

S-1 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究

テーマIII アジア陸域生態系の炭素収支変動予測と21世紀の炭素管理手法の検討

(4) 21世紀の陸域炭素管理オプションの総合評価と炭素収支の統合予測モデルの開発

独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター

山形与志樹

〈研究協力者〉 独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター

岩男弘毅・木下嗣基

京都大学大学院地球環境学堂

松本泰子

東北大学東北アジア研究センター

石井敦

尚美学園大学総合政策学部

岡松暁子

〈研究協力機関〉 国際応用システム分析研究所 (IIASA)

Michael Obersteiner

平成14～18年度合計予算額 230,728千円

(うち、平成18年度予算額 49,013千円)

※上記予算額には、間接経費 53,244千円を含む

[要旨] 本課題では、他課題において評価される陸域炭素収支変動に関するモデル分析等とも連携して、京都議定書の第2約束期間以降における吸収源の取扱いに関連するポテンシャル評価等、中長期的な科学的炭素管理手法に関する統合的（自然・社会科学の両面）な検討を実施した。特に、下記の2つの研究テーマに関する検討を実施した。1) 土地利用変化を予測する炭素収支変動予測モデルを用いて、中長期的な陸域炭素管理オプションを評価し、人間活動と自然生態の相互作用を考慮した、炭素管理に係わる統合予測モデルを開発した。2) 陸域炭素収支を中長期的に適切に管理するため、京都議定書の第2約束期間以降においてどのような気候レジーム（制度）が望ましいのかに関して検討した。

[キーワード] 陸域炭素収支、炭素管理、ポテンシャル評価、予測モデル、レジーム分析

1. はじめに

地球温暖化問題に対処するための中長期的な科学的炭素管理手法を検討する上で、人為的な活動によりもたらされる陸域炭素収支の変動に対する正確な理解が不可欠である。本課題では、本プロジェクトの他課題から得られる成果との連携を図りつつ、陸域炭素収支を中長期的に管理する炭素管理方策を検討するため、下記の課題に関する研究を実施した。

(1) 炭素管理に係わる統合予測モデルの開発と陸域炭素管理オプションの評価

(2) 中長期的な陸域炭素収支変動を考慮した統合的炭素管理モデルの開発

(3) 効果的な炭素管理レジームの要件に関する分析

尚、本課題は、ICSU（国際科学会議）における国際研究計画グローバル・カーボン・プロジェクト（Global Carbon Project；以下GCP）のテーマ3「炭素循環の将来予測と管理」に対応した国際

共同研究課題とし手位置づけられている。その一環として、国際応用システム分析研究所（IIASA）との共同研究を実施した。

2. 研究目的

（1）炭素管理に係わる統合予測モデルの開発と陸域炭素管理オプションの評価

本サブテーマでは陸域炭素収支モデルによる吸収量評価結果を用いて、土地利用変化等の人為的な活動による中長期的な陸域炭素収支管理ポテンシャルを統合的に予測・評価するためのモデルの開発を実施した。

（2）中長期的な陸域炭素収支変動を考慮した統合的炭素管理モデルの開発

本サブテーマでは、炭素吸収源の中長期的な変動を踏まえて炭素管理が今後どのように実現（対策の規模と実施時期）して行くかを検討するため、国際炭素管理レジーム形成モデルを開発して分析した。

（3）効果的な陸域炭素管理レジームの要件分析

本サブテーマでは、有効な炭素管理レジーム（制度）について社会科学的な検討のために、科学的アセスメントの影響、履行確保メカニズムの可能性について分析を実施した。

3. 研究方法

（1）炭素管理に係わる統合予測モデルの開発

1) 陸域炭素管理オプションの評価

陸域生態系における炭素収支の変動には自然的なものと人為的なものがある。今後の中長期的な温暖化対策の検討に当たっても、やはりこの人為的な影響による二酸化炭素排出を減少させること、もしくは吸収源としての生態系機能を拡大させるための方策の検討が重要である。その中で、京都議定書の第1約束期間においても考慮されることになった温暖化対策が、新規（再）植林と森林管理（Forest Management）である。樹木がなくなってしまったところに木をもう一度植えることと、樹木がある場所において、適正に管理をすることにより森林をさらに成長させることに注目して、京都議定書においてカウント可能な炭素吸収源活動として認められた。

吸収源の問題について、今後京都議定書あるいは気候変動枠組条約のなかでどう考えていくかについて、ポスト京都の枠組を含めて整理すると、吸収量を削減量に加える意味として温暖化のみに関する問題と、温暖化以外の問題の両方の意味があると考えられる。温暖化の問題としては、排出削減ということで、つまり2Gtにおよぶ大規模な森林減少を減らすということは大きな意味がある。また、吸収エネルギーの代替効果ということで、伐採木材等をエネルギーとして使っていくことも重要である。さらに、吸収と排出を両方考えることで、温暖化対策の一貫性を持たせることができる。さらに、土地所有者から政府までの全てのレベルに対しインセンティブを与えることが重要で、「森林減少の防止」が新たなオプションとして検討されることを通じて、発展途上国も含めた森林所有者レベルにおいて、森林保全による温暖化対策へのインセンティブを与えることができれば、それは大変意味があるものと考えられる。

また、2013年以降の陸域炭素吸収源の評価オプションとしては次の二つが有力なものと考えられる。

・全管理地を対象とするネットネットアカウンティング

現在、基準年が1990年と一義的に決定されているが、この考え方を柔軟にして、ネットネット

で考えるという案である。例えば、基準年ではなく期間として90年前後を取るという考え方や、第1約束期間を基準年とする考え方がある。第1約束期間と第2約束期間が近すぎて、ネットネットが難しいのであれば、第1約束期間の前の5年間をネットで取ることも可能である。この場合の問題点は、日本など、森林の高齢化が進んで吸収量が飽和していく国では、ネットネット方式では徐々に吸収量減少してしまうという問題点がある。図1に概要を示す。

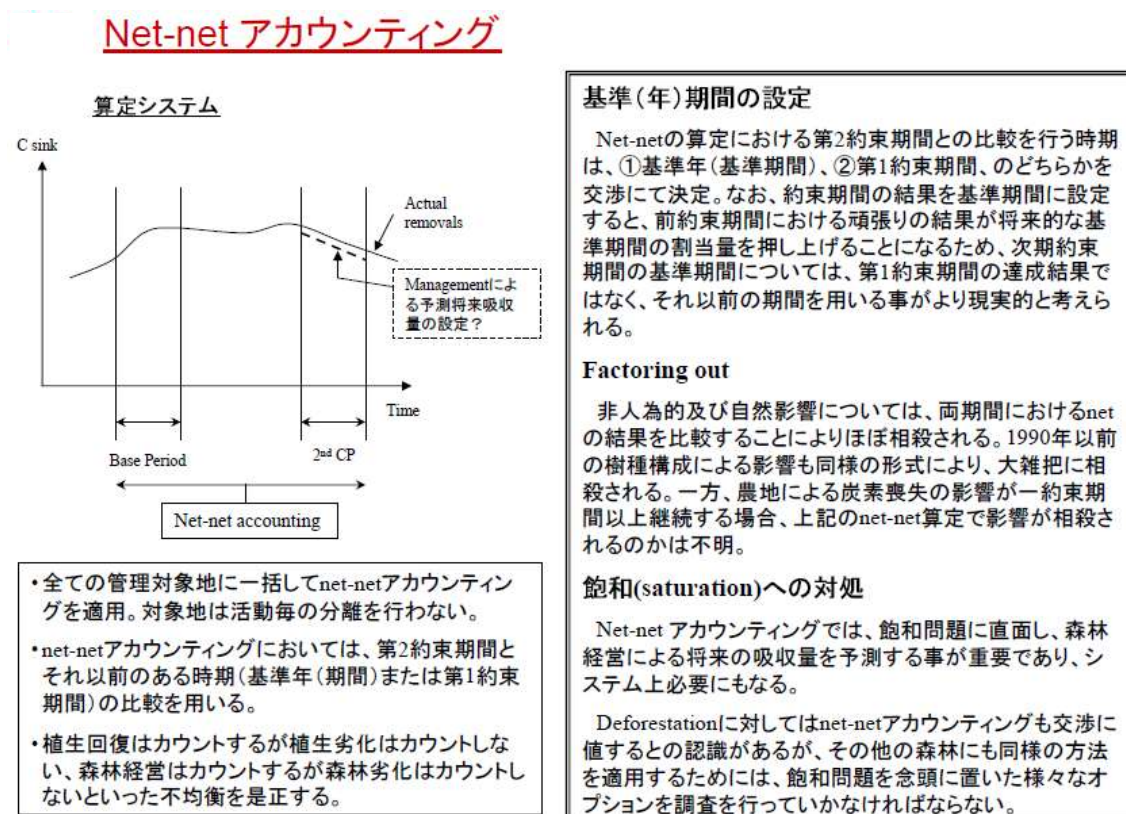


図1 全管理地を対象とするネットネットアカウンティングの概要

・全管理地を対象とするグロスネットアカウンティング

グロスネットの場合、今までと同様のカウント方式となるため、基準年の90年でシンクがカウントされていないのに第1約束期間で突然カウントが始まり、さらに第2約束期間も継続するため、この差額が自動的にクレジットとなる。森林全体の吸収量をカウントすることになると、非常に大きな値となるため、この目標値の調整が必要となる。その方法としては、追加的な人為的な活動による吸収量だけを分離(ファクターアウト)、上限値(キャップ)を設定する方式、あるいはベースラインを設定してそこからの差額を交渉する方式が考えられる。図2に概要を示す。

