エネルギーと農業・土地利用を考慮した インドネシアにおける低炭素社会シナリオの構築

大沢遼平¹・五味 馨^{2*}・松岡 譲³

¹非会員 丸紅株式会社海外電力プロジェクト第三部電気事業第一チーム (〒100-8088 東京都千代田区大手町 1-4-2)

²正会員 国立環境研究所社会環境システム研究センター (〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

³正会員 京都大学大学院工学研究科 教授 (〒606-8530 京都市西京区京都大学桂)

*E-mail: gomi.kei@nies.go.jp

今後、人口増加と経済発展が見込まれる東南アジアの新興国のうち、特にインドネシアにおいてはその人口規模の大きさと森林面積の広さ、バイオ燃料の生産ポテンシャルを含む農業生産の高さなどから将来のGHG排出量増加とその抑制とが世界的な温暖化緩和において重要になると考えられている。このような人口・経済ともに成長中で今後の食料とエネルギー需要の増加が見込まれ、かつ、農林業・土地利用部門からのGHG排出量の割合が比較的高い地域で低炭素社会を構築するため、本研究では社会経済発展の想定を取り込み、エネルギー・農業・土地利用の各部門を統合的に考慮した低炭素社会シナリオの構築手法を開発した。これを2020年及び2050年のインドネシアに適用し、低炭素対策を導入しないBaU及び低炭素対策の違いにより三通りの対策(CM)シナリオを構築し、総合的な低炭素社会シナリオの中で、燃料作物栽培のための土地利用転換による排出も含むバイオ燃料の利用による正味の効果を考慮する例を示した。

Key Words: low-carbon society, climate change, bio fuel, Indonesia, land-use change

1. 背景と目的

21 世紀に入り、先進工業国(以下、先進国)の経済成長が緩やかになるのとは対照的に、東南アジア諸国の急速な経済成長が目立つようになってきた。GDP 成長率でみると、2014 年度は先進国が 2.0%と予想されているのに対し、ASEAN-5 と呼ばれる国々(GDP 規模において東南アジアの上位五か国であるインドネシア、タイ、マレーシア、フィリピン、ベトナム)では5.1%から7.3%となっている¹⁾。その結果、それらの地域におけるエネルギー消費量が増え、人為起源の温室効果ガス(Greenhouse Gas; GHG)の排出量が増加すると考えられる。そのような状況の中、世界各国では自主的な GHG 排出削減目標の策定が進んでおり、東南アジアの経済成長を考える上で重要視されているインドネシアもその国の一つである。World Resource Institute によると2011 年においてインドネシアの GHG 排出量は世界の国の中で第 5 位である²⁾。今後も人口が増えたと予想されており、GDP も成長中であるインドネシアでは、何も対策を施さなかった場合、GHG 排出量の増加が予測される。インドネシアでの GHG 排出量削減に関して、DNPI³⁾は泥炭部門、LULUCF (森林と土地利用、土地利用転換)部門、電力部門、交通部門、石油とガス部門、セメント部門、農業部門、建築物部門からの排出量をそれぞれ求めている。それぞれの分野で限界削減費用曲線を使い、2030 年

のインドネシアの GHG 排出量の削減ポテンシャルと削減にかかるコストを計算している。しかし、このような部門別の排出削減シナリオでは十分に考慮出来ない低炭素対策としてバイオ燃料がある。インドネシアではバイオ燃料の普及を積極的に進めている。一般的にバイオ燃料の利用促進は低炭素対策とみなされているが、土地利用転換からの排出量を考慮しないバイオ燃料の普及は更に GHG 排出量を増加させるとの懸念がある。UNEP⁴⁾はバイオ燃料の化石燃料と比較した正味の GHG 収支の推計値には幅があり、特にパーム由来バイオ燃料は 80%削減から 2,070%増加まで幅広い推計値が報告されている。このような人口・経済ともに成長中で今後の食料とエネルギー需要の増加が見込まれ、かつ、AFOLU 部門からの GHG 排出量の割合が比較的高い地域で低炭素社会を構築するには、社会経済発展の想定を取り込み、エネルギー・AFOLU 両部門を統合し、両部門間の関係も考慮した低炭素社会シナリオの構築が必要であると考えられる。そこで本研究ではこのようなシナリオの構築手法を開発し、2020 年及び 2050 年のインドネシアにこれを適用してシナリオの例を示すことを目的とする。

