

## 三重県におけるセンダンの初期成長に及ぼす施肥と微地形の影響

島田博匡（三重県林業研）

三重県におけるセンダンの初期成長特性と植栽適地の解明を試みた。津市に谷から尾根まで、熊野市には谷から急崖地直下までを含む試験地を設置して樹高 100cm 程度のセンダン裸苗を植栽し、半数の植栽木には施肥を行った。施肥有の植栽木では植栽後 3 年間の樹高成長量と DBH 成長量は施肥無の植栽木よりも大きく、施肥による成長促進効果が確認された。3 成長期後の樹高、DBH は熊本県などで報告されている事例よりも小さかった。線形混合モデルによる植栽後 3 年間の樹高成長量に影響する要因の解析から、良好な成長を得るには、過湿地を除く谷状地形に健全な苗木を植栽し、施肥を行うことが望ましいと考えられた。

キーワード：早生樹、広葉樹造林、植栽適地、TPI、TWI

### I はじめに

近年、林業の採算性悪化を背景とし、収益性の高い造林樹種として早生樹が注目されている。なかでもセンダン (*Melia azedarach*) は、葉乾重量あたりの最大光合成速度が大きいため成長が旺盛であり (10)、材は建築材、器具材など様々な用途に用いられて材価も良いことから、短伐期で収入が得られる早生樹として期待されている (5)。

センダン人工林の育成については、横尾による熊本県における一連の研究があり (5, 11, 12 など)、育成方法がまとめられている (5)。そのなかで早期に収穫可能な直径に達すること、施肥による成長促進効果がみられることが示されている。熊本県以外の西日本でも良好な成長を示す事例や施肥効果が報告されているが (4, 7, 8)、三重県では長期間の育成事例は無く、熊本県などの事例と同様の成長量や施肥効果が得られるか不明である。三重県においてセンダンの育成を行うにあたり、三重県での成長特性、施肥効果について明らかにし、早生樹としての可能性を検討する必要がある。また、養分、水分要求度が非常に高い樹種であるため、谷筋などの斜面下部や平地が植栽適地であることが示されているが (5, 12)、これまでに微地形を精密な DEM から求めた地形指標で表現し、これと成長との関係を示した事例は無い。成長と地形指標との関係性を明らかにすることで、より適切な植栽適地判定が行えるほか、GIS による広域的な植栽適地のマッピングも可能になると考えられる。

そこで、本研究では、三重県内の 2 ヶ所に設置したセンダンの植栽試験地における 3 年間の成長の調査から、三重県における初期成長、施肥効果を明らかにするとともに、樹高成長量と DEM から算出された地形因子などとの関係を解析することで植栽適地の検討を行った。

### II 試験地と調査方法

#### 1. 試験地

三重県中部の津市白山町に津試験地 (以下、津) と南部の熊野市紀和町に熊野試験地 (以下、熊野) を設置した (図-1)。津は 2011 年、熊野は 2007 年に皆伐が行われ、ともにヒノキの植栽を行ったもののニホンジカ (以下、シカ) の採食により植栽木が全て枯死した林地の一部である。試験地内に設置した温度計 (Onset 社製 HOBO Pro v2) で測定した調査期間中の平均気温は津で 16.0°C (2018 年 4 月 23 日~2020 年 11 月 18 日)、熊野で 16.2°C (2018 年 4 月 11 日~2020 年 11 月 13 日) であった。メッシュ気候値 2010 (6) から算出した年間降水量は津で 1,737.2mm、熊野で 3,045.7mm であった。

センダンの成長に対する微地形の影響や植栽適地を明らかにするために、津は谷から下部斜面、上部斜面、尾根までを連続的に含む標高 250~285m の南東向き斜面 (0.32ha)、熊野は急崖下にある崖錘状斜面の谷部から急崖直下まで標高 145~170m の北西向き斜面 (0.19ha) に植栽を行った。植栽には長野県産 4 年生裸苗を使用し、津では 2018 年 2 月中旬、熊野では 2018 年 3 月上旬に用材生産に適した植栽密度 400 本/ha (5) で植栽した。植栽本数は津で 141 本、熊野で 80 本であった。両試験地の獣害対策は異なり、津では植栽前に高さ 1.8m、網目 5cm の獣害防護柵を植栽地の周囲に設置した。熊野では獣害防護柵を設置せず、植栽時に高さ 1.7m、直径 28cm の単木防護ネット (東工コーセン社製チューブラーGS) を各植栽木にかぶせた。なお、熊野では植栽当年に単木防護ネットの高さを抜け出した枝葉に対するシカ採食がみられたため、高さ 2.1m 程度まで嵩上げした。下刈りは津では植栽当年から植栽後 3 年目まで年 1 回行ったが、熊野では実施しなかった。津の下刈り実施時期は植栽当年が 6 月中旬~7 月上旬、2 年目と 3 年目は 6 月中旬であった。

