標準地法における調査区の大きさと形状の再検討

細田 和男^{*1}・高橋 與明¹・北原 文章²

スギ人工林の実測データをもとにした 4 ha の模型林分内に、面積 0.01～1.0 ha、正方形・円形・ひし形の標準地を多数設定してシミュレーションを行い、林分全体の本数密度と標準地の面積・形状から、標準地の幹材積合計や本数の変動係数を推定するモデルを作成した。このモデルを用い、幹材積合計の目標精度を 10% と仮定すると、立木本数が 2,000 本/ha 以上の幼齢林で 0.1 ha、500 本/ha 未満の主伐期の林分では 0.4 ha 以上、その中間の若齢～壮齢林では 0.2～0.3 ha が標準地面積の目安になると考えられた。また標準地に含まれる立木本数が 270 本以上であれば、立木密度や標準地の形状にかかわらず幹材積合計の目標精度 10% を満たすことが分かった。立木配置を考慮せず無作為に標準地を配置すると、特に標準地が小面積の場合、円形・ひし形よりも正方形の標準地の変動係数が大きくなる。標準地を設定する測定者の習熟度が不明な場合は、正方形よりも円形・ひし形の標準地の方がより正確な調査結果を期待できると考えられる。

キーワード：スギ人工林、標準地法、プロットサイズ、変動係数、目標精度

Kazuo Hosoda, ^{*,1} Tomoaki Takahashi, ¹ Fumiaki Kitahara² (2012) Reconsideration of the Size and Shape of the Survey Area in the Selective Sample Plot Method. J Jpn For Soc 94: 105–111 Selective sample plots of 0.01–1.0 ha and square, circle, and diamond in shape were placed at random in 4 ha model stands consisting of survey data from actual Japanese cedar plantations. From this computer simulation, we developed an estimation model to determine the coefficient of the stand volume variation in the sample plot based on the plot size and shape and the stand density. Assuming aiming precision of 10%, the recommended plot size is 0.1 ha for a young stand of about 2,000 stem/ha, 0.2–0.3 ha for an immature or mature stand, and 0.4 ha or larger for a final aged stand of about 500 stem/ha, respectively. If more than 270 trees are included in the sample plot, the precision declines below 10%, regardless of plot shape and stand density. Particularly in the case of a small plot, the coefficient of variation by square plots exceeded that with circle or diamond varieties, when the sample plots were placed at random, regardless of stand disposition. More accurate results can be expected from the circle or diamond plot than the square plot, regardless of the skill of the surveyor selecting the sample plot.

Key words: Japanese cedar plantation, selective sample plot method, plot size, coefficient of variation, aiming precision

I. はじめに

対象林分の中から平均的な林相の調査区（標準地）を有意抽出し、標準地での調査結果を面積比によって林分全体に拡張する森林調査法を標準地法という。標準地法による調査結果の正確度は調査者の経験や主観に左右され、また標本調査法のように精度を評価できないという欠点がある（大隅 1989；南雲・箕輪 1990；West 2004）。しかし実行が容易であることから、収穫調査や間伐調査など小班スケールの森林調査では、現在でも広く用いられている方法である。

標本調査法でのプロットの面積や箇所数が統計学的に設計されるのとは異なり、標準地の面積や抽出率はもっぱら経験的、慣習的に決められてきた。人工林の研究目的では 30×30 m や 0.1 ha など、きりのよい辺長・面積の四角形や円形、あるいは樹高以上の辺長をもつ正方形の標準地などがよく用いられている。また測樹学の教科書では、標準地は 1 カ所 0.1 ha 以上、林分全体の 5～10% 以上などといった経験的な基準が示されている（嶺 1952；中山 1969；西沢 1972 など）。しかしながら、一般民有林の間伐調査な

ど実務の現場では、たとえば 10×10 m の正方形（0.01 ha）や半径 4 m の円形（約 0.005 ha）など、複数の標準地を設けるにしても非常に狭い標準地を用いている場合が見受けられる。

標準地には林相のよい場所が選ばれやすい傾向がある（中山 1969；大隅 1989）。また、標準地の境界付近において、立木が標準地に含まれるか否かの誤判定の影響は小面積ほど大きいので、狭すぎる標準地では林分全体の状態を正しく把握できない恐れがある。むしろ実務において費用対効果を考慮することは当然であるが、調査結果が立木評価や間伐設計を左右することを考えれば、標準地法においても必要最小限の確からしさを保つ必要があろう。

