

ISSN 2436-441X

# 研 究 報 告

第 2 8 号

2 0 2 1 . 3

秋田県林業研究研修センター

## 目 次

立地環境因子を用いたスギ人工林の地位指数推定手法の開発

..... 新田 響平 ..... 1 ～ 30

# 立地環境因子を用いたスギ人工林の地位指数推定手法の開発

新田 響平

Predict methods of site index of Sugi plantations by environmental factors in Akita Prefecture

Kyohei Nitta

## 要 旨

スギ人工林の再造林を促進するにあたり、十分な収穫量が期待できる林地を明らかにし、適切なゾーニングに基づく森林管理が求められている。そこで、林地生産力の指標であるスギの地位指数を立地環境から広範囲に推定するため、県内のスギ人工林 365 箇所でスギの上層木平均樹高と林齢及びその立地環境を計測・収集し、線形モデルを作成した。その結果、大流域、表層地質、土壌型、標高、開度、最深積雪深、温量指数を説明変数とするモデルの当てはまりが最もよかった。同様に大流域毎に線形モデルを作成した結果、局所的な地形などを表す TWI や曲率を説明変数に加えたモデルの当てはまりが最もよかった。また標高や有効土層厚などをカテゴリに再区分してモデルを作成した結果、いずれのモデルにおいても推定精度が向上した。これらのことから、流域別など推定する対象範囲のスケールを小さくし、それぞれに最も適合するモデルを活用することでより高い精度での地位指数推定が可能であると考えられた。

## I. はじめに

地位は、ある樹種に対するその林地の生産力の大きさを表す概念である（真田, 1999）。また地位指数は、地位を具体的な数値で表現する尺度であり、当該樹種の基準林齢における上層木の平均樹高で表され（真田, 1999）、スギ人工林においては 40 年生を基準林齢としている。任意の林地において、地位、あるいは地位指数を簡易に判別することができれば、より多くの収穫が可能な林地が明らかとなり、ゾーニングや集約化などに際して重要な指標となると考えられる。また地位指数の低い林地を林業の対象としないことで、地域レベルにおける林業コストの低減にも貢献する。しかし、地位指数の判定には、現地での樹高と林齢の調査が必要であるうえ、林地に樹木がなければその把握は困難である。さらに、我が国の森林は地形的に急峻であり、経営対象全林の現地調査による把握は労力・時間及び費用の面からも実行不可能とされ（寺岡ら 1991）、現地調査を必要としない地位指数の推定方法が必要である。

秋田県におけるスギ人工林地位指数の推定方法は、地域森林計画編成業務の一環として立地級調査の結果に基づき作成された。そこでは土壌型、傾斜、標高、斜面方位、積雪深が推定に用いる立地環境因子とされている。これらは既存の研究においても地位指数との関係が指摘されてきた。土壌型は複数の研究においてスギの地位指数と関係が深いことが指摘されている（真下, 1960 ; 小林, 1963 ; 野越, 1971 ; 照井, 1976）。傾斜はスギの成林度に影響すると指摘されている（横井・山口, 2000）ほか、標高が高くなるとスギの地位指数に対してマイナスに作用することが報告されている（Kodani et al,

2011)。Chen and Abe (1999) は斜面方位と斜面における位置でスギの地位指数を推定できることを示した。豪多雪地帯においては、雪害が成林に大きな影響を及ぼしているとされている (小野瀬, 2000 ; 野表, 1992 ; 横井・山口, 2000)。

以上のように現行の地位指数推定に用いている立地環境因子は、既存の研究に照らしても大きく矛盾しない。しかしながら、推定された地位指数と現地調査から得られた地位指数とを比較すると一致しない場合が多い。この要因の一つは作成に用いたデータの精度の問題が考えられる。推定方法を作成した時期においては若齢なスギ人工林が多く、地位指数の基準である 40 年生以上の樹高成長については推定によらざるを得なかった部分がある。また樹高測定は直径等に比較して時間を要する作業であり、時間的制約から十分なサンプル数を確保できなかった可能性もある。現在は地位指数基準年 (40 年生) を超えるスギ人工林が多く、レーザー測高機等の開発によって以前よりも迅速かつ正確に樹高を測定できるようになった。このことから、以前よりも正確な地位指数の実測データを得ることができると考えられる。

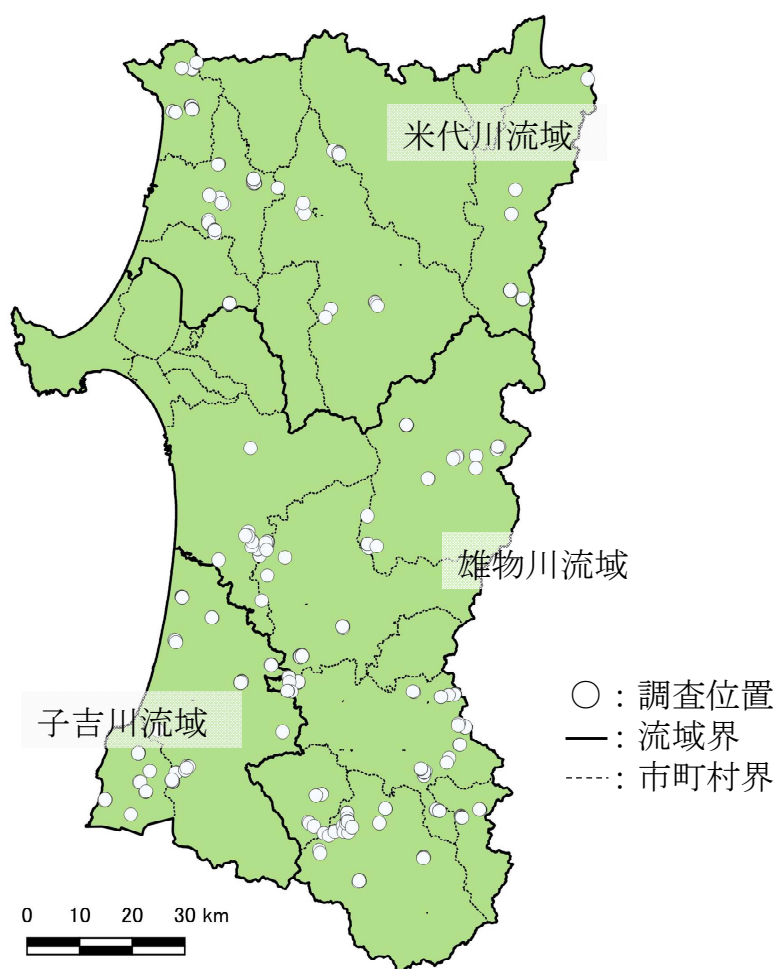
もう一つの要因として推定に用いる立地環境因子が適切でなかった可能性が挙げられる。竹下 (1964) は土壌中の水分量こそ林木の成長に影響するとした。また竹下・高木 (1977) は、その土壌に水を貯留できる量 (有効貯留容量) を斜面傾斜と斜面型から表現できるとした。Beven and Wood (1983) は土壌中の水分量の指標である Topographic Wetness index (TWI) の理論を提唱し、Zushi (2006) 及び図子 (2010) はスギ林地位指数をこの TWI と開度で精度よく推定できることを示した。開度は日当たりや風当たりの良さを示しており、図子 (2010) は開度の増加に伴う土地生産力の低下は、風に起因する蒸発散に伴う土壌水分量の低下によって引き起こされたと考察している。Mitsuda et al (2007) や Mitsuda and Ito (2015) は日射量や露出度、TWI の要素である表面流出寄与域を用いることにより高精度で地位指数を推定できることを示している。日射量や露出度は開度と同様に日当たりの良さを表し、それらの高さは土壌水分量の低下を招くためにスギの成長に影響したと指摘されている。Zushi (2007) は富山県のスギの平均純生産量に対して、開度や TWI に加え年平均気温が影響していることを示している。Kodani et al (2011) もまた四国地方のスギの地位指数に対して平均気温や 4~8 月の日射量などが影響していると指摘している。こうした現行の推定式で採用されていない立地環境因子を説明変数として追加する、あるいは既存の説明変数と置き換えることによって、地位指数の推定精度が向上する可能性は高い。

そこで本研究では、秋田県のスギ人工林を対象としたより精度の高い地位指数の推定方法を開発することを目的とし、県内のスギ人工林の生育状況調査を実施した。また、その調査地において、樹高成長に関係していることが予想される多様な立地環境因子を現地調査や既存の資料、数値地形解析により取得した。これらの結果を用いて、立地環境から地位指数を推定する線形モデルの作成を試みた。

## II. 材料 (調査地) と調査方法

### 1. 秋田県における大流域毎の気候的特徴の把握

秋田県は子吉川，雄物川，米代川の3つの大流域に区分される（図－1）。後述するように地位指数の推定に用いる立地環境因子としてこの大流域を候補とすることから，それらの気候的特徴を把握するため，年平均気温及び降水量について集計した。集計に用いたデータは国土交通省の国土数値情報の平年値気候メッシュデータ（国土交通省，2012）である。このデータは降水量，気温，最深積雪，日照時間，全天日射量の5種類の気象要素について，過去30年間の観測値から1km四方メッシュ毎の平年値を推定・算出したものである。当該データをGIS（Geographic Information System；QGISver.3.16.2）に取り込み，各メッシュにおける年平均気温と冬季降水量（1～3月及び12月の合計値）を算出し，各大流域に含まれるメッシュを抽出した。なお，2つの流域にまたがるメッシュについては2つの流域それぞれで集計の対象とした。



図－1 秋田県の大流域と調査位置図

## 2. スギ人工林の生育状況調査と地位指数の算出

調査は，秋田県内の30～80年生のスギ人工林365箇所で行った（図－1）。現地において，上層樹高及び見た目の立木密度を基準に10m×10～30m（100～300㎡）の方形調査区を設定し，設定した調査区内に生育しているスギ全個体について，樹高を測定するとともに被圧状況や諸被害について記

録した。樹高の測定にはレーザー測高機（IMPULSE200，レーザーテクノロジー社）を用いた。また方形区の短辺及び長辺の中間地点を結ぶ線の交点地際においてポータブル GPS デバイス（62SCJ，Garmin 社）によって緯度経度を記録した。

各調査地において被圧木や被害木以外を上層木とし，その平均樹高を算出した。また森林簿から調査時点における林齢を抽出した。上層木平均樹高と林齢をもとに秋田県森林技術センター（2013）の林分収穫予測表から実測地位指数を算定した。

### 3. 推定に用いる説明変数の候補

本研究において，地位指数推定に用いる説明変数の候補は大流域，表層地質，土壌型，有効土壌厚，標高，TWI，開度，縦断曲率，平面曲率，斜面傾斜，斜面方位，最深積雪深，温量指数の計 13 因子とした。大流域については後述するようにそれぞれ気候的特色が異なるために候補とした。表層地質は岩手県や四国地方のスギの地位指数推定において説明変数として採用されている（照井, 1976 ; Kodani et al, 2011）。土壌型も既存の研究においてスギの成長と深く関係していることが指摘されている（真下, 1960 ; 小林, 1963 ; 野越, 197 ; 照井, 1976）。有効土壌厚は，土壌の堆積程度を把握するために採用した。これは，竹下（1964）が「有効起伏量－堆積」指数がスギの樹高成長と密接に関係していること，照井（1976）がスギの地位指数推定のための因子として堆積様式を採用していることに起因している。標高は高くなるとスギの地位指数にはマイナスに作用することが報告されており（Kodani et al, 2011），TWI や開度（露出度）も地位指数推定に有効な因子であることが指摘されている（Zushi, 2006 ; Mitsuda et al, 2007 ; 図子, 2010 ; Mitsuda and Ito, 2015）。縦断曲率，平面曲率は類似した概念である凹凸といった斜面形状が地位指数推定に有効であることが示されている（野越, 1971 ; 照井, 1976）。また，凹地形ではスギの雪害が発生しやすいとされている（山谷・塚原, 1993）ことから縦断曲率，平面曲率を説明変数候補とした。斜面傾斜もまたスギの成林度に影響すると指摘されている（横井・山口, 2000）ことから，雪による影響を考慮して採用した。斜面方位は，斜面における位置とともにスギの地位指数を推定できると示されている（Chen and Abe, 1999）。最深積雪深はスギの成林に影響すること（横井・山口, 2000），温量指数は平均気温がスギの成長に影響すること（Zushi, 2007 ; Kodani et al, 2011）が指摘されていることから，それぞれ説明変数候補とした。

### 4. 説明変数候補の調査と GIS による抽出

#### 1) 現地における説明変数データの調査

スギの生育状況調査と同時に，各調査地において土壌型，有効土壌厚，標高，斜面傾斜，斜面方位を計測した。土壌型は生育状況調査区内の 5 点ほどで検土杖による簡易土壌調査を実施し，秋田県農林水産部農山村振興課（2004）を参考に，乾性褐色森林土壌（BA），適潤性褐色森林土壌（Bd），湿性褐色森林土壌（BE），グライ土壌（G），黒ボク土壌（BI）に区分した。また人力で検土杖が貫入できる深さを有効土壌厚（cm）とし，その厚さを記録した。標高は緯度経度を計測した点において GPS デバイス（62SCJ, Garmin 社）によって記録した。平均傾斜は調査区の傾斜方向の中心線についてクリノメーターにより，斜面方位は磁北を 0° として最大傾斜方向を登山用コンパスにより測定した。

## 2) 既存資料に基づく説明変数データの調査

表層地質、最深積雪深及び温量指数については、既存の資料から収集した。表層地質は産業技術総合研究所（2015）におけるシームレス地質図を用いた。最深積雪深は最深積雪深分布図（秋田県林業技術センター, 1992）、温量指数については秋田県地域森林計画編成業務要領に基づき算出した。

