慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

| | |
|---|---|
| Title | バイオマスエネルギーの導入可能性に関する評価（１） |
| Sub Title | |
| Author | 堂脇, 清志(Dowaki, Kiyoshi)<br>石谷, 久(Ishitani, Hisashi)<br>松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji) |
| Publisher | 慶應義塾大学産業研究所 |
| Publication year | 1998 |
| Jtitle | KEO discussion paper. G :<br>『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』 (KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-24 |
| JaLC DOI | |
| Abstract | 一般的にバイオマス資源は、再生可能エネルギーとして、また環境調和に優れたクリーンなエネルギー源として注目を集めており、さらに化石系資源の代替エネルギー源として、その利用が期待されている。また、97年12月に開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)においても、バイオマス資源(特に木材資源)は、CO2固定能力に優れているため、吸収源としての再評価が今後の急務となっている。このような背景から、先進国の援助のもと植林事業が行われつつあるが、木材資源はある一定期間を過ぎるとCO2固定能力が激減するため、木材資源利用によるCO2排出量を吸収できる範囲内で利用方策を考えていく必要がある。従って、木材資源の利用については、CO2削減に貢献するという前提のもと、既存産業として成立している木材産業においてCO2削減に貢献するようなシステムを考案するか、あるいは、これに代替し、かつCO2削減に大いに貢献できるようなエネルギー産業を成長させていくことが現実的、かつ効果的な対応策といえよう。今後、木材資源の利用方向を発展途上国に限定してみた場合、当該地位での電力インフラの整備が遅れていること、また雇用促進といった経済活性化を図りたいこと等の理由から、現在はチップ原料の利用が主な目的としている木材資源を、プランテーション化することによって雇用を生み出し、またプランテーションから生産されたバイオマス資源を利用した発電システムを提案することによって、経済的付加価値も享受しつつ環境問題にも貢献していくという大きな役割を果たすことが考えられる。従って本研究では、発展途上国をモデル地域にしたバイオマスエネルギーシステムに関する導入可能性評価をLCA(生涯環境影響評価)指標を用い、 CO2排出量の削減という観点から評価し、今後の発展途上国地域に新たなエネルギーシステムを開発する際に少なからず導入のインセンティブになるものと期待するものである。 |
| Notes | 表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり |
| Genre | Technical Report |
| URL | https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000024-0001 |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

# バイオマスエネルギーの導入可能性に関する評価(1)

堂脇　清志
石谷　　久
松橋　隆治

No.G-24

学振未来 WG２－10

# バイオマスエネルギーの導入可能性に関する評価(1)

堂脇 清志，石谷 久，松橋 隆治†

1998年10月

**キーワード**

ユーカリ、プランテーション、土壌流出量、N(窒素)・P(リン)・K(カリウム)の循環量、LCA 評価、ガス化コンバインドサイクル、内部循環流動床ボイラ、エネルギー収支比、$CO_2$排出量

一般的にバイオマス資源は、再生可能エネルギーとして、また環境調和に優れたクリーンなエネルギー源として注目を集めており、さらに化石系資源の代替エネルギー源として、その利用が期待されている。また、97年12月に開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)においても、バイオマス資源(特に木材資源)は、$CO_2$固定能力に優れているため、吸収源としての再評価が今後の急務となっている。

このような背景から、先進国の援助のもと植林事業が行われつつあるが、木材資源はある一定期間を過ぎると $CO_2$固定能力が激減するため、木材資源利用による $CO_2$排出量を吸収できる範囲内で利用方策を考えていく必要がある。従って、木材資源の利用については、$CO_2$ 削減に貢献するという前提のもと、既存産業として成立している木材産業において$CO_2$削減に貢献するようなシステムを考案するか、あるいは、これに代替し、かつ $CO_2$ 削減に大いに貢献できるようなエネルギー産業を成長させていくことが現実的、かつ効果的な対応策といえよう。

今後、木材資源の利用方向を発展途上国に限定してみた場合、当該地位での電力インフラの整備が遅れていること、また雇用促進といった経済活性化を図りたいこと等の理由から、現在はチップ原料の利用が主な目的としている木材資源を、プランテーション化することによって雇用を生み出し、またプランテーションから生産されたバイオマス資源を利用した発電システムを提案することによって、経済的付加価値も享受しつつ環境問題にも貢献していくという大きな役割を果たすことが考えられる。

従って本研究では、発展途上国をモデル地域にしたバイオマスエネルギーシステムに関する導入可能性評価を LCA(生涯環境影響評価)指標を用い、$CO_2$ 排出量の削減という観点から評価し、今後の発展途上国地域に新たなエネルギーシステムを開発する際に少なからず導入のインセンティブになるものと期待するものである。

---

この研究は、学術振興会 未来開拓技術研究事業「アジア地域の環境保全」Working Group 2 の一環で行われた。なお、本論文に含まれるミスに関しては、筆者の責任である。

†東京大学工学部、慶應義塾大学産業研究所未来開拓事業

## 1. はじめに

今日のエネルギー・環境問題を取り巻く環境は、気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)が京都で開催されて以来、各国で具体的な行動計画がとられており、日本をはじめとする先進国では省エネ対策やエネルギー利用効率の向上や未利用エネルギー利用に関する技術開発、あるいはリサイクル事業の推進等の対策が行われつつある。一方、今後ますますエネルギー需要が見込まれる発展途上国地域については、エネルギーに関するインフラ整備の遅れから、環境負荷低減に関する技術よりは、むしろ経済的有利な技術の導入が主導的であり、このような技術は必ずしも環境に貢献するものとは言えない。従って本研究では、途上国地域で経済的にも有利であると同時に、環境負荷低減にも少なからず貢献するようなエネルギーシステムを導入することを目的としたケーススタディを行う。すなわち、当該地域における地場産業を活性化するような資源等の利用により、今後増大すると見込まれる電力需要にも対応し、経済的効果も高く、環境にも十分に貢献するシステムづくりを提案したいと考えている。このようなエネルギーシステムの提案によって、少なくとも環境負荷低減に関する責任を発展途上国に負わせることを極力少なくし、それらの地域の経済成長を促進、すなわち雇用が促進することを期待するものである。発展途上国地域において新たなエネルギーシステムを提案する場合、近年の世界的な環境政策に係る状況を鑑み化石系資源のエネルギーシステムについては、エネルギー効率の高い機器の導入、あるいは環境排出物除去装置等の関連施設の設置が義務づけられ、結果的には経済的負担が増大することが予想され、途上国に対しては環境負荷低減に関する責任について増大することになろう。従って、化石系資源のエネルギー変換の効率を図るよりも他の資源に代替するようなエネルギーシステムについて、当該地域で利用可能となるエネルギー資源を抽出し、より効率的なエネルギーシステムを構築していくことが重要となることが予想される。

本研究では、途上国地域において有望な資源の1つであるバイオマスを利用するエネルギーシステムを提案する。特に、対象とするバイオマス資源には早生樹種であるユーカリを選定する。バイオマスは$CO_2$を固定する速度でバイオマスを利用している限りは、大気中の$CO_2$濃度を増加させない。すなわち、正味の $CO_2$ 排出なしでエネルギーを取り出すことができる。またユーカリについては、我が国を代表とする先進国がパルプ原料の確保、あるいは緑化事業の推進からプランテーション化を行ってきており、今後ますます増大していくものと考えられている。またこのようなプランテーション事業の推進は、多少なりとも現地における雇用促進に貢献しており地場産業の活性化に繋がると同時に、比較的早く生育するユーカリを大量供給可能なプランテーションによって供給することが可能となれば、エネルギーを安定供給できるという十分なポテンシャルを有していると考えることができるからである。

ここでの評価では、ある程度具体的な地域をモデルにして、それからさまざまな条件を検討することによって評価を行うこととした。なお具体的な地域としては、比較的本研究の条件及び目的に合う国として、パプアニューギニア(以下PNGとする)を対象に、バイオマスに関するエネルギーシステムを想定し、それらのシステムに対しエネルギー・環境影響に関する評価を行った。すなわち、想定するシステムとしてバイオマスエネルギーの利用技術については、直接燃焼による発電プロセス及びガス化技術を利用した発電プロセスをとり挙げ、育林からガス化・発電に至るまでのエネルギー利用システムに対し LCA 評価を行った。また比較システムとして、エネルギー単価が比較的安く、また対象国の地理的条件から

資源の安定供給が可能な石炭火力発電によるシステムを対象に選び、提案するバイオマスエネルギーシステムとを比較することによって、環境負荷及びエネルギー負荷等の削減効果を検討した。

## 2. LCA評価のための準備

### 2. 1概要

バイオマスエネルギーシステムは主に次の2つのプロセスから構成される。なお、図1はここで評価するシステムの構築例を示したものである。

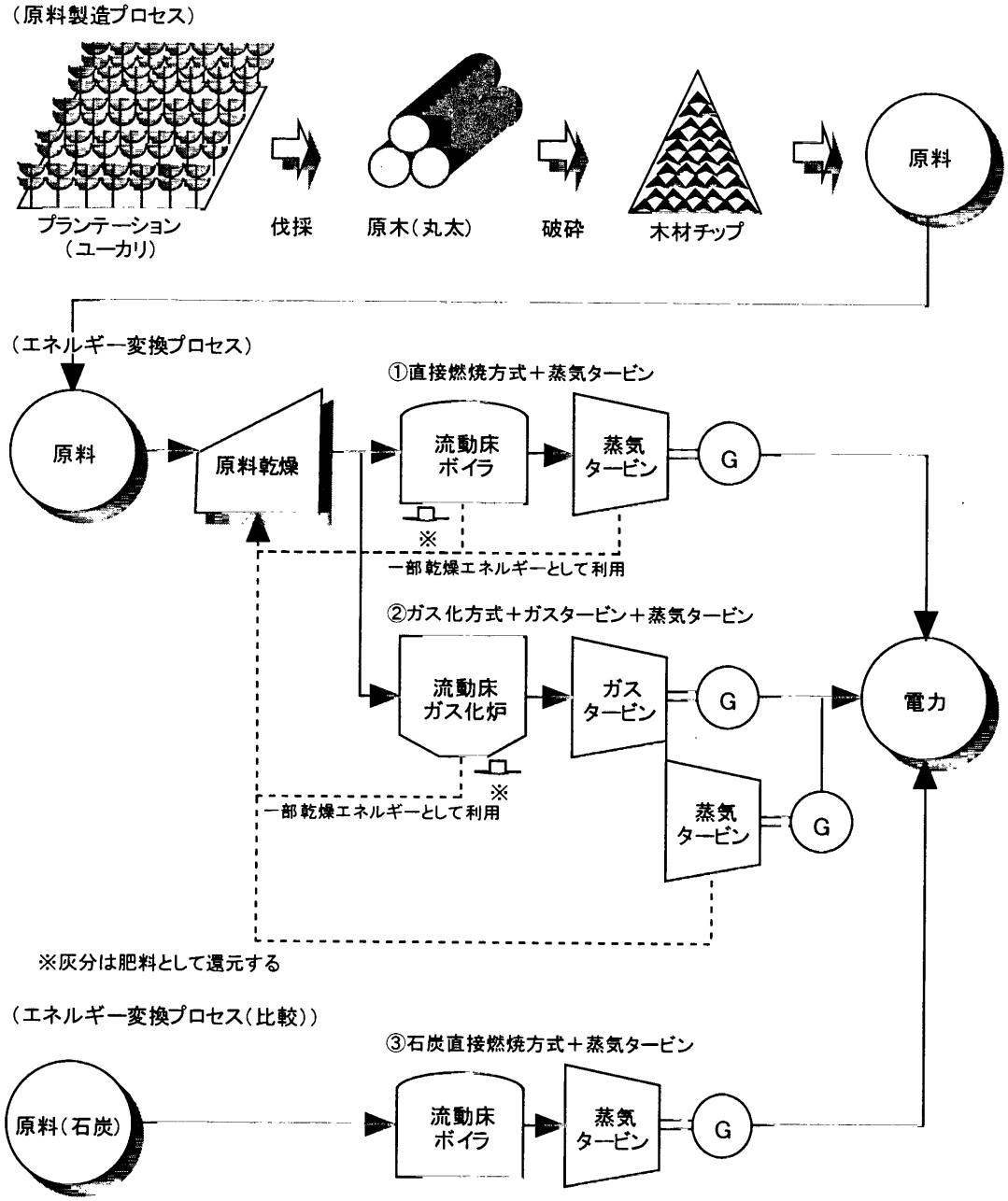



図1 システム構築例

本研究においては、バイオマスエネルギーシステムが LCA ベースでのエネルギー収支を検討し、また $CO_2$ 排出量が化石系の既存の発電システムと比べた場合の削減効果について検討する。特に、バイオマス資源は再生可能資源と言われているが、気候条件による生産性の影響、あるいは土壌流出に伴う肥料量の影響等が無視できないため、これらの数値を具体的に定量化してシステム評価に加え、システム構築のための最適な条件を検討することとした。

