〔研究ノート〕

バイオマスエネルギーと開発途上国
――薪炭を中核とした木質バイオマスの再評価――

鳥飼行博*

はじめに

2011年３月11日の東日本大震災による東京電力福島第１原子力発電所の事故を踏まえ，菅直人首相は５月18日の記者会見で，「原子力行政を根本的に見直さなければならない」とし，政府が近く設置する原発事故調査特別委員会で検討していく考えを明らかにした。そして，再生可能エネルギー，特に風力発電や太陽光発電など，自然エネルギーの開発・普及を重視する姿勢を打ち出している。

この議論から窺われることは，日本では，再生可能エネルギーが太陽光発電や風力発電など先端技術を活用した電気エネルギーであるかのような誤解が広まっていることである。メディアや討論会に登場する行政担当者から有名人まで，再生可能エネルギーの中核が，風力や太陽光による発電であるとみなしているように見える。また，再生可能エネルギーであるバイオマスエネルギーに言及される場合でも，バイオエタノールやバイオディーゼルに代表されるバイオ液体燃料，あるいはバイオガスによる発電と同一視されることが多いようである。

他方，グローバルな視点で，再生可能エネルギーの実情を見ると，その主流は，バイオマスエネルギー，とりわけ薪炭，農業廃棄物などの固形バイオマスを直接燃焼利用することによって得られる熱エネルギーである。世界のバイオマスエネルギー統計から再生可能エネルギーの実情を整理してみると，現代の再生可能エネルギーの多くが，木材に由来する木質バイオマスの燃焼によるものである。ローカルな視点でみると，再生可能エネルギーは，電気・ガスなどエネルギー関連インフラが整っていない開発途上国の貧困者が利用しているが，木質バイオマスが特に農村の貧困者に無償エネルギーを提供している点で，世界の持続可能な開発に重要な役割を担っている。

そこで，本稿では，グローバルとローカルの双方の視点から，エネルギー（Energy），環境（Environment），経済成長（Economy）の3Esに関わる再生可能エネルギーを，特に木質バイオマスの実情を踏まえて分析し，持続可能な開発に有用な提言を試みたい。

提出日2011年８月24日　　受理日2011年11月23日
＊教養学部人間環境学科社会環境課程教授
＊本論文は，文科省科学研究費補助金 基盤研究（C）の成果報告である。

1．再生可能エネルギー

（1）再生可能エネルギーの分類

「再生可能」とは持続可能なための十分条件といえるもので，再生可能エネルギーは，①自然エネルギー，②水力，③バイオマスエネルギー，という三種類に分類できる（表1参照）。

自然エネルギーとしては，例えば，太陽熱によって生じる風を利用する風力，太陽と月の回転と重力を利用した潮力，太陽光を直接利用する太陽光発電などがある。現代では，自然エネルギーは電気エネルギーの形態で利用されることが多いが，伝統的には，水の運動エネルギーを直接利用する水車，風を利用した風車が動力として利用され続けている。これらはみな太陽熱による水の蒸発，降雨による位置エネルギーが源になっている。また，日本では，洗濯や食器洗い後の電気乾燥機が家庭に普及し，干物など食材加工・食材乾燥にも電気乾燥機を使用している。しかし，伝統的には天日乾燥で済ましたり，薪炭を利用したりしてきた（写真1参照）。つまり，現代的な生活では，化石燃料，ウランなど再生不可能な資源を消費しているが，伝統的な生活では，これらは再生可能エネルギーを利用して対処していたのである。

他方，バイオマスエネルギーは，バイオマスを起源とするエネルギーであり，バイオマスとは「再生可能な生物由来の有機性資源で化石燃料以外のもの」である。この内訳は，①エネルギー作物（資源作物），②家畜の糞尿，③木材，④農業廃棄物，の4種類である。

エネルギー作物から作られるバイオ液体燃料は，バイオエタノールとバイオディーゼルというバイオアルコール類である。家畜の排出する糞尿や分解した廃棄物からメタンなどバイオガスを取り出すこともできる。これら二つは，液体バイオマス，気体バイオマスとして分類される現代的バイオマスエネルギーである。

表1　再生可能エネルギーの分類

	源　泉	現代的エネルギー	伝統的エネルギー
自然エネルギー	風	風力発電	風車
	太陽	太陽光発電	天日乾燥（洗濯，干物加工）
	引力	潮力発電	干満（水産業，塩田など）
	地熱	地熱発電	地熱利用（温泉，農業など）
水力	水流	水力発電（ダム式・水路式）	水車（製粉機など）
バイオマスエネルギー	エネルギー作物	バイオ燃料（液体バイオマス）	－
	家畜の糞尿	バイオガス（気体バイオマス）	乾燥糞燃料（固形バイオマス）
	木材	バイオマス発電（チップなどを燃料とした）	薪炭
	農業廃棄物（籾殻，バガス）		焚きつけ燃料

注1）エネルギー作物は，サトウキビ，テンサイ，トウモロコシ，小麦，大豆，油糧作物（ナタネ，ヒマワリ）など。
注2）大規模水力発電は，ダム建設に伴い生物多様性の減少を伴うため，OECD 分類基準でも10メガワット以下の小規模水力だけを再生可能エネルギーに含めている。ただし，統計によって水力発電全てを再生可能エネルギーとする場合もある。
出所）筆者作成。

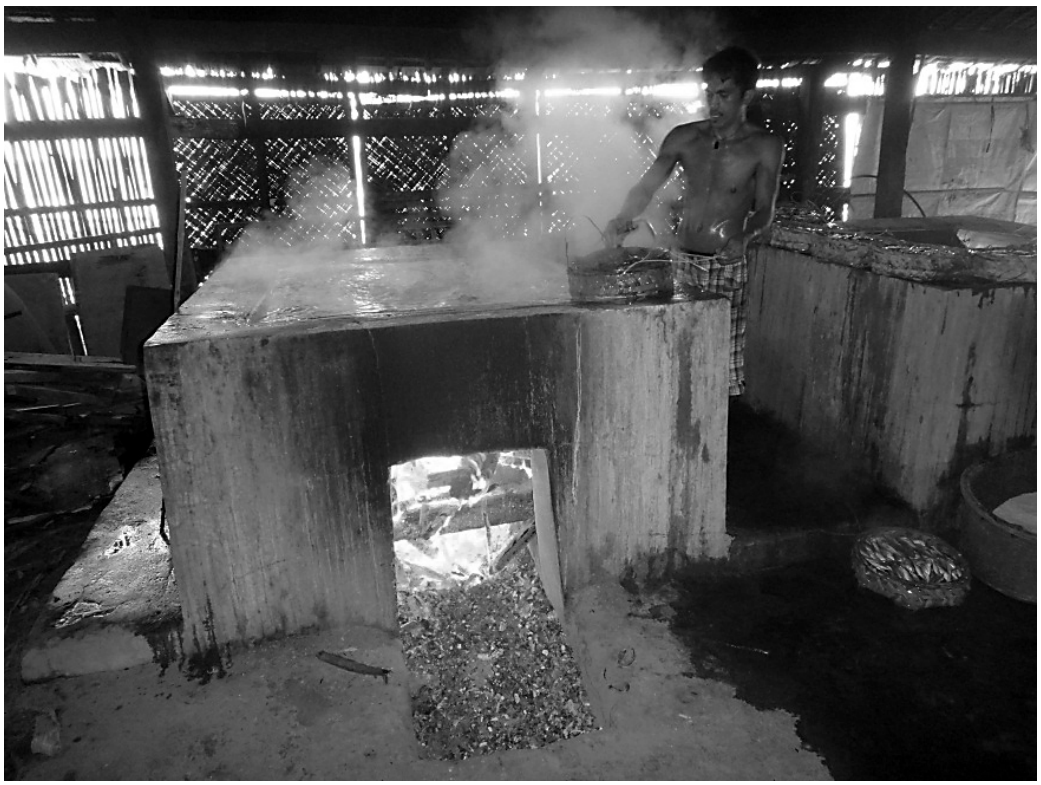


写真１：薪炭を使った魚の燻製生産。本稿の写真は，いずれも2010年８月，フィリピンの北カマリネス州で筆者が撮影。

しかし，バイオ燃料やバイオガスよりも古く，先史時代から人類が利用してきた薪炭は木質バイオマスに分類され，草食動物の糞の植物繊維を乾燥させた動物由来バイオマス，すなわち乾燥糞燃料と合わせて，固形バイオマスと呼称することができる。これらいずれの固形バイオマスも，伝統的エネルギーとして分類できる。

米国でも，19世紀後半までは，木質バイオマスが調理・給湯，照明など民生部門（家庭と事業）や商業用に広範に利用され，輸送部門の燃料として多用されていた。蒸気機関車の燃料も，19世紀前半までは薪炭が多用されていたのである[1)]。これは，工場など産業部門でも同じで，鍛冶屋など金属工場でも，熱を得るのは薪炭が主流だった。しかし，20世紀には，蒸気機関車の燃料も石炭が主流になり，自動車の普及から，石油が広く使用されるようになった。そして，発電所が多数建設されたことで，電気が民生エネルギーの中核となり，天然ガスも普及し始めた。

