

試錐ならびに¹⁴C年代よりみた アンコール遺跡東バライ貯水池跡の表層地下構造

塚脇真二¹・奥野 充²・大河原正文³・加藤道雄⁴・中村俊夫⁵

1:金沢大学工学部土木建設工学科

2:日本学術振興会特別研究員(名古屋大学)

3:岩手大学工学部建設環境工学科

4:金沢大学理学部地球学教室

5:名古屋大学年代測定資料研究センター

1. はじめに

熱帯モンスーン気候に属し、5月から11月までの雨季と12月から4月までの乾季とが明瞭に区別されるカンボジアでは、乾季期間中の生活・農業用水の確保ならびに雨季期間中の洪水対策、すなわち「水」の管理が社会生活の基本であり、そのため前アンコール時代(2世紀頃～802年)よりあらゆる対策が講じられてきた(石澤, 1996)。そして、このような水の管理が徹底的になされ、かつもっとも高度に発達したのが9世紀に始まるアンコール王朝の時代(802年～1431年頃)であったといえよう。同王朝初期には、まず現在のロリュオス地域に初の大貯水池インドラターカ(面積約304万m²)が建設され、この完成により同地域の農業生産は飛躍的な発展を遂げた(Groslier, 1958; 石澤, 1996)。さらに、同王朝は10世紀から13世紀初頭にかけて、現在のアンコール地域東部にヤショダラターカ(東バライ:面積約1,210万m²)、西部に最大の面積を誇る西バライ(面積約1,760万m²)、および北部にジャヤタータカ(面積約280万m²)の巨大貯水池を相次いで建設した。そして、乾季でも涸れることのないロリュオス川やシムリアブ川と、これら貯水池群や諸寺院の環壕などを水路網によって結合させることで高度に発達した水利灌漑網を構築し、乾季の干魃や雨季の洪水に対応したとされる(石澤, 1996)。また、これらの水利網は、河川群を通じてカンボジアの中央に位置するトンレサップ湖と連絡し、さらにトンレサップ川やメコン河に通じることで、国内各地はもとより国外とも連絡可能な重要な交通網としても機能した(石澤, 1996)。

このような巨大貯水池群は、いずれも平地に高さ3～5mほどの土砂を盛土築堤しただけの簡単な構造であったとされ、現在もその一部が貯水池として機能している西バライをのぞき、いずれも地表や空中写真などからその築堤跡が確認されるにすぎない。したがって、各貯水池それぞれの貯水量については、いずれも地表調査、空中写真ならびに衛星写真などによる築堤跡の追跡から求められた面積に、現存する築堤の高さを掛け合わせることで算出されており(石澤, 1996)、当時の貯水池の水底が貯水池周辺の地表面と同じであったという仮定にもとづいている。しかし、貯水池の築堤建設に必要な土砂を、貯水池内の地表面を掘り込むことで調達した可能性があることを考えると、アンコール王朝水利網の核となる巨大貯水池群の正確な実貯水量の算出に

あたっては、それぞれの貯水池のかつての水底の位置、すなわち正確な水深を試錐調査などで確認する必要がある。

これに加えて、アンコール王朝崩壊の一因として、水利灌漑網の長期的維持に必要となる水路や貯水池の浚渫および築堤の管理維持が不可能になった点が指摘され、衛星写真による貯水池築堤の崩壊跡などの確認にもとづき、河川などから流入する堆積物によって貯水池が徐々に埋積され、最終的には貯水池として機能しなくなったと推定されている(石澤, 1996)。したがって、貯水池跡での試錐調査から貯水池埋積堆積物の層序や堆積相を確認し、そこに年代値を挿入することで、貯水池の埋積過程の詳細や埋積完了年代などを解明できる可能性もある。