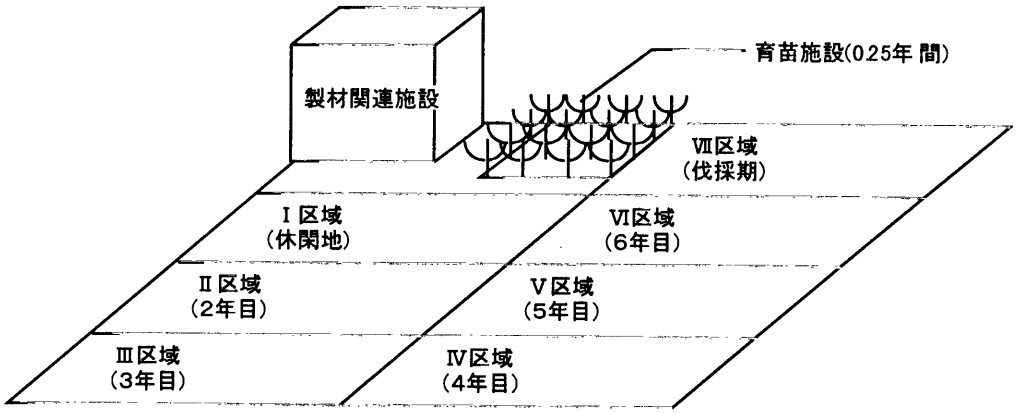
## 2. 2各プロセスの設定条件

### Ⅰ. 原料製造プロセス

### ○プランテーション概要

原料製造プロセスは、バイオマスプランテーション及び木材加工施設からなり、エネルギー変換プロセスに供給する原料までのプロセスを表す。このプロセスでは、気候による生産性や土壌流出量に伴う施肥量の検討を行い、原料までに投入されるエネルギー資源別エネルギー量について検討する。

最初に、バイオマスプランテーションの設定条件について説明する。ここで想定しているバイオマスプランテーションのイメージはプランテーション内の面積を7区間に分割した林地と関連施設から構成される (図2)。




:育林地

Ⅰ区域面積:1,000[ha](合 計:7,000[ha]) 傾斜率:9%

図2 バイオマスプランテーション(イメージ)

ここでのバイオマスプランテーションの諸条件については、対象バイオマス資源として PNG 産のユーカリ(カメレレ)とし、また現地で実際にユーカリの植林が実施されていることから、ユーカリ単一種の植林事業を想定した。また、以下の評価に用いる土壌条件などのデータについては可能な限り現地のデータを利用することとした。但し、このプランテーションにおけるユーカリの生産性については、ユーカリは萌芽力に優れているため、このプランテーションでは2回の萌芽が可能であるとし、育苗期間 0.25 年→植林期間6.75 年→萌芽による成長期間7年×2回→休耕期間1年のサイクルを想定する。但し、2回目

以降の萌芽林については関連文献[文献1)]より生産性が低下することが知られており、前期生産量×0.7[萌芽回数]として扱った。従って、原料1単位あたりの数値の算定にあたっては1サイクル(22年)で生産される量を基本単位とする。

実際このような事業を展開する場合には、単一種の植林では生態系がアンバランスになり、結果的に土地の荒廃をもたらすと言われており、本来ならば複数の種類を植林することが望ましいとされることを注記しておく。

## ○気候条件

PNG における気候条件(気温・降水量)については、年間平均気温 27.1[℃]及び年間降水量 2,067[mm]である。また、年間平均湿度は 83.3%であり熱帯気候に属している。

## ○土壌条件

育林面積については、現地の植林実績が約 5,000[ha]の実績(ユーカリ、チーク)があり、今後の植林事業の増加を考慮して、想定しているプランテーション面積を 1 区域あたり 1,000[ha]が可能な面積であるとした。また、この土壌の物理的条件として、平均9%の傾斜と土壌密度 0.8[g/cm$^3$] (2,000[t/ha])を与えた。さらに PNG における土壌性能については、Edwards ら[文献2)]によって調査が行われており、その結果、有機物集積率は平均 16.25%(0～25[cm])、有機物中に含まれる C(炭素)が 50%、炭素と窒素の比が 16:1 であり、その他の微量元素群(P(リン)、K(カリウム)、Ca(カルシウム)、Mg(マグネシウム))については、以下の表1にまとめるとおりである。

表1 土壌中(0～25cm)に含まれる微量元素群

| 項 目 | 含有量[kg/ha] |
|---|---|
| N(窒素) | 10,156.25 |
| P(リン) | 13.33 |
| K(カリウム) | 335.83 |
| Ca(カルシウム) | 3,125.00 |
| Mg(マグネシウム) | 568.33 |

出典)文献2)
注)N(窒素)については、PNG の平均的なデータを利用した。その他の元素群については調査結果をそのまま利用した。

## ○バイオマス原料(ユーカリ)の生育特性及び含有微量元素

次にユーカリの生育特性及び材積に含まれる微量元素量について、関連文献等の調査結果をもとに算出する。

まず生育特性については、林齢に対する成長経過(表2)から伐採林齢7年のときの材積を決定する。これから、ユーカリの元素分析結果[文献4)]より伐採林齢に対する N(窒素)の含有量を決定する。N(窒素)以外の微量元素群については、元素分析結果と Edwards らの PNG における植生に関する調査結果[文献5)]との整合性がとれるように再評価した。但し、再評価に利用した各微量元素群のデータは PNG に植生している 119 種類の樹木の平均値であるが、構成元素については樹種間では大きな相違がないの

で、これらのデータを採用した。

表2 林齢別成長経過

| 林齢[年] | 5 | 10 | 15 | 7(計算値) |
|---|---|---|---|---|
| 平均樹高[m] | 23 | 35 | 43 | 27.8 |
| 平均胸径[cm] | 20 | 32 | 43 | 24.8 |
| 年平均成長量[$m^3$/ha] | 34.0 | 32.0 | 39.3 | 32.9 |

出典)文献 3)
基準植栽間隔=4.6m×4.6m(472.6 本/ha), 密度:0.575t/$m^3$

次に表２から幹部の体積について推定する。この幹材積の推定については、加茂[文献7)]によって実験的に相対関係があることが確認されており、胸高直径$^2$×樹高との相対関係を表す式として次式が示されている。

$$V = 0.000071 \cdot (D^2 H)^{0.9197} \qquad (r^2 = 0.9989) \tag{1}$$

V:幹材積[$m^3$/本]

D:胸高直径[cm]

H:樹高[m]

(1)式から林齢 7 年の幹材積が推定される。この幹材積を 1 [ha]あたりの基準生産本数を乗じて再評価した結果を表 3 に示す。

表3 ユーカリの各部に含まれる微量元素量(胸高直径をもとに再評価した基準データ)

| 部位 | 乾重量 [t/ha] | N [kg/t] | P [kg/t] | K [kg/t] | Na [kg/t] | Ca [kg/t] | Mg [kg/t] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 幹 | 456.2 | 1.50 | 0.07 | 1.70 | 0.09 | 2.80 | 0.47 |
| 枝 | 112.0 | 2.30 | 0.10 | 2.00 | 0.06 | 6.70 | 0.57 |
| 小枝 | 7.8 | 8.21 | 0.72 | 7.69 | 0.21 | 16.67 | 1.90 |
| 葉 | 13.8 | 11.88 | 0.77 | 5.94 | 0.16 | 10.87 | 2.32 |

注)表2のデータから第1期(7年)伐採後の平均幹材積を推定し、これからその他の部位のデータは文献値を利用して計算した。

表3の N(窒素)分については、ユーカリの元素分析値[文献4)]とほぼ合致するため、元素分析値中の N 分についてはこの値を準用した。従って、バイオマス原料の元素分析結果は表 4 に示すとおりである。

表4 ユーカリの元素分析値

| 項目 | 含有率[wt%] |
|---|---|
| C(炭素) | 46.647% |
| H(水素) | 5.952% |
| O(酸素) | 46.703% |
| S(硫黄) | 0.037% |
| N(窒素) | 0.150% |
| P(リン) | 0.007% |
| K(カリウム) | 0.169% |
| Na(ナトリウム) | 0.009% |
| Ca(カルシウム) | 0.278% |
| Mg(マグネシウム) | 0.047% |

出典)文献4)
注1)O[wt%]=1-(C+H+S+N)
注2)元素分析結果は、C,H,S,Nの測定結果から、P、K、Na、Ca、Mgを加えて、合計が100%になるように調整した。

## ○降水量による生産性の変化と幹材積の推定

ユーカリなどのバイオマス資源は、降水量等の気象条件により生産力が変化する。Lieth はバイオマス資源の純生産量と降雨量の関係として、次式を提案した。

$$P = 3000\left(1 - exp\left(-0.000664x\right)\right) \tag{2}$$

P:バイオマス資源の純生産量[g/m$^2$/year]

x:年間降水量[mm]

生産量の調整方法については、品田ら[文献6)]によると、ユーカリ植林に適している年間降水量の範囲を1,000[mm]～2,500[mm]としているので、最高降雨量の 2,500[mm]のときに最小植栽密度で植林を行ったと仮定する。最小植栽密度は、造林目的によるが関連文献[文献8)]によると3[m]×2[m]で行われている実績があるので、そのときの生産量から 1,000[mm]～2,500[mm]の任意の降水量での生産量を(2)式を利用して算出した。但し、このときの植栽条件と(2)式から算出される生産量は一致しないため、ここでは降水量による生産性の変化のみが一致するとして評価した。すなわち、シミュレーション上でのユーカリ生産量=(Liethの式による生産量)×2.1792 として計算した。

このときの植栽密度については、縦横等間隔で植林が行われたものとして、またユーカリ1本あたりの生産性は一定であるとして、1[ha]あたりの本数[本/ha]及び1サイクルあたりの生産量[t/ha]を決定した(図3)。