ところで、単純無作為抽出の標本調査法において、標本数 n に対して母集団が非常に大きく、母集団の統計量、たとえば蓄積や本数などの変動係数（標本の標準偏差÷平均値）を $cv(\%)$, $t(0.05, \infty) \div 2$ とすると、期待誤差率 $E(\%)$ は(1)式のように表される。

$$E = 2 cv / \sqrt{n} \quad (1)$$

標準地法は(1)式で $n=1$ の場合に相当する。また変動

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: khosoda@affrc.go.jp

¹ 独立行政法人森林総合研究所森林管理研究領域 〒305-8687 つくば市松の里 1（Department of Forest Management, Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba 305-8687, Japan）

² 独立行政法人森林総合研究所四国支所 〒780-8077 高知市朝倉西町 2-915（Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 2-915 Asakuranishi, Kochi 780-8077, Japan）

（2011 年 5 月 20 日受付；2012 年 3 月 5 日受理）

係数 cv は、同じ林相を対象にしても、調査区面積が広いほど小さくなることが知られており（大隅 1989；南雲・箕輪 1990）、両者の関係は(2)式で近似されることが多い（Loetsch *et al.* 1973；高田・風間 1982）。

$$cv = a A^b \quad (2)$$

ここで A は調査区の面積、 a と b は定数で、 $b < 0$ である。したがって、この定数 a および b が何らかの方法で推定できれば、許容可能な誤差率のもとで、標準地の面積を決定することができると考えられる。(2)式、すなわち調査区面積の増加に伴う変動係数の減少の程度は、人工林の場合、地形の複雑さや植栽位置の均等性、間伐方法、実生苗か挿木苗か、風雪害などさまざまな因子によって左右されることが想像される。しかし、実用面から考えると、たとえば林齢、目測による平均単木サイズや本数密度など、森林簿などの机上調査で、あるいは短時間の現地踏査で取得できる因子から定数 a および b を推定し、標準地の面積を事前を選択できることが望ましい。

(2)式の関係は、主として標本調査法の設計に関連して論じられてきており、森林経営単位の大きい北米の、とりわけ天然林での研究例が多い（Mesavage and Grosenbaugh 1956；Kullov 1966 など）。わが国でもいくつかの報告がみられるが、現地調査による検討には膨大な労力がかかるためか、スギ人工林でさえも6例が報告されているに過ぎず（林野庁計画課・林業試験場測定研究室 1957；木梨 1978；高田・風間 1982）、(2)式を推定する知見に乏しいのが現状である。

そこで本報では、スギ人工林の実測データをもとにしてモデル林分を作成し、そのモデル林分内に、異なる面積や形状の標準地を多数設定してシミュレーションを行う。後述のように、このモデル林分は林齢や単木サイズの情報をもたないので、本数密度から(2)式の定数 a および b を推定する。その結果をもとに、人工林の森林調査を標準地法によって行う際の適切な標準地の大きさや形状について考察することを目的とする。

なお、同一の小班や伐区の人工林であっても、微地形や施業などの影響で立木の疎密があることや、尾根部と谷部、あるいは斜面の上部と下部とで単木サイズが異なることは少なくない。しかし本報では、同一の小班や伐区の内部における林相の違いは、踏査によってあらかじめ区別することを前提とし、各林相にそれぞれ標準地を設定するケースを想定して議論を進める。

II. 資料と方法

1. モデル林分の作成

次のような手順で、林分が植林され除間伐が反復される経過を再現し、人工林のモデルを作成した。

① 横方向（等高線方向）が 200 m、縦方向（斜面傾斜方向）が水平距離で 200 m、面積 4 ha の林地に ha あたり 3,000 本を正方植えで等間隔に植栽する。

② ただし、現実の植栽は完全な等間隔ではなく、また斜面傾斜方向に沿って並木植えになっていることが多いことから、横方向に標準偏差 0.1 m、縦方向に標準偏差 0.2 m、いずれも平均 0 m の正規乱数を加えて植栽位置を変動させる。これを植栽時の立木配置とする。

