

# システム収穫表「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト」の開発

八坂通泰・滝谷美香・山田健四

## Development of the “Hokkaido Larch Yield Prediction System” forestry model

Michiyasu YASAKA, Mika TAKIYA and Kenji YAMADA

### 要 旨

カラマツ人工林のためのシステム収穫表「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト」における使用データ、基本構造、予測精度、ソフトの具体的な使用方法を報告した。収穫予測ソフト作成に用いたデータは主に3種類ある。1つめのデータは全道2,680のカラマツ人工林において樹高や直径を調べたものである。このデータから地位指数曲線、Y-N曲線などを作成した。2つめのデータは19林分(4地域)において直径成長量を調べたものである。このデータから直径成長モデルを作成し林分材積成長量の推定を行った。3つめのデータは、630本の立木から胸高直径、樹高、様々な高さの直径などを測定したものである。このデータからは相対幹曲線式を作成し末口径別丸太本数の推定などを行った。これらのモデルを統合して、マイクロソフト社エクセル2010においてシステム収穫表を作成した。

キーワード：カラマツ人工林、収穫予測、地位指数曲線、直径成長モデル、Y-N曲線

### はじめに

これまで人工林の収穫予測には、林分収穫表(例えば石橋ら2006)、林分密度管理図(安藤1968, 真鍋1982)、林分収量一密度図(菊沢1981)などが用いられてきた。林分収穫表では、平均的な本数密度で推移した場合の平均直径、林分材積などの予測ができる。ただし、間伐率や間伐時期を変えたときの収穫予測はできない。これに対し林分密度管理図では、様々な強度の間伐を実施したときの上層高、平均直径、林分材積などの予測が可能である。一方、林分収量一密度図では上層高、平均直径、林分材積だけでなく径級分布も含めた収穫予測ができる。これらの収穫予測手法は基本的には紙媒体で提供され、ユーザーは表や図の上で林分の現況や将来予測について数値を読み取り判断する。

紙媒体での収穫予測手法は数多くの施業パターンを比較し、より適切な施業方法を選択するという作業には適していない。そこで考案されたのが、コンピューター上で収穫予測が実施できるシステム収穫表である。システム収穫表とは「様々な状態にある林分について、様々な施業がなされた場合に対応して、将来の成長変化を予測することができる仕組みを持ったコンピュータープログラムの総称」と定義される(白石2005)。現在、我が国で開発されているシステム収穫表には、

「穂の国」(稲田2006)、「シルブの森」(田中・嘉戸2001)、「LYCS」(松本2005)などがあり、これらのシステムを各都道府県の人工林に適用した地域版(渡邊2005など)も作成されている。

しかし、北海道においては主要人工林であるカラマツ、トドマツ、アカエゾマツについてシステム収穫表は十分利用されていない。真鍋(1982)や阿部・伊藤(1992)はトドマツについて収穫予測システムを開発している。これらのシステムは行政や林業現場において、コンピューターによる収穫予測が一般的なツールとなる以前の取り組みであり、高齢林など人工林データも不足していたため、林分収穫表や林分密度管理図に取って代わり一般化するには至らなかった。

本報告では、現在最も一般的な表計算ソフトであるマイクロソフト社エクセルを用いて開発したカラマツ人工林のためのシステム収穫表「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト」について、その使用データ、基本構造、予測精度などを記述するとともにソフトの具体的な使用方法を解説する。なお、本ソフトは2008年に開発し林業試験場ホームページで公開したが、2010年に大幅なバージョンアップを行ったので本稿ではバージョンアップ版(ver2.0)を対象に報告する。バージョンアップにあたっては予測精度向上のため、高齢林を含む様々な間伐強度での成長量データや大径木の幹の細りデータを充実させている。

## 使用データ

### 1 林分データ

道内の民有林2,680林分において樹高と直径を調査したデータを用いた(以下では林分データという)。これらの調査は林業試験場だけでなく、道水産林務部の森林室などによって実施されたものである。調査対象林分の概要について表-1に整理した。林齢は10~100年生、上層高4~35m、平均直径6~45cmと林齢や生育状況はばらつきが大きく、地域的にもほぼ全道を網羅している。これらのデータセットを用いて、後述する地位指数曲線、Y-N曲線、等限界直径線などを作成した。

### 2 成長データ

本ソフトでは林分材積成長量を予測するために、胸高直径を2~5年間隔で継続して調査したデータを用いた(以下では成長データという)。胸高直径の測定回数は約7,624回に及ぶ。これらの調査は林業試験場を中心とし、道水産林務部の森林室などによって実施されたものである。データを得た調査地の情報を表-2に示した。調査した市町村数は4カ所で調査林分数は7カ所、調査区数は19カ所、林齢は12~76年生、胸高直径6~66cm、立木密度175~2,060本/ha、材積間伐率0~50%と林齢や生育状況、間伐強度は様々である。これら

のデータセットを用いて、胸高直径成長量をモデル化し林分材積成長量を算出している。林分材積成長量からは二酸化炭素固定量の評価も行っている。

### 3 幹の細りデータ

幹の細りデータは道水産林務部の森林室を中心に全道のカラマツ人工林を対象に収集されたものである(山田ら2009)(以下では細りデータという)。測定項目は各立木の胸高直径、樹高、伐採断面ごとの断面高と断面の皮なし直径、皮部厚である。測定対象とした立木本数は630本、断面は4,562カ所である。収集されたデータは胸高直径で8~56cm、樹高で10~34mの範囲であった。細りデータから相対幹曲線式を作成し、末口径別丸太本数の予測に利用した。

## 収穫予測ソフトの構造

本収穫予測ソフトは多数のサブモデルから構成されている。予測モデルの基本的な構造について図-1に示した。図中の括弧が各過程で使用した主なサブモデルである。

標準地の胸高直径や樹高のデータがあるときは①から予測をスタートさせる。標準地データの林齢と上層高から地位指数を決定し、胸高直径と樹高のデータから林分材積、立木密度を計算する。林齢と上層高から地位指数を決定するときに

