

一般論文

資源作物の燃料材代替による発展途上地域の
二酸化炭素排出削減ポテンシャルの評価

天野 耕二*・垣守 雅善**・加用 千裕***

摘 要

地球規模の気候変動や砂漠化が深刻化する中、先進国を中心にバイオマス資源の活用が注目されているが、発展途上地域ではバイオマス資源である燃料材（薪炭材）の過剰伐採が森林減少の要因のひとつとなっており、将来の化石燃料需要の増加も懸念されている。本研究では、発展途上地域における森林減少を伴う燃料材へのエネルギー依存を低減し二酸化炭素排出量を増加させないカーボンニュートラル（炭素中立）型経済発展の方向性を考察する視点で、資源作物として1年程度の周期で収穫可能な草本系バイオマスの導入を検討し、その燃料材代替による二酸化炭素排出削減ポテンシャルを評価した。森林火災以外の森林面積減少を伴う木質系燃料材（非カーボンニュートラル系燃料材）の2000年および2030年における消費量を推計した上で、それらのエネルギー需要を資源作物に代替するシナリオを検討した。1990年代に森林火災以外の要因で森林面積が減少している51の発展途上地域を対象として、永続農耕地で一年生イネ科植物の輪作を行い、農耕可能地の一部で多年生イネ科植物を栽培することにより、非カーボンニュートラル系燃料材需要の代替に必要な資源作物が栽培可能であることが確認できた。さらに、非カーボンニュートラル系燃料材代替を果たした上で余剰となる草本系バイオマスのエネルギー利用で化石燃料需要の一部を代替することにより、2030年に予想される発展途上地域からの化石燃料由来二酸化炭素排出を最大18%程度削減できる可能性を示した。

キーワード：資源作物，燃料材，発展途上地域，二酸化炭素排出，カーボンニュートラル

1. はじめに

地球規模の森林面積減少が地球温暖化に伴う気候変動に大きく寄与していることが指摘されている。特に、発展途上地域の森林破壊は焼畑農業や家畜の放牧、薪・炭材のための伐採など人口増加や貧困問題を背景に加速しており、アジアやアフリカを中心に全陸地のおよそ4分の1で砂漠化が進行しているとも言われている¹⁾。地球温暖化については、森林面積の減少に加えて化石燃料消費の増大が最大の要因とされているが、地球温暖化問題と化石資源枯渇の双方の問題解決に向けて注目されているのが持続的に再生可能なバイオマス資源²⁾である。バイオマスの燃焼や分解等により放出される二酸

化炭素は、生物の成長過程で光合成により大気中から吸収した二酸化炭素と同等であることから、バイオマス資源によるエネルギー利用は、大気中の二酸化炭素を増加させない「カーボンニュートラル（炭素中立）」と呼ばれる特性を有している。このため、化石資源由来のエネルギーや製品をバイオマスに代替することにより、代表的な温室効果ガスである二酸化炭素の排出削減に大きく貢献することが期待されている。

木材資源は代表的なバイオマス資源であり、先進国では持続可能な森林経営に基づいて木材をエネルギー資源として活用する試みが始まっている。一方で、多くの発展途上地域では、現在も伝統的バイオマス（燃料材、薪炭材など非商業的バイオマス）

2007年5月1日受付，2007年12月24日受理

* 立命館大学理工学部，〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

** ビジネスサービス株式会社，〒525-0059 滋賀県草津市野路1-5-1-103

*** 東京大学大学院工学系研究科，〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

が主要なエネルギー資源であり、最も貧しい40の国では木材はエネルギー需要の70%以上をまかなっていると言われて³⁾。このように、発展途上地域においては、燃料材はバイオマスエネルギー利用ではあるが、木材資源の大部分をエネルギーとして消費していることから、過度の燃料材伐採が森林減少の主要な要因のひとつになっている^{4,5)}。これらの地域においては、今後も総エネルギー需要は増大していくと予想されているため、燃料材の過剰伐採に加えて化石燃料の消費量も増加していく懸念も高まっている。バイオマスエネルギー利用に関しては、「エネルギー利用を主目的として成長の早い木質系あるいは草本系のバイオマスを栽培し、短い周期で伐採・収穫してエネルギーを得る」というバイオマスプランテーション構想に基づいた木質系バイオマスの供給ポテンシャルやエネルギーシステムとしての総合評価についていくつかの報告事例^{6,7)}があり、地球規模での食糧需給との競合問題や天然林破壊への深刻な影響が危惧されている。一方で、再生力が旺盛で環境適応性が高く、天日乾燥が容易でバイオマス資源としての扱いに優位性を持つ草本系バイオマスについては、地球規模での供給ポテンシャルの推計や天然林破壊抑制を通じた二酸化炭素排出削減効果の評価についての報告が見られない。