## 3) 数値地形解析による説明変数の抽出

数値地形解析は数値標高モデル（以下、DEM）と呼ばれるデータを用いて傾斜等の地形量を計算する手法である。DEMは格子点の標高値データで、通常、建物・橋梁等の地物や植生を除去した地上面の標高値であり（岩橋, 2019）、秋田県においては格子点間隔 10m の DEM（以下、10mDEM）が国土地理院において全県分公開され

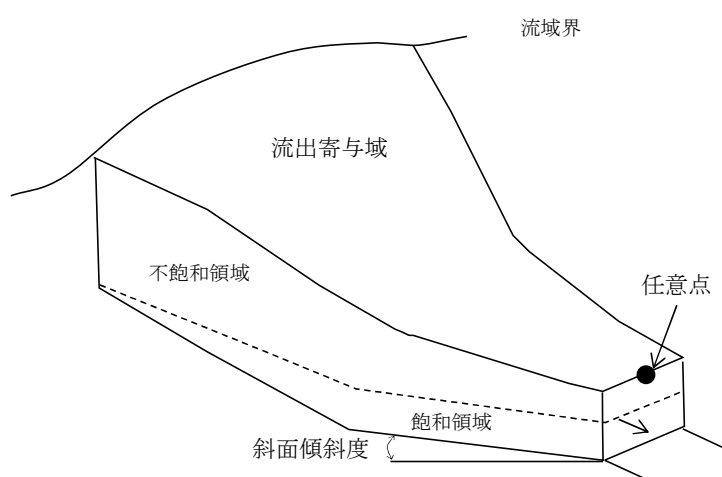


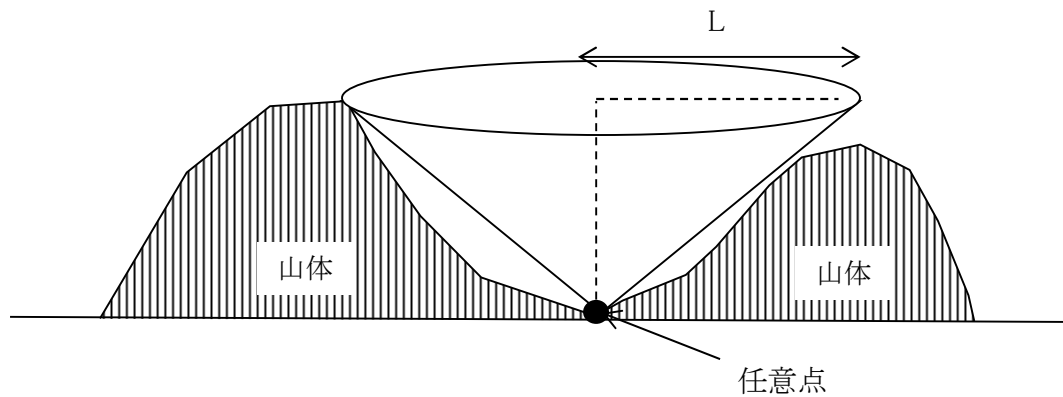
図-2 TWIの概念図

Beven and Wood(1983), 田齊ら(2004)および図子(2010)により作成

ている。この 10mDEM を国土地理院の WEB サイトからダウンロードした後、「基盤地図情報標高 DEM 変換ツール ver.1.6.9」(株式会社エコリス, 2018) により平面直角座標系の GeoTIFF ファイルへと変換し、GIS (SAGA GIS ver.7.9.0) に取り込んだ。

数値地形解析の対象としたのは TWI、開度、縦断曲率、平面曲率の 4 つの地形因子である。TWI は任意の地点の流出寄与域（集水面積）と斜面傾斜によって計算され、その地点における土壌水分量の指標である（図-2）。開度は着目する標地点から距離  $L$  の範囲内で見える空の広さを表しており（横山ら, 1999）、ある地点の日当たりの良さを示している（図-3）。縦断曲率は最大傾斜方向の、平面曲率は等高線方向の変化率を意味し、いずれも正負の値をとる。縦断曲率は負数ならば凸型の、正数ならば凹型の、平面曲率は正数ならば尾根型の、負数ならば谷壁型の斜面の形状を表現する（図-4）。

TWI、開度、縦断曲率、平面曲率のラスターデータの作成は GIS (SAGA GIS ver.7.9.0) のジオプロセッシングツールにより実施した。開度の距離は、本研究成果から地位指数マップを作成する際のメッシュサイズを 50~100m と想定していることから 50m とした。作成したラスターデータを調査地点の緯度経度座標データとともに GIS (QGIS ver.3.16.2) に取り込み、各調査地点の地形因子データを抽出した。



図－3 地上開度の概念図

(横山ら(1999)および図子(2010)を参考に作成)

|      |                  | 平面曲率               |                   |                   |
|------|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|      |                  | 尾根型斜面<br>(PlanC>0) | 直線斜面<br>(PlanC=0) | 谷壁斜面<br>(PlanC<0) |
| 縦断曲率 | 凹型斜面<br>(PrfC>0) | <br>凹形尾根型斜面        | <br>凹形直線斜面        | <br>凹形谷壁斜面        |
|      | 等斉斜面<br>(PrfC=0) | <br>等斉尾根型斜面        | <br>等斉直線斜面        | <br>等斉谷壁斜面        |
|      | 凸型斜面<br>(PrfC<0) | <br>凸形尾根型斜面        | <br>凸形直線斜面        | <br>凸形谷壁斜面        |

図－4 縦断曲率・平面曲率の概念図

## 5. 地位指数推定モデルの作成

### 1) 大流域を含む地位指数推定モデル

地位指数を応答変数，立地環境諸因子を説明変数として線型モデルを作成した。説明変数の候補には，大流域，表層地質や土壌型，斜面方位等のカテゴリカルデータと，標高，TWI，開度，縦断曲率等の数値データとがある。本研究においてはモデル化に際し，数値データをそのまま扱うモデル（以下，モデル1）と数値データをカテゴリカルデータに区分して扱うモデル（以下，モデル2）の2つについて検討した。モデル2において，有効土壌厚は50cm毎に，標高は50m毎に，斜面傾斜は5°



毎に区分した。ただし、数値地形解析によって抽出された TWI、開度、縦断曲率、平面曲率についてはデータの分布範囲が狭いため、そのまま数値データとして扱った。統計解析は統計パッケージ R-ver.4.0.2(R Development Core Team, 2020)を用いて実施し、線形回帰には lm 関数を用いた。効果のある説明変数に絞り込むため、赤池情報量基準 (Akaike's Information Criteria:AIC) に基づくステップワイズ法によって変数削減を行い、AIC が最小になるモデルを選択した。欠損値等を含む調査地データは解析から除外し、合計 360 箇所のデータについて解析を実施した。

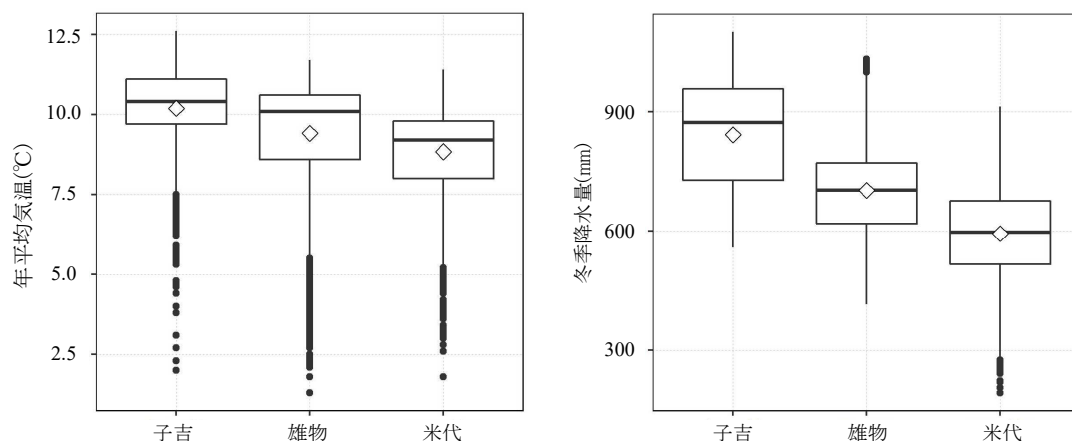
## 2) 流域毎の地位指数推定モデル

後述するようにモデル 1 およびモデル 2 においては大流域を変数に含むモデルのあてはまりが最もよかった。このことから、調査地を子吉川流域、米代川流域、雄物川流域に区分し、1) と同様の手順でモデル化を検討した。欠損値を含む調査地データを除外したため、モデル化は子吉川流域では 68 箇所、雄物川流域では 189 箇所、米代川流域では 103 箇所のデータを用いて実施した。

## Ⅲ. 結果

### 1. 秋田県の 3 大流域の気候

子吉川流域、雄物川流域、米代川流域（以下、単に子吉、雄物、米代）それぞれの年平均気温及び冬季降水量を図－5 に示す。年平均気温の範囲は子吉 2.0～12.6℃、雄物 1.3～11.7℃、米代 1.8～11.4℃となっていた。その中央値や平均値を比較すると子吉、雄物、米代の順に低くなる傾向がみられた。冬季降水量では子吉 558～1,100mm、雄物 415～1,032mm、米代 193～913mm となっており、その中央値や平均値を比較すると年平均気温同様、子吉、雄物、米代の順に低くなっていた。



図－5 各大流域の年平均気温、冬季(12-3月)降水量

箱の中程の太線は中央値、下端は第1四分位、上端は第3四分位を表す。箱内の◇は平均値を、●は外れ値を意味する。

## 2. 林齢，地位指数，及び各種立地環境因子の流域毎の分布

現地調査を実施したスギ人工林の林齢と上層木平均樹高の概要を表―1 に示す。全調査地の林齢は最小 22 年生，最大 78 年生であり，その平均は 48 年生であった。流域別では子吉が 43～73 年生で平均 51 年生，雄物が 27～78 年生で平均 47 年生，米代が 22～73 年生で 49 年生であった。全調査地の上層木平均樹高は最小 5.4m，最大 38.0m，平均 20.5m であった。子吉では 8.3～30.2m で平均 19.2m，雄物では 5.4～32.4m で平均 20.0m，米代で 7.4～38.5m，平均 22.1m であった。

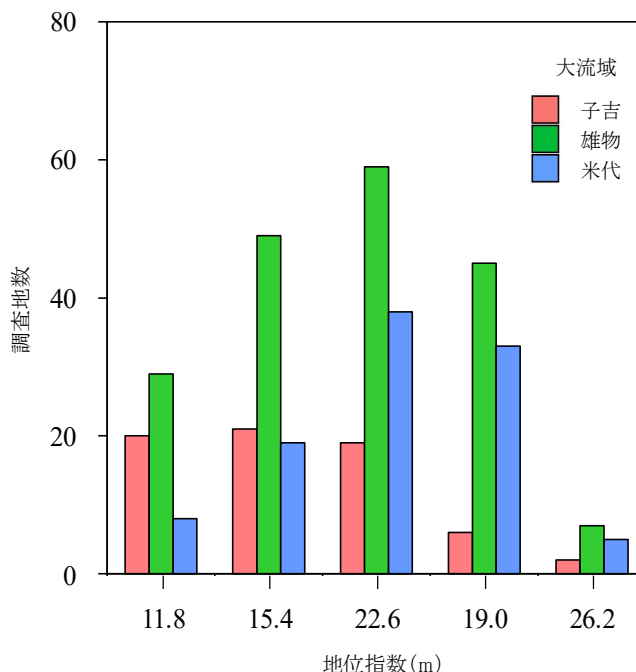
表―1 調査林分の流域毎の林齢及び上層木平均樹高

| 林分 | 林分数 | 林齢（年生） |    |    | 上層木平均樹高（m） |      |      |
|----|-----|--------|----|----|------------|------|------|
|    |     | 最小     | 最大 | 平均 | 最小         | 最大   | 平均   |
| 全体 | 360 | 22     | 78 | 48 | 5.4        | 38.5 | 20.5 |
| 子吉 | 68  | 43     | 73 | 51 | 8.3        | 30.2 | 19.2 |
| 雄物 | 189 | 27     | 78 | 47 | 5.4        | 32.4 | 20.0 |
| 米代 | 103 | 22     | 73 | 49 | 7.4        | 38.5 | 22.1 |

地位指数毎の調査地数を図―6 に示す。地位指数が 26.2m と判断された調査地は 14 か所で全体の 3.8% であった。また地位指数 22.6m は 84 か所（23.3%），19.0m は 116 か所（32.2%），15.4m は 89 か所（24.7%），11.8m は 57 か所（15.8%）であった。流域別では他の 2 流域に比較して子吉で地位指数の低い調査地の割合が高かった。

現地で調査した各調査地の土壌型，有効土壌厚，標高，斜面傾斜，斜面方位を図―7 に示す。土壌型では乾性褐色森林土壌（BA）が 19 か所，適潤性褐色森林土壌（BD）が 312 箇所，湿性褐色森林土壌（BE）が 14 箇所，黒ボク土壌（BI）が 14 箇所，グライ土壌（G）が 1 箇所であり，適潤性褐色森林土壌が全体の 86.7% を占

めた（図―7 左上）。子吉と雄物における黒ボク土壌，米代における乾性褐色森林土壌は調査地の中では確認されなかった。有効土壌厚は 10～110cm の範囲で広く観察され，いずれの流域においても 42～60cm の頻度が高かった（図―7 右上）。各調査地の標高は全体では 29～886m の範囲に分布していた