表-1 林分データを得た林分の概要

支 庁	調査林分数	林齢 (年生)	上層高 (m)	平均直径 (cm)
渡島	151	14-75	8-29	7-34
檜山	96	13-66	4-29	6-37
後志	37	41-100	15-27	16-32
胆振	208	15-67	6-30	9-38
日高	168	10-68	8-30	9-38
石狩	89	13-73	9-26	9-30
空知	190	12-76	8-32	7-41
上川	418	13-83	10-32	9-43
留萌	166	11-76	9-32	8-34
宗谷	106	12-64	5-27	6-37
網走	325	10-76	7-35	8-45
根室	65	17-67	9-22	10-32
釧路	288	12-95	8-30	10-38
十勝	373	11-87	7-34	7-42

表-2 成長データを得た林分の概要

市町村	調査林分数	調査区数	林齢 (年生)	胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)
新得町	2	6	32-66	8-41	175-842
阿寒町	1	2	64-76	15-66	269-341
平取町	1	5	16-22	6-29	410-2060
北見市	3	6	12-36	7-41	230-1268

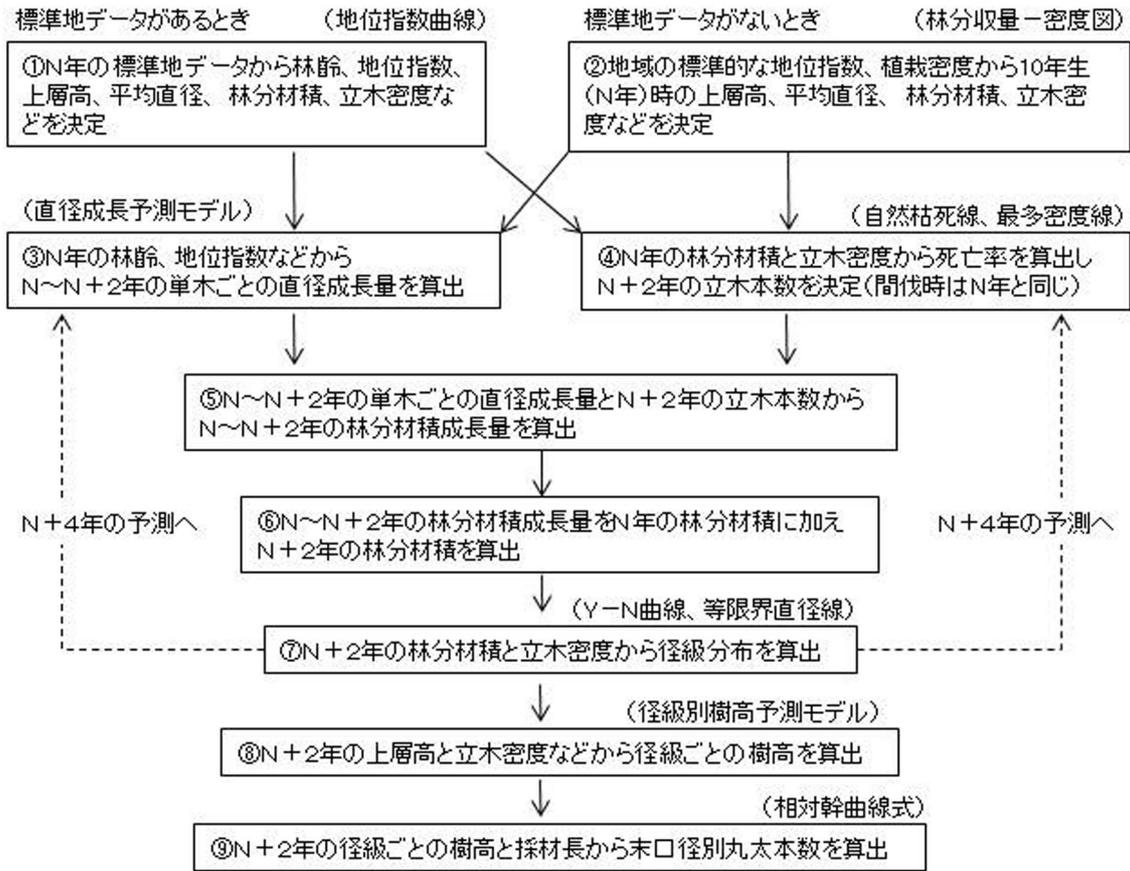


図-1 北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフトの基本構造

地位指数曲線を使用する。標準地データがないときは、②のように地域の標準的な地位指数、植栽密度から10年生時の上層高、平均直径、林分材積、立木本数を決定する。このときの標準的な林分材積や立木本数は、林分収量-密度図等を用いた「カラマツ人工林施業の手引き」(北海道立林業試験場2007)の方法によって算出している。これ以降は標準地データがあるときもないときも予測の過程は同じである。

③で林齢、地位指数などから直径成長予測モデルを用いてN年からN+2年の単木ごとの直径成長量を算出する。予測は2年ごとに行うのでN年の次はN+2年となる。④では自然枯死線と最多密度線を用いて林分材積と立木密度から死亡率を算出してN+2年の立木本数を決定する。⑤では③で求めたN年からN+2年の単木ごとの直径成長量と④で決定したN+2年の立木本数からN年からN+2年の林分材積成長量を算出する。直径成長量から林分材積成長量を算出する際は、中島(1948)のカラマツの胸高樹幹指数表の予測式を用いた。また、N+2年に死亡する立木の直径成長量は林分材積成長量に加えない。⑥では⑤で求めたN年からN+2年の林分材積成長量をN年の林分材積に加えることによりN+2年の林分材積を算出する。これによりN+2年の林分材積と立木本数が決定する。⑦では林分材積と立木本数からY-N