そこで、本研究では、伝統的バイオマス依存度の高い発展途上地域における非木質バイオマス（草本系バイオマス）に注目し、資源作物としてこのような草本系バイオマスの栽培を促進することにより、森林面積の減少や化石燃料消費の増加を抑制しながら発展途上地域のエネルギー需要増大に対応できるカーボンニュートラル型経済発展の方向性について検討する。対象地域は、1990年代に森林火災以外の要因で森林面積が減少し林産物の過剰伐採による森林破壊が懸念されている発展途上国・地域であり、対象期間は2000年から2030年までとする。1990年から2000年にかけての森林面積の変化、燃料材の生産量、バイオマスエネルギー需要等の実績に基づいて、2000年および2030年における森林破壊の要因になっていると予測される「カーボンニュートラルでない」燃料材消費量（エネルギー需要）を推計し、そのエネルギー需要を資源作物に代替するシナリオを設定する。資源作物に代替すべきエネルギーの需給バランスについて、地域の気候区分や実際の農耕地面積など供給側の制約条件を考慮しながら検証し、代替した場合の二酸化炭素排出削減ポテンシャルを包括的に評価する。

2. 発展途上地域における森林と燃料材エネルギー需要の現状

FAO（国連食糧農業機関）の報告⁸⁾によると、2000年時点における世界全体の森林面積は約39億ha（ヘクタール）であり国土面積の約30%を占めているが、1990年から2000年までの10年間で年平均約940万haの森林が消失している。地域別に見ると、先進国では年平均約360万ha増加しているが、発展途上地域では年平均約1,300万ha減少している。また、気候区分別に見ると、非熱帯地域では年平均約290万ha増加しているが、熱帯地域では年平均約1,230万ha減少している。特に、アフリカと南米の森林面積は著しく減少している。このような急激な森林の減少は木材生産だけでなく、水源や土地保全を危うくし、地域の人間生活や産業活動を大きく阻害する要因となっている。

FAOによる林産物の生産、貿易および消費に関する統計によると、輸入・輸出されている林産物に占める燃料材の割合は1%未満と極端に少ない。すなわち、燃料材のほとんどが、生産された地域で消費されているということになる。また、林産物全体における燃料材の生産割合は約3分の1と最も大きい割合を占めている。地域別に見ると、アフリカでは林産物のほとんどが燃料材であり、90%を超える地域も少なくない。アジアと南米においても燃料材が最も大きな生産割合となっている地域が多く見られ、発展途上地域では木材資源の大部分をエネルギーとして消費していることがわかる。

また、調理・暖房に主として伝統的バイオマス（燃料材）を使用する人口が開発途上地域を中心に2002年の24億人近くから2030年には26億人あまりに増加することにより、世界全体の伝統的バイオマスエネルギー消費は765,000 [10⁹TOE] から907,000 [10⁹TOE] に増大することが予測されており⁹⁾、人口増加が続く開発途上地域においては、平均所得の向上や都市部への人口移動による商業エネルギーへの転換を上回る規模で森林への燃料材依存が高まる懸念されている。

3. 資源作物に代替する非カーボンニュートラル系燃料材エネルギー需要の推計

前節で述べた森林資源に関する統計データに基づいて、ここでは資源作物に代替すべきカーボンニュートラルでない（伐採後植林をせず、森林面積の減少を伴う）燃料材（以後、非カーボンニュートラル系燃料材と表記）エネルギー需要を推計する。対象地域は、IEA（国際エネルギー機関）の統計デー

タ⁹⁾において「発展途上地域」に分類されている国・地域のうち、FAOの統計データ⁸⁾において1990年代(1990～2000年の10年間)に森林火災以外の要因で森林面積が減少しており、自国内で燃料材を生産している51(アジア6, 南米13, アフリカ32)の国・地域である。対象51地域における人口合計は、世界合計の20.3%を占めていることに対して、対象地域の燃料材生産量は世界合計の46.9%を占め、これらの地域には燃料材依存度の高い地域が多く含まれていることを示している。また、1990年から2000年にかけて、世界全体の森林面積合計は2.4%減少しているが、対象51地域の森林面積合計は6.4%減少となっている。