2. 研究の手法

(1) 研究の全体像

図-1 に低炭素社会シナリオ構築手法の全体像を示す。

(2) モデル

本研究ではインドネシアの将来像を推計するために2つのモデル、ExSS、AFOLUAを組み合わせて低炭素社会シナリオの構築を行う。以下にそれらの概要を示す。

a) ExSS

ExSSは、五味ら⁹⁾が低炭素社会ビジョン構築のために開発したツールである。ExSSはある地域、または全地域の目標年の社会像を社会経済指標、二酸化炭素排出量、エネルギー需要量、エネルギー利用技術などから整合的、定量的に表現、評価するツールとして開発された。社会経済指標とは社会の姿を定量的に表す指標であり、具体的に人口、GDP、交通需要量などが含まれる。ExSSはこれらの指標を推計し、その下で、目標年の排出量を達成するための低炭素対策を同定することができる。

ExSSは勘定表型の静学モデルである。このツール内は連立方程式体系で記述されており、方程式の数は内生変数の数と同じとなっているため、与えられた外生変数のもとで解は一意的に決まる。低炭素対策は各部門・サービス別のエネルギー効率、燃料シェアなどの形で与えられる。計算プログラムの記述にはGAMS (General Algebraic Modeling System)を利用して非線形計画法として定式化し、求解ソフトウェア(Solver)には非線形計画法の求解に優れたCONOPTを利用している。

b) AFOLUA

AFOLUAは三隅⁷⁾によって開発されたツールである。

AFOLUAモデルは低炭素社会としての将来ビジョンを構築するために、農畜産業・森林・土地利用の各部門の将来の活動状況を描写し、GHG排出量および排出削減量を推計するために開発された。AFOLUAの計算体系の概略を図-2に示す。

図-1 研究の全体像

図-2 AFOLUAの計算体系

人口の増加や食糧需要構造の変化、食糧の輸出入などに伴い農畜産業による食糧や飼料の生産は変化し、その生

産のために必要な土地利用にも、例えば農地や草地拡大のための森林伐採といった形で影響を与える。単収の増加によ

り単位作物生産あたりの土地需要が減少することもある。また特に GHG 排出についていえば、エネルギー部門の GHG 排出量削減策とみなされるバイオ燃料の生産は農地を需要し、森林伐採による GHG 排出増加の原因となりもする。AFOLUA モデルは主としてこれら部門の整合的な活動量(食糧生産、作物収穫面積、家畜頭数、土地面積、土地利用変化)の推計を主な目的としている。AFOLUA モデルは人口と食料、そしてバイオ燃料需要を起点としてこれらの関係を記述し、AFOLU 部門の活動量の変化による将来の GHG 排出量への影響を示すことが出来る。

食料・農業、バイオ燃料、森林・林業、土地利用、GHG の 4 つのモジュールによって構成されている。食料・農業モジュールでは人口と一人あたりの食料需要から対象地域全体の食料消費量を求め、これに輸出入を考慮して地域内での食料生産量を求める。農産品の生産量と単収から収穫面積を、畜産品の生産量から家畜頭数をそれぞれ求める。飼料生産もここで考慮される。バイオ燃料モジュールでは外生的に与えられるバイオ燃料需要を満たす原料の必要量を推計する。原料のうち農産品は農産品の需要量として食料・農業モジュールに送られる。農業残渣や林産物からのバイオ燃料の生産も記述し、農業残渣の需要量は食料・農業モジュールへ、林産物の需要量は森林・林業モジュールへ、それぞれ送られる。森林・林業モジュールは外生的に与えられる林産品の国内需要と輸出入から国内生産量を求め、材木切り出しのタイプ別に森林の劣化及び伐採面積を求める。土地利用モジュールでは次のようにして各土地利用区分の土地利用面積を求める。

- ・農産品の収穫面積と作付け回数から農地面積
- ・家畜頭数と放牧される家畜 1 頭あたりの草地面積需要から草地面積
- ・人口と人口密度の想定から宅地面積
- ・森林の伐採面積及び保全林の想定から森林面積

