

ナミビア国季節性湿地帯における 稲作導入による水収支への影響評価

名古屋大学大学院生命農学研究科

生物圏資源学専攻

地域資源管理学講座

森林気象水文学研究分野

鈴木 哲 司

2014 年 1 月

目次

1	序論.....	1
1-1	湿地帯の水環境.....	1
1-2	湿地帯開発による土地利用の改変.....	2
1-3	ナミビアにおける稲作導入.....	3
1-3-1	ナミビアの気象環境.....	3
1-3-2	ナミビア北部における伝統的トウジンビエ栽培と稲作導入.....	4
1-3-3	稲作による水消費特性.....	5
1-4	本論文の目的と構成.....	6
2	イネの品種、栽植密度の水利用効率に対する影響評価.....	8
2-1	本章の背景.....	8
2-2	材料と方法.....	9
2-2-1	ポット試験.....	9
2-2-2	圃場試験.....	12
2-2-3	気象観測.....	13
2-2-4	統計解析.....	14
2-3	結果と考察.....	14
2-3-1	気象環境.....	14
2-3-2	水利用効率 (WUE) の種間、品種間差.....	15
2-3-3	WUE に対する栽植密度の影響.....	18
2-3-4	WUE の決定因子.....	19
2-3-5	高 WUE を可能とする最適栽植密度.....	21
2-4	まとめ.....	23
3	ナミビア北部の蒸発散特性と稲作導入の影響.....	25
3-1	本章の背景.....	25
3-2	材料と方法.....	26
3-2-1	観測サイト概要.....	26
3-2-2	観測方法.....	27
3-2-3	熱収支・ボーエン比法.....	29
3-2-4	品質管理.....	31
3-2-5	蒸発散に対する地表面の影響因子.....	31
3-3	結果と考察.....	32
3-3-1	気象環境.....	32
3-3-2	蒸発散量の時間変動.....	34
3-3-3	RF と NVF における蒸発散量の比較.....	37

3-3-4	β と C_E の決定因子.....	38
3-3-5	蒸発散量の LAI に対する感度テスト.....	42
3-4	まとめ.....	45
4	稲作導入の水収支に対する影響評価.....	47
4-1	本章の背景.....	47
4-2	材料と方法.....	48
4-2-1	対象領域.....	48
4-2-2	対象領域の水収支式.....	48
4-2-3	稲作導入の影響評価.....	53
4-3	結果と考察.....	55
4-3-1	対象領域の自然植生状態における水収支.....	55
4-3-2	稲作導入の水収支に対する影響.....	59
4-4	まとめ.....	61
5	総括.....	62
謝辞	66
引用文献	68
外国語引用文献	68
日本語引用文献	77
報文		
“Role of Canopy Coverage in Water Use Efficiency of Lowland Rice in Early Growth Period in Semi-Arid Region”		
“Effects of the introduction of rice on evapotranspiration in seasonal wetlands”		

1 序論

1-1 湿地帯の水環境

湿地帯は地球上の陸地面積の 6%を占め、水文学的、生態学的観点からその重要性が指摘されてきている (UNESCO, 1971; IWMI, 2010)。生態学的には、湿地帯は高い生物多様性を示し “biological supermarkets” と呼ばれる (Mitsch and Gosselink, 1993)。そして、その高い生物多様性を保全するうえで重要な役目を果たしている。水文学的には洪水の緩和や地下水涵養、栄養循環などに寄与し (Acreman *et al.*, 2003; Sun and Song, 2008)、また大気との相互作用により気象環境に対しても影響を与える (Marshall *et al.*, 2003)。さらに、その湿地帯の水文学的機能は湿地帯の生態系に対しても影響を与え、生物多様性の発展や持続においても重要な意味を成している (Mitsch and Gosselink, 1993)。そのため、湿地帯の水文学的役割を理解することは重要であり、そのために湿地帯の蒸発散に関する多くの研究がなされてきた (e.g. Lafleur *et al.*, 2005; Goulden *et al.*, 2007; Sun and Song, 2008)。

湿地帯には様々な種類がある。植物による水面被覆率が異なったり、地下水位が異なったり、あるいは植生そのものが異なったりすることで多様性を生みだしている。また、蒸発散の測定方法には渦相関法はじめ熱収支ボーエン比法やライシメーター法等があり、その測定方法の違いによっても多少の蒸発散量の測定値の差もあると考えられる。そのような湿地帯そのものの多様性や蒸発散量の測定方法の違いにより、世界各地域の湿地帯における蒸発散量の観測値は大きな変動幅を有する (Souch *et al.*, 1998; Goulden *et al.*, 2007)。例えば、同じ地域に位置する 2 つの湿地帯における観測では、アシが生育する湿地帯の方が、その他の草本 (*Centaureo-Cynosuretu cristati* や *Senecioni-brometum racemosi*) が優占する湿性草原よりも 15%多く蒸発散した場合もある (Acreman *et al.*, 2003)。また、同じ植生 (パピルス) が生育する湿地帯における計測でも、ウガンダのヴィクトリア湖で計測した蒸発散量 ($4.75 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; Saunders *et al.*, 2007) はケニアでの値 ($2.4 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; Jones and Humphries, 2002) の約 2 倍であった。湿地帯の蒸発散量はその湿地帯の植生やそれが位置する地域、また季節等によって大きく変化する。アシが優占する湿地帯における、冬季の 0.16 mm day^{-1} から夏の 6.72 mm day^{-1} への大きな変動もその一例と言える (Acreman *et al.*, 2003)。さらに、同じくアシが優占する

別の地域の湿地帯では、生育期に $13.39 \text{ mm day}^{-1}$ の蒸発散量を示したとする報告もある (Acreman *et al.*, 2003)。そのため、湿地帯の水収支を理解し、生態系の保全を考える上で、今後ともより多くの湿地帯における蒸発散量の計測とその特徴の理解が重要であるといえる。

1－2 湿地帯開発による土地利用の改変

近年、そのような生態学的、水文学的に重要な役割を果たす湿地帯に対して、都市化や食糧増産を目指した開発が行われ、多くの面積の湿地帯が耕作地等へと改変されている。中国東北部では 1950 年から 2000 年までの 50 年に約 84% の湿地帯が農業目的で失われており (Zhao *et al.*, 2008)、アメリカのフロリダ州においては多くの湿地帯がサトウキビ等の耕作地へ (Marshall *et al.*, 2003)、メキシコ湾からイリノイ州南部にかけての湿地帯は 1950 年代以降急速に綿花、トウモロコシ、ダイズの耕作地へと改変されてきている (OTA, 1984)。多くの先行研究において土地利用の改変は水文学的プロセスに対して大きな影響を与えるといわれている (e.g. Giambelluca *et al.*, 2000; José *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2008)。土地利用の改変は放射環境や乱流フラックスに影響を与え気象環境を変化させ、より広域な地域の気候や水文学的特徴に対しても影響を与える (Zhao *et al.*, 2008)。例えば、アメリカのフロリダ州における湿地帯からサトウキビ等の耕作地への土地利用の改変では、大気環境が変化し、作物に対する低温障害が増加したとする報告や (Marshall *et al.*, 2003)、中国東北部では湿地帯から稲作への土地利用の改変により蒸発散量が増加したとする報告がある (Zhao *et al.*, 2008)。急激な土地利用の改変は、その地域の水収支や生態系だけでなく最終的に将来の人間生活に対しても悪影響を与える可能性がある (Foley *et al.*, 2005)。そのため、土地利用を考える上で、人口増に伴う作物増産の需要に応えるとともに、湿地帯の水環境、生態系を保全しうるような効率的な土地や水資源の利用方法を模索する必要がある。

近年、アフリカ諸国においても食糧増産を目的とした農耕地開発が進められてきている。特にアフリカの半乾燥地域においては洪水等によって形成される氾濫原と呼ばれる季節性の湿地帯が、稲作を行うのに十分な水資源を有するとして注目されてきている (Andriesse and Fresco, 1991; Turner and Congalton, 1998)。また、半乾燥地域では強い日射環境に恵まれ (Löff *et al.*, 1966)、稲作に対して高いポテンシャルを示すと考えられる。

次項に示すように、南西アフリカに位置するナミビア共和国（以下、ナミビア）も半乾燥国でありながら、雨季になると北部地域では季節性湿地帯を有する（図 1-1）。その季節性湿地帯に着目し、新規作物として稲作を導入することで、ナミビア国内の食料安全保障に寄与しようとする研究がなされてきている（SATREPS: http://www.jst.go.jp/global/kadai/h2306_namibia.html）。

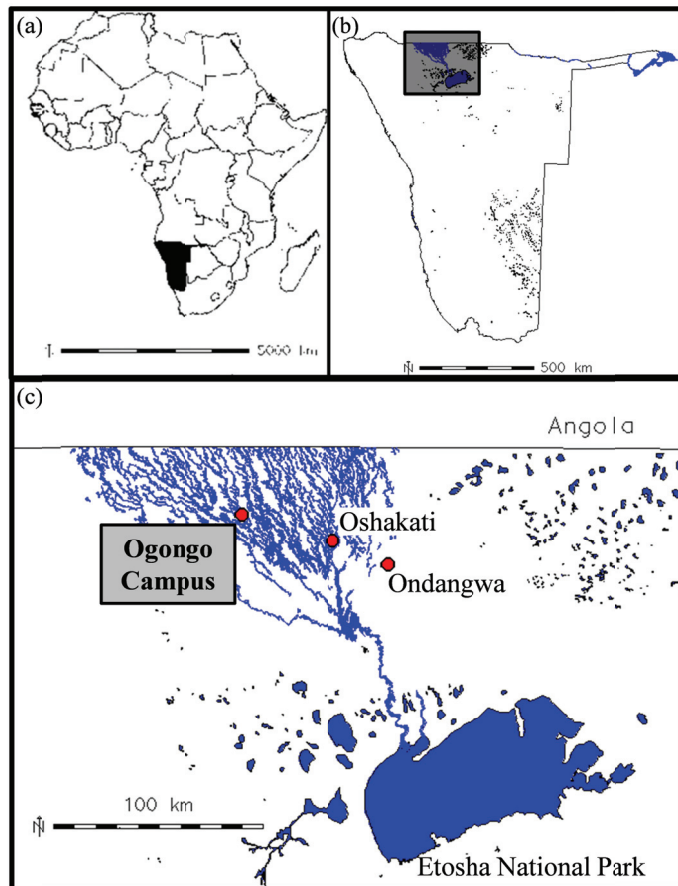


図 1-1 ナミビア北部に出現する季節性湿地帯

(a) ナミビア共和国はアフリカ南西部に位置し、(b) その北部地域に季節性湿地帯を有する。(c) 季節性湿地帯ならびにエトーシャ塩湖を青色で示す。

1-3 ナミビアにおける稲作導入

1-3-1 ナミビアの気象環境

ナミビアはサハラ砂漠以南のアフリカ諸国で最も乾燥した国であり、半乾燥地域に属し、ナミブ砂漠とカラハリ砂漠という 2 つの砂漠を有する。年降水量は海岸地域の 50 mm 未満から北東部の 600 mm 以上まで地理的に偏っており（Bethune *et al.*, 2005）、天水依存型農業が可能とされる 500 mm 以上の降雨がもたらされるのは国土の 8%に過ぎない（Krugmann, 2000）。また北部地域では、全降雨のうち 99%は 10 月から 4 月に集中しており（Marsh *et al.*, 1992）、季節変動も大きい。降雨のうち 83%は蒸発し、14%が植物により蒸散され、2%が流出しそして残りの 1%が地下水へ移行すると見積もられている（Crerar and Bethune, 1992; Marsh *et al.*, 1992）。つまりナミビアの水環境は、降水量の少

なさとその時空間的偏り、盛んな蒸発作用として特徴付けられる (Heyns, 1991)。この地域における可能蒸発量は 2500 mm から 3800 mm の間を変動し (Amakali *et al.*, 2002)、平均年降水量の 5~18 倍量が蒸発により地上から失われるような状況にある (MWCT, 1992)。しかしながら、前述のようにナミビア北部地域には季節性湿地帯が出現する。季節性湿地帯は雨季の降雨と、ナミビアの北に位置するアンゴラ共和国 (以下、アンゴラ) より流れてくる洪水によって形成される。通常季節性湿地帯には 12 月から 3 月の間に地表水が出現し、その後 4 月から 7 月頃まで地表水を保持し続ける。湿地帯の大きさや水深、地表水の存在期間は、アンゴラ南部を含めた約 37000 km² の集水域における降雨量に強く依存している (Lindeque and Archibald, 1991)。季節性湿地帯の地表水は湿地帯南部にあるエトーシャ国立公園内のエトーシャ塩湖に注がれる。エトーシャ国立公園は野生動物の宝庫となっており、ナミビア政府は生物多様性維持の観点だけでなく、ナミビアにとっての重要な観光資源の保護という点でも、エトーシャ国立公園の自然環境の保全、保護に力を入れている (Lindeque and Archibald, 1991)。近年、ナミビア北部地域では人口が増加しており、水消費量も増加傾向にある。そのため、エトーシャ国立公園の上流部に存在する季節性湿地帯に稲作を導入する場合は、水資源の節約という観点とともに、季節性湿地帯下流域への影響についても十分に考慮しなければならない。しかしながら、これまで季節性湿地帯における体系的な地域環境調査は実施されておらず、自然環境に関する情報は限られている (Kangombe and Strohbach, 2008)。水環境に関する基礎情報もいまだ乏しく、国内の季節性湿地帯の流量や生態系や人間活動を維持するために必要な水量などは明らかにされていない (Bethune *et al.*, 2005)。また、先行研究において世界各地における湿地帯の蒸発散量に関する研究は多くなされてきているものの (e.g. Acreman *et al.*, 2003; Burba *et al.*, 1999)、ナミビア北部のような半乾燥地域において乾季と雨季とで水環境が大きく変化する季節性湿地帯環境下での研究例は少なく、ナミビア北部の季節性湿地帯の水環境を推察するには情報が限られているのが現状である。

1-3-2 ナミビア北部における伝統的トウジンビエ栽培と稲作導入

季節性湿地帯が出現するナミビア北部地域の人々は、雨季においても地表水に覆われない土地 (アップランド) に居住し、主にアップランドにおいて伝統作物であるトウジ

ンビエ (*Pennisetum glaucum*) を栽培し (総穀物生産の 92% ; Keyler, 1995)、主食としている (McDonagh and Hillyer, 2003)。トウジンビエはこの地域でたびたび起こる乾燥条件に比較的強く、そのため主食として栽培されるとともに、その茎葉部は家畜の餌としたり、家屋の材料にしたりと多角的に利用されている。しかしながら、2008/2009 年の雨季にはアンゴラからの洪水が過去 60 年間で最大規模のものとなり、ナミビア北部におけるトウジンビエ栽培は湿害により大きな損害を受け収穫量は著しく減少した。さらに、ナミビアにおけるトウジンビエ栽培は世界平均収量の約 35%と低収であるため (Zegada-Lizarazu, 2006)、ナミビアでの穀物生産量は、国内における穀物需要の 50%にも満たない状況である (Mendelsohn *et al.*, 2002)。

現状ではナミビア北部の人々は季節性湿地帯を釣りや家畜の放牧だけに利用している。しかし、Awala *et al.* (2009, 2010) は季節性湿地帯を天水田として見直し実験的にこの地域でイネを栽培し、その生産性の高さを指摘した。季節性湿地帯環境について理解をより深め稲作導入を進めることは、土地利用を効率化し穀物生産量を増加させ、ナミビアの食糧安全保障につながると期待される。

なお、季節性湿地帯はその規模と立地から大きく 2 つに分類することができる。より規模が大きく低地に出現する湿地帯を現地語で‘オシャナ’と呼び、規模が小さく比較的高いところに出現するものを‘オンドンベ’と呼ぶ。オシャナは季節性湿地帯における本流と考えることができ、広い面積に流れを持った水をたたえる。オンドンベは小規模な窪地にたまった水であり、オシャナの周囲に散在している。本博士論文で扱う稲作導入はそのオシャナに対して実施されるものを対象とする。以降、特別にことわりがない場合、季節性湿地帯はこのオシャナを意味することとする。

1-3-3 稲作による水消費特性

今日、全世界の稲作地域のうち実に 30%以上が天水田であるといわれており (IRRI, 2010)、ナミビアにおける稲作導入もまた当地の水環境をそのまま利用した粗放的な天水田として導入が進められてきている (Suzuki *et al.*, 2009)。灌漑設備は高価なため (Becker and Johnson, 2001)、半乾燥地域の多くの国々が抱える経済的制約の中では (Traore *et al.*, 2010)、灌漑設備の普及には限りがある。さらに、半乾燥地域における灌漑設備の導入は塩害をもたらす危険性を孕んでいる (Smedema and Shiati, 2002)。その

ため、多くの半乾燥地域の稲作は自然環境をそのまま利用した天水田の形態をとっている場合が多い。

作物学的に稲作はその他の作物に比べ要水量が多いことが知られている(Zwart and Bastiaanssen, 2004; 上堂, 山西, 1978; Pearce, 2006)。しかし、稲作によるその水消費量は次のような方法で減少させられると考えられる。漏出や浸透量(Seepage and Percolation; S&P)の減少、水面からの蒸発量の抑制、イネの蒸散効率の向上である(Sharma *et al.*, 1995; Borrell *et al.*, 1997; Roel *et al.*, 1999; Bouman and Tuong, 2001; Pirmoradian *et al.*, 2004; Mahrup *et al.*, 2005; Kato *et al.*, 2009; de Vries *et al.*, 2010)。S&Pは稲作における水消費の中で大きな要素であるものの、ナミビアで導入されようとしている粗放的な稲作においてはその管理が難しい。しかし、水面蒸発量の抑制に着目することで稲作による水消費量を減少させられる可能性がある。水面からの蒸発量は特にイネの生育初期において水消費量全体の大きな割合を占める(足立ら, 1995; Cabangon *et al.*, 2002)。特にナミビアのような低投入型農業が卓越する地域においては、水面からの蒸発量の影響は大きいと考えられる。また、低緯度地域においては高緯度地域に比べ、蒸発散量が日射量などの有効エネルギー量により強く依存しているため(Khatun *et al.*, 2011)、水面に到達する日射量をコントロールすることで水面からの蒸発量を抑制することは有効であると考えられる。そのため、ナミビアで栽培した場合のイネの水消費に関する生理的特徴の理解と共に、バイオマス量やイネの草型、栽植密度といったイネによる水面被覆率に影響を与えるような物理的特徴についても検討する価値は大きいと言えよう。このように天水田環境における稲作による水消費量は、イネの栽培品種や栽培方法によって大きく影響を受けることが考えられ、ナミビアの季節性湿地帯の水環境に調和した稲作導入方法を検討することが望まれる。

1-4 本論文の目的と構成

本博士論文では、季節性湿地帯へ環境保全型稲作を導入するため、ナミビア北部地域の水収支に対する稲作導入の影響を検討した。個体、群落両スケールにおけるイネの水消費特性について、それぞれ個体スケールとして作物学視点、群落スケールとして水文学視点からのアプローチを試み、次の3点を目的とし、実験、観測、そしてそれらの解析を行った。

1. イネの品種、栽植密度の水利用効率に対する影響評価
(作物学的視点)
2. ナミビア北部地域の蒸発散特性に対する稲作導入の影響評価
(水文学的視点)
3. ナミビア北部地域への稲作導入による水収支に対する影響評価

第2章では、イネの水利用効率に対するイネ品種ならびに栽植密度の影響について作物学的に検討した。季節性湿地帯中流域に位置するナミビア大学オゴンゴキャンパスにおいてポット試験と小規模な圃場試験を実施した。食糧供給を目的とした稲作導入においては、水消費量だけでなく生産性も重要となるため、水消費量あたりのバイオマス生産量で定義される水利用効率という概念を導入した。ポット試験では、イネの水利用効率における種間差、品種間差を議論するとともに、水利用効率や水消費量に対するイネによる水面の被覆率や栽植密度の影響を調査した。また、ポット試験で得られた水利用効率に対する栽植密度の影響について実験圃場レベルで確認した。

第3章では、ナミビア北部地域の蒸発散特性を理解するとともに、稲作導入による蒸発散量への影響を水文学的に評価した。オゴンゴキャンパスにて通年地表水に覆われることのないアップランド圃場と、季節性湿地帯内に設営したイネ圃場ならびに自然植生圃場の合計3圃場において、熱収支・ボーエン比法によって蒸発散量を観測した。そして、それぞれの圃場における観測結果から蒸発散特性を議論するとともに、稲作導入による影響を評価した。

第4章では、ナミビア北部地域の水収支に対する稲作導入の影響を評価した。第2章と第3章から得られた結果を用いて対象領域の水収支式を解き、稲作導入が水収支に与える影響について数値シミュレーションを実施した。

最後に第5章で、ナミビア北部に広がる季節性湿地帯での、稲作の水消費特性ならびに稲作導入による水収支に対する影響について総括した。

2 イネの品種、栽植密度の水利用効率に対する影響評価

2-1 本章の背景

近年、ナミビア北部において稲作導入の可能性が指摘されてきている (Awala *et al.*, 2009, 2010)。しかしながら、序章でも述べたように作物学的にイネは収量を得るために他の作物に比べてより多くの水を必要とするといわれている。そのため、稲作導入においてはできる限り水を効率的に利用するイネ品種の選抜や栽培方法の確立が望まれる。そこで、本章ではイネの品種や草型、そして栽植密度がイネの水利用効率に対して与える影響について議論する。本章では水消費量のみならず、水利用効率という概念を導入する。水消費量はイネ栽培によって単位時間あたりに消費された水量であり、水利用効率はその水消費量あたりのバイオマス生産量として定義され、水消費量だけでなくどれだけのバイオマス生産量が得られたのかを加味している。ナミビアのような半乾燥国では特により高い水利用効率を得ることが望まれる。

イネは湛水状態で良く生育し、その栽培過程において漏出や土壌への浸透 (Seepage and percolation; S&P)、湛水面からの蒸発、イネによる蒸散作用などによって水が消費される。そのため、先行研究では、S&P を抑制するため、圃場の心土圧縮や (Sharma *et al.*, 1995)、間断灌漑法や飽和土壌法 (Bouman and Tuong, 2001) などの新規栽培方法が提案されてきた。また、生育初期の土壌表層からの蒸発量を抑制するため、コムギ栽培において早撒きや高密度播種 (Anderson, 1992; Passioura, 2006)、オオムギ栽培においては施肥 (Shepherd *et al.*, 1987) によって群落を拡大させることによる蒸発抑制効果が検討されてきている。分子生物学の分野においても炭素同化能力の向上や蒸散量の抑制を目指した研究がなされてきている (Karaba *et al.*, 2007)。ナミビアのような灌漑設備の導入が困難な地域においては、先行研究において提案されている灌漑方法をそのまま適用することは難しい。しかし、コムギやオオムギ栽培において提案されているように、植物体によって水面被覆率をコントロールすることで水消費量を減少させ、高い水利用効率を得られる可能性がある。

群落による水面の被覆率は植物バイオマス、イネの草型、栽植密度、そしてイネの成長によって変化する。大苗を高密度に移植することで高い群落被覆率が得られ、水面からの蒸発量を抑制できるかもしれない。しかし、一方で大きな植物バイオマスによる蒸

散作用によってより多くの水を消費する可能性もある（大上，2004; Impa *et al.*, 2005）。そのため、高い水利用効率を達成するためには適切なイネ品種と適切な栽植密度による群落被覆率の拡大を検討する必要があるだろう。群落の拡大と水面からの蒸発散量との関係に関する情報は限られており、日本における多層モデルや（大上，2004）、日本での圃場試験による報告（Hayashi *et al.*, 2006）程度である。さらに、水利用効率に対するイネの草型や栽植密度のような物理的側面と気孔コンダクタンスのような植物生理学的側面の両方を同時に議論している例もみられない。そこで、ナミビア北部地域におけるイネの水消費特性について作物学的視点から検討するため、

- 1) イネの水利用効率の種間差ならびに品種間差
- 2) 個体レベルでの水利用効率の決定因子
- 3) 栽植密度の水利用効率に対する影響

を明らかにすることを目的とし、現地にてポット試験ならびに圃場試験を実施した。

2-2 材料と方法

2-2-1 ポット試験

ナミビア北部、オムサティ州に位置し、季節性湿地帯の中流域に位置するナミビア大学農学部オゴンゴキャンパス（南緯 17°40'、東経 15°17'、標高 1100 m）にてポット試験を実施した（図 1-1）。ポット試験はグリーンハウスにて実施した。グリーンハウス内の空調システムによって気温が 50 °C 以上などの異常高温になることを避けた。また、グリーンハウスの日射透過率は 52.3%であった。

2-2-1-1 ポット試験 1 ; 水利用効率の種間差、品種間差

オゴンゴキャンパスにおいて行われた先行研究である品種選抜試験（Awala *et al.*, 2009）をもとにアジアイネ（*Oryza sativa* L.）、アフリカイネ（*Oryza glaberrima* Steud.）、そして NERICA を含む種間交雑種から成る 30 品種を選抜し、供試した（表 2-1）。2009 年 1 月 16 日に 2、3 日浸漬し発芽のタイミングがそろそろように催芽させた種子をセルトレイに播種した。播種後（days after sowing, DAS）14 日目にポット（容積 3 L）に 3 個体ずつ移植し、その後 28 DAS にポットあたり 1 個体となるように間引きを行った。その際に間引かれた 2 個体のうち、残された 1 個体に大きさがより類似しているものの地

表 2-1 ポット試験 1 における供試品種リスト

Species	Genotype	Origin	Ecology
<i>Oryza sativa</i> L.	AZUCENA	Philippines	Upland
	IR 24	Philippines	Lowland
	IR 64	Philippines	Lowland
	IRGA418	Brazil	Lowland
	ITA230 (FARO50)	Nigeria	Lowland
	LK1484-5	Guinea	Lowland
	Mamoudeni	Mali	Lowland
	Pokkali	India	Lowland
	Super	SADC*	Lowland
	Tumo-tumo	Malaysia	Upland
	WAB56-104	Côte d'Ivoire	Upland
	WITA 2	Côte d'Ivoire	Lowland
	WITA 5	Côte d'Ivoire	Lowland
Interspecific progeny	NERICA 1	Côte d'Ivoire	Upland
	NERICA 2	Côte d'Ivoire	Upland
	NERICA 4	Côte d'Ivoire	Upland
	NERICA 6	Côte d'Ivoire	Upland
	WAB1159-2-12-11-2-10	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAB1159-2-12-11-5-1	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAB1159-2-12-11-5-3	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAB450-I-B-P-91-HB	Côte d'Ivoire	Upland
	WAS122-IDSA-10-WAS-4	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAS127-B-5-2	Côte d'Ivoire	Lowland
<i>Oryza glaberrima</i> Steud.	Aawba	Guinea	Upland
	C0440	Guinea	Lowland
	CG 14	Senegal	Lowland
	Loubi tetera	-	Lowland
	Mala Noir V	Niger	Lowland
	Tataro	Mali	Lowland
	W0492	Guinea	Lowland

* Southern African Development Community.

上部を 28 DAS におけるサンプルとした。そして 42 DAS にポットで生育させた個体の地上部をサンプリングした。なお、ポット試験には季節性湿地帯から採取した壤砂土(表 2-2) を化成肥料 (N: P₂O₅: K₂O = 0.20: 0.30: 0.20 g kg⁻¹ soil) と十分に混和させ、ポットあたり 2 kg となるように充填したものを利用した。6 反復用意し (n 反復 ; 一つの品種

や処理に対して n 個ずつ同様のものを用意することを、 n 反復用意すると言う)、合計 180 ポットを乱塊法（乱数を用いて品種や反復番号に関係なくランダムにポットを配置する方法）に従いランダムに配置し位置の影響を考慮した。試験期間中、すべてのポットを湛水状態に保った。

全てのポットに対して 28 DAS から 42 DAS の 2 週間の水利用効率 (WUE , g kg^{-1}) を重量法により算出した (Sumi *et al.*, 1994; Zegada-Lizarazu and Iijima, 2005)。なお、 WUE は単位蒸発散量 (kg) 当たりのバイオマス生産量 (g) として定義する。本試験ではバイオマス生産量を 28 DAS のサンプルと 42 DAS にサンプリングした個体のバイオマス量の差として求めた。すべてのバイオマスサンプルは 80°C で 72 時間以上乾燥させ、その重さを乾燥重量として計測した。42 DAS のサンプルについては分けつ数も数えた。

36、39、42 DAS の朝に、各個体の最上位展開葉における気孔コンダクタンス ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) をポロメーター (Porometer -AP4, DELTA-T DEVICES, UK) を用いて計測した。解析には 3 日間の計測値の平均値を用い、標準誤差は表 2-4 に示した。

表 2-2 ポット試験ならびに圃場試験における土壌の物理化学特性

Experiment	N (g kg^{-1})	P (ppm)	K (ppm)	C (g kg^{-1})	pH (H_2O)	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Taxonomy
Pot exp. 1 ^a	0.11±0.03	0.79±0.37	35.0±6.1	5.3±0.3	6.65±0.03	91.7±1.1	5.1±1.6	3.2±0.7	LS
Pot exp. 2, 3 ^a	0.48±0.01	8.91±0.19	67.7±0.7	8.5±0.4	8.35±0.01	88.9±0.5	8.8±0.1	2.3±0.6	LS
Field exp. ^b	0.2	12.3	41	5	5.94	80.4	2.6	17.1	SL

平均値±標準誤差

^aN, ケルダール法 ; P, オルセン法 ; K, 原子吸光分析法 ; C, ウォークリー・ブラック法 (ナミビア国立土壌科学研究所による分析)

^bAwala *et al.* (2009)

LS, 壤砂土 ; SL, 砂壤土

2-2-1-2 ポット試験 2 ; 水利用効率に対する栽植密度の影響

ポットの準備ならびに水管理はポット試験 1 と同様の方法で実施した。供試品種として Pokkali を用いた。Pokkali は成長が早くバイオマスが大きいため本試験に適切と判断した。成長が遅くバイオマスが小さい Pokkali とは逆センスのものを同時に供試することが望まれたが、資材や労力の制限のため、一品種のみを供試することとした。2010 年 3 月 24 日にセルトレイに播種した。処理区として栽植密度が 1、2、4、8 個体 pot^{-1}

(32、64、127、255 個体 m^{-2}) のものを 6 反復用意した。 WUE は重量法により 22 DAS から 35 DAS の期間に対して算出した。

2-2-1-3 ポット試験 3 ; 表層水からの蒸発量に対する被覆率の影響

ポット試験 2 と同様の期間に実施した。蒸散作用を有さない植物体による被覆効果を検証するため、半径 50、70、85 mm の発泡スチロールの円盤によって異なるサイズの模擬群落を表現した。また同時に発泡スチロールの円盤のないポットを用意し植物による被覆がない水面を表現した。すべての円盤を土壌表層から約 150 mm の位置に 1 円盤 pot^{-1} となるように設置した。それぞれの処理を 6 反復用意し、14 日間重量法によって蒸発量を計測した。すべてのポットを試験期間中湛水状態に保った。円盤による水面被覆率はある既知の面積に対する円盤面積の比率で定義し、写真画像解析によって求めた。すなわち、写真内に一定の大きさを持つ円を含むように、ポットから約 1 m の高さで地面と平行に写真を撮影した。その後、画像解析ソフトである LIA 32 (入手先 : <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/>) を用いて円盤による被覆率を推定した。

2-2-2 圃場試験

オゴンゴキャンパス内の実験圃場において 2010 年 12 月から 2011 年 1 月にかけて圃場試験を実施した。14 m \times 14 m の実験圃場 2 つを移植 5 日前に小型トラクター (G1000 Boxer, Kubota, Japan) を用いて耕うん、ならびに平準化した。そして、移植 4 日前に基肥 (N: P_2O_5 : K_2O = 20 : 30 : 20 kg ha^{-1}) を施与した。移植前日には、各圃場に 8 プロット (3.5 \times 7.5 m) ずつ用意し、マイクロライシメータ (60 L) を各プロットの中央に埋設した。その際、マイクロライシメータ内の土壌環境が周囲と同様となるように、マイクロライシメータに土壌を充填した。試験期間中、実験圃場ならびにマイクロライシメータ内を湛水状態に保った。処理区として栽植密度が 11、22、44、89 個体 m^{-2} の 4 種類を準備した。それぞれ、株間 \times 条間は、30 cm \times 30 cm、15 cm \times 30 cm、15 cm \times 15 cm、7.5 cm \times 15 cm とし、以下、LOW、MED、HIGH、EXCESS と呼称する。それぞれの処理区に対し 4 反復用意し分割法 (それぞれの圃場に全ての処理区を同反復ずつ配置する方法) に従い配置した。本試験では 2 つの圃場に 8 プロットずつ用意したため、各圃場に 4 処理 \times 2 反復がランダムに配置されるようにした。ポット試験 2 と同様の Pokkali

を供試し、18 日生の苗を 1 個体 株⁻¹となるように手植えた。マイクロライシメータ内には周囲と同様の栽植密度となるように、LOW、MED、HIGH、EXCESS に対して、それぞれ 4、8、12、24 個体 マイクロライシメータ⁻¹の割合で移植した。

WUE をマイクロライシメータ法（堀江，桜谷，1982; Maruyama *et al.*, 1985; 足立ら，1995）に従って、移植後（days after transplanting, DAT）7 から 27 日目の期間に対して算出した。また、7 DAT から 5 日おきにイネをサンプリングすることで 12、17、22、27 DAT における前 5 日間の *WUE* を算出した。

17、22、27 DAT には、ポット試験 3 と同様の方法で群落被覆率を推定した。各プロットの群落上で一定の面積を持つ円を含む写真を地面と平行に撮影し、LIA32 を用いてその写真を解析した。イネの葉身と葉鞘両方を群落として扱い、群落被覆率を推定した。

2-2-3 気象観測

気象観測機器の詳細を表 2-3 に示す。ポット試験 2 では、ウェザーステーション（Vantage Pro）を用いてグリーンハウス内の気温（ T_a , °C）、相対湿度（ Rh , %）を測定した。また、簡易日射計（橋本，2000）を用いて日射量（ S_d , $W m^{-2}$ ）を推定した。簡易日射計は四成分放射計（CNR-1, Kipp & Zonen）によって検定し（ $R^2 = 0.904$ ）、グリーンハウスから南西に 1 km 未満の場所に設置した。

圃場試験では、実験圃場にてウェザーステーション（HOBO weather station）を用いて T_a 、 Rh そして S_d を計測した。イネ群落の日射透過率（%）を計測するため、田面水直上における日射量を計測した。日射透過率はイネ群落の上層における日射量に対する群落内のその比率として定義した。群落内の田面水直上における日射量は、6 DAT から 8 個の簡易日射計（以下、簡易日射計セット）を用いて計測した。簡易日射計セットの各日射系を、イネ個体の周囲（2 個を条間、2 個を株間、4 個を対角線上）に設置することで田面水直上における平均的な日射量を計測した。簡易日射計セットが 1 つしか利用可能でなかったため、各処理区を順番に毎日変更し計測を実施した。これらの簡易日射計の値は同じ圃場に設置したウェザーステーションの日射計の値によって検定した（ $R^2 = 0.968$ ）。

表 2-3 気象要素と測定機器ならびに観測、記録頻度

Experiment	Climatic variable	Instrument	Data logger	Sampling interval	Recording interval
Pot exp. 2, 3	T_a	Platinum wire thermistor	Vantage Pro ¹	1 hr	1 hr
	Rh	Film capacitor element			
	Sd	Simplified pyranometer	C-CR1000-4M ²	30 s	10 min
Field exp.	T_a	S-THB-M002 ³	HOBO weather station ³	1 min	2 min
	Rh				
	Sd	S-LIB-M003 ³	DATAMARK LS-3300 PV ⁴		
	Sd [#]	Simplified pyranometer			

¹ Davis Instruments, USA; ² Campbell Scientific, USA; ³ Onset computer corporation, USA;

⁴ Hakusan Corporation, Japan.

[#] 田面水上における Sd 。

2-2-4 統計解析

一元配置の分散分析 (ANOVA) によって種間差や品種間差を検定した。解析結果の F 値、危険率、自由度、標準誤差は表 2-4 に示す。また、Excel (Excel, Microsoft) の Statcel (1998) を利用して、多重比較検定 (Fisher's PLSD) を 5% 水準で行い、また要素間の相関関係を検定するためピアソンの相関関係検定を実施した。さらに、決定係数を算出しそれぞれの図に示した。

2-3 結果と考察

2-3-1 気象環境

ポット試験 2、3 の間の日平均気温 (T_a) ならびに日平均飽差 (VPD) は、それぞれ $22.9 \pm 2.4^\circ\text{C}$ (平均値 \pm 標準偏差)、 $10.5 \pm 3.6 \text{ hPa}$ であった (図 2-1(b, c))。試験期間後半にかけて日中

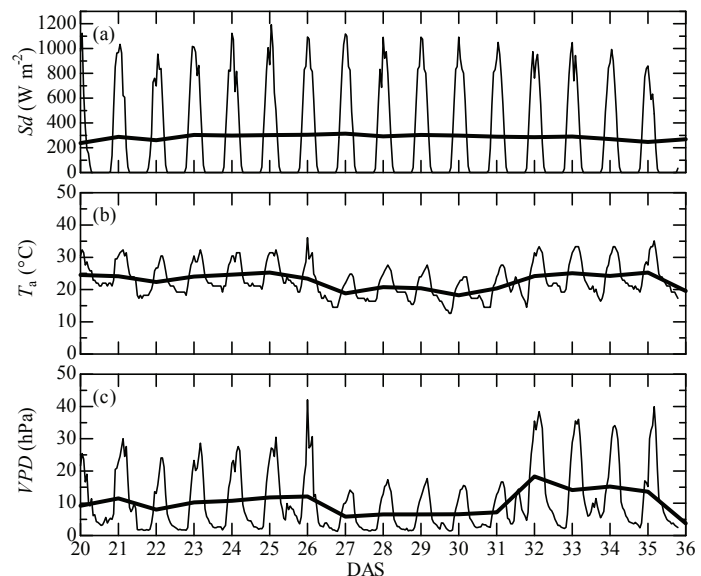


図 2-1 ポット試験実施時の気象要素の時間変動

ポット試験 2、3 実施時の、(a) 日射量 (Sd)、(b) 気温 (T_a)、(c) 飽差 (VPD) の一時間ごとの変動 (細線) と日平均値 (太線) を示す。DAS は days after sowing (播種後) を示す。

に VPD は時折 30.0 hPa 以上となった。グリーハウス外における日平均日射量 (S_d) は 299 ± 22 $W\ m^{-2}$ であり、基本的に日中に S_d は $1000\ W\ m^{-2}$ に達した (図 2-1(a))。

圃場試験の間の T_a ならびに VPD はそれぞれ $23.7 \pm 1.7^\circ C$ 、 9.6 ± 3.9 hPa であった (図 2-2(c))。また、 S_d もポット試験実施時同様、晴れた日中には $1000\ W\ m^{-2}$ 近くに達した (図 2-2(b))。降雨量は 13 DAT から 17 DAT の期間に 58.5 mm がもたらされた (図 2-2(d))。

2-3-2 水利用効率 (WUE) の種間、品種間差

ポット試験 1 において WUE は品種間で異なる値を示した (表 2-4)。WAB1159-2-12-11-5-1 が最も高い WUE を示し、続いて Pokkali、LK1484-5、WITA 2、Loubi tetera であった。種間では有意差は見られなかったものの、種ごとの平均 WUE は大きい方から *Oryza sativa*、*Oryza glaberrima*、そして NERICA を含む種間交雑種の順であった。ポット試験 1 の結果では、 WUE は *Oryza sativa* と種間交雑種においては分げつ数と有意な相関関係を示した (図 2-3(a))。また、全品種でも WUE は分げつ数とは有意な相関関係を示したが、気孔コンダクタンスとは有意な相関関係を示さなかった (図 2-3(a), (b))。そのため、 WUE に対しては分げつ数が気孔コンダクタンスよりもより大きな影響力を持っていることが示唆された。また、水利用効率はすべての種においてバイオマスと有意な相関関係を示した (図 2-3(c))。

Oryza glaberrima の CO_2 同化量 (photosynthesis, P) の蒸散量 (transpiration, T) に対す

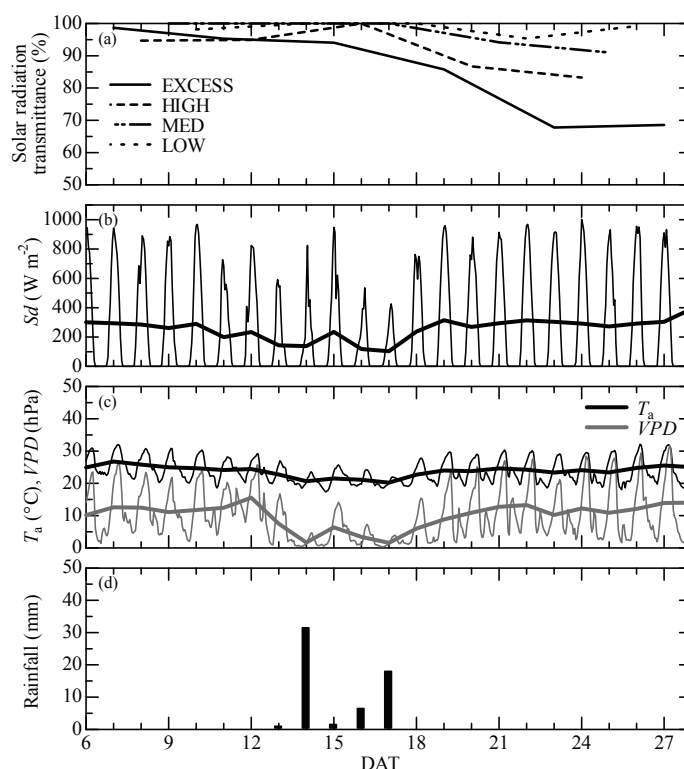


図 2-2 圃場試験実施時の日射透過率と気象要素の時間変動ならびに日降雨量

圃場試験実施時の、(a) 各処理区における日射透過率と、(b) 日射量 (S_d)、(c) 気温 (T_a)、飽差 (VPD) の一時間ごとの変動 (細線) と日平均値 (太線)、そして (d) 日降雨量を示す。DAT は days after transplanting (移植後) を示す。

表 2-4 ポット試験 1 での水利用効率 (WUE)、乾物重、分げつ数、気孔コンダクタンスの種・品種間差

Genotype	Species	WUE (g kg ⁻¹)	Dry weight (g)	No. of tillers	Stomatal conductance (mmol m ⁻² s ⁻¹)
AZUCENA	S	1.22 ± 0.13	2.13 ± 0.19	9.5 ± 0.8	371.8 ± 32.3
IR 24	S	1.91 ± 0.06	3.91 ± 0.25	21.0 ± 1.0	867.9 ± 42.7
IR 64	S	1.77 ± 0.10	3.24 ± 0.20	28.3 ± 0.9	906.7 ± 47.2
IRGA418	S	1.11 ± 0.14	1.50 ± 0.30	8.7 ± 1.6	829.2 ± 41.7
ITA230 (FARO50)	S	1.67 ± 0.19	3.33 ± 0.47	23.7 ± 2.7	903.9 ± 39.3
LK1484-5	S	2.37 ± 0.13	5.49 ± 0.40	28.7 ± 2.2	668.5 ± 40.7
Mamoudeni	S	0.97 ± 0.14	1.31 ± 0.29	10.3 ± 2.2	639.8 ± 50.9
Pokkali	S	2.46 ± 0.20	6.34 ± 0.45	16.0 ± 1.3	638.0 ± 34.0
Super	S	1.98 ± 0.06	3.58 ± 0.40	13.8 ± 1.2	718.3 ± 40.0
Tumo-tumo	S	0.72 ± 0.11	0.88 ± 0.17	5.3 ± 0.8	607.4 ± 51.6
WAB56-104	S	1.50 ± 0.16	2.49 ± 0.21	9.8 ± 0.9	530.4 ± 42.6
WITA 2	S	2.18 ± 0.13	4.16 ± 0.29	29.2 ± 2.5	783.1 ± 52.1
WITA 5	S	1.94 ± 0.14	3.93 ± 0.39	28.8 ± 2.2	820.2 ± 37.3
NERICA 1	I	1.66 ± 0.18	3.03 ± 0.32	13.5 ± 0.9	666.9 ± 49.0
NERICA 2	I	1.66 ± 0.21	3.13 ± 0.41	12.5 ± 1.1	604.3 ± 40.1
NERICA 4	I	1.64 ± 0.06	3.20 ± 0.28	12.3 ± 0.6	675.7 ± 48.2
NERICA 6	I	1.59 ± 0.19	2.93 ± 0.34	11.7 ± 1.4	540.2 ± 41.4
WAB1159-2-12-11-2-10	I	1.13 ± 0.14	2.21 ± 0.31	13.7 ± 1.6	618.9 ± 36.7
WAB1159-2-12-11-5-1	I	2.54 ± 0.15	5.44 ± 0.33	30.8 ± 1.6	589.7 ± 35.4
WAB1159-2-12-11-5-3	I	1.69 ± 0.19	3.22 ± 0.49	18.5 ± 2.0	794.7 ± 62.2
WAB450-I-B-P-91-HB	I	1.27 ± 0.14	2.34 ± 0.14	11.3 ± 0.3	469.9 ± 48.3
WAS122-IDSA-10-WAS-4	I	1.14 ± 0.18	1.93 ± 0.34	17.8 ± 2.5	885.5 ± 41.9
WAS127-B-5-2	I	1.30 ± 0.19	2.08 ± 0.32	18.5 ± 2.6	882.6 ± 52.7
Aawba	G	1.59 ± 0.11	2.94 ± 0.20	18.0 ± 1.5	630.1 ± 36.5
C0440	G	1.36 ± 0.10	2.34 ± 0.19	15.0 ± 0.9	766.6 ± 64.1
CG 14	G	1.46 ± 0.16	2.22 ± 0.21	14.8 ± 1.1	827.4 ± 41.6
Loubi tetera	G	2.08 ± 0.21	4.11 ± 0.45	19.5 ± 1.5	730.9 ± 33.5
Mala Noir V	G	1.70 ± 0.26	4.16 ± 0.76	13.8 ± 1.9	617.6 ± 50.8
Tataro	G	1.64 ± 0.18	3.15 ± 0.52	29.8 ± 2.8	826.3 ± 64.9
W0492	G	1.39 ± 0.06	2.26 ± 0.28	15.2 ± 1.5	795.0 ± 42.7
Significance		***	***	***	***
F value		7.49	11.95	18.3	9.1
Probability		0.000	0.000	0.000	0.000
Degree of freedom		29	29	29	29
<i>O. sativa</i> L.		1.68 ± 0.15	3.25 ± 0.44	17.9 ± 2.5	714.2 ± 44.0
Interspecific progeny		1.56 ± 0.13	2.95 ± 0.32	16.1 ± 1.9	672.8 ± 44.4
<i>O. glaberrima</i> Steud.		1.60 ± 0.09	3.03 ± 0.32	18.0 ± 2.1	742.0 ± 33.1
Significance		NS	NS	NS	NS
F value		0.20	0.17	0.2	0.5
Probability		0.824	0.842	0.803	0.590
Degree of freedom		2	2	2	2

平均値±標準誤差。S, *Oryza sativa* L.; I, Interspecific progeny; G, *Oryza glaberrima* Steud..