③ 間伐（除伐）を実施する。選木方法は④と④'の方法を混用する。

④ 至近隣接木との距離が短い立木から順に、所定の本数を間伐する。ただし、互いに至近である2本の隣接木は、無作為に選んだ片方だけを間伐する。

④' 林分全体から所定の本数を無作為に選んで間伐する。

⑤ 本数率約 30%の間伐を6回実施し本数密度を 3,000, 2,100, 1,470, 1,030, 720, 500, 350 本/ha の7段階に変化させる。

⑥ 林分内の個々の立木に対し、平均 1、所定の変動係数の正規乱数を用い、無作為に幹材積を付与する。

単木幹材積の変動係数は、関東森林管理局および中部森林管理局管内の国有林内に設置されたスギ人工林固定試験地の毎木調査結果から推定した。広葉樹が多数混交している試験地や、初回調査時の残存本数からみて植栽時の本数密度が 3,000 本/ha ではないと判断される試験地は除外し、24 試験地、のべ 212 回分の毎木調査結果を用いた。林齢は 5～99 年、本数密度は 377～3,059 本/ha で、国有林の標準的な施業が施された試験地が多い。非常にばらつきが大きいものの、本数密度が多い、すなわち林齢が若いほど単木幹材積の変動係数が大きい傾向が認められたことから（図-1）、次の推定式によって手順⑥の変動係数を定めることにした。

$$vcv = 32.8 + 0.0116 N \quad (3)$$

ここで vcv は単木幹材積の変動係数（%）、 N は林分の本数密度（本/ha）である。

①～⑥の手順を 100 回反復し、合計 700 のモデル林分を作成した。林分面積は機械化森林施業研究会が、2005～2007 年度に実施したアンケート調査において、伐区面積が平均 3.5 ha であったこと（吉田 2009）を参考にして想定した。

2. 立木配置の検証

上述の手順で発生させた立木配置が現実の林分を再現しているかを検証するため、また手順④と④'の割合を決定するため現実の立木位置図を参照した。参照した立木位置図は茨城県石岡市内の国有林において、航空レーザー測量によって作成した 47 カ所の立木位置図である。47 カ所はすべてスギ人工林で、いずれも面積は 0.16 ha（40×40 m）、林齢は 19～97 年生、本数密度は 430～1,420 本/ha である。区画は複数の小班にまたがらないように、また明らかな林孔や立木の集中斑を避け、立木配置からみて同一の林相と思われる場所に設定した。

モデルおよび現実の立木位置図に対し、立木位置を中心点としたボロノイ分割を行い、全体が図郭内に含まれるボロ

図-1. 固定試験地における単木幹材積の変動係数と本数密度との関係

図-2. ボロノイ多角形面積の標準偏差の比較

ノイ多角形面積の標準偏差を、立木配置のばらつき具合の指標とした。ボロノイ多角形は隣接点どうしを結んだ直線の垂直二等分線で囲まれた多角形である。森林分野では Brown (1965) の Area Potential Available (APA) としても知られ、樹冠投影面積との比較や局所密度の指標に用いられている (高田・小林 1989; 宮本・天野 2002)。試行錯誤的に検討した結果、間伐木の 3/4 を④の方法で均等に、残り 1/4 を④'の方法で無作為に間伐すると、現実林分に近いばらつきをもつ模型林分を生成することができた(図-2, 3)。

3. 標準地調査のシミュレーション

生成した模型林分の内側にさまざまな広さの標準地を無作為に設定し、幹材積を合計すると同時に本数を数えた。この際立木の胸高直径は考慮せず、立木位置の点が標準地に含まれる立木の幹材積と本数を数えた。標準地の形状は、①植栽列(斜面傾斜方向)に平行な正方形、②円形、③植栽列(斜面傾斜方向)に対して斜め 45 度の正方形 (以下、ひし形と呼ぶ) の 3 種類である。試行回数は各密度段階で 100 ずつの模型林分に対し、標準地面積が 0.01~0.1 ha, 0.1~1.0 ha の範囲で各 100 カ所ずつ、すなわち各密度段階別、標準地の形状別にそれぞれ 20,000 カ所である。標準地の面積は無段階に変化させて試行したうえで、0.1 ha 未満では階級幅 0.01, 0.1 ha 以上では階級幅 0.1 ha で区分し、

図-3. 模型林分の例 (4 ha の一部, 1,030 本/ha)

