

# インドネシアにおける農畜産業・森林・土地利用変化 に由来する温室効果ガス排出緩和に関する研究

長谷川知子<sup>1\*</sup>・松岡 譲<sup>2</sup>

1 非会員 (独)国立環境研究所 社会環境システム研究センター・日本学術振興会特別研究員 PD

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

2 正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-3-361 号室)

\*E-mail: hasegawa.tomoko@nies.go.jp

インドネシアでは、国内温室効果ガス(GHG)排出量の約 67%が農業・森林・土地利用変化(AFOLU)に由来している。排出削減効果の定量的な評価および高い削減効果をもつ対策の特定は重要である。我々は、AFOLU 排出削減評価モデル(AFOLUB)を開発したが、これを用い AFOLU 部門における GHG 排出緩和のための具体策を提示した。GHG 排出量を推計した結果、2030 年において対策を実施しない場合 AFOLU 部門に由来する排出量は 2000 年比 2.5 倍の 1.7GtCO<sub>2</sub>eq になることが示された。その 75%は泥炭地の排水・酸化による。また、2030 年、GHG 排出削減のための追加的許容費用 10USD/tCO<sub>2</sub>eq 下において農畜産業部門では 2000 年排出量比 45%に相当する 33MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減が見込まれ、うち 11MtCO<sub>2</sub>eq/年は水田での水管理および農閑期の稲わらのすき込みによる効果であった。一方、森林・土地利用変化部門については 10 億 USD(2005~2050 年)の資金制約下において、長期的な視点での対策策定を行えば、自然回復の強化、再植林、森林伐採の減少により、2050 年まで平均して約 829MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減効果が示された。これは 2000 年時点の LULUCF 部門の排出量の 1.2 倍、エネルギー部門の排出量の約 2.6 倍に相当する。

**Key Words:** climate change, mitigation, agriculture, land use change, Indonesia

## 1. はじめに

インドネシアでは、第一次産業が主産業であり、国内の温室効果ガス(GHG)排出量の 67%が農畜産業・森林・土地利用変化(Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)部門から排出されている(MoE, 2010)<sup>1)</sup>。優先的に導入すべき削減効果の高い対策を定量的に評価し特定することにより、今後の対策の策定に有意義な情報を提供することが可能となる。MoE(2009)<sup>2)</sup>、DNPI(2010)<sup>3)</sup>および Rizaldi(2001)<sup>4)</sup>が多くの対策種を対象に、包括的に各対策による削減効果を推計しているが、彼らの検討では過去の土地利用変化の履歴や過去に実施された対策による時間的に変化する緩和効果を考慮していない。しかし、例えばアジア・アフリカの熱帯地域では森林樹齢により、バイオマス生長による炭素吸収量、地上部バイオマスストック量がそれぞれ約 3~4 倍異なるため(IPCC, 2006)、森林に由来する排出・吸収量の推計にあたっては森林の樹齢を考慮する必要がある。そこで、AFOLU 部門での対策の選択や過去の土地利用変化の履歴を考慮した削減効果を推計するため、我々は AFOLU 排出削減評価モデル(AFOLU Bottom-up Model for emission reduction, AFOLUB) (Hasegawa and Matsuoka, accepted)<sup>5)</sup>を開発した。本研究

では、AFOLUB を用いて、インドネシアの AFOLU 部門における GHG 削減の可能性について検討する。

## 2. AFOLU 排出削減評価モデル(AFOLUB)

### (1) モデルの概要

AFOLUB は、国・地域レベルで、具体的な緩和策の詳細な情報に基づいて、AFOLU 部門の GHG 排出量・削減量を計算するボトムアップ型モデルである。モデルで対象とする体系の外で将来の農畜産業の生産量や土地利用の変化量を想定し、所与とする。本モデルでは、農畜産業生産者・林業経営者らによる排出量削減オプション(技術)の経済合理性を持った選択肢を算定する。削減技術の選択は費用、削減効果の評価法および技術間の依存性を考慮している。さらに複数の効果評価法を準備し、各期の許容最小削減量や費用制約を定め、対策導入量の挙動を比較・検討している。AFOLUB で対象とする排出源、農畜産物、土地利用区分、温室効果ガスを表-1 に示す。

表- 1 AFOLUB モデルが対象とする排出源

Emission sources	Classification	Gases	IPCC category <sup>1)</sup>
Enteric fermentation	Dairy cattle, Other cattle, Buffalo, Sheep, Goats, Camels, Horses, Mules, Asses, Swine	CH <sub>4</sub>	3A1
Manure management	Dairy cattle, Other cattle, Buffalo, Sheep, Goats, Camels, Horses, Mules, Asses, Swine, Chickens,	CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	3A2
Landuse, Landuse change and Forestry (LULUCF)	Forest Land, Cropland, Grassland, Wetlands, Settlements, Other Land	CO <sub>2</sub>	3B
Aggregate Sources and Non-CO <sub>2</sub> Emissions Sources on Land	Emissions from Biomass Burning <sup>2)</sup>	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	3C1
	Liming <sup>2)</sup>	CO <sub>2</sub>	3C2
	Urea Application <sup>2)</sup>	CO <sub>2</sub>	3C3
	Direct N <sub>2</sub> O emission from Managed soils	N <sub>2</sub> O	3C4
	Indirect N <sub>2</sub> O emission from Managed soils	N <sub>2</sub> O	3C5
Rice cultivations		CH <sub>4</sub>	3C6
			3C7

Source: Hasegawa and Matsuoka, accepted.

Note: 1] Emission categories of IPCC(2006), 2] Not estimated in this study.