曲線を用いN+2年の径級分布を算出する。ここまでが林分および立木レベルの予測である。

林分および立木レベルの予測を次期(N+4年)に進めるには③および④へ戻って同様な作業を繰り返す。丸太レベルでの予測を行うときは⑧へ進む。⑧ではN+2年の胸高直径別立木本数、樹高、採材長と相対幹曲線式を用いて末口径別丸太本数を計算する。以下では各サブモデルの詳細について述べる。

### 1 地位指数曲線

地位指数は土地の生産力の指標となるため、林分収穫表などを調整する上で重要な要素となる。地位指数は林分の上層木の平均樹高をもって表す。これは上層木の樹高が、立木密度の影響を受けづらいと考えられているからである。林分データの林齢と上層高(高い方から1ヘクタール当たり100本の上層木の平均樹高)にガイドカーブとしてリチャーズ曲線式をあてはめ(式1)、これをもとに地位指数曲線群を作成した(式2)(図-2)。地位指数としては林齢40年生時の上層高を用いた。予測モデルでは、地位指数曲線を用いて各地位指数の上層高や樹高成長量を算出している。

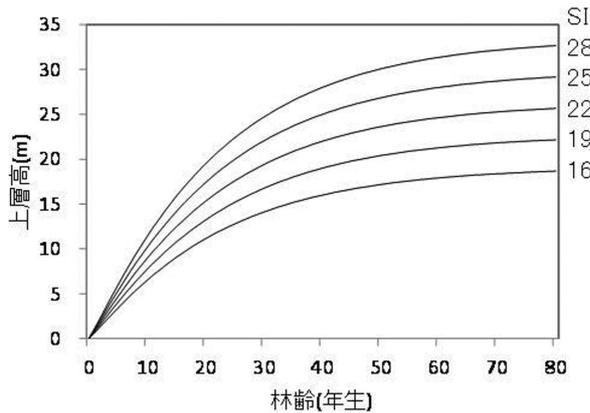


図-2 各地位指数 (SI) における樹高成長の経年変化

$$Hg = a \times (1 - \exp(-b(t - c)))^{1/d} \quad \dots (式1)$$

Hg: ガイドカーブのt年の上層高, t: 林齢,  
a, b, c, d: パラメータ

$$Ht = Hg \times \frac{SI}{Hg40} \quad \dots (式2)$$

Ht: t年の上層高, SI: 地位指数,  
Hg40: ガイドカーブの林齢40年の上層高

## 2 直径成長予測モデル

成長データを用いて単木レベルの直径成長量 (cm/年) をモデル化した。直径成長量を予測する要因として林分および単木レベルの説明変数を仮定した。林分レベルの説明変数としては、樹高成長量、疎密度を、単木レベルの説明変数としては、個体サイズ、個体の競争状態を用いた。樹高成長量とは、地位指数曲線によりN年からN+2年の平均樹高成長量 (m/年) を林齢および地位ごとに算出した値 (以下樹高成長量) である。林分レベルの疎密度としては、期首の胸高断面積合計 (m<sup>2</sup>/ha) (以下BA合計) を用いた。個体サイズは期首の胸高直径 (cm) (以下期首直径) を用いた。個体の競争状態を表す指数として、1ヘクタールの林分内で期首直径の大きい個体から順に胸高断面積を合計した値 (m<sup>2</sup>/ha) (以下競争指数) を用いた (Hara 1988)。競争指数は調査区内で最も期首直径が大きい個体が最小で、最も小さな個体で最大となる。したがって最小個体の競争指数とBA合計は一致する。これらの直径成長に影響があると考えられる林分および単木レベルで4つの要因と4つの要因間の交互作用を説明変数とし、さらに期首直径測定年をランダム要因として一般化線形混合モデル (GLMM) によってAICを統計量としてモデル選択を行った。GLMMでは誤差項の分布に対数正規分布を用いた。その結果、式3のモデル式が選択された。モデル式においては、期首直径が大きい個体や地位指数が高い林分で直径成長量が大き

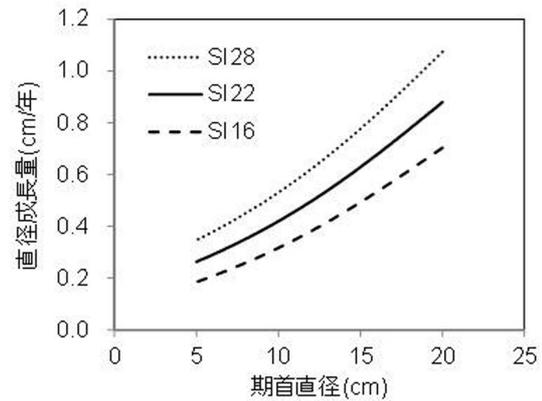


図-3 10年生時の地位指数 (SI) ごとの胸高直径と直径成長量の関係

きなど実際のカラマツ人工林で観察される傾向が表現できている (図-3)。なお、本予測式では極端に過密な林分などでは直径成長量が負の値を示すことがある。この場合の直径成長量は0とした。

$$GD = \exp(a + b \times D + c \times BAT + d \times BAS + e \times GH + f \times D \times GH + g \times D \times BAC) \quad \dots (式3)$$

GD: 直径成長量, D: 期首直径, BAT: BA合計,  
BAC: 競争指数, GH: 樹高成長,  
a, b, c, d, e, f, g: パラメータ

## 3 Y-N曲線, 等限界直径線

Y-N曲線とは1つの林分における大きい木から順に積算した積算本数と積算材積を定式化したものである (式4) (菊沢1981)。Y-N曲線上には、ある直径階以上の立木の本数と材積を示す点があり、この点を結んだ曲線が等限界直径線 (式5, 6) である。カラマツ人工林のY-N曲線, 等限界直径線については、林分データを用いて作成した (滝谷2007) (図-4)。これらの曲線を用い林分材積と立木密度によって胸高直径別立木本数を算出した。

$$Y = \frac{B}{1-A} N - \frac{A^{1/A}}{1-A} C^{-(1-A)/A} N^{1/A} \quad \dots (式4)$$

