

# 石川県南加賀地域における航空機 LiDAR を利用した林分材積表の作成の検討

向野峻平・矢田 豊・小谷二郎

Jクレジット制度の申請の際に使用する林分材積表について、最新かつ、高齢級の様々な林分を含んだものの作成が求められている。本研究では、航空機 LiDAR データを用いた「石川県林分材積表」の作成が可能であるかの検討をするため、石川県南加賀地域に限定した「石川県南加賀地域スギ林分材積表」を作成し、既存のものと比較した。その結果、航空機 LiDAR データを用いて作成した材積表は既存のものとは比べ、高齢になるほど材積が過少評価する傾向がみられた。これは、立木密度の推定に利用した標準地調査が、上層木のみを対象としていたためだと考えられた。このことから、標準地調査の対象木を全立木にすることで、林分材積表の作成は可能であると考えられる。

キーワード：LiDAR、林分材積表、スギ、密度管理図、地位指数曲線

## I. はじめに

現在、石川県の人工林の約7割が主伐期を迎えており（石川県 2021）、木材の収穫量や収支を見積もるため、林分の材積量を把握することが重要になっている。このような中、航空機 LiDAR による森林資源情報の調査に注目が集まっており、石川県でも令和2年度より航空機 LiDAR による森林資源情報等の調査を行っている。

一方、近年活用事例が増えている Jクレジット制度では、申請に必要な幹材積量や幹材積成長量を林分材積表等から引用する際に、地位の特定のための実地踏査が必要だったが、令和3年度の Jクレジット制度の改定により、航空機 LiDAR による地位の特定も認められるようになった（Jクレジット制度事務局 2022）。これにより石川県では、航空機 LiDAR を用いて Jクレジット制度への申請を検討している。一方、石川県で現在使用してい

るスギ林分材積表は 2006 年に作成されたものであり、100 年生までしか記載していない（以下、既存材積表とする；石川県内部資料 2006）。また、より高齢級の様々な林分や樹種を含んだ林分材積表の作成が求められている。そこで、航空機 LiDAR データを用いた新しい「石川県林分材積表」の作成が可能であるか検討した。

本研究では、「石川県林分材積表」を作成するための予備的な検討として、2021 年に航空機 LiDAR で計測を行った石川県南加賀地域に限定し、航空機 LiDAR データを用いた「石川県南加賀地域スギ林分材積表」を作成し、既存材積表と比較した。

林分材積表の作成では、1980 年代前半に多くの県の林分材積表の作成で用いられた林分密度管理図（以下、密度管理図とする；例えば山本・安井 1983；家原 1990；猪瀬ら 1993）に基づく作成方法が主として用いられてきた。これは上層木平均樹高と立木本数を密度管理図の諸式に適用して、林分材積を定める方法であり、既存材積表もこの方法で作成されている。しかし、密度管理図は標準的な伐期を超える林分に適用するには問題が生じる可能性や、広範囲の地域を対象として作成されているため、地域によっては不適合が生じる可能性もある（長濱・近藤 2006）。これらのことから本研究では、密度管理図に基づく作成法の適用の妥当性も検討した。本研究で林分材積表を作成するに当たっての手順を図-1 に示す。

一方、白井・坂井（1995）が行った、林分因子の相互関係を用いて林分幹材積を求める事例が増えており、近年では、三重県（島田 2010）、広島県（佐野 2022）等がこの方法を用いて林分材積表の作成を行っている。これは林齢と上層木樹高との関係を求め、順次平均樹高と平均直径、平均直

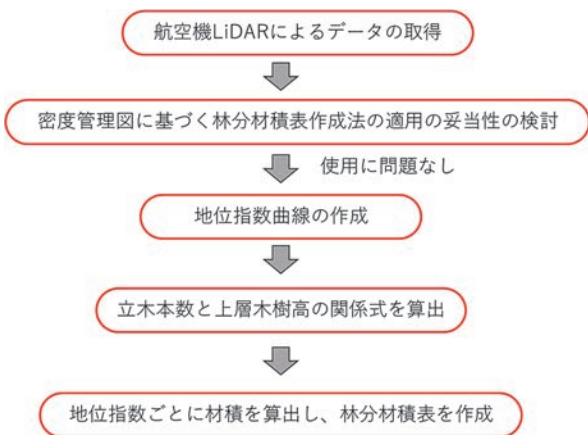


図-1. 林分材積表作成のフロー

径と立木本数、平均直径と平均幹材積の関係式を求め、最後に立木本数と平均幹材積から林分幹材積を求める方法である。航空機 LiDAR は上空から補足できる個体のみ計測するため、下層木を含めた林分の平均樹高を算出するのは難しい。そのため、本研究ではこの方法での林分材積表の作成は行わなかった。



