研 究 論 文

傾斜度を考慮した推定法による紀伊半島における木質バイオマス資源調査

The Gatherable Resources of Woody Biomass in the Kii-peninsula for Considering the Sloping Degree of Forestal Land

森 田 明 宏* ・ 井 田 民 男** ・ 渕 端 学**
Akihiro Morita Tamio Ida Manabu Fuchihata
澤 井 徹*** ・ 佐 野 寛****
Toru Sawai Hiroshi Sano

（原稿受付日2004年 8 月 6 日，受理日2005年 4 月12日）

Abstract

In this study, a technique for an estimation of the quantitative correlation between of sloping land and biomass resource is proposed. In particular, a new index is presented for the estimation of woody biomass resources using by the land record data issued by the Geographical Survey Institute and also using by the municipal statistical data in order to ensure that woody biomass resources are effectively managed. The woody biomass resources was evaluated and by correlating municipal statistical data and land record data to define the renewable sloping forest rate, it was possible to propose an estimation method which can quantitatively evaluate the resources of the steep forests which exist in Japan.

1．緒言

温暖化防止対策と化石燃料節減のためには，自然エネルギーの有効な利活用への期待が高い．主要な３つの自然エネルギーである太陽光，風力，バイオマスのうち，バイオマスは古くから薪炭として利用されているが，反面，大規模な利用拡大にはバイオマス潜在資源量評価をはじめ，不確実性を伴う問題点が多い[1~3]．

日本は世界の中でフィンランドと並んで最も森林面積率の高い国である．ところが北欧では，木質チップやペレットなどの木質資源が，発電用から地域熱暖房，家庭用ストーブまで幅広く普及している．特に，日本と地理的条件が相似なオーストリア（狭い国土で急峻な山林に覆われている）においてさえ，ペレット供給が国産では間に合わず，カナダから輸入しているほどである．

一方，日本では多くの森林がエネルギー用にも材料用にも，見放されている状態にある．主たる原因の一つに，国内の山林において急傾斜林が多いことが指摘されるが，定量的な解析が少ないため，解決の方向づけさえできていない状況である．また，国内におけるバイオマスに関する研究開発は，エネルギー変換技術に関するものは活発であるが，伐採，収集運搬など収穫工学的なものに対しては報告が少ない．このような状況の中で，木質バイオマス資源量を推定する基礎的研究は，バイオマス社会が到来する準備として，重要な役割を担う．

資源量については，単純に森林面積から求められる究極的な資源量が，温帯林の標準的な純生産量10dry-t/ha・yから推定して，250dry-Mt/y（Mt：百万トン）となるが，現状での利用資源量は，僅かに15dry-Mt/yの伐採量に留まっている[4]．この森林資源の生産量を向上させるには，放棄されているバイオマス資源を有効に利用する必要がある．

木質バイオマスの可採できる資源量は，急峻かつ狭い国土を有するため林道整備の状況と傾斜林率に大きく依存している．林道整備は，技術的な課題より経済的な課題（木材価格）に左右されているところが大きい．従って，林道が延長されれば，比例的に搬出量が増量されることになる．

一方，傾斜林地におけるコスト問題を含む搬出量の改善は，急峻な地理条件に覆われている国内林業の最大の課題であり，人的作業の限界と林業機械の性能に極めて依存している．このように木質バイオマスを搬出するための要因と搬出量を推定するためには，林道整備に対する数値目標や林業機械に求められる限界性能などを具体化する必要が

*宮崎県産業支援財団　研究員
E-mail：morita-akihiro@btvm.ne.jp
〒885-0037 宮崎県都城市花繰町21-2 木材利用技術センター内
**近畿大学　理工学部
〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1
***　〃　　生物理工学部
〒649-6493 和歌山県那賀郡打田町西三谷930-2
****地球エネルギーシステム研究所
〒562-0004 大阪府箕面市牧落