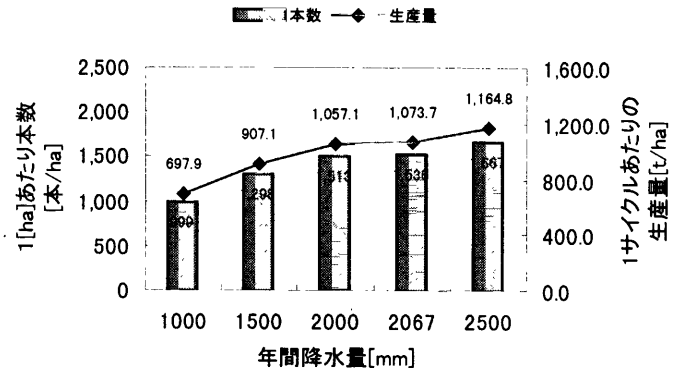



図3 年間降水量の相違による生育特性の検討

## ○森林内における養分循環量の予測

このプランテーションにおける中間エネルギー投入量の最大要因の1つとして、生育上不可欠な各微量元素群に関する投入エネルギー(収入)が挙げられる。すなわち、これら元素群の投入量の増加が中間投入のエネルギー量を増加させ、最終的にはLCA評価におけるエネルギー収支を悪くするとともに、$CO_2$排出量も増大させることになるからである。従って、持続可能な条件でバイオマスを生産するためには、生育上不可欠な各微量元素群の収支バランスについて検討することが重要となる(図4)。

ここでは特に、生育上最も重要な養分である N(窒素)、P(リン)、K(カリウム)の3元素について主に検討する。養分の循環には、収入側要因は施肥、リターフォール及び降雨による添加が考えられ、支出側要因としてはバイオマスをそのままプランテーションから持ち出す直接的な要因と、降雨による土壌流出、溶脱、大気中への散逸等の間接的な要因が挙げられる。収入側要因である施肥量については、バイオマスプランテーションを行う上で中間投入エネルギー量としてカウントされるが、後述する降雨による土壌流出によって消失した土壌についても、その土壌内に含まれる養分量が土壌改良材等で補われるものとして扱い、そのときの投入されるエネルギー量を各元素のエネルギー原単位から評価した。

最初に、支出側要因である土壌流出量について検討する。

土壌流出量は、育林期間で毎年同じ量だけ流出するものではなく、降雨特性や成長の度合いなどの要因によって決まる。特にバイオマスの LCA 評価では、1サイクル中に土壌流出によって失われる養分量をエネルギー換算し、平年化して評価に組み入れることが重要となる。

このような要因を考慮した土壌流出量の予測は、次の USLE(Universal of Soil Loss Equation)の式によって与えられる。

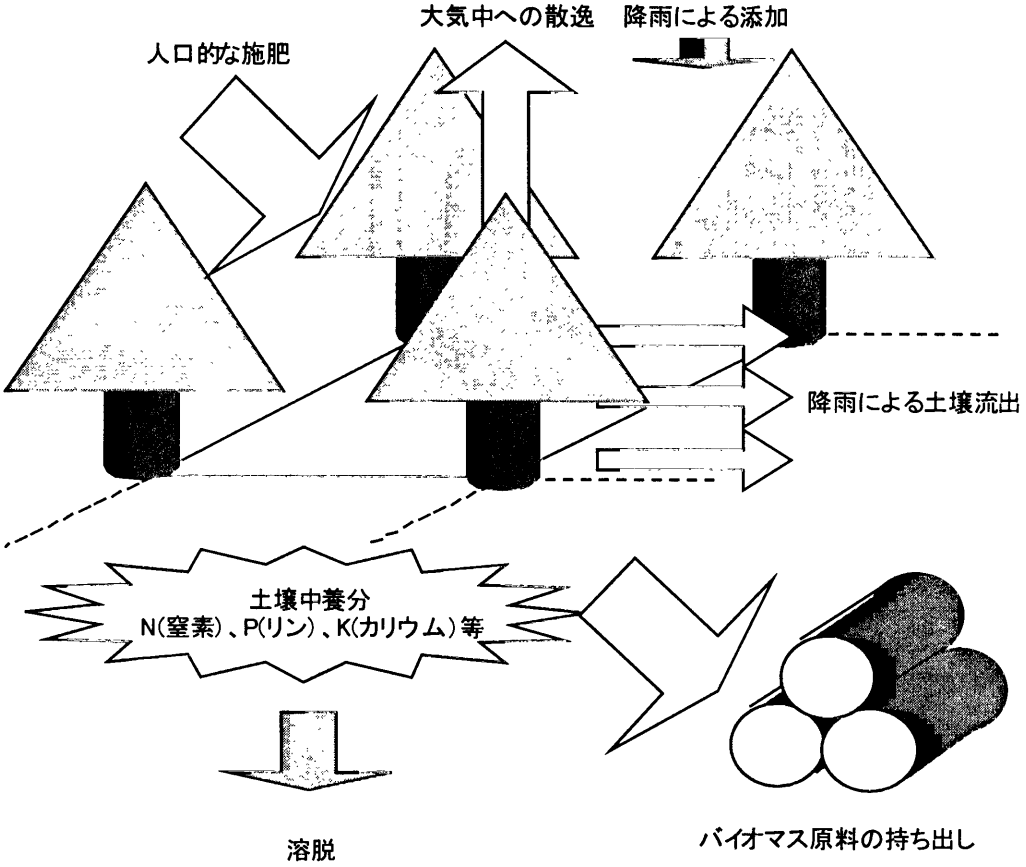



図4 養分(N,P,K)の循環

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \tag{3}$$

A:単位面積あたりの年間流出土量[t/ha]

R:降雨係数[$m^2$・tf/ha・h]

K:土壌係数[t・h/$m^2$・tf]

L:斜面長係数[-]

S:傾斜係数[-]

C:作物係数[-]

P:保全係数[-]

USLE は、1950 年代からアメリカにおいて Wischmeier と Smith らが中心となって取り組まれた研究の成果であり、 現在では(3)式に集約されている。侵食作用によって発生する流出土量は、降雨に代表される気象条件、土壌及び地盤条件、地形条件、作物の種類や栽培方法及び保全対策上の効果が総合的に作用した結果として表され、それぞれの影響因子を固有に求めることができるため(3)式により土壌流出量の推定が可能となる。そこで、本研究ではこの USLE の予測式を用いて土壌流亡量を検討する。

降雨係数Rは、以下のような手法により算定される。

$$E_K = 210 + 89\log(I_K) \tag{4}$$

$I_K$:一定強度に区分された各降雨強度[cm/h]

$E_K$:降雨強度 $I_K$ の降雨量1cm あたりの運動エネルギー[m・tf/ha・cm]

$$E = \sum(E_K \cdot r_K)/100 \tag{5}$$

$r_K$:一定強度に区分された各期間の降雨量[cm]

E:侵食性一連降雨の運動エネルギー[hundred of m・tf/ha]

$$R = \sum(E \cdot I_{30}) \tag{6}$$

$I_{30}$:一定降雨の 30 分ピーク降雨強度[cm/h]

R:降雨係数[$m^2$・tf/ha・h]

(4)式をはじめとする降雨係数の算定式は、雨滴の地表面に対する衝撃力とそれによる侵食性を評価するものとして考えられる。

降雨係数Rは本来実際に観測された降雨強度から算出する必要がある。しかしながら、現地でのこのようなデータは整備されていないので、筆者は年間降水量と降雨係数の間には直線関係があるものと仮定し、村岡氏ら[文献10)]の実測データから年間降水量と降雨強度の推定式を導いた。なお、観測データについては、植林可能降水範囲である 1,000[mm]～2,500[mm]内のデータから検討した(表5)。

**表5 年間降水量と降雨係数Rの観測結果**

| 調査年 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 |
|---|---|---|---|---|
| 年間降水量[mm] | 1,643 | 2,614 | 1,780 | 2,275 |
| 降雨係数R [$m^2$・tf/ha・h] | 465 | 733 | 427 | 731 |

出典)文献10)

この表5から降雨係数R[$m^2$・tf/ha・h]と年間降水量M[mm]とが 1,000[mm]～2,500[mm]で線形関係が成り立つとすれば、

$$R = 0.3433M - 124.291 \qquad (r^2 = 0.8626) \tag{7}$$

となり、現地の年間降水量 2,067[mm]に対する降雨係数 R[$m^2$・tf/ha・h]は(7)式より 585.2[$m^2$・tf/ha・h]となる。

実際 USLE では、降雨量が 12.7[mm]以上の降雨のほか、降雨強度が 6.4[mm/15min]以上の降雨についても侵食性の降雨と規定している。また、長沢氏ら[文献11)]の研究では、土壌流出が発生するのは降雨量が 10[mm]～20[mm]と推定し、また、降雨強度が3[mm/h]以下の降雨では侵食はほとんど問題に

ならないとし、さらに USLE では降雨が0[mm/h]のまま6時間以上経過すると連続性を断つとしている。従って、土壌流出量の正確な推測にあたっては、この規定に沿った実データを取得し、(4)～(6)式を用いて降雨係数を計算する必要がある。

次に、土壌係数Kは土壌の受食性を評価する数値であり、USLE では7種類の土壌タイプについて、標準斜面による侵食試験結果と、16種類の土壌タイプについては少し異なる斜面の試験結果が調整された値によって、23種類の土壌についてはK=0.03～0.69 の範囲の値が与えられている。現地の土壌については、有機性炭素が約8%含まれており、またシルト埴壌土とすればK=0.37 となる。なお、このK値は US 慣習単位で与えられているのでメートル単位に変換するには$K=K_{us}/1.29$ とする必要がある。

次に斜面長係数と傾斜係数は、いずれも平面斜面としての特徴を表すもので、結合して1つの因子として次のような式が与えられている。

$$LS = (l/22.1)^m(65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065) \tag{8}$$

$l$:傾斜長[m]

$\theta$:傾斜角[°]

m:傾斜が 5%以上のとき 0.5

ここで想定しているプランテーションは、傾斜が標準状態の9%ととし、傾斜長は単位土壌面積1[ha]が正方形であるとした場合の1辺の長さ(100[m])を与えているので、このとき(8)式から求められるLSは2.14となる。なお、傾斜9%のとき植林を等高線上に行った場合、保全係数Pは0.60が与えられている。

次に作物係数Cについては、作物の種別と生育状態により定まる定数で、裸地での土壌流出量と、それに対応する特定の条件のもとで作付けされている圃場からの土壌流出量の割合を示す。例えば休閑地で作物が作付けされていない場合には、C=1.0、密生した植生によって圃場面が完全に被覆されているならばC=0.0、すなわち、土壌流出量がゼロとなる。このことから、プランテーションにおける作物係数Cについて休閑地の場合はC=1.0 を与え、また植林をした際には、文献調査[文献13)]によれば年間降水量 1,046.3[mm]のときの森林地域での土壌流出量は 0.129[t/ha]であり、これから(3)式、(7)式及び(8)式からC値を求めると、C=0.003 を得る。この場合、その他の条件については上記で仮定した条件と同一としている。

これからC値の決定方法については、単位面積あたりの本数及び林齢(林齢によって土壌の被覆面積が異なる)を考慮する必要がある。森林地域でのC値(=0.003)は、最小植栽密度である年間降水量2,500[mm]のときで、かつ伐採時のときの作物係数Cに等価であるとし、その他の降水量のときは植栽密度に反比例するとしてC値を決定した。また林齢を考慮する場合は、植林1年目から伐採期までは枝葉が土壌を被覆する面積に比例した値からC値を決定した。なお、植林1年目及び萌芽 1 年目のC値については、関連文献からC=0.10×M[mm]の植栽密度／2,500[mm]の植栽密度として与えた。

以上より、(3)式を用いて年間降水量とそのときの年平均土壌流出量を算定する。ここでは、年間降水量Mに対する降雨係数Rの関係式((7)式)を利用することとし、年間降水量が 1,000[mm]～2,500[mm]の範囲について検討した(図5)。

図中の網掛部分が対象としている地域(年間降水量 2,067[mm])の土壌流出量[t/ha]であり、1サイクル期間中に約526.4[t/ha]の土壌が流出する。また、年間降水量が1,000[mm]～2,500[mm]の範囲では、土壌流出量は約303.0[t/ha]～608.5[t/ha]となる。また土壌流出量の結果を受けて、N(窒素)、P(リン)、K(カリウム)の各養分の流出量についても検討した(図6)。