再生可能エネルギーのもう一つの範疇は，水力あるいは小規模水力発電である。水力発電は，水の運動エネルギーを介して電気エネルギーにするが，伝統的には，水の運動エネルギーを直接利用する水車がある。これらはみな太陽熱による水の蒸発，降雨による位置エネルギーが源になっているという意味では，自然エネルギーに分類することも可能である。つまり，再生可



写真 2：非電化地域における太陽光発電（右上）と天日乾燥の洗濯物。

能エネルギーは，自然エネルギー（水力を含む）もバイオマスエネルギーも太陽からのエネルギーを直接的あるいは間接的に利用することで，仕事ができるようになる。この場合，自然と生物とは，同一の源からエネルギーを得ているのであって，太陽の核融合反応の持続性を引継いでいる点は共通している。

こうしてみると，現在の先進工業国でも，20世紀以前は，再生可能エネルギーに依存していたのであって，再生可能エネルギーは，決して「新エネルギー」ではない。伝統的バイオマスは，日本のような先進工業国ではもはやエネルギーとして重要な役割を担っていないが，開発途上国では依然として現在でも重要である。電気・ガスのインフラが整備されていない地域を中心に，貧困者10億人以上の人々が木質バイオマスを主な調理用エネルギーとして日々利用しているのである[2)]。

（２）世界の発電部門における再生可能エネルギー

再生可能エネルギーの実情を見ると，一般的に先端技術を用いたクリーンエネルギーとして，電気エネルギーが注目されている。その理由は，

① 電気エネルギーの用途の広さという汎用性
② スイッチ一つで操作できるという簡便性
③ 利用にあたって廃棄物や汚染が生じないというクリーン性

という三つの特徴が指摘できる。対象的に，薪炭を直接燃焼する利用方法は，煤煙，燃殻による室内の汚れ，汚染の問題を引き起こし，利用空間の汚れを伴うのであって，「クリーン」ではない。電気エネルギーは，生産拠点ではともかく，利用空間では清浄であり，その意味では，火力発電であっても「クリーンエネルギー」といえる。

国際エネルギー機関（IEA）によれば，2008年の再生可能エネルギーと廃棄物による発電電力量は，日本は11万3309ギガワット時で中国の60万797ギガワット時よりは少ないが，日本人口の２倍近いインドネシア，人口8500万規模のフィリピン，ベトナムの５倍もの電力量を発電している（表２参照）。しかし，開発途上国でも，離島，山村のような非電化地域で，次第に家庭用に太陽光発電が普及し始めている（写真２参照）。他方，固形バイオマスは，製材産業の副産物（樹皮，おがくず，木くず），リサイクルされた木材，パルプ製造時の黒液といった木材由来の燃料で大半が産業部門における利用であり，発電よりも燃焼による熱エネルギー利用が中心となっている。

表２　2008年の国別の再生可能エネルギーと廃棄物とによる発電電力量

（単位：GW 時）

	一般廃棄物	産業廃棄物	固形バイオマス	地熱	水力	太陽光	風力	合計
日本	6837	472	15079	2752	83295	2251	2623	113309
	6.0%	0.4%	13.3%	2.4%	73.5%	2.0%	2.3%	100.0%
中国	0	0	2359	0	585187	172	13079	600797
	0.0%	0.0%	0.4%	0.0%	97.4%	0.0%	2.2%	100.0%
インドネシア	0	0	0	8297	11528	0	0	19825
	0.0%	0.0%	0.0%	41.9%	58.1%	0.0%	0.0%	100.0%
フィリピン	0	0	0	10723	9843	1	61	20628
	0.0%	0.0%	0.0%	52.0%	47.7%	0.0%	0.3%	100.0%
ベトナム	0	0	0	0	25986	0	0	25986
世界	58120	11207	162825	31435	3287554	64608	218504	3851156
	1.5%	0.3%	4.2%	0.8%	85.4%	1.7%	5.7%	100.0%

注１）合計には，太陽熱，潮力，バイオガス，バイオ液体燃料による発電を含む。ただし，上記の国は各項目ゼロ。
注２）固形バイオマスは，丸太，製材産業の副産物（樹皮，おがくず，木くず），リサイクルされた木材，黒液等といった木材由来の燃料で大半が産業部門における利用。
注３）G（ギガ）＝10^9（10億）。
注４）廃棄物は，再生可能だけでなく再生不可能な一般廃棄物と産業廃棄物。
出所）IEA Statistics（http://www.iea.org/stats/index.asp）より作成。

発電方法は，日本では，水力発電の8.3万ギガワット時で73.5%を占め，固形バイオマス発電1.5万ギガワット時（13.3%），廃棄物発電（一般廃棄物と産業廃棄物）7039ギガワット時（6.5%）で，太陽光発電2251ギガワット時（2.0%），風力発電2623ギガワット時（2.3%）は，地熱発電（2.4%）以下の水準でしかない。したがって，太陽光，風力は，急増しているとはいっても，再生可能エネルギーによる発電電力量の５%に満たない低い比率でしかない。しかし，日本を中国など他のアジア諸国と比較すると，発電方法は多様化しており，水力発電だけに頼っているベトナムとは対照的である。その意味で，日本の太陽光発電，風力発電は，国内エネルギー供給の上からは，微小な位置にあるが，再生可能エネルギーを重視しようとする日本のエネルギー政策，地球温暖化対策を反映していると考えられる。

ここで1997年の RPS 法制定後も，2008年の政令改正までは，日本の経済産業省は「新エネルギー」の中に廃棄物発電を含めており，新エネルギー利用の７割以上がパルプ黒液と廃棄物発電であった。しかし，プラスチック類などのサーマルリサイクル（熱回収）は循環型社会の一形態として認められているものの，非再生可能資源の消費・燃焼によるエネルギーの利用であり，これは，ワンウェー型であり「再生可能」ではない。他方，「再生可能」な地熱発電は「新エネルギー」に含まれていない。日本の「新エネルギー」は，産業育成の観点から定義されているために，再生可能エネルギーとは大きく異なることは注意を要する。

（３）世界の再生可能エネルギーの供給

利用に際して汚れる心配のある薪炭は，「クリーン」なエネルギーとは言えないが，カーボンニュートラルの性質のために，再生可能エネルギーに分類される。カーボンニュートラルとは，ライフサイクルアセスメント（LCA）によって，バイオマスの光合成・生長に伴う二酸化炭素の吸収と，バイオマスの燃焼に伴う排出が相殺することであり，炭素中立性と訳すことができる。この性質は，バイオマスの生長と燃焼というサイクルが持続的に行われることによって保障されるものであり，大気中の二酸化炭素の増減に影響を与えないバイオマスエネルギーを開発することは，持続可能な開発にも寄与することになる。

国際エネルギー機関（IEA）によれば，2008年の主なアジア諸国における再生可能エネルギーと廃棄物による発熱量は，日本は42万2297テラジュールで中国の868万2943テラジュールの20分の１程度で，インドネシアの282万317テラジュール，フィリピン70万2865テラジュール，ベトナムの103万9576テラジュールよりも少ない[3)]。日本のような先進工業国は，開発途上国と比較して，再生可能エネルギーによる発電電力量は大きいが，熱エネルギーを回収利用する方法は廃れてしまった（表３参照）。バイオマスエネルギー，特に固形バイオマスの直接燃焼が世界の再生可能エネルギーの主流となっているのである。

固形バイオマスの内容は，薪炭と農作物のカス，家畜の糞尿など農業廃棄物が中心であり，それらを直接燃焼し熱エネルギーを回収して利用する。世界のバイオマスエネルギー発熱量統計から再生可能エネルギーの実情を整理してみると，現代の再生可能エネルギーの９割が，木材に由来する木質バイオマスの燃焼によるということができる。

表３　2008年の国別の再生可能エネルギーと廃棄物とによる発熱量

	廃棄物	固形バイオマス	バイオガス	バイオ液体燃料	地熱	太陽熱	合計
	TJ	TJ	TJ	1000 t	TJ	TJ	TJ
日本	69771	218317	5351	0	107523	21335	422297
	16.5%	51.7%	1.3%	0.0%	25.5%	5.1%	100.0%
中国	0	8148475	308050	2050	0	226418	8682943
	0	93.8%	3.5%	0.0%	0.0%	2.6%	100.0%
インドネシア	0	2222933	0	94	597384	0	2820317
	0	78.8%	0.0%	0.0%	21.2%	0.0%	100.0%
フィリピン	0	316837	0	56	386028	0	702865
	0	45.1%	0.0%	0.0%	54.9%	0.0%	100.0%
ベトナム	0	1039756	0	0	0	0	1039756
世界	1539406	46870063	867423	70631	2445184	461883	52183959
	2.9%	89.8%	1.7%	0.1%	4.7%	0.9%	100.0%

