

修士論文

木質バイオマス収集コスト算出モデルの構築と エネルギー利用システムの導入評価

指導教官

影本 浩 教授

阿久津 好明 助教授

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科

環境システム学専攻 地球環境工学研究室

56735 井上 桂佑

平成 19 年 2 月 1 日

第 1 章 序論.....	3
1-1 はじめに.....	3
1-1-1 CO ₂ をめぐる世界的な動き	3
1-1-2 日本の森林と林業	4
1-1-3 森林の機能.....	5
1-1-4 日本の動向.....	6
1-1-5 バイオマスエネルギーとしての森林資源利用	6
1-2 木質バイオマスエネルギーの生産コスト・利用システムに関わる既往の研究.....	9
1-2-1 概要.....	9
1-2-2 諸外国における研究	9
1-2-3 日本における研究.....	16
1-2-4 考察.....	18
1-3 本研究の目的と構成.....	19
1-3-1 本研究の目的	19
1-3-2 本研究の構成と流れ	20
1-3-3 モデル地域の概要	21
第 2 章 木質バイオマス収集コスト算出モデルの構築.....	22
2-1 材料	22
2-2 方法 - 資源量の推定 -	23
2-2-1 森林生態モデルについて	23
2-2-2 条件設定.....	25
2-2-3 資源量の算出	25
2-3 方法 - コスト算出モデルの構築 -	26
2-3-1 作業工程の分割.....	26
2-3-2 機械の選定と機械データ	26
2-3-3 コスト算出モデルの構築.....	37
2-4 資源量の推定結果とその分布	40
2-4-1 資源量の現状とその分布	40
2-4-2 Case40 における資源量とその分布	42
2-4-3 Case80 における資源量とその分布	44
2-5 木質バイオマスの収集コスト算出結果	45
2-5-1 施業形態について	45
2-5-2 Case40 における木質バイオマス収集コストとその分布	46
2-5-3 Case80 における木質バイオマス収集コストとその分布	48
2-5-4 Case40 と Case80 の比較	49
2-6 木質バイオマス収集コスト算出モデルの構築 まとめ.....	50

第 3 章	モデル地域における木質バイオマス需要量.....	51
3-1	エネルギー消費の実態調査.....	51
3-1-1	調査方法.....	51
3-1-2	調査結果 - 施設におけるエネルギー消費調査 -	53
3-1-3	調査結果 - 一般家庭アンケート調査 -	58
3-2	木質バイオマス需要量の推定.....	69
3-2-1	推定方法.....	69
3-2-2	施設における木質バイオマス需要量の推定結果.....	73
3-2-3	一般家庭における木質バイオマス需要量の推定結果.....	74
3-3	モデル地域における木質バイオマス需要量 まとめ	75
第 4 章	ケーススタディ	76
4-1	方法	76
4-1-1	将来予測シナリオの設定.....	76
4-1-2	各シナリオにおける木質バイオマス収集コストの算出.....	83
4-1-3	各シナリオにおける木質バイオマス需要量の推定.....	83
4-1-4	各シナリオにおけるバイオマス価格の算出.....	83
4-1-5	各シナリオにおける木質バイオマスエネルギー利用システムの導入評価	84
4-2	各シナリオにおける検討	84
4-2-1	現状把握.....	84
4-2-2	A1 シナリオ.....	88
4-2-3	A2 シナリオ.....	92
4-2-4	B1 シナリオ.....	95
4-2-5	B2 シナリオ.....	97
4-3	ケーススタディ まとめ	99
第 5 章	結論.....	101
参考文献	103
謝辞		

第 1 章 序論

1-1 はじめに

1-1-1 CO₂をめぐる世界的な動き

温暖化は地球規模で問題視されている。地球の平均気温は今後約 100 年で 1.4～5.8℃上昇するとも言われ、生態系や人間に甚大な影響を及ぼすことが考えられる。温暖化に対する国際的な取り組みも 1980 年代から本格化した。その中で実効をあげるために国際的な取り決めとして生まれたのが「気候変動に関する国際連合枠組条約」（気候変動枠組条約：COP）であり、具体的に温室効果ガスの削減目標と対策を示したものが京都議定書である。京都議定書で示されている主な点は、①温室効果ガスの排出削減の数値目標、②森林等吸収源による吸収量の加味、③京都メカニズムと称される、排出量取引、共同実施、クリーン開発メカニズムなどの国際制度の導入、の 3 つである。①に関して、具体的に先進国等では第 1 約束期間（2008～2012 年）の温室効果ガス排出量を、基準年となる 1990 年の排出量と比べて少なくとも平均 5%削減することを義務付けた。さらに国別に排出削減数値目標が設定され、日本では 6%減らすことが義務付けられている。その具体的な対策として、上記②で可能となった森林経営などによる吸収量で相当量をまかなうこととしている。日本の森林はその面積が国土面積の 67%で、このうち人工林は 41%を占める。さらにその 80%が 45 年生以下と、CO₂吸収力が旺盛で育ち盛りの林が多いことから、森林による CO₂の吸収によりかなりの排出削減が期待されている。実際に目標とされているのは、6%の排出量削減のうち、エネルギー起源の CO₂削減目標は+0.6%とされる一方、森林経営などによる吸収量で 3.9%程度確保するとしている。京都議定書は 2005 年 2 月 16 日に発効した。

森林による CO₂吸収については、京都議定書第 3 条 3 項、第 3 条 4 項によって、排出量削減としてカウントすることのできる活動内容が規定されている。第 3 条 3 項では、新規植林、再植林による CO₂吸収と森林減少による CO₂排出、第 3 条 4 項では、土地利用、土地利用変化及び林業分野での活動をそれぞれカウントできるものとして定められた。さらにその具体的内容は 2001 年 10 月～11 月にモロッコのマラケシュで行なわれた気候変動枠組条約第 7 回締約国会議で決定された（この合意は「マラケシュ合意」と呼ばれている）。第 3 条 3 項における新規植林については過去 50 年間以上森林ではなかった土地での植林であること、また、再植林については 1989 年 12 月 31 日時点で森林ではない土地での植林であることとされた。一方、第 3 条 4 項の対象となる活動は森林経営、農用地管理、牧地管理、植生回復の 4 つとし、1990 年以降に実施されたものに限り第 1 約束期間で適用可能とされた。さらに各国別に森林による吸収を CO₂排出削減量として適用できる上限値が設定され、日本では 3.9%がその上限とされた。これらの定義によると日本においては京都議定書第 3 条 3 項の対象となる森林はほとんど存在しないと考えられ、講じられる対策はすべて第 3 条 4 項にあたる森林ということになる。その点で、今ある森林資源の利用、管理について有効な施策を講じていくことは重要である。

1-1-2 日本の森林と林業

日本の森林は森林率 66 %と、フィンランドやスウェーデンと並んで世界の先進国の中でも非常に高い割合を占めている¹。その所有に関して、森林は大きく国有林と民有林に分けられる。主に林野庁の所管である国有林は日本の森林の約 3 割を占める。その多くは地形の急峻な奥地の山々や河川の源流に分布しており、野生動植物の生息地や生育地として重要な森林も多く含まれている。国有林では、民有林に比べて原生的な天然林が広く分布し、その割合は約 6 割にもなる。保安林の約 5 割、国立公園の約 6 割がこの国有林である。国産木材の約 3 割も国有林で生産されている。国有林では第二次世界大戦で荒廃した森林の整備や、戦後の復興あるいは高度経済成長期における木材需要への資材供給のために大規模な人工林の造成などがなされてきた。また、日本の森林のうち、残りの約 7 割は民有林である。民有林はさらに私有林と公有林に分類されるが、民有林の大部分は私有林で占められている。民有林は国有林に比べて人工林の割合が若干高い。

日本の森林の特徴として、人工林の割合が高いことが挙げられる。森林の 41 %は人工林であり、その面積は 1036 万 ha にのぼる¹。1000 万 ha 以上の人工林を持つ国は世界で 4 カ国しかない。日本の人工林の多くは樹齢 40 年以下の若い森林で、成長中の段階にある。またそのほとんどは針葉樹林で、中でもスギ・ヒノキが多く、特にスギは人工林の 44%を占めている。スギは樹齢 50 年程度から伐採・販売が開始されるので、まさにこれから国産スギの供給量が大幅に増えると思われる。

しかし、現在国内の人工林には適切な管理が施されていない森林が多く存在する。というのは、適切な手入れ、特に間伐が行なわれずに過密な状態になってしまった、いわゆる「荒廃森林」が増加しているのである。木材生産を目的とするスギやヒノキなどの人工林では、植林する際に密集した状態で苗木を植える。これは、材として商品価値のあるものを作るためにはできるかぎり下から上まで均一に真っ直ぐな木を育てていく必要があるのだが、まばらな状態で育てていくと下が太く上に向かうにつれて細い木になってしまうためである。また、初期段階では生育させる樹種で土地を覆うことで他の草木を被圧する、あるいは風害などによる倒木の被害を防ぐ、といった理由でも密集した状態で植林したほうがよいとされる。その後、木の成長度合に応じて下草刈り、枝打ち、間伐などの手入れや密度の調整をしていくのである。もともと過密な状態で植林されるので、数年ごとに間伐を行なうことで適正な密度管理をしていくことは優良な木材を生産するためにも特に必要不可欠である。間伐が行なわれない過密な状態の森林では、成長阻害や日照不足、病虫害などといった木材生産に関する問題ばかりでなく、林床まで十分な日照が届かないために下草が生えずに森林が本来持っている機能であるはずの保水力を失い、降雨時の土壌の流出や倒木などが発生する危険性も生じる。現在の日本は、このように木材資源として有効利用できないばかりか、土砂崩れなどの災害を引き起こす恐れのある森林を多く生み出している状況にある。

日本の森林がこのような状況に至った背景には次のことが挙げられる。戦後の日本の森

林は、戦中の乱伐によって荒廃した状態にあり、木材資源は不足していた。逆に木材需要は戦後の復興とともに拡大するとともに、同時期の朝鮮戦争による特需景気にもあおられて木材需要は急増、木材価格は高騰していった。木材供給の確保と同時に価格抑制に向け、1960年以降日本は木材の貿易自由化を進め、それにともない外国産木材の輸入量は増加した。それでもなお需要が満たされず、価格上昇も続いた。高度経済成長期に入ると木材需要はさらなる高まりを見せ、日本は国策として拡大造林を行なう。拡大造林とは、薪炭林として利用されていたような広葉樹林を伐り払い、そこに新たに、成長の早いスギ・ヒノキ・マツなどの針葉樹の人工林をつくることである。これによって現在の1000万haを超える日本の人工林が存在する。人工林のほとんどを針葉樹が占めているのもこのためである。その一方、高度経済成長期にさしかかる頃、円の価値はそれまで1ドル＝360円だったのが、1971年のいわゆるニクソン・ショック（金とドルの交換停止による混乱）によって1ドル＝308円（16.88%の切り上げ）になり、さらには1973年の第一次オイル・ショックの年に変動相場制へと以降し、円の価値が高まっていった。円高になり石油価格が安くなったことで薪・炭の需要は激減した。また、拡大造林を進めていた日本林業であったが、国内の労働賃金や運搬費が高まる一方、安価な外国産木材の輸入量は増加し続け、木材価格は低下していった。スギの立木価格では、1980年頃のピーク時で約20,000円超だったのが、2004年では約4,000円の水準にまで低下している。木材を伐って売っても生産コストに見合わない価格でしか売れない、あるいは赤字になってしまうなど、林業を行なっても採算が合わない状況に陥った。間伐によって伐り出された間伐材もかつては建築作業材など様々な分野に利用されていたが、用途が減少するにつれてその価格も低下していった。成木にまで育てたとしてもあまり利益が上がらず、間伐材も大した収入が見込めない状況下におかれ、林業を放棄される森林も増加した。さらに、都市部への労働力の流出による林業就業者の減少と高齢化によって人手不足も進んだ。こうした結果、適正な林業が行なわれずに放置された森林が増加しているのである。

1-1-3 森林の機能

手入れがなされない過密な状態の人工林では保水力という森林の重要な機能が失われた状態にある、と述べた。森林は木材供給源としての役割、CO₂吸収源としての役割の他に、多面的機能と呼ばれる役割を果たしていると言われている。保水力というのもこの多面的機能のひとつである。多面的機能というのは、森林の持つ生物多様性保全、土砂災害防止、水源涵養、保健休養の場の提供など多岐にわたる機能のことである。木材生産を主目的とし、概ね単一の樹種で構成される人工林に対して、多種多様な樹種で構成されている天然林は、その多面的機能、特に生物多様性保全や保健休養の場の提供といった点で非常に重要な森林として考えられている。林業が行なわれなくなった森林は多種構成の森林に植え替えることで、極力天然林に移行するべきだという意見もある。

1-1-4 日本の動向

人工林が手入れされずに放置されていることの問題点として、森林による CO₂ 吸収源としての機能が十分に発揮されなくなる恐れがあるということも挙げられる。成長が進み、育ちきってしまった成木は、それ以上大きくなるための炭素を必要としないので CO₂ を吸収しない。それどころか私たちと同じように呼吸によって CO₂ を排出するだけの森林をかかえてしまうことにもなる。近年の日本の木材供給における国産材の割合は、2004 年において 1,656 万 m³ であり、自給率は 18.4%となっている。伐採量全体としては約 2,000 万 m³ とされる一方、国内の森林の蓄積は 4 億 m³、年間成長量は人工林を中心に約 8,000 万 m³ に達している²。つまり、多くの森林が利用されないまま存在しているとともに、年々その蓄積量は増加しているのである。

前述のように、日本は森林経営によって 1990 年比で 3.9 %の CO₂ 排出量削減を進めることを決定したが、そのためにも放置されつつある人工林に過剰に存在する森林資源の問題を解決していくことは不可欠である。そうした中、2001 年 10 月には「森林・林業基本計画」が閣議決定され、森林整備の目標値などが設定された。林野庁の試算によると、現状程度の森林整備水準のままだと 2010 年頃の森林による CO₂ 吸収量は約 860 万炭素トン・2.6 %程度にしかならないとされている。しかし、「森林・林業基本計画」の目標どおりに森林整備が行なわれると、2010 年頃の吸収量は 2580 万炭素トンとも見積もられている。一方、木材供給量は 3400 万 m³ で CO₂ 排出量は 1270 万炭素トンと見込まれ、これを差し引いた CO₂ 吸収量は 1310 万炭素トンで、京都議定書目標達成計画で示されている 3.9 %をクリアできることとなる³。

1-1-5 バイオマスエネルギーとしての森林資源利用

仮に現在余っている森林資源を木材として利用することができれば、木材供給量・木材自給率の低下にも歯止めがかけられ、輸入木材を減らすことで国外での森林の減少を抑えることにもつながる。効果的な森林整備と国産木材利用を図ることで日本のみならず世界的な CO₂ 排出量削減、さらには停滞気味の国内林業の活性化も期待できる。しかし、経済的に厳しい状況下にある林業の現状では木材としての用途のみで積極的な資源利用を進めていくことは難しく、少しでも多くの利益を生み出すことのできる林業システムを作り出す必要がある。その手段のひとつとしてバイオマスエネルギーとしての森林資源利用が挙げられる。エネルギー・資源の分野で「バイオマス」とは、“ある一定量集積した、生物体に由来する有機資源（ただし化石燃料をのぞく）”と定義され、その特徴として、再生可能であること、莫大な賦存量があること、貯蔵性・代替性があること、カーボン・ニュートラルであることが挙げられている⁴。森林に蓄積された木質資源はまさにバイオマスであり、木質バイオマス、あるいは森林バイオマスと呼ばれる。木質バイオマスのエネルギーとしての利用促進は、エネルギー資源の需要という新たな市場を開拓することで林業を活性化させる可能性を秘めているのみならず、温暖化抑制に向けた CO₂ 排出量の削減手段のひとつ