Y: 大きい個体から積算した材積 (m<sup>3</sup>/ha),  
N: 大きい個体から積算した個体数 (本/ha),  
A, B, C: パラメータ

$$N(D) = \frac{C}{A} ((A-1)V(D) + B)^{\frac{A}{1-A}} \quad \dots (式5)$$

$$Y(D) = \frac{C}{A} ((A-1)V(D) + B)^{\frac{A}{1-A}} (AV(D) + B) \quad \dots (式6)$$

N(D): 直径D以上の本数 (本/ha),  
Y(D): 直径D以上の材積 (m<sup>3</sup>/ha),  
V(D): 直径Dの立木材積 (m<sup>3</sup>),  
A, B, C: パラメータ

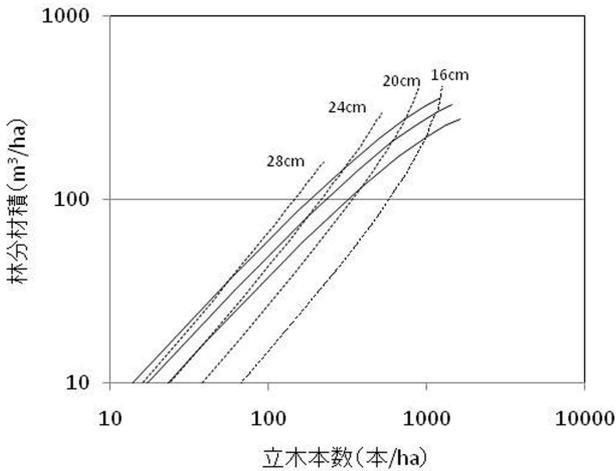


図-4 Y-N曲線(実線)と等限界直径線(波線, 図中の数字は胸高直径)

#### 4 自然枯死線, 最多密度線

本予測ソフトでは, 間伐を実施しない場合の立木本数は自然枯死線と最多密度線によって決定される。自然枯死線は林分を放置したときの立木本数を植栽本数ごとに示したもので本予測ソフトでは林分データを用いて作成した(式7)(滝谷2007)。最多密度線とは単位面積当たりの林分に生育できる最大の木数と材積の関係を示した関係式でありこれも林分データから作成した(式8)(滝谷2007)。予測ソフトでは林分材積と立木本数の関係が最多密度に達するまでは自然枯死線によって立木本数が決定し, 最多密度到達後は最多密度線に沿って立木本数が決まると仮定した(図-5)。自然枯死線では植栽密度とN年の林分材積から, 最多密度線ではN年の林分材積からN年の立木本数が算出できる。本予測モデルの間伐時には, このN年の立木本数をN+2年の立木本数に利用している。すなわち, 無間伐時の自然枯死線や最多密度線によって規定される立木本数の減少は2年間遅れて反映されると仮定している。例えば, 植栽本数とN年の立木本数, 林分材積からN+2年の立木本数が2,000本と算出され, N年の立木本数が2,100本であった場合は, 胸高直径が小さいものから順に100本を枯死させる。

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_0} + \frac{V}{aN_0^{-b}} \quad \dots (式7)$$

N: 立木本数 (本/ha), N<sub>0</sub>: 植栽本数 (本/ha),  
V: 平均幹材積材積 (m<sup>3</sup>), a,b: パラメータ

$$Y = aN^{-b} \quad \dots (式8)$$

Y: 林分材積 (m<sup>3</sup>/ha), N: 立木本数 (本/ha),  
a,b: パラメータ

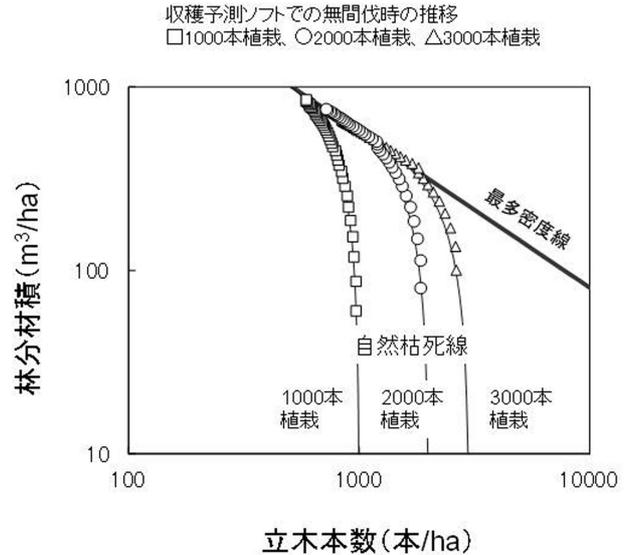


図-5 自然枯死線・最多密度線と無間伐状態での収穫予測ソフト上での立木密度の推移

#### 5 間伐時の立木本数

N年に間伐を実施した場合, N+2年の立木本数はN年の立木本数から間伐木を差し引いた値になり, 間伐以外の要因での木数減少はないと仮定している。間伐方法は全層間伐, 上層間伐, 下層間伐の3通りが選択できる。ただし, 本ソフトでは胸高直径別立木本数の分布にβ型分布を仮定したY-N曲線を用いているので全層間伐が基本となる。様々な間伐方法を行っても胸高直径別立木本数の分布型は林分の発達に伴いβ型分布に近づくと考えられているが(菊沢1981), 上層間伐や下層間伐の予測値については今後検証もしくは改良が必要である。図-6では全層, 上層, 下層それぞれの間伐を実施したときの径級分布を示した。全層間伐では上層から下層まで均等に選木されるので列状間伐など機械的に間伐木を決めるときは全層間伐が適当である。上層間伐と下層間伐はそれぞれ胸高直径で上位あるいは下位の立木を間伐対象とする。