その他の土地利用面積は外生的に与えられる。次いで各土地利用の前期の面積と土地利用転換係数の想定からクロスエントロピー法を用いて土地利用転換マトリクスを推計する。すなわち、 x_{ij} を前期から当期への土地利用転換行列として、

$$\sum_{i,j} p_{i,j} \log \frac{p_{i,j}}{q_{i,j}} \rightarrow \text{MIN} \quad (1)$$

$$p_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_j x_{i,j}} \quad (2)$$

$$\sum_j x_{i,j} = u_i \quad (3)$$

$$\sum_i x_{i,j} = u_j \quad (4)$$

ここに、

p_{ij} : 前期から当期への土地利用転換係数 ($0 \leq p \leq 1$, $\sum (p_{ij})=1$)

q_{ij} : 参照土地利用転換係数 ($0 \leq q \leq 1$, $\sum (q_{ij})=1$)

i : 前期の土地利用種

j : 当期の土地利用種

u_i : 前期の土地利用

u_j : 当期の土地利用

このように土地利用転換を定式化することにより、前期から当期への土地利用 i から土地利用 j への転換割合を与えられた参照土地利用転換係数に近づけるよう定式化されている。このとき q_{ij} を過去の土地利用転換行列から推計することで、過去に起きた土地利用転換のパターンと似た土地利用転換のシナリオとすることが出来る。例えば「農地」への土地利用転換が主として「森林」から起きたならば、 $q_{\text{森林農地}}$ が相対的に大きい。また、 $q_{\text{森林農地}}$ の値を小さくし、 $q_{\text{その他農地}}$ を大きくすることで「森林」からではなく「その他」の土地を優先的に農地へ転換するシナリオとすることが出来る。

GHG モジュールでは以上で得られた作付面積、家畜頭数、土地利用転換等に GHG 排出係数を乗じて GHG 排出量を求める。GHG 排出量の推計は IPCC によるインベントリガイドライン⁸⁾と整合的である。これは各国が同ガイドラインに従って排出量を推計していることを考慮し、データ入手や結果の比較を容易にするためである。また土地利用からの排出量については、炭素ストックの差により求めている。土地利用転換から発生する GHG 排出量の排出係数は炭素ストック量の差により求める。

上記のように各モジュールを繋ぐことによって、例えば、食糧需要の増加や食料の輸出入パターンの変化が対象地域の GHG 排出量に与える影響を推計することや、エネルギー部門の低炭素対策としてのバイオ燃料の需要が森林の農地への転換を引き起こし土地利用部門からの GHG 排出量の増加を招く、といった関係を、AFOLU 部門全体の枠組みの中で定量的に検討することが出来る。

本研究では、ExSS で将来のバイオマス需要量を計算し、AFOLUA モデルの外生変数として入力し、AFOLU 部門での土地利用転換がどのように変化するかを確認できるように改良した。

3. データとシナリオ想定

(1) 対象地域の動向

インドネシアの 2005 年時点での人口は 2 億 2448 万人であったが、2020 年には 2 億 6941 万人、2050 年には 3 億 2138 万人になると予想されている⁹⁾。また、GDP 成長率は 2005 年から 2010 年の間で 5.7%/年である。2013 年の GDP 成長率は 5.7%/年と予想されており¹²⁾、後も同程度以上の急な経済成長が予想されており、人為起源の GHG 排出量は今後も伸びていくと予想される。GHG 排出においては、農林業及びその他の土地利用(Agriculture, Forestry and Other Land Use; AFOLU)部門からの排出が過半を占めることが知られている。インドネ

シア政府が国連気候変動枠組条約事務局へ提出した Second National Communication によれば¹³⁾、2005 年の同国の GHG 排出量合計は 1,791MtCO₂eq(二酸化炭素換算百万トン)でその内訳はエネルギー 21%、産業プロセス 3%、農業 4%、土地利用 38%、泥炭火災 25%、廃棄物 9%である。2006 年に本格的なバイオエタノール、バイオディーゼルの生産を始め、インドネシア政府はエネルギー政策やバイオ燃料について法律によって定められた政策を発表している。それらの中で大規模なプランテーション開発計画が書かれている¹⁴⁾。また、2013 年にはインドネシア政府からエネルギー・鉱物資源省規則 25 号¹⁵⁾が発令された。この文書は輸送・工業・商業・発電の各分野でバイオディーゼル利用の促進を図るものとなっている。

(2) シナリオの枠組み

シナリオの枠組みを表-1 に示す。BaU シナリオでは低炭素対策を特に施さず、現在予測されている経済発展を続け、エネルギー、農業、土地利用の GHG 排出に関する諸要素は基本的にこれまで通りを維持するシナリオである。CM1 シナリオはインドネシア政府の現行の低炭素政策に基づくシナリオである。ここでは BaU と同じ経済発展を前提として低炭素対策を導入し、同国の目標である 2020 年にベースライン(ここでは BaU シナリオ)から 26%削減を達成する。CM2, CM3 シナリ