ある．

全森林面積から導き出される究極的な資源量は，森林から搬出する際の作業性を無視して，伐採困難として放棄された量も含まれている．また，可採資源量に影響する山林の険しさの調査方法として，高度なGIS(Geographic Information System）等を用いる方法も考えられるが，森林に対しては，森林管理を対象にした研究開発がほとんどである[5~7]．本研究では，傾斜度を考慮することにより，木質バイオマスの究極的な可採資源量を市町村などの地域別に把握する手法を提案する．

2．研究方法

2.1 研究地域の特徴

日本における木質バイオマスの有望な供給地として，生育に有利である豊富な日射量・降水量を有する南九州，四国，紀伊半島が考えられるが，本研究では，紀伊半島を対象に木質資源の特徴をつかみ，木質バイオマスの利用推進を図る基礎研究になるように努めた．

まず，木質バイオマスの資源量を推定するために，材積，材積密度などの情報を収集した．さらに，３県の各市長村における行政区域面積と林野率の相関をとり，紀伊半島における木質資源の特徴を調べた．

2.2 資源量解析法

資源量の解析手順の概略を**図１**に示し，以下に詳細を説明する．傾斜度の解析には「数値地図データ（標高）」を使用した．これは，国土地理院が発行している数値データで，国土を一辺50mのメッシュ（0.25ha）で分割し，その中央の標高を与えたものである．本研究では，紀伊半島の中で最も材積量の多い和歌山県を解析対象にし，まず，傾斜度を計算した後，市町村別に傾斜角データを作成し，傾斜頻度等の解析を行った．結果の表示は，和歌山県を７地域に分けて表示し，F地域（西牟婁）については，更に市町村別に示した．

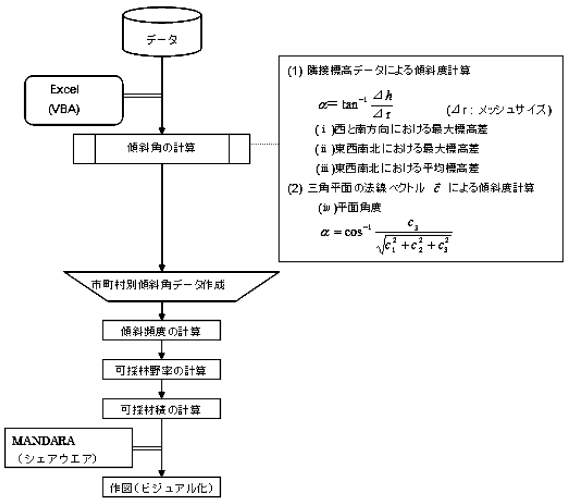


図１　解析手順の概略

本論文では，区画をアルファベットと数字の組み合わせで表し，**図２**のように横軸がアルファベット，縦軸が数字とした．この区画は，「数値地図データ（標高）」のメッシュ・コードで定義されている２次地域区画であり，40,000個（200×200）の50mメッシュから構成されている．

傾斜度の解析については，隣接する標高データの組み合わせから下記の４通りを考え，結果の比較（後述）より解析法(iv)から求めることにした．

（ⅰ）隣接する西南の標高差の最大値

（ⅱ）隣接する東西南北の標高差の最大値

（ⅲ）隣接する東西南北の標高差の平均

（ⅳ）三角平面の法線ベクトル

解析法（ⅰ）～（ⅲ）による傾斜度は，標高差とメッシュ寸法⊿r（50m）から式（1）を用い，平均と最大値から求めたものである．解析法(iv)は，標高差から得られるベクトル$\vec{a}$，$\vec{b}$によって作られる三角平面に対する法線ベクトル$\vec{c}$を式（2）のように定義し，平面の傾斜度は式（3）から求められる．

標高差から求められる傾斜度α［°］

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{\Delta h}{\Delta r} \quad \cdots\cdots(1)$$