図-2. 調査範囲 (石川県南加賀地域)

## II. 材料と方法

### 1. 使用データ

2021年に石川県が朝日航洋株式会社に航空機 LiDAR の計測を委託整備した石川県南加賀地域 (図-2) の全林分データを利用した (以下、航空機 LiDAR 委託調査)。また、その林分データの中でスギ人工林を対象に、3 齢級~30 齢級の 220 林分をランダムに抽出し、上層木樹高データを利用した。なお、林齢は森林簿のデータを参照した。

密度管理図に基づく作成法の適用妥当性の検討、及び立木密度のデータは、航空機 LiDAR 委託調査における精度検証をするための、29 地点のスギ林分現地調査データ (400 m<sup>2</sup>の標準地) を利用した。

### 2. 密度管理図に基づく作成法の適用妥当性の検討

現地調査データの実測材積と、航空機 LiDAR で同林分の上層木樹高および現地調査データの立木密度を「裏東北・北陸地方スギ林分密度管理図 (林野庁 1978)」の (1) 式を用いて算出した推定材積  $V'$  を比較し、密度管理図に基づく作成法の適用妥当性の検討を行った。実測材積  $V$  は、各個体の樹高と胸高直径から、立木材積表西日本編 (林野庁

1970) に記載された材積式を用いて単木の材積を算出した。

$$V' = (0.060047H^{-1.352337} + \frac{3743.3H^{-2.824828}}{N})^{-1} \quad (1)$$

$V'$  : 推定材積 (m<sup>3</sup>/ha) H : 上層木平均樹高 (m)  
N : 立木密度 (本/ha)

推定精度の検証は、島田 (2010) の手法を参考にし、各林分データの実測材積  $V$  と推定材積  $V'$  との誤差率を求め、その値が許容誤差内にあるかどうかの検証を行った。具体的には許容誤差率  $E$  の  $\chi^2$  値を (2) 式で、危険率 5% の  $\chi^2$  値  $\chi (0.05)^2$  を (3) 式で計算し、両者の有意差を検定した。

$$\chi^2 = \frac{1}{E^2} \sum \left[ \frac{V' - V}{V} \right]^2 \quad (2)$$

$$\chi_{0.05[v]}^2 = \frac{1}{2} (t_{0.10[v]} + \sqrt{2n - 1})^2 \quad (3)$$

n : データ数 v : 自由度 E : 許容誤差率 20%  
 $t_{0.10[v]}$  : Student の t 分布の棄却域

### 3. 地位指数曲線の作成

地位指数曲線の作成は、林野庁 (2022) に記載されている航空機 LiDAR データを用いた作成法により行った。予備的な検討の結果、地位指数曲線のガイドカーブは以下に示すリチャーズの成長曲線式 (4) 式を採用した。

$$H = K \times (1 - \exp(-A \times t))^B \quad (4)$$

H : 林齢  $t$  における上層木平均樹高 (m)  
K, A, B : 係数 t : 林齢 (年)

成長曲線式の当てはめは、Microsoft Excel2016 のソルバーGRG 非線形回帰法により行った。

地位の区分は、利便性を考慮して、相対的樹高地位と絶対的樹高地位を同時に採用し、両者の対応関係を示すこととした。

相対的樹高地位は、山田・村松 (1971) の方法に従い分布範囲を決定した。まず、(5) 式で平均偏差率  $\delta$  を求め、(6) 式によりガイドカーブと同じ形状となり、全標本の 95% 以上が範囲に収まるように上下の界線を定めた。その後、地位の区分を 3 区分して上から地位 I、地位 II、地位 III とした。