まず、国・地域別の森林面積変化(1990年から2000年までの10年間の変化量)⁸⁾から1年あたり森林減少面積を算出し、この値から年平均森林火災面積(1990年から2000年までに森林火災の影響を受けた年平均面積)¹⁰⁾を差し引いて1年あたりの平均伐採木材積(伐採による森林蓄積変化量)を推計する。変換係数として、地域別の森林蓄積密度(m^3/ha)を適用する。なお、「年平均森林火災面積」には、土地利用改変を目的とした人為的な焼き払いや焼畑農業の拡大による火災影響も含まれている。このように、森林火災による森林面積減少を考慮しながら1年あたりの平均伐採木材積を推計した上で、伐採木材は全て林産物として消費されたと仮定する。この伐採木材積に地域別の燃料材生産割合を乗じて、森林火災以外の要因で森林面積の減少している地域で伐採された燃料材(非カーボンニュートラル系燃料材)量を算定し、木材の平均材積密度 $0.45 [\text{t}/\text{m}^3]$ を用いて重量に変換する。このような非カーボンニュートラル系燃料材の推計量が実際の燃料材生産量を上回るケースが出てくるが、これは、森林火災による森林面積減少を考慮しながら推計した森林蓄積変化が全て林産物消費によるものと仮定したためである。現実的には、違法伐採や過放牧、病虫害や暴風雨など火災以外の天災、あるいは火災を伴わない土地利用改変などにより消失した森林面積が多い国・地域では、森林火災を考慮した上でなお非カーボンニュートラル系燃料材の推計量が過大評価される可能性を残している。これより、非カーボンニュートラル系燃料材の推計量が燃料材の生産量実績を上回った地域においては、実際に生産されている燃料材の全てが非カーボンニュートラル系燃料材であると仮定した。このような、燃料材の全てが非カーボンニュートラル系燃料材である国・地域は21地域であったが、対象51地域全体としての非カーボンニュートラル系燃

料材率(燃料材生産実績における非カーボンニュートラル系燃料材の割合)は、50.3%であった。最後に、非カーボンニュートラル系燃料材として推計された値を重量から発熱量に変換して非カーボンニュートラル系燃料材エネルギー需要を捉える。熱量への変換に際しては、燃料材(平均含水率30%)の平均有効熱量である $14 [\text{MJ}/\text{Kg}]$ ¹¹⁾を適用した。

前節でも述べたとおり、地球規模での中長期的な人口増は調理・暖房に主として燃料材を使用する人口増をもたらす、燃料材需要は将来も発展途上地域を中心に増加すると予想されている。しかし、森林火災以外の要因で森林面積が減少している国・地域では、増加する燃料材需要の一部は非カーボンニュートラル系燃料材でまかなわれる可能性が大きい。そこで、発展途上地域におけるエネルギー需要増加量予測に基づいた2030年までの地域別バイオマスエネルギー需要増加率⁹⁾を国・地域別の燃料材生産実績に乘じた上で、この値に非カーボンニュートラル系燃料材率(先に推計した国・地域別の燃料材生産実績における非カーボンニュートラル系燃料材の割合)を乗じたものを2030年までの非カーボンニュートラル系燃料材需要増と仮定した。この需要増を2000年における非カーボンニュートラル系燃料材需要に加えることにより、2030年における非カーボンニュートラル系燃料材需要を推計した。ここで適用した地域別バイオマスエネルギー需要増加率⁹⁾については、発展途上地域における非商業エネルギー(燃料材)への依存継続・拡大を考慮したものととなっている。このような2030年における非カーボンニュートラル系燃料材需要推計を森林減少面積に換算すると、対象51地域全体で2000年から2030年までの30年間に累計で $193,953$ [千 ha]の森林が非カーボンニュートラル系燃料材伐採で失われることになる。これは2000年における対象51地域全体の森林面積の12.9%に相当するが、1990年から2000年にかけて対象51地域の森林面積合計が10年間で6.4%減少していることから、今後の各国・地域の森林保全施策検討にあたり特に燃料材の扱いに関して留意すべき数値であると考えられる。

4. 代替する資源作物の設定

本研究では、資源作物の中でも特に草本系バイオマスに着目している。草本系バイオマスの中には、木質バイオマスよりも成長が早く単位面積あたりの収量が大きいものもあり、一年生作物においては1年周期で収穫が可能のため、毎年持続的に収穫しながら相当のエネルギー資源の確保が期待でき