このようなプランテーションにおいて流出土量を抑制するためには裸地期間(1年間)での流出量を抑えることが効果的で、例えばユーカリと生育期間が異なる樹種を栽培し、混合林としてプランテーション化を行うことによって土壌流出削減の効果が期待される。

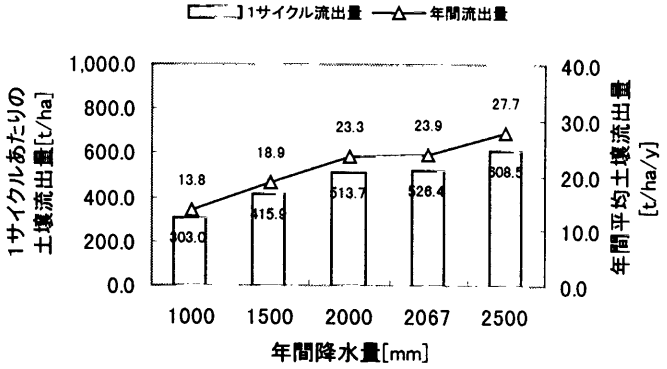



図5 年間降水量に対する土壌流亡量の推定

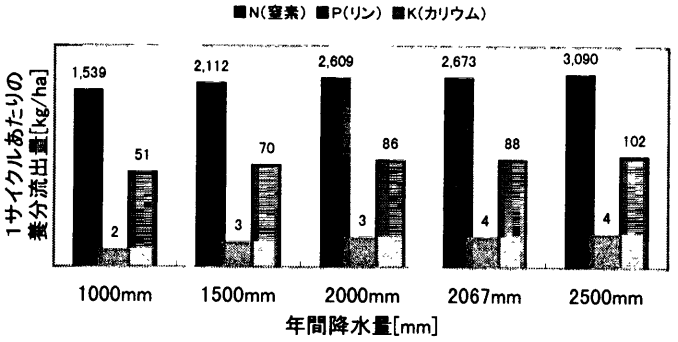



図6 土壌流出量に伴う各養分流出量の推定

次に、土壌流出以外の各養分の収支を検討する。各養分の収支は、土壌流出及び材の持ち出し以外には降雨による収入、葉などのリターとして移動、林内雨としての移動、土壌からの養分吸収及びその他の損失が挙げられる。これらの要因における各養分の移動量を定量化するためには、現地調査等により各養分の移動量を測定する必要があるが、本研究でモデル地域としているPNGでは、Whitmore文献14)によって現地調査した結果があるので、これをベースに評価することとした。

プランテーション内の各養分の収支は、以下の仮定を満たしているものとして評価した。

①バイオマス(ユーカリ)の各養分の収入は、降雨及び土壌からの各養分の吸収である。

②バイオマス(ユーカリ)の各養分の支出は、リター(葉、一部の小枝)及び降雨による溶出(林内雨)である。

③土壌への各養分の収入は、リター(一部自然作用等により損失する)、伐採時における根、小枝、枝の各部に含まれる養分があり、さらに幹部のP(リン)及びK(カリウム)については、エネルギー変換の際に生じる灰分も土壌へ還元されるものとして扱う。

④土壌への各養分の支出は、バイオマス(ユーカリ)に吸収される分と土壌流出による養分損失である。

⑤土壌内の収支は、バイオマスを持続可能な条件で生育させることを前提としているので、初期状態における土壌内養分量は最終的には保持されるものとする。従って、肥料は土壌内の正味支出から計算される。

⑥さらに育苗には、肥料(N:P:K=1:1:1)を 0.5[g/本]与えるものとする。但し、発芽率が平均 60%であるので、発芽しなかった苗木の肥料についてもカウントする。

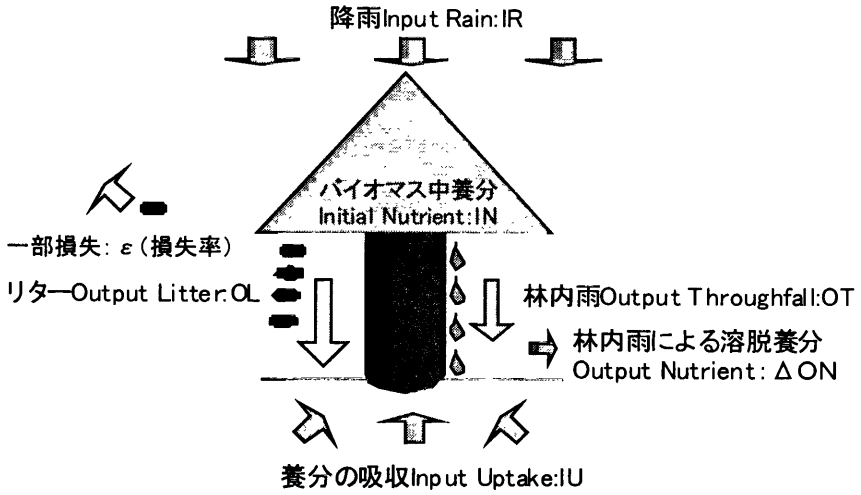



**図 7 バイオマス(ユーカリ)の養分吸収**

①及び②の条件から、バイオマス(ユーカリ)の養分収支は次式のように表される。

$$IU = IN + IR - OL - OT \tag{9}$$

(9)式は、バイオマスが土壌から吸収する正味量を表しており、これは土壌からの損失量にあたる。一方(9)式の養分収支式は、林内雨による養分溶脱の前後でバイオマス中の各養分の収支が合わない。降雨によって生じる林内雨の各養分濃度は、降雨の各養分濃度よりもN(窒素)で約 4.6 倍、P(リン)では約 5.0 倍、K(カリウム)では約 9.7 倍の濃度となるからである。そこで林内雨による養分溶脱後にバイオマスの各微量元素が表3のような結果となるとすれば、溶脱前の各養分の濃度に林内雨に含まれるバイオマスから溶脱した各養分量を考慮する必要があり、(9)式は、

$$IU = IN + \Delta ON + IR - OL - OT \tag{10}$$

のように書き換える必要がある。さらに、(10)式は、

$$IU = IN - OL \qquad (\because \Delta ON = OT - IR) \tag{11}$$

となり、最終的には、土壌からの正味の養分吸収量はバイオマス中に含まれる各養分の濃度から、リターに含まれる各濃度を差引いた値と等しくなる。

次に土壌の養分収支について検討する(図8)。

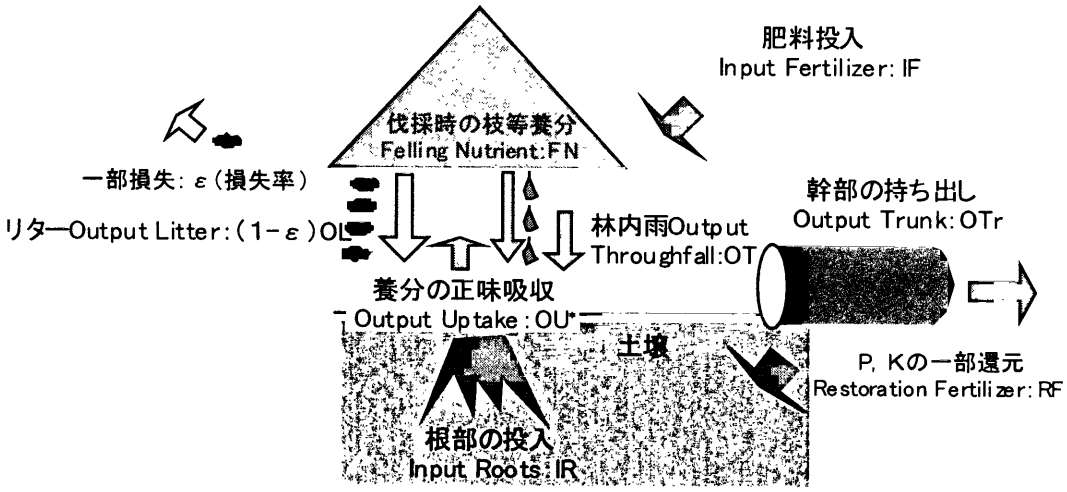



図8 土壌の養分吸収

③～⑤の条件から、土壌に投入される肥料IFは次式のように表される。

$$IF = OU + OTr - FN - (1-\varepsilon)OL - IR - OT(-RF) \qquad (\because OU = IU) \tag{12}$$

(12)式は土壌内における肥料の正味投入量を表しており、その投入量はバイオマスの養分吸収量からバイオマスが還元できる養分量との差である。なお、P(リン)及びK(カリウム)の場合は、－RF(灰分からの還元量)の項が加えられる。また、式中のリターのε(損失率)は13.9%とし、製材・輸送等の作業中にそれぞれ5%及び10%の損失があるものとした。

以上から土壌流出に伴う養分の流出量と苗木に投入される肥料を考慮して、土壌における各養分の正味流出(投入)量を図9～図11に評価した。

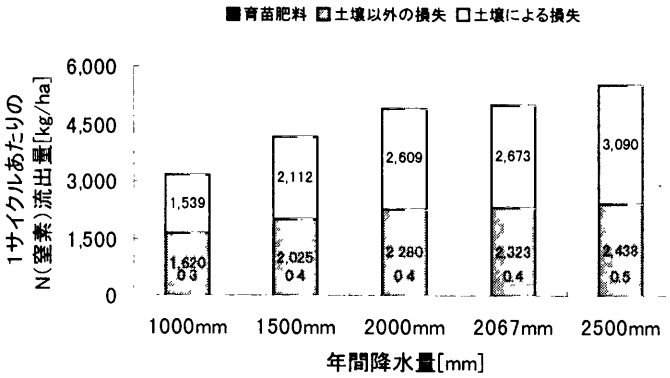



図9 N(窒素)の正味流出(投入)量

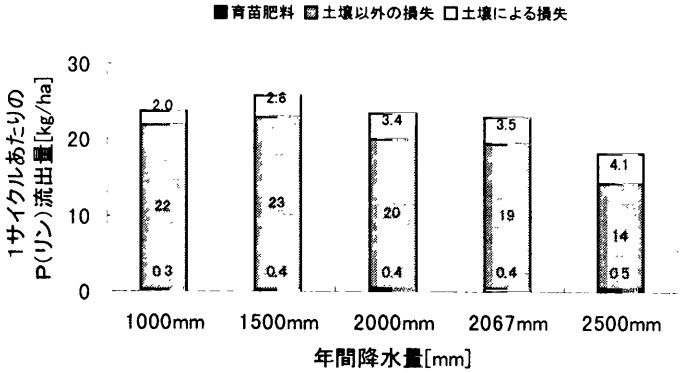



図10 P(リン)の正味流出(投入)量

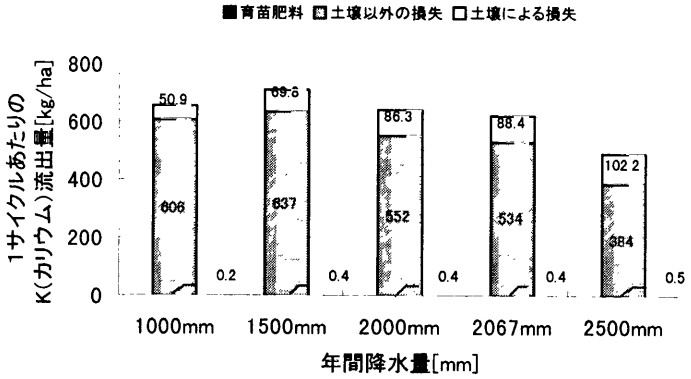



図11 K(カリウム)の正味流出(投入)量

図9では、N(窒素)の灰分からの還元は考慮していないので、年間降水量の増加に伴って養分の流出量も増大するが、図10・11に示されるとおりP(リン)及びK(カリウム)については、灰分による還元を考慮しているので、バイオマスの生産量が多くなるほど相対的な養分の損失量は少なくなるが、生産量