そこで本研究では、このような巨大貯水池のひとつである東バライ貯水池跡中央部での試錐調査結果ならびに試料の¹⁴C年代測定結果にもとづき、同貯水池の水底の確認を第一の目的として同跡の表層地下構造について検討した。東バライ貯水池(正式名「ヤショダラターカ」)は、ヤショヴァルマン1世(在位889~910?年)の治世である紀元900年ころに築かれたものである(石澤, 1996)。東西方向の長辺が7km、南北方向の短辺が1.8kmで、面積が1,210万m²におよぶこの巨大貯水池は、雨水の貯水ならびにシエムリアプ川の流水を一部引き込むことで、乾季で3,600万m³、雨季で6,000万m³の貯水量を維持し、この貯水によって6~7万haの農地が灌漑されたと推定されている(石澤, 1996)。

謝 辞:本研究は1997年11月16日放送の日本放送協会「NHKスペシャル:アンコールワット~知られざる水の帝国~」の番組制作の一環として実施されたものである。本研究を行うにあたり、日本放送協会番組制作局井上勝弘氏、同放送技術極堀内一路氏ならびに園部文明氏、およびPITトラベルカンボジア谷川茂氏には、円滑な調査研究の遂行にあたりさまざまな便宜を図っていただいた。上智大学外国語学部長石澤良昭教授には東バライ遺跡やアンコール水利都市説などについてご教示いただいた。石油技術研究所秋葉文雄博士には試料に含まれる微小生物遺骸群集をご検討のうえご意見をいただいた。農林水産省名古屋植物防疫所伏木支所金沢出張所ならびに同省神戸植物防疫所関西空港支所の植物防疫官諸氏には、試料の国内持ち込みにあたりご指導いただくとともに便宜をはかっていただいた。また、本調査にかかる諸費用については日本放送協会の後援を得た。以上の方々ならびに団体に対し感謝の意を表する。

2. 調査・研究方法

1997年8月30日および31日の両日、東バライ貯水池跡のほぼ中央を南北に走る道路に沿った3地点で試錐調査を行い、表層地下構造の概要ならびに試料の採集を行った(図1)。試錐にあたっては、まず5万分の1地形図ならびにGPSにもとづき正確な試錐位置を確認した。北部試錐地点(EB-N':N13°27'07", E103°55'07")は北側築堤の約100m南方に、中央部の試錐地点(EB-C:N13°26'39", E103°55'31")は東メボン遺跡の約20m南方に、そして南部試錐地点(EB-S:N13°26'25", E103°55'29")は南側築堤の約100m北方にそれぞれ位置する。試錐にあたっては、スパイラル刃先を取り付けた全長6mの手動式オーガーを使用し、いずれの地点でも道路縁