*** ANOVA により危険率 $p < 0.001$ で有意差あり; ^{NS} 有意差なし

る比率 (P/T) は *Oryza sativa* のそれに比べ有意に低いといわれている (縣ら, 1989)。また、蒸散効率 (単位蒸散量当たりのバイオマス生産量) についても、*Oryza glaberrima* は *Oryza sativa* に比べ低いといわれている (Sumi *et al.*, 1994)。本研究では *WUE* の種間差に着目したところ、*Oryza glaberrima* の *WUE* は *Oryza sativa* のそれに比べ若干低い値を示したが、その差は有意なものではなかった (表 2-4)。それは、*Oryza glaberrima* は *Oryza sativa* の 1.04 倍、種間交雑種の 1.10 倍という比較的大きな気孔コンダクタンスを有し (表 2-4)、*WUE* はより低くなると考えられるが、一方でその旺盛な葉の拡大 (Sumi *et al.*, 1994) によって後に議論するように水面からの蒸発量が抑えられ *WUE* が上昇したためと考えられる。

NERICA は陸稲環境では *Oryza sativa* に比べより高い P/T や蒸散効率を示すとする報告がある (藤井ら, 2006; Onyango *et al.*, 2007)。また、その高い蒸散効率はより小さな気孔コンダクタンスと関係があるといわれている (藤井ら, 2006)。しかしながら、本研究においては NERICA を含む種間交雑種は他の品種に比べ小さな気孔コンダクタ

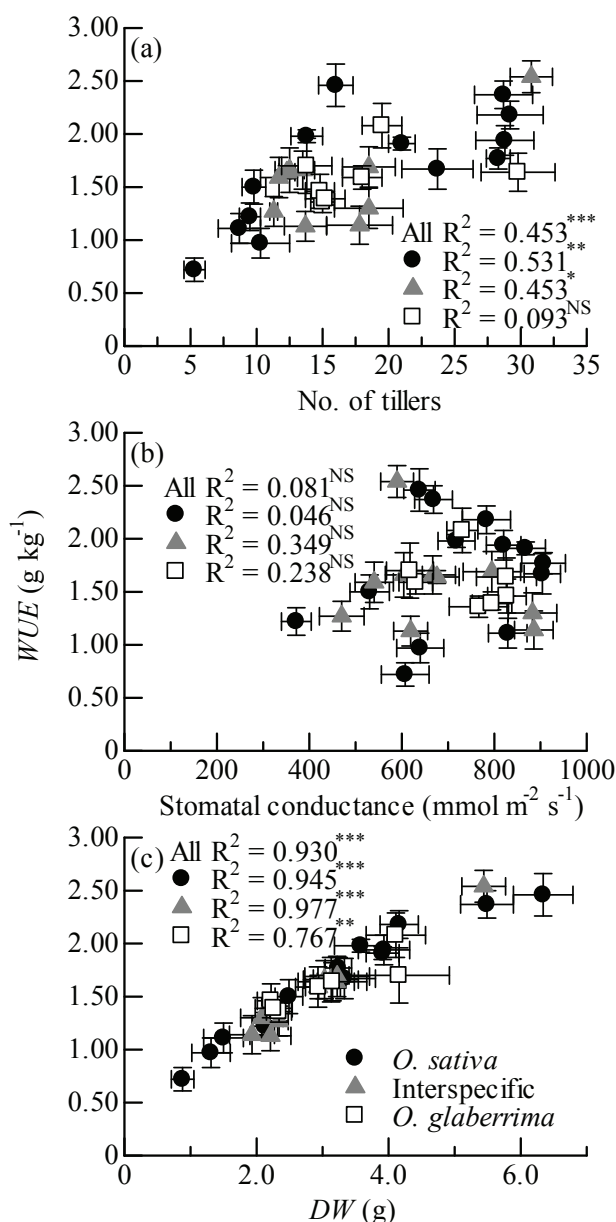


図 2-3 水利用効率 (*WUE*) と各要素との相関関係

ポット試験 1 における *WUE* と (a) 分けつ数、(b) 気孔コンダクタンス、そして (c) 乾物重 (*DW*) との相関関係を示す。バーは標準誤差を示す (a, c) $n = 5 \sim 6$; (b) $n = 18$ 。***, **, * ピアソンの相関関係検定により、それぞれ危険率 $p < 0.001, 0.01, 0.05$ で有意な相関関係あり; ^{NS} 有意な相関関係なし

ンスを示したものの、分けつ数は他の2種よりも10%程度少なく、*WUE* は最も小さかった（表2-4）。藤井ら（2006）で言われるように、種間交雑種のより小さな気孔コンダクタンスは蒸散効率に影響を与えたかもしれないが、本試験のような湛水環境下では気孔コンダクタンスの *WUE* に対する影響は、*Oryza sativa* においても見られるように、分けつ数による影響よりも小さかったと考えられる（図2-3）。

2-3-3 *WUE* に対する栽植密度の影響

ポット試験2、圃場試験ともに *WUE* は栽植密度とともに増加した（図2-4(a), 2-5）。そしてその増加率は栽植密度が増加するにつれ小さくなった。そのため、*WUE* と栽植密度の関係は負の二次関数で近似することができた。イネが過密に生育した場合2-3-5でも述べるように、生育環境の悪化等によって *WUE* は低下すると考えられ、*WUE* はある栽植密度で極大値を示すと考えられる。そのため、直線や双曲線による近似ではなく、本解析では二次関数による近似を試みた。図2-6は *WUE* の時系列変化を示している。すべての処理区において *WUE* はイネの生育と共に増加した。ただし、EXCESS処理区の *WUE* は22 DATで極大値を取り、その後減少する傾向を示した。一方で、そ

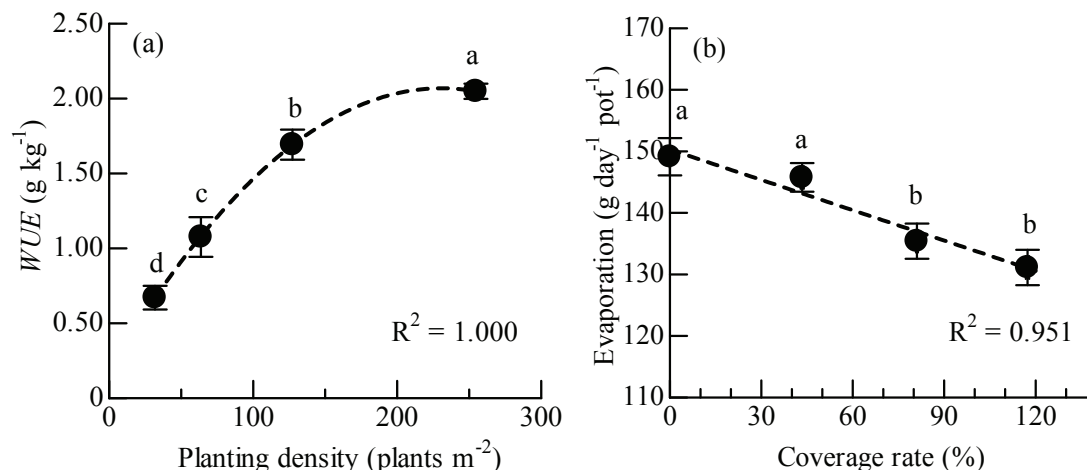


図2-4 栽植密度の水利用効率 (*WUE*) に対する影響と被覆率の蒸発量に対する影響

(a) ポット試験2での *WUE* に対する栽植密度の影響と、(b) ポット試験3での模擬群落による被覆率の増加が蒸発量に与える影響を示す。バーは標準誤差を示す (n=6)。破線はそれぞれ(a) 二次、(b) 直線回帰曲線を示す。異なるアルファベットは多重比較検定 (Fisher's PLSD) により危険率 $p < 0.05$ で有意差があったことを示す。Planting density ; 栽植密度、Coverage rate ; 模擬群落*による水面被覆率

*模擬群落とは発泡スチロール性の円盤を用いて蒸散作用を有さない群落をモデル化したものである。

の他の処理区の WUE は試験期間の後半にかけて増加し続けた。このように、群落構造に大きな影響を与える栽植密度は、ポット試験、圃場試験ともに WUE に対して有意な影響を与えることが分かった (図 2-4(a)、2-5)。

2-3-4 WUE の決定因子

本研究では、 WUE (g kg^{-1}) を単位蒸発散量 (kg) 当たりのバイオマス生産量 (g) と定義した。その蒸発散量を蒸発量と蒸散量に分解すると、 WUE が蒸散効率 (= バイオマス生産量/蒸散量) と蒸発量という 2 つの概念を含むことがわかる。

つまり、 WUE は蒸散効率の改善や蒸発量の減少によって高めることができる。蒸散効率は植物生理学的特性として考えられており (Ludlow and Muchow, 1990)、葉の同化能力や気孔コンダクタンスによってコントロールされる (Impa *et al.*, 2005)。一方、蒸発

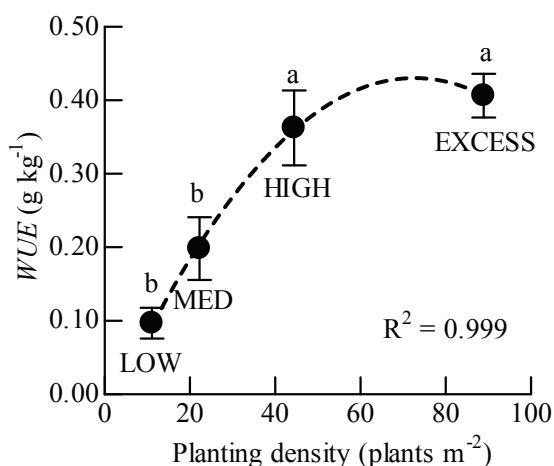


図 2-5 圃場試験での栽植密度の水利利用効率 (WUE) に対する影響

バーは標準誤差を示す ($n=4$)。破線は二次回帰曲線を示す。異なるアルファベットは多重比較検定 (Fisher's PLSD) により危険率 $p < 0.05$ で有意差があったことを示す。

Planting density ; 栽植密度

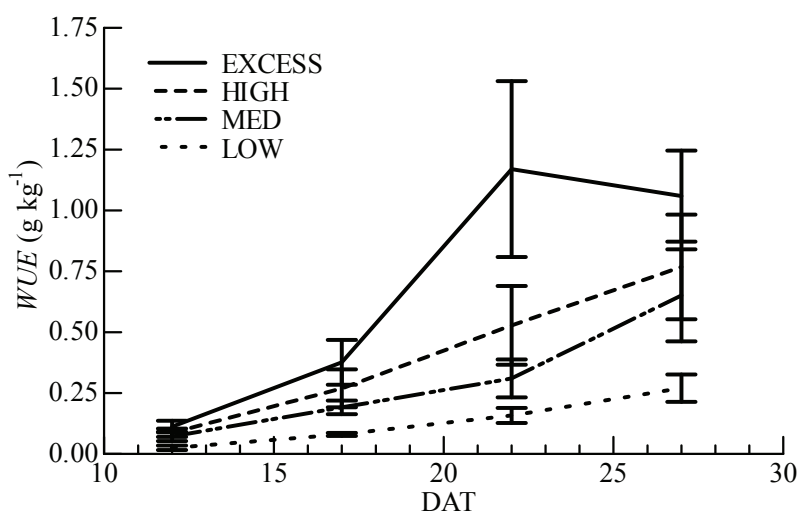


図 2-6 処理区ごとの水利利用効率 (WUE) の時間変動

異なる栽植密度処理区における WUE の 5 日毎の時間変動を示す。バーは標準誤差を示す ($n=4$)。DAT は days after transplanting (移植後) を意味する。

量は基本的に S_d や VPD などの気象要素によって左右され (Penman, 1948)、それらの気象要素はイネの草型や群落構造に影響を受ける。イネの蒸散作用も群落内の VPD に対して影響を与える可能性があるが、本試験ではその影響は小さかったと考えられる。なぜなら、試験中が

ットは十分に疎らに配置されていたとともに、試験期間はイネの生育初期に限られ、群落は密に発達していなかったためである。

先行研究では、蒸散効率や P/T に対する様々な要因（気孔コンダクタンス、葉内窒素量、葉内炭素量、葉内 CO₂ 濃度 (C_i) の大気 CO₂ 濃度 (C_a) に対する比率 (C_i/C_a)）の影響を調査したり（Maruyama *et al.*, 1985; Dingkuhn *et al.*, 1989; 足立ら, 1996）、P/T と同位体炭素分別（CID）との間に負の相関関係があることなどを報告したりしている（Dingkuhn *et al.*, 1991; Kondo *et al.*, 2004; Impa *et al.*, 2005）。しかしながら、CID は WUE とは、特に分けつ期において顕著な関係を示さず、その理由として Zhao *et al.* (2004) は WUE と P/T との関係性が乏しい可能性を指摘している。本ポット試験 1 の結果でも、WUE は気孔コンダクタンスと相関関係を示さず（図 2-3）、気孔コンダクタンスに影響を受ける P/T や蒸散効率が生育初期の WUE においては主な決定要因ではなかったことを示唆している。

一方で、ポット試験 1、2 や圃場試験では、分けつ数や栽植密度が WUE に対して有意に影響を与えた（図 2-3, 2-4, 2-5）。それは、植物体による日射の遮蔽効果による影響が大きいと考えられる。圃場試験では、日射透過率がイネの生育と共に減少し、特に、図 2-2(a) に示される EXCESS 処理区では LOW 処理区や MED 処理区に比べ試験期間の後半にかけて大きく減少した。さらに、図 2-4(b) はポット試験 3 の結果である水面からの蒸発量に対する模擬群落の大きさの影響を示している。模擬群落は蒸散効果を有さないため、群落による日射遮蔽効果のみの水面蒸発量に対する影響を表している。表層からの蒸発量は模擬群落による被覆率と負の関係を示しており、群落の拡大が水面からの蒸発量を大きく抑制することを示唆している。大上 (2004) もシミュレーションによって群落による日射の遮蔽効果によって水面蒸発量が抑制されることを推定している。半乾燥地域におけるイネ生育初期の WUE において蒸発量は主要な要素であるため、群落による日射の遮蔽効果は水消費量の減少に大きな役割を果たすと考えられる。

そこで、群落の拡大が水消費に与える影響について推定した。群落被覆率とバイオマスとの関係を双曲線 ($y = -ax/(x - b)$; $a = 44.6$, $b = 64.4$) によって近似した（図 2-7(a)）。バイオマスが増加し続けた場合、群落被覆率は最大値に達し飽和すると考えられるため双曲線を採用した。また、群落被覆率と WUE との関係は指数関数 ($y = ce^{dx}$; $c = 0.110$, $d = 0.065$) によって近似することができた（図 2-7(b)）。そのため、群落被覆率が増加す

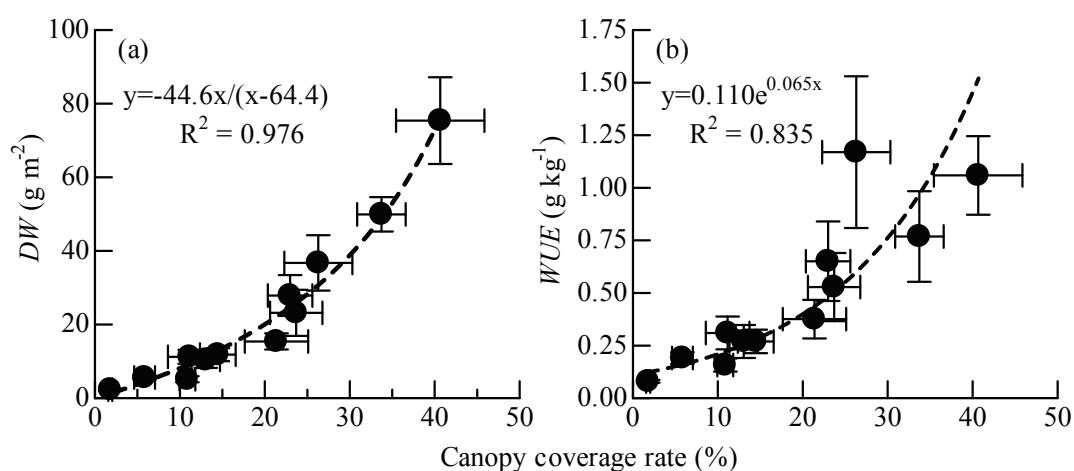


図 2-7 圃場試験における群落被覆率の影響

圃場試験における群落被覆率と (a) 乾物重 (DW)、(b) 水利用効率 (WUE) との関係を示す。バーは標準誤差を示す ($n=4$)。破線は (a) 双曲線 ($y = -ax / (x - b)$; $a = 44.6$, $b = 64.4$)、(b) 指数関数 ($y = ce^{dx}$; $c = 0.110$, $d = 0.065$) による回帰曲線を示す。Canopy coverage rate ; 群落被覆率

ることで、 WUE が飛躍的に増加するとともに、 WUE はバイオマスの増加に伴い群落被覆率が飽和することで極大値を取ると考えられる。なお、群落の拡大能力は双曲線の係数によって表現できる。より小さな曲率 ($= a$) はより高い群落拡大能力を意味し、小さなバイオマス量で大きな群落被覆率を有する。本推定においては双曲線の漸近線の値 ($= b$) は不変とし、群落被覆率の最大値は一定値とした。図 2-8 は群落被覆率とバイオマスとの関係と、異なる曲率を用いて推定した水消費量とバイオマスとの関係を示している。曲率が小さい方が、つまり群落拡大能力が高い方が、同じバイオマス生産量で水消費量を大きく抑えられることが推定された。この推定結果は、生育初期において群落拡大能力の高い品種を選抜することで水消費量を飛躍的に減少させられる可能性があることを示している。そのため、より高い WUE を得るために多分げつ品種などの高い群落拡大能力を有したものが推奨されよう。

以上のことから、ナミビア北部地域におけるイネ栽培で、高 WUE を得るためには、気孔コンダクタンスのような植物生理学的要因ではなく、草型や栽植密度のような物理的要因によって水面からの蒸発量を抑制することがより効果的であることが示された。

2-3-5 高 WUE を可能とする最適栽植密度

ポット試験 2 と圃場試験両方において、 WUE と栽植密度の関係は二次関数で近似さ

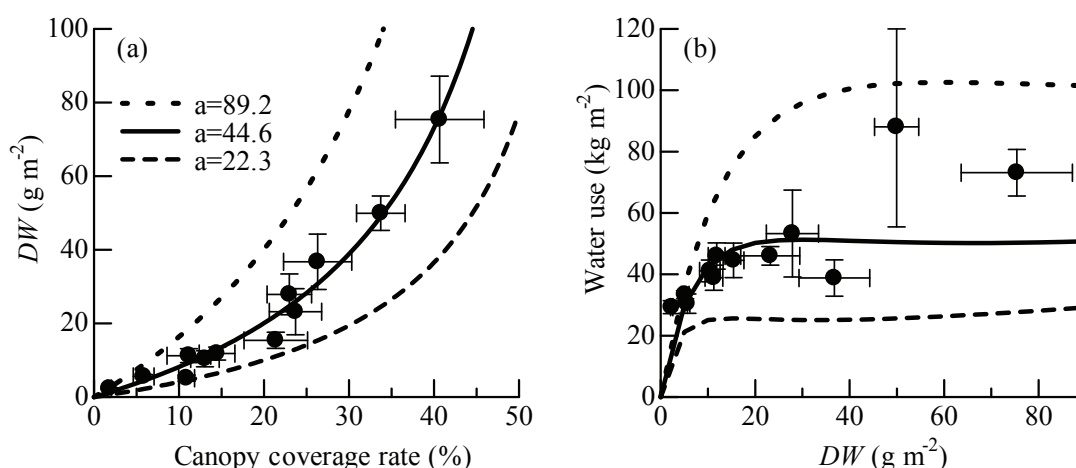


図 2-8 群落拡大能力の水消費量に対する影響評価

(a) 異なる曲率 ($a = 22.3, 44.6, 89.2$) の双曲線 ($y = -ax / (x - b)$; $b = 64.4$) による群落被覆率と乾物重 (DW) との関係と (b) その関係と図 2-7 に示した回帰曲線を用いて算出した水消費量の推定曲線を示す。水消費量は水利用効率 (WUE) の逆数に DW を乗ずることで求めた。プロットは圃場試験における実測値を示し、バーは標準誤差を示す ($n=4$)。Canopy coverage rate ; 群落被覆率

れ (図 2-4(a), 2-5)、イネ生育初期において WUE の最大値を取る最適栽植密度が存在する可能性が示唆された。 WUE と栽植密度との関係は双曲線によっても近似することができるが、過度な栽植密度は次の理由から WUE の減少を引き起こすと考えられるため本解析では二次関数を採用した。過度な栽植密度によって、過繁茂状態による群落蒸散量の増加 (大上, 2004; Impa *et al.*, 2005)、群落内の放射環境の悪化による蒸散効率の悪化 (大上, 2004)、そして群落被覆率の飽和による蒸発抑制効果の低下 (図 2-7(a)) である。実際、 WUE の時系列変化をみると、EXCESS 処理区では 22 DAT に最大値を取りその後減少している (図 2-6)。

今までにイネの収量を最大化する最適栽植密度を求める研究はなされてきているが (e.g. 萩原ら, 1994; 難波, 2003)、栽植密度を変化させイネの WUE が最大となる最適栽植密度を検討した研究はあまりなされてきていない。Hayashi *et al.* (2006) は日本において圃場試験を実施し、 WUE に対する栽植密度の影響が年によって異なり、また WUE と栽植密度との間で有意な関係を示さないこともあることを報告している。本研究の結果では、栽植密度によって WUE は有意に影響を受け、ポット試験 2 と圃場試験両方において栽植密度の増加によって WUE も上昇する傾向が安定して見られた (図 2-4(a), 2-5)。Hayashi *et al.* (2006) の結果と異なり、ナミビアにおいて栽植密度の影響が常に

有意であったのは、ナミビアのような半乾燥地域では、イネ生育初期の群落による日射量の遮蔽効果が有意であり（図 2-2(a)）、高栽植密度による高群落被覆率が *WUE* の上昇に強く貢献したためと考えられる。

圃場試験よりイネの生育初期における *WUE* を最大化する最適栽植密度は 71.7 個体 m^{-2} と見積もられた（図 2-5）。この値は、他の半乾燥国であるエジプトで高収量を目的として提案された栽植密度と比較可能と言える（33.3 株 m^{-2} 、ただし 4 個体 株⁻¹；難波, 2003）。強い日射環境下では、葉面積指数がたとえ大きくなっても、群落内部の下層における光合成能力が高く維持されやすい（大上, 2004）。そのため、本試験より得られた最適栽植密度も、水消費を抑制し高い水利用効率を獲得するために、本試験期間よりも長い期間に対して適用可能かもしれない。ただし、本試験では 1 品種を用いて栄養成長期のみの *WUE* を計測しており、それぞれの品種に対する生育期間全体に適用可能な最適栽植密度の検討は今後の課題と言えよう。

2-4 まとめ

ナミビア北部地域でのイネ栽培においてイネの生育初期の *WUE* に影響を与える因子について作物学的視点から解明するため、ナミビアにおいてポット試験と圃場試験を実施した。ポット試験では、*Oryza sativa*、*Oryza glaberrima* そして NERICA を含む種間交雑種からなる 3 栽培種の計 30 品種を供試して *WUE* の種間差、品種間差を検討するとともに、栽植密度が *WUE* に与える影響について調査した。さらに、圃場試験では栽植密度が *WUE* に与える影響について圃場レベルで検討を加えた。その結果、次のような点が明らかとなった。

- ナミビアのような半乾燥地域では、イネ生育初期の *WUE* に対して、気孔コンダクタンスのような植物生理学的特徴よりも、むしろ分けつ数や栽植密度といった物理的要因がより大きな影響を与えることが分かった。
- ナミビアのような低緯度に位置する半乾燥地域では、蒸発が日射量に強く依存しているため、群落被覆率の拡大が水面からの蒸発量を効果的に抑制し、結果としてより高い *WUE* を得られる可能性が高いことが分かった。
- 半乾燥地域では群落被覆率の増加によってより高い *WUE* を得られるため、イネの生育初期から高い群落被覆率を得られる高栽植密度栽培が推奨される。

作物学的視点からポット試験や小規模な圃場試験を実施し、ナミビアでの稲作による水消費量に対するイネの日射遮蔽効果について明らかにした。そのようなイネの水消費特性がより大きな群落スケールでも見られるのか、また、イネによる水消費がナミビア北部地域の水収支に対して与える影響について、次章以降にて議論する。

3 ナミビア北部の蒸発散特性と稲作導入の影響

3-1 本章の背景

第2章においてナミビア北部地域におけるイネの水利用効率 (*WUE*) が気孔コンダクタンスのような植物生理学的な要因ではなく、主にイネによる水面の被覆率という物理的な要因によって影響を受けていることが示された。第2章ではポット試験や小規模な圃場試験によって作物学的にイネの水消費について議論を展開したが、本章ではスケールを拡大し、イネの群落としての水消費量を明らかにし、その水消費特性についてその他の地表面状態と比較しながら水文学的に明らかにしていく。本章では、バイオマス生産量に関するデータが不十分なため、水利用効率ではなく水消費量に着目し議論を進める。

湿地帯の水収支においては蒸発散が主要な要素と言われており (Lafleur, 1990; Souch *et al.*, 1998)、特に、半乾燥地域の湿地帯においては他の地域に比べより盛んに蒸発散が生じる (Allen *et al.*, 1992; Sánchez-Carrillo *et al.*, 2004; Drexler *et al.*, 2008; Doody and Benyon, 2011)。また、湿地帯から水田へと土地利用が変化した中国東北部では蒸発散量が増加したとする報告もある (Zhao *et al.*, 2008)。そのため、ナミビア北部の季節性湿地帯における稲作導入の水収支に対する影響を評価するためには、まず季節性湿地帯の蒸発散特性を理解し、さらにそれに対する稲作導入の影響を検討する必要がある。

ナミビア北部地域における蒸発散量の情報は限られており、可能蒸発量が 2500 mm から 3800 mm の間を変動し (Amakali *et al.*, 2002)、平均年降雨量の 5 から 18 倍量が計算上蒸発により地上から失われる (MWCT, 1992) とする報告が見受けられる程度である。類似した環境における実蒸発散量の報告例としては、ニジェールにおける灌木と草本からなるサイトや (Ramier *et al.*, 2009)、隣国のボツワナのオカヴァンゴデルタにおけるもの (Bauer *et al.*, 2004) などがあげられる。しかしながら、ナミビア北部地域における観測は今までに実施されてきておらず、その地域の実蒸発散特性は明らかとなっていない。ヨーロッパの温帯地域、地中海沿岸地域、あるいはアメリカやオーストラリアの乾燥地域における湿地帯では蒸発散量に関する研究が多くなされてきているものの (e.g. Burba *et al.*, 1999; Acreman *et al.*, 2003; Sánchez-Carrillo *et al.*, 2004; Doody and Benyon, 2011)、ナミビア北部の季節性湿地帯のような乾季と雨季とで水環境が大きく

変化する環境下での研究例は少なく、そのような環境における稲作導入の影響は評価されてきていない。

そこで、ナミビア北部地域に出現する季節性湿地帯への稲作導入による蒸発散特性への影響を明らかにするために、本章の目的を次の3つとした。

- 1) ナミビア北部地域における蒸発散量の変動の理解
- 2) その蒸発散量の制限因子の決定
- 3) そのような湿地帯環境下に稲作を導入した場合の影響評価

3-2 材料と方法

3-2-1 観測サイト概要

第2章で述べたオゴンゴキャンパスにて観測を実施した(図1-1)。オゴンゴキャンパスは地表面が水面に覆われないアップランドと、雨季(11月から5月)にその地域周辺における降雨とアンゴラからの洪水によって地表面が水面に覆われる季節性湿地帯とを有する。オゴンゴキャンパスは農業省の管轄下にあったため人的影響を強く受けておらず自然植生がよく保存されている(Kangombe and Strohbach, 2008)。オゴンゴキャンパスの季節性湿地帯に2つの圃場を(自然植生圃場、NVF; 南緯 17°40'53.9" 東経 15°17'18.7"、イネ圃場、RF; 南緯 17°40' 57.0" 東経 15°17'20.0")、さらにアップランドに1つの圃場を設営し(UF、南緯 17°41'03.5" 東経 15°17'39.4")、各圃場は 100 m × 100 m とした。植生は、UF では草本の *Eragrostis cilianensis* が優占しているが、その他に *Combretum collinum* や *Hyphaene petersiana* などが成育し、草本以外の植物が 1 ha あたり 7.3%の樹冠面積を占めている。NVF では *Willkomia sarmentosa* や *Cyperus esculentus* が優占して生息し、雨季に盛んに成長し、乾季の後半には乾燥のために枯死するという顕著な季節変化を示す。さらに、RF では、稲作導入による蒸発散量への影響を調べるため、2008 年から毎年イネを栽培した。2008/2009 年には、第2章でも代表種として用いた Pokkali を、2009/2010 年以降は Pokkali に加え Super と IRGA418 を栽培した。RF では雨季にはイネが生育し(図3-1)、乾季には裸地が広がっていた。解析期間中のそれぞれの圃場の地表面状態を表3-1に示す。なお、2009年2月から3月は、RF と NVF において季節性湿地帯の急激な水位上昇により植生が完全に冠水し、オープンウォーター状態となった。

3-2-2 観測方法

ボーエン比、潜熱フラックスならびに顕熱フラックスを算出するため、各圃場の中央にボーエン比測定システムを設置した。各測定機器の詳細は表 3-2 に示す。近年の蒸発散計測では渦相関法が頻繁に用いられるが（e.g. Saunders *et al.*, 2007; Alberto *et al.*, 2011）、測定に必要な機器が高価であり（Drexler *et al.*, 2004）、さらに十分な安定した電力供給が必要であるため、ナミビアでの複数圃場における渦相関法



図 3-1 イネ圃場（RF）にてイネが生育している様子

写真は 2009 年 2 月 10 日撮影。写真中央やや左の構造物がボーエン比測定システムを示す。

の適用は難しい。一方、熱収支・ボーエン比法は比較的安価な測定機器を用いて蒸発散量を算出することができ、それほど大きな電力を必要としない。また、熱収支・ボーエ

表 3-1 観測期間中のそれぞれの観測圃場（アップランド圃場；UF、自然植生圃場；NVF、イネ圃場；RF）の地表面状態

Field	2008				2009											
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
UF	<i>Eragrostis cilianensis</i> , <i>Combretum collinum</i> , <i>Hyphaene petersiana</i>															
NVF	<i>W. sarmentosa</i> <i>C. esculentus</i>				Open water [*]		Dead vegetation									
RF	<i>W. sarmentosa</i> <i>C. esculentus</i>		L		R		Open water [*]		Bare land							

Field	2010												2011		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
UF	<i>Eragrostis cilianensis</i> , <i>Combretum collinum</i> , <i>Hyphaene petersiana</i>														
NVF	<i>Willkomia sarmentosa</i> , <i>Cyperus esculentus</i>														
RF	L		R		Bare land								L	R	

L Land preparation, direct sowing, transplanting

R Rice growing

*NVF と RF の植生は、季節性湿地帯の急激な水位上昇により冠水状態となった。

ン比法は鉛直方向の温湿度勾配を利用して蒸発散量を算出する。本観測サイトであるナミビア北部地域のような半乾燥地域においては特に雨季において十分な鉛直方向の温湿度勾配が存在すると考えられ、熱収支・ボーエン比法が適用可能であると判断した。

大気の気温 (T_a , °C) 並びに相対湿度 (Rh , %) を測定するため、通風乾湿計 (Humicap; CVS-HMP-45D, Vaisala, Finland) を地表面から 0.50 m と 3.00 m の 2 高度に設置した。雨季の間は RF と NVF において水位の上昇、下降に合わせて低い位置の通風乾湿計を両圃場ほぼ同時に上下させた。また、純放射計 (CPR-NR-LITE, Kipp & Zonen, the Netherlands) を地表面から約 4 m の位置に取り付け純放射量 (Rn , $W m^{-2}$) を測定した。2009 年 11 月からは簡易日射計 (橋本, 2000) を純放射計近傍に設置しアルベド (α) を計測した。熱流板 (CPR-PHF-01, Campbell Scientific, Inc., USA) を地表面から 0.05 m の深さに埋設し地中熱流量 (G , $W m^{-2}$) を測定した。地表水が存在していない時期は地表面温度 (T_s , °C) を、存在している時期は地表水温 (T_w , °C) を計測するため、地表面から 0.00 m、0.20 m そして 0.40 m の位置に白金抵抗温度計を設置した。2010 年 4 月からは、2.85 m の高さに三杯風速計 (CYG-3102, Young, Japan) を設置し風速 (U , $m s^{-1}$) を計測した。地表水の水位 (z_w , m) を 2008/2009 年の雨季はほぼ毎日定規で計測し、2009/2010 年の雨季以降は水位計 (CME-M86, Meteo Denshi, Japan) で 10 分ごとに測定し記録した。 z_w 以外の各要素は 30 秒毎に計測し、10 分毎に平均値を記録した。すべてのデータはロガー (C-CR1000, Campbell Scientific, Inc., USA) に蓄積した。ボーエン比の計測は 2008 年 9 月 10 日から開始した。通風乾湿計は n 時 45 分から $n+1$ 時 00 分まで通風し、 n 時 50 分から $n+1$ 時 00 分までの各要素の平均値を用いて熱収支・ボーエン比法に基づいて 1 時間ごとのボーエン比、潜熱フラックス、顕熱フラックスを計算した。植物に関する指標として葉面積指数 (LAI) を、2012 年に葉面積計 (LAI-2000; LI-COR Inc.,

表 3-2 ボーエン比測定システムの測定機器の詳細と設置位置

Variable	Instruments	Model	Company	Installed height (m)
Rn	Net radiometer	CPR-NR-LITE	Kipp & Zonen, the Netherlands	4.0
G	Soil heat plate	CPR-PHF-01	Campbell Scientific, Inc., USA	-0.05
T_a	Humicap	CVS-HMP-45D	Vaisala, Finland	0.5, 3.0
Rh	Humicap	CVS-HMP-45D	Vaisala, Finland	0.5, 3.0
T_w / T_s	Platinum resistance thermometer	COT-PTWT	Climattec, Japan	0.0, 0.2, 0.4
z_w	Water level gauge	CME-M86	Meteo Denshi, Japan	0.0
U	Anemometer	CYG-3102	Young, Japan	2.85
α	Simplified pyranometer	-	-	4.0

USA) により各圃場において計測し、それらの値を DOY (Day of year) によって近似することで解析期間全体の季節変動を推定した (図 3-2)。なお、オゴンゴキャンパスにおける日降雨量のデータは、2009 年 11 月まではナミビア大学農学部より提供していただいたものを利用し、それ以降は UF に設置した転倒マス型雨量計による測定値を利用した。

3-2-3 熱収支・ボーエン比法

蒸発散量は熱収支・ボーエン比法によって一時間ごとのデータを用いて算出される潜熱フラックスから計算した。熱収支・ボーエン比法では熱収支式、

$$Rn = H + \lambda E + G + \Delta S \quad (3-1)$$

とボーエン比を表す式 (Bowen, 1926)、

$$Bo = \frac{H}{\lambda E} \quad (3-2)$$

を組み合わせることで、潜熱フラックス ($\lambda E, \text{W m}^{-2}$) と顕熱フラックス ($H, \text{W m}^{-2}$) を算出することができる。ただし、 G は地中熱流量 (W m^{-2})、 ΔS は水体貯熱量変化量 (W m^{-2}) であり、 Bo はボーエン比である。 ΔS は地表面が水面に覆われていない場合は 0 となり、地表水が存在した期間については後に示すように水温変化量と z_w から推定した。 Bo は次式に表されるように、大気気温と比湿の勾配から求めることができる。

$$Bo = \frac{c_p \Delta T_a}{\lambda \Delta q_a} \quad (3-3)$$

ここで、 ΔT_a ならびに Δq_a はそれぞれ 2 高度間の気温差 ($^{\circ}\text{C}$) と大気の比湿差 (kg kg^{-1}) を示し、 c_p 、 λ は空気の定圧比熱 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) と気化の潜熱 (J kg^{-1}) を示す。すなわち

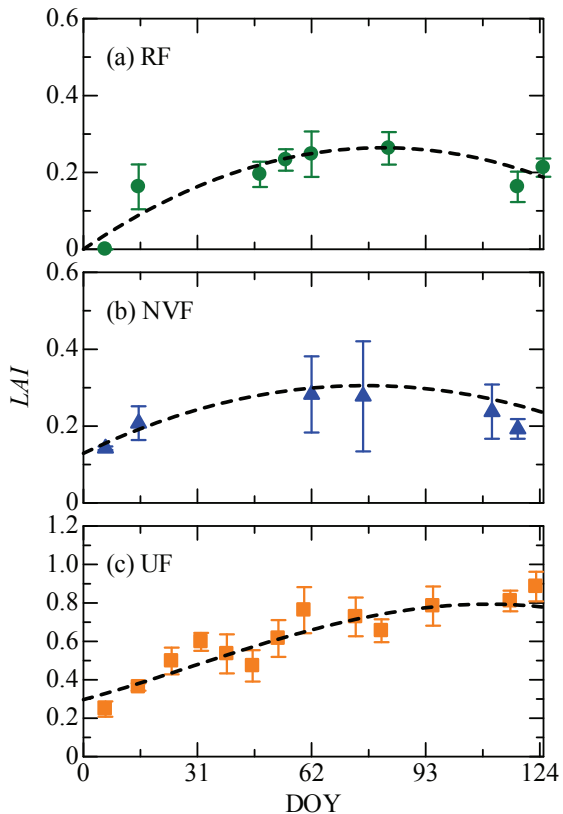


図 3-2 2012 年に実測されたそれぞれの圃場における葉面積指数 (LAI) の季節変動

バーは標準誤差を示す ($n=4$)。DOY は Day of year を示す。 LAI の季節変化を多項式によって DOY で近似した曲線を破線で示す。

式 (3-1)、(3-2)、(3-3) より、潜熱、顕熱フラックスは次式から求めることができる。

$$\lambda E = \frac{1}{Bo+1}(Rn - G - \Delta S) \quad (3-4)$$

$$H = \frac{Bo}{Bo+1}(Rn - G - \Delta S) \quad (3-5)$$

RF と NVF における ΔS は、地表が水に覆われている期間について単位時間当たりの平均水温変化量から計算した。

$$\Delta S = \frac{c_w \times \rho_w \times \Delta T_w}{\Delta t} \quad (3-6)$$

ここで、 c_w は水の比熱 ($= 4184 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 ρ_w は水の密度 ($= 1000 \text{ kg m}^{-3}$)、 Δt は 3600 s、そして ΔT_w は Δt における平均水温変化量 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}$) を表す。なお、平均水温変化量は単位時間当たりの水温変化量とその時の z_w を用いて、以下のように加重平均値として算出した。

$$\Delta T_w = \Delta T_{w-0.00} \times z_w \quad (z_w < 0.20 \text{ m})$$

$$\Delta T_w = \Delta T_{w-0.00} \times \frac{0.20}{z_w} + \Delta T_{w-0.20} \times \frac{z_w - 0.20}{z_w} \quad (0.20 \text{ m} \leq z_w < 0.40 \text{ m})$$

$$\Delta T_w = \Delta T_{w-0.00} \times \frac{0.20}{z_w} + \Delta T_{w-0.20} \times \frac{0.20}{z_w} + \Delta T_{w-0.40} \times \frac{z_w - 0.40}{z_w} \quad (z_w \geq 0.40 \text{ m})$$