$$\delta = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{y - y'}{y'} \right| \quad (5)$$

$$y'' = y' \pm m \delta y' = (1 \pm m \delta) y' \quad (6)$$

$\delta$  : 平均偏差率 N : データ数 y : 上層木樹高の

実数値  $y'$  : 推定値 (対応するガイドカーブ上の値)  $m$  : 平均偏差率の倍数

絶対的樹高地位は、本研究では基準林齢を 80 年に設定し、基準林齢における上層木樹高を地位指数とした。ガイドカーブと同じ形状になるように各地位指数曲線を (7) 式により決定した。

$$H = H_x \times \frac{SI}{H_{80}} \quad (7)$$

$H$  : 地位指数  $SI$  における曲線上の  $x$  年における上層木平均樹高  $H_x$  : ガイドカーブ上の  $x$  年における上層木平均樹高  $H_{80}$  : ガイドカーブ上の基準年齢における上層木平均樹高

#### 4. 上層木平均樹高と立木密度の関係式の推定

航空機 LiDAR 委託調査の結果、立木密度の平均誤差率は-18%となっており、過小評価する傾向にあった。このことから、本研究では現地調査で測定した上層木平均樹高と立木密度の関係式を求め、立木密度の推定を行った。

#### 5. 林分材積表の作成

作成した地位指数曲線から推定した林齢毎の上層木樹高と立木密度の関係式を用いて、上層木樹高に対する立木密度を推定した。その後、推定した上層木樹高と立木密度を、(1) 式に当てはめて材積の推定を行った。

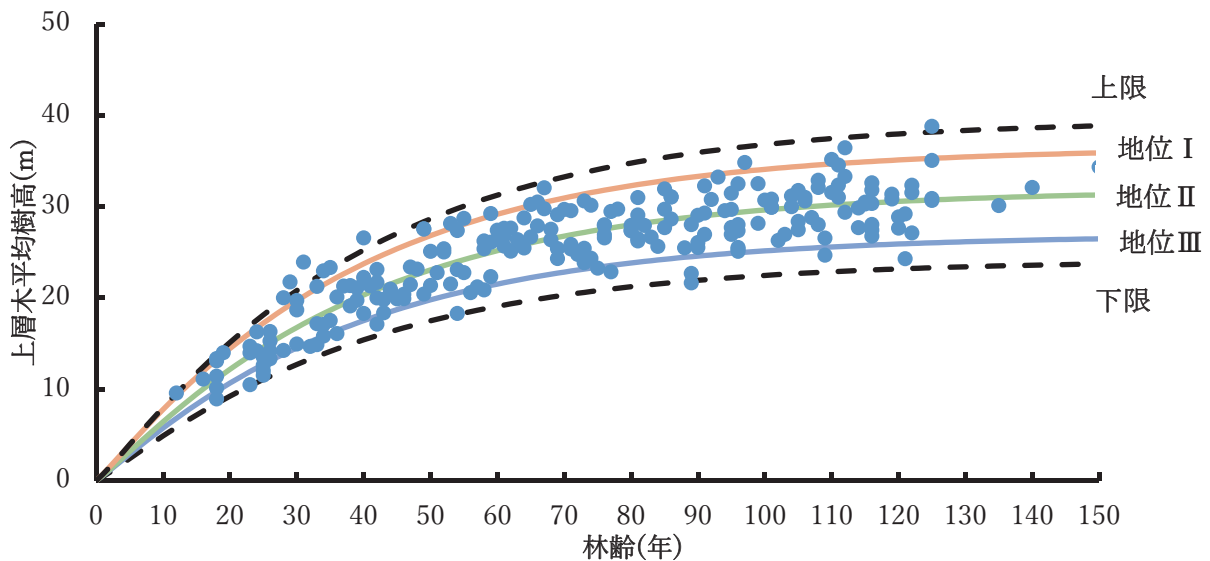


図-4. ガイドカーブ及び相対的樹高地位の区分

### III. 結果

#### 1. 密度管理図に基づく作成法の適用妥当性の検討

実測材積  $V$  と推定材積  $V'$  の関係を図-3 に示す。図-3 から 1,000  $m^3$  以上の推定材積  $V'$  が実測材積  $V$  より過小に算出する傾向が読み取れるが、誤差率を求め、その値が許容誤差内にあるかどうかの検定を行った結果、有意差が確認されず、許容誤差を超える誤差は生じていなかった (表-1)。