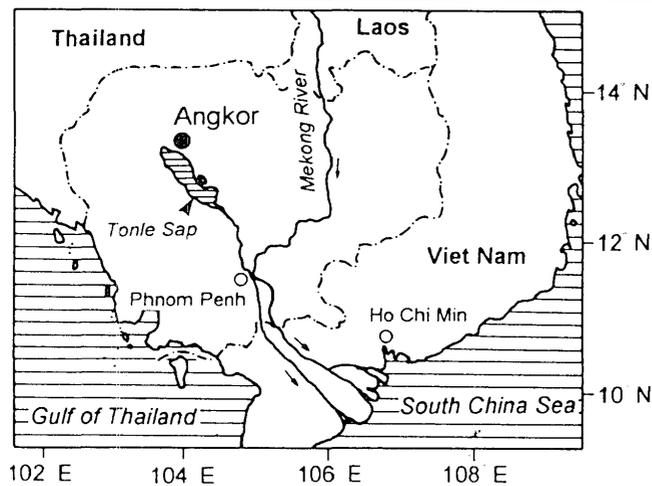
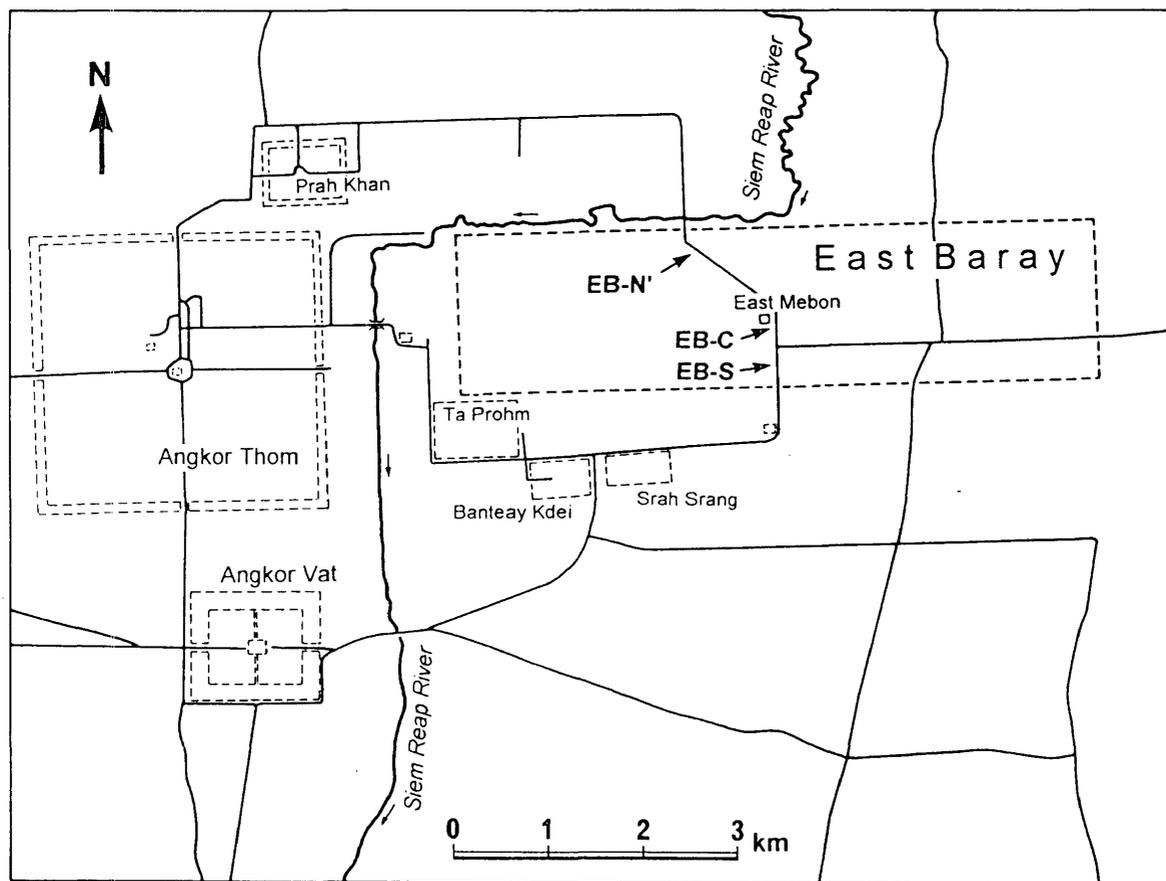


図1. カンボジア国内におけるアンコール地域の位置（下）ならびに東バライを中心とするアンコール地域北東部の概略（上）。点線は比較的大きな環壕をもつ主要クメール遺跡を示す。3カ所の試錐地点はそれぞれ矢印で示す。

Fig. 1. Locality of the Angkor district in central Cambodia (lower), and localities of the site of East Baray reservoir and main Khmer monuments having certain moat pondages in the northeastern part of the Angkor district (upper). Arrows indicate auger-drilling sites EB-N', EB-C and EB-S.

