

森林バイオマス資源収穫システムの構築に関する研究

吉岡拓如

目次

第1章 序論	1
1. はじめに	1
2. 森林バイオマス資源の収穫に関する既往の研究	4
2.1 概要	4
2.2 諸外国における研究の経過	4
2.2.1 1970～80年代	4
2.2.2 1990年代～現在	7
2.3 わが国における研究の経過	15
2.4 考察	18
3. 本研究の目的と構成	21
3.1 本研究の目的	21
3.2 本研究の構成	22
第2章 木材生産システムへの森林バイオマス資源運搬工程の導入	23
1. 概要	23
2. プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム	24
2.1 システムの概要	24
2.2 システムの構成および分析方法	27
2.2.1 プロセッサによる造材作業	27
2.2.2 フォワーダによる丸太および森林バイオマス資源の運搬作業	27
2.2.3 エネルギー消費	27
2.2.4 森林バイオマス資源の運搬コスト	28
2.2.5 森林バイオマス資源の重量	28
3. 現地実験	30
4. 結果	31
4.1 プロセッサによる造材作業	33
4.2 フォワーダによる運材作業	33
4.3 フォワーダによる森林バイオマス資源運搬作業	33
4.3.1 作業時間	33
4.3.2 燃料消費量	33
4.3.3 コスト計算	34
4.3.4 森林バイオマス資源の重量	34
5. 考察	36
5.1 プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム	36
5.2 エネルギー分析	39
5.3 コスト分析	39
6. 小括	41

第3章 森林バイオマス資源収穫システムの構築	42
1. 概要	42
2. ヨーロッパ諸国の森林バイオマス事情	43
2.1 イギリス	45
2.2 スウェーデン	46
2.3 フィンランド	46
2.4 考察	47
3. 森林バイオマス資源収穫システム	49
3.1 システムの構成	49
3.2 システムの分析方法	51
4. 現地実験	53
5. 結果	55
6. 考察	58
6.1 コスト分析	61
6.2 エネルギー分析	62
6.3 輸送効率の改善	63
7. 小括	64
第4章 森林バイオマス資源収穫システムのライフサイクルインベントリ(LCI)分析	66
1. 概要	66
2. 目的	67
3. 分析方法	68
3.1 概要	68
3.1.1 積み上げ方式	69
3.1.2 産業連関分析	69
3.1.3 エネルギー収支	70
3.1.4 二酸化炭素排出量	71
3.2 投入エネルギー	72
3.2.1 設備エネルギー	73
3.2.2 運用エネルギー	74
4. 森林バイオマス資源収穫システムのエネルギー収支	75
4.1 検討範囲と前提条件	75
4.1.1 システムの検討範囲	75
4.1.2 森林バイオマス資源収穫システム	77
4.1.3 バイオマス火力発電プラント	78
4.2 設備エネルギー	79
4.2.1 森林バイオマス資源収穫システム	79
4.2.2 バイオマス火力発電プラント	82
4.3 運用エネルギー	85
4.3.1 森林バイオマス資源収穫システム	85
4.3.2 バイオマス火力発電プラント	85
4.4 投入エネルギーおよびエネルギー収支	86
5. 森林バイオマス資源収穫システムの二酸化炭素排出量	90
6. 感度分析	94
7. 小括	97

第 5 章 地域への森林バイオマス資源収穫システムの適用	99
1. 概要	... 99
2. 目的	... 100
3. 材料と方法	... 101
4. 森林バイオマス資源収穫システムの分類とコスト計算式の作成	... 102
4.1 森林バイオマス資源収穫システムの分類	... 102
4.2 コスト計算式の作成	... 105
4.2.1 機械の選定	... 105
4.2.2 各種機械の機械経費，労務経費，作業能率と各工程のコスト計算	... 105
4.2.3 森林バイオマス資源収穫システムのコスト計算式	... 110
5. 小班データの作成と森林バイオマス資源量の算出	... 112
5.1 小班データの作成	... 112
5.1.1 森林簿データの整理と図面データへの割り付け	... 113
5.1.2 道路データの作成	... 113
5.1.3 地形データの作成	... 114
5.1.4 地理的条件の算出	... 116
5.2 森林バイオマス資源量の算出	... 116
5.2.1 小班の伐採形態	... 117
5.2.2 森林バイオマス資源の年間利用可能量	... 119
6. 森林バイオマス資源量と収穫コストの関係	... 122
7. 小括	... 126
第 6 章 総括	128
謝辞	132
引用文献	134
摘要	142

第1章 序論

1. はじめに

1970年代の2度にわたるオイルショックを契機として、化石資源の代替エネルギー開発の推進が強く提唱されるようになり、世界的にバイオマスエネルギーに関する研究が盛んになった（なお、エネルギー・資源の分野では、バイオマスは“ある一定量集積した、生物体に由来する有機資源（ただし化石燃料を除く）”と定義されている⁽⁷⁶⁾）。

わが国における研究の代表的なものとして、農林水産省が中心となり、昭和56年度より10年計画で進められた“生物資源の効率的利用技術の開発に関する総合研究（バイオマス変換計画）”⁽⁷⁴⁾がある。農学分野では、他にも林業・林産業を中心に数多くのプロジェクト^(49～51, 68～72)が進められ、各方面の研究の中には実用化に達した技術もあるものの、バイオマス変換計画については、得られた成果の多くは経済性を克服できず、原油価格が再び安値で安定したことにより普及するまでには至らなかったと総括されている⁽⁹⁷⁾。自国で石油がほとんど産出されないという点においてわが国と同様の背景を有するスウェーデンやフィンランドなどの北欧諸国では、オイルショックを契機に、政府が自国のエコロジカルかつ持続可能なエネルギー源で賄うべく、政策を採択して不断の努力を重ねてきた。この結果、現在ではバイオマスの競争力が化石燃料に対してコスト的に対等に近い状態になり、1次エネルギー供給に占めるバイオマスの割合が2割以上にも至っていることと比較すると、わが国の現状は非常に好対照である。

しかしながら近年、地球規模での温暖化問題が顕在化するのに伴い、再生可能かつカーボン・ニュートラルである“エネルギー源としての生物資源”の総称としての“バイオマス”に対する関心が再び高まりつつある。折しも2001年5月に資源エネルギー庁より発表された新エネルギー導入目標の中で、初めてバイオマスの新エネルギーとしての位置付けが明確に定められ（2010年度の目標ケースで、発電で34万kL、熱利用で67万kL（ともに原油換算））、また2002年1月22日に“新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法

施行例の一部を改正する政令”，いわゆる新エネ法が閣議決定され，1月25日に施行される(116)など，わが国におけるバイオマスのエネルギー利用も現実味を帯びてきた。

バイオマスの中でも，木質バイオマスはとりわけ注目度が高い。これは，資源量が豊富であることだけでなく，そのエネルギー利用が，わが国では長い間不振の続く林業・製材業を基盤とする中山間地域の活性化，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。現在，エネルギー利用が可能な木質バイオマス資源量の定量化，低コスト収集・輸送システムの開発，社会システムのニーズに即した変換プロセス等を総合的に考慮した，将来的な導入・普及ビジョンを国家レベルで早急に確立することが求められている。

木質バイオマスには，木材生産時に発生する末木や枝条などの林地残材，伐採されたもののコスト的に見合わずに林内に放置される未利用の間伐材，人工林のうち間伐を必要としているにもかかわらず立木として放置されている林分，かつては“里山”として薪炭材等の用途で広く利用されていた未利用広葉樹，タケ・ササ，製材工場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，解体廃材，街路樹剪定枝が該当する。現状における木質バイオマスの未利用資源量を表-1.1に示すが，年間の合計は3,170万 dry-tとなる。木質バイオマスの発熱量を20 GJ / dry-tとすればそのエネルギー量は634 PJ，国内の1次エネルギー供給量23.0 EJ(1999年度)(66)の2.8%を占める計算になる。しかしながら，現在エネルギーとして利用されているのは，このうちのごく一部にすぎない。これは，実用化段階にある木質バイオマスのエネルギー変換技術に比べ，広い範囲に分散しているバイオマスを，低コストで収集・輸送することが可能な技術が未確立だからである。

表-1.1 国内で1年間に発生する木質バイオマスの未利用資源量(37, 41)

項目	(万 dry-t / 年)	注釈
林地残材	300	未利用の間伐材を含む
間伐材	500	間伐対象林であって間伐が行われなかった林分から間伐率2割で搬出
広葉樹	900	林道から500 m以内の用材林・椎茸林以外の広葉樹林を伐期30年で搬出
タケ	30	年間総量100万 dry-t程度の3割を搬出
ササ	300	林道から一定距離にあるササを搬出
工場廃材	40	木材工業全般が対象
解体廃材	800	建築解体材，新築廃材，パレット廃材，梱包廃材など
街路樹剪定枝	300	日本全国の公園緑地，街路樹，庭木などの純一次生産量
計	3170	

一方、わが国の林業においては、近年、機械化による生産性の向上を目的として、高性能林業機械の普及が進んでいる。中でも造材機械のプロセッサが急速に普及しており、それに伴って、集材方式も従来型の短幹集材から全木集材へ移行しつつある。プロセッサの全木材の処理能力が非常に高いため、プロセッサ作業土場に末木や枝条などの林地残材が短時間に大量に発生し、作業の障害となるばかりでなく周辺環境への影響も懸念されるという新たな問題が生じている。また、わが国における林道の建設コストが非常に高価であるため、低密度の林道網を補完する形での低規格の作業路が敷設され、従来は林内作業車による林内運搬作業が行われてきたが、この作業が機械化に伴って大形車両のフォワーダに代わりつつある。木材生産時に発生する末木や枝条などが産業廃棄物とされ、野外焼却処分ができないという現状を考慮すれば、このような林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、プロセッサ作業土場という1つのターミナルに集められたバイオマスを、フォワーダで運び出しエネルギーとして利用するという考え方も成り立ち、森林バイオマス資源の収穫システムの構築を検討する1つの契機となるといえよう。

2. 森林バイオマス資源の収穫に関する既往の研究

2.1 概要

本節では、森林バイオマス資源の収穫に関する既往の研究について、まず、森林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、各国で個別に研究が行われた“1970～80年代”と、国際エネルギー機関（IEA）の枠組みの中で各国が連携を図りながら取り組むようになった“1990年代～現在”に区分して整理するものとする。その上で、オイルショックを契機として進められたわが国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、わが国における森林バイオマスのエネルギー利用を目的とした収穫システムを実現するために本研究が取り組むべき課題を整理する。

2.2 諸外国における研究の経過

2.2.1 1970～80年代

1970～80年代は、全木材の利用が中心であり、地域的には北米（アメリカ合衆国、カナダが中心）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われた。両地域とも地形が平坦な林地が多いことから、1970年代の多くの検討において、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に、林道端で造材、全木材を粉碎、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、森林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であるが、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、全木材の粉碎に関する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 Morey(63)が、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。従来型の林内でのチェーンソーによる伐倒，造材という短幹集材作業システムに比べ生産性が2倍に向上し，1チーム6人のオペレータで280～300トン/日のチップを生産し，また工場着の原料コストは，従来型の20～30アメリカドル/トンから6.22アメリカドル/トンまで削減することができ，さらに伐採面積，労働力，伐採後の再造林コストの節約にもつながったと報告している。また全木材のチップ化システムが，従来は原料となり得なかった間伐材や低質広葉樹などの収穫にも有効であるとしている。

生産性については，アメリカ合衆国のTufts(106)が，全木材のチップ化システムは初期投資が高価となることを欠点として指摘しているものの，工場までの輸送を含め，マツ人工林の間伐で1週間に800トン(1チーム11人，輸送距離40～50マイル)，広葉樹林の皆伐で1日150トン(1チーム8人)の生産性を達成したと報告している。また伐採後の再造林コストの低減化については，同じくアメリカ合衆国のMalac(58)が，従来型の短幹集材から全木集材への移行により，その後の再造林費用は，個々の林地の条件により変動はあるものの，33～65%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Palenius(80)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かかわらず，それに対処するだけの労働力を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としても，間伐材が中心であると報告している。

パルプチップの生産から輸送までをまとめたFAOの報告書(29)においても，上記4報と同様の記述がある。加えて北欧諸国では，伐採跡地に放置された根株や林地残材の収穫も検討されたが，全木材のチップ化とパルプ用のクリーンなチップの選別機の組み合わせが最も経済的な方式であるとした上で，全木材のチップ化システムと各種移動式チップについて解説されている。特に間伐材などの小径木のチップ化については，全木材のチップ化システムがコスト的に見合う唯一の手段となり得るものとも報告されている。

エネルギー利用を目的とした取り組みについて，まず北米ではカナダのFolkema(26)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(27)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なものであり，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。中小規模の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砕する、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砕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。

全木材の粉砕以外の取り組みとしては、アメリカ合衆国の *Stuart et al.(102)* 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い、その際発生した末木・枝条を粉砕、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、残材を粉砕、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。またベール化については、規模が小さい場合に限り、粉砕よりも有効なシステムであるとされている。

また *Watson et al.(112)* 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砕を行うシステム（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、粉砕した後、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とな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(3)。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。

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ダによる粉砕・運搬システム、フォワーダによる収穫、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、フォワーダに取り付けたグラップルソーで玉切りのみを行い、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）フォワーダ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できないので、付属のグラップルで積み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パ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。ただし、チップパへの全木材の投入は人力によるものとなる点について、騒音や材の跳ね返りによる労働災害の危険性が指摘されているが、この点に対しては、Almqvist and Liss(2)が小規模林業の経営者向けに粉碎作業のマニュアルを作成し、フォローしている。

以上の検討に加え、アメリカ合衆国エネルギー省（USDOE）の取り組みやカナダ林野庁のENFORプロジェクトなど、森林バイオマスのエネルギー利用に関する1980年代以前の研究について、フィンランドのHakkila(34)が包括的にまとめている。本研究で対象とする森林バイオマスの収穫については、全木材、ツリーセクション、林地残材の収穫、粉碎、輸送に関する検討、プロジェクトを整理した上で、各種システムに関するケーススタディを提示している。

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た。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、前者はニュージーランドの Goulding and Twaddle(32)が、後者はデンマークの Brenøe and Kofman(16)が、それぞれまとめている。

森林バイオマスの収穫について Goulding and Twaddle は、プロジェクトの参加各国において行われた全木材の収穫試験をレビューした上で、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。

早期間伐材の収穫について Brenøe and Kofman は、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、その中でも integrated harvesting に関する試験が含まれている。Brenøe 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は、カナダの Puttock(81)が、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・粉碎工程のコストを比較した上で、それぞれの得失について考察している。まず利点としては、伐採跡地に林地残材が残されれば、害虫や火災の発生の危険性が高まるという問題が生じることから、残材を収穫することにより、植林作業の能率が改善され、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。また欠点としては、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侵食、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 年に総括されている。短伐期林業（SRF）の機械化についてはイギリスの Culshaw and Stokes(17)が、integrated harvesting についてはイギリスの Hudson(43)が、小径木と林地残材の収穫についてはカナダの Gingras(31)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.*(6)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、フィンランドでは 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、残材を粉碎したチップ、未粉碎の残材、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い、さらに残材をバ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（この時期から、このようなチップ、残材、バ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われるようになる）。

1998 年から 2000 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、短伐期林業、例えば chain flail technology などの integrated harvesting（one-pass system と位置付けられる）については、“Short Rotation Crops for Bioenergy (IEA Bioenergy Task 17)” の枠組みにおいて、アメリカ合衆国を中心に議論されるようになったことである。これにより、Task 18 は“林業における森林バイオマスのエネルギー利用” に特化されたことになる。参加各国の現状や取り組みについては、フィンランドの Nurmi(75)、デンマークの Heding(39)、オランダの Vis(111)、ならびにニュージーランドの Hall(35)の報告がある。

Nurmi は、フィンランドにおいては、林地残材はチップフォワードで、土場に集積した

残材は林道端で粉碎して輸送する方式が主流であり、残材の収穫により、伐採後の育林コストが ha あたり 100 アメリカドル低減されるとしている。また、熱電併給 (CHP) プラントを想定した場合の損益分岐点となる森林バイオマスの輸送距離は 40 ~ 50 km であると報告している。

Heding は、デンマークの現状として、間伐材の全木利用が主体であり、システムは、冬に伐採した後、夏の間放置して乾燥させることにより、含水率を 3 分の 1 にまで低下させ、土壌の養分となる葉を落とした後に、林内においてチップフォワードで粉碎し、収集する方式であると報告している。1 GJ あたりの取り引き価格は 6 アメリカドルであり、このこと自体が林業にもたらす利益は大きくないが、間伐を終えた後の主伐時の作業効率へ波及する効果が大きいとのことである。

Vis は、オランダにおいて林業の機械化が進んだことにより、生産コストを主伐時で 70% まで、間伐時で 66% まで、それぞれ低減できたものの、これまで木材とパルプ材以外の低質材の需要がなかったこともあり、森林バイオマスのエネルギー利用にとって格好の機会となっていると報告している。システムはデンマークに類似しているが、主伐時の林地残材も収穫の対象となるとしている。

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、作業土場で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”方法のみが黒字となる、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) においては、残材を丸太のような形状に圧縮整形し (この状態のものを “ベール (bale)” と呼ぶ。“バンドル (bundle)”, あるいは “composite residue log (CRL)” と呼ぶ場合もある), 丸太と同様の取り扱いを可能にするベラー、ならびに早期間伐時に、複数の小径木を同時に伐倒することが可能な multi-tree felling head の開発・実証試験が実施された。また収穫システムについては、林内においてハーベスタで造材し、フォワードで丸太を集材した後に森林バイオマスを収穫するシステム、あるいは全木集材作業システムにおいて、林道端で造材した後に森林バイオマスを輸送するシステムが、主な検討対象となった。これらのシステム (two-pass system と位置付けられる) については、残材を粉碎する場所により、システムを数種類に分類することが可能である。

このプロジェクトの特徴として、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。例えば、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、スウェーデンの Andersson(4), Andersson *et al.*(5), Eriksson(23), イギリスの Hudson and Hudson(44, 45), Hunter *et al.*(46)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ーで輸送し、大形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。ただし Hudson and Hudson(45)は、ペーラーがまだ試験段階にあるとしながらも、輸送距離が長くなるほどペール化システムが低コストとなると分析している。またフィンランドの Asikainen and Kuitto(9)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。一方 multi-tree felling head については、Andersson と Eriksson が試験報告をしており、従来はチェーンソーで行われてきた早期間伐作業の機械化により、生産性が向上して低コスト化が期待され、早期間伐材のエネルギー利用も可能になるとしている。

なお、Task 18 は 2002 年に総括されている(82)が、2001 年から 3 年計画で、“Conventional Forestry Systems for Sustainable Production of Bioenergy (IEA Bioenergy Task 31)” というテーマのもとでプロジェクトが継続されている。

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われている。対象となる森林バイオマスとしては、林内に散在した状態にある末木や枝条などの林地残材、ならびに早期間伐時に発生する小径木が中心となる。

カナダの Desrochers *et al.*(19)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においては、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 *et al.*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い、これを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、チップ

を搭載したトラックで粉砕するシステムと比較している。チップフォワーダによる林地残材の粉砕・収集に関する同様の検討については、フィンランドの Asikainen and Pulkkinen(10)も実施しているが、いずれの検討においても、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.*(36)は、林地残材と土場集積残材について、チップ化作業（チップフォワーダの導入を含む）の場所別の収穫コストを比較し、チップ化コストのスケールメリットが大きいために、林地残材、土場集積残材のいずれの場合においても、残材のままエネルギープラントまで輸送し、大形チップで集中的に粉砕するシステムが最も低コストとなると報告している。

フィンランドの Malinen *et al.*(59)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っている。フィンランドにおいては、林地残材のエネルギー利用が進んでおり、残材の収穫のマニュアル(1)も作成されている。

早期間伐時の小径木については、スペインの Delgado and Giraldo(18)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砕コストは、それぞれ 1.45 ペセタ/kg、2.45 ペセタ/kg（含水率 15%。ただし全量基準）という結果が得られたと報告している。

スウェーデンの Sennblad(94)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、主伐時およ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。Sennblad は、小規模経営者向けに、早期間伐から主伐に至るまでの、森林バイオマスの収穫に関するスケジュールを提案し(95)、この点についてフォローしている。

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 Faaij *et al.*(24)は、各種バイオマスのガス化複合発電のコスト収支およ

び環境影響に関するシステム評価において、ポプラの間伐材を対象としている。Faaij *et al.* は、オランダにおいては、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ですが、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（含水率 50%。ただし全量基準）となると報告している。

またフィンランドのKorpilahti(54)は、林地残材の収穫システムの収集、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 kgCO₂/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、石炭および石油の二酸化炭素排出量が、それぞれ 341 kgCO₂/MWh, 304 kgCO₂/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。

一方スウェーデンのHektor(40)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、トータル（生産からエネルギー利用まで）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。二酸化炭素排出量に課せられる炭素税が1997年に強化されたことにより、バイオマスの方がコスト的に有利となると分析している。森林バイオマスについては、間伐時の全木材、主伐時の林地残材、ならびに短伐期林業によるヤナギ (*Salix*) を対象としているが、いずれの場合においても、育林からエネルギー利用までの二酸化炭素排出量を考慮しているという点において、上記Korpilahtiの検討よりも広い範囲をカバーした分析といえよう。

ライフサイクルアセスメント (LCA) は、システムにおけるエネルギー収支、二酸化炭素をはじめとする各種温室効果ガスの排出量や環境へ及ぼす影響を、総合的に評価する手法である。上記Hektorの検討も、LCA的な考え方に基づいたものであるといえるが、この手法を用いて、バイオマスの生産からエネルギー利用までのトータルシステムを評価する検討(11～15, 30, 33)が、近年活発に行われている。

まず、スウェーデンのBörjessonとGustavssonらによる一連の検討(12, 13, 15, 33)においては、各種バイオマスの生産からエネルギー利用までのエネルギー収支、ならびに二酸化炭素等各種温室効果ガスの排出量が、化学肥料、各工程で使用される機械、プラント建設および解体などシステムの外部から投入されるエネルギーを可能な限り考慮することにより、包括的に求められている。Gustavsson *et al.*(33)は、化石資源の代替エネルギーとして

の各種バイオマスによる発電，熱電併給，ボイラー利用，エタノール製造を目的としたプラントの投資コストと運転コストを算出し，二酸化炭素排出量削減の費用対効果について評価している。また Börjesson and Gustavsson(15)は，スウェーデンにおける地域内のバイオマスのエネルギー利用に関する検討において，主伐時および間伐時の林地残材の収穫コストが，1970年代に比べ約70%減少したことにより，現在ではバイオマスの中で最も低コストで調達することが可能となったとし，林業が盛んな地域であれば，絶乾重量で年間約30万トン消費する大規模発電プラントの平均輸送距離が42 kmであり，2015年には30 kmにまで短縮されると見積もっている。さらに Börjesson は，各種バイオマスの生産から輸送までのエネルギー収支を分析し，主伐時および間伐時の林地残材と藁が，エネルギー作物や短伐期林業のヤナギに比べ，非常にエネルギー効率が高くなるとしている(12, 13)。

スウェーデンの Boman and Turnbull(11)は，アメリカ合衆国の電力研究所 (EPRI) とエネルギー省 (USDOE) の支援を受け，合衆国において，発電用の燃料を石炭からバイオマスに代替した場合の二酸化炭素排出量の削減効果について，4つのケーススタディをLCA的に評価している。対象となったバイオマスは，エネルギー作物(ヤナギを含む)，主伐時および間伐時の林地残材，製材廃材であった。またバイオマスの発電技術として，ガス化複合発電を対象としたため，システムとしては大規模なものであったが，それでもコスト面および環境への影響の面において許容できるトラック輸送距離は80 kmであるとしている。Boman and Turnbull は，いずれのケースにおいても，石炭をバイオマスで代替することにより，二酸化炭素排出量の95%を削減することが可能であると分析している。

上記 Boman and Turnbull の検討のように，例えば二酸化炭素などある特定の対象についてLCA的に評価する手法をライフサイクルインベントリ(LCI)分析といい，LCAの中の一手法として位置付けられている。スウェーデンの Forsberg(30)は，森林バイオマスをスウェーデンからオランダまで輸出し，電力として利用するシステムに対して，その輸出形態別にLCI分析を行っている。森林バイオマスの形態としては，ツリーセクション，林地残材をペレット化，ベール化，チップ化したもの，スウェーデン国内で発電した電力の5種類を対象としている。Forsberg は，ベール化，ペレット化，チップ化といった前処理，収集・輸送，貯蔵，ならびにエネルギー変換の各工程について詳細に分析した上で，エネルギー収支および二酸化炭素排出量の観点から見た場合でも，森林バイオマスを燃料とする電力が，輸出の対象となり得ると結論している。

末木や枝条は，本来は森林土壌の養分となるものであるため，エネルギー利用を目的と

して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る。北欧諸国ではこの方面の研究も盛んに行われており、既にスウェーデンの Lundborg がレビューをまとめている(56)。また Lundborg 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い(57)、このうち有機物については、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へ還元することにより、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。またスウェーデンの Börjesson(14)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。

なお、短伐期林業における森林バイオマスの収穫については、chain flail technology によるパルプ用のクリーンなチップと燃料用チップの選別(38, 101)、小径木の全木材のチップ化、ならびにベール化機械の開発(25)、イタリアにおける全木集材システムを対象とした、スキッドとフロントエンドローダの性能比較(99)やチップ化作業の実態調査(100)などが検討されている。

2.3 わが国における研究の経過

わが国においては、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われた。このうち森林バイオマスの収穫を対象としたものとしては、次の4つのプロジェクトが挙げられる。

(1) 森林資源の有効利用システムの研究開発

“環境保全、資源有効利用システム技術開発事業”の一環として実施されたこのプロジェクト(71, 72)では、林内での伐倒、造材といった従来型の林業における、林内に散在した末木や枝条が対象となった。昭和53年度の報告では、林地残材の収穫システムとして、残材は傾斜を利用して引き出す、あるいはロープを用いて林道や作業道まで引き出すなど、

森林の地形に応じた費用の安い簡易な方法で収集することが提案されている。また残材のままでは嵩張るので、チップ化もしくは圧縮により、輸送コストの低減を図ることが必要であるとされている。続く昭和54年度には、宮崎県をモデル地域として、作業道から50m以内の除伐材を小型ウインチもしくは人力により、林道から500m以内の間伐材を簡易架線により、主伐材を通常の架線によりそれぞれ集材する場合において、いずれも林地残材も収集することを考慮した実証試験が実施された。報告では、輸送システムとして、林道端で小型チップで粉碎し、4トントラックを用いることが提案され、その輸送距離は20km以内が適切であるとされている。

(2) 林野庁委託事業・農林水産省補助事業

この事業(68~70)においては、猪内ら(98)が、集材機による除間伐材の全幹集材およびトラックによる全幹材の輸送、パルプ材や薪炭材にもならない低質広葉樹材のトラクタによる全幹集材、山元でのチップ化の3つの試験を実施している。猪内らは、除間伐材の全幹集材および全幹材の運材試験により、全幹材の運材が、玉切りされた丸太を運材するよりも低コストで実施できることを明らかにした上で、エネルギー利用を目的とした低質広葉樹材も、全幹集材することで、コスト的に収穫が可能になると分析している。また山元でのチップ化試験については、チップ工場でのチップ化よりも低コストで実施できると試算している。

(3) 文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究(エネルギー)

このプロジェクト(49~51)においては、まず山本ら(114)が、林地残材および小径間伐材の収集・粉碎機械(自走式架線集材機)を開発し、1m³の木材を収集・粉碎するのに1.1時間を要したという試験結果を得ている。またMiyazaki(62)は、林地残材および未利用除間伐材の集材方法として、架線、簡易架線、シュートを用いた場合の収穫コストを試算している。しかしながら、全木集材システムの場合に末木や枝条が集中的に確保できることと比較すると、残材や間伐材を単独で集材しての利用は、コスト的に相当厳しいと結論している。一方南方(60,61)は、林地残材の収穫のためには全木集材システムが不可欠であるとし、さらに従来型のチェーンソーによる伐木造材作業の低生産性を克服する必要があることを強調した。具体的には、緩傾斜地にはスキッド、急傾斜地にはタワーヤードを導入して全木集材を行い、全木材をプロセッサにより集中的に造材するシステムの導入が急務であるとした。

(4) バイオマス変換計画

農林水産省大型別枠研究として、昭和 56 年度より 10 年計画で実施されたものであり、農学分野におけるバイオマス関連のプロジェクトとしては最も大きなものとなった。このプロジェクトでは、森林バイオマスの収穫については、全木集材を対象とすることが前提となっていた。昭和 58 年度の調査(83)では、全木集材に関する文献調査により全木集材方式の得失が検討された上で、ヒノキの全木集材、枝条量の調査、ならびに枝条のチップ化の各試験が実施され、枝条の層積が 1 m³あたり 177 kg と非常に嵩張る測定結果が得られたこと、チップ化コストが 393 円 / m³ と試算されたことなどが報告されている。続く昭和 59 年度の調査(84)では、全国の林地残材発生量が年間の素材生産量から推計され、架線集材作業に占める全木集材の割合をもとに、残材の経済的利用可能量が試算された。また、広葉樹の全木集材と全幹集材の作業能率の比較に関する試験が行われ、全木集材における作業能率が、全幹集材の場合と比較しても低下することはないということが実証された。また、林野庁の林業機械開発改良事業により開発された木材破砕車によるチップ化試験が実施され、ブナとホホの残材のチップ化コストが、絶乾重量で 1 kg あたり 5.64 ~ 6.74 円と試算された。

1980 年代を中心に取り組まれた上記 4 つのプロジェクトのうち、例えば、農学分野においては最も大きなものとなったバイオマス変換計画は 1991 年に総括されており(74)、各種バイオマスについて、それぞれ一定の成果が得られたことが報告されている。しかしながら、バイオマス変換計画を含めオイルショックを契機として進められたバイオマス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、得られた成果の多くは、経済性を克服できず、原油価格が再び安値で安定したことにより普及するまでには至らなかったといわれている(97)。

しかしながら、地球規模での温暖化問題の顕在化や京都議定書における温室効果ガス排出量の削減目標などを背景に、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、近年再び高まりつつある。そしてバイオマスの中でも、木質バイオマスはとりわけ注目度が高い。これは、資源量が豊富であることだけでなく、そのエネルギー利用が、わが国では長い間不振の続く林業・製材業を基盤とする中山間地域の活性化、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。

そのような中で、林野庁は、バイオマス資源の利用手法に関する調査を、平成 11 年度より 3 年計画のプロジェクトとして開始した。森林バイオマスの生産手法について検討した 1 年目の取り組み(90)においては、スギ人工林の皆伐施業地と列状間伐施業地を対象とした。検討では、全木集材、プロセッサ造材、フォワーダ小運搬、トラック輸送という作業システムを対象に、プロセッサ造材時に発生する末木・枝条を、そのまま輸送する場合、チップ化して輸送する場合、ベール化して輸送する場合の 3 つのケースにおける収穫コストが試算され、ベール化して輸送するシステムが最も低コストとなる結果が得られたことが報告されている。

またわが国においても、温室効果ガス排出量の削減の観点から、エネルギーシステムを化石資源ベースからバイオマスベースへ移行させた場合の二酸化炭素排出量の削減可能性を、LCA 的に評価する検討(20~22, 105)が多く行われている。いずれの検討においても、対象となるバイオマスが、海外におけるプランテーションからの森林バイオマスではあるものの、持続的な生産を考慮した植林からエネルギー利用までのトータルシステムが定量的に評価されることにより、バイオマスベースのシステムにおける単位エネルギーあたりの二酸化炭素排出量が、化石資源ベースの場合と比較して、オーダーで見ても小さくなることが明らかにされている。

2.4 考察

わが国におけるバイオマスに関する研究の問題点として、まず、オイルショックを契機に進められた研究が、原油価格が再び安値で安定するとともに打ち切られてしまったことにより、例えば末木や枝条などの林地残材の収穫については、従来型の集材作業システムを対象とした個別の検討でストップしており、近年の高性能林業機械化が進んだシステムに対しては検討が行われていない点が挙げられる。このことは、諸外国の方がわが国よりも林業の機械化が早く進んだ事情があるにせよ、諸外国において、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を対象とした研究が実施されてきた結果、林地残材のエネルギー利用が既の実現していることと比較すると、わが国の現状が相当遅れていることを如実に表しているといえよう。

この問題を解決するためには、まず、高性能林業機械による作業システムにおいて、残材を収穫することを検討する必要がある。具体的には、前節でプロセッサ作業土場に短時間に大量の残材が発生することが問題となっていることを述べたが、このような木材生産

システムの中で、フォワーダで残材を運び出すことが可能かどうかといったことも1つの検討課題となろう。次に、残材のエネルギー利用の実現へ向け、エネルギー変換プラントへバイオマスを粉碎した状態で供給する状況を想定し、諸外国において実施されているような、システムのどの工程で粉碎作業を行うか、さらに圧縮により林内運搬・輸送工程の積載効率がどの程度向上するかといった課題に取り組むことにより、最適な低コスト収穫システムを構築する必要がある。

またわが国においても、近年の地球規模での温暖化問題への関心の高まりを背景に、温室効果ガス排出量削減の観点から、バイオマスベースのエネルギーシステムに対するシステム評価が行われているが、いずれも海外におけるプランテーションによる森林バイオマスを対象としたものであり、国内の林業を対象としたものは存在しない。わが国の林業を対象とした林地残材の収穫システムに対しても、エネルギー収支および二酸化炭素排出量の観点からシステム評価を行い、環境へ与える影響の面から見た場合に、化石燃料に対してバイオマスが有利であることを実証することにより、林地残材のエネルギー利用を契機とした日本林業の活性化の一助とする必要がある。

一方、森林に由来するバイオマスとしては、林地残材の他に間伐材、広葉樹があり、前出の表-1.1 を見ても、両者のエネルギーポテンシャルは大きい。ここでわが国における森林由来のバイオマス資源の現状を見ておきたい。

表-1.1 における林地残材のデータは年間伐採量 2,900 万 m^3 に基づいたものであるが、この数値を差し引いても、国内の森林蓄積量は 1,000 万haの人工林を中心に毎年 6,900 万 m^3 の割合で増加している状態にある。間伐材について見てみると、年間伐採量には、伐採されたもののコスト的に見合わずに林地に放置されているものが少なからず含まれており、また蓄積増加量については、そのほとんどが戦後の拡大造林の時期に植林された針葉樹・人工林の成長によるものであり、さらにその多くに間伐の時期を迎えた林分が該当することは容易に想像できよう。したがって、将来的な林地残材および間伐材のエネルギー利用可能量は、再生可能エネルギーとしての木質バイオマスが注目を浴び、適正な管理のもとで森林伐採が推進された場合、現状の合計 800 万dry-t / 年よりも大幅に増加することが予想される（ただし、間伐材の利用については、ここでは現在の市場価値を考慮して、全量をエネルギー利用することが可能という仮定を置いたが、一方で、いわゆる“カスケード利用”の観点からは好ましくないという意見もあり、別途議論する必要がある）。

広葉樹も 900 万 dry-t / 年と大きいエネルギーポテンシャルを示す。もともと薪炭林は定

期的に人手が加わることにより、その豊かな生態系が維持されていた。現在利用されず放置された状態にあり、荒廃しつつあるこの広葉樹林を、新たにエネルギー利用を目的とした周期的な伐採のもとで管理することにより、かつての“里山”の生態系を復元することも可能ではないかと考える。

間伐材と広葉樹については、経済的価値を有さないためにその利用がほとんどなされていないというのがわが国における現状であることから 諸外国で 1970～80 年代に検討されたような、エネルギー利用に特化した全木材のチップ化システムを導入して大幅にコストダウンを図ることも、森林整備をも視野に入れた 1 つの方法として考えられる。この場合、林地残材に加えて間伐材、広葉樹も利用可能となるため、地域における森林バイオマス資源のエネルギー利用が現実味を帯びてくる。その際には、地域で実現できるエネルギー変換プラントの規模を決定するために、コスト別に利用可能な資源量の把握が必須となる。