SHIMADA Hiromasa\*

Effects of fertilization and microtopography on the initial growth of *Melia azedarach* in Mie Prefecture, Japan

shimah03@pref.mie.lg.jp

施肥効果を明らかにするために、津で 72 本、熊野で 40 本の植栽木に植栽時 250g/本、2 年目と 3 年目は 4 月上旬に 500g/本の施肥 (IB 化成 N:P:K=10:10:10) を行った。施肥を行った植栽木 (以下、施肥有) と行っていない植栽木 (以下、施肥無) は植栽列のなかで概ね交互に配置し、それぞれが偏ることなく試験地全体に分布するようにした (図-1)。また、センダンでは樹幹形を矯正するために芽かきの実施が有効であることが示されている (5, 12)。植栽当年は芽かきをほとんど行わなかったが、2 年目と 3 年目には全植栽木を対象に年 1 回実施した。実施時期は 2 年目が 5 月上旬、3 年目が 6 月中～下旬であった。そのほか、津では台風時の強風で幹が途中から曲がる植栽木が多くみられたため、台風通過後には点検を行い、曲がった幹に対しては幹起こしを行い固定した。このとき、サイズが小さいものには支柱を添えて固定し、大きなものは麻縄で引っ張り、地中に打ち込んだプラスチック製ペグに結び付けて固定を行った。

なお、植栽直後に地上部が根元付近から枯死する植栽木が多数発生したが、その後速やかに新たな幹が再生した。このとき再生幹が順調に成長するか不明であったため、津では 2018 年 6 月上旬、各裸苗の近傍に 3

年生ポット苗を植栽したが、再生幹は順調に成長したため、裸苗とポット苗の両方を育成した。本報ではポット苗は対象とせず、裸苗の結果のみを植栽木として報告する。なお、3 成長期後までにポット苗が裸苗の地上部の成長を被陰などにより阻害するような事例はみられなかった。

## 2. 調査方法

植栽直後の 2018 年 2 月下旬 (津)、3 月中旬 (熊野)、1 成長期後の 2018 年 12 月中旬 (津)、2019 年 1 月下旬 (熊野)、2 成長期後の 2019 年 12 月中旬、3 成長期後の 2020 年 11 月中旬に各試験地の全植栽木の生残と生存木の樹高 (cm)、胸高直径 (mm、地上高 1.2m、以下、DBH) を調査した。このとき、樹高には測棒、DBH にはデジタルノギスを使用して測定を行った。樹高測定では根元から最も高い位置の頂芽までを測定した。同時に幹の支柱や麻縄による固定有無も記録した。また、1 成長期後調査では植栽直後の地上部枯死の有無を記録した。植栽木の位置については、各調査地内に基準点を設け、GNSS (Spectra Precision 社製 Mobile Mapper120) による測位と電子基準点データでの後補正を行うことで基準点位置の平面直角座標を求め、デジタルコンパス (Laser Technology 社製 Trupulse360° B) により基準点から全植栽木の位置を測量することで各植栽木位置の平面直角座標を求めた。