つとしても期待される。木質バイオマスの燃焼の過程において CO₂ は排出されるが、その CO₂ の根源をたどれば、植物の成長過程で吸収された CO₂ がそのまま大気に放出されるだけであるため、木を伐った土地に新たに植林することで再び CO₂ の吸収が始まる。新たに植林された木が育ち元通りの森林となるのにかかる時間はせいぜい数十年であり、数十年経てば木の伐採・燃焼によって排出されたのと同量の CO₂ が再び森林に吸収される。これらを長期的に見ると、始めと終わりで大気中の CO₂ 濃度は変わらないと考えられ、この概念をカーボン・ニュートラルと言う。CO₂ を排出するいっぽうの化石燃料に替えてバイオマスエネルギーを利用することは排出量削減に向けた対策として期待されると同時に、有限な化石燃料に対して、再生可能なエネルギーとしても期待されている。

木質バイオマスのエネルギー利用は、1970 年代のオイルショックを契機としてエネルギーセキュリティの面で注目されたが、その後の原油価格の低下や円高の進行などを背景に原油に対する価格優位性が薄れ、普及が進むには至らなかった。関連の深い林産業界においてさえ木質バイオマスエネルギーの利用は 1999 年時点で 174 件、発電は 12 件にとどまっている⁵。しかし、近年の温暖化を始めとする環境問題やエネルギー問題の顕在化を背景に、再生可能で持続的な利用が可能であり、環境への負荷も小さい木質バイオマスエネルギーに再び注目が集まっている。2001 年 10 月に閣議決定された「森林・林業基本計画」の中で、林地残材、製材工場残材、建築廃材などを中心に、林産物のバイオマスエネルギーとしての利用促進や、そのための技術開発を推進していくことが明記された。バイオマスエネルギーに関する動きとしては、2002 年 1 月に「新エネルギー利用などの促進に関する特別措置法」（いわゆる「新エネ法」）が改正され、バイオマスが新たに新エネルギーとして明確に位置づけられた。エネルギー利用の具体的手段としては、バイオマスを原料とするメタンガスやメタノールなどの燃料の製造、燃焼による熱利用、発電などが挙げられる。また、同年 3 月に策定された地球温暖化対策推進大綱においては、2010 年のバイオマスエネルギーの導入目標として、バイオマス発電で 33 万 kW（原油換算 34 万 kL）、バイオマス熱利用で 67 万 kL という数値目標が掲げられた。さらに、同年 12 月には「バイオマス・ニッポン総合戦略」として、国としてバイオマスの利活用に関する総合的な取組を進めることが決定され、その中で建設廃材などの廃棄物系バイオマスを 80 %以上、林地残材などの未利用バイオマスを 25 %以上利活用することなどが具体的目標として掲げられている⁶。こうした中、森林由来の木質バイオマスについてもエネルギー利用促進に向けた取組が数多くなされ、そのエネルギー変換技術は多くがすでに実用化段階にある。

木質バイオマスには、針葉樹・広葉樹・竹などの立木をはじめ、木材生産時に発生する末木や枝条などの林地残材、間伐材、製材所や合板工場などで発生する木屑やバークなどの工場廃材、建築現場などでの解体廃材、街路樹剪定枝が該当する。現状の木質バイオマスの未利用資源量は、表 1 のようにまとめられる⁷。未利用資源量は年間の合計で 3,170 万 dry-t 存在し、木質バイオマスの発熱量を 20 GJ/dry-t とするとそのエネルギー量は 634 PJ、国内の 1 次エネルギー供給量 23.68 EJ（2003 年度）⁸の 2.7 %を占める計算になる。

表 1-1.1 国内で年間に発生する未利用木質バイオマス量

項目	(万 dry-t/年)
林地残材	300
間伐材	500
広葉樹	900
タケ	30
ササ	300
工場廃材	40
解体廃材	800
街路樹剪定枝	300
計	3170

しかし、現状では多くの林業現場で、発生する末木、枝条、間伐材はそのほとんどが未利用のまま林内に放置されている。その主な要因として、コストの問題が挙げられる。発熱量が大きく取り扱いやすい化石燃料の価格は非常に安く推移し、ボイラーやストーブなどの機器も安価な上に小さく扱いやすいものが出回ったのに対し、木質バイオマスは化石燃料と比べて発熱量が小さく、形状が不安定で原料がかさばるために広域収集費用がかさんで燃料の生産コストが高くなり、また、機器設備も化石燃料のそれと比べて高価で大型になるといった理由でその利用が進まない。特に生産コストに関わる課題は木質バイオマスエネルギーの導入を促進していく上で非常に重要である。実用化段階にあるエネルギー変換技術に比べ、未確立の低コストでの木質バイオマスの収集、供給技術の実現が望まれ、これまでも木質バイオマスの収集に関して数多く研究がなされている。

1-2 木質バイオマスエネルギーの生産コスト・利用システムに関わる既往の研究

1-2-1 概要

本節では、木質バイオマス資源の収集・利用システムに関する研究について、まず木質バイオマスのエネルギー利用システムが既に現実のものとなっている諸外国の事例を概観する。諸外国の事例については吉岡⁷が、“1970年代～80年代”と“1990年代～現代”に区分して整理している。それによると、“1970年代～80年代”は各国で個別に研究が行なわれており、“1990年代～現代”では国際エネルギー機関（IEA）の枠組の中で各国が連携を図りながら取り組むようになったとしている。そこで本節でもその区分のもとに諸外国での取り組みを概観した上で、オイルショックを契機として進められた日本の取り組みと最近の動向を概観して問題点を抽出するとともに、日本における木質バイオマスのエネルギー利用の導入を実現するための最大の課題とされるコストの問題について、本研究が取り組むべき課題を整理する。

1-2-2 諸外国における研究

1-2-2-1 1970～80年代

1970年代～80年代は、全木材の利用が中心であり、地域的には北米と北欧（スウェーデン、フィンランドが中心）において主に検討が行なわれた。両地域とも平坦な林地が多いことから、1970年代の多くの検討では、林内でのフェラーバンチャによる伐倒、グラップルスキッドによる林道端までの全木集材の後、林道端で造材、全木材を粉砕、あるいは全木材を輸送するという作業システムが対象となった。1980年代に入ると、別タイプのシステムも検討されるようになった。

1970年代の2度にわたるオイルショックが、木質バイオマスの収穫に関する研究を活性化させる契機となったのは確かだが、それに先行する形で紙・パルプ業界で全木材のチップ化システムの開発が検討された。1975年から76年にかけて、全木材の粉砕に関する4つの報告がアメリカ合衆国の紙・パルプ技術協会誌に発表されている。

北米の取り組みについては、アメリカ合衆国のMorey⁸が、それまでのパルプ原料用木材の収穫手法とその生産性について述べた上で、林業の機械化が進み、フェラーバンチャとグラップルスキッドによる作業が可能になったこと、パルプ工場においてパルプ原料用のクリーンなチップを選別する技術が開発されたことにより全木材のチップを受け入れるパルプ工場が増え、全木材のチップ化システムが普及しつつあると報告している。それによると、全木材のチップ化システムによって、従来型の短幹集材作業システムに比べて生産性が2倍に向上し、作業条件による違いはあるものの1チーム6人のオペレーターで280～300トン／日のチップ生産が可能となり、原料コストはそれまでの20～30アメリカドル／トンから6.22アメリカドル／トンまで削減できる上に、伐採面積、労働力、伐採後の再

造林コストの節約にもつながるとしている。また、従来は原料となり得なかった間伐材や低品質広葉樹などの収穫における全木材のチップ化システムの有効性も指摘している。

アメリカ合衆国の Tufts¹⁰⁾は、数例の施業地、施業チーム、そこで用いられている機種を挙げた上で、それぞれについての全木材のチップ化システムの生産性を報告している。その中で、あるマツ人工林の間伐において、11 人のチーム、輸送距離 40~50 マイルで作業した場合、工場までの輸送を含め 1 週間に 800 トンの生産性、またある広葉樹林の皆伐では、8 人のチームで作業して 1 日 150 トンの生産性を達成したとしている。Tufts は、全木材のチップ化システムは初期投資や機会の維持管理にかかるコストが高価となること、通常に比べてチップの質が低下することなどといった全木材のチップ化システムの欠点も指摘している。

また、伐採後の再生林について、同じくアメリカ合衆国の Malac¹¹⁾が、従来型の短幹集材から全木集材への移行により、林地残材量を 68 %低減することができ、その結果再生林費用を 30~65 %削減することが可能であると報告している。

一方北欧における取り組みについては、フィンランドの Palenius¹²⁾が、北欧諸国で機械化による全木材のチップ化システムが導入された背景には、多くの工場でパルプ材の原料不足に陥ったこと、間伐を必要とする林分が増加しているにも関わらずそれに対処する労働力を十分に確保できなかったことがあるとしており、事情は北米地域とは異なっていた。また、全木材の粉碎の対象は間伐材が中心であると報告している。

エネルギー利用を目的とした取り組みでは、まず北米ではカナダの Folkema が、フェラーバンチャとグラップルスキッドによる全木材のチップ化システムについて、グラップルスキッドで全木材をチップまで直接運んで粉碎するシステムと、グラップルスキッドで全木材を林道端に集積した後にチップが移動しながら粉碎するシステムを比較したところ、前者の方が高い生産性を達成できたと報告している。同じく Folkema は、上述のような完全に機械化されたシステムは大規模林業で実現可能であり、プラントまでの輸送を含めた原料コストは、輸送距離 50 km で 1 トン（含水率 45 %、ただし全量基準）あたり 22.50~26.00 カナダドルとしている。中小規模林業での完全な機械化は困難であり、チェーンソー伐倒の後ケーブルスキッドで林道端まで集材して全木材を粉碎する、あるいは林内で農業用トラクタに取り付けたチップで全木材を粉碎して林道端まで運搬するといった方式が適切であり、トラック輸送距離も 30 km 以内が望ましいとしている⁷⁾。

全木材の粉碎以外の取り組みとしてはアメリカ合衆国の Stuart et al.¹³⁾が、フェラーバンチャによる伐倒、グラップルスキッドによる全木集材の後、集中的に造材を行ない、その際発生した末木・枝条を粉碎、もしくはベール化するシステムと、チェーンソーによる林内での伐倒、造材の後、フォワーダにより丸太と残材を個別に収集し、残材を粉碎、もしくはベール化するシステムのチップ化コストを比較しているが、全木集材システムが最も経済的であり、林内からの残材運搬は相当の時間、労力、コストを要すると報告している。ベール化については、小規模の場合に限り粉碎よりも有効なシステムであるとしている。

また、Watson et al.¹⁴⁾は、フェラーバンチャによる伐倒、チェーンソーによる枝払い、スキッドによる全幹集材というシステムにおける丸太の生産コスト、フェラーバンチャによる伐倒、スキッドによる全木集材の後、丸太用とチップ用に選別しながら造材と粉碎を行なうシステム（one-pass system）における丸太とチップの生産コスト、ならびにチップ用の小径木をフェラーバンチャにより伐倒、スキッドにより全木集材し、粉碎した後、丸太を同様の方法で集材、造材するシステム（two-pass system）における丸太とチップの生産コストの3つを比較し、one-pass system が、丸太、チップとも最も低コストで生産できるシステムであったと報告している。

一方、北欧諸国の取り組みの代表的なものとしては、スウェーデンにおいて、スウェーデン農科大学が中心となり7年計画で進められた“The Forestry Energy Project”がある。このプロジェクトでは、燃料としての木材利用の歴史から、末木や枝条などの収穫による林地からの養分収奪の問題に至るまで、林地残材のエネルギー利用に関する研究が広範に進められた⁷⁾。収穫技術については、まず大規模システムとして、フェラーバンチャによる伐倒、スキッドによる全木集材のシステム、ハーベスタによる皆伐後の林地に散在した残材のチップフォワードによる粉碎・運搬システム、フォワードによる集材、林道端あるいはターミナルでのチップ化システムなどが検討されたが、プロジェクトにおける研究対象の中心はツリーセクションシステムであった。このシステムは、フェラーバンチャでの伐倒の後、フォワードに取り付けたグラップルソーで玉切りのみを行ない、枝付きのまま（この状態のものを“ツリーセクション”と呼ぶ）フォワードで集材するものである。この方法により、ハーベスタで丸太のみを生産するシステムよりも高い生産性が達成されたと報告されている。輸送については、ツリーセクションや残材では、重量換算でトレーラの有効積載量の20～30%しか積み込むことが出来ないため、付属のグラップルで積荷を押し付けることにより圧縮する必要があるとしている。また、小規模システムとしては、除伐材の利用が、その後の林内作業を効率的に行なう上で有効であるとしており、チェーンソーによる伐倒の後、農業用トラクタに取り付けたチップにより粉碎する方式か、あるいはケーブルスキッドによる全木集材の後、土場で粉碎する方式（この場合、広い土場を必要とすることがネックであるとしている）を推奨している。

1-2-2-2 1990年代～現在

1990年代から現在に至るまでの森林バイオマスの収穫に関する研究については、大きく“IEA Bioenergy を中心とした取り組み”と、“その他の取り組み”に分けることができる。

1) IEA Bioenergy を中心とした取り組み

国際エネルギー機関（IEA）は、経済協力開発機構（OECD）の枠組みの中で、参加各国の国際的なエネルギー協力を目的として1974年に設立された。1978年には、“IEA Forestry Energy”としてバイオマスの中でも先陣を切って森林バイオマスを対象としたプロジェク

トが開始された。1986 年には非森林系のバイオマスも含め“IEA Bioenergy”に改定されるが、これ以降、“バイオエネルギー”という言葉がバイオマスのエネルギー利用という意味において一般的に用いられるようになる。

IEA Bioenergy における森林バイオマスに関する取り組みとしては、まず 1986 年から 88 年にかけて、“Development of Improved Methods for Harvesting, Processing and Transport of Forest Biomass (IEA Bioenergy Task III)”というテーマで開始され、このプロジェクトは 1990 年に総括されている。森林バイオマスの収穫については“Integrated Harvesting Systems to Incorporate the Recovery of Logging Residues with the Harvesting of Conventional Forest Products”のセクション、早期間伐材の収穫については“Harvesting Early Thinnings for Energy”のセクションにおいて取り組まれた。前者はニュージーランドの Goulding and Twaddle¹⁵が、後者はデンマークの Breone and Kofman¹⁶が、それぞれまとめている。Goulding and Twaddle は、森林バイオマスの収穫について、プロジェクトの参加各国において行なわれた全木材の収穫試験をレビューしたうえで、丸太やパルプ材といった従来の林業における生産物に加え、それまでは廃棄物とされてきた末木や枝条などの林地残材を、エネルギー利用を目的として同時に収穫するシステム (integrated harvesting system) のデザインを提示している。この“integrated harvesting”は、IEA Bioenergy における森林バイオマスの収穫に関するプロジェクトにおいて、1990 年代前半の 1 つのキーワードとなる。Breone and Kofman は、早期間伐材の収穫について、プロジェクトにおいて実施された 8 つの試験をレビューしているが、その中にも integrated harvesting に関する試験が含まれている。Breone and Kofman は、全木材を処理する場所としてターミナル、土場、林内に分類し、それぞれの得失と実現可能性に言及している。早期間伐材の収穫の場合、経済的に可能な integrated harvesting は、スウェーデンやフィンランドで行なわれているツリーセクション方式のみであると報告している。