の増加により製材・輸送による損失が大きくなるので、最終的にはそのバランスを考慮することが重要となる。

## ○養分投入量による $CO_2$ 排出量

次に、これらの養分の損失量をエネルギー原単位及び $CO_2$排出原単位を乗じることによってプランテーションの育成プロセスにおける投入エネルギー量及び $CO_2$排出量が算出される。算出にあたっては各施肥成分のエネルギー原単位は Turhollow ら[文献16)]のデータを本研究のプランテーションモデルに合わせることによって算出される(表6)。また $CO_2$排出原単位については、筆者がエネルギー原単位及び関連文献[文献17)]等を参照にして設定したものである(表6)。但し、電力以外の各 $CO_2$排出原単位は各対象エネルギーが燃焼したときに排出される $CO_2$排出量のみを考慮し、それらのエネルギーを製造する際に投入されるエネルギー及び関連設備のエネルギーについては考慮しなかった。また電力の $CO_2$排出量原単位については、本研究での対象国であるPNGの電力構成(水力 25%、石油火力 75%)から1次エネルギー換算を行い電力の $CO_2$排出量原単位を求めた。このときの石油火力の発電効率は39%とした。

表6 各養分(N、P、K)のエネルギー・$CO_2$原単位

| 項目 | 軽油 | 天然ガス | 電力 | 合計 |
|---|---|---|---|---|
| N(窒素)[MJ/kg] | 3.16 | 54.63 | 2.91 | 60.70 |
| P(リン) [MJ/kg] | 1.68 | 1.63 | 2.98 | 6.28 |
| K(カリウム) [MJ/kg] | 1.05 | 0.89 | 1.41 | 3.35 |
| $CO_2$排出量[kg-$CO_2$/MJ] | 0.069 | 0.049 | 0.137 | — |

出典)文献15), 16)
注)ここの各データは、文献15)及び16)を参考に、1サイクルを22年として、エネルギー投入量を再計算した結果である。

各養分の正味投入量の結果(図9～11)と表6の各養分のエネルギー・$CO_2$ 原単位から、各降水量における1サイクル期間に投入されるエネルギー量及びそれに伴う $CO_2$ 排出量が計算される(図12・13)。

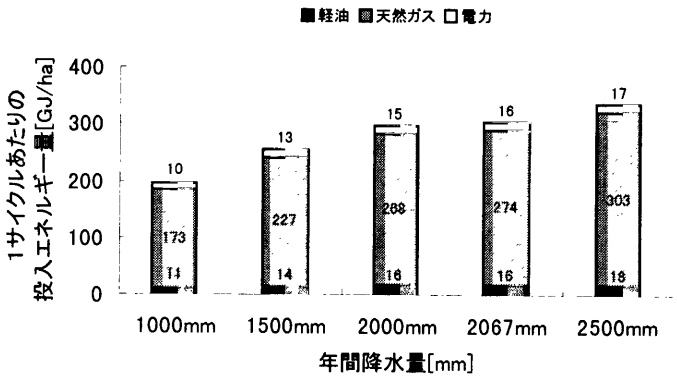



図12 1サイクルあたりに投入される養分によるエネルギー量

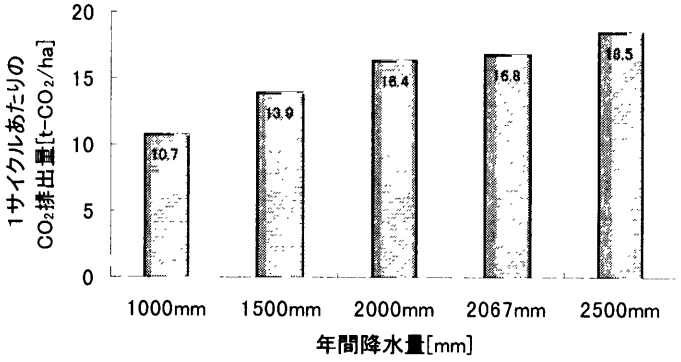



図13 1サイクルあたりに投入される養分による $CO_2$ 排出量

## ○その他の各種作業に係るエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量

バイオマスプランテーションでは土壌流出に伴うエネルギー投入のほか、バイオマスを安定的に生育させるために各種作業が必要となる。エネルギー投入に係る作業の要因としては、地拵え、除草剤散布、伐採・皮剥ぎ・チップ化及び運搬等の作業に加え、散布等動力が挙げられる。ここでは、これらの要因に関するエネルギー量・$CO_2$ 排出量を検討した。

地拵えは、トラクターもしくはブルドーザを利用して前生樹を根こそぎ倒し、焼却を行った後に機械(トラクタ)を利用した耕耘を行う。一般に地拵えを行うことによってその後の成長が良くなる。地拵えに伴うエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出原単位については、土壌流出のときの計算と同様な方法で関連文献[文献15), 16)]を参考にして与えた。但し、地拵えのエネルギー及び $CO_2$ 排出量については、各降水量による生産性不変であるとした。

除草等散布の作業では、基準データとして 252[t/ha]のバイオマス生産量に対して地拵えの時期に7[kg/ha]、次の成長期に2[kg/ha]を散布する。また、各ローテーションで殺菌剤及び殺虫剤をそれぞれ2.7[kg/ha]及び 2.1[kg/ha]としている。ここでは、地拵えの時期に散布される除草剤のほかは、すべてバイオマスの生産量に比例するものとしてエネルギー及び $CO_2$ 排出量の算出を行った。なお、各散布剤のエネルギー原単位は同一であると仮定した。

伐採・皮剥ぎ・チップ化、運搬及び散布等動力についても除草剤等散布のときと同様に、バイオマスの生産量に比例するものとしてエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量を計算した。なお、運搬距離については40[km]を想定した。また関連文献[文献15)]から伐採・皮剥ぎ・チップ化及び運搬作業においては、生産されたバイオマスの損失を考慮する必要があり、それぞれの作業で前作業時におけるバイオマス取扱量のそれぞれ5%及び 15%損失するものと仮定した。

以上、各作業におけるエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量を表7にまとめる。

表7 各作業のエネルギー投入量・$CO_2$排出量

| 項目 | エネルギー投入量[GJ/ha] | | | | $CO_2$排出量 [t-$CO_2$/ha] |
|---|---|---|---|---|---|
| | 軽油 | 天然ガス | 電力 | 合計 | |
| 地拵え | 2.52 | 0.00 | 0.00 | 2.52 | 0.17 |
| 除草剤等散布 | 9.77～14.54 | 3.37～5.01 | 0.67～1.00 | 13.81～20.55 | 0.93～1.38 |
| 伐採・皮剥ぎ・チップ化 | 361.41～603.22 | 0.00 | 0.00 | 361.41～603.22 | 24.81～41.41 |
| 散布等動力 | 8.47～14.14 | 0.00 | 0.00 | 8.47～14.14 | 0.58～0.97 |
| 運搬 | 118.66～198.05 | 0.00 | 0.00 | 118.66～198.05 | 8.15～13.60 |
| 合計 | 500.83～832.47 | 3.37～5.01 | 0.67～1.00 | 504.87～838.48 | 34.64～57.53 |

出典）文献15), 16)
注)除草剤等散布のエネルギー原単位及び$CO_2$排出原単位は、基準データから生産量に合うように再計算した。

## ○原料製造プロセスにおけるエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量

これまでの評価をもとに原料製造プロセスにおけるエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量を検討した(図14・15)。なお、図中のその他は地拵え、除草剤散布及び散布等動力である。

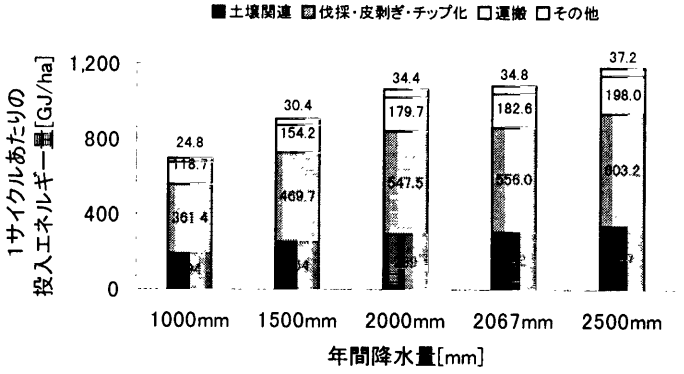



図14 1サイクルあたりの投入エネルギー量

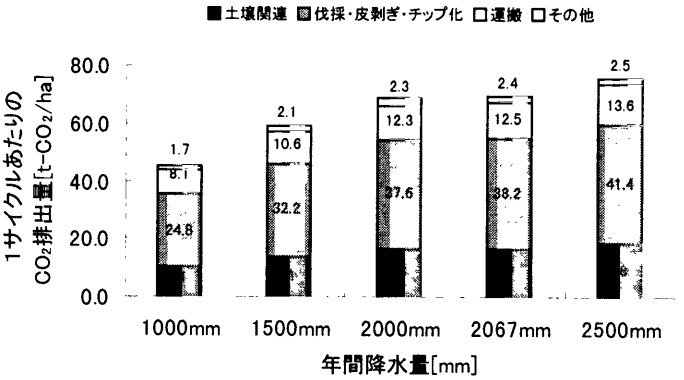



図15 1サイクルあたりの $CO_2$ 排出量

## ○石炭のエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量

次に、石炭の生産に係るエネルギー投入量と $CO_2$ 排出量について検討する。

本研究の対象地域であるPNGにバイオマスによる発電システムを導入する場合、石炭の主要原産国であるオーストラリアと比較的近いこと、エネルギーコストが比較的安価であることなどの理由から石炭火力発電との競合が予想されるため、石炭との比較を行うことは非常に重要であると考えられる。

石炭の基本的な性質及び生産に必要なエネルギー量・$CO_2$ 排出量については、表8にまとめるとおりである。なおバイオマスと同様に、石炭についても、掘削から発電プロセスに投入されるまでの経路において投入されるエネルギー量(各経路の運用エネルギーのみを考慮する)及び $CO_2$ 排出量について検討する。石炭の各プロセスにおける中間投入のエネルギーの算出にあたっては、関連文献[文献16)]を参照にした。

表8 石炭の基本性質と生産に必要なエネルギー量・$CO_2$排出量

| 原産国 | | オーストラリア |
|---|---|---|
| 総発熱量[kcal/kg] | | 6,126 |
| CO2排出原単位[t-$CO_2$/GJ] | | 0.091 |
| 含水率[wt%] | | 5.0% |
| 採掘・選炭 [MJ/t石炭] | 石炭 | 70.34 |
| | 石油 | 11.30 |
| | 天然ガス | 31.82 |
| | 電力 | 85.03 |
| 輸送(距離3,280km) [MJ/t石炭] | 石油 | 357.04 |
| 合計[MJ/t石炭] | | 555.53 |
| 採掘・選炭 [kg-$CO_2$/t石炭] | 石炭 | 6.38 |
| | 石油 | 0.78 |
| | 天然ガス | 1.57 |
| | 電力 | 16.34 |
| 輸送(距離3,280km) [kg-$CO_2$/t石炭] | 石油 | 24.74 |
| 合計[kg-$CO_2$/t石炭] | | 49.81 |

出典)文献16)

注)電力の$CO_2$原単位は、オーストラリアの電力構成及び化石系の発電効率39.0%として1次エネルギーベースに換算し、それに各種原料の$CO_2$原単位を乗じて求めた。