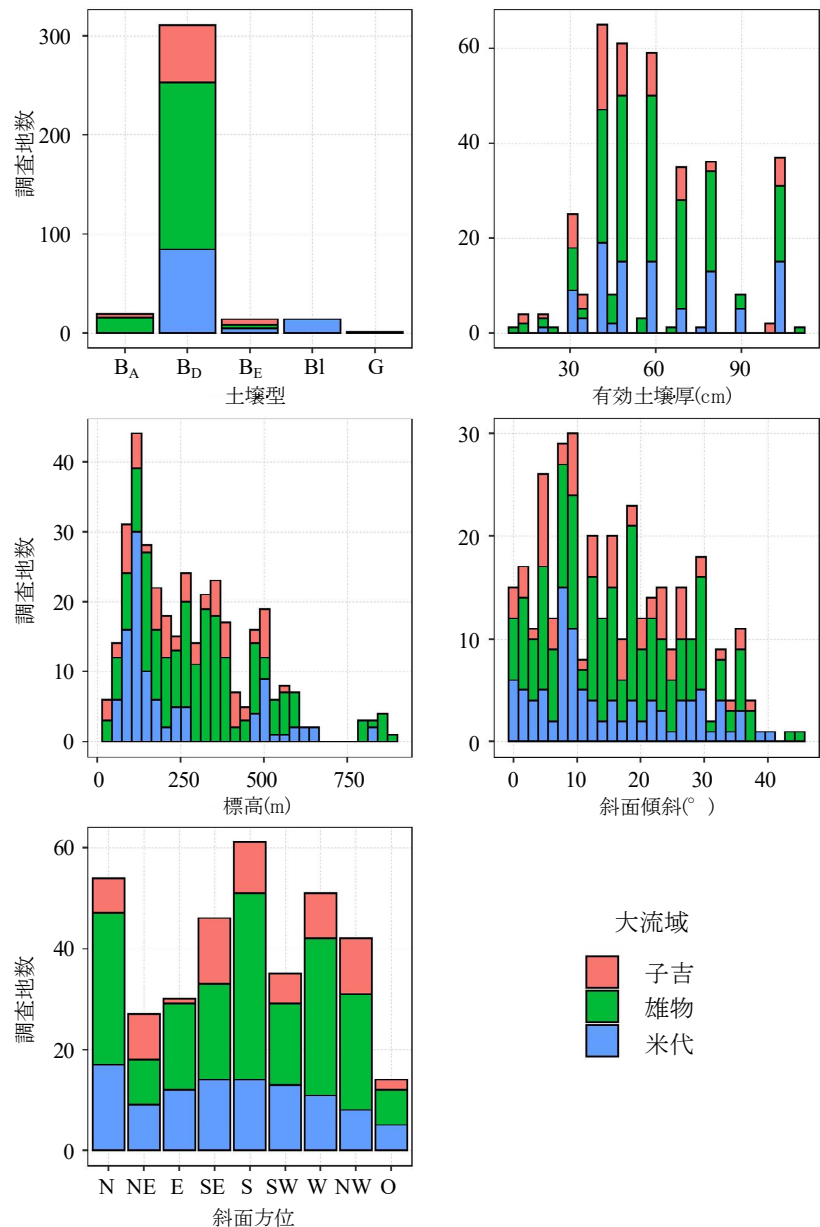


図―6 地位指数別の調査地数

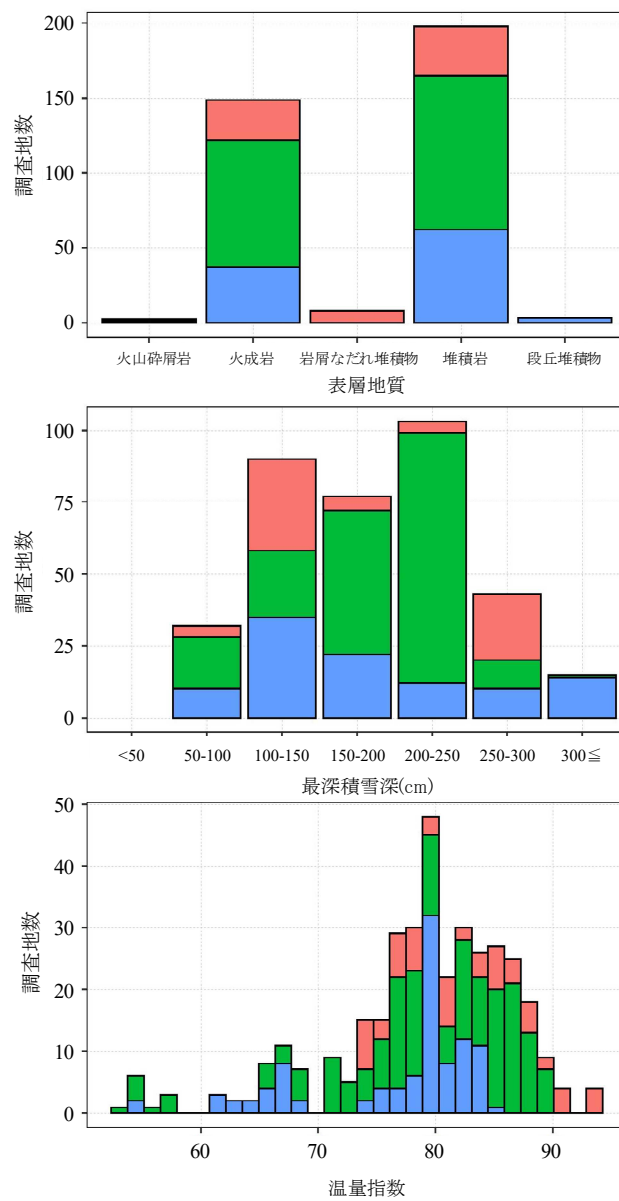
(図－7 左中央)。流域別の最大標高は子吉が 552m、雄物が 886m、米代が 817m で、子吉における調査地の標高は他流域に比較してやや低い範囲に限定されていた。米代においては標高 300～450m は調査地に含まれなかった。各調査地の斜面傾斜は 0～45 度の広い範囲に分布しており、7～9 度前後に最頻値があった(図－7 右中央)。斜面方位は、S が 61 箇所、次いで N が 54 箇所、W が 51 箇所、SE が 46 箇所であった(図－7 左下)。

既存の資料等により把握した表層地質、最大積雪深、温量指数の調査地数の頻度分布を図－8 に示す。表層地質はいずれの流域においても火成岩や堆積岩が多く、それぞれ 149 箇所と 198 箇所であった。また子吉においては岩屑なだれ堆積物の林分も確認された。最深積雪深は 50cm から 300cm まではすべての流域で確認されたが、300cm 以上については子吉では確認されなかった。温量指数は 53.3～93.7 の範囲に分布しており、80 前後に最頻値が確認された。

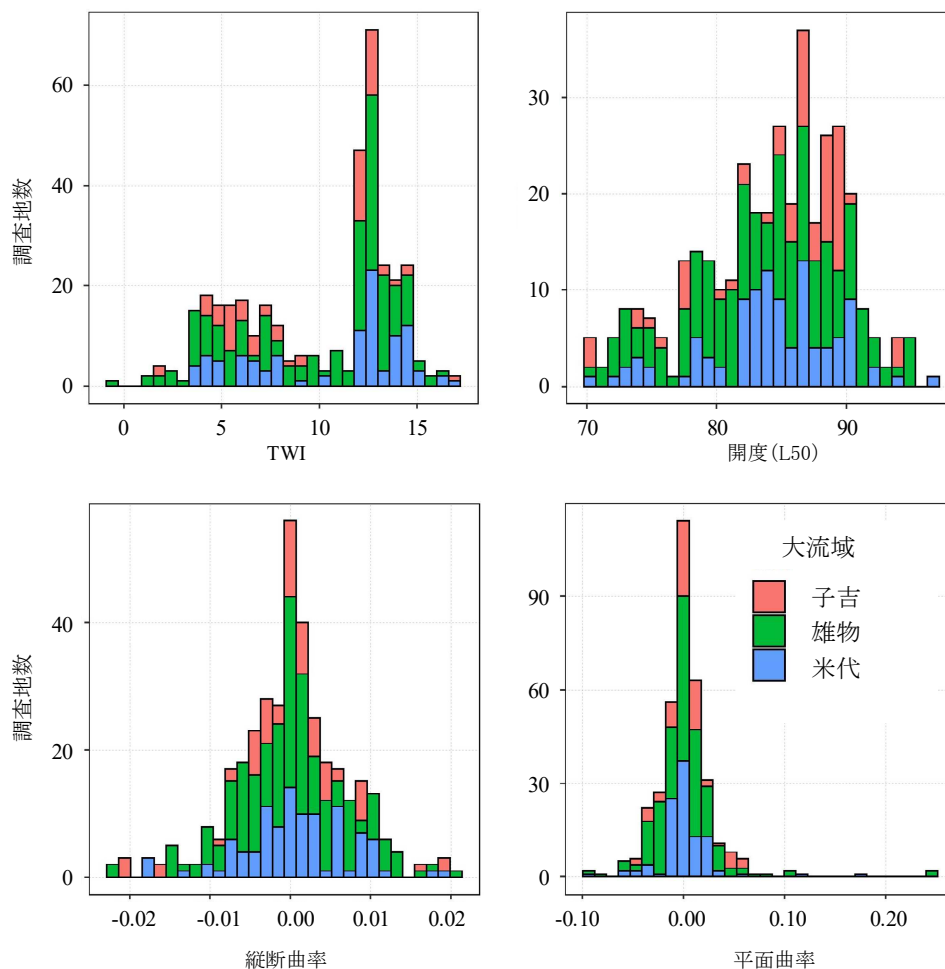
GIS の数値地形解析により把握した各調査地の TWI、縦断曲率、平面曲率及び開度の頻度分布を図－9 に示す。各指標の分布範囲は TWI が -0.60～16.9、開度が 69.8～96.3、縦断曲率が -0.02～0.02、平面曲率が -0.10～0.24 であった。TWI は 12 付近に、開度は 87 付近に、縦断曲率および平面曲率は 0 付近最頻値を有する分布を呈していた。



図－7 現地調査で把握した土壌型、有効土層厚、標高、斜面傾斜及び斜面方位



図－8 資料により把握した各調査地の表層地質，最深積雪深及び温量指数



図－9 GISで算出した各調査地のTWI、開度、縦断曲率及び平面曲率の分布

### 3. 作成されたモデルの概要

#### 1) 大流域を含む地位指数推定モデル

作成したモデルの概要を表－2に、説明変数毎の分散分析の結果を表－3に示す。モデル1において、最も当てはまりがよい、すなわち自由度調整済み決定係数  $R^2_a$  が最も高く、AIC が最小であったのは大流域、表層地質、土壌型、標高、開度、最深積雪深を説明変数とするモデルであった ( $R^2_a=0.242$ , AIC=1931.5)。分散分析の結果、いずれの説明変数も有意であり ( $p<0.05$ )、また多重共線性の有無の判断指標である各説明変数の自由度調整済み GVIF はいずれも2未満と低かった。モデル2においては、モデル1に温量指数を説明変数として加えたモデルの当てはまりが最もよく ( $R^2_a=0.303$ , AIC=1916.6)、モデル1よりも  $R^2_a$  は高くなった。分散分析の結果、表層地質は有意でなかったものの ( $p=0.080$ )、他の説明変数については有意であった ( $p<0.05$ )。また GVIF はいずれも2未満であった。

表－2 流域を含む２つの線型モデルの概要

|   | モデル式                                                          | $R_a^2$ | AIC    |
|---|---------------------------------------------------------------|---------|--------|
| 1 | 21.163 + 大流域 + 表層地質 + 土壌型 - 0.010×標高 - 0.085×開度 + 最深積雪深       | 0.242   | 1931.5 |
| 2 | 6.791 + 大流域 + 表層地質 + 土壌型 + 標高 - 0.108×開度 + 最深積雪深 + 0.149×温量指数 | 0.303   | 1916.6 |

表－3 流域を含む２つの線型モデルの分散分析表

| モデル | 項目      | 平方和    | 自由度 | F値     | 有意確率      | 自由度調整済み<br>GVIF |
|-----|---------|--------|-----|--------|-----------|-----------------|
| 1   | 大流域     | 106.37 | 2   | 4.485  | 0.012 *   | 1.20            |
|     | 表層地質    | 116.66 | 4   | 2.459  | 0.045 *   | 1.08            |
|     | 土壌型     | 347.72 | 4   | 7.330  | 0.000 *** | 1.07            |
|     | 標高      | 502.21 | 1   | 42.347 | 0.000 *** | 1.57            |
|     | 開度(L50) | 71.20  | 1   | 6.004  | 0.015 *   | 1.05            |
|     | 最深積雪深   | 294.83 | 5   | 4.972  | 0.000 *** | 1.20            |
| 2   | 大流域     | 196.14 | 2   | 8.979  | 0.000 *** | 1.52            |
|     | 表層地質    | 91.83  | 4   | 2.102  | 0.080     | 1.14            |
|     | 土壌型     | 396.40 | 4   | 9.073  | 0.000 *** | 1.12            |
|     | 標高      | 524.56 | 16  | 3.002  | 0.000 *** | 1.10            |
|     | 開度(L50) | 106.84 | 1   | 9.782  | 0.002 **  | 1.15            |
|     | 最深積雪深   | 144.68 | 5   | 2.649  | 0.023 *   | 1.11            |
|     | 温量指数    | 43.10  | 1   | 3.946  | 0.048 *   | 1.36            |

作成されたモデルを表－4に示す。大流域は子吉を基準とした場合に雄物，米代ともに有意であり（ $p<0.01$ ），標準化回帰係数（以下，単に係数）はそれぞれ 1.648，1.618 であった。すなわち，その他の説明変数がすべて同じであれば，子吉よりも雄物や米代で地位指数が高いという結果が得られた。表層地質は分散分析においては有意であったものの，カテゴリ別では有意ではなく，係数は正負様々な値を示した。土壌型は適潤性褐色森林土壌や湿性褐色森林土壌，黒ボク土壌で有意で（ $p<0.01$ ），係数はそれぞれ 3.854，6.238，4.919 となっており，乾性褐色森林土壌に比較して適潤性褐色森林土壌，黒ボク土壌，湿性褐色森林土壌の順に地位指数が高くなる傾向があった。標高や開度（L50）の係数は