法線ベクトルから求められる傾斜度 α［°］

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$$

$$= \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} = (ic_1 + jc_2 + kc_2) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\frac{c_3}{\sqrt{c_1^2+c_2^2+c_3^2}} \quad \cdots\cdots(3)$$

図３は，縦軸を傾斜頻度，横軸を傾斜度とし，上記（ⅰ）～（ⅳ）の計算結果例をプロットしたものである．**図３**(a)においては，解析法(iii)，つまり，東西南北４方向の傾斜度平均から求める傾斜度以外は，同じ傾向で示されている．

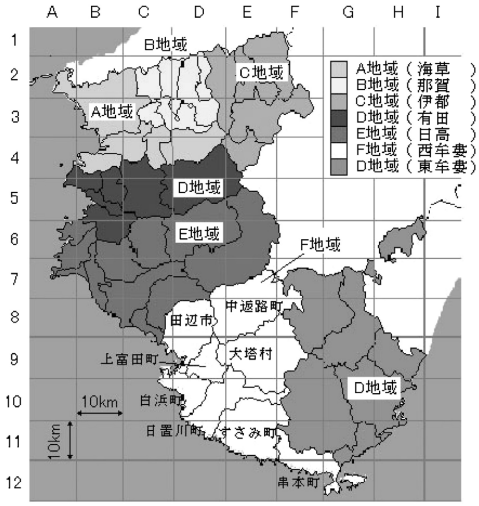
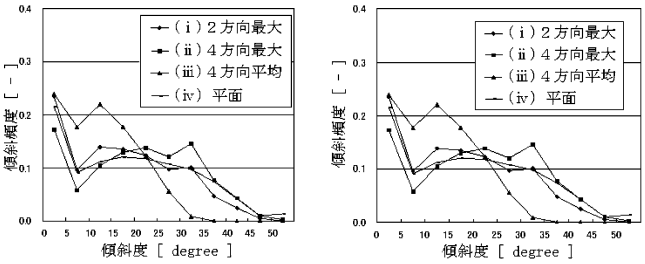


図２　計算範囲と区画



(a) D9地区（紀伊田辺）　(b) C9地区（富田）

図 3　傾斜度と傾斜頻度の関係（地区記号は**図 2** を参照）

これは，傾斜度を平均していることが解析結果に悪影響を与えているためである．**図 3**（b）は海岸線近くの解析例であり，0°～15°の緩傾斜地で解析法によるバラツキが見られる．これは，起伏が激しい地区であるため，4方向の最高値をそのポイントの傾斜度とする解析法（ii）では，緩傾斜地の割合が減少してしまうからだと考えられる．この中で解析法（iv）の三角平面から3次元的に傾斜度を求める方法が平均的な値を取っているが，一方，急傾斜側を比較すると，50°以上の地形の存在を示しているのも解析法（iv）である．以上のことから，解析法（iv）は平均的な値を取っているのではなく，より細かく傾斜を解析していることが分かる．よって，本研究では解析法（iv）を用いた結果から考察を行った．

このように解析法（iv）で傾斜度を求めた後に，市町村毎に傾斜度データを整理した．これから，各傾斜度に対応する面積比率を傾斜頻度とし，式（4）のように定義し求めた．

$$\text{傾斜頻度} = \frac{(\text{各傾斜度に対応する区域面積})}{(\text{行政区域面積})} \quad \cdots\cdots(4)$$

可採材積については，後に述べる可採林野率から可採面積を求め，また，和歌山県内の市町村別の材積と森林面積の関係をグラフにすると，材積は林野面積に比例していることが分かり，材積には枝葉が含まれていないが，材積は材積密度（材積/林野面積）から求められるものとした．