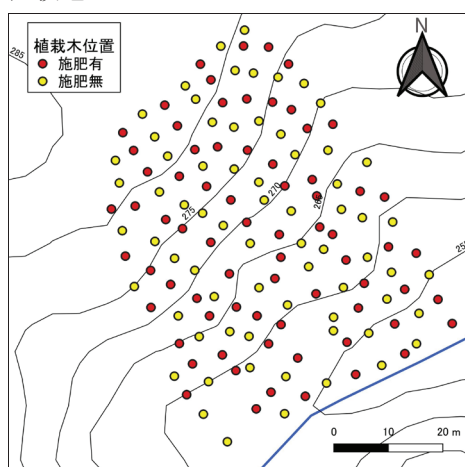
## 3. 解析方法

各調査時の生存調査の結果から、各試験地の施肥有無別に Kaplan-Meier 法による生存曲線を作成し、Log-Rank 検定により生存曲線の差異を検定した。

成長の解析には、各調査時に生存していた植栽木を対象とし、各試験地の施肥有無別に調査時毎の樹高、DBH の平均値、標準偏差を求めた。このとき、DBH については樹高 1.2m 以上になった植栽木のみを対象に計算を行った。また、最終調査時まで生存していた植栽木を対象に樹高、DBH について、最終調査時の値から植栽時の値を引いた 3 年間の成長量を成長量として定義し、各試験地の施肥有無別に平均成長量と標準偏差を求めた。成長量の比較では、一元配置分散分析を行い、そこで有意差がみられた場合、どのカテゴリー間に差があるのかをみるために Bonferroni の多重比較を行った。また、各植栽木の樹高成長量と DBH 成長量の関係について、各試験地の施肥有無別に当てはめた直線式と全てのデータに 1 本の直線式を当てはめたものについて、当てはまりの良さを比較した。帰無仮説を全てのデータを当てはめた 1 本の直線式、対立仮説を各試験地の施肥有無別にデータを当てはめた直線式として、Extra sum-of-squares F-test による検定を行った。

植栽木の樹高成長量に影響する要因を明らかにするために、最終調査年に幹折れにより前年よりも樹高が低くなった植栽木を除く 177 本を対象とし、各植栽

a) 津試験地



b) 熊野試験地

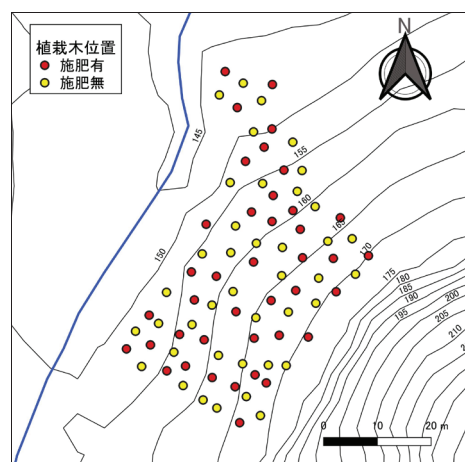


図-1. 試験地の概要

木の樹高成長量データを線形混合モデル(以下, LMM)に当てはめた。目的変数は樹高成長量 (cm), 説明変数を植栽時樹高 (cm), 施肥有無 (有 1, 無 0), 植栽直後の地上部枯死有無 (有 1, 無 0), 各植栽木位置の 5m×5mDEM から求めた地形の斜面傾斜 (°), TPI (Topographic Position Index ; 3), TWI (Topographic Wetness Index ; 1) とそれらの二次項, ランダム要因を試験地として解析を行った。総当たり法による変数選択を行い, 多重共線性を避けるため選択された説明変数の VIF が 10 未満となる AIC が最小モデルを選択した。説明変数に用いた TPI, TWI は地形指標の一種であり, TPI の値に基づいて様々な空間スケールで尾根や谷などの地形単位を抽出することができる。TPI が正値をとれば尾根状の地形であることを, 負値をとれば谷状の地形であることを示す。本研究では対象メッシュの標高値と周囲 100m 範囲の平均標高値との比較から TPI 値を算出した。TWI は各メッシュの集水域面積と斜面傾斜をもとにした地形的な観点から計算される湿潤度である。斜面傾斜, TPI, TWI の算出には, 津では国土交通省中部地方整備局三重河川国道事務所 (以下, 三重河川国道事務所), 熊野では国土交通省中部地方整備局越美山系砂防事務所 (以下, 越美山系砂防事務所) が, とともに 2013 年度に実施した航空レーザ測量業務で作成した DEM データを用いた。

なお, 後述するように 1 成長期後の生存木の大部分が植栽直後に地上部が枯死し, 再生幹が成長した個体 (以下, 地上部枯死有) であった。この地上部枯死が成長に及ぼす影響について, 植栽直後の地上部枯死が無い個体 (以下, 地上部枯死無) はわずかであったこと, それらは試験地全体に偏りなく分布しておらず, 成長に特定の微地形の影響が生じる可能性があることから, 地上部枯死無のみの集計では成長を適切に評価することは困難であった。そのため成長の直接比較では地上部枯死の有無を区別せず, 試験地別, 施肥有無別で集計を行い, 試験地, 施肥の影響を検討した。地上部枯死については, LMM の説明変数に植栽直後の地上部枯死有無を入れることで, 樹高成長量に対する影響を評価した。