る。例えば、面積あたりの年間成長量が同じ木質バイオマス（10～30年周期で伐採可能とする）と草本系バイオマス（一年生作物）を比較する場合、同じ収穫量ならば毎年収穫できるものの方が小規模な土地でも十分に持続可能な収穫が期待できる。発展途上地域では、エネルギーが安定的に供給されている状況になることは容易でなく、そこに住む人々にとって10～30年という長いストック期間は簡単に受容されるとは言えない。加えて、10～30年のストック期間においては、森林火災や違法伐採による損失を受ける可能性もある。

発展途上地域の農業の現状を鑑みても、草本系バイオマスの導入を促進する優位性は顕著である。発展途上地域では、人口の増加に伴い過度な農耕作が進んでおり、農地に休閑期間を与えず同じ作物を栽培し続け地力が低下するケースが少なくない。地力を低下させず持続可能な農業を進めるために必要とされているのが輪作である。草本系バイオマスの中には地力を回復させる効果を持つ種もあり、このような草本系バイオマスを他の食糧供給目的の作物栽培とともに輪作に組み込むことで、地力を回復させて農作物の収穫量を高めると共にカーボンニュートラルなエネルギーも得るという複合的な効果も期待できる。

草本系バイオマスはイネ科植物とマメ科植物に分類され、さらに、イネ科植物は一年生と多年生に分類されている¹²⁾。イネ科植物は多様な気候条件に適応し、成長速度が速く、再生力も強く多年生は5～6年以上持続的な栽培ができる¹²⁾ことから、本研究では、イネ科植物を非カーボンニュートラル系燃料材に代替する資源作物として適用する。本研究では、発展途上地域において調理・暖房に主として燃

料材を使用するケースを想定していることから、エネルギー利用条件は燃料材と資源作物（イネ科植物）で同等とみなして熱量換算による代替について検討した上で、二酸化炭素排出削減のポテンシャル評価を試みる。

5. 非カーボンニュートラル系燃料材エネルギー需要代替に必要な耕地面積の推計

ここでは、3. で推計した非カーボンニュートラル系燃料材エネルギー需要を代替する草本系バイオマス（一年生イネ科植物）の栽培に必要な耕地面積を算出する。まず、草本系バイオマスの文献値から、地域の気候ごとに一年生イネ科植物の面積あたり収穫量と発熱量を設定する。収穫量（乾物収量）については、気候帯ごとに15～33 [t/ha/y]¹²⁾を適用する。水の供給等、多様な気候条件への適応については、この気候帯ごとの収穫量の違いで考慮する。発熱量については、草本系バイオマス（平均含水率15%）の平均有効熱量17 [MJ/kg]¹¹⁾を適用する。

地域ごとに、非カーボンニュートラル系燃料材エネルギー需要を一年生イネ科植物の有効熱量で除して代替資源作物必要量とし、この値を面積あたり収穫量で除すことにより、代替に必要な耕地面積を算出した。各発展途上地域の非カーボンニュートラル系燃料材需要（2000年および2030年）とその代替に必要な耕地面積（一年生イネ科植物）および実際の農耕地面積（2000年）¹³⁾を地域別に表1（アジア）、表2（南米）、表3（アフリカ）に示す。エネルギー量の単位は全てTOE（原油1トン当量 = 107 kcal, 1cal = 4.186J）換算している。

対象51地域における非カーボンニュートラル系燃料材需要合計は、2000年で62,284 [10³TOE]

表1 アジア地域の非カーボンニュートラル系燃料材需要とその代替に必要な耕地面積（一年生イネ科植物）および実際の農耕地面積

国名	非カーボンニュートラル系 燃料材エネルギー需要 (10 ³ TOE)		非カーボンニュートラル系 燃料材代替必要耕地面積 (ha)		農耕地 面積 (1000ha)
	2000年	2030年	2000年	2030年	2000年
ブルネイ	4	5	278	343	19
インドネシア	10,043	12,390	760,923	938,709	44,777
マレーシア	754	930	57,097	70,437	7,890
バブアニューギニア	355	438	26,894	33,178	1,030
フィリピン	717	884	54,307	66,996	12,150
スリランカ	164	208	12,460	15,723	2,350

(1TOE = 10⁷kcal)

となり、アジア6地域で12,037 [10⁹TOE]、南米13地域で22,337 [10⁹TOE]、アフリカ32地域で27,910 [10⁹TOE]という内訳となった。1国・地域あたりの平均値では、アジアと南米がアフリカの2倍程度となっている。また、2030年における非カーボンニュートラル系燃料材需要合計は88,823 [10⁹TOE]となり、今後30年で43%増程度となることが予想された。