(3-7)

ここで、 ΔT_{w-x} は 3600 s の間の水温変化量を示し、添え字 (x) はそれぞれの水温計の地表面からの高さを示す。

熱収支・ボーエン比法によって求められる λE より、一時間当たりの蒸発散量 (ET_{obs} , mm) を、

$$ET_{\text{obs}} = \frac{\lambda E \times \Delta t}{\rho_w \times \lambda} \times 1000 \quad (3-8)$$

により求めた。

なお、解析期間は 2008 年 9 月 11 日から 2011 年 3 月 20 日までとした。ただし、RF と NVF においては電源供給停止により、2009 年 9 月 26 日から 2009 年 11 月 19 日までの

期間の欠測を含む。

3-2-4 品質管理

熱収支・ボーエン比法により算出された一時間ごとの λE 、 H から、スパイク状のデータならびに算出された各フラックスの符号が実測された温湿度勾配と異なり熱収支・ボーエン比法の仮定上成立しえないものを異常値として除去した (Perez *et al.*, 1999)。また、日の出、日の入りの時間帯にはボーエン比が-1 付近を取るため、式 (3-4)、(3-5) により潜熱フラックスならびに顕熱フラックスが異常値を示すケースが多いことが知られている (Perez *et al.*, 1999; Kurc and Small, 2004; Drexler *et al.*, 2004)。本解析においては、ボーエン比が-1.2 より大きく、-0.8 より小さい範囲でフラックスの絶対値が極端に大きくなる異常値を多く示したので、ボーエン比がその範囲を示す場合のデータを除去した。RF、NVF、UF において異常値はそれぞれ、解析データ全体の約 29、25、そして 22%の割合であったが、異常値は大気が安定状態になりやすい夜間 ($Rn \leq 0$) に集中しており、日中データ ($Rn > 0$) に関しては、それぞれ約 6、6、8%であった。前述した長期欠測期間を除いて、連続した 3 時間以内の異常値に対しては線形補間を行い、それ以上の連続した異常値については前後 10 日間の同じ時間における Rn に対する各フラックスの比を用いて補間した。蒸発散は主に日中に生じるため、 Rn が正の時を日中として扱い、その時間帯の蒸発散量の和を日中蒸発散量として解析に用いた。夜間においても RF、NVF、UF において、それぞれ 0.9、0.7、0.4 mm night-time⁻¹ の蒸発散量が観測されたが、夜間のデータセットには多くの欠測値が含まれており (RF ; 46%、NVF ; 39%、UF ; 33%の欠測値)、その値の信憑性は低いと判断し日中データのみで解析を行った。

なお、RF と NVF の蒸発散量を比較するため、両圃場の測器差を補正した。すなわち、両圃場の地表面状態が同じであった期間 (2008 年 9 月から 11 月ならびに 2009 年 3 月) の RF と NVF の潜熱フラックスを等しいものとし、その期間の両者の関係式 ($\lambda E_{NVF} = 1.04\lambda E_{RF} + 13.69, r = 0.88$) を用いて RF のデータを補正した。

3-2-5 蒸発散に対する地表面の影響因子

地表面状態を表す指標として、バルク輸送係数を算出した。バルク法によって、潜熱フラックス (λE)、顕熱フラックス (H) は次式により示すことができる (Kondo and

Watanabe, 1992)。

$$H = c_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) \quad (3-9)$$

$$\lambda E = \lambda \rho_a C_E U (q_s - q_a) \quad (3-10)$$

ここで、 ρ_a は空気密度 (kg m^{-3})、 q_s は地表面の比湿 (kg kg^{-1}) を示す。 T_a 、 q_a ならびに U は、それぞれ、大気の気温、比湿、風速を示す。 U には 2.85 m の高度で計測されたものを利用した。 C_H ならびに C_E は、それぞれ、顕熱と潜熱輸送に関するバルク輸送係数を示し、風速や地表面状態の物理的特性に影響を受け、大気の交換のしやすさを示す指標である。なお、十分に湿った地表面においては $C_H \approx C_E$ となる (Kondo and Watanabe, 1992)。また、 q_s を実際に計測することは難しいが、十分に湿った地表面において q_s は、地表面温度 (T_s) における飽和比湿 ($q_{\text{sat}}(T_s)$, kg kg^{-1}) と等しいと仮定できる。そこで、 $q_{\text{sat}}(T_s)$ と地表面の湿潤度を示す指標である蒸発効率 (β) を導入することで、 λE は次式のように表すことができる。

$$\lambda E = \lambda \rho_a \beta C_E U [q_{\text{sat}}(T_s) - q_a] \quad (3-11)$$

β は十分に湿った土壌や水面では 1 をとり、地表面の湿潤度や植生の影響を受け 0 まで変化する。 C_E はしばしば、地表面の乾燥の具合を含むものとして定義されるが (Shimoyama *et al.*, 2004)、ここでは、 $C_H = C_E$ として定義した。

本研究では、風速が実測値として得られた 2010 年 4 月からの実測値を用いて C_E ならびに β を算出した。なお、 T_s として水面が存在していない期間には地表 0 m に設置した温度計の値を、水面が存在している期間には水面に最も近い温度計の値を用いた。地表面温度を測定する場合、植生が存在すると葉面温度が鉛直方向に分布を持つことが測定誤差の原因となる (Kondo and Watanabe, 1992)。しかし、本研究サイトでは植生が十分に疎に生育しており、地表面温度に対する葉面温度の影響は無視できものと仮定した。

3-3 結果と考察

3-3-1 気象環境

図 3-3 は各圃場における純放射量 (Rn)、アルベド (α)、気温 (T_a)、飽差 (VPD) の日中平均値と 10 日間の移動平均値ならびに日降雨量と地表水の水位 (z_w) を示している。すべての圃場において Rn は雨季 (11 月から 5 月) に高く、乾季に減少するという

顕著な季節変化を示し、 T_a と VPD は乾季の終わり（10月ごろ）にピークをとる傾向が見られた。 VPD は雨季に入ると降雨イベントごとに減少し、その後降雨がないと乾季の後半にかけて上昇した。 T_a は、5月ごろから Rn の低下と同調するように低下し、6月から7月ごろに最低値を記録した。観測期間を通じての日中平均気温ならびに日中平均飽差に圃場間で顕著な差は見られず、それぞれ約 26.8°C 、約 24.6 hPa であった（表 3-3）。日

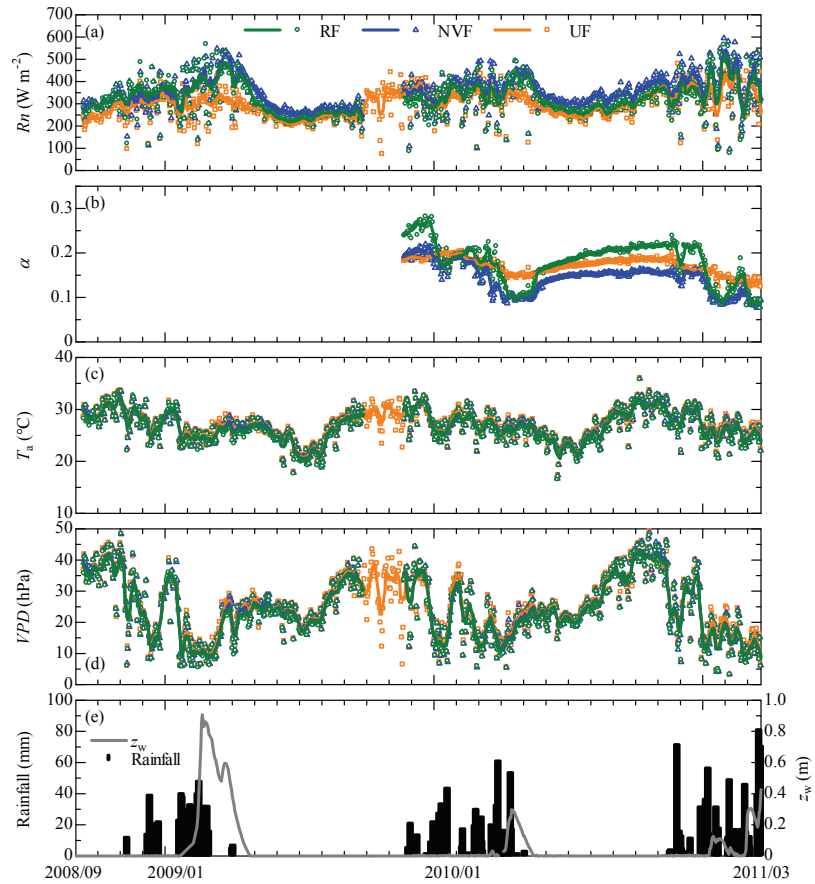


図 3-3 各圃場における気象要素の季節変動

(a) 純放射量 (Rn)、(b) アルベド (α)、(c) 気温 (T_a)、(d) 飽差 (VPD) の日中平均値を示す。また、(e) 日降雨量ならびに RF や NVF における地表水の水位 (z_w) を示す。緑色は RF を、青色は NVF を、橙色は UF を意味する。中抜きのプロットは日中平均値を示し、実線は 10 日間の移動平均値を示す。

中平均飽差は雨季においても約 21 hPa であり、雨季においても比較的乾燥した大気であった。観測期間を通しての Rn の日中平均値はイネ圃場 (RF) で $323.3 \pm 80.4\text{ W m}^{-2}$ 、自然植生圃場 (NVF) で $346.6 \pm 80.4\text{ W m}^{-2}$ 、アップランド圃場 (UF) で $296.8 \pm 66.2\text{ W m}^{-2}$ と、圃場間で若干の違いが見られた。RF や NVF のような湿地帯環境下では雨季に水面が現れることで α が低下した（図 3-3(b)）。その結果、 Rn が増加し UF よりも高い値を示したと考えられる。また、RF における Rn は NVF のそれに比べ、乾季においても雨季においても低かった。これは、雨季については圃場準備のための耕うん作業が、乾季については収穫作業が実施されることで地表面から植生が除かれ、 α が増加したため（図

表 3-3 各期間における気象要素ならびに蒸発散量の平均値

RF、NVF、UF における観測期間全体、雨季（11 月から 5 月）、そして乾季（6 月から 10 月）の純放射量 (R_n)、気温 (T_a)、飽差 (VPD)、アルベド (α)、日中蒸発散量 (ET_{obs}) を示す。

Season	Field	R_n ($W\ m^{-2}$)	T_a ($^{\circ}C$)	VPD (hPa)	α	ET_{obs} ($mm\ daytime^{-1}$)
Whole	RF	323.3 \pm 80.4	26.6 \pm 3.0	24.1 \pm 9.9	0.18 \pm 0.05	1.9 \pm 1.7
	NVF	346.6 \pm 80.4	26.8 \pm 3.0	24.5 \pm 9.9	0.15 \pm 0.03	1.8 \pm 1.5
	UF	296.8 \pm 66.2	27.0 \pm 2.9	25.2 \pm 9.8	0.17 \pm 0.02	1.0 \pm 0.7
Wet	RF	352.4 \pm 84.6	26.8 \pm 2.4	20.8 \pm 9.2	0.17 \pm 0.05	2.8 \pm 1.6
	NVF	372.0 \pm 87.0	27.0 \pm 2.4	21.1 \pm 9.3	0.14 \pm 0.04	2.5 \pm 1.5
	UF	318.6 \pm 68.7	27.2 \pm 2.3	21.9 \pm 9.2	0.17 \pm 0.02	1.3 \pm 0.7
Dry	RF	273.9 \pm 37.7	26.2 \pm 3.8	29.7 \pm 8.4	0.20 \pm 0.01	0.6 \pm 0.3
	NVF	304.0 \pm 41.2	26.4 \pm 3.8	30.1 \pm 8.4	0.15 \pm 0.01	0.7 \pm 0.3
	UF	262.4 \pm 43.9	26.7 \pm 3.7	30.4 \pm 8.2	0.18 \pm 0.01	0.4 \pm 0.2

平均値 \pm 標準偏差

3-3(a, b)、表 3-3)、 R_n も低くなったと考えられる。

観測期間の年降雨量（ここでは 9 月 1 日から 8 月 31 日を一年とする）は 2008/2009 年が 697 mm、2009/2010 年が 643 mm、そして 2010/2011 年が 1109 mm であった。いずれの年も、2001 年から 2008 年までの平均値（440 mm）に比べ多かった。季節性湿地帯の地表水の水位 (z_w) は 2009 年 1 月後半から洪水によって急激に上昇し、2 月 19 日には約 0.90 m に達し、その後 4 月、5 月にかけて低下した（図 3-3(e)）。2010 年はその他の観測年に比べ地表水の出現が遅れ、3 月下旬から水面が認められ 4 月 15 日に最大値 0.30 m を記録した。2011 年は 1 月に一度 z_w が上昇し 0.12 m まで達したがその後減少し、3 月に改めて急激に上昇し 3 月 27 日には 0.81 m を記録した。

3-3-2 蒸発散量の時間変動

図 3-4 は各圃場における積算蒸発散量と蒸発散量の季節変化を示している。RF は緑色、NVF は青色、そして UF は橙色の線で示されている。UF における年蒸発散量は 2008/2009 年が 325.9 mm、2009/2010 年が 324.3 mm であり、年々変動が小さかった（図 3-4(a)）。蒸発散量は、降雨の開始と共に増加し始め、1 月から 2 月にピークを取り、その後減少した（図 3-4(b)）。日中蒸発散量は観測期間において $0\ mm\ daytime^{-1}$ から $3.4\ mm\ daytime^{-1}$ の値をとった。そして、雨季の平均蒸発散量は $1.27\pm0.68\ mm\ daytime^{-1}$ 、乾

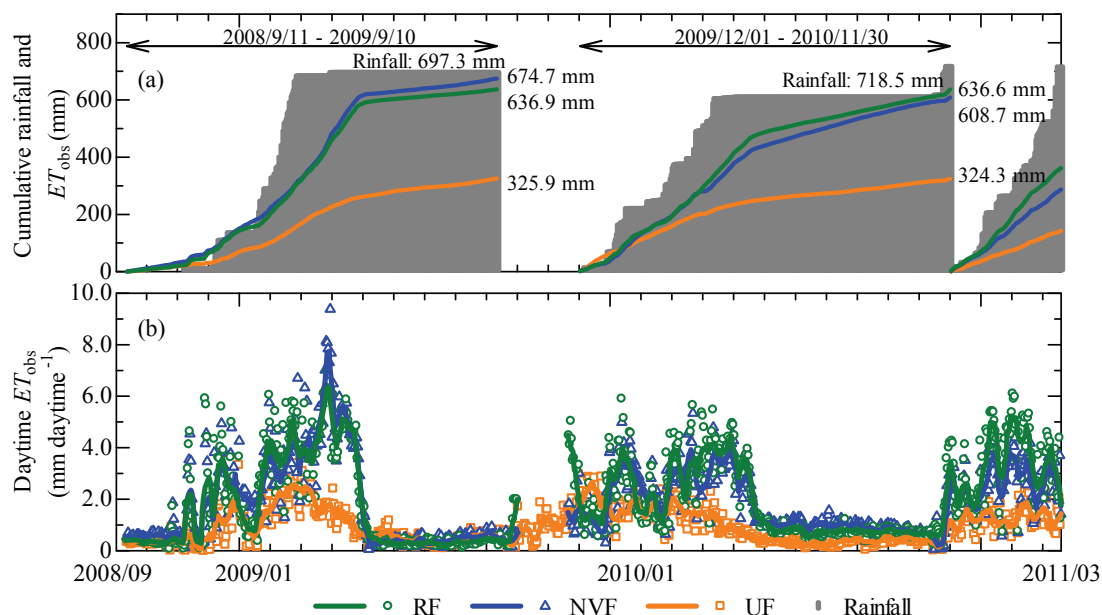


図 3-4 蒸発散量の季節変動

それぞれの圃場における、(a) 積算蒸発散量 (ET_{obs})、積算降雨量、そして (b) 日中蒸発散量 (ET_{obs}) の季節変動を示す。図中の矢印は積算蒸発散量ならびに積算降雨量を算出した期間を示す。積算した値はそれぞれの実線の隣に示した。中抜きのプロットは日データを示し、実線は 10 日間の移動平均値を示す。

季は $0.44 \pm 0.24 \text{ mm daytime}^{-1}$ で、観測期間全体では $0.95 \pm 0.69 \text{ mm daytime}^{-1}$ であった (表 3-3)。半乾燥地域の灌木林や草地での観測では、 $0.5 - 4.0 \text{ mm day}^{-1}$ の蒸発散量が報告されており (Kurc and Small, 2004)、本研究における計測値も類似していた。また、UF における観測期間全体における平均蒸発散量は、アフリカの乾燥国であるニジェールにおける灌木と草本からなるサイトにおける年平均蒸発散量 (0.95 mm day^{-1} , Ramier *et al.*, 2009) に酷似していた。

一方、RF の年蒸発散量は 2008/2009 年が 636.9 mm 、2009/2010 年が 636.6 mm 、NVF のそれはそれぞれ、 674.7 mm 、 608.7 mm であり (図 3-4(a))、UF に比べはるかに高い蒸発散量を示した。年蒸発散量は 2008/2009 年では NVF の方が RF より大きく、2009/2010 年はその関係が反対であった。NVF において 2008/2009 年の方が 2009/2010 年よりも高い年蒸発散量を記録したのは、2009 年 3 月に NVF ではオープンウォーター状態となり蒸発が促進されたためだと考えられる (表 3-1)。

RF における日中蒸発散量は観測期間を通して $0.07 \text{ mm daytime}^{-1}$ から $6.98 \text{ mm daytime}^{-1}$ 、NVF におけるそれは $0.06 \text{ mm daytime}^{-1}$ から $9.38 \text{ mm daytime}^{-1}$ の値を示し、と

表 3-4 異なる地域の湿地帯、水田における蒸発散量の例

Surface type	Site	Climate	Evapotranspiration (mm day ⁻¹)		Source
			Mean	Range	
Sedge fen	Central Canada	Subarctic	3.09*	1.4 - 6.0	Lafleur, 1990
Open sphagnum fen	Minnesota, USA	Continental	3.0*	0.2 - 4.8	Kim and Verma, 1996
Delta marsh	California, USA	Semi-arid Mediterranean	6.0*	0.8 - 12.2	Drexler <i>et al.</i> , 2008
Floodplain wetland	Central Spain	Semi-arid	8.0	0 - 19.6	Sánchez-Carrillo <i>et al.</i> , 2004
Papyrus wetland	Kenya	Equatorial	2.4*	N.A.	Jones and Humphries, 2002
Reed wetland	Nebraska, USA	Semi-arid	3.75*	0.5 - 6.5	Burba <i>et al.</i> , 1999
Paddy field	the Philippines	Warm humid tropics	4.29*	N.A.	Alberto <i>et al.</i> , 2011
Paddy field	Bangladesh	Tropical monsoon	3.33*	0.2 - 6.6	Hossen <i>et al.</i> , 2012
Paddy field	Thailand	Maritime monsoon	7.11*	N.A.	Jensen and Rahman, 1987

*生育時期の平均値

N.A. : 入手不可

もに大きな季節変動を示した (図 3-4(b))。他の地域の異なる環境下における蒸発散量の例を表 3-4 に示す。カナダ中央部のスゲが優占する湿地において 1.4–6.0 mm day⁻¹ の蒸発散量が (Lafleur, 1990)、ミネソタ州のミズゴケの生育する沼地においては 0.2–4.8 mm day⁻¹ (Kim and Verma, 1996)、チェコスロバキアのアシ湿地においては 1.4–6.9 mm day⁻¹ の蒸発散量 (Smid, 1975) などが報告されており、RF や NVF はそれらのサイトよりも若干大きな季節変動を示した。これは、乾季には地表水が全くなくなり、蒸発散が極めて小さくなる一方で、雨季には地表水の存在と高い R_n により盛んに蒸発散が生ずるという大きな季節変化を含む湿地帯であるためだと考えられる。また、半乾燥地域では、アメリカカリフォルニア州の湿地帯での 12.2 mm day⁻¹ の蒸発散量 (Drexler *et al.*, 2008)、アメリカユタ州の湿地帯での 14 mm day⁻¹ を超える蒸発散量 (Allen *et al.*, 1992)、あるいはスペインの半乾燥地域に存在する湿地帯での最大 19.6 mm day⁻¹ の蒸発散量 (Sánchez-Carrillo *et al.*, 2004) のように、高い蒸発散量が報告されている。そのような高い蒸発散量の理由として、著者らは半乾燥地域における乾燥した大気の移流効果や風速等を挙げている。本観測サイトにおいても、雨季の VPD は高く大気が乾燥していたため、移流により蒸発散が促進された可能性もある。

雨季の平均日中蒸発散量は、RF において 2.76±1.64 mm daytime⁻¹、NVF において 2.53±1.54 mm daytime⁻¹ であり、乾季を含めた観測期間を通しての平均値は RF で 1.94±1.69 mm daytime⁻¹、NVF で 1.85±1.51 mm daytime⁻¹ であった (表 3-3)。NVF における雨季の平均蒸発散量は、中国東北部の湿地帯における生育期の観測値 (2.31 mm day⁻¹; Sun and Song, 2008) やケニアのパピルスが生育する湿地帯の観測値 (2.4 kg H₂O m⁻² day⁻¹ = 2.4 mm day⁻¹, Jones and Humphries, 2002) に近く、ネブラスカ州の半乾燥地域にあ

るアシ湿地帯における蒸発散量 (3.75 mm day^{-1}) よりも低い値を示した (Burba *et al.*, 1999)。アシ湿地帯では比較的高い蒸発散量が報告されており (Acreman *et al.*, 2003)、NVF とアシ湿地帯との差は植生による影響も大きいと考えられる。RF における雨季の平均蒸発散量はバングラデシュやフィリピンの水田における蒸発散量よりもやや少なく (3.33 mm day^{-1} , Hossen *et al.*, 2012; 4.29 mm day^{-1} , Alberto *et al.*, 2011)、タイの水田における値 (7.11 mm day^{-1} ; Jensen and Rahman, 1987) よりもはるかに少なかった。バングラデシュ、フィリピンそしてタイのようなアジア諸国では多収を目指した集約的な稲作が進展してきているが、RF においてはイネを疎らに育て、水管理を行わない自然状態に近い粗放的な稲作を実施した。そのため、そのような栽培方法や生育状況の差が蒸発散量において大きな差が生じた理由の一つとして考えられる。なお、2009/2010 年雨季のイネの収量は 1.27 t ha^{-1} であり、アフリカの平均収量の範囲内 ($0.91 - 2.20 \text{ t ha}^{-1}$) であった (Africa Rice Center, 2007)。そのため、RF での蒸発散量は、アフリカにおける粗放的な稲栽培環境下における蒸発散量の参考データとして考えられよう。

なお、2008 年から 2009 年時 NVF における年蒸発散量は、その期間の降雨量 (697.3 mm) に匹敵するものであった (図 3-4(a))。また、2009 年から 2010 年においても、2010 年 11 月 26 日の豪雨 (71.5 mm) を除けば年降雨量は 647.0 mm であり、その期間の蒸発散量 608.7 mm はその値に近いといえる。これらの結果はナミビア北部の季節性湿地帯環境の水収支において、蒸発散が主要な要素であることを示唆した。

3-3-3 RF と NVF における蒸発散量の比較

季節性湿地帯への稲作導入という土地利用変化の影響を見るために、NVF と RF における蒸発散量の季節変化をより詳しく比較する。図 3-4(b)の雨季の蒸発散量 (ET_{obs}) をみると、両圃場において 2008/2009 年時はほぼ同様の傾向を示し 2009/2010 年時は 3 月から 4 月にかけて RF において NVF より若干高い蒸発散量を記録した。そして 2010/2011 年には 1~2 月のイネの生育初期の期間に RF の方が NVF よりも顕著に高い値を示した。図 3-5(a)はバルク法によって算出された蒸発効率 (β)、図 3-5(b)は潜熱輸送に関するバルク輸送係数 (C_E)、図 3-5(c)は地表面温度 (T_s) から算出された飽和比湿 ($q_{\text{sat}}(T_s)$) を示している。RF における蒸発散量が NVF のそれを顕著に上回った 2011 年 1 月から 2 月において、RF の β が NVF のそれよりも大きく、一方で C_E は NVF の方

が RF を上回っていたことがわかる。 $q_{\text{sat}}(T_s)$ については、RF と NVF とともに地表面が水面に覆われていたため大きな差は見られなかった。つまり、RF と NVF の雨季の蒸発散量の差は β ならびに C_E の差に起因していたといえる。図 3-4(b)において RF の蒸発散量が

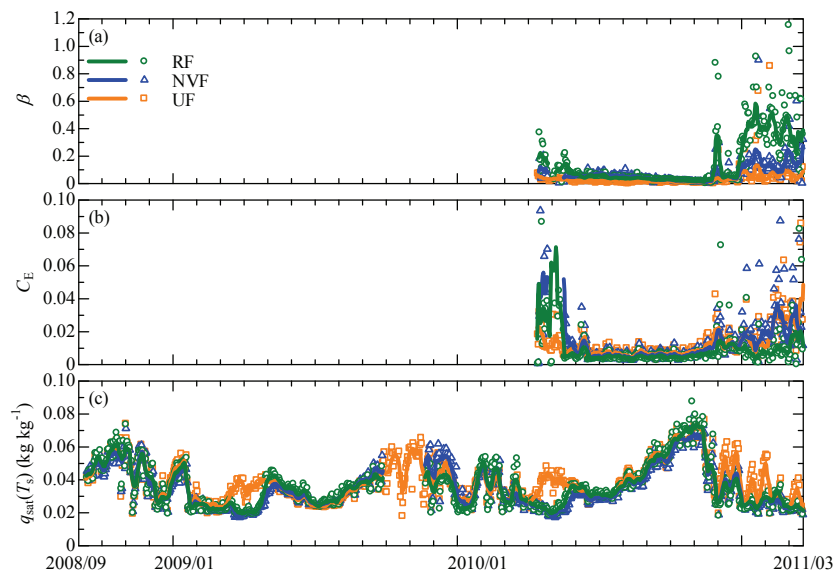


図 3-5 各圃場における地表面状態の季節変動

各圃場の (a) 蒸発効率 (β)、(b) 潜熱輸送に関するバルク輸送係数 (C_E)、そして、(c) 表面温度における飽和比湿 ($q_{\text{sat}}(T_s)$) の季節変動を示す。中抜きのプロットは日中平均値を示し、実線は 10 日間の移動平均値を示す。

NVF のそれよりも大きかった時期において、NVF では RF に比べて地表面状態が蒸発散に対して制限要因となっていたことが示唆された。

乾季の蒸発散量は、特に 2010 年の 6 月から 9 月において NVF が RF よりもやや高い値を示した (図 3-4(b))。その時期の β や C_E には圃場間で違いが見られなかったが (図 3-5(a), (b))、RF においては NVF よりも α が大きく、 Rn が低いという放射環境における違いが見られた (図 3-3(a), (b)、表 3-3)。前述したように RF ではイネを収穫することで植物体が持ち出され裸地が広がるため、 α が上昇し、その結果 Rn が NVF のそれに比べ減少したと考えられる。2009 年の乾季については α の実測値は得られなかったものの、2010 年同様 Rn は RF において NVF よりもやや低い傾向を示し、RF において α がより高い値を示していたと推測される。

3-3-4 β と C_E の決定因子

RF と NVF における蒸発散量に特にイネの分けつ期にあたる生育初期において差が見られ、それが β や C_E の圃場間差に起因していることが示唆された。そこで、それぞれの要素の決定因子について解析を進める。 β は土壤間隙内における水分拡散と土壤表層

と大気間の水分拡散の和と考えることができる。そこで、しばしば β は土壌水分の関数として示されてきている (Barton, 1979; Dekić *et al.*, 1995; Alvenäs and Jansson, 1997)。一方で、風速や大気の湿潤度など大気側の要因も影響を与えているという指摘もある (Kondo *et al.*, 1990)。

さらに、植生が存在する地表面において植物体の葉面抵抗や気孔抵抗も β に含

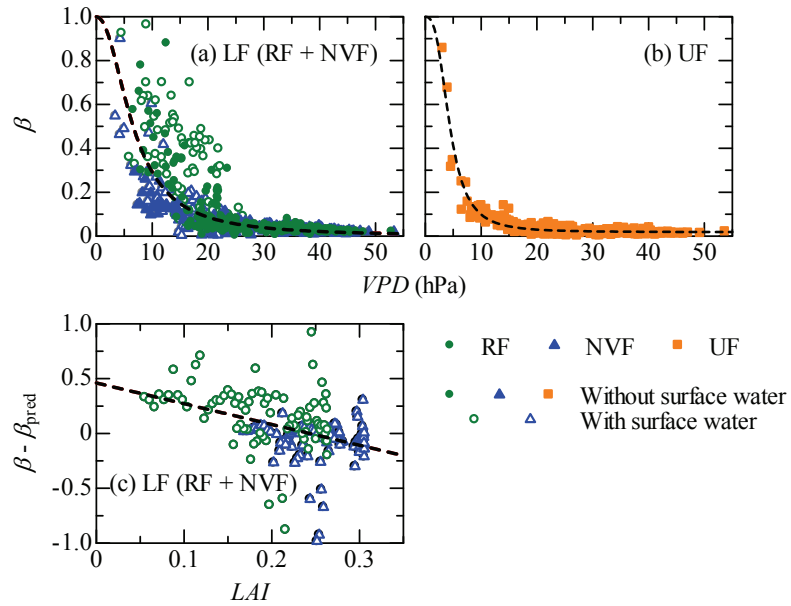


図 3-6 蒸発効率 (β) の決定因子

β と飽差 (VPD) との関係を示す。(a) RF と NVF についてと (b) UF について示す。RF と NVF におけるデータをローランド圃場 (LF) データセットとして同じ図に示した。(c) 地表水が存在している期間について β と推定蒸発効率 (β_{pred}) との差 ($\beta - \beta_{pred}$) と LAI との関係を示す。ただし、 β_{pred} は地表水が存在していない期間について式 (3-12) を用いて β と VPD との関係から推定した。中抜きのプロットは地表水が存在している期間のデータを、中塗りのプロットは地表水が存在していない期間のデータを示す。

まれる概念と考えられる。つまり、 β は土壌の湿潤度、大気側の影響、植物生理学的特徴や LAI などによって説明されると考えられる。一方、群落コンダクタンス (Gc) は多くの研究で算出されており、多くの環境因子に影響を受け β と Gc は類似した概念であると考えられる (e.g. Stewart, 1988; Matsumoto *et al.*, 2008)。

図 3-6(a), (b) は β と VPD との関係を示している。 β は VPD とすべての圃場において類似した関係を示した。そしてその関係性は、特に地表面に水面が存在していない時期においてよく類似していた。地表面に水面が存在していない時期の β と VPD との関係は、 Gc と VPD との関係に利用される次式 (Matsumoto *et al.*, 2008) によって、よく近似することができた。

$$\beta_{dry} = \left[\frac{1}{1 + (VPD/VPD_{05})^{k_{\beta-1}}} \right] (1 - k_{\beta-2}) + k_{\beta-2} \quad (3-12)$$

ここで、 β_{dry} は地表面に水面が存在していない期間の推定蒸発効率を表し、 VPD_{05} は β_{dry} が1と $k_{\beta-2}$ の中間値をとるときの VPD を示している。また、 $k_{\beta-1}$ 、 $k_{\beta-2}$ はそれぞれフィッティングパラメータを示す。なお、フィッティングにはRFとNVFそれぞれのデータを用いず、両圃場のデータを統合したデータセットを利用した。このRFとNVFとの統合データを以降ローランド圃場(LF)データと呼ぶ。UFでは、 VPD は土壌体積含水率と負の相関を示し(data not shown)、 VPD により大気側の要因だけでなく、土壌水分の影響もある程度包含することができたため、 β と VPD は強い関係性を示したと考えられる。LFではTDR土壌水分計が土壌中の塩の影響を受け異常値を示したため、LFにおける VPD と土壌体積含水率との関係性を見ることはできなかった。

地表面に水面が存在している時期においては β と VPD との関係性にばらつきが見られた(図3-6(a))。そして、そのばらつきは LAI によって説明することができた。図3-6(c)は、 β_{dry} と水面が存在する時期の β との差を LAI に対してプロットしたものである。 β_{dry} と β との差は LAI に対して負の直線で近似された。

$$\beta - \beta_{\text{dry}} = k_{\beta-3}LAI + k_{\beta-4} \quad (3-13)$$

ここで、 $k_{\beta-3}$ 、 $k_{\beta-4}$ はフィッティングパラメータである。これらの関係式を利用し、蒸発効率(β_{pred})を次のように推定しサブモデルとして構築した。

$$\beta_{\text{pred}} = \beta_{\text{dry}} \quad (\text{地表水が存在していない時})$$

$$\beta_{\text{pred}} = \beta_{\text{dry}} + k_{\beta-3}LAI + k_{\beta-4} \quad (\text{地表水が存在する時})$$

$$(3-14)$$

このサブモデルは水面が存在している時期においては、 LAI が小さいほど、 β が大きくなることを示している。渡辺(1994)は、水田における多層モデルの結果で β が LAI の減少によって増加することを示している。これは、 LAI が減少することで、水面に対する植物の被覆率が減少しより蒸発が盛んにおこなわれるためだと説明されている。以上のことから、本観測サイトにおいては、 β は主に VPD に決定されるものの、水面が存在している時期においては LAI の影響も受けることが示唆された。

次に、図3-7は C_E と U ならびに LAI との関係性を示している。図3-7(a), (b)において C_E は風速が 2 m s^{-1} 以上ではばらつきが比較的小さく、RFでは平均0.0059、NVFで

は 0.0082、UF では 0.0072 を示した。それらの値は、基準高度 2.5 m の水面や土壌面における C_H (本論文では C_E) の値 (水面、0.0013-0.0017 ; 土壌面、0.0015-0.0030) よりも大きく (近藤, 1994)、基準高度 10 m の水田における値 (0.002-0.0055; Kimura and Kondo, 1998) に近かった。 C_E は基準高度に依存し、高度が高くなると減少する。本解析サイトにおける値から異なる基準高度での C_E を概算すると、RF のそれは、基準高度 2.5 m の場合は 0.0063、基準高度 10 m の場合は 0.0037、NVF は基準高度 2.5 m の場合で 0.0090、基準高度 10 m の場合 0.0045、そして UF では基準高度 2.5 m の場合 0.0078、基準高度 10 m の場合は 0.0042 であった。この概算結果からも水田における値に近かったことが分かった。一方、風速が 2 m s^{-1} より小さい時はばらつきが大きかった (図 3-7(a), (b))。それは弱風下では地表面状態の影響をより大きく受けるためだと考えられる。そこで、 C_E と LAI との関係を図 3-7(c), (d) に示した。その結果、 C_E は LAI とともに増加する傾向が見られた。 LAI が増加することで C_E も増加する傾向は、他の研究においても言われており (Shimoyama *et al.*, 2004)、 LAI が増加し続けた場合は、 C_E は上に凸の曲線を描き極大値をとること

が多層モデルによって推定されている (渡辺, 1994)。 C_E は地表面の物理的特徴に影響を受け、 LAI の増加により地表面の粗度が増加するために増加すると考えられる (Shimoyama *et al.*, 2004)。なお、 C_E が極大値を取りその後減少する現象は、 LAI の増加に伴ってキャノピーが閉じ粗度が減少するためと説明

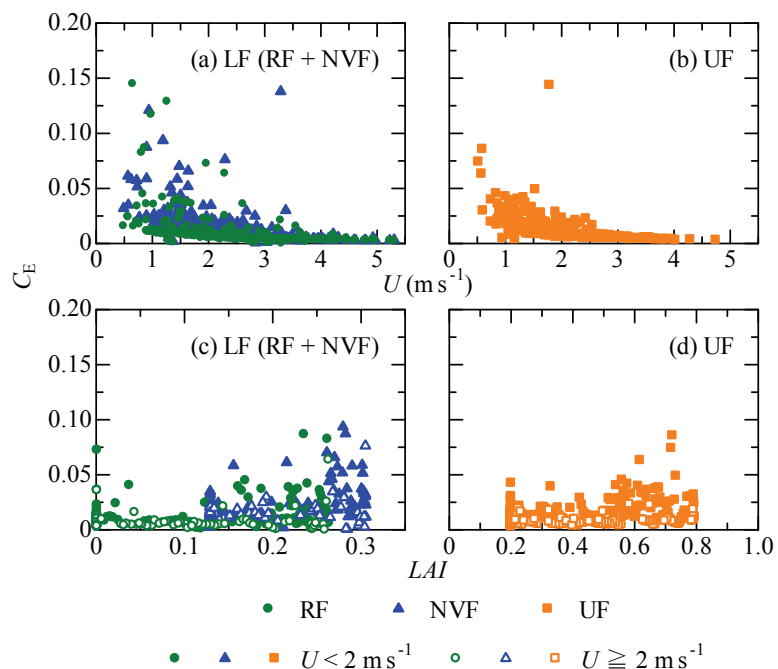


図 3-7 バルク輸送係数 (C_E) の決定因子

潜熱に関するバルク輸送係数 (C_E) と風速 (U) ならびに LAI との関係を (a, c) LF (RF+NVF)、(b, d) UF について示す。(c, d) 中抜きのプロットは $U \geq 2 \text{ m s}^{-1}$ のデータを、中塗りプロットは $U < 2 \text{ m s}^{-1}$ のデータを示す。

されている（渡辺, 1994）。Yan *et al.*（2012）は、 C_E を Plant area index（ PAI ）のみで近似しているが、本研究では風速が 2 m s^{-1} 前後での C_E のばらつきの違いを加味するため、風速 2 m s^{-1} 前後で 2 つにデータセットに分け、それぞれのデータセットに対して U と LAI によって重回帰分析によって C_E を推定した（ $C_{E\text{pred}}$ ）。

$$C_{E\text{pred}} = k_{C_E-1}U + k_{C_E-2}LAI + k_{C_E-3} \quad (3-15)$$

ここで、 k_{C_E-1} 、 k_{C_E-2} 、 k_{C_E-3} はフィッティングパラメータである。すべてのフィッティングパラメータの値と相関係数を表 3-5 に示した。これらの関係式を用いて次節にて蒸発散量の推定ならびに蒸発散量の LAI に対する感度テストを実施した。

表 3-5 サブモデルのフィッティングパラメータならびに相関係数

蒸発効率（ β ）ならびに潜熱に関するバルク輸送係数（ C_E ）の推定サブモデルにおけるフィッティングパラメータと相関係数をデータセットごとに示す。

Dataset	$U \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	Fitting parameter								Correlation coefficient (r)	
		VPD_{05}	$k_{\beta-1}$	$k_{\beta-2}$	$k_{\beta-3}$	$k_{\beta-4}$	k_{C_E-1}	k_{C_E-2}	k_{C_E-3}	β	C_E
LF (RF + NVF)	< 2						-0.014	0.053	0.032	0.810	0.643
	≥ 2	6.597	2.125	0.000	-1.893	0.461	-0.002	0.024	0.012		
UF	< 2						-0.019	0.008	0.042	0.954	0.735
	≥ 2	4.356	3.012	0.018	-	-	-0.003	0.005	0.013		

3-3-5 蒸発散量の LAI に対する感度テスト

観測サイトにおいて蒸発散量に対する β や C_E の影響が大きく、さらに β や C_E は LAI の影響を受けることが実測値から示唆された。稲作導入は LAI を大きく変化させる。その影響力を定量的に調べるために、バルク法を用いて蒸発散量推定モデルを構築した。バルク式に含まれる β ならびに C_E を、前述の β ならびに C_E 推定サブモデルにより推定し蒸発散量を求め、 LAI に対する蒸発散量の感度テストを実施した。本モデルによる推定値（ ET_{pred} ）と実測値との相関係数は RF、NVF、UF それぞれ、0.612、0.459、0.120 であった。本モデルの推定値のばらつきの原因として、風速や LAI の実測値が取れていない期間に対して推定値を利用していることがあげられる。しかしながら、本モデルによって蒸発散量の季節変動についてはある程度再現することができたといえる（図 3-8）。本モデルでは蒸発散量そのものを量的に解析することを目的としておらず、蒸発散に対して影響を与える因子（たとえば、飽差、風速、 LAI など）について、その影響強度を定量的に分析することを目的としている。そのため、本モデルは若干のばらつきが

あるものの季節変動を十分に表しており、感度テストに適用可能と判断した。感度テストでは雨季として1月、4月、乾季として10月の各要素の平均値を利用して解析を実施した（表3-6）。なお、乾季の他の月による解析結果は10月のそれと類似していたため、ここでは10月の結果のみを示す。

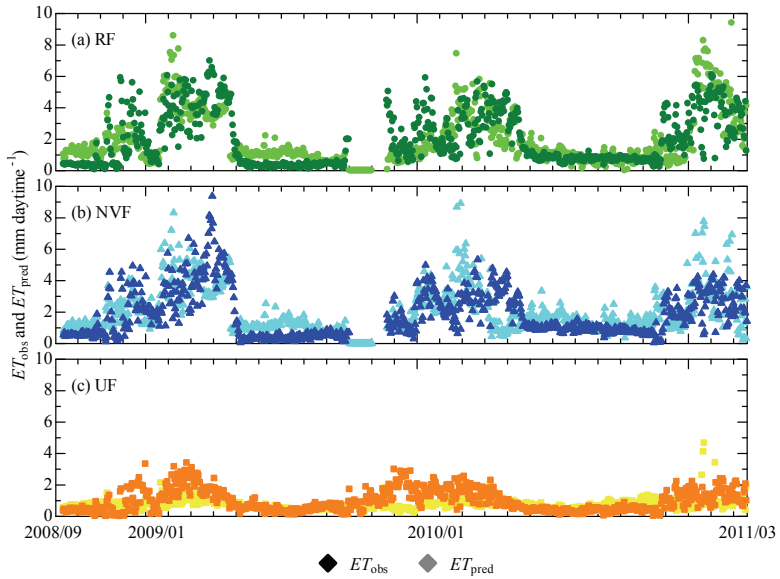


図3-8 実蒸発散量と推定蒸発散量の季節変動
各圃場における実蒸発散量（ ET_{obs} 、濃色で表示）とモデルにより推定された推定蒸発散量（ ET_{pred} 、淡色で表示）の季節変動を示す。

図3-9はLFとUFにおける蒸発散量の LAI に対する応答を表している。UFでは、季節を問わず LAI の増加に伴って蒸発散量も増加する傾向が推定された。そして、その影響度については、顕著な季節差は見られなかった。一方、LFにおいては、時期によって蒸発散量に対する LAI の影響は大きく異なった。乾季の10月では、UFと同様に LAI とともに蒸発散量も増加する傾向が推定された。反対に4月の条件下では LAI が増加することで急激に蒸発散量が減少することが推定された。これは、4月には LAI の増加にともない水面が植物により被覆され水面からの蒸発が抑制されるためだと考えられる。1月の条件下では、 LAI が減少すると、一時蒸発散量は増加し、その後減少し始める傾向が示された。 LAI の減少により β が増加するものの、 LAI が極端に小さくなることで C_E が小さくなるために、結果として極大値を示したと考えられる。 LAI の蒸発散量に対する影響度は1月のよう