統計解析は LMM には R version 4.0.3, その他は GraphPad Prism version 8.4.3 を使用した。また, DEM からの斜面傾斜の算出には ArcGIS10.8, TPI と TWI の算出は QGIS3.12.3 を用いた。

### III 結果

#### 1. 植栽木の生残

各試験地の施肥有無別の 3 年間の生存曲線を図-2 に示す。植栽直後の地上部枯死が多数みられた 1 成長期後の生残率は津の施肥有 88.9%, 施肥無 88.4%, 熊野の施肥有 97.5%, 施肥無 100%であった。また, 1 成長期後の生存木のうち地上部枯死有は津の施肥有

67.2%, 施肥無 80.3%, 熊野の施肥有 92.3%, 施肥無 92.5%であり, 大部分が地上部枯死有であった。3 成長期後の生残率は津の施肥有 80.6%, 施肥無 81.2%, 熊野の施肥有 87.5%, 施肥無 87.5%であった。試験地間, 施肥有無間で生存曲線に有意差はみられなかった (Log-Rank 検定,  $p > 0.05$ )。枯死木は谷底付近の過湿地, 極端な急傾斜地や尾根部など乾燥地で多くみられた。なお, 津において支柱や麻縄による幹の固定を行った植栽木は植栽当年 28.8%, 2 年目 25.6%, 3 年目 0.9%であった。

#### 2. 樹高, DBH の経年変化

樹高の経年変化を図-3 に示す。両試験地ともに植

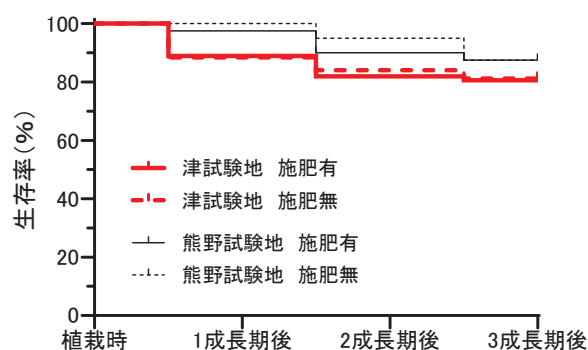


図-2. 生存曲線の比較

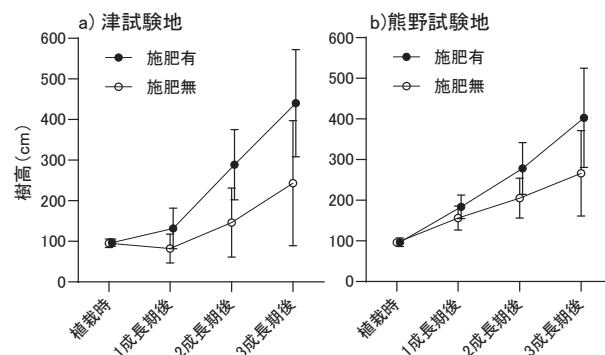


図-3. 樹高の経年変化

誤差線は標準偏差を示す。

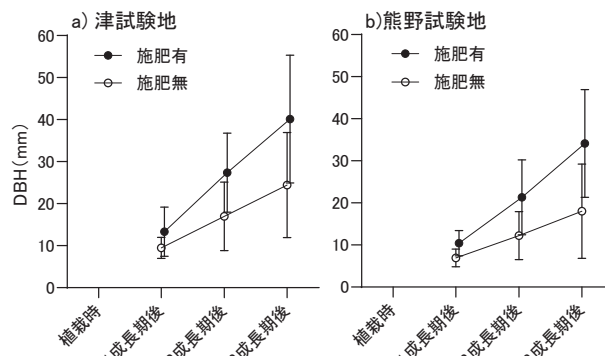


図-4. DBH の経年変化

誤差線は標準偏差を示す。

栽時は 100cm 程度であったが、その後施肥有が施肥無よりも大きく成長し、その差は年々大きくなった。施肥有の平均樹高は津 440cm、熊野 403cm、最大樹高は津 665cm、熊野 610cm であった。