注１）合計には，各種の発電電力量，バイオ液体燃料を含まない。
注２）T（テラ）＝10^{12}（１兆）。1J（ジュール）は１ワット秒（Ws），約2.78×10^{-7} kWh，約0.24cal。1TJ＝原油換算25.8kℓ。
出所）IEA Statistics（http://www.iea.org/stats/index.asp）より作成。

2. 再生可能エネルギーの中核をなすバイオマスエネルギー

（１）バイオマス・ニッポン総合戦略

バイオマスが再生可能エネルギーとして日本で注目されたのは，2002年の「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定されてからで，バイオマスの賦存量の大きさに注目して，2010年までに熱利用に原油換算308万キロリットルを導入するとしている。ここでは，

①　地球温暖化対策（エネルギーの観点）
②　循環型社会形成（廃棄物処理の観点）
③　競争力のある戦略的産業の育成（経済的観点）
④　農林漁業・農林漁村の活性化（地域経済活性化の観点）

という４目的に着目して，日本のバイオマスを活用すべきであると提言している。また，2002年の「バイオマス・ニッポン総合戦略」では，「動植物，微生物，有機性廃棄物からエネルギー源や生分解素材，飼肥料等の製品を得る」ことのできるものをバイオマス発生起源とし，①廃棄物，②未利用，③資源作物，④新作物，に分類している。

世界のバイオマス賦存量の推計は，森林面積とそこの植生の状況から，推計できる（表４参照）。地域別の森林面積をみると，アジアは5.5億ヘクタール，その森林密度は１ヘクタール当たり63立方メートルであり，森林体積は345億立方メートルと推計される。そこで，１ヘクタール当たりの木質バイオマスを82トンとして，バイオマス賦存量は449億トンと推計できる。

表 4　地域別の森林とバイオマス賦存量の推計

	森林面積	森林密度	森林体積	木質バイオマス密度	木質バイオマス
	100万 ha	m^3/ha	100万m^3	t/ha	100万 t
	a	b	a×b	c	a × c
アジア	547	63	34461	82	44854
アフリカ	649	72	46728	109	70741
南アメリカ	885	125	110625	203	179655
北中アメリカ	549	123	67527	95	52155
欧州	1039	112	116368	59	61301
オセアニア	197	55	10835	64	12608
世界	3869	100	386900	109	421721

出所）Matti Parikka（2004）“Global biomass fuel resources” table2（http://faculty.washington.edu/stevehar/World%20woody%20biomass.pdf）より作成。

他方，欧州（ロシアを含む）森林面積10.4億ヘクタール，その森林密度は 1 ヘクタール当たり112立方メートル，森林体積は1164億立方メートルもある。しかし，欧州の 1 ヘクタール当たりの木質バイオマスは59トンとアジアの82トンを下回るために，バイオマス賦存量は613億トンとアジアの1.4倍弱と推計される。森林密度に比較して，木質バイオマスの値が乖離している理由は，樹木に含まれる水分，すなわち乾燥重量の格差，樹高や枝振りなど木質バイオマス賦存量の格差が関連していて，広葉樹林と針葉樹林では，木質バイオマス密度は後者が小さくなる場合が多い。

こうして，木質バイオマス賦存量の推計から，南アメリカ1797億トン，アフリカ707億トンと，熱帯雨林のジャングルが分布している地域に木質バイオマスが豊富に存在し，オセアニアのような乾燥地域では乏しい。しかし，世界のバイオマス賦存量は4217億トンであるから，地域的に偏在してはいても，潜在的には，世界的にエネルギーとして利用可能ともいえる。

同様にして，国際エネルギー機関（IEA）は，火力発電による電気エネルギーを熱エネルギーとして換算した一次エネルギー供給（TPES）を推計し，それを石油換算した値を公表している。それによれば，2007年の世界の一次エネルギー供給は，120.3億トンで，その発生源別分類は，石油34.3%，石炭26.5%，天然ガス20.9%，バイオマス9.8%，原子力5.9%で，バイオマスはエネルギー供給量の上で，原子力よりも高い比率を誇っている。

南北比較をすると，先進工業国（OECD 諸国）のバイオマスエネルギー供給量は石油換算2.2億トンと，総供給量に占める比率（バイオマス比率）は4.0%と低いのに対して，開発途上国（非 OECD 諸国）は9.5億トンと15.4%を占め，開発途上国のバイオマスエネルギー供給は，先進工業国の4.3倍に達している（表 5 参照）。バイオマス比率は，アフリカ47.0%，中南米19.6%，アジア24.5%と開発途上国が主な利用地域となっていて，再生可能エネルギーの利用が盛んな地域は，薪炭の普及している開発途上国であることが明らかである（表 5 参照）。

表5　地域別のバイオマスエネルギーの利用状況（2007年）

（単位：石油換算100万トン）

	総エネルギー	バイオマス	バイオマス比率（%）
OECD 諸国	5497.1	221.1	4.0
北米	2793.6	102.2	3.7
OECD 加盟の欧州	1827.0	102.4	5.6
日本以外のアジア太平洋	363.2	9.1	0.5
日本	513.5	7.4	1.4
非 OECD 諸国	6201.6	955.3	15.4
アフリカ	629.0	295.4	47.0
中南米	550.4	108.1	19.6
中国以外のアジア	1376.6	337.6	24.5
中国	1969.5	194.6	9.9
OECD 未加盟の欧州	105.9	6.4	6.0
旧ソ連	1018.5	12.1	1.2
中東	551.6	1.2	0.2
世界	12029.3	1176.4	9.8

注1）総エネルギーは，IEA の一次エネルギー供給（TPES）。1TJ＝石油換算23.9t。
注2）バイオマスは可燃性のバイオ液体燃料と廃棄物。
出所）IEA（2009a）*Energy Balance of Non OECD Countries 2006-2007 2009 Edition*, IEA（2009b）*Energy Balance of OECD Countries 2006-2007 2009 Edition* より作成。

（2）現代的バイオマスエネルギー

バイオマスエネルギーは，薪炭，製紙から排出される産業廃棄物（黒液，チップ廃材），農林畜産業から排出される農業廃棄物（間伐材，もみ殻，牛糞），家計と事務所から排出される一般廃棄物（ごみ，廃油）を燃焼して得られるもので，形態として，熱エネルギーと電気エネルギーがある。

可燃性の再生可能一次エネルギー及び廃棄物を用いるバイオマス発電の発電電力量は，先進工業国（OECD 諸国）では，1971年の5967ギガワット時から2007年の21万7258ギガワット時に36倍に急増し，先進工業国のバイオマスエネルギー電化率は40%を超えている（図1参照）。この間のバイオマスの生産量は8158万トン（石油換算）から2億2180万トンへと2.7倍の増加にとどまっているから，バイオマス発電の普及は，バイオマス生産を遥かに上回った。

先進工業国では，バイオマスをストーブ，窯，囲炉裏で燃焼する利用方法は，燃え殻，灰の除去，処分に手間がかかり，手を汚すために，行われない。手を汚さず汎用性もある電化利用に重点が置かれているのである。こうして，先進工業国（OECD 諸国）では，バイオマス電化利用が急速に拡大した結果，2007年時点でバイオマスの発電量は22万ギガワット時近くまで増加し，開発途上国（非 OECD 諸国）の4.1万ギガワット時を遥かに上回っている（図1参照）。

他方，開発途上国のバイオマスエネルギーは，自家用を中心とした無償エネルギーであり，

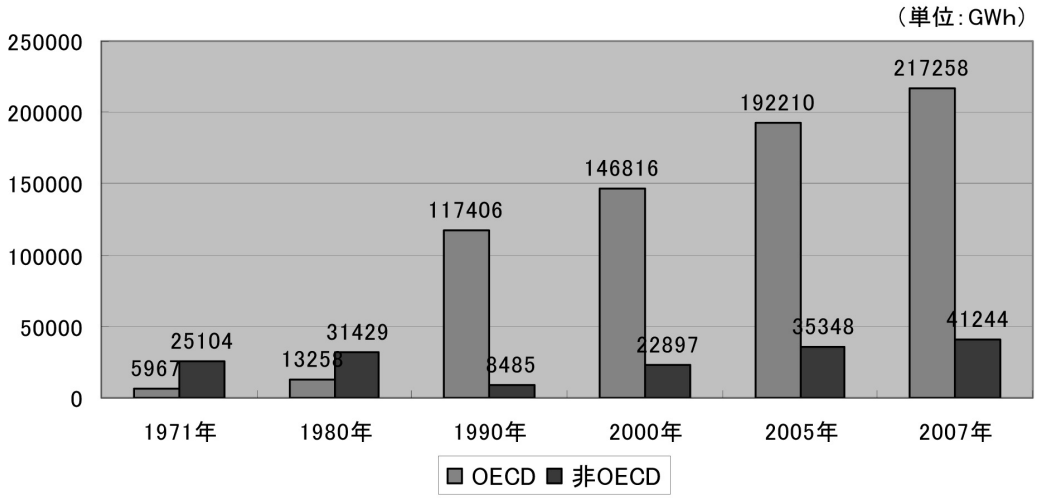


図1 可燃性再生可能エネルギー及び廃棄物からの発電量
出所）IEA（2009a）*Energy Balance of Non OECD Countries 2006-2007 2009 Edition* より作成。