表3-6 感度テストに用いた各要素の平均値								な LAI が小さい条件下 ($LAI = 0.14$) よりも、 LAI が大きい4月の条件下 ($LAI = 0.25$) での方が大きいことが
Dataset	Month	U ($m s^{-1}$)	T_s ($^{\circ}C$)	T_a ($^{\circ}C$)	q ($kg kg^{-1}$)	z_w (m)	LAI	
LF (RF + NVF)	Jan.	1.9	29.2	25.3	0.011	0.07	0.14	
	Apr.	1.8	26.8	26.5	0.010	0.23	0.25	
	Oct.	2.8	46.5	31.2	0.003	0.00	0.07	
UF	Jan.	1.7	34.1	25.7	0.011	0.00	0.39	
	Apr.	1.5	36.8	26.8	0.010	0.00	0.79	
	Oct.	2.2	46.5	31.2	0.003	0.00	0.20	

分かった（図 3-9、表 3-6）。RF ではイネの栽培過程において、移植時の $LAI \approx 0$ から生育時期の $LAI \approx 0.3$ まで変化し、NVF における変化よりも大きかった。本解析はどのような LAI の変化によって蒸発散量が急激に増減する可能性を示しており、イネをどのように栽培し LAI をコントロールするかによって季節性湿地帯の蒸発散量に対する影響も左右されることを示唆している。

本解析対象期間においては、RF ならびに NVF における LAI が 0.35 程度までにしか増加しなかったため、感度テストの範囲も LAI が小さな領域に限られた。しかし、イネの栽培方法を変化

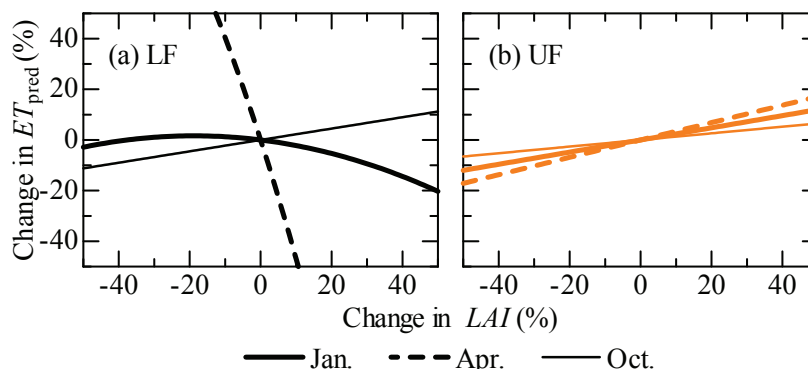


図 3-9 蒸発散量の LAI に対する感度テスト

(a) LF と (b) UF における LAI の変化 (%) に対する推定蒸発散量の変化率 (%) を示す。感度テストに用いられた各データセットの平均値は表 3-6 に示す。

させ、よりイネを高密度に栽培した際には LAI が 6 に達することもある（Jensen and Rahman, 1987; Alberto *et al.*, 2011; Hossen *et al.*, 2012）。そのような場合、 β は LAI の増加により極大値を示すことが推測される（渡辺, 1994）。また、 C_E は LAI の増加に伴い、極大値を取りその後減少するといわれている（Kondo and Watanabe, 1992）。ナミビア北部地域においても、イネの栽培方法によっては高い LAI を示す可能性があり、その場合の蒸発散量に対する LAI の影響についても今後調査を進めていく必要がある。

さらに、2009 年 2 月 15 日にポロメーター (Porometer-AP4, DELTA-T DEVICES, UK) によって計測された気孔コンダクタンスはイネが $0.0185 \pm 0.0043 \text{ m s}^{-1}$ （平均値 \pm 標準偏差）、自然植生が $0.0025 \pm 0.0007 \text{ m s}^{-1}$ であり、イネの方が有意 ($p < 0.001$) に大きかった。これらの値は一日の計測によるもので参考データとして扱うべきだが、イネをより高密度に栽培した場合、 LAI だけでなく、植物生理学的要因が蒸発散量に対して与える影響についても今後検討していく必要がある。

3-4 まとめ

本研究では、ナミビア北部地域に広がる季節性湿地帯への稲作導入による蒸発散特性に対する影響評価を目的とし、現地において蒸発散量を2年半にわたり計測した。その結果、次のような点が明らかとなった。

- RF や NVF では、雨季に水面が出現するに伴って蒸発散が盛んに起こり、年降雨量に匹敵する量の水が蒸発散により失われ、当地の水収支において蒸発散が重要な要素であることが確認された。
- RF と NVF の蒸発散量の差は、蒸発効率 (β) ならびに潜熱輸送に関するバルク輸送係数 (C_E) の差に主に起因していた。それらのパラメータは、飽差 (VPD)、風速 (U)、 LAI によって説明することができた。雨季の地表面に水面が存在している時期においては、 LAI が減少することで、 β が増加し、蒸発散量が増加することが分かった。
- 季節性湿地帯にイネを植えることにより、次のように雨季と乾季両方の時期において蒸発散量に影響を与えることがわかった。すなわち、
 - ・ 雨季には、イネの生育初期の低い LAI によって β が大きくなり蒸発散を促進し、その後のイネの成長により LAI が増加することで蒸発散量は自然植生のそれに近づくことが分かった。
 - ・ 乾季の RF では、イネの収穫作業により植物体が圃場から持ち出され地表面が露出することで、アルベド (α) が増加し純放射量 (R_n) が減少した。
そして、結果的に蒸発散量が NVF に比べ減少することが分かった。
- 蒸発散量の LAI に対する感度テストにより、湿地帯環境下では雨季においては LAI が増加することで蒸発散量が減少する可能性が示された。

このような季節性湿地帯環境下においては、イネの生育に応じて LAI を適切にコントロールすることで、水資源を節約するような稲作導入が可能となるかもしれない。つまり、イネ生育初期からより高い LAI を確立し β を低下させ、水面からの蒸発量を抑え蒸発散量を減少させるとともに、収穫作業によって植物体を圃場から持ち出し、アルベドを増加させ乾季の蒸発散量を減少させることで、総水消費量を減少させることが可能かもしれない。第2章ではイネの生育初期における群落被覆率の拡大が水面からの蒸発量を効果的に抑制するという結果が得られており、その点において作物学的視点からの結果と

本章の水文学的視点からの結果が一致を見たといえる。

ただし、今回構築したモデルは 2008 年から 2011 年という多雨年の観測データに基づいたものであり、寡雨年時の蒸発散量の推定においては信憑性がそれほど高くはないと考えられる。寡雨年においては乾燥ストレスが気孔コンダクタンスのようなイネの植物生理学的特性や生育に対して影響を与える。今後、Jarvis-type モデル (e.g. Jarvis, 1976; Matsumoto *et al.*, 2008) や Ball-Berry モデル (e.g. Ball *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 2009) といった植物生理学的指標と水ストレスなどの環境因子との関係性を組み込んだモデルを構築することで、様々な年の状況に合わせた蒸発散量の推定が可能となるかもしれない。

4 稲作導入の水収支に対する影響評価

4-1 本章の背景

第2章ではナミビア北部において、イネがどのような水消費特性を有するのかを解明するため個体スケールで水利用効率を算出し、作物学的に検討を加えた。第3章ではスケールを拡大し、群落としてのイネの水消費特性を水文学的に調査した。その結果、両視点からイネの生育初期にはイネによる水面被覆率が水消費に大きな影響をもたらすことが示された。イネの生育初期のような低い葉面積指数 (*LAI*) の時には、水面から蒸発が盛んに起こり比較的高い蒸発散量を示すことが分かった。それに対して、第2章では分けつ数の多い品種の選択や栽植密度の増加によって生育初期の水消費量が抑えられる可能性を示し、第3章ではイネの生育初期には自然植生に比べ大きな蒸発散量を示すものの、成長に伴う *LAI* の増加によって、徐々に自然植生の蒸発散量に近づくことが群落レベルで示された。このように稲作導入によって蒸発散量に対して変化が生じることが明らかとなった。そこで、本章ではそのような稲作導入による蒸発散量の変化がナミビア北部地域の水収支に対してどのような影響をもたらすのかを明らかにしていく。

序章で述べたように、土地利用の改変は水文学的プロセスに対して大きな影響を与えるとされている (e.g. Giambelluca *et al.*, 2000; José *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2008)。例えば、20 世紀の中国では多くの森林が水田などの耕作地へと改変されることで蒸発散量が増加し、結果として地域の河川流出量や人々の利用可能な水資源量に対して影響を与えた (Liu *et al.*, 2008)。水収支に対する土地利用改変の影響を考慮するためには、土地利用改変に伴う水消費量の変化量が、その地域の水資源量に対してどの程度の割合を占めるのかを検討する必要がある。たとえ同じ量の蒸発散量変化量が生じたとしても、その影響は半乾燥地域のような水資源が乏しい環境におけるものと、熱帯地域のような湿潤な環境におけるものとは大きく異なると考えられる。

そこで、本章では半乾燥国であるナミビア北部地域に広がる季節性湿地帯での、稲作導入の水収支に対する影響を検証するため、次の2つを目的とした。

- 1) ナミビア北部地域の水収支の理解
- 2) その水収支に対する稲作導入の影響評価

水収支の各要素について、短期的視点として日変動ならびに季節変動を解析し、長期的視点として日変動の積算値を議論した。

4-2 材料と方法

4-2-1 対象領域

オゴンゴキャンパスを中心とする 20 km 四方の範囲 (469.7 km²) を対象領域とした (図 4-1)。その中で、通年地表面が水に覆われることのないアップランドが 333.8 km² を占め、雨季になると地表水に覆われることのある季節性湿地帯が 135.9 km² を占める。季節性湿地帯は、年や季節によって地表水に覆われる面積が異なり、最大 135.9 km² が水面に覆われることを意味する。なお、季節

性湿地帯の領域は、インターネット上に公開されている Digital Atlas of Namibia における季節性湿地帯を示すベクターデータを用いて分離した。

4-2-2 対象領域の水収支式

ナミビア北部地域の対象領域の水収支は次式により表すことができる。

$$Q_{in} + P = Q_{out} + ET_{Region} + I + \Delta V \quad (4-1)$$

ここで、 Q_{in} 、 Q_{out} は流入量 (mm) ならびに流出量 (mm) であり、 P は降雨量 (mm)、 ET_{Region} は蒸発散量 (mm)、 I は土壌浸透量 (mm)、そして ΔV は単位時間当たりの地表水量変化量 (mm) である。左辺は対象領域へのインプットを、右辺はアウトプットならびに変化量を示している。 ET_{Region} 、 P 、そして ΔV を明らかにすることで、水収支式の残差 (ΔR , mm) を求めることができる。

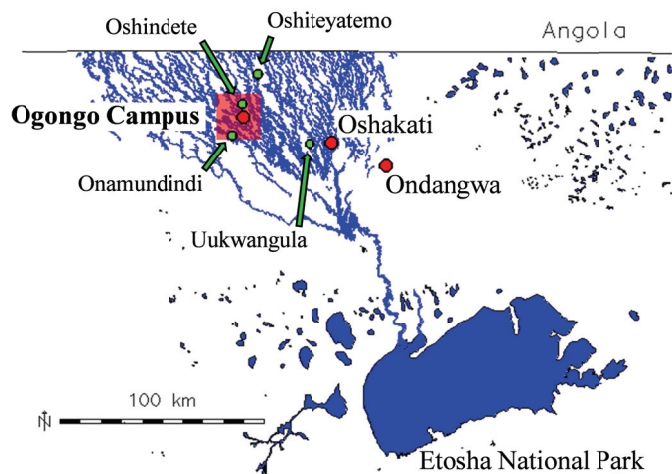


図 4-1 水収支推定対象領域とその周辺地図

水収支推定対象領域を赤色で示す。緑色の点で示した村で 2011 年から降雨量を計測している。なお、青色で示した領域は季節性湿地帯ならびにエトーシャ塩湖を示す。

$$\Delta R = Q_{in} - Q_{out} - I \quad (4-2)$$

ΔR は対象領域における水資源の水要求度を示す。 ΔR が正の値を示す時、対象領域では対象領域外から水を必要としている状況を示し、負の値を示す時には対象領域外に対し水を供給可能な状況であることを意味する。つまり、対象領域内において土地利用が変化し大量の水が消費されるようになった場合、 ΔR は正の方向へ変化することとなる。 ΔR を求めることで、稲作導入による蒸発散量の変化が対象領域の水収支に対してどのような影響を与えるのかについて評価することができる。本解析では、稲作導入によって I は変化しないものとし、蒸発散量の変化による影響のみを評価した。解析対象期間は蒸発散量の推定が可能な 2008 年 9 月から 2011 年 3 月とした。

4-2-2-1 蒸発散量の推定

本解析では、蒸発散量データとして第 3 章にて構築されたモデルによる推定値を利用した。蒸発散量は、対象領域内のアップランドでは、アップランド圃場 (UF) における推定蒸発散量 (ET_{UF}) を、季節性湿地帯では NVF または RF における推定蒸発散量 ($ET_{NVF \text{ or } RF}$) を適用した。ただし、季節性湿地帯領域であっても雨季に水面が存在していない領域については ET_{UF} を適用した。季節性湿地帯における ET_{NVF} と ET_{RF} の適用面積の割合を変化させることで、水収支に対する稲作導入の影響を評価した。 ET_{RF} には第 3 章におけるイネの LAI をそのまま適用しており、第 3 章で述べた Pokkali、Super、IRGA418 の 3 品種の平均値が反映されている。なお、季節性湿地帯における水面の出現と消失のタイミングはオゴンゴキャンパスの NVF ならびに RF におけるそれを基準とした。対象領域内の ET_{Region} は、

$$ET_{Region} = \frac{L \cdot ET_{NVF \text{ or } RF} + UP \cdot ET_{UF}}{L + UP} \times 10^6 \quad (\text{乾季})$$

$$ET_{Region} = \frac{W \cdot ET_{NVF \text{ or } RF} + (L - W) \cdot ET_{UF} + UP \cdot ET_{UF}}{L + UP} \times 10^6 \quad (\text{雨季})$$

(4-3)

ここで、 L は季節性湿地帯の面積 (km^2) を、 W は季節性湿地帯において地表水に覆われている面積 (km^2) を、 UP はアップランドの面積 (km^2) を示す。 W は季節ならびに年によって変動する。なお、添え字はモデルを構築した圃場を示す。

4-2-2-2 降雨量の推定

降雨量データとしてオゴンゴキャンパスで計測された第3章で用いたものと同様のものを利用し、対象領域全体における日降雨量を推定した。

$$P = \frac{(L + UP) \cdot P_{\text{Ogongo}}}{L + UP} \times 10^6 \quad (4-4)$$

ここで、 P_{Ogongo} はオゴンゴキャンパスで観測された日降雨量 (mm) を示す。

図4-2はオゴンゴキャンパスとその周辺に位置する他の村において2011年から2012年にかけて計測した日降雨量を示す。Oshiteyatemo、OshindeteそしてOnamundindiにおける降雨量の季節変動はオゴンゴキャンパスにおけるそれと類似していた。また、オゴンゴキャンパスから南東へ約 50 km 離れた Uukwangula における降雨量はオゴンゴのそれよりも少なかったものの、季節変動については比較的類似していた。このようにナミビア北部地域の降雨量にはある程度の空間変動があると考えられる。しかしながら、本解析の対象領域に含まれるOshindeteやOnamundindiの降雨量とオゴンゴキャンパスのそれとの間にそれほど大きな空間的ばらつきが見られなかったため、オゴンゴキャンパスにおける降雨量データで対象領域全体を空間的に代表できると仮定した。

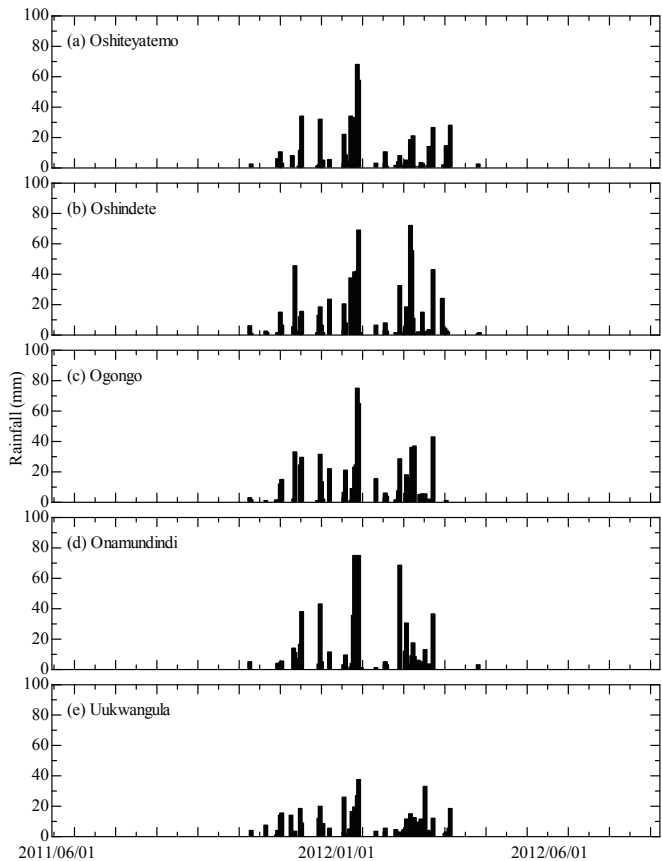


図 4-2 オゴンゴキャンパス周辺の村における日降雨量

それぞれの村の位置は図 4-1 に示す。

4-2-2-3 地表水量の推定

地表水量は衛星画像と水位の実測値を用いて推定した。図 4-3 は季節性湿地帯の模式図を示している。平均勾配が 1:5300 のナミビア北部地域において (Hipondoka, 2005)、

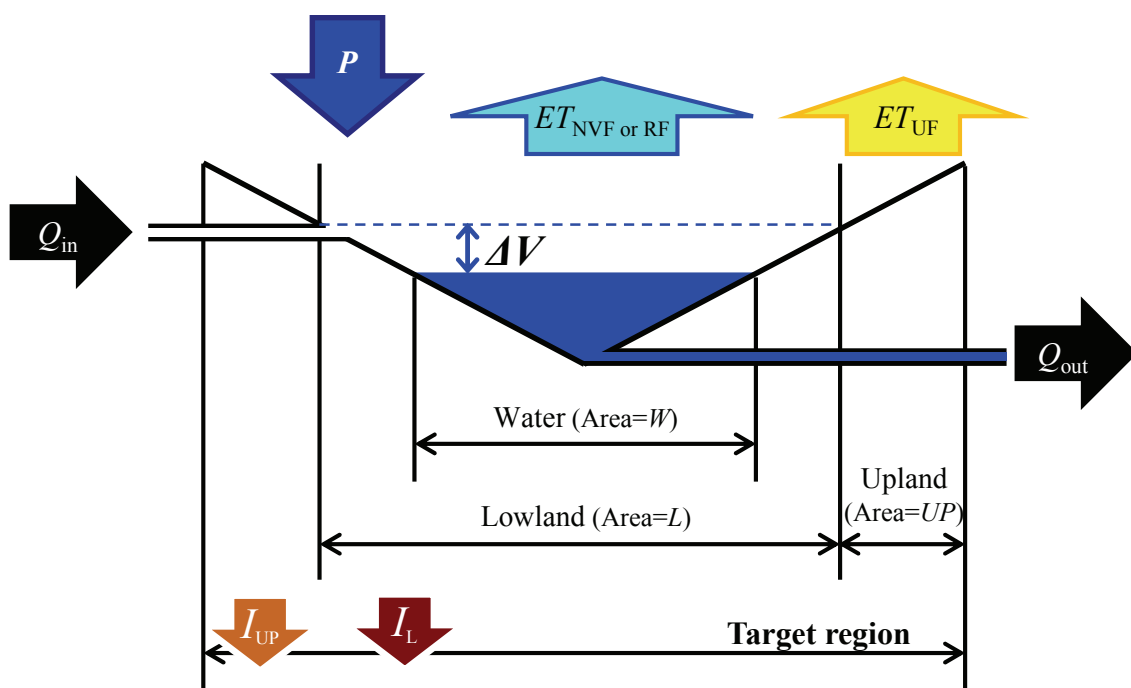


図 4-3 対象領域における水収支の模式図

対象領域を円錐と仮定し、その領域における水収支項目；降雨量 (P)、蒸発散量 (ET)、土壌浸透量 (I)、流入量 (Q_{in})、流出量 (Q_{out})、地表水量変化量 (ΔV) を示す。ここで、ベクターデータを用いて、対象領域を季節性湿地帯（雨季に地表水に覆われる領域）とアップランドに分離し、それぞれの占める面積を L ($= 135.9 \text{ km}^2$) と UP ($= 333.8 \text{ km}^2$) とした。さらに、雨季に L の中でも地表水に覆われる面積を W として表した。

地表水の水位変動は水面面積の変動に直接大きな影響を与えると考えられる。類似した地形を有するオカヴァンゴデルタ（平均勾配 1:3300; Gumbrecht *et al.*, 2001）を対象とした研究では、湿地帯のモデル化に際して浅い鉢や台形型を適用した場合は見られたが（Dinçer *et al.*, 1976; Scudder *et al.*, 1993）、本解析では図 4-3 のように対象領域を三角錐として仮定した。すなわち、地表水量 (V , mm) は水位と水面面積との関係から、

$$V = \frac{A \times z_w}{3(L + UP)} \times 10^6 \quad (4-5)$$

によって求められる。ここで、 A は地表水面積 (km^2)、 z_w は地表水水位 (km) を示す。

地表水面積のデータは衛星画像解析によって推定した。MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) のデータ（表 4-1）を利用し、正規化水指数 ($NDWI$) を次式により算出し（e.g. Gao, 1996; McFeeters, 1996; Ji *et al.*, 2009）、地表水を同定したのち地表水面積の時間変動を求めた。

$$NDWI = \frac{\rho_{\text{Red}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{Red}} + \rho_{\text{MIR}}} \quad (4-6)$$

ただし、 ρ_{Red} は赤バンド (BAND 1; 620 – 670 nm) の反射率、 ρ_{MIR} は中間赤外バンド (BAND 7; 2105 – 2155 nm) の反射率である。

表 4－1 衛星画像の基礎情報

地表水面積の推定に利用した MODIS プロダクトの詳細を示す。

Satellite / Sensor	Product name	Band used	Resolution		Starting date of composition	Period of analysis
			Temporal	Spatial		
Terra / MODIS	MOD13Q1	Red ¹ , MIR ²	16 days	250 m	1-Jan	2003 to 2012
Aqua / MODIS	MYD13Q1		16 days	250 m	9-Jan	2003 to 2012

¹Red; BAND 1 (620-670 nm)

²MIR; BAND 7 (2105-2155 nm)

水位データはオゴンゴキャンパス内の NVF で 2008 年から計測したものを利用した。対象領域内の季節性湿地帯全域における水位データは入手が困難であり不足している。20 km 四方の対象領域内に広がる季節性湿地帯の水位をオゴンゴキャンパス内で計測された一地点における水位データで代表することは大きな誤差を含む可能性を包含して

いるものの、オゴンゴキャンパス内の蒸発散量測定圃場において得られた水位データは比較的平均的なものであると判断し

(図 4－4)、代表値として適用した。

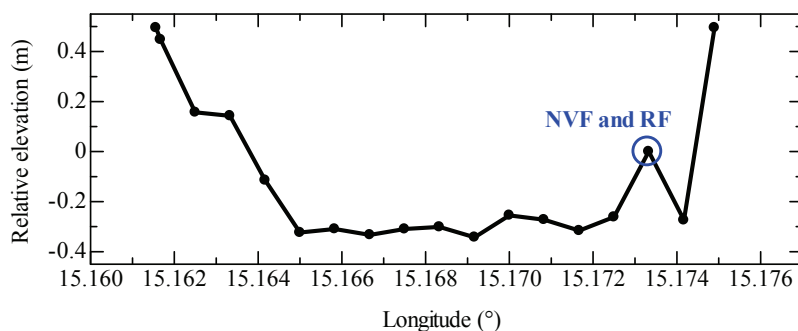


図 4－4 季節性湿地帯の横断面図

第 3 章における自然植生圃場 (NVF) ならびにイネ圃場 (RF) を含む季節性湿地帯の東西方向での横断面図を示す。NVF ならびに RF の標高をゼロとし季節性湿地帯横断面を比高として示した。

4－2－2－4 土壌物理特性の理解

地下浸透量についての基礎的情報を得るため、対象領域内に位置するオゴンゴキャン

パスの NVF と UF において土壌をサンプリングし、土壌の物理特性を調査した。各圃場において地表面から 0.00～-0.05 m と -0.10～-0.15 m の土壌を、円筒形コア (0.0001 m³) を用いて 2 サンプルずつ採取した。得られたコアサンプルを用いて、土壌 pF 測定器を用いた pF 試験を実施し、その後定水位透水試験により飽和透水係数 (K_s , cm s⁻¹) を算出した。pF 試験によって土壌の体積含水率 (θ , %) と土壌の圧力ポテンシャル (Ψ , hPa) との関係を調べ、次式により近似し水分特性曲線を得た (van Genuchten, 1980)。なお、近似には 2 サンプルの平均値を用いた。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (a\Psi)^n\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (4-7)$$

ここで、 θ_s は飽和状態の θ を示し、 θ_r は気乾含水率の θ を示す。 a ならびに n は水分特性曲線の形を決定するフィッティングパラメータである。

図 4-5 に NVF と UF の土壌における近似曲線と実測値を示す。また、表 4-2 に、水分特性曲線の各パラメータと共に、それぞれの K_s を示す。なお、UF においては -0.30 m から -0.90 の深度まで 0.10 m おきに 1 サンプルずつ採取し、 K_s を測定し参考データとした (表 4-2)。

4-2-3 稲作導入の影響評価

水収支に対する稲作導入の影響を評価するため、季節性湿地帯における稲作導入面積の割合を変化させ、水収支に対する影響をシミュレートした。式 (4-3) における乾季の L と雨季の W に占める稲作導入面積の割合を 0%、50%、100% と変化させ、次のよう

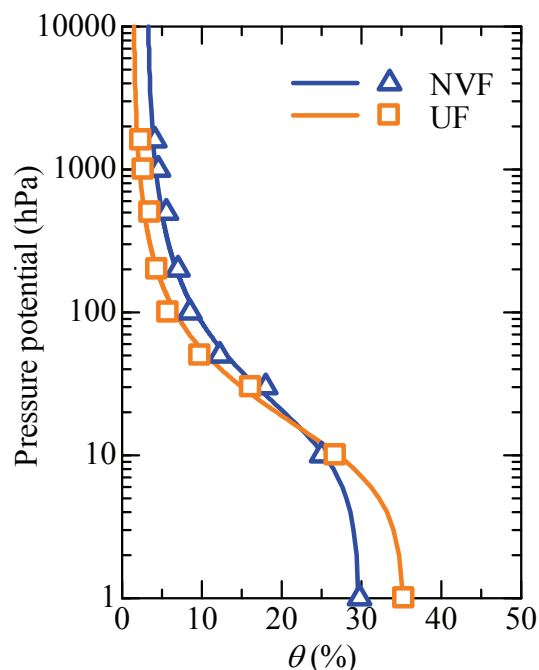


図 4-5 対象領域の土壌の水分特性曲線

第 3 章において蒸発散量を測定した自然植生圃場 (NVF) とアップランド圃場 (UF) における土壌の体積含水率 (θ) と圧力ポテンシャルとの関係を示す。プロットは実測値を、実線は式 (4-7) による近似曲線を示す。式 (4-7) の各フィッティングパラメータは表 4-2 に示す。

表 4-2 対象領域の土壌の透水係数 (K_s) と水分特性パラメータ

		NVF			UF		
		Sample 1	Sample 2	Mean	Sample 1	Sample 2	Mean
K_s ($\times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$)	0 to -5 cm	0.73 \pm 0.02	1.79 \pm 0.14	1.26	7.45 \pm 0.10	4.76 \pm 0.05	6.11
	-10 to -15 cm	N.D.	N.D.	-	6.30 \pm 0.07	4.60 \pm 0.09	5.45
	-30 to -35 cm	-	-	-	3.36 \pm 0.36	4.75 \pm 0.01	4.06
	-40 to -45 cm	-	-	-	6.35 \pm 0.05	-	-
	-50 to -55 cm	-	-	-	6.58 \pm 0.08	-	-
	-60 to -65 cm	-	-	-	5.62 \pm 0.08	-	-
	-70 to -75 cm	-	-	-	4.81 \pm 0.05	-	-
	-80 to -85 cm	-	-	-	3.43 \pm 0.16	-	-
	-90 to -95 cm	-	-	-	2.94 \pm 0.03	-	-
θ - Ψ curve's parameter*	θ_s		29.8			35.4	
	θ_r		3.1			1.4	
	a		0.070			0.091	
	n		1.749			1.839	

* 水分特性パラメータは 0 から -5 cm における土壌サンプルを用いて描いた図 4-5 の近似曲線のフィッティングパラメータである。

N.D. ; 検出不可、- ; 未測定

に ET_{Region} を推定した。

$$ET_{\text{Region}} = \frac{(1 - RI) \cdot L \cdot ET_{\text{NVF}} + RI \cdot L \cdot ET_{\text{RF}} + UP \cdot ET_{\text{UF}}}{L + UP} \times 10^6 \quad (\text{乾季})$$

$$ET_{\text{Region}} = \frac{(1 - RI) \cdot W \cdot ET_{\text{NVF}} + RI \cdot W \cdot ET_{\text{RF}} + (L - W) \cdot ET_{\text{UF}} + UP \cdot ET_{\text{UF}}}{L + UP} \times 10^6 \quad (\text{雨季})$$

(4-8)

ここで、 RI は稲作導入面積割合を示し、0.0、0.5、1.0 の値を取る。なお、 W 全域に対してイネが栽培可能であると仮定した。より精度の高い推定には、季節性湿地帯の地形を考慮し、水位が深すぎる所などイネが生育できない領域を、稲作導入面積から除外することが望まれたが、季節性湿地帯の勾配が十分に小さく、極端に水位の深い領域は少ないものと仮定した。また対象領域における高精度の標高データ (DEM など) を得られず、標高データを用いた領域の解析が困難であったことから、本シミュレーションにおいては W 全域に稲作が導入可能であるとした。

4-3 結果と考察

4-3-1 対象領域の自然植生状態における水収支

水収支式の残差項である ΔR を見ることで、対象領域における水要求度を理解することができる。 ΔR の変動に対して短期的視点として日変動ならびに季節変動を、長期的視点として日変動の積算値を算出し、一年間で累積された影響について検討する。まず、対象領域に自然植生のみが生育した場合の水収支について議論し、次項において稲作を導入した場合の水収支への影響について議論する。

ここではまず、短期的視点における日変動ならびに季節変動を中心に議論する。図 4-6 の青線は自然植生状態における ΔR の日変動を示している。変動幅が大きいため、より詳細な変動が見られるように図 4-6(b)には拡大した図を示した。 ΔR は雨季に大きく負の値を示し、乾季には小さな正の値を推移した。その値は-78.6 から 12.2 mm の範囲であった。 ΔR は式 (4-1、4-2) により表され、地表水量変化量 (ΔV)、日降雨量 (P)

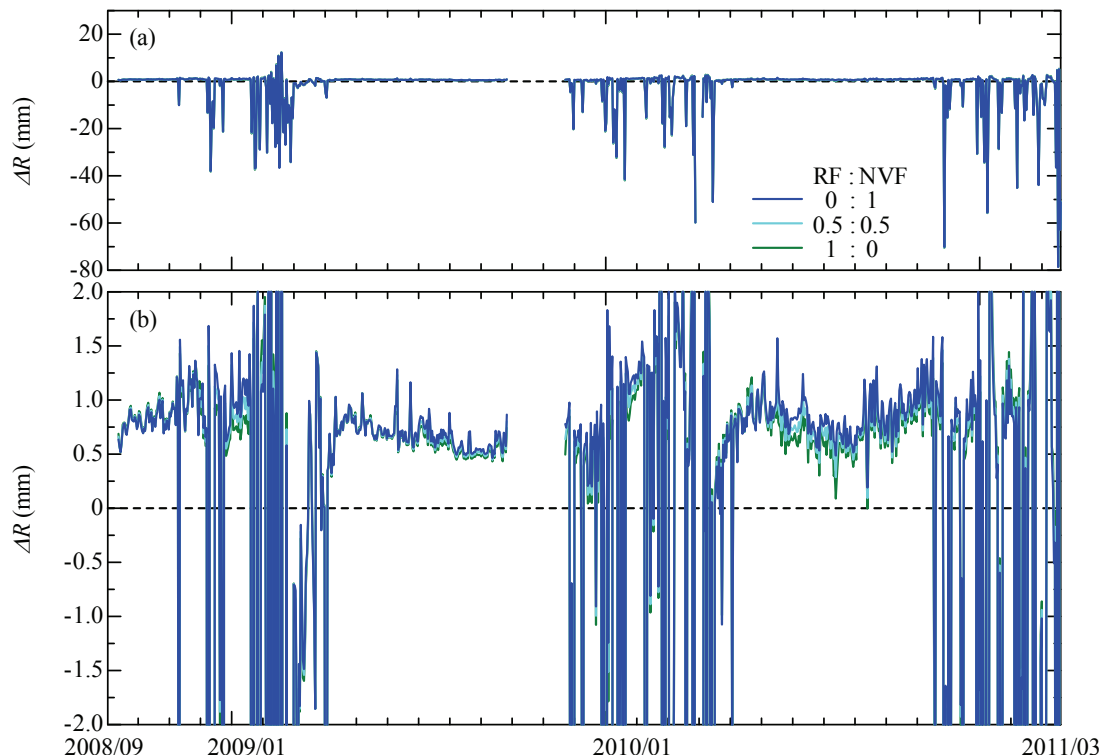


図 4-6 水収支式の残差項 (ΔR) の時間変動

(a) ΔR の変動範囲全体、(b) ΔR の-2.0 から 2.0 の範囲における変動を拡大して示す。青色、水色、緑色の実線は、それぞれ、稲作導入面積が 0%、50%、100% の場合の推定結果を示す。

そして蒸発散量 (ET_{Region}) に影響を受ける。そこで、それぞれの要素の日変動ならびに季節変動をより詳しく見る。

ΔV は -4.8 から 14.4 mm の値の範囲を変動した (図 4-7(a))。乾季においては地表水が存在しないため、その変化量もゼロであった。 ΔV は雨季前半に対象領域内の地表水量が増加したことで正の値を取り、雨季が進むにつれ ΔV は負に転じ地表水量の減少を反映した。また、2008/2009 年の雨季にはその他の年に比べより大きな変動を示した。2008/2009 年の雨季においては ΔV が正の値の期間よりも負の値の期間が長く続いた。このことは地表水量の変動速度が異なっていたことを示す。すなわち、地表水が増加するときよりも減少するときの方が遅かったことを意味している。ただし、2009/2010 年の雨季については、その変動速度に顕著な違いは見られず、 ΔV の季節変動には量と速度において年による大きな違いがあることが分かった。このことは、イネを導入する際

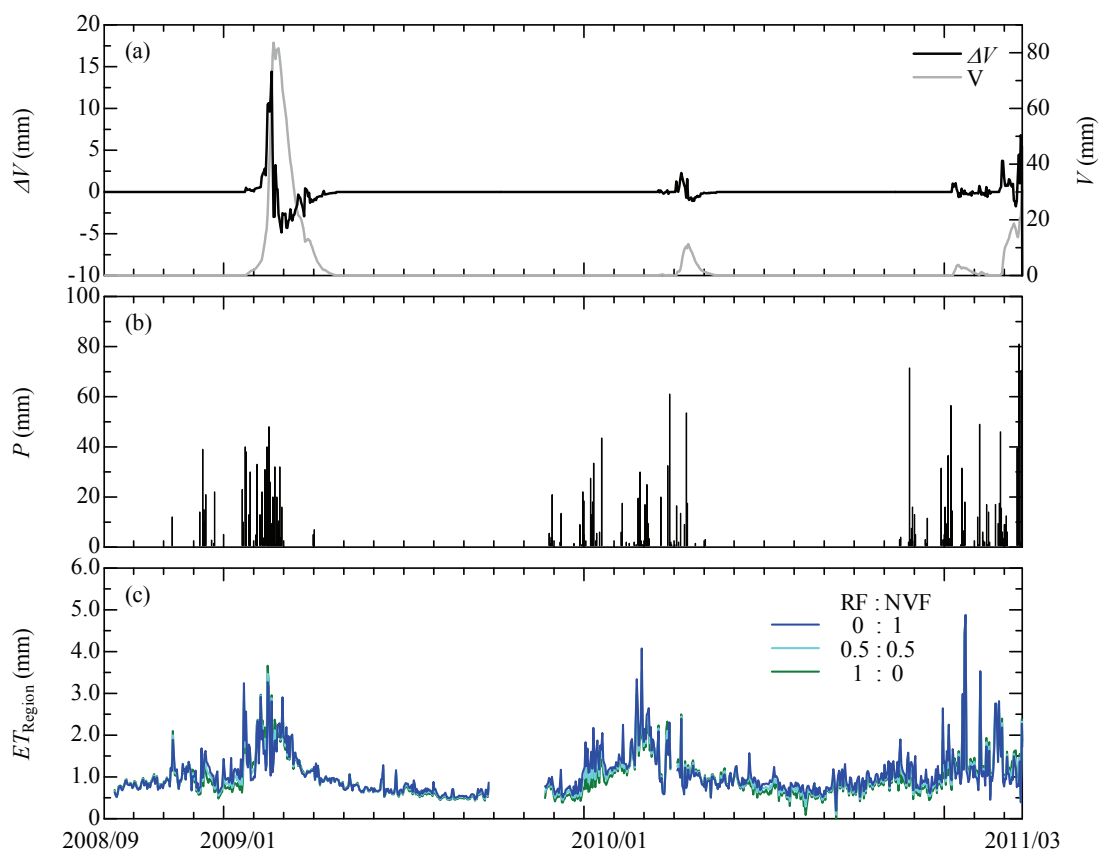


図 4-7 各水収支項目の時間変動

(a) 地表水量変化量 (ΔV) と地表水量 (V)、(b) 日降雨量 (P)、そして (c) 蒸発散量 (ET_{Region}) を示す。青色、水色、緑色の実線は、それぞれ、稲作導入面積が 0%、50%、100% の場合の推定結果を示す。

に、急激な水位上昇に適応可能な品種の選択や栽培方法の工夫が求められることを示唆している。

P は 0 から約 81.0 mm の範囲を変動し、地表水量 (V) の変動 (0 – 83.6 mm) とほぼ同様であった (図 4-7(b))。 ΔV の値に比べ降雨量の変動は大きく、水収支の日変動に対する影響は ΔV よりも P の方が大きいことが示唆された。ただし、乾季には全く降雨が観測されなかったため、 P の影響は主に雨季に限られると考えられる。

ET_{Region} は、約 0.2 から 4.9 mm の範囲で変動した (図 4-7(c))。乾季は 1.0 mm よりも小さな値で変動したが、雨季の 1 月から 2 月にかけてピークを示し、4.0 mm を超える蒸発散量を示した。 ET_{Region} の変動量は P に比べ 16 分の 1 程度であり、 ΔV に対しては 4 分の 1 程度であった。

以上のように、短期的視点では対象領域の水収支の各要素の日変動において、 P がその他の ΔV や ET_{Region} に比べより大きく変動していた (図 4-7)。負の ΔR は主に降雨が観測された際に生じており、対象領域の水収支の日変動においては降雨量の影響が最も大きいことが分かった。また、負の ΔR の値は水要求度が低いことを示すとともに、式 4-2 より対象領域から領域外へと水が移動可能であったことを意味している。地表水が存在していなかった時期の負の ΔR は主に土壌浸透量として地下水を涵養し対象領域外へと移動したか、土壌中の水分量が変化したものと考えられる。

表 4-2 は対象領域内の UF と NVF における土壌の透水係数 (K_s) を示している。対象領域内における土壌浸透量の空間分布に関する調査は進んでおらず、これらのデータからその量を推定することは難しい。ただし、対象領域の隣国に存在するオカヴァンゴデルタでは、土壌浸透量が多く、年間土壌浸透量は地表水面からの蒸発量の 6 から 9 倍にもものぼるとする報告もある (Wolski *et al.*, 2006)。UF や NVF における K_s の値はそれらよりも小さい値ではあったが、他の地域の砂質土壌よりも高いあるいはほぼ同等の値であり、壤質土壌よりも高い値であった (e.g. Kim and Stricker, 1996; Lee *et al.*, 1985)。そのため、対象領域においてもある程度の土壌浸透量が生じていたかもしれない。乾季には ΔR はほぼゼロに近いものの正の値を示した。乾季には地表水の流入がないため、正の ΔR は負の土壌浸透量、つまり土壌水分や地下水からの蒸発散による消費を意味する。そのため、乾季には雨季の変動に比べ小さいものの、地下から大気への水の移動があったことが示唆された。

次に、長期的視点から日変動の積算値について議論を進める。 ΔR の一年間の積算値を見ることで一年間に累積された影響を評価することができる。図 4-8(a)はそれぞれ 2008 年 9 月 11 日からと 2009 年 12 月 1 日からの一年間の累積 ΔR の変動を示している。解析対象期間において ΔR は一年経過時に負の値を示しており、前年に比べ対象領域外により多くの水を供給可能な状態となっていたことが推定された (図 4-8(a))。また、