Gross-net アカウンティング

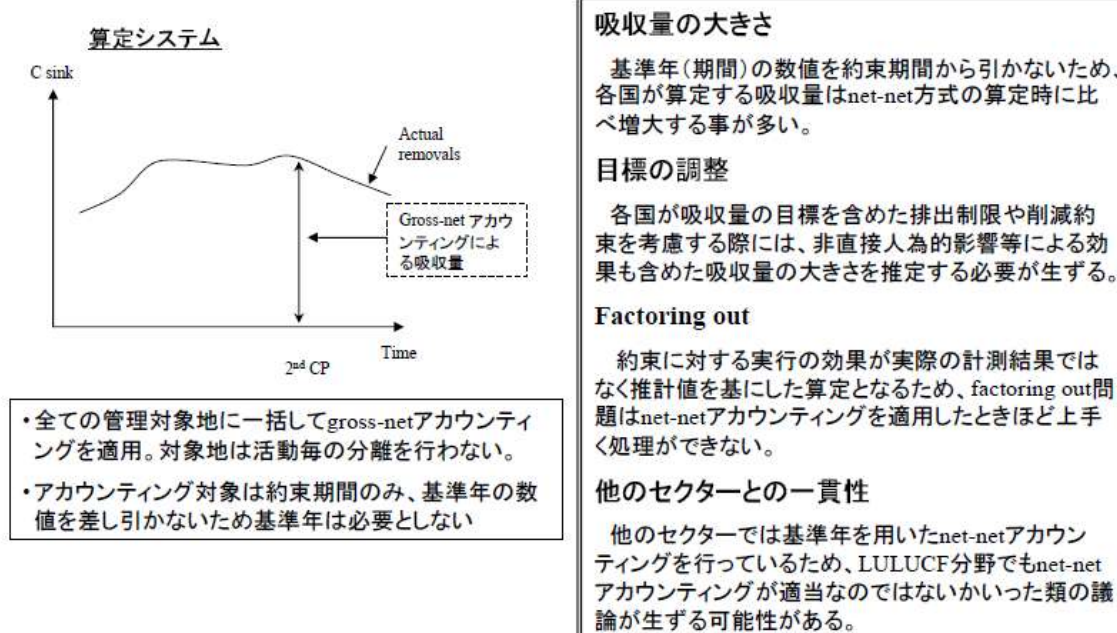


図2 全管理地を対象とするグロスネットアカウンティングの概要

陸域炭素管理のポテンシャル量を評価して検討するためには、このようなアカウンティング方式の違いや、炭素管理施策による影響を評価しなければならない。本課題では、本プロジェクトによってえられた利器域生態系における炭素収支の変動に関する知見と、人為的な土地利用変化の予測を組み合わせることで、炭素循環の変動予測と評価を実施した。

2) 土地利用モデルの開発

本プロジェクトにおいて開発を行った土地利用モデルでは、プロジェクト内で得られた、従来と比較して精度の高い(科学的に頑健である)陸域生態系モデルと、土地被覆情報を用いている。これらに社会的な制約である、人間活動や経済の要因を含めたモデルとして、土地利用変化の推定するモデルを開発した。このモデルでは、各国家の意志を取り込めるように、社会的要因に関しては国家単位の取り扱いをし、自然科学的要因に関しては、メッシュ単位の取り扱いを行う。

本研究では、炭素クレジットの導入に伴う土地利用変化を予測する手法を開発し、炭素クレジットの導入による土地利用変化を数値モデルを用いて評価する。土地利用変化は、主に経済的な要因によると仮定する。土地利用変化を予測するためには、林業の経済的評価と農業の経済的評価を同等に行う。林業、農業の経済評価には、農林業の生産性に関する情報が必要となるが、その情報には陸域生態系モデルや、農業生産性モデルによる推定値を用いる。これによって、国内の地域差による生産性の相違を明確にすることが出来る。また現状の土地利用状況については、1kmメッシュの全球土地被覆図をもとに推定を行う。モデルの基本的な解像度は緯度経度0.5°とし、各メッシュ内における土地利用割合の推定を行う。農業と林業の経済評価を行う場合に必要となる穀物や木材の価格は、国単位で推定を行う。

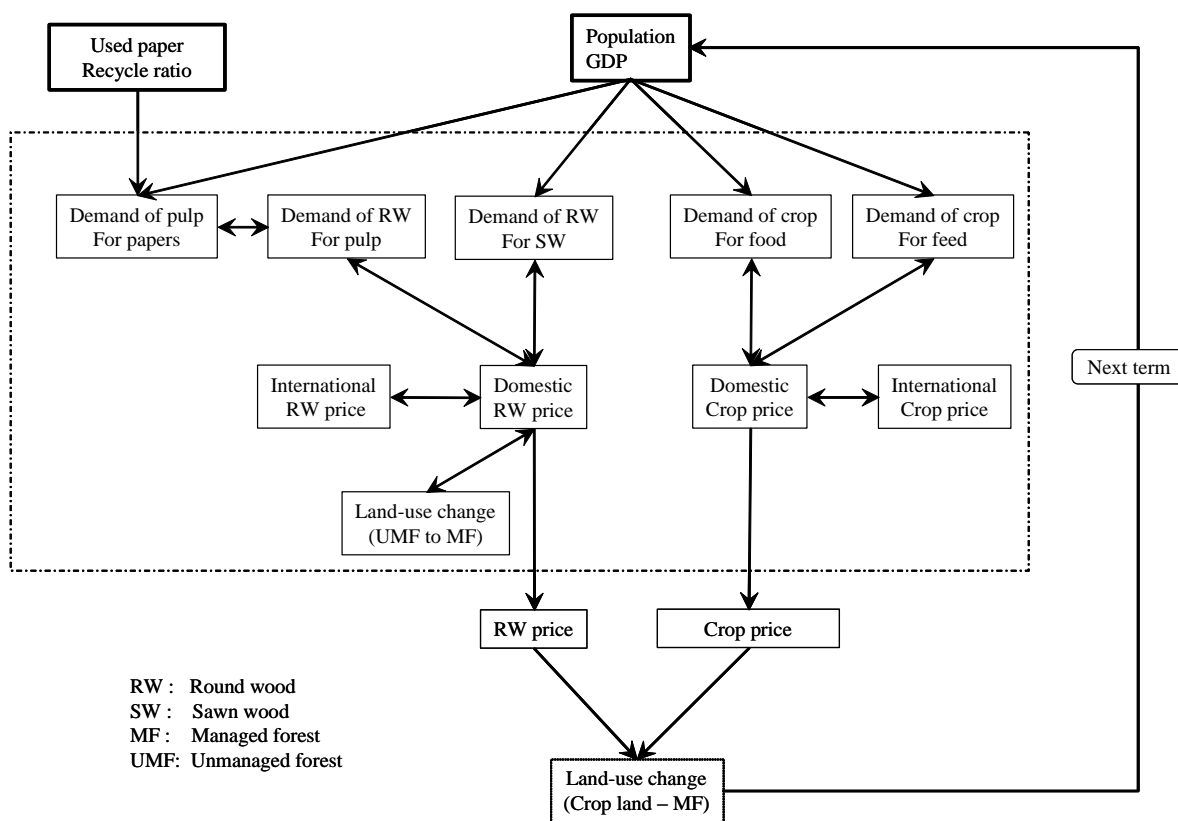


図3 モデルの流れ

モデルのフローを図3に示す。太線で囲われた要素は外生変数を表し、細線で囲われた要素は内生変数である。また破線で囲まれた部分は反復計算によって計算される。

まず、国毎の人口およびGDPは外生変数としてシナリオ毎に与える。このデータは、SRESシナリオをもとに国毎にダウンスケールしたものである。人口、GDPに加えて穀物価格、丸太価格から、各国の穀物需要および丸太需要を算出する。需要量は、全ての国において価格と需要が均衡する量となる。一方、供給は生産者利益から決定される。穀物は、作付けと収穫の間に1年のラグがあると仮定し、翌年度の作付けが増加する。しかし、林業では植栽と伐採のラグが数十年と非常に大きい。また未利用の森林である非管理森林が存在する点が農業と異なる。丸太価格の上昇に関しては、非管理森林の管理森林の移行が年度内に発生するとする。非管理森林から管理森林への移行では丸太を産出するため、丸太価格を下落させる効果があり、需要と供給が均衡するまで伐採される。期末には、農地から管理森林、草原から管理森林への移行が発生する。農地から管理森林への移行は、林業の一伐採期間での正味の収益が、林業の方が大きい場合におこる。草原から管理森林への移行は、林業の一伐採期間での正味の収益が正であれば発生する。林業や農業の収益は、丸太や穀物の売却価格から管理コストを差し引く。林業では、植林費用と伐採費用、丸太輸送費用が差し引かれる。植林や伐採の費用は傾斜に依存すると仮定し、丸太の輸送費用は、洋上での運搬費用が安価であることを考慮し、伐採地から大河もしくは海岸までの距離の関数とした。本モデルでは、丸太の種類は1種類のみとし、穀物の種類も1種類のみとした。また、輸出入には関税が課せられる。

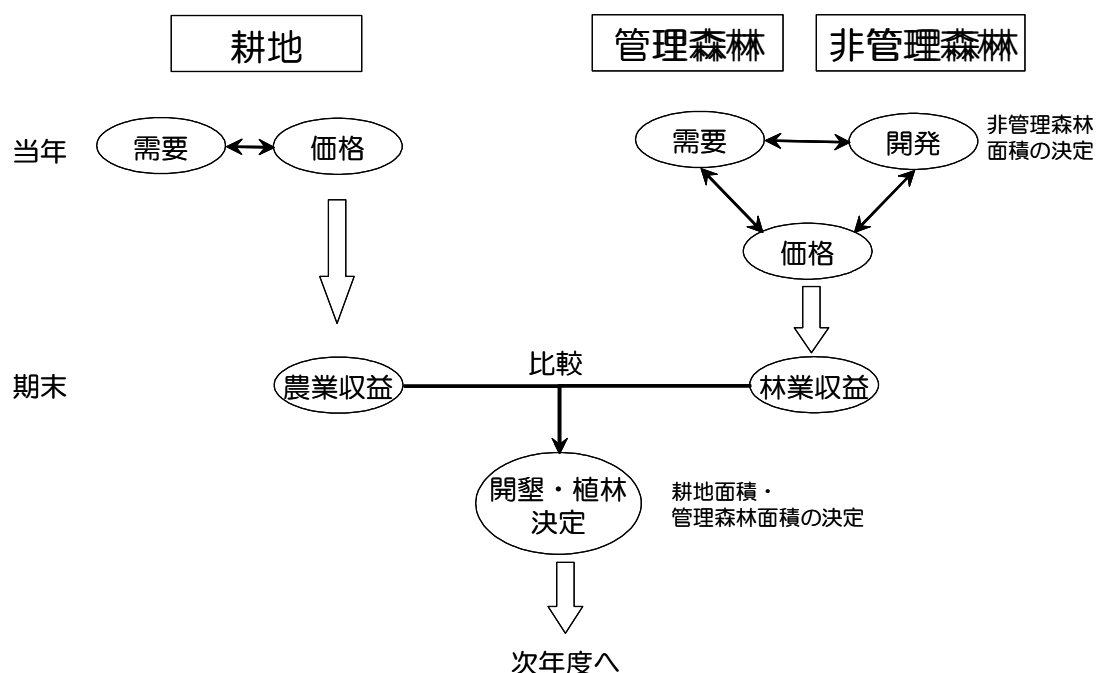


図4 価格決定の流れ

モデルへの入力変数は、GDP(国毎)、人口(国毎)、価格弾力性(国毎)、バイオマス利用率(国毎)、輸送距離(0.5°メッシュ毎)、農林業収率(0.5°メッシュ毎)、傾斜(1kmメッシュ毎)となり、内生変数は、管理森林面積(0.5°メッシュ毎)、非管理森林面積(0.5°メッシュ毎)、耕地面積(0.5°メッシュ毎)、穀物丸太価格(国毎)、穀物丸太輸出入量(国毎)である。