3. 本研究の目的と構成

前節までに概観したわが国の現状および国内外の研究経過をまとめると、わが国においては木質バイオマスのエネルギー利用が進んでいないが、これについては、実用化段階にある木質バイオマスのエネルギー変換技術に比べ、広い範囲に分散しているバイオマスを低コストで収集・輸送することが可能な技術が未確立であることが、大きな原因の1つとして挙げられる。森林バイオマスについて見ると、諸外国では機械化集材作業システムにおける林地残材、間伐材等の収穫に関する様々な検討が継続して行われてきたことが、エネルギー資源としての森林バイオマスの地位向上へと繋がっていることとは対照的に、わが国では収穫や利用の検討すら行われず、造材時に発生する末木や枝条は廃棄物とされ、間伐材は集材されず林内に放置されるにまで至っている。わが国においても、近年の地球規模での温暖化問題に対する関心の高まりを背景に、森林バイオマスのエネルギー利用への気運が高まっているにもかかわらず、果たして収穫することができるのか、収穫できる場合のコスト、エネルギーの面から見た効率、地域で利用する際に一体どの程度の資源量をどの程度のコストで調達できるのか、といったことが全く把握されていない状況にある。これらの問題が解決されないことには、森林バイオマスのエネルギー利用を実現することは大変難しいといえよう。

3.1 本研究の目的

本研究は以上の状況を踏まえ、機械化集材作業システムにおける森林バイオマス収穫の可否を確認した上で森林バイオマス資源収穫システムを構築し、その可能性について収穫コスト、エネルギー収支、二酸化炭素排出量の面から検討を行い、また地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用した場合の、エネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係について、モデル地域を対象とした評価を行うことにより、わが国での収穫システムの可能性に関する検討材料とするとともに、わが国における森林バイオマスのエネルギー利用の実現に資することを目的とする。

3.2 本研究の構成

まず第2章では、造材作業時に発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス運搬工程の導入可能性について、現地実験に基づいた検討を行うことにより、機械化集材作業システムにおける森林バイオマス収穫の可否を確認する。

第3章では、森林バイオマスのエネルギー利用の進んでいるヨーロッパ諸国の事例を参考に森林バイオマス資源収穫システムを構築する。そして森林バイオマス収穫専用車両による現地実験に基づき、わが国におけるシステムの可能性を収穫コストおよびエネルギー収支の観点から評価を行い、最適な低コスト収穫システムを検討するとともに、ヨーロッパ諸国との比較により考察する。

第4章では、第3章で構築した低コスト収穫システムでのエネルギー生産を想定した場合の、エネルギーシステムとしての評価を行う。すなわち、ライフサイクルインベントリ(LCI)分析手法を用いて、森林バイオマスのトータルのライフサイクルにおけるエネルギー収支および二酸化炭素排出量を算出し、化石燃料および再生可能エネルギーの場合と比較することにより、エネルギー資源としての森林バイオマスの位置付けを議論する。

一方、わが国の林業では長い間不振が続いているが、その中には高性能林業機械を導入できないために木材生産のコストダウンを図れない地域も少なくない。そのような地域においては、森林の荒廃も進行しつつあることが予想される。そこで第5章では、地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用した場合の、地域における森林バイオマスのエネルギー利用の可能性について、モデル地域を対象に、1年間にエネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係を分析することにより検討を行う。ここでは地域の森林整備も視野に入れ、林地残材に加え間伐材、広葉樹を森林バイオマス資源と位置付け、地域の森林資源の分布状況や地形傾斜、林道・一般道の配置などについて正確に把握することにより、地域の実状に即した現実的な評価を行う。

最後に第6章において、本研究で構築した森林バイオマス資源収穫システムのわが国における可能性について結論としてまとめるとともに、わが国における森林バイオマスのエネルギー利用の実現へ向けての展望を述べることにより、本研究を総括する。

第2章 木材生産システムへの森林バイオマス資源運搬工程の導入

1. 概要

造材作業時に発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス資源運搬工程の導入可能性を検討した。すなわち、新たなエネルギー資源としての林地残材の収穫システムを構築することを目的として、まず“プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム”を構築し、“森林バイオマス運搬指数”と森林バイオマス運搬時の“エネルギー投入率” p (%)を、森林バイオマスをエネルギーとして利用する可能性の指標とした。現地実験をもとに分析した結果、フォワーダの1日の運材材積 E_F (m^3 /日)と p はフォワーダの運材距離 L (m)の関数として表され、またプロセッサの生産性 E_p (m^3 /日)と L から p を求めることが可能となった。実験を行った現場においては、 p が0.95であったことから、生産される森林バイオマスのほぼ全てを運搬可能であり、また p が1%にも達しなかったことから、エネルギー収支の観点からは森林バイオマスのエネルギー利用は十分可能であることが確認された。絶乾状態の森林バイオマスの単位重量あたり運搬コストが15.4円/kgと計算されたことから、フォワーダの運搬効率を向上させることにより、運搬コストを低減する必要があることが示された。

2. プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム

2.1 システムの概要

本章では、造材作業時に発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス資源運搬工程の導入可能性を検討する。すなわち、新たなエネルギー資源としての林地残材の収穫システムを構築することを目的として、まず Sundberg and Silversides の提案(104)に基づき、フォワーダが森林バイオマスを運搬する“プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム”を構築した(図-2.1)。このシステムは、全木集材、プロセッサによる造材、フォワーダによる林内のプロセッサ作業土場から林道端土場までの作業路上の丸太および森林バイオマスの運搬から構成される。

Sundberg and Silversides の提案は、ハーベスタとフォワーダを組み合わせた木材生産システムにおいて、森林バイオマスの収穫にフォワーダを用いている点で、本章で対象とするシステムと異なる。“プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム”は、わが国のように、ハーベスタが進入できない急峻で高密度の路網を必要とする地形に適している。このようなタイプの森林バイオマス資源収穫システムの可能性を検討すべく、プロセッサおよびフォワーダに関する各種作業の理論功程式について、既往の研究(91, 92)をもとに構築した。(2.1)式から(2.15)式までの理論功程式を構成する変数とその説明を表-2.1 に示す。

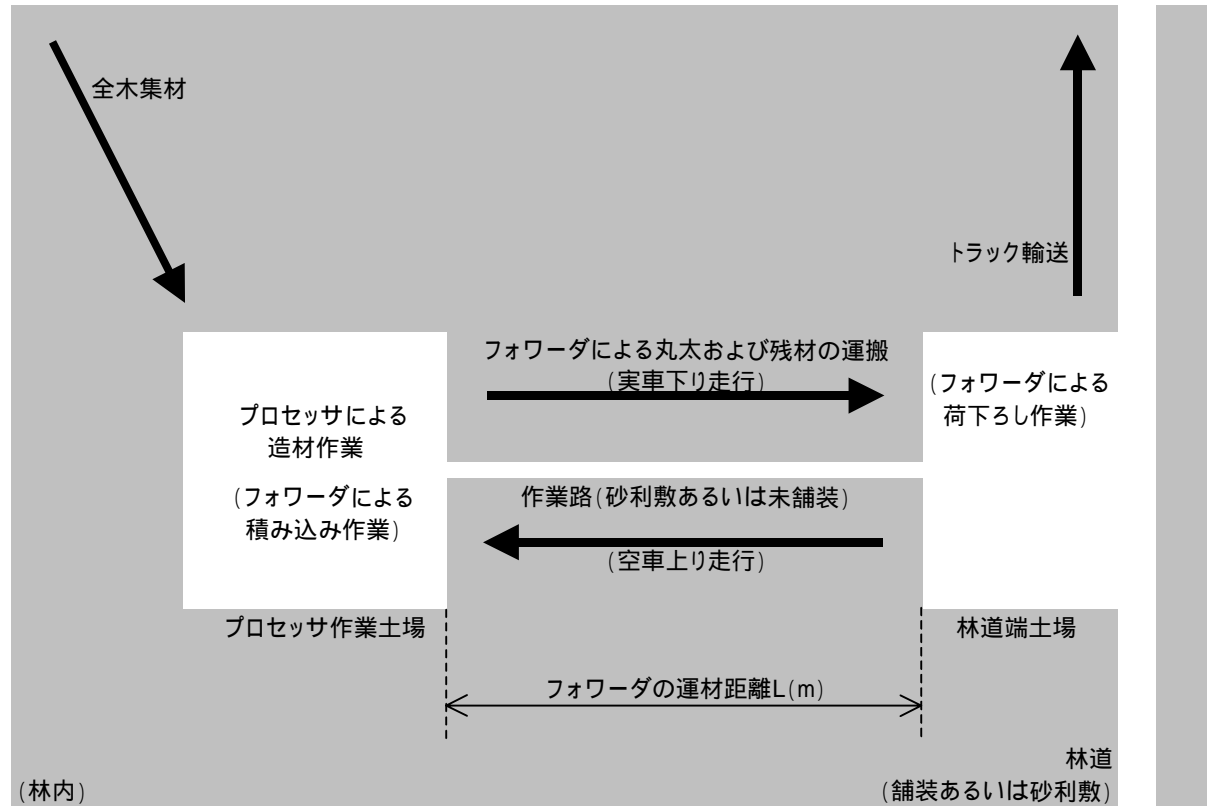


図-2.1 プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム

表-2.1 理論方程式 ((2.1)式 ~ (2.15)式) を構成する変数とその説明

項目	変数
プロセッサの生産性 ($\text{m}^3/\text{日}$)	E_P
プロセッサ造材作業に関する修正係数 ¹	C_P
プロセッサ造材作業の1日の実働時間 (時/日)	D_P
1本の全木材からの丸太生産量 ($\text{m}^3/\text{本}$)	V_P
プロセッサ造材作業のサイクルタイム (秒/本)	CT_P
プロセッサ造材作業により1日に生産される森林バイオマス量 ($\text{kg}/\text{日}$) ²	E_{PS}
1本の全木材からの森林バイオマス生産量 ($\text{kg}/\text{本}$)	W_P
フォワーダにより1日に運搬される丸太材積 ($\text{m}^3/\text{日}$)	E_F
フォワーダ運材作業に関する修正係数 ¹	C_F
フォワーダ運材作業の1日の実働時間 (時/日)	D_F
1サイクルあたりの丸太運搬量 ($\text{m}^3/\text{回}$)	V_F
フォワーダ運材作業のサイクルタイム (秒/回)	CT_F
運材距離 (m)	L
走行速度 (m/秒)	
実車下り走行	v_1
空車上り走行	v_2
作業時間 (秒)	
積み込み作業	T_L
荷下ろし作業	T_U
フォワーダにより1日に運搬される森林バイオマス量 ($\text{kg}/\text{日}$) ²	E_{FS}
フォワーダによる森林バイオマス運搬作業に関する修正係数 ¹	C_{FS}
フォワーダによる森林バイオマス運搬作業の1日の実働時間 (時/日)	D_{FS}
1サイクルあたりの森林バイオマス運搬量 ($\text{kg}/\text{回}$)	W_{FS}
フォワーダによる森林バイオマス運搬作業のサイクルタイム (秒/回)	CT_{FS}
作業時間 (秒)	
積み込み作業	T_{LS}
荷下ろし作業	T_{US}
森林バイオマスの運搬作業による消費エネルギー ($\text{MJ}/\text{日}$)	H_{FS}
燃料の単位容積あたりの熱量換算値 (MJ/dm^3)	u_{FS}
フォワーダによる森林バイオマス運搬作業の1日の燃料消費量 ($\text{cm}^3/\text{日}$)	F_{FS}
フォワーダによる森林バイオマス運搬作業の1サイクルあたり燃料消費量 ($\text{cm}^3/\text{回}$)	CF_{FS}
作業時間あたりの燃料消費量 ($\text{cm}^3/\text{秒}$)	
実車下り走行	a_1
空車上り走行	a_2
積み込み作業	a_{LS}
荷下ろし作業	a_{US}
森林バイオマスの運搬作業による獲得エネルギー ($\text{MJ}/\text{日}$) ²	H_S
森林バイオマスの単位重量あたりエネルギーの熱量換算値 (MJ/kg)	u_S
森林バイオマスの単位重量あたりの運搬コスト ($\text{円}/\text{kg}$) ²	CW_{FS}
森林バイオマス運搬作業の1日あたり運搬コスト ($\text{円}/\text{日}$)	C_{FS}
単位時間あたりコスト ($\text{円}/\text{時}$)	
労務経費	P
機械損料	M
燃料油脂費	F
生産される丸太材積に対する森林バイオマス重量の割合 (kg/m^3) ²	k
丸太の比重 (kg/m^3)	mk
全木材に占める重量の割合 (%)	
末木	r_1
枝条	r_2
その他	r_3

¹修正係数 C_P , C_F , C_{FS} は、プロセッサに関する作業能率 E_P , E_{PS} , ならびにフォワーダに関する作業能率 E_F , E_{FS} を、機械の稼働率や造材歩止り、フォワーダの積載量などに応じて修正するための係数である。

²本章では、森林バイオマスの有する潜在的なエネルギーを評価するため、バイオマスの重量に関しては絶乾状態で表すものとする。

2.2 システムの構成および分析方法

2.2.1 プロセッサによる造材作業

プロセッサの1日の丸太生産量 E_P (m^3 /日)および森林バイオマス生産量 E_{PS} (kg /日)は、次式により表される。

$$E_P = 3600 \cdot c_P \cdot D_P \cdot V_P / CT_P \quad (2.1)$$

$$E_{PS} = 3600 \cdot c_P \cdot D_P \cdot W_P / CT_P \quad (2.2)$$

2.2.2 フォワーダによる丸太および森林バイオマス資源の運搬作業

フォワーダにより、林内のプロセッサ作業土場から林道端土場まで1日に運搬される丸太材積 E_F (m^3 /日)および森林バイオマス量 E_{FS} (kg /日)は、次式により表される。

$$E_F = 3600 \cdot c_F \cdot D_F \cdot V_F / CT_F \quad (2.3)$$

$$E_{FS} = 3600 \cdot c_{FS} \cdot D_{FS} \cdot W_{FS} / CT_{FS} \quad (2.4)$$

フォワーダ作業の1サイクルは、プロセッサ作業土場での積み込み、作業路上の実車下り走行、林道端土場での荷下ろし、作業路上の空車上り走行の4つの工程から構成される。したがって、丸太運搬作業のサイクルタイム CT_F (秒/回)および森林バイオマス運搬作業のサイクルタイム CT_{FS} (秒/回)は、次式により表される。

$$CT_F = L \cdot (1/v_1 + 1/v_2) + T_L + T_U \quad (2.5)$$

$$CT_{FS} = L \cdot (1/v_1 + 1/v_2) + T_{LS} + T_{US} \quad (2.6)$$

2.2.3 エネルギー消費

バイオマスの収穫に要するエネルギーが、バイオマスの有するエネルギーよりも多くなってしまふような場合、それはバイオマスを収穫することが効率的ではないことを意味する。木材をアルコール化する場合において、アルコールを生産するために投入したエネルギーが、アルコールから得られるエネルギーの数倍にも達してしまうという報告(96)もあることから、森林バイオマスの運搬作業を検討するにあたっては、燃料消費量およびエネルギー収支を注意深く評価する必要がある。

森林バイオマス運搬時の投入エネルギー H_{FS} (MJ /日)を、森林バイオマスの運搬作業によるフォワーダの1日の燃料消費量 F_{FS} (cm^3 /日)を熱量換算したものとすれば、 H_{FS} および F_{FS} は、それぞれ次式により表される。

$$H_{FS} = u_{FS} \cdot (F_{FS} / 1000) \quad (2.7)$$

$$F_{FS} = 3600 \cdot c_{FS} \cdot D_{FS} \cdot CF_{FS} / CT_{FS} \quad (2.8)$$

フォワーダによる森林バイオマス運搬作業時の1サイクルあたりの燃料消費量 CF_{FS} (cm^3 /回)は、積み込み、実車走行、荷下ろし、空車走行の各工程における燃料消費量がそれぞれの作業時間に比例するものとして、次式により表される。

$$CF_{FS} = a_1 \cdot L / v_1 + a_2 \cdot L / v_2 + a_{LS} \cdot T_{LS} + a_{US} \cdot T_{US} \quad (2.9)$$

木材の熱量については、木材の含水率が高いほど、木材の単位重量あたりの熱量が低下する(88)。しかしながら本章では、森林バイオマスの絶乾重量を熱量換算することにより、森林バイオマスの有する潜在的なエネルギーとして評価するものとする。したがって、森林バイオマスの有するエネルギー H_S (MJ/日)は、フォワーダの1日の森林バイオマス運搬量 E_{FS} を熱量換算したのものとして、次式により表される。

$$H_S = u_S \cdot E_{FS} \quad (2.10)$$

以上より、森林バイオマス運搬時のエネルギー収支 p (%)は、次式により表される。

$$p = (H_{FS} / H_S) \cdot 100 \quad (2.11)$$

本章においては、 p を森林バイオマス運搬時の“エネルギー投入率”と定義する。 p が100%を超えてしまう、すなわちエネルギー収支がマイナスになってしまう場合、森林バイオマスをエネルギー資源として収穫することは効率的ではないものとなる。

2.2.4 森林バイオマス資源の運搬コスト

森林バイオマスの単位重量あたりの運搬コスト CW_{FS} (円/kg)、ならびに1日の運搬コスト C_{FS} (円/日)は、それぞれ次式により表される。

$$CW_{FS} = C_{FS} / E_{FS} \quad (2.12)$$

$$C_{FS} = (P + M + F) \cdot D_{FS} \quad (2.13)$$

本章で検討するシステムでは、全木集材が対象となっているが、全木集材方式においては、集材距離が長いほど集材作業のコストや燃料消費量が増加することが予想される。しかしながらここでは、全木集材を、末木や枝条などの森林バイオマスが幹に付属して集材される方式とみなし、森林バイオマスの運搬コストおよびエネルギー消費には、プロセッサ作業土場までの集材コストとエネルギー消費は考慮しないものとする。

2.2.5 森林バイオマス資源の重量

全木1本あたりの森林バイオマスの重量 W_P (kg/本)が、全木1本あたりの幹材積 V_P (m^3 /本)に比例するものとするれば、 W_P は k (kg/ m^3)を比例定数として、次式により表される。

$$W_P = k \cdot V_P \quad (2.14)$$

k は生産される丸太材積に対する、発生する残材重量の割合と解釈できるので、 k は樹種によって固有の数値を有すると考えられる。また林野庁が実施した、わが国における林地残材の年間発生量の推計調査(84)においては、残材は“末木”、“枝条”および“その他”に分類されていた。本章では、プロセッサ造材作業時に発生する残材を収穫の対象とするため、森林バイオマスとして末木と枝条を考慮に入れる必要があり、したがって k は次式により表される。

$$k = mk \cdot (r_1 + r_2) / \{100 - (r_1 + r_2 + r_3)\} \quad (2.15)$$

3. 現地実験

前節で構築した理論功程式を，実際の林業の現場に適用することを目的として，宮城県登米町森林組合の間伐作業現場において現地実験を実施した（表-2.2）。表-2.2 では作業の予定時期が7月22日～8月12日となっているが，間伐材は葉枯らし乾燥を目的として，同年の春先には既に伐倒されていた。

現場の作業システムは，スキッドによる全木集材，プロセッサ（NIAB，スウェーデン）による造材，フォワーダ（RMF-CH，及川自動車（株））による作業路上の運材という構成であった。機械1台にオペレータが1人ずつ配置され，2台のチェーンソーが補助的に使用されていた。

プロセッサによる造材作業とフォワーダによる運材作業については，時間観測を行い，丸太の処理材積を測定した。またフォワーダによる森林バイオマス運搬実験を行い（図-2.2），作業時間，運搬した森林バイオマスの重量，各作業工程における燃料消費量を測定するとともに，フォワーダの走行速度，運搬距離を計測した。



図-2.2 フォワーダによる森林バイオマス運搬実験

表-2.2 実験対象地の概要

項目	実験対象地
対象地名	宮城県登米郡登米町町有林 29 林班イ 2, 3 小班
面積	1.30 ha
林種	人工林
樹種	スギ
林齢	55 年生
作業種	間伐
予定工期	平成 9 年 7 月 22 日から平成 9 年 8 月 12 日まで
作業人員	3 名
立木本数	772 本
ha あたり立木本数	594 本 / ha
材積	520.493 m ³
ha あたり材積	400.379 m ³ / ha
単木材積	0.876 m ³ / 本
間伐本数	390 本
本数間伐率	50.5%
間伐材積	273.259 m ³
材積間伐率	52.5%

4. 結果

現地実験より得られた結果を表-2.3 に示す。

表-2.3 実験結果

項目	結果
プロセッサ造材作業	
サイクルタイム CT_P (秒/本) ^{1,2}	830
1本の全木材からの丸太生産量 V_P (m ³ /本) ¹	1.20
1本の全木材からの森林バイオマス生産量 W_P (kg/本) ¹	45.7
フォワーダ運材作業	
作業時間 (秒) ¹	
積み込み作業 T_L	1080
荷下ろし作業 T_U	741
運材距離 L (m) ³	191.4
走行速度 (m/秒) ¹	
実車下り走行 v_1	0.67
空車上り走行 v_2	1.27
1サイクルあたりの丸太運搬量 V_F (m ³ /回) ¹	5.53
フォワーダによる森林バイオマス運搬作業	
作業時間 (秒) ⁴	
積み込み作業 T_{LS}	2238
荷下ろし作業 T_{US}	636
1サイクルあたりの森林バイオマス運搬量 W_{FS} (kg/回)	425.3
作業時間あたりの燃料消費量 (cm ³ /秒)	
積み込み作業 a_{LS}	0.47
荷下ろし作業 a_{US}	0.47
実車下り走行 a_1	0.94
空車上り走行 a_2	1.50

¹総観測値を観測回数で除することにより平均値で示した。

²総作業時間から休憩時間を引いた値である。

³実験現場におけるフォワーダの運材距離は、コンパス測量により求めた。

⁴実験のための準備時間を除いた値である。

4.1 プロセッサによる造材作業

作業の総観測時間は 12,445 秒で、プロセッサは 14 本の全木材を処理した。表-2.3 のプロセッサ造材作業に関する観測結果より、 $c_P = 1$ 、 $D_P = 6$ 時/日とした場合、(2.1)式のプロセッサによる 1 日の丸太生産量 E_P 、ならびに(2.2)式の森林バイオマス生産量 E_{PS} は、それぞれ $31.23 \text{ m}^3/\text{日}$ 、 $1,189 \text{ kg}/\text{日}$ と計算される。本章では、プロセッサ造材作業については、修正係数 c_P を 1 として“標準的な”作業が行われるものとした。すなわち“標準的な”作業が 1 日 6 時間行われた場合、プロセッサの生産性は $31.23 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、造材作業に伴って、森林バイオマスは絶乾重量で 1 日に $1,189 \text{ kg}$ 生産されることになる。

4.2 フォワーダによる運材作業

作業の総観測時間 8,590 秒の間に、3 サイクルの観測を行った。表-2.3 のフォワーダ運材作業に関する観測結果より、(2.5)式のフォワーダ運材作業のサイクルタイム CT_F (秒/回) は、次のように計算された。

$$CT_F = 2.28 \cdot L + 1821 \quad (2.16)$$

(2.16)式と表-2.3 より、(2.3)式のフォワーダによる 1 日の運材材積 E_F ($\text{m}^3/\text{日}$) は、次のように計算された。

$$E_F = 3600 \cdot c_F \cdot D_F \cdot 5.53 / (2.28 \cdot L + 1821) \quad (2.17)$$

4.3 フォワーダによる森林バイオマス資源の運搬実験

4.3.1 作業時間

実験時間 3,651 秒の間に、1 サイクルの観測を行った。表-2.3 のフォワーダによる森林バイオマス運搬作業に関する実験結果より、(2.6)式のフォワーダ森林バイオマス運搬作業のサイクルタイム CT_{FS} (秒/回) は、次のように計算された。

$$CT_{FS} = 2.28 \cdot L + 2874 \quad (2.18)$$

(2.18)式と表-2.3 より、(2.4)式のフォワーダによる 1 日の森林バイオマス運搬量 E_{FS} ($\text{kg}/\text{日}$) は、次のように計算された。

$$E_{FS} = 3600 \cdot c_{FS} \cdot D_{FS} \cdot 425.3 / (2.28 \cdot L + 2874) \quad (2.19)$$

4.3.2 燃料消費量

各作業工程における燃料(軽油)消費量を測定し、それを作業時間で除することにより、

単位時間あたりの燃料消費量を算出した(表-2.3 参照)。表-2.3 より, (2.9)式のフォワーダによる森林バイオマス運搬時の 1 サイクルあたり燃料消費量 CF_{FS} ($\text{cm}^3 / \text{回}$) は, 次のように計算された。

$$CF_{FS} = 2.58 \cdot L + 1351 \quad (2.20)$$

(2.18)式と(2.20)式より, (2.8)式の森林バイオマスの運搬作業によるフォワーダの 1 日の燃料消費量 F_{FS} ($\text{cm}^3 / \text{日}$) は, 次のように計算された。

$$F_{FS} = 3600 \cdot c_{FS} \cdot D_{FS} \cdot (2.58 \cdot L + 1351) / (2.28 \cdot L + 2874) \quad (2.21)$$

4.3.3 コスト計算

フォワーダによる森林バイオマス運搬時の燃料油脂費 F (円/時) は, 軽油価格を 80 円/ dm^3 , 油脂費の燃料費に対する割合を 0.2(91)とすれば, 次式により表される。

$$F = 9.6 \times 10^{-2} \cdot F_{FS} / D_{FS} \quad (2.22)$$

実験を行った現場では, 労務経費 P は 2,963 円/時であった。また機械損料 M は, 機械価格(85)と標準工期表(109)より 3,960 円/時と計算された。したがって, (2.22)式, $P = 2,963$ 円/時, $M = 3,960$ 円/時より, (2.13)式の森林バイオマスの運搬コスト C_{FS} (円/日) は, 次のように計算された。

$$C_{FS} = (6923 + 9.6 \times 10^{-2} \cdot F_{FS} / D_{FS}) \cdot D_{FS} \quad (2.23)$$

4.3.4 森林バイオマス資源の重量

本章では, 森林バイオマスの重量については絶乾重量で考えているが, 現地実験においては(葉枯らし乾燥のため伐倒後 2, 3 ヶ月間放置されてはいたものの)生材の重量を測定し, 含水率を求めた上で絶乾重量を算出した。5 本の丸太のサンプリングにより, 丸太の生材の比重が $485.7 \text{ kg} / \text{m}^3$ と計測されたため, 含水率を 50%と推定することにより(88), 実験現場におけるスギ丸太の絶乾比重 mk は $323.8 \text{ kg} / \text{m}^3$ と計算された。

現場では, 葉枯らし乾燥のため, 春先の伐倒作業の際に少量の枝払い作業も行われた。そのため, 実験時には全木に占める末木や枝条の重量の割合を正確に把握することができなかった。前出の林野庁が実施した, わが国における林地残材の年間発生量の推計調査においては, スギ全木材に占める末木重量の割合 $r_1 = 2\%$, 枝条重量の割合 $r_2 = 8\%$, その他残材の重量の割合 $r_3 = 5\%$ が, 推計の基礎数値として用いられていた。本章でもこれらの数値を用いるものとし, $mk = 323.8 \text{ kg} / \text{m}^3$, $r_1 = 2\%$, $r_2 = 8\%$, $r_3 = 5\%$ より, (2.15)式の生産される丸太材積に対する, 発生する残材重量の割合 k は $38.1 \text{ kg} / \text{m}^3$ と計算された。さらに $k = 38.1 \text{ kg} / \text{m}^3$ と表-2.3 より, (2.14)式の, 全木 1 本あたりの森林バイオマスの絶乾重量 W_p は 45.7 kg

/本と計算された。

実験においては、1 サイクルに運搬された森林バイオマスの生材重量は 638.0 kg と計測された。したがって森林バイオマスの含水率を丸太と同じく 50% とみなすことにより、1 サイクルあたりの森林バイオマス運搬量 W_{FS} は、絶乾重量で 425.3 kg / 回 と計算された。

5. 考察

5.1 プロセッサ・フォワーダ型森林バイオマス資源運搬システム

1人のオペレータがプロセッサ造材作業に従事し、もう1人のオペレータがフォワーダによる丸太および森林バイオマスの運搬作業に従事するものとすれば、プロセッサの1日の実働時間 D_P (時/日)、フォワーダ運材作業の1日の実働時間 D_F (時/日)、ならびに森林バイオマス運搬作業の1日の実働時間 D_{FS} (時/日)の3変数間には、次の関係が成立する。

$$D_P = D_F + D_{FS} \quad (2.24)$$

本章で対象となるシステムにおいて、フォワーダにより1日に運搬される丸太材積が、プロセッサの1日の造材材積を超えることはない。このような現場において、フォワーダの作業能率がプロセッサよりも高い場合、フォワーダには、プロセッサが造材した丸太を運搬してもなお待ち時間が生じることになる。すなわち、フォワーダがこの時間を利用して森林バイオマスを運搬することが可能となる。プロセッサが造材する丸太を、フォワーダがその日のうちに全て運搬するものとすれば、プロセッサの生産性 E_P ($\text{m}^3/\text{日}$)とフォワーダの1日の運材材積 E_F ($\text{m}^3/\text{日}$)の間には、次の関係が成立する。

$$E_P = E_F \quad (2.25)$$

プロセッサ造材作業の際に生産される森林バイオマスの重量は、造材材積に比例するとみなすことができ、比例定数である生産される丸太材積に対する、発生する残材重量の割合 k を用いれば、 E_P とプロセッサの1日の森林バイオマス生産量 E_{PS} ($\text{kg}/\text{日}$)の関係は、次のように表される。

$$E_{PS} = k \cdot E_P \quad (2.26)$$

ここで を“森林バイオマス運搬指数”と定義し、 E_{PS} とフォワーダによる1日の森林バイオマス運搬量 E_{FS} ($\text{kg}/\text{日}$)の関係を、 を用いて次のように表すものとする。

$$E_{FS} = \cdot E_{PS} \quad (2.27)$$

上述の通り、フォワーダがプロセッサに対する待ち時間を利用して森林バイオマスの運搬作業を行うので、 の値により、プロセッサが生産する森林バイオマス量に対するフォワーダの森林バイオマス運搬量を把握することが可能となる。したがって、 を、フォワ

ーダの待ち時間を利用した森林バイオマス運搬作業導入の可能性の指標とみなすことができる。

以上より,(2.17)式,(2.19)式,(2.24)式,(2.25)式,(2.26)式,ならびに(2.27)式を整理して, E_F は次のようにフォワーダの運材距離 L (m)の関数として表される。

$$E_F = c_F \cdot c_{FS} \cdot D_P / \{ (1.15 \times 10^{-4} \cdot c_{FS} + 1.49 \times 10^{-6} \cdot k \cdot c_F) \cdot L + (9.15 \times 10^{-2} \cdot c_{FS} + 1.88 \times 10^{-3} \cdot k \cdot c_F) \} \quad (2.28)$$

フォワーダによる丸太と森林バイオマスの“標準的な(すなわち修正係数が1となる)”運搬作業が1日6時間行われるものとすれば,(2.28)式に $k = 38.1 \text{ kg/m}^3$, $c_F = c_{FS} = 1$, $D_P = 6$ 時/日を代入することにより, $k = 0, 0.5, 1$ の時の L と E_F の関係は図-2.3のように表される。 k は樹種によって固有の数値を有するので,(2.28)式は本章で対象としたスギ以外の樹種にも適用可能である。また,修正係数 c_F, c_{FS} を調節することにより,(2.28)式は樹種,フォワーダの丸太および森林バイオマス積載量の変動にも対応することができる。

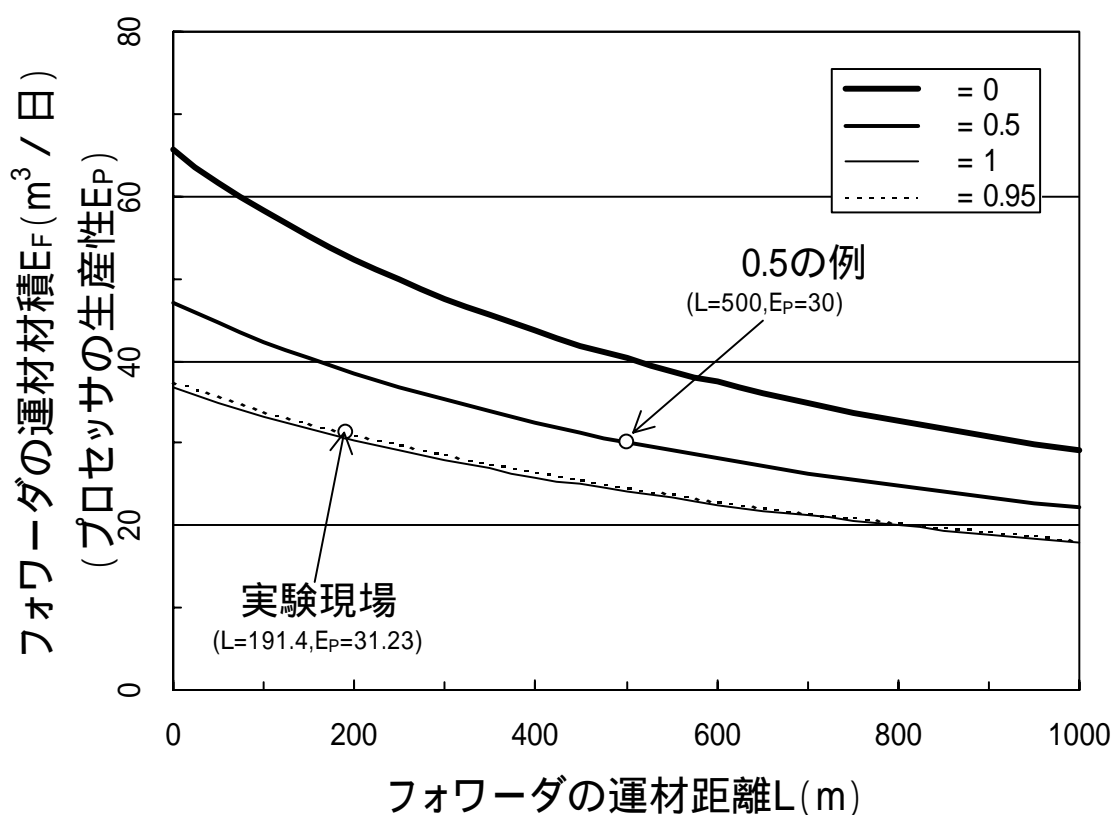


図-2.3 フォワーダの運材距離 L (m)と運材材積 E_F ($\text{m}^3/\text{日}$)の関係

$\alpha = 0$ は、フォワーダが丸太のみを運搬し、森林バイオマスは全く運搬しない状況を表す。シングルグリッププロセッサのような生産性の高い機種を導入している現場では、図-2.3における (L, E_p) の座標が、 $\alpha = 0$ の曲線より上に位置する場合も考えられる。このような場合、プロセッサの作業能率がフォワーダよりも高いため、両者が同時間だけ稼動した場合はプロセッサ作業土場に丸太が残ってしまうことになる。したがって、フォワーダはプロセッサよりも長い時間稼動する必要が生じる。この問題の解決策としては、例えば次の方法が挙げられる。

- 1) 図-2.3における (L, E_p) の座標が、 $\alpha = 0$ の曲線の下に位置するようにフォワーダの運材距離を短くする。
- 2) プロセッサの高い作業能率に対応可能な大形フォワーダを導入する。
- 3) フォワーダをもう1台導入する。

$\alpha = 1$ は、フォワーダが、プロセッサが生産する丸太と森林バイオマス全てを運搬する場合を意味する。したがって、図-2.3における $\alpha = 1$ の曲線は、フォワーダが丸太も森林バイオマスも全て運搬する場合における、フォワーダの運材距離と運材材積の関係を表している。プロセッサの生産性が $\alpha = 1$ の曲線よりも下に位置する場合、フォワーダの作業能率がプロセッサよりも高いことを意味するので、フォワーダには丸太と森林バイオマスを全て運搬してもなお待ち時間があることになる。