それぞれ-0.468, -0.118 であり、標高や開度が高いほど地位指数は低下するという結果であった。最深積雪深は、200cm 以上のカテゴリにおいて有意で ( $p<0.05$ )、係数は順に 2.122, 2.549, 4.476 となっており、雪が多いほど地位指数が高くなる傾向が見られた。

モデル 2 について、大流域は雄物・米代ともに有意で ( $p<0.001$ )、係数はそれぞれ 2.450, 3.340 であり、子吉に比較して雄物、米代の順に地位指数が高くなる傾向があった(表-4)。表層地質はカテゴリ別でも有意ではなく、その係数はカテゴリにより正負様々な値を示した。土壌型はいずれのカテゴリも有意であり ( $p<0.05$ )、係数は適潤性褐色森林土壌 (4.187)、黒ボク土壌 (6.236)、湿性褐色森林土壌 (6.425)、グライ化土壌 (7.875) の順に高くなった。標高は分散分析では有意であったが、カテゴリ別では有意ではなく、係数は正負様々な値を示した。開度及び温量指数の係数はそれぞれ-0.151 と 0.286 であり、地位指数に対して開度はマイナスに、温量指数はプラスに作用するという結果であった。最深積雪深は分散分析においては有意であったが、カテゴリ別では積雪深 250cm 以上でのみ有意であり、係数は 250cm 以上 300cm 未満が 3.056, 300cm 以上が 2.567 であった。

現地調査によって実測した地位指数と作成された 2 つのモデルから予測された地位指数との関係を図-10 に示す。いずれのモデルにおいても回帰直線の傾きは 1:1 の直線に比較しての小さく、低い地位指数を過大に、高い地位指数を過小に予測する傾向が確認された。

表-4 流域を含む2つモデルの偏回帰係数と各統計指標

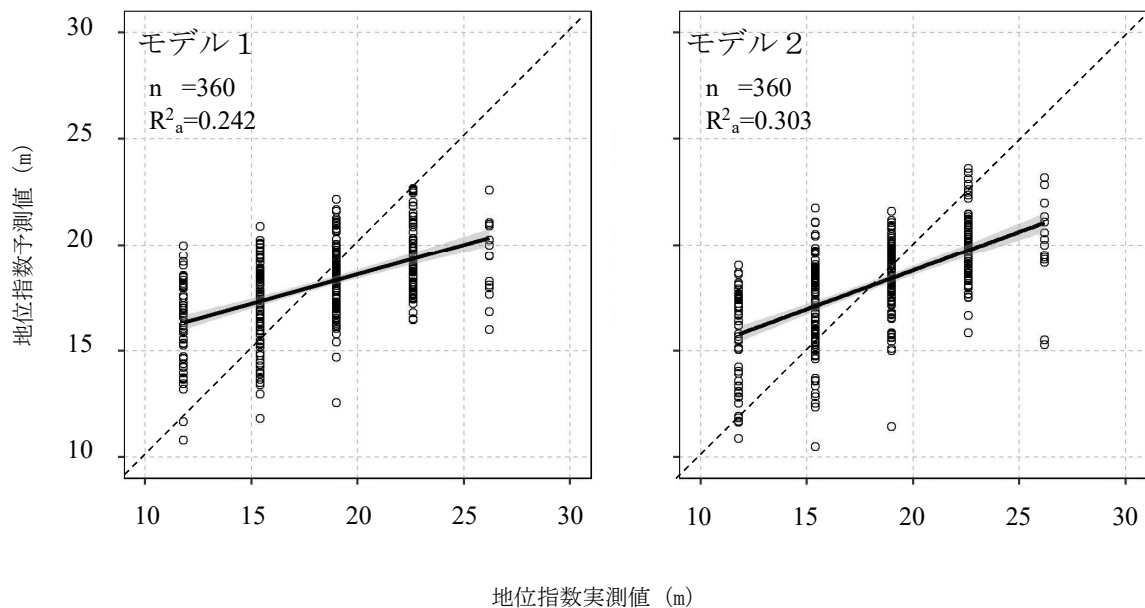
| モデル | 説明変数           | 偏回帰係数  | 標準化回帰係数 | 標準誤差  | t値     | 有意確率       |
|-----|----------------|--------|---------|-------|--------|------------|
| 1   | 切片             | 21.163 |         | 3.836 | 5.517  | 0.0000 *** |
|     | 大流域            |        |         |       |        |            |
|     | 子吉川            | 0.000  |         |       |        |            |
|     | 雄物川            | 1.648  | 1.648   | 0.598 | 2.755  | 0.0062 **  |
|     | 米代川            | 1.618  | 1.618   | 0.609 | 2.657  | 0.0083 **  |
|     | 表層地質           |        |         |       |        |            |
|     | 火山砕屑岩          | 0.000  |         |       |        |            |
|     | 火成岩            | 1.072  | 1.072   | 2.493 | 0.430  | 0.6673     |
|     | 岩屑なだれ堆積物       | -2.591 | -2.591  | 2.806 | -0.923 | 0.3566     |
|     | 堆積岩            | 0.257  | 0.257   | 2.494 | 0.103  | 0.9180     |
|     | 段丘堆積物          | 2.191  | 2.191   | 3.203 | 0.684  | 0.4944     |
|     | 土壌型            |        |         |       |        |            |
|     | 乾性褐色森林土壌       | 0.000  |         |       |        |            |
|     | 適潤性褐色森林土壌      | 3.854  | 3.854   | 0.837 | 4.604  | 0.0000 *** |
|     | 湿性褐色森林土壌       | 6.238  | 6.238   | 1.263 | 4.940  | 0.0000 *** |
|     | 黒ボク土壌          | 4.919  | 4.919   | 1.412 | 3.483  | 0.0006 **  |
|     | グライ土壌          | 6.370  | 6.370   | 3.561 | 1.789  | 0.0745     |
|     | 標高             | -0.010 | -0.468  | 0.002 | -6.507 | 0.0000 *** |
|     | 開度(L50)        | -0.085 | -0.118  | 0.035 | -2.450 | 0.0148 *   |
|     | 最深積雪深          |        |         |       |        |            |
|     | 50cm以上100cm未満  | -0.914 | -0.914  | 0.761 | -1.201 | 0.2306     |
|     | 100cm以上150cm未満 | 0.000  | 0.000   |       |        |            |
|     | 150cm以上200cm未満 | 1.148  | 1.148   | 0.594 | 1.934  | 0.0540     |
|     | 200cm以上250cm未満 | 2.122  | 2.122   | 0.619 | 3.430  | 0.0007 **  |
|     | 250cm以上300cm未満 | 2.549  | 2.549   | 0.884 | 2.884  | 0.0042 **  |
|     | 300cm以上        | 4.476  | 4.476   | 1.258 | 3.558  | 0.0004 **  |

表ー4 流域を含む2つモデルの偏回帰係数と各統計指標(続き)

| モデル | 説明変数           | 偏回帰係数  | 標準化回帰係数 | 標準誤差  | t値     | 有意確率       |
|-----|----------------|--------|---------|-------|--------|------------|
| 2   | 切片             | 6.791  |         | 8.271 | 0.821  | 0.4122     |
|     | 大流域            |        |         |       |        |            |
|     | 子吉川            | 0.000  | 0.000   |       |        |            |
|     | 雄物川            | 2.450  | 2.450   | 0.641 | 3.825  | 0.0002 **  |
|     | 米代川            | 3.340  | 3.340   | 0.858 | 3.891  | 0.0001 **  |
|     | 表層地質           |        |         |       |        |            |
|     | 火山砕屑岩          | 0.000  | 0.000   |       |        |            |
|     | 火成岩            | 2.696  | 2.696   | 2.430 | 1.109  | 0.2681     |
|     | 岩屑なだれ堆積物       | -1.250 | -1.250  | 2.751 | -0.454 | 0.6499     |
|     | 堆積岩            | 2.191  | 2.191   | 2.445 | 0.896  | 0.3708     |
|     | 段丘堆積物          | 2.896  | 2.896   | 3.149 | 0.920  | 0.3584     |
|     | 土壌型            |        |         |       |        |            |
|     | 乾性褐色森林土壌       | 0.000  | 0.000   |       |        |            |
|     | 適潤性褐色森林土壌      | 4.187  | 4.187   | 0.816 | 5.130  | 0.0000 *** |
|     | 湿性褐色森林土壌       | 6.425  | 6.425   | 1.227 | 5.237  | 0.0000 *** |
|     | 黒ボク土壌          | 6.236  | 6.236   | 1.503 | 4.148  | 0.0000 *** |
|     | グライ土壌          | 7.875  | 7.875   | 3.458 | 2.277  | 0.0234 *   |
|     | 標高             |        |         |       |        |            |
|     | 50m未満          | 0.000  | 0.000   |       |        |            |
|     | 50m以上100m未満    | -1.330 | -1.330  | 1.607 | -0.827 | 0.4087     |
|     | 100m以上150m未満   | -0.655 | -0.655  | 1.612 | -0.407 | 0.6845     |
|     | 150m以上200m未満   | -1.779 | -1.779  | 1.681 | -1.058 | 0.2907     |
|     | 200m以上250m未満   | 0.765  | 0.765   | 1.766 | 0.433  | 0.6652     |
|     | 250m以上300m未満   | 0.273  | 0.273   | 1.791 | 0.153  | 0.8788     |
|     | 300m以上350m未満   | 0.028  | 0.028   | 1.905 | 0.015  | 0.9881     |
|     | 350m以上400m未満   | -2.444 | -2.444  | 1.909 | -1.280 | 0.2014     |
|     | 400m以上450m未満   | 0.078  | 0.078   | 2.212 | 0.035  | 0.9718     |
|     | 450m以上500m未満   | 0.715  | 0.715   | 2.179 | 0.328  | 0.7429     |
|     | 500m以上550m未満   | -2.864 | -2.864  | 2.330 | -1.229 | 0.2199     |
|     | 550m以上600m未満   | -2.641 | -2.641  | 2.314 | -1.141 | 0.2547     |
|     | 600m以上650m未満   | 0.879  | 0.879   | 2.967 | 0.296  | 0.7673     |
|     | 650m以上700m未満   | -1.236 | -1.236  | 4.014 | -0.308 | 0.7583     |
|     | 750m以上800m未満   | -5.805 | -5.805  | 3.544 | -1.638 | 0.1024     |
|     | 800m以上850m未満   | -4.432 | -4.432  | 2.721 | -1.629 | 0.1043     |
|     | 850m以上900m未満   | -6.343 | -6.343  | 3.703 | -1.713 | 0.0876     |
|     | 開度 (L50)       | -0.108 | -0.151  | 0.034 | -3.128 | 0.0019 **  |
|     | 最深積雪深          |        |         |       |        |            |
|     | 50cm以上100cm未満  | -0.264 | -0.264  | 0.810 | -0.326 | 0.7447     |
|     | 100cm以上150cm未満 | 0.000  | 0.000   |       |        |            |
|     | 150cm以上200cm未満 | 0.383  | 0.383   | 0.640 | 0.599  | 0.5497     |
|     | 200cm以上250cm未満 | 1.385  | 1.385   | 0.715 | 1.937  | 0.0536     |
|     | 250cm以上300cm未満 | 3.056  | 3.056   | 0.937 | 3.263  | 0.0012 **  |
|     | 300cm以上        | 2.567  | 2.567   | 1.302 | 1.972  | 0.0495 *   |
|     | 温量指数           | 0.149  | 0.286   | 0.075 | 1.986  | 0.0478 *   |

表中の\*は、「\*」は  $p < 0.05$  , 「\*\*」は  $p < 0.01$  , 「\*\*\*」は  $p < 0.001$  で有意であることを示す。





図－10 地位指数実測値と流域を含む2モデルによる予測値の比較

実線は実測値と予測値から算出された回帰直線であり、周囲の網掛け部は95%信頼区間を意味する。また比較のため、実測値:予測値=1:1の線を点線で示した。

## 2) 流域毎の地位指数推定モデル

### (1) 子吉川流域

子吉川流域のデータのみを用いて作成された2モデルの概要を表－5に、分散分析の結果を表－6に示す。子吉1においては表層地質、TWI、開度、縦断曲率、斜面方位、最深積雪深、温量指数を説明変数とするモデルの当てはまりが最もよかった ( $R^2_a=0.258$ ,  $AIC=373.9$ )。このうち TWI、縦断曲率、最深積雪深および温量指数は分散分析において統計的に有意であった ( $p<0.05$ )。一方、子吉2では、候補とした説明変数すべてを含むモデルの当てはまりが最もよく ( $R^2_a=0.457$ ,  $AIC=355.5$ )、子吉1よりも  $R^2_a$  は高かった。分散分析の結果、説明変数のうち土壌型、標高、TWI、縦断曲率、斜面方位、温量指数は統計的に有意であった ( $p<0.05$ )。GVIF は子吉2における温量指数では13.95と高かったが、それ以外の変数では5未満と低かった。

作成されたモデルを表－7に示す。表層地質は分散分析においては有意でなかったが、カテゴリ別ではすべて有意であった ( $p<0.05$ )。係数は岩屑なだれ堆積物-4.056、堆積岩-3.494で、それぞれ地位指数に対してマイナスに作用する結果となった。分散分析において有意であった TWI、縦断曲率及び温量指数の係数はそれぞれ-0.247、0.370、0.882であった。すなわち TWIが高いほど地位指数は下がり、縦断曲率が正、すなわち傾斜方向に凹型の地形ほど、また温量指数が高いほど地位指数が高くなる結果となった。開度は有意ではなかったが、係数は-0.347であった。斜面方位はカテゴリ別でも有意ではなく、カテゴリの係数の符号はいずれも正であった。最深積雪深はカテゴリ別では250cm以上300cm未満のみ有意で、係数は3.933であった。