#### 6 相対幹曲線式

相対幹曲線式の作成(山田ら2009)においては, 基準直径として樹高を1としたときの相対樹高0.9の位置の皮なし直径D0.9を用いた。樹高Htの立木の任意の高さhの皮なし直径dは相対樹高rh(式9)および相対直径rd(式10)は以下のように表される。

$$rh = (Ht - h) / Ht \quad \dots (式9)$$

$$rd = d / D0.9 \quad \dots (式10)$$

rh: 相対樹高, 樹高: Ht(m), rd: 相対直径,  
d: 高さh(m)の皮なし直径(cm), D0.9: 基準直径(cm)

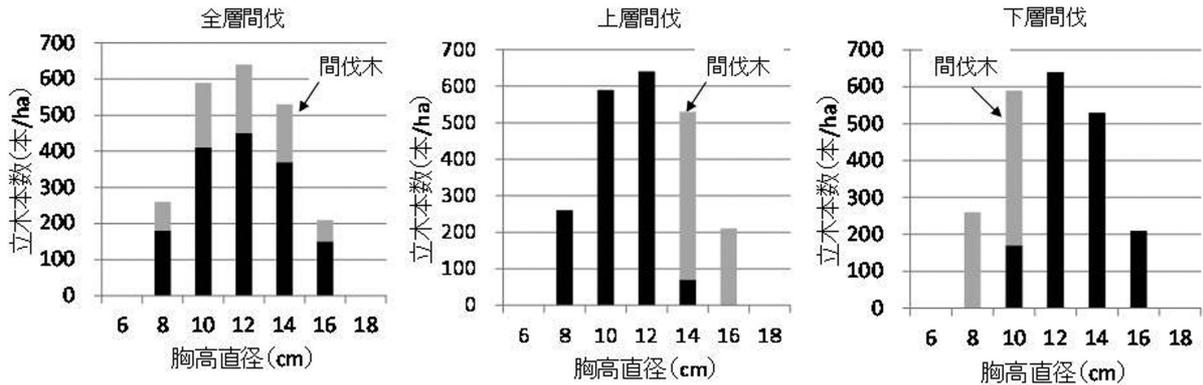


図-6 収穫予測ソフトで材積間伐率30%の間伐を実施したときの間伐対象木

相対幹曲線式には、スギやヒノキで利用されている以下の3次式を用いた(式11)。

$$rd = a_1 rh^3 + a_2 rh^2 + a_3 rh \quad \dots (式11)$$

$a_1, a_2, a_3$ :パラメータ

さらに、パラメータ $a_1 \sim a_3$ は樹高や胸高直径によって変化する可能性があるため以下のような式(式12)を用い、立木をランダム効果として一般化線形混合モデルを用いてAICを統計量としてモデル選択を行った。その結果すべての説明変数を含むモデル式が選択された(山田ら2009)。相対幹曲線式を用いて任意の高さの末口直径を算出するためには樹高が必要である。ここでは林分データを用いて直径階ごとの樹高を立木密度、上層高、地位指数などから推定する径級別樹高予測モデル(滝谷 未発表)を用いた。これらの式を用いて任意の高さの末口径を推定した。

$$d = D0.9 \left( (a_1 + b_1 Ht + c_1 DBH) rh^3 + (a_2 + b_2 Ht + c_2 DBH) rh^2 + (a_3 + b_3 Ht + c_3 DBH) rh \right) \quad \dots (式12)$$

$d$ : 任意の高さの末口径,  $DBH$ :胸高直径,

$a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ :パラメータ

### ソフトの予測精度

ソフトによる予測値が実際の林分と適合しているかどうかについて検証した。検証に用いたデータは林分データである。林分データから地位指数ごとの上層高、平均胸高直径の経年変化を求め、ソフトの値と比較することで検証を行った。平均胸高直径の経年変化については、まず地位指数ごとの立木本数の経年変化を林分データから地位指数ごとに求め、その本数変化をソフト上で再現しソフトと林分データの平均胸高直径を比較した。図-7にソフトと林分データの上層高・胸高直径の経年変化について地位指数ごとに示した。林分データから各地位指数の上層高と胸高直径を算出する際は、地位指数19は17以上21未満、地位指数23は21以上25未満、地位指

数27は25以上29未満の平均値を用いた。上層高および胸高直径ともにソフトの予測値は林分データの値と一致しており現実林分の値をよく反映できていることがわかった。

### 具体的な使用方法

北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフトver2.0はマイクロソフト社エクセル2010で作成しており、10枚のワークシートから構成されている。ファイルサイズは約7MBあり、エクセル2007でも動作確認済みである。以下では主な予測機能と使用方法について説明する。

#### 1 “地位指数” ワークシート

このワークシートで、対象林分の林齢と上層高を入力すると地位指数が計算される。ここでの地位指数は40年生時の上層高(1ヘクタール当たり上位100本の平均樹高)で表している。樹高のデータがある場合に利用できる。

#### 2 “収穫予測” ワークシート

立木データの欄では、胸高直径と樹高のデータのあるなしとデータの入力方法を選択する(図-8)。入力方法1では各立木のデータを直接入力する。入力方法2では胸高直径別の立木本数を入力する(バージョン2.0で追加)。各立木のデータを直接入力する場合は、胸高直径の大きい順番に入力する。データは300まで入力でき、これを超える場合は入力方法2を使用する。次に林分データの欄に標準地の林齢(10年生以降)、地位指数、面積、植栽本数を入力する。なお、これらにはサンプルデータが入っている。立木データがない場合は林齢、調査面積は空欄にする。

地位指数や植栽本数が不明な場合は、地域の標準的な値を入力する。その際、“地位別地域区分”のワークシートが参考になる。地位指数については対象地が特等地・I等地なら25、II等地なら21、III等地なら17を目安とする。次に、間伐スケジュールのセルに2年ごとに林齢が記載されているので、適当な林齢で本数間伐率を入力する(図-9)。間伐率を入力す