プロセッサが造材する丸太を、フォワーダがその日のうちに全て運搬するという条件において、図-2.3における E_F は E_p に置換可能である。よってフォワーダの運材距離 L とプロセッサの生産性 E_p が既知の現場においては、 (L, E_p) の座標を図-2.3のグラフ上にプロットすることができる。 (L, E_p) の座標が $\alpha = 1$ の曲線より下に位置する場合、プロセッサが生産する森林バイオマスの全てをフォワーダで運搬可能と判定できる。また、 (L, E_p) の座標が $\alpha = 0$ の曲線と $\alpha = 1$ の曲線の間位置する場合、“森林バイオマス運搬指数”の値をグラフから読み取ることにより、プロセッサが生産する森林バイオマス量に対するフォワーダの森林バイオマス運搬量の割合を把握することができる。例えば、 $L = 500 \text{ m}$ 、 $E_p = 30 \text{ m}^3 / \text{日}$ の現場では、図-2.3において $(500, 30)$ の座標が $\alpha = 0.5$ の曲線上に位置するので、生産される森林バイオマスの約5割を林内から林道端まで搬出可能と判定できる。実験を行った現場については、 $L = 191.4 \text{ m}$ 、 $E_p = 31.23 \text{ m}^3 / \text{日}$ から $\alpha = 0.95$ と読み取れたので、ほぼ全ての森林バイオマスを運搬することができることが確認された。

5.2 エネルギー分析

(2.11)式の森林バイオマス運搬時の“エネルギー投入率” p (%)は,(2.7)式,(2.10)式,(2.19)式および(2.21)式より,次のようにフォワーダの運材距離 L の関数として表される。

$$p = (u_{FS} / u_S) \cdot (6.07 \times 10^{-4} \cdot L + 3.18 \times 10^{-1}) \quad (2.29)$$

u_S は樹種によって固有の数値を有するので,(2.29)式も(2.28)式と同様スギ以外の樹種にも適用可能である。

実験を行った現場の運材距離は 191.4 mであった。また,フォワーダの燃料である軽油の単位容積あたり発熱量は $38.49 \text{ MJ} / \text{dm}^3$,絶乾状態のスギの単位重量あたり高位発熱量は $19.54 \text{ MJ} / \text{dm}^3$ であることから(41),(2.29)式に $L = 191.4 \text{ m}$, $\mu_{FS} = 38.49 \text{ MJ} / \text{dm}^3$, $\mu_S = 19.54 \text{ MJ} / \text{dm}^3$ を代入することにより, $p = 0.85\%$ と計算された。したがって p が1%にも達しなかったことから,フォワーダで森林バイオマスを運搬することにより,効率の高いエネルギー利用を実現する可能性があることが確認された。事前にフォワーダの運材距離により“エネルギー投入率”を決めておくことにより,最適な運材距離が決定され効率的な林内路網計画が可能となる。

エネルギー収支について本章では,絶乾状態の森林バイオマスを熱量換算するという最も単純な場合を検討した。しかしながら投入エネルギーについては,例えばフォワーダの製造に要したエネルギーも考慮する必要がある。また,森林バイオマスのエネルギー利用システムの実現に向けては,エネルギー変換効率も厳密に評価することが求められる。

5.3 コスト分析

(2.12)式の森林バイオマスの単位重量あたり運搬コスト CW_{FS} (円/kg)は,(2.19)式,(2.21)式および(2.23)式より,次のようにフォワーダの運材距離 L の関数として表される。

$$CW_{FS} = \{ (1.03 \times 10^{-2} + 5.82 \times 10^{-4} \cdot c_{FS}) \cdot L + (13 + 3.05 \times 10^{-1} \cdot c_{FS}) \} / c_{FS} \quad (2.30)$$

フォワーダによる森林バイオマスの“標準的な(すなわち $c_{FS} = 1$)”運搬作業が行われるものとすれば,(2.30)式に $L = 191.4 \text{ m}$, $c_{FS} = 1$ を代入することにより, $CW_{FS} = 15.4 \text{ 円} / \text{kg}$ と計算された。フォワーダの積載量について修正係数 c_{FS} を調節することにより,(2.30)式も(2.28)式,(2.29)式と同様スギ以外の樹種にも適用可能である。

わが国における末木や枝条などの林地残材の価値は,生材重量で1kgあたり数円程度といわれている(41)。この数値と比較すると,森林バイオマスの運搬コストは割高となって

しまう。しかしながら、次に示す近年の林地残材の新たな用途としての利用可能性の観点から、森林バイオマスの価値を見直す必要もある。

- 1) 土壌改良，家屋の調湿，消臭などを目的とした木炭に対する需要が伸びている。
- 2) 1)に示した需要に対し，林地残材を炭化することで対応する“山元土場における末木枝条処理システム（移動式連続炭化装置）”が開発された(86)。

一方で，森林バイオマスの単位重量あたりの運搬コストを低減する必要がある。運搬効率を向上させるためには，フォワーダの積載量を増加させることが有効である。実験現場におけるフォワーダの丸太積載量 5.53 m^3 は絶乾重量に換算すると $1,791 \text{ kg}$ であるが，この数値は森林バイオマスの積載量 425.3 kg の 4.21 倍に相当する。すなわち，フォワーダの森林バイオマスの運搬効率は丸太の $\frac{1}{4}$ にも満たないことになる。

この問題を解決するためには，粉碎機能を有するチップを導入することにより，森林バイオマスの減容化を図ることが有効である。また将来的には，粉碎機能を備えた森林バイオマス収穫専用のフォワーダを開発し，エネルギーおよびコストの観点から導入の可能性を検討する必要もある。

6. 小括

プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス資源運搬工程の導入可能性を検討した。その結果、実験を行った現場においては、プロセッサにより生産される森林バイオマスのほぼ全てを運搬可能であり、エネルギー収支の観点からは十分に導入可能であることが明らかとなった。また、森林バイオマス運搬コストの低減化の必要性が示された。

北欧諸国では森林バイオマスのエネルギー利用が着実に進みつつあり、中でもスウェーデンにおいては、1次エネルギー供給の19%が森林バイオマスをはじめとした木質バイオマスにより賄われている(53)。またバイオマス利用の拡大を目的とした計画のもと、林地残材をエネルギーとして利用するためのチップの導入に関する基礎的な研究もなされている(10)。このような北欧諸国の緩傾斜地に対応したシステムに対し、わが国のように地形の急峻な林地に導入可能な森林バイオマス収穫システムについては、独自に検討する必要がある。

第3章 森林バイオマス資源収穫システムの構築

1. 概要

わが国における新たなエネルギー資源としての林地残材の収穫システムの可能性を検討することを目的として、前章に引き続きプロセッサによる造材作業時に発生する林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、森林バイオマスのエネルギー利用の進んでいるヨーロッパ諸国の事例を参考に森林バイオマス資源収穫システムを構築した。わが国におけるシステムの可能性について、現地実験と既往の研究に基づいてコストおよびエネルギーの観点から評価を行い、ヨーロッパ諸国との比較により考察した。本章で構築したシステムについては、収穫コストと燃料消費量の観点からは、チップによる粉砕作業がシステムの早い段階で行われるものが望ましいという結果を得た。またわが国における実現可能性については、収穫コストの面では厳しいものの、エネルギー収支の面では特に問題ないと評価した。さらに、森林バイオマスを化石資源の代替エネルギーとして利用することにより、国内の二酸化炭素排出量を削減できる可能性が示唆された。ヨーロッパ諸国との比較、ならびにシステムにおける輸送工程の改善を検討した結果、林内運搬および輸送の際の積載効率向上といった収穫コスト削減のための技術開発、ならびに政府による制度面からの支援が、わが国における森林バイオマス資源収穫システムの実現のためには不可欠であることが示された。

2. ヨーロッパ諸国の森林バイオマス事情

前章において、プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス資源運搬工程の導入可能性を検討した結果、現地実験を行った現場では、プロセッサにより生産される森林バイオマスのほぼ全てを運搬可能であることが確認された。この結果をもとに、本章では、前章に引き続きプロセッサによる造材作業時に発生する発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、バイオマスを粉砕してエネルギープラントへ供給する収穫システムを構築する。

システムの構築にあたり、まず、バイオマスのエネルギー利用が着実に進んでいるヨーロッパ諸国（イギリス、スウェーデンおよびフィンランド）における森林バイオマスの収穫の事例を概観することにより、わが国のような急傾斜の林地に対応した収穫システムを検討する。以下ヨーロッパ諸国の事例を示すが、各国の森林バイオマス収穫システムにおける林内運搬距離、トラック輸送距離、収穫コスト、ならびに二酸化炭素排出量については、あらかじめ表-3.1 に整理した。

表-3.1 ヨーロッパ諸国の事例における森林バイオマス収穫システムの運搬距離，輸送距離，収穫コスト，二酸化炭素排出量

国	運搬距離 (m)	輸送距離 (km)	収穫コスト (円 / kWh)			二酸化炭素排出量 (gCO ₂ / kWh)		
			粉砕作業の場所			粉砕作業の場所		
			林内	林道端土場	プラント	林内	林道端土場	プラント
イギリス ¹		20-80	1.19-1.48	1.08-1.49	0.881-1.18 (1.07-1.26) ⁴			
スウェーデン ²		60		1.49-1.64	1.31-1.46 (1.26-1.42) ⁴			
フィンランド ³	250	60	1.04	1.02 (0.849) ⁵		5.78	5.61 (7.83) ⁵	

¹Hunter *et al.*(46)より引用。なお，林内運搬距離については記載されていなかった。

²Andersson(4)より引用。なお，林内運搬距離については記載されていなかった。

³Korpilahti(54)より引用。

⁴ベラーを導入した場合を表す。ベラーとは，残材を丸太のような形状に圧縮する機械であり，バンドリングマシンとも呼ばれている。

⁵チップ搭載型トラックが，走行時に粉砕作業を行う場合を表す。

2.1 イギリス

イギリスでは、2010年までに電力供給の10%を再生可能エネルギーで賄うことが政府目標として掲げられている。イギリスの事例については、木質バイオマスを燃料とするエネルギープラントへ林地残材を供給するシステムおよびその収穫コストを、Hunter *et al.*が検討している(46)。

プラントまでの各種木質バイオマスの収穫コストについては、1.56~2.13 ポンド/GJ(1ポンド=約190円)と算出している。また、発電所において支払われる化石燃料の価格が、石炭が1.47ポンド/GJ、石油が1.59ポンド/GJ、天然ガスが1.85ポンド/GJであることを例示することにより、エネルギー資源としてのバイオマスの競争力が、化石燃料に対しかなり強くなりつつあることを示している。

Hunter *et al.*は、残材を粉砕してエネルギープラントへ供給するシステムを、粉砕作業の場所(林内、林道端土場およびエネルギープラント)、チップの種類、輸送手段、チップの貯蔵場所などにより分類し、数種類のモデルケースを検討している。このうち、粉砕作業の場所により分類される4つのシステム(エネルギープラントについては2種類)の収穫コストを示した表-3.1より、粉砕作業がシステムの遅い段階で行われるものほど低コストとなる傾向にあることがうかがえる。

林内で粉砕作業が行われるシステムの場合に用いられる機械は、粉砕機能を備えたチップパワーダであり、また、粉砕作業が林道端土場において行われる場合は、90 m³ものチップの積載が可能であるチップ搭載型トレーラなどが用いられている。粉砕作業の工程をより集約的に行うことができる後者の収穫システムが、前者に対してコスト面で有利となっている。粉砕作業がエネルギープラントで行われるシステムは、林道端土場において残材を積み込む際に圧縮して減容化するベラー(残材を丸太のような形状に圧縮整形する機械)を導入することにより、バイオマスの単位容積あたりの重量を増やして輸送効率の向上を図るとともに、プラントにおいて集約的に粉砕作業を行うことにより、他のシステムよりもコスト面で有利となっている。

Hunter *et al.*は、林地残材の収穫コストを他の木質バイオマスの場合とも比較している。エネルギー造林(プランテーション)による低質林からのバイオマスと比較すると、林地残材は約6割のコストで収穫することが可能であるとしている。

2.2 スウェーデン

1996年から97年にかけて、スウェーデンにおいては燃料としての木質バイオマスの需要が25%以上も増加し、年間6TWhものエネルギーを木質バイオマスにより賄うまでに至っている。スウェーデンの事例については、森林バイオマスの収穫機械として有望とされるベラーを導入したシステムの可能性をAnderssonが検討している(4)。

森林バイオマスの収穫については、単にエネルギーとしての利用のみを促進させるという訳ではない。すなわち、林地残材の収穫の際には土壌養分の収奪が懸念されるが、この点をスウェーデンの林業委員会が厳しく規定している。例えば、業者は春から初夏にかけて伐採を行い、残材の収穫については、養分豊富な葉部が枯れ落ちた後に行うべきであるといったことが決められている。また森林バイオマスの収穫の際、林業において通常用いられているフォワーダやトラックを利用することにより、収益を維持することが可能であるとしている。

Anderssonは、残材を粉砕してエネルギープラントへ供給するシステムについて、粉砕作業の場所を林道端土場とエネルギープラントに分け、さらに後者のシステムにベラーを導入した場合を加えた3つのシステムに分類し、検討を行った。これらのシステムにおける収穫コストを示した表-3.1より、エネルギープラントで粉砕作業を行うシステムの方が、林道端土場において行う場合よりも低コストであることがわかる。すなわち、粉砕作業をより集約的に行うことができる前者の収穫システムが、後者に対してコスト面で有利となっていることになる。また、ベラーを導入したシステムが3つのうちで最も低コストとなる。ベラーが残材を圧縮することにより、バイオマスの林内運搬および輸送時の効率が向上し、運搬・輸送コストおよびエネルギープラントにおける粉砕コストの低減化が可能となる。このコストの低減化が、圧縮コストを十分カバーし得るために、ベラーを導入したシステムが他のシステムよりもコスト面で有利となっている。

2.3 フィンランド

フィンランドの事例については、森林バイオマスの収穫システムをKorpilahtiが検討している(54)。この検討は、外来の化石燃料に対して、自給が可能であるバイオマスエネルギーの競争力を改善することを目的としたBioenergy Research Programmeの一環として行われたものである。

Korpilahti は、残材を粉砕してエネルギープラントへ供給するシステムを、粉砕作業の場所（林内および林道端土場）により 2 つに分け、さらに後者のシステムにおいて、粉砕機能を備えたトラックが輸送中に粉砕作業を行う場合を加えた 3 つのシステムに分類して考察を行った。これらのシステムにおける収穫コスト、ならびに各工程における機械の燃料消費量より導かれる二酸化炭素排出量を示した表-3.1 より、林道端土場において粉砕作業を行うシステムの方が、林内で行うものよりも低コストであることがわかる。林内における粉砕作業には粉砕機能を備えたチップフォワーダが、林道端土場の場合にはチップ搭載型トラックが、それぞれ用いられている。粉砕作業をより集約的に行うことができる後者のシステムが、前者に対してコスト面で有利となっている。また表-3.1 より、輸送中に粉砕作業を行うシステムの方が、林道端土場で行うものよりも低コストとなる。Korpilahti は、トラック走行時に粉砕作業を行うことにより、林道端土場の場合に生じる、粉砕作業に対する待ち時間が解消されるために、コスト面で有利になるとしている。ただし同じく表-3.1 において、輸送中に粉砕作業を行うシステムの二酸化炭素排出量が最も多くなっていることから、トラック走行時の粉砕作業には相当の動力を要することが推察される。

フィンランドでは、バイオマスエネルギーに関する技術開発が 1993 年より活発になり、既に国内の 1 次エネルギー供給の 20%以上がバイオマスにより賄われている。さらに 2010 年までに、新たに石油換算で 150 万トンに相当するエネルギーをバイオマスで代替するという政府目標が掲げられている。表-3.1 における森林バイオマス収穫システムの二酸化炭素排出量は 5.61 ~ 7.83 gCO₂ / kWh であるが、Korpilahti は、この数値が石炭の場合では 341 gCO₂ / kWh、石油の場合では 304 gCO₂ / kWh であることを示し、この政府目標が達成されれば、国内の二酸化炭素排出量の 6.9% を削減可能であるとしている。

2.4 考察

以上のイギリス、スウェーデンおよびフィンランドの事例では、いずれの場合においても、バイオマスが国内の 1 次エネルギー供給に対してある程度のシェアを占めており、またバイオマス利用の拡大を前提とした、今後の具体的な政府目標が掲げられている。このような制度面における政府の支援が存在してこそ、エネルギー資源としてのバイオマス利用、ひいては木材生産システムの中における森林バイオマス収穫システムが実現しているといえよう。

またヨーロッパ諸国の事例をもとに、森林バイオマスの収穫システムを、粉砕作業が行

われる場所により大きく3つのタイプに分類することができる。すなわち林内で行われる場合、林道端土場の場合およびエネルギープラントの場合である。林地残材は嵩が張るため、残材をそのままの形態で林内運搬および輸送を行うことは低効率である。このため、収穫システムのなるべく早い段階に粉碎工程を導入することにより、運搬・輸送効率の向上を図るという考え方も成り立ち得る。しかしながらここまで見てきたヨーロッパ諸国の事例では、収穫システムの最終段階のエネルギープラントにおいて粉碎作業を行うシステムが最も低コストとなる傾向にあった。これは、プラントで粉碎作業を行うシステムにおいては、森林バイオマスを圧縮する、あるいは数十トンクラスのトレーラを導入するといった手段により、輸送効率の向上を図る工夫が施されることによるものである。

わが国における森林バイオマスの収穫システムとしては、例えばアメリカ合衆国に見られるような、エネルギー造林によるプランテーションを対象としたものではなく、上記ヨーロッパ諸国の事例のような、林業における木材生産性を損なうことなく稼動することが可能なシステムの構築が目標とされるべきである。すなわち、スウェーデンの Andersson が、林業で通常用いられているフォワーダやトラックを森林バイオマスの収穫に利用することにより、収益を維持することが可能であるとしているように、わが国においても、エネルギー利用を目的とした森林バイオマス収穫専用のシステムではなく、まず林業の現状に即した収穫システムを構築することが妥当であるといえよう。

本章では、以上の考察をもとに森林バイオマス資源収穫システムを構築し、収穫コストおよびエネルギー収支の観点から、わが国におけるシステムの可能性を検討する。また、検討結果をヨーロッパ諸国の事例と比較することにより、システムの改善すべき点などの課題を整理する。

3. 森林バイオマス資源収穫システム

3.1 システムの構成

高性能林業機械による機械化が進みつつある日本林業の現状を勘案して、森林バイオマス資源収穫システムを構築した(図-3.1)。このシステムは、まず次の5つの工程から構成される。

- 1) 全木集材 この工程で使用される機械については、本章では特に限定しないが、通常は集材機、タワーヤーダ、あるいは林業用トラクタが用いられる。従来型林業機械の集材機や林業用トラクタに比べ、高性能林業機械であるタワーヤーダは、近年、特に間伐作業量の増加に伴い普及しつつある。
- 2) プロセッサ造材 この作業は林内の先山土場で行われる。
- 3) フォワーダ運搬 フォワーダは、林内の先山土場から林道端土場まで作業路上を走行して、丸太および残材、あるいは残材を粉砕したものを運搬する。わが国においては、林道の建設コストが高価であるため、低規格の作業路が低密度の林道網を補完している。しかしながら、トラックはこのような低規格の作業路上を走行できないため、本章で対象とするシステムには2つの土場が必要となる。
- 4) トラック輸送 トラックは、林道および一般道上を走行して、残材または残材を粉砕したものをエネルギープラントまで輸送する。
- 5) エネルギー変換 わが国においては、森林バイオマスをエネルギーとして利用するための変換プラントは実在しないというのが現状である。このため本章では、エネルギープラントを仮想して検討を進めるものとする。なお、エネルギー変換については、周辺地域へ熱と電力を供給する熱電併給(CHP)システムが、変換効率が高く、ヨーロッパ諸国では最も普及の期待できる方式であるといわれている(46)。

システムにおけるフォワーダ運搬およびトラック輸送の際の距離については、本章では、日本林業の現状と素材生産業へのアンケート調査(73)をもとに、運搬距離を100~1,000 m、輸送距離を20~80 kmに設定した。

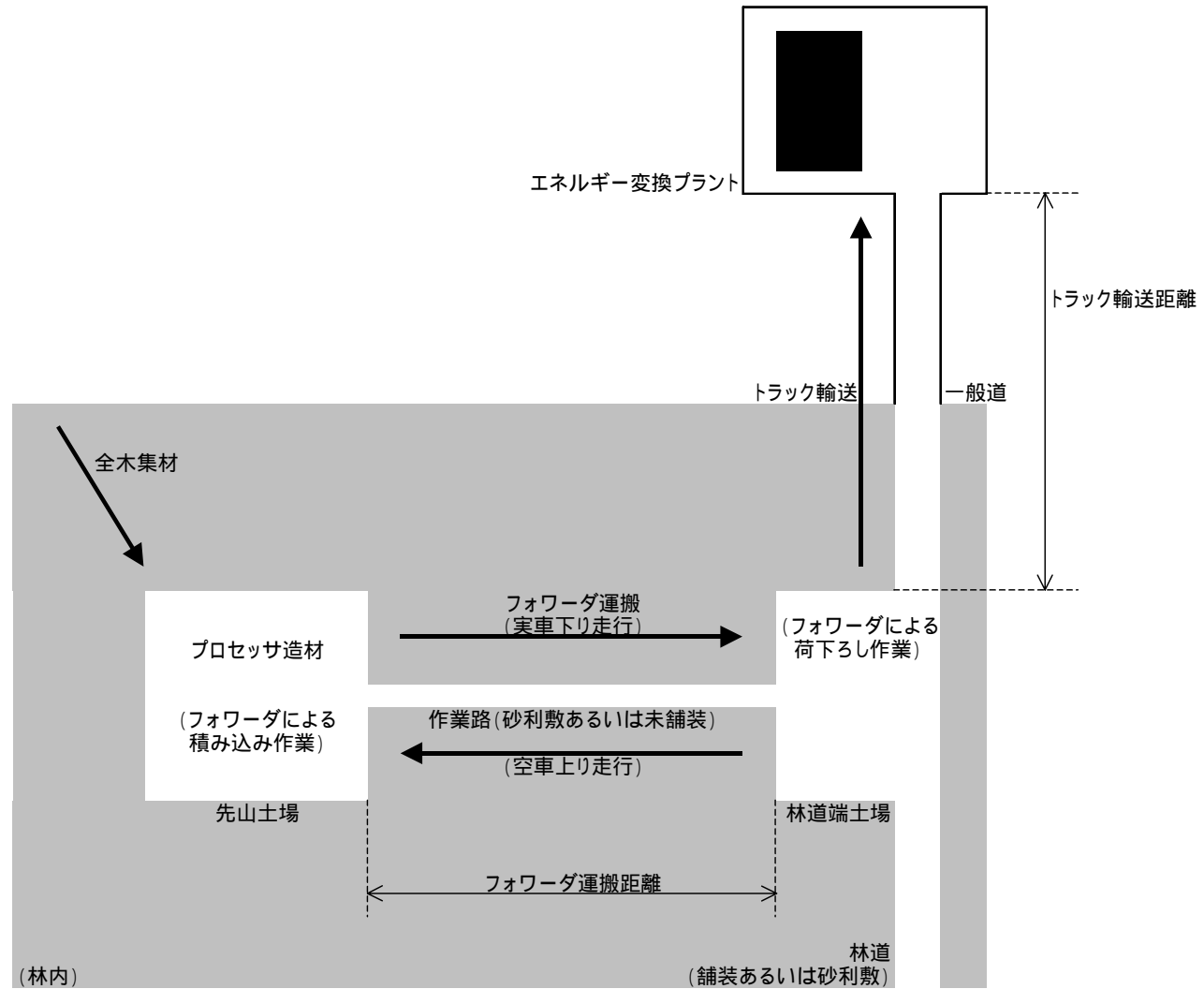


図-3.1 森林バイオマス資源収穫システム

3.2 システムの分析方法

上記5つの工程に加え、森林バイオマスの林内運搬および輸送工程の効率を向上させ、また粉砕したバイオマスをエネルギープラントへ供給することを目的として、森林バイオマス資源収穫システムに、チップによる粉砕作業の工程を導入した。しかしながら、チップ粉砕の工程の導入により、その分だけシステム全体で見た収穫コストとエネルギー消費は増加する。したがって、前節で概観したヨーロッパ諸国の事例をもとに、粉砕作業が行われる場所として林内の先山土場、林道端土場、エネルギープラントの3箇所を選定し、システムを3種類のタイプに分類した(図-3.2)。それぞれのシステムを“林内型”、“土場型”、“プラント型”と呼ぶものとすれば、林内型システムおよび土場型システムでは移動式チップが使用され、プラント型システムでは大形チップが使用されるものとした。

システムを分析するにあたり、まず、システムを分類することにより生じる、粉砕作業の行われる場所の違いが収穫システムのコストとエネルギー消費へ与える影響を評価することにした。次に、収穫コストおよびエネルギー収支の観点から、わが国におけるシステムの実現可能性を検討した。また、検討結果をヨーロッパ諸国の事例と比較することにより、システムの改善すべき点などの課題を整理し、考察を行った。

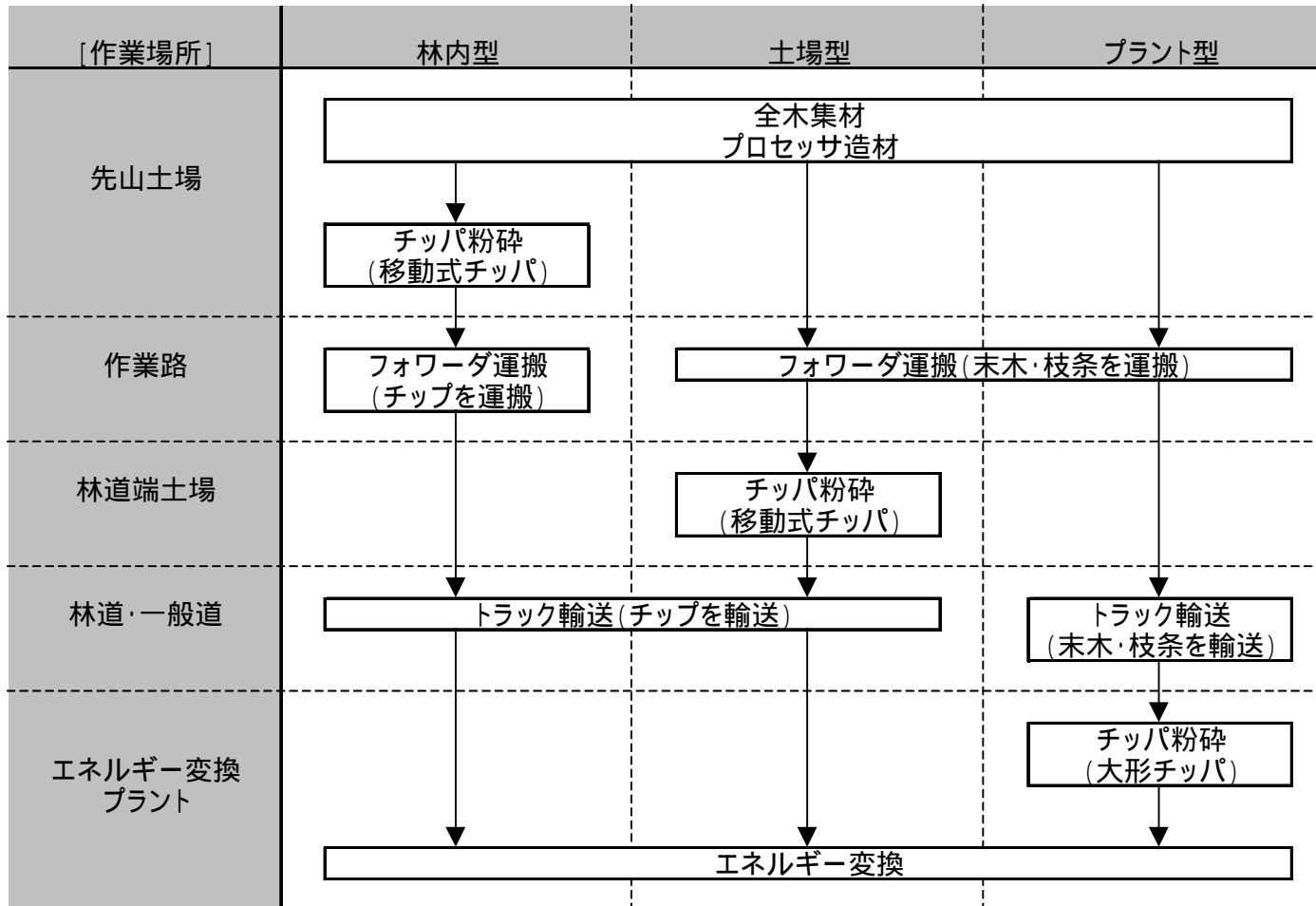


図-3.2 粉砕作業の場所により3種類のタイプに分類された森林バイオマス資源収穫システム

4. 現地実験

フォワーダによる森林バイオマスの運搬作業については、岩手大学農学部附属滝沢演習林において、積載量 2,000 kg のホイール型フォワーダ (RM8WDB-6HG, 及川自動車 (株)) を対象に実験を行った (図-3.3)。対象となった森林バイオマスは、26 年生スギ人工林で発生した末木および枝条であり、フォワーダは森林バイオマス収穫専用車両として荷台に柵を装備したものであった。実験の際には、作業時間観測を行うとともに森林バイオマスの重量、ならびに各種作業の燃料 (軽油) 消費量を計測し、またバイオマスの含水率については、サンプルを採取して実験後に乾燥させることにより測定した。



図-3.3 フォワーダによる森林バイオマス運搬実験

移動式チップによる森林バイオマスの粉碎作業については、及川自動車 (株) の試作品で、エンジンとしていすゞ 6BD1 (総排気量 5,785 cm³, 定格出力 118 kW / 2,800 rpm) を搭載したものを対象に実験を行った。フォワーダ運搬の作業実験と同様の方法で作業時間、森林バイオマスの重量、燃料 (軽油) 消費量、ならびに含水率を測定した。また、チップ

で森林バイオマスを粉砕することにより，林内運搬および輸送時の積載効率がどの程度向上するかを把握することを目的として，チップ粉砕による森林バイオマスの“減容率”（表-3.2(c)脚注参照）を計測した。

大形チップによる森林バイオマスの粉砕作業については，わが国の林業において，1時間にオーダーで100 m³もの量のチップを生産できる大形チップを導入した事例が，今のところ見受けられない。このため本章では，造成工事での法面施工により発生した伐採樹木を，リサイクルを目的として有効処理することを目的として，タブグラインダー（TG400A，Vermeer Manufacturing Company，アメリカ合衆国）を導入した事例報告(78)をもとに検討を行うものとした。

5. 結果

現地実験と既往の研究より得られた結果を表-3.2 に示す。

表-3.2 現地実験と既往の研究より得られた結果

(a) フォワーダ運搬	
項目	結果
単位時間あたりコスト (円/時)	
労務経費	2963 ³
機械経費	2531 ⁴
単位容積あたり燃料 (軽油) 費 (円/dm ³)	80
油脂費の燃料費に対する比率	0.2 ⁵
1 サイクルあたり運搬量 (kg/回) ^{1,2}	
残材	113.9 ⁶
残材を粉砕したチップ	415.7
走行速度 (m/秒)	
実車下り走行	1.41
空車上り走行	1.42
運搬距離 (m)	100-1000
作業時間 (秒)	
積み込み作業	552
荷下ろし作業	545
作業時間あたりの燃料消費量 (cm ³ /秒)	
実車下り走行	0.32
空車上り走行	1.13
積み込み作業	0.28
荷下ろし作業	0.35

¹本章では、森林バイオマスについて絶乾重量で検討することにより、森林バイオマスの有する潜在的なエネルギーを評価するものとした。

²フォワーダ運搬作業の1サイクルは、先山のプロセッサ作業土場での積み込み、作業路上の実車下り走行、林道端土場での荷下ろし、作業路上の空車上り走行の4つの工程から構成される。

³著者らの聞き取り調査による数値である(第2章参照)。

⁴機械価格(85)と標準功程表(109)をもとに算出した。

⁵酒井(91)より引用。

⁶実験時の残材の運搬量は、生材重量で249.80 kgと測定された。また、サンプリングにより求めた残材の含水率は119.3%であった(サンプル数7, 標準偏差10.9%)。したがって、1サイクルあたりの運搬量は、乾燥重量で113.9 kgとなる。

(b) トラック輸送¹

項目	結果
1 サイクルあたりコスト (円 / 回)	14880-29460 ²
1 サイクルあたり輸送量 (kg / 回)	
残材	345.0 ³
残材を粉砕したチップ	1259.1
輸送距離 (km)	20-80
燃料の単位容積あたりの走行距離 (km / dm ³)	5.5 ⁴

¹本章で構築したシステムにおける，輸送工程に用いられるトラックについては，わが国の林業の現状を勘案して，5 m³の丸太を積載可能な(73)4トントラックを想定した。

²トラック輸送については，運送業者の請負業務により行われるものとした(109)。したがって 4トントラックを用いた場合の輸送距離が 20～80 km であることから，関東運輸局の一般貨物自動車運送事業貸切運賃早見表(110)に基づき，1 サイクルあたりの輸送コストを 14,880～29,460 円に設定した。

³第 2 章において，5.53 m³の丸太を積載することができるフォワーダの残材運搬量は 381.6 kgであったことから，本章では，運搬量に関する丸太と残材の比率はフォワーダとトラックで同一であるものとし，丸太を 5 m³積載可能なトラックの残材運搬量を 345.0 kgとした。

⁴元田ら(64)より引用。

(c) チッパ粉砕

項目	結果
移動式チッパ	
単位時間あたりコスト(円/時)	
労務経費	2963
機械損料	2372 ²
燃料油脂費	868 ³
単位時間あたりチップ生産量(kg/時)	883.30
単位時間あたり燃料(軽油)消費量(dm ³ /時)	9.04
チッパ粉砕による森林バイオマスの“減容率” ¹	0.274 ⁴
大形チッパ	
単位時間あたり合計コスト(円/時)	20480 ⁵
単位時間あたりチップ生産量(kg/時)	4267.44-8534.88 ⁶
単位時間あたり燃料(軽油)消費量(dm ³ /時)	28.04 ⁶

¹本章では、残材をチッパで粉砕することにより、その容積をどの程度減少させることができるかを示す指標として、チッパ粉砕による森林バイオマスの“減容率”を設定した。すなわち“減容率”は、粉砕前の残材の容積に対して、粉砕後のチップの容積が占める割合で表される。

²移動式チッパの価格は、製造元の及川自動車(株)への聞き取り調査により800万円であったことから、年間運転時間を1,000時間、耐用年数を5年、利子を3%とすれば、FAOの簡易計算方式(28)に基づき、1時間あたりの機械経費は2,372円と計算された。

³移動式チッパの燃料油脂費については、フォワーダ運搬と同様のコスト計算方法により算出した。

⁴粉砕前の残材の容積は、残材を積載した2トントラックの荷台の容積を測定することにより4.386m³であり、また粉砕後のチップの容積は、チップの入ったコンテナの容積を測定することにより1.20m³であった。したがって、チッパ粉砕による森林バイオマスの“減容率”は0.274と計算された。

⁵大形チッパの価格は5,000万円であったことから(85)、1時間あたりの合計コストを、移動式チッパと同様の計算方法により算出した。

⁶岡田ら(78)より引用。

6. 考察

実験結果に関する表-3.2 と各種作業の理論功程式に関する既往の研究(91, 92)および第 2 章をもとに、森林バイオマス資源収穫システムの収穫コストおよび燃料消費量を算出し、“林内型”、“土場型”、“プラント型”のタイプ別に整理した(表-3.3)。また、森林バイオマスの単位熱量あたりの収穫コストと“エネルギー投入率”(表-3.3 脚注参照)についても併せて求めた。なお、収穫システムにおけるフォワーダの運搬距離を 100~1,000 m、トラックの輸送距離を 20~80 km として計算した。

本章で構築したシステムについて、ヨーロッパ諸国の事例と比較した結果を表-3.4 に示すが、森林バイオマスの単位熱量あたりの収穫コスト、ならびに燃料消費量から導かれる二酸化炭素排出量(表-3.4 脚注参照)について比較するものとした。

表-3.3 森林バイオマス資源収穫システムにおける収穫コスト，燃料消費量，ならびに“エネルギー投入率”