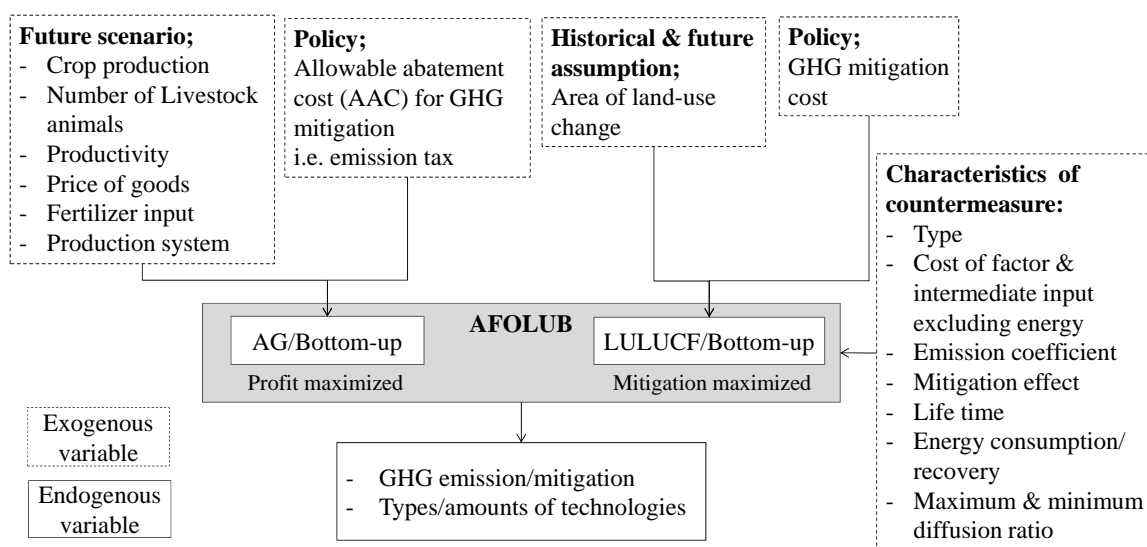


図- 1 AFOLUB モデルの入出力

本モデルは、農畜産業に関するモジュール(AG/Bottom-up)と森林・土地利用変化(Land Use, Land Use Change and Forestry, LULUCF)に関するモジュール(LULUCF/Bottom-up)から成る(図- 1)。

AG/Bottom-up は、農畜産物の生産に伴う GHG 排出量および農業機械運転に必要なエネルギーの投入・産出に伴う GHG 排出量, GHG 排出削減技術の組み合わせとそれによる削減量を推計する。技術の組み合わせは、GHG 排出削減に対する追加的許容費用(Allowable Abatement Cost for GHG emission mitigation, AAC, 排出税率・補助金率など追加的に一単位の GHG 排出を削減するインセンティブあるいはディスインセンティブを統合した指標)の想定の上で計算される。

LULUCF/Bottom-up は、過去の土地利用変化の履歴, 異なる時間スケールでの緩和効果および費用を考慮し

た上で、バイオマスや土壌中の炭素貯留量の変化, 森林火災, 森林の自然災害(かく乱)および泥炭地に由来する GHG 排出量および具体的な対策による削減量を推計する。土地利用変化を伴わない木材採取・伐採による排出は考えていない。また、木材採取・伐採は土地利用区分を変更させるほど大規模なものではなく、排出・吸収原単位には影響を及ぼさないと仮定する。

## (2) AG/Bottom-up の排出削減推計手法

### 1) 基本的な考え方

本モジュールでは、農畜産物の生産量を外生的に与え、生産者はそれを満たすような生産活動を行うと仮定している。このとき、対策実施期間をいくつかの期に分け、各期での利潤が最大となる農畜産物の生産技術と GHG 排出削減技術の組み合わせを選択する。ここで、利潤とは、売上-費用+回収エネルギーの売上

と定義する。生産量は、生産性(ここでは、単位面積当たりの作物収量、家畜一頭当たりの畜産物生産量を表す)と技術の活動量(水田稲作ならば水田の収穫面積、家畜ならば飼育頭数)の積として算出している。

## 2) 技術の取り扱い・重ね合わせ

技術としては、現時点で利用可能な技術のみとし、生産技術および温暖化対策の両技術を考慮する。一つの生産技術と零もしくは一つ以上の温暖化対策を一つの組み合わせとし、それを複数個導入することによって、外生的に与えられる生産量を供給すると想定している。技術には、その特性を示すパラメーターとして、農畜産物の生産性、技術一単位に要する費用、エネルギー効率、生産技術一単位あたりの排出量(排出係数)、全活動量に対する技術の最大普及率および最小普及率などを付随させる。

## 3) 費用の設定

本モジュールで想定する費用は、排出量削減技術および対策の採用に伴い変化する部分である。すなわち、基準年をベースとしそこからの差で測り、それらを年価で表現している。その上で導入する全技術の費用を積み上げ、それが最も安価な組合せを導入すると考えている。

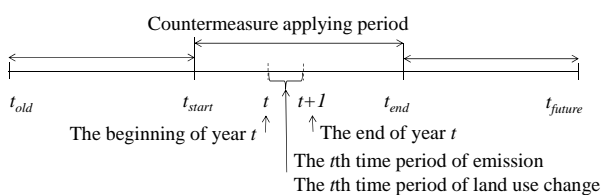
### (3) LULUCF/Bottom-up の排出削減推計手法

#### 1) 基本的な考え方

AG/Bottom-up と同様に利潤最大化となる対策の組合せを求めるが、このモジュールでは売上げに相当するものは考えていない。すなわち、土地利用の改善とか林産物生産に伴う収益への効果は考慮していない。つまり、利用区分間の土地価格の違いや林産物からの収益がもたらす森林増加などの土地利用変化への影響は小さいという想定に基づく。なお、この想定は今後の課題として第6章に挙げた。また、排出削減効果として対策実施後、長期間に渡って継続するものもあり期間長を定めその期間での累積削減量を対策効果としている。

#### 2) 時間フレーム

本モジュールでは、図-2 に示す時間経緯を想定する。一期一年とし、排出(吸収)量が落ち着くまでに要する時間ラグを考慮するため、検討の対象とする最古年を  $t_{old}$ 、対策効果を評価する最終年を  $t_{future}$  とし、排出削減対策を  $t_{start} \sim t_{end}$  各期について実施すると考える。



Where,  $t_{old} + \Delta t_{transient} < t_{start} < t_{end} < t_{future} - \Delta t_{transient}$

図-2 モデルで取り扱う時間フレーム

#### 3) 土地利用変化の設定

過去から将来に渡る土地利用変化の履歴およびスケジュールは外生的に与える。排出量の計算にあたり、ある期の土地について、計画開始年以降に土地利用変化(転用)がある土地とない土地とに分ける。火災、かく乱に関しては、対象とする土地利用区分に応じ予め想定した割合で発生すると仮定している。

#### 4) 排出係数の算定

施策を実施しない場合の排出係数の算定手法は、IPCC(2006)<sup>9)</sup>の Tier1 あるいは Tier2 を使用する。LULUCF 部門の GHG 排出量は、土地の面積と単位面積当たりの炭素貯留量の変化で計算される。過去に起きた土地利用変化による現在の排出・吸収量への影響を考慮し、その影響の程度は、土地利用変化が起きてからの経過年数で異なると考える。例えば、過去に植林された森林の成長に伴う現在の吸収量は植林からの経過年数で異なる。したがって、その時間的変化を考慮するため、土地利用変化がない土地では単位面積当たりの炭素貯留量は一定であるが、土地利用変化が起きた土地では、時間的に変化すると想定した。