オはバイオ燃料利用によるエネルギー部門の排出削減と土地利用転換からの排出の関係を CM1 との比較によって検討するためのシナリオである。CM2 シナリオでは CM1 シナリオの低炭素対策に加えて自動車にバイオ燃料を導入し、バイオ燃料の原材料はパームオイルとする。このとき参照土地利用転換係数は BaU と同じものを用いる。CM3 シナリオでは CM2 から参照土地利用転換係数だけを変更し、森林から農地への転換を抑制し、「その他」の土地から主に転換されるようにする。表-2 にシナリオの一覧を示した。その他に本研究で対象とした AFOLU 部門の排出源及び対象となる排出ガスを表-3 に示す。また、ExSS で対象とする産業部門を表-4 に示し、AFOLUA で対象とする財を表-5 に示す。

(3) 基準年データについて

エネルギー消費部門の基準年情報として、人口、産業連関表、旅客輸送量、貨物輸送量などを国際連合(2012)⁹⁾などから収集して用いた。AFOLU 部門の基準年情報として、農林畜産業及びデータの大部分は、国際連合食糧農業機関(Food and Agriculture Organization of the United Nations ; FAO)のデータベース(FAOSTAT)¹⁰⁾からダウンロードしたものを用いた。FAO データベースから得た基準年のデータを表-6 に示す。

表-1 シナリオの枠組み

項目	内容
地域	インドネシア
基準年	2005年
目標年	2020年, 2050年
シナリオ名	2020BaU, 2020CM1, 2020CM2, 2020CM3, 2050BaU, 2050CM1, 2050CM2, 2050CM3
GHG	産業・交通・民生のエネルギー消費部門由来のCO ₂ 、農林業及び土地利用転換由来のCO ₂ , CH ₄ , N ₂ O

表-2 シナリオ一覧

	2020	2050
BaU	・対策なし	・対策なし
CM1	・両部門でGHG排出量26%削減	・2020年のシナリオを延長 ・発電用燃料の多様化
CM2	・CM1の想定に加え、交通部門の石油燃料の10%をバイオ燃料に	・CM1の想定に加え、交通部門の石油燃料の25%をバイオ燃料に
CM3	・CM2の想定に加え、「その他」の土地を優先的に農地に転換	・CM2の想定に加え、「その他」の土地を優先的に農地に転換

表-3 AFOLU 部門の排出源及び GHG

排出源	排出源小分類	排出ガス
水田	窒素肥料	N ₂ O
	稲作による排出	CH ₄
農作物	窒素肥料	N ₂ O
反芻家畜	家畜腸内発酵	CH ₄
家畜ふん尿	ふん尿管理	CH ₄ , N ₂ O
泥炭地	泥炭酸化(農耕地)	CO ₂
	泥炭火災	CO ₂
土地利用変化	土地利用変化	CO ₂

表-4 ExSS で対象とする産業部門

分類	部門
第一産業	農林水産業
第二次産業	鉱工業、食品加工、繊維・パルプ、化学、建設、鉄鋼、セメント、その他製造業
第三次産業	サービス業

その他の文献から得たデータを表-7 に示す。FAO データベースでは農地以外の土地利用データが収録されていない

ため、USGS のリモートセンシングによる 2001 年及び 2006 年におけるインドネシア全土の土地利用によって補完し、これら

2時点間の土地利用を比較して2001年から2006年にかけての土地利用転換行列を作成した。この土地利用転換行列を表-9に示す。これから求めた土地利用転換係数をBaUシナリオにおける参照土地利用転換係数として用いた。土地利用転換からの排出係数を求めるための土地利用用途別の炭素ストック量を表-8に示した。

(4) 将来の社会経済指標

人口、社会経済指標についてはシナリオの種類によらず、

表-5 AFOLUAで対象とする財

分類	品目
農作物	米, 小麦, その他穀物, 野菜類, 果実類, キャッサバ, サトウキビ, 砂糖, 植物油, パーム油(食用・燃料用), 油糧作物, パーム, その他食料作物, 工芸作物, ジャトロファ
畜産物	食肉(牛, 豚, 羊, ヤギ, バッファロー, 馬, 鶏, アヒル), 生乳(牛, 羊, ヤギ), 卵(鶏, その他), 乳製品
水産物	水産物
林産物	産業用丸太, 燃料用丸太, 伐採残渣, 繊維板, 製材, パルプ, その他工業木材
残差	作物残渣, バルボジョ, バガス, パーム残渣(空房, パルプ, 工場排水), 家畜糞尿, 製材残渣, 食物残渣