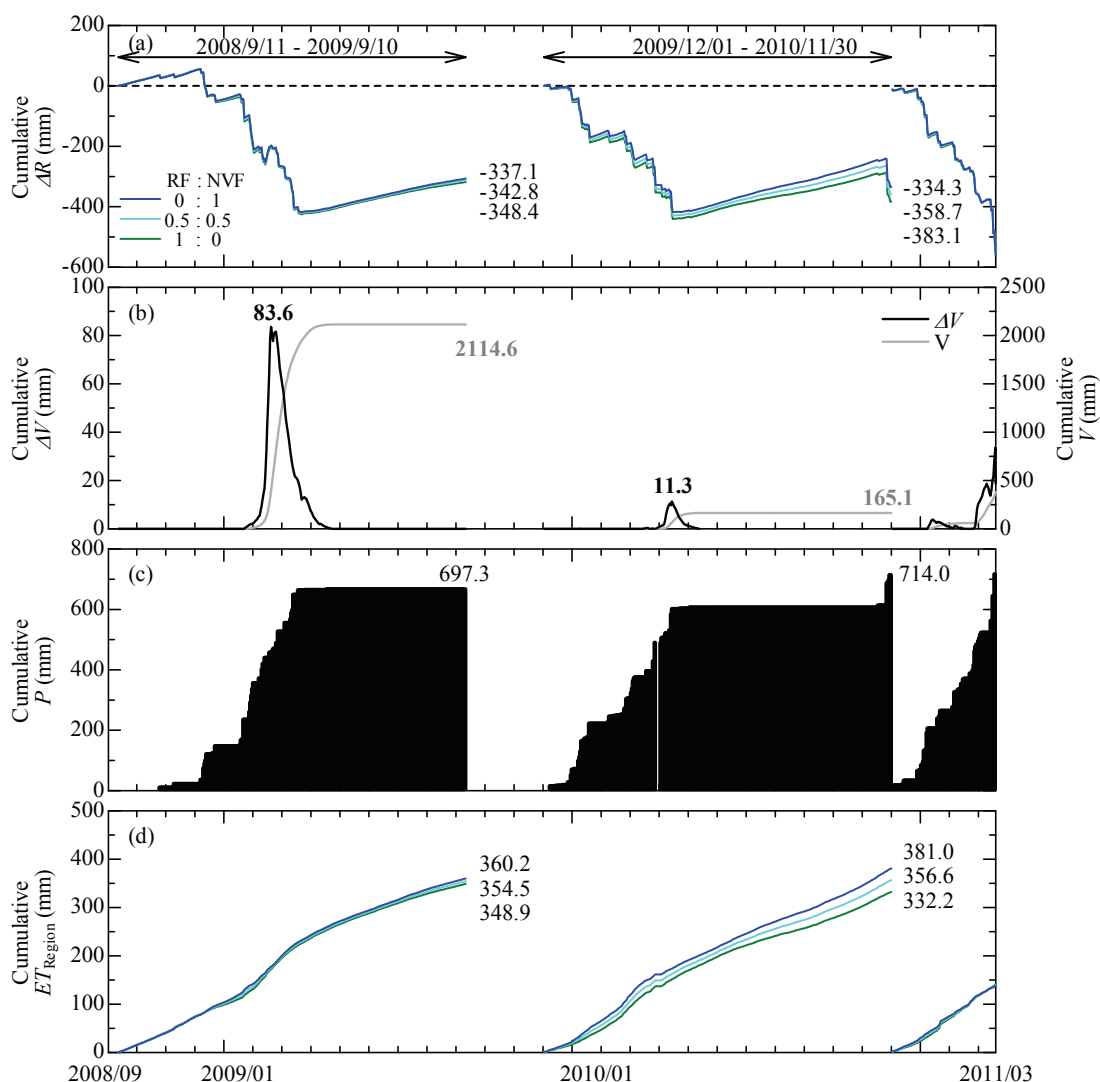


図 4-8 水収支項目の積算値の時間変動

(a) 水収支の残差項 (ΔR)、(b) 地表水量変化量 (ΔV) と地表水量 (V)、(c) 日降雨量 (P)、そして (d) 蒸発散量 (ET_{Region}) の積算値の時間変動を示す。図中の矢印は積算値を算出した期間を示す。積算した値はそれぞれの実線の隣に示した。ただし、 ΔV については各年の最大値を示した。青色、水色、緑色の実線は、それぞれ、稲作導入面積が 0%、50%、100% の場合の推定結果を示す。

P は700 mm前後の年積算値を示し、 ET_{Region} は360 mm程度の値を示した(図4-8(c), (d))。日変動では P は ET_{Region} の16倍の変動量を示したが、年積算値においては1.9倍程度の差であった(図4-8(c), (d))。それは、乾季に降雨がもたらされないため乾季の P の影響がないことに起因しており、年単位という長期的な水収支においては P の影響力は日変動におけるそれよりも比較的小さいことが示唆された。 ΔV の積算値は約83.6 mm(2008/2009年)や11.3 mm(2009/2010年)の年最大値をとり、乾季にはゼロとなった。そのため、 ΔV の水収支に対する影響も P 同様に雨季に限られていた。

つまり、雨季の ΔR は P や ΔV に大きく影響を受け大きく負の方向に変動するものの、乾季が進むにつれ P や ΔV の影響がなくなり、 ET_{Region} が ΔR に対して主な決定因子として働いた。その結果 ΔR の積算値は乾季に徐々に正の方向へ増加した。対象領域内においては ΔR の年積算量は負の値を示した。 ΔR がゼロでないことは次の年に履歴として影響を与えることを意味する。すなわち、本対象領域では ΔR の年積算値が負の値であり、対象領域内に前年よりも多くの水が残存していた可能性を示唆した。

オカヴァンゴデルタにおいても前年の洪水により地下水位が高く保たれた場合、その次の年の流入量や降水量がたとえ多くなくても湿地帯は大きく広がるといわれている(Gumbrecht *et al.*, 2004)。本解析の対象領域においても負の ΔR が高い地下水位や高い土壌水分量の保持を意味した場合、次の年の地域的な降雨や周辺地域からの移流水によって地表水面の形成が促進され、地表水面積も大きく拡大する可能性がある。オカヴァンゴデルタにおいてはより長い何十年という時間スケールで、地下水位の変動がより大きく流出量に影響をあたえるといわれており(Gieske, 1997)、 ΔR の変動はより長期的な水収支を考える上でも重要であると考えられる。

4-3-2 稲作導入の水収支に対する影響

ΔR に対する稲作導入の影響を明らかにするため、季節性湿地帯の面積に対して異なる割合で稲作を導入した場合について、その水収支に対する影響をシミュレートした。

まず、短期的な視点から図4-6に ΔR の日変動ならびに季節変動に対する異なる稲作導入面積の割合の影響を示した。稲作導入面積の拡大は雨季の始めや乾季において ΔR を若干減少させる傾向が見られるものの、その影響は ΔR の全体の変動と比較すると大変小さかった(図4-6(b))。図4-7(c)における ET_{Region} においては稲作導入面積を拡

大することで乾季から雨季の始めにかけて ET_{Region} が減少する傾向が見られた。特に、2010 年の乾季においては、稲作導入面積が大きいほど ET_{Region} は減少した (図 4-7(c))。ただし、2009 年 2 月にみられるように、稲作導入によって ET_{Region} が増加した時期も見られた。これらのような季節による稲作導入面積による蒸発散量に対する影響の差は、第 3 章でも議論したように、稲作導入に伴う乾季と雨季の異なる現象に起因していると考えられる。つまり、乾季においてはイネの収穫によるアルベドの増加が純放射量を減少させ蒸発散量を減少させること、さらに雨季初期においてはイネの低い LAI によって蒸発効率が増加し、結果として蒸発散量が増加することである。そのような傾向が、季節性湿地帯以外のアップランドを含む約 470 km^2 の面積を持った対象領域においても推察する事ができた。

稲作導入面積拡大による ET_{Region} の変化量は最大で 1.09 mm であり、 P の 0 から 81 mm の変動量や ΔV の -4.8 から 14.4 mm の変動量に比べ小さく、対象領域における水収支の日変動においては稲作導入による影響は小さいことが示唆された。オカヴァンゴデルタにおいても洪水の規模を決定する最も重要な要素は流入量と降雨量だとし、蒸発散量はその次だとしている (Gumbricht *et al.*, 2004)。

次に、長期的視点から稲作導入による影響を検討するため、図 4-8(a)に異なる稲作導入面積における ΔR の積算値を示した。 ΔR の積算値においては稲作導入面積を増加させることで、結果的に ΔR がより小さな値を示す傾向が見られた (図 4-8(a))。その傾向は 2010 年により顕著であった。日変動においては稲作導入に伴う蒸発散量の変化による水収支への影響は小さかったが、年積算値ではより顕著な影響が見られた。それはイネを栽培することによる LAI や乾季の蒸発散量の変化が、その他の水収支項目 (P 、 ΔV) の影響が見られない乾季においても累積したためと考えられる。

雨季と乾季を経た一年の ΔR の積算値が稲作を導入することでより小さな値を示したことは、稲作導入の影響が雨季の栽培期間だけでなく、乾季の間の変化も通して、次の年の水収支に対しても影響を与えうる連続性を伴ったものであることが示唆された。そして、シミュレーションにおいては、稲作導入によって水の消費量は減少し、翌年に対してより多くの水資源が供給されうる状態をつくりだすことが推定された。

4-4 まとめ

稲作導入による蒸発散量の変化が、ナミビア北部地域の水収支に対してどの程度の影響力を有するのかを量的に明らかにするため、シミュレーションを試みた。オゴンゴキャンパスを中心とする約 20 km 四方を対象領域と設定し、その領域内における地表水量変化量 (ΔV)、降雨量 (P)、そして蒸発散量 (ET_{Region}) を推定し、その他の水収支項目を残差項 (ΔR) として算出した。 ΔR は対象領域における水要求度を示し、 ΔR が負の時には対象領域から外へ水が移動できる状態にあることを意味する。稲作導入面積を季節性湿地帯全体の 0%、50%、100% と変動させ、稲作導入の水収支に対する影響を評価した。その結果、次のようなことが明らかとなった。

- 各水収支項目の日変動において、 P は ET_{Region} の約 16 倍の変動量を、 ΔV は ET_{Region} の約 4 倍の変動量を示し、 P が短期的な水収支に対してより大きな影響力を持つことが示唆された。
- 短期的視点からは、水収支の日変動に対する稲作導入の影響は大変小さいものであることが分かった。稲作導入によって ET_{Region} は増減するものの、その変化量はその他の水収支項目である P や ΔV よりも大変小さなものであった。
- しかし、長期的視点から ΔR の年積算値を評価したところ、水収支に対して稲作導入は水消費量を減少させる方向に働くことが推定された。稲作を導入することで ΔR の年積算値がより小さな値になることが推定され、稲作導入が水資源を保全する方向で影響を与える可能性があることが分かった。

5 総括

本博士論文では、ナミビア北部に広がる季節性湿地帯に稲作を導入することでどのような影響が起こりうるのか、作物学的視点と水文学的視点両方から検討を進めた。ナミビア北部の季節性湿地帯の水環境はこれまであまり研究が進められてきておらず、地表水量や蒸発散量に関する情報はほとんど見受けられない。また、季節性湿地帯における稲作はまだ試験段階であり、今後新規作物として食糧安全保障に寄与する作物として期待されている。そのため、稲作導入が季節性湿地帯の水環境に対してどのような影響をもたらすのかは未知である。そこで、本博士論文では、ナミビア北部地域におけるイネの水消費特性の理解、季節性湿地帯の水環境の理解、そしてその湿地帯における稲作導入の影響について、ポット試験や圃場試験、また水文学的現地観測によって解明することを目的とした。

第2章では、まず作物学視点からイネの個体レベルにおける水消費特性について検討した。また、他の作物に比べより多くの水を消費するといわれるイネについて、イネ品種や栽培方法の工夫による水節約型稲作の可能性について考察した。季節性湿地帯が出現するナミビア北部地域のほぼ中央に位置するオゴンゴキャンパスにおいてポット試験ならびに圃場試験を実施した。ここでは単位蒸発散量あたりのバイオマス生産量として定義される水利用効率という概念を導入し、水消費量とともにバイオマス生産量についても考慮した。これらの試験はイネの生育初期に実施され、ここでのバイオマス生産量はイネ生育初期の2週間程度の成長量を示す。イネ3栽培種により構成される30品種を供試しポット試験を実施し、水利用効率に対する分げつ数や気孔コンダクタンスの影響について調査した。さらに、優良品種を利用し水利用効率に対する栽植密度の影響についてポット試験と圃場試験によって検討した。

ナミビアのような強い日射を有する半乾燥地域においては、気孔コンダクタンスのような植物生理学的特性よりも分げつ数や栽植密度のような物理的因子の方が、水消費量の抑制にはより有効であることが明らかとなった。それは、イネによる水面被覆によって水面からの蒸発量が抑制され、より高い水利用効率が得られるためである。本章でのポット試験ならびに圃場試験の結果はイネの生育初期において、イネによる水面被覆率が大きいほど水を節約することが可能となることを示唆した。

第3章では、季節性湿地帯に実際にイネを栽培した場合に、蒸発散量に対してどのような影響をもたらすのかを自然植生と比較調査した。第2章では作物学的視点から、イネによる水面被覆率を増加させることで水を節約することができる可能性が示された。その結果を、本章ではより大きなスケールにおいて水文学的に検証を加えた。第2章と同様のオゴンゴキャンパス内に3つの圃場を設営し蒸発散量を約2年半計測した。観測圃場の1つとして通年地表面が水に覆われることのないアップランド圃場（UF）を設営し、2つは季節性湿地帯に設営し、そのうちの1つを自然植生そのままの圃場（NVF）、そしてもう1つにイネを栽培しイネ圃場（RF）として、蒸発散量を観測した。

まず、UFに比べNVFやRFでは年間で実に倍近い蒸発散量が生じていたことが分かった。また、NVFやRFにおける年蒸発散量は年降雨量に匹敵する量であり、対象地域の水収支において蒸発散量が重要な役割を果たしていたことが示唆された。そのような環境におけるイネの影響については、イネの生育初期においてNVFよりもRFの方がより大きな蒸発散量を示す傾向にあることが分かった。一方で、乾季にはRFにおける蒸発散量はNVFのそれよりも少ないことが分かった。イネの生育初期には、植物バイオマスによる水面の被覆率が小さく、そのために蒸発効率が増加し、より盛んに蒸発散が生じることが分かった。そのため、イネの生育に伴い葉面積指数（*LAI*）が増加することで、RFの蒸発散量はNVFのそれに近づいた。この点は、第2章において作物学的実験から得られた結果と一致するものであった。乾季における蒸発散量の差は主に純放射量の差に起因していた。RFではイネの収穫作業により植物体が圃場から持ち出され裸地となることでアルベドが増加した。そのため純放射量が減少し、結果として蒸発散量もNVFに比べ減少したと考えられる。以上のように、イネ栽培によって雨季には*LAI*の変化が、乾季には収穫作業による裸地化が蒸発散量に対して影響を与えることが分かった。

稲作を導入することで*LAI*は大きく変化する。そこで、蒸発散量に対する*LAI*の変動の影響を量的に検証するため感度テストを実施した。その結果、地表水が存在している場合、季節性湿地帯における蒸発散量は*LAI*が増加することで大きく減少することが示された。これは、イネ栽培において*LAI*を適切にコントロールすることで、蒸発散量を減少させ、水を節約する稲作を導入することができる可能性を示唆している。

第4章では、稲作導入によって季節性湿地帯の水収支に対してどのような影響があるのかをシミュレートした。稲作導入の影響を検討するため、対象領域内の季節性湿地帯に対して、稲作導入面積の割合を0%、50%、そして100%と変動させた。そして、対象領域の水収支について、短期的視点から日変動ならびに季節変動を評価し、長期的視点から日変動の年積算値を評価した。その結果、短期的視点からは季節性湿地帯全体に稲作を導入した場合でも、対象領域の水収支の日変動に対しては影響がほとんど見られないことが分かった。それは、対象領域の水収支の日変動において、降雨量や地表水量変化量が、蒸発散量の変動量よりも1オーダー大きな値で変動しており、稲作を導入することで生じる自然植生の蒸発散量との差の影響はさらに小さかったためと考えられる。ただし、長期的視点から一年の積算値を評価した場合、乾季の継続的な蒸発散作用によって蒸発散量の水収支に対する影響は日変動に対するそれに比べより大きくなることが推定された。また、稲作導入面積が大きいほど蒸発散量が減少すると推定され、稲作導入によって水資源を節約することができる可能性が示された。これは、稲作を導入することで特に乾季の蒸発散量が減少し土壌水分量の減少を抑制できるためだと考えられる。つまり、稲作導入の影響は、雨季の栽培期間だけでなく、雨季と乾季を含めた一年に及ぶものであり、その累積の影響は次の年の水収支に対しても履歴として影響を与えうる連続性を伴ったものであることが示唆された。

今後はイネの栽培方法を変化させ、栽植密度や LAI が変動した場合の蒸発散量への影響、ならびに水収支への影響を推定するため、蒸発散推定モデルの改善が望まれる。また、同時に地表水量変化量や降雨量の推定精度を高めるとともに、土壌浸透量に対する稲作導入の影響を検討するため、対象領域内の多地点における水位、降雨、そして土壌の物理性の集中的な現地調査が望まれる。

本博士論文における各種試験、現地観測、ならびに数値シミュレーションによって、ナミビア北部に広がる季節性湿地帯の水環境がより明らかとなり、また季節性湿地帯に稲作を導入した場合の影響について評価することができた。アフリカ地域で見られるようなイネの収量が $1-2\text{ t ha}^{-1}$ というレベルの粗放稲作を導入する限り、短期的視点では季節性湿地帯の水収支の日変動に対しては大きな影響を及ぼさない可能性が高いことが分かった。一方、長期的視点では稲作を導入することで蒸発散量の年積算値が減少することが推定され、

稲作導入によって季節性湿地帯の水資源を節約することができる可能性が示された。稲作導入による季節性湿地帯水収支への影響評価については、いまだ精度向上に向けたさらなる現地調査やモデルの改善等が望まれるものの、地域の水環境を保全しながら有効活用していくための基礎情報として本研究結果は有用であると考ええる。

謝辞

本博士研究を遂行し、論文を執筆するにあたり、名古屋大学大学院生命農学研究科太田岳史教授には大変お世話になりました。太田教授と交わした多くの会話の中で、研究のみならず生き方についてもご指南いただき、誠に感謝いたしております。今後とも森林水文学分野を牽引されるとともに、健康に留意し笑いの多い人生を歩まれることを願ひ感謝の意いたします。

また、同研究室の田中隆文准教授、小谷亜由美助教にも多くのご助言を頂き、感謝いたします。先生方の多方面からのご指摘を得られたことで、本博士論文もより厚みのあるものとなりました。ありがとうございました。

本博士論文はナミビアへの持続可能な稲作導入を目指したプロジェクトに参加させていただくことでまとめ上げることができました。そのプロジェクトリーダーである近畿大学農学部飯嶋盛雄教授には、名古屋大学学部生時代からお世話になり、飯嶋教授のお蔭で様々な世界を経験してすることができました。誠にありがとうございます。

同プロジェクトメンバーの総合地球環境学研究所檜山哲哉准教授には水文学をゼロからご指導いただき、檜山准教授のご指導のお蔭で研究を継続してすることができました。心より感謝いたします。また、近畿大学農学部藤岡悠一郎氏にはナミビアでの研究活動において大きなご協力を頂きました。誠にありがとうございました。

独立行政法人国際農林水産業研究センターの坂上潤一氏には、アフリカ研究の第一歩目をご指導頂いただけでなく、私の博士課程進学の決断をより堅固なものにしてくださいました。心より感謝いたします。また、滋賀県立大学泉泰弘准教授、近畿大学農学部山根浩二講師にはご指導頂くとともに、研究にご協力頂き、ありがとうございました。

ナミビア大学の Mwandemele 教授、Awala 氏、Lwiinga 氏には、ナミビア現地における研究活動の遂行にあたり、多大なるサポートを頂きました。また、今は亡き Kanyomeka 准教授はナミビアでの研究を軌道に乗せるためにご尽力いただき、彼のご協力なしでは本博士論文も完成し得なかったと言えます。Kanyomeka 准教授への感謝の気持ちを込め、ご冥福をお祈りいたします。

名古屋大学大学院生命農学研究科森林気象水文学研究分野の先輩方、後輩の皆様には大変お世話になりました。博士課程後期課程からお世話になり始めた私を、皆様は暖か

く迎え入れて下さるとともに、研究についても多くのご助言をくださいました。本当にありがとうございます。

最後になりましたが、親、兄、姉、そしてそれぞれの家族に感謝いたします。ある時は励まし、ある時は叱ってくれた親には、ずいぶん長い間心配をかけてしまいました。親や家族が見守っていてくれたおかげで、本博士論文をまとめることができました。家族への感謝の気持ちは言葉では言い尽くせません。これからの私の人生の中で、行動で恩返ししてまいります。

引用文献

外国語引用文献

- Acreman, M.C., Harding, R.J., Lloyd, C.R. and McNeil, D.D. 2003. Evaporation characteristics of wetlands: experience from a wet grassland and a reedbed using eddy correlation measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* 7 (1): 11-21.
- Africa Rice Center (WARDA). 2007. *Africa Rice Trends: Overview of recent developments in the sub-Saharan African rice sector*. Africa Rice Center Brief. Cotonou, Benin: Africa Rice Center (WARDA).
- Alberto, M.C.R., Wassmann, R., Hirano, T., Miyata, A., Hatano, R., Kumar, A., Padre, A. and Amante, M. 2011. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. *Agricultural Water Management* 98: 1417-1430.
- Allen, R.G., Prueger, J.H. and Hill, R.W. 1992. Evapotranspiration from isolated stands of hydrophytes: cattail and bulrush. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 35: 1191-1198.
- Alvenäs, G. and Jansson, P-E. 1997. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 88: 47-56.
- Amakali, M., Bethune, S. and Roberts, K. 2002. Incorporation of Environmental Flows into Namibia's National Water Policy, National Development Plan, new water legislation and national strategies. Presented at the conference on Environmental Flows for River Systems in Cape Town.
- Anderson, W.K. 1992. Increasing grain yield and water use of wheat in a rainfed Mediterranean type environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 43: 1-17.
- Andriesse, W. and Fresco, L.O. 1991. A characterization of rice-growing environments in West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 33: 377-395.
- Awala, S., Nanhapo, P., Kanyomeka, L., Sakagami, J., Mwandemele, O., Ipinge, I., Izumi, Y., Suzuki, T. and Iijima, M. 2009. Potential for rice cultivation in seasonal wetlands and Zambezi river flood plains in Namibia. *Japanese Journal of Crop Science* 78 (Extra Issue 1): 10-11.
- Awala, S.K., Nanhapo, P.I., Sakagami, J., Kanyomeka, L. and Iijima, M. 2010. Differential salinity tolerance among *Oryza glaberrima*, *Oryza sativa* and their interspecies including NERICA. *Plant Production Science* 13: 3-10.

- Ball, J.T., Woodrow, I.E. and Berry, J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *In*: Biggins, J. (Ed), Progress in Photosynthesis Research, vol. 4. Proceedings of the 7th International Congress on Photosynthesis. Martins Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands, pp 221-224.
- Barton, I.J. 1979. A parameterization of the evaporation from nonsaturated surfaces. *Journal of Applied Meteorology* 18: 43-47.
- Bauer, P., Thabeng, G., Stauffer, F. and Kinzelbach, W. 2004. Estimation of the evapotranspiration rate from diurnal groundwater level fluctuations in the Okavango Delta, Botswana. *Journal of Hydrology* 288: 344-355.
- Becker, M. and Johnson, D.E. 2001. Improved water control and crop management effects on lowland rice productivity in West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59: 119-127.
- Bethune, S., Amakali, M. and Roberts, K. 2005. Review of Namibia legislation and policies pertinent to environmental flows. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 894-902.
- Borrell, A., Garside, A. and Fukai, S. 1997. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research* 52: 231-248.
- Bouman, B.A.M. and Tuong, T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agricultural Water Management* 49: 11-30.
- Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review* 27: 779-787.
- Burba, G.G., Verma, S.B. and Kim, J. 1999. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. *Agricultural and Forest Meteorology* 94: 31-51.
- Cabangon, R.J., Tuong, T.P. and Abdullah, N.B. 2002. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems. *Agricultural Water Management* 57: 11-31.
- Crerar, S. and Bethune, S. 1992. Continuing action to protect and restore our water. *In*: Brown, C.J. (Ed), Namibia's Green Plan (Environment and Development). Presented at Rio World Summit 1992.
- Dekić, L., Mihailović, D.T. and Rajković, B. 1995. A study of the sensitivity of bare soil evaporation schemes to soil surface wetness, using the coupled soil moisture and surface temperature prediction model, BARESOIL. *Meteorology and Atmospheric Physics* 55:

101-112.

de Vries, M.E., Rodenburg, J., Bado, B.V., Sow, A., Leffelaar, P.A. and Giller, K.E. 2010. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. *Field Crops Research* 116: 154-164.

Dingkuhn, M., Cruz, R.T., O'Toole, J.C. and Dörffling, K. 1989. Net photosynthesis, water use efficiency, leaf water potential and leaf rolling as affected by water deficit in tropical upland rice. *Australian Journal of Agricultural Research* 40: 1171-1181.

Dingkuhn, M., Farquhar, G.D., De Datta, S.K. and O'Toole, J.C. 1991. Discrimination of ^{13}C among upland rices having different water use efficiencies. *Australian Journal of Agricultural Research* 42: 1123-1131.

Dinçer, T., Heemstra, H.H. and Kraatz, D.B. 1976. The study of hydrological conditions in an experimental area in the seasonal swamp. Tech. Note No 20, UNDP/FAO: BOT/71/706.

Doody, T. and Benyon, R. 2011. Quantifying water savings from willow removal in Australian streams. *Journal of Environmental Management* 92: 926-935.

Drexler, J.Z., Anderson, F.E. and Snyder, R.L. 2008. Evapotranspiration rates and crop coefficients for a restored marsh in the Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA. *Hydrological Processes* 22: 725-735.

Drexler, J.Z., Snyder, R.L., Spano, D. and Paw U, K.T. 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes* 18: 2071-2101.

Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. and Snyder, P.K. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.

Gao, B. 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58: 257-266.

Giambelluca, T.W., Nullet, M.A., Ziegler, A.D. and Tran, L. 2000. Latent and sensible energy flux over deforested land surfaces in the eastern Amazon and northern Thailand. *Singapore Journal of Tropical Geography* 21 (2): 107-130.

Gieske, A. 1997. Modelling outflow from the Jao/Boro river system in the Okavango Delta, Botswana. *Journal of Hydrology* 193: 214-239.

- Goulden, M.L., Litvak, M. and Miller, S.D. 2007. Factors that control Typha marsh evapotranspiration. *Aquatic Botany* 86: 97-106.
- Gumbricht, T., McCarthy, T.S. and Merry, C.L. 2001. The topography of the Okavango Delta, Botswana, and its sedimentological and tectonic implications. *South African Journal of Geology* 104: 243-264.
- Gumbricht, T., Wolski, P. and McCarthy, T.S. 2004. Forecasting the spatial extent of the annual flood in the Okavango Delta, Botswana. *Journal of Hydrology* 290: 178-191.
- Hayashi, S., Kamoshita, A. and Yamagishi, J. 2006. Effect of planting density on grain yield and water productivity of rice (*Oryza sativa* L.) grown in flooded and non-flooded fields in Japan. *Plant Production Science* 9: 298-311.
- Heyns, P. 1991. Guidelines for the utilization of water resources and protection of wetlands in Namibia. *Madoqua* 17: 249-251.
- Hipondoka, M.H.T. 2005. The development and evolution of the Etosha pan, Namibia. Doctorate thesis, Julius-Maximilian University of Würzburg, Germany.
- Hossen, M.S., Mano, M., Miyata, A., Baten, M.A. and Hiyama, T. 2012. Surface energy partitioning and evapotranspiration over a double-cropping paddy field in Bangladesh. *Hydrological Processes* 26: 1311-1320.
- Impa, S.M., Nadaradjan, S., Boominathan, P., Shashidhar, G., Bindumadhava, H. and Sheshshayee, M.S. 2005. Carbon isotope discrimination accurately reflects variability in WUE measured at a whole plant level in rice. *Crop Science* 45: 2517-2522.
- IRRI (International Rice Research Institute). 2010. IRRI world rice statistics: Distribution of rice crop area, by environment. (<http://beta.irri.org/index.php/Home/Welcome/Frontpage.html>)
- IWMI (International Water Management Institute). 2010. Using wetlands sustainably. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 4p. (IWMI Water Issue Brief 1). doi:10.5337/2010.231.
- Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B: Biological Sciences* 273: 593-610.
- Jensen, J.R. and Rahman, M.M. 1987. A semi-empirical model for calculating evaporation and transpiration from wetland rice. *Agricultural and Forest Meteorology* 41: 289-306.

- Ji, L. Zhang, L. and Wylie, B. 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75: 1307-1317.
- Jones, M.B. and Humphries, S.W. 2002. Impacts of the C₄ sedge *Cyperus papyrus* L. on carbon and water fluxes in an African wetland. *Hydrobiologia* 488: 107-113.
- José, J.S., Montes, R., Grace, J., Nikonova, N. and Osio, A. 2008. Land-use changes alter radiative energy and water vapor fluxes of a tall-grass *Andropogon* field and a savanna-woodland continuum in the Orinoco lowlands. *Tree Physiology* 28: 425-435.
- Kangombe, F.N. and Strohbach, B.J. 2008. Vegetation mapping and description of Ogongo Agricultural Farm and surrounds. *South African Journal of Botany* 74 (2): 387-388.
- Karaba, A., Dixit, S., Greco, R., Aharoni, A., Trijatmiko, K.R., Marsch-Martinez, N., Krishnan, A., Nataraja, K.N., Udayakumar, M. and Pereira, A. 2007. Improvement of water use efficiency in rice by expression of *HARDY*, an *Arabidopsis* drought and salt tolerance gene. *PNAS* 104: 15270-15275.
- Kato, Y., Okami, M. and Katsura, K. 2009. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crops Research* 113: 328-334.
- Keyler, S. 1995. Economics of the pearl millet subsector in northern Namibia. A summary of baseline data. ICRISAT working paper 95/03, Windhoek.
- Khatun, R., Ohta, T., Kotani, A., Asanuma, J., Gamo, M., Han, S., Hirano, T., Nakai, Y., Saigusa, N., Takagi, K., Wang, H. and Yoshifuji, N. 2011. Spatial variations in evapotranspiration over east Asian forest sites. I. Evapotranspiration and decoupling coefficient. *Hydrological Research Letters* 5: 83-87.
- Kim, C.P. and Stricker, J.N.M. 1996. Influence of spatially variable soil hydraulic properties and rainfall intensity on the water budget. *Water Resources Research* 32: 1699-1712.
- Kim, J. and Verma, S.B. 1996. Surface exchange of water vapour between an open sphagnum fen and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* 79: 243-264.
- Kimura, R. and Kondo, J. 1998. Heat balance model over a vegetated area and its application to a paddy field. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 76: 937-953.
- Kondo, J. and Watanabe, T. 1992. Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *Journal of the Atmospheric Sciences* 49: 2183-2199.

- Kondo, M., Pablico, P.P., Aragones, D.V. and Agbisit, R. 2004. Genotypic variations in carbon isotope discrimination, transpiration efficiency, and biomass production in rice as affected by soil water conditions and N. *Plant Soil* 267: 165-177.
- Kondo, J., Saigusa, N. and Sato, T. 1990. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *Journal of Applied Meteorology* 29: 385-389.
- Krugmann, H. 2000. Fundamental Issue and Threats to Sustainable Development in Namibia. Southern Sustainable Development Corporation, Windhoek.
- Kurc, S.A. and Small, E.E. 2004. Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico. *Water Resources Research* 40, W09305, doi: 10.1029/2004WR003068.
- Lafleur, P.M. 1990. Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces. *Aquatic Botany* 37: 341-353.
- Lafleur, P.M., Hember, R.A., Admiral, S.W. and Roulet, N.T. 2005. Annual and seasonal variability in evapotranspiration and water table at a shrub-covered bog in southern Ontario, Canada. *Hydrological Processes* 19: 3533-3550.
- Lee, D.M., Reynolds, W.D., Elrick, D.E. and Clothier, B.E. 1985. A comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Canadian Journal of Soil Science* 65: 563-573.
- Lindeque, M. and Archibald, T.J. 1991. Seasonal wetlands in Owambo and the Etosha National Park. *Madoqua* 17 (2): 129-133.
- Liu, F., Andersen, M.N. and Jensen, C.R. 2009. Capability of the 'Ball-Berry' model for predicting stomatal conductance and water use efficiency of potato leaves under different irrigation regimes. *Scientia Horticulturae* 122: 346-354.
- Liu, M., Tian, H., Chen, G., Ren, W., Zhang, C. and Liu, J. 2008. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900-2000. *Journal of the American Water Resources Association* 44: 1193-1207.
- Löf, G.O.G., Duffie, J.A. and Smith, C.O. 1966. World distribution of solar radiation. *Solar Energy Society* 10: 27-37.
- Ludlow, M.M. and Muchow, R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy* 43: 107-153.

- Mahrup, Borrell, A., Ma'shum, M., Kusnarta, IGM., Sukartono, Tisdall, J. and Gill, J.S. 2005. Soil management systems improve water use efficiency of rainfed rice in the semi-arid tropics of southern Lombok, eastern Indonesia. *Plant Production Science* 8: 342-344.
- Marsh, A. and Seely, M. 1992. Oshanas: Sustaining People, Environment and Development in Central Owanbo, Namibia. Desert Research Foundation of Namibia, Windhoek.
- Marshall, C.H., Pielke Sr., R.A. and Steyaert, L.T. 2003. Crop freezes and land-use change in Florida. *Nature* 426: 29-30.
- Maruyama, S., Kabaki, N. and Tajima, K. 1985. Water Consumptions in Japonica and Indica Rice Varieties. *Japanese Journal of Crop Science* 54: 32-38.
- Matsumoto, K., Ohta, T., Nakai, T., Kuwada, T., Daikoku, K., Iida, S., Yabuki, H., Kononov, A.V., van der Molen, M.K., Kodama, Y., Maximov, T.C., Dolman, A.J. and Hattori, S. 2008. Responses of surface conductance to forest environments in the Far East. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1926-1940.
- McDonagh, J.F. and Hillyer, A.E.M. 2003. Grain legumes in pearl millet system in northern Namibia: an assessment of potential nitrogen contributions. *Experimental Agriculture* 39: 349-362.
- McFeeters, S.K. 1996. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17: 1425-1432.
- Mendelsohn, J., Jarvis, A., Roberts, C. and Robertson, T. 2002. Atlas of Namibia. A portrait of the land and its people. Philip publishers, South Africa. 1-200.
- Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G. 1993. Wetlands. second ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- MWCT (Ministry of Wildlife, Conservation and Tourism). 1992. Namibia's Green Plan.
- Onyango, J.C., Suralta, R.R., Inukai, Y., Asanuma, S. and Yamauchi, A. 2007. Responses in dry matter production of NERICA to soil moisture stress. *Japanese Journal of Crop Science* 76 (Extra Issue 1): 168-169.
- OTA (Office of Technology Assessment). 1984. *Wetlands: Their Use and Regulation*. OTA, 0-206. US Congress, Washington, DC.
- Passioura, J. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce - from breeding to field management. *Agricultural Water Management* 80: 176-196.
- Pearce, F. 2006. When the Rivers Run Dry. Water - the defining crisis of the twenty-first century.

Beacon Press, Boston.

- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 193: 120-145.
- Perez, P.J., Castellvi, F., Ibañez, M. and Rosell, J.I. 1999. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 97: 141-150.
- Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R. and Maftoun, M. 2004. Effects of water-saving irrigation and nitrogen fertilization on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Production Science* 7: 337-346.
- Ramier, D., Boulain, N., Cappelaere, B., Timouk, F., Rabanit, M., Lloyd, C.R., Boubkraoui, S., Métayer, F., Descroix, L. and Wawrzyniak, V. 2009. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel - 1. Energy and water. *Journal of Hydrology* 375: 204-216.
- Roel, A., Heilman, J.L. and McCauley, G.N. 1999. Water use and plant response in two rice irrigation methods. *Agricultural Water Management* 39: 35-46.
- Sánchez-Carrillo, S., Angeler, D.G., Sánchez-Andrés, R., Alvarez-Cobelas, M. and Garatuza-Payán, J. 2004. Evapotranspiration in semi-arid wetlands: relationships between inundation and the macrophyte-cover: open-water ratio. *Advances in Water Resources* 27: 643-655.
- Saunders, M.J., Jones, M.B. and Kansiime, F. 2007. Carbon and water cycles in tropical papyrus wetlands. *Wetlands Ecology and Management* 15: 489-498.
- Scudder, T., Manley, R.E., Coley, R.W., Davis, R.K., Green, J., Howard, G.W., Lawry, S.W., Martz, D., Rogers, P.P., Taylor, A.R.D., Turner, S.D., White, G.F. and Wright, E.P. 1993. The IUCN (World Conservation Union) review of the southern Okavango integrated water development project. IUCN, Switzerland. 543 pp.
- Sharma, P.K., Ingram, K.T. and Harnpichitvitaya, D. 1995. Subsoil compaction to improve water use efficiency and yields of rainfed lowland rice in coarse-textured soils. *Soil and Tillage Research* 36: 33-44.
- Shepherd, K.D., Cooper, P.J.M., Allan, A.Y. and Drennan, D.S.H. 1987. Growth, water use and yield of barley in Mediterranean-type environments. *Journal of Agricultural Science* 108: 365-378.
- Shimoyama, K., Hiyama, T., Fukushima, Y. and Inoue, G. 2004. Controls on evapotranspiration

- in a west Siberian bog. *Journal of Geophysical Research* 109, D08111, doi: 10.1029/2003JD004114.
- Smedema, L.K. and Shiati, K. 2002. Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone. *Irrigation and Drainage Systems* 16: 161-174.
- Smid, P. 1975. Evaporation from a reedswamp. *Journal of Ecology* 63: 299-309.
- Souch, C., Grimmond, C.S.B. and Wolfe, C.P. 1998. Evapotranspiration rates from wetlands with different disturbance histories: Indiana dunes national lakeshore. *Wetlands* 18: 216-229.
- Stewart, J.B. 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 43: 19-35.
- Sumi, A., Katayama, T.C. and Agata, W. 1994. Studies on Agronomic Traits of African Rice (*Oryza glaberrima* Steud.) II. Dry matter increase and water use efficiency. *Japanese Journal of Crop Science* 63: 105-110.
- Sun, L. and Song, C. 2008. Evapotranspiration from a freshwater marsh in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Hydrology* 352: 202-210.
- Suzuki, T., Hiyama, T., Kanyomeka, L., Mwandemele, O.D. and Iijima, M. 2009. Preliminary results on energy balance of seasonal wetland in northern Namibia toward the water use assessment to introduce rice cropping. In: L. Kanyomeka, B. Kachigunda and I. Mpofu eds. Climate Change and Food Security Challenges in Sub-Saharan Africa: Current Agricultural Innovations. Proceedings of the 13th agricultural scientific society of Namibia (AGRISSON) congress. 1-2 July, 2009. 57-68.
- Traore, S., Wang, Y.M., Kan, C.E. Kerh, T. and Leu, J.M. 2010. A mixture neural methodology for computing rice consumptive water requirements in Fada N’Gourma Region, Eastern Burkina Faso. *Paddy and Water Environment* 8: 165-173.
- Turner, M.D. and Congalton, R.G. 1998. Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice fields on a West African floodplain. *International Journal of Remote Sensing* 19: 21-41.
- UNESCO, 1971. Convention on Wetlands of International Importance Especially as Waterfowl Habitat. Ramsar (Iran), 2 February 1971. UN Treaty Series No. 14583. As Amended by the Paris Protocol, 3 December 1982, and Regina Amendments, 28 May 1987. Tech. Rep.
- Wolski, P. Savenije, H.H.G., Murray-Hudson, M. and Gumbrecht, T. 2006. Modelling of the

- flooding in the Okavango Delta, Botswana, using a hybrid reservoir-GIS model. *Journal of Hydrology* 331: 58-72.
- Yan, H., Oue, H. and Zhang, C. 2012. Predicting water surface evaporation in the paddy field by solving energy balance equation beneath the rice canopy. *Paddy and Water Environment* 10: 121-127.
- Zegada-Lizarazu, W. 2006. Competition for water between crop species in the pearl millet intercropping system. Unpubl. PhD. thesis. Nagoya University.
- Zegada-Lizarazu, W. and Iijima, M. 2005. Deep root water uptake ability and water use efficiency of pearl millet in comparison to other millet species. *Plant Production Science* 8: 454-460.
- Zhao, B., Kondo, M., Maeda, M., Ozaki, Y. and Zhang, J. 2004. Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in two cultivars of upland rice during different developmental stages under three water regimes. *Plant Soil* 261: 61-75.
- Zhao, X., Huang, Y., Jia, Z., Liu, H., Song, T., Wang, Y., Shi, L., Song, C. and Wang, Y. 2008. Effects of the conversion of marshland to cropland on water energy exchanges in northeastern China. *Journal of Hydrology* 355: 181-191.
- Zwart, S.J. and Bastiaanssen, W.G.M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management* 69: 115-133.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.

日本語引用文献

- 縣和一, 片山忠夫, 川満芳信, 柴戸靖志. 1989. アフリカ産栽培稲 *Oryza sativa* L. と *Oryza glaberrima* Steud. の光合成・物質生産特性. 第1報 異なる葉面飽差条件下における個葉光合成速度並びに蒸散速度. *日本作物学会紀事* 58 (別2): 83-84.
- 足立文彦, 小葉田亨, 今木正. 1995. 窒素施肥条件はイネの群落水利用効率を変化させない. *日本作物学会紀事* 64 (2): 247-248.
- 足立文彦, 小葉田亨, 有本雅幸, 今木正. 1996. 水稻水利用効率の地域・年度間比較. 第2報 島根県下3地域間・2品種間の比較. *日本作物学会紀事* 65 (2): 173-180.
- 大上博基. 2004. 水田の蒸発散・光合成特性と水利用効率に関する研究 (III) 一多層モ

- デルを用いた, LAI の違いが蒸発散量, 光合成速度, 水利用効率に及ぼす影響の検討－. *水文・水資源学会誌* 17 (3) : 274-294.
- 近藤純正. 1994. 地表面の熱収支の基礎. *In*: 水環境の気象学－地表面の水収支・熱収支－ (近藤純正 編), pp. 128-159. 朝倉書店, 東京.
- 上堂秀一郎, 山西和広. 1978. C3, C4 作物の吸水量および要水量の比較. *日本作物学会紀事* 47 (1) : 227-228.
- 難波輝久. 2003. ナイルデルタにおける栽植密度および窒素施与量がイネの収量・収量構成要素・乾物生産におよぼす影響. *日本作物学会紀事* 72 (2) : 133-141.
- 萩原素之, 阪野敬, 丸山悟, 俣野敏子. 1994. 水稻品種コシヒカリの安定多収栽培: 2. 栽植密度と基肥施用量の影響. *信州大学農学部紀要* 31 (1) : 11-19.
- 橋本哲. 2000. 地表面の放射環境. *In*: 身近な気象・気候調査の基礎 (牛山素行 編), pp. 110-123. 古今書院, 東京.
- 藤井道彦, 宮本勇也, 石原清治. 2006. アジアイネと NERICA の干ばつ抵抗性に関する研究－ポット実験により推定した水利用効率の比較－. *日本作物学会紀事* 75 (別2) : 144-145.
- 堀江武, 桜谷哲夫. 1982. 蒸発散の測定法 (I). *農業気象* 38 (2) : 193-195.
- 渡辺力. 1994. 植物と大気. *In*: 水環境の気象学－地表面の水収支・熱収支－ (近藤純正 編), pp. 208-239. 朝倉書店, 東京.