## ○バイオマスと石炭のエネルギー投入量及び $CO_2$ 排出量の比較

これらの結果を総合して、石炭とバイオマス(ユーカリ)の原料製造プロセスにおけるエネルギー投入量と $CO_2$ 排出量について検討した(図16・17)。これら2つの異なったエネルギー資源を同等の規準で評価するためには、各資源の発熱量で割って正規化する必要があり、それぞれ(13)、(14)式で評価される。なお、ユーカリの単位発熱量は 5,890[kcal/kg]とした。

エネルギー投入量 $E_1$[MJ/MJ 原料]については、

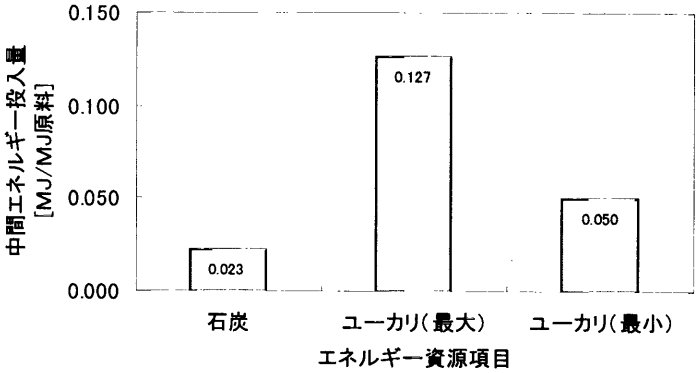
$$E_1 = \frac{1\text{サイクルあたりの生産量に対する中間投入エネルギー量}[MJ/cycle]}{1\text{サイクルあたり生産されるエネルギー量}[MJ/cycle]} \quad (13)$$

として評価する。

また中間投入エネルギー起源による$CO_2$排出量 $E_2$[kg-$CO_2$/GJ 原料]については、

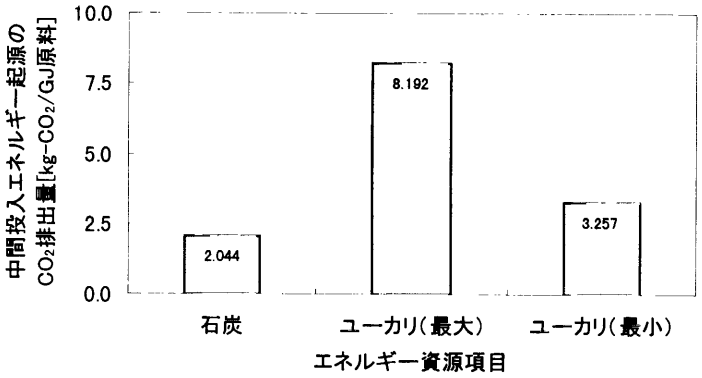
$$E_2 = \frac{1\text{サイクルの中間投入エネルギー起源の}CO_2\text{排出量}[kg-CO_2/cycle]}{1\text{サイクルあたり生産されるエネルギー量}[GJ/cycle]} \quad (14)$$

として評価する。




ユーカリ(最大):含水率 60%, 年間降水量 2,500[mm]
ユーカリ(最小):含水率 0%, 年間降水量 1,000[mm]

**図16 原料の単位エネルギーあたりにおける中間投入エネルギー量**




ユーカリ(最大):含水率 60%, 年間降水量 2,500[mm]
ユーカリ(最小):含水率 0%, 年間降水量 1,000[mm]

**図17 中間投入エネルギー起源の $CO_2$ 排出量**

これらの結果から、バイオマス(ユーカリ)資源をエネルギー資源として生産する場合、そのために必要となる中間投入エネルギー量やそれに起因する $CO_2$ 排出量は石炭に比べて多いが、$CO_2$ 排出量については、バイオマスを持続可能な条件で生産を続ける限り、燃焼による $CO_2$ 排出量を考慮する必要がないので、最終的に得られるエネルギー(電力)あたりの $CO_2$ 排出量は石炭よりも小さくなる可能性が

ある。従って、バイオマスのエネルギーの変換効率を上げることによって十分に環境負荷低減に貢献するポテンシャルが有しているといえよう。

## Ⅱ. エネルギー変換プロセス

### ○システム概要

次に、プランテーションで生産されたバイオマス原料をエネルギー変換するためのシステムを提案する。基本的なシステムは図1に示すとおり、バイオマス原料をガス化しコンバインドサイクル発電にて電力を得るケース、直接燃焼により蒸気タービンをまわして電力を得るケースである。これらの各ケースについてエネルギー収支及び $CO_2$ 排出量の評価を行う。

### ○乾燥に必要なエネルギー

バイオマス原料をエネルギー変換する上で、最も重要となる要因はバイオマスに含まれる水分である。原料中に水分が多い場合には、発熱量が低下し最終的に得られるエネルギー量が小さくなる。また一方で、原料中の水分を乾燥させるためにエネルギーが必要以上に投入されれば、プロセス内の排熱で乾燥エネルギーを賄うこととしている本システムでは、やはり最終的に得られるエネルギー量が小さくなる可能性を生じる。

原料乾燥に必要なエネルギー量は以下の方法によって定量化される。

ここで想定しているバイオマス原料の初期含水率は 60%であり、1時間あたりの処理量は1サイクル1年あたりの生産量に応じて 37.3～62.2[$m^3$/h]である。原料乾燥に必要なエネルギーは、材(チップ)の温度上昇に必要な熱量、木材中の水分蒸発に必要な熱量、排気空気の加熱に必要な熱量及び乾燥室壁体からの放射熱の合計として表される。なお、以下の各熱量の計算は関連文献[文献19)]を参考にして行った。

材(チップ)の温度上昇に必要な熱量は、乾燥初期に必要となる熱量 $H_1$[kJ]は、木材質の昇温に必要な熱量 $H_{1a}$ と木材中の水分を上昇する熱量 $H_{1b}$ に分けて次式のように計算される。

$$H_{1a} = V\gamma_0 C \cdot (T_2 - T_1) \tag{15}$$
$$H_{1b} = 4.1868W \cdot (T_2 - T_1)$$

V:材積[$m^3$]

$\gamma_0$:木材の密度[kg/$m^3$](=575)

C:木材の比熱(=(0.266+0.00116T)×4.1868[kJ/kg℃])、T:温度[℃]

W:木材中の水分[kg]

$T_1$:外気温度[℃]

$T_2$:乾燥温度[℃](=105)

次に木材中の水分蒸発に必要な熱量 $H_{2a}$[kJ]は蒸発潜熱のほかに分離熱(微分吸着熱)を加算する必要がある。この分離熱は、含水率が 23.1%以下のときに平均値として 104.8[kJ/kg]を加算すれば十

分である。また蒸気表[文献18)]から蒸発潜熱は 2,243.5[kJ/kg]であるので、これらの値を用いて $H_{2a}$[kJ]は

$$H_{2a} = V\gamma_0 \cdot \{(U_s - 23.1\%)q + (23.1\% - U_e)\cdot(q + 104.8)\} \tag{16}$$

$U_s$:初期含水率[%](=60.0%)

$U_e$:仕上げ含水率[%]

q:蒸発潜熱[kJ/kg](=2,243.5)

として計算される。また排気空気の加熱に必要な熱量 $H_{2b}$[kJ]は、乾燥室内の相対湿度を取り除くために必要な熱量であり、これは吸気する空気中に含まれる水分と乾燥によって室内に排気される水分との合わせた量を取り除くことになる。すなわち、乾燥中の換気に必要な全空気量 M[$kg_{DRYair}$]は、

$$Mx_2 = Mx_1 + m'$$
$$M = \frac{m'}{(x_2 - x_1)} \tag{17}$$

$x_2$:排気される空気中に含まれる平均水蒸気量[$kg/kg_{DRYair}$]

$x_1$:排気される空気中に含まれる平均水蒸気量[$kg/kg_{DRYair}$]

m':木材中の水分のうち乾燥させる水分量[kg]

となり、排気に必要な熱量 $H_{2b}$[kJ]は、

$$H_{2b} = M\cdot(1.005 + 1.926x_1)\cdot(T_2 - T_1) \tag{18}$$

1.005:空気の定圧比熱[kJ/kg・℃]

1.926:水蒸気の定圧比熱[kJ/kg・℃]

と計算される。

最後に乾燥室壁体からの放射熱について説明する。ここで想定する乾燥室の大きさ及び性能については表9にまとめるとおりである。

**表9 乾燥室容積及び性能**

| 容 積[$m^3$] | 材質及び熱貫流率 |
|---|---|
| 時間処理量×1.2 | 内側:鉄(厚さ5[cm])<br>熱伝導率:259.25[kJ/m・h・℃]<br>外側:硬質ウレタン(厚さ10[cm])<br>熱伝導率:0.10[kJ/m・h・℃]<br>内側熱伝達率:83.74[kJ/$m^2$・h・℃]<br>外側熱伝達率:62.80[kJ/$m^2$・h・℃]<br>熱貫流率:0.977[kJ/$m^2$・h・℃] |
| 側面積[$m^2$] | |
| 12.6～17.7 | |

注)乾燥室容積はチップかすることによって体積が20%増加すると仮定した。

この表から、床、天井及び壁体からの総放射熱量 $H_{2c}$[kJ]は、

$$H_{2c} = (A_c K_c + 4A_w K_w + A_f K_f)\cdot(T_2 - T_1) \tag{19}$$

$A_c$:天井面積[$m^2$]

$A_w$:壁面積[$m^2$]

$A_f$:床面積[$m^2$]

$K_c$:天井の熱貫流率[kJ/$m^2$・h・℃]

$K_w$:壁の熱貫流率[kJ/$m^2$・h・℃]

$K_f$:床の熱貫流率[kJ/$m^2$・h・℃]

として計算される。ここでは、すべての側面積及び熱貫流率は同一として計算した。

以上の計算から、1[kg/h]あたりの原料の乾燥に必要なエネルギー量の算出結果を図18に示す。

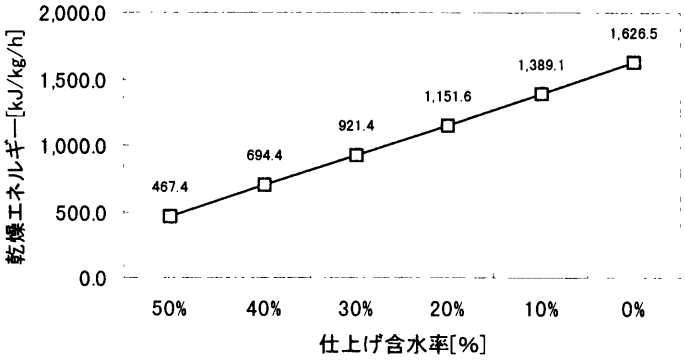



**図18 1[kg/h]あたりの原料の乾燥に必要なエネルギー量**

## ○ガス化コンバインドサイクル発電システム(IGCC)導入ケース(ケース1)

バイオマス原料をエネルギー変換する1つのケースとして、バイオマスの熱分解を行い、発生ガスをガスタービン及び蒸気タービンに導入して発電を行うシステムを想定する。この技術は石炭の $CO_2$ 排出低減技術として既に実用化の目処が立っている。またバイオマスのガス化技術は、石炭のガス化技術をそのまま適用することが可能であり、反応機構が石炭に比して単純化されるため、ガス化温度が低下し、それによって灰が溶融する前に肥料として灰分(土壌養分)の回収が可能となるため、バイオマスをエネルギーとしての利用価値を高める技術として評価される。