DBH の経年変化を図-4 に示す。DBH についても、両試験地ともに施肥有が施肥無よりも大きく成長し、その差は年々大きくなった。施肥有の平均値は津で 40mm、熊野で 34mm、最大値では津で 77mm、熊野で 55mm であった。

### 3. 樹高成長量と DBH 成長量の比較

3 年間の樹高成長量を比較した結果を図-5 に示す。また、DBH 成長量の結果について図-6 に示す。樹高成長量、DBH 成長量のいずれも、両試験地ともに施肥有は施肥無よりも有意に大きい傾向がみられた。試験地間では有意な差異はみられなかった。

樹高成長量と DBH 成長量の関係を図-7 に示す。津の施肥有と施肥無、熊野の施肥有と施肥無の 4 つのデータセットの樹高成長量と DBH 成長量の関係は 1 本の直線式で示すことができた (Extra sum-of-squares F-test,  $p=0.1478$ ,  $F=1.524$ )。試験地の違い、施肥有無

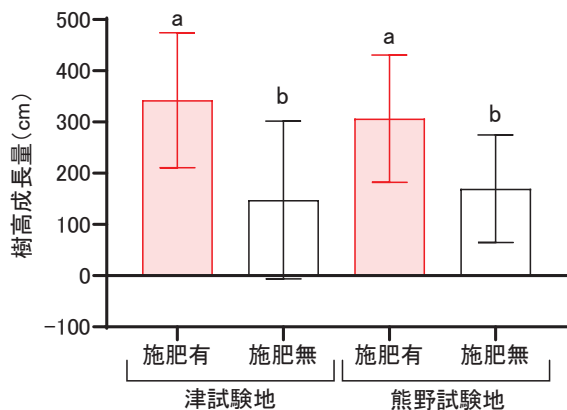


図-5. 樹高成長量の比較

誤差線は標準偏差を示す。異なる英文字間には有意差がある (Bonferroni の多重比較,  $p < 0.05$ )。

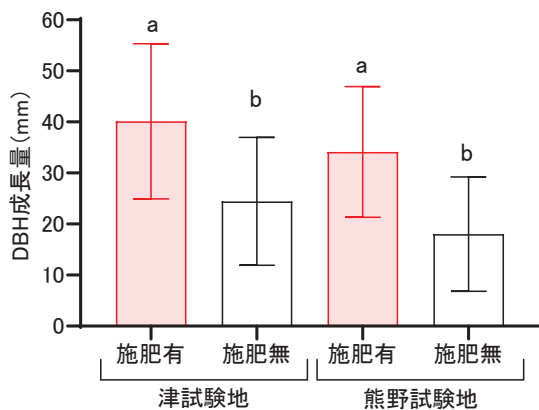


図-6. DBH 成長量の比較

誤差線は標準偏差を示す。異なる英文字間には有意差がある (Bonferroni の多重比較,  $p < 0.05$ )。

は両者の関係に影響していなかった。

### 4. 樹高成長量に影響する要因

表-1 に LMM により明らかになった樹高成長量に影響する要因を示す。施肥有無、植栽直後の地上部枯死有無、TPI、TWI の二次項が有意な説明変数として選択された (LMM,  $p < 0.05$ )。植栽直後の地上部枯死は 3 年間の樹高成長量に -73cm の影響を及ぼしていた。

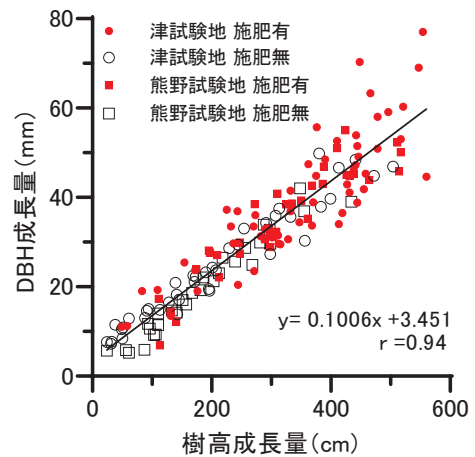


図-7. 樹高成長量と DBH 成長量の関係

表-1. 樹高成長量に影響する要因

線形混合モデル (LMM) の解析結果から説明変数の VIF が 10 未満となる AIC 最小モデルのパラメータ値を示す。

説明変数	係数	p 値
施肥有無	161.2467	0.0000
植栽直後の地上部枯死有無	-73.0337	0.0005
斜面傾斜	0.0376	0.9817
TPI <sup>2</sup>	9.7148	0.6600
TPI	-115.9850	0.0000
TWI <sup>2</sup>	-5.4747	0.0000
(切片)	218.7678	0.0012