白丸が立木位置、実線はボロノイ多角形を示す。

標準地面積の各階級における幹材積合計および本数の変動係数を算出した。

III. 結 果

1. 標準地の面積や形状と幹材積合計の変動係数との関係

各密度段階の模型林分の中に無作為に設定した、正方形、円形およびひし形の標準地それぞれ 20,000 カ所において、算出された ha あたり幹材積合計の変動係数を求め、標準地の面積や形状との関係を検討した (図-4(a))。変動係数は標準地が広いほど小さく、また林分全体の本数密度が高いほど小さくなった。標準地の形状で比較すると、本数密度が低い場合は大差がないが、密度が高い場合で特に標準地が狭い場合、正方形よりも円形やひし形の標準地の変動係数の方が小さい傾向にあった。本数密度が 2,100 および 3,000 本/ha の場合、ほとんどの標準地面積で 3 種類の標準地形状の変動係数に有意な差が認められた (表-1 上段)。

図-4(a) に示した幹材積合計の変動係数と標準地面積の関係を、非線形最小二乗法で(2)式にあてはめた結果、定数 a は本数密度の増加に伴って単調に減少していた (図-5(a))。定数 b は $-0.56 \sim -0.50$ 、平均 -0.523 で、本数密度が大きいほど b が大きい傾向がある。しかしながら単調に増加せず、また標準地の形状による b の大小関係は一定していなかった (図-5(b))。簡単のため $b = -0.52$ に固定して改めて(2)式で近似したところ、定数 a は本数密度の増加に伴って滑らかに漸減し、また方形標準地より円形・ひし形標準地の定数 a の方がやや小さくなった (図-5(c))。 $b = -0.52$ に固定した場合の、本数密度 N (本/ha) に対する定数 a の変化を対数式で近似したところ、(4)~(6)式のとおりであった。

図-4. 幹材積合計や本数の変動係数と標準地面積との関係

(a) 幹材積合計の変動係数, (b) 本数の変動係数。
横軸は階級の中央値を表す。

図-5. 幹材積合計の変動係数における近似式の定数と本数密度との関係

(a) 定数 a , (b) 定数 b , (c) $b = -0.52$ に固定した場合の定数 a 。

$$\text{正方形の場合 } a = 10.21 - 2.57 \log N \quad (4)$$

$$\text{円形の場合 } a = 10.35 - 2.65 \log N \quad (5)$$

$$\text{ひし形の場合 } a = 10.38 - 2.65 \log N \quad (6)$$

2. 標準地の面積や形状と本数の変動係数との関係

標準地内の本数の変動係数は、幹材積合計の場合と同様に、標準地が広いほど小さく、また林分全体の本数密度が高いほど小さくなった (図-4(b))。標準地の形状で比較したときも、幹材積合計と同様の傾向であり、本数密度が高い場合、正方形よりも円形やひし形の標準地の方の変動係数が小さい傾向があった。本数密度が 1,470 本/ha 以上の場合、標準地面積にかかわらず 3 種類の標準地形状の変動係数に有意な差が認められた (表-1 下段)。また、全体として幹材積合計の場合よりも変動係数は小さく、たとえば標準地面積 0.09 ha 以上 0.1 ha 未満の階級では、同じ本数密度、同じ標準地形状で比べた場合、幹材積合計よりも本数の変動係数の方が 1.2~3.4 ポイント小さかった。

(2)式にあてはめてみると、定数 a は 0.18~2.96 の範囲で、モデル林分の本数密度が多いほど定数 a は小さかった。また定数 b は、3,000 本/ha での円形標準地で -0.70 であったのを除くと、-0.57~-0.52、平均 -0.538 であり、標準地の形状による定数 b の大小関係に一定の関係は見受けられなかった。幹材積合計の場合と同様、簡単のため $b =$

-0.54 に固定して (2)式に近似すると、本数密度が大きいくほど定数 a は小さく、また正方形標準地より円形やひし形標準地の定数 a の方がやや小さかった。 $b = -0.54$ に固定した場合の、本数密度に対する定数 a の変化は (7)~(9) 式で近似された。