の盛土上から人力による最大掘削深度の約6mまで掘進するようつとめたが、軟弱地盤に達しそれ以深の掘進が困難となった場合にはその深度で掘進を中止した。試掘のさいには約20cm掘進するごとに刃先を回収し、堆積物の粒度組成、構成鉱物、色彩の概要や微小生物遺骸の有無を肉眼ならびに生物顕微鏡(400倍)で調べ、特徴的な岩相については試料を採集し微小生物遺骸群集組成ならびに粘土鉱物組成検討用試料、および¹⁴C年代測定用試料とした。試料の採集のさいには、汚染を避けるため刃先間の試料不攪乱部分より採取するようつとめた。

採集した試料は、入国直後に農林水産省神戸植物防疫所関西空港支所にて、オートクレーブによる120°C20分間の高圧殺菌を行い、その後放射性炭素年代測定用、微小生物遺骸群集ならびに粘土鉱物組成検討用に区分し、それぞれの解析を行った。なお、試料に含まれる微小生物遺骸組成ならびに粘土鉱物組成については現在検討中である。

3. 東バライ貯水池跡中央部の表層地下構造

東バライ貯水池跡中央部のいずれの試錐地点でも、道路に沿った盛土表面からの深度1m以内で地下水位面が検出され、これらの水位面は同跡内の低地では地表面上でも確認される。したがって、これらの地下水位面は同跡中央部において一連の地下水位面を形成するものと判断され、この地下水位面を基準面とし各試錐結果を対比したものを図2に示す。

同跡中央部の表層地下構造は道路沿いの盛土表面より、暗黄褐色含礫粘土質細粒砂層(盛土:層厚0.4~0.6m)、赤褐色粘土質細粒砂層(層厚0.2~0.6m)、黄褐色粘土質細粒砂層(層厚0.7~1.6m)、明灰色砂質粘土層(層厚1.1~1.8m)、黄灰色粘土質細粒砂層(層厚0.3~1.8m以上)および灰白色礫質細~粗粒砂層(層厚1.8m以上)におおまかに区分される。上位の盛土層ならびに赤褐色粘土質細粒砂層は中央試錐地点(EB-C)でもっとも厚く、南北地点では層厚を減ずるが、これらをのぞく諸層はいずれも南へ向かって層厚を増す傾向にあり、南側試錐(EB-S)では最下位の灰白色礫質細~粗粒砂が確認されない。

地表面から約80cm下位層準までの堆積物中には、現生植物の細根の侵入が認められる。最下位の礫質細~粗粒砂層を除き、砂はいずれの層準でも細~中粒の石英から構成され、わずかに赤褐色を呈するラテライト片が確認される。最下位の灰白色礫質細~粗粒砂に含まれる礫は、いずれもきわめてよく円磨されたチャートの細~小礫からなる。黄褐色粘土質細粒砂層ならびに明灰色砂質粘土層には、淡水生海綿の骨針が確認される(石油資源開発㈱ 秋葉文雄博士、私信)。また、北側地点(EB-N')の盛土表面より約210cm下の明灰色砂質粘土中、同じく約270cm下の黄灰色粘土質細粒砂中には、黒褐色を呈し層厚約5cmの鉄酸化物濃集層が挟在する。このような鉄酸化物濃集層は、東バライ貯水池跡西側築堤の西方約3kmに位置するバイヨン遺跡での試錐調査でも存在が確認されており(Tsukawaki and Murakami, 1996)、同貯水池跡地域における乾季期間中の地下水位の一時停滞面を示すものと推定される。