1992 年から 94 年にかけては、“Harvesting and Supply of Woody Biomass for Energy (IEA Bioenergy Task IX)”というテーマで取り組まれた。integrated harvesting による全木材の収穫について、カナダの Puttock¹⁷は、参加各国のシステムにおける土場までの森林バイオマスの収集・粉砕工程のコストを、粉砕工程のみをバイオマス燃料生産コストに割り当てる算出方法と、生産量に応じて各工程におけるコストを木材生産とバイオマス燃料生産に割り当てる算出方法の 2 通りのコスト分析を行ない比較している。後者のコスト算出方法の方がより実際を反映しているとしながらも、バイオマス燃料の生産コストは前者の算出方法よりも高くされるため、市場への供給量が減少してしまう危険性を指摘している。Puttock は、integrated harvesting system の得失についても考察している。まず利点としては、全木集材により伐採跡地の林地残材を残さないことで、植林準備にかかる手間が軽減し、そのコストは従来の 200 ドル／ヘクタールから 90～145 ドル／ヘクタールに低下するとしている。また、害虫や火災発生の危険性を低下させることができ、結果とし

て苗木の生存率が高まる点を挙げている。ただし、これらの経済的な利益を定量化するのは現時点では困難であるとしている。一方、欠点としては、残材の収穫により、林内での作業量の増加に起因する土壌の締め固めや攪乱による土壌浸食、ならびに養分収奪の危険性が高まり、林分成長に大きく影響を及ぼす可能性がある点を挙げている。これらの問題の解決策として、土壌の締め固めや侵食については、林内で作業を行なう機械の走行経路を規制すること、養分収奪については、森林バイオマスを燃焼させた後の灰を林地へ還すことにより土壌の肥沃度を回復させることを、それぞれ提案している。IEA Bioenergy Task IXは、1995年に総括されており、短伐期林業（SRF）の機械化についてはイギリスの Culshaw and Stokes¹⁸が、integrated harvesting についてはイギリスの Hudson¹⁹が、小径木と林地残材の収穫についてはカナダの Gingras²⁰が、森林バイオマスの輸送についてはイギリスの Angus-Hankin et al.²¹が、各セクションにおける取り組みをまとめている。Hudson は、integrated harvesting に関する参加各国の取り組みを報告している。北米では chain flail technology、フィンランド Massahake Method が開発された。両技術とも、全木材のチップ化の際にクリーンなパルプチップと燃料用のチップの選別を行なうものであり、この技術により間伐作業を経済的に実施することが可能となったとしている。一方で、かつて北欧で開発され、最も一般的な integrated harvesting system として普及していたツリーセクションシステムは、シングルグリップハーベスタの普及により衰退傾向にあるとしている。Gingras の報告においては、早期間伐の経済性向上、ならびに機械化のための解決策として、複数の小径木を同時に伐採することが可能な multi-tree felling head が北欧で開発中であることが述べられている。Angus-Hankin らは、残材を粉砕したチップ、未粉砕の残材、ならびにツリーセクションをいずれも 100 m³ 以上を積載可能なトレーラで 80 km 輸送した場合のコスト比較を行ない、さらに残材をペール化したものの輸送の可能性についても言及している。また、輸送効率の改善や低コスト化に向けた要因として、積載するバイオマスの容積重を増加する必要があると述べている。また、この時期から、このようなチップ、残材、ペールといった森林バイオマスの収穫形態別のコスト比較に関する研究が行なわれるようになる。

1998年から2001年にかけては、“Conventional Forestry Systems for Bioenergy (IEA Bioenergy Task 18)” というテーマで取り組まれた。ここで特筆すべきは、Task 18が“林業における森林バイオマスのエネルギー利用”に特化されていたことである。参加各国の現状や取り組みのひとつとして、ニュージーランドの Hall²²の報告を挙げる。Hall は、ニュージーランドの林業が短幹集材から全木集材へシフトし、作業土場への集中的な造材により末木や枝条などの残材が大量に発生し、その処理が問題となっていると報告している。そこで、その残材の処理方法として、“廃棄物として処理する”、“その場で焼却処分する”、“パルプ工場の燃料にする”、“ファイバーボードやパルプチップの原料にする”の4つを検討したところ、“ファイバーボードやパルプチップの原料にする”方法のみが黒字になるという結果が得られたとしている。

このプロジェクト (Task 18) の特徴として、森林バイオマスの輸送形態別に数種類のシステムを想定し、単位重量（もしくは単位エネルギー）あたりの収穫コストを比較する検討が多く実施されたことが挙げられる。未粉碎の残材、粉碎したチップ、残材をペール化したものの収穫コストの比較については Eriksson²³、イギリスの Hudson and Hudson²⁴らが検討している。いずれの検討においても、未粉碎の残材をエネルギープラントまで大型トレーラで輸送し、大型チップで集中的に粉碎するシステムが最も低コストとなるという結果が得られている。また、フィンランドの Asikainen and Kuitto²⁵は、林地残材を林道端まで収集した上でチップ化するシステムと、粉碎機能を有するチップフォワードもしくはチップトラックにより林内でチップ化するシステムの収穫コストを比較している。

2) その他の取り組み

IEA Bioenergy の枠組み以外にも、森林バイオマスの収穫に関する検討は、現在に至るまで引き続き行なわれている。

カナダの Desrochers et al.²⁶は、従来型林業において一般的であった短幹集材作業システムでは、林内に散在した林地残材の収穫が、技術的困難、低生産性、高コストなどの理由から困難であるとされてきたが、残材を粉碎するチップが普及したこと、ならびに残材の収穫による伐採跡地の再造林コストの低減化など育林面でのメリットがあることから、エネルギー利用を目的とした、残材を収集し林道端で粉碎して輸送するシステムが可能となったとしている。その上で Desrochers らは、新規に開発されたチップフォワードにより林内において残材を粉碎しながら林道端まで収集するシステムの実証試験を行ない、これと、カナダで稼働しているローダ付きスキッドで林内から残材を収集し林道端でチップを搭載したトラックで粉碎するシステムと比較したが、林道端でチップ化するシステムと比較して低生産性、高コストとなる結果が得られている。

ニュージーランドの Hall et al.²⁷は、125,000～200,000 ha の 3 つの林地における土場集積残材と林地残材について、チップ化作業の場所別収穫コストを比較した。土場集積残材、林地残材のいずれの場合においても、シンプルなシステムであるほど低コストとなる傾向にあり、残材のままエネルギープラントまで輸送し大型チップで集中的に粉碎するシステムが最も低コストで、それぞれ 22～37 ニュージーランドドル/dry-t、29～49 ニュージーランドドル/dry-t であったと報告している。また、コスト計算モデルに使用する機械データなどのパラメーターは極力正確に測られたものであるべきだとしている。

フィンランドの Malinen et al.²⁸は、主伐時および間伐時の林地残材について林内運搬距離 250 m、トラック輸送距離 40 km のシステムに対して、エネルギープラントにおける森林バイオマスの受け入れコストの上限値を設定した上で、その上限値別に森林バイオマスの利用可能量を算出するという分析を行なっている。

早期間伐時の小径木については、スペインの Delgado and Giraldo²⁹が、ボイラー燃料として利用するために、林内で造材、トラクタで集材した後に林道端でチップ化して輸送す

るシステムを検討している。輸送距離を最大 30 km とした場合、収集コストおよび粉碎コストは、それぞれ 1.45 ペセタ/kg、2.45 ペセタ/kg という結果が得られたと報告している。

スウェーデンの Sennblad³⁰⁾は、地域暖房プラントの燃料として利用するシステムについて、小規模、大規模別に、主伐時及び間伐時の林地残材、ならびに早期間伐時の小径木を収穫するシステムのコスト収支を算出している。林内の運搬距離を 300 m、トラック輸送距離を 30 km とした場合、大規模システムの方が高い収益を得られるとしている。

1990 年代後半から現在に至るまでの研究の特徴として、森林バイオマスの収穫を含めたエネルギー利用システムのシステム評価、すなわち環境へ及ぼす影響、あるいは京都議定書を背景とした、化石資源の代替エネルギーとしてのバイオマス利用による二酸化炭素排出量の削減効果といった側面からアプローチするものが増えつつあることが挙げられる。

例えばオランダの Faaji et al.³¹⁾は、各種バイオマスのガス化複合発電のコスト収支及び環境影響に関するシステム評価を行なった。Faaji et al.は、オランダにおいて、間伐材は他の廃棄物系バイオマスと比較してその利用ポテンシャルは大きい、その反面単位エネルギーあたりの調達コストが相対的に高く、粉碎した状態での輸送とプラントでの前処理コストの合計が 5.73 ユーロ/トンとなると報告している。

また、フィンランドの Korpilahti³²⁾は、林地残材の収穫システムごとに、バイオマス収集コストを算出・比較するとともに、収集、輸送、粉碎の各工程における燃料消費量から導かれる二酸化炭素排出量を 5.6~7.8 kg CO₂/MWh と算出している。Korpilahti は、バイオマスがカーボン・ニュートラルであること、石油および石炭の二酸化炭素排出量がそれぞれ 341 kg CO₂/MWh、304 kg CO₂/MWh であることを示した上で、“2010 年までに石油換算で 150 万トンのエネルギーをバイオマスで代替する”という政府目標が達成されれば 1996 年時点における国内の二酸化炭素排出量の 6.9 % を削減可能と試算している。

スウェーデンの Hector³³⁾は、地域暖房システムにおいて、化石燃料と各種木質バイオマスのそれぞれを原料とした場合の、生産からエネルギー利用までのトータルのコストと二酸化炭素排出量を単位エネルギーあたりで算出している。その上で、スウェーデンでは、化石燃料に各種税金が課せられていること、1997 年に二酸化炭素排出量に課せられる炭素税が強化されたことを考慮すると、バイオマスの方がコスト的に有利になると分析している。

以上のように、ここまで林地残材などのエネルギー利用を促進する立場での研究を中心に見てきたが、末木や枝条は本来、森林土壌の養分となるものであるため、エネルギー利用の目的で林地残材を収穫することにより、養分収奪、ひいては将来的な樹木の成長低下につながる危険性があり、北欧諸国ではこの方面の研究も盛んに行なわれている。スウェーデンの Lundborg³⁴⁾は、林地残材の収穫や全木集材などによる土壌中の有機物や無機養分への影響について検討を行なっている。その中で、有機物については森林バイオマスの収穫による影響はほとんどないとしている。一方無機養分については、収穫により減少する

が、森林バイオマスを燃焼させた後に発生する焼却灰を林地に還元することで、土壌の酸性化といった環境への影響を抑止する効果があると分析している。また、同じくスウェーデンの Borjesson³⁵は、林地残材のエネルギー利用システムにおける焼却灰の還元について、コスト面から評価している。スウェーデンにおける残材の収穫コストが 3.8~4.2 アメリカドル/GJ であるのに対し、焼却灰の還元は 0.18~0.48 アメリカドル/GJ と低コストであり、さらに還元による環境面のメリットを経済的な価値に換算した場合、残材の調達コストは 1.1~4.6 アメリカドル/GJ となると見積もっている。

1-2-3 日本における研究

日本においては、1970 年代の 2 度にわたるオイルショックを契機として、エネルギーセキュリティ上の観点から代替エネルギーの開発の推進が強く提唱されるようになり、各種バイオマスのエネルギー利用を目的とした研究が活発に行なわれた。中でも特に大きな取り組みとして、昭和 58 年度から 10 年計画で実施されたバイオマス変換計画が挙げられる。バイオマス変換計画は 1991 年に総括されている³⁶。その中で森林バイオマスを対象とした研究では、国内の残材の経済的利用可能量の試算、ササの収穫システムの構想、ポプラ・カンバの収穫システムの構想、広葉樹資源の地域導入システムの構想などが行なわれた。その他、オイルショックを契機に進められたバイオマスのエネルギー利用に関するプロジェクトについて、実用化にまで達した技術もあるものの、その成果の多くは原油価格がその後安値で安定したこともあって経済性を克服できず、普及するまでには至っていない。

しかしながら、前述のように、地球規模での温暖化を始めとする環境問題やエネルギー問題の顕在化、京都議定書における温室効果ガス排出量の削減目標の設定、京都議定書の発効などを背景に、再生可能かつカーボン・ニュートラルであるバイオマスに対する関心が再び高まってきた。中でも木質バイオマスは、国内に豊富な資源量を有し、二酸化炭素排出量の削減のみならず長い間不振の続く国内林業の活性化、ならびに間伐の遅れた人工林の手入れによる森林の公益的機能維持へ寄与することも期待されているからである。木質バイオマスのエネルギー利用の導入実現に向け、近年、木質バイオマスの低コスト収集システム、あるいは地域における木質バイオマスエネルギーシステム導入の経済性評価について、実際の事業化を念頭においた検討が多く行なわれている。

吉岡⁷は、林地残材の収穫システムと収穫コストについての検討を行なった上で、モデル地域での森林バイオマスのエネルギー利用の可能性について、資源量と収穫コストの関係を分析している。それによると、収穫コストと燃料消費量の観点からは、バイオマスの粉碎作業はシステムの早い段階で行なわれるものが望ましく、日本での収穫コストは最も安い場合でも 4.32~8.41 円/kWh と国内の電力価格 18.17 円/kWh に対して高い割合となると報告している。モデル地域での検討では、収穫コストが 13,037 円/dry-t よりも安い小班から収穫すべきだという結果を得ている。また、吉岡は、バイオマス火力発電プラントでのエネルギー生産を想定した場合のエネルギー収支と二酸化炭素排出量について、ラ

ライフサイクルインベントリ（LCI）手法を用いた分析も行なっている。

久保山ら³⁷⁾は、岩手県遠野市を対象として、地域での林業や製材などによる林業・林産バイオマスの発生量の推定と、バイオマス発電によるエネルギー利用におけるコスト分析を行なっている。同市から発生するバイオマス量は 58,000 トン／年であったとし、コスト分析の結果、現実的に供給可能なバイオマス量は 6,500 トン／年であったとしている。また、久保山らは、林業よりも林産によるバイオマス利用可能性が高いこと、需要が限られる場合には広域収集を行なった方がコスト的に有利であることも報告している。

その他、燃料としての木質バイオマスの収集・運搬工程についてのコスト分析、低コスト利用システムの検討が数多くなされ、その中には実際の地域への導入に向けたバイオマスエネルギー利用システムの検討も見られる^(38,39,40,41,42,43)。一方、林地残材の収穫が森林生態系の物質循環に与える影響についての検討例として、戸田⁴⁴⁾は、バイオマス資源の有効利用は重要であるとした上で、伐採木の枝葉は全木の 20 %程度とわずかで、その利用にはエネルギー効率やコスト面での解析を進める必要があること、皆伐などの際には次世代の森林の養分として枝葉を林地に残す必要があることを指摘している。また、都道府県単位で、木質バイオマスのエネルギー利用システムの導入に向けた検討についての報告もある。