$$\text{正方形の場合 } a = 9.49 - 2.53 \log N \quad (7)$$

$$\text{円形の場合 } a = 10.2 - 2.79 \log N \quad (8)$$

$$\text{ひし形の場合 } a = 9.94 - 2.71 \log N \quad (9)$$

IV. 考 察

1. 標準地の面積と変動係数

高田・風間 (1982) は調査区の面積と変動係数の関係について、国内外の既往文献から 38 例を収集して再検討し、(2)式の定数 b は -0.5~-0.4 および -0.3~-0.2 の範囲の例が多いことを見出した。また、設定した調査区面積の範囲が大きい事例において、定数 b の絶対値が小さい、すなわち調査区面積の拡大に応じた変動係数の減少が緩やかであることを指摘した。国内のスギ人工林の例では、高田・風間 (1982) は調査区面積 0.0025~0.0306 ha に対し、定数 b が -0.566~-0.476、木梨 (1978) は調査区面積 0.01~0.64 ha で定数 b が -0.26 という値を得ている。また、林野庁

表-1. プロット形状間における変動係数の均一性の検定（上段，幹材積合計；下段，本数）

標準地面積 (ha)	本数密度 (本/ha)						
	350	500	720	1030	1470	2100	3000
0.015	ns	ns	ns	ns	ns	**	***
0.025	ns	ns	ns	ns	ns	**	***
0.035	ns	ns	ns	ns	ns	***	***
0.045	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
0.055	ns	ns	ns	*	*	*	***
0.065	ns	ns	ns	ns	*	**	***
0.075	ns	ns	ns	ns	**	*	***
0.085	ns	ns	ns	ns	*	**	***
0.095	ns	ns	ns	ns	ns	**	***
0.15	ns	ns	ns	ns	ns	*	***
0.25	ns	ns	ns	ns	ns	**	***
0.35	ns	ns	ns	ns	*	**	***
0.45	ns	ns	ns	ns	**	***	***
0.55	ns	ns	ns	ns	*	**	***
0.65	ns	ns	ns	ns	ns	**	***
0.75	ns	ns	ns	*	*	**	***
0.85	ns	ns	ns	ns	*	***	***
0.95	ns	ns	ns	ns	***	***	***
0.015	ns	ns	ns	*	**	***	***
0.025	ns	ns	ns	ns	*	***	***
0.035	ns	ns	ns	ns	**	***	***
0.045	ns	*	ns	ns	**	***	***
0.055	ns	ns	ns	**	***	***	***
0.065	ns	ns	*	*	***	***	***
0.075	ns	ns	ns	*	***	***	***
0.085	ns	ns	ns	ns	***	***	***
0.095	ns	ns	ns	ns	**	***	***
0.15	ns	ns	ns	ns	***	***	***
0.25	ns	ns	ns	ns	**	***	***
0.35	ns	ns	ns	***	**	***	***
0.45	ns	ns	ns	**	***	***	***
0.55	ns	ns	ns	*	***	***	***
0.65	ns	ns	ns	ns	***	***	***
0.75	ns	ns	*	**	***	***	***
0.85	ns	ns	ns	***	***	***	***
0.95	ns	*	ns	***	***	***	***

Zar (1999) の方法による χ^2 検定。***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$; ns, $p \geq 0.05$ 。標準地面積は階級の中央値を表す。

計画課・林業試験場測定研究室 (1957) は最大約 1.8 ha までの調査区を設定して検討し，定数 b は -0.194468 であった。木梨 (1978) や林野庁計画課・林業試験場測定研究室 (1957) の例では，相対的に大きな面積の調査区まで試みているため，調査区の拡大に伴って林相が異なる部分や林孔が含まれるようになり，変動係数の減少が緩やかになったと考えられる。本研究では 0.01~1.0 ha の範囲で検討したが，前述のとおり 4 ha の模型林分全体が同一の林相であることを仮定しているため，定数 b が高田・風間 (1982) の例に近いものになったと推察される。

2. 標準地の形状と変動係数

図-4 に示したとおり，標準地が狭く，特に模型林分の本数密度が高い場合は正方形の標準地よりも円形やひし形の標準地の変動係数が小さかった。図-5(c) において正方形の定数 a よりも円形やひし形の定数 a の方がやや小さいことにも，そのことは表されている。