なお、最上位の暗黄褐色含礫粘土質細粒砂中には煉瓦片やビニール片などが認められ、近年における道路建設時の盛土層と断定される。

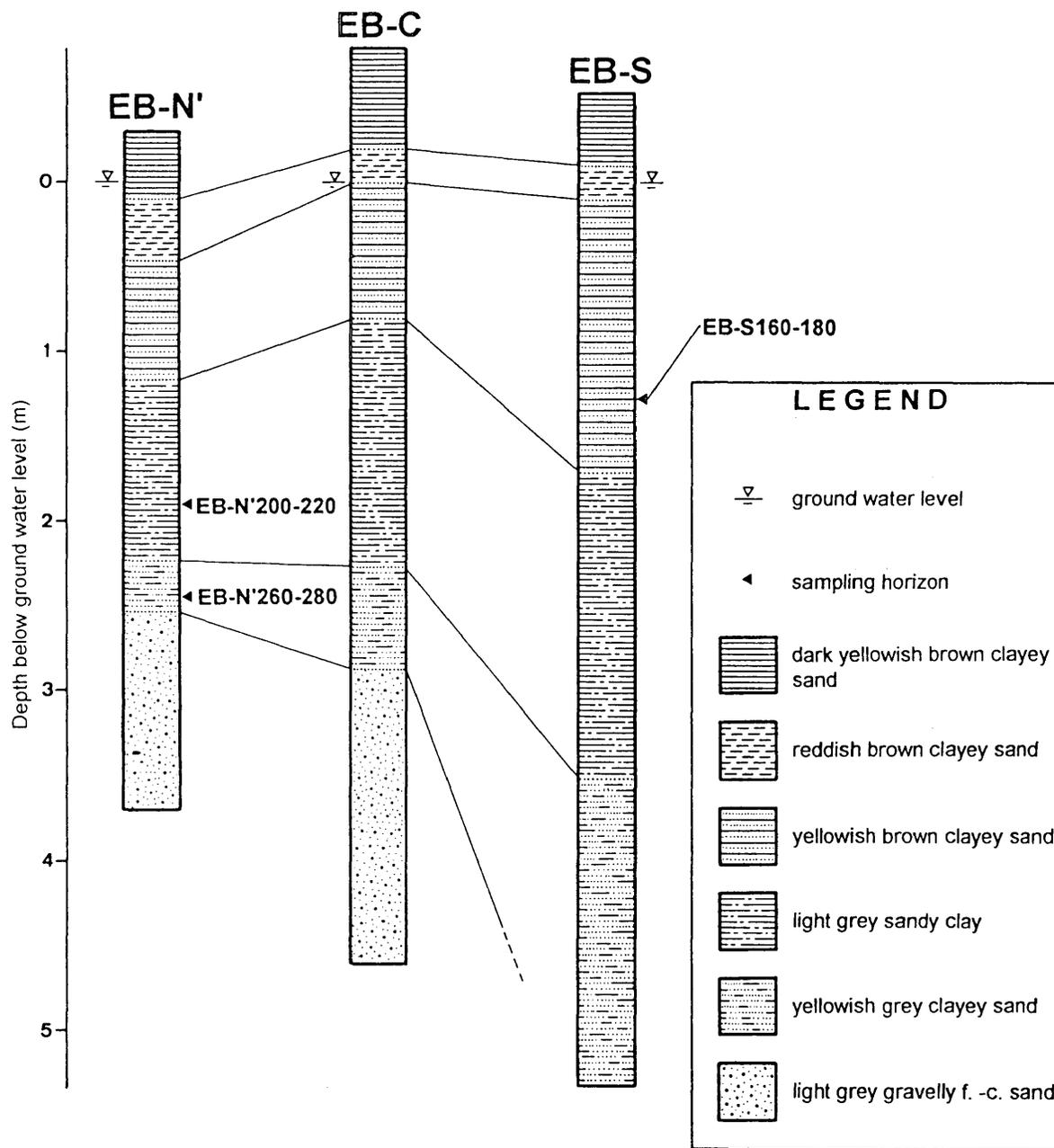


図2. 東バライ貯水池跡でのオーガー試錐にもとづく堆積物柱状図, ならびに試錐時の地下水位面を基準面とした各柱状図の対比.

Fig. 2. Results of auger-drillings in the central part of the East Baray reservoir, and correlations of the results on the basis of underground water level.