一般に木質バイオマスのガス化反応は次の過程を経てガス化される。

i)木材に熱を加えると、200℃までは木材中の水分が蒸発し、250℃前後から熱分解が始まる。

ii)熱分解が始まった後は昇温するにつれて、ガス・タール及びチャーが生成される。

iii)500℃前後までにはタールの2次分解が完了し、タールは分解しつくされ、昇温されるにつれ、チャーのガス化反応が進行する。

iv)ガス化温度では、メタン化反応やシフト反応などの平衡反応が起こり、ガスの平衡組成が決定される。

ここで、ガス化反応を考慮したのは、シミュレーションによりガス化して得られるガスの組成及び効率を決定するためである。シミュレーションの主な目的は、温度やガス化剤投入量の変化に対してガス化効率等のガス化反応の性能を簡単に知ることができることにある。ガス化シミュレーションの方法についてはいくつかの方法が提案されているが、発生するガスを事前に想定し、それらの平衡組成を求めるという点では本質的には同じである。最もよく利用される方法としては、事前に想定したガス成分に対して各成分が独立とならない反応式をいくつか想定し、その各反応式に対して設定温度及び圧力に対する平衡定数を決め、それらを制約値とし非線形方程式を解くことによって平衡組成を得る方法がある。また、もう1つの方法としては、事前に想定した各ガス成分に対して化学ポテンシャルを決定し、これと物質収支に関する制約式とを Lagrange の未定係数法によって平衡組成を得る方法がある。前者の方法では、反応式を選ぶ際に他の反応と著しく平衡定数が異なる反応を選択することによって、収束時間が遅くなり計算時間を多く要するという欠点があるため、ここでは後者の方法を用いてシミュレーションを行った。なお、プログラム作成にあたっては海保ら[文献20)]の論文を参考にした。

図19にガス化シミュレーションの簡単な計算フローを示す。ここでは詳細なシミュレーションの方法についての説明は省くが、ここで行うガス化シミュレーションは最初に圧力、ガス化温度、ガス化剤(酸素)投入量を決定し、系のエネルギーが最小となるポイントのところの熱分解して得られるガス組成を求めることである。

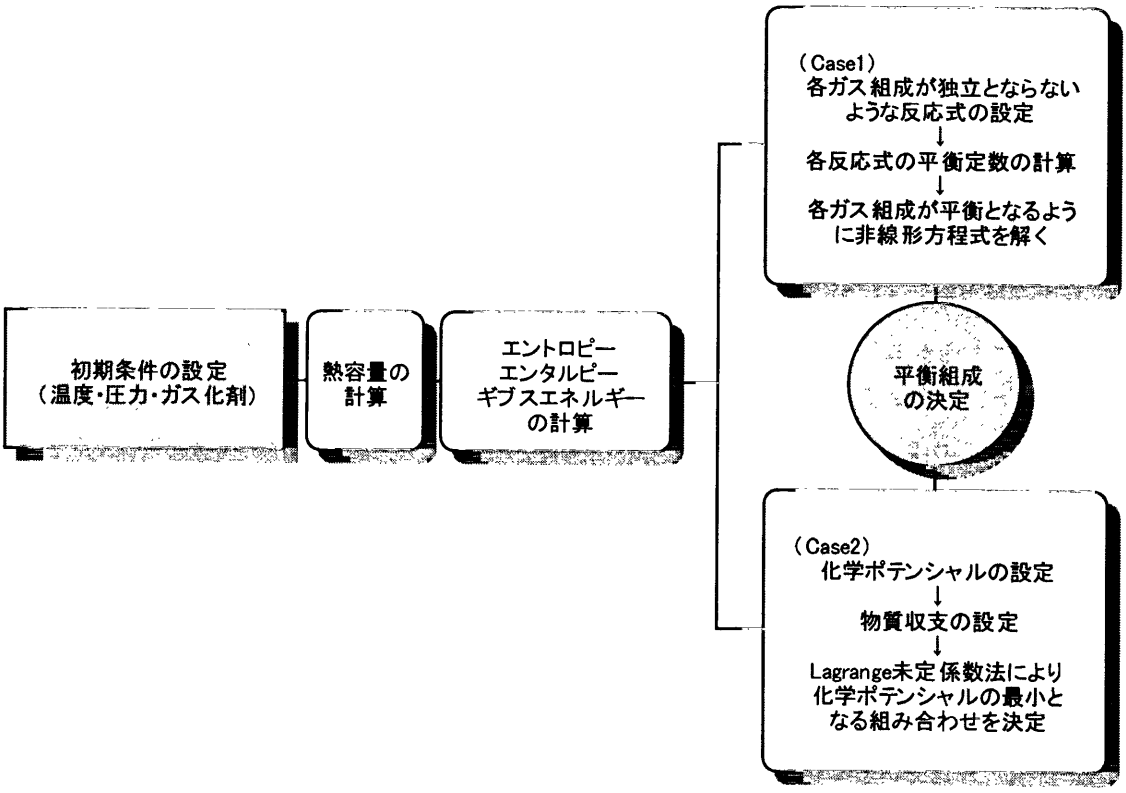



図19 シミュレーション計算例

本シミュレーションで想定しているガスは、いくつかの均一系平衡反応の中から主要成分である CO（一酸化炭素）、$H_2$（水素）、$N_2$（窒素）、$CO_2$（二酸化炭素）、$H_2O$（水）、$CH_4$（メタン）、$C_2H_4$（エチレン）、$NH_3$（アンモニア）と環境保全上重要な $H_2S$（硫化水素）について平衡組成を考える。

また熱分解に必要な酸素投入量については、酸素比 $\alpha$ [-]を

$$\alpha = \frac{\text{ガス化反応に使用される酸素量}[kg/h]}{\text{原料中の炭素及び水素が完全燃焼する際に反応する酸素量}[kg/h]} \tag{20}$$

のように定義したとき、含水率に応じて $\alpha$ =0.38～0.62 の間で与えられる。これらの酸素比はシミュレーション上、最もガス化成績が良いとされる範囲である。さらに、酸素比と同様にガス化温度についてもガス化成績が最も良い 950[℃]を与えて計算した。但し、含水率が50%以上のときは原料中の水分が多いため、ガス化反応は起こらないものとした。

次にガス化成績を表す指標として、冷ガス効率 $\eta_g$ や炭素転換率 $\eta_c$ がある。これらの指標は、

$$\eta_c = \frac{\text{生成ガス中の炭素量}[kg/h]}{\text{原料中の炭素量}[kg/h]} \tag{21}$$

$$\eta_g = \frac{\text{生成ガス量}[kg/h] \times \text{生成ガス発熱量}[kJ/kg(NTP)]}{\text{バイオマス供給量}[kg/h] \times \text{バイオマス発熱量}[kJ/kg(NTP)]} \tag{22}$$

として与えられる。冷ガス効率 $\eta_g$ や炭素転換率 $\eta_c$ は、発生したガスのエネルギー量（発熱量）がどのくらいあるか、あるいは原料から熱分解によって燃焼性のガスがどのくらい得られたかを評価するものである。表4のユーカリの元素分析及びガス化に関する諸条件から計算した含水率に対する冷ガス効率 $\eta_g$ は 44.2%～76.2%となった。

次に、これらの各冷ガス効率の結果をもとに、ガス化システムとコンバインドサイクルを組み合わせた IGCC（Integrated Gasification Combined Cycle）システムを想定した場合の発電効率の算定を行う。なお、コンバインドサイクルに伴う諸条件については表10にまとめるとおりである。

これらの諸条件を用いてコンバインドサイクルの発電効率が計算される。ガスタービンの発電効率は 37.0%であり、蒸気タービンの発電効率は 23.1%と計算され、コンバインドサイクルの総合効率は 50.8%となる。この総合効率の値は、天然ガスコンバインドサイクル発電の水準とほぼ同等であり（現在の実用化最高発電効率 48.6%）、今後十分に実用化可能な水準である。これから各含水率に応じた乾燥エネルギーを考慮したエネルギー効率は図20に示されるとおりである。

また、このガス化コンバインドサイクルによる発電システムでは、年間稼働率を 80%とした場合、生産量及び変換効率に応じて発電規模は 41[MW]～118[MW]となる。

表10 コンバインドサイクルの諸条件

| | | |
|---|---|---|
| ボイラ | 熱回収ボイラ効率 | 95.0% |
| | 排ガスボイラ効率 | 95.0% |
| ガスタービン | 作動流体(空気)比熱比 | 1.404 |
| | 圧縮比 | 15 |
| | 作動流体(空気)比熱[kJ/kg・K] | 1.006 |
| | タービン入口温度[℃] | 1300 |
| | 燃焼器効率 | 99.0% |
| | 圧縮機断熱効率 | 85.0% |
| | タービン断熱効率 | 87.5% |
| 蒸気タービン | 排ガスボイラ出口圧力[MPa] | 11 |
| | 排ガスボイラ出口温度[℃] | 566 |
| | タービン入口圧力[MPa] | 10.3 |
| | タービン入口温度[℃] | 538 |
| | タービン内部効率 | 90.0% |
| | 復水器圧力[MPa] | 0.005 |

出典)文献27)

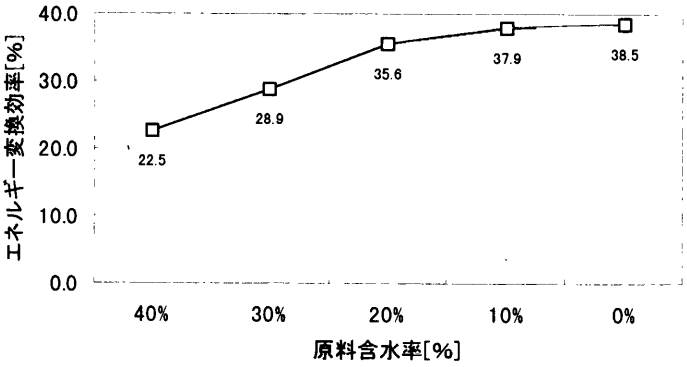



図20 乾燥エネルギーを考慮したエネルギー変換効率

## ○内部循環流動床ボイラ(ICFB)利用発電システム導入ケース(ケース2)

次に、直接燃焼による発電システムとして、比較的高効率にエネルギー回収が可能な内部循環流動床ボイラと蒸気タービンを組み合わせた発電システムを想定する。この発電システムは廃棄物から高い効率でエネルギー回収が可能なシステムであり、既に実用化がされているシステムである。表11に想定している発電システムの諸条件を示す。

これらの諸条件を用いて直接燃焼による発電システムのエネルギー効率を算定される。循環流動床ボイラの効率は発熱量に対して変動し、川口[文献28)]のシミュレーション結果をもとに 79.0%～80.7%に変化させた。また蒸気タービンの効率は 20.6%であり、流動床ボイラと蒸気タービンを組み合わせた総合効率は 16.2%～16.5%と計算される。これから各含水率に応じた乾燥エネルギーを考慮したエネルギー効率は図21に示されるとおりである。

また、この内部循環流動床ボイラと蒸気タービンを組み合わせた直接燃焼発電システムでは、年間

稼働率を80%とした場合、生産量及び変換効率に応じて発電規模は17[MW]～47[MW]となる。

表11 内部循環流動床ボイラの諸条件

| | | |
|---|---|---|
| 循環流動床ボイラ | 燃焼空気比 | 2.0 |
| | 排ガス出口温度[℃] | 180 |
| | ボイラ効率 | 79.0～80.7% |
| | 蒸気圧力[MPa] | 5.88 |
| | 蒸気温度[℃] | 460 |
| 蒸気タービン | タービン入口圧力[MPa] | 5.69 |
| | タービン入口温度[℃] | 455 |
| | タービン内部効率 | 90.0% |
| | 復水器圧力[MPa] | 0.005 |

出展）文献28)