#### 5) 排出量低減の組み込み

排出量低減策の評価方法として、対策によって排出係数を低減させたときの効果を算出する。単位面積当たりの削減効果は対策による排出削減もしくは吸収強化の程度を表す係数を施策を実施しない場合の排出係数に乗じることにより算出する。土地利用転換がある土地の対策削減量は、転換面積内での対策適用面積と単位面積当たりの削減効果もしくは吸収効果の積として算出する。転換がない土地についても同様に算定する。

削減量として、対策時点から将来までの累積排出削減量、および、過去に実施した対策の現時点での総削減量を算出する。前者については、ある期(第  $t$  期とする)に実施した対策による将来(第  $t$  期以降)各期の削減効果の総和として算出し、後者については、 $t$  期以前に実施した対策による第  $t$  期の削減量の総和として算定することとしている。

#### 6) 制約条件

モジュール内では、土地に関する複数の制約条件下での対策組み合わせを探索している。一つの土地に重ねて適用できる組み合わせを決め、それ以外はできないとし、対策適用後の対策変更の可能性については、一部の対策では、それを適用した後に異なる対策に変更することはできないと想定している。また、各対策適用面積およびそれらの全量が適用可能な面積を超えないなどの制約条件を定式化することで考慮している。

#### 7) 対策の費用

対策の費用は、単位面積当たりの費用および対策実

施によって得られる二次的便益(バイオマスエネルギーの売却等)を年価に換算し、1) 現在から将来に渡る費用の現価、あるいは、2) 対策を行う全期間中に発生する費用総額で評価している。このとき利子率を年5%と設定した。土地利用用途変更に伴う費用・便益は考慮していない。

#### (4) 対策選択スキーム

農畜産業部門に関しては、生産者は各期毎に技術導入の判断を行うという比較的現実に近い行動を描写するため、また、技術の継続期間が比較的短いことを勘案し、各期毎にその期の削減量最大あるいは対策費用最小となるように選定することとしている。

LULUCF 部門の対策選定にあたっては、効果が長期にわたるため、対策実施期間あるいは対策効果の評価期間の組み合わせによっては、選定内容が大きく変化することが想定される。そこで、本研究においては以下に示すような典型的かつ対比的な2つのスキームを想定し、各スキームでの具体的な対策を選定することを考えた。すなわち、

- a) 各期毎に費用制約を与え、各期毎にその期の削減効果が最大となるように対策を選定する。削減効果は、対策実施期から評価最終年までの累積量とし、対策期から計画期間終了までに削減する累積削減量を最大化するように対策を選択する(SQF)。
- b) 計画期間中での全対策費用に関する制約下で、全期間の累積削減量を最大化するように各期の対策を選択する(WQ)

SQF では、各期の資金が決まっており、そのもとの各期毎に対策を決定する。このとき、今期の選択にあたっては、来期以降の状況は考慮していない。一方 WQ では、より長期的な視点から全対象期間内で費用をやり繰りし、全期間の累積削減量を最大化しようとするから、例えば、将来に対策を実施した方が今期に実施するよりも効果的な場合は、対策実施時期を遅らせることも考慮している。

### 3. インドネシアへの AFOLUB モデルの適用

#### (1) 適用の枠組み

AFOLUB を用いて、AFOLU 部門に由来する二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)の三種の温室効果ガスの排出量および削減量を推計した。1 期を1年とし、対策は2005～2030年に実施されるとし、それによる2050年までの累積削減量を考慮した。本適用では、火災やかく乱による排出は考慮していない。農畜産業部門における AAC として、IPCC(2007)等で評価

基準として採用されている 0, 10, 100 USD/tCO<sub>2</sub>eq 未満, 100USD/tCO<sub>2</sub>eq 以上を設定した(USD: 米ドル, CO<sub>2</sub>eq: 二酸化炭素換算)。

LULUCF 部門については上で示した WQ と SQF の二つの緩和対策選択スキームを想定した。WQ では、全期間の最大総対策費用を 1 千万 USD～500 億 USD とし、SQF では、それらを対策期間内に同一になるよう配分した。

表- 2 設定した主要な諸値

Settings		2005	Reference
Population[thousand people]		227130	UN, 2006 <sup>14)</sup>
Energy price[USD per toe]	oil	940	IEA, 2007 <sup>15)</sup>
	coal	192	IEA, 2007 <sup>15)</sup>
	natural gas	262	IEA, 2007 <sup>15)</sup>
Irrigation area of rice paddy[%]		60	IRRI, 2011 <sup>11)</sup>
Wetland of rice paddy[%]		100	IRRI, 2011 <sup>11)</sup>
Total nitrogen fertilizer[million ton]		1.9	FAOSTAT, 2012 <sup>10)</sup>

#### (2) 将来シナリオの策定と用いたデータ

モデルへの入力としては、作物の収穫面積、単収、家畜頭数および土地利用変化の将来シナリオがある。基準年および将来シナリオの設定にあたっては、インドネシア固有の条件を反映させるため、国政府による統計書、将来計画等<sup>1), 7), 8), 9)</sup>を参照した。それらが入手不可能な場合は、国際統計<sup>10), 11), 12), 13)</sup>を参照した。

表- 2 に設定した主要な諸値<sup>10), 11), 14), 15)</sup>を一覧し、図- 3 から図- 6 に2030年までの作物の収穫面積と家畜頭数、土地利用変化の将来シナリオを示す。過去のコメ、天然ゴム、コーヒー、オイルパーム等の作物の収穫面積は、FAOSTAT(2012)<sup>10)</sup>を参照した。インドネシアでは水田面積が1970～2005年に8百万haから12百万haに増加した。2005年時点で水田の6割は灌漑栽培であり、残りが天水栽培である(IRRI, 2011)<sup>11)</sup>。インドネシアの主要作物の一つであるオイルパームの収穫面積は、1970～2005年にかけて10万haから360万haへと著しく増加した。将来については、オイルパームの収穫面積は2020年までは年45万haの割合(MoF, 2008)<sup>7)</sup>、2030年までは年30万haの割合で増加すると想定した(DNPI, 2010)<sup>3)</sup>。