報文

Role of Canopy Coverage in Water Use Efficiency of Lowland Rice in Early Growth Period in Semi-Arid Region

Tetsuji Suzuki¹, Takeshi Ohta¹, Yasuhiro Izumi², Luke Kanyomeka³, Osmund Mwandemele³, Jun-Ichi Sakagami⁴, Koji Yamane⁵ and Morio Iijima⁵

¹Graduate school of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan;

²School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture, Hikone 522-8533, Japan;

³Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Namibia, Oshakati Private Bag 5520, Namibia;

⁴Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Tsukuba 305-8686, Japan;

⁵School of Agriculture, Kinki University, Nara 631-8505, Japan)

Abstract: An appropriate combination of rice cultivar and cropping system that maximizes water use efficiency (WUE) may improve yield of rainfed lowland rice. In the paddy field, a large amount of water is consumed by evaporation during the early growth period, and it can be reduced by canopy coverage especially in semi-arid regions. Therefore, we evaluated the role of canopy coverage in WUE of rice in the early growth period in semi-arid region. A pot experiment was conducted in Namibia to investigate the genotypic and species difference in WUE, and another pot and a field experiment were conducted to investigate the effects of planting density on WUE. Although no significant difference was observed among species, the mean WUE was in the decreasing order of *Oryza sativa*, and *Oryza glaberrima* followed by the interspecific progenies including NERICA. In contrast, there was a significant difference in WUE at the genotypic level. Highly tillering genotypes such as WAB1159-2-12-11-5-1 and WITA 2 showed a high WUE. Furthermore, WUE was significantly correlated with the number of tillers ($R^2 = 0.453$), and higher planting density resulted in a higher WUE. In contrast, stomatal conductance had no significant correlation with WUE ($R^2 = 0.081$). Thus, the physical conditions affected by number of tillers and planting density had greater impacts on WUE than physiological characteristics such as stomatal conductance. The suppression of surface water evaporation by coverage was significant, probably contributing to WUE improvement. To increase WUE in semi-arid regions, we recommend the increase of canopy coverage and higher planting density.

Key words: Canopy coverage, Interspecific progenies, NERICA, *Oryza glaberrima* Steud., Semi-arid regions, Solar radiation, Water use efficiency.

Currently, more than 30% of the global rice cropping area is rainfed lowland (IRRI, 2010) and irrigation systems are often too expensive to implement (Becker and Johnson, 2001). Many countries in semi-arid regions are actually facing economic limitations (Traore et al., 2010). Furthermore, introduction of irrigation system has a risk to provoke salinity problem especially in semi-arid regions (Smedema and Shiati, 2002). Therefore, much of the rice production in semi-arid regions is still based on natural rainfed conditions. Some areas called floodplains or inland valleys in semi-arid countries temporarily offer sufficient water for rice production by receiving flooded water from the surrounding areas (Andriess and Fresco, 1991; Turner and Congalton, 1998). Namibia does not own an irrigation

system but has a high potential of rice production with minimum water availability (Awala et al., 2009, 2010). The annual rainfall in Namibia is 50–600 mm (Bethune et al., 2005) but the seasonal wetlands formed during the rainy season due to flooded water from Angola, have high rice productivity. Some of the semi-arid regions also have a high potential for rice production because of a strong radiative environment (Löf et al., 1966), which increases the yield of rice (Namba, 2003). However, water is still limited in semi-arid regions, and thus it is important to develop water saving techniques that are adoptable for such semi-arid regions with minimum water resources but without an irrigation system.

Water use can be saved by reducing seepage and

percolation (S&P), by suppressing surface water evaporation and by improving transpiration efficiency. Numerous studies have been conducted to reduce S&P (Sharma et al., 1995; Borrell et al., 1997; Roel et al., 1999; Bouman and Tuong, 2001; Pirmoradian et al., 2004; Mahrup et al., 2005; Kato et al., 2009; de Vries et al., 2010), and these studies finally resulted in higher water use efficiency (WUE). Although S&P is a major component in water loss, we focused on the suppression of surface water evaporation to achieve a high WUE in this study because a large amount of water loss also occurs during the early growth period by surface water evaporation (Adachi et al., 1995; Cabangon et al., 2002). Surface water evaporation can be suppressed by shortening active evaporative period, by rapidly expanding canopy coverage and by changing plant type. The direct seeding technique has been proposed to reduce water loss by shortening the land preparation period (Cabangon et al., 2002), but this technique is not always applicable in rainfed paddy fields in semi-arid regions. The increase of canopy coverage may help suppress surface water evaporation in rainfed paddy fields. In wheat fields in Mediterranean climatic regions, the increase of canopy coverage suppressed the soil evaporation (van Herwaarden and Passioura, 2001; Passioura, 2006). The same or even larger effects can be predicted for the rainfed paddy field in low latitudinal regions because evapotranspiration highly depends on available energy such as solar radiation (Khatun et al., 2011). The increase of canopy coverage can be an effective method to improve WUE in rainfed paddy field in such regions. Passioura (2006) pointed out that early-sowing would be effective to reduce soil evaporation by enhancing canopy expansion before the evaporative demand became high in spring. Rapid canopy expansion was also achieved through fertilizer application in barley (Shepherd et al., 1987) or high sowing density in wheat (Anderson, 1992) resulting in substantial reduction of soil evaporation. However, there is little information on the effects of canopy coverage on surface water evaporation and WUE in paddy field. In Japan, the effects of leaf area index or planting density on WUE of rice have been discussed using a multilayer model (Oue, 2004) or field experiment (Hayashi et al., 2006). There are few if any field studies conducted in semi-arid regions that take into account the role of canopy coverage in WUE of rice.

Canopy coverage is changed by plant biomass, plant type, planting density and plant growth. Transplanting of large plants with a high planting density might improve WUE of rice by suppressing surface water evaporation. However, the increase of canopy coverage by larger plant biomass has a risk of losing more water by transpiration (Oue, 2004; Impa et al., 2005) or dehydration stress to rice plants. Therefore, a method of expanding canopy coverage such as control of planting density and selection

of plant type needs to be developed to achieve high WUE.

In this study, we hypothesized that the increase of canopy coverage would reduce surface water evaporation and consequently improve WUE of rice in semi-arid regions. Therefore, we conducted pot and field experiments in Namibia to clarify the role of canopy coverage in WUE of rice. We evaluated the genotypic and species difference of WUE using 30 rice genotypes consisting of three cultivated species (*Oryza sativa* L., *Oryza glaberrima* Steud., interspecific progenies including NERICA) in pot experiment and compared the influential factors to WUE among species. We also investigated the effects of planting density on WUE in pot and field experiment since planting density substantially affected canopy coverage, and finally we discuss the role of canopy coverage in WUE of rice.

Materials and Methods

1. Pot experiments

Pot experiments were conducted in a greenhouse on Ogongo campus (latitude 17°40'S, longitude 15°17'E, altitude 1100 m a.s.l.), Omusati region, Namibia. The greenhouse had an air conditioning system to avoid high temperatures and had a solar radiation transmittance of 52.3%.

(1) Experiment 1; Genotypic and species difference of WUE

Thirty rice genotypes (Table 1) were selected on the basis of the previous cultivar selection study conducted in Ogongo campus (Awala et al., 2009), and consisted of *Oryza sativa* L., *Oryza glaberrima* Steud. and interspecific progenies including NERICA. The seeds soaked for 2–3 days were sown in a cell tray on 16 January 2009. Three plants were transplanted to each pot (3 L volume, 314 cm² surface area) 14 days after sowing (DAS) and were thinned to one plant pot⁻¹ on 28 DAS. The above-ground biomass was then sampled on 42 DAS. The pots were filled with 2 kg of loamy sand soil from seasonal wetland (Table 2) mixed with synthetic fertilizer (N: P₂O₅: K₂O = 0.20: 0.30: 0.20 g kg⁻¹ soil). All the pots, 180 in total, were placed in a completely randomized block design replicated six times. All the pots were kept with standing water during the experimental period.

From 28 to 42 DAS, water use efficiency (WUE, g kg⁻¹) defined as biomass increase per unit of evapotranspiration was gravimetrically calculated (Sumi et al., 1994; Zegada-Lizarazu and Iijima, 2005). The biomass increase in this study was estimated from the biomass difference between 28 and 42 DAS using thinned samples. The biomass samples were oven dried at 80°C for 72 hours and the dry weights were measured. On 42 DAS, the number of tillers was also counted.

Stomatal conductance (mmol m⁻² s⁻¹) of the top most-expanded leaf was measured in the morning (0800–1000) of 36, 39 and 42 DAS by a porometer (Porometer -AP4,

Table 1. List of genotypes used in pot experiment 1.

Species	Genotype	Origin	Ecology
<i>Oryza sativa</i> L.	AZUCENA	Philippines	Upland
	IR 24	Philippines	Lowland
	IR 64	Philippines	Lowland
	IRGA418	Brazil	Lowland
	ITA230 (FARO50)	Nigeria	Lowland
	LK1484-5	Guinea	Lowland
	Mamoudeni	Mali	Lowland
	Pokkali	India	Lowland
	Super	SADC*	Lowland
	Tumo-tumo	Malaysia	Upland
	WAB56-104	Côte d'Ivoire	Upland
	WITA 2	Côte d'Ivoire	Lowland
	WITA 5	Côte d'Ivoire	Lowland
Interspecific progeny	NERICA 1	Côte d'Ivoire	Upland
	NERICA 2	Côte d'Ivoire	Upland
	NERICA 4	Côte d'Ivoire	Upland
	NERICA 6	Côte d'Ivoire	Upland
	WAB1159-2-12-11-2-10	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAB1159-2-12-11-5-1	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAB1159-2-12-11-5-3	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAB450-I-B-P-91-HB	Côte d'Ivoire	Upland
	WAS122-IDSA-10-WAS-4	Côte d'Ivoire	Lowland
	WAS127-B-5-2	Côte d'Ivoire	Lowland
<i>Oryza glaberrima</i> Steud.	Aawba	Guinea	Upland
	C0440	Guinea	Lowland
	CG 14	Senegal	Lowland
	Loubi tetera	-	Lowland
	Mala Noir V	Niger	Lowland
	Tataro	Mali	Lowland
	W0492	Guinea	Lowland

* Southern African Development Community.

Table 2. Characteristics of soils used in the experiments.

Experiment	N (g kg ⁻¹)	P (ppm)	K (ppm)	C (g kg ⁻¹)	pH (H ₂ O)	Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Taxonomy
Pot exp. 1 ^a	0.11±0.03	0.79±0.37	35.0±6.1	5.3±0.3	6.65±0.03	91.7±1.1	5.1±1.6	3.2±0.7	LS
Pot exp. 2, 3 ^a	0.48±0.01	8.91±0.19	67.7±0.7	8.5±0.4	8.35±0.01	88.9±0.5	8.8±0.1	2.3±0.6	LS
Field exp. ^b	0.2	12.3	41	5	5.94	80.4	2.6	17.1	SL

Values are means ± S.E.

^a N, Kjeldahl acid digestion; P, Olsen method; K, Atomic absorption spectroscopy; C, Walkley-Black method. (Analyzed by the National Soil Science Laboratory, Namibia.)^b Awala et al., 2009.

LS, loamy sand; SL, sandy loam.

Table 3. List of climatic variables, the instruments, data loggers, and sampling and recording interval.

Experiment	Climatic variable	Instrument	Data logger	Sampling interval	Recording interval
Pot exp. 2, 3	T_a	Platinum wire thermistor	Vantage Pro ¹	1 hr	1 hr
	Rh	Film capacitor element			
	Sd	Simplified pyranometer	C-CR1000-4M ²	30 s	10 min
Field exp.	T_a	S-THB-M002 ³	HOBO weather station ³	1 min	2 min
	Rh				
	Sd	S-LIB-M003 ³	DATAMARK LS-3300 PV ⁴		
	$Sd^{\#}$	Simplified pyranometer			

¹ Davis Instruments, USA; ² Campbell Scientific, USA; ³ Onset computer corporation, USA; ⁴ Hakusan Corporation, Japan. $Sd^{\#}$ at the surface water level.

DELTA-T DEVICES, UK). The mean value of three measurements for each genotype was obtained.

(2) Experiment 2; The effects of planting density on WUE

The pot was prepared and water management was done in the same way as in pot exp. 1 conducted during the previous cropping season. Pokkali was used because of its fast growing ability and its large biomass. The seeds were sown in cell trays on 24 March 2010. The planting density was 1, 2, 4 or 8 plants pot⁻¹ (32, 64, 127, 255 plants m⁻²). WUE per pot was calculated from 22 to 35 DAS.

(3) Experiment 3; The effect of coverage rate on surface water evaporation

The experiment was conducted during the same period as in pot exp. 2. Polystyrene foam disks, 50, 70 and 85 mm in diameter were used in addition to bare pots (without polystyrene foam disk) to model different sizes of plant canopy without transpiration. The disk was placed at about 150 mm above the soil surface. Six replicates were prepared and evaporation was estimated gravimetrically for 14 days. The pots were kept with standing water during the experimental period. The coverage rate by disk, which was defined as the ratio of disk area to fixed area, was estimated by analyzing the pictures. A picture of the circled area was taken parallel to the ground at about 1 m above the pot. The picture was then analyzed with image analysis software LIA 32 (Available at <http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/>) to estimate the coverage rate.

2. Field experiment

The field experiment was conducted at the experimental field on Ogongo campus, Namibia from December 2010 to January 2011. Two fields (14 × 14 m for each) were plowed and leveled with a hand tractor (G1000 Boxer, Kubota, Japan) 5 days before transplanting. Basal fertilizer (N : P₂O₅ : K₂O = 20 : 30 : 20 kg ha⁻¹) was broadcasted 4 days before transplanting. A microlysimeter (60 L) was buried at the center of each plot (3.5 × 7.5 m) the day before transplanting. The soil that was dug up was put into

the microlysimeter to maintain the same soil condition as the surrounding area. The field and the inside of the microlysimeter were maintained with standing water during the experiment. The planting density was 11, 22, 44 and 89 plants m⁻² with a distance between plants and rows of 30 × 30, 15 × 30, 15 × 15 and 7.5 × 15 cm, respectively, and were designated as LOW, MED, HIGH and EXCESS density, respectively. The plots were arranged in a split plot design replicated four times. The 18-day-old rice seedlings (CV. Pokkali same as in pot exp. 2) were manually transplanted in the fields at a rate of 1 plant hill⁻¹. Four, 8, 12 and 24 plants lysimeter⁻¹ were transplanted into the microlysimeter to maintain the same planting density as the surrounding area, i.e. LOW, MED, HIGH, and EXCESS, respectively.

WUE was calculated by the microlysimeter method (Horie and Sakuratani, 1982; Maruyama et al., 1985; Adachi et al., 1995) for 7 to 27 days after transplanting (DAT). WUE was also calculated by sampling rice plant every 5 days.

The canopy coverage rate was estimated on 17, 22 and 27 DAT in the same way as in pot exp. 3. The picture of the circled area was taken parallel to the ground and analyzed with LIA 32. Both the leaf blade and leaf sheath of rice in the fixed area were considered as canopy coverage in the analysis.

3. Measurement of meteorological data

Table 3 shows the details of the instruments for obtaining meteorological data. During the pot exp. 2 and 3, air temperature (T_a , °C) and relative humidity (Rh , %) were measured in the greenhouse with a weather station (Vantage Pro), and solar radiation (Sd , W m⁻²) was estimated with a simplified pyranometer (Hashimoto, 2000). The simplified pyranometers were calibrated ($R^2 = 0.904$) by a four-component radiometer (CNR-1, Kipp & Zonen, Netherland) and were set up in a nearby field (< 1 km south west).

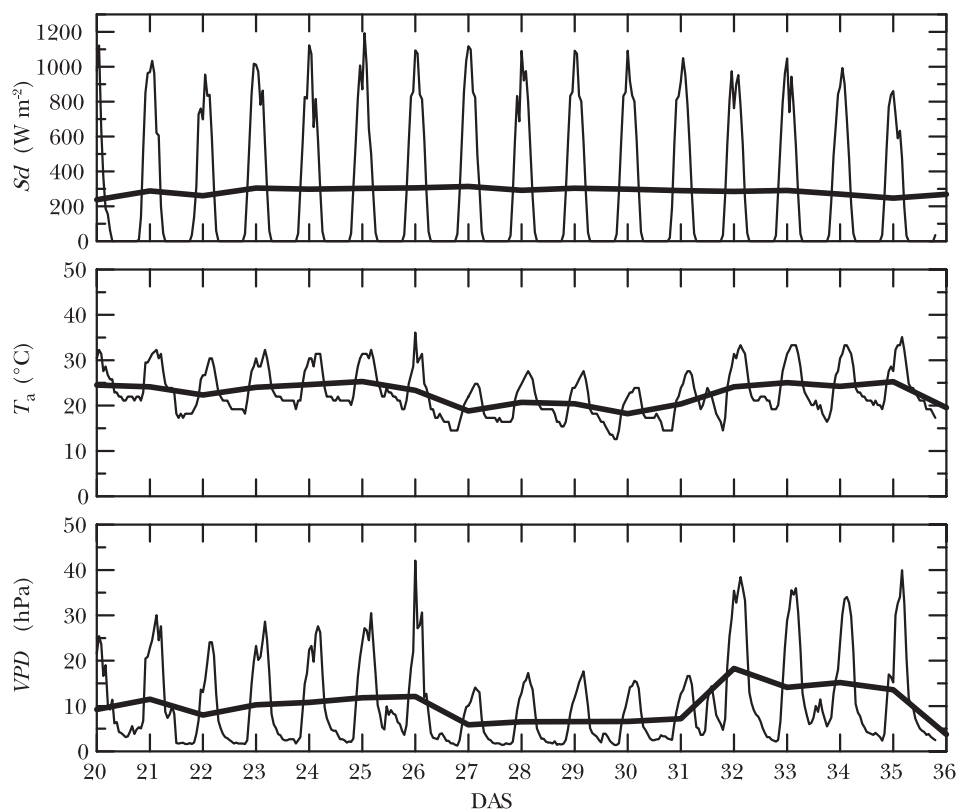


Fig. 1. Time course change of solar radiation (S_d), temperature (T_a) and vapor pressure deficit (VPD) during the pot exp. 2 and 3. The thin line indicates the hourly value and the thick line indicates the daily mean value. DAS, days after sowing.

During the field experiment, T_a , Rh and S_d were measured with a weather station (HOBO weather station) at the experimental field. The solar radiation at surface water level was also measured to estimate solar radiation transmittance (%). The solar radiation transmittance was defined as the ratio of solar radiation at the surface water level to that outside the canopy. Solar radiation at surface water level was measured from 6 DAT with eight simplified pyranometers installed around the plant (2 for between rows, 2 for between plants and 4 for diagonal corners). In one of the four replicates for each treatment, sensors were transferred every day among treatments. Values obtained with these simplified pyranometers were calibrated ($R^2 = 0.968$) with those from the pyranometer of the weather station.

4. Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was performed to statistically analyze the data. F-values, probability levels, degrees of freedom and standard errors of means are shown in each table. Fisher's PLSD was operated at the level of $p < 0.05$ using Statcel (1998) in Excel software (Excel, Microsoft). Pearson's correlation test was used for evaluating the correlation between parameters, and the coefficient of determination was also calculated.

Results

1. Pot experiments

During pot exps. 2 and 3, the daily mean temperature (T_a) and vapor pressure deficit (VPD) were $22.9 \pm 2.4^\circ\text{C}$ (mean \pm S.D.) and 10.5 ± 3.6 hPa, respectively (Fig. 1). In the daytime, VPD sometimes became more than 30.0 hPa especially towards the end of the experiment. The daily mean solar radiation (S_d) was 299 ± 22 W m^{-2} and basically S_d reached 1000 W m^{-2} during the daytime (Fig. 1).

WUE varied with the genotype (Table 4). WAB1159-2-12-11-5-1 showed the highest WUE followed by Pokkali, LK1484-5, WITA 2 and Loubi tetera. Although no significant difference was observed among species, the mean WUE was in the decreasing order of *Oryza sativa* and *Oryza glaberrima* followed by interspecific progenies including NERICA. A significant genotypic difference was observed in the number of tillers and stomatal conductance. Although the difference was not statistically significant, the stomatal conductance in *Oryza glaberrima* was 1.04 and 1.10 times larger than that in *Oryza sativa* and interspecific progenies, respectively, and the number of tillers in interspecific progenies was about 10% less than that in the other two species. WUE was significantly correlated with the number of tillers in *Oryza sativa* and interspecific

Table 4. Genotypic and species difference in WUE, dry weight, number of tillers and mean stomatal conductance in the pot experiment 1.

Genotype	Species	WUE (g kg ⁻¹)	Dry weight (g)	No. of tillers	Stomatal conductance (mmol m ⁻² s ⁻¹)
AZUCENA	S	1.22 ± 0.13	2.13 ± 0.19	9.5 ± 0.8	371.8 ± 32.3
IR 24	S	1.91 ± 0.06	3.91 ± 0.25	21.0 ± 1.0	867.9 ± 42.7
IR 64	S	1.77 ± 0.10	3.24 ± 0.20	28.3 ± 0.9	906.7 ± 47.2
IRGA418	S	1.11 ± 0.14	1.50 ± 0.30	8.7 ± 1.6	829.2 ± 41.7
ITA230 (FARO50)	S	1.67 ± 0.19	3.33 ± 0.47	23.7 ± 2.7	903.9 ± 39.3
LK14845	S	2.37 ± 0.13	5.49 ± 0.40	28.7 ± 2.2	668.5 ± 40.7
Mamoudeni	S	0.97 ± 0.14	1.31 ± 0.29	10.3 ± 2.2	639.8 ± 50.9
Pokkali	S	2.46 ± 0.20	6.34 ± 0.45	16.0 ± 1.3	638.0 ± 34.0
Super	S	1.98 ± 0.06	3.58 ± 0.40	13.8 ± 1.2	718.3 ± 40.0
Tumo-tumo	S	0.72 ± 0.11	0.88 ± 0.17	5.3 ± 0.8	607.4 ± 51.6
WAB56-104	S	1.50 ± 0.16	2.49 ± 0.21	9.8 ± 0.9	530.4 ± 42.6
WITA 2	S	2.18 ± 0.13	4.16 ± 0.29	29.2 ± 2.5	783.1 ± 52.1
WITA 5	S	1.94 ± 0.14	3.93 ± 0.39	28.8 ± 2.2	820.2 ± 37.3
NERICA 1	I	1.66 ± 0.18	3.03 ± 0.32	13.5 ± 0.9	666.9 ± 49.0
NERICA 2	I	1.66 ± 0.21	3.13 ± 0.41	12.5 ± 1.1	604.3 ± 40.1
NERICA 4	I	1.64 ± 0.06	3.20 ± 0.28	12.3 ± 0.6	675.7 ± 48.2
NERICA 6	I	1.59 ± 0.19	2.93 ± 0.34	11.7 ± 1.4	540.2 ± 41.4
WAB1159-2-12-11-2-10	I	1.13 ± 0.14	2.21 ± 0.31	13.7 ± 1.6	618.9 ± 36.7
WAB1159-2-12-11-5-1	I	2.54 ± 0.15	5.44 ± 0.33	30.8 ± 1.6	589.7 ± 35.4
WAB1159-2-12-11-5-3	I	1.69 ± 0.19	3.22 ± 0.49	18.5 ± 2.0	794.7 ± 62.2
WAB450-I-B-P-91-HB	I	1.27 ± 0.14	2.34 ± 0.14	11.3 ± 0.3	469.9 ± 48.3
WAS122-IDS-10-WAS-4	I	1.14 ± 0.18	1.93 ± 0.34	17.8 ± 2.5	885.5 ± 41.9
WAS127-B-5-2	I	1.30 ± 0.19	2.08 ± 0.32	18.5 ± 2.6	882.6 ± 52.7
Aawba	G	1.59 ± 0.11	2.94 ± 0.20	18.0 ± 1.5	630.1 ± 36.5
C0440	G	1.36 ± 0.10	2.34 ± 0.19	15.0 ± 0.9	766.6 ± 64.1
CG 14	G	1.46 ± 0.16	2.22 ± 0.21	14.8 ± 1.1	827.4 ± 41.6
Loubi tetera	G	2.08 ± 0.21	4.11 ± 0.45	19.5 ± 1.5	730.9 ± 33.5
Mala Noir V	G	1.70 ± 0.26	4.16 ± 0.76	13.8 ± 1.9	617.6 ± 50.8
Tataro	G	1.64 ± 0.18	3.15 ± 0.52	29.8 ± 2.8	826.3 ± 64.9
W0492	G	1.39 ± 0.06	2.26 ± 0.28	15.2 ± 1.5	795.0 ± 42.7
Significance		***	***	***	***
F value		7.49	11.95	18.3	9.1
Probability		0.000	0.000	0.000	0.000
Degree of freedom		29	29	29	29
<i>O. sativa</i> L.		1.68 ± 0.15	3.25 ± 0.44	17.9 ± 2.5	714.2 ± 44.0
Interspecific progeny		1.56 ± 0.13	2.95 ± 0.32	16.1 ± 1.9	672.8 ± 44.4
<i>O. glaberrima</i> Steud.		1.60 ± 0.09	3.03 ± 0.32	18.0 ± 2.1	742.0 ± 33.1
Significance		NS	NS	NS	NS
F value		0.20	0.17	0.2	0.5
Probability		0.824	0.842	0.803	0.590
Degree of freedom		2	2	2	2

Values are means ± S.E. S, *Oryza sativa* L.; I, Interspecific progeny; G, *Oryza glaberrima* Steud.. WUE, water use efficiency. ***, significant at the level of $p < 0.001$; NS, not significant by ANOVA.

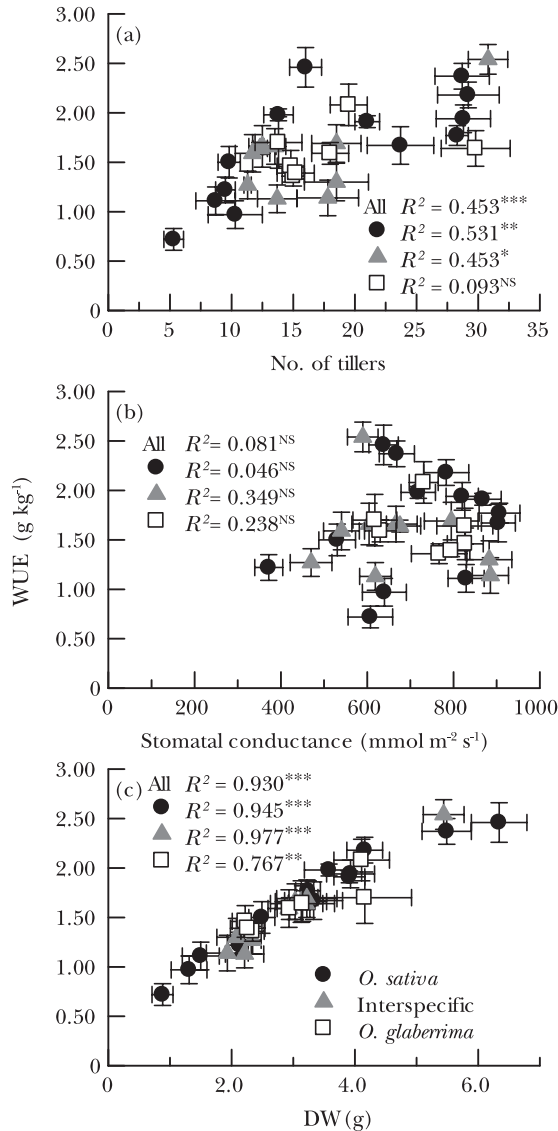


Fig. 2. Correlation of WUE with (a) number of tillers, (b) mean stomatal conductance and (c) dry weight (DW) in the pot exp. 1. Bars indicate standard error. (a, c), $n = 5 - 6$; (b), $n = 18$. Solid circle, *Oryza sativa*; gray triangle, interspecific progeny; open square, *Oryza glaberrima*. ***, **, *, significant at the level of $p < 0.001$, 0.01, 0.05, respectively; NS, not significant by Pearson's correlation test.

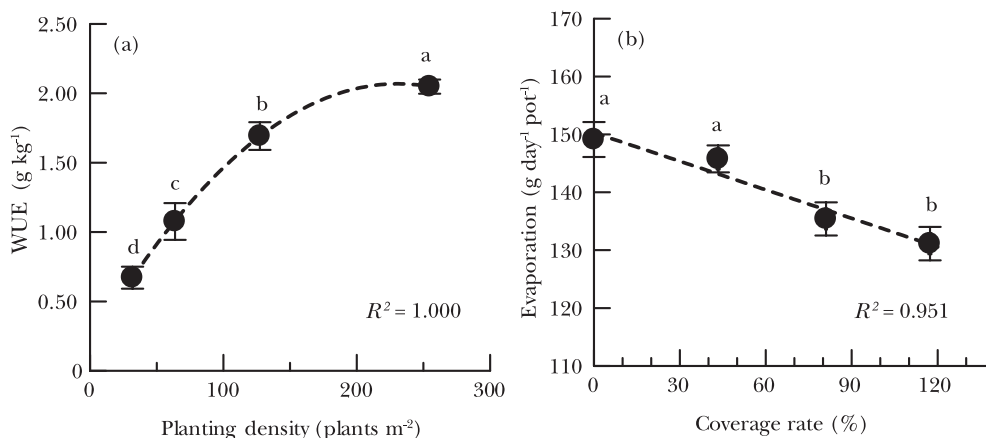


Fig. 3. Effects of (a) planting density on WUE in the pot exp. 2 and (b) coverage rate on evaporation in the pot exp. 3. Bars indicate standard error with 6 replicates. Broken lines shows (a) quadratic and (b) linear regression curves. Different letters indicate significant difference by Fisher's PLSD at the level of $p < 0.05$.

progenies, but not in *Oryza glaberrima*. The number of tillers had less effect on WUE in *Oryza glaberrima* probably because of its tendency of having larger stomatal conductance compared to the other two species. Among the highly tillering genotypes, WAB1159-2-12-11-5-1 from interspecific progenies showed the highest WUE with the smallest stomatal conductance. In all the genotypes, however, WUE was significantly correlated with the number of tillers, but not with stomatal conductance (Fig. 2a, b). Therefore, the number of tillers affected WUE more than the stomatal conductance overall. In addition, WUE was strongly correlated with biomass in all species (Fig. 2c).

WUE significantly increased with increasing planting density (Fig. 3a). The rate of increase, however, declined as the planting density increased. The values showed good regression with the negative quadric curve.

Fig. 3b shows the effects of modeled canopy on surface water evaporation. The modeled canopy affects the surface water evaporation mainly by shading of the canopy because the polystyrene foam-canopy does not transpire. The surface water evaporation was negatively correlated with coverage rate, which means that canopy expansion substantially suppressed the surface water evaporation.

2. Field experiment

During the field experiment, the daily mean temperature (T_a) and vapor pressure deficit (VPD) were $23.7 \pm 1.7^\circ\text{C}$ and 9.6 ± 3.9 hPa, respectively. The daily mean solar radiation (S_d) was 248 ± 69 W m⁻² (Fig. 4). Total rainfall in January 2011 was 196 mm, 58.5 mm of which was delivered from 13 to 17 DAT (Fig. 4).

WUE was significantly improved by the increase in planting density (Fig. 5). WUE increased with increasing planting density up to 44 plants m⁻² (HIGH) and increased slightly thereafter. Thus, the values showed a good regression with the negative quadric curve. Fig. 6 shows the time course change of WUE. The WUE increased with time at every planting density. WUE at the EXCESS density, however, appeared to reach a maximum at around 22 DAT

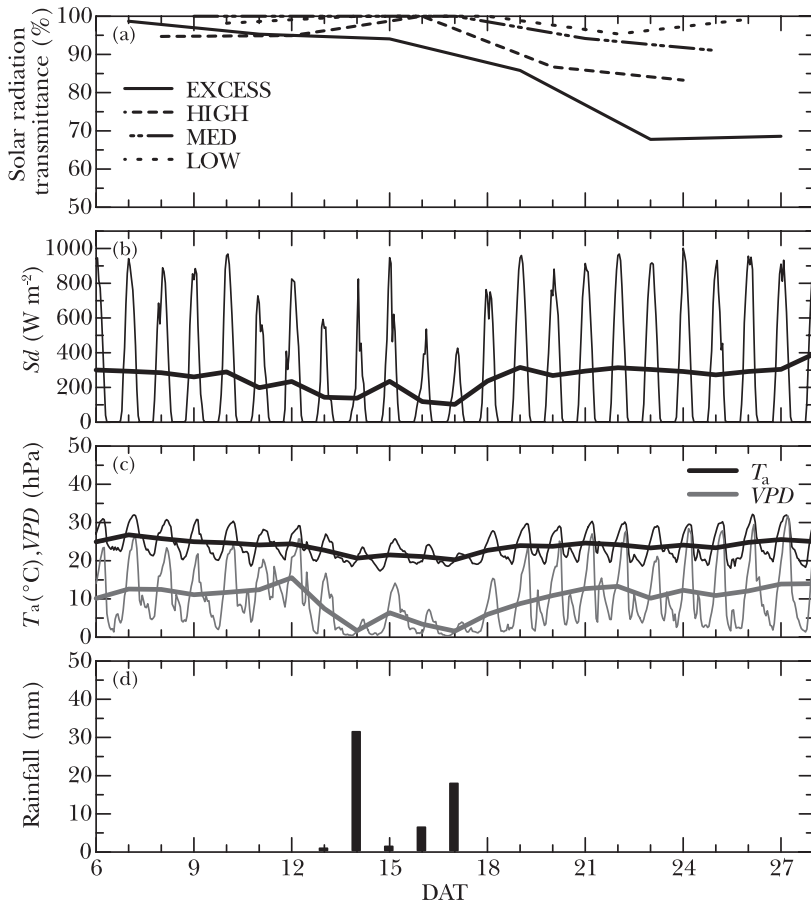


Fig. 4. Time course change of (a) solar radiation transmittance at each planting density, (b) solar radiation (S_d), (c) temperature (T_a) and vapor pressure deficit (VPD) and (d) daily rainfall during the field experiment. In (b) and (c), the thin line indicates the hourly value and the thick line indicates the daily mean value. DAT, days after transplanting.

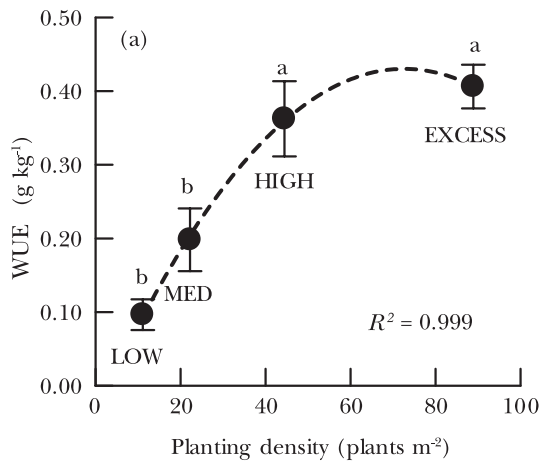


Fig. 5. Effects of planting density on WUE in the field experiment. Bars indicate standard error for 4 replicates. Broken line shows a quadric regression curve. Different letters indicate significant difference by Fisher's PLSD at the level of $p < 0.05$.

and slightly decreased thereafter. On the other hand, WUE in other treatments gradually increased towards the end of the experimental period. The solar radiation transmittance decreased as the plants grew, and considerably declined towards the end of the experiment especially at an EXCESS density compared with those at a LOW and MED

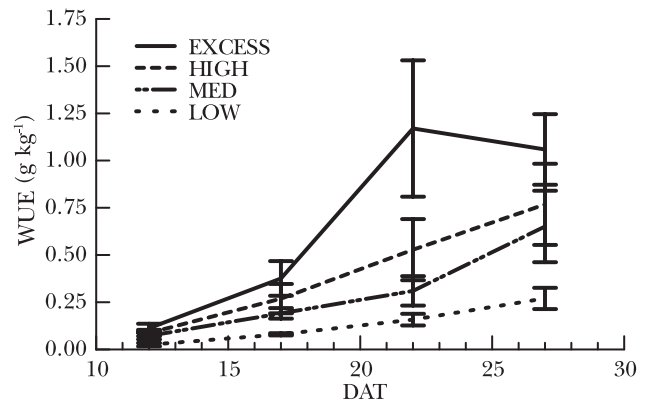


Fig. 6. Time course change of WUE at each planting density at 5-day intervals in the field experiment. Bars indicate standard error for 4 replicates. DAT, days after transplanting.

density (Fig. 4).

The canopy coverage rate in the field was significantly correlated with biomass (Fig. 7a). In addition, the canopy coverage rate correlated with WUE (Fig. 7b). The relationship between canopy coverage rate and biomass showed a good regression with a hyperbolic curve because the canopy coverage rate would reach a maximum when the biomass increased further, and the relationship between canopy

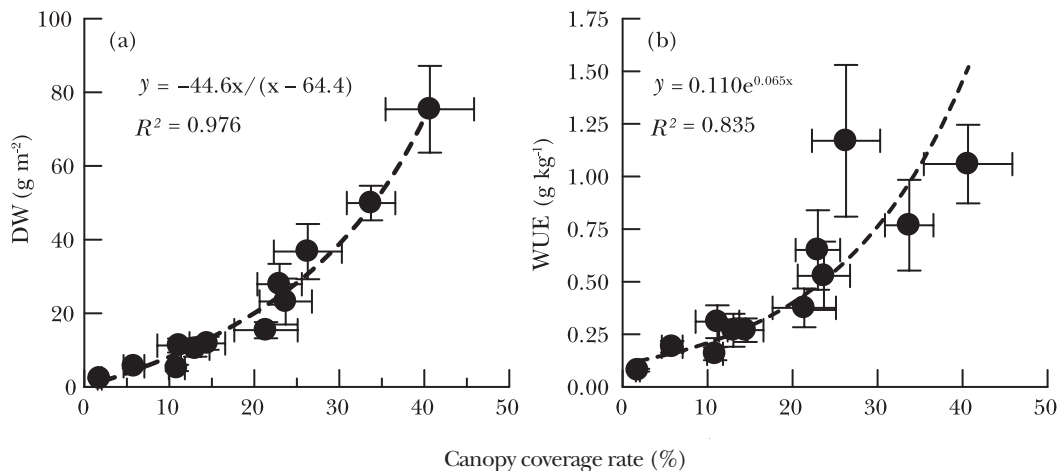


Fig. 7. Relationship between canopy coverage rate and (a) dry weight (DW) or (b) WUE in the field experiment. Bars indicate standard error for 4 replicates. Broken line shows (a) a hyperbolic ($y = -ax/(x - b)$; $a = 44.6$, $b = 64.4$) or (b) an exponential ($y = ce^{dx}$; $c = 0.110$, $d = 0.065$) regression curve.

coverage rate and WUE showed a good regression with an exponential curve. Thus, WUE will become maximal with the saturation of canopy coverage rate. Fig. 7b shows that WUE drastically increased with the increment of canopy coverage rate. The increase of canopy coverage rate may, therefore, efficiently improve WUE in the early growth period.

Discussion

We conducted pot and field experiments in Namibia to evaluate the role of canopy coverage in WUE of rice in the early growth period. In one pot experiment, the genotypic difference in WUE was investigated using 30 genotypes consisting of the cultivated species, *Oryza sativa* L. and *Oryza glaberrima* Steud., and interspecific progenies including NERICA, and in another pot experiment, the effects of planting density on WUE was investigated using one genotype. The field experiment was conducted to confirm the effects of planting density on WUE at the field level.

WUE varied significantly with the genotype, but not with the species (Table 4). The mean WUE was, however, in the decreasing order of *Oryza sativa* and *Oryza glaberrima* followed by interspecific progenies including NERICA. *Oryza glaberrima* is reported to show a significantly lower ratio of net CO₂ assimilation rate to transpiration rate (P/T) than *Oryza sativa* (Agata et al., 1989), and the transpiration efficiency (biomass increase per unit of transpiration) of *Oryza glaberrima* is also reported to be lower than that of *Oryza sativa* (Sumi et al., 1994). However, the species difference in WUE has not been fully examined. In this study, although WUE was relatively lower in *Oryza glaberrima* than in *Oryza sativa*, the difference was not significant. In *Oryza glaberrima*, WUE may be lowered by its large stomatal conductance, but may also be

improved by vigorous leaf development (Sumi et al., 1994) that suppresses surface water evaporation as discussed later. Neither effect on WUE was significant, as seen in the correlation of WUE with stomatal conductance and number of tillers. NERICA is reported to have a higher P/T as well as transpiration efficiency compared to *Oryza sativa* under upland conditions (Fujii et al., 2006; Onyango et al., 2007). In addition, its high transpiration efficiency is accompanied by low stomatal conductance (Fujii et al., 2006). The WUE of interspecific progenies including NERICA, however, was the lowest under flooded conditions in this study. Although the stomatal conductance may have affected transpiration efficiency as reported by Fujii et al. (2006), the effects of stomatal conductance on WUE seemed to be smaller than that of the number of tillers as seen in *Oryza sativa* (Fig. 2). In all genotypes, WUE was significantly correlated with the number of tillers but not with stomatal conductance (Fig. 2). Larger genotypes with more tillers (WAB1159-2-12-11-5-1, LK1484-5), achieved a high WUE, and among the two largest *Oryza glaberrima* (Mala Noir V and Loubi tetera), the genotype Loubi tetera showed a higher WUE with more tillers. Planting density, which substantially changed the canopy structure, also significantly affected WUE in both pot and field experiments (Fig. 3a, 5).

In this study, the WUE is defined as biomass increase per unit of evapotranspiration. The WUE, thus, consists of transpiration efficiency and evaporation. Increase of transpiration efficiency and decrease of evaporation contribute to improvement of WUE. The transpiration efficiency has been considered as a physiological attribute (Ludlow and Muchow, 1990) determined by net assimilation rate and/or stomatal conductance (Impa et al., 2005). On the other hand, the evaporation is basically controlled by meteorological factors such as solar radiation (*S_d*) and

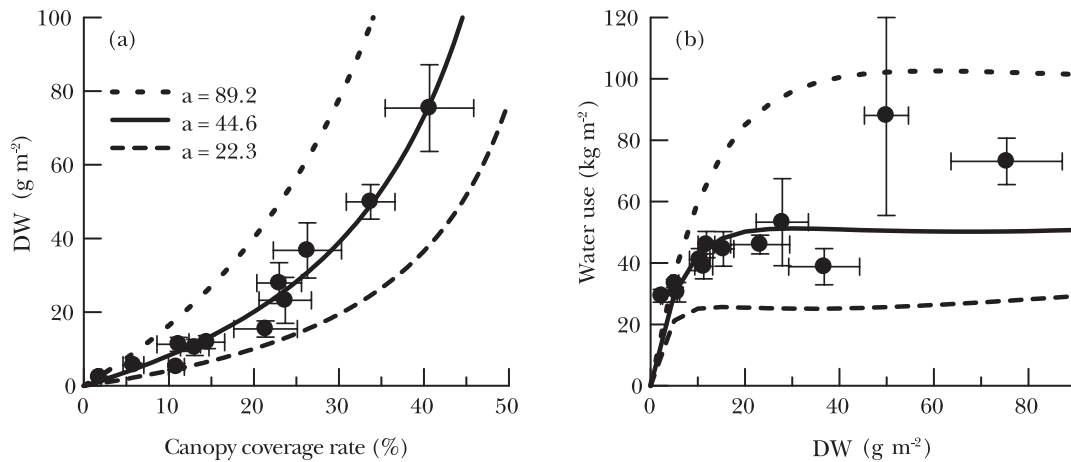


Fig. 8. (a) Relationship between canopy coverage rate and dry weight (DW) shown by the hyperbolic regression curve ($y = -ax/(x - b)$; $b = 64.4$) with different curvature values ($a = 22.3, 44.6, 89.2$) and (b) water use predicted from the relationship and the exponential regression curve ($y = ce^{dx}$; $c = 0.110, d = 0.065$) shown in Figure 7. Water use was given by multiplying reciprocal of WUE by DW. Points are observed values and bars indicate standard error for 4 replicates in the field experiment.

vapor pressure deficit (*VPD*) (Penman, 1948), which can be affected by plant type and/or canopy structure. Even though plant transpiration could affect the evaporation by altering the *VPD* inside the canopy, the effects were presumed to be small in this study because the pots were arranged sparsely enough and the experiments were conducted in the early growth period during which the pot was not fully covered by the canopy.