作業場所	工程	収穫コスト (円/kg)			燃料消費量 (cm ³ /kg)		
		林内型	土場型	プラント型	林内型	土場型	プラント型
先山土場	粉碎	7.02			10.2		
作業路	運搬	4.65-9.52	16.9-34.7	16.9-34.7	1.08-3.28	3.92-12.0	3.92-12.0
林道端土場	粉碎		7.02			10.2	
林道・一般道	輸送	11.8-23.4	11.8-23.4	43.1-85.4	5.78-23.1	5.78-23.1	21.1-84.3
プラント	粉碎			2.40-4.80			3.29-6.57
計		23.5-45.7	35.8-71.0	62.5-125	17.1-36.6	19.9-45.3	28.3-103
収穫コスト (円/kWh) ¹		4.32-8.41	6.60-13.1	11.5-23.0			
エネルギー投入率 (%) ^{2,3}					3.37-7.21	3.92-8.92	5.57-20.3
[輸送効率の改善] ⁴							
輸送コスト (円/kg)		1.10-4.40	1.10-4.40	4.02-16.0			
合計コスト							
単位重量あたり (円/kg)		12.8-20.9	25.0-46.1	23.3-55.5			
単位熱量あたり (円/kWh)		2.36-3.85	4.61-8.49	4.29-10.2			

¹ 絶乾状態のスギの単位重量あたり高位発熱量

$$= 4670 \text{ kcal / kg} (41) = 19.54 \text{ MJ / kg} (1 \text{ MJ} = 239.01 \text{ kcal}) = 5.428 \text{ kWh / kg} (1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}) (52)$$

² “エネルギー投入率”とは，第2章と同様に本研究で定義したエネルギー収支に関する指標であり，森林バイオマスの有する潜在的なエネルギー量に対する，森林バイオマス収穫時の投入エネルギーの占める割合を表す。なお本章では，投入エネルギーとして，各種機械の燃料消費量を熱量換算したもののみを考慮した。

³ 軽油の単位容積あたり発熱量

$$= 9200 \text{ kcal / dm}^3 (41) = 38.49 \text{ MJ / dm}^3 = 10.69 \text{ kWh / dm}^3$$

⁴ 本章では，輸送効率の改善として，輸送工程を4トントラックによる請負業務から，60m³のチップを積載可能な18トントレーラの自社購入・運転手の直備へ移行した場合を検討した（このサイズのトレーラは，わが国では紙・パルプ産業で主に用いられている）。そしてこの移行により，トータル収穫コストがどの程度削減されるかを吟味した。

表-3.4 森林バイオマス資源収穫システムの収穫コストと二酸化炭素排出量に関するヨーロッパ諸国の事例との比較

国	運搬距離 (m)	輸送距離 (km)	収穫コスト (円 / kWh)			二酸化炭素排出量 (gCO ₂ / kWh) ¹		
			林内型	土場型	プラント型	林内型	土場型	プラント型
日本	100-1000	20-80	4.32-8.41 (2.36-3.85) ²	6.60-13.1 (4.61-8.49) ²	11.5-23.0 (4.29-10.2) ²	2.65-5.66	3.08-7.01	4.38-15.9
イギリス		20-80	1.19-1.48	1.08-1.49	0.881-1.18 (1.07-1.26) ³			
スウェーデン		60		1.49-1.64	1.31-1.46 (1.26-1.42) ³			
フィンランド	250	60	1.04	1.02 (0.849) ⁴		5.78	5.61 (7.83) ⁴	

¹軽油の単位容積あたりの二酸化炭素排出量

= 840 gCO₂ / dm³(54) (森林バイオマスの単位熱量あたりの二酸化炭素排出量については、この値と表-3.3の燃料消費量をもとに算出した。)

²輸送効率の改善を検討した結果である(表-3.3参照)。

³ペーラーを導入した場合を表す。

⁴チップ搭載型トラックが、走行時に粉砕作業を行う場合を表す。

6.1 コスト分析

本章で提案した3種類のタイプのシステムにおける、森林バイオマスの単位重量あたりの収穫コストについては、表-3.3より、林内型システムが最も安く、プラント型システムが最も高い、すなわちチップ粉砕の工程がシステムの早い段階で導入されるものほど低コストとなるという結果が得られた。つまり、大形チップで集約的に粉砕作業を行えるというメリットよりも、森林バイオマスの粉砕によりフォワーダ運搬とトラック輸送の工程の効率を向上させるというメリットの方が、システムの収穫コストへ与える影響が大きいということになる。

表-3.3における森林バイオマスの単位熱量あたりの収穫コストは、わが国における電力価格18.17円/kWh(65)に対してかなり高い割合を占めてしまっている。特にプラント型システムの場合、フォワーダ運搬距離とトラック輸送距離によっては収穫の段階で既に電力価格を超えてしまうことになる。このような現状においては、わが国における森林バイオマスの収穫システムの実現可能性は、収穫コストの観点からは厳しいといえよう。

スウェーデンのエネルギー変換プラントにおける、設備コスト、運転コスト、維持修理コストから構成されるエネルギー生産コストは、化石燃料の場合で0.64~2.24円/kWh、林地残材の場合で1.92円/kWhといわれている(40)。両者のコストはほぼ同水準であり、また、表-3.3に示した本章で検討したシステムの収穫コストに比べ、大変小さな値となっている。このことは、わが国において、スウェーデンの事例と同程度のコストでエネルギープラントを操業できるとした場合に、収穫コストがトータルコストに大きく影響することを意味するものである。わが国で森林バイオマスのエネルギー利用を実現させるためには、低コストで収穫することが可能な林内運搬・輸送技術の開発が不可欠である。

表-3.4より、森林バイオマスの単位熱量あたりの収穫コストについては、本章で検討したシステムとヨーロッパ諸国の事例との間には、両者の林内運搬および輸送の距離が同レベルであるにもかかわらず、大きな格差があることがわかる。ヨーロッパ諸国の事例においては、チップによる粉砕作業の場所や使用機械の種類に関係なく、収穫コストは1円/kWh程度でほぼ同水準である。イギリスのHunterが、エネルギー資源としてのバイオマスの競争力が、化石燃料に対してかなり強くなりつつあることを示していることから、1円/kWhという収穫コストの水準が、本章で検討したシステムの1つの目標となる。

一方で、ヨーロッパ諸国の事例においては、本章で検討したシステムとは反対に、チッ

パによる粉砕作業の工程がシステムの遅い段階に導入されるものほど低コストとなる傾向が見られる。これは、林内運搬や輸送の前段階に、ペーラーによる森林バイオマスの圧縮工程を導入する、あるいは輸送工程に30トンクラスのトレーラを導入するといったことにより、林内運搬および輸送時の積載効率の向上を図っていることによるものである。したがって、本章で検討したシステムにおいても、圧縮工程を導入するとともに全体の林内運搬・輸送効率を向上させることにより、ヨーロッパ諸国との格差を縮小させる余地は十分にあるといえよう。

6.2 エネルギー分析

表-3.3 より、本章で提案した3種類のタイプのシステムにおける、森林バイオマスの単位重量あたりの燃料消費量についても、チップ粉砕の工程がシステムの早い段階で導入されるものほど少なくなるという、収穫コストの場合と同様の傾向が見られた。

また表-3.3 に示した、収穫システムの“エネルギー投入率”は、3つのシステムのいずれにおいても概ね数パーセント程度に留まった。したがって、例えば熱電併給システムのような高効率のエネルギー変換技術が導入されることを前提とした場合において、わが国における森林バイオマス資源収穫システムの実現可能性は、“エネルギー投入率”，すなわちエネルギー収支の観点からは特に問題ないといえよう。

表-3.4 における森林バイオマスの単位熱量あたりの二酸化炭素排出量については、本章で検討したシステムとフィンランドの事例とでほぼ同水準となる結果が得られた。フィンランドのKorpilahtiが、この数値が石炭の場合では $341 \text{ gCO}_2 / \text{kWh}$ 、石油の場合では $304 \text{ gCO}_2 / \text{kWh}$ であることを示し、2010年までに、新たに石油換算で150万トンに相当する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、国内の二酸化炭素排出量の6.9%を削減可能であるとしていることから、わが国においても、森林バイオマスを化石資源の代替エネルギーとして利用することにより、国内の二酸化炭素排出量を削減できる可能性がある。

しかしながら、ヨーロッパ諸国の事例では、いずれの場合においても、バイオマスが国内の1次エネルギー供給に対してある程度のシェアを占めており、またバイオマス利用の拡大を前提とした、今後の具体的な政府目標が掲げられている。このことから、わが国において森林バイオマスのエネルギー利用を実現するためには、例えば、二酸化炭素の排出量に応じて税金を賦課する、というような制度面からの政府の支援も不可欠である。

6.3 輸送効率の改善

本章で検討した収穫システムにおいて、トラック輸送工程のコストが特に高価であったため、輸送工程の効率を向上させることを検討した（表-3.3 脚注参照）。その結果、トータルの収穫コストはほぼ半分にまで減少し（表-3.3 参照）、ヨーロッパ諸国との格差も縮小された（表-3.4 参照）。

したがって、森林バイオマス資源収穫システムにおいても、表-3.3 で検討したような大形トレーラの導入、そして大形トレーラがプロセッサ作業土場まで進入可能な林道網の整備を図り、収穫コストを削減する必要がある。さらに、ここでは検討しなかった粉碎および林内運搬の工程の効率を向上させるために、ベラーやチップフォワーダの導入、あるいはわが国の急峻な林地に対応できる森林バイオマス収穫専用車両の開発といったことも、併せて検討する必要がある。

7. 小括

森林バイオマスのエネルギー利用の進んでいるヨーロッパ諸国の事例を参考に森林バイオマス資源収穫システムを構築し、わが国におけるシステムの可能性について、現地実験と既往の研究に基づいてコストおよびエネルギーの観点から評価を行い、ヨーロッパ諸国との比較により考察した。その結果、次の3つの結論を得た。

(1) 森林バイオマス資源収穫システム

システムの収穫コストと燃料消費量の傾向より、チップによる粉砕作業の工程がシステムの早い段階に導入される方が望ましいという結果が得られた。

(2) わが国におけるシステムの可能性

森林バイオマスの単位熱量あたり収穫コストの面では厳しいものの、エネルギー収支の面では特に問題ないものと評価された。さらに、森林バイオマスを化石資源の代替エネルギーとして利用することにより、国内の二酸化炭素排出量を削減できる可能性が示唆された。

(3) ヨーロッパ諸国との比較および輸送効率の改善

わが国における森林バイオマスのエネルギー利用を実現させるためには、輸送工程への大形トレーラの導入、収穫コスト削減のための技術開発、ならびに制度面からの政府の支援が不可欠であることが示された。

一方で、本章で構築したシステムに対しては、次の2つの課題についてさらに検討を進める必要がある。

(1) 森林バイオマスの圧縮工程の導入

システムに森林バイオマスを圧縮する工程を導入する、などの方法により、収穫コストを削減することが不可欠である。しかしながら、ベラーによるシステムは北欧諸国の緩傾斜地に対応したものであり、わが国のように地形の急峻な林地に適したシステムについては、別途検討する必要がある。

(2) ライフサイクルアセスメント(LCA)手法に基づいたシステム評価

システムのエネルギー収支および二酸化炭素排出量については、本章では各種機械の燃料消費量のみを考慮して検討を行った。これについては、LCA手法に基づいたより詳細な分析、すなわちライフサイクルインベントリ(LCI)分析を行うことにより、エネルギー資源としてトータルのライフサイクルで見た場合に、エネルギー変換効率を考慮したエネルギー収支がどの程度となるかを検討するとともに、森林バイオマスが化石燃料よりも環境へ与える負荷が小さい資源であることを科学的に証明する必要がある。

第4章 森林バイオマス資源収穫システムのライフサイクルインベントリ(LCI)分析

1. 概要

前章で構築した森林バイオマス資源収穫システムにおける、バイオマス火力発電プラントによるエネルギー生産を想定した場合のエネルギー収支および二酸化炭素排出量について、バイオマスのトータルのライフサイクルで見た精緻な検討を行うことを目的として、システムに対してライフサイクルインベントリ(LCI)分析を行った。投入エネルギーについては、システムを運用するためのエネルギー量が、システムを構成する設備のエネルギー量よりも相当に大きく、また運用エネルギーの内訳より、粉碎、輸送の両工程の処理効率を向上させるための作業システムの改善および技術開発が、システムの投入エネルギーを減少させるための先決課題であることが確認された。システムを構成するために必要な各種機械、機器・装置等の設備のエネルギーを、エネルギー生産により1.09年という短期間で回収できることが示された。システムの総エネルギー収支については、5.69という値を示したため、本章で検討したシステムがエネルギー生産システムとして十分成り立ち得ることが明らかとなった。また、システムの二酸化炭素排出原単位が $61.8 \text{ gCO}_2 / \text{kWh}$ と算出されたことから、この点においては森林バイオマスが化石燃料に対して十分に有利であることが確認された。さらにこの場合、石炭火力発電によるエネルギーを森林バイオマスで代替することにより、国内の年間二酸化炭素排出量の0.142%を削減可能である。感度分析では、発電プラントのエネルギー変換効率がシステムのインベントリ結果に最も大きな影響を及ぼすパラメータとなり、森林バイオマスのエネルギー利用を実現するためには、小規模・高効率変換技術の開発の必要性が示唆される結果が得られた。

2. 目的

森林バイオマス資源収穫システムのわが国における可能性について、前章においては、エネルギー収支の面では特に問題ないものと評価し、森林バイオマスを化石燃料の代替エネルギーとして利用することによる、国内の二酸化炭素排出量削減の可能性を示した。しかしながら、これは各種機械の燃料消費量のみを考慮に入れた検討であるため、エネルギー生産システムとして評価したことにはならない。例えばエネルギー収支を分析するためには、エネルギー入力として機械の燃料消費量の他に、機械やエネルギー変換プラントを構成する素材のエネルギー、ならびに機械やプラントの製造、建設に要するエネルギーを、エネルギー出力としてエネルギープラントの変換効率を、それぞれ考慮しなければならない。二酸化炭素排出量についても、その考え方は同様である。

本章では、森林バイオマス資源収穫システムのエネルギー生産システムとしての評価を行うことを目的として、ライフサイクルアセスメント(LCA)手法に基づいた詳細な分析、すなわちライフサイクルインベントリ(LCI)分析を行うことにより、エネルギー資源としての森林バイオマスをトータルのライフサイクルで見た場合の、エネルギー収支および二酸化炭素排出量を算出する。そのために、まずシステムの各工程の投入エネルギーを調査することにより、システムの改善点を検討するとともに、各種機械の燃料消費量がシステム全体の投入エネルギーに占める割合を求めることにより、前章のエネルギー収支に関する結論の信頼性を検証する。そして素材別のエネルギー原単位、エネルギーの種類別の二酸化炭素排出原単位等を用いてシステムのエネルギー収支、ならびに二酸化炭素排出量を算出し、エネルギー生産システムとしての可能性について考察する。最後に感度分析として、システムの主要なパラメータの変化により分析結果が受ける影響を検討することにより、森林バイオマス資源収穫システムについて今後の課題を整理する。

3. 分析方法

3.1 概要

ライフサイクルアセスメント（LCA）は、現代の複雑な技術社会が産み出した諸問題を取り扱うシステム分析方法の1つである。それは、製品や技術のライフサイクルにおける環境問題を中心とした諸問題が、社会に与えている影響を総合的に分析する手法であり、問題複合体としての複雑な環境影響を個々の成分について明らかにすることにより、環境負荷を低減する具体的な解決策の検討に役立てるものである。

ライフサイクルインベントリ（LCI）分析とは、製品（財・サービス）や技術について資源、労働、金額、環境負荷等がどのように投入、産出されているかを明らかにするもので、LCA の中でも最も基本となるプロセスである。本章で検討する発電プラントの場合、システムのエネルギー収支や二酸化炭素排出量が分析の対象となる。

エネルギー収支分析とは、あるエネルギー生産システムについて、種々の財およびサービスに対して直接あるいは間接に投入されるエネルギー量を、そのシステムが生産するエネルギー量と比較することである。この分析は、エネルギー消費という社会的価値の一側面からの計量分析方法であるため、経済学で行われる労働と投資による計量分析に対しては、その代替手段ではなく、補完的な手段となると考えられる。すなわち経済学が、貨幣という時間や場所でその価値が変動する指標を使って社会活動を説明するのに対し、エネルギー収支分析では、現代の技術社会が産み出した様々な技術やシステムを、エネルギーという客観的かつ普遍性を備えた指標でもって分析する。それはある意味において、自然科学から見たエネルギー利用システムの合理性と、人間が社会活動を営む社会的合理性との乖離を説明することにもなる。

発電プラントは、燃料である1次エネルギーを、ある設備を介して2次エネルギーである電力に変換するものであるが、その生産設備には、電力を得るための燃料以外に、プラントの建設や燃料の採掘、輸送、転換、貯蔵、発電所の運転に大量のエネルギーが直接あるいは間接に投入されている。エネルギーを生産する発電プラントは、その一方においてはエネルギーの消費者でもある。発電用の燃料を除いた建設と運転に投入されるエネルギーが生産される電気エネルギーより大きい場合、発電プラントとして成立しないこととな

る。通常、生産エネルギーは投入エネルギーより大きく、その大小関係でもって、その技術が発電プラントとしてどの程度優れているか、またそれを改善するにはどのプロセスを改善すべきかを理解することが可能となる。

エネルギー収支の計算の過程で投入エネルギーを算出するには、積み上げ方式と産業連関分析の2通りの方法がある。以下にその2つの方法を説明する。

3.1.1 積み上げ方式

積み上げ方式とは、対象を構成要素に分類し、各要素の形成に必要なエネルギーを積算するものである。例えば発電所の建設に要するエネルギーについては、発電所を土木部分、タービン、配管などの構成要素に分類し、それを製造するのに必要な機器素材の量を求めて、機器素材のエネルギー原単位を乗じることにより算出する。建設には、機器を製造するために直接必要となる素材エネルギーだけでなく、発電所の建設現場などで消費するエネルギーも必要である。この消費エネルギーには、素材を発電所まで運搬するのに必要なエネルギー、発電所の建設現場で必要なエネルギー、建設現場の作業機器の製造に必要なエネルギーがある。このように、積み上げ方式は計算の労力が大きく、どこまでのプロセスについて検討するかで結果が異なってくる。

また積み上げ方式では、対象プラントの設計や立地条件の差異により、必要エネルギーが大きく異なることがある。例えば同じ原子力発電でも、プラントの土木基礎工事に必要なセメントの量は地盤の条件によって大きく違う。積み上げ方式の場合、このように調査のサンプルの選び方で結果は異なってしまう。しかしながら、反対の見方をすれば、これは特定のエネルギー収支分析に適していることになる。

3.1.2 産業連関分析

これは産業連関表を利用してエネルギー収支分析を行うものである。産業連関表とは、日本の経済活動を系統的かつ400程度の詳細な部門別に記述している統計のことであり(8)、産業連関分析は、産業連関表に示される各産業について、生産される財の単位金額あたりに必要な1次エネルギー量をその財のエネルギー濃度と定義し、求めるものである。

産業連関分析は、積み上げ方式と比較すると作業に要する労力は少ない。これは、産業連関表で作成されているデータを加工して、投入エネルギーを計算することができるためである。また投入エネルギーについては、対象の産業に対して間接に投入されている量も含めて計算することができる。

ただしこの方法には、産業連関表を利用することによる欠点がある。まず第1に、産業

連関表における産業ないし商品分類が高々数百であるため、それ以上に細かい品目に関する分析は不可能である。すなわち同一部門に属する製品間の、価格あたりのエネルギー量（エネルギー濃度）の違いを表現することができない。第2の問題は、非エネルギー製品の同一部門内での価格差である。産業連関表の分類では、1つの部門の中に多種多様な製品が含まれているが、全て金額表示で表現されてしまうという欠点がある。そして第3には、輸入品と国産品の価格差、ならびにそれに起因するエネルギー濃度差があることである。これはエネルギー資源について見た場合、国内価格と輸入価格の差に相当する。

以上のように、積み上げ方式と産業連関分析は性格が異なるものであるが、どちらが優れた手法であるかということは一概にいえず、検討対象によって使い分ける必要がある。一般的には、比較的大きな分類の商品や産業のエネルギー濃度の計算には産業連関分析、個別の商品や技術については積み上げ方式が多く用いられている。本章では、森林バイオマス資源収穫システム、ならびにバイオマス発電技術を検討するため、分析にあたっては、産業連関分析ではなく積み上げ方式を用いて行った。

3.1.3 エネルギー収支

エネルギー収支分析の投入エネルギーには、プラントの建設に投入する機器や資材だけでなく、機器製造時やプラント建設時に働く労働者の消費エネルギーも含めて考えるべきであるという意見がある。またプラントの運用エネルギーには、発電に用いる燃料を含めて検討すべきだという考え方もある。

エネルギー収支は、その計算方法から、総エネルギー収支（GEA）と正味エネルギー収支（NEA）の2種類に分類される（図-4.1）。

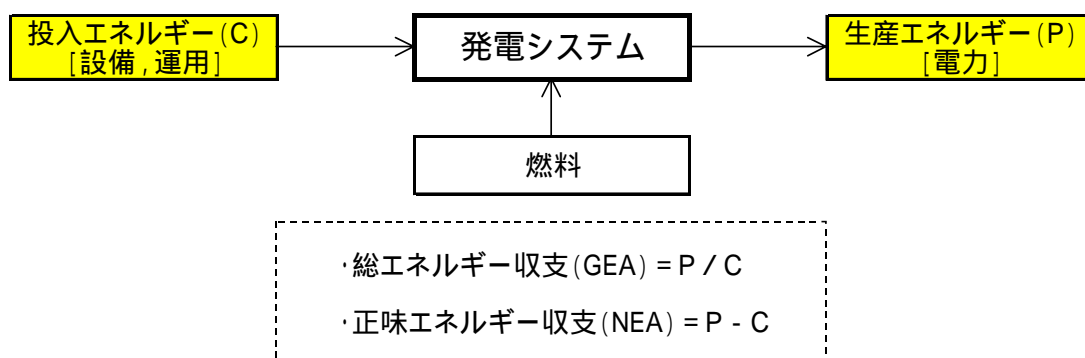


図-4.1 総エネルギー収支と正味エネルギー収支

発電プラントにおける投入エネルギーに燃料を含めると、 $GEA < 1$ 、 $NEA < 0$ となる。また燃料を含めないエネルギー収支を検討する場合、 $GEA > 1$ 、 $NEA > 0$ であることが、発電プラントとして成立する条件となる。

総エネルギー収支は、発電プラントで生産されるエネルギー (P) とプラントに直接あるいは間接に投入するエネルギー (C) の比 (P/C) で表される。一方正味エネルギー収支は、エネルギー生産量 (P) から投入エネルギー量 (C) を差し引いた値 ($P - C$) である。正味エネルギー収支は、投入エネルギーに燃料を含めない場合プラントの発電容量に依存し、容量が大きくなれば値も大きくなる。発電容量が異なるプラント、例えば原子力発電のような大型電源と太陽光発電のような分散型電源を比較する場合、正味エネルギー収支は、大型電源である原子力発電の値の方が大きくなるのは当然であり、この場合、両者の比較は無意味となる。これに対し総エネルギー収支は、生産エネルギーと投入エネルギーの比で表されるため、異なる発電技術について、それぞれのプラントに最適な発電容量で比較するのに適している。

エネルギー収支分析において、生産エネルギー (P) は 2 次エネルギーであり、投入エネルギーには 1 次エネルギー (C_1) と 2 次エネルギー (C_2) が含まれる。エネルギー収支の値は、2 次エネルギーの値をそのまま適用するか、それとも 1 次エネルギーに換算して適用するかにより異なった結果となるため、総エネルギー収支 (E) は、次の 3 種類の計算式により表される。

1 次エネルギーと 2 次エネルギーを区別しない。

$$E_1 = P / (C_1 + C_2)$$

P を 2 次エネルギー、 C を 1 次エネルギーで表す。

$$E_2 = P / (C_1 + C_2 \cdot \quad) \text{ [ただし } \quad \text{は 1 次エネルギー換算係数]}$$

P 、 C とともに 1 次エネルギーで表す。

$$E_3 = P \cdot \quad / (C_1 + C_2 \cdot \quad)$$

本章では、上記 の考え方に基づいて総エネルギー収支を求めている。すなわち、投入エネルギーを全て 1 次エネルギーに換算し、また発生する生産エネルギー (電力) も 1 次エネルギーに換算して、その比で表したものである。なお 1 次エネルギー換算係数 については、わが国の各種発電システムの発電効率を考慮して $2,250 \text{ kcal} / \text{kWh}(107)$ とした。

3.1.4 二酸化炭素排出量

森林バイオマス資源収穫システムおよび発電プラントの二酸化炭素排出量については、

エネルギー収支分析により求めた投入エネルギーをもとに、生産エネルギー1 kWhあたりの二酸化炭素排出原単位で表した。二酸化炭素の排出量を、プラントの建設、森林バイオマスの粉碎から林内運搬、輸送までの各工程も含めて総合的に分析した。これにより、建設からバイオマスの搬入、ならびに発電プラントに関わる全過程において、エネルギーがどのように消費され、それぞれの工程でどの程度の二酸化炭素が排出されているかを明らかにした。ただし、燃料となる森林バイオマスの燃焼時の二酸化炭素排出量については、本章ではカウントしなかった。これはバイオマスのカーボン・ニュートラルという特性、すなわち、植物が光合成により大気中の二酸化炭素を固定してバイオマスの再生産を行うという性質を考慮したことによるものである。

3.2 投入エネルギー

エネルギー収支分析の際には、収穫システムやプラントに投入されるエネルギーをどのように定義し、そしてそれをどのように計算するかが大切となる。投入エネルギーについては、発電プラントの場合、その入力エネルギーを求めることは難しい。本章では、発電所で発電時に消費する燃料を投入エネルギーに含めないものとした。

また機械を製造する、あるいは設備を建設する際に労働者が消費するエネルギーも本章では考慮していない。それは、人が生きていくには社会で何らかの仕事に従事しなければならず、必ずしも機械の製造や発電プラントの建設のためだけに生きているのではないという理由によるものである。

森林バイオマス資源収穫システム、ならびに燃料を除いた発電プラントの投入エネルギーは、設備エネルギーと運用エネルギーに大別される。設備エネルギーとは、機械の製造や発電プラントの建設に要するエネルギーのことであり、それには単にプラント機器や資材の素材エネルギーだけでなく、機器や資材を工場で製造するのに要する製造エネルギー、それを建設現場にまで運ぶ輸送エネルギー、さらに建設現場で組み立てるのに要する建設エネルギーも含まれる。また運用エネルギーとは、収穫システムおよびプラントのライフサイクルにおいて、その運用に要するエネルギーのことであり、発電時に消費する燃料を除いた他の全てのエネルギーがこれに該当するが、それには森林バイオマスの粉碎、林内運搬、発電所までの輸送、それに修繕保守に要するエネルギーが含まれる。

プラントの建設や運用、燃料の搬入には、資材やエネルギーの他に多数の労働者も関与している。人間の労働も、人が食糧や物資を消費することから間接的にはエネルギーを消

費しているという考え方も成り立つ。しかし本章ではエネルギー収支を狭義に捉え、収穫システムおよびプラントの投入エネルギーの分析については、直接に関係する物質のみを対象とした。したがって、プラントの建設や運転等に費やされる人間の労力という形のエネルギーは、投入エネルギーの検討範囲には含まれていない。本章で定義した投入エネルギーである設備エネルギーと運用エネルギーについて以下に説明する。

3.2.1 設備エネルギー

設備エネルギーとは、発電プラントと発電用燃料である森林バイオマスの粉碎、林内運搬、輸送の各工程における設備の建設に要するエネルギーのことであり、素材エネルギー、製造エネルギー、輸送エネルギーおよび建設エネルギーの4種類により構成される。

- 1) 素材エネルギー 収穫システムにおける各種機械の材料、発電プラントを構成する機器・装置等の使用材料、ならびにプラントの建設に投入する資材を生産する際に必要となるエネルギーのことである。素材エネルギー量については、各種機械、機器・装置等の材料と建設資材についてその重量を算出し、それにそれぞれの材料のエネルギー原単位を乗じることにより計算することができる。
- 2) 製造エネルギー システムの各種機械、ならびに発電プラントを構成する機器・装置等を、工場で原材料から製造し、組み立てる際に消費するエネルギーのことである。この値については、各種機械、機器・装置等の重量を算出し、これに各種機械、機器・装置等の製造および組み立てに要したエネルギー原単位を乗じることにより計算可能である。
- 3) 輸送エネルギー システムにおける各種機械、発電プラントの建設に要する機器・装置および建設資材を工場から現場まで輸送する際に必要となるエネルギーのことである。輸送エネルギー量については、各輸送手段の輸送距離に各輸送手段のエネルギー原単位を乗じ、さらに機械、機器・装置、資材等の重量を乗じることにより算出することができる。
- 4) 建設エネルギー 建設現場における機器・装置等の組み立て、ならびに土木構造物の建設に要するエネルギーのことであり、建設時に消費する燃料使用量および電力量と、建設機械の使用による損耗エネルギー量の合計値である。このうち建設機械の使用による損耗エネルギー量は、建設機械の素材エネルギー量と製造エネルギー量のそれぞれに、建設機械の耐用年数に対する使用期間の割合を乗じて算出した値の合計値である。

3.2.2 運用エネルギー

運用エネルギーとは、発電プラントに搬入される燃料である森林バイオマスの粉碎、林内運搬、輸送の各工程において設備の運用に要するエネルギー、ならびにプラントの修繕保守に要するエネルギーのことである。修繕保守エネルギー量は、消耗あるいは破損により取り替えを必要とする機器および部品の素材および製造エネルギー量である。発電プラントの修繕保守エネルギーについては、20年間でプラントの全設備が更新されるように、毎年修繕保守を行うものとして算出している(107)。すなわち、発電プラントの建設に要する設備エネルギーの5%が、年間の修繕保守の運用エネルギーとなる。

運用エネルギーには、動力および加熱源として電力や石油を直接に利用する部分と、修繕保守での交換機器や資材に投入するエネルギーとがある。両者は、設備エネルギーの算出と同様電力、石炭、石油、軽油に分類し、それぞれのエネルギー原単位をもとに全投入エネルギーが計算できる。

4. 森林バイオマス資源収穫システムのエネルギー収支

4.1 検討範囲と前提条件

4.1.1 システムの検討範囲

積み上げ方式によるエネルギー収支分析を行う場合、前提として分析の検討範囲を正確に設定する必要がある。本章で対象とする森林バイオマス資源収穫システムの検討範囲について、森林バイオマスの粉碎から発電所までの各工程で検討した設備の建設とその運用に要するエネルギーを図-4.2 に示す。なお図-4.2 には、本章の検討の範囲外ではあるが、立木の伐採から造材までの各工程、ならびに次節で検討する二酸化炭素排出量の検討範囲も併せて示されている。またシステムの各工程の詳細については、4.1.2 で解説する。

なお、分析のための調査において注意すべき点が2つある。まず、検討範囲は可能な限り詳細に調査することが望ましいが、そのためには大変な労力が必要となる。このことを回避するには、エネルギー投入量の大きな工程をあらかじめ調査しておくことにより、値の大きな順に詳細に分析していくことが重要となる。影響の小さい工程を正確に分析することは、労力を無駄に用いることとなる。2番目の注意点としては、工程によっては検討すべきデータを入手できないことがあることが挙げられる。それには、過去の分析例がない場合と、商用化していない技術で分析が不可能な場合とがある。

本章では、収穫システムおよび発電プラントの各工程における投入エネルギーのデータを可能な限り収集した。設備エネルギーについては、素材、製造、輸送、建設に関する投入エネルギーを求め、また運用エネルギーについては、発電プラントだけでなく森林バイオマスの粉碎、林内運搬、輸送の各工程における投入エネルギーを求めた。

発電プラントのエネルギー収支については、石炭火力発電プラント対して分析した事例(107)を参考にした。本章で対象とするバイオマス火力発電プラントと石炭火力発電プラントの発電容量を比較することにより、バイオマス火力発電プラントの素材エネルギーを求め、プラントの製造、輸送、建設エネルギーの合計を素材エネルギーの20%と仮定し(107)、その値を含めて設備の投入エネルギーを算出した。

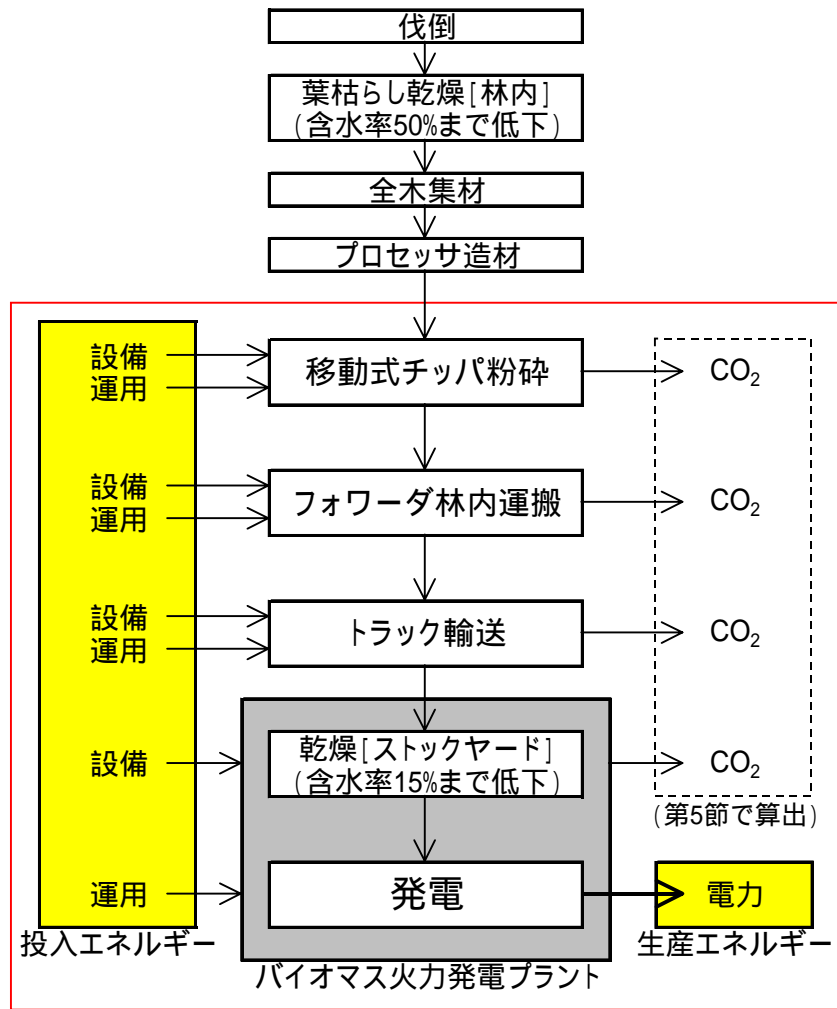


図-4.2 エネルギー収支分析の検討範囲（赤線枠内）

また、素材（鋼材，アルミニウム，コンクリート）のエネルギー原単位（表-4.1）については、わが国における値を採用し、この値をもとに各工程の素材エネルギーを求めた。

表-4.1 素材のエネルギー原単位(107)

素材	単位	電力	石油	石炭	合計
鋼材	Mcal / t (kWh / t)	1125 (500)	0	5000	6125
アルミニウム	Mcal / t (kWh / t)	39375 (17500)	11000	0	50375
コンクリート	Mcal / t (kWh / t)	44 (20)	104	61	209

4.1.2 森林バイオマス資源収穫システム

収穫システムにおいては、まず立木を伐倒した後に葉枯らし乾燥を行うことにより、全木材の含水率を 50%にまで低下させる（第 2 章参照）。これは、含水率を低下させることにより、木材の乾燥コストを低減させることはもとよりバイオマスの単位重量あたりの発熱量を増加させることを目的とした措置である。次に、第 2 章および第 3 章に引き続き、全木集材、先山土場におけるプロセッサ造材が実施される作業システムを想定した。本章においても、プロセッサによる造材作業の際に発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付けているため、プロセッサ造材工程までは木材生産を目的として行われるものとし、それよりも先の工程についてエネルギー収支分析を実施した。