4. ^{14}C 年代の試料調製ならびに測定

今回の東バライ貯水池跡中央部での試錐から得られた堆積物試料3点について、 ^{14}C 年代測定を行った。測定した試料は北側の試錐EB-N'の2層準(灰白色砂質粘土層:EB-N'200-220, 黄灰色粘土質砂層:EB-N'260-280)ならびに南側の地点EB-Sの1層準(黄褐色粘土質砂層:EB-S160-180)である。

測定にあたっては、いずれの試料も蒸留水中で超音波洗浄して分散させ、開口径 $106\mu\text{m}$ のふるいを通したもののみを以下の作業に用いた。まず、 80°C 2時間の1.2規定塩酸処理を2回繰り返して炭酸塩などを融解除去し、続いて 80°C 1時間の1.2規定の水酸化ナトリウム溶液処理によりアルカリ可溶成分を除去した。さらに、 80°C 2時間の1.2規定塩酸処理を2回行ったうえで蒸留水で十分に洗浄し、 80°C の乾燥器内で乾燥させた。処理試料の炭素および窒素含量は、CNコーダー(柳本社製, MT-700)により測定した。そして、試料を酸化銅とともにバイコール管に真空封入し 950°C にて約2時間加熱した。さらに堆積物から発生した気体を真空ライン中で寒剤を用いて精製し、これによって得られた二酸化炭素(CO_2)を用い、Kitagawa *et al.*(1993)の水素還元法によりグラファイトターゲットを作製した。そして、調製したグラファイトターゲットについて名古屋大学のタンデム加速器質量分析計(Nakamura *et al.*, 1985; 中村・中井, 1988)を用い ^{14}C 年代を測定した。 ^{14}C 濃度の標準体には、NBS蔘酸(SRM-4990)を使用した。

5. 結果および考察

測定結果をまとめ表1に示す。 ^{14}C 年代値は、Libbyの半減期5,568年を用いて算出し、西暦1950年から遡った年数である。測定誤差は ^{14}C の計数にもとづく統計誤差を考慮し1標準偏差(1σ)で示す。試料の $\delta^{13}\text{C}$ 値はトリプルコレクター式気体用質量分析計(Finnigan MAT社製, MAT-252)で測定し、炭素同位体の質量分別効果を補正した(中村ほか, 1994)。なお、試料EB-N'200-220については、3つのバイコール管に分けて、合計3,844.9mgの試料から0.31mgの二酸化炭素が回収されたのみである。 CO_2 の回収率から計算される炭素含有量は0.008%ときわめて低く、年代測定の対象とはならなかった。

表1. 東バライ貯水池跡での試錐より得られた堆積物の ^{14}C 年代値。

Table 1. Radiocarbon ages of sediments from the site of East Baray Reservoir in Angkor district, Cambodia.

Sample No	Material	C (%)	N (%)	C/N ratio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	^{14}C date (yr BP)	Lab no. (NUTA)
EB-N' 200-220	sediments	n.d.	n.d.	-	-	-	-
EB-N' 260-280	sediments	0.08	0.03	3.2	-23.4	$11,000 \pm 200$	5477
EB-N' 260-280	sediments	0.08	0.03	3.2	-23.4	$10,980 \pm 120$	5505
EB-S 160-180	sediments	0.09	0.02	4.6	30	2540 ± 110	5808

今回の測定から、東バライ貯水池跡中央部北側試錐(EB-N')の地表面下約270cmの試料について、 $11,000 \pm 200$ yr BP (NUTA-5477) および $10,980 \pm 120$ yr BP (NUTA-5505) という2つの ^{14}C 年代値が得られた。本試料も炭素含有量が0.08%と低い。得られた年代値はそれぞれ独立してガス化した CO_2 を用いたが、このようにきわめて近い年代値を示す。このことから、得られた年代値は試料中に含まれる有機物の ^{14}C 年代を示すと判断される。したがってこの試料を採取した同跡地表面下約250~280cmの黄灰色粘土質砂層は、明らかに東バライ貯水池建設以前の堆積物(いわゆる'沖積層': United States Geological Survey, 1971)と断定される。一方、南側試錐(EB-S)の地表面下約170cmの試料については、 2540 ± 110 yr BP (NUTA-5808) という ^{14}C 年代値が得られた。この試料を採取した同試錐の黄褐色粘土質砂層は、北側試錐(EB-N')の地表面下約80~150cm層準の同粘土質砂層に岩相上確実に対比され(図2)、同層基底より約120cm下位にある黄灰色粘土質砂層の試料がより古い ^{14}C 年代値(NUTA-5477, 5505)を示すことと矛盾しない。したがって、本層準も東バライ貯水池建設以前の堆積物('沖積層')と判断され、これは、黄褐色粘土質砂層以下の各層が、カンボジア中央部における沖積低地の中心となるトンレサップ湖へ向かっていずれも層厚を増すこととも調和的である。