北海道では、具体的な市町村をモデルとして、木質バイオマス資源量の評価・検討をした上で、道内での未利用資源の利用モデルに関する検討が行なわれた⁴⁵⁾。それによると、資源量の算出や、木質バイオマス利用システム導入の経済的評価にはその地域における実情の詳細な検討が必要であるとした上で、林地残材の発生量は立木伐採材積の 40 %であり、そのエネルギー利用に際しては、1 施設につき 5000 m³／年の立木伐採材積が、施設での熱需要を満たす木質バイオマス資源の供給のための目安であると報告している。また、木質バイオマスの利用単価は、末木・枝条 1,949 円／m³、皆伐未利用原木 6,245 円／m³、間伐未利用原木 6,903 円／m³と試算し、これらからペレットを製造した場合、灯油に比べて割高になるなど、コストに関する課題を挙げ、資源の供給・加工におけるコスト削減に向けた工夫や利用用途の拡大による需要の確保などの対策が必要であるとしている。

群馬県でも県内の一部地域における林地残材、製材残材、きのこ栽培での廃木材などを中心とした未利用バイオマス資源量、エネルギー需要量、バイオマス収集コストを推計するとともに、いくつかのケースでバイオマス発電を行なったときのトータルコストと事業性についての評価が行なわれている⁴⁶⁾。これによると、同地域のバイオマス資源量は 47,735 m³／年、林地残材の収集コストは伐採残渣が 6,145 円／m³、未利用間伐材が 11,010 円／m³と試算された。また、バイオマス発電のコスト分析については、いずれのケースも収益が上げられず、施設の運用が困難であるとしている。ただし、バイオマスエネルギー施設の導入によって期待される温室効果ガス削減や廃棄物削減に対して社会的費用削減効果を算入できるとすると、施設の事業化も可能となりうると付け加えている。

1-2-4 考察

諸外国では、パルプ業界を中心に未利用木質バイオマスの収集に関する研究が進められ、1970年代のオイルショックを契機としてエネルギー用途としての木質バイオマスの収集、エネルギー変換に関わる研究は現在まで続けられてきた。早くから継続的に低コストでの木質バイオマス収集システムの検討がされてきたこと、さらに北欧などでは、化石燃料に課せられている炭素税や硫黄税といった要因もあり、木質バイオマスのエネルギー利用が非常に進んでいる。

それに対して、わが国におけるバイオマスに関する研究における問題点としては、オイルショックを契機に進められた研究が原油価格の落ち着きとともに下火になってしまったことで、林地残材をはじめとする未利用の木質バイオマスの利用システムに対する検討が不十分であることが挙げられる。諸外国の方がわが国よりも早期に機械化の導入が進み、パルプ業界を中心に未利用の木質バイオマスの収集についても早い段階から検討されてきたという事情もあるが、オイルショック時より継続して機械化集材作業システムやエネルギー利用システムを対象とした研究を実施してきた諸外国においてすでに木質バイオマスのエネルギー利用が実現していることと比較すると、再生可能なエネルギーの利用が推奨される中で、わが国の現状が遅れていることは明らかである。

しかし、近年、わが国においても、高性能林業機械を用いた木質バイオマスの低コスト収集システムの検討や、各地域における木質バイオマスのエネルギー利用システムの事業性評価についての検討が見られるようになった。地球温暖化などを背景とする環境問題やエネルギー問題への関心の高まりによって、今後そのような実際の木質バイオマスのエネルギー利用システム導入に関わる検討はさらに多くの地域でなされることが予想される。また、それらの検討に共通して見られるのが、ある地域の中で発生した未利用の木質バイオマスを同じ地域内で消費するといった、「地産地消型」のエネルギー利用システムである。持続可能な社会の実現が目指される中で、今後エネルギーの分野においても、土着のエネルギー資源を地産地消という形で利用の促進がされていくと思われる。また、実際の事業化に向けた取り組みの中で、各都道府県などにおける木質バイオマスのエネルギー利用システムの検討では、各地域内のエネルギー需要について考慮していることも見逃すことのできない重要な要素である。

1-3 本研究の目的と構成

本研究では木質バイオマスエネルギーの導入における最大の課題とも言えるコストに焦点をあてる。前節で概観したように、木質バイオマスのエネルギー利用システムの導入が現実味を帯びてきている中で、わが国でも林地残材など未利用の木質バイオマスの収集コストの検討、あるいはエネルギー利用システムについての事業性評価などが行なわれるようになった。だが、それらの多くは、限られた林分からの木質バイオマス収集コストの試算や、ひとつの市町村全体で一意に試算されたコストでの検討といった形のもので、地域の中の林分それぞれからの収集コストを空間的に捉えた検討はほとんどなされていない。本来、木質バイオマスの収集コストはどこから収集してくるかによって異なり、ゆえに空間分布を持つものである。そうしたより現実的な状況を反映した空間的な把握がされにくい理由としては、詳細なデータ収集に大きな労力を必要とし困難であることが挙げられる。地域の実情を詳細に調査した上で、数ある林分の中から低コストで収集が可能な林分を選択してバイオマスを収集し、エネルギーとして供給していくといった検討は、実際の事業化を目指した計画をたてる上で非常に重要である。

また、多くの研究が現状でのコスト分析にとどまり、その結果事業としての採算が合わないことがほとんどであることから、具体的な導入計画にまで言及しているものは少ない。木質バイオマスのエネルギー利用システムの導入を考えた場合、将来のエネルギー動向や社会情勢を見越した上で現段階から計画を検討する必要がある。というのも木が育つのに少なくとも数十年という時間がかかるため、持続可能な森林資源の利用計画は、限界があるとは言え将来予測にもとづいて行なわれるべきだからである。現状は既存燃料に比べてコスト的に不利でも、今後の状況次第では木質バイオマスエネルギーの導入が有利に働くということも考えられる。そうした場合に現段階でどのような対策を講じるべきか検討するためにも、長期的な予測を考慮した上でコストに関わる要因を分析する必要がある。そして、そのような議論を進めていくためには木質バイオマスエネルギーの需要についての検討も課題となる。

1-3-1 本研究の目的

本研究では以上のことを踏まえ、ひとつの町を研究対象地域（以下、モデル地域）とし、モデル地域における木質バイオマス収集コストについて施業班レベルでの空間分布を把握し、社会・経済の将来予測を考慮したモデル地域内での木質バイオマスエネルギーの導入検討に活用する手法を提示することで、木質バイオマスエネルギーの導入促進に資することを目的とする。

なお、本研究は Global Carbon Project による「都市と地域における炭素管理 (Urban and Regional Carbon Management)」の一環として高知県と独立行政法人国立環境研究所によって進められている「梶原町における木質バイオマスエネルギー導入促進プロジェクト」の一端を担う形で行なわれた。

1-3-2 本研究の構成と流れ

以上の目的のもと、本研究では、

- ・木質バイオマスの収集コストを空間的に把握するシステムを構築すること
 - ・構築したコスト算出モデルを用いて木質バイオマスエネルギーの利用コストを検討するとともに、需要と供給のバランスを捉えた上で諸要素の将来予測を考慮したエネルギー利用システムの長期導入計画についての経済的な評価をケーススタディとして行なうこと
- の 2 点を主な研究内容とする。

まず第 2 章では、造材時に発生する末木や枝条、間伐材などの林地残材を木質バイオマス資源と位置づけ、モデル地域における木材生産、および木質バイオマスの資源量、収集コストを林分ごとに算出し、それらの空間的な把握を行なうためのモデル式を構築するとともに、エネルギー供給形態ごとの加工にともなう利用コストを算出するモデル式を構築する。これらは、伐期、施業方法、エネルギー供給形態を入力項目とし、それらの違いによる収集コスト・加工コストの分析と木質バイオマスエネルギーの価格を算出する際の供給サイドの検討を行なうためのツールとなる。

第 3 章では、モデル地域におけるエネルギー使用量の現状を把握し、木質バイオマスエネルギーの潜在的な需要量を算出するための需要調査を行なう。

第 4 章では、いくつかの将来予測シナリオについて、第 2 章で構築したモデルを用いて木質バイオマスの利用コストの検討を行なうとともに、第 3 章での需要調査をもとに需要量の試算を行ない、最もコスト的に有利な施業計画、木質バイオマスのエネルギー利用システムとその導入に向けて講じるべき対策についての検討をケーススタディという形で行なう。具体的には、IPCC の排出シナリオ (SRES) をもとに、2001 年環境省にて作成された日本国シナリオ⁴⁷を用いた。

最後に第 5 章にて、本研究で行なった木質バイオマスのエネルギー利用システムの導入に向けた施業計画や施策の評価手法によって、モデル地域ではシナリオごとにどのような計画が最も利益をあげられると考えられるか、最大の課題と言われるコストに関してどのような対策を講じることが適切であるかを結論としてまとめるとともに、わが国における木質バイオマスエネルギーの導入促進に向けての展望をのべることにより、本研究を総括する。

以上で述べた本研究の流れを概念図として図 1-3-1 に示す。

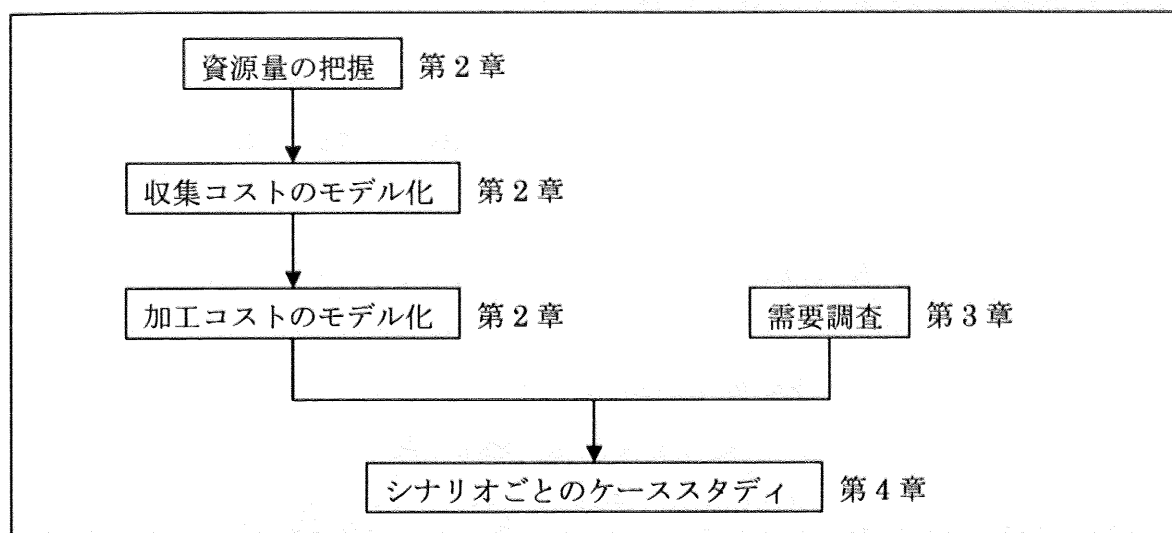


図 1-3-1 研究の流れ概念図

1-3-3 モデル地域の概要

本研究では、高知県高岡郡梼原町をモデル地域とした。

高知県中西部、愛媛県との県境に位置し、四万十川源流域にもあたる梼原町は、総土地面積 23,651 ha、四国カルストを有し、標高 220～1455 m とかなりの高低差をもつ山間地域である。林野率が 91 % と、総土地面積に占める森林の割合が国内でも非常に高く、そのうち 75.6 % を人工林が占め、主な樹種はスギ (38 %) とヒノキ (32 %) である。総世帯数の 44.8 % を占める 845 世帯が林家 (2000 年時) であるが、その数は年々減少傾向にある。一方、耕地面積率は 1.4 % と非常に少ないものの、米ナス、小ナス、ミョウガなどを中心とした農業が行われている。梼原町の総人口は 4,625 人 (1,930 世帯) で、その数は減少傾向にあり、年少人口 (15 歳未満) 10.9 %、高齢人口 (65 歳以上) 36.0 % と、人口減少に加えて少子高齢になりつつあるとすることができる。豊富な森林資源を有する梼原町において、その有効な利用のひとつとして木質バイオマスのエネルギー利用に関する検討を行なうことは非常に意義のあることと言えよう。

第 2 章 木質バイオマス収集コスト算出モデルの構築

本章では、木質バイオマスの収集・利用システムの検討にさきがけ、木質バイオマスのエネルギー利用に関わるコストの算出モデルを構築する。具体的にはまず、造材時に発生する末木や枝条、間伐材などの林地残材を木質バイオマス資源と位置づけ（以下、木質バイオマスとは、末木・枝条、切捨間伐材などの林地残材、つまり林業により発生する森林資源のうち未利用の部分を目指すこととする）、モデル地域における施業班（細分化された林分の単位）ごとの木材、および木質バイオマスの資源量を算出する。その後、算出された資源量をもとに、収集コストを施業班ごとに算出し、それらの空間的な分布の把握を行なうためのモデル式を構築するとともに、エネルギー供給形態ごとの加工にともなう利用コストを算出するモデル式を構築する。また、モデル地域の現状における木質バイオマスの資源量と利用コストについての算出も本章で行なう。本研究では、地理的な分布状況の把握、その他、解析のためのツールとして、地理情報システム（GIS）ソフトウェア ArcGIS（ESRI 社（米））を使用した。地理情報を視覚的に把握できる上に、道路と各施業班との位置関係の把握や、道路延長などへの対応が容易に行なえるためである。

2-1 材料

資源量の推定、および収集コスト計算には、主に森林簿、数値地図 25000 の 2 点を用いた。また、詳細な数値などは現地におけるヒアリングの結果、および文献値を引用した。

(1) 森林簿

資源量の推定には、高知県にて作成されている森林簿を用いた。林業において、林野はその地形、森林形態、所有者などの違いから、林班、小班、施業班などに細分化され、その小区画を単位として施業計画などが立てられる。高知県で作成された森林簿では、町ごとの林野が施業班まで細分化され、各施業班における森林に関わる各種データが記載されており、各林分の現況がそこから判断できる（図 2-1-1）。また、森林簿には GIS で利用可能な地理データファイルも含まれ、施業班や林道・作業道の分布の把握にはそれを用いた。本研究では、施業班を一単位として検討を行なった。

(2) 数値地図 25000

一般道データは国土地理院による数値地図 25000（空間データ基盤）高知を利用した。この一般道データと、森林簿に含まれていた林道・作業道データを統合し、道路データを作成した。

図 2-1-1 森林簿帳票サンプル

2-2 方法 - 資源量の推定 -

森林簿に記載されている各施業班の面積、林種、地位級から、ある林齢における ha あたり本数、ha あたり材積を求めた上で、その林齢での木材・木質バイオマスの資源量を算出した。算出方法については、数理生態学と林業経験則による森林生態モデルを用いた。また、現在の林齢における森林状況に関する数値は、あらかじめ森林簿に記載されていたが、一貫した検討を行なうため、上記のモデルを用いて改めて算出したものを現在の森林状況とした。