作物別単位面積当たりの窒素肥料投入量は、各年の国別窒素肥料消費量(FAOSTAT, 2012)<sup>10)</sup>と2001年における作物別単位面積当たり窒素肥料投入量(IFA/FAO/IFDC, 1999, 2002)<sup>12), 13)</sup>からクロスエントロピー法(Golan *et al.*, 1996)<sup>10)</sup>により推計した。将来の肥料投入量は単収と比例して増加すると想定した。

2000年、2005年の家畜頭数は、第2回気候変動枠組条約の国別報告書(SNC)<sup>1)</sup>を参照し、2009年についてはFAOSTATを参照した。乳牛と肉牛の比率は、2000

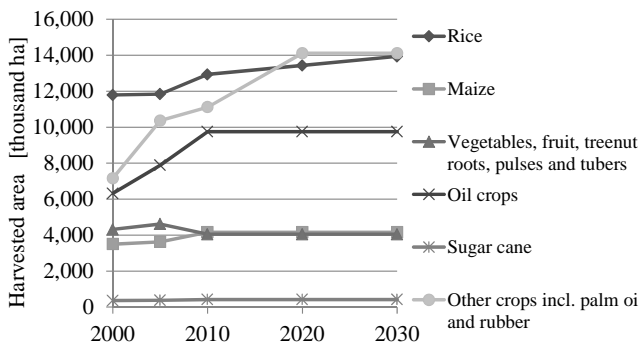


図-3 作物別収穫面積の将来シナリオ

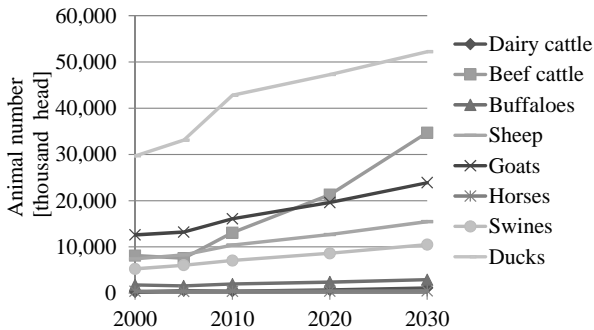


図-4 家畜別頭数の将来シナリオ

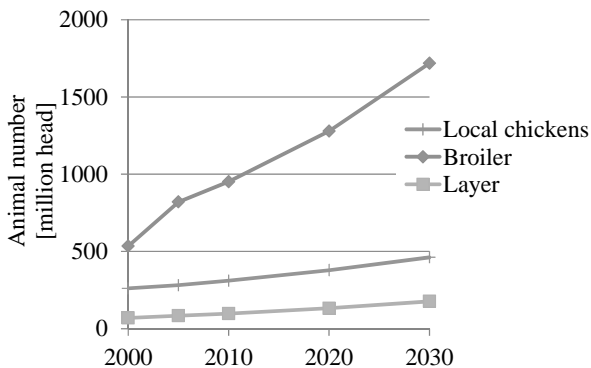


図-5 家畜別頭数の将来シナリオ

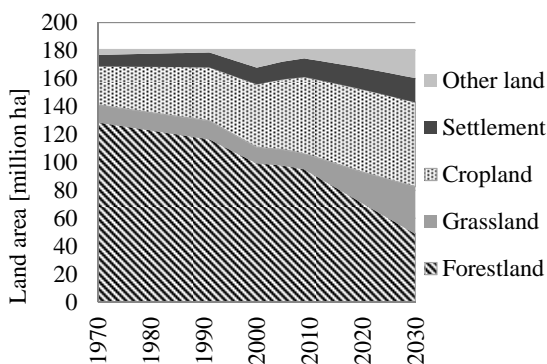


図-6 土地利用変化の将来シナリオ

年の生産処理頭数(FAOSTAT, 2012)<sup>10</sup>から算出した。将来の家畜頭数の増加率はSNCを参照した。

土地利用変化については、森林面積の1970年値はWicke *et al.*(2011)<sup>8</sup>を、1990年から2009年まではFAOSTATを参照した。森林面積は、SNCの2010年値

から算出した比率を用いて天然林とプランテーションに区分した。農地、牧草地については、FAOSTATを参照した。定住地は、国土面積の7%と想定した(MoE, 2010)<sup>11</sup>。FAOSTATによると、「その他の土地(Other land)」は上述した土地利用区分に属さない土地として定義されている。そこで、その他の土地は、国土面積から森林、農地、牧草地、定住地、内水面の面積を差し引くことで算出した。また、インドネシアには、2000年時点で2200万ha(BAPPENAS, 2009)<sup>9</sup>の泥炭地が存在し、この泥炭地と水田を有機土壌として計上した。このとき、多期作の水田面積の重複をさけるため、収穫面積を耕作回数で除すことで実際の水田面積に変換した。将来については、国土面積および内水面積を2009年値レベルで変化せず、森林は年110万haの割合で伐採されると想定した(MoE, 2010)<sup>11</sup>。この伐採速度は、2005~2030年に森林が9800万haから7200万haまで減少することを意味する。一方、将来の定住地面積は、人口増加率を用いた。農地面積は、収穫面積の増加率を用いて外挿し、それらの土地については森林減少分から割り当てた。さらに、毎年15千haの泥炭地が農地として利用するために排水されるとし、排水開始後は排水に伴う土壌中有機物の酸化が行われると想定した。

### (3) 対策に関する設定

対策種に関する情報を国内外の文献<sup>4), 17), 18), 19), 20), 21), 22), 23), 24), 25)</sup>から収集し、その中から比較的確度が高いと思われる対策を選定し、対策データベースを構築した。データベースは、対策種、削減効果、費用、実施期間に関する情報からなる。対策費用についてはデータ参照国およびインドネシアの工事費、実質賃金、エネルギー価格(World Bank<sup>26</sup>, Davis Langdon & Seah International, 2010<sup>27</sup>)を用いてインドネシアでの費用へ変換した。表-3と表-4にそれぞれ農畜産業部門、LULUCF部門における主要な対策の費用と削減効果を示す。

土地は、利用区分の変更がある土地と変更がない土地に分けている。それに対応し、対策についても、土地利用区分に変更がある土地に導入されるものと、それがなく土地に導入されるものに分類する。例えば、森林減少の防止(AD)は森林から他の区分(農地や定住地等)に転用される土地に導入するが、自然再生の強化(ENR)、木材切り出しによる影響の緩和(RIL)は転用されない森林に、新規植林(AF)や再植林(RF)は、転用されない草地、湿地、その他の土地に導入されると想定した。対策効果については、削減効果が対策実施期間後も継続するものと、対策実施期間にのみ効果があるものがある。例えば、木材切り出しによる影響の緩和(RIL)は対策実施期間内においてのみ吸収が強化されるが、一方、新規植林(AF)、再植林(RF)、森林伐採の