この結果を受け、本研究では、密度管理図に基づく林分材積表の作成には問題がないとし、この方法を採用した。

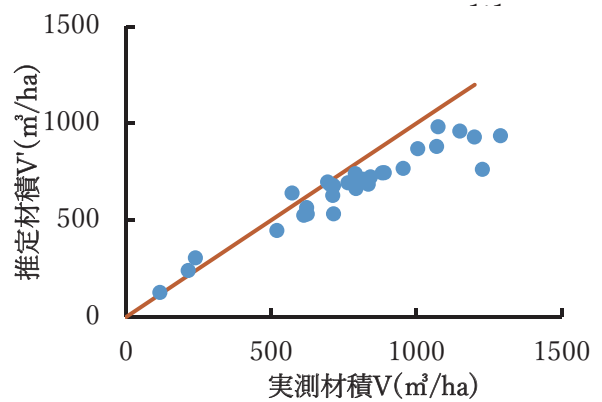


図-3. 実測材積  $V$  と推定材積  $V'$  の関係

表-1. 密度管理図の推定精度の検証結果

実測材積 (m)	データ 数	許容誤差率Eの		検定※
		$\chi^2$ 二乗値	危険率5%の $\chi^2$ 乗値	
0~500	3	2.33	13.29	ns
500~1000	19	9.13	30.51	ns
1000~	7	8.85	15.39	ns
全体	29	20.31	42.75	ns

\*ns は危険率 5% で有意差がないことを示す。

## 2. 樹高成長曲線

成長曲線式の当てはめを行った結果、ガイドカーブの(8)式が求められた。

$$H = 31.67(1 - \exp(-0.0283 \times t))^{1.10} \quad (8)$$

H: 林齢 t における上層木樹高 t: 林齢

(4)式、(5)式から、 $m=2.5$  とするとき分布の95%以上を含むことから、分布の上下限の m を ± 2.50000 とした。地位区分 I、II、III の中心曲線式の m はそれぞれ +1.66667、+1.00000 (ガイドカーブ)、-1.6667 とした (図-4)。

また、地位指数曲線を作成した結果、図-5 のようになった。地位指数曲線と相対的地位区分 I の範囲内に地位指数曲線 30~34、地位区分 II の範囲内地位指数曲線に 26~30 未満、地位区分 III の範囲内に 22~26 未満が含まれた。