Previous studies revealed the effects of stomatal conductance, leaf nitrogen and carbon content, and the ratio of intercellular to ambient CO₂ concentration (C_i/C_a) on transpiration efficiency and P/T (Maruyama et al., 1985; Dingkuhn et al., 1989; Adachi et al., 1996) and also reported a negative correlation between P/T and carbon isotope discrimination (CID) (Dingkuhn et al., 1991; Kondo et al., 2004; Impa et al., 2005). However, CID showed a poor relationship with WUE, especially in the tillering period, and Zhao et al. (2004) pointed out the possibility of breakdown of relationship between WUE and P/T to explain the poor relationship. In this study, stomatal conductance had no correlation with WUE probably because the P/T and transpiration efficiency, which can be affected by stomatal conductance, were a minor component of WUE in the early growth period, and stomatal conductance was high during the early growth period.

The number of tillers and planting density, on the other hand, significantly affected the WUE probably by blocking *Sd* before it reached the water surface. The decline of solar radiation transmittance by canopy coverage probably suppressed the surface water evaporation as observed with the modeled canopy in the pot exp. 3 (Fig. 3b) and also as simulated by Oue (2004). The role of canopy coverage in WUE was substantial because the evaporation was a major component of WUE in rice especially in the early growth

period in semi-arid regions.

We simulated the effects of canopy expansion on water use (Fig. 8). The correlation of canopy coverage rate with biomass and WUE were fitted to hyperbolic ($y = -ax/(x - b)$; $a = 44.6, b = 64.4$) and exponential curves ($y = ce^{dx}$; $c = 0.110, d = 0.065$), respectively (Fig. 7). The canopy expansion can be shown by coefficients of hyperbolic curve. The high expansion ability can be reflected to lower value of curvature ($= a$). We assumed that the maximum coverage rate ($= b$) was constant in the simulation. Fig. 8 shows the assumed correlation of canopy coverage rate with biomass and water use predicted from these assumed relationships. The results show that the effects of canopy expansion become marked from the early growth stage and water use can be drastically reduced by adopting high canopy expanding genotype. Thus, highly tillering genotypes may be recommendable to achieve a high WUE.

In both pot and field experiments, the relationship between WUE and planting density showed regression to the quadratic curve (Fig. 3a, 5), which suggests the existence of optimum planting density for WUE in the early growth period. Although the relationship also showed regression to a hyperbolic curve, we fitted it to a quadric curve because excess planting density would finally cause decline of WUE for the following reasons; increase in transpiration by excess plant biomass (Oue, 2004; Impa et al., 2005), decrease in transpiration efficiency by worsening the radiative condition in canopy (Oue, 2004), decrease in evaporation-suppressing effects of plant biomass owing to the saturation of canopy coverage rate (Fig. 7a) and possible dehydration stress to rice plants. In fact, the time course change of WUE at the EXCESS density reached the highest on 22 DAT and slightly decreased thereafter (Fig. 6). WUE of EXCESS density must be saturated earlier

because the canopy coverage rate is close to the maximum at this density as shown by the hyperbolic relationship between canopy coverage rate and biomass (Fig. 7a).

Although the optimum planting density to achieve a high yield has been studied previously (e.g. Hagiwara et al., 1994; Namba, 2003), there are few studies on the optimum planting density for WUE of rice. Hayashi et al. (2006) conducted a field experiment in Japan and reported that the effects of planting density on WUE of rice varied with the year and were sometimes not significant. Our results, on the other hand, showed a significant difference in WUE among planting densities and an increasing trend of WUE with increasing planting density was observed in both pot and field experiments (Fig. 3a, 5). The effects of planting density were always significant in Namibia probably because especially in semi-arid regions, the interruption of solar energy by canopy coverage was significant in the early growth period and contributed to the improvement of WUE.

In addition, canopy coverage seems more effective for improving WUE in the paddy field than in the upland field. Although the improvement of WUE by canopy coverage was reported for upland crops such as wheat and barley, the improvement of WUE was only 1.35 to 2.21 times of the control (Shepherd et al., 1987; Anderson, 1992). In this field experiment, on the other hand, WUE at the EXCESS density was 4.1 times higher than that at the LOW density (Fig. 5). This significant increase of WUE by planting density suggests that the increase of canopy coverage is an effective method to improve WUE especially in the paddy field in semi-arid regions.

The optimum planting density for WUE in the early growth period was estimated as 71.7 plants m⁻² from the field experiment in this study (Fig. 5). This is comparable with the density proposed in another semi-arid country, Egypt for better yield (33.3 hills m⁻² with 4 plants hill⁻¹, Namba, 2003). In addition, under high radiative environments, a high photosynthetic rate can be maintained even in low layers of the canopy when the leaf area index is high (Oue, 2004). Accordingly, the optimum density proposed in this study might be adoptable to save water use for a longer period than examined in this study. However, since we measured WUE only during the vegetative stage using one genotype, identification of the optimum planting density for each genotype and for the whole growth period remains to be studied.

We conclude that rather than physiological characteristics, the physical conditions affected by the number of tillers and planting density have a strong impact on WUE of rice in semi-arid regions in the early growth period. In the semi-arid regions, evaporation highly depends on solar radiation, and increase of canopy coverage suppresses surface water evaporation and consequently contributes to the improvement of WUE. Since the increase of canopy

coverage can affect WUE in semi-arid regions, a high planting density is recommended to improve WUE from the beginning of crop growth.

Acknowledgements

We thank Dr. Adachi F. (Shimane University) for his valuable advice on the field experiment. We also thank Mr. Lwiinga T. (University of Namibia) for his contributions to the experiments. This study was funded by a grant-in-aid (A-20255008) from the Japanese Society for the Promotion of Science.

References

- Adachi, F., Kobata, T., Arimoto, M. and Imaki, T. 1995. Comparison of water use efficiency of paddy rice (*Oryza sativa* L.) among locations and interannual variation in humid areas I. Reliability of estimated canopy transpiration rate from meteorological and physiological data of the crop. *Jpn. J. Crop. Sci.* 64: 509-515*.
- Adachi, F., Kobata, T., Arimoto, M. and Imaki, T. 1996. Comparison of water use efficiency of paddy rice (*Oryza sativa* L.) among locations and interannual variation in humid areas II. Comparison among three locations and two cultivars in Shimane prefecture. *Jpn. J. Crop. Sci.* 65: 173-180*.
- Agata, W., Katayama, T., Kawamitsu, Y. and Shibato, Y. 1989. Dry matter production and photosynthesis in *Oryza sativa* L. and *Oryza glaberrima* Steud. introduced from Africa. I. Photosynthetic rate and transpiration rate in single leaf under different leaf vapor pressure deficit conditions. *Jpn. J. Crop. Sci.* 58 (Extra Issue 2): 83-84****.
- Anderson, W.K. 1992. Increasing grain yield and water use of wheat in a rainfed Mediterranean type environment. *Aust. J. Agric. Res.* 43: 1-17.
- Andriesse, W. and Fresco, L.O. 1991. A characterization of rice-growing environments in West Africa. *Agric., Ecosyst. and Environ.* 33: 377-395.
- Awala, S., Nanhapo, P., Kanyomeka, L., Sakagami, J., Mwandemele, O., Ipinge, S., Izumi, Y., Suzuki, T. and Iijima, M. 2009. Potential for rice cultivation in seasonal wetlands and Zambezi river flood plains in Namibia. *Jpn. J. Crop. Sci.* 78 (Extra Issue 1): 10-11.
- Awala, S.K., Nanhapo, P.I., Sakagami, J., Kanyomeka, L. and Iijima, M. 2010. Differential salinity tolerance among *Oryza glaberrima*, *Oryza sativa* and their interspecies including NERICA. *Plant Prod. Sci.* 13: 3-10.
- Becker, M. and Johnson, D.E. 2001. Improved water control and crop management effects on lowland rice productivity in West Africa. *Nutr. Cycl. in Agroecosyst.* 59: 119-127.
- Bethune, S., Amakali, M. and Roberts, K. 2005. Review of Namibia legislation and policies pertinent to environmental flows. *Phys. and Chem. of the Earth.* 30: 894-902.
- Borrell, A., Garside, A. and Fukai, S. 1997. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Res.* 52: 231-248.
- Bouman, B.A.M. and Tuong, T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agric. Water Manage.* 49: 11-30.
- Cabangon, R.J., Tuong, T.P. and Abdullah, N.B. 2002. Comparing

- water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems. *Agric. Water Manage.* 57: 11-31.
- de Vries, M.E., Rodenburg, J., Bado, B.V., Sow, A., Leffelaar, P.A. and Giller, K.E. 2010. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. *Field Crops Res.* 116: 154-164.
- Dingkuhn, M., Cruz, R.T., O'Toole, J.C. and Dörffling, K. 1989. Net photosynthesis, water use efficiency, leaf water potential and leaf rolling as affected by water deficit in tropical upland rice. *Aust. J. Agric. Res.* 40: 1171-1181.
- Dingkuhn, M., Farquhar, G.D., De Datta, S.K. and O'Toole, J.C. 1991. Discrimination of ^{13}C among upland rices having different water use efficiencies. *Aust. J. Agric. Res.* 42: 1123-1131.
- Fujii, M., Miyamoto, Y. and Ishihara, S. 2006. Studies on drought resistance of *Oryza sativa* L. and NERICA -Comparison of water use efficiency estimated by pot experiment-. *Jpn. J. Crop Sci.* 75 (Extra Issue 2): 144-145***.
- Hagiwara, M., Banno, T., Maruyama, S. and Matano, T. 1994. Stable high yielding culture of paddy rice variety "Koshihikari" 2. Effects of planting density and amount of basal dressing. *J. Fac. Agric. Shinshu Univ.* 31: 11-19**.
- Hashimoto, T. 2000. The radiative environment at the surface level. In M. Ushiyama eds., How to Investigate Local Climate. Kokon-shoin, Tokyo. 110-123****.
- Hayashi, S., Kamoshita, A. and Yamagishi, J. 2006. Effect of planting density on grain yield and water productivity of rice (*Oryza sativa* L.) grown in flooded and non-flooded fields in Japan. *Plant Prod. Sci.* 9: 298-311.
- Horie, T. and Sakuratani, T. 1982. Methods for measuring evapotranspiration (I). *J. Agr. Met. Japan.* 38: 193-195****.
- Impa, S.M., Nadaradjan, S., Boominathan, P., Shashidhar, G., Bindumadhava, H. and Sheshshayee, M.S. 2005. Carbon isotope discrimination accurately reflects variability in WUE measured at a whole plant level in rice. *Crop Sci.* 45: 2517-2522.
- International Rice Research Institute. 2010. IRRI world rice statistics: Distribution of rice crop area, by environment. <http://beta.irri.org/index.php/Home/Welcomes/Frontpage.html>.
- Kato, Y., Okami, M. and Katsura, K. 2009. Yield potential and water use efficiency of aerobic rice (*Oryza sativa* L.) in Japan. *Field Crops Res.* 113: 328-334.
- Khatun, R., Ohta, T., Kotani, A., Asanuma, J., Gamo, M., Han, S., Hirano, T., Nakai, Y., Saigusa, N., Takagi, K., Wang, H. and Yoshifuji, N. 2011. Spatial variations in evapotranspiration over east Asian forest sites. I. Evapotranspiration and decoupling coefficient. *Hydrological Research Letters.* 5: 83-87.
- Kondo, M., Pablico, P.P., Aragones, D.V. and Agbisit, R. 2004. Genotypic variations in carbon isotope discrimination, transpiration efficiency, and biomass production in rice as affected by soil water conditions and N. *Plant Soil* 267: 165-177.
- Löf, G.O.G., Duffie, J.A. and Smith, C.O. 1966. World distribution of solar radiation. *Solar Ener. Soc.* 10: 27-37.
- Ludlow, M.M. and Muchow, R.C. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy.* 43: 107-153.
- Mahrup, Borrell, A., Ma'shum, M., Kusnarta, IGM., Sukartono, Tisdall, J. and Gill, J.S. 2005. Soil management systems improve water use efficiency of rainfed rice in the semi-arid tropics of southern Lombok, eastern Indonesia. *Plant Prod. Sci.* 8: 342-344.
- Maruyama, S., Kabaki, N. and Tajima, K. 1985. Water Consumptions in Japonica and Indica Rice Varieties. *Jpn. J. Crop Sci.* 54: 32-38.
- Namba, T. 2003. Optimum planting density and nitrogen application rate for maximizing rice yield in the Nile delta. *Jpn. J. Crop Sci.* 72: 133-141**.
- Onyango, J.C., Suralta, R.R., Inukai, Y., Asanuma, S. and Yamauchi, A. 2007. Responses in dry matter production of NERICA to soil moisture stress. *Jpn. J. Crop Sci.* 76 (Extra Issue 1): 168-169.
- Oue, H. 2004. Evapotranspiration, photosynthesis and water use efficiency in a paddy field (III)-Scaling impacts of the change of LAI on evapotranspiration, photosynthesis and water use efficiency from leaf to canopy by the multilayer model-. *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* 17: 274-294*.
- Passioura, J. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce - from breeding to field management. *Agric. Water Manage.* 80: 176-196.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.* 193: 120-145.
- Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R. and Maftoun, M. 2004. Effects of water-saving irrigation and nitrogen fertilization on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Prod. Sci.* 7: 337-346.
- Roel, A., Heilman, J.L. and McCauley, G.N. 1999. Water use and plant response in two rice irrigation methods. *Agric. Water Manage.* 39: 35-46.
- Sharma, P.K., Ingram, K.T. and Harnpichitvitaya, D. 1995. Subsoil compaction to improve water use efficiency and yields of rainfed lowland rice in coarse-textured soils. *Soil Till. Res.* 36: 33-44.
- Shepherd, K.D., Cooper, P.J.M., Allan, A.Y. and Drennan, D.S.H. 1987. Growth, water use and yield of barley in Mediterranean-type environments. *J. Agric. Sci., Camb.* 108: 365-378.
- Smedema, L.K. and Shiati, K. 2002. Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone. *Irrigation and Drainage Systems.* 16: 161-174.
- Sumi, A., Katayama, T.C. and Agata, W. 1994. Studies on Agronomic Traits of African Rice (*Oryza glaberrima* Steud.). II. Dry matter increase and water use efficiency. *Jpn. J. Crop Sci.* 63: 105-110.
- Traore, S., Wang, Y.M., Kan, C.E. Kerh, T. and Leu, J.M. 2010. A mixture neural methodology for computing rice consumptive water requirements in Fada N'Gourma Region, Eastern Burkina Faso. *Paddy Water Environ.* 8: 165-173.
- Turner, M.D. and Congalton, R.G. 1998. Classification of multi-temporal SPOT-XS satellite data for mapping rice fields on a West African floodplain. *Int. J. Remote Sensing.* 19: 21-41.
- van Herwaarden, A.F. and Passioura, J.B. 2001. Improving estimates of water-use efficiency in wheat. *Australian Grain.* 11: 3-5.
- Zegada-Lizarazu, W. and Iijima, M. 2005. Deep root water uptake ability and water use efficiency of pearl millet in comparison to other millet species. *Plant Prod. Sci.* 8: 454-460.
- Zhao, B., Kondo, M., Maeda, M., Ozaki, Y. and Zhang, J. 2004. Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in two cultivars of upland rice during different developmental stages under three water regimes. *Plant Soil* 261: 61-75.

* In Japanese with English abstract.

** In Japanese with English summary.

*** In Japanese with English title.

**** In Japanese. Title was translated into English by the present author.

Effects of the introduction of rice on evapotranspiration in seasonal wetlands

Tetsuji Suzuki,^{1,6*} Takeshi Ohta,^{1,6} Tetsuya Hiyama,^{2,6} Yasuhiro Izumi,^{3,6}
Osmund Mwandemele^{4,6} and Morio Iijima^{5,6}

¹ Graduate school of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

² Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto 603-8047, Japan

³ School of Environmental Science, The University of Shiga Prefecture, Hikone 522-8533, Japan

⁴ Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Namibia, Oshakati Private Bag 5520, Windhoek, Namibia

⁵ School of Agriculture, Kinki University, Nara 631-8505, Japan

⁶ JST/JICA, SATREPS, Tokyo, Japan

Abstract:

Land use changes in wetland areas can alter evapotranspiration, a major component of the water balance, which eventually affects the water cycle and ecosystem. This study assessed the effect of introduced rice-cropping on evapotranspiration in seasonal wetlands of northern Namibia. By using the Bowen ratio–energy balance method, measurements of evapotranspiration were performed over a period of 2.5 years at two wetland sites—a rice field (RF) and a natural vegetation field (NVF)—and at one upland field (UF) devoid of surface water. The mean evapotranspiration rates of RF (1.9 mm daytime^{−1}) and NVF (1.8 mm daytime^{−1}) were greater than that in UF (1.0 mm daytime^{−1}). RF and NVF showed a slight difference in seasonal variations in evapotranspiration rates. During the dry season, RF evapotranspiration was less than the NVF evapotranspiration. The net radiation in RF was less in this period because of the higher albedo of the non-vegetated surface after rice harvesting. In the early growth period of rice during the wet season, evapotranspiration in RF was higher than that in NVF, which was attributed to a difference in the evaporation efficiency and the transfer coefficient for latent heat that were both affected by leaf area index (*LAI*). Evapotranspiration sharply negatively responded to an increase in *LAI* when surface water is present according to sensitivity analysis, probably because a higher *LAI* over a surface suppresses evaporation. The control of *LAI* is therefore a key for reducing evaporation and conserving water. Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

KEY WORDS evapotranspiration; land use change; leaf area index; rice; semi-arid regions; wetlands

Received 31 March 2013; Accepted 3 July 2013

INTRODUCTION

Wetlands cover 6% of the Earth's land surface and have been noted for their hydrologic and ecologic importance (UNESCO, 1971; IWMI, 2010). Wetlands serve an essential role in maintaining high biodiversity, and their hydrologic functions influence ecosystems (Mitsch and Gosselink, 1993) and contribute to moderating floods, recharging groundwater, and circulating nutrients (Acreman *et al.*, 2003; Sun and Song, 2008). Meteorological environments are also affected through interactions between wetlands and the atmosphere (Marshall *et al.*, 2003). The evapotranspiration rates from wetlands differ (Souch *et al.*, 1998; Goulden *et al.*, 2007) because

wetlands have great diversity, varying by vegetation type, vegetative coverage area over the surface water, and water table depths. Additionally, measurement results can differ on the basis of the method used to measure evapotranspiration. Further investigations of evapotranspiration are needed to gain a better understanding of water cycles in wetlands and their effects on the conservation of biodiversity and ecosystems.

Recently, large areas of wetland have been converted to cropland to satisfy the increasing demand of food production by growing populations. For example, approximately 84% of marshland in north-east China was converted to agricultural purposes from 1950 to 2000 (Zhao *et al.*, 2008). In the USA, wetlands have been converted to sugar cane, corn, and soybean fields (OTA, 1984; Marshall *et al.*, 2003). Previous studies reported that land use change has a large impact on hydrologic processes (e.g. Giambelluca *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2008). Land use change alters the micrometeorological environment by changing the

*Correspondence to: Tetsuji Suzuki, Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601, Japan
E-mail: suzuki.tetsuji@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

radiative environment and turbulent fluxes and can affect regional climate and hydrologic characteristics (Zhao *et al.*, 2008). Land use change in the USA, in fact, created low temperature stress on crops (Marshall *et al.*, 2003), and land use changes in China resulted in an increase of evapotranspiration (Zhao *et al.*, 2008). A rapid change in land use can affect not only local water cycles and ecosystems but also human welfare over a long timescale (Foley *et al.*, 2005).

The introduction of rice in seasonal wetlands in the semi-arid region of northern Namibia has been previously investigated (Awala *et al.*, 2009, 2010; Suzuki *et al.*, 2009, 2013). Namibia receives an uneven distribution of rainfall, ranging from 50 mm in the coastal region to more than 600 mm in the north-east region (Bethune *et al.*, 2005). Although the climate of Namibia is characterized by low rainfall, high evapotranspiration rates, and high temperatures (Heyns, 1991), northern Namibia develops seasonal wetlands during the wet season (November to May) by receiving local rainfall and flood water from the Angolan highlands. The seasonal wetlands create a high potential for rice production and have been progressively studied (Awala *et al.*, 2009, 2010). Rice had never grown in the seasonal wetlands because of the uncertainty of flooding intensity and timing of flood arrival. Recently, rice has been newly introduced and promoted in Namibia and has received growing attention. However, the utilization of water resources in seasonal wetlands by a new crop might pose risks such as water depletion and soil salinization especially under semi-arid conditions. Etosha National Park, located downstream from the seasonal

wetlands, provides an important wildlife habitat and is a popular site for tourism. The water resources of the seasonal wetlands are ecologically and economically important. To ensure that the introduction of rice does not have negative impacts on this environment, the effects of rice introduction on water cycles should be carefully investigated.

Evapotranspiration generally plays an important role in the water cycle in wetlands (Lafleur, 1990; Souch *et al.*, 1998). Especially high evapotranspiration rates have been reported in semi-arid regions (Allen *et al.*, 1992; Sánchez-Carrillo *et al.*, 2004; Drexler *et al.*, 2008; Doody and Benyon, 2011). Evapotranspiration characteristics are not well known in northern Namibia, and thus, the effects of the introduction of rice are unpredictable. To determine if rice can be introduced into seasonal wetlands in northern Namibia with conservation of water resource, we studied evapotranspiration with the following aims: (1) to clarify the evapotranspiration characteristics in the seasonal wetlands, (2) to determine the controlling factors of the evapotranspiration, and (3) to assess the effects of the introduction of rice on evapotranspiration.

STUDY SITE

Evapotranspiration was measured on the Ogongo campus (17°40'S, 15°17'E, altitude 1100 m above sea level) of the University of Namibia, located in the Omusati region of Namibia (Figure 1). The Ogongo

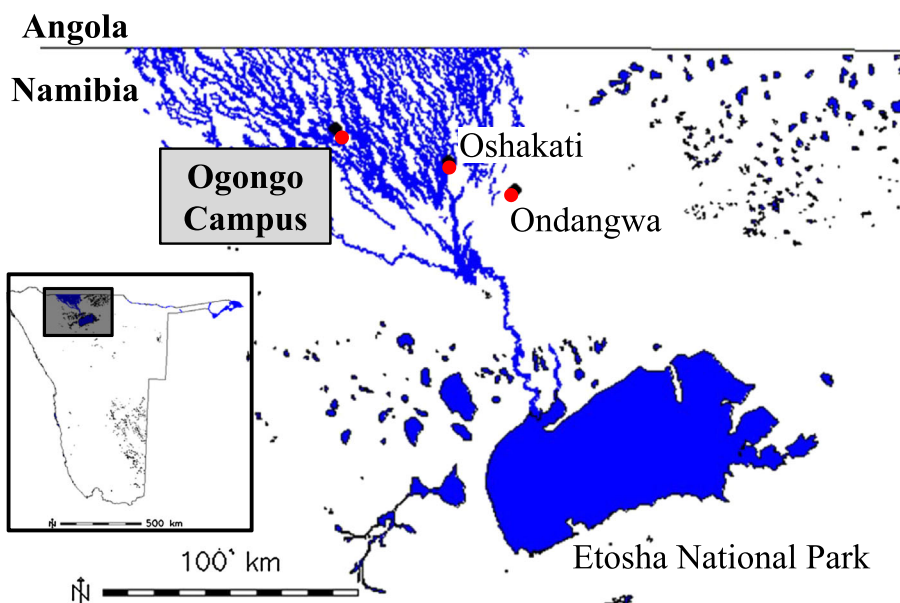


Figure 1. Location of Ogongo campus, where the observation sites were situated. Blue areas indicate seasonal wetlands and the Etosha pan

campus contains both upland that has never been covered with water and seasonal wetlands that are covered with water during the wet season (November to May) by receiving local rainfall and floods from the Angolan highlands. The Ogongo campus has a well-conserved natural landscape (Kangombe and Strohbach, 2008). Two observation sites named 'rice field' (RF; 17°40'57.0"S, 15°17'20.0"E) and 'natural vegetation field' (NVF; 17°40'53.9"S, 15°17'18.7"E) were established in the seasonal wetlands. Another observation site named 'upland field' (UF; 17°41'03.5"S, 15°17'39.4"E) was established in the uplands. All the fields were designed to be 100 m × 100 m. UF is dominated by stink grass (*Eragrostis cilianensis*), a woody plant (*Combretum collinum*), and palm trees (*Hyphaene petersiana*). The woody plants and palm trees occupy 7.3% of the surface of the field. In NVF, the gramineous plant *Willkomia sarmentosa* and sedge *Cyperus esculentus* dominate and grow actively in the wet season and wither in the dry season. In RF, rice was cultivated every wet season from the wet season of 2008/2009 until that of 2011/2012. Rice grew during

wet seasons, and bare land remained after harvesting. In 2008/2009, rice was transplanted to the field in mid-January, and their canopy was completely covered by severe flood from February to March, which killed almost all rice during flooding. During the other wet seasons, rice was grown in the field from January to May. Table I shows the surface conditions at each site during the observation period. In RF and NVF, the vegetation was totally submerged by the sudden rise in surface water levels during the period of February to March 2009.

METHODS

Measurements

A Bowen ratio measuring system was installed at the centre of each site to calculate the Bowen ratio, latent heat flux, and sensible heat flux. Although recent studies have often used the eddy covariance method to measure evapotranspiration (e.g. Saunders *et al.*, 2007; Alberto *et al.*, 2011), the eddy covariance method requires

Table I. Surface conditions of each site during the observation period

Site	2008				2009											
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
UF	<i>Eragrostis cilianensis</i> , <i>Combretum collinum</i> , <i>Hyphaene petersiana</i>															
NVF	<i>W. sarmentosa</i>				Open water ^a		Dead vegetation									
	<i>C. esculentus</i>															
RF	<i>W. sarmentosa</i>		L		R	Open water ^a		Bare land								
	<i>C. esculentus</i>															

Site	2010												2011		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
UF	<i>Eragrostis cilianensis</i> , <i>Combretum collinum</i> , <i>Hyphaene petersiana</i>														
NVF	<i>Willkomia sarmentosa</i> , <i>Cyperus esculentus</i>														
RF	L		R				Bare land						L	R	

L Land preparation, direct sowing, transplanting

R Rice growing

^aUF, upland field; NVF, natural vegetation field; RF, rice field.

The vegetation at RVF and RF was submerged owing to a sudden increase in the surface water level in the seasonal wetlands by severe flooding.

expensive instruments (Drexler *et al.*, 2004) and a high and steady voltage of electricity. The eddy covariance method was thus inapplicable in this study because of the necessity of measuring three sites simultaneously and the difficulty of obtaining high, steady power. The Bowen ratio–energy balance method (BREB), on the other hand, enables measurement of evapotranspiration without expensive instruments and high power. The BREB calculates evapotranspiration from a vertical gradient of temperature and humidity between two heights. Evapotranspiration in a semi-arid region such as Namibia is expected to be large enough for the BREB calculations. Therefore, we decided to apply the BREB at the three sites to measure evapotranspiration.

Bowen ratio–energy balance assumes one-dimensional heat and vapour transport without any lateral heat or vapour transported to or from the measurement area from adjacent areas. Another assumption is that eddy diffusivities for sensible heat and latent heat are equal and that latent and sensible fluxes originate from the same point on land surface. Under the seasonal wetland conditions, the second assumption could be affected because of the presence of both vegetation and standing water. A disproportional amount of latent heat flux comes from the water surface, whereas a disproportional amount of sensible heat flux comes from vegetative material above the water surface that has been heated by solar radiation. This difference could bias the Bowen ratio because the effective source of sensible heat might be higher than that of latent heat, resulting in greater Bowen ratio than the true Bowen ratio, which indicates a negative bias in measured evapotranspiration (German, 2000). This possible negative bias might have to be taken into account with observed evapotranspiration values.

Air temperature (T_a , °C) and relative humidity (Rh , %) were measured using a ventilated psychrometer (HUMICAP CVS-HMP-45D, Vaisala, Vantaa, Finland) installed on a pole at heights of 0.50 and 3.00 m. The lower psychrometers at RF and NVF were shifted up and down to adjust to the surface water level during the wet season. Net radiation (Rn , $W m^{-2}$) was measured using a net radiometer (CPR-NR-LITE, Kipp & Zonen, Delft, the Netherlands) installed at a height of approximately 4 m. The soil heat flux (G , $W m^{-2}$) was measured by a soil heat plate (CPR-PHF-01, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) buried at a depth of 0.05 m near the pole. Three platinum resistance thermometers (PRTs) were installed at heights of 0.00, 0.20, and 0.40 m to measure the surface temperature (T_s , °C) when surface water was absent and the surface water temperature (T_w , °C) when surface water was present. The surface water level (z_w , m) was measured manually every day in the wet season of 2008/2009 with a water level gauge

(CME-M86, Meteo Denshi, Sapporo, Japan) at 10-min intervals during the other wet seasons. Albedo was measured from November 2009 using a simplified pyranometer (Hashimoto, 2000; Suzuki *et al.*, 2013) installed beside the net radiometer. Wind speed (U , $m s^{-1}$) was measured from April 2010 using a cup anemometer (CYG-3102, Young, Japan) installed at a height of 2.85 m on the pole. The measurements of fluxes began on 10 September 2008. All meteorological variables except z_w were measured every 30 s and averaged every 10 min. Data were recorded using a data logger (C-CR1000, Campbell Scientific, Inc.). Hourly Bowen ratios, latent heat flux, and sensible heat flux were calculated using mean values obtained when the psychrometer was ventilated. The leaf area index (LAI) was measured as a vegetation parameter using a plant canopy analyser (LAI-2000, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA) at each site in 2012. The LAI in the other observation period was estimated from the measured seasonal variation in LAI (Figure 2). Rainfall data at the Ogongo campus were provided by the Ogongo campus, University of Namibia, for the period of 2000–2009, and after 2009, rainfall was measured using a tipping-bucket rain gauge installed at UF.

BREB method

Evapotranspiration was calculated using the BREB method, from latent heat flux measured hourly, where latent heat flux (λE , $W m^{-2}$) and sensible heat flux (H , $W m^{-2}$) are calculated by combining the energy balance equation and the Bowen ratio equation (Bowen, 1926) as

$$Rn = H + \lambda E + G + \Delta S \quad (1)$$

$$Bo = \frac{H}{\lambda E} \quad (2)$$

where G and ΔS are the soil heat flux ($W m^{-2}$) and heat storage change in a body of water ($W m^{-2}$), respectively, Bo is the Bowen ratio, and ΔS is 0 when the surface water is absent. For the period when surface water was present, ΔS was calculated from the change in water temperature and z_w . Storage changes in the soil and vegetation were assumed to be negligible in this study. The value for Bo can also be expressed as the gradient of air temperature and humidity between two heights:

$$Bo = \frac{c_p \Delta T_a}{\lambda \Delta q_a} \quad (3)$$

where ΔT_a and Δq_a are the difference in air temperature (°C) and specific humidity ($kg kg^{-1}$) between the two heights, c_p is the specific heat of air at a constant pressure ($J kg^{-1} K^{-1}$),

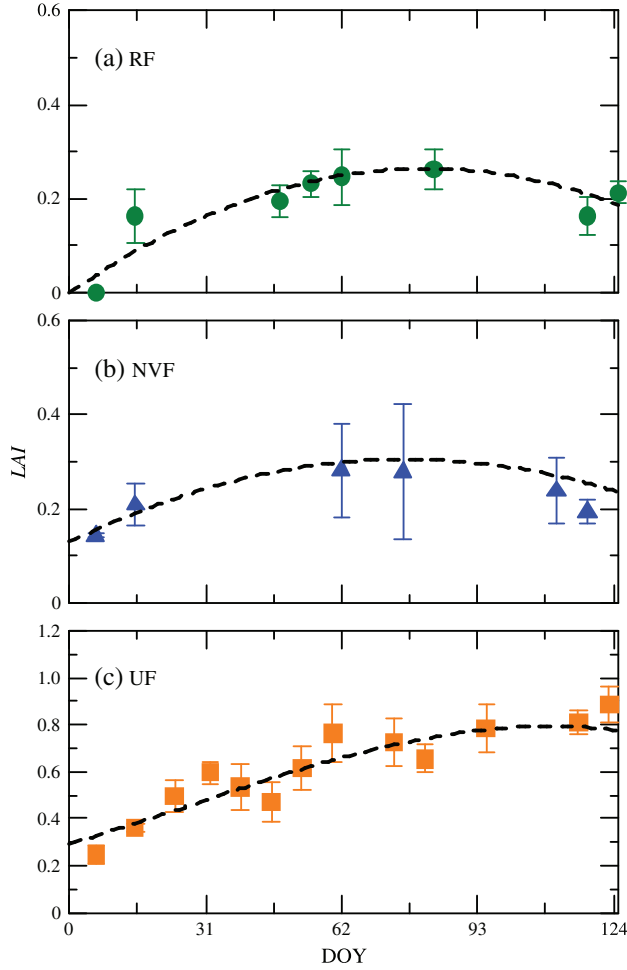


Figure 2. Time course change in the leaf area index (LAI) at each site measured in 2012. Bars indicate standard error ($n=4$). DOY stands for day of year. Seasonal trends of LAI were estimated by approximated polynomial fitting curves. RF, rice field; NVF, natural vegetation field; UF, upland field

and λ is the latent heat of vaporization (J kg^{-1}). The values of λE and H are then calculated using the following equations:

$$\lambda E = \frac{1}{Bo + 1} (Rn - G - \Delta S) \quad (4)$$

$$H = \frac{Bo}{Bo + 1} (Rn - G - \Delta S) \quad (5)$$

When surface water was present, ΔS values in RF and NVF were calculated using the change in the surface water temperature

$$\Delta S = \frac{c_w \times \rho_w \times \Delta T_w}{\Delta t} \quad (6)$$

where c_w and ρ_w are water-specific heat ($4184 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) and water density (1000 kg m^{-3}) and Δt is 3600 s. ΔT_w ($^{\circ}\text{C m}^{-1}$) is the average change in water temperature

during Δt , estimated by weighted averaging of the change in water temperature by z_w ,

$$\begin{aligned} \Delta T_w &= \Delta T_{w-0.00} \times z_w \quad (z_w < 0.20 \text{ m}) \\ \Delta T_w &= \Delta T_{w-0.00} \times \frac{0.20}{z_w} + \Delta T_{w-0.20} \times \frac{z_w - 0.20}{z_w} \quad (0.20 \text{ m} \leq z_w < 0.40 \text{ m}) \\ \Delta T_w &= \Delta T_{w-0.00} \times \frac{0.20}{z_w} + \Delta T_{w-0.20} \times \frac{0.20}{z_w} + \Delta T_{w-0.40} \times \frac{z_w - 0.40}{z_w} \quad (z_w \geq 0.40 \text{ m}) \end{aligned} \quad (7)$$

where ΔT_{w-x} ($^{\circ}\text{C}$) is the change in water temperature during the time interval Δt and the index 'x' represents the height of the PRT.

Evapotranspiration (ET_{obs} , mm) was calculated from λE using the following equation:

$$ET_{\text{obs}} = \frac{\lambda E \times \Delta t}{\rho_w \times \lambda} \times 1000 \quad (8)$$

The period of analysis was approximately 2.5 years starting from 11 September 2008 to 20 March 2011. There was, however, a gap in data collection for RF and NVF between 26 September 2009 and 19 November 2009 because of main power source shutdown.

Quality control

All data were filtered using several steps for quality assurance. First, data spikes with an extremely large flux were discarded. Second, the theoretically unacceptable turbulent flux was discarded, such as when the sign of λE or H was not consistent with the sign of the vapour or air temperature gradient (Perez *et al.*, 1999). Third, the flux when $-1.2 < Bo < -0.8$ was discarded because large errors in λE can occur near sunrise and sunset when Bo reaches -1 (Perez *et al.*, 1999; Drexler *et al.*, 2004; Kurc and Small, 2004). Discarded data were about 29%, 25%, and 22% of each dataset for RF, NVF, and UF, respectively, but most of the errors occurred during night-time ($Rn \leq 0$) in which the atmosphere was more stable. Daytime datasets ($Rn > 0$) had only about 6%, 6%, and 8% of errors for RF, NVF, and UF, respectively. Linear interpolation for gaps of less than 4 h was undertaken. For longer gaps, flux was interpolated using the mean ratio of flux to Rn for each hour calculated using a dataset of the same hour during the 10-day data collection periods.

Daytime evapotranspiration was calculated as the sum of hourly data when $Rn > 0$. Daytime datasets were used

for comparison because evapotranspiration mainly occurs during the daytime. Although evaporation was also observed during night-time as mean values of 0.9, 0.7, and 0.4 mm night-time⁻¹ for RF, NVF, and UF, respectively, the absolute values were considered not to be reliable because of the high rates of discarded data in the night-time datasets (46%, 39%, and 33% for RF, NVF, and UF, respectively). To compare the evapotranspiration between RF and NVF, instrumental difference of evapotranspiration between the two sites was considered by offsetting evapotranspiration in RF; that is, the relationship of λE between RF and NVF during the period in which the surface conditions were the same (September 2008 to November 2008 and March 2009) was obtained, and the relationship was applied to offset the λE in RF for the whole period of analysis.

Determination of energy and surface characteristics

Surface conditions were evaluated by calculating the bulk transfer coefficients. The bulk transfer method explains λE and H using the equations (Kondo and Watanabe, 1992)

$$H = c_p \rho_a C_H U (T_s - T_a) \quad (9)$$

$$\lambda E = \lambda \rho_a C_E U (q_s - q_a) \quad (10)$$

where ρ_a is the air density (kg m⁻³), q_s is the specific humidity at the surface (kg kg⁻¹), q_a and U are the specific humidity and wind speed, respectively, and C_H and C_E are bulk transfer coefficients for sensible heat and latent heat, respectively. C_H and C_E reflect the exchange efficiency that is affected by physical characteristics such as wind speed and surface conditions. When the surface is wet enough, C_H is assumed to be equal to C_E , and q_s can be replaced by the saturation-specific humidity ($q_{\text{sat}}(T_s)$, kg kg⁻¹) at the surface temperature (T_s). The introduction of $q_{\text{sat}}(T_s)$ and evaporation efficiency (β), which reflects moisture availability, into Equation (10) creates the following equation:

$$\lambda E = \lambda \rho_a \beta C_E U [q_{\text{sat}}(T_s) - q_a] \quad (11)$$

When the surface is covered with water or is wet enough, β reaches unity and then varies depending on the moisture availability of the surface and vegetation. Although C_E sometimes includes the effects of moisture availability in its definition (Shimoyama *et al.*, 2004), the C_E in this study is defined to be equal to C_H .

The values of C_E and β were calculated for the period in which U was measured. The value of T_s was directly measured by the PRTs at the three heights. When surface

water was absent, T_s was the temperature measured by the PRT at 0.00 m, and when the surface water was present, T_s was the temperature measured by the PRT closest to the water surface. Direct measurement of T_s in the plant canopy is generally difficult because of the vertical gradient of T_s caused by the presence of plant bodies (Kondo and Watanabe, 1992). In this study, however, plants grew sparsely enough so that the effects of plant bodies on T_s were assumed to be negligible.

RESULTS AND DISCUSSION

Meteorological variables

Figure 3 shows the daytime means and the 10-day moving averages of net radiation (R_n), albedo, air temperature (T_a), and vapour pressure deficit (VPD) for each site. R_n had a clear seasonal variation with higher values during the wet season (November to May) and lower values during the dry season. Peaks in T_a and VPD occurred at the end of the dry season (around October). VPD declined when rainfall was delivered and increased again when rainfall stopped. T_a and R_n decreased from May and had minimum values from June to July. Mean daytime T_a and VPD for the whole period did not differ largely among the three sites and were about 26.8 °C and 24.6 hPa, respectively (Table II). The daytime VPD during the wet season was relatively high (21 hPa), which indicates that atmospheric conditions in northern Namibia remain dry throughout the year. Mean daytime R_n for the whole observation period in RF and NVF was higher than that in UF probably because the surface water in RF and NVF decreased albedo during the wet season. (Figure 3, Table II). In addition, R_n in RF was slightly lower than that in NVF during both the dry and wet seasons, resulting from the higher albedo in RF (Figure 3 and Table II). Albedo in RF was possibly affected by rice-cropping activities such as tillage in the beginning of the wet season and harvesting in the end of the wet season, which expose bare land surfaces and reflect more solar radiation than grassland, by mixing plant bodies with soil or by removing most of the plant shoots from the field. Annual rainfall (from September to August) during the observation period was 697 mm in 2008/2009, 643 mm in 2009/2010, and 1109 mm in 2010/2011. All three years received much heavier annual rainfall compared with the mean annual rainfall (440 mm) from 2001 to 2008 and thus are considered to be wet years.