3) 全球土地利用情報の整備

土地利用予測モデルの構築には、全球に於ける各種のデータセットが必要となる。重要なデータセットとしては、

- ・ 植物(林業、農業)の生産性
- ・ 土地利用の現状

である。まず前者であるが、農業の生産性に関しては既往の研究が進んでおり、そのデータを活用する。林業の生産性については、全球のデータセットは存在しない。そこで、本プロジェクトのテーマIIIサブテーマ(1)で開発された陸域生態系モデルの結果を利用する。具体的には、地上部バイオマスの推定にはTsuBiMoを利用し、土壌中炭素ストックの推定にはSim-CYCLEの結果を用いた。地上部の推定にTsuBiMoを用いた理由は、潜在的な生産性を考慮する為には有利であると考えられる為であり、地下部の推定にSim-CYCLEを用いた理由は、農業利用の場合の土壌中炭素ストックの推定がなされているためである。

次に土地利用の現状に関するデータセットであるが、これは精度の高いものは存在しない。一方、土地被覆図は全球を対象としたものは複数存在する。土地被覆は現在の状態を表したもので、必ずしも利用状態を表している訳ではない。また、精度検証が十分になされている訳ではない。そこでまず、本課題テーマIIIサブテーマ(3)と協力体制のもと、既存の土地被覆図の精度検証を行った。手法は有志によって行われているDegree Confluence Project(以降DCPと略す)の情

報を用いたものである。その精度検証の情報をもとに開発された土地被覆の全球データセットを利用する。本モデルで対象とする土地利用は、森林、草原、農地の3種類である。農地に関しては、新土地被覆図により明確に分類可能である。草原の内、牧草地として利用されている土地を分類することは非常に困難であり、森林に関しても同様である。これに対し本モデルでは、森林の内、人間が活用しているもの（管理森林）は、経済的な評価から行い、草原に関しては全てが利用されていない土地と仮定した。

ここで問題となるのは、TsuBiMoでは潜在的な生産性を表しているため、現状とは必ずしも一致しないことである。これは、現在森林の場所を伐採して農地に転換する場合、伐採された木材が売却可能であるか否かに影響する。これは初期コストのため大きく影響する。新土地被覆図を含め何れの土地被覆図でも、現状が木材を算出するかどうかは不明である。このため、新土地被覆図のSimplified IGBP 16分類から、

- ・ 森林
- ・ 農地
- ・ 草地
- ・ その他

の4種類に再分類する。

（2）中長期的な陸域炭素収支変動を考慮した統合的炭素管理モデルの開発

本モデルは、複数地域を考慮した気候経済統合モデルであるRICEモデルと、陸域生態系の炭素循環モデルであるCo_xモデルを基礎ダイナミックシステムとして利用し、長期的な吸収源変動効果と非線形な炭素循環システムの変動及びカタストロフィ型被害関数の導入を行うことで、排出と効果、意思決定の関連をより詳細化した、複数の意思決定主体による微分ゲーム理論による統合的炭素管理シミュレーションモデルである。パラメータについても現実の気候や経済をトレースするものを用い、複雑な機構と経済を再現、実際の意思決定に近い状態をシミュレーションし、計算によって複数の意思決定主体の最適反応制御とそのナッシュ均衡を導出することに成功した。

・モデルの概要

陸域炭素収支の変動、炭素管理のコストとベネフィット、国家間の継時的な交渉プロセスを、それぞれダイナミカルシステム、効用関数、動的ゲームとして記述、さらに全体システムを微分ゲームとしてモデル化した。微分ゲームを用いたアプローチによって、自然生態的な制約条件下における多様なエージェント（リスク回避度の異なる意思決定主体）の継続的な意思決定過程を、動的均衡戦略（マルコビアンナッシュ均衡等）の概念を用いて分析した。微分ゲームは、最適制御とゲーム理論の融合した手法である。最適制御問題として、ベネフィットとコストを勘案して効用を最大化する動的な最適意思決定過程の分析が可能であると同時に、複数の主体（エージェント）が存在し、多様な価値観に基づいて意思決定をする動的ゲームにおける、他者の行動を考慮した最適戦略（マルコビアン・ナッシュ均衡）に関する分析が可能である。また、炭素管理レジーム形成の分析に微分ゲームモデルを用いる他の利点としては、1)炭素循環システムの最適制御、2)排出による利益の国際交渉による調整、3)地球温暖化ダメージの分配、等を取扱える点があげられる。

(3) 効果的な気候レジームの要件分析

中長期的な気候レジームにおける陸域炭素吸収源に関する社会科学的な分析が必要な問題として、今後は、「森林減少の防止」が重要なオプションとなるが、森林減少のベースラインを推定することや、その抑制を実現するためのメカニズムについての検討が必要となる。本サブテーマでは、制度的に考慮可能なモデルの構築の要素として「科学アセスメントの影響」と「履行確保メカニズムの可能性」の2点に関する分析を実施した。

1) 科学アセスメントの影響

国際レジームにおける交渉では、学術研究とは異なる違う振る舞いをする科学アセスメントが各国の意思決定に大きな影響を与え得ることが分かってきている。本研究では、そうした科学アセスメントの実施過程とその方法論を、欧州酸性雨レジームと国際捕鯨管理の事例をもとに分析した。

2) 履行確保メカニズムの可能性

国家の国際義務違反に対しては、従来、国家責任を追及したり、紛争解決手続に付したりすることによって平和的な解決を図り、あるいは貿易制限のような、他のレジームとの連携を通して義務の履行を確保するように努めてきた。これらの既存の国際法の履行確保の諸形態を再検討し、その有効性と限界を明らかにすることは、今日の問題への課題を導き出すために不可欠である。そこで、まずは研究の基盤として、まずこれらの諸形態の整理と再評価、既存のレジームの再検討を行った。その上で、予防原則、国際社会の共通利益概念等、新しい概念の確立のために、これらの概念の出現の経緯を検討し、それらを一般国際法の中で確立するための要件の検討を行った。

4. 結果・考察

(1) 炭素管理に係わる統合予測モデルの開発

1) 陸域炭素管理オプションの評価

a. 全球土地被覆図の整備

既存の土地被覆図の比較を行ったところ、アジア地域ではMOD12とGLC2000が比較的高い精度を有していることが判明した。(表1) エラー! ブックマークが定義されていません。

表1 土地被覆図検証結果

	Point	New Map		MOD12		GLC2000		UMD		IGBP	
		○	×	○	×	○	×	○	×	○	×
Forest	244	199	108	183	118	182	118	193	170	123	107
Grass	194	53	62	50	48	52	71	76	134	43	25
Crop	256	193	146	194	155	178	175	109	109	215	269
Water	79	41	8	40	12	33	5	40	9	40	15
Residential	14	4	7	5	14	2	3	2	4	2	3
Others	61	19	8	20	9	20	9	2	0	5	1
Total		509	339	492	356	467	381	422	426	428	420
一致度(%)		60.0		58.0		55.1		49.8		50.5	

しかし、MOD12とGLC2000が比較的高い精度を有しているといえ、その精度は60%以下である。それをもとに作成した新土地被覆図(表1のNew Map)も60%である。本プロジェクトの対象となる東アジア地域では、砂漠や雪氷圏にあたる”Others”の割合も低く、大半が「Forest」、「Grass」、「Crop」に分類される。この中でGrassとCropの正解率が低くなっている。この原因を解析するために、全球を対象として、MOD12とGLC2000の比較を行った。その様子を表2に示す。

表2 土地被覆図検証結果 (未発表)
GLC2000の分類に対するMOD12の分類割合

		MODIS																GLC2000			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16				
GLC2000	0	1	81	0	1	2	0	0	6	3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	1	2	1	6	0	17	23	0	5	17	10	4	6	0	9	0	0	6	0	1 Tree Cover, broadleaved, evergreen	
	2	4	38	2	0	2	17	0	10	14	2	5	2	0	3	0	2	2	0	2 Tree Cover, broadleaved, deciduous, closed	
	3	5	6	0	18	0	12	0	38	17	1	7	0	0	0	0	0	0	0	3 Tree Cover, broadleaved, deciduous, open	
	4	6	19	3	2	5	48	0	4	8	2	1	3	0	4	0	0	3	0	4 Tree Cover, needle-leaved, evergreen	
	5	7	0	89	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	0	0	0	3	0	5 Tree Cover, needle-leaved, deciduous	
	6	8	10	41	0	1	6	1	4	6	4	2	0	14	0	0	7	0	1	6 Tree Cover, mixed leaf type	
	7	17	0	43	0	0	3	0	1	13	15	4	5	0	12	0	0	5	0	7 Tree Cover, regularly flooded, fresh water	
	8	3	0	3	0	3	0	1	7	41	37	3	1	0	0	0	0	1	0	8 Tree Cover, regularly flooded, saline water	
	9	9	7	13	0	0	3	0	35	22	8	5	0	0	2	0	2	0	0	9 Mosaic: Tree Cover / Other natural vegetation	
	10	10	15	0	3	0	5	0	41	12	1	14	0	0	1	0	7	0	0	10 Tree Cover, burnt	
	11	11	6	17	1	2	11	0	26	15	4	7	2	0	5	0	1	2	1	11 Shrub Cover, closed-open, evergreen	
	12	12	0	1	0	1	1	2	38	12	18	16	1	0	5	0	0	1	3	12 Shrub Cover, closed-open, deciduous	
	13	13	0	1	0	0	2	0	35	5	11	27	3	0	8	0	0	3	5	13 Herbaceous Cover, closed-open	
	14	14	0	0	0	0	0	0	56	2	1	16	0	0	3	0	2	0	17	14 Sparse herbaceous or sparse shrub cover	
	15	15	8	4	1	1	6	0	32	13	10	8	0	3	4	0	6	0	1	15 Regularly flooded shrub and/or herbaceous cover	
	16	16	0	3	0	1	2	0	6	5	11	11	7	0	50	1	0	7	0	16 Cultivated and managed areas	
	17	18	0	2	0	0	3	4	0	8	9	22	17	4	0	26	0	0	4	2	17 Mosaic: Cropland / Tree Cover / Other natural vege
	18	19	0	0	0	0	0	0	3	3	1	2	3	0	14	62	3	0	2	18 Mosaic: Cropland / Shrub and/or grass cover	
	19	20	0	0	0	0	0	0	14	0	0	7	0	0	0	0	0	0	77	19 Bare Areas	
	20	21	2	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	88	0	0	20 Water Bodies	
21	22	0	0	0	0	0	0	8	0	0	2	0	0	0	0	8	69	12	21 Snow and Ice		
22	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22 Artificial surfaces and associated areas		
23																			23 No data		