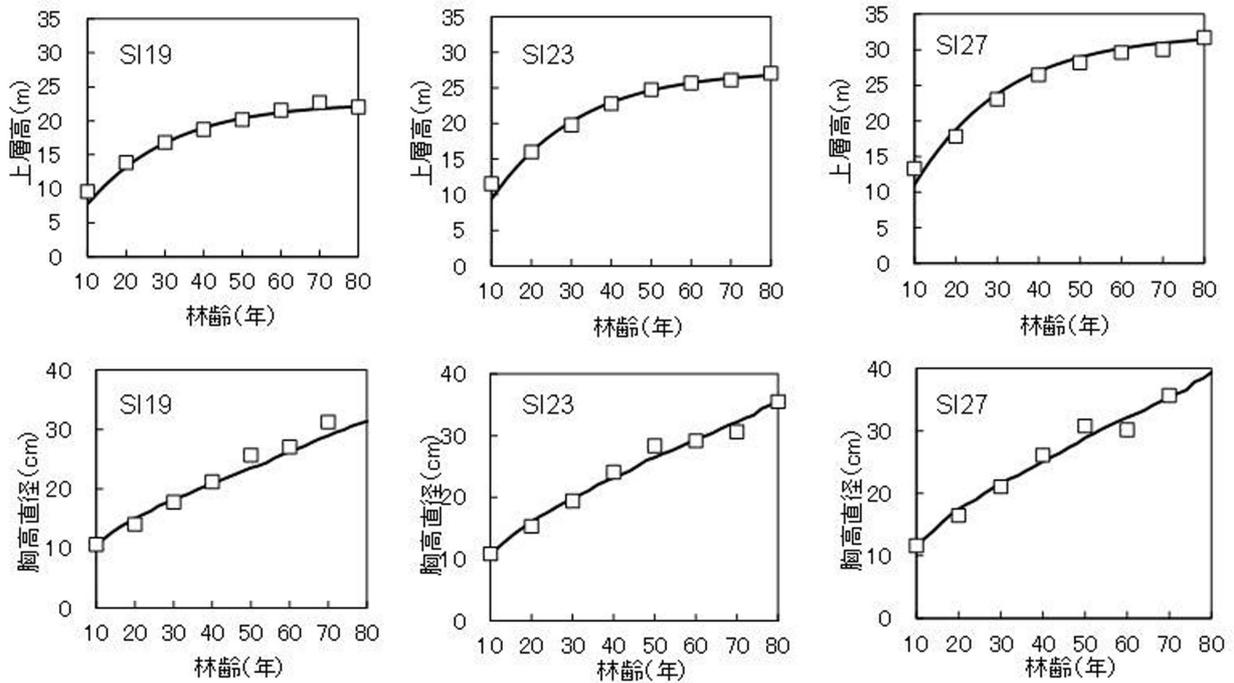


図-7 地位指数 (SI) ごとの林分データ (□) と収穫予測ソフト (実線) の上層高・胸高直径の経年変化

立木データ			林分データ		
胸高直径	データなし		地位指数	25	
樹高	データなし		植栽本数	2500	本/ha
入力方法	入力方法1		林齢	16 年生	
			調査面積	0.1 ha	

入力方法1			入力方法2			間伐スケジュール			
立木	胸高直径	樹高	胸高直径階		立木	林齢	本数間伐率(%)		
No.	cm	m	cm以上	cm未満	本数	年	全層	上層	下層
1	21.6	14.5	0	2		10			
2	18.8	14.6	2	4		12	30		
3	18.5	14	4	6		14			
4	18.3	14.6	6	8	12	16			
5	18.1	14.5	8	10	40	18	30		
6	18.0	14	10	12	54	20			
7	17.9	15	12	14	43	22			
8	17.9	12.5	14	16	25	24			
9	17.8	13.8	16	18	14	26	30		
10	17.7	14.3	18	20		28			
11	17.7	14	20	22		30			
12	17.6	14.5	22	24		32			
13	17.6	14	24	26		34			
14	17.5	13.5	26	28		36			
15	17.4	13.2	28	30		38	30		
16	17.3	14	30	32		40			

図-8 収穫予測ソフトにおける立木データ, 林分データ, 間伐率等の入力

		地位指数 22					植栽本数 2500 本/ha							
収穫予測		主副林木(間伐前)					主林木(間伐後)			副林木(間伐木)				
林齢	上層高	平均		ha当たり			ha当たり			ha当たり				
		幹材積	胸高直径	立木本数	幹材積	収量比数	立木本数	幹材積	収量比数	立木本数	本数比率	幹材積	幹材積比率	胸高直径
年	m	m <sup>2</sup>	cm	本	m <sup>2</sup>	Ry	本	m <sup>2</sup>	Ry	本	%	m <sup>2</sup>	%	cm
10	9.0	0.060	12.5	1510	91	0.65								
12	10.5	0.083	12.6	1510	125	0.73								
14	11.9	0.104	13.7	1510	157	0.78	1020	106	0.61	490	32	51	32	13.7
16	13.1	0.130	14.9	1020	133	0.66								
18	14.3	0.156	16.1	1020	160	0.71								
20	15.3	0.183	17.1	1020	187	0.74								
22	16.3	0.209	18.0	1020	213	0.78	690	146	0.60	330	32	68	32	17.8
24	17.2	0.244	19.2	690	168	0.64								
26	18.0	0.277	20.1	690	191	0.67								
28	18.7	0.309	21.0	690	213	0.70								
30	19.4	0.341	21.8	690	235	0.72								

図-9 間伐実施時の間伐前、間伐後、間伐木の林況表示(林齢14および22年に間伐を実施)