3．解析結果および考察

3.1 研究地域の特徴

まず，木質バイオマスの資源量を推定するために，材積，材積密度などの情報を収集した．紀伊半島に潜在する木質バイオマスの資源量の統計データを**表 1** に示す．

次に，紀伊半島3県の各市長村における行政区域面積と林野率の相関をとった結果を**図 4** に示す．紀伊半島における平均林野率（森林面積と草生地（野草地）を合計した面積を行政区域面積で割った値）は，0.73と非常に高い値となっている．所有区分では，民有林と国有林の割合は，95：5で圧倒的に民有林が多い状態である．材積密度は，民有林の場合は県別によるバラツキがあるが平均で0.2千m^3/haであり，国有林では県別によるバラツキが少なく0.16m^3/ha

表 1　紀伊半島における木質バイオマスデータ

府県名	面積	私有林			国有林			林野面積率
		私有林面積	材積	材積密度	国有林面積	材積	材積密度	
	ha	ha	×1,000m^3	×1,000m^3/ha	ha	×1,000m^3	×1,000m^3/ha	－
大阪府	189,359	55,576	7,299	0.131	1,040	176	0.170	0.30
奈良県	369,109	270,952	54,190	0.200	13,534	2,165	0.160	0.77
三重県	577,324	351,614	59,986	0.171	24,050	3,661	0.150	0.65
和歌山県	472,555	344,910	88,110	0.255	18,856	3,207	0.170	0.77
全体	1,418,988	967,476	202,286	0.209	56,440	9,033	0.161	0.73

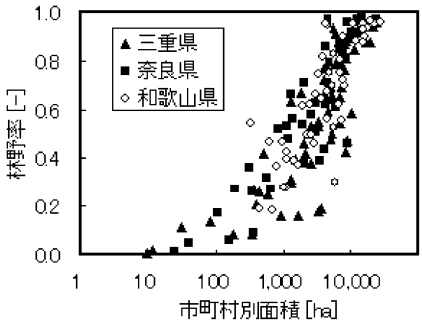


図 4　紀伊半島での行政区域面積と林野率の関係

となり，民有林の材積密度が若干まさっていることが分かる．

図 4 より，行政区域面積が5千ha以下の地域では，林野率が低い傾向にあり，それ以上では，急激に林野率が増し，10千ha付近で，ほぼ林野率が0.8に近い値となっている．従って，これらが意味することは，行政区域面積が大きくなるに従い，木質バイオマス資源の潜在量が急激に増加することである．また，この行政区域面積と林野率の相関は，紀伊半島3県ともに同様な傾向であることも分かる．

3.2 傾斜度分布のマップ化

図 5 はD9地区（紀伊田辺地区：ファイル№503543）の傾斜度分布を示したもので，一般的な自動車の走行限界が傾斜度20°であることや伐採作業性を考慮して，傾斜度が0°～15°は道路を作るのに傾斜の制限を受けない区域，15°～20°は急傾斜だが車両の通れる道路を作れる区域，20°～35°は標準的な作業で伐採が可能な区域，35°～45°は伐採に技術を要するところ，45°以上は伐採が困難

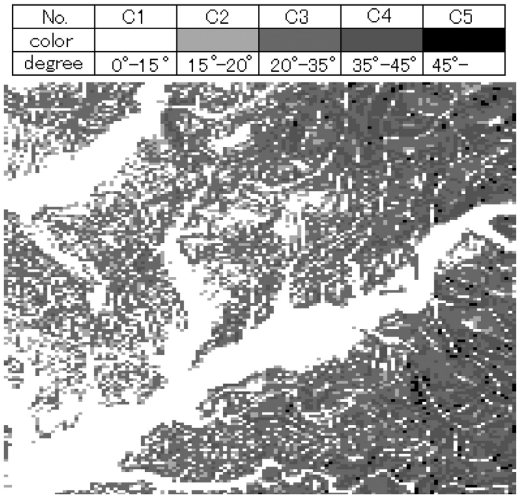


図 5　D9地区の傾斜度分布図

な地域と定義して色分けをした．傾斜の状態はある程度，等高線の幅から読み取ることが出来るが，このように傾斜度ごとに色分けをすることにより視覚的に山の情報を把握できる．