MOD12の分類に対するGLC2000の分類割合

		MODIS																MODIS	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
GLC2000	0	1	3	69	0	6	4	5	0	7	4	0	2	19	0	0	0	0	0 water
	1	2	2	3	2	47	22	5	1	10	6	2	0	3	4	3	0	0	1 evergreen needleleaf forest
	2	4	60	1	6	8	22	9	3	12	2	4	5	11	2	7	1	0	2 evergreen broadleaf forest
	3	5	4	0	74	0	7	0	5	6	0	2	4	0	0	0	0	0	3 deciduous needleleaf forest
	4	6	10	0	7	7	23	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	4 deciduous broadleaf forest
	5	7	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	5 mixed forests
	6	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	6 closed shrublands
	7	17	0	10	0	1	2	1	0	4	5	1	0	5	3	2	0	0	7 open shrublands
	8	9	3	0	0	0	5	0	6	0	14	14	0	0	2	0	0	0	8 woody savannnas
	9	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	9 savannnas
	10	11	2	2	3	1	3	1	2	3	0	1	1	2	0	0	0	0	10 grassland
	11	12	1	1	0	6	2	22	16	13	20	13	0	3	4	5	0	0	11 permanent wetlands
	12	13	0	1	0	3	3	16	17	6	15	27	42	3	8	6	0	0	12 croplands
	13	14	2	0	0	1	0	12	29	2	2	17	6	0	3	4	2	4	13 urban and built-up
	14	15	3	0	2	0	1	1	2	2	2	1	5	14	0	2	0	0	14 cropland/natural vegetation mosaic
	15	16	1	3	0	8	6	11	4	8	19	14	0	5	65	34	0	0	15 snow and ice
	16	18	0	0	0	4	2	3	0	3	7	4	0	0	6	2	0	0	16 barren or sparsely vegetated
17	19	0	0	0	0	0	2	10	0	0	10	0	0	0	3	0	0		
18	20	6	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0	22	0	4	89	0		
19	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	94	2		

エラー! ブックマークが定義されていません。

薄い緑の部分は分類が困難な土地被覆である。薄い緑の部分の対応を考慮すると、この部分は一律に草原として取り扱うことの方が整合性は高くなる。また、Shrubに分類される地域は、低木であ

り、林業が成立しない。両者を考慮し、新土地被覆図のサバンナや低木林は草原として取り扱うことが土地利用の観点からは妥当であることが分かった。

表2によるとCropが比較的一致度が高い。しかし両者の一致度は70%程度であり、総面積は大きな差が見られる。面積の差違は、穀物生産量に影響を与えるため、センサスを含めて高い一致度が要求される。各国のセンサスによる農地面積と、GLC2000、MOD12の比較を図5に示す。

エラー! ブックマークが定義されていません。

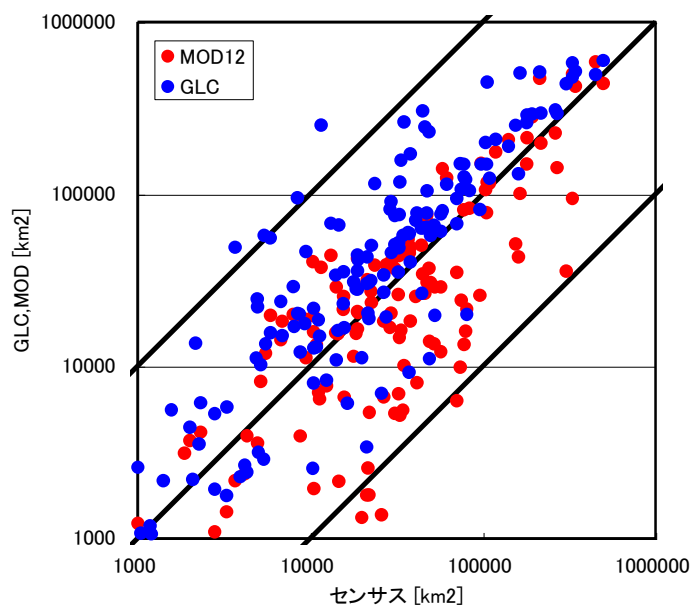


図5 農地面積に関する国別のセンサスとMOD12、GLC2000の比較（未発表）

GLC2000はやや過大評価、MOD12はやや過小評価の傾向がある。しかし、MOD12に関しては、一部の国でセンサスと比較して非常に大きい値と与えており、総面積ではセンサスと近い値となる。以上の結果より、GLC2000やMOD12の農地面積を経済モデルに直接用いることは困難であり、本プロジェクトではセンサスのデータと一致するように収率を変化させた。

b. シナリオ比較

図6にSRES A2、B1、B2の各シナリオを用いた場合の土地利用変化を示す。また図7に各シナリオの伐採面積の時間変化を示す。伐採面積の合計は、B2シナリオが10～20%程度A2シナリオ、B1シナリオより大きいだが、A2シナリオとB1シナリオは大きく変わらない。一方、伐採地域の分布はA2シナリオではアフリカ中央部の伐採面積が小さいが、B1シナリオでは伐採が進む結果となった。さらに、このモデルでは各国内の伐採地域の分布も推定可能で、例えばザイールでは国内の分布が大きく異なる結果が得られた。これは輸送費や林業経営の費用が地理的な要因により異なる為であると推察される。また、化石燃料消費による二酸化炭素の排出はB2シナリオが最も少ないとされているが、土地利用変化による二酸化炭素排出はB2シナリオがA2、B1シナリオよりも大きい結果となった。これは現在穀物需要量が小さいアフリカでの需要量の増加が大きいためである。

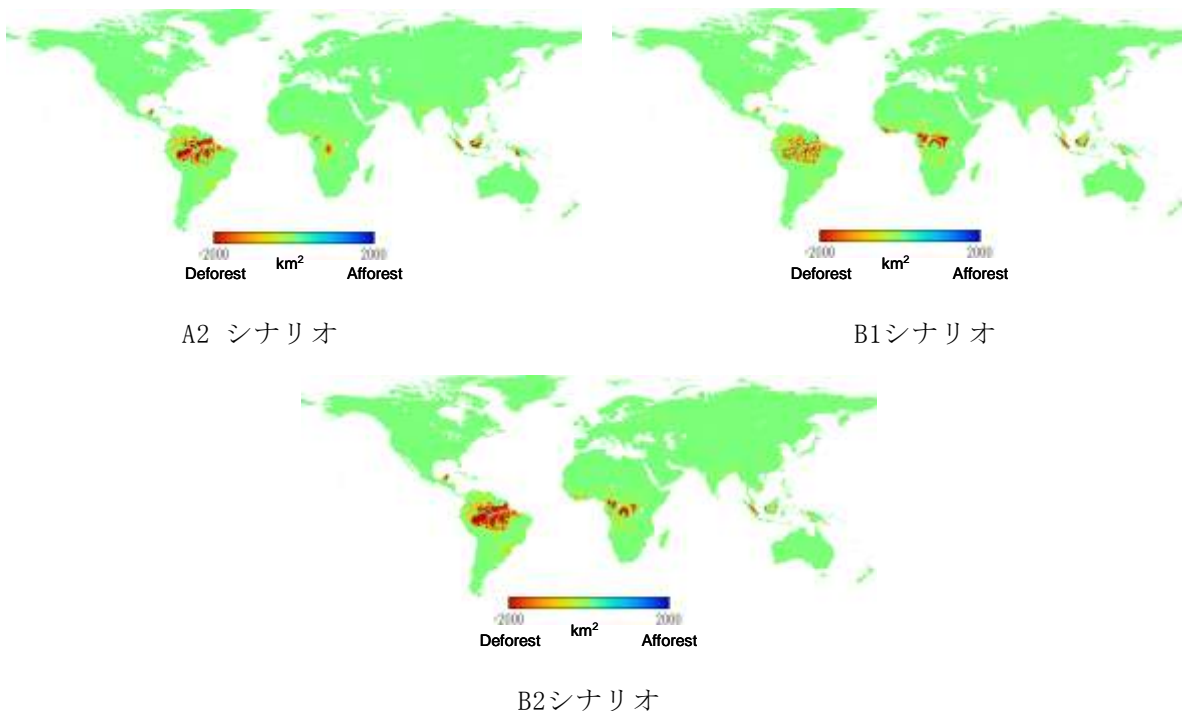


図6 SRESシナリオと土地利用変化

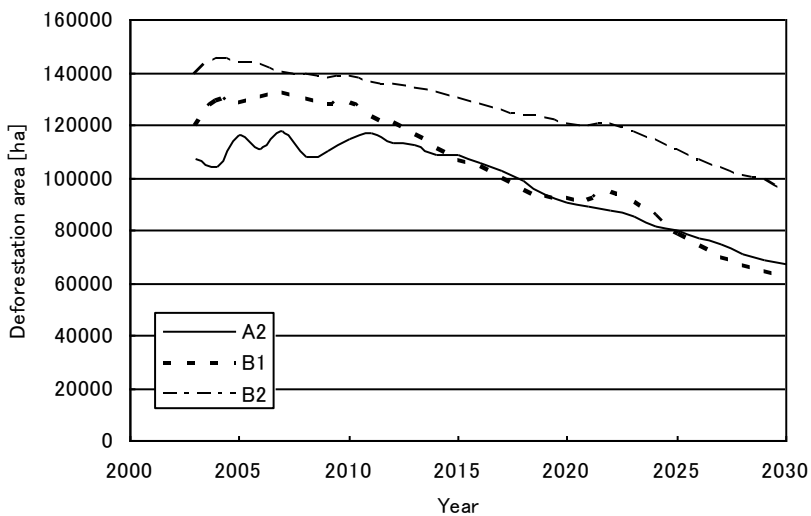


図7 SRESシナリオと土地利用の時間変化

c. 炭素価格

図8に炭素価格を0\$/t-C、20\$/t-C、40\$/t-Cと変化させたときの2000年～2030年の森林面積の増減を示す。0\$/t-Cは炭素クレジットが導入されない状況での森林面積の増減を表している。炭素クレジットが設定されると北米やヨーロッパでの植林が進み、赤道地域の開墾が減少する傾向がわかる。特に開墾 (Deforestation) が減少する影響が大きい。一方、2000年を100としたときの2030