発電プラントへは、森林バイオマスを粉砕したチップを搬入する必要があるが、この際必要となる工程は林内運搬、輸送、粉砕の 3 つであり、これについては前章で検討したシステムを適用することが可能である。したがって本章では、前章において“エネルギー投入率”および森林バイオマスの単位重量あたりの二酸化炭素排出量が最も小さい値となった“林内型”システム、すなわち先山土場で移動式チップパによりバイオマスを粉砕し、フォワーダが林内の作業路上を運搬し、林道端土場で積み替えた後にトラックが林道・一般道上を輸送するシステムを想定した。なおフォワーダの林内運搬距離については、第 2 章の現地実験の測定結果である 191.4 m の値を用いている。またトラック輸送距離は、発電プラントの規模等により決定される性格のものであるため、4.1.3 で算出する。

発電プラントにおいて森林バイオマスをエネルギー変換する前に、施設内のストックヤ

ードでバイオマスを再び乾燥させることにより、単位重量あたりの発熱量の増加を図る。乾燥により低下させることが可能な含水率については、ここでは気乾状態の 15% に設定した(88)。またプラントの変換技術については、熱電併給システム (CHP) による効率の向上が不可欠であるという意見もあるが、熱供給についてインフラ整備等の困難な課題を有するわが国の現状を考慮して、ここでは発電のみを行い、周辺地域へ電力を供給するシステムを検討するものとした。

4.1.3 バイオマス火力発電プラント

ここではバイオマス火力発電プラントの規模を決定し、その規模に基づいて、プラントを稼働させるために必要なバイオマス量およびトラック輸送距離を算出した。

(1) バイオマス火力発電プラントの規模

本章で検討するバイオマス火力発電プラントの規模については、わが国において実際に木質バイオマスを専用に用いて発電している事例の調査結果をもとに、発電容量を 3 MW、発電効率 (送電端) を 12% とした(77)。両者は、国内で実機稼働している 9 箇所の施設の平均値である。またプラントは 1 日 24 時間稼働するものとし、年間稼働日数については 256 日 / 年 (稼働率 70%) (118) とした。

(2) プラントを稼働させるために必要なバイオマス量

発電プラントでは含水率 15% のバイオマスを燃焼させるため、発熱量については、絶乾重量で 1 トンのバイオマスに対し、0.15 トンの水分を考慮に入れる必要がある。水を蒸発させるために必要な熱量、すなわち水の潜熱を 2.5 GJ / トン(113) として、0.15 トンの水を蒸発させるために必要な熱量は 0.375 GJ となる。したがって、水分を考慮したバイオマスの単位重量あたりの発熱量は、バイオマスの絶乾重量 1 トンあたりの発熱量を 18.6 GJ(52) とすれば、0.15 トンの水の潜熱 0.375 GJ を差し引いて 18.2 GJ / dry-t と計算される。

次に発電容量 3 MW、発電効率 (送電端) 12% のプラントが 1 時間に消費するバイオマス量を求める。このプラントが 1 時間に 3 MWh の電力を発電し、また 1 MWh が 3.6 GJ に相当することから、バイオマス量は $3 \text{ (MW)} \times 3.6 \text{ (GJ / MWh)} / 0.12 / 18.2 \text{ (GJ / dry-t)} = 4.9 \text{ (dry-t / 時)}$ となる。以上より、このプラントを 1 年間稼働させるために必要なバイオマス量については、プラントが 1 日に 24 時間、1 年間に 256 日稼働することから、次のように計算される。

$$4.9 \text{ (dry-t / 時)} \times 24 \text{ (時 / 日)} \times 256 \text{ (日 / 年)} = \underline{30106 \text{ (dry-t / 年)}}$$

(3) トラック輸送距離

本章では森林バイオマス資源として林地残材を対象としているが、わが国における林地残材の年間発生量が 300 万 dry-t / 年 (表-1.1 参照) であることから、本章で想定した年間 30,106 dry-t の森林バイオマスを消費するバイオマス発電プラントを、日本に 100 基建設することが可能であるという計算になる。

日本の国土面積は 37.78 万 km² であるが、ここで本章で対象とするバイオマス発電プラント 1 基がカバーすべき地域を、面積が 3,778 km² となる、プラントを中心とする円であるものとする。円の面積が 3,778 km² であることから、円の半径は 34.7 km と計算でき、この値を森林バイオマスの最大輸送距離とした場合、円の中心までの平均輸送距離は最大輸送距離の 3 分の 2 (103) であるため、トラック輸送距離については、迂回率を 1.2 (15) とし、次式により求められる。

$$34.7 \text{ (km)} \times 2/3 \times 1.2 = \underline{27.8 \text{ (km)}}$$

4.2 設備エネルギー

4.2.1 森林バイオマス資源収穫システム

収穫システムを構成する移動式チップ粉砕、フォワーダ林内運搬、トラック輸送の各工程における機械に関する基礎データについては、運用エネルギーを求める際に必要となる燃料消費量も含め、表-4.2 に整理した。なお本章では、各種機械の素材エネルギーを求めるにあたり、機械が全て鋼材により構成されているという仮定を置き (42)、また製造、輸送、建設の設備エネルギーについては、素材エネルギーの 20% (107) と仮定して求めた。

各種機械に関する基礎データとして、フォワーダについては第 2 章、トラックについては第 3 章の実験結果をそれぞれ用いた。また移動式チップについては、東京大学大学院農学生命科学研究科附属秩父演習林 29 林班は 8 小班において、コマツゼノア (株) 製 SR350 (定格出力 25.7 kW / 2,100 rpm) を対象に森林バイオマス粉砕実験を行い (図-4.3)、作業時間、バイオマス処理量、燃料 (軽油) 消費量等を測定し、処理能力などを算出した。



図-4.3 移動式チップによる森林バイオマス粉砕実験

表-4.2 収穫システムを構成する各工程における機械に関する基礎データ

機械	重量	耐用時間	処理能力	燃料消費量
移動式チップ	2450 (kg / 台) ²	5000 (時 / 台) ³	0.450 (dry-t / 時) ⁵	4.53 (L / 時) ⁵
フォワーダ	5600 (kg / 台) ²	5400 (時 / 台) ⁴	1.688 (dry-t / 時) ⁶	2.01 (L / 時) ⁶
トラック ¹	7960 (kg / 台) ²	5500 (時 / 台) ⁴	1.259 (dry-t / 回) ³	5.5 (km / L) ³

¹ここでは4トントラックを想定しているが(第3章参照), 走行速度については30 km / 時(93)とした。

²林業機械化協会(87)より引用。

³第3章を参照されたい。

⁴澤口(93)より引用。

⁵移動式チップによる森林バイオマス粉碎実験においては, 作業時間1.6時間で5.995 m³のチップを生産し, その間の燃料消費量については7.25 Lという測定結果が得られた。したがって移動式チップの処理能力は, チップの比重を0.12 dry-t / m³(第3章参照)として $5.995 \times 0.12 / 1.6 = 0.450 \text{ dry-t / 時}$, 単位時間あたりの燃料消費量は $7.25 / 1.6 = 4.53 \text{ L / 時}$ となる。

⁶フォワーダについては, 第2章の実験結果を用いているが, 1サイクルあたり残材運搬量が0.4253 dry-t / 回であることから, チップ粉碎による森林バイオマスの“減容率”0.274(第3章参照)を用いて, 1サイクルあたりチップ運搬量は $0.4253 / 0.274 = 1.552 \text{ dry-t / 回}$ となる。一方, フォワーダの林内運搬距離を191.4 mとしていることから, サイクルタイムは第2章の(2.18)式を用いて $2.28 \times 191.4 + 2874 = 3310 \text{ 秒 / 回}$, 1サイクルあたり燃料消費量は第2章の(2.20)式を用いて $2.58 \times 191.4 + 1351 = 1845 \text{ cm}^3 / \text{回}$ と計算される。したがって, フォワーダの処理能力は $1.552 / (3310 / 3600) = 1.688 \text{ dry-t / 時}$, 単位時間あたりの燃料消費量は $(1845 / 1000) / (3310 / 3600) = 2.01 \text{ L / 時}$ となる。

(1) 移動式チップ粉砕

表-4.2 より，耐用時間が 5,000 時間，処理能力が 0.450 dry-t / 時であることから，1 台の移動式チップが，そのライフタイムの間に生産する森林バイオマス量は $0.450 \times 5000 = 2250$ dry-t となる。本章で対象とするバイオマス火力発電プラントを運転するためには，1 年間に 30,106 dry-t の森林バイオマスが必要となるため， $30106 / 2250 = 13.38$ ，すなわち，1 年間の森林バイオマスの粉砕には 13.38 台分の移動式チップの設備エネルギーが必要である。したがって，移動式チップの重量が 2,450kg / 台であることから，1 年間の粉砕作業に要する鋼材の重量は，次のように計算される。

$$(2450 / 1000) \times 13.38 = \underline{32.8 \text{ t / 年}}$$

(2) フォワーダ林内運搬

表-4.2 における耐用時間 5,400 時 / 台，処理能力 1.688 dry-t / 時の値を用いることにより，1 台のフォワーダが，そのライフタイムの間に運搬する森林バイオマス量は $1.688 \times 5400 = 9115$ dry-t と計算される。したがって，1 年間に 30,106 dry-t の森林バイオマスを消費する発電プラントを運転するためには， $30106 / 9115 = 3.30$ ，つまり 1 年間の森林バイオマスの林内運搬に 3.30 台分のフォワーダの設備エネルギーが必要となる。フォワーダの重量が 5,600 kg / 台であることより，次式により 1 年間の林内運搬作業に要する鋼材の重量を求めることができる。

$$(5600 / 1000) \times 3.30 = \underline{18.5 \text{ t / 年}}$$

(3) トラック輸送

トラックの走行速度を 30 km / 時としていることから，トラック 1 台の耐用時間 5,500 時間における総走行距離は 165,000 km である。森林バイオマス資源収穫システムにおけるトラックの平均輸送距離が 27.8 km と計算されているため，システムにおいて，トラックがフォワーダから森林バイオマスを積み替える林道端土場と発電プラントの間を往復する回数は，合計で $165000 / (27.8 \times 2) = 2968$ 回と計算される。1 回の輸送量が 1.259 dry-t (表-4.2 参照) であることから，1 台のトラックが，そのライフタイムの間に輸送する森林バイオマス量は $1.259 \times 2968 = 3737$ dry-t となり，1 年間に 30,106 dry-t の森林バイオマスを消費する発電プラントを運転するためには， $30106 / 3737 = 8.06$ ，つまり 1 年間の森林バイオマスの輸送に 8.06 台分のトラックの設備エネルギーが必要となる計算になる。トラックの重量が 7,960 kg / 台であることから，1 年間の輸送作業に要する鋼材の重量は，次の計

算により求めることができる。

$$(7960 / 1000) \times 8.06 = \underline{64.2 \text{ t/年}}$$

4.2.2 バイオマス火力発電プラント

バイオマス火力発電プラントの建設に必要な資材量は、1,000 MWの石炭火力発電プラントを基準として、発電容量の規模の0.7乗に比例する(105)ものとした。本章で対象とするバイオマス火力発電プラントの発電容量が3 MWであることから、 $(3/1000)^{0.7} = 0.0171$ 、すなわちこの発電所の建設に必要な資材量については、1,000 MWの石炭火力発電所の建設に要する資材量に0.0171を乗じることにより求めることができる。

火力発電所の建設に使用される主要な素材は、鉄筋、コンクリート、ケーブル、配管(金属部、非金属部)、ケーブル・トレイ、導管、発電用タービン、ボイラーである。建設に必要な素材エネルギーの約70%はボイラー、タービン、発電機などの主要機器と土木基礎や構築物(森林バイオマスの場合、この中に乾燥用のストックヤードも含まれる)で、残りの約30%は敷地の造成、塗装、内装、ガラス、絶縁、フェンス、タンク、制御装置、ドア、エレベーター等種々雑多なものである。

表-4.3 に、本章で対象とするバイオマス火力発電プラントの建設に必要な素材量を、鋼材、アルミニウム、コンクリートの材質別に示す。プラントの素材エネルギー量は、この素材量に、表-4.1 に示したそれぞれの素材のエネルギー原単位を乗じることにより求めることができる。またプラントの設備エネルギーを算出するためには、素材以外の製造、輸送、建設についても設備のエネルギーを求める必要があるが、本章では、前述の通り製造、輸送、建設の設備エネルギーを素材エネルギーの20%と仮定した。

表-4.3 バイオマス火力発電プラントの必要素材量（発電容量 3 MW）¹

素材	単位	鋼材	アルミニウム	コンクリート
鉄筋	t	124.6	-	-
コンクリート	t	-	-	3006.9
	(m ³)			(1307.3)
ケーブル	t	3.9	10.7	-
	(km)	(19.1)	(19.1)	
配管	t	138.4	-	42.4
	(km)	(1.9)		(1.9)
ケーブル・トレイ	t	42.4	-	-
	(km)	(3.7)		
導管	t	43.6	-	-
タービン	t	654.9	-	-
ボイラー	t	55.9	-	-
小計（70%）	t	1063.7	10.7	3049.3
計	t	1519.6	15.3	4356.1

¹1,000 MWの石炭火力発電プラントの建設に要する資材量(107)に 0.0171 を乗じることにより求めた値である。

ここで森林バイオマス資源収穫システムの素材エネルギーについて、以上より求めたシステムの粉砕，林内運搬，輸送，発電の各工程における必要素材量に，表-4.1 に示した素材のエネルギー原単位を乗じることにより得られた結果を表-4.4 に示す。なお，発電工程の必要素材量の算出に用いた石炭火力発電プラントの必要素材量についても併せて示す。

表-4.4 森林バイオマス資源収穫システムの素材エネルギー

工程	材質	素材量		素材エネルギー量				
		単位	重量 ¹	単位	電力	石炭	石油	計
粉砕	鋼材	t / 年	32.8	Gcal / 年 (MWh / 年)	36.9 (16.4)	164.0	-	200.9
林内 運搬	鋼材	t / 年	18.5	Gcal / 年 (MWh / 年)	20.8 (9.3)	92.5	-	113.3
輸送	鋼材	t / 年	64.2	Gcal / 年 (MWh / 年)	72.2 (32.1)	321.0	-	393.2
発電	鋼材	t	1063.7 (62204)	Gcal (MWh)	1196.7 (531.9)	5318.5	-	6515.2
	アルミ ニウム	t	10.7 (624)	Gcal (MWh)	421.3 (187.3)	-	117.7	539.0
	コンク リート	t	3049.3 (178320)	Gcal (MWh)	134.2 (61.0)	186.0	317.1	637.3
	小計 (70%)	t	-	Gcal (MWh)	1752.2 (780.2)	5504.5	434.8	7691.5
計		t	-	Gcal (MWh)	2503.1 (1114.6)	7863.6	621.1	10987.9

¹発電工程の素材量については，算出に用いた石炭火力発電プラントの必要素材量を括弧内に示した（括弧内の値に 0.0171 を乗じることにより求めることができる）。

以上，森林バイオマス資源収穫システムおよび 3 MW のバイオマス火力発電プラントについて，設備の建設に必要な素材量とそのエネルギー量を求めた。発電プラントの耐用年数を 30 年として運用した場合，その運用に要する粉砕，林内運搬，輸送，発電の各工程の素材エネルギーは，合計で $(200.9 + 113.3 + 393.2) \times 30 + 10987.9 = 32209.9$ Gcal と計算される。このうちプラントの素材エネルギー 10,987.9 Gcal は全体の 34% を占めており，それはボイラー，タービンなどの主要機器と土木基礎，構築物の素材エネルギー 7,691.5 Gcal に，その他のプラント周辺機器の素材エネルギー 3,296.4 Gcal（プラントの素材エネルギーの 30%）を加えたものである。

4.3 運用エネルギー

4.3.1 森林バイオマス資源収穫システム

収穫システムにおける各種機械は全て軽油を燃料としているが、ここでは軽油のエネルギー原単位を 9,200 kcal / L(4I)として、各工程の運用エネルギーを算出する。

(1) 移動式チップ

表-4.2 より耐用時間が 5,000 時間、燃料消費量が 4.53 L / 時であり、また前項より、本章で対象とするバイオマス火力発電プラントを運転するためには年間 13.38 台分の移動式チップが必要であることから、粉碎作業により 1 年間に $4.53 \times 5000 \times 13.38 = 303057$ L / 年の軽油を消費する計算になる。したがって $1 \text{ Gcal} = 10^6 \text{ kcal}$ の関係を用いて、粉碎工程の 1 年間の運用エネルギーを次式により求めることができる。

$$303057 \times 9200 / 10^6 = \underline{2788.1 \text{ Gcal / 年}}$$

(2) フォワーダ林内運搬

前項より、プラントの運転に年間 3.30 台分のフォワーダが必要となることから、表-4.2 における耐用時間 5,400 時 / 台、燃料消費量 2.01 L / 時の値を用いることにより、林内運搬時の 1 年間の軽油消費量は $2.01 \times 5400 \times 3.30 = 35818$ L / 年となる。よって、林内運搬工程の 1 年間の運用エネルギーは次のように計算される。

$$35818 \times 9200 / 10^6 = \underline{329.5 \text{ Gcal / 年}}$$

(3) トラック輸送

表-4.2 における耐用時間 5,500 時 / 台、燃料消費量 5.5 km / L、走行速度 30 km / 時の値より、1 台のトラックは、そのライフタイムの間に $(30 \times 5500) / 5.5 = 30000$ L の軽油を消費することになる。前項よりプラントの運転に年間 8.06 台分のトラックが必要となることから、輸送工程の 1 年間の運用エネルギーは次式により計算される。

$$30000 \times 8.06 \times 9200 / 10^6 = \underline{2224.6 \text{ Gcal / 年}}$$

4.3.2 バイオマス火力発電プラント

発電プラントの運用エネルギーのうち修繕保守エネルギーについては、前述の通り 20 年間でプラントの全設備が更新されるように、毎年修繕保守を行うものとして、プラントの建設に要する設備エネルギーの 5% を、年間の修繕保守の運用エネルギーとした。

またプラントの運用エネルギーについては、修繕保守エネルギーの他に発電所内で必要となる電力がある。このことについては、本章ではプラントの発電出力を送電端効率で考えている、換言すれば発電機が生産する電力から発電所内で必要となる分を差し引いたもので考えている。このため、所内で必要となる電力については、自家発電により賄うものとし、ここではプラントの運用エネルギーにカウントしていない。

4.4 投入エネルギーおよびエネルギー収支

以上より、森林バイオマス資源収穫システムの投入エネルギー量を、設備エネルギーと運用エネルギーの和で表すことができる。バイオマス火力発電プラントの耐用年数を 30 年とした場合の、粉砕から発電までの全工程に関する設備エネルギーと運用エネルギーの比率を図-4.4 に示す。

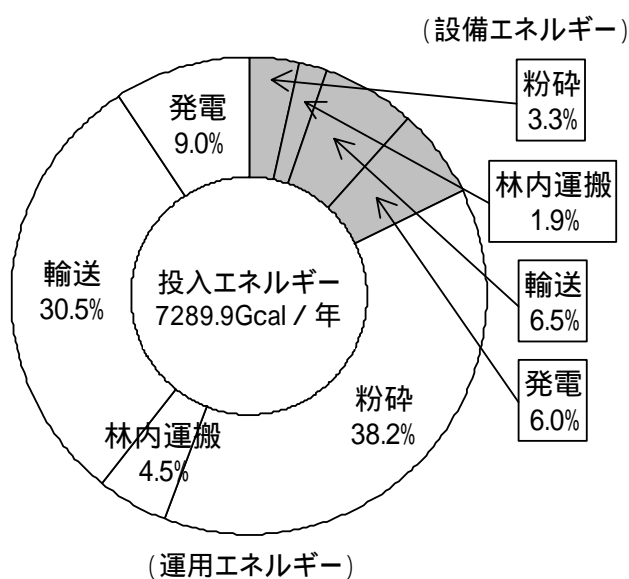


図-4.4 森林バイオマス資源収穫システムの投入エネルギー
(バイオマス火力発電プラントの耐用年数を 30 年とした場合)

年間の投入エネルギー量は 7,289.9 Gcal / 年となり、そのうち運用エネルギーが 6,001.5 Gcal / 年と全体の 82% を占めている。このことは、システムを構成する各種機械、機器・装置等の設備エネルギーと比較して、運用エネルギーが相当に大きいことを意味するもの

である。したがって、粉碎、林内運搬、輸送の各工程の運用エネルギーである機械の燃料消費量の有する熱量が、機械を構成する素材を製造するためのエネルギーや機械を組み立てるエネルギーよりも相当に大きいことになり、前章で林業機械の燃料消費量を基準とした収穫システムの“エネルギー投入率”が概ね数パーセント台となったことについては、相応の信頼性を有する結果が得られたことが示された。

また運用エネルギーについては、粉碎および輸送の占めるエネルギーが大きく、それぞれ 2,788.1 Gcal / 年、2,224.6 Gcal / 年と、全体の 38.2%、30.5%を占めている。これは、システムの中で粉碎工程および輸送工程のエネルギー効率が他の工程に比べ低いことを意味するものであり、この場合、運用エネルギーは移動式チップおよびトラックの燃料消費量であることから、粉碎、輸送の両工程の処理能力を高め、森林バイオマスの単位重量あたりの燃料消費量を減少させるような作業システムの改善および技術開発が、収穫システムの投入エネルギーを減少させるための先決課題となるといえよう。

エネルギー収支については、生産エネルギーと投入エネルギーから求めることが可能である。表-4.5 は、森林バイオマス資源収穫システムの生産エネルギーと投入エネルギー、そしてそれから計算されるエネルギー収支の結果を示したものである。

表-4.5 森林バイオマス資源収穫システムの投入エネルギーおよびエネルギー収支

項目		単位	バイオマス火力発電プラント						
生産エネルギー	発電容量	MW	3						
	発電効率 (送電端)	%	12						
	1日の稼働時間	時/日	24						
	年間稼働日数	日/年	256						
	発電電力量 (送電端)	MWh/年 (Gcal/年)	18432.0 (41472.0)						
燃料 (森林バイオマス)		Gcal	130960						
投入エネルギー	工程	エネルギー量	単位	電力	石炭	石油	軽油	計	
	粉砕	素材	Gcal/年 (MWh/年)	36.9 (16.4)	164.0	-	-	200.9	
		製造・輸送・建設	Gcal/年 (MWh/年)	7.4 (3.3)	32.8	-	-	40.2	
	林内 運搬	素材	Gcal/年 (MWh/年)	20.8 (9.3)	92.5	-	-	113.3	
		製造・輸送・建設	Gcal/年 (MWh/年)	4.2 (1.9)	18.5	-	-	22.7	
	輸送	素材	Gcal/年 (MWh/年)	72.2 (32.1)	321.0	-	-	393.2	
		製造・輸送・建設	Gcal/年 (MWh/年)	14.4 (6.4)	64.2	-	-	78.6	
	小計		Gcal/年 (MWh/年)	155.9 (69.4)	693.0	-	-	848.9	
	発電	素材	Gcal (MWh)	2503.1 (1114.6)	7863.6	621.1	-	10987.9	
		製造・輸送・建設	Gcal (MWh)	500.6 (222.9)	1572.7	124.2	-	2197.6	
		小計	Gcal (MWh)	3003.7 (1337.5)	9436.3	745.3	-	13185.5	
	運用エネルギー	粉砕		Gcal/年 (MWh/年)	-	-	-	2788.1	2788.1
		林内 運搬		Gcal/年 (MWh/年)	-	-	-	329.5	329.5
		輸送		Gcal/年 (MWh/年)	-	-	-	2224.6	2224.6
		発電		Gcal/年 (MWh/年)	150.2 (66.9)	471.8	37.3	-	659.3
小計			Gcal/年 (MWh/年)	150.2 (66.9)	471.8	37.3	5342.2	6001.5	
			単位	森林バイオマス資源収穫システム					
エネルギー回収年数 ($\times 30 +$) / (-)			年	1.09					
総エネルギー収支 $\times 30 / (\times 30 + + \times 30)$			-	5.69					
正味エネルギー収支 $\times 30 - (\times 30 + + \times 30)$			MWh (Gcal)	455779 (1025503)					

エネルギー回収年数とは、システムを構築するために要したエネルギーを、システムが生産する正味のエネルギーにより何年で回収することができるかを示すものである。したがって、システムの全設備エネルギーを、システムの1年間の生産エネルギーから1年間の運用エネルギーを差し引いた値で除することにより求めることができるが、森林バイオマス資源収穫システムの場合は1.09年と計算された。つまり、耐用年数30年の発電プラントを有するシステムを構成する各種機械、機器・装置等の設備エネルギーを、発電により1.09年という短期間で回収できることを意味する。海外での持続的な植林によるバイオマス火力発電を耐用年数30年で運転した場合において、エネルギー回収年数0.21年と試算された事例(105)があるが、これは発電容量49.3 MW、発電効率22%、稼働率60%で運転した場合の試算値であり、これと比べると本章で検討した発電プラントは規模も効率も小さいこと、他の再生可能エネルギーでは風力発電(発電容量100 kW)が1.99年、太陽光発電(同1,000 kW)が10.00年であることから(107)、森林バイオマス資源収穫システムが、エネルギー回収年数の観点から見て優れたシステムであることが確認された。

また総エネルギー収支が5.69と計算されたことから、収穫システムの各種機械等の燃料消費量以外に、機械の製造エネルギーや(12%と非常に低い)バイオマスのエネルギー変換効率を考慮に入れても、エネルギー生産システムとして十分成り立ち得る結果が得られたといえよう。ライフサイクルを通じた分析により、エネルギー収支の面から見た場合のわが国における森林バイオマスのエネルギー利用の可能性が前章よりも明確に示された。ただし、発電容量1,000 MW、稼働率75%の大型発電プラントの総エネルギー収支を本章と同様の計算方法により求めた場合、石炭が17.15、石油が20.75、原子力が17.40と非常に大きい値となる(107)ことから、大型プラントが本章で検討したバイオマス火力発電プラントよりも優れていることがわかる。このような大型プラントの電力は、その需要に応じて安定的に供給できるといった利点がある。それに対し、バイオマスなどの再生可能エネルギーには、供給能力の低さに加え、その供給の季節変動性が大きいという欠点がある。結局、エネルギーを大量に消費する社会には、火力や原子力といったエネルギーを大量かつ安定的に供給できるプラントが必要となる。エネルギーを大量に消費する今日の社会が、火力や原子力などの大型発電システムによって支えられている所以であり、このようなわが国の社会システムの中で、エネルギー収支の観点のみで森林バイオマス資源収穫システムの導入・普及を議論することは現実的ではない。

5. 森林バイオマス資源収穫システムの二酸化炭素排出量

本節では、森林バイオマス資源収穫システムの二酸化炭素排出量について分析した。システムの二酸化炭素排出量は、前節のエネルギー収支分析で算出した電力、石炭、石油、軽油別の投入エネルギー（表-4.5 参照）に、エネルギーの種類別の二酸化炭素排出原単位（表-4.6）を乗じることにより求められる。

表-4.6 二酸化炭素排出原単位(54, 108)

排出源	単位	原単位
電力	gCO ₂ / kWh	392.33
石炭	gCO ₂ / Mcal	379.28
石油	gCO ₂ / Mcal	294.18
軽油	gCO ₂ / Mcal	91.30

本章では、電力、石炭および石油の二酸化炭素排出原単位として、わが国における値(108)を用いた。すなわち石炭と石油に関する値は、国内および海外での採掘や輸送をも考慮した単位発熱量あたりの二酸化炭素排出量であり、また電力に関する値については、1988年の時点におけるわが国の電源構成（石炭 14%、石油 24%、天然ガス 22%）、ならびに石炭、石油、天然ガスの二酸化炭素排出量原単位に基づいて計算したものである。なお軽油については、国内のデータが得られなかったため、Korpilahti(54)より引用した。

以上より算出した、森林バイオマス資源収穫システムの生産エネルギー1 kWh あたりの二酸化炭素排出量を表-4.7 に示す。ただし前述の通り、燃料となる森林バイオマスの燃焼時の二酸化炭素排出量については、本章ではカウントに入れなかった。

表-4.7 森林バイオマス資源収穫システムの二酸化炭素排出量

項目		単位	バイオマス火力発電プラント						
生産 工 ネ	発電容量	MW	3						
	発電効率（送電端）	%	12						
	1日の稼働時間	時/日	24						
	年間稼働日数	日/年	256						
	発電電力量（送電端）	MWh/年	18432.0						
	燃料（森林バイオマス）	Gcal	130960						
二 酸 化 炭 素 排 出 量	工程	エネルギー量	単位	電力	石炭	石油	軽油	計	
	粉砕	素材	tCO ₂ /年	6.4	62.2	-	-	68.6	
		製造・輸送・建設	tCO ₂ /年	1.3	12.4	-	-	13.7	
	林内	素材	tCO ₂ /年	3.6	35.1	-	-	38.7	
		製造・輸送・建設	tCO ₂ /年	0.7	7.0	-	-	7.7	
	運搬	素材	tCO ₂ /年	12.6	121.7	-	-	134.3	
		製造・輸送・建設	tCO ₂ /年	2.5	24.3	-	-	26.8	
	小計		tCO ₂ /年	27.2	262.8	-	-	290.0	
	設 備 工 ネ	発電	素材	tCO ₂	437.3	2982.5	182.7	-	3602.5
			製造・輸送・建設	tCO ₂	87.5	596.5	36.5	-	720.5
		小計		tCO ₂	524.7	3579.7	219.3	-	4323.0
	運 用 工 ネ	粉砕		tCO ₂ /年	-	-	-	254.6	254.6
		林内運搬		tCO ₂ /年	-	-	-	30.1	30.1
		輸送		tCO ₂ /年	-	-	-	203.1	203.1
		発電		tCO ₂ /年	26.2	178.9	11.0	-	216.1
小計			tCO ₂ /年	26.2	178.9	11.0	487.7	703.8	
二酸化炭素排出量		単位	森林バイオマス資源収穫システム						
設備	= (+ / 30) /	gCO ₂ / kWh	23.6						
運用	= /	gCO ₂ / kWh	38.2						
全体	+	gCO ₂ / kWh	61.8						

発電容量 3 MW，発電効率（送電端）12%，稼働率 70%のバイオマス火力発電プラント（耐用年数 30 年）を有する森林バイオマス資源収穫システムの二酸化炭素排出量は 1,137.9 tCO₂/年であり，生産エネルギー 1 kWhあたりの排出原単位は 61.8 gCO₂/kWhである。設備エネルギーと運用エネルギーからの二酸化炭素排出量はそれぞれ全体の 38%，62%となり，エネルギー収支分析の場合と比較すると両者の差が小さくなる結果が得られた。また，エネルギー収支分析において投入エネルギーに占める割合の高かった粉碎工程および輸送工程の運用エネルギーからの二酸化炭素排出量は，それぞれ 254.6 tCO₂/年（全体の 22.4%），203.1 tCO₂/年（同 17.8%）となり，この点についてもエネルギー収支分析の結果比べて全体に占める割合は小さくなった。

生産エネルギー 1 kWhあたりの排出原単位は，発電効率を 12%として算出した値である。この効率を高めることができれば，すなわち一定の電力量を得るために必要な森林バイオマス量を減少させることができれば，輸送距離の短縮等の効果により（分母のエネルギー生産量が一定の状態での分子のシステム全体の二酸化炭素排出量が減少するので）収穫システムの二酸化炭素排出原単位は減少する。このためには，バイオマスを高効率でエネルギー変換する技術の開発が不可欠であり，この課題は本章の検討の範囲外となるが，発電効率が向上した場合の二酸化炭素排出量の削減効果については，次節で感度分析を行うことにより検討する。

前出の海外での持続可能な植林によるバイオマス火力発電の事例では，二酸化炭素排出原単位は 81.9 gCO₂/kWh(105)と試算されており，本章で対象とした森林バイオマス資源収穫システムにおける値よりも大きい。これは，海外の事例においては，本章では検討の範囲外とした地拵え，植林，施肥，農薬散布，伐倒などの各工程における二酸化炭素排出量も考慮して分析しているためと考えられる。本章は，立木の伐倒から造材までについては，木材生産を目的として実施されるものと位置付けている。このこと自体はわが国の林業の現状に即しているという点において適切であるといえるが，今後，森林バイオマス資源収穫システムの二酸化炭素排出量をより精緻に分析するためには，伐倒から造材までの各工程における二酸化炭素排出量を重量，経済的価値等に応じて木材と森林バイオマスに配分することにより，伐倒工程から検討することが必要となろう。

石炭は，化石燃料の中でも最も環境負荷が高い。エネルギー収支分析の際に，本章で検討したシステムと比較した石炭火力発電プラントの二酸化炭素排出原単位が 960 gCO₂/kWh(108)であることから，二酸化炭素排出量の観点からは，本章での分析の時点で，森林

バイオマスが化石燃料に対して十分有利であることが確認された。ライフサイクルを通じた分析により、森林バイオマスの優位性が前章よりも明確に示された。このことは、近年地球規模での温暖化問題が深刻化するに伴い、社会全体の二酸化炭素排出量の低減に有効な技術や政策に大きな関心が集まっていることから、わが国の社会システムにおける森林バイオマス資源収穫システムの導入・普及の一助となり得ることを意味するものである。

ここで石炭火力発電をバイオマス火力発電で代替することによる、わが国における二酸化炭素排出削減量を算出する。本章で対象としたバイオマス火力発電プラント1基の1年間の発電電力量が18,432.0 MWh/年であり(表-4.5 参照)、このプラントを国内に100基建設可能であることから、年間発電電力量の合計は $18432.0 \times 100 / 1000 = 1843.2$ GWh/年となる。この電力量を石炭の代わりに森林バイオマスで賄う場合、石炭の排出原単位 960 gCO₂/kWh、森林バイオマスの排出原単位 61.8 gCO₂/kWhの値を用いて、国内の1年間の二酸化炭素排出削減量は $(960 - 61.8) / 1000000 \times 1843.2 \times 1000000 = 1655562$ tCO₂/年と計算される。2000年度には、1次エネルギーの国内供給に起因するわが国の二酸化炭素排出量が11億6,200万トン/年(67)であったことより、削減可能量は率にして0.142%となる結果が得られた。この値は、京都議定書に定められた温室効果ガス削減目標の6%と比較すると、決して大きいとはいえない。ただし、この結果は本章で年間300万dry-tの林地残材のみを対象に検討したことによるものであり、森林バイオマス資源収穫システムが実現した場合の二酸化炭素削減可能量を京都議定書の枠組みの中で議論する際には、ポテンシャルの大きい間伐材(500万dry-t/年)および広葉樹(900万dry-t/年)を含めて分析を行う必要がある。

6. 感度分析

感度分析は、システムに対する LCI 分析の結果（“インベントリ結果”という）に影響を及ぼすパラメータのうち、ある 1 つを変化させた場合に（それ以外のパラメータは不変）、インベントリ結果がどの程度影響を受けるかを検討することにより、どのパラメータの影響が大きいかを把握する手法である。

本章では、パラメータとしてバイオマス火力発電所の耐用年数、発電容量および発電効率、インベントリ結果としてエネルギー回収年数、総エネルギー収支、二酸化炭素排出原単位および二酸化炭素排出削減量をそれぞれ選定して、森林バイオマス資源収穫システムに対して感度分析を行った（表-4.8）。

耐用年数については、分析の際に参照した事例と統一して 30 年を基準ケースとしたが、オーストリアの熱電併給（CHP）プラントについて耐用年数を 20 年として LCI 分析を行った事例(47)があることから、20 年とした場合を検討した。

発電容量については、5 MW および 8 MW の場合を検討した。発電プラントの規模が大きくなるためバイオマス収穫量が増加し、各種林業機械、プラントともに素材、運用のエネルギーが増加する。なお基準ケースの 3 MW については、国内の稼働事例の平均値を用いているが、5 MW は岐阜県内における計画事例(55)、8 MW はイギリスにおける計画事例(115)をそれぞれ参考に設定した値である。8 MW の場合、システムのトラック平均輸送距離は 45.6 km となる。したがって、プラントの発電容量が 10 MW 以上となる場合については、森林バイオマス収穫の高コスト化が予想されるため、分析の範囲外とした。