表- 3 農畜産業における排出削減対策

Aggregated countermeasures	Code	Countermeasures	Code	Mitigation [tCO <sub>2</sub> eq/ activity/yr]*	Reference
Improvement feeding practices	IFP	Replacement of roughage with concentrates	RRC	0.45	Bates(1998a), Shibata et al.(2010), Graus et al.(2004)
Enteric fermentation, Other	EF	High genetic merit	HGM	0.32	Bates(1998a)
Improved manure management	MM	Dome digester for cooking fuel and light	CFL	0.62	USEPA(2006)
		Daily spread of manure	DSM	0.33	Bates(1998a)
Water management	WM	Midseason drainage	MD	0.89	USEPA(2006)
Fertilizer and residue management in rice paddy	FR	Off-season incorporation of rice straw	OIR	0.68	USEPA(2006)
		Replace urea with ammonium sulphate	RAS	0.24	USEPA(2006), Graus et al. (2004)
Fertilizer management	FM	High efficiency fertilizer application	HEF	0.65	USEPA(2006), Hendriks et al. (1998), Amann et al. (2005)
		Slow-release fertilizer	SRF	0.76	USEPA(2006), Akiyama et al.(2010)
Residue management	RM	Tillage and residue management	TRM	0.08	IPCC(2007), Smith et al.(2007)

\* Activity is area of cropland for crop cultivation and animal numbers for livestock.

表- 4 森林・土地利用変化部門における排出削減対策

Countermeasures	Code	Cost [US\$/ha/yr]	Mitigation [tCO <sub>2</sub> /ha/yr]	Life cycle cost [US\$/ha]	Life time [year]	Mitigation [tC/ha]	Source
Plantation-short rotation	AF1	10	9	144	15	37	[1]
Plantation-long rotation	AF2	13	44	189	15	180	[1]
Reforestation-fast growing species	RF1	5	18	73	15	75	[1]
Reforestation-slow growing species	RF2	7	53	104	15	218	[1]
Forest Protection	FP	4	13	65	15	55	[1]
Reduced Impact Logging	RIL	0.2	12	3	15	49	[1]
Enhanced natural regeneration	ENR	1.2	17	18	15	70	[1]
Avoid deforestation	AD	229	316	229	1	86	[2]

Source: [1] Rizaldi (2001)<sup>4)</sup>, [2] USEPA(2005)<sup>25)</sup>

減少(AD)は、対策実施期間後も森林による炭素吸収が継続するとした。森林伐採の減少(AD)については、森林減少を回避することで、炭素が大気中に放出されずにすむ量を削減量とみなした。

#### 4. 推計結果と考察

##### (1) 対策なしの場合の温室効果ガス排出量

対策なしの場合の排出量を、図-7に示す。2000年時点で純排出量は664MtCO<sub>2</sub>eq/年となり、農畜産業由来が73MtCO<sub>2</sub>eq/年、LULUCFに由来する排出および吸収はそれぞれ835MtCO<sub>2</sub>eq/年、244MtCO<sub>2</sub>eq/年であった。農畜産業の最大の排出源は稲作(3C7)(39%)で、続いて、農耕地土壌(水田土壌も含む)(3C4~3C6)(37%)、家畜の反芻(3A1)(17%)、排せつ物管理(3A2)(7.3%)である。図-8は2000年の排出量をインドネシア国政府が公表している第2回気候変動枠組条約の国別報告書(SNC)<sup>1)</sup>の推計と比較したものである。2000年の活動量データおよび排出係数は大きく異なることから、SNCの推計値と類似す

る結果が得られた。

2000年のLULUCF由来の排出量は、泥炭地の排水・酸化(46%)、森林・牧草地の転換(38%)、残りが土壌中炭素(17%)に由来する。から対策を実施しない場合、2030年にAFOLU由来の排出量は約1.7GtCO<sub>2</sub>eq/年にまで増加することがわかる。農畜産業部門は2000年比で2.1倍、LULUCF部門では2.5倍となる。農畜産業部門では、家畜(3A1, 3A2)と農耕地土壌(3C4~3C6)由来のN<sub>2</sub>O排出が著しく増加する。LULUCF部門の75%は泥炭地の排水・酸化に起因した。

LULUCF部門(3B)に由来する2005年の純排出量を既往研究と比較したものを図-9に示す。ここで、他文献では土壌中炭素に由来する排出量を考慮していないので、これを除く排出量を示す。この中でDNPI(2010)とCAIT-WRI(2002)は、森林火災による排出量を含むため他よりも大きい排出量を示しているが、これらを除くと本研究では他の報告値と同様の結果を得た。本研究では他の研究では考慮していない土地利用変化の履歴を考慮したにもかかわらず、他の報告値と類似した結果となったのは、排出量の大部分が過去の土地利用変化の影響を受

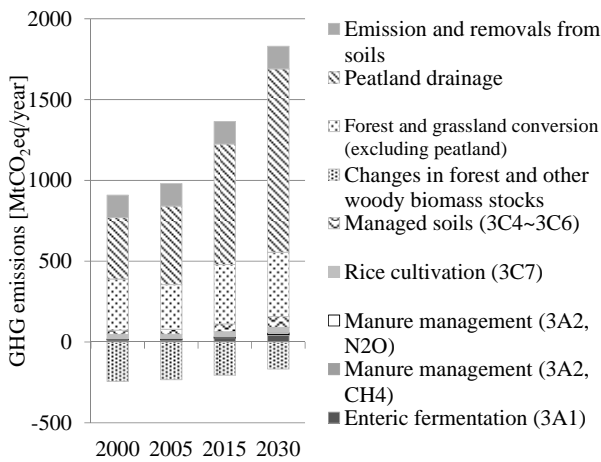


図-7 農畜産業・森林・土地利用変化由来のGHG排出量 (対策なしの場合)