年の木材の価格は炭素クレジット0\$/t-Cでは120、20\$/t-Cでは135、40\$/t-Cでは146と上昇し、穀物価格も0\$/t-Cでは103、20\$/t-Cでは118、40\$/t-Cでは138と上昇する。穀物価格が上昇する理由は、開墾面積が少ないため、穀物需要の増大に供給が追いつけないためである。木材価格の上昇は、非管理森林の伐採時、炭素クレジットの支払いが発生するため、非管理森林の管理化を抑制するためである。

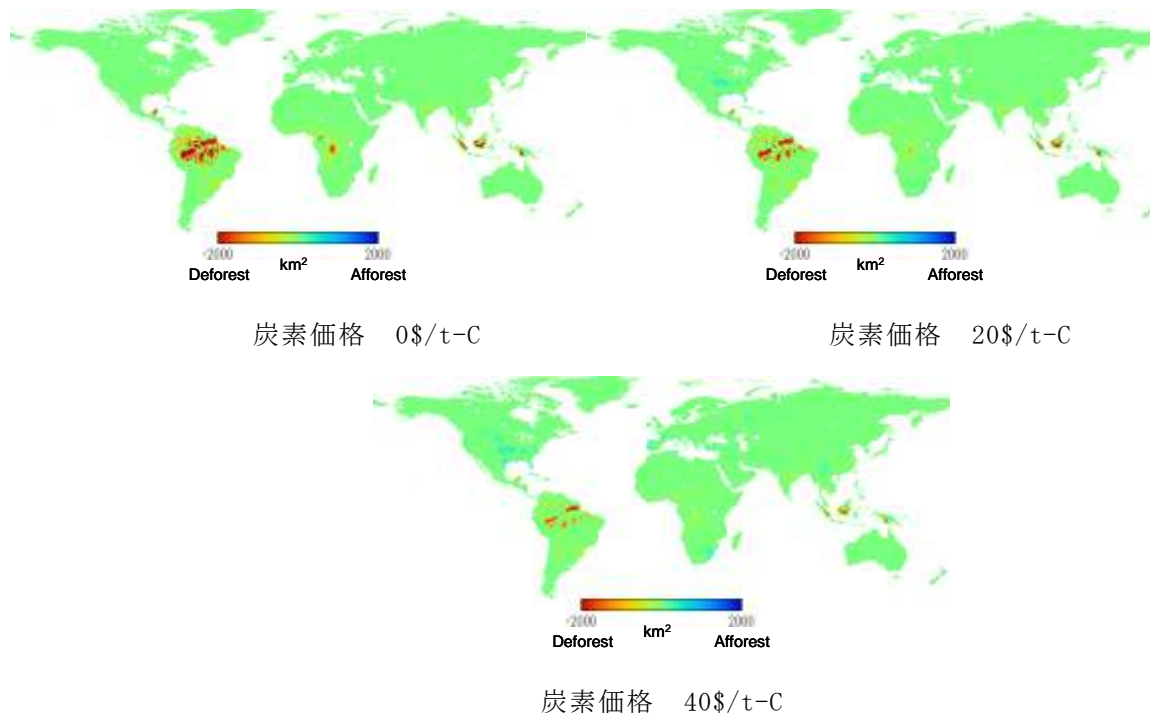


図8 炭素クレジットと土地利用変化

d. 炭素価格上昇シナリオ

前節では、炭素クレジットは一定の条件で計算を行った。これは既往の研究でも一定とするものが多いためである。また、CDM植林の試算も炭素クレジット一定の条件で行われることが多い。しかし、炭素クレジットは、気候変動や、炭素隔離などの技術的な要素により変化していくことが予測される。そこで図9に炭素価格が上昇的に変化する場合の森林面積の変化を示す。各々上昇率が0%、1%、3%、5%である。年間5%の増加は50年間で炭素価格が\$20から\$86に上昇する。炭素価格の上昇が1%の場合、0%の場合と比較すると、植林面積が減少するが、開墾の面積は大きく変化しない。しかし、上昇率が割引率を上回る場合は、成長時に獲得する炭素クレジットを、伐採時に支払う炭素クレジットが上回るため、林業の収益性が悪化する。このため、農地への転換が行われるようになる。

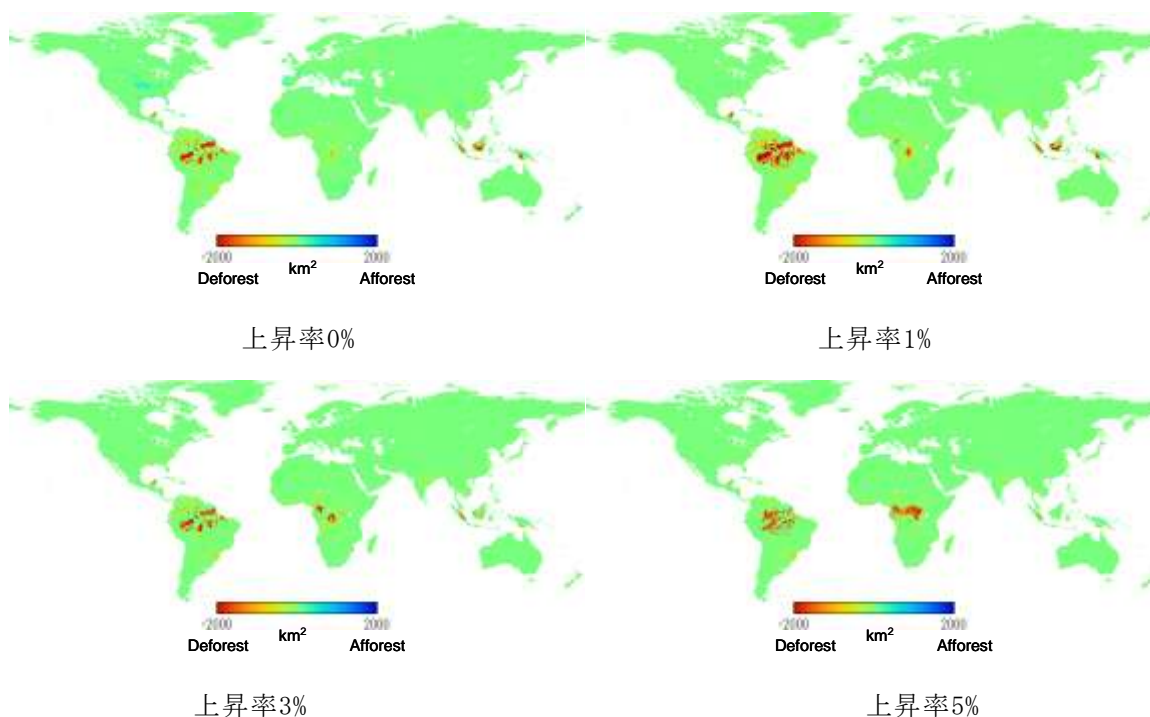


図9 炭素クレジットの上昇と土地利用変化

e. 考察

本課題では、耕地と森林に重点をおいた土地利用変化予測モデルを構築し、炭素クレジットの影響について評価を行った。

SRESシナリオによる土地利用の将来予測では、経済発展の違いによる分布パターンの相違がみられた。とくにアフリカ中央部の土地利用変化がシナリオによって大きく異なり、当該地域の土地利用予測には、社会・経済シナリオの精緻化が必要であることが示された。また、シナリオにより、国内の土地利用変化パターンが異なる結果が得られた。これは林業経営費や、木材・穀物の輸送費の影響を受けるためであると考えうる。農林業の収益性を考える場合は、地理的な要素の精緻化が重要であることが示唆された。人口分布やインフラストラクチャ（道路、港湾といった社会基盤情報）の情報を導入することで、より高精度な予測ができると考えられる。また、基盤データとしての土地被覆図などにも不確実性があることが指摘されており、土地被覆図や標高、河川情報などについての精緻化も必要と考えうる。

次に炭素クレジットが土地利用に与える影響を検討した。炭素クレジットが課されることにより、土地利用変化は抑制される結果となった。これは森林を切り開いて耕地に転換することを抑制するだけでなく、非管理森林を林地に転換し、林業活動を行うことも抑制される。これにより、木材・穀物の価格は上昇することも同時に示された。

最後に炭素価格が上昇する場合の予測を行った。炭素価格の上昇率が割引率を上回る場合、成長時に獲得できる炭素クレジットが、伐採時に支払う炭素クレジットを下回るため、収益性が悪化する。これによって森林から農地に転換する土地利用変化が誘発される。ただし、炭素価格の上昇率が非常に高い場合、農業に転換することも不可能になるため、非管理森林が増大する結果となった。

以上より、炭素クレジットの導入は森林の減少に歯止めをかけることが示唆されたが、林地の減少を引き起こす可能性もあり慎重に対処する必要があると考える。本論文では言及しなかった、木材製品の再利用としてバイオマスエネルギーの燃料を考慮する場合は、炭素クレジットが得られるため木材製品に利益が見込める。ただし、炭素価格の上昇率が高い場合は効果が少ないと考える。

本研究で得られた今後の課題は大きく二つあげられる。まず、林地から農地への転換が減少することにより、穀物価格が上昇することが予想されるが、上昇した価格に見合った肥料の投入が行われることも予想されるため、今後のモデルでは肥料価格・投入量も推定することが必要である。次に本研究で用いたモデルは、全球のデータを用いるが、各国の統計データから得られた農地の面積とMODIS全球データセットで得られた農地との間には、国によっては大きな隔たりが見られた。今後は、統計データと人工衛星等を用いた土地被覆データとの整合性について検討することも必要である。

f. 他の研究との連携（統合化）

土地利用モデルでは、土地利用変化の予測を行うが、生態系モデルと連携することで、人為的要因による、自然生態系の炭素循環の変化を予測することが可能となる。ここでは、テーマ3サブテーマ1のSim-CYCLEの地上部バイオマス量と土壌中炭素の結果を用いて、東アジアにおける2000年から2030年の炭素動態の将来予測を行った。その結果を図10に示す。