実際の農耕地面積に対する非カーボンニュートラル系燃料材代替必要耕地面積の比率を算出してみると、全ての地域で3%以下となり、草本系バイオマス（一年生イネ科植物）による燃料材代替の実現可能性の大きさを示した。ただし、農耕地面積には、既に食糧生産や家畜放牧などに継続的に利用されている永続農耕地や永続牧草地が含まれていることに注意しなければならない。このような永続農耕地や永続牧草地を除く農耕可能地（一時的利用耕地や休閑耕地を含む）面積に対する燃料材代替必要耕地面積の比率に着目してみると、農耕可能地の1%前後～20%程度で草本系バイオマスを栽培することにより、本研究で対象とした51の発展途上地域における非カーボンニュートラル系燃料材エネルギー需要が2030年においてもカーボンニュートラルに代替できることがわかった。

6. 農耕地の内訳を考慮した資源作物導入シナリオの設定

FAO統計¹³⁾による各地域の農耕地面積内訳を考慮しながら、燃料材代替に加えて化石燃料代替まで意図した二酸化炭素排出削減ポテンシャルを評価することを目的として、以下に示す2つの資源作物導入シナリオを設定する。なお、永続牧草地は牧草栽培に必要な土地とされているため、資源作物の栽培は行わないものとした。

① 永続農耕地における輪作による一年生イネ科植物栽培シナリオ

輪作の基本型としては、イネ科作物→マメ科作物・葉菜類・果菜類→根菜類、という体系が報告されている¹⁴⁾。イネ科作物は有機物の還元量が多く地力を増強する性質があり、マメ科作物は窒素固定により土壌中の窒素量を増加させ、根菜類は収穫作業等により深耕的な作用を耕地にもたらす。そこで、永続農耕地において、一年生イネ科植物（エネルギー資源）→各種イネ科作物（食料源）→マメ科作物・葉菜類・果菜類（食料源）→根菜類（食料源）、という4年サイクルの輪作体系を導入することとした。すなわち、永続農耕地面積の4分の1で一年生イネ科植物を栽培することになる。

表2 南米地域の非カーボンニュートラル系燃料材需要とその代替に必要な耕地面積（一年生イネ科植物）および実際の農耕地面積

国名	非カーボンニュートラル系 燃料材エネルギー需要 (10 ⁹ TOE)		非カーボンニュートラル系 燃料材代替必要耕地面積 (ha)		農耕地 面積 (1000ha)
	2000年	2030年	2000年	2030年	2000年
ベリーズ	20	27	3,360	4,413	149
ブラジル	17,165	22,542	1,779,635	2,337,111	261,406
コロンビア	2,066	2,713	214,206	281,307	45,465
コスタリカ	182	239	18,831	24,730	2,865
エクアドル	816	1,071	84,572	111,065	8,066
ガイアナ	2	2	125	165	1,740
ハイチ	28	37	2,147	2,819	1,590
ホンジュラス	28	37	2,891	3,796	2,935
ジャマイカ	45	59	7,412	9,734	513
ニカラグア	597	785	45,269	59,449	6,966
パナマ	151	198	11,414	14,990	2,188
ペルー	1,103	1,448	83,559	109,734	21,185
ベネズエラ	135	177	13,950	18,320	21,645

(1TOE=10⁷kcal)

表3 アフリカ地域の非カーボンニュートラル系燃料材需要とその代替に必要な耕地面積（一年生イネ科植物）および実際の農耕地面積

国名	非カーボンニュートラル系 燃料材エネルギー需要 (10 ³ TOE)		非カーボンニュートラル系 燃料材代替必要耕地面積 (ha)		農耕地 面積 (1000ha)
	2000年	2030年	2000年	2030年	2000年
アンゴラ	602	963	45,634	72,979	57,300
ベナン	851	1,361	64,482	103,123	3,195
ボツワナ	236	378	38,788	62,032	25,980
ブルキナファソ	22	35	1,653	2,644	10,100
ブルンジ	201	321	15,197	24,304	2,270
カメルーン	1,835	2,934	139,022	222,329	9,160
中央アフリカ	286	457	21,643	34,612	5,149
コートジボワール	1,526	2,440	115,589	184,855	19,800
コンゴ民主共和国	6,910	11,050	523,499	837,198	22,800
赤道ギニア	67	108	5,097	8,151	334
エリトリア	19	30	1,416	2,265	7,530
エチオピア	322	515	52,902	84,604	30,695
ガボン	92	147	6,961	11,132	5,160
ガーナ	808	1,292	61,200	97,873	14,450
ギニア	563	901	42,687	68,266	12,300
ケニア	433	693	32,815	52,480	26,360
リベリア	406	650	30,787	49,236	2,595
マダガスカル	1,376	2,201	142,681	228,181	27,500
マラウイ	1,032	1,650	78,167	125,007	4,090
マリ	308	492	23,304	37,268	34,674
モーリタニア	1	2	103	164	39,750
モザンビーク	222	355	23,025	36,822	48,135
ニジェール	26	42	1,979	3,165	37,500
ナイジェリア	4,319	6,907	327,221	523,304	70,050
ソマリア	205	328	50,524	80,800	44,067
南アフリカ	20	31	3,210	5,134	99,640
スーダン	1,001	1,600	75,823	121,259	133,833
トーゴ	135	215	10,205	16,321	3,630
ウガンダ	1,560	2,495	256,066	409,510	12,272
タンザニア	499	798	37,798	60,448	48,000
ザンビア	1,086	1,738	112,643	180,143	35,287
ジンバブエ	942	1,507	71,381	114,155	20,550