胸高直径別立木本数		地位指数 22					直径階 2 cm											
間伐前胸高直径		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
cm以上		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	
cm未満		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	
林 齢 (年)	10	0	0	180	760	840	520	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	12	0	0	0	550	730	680	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	14	0	0	0	260	590	640	530	210	0	0	0	0	0	0	0	0	
	16	0	0	0	60	490	570	540	380	110	0	0	0	0	0	0	0	
	18	0	0	0	0	340	490	510	430	260	40	0	0	0	0	0	0	
	20	0	0	0	0	180	430	460	430	330	150	10	0	0	0	0	0	
	22	0	0	0	0	60	380	420	420	350	220	70	0	0	0	0	0	
	24	0	0	0	0	0	310	380	400	350	260	130	20	0	0	0	0	
	26	0	0	0	0	0	200	360	370	350	280	170	60	0	0	0	0	
	28	0	0	0	0	0	120	330	340	340	290	200	100	10	0	0	0	
	30	0	0	0	0	0	50	300	330	330	280	220	130	40	0	0	0	

図-10 胸高直径別立木本数(本/ha)の予測

1番玉末口径		採材 4 m					追上 0.3 m					(採材高 4.3 m)					
cm以上		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
cm未満		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
林 齢 (年)	10	0	610	740	660	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	0	290	620	650	520	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	350	430	430	370	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	190	370	390	370	260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	70	330	360	370	450	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	140	230	260	450	30	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	60	210	240	240	350	10	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	190	220	230	400	70	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	120	210	220	410	120	30	0	0	0	0	0	0
	28	0	0	0	0	10	130	160	160	280	40	0	0	0	0	0	0
	30	0	0	0	0	0	90	150	150	290	90	10	0	0	0	0	0

図-11 1番玉の末口径別丸太本数(本/ha)の予測

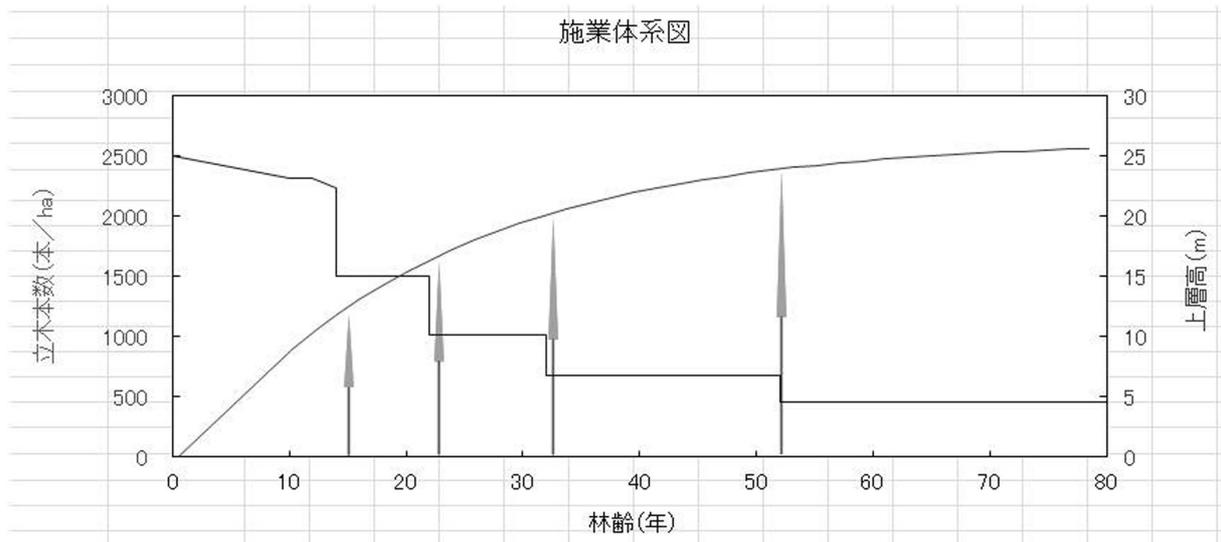


図-12 間伐スケジュールに沿った施業体系図の作成

ると林齢80年までの平均胸高直径，林分材積，立木密度などが表示される。

### 3 “胸高直径別立木本数” ワークシート

このワークシートには間伐前および間伐木，間伐後の胸高直径別立木本数径級分布が表示される。胸高直径階は“直径階”と書かれた右隣のセルを変えることで調節できる（バージョン2.0で追加）（図-10）。ただし，次の末口径別丸太本数を予測したいときには2cmで固定する。

### 4 “間伐前末口径別丸太本数” および “間伐木末口径別丸太本数” ワークシート

これらのワークシートでは，間伐前および間伐木の末口径別丸太本数が表示される。これにより丸太本数がわかることで末口二乗法等を用いると丸太材積の計算も可能である。この機能もバージョン2.0から新たに追加した。このシートの1番上の表は1～10番玉までの末口径別丸太本数である。2番目の表が1番玉の末口径別丸太本数を示しており採材長と追入を入力する（図-11）。同様に2番玉以降の採材長を入力する。本バージョンでは末口径別丸太本数の評価は10番玉までなので，採材長によっては10番玉では足りない場合もある。この点については今後改良が必要である。

### 5 その他の機能

“施業体系図” ワークシートには，“収穫予測”のワークシートで入力した間伐スケジュールを反映した施業体系図が作成される（図-12）。施業経過を視覚的に理解する上で利用できる。バージョン2.0からは，樹高や直径，材積などの木材生産予測の他に，育林コストや二酸化炭素固定量の予測機能を