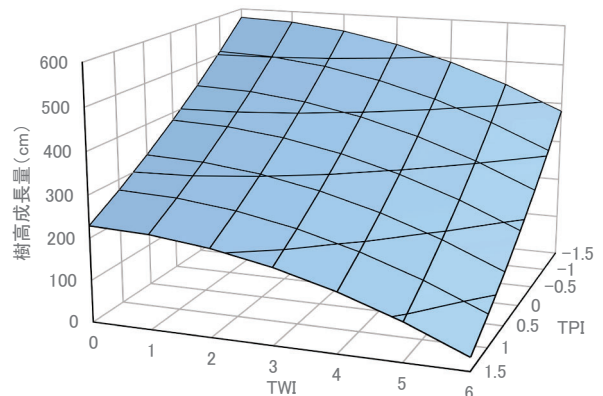


図-8. LMM により得られたモデルにおける TPI、TWI と樹高成長量の関係

その他のパラメータは施肥有、植栽直後の地上部枯死無、斜面傾斜 20°で固定して計算した。

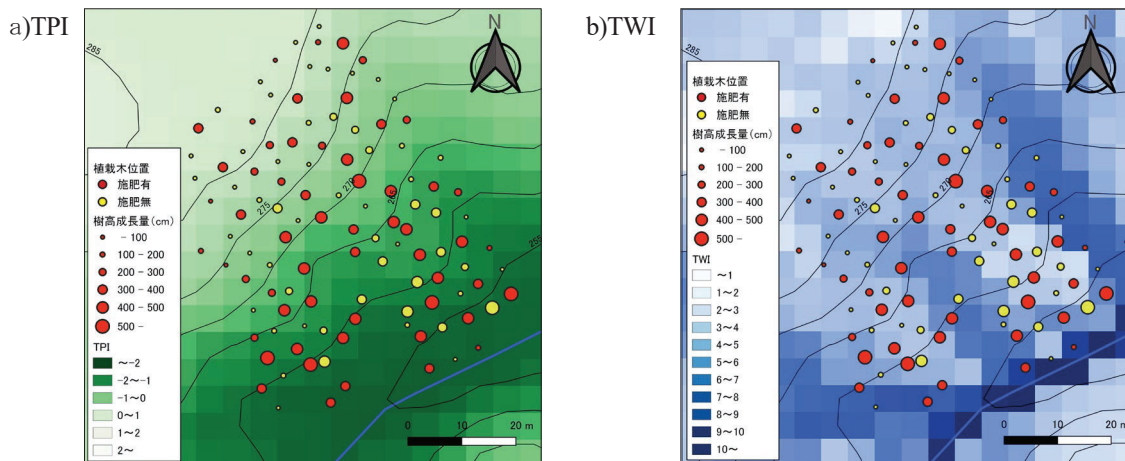


図-9. 津試験地における植栽木の樹高成長量と TPI, TWI

TPI, TWI は三重河川国道事務所が 2013 年度に実施した航空レーザ測量業務で作成した 5m×5mDEM データより算出した。

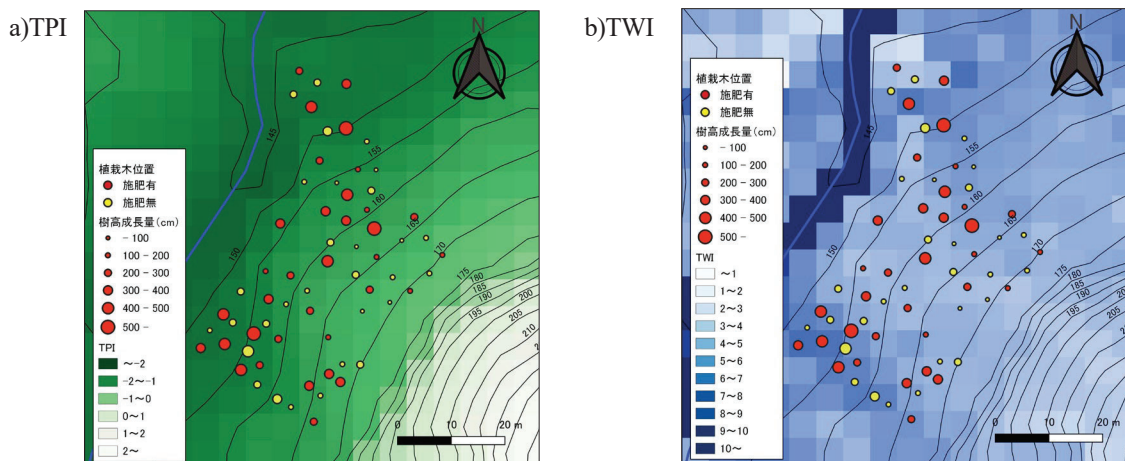


図-10. 熊野試験地における植栽木の樹高成長量と TPI, TWI

TPI, TWI は越美山系砂防事務所が 2013 年度に実施した航空レーザ測量業務で作成した 5m×5mDEM データより算出した。

LMM により得られたモデルにおける TPI, TWI と樹高成長量の関係を図-8 に示す。TPI はモデルに二次項が含まれるものの二次項の影響は小さく、TPI が小さいほど成長量が大きくなる傾向がみられた。また、TWI が大きいほど成長量は小さくなったが、値 3 程度より小さい場所であまり成長量は低下せず、それより大きい場所で大きく成長量が低下する傾向がみられた。図-9, 10 に両試験地における植栽木の樹高成長量と TPI, TWI の分布を示す。TPI が負値の谷状地形で成長量が大きく、TWI が極端に大きい場所では成長量が小さい傾向がみられた。津の TWI が極端に大きい場所では地表面から水が湧き出している地点もみられた。

#### IV 考察

##### 1. 初期成長と施肥効果

成長量に試験地間で有意差はみられず、いずれの試験地でも施肥有は施肥無よりも有意に樹高成長量と DBH 成長量が大きかった (図-5, 6)。そのため、3

成長期後の平均樹高、平均 DBH は施肥有が施肥無よりも 1.5~2 倍程度大きくなった (図-3, 4)。このことから施肥は顕著に成長を促進しており、早期に収穫を行うために重要であると考えられた。また、樹高成長量が大きい植栽木は DBH 成長量も大きい傾向があり、樹高成長量と DBH 成長量の関係は施肥有無に関わらず 1 本の直線式で示すことができたことから (図-7)、施肥は樹高と DBH の両者の成長をともに促進したと考えられる。