(1TOE = 10⁷kcal)

② 農耕可能地における多年生イネ科植物栽培シナリオ

多年生イネ科植物は5～6年持続可能な収穫ができるため、連作後1年の休閑期間を設ける場合、6～7年サイクルで栽培可能である。ここでは、永続農耕地に影響を与えない農耕可能地の25%の土地において6年周期（5年連作+1年休閑）で多年生イネ科植物を栽培することとした。すなわち、農耕可能地面積の24分の5（25%×5/6）で多年生イネ科植物を栽培することになる。農耕可能地については、植林による持続的森林管理の適用も想定されるが、ここでは一度耕起と播種を行えば更新時までの作業が不要で低投入持続栽培において優位性¹²⁾を持ち多くの発展途上地域において早期に導入可能と思われる多年生イネ科植物栽培シナリオを検討対象とした。なお、多年生イネ科植物の収穫量は、気候帯ごとに35～65 [t/ha/y]¹²⁾を適用する。先と同様に、水の供給等、多様な気候条件への適応については、この気候帯ごとの収穫量の違いで考慮している。多年生イネ科植物（平均含水率15%）の発熱量については、一年生イネ科植物と同様に有効熱量17 [MJ/kg]¹¹⁾を適用する。

7. 非カーボンニュートラル系燃料材と資源作物のエネルギー需給バランス

各発展途上地域の非カーボンニュートラル系燃料材需要（2000年および2030年）と資源作物によるエネルギー供給（6.で設定した栽培シナリオによる供給可能量）に基づき、地域ごとに需要に対する供給の比率を頻度分布として整理した結果を表4（2000年）および表5（2030年）に示す。なお、6.で設定した栽培シナリオによる供給可能量は2000年、2030年ともに同一とみなした。

2000年の非カーボンニュートラル系燃料材需要に対して、永続農耕地輪作（4年周期）による一年生イネ科植物栽培だけで代替できる（[供給/需要]>1.0）地域は、対象51発展途上地域の約8割にあたる43地域であったが、農耕可能地に多年生イネ科植物を栽培する（25%の土地で6年周期）シナリオでは全ての地域で代替可能となった（表4）。非カーボンニュートラル系燃料材需要が43%程度増加すると予想される2030年においても、農耕可能地に多年生イネ科植物を栽培するシナリオを含む条件で全ての地域が代替可能となった（表5）。

永続農耕地で一年生イネ科植物の輪作を行うことに加えて農耕可能地に多年生イネ科植物を栽培するシナリオ（6.で設定したシナリオ①と②の組み合わせ）では、多くの地域（2000年で約8割、

表4 2000年における非カーボンニュートラル系燃料材需要に対する資源作物エネルギー供給比率の頻度分布

供給/需要	①永続農耕地輪作による一年生イネ科植物栽培	②農耕可能地における多年生イネ科植物栽培	①+②
～1	8	0	0
1～5	27	2	1
5～10	7	10	7
10～100	9	30	34
100～	0	9	9

表5 2030年における非カーボンニュートラル系燃料材需要に対する資源作物エネルギー供給比率の頻度分布

供給/需要	①永続農耕地輪作による一年生イネ科植物栽培	②農耕可能地における多年生イネ科植物栽培	①+②
～1	14	0	0
1～5	25	7	4
5～10	3	11	10
10～100	9	25	29
100～	0	8	8

2030年で約7割の地域）で非カーボンニュートラル系燃料材需要の10倍以上の資源作物エネルギー供給が可能であることが示された。これらの地域では、燃料材代替を果たした上での資源作物による余剰エネルギー利用が、化石燃料によるエネルギー需要の増大にも対処し得る代替可能性を持つものと考えられる。