付加した。育林コストは造林補助事業における標準経費を基礎とし，標準経費は変更可能となっている。育林コスト算出時の間伐回数は収穫予測ワークシートと連動しており，間伐時の搬出作業の有無は平均胸高直径を基準に設定可能であり，これも収穫予測ワークシートの値と連動している（図-9, 12）。間伐時にすべての間伐木を搬出する場合は，平均胸高直径が0cm以上を対象に搬出すると指定する。二酸化炭素固定量の算出は（独）森林総合研究所が公表している計算方法，枝の量を表す拡大係数，地下部の割合を表す地上部地下部比などを用いて算出した（<http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/dept/22climate/kyuushuuryou/documents/page1-2-per-a-tree.pdf>）。二酸化炭素固定量については計算式や各係数が編集可能となっているので，ユーザーが係数や計算方法を変更できる。

### 6 間伐スケジュールの入力方法

間伐の実施林齢や間伐率の決定には様々な方法がある。このソフトでは間伐率を入力したときの結果がすぐに横の欄に表示されるので，林分の混み合い度を示す収量比数や，間伐木の材積，平均直径などを見ながら実施林齢や間伐率を決めることが可能である。例えば，中庸仕立てでは収量比数を0.7～0.8の範囲で管理するので，間伐前の収量比数が0.8を超えていたら30%程度の間伐を実施し，収量比数を0.7程度にする。このとき間伐木の材積が少ないと判断されたときには間伐率を上げるなどの調整をする。逆に予定する主伐年での収穫が少ないときには，間伐率を低くする。こうした作業を繰り返し経営目標に適した間伐スケジュールを決定する。

### おわりに

北海道におけるカラマツ造林が始まってから約1世紀が経

過した。炭鉱用坑木の需要は石炭から石油へのエネルギー源のシフトにより減少し、梱包材など輸送資材を中心に利用が進んできた。最近では、もともと材の強度が高いカラマツ材に対して、乾燥技術の確立とも相まって建築材としての利用に注目が集まっている。さらに、近年の世界的な木材の需給構造の変化による丸太の輸入量減少に伴い合板用需要も伸びている。このように、道内のカラマツ人工林資源の充実とともに、その用途も拡大しつつあり、ある程度生産目標を意識した森林施業が可能な時代になってきた。生産目標を効率よく達成するために、どんな施業方法が適切なのかを判断するツールとして今回紹介した収穫予測ソフトは非常に有効である。コンピューターソフトによる施業計画の立案は使用方法に慣れれば紙媒体での収穫予測手法に比べ柔軟性が高く、より人工林施業の収益性向上に貢献できると考えられる。今後のソフト開発の方向としては、カラマツの需要として今後期待される建築材としての利用を促進するための材質予測を目指している。海外でも森林の予測モデルは、材密度や強度、含水率など材質予測の方向へ進んでいる（Wilhelmsson et al 2002など）。材質予測が可能になることで、より強度の高い材の計画的かつ効率的生産にも貢献できるだろう。

## 謝 辞

本ソフトで使用したデータは、道庁水産林務部、各振興局森林室、市町村など道内の多くの林業関係者の協力によって得られたものである。これらのデータなくして人工林の収穫予測技術の開発は不可能であった。長年の地道な調査に敬意を払い謝辞を述べると同時に、今後とも林業の現場で望まれる研究の実施と普及に努めたいと考えている。

## 引用文献

- 安藤 貴 1968 密度管理 246pp. 農林出版, 東京.
- 阿部信行・伊藤寿勝 1992 トドマツ人工林のシステム収穫表 光珠内季報88: 1-8.
- Hara, T. 1988 Dynamics of size structure in plant populations. Trends Ecol. Evol. 3: 129-133.
- 稲田充男 2006 システム収穫表穂の国「創造」の開発 Bulletin of Toyohashi Sozo College 10: 91-103.
- 石橋聡・鷹尾元・高橋正義・駒木貴彰・飯田滋生 2006 北海道地方版カラマツ収穫予想表 8 pp. 森林総合研究所北海道支所, 札幌.
- 北海道立林業試験場 2007 カラマツ人工林施業の手引き 91pp. 札幌.
- 菊沢喜八郎 1981 トドマツ人工林の収量-密度図 (I) 日本林学会誌 63: 442-450.
- 真鍋昭 1982 トドマツ人工林の収穫量と収益の予測システムに関する研究 林試研報317: 1-65.
- 松本光朗 2005 システム収穫表Excel版LYCSの開発 森林

技術764: 9-12.

- 中島広吉 1948 北海道立木幹材積表 46pp. 林友会北海道支部, 札幌.
- 白石則彦 2005 収穫予測システムの過去・現在・未来 森林技術764: 9-12.
- 滝谷美香 2007 収量-密度図で収穫予測をしよう-カラマツを対象とした新しい施業体系- 光珠内季報147: 5-10.
- 田中和博・嘉戸昭夫 2001 富山県システム収穫表Excel版の開発 日林論112: 149.
- 渡邊仁志 2005 「シルブの森」で予測するヒノキ林の成長過程 森林技術764: 9-12.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spngberg, K., Lundqvist, S., Grahn, T., Hedenberg, R., Olsson L. 2002 Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 17: 330-350.
- 山田健四・八坂通泰・大野泰之・中川昌彦・櫻井謙 2009 大径木に対応した北海道カラマツ細り表の作成 日林北支論58: 25-26.

## Summary

We developed a forestry model entitled “Hokkaido Larch Yield Prediction System” for larch plantations. We report the data sets, system structures, and the precision and method of the system. For the first data set, tree diameter and height were measured in 2,680 stands throughout Hokkaido, Japan. The site index curve and Y-N curve were derived from this data set. The second data set comprised measurements of stem diameter growth in 19 stands in 4 areas. The diameter growth model was derived from this data set, which facilitated the calculation of stand volume growth rate. The third data set comprised measurements of tree height and the stem diameter at various heights for 630 trees. The average relative stem curve was derived from this data set, and log production for each diameter class was calculated. We integrated these models to compile the “Hokkaido Larch Yield Prediction System” using Microsoft Excel 2010.

**Keywords:** Diameter growth model, Larch plantation, Site index curve, Y-N curve, Yield prediction