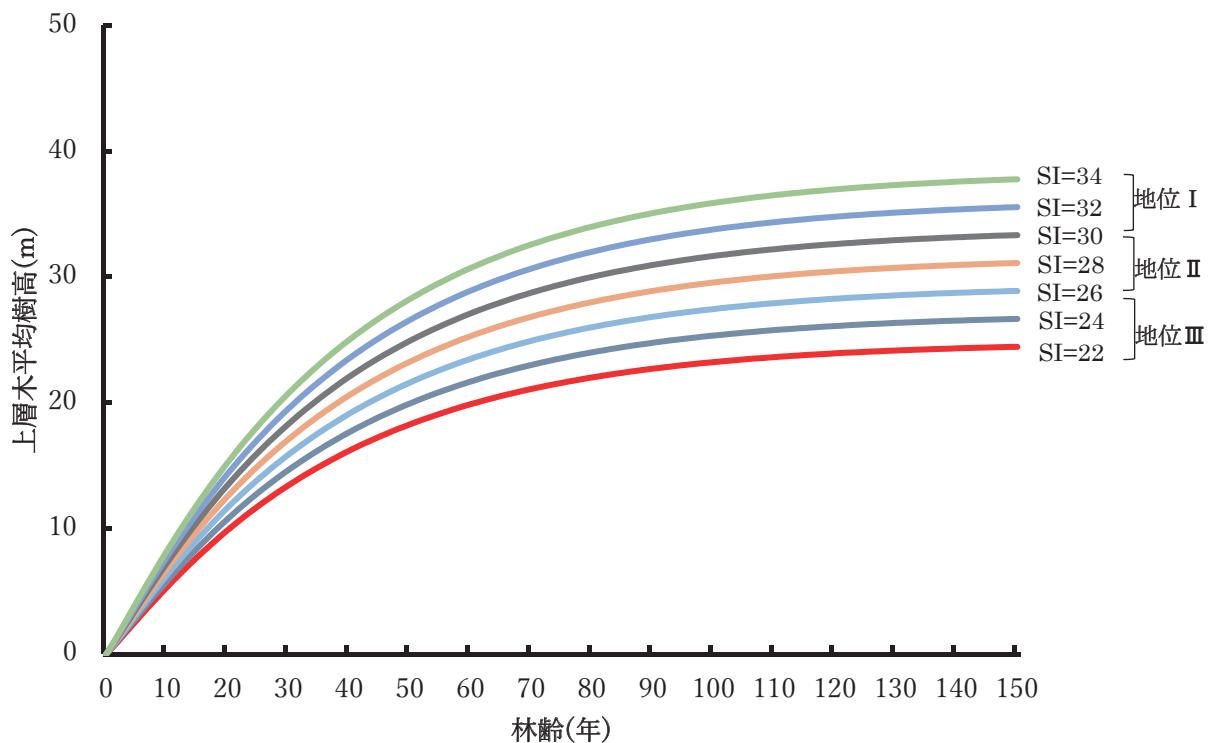


図-5. 地位指数曲線及び絶対的樹高地位と相対的樹高地位の対応

## 3. 上層木平均樹高と密度の関係式

上層木平均樹高と立木密度の関係式を推定した結果、以下の(9)式が求められた (図-6)。

$$N = 3942.2 \times e^{-0.073 \times H} \quad (9)$$

N: 立木本数(本/ha) H: 上層木平均樹高(m)

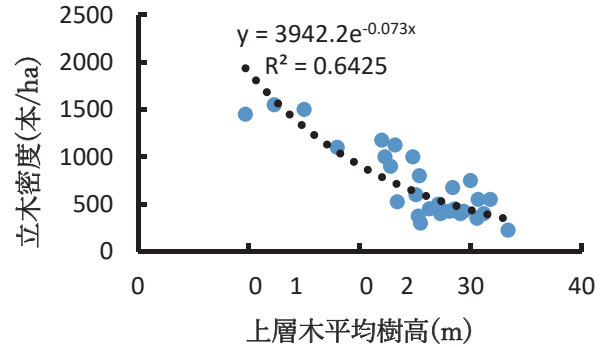


図-6. 上層木樹高と立木密度の関係式

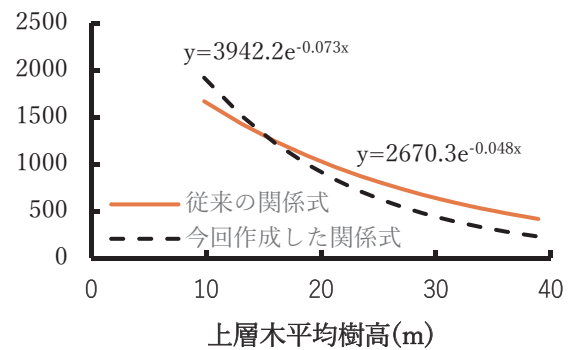


図-7. 従来関係式と今回作成した関係式の

図-7 は、今回作成した樹高と密度の関係式と、既存材積表作成の際に使用した関係式を重ねたものである。従来関係式より、今回作成した関係式は上層木平均樹高が高くなるにつれて密度が低くなる傾向が認められた。

#### 4. 林分材積表

地位指数曲線から、地位ごと、林齢ごとの上層木平均樹高を求めた。その上層木平均樹高と、(9)式で求めた密度を(1)式に当てはめて材積の推定をした。

これらの計算結果をまとめて、「石川県南加賀地域スギ林分材積表」(表-2)を地位ごとに示した。また、比較のため既存材積表を横に示す。(表-3)

### IV. 考察

今回作成した「石川県南加賀地域スギ林分材積表」(表-2)を既存材積表(表-3)と比べた結果、高齢になるにつれて材積が過小評価される傾向が認められた。原因としては、従来の調査法と比べて、樹高が高くなるほど立木密度を過小評価しているためだと考えられる。これは、上層木平均樹高と立木密度の関係式の推定に利用した標準地調査の対象木が、航空機 LiDAR の計測の対象となる上層木のみとしていたためだと考えられる。