8. 資源作物導入による二酸化炭素排出削減ポテンシャルの評価

5.～7.で示したように、対象51地域における2000年の非カーボンニュートラル系燃料材需要総計62,284 [10³TOE]について、農耕可能地で多年生イネ科植物を栽培するシナリオでは全ての地域でカーボンニュートラルな資源作物による代替が可能となったが、この場合の二酸化炭素排出削減効果は、燃料材の平均有効熱量14 [MJ/Kg]と木材の炭素含有率0.5を用いて341 [Mton-CO₂]削減と評価できる。これは、2000年の発展途上地域

全体からの化石燃料由来二酸化炭素排出量 8,226 [Mton-CO₂]⁹⁾ の 4.2% に相当する。さらに、燃料材代替後の資源作物による余剰エネルギー供給可能量を地域ごとに算出した上で総計した 1,191,025 [10³TOE] を一般的な熱源二酸化炭素排出原単位 [0.06ton-CO₂/GJ]¹⁵⁾ を用いて二酸化炭素排出量換算すると 2,978 [Mton-CO₂] となる。この一般的な熱源対象の原単位は、天然ガス [0.05ton-CO₂/GJ] と石炭 [0.10ton-CO₂/GJ] の中間的な値である。これより、農耕可能地を利用して多年生イネ科植物を栽培しエネルギー利用することが、発展途上地域全体からの化石燃料由来二酸化炭素排出を最大で 3 分の 1 程度削減できるポテンシャルを持っていることが示された。

2030 年における世界全体の化石燃料由来二酸化炭素排出量は 38,214 [Mton-CO₂]、発展途上地域の化石燃料由来二酸化炭素排出量は 18,365 [Mton-CO₂] と IEA により予測されている⁹⁾。永続農耕地輪作による一年生イネ科植物栽培に加えて農耕可能地で多年生イネ科植物を栽培するシナリオにおいては、2030 年の非カーボンニュートラル系燃料材需要を代替した上で余剰となる草本系バイオマスのエネルギー供給の総計が 1,341,338 [10³TOE] となる。これを先と同様に二酸化炭素排出量換算すると 3,353 [Mton-CO₂] となることから、燃料材代替後の余剰資源作物エネルギー利用により、2030 年に予想される世界全体の化石燃料由来二酸化炭素排出を最大 8% 程度、発展途上地域からの化石燃料由来二酸化炭素排出を最大 18% 程度削減できる可能性があることがわかる。

9. まとめと今後の課題

本研究では、発展途上地域における森林火災以外の森林面積減少を伴う燃料材へのエネルギー依存を低減し二酸化炭素排出量を増加させないカーボンニュートラル（炭素中立）型経済発展の方向性を考察する視点で、資源作物として 1 年程度で収穫可能な草本系バイオマスの導入を検討し、草本系バイオマスエネルギー利用による燃料材代替および余剰エネルギーの化石燃料代替による二酸化炭素排出削減ポテンシャルを評価した。永続農耕地で一年生イネ科植物の輪作を行い、農耕可能地の一部で多年生イネ科植物を栽培することにより、カーボンニュートラルに供給できない燃料材需要の代替が長期的にも可能であることが確認できた。さらに、燃料材代替を果たした上で余剰となる草本系バイオマスのエネルギー利用で化石燃料需要の一部を代替することにより、2030 年に予想される発展途

上地域からの化石燃料由来二酸化炭素排出を最大 18% 程度削減できる可能性を示した。資源作物の導入促進は地球規模の森林破壊問題と地球温暖化問題に同時に対処し得る有効な手段になり得ることが本研究を通して示された。今後、資源作物の品種改良などにより、より多くの収量が得られる草種が開発されていけば、本研究で得られた知見以上の二酸化炭素排出削減シナリオが実現する可能性もある。ただし、本研究においては、森林火災以外の森林蓄積変化が全て林産物消費によるものと仮定したため、火災以外の天災あるいは火災を伴わない土地利用改変などにより消失した森林面積が多い国・地域ではカーボンニュートラルに供給できない燃料材需要の推計について再考の余地を残している。