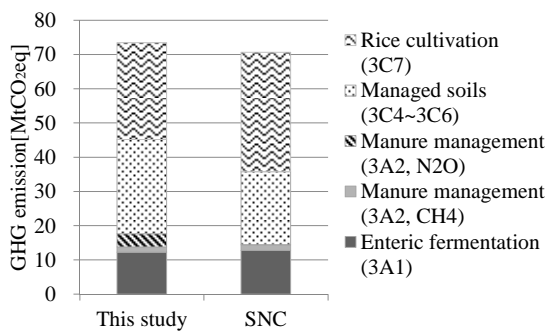


図-8 2000年農畜産業由来のGHG排出量の比較

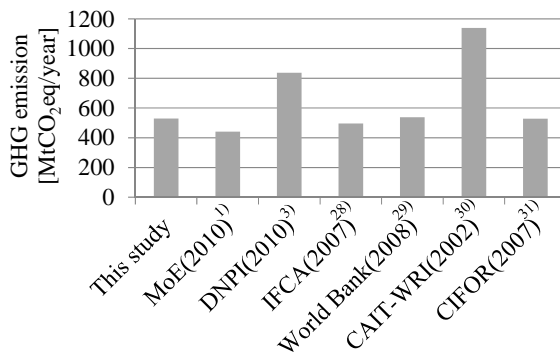


図-9 2005年における森林・土地利用変化由来のGHG純排出量の比較

けない泥炭地の排水・酸化に由来すること、森林の樹齢を考慮したことによる排出量の変化分と吸収量の変化分が相殺されたことが考えられる。

## (2) 農畜産業部門の排出削減量と費用

異なるAAC下における農畜産業部門での削減量とその対策の内訳を図-10に示す。まず、負の費用やゼロ費用による削減対策いわゆるノーリグレット対策(AACが0USD/tCO<sub>2</sub>eq以下)により21MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減効果があることが示された。そのうち最も削減効果が高い対策は水田の水管理(MD)であり、12MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減が見込ま

れた。AAC10USD/tCO<sub>2</sub>eq下において33MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減可能性が示された。これは、2000年比の同部門における排出量の45%に相当する。稲作(3C7)では、2030年で水田の水管理(MD)、農閑期の稲わらのすき込み(OIR)によりそれぞれ7MtCO<sub>2</sub>eq/年、4MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減効果が示された。家畜の反芻(3A1)については粗飼料から濃厚飼料への転換(RRC)、排せつ物管理(3A2)については家庭用家畜排せつ物発電システムの導入(CFL)によりそれぞれ6MtCO<sub>2</sub>eq/年、2MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減効果が示された。農耕地土壌(3C4~3C6)については、肥料の高効率な利用(分肥等)(HEF)により11MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減効果が示された。肥料の利用効率が高いとされる被覆肥料(SRF)等のように高価な対策は、100USD/tCO<sub>2</sub>eqのAACでないと選択されなかった。

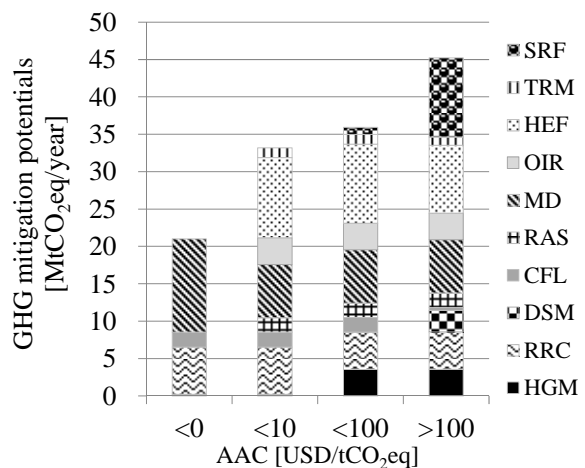


図-10 異なるAAC下での農畜産業における削減可能性

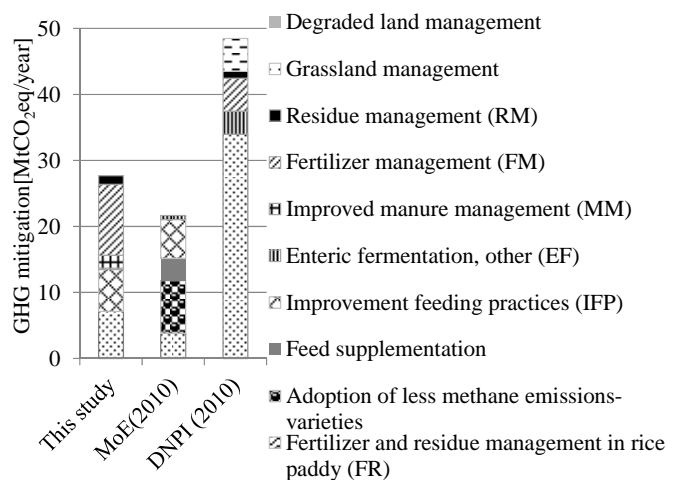


図-11 農畜産業のAAC 10USD/tCO<sub>2</sub>eq下での排出削減可能性

図-11にAAC 10USD/tCO<sub>2</sub>eq下における農畜産業での削減可能性について、他の研究SNC(MoE, 2010)<sup>1)</sup>とDNPI(2010)<sup>3)</sup>との比較を示す。SNCとDNPIは農畜産業全体でそれぞれ22MtCO<sub>2</sub>eq/年、49MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減としている。SNCではメタン排出量の少ない稲の種類への変

更(Adoption of less methane emissions-varieties)による削減可能量が8MtCO<sub>2</sub>eqと最も高い。一方、DNPIでは水管理(WM)による削減効果を34MtCO<sub>2</sub>eq/年と高く見込んでいる。DNPIは想定した費用、削減効果に関する情報を公表していないが、大きい削減量の要因の一つとして、費用を安く見積もっていることが考えられる。SNCで採用されているメタン排出量の少ない稲種への変更は、本研究では想定していない対策である。

### (3) LULUCF 部門の排出削減量と費用

LULUCF 部門については、WQ と SQF における異なる削減費用制約下での削減効果の推計結果を図-12 に示す。ここで示す削減効果は、2005～2030 年の間に実施された対策による削減効果を年当たりに換算したものである。どの対策費用下においても WQ の削減効果が SQF のそれを上回る。さらに、削減費用に対する削減効果の増加率は、費用が上がるにつれて低減し、SQF では100 億 USD 以上では対策効果量の増加が見込まれないことがわかる。