表-6 FAOデータベースから得た基準年情報

項目	区分
食糧需要量	品目
食糧生産量	品目
食糧輸出入量	品目
家畜頭羽数	品種
家畜用土地面積	品種
単収, 収量	品目
農地面積	用途
収穫面積	品目
排出係数	排出源

表-7 その他文献から得た基準年データ

項目	参考文献
土地利用用途別炭素ストック量	Shrestha et al. ²⁹ , 電力中央研究所 ²⁵ , Germer et al. ²⁶ , IFEU ²⁷ , Gnanavelrajah et al. ²⁸ , Wicke et al. ²⁹
エネルギー作物の燃料転換率	電力中央研究所 ²⁵
残渣系バイオマス発生係数, 高位発熱量	Wicke et al. ²⁹ , 日本エネルギー学会 ²⁴

表-8 土地利用用途別炭素ストック

土地形態	炭素ストック量(tC/ha)	参照
熱帯雨林	233.6	23)
パーム栽培地	93.1	23)
荒地	62.5	23)
水田	71.0	28)
果樹園	184.7	28)
工芸作物栽培(生ゴムなど)	240.0	28)
牧草地	11.5	28)
その他作物栽培	27.0	22)

表-9 2001年から2006年の土地利用転換行列

		2006年								合計
		農耕地(泥炭)	農耕地(非泥炭)	森林(泥炭)	森林(非泥炭)	牧草地	宅地	湿地	その他	
2001年	農耕地(泥炭)	2.88	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	2.91
	農耕地(非泥炭)	0.00	42.19	0.00	0.01	0.03	0.10	0.00	0.19	42.53
	森林(泥炭)	0.11	0.00	5.72	0.00	0.21	0.00	0.01	0.56	6.60
	森林(非泥炭)	0.00	0.83	0.00	104.56	0.67	0.01	0.09	1.43	107.58
	牧草地	0.02	0.29	0.02	0.04	9.95	0.00	0.04	0.14	10.50
	宅地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.43	0.00	0.00	2.43
	湿地	0.00	0.02	0.00	0.00	0.12	0.00	2.42	0.19	2.75
	その他	0.05	0.58	0.05	0.15	0.03	0.03	0.08	26.72	27.70
合計		3.05	43.91	5.79	104.76	11.00	2.57	2.65	29.26	202.99

表-10 人口・一世帯当たり人員世帯数・世帯数

	単位	2005	2020	2050	2020/2005	2050/2005
人口	千人	224,481	269,413	321,377	1.20	1.43
一世帯当たり人員	人/世帯	3.86	3.42	2.69	0.89	0.70
世帯数	世帯	58,152	78,819	119,596	1.36	2.06

表-11 産業別生産額の構成比

	2005	2020	2050	2020 /2005	2050 /2005
農林水産業	9.3%	7.5%	9%	0.8	0.9
鉱業・採石業	6.8%	4.4%	3.6%	0.6	0.5
食料品産業	9.0%	11.0%	13.1%	1.2	1.5
繊維産業	7.2%	3.7%	2.9%	0.5	0.4
化学産業	9.6%	4.7%	3.3%	0.5	0.3
建設業	10.2%	7.8%	7.6%	0.8	0.7
その他の産業	4.7%	14.6%	16%	3.1	3.3
鉄鋼業	7.5%	2.4%	1.6%	0.3	0.2
窯業	0.4%	0.6%	0.6%	1.6	1.5
サービス業	35%	43%	43%	1.2	1.2
合計	100%	100%	100%	1.0	1.0

表-13 2020年・2050年の貨物輸送機関分担率

		自動車	鉄道	船舶	飛行機
2005	国内	95.8%	1.8%	2.4%	0.1%
	国外	0.0%	0.0%	98.1%	1.9%
BaU	国内	95.8%	1.8%	2.4%	0.1%
	国外	0.0%	0.0%	98.1%	1.9%
CM1, CM2, CM3	国内	95.8%	1.8%	2.4%	0.1%
	国外	0.0%	0.0%	98.1%	1.9%

表-12 2020年の旅客輸送機関分担率

		自動車	バス	鉄道	二輪車
2005	国内	19.3%	11.5%	0.7%	24.6%
	国外	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2020BaU	国内	29.0%	15.0%	2.0%	30.0%
	国外	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2020CM1, CM2, CM3	国内	13.6%	19.3%	28.3%	14.6%
	国外	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		船舶	飛行機	徒歩	自転車
2005	国内	5.0%	2.7%	29.0%	7.2%
	国外	10.0%	90.0%	0.0%	0.0%
2020BaU	国内	4.0%	5.0%	5.0%	10.0%
	国外	10.0%	90.0%	0.0%	0.0%
2020CM1, CM2, CM3	国内	4.0%	5.0%	5.1%	10.1%
	国外	10.0%	90.0%	0.0%	0.0%