熊本県におけるセンダンの生産目標は 15~20 年で材長 2~4m、末口径 30cm 以上の通直材を得ることとしており (5, 11, 12)、その施業体系では苗高 100cm の苗木を植栽密度 400 本/ha で植栽し、その後の林分密度と DBH は 3 年生で 360 本/ha, 10cm, 12 年生で 140 本/ha, 35cm, 20 年生 70 本/ha, 50cm と示されている (5)。本研究における 3 成長期後のサイズは、津が熊野よりもやや大きく、施肥有で平均樹高 440cm、平均 DBH40mm、最大値では樹高 665cm、DBH77mm であ

った(図-3, 4)。本研究で設定した試験地は谷部から尾根部まで様々な立地条件下に植栽していることから、サイズ分布の範囲が大きかったが、最大値の個体でも熊本県の施業体系(5)で示された3年生時の樹高8m, DBH100mmよりも小さい値であった。他の事例においては、熊本県で3成長期後に林分密度2,861本/ha, 平均樹高7.9m, 平均DBH79mm(11), 大阪市で3成長期中までの林分密度400本/ha, 最大樹高6.7m, 最大DBH90mm(8)などの報告があり、本研究での最大値はこれらの値よりも小さかった。今後も引き続き、成長経過を追跡調査し、三重県における成長特性や早期の収穫の可否を明らかにする必要がある。

他事例と比較して成長が小さい理由は明確ではないが、気象、土壌条件の差異のほか、本研究で使用した苗木では植栽直後の地上部枯死が多数みられ、植栽時には既に地上部の褐変が始まっているものも多かったことから、全体的に苗木の状態が不良であった可能性がある。今後さらに三重県で後述する植栽適地における植栽事例を増やし、三重県で実現可能な成長量を明らかにする必要がある。また、本研究で使用した苗木の遺伝的系統は、成長が良好な事例で使用された苗木とは異なる可能性がある。熊本県ではセンダンの優良系統の選抜が開始されているが(12)、優良系統の苗木を三重県で育成した場合の成長特性を明らかにすることも必要と考えられる。