表－5 流域別それぞれの線形モデルの概要

|     | モデル式                                                                                                                            | $R_a^2$ | AIC    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|
| 子吉1 | -13.125 + 表層地質 - 0.257×TWI - 0.234×開度 + 184.151×縦断曲率<br>+ 斜面方位 + 最深積雪深 + 0.584×温量指数                                             | 0.258   | 373.9  |
| 子吉2 | -159.616 + 表層地質 + 土壌型 + 有効土層厚 + 標高 - 0.358×TWI<br>- 0.357×開度 + 343.744×縦断曲率 + 51.468×平面曲率 + 斜面傾斜<br>+ 斜面方位 + 最深積雪深 + 2.226×温量指数 | 0.457   | 355.5  |
| 雄物1 | 67.843 + 表層地質 + 土壌型 - 0.021×標高 - 0.163×開度<br>+ 16.941×平面曲率 - 0.037×斜面傾斜 + 最深積雪深<br>- 0.325×温量指数                                 | 0.277   | 1011.2 |
| 雄物2 | 40.141 + 土壌型 + 標高 - 0.150×開度 + 14.206×平面曲率<br>- 0.214×温量指数                                                                      | 0.364   | 982.3  |
| 米代1 | 21.377 + 土壌型 - 0.017×標高 - 130.690×縦断曲率 + 最深積雪深                                                                                  | 0.206   | 545.3  |
| 米代2 | -32.505 + 表層地質 + 標高 + 0.152×TWI - 150.086×縦断曲率<br>+ 最深積雪深 + 0.558×温量指数                                                          | 0.365   | 532.1  |

子吉2について、表層地質はカテゴリ別でも有意でなかったが、係数は岩屑なだれ堆積物 0.047、堆積岩-3.669 であり、正負の符号がカテゴリにより異なった（表－7）。土壌型の係数は適潤性褐色森林土壌 0.783、湿性褐色森林土壌 7.615 であり、湿性褐色森林土壌のみ有意であった。有効土層厚は分散分析で有意でなかったがカテゴリ別ではすべて有意であり、係数は 50cm 未満 6.505、50cm 以上 100cm 未満 6.455 であった。標高はカテゴリ別では 550m 以上 600m 未満でのみ有意で、係数は 40.0002 であった。その他の標高カテゴリについては有意ではないものの概ね標高が高くなるとともに係数が増加する傾向が見られた。TWI や縦断曲率の係数はそれぞれ-0.343、0.690 であり、地位指数は TWI が高いほど下がり、縦断方向に凹型の地形ほど高くなるという結果となった。開度と平面曲率は有意ではなかったものの、係数はそれぞれ-0.530 と 0.300 であった。分散分析でも有意でなかった斜面傾斜は、カテゴリ別では 15 度以上 20 度未満でのみ有意であり、係数は 4.653 であった。その他のカテゴリについては有意ではないが、35 度以上 40 度未満の係数のみ符号が負であった。斜面方位は N、SE、S のカテゴリでのみ有意で、係数はそれぞれ 12.130、15.535、14.211 であった。またその他のカテゴリも有意ではないが、いずれも符号は正であった。最深積雪深は分散分析では有意でなかったが、カテゴリ別では 50cm 以上 100cm 未満でのみ有意であり、係数は-13.584 であった。それ以外ではカテゴリ毎に正負の符号が異なり、一定の傾向は確認されなかった。温量指数の係数は 3.363 であり、地位指数に対してプラスに作用する結果となった。

表ー6 子吉川流域で作成された2モデルの分散分析表

| モデル | 項目      | 平方和    | 自由度 | F値     | 有意確率      | 自由度調整済み<br>GVIF |
|-----|---------|--------|-----|--------|-----------|-----------------|
| 子吉1 | 表層地質    | 61.62  | 2   | 2.795  | 0.071     | 1.56            |
|     | TWI     | 45.62  | 1   | 4.139  | 0.047 *   | 1.15            |
|     | 開度(L50) | 30.86  | 1   | 2.800  | 0.101     | 1.97            |
|     | 縦断曲率    | 45.70  | 1   | 4.146  | 0.047 *   | 1.73            |
|     | 斜面方位    | 158.28 | 8   | 1.795  | 0.101     | 1.14            |
|     | 最深積雪深   | 118.38 | 4   | 2.685  | 0.042 *   | 1.46            |
|     | 温量指数    | 153.91 | 1   | 13.964 | 0.000 *** | 2.24            |
| 子吉2 | 表層地質    | 26.03  | 2   | 1.616  | 0.218     | 3.15            |
|     | 土壌型     | 73.00  | 2   | 4.531  | 0.020 *   | 1.81            |
|     | 有効土壌厚   | 50.90  | 2   | 3.160  | 0.059     | 2.11            |
|     | 標高      | 251.51 | 11  | 2.839  | 0.014 *   | 2.08            |
|     | TWI     | 42.38  | 1   | 5.261  | 0.030 *   | 1.66            |
|     | 開度(L50) | 33.27  | 1   | 4.130  | 0.052     | 2.90            |
|     | 縦断曲率    | 77.19  | 1   | 9.584  | 0.005 **  | 2.48            |
|     | 平面曲率    | 18.93  | 1   | 2.351  | 0.137     | 2.17            |
|     | 斜面傾斜    | 75.26  | 7   | 1.335  | 0.274     | 1.51            |
|     | 斜面方位    | 234.20 | 8   | 3.635  | 0.006 **  | 1.58            |
|     | 最深積雪深   | 52.98  | 4   | 1.644  | 0.193     | 3.02            |
|     | 温量指数    | 57.80  | 1   | 7.176  | 0.013 *   | 13.95           |

表ー7 子吉川流域における2モデルの偏回帰係数と各統計指標

| モデル | 説明変数     | 偏回帰係数   | 標準化回帰係数 | 標準誤差   | t値     | 有意確率     |
|-----|----------|---------|---------|--------|--------|----------|
| 子吉1 | 切片       | -13.125 |         | 19.495 | -0.673 | 0.5039   |
|     | 表層地質     |         |         |        |        |          |
|     | 火成岩      | 0.000   | 0.000   |        |        |          |
|     | 岩屑なだれ堆積物 | -4.056  | -4.056  | 1.900  | -2.135 | 0.0378 * |
|     | 堆積岩      | -3.494  | -3.494  | 1.688  | -2.069 | 0.0438 * |
|     | TWI      | -0.257  | -0.247  | 0.126  | -2.034 | 0.0473 * |
|     | 開度(L50)  | -0.234  | -0.347  | 0.140  | -1.673 | 0.1007   |
|     | 縦断曲率     | 184.151 | 0.370   | 90.443 | 2.036  | 0.0472 * |

表ー7 子吉川流域における2モデルの偏回帰係数と各統計指標(続き1)

| モデル | 説明変数           | 偏回帰係数    | 標準化回帰係数 | 標準誤差    | t値     | 有意確率      |
|-----|----------------|----------|---------|---------|--------|-----------|
| 子吉2 | 斜面方位           |          |         |         |        |           |
|     | N              | 6.359    | 6.359   | 3.900   | 1.630  | 0.1094    |
|     | NE             | 4.360    | 4.360   | 3.975   | 1.097  | 0.2780    |
|     | E              | 0.000    | 0.000   |         |        |           |
|     | SE             | 6.529    | 6.529   | 3.555   | 1.837  | 0.0723    |
|     | S              | 5.579    | 5.579   | 3.574   | 1.561  | 0.1250    |
|     | SW             | 1.531    | 1.531   | 4.074   | 0.376  | 0.7087    |
|     | W              | 2.408    | 2.408   | 3.794   | 0.635  | 0.5285    |
|     | NW             | 3.118    | 3.118   | 3.745   | 0.833  | 0.4092    |
|     | O              | 3.124    | 3.124   | 4.342   | 0.719  | 0.4753    |
|     | 最深積雪深          |          |         |         |        |           |
|     | 50cm以上100cm未満  | -3.641   | -3.641  | 3.155   | -1.154 | 0.2540    |
|     | 100cm以上150cm未満 | 0.000    | 0.000   |         |        |           |
|     | 150cm以上200cm未満 | 4.286    | 4.286   | 2.557   | 1.676  | 0.1001    |
|     | 200cm以上250cm未満 | 3.754    | 3.754   | 2.095   | 1.792  | 0.0794    |
|     | 250cm以上300cm未満 | 3.933    | 3.933   | 1.356   | 2.901  | 0.0056 ** |
|     | 温量指数           | 0.584    | 0.882   | 0.156   | 3.737  | 0.0005 ** |
|     | 切片             | -159.616 |         | 74.472  | -2.143 | 0.0416 *  |
|     | 表層地質           |          |         |         |        |           |
|     | 火成岩            | 0.000    | 0.000   |         |        |           |
|     | 岩屑なだれ堆積物       | 0.047    | 0.047   | 3.806   | 0.012  | 0.9903    |
|     | 堆積岩            | -3.669   | -3.669  | 2.164   | -1.695 | 0.1020    |
|     | 土壌型            |          |         |         |        |           |
|     | 乾性褐色森林土壌       | 0.000    | 0.000   |         |        |           |
|     | 適潤性褐色森林土壌      | 0.783    | 0.783   | 2.894   | 0.270  | 0.7890    |
|     | 湿性褐色森林土壌       | 7.615    | 7.615   | 3.490   | 2.182  | 0.0383 *  |
|     | 有効土層厚          |          |         |         |        |           |
|     | 50cm未満         | 6.505    | 6.505   | 2.710   | 2.401  | 0.0238 *  |
|     | 50cm以上100cm未満  | 6.455    | 6.455   | 2.627   | 2.457  | 0.0210 *  |
|     | 100cm以上        | 0.000    | 0.000   |         |        |           |
|     | 標高             |          |         |         |        |           |
|     | 50m未満          | 0.000    | 0.000   |         |        |           |
|     | 50m以上100m未満    | -0.457   | -0.457  | 4.537   | -0.101 | 0.9205    |
|     | 100m以上150m未満   | -1.413   | -1.413  | 4.733   | -0.299 | 0.7676    |
|     | 150m以上200m未満   | 8.668    | 8.668   | 5.786   | 1.498  | 0.1462    |
|     | 200m以上250m未満   | 1.703    | 1.703   | 6.478   | 0.263  | 0.7947    |
|     | 250m以上300m未満   | 6.283    | 6.283   | 8.454   | 0.743  | 0.4640    |
|     | 300m以上350m未満   | 15.043   | 15.043  | 12.341  | 1.219  | 0.2338    |
|     | 350m以上400m未満   | 17.585   | 17.585  | 11.171  | 1.574  | 0.1275    |
|     | 400m以上450m未満   | 19.209   | 19.209  | 12.150  | 1.581  | 0.1260    |
|     | 450m以上500m未満   | 27.479   | 27.479  | 15.492  | 1.774  | 0.0878    |
|     | 500m以上550m未満   | 32.463   | 32.463  | 17.731  | 1.831  | 0.0786    |
|     | 550m以上600m未満   | 40.002   | 40.002  | 18.004  | 2.222  | 0.0352 *  |
|     | TWI            | -0.358   | -0.343  | 0.156   | -2.294 | 0.0301 *  |
|     | 開度(L50)        | -0.357   | -0.530  | 0.176   | -2.032 | 0.0525    |
|     | 縦断曲率           | 343.744  | 0.690   | 111.038 | 3.096  | 0.0047 ** |
|     | 平面曲率           | 51.468   | 0.300   | 33.569  | 1.533  | 0.1373    |

表ー7 子吉川流域における2モデルの偏回帰係数と各統計指標(続き2)

| モデル   | 説明変数           | 偏回帰係数   | 標準化回帰係数 | 標準誤差  | t値     | 有意確率      |
|-------|----------------|---------|---------|-------|--------|-----------|
| 斜面傾斜  |                |         |         |       |        |           |
|       | 5度未満           | 0.000   | 0.000   |       |        |           |
|       | 5度以上～10度未満     | 2.471   | 2.471   | 1.666 | 1.484  | 0.1499    |
|       | 10度以上～15度未満    | 2.655   | 2.655   | 1.917 | 1.385  | 0.1777    |
|       | 15度以上～20度未満    | 4.653   | 4.653   | 1.831 | 2.542  | 0.0173 *  |
|       | 20度以上～25度未満    | 3.401   | 3.401   | 2.214 | 1.536  | 0.1366    |
|       | 25度以上～30度未満    | 4.225   | 4.225   | 2.202 | 1.919  | 0.0661    |
|       | 30度以上～35度未満    | 1.822   | 1.822   | 2.826 | 0.645  | 0.5249    |
|       | 35度以上～40度未満    | -0.864  | -0.864  | 3.034 | -0.285 | 0.7780    |
| 斜面方位  |                |         |         |       |        |           |
|       | N              | 12.130  | 12.130  | 4.902 | 2.474  | 0.0202 *  |
|       | NE             | 9.948   | 9.948   | 5.242 | 1.898  | 0.0689    |
|       | E              | 0.000   | 0.000   |       |        |           |
|       | SE             | 15.535  | 15.535  | 4.408 | 3.524  | 0.0016 ** |
|       | S              | 14.211  | 14.211  | 4.376 | 3.248  | 0.0032 ** |
|       | SW             | 6.208   | 6.208   | 5.249 | 1.183  | 0.2476    |
|       | W              | 8.052   | 8.052   | 5.261 | 1.530  | 0.1380    |
|       | NW             | 8.299   | 8.299   | 4.664 | 1.779  | 0.0869    |
|       | O              | 10.510  | 10.510  | 5.493 | 1.913  | 0.0668    |
| 最深積雪深 |                |         |         |       |        |           |
|       | 50cm以上100cm未満  | -13.584 | -13.584 | 5.410 | -2.511 | 0.0186 *  |
|       | 100cm以上150cm未満 | 0.000   | 0.000   |       |        |           |
|       | 150cm以上200cm未満 | -2.298  | -2.298  | 3.403 | -0.675 | 0.5054    |
|       | 200cm以上250cm未満 | 2.501   | 2.501   | 4.679 | 0.535  | 0.5975    |
|       | 250cm以上300cm未満 | -7.167  | -7.167  | 3.704 | -1.935 | 0.0640    |
|       | 温量指数           | 2.226   | 3.363   | 0.831 | 2.679  | 0.0126 *  |