表-14 2050年旅客輸送機関分担率

		自動車	バス	電車	二輪車
2005	国内	19.3%	11.5%	0.7%	24.6%
	国外	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2050BaU	国内	24.6%	32.8%	20.5%	12.3%
	国外	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2050CM1, CM2, CM3	国内	11.1%	17.6%	36.0%	13.3%
	国外	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
		船舶	飛行機	徒歩	自転車
2005	国内	5.0%	2.7%	29.0%	7.2%
	国外	10.0%	90.0%	0.0%	0.0%
2050BaU	国内	1.6%	1.6%	4.1%	2.5%
	国外	10.0%	90.0%	0.0%	0.0%
2050CM1, CM2, CM3	国内	3.6%	4.5%	4.6%	9.2%
	国外	10.0%	90.0%	0.0%	0.0%

(5) 2020年のシナリオ想定

2020 年においては、2020BaU、2020CM1、2020CM2、2020CM3 の 4 つのシナリオを構築した。ここで BaU(business as usual)とは GHG 排出量削減を一切行わない場合を示し、エネルギー部門についてはエネルギー効率およびエネルギー最終需要部門でのエネルギー構成比を基準年の値で固定、発電においては現在のインドネシア政府の政策に従い石炭火力の割合を2005年の40%から60%に増加した。AFOLU部門では排出係数を2005年から一定としたほか、2001年から2006年の土地利用転換係数を将来に渡っても参照土地利用転換係数として利用した。エネルギー部門のCMケースの対策、特にCM1シナリオではインドネシア政府が2010年に策定した目標である26%削減を達成するように設定した(コペンハーゲン合意に基づき、2010年1月に気候変動枠組条約(UNFCCC)に削減行動として提出済み)。CM2では更に石油燃料の一部にバイオエタノールなどといったバイオ燃料を導入することとした。またAFOLU部門において、森林からの土地利用転換の抑制、泥炭火災の抑制、泥炭酸化の抑制、家畜から排出されるGHGの抑制を行っている。CM3ではCM2に加え、バイオ燃料を生産するプランテーションの場所を主に森林ではなく、「その他」の土地利用用途から転換させ

て生産させるシナリオとした。エネルギー消費部門における旅客輸送、貨物輸送の想定を表-12、表-13に示した。AFOLU部門では一人当たり食糧需要、輸出、単収を過去10年の傾向を延長して与え、輸入率は2005年の値で固定した。

(6) 2050年のシナリオ想定

2050年では人口が3億2138万人となり、GDPも2005年比で約19倍となる。そのため、多くの温室効果ガスが排出されると予測出来る。2050年においてもシナリオは4つ(2050BaU、2050CM1、2050CM2、2050CM3)ある。2020年の想定と同様にBaUシナリオをまず計算する。自動車の割合は依然2005年から比較すると高くなるものの、BaUシナリオにおいてもバス、電車といった公共交通機関での移動が主流となると想定した。また、二輪車の機関分担率は減少する。2050年における旅客輸送の想定を表-14に示した。貨物輸送については2020年と同じ想定をしている。CM1シナリオでは2020年のCM1シナリオを2050年まで継続した場合のシナリオとなっている。CM2では2020年同様バイオ燃料を導入するが、2050年の推計ではバイオ燃料を25%導入することとした。CM2シナリオも2020年のCM2シナリオを延長して推計した。AFOLU部門の推計についてもそれぞれのシナリオの延長とした。

4. 結果と考察

(1) 最終エネルギー需要量

部門別最終エネルギー需要量の推計結果を表-15 に示す。最終エネルギー需要量の合計は、2020 年 BaU シナリオでは 2005 年比で 2.63 倍、CM シナリオでは 2005 年比で 2.11~2.33 倍となった。また 2050 年 BaU シナリオでは 2005 年比で 10.7 倍、CM シナリオでは 2005 年比で約 9.0 倍となった。