先進工業国のような商業エネルギーではない。薪炭は採取と運搬に労力が必要で，乾燥させ保管する場所も用意することが求められ，直接燃焼に伴う排煙，灰・燃え殻の処理もしなければならない（写真３・４参照）。このように伝統的バイオマスの直接利用は，労力という汗，燃焼以降の排煙・汚れを伴うのであって，利用方法の上では，「クリーンエネルギー」とみなすことはできない。対照的にバイオマスを電化利用している先進工業国の市民は，スイッチ一つで手を汚さずに使用できる。この利便性が，バイオマス電化利用が普及した一つの理由である。

21世紀に入ってから，バイオガス発電以上に注目を集めたのは，バイオ液体燃料である。これは，先端的技術によって，トウモロコシ，サトウキビ，テンサイ（砂糖大根）などを原料にして生産されたバイオアルコール類であり，伝統的に利用されてきた大豆，菜種など植物油（植物性油脂）から生産されるものも含めて，一般的にはバイオ燃料（biofuel）と呼ばれる。

バイオアルコール類には，バイオエタノールとバイオディーゼルがある。バイオエタノールは，トウモロコシ，サトウキビなどの糖質またはデンプン質の作物を原料として，これを発酵させ，エタノールに蒸留してつくられる。これに石油系ガスのイソブデンを合成したのがバイオ ETBE である。しかし，廃材などの木質系バイオマスを原料としてセルロースを発酵・醸造し，糖化することでエタノールを製造する方法が実用化されつつある。他方，バイオディーゼルは，油糧作物（ナタネ，ヒマワリ，パーム）や廃食用油といった油脂を原料として製造され，軽油を代替できる液体燃料である。

これらバイオ液体燃料は，エネルギー作物を糖化し，液体燃料に転換してエネルギーとしたことで，体積・重量当たりの発熱量が高く，輸送や保管の取り扱いが便利である。このように固形バイオマスにはない利便性のために，バイオ液体燃料の生産は急増し，新しい自動車燃料としての期待が高まり，カーボンニュートラルの特性から，地球温暖化対策，エネルギーの安全保障，農村振興を目的に，税制上の優遇措置，補助金支給の対象ともなった。



写真 3 ：枯れ木・倒木を利用した薪採取。高齢者が会話しながら仕事する。



写真 4 ：人力による薪の運搬。親子の労力を踏まえれば利用に限度がある。

IEAでは，運輸部門に利用されるバイオマス液体燃料をバイオ燃料（biofuel）と呼称しており，世界のバイオ燃料供給量（石油換算）は，2000年918万トン，2009年5210万トンと急増した。この2009年のバイオマス液体燃料の供給量は世界の一次エネルギー供給量（石油換算）121.5億トンの0.43%，運輸部門の燃料消費の2.3%に相当する。2007年の国別バイオエタノール生産比率は，米国49.4%，ブラジル37.8%，EU4.6%で，バイオディーゼルは，EU58.6%，米国20.0%となっている。2003年のEUバイオ燃料指令でも，2010年までにバイオ燃料導入比率を運輸燃料の5.75%とする数値目標が，2005年の米国エネルギー政策法でバイオエタノール導入量を75億ガロン（2839万キロリットル）とする数値目標が定められていた。

ここで，バイオ液体燃料の政策的導入が図られるようになると，バイオ液体燃料の需要が急増するとの予測のもとで，民間の投機的資金が投入されるようになり「バイオ燃料ブーム」が到来した。そして，先物市場での期待も高まり，エネルギー作物の価格が高騰したため，バイオ液体燃料と食糧との競合が生じた。また，エネルギー作物増産に伴う土地改変の悪影響，バイオ液体燃料の生産から消費までのライフサイクルアセスメント（LCA）の進展によるカーボンニュートラルへの疑問も指摘されるようになった。そこで，2008年の洞爺湖サミット以降，LCAを踏まえたバイオ燃料の持続可能性基準を策定する動きが出てきた。

2008年のEU再生可能エネルギー利用促進指令は，原案の段階から開発途上国による反発を受けたが，これは自由貿易の原則を環境保全を理由にゆがめてしまうという理由からである。EUは2020年に運輸燃料の10%をバイオ燃料とするとの目標を定めたが，バイオ燃料普及のためには，国内生産では不足し，輸入に頼らざるを得なくなった。そこで，EU再生可能エネルギー利用促進指令第17条で規定されたバイオ燃料の持続性基準を緩和し，2008年1月以降の生産という時間的条件を加えて，バイオ燃料の土地利用（泥炭地，草地，自然保護地，高度な生物多様性を有する土地，森林地区）に言及した。また，温室効果ガス削減についても，2017年以降，バイオ燃料利用に伴う温室効果ガスは化石燃料に比して50%以上削減（2017年以後に新たに生産するものは60%）という規定を盛り込んだ[4)]。

日本では，2010年3月，経済産業省の「バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会」の報告書が，バイオエタノールなどの製造や輸送時に排出されるCO_2をガソリンの50%以下とする基準を設けた。この基準は，ブラジルの既存農地で収穫されたサトウキビから生産されたバイオエタノール以外では満たすことができないと考えられ，日本もバイオETBTの輸入をしている。

開発途上国からは，バイオ燃料の生産プロセスにまで踏み込んだ環境基準の策定に反発する動きもみられる。先進工業国の求める環境基準のどこまでが，国内産業（農業やバイオ燃料産業）保護のための環境保護を名目にした非関税障壁となるのか，その基準のあり方を巡った論争が起こった。つまり，バイオ液体燃料貿易に環境基準が設定され，貿易と環境を巡る新たな南北問題が生じているといえる。

しかし，根本的な問題は，先進工業国では燃料となるバイオマスを国内供給するだけの生産能力がないために，増加するバイオ液体燃料の需要を満たすためには，開発途上国からの輸入に頼らざるを得ないという点である。そして，バイオ液体燃料の輸入・輸送に伴う化石燃料消

費をふまえると，このバイオ液体燃料の輸送に伴う資源マイレージの大きさのために，先進国工業国の国内レベルでは成り立つカーボンニュートラルも，グローバルには成り立たないことになる。日本でガソリンをバイオ ETBE に代替しても，資源マイレージを含めた LCA によれば，代替した化石燃料の排出する温室効果ガスの何割かを削減できるだけにとどまってしまう。そうであれば，バイオ液体燃料は，再生可能エネルギーであるとは言えなくなってしまう。

3. バイオ液体燃料の非持続可能性

（1）高価格に伴う費用負担

バイオ燃料の問題点として，トウモロコシ等の食糧を原料にしたバイオ燃料の生産が食糧価格の高騰を引き起こし，アフリカの食糧危機の一因になったことが指摘されている。その結果，次世代バイオ燃料といわれるセルロース系の非食糧を原料としたバイオ燃料の導入に向けた政策が注目されているが，2008年版世界食糧機関（FAO）『世界食料農業白書』のなかで，インドなどでの非食糧のエネルギー作物であるジェトロファについても大量生産に伴う土地利用の変化と環境への悪影響が懸念されている。

こうしたなか，開発途上国から先進工業国に向けたバイオ燃料輸出が増加しているが，その背景には，資源が安価で豊富な開発途上国が，バイオ燃料を新たなアグリビジネスとして促進し，輸出を拡大しようとする思惑も指摘できる。

他方，先進工業国がバイオ燃料政策を維持するためには，輸入に頼らざるを得ず，バイオ液体燃料の貿易は拡大することが見込まれるが，その第一の理由として，先進工業国におけるバイオ液体燃料の生産費用の問題をあげることができる。バイオ液体燃料の生産費用がガソリン純価格（税抜き）より安い国はブラジルのサトウキビを原料としたエタノールのみである。米国においては，2007年のエタノール（トウモロコシ原料）1リットル当たり価格は0.97ドルとガソリンの0.51ドルの1.4倍高価で，バイオディーゼル（大豆原料）1リットル当たり価格は0.65ドルでディーゼル（0.20ドル）より3.1倍高価である[5)]。ガソリン価格を下回る価格は，ブラジルのエタノール（サトウキビ原料）の0.27ドル程度で限られており，バイオ液体燃料の価格競争力は低い。つまり，バイオ燃料純生産費用はガソリン価格を上回るのであって，財政支援や税制上の優遇措置がない限り，市場に受け入れられる余地は大きくない。バイオ燃料生産費用の視点では，ブラジルのサトウキビ原料のエタノールだけが，有力な商品といえる。したがって，欧米では，生産コストとガソリン価格の差額以上に税・補助金を投入しない限り，バイオ燃料政策は持続できない。第二に，バイオ液体燃料生産費用の動向を見ると，今後の生産経費は一層の上昇が見込まれており，バイオ液体燃料の普及には不利である。2004年から2007年にかけてのガソリン価格高騰期には，エネルギー作物の価格も高騰した。米国では2004年から2007年にかけてガソリン価格は1.8倍だったが，バイオ液体燃料生産費用は1.5倍，EU では1.7倍に増加している。