表中の\*は、「\*」は  $p < 0.05$  , 「\*\*」は  $p < 0.01$  , 「\*\*\*」は  $p < 0.001$  で有意であることを示す。

## (2) 雄物川流域

雄物川流域のデータのみを用いて作成された2モデルの概要を表ー5に、分散分析の結果を表ー8に示す。雄物1において最もあてはまりのよいモデルは表層地質、土壌型、標高、開度、平面曲率、最深積雪深、温量指数を説明変数とするモデルであった ( $R^2_a=0.277$ ,  $AIC=1011.2$ )。分散分析の結果、土壌型、標高、開度、平面曲率、最深積雪深は説明変数として統計的に有意であった ( $p<0.05$ )。GVIFは標高 6.23、温量指数 5.66 とやや高かったものの、そのほかの説明変数では 1.3 未満であった。雄物2では土壌型、標高、平面曲率、開度温量指数を説明変数とするモデルの当てはまりが最もよく ( $R^2_a=0.364$ ,  $AIC=982.3$ )、雄物1よりも  $R^2_a$  は高かった。分散分析の結果、温量指数を除くすべての説明変数が有意であった ( $p<0.05$ )。GVIFは温量指数で 4.3 とやや高かったが、それ以外については 1.3 未満であった。

作成されたモデルの詳細を表ー9に示す。雄物1において、表層地質は分散分析においては有意ではなかったが、カテゴリ別では有意であり ( $p<0.05$ )、係数は火成岩-8.023、堆積岩-8.333 であった。土

表－8 雄物川流域で作成された2モデルの分散分析表

| モデル | 項目       | 平方和    | 自由度 | F値     | 有意確率      | 自由度調整済み<br>GVIF |
|-----|----------|--------|-----|--------|-----------|-----------------|
| 雄物1 | 表層地質     | 50.35  | 2   | 2.236  | 0.110     | 1.18            |
|     | 土壌型      | 261.48 | 3   | 7.741  | 0.000 *** | 1.03            |
|     | 標高       | 71.28  | 1   | 6.330  | 0.013 *   | 6.23            |
|     | 開度 (L50) | 100.24 | 1   | 8.902  | 0.003 **  | 1.29            |
|     | 平面曲率     | 51.52  | 1   | 4.576  | 0.034 *   | 1.18            |
|     | 斜面傾斜     | 24.16  | 1   | 2.145  | 0.145     | 1.08            |
|     | 最深積雪深    | 231.27 | 5   | 4.108  | 0.002 **  | 1.23            |
|     | 温量指数     | 39.46  | 1   | 3.505  | 0.063     | 5.66            |
| 雄物2 | 土壌型      | 361.00 | 3   | 12.751 | 0.000 *** | 1.03            |
|     | 標高       | 634.12 | 14  | 4.799  | 0.000 *** | 1.12            |
|     | 開度 (L50) | 89.99  | 1   | 9.535  | 0.002 **  | 1.25            |
|     | 平面曲率     | 37.53  | 1   | 3.977  | 0.048 *   | 1.16            |
|     | 温量指数     | 29.75  | 1   | 3.152  | 0.078     | 4.30            |

表中の\*は、「\*」は  $p < 0.05$  , 「\*\*」は  $p < 0.01$  , 「\*\*\*」は  $p < 0.001$  で有意であることを示す。

壤型のカテゴリ別係数は適潤性褐色森林土壌 3.910, 湿性褐色森林土壌 7.448, グライ土壌 6.722 であり, 適潤性褐色森林土壌と湿性褐色森林土壌において有意であった ( $p < 0.01$ )。標高, 開度, 平面曲率の係数はそれぞれ-0.972, 1.459, 0.157 で, 地位指数に対して標高はマイナスに, 開度は高いほど, 斜面が尾根型 (平面曲率の符号が正) であるほどプラスに作用する結果となった。斜面傾斜と温量指数は有意ではなかったが, 係数はそれぞれ-0.098, -0.325 といずれも符号は負であった。また最深積雪深はカテゴリ別では 150cm 以上 200cm 未満と 200cm 以上 250cm 未満で有意で ( $p < 0.05$ ), 係数はそれぞれ 2.111 と 2.234 であった。それ以外のカテゴリの係数はいずれも負であった。

雄物2において, 土壌型ではすべてのカテゴリで有意であり ( $p < 0.01$ ), 係数は適潤性褐色森林土壌 4.417, 湿性褐色森林土壌 8.474, グライ土壌 9.611 であった (表－9)。標高については 500m 以上 550 未満及び 750m 以上のカテゴリでのみ有意であり ( $p < 0.05$ ), 係数は順に-6.933, -12.001, -11.427, -13.433 となっており, いずれも符号は負であった。それ以外のカテゴリの係数においては, 正負の符号及び絶対値ともに一定の傾向は確認できなかった。開度と平面曲率の係数はそれぞれ-0.219, 0.131 であった。温量指数は有意ではなかったが, その係数は-0.433 であった。

表ー9 雄物川流域における2モデルの回帰係数と各統計指標

| モデル | 説明変数           | 偏回帰係数   | 標準化回帰係数 | 標準誤差   | t値     | 有意確率       |
|-----|----------------|---------|---------|--------|--------|------------|
| 雄物1 | 切片             | 67.843  |         | 17.652 | 3.843  | 0.0002 **  |
|     | 表層地質           |         |         |        |        |            |
|     | 火山砕屑岩          | 0.000   | 0.000   |        |        |            |
|     | 火成岩            | -8.023  | -8.023  | 3.916  | -2.049 | 0.0420 *   |
|     | 堆積岩            | -8.333  | -8.333  | 3.961  | -2.104 | 0.0368 *   |
|     | 土壌型            |         |         |        |        |            |
|     | 乾性褐色森林土壌       | 0.000   | 0.000   |        |        |            |
|     | 適潤性褐色森林土壌      | 3.910   | 3.910   | 0.920  | 4.248  | 0.0000 *** |
|     | 湿性褐色森林土壌       | 7.448   | 7.448   | 1.959  | 3.803  | 0.0002 **  |
|     | グライ土壌          | 6.722   | 6.722   | 3.527  | 1.906  | 0.0583     |
|     | 標高             | -0.021  | -0.972  | 0.008  | -2.516 | 0.0128 *   |
|     | 開度 (L50)       | -0.163  | 1.459   | 0.055  | -2.984 | 0.0033 *   |
|     | 平面曲率           | 16.941  | 0.157   | 7.919  | 2.139  | 0.0338 *   |
|     | 斜面傾斜           | -0.037  | -0.098  | 0.026  | -1.465 | 0.1448     |
|     | 最深積雪深          |         |         |        |        |            |
|     | 50cm以上100cm未満  | -1.868  | -1.868  | 1.193  | -1.566 | 0.1192     |
|     | 100cm以上150cm未満 | 0.000   | 0.000   |        |        |            |
|     | 150cm以上200cm未満 | 2.111   | 2.111   | 1.009  | 2.092  | 0.0379 *   |
|     | 200cm以上250cm未満 | 2.234   | 2.234   | 1.045  | 2.138  | 0.0339 *   |
|     | 250cm以上300cm未満 | -1.147  | -1.147  | 2.107  | -0.544 | 0.5868     |
|     | 300cm以上        | -0.323  | -0.323  | 3.504  | -0.092 | 0.9267     |
|     | 温量指数           | -0.325  | -0.658  | 0.174  | -1.872 | 0.0629     |
| 雄物2 | 切片             | 40.141  |         | 12.246 | 3.278  | 0.0013 **  |
|     | 土壌型            |         |         |        |        |            |
|     | 乾性褐色森林土壌       | 0.000   | 0.000   |        |        |            |
|     | 適潤性褐色森林土壌      | 4.417   | 4.417   | 0.826  | 5.350  | 0.0000 *** |
|     | 湿性褐色森林土壌       | 8.474   | 8.474   | 1.797  | 4.717  | 0.0000 *** |
|     | グライ土壌          | 9.611   | 9.611   | 3.274  | 2.936  | 0.0038 **  |
|     | 標高             |         |         |        |        |            |
|     | 50m未満          | 0.000   | 0.000   |        |        |            |
|     | 50m以上100m未満    | -1.099  | -1.099  | 2.356  | -0.467 | 0.6413     |
|     | 100m以上150m未満   | 0.368   | 0.368   | 2.303  | 0.160  | 0.8733     |
|     | 150m以上200m未満   | -0.901  | -0.901  | 2.316  | -0.389 | 0.6977     |
|     | 200m以上250m未満   | 2.882   | 2.882   | 2.391  | 1.205  | 0.2298     |
|     | 250m以上300m未満   | 1.273   | 1.273   | 2.438  | 0.522  | 0.6022     |
|     | 300m以上350m未満   | -0.951  | -0.951  | 2.580  | -0.369 | 0.7129     |
|     | 350m以上400m未満   | -3.199  | -3.199  | 2.575  | -1.242 | 0.2158     |
|     | 400m以上450m未満   | -1.061  | -1.061  | 3.091  | -0.343 | 0.7317     |
|     | 450m以上500m未満   | -1.941  | -1.941  | 3.052  | -0.636 | 0.5257     |
|     | 500m以上550m未満   | -6.933  | -6.933  | 3.370  | -2.058 | 0.0412 *   |
|     | 550m以上600m未満   | -5.479  | -5.479  | 3.260  | -1.681 | 0.0946     |
|     | 750m以上800m未満   | -12.001 | -12.001 | 4.720  | -2.543 | 0.0119 *   |
|     | 800m以上850m未満   | -11.427 | -11.427 | 4.904  | -2.330 | 0.0210 *   |
|     | 850m以上900m未満   | -13.433 | -13.433 | 5.036  | -2.667 | 0.0084 **  |
|     | 開度 (L50)       | -0.150  | -0.219  | 0.050  | -2.354 | 0.0197 *   |
|     | 平面曲率           | 14.206  | 0.131   | 7.326  | 1.759  | 0.0804 *   |
|     | 温量指数           | -0.214  | -0.433  | 0.124  | -1.503 | 0.1347     |

表中の＊は、「＊」は  $p < 0.05$  , 「＊＊」は  $p < 0.01$  , 「＊＊＊」は  $p < 0.001$  で有意であることを示す。

### (3) 米代川流域

米代川流域のデータで作成された2モデルの概要を表－5に、分散分析の結果を表－10に示す。米代1では土壌型、標高、縦断曲率、最深積雪深を説明変数としたモデルの当てはまりが最もよかった ( $R^2_a=0.206$ ,  $AIC=545.3$ )。分散分析の結果、土壌型を除くすべての説明変数で統計的に有意であった ( $p<0.05$ )。米代2では表層地質、標高、TWI、縦断曲率、最深積雪深を説明変数とするモデルの当てはまりが最もよく ( $R^2_a=0.365$ ,  $AIC=532.1$ )、米代1よりも  $R^2_a$  は高かった。分散分析の結果、標高と縦断曲率および温量指数は統計的に有意であった ( $p<0.01$ )。2つのモデルにおけるいずれの説明変数のGVIFも4未満であった。

作成されたモデルの詳細を表－11に示す。米代1では、土壌型は有意ではないものの変数として採用され、その係数は湿性褐色森林土壌 3.424、黒ボク土壌 0.257 であった。標高および縦断曲率の係数はそれぞれ-0.865 と-0.240 で、いずれも値が高いほど地位指数に対してマイナスに作用する結果となった。最深積雪深は 250cm 以上のカテゴリにおいて有意であり ( $p<0.001$ )、係数は 250cm 以上 300cm 未満 7.197、300cm 以上 7.366 であった。しかし、それ以外についてはカテゴリにより正負の符号が異なった。

米代2において、表層地質は分散分析においては有意でなかったものの、段丘堆積物のカテゴリでのみ有意で ( $p<0.05$ )、係数は 8.123 であった (表－11)。またその他のカテゴリについては有意ではなかったが、係数の符号はいずれも正であった。標高は分散分析においては有意であったが、カテゴリ別では有意でなかった。また、その係数はカテゴリ毎に符号や絶対値が異なっており、一定の傾向は確認されなかった。TWI は有意ではなかったが変数として採用され、その係数は 0.159 であった。縦断曲率、温量指数の係数はそれぞれ-0.276 と 1.104 であった。最深積雪深はモデル1同様 250cm 以上 300cm 未満と 300cm 以上のカテゴリでのみ有意であり、係数はそれぞれ 9.715、7.312 であった。それ以外のカテゴリの係数の符号は正負様々な値を示していた。

表－10 米代川流域で作成された2モデルの分散分析表

| モデル | 項目    | 平方和    | 自由度 | F値     | 有意確率      | 自由度調整済み<br>GVIF |
|-----|-------|--------|-----|--------|-----------|-----------------|
| 米代1 | 土壌型   | 39.84  | 2   | 1.910  | 0.154     | 1.14            |
|     | 標高    | 194.38 | 1   | 18.636 | 0.000 *** | 2.27            |
|     | 縦断曲率  | 68.52  | 1   | 6.570  | 0.012 *   | 1.06            |
|     | 最深積雪深 | 205.66 | 5   | 3.944  | 0.003 **  | 1.24            |
| 米代2 | 表層地質  | 41.14  | 3   | 1.644  | 0.186     | 1.34            |
|     | 標高    | 280.66 | 10  | 3.364  | 0.001 **  | 1.33            |
|     | TWI   | 21.55  | 1   | 2.583  | 0.112     | 1.25            |
|     | 縦断曲率  | 70.24  | 1   | 8.418  | 0.005 **  | 1.20            |
|     | 最深積雪深 | 77.07  | 5   | 1.847  | 0.113     | 1.63            |
|     | 温量指数  | 121.66 | 1   | 14.582 | 0.000 *** | 3.66            |