発電効率については、27%および 40%の場合を検討した。プラントの規模は変わらずバイオマス収穫量が少なくて済むため、各種林業機械の素材エネルギーおよび運用エネルギーが減少する。なお基準ケースの 12%についても、発電容量の場合と同様に国内の稼働事例の平均値を用いているが、27%はアメリカ合衆国における稼働事例(20)を参考に設定した値である。また 40%については、この変換効率を達成できるバイオマス発電技術はまだ研究開発レベルにあるに過ぎないが、バイオマスの将来性を検討した事例における最大値(7)として採用した。

表-4.8 森林バイオマス資源収穫システムに対する感度分析¹

パラメータ	数値	エネルギー回収年数 (年)	総エネルギー収支	二酸化炭素排出原単位 (gCO ₂ /kWh)	二酸化炭素排出削減量 (tCO ₂ /年)
耐用年数	30年(基準ケース)	1.09	5.69	61.8	1655562
	20年(基準ケースの67%)	0.85(78.0%)	5.52(97.0%)	65.7(106.3%)	1648374(99.6%)
発電容量	3MW(基準ケース)	1.09	5.69	61.8	1655562
	5MW(基準ケースの167%)	1.17(107.3%)	5.22(91.7%)	64.9(105.0%)	1649848(99.7%)
	8MW(基準ケースの267%)	1.31(120.2%)	4.70(82.6%)	70.0(113.3%)	1618575(97.8%)
発電効率	12%(基準ケース)	1.09	5.69	61.8	1655562
	27%(基準ケースの225%)	0.58(53.2%)	11.93(209.7%)	35.6(57.6%)	3782556(228.5%)
	40%(基準ケースの333%)	0.48(44.0%)	15.80(277.7%)	29.7(48.1%)	5590016(337.7%)

¹括弧内の数値は、基準ケース(本章での検討結果)に対する割合を示したものである。

インベントリ結果のうちエネルギー回収年数は、いずれのパラメータに対しても1年程度の値を示した。すなわち、森林バイオマス資源収穫システムについては、システムを30年間(ないし20年間)運用するために投入するエネルギーを、いずれの場合においても1年程度の短期間のエネルギー生産で回収可能であることが確認された。

その他のインベントリ結果については、パラメータ別に考察するものとする。まず耐用年数20年の場合、基準ケースに対して総エネルギー収支は小さい値を、二酸化炭素排出原単位は大きい値をそれぞれ示した。このことは、エネルギー収支および二酸化炭素排出量の観点からは、発電プラントを長期間運転することにより、トータルで見たシステムの効率が向上することを意味するものである。一方二酸化炭素排出削減量は、耐用年数に対してほとんど変化を示さなかったが、これは代替の対象である石炭の排出原単位が、オーダーで見てバイオマスの場合よりも一桁以上大きいことによるものである。

発電容量についても、発電容量が大きいケースほど総エネルギー収支が減少し、二酸化炭素排出量原単位が増加する傾向を示した。これは、システムの規模が大きくなることによりバイオマス収穫量が増加するが、それに伴う各種林業機械およびプラントの素材、運用のエネルギーの増加が、発電プラントの規模拡大によるエネルギー生産量の増加よりも大きくなることを意味するものである。また、バイオマスのエネルギー変換効率が基準ケースと同値であるにもかかわらず、二酸化炭素排出削減量は減少してしまう。したがって森林バイオマス資源収穫システムについては、規模の大きなものほど現実的ではなくなる。ことが、(収穫コストの面のみならず)エネルギー収支、ならびに二酸化炭素排出量の面からも確認された。

一方発電効率が向上することにより、総エネルギー収支、二酸化炭素排出原単位ともに大きく改善される。総エネルギー収支については、発電効率40%が実現されれば、石炭、石油、原子力といった大型発電プラントのケースに近い値となり、エネルギー生産システムとしての信頼性が確立されることから、わが国におけるシステムの導入・普及も現実味を帯びてくることになろう。また二酸化炭素排出原単位が大きく改善されるため、二酸化炭素排出削減量の増加率が、バイオマスのエネルギー変換効率の増加率よりも高くなる。以上より、森林バイオマスのエネルギー変換については、小規模・高効率変換技術の開発の必要性が、本章で検討したシステムのエネルギー収支および二酸化炭素の観点から明確に示された。

7. 小括

森林バイオマス資源収穫システムのエネルギー収支および二酸化炭素排出量について、バイオマスのトータルのライフサイクルで見た精緻な検討を行うことを目的として、システムに対してライフサイクルインベントリ（LCI）分析を行い、システムの投入エネルギー、エネルギー回収年数および総エネルギー収支、二酸化炭素排出原単位について考察した。またインベントリ結果に対して感度分析を行うことにより、以下の4点について結論を得た。

(1) 投入エネルギー

森林バイオマス資源収穫システムを運用するためのエネルギー量が、システムを構成する設備のエネルギー量よりも相当に大きく、全体の投入エネルギー量に対して82%という高い割合を占める結果が得られた。また、運用エネルギーについては、粉碎および輸送の占めるエネルギーが大きく、粉碎、輸送の両工程の処理効率を向上させるような作業システムの改善および技術開発が、システムの投入エネルギーを減少させるための先決課題であることが確認された。

(2) エネルギー回収年数および総エネルギー収支

システムを構成する各種機械、機器・装置等の設備エネルギーを、エネルギー生産により1.09年という短期間で回収できることが示され、エネルギー回収年数の面では、森林バイオマスが他の再生可能エネルギーよりも優れていることが確認された。また、システムの総エネルギー収支が5.69となったことから、本章で検討したシステムがエネルギー生産システムとして十分成り立ち得ることが明らかとなった。

(3) 二酸化炭素排出原単位

システムの二酸化炭素排出原単位が61.8 gCO₂ / kWhと算出されたことから、この点では森林バイオマスが化石燃料に対して十分に有利であることが確認された。このことは、わが国の社会システムの枠組みにおける森林バイオマス資源収穫システムの導入・普及の一助となり得るものである。また、石炭火力発電プラントによるエネルギーを年間300万dry-tの森林バイオマスで代替する場合、国内の年間二酸化炭素排出量の0.142%を削減可能であ

ることが示された。

(4) インベントリ結果に対する感度分析

感度分析により、発電プラントのエネルギー変換効率が、システムのインベントリ結果に最も大きな影響を及ぼすパラメータであることが示された。本章で検討したシステムについては、収穫コストの面から規模の大きなものが期待できないことと併せ、森林バイオマスのエネルギー利用を実現するためには、バイオマスの小規模・高効率エネルギー変換技術の開発が必要であることも確認された。

ただし、エネルギー収支の面では、火力や原子力などの大型発電システムが非常に優れているため、わが国の社会システムの中で、エネルギー収支の観点のみで森林バイオマス資源収穫システムの導入・普及を議論することは現実的ではない。近年、地球規模での温暖化問題が深刻化するに伴い、社会全体の二酸化炭素排出量の低減に有効な技術や政策に大きな関心が集まっていることから、二酸化炭素排出量の面でのバイオマスの優位性と併せて議論すべきである。本章で森林バイオマスと位置付けた林地残材による国内の二酸化炭素排出削減量は率にして0.142%であるが、この点については間伐材、広葉樹はもとより工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝なども含めて検討する必要がある。

なお間伐材、広葉樹については、そのエネルギー利用による森林の公益的機能の維持、ならびに地域の雇用確保も期待できることから、その検討の必要性は高い。

第5章 地域への森林バイオマス資源収穫システムの適用

1. 概要

わが国の林業では長い間不振が続いているが、林業を基盤とする中山間地域においては近年、森林バイオマスのエネルギー利用が地域振興、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の効果の面から期待されている。本章ではこのような地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用することにより、1年間にエネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係を把握し、地域における森林バイオマスのエネルギー利用の可能性を評価することを目的として、モデル地域を対象とした検討を行った。収穫コストについては、森林バイオマスのエネルギーとしての利用部位と地理的条件をもとにシステムを8種類に分類し、林地傾斜、林道からの距離、エネルギー変換プラントまでの輸送距離を変数とするコスト計算式を作成し、また資源量については地域の森林整備も視野に入れ、林地残材に加え間伐材、広葉樹を森林バイオマス資源と位置付け、森林資源の分布状況を地理情報システム（GIS）を用いて小班単位で正確に把握することにより、資源の持続的利用を前提とした、地域の実状を反映した森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を求めた。収穫コストの傾向については、林地残材（資源量 4,035 dry-t / 年）が最も低コストで収穫可能であり、次いで広葉樹（同 20,317 dry-t / 年）、間伐材（同 27,854 dry-t / 年）の順となった。またエネルギー生産を行う場合、伐採対象となる小班の選定といった作業計画の策定に資するものとなった。例えば、地域の 24.8% の世帯が消費する電力を賄う発電プラントを建設する場合、必要となる森林バイオマス量は 30,106 dry-t / 年となり、コストが 13,037 円 / dry-t よりも安い小班から収穫するという方針が立てられる。また、発電コストの燃料部分は 16.95 円 / kWh となったが、これについては地域で発生する工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝も燃料とすると考えるのが現実的であり、この場合、全体の燃料コストの低減効果が大きくなることが期待された。

2. 目的

わが国の林業では長い間不振が続いているが、その中には機械化が進まないために木材生産のコストダウンを図れない地域も少なくない。一方、このような林業を基盤とするいわゆる中山間地域においては、近年、森林バイオマスのエネルギー利用が地域振興、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の効果の面から期待されている。しかしながら、地域で森林バイオマスをエネルギーとして利用するために、一体どの程度の資源量がどの程度のコストで調達できるのかといったことについては、わが国においては全く把握されていないのが現状であり、この問題が解決されないことには森林バイオマスのエネルギー利用を実現することは大変難しいといえよう。

本章では、このような地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用することにより、1年間にエネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係を把握し、地域における森林バイオマスのエネルギー利用の可能性を評価することを目的として、具体的なモデル地域を対象に検討を行う。また、ここでは地域の森林整備も視野に入れ、前章まで対象としていた林地残材に加え間伐材、広葉樹を森林バイオマス資源として位置付けるとともに、地域の森林資源の分布状況や地形傾斜、林道・一般道の配置などについて正確に把握することにより、地域の実状に即した現実的な評価を行うことを目的とする。

3. 材料と方法

本章では、モデル地域として X 県 A 郡を選定し、検討を行うものとする。

6 町から構成される A 郡は X 県の中央部に位置し、平均高度 600 m 前後のやや急斜面の山々により形作られた山間地域である。面積 493.28 km²、人口 72,862 人 (21,769 世帯)、気候は内陸盆地型に属し、年平均気温は 13 ~ 14 °C、年間降水量は 1,500 ~ 1,600 mm である。森林は照葉樹林帯に属し、その面積は 37,202 ha と A 郡全面積の約 75% を占め、そのうち民有林における人工林の比率が 58% にも達している。一方、製材業も製材所数が 43 (製材総馬力数 4,610 kW)、年間製材用素材消費量が 78,992 m³ であり、X 県下でも有数の林業・製材業地域である。しかしながら、年間素材生産量はここ 5 年で約半分強に落ち込んでおり、手入れの遅れた林分も目立ち始めているのが実状である。

このような特徴を有する A 郡を対象に検討を実施するにあたり、森林資源の分布状況については、X 県作成の森林簿データおよび森林資源現況表を調査した。地理的条件の算出にあたっては、材料として、林班および小班の形状や位置については X 県より購入したベクタデータを、標高および地形傾斜については DEM (Digital Elevation Model) を、林道・一般道については地形図をそれぞれ用い、GIS ソフトウェア上で統合した上で処理を行った。また、素材生産量および年間製材用素材消費量について X 県の統計書を参照するとともに、X 県および A 郡の作成した資料をもとに森林の典型的な伐期および樹木のサイズ、間伐対象林齢、間伐率等を調査した。

検討にあたり本章では、まず森林バイオマスのエネルギーとしての利用部位、ならびに林地傾斜、集材距離、集材方向といった地理的条件により森林バイオマス資源収穫システムを分類し、システム別のコスト計算式を作成する。次に、上記材料を用いて A 郡の森林資源の分布状況と地理的条件を求めるとともに、A 郡において 1 年間にエネルギーとして利用可能な森林バイオマス資源量を算出する。最後にコスト計算式を森林の地理的条件に適用することにより、森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を整理し、考察を行う。

4. 森林バイオマス資源収穫システムの分類とコスト計算式の作成

本章で森林バイオマス資源収穫システムを構築するにあたり、組み込む必要のある作業工程は伐倒、集材、造材、粉碎、輸送の5つである。ここでは、まずこの5つの工程のうち、森林バイオマスのエネルギーとしての利用部位と林地傾斜、林道からの距離、集材方向の地理的条件により使用機械が異なる集材工程および粉碎工程を検討することにより、収穫システムを分類する。次にシステムを構成する各種機械を選定し、機械経費、労務経費、作業能率を調査した上で、分類したシステムのそれぞれについて、林道からの距離、プラントまでの輸送距離等を変数とするコスト計算式を作成する。

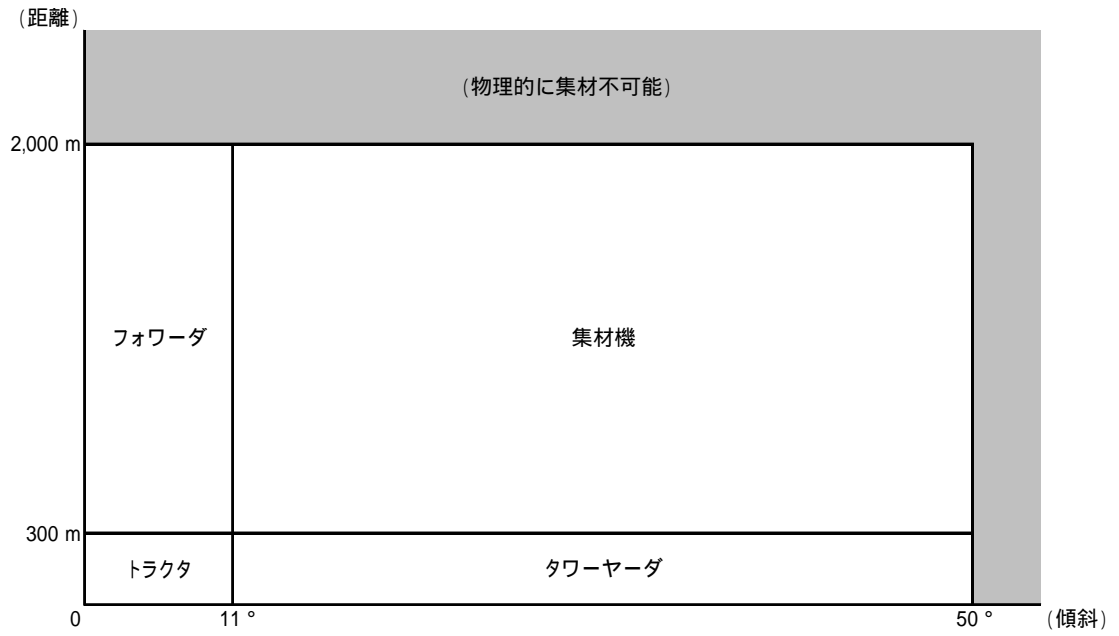
4.1 森林バイオマス資源収穫システムの分類

本章では林地残材、間伐材、広葉樹を森林バイオマス資源と位置付けているが、間伐材と広葉樹については、全木を粉碎してエネルギーとして利用することを想定している。このため、森林バイオマスのエネルギーとしての利用部位は、残材を構成する末木・枝条と全木に分類される。そこで粉碎工程については、末木・枝条の場合には小形チップ、全木の場合には中型チップが使用されるものとした。

集材工程については、使用機械が林地傾斜、林道からの距離、集材方向（上荷・下荷）の地理的条件により決定されるため、ここでは集材機械としてトラクタ、フォワーダ、タワーヤダ、集材機を用いるものとして、地理的条件に基づいて使用機械を分類した（図-5.1）。なおA郡内においては、林内作業車や自走式搬器を用いた、比較的小規模な林業が中心に行われているが、このような地域へ高性能林業機械を中心とした大形機械を導入することについては、次節でシステムの年間事業量の観点から検証するものとする。

以上の粉碎工程および集材工程の検討結果に基づいて、森林バイオマスの利用部位と集材機械により森林バイオマス資源収穫システムを8通りに分類した（図-5.2）。なおトラクタ、タワーヤダ、集材機は全木集材が可能であることから、林道端に土場を設け、プロセッサで造材作業を行うものとした。フォワーダは全木集材が不可能であるため、林内でチェーンソーにより造材するものとした。

(a) 上荷集材



(b) 下荷集材

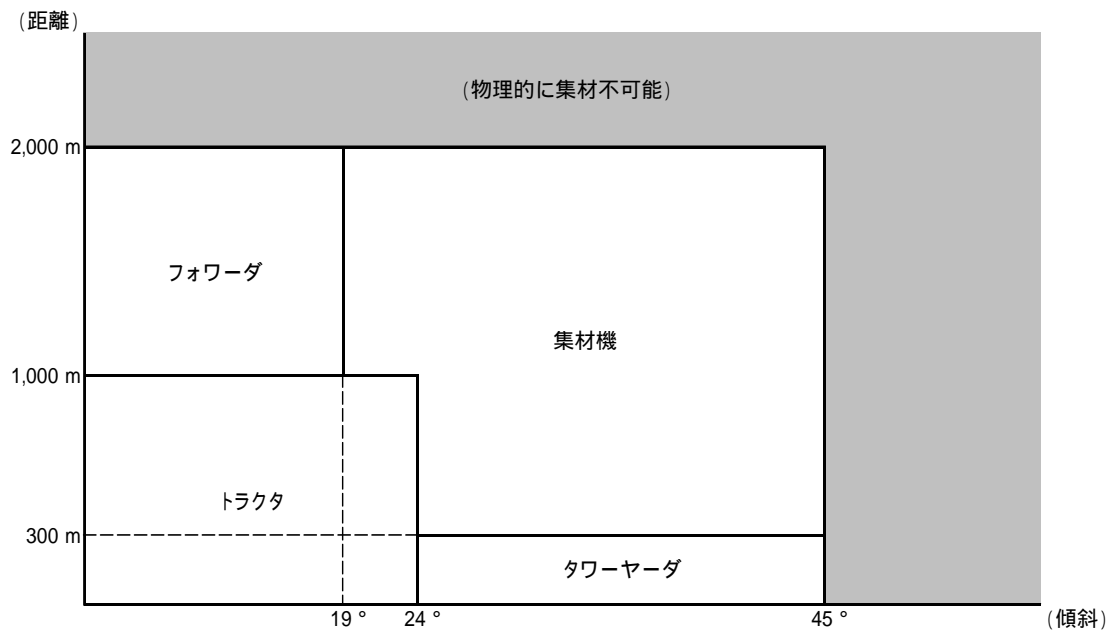
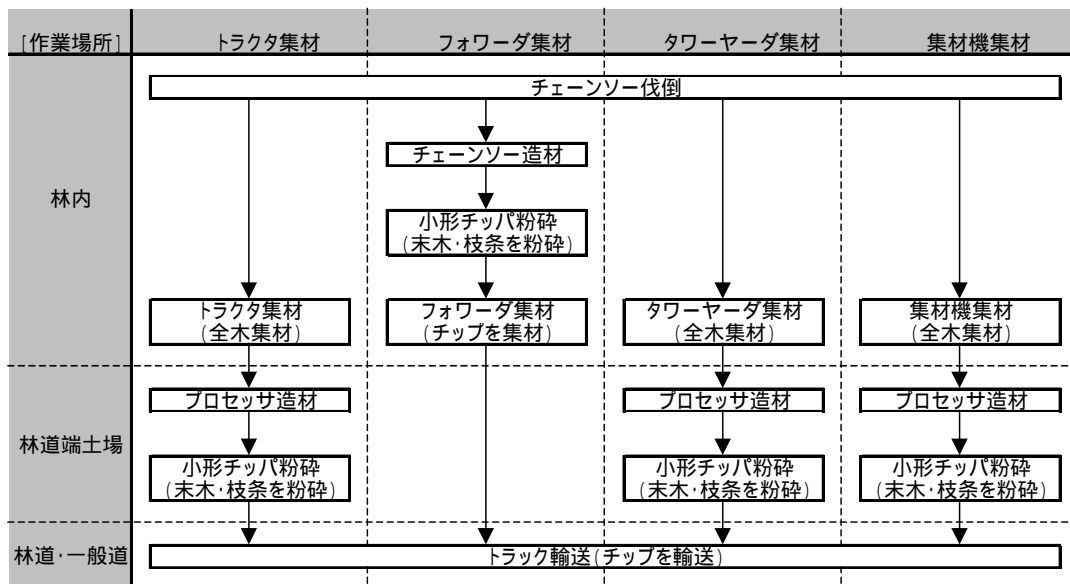


図-5.1 地理的条件による集材機械の分類(89)

(a) 末木・枝条を利用する場合



(b) 全木を利用する場合

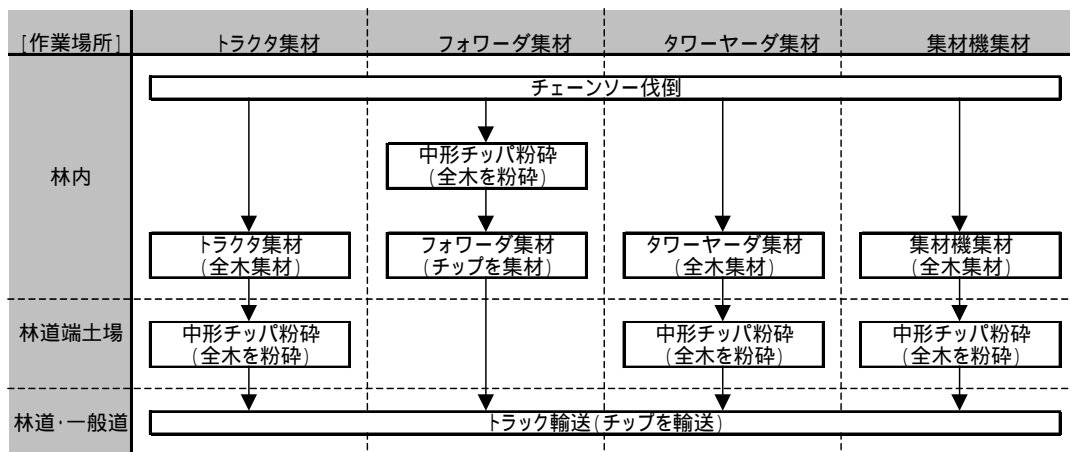


図-5.2 森林バイオマスの利用部位と集材機械により 8 通りに分類された森林バイオマス資源収穫システム

4.2 コスト計算式の作成

4.2.1 機械の選定

ここでは、森林バイオマス資源収穫システムのコスト計算に関係するチェーンソー、トラクタ、フォワーダ、タワーヤダ、集材機、小形チップパ、中形チップパ、トラックの選定を行った。選定機械の概要について、以下に述べる。

伐倒する立木のうち、スギ100年生（A郡の針葉樹・人工林では100年生までが大部分を占める）の胸高直径36.7 cmが最大であったため、最大40 cmのものを切断できるチェーンソー（排気量39.6 cc、常用回転数9,500 rpm、全装備重量6.0 kg）を選定した。

集材機械の選定にあたり、まずトラクタについては、本章では全木集材を想定しているため、牽引力の大きいクローラ型の機種（全装備重量6,000 kg、エンジン定格出力70 PS、エンジン排気量2,500 cc）を採用した。フォワーダについては、チップを集材することから、荷下ろし作業を容易にするダンプ機能を備えた機種（重量9,100 kg、エンジン定格出力110 PS、エンジン定格回転数2,400 rpm、エンジン排気量4,329 cc）を想定した。架線系集材機械としては、最大集材距離300 mのタワーヤダ（全装備重量7,425 kg、エンジン定格出力87 PS、エンジン定格回転速度2,300 rpm）を選定し、集材機については調査した機械のうち最も長い距離の集材が可能な機種（全装備重量3,000 kg、エンジン定格出力98 PS、エンジン定格回転速度2,000 rpm）を採用した。

粉砕工程については、林内で作業を行うシステムも存在するため、自走式のチップパを採用した。小形チップパについては、処理直径が最大で15 cmの機種（重量1,310 kg、所要動力23 PS）を、中形チップパについては、直径35 cmまでの全木を粉砕可能な機種（重量7,802 kg、所要動力200 PS）をそれぞれ選定した。

輸送用のトラックとしては、林道端からエネルギー変換プラントまでチップを輸送することから、ダンプ機能を有する8 tトラックを想定した。

4.2.2 各種機械の機械経費、労務経費、作業能率と各工程のコスト計算

ここでは、システムのコスト計算式を作成するために、各種林業機械の機械経費、労務経費、作業能率を求めた上で、各工程のコストを計算した。

まず機械経費の計算にあたっては、機械価格、耐用年数、年間運転時間、償却費率、維持修理費率、年間管理費率、減価償却費、維持修理費、管理費、燃料消費率、燃料・油脂費を考慮した（表-5.1）。

表-5.1 各種機械の機械経費¹

項目	チェーン ソー	トラクタ	フォワーダ	タワー ヤーダ	集材機	小形チップ	中型チップ	トラック	説明
機械価格(円) ²	136800	9800000	7700000	18000000	5150000	5640000	38400000	10180000	
耐用年数(年)	3	6	5	6	7	5	5	5	
現在の林業における 年間運転時間(時/年)	900	1080	1080	900	900	1000	1000	1100	
エネルギー利用における 年間運転時間(時/年) ³	1350	1620	1620	1350	1350	1500	1500	1650	× 1.5
償却費率	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
維持修理費率	0.85	0.96	0.96	0.96	0.96	0.75	0.75	0.4	
年間管理費率	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.018	0.018	0.1	
減価償却費(円/時)	30	907	856	2000	490	677	4608	1111	× (/ (×))
維持修理費(円/時)	29	968	913	2133	523	564	3840	494	× (/ (×))
管理費(円/時)	7	393	309	867	248	68	461	617	× (/)
燃料消費率(L/時)	2.8	4.3	4.0	3.0	2.8	3.2	28.0	8.2	
燃料・油脂費(円/時) ⁴	269	413	384	288	269	307	2688	787	× 80 × (1 + 0.2)
機械経費(円/時)	334	2681	2461	5288	1530	1616	11597	3009	+ + +

¹チェーンソーについては全国林業改良普及協会編(122)より、トラクタ、フォワーダ、タワーヤーダ、集材機、トラックについては澤口(93)より、小形チップ、中形チップについてはFAO(28)および川村ら(48)より、それぞれ引用した。

²林業機械化協会(87)より引用。

³年間運転時間については、文献より得られた数値がわが国における標準的なものであり、エネルギー利用を目的とした森林バイオマスの収穫が実現した場合、機械の稼働率を向上させることができると考えられる。したがって本章では、年間運転時間を標準の1.5倍と見込んだ。

⁴燃料・油脂費については、燃料(軽油)単価を80円/L、油脂費の燃料費に対する割合を0.2(91)として計算した。

労務経費は労賃と保険料の合計とし、林業機械による作業全般については1,915 円/時、トラック輸送工程については2,417 円/時に設定した(93)。

次に機械の各種作業の作業能率を調査した上で、各種機械の機械経費および労務経費と照らし合わせ、各工程のコストを計算した。結果について、チェーンソー(表-5.2)、トラクタとフォワーダ(表-5.3)、タワーヤードと集材機(表-5.4)、小形チップと中形チップ(表-5.5)、トラック(表-5.6)に分けて示す。なお本章では、主伐時の林地残材を、木材生産を目的とした造材作業時に発生する廃棄物と位置付けているため、造材コストは全て丸太に帰することができる。したがって表-5.2 のチェーンソーについては、間伐材および広葉樹の伐倒コストのみ記載した。表-5.1 でプロセッサの機械経費を検討しなかったことについても、これと同様の理由によるものである。

ここで作業能率に影響を与える因子には、集材工程における林地傾斜と集材距離、輸送工程におけるトラック輸送距離がある。これらの因子はコスト計算式の変数となるため、本章では林地傾斜を $(^\circ)$ 、集材距離を L_Y (m)、輸送距離を L_T (m) として作業能率を求めた。

表-5.2 チェーンソー伐倒作業の作業能率とコスト¹

項目	間伐材	広葉樹	説明
機械経費(円/時)	334	334	
労務経費(円/時)	1915	1915	
単位時間経費(円/時)	2249	2249	+
作業能率(m ³ /時)	2.25	2	
コスト(円/m ³)	1000	1125	/

¹作業能率については、梅田ら(109)および全国林業改良普及協会編(122)より引用した。

表-5.3 トラクタおよびフォワーダの作業能率とコスト¹

項目	トラクタ	フォワーダ	説明
機械経費 (円/時)	2681	2461	
労務経費 (円/時)	1915	1915	
単位時間経費 (円/時)	4596	4376	+
走行速度 (m/時)	3400	7900	
集材材積 (m ³) ²	3.2	6.7	森林バイオマスの実材積
集材能力 [往復] (m ³ ・m/時)	5440	26465	(x) / 2
単位集材変動費 (円/m ³ ・m)	0.845	0.165	/
直接集材変動費 (円/m ³)	0.845L _Y	0.165L _Y	× L _Y (L _Y : 集材距離 (m))
直接集材固定費 (円/m ³)	1746	2666	
作業路開設費 (円/m ³)	91.7e ^{0.117}	45.0e ^{0.117}	: 林地傾斜 (°)
コスト (円/m ³)	0.845L _Y + 91.7e ^{0.117} + 1746	0.165L _Y + 45.0e ^{0.117} + 2666	+ +

¹作業能率に関する因子については、澤口(93)より引用した。

²トラクタは全木集材を行うのに対し、フォワーダはチップを集材する。表-5.3において、集材材積を“森林バイオマスの実材積”としているが、これはチップの容積ではないことを意味するものであり、最終的に次節で求める森林バイオマス資源量にコスト計算式を適用してコストを算出するための措置である。ここで注意する必要があるのはフォワーダの集材材積であり、これについては次の仮定をおいた。

[フォワーダの集材材積の計算方法]

- ・森林バイオマスを粉碎することにより生産されたチップは、粉碎前の末木・枝条および全木の材積に比べ、容積が20%増加する。
- ・最大積載量が4tのフォワーダは、8m³のチップを積載することができる。
- ・したがって、フォワーダの集材材積は、森林バイオマスの実材積に換算して $8 \times 100 / (100 + 20) = 6.7 \text{ m}^3$ と計算される。

表-5.4 タワーヤードおよび集材機の作業能率とコスト¹

項目	タワーヤード	集材機	説明
機械経費 (円/時)		5288	1530
労務経費 (円/時)		1915	1915
作業能率 (m ³ /日・組)	29160 / (2L _Y + 243)		72.401L _Y ^{-0.2142}
組人員 (人/組)		3	4
直接作業時間 (円/m ³)		6	6
直接集材費 (円/m ³)	5.540L _Y + 552		761.592 / L _Y ^{-0.2142} (× + × ×) /
架設・撤去費 (円/m ³)	14363 / L _Y		12409 / L _Y + 394
消耗品費 (円/m ³)		91	196
コスト (円/m ³)	5.540L _Y + 14363 / L _Y + 643		761.592 / L _Y ^{-0.2142} + 12409 / L _Y + 590 + +

¹作業能率に関する因子については、澤口(93)より引用した。

表-5.5 小形チップおよび中形チップの作業能率およびコスト

項目	小形チップ	中形チップ	説明
機械経費 (円/時)	1616	11597	
労務経費 (円/時)	1915	1915	
単位時間経費 (円/時)	3531	13512	+
処理能力 (m ³ /時) ¹	3	13	森林バイオマスの実材積
コスト (円/m ³)	1177	1039	/

¹選定した小形チップおよび中形チップの販売会社への聞き取り調査によれば、表-5.5における処理能力は森林バイオマスの実材積，すなわち粉碎前の末木・枝条および全木の材積で表されている。これは、販売会社が、チップの処理能力を粉碎対象物の直径とチップの投入速度により決定していることによるものである。

表-5.6 トラックの作業能率とコスト¹

項目	トラック	説明
機械経費 (円/時)	3009	
労務経費 (円/時)	2417	
単位時間経費 (円/時)	5426	+
走行速度 (m/時)	30000	
輸送材積 (m ³) ²	13.3	森林バイオマスの実材積
輸送能力 [往復] (m ³ ・m/時)	199500	(×) / 2
単位輸送変動費 (円/m ³ ・m)	0.027	/
直接輸送変動費 (円/m ³)	0.027L _T	× L _T (L _T : 輸送距離 (m))
直接輸送固定費 (円/m ³)	778	
コスト (円/m ³)	0.027L _T + 778	+

¹作業能率に関する因子については、澤口(93)より引用した。

²トラックはチップを輸送するのに対し、表-5.6において輸送材積を“森林バイオマスの実材積”としているが、これは、表-5.3のフォワーダの場合と同様の理由による措置である。したがって、ここでもフォワーダと同様に次の仮定をおいた。

[トラックの輸送材積の計算方法]

- ・森林バイオマスを粉碎することにより生産されたチップは、粉碎前の末木・枝条および全木の材積に比べ、容積が20%増加する。
- ・最大積載量が8tのトラックは、16m³のチップを積載することができる。
- ・したがってトラックの輸送材積は、森林バイオマスの実材積に換算して $16 \times 100 / (100 + 20) = 13.3 \text{ m}^3$ と計算される。

4.2.3 森林バイオマス資源収穫システムのコスト計算式

以上により求めた各種機械の各作業工程のコストをもとに、前項で分類した森林バイオマス資源収穫システムのコスト計算式を作成した。計算式は、4種類の集材機械と、林地残材、間伐材、広葉樹に関する3種類の組み合わせにより、12種類となった。この結果を表-5.7に、図-5.2のシステムの分類番号と対応する形で示す。

表-5.7 森林バイオマス資源収穫システムのコスト計算式

集材機械		林地残材 ¹	間伐材	広葉樹
トラクタ	システム	システム (末木・枝条を利用)	システム (全木を利用)	システム (全木を利用)
	工程	粉碎(小形チップ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 集材(トラクタ) 粉碎(中形チップ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 集材(トラクタ) 粉碎(中形チップ) 輸送(トラック)
	計算式(円/m ³)	$0.027L_T + 1955$	$0.845L_Y + 0.027L_T + 91.7e^{0.117} + 4563$	$0.845L_Y + 0.027L_T + 91.7e^{0.117} + 4688$
フォワーダ	システム	システム (末木・枝条を利用)	システム (全木を利用)	システム (全木を利用)
	工程	粉碎(小形チップ) 集材(フォワーダ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 粉碎(中形チップ) 集材(フォワーダ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 粉碎(中形チップ) 集材(フォワーダ) 輸送(トラック)
	計算式(円/m ³)	$0.165L_Y + 0.027L_T + 45.0e^{0.117} + 4621$	$0.165L_Y + 0.027L_T + 45.0e^{0.117} + 5483$	$0.165L_Y + 0.027L_T + 45.0e^{0.117} + 5608$
タワーヤード	システム	システム (末木・枝条を利用)	システム (全木を利用)	システム (全木を利用)
	工程	粉碎(小形チップ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 集材(タワーヤード) 粉碎(中形チップ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 集材(タワーヤード) 粉碎(中形チップ) 輸送(トラック)
	計算式(円/m ³)	$0.027L_T + 1955$	$5.540L_Y + 14363 / L_Y + 0.027L_T + 3460$	$5.540L_Y + 14363 / L_Y + 0.027L_T + 3585$
集材機	システム	システム (末木・枝条を利用)	システム	システム
	工程	粉碎(小形チップ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 集材(集材機) 粉碎(中形チップ) 輸送(トラック)	伐倒(チェーンソー) 集材(集材機) 粉碎(中形チップ) 輸送(トラック)
	計算式(円/m ³)	$0.027L_T + 1955$	$761.592 / L_Y^{-0.2142} + 12409 / L_Y + 0.027L_T + 3407$	$761.592 / L_Y^{-0.2142} + 12409 / L_Y + 0.027L_T + 3532$