表-5 には10 億 USD 下で選定された削減技術とその効果を示す。WQ と SQF で選定された対策種が異なることがわかる。WQ では、自然再生の強化(ENR) が最も高く551MtCO<sub>2</sub>/年、ついで再植林(RF)、森林伐採の減少(AD)により平均して約829MtCO<sub>2</sub>/年削減されると推定された。これは、2000 年時点のLULUCF 部門の排出量の1.2 倍、エネルギー関連部門の排出量の約2.6 倍に相当する。自然再生の強化(ENR)が最も削減量が大きくなっている。一方、SQF では、自然再生の強化(ENR)ついで再植林(RF)が223MtCO<sub>2</sub>/年、新規植林(AF)より695MtCO<sub>2</sub>/年の削減効果となった。

以上の理由の一つとして、費用の時間的割引率と対策効果の持続性の関係で、今期費用のみで選定する場合と将来費用までを考慮して選定する場合では費用対効果が変わってしまうことがあげられる。WQ では、例えば、将来費用の割引効果から早いうちに実施するよりも遅い時期に実施する方が効果的である対策では、実施時期を遅らせる判断が可能となる。このように、期間内の資金配分に制約がないWQ の場合には、累積削減効果や導入過程を長期的な視点から評価し、将来までの累積削減効果が最も高く見込める対策に投じるなど弾力的な選択が可能であり全体の削減効果も大きくなる。DNPI(2010)は、ある期の費用制約下でその期に導入する対策を決定した場合の削減効果を示しているため、SQF の結果に近い。

また、WQ では、森林伐採の減少(AD)は83MtCO<sub>2</sub>/年の削減が見込まれ、インドネシアにとって優先度高い対策の一つとなっているが、現在の京都議定書では植林や森林管理は温暖化対策として認められているが、森林伐採の減少は認められていない。ポスト京都に関する国際

合意として、森林減少の防止も含めた途上国も参加する新たな枠組みを早急に検討することが求められる。

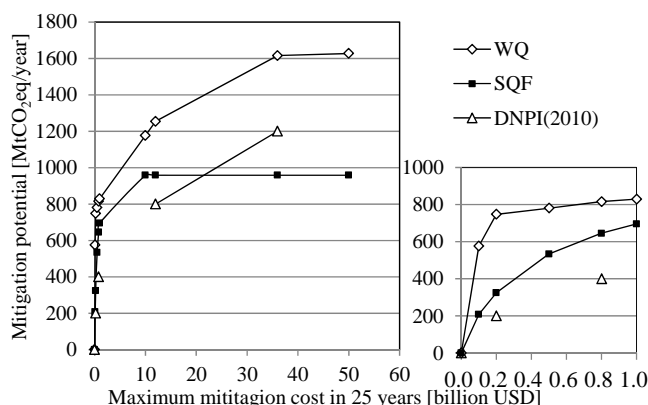


図-12 異なる対策費用下での削減効果の比較 (右: 削減費用10 億 USD 以下の部分を拡大して示す)

表-5 総削減費用10 億 USD 下での森林・土地利用変化部門における削減効果の推計結果

Contermeasures	Code	WQ	SQF
		Mean annual mitigation [MtCO <sub>2</sub> eq/yr]	Mean annual mitigation [MtCO <sub>2</sub> eq/yr]
Reduced Impact Logging	RIL	0	51
Enhanced natural regeneration	ENR	551	291
Afforestation	AF1+AF2	0	103
Reforestation	RF1+RF2	194	223
Avoid deforestation	AD	83	13
Forest Protection	FP	0	14
<b>Total</b>		<b>829</b>	<b>695</b>

## 5. まとめ

本研究では著者らが開発した AFOLUB を使用して、インドネシアの AFOLU 部門における GHG 排出量および削減量を推計した。本研究で得られた結果を下に示す。

- 1) インドネシアの AFOLU 部門の2030 年の排出量は対策なしの場合で2000 年比2.5 倍の1.7GtCO<sub>2</sub>eq/年となった。
- 2) 2030 年、AAC 10USD/tCO<sub>2</sub>eq 下では農畜産業部門で2000 年の同部門排出量比45%に相当する33MtCO<sub>2</sub>eq/年の削減効果が示された。そのうち、21MtCO<sub>2</sub>eq/年が水田での水管理(MD)や農閑期の稲わらのすき込み(OIR)、肥料の高効率利用(HEF)により削減できることが示された。
- 3) 2050 年までの累積的な費用および削減効果を考慮した推計から、LULUCF 部門では、インドネシアにとって自然再生の強化(ENR)、再植林(RF)、森林伐採の減少(AD)が優先度高い対策になることとなる。こ



これらの2050年までの削減効果は約829MtCO<sub>2</sub>eq/年となる。これらの平均年間削減量は2000年時点のLULUCF部門の排出量の1.2倍、エネルギー関連部門の排出量の約2.6倍に相当する。現在の京都議定書温暖化対策として認められていない森林減少の防止を含めた、新たな枠組みを早急に検討することが求められる。

- 4) また、将来の削減計画を設計する有効な方法として、累積削減効果や導入過程を長期的視点から評価し、将来までの累積削減効果が最も高く見込める対策に資金を投じるなど弾力的な選択が求められるといえる。

以上のように、本研究で用いたAFOLUBは、とりわけ途上国でのGHG排出緩和、農業および国土に関する開発計画の策定に有用な情報を提供する。最後に本論文の限界と今後改善すべき点を述べる。

- 1) 将来の技術費用について  
技術進歩による技術費用の低減が考慮されていないことがある。このため、削減費用が実際より大きく推計されている可能性がある。実際には物価や賃金の変動を含むため、実際の政策の検討にあたっては本モデルとCGEとの補完的な利用による分析等が必要と考えられる。
- 2) 土地価格と林産物の収益について  
本研究では、土地利用変化や林産物生産に伴う収益への効果は考慮しておらず、利用区分間の土地価格の違いや林産物からの収益による土地利用変化への影響は小さいと想定しているが、将来、農畜産財や土地の価格が土地利用変化をもたらすほど大きく変わる可能性も考えられる。また、植林してから林産物を生産し収益を得るまでのラグも同時に考慮されるべきものであり、今後の課題としたい。

## 謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金20・7066による研究成果の一部である。また、本研究は、環境省地球環境総合研究推進費S-6-1「アジア低炭素社会に向けた中長期的政策オプションの立案・予測・評価手法の開発とその普及に関する総合的研究」、A-1103「統合評価モデルを用いた世界の温暖化対策を考慮したわが国の温暖化政策の効果と影響」の支援を受けている。ここに記して感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) Ministry of Environment of the Republic of Indonesia (MoE), 2010: Indonesia second national communication under the UNFCCC (SNC).
- 2) Ministry of Environment of the Republic of Indonesia (MoE), 2009: Indonesia's Technology Needs Assessment on Climate Change

Mitigation, synthesis report.