2-2-1 森林生態モデルについて

このモデルは、植林時の初期本数と初期樹高を入力として、ある林齢における樹高、本数、材積を出力とし、その結果には自然倒木や間伐の影響なども反映される。平均的な生育環境にて初期本数 3,500 本/ha、初期樹高 0.5 m で植林した森林における、樹木成長にともなう樹高、本数、材積の計算結果を、間伐を行なわなかった場合 (図 2-2-1～図 2-2-4) と間伐を行なった場合 (図 2-2-5～図 2-2-8) について示す。

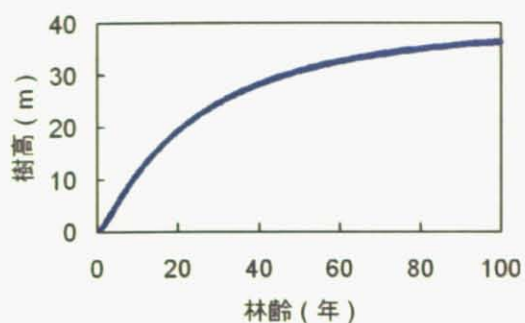


図 2-2-1 林齢 - 樹高 (無間伐)

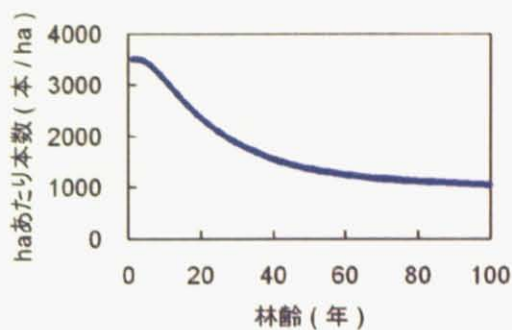


図 2-2-2 林齢 - 本数密度 (無間伐)

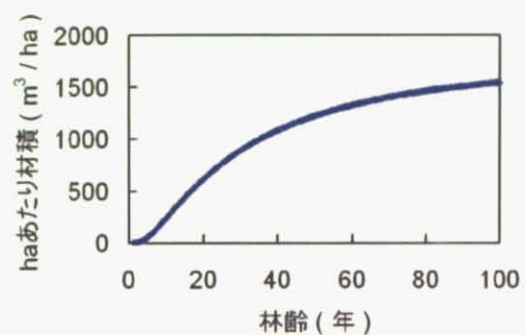


図 2-2-3 林齢 - 材積密度 (無間伐)

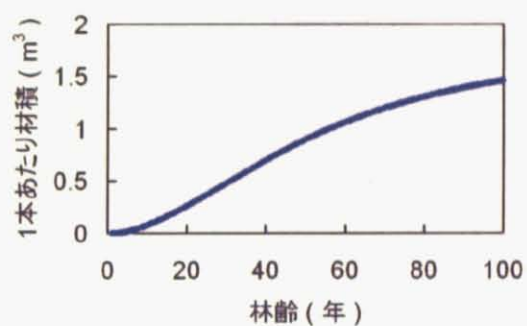


図 2-2-4 林齢 - 単木材積 (無間伐)

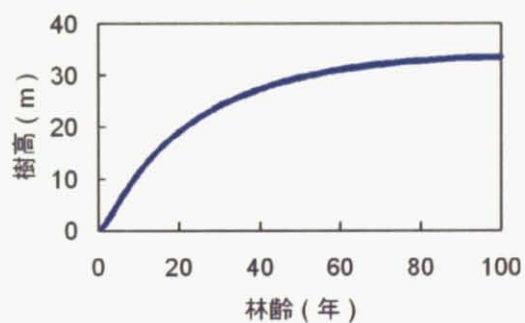


図 2-2-5 林齢 - 樹高 (間伐あり)

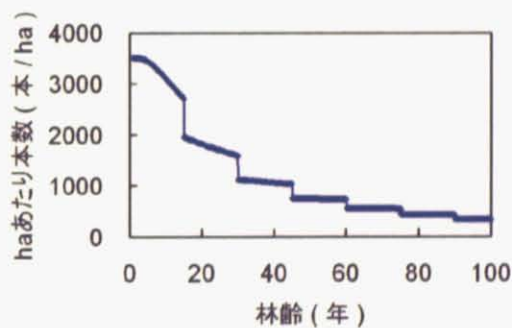


図 2-2-6 林齢 - 本数密度 (間伐あり)

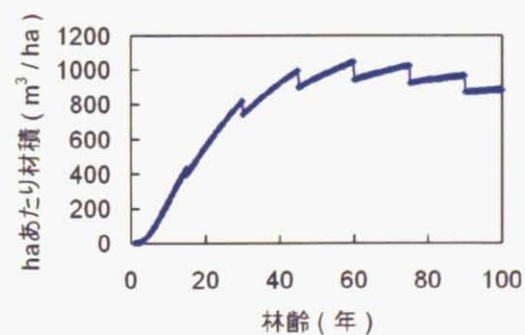


図 2-2-7 林齢 - 材積密度 (間伐あり)

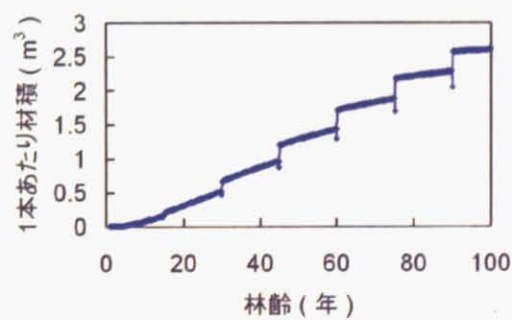


図 2-2-8 林齢 - 単木材積 (間伐あり)

2-2-2 条件設定

本研究での資源量推定、およびコストに関する各分析では、主伐時期の違いによる 2 通りのケースについて検討を進めるものとする。すなわち、モデル地域で過去に計画されていた 40 年で主伐を行なった場合 (Case40) と、現在の計画として進められている 80 年で主伐を行なった場合 (Case80) の 2 通りとする。また、各ケースにおける条件を、現地でのヒアリングなどをもとに、表 2-2.1 のように設定した。

表 2-2.1 各ケースにおける条件設定

設定項目	Case40	Case80
植林本数 (本/ha)	3,500	3,500
初期樹高 (m)	0.5	0.5
間伐開始時期 (年)	15 (20) ⁱ	15 (20) ⁱ
間伐間隔 (年)	15	15
間伐率 (%) ⁱⁱ		
主伐時期 (年)	40	80

i ()内はヒノキの場合の数値。

ii 間伐率は、モデル地域では 30 %以上の間伐に補助金が支給されとのことだったが、植林本数と現在の立木本数の状況から、試行錯誤的に 10 %と設定した。

2-2-3 資源量の算出

モデルによる資源量の算出結果は材積として算出されるため、木質バイオマスの資源量については、材積に対する木質バイオマスの比率を考慮して求める必要がある。前出のバイオマス変換計画³⁶の中で実施された林地残材の年間発生量の推計調査において、推計の基礎数値として、表 2-2.2 に示す数値が用いられている。それによると、スギ・ヒノキの材積に対する残材率は 15 %であることから、本研究でもこの数値を用いることとする。すなわち、材積 V (m³) の木材収集にともない発生する木質バイオマス量 R (m³) は、次式で求めることとする。また、本研究では、40 年以下の間伐材もエネルギー資源として利用するものとした。

$$R = V \times 0.15 \quad (2.1)$$

表 2-2.2 樹種別残材率 (%) ⁱ

樹種	末木	枝条	その他	計
スギ・ヒノキ	2	8	5	15
マツ	3	11	5	19
その他針葉樹	3	16	5	24
広葉樹	5	20	10	35

i 農林水産省農林水産技術会議事務局 ³⁶ から引用。

モデル地域における森林はスギとヒノキが大部分を占めるため、本研究で木材、および木質バイオマスの収集が可能な林分としたのは、国有林・保安林を除く、針葉樹（スギ、ヒノキ、マツ）の人工林とし、資源量の算出については全樹種ともに同じモデル式を適用した。

2-3 方法 - コスト算出モデルの構築 -

2-3-1 作業工程の分割

コスト算出モデルの構築に際し、まず収集作業を「伐倒」、「造材」、「集材」、「運搬」「破碎」の 5 つの作業工程に分割した。「伐倒」は立木を伐り倒す作業、「造材」は伐り倒された木の枝払い・玉切り作業、「集材」は林内から土場まで材を搬出する作業、「運搬」は土場から製材所あるいはエネルギープラントまで材を輸送する作業、「破碎」は木質バイオマスをチップ化する作業のことをそれぞれ指す。場合により、造材と集材、運搬と破碎などで順序が前後することや、行なわれない作業が生じることはあるが、基本的にすべての木材・木質バイオマス収集作業は、これらの主要な工程を経て行なわれるものとする。

2-3-2 機械の選定と機械データ

2-3-2-1 機械の選定

各作業工程で使用する林業機械を、想定しうるすべての施業型を考慮した上で、モデル地域で実際に使用されているもの、および一般的に使用される代表的なものを中心に、表 2-3.1 のように選定した。近年、大型で効率的な作業の行なうことのできる「高性能林業機械」を用いた施業システムの導入が進みつつあるが、本研究では従来から用いられている林業機械、高性能林業機械のどちらもカバーしている。また、各機械のサイズについては、モデル地域での実際の作業を想定し、中型、もしくは小型のものとした。

表 2-3.1 作業工程別使用機械

作業工程		使用機械
伐倒	伐倒＋造材	ハーベスタ
	伐倒のみ	チェーンソー、フェラーバンチャ
造材		チェーンソー、プロセッサ、ハーベスタ ⁱ 、グラップルソー
集材	架線集材	集材機、ラジキャリー、タワーヤード、スイングヤード
	走行車集材	スキッド、フォワーダ、トラクタ、林内作業車
運搬	積載	グラップルローダ
	運搬	4tトラック、7.5tトラック
破碎		中型チップパ、小型チップパ

i ハーベスタは、林内にて伐倒と造材を同時に行なう林業機械であるが、わが国では土場などにおいて造材のみに使用されることもあることから、造材機械としても加えた。

表 2-3.2 各種機械のコスト因子ⁱ - その1 -

	ハーベスタ	チェーンソー	フェラーバンチャ	プロセッサ	グループソー
機械価格	(円)	20200	20400000	21770000	15500000
自己負担率 ⁱⁱ	0.4	1	0.4	0.4	1
耐用年数	(年)	3	6	5	6
減価償却率	0.9	0.369	0.9	0.369	0.9
管理費率	0.048	0.045	0.048	0.048	0.048
保守修理費率	0.46	0.85	0.38	0.39	0.36
燃料・油脂費	(円/年)	10700	569400	340200	698478
機械消耗品費	(円/年)	245000	216000	653100	161000
年間作業日数	(日/年)	180	150 (180) ⁱⁱⁱ	130	180
日作業時間	(時間/日)	6	6	6	6
機械台数 ^{iv}		1	3	1	1
機械作業人員 ^v	(人/台)	1	1 (2) ⁱⁱⁱ	1	2
最大稼動傾斜		19	—	19	19

i 各種機械データについては、現地森林組合でのヒアリング、および全国林業改良普及協会⁴⁸、澤口⁴⁹、吉岡⁷より引用した(続表についても同様)。

ii 自己負担率は、ヒアリングによって設定している。ただし、不明のものに関しては全額自己負担とした。

iii チェーンソーの()内の数字は、造材作業時の値である。

iv 機械台数は、現地森林組合でのヒアリングをもとに設定した。なお、現在所有されていないものについてはすべて1台とした。

v 機械1台あたりの作業に必要な人数を「機械作業人員」とした。

表 2-3.3 各種機械のコスト因子 - その 2 -

	集材機	ラジキヤリー	タワヤーダ	スイングヤーダ	スキッド	フォワーダ	トラクタ	林内作業車
機械価格 (円)	160000	2976000	22000000	19500000	11000000	9500000	9800000	1330000
自己負担率	1	0.23	1	0.25	1	1	1	0.23
耐用年数 (年)	5	5	6	5	6	6	6	5
減価償却率	0.369	0.369	0.9	0.369	0.9	0.9	0.9	0.369
管理費率	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.048	0.065	0.048
保守修理費率	0.27	0.27	0.27	0.27	0.46	0.41	0.96	0.45
燃料・油脂費 (円/年)	100000	70000	513990	110160	463008	229068	446040	80000
機械消耗品費 (円/年)	48000	89280	215000	585000	77000	0	0	39900
年間作業日数 (日/年)	100	50	150	150	140	140	180	80
日作業時間 (時間/日)	6	6	6	6	6	6	6	6
機械台数	1	1	1	1	1	1	1	1
機械作業人数 (人/台)	3	2	2	2	1	1	1	1
最大稼動傾斜	—	—	30	30	22	19	19	19

表 2-3.4 各種機械のコスト因子 - その 3 -

	グラップルローダ	4tトラック	7.5tトラック	中型チップ	小型チップ
機械価格 (円)	9500000	11367000	11505000	38400000	5640000
自己負担率	1	0.25	0.59	1	1
耐用年数 (年)	6	5	5	5	5
減価償却率	0.9	0.369	0.369	0.9	0.9
管理費率	0.048	0.06	0.06	0.018	0.018
保守修理費率	0.31	0.45	0.45	0.75	0.75
燃料・油脂費 (円/年)	541320	270000	375000	2688000	307000
機械消耗品費 (円/年)	0	341010	345150	0	0
年間作業日数 (日/年)	200	150	150	170	170
日作業時間 (時間/日)	6	6	6	6	6
機械台数	1	1	1	1	1
機械作業人数 (人/台)	1	1	1	1	1
最大稼動傾斜	—	—	—	—	—

表 2-3.5 表記定義

	表記	備考
機械価格	Pm	機械の購入価格
自己負担率	bm	補助金などの考慮
耐用年数	Y	
減価償却率	dep	
管理費率	$hold$	
保守修理費率	$main$	
燃料・油脂費	F	年間の総経費 (円/年)
機械消耗品費	Ex	年間の総経費 (円/年)
年間作業日数	Day	
日作業時間	wt	
生産性	$prod$	($m^3/時$)
実生産性	$prod'$	稼働率など考慮した実際の生産性 ($m^3/時$)
稼働率	wr	
走行速度	u	($km/時$)
積載可能量	$Carry$	
機械台数	Nm	
機械作業人数	Nmp	機械 1 台あたりの作業に必要な人数
必要作業日数	Nd	
必要作業人員	Np	
年間機械経費	Cy	年間の総経費 (円/年)
機械コスト	Cm	単位生産体積あたり (円/ m^3)
人件費	$Wage$	日給 (円/日)
労務コスト	Cl	単位生産体積あたり (円/ m^3)
オーバーヘッドコスト	Co	保険料など 単位生産体積あたり (円/ m^3)
安全率	λ	オーバーヘッドコスト算出のための係数
固定費	Cst	単位生産体積あたり (円/ m^3)
作業路開設費	$Croad$	単位生産体積あたり (円/ m^3)
トータルコスト	TC	単位生産体積あたり (円/ m^3)
収集材積	TV	(m^3)
単木材積	V_l	木材 1 本あたりの材積 ($m^3/本$)
木質バイオマス量	TR	(m^3)
集材距離	df	林内での集材作業時の集材距離 (m)
運搬距離	dr	道路上での運搬作業時の運搬距離 (km)
傾斜角度	θ	