現在，林業の効率を上げるために道幅の広いスーパー林道だけでなく，等高線に沿って道を作る（傾斜のない）林内作業道が注目を浴びているが，**図5**のような傾斜度分布マップを作成すれば，傾斜の緩やかな区域を視覚的に把握することができるため，林道整備への応用が可能であり，また，緩傾斜地と急傾斜地を作業性で比較した場合，当然，急傾斜地の作業性は劣るので，作業性を考慮した作業計画にも応用することができる．

3.3 傾斜頻度と傾斜度の関係

図6は，地域別に傾斜頻度と傾斜度の関係をグラフにしたものであるが，5°～10°の間でグラフの形が凹になり，この間の傾斜頻度が減少している形状になっている．これは長年にわたる人の活動から山の麓などを削って平地をより多く確保するために努力した結果だと推測される．このように，傾斜度の大きさにより土地の活用が制限されるので，傾斜頻度と林野率の関係を調べると，**図7**のように25°以上の傾斜頻度と林野率の間に強い相関があることが分かった．このことから傾斜頻度と林野率を考慮できる指標があれば，伐採に適した土地を選定するのに有効であることが推測され，後述するように可採林野率を定義した．

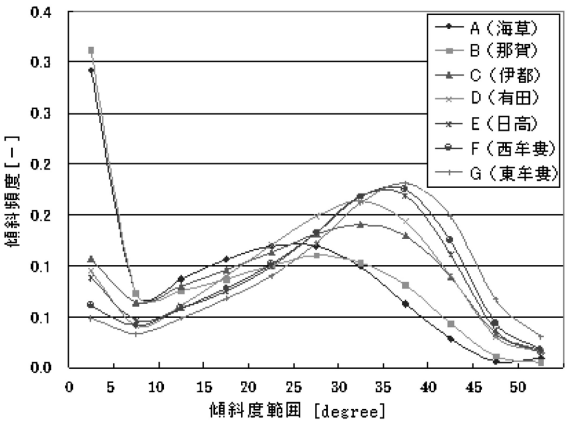


図6　地域別傾斜頻度分布

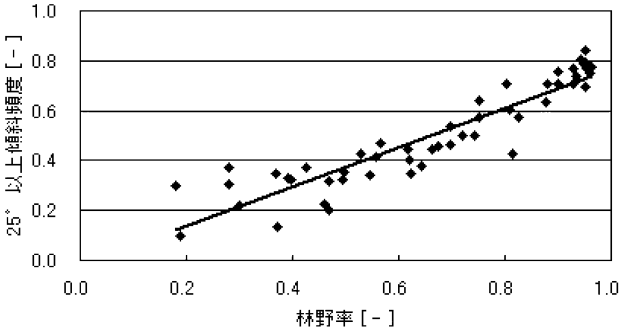


図7　林野率と傾斜頻度の関係

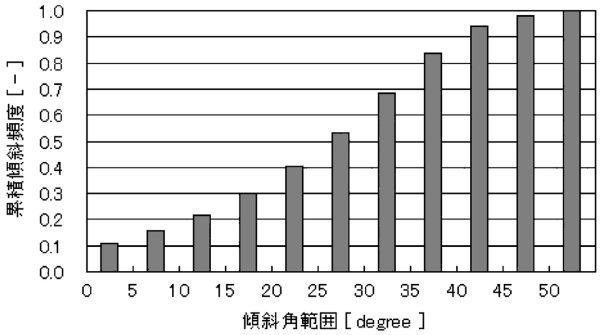


図8　和歌山県の累積傾斜頻度グラフ

一方，和歌山県の天然林は約139千haであり，和歌山県全面積の約30%である．これに対し，**図8**は累積の傾斜頻度を取ったものであるが，35°以上の面積が約30%で天然林の面積と等しいことが分かる．これは，一般に人が作業できる傾斜角は30°～35°と言われているが，和歌山県は林業が盛んな地域であることもあり，限界近くまで人工林化されていて，作業が困難な森林の大部分が天然林として残されていることを示唆していると考えられ，また，これより植林に対する作業限界は35°付近であることも推測できる．