本報で行ったシミュレーションでは，模型林分内におけ

表-2. 標準地内で境界線から平均樹間距離の1/2未満に位置する本数の標準偏差

標準地面積 (ha)	500 本/ha			1030 本/ha			2100 本/ha		
	正方形	円形	ひし形	正方形	円形	ひし形	正方形	円形	ひし形
0.015	1.7 ^a	1.6 ^a	1.7 ^a	2.2 ^a	2.0 ^b	2.2 ^a	4.2 ^a	2.3 ^b	2.5 ^b
0.025	1.9 ^a	1.8 ^b	2.0 ^a	2.5 ^a	2.2 ^b	2.6 ^a	4.6 ^a	2.6 ^b	2.8 ^c
0.035	2.2 ^a	2.0 ^b	2.2 ^a	2.9 ^a	2.4 ^b	2.7 ^a	5.9 ^a	2.8 ^b	3.0 ^c
0.045	2.4 ^a	2.2 ^b	2.4 ^a	3.0 ^a	2.6 ^b	3.0 ^a	6.0 ^a	3.0 ^b	3.3 ^c
0.055	2.6 ^a	2.3 ^b	2.5 ^a	3.3 ^a	2.8 ^b	3.1 ^a	7.1 ^a	3.0 ^b	3.6 ^c
0.065	2.7 ^a	2.4 ^b	2.6 ^{ab}	3.5 ^a	2.8 ^b	3.3 ^a	7.9 ^a	3.1 ^b	3.6 ^c
0.075	2.9 ^a	2.5 ^b	2.9 ^a	3.7 ^a	2.9 ^b	3.4 ^a	8.3 ^a	3.4 ^b	4.2 ^c
0.085	2.9 ^a	2.5 ^b	2.9 ^a	3.8 ^a	3.0 ^b	3.7 ^a	8.8 ^a	3.4 ^b	4.0 ^c
0.095	3.1 ^a	2.7 ^b	2.9 ^a	4.0 ^a	3.1 ^b	3.8 ^c	9.3 ^a	3.5 ^b	4.1 ^c
0.15	4.0 ^a	3.3 ^b	3.7 ^a	5.1 ^a	4.1 ^b	5.0 ^a	12.7 ^a	5.0 ^b	6.2 ^c
0.25	4.3 ^a	3.6 ^b	4.2 ^a	5.9 ^a	4.0 ^b	5.6 ^a	15.1 ^a	5.0 ^b	6.7 ^c
0.35	4.9 ^a	3.8 ^b	4.5 ^c	6.4 ^a	4.5 ^b	5.6 ^c	17.9 ^a	5.2 ^b	7.5 ^c
0.45	5.3 ^a	4.0 ^b	4.8 ^c	7.0 ^a	4.7 ^b	6.5 ^c	20.0 ^a	5.6 ^b	7.8 ^c
0.55	5.6 ^a	4.1 ^b	5.0 ^c	8.1 ^a	5.0 ^b	6.7 ^c	21.7 ^a	5.8 ^b	8.8 ^c
0.65	6.1 ^a	4.4 ^b	5.4 ^c	8.1 ^a	5.1 ^b	7.1 ^c	24.5 ^a	5.9 ^b	9.3 ^c
0.75	6.8 ^a	4.5 ^b	5.6 ^c	8.5 ^a	5.3 ^b	7.7 ^c	24.9 ^a	6.1 ^b	9.9 ^c
0.85	6.9 ^a	4.6 ^b	5.9 ^c	9.4 ^a	5.5 ^b	8.0 ^c	28.0 ^a	6.1 ^b	10.9 ^c
0.95	7.0 ^a	4.8 ^b	6.0 ^c	9.7 ^a	5.7 ^b	8.3 ^c	29.8 ^a	6.6 ^b	10.8 ^c

標準地の形状間で異なる添字は有意差を表す ($p < 0.05$, Zar (1999) の方法による多重比較検定)。標準地面積は階級の中央値を表す。

る標準地の位置および辺長や半径は全く無作為に設定しており，標準地の境界線が立木と立木の間を通過しているとは限らないため，ha あたりに換算した幹材積合計や本数が過大ないし過小評価になっているケースが含まれていると考えられる。

シミュレーションにおいて，標準地の内縁近く（模型林分の本数密度から算出される平均樹間距離の 1/2 未満）に位置する立木の本数に着目すると，そのばらつきは正方形 > ひし形 > 円形で，特に本数密度が高い場合にその傾向が明瞭であった（表-2）。これは正方形の場合，標準地の縦方向の境界線が植栽列と平行であるため，同じ辺長でも，無作為に設定された境界線の位置によって，内縁近くの本数が大きく変動するのに対して，円形やひし形の場合は境界線の位置による影響を受けにくいためであると考えられる。