また、本研究では、発展途上地域において調理・暖房に主として燃料材を使用するケースを想定し、エネルギー利用条件は燃料材と資源作物（イネ科植物）で同等とみなし熱量換算による代替について検討したが、具体的な調理・暖房機器など代替条件の詳細や代替コストについては今後さらに検討する必要がある。資源作物については、自動車燃料代替として近年開発が進んでいる澱粉・糖生産型や油生産型の植物資源も念頭に入れるべきであり、現実的なエネルギー代替シナリオの検討にはより詳細な知見が求められよう。また、本研究において設定した資源作物栽培シナリオは各地域の気候区分と農耕地面積のみ考量したものであるが、地域の食糧需給状況や農耕地の土壌状態など他の様々な要因を考慮しながら資源作物の栽培条件を検討していく必要もある。さらに、バイオマスエネルギーによる二酸化炭素排出削減効果については、エネルギー変換効率やエネルギー利用コストなど、多面的な検証が今後重要になって行くと考えられる。

文 献

- 1) 独立行政法人国際協力機構 (JICA) HP (2005) 世界の諸問題, <http://www.jica.go.jp/world/issues/index.html>
- 2) 農林水産省 HP (2005) バイオマスニッポン, <http://www.maff.go.jp/biomass/>
- 3) Christopher Flavin 編著 (2005) 地球白書 2005, World Watch Institute
- 4) Contreras-Hermosilla, A. (2000) The underlying causes of forest decline, CIFOR Occasional Paper 30. 25p.
- 5) Dovie, Delali · Witkowski, E.T.F. · Shackleton, Charlie Source (2004) The Fuelwood Crisis in Southern Africa -- Relating Fuelwood Use

- to Livelihoods in a Rural Village, *GeoJournal*, Vol.60, pp.123-133.
- 6) 杉山大志・斉木 博・渡部良朋・中園 聡・藤野 純一 (1996) バイオマスエネルギーの供給可能量見積り－土地利用競合下でのプランテーション利用の可能性－, 第12回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.257-262.
 - 7) Komiyama, H.・Mitsumori, T.・Yamaji, K.・Yamada, K. (2001) Assessment of energy systems by using biomass plantation, *Fuel*, Vol. 80, pp.707-715.
 - 8) 国際連合食糧農業機関 (FAO) (2002) 世界森林白書 2001年報告, FAO協会, 311pp.
 - 9) 国際エネルギー機関 (IEA) (2004) WORLD ENERGY OUTLOOK 2004, OECD/IEA, 602pp.
 - 10) 国際連合食糧農業機関 (FAO) HP (2005) FRA 2005 Country tables, <http://www.fao.org/forestry/site/32179/en/>
 - 11) 国際連合食糧農業機関 (FAO) (2004) Forestry Department Wood Energy Programme, UNIFIED BIOENERGY TERMINOLOGY, 50pp.
 - 12) 社団法人日本エネルギー学会編 (2002) バイオマスハンドブック, オーム社, 422pp.
 - 13) 国際連合食糧農業機関 (FAO) HP (2005) FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/default.aspx>
 - 14) 佐賀県農業技術防除センター HP (2003) 持続的農業技術情報「輪作体系による連作障害対策」, <http://www.pref.saga.lg.jp/at-contents/shigoto/nogyo/nougyougijutsu/jizoku.htm>
 - 15) 環境省地球環境局 HP (2003) 温室効果ガス排出量－算定・報告・公表制度について [関連資料集], <http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/>

Potential Evaluation of Carbon Dioxide Reduction by Substituting Energy Crops for Fuel Wood in Developing Countries

Koji AMANO * , Masayoshi KAKIMORI ** and Chihiro KAYO ***

(* Ritsumeikan University, 1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

** Business Service, Co. Ltd., 1-5-1-103 Noji, Kusatsu, Shiga 525-0059

*** University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656)

Abstract

Extreme consumption of fuel woods as biomass energy has caused global depletion of forest in many developing countries. In focusing on the carbon neutral development, we evaluated reduction potential of carbon dioxide emission by substituting energy crops for fuel woods and fossil fuels based on the plantation scenarios of grass type biomass that could be harvested in one year cycle in developing countries. After estimating energy demand by fuel woods in 2000 and 2030, we investigated the harvested land use scenarios including the substitution of grass type biomass for fuel wood energy consumption. The objective regions were 51 developing countries where forest depletion besides wildfires has been proceeding between 1990 and 2000. On the scenario including crop rotation in the permanent crop land and grass plantation in the arable land, we could confirm the possibility of substitution for fuel wood energy consumption accompanying forest depletion. Furthermore, utmost 18% reduction potential of carbon dioxide emission derived by fossil fuels from developing countries in 2030 was shown by investigating the substitution for fossil fuels consumption by utilizing surplus grass biomass energy after substituting for fuel woods.

Key Words: Energy crops, Fuel wood, Developing countries, Carbon dioxide emission, Carbon neutral