このことから、石川県全域でスギをはじめとするその他の樹種の林分材積表を作成する場合には、標準地調査をする際に下層木を含めた全立木を対象とし、航空機 LiDAR の調査結果を補正するための情報を得ることで、本手法による作成が可能であると考ええる。

### 謝辞

本研究は、石川県農林水産部森林管理課西田結也技師及び関係者各位にご協力いただいた。記して感謝の意を示す。

### 引用文献

- 家原敏郎(1990)大阪営林局管理内高齢級林の収穫予測(Ⅱ)-収穫予想表の作成-。日林関西支講 41: 215-218
- 石川県(2021)いしかわ森林・林業・木材産業振興ビジョン 2021。石川県
- 猪瀬光雄・佐野真・石橋聡(1993)密度管理図をもとにしたカラマツの収穫予想表。北方林業 45: 76-81

J クレジット制度事務局(2022)J クレジット制度について～森林管理プロジェクトを中心に～。

[https://japancredit.go.jp/data/pdf/credit\\_004.pdf](https://japancredit.go.jp/data/pdf/credit_004.pdf) (2023年3月25日参照)

小谷二郎・千木容(2006)立地環境要因によるスギ高齢林の地位指数および形質の推定。石川県林試県報 38: 16-20

長濱孝行・近藤洋史(2006)長伐期施業に対応した鹿児島県スギ人工林収穫予測。日林誌 88: 71-78

林野庁(1970)立木幹材積表西日本編。日本林業調査会

林野庁(1978)裏東北・北陸地方スギ林分密度管理図。日本森林技術協会

林野庁(2022)航空機 LiDAR データを使った地位指数分布図作成の手引き。林野庁

狭野俊和(2022)広島県のスギ・ヒノキ林現実林分収穫表の調整。広島県林技セ研報 43: 1-23

島田博匡(2010)三重県のスギ・ヒノキ林における長伐期施業に対応した林分収穫表の作成。三重県林業研報 2: 1-28

白石則彦・坂井康宏(1995)アカエゾマツ人工林の収穫予想表作成。北方林業 47(4): 4-7

山本茂夫・村松保男(1997)例解側樹の実務 再訂増補。地球社

山本充男・安井鈞(1983)島根県スギ人工収穫予想表 1. 林分密度管理図に基づく作成システム。山陰文研紀要 23: 55-69

表-2-1. 石川県南加賀地域スギ林分材積表  
地位区分 I

林齢年	上層樹高 m	本数 本/ha	林分材積 m <sup>3</sup> /ha
5	3.9	2963	28
10	7.8	2233	113
15	11.3	1726	220
20	14.5	1372	327
25	17.2	1120	425
30	19.7	936	513
35	21.8	800	589
40	23.7	697	654
45	25.4	618	709
50	26.8	557	756
55	28.1	508	795
60	29.2	469	827
65	30.1	438	855
70	30.9	412	878
75	31.7	391	897
80	32.3	373	914
85	32.8	359	928
90	33.3	347	939
95	33.7	336	949
100	34.1	328	958
105	34.4	320	965
110	34.7	314	971
115	34.9	309	977
120	35.1	304	981
125	35.3	300	985
130	35.4	297	988
135	35.6	294	991
140	35.7	291	994
145	35.8	289	996
150	35.9	287	998

表-3-1. 既存材積表\*  
地位区分 I

林齢年	上層樹高 m	本数 本/ha	林分材積 m <sup>3</sup> /ha
5	5.5	2051	49
10	8.7	1762	127
15	11.6	1534	220
20	14.3	1354	316
25	16.7	1208	411
30	18.8	1090	501
35	20.8	993	586
40	22.6	912	665
45	24.2	844	738
50	25.7	788	804
55	27.0	739	865
60	28.2	698	920
65	29.3	662	971
70	30.3	632	1016
75	31.2	605	1057
80	32.0	582	1095
85	32.7	562	1129
90	33.4	544	1159
95	34.0	529	1187
100	34.6	515	1212
105	35.1	503	1234
110	35.5	492	1255
115	36.0	482	1273
120	36.3	474	1290
125	36.7	466	1305
130	37.0	459	1319
135	37.3	453	1331
140	37.5	448	1342
145	37.7	443	1352
150	38.0	438	1361