2-3-2-2 機械データ

コスト算出に関わる諸因子として、各機械の基本データは表 2-3.2～表 2-3.4 の通りである。各数値については、モデル地域の森林組合でのヒアリング、および文献値を用いた。生産性については、作業工程ごとにそれぞれまとめることとする。また、本研究における各要素の文字記号による表記を表 2-3.5 の通りに定義した。

(1) 伐倒・造材作業の生産性

現地ヒアリング、および文献調査により、全国的に用いられる標準的な数値という形で、生産性の数値を得た。しかし、一般に伐倒・造材作業では、単木材積（木材 1 本あたりの材積）が大きくなるほど 1 度の作業で搬出できる材積が大きくなるため、生産性は上がり、その分コストは下がる。一方で、単木材積が大きくなるということは木材の直径が大きくなることを意味し、作業にかかる時間が増加するため、その分、生産性は下がると考えられる。しかし、それらの要因を定量化し、生産性に反映させる有効な手段は見当たらなかった。そこで本研究では簡易的に、伐倒・造材作業の実際の生産性 $prod'$ は、材積に比例、直径に反比例するとし、単木材積 V_l を用いて次式にて求めることとした。なお、単木材積が 1 m^3 のときに標準的な生産性で作業が行なわれると仮定した。

$$prod' = prod \cdot V_l^{\frac{2}{3}} \quad (2.2)$$

(2) 集材・運搬作業の生産性

集材・運搬作業では、集材する距離が、生産性を左右する主要因のひとつであり、生産性は距離の関数として求められる。そのため、まず、集材・運搬作業に関わる距離を求めた。

距離の算出は、モデル地域における施業班と道路の地図データを、GIS 上で編集することによって行なった。各施業班の重心を求め、その点を各施業班の中心地点とした。中心地点から最寄りの道路（一般道、林道、作業道）までの直線距離を、林内の集材作業における集材距離 df とした。また、中心地点からの最寄りの道路上における最近隣地点を土場とし、土場から輸送目的地（以下、プラントとする）までの直線距離を補正して、道路上での運搬距離 dr とした（図 2-3-1）。運搬距離の補正については、直線距離を 1.5 倍するものとした。

各機械の生産性は、得られた集材距離 df 、運搬距離 dr の関数として求めた。また、一部の集材機械と、集材・運搬作業にともなう積載作業に使用される機械については、生産性と稼働率から実生産性を求めた。

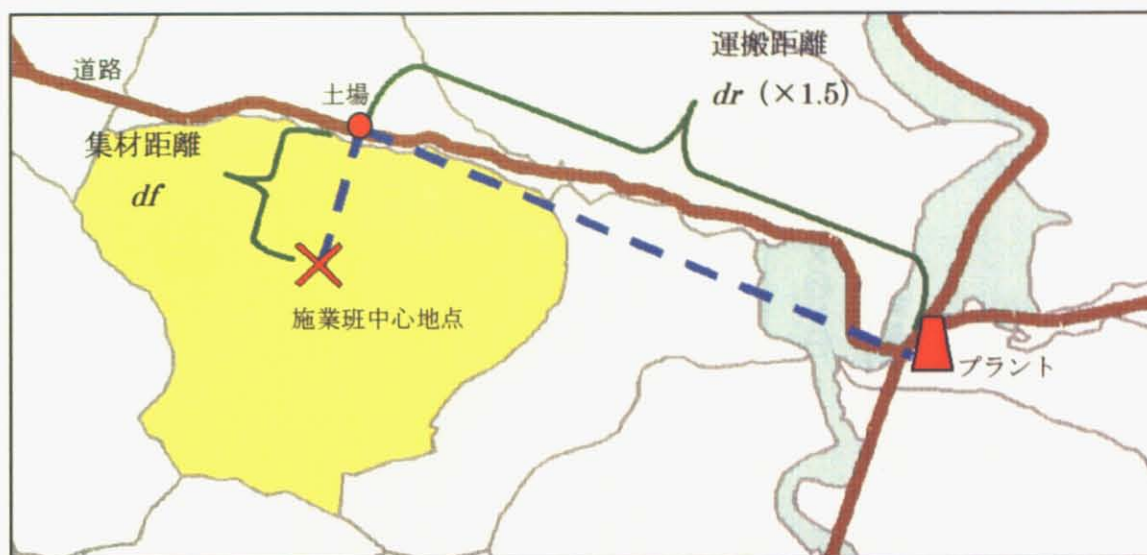


図 2-3-1 距離計算概念図

(3) 破碎作業の生産性

木質バイオマスのエネルギー利用の際、ほとんどの場合は細かくチップ状に破碎され、その状態を経て利用される。破碎作業は、プラントに木質バイオマスを収集した後、大型の破碎機（チップパ）で一括して行なわれるか、林内、あるいは土場で小型の破碎機を用いて分散的に行なわれる。そこで、本研究では、プラントでの一括破碎に用いられる中型チップパと、林内・土場での破碎に用いられる小型チップパの 2 通りを設定した。チップパの生産性については、文献値をそのまま用いた。

以上、(1) ～ (3) の機械の生産性について、表 2-3.6～表 2-3.12 にまとめた。

表 2-3.6 伐倒機械の生産性ⁱ

	ハーベスタ ⁱⁱ	チェーンソー	フェラーバンチャ	備考
① 生産性 (m ³ /時)	8	3	17	
② 稼働率	0.7	0.9	0.6	
③ 実生産性 (m ³ /時)	$5.6 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	$2.1 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	$10.2 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	①×②× $V_1^{\frac{2}{3}}$

i 生産性についての各数値は、全国林業改良普及協会⁴⁸、澤口⁴⁹、吉岡⁷より引用した（続表についても同様）。

ii ハーベスタは伐倒、造材を同時に行う林業機械であるため、表内の数値は、伐倒から造材までの生産性を表す。

表 2-3.7 造材機械の生産性

	チェーンソー	プロセスサ	ハーベスタ ⁱ	グラップルソー	備考
① 生産性 (m ³ /時)	7.5	10	8	13	
② 稼働率	0.9	0.5	0.7	0.5	
③ 実生産性 (m ³ /時)	$6.75 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	$5 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	$5.6 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	$6.5 \times V_1^{\frac{2}{3}}$	①×②× $V_1^{\frac{2}{3}}$

i ハーベスタは本来、伐倒と造材を同時に行なう林業機械であるが、国内では造材を目的として使用されることがあるため、造材機械としても加えた。

表 2-3.8 集材機械の生産性 - その 1 -

集材機・ラジキヤリー ⁱ ・林内作業車 ⁱⁱ			タワーヤード・スイングヤード ⁱⁱⁱ	備考
① 日生産性 (m ³ /日)	$72.401 \cdot df^{-0.2142}$	$\frac{29160}{2 \cdot df + 243}$		
② 日作業時間 (時間/日)	6	6		
③ 実生産性 (m ³ /時)	$\frac{72.401 \cdot df^{-0.2142}}{6}$	$\frac{29160}{6 \cdot (2 \cdot df + 243)}$		①/②

- i ラジキヤリーは、架線を利用した自走式の搬出機である。本研究では、集材機と同じ生産性とした。
- ii 林内作業車は、ワイヤーロープで材を引き出し、荷台に積載して搬出する走行車であり、生産性は集材機同様とした。
- iii スイングヤードは、ワイヤーロープで材を引き出す大型の重機である。大型の架線集材機械であるタワーヤードの生産性を用いた。

表 2-3.9 集材機械の生産性 - その 2 -

	フォワード	トラクタ	備考
① 走行速度 (km/時)	7.9	3.4	
② サイクルタイム (時間/回) ⁱ	$\frac{2 \cdot df}{7.9}$	$\frac{2 \cdot df}{3.4}$	集材距離×2/①
③ 積載可能量 (m ³)	8	3.2	
④ 実生産性 (m ³ /時)	$\frac{31.6}{df}$	$\frac{5.44}{df}$	③/②

- i 1 度の搬出作業にかかる時間をサイクルタイムとした。本研究では、林地・土場間の往復時間をサイクルタイムとした。

表 2-3.10 集材機械の生産性 - その 4 -

	スキッド	グループローダ ⁱ	備考
① 生産性 (m ³ /時間)	4.5	15	
② 稼働率	0.95	0.45	
③ 実生産性 (m ³ /時)	4.275	6.75	①×②

i グラップルローダは、搬出された材を土場にて集積、あるいはトラックへ積載するために用いられるものとした。

表 2-3.11 トラックの生産性

	4tトラック	7.5tトラック	備考
① 走行速度 (km/時)	30	30	
② サイクルタイム (時間/回)	$\frac{2 \cdot dr}{30}$	$\frac{2 \cdot dr}{30}$	運搬距離×2/①
③ 積載可能量 (m ³)	8 (6.67)	15 (12.5)	実材積 ⁱ
④ 実生産性 (m ³ /時)	$\frac{120}{dr}$	$\frac{225}{dr}$	③/②

i () 内に示した数値は、林内・土場で破砕し、チップをトラックで運搬した場合の実材積。吉岡⁷によると、木質バイオマスを破砕すると、全木の材積に比べ、容積が20%増加する。それにもとづき、破砕前の木質バイオマスの実材積を換算した。

表 2-3.12 チップの生産性

	中型チップ	小型チップ	備考
① 生産性 (m ³ /時間)	13	3	これを実生産性とする

2-3-3 コスト算出モデルの構築

2-3-3-1 機械コスト

機械コストの算出は、機械価格 Pm 、自己負担率（補助金率） bm 、耐用年数 Y 、年間稼働日数 Day 、1日あたり作業時間 wt 、稼働率 wr 、減価償却率 dep 、管理比率 $hold$ 、保守修理費率 $maint$ 、燃料・油脂費 F 、機械消耗品費 Ex 、機械台数 Nm 、および生産性 $prod$ を考慮した。

これらの因子から、機械コストとして年間にかかる総コスト Cy が求められる。また、各施業班で収集する総資源量 TV より、その施業班での作業に必要な日数 Nd が求められる。

$$Cy = Nm \cdot \left(Pm \cdot \frac{bm \cdot dep + hold + maint}{Y} + F + Ex \right) \quad (2.3)$$

$$Nd = \frac{TV}{prod \cdot wr \cdot wt \cdot Nm} \quad (2.4)$$

ある作業における単位体積木材の収集に関わる各工程での機械コスト Cm (円/m³) は、次式によって求められる。

$$Cm = \frac{Cy}{Day} \cdot Nd \cdot \frac{1}{TV} \quad (2.5)$$

よって機械コスト Cm は、(2.3)式、(2.4)式、(2.5)式から、次式にまとめることができる。

$$Cm = \left(Pm \cdot \frac{bm \cdot dep + hold + maint}{Y} + F + Ex \right) \cdot \frac{1}{Day \cdot prod \cdot wr \cdot wt} \quad (2.6)$$

2-3-3-2 労務コスト

労務コストの算出は、人件費 $Wage$ 、作業日数 Nd 、機械 1 台あたり作業人員 Nmp を考慮した。

上記(2.4)式で求められた作業日数 Nd より、収集に必要な作業人員 Np (人・日) は次式で求められる。

$$Np = Nd \cdot Nm \cdot Nmp \quad (2.7)$$

ある作業における単位体積木材の収集に関わる各工程での労務コスト Cl (円/ m^3) は、次式となる。

$$Cl = \frac{Wage \cdot Np}{TV} \quad (2.8)$$

よって、労務コスト Cl は、(2.4)式、(2.7)式、(2.8)式から、次式にまとめられる。

$$Cm = \frac{Wage \cdot Nmp}{prod \cdot wr \cdot wt} \quad (2.9)$$

2-3-3-3 オーバーヘッドコスト

保険料など、機械コスト、労務コストに間接的に加算されるコストをオーバーヘッドコストとして設定した。ある作業における単位体積木材あたりのオーバーヘッドコスト Co は、一定比率 λ を用いて次式により算出されるものとした。なお、本研究では、 $\lambda = 0.2$ とした。

$$Co = \lambda \cdot (Cm + Cl) \quad (2.10)$$

2-3-3-4 固定費および作業路開設費

集材・運搬作業には、積み込み、積み下ろし、架線の設置および撤去、作業路の開設などの作業が必要となるものもあり、それらの作業ともなうコストを、上記のコストと別途に考慮する必要がある。そこで、それら作業にともなう単位体積生産あたりのコストを固定費 Cst および作業路開設費 $Croad$ として設定し、架線集材における固定費を、表 2-3.13 に、走行車集材における固定費および作業路開設費を表 2-3.14 にそれぞれ示した。作業路開設費は、林地の傾斜角度の関数として求められるため、各施業班における平均傾斜角度 θ を、GIS を用いて求めた。

表 2-3.13 架線集材における固定費

	集材機 ラジキャリー	タワーヤーダ スイングヤーダ	備考
固定費 (円／m ³)	$\frac{12409}{df} + 394$	$\frac{14363}{df}$	<i>Cst</i>

表 2-3.14 走行車集材における固定費および作業路開設費

	フォワーダ 林内作業車	トラクタ	スキッド	備考
固定費 (円／m ³)	2666	1746		<i>Cst</i>
作業路開設費 (円／m ³)	$45 \cdot \exp(0.117 \cdot \theta)$	$91.7 \cdot \exp(0.117 \cdot \theta)$	$91.7 \cdot \exp(0.117 \cdot \theta)$	<i>Croad</i>

2-3-3-5 単位体積あたり生産コスト

各工程における単位体積あたり生産コスト TC (円／m³) は、基本となる機械コスト Cm 、労務コスト Cl 、オーバーヘッドコスト Co と、固定費 Cst 、作業路開設費 $Croad$ の総和で表される。

$$TC = Cm + Cl + Co + Cst + Croad \quad (2.11)$$

2-4 資源量の推定結果とその分布

2-4-1 資源量の現状とその分布

前述の森林生態モデルを用いて、現在のモデル地域における各施業班の資源量を算出した。図 2-4-1、図 2-4-2 に示すように、モデル地域における森林は 35 年生～50 年生のものが中心で、その年代の林分を合わせると、面積にして全体の 66.4 %、総材積にして全体の 70.6 %を占める結果となった。資源量の分布状況を図 2-4-3 に示す。なお、図 2-4-3 では木材・木質バイオマスの収集が可能な施業班のみが色付きで表示されている。

また、岩本⁵⁰によって、現在のモデル地域における林業・製材にともない発生する未利用の木質バイオマス量がまとめられている（表 2-4.1）。製材所から発生する廃材に比べて、林地残材の発生量が非常に大きい。これは、現在の林齢構成の中で、間伐期を迎えている林分が多く占めている一方で、間伐についてはほとんどが切捨間伐であり、利用されずに林地に放置される間伐材の発生量が多いからである。今後は、林齢を重ねるにつれて、切捨間伐から利用間伐、あるいは主伐にシフトすることにより、切捨間伐材が減少し、代わりに林道端・山土場の林地残材、製材所廃材が増加することが予想される。