(2) GHG排出量

GHG 排出量の推計結果を表-16、図-3、図-4 に示す。2020

年の BaU シナリオに対し、CM1 シナリオ、CM2 シナリオ、CM3 シナリオの削減割合はそれぞれ 26%、24%、30%となった。この内、インドネシアの公式の目標である 26%削減目標に届いたシナリオは CM1 シナリオと CM3 シナリオであり、CM2 シナリオでは達成出来なかった。2005 年から 2050 年までの推計を比較すると、エネルギー部門と AFOLU 部門の排出量の割合が変化している。エネルギー消費部門からの GHG 排出量は人口と GDP に比例して伸びる傾向にある。それに対して AFOLU 部門の排出量は GDP に比例的に成長するとは考えられない。そのため 2005 年には全体の 11%しか占めていなかったエネルギー起源排出量が 2050 年では 75%となった。

表-15 最終エネルギー需要量(Mtoe)

		石炭	石油	天然ガス	バイオマス	電力	バイオ燃料	合計
2005		10	45	10	40	10	0	115
	BaU	52	94	32	56	39	0	274
2020	CM1	51	82	33	53	39	0	258
	CM2, CM3	42	70	32	53	39	17	237
	BaU	104	387	177	198	188	0	1052
2050	CM1	101	341	173	195	210	0	1019
	CM2, CM3	101	258	173	195	210	83	1020

表-16 GHG 排出量(MtCO₂eq)

		2005		2020			
				BaU	CM1	CM2	CM3
エネルギー消費部門	家庭部門	69	176	168	168	168	168
	業務部門	28	182	177	177	173	173
	産業部門	134	506	491	491	433	433
	旅客輸送部門	51	88	63	63	57	57
	貨物輸送部門	29	61	61	61	55	55
	合計	311	1,013	960	960	887	887
AFOLU部門	農林業由来	58	73	63	63	63	63
	家畜由来	24	36	30	30	30	30
	土地利用変化	706	753	397	397	494	331
	泥炭火災	451	294	225	225	202	225
	泥炭酸化	379	571	331	331	372	372
	合計	1,618	1,726	1,046	1,046	1,161	1,020
GHG排出量 (MtCO ₂ eq)		1,929	2,739	2,006	2,006	2,047	1,907
				2050			
				BaU	CM1	CM2	CM3
エネルギー消費部門	家庭部門	217	153	131	131	131	131
	業務部門	833	545	498	498	498	498
	産業部門	2,101	1,493	1,355	1,355	1,355	1,355
	旅客輸送部門	79	53	43	43	43	43
	貨物輸送部門	303	253	206	206	206	206
	合計	3,534	2,497	2,233	2,233	2,233	2,233
AFOLU部門	農林業由来	86	64	64	64	64	64
	家畜由来	48	40	40	40	40	40
	土地利用変化	448	217	453	453	453	313
	泥炭火災	170	201	126	126	126	191
	泥炭酸化	996	331	386	386	386	386
	合計	1,748	853	1,069	1,069	1,069	994
		5,283	3,350	3,303	3,303	3,303	3,227

図-3 GHG 排出量

図-4 一人当たり GHG 排出量

(3) 考察

CM2 シナリオでは CM1 シナリオよりも GHG 排出量が多く、インドネシア政府の2020年の目標は達成できなかった。これは、バイオ燃料を使用するために AFOLU 部門でのその原料となるオイルパームの生産量が伸び、バイオ燃料をもちいることによる GHG 削減と、森林を伐採して農地に転換したことによる GHG 排出とが正味で排出になったためである。

これに対して CM3 シナリオでは森林ではなく、「その他」として分類されている土地を農地に積極的に転換するよう想定した結果、GHG 排出量は CM1 に比較して約 5% 低く、正味で削減となった。また BaU からの GHG 排出量削減のうち約 12% を占めることとなった。

5. まとめ

本研究ではエネルギー、農業、土地利用の相互の影響を総合的な低炭素社会シナリオの枠組みの中で考慮することが出来る手法を開発した。このような考慮はインドネシアのような AFOLU 部門からの排出の割合が比較的高く、またバイオ燃料の生産が低炭素対策として考慮されるような国・地域において低炭素社会を構築しようとする際に有用であると考えられる。今後の課題として、ここでのインドネシアにおける適用例は基準年が 2005 年と現在までに時間が経っていることや、限られたデータに基づいていることから、社会経済発展の見込み、バイオ燃料の生産諸元、インドネシアにおける農業からの詳細な排出係数、土地利用種別の炭素ストックなどのより正確・詳細なデータが入手されたならば更新されるべきであることが挙げられる。また、この手法を活用し、自動車用燃料用以外も含むバイオ燃料生産が正味の GHG 排出削減となるような諸条件(原材料作物の選択、農地に転換する土地、生産効率、バイオ燃料が利用されない場合の燃料等)の範囲や、エネルギーや廃棄物部門の対策も含めて国全体の排出削減策の中での相対的重要性等について詳細な検討をするためのシナリオ開発が必要と思われる。