つまり，バイオ液体燃料の導入によって，石油依存度の引き下げ，エネルギー源・輸入先の多様化，エネルギー安全保障への貢献は可能であるが，価格面からみると，①ガソリンよりも

高価であること，②バイオ液体燃料の大量生産によっても価格低下が困難なこと，から急速なバイオ燃料の普及は困難であると考えられる。

（２）環境面での持続可能性

バイオ液体燃料政策は，低炭素社会の形成に寄与することを謳っているが，アグリビジネスとしてエネルギー作物の大量生産が開始され，貿易も活発化することで，気候変動に対して負の効果が顕著になりつつある。そこで，バイオ液体燃料に次のような視点を加えて環境基準を導入しようとする動きが生まれた。

① エネルギー作物生産のための土地利用変化（森林減少など）と温室効果ガス排出への影響

② バイオ液体燃料貿易と移動に伴う資源マイレージと温室効果ガス排出への影響

つまり，バイオ液体燃料のライフサイクルアセスメント（LCA）を踏まえたエネルギー収支の議論をすることが重要となる。米国農務省の Shapouri らによる2004年の研究によれば，2001年の計測結果から，１ガロンのバイオエタノール生産に４万5802Btu（Btu＝１ポンドの水の温度を華氏度で１度上げるのに必要な熱量のエネルギー，253カロリー相当）の総エネルギー投入が必要であるが，バイオエタノールの総エネルギー産出は７万6330Btu であり，エネルギ

表６ バイオ液体燃料生産に伴うエネルギー収支の比較

	Shapouri *et al.*（2004）		Pimentel and Patzek（2005）	
	Btu/gal	（%）	Btu/gal	（%）
トウモロコシ生産	18713	100.00%	37890	100.00%
化学肥料生産	10177	54.40%	15333	40.50%
化石燃料・電力	6474	34.60%	6733	17.80%
種子［除草］	227	1.21%	2428	6.41%
農薬生産	1106	5.90%	4202	11.10%
農業機械	−	0.00%	4753	12.50%
灌漑	−	0.00%	1494	3.90%
労働者移動	594	3.17%	2157	5.69%
肥料等の運搬	76	0.41%	789	2.08%
エネルギー控除	−26251		−6685	
エタノール生産	49733		56441	
総エネルギー投入	45802		92482	
総エネルギー産出	76330		76330	
エネルギー収支	30528	40.00%	−16152	−21.20%

注１）Btu＝水１ポンドを華氏１度上昇させるのに必要な熱量で253cal 相当。

注２）トウモロコシ由来のエタノール生産に伴って，エタノール以外の生産物にもエネルギー投入がなされている。そこで，エネルギー控除は，これを差し引いているのでマイナスとなる。

注３）Shapouri *et al.*（2004）では，除草，農業機械，灌漑に要するエネルギー投入を除外。

出所）MathPro（2005）table 2より作成。

ー収支は３万528Btu のプラスになるとした（表６参照）。そこで，トウモロコシ由来のバイオエタノールの総エネルギー産出に対するエネルギー収支の比率を有効エネルギー比率と定義すれば，それは40.0%になる[6)]。

他方，米国農務省の研究結果とは逆に，コーネル大学の Pimentel と Patzek の研究によると，１ガロン相当のエタノールを生み出すトウモロコシ生産には，化学肥料１万5333Btu，化石燃料・電力6733Btu に加えて，農業機械や灌漑の整備に要したエネルギーも加算している。また，トウモロコシからエタノールを生成するために必要な熱，電力のエネルギー５万6441Btu を加え，エタノール以外の生成に要するエネルギー6685Btu を控除すると，総エネルギー投入は９万2482Btu となる。エタノール１ガロンのエネルギー産出は７万6330Btu で米国農務省の数値と同じであるが，エネルギー収支は差し引き１万6152Btu のマイナスとなる（表６参照）。このマイナスのエネルギー収支は，二酸化炭素の純排出量がプラスであることを意味し，有効エネルギー比率（マイナス21.2%）はカーボンニュートラルの基準０％を下回っている。

バイオエタノール生産の有効エネルギー収支がマイナスであることから，エネルギー安全保障・農業・経済・環境の上で利益にならない。そして，30億ドルのバイオマス生産に対する米政府の補助金は，水・大気・土壌の環境汚染を招くだけであり，補助金は農家ではなく，エタノール生産企業のためのものだと批判されたのである。

エネルギー収支の試算方法は，対象をトウモロコシの主要産地９州のデータに限れば，全米50州とするよりも，収支は正の値に傾く。他方，コーネル大学の研究では，農耕機械，灌漑の整備に要したエネルギーを加算して計測した結果，エネルギー収支はマイナスとなり，バイオ液体燃料の環境面での有効性は否定される。

このようにバイオ燃料生産に伴うエネルギー収支については，専門家の間でも，意見が分かれている。その理由は，バイオ燃料の生産の過程で投入するエネルギーの計算方法によって結果が左右される傾向が指摘できる。しかし，上記のエネルギー収支の研究でも，バイオ液体燃料の資源マイレージ，すなわち重油を消費する船舶で数千マイル燃料を輸送する際に投入されるエネルギーは加味されていない。欧州，日本のように，バイオ液体燃料輸入を海外から輸送，輸入する貿易国にとって，バイオ液体燃料の資源マイレージは大きく，ますますバイオ液体燃料の環境面での優位性は否定される。

4．固形バイオマスの有用性

（１）木質バイオマスの優位

地球温暖化問題が世界的に注目される中，二酸化炭素排出係数の低い再生可能エネルギーの利用拡大による低炭素社会の実現に向けた取組みが進展し，バイオマス，地熱，太陽熱，水力，風力から生産された再生可能エネルギーの供給量は増加する傾向にある。2005年には世界の一次エネルギー供給量114億3392万トン（石油換算）の11.4億トンがバイオマスである。そして，世界のエネルギー供給に対する再生可能エネルギー供給の内訳をみると，バイオマス10.0%，水力2.2%，地熱0.5%であり，バイオマスの占める割合が圧倒的に高い（表７参照）。

2007年のバイオマスエネルギーの内訳は，固形バイオマス・木炭72.9%，液体燃料2.4%，バイオガス1.1%，バイオマス発電0.9%であり，固形バイオマスが再生可能エネルギーの大半を占めるのは，開発途上国における伝統的なバイオマス利用を反映した結果である[7)]。

再生可能エネルギーといえば，ソーラーパネルを用いた太陽光発電や大型の風車と発電機を用いた風力発電，バイオマスのガス化・液体化・電力化利用といった先端技術を用いたものが注目を集めている。確かに，これらのエネルギー供給量は急速に拡大している。しかし，再生可能エネルギーの総供給量に占める割合は小さく，固形バイオマス・木炭の燃焼という伝統的な利用方法が，世界の再生可能エネルギーの大半を占めている。

日本においては，2008年の総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会『新エネルギー政策の新たな方向性―新エネルギーモデル国家の構築に向けて』で，2005年の再生可能エネルギー供給を試算している。ここでは，水力発電1732万 kℓ（原油換算），地熱発電570万 kℓ，新エネルギー1160万 kℓ として，一次エネルギー供給の5.9%を占め，他の先進工業国と同等以上の水準にあるとしている。この新エネルギーとは，石油代替エネルギーの導入を図るための概念で，「再生可能エネルギーのうち，その普及のために支援を必要とするもの」（新エネルギー部会中間報告，2006年11月）であり，太陽光発電，風力発電，バイオマス発電・熱利用等をあげている。

しかし，実際の新エネルギーの７割は，廃棄物発電とパルプ黒液であり，再生可能エネルギーとはいいがたい。この報告書では，太陽光発電，風力発電の急速な増加が詳細に述べられているが，日本の一次エネルギー供給の中に占める比重について語られることはないのは，その割合が１%に満たないからである。つまり，再生可能エネルギーの普及が政策目標になる中で，再生可能エネルギーの定義を歪めて対応しているのが現状である。

このように，再生可能エネルギー，新エネルギーとして，従来には無い新技術を駆使してク

表７　南北別一次エネルギー供給（2005年）

（単位：石油換算 万トン）

	世界		OECD		非 OECD	
	（万 t）	構成比（%）	（万 t）	構成比（%）	（万 t）	構成比（%）
石炭	289211	25.3	113027	20.4	176184	30.8
原油	407603	35.7	221866	40.0	185736	32.5
天然ガス	236154	20.7	121144	21.8	115010	20.1
原子力	72183	6.3	61143	11.0	11040	1.9
水力	25132	2.2	10926	2.0	14205	2.5
地熱等	5903	0.5	3982	0.7	1921	0.3
バイオマス	114651	10.0	19439	3.5	95212	16.7
総供給	1143392	100.00	554760	100.00	571536	100.00

注）エネルギーは，石油換算（万トン）。世界は，OECD と非 OECD の合計。
出所）IEA（2007）*Energy Balance of Non OECD Countries 2004-2005* より作成。