¹本章においては、林地残材は造材作業に伴って発生するものとしているため、ここでは造材の直後の工程よりコスト計算に考慮している。

5. 小班データの作成と森林バイオマス資源量の算出

前節で林道からの距離，林地傾斜および集材方向により分類した森林バイオマス資源収穫システムを A 郡の森林に適用し，次節でコスト計算式を用いて，A 郡における 1 年間にエネルギーとして利用することが可能な森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を求めるために，本節では，まず A 郡の森林を構成する樹種（針葉樹・広葉樹），林種（人工林・天然林），制普（普通林・制限林），林齢，面積，蓄積を調査する。次に森林の地理的条件，すなわち森林の林道からの距離，林地傾斜，集材方向（上荷・下荷），さらに林道端まで森林バイオマスを集材してからエネルギー変換プラントまで輸送する距離を算出する。最後にエネルギー利用の対象となる森林を判定し，伐採作業の形態により分類した上でエネルギー利用を目的とした森林バイオマスの年間利用可能量を計算する。

なお本節では，X 県において森林区画の最小単位として用いられている“小班”を森林の区分とする。この小班を単位として森林の樹種，林種等を調査し，また地理的条件および森林バイオマス資源量を計算して得られた各種データを整理する。以後本節で最終的に作成するデータを“小班データ”と呼ぶものとする。

ここで制限林とは，国土利用計画法の土地利用基本計画に定められたもので，伐採などの利用が制限される森林のことであり，これには保安林，砂防指定地，国立公園，県立自然公園，鳥獣保護法による特別保護地区，林業種苗法による特別母樹林，文化財保護法による史跡・名勝・天然記念物に係る指定地などが該当する。制限林以外の森林が普通林となる。

5.1 小班データの作成

本節では小班の樹種，林種，制普，林齢，面積，蓄積に関する情報を地図に対応させ，さらに小班ごとに林道からの距離，林地傾斜，集材方向，プラントまでの距離といった地理的条件を求める必要があったため，作業にあたっては，図面データと数値データを取り込んで一元的に解析・処理することのできる地理情報システム（GIS）を用いた。GIS ソフトウェア上では位置情報を与えるなどの地理的な要素が関係する作業，ベクタデータ（点，線，面で表現されるデータ）からラスタデータ（格子状のセルで表現されるデータ）への

変換作業などを行った。なお GIS ソフトウェアとして Microimages 社（アメリカ合衆国）の TNTmips を使用し，小班から林道までの距離，林地傾斜，集材方向，エネルギー変換プラントまでの輸送距離を算出した。

5.1.1 森林簿データの整理と図面データへの割り付け

X 県より入手した森林簿データは，所有者の違い等から小班よりも細分化されている，すなわち 1 つの小班のデータに，樹種や林齢などが異なる複数の森林に関する情報が含まれていた。このため，まず森林簿データについて，1 つの小班に対して複数存在する情報を 1 つにまとめる作業を行った。データの各項目について，次のように小班の代表値を決定することにより森林簿データを小班単位に再編した。

- 1) 樹種，林種，制普および林齢については，各小班内で最も面積の大きい森林の値を代表値とした。
- 2) 面積および蓄積については，小班内における各森林の値を合計した。

次に再編したデータを図面データに割り付ける作業を行った。図面データには小班の形状と位置に関する情報が入力されていたが，これを GIS ソフトウェアに取り込むとともに，再編した森林簿データについては，小班ごとに ha あたり蓄積を計算した上で GIS ソフトウェアに読み込ませた。この作業により，GIS ソフトウェア上で小班に関する情報を直接表示・検索できるようにした。

5.1.2 道路データの作成

次に，道路データを地形図から読み取ることにより作成した。地図画像については，国土地理院が発行している，地形図をデジタルデータ化した“数値地図 25000”を使用した。この地図画像を GIS ソフトウェアに取り込み，四隅の緯度および経度を指定することにより位置情報を与えた。

地図上，すなわち“絵”の情報をトレースすることにより GIS データとしての“線”の道路を作成するにあたり，地図上には歩道や獣道と考えられる狭い道路も描かれていた。このため，ここでは森林バイオマスを林内から道路まで集材する際の作業基地として，またバイオマスを輸送するための道路として幅員 3 m 以上の道路を使用するものとし，地図上において A 郡内の 3 m 以上の幅員があるとされる道路を全てトレースし，“線”としての道路データを作成した（図-5.3）。



図-5.3 地形図上の“絵”の道路（左）とGISデータとしての“線”の道路（右）

5.1.3 地形データの作成

小班ごとに林地傾斜，ならびに集材方向の判定材料となる林道との標高差を計算するために，DEM (Digital Elevation Model) をGISに取り込んだ。DEMとは標高を表す数値が格子状に並んだマス目（メッシュ）状のデータのことであり，ここではA郡を含むものとしては最も目の細かい，1つのマスが50m四方のものを使用した（図-5.4）。

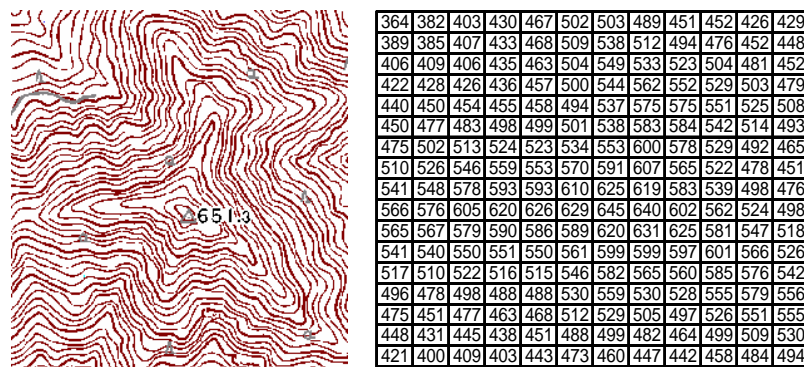


図-5.4 地形図（左）に対応したDEM（右）

次に，この時点で調整の終わっている森林簿データおよび道路データをラスタデータに変換した。基準となるマス目としてはDEMのものを用いた。森林簿データについては，町名，林班番号，小班番号をもとに作成したコード番号を，マス目を埋める数値として使用し（図-5.5，図-5.6），また道路データの数値については，データ作成時に自動的に割り振られるコード番号とした（図-5.5，図-5.7）。

5.1.4 地理的条件の算出

ラスタ化した森林簿データを用いて、まず小班ごとに斜面の緩急を表す指標となる平均傾斜を求め、これを林地傾斜とした。

続いて道路データも併用して、小班ごとに林道からの距離を算出した。小班は面的な広がりを持つため、小班内のどの場所から道路までの距離をもって“小班から林道までの距離”とするかという問題が存在する。この問題について本節では、該当する小班に含まれるメッシュのx座標およびy座標をそれぞれ平均した点、すなわち重心に相当するメッシュを求め、小班の位置を表す代表値として取り扱うこととした。各小班の重心から道路が存在するメッシュ、つまり図-5.7において道路ラスタデータで値が0でないメッシュまでの距離を全て求め、その中から最短距離を与えるメッシュをその小班内のバイオマスが道路へ運び出す地点とし、2点間の距離を計算した。なお実際に作業を行う場合、この最短距離を与えるメッシュが、集材された森林バイオマスが集材用の林業機械から輸送用のトラックに積み替えられる作業エリア(土場)に相当する。この場合、当然ながら土場は小班ごとに道路上の異なる位置に存在することになる。

また、土場からエネルギー変換プラントまでの輸送距離を求めるにあたり、プラントはA郡の中央部に位置するものとし、小班ごとに土場が属する道路からプラントまでの距離を計算した。

さらに各小班の重心と、先に求めた小班ごとの土場との標高差についてDEMを用いて比較することにより、集材方向を判定した。

以上により、小班ごとに確定させた林地傾斜、林道からの距離、プラントまでの輸送距離および集材方向をGISソフトウェアに取り込み、GIS上の森林簿データに新たに項目を作成する形で追加することにより、地域の実状に即した小班データを完成させた。

5.2 森林バイオマス資源量の算出

ここでは、エネルギー利用の対象となる小班を選定した上で、A郡全体で1年間に利用することができる森林バイオマス資源量を求める。

まず、エネルギー利用の対象となる小班の選定については、小班を樹種、林種、制普で分類し、その分類をもとに伐採するかしないか、伐採するとしたものについては対象となる林齢、ならびに全木をエネルギーとして利用するのか、それとも丸太は木材として利用して末木・枝条を利用するのか、といった伐採の形態を確定させる。

続いて森林バイオマス資源の年間利用可能量を求めるにあたり、まずエネルギー利用の対象となる森林の各種伐採形態別に、全木および末木・枝条の蓄積に対する割合等の森林バイオマス資源量の計算方法と年間利用可能量を求めるための伐採のサイクルを検討する。その上で A 郡全体のエネルギー利用を目的とした資源量を求めるとともに、年間の利用可能量を確定させる。

5.2.1 小班の伐採形態

まず、小班の樹種・林種・制普別に伐採の可否を検討した。この結果を、小班数、面積、蓄積とともに表-5.8 に示す。制限林は基本的に伐採しないものとしたが、針葉樹・人工林・制限林についてのみ、人工林が手入れを必要とする森林であることから伐採対象とした。

表-5.1 小班の樹種・林種・制普別の伐採の可否と小班数、面積、蓄積

樹種	林種	制普	伐採の可否	小班数	面積 (ha)	蓄積 (m ³)
針葉樹	人工林	普通林	伐採する	791	11370	2835491
		制限林	伐採する	322	6136	1624148
	天然林	普通林	伐採しない	538	7965	1416903
		制限林	伐採しない	126	2876	562201
広葉樹	人工林	普通林	伐採する	0	0	0
		制限林	伐採しない	1	15	2908
	天然林	普通林	伐採する	268	5006	877880
		制限林	伐採しない	130	3021	522280
無立木地			10	22	0	
計			2168	36411	7841851	

次に、伐採してエネルギーとして利用すると判定したものについて、伐採対象となる林齢と伐採の形態を確定させた。この結果に代表樹種を加えたものを表-5.9 に示す。なお、ここで分類した伐採形態について、以後本章では表の通り“針葉樹・人工林・間伐”、“針葉樹・人工林・主伐”、“広葉樹・天然林・エネルギー利用主伐”と呼ぶものとする。

表-5.9 より、全木が粉碎の対象となる林齢は、針葉樹・人工林（ヒノキ）の 31～60 年生と広葉樹・天然林（ケヤキ）の 31 年生以上となる。X 県の資料によれば、ヒノキの 60 年生の胸高直径は 27.5 cm、A 郡ではケヤキは 60 年生までが大部分を占めるが、ケヤキの 60 年生の胸高直径は 26.7 cm である。したがって、前節で選定した中形チップ（最大処理直径 35 cm）で、利用対象とする全木の全てを粉碎可能であることをここで確認した。

表-5.9 伐採対象となる小班の代表樹種，伐採対象林齢，伐採形態

樹種・林種・制普	代表樹種	伐採対象林齢	伐採形態
針葉樹 人工林 普通林・制限林	ヒノキ	31～60年生 ¹	[針葉樹・人工林・間伐] ³ haあたり蓄積が200 m ³ 以上の小班を間伐未実施とみなし，間伐率20%で間伐を実施して全木をエネルギー利用
		61年生以上 ²	[針葉樹・人工林・主伐] 主伐を実施して丸太は木材として利用し，末木・枝条をエネルギー利用
広葉樹 天然林 普通林	ケヤキ	31年生以上	[広葉樹・天然林・エネルギー利用主伐] 広葉樹・天然林を旧薪炭林とみなし，30年サイクルで主伐を実施して全木をエネルギー利用

¹A郡内では，針葉樹・人工林の31～60年生が間伐の補助対象となり，間伐率は20%以上とされているため，ここでは20%に設定した。

²針葉樹・人工林・主伐については，X県のヒノキ人工林の施業体系に基づき，対象林齢を61年生以上とした。

³A郡内において実施される間伐は，そのほとんどが補助金によるものであり，しかもその間伐材のほぼ全てが利用されず，林内に切り捨てられた状態にあるという調査結果が得られていることから，全木をエネルギー利用するものとした。また，ここではhaあたり蓄積が200 m³以上の小班について，間伐が未実施のため過密になっている要間伐林分であると判定した。

5.2.2 森林バイオマス資源の年間利用可能量

森林バイオマスの利用部位，つまり末木・枝条を利用するか全木を利用するかを確定させたので，続いて小班データの“蓄積”の項目から森林バイオマス資源量を求めるための計算式を整理した。

まず伐採形態ごとの代表樹種について，全木に占める利用部位および蓄積の割合と利用部位の比重を整理した（表-5.10）。そして表-5.10をもとに，小班データの蓄積の項目から森林バイオマス資源量を求める計算式を，小班の伐採形態ごとに作成した（表-5.11）。

表-5.10 伐採形態別の利用部位の全木に占める割合および比重(84, 88)

伐採形態	代表樹種	利用部位	全木に占める割合(%) ¹		比重 (dry-t / m ³)
			利用部位	蓄積	
針葉樹・人工林・主伐 ²	ヒノキ	末木・枝条	15	92	0.40
針葉樹・人工林・間伐	ヒノキ	全木	100	92	0.40
広葉樹・天然林・ エネルギー利用主伐	ケヤキ	全木	100	80	0.56

¹この値は，林野庁が実施した，わが国における林地残材の年間発生量の推計調査における基礎数値として用いられたものであり（第2章参照），その内訳は，ヒノキが末木2%，枝条8%，その他5%，ケヤキが末木5%，枝条20%，その他10%となっている。蓄積は樹木の幹材積であるため，全木に占める割合は，全体から枝条の割合を差し引いた値となる。

²針葉樹・人工林・主伐の際の丸太生産量については，エネルギー利用部位以外の部分が丸太であるため，全木に占める割合は，全体から利用部位の割合を差し引いた $100 - 15 = 85\%$ となる。

表-5.11 小班データから森林バイオマス資源量を求める計算式

伐採形態	計算式	注釈
針葉樹 人工林 主伐 (末木・枝条を利用) ¹	資源量 (m ³) = 蓄積 × 15/92 資源量 (dry-t) = 蓄積 × 15/92 × 0.40	・ 15/92: 蓄積に対するヒノキの末木・枝条の割合 ・ 0.40: ヒノキの末木・枝条の比重
針葉樹 人工林 間伐 (全木を利用)	資源量 (m ³) = 蓄積 × 20/100 × 100/92 資源量 (dry-t) = 蓄積 × 20/100 × 100/92 × 0.40	・ 20/100: 間伐率 ・ 100/92: 蓄積に対するヒノキの全木の割合 ・ 0.40: ヒノキの全木の比重
広葉樹 天然林 エネルギー利用主伐 (全木を利用)	資源量 (m ³) = 蓄積 × 100/80 資源量 (dry-t) = 蓄積 × 100/80 × 0.56	・ 100/80: 蓄積に対するケヤキの全木の割合 ・ 0.56: ケヤキの全木の比重

¹針葉樹・人工林・主伐の際の丸太生産量については，次の計算式で求めることができる。

$$\text{丸太生産量 (m}^3\text{)} = \text{蓄積} \times 85/92$$

表-5.11 より，A 郡全体の，エネルギー利用を目的とした森林バイオマス資源量を計算することが可能となったが，一方で，1 年間に利用することが可能な資源量を求める必要がある。例えば広葉樹については，ここでは 30 年サイクルでエネルギー利用主伐を実施するものとしていることから，年間利用可能量は資源量を 30 で割ることにより求められる。針葉樹についても，このような伐採のサイクルを決める必要があり，これにあたっては，“A 郡の針葉樹・人工林の 1 年間の成長量分だけ伐採する” という仮定をおいた。

A 郡の針葉樹・人工林の年間成長量については，X 県が作成した森林簿の森林資源現況表より求めた。森林資源現況表によれば，A 郡の針葉樹・人工林の年間成長量は平成 10 年度の時点で $125,934 \text{ m}^3 / \text{年}$ であった。森林簿の数値であるため，蓄積の増加量ということになるが，この値が本章における針葉樹・人工林の 1 年間の伐採量となる。

一方で，本章で伐採対象とした針葉樹・人工林の伐採量の合計を求める必要がある。これについては表-5.9 をもとに対象となる小班を抽出し，次の方法により計算した。

針葉樹・人工林の伐採量の合計

$$\begin{aligned} &= \text{針葉樹・人工林・主伐の伐採量の合計} + \text{針葉樹・人工林・間伐の伐採量の合計} \\ &= \text{針葉樹・人工林・主伐の蓄積の合計} + \text{針葉樹・人工林・間伐の蓄積の合計} \times 20/100 \\ &= 569302 + 2947470 \times 20/100 = 569302 + 589494 = \underline{1158796 \text{ (m}^3\text{)}} \end{aligned}$$

すなわち，A 郡の針葉樹・人工林の伐採量の合計は $1,158,796 \text{ m}^3$ であり，伐採のサイクルは $1158796 / 125934 = 9.2016$ 年となる。したがって，針葉樹・人工林から得られる森林バイオマス資源の年間利用可能量は，資源量を 9.2016 で割ることにより求められる。

以上の考え方をもとに，A 郡全体の，エネルギー利用を目的とした森林バイオマス資源量および年間利用可能量を算出した（表-5.12）。

表-5.12 伐採対象となる小班数と森林バイオマス資源量（年間，全体），丸太生産量

伐採形態	利用部位	小班数	資源量 ¹		丸太生産量 ¹ 上: m ³ /年 (下: m ³)
			材積 上: m ³ /年 (下: m ³)	重量 上: dry-t/年 (下: dry-t)	
針葉樹・人工林・主伐	末木・枝条	120	10087 (92821)	4035 (37128)	57162 (525986)
針葉樹・人工林・間伐	全木	637	69635 (640754)	27854 (256301)	-
広葉樹・天然林・ エネルギー利用主伐	全木	266	36281 (1088435)	20317 (609524)	-
計		1023	116003 (1822010)	52206 (902953)	57162 (525986)

¹資源量および丸太生産量については，括弧内に記されている全体の量を，針葉樹および広葉樹のそれぞれの伐採サイクル（9.2016年，30年）で割ることにより求めた1年あたりの量で示されている。

A郡の森林のうち，小班数にして約半分がエネルギー利用を目的とした伐採の対象となり，森林バイオマス資源の年間利用可能量は，針葉樹・人工林，広葉樹・天然林ともに持続的な利用が可能なサイクルで伐採した場合において，52,206 dry-t/年と計算された。エネルギー利用により，これまで手入れのなされてこなかった森林の整備が進むことが期待され，またエネルギー変換プラントの稼働日数にもよるが，資源量は確実に1日150 dry-t近くをプラントへ供給できる量である。一方丸太生産量は57,162 m³/年と計算されたが，この値はA郡の製材用素材消費量78,992 m³/年（平成11年度）の約7割に相当する。生産された丸太が郡内の製材工場へ供給されるシステムが確立されれば，国産材のシェアの向上や地域で製材された木材の利用の推進に繋がることも考えられる。

森林バイオマス資源収穫システムについては，本章では十分な事業量を確保することが可能であると判断したことから高性能林業機械を中心としたシステムを構築しているが，年間の伐採量が116003 + 57162 = 173165 m³/年となるため，高性能林業機械を導入する1つの基準となっている年間事業量2,000 ~ 3,000 m³/年(79)に対し，十分確保可能であることをここで確認した。

6. 森林バイオマス資源量と収穫コストの関係

前節において作成したA郡の小班データの地理的条件に、第4節で分類した森林バイオマス資源収穫システムを適用することにより、A郡における1年間にエネルギーとして利用可能な森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を求めた。具体的には、まず小班データの樹種と林地傾斜、林道からの距離、集材方向をもとに適用されるシステムを決定した。次に、表-5.7のコスト計算式をシステム別に適用することにより、小班ごとに森林バイオマス1m³あたりの収穫コストを求めた。最後にこれを小班の年間利用可能資源量と対応させることにより、収穫コスト別の年間利用可能資源量を伐採形態ごとに整理した(図-5.8)。また、針葉樹と広葉樹では比重が異なるため、これをバイオマス1dry-tあたりの値に補正した上でまとめ、森林バイオマス資源量と収穫コストの関係とした(図-5.9)。

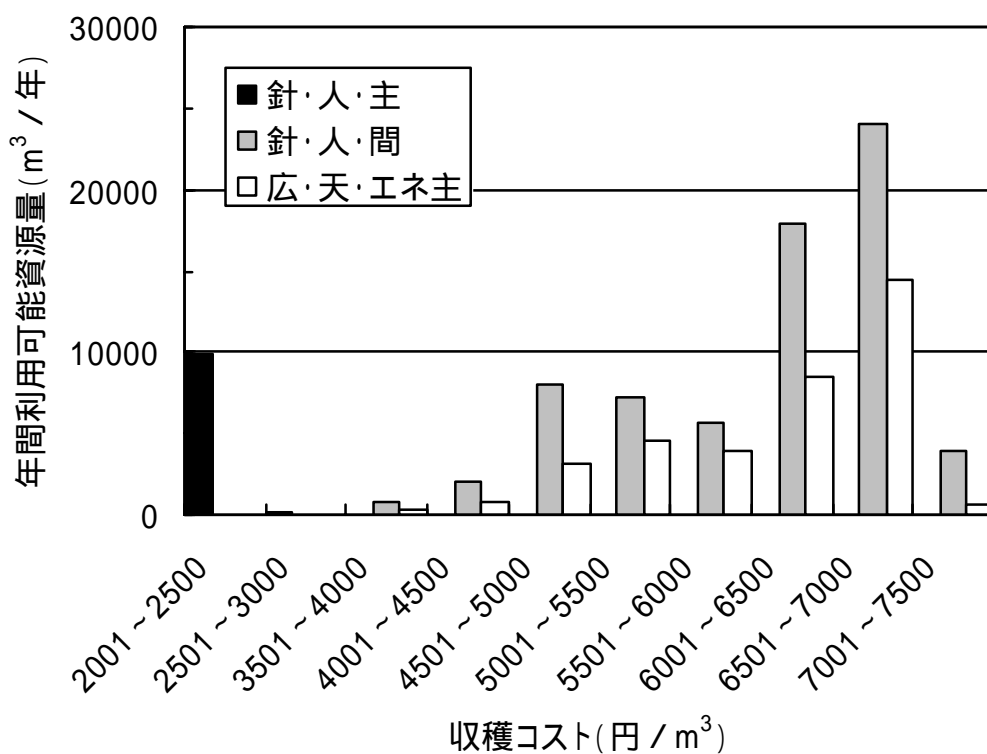


図-5.8 森林バイオマスの伐採形態別・収穫コスト別の年間利用可能資源量

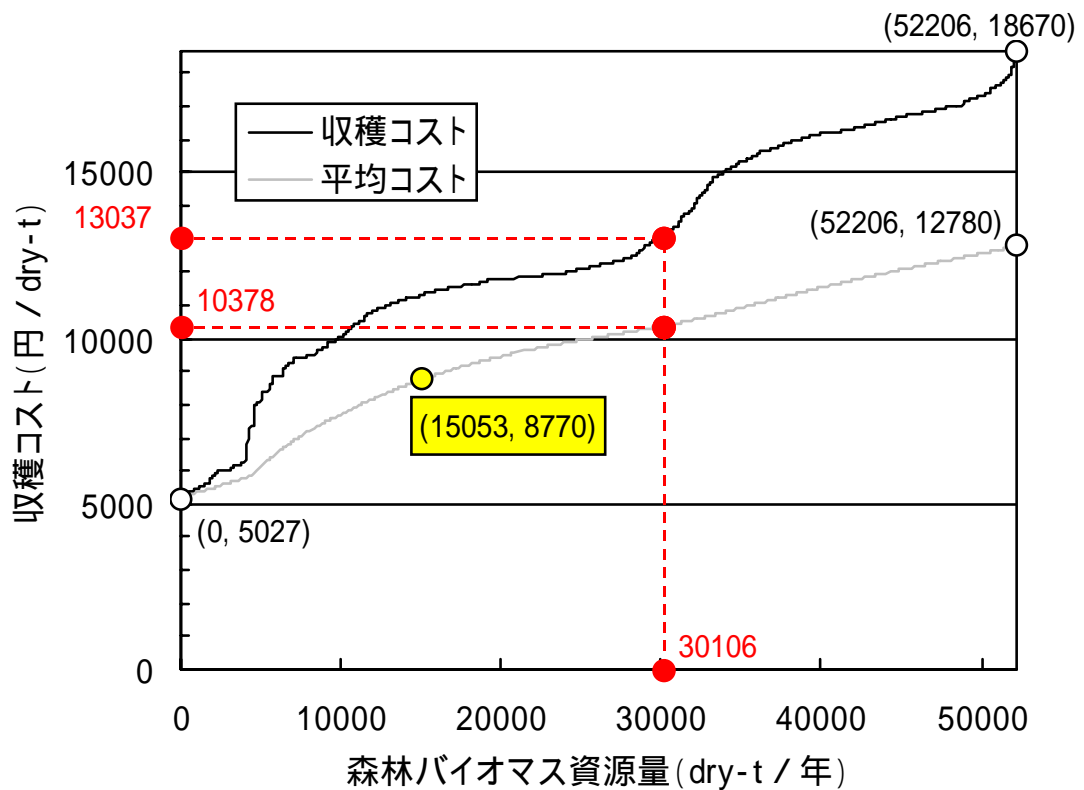


図-5.9 森林バイオマス資源量と収穫コストの関係

本章では、森林バイオマス資源量については、針葉樹・人工林の年間の成長量分を伐採し、広葉樹・天然林を30年サイクルで伐採することを想定している。また収穫コストについては、森林資源の分布状況（樹種、林種、制普、林齢、面積、蓄積）および地理的条件（林地傾斜、林道からの距離、集材方向、プラントまでの輸送距離）を考慮している。したがって図-5.8 および図-5.9 は、資源の持続的利用を前提とした、地域の実状を反映した結果であるといえよう。

この結果について伐採形態別に見ると、まず図-5.8 において、間伐材と広葉樹ではコストの分布がほぼ同じである。また両者に比べ林地残材は低コストとなっているが、これは本章において林地残材を造材作業に伴って発生するものとしていることが影響しているためである。一方間伐材と広葉樹では、広葉樹の比重の方が大きいので、重量あたりのコストに換算すると広葉樹の方が間伐材よりも安くなる。このため図-5.9 においては、林地残材が最も低コストで収穫可能であり、次いで広葉樹、間伐材の順となる。ただし、A 郡で

実施される間伐のほとんどが補助金によるものであることから（表-5.9 参照），間伐作業に対して補助金が交付される場合，本章の結果は変わってくる。この補助は，森林の公益的機能維持の観点からなされるものではあるが，森林バイオマスのエネルギー利用にあたっては，1つの大きなポイントとなるであろう。

A 郡における森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を図-5.9 のように整理したことにより，地域における森林バイオマスのエネルギー利用の実現へ向けては，次の3つのメリットがあると考えられる。

- 1) “10,000 円 / dry-t までならばプラントで受け入れ可能” といった森林バイオマスの購入価格の上限が決まれば，それに応じて1年間に利用可能な資源量を把握することができる。
- 2) 1)とは反対に“プラントを運転するには20,000 dry-t / 年の森林バイオマスが必要”ということになれば，この場合の原料調達コストについて，図を用いることにより確認可能である。
- 3) 森林バイオマスの収穫コストが小班ごとに算出されているため，1)および2)の両者の場合において，“どこの森林を伐採すればよいか”という作業計画の策定に資することができる。

一例として，森林バイオマスを燃料とした発電プラントの建設，地域への電力供給について検討する。プラントの規模としては，前章の分析で用いた発電容量（送電端）3 MW，発電効率12%を，わが国の現状の技術で建設可能なものとして想定する。この規模のプラントで5,400世帯(77)，率にしてA郡の24.8%が消費する電力を賄うことが可能であるが，プラントが1年間に消費する森林バイオマス量は30,106 dry-t / 年である（第4章参照）。図-5.9より，この場合の収穫コストが13,037 円 / dry-t と読み取れるため，この価格よりも安い小班から森林バイオマスを収穫すればよいことになる。また資源量の内訳については表-5.13のように整理される。

表-5.13 森林バイオマス資源量の内訳と平均集材距離，平均輸送距離

項目	資源量 (dry-t / 年)	平均集材距離 (m)	平均輸送距離 (km)
林地残材	4035	362	13.2
間伐材	5754	146	13.1
広葉樹	20317	275	15.1
計 (全体)	30106	262	14.5

平均集材距離および平均輸送距離は、小班ごとの値を、得られる資源量で重み付けした上で算出したものである。プラントは郡内の中央部に位置するものとしているが、広葉樹の平均輸送距離が相対的に大きいということについては、広葉樹・天然林が比較的奥まった場所に位置するものと解釈できる。また全体の平均輸送距離は 14.5 km となったが、前章で同規模の発電プラントを林地残材により賄う場合で 27.8 km であったことから、本章で実際の一般道の配置を考慮に入れ、間伐材と広葉樹を加えて分析を行った結果、ほぼ半分の距離の輸送で済むことが明らかとなった。一方資源量については、林地残材と広葉樹は A 郡の年間利用可能量と同量である。したがって表-5.13 からは、伐採の方針として郡内の利用可能な林地残材と広葉樹を全て収穫し、間伐材についてはプラントに近い、林道から概ね 150 m 以内の小班から搬出するということが読み取れる。

図-5.9 には、プラントで森林バイオマスを受け入れる際の平均コスト（代金の支払い総額を購入するバイオマス量で除したもの）が併せて示されている。想定した発電プラントにおける森林バイオマスの平均コストは図-5.9 より 10,378 円 / dry-t となる。30,106 dry-t / 年のバイオマスを消費するこのプラントの 1 年間の総発電量が 18,432.0 MWh / 年であることから、発電コストの燃料部分は $10378 \times 30106 / (18432.0 \times 1000) = 16.95$ 円 / kWh と計算される。現状を正確に把握できたといえるが、わが国の電力価格 18.17 円 / kWh⁽⁶⁵⁾ を考えると、この値は森林バイオマスのエネルギー利用の実現へ向け、大変厳しい結果を示している。しかしながら、森林バイオマスをエネルギーとして利用する場合をコストの観点のみから議論すべきではなく、二酸化炭素排出量の削減効果はもちろんのこと、地域の雇用創出等の面も含めて総合的に評価する必要がある。また、実際にエネルギー生産を開始するにあたっては、地域で発生する工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝なども燃料とすると考えるのが現実的である。仮に想定したプラントで必要とする燃料の半分の 15,053 dry-t / 年を工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝で賄うとすると、図-5.9 より森林バイオマスの平均コストは 8,770 円 / dry-t まで低下する。さらに近年、廃棄物処理に対する規制が強化されていることを考えると、工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝は無償、あるいは逆有償、つまり引き取り料という形で収入を得て調達できる状況も考えられ、全体の燃料コストを低下させる効果が大きくなることが期待される。

7. 小括

わが国の林業では長い間不振が続いているが，その中には機械化が進まないために木材生産のコストダウンを図れない地域も少なくない。本章ではこのような地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用することにより，1年間にエネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係を把握し，地域における森林バイオマスのエネルギー利用の可能性を評価することを目的として検討を行った。

まず大形機械により収穫システムを構築し，森林バイオマスのエネルギーとしての利用部位と地形傾斜，集材距離，集材方向によりシステムを8種類に分類した。収穫コストについては，この分類に対応する形で林地傾斜，林道からの距離，ならびにエネルギー変換プラントまでの輸送距離を変数とするコスト計算式を作成した。

資源量については，まず地域の森林整備も視野に入れ，林地残材に加えて間伐材，広葉樹を森林バイオマス資源と位置付けた上で，森林資源の分布状況を森林簿データとGISデータを用いて小班単位で正確に把握した。森林資源の持続的な利用が可能なサイクルでの伐採を想定した場合，森林バイオマス資源の年間利用可能量は52,206 dry-t / 年と算出された。また年間伐採量が173,165 m³ / 年となったことから，大形機械を導入するための十分な事業量を確保可能であることを確認した。

以上より求めた小班ごとの資源量およびコストを整理することにより，資源の持続的利用を前提とした，地域の実状を反映した森林バイオマス資源量と収穫コストの関係としてまとめた。この関係について分析することにより，次の3つの結論が得られた。

- 1) 収穫コストに関する全体の傾向として，林地残材（資源量 4,035 dry-t / 年）が最も低コストで収穫可能であり，次いで広葉樹（同 20,317 dry-t / 年），間伐材（同 27,854 dry-t / 年）の順となった。ただし地域において実施される間伐のほとんどが補助金によるものであるという実状を考慮すると，森林バイオマスのエネルギー利用にあたっては，間伐材に対する補助が1つの大きなポイントとなると考えられる。
- 2) 森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を整理したことにより，エネルギー変換プラントにおける森林バイオマスの購入価格の上限が決まれば，それに応じた利用可能資源量を把握でき，また反対にプラントを運転するための必要資源量が決められ

ば、この場合の原料調達コストを確認できるようになった。両者の場合において、森林バイオマスの収穫コストが小班単位で算出されているため、伐採対象となる小班の選定といった作業計画の策定に資することができる。

- 3) 世帯数で地域の 24.8% が消費する電力を賄う発電プラントを建設する場合、必要となる森林バイオマス量は 30,106 dry-t / 年、トラックの平均輸送距離は 14.5 km となった。資源量と収穫コストの関係を適用することにより、コストが 13,037 円 / dry-t よりも安い小班から収穫するという伐採の方針を立てることができた。すなわち、地域内の利用可能な林地残材と広葉樹を全て収穫し、間伐材についてはプラントに近い、林道から概ね 150 m 以内の小班から搬出するというものとなった。発電コストの燃料部分は 16.95 円 / kWh と計算されたが、これについては地域で発生する工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝も燃料とすると考えるのが現実的であり、この場合、全体の燃料コストの低減効果が大きくなることが期待される。

第6章 総括

本研究は、森林バイオマス資源収穫システムの構築に関する研究として、機械化集材作業システムにおける森林バイオマス収穫の可否を確認した上でシステムを構築し、その可能性について収穫コスト、エネルギー収支、二酸化炭素排出量の面から検討を行うとともに、地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用した場合の、エネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係についてモデル地域を対象とした評価を行うことにより、わが国における森林バイオマスのエネルギー利用の実現に資することを目的として、実施したものである。本研究で得られた結果の概要について、以下に述べる。

はじめに国内外の現状および研究経過に関する文献調査を行い、わが国における森林バイオマス利用の問題点を整理することにより、本研究の位置付けを明確にした(第1章)。すなわち、1970年代の2度にわたるオイルショックを契機として、化石燃料の代替資源開発の推進が強く提唱されるようになり、世界的にバイオマスエネルギーに関する研究が盛んになった。しかしながら、原油価格が再び安値で安定したこともあり、わが国では木質バイオマスのエネルギー利用が一向に進んでいない。これについては、実用化段階にある木質バイオマスのエネルギー変換技術に比べ、広い範囲に分散しているバイオマスを低コストで収集・輸送することが可能な技術が未確立であることが、大きな原因の1つとして挙げられる(119)。森林バイオマスの場合、諸外国では機械化集材作業システムにおける林地残材、間伐材等の収穫に関する様々な検討が継続して行われてきたことが、エネルギー資源としての森林バイオマスの地位向上へと繋がっていることとは対照的に、わが国では収穫や利用の検討すら行われず、造材時に発生する末木や枝条は廃棄物とされ、さらに間伐材は集材されず林内に放置されるにまで至っている。わが国においても、近年の地球規模での温暖化問題に対する関心の高まりを背景に、森林バイオマスのエネルギー利用への気運が高まっているにもかかわらず、“果たして収穫することができるのか”、“収穫できる場合のコスト”、“エネルギー面から見た効率”、“地域で利用する際に一体どの程度の資源量をどの程度のコストで調達できるのか”といったことが全く把握されていない状況に

ある。本研究は、これらの問題の一つ一つに対して解決策を示すことにより、わが国における森林バイオマスのエネルギー利用の実現に資するためのものと位置付けられた。

次に、具体的な検討内容および結果を述べる。まず、造材作業時に発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス運搬工程の導入可能性について、現地実験に基づいた検討を行った(第2章)。作業時間分析により、現場で発生する森林バイオマスの運搬可能量を、プロセッサの生産性とフォワーダの運材距離から判定することを可能とし、これを実験を実施した現場に適用した結果、生産される森林バイオマスのほぼ全てを運搬可能であることが明らかとなった。また、この場合のエネルギー収支が1%にも達しなかったことから、この点においては森林バイオマスのエネルギー利用は十分可能であることが確認された。森林バイオマスの運搬コストは15.4円/dry-kgと計算されたが、残材を粉砕することにより積載効率を向上させ、コストを低減する必要があることが示された(120)。