エラー！ブックマークが定義されていません。

計算対象領域は、テーマ4サブテーマ1の統合化と同一のエリアである。土地利用変化は熱帯地方に多く発生すると予想される。一方、土壌中炭素は熱帯地方が少なく、地上部バイオマス量は熱帯が多い。計算の結果、地上部バイオマス量の影響と土地利用変化の大きさが、土地利用変化による炭素動態に与える影響が大きいことが判明した。

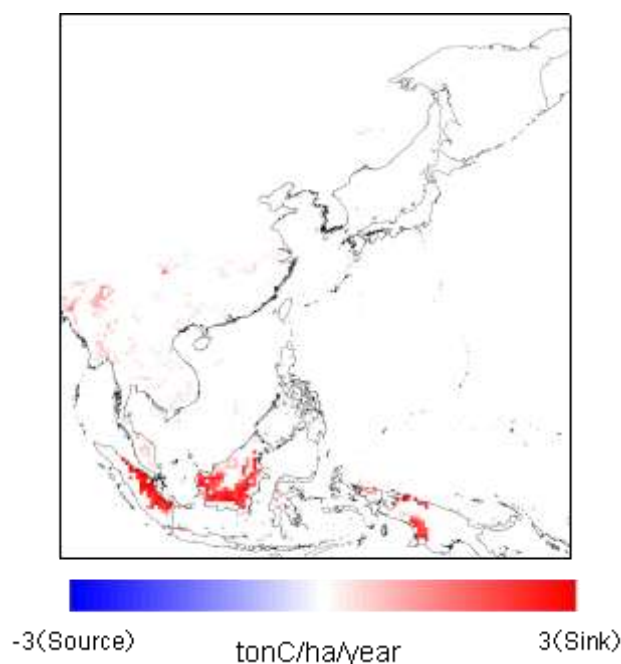


図10 土地利用変化による炭素動態の将来予測

(2) 統合的炭素管理モデルの開発

本モデルを用いて分析を行った結果、炭素吸収源の効果が変化すると大気中のCO₂濃度は大きく変動するが、排出を行う意思決定主体の行動は特に大きくは変化しない。これは、大気中のCO₂濃度上昇に伴い大きくなる気候変動ダメージが顕著となるのが数十年～数百年後であるの対し、それを引き起こすのは現在～数十年後の意思決定の影響が大きい、年率数%の割引率では現在の経済利得に対して数百年後の気候変動ダメージの割合が非常に小さいために生じる行動である。

しかしその上で、意思決定者の行動は経済利得に対して気候変動ダメージの割合が高くなってくる150年～200年後頃には、わずかではあるがCO₂排出を抑制する。確率的に陸域生態系の破綻（カタストロフィ）が生じる状況では、100年後頃に急激にその確率が上昇するため、それに向けて排出を抑制する行為が見られる。しかし、一旦陸域生態系の破綻が生じると、大気中のCO₂濃度上昇及び気候変動ダメージが両者とも急激に大きくなるため、意思決定者のCO₂排出が陸域生態系の破綻によって見えなくなることと、気候変動ダメージ上昇による経済的損失の補填のために、かえってCO₂排出を上昇させる行為が見られた。

また、これらの他にも、ナッシュ均衡の唯一性／複数性に関する計算及びナッシュ均衡の近似精度、開ループナッシュ均衡とマルコビアンナッシュ均衡との比較など、本開発における技術的・計算数理的側面についても、その計算可能性の検証を実施している。

(3) 効果的な気候レジームの要件分析

1) 科学アセスメントの影響

臨界負荷量の科学アセスメントの事例からディプロマトリ・サイエンスの概念モデルを導き出すと以下のとおりになる。ディプロマトリ・サイエンスは、外交交渉と科学研究の融合した領域

にある問題を扱う。それは、問題解決のためには国際協力が必要であり、かつ問題の複雑性や不確実性ゆえに、科学研究に大きく依存しなければならない問題群に対処するための科学である。こうした科学は従来の学術研究とは大きく異なり、外交の文脈に則した形で、科学アセスメントを実施しなければならない。具体的には、ディプロマトリ・サイエンスの目的は、外交の文脈に則した政策的有用性のある科学的知見を生み出すことである。そして、それが外交交渉で用いられるためには、以下のクライテリアを満たさなければならない。

- 政治的中立性
- ユーザーフレンドリー
- 科学者コミュニティのコンセンサス

これらの目的を果たし、これらのクライテリアを満たすためのアセスメントの方法論・プロセスの特徴は以下の6点である。

- 国際共有財として認知されているデータを用いる
- 外交の文脈に適合した時間スケール・空間スケールを用いる
- 実用主義的な方法論を用いる
- 補完的研究を行う
- 科学者と政策決定者とのコミュニケーションを通じて方法論を調整する
- 不確実性を管理する

構築したディプロマトリ・サイエンスを用いて、吸収源の科学アセスメントが建設的に外交交渉に関与するには、どのような制度設計とアセスメントの方法論があり得るのかを検討した。京都議定書は削減目標を遵守するための手段として、エネルギー起源の温室効果ガスの削減だけでなく森林吸収源を拡大することも認めている。その算入方法を検討するため、気候変動に関する政府間パネルは吸収源の科学アセスメントを実施したが、種々の批判に曝されている。

2012年以降も森林吸収源が存続し、そのための科学アセスメントが実施されることも必至であるため、そうした批判を克服するために必要な吸収源アセスメントの改善点を検討することが必要となっている。そのために、欧州酸性雨の環境外交で酸性雨の影響指標として用いられている臨界負荷量の科学アセスメントと、吸収源の科学アセスメントとを比較し教訓を導き出した。得られた教訓は以下のとおりである。

国際社会では、国家主権に優越する権限をもつ執行機関が存在しない。臨界負荷量の科学アセスメントは、このような国際社会の意思決定を行う外交交渉で科学的知見が有効に用いられるためには、科学的知見が予想される批判に対し頑健でなければならないことを示している。吸収源が頑健な性質を持つためには、科学的意味を持ち得ない人為的な吸収源活動ではなく、科学的概念である全炭素吸収量を対象に科学アセスメントを行うことである。しかし、京都議定書の排出目録では全炭素吸収量を用いるべきではなく、科学アセスメントと外交交渉に適度な距離を保つために全炭素吸収量に立脚した別の算定方式を用いるべきである。さらに制度設計としては

- 国際的にコーディネートされたモニタリングシステムの構築
- 公開公平をアセスの運用原則とすること
- 予想される問題に対し国際共同研究を行うこと

が求められる。

2) 履行確保メカニズムの可能性

一般国際法の中で確立するための要件の検討を行い、以下の3点にまとめられた。

- 地球温暖化をめぐる法的紛争に関し、分析枠組として、地球環境損害の内容上の変化及び国際法上の保護法益の変化に焦点を当て、従来の国際法による対応の限界を指摘した。ここでは、相隣関係法や領域使用の管理責任に基づく事後救済では補償できない、最も広義の環境損害への法的関心の拡大、という環境損害概念の多様化を受けて、国際保護法益が、人類の共通利益や、相隣関係や領域使用の管理責任を援用した相互主義適用の範囲を超える生態系・生物圏全体の保護・保全に拡大し、「環境安全確保」(global environmental security) という概念が主張されるようになったことが注目される。
- 環境損害概念の変遷を受け、今後の国際環境紛争の解決については、原告適格の拡大、国家の義務の厳格化と明確化、温暖化の損害と違法行為との因果関係の立証責任の容易化または転換が必要であることを指摘した。
- 概念の多様化を反映し、新しい原則を取り込んだ制度化への取組みを検討した。今日の問題に対しては、国際的な制度を設立して事前の危険防止・予防に関する連帯と協力の一般的義務を設定し、国家の行為規範を明確化していく必要がある。具体的には、共通資源の衡平な利用や開発の主権的権能に関する国際規則・基準の設定、自国領域内で起こり得る環境損害についての国際責任の強化、各国の条約に基づく国内的措置の整備などである。

また、他のレジームとの連携を通しての義務の履行確保という観点からは、貿易と環境という分析枠組の先例を検討した上で、上述の環境損害概念の変遷が、森林吸収源の保護、あるいは森林保護をめぐる国際紛争において、どのように影響を与えるかを検討する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本課題では、陸域炭素管理オプションの評価として土地利用モデルの開発を実施した。この土地利用モデルは、陸域生態の人為的变化に関する予測を行うものであり、今後の炭素管理に関する国際レジームの形成に際して、国際的に受容されうる科学的なアセスメント手法の一つとしての役割を果たすことが期待される。

特にこの土地利用モデルを含む、本課題における新たなモデル手法の開発は、炭素動態把握のためのシステムアプローチの一環として陸域生態モデルとの統合的な開発による実施されたものである。このことにより、炭素収支変動の要因分析や、炭素収支変動の将来予測が、東アジアレベルにおいて初めて可能となり、今後の炭素管理方策を検討するための科学的な基盤が確立されたことが成果である。

また、不確実性の大きいアジアの多様な生態系タイプごとの炭素ストック量や炭素吸収量が、今後予想される土地利用変化により、どのように変動する可能性があるのかに関する知見がえられたことで、東アジアの陸域生態系における炭素動態を総合評価して、今度の第2約束期間以降におけるアジアの陸域生態系における炭素管理に関する国際制度を検討する科学的な基盤が構築された。

最後に、陸域炭素収支の変動性の評価に関する最新の知見と、社会経済モデルを結合したモデ

ル分析は世界的にもオリジナルな研究成果であり、統合的炭素管理モデル分析の結果から、中長期に於ける生態系攪乱が気候レジームに与える影響評価が今後の重要課題として指摘される。

(2) 地球環境政策への貢献

環境省地球環境局「森林等の吸収源に関するワーキンググループ」検討会において、京都議定書における第2約束期間以降における吸収源の取り扱いに関する国際交渉の進展に合わせて提案する吸収源オプションの検討において、本研究成果であるモデル分析から得られる科学的な知見に基づいて検討に貢献した。