- 3) Dewan Nasional Perubahan Iklim (DNPI), Indonesia, 2010: Indonesia's greenhouse gas abatement cost curve, [http://www.dnpi.go.id/report/DNPI-Media-Kit/reports/Indonesia-ghg\\_abatement\\_cost\\_curv/Indonesia\\_ghg\\_cost\\_curve\\_english.pdf](http://www.dnpi.go.id/report/DNPI-Media-Kit/reports/Indonesia-ghg_abatement_cost_curv/Indonesia_ghg_cost_curve_english.pdf).
- 4) Rizaldi, B., 2001: Economic assessment of mitigation options for enhancing and maintaining carbon sink capacity in Indonesia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 6, 257-290.
- 5) Hasegawa, T. And Y. Matsuoka, : Greenhouse gas emissions and mitigation potentials in agriculture, forestry and other land use in Southeast Asia, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, accepted.
- 6) IPCC, 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- 7) Ministry of Forestry of the Republic of Indonesia (MoF), 2008: Reducing emissions from deforests and forest degradation in Indonesia.
- 8) Wicke, B., Richard Sikkema, Veronika Dornburg, Andr? Faaij, 2011: Exploring land use changes and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia, *Land Use Policy* 28, 193-206.
- 9) Badan Perencanaan dan Pembangunan Nasional (BAPPENAS), 2009: Reducing carbon emissions from Indonesia's peat lands.
- 10) FAOSTAT, 2012: FAOSTAT. Download from: <http://faostat.fao.org/default.aspx>.
- 11) IRRI, 2011: IRRI World Rice Statistics, Table 30.
- 12) International Fertilizer Industry Association (IFA)/International Fertilizer Development Center (IFDC)/Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1999: Fertilizer use by crop 4th edition, Rome.
- 13) International Fertilizer Industry Association (IFA)/International Fertilizer Development Center (IFDC)/Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2002: Fertilizer use by crop 5th edition, Rome.
- 14) UN, 2007: World Population Prospects, The 2007 Revision Population Database.
- 15) International Energy Agency, 2007: CO2 Emissions from fuel combustion 1971-2005.
- 16) Golan, A., Judge, G. and Miller, D., 1996: Series in financial economics and quantitative analysis, maximum entropy econometrics, robust estimation with limited data, ISBN 978-0-471-95311-1, Wiley, New York.
- 17) Bates, J., 1998: Options to Reduce Methane Emissions (Final Report), ATA Technology Environment, 3773, 3.
- 18) Shibata, M. and T. Fuminori, 2010: Factors affecting methane production and mitigation in ruminants, *Animal Science Journal*, 81, 2-10, doi: 10.1111/j.1740-0929.2009.00687.x.
- 19) Graus, W., M. Harmelink, and C. Hendriks, 2004: Marginal GHG-Abatement Curves for Agriculture, The Netherland, Ecofys.

- 20) USEPA, 2006: Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases, EPA Report, 430-R-06-005, Washington. DC.
- 21) Hendriks, C.A., D. de Jager, K. Blok, 1998: Emission Reduction Potential and Costs for Methane and Nitrous Oxide in the EU-15. Interim report by order of DGXI, EC, M714, ECOFYS, Utrecht.
- 22) Amann, M., L. H?glund Isaksson, W. Winiwarter, A. Tohka, F. Wagner, W. Schopp, I. Bertok, C. Heyes, 2008: Emission scenarios for non-CO2 greenhouse gases in the EU-27 Mitigation potentials and costs in 2020.
- 23) Akiyama, H., X. Yan and K. Yagi, 2010: Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N2O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis, *Global Change Biology* (2010) 16, 1837-1846, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x.
- 24) Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H.H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, C. Rice, R.J. Scholes, O. Sirotenko, M. Howden, T. McAllister, G. Pan, V. Romanenkov, U. Schneider, S. Towprayoon, M. Wattenbach, and J.U. Smith. 2007. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society. B.* 363. doi:10.1098/rstb.2007.2184.
- 25) USEPA, 2005: Greenhouse gas mitigation potential in U.S. forestry and agriculture, EPA 430-R-05-006, Washington DC 20460
- 26) World Bank, 2006: World development indicators, CD-ROM.
- 27) Davis Langdon & Seah International, 2010: Cost Data, download from <http://www.dlsqs.com/ice/>.
- 28) IFCA, Forestry Research and Development Agency (FORDA), Ministry of Forestry, 2007: Consolidation Report Reducing Emission From Deforestation And Forest Degradation in Indonesia, Ministry of Forestry.
- 29) Ministry of Finance and World Bank, 2008: Indonesia Low Carbon Option study: Phase 1 Status: Report and Findings.
- 30) World Resource International (WRI), 2002; State of World Forests – Indonesia.
- 31) Center For International Forestry Research (CIFOR), 2007; The Implications of Deforestation Research Policies To Promote REDD.

(2012. 4. 5 受付)

(2012. 7.14 受理)

## A Study on GHG Emissions and Mitigation potentials in Agriculture, Forestry and Other Land Use sectors in Indonesia

Tomoko HASEGAWA<sup>1)</sup> and Yuzuru MATSUOKA<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>National Institute for Environmental Studies and Research Fellow of the JSPS

<sup>2)</sup>Dept. of Urban and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

In Indonesia, in 2000 around 67% of domestic GHG emissions derives from Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). It is important to evaluate quantitatively mitigation potentials and to specify countermeasures with large mitigation potentials. Using the AFOLU Bottom-up Model, we estimated GHG emissions and mitigation in AFOLU sectors based on a future scenario, harvested area of crops, number of livestock and land use change. Based on the analysis, in 2030 we found that GHG emissions in AFOLU sectors are expected to increase by 2.5 times at the 2000 level in the BaU case. 75% of emission in 2030 derives from peat land drainage. Under 10USD/tCO<sub>2</sub>eq of allowable abatement costs, 33MtCO<sub>2</sub>eq/year of GHG emissions can be reduced in agriculture, which corresponds approximately to 46% of agricultural emissions in 2000. Midseason drainage in rice paddies, fall incorporation of rice straw and high efficiency fertilizer application are expected to reduce around 11MtCO<sub>2</sub>eq/year. For the Land Use, Land-Use Change and Forestry sectors, enhanced natural regeneration, reforestation and avoid deforestation will be the most cost-effective countermeasures considering cumulative mitigation potentials up to 2050.