このように東バライ貯水池跡の試錐によって得られた試料は、いずれも同貯水池の推定建設年代である紀元900年(=1,050 yr BP)よりはるかに古い ^{14}C 年代を示した。これらの年代値にもとづけば、東バライ貯水池のかつての水底は各試錐の地表面(盛土面)下60~80cmにある下位の黄褐色粘土質細粒砂層(沖積層)と上位の赤褐色粘土質細粒砂層との境界面以上に限定され、最上位の濃黄褐色粘土質砂層が盛土と判断されることから、水底は赤褐色粘土質細粒砂層内に存在することは確実である。これは試錐調査時の地下水位面下0~40cmに相当し、現在の東バライ貯水池跡内の平均地表面の高さとほぼ同じか数10cm低い程度となる。したがって、同貯水池建設当時の水底は現在の同跡内の地表面にほぼ該当するといえ、建設後の築堤の浸食・崩壊などによる高度低下を無視すれば、同貯水池のかつての水深は現在の築堤の高さ(約5m)にほぼ同じであり、現在の築堤の分布が示す同貯水池の面積(1,210万 m^3)ならびに今回求められた水深(満水時5m)より、東バライ貯水池建設当時の最大貯水量は約6,050万 m^3 と見積もられる。

さらに、東バライ貯水池が機能しなくなった要因として、石澤(1996)は堆積物による埋積の進行ならびに築堤の崩壊をあげているが、今回の調査より同跡内には東バライ建設後の堆積物(埋積堆積物)がほとんど残存しないことが判明した。これは、堆積物による埋積が進行したため同貯水池が放棄されたという説に疑問を投げかけるものであり、これを解明するためには同貯水池跡全域にわたる試掘調査が望まれよう。

6. ま と め

本研究を通し明らかになったことは以下のとおりである。

1. 東バライ貯水池跡の表層地下構造は、地表面より暗黄褐色含礫粘土質細粒砂(盛土)、赤褐色粘土質細粒砂、黄褐色粘土質細粒砂、明灰色砂質粘土、黄灰色粘土質細粒砂および灰白色礫質細~粗粒砂に区分される。

2. ^{14}C 年代測定結果にもとづき、黄褐色粘土質細粒砂以下の層は、東バイ貯水池建設以前の堆積物(いわゆる'沖積層')と判断される。
3. 東バイ貯水池の建設当時の水深は、今回明らかになった水底の位置ならびに現在確認される築堤の高さから約5mと推定され、その最大貯水量は約6,050万 m^3 と見積もられる。