環境省地球環境局「CDM/JIに関する検討調査委員会」検討会において、京都議定書における京都メカニズムに関する国際交渉の進展に合わせて、CDMやJIにおけるプロジェクトベースの活動の評価のあり方について、本研究成果であるモデル分析から得られる科学的な知見に基づいて検討に貢献した。

林野庁「地球益・森林環境研究会～シンク戦略部会」検討会において、京都議定書の第2約束期間以降における吸収源の取り扱いに関する総合的な検討に際して、現時点で検討されている吸収源オプションの検討において、本研究成果であるモデル分析から得られる科学的な知見に基づいて検討に貢献した。

IPCCの第4次評価報告書において、2つの論文（引用論文1,2）が引用された。

6. 引用文献

- 1) Benitez-Ponce, P.C., I. Mc Callum, M. Obersteiner and Y. Yamagata: IIASA Interim Report IR-04-022, Laxenburg, Austria (2004)
“Global Supply for Carbon Sequestration: Identifying Least-Cost Afforestation Sites under Country Risk Considerations”
- 2) Benitez-Ponce, P.C., I. McCallum, M. Obersteiner and Y. Yamagata: Ecological Economics 60, 572- 583 (2007)
“Global Potential for Carbon Sequestration: Geographical Distribution, Country Risk and Policy Implications”

7. 国際共同研究等の状況

本サブテーマにおける炭素管理モデル研究は、ICSU(国際科学会議)のグローバル・カーボン・プロジェクト(GCP)と連携して、同プログラムの1つのフォーカスである「将来の炭素循環の予測と管理」(GCP国際研究計画テーマ3)に関する日本における研究として実施されたものである。尚、土地利用モデルの開発に際しては、特にプロジェクトの第I期においては、IIASA(国際応用システム研究所)との共同研究として実施された。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

- 1) 山形与志樹、水田秀行：システム／制御／情報，46，9，569-577（2002）

- 「京都議定書にかかわる国際制度設計：マルチエージェントシミュレーションの役割」
- 2) 関根秀真、山形与志樹、小熊宏之：日本リモートセンシング学会誌，22，5，517-530（2002）
「吸収源プロジェクト実施地域を対象とした衛星データによるARD活動のモニタリング」
 - 3) 山形与志樹、小熊宏之、関根秀真、土田聡：日本リモートセンシング学会誌，22，5，494-509（2002）
「吸収源を用いた地球温暖化対策とリモートセンシングの役割」
 - 4) Clark S. Binkley, David Brand, Zoe Harkin, Gary Bull, N. H. Ravindranath, Michael Obersteiner, Sten Nilsson, Yoshiki Yamagata, Max Krott: Forest Policy and Economics, 4, 65-77 (2002)
“Carbon sink by the forest sector - options and needs for implementation”
 - 5) G.A.Alexandrov, Oikawa, T., and Y. Yamagata: Ecological Modelling, 148, 293-306 (2002)
“The scheme for globalization of a process-based model explaining gradations in terrestrial NPP and its application”
 - 6) Obersteiner M. (with contributing authors: Ch. Azar, S. Kossmeier, R. Mechler, K. Möllersten, S. Nilsson, P. Read, , Y. Yamagata, J. Yan) : Managing Climate Risk. Interim Report, IR-01-051 (2002)
“International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria”
 - 7) G. A. Alexandrov, Y. Yamagata: Science in China(Series C), 45, 7, 1-6 (2002)
“Net biome production of managed forests in Japan”
 - 8) 松本泰子：環境保全と公共政策（寺西俊一 石弘光編），179-205（2002）
「環境政策とNGOの役割－気候変動問題を中心に」
 - 9) G. A. Alexandrov, T. Oikawa, Y. Yamagata : Tellus B, 55, 2, 669-675 (2003)
“Climate dependence of the CO2 fertilization effect on terrestrial net primary production”
 - 10) 松本泰子：環境と公害，33，1，45-51（2003）
「気候変動問題の政府間交渉における科学とNGO：知見の仲介者としての環境NGOの役割」
 - 11) 松村弓彦、井上秀典、岡松暁子（共著）：法律時報，75，13（通巻938号），114-118（2003）
「2003年学界回顧：環境法」
 - 12) Y. Yamagata, G. A.Alexandrov, K. Nishida, N. Saigusa, T. Oikawa : International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34 (Part. 7/W14), E8.1-5 (2003)
“Integration of Remote Sensing with CO2 Flux measurement for modelling forest NEP”
 - 13) 岡松暁子：環境法研究，29，113-121（2004）
「重要環境判例の最近の動向 MOX工場事件」
 - 14) 松本泰子：環境ホルモン(Journal of Endocrine Disruption), 4, 177-188 (2004)
「代替フロン問題解決への一視点：気候変動問題とオゾン層破壊問題の政策的関連の検討」
 - 15) 井上秀典、奥真美、岡松暁子（共著）：法律時報，76，13（通巻951号），127-131（2004）
「2004年学界回顧：環境法」
 - 16) G. A. Alexandrov and Y. Yamagata: Climatic Change, 67(2-3), 437-449 (2004)

- “Verification of carbon sink assessment: can we exclude natural sinks?”
- 17) Benitez-Ponce, P.C., I. Mc Callum, M. Obersteiner and Y. Yamagata : IIASA Interim Report IR-04-022, Laxenburg, Austria (2004)
 “Global Supply for Carbon Sequestration: Identifying Least-Cost Afforestation Sites under Country Risk Considerations”
- 18) Y. Yamagata, M. Ceronsky, C. Hepburn, M. Obersteiner: Climate Policy, 4, issue4, 347-357 (2005)
 “Clashing Strategic Cultures and Climate Policy”
- 19) 山形与志樹、中村仁也 : シミュレーション, 24 (4), 66-74 (2005)
 “地球温暖化対策の国際合意形成に関する動的ゲームシミュレーション (Analysis of global carbon management regime using Differential Game model) ”
- 20) H. Mizuta, Y. Yamagata: Agent-Based Simulation, 72-81 (2005)
 “Gaming Simulation of the International CO2 Emission Trading under the Kyoto Protocol”
- 21) H. Mizuta, Y. Yamagata: ICM Millennium Lectures on Games, 319-333 (2005)
 “International Emissions Trading with Agent-Based Simulation and Web-Based Gaming”
- 22) G. A. Alexandrov, Y. Yamagata, T. Oikawa and N. Saigusa: Agricultural and Forest Meteorology, 134 (1-4), 135-142 (2005)
 “Re-calibrating TsuBiMo with eddy-covariance measurements at Takayama”
- 23) 岩男弘毅、西田顕郎、山形与志樹 : 写真測量とリモートセンシング, 45 , 4, 35-36 (2006)
 「緯度経度整数地点の土地被覆情報を用いた土地被覆図の検証手法」
- 24) Obersteiner M., Alexandrov G., Benitez P.C., McCallum I., Kraxner F., Riahi K., Rokityanskiy D., Yamagata Y. : Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11, 5-6, 1003-1021 (2006)
 “Global Supply of Biomass for energy and carbon sequestration from afforestation/reforestation activities”
- 25) Koki Iwao, Kenlo Nishida, Tsuguki Kinoshita, Yoshiki Yamagata: Geophysical Research Letters, 33, L23404, 38722 (2006)
 “Validating land cover maps with Degree Confluence Project information”
- 26) Benitez-Ponce, P. C., I. McCallum, M. Obersteiner and Y. Yamagata: Ecological Economics 60, 572- 583 (2007)
 “Global Potential for Carbon Sequestration: Geographical Distribution, Country Risk and Policy Implications
- 27) Alexandrov G.A., Yamagata Y. : Ecological Modelling , 200, 1-2, 189-192 (2007)
 “A peaked function for modeling temperature dependence of plant productivity”
- 28) 山形与志樹, 中村仁也 : 環境科学会誌, 20, 2, 107-117 (2007)
 「炭素吸収源変動リスクを考慮したグローバルな温暖化対策に関する動的ゲーム分析」

<学術誌 (査読なし) >

- 1) 山形与志樹 : 日本政策投資銀行 Regional Policy レビュー, 8, 2, 20-28 (2002)

「京都議定書と吸収源－COP7までの合意と今後の課題」

- 2) 山形与志樹：バイオサイエンスとインダストリー，60，8，556-558（2002）
「京都議定書における炭素吸収源：最新の国際動向」
- 3) 松本泰子：環境法辞典（淡路剛久 磯崎博司 大塚直 北村喜宣編）（2002）有斐閣 分担執筆
- 4) Y. Matsumoto：PROTECTING THE OZONE LAYER The United Nations History，328-329（2002）
“JAPANESE SOCIETY AND THE GREENPEACE CAMPAIGN TO PROTECT THE OZONE LAYER，”
- 5) 山形与志樹：regional Policy レビュー、11，2，28-38（2003）
「グローバル炭素循環の急激な変動リスクと中長期的な吸収源対策の可能性」
- 6) 松本泰子：化学物質規制、関連法事典 淡路剛久、田村昌三編，328-331（2003）
「特定製品に関わるフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律，丸善株式会社」
- 7) 松本泰子：アジア環境白書2003/2004 日本環境会議「アジア環境白書」編集会，87-89（2003）
「アジア地域におけるオゾン層破壊物質の不正取引問題」
- 8) Matsumoto, Yasuko：IHDP Update，2003，4，9（2004）
“The Importance of Policy Interlinkage posed by the CFC Substitutes Issue”
- 9) 山形与志樹：エネルギー・資源、24，4，35-38（2004）
「京都議定書における吸収源対策：マラケシュ合意と中長期的課題」
- 10) P. Benitez., I, McCallum., M. Obersteiner., Y, Yamagata.: IR-04-022（2004）
“Global Supply for Carbon Sequestration: Identifying Least-Cost Afforestation Sites Under Country Risk Consideration”

<書籍>

- 1) B. Schlamadinger, et al.: Land-Use Change and Forestry（2000）
“Good Practice Guidance for Land Use” Y. Yamagata(CA), Ch4, 1-123
- 2) B. Schlamadinger, et al.: Land-Use Change and Forestry（2000）
“Good Practice Guidance for Land Use” Y. Yamagata (CA), Ch5, 2-274