次に、森林バイオマスのエネルギー利用の進んでいるヨーロッパ諸国の事例を参考に(121)、森林バイオマス資源収穫システムを構築した。森林バイオマス収穫専用車両による現地実験に基づき、わが国におけるシステムの可能性を収穫コストおよびエネルギー収支の観点から評価を行うことにより、最適な低コスト収穫システムを検討するとともに、ヨーロッパ諸国との比較により考察した(第3章)。構築したシステムについて収穫コストと燃料消費量の観点からは、チップによる粉砕作業がシステムの早い段階で行われるものが望ましいという結果を得た。またわが国での実現可能性については、収穫コストが最も安い場合でも4.32~8.41円/kWhと、国内の電力価格18.17円/kWhに対して高い割合を示したことからコストの面では厳しいものの、システムのエネルギー収支の面では、概ね数パーセント台に留まったことから特に問題ないものと評価された。さらに森林バイオマスを化石資源の代替エネルギーとして利用することによる、国内の二酸化炭素排出量削減の可能性が示唆された。ヨーロッパ諸国との比較の結果、収穫コストに大きな格差があったことから林内運搬、輸送の両工程の積載効率向上といったコスト削減のための技術開発、ならびに政府による制度面からの支援が、わが国におけるシステムの実現のためには不可欠であることが示された(117)。

さらに構築した低コスト収穫システムについて、ライフサイクルインベントリ(LCI)分析手法を用いることにより、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および二酸化炭素排出量を、森林バイオマスのトータルのライフサイクルの観点から精緻に分析した(第4章)。投入エネルギーについては、システムを運用するためのエネルギー量が、システムを構成する設備のエネルギー量よりも相当に大きく、また運用エネルギーの内訳より、粉砕、輸送の両工程の処理効率を向上させるための作業システムの改善および技術開発が、システムの投入エネルギーを減少させるための先決課題であることが確認された。システムの構築に必要な各種機械、機器・装置等の設備エネルギーを、発電により1.09年という短期間で回収できることが示され、またシステムの総エネルギー収支が5.69となったため、本研究で構築したシステムがエネルギー生産システムとして十分成り立ち得ることが明らかとなった。さらにシステムの二酸化炭素排出原単位が $61.8 \text{ gCO}_2 / \text{ kWh}$ と算出されたことから、この点では森林バイオマスが化石資源に対して十分有利であり、この場合、石炭火力発電によるエネルギーをバイオマスで代替することにより、国内の年間二酸化炭素排出量の0.142%を削減可能であることが確認された。感度分析の結果、発電プラントのエネルギー変換効率がシステムのインベントリ結果に最も大きな影響を及ぼすパラメータとなり、森林バイオマスのエネルギー利用を実現するためには、小規模・高効率変換技術の開発の必要性が示唆された。

一方、地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用した場合の、地域における森林バイオマスのエネルギー利用の可能性については、モデル地域を対象に、1年間にエネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係を分析することにより検討を行った(第5章)。収穫コストについて森林バイオマスの利用部位と地理的条件をもとにシステムを8種類に分類し、林地傾斜、林道からの距離、エネルギー変換プラントまでの輸送距離を変数とするコスト計算式を作成するとともに、資源量について地域の森林整備も視野に入れ、林地残材に加え間伐材、広葉樹を森林バイオマス資源と位置付け、森林資源の分布状況を地理情報システム(GIS)を用いて小班単位で正確に把握することにより、資源の持続的な利用を前提とした、地域の実状を反映した森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を求めた。収穫コストの傾向として、林地残材(資源量 $4,035 \text{ dry-t} / \text{ 年}$)が最も低コストで収穫可能であり、次いで広葉樹(同 $20,317 \text{ dry-t} / \text{ 年}$)、間伐材(同 $27,854 \text{ dry-t} / \text{ 年}$)の順となった。また資源量と収穫コストの関係は、森林バイオマスをエネルギーとして利用する場合、伐採対象となる小班の選定といった作業計画の策定に資するものとなった。すなわち、モデル地域の24.8%の世帯が消費する電力を賄う発電プラントを建設する場合、必要となる森林バイオマス量は $30,106 \text{ dry-t} / \text{ 年}$ となり、コストが $13,037 \text{ 円} / \text{ dry-t}$ よりも安

い小班から収穫するという方針が立てられる。この場合の発電コストの燃料部分は 16.95 円/kWh となったが、これについては地域で発生する工場廃材、解体廃材、街路樹剪定枝も燃料とすると考えるのが現実的であり、この場合、全体の燃料コストの低減効果が大きくなることが期待された。

以上総括するに、森林バイオマス資源収穫システムのわが国における可能性について、わが国では全く把握されていない状況にあった 4 つの問題に対し、本研究で得られた結果を解決策として提示する形で、次のように整理できる。

(1) “果たして収穫することができるのか”

機械化集材作業システムにおいて発生する森林バイオマスの運搬可能量を、プロセッサの生産性とフォワーダの運材距離から判定する手法を提示し、現地実験をもとに、生産される森林バイオマスのほぼ全てを運搬可能であることを示した。

(2) “収穫できる場合のコスト”

現時点においては、収穫コストの観点からは厳しいが、ヨーロッパ諸国の事例との比較を通して、森林基盤整備、技術開発等によるコスト削減の余地は十分にあることを確認した。

(3) “エネルギー面から見た効率”

エネルギー収支の面では、エネルギー生産システムとして十分成り立ち得るものであることを明確にした。また二酸化炭素排出量の面では、化石資源に対して十分に有利であり、化石資源によるエネルギーを森林バイオマスで代替することにより、国内の二酸化炭素排出量を削減可能であることを併せて示した。

(4) “地域で利用する際に一体どの程度の資源量をどの程度のコストで調達できるのか”

モデル地域へのシステムの適用を検討することにより、資源の持続的利用を前提とした、地域の実状を反映した森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を把握する手法を提示した。地域において森林バイオマスをエネルギーとして利用する場合、この関係が、伐採対象となる小班の選定といった作業計画の策定に資するものとなることを確認した。

本研究は、以上の 4 点をもって、わが国における森林バイオマス資源収穫システムの実用化、ひいては森林バイオマスのエネルギー利用の実現に資するものであると考える。

謝辞

本論文は、非常に多くの方々より賜った多大なご支援の上に成立したものである。ここに記して、心より謝意を捧げたい。

まず本論文に取りまとめた研究は、東京大学大学院農学生命科学研究科森林利用学研究室小林洋司教授のご指導のもとに行われたものである。わが国では、今でこそバイオマスへの注目が集まっているものの、森林バイオマスに関する研究は、筆者が森林利用学研究室に入室した当時はほとんど行われていない状況にあった。そのような中で、小林先生には、筆者の個人的な興味に端を発した森林バイオマスの収穫に関する研究を、卒業論文から数えて6年間にもわたり我慢強くご指導いただいた。筆者の外部での身勝手な行動も、先生は温かく見守ってくださった。また論文審査の過程においては、終始懇篤なご指導を賜り、さらに校閲の労を執っていただいた。先生の厳しくも温かいご指導がなければ、本論文を完成させるには至らなかったであろう。

本論文を取りまとめるにあたり、東京大学大学院農学生命科学研究科森林利用学研究室仁多見俊夫助教授および有賀一広助手より多くの有益なご助言をいただいた。仁多見先生には、先生が東京大学大学院農学生命科学研究科附属秩父演習林長を務めておられた頃より、試験地設定の便宜を図っていただくなど、公私にわたり面倒をみていただいた。また有賀先生には、研究室の日常業務、現地での調査等でお世話になったばかりでなく、同世代の立場から、研究の進め方についても非常に多くのアドバイスをいただいた。

論文審査では、東京大学大学院農学生命科学研究科附属秩父演習林長酒井秀夫教授より的確なご助言をいただいた。酒井先生には、筆者が博士課程1年次までの4年間、森林利用学研究室の助教授としてご指導いただいた。先生は、筆者の卒業論文の調査として、林地残材をフォワードで収穫するという実験を設定してくださった。この調査が本論文の出発点である。また、先生が文部科学省の在外研究員としてデンマーク森林・景観研究所に滞在しておられた際には、筆者の訪問を歓迎してくださった。デンマークで数多くの貴重

な経験ができたことは生涯忘れられない。

また、東京大学大学院農学生命科学研究科森林経理学研究室箕輪光博教授および独立行政法人森林総合研究所企画調整部研究評価科長豊川勝生博士には、激務の最中にもかかわらず論文審査をお引き受けいただき、数多くの有意義なご指摘を賜った。

東京農工大学農学部地域生態システム学科森林環境学講座岩岡正博助手には、筆者が修士課程1年次までの2年間、森林利用学研究室の助手としてご指導いただいた。また森林利用学研究室の歴代の事務補佐員、大学院生、ならびに学生の諸氏には、研究室の日常生活において非常にお世話になった。

この他、お名前を挙げることはできないが、宮城県登米町森林組合、岩手大学農学部附属滝沢演習林、ならびに東京大学大学院農学生命科学研究科附属秩父演習林における現地調査、日本エネルギー学会バイオマス部会ビジョンワーキンググループでのビジョン策定をはじめ、調査結果の分析、データ、資料等の収集、学会およびシンポジウムへの参加など筆者のこれまでの研究活動において、多くの方々より多大なご支援をいただいた。

最後になるが、筆者がこれまで論文執筆に専念できたのは、家族の献身的な支えによるところが大きい。この場を借りて、深く感謝の意を表したい。

引用文献

- (1) Alakangas, E., Sauranen, T., and Vesisenaho T. (1999) Production Techniques of Logging Residue Chips in Finland: Training Manual. 84 pp, VTT Energy, Jyväskylä.
- (2) Almqvist, R. and Liss J.-E. (1987) Desirable specifications for farm tractor mounted handfed chippers. *Small Scale Forestry* 87(2): 12-16.
- (3) Andersson, B. and Falk, S. (eds.) (1984) Forest Energy in Sweden: Report from Seven Years of Whole Tree Utilization Research. 111 pp, Swedeish University of Agricultural Sciences, Garpenberg.
- (4) Andersson, G. (1999) New technique for forest residue handling. *In Forest Engineering for Tomorrow: Harvesting* (Proceedings of FEG International Conference, Edinburgh, Scotland, June 28-30 1999).
- (5) Andersson, G., Nordén, B., Jirjis, R., and Åstrand, C. (2000) Composite Residue Logs Cut Wood-Fuel Costs (SkogForsk Results No. 1, 2000). 4 pp, The Forestry Research Institute of Sweden, Uppsala.
- (6) Angus-Hankin, C., Stokes, B., and Twaddle, A. (1995) The transportation of fuel wood from forest to facility. *Biomass and Bioenergy* 9: 191-203.
- (7) 青柳聡史・野田玲治・堀尾正靱・岩岡正博・藤村宏幸 (2002) 定常伐採型森林バイオマスエネルギーの可能性. 日本エネルギー学会創立 80 周年記念大会講演要旨集: 200-201.
- (8) 朝倉啓一郎・早見均・溝下雅子・中村政男・中野諭・篠崎美貴・鷺津明由・吉岡完治 (2001) 環境分析用産業連関表. 236 pp, 慶應義塾大学出版会, 東京.
- (9) Asikainen, A. and Kuitto, P.-J. (2000) Cost factors in wood fuel procurement. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1/2): 79-87.
- (10) Asikainen, A. and Pulkkinen, P. (1998) Comminution of logging residues with Evolution 910R chipper, MOHA chipper truck, and Morbark 1200 tub grinder. *Journal of Forest Engineering* 9(1): 47-53.
- (11) Boman, U. R. and Turnbull, J. H. (1997) Integrated biomass energy systems and emissions of carbon dioxide. *Biomass and Bioenergy* 13: 333-343.
- (12) Börjesson, P. (1996) Emissions of CO₂ from biomass production and transportation in agriculture and forestry. *Energy Conversion Management* 37: 1235-1240.

- (13) Börjesson, P. (1996) Energy analysis of biomass production and transportation. *Biomass and Bioenergy* 11: 305-318.
- (14) Börjesson, P. (2000) Economic valuation of the environmental impact of logging residue recovery and nutrient compensation. *Biomass and Bioenergy* 19: 137-152.
- (15) Börjesson, P. and Gustavsson, L. (1996) Regional production and utilization of biomass in Sweden. *Energy* 21: 747-764.
- (16) Brenøe, P. T. and Kofman, P. D. (1990) Harvesting early thinnings for energy. *Biomass* 22: 159-169.
- (17) Culshaw, D. and Stokes, B. (1995) Mechanisation of short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy* 9: 127-140.
- (18) Delgado, J. B. and Giraldo, G. A. (1995) Energy possibilities from forest residues in the region of Castilla y León in Spain. *Biomass and Bioenergy* 8: 21-28.
- (19) Desrochers, L., Puttock, D., and Ryans, M. (1993) The economics of chipping logging residues at roadside: A study of three systems. *Biomass and Bioenergy* 5: 401-411.
- (20) 土手裕・横山伸也 (1994) バイオマス利用によるCO₂削減効果. *資源と環境* 3: 95-102.
- (21) 堂脇清志・石谷久・松橋隆治 (2000) バイオマスエネルギーシステムの導入可能性評価. *エネルギー・資源* 21: 173-180.
- (22) 堂脇清志・石谷久・松橋隆治 (2001) 養分循環を考慮したバイオマスエネルギーシステムのライフサイクル分析 - エネルギー収支およびLCCO₂の検討 - . *エネルギー・資源* 22: 373-378.
- (23) Eriksson, P. (2000) SkogForsk review of systems for logging residues handling in Sweden. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1/2): 88-93.
- (24) Faaij, A., van Ree, R., Waldheim, L., Olsson, E., Oudhuis, A., van Wijk, A., Daey-Ouwens, C., and Turkenburg, W. (1997) Gasification of biomass wastes and residues for electricity production. *Biomass and Bioenergy* 12: 387-407.
- (25) Felker, P., McLauchlan, R. A., Conkey, A., and Brown, S. (1999) Case study: Development of a swath harvester for small diameter (< 10 cm) woody vegetation. *Biomass and Bioenergy* 17: 1-17.
- (26) Folkema, M. P. (1977) Whole-Tree Chipping with the Morbark Model 22 Chipharvester. 14 pp, Forest Engineering Research Institute of Canada, Pointe Claire and Vancouver.
- (27) Folkema, M. P. (1989) Handbook for Small-to-Medium Size Fuelwood Chipping Operations. 48 pp, Forest Engineering Research Institute of Canada, Pointe Claire and Vancouver.

- (28) Food and Agriculture Organization of the United Nations (1974) Logging and Log Transport in Tropical High Forest (FAO Forestry Development Paper No. 18). 90 pp, Food and Agriculture Organizations of the United Nations, Rome.
- (29) Food and Agriculture Organization of the United Nations (1976) Wood Chips: Production, Handling, Transport (Second (Updated) Edition). 136 pp, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- (30) Forsberg, G. (2000) Biomass energy transport: Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. *Biomass and Bioenergy* 19: 17-30.
- (31) Gingras, J.-F. (1995) Harvesting small trees and forest residues. *Biomass and Bioenergy* 9: 153-160.
- (32) Goulding, C. J. and Twaddle, A. (1990) Harvesting whole trees with processing and log allocation (in the forest) to conventional and energy products. *Biomass* 22: 145-158.
- (33) Gustavsson, L., Börjesson, P., Johansson, B., and Svenningsson, P. (1995) Reducing CO₂ emissions by substituting biomass for fossil fuels. *Energy* 20: 1097-1113.
- (34) Hakkila, P. (1989) Utilization of Residual Forest Biomass. 568 pp, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York.
- (35) Hall, P. (2000) Bioenergy fuel from stem-to-log processing waste using conventional forest harvesting systems. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1/2): 108-113.
- (36) Hall, P., Gigler, J. K., and Sims, R. E. H. (2001) Delivery systems of forest arisings for energy production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 21: 391-399.
- (37) 原田寿郎 (2000) 森林由来のバイオマス資源のエネルギー利用. *農林水産技術研究ジャーナル* 23(6): 39-44.
- (38) Hartsough, B., Spinelli, R., Pottle, S., and Klepac, J. (2000) Fiber recovery with chain flail delimiting/debarking and chipping of hybrid poplar. *Journal of Forest Engineering* 11(2): 59-68.
- (39) Heding, N. (1999) Energy woods from forests and plantations. IEA Task 18 Technical Notes 1: 10-11.
- (40) Hektor, B. (1998) Cost effectiveness of measures for the reduction of net accumulation of carbon dioxide in the atmosphere. *Biomass and Bioenergy* 15: 299-309.
- (41) 本多淳裕 (1986) バイオマスエネルギー - 生物系資源・廃棄物の有効利用 - . 171 pp, 省エネルギーセンター, 東京.
- (42) 本藤祐樹・内山洋司・森泉由恵 (2000) ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価 - 最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響 - (電力中央研究所・研究報告: Y99009). 105 pp.
- (43) Hudson, B. (1995) Integrated harvesting systems. *Biomass and Bioenergy* 9: 141-151.

- (44) Hudson, B. and Hudson, B. (1999) Technical developments in wood fuel harvesting. *In* Forest Engineering for Tomorrow: Harvesting (Proceedings of FEG International Conference, Edinburgh, Scotland, June 28-30 1999).
- (45) Hudson, B. and Hudson, B. (2000) Wood fuel supply chain in The United Kingdom. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30(1/2): 94-107.
- (46) Hunter, A., Boyd, J., Palmer, H., Allen, J., and Browne, M. (1999) Transport of forest residues to power stations. *In* Forest Engineering for Tomorrow: Harvesting (Proceedings of FEG International Conference, Edinburgh, Scotland, June 28-30 1999).
- (47) Jungmeier, G., Resch, G., and Spitzer, J. (1998) Environmental burdens over the entire life cycle of a biomass CHP plant. *Biomass and Bioenergy* 15: 311-323.
- (48) 川村勇・熊谷国夫・伊藤勲・斎藤誠 (1998) 林地残・廃材の利活用に関する研究. 岩手大学演習林業務資料 20: 5-9.
- (49) 川村登研究代表者 (1987) 生物資源にかかわるエネルギー利用の高効率化に関する研究 (文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究 (エネルギー) 昭和 61 年度研究成果報告書). 258 pp.
- (50) 木谷収研究代表者 (1982) 農業におけるエネルギーの有効利用の研究 (文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究 (エネルギー) 昭和 56 年度研究成果報告書). 252 pp.
- (51) 木谷収研究代表者 (1984) 農業におけるエネルギーの有効利用の研究 (文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究 (エネルギー) 昭和 58 年度研究成果報告書). 184 pp.
- (52) Klass, D. L. (1998) *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*. 651 pp, Academic Press, San Diego.
- (53) 小島健一郎 (1999) 木質バイオマスの利用によるCO₂の削減策とその社会的効果 - スウェーデンの事例を参考に - . *林業技術* 682: 25-30.
- (54) Korpilahti, A. (1998) Finnish forest energy systems and CO₂ consequences. *Biomass and Bioenergy* 15: 293-297.
- (55) 熊崎実 (2002) 中山間地における森林バイオマスのエネルギー利用 - 課題と展望 - . *木材工業* 57: 472-475.
- (56) Lundborg, A. (1997) Reducing the nitrogen load: Whole-tree harvesting. *Ambio* 26: 387-393.
- (57) Lundborg, A. (1998) A sustainable forest fuel system in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 15: 399-406.
- (58) Malac, B. F. (1976) The effect of whole-tree chipping on site preparation and regeneration. *Tappi Journal* 59(7): 82-84.

- (59) Malinen, J., Pesonen, M., Määttä, T., and Kajanus, M. (2001) Potential harvest for wood fuels (energy wood) from logging residues and first thinnings in Southern Finland. *Biomass and Bioenergy* 20: 189-196.
- (60) 南方康 (1987) バイオマスの搬出法と利用限界. (生物資源にかかわるエネルギー利用の高効率化に関する研究 (文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究 (エネルギー) 昭和 61 年度研究成果報告書). 川村登研究代表者, 258 pp). 195-200.
- (61) Minamikata, Y. (1989) Collection method. *In Biomass Handbook*. Kitani, O. and Hall, C. W. (eds.), 963 pp, Gordon and Breach Science Publishers, New York, London, Paris, Montreux, Tokyo and Melbourne, 475-480.
- (62) Miyazaki, M. (1989) Forestry products and waste. *In Biomass Handbook*. Kitani, O. and Hall, C. W. (eds.), 963 pp, Gordon and Breach Science Publishers, New York, London, Paris, Montreux, Tokyo and Melbourne, 160-170.
- (63) Morey, J. (1975) Conservation and economical harvesting of wood fiber by using the whole tree. *Tappi Journal* 58(5): 94-97.
- (64) 元田欽也・大山長七郎 (1999) わかりやすい廃棄物処理・リサイクルの実務計算. 168 pp, オーム社, 東京.
- (65) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編 (2000) エネルギー・経済統計要覧 2000. 312 pp, 省エネルギーセンター, 東京.
- (66) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編 (2001) エネルギー・経済統計要覧 2001. 320 pp, 省エネルギーセンター, 東京.
- (67) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編 (2002) エネルギー・経済統計要覧 2002. 324 pp, 省エネルギーセンター, 東京.
- (68) 日本住宅・木材技術センター (1981) 木質系エネルギー活用促進調査 (林野庁委託事業報告書). 809 pp.
- (69) 日本住宅・木材技術センター (1982) 森林系エネルギー活用促進調査事業報告書 (昭和 56 年度農林水産省補助事業). 490 pp.
- (70) 日本住宅・木材技術センター (1984) 森林資源有効活用促進調査事業報告書 (昭和 57・58 年度農林水産省補助事業). 412 pp.
- (71) 日本産業機械工業会 (1979) 森林資源の有効利用システムの研究開発 I. 153 pp.
- (72) 日本産業機械工業会 (1980) 森林資源の有効利用システムの研究開発 II. 184 pp.
- (73) 仁多見俊夫・上飯坂實 (1982) トラック運材作業経費の分析. *日林論* 93: 527-528.
- (74) 農林水産省農林水産技術会議事務局編 (1991) バイオマス変換計画 - 豊かな生物資源を生かす -. 737 pp, 光琳, 東京.

- (75) Nurmi, J. (1999) Energy from the forest in Finland. IEA Task 18 Technical Notes 1: 4-8.
- (76) 小木知子 (1999) バイオマスエネルギーの特性 - エネルギー資源としての観点からの分類と特徴 - . 日エネ誌 78: 232-238.
- (77) 小木知子・中西正和・土手裕・久保山裕史・天野正博 (2002) 木質系バイオマスのエネルギー変換技術の評価 - 実用化に向けた地域分散型発電システムの検討 - . 日本エネルギー学会創立 80 周年記念大会講演要旨集: 204-205.
- (78) 岡田喬・渡辺輝文・供田英一 (1998) リサイクル緑化“ ネッコチップ工法 ”の開発. 建設の機械化 583: 3-8.
- (79) 尾張敏章・仁多見俊夫 (1996) 採算性を考慮した機械化作業システムの必要事業規模. 日林誌 78: 475-477.
- (80) Palenius, I. (1976) The state of whole-tree utilization in Scandinavia. Tappi Journal 59(7): 72-74.
- (81) Puttock, D. (1995) Estimating cost for integrated harvesting and related forest management activities. Biomass and Bioenergy 8: 73-79.
- (82) Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A. T., and Smith, C. T. (eds.) (2002) Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice. 344 pp, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London.
- (83) 林業科学技術振興所 (1984) 林地残材の収集・搬送に関する事前評価 (農林水産省大型別枠研究 (バイオマス変換計画) 昭和 58 年度委託事業報告書). 37 pp.
- (84) 林業科学技術振興所 (1985) 林地残材の収集・搬送に関する事前評価 - 広葉樹林地残材の収集・搬送 - (農林水産省大型別枠研究 (バイオマス変換計画) 昭和 59 年度委託事業報告書). 48 pp.
- (85) 林業機械化協会 (1996) 林業機械便覧 1996. 252 pp, 林業機械化協会, 東京.
- (86) 林業機械化協会 (1998) 平成 9 年度林業災害防止・多用途機械開発改良事業成果の概要. 機械化林業 537: 39-55.
- (87) 林業機械化協会 (1999) 林業機械便覧 1999. 267 pp, 林業機械化協会, 東京.
- (88) 林業試験場監修 (1982) 改訂 3 版木材工業ハンドブック. 1099 pp, 丸善, 東京.
- (89) 林野庁監修 (1998) 林業技術ハンドブック. 1969 pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (90) 林野庁 (2000) 平成 11 年度バイオマス資源の利用手法に関する調査報告書. 129 pp.
- (91) 酒井秀夫 (1987) 合理的集運材方式に基づく長期林内路網計画に関する研究. 東大演報 76: 1-85.

- (92) 酒井秀夫・岩岡正博・朴相俊・小林洋司 (1989) ハーベスタ・フォワーダによる間伐作業の作業能率. 東大演報 94: 29-47.
- (93) 澤口勇雄 (1996) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第 1 報). 森林総合研究所研究報告 372: 1-110.
- (94) Sennblad, G. (1994) Forest fuel. *Small Scale Forestry* 94(2): 11-18.
- (95) Sennblad, G. (1995) Producing forest fuel to supply small local heating plants. *Small Scale Forestry* 95(2): 3-7.
- (96) 柴田和雄・木谷収編 (1981) バイオマス - 生産と変換 - (上). 282 pp, 学会出版センター, 東京.
- (97) 志水一允 (1995) 森林資源の持続的利用. *林業技術* 636: 23-25.
- (98) 猪内正雄・立川史郎 (1984) 木質系エネルギーの活用システムの実験調査. (森林資源有効活用促進調査事業報告書 (昭和 57・58 年度農林水産省補助事業). 日本住宅・木材技術センター, 412 pp). 66-96.
- (99) Spinelli, R., Hartsough, B. R. (2001) Extracting whole short rotation trees with a skidder and a front-end loader. *Biomass and Bioenergy* 21: 425-431.
- (100) Spinelli, R., Hartsough, B. R. (2001) A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy* 21: 433-444.
- (101) Stokes, B. and Watson, W. (1991) Wood recovery with in-woods flailing and chipping. *Tappi Journal* 74(9): 109-113.
- (102) Stuart, W. B., Porter, C. D., Walbridge, T. A., and Oderwald, R. G. (1981) Economics of modifying harvesting systems to recover energy wood. *Forest Products Journal* 31(8): 37-42.
- (103) Sundberg, U. and Silversides, C. R. (1988) *Operational Efficiency in Forestry (Vol. 1: Analysis)*. 228 pp, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London.
- (104) Sundberg, U. and Silversides, C. R. (1989) *Operational Efficiency in Forestry (Vol. 2: Practice)*. 169 pp, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London.
- (105) 田原聖隆・小島紀徳・稲葉敦・小木知子・横山伸也 (1998) 持続的な植林によるバイオマス発電のCO₂排出削減量の評価 - LCA的検討 - . *日エネ誌* 77: 403-409.
- (106) Tufts, D. M. (1976) Whole-tree chipping. *Tappi Journal* 59(7): 60-62.
- (107) 内山洋司・山本博巳 (1991) 発電プラントのエネルギー収支分析 (電力中央研究所・研究報告: Y90015). 75 pp.
- (108) 内山洋司・山本博巳 (1992) 発電プラントの温暖化影響分析 (電力中央研究所・研究報告: Y91005). 49 pp.

- (109) 梅田三樹男・辻隆道・井上公基 (1982) 標準功程表と立木評価. 140 pp, 日本林業調査会, 東京.
- (110) 運輸図書 (1999) 一般貨物自動車貸切運賃早見表 (全国版). 253 pp, 運輸図書, 東京.
- (111) Vis, J. (1999) Energy wood from Dutch forests. IEA Task 18 Technical Notes 1: 12-14.
- (112) Watson, W., Stokes, B., and Savelle, I. W. (1986) Comparisons of two methods of harvesting biomass for energy. Forest Products Journal 36(4): 63-68.
- (113) 山地憲治・山本博巳・藤野純一 (2000) バイオエネルギー. 237 pp, ミオシン出版, 東京.
- (114) 山本博昭・堀尾尚志 (1987) 林地残材収集用機械の開発. (生物資源にかかわるエネルギー利用の高効率化に関する研究 (文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究 (エネルギー) 昭和 61 年度研究成果報告書). 川村登研究代表者, 258 pp). 249-258.
- (115) 山本博巳 (2002) 木質バイオマス発電. 木材工業 57: 484-488.
- (116) 横山伸也 (2002) バイオエネルギーへの期待 - 概論 -. 日エネ誌 81: 236-240.
- (117) Yoshioka, T., Aruga, K., Sakai, H., Kobayashi, H., and Nitami, T. (2002) Cost, energy and carbon dioxide (CO₂) effectiveness of a harvesting and transporting system for residual forest biomass. J. For. Res. 7: 157-163.
- (118) 吉岡拓如・平田悟史・松村幸彦・坂西欣也 (2001) 国内の木質系バイオマス資源ポテンシャルとエネルギー利用の可能性. 日エネ講 10: 341-344.
- (119) 吉岡拓如・平田悟史・松村幸彦・坂西欣也 (2002) 木質バイオマス資源のポテンシャルとエネルギー利用の可能性. 日エネ誌 81: 241-249.
- (120) Yoshioka, T., Iwaoka, M., Sakai, H., and Kobayashi, H. (2000) Feasibility of a harvesting system for logging residues as unutilized forest biomass. J. For. Res. 5: 59-65.
- (121) 吉岡拓如・酒井秀夫・小林洋司 (2000) ヨーロッパ諸国の森林バイオマス事情とわが国における研究の展開. 森林学誌 15: 233-238.
- (122) 全国林業改良普及協会編 (2001) 機械化のマネジメント. 239 pp, 全国林業改良普及協会, 東京.

摘要

1970年代の2度にわたるオイルショックを契機として、化石燃料の代替資源開発の推進が強く提唱されるようになり、世界的にバイオマスエネルギーに関する研究が盛んになった。しかしながら、原油価格が再び安値で安定したこともあり、わが国では木質バイオマスのエネルギー利用が一向に進んでいない。これは、実用化段階にある木質バイオマスのエネルギー変換技術に比べ、広い範囲に分散しているバイオマスを低コストで収集・輸送することが可能な技術が未確立であることが、大きな原因の1つとして挙げられる。わが国では森林バイオマスの収穫や利用の検討すら行われていないため、近年の地球規模での温暖化問題に対する関心の高まりを背景に、森林バイオマスのエネルギー利用への気運が高まっているにもかかわらず、果たして収穫することができるのか、収穫できる場合のコスト、エネルギー面から見た効率、地域で利用する際に一体どの程度の資源量をどの程度のコストで調達できるのか、といったことが全く把握されていない状況にある。

本研究は以上の状況を踏まえ、機械化集材作業システムにおける森林バイオマス収穫の可否を確認した上で森林バイオマス資源収穫システムを構築し、その可能性について収穫コスト、エネルギー収支、二酸化炭素排出量の面から検討を行うとともに、地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用した場合の、エネルギーとして利用可能な資源量と収穫コストの関係を評価することにより、わが国における森林バイオマスのエネルギー利用の実現に資することを目的とするものである。

まず第1章では、わが国における森林バイオマス利用の問題点を整理することにより、本研究の位置付けを明確にした。

第2章では、造材作業時に発生する末木や枝条などの林地残材を森林バイオマス資源と位置付け、プロセッサとフォワーダを組み合わせた木材生産システムへの、フォワーダによる森林バイオマス運搬工程の導入可能性について、現地実験に基づいた検討を行った。作業時間分析により、現場で発生する森林バイオマスの運搬可能量を、プロセッサの生産性とフォワーダの運材距離から判定する手法を提示し、これを実験を実施した現場に適用

した結果、生産される森林バイオマスのほぼ全てを運搬可能であることを確認した。またこの場合のエネルギー収支は 1%にも達しなかったことから、この点においても、森林バイオマスのエネルギー利用は十分可能である。森林バイオマスの運搬コストは 15.4 円 / dry-kg と計算されたが、さらに残材を粉砕することにより積載効率を向上させ、コストを低減する必要がある。

第 3 章では、森林バイオマス資源収穫システムを構築し、森林バイオマス収穫専用車両による現地実験に基づき、わが国におけるシステムの可能性を収穫コストおよびエネルギー収支の観点から評価を行い、ヨーロッパ諸国の事例との比較により考察した。構築したシステムは、収穫コストと燃料消費量の観点からは、チップによる粉砕作業がシステムの早い段階で行われるものが望ましいという結果を得た。またわが国での実現可能性は、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 に対して高い割合を示したことからコストの面では厳しいものの、システムのエネルギー収支の面では、概ね数パーセント台に留まったことから特に問題ない。さらに森林バイオマスを化石資源の代替エネルギーとして利用することによる、国内の二酸化炭素排出量削減の可能性が示唆された。ヨーロッパ諸国との比較の結果、収穫コストに大きな格差があったことから、林内運搬、輸送の両工程の積載効率向上といったコスト削減のための技術開発が、わが国におけるシステムの実現のためには不可欠である。

第 4 章では、第 3 章で構築したシステムについて、ライフサイクルインベントリ (LCI) 分析手法を用いることにより、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を精緻に分析した。投入エネルギーは、システムを運用するためのエネルギー量が、システムを構成する設備のエネルギー量よりも相当に大きく、また運用エネルギーの内訳より、粉砕、輸送の両工程の処理効率を向上させるための作業方法の改善および技術開発が、投入エネルギーを減少させるための先決課題であることを確認した。システムの構築に必要な各種機械、機器・装置等の設備エネルギーを、発電により 1.09 年という短期間で回収できることを示し、またシステムの総エネルギー収支は 5.69 となったため、本研究で構築したシステムが、エネルギー生産システムとして十分成り立ち得ることを明らかにした。さらにシステムの二酸化炭素排出原単位は 61.8 gCO₂ / kWh と算出されたことから、この点では森林バイオマスが化石資源に対して十分有利であり、石炭火力発電によるエネルギーを森林バイオマスで代替することにより、国内の年間二酸化炭素排出量の 0.142% を削減可能である。

第5章では、地域へ森林バイオマス資源収穫システムを適用した場合の森林バイオマスのエネルギー利用の可能性について、モデル地域を対象に、1年間に利用可能な資源量と収穫コストの関係を分析することにより検討を行った。収穫コストは、森林バイオマスの利用部位と地理的条件をもとにシステムを8種類に分類し、林地傾斜、林道からの距離、エネルギー変換プラントまでの輸送距離を変数とするコスト計算式を作成するとともに、資源量は、地域の森林整備も視野に入れ、林地残材に加え間伐材、広葉樹を森林バイオマス資源と位置付け、森林資源の分布状況を地理情報システム（GIS）を用いて小班単位で把握することにより、地域の実状を反映した森林バイオマス資源量と収穫コストの関係を求めた。収穫コストの傾向は、林地残材（資源量 4,035 dry-t / 年）が最も低コストで収穫可能であり、次いで広葉樹（同 20,317 dry-t / 年）、間伐材（同 27,854 dry-t / 年）の順となった。また資源量と収穫コストの関係は、森林バイオマスをエネルギーとして利用する場合の作業計画の策定に資するものとなった。モデル地域の 24.8%の世帯が消費する電力を賄う発電プラントを建設する場合、必要となる森林バイオマス量は 30,106 dry-t / 年となり、コストが 13,037 円 / dry-t よりも安い小班から収穫するという方針が立てられる。

以上の結果を踏まえ第6章では、本研究で構築した森林バイオマス資源収穫システムのわが国における可能性について、次の結論を述べた。機械化集材作業システムにおいて発生する森林バイオマスのほぼ全てを収穫可能である。エネルギー収支の面では、エネルギー生産システムとして十分成り立ち得るものであり、また二酸化炭素排出量の面では、化石資源に対して十分に有利であるため、化石資源によるエネルギーを森林バイオマスで代替することにより、国内の二酸化炭素排出量を削減することができる。地域において森林バイオマスをエネルギーとして利用する場合の作業計画の策定に資するものである。

本研究は、以上の結論をもって、わが国における森林バイオマス資源収穫システムの実用化、ひいては森林バイオマスのエネルギー利用の実現に資するものであると考える。