表-2-2. 石川県南加賀地域スギ林分材積表  
地位区分 II

林齢年	上層樹高 m	本数 本/ha	林分材積 m <sup>3</sup> /ha
5	3.4	3076	20
10	6.8	2405	87
15	9.8	1924	173
20	12.6	1576	261
25	15.0	1321	345
30	17.1	1130	421
35	19.0	986	488
40	20.6	875	546
45	22.0	788	596
50	23.3	720	639
55	24.4	665	676
60	25.3	620	708
65	26.2	584	735
70	26.9	554	758
75	27.5	529	778
80	28.1	508	794
85	28.5	491	809
90	28.9	477	821
95	29.3	464	832
100	29.6	454	841
105	29.9	445	848
110	30.1	437	855
115	30.3	431	861
120	30.5	425	866
125	30.7	421	870
130	30.8	417	874
135	30.9	413	877
140	31.0	410	880
145	31.1	407	882
150	31.2	405	884

表-3-2. 既存材積表\*  
地位区分 II

林齢年	上層樹高 m	本数 本/ha	林分材積 m <sup>3</sup> /ha
5	4.9	2120	36
10	7.6	1856	97
15	10.2	1644	171
20	12.5	1474	250
25	14.6	1334	328
30	16.5	1219	403
35	18.2	1124	474
40	19.7	1043	541
45	21.2	975	603
50	22.4	917	660
55	23.6	868	712
60	24.7	825	759
65	25.6	789	803
70	26.5	757	843
75	27.3	729	879
80	28.0	704	912
85	28.6	683	941
90	29.2	664	968
95	29.8	647	993
100	30.3	632	1015
105	30.7	619	1035
110	31.1	608	1054
115	31.5	597	1070
120	31.8	588	1085
125	32.1	580	1099
130	32.4	572	1111
135	32.6	566	1122
140	32.8	560	1132
145	33.0	554	1141
150	33.2	550	1150

\*石川県内部資料より引用

表-2-3. 石川県南加賀地域スギ林分材積表

地位区分Ⅲ

林齢年	上層樹高 m	本数 本/ha	林分材積 m <sup>3</sup> /ha
5	2.9	3193	14
10	5.7	2591	63
15	8.3	2144	129
20	10.7	1809	199
25	12.7	1558	267
30	14.5	1365	329
35	16.1	1216	385
40	17.5	1098	435
45	18.7	1005	478
50	19.8	930	516
55	20.7	869	549
60	21.5	820	577
65	22.2	779	602
70	22.8	745	623
75	23.4	716	642
80	23.8	693	657
85	24.2	672	671
90	24.6	656	683
95	24.9	641	693
100	25.1	629	702
105	25.4	618	709
110	25.6	609	716
115	25.7	602	721
120	25.9	595	726
125	26.0	590	731
130	26.1	585	734
135	26.2	580	737
140	26.3	577	740
145	26.4	574	743
150	26.5	571	745

表-3-3. 既存材積表\*  
地位区分Ⅲ

林齢年	上層樹高 m	本数 本/ha	林分材積 m <sup>3</sup> /ha
5	4.2	2191	25
10	6.6	1955	71
15	8.7	1762	127
20	10.7	1604	188
25	12.5	1473	250
30	14.1	1364	310
35	15.6	1271	368
40	16.9	1193	422
45	18.1	1126	472
50	19.2	1069	519
55	20.2	1019	562
60	21.1	976	602
65	22.0	939	638
70	22.7	906	671
75	23.4	877	702
80	24.0	852	729
85	24.6	830	755
90	25.1	810	777
95	25.5	793	798
100	25.9	777	817
105	26.3	763	834
110	26.7	751	850
115	27.0	740	864
120	27.2	730	877
125	27.5	721	889
130	27.7	713	899
135	27.9	706	909
140	28.1	700	918
145	28.3	694	926
150	28.5	689	933