(2) 口頭発表

- 1) Y. Yamagata, H. Mizuta：The Second International Workshop on Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems, Tokyo. Japan（2002）
“An international regime design regarding the Kyoto Protocol: The role of multi-agent simulation”
- 2) H. Mizuta, Y. Yamagata：International Congress of Mathematicians - Game theory and applications satellite conference, Qingdao. China（2002）
“International emissions trading with agent-based simulation and web-based gaming”
- 3) G. A. Alexandrov, Y. Yamagata: International Workshop Quantifying Terrestrial Carbon Sinks: Science, Technology and Policy, Wengen. Switzerland（2002）
“Toward verification guidelines for carbon sink assessments at regional, continental and global scale”
- 4) Y. Yamagata, H. Mizuta：The 6th International Conference COMPLEX SYSTEMS, Tokyo. Japan（2002）

- “Agent-based simulation of the international CO2 emission trading: emergent behavior of countries”
- 5) H. Mizuta, Y. Yamagata: WSC '02 Exploring new frontiers winter simulation conference, San Diego. USA (2002)
 “Transaction cycle of agents and web-based gaming simulation for international-emissions trading”
- 6) H. Mizuta, Y. Yamagata: 48th Symposium of Operations Research Society of Japan, Hakodate. Japan (2002)
 “Kyoto protocol: international emissions trading with agent-based approach”
- 7) 水田秀行、山形与志樹：日本シミュレーション・ゲーミング学会2002年度秋季全国大会、京都（2002）
 「エージェントベース・アプローチと京都議定書・国際排出量取引」
- 8) A.L. Stepanov, G.A. Alexandrov, Y. Yamagata: 16th International Symposium on Environmental Biogeochemistry, Oirase. Japan (2003)
 “Microbial transformation of organic matter in soil aggregates as carbon stock or source in biosphere”
- 9) 山形与志樹：環境経済・政策学会2003年大会、東京（2003）
 「国際レジーム形成過程の微分ゲームモデルによる分析—中長期的な陸域炭素管理」
- 10) Y. Yamagata, G. Alexandrov, K. Nishida, N. Saigusa, T. Oikawa: International Workshop on Monitoring and Modeling of Global Environmental Change, Kyoto. Japan (2003)
 ” Integration of remote sensing with CO2 flux measurement for modelling forest NEP”
- 11) 山形与志樹：研究・技術計画学会第18回年次学術大会、東京（2003）
 「科学技術への戦略的資源配分と持続的発展」
- 12) Nomura, Y. and Y. Yamagata: THIRD ANNUAL CONFERENCE ON CARBON CAPTURE & SEQUESTRATION, Building on the Current Technology Base to Provide Viable Options to Reduce Carbon Intensity, Washington D.C. (2004)
 “Eco-Carbon Accounting for Evaluating Environmental Impact and Co-benefit of Combined Carbon Management Projects: Application Case Studies”
- 13) Y. Yamagata. and Nomura, Y.: THIRD ANNUAL CONFERENCE ON CARBON CAPTURE & SEQUESTRATION, Building on the Current Technology Base to Provide Viable Options to Reduce Carbon Intensity, Washington D.C. (2004)
 “Eco-Carbon Accounting for Evaluating Environmental Impact and Co-benefit of Combined Carbon Management Projects: Optimal Portfolio for Innovation”
- 14) Y. Yamagata. and Mizuta, H: The Third International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS' 04), Kyoto, 2004;(Proceedings of The Third International Workshop on Agent-based Approaches in Economic and Social Complex Systems (AESCS' 04))
 “Gaming Simulation of the International CO2 Emission Trading under the Kyoto Protocol”

- 15) 石井敦・山形与志樹：環境経済，政策学会2004年大会報告，広島（環境経済，政策学会2004年大会報告要旨集，132-133）（2004）
「炭素吸収源：その国際交渉および他の環境問題とのインターリンクージ」
- 16) 山形与志樹：山形とコロラドから地球温暖化を考えるシンポジウム（2004）
「地球温暖化に対処する地域における炭素管理の可能性」
- 17) Y. Yamagata：ACC(Abrupt Climate Change) Strategy Workshop, Paris (2004)
“Global institutional regime for responding to ACC—a dynamic game analysis on global carbon cycle”
- 18) Y. Yamagata and G. A. Alexandrov：The 6th International Symposium on Plant Responses to Air Pollution and Global Changes, Tsukuba, Japan (2004)
“TsuBiMo-Economica：coupling human and biophysical components of carbon cycle”
- 19) G. A. Alexandrov and Y. Yamagata：from Methodologies to Quantification 15-18 Beijing (2004)
“The C budget of Japan：Ecosystem Model (TsuBiMo), Regional Carbon Budgets”
- 20) G. A. Alexandrov and Y. Yamagata：The 6th International Symposium on Plant Responses to Air Pollution and Global Changes, Tsukuba, Japan (2004) (Abstracts, p.115)
“Enhancing TsuBiMo for getting robust estimates of regional carbon sinks”
- 21) G. A. Alexandrov and Y. Yamagata：The 4th European Conference on Ecological Modelling, Josef Stefan Institute, Ljubljana, Bled, Slovenia, (2004) (Proceedings, p. 11-12)
“Assessing NEP of an even-aged forest with Mathematica, Dzeroski, S. et al. (Eds.)”
- 22) G. A. Alexandrov and Y. Yamagata：Joint AOGS 1st Annual Meeting & 2nd APHW Conference, Singapore (2004) (Abstracts, Vol.1, p. 700)
“Characterization of climate feedbacks from terrestrial carbon cycle”
- 23) Y. Yamagata：Joint AOGS 1st Annual Meeting & 2nd APHW Conference, Singapore (2004) (Abstracts, Vol. 1, p. 702)
“A Coupled Dynamic Gaming Simulation on Global Carbon Management Regime Formation”
- 24) 山形与志樹：IGBPシンポジウム「今後100年における地球システム（自然と社会）の将来予測—京都議定書の発効を受けて—」（2005）
「GCP全体計画とつくば国際オフィスでの活動紹介」
- 25) Y. Yamagata: GCP2005 International Workshop on Networks & Regional Carbon Management, Tsukuba Japan (2005)
“Toward a Carbon Balanced Region —Integrated Modeling Approach”
- 26) S. Scholz, Y. Yamagata, F. Kraxner, E. Schienke: Third US-Japan Joint Conference on Mathematical Sociology, Sapporo (2005)
“Knitting Biomass Energy Networks through a Public Participation Geographic Information System”
- 27) 山形与志樹：第20回年次学術大会 研究・技術計画学会（2005）
「過去50年間の産業におけるCO₂排出と経済活動（生産・研究開発）との関係分析」
- 28) 山形与志樹、中村仁也：2005年次大会環境経済・政策学会（2005）

「微分ゲームによる地球温暖化対策のシミュレーション：資源管理・気候変動・炭素循環変動の3層モデル」

- 29) 木下嗣基、山形与志樹：2005年次大会 環境経済・政策学会（2005）
「TsuBiMo-Economicaによる土地利用変化の予測 炭素クレジットと森林面積の増減」
- 30) 山形与志樹、水田秀行、井上さやか：JAWS2005（2005）
「CO2排出量取引のエージェントベースシミュレーション：ゲーミング実験と実市場動向における検討」
- 31) Y. Yamagata, G. A. Alexandrov, T. Kinoshita and K. Iwao: The 11th Japan-U.S. Workshop on Global Change, Yokohama（2005）
“Coupling terrestrial ecosystem model and land-use economics model for assessing long-term carbon management potential”
- 32) Alexandrov, G. A., Iwao, K., Yamagata, Y., Ito, A., Krapivin, V. F., Mokhov, I. I., Nishida, K.: V European Conference on Ecological Modelling, Pushchino, Russia（2005）
“Analysis and interpretation of satellite data in connection with global carbon cycle modeling”
- 33) 岩男弘毅、西田顕郎、木下嗣基、山形与志樹：S1ワークショップ「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」, 60（2006）
「DCPデータによる土地被覆分類図の検証と高精度化」
- 34) 木下嗣基、山形与志樹：S1ワークショップ「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」, 64（2006）
「土地利用変化予測モデルによる二酸化炭素排出量推定」
- 35) Ayako Tanaka (University of Tokyo), Koki Iwao, Ryosuke Shibasaki (University of Tokyo) : 27th Asian Conference on Remote Sensing 2006（2006）
“A comparative Study on Classification Techniques to Extract Urbanization Area Using Satellite Images”
- 36) T. Kinoshita, Y. Yamagata : ESSP 2006 OSC, 654（2006）
“Development of Global Land-Use Change Model”
- 37) 岩男弘毅、西田顕郎、山形与志樹：日本リモートセンシング学会 第40回学術講演会（2006）
「Degree Confluence Points 情報を用いた土地被覆図精度検証手法の開発」
- 38) 山形与志樹、水田秀行、井上さやか、熊倉広志、中里裕美、中村仁也：ネットワーク生態学研究会第2回サマースクール（2006）
「空間ネットワークのダイナミクスを考慮したエージェントデータベースシミュレーションの構想（持続可能な都市-地域システムとは？地理的ネットワーク（Geo Net）のエージェントベースシミュレーションによる検討）」
- 39) Kinoshita T., Inoue K., Kagemoto H., Yamagata Y.: 1st Int. Conf. Carbon Manage. Urban Reg. Levels: Connecting Dev. Decis. Global Issues（2006）
“Investigating of regional CO2 absorption potential using wood biomass”
- 40) 山形与志樹、岩男弘毅：GEOGrid Symposium2006プログラム（2006）
「GeoGRIDの地球温暖化研究への応用」

- 41) 山形与志樹：S1ワークショップ「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」，7-8（2006）
「炭素動態把握のためのシステムアプローチ」
- 42) 山形与志樹：S1ワークショップ「システムアプローチで見えてきた東アジア陸域生態系の炭素動態」，39-40（2006）
「東アジアの炭素動態：今後の課題と政策的含意」
- 43) Y. YAMAGATA, A. Ito, T. Kinoshita, K. Iwao：ESSP 2006 OSC, 419（2006）
“Integrated System Approach for the Terrestrial Carbon Budget in Asia: Flux Measurement, Remote Sensing, Ecosystem and Land Models”

（3）出願特許

なし

（4）受賞等

下記の成果に対して、日本シミュレーション学会論文賞を受賞した。

- ・ 山形与志樹、中村仁也：日本シミュレーション学会論文誌，24（4），66-74（2005）
“地球温暖化対策の国際合意形成に関する動的ゲームシミュレーション”

（5）一般への公表・報道等

研究成果についてS1課題一般公開シンポジウムにおいて発表した。