このことによって間接的に示されるように，ha あたりに換算した幹材積合計や本数が過大ないし過小評価になっているケースは，円形やひし形よりも，正方形の標準地でより発生し易いため，図-4 のような結果になったものと考えられる。

3. 本数密度を基準とした標準地の大きさ

標準地の面積と変動係数の関係が(2)式，定数 a は(4)~(9)式に従い，定数 b は幹材積合計の場合 -0.52，本数の場合 -0.54 とすると，(1)式から所定の目標精度を満たす標準地面積が算出できる。標準地面積 A (ha) は，例として正方形の標準地で幹材積合計の変動係数を基準とする場合，次式のように表される。

$$A = (2(10.21 - 2.57 \log N)/E)^{1/0.52} \quad (10)$$

ここで N は本数密度 (本/ha)， E は目標精度 (%) である。森林調査における目標精度は通常 5% や 10% とされている。

図-6. 目標精度 10%を満たす標準地面積

(a) 幹材積合計を目的とする場合、(b) 本数を目的とする場合。

る(大隅 1989)。また、林野庁「国有林野産物収穫調査規程準則」(最終改正 1999 年 8 月 18 日)においては、標本調査法による材積の推定誤差が 10%以内と規定されている。

そこで目標精度を 10%と仮定し、標準地の形状および林分全体の本数密度別に、この目標精度を満たす標準地の面積を算出して図-6 に示した。標準地面積の選択基準となる本数密度は、より正確には標準地調査を行った結果として得られるものであるが、ここでは、踏査中に目測した平均樹間距離から概算した本数密度によって、標準地面積を選択することを想定している。概算本数密度 N' (本/ha) は次式で算出できる。

$$N' = 10,000/TD^2 \quad (11)$$

ここで TD は目測による平均樹間距離 (m) である。

図-6 は本数密度を基準としているが、林齢に置き換えて考えると、幹材積合計を目的とする場合、本数密度が 2,000 本/ha 以上の幼齢林で 0.1 ha、500 本/ha 未満の主伐期の林分では 0.4 ha 以上、その中間の若齢～壮齢林では 0.2～0.3 ha が目標精度 10%での標準地面積の目安となろう。中山 (1969) は標準地の面積について「老齢で均斉でない森林」では 1 ha 以上、「一斉林」で 0.5 ha 以上、「幼齢林」で 0.1～0.2 ha という目安を示しているが、図-6 は比較的これに近い結果となっている。

林分密度管理図を用いた間伐設計を行う場合、幹材積合計よりも本数と上層樹高が主たる調査目的となる。林分の本数密度を主目的とする調査では、図-6 に示すとおり、幹材積合計を目的とする場合よりも、より小面積の標準地で目標精度を満たすことができる。

標準地の大きさの目安は、これまで標準地の面積として示されてきたことが多いが、標準地に含まれる本数を目安として考えることもできる。Chapman and Meyer (1949) は、収穫表の調製に用いる暫定標準地の大きさとして、100～300 本が含まれる大きさが適当であると述べている。また林野庁が 1949 年に制定した「同齢単純林の林分収穫

図-7. 目標精度 10%を満たす面積の標準地に含まれる本数

(a) 幹材積合計を目的とする場合、(b) 本数を目的とする場合。

表調製要綱」においては、暫定標準地がなるべく 200 本以上を含むようにと規定されている。図-6 に示した標準地の面積に、それぞれ対応する本数密度を乗じると、幹材積の場合で 162～269 本、本数で 30～167 本となり、密度や形状によって変化して一定の値にはならない(図-7)。しかしその最大値に着目すると、幹材積合計を目的とする場合で 270 本以上、本数を目的とする場合で 170 本以上を含むような広さの標準地であれば、密度や形状にかかわらず目標精度 10%を満たすといえる。さらに円形標準地に限れば、これらより 10%程度少ない本数で目標精度 10%を満たすことが期待できる。