謝辞: 本研究は、環境省の地球環境研究総合推進費(S-6-2)、科学技術振興機構:地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS)の支援により実施された。またインドネシアの土地利用データについてボゴール農科大学のRizaldi Boer 教授の協力を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) International Monetary Fund: World Economic Outlook, 2013.
- 2) World Resource Institute, CAIT2.0: <http://cait2.wri.org/>
- 3) National Council for Climate Change (DNPI): Indonesia's Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2010.
- 4) International: Peatland degradation fuels climate change, 2006.
- 5) UNEP: Towards sustainable production and use of resources Assessing Biofuel, 2009.
- 6) 五味馨: 仲座方伯, 松岡譲, 地域経済の開放性を考慮した低炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用, 環境システム研究論文集, 36, pp1-10, 2008.
- 7) 三隅卓矢: 農林業及び土地利用転換を考慮した低炭素社会シナリオ構築手法の開発, 京都大学修士論文, 2013.
- 8) IPCC: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories, 2006.
- 9) United Nations: World Population Prospects: The 2012 Revision, 2012.
- 10) FAOSTAT: <http://faostat.fao.org/>
- 11) USGS: <http://glovis.usgs.gov/>
- 12) ADB: <http://www.adb.org/countries/indonesia/economy>
- 13) Ministry of Environment, Republic of Indonesia: Indonesia Second National Communication UNDER The United Nations Framework Convention on Climate Change, 2010.
- 14) Center for International Forestry Research: Policy and institutional frameworks for the development of palm oil-based biodiesel in Indonesia, 2011.
- 15) Ministry of Energy and Mineral Resources: Republic Indonesia, EMR Regulation No.25, 2013.
- 16) Hooijer, A., Silvius, M., Wösten, H., and Page, S.: Assessment of CO2 emissions from drained peatlands in SE Asia, 2006.
- 17) Asia Development Bank: ASIA 2050, 2011.
- 18) Goldman Sachs: The N-11: More Than an Acronym, 2007.

- 19) PricewaterhouseCoopers: World in 2050, 2013.
- 20) インドネシア国営電力公社: PLN STATISTICS 2012, 2012.
- 21) インドネシア統計局: Statistics Indonesia, <http://www.bps.go.id/>
- 22) Shrestha, P., Vogt, D., Gnanavelrajah, N.: Relating plant diversity to biomass and soil erosion in a cultivated landscape of the eastern seaboard region of Thailand, *Applied Geography*, 30, pp606–617, 2010.
- 23) Wicke, B., Domburg, V., Iunginger, M., Faaij, A.: Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications, *Biomass and Bioenergy*, 32, pp1322-1337, 2008.
- 24) 日本エネルギー学会: バイオマスハンドブック, 2002.
- 25) 電力中央研究所: バイオ燃料としてのジャトロファ油のポテンシャル評価, 2009.
- 26) Germer, J., Sauerbom, J: Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance. *Environment, Development and Sustainability*, 10, pp697-716, 2008.
- 27) IFEU: Base data for Jatropha production and use – updated version -, 2008.
- 28) Gnanavelrajah R., Shrestha, P., Vogt, D. Samarakoon, L.: Carbon Stock Assessment and Soil Carbon Management in Agricultural Land-Uses in Thailand, *Land Degrad. Develop.* 19, pp242–256, 2008.
- 29) Hooijer, A., Silvius, M., Wösten, H., Page, S.: Assessment of CO₂ emissions from drained peatlands in SE Asia, 2006.
- 30) Ministry of Environment, Republic of Indonesia: Indonesia First National Communication, 1994.

(2014. 3. 28 受付)

DEVELOPMENT OF LOW CARBON SOCIETY SCENARIOS CONSIDERING ENERGY AND AGRICULTURE, FORESTRY AND LANDUSE IN INDONESIA

Ryohei OSAWA, Kei GOMI and Yuzuru MATSUOKA

Among Southeast Asian countries in which population and economic growth is expected, Indonesia is considered especially important in terms of mitigation of global warming because of its population size, wide forestland, and high agriculture production. For such a country where population and economy are growing, increase of food and energy demand is expected, and GHG emission from AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land use) sector has a significant share, we propose an integrated approach for low-carbon society scenario. The methodology was applied in Indonesia and one BaU (business as usual) scenario and three CM (countermeasure) scenarios were developed, and showed an example to consider net effect of biofuel.