リーンなエネルギーが急速に拡張しているという印象を強めてはいるが，実際には，太陽光発電などの再生可能な電力エネルギーの供給は，バイオ燃料と同じく，限定的である。結局，日本でも再生可能エネルギーを論じる場合，バイオマス賦存量が多い固形バイオマス，とりわけ固形の木質バイオマスを無視することはできなくなっている。

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）では，「バイオマス・ニッポン総合戦略」の策定にあわせて，木質バイオマス，農業廃棄バイオマス，下水汚泥バイオマスの合計として，日本国内のバイオマス賦存量は２億735万トンと積算し，エネルギー作物の賦存量は，石油換算500万トン相当と見込んでいる。そして，NEDO の分析を踏襲した環境エネルギー政策研究所の「バイオマスによるエネルギー導入目標」は，長期目標として楽観的に算出できる2050年

表８　日本国内バイオマスによるエネルギー供給推定（2050年）

バイオマス系統	バイオマス種別	バイオマス賦存量	発熱量係数	一次エネルギー供給	石油換算供給量
		（万トン／年）	（GJ/t）	（PJ ／年）	（1000 t）
木質	林地残材・製材所廃材	1,350	15.6	249	5,204
	薪　炭	1,136	15.6	167	3,490
	建築廃材	1,440	15.6	265	5,539
	黒　液	278	15.6	270	5,643
	古　紙	826	14.1	137	2,863
	小　計	5,030	−	1,088	22,739
農業廃棄	稲ワラ	920	14.7	160	3,344
	もみ殻	126	14.7	21	439
	麦わら	82	13.6	13	272
	小　計	1,128	−	194	4055
畜産排泄	乳用牛	2,099	0.5	11	230
	肉用牛	1,854	0.5	10	209
	養　豚	2,251	0.5	13	272
	排卵鶏	681	10.5	89	1,860
	ブロイラ	495	16.0	100	2,090
	小　計	7,380	−	223	4,661
食品廃棄		2,242	2.1	58	1,212
下水汚泥		7,976	0.3	26	543
賦存量合計		23,756	−	1,779	33,210

注）１ジュール（1J＝0.278×10^{-6}kWh＝0.239cal），PJ（ペタジュール）＝1GJ×10^{6}。食品廃棄物バイオマスは，生活系・事業系の厨芥類と動植物性残渣。エネルギー作物については，バイオマス燃料への転換量が不明のため，除かれている。石油換算供給量は，一次エネルギー供給1PJ を石油２万3900トン相当として算出。

出所）環境エネルギー政策研究所2008年２月21日公表「バイオマスによるエネルギー導入目標」（http://www.isep.or.jp/event/080221sympo2050/backdata_biomass.pdf#search＝‘バイオマス エネルギー量推計’）より作成。

の潜在的供給を，木質バイオマス1088ペタジュール，農業廃棄物194ペタジュール，畜産排泄223ペタジュール，食品廃棄58ペタジュール，下水汚泥26ペタジュールとした（表８参照）。

NEDO は，広葉樹林の森林面積比率の高い日本の木質バイオマスを高く評価し，その開発，普及が可能であるとの前提に立っているようにもみえるが，木質バイオマスの供給源は，①建築廃材460万トン（乾燥重量），②製材残材500万トン，③林残材370万トン，であって，伝統的な薪炭とは関連しない産業部門の供給になる。

EU においても，2006年のバイオマスエネルギー78400万トン（石油換算）の内，62.4%が固形バイオマスでその利用内訳をみると，木材42%，木材廃材・ウッドペレット29%，有機廃材８%，黒液21%となっている[8)]。

したがって，先端的技術を用いた再生可能エネルギーは，先進工業国を中心に利用率が年々高まっているが，一次エネルギー供給に占める割合は，まだ限定的である。他方，固形バイオマス・木質バイオマスの燃焼という伝統的な利用方法が開発途上国で広まっており，世界の再生可能エネルギーという場合，その73%を供給している開発途上国のバイオマスを考察する必要があると思われる[9)]。

（２）バイオマスエネルギーの南北比較

ここで，再生可能エネルギーである固形バイオマスの利用率と一人当たり GDP の相関関係をみてみよう。2000年の国連ミレニアム・サミットで採択された国連ミレニアム開発目標では，2015年までに世界の貧困を半減させるなど，８つの目標と21のターゲットを定めている。目標の一つである「環境の持続性確保」の達成状況をはかるためのミレニアム開発指標の一つに，固形バイオマスを利用する人口の比率がある。

薪炭など固形バイオマスを利用する人口の比率は，ニジュール，マラウィ，タンザニアなどアフリカの後発開発途上国で95.0%，ケニア，コートジボワールといった一人当たり GDP が1500ドルを超える国でそれぞれ68.7%，77.2%，ASEAN 諸国では，ベトナム60.3%，インドネシア58.4%，フィリピン47.1%，タイ23.1%，日本，欧州，米国の先進工業国では最低値の５%未満である[10)]。つまり，固形バイオマスの利用率が高いほど，一人当たり GDP が低く貧困が蔓延している状況がうかがわれる。

南北別のバイオマスの部門別最終消費については，先進工業国の産業部門で消費されるバイオマスエネルギー7142万トンの9.9倍に当たる７億641万トンが開発途上国の民生家庭部門で消費されている。先進工業国においては，産業用7142万トン（46.5%）（その内，パルプ・印刷が4618万トン），運輸部門2348万トン（15.3%）と商業用エネルギーの利用が多いが，開発途上国においては，バイオマスエネルギー消費の80.7%が民生家庭部門であり，非商業エネルギー，特に自家消費分が多い[11)]。

つまり，再生可能エネルギーで大きな比率を占めているバイオマスエネルギーの中核は，先進工業国におけるバイオエタノール，バイオディーゼルなどバイオ液体燃料でも，バイオマス発電でもなく，開発途上国における薪炭，農業廃棄物，家畜の糞など固形バイオマスの直接燃焼という伝統的利用である。しかし，この再生可能エネルギーの実情が等閑視されてきたため

に，開発途上国のエネルギー利用の効率向上の取り組みは未だに端緒についたばかりである。国際協力として，開発途上国における固形・木質バイオマスの効率的利用を促す支援が拡充されるべきであるというのが本稿の立場である。

5. 開発途上国のバイオマスエネルギーの利用可能性

（1）ローカル・コモンズとしてのバイオマス

世界食糧機関（FAO）の林産物生産量で，原木の目的別利用状況から，木質燃料の利用状況を概観することできる。例えば，2009年にフィリピンでは，原木の年間生産量1627万立方メートルのうち，1247万立方メートルが木質燃料として利用され，残り380万立方メートルが産業向け用材として，製材品，合板，紙・パルプ等に利用されている。マレーシアでは，2299万立方メートルの原木生産のうち，286万立方メートルが木質燃料として利用されている。

しかし，開発途上国における森林，とりわけ天然林の減少の問題が指摘され，木質バイオマスの新規利用を拡大する余地は少ないと考えられる。政府，企業，地域住民が協力して，植林を行い，造林によって，木質バイオマスの賦存量を増加させることは可能であるが，その費用は決して安価なものではないであろう。他方，未利用あるいは粗放的に利用されている木質バイオマスを低い費用で生産する，あるいは既存の木質バイオマスの利用効率を向上させることは十分に可能であると考えられる。

住民による木質バイオマス利用は，居住地域内の森林，里山で，柴刈り，枝打ちによって採取した薪として，調理，給湯，暖房に直接燃焼するもので，無償利用される場合が多い。しかし，薪採取は，財産権の無い公有地（国有地や州有地）の森林に不法侵入し，樹木を伐採して得られるというわけではない。堆肥にする落ち葉拾い，木の実や山菜を採取と同様に，薪と木質バイオマスは，住民が柴刈りや枝打ちをし，落ちている枝を集めることで採取される（写真５参照）。木質バイオマスの存在している森林も，住民が共同利用するローカル・コモンズと位置づけられているのである。

ローカル・コモンズとは，コミュニティやメンバーが利用権（入会権）を行使できる空間であり，自然共有財産として長年機能してきたのであり，欧州でも中世以来，各地に広がっていた。しかし，近世になって，牧草地に多数の農民が放牧するようになると，牧草地の状態よりも利益を求める傾向から，過剰な放牧を行うようになり，牧草地を守る道徳的倫理観欠如というモラル・ハザードから，ハーディンのいう「コモンズの悲劇」をもたらすとされた。

つまり，他の経済主体の活動を制約できない非排除性と，自由財としての無償性をあわせもつローカル・コモンズは，個人の利益最大化行動によって，収奪的利用が促され，結果として，資源の減少とコモンズの荒廃という外部不経済が引き起こされることになる。したがって，誰でも自由に利用できるオープン・アクセス状態のコモンズで，資源を劣化させる傾向を抑制するには，適正なコモンズ管理のために，私的所有制による分権化，市場への内部化，あるいは国有化による統制管理が必要であると指摘された。