Seasonal and interannual variations in evapotranspiration

Although evapotranspiration measured using BREB can be negatively biased on the basis of the assumption of BREB as noted earlier, German (2000) empirically

EFFECTS OF RICE INTRODUCTION ON EVAPOTRANSPIRATION

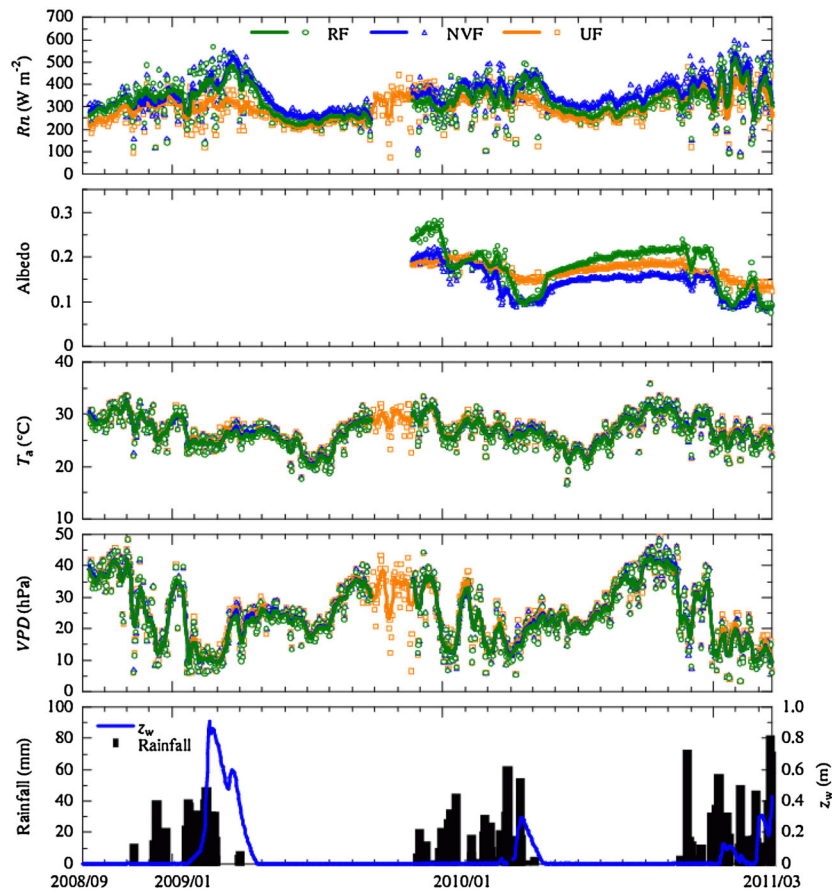


Figure 3. Seasonal variations in net radiation (R_n), albedo, air temperature (T_a), and vapour pressure deficit (VPD) at each site. Daily rainfall and surface water level (z_w) in rice field (RF) and natural vegetation field (NVF) are also shown. Green shows the data for the RF, blue for the NVF, and orange for the upland field (UF). Open points indicate daytime mean values, and solid lines denote the 10-day moving average

Table II. Daytime mean values of net radiation (R_n), air temperature (T_a), vapour pressure deficit (VPD), albedo, and daytime evapotranspiration (ET_{obs}) for the rice field (RF), natural vegetation field (NVF), and upland field (UF) during the whole observation period, wet season (November to May), and dry season (June to October)

Season	Site	R_n ($W m^{-2}$)	T_a ($^{\circ}C$)	VPD (hPa)	Albedo	ET_{obs} ($mm\ day^{-1}$)
Whole	RF	323.3 ± 80.4	26.6 ± 3.0	24.1 ± 9.9	0.18 ± 0.05	1.9 ± 1.7
	NVF	346.6 ± 80.4	26.8 ± 3.0	24.5 ± 9.9	0.15 ± 0.03	1.8 ± 1.5
	UF	296.8 ± 66.2	27.0 ± 2.9	25.2 ± 9.8	0.17 ± 0.02	1.0 ± 0.7
Wet	RF	352.4 ± 84.6	26.8 ± 2.4	20.8 ± 9.2	0.17 ± 0.05	2.8 ± 1.6
	NVF	372.0 ± 87.0	27.0 ± 2.4	21.1 ± 9.3	0.14 ± 0.04	2.5 ± 1.5
	UF	318.6 ± 68.7	27.2 ± 2.3	21.9 ± 9.2	0.17 ± 0.02	1.3 ± 0.7
Dry	RF	273.9 ± 37.7	26.2 ± 3.8	29.7 ± 8.4	0.20 ± 0.01	0.6 ± 0.3
	NVF	304.0 ± 41.2	26.4 ± 3.8	30.1 ± 8.4	0.15 ± 0.01	0.7 ± 0.3
	UF	262.4 ± 43.9	26.7 ± 3.7	30.4 ± 8.2	0.18 ± 0.01	0.4 ± 0.2

Values are means \pm standard deviation.

supported that latent heat flux measured by BREB was comparable with that measured by the eddy correlation method through simultaneous measurements of evapotranspiration in a sawgrass wetland. Actual observed evapotranspiration was, thus, used for discussion in this study.

Annual cumulative evapotranspiration (ET_{obs}) in UF was stable across the observation years (325.9 and 324.3 mm in 2008/2009 and in 2009/2010, respectively) (Figure 4a). The daytime ET_{obs} in UF started increasing when rainfall arrived, peaking from December to

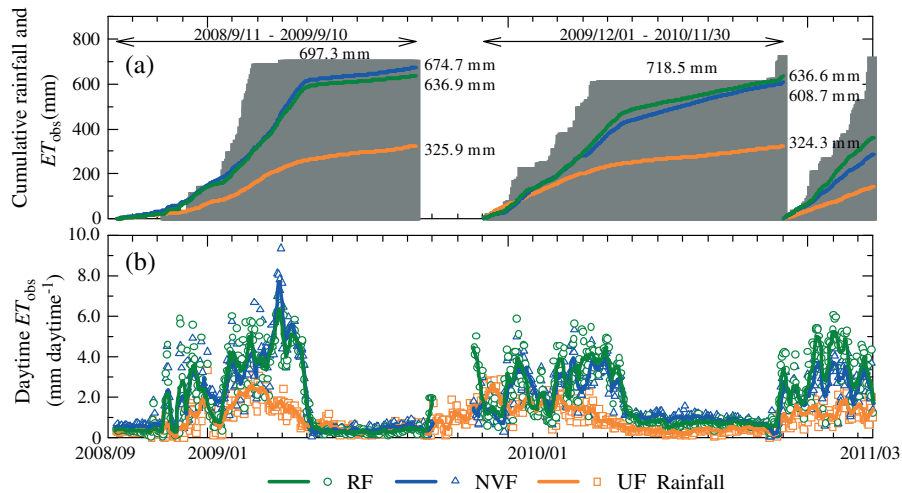


Figure 4. (a) Cumulative evapotranspiration (ET_{obs}) and rainfall and (b) seasonal variations in daytime observed evapotranspiration (ET_{obs}) at each site. Arrows indicate the calculation period for the cumulative values. The numbers next to lines or bars indicate the cumulative amount. RF, rice field; NVF, natural vegetation field; UF, upland field

February (Figure 4b). Daytime ET_{obs} in UF ranged from 0 to 3.4 mm day⁻¹. Daytime mean was 1.3 ± 0.7 mm day⁻¹ during the wet season and 1.0 ± 0.7 mm day⁻¹ for the whole observation period (Table II). Evapotranspiration from shrub and grassland areas in other semi-arid regions is reported to range from 0.5 to 4.0 mm day⁻¹ (Kurc and Small, 2004), which was consistent with ET_{obs} in UF. Additionally, mean ET_{obs} for the whole observation period was similar to the evapotranspiration measured in upland shrub and grassland in Niger (0.95 mm day⁻¹, Ramier *et al.*, 2009), which is a semi-arid country in Africa similar to Namibia.

Annual cumulative ET_{obs} was 636.9 mm in 2008/2009 and 636.6 mm in 2009/2010 in RF and 674.7 mm in 2008/2009 and 608.7 mm in 2009/2010 in NVF (Figure 4a). The annual cumulative ET_{obs} at both sites was much higher than that at UF. In addition, a higher annual cumulative ET_{obs} was observed in NVF than in RF in 2008/2009 with the opposite relationship observed in 2009/2010. Annual cumulative ET_{obs} in NVF was higher in 2008/2009 than in 2009/2010 probably because open-water conditions in March 2009 promoted ET_{obs} (Figure 4b).

ET_{obs} in RF and NVF had a clear seasonal variation ranging from 0.1 to 7.0 mm day⁻¹ in RF and from 0.1 to 9.4 mm day⁻¹ in NVF (Figure 4b). Ranges of ET_{obs} in RF and NVF were close to the ranges reported in reed wetland or cattail delta marsh in other semi-arid regions (Table III). Large seasonal variation in the seasonal wetlands of Namibia was possibly caused by the large environmental differences between dry and wet seasons; i.e. absence of surface water and less active vegetation in the dry season and the presence of surface water and a high Rn in the wet season. In addition, wetlands in semi-arid regions tend to have high

evapotranspiration (Table III), affected by wind speed and advection of dry air (Drexler *et al.*, 2008). High ET_{obs} in this study was also possibly affected by advection with a relatively high VPD .

Mean daytime ET_{obs} for the wet season was 2.8 ± 1.6 mm day⁻¹ in RF and 2.5 ± 1.5 mm day⁻¹ in NVF. For the whole observation period, mean daytime ET_{obs} was 1.9 ± 1.7 mm day⁻¹ in RF and 1.8 ± 1.5 mm day⁻¹ in NVF (Table II). Mean ET_{obs} in NVF in the wet season was similar to that at a papyrus wetland in Kenya and lower than that at a reed wetland in Nebraska, USA (Table III). Evapotranspiration from a reed wetland has been reported to be relatively high compared with that from grassland (Acreman *et al.*, 2003). Mean ET_{obs} in RF for the wet season was lower than those in paddy fields in Asian countries, where intensive high-yielding rice cropping has been developed (Table III). Differences in rice cropping methods may have caused this as RF had no irrigation system and rice grew sparsely, resulting in a much smaller LAI than in other cited studies. However, the obtained rice yield in RF in 2009/2010 was 1.27 t ha⁻¹ and was in the typical range of rice yield in Africa of 0.91–2.20 t ha⁻¹ (Africa Rice Center, 2007). The mean ET_{obs} in RF can perhaps provide a reference value, representing an evapotranspiration rate in a typical extensive paddy field in Africa.

Annual cumulative ET_{obs} in NVF in 2008/2009 (674.7 mm) was matchable with annual cumulative rainfall (697.3 mm) (Figure 4a). Even in 2009/2010, the annual cumulative ET_{obs} was close to annual cumulative rainfall if heavy rainfall (71.5 mm) delivered on 26 November 2010 was excluded. These results indicate that evapotranspiration is a major component in the water cycle of seasonal wetlands.

Table III. Evapotranspiration rates for different wetland types and paddy fields in various regions

Surface type	Site	Climate	Evapotranspiration (mm day^{-1})		Source
			Mean	Range	
Sedge fen	Central Canada	Subarctic	3.09 ^a	1.4–6.0	Lafleur, 1990
Open sphagnum fen	Minnesota, USA	Continental	3.0 ^a	0.2–4.8	Kim and Verma, 1996
Delta marsh	California, USA	Semi-arid	6.0 ^a	0.8–12.2	Drexler <i>et al.</i> , 2008
		Mediterranean			
Floodplain wetland	Central Spain	Semi-arid	8.0	0–19.6	Sanchez-Carrillo <i>et al.</i> , 2004
Papyrus wetland	Kenya	Equatorial	2.4 ^a	NA	Jones and Humphries, 2002
Reed wetland	Nebraska, USA	Semi-arid	3.75 ^a	0.5–6.5	Burba <i>et al.</i> , 1999
Paddy field	The Philippines	Warm humid tropics	4.29 ^a	NA	Alberto <i>et al.</i> , 2011
Paddy field	Bangladesh	Tropical monsoon	3.33 ^a	0.2–6.6	Hossen <i>et al.</i> , 2012
Paddy field	Thailand	Maritime monsoon	7.11 ^a	NA	Jensen and Rahman, 1987

NA, not available.

^a Mean value of growth season.

Comparison of evapotranspiration characteristics between RF and NVF

During the wet season, seasonal variations in ET_{obs} in RF and NVF were almost identical in 2008/2009 and slightly higher in RF from March to April in 2010 (Figure 4b). In January to February, 2011, ET_{obs} in RF was higher than that in NVF. ET_{obs} in RF tended to be higher in the early growth period of rice. Figure 5

shows the seasonal variations in the evaporation efficiency (β), the bulk transfer coefficient for latent heat (C_E), and the saturation-specific humidity ($q_{\text{sat}}(T_s)$) at the surface temperature (T_s). The β in RF was clearly higher than in that in NVF for the period of January to February 2011, in which the ET_{obs} in RF was higher than that in NVF; in the same period, C_E was higher in NVF. The $q_{\text{sat}}(T_s)$ was similar between the two sites probably

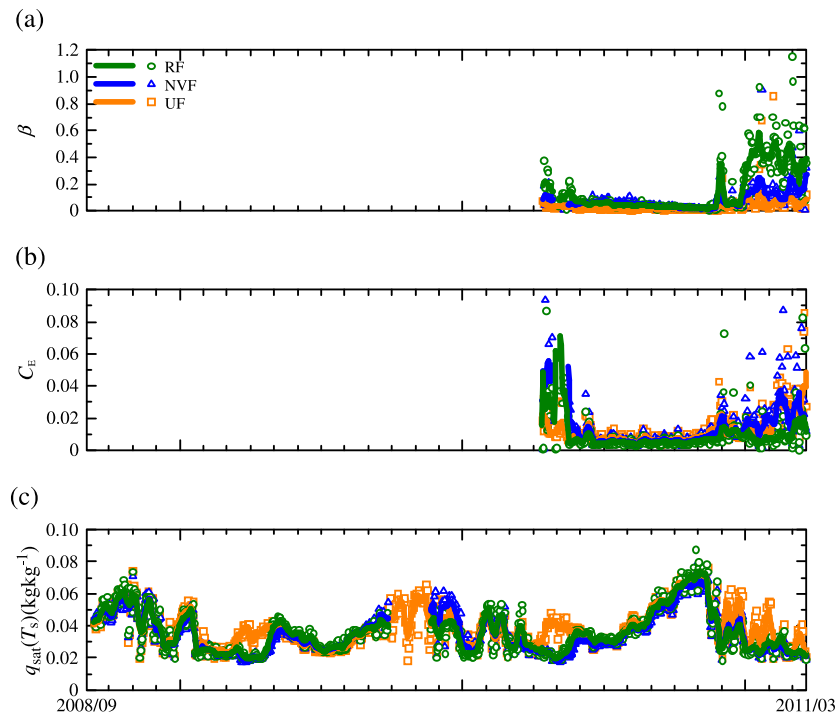


Figure 5. Seasonal variations in (a) evaporation efficiency (β), (b) bulk transfer coefficient for latent heat (C_E), and (c) saturation-specific humidity at the surface temperature ($q_{\text{sat}}(T_s)$). RF, rice field; NVF, natural vegetation field; UF, upland field

because the surface was covered with water during that period. These results show that the difference in ET_{obs} between RF and NVF is attributed to β and C_E . Higher β in RF in January to February 2011 suggests that the ET_{obs} in RF was promoted by surface conditions compared with that in NVF.

During the dry season, ET_{obs} in RF was smaller than that in NVF, particularly in June to September 2010 (Figure 4b). In this period, R_n in RF was less than that in NVF, albedo was higher at RF, and β and C_E were similar at the two sites (Figures 3 and 5 and Table II). During the dry season, albedo was higher and R_n was less in RF because the field became bare land after rice harvesting. The difference in the available energy explains the difference of ET_{obs} between RF and NVF during the dry season.

Determinants of β and C_E

The ET_{obs} in RF differed from that in NVF especially in the early growth period of rice, and that difference was attributed to the values of β and C_E . Previous studies considered β to be a function of soil water content (Barton, 1979; Dekić *et al.*, 1995; Alvenäs and Jansson, 1997). Kondo *et al.* (1990) additionally included the effects of air humidity on the function of β . If a surface is covered with vegetation, β should also include the effects of leaf

surface resistance and stomatal resistance. The value of β is, therefore, controlled by various elements such as soil moisture availability, atmospheric requirements, and plant physical and physiological characteristics including LAI .

Canopy conductance (G_c) has been extensively studied and is similar in concept to β , being associated with various environmental variables (e.g. Stewart, 1988; Matsumoto *et al.*, 2008). Figure 6(a, b) shows the relationship between β and VPD at each site. The value of β had a similar relationship with VPD for all sites, especially for the period in which the surface water was absent. The relationship between β and VPD was well fit by the equation that was introduced to explain G_c and VPD (Matsumoto *et al.*, 2008),

$$\beta_{\text{dry}} = \left[\frac{1}{1 + (VPD/VPD_{05})^{k_{\beta-1}}} \right] (1 - k_{\beta-2}) + k_{\beta-2} \quad (12)$$

where β_{dry} is predicted β for the period without surface water, VPD_{05} is the VPD when β_{dry} reaches the midpoint between 1 and $k_{\beta-2}$, and $k_{\beta-1}$ and $k_{\beta-2}$ are fitting parameters. The datasets of RF and NVF were combined for calculating fitting parameters as a lowland (LF) dataset because the relationship of β with VPD was similar between the two sites. Although previous studies

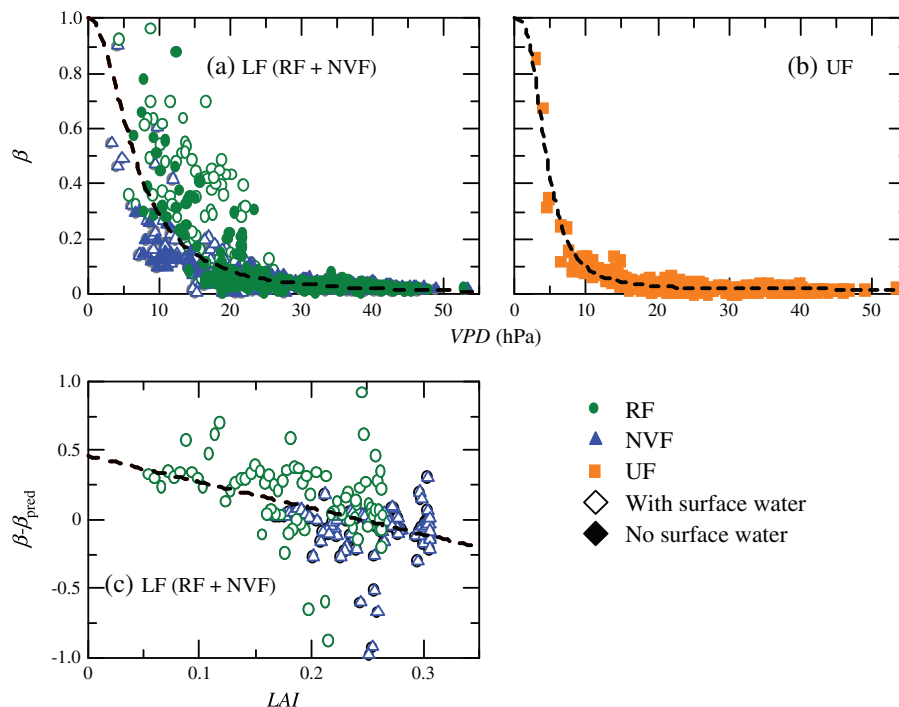


Figure 6. Relationship between evaporation efficiency (β) and vapour pressure deficit (VPD) for (a) rice field (RF) and natural vegetation field (NVF) and (b) upland field (UF). (c) Relationship between leaf area index (LAI) and the difference in β , $\beta - \beta_{\text{pred}}$ during the period in which surface water is present. The data for RF and NVF are shown in the same figure as the lowland field (LF) dataset. (a, b) β is fit to Equation (12) using the LF and UF datasets. The data shown by open points were taken when surface water was present, and those represented by closed points were taken when surface water was absent

reported a correlation between β and soil water content, β in this study was highly correlated with VPD possibly because VPD also included the effects of soil water content. VPD actually showed a negative relationship with volumetric soil water content measured in UF ($r = -0.641$, $p < 0.001$, data not shown).

The relationship between β and VPD was relatively scattered for the period in which the surface water was present (Figure 6a), and this variability was negatively correlated with LAI . Figure 6c shows the relationship between LAI and the difference between β_{dry} and β for the period in which the surface water was present. The difference between β_{dry} and β was fit against LAI with a negative straight line

$$\beta - \beta_{dry} = k_{\beta-3}LAI + k_{\beta-4} \quad (13)$$

where $k_{\beta-3}$ and $k_{\beta-4}$ are fitting parameters. From Equations (12) and (13), the β submodel was described as

$$\begin{aligned} \beta_{pred} &= \beta_{dry} & (\text{without surface water}) \\ \beta_{pred} &= \beta_{dry} + k_{\beta-3}LAI + k_{\beta-4} & (\text{without surface water}) \end{aligned} \quad (14)$$

where β_{pred} is predicted β . This submodel indicates that a decrease in LAI results in a larger β when the surface

water is present. Watanabe (1994), by applying a multilayer model to a paddy field, estimated that β increases when LAI decreases. In this study site, β was mainly controlled by VPD , especially in the period in which surface water was absent, and LAI was also a key controlling factor when the surface water was present (Figure 6).

Figure 7 shows the relationship of C_E with U and LAI . The value of C_E tends to be stable when $U > 2 \text{ m s}^{-1}$, with values of approximately 0.0059 in RF, 0.0082 in NVF, and 0.0072 in UF (reference height of 2.85 m). These values are greater than the values for open-water (0.0013–0.0017) and soil surface (0.0015–0.0030) with a reference height of 2.5 m (Kondo, 1994), and rather close to the value for paddy fields (0.0020–0.0055) with a reference height of 10 m (Kimura and Kondo, 1998). The value of C_E depends on the reference height. Rough estimations of C_E in this study for other reference heights also showed that the values of C_E were close to previously reported values for paddy fields, indicating that the sites had larger exchange efficiency than flat surfaces such as water and soil.

The plots in the Figure 7(a, b) were scattered when $U < 2 \text{ m s}^{-1}$, and those values tended to increase with LAI (Figure 7(c, d)). This positive correlation between C_E and LAI was also reported in previous studies (Watanabe, 1994; Shimoyama *et al.*, 2004). C_E depends on the

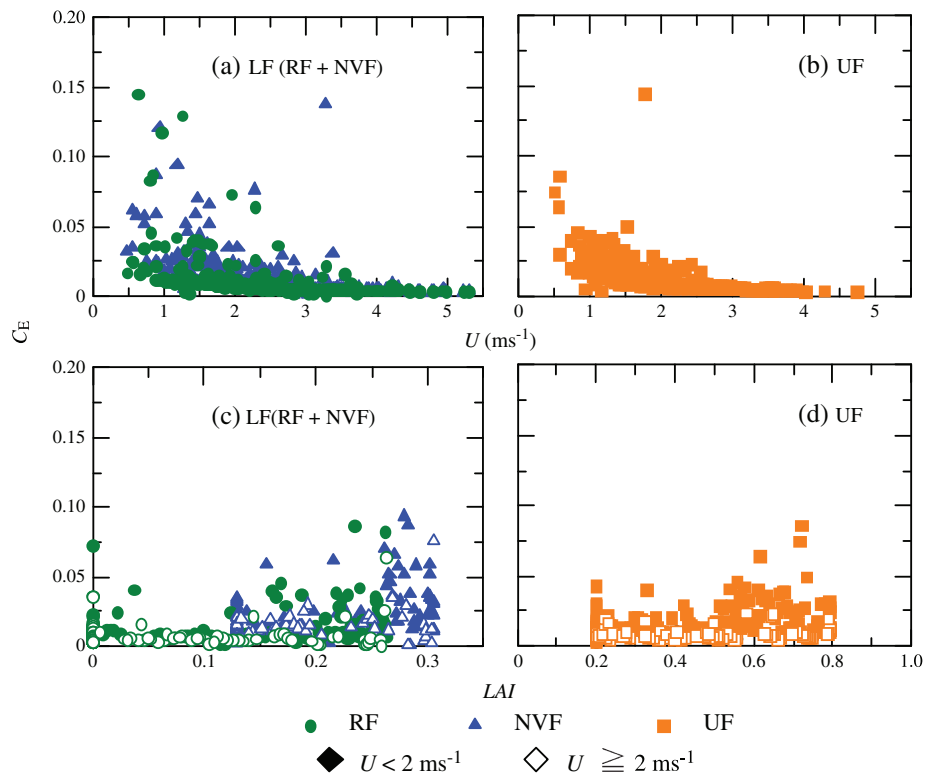


Figure 7. Relationship between bulk transfer coefficient for latent heat (C_E) and (a, b) wind speed (U) or (c, d) leaf area index (LAI) for lowland field (LF) [rice field (RF) and natural vegetation field (NVF)] and upland field (UF). (c, d) Open points indicate data with $U \geq 2 \text{ m s}^{-1}$ and closed points with $U < 2 \text{ m s}^{-1}$.

surface roughness that is related with LAI (Shimoyama *et al.*, 2004). Although Yan *et al.* (2012) fit C_E using only the plant area index (PAI), C_E was fit in this study using both U and LAI to consider the difference in the variability of C_E depending on U . The dataset was separated into two groups with a threshold of $U = 2 \text{ m s}^{-1}$. Multiple regression analysis was performed for each group to predict C_E ($C_{E\text{pred}}$),

$$C_{E\text{pred}} = k_{C_E-1}U + k_{C_E-2}LAI + k_{C_E-3} \quad (15)$$

where k_{C_E-1} , k_{C_E-2} , and k_{C_E-3} are fitting parameters. All the values of the fitting parameters are shown in Table IV.

Sensitivity of evapotranspiration to LAI

The sensitivity of evapotranspiration to the change in LAI was analysed to quantitatively evaluate the effects of LAI on evapotranspiration at the study sites because the introduction of rice substantially alters LAI . The model

was established on the basis of the relationships of C_E and β with U , LAI , and VPD as described earlier. The correlation coefficients between ET_{obs} and predicted evapotranspiration (ET_{pred}) by the model were 0.612, 0.459, and 0.120 for RF, NVF, and UF, respectively. The model has a certain margin of estimation error, possibly because it used the predicted U and LAI . However, Figure 8 shows that the model could explain the seasonal variations, and thus, the model was still applicable for the sensitivity analysis. The mean value was obtained for the sensitivity analysis in a selected month such as January and April for the wet season and October for the dry season (Table V).

Figure 9 indicates the sensitivity of evapotranspiration to change in LAI for LF (RF + NVF) and UF. Change in evapotranspiration was simulated by only changing LAI under average conditions of each month (Table V). In UF, evapotranspiration tended to positively respond to the change in LAI for the whole observation period, and the

Table IV. Fitting parameters and correlation coefficients of sub-models for evaporation efficiency (β) and the bulk transfer coefficient for latent heat (C_E)

Dataset	U (m s^{-1})	Fitting parameter								Correlation coefficient (r)	
		VPD_{05}	$k_{\beta-1}$	$k_{\beta-2}$	$k_{\beta-3}$	$k_{\beta-4}$	k_{C_E-1}	k_{C_E-2}	k_{C_E-3}	β	C_E
LF (RF + NVF)	<2	6.597	2.125	0.000	-1.893	0.461	-0.014	0.053	0.032	0.810	0.643
	≥ 2						-0.002	0.024	0.012		
UF	<2	4.356	3.012	0.018	—	—	-0.019	0.008	0.042	0.954	0.735
	≥ 2						-0.003	0.005	0.013		

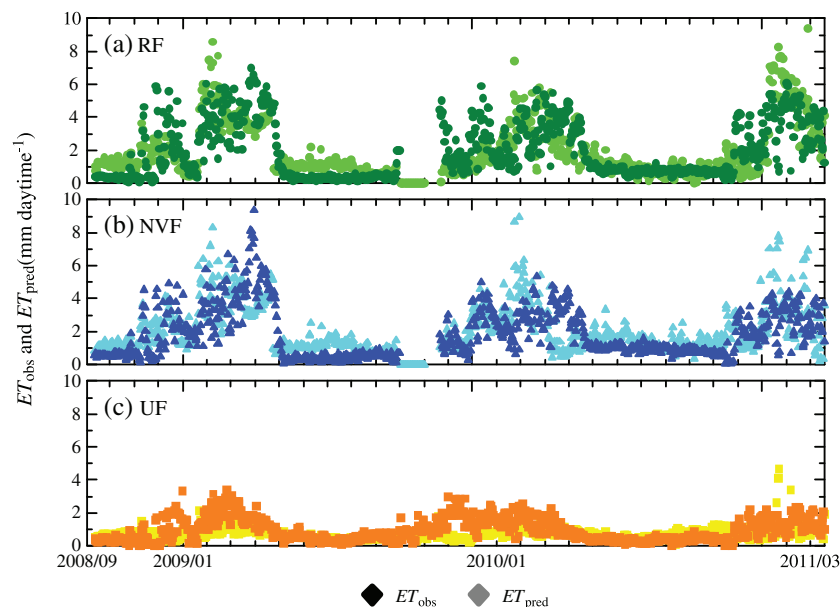


Figure 8. Seasonal variations in observed (ET_{obs}) and predicted evapotranspiration (ET_{pred}) at each site. Darker points indicate ET_{obs} , and lighter points indicate ET_{pred} . RF, rice field; NVF, natural vegetation field; UF, upland field

Table V. Mean value of each parameter used for the sensitivity analysis

Dataset	Month	U (m s^{-1})	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	q (kg kg^{-1})	z_w (m)	LAI
LF	Jan	1.9	29.2	25.3	0.011	0.07	0.14
	Apr	1.8	26.8	26.5	0.010	0.23	0.25
	Oct	2.8	46.5	31.2	0.003	0.00	0.07
UF	Jan	1.7	34.1	25.7	0.011	0.00	0.39
	Apr	1.5	36.8	26.8	0.010	0.00	0.79
	Oct	2.2	46.5	31.2	0.003	0.00	0.20

LF, lowland field; UF, upland field.

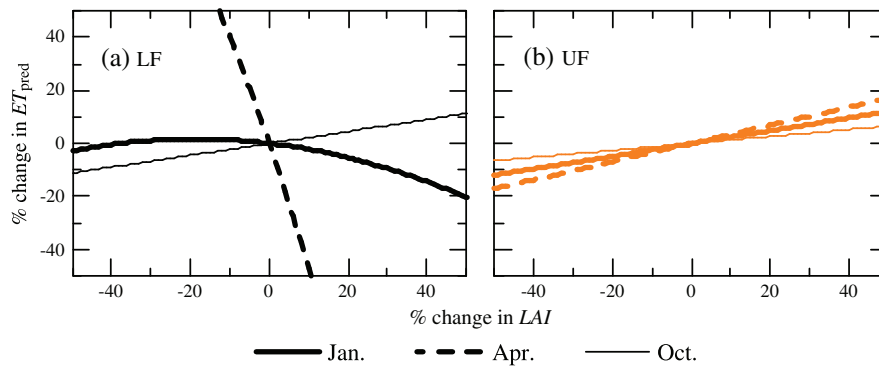


Figure 9. Predicted change in evapotranspiration (%) with change in leaf area index (LAI) (%) for (a) lowland field (LF) and (b) upland field (UF). The mean values used for the analysis are shown in Table V

effect of LAI did not change largely across the seasons. On the other hand, the response of evapotranspiration to change in LAI in LF was more substantial compared with that in UF and varied across the seasons. Under the conditions of October, evapotranspiration in LF positively responded to change in LAI , as seen in UF. Under the conditions of April, however, the evapotranspiration sharply negatively responded to change in LAI . Under the conditions of January, the evapotranspiration was predicted to have maximal value by the change in LAI . Smaller LAI (close to zero) caused both larger β and smaller C_E over the surface, and the balance of these two factors probably resulted in maximal evapotranspiration.

When surface water was present in the seasonal wetlands, higher LAI decreased the open-water area, probably resulting in the suppression of evaporation. Linacre's theory suggests that an increase of emergent macrophyte cover causes a reduction of water loss by evapotranspiration (Linacre, 1976). In some previous studies, the presence of plant resulted in less evapotranspiration compared with open water (Jones and Humphries, 2002; Sánchez-Carrillo *et al.*, 2004). However, the question of whether the presence of emergent aquatic vegetation increases or decreases evapotranspira-

tion has been a topic of debate for decades (Idso and Anderson, 1988). In other studies, evapotranspiration was reported to increase by the presence of plant (e.g. Saunders *et al.*, 2007; Doody and Benyon, 2011). In this study, the sensitivity analysis showed that change in LAI could negatively affect evapotranspiration, suggesting that higher LAI could result in less evapotranspiration. In RF, LAI largely varied from 0 to around 0.3 depending on the rice growth, and this variation was larger than that in NVF. Therefore, LAI management is a key factor in growing rice and possibly conserving water in seasonal wetlands.

The range of LAI in this analysis was limited to small values because the LAI in RF and NVF reached only around 0.35. The LAI in paddy fields can reach up to 6.0 depending on the cultivation method (Jensen and Rahman, 1987; Alberto *et al.*, 2011). When the LAI increases, β might eventually increase (Watanabe, 1994). In addition, increasing LAI might decrease C_E by creating more closed canopy (Kondo and Watanabe, 1992). The effects of high LAI on evapotranspiration are still unknown in the seasonal wetlands. Even in northern Namibia, rice cultivation may result in a high LAI . Further studies are recommended to investigate the effects of a higher LAI on evapotranspiration.

CONCLUSIONS

This study yielded the following conclusions:

- The ET_{obs} values in RF and NVF were much higher than that in UF and largely increased when surface water was present. The annual cumulative ET_{obs} in NVF during the observation period, which was considered to be in wet years, approximately equalled to or exceeded the average annual rainfall conditions. Evapotranspiration was, therefore, an important and major component in the regional water cycle.
- The difference in ET_{obs} between RF and NVF was attributed to the differences in the values of β and C_E . In addition, β and C_E are both affected by LAI . A decrease in LAI resulted in an increase in β and consequently increased ET_{obs} when surface water was present.
- The introduction of rice cropping into the seasonal wetlands resulted in a change in ET_{obs} in both the dry and wet seasons in different manners:
 - During the wet season, the low LAI in RF in the early growth period increased β , and consequently higher ET_{obs} was observed compared with that in NVF.
 - In the dry season, rice harvesting affected the ET_{obs} in RF. Land cleared bare by harvesting in RF had higher albedo and lower net radiation (R_n) compared with that in NVF. As a result, the ET_{obs} in RF was lower than that in NVF.
- Sensitivity analysis showed that evapotranspiration in the seasonal wetlands sharply negatively responded to change in LAI when the surface water was present, probably because increase of plant cover suppresses water surface evaporation.

In the seasonal wetlands, an appropriate rice cropping system might aid in conserving water resources. Creating a higher LAI in the early growth period of rice would reduce water consumption by suppressing surface evaporation. In addition, harvesting rice, which increases albedo and decreases the available energy for evapotranspiration, would reduce water consumption in the dry season.

ACKNOWLEDGEMENTS

Our deepest appreciation goes to the late Prof. Luke Kanyomeka for his support and contribution to this study. We also thank Dr. Yuichiro Fujioka (Kinki University) and Mr. Teofilus Lwiinga (University of Namibia) for their works on the measurements. This study was funded by a grant-in-aid (A-20255008) from the Japanese Society for the Promotion of Science and JST/JICA, SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development).

REFERENCES

- Acreman MC, Harding RJ, Lloyd CR, McNeil DD. 2003. Evaporation characteristics of wetlands: experience from a wet grassland and a reedbed using eddy correlation measurements. *Hydrology and Earth System Sciences* **7**: 11–21.
- Africa Rice Center (WARDA). 2007. Africa Rice Trends: Overview of Recent Developments in the sub-Saharan African Rice Sector. Africa Rice Center Brief: Cotonou, Benin: Africa Rice Center (WARDA).
- Alberto MCR, Wassmann R, Hirano T, Miyata A, Hatano R, Kumar A, Padre A, Amante M. 2011. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. *Agricultural Water Management* **98**: 1417–1430.
- Allen RG, Prueger JH, Hill RW. 1992. Evapotranspiration from isolated stands of hydrophytes: cattail and bulrush. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **35**: 1191–1198.
- Alvenäs G, Jansson P-E. 1997. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* **88**: 47–56.
- Awala S, Nanhapo P, Kanyomeka L, Sakagami J, Mwandemele O, Ipinge I, Izumi Y, Suzuki T, Iijima M. 2009. Potential for rice cultivation in seasonal wetlands and Zambezi river flood plains in Namibia. *Japanese Journal of Crop Science* **78**(Extra Issue 1): 10–11.
- Awala SK, Nanhapo PI, Sakagami J, Kanyomeka L, Iijima M. 2010. Differential salinity tolerance among *Oryza glaberrima*, *Oryza sativa* and their interspecies including NERICA. *Plant Production Science* **13**: 3–10.
- Barton IJ. 1979. A parameterization of the evaporation from nonsaturated surfaces. *Journal of Applied Meteorology* **18**: 43–47.
- Bethune S, Amakali M, Roberts K. 2005. Review of Namibia legislation and policies pertinent to environmental flows. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**: 894–902.
- Bowen IS. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review* **27**: 779–787.
- Burba GG, Verma SB, Kim J. 1999. Surface energy fluxes of Phragmites australis in a prairie wetland. *Agricultural and Forest Meteorology* **94**: 31–51.
- Dekić L, Mihailović DT, Rajković B. 1995. A study of the sensitivity of bare soil evaporation schemes to soil surface wetness, using the coupled soil moisture and surface temperature prediction model, BARESOIL. *Meteorology and Atmospheric Physics* **55**: 101–112.
- Doody T, Benyon R. 2011. Quantifying water savings from willow removal in Australian streams. *Journal of Environmental Management* **92**: 926–935.
- Drexler JZ, Snyder RL, Spano D, Paw UKT. 2004. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes* **18**: 2071–2101.
- Drexler JZ, Anderson FE, Snyder RL. 2008. Evapotranspiration rates and crop coefficients for a restored marsh in the Sacramento–San Joaquin Delta, California, USA. *Hydrological Processes* **22**: 725–735.
- Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, Howard EA, Kucharik CJ, Monfreda C, Patz JA, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder PK. 2005. Global consequences of land use. *Science* **309**: 570–574.
- German ER. 2000. Regional evaluation of evapotranspiration in the Everglades. USGS Water-Resources Investigations Report 00-4217, Tallahassee, FL.
- Giambelluca TW, Nullet MA, Ziegler AD, Tran L. 2000. Latent and sensible energy flux over deforested land surfaces in the eastern Amazon and northern Thailand. *Singapore Journal of Tropical Geography* **21**: 107–130.
- Goulden ML, Litvak M, Miller SD. 2007. Factors that control *Typha* marsh evapotranspiration. *Aquatic Botany* **86**: 97–106.
- Hashimoto T. 2000. The radiative environment at the surface level. In *How to Investigate Local Climate* (in Japanese). Kokon-shoin: Tokyo, Japan; 110–123.
- Heyns P. 1991. Guidelines for the utilization of water resources and protection of wetlands in Namibia. *Madoqua* **17**: 249–251.
- Hossen MS, Mano M, Miyata A, Baten MA, Hiyama T. 2012. Surface energy partitioning and evapotranspiration over a double-cropping paddy field in Bangladesh. *Hydrological Processes* **26**: 1311–1320.
- Idso SB, Anderson MG. 1988. A comparison of two recent studies of transpirational water loss from emergent aquatic macrophytes. *Aquatic Botany* **31**: 191–195.

- International Water Management Institute (IWMI). 2010. Using wetlands sustainably. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 4p. (IWMI Water Issue Brief 1). doi:10.5337/2010.231.
- Jensen JR, Rahman MM. 1987. A semi-empirical model for calculating evaporation and transpiration from wetland rice. *Agricultural and Forest Meteorology* **41**: 289–306.
- Jones MB, Humphries SW. 2002. Impacts of the C₄ sedge *Cyperus papyrus* L. on carbon and water fluxes in an African wetland. *Hydrobiologia* **488**: 107–113.
- Kangombe FN, Strohbach BJ. 2008. Vegetation mapping and description of Ogongo Agricultural Farm and surrounds. *South African Journal of Botany* **74**(2): 387–388.
- Kim J, Verma SB. 1996. Surface exchange of water vapour between an open sphagnum fen and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology* **79**: 243–264.
- Kimura R, Kondo J. 1998. Heat balance model over a vegetated area and its application to a paddy field. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **76**: 937–953.
- Kondo J. 1994. Meteorology of the Water Environment – Water and Heat Balance of the Earth's Surface (in Japanese). Asakura Shoten: Tokyo, Japan.
- Kondo J, Watanabe T. 1992. Studies on the bulk transfer coefficients over a vegetated surface with a multilayer energy budget model. *Journal of the Atmospheric Sciences* **49**: 2183–2199.
- Kondo J, Saigusa N, Sato T. 1990. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces. *Journal of Applied Meteorology* **29**: 385–389.
- Kurc SA, Small EE. 2004. Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico. *Water Resources Research* **40**: W09305. doi: 10.1029/2004WR003068
- Lafleur PM. 1990. Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces. *Aquatic Botany* **37**: 341–353.
- Linacre ET. 1976. Swamp. In *Vegetation and the Atmosphere*. Academic Press: London; 329–347.
- Marshall CH, Pielke Sr. RA, Steyaert LT. 2003. Crop freezes and land-use change in Florida. *Nature* **426**: 29–30.
- Matsumoto K, Ohta T, Nakai T, Kuwada T, Daikoku K, Iida S, Yabuki H, Kononov AV, van der Molen MK, Kodama Y, Maximov TC, Dolman AJ, Hattori S. 2008. Responses of surface conductance to forest environments in the Far East. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**: 1926–1940.
- Mitsch WJ, Gosselink JG. 1993. Wetlands, 2nd edn. Van Nostrand Reinhold: New York, USA.
- Office of Technology Assessment (OTA). 1984. Wetlands: Their Use and Regulation. OTA, 0-206. US Congress: Washington, DC, USA.
- Perez PJ, Castellvi F, Ibañez M, Rosell JI. 1999. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* **97**: 141–150.
- Ramier D, Boulain N, Cappelaere B, Timouk F, Rabanit M, Lloyd CR, Boubkraoui S, Métayer F, Descroix L, Wawrzyniak V. 2009. Towards an understanding of coupled physical and biological processes in the cultivated Sahel—I. Energy and water. *Journal of Hydrology* **375**: 204–216.
- Sánchez-Carrillo S, Angeler DG, Sánchez-Andrés R, Alvarez-Cobelas M, Garatuzza-Payán J. 2004. Evapotranspiration in semi-arid wetlands: relationships between inundation and the macrophyte-cover: open-water ratio. *Advances in Water Resources* **27**: 643–655.
- Saunders MJ, Jones MB, Kansime F. 2007. Carbon and water cycles in tropical papyrus wetlands. *Wetlands Ecology and Management* **15**: 489–498.
- Shimoyama K, Hiyama T, Fukushima Y, Inoue G. 2004. Controls on evapotranspiration in a west Siberian bog. *Journal of Geophysical Research* **109**: D08111. doi: 10.1029/2003JD004114
- Souch C, Grimmond CSB, Wolfe CP. 1998. Evapotranspiration rates from wetlands with different disturbance histories: Indiana dunes national lakeshore. *Wetlands* **18**: 216–229.
- Stewart JB. 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **43**: 19–35.
- Sun L, Song C. 2008. Evapotranspiration from a freshwater marsh in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Journal of Hydrology* **352**: 202–210.
- Suzuki T, Hiyama T, Kanyomeka L, Mwandemele OD, Iijima M. 2009. Preliminary results on energy balance of seasonal wetland in northern Namibia toward the water use assessment to introduce rice cropping. In *Climate Change and Food Security Challenges in Sub-Saharan Africa: Current Agricultural Innovations, Proceedings of the 13th Agricultural Scientific Society of Namibia (AGRISSON) Congress*, 1–2 July, 2009, Namibia; 57–68.
- Suzuki T, Ohta T, Izumi Y, Kanyomeka L, Mwandemele O, Sakagami J, Yamane K, Iijima M. 2013. Role of canopy coverage in water use efficiency of lowland rice in early growth period in semi-arid region. *Plant Production Science* **16**: 12–23.
- UNESCO. 1971. Convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat. Ramsar (Iran), 2 February 1971. UN Treaty Series No. 14583. As Amended by the Paris Protocol, 3 December 1982, and Regina Amendments, 28 May 1987. Tech. Rep.
- Watanabe T. 1994. Meteorology of the Water Environment – Plants and the Atmosphere (in Japanese). Asakura Shoten: Tokyo, Japan.
- Yan H, Oue H, Zhang C. 2012. Predicting water surface evaporation in the paddy field by solving energy balance equation beneath the rice canopy. *Paddy and Water Environment* **10**: 121–127.
- Zhao X, Huang Y, Jia Z, Liu H, Song T, Wang Y, Shi L, Song C, Wang Y. 2008. Effects of the conversion of marshland to cropland on water energy exchanges in northeastern China. *Journal of Hydrology* **355**: 181–191.