## 2. 植栽適地

LMMによる解析の結果、施肥有、植栽直後の地上部枯死無、TPIが小さいほど、TWIが3程度より小さい範囲で樹高成長量が大きい(表-1, 図-8)。つまり、過湿地を除く谷状地形の場所に健全な苗木を植栽し、施肥を行うことで樹高成長量が大きくなることがわかった。これまでに谷部から尾根に向けての水平距離が大きくなるほど樹高やDBHが小さくなることが報告されており(2, 12)、センダンは谷筋などの斜面下部や平地が植栽適地であるとされている(5, 12)。本研究での結果はこれらとほぼ同様の結果であり、従来の知見をTPI, TWIにより客観的に示すことができた。また、植栽地として水分環境の良い適潤性から弱適潤性の土壌を選ぶ必要があるとする報告もあるが(2)、谷状地形であっても過湿地では成長が不良になることをTWIによって示すことができた。過湿地では枯死が生じやすい傾向もみられたが、過湿地の枯死木は根系がほとんど発達していなかったことから、過湿地では根系の発達が悪く、地上部の成長も不良となっていると考えられる。なお、TPI, TWIはDEMから算出される地形指標であることからGISとの親和性が高い。近年は各地で航空レーザー測量が行われ、精密なDEMデータが入手可能になっているが(9)、それらと本研究で得られた知見を組み合わせることで、GISによる広域的な植栽適地のマッピングも可能になると考えられる。

## V おわりに

本研究におけるセンダンの初期成長は最大個体であっても、熊本県など他県での事例よりも小さかった。追跡調査を継続し、早生樹として期待できる成長が得られるか検討する必要がある。植栽適地は過湿地を除く谷地形であり、良好な成長を得るには、ここに健全な苗木を植栽し、施肥を実施して育成することが望ましいと考えられる。また、センダンの用材では2~4mの通直材が求められているが(5, 11, 12)、本研究では幹曲がりなど形質の評価をしていない。今後は成長とともに形質についても評価を行う必要がある。

### 謝辞

本研究の実施にあたり、山林所有者様には試験地を設定させて頂きました。三重河川国道事務所、越美山系砂防事務所には航空レーザー測量データを貸与頂きました。試験地設定や調査には浅井俊次氏、山副新仁氏をはじめ三重県林業研究所職員にご協力いただきました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

### 引用文献

- (1) Beven KJ, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydro Sci Bull* 24: 43-69
- (2) 福山宣高(1996)センダン幼齡人工林の成長について. *日林九支論* 49: 83-84
- (3) Guisan A, Weiss SB, Weiss AD (1999) GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecol* 143: 107-122
- (4) 糟谷信彦・宮藤久士・村田功二・中村彰男・横尾謙一郎(2017)本州西部地域での早生樹センダンの植栽試験. *日本森林学会大会発表データベース* 128: 536
- (5) 熊本県林業研究指導所(2015)センダンの育成方法 H27 改訂版. 熊本県 <https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/118828.pdf> (2020/12/19 アクセス)
- (6) 国土交通省 国土数値情報 平年値メッシュデータ(メッシュ平年値2010). <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html> (2016/5/2 アクセス)
- (7) 村田功二・内海真弓・宮藤久士・横尾謙一郎・横尾国治(2015)関西地区における国産早生樹センダンの試験植林. *日本森林学会大会発表データベース* 126: 531
- (8) 村田功二・宮崎 薫・横尾謙一郎・宮藤久士・荘保伸一・横尾国治(2017)関西地区でのセンダン(*Melia azedarach*)植栽試験とセンダン材合板原料適正の検討. *木材工業* 72(9): 345-349
- (9) 日本測量調査技術協会 航空レーザー測量データポータルサイト. <http://www.sokugikyoku.or.jp/laser/> (2020/12/19 アクセス)
- (10) 高木正博・玉泉幸一郎・家入龍二・齋藤 明(1994)広葉樹種の成長量とガス交換速度との関係. *日林九支論* 47: 119-120
- (11) 横尾謙一郎(2010)植栽密度が異なるセンダン幼齡林の成長と幹材の形状. *森林立地* 52(1): 29-35
- (12) 横尾謙一郎(2020)センダンで始まった新たな林業・林産業. *森林科学* 89: 34-37