しかし，コモンズの悲劇を，開発途上国における貧困世帯が無償で採取する里山の薪のよう



写真 5 ：柴刈りによる薪採取。少年でも可能な仕事で，樹木を根元から伐採するのではない。

なバイオマスに当てはめることは，できないのではないか。ローカル・コモンズとは，地域コミュニティ住民など限定的なメンバーが利用する，会員制クラブ財，あるいはコモンプール財である。したがって，メンバーは，故意に他人の利益を侵害しようとは思わないが，資源収奪的利用に陥れば，ローカル・コモンズは劣化してしまうリスクが存在する。そこで，コモンズから得られる利益を長期的に安定化させ，同時に，コモンズの保全を図るために，コモンズを荒廃させるような利用は避けなければならず，コモンズの悲劇に陥るリスクを回避するはずである。

こうして，地域コミュニティでは，メンバー間の情報共有，モニタリングから，モラル・ハザードが抑制され，ローカル・コモンズを巡る過当競争に陥るのを避けるように，持続可能な利用が行われていると考えられる。つまり，地域コミュニティの住民は，コモンズからの利益を安定化させ，コモンズ保全の機能を担っているのであって，貧困世帯にとって無償の木質バイオマス利用の利益が大きい以上，薪採取する森林・里山をローカル・コモンズとして保全し，持続可能な利用を図る必要が生まれてくる。

（2）伝統的バイオマスエネルギーの否定的見解とその再考の可能性

世界の再生可能エネルギーの中核は，開発途上国における家庭部門の自家用バイオマスで，

これは，日々の調理，照明，暖房に用いられる薪炭，農業廃棄物，家畜の糞など伝統的バイオマスである。

国連ミレニアム開発目標について，固形バイオマス利用と貧困の関連が分析されているが，国別の固形バイオマスを利用する人口比率（2007年）は，カンボジア91.0%，中国49.0%，ベトナム60.3%，インドネイア58.4%，フィリピン47.1%，スリランカ73.8%，インド59.7%など，アジア諸国で依存度が高い[12)]。また，IEA（2009f）によると，世界人口の37%に当たる25億人が伝統的バイオマスを利用し，今後も2030年までにその利用人口は27億人に増加すると推計されている。

このように，固形バイオマスは，開発途上国の貧困世帯における重要なエネルギー供給源となっているが，以下の理由から健康，経済，環境に悪影響を及ぼすことから否定的に扱われることが多い。

① 木質バイオマス（薪炭）が森林バイオマスの減少を招くこと
② 地域の大気汚染の原因となること
③ 近代的エネルギーと比較して熱効率が悪いこと
④ 木質バイオマスの採取が女性や児童労働の要因になること
⑤ 燃焼に伴う灰が健康上有害であること

具体的には，WHO（2006）が，固形燃料の利用による室内の大気汚染のため，年間150万人が死亡していると試算し，IEA（2006）は，150万人の85%に当たる130万人がバイオマス，残りは石炭が原因になっていると指摘している。同じくWHOによれば，原因別の年間死亡者数では，マラリア120万人，結核160万人，HIV/AIDS280万人と比較して，バイオマスはマラリアを超える死因となっている。また，IEA（2006）は，事例として，タンザニアの農村部における薪集めの移動距離を示し，平均移動距離は，最大で中央部のシンギダで毎日10キロメートル，次いで西部タンガニカ湖近くにおいて毎日５キロメートルであると紹介し，それが子どもの教育，特に女性の就学問題に影響していると指摘している。国連ミレニアム開発目標においても，環境問題の一環として，固形バイオマスを利用する人口の割合を指標化し，その削減を求めている状況にある。

Bhattacharya *et al.*（2000）は，アジア７か国（中国，インド，ネパール，パキスタン，フィリピン，スリランカ，ベトナム）のバイオマスについて，木質燃料，農業廃棄物，動物の糞，木炭の４種類に分類し，その利用状況とそこから排出されるCO_2やSOx等の量を試算している。その結果，バイオマス消費の内訳は，中国が農業廃棄物63%，インドが動物の糞29%，パキスタンが動物の糞21%など，バイオマス利用の中心が木質燃料となっていることを指摘している。また，そこでは調理用ストーブ（コンロ）に用いるバイオマスの不完全燃焼によって，CO，CH_4，TSP，SOx，NOxの排出量を増加させ，室内空気汚染によって健康上の問題を引き起こすことを示唆している。

調理用ストーブの利用効率改善に対する問題意識については，Miah *et al.*（2009）のバングラディシュ農村部でのアンケート調査によると，調理用ストーブを改善したいと考えている女性は，経済的余裕がないにもかかわらず，83%を占め，金銭的な制約から，ストーブの改善は

希望していないと答えた者は17%にとどまり，コンロを改善したい理由は，煙の健康被害をあげていることを報告している。

開発途上国で，電気など近代的エネルギーが利用困難・未整備の地域では，農外雇用機会に乏しい状況で，手間をおしまないことから，薪採取が盛んであるが，石を並べたストーブの効率の悪さが，バイオマスエネルギーの無駄使いを招き，経済，環境，健康に悪影響を与えている可能性がある。したがって，薪炭を燃焼させる調理用ストーブの改善が課題となると考えられる（写真６・７参照）。つまり，地域コミュニティの住民が，ローカル・コモンズの収奪的利用を回避している状況を維持して，住民を持続可能な開発の担い手として位置づけるには，固形木質バイオマスの利用効率を高めるような援助を行うことが，有効であって，これが草の根民活の育成に繋がると考えられる。

（３）開発途上国の地域コミュニティにおけるバイオマスの国際協力

国際協力に当たって，技術協力の重要性が指摘されるが，固形バイオマス利用，すなわち薪炭，に加えて，動物の糞，麦わら，籾殻，ココナツの殻など農業廃棄物の利用効率改善によって，バイオマス消費節約，バイオマス利用による健康被害の減少に寄与する方法が問題となる。実際，開発途上国の地域コミュニティでは，薪炭で煮炊きをする際，数個の石を並べた炉，鉄棒を湾曲させて作った炉で行う場合が多い。これでは，空気と火力の調整が難しく，本来，バイオマスから取り出し，利用できる熱量よりも少ないエネルギーしか利用できない[13)]。そこで，粘土やコンクリートを材料として，エネルギー転換率の高い調理用ストーブを作成，配布して，薪炭など固形バイオマスを節約することが考えられる。

米国援助庁（USAID）は1980年代から開発途上国の薪炭生産用のアグロフォレストリー，熱効率を改善した改良ストーブ，バイオガス回収利用などの実用性を調査し，ストーブの形状，特に空気取り入れ口の大きさと形，薪の燃焼方法に配慮した改良コンロの設計･試作，配布を行った。つまり，バイオマスエネルギーの効率を高めるには，地域コミュニティの実状に見合った安価な中間技術を開発し，それを普及することが重要である。また，開発途上国では，自然エネルギー，バイオマスエネルギーなど自然条件，農業，森林を活かしたエネルギーを有効活用する余地が地方で多く，民間部門，特に家計における調理・炊事・暖房用燃料として利用されているため，開発途上国における再生可能エネルギーとしてのバイオマスの効率的利用を図るために，本稿の結論として，以下の点を提案したい。

① 地域コミュニティの住民によるローカル・コモンズとしてのバイオマスの収奪的利用を回避している状況を評価して，住民を持続可能な開発の担い手として位置づけ，住民参加型の伝統的バイオマスの管理とその効率的利用を図る。

② 木質バイオマスの効率向上のための技術協力として，改良されたコンロを配布して，バイオマスの消費節約に努めると共に，地域コミュニティ林の育成のための小規模無償援助やマイクロファイナンスなど資金支援を行う。

③ 地域コミュニティ林では，畑作・果樹栽培・薪炭採取を含むアグロフォレストリーが行われているが，この森林と農地の立体的利用の中に，炭素貯蔵（温暖化対策），生物多

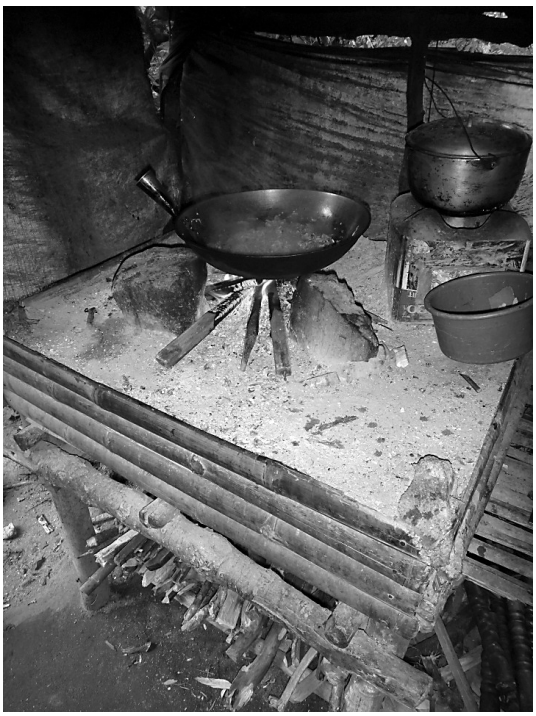


写真６：石を並べた囲炉裏（中央）よりもコンクリート製ストーブ（右奥）は熱回収効率が高い。炉の周りは灰が積もり、下には薪が保管されている。薪炭はクリーンではない。



写真７：熱回収効率の高い大型ストーブ（コンロ）が200ペソ（約400円）で販売。

様性保全，再生可能エネルギーの開発に連携させて，森林・農地の多面的機能を拡大させる。

④ 以上により，ローカル・コモンズの社会的意義とコモンズ管理に対する公的支援の正当性を再評価し，貧困世帯の生活維持と環境保全を図る。

現在，日本では，薪炭など木質バイオマスが世界の再生可能エネルギーの中で中核を占めている状況が等閑視されているが，地域コミュニティのローカル・コモンズで採取される木質バイオマスの管理と保全が，重要な国際協力に繋がると考えられる。