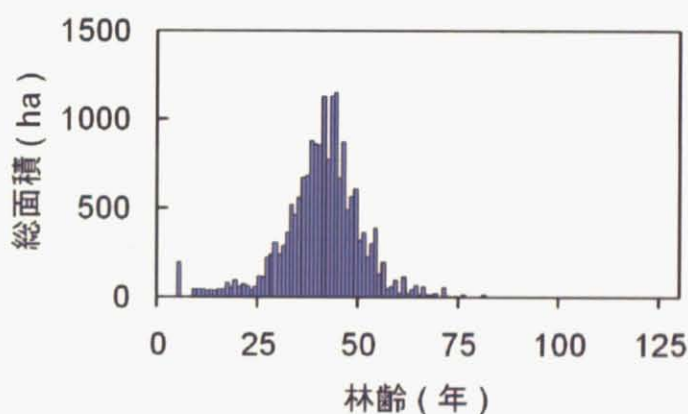


図 2-4-1 林齢別総面積

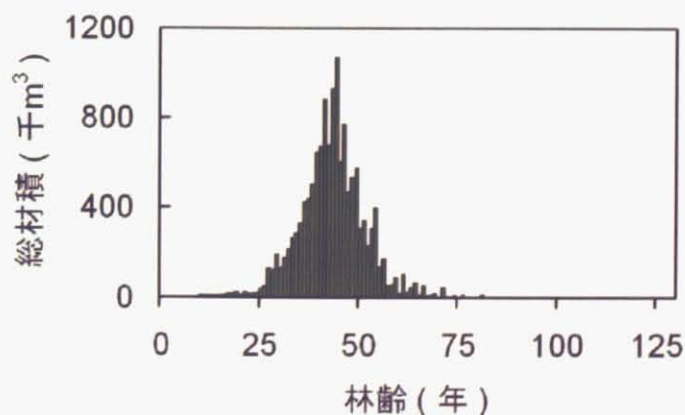


図 2-4-2 林齢別総材積

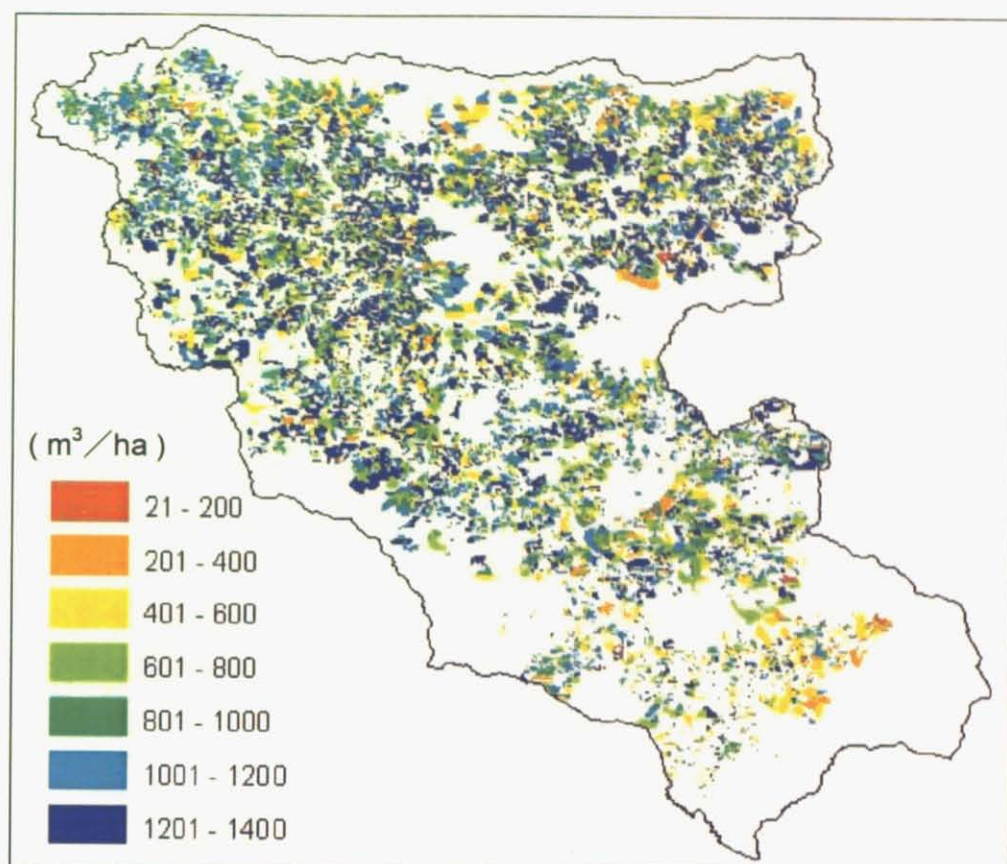


図 2-4-3 モデル地域における現在の資源量分布

表 2-4.1 モデル地域における未利用木質バイオマス発生量ⁱ

発生源		発生量 (t/年)
林地残材	林道端・山土場	1,683
	林地内	1,710
	切捨間伐材	35,558
	林地残材 計	38,951
製材所廃材	チップ	2,100
	オガクズ	1,110
	樹皮	368
	その他廃材	315
	製材所廃材 計	3,893
総計		42,844

i 岩本⁵⁰より引用。

2-4-2 Case40 における資源量とその分布

主伐時期を 40 年としたときの主伐時の資源量、つまり、各施業班での林齢が 40 年に達したときにそれぞれどれくらいの資源量を有するかを、ha あたり材積という形で図 2-4-5 に示した。土地における樹木成長量の指数を表す「地位級」の違いによって立木本数や成長量に差が生じるため、各施業班で資源量は異なる。ただし、厳密には、地位級は、ある時点での立木状況から決定されるものであるため、植林から伐採が繰り返される林業サイクルを通じて、各施業班で地位級が不変というわけではない。しかし、本研究では、次世代以降の地位級を予測する手段を有していないことから、現在の森林簿に記載されている地位級が今後も不変であるとして計算を行なった。参考として、モデル地域の地位級の分布を図 2-4-4 に示す。なお、地位級が高いほど樹木成長量は大きい。

40 年伐期の林業を行なった場合に、モデル地域全体で発生する資源量は表 2-4.2 のようになった。主伐と間伐で発生するすべての木質バイオマスをエネルギー利用の目的で収集可能とした場合、40 年間で木質バイオマスを等分できたとしたときの、年間に得られる木質バイオマスの潜在量は 25,000 t/年と試算された。

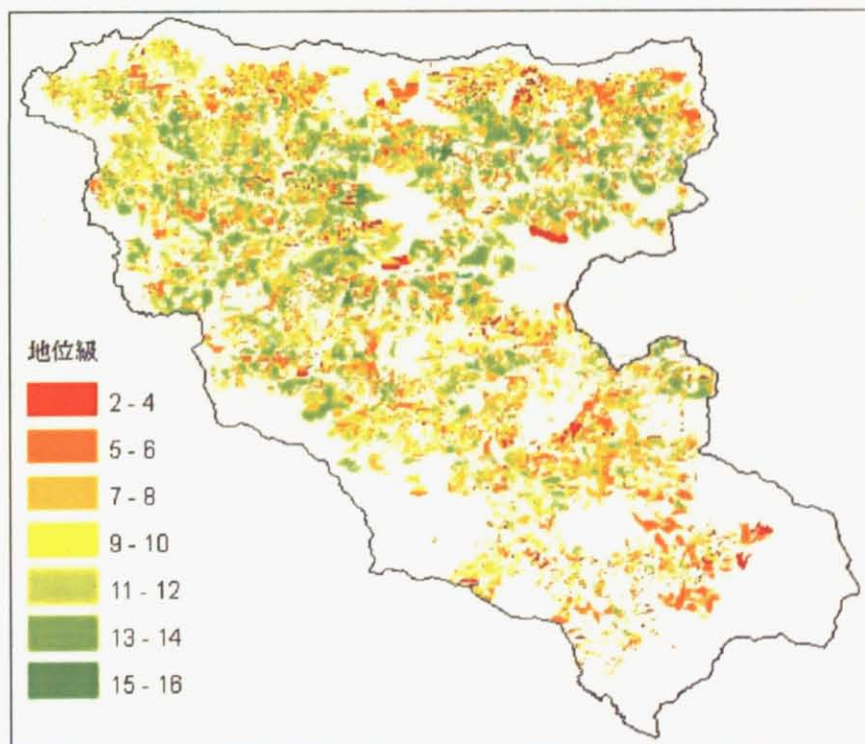


図 2-4-4 (参考) モデル地域における地位級の分布

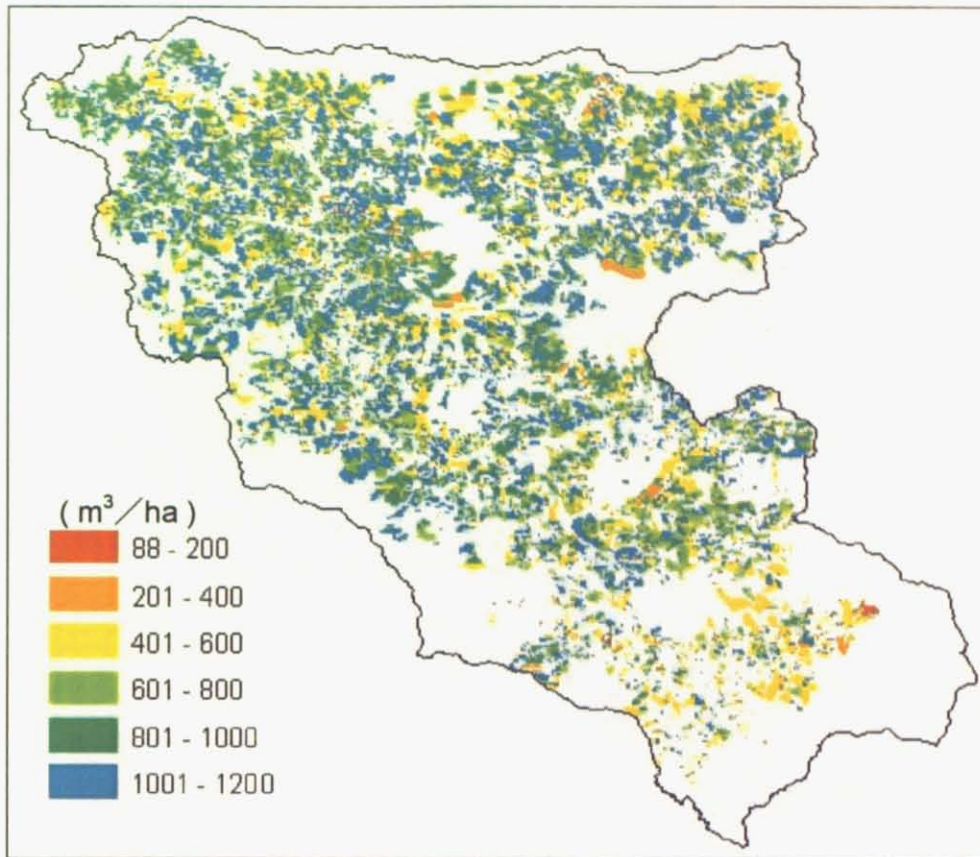


図 2-4-5 40 年伐期の主伐時の各施業班における材積密度

表 2-4.2 40 年間の林業サイクルの中で発生する資源量

	総材積		木質バイオマス量	
	(千 m ³)	(千 t)	(千 m ³)	(千 t)
主伐	7772	3886	1166	583
初回間伐 ⁱ	(388)	(194)	(58)	(29)
間伐 ⁱⁱ	708	354	708 + 106	354 + 53
40 年間 計	8480	4240	1980	990
年間 ⁱⁱⁱ	212	106	50	25

i 初回間伐で発生する間伐材は小径木のため、単位体積あたりの収集コストは非常に高くなり、ほとんど収集されることはない。そこで本研究でも、2 回目以降の間伐から収集・利用を開始することとした。

ii 40 年以下の間伐材はエネルギー利用するものとし、木質バイオマスに加算した。

iii 40 年間で発生する資源量を、林業サイクル年数 (40 年) で割ることで求めた。

2-4-3 Case80 における資源量とその分布

2-4-2 と同様にして、主伐時期を 80 年としたときの資源量の分布と、その発生量は図 2-4-6、表 2-4.3 のようになり、80 年間で等分した場合に年間で得られる木質バイオマスの潜在量は 15,000 t/年と試算された。

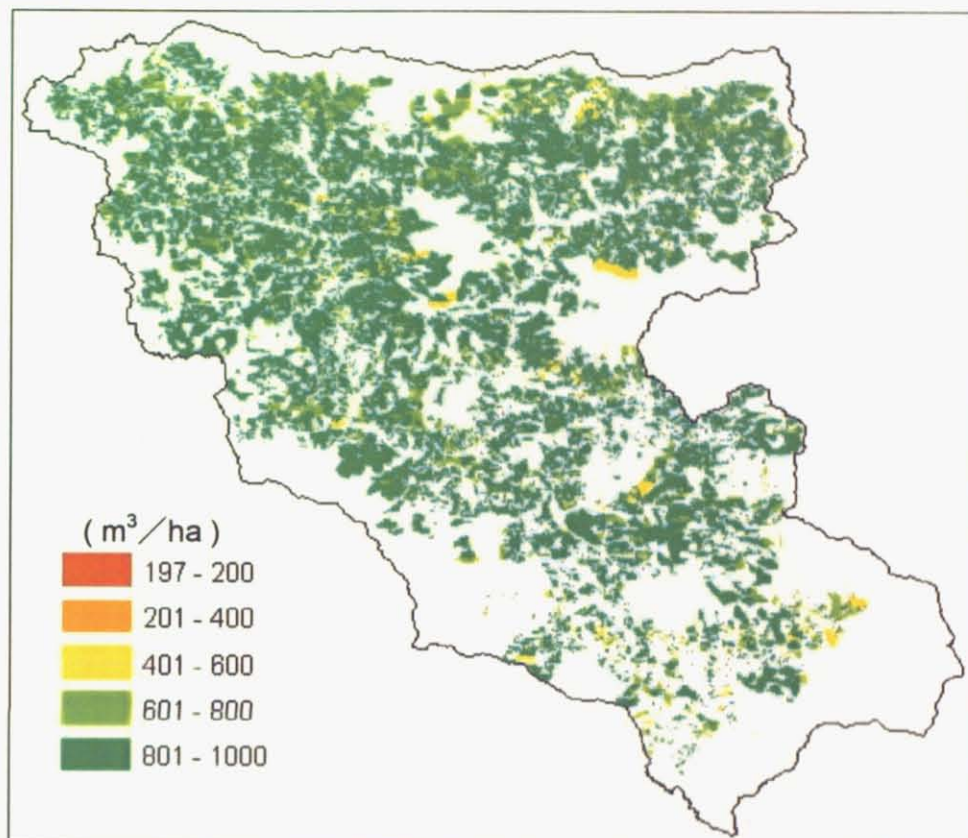


図 2-4-6 80 年伐期の主伐時の各施業班における材積密度

表 2-4.3 80 年間の林業サイクルの中で発生する資源量

	総材積		木質バイオマス量	
	(千 m³)	(千 t)	(千 m³)	(千 t)
主伐	8091	4046	1214	607
初回間伐 ⁱ	(388)	(194)	(58)	(29)
間伐 ⁱⁱ	3068	1534	708 + 460	354 + 230
80 年間 計	11159	5580	2382	1191
年間 ⁱⁱⁱ	139	70	30	15

i 初回間伐材は利用しない。

ii 40 年以下の間伐材はエネルギー利用するものとし、木質バイオマスに加算した。

iii 80 年間で発生する総資源量を、林業サイクル年数 (80 年) で割ることで求めた。

2-5 木質バイオマスの収集コスト算出結果

コストに関わる因子が現状のまま今後も変わらないとしたときの、40年伐期と80年伐期それぞれのケースでの各施業班におけるコストを算出した。なお、プラントの設置ポイントについては、実際に最有力候補として挙げられている場所に設定した（図 2-5-1）。