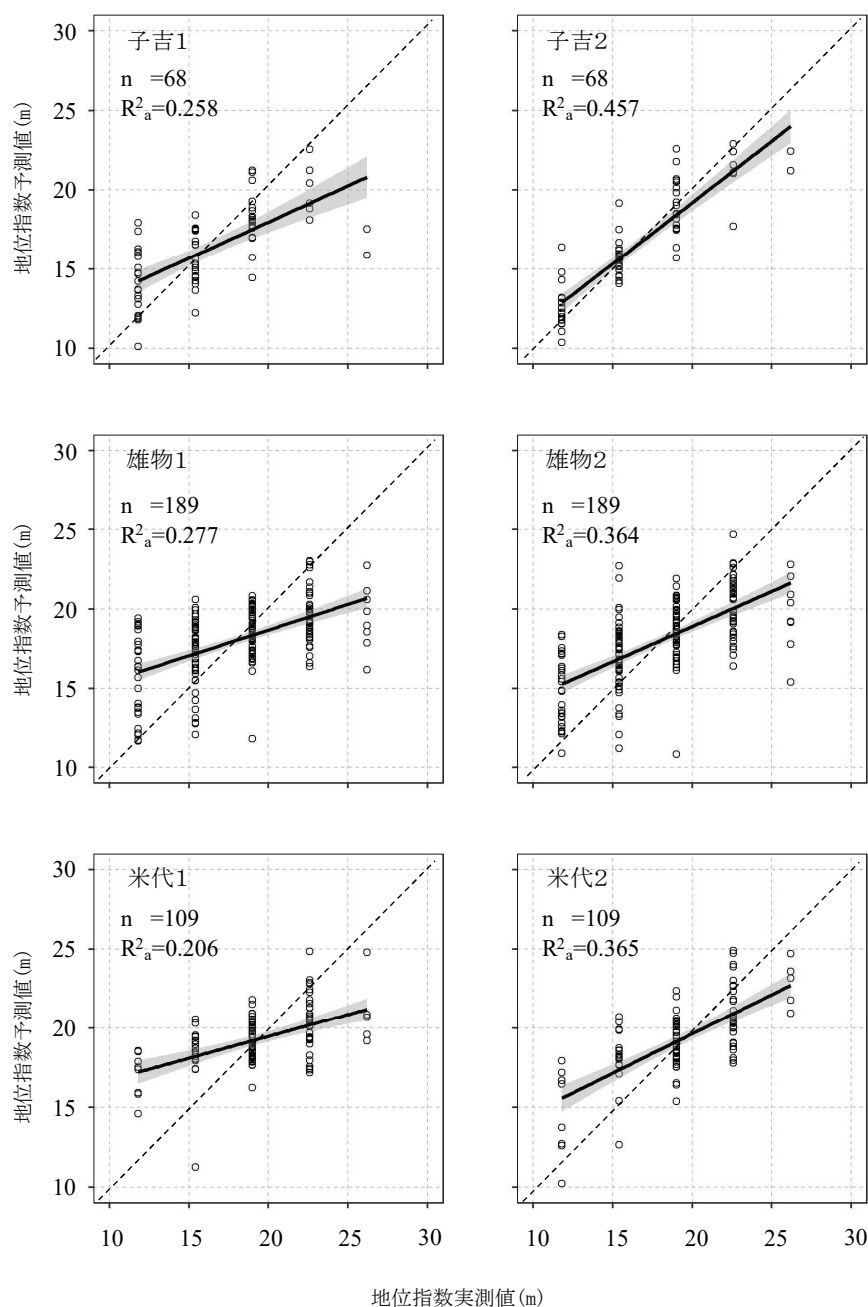
表－11 米代側流域における2モデルの回帰係数と各統計指標

| モデル | 説明変数           | 偏回帰係数    | 標準化回帰係数 | 標準誤差   | t値     | 有意確率       |
|-----|----------------|----------|---------|--------|--------|------------|
| 米代1 | 切片             | 21.377   |         | 0.803  | 26.606 | 0.0000 *** |
|     | 土壌型            |          |         |        |        |            |
|     | 適潤性褐色森林土壌      | 0.000    | 0.000   |        |        |            |
|     | 湿性褐色森林土壌       | 3.424    | 3.424   | 1.761  | 1.945  | 0.0548     |
|     | 黒ボク土壌          | 0.257    | 0.257   | 1.126  | 0.228  | 0.8202     |
|     | 標高             | -0.017   | -0.865  | 0.004  | -4.317 | 0.0000 *** |
|     | 縦断曲率           | -130.690 | -0.240  | 50.988 | -2.563 | 0.0120 *   |
|     | 最深積雪深          |          |         |        |        |            |
|     | 50cm以上100cm未満  | -0.740   | -0.740  | 1.188  | -0.623 | 0.5351     |
|     | 100cm以上150cm未満 | 0.000    | 0.000   |        |        |            |
|     | 150cm以上200cm未満 | -1.078   | -1.078  | 0.923  | -1.168 | 0.2457     |
|     | 200cm以上250cm未満 | 1.887    | 1.887   | 1.125  | 1.678  | 0.0968     |
|     | 250cm以上300cm未満 | 7.197    | 7.197   | 1.941  | 3.707  | 0.0004 **  |
|     | 300cm以上        | 7.366    | 7.366   | 1.955  | 3.768  | 0.0003 **  |
| 米代2 | 切片             | -32.505  |         | 12.227 | -2.658 | 0.0095 **  |
|     | 表層地質           |          |         |        |        |            |
|     | 火山砕屑岩          | 0.000    | 0.000   |        |        |            |
|     | 火成岩            | 5.356    | 5.356   | 3.035  | 1.765  | 0.0813     |
|     | 堆積岩            | 5.824    | 5.824   | 3.026  | 1.924  | 0.0578     |
|     | 段丘堆積物          | 8.123    | 8.123   | 3.755  | 2.163  | 0.0335 *   |
|     | 標高             |          |         |        |        |            |
|     | 50m以上100m未満    | -1.953   | -1.953  | 1.032  | -1.892 | 0.0621     |
|     | 10m以上150m未満    | 0.000    | 0.000   |        |        |            |
|     | 150m以上200m未満   | -1.422   | -1.422  | 1.172  | -1.214 | 0.2283     |
|     | 200m以上250m未満   | 0.266    | 0.266   | 2.123  | 0.125  | 0.9007     |
|     | 250m以上300m未満   | 0.590    | 0.590   | 2.012  | 0.293  | 0.7700     |
|     | 450m以上500m未満   | 3.403    | 3.403   | 2.843  | 1.197  | 0.2348     |
|     | 500m以上550m未満   | 0.631    | 0.631   | 2.968  | 0.213  | 0.8320     |
|     | 550m以上600m未満   | -5.759   | -5.759  | 3.494  | -1.648 | 0.1031     |
|     | 600m以上650m未満   | 2.652    | 2.652   | 3.091  | 0.858  | 0.3934     |
|     | 650m以上700m未満   | 7.075    | 7.075   | 4.208  | 1.681  | 0.0966     |
|     | 800m以上850m未満   | -0.944   | -0.944  | 2.372  | -0.398 | 0.6918     |
|     | TWI            | 0.152    | 0.159   | 0.095  | 1.607  | 0.1119     |
|     | 縦断曲率           | -150.086 | -0.276  | 51.729 | -2.901 | 0.0048 **  |
|     | 最深積雪深          |          |         |        |        |            |
|     | 50cm以上100cm未満  | -0.180   | -0.180  | 1.282  | -0.140 | 0.8887     |
|     | 100cm以上150cm未満 | 0.000    | 0.000   |        |        |            |
|     | 150cm以上200cm未満 | -0.583   | -0.583  | 0.905  | -0.645 | 0.5208     |
|     | 200cm以上250cm未満 | 1.980    | 1.980   | 1.603  | 1.235  | 0.2205     |
|     | 250cm以上300cm未満 | 9.715    | 9.715   | 3.360  | 2.892  | 0.0049 *   |
|     | 300cm以上        | 7.312    | 7.312   | 2.974  | 2.458  | 0.0161 *   |
|     | 温量指数           | 0.558    | 1.104   | 0.146  | 3.819  | 0.0003 **  |

表中の＊は、「＊」は  $p < 0.05$  , 「＊＊」は  $p < 0.01$  , 「＊＊＊」は  $p < 0.001$  で有意であることを示す。

#### (4) 地位指数の実測値と流域毎のモデルに基づく予測値の比較

現地調査された地位指数と流域毎の各2モデルによる予測値を比較した(図-11)。流域を含むモデル同様、いずれのモデルもその回帰直線の傾きは実測値:予測値が1:1となる直線の傾きよりも小さく、地位指数が低い林分においては過大に、地位指数が高い林分においては過小に予測する傾向がみられた。またいずれの流域においてもモデル1よりもモデル2ではまりがよい結果となった。特に子吉2は1:1の直線に近く、推定精度が高かった。



## IV. 考察

### 1. 大流域を含む地位推定モデルの特徴

秋田県の任意の林地におけるスギ人工林の

地位指数を推定するため、大流域を説明変数に含む2つのモデルを作成した。その結果、作成された2つのモデルとともに、大流域、表層地質、土壌型、標高、開度、最深積雪深が説明変数として選択され、それらは統計的に有意であった(表-2及び表-3)。このことから秋田県全域を対象としてスギ人工林の地位指数を推定する場合、これらの説明変数が重要な位置づけを担っているものと推察される。

図-11 地位指数実測値と各流域の2つのモデルによる予測値の比較  
実線は実測値と予測値から算出された回帰直線であり、周囲の網掛け部は95%信頼区間を意味する。また比較のため、実測値:予測値=1:1の線を点線で示した。

大流域についてその気候的特徴を GIS により解析した結果、年平均気温、冬季（12-3 月）降水量ともに子吉川流域、雄物川流域、米代川流域の順に低くなる傾向がみられた（図－5）。子吉川流域は秋田県において相対的に南に、米代川流域は北に、雄物川流域はその中間に位置している。冬季（12-3 月）降水量は概ね降雪量とみなせることから、秋田県においては北部ほど気温が低い、雪は少ないという気候的特徴があると考えられる。大流域を説明変数として含むモデルの当てはまりが最もよかった理由は、この気候的特徴が影響したと推察される。

表層地質は分散分析の結果、2つのモデルどちらでも説明変数として採用されたが、カテゴリ別にみると有意ではなかった（表－3および4）。この理由は、本研究における表層地質が火成岩と堆積岩に区分される調査地に偏っていたためであると考えられる。しかし、秋田県農林水産部（2020）によれば、「秋田県における地質は新第三紀層及び第四紀層などの地層が広く分布している」とし、「新第三紀層は大別すると下部の火山岩類を主とする岩相と上部の堆積岩類を主とする岩相に分けられ、火山岩類は脊梁山地を中心とする県内陸部に広く分布し、海底火山噴出物である変質安山岩、石英安山岩、玄武岩などからなり、緑色凝灰岩によって特徴づけられる」とし、「堆積岩類は出羽丘陵以西の日本海側沿いに厚く発達しており、泥岩、砂岩、礫岩などで構成」とある。さらに「第四紀層としては、平野部では盆地、扇状地、段丘、砂丘などを構成する砂礫が卓越」とある。これら秋田県の地質の特徴と照らすと、本研究における調査林分の表層地質データの偏りは秋田県の地質的特徴を反映していると考えられる。したがって、表層地質はスギの地位指数を推定する上で無視できない要素であるが相対的な重要性は高くないと推察される。

土壌型は分散分析の結果、2つのモデルいずれにおいても有意であり、モデル1ではグライ土壌を除くすべてのカテゴリで、モデル2ではすべてのカテゴリで有意であった（表－3および4）。またこれらの係数の絶対値は他の説明変数に比較して大きいことから、説明変数の中でも地位指数に与える影響が大きいと考えられた。カテゴリ別に比較すると、いずれのモデルにおいても乾性褐色森林土壌、適潤性褐色森林土壌、黒ボク土壌、湿性褐色森林土壌、グライ土壌の順に高くなる傾向がみられた。真下（1960）は土壌型とスギの成長について BA 型、Bc 型、Bd 型、Be 型の順に成長がよくなること、B0型は Be 型と同程度かやや劣ることを報告しており、グライ土壌についての記述はないものの、それ以外は本研究の結果と一致している。また小林（1963）や野越（1971）、照井（1976）などの研究報告においても土壌型の区分はやや異なるが同様の結果となることが報告されている。これらのことから、土壌型は秋田県においてもスギの地位指数推定に重要な要素であると考えられる。

標高は分散分析において2モデルともに有意であったが、モデル2のカテゴリ別では有意ではなかった（表－3および4）。標高を数値データとして扱ったモデル1の係数は負の値を示していたことから、標高が高いほどスギの地位指数は低くなると考えられる。モデル2においても同様ではないが特に標高 750m 以上のカテゴリにおいて係数が低くなっており、有意確率も低くなっていた。このことから、高標高な林地、特に 750m 以上では、スギの生育には不利になると考えられる。

開度は2つのモデルともに分散分析において有意であり、係数は負であったことから開度が高いほど地位指数が下がると考えられる（表－3および4）。開度はその地点の日当たりのよさと捉えることができることから、尾根筋などの開度が高い場所では土壌の乾燥等が進みやすくなり、スギの生育を

阻害すると推察される。これは既存の研究に照らしても矛盾しない（Zushi, 2006; Mitsuda et al, 2007 ; 図子, 2010; Mitsuda and Ito, 2015）。しかし土壌型をはじめとする他の説明変数に比べてその係数の絶対値はいずれも 1 未満と小さいことから、地位指数の推定に与える影響は相対的に小さいと考えられた。