注

1）19 世紀前半の蒸気機関車は，Basil Hall（1829）*Travels in North America in the Years 1827 and 1828*（*Volumes1, 2, 3*），Simpkin and Marshall 参照。

2）バイオマスエネルギー利用人口は，Mustafa Balat and Günhan Ayar（2005）および鳥飼行博・万城目正雄（2009）参照。

3）IEA（International Energy Agency）は日本，韓国，アメリカ，欧州など 27 カ国が加盟する国際機関で，エネルギー政策立案，エネルギー安全保障，エコ（経済発展と環境保全）を目標としている。

4）EU の再生可能エネルギー促進指令（2008 年 12 月 17 日）は，European Parliament（http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+TA+P6-TA-2008-0609+0+DOC+XML+V0//EN&language=EN#BKMD-1）参照。

5）バイオ液体燃料の価格は “Biodiesel Performance, Costs, and Use” U.S. Energy Information Administration（http://www.eia.gov/oiaf/analysispaper/biodiesel/pdf/tbl3.pdf）を，バイオ液体燃料の生産経費は OECD-FAO（2008）（http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/550/en/AgOut2017E.pdf）参照。

6）バイオ液体燃料のエネルギー収支については，鳥飼行博・万城目正雄（2009）参照。

7）バイオマス利用は，IEA（2009e）*Renewable Information 2009* 参照。

8）EU の再生可能エネルギーについては，EurObserv’ER Barometer に掲載されている Solid Biomass Barometer 2007 を参照した。

9）固形バイオマスを中心とした世界の再生可能エネルギー利用は，鳥飼（2007）第 7 章，Millennium Development Goals Indicators（http://unstats.un.org/unsd/mdg/Data.aspx）参照。

10）後発開発途上国とは，低所得，健康面での不安，製造業や輸出産業の不調を表す基準を満たす開発途上国で，国連が重点的な援助国として定めた。バイオマス利用人口の動向は，IEA（2006）*World Energy Outlook 2006* 参照。

11）部門別の利用状況は，IEA（2009a）*Energy Balance of Non OECD Countries 2006-2007 2009Edition* 参照。

12）国連ミレニアム開発目標は，Millennium Development Goals - United Nations（http://www.un.org/millenniumgoals/）参照。

13）固形バイオマスを燃焼させる調理用ストーブの改善は，鳥飼（2007）pp. 289-291 参照。

参考文献

Bhattacharya S.C.*et al.*（2000）*Emissions from Biomass Energy Use in Some Selected Asian Countries* Energy 25 2000 pp. 169-188

David and Patzek Tad W.（2005）“Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower”, *Natural Resources Research,* Vol. 14, Number 1

Division of Energy Research and Development, Ministry of Science, Technology and Energy（1984）

"Industrial Biogass: A Feasibility Study of Waste Utilization from Agro-Industry in Thailand" National Energy Administration, Ministry of Science, Technology and Energy

FAO（2009）*State of the World's Forests 2009*, FAO, Rome

Forest Products Research Division, Ministry of Agriculture and Cooperatives（1984）"Improoved Biomass Cooking Stove for Household Use" National Energy Administration, Ministry of Science, Technology and Energy

Hardin, G.（1968）"The Tragedy of the Commons", *Science*, Vol. 162

IEA（2006）*World Energy Outlook 2006*, OECD/IEA, Paris

IEA（2007）*Energy Balance of Non OECD Countries 2004-2005 2007 Edition* OECD/IEA, Paris

IEA（2009a）*Energy Balance of Non OECD Countries 2006-2007 2009 Edition* OECD/IEA, Paris

IEA（2009b）*Energy Balance of OECD Countries 2006-2007 2009 Edition*, OECD/IEA, Paris

IEA（2009c）*Energy Statistics of Non OECD Countries 2009 Edition*, OECD/IEA, Paris

IEA（2009d）*Energy Statistics of OECD Countries 2009 Edition*, OECD/IEA, Paris

IEA（2009e）*Renewable Information 2009*, OECD/IEA, Paris

IEA（2009f）*World Energy Outlook 2009*, OECD/IEA, Paris

Jashimuddin.M *et al.*（2009）*Preference and Consumption Pattern of Biomass Fuel in Some Disregarded Villages of Bangladish* Biomass and Bioenergy 30 2006 pp. 446-451

MathPro（2005）"*The Net Energy Value of Corn Ethanol: Is it positive or negative?*" MathPro Inc. Maryland

Miah Danesh Md *et al.*（2009）*Wood Fuel Use in the Traditional Cooking Stoves in the* Pimentel

Rural Floodplain Areas of Bangladesh: A Socio-Enviromental Perspective Biomass and Bioenergy 33 2009 pp. 70-78

Mustafa Balat and Günhan Ayar（2005）"Biomass Energy in the World, Use of Biomass and Potential Trends" *Energy Sources*, Vol. 27: 931-940, 2005

OECD-FAO（2008）*Agricultural Outlook 2008-2017*. OECD-FAO

Shapouri Hosein, Duffield James, McAloon Andrew, Wang Michael（2004）"The 2001 Net Energy Balance of Corn-Ethanol", *Proceedings of the Conference on Agriculture as a Producer and Consumer of Energy*, Arlington, VA., June 24-25

WHO（2006）*Fuel for Life: Hous ehold Energy and Health*, WHO, Geneva

世界銀行（2003）『世界開発報告 2003　ダイナミックな世界における持続的開発―制度・成長および生活の質を転換する』シュプリンガー・フェアラーク東京

鳥飼行博（2007）『地域コミュニティの環境経済学―開発途上国の草の根民活論と持続可能な開発』多賀出版

鳥飼行博・万城目正雄（2009）「バイオマスエネルギーの新利用形態の将来性」『経済政策ジャーナル』第 6 巻第 2 号日本経済政策学会

山本幸一他（2007）「アセアン諸国における木質バイオマスの利活用」『日本エネルギー学会誌』86 巻 6 号

Abstract

Biomass Energy and Developing Countries:

Firewood as Residential Renewable Energy

Yukihiro TORIKAI

The purpose of this paper is to learn about today's biomass energy, and environmental impacts of biomass energy development, including global impacts from biomass production, preprocessing, and transportation from the view point of the LCA (life cycle assessment). I find its importance of the traditional technology that can be used to reduce environmental impacts by developing renewable energy, especially solid biomass.

The IEA (International Energy Agency) defines renewable energy is derived from natural processes or directly from the sun and from heat generated deep within the earth. Included in the definition is heat and electricity generated from biomass, solar, wind, ocean, hydropower, geothermal resources, and biofuels. To many people living in the developing countries, the most familiar forms of renewable energy are the wind and the sun or renewable energy from electricity. However renewable energy is derived from natural processes and in its various forms biomass (plant material and animal waste) is the oldest source of renewable energy from heating, used since our ancestors learned the secret of fire. Woody biomass is the most important renewable energy source on the earth. Developing countries are the biggest users of today's biomass energy where it is the main source of energy from firewood. In some developing countries it provides over 70% of the energy used in the form of traditional fuels in their household.

Biomass can be burnt directly or it can be converted into solid woods, liquid and gaseous fuels using conversion technologies such as fermentation to produce bio-alcohols and bacterial digestion to produce biogas or gasification to produce natural gas substitute. Burning firewood or plant biomass as a solid biofuel source result not to increase net carbon emissions since the biomass energy has a character of carbon natural. Firewood will only release the amount of carbon they have absorbed during growth although burning wood fuel in an open fire is both inefficient and polluting air due to low temperature partial combustion. Energy crops are grown on farms in developing countries and in ways that displace or otherwise reduce food production, and increases net carbon emissions during using agricultural machines, pesticide and fertilizer.

Wood-in contrast to fossil fuels-is a renewable resource and firewood is typically a sustainable source of energy in local communities of developing countries. Local residents in the community leave main part of trees, and use branches and dead trees on-site after forest harvests. Community forest managers provide good opportunities to maintain sustainability of the forest, reduces erosion and provides free energy to the habitat skateboards. Designing improved wood burning heating stoves is important to making a burning fireplace more efficient.