図 2-5-1 プラントの設置ポイント

※ 参考としてモデル地域における公共施設の位置も示した。

2-5-1 施業形態について

施業形態は、大きく分けて全木集材型、全幹集材型、短幹集材型の3つに分類できる。

全木集材とは、伐った木を、枝払い・玉切りを行わずに枝葉などがついた状態で土場まで搬出し、そこで造材するという施業型である。全幹集材は、林内で枝払いのみを行ない、幹部を土場まで搬出し、そこで玉きりを行なうという施業型である。短幹集材は、林内にて造材も行ない、丸太の状態のものを搬出するという施業型である。一般に全木集材型の施業では、土場に枝条・末木などの木質バイオマスも同時に集積されるため、木質バイオマスの収集に着目した場合には、容易かつ低コストに収集することができるとされる。

本研究では木質バイオマスのエネルギー利用を見越しているため、全木集材型の施業を行なうものとして検討した。使用機械は、各施業班で最も低コストとなる組み合わせを選択するものとした。

初回間伐については、伐倒機械としてすべてチェーンソーを用いることとした。また、林地の傾斜と、使用機械の最大移動傾斜の比較により、各施業班からの収集の可否を判断した。

2-5-2 Case40における木質バイオマス収集コストとその分布

Case40における、最も低コストとなる機械の組み合わせは、それぞれ表 2-5.1 のようになった。大部分はフェラーバンチャとスイングヤーダ、もしくはチェーンソーとスイングヤーダを用いた架線集材で、一部でラジキャリーによる架線集材、スキッドによる走行車集材となる施業班が見られた（図 2-5-2）。また、チェーンソーが用いられるのは、主に、フェラーバンチャでの作業が困難な急傾斜の施業班であった。なお、機械の選定は、主伐時におけるコストにより決定している。主伐時における木材生産コストは 5,203～24,994 円/m³、それにとまって発生する木質バイオマスの運搬・破碎コストは 2,505～3,250 円/m³、間伐材の収集コストは 10,247～67,848 円/m³であった。各施業班で求めた主伐時の木材生産コストの分布を図 2-5-3 に示す。

収集可能範囲は 9,008 ha で、収集可能な総資源量は、いずれの施業型でも、主伐により 7,772,388 m³、間伐により 708,146 m³、計 8,480,534 m³であった。それらにとまって発生するエネルギー利用が可能な木質バイオマスの総量は 1,980,226 m³ で、重量にして 990,113 t と試算された。それを林業サイクルの 40 年で割ることで求めた年間に得られる木質バイオマス量は、24,753 t/年となった。なお、重量は生材の状態での比重を 500 kg/m³ として求めた。

表 2-5.1 Case40 において低コストとなる使用機械の組み合わせ

伐倒	集材	造材	積載 ⁱ	運搬	破碎 ⁱⁱ
① フェラーバンチャ	スイングヤーダ	チェーンソー	グラップル ローダ	7.5t トラック	中型チップ
② チェーンソー	スイングヤーダ	チェーンソー	グラップル ローダ	7.5t トラック	中型チップ
③ フェラーバンチャ	スキッド	チェーンソー	グラップル ローダ	7.5t トラック	中型チップ
④ チェーンソー	スキッド	チェーンソー	グラップル ローダ	7.5t トラック	中型チップ
⑤ フェラーバンチャ	ラジキャリー	チェーンソー	グラップル ローダ	7.5t トラック	中型チップ
⑥ チェーンソー	ラジキャリー	チェーンソー	グラップル ローダ	7.5t トラック	中型チップ

i 集材、造材、運搬作業にともなう積載作業についても作業工程のひとつとして加えた。

ii 破碎はプラントにて集約的に行なった方が低コストとなった。

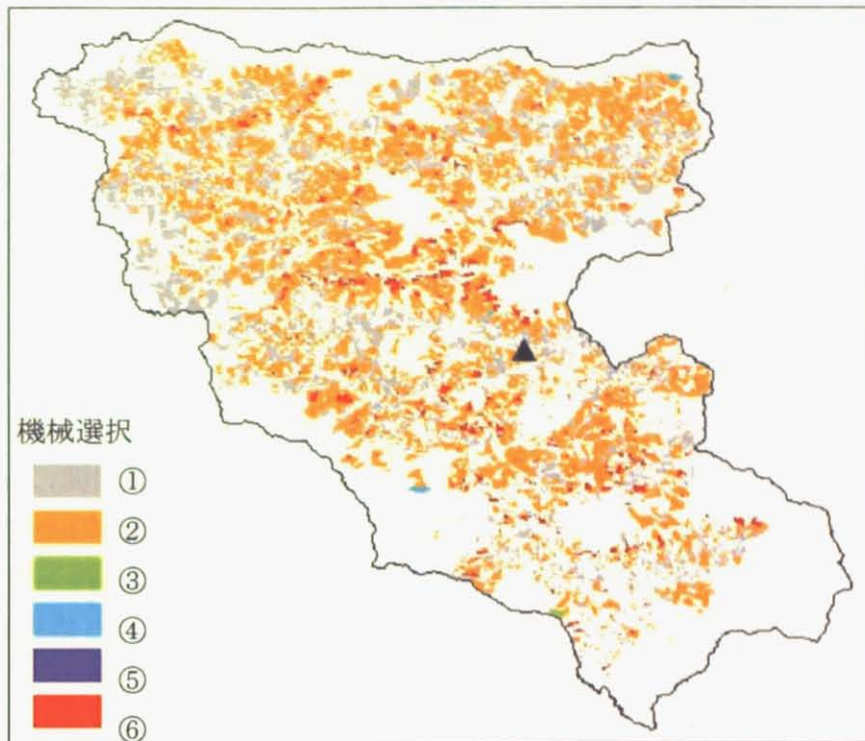


図 2-5-2 Case40 における低コスト施業での使用機械の選択

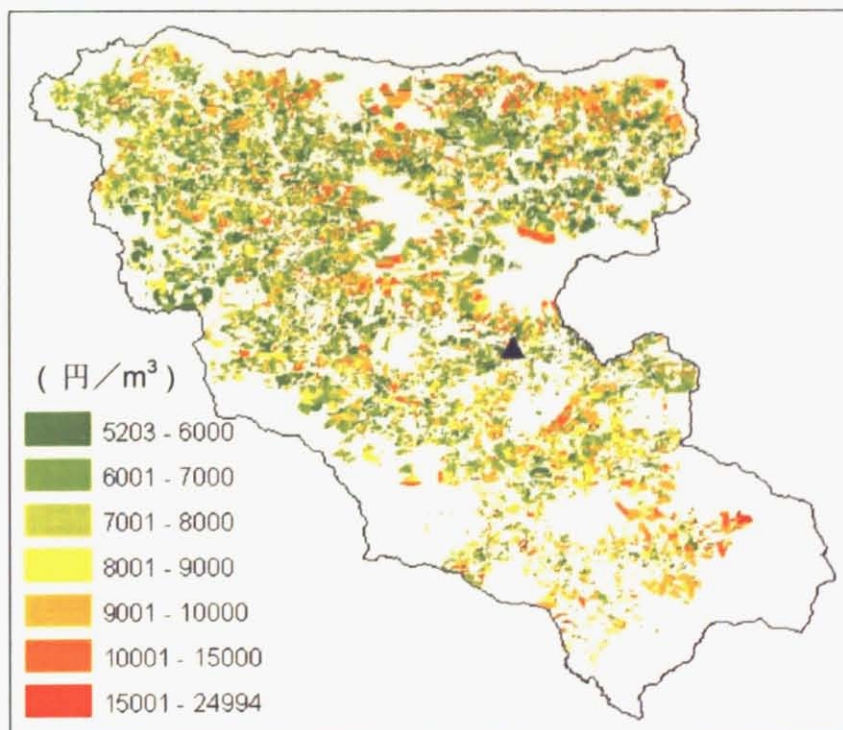


図 2-5-3 Case40 における収集コスト

2-5-3 Case80における木質バイオマス収集コストとその分布

Case80における、低コストとなる機械の組み合わせは、Case40と同じく表 2-5.1 のようになり、大部分はフェラーパンチャとスイングヤーダ、もしくはチェーンソーとスイングヤーダを用いた架線集材で、一部でラジキャリーによる架線集材、スキッドによる走行車集材となる施業班が見られた（図 2-5-4）。主伐時の木材生産コストは 4,496～16,317 円/m³、それにともない発生する木質バイオマスの運搬・破碎コストは、Case40 と同じく 2,505～3,250 円/m³、間伐材の収集コストは 9,711～37,066 円/m³であった。各施業班で求めた主伐時の木材生産コストの分布を図 2-5-5 に示す。

全収集範囲は、Case40 と同じく 9,008 ha で、収集可能な総資源量は、主伐により 8,091,499 m³、間伐により 3,063,373 m³、計 11,154,872 m³であった。それらにともない発生する木質バイオマスの総量は 234,377 m³で、重量にして 1,190,688 t と試算された。それを林業サイクルの 80 年で割ることで求めた年間に得られる木質バイオマス量は、14,884 t/年となった。

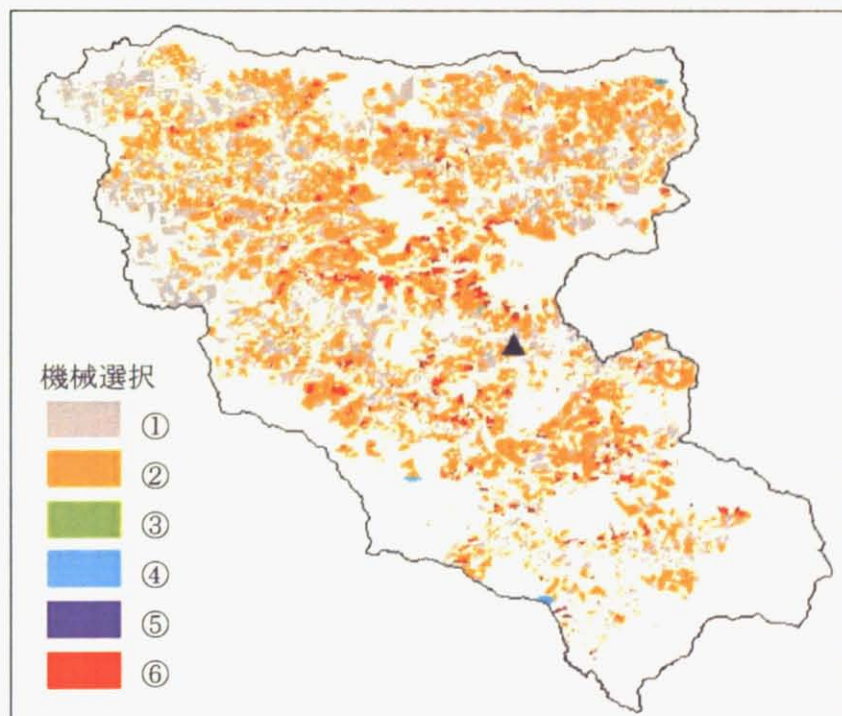


図 2-5-4 Case80における低コスト施業での使用機械

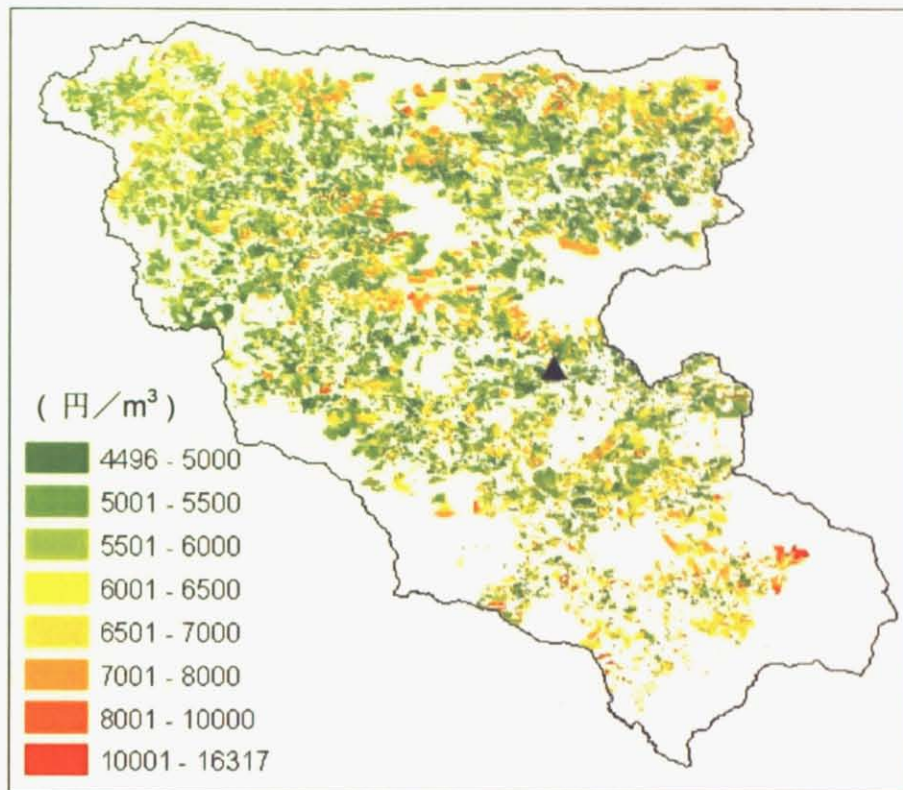


図 2-5-5 Case80 における収集コスト

2-5-4 Case40 と Case80 の比較

年間に得られる木材、および木質バイオマスの総資源量は、Case40の方がCase80に比べて約1.5倍多くなる。一方、主伐の際のコストはCase80の方が低くなった。ここで、すべての施業班から木材および木質バイオマスの収集を行なうとしたときの、各林業サイクルの中でかかる総コストは、Case40で1,075億円、Case80で1,261億円と試算された。なお、各林業サイクルで、植林費用として1,850,000円/ha、その他下刈り作業などで1,750,000円/haが収集コストの他ににかかるものとした。また、いずれのケースでも、伐倒と集材について、フェラーパンチャとスイングヤーダ、チェーンソーとスイングヤーダが、低コストとなる機械の組み合わせとして広範囲にわたっていた。

2-6 木質バイオマス収集コスト算出モデルの構築 まとめ

本章で構築した木質バイオマス収集コスト算出モデルにより、各施業班における、森林資源量とその分布、木材生産コストおよび木質バイオマス収集コスト、コストの空間的な分布、最も低コストで施業可能な機械の組み合わせを把握することが可能となった。また、複数の算出結果を比較することで、どのような場合にどのような施業型が有利となるかを判断することも可能となった。以下、本研究では、この木質バイオマス収集コスト算出モデルを用いて、各検討を行なった。