図-6 や図-7 に例示した基準は、本研究で行ったシミュレーションによって得られた定数 a と b に依存している。本研究では前述のとおり、模型林分の検証データとして、一地域のスギ人工林から取得された立木位置図を用いているにすぎないとはいえ、検証データは通常の施業が行われている国有林であること、明らかな林孔や立木の集中斑は避けたこと、模型林分の生成手順が現実の施業から考えて不自然ではないこと、単木幹材積の変動係数は関東・中部地方の広範囲から収集されたデータによって推定されていることから、定数 a および b は、3,000 本/ha で植栽された平均的なスギ人工林におおむね適合すると考えられる。しかし、より高い信頼性を求めるならば、標準地調査を行うとする特定の地域・林相について、本数密度等から変動係数を推定する式を独自に用意し、所定の目標精度のもとで標準地の大きさの目安を定める必要がある。

4. 標準地の形状の選択

前述のとおり、本報で行ったシミュレーションでは円形やひし形よりも正方形の変動係数の方が大きいため、図-6 の目安面積も正方形の方がやや大きい。しかし現実の森林調査においては、習熟した測定者であれば、標準地の境界線を立木の中間に通すように心掛けるため、円形やひし形の場合に比べ、正方形での正確度が明らかに低下することはないであろう(測量を簡略にするために、立木の配置と関係なく辺長を 20 m や 30 m などに固定することはやめ

るべきである)。

しかしまた一方で、測定者の習熟度が不明な場合、面積が同じならば、正方形よりも円形やひし形を用いた方がより正確な調査結果が期待できるともいえる。ひし形標準地については、福地・江村(2003)が、斜面方向に平行な正方形に比較して、標準地の設定時間が3分の1に短縮できるという報告をしている。円形標準地についても、近年、超音波やレーザーを用いた距離計が比較的安価に入手できるようになり、所定の中心点から立木までの水平距離が容易に測定できるようになった。これらを考え合わせると0.1 ha未満の比較的小さな、全体を見通せるような広さの標準地の場合、正確度および工期という両面の有利性から、円形やひし形の採用が検討されてよいと考えられる。

なお同一の小班や伐区の中に複数の林相が含まれている場合は、まず対象林分全体を踏査し、明らかに複数の林相に分かれているならば、まずそれらを区分しそれぞれの面積を測量したうえで、それぞれの林相に対し、図-6に例示したような基準で標準地を設定する必要がある。また、対象林分的一端から他方に向かって密度や単木サイズが漸変している場合には、本報に例示したような基準は適用できないと考えられる。

航空レーザー測量による立木位置図の作成について、便宜を図っていただいた岐阜大学流域圏科学研究センターの栗屋善雄教授に謝意を表します。また的確なご指摘をくださった査読者ならびに担当編集委

員の皆様にお礼を申し上げます。

引用文献

- Brown GS (1965) Point density in stems per acre. N Z For Res Note No. 38
 Chapman HH, Meyer WH (1949) Forest mensuration. McGraw-Hill
 福地雅弘・江村 健 (2003) 林況調査改善への取り組み. 治山研究発表会論文集 42: 37-41
 木梨謙吉 (1978) 森林調査詳説. 農林出版
 Kullow DL (1966) Comparison of forest sampling designs. J Forestry 64: 469-474
 Loetsch F, Zöhrer F, Haller KE (1973) Forest inventory, Volume 2. BLV
 Mesavage C, Grosenbaugh LR (1956) Efficiency of several cruising designs on small tracts in North Arkansas. J Forestry 54: 569-576
 嶺 一三 (1952) 測樹. 朝倉書店
 宮本麻子・天野正博 (2002) 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響. 森林総研研報 1(2): 163-178
 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 測樹学. 地球社
 中山博一 (1969) 林木材積測定学 改訂第2版. 金原出版
 西沢正久 (1972) 森林測定. 農林出版
 大隅眞一 (1989) 森林計測学講義. 養賢堂
 林野庁計画課・林業試験場測定研究室 (1957) 森林調査上の問題点とその解明. 経営規程改正資料 45: 1-48
 高田和彦・風間葉子 (1982) プロットの大きさと変異係数の関係. 新潟大演報 15: 99-103
 高田和彦・小林正吾 (1989) 樹冠投影面積に関係のある因子について. 新潟大演報 22: 45-49
 West PW (2004) Tree and forest measurement. Springer
 吉田智佳史 (2009) 伐出作業の実態に関するアンケート調査の集計・分析. (機械化森林施業研究会成果報告書. 陣川雅樹ら著, 関東・中部林業試験研究機関連絡協議会). 8-20
 Zar JH (1999) Biostatistical analysis, 4th Edition. Prentice Hall