3.4 可採林野率の定義

以上のことから，傾斜頻度から地目を区分けすることを試みた．まず，**図9**のようにA～Dの4つのゾーンに区分けし，Aゾーンは，傾斜が緩やかな土地に相当しているので，住宅や畑などの地目である．CゾーンとDゾーンはどちらも林野の地目であるが，Cゾーンは人が作業できる領域であり，Dゾーンは人が作業できない領域である．Bゾーンは，雑地（道路，河川など）である．

次に，可採可能な林野を推定するために，可採林野率を式(5)のように定義した．

$$\text{可採林野率} = \frac{(\text{全林野面積} - \text{作業限界傾斜度以上の面積})}{(\text{林野面積})} = \frac{(\text{可採林野面積})}{(\text{林野面積})} \quad \cdots(5)$$

図10は，和歌山県内市町村の可採林野率マップをそれぞ

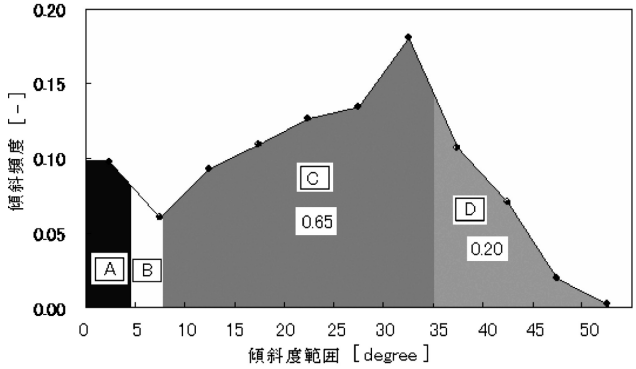
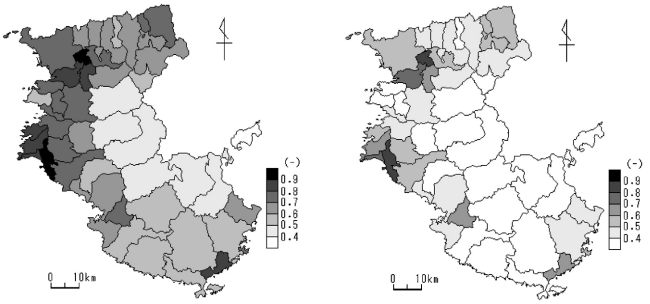


図9　傾斜度と傾斜頻度による地目分け



(a) 作業限界傾斜度＝35°　　(b) 作業限界傾斜度＝30°

図10　可採林野率分布

れ作業限界傾斜度30°と35°として図示したものである．人が実際に山に入って伐採作業が可能である傾斜度は概ね30°～35°であるが，**図10**よりこの曖昧な傾斜度の範囲で劇的に伐採可能領域が変化していることが分かる．よって，作業限界傾斜度は，資源量の見極めに重要な因子であり，この角度は林業機械の開発目標と成り得る．また，前述したように植林に対する作業限界角度は35°付近であると推定できたので，ここでは，伐採も同様に作業できるとし，伐採に対する作業限界角度を35°として可採林野率を推定した．

3.5 可採資源量の推定

地域別の計算結果を示すと**表2**のようになり，和歌山県では林野面積の約6割が伐採可能な面積であり，可採材積量は約53.9百万m^3である．ここで，含水率0％の木材比重を約0.5，発熱量を約20GJ/tとすると，27.0百万dry-t（539PJ）の搬出可能な資源量があることになる．一方，木の生長量から求めると温帯林での成長量は約10dry-t/年であるので，可採面積214,855haより2,148,550dry-t/年（42PJ/年）の搬出可能な資源量となる．これに対し，和歌山県の平成5年素材生産量は303千m^3/年（3PJ/年）であり，未活用の森林資源が多く存在することが伺える．