参考文献

- Goddard, E. N., Trask, P. D., de Ford, R. K., Rove, O. N., Singewald, J. T., Jr. and Overbeck, R. N., 1951, *Rock Color Chart*. Geol. Soc. America.
- Groslier, B. P., 1958, *Angkor et le Cambodge au XVIe Siecle*. Presses Universitaires de France. 石澤良昭・中島節子訳, 1997, 西欧が見たアンコール: 水利都市アンコールの繁栄と没落. 連合出版, 東京, 325p.
- 石澤良昭, 1996, アンコール・ワット: 大伽藍と文明の謎. 講談社現代新書P650, 講談社, 東京, 215p.
- Kitagawa, H., Masuzawa, T., Nakamura, T. and Matsumoto, E., 1993, A batch preparation method of graphite targets with low background for AMS ^{14}C measurements. *Radiocarbon*, **35**, 295-300.
- 中村俊夫・中井信之, 1988, 放射性炭素年代測定法の基礎 - 加速器質量分析法に重点をおいて -. 地質学論集, **29**, 83-106.
- 中村俊夫・池田晃子・小田寛貴, 1994, タンデトロン加速器質量分析計による ^{14}C 測定における炭素同位体分別の補正について - ^{14}C 年代算出の手引き -. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, **5**, 237-243.
- Nakamura, T., Nakai, N., Sakase, T., Kimura, M., Ohishi, S. Taniguchi, M. and Yoshioka, S., 1985, Direct detection of radiocarbon using accelerator techniques and its application to age measurements. *Japanese Journal of Applied Physics*, **24**, 1716-1723.
- Tsukawaki, S. and Murakami, F., 1996, Seasonal fluctuations of ground water level in Angkor district, Cambodia. *Proc. Intern. Symp., Geology and Environment*, Chiang Mai, 227-241.
- United States Geological Survey, 1971, *Geological Map of Cambodia, scale 1:1,000,000*. United States Geological Survey.

Underground Structures of the Site of East Baray Reservoir in the Angkor District, Central Cambodia

Shinji Tsukawaki¹, Mitsuru Okuno², Masafumi Okawara³, Michio Kato⁴ and Toshio Nakamura⁵

1: Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University

2: JAPS Research Fellow, Nagoya University

3: Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Iwate University

4: Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kanazawa University

5: Dating and Materials Research Center, Nagoya University

Abstract

Four gigantic water reservoirs were constructed through the Khmer Dynastic period in the Angkor district, central Cambodia to irrigate during the dry seasons as well as to guard against inundations during the rainy seasons. Although these reservoirs performed their function as cores of the water networks in the district at their beginning stages, their function had gradually been unfulfilling due to filling up with sediments, and they were finally relinquished. Since no geological and archaeological investigations have been made in the bottoms of these reservoirs, their actual pondages at that time have been no more than inferences because their actual bottoms (= water depths) have not been distinguished. Further, there is a certain possibility that the sedimentary filling up processes of the reservoirs can be reconstructed by geological approaches using underground sediments. Accordingly, about 6-metres-deep auger drillings were carried out in the north (EB-N'), centre (EB-C) and south (EB-S) of the central part of the East Baray reservoir, one of the four reservoirs, built in the beginning of the 10th century, in August 1997. Sedimentological and micropalaeontological analyses, and radiocarbon datings of the underground sediment samples were carried out on pursuing the above-mentioned subjects

The underground sediments of the East Baray are composed downwards of surface dark yellowish brown gravel bearing clayey sand (banking soil: 0.4 - 0.6 m), reddish brown clayey sand (0.2 - 0.6 m), yellowish brown clayey sand (0.7 - 1.6 m), light grey sandy clay (1.1 - 1.8 m), yellowish grey clayey sand (0.3 - 1.8 m) and light grey gravelly fine- to coarse-grained sand (more than 1.8 m). Strata below yellowish brown clayey sand thicken gradually to the south. Fresh-water sponge spicules and are frequently recognized in both yellowish brown clayey sand and light grey sandy clay.

Radiocarbon datings of the underground sediments obtained from two horizons of EB-N' and one horizon of EB-S were carried out by an accelerator mass spectrometer (AMS) of the Dating and Material Center, Nagoya University. However, the age was not obtained from 200-220 cm (light grey sandy clay) below the surface at EB-N'. The radiocarbon ages of sediments from 260-280 cm (yellowish grey clayey sand) below the ground surface at EB-N' are $11,000 \pm 200$ and $10,980 \pm 120$ years BP. The age of sediments from 160 - 180 cm (yellowish brown clayey sand) is 2540 ± 110 years BP. Thus, strata below the yellowish brown clayey sand are undoubted alluvial deposits. Consequently, the actual water pondage of the East Baray when it constructed should be estimated at 60 million m³ on the basis of height of the embankment and its area of the East Baray at the present time.