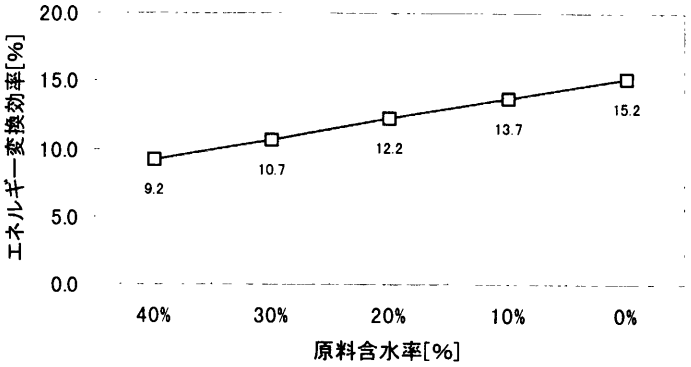



図21 乾燥エネルギーを考慮したエネルギー変換効率

## ○石炭火力発電システム（基本ケース）との比較

次に、前述したバイオマスの発電システムと比較するシステムとして、加圧流動床複合発電（PFBC）システム（基本ケース）をとりあげる。ここで比較する石炭発電システムは、今後設備コストが比較的安くなると予想され、また高効率のエネルギー変換が可能となる。加圧流動床複合発電（PFBC）は、燃焼ガス温度が 900[℃]以下に制御されるために窒素酸化物の発生が少なくなることに加え、流動媒体の石灰石と石炭中の硫黄分の反応により 90%程度の脱硫が可能となるなどの特徴を有しており、ガスタービンとの複合化によって全体の熱効率が高まり発電端効率は 42.0%まで上げることができると期待されている。

## 3. LCA評価によるエネルギー収支比・$CO_2$排出量

これまでの原料製造プロセス及びエネルギー変換プロセスにおける各事項の検討結果を踏まえ、バイオマスのガス化コンバインドサイクル発電（ケース1）、バイオマスの内部循環流動床ボイラ利用の直接燃焼発電（ケース2）及び比較ケースとして加圧流動床ボイラ利用の石炭火力発電（基本ケース）について、エネルギー収支比及び $CO_2$ 排出量の比較検討を行った（図22・23）。

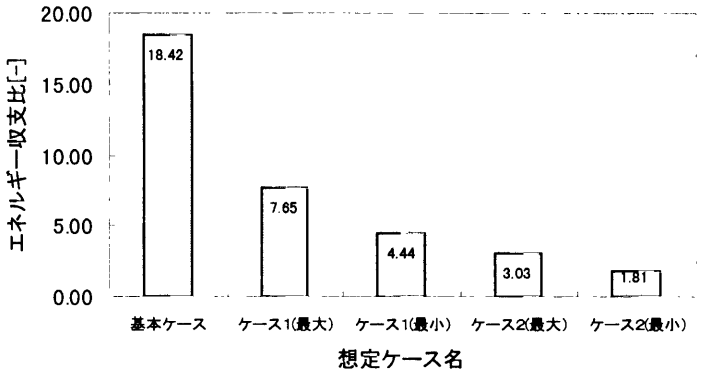
ここで、エネルギー収支比 σ [-]は

$$\sigma = \frac{\text{生産される正味エネルギー量(電力)}[\text{kJ/h}]}{\text{中間投入エネルギー量}[\text{kJ/h}]} \tag{23}$$

によって定義され、また $CO_2$ 排出量 $E'_1$[kg-$CO_2$/GJ]は、

$$E'_1 = \frac{\text{電力生産で排出される}CO_2\text{排出量}[\text{kg-}CO_2\text{/h}]}{\text{生産される正味エネルギー量(電力)}[\text{GJ/h}]} \tag{24}$$

として定義される。但し、バイオマス(ユーカリ)原料の場合、(24)式から定義される $CO_2$ 排出量は原料製造に必要な中間投入エネルギーを起源とする $CO_2$ 排出量のみであり、一方、石炭原料の場合は自身が燃焼によって排出される量もカウントされる。



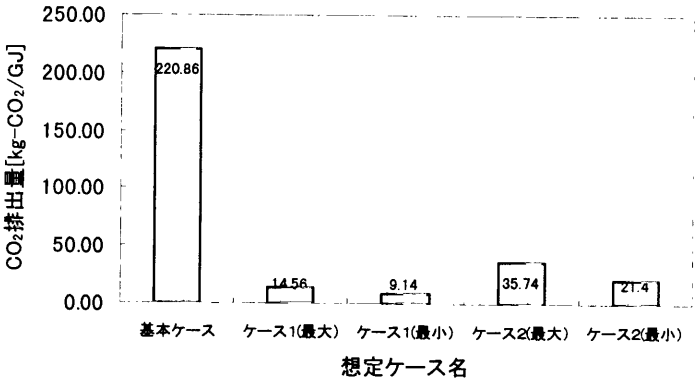

ケース1(最大):含水率 0%, 年間降水量 1,500[mm]
ケース1(最小):含水率 40%, 年間降水量 2,500[mm]
ケース2(最大):含水率 0%, 年間降水量 1,500[mm]
ケース2(最小):含水率 40%, 年間降水量 2,500[mm]

**図22 各ケースのエネルギー収支比比較**

この結果からエネルギー収支比が最大となるポイントは、ケース1及びケース2とも年間降水量1,500[mm]、含水率0%のときで、それぞれ 7.65 及び 3.03 であった。含水率の低下に伴いエネルギー収支比が増加するのは、乾燥に必要なエネルギー量よりは、むしろ原料中の水分が減少することによって、出力エネルギーの増加による効果の方が大きいことを意味する。また、年間降水量 1,500[mm]のところでエネルギー収支比が最大となるのは、生産性の減少によって土壌流出を促進させることによって投入される微量元素群に係るエネルギーの増加量と、反対に生産性の増加によって加工・運搬等のエネルギーの増加量との合計値、すなわち中間投入のエネルギー量が最小となるためである。但し、いずれの場合も石炭火力のエネルギー収支比よりは小さくなる。

次に、エネルギー変換によって得られた電力1単位あたりの $CO_2$排出量[kg-$CO_2$/GJ]の結果を示す

(図23)。




ケース1(最大):含水率 40%, 年間降水量 2,500[mm]
ケース1(最小):含水率 0%, 年間降水量 1,500[mm]
ケース2(最大):含水率 40%, 年間降水量 2,500[mm]
ケース2(最小):含水率 0%, 年間降水量 1,500[mm]

**図23 電力1単位あたりの $CO_2$排出量[kg-$CO_2$/GJ]**

この結果から、ケース1及びケース2とも $CO_2$排出量が最小となるポイントは、年間降水量 1,500[mm]、含水率0%のときで 9.14[kg-$CO_2$/GJ]であった。年間降水量 1,500[mm]、含水率0%のところで $CO_2$ 排出量が最小となるのは、エネルギー収支比の場合と同様な理由による。

## 4. おわりに

今回、途上国を対象にしたエネルギーシステムの導入について、バイオマスを利用したエネルギーシステムを検討した。現在、特にユーカリなどの早生樹種を対象とした植林事業が数多く行われているが、成長したバイオマスはチップとしての利用が主な目的である。しかしながら、冒頭でも述べたように途上国については、電力インフラが不足していること、あるいは雇用を促進するような経済の活性化を望んでいること等の状況を鑑みれば、プランテーション化によるバイオマス発電システムは、1つの重要な選択肢となり得る。

今回対象に選んだユーカリのケースでは、土壌流出量等の中間投入のエネルギー量に対して生産されるエネルギー量の比(エネルギー収支比)は、最も変換効率が高い場合でも石炭の場合の約2/5倍程度であり、必ずしも効率的なエネルギー生産ができるわけではなく、また1[ha]あたりの生産性が上がったとしても必ずしもエネルギー収支比を上げることにはならないことが分かった。しかしながら、$CO_2$排出量については、バイオマスは優れた $CO_2$ 固定能力を有するため、エネルギー変換した際にも石炭に比べ最も良い条件で約1/24になり、$CO_2$の削減に大きく貢献することが期待される。

従って、今後筆者は電力インフラの整備、雇用促進及び環境への貢献という観点から、バイオマス発電システムの経済性を含め、地域の選定、規模及び樹種の選定等を考慮した導入可能性について検討していきたいと考えている。

# 参考文献


1)横山 伸也, ブラジルにおけるユーカリ植林のケーススタディ, 資源と環境 Vol.5 No.6(1996), pp431-435

2)P. J. Edwards and P. J. Grubb, Studies Of Mineral Cycling In A Montane Rain Forest In New Guinea, Journal of Ecology(1982), 70, pp649-666

3)西川 匡英ほか3名, 熱帯林の成長データ集録(1996), 財団法人国際緑化推進センター, pp149-153

4)杉江 達也, ガス化プロセスを考慮したバイオマスエネルギーシステムに関する研究, 東京大学工学部地球システム工学科修士論文(1997)

5)P. J. Edwards and P. J. Grubb, Studies Of Mineral Cycling In A Montane Rain Forest In New Guinea, Journal of Ecology(1982), 70, pp623-648

6)品田 秦ほか5名, 炭酸ガス削減のための植物利用, 財団法人電力中央研究所調査報告書(1992)

7)加茂 皓一, ユーカリ林における間伐と萌芽更新の試み, 熱帯林業 No.39(1997), pp12－24

8)石塚 和裕, カマルドゥレンシスユーカリ, 熱帯樹種の造林特性第1巻(1996), 財団法人国際緑化推進センター, pp200-208

9)地球環境工学ハンドブック, 地球環境工学ハンドブック編集委員会編(1993)

10)村岡 宏・三浦 直樹, 造成農地における降雨による土壌流亡量の予測, 農業土木学会誌第 59 巻第3号(1991), pp283-288

11)長沢 徹明らほか 2 名, USLE における降雨係数の評価について, 農業土木学会論文集第 165 号(1993), pp121-127

12)細山田 健三・藤原 輝男, 侵食流亡土量に関する USLE の適用について(II), 農業土木学会誌集第 52 号第 6 号(1984), pp497-502

13)竹下 敬司, 土砂の生成水の流出と森林への影響, 山海堂(1993)

14)T. C. Whitmore, Tropical Rain Forests, Oxford University Press(1990)

15)A. F. Turhollow and R. D. Perlack, Emissions Of $CO_2$ From Energy Crop Production, Biomass and Bioenergy(1991) Vol. 1, No. 3, pp129-135

16)発電プラントのエネルギー収支分析, 財団法人電力中央研究所報告書(1990)

17)理科年表(1997), 国立天文台編

18)SI 蒸気表(1980), 日本機械学会

19)寺澤 真, 木材乾燥のすべて(1994), 海青社

20)海保 守・小林 光雄, 石炭ガス化の平衡論的な解析, 日本エネルギー学会ガス化委員会編(1994), pp96-114

21)D. H. Himmelblau(大竹伝雄訳), 化学工学の基礎と計算, 培風館(1989)

22)伊香輪恒男・新山浩雄, プログラム学習化学熱力学, 講談社(1996)

23)小山 俊太郎, 石炭ガス化技術, 日本機会学会誌, Vol. 99, No. 930(1996), pp63-65

24)小山 俊太郎, 講座「石炭科学基礎論」(IV), 日本エネルギー学会誌 Vol. 75, No. 2(1996), pp103-109

25)保泉 真一・ほか 2 名, 石炭ガス化複合発電技術, 燃料及燃焼 Vol. 61, No. 5(1994), pp331-341

26)小山 俊太郎, 21 世紀の石炭ガス化システム, 第4回石炭化学コロキウム講演予稿集(1990), pp1-8
27)宮本 忠, コンバインドサイクル発電の現状と動向, エネルギー・資源 Vol.18 No.1(1997), pp41-46
28)川口 一, ごみ発電の技術開発動向と実用化, NTS(1995), pp129-150
29)土手 裕・横山 伸也, バイオマス利用による $CO_2$ 削減効果, 資源と環境 Vol.3 No.2(1994), pp31-37