最深積雪深は分散分析において 2 つのモデルともに有意であった（表－ 3）。モデル 1 のカテゴリ別では 150cm 以上のカテゴリにおいては有意であり、係数も積雪深の増加に伴い高くなる傾向がみられた（表－ 4）。モデル 2 においても 250cm 以上のカテゴリにおいて有意で、係数の符号は正であった。つまり、いずれのモデルにおいても最深積雪深が大きいほど地位指数にプラスに作用するという結果であった。最深積雪深は冬季の降水量と捉えることができることから、この結果は十分な水分供給はスギの成長にとっては有利であることを示していると考えられる。しかし、横井・山口（2000）は最深積雪深 2.5m 以上の地域ではスギ経済林の成林は見込めないとしており、本研究の結果と矛盾する。これは、本研究が上層木樹高のみを対象としており、横井・山口（2000）のように実際の雪害の発生の有無を考慮していないためであると推察される。雪害、特に冠雪害の発生について、図子（2010）は風上の最大斜面傾斜、標高、斜面傾斜が影響していることを指摘している。本研究においても標高 750m 以上ではスギの生育に不利という結果が得られており、これは雪害の影響が大きいと考えられる。これらのことから最深積雪深は、単純にスギの成長促進という効果だけでなく、雪害リスクの増加という相反する特性を有しており、スギへの影響についてはより詳細な検討が必要であると考えられた。

モデル 2 においては温量指数も説明変数の 1 つとして選択され、係数の符号は正であった（表－ 4）。温量指数は月平均気温が 5 度以上の月の月平均気温の積算値であり、高いほど温暖であることを示している。気温の高さは光合成効率の向上に寄与していると考えられ、温量指数の高さはスギの成長に有利に働くものと推察された。

## 2. 流域毎に作成した地位指数推定モデル

本研究で作成されたすべてのモデルにおいて採用された説明変数を比較した（表－ 1 2）。全県ベースのモデル 1 に対し、雄物 1 や米代 1 では概ね共通する変数に加え、縦断曲率や平面曲率といった地形を表すデータが説明変数として採用された。またモデル 2 と比較した場合においても、子吉 2 ではすべての立地環境因子が、雄物 2 では有意ではないものの平面曲率が、米代 2 では TWI や縦断曲率が説明変数として採用されていた。これらのことは、流域スケールで地位指数を推定する場合、局所的な地形もまた重要であることを示唆している。つまり、推定を行うスケールによって適切な変数選択が必要であり、実際に活用する場合もスケールに応じたモデルを適用することで推定精度の向上が期待できると考えられた。

子吉 1、雄物 1 および米代 1 を比較すると最深積雪深が、子吉 2、雄物 2 および米代 2 においては温量指数が 3 流域で共通して説明変数として採用されていた（表－ 1 2）。これらが共通して採用された要因は、前述したように 3 流域の異なる気候的特徴が地位指数の推定において重要であるためと考えられる。しかし、最深積雪深についてはカテゴリ毎の係数の正負の符号に一定の傾向は見られなかった（表－ 7、9 及び 1 1）。これは前述した最深積雪深がもつ、スギの成長促進と雪害リスクの増加

という2つの側面のほか、参照データが調査区画サイズに対して広域であることも影響した可能性が

表－12 各モデルにおける説明変数の比較

|         | モデル1 | モデル2 | 子吉1 | 子吉2 | 雄物1 | 雄物2 | 米代1 | 米代2 |
|---------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 大流域     | ◎    | ◎    |     |     |     |     |     |     |
| 表層地質    | ○    | △    | ○   | △   | ○   |     |     | ○   |
| 土壌型     | ◎    | ◎    |     | ◎   | ◎   | ◎   | △   |     |
| 有効土壌厚   |      |      |     | ○   |     |     |     |     |
| 標高      | ◎    | ◎    |     | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   |
| TWI     |      |      | ◎   | ◎   |     |     |     | △   |
| 開度(L50) | ◎    | ◎    | △   | △   | ◎   | ◎   |     |     |
| 縦断曲率    |      |      | ◎   | ◎   |     |     | ◎   | ◎   |
| 平面曲率    |      |      |     | △   | ◎   | ◎   |     |     |
| 斜面傾斜    |      |      |     | ○   | △   |     |     |     |
| 斜面方位    |      |      | △   | ◎   |     |     |     |     |
| 最深積雪深   | ◎    | ◎    | ◎   | ○   | ◎   |     | ◎   | ○   |
| 温量指数    |      | ◎    | ◎   | ◎   | ○   | △   |     | ◎   |

「◎」は分散分析、カテゴリ別ともに有意( $p<0.05$ )、「○」は分散分析あるいはカテゴリ別で有意( $p<0.05$ )、「△」はモデルに組み込むことでモデルの当てはまりは向上するが有意ではなかった変数。

高い。本研究において最深積雪深データは「耐雪性森林育成技術について」（秋田県林業技術センター，1992）に基づいている。しかし、傾斜地に積もった雪には、絶えず斜面に沿って下の方へ移動するという特有の特性があり（小野寺，1990），同一斜面であれば斜面下部ほど積雪深は深くなる傾向がある。本研究においては、この斜面上の積雪深の違いが考慮されていないために、雪による影響が不明瞭になったと推察される。また温量指数について、その係数の符号は子吉2と米代2では正であったが、雄物2では負であった（表－7，9及び11）。温量指数のGVIFは他の説明変数に比較して高かったことから（表－6，8及び10），多重共線性が生じている可能性があり，年平均気温など異なる気候データに説明変数を置き換えるなどの改良が必要であると考えられた。

そのほかの説明変数について、表層地質や土壌型、標高も比較的多くの流域別モデルで採用されていた。これらは全県ベースのモデルにおいても採用されていることから、流域別でも地位推定に重要な因子であると考えられる。また斜面方位については子吉でのみ説明変数として採用され、子吉2におけるN，SE，Sのカテゴリのみ有意であった。子吉においては沿岸に面した林地も多く、西からの冬冬季節風がスギの生育に影響した可能性がある。この点については林地の海からの距離や風衝地であるかといった本研究において採用していない立地環境因子について追加で調査する必要があるだろう。しかし、これら以外説明変数については流域間で異なり、同一流域モデル間でも採用の可否が異なっていた。特にTWIや縦断曲率、平面曲率といった数値地形解析によって得られたデータは、流域によって説明変数として採用されるかどうか異なっていた。この理由は明らかでないが、これらのデータ

の分布が流域毎に異なる可能性があることから、今後流域毎に追加の調査が必要であろう。

### 3. GISにおける運用とより精度の高いモデルの策定に向けて

本研究において作成したモデルは全県ベースに比較して、米代を除き流域別でより当てはまりがよかった。また説明変数をカテゴリ化することでモデルの決定係数が高くなった。これらのことからモデルの運用に際してはスケールに応じて適用するモデルを変えること、説明変数をカテゴリ化して扱うことでより高い推定精度を得ることができると考えられる。

しかしながら、いずれのモデルもその決定係数は決して高いとはいえなかった。その背景には次のような原因があると考えられる。まず、秋田県におけるスギ人工林の地位指数推定においては、大流域が重要な要素であり、それは大流域それぞれで気候的特徴が異なるためであると考察した。しかし、特に雪についてはスギの生育に対して正負2つの側面で作用することが示唆されたほか、斜面レベルでの積雪深の違いが考慮されていないなど課題があると考えられた。次に、本研究においては、全県から流域へとスケールを変えることでモデルに採用される説明変数が変化し、特に局所的な特徴を表現する説明変数が追加されていた。これはさらに小さい地域、小流域といったスケールでも発生する現象と予想される。スケール別のモデル作成の必要性が示唆されたことは重要な知見であり、今後検討すべき大きな課題といえる。そして、最後に応答変数の地位指数についてである。近年の研究において秋田県のスギは晩生な成長を示すとされており（大住ら, 2000 ; Nishizono et al, 2014）、現状の地位指数は40年生以降の樹高成長を正しく反映していない可能性がある。長伐期化も施業方針の一つとなっている近年、基準年を80年生とすることも有効であるかもしれない。こうした課題の解決によって、より精度の高い推定モデルが策定されることを期待する。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、現地調査にご協力頂いた秋田県林業研究研修センターの研究員の皆様および歴代の臨時職員の皆様に対してもこの場を借りて厚くお礼申し上げます。また本報告の執筆にあたり、適切なご指導、ご助言を頂いた秋田県林業研究研修センターの諸氏に対し、心からお礼申し上げます。

## 引用文献

- 秋田県農林水産部（2020） 秋田県森林・林業の概要 令和2年度版. 秋田県農林水産部林業木材産業化.
- 秋田県農林水産部農山村振興課（2004）土地分類基本調査 山地・丘陵地（林地）土壌. 秋田県農林水産部農山村振興課
- 秋田県農林水産部（2012）秋田県地域森林計画編成業務要領. 秋田県農林水産部
- 秋田県林業技術センター（1992） 耐雪性森林育成技術について. 秋田県林業技術センター
- 秋田県森林技術センター（2013）秋田県民有林スギ林分収穫表—平成24年度森林資源モニタリング

調査成果品一．秋田県森林技術センター

Beven K and Wood EF (1983) Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas.  
Journal of Hydrology 65:139-158

Chen J, Abe N (1999) Site classification for sugi plantation using GIS. J For Plann 5:1-8

岩橋純子 (2019) DEM (数値標高モデル) を用いた地形量・浸水量の計測. 砂防学会誌 72(2): 43-47

株式会社エコリス (2018) 基盤地図情報標高 DEM 変換ツール Ver1.6.9.

<https://www.ecoris.co.jp/contents/demtool.html>

国土数値情報 (平年値データ) <https://nlftp.mlit.go.jp/index.html>

国土地理院ウェブサイト <https://www.gsi.go.jp/top.html>

小林正吾 (1963) 数値化による地位予測法. 森林立地 4(2):21-26

Kodani E, Matsumura N and Tamura A (2011) Analyzing the effects of environmental factors on the site indexes of sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtuse*) manmade coniferous forest stands in the Shikoku National Forest using GIS. J For Plann 17:3-8

真下育久 (1960) 森林土壌の理学的性質とスギ・ヒノキの成長に関する研究. 林野土壌調査報告第 11 号:1-182

Mitsuda Y, Ito S and Sakamoto S (2007) Predicting the site index of sugi plantations from GIS-derived environmental factors in Miyazaki Prefecture. J For Res 12:177-186

Mitsuda Y, Ito S (2015) Modifying the site index model of sugi planted forests in Miyazaki Prefecture considering the effect of DEM quality and scale of digital terrain analysis. J For Plann 20:45-51

Nishizono T, Kitahara F, Iehara T and Mitsuda Y (2014) Geographical variation in age-height relationships for trees in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D.DON) forests in Japan. J For Res 19:305-316

野越恒雄 (1971) スギ造林適地調査研究. 富山県林業試験場研究報告第 1 号:1-49

野表昌夫 (1992) 豪多雪地帯におけるスギ人工林の成林率と埋設回数. 日本雪氷学会誌 54(2):159-164

大住克博・森 麻須夫・桜井尚武・斎藤勝郎・佐藤昭敏・関 剛 (2000) 秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過. 日本林学会誌 82(2):179-187

小野寺弘道 (1990) 雪と森林. わかりやすい林業研究解説シリーズ No.96. (財) 林業科学技術振興所

小野瀬浩司 (2000) 雪国における成林予測と造林限界. (雪国の森林づくり—スギ造林の現状と広葉樹の活用—. 豪雪地帯林業技術開発協議会, 日本林業調査会): 67-88

真田 勝 (1999) 第七章 解説. 8 地位指数. (森林立地調査法—森の環境を測る—. 森林立地調査法編集委員会, 博友社): 238

産業技術総合研究所地質調査総合センター (2015) 20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. <https://gbank.gsj.jp/seamless/>

竹下敬司 (1964) 山地の地形形成とその林業的意義. 福岡県林業試験場時報 17:1-109

- 竹下敬司・高木潤治（1977） 暖帯林地の水保全環境に関する土壌及び地形的研究．福岡県林業試験場時報 26:1-51
- 田齊秀章・平松和昭・森 牧人・四ヶ所 四男美（2004） TOPMODEL による山地小流域の長短期流出解析．九大学農学芸誌 59(2):173-183
- 寺岡行雄・増谷利博・今田盛生（1991） 森林経営のための地位指数推定方法－地形図上で判読可能な地形因子による樹高の推定－．九大農学芸誌 45(3/4)：125-133
- 照井隆一（1976）数量化による岩手地方スギ林分の生長予測．岩手県林業試験場成果報告 8:7-21
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 山谷 睦・塚原初男（1993）豪雪地における局所的斜面形とスギの生育．日林誌 75(4)
- 横井秀一・山口 清（2000） 積雪地帯におけるスギ人工林の成林に影響する立地要因．日林誌 82(1):15-19
- 横山隆三・白沢道生・菊地 祐（1999） 開度による地形特徴の表示．写真測量とリモートセンシング 38(4):26-34
- Zushi K（2006） Spatial distribution of soil carbon and nitrogen storage and forest productivity in a watershed planted to Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D.Don). J For Res 11:351-358
- Zushi K（2007） Regional estimation of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D.Don) productivity by use of digital terrain analysis. J For Res 12:289-297
- 図子光太郎（2010） 富山県におけるスギ生育適地の空間分布のための数値地形解析に関する研究．富山県農林水産総合技術センター森林研究所研究報告別冊． 61pp



## 研究報告（第 28 号）

令和 3 年 3 月発行

編 集 編集委員長 鈴木 光宏

編集委員 菅原 冬樹，長岐 昭彦，佐藤 博文，眞坂 京子

発 行 秋田県秋田市河辺戸島字井戸尻台 4 7 - 2

秋田県林業研究研修センター

郵便番号 019-2611

T E L 018-882-4511

F A X 018-882-4443

U R L <http://www.pref.akita.lg.jp/rinken/>  
(美の国あきたネットからアクセス)

e-mail forest-c@pref.akita.lg.jp

BULLETIN  
OF  
THE AKITA FOREST RESEACH AND TRAINING CENTER

No.28    2021.3

Predict methods of site index of Sugi plantations  
by environmental factors in Akita Prefcture

Kyohei Nitta    .....    1   ～   30