また，**表2**より，林野面積は東牟婁地域が最大であるが，可採資源量は西牟婁地域が最大であることが分かる．更に，この西牟婁地域の市町村毎に対する傾斜頻度分布図を**図11**のように作成すると，10°～20°の傾斜頻度が多い緩やかな地域と30°～35°の傾斜頻度が多い急勾配の地域とに分かれていることが分かる．よって，木質バイオマスの地域特性を見るためには，郡別のような大きな区域で分割するのではなく，市町村単位などのより小さい区域で分割する必要性があることが分かる．また，車両の走行限界は約20°～25°にあるので，効率よく林道や林内作業道を整備できる傾斜の緩やかな地域を選んで優先的に林道整備することが望まれる．

表2　地域別木質バイオマス資源量

項目	行政区域面積	林野率	林野面積	可採林野率	可採林野面積	可採材積
単位	ha	−	ha	−	ha	m^3
海草	43,839	0.453	19,843	0.766	15,202	3,208,047
那賀	26,704	0.464	12,400	0.698	8,657	2,155,617
伊都	46,324	0.736	34,086	0.634	21,615	6,537,688
有田	47,483	0.702	33,317	0.609	20,303	4,886,978
日高	95,434	0.805	76,865	0.589	45,253	10,808,479
西牟婁	109,041	0.844	92,013	0.574	52,822	14,517,417
東牟婁	103,730	0.918	95,246	0.535	51,002	11,815,767
合計	472,555	0.770	363,770	0.591	214,855	53,934,989

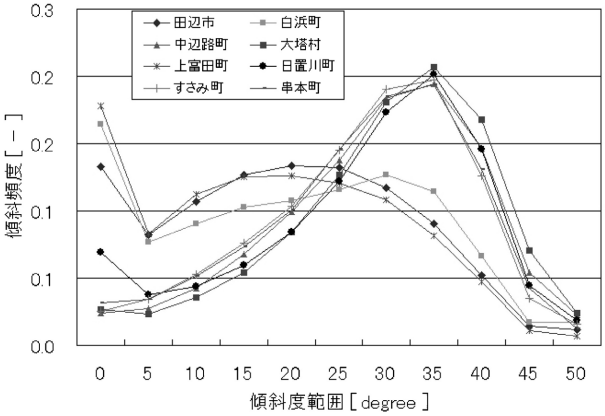


図11　西牟婁地域における傾斜度と傾斜頻度の関係

4．結言

本研究では，木質バイオマス資源量を評価するために，数値地図データと森林に関する主要統計データの相関を求め，新しく可採林野率を定義した．これにより，高度な地理情報システムを駆使することなく，日本が抱える急傾斜林の課題を定量的に評価し，伐採可能な資源量の推定法を提案することができた．そして，国内の木質バイオマス資源量が傾斜林の角度により大きく影響することが示唆され，作業限界に対する傾斜度は林業機械の開発に対して重要な指標であることが定量的に示された．

また，傾斜度分布マップを作成することにより，効率的な林道整備への応用の可能性や，作業性を考慮した作業計画に役立つ可能性があることを示した．

参 考 文 献

1）佐野寛；燃料及び燃焼，66-11，803（1999）．
2）佐野寛；燃料及び燃焼，409，11（1998）．
3）佐野寛；日本機械学会関西支部76期総会,FM-2基調講演(2001)．
4）佐野寛，本庄孝子，井田民男，渕端学他；日本の森林潜在資源の段階評価，第19回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，(2003)，727-732．
5）平成13年度実証実験データベース利活用実験（高知県地区）「森林管理を目的とした3次元GISの検討」　平成14年2月15日　㈱第一コンサルタンツ．
6）地理情報システム学会森林計画分科会 http://af2s.kpu.ac.jp/forestry-gis/
7）森林GISフォーラム　http://www.forestgis.jp/