

32. アジア地域における温暖化影響の見通しについて

Climatic Impacts on the Asia Region

高橋 潔* 原沢英夫* 松岡 譲**

Kiyoshi Takahashi, Hideo Harasawa, Yuzuru Matsuoka

ABSTRACT; Climate impacts will be one of the important concerns in the Asia-Pacific regions. These regions will experience dynamic development in the next century. Even without climate change, rapid growth in the demographic and economic situations of these areas will cause drastic changes in the local and global environment. Climatic impacts will make the situation even more complex. In order to assess the impact on this dynamic Asia-Pacific region, we estimated several kinds of direct physical impacts based on the probable range of global temperature increase, and identified the impact response curves of the climate changes. In this paper, we describe the impact on water resources, crop production and spatial changes in natural ecosystems. Typical outcomes of the model calculations in the Asia-Pacific area are briefly summarized as follows:

1) Following global average temperature increase of 2°C, the median estimations of national average temperature increases ranged between 1.3~2.7°C in these regions. The precipitation changes ranged between +1~17%. The variance among estimations is large, and some estimate show more than a 3.5°C temperature increase. The change in runoff ranged between -8~67%.

2) Slight decrease in rice production is expected in most of the countries. The productivity of wheat will decrease significantly in Bangladesh, India and other tropical countries. The variance in productivity changes among estimations is large. The relation between the impact and global temperature change reveals no discernibly logical pattern by either crops or countries.

KEYWORDS; Global Warming, Climate Impact, Integrated Assessment Model

1. はじめに

将来のアジア地域の環境について考える場合、自然現象に起因する不確実さに加えて、人口増加、経済発展、技術進歩といった人間活動に由来する不確実な要素も考慮する必要がある。よって政策決定にあたっては、様々な可能性を検討できるようにそれらの不確実性を考慮に入れたシナリオを用いた評価が重要となる。そのような問題を取り扱うために、我々は AIM (the Asian-Pacific Integrated Model) という時間的・空間的に広範囲を対象とした気候変動の統合評価モデルを開発し、種々の評価を行っている (Matsuoka *et al.*, 1995)。本論文では、うち将来起こりうる気候変動の直接的影響の推定に焦点を絞って報告を行う。GCM (大循環モデル)、気候変動シナリオ、影響算定モデルなどの違いにより、直接影響の推定結果はかなり変化する。各国比較を行えるような形で気候変動の影響の見通しを得るためには、地球規模かつ空間的に詳細な影響推定が複数の GCM シナリオを用いて行われるべきである。本論文では、いくつかの世界平均気温上昇を仮定し、それに 11 の空間的な気候変化パターンを重ね、AIM/影響モデルのサブモジュールを用いてそれらの気候変動が流出量、農作物生産性、森林適性に与える直接影響を算定した。

2. 算定手法

図 1 は AIM/影響モデルのサブモジュールを用いた本論文の影響評価のフレームワークを示している。気候、水資源、農作物生産、生態システムの 4 つのモジュールが用いられる。予測は複数の世界平均気温変化シナリオ、複数の GCM 出力による気候パターンを用いて行われ、計算結果は各国単位で集計される。その集計値の中央値及び最高・最低値を分析に用いる。

2.1 気候モジュール

気候モジュール (図 2) では現在の気温・降水量分布と GCM 出力を用いた気候変動パターンが組み合わ

* 国立環境研究所社会環境システム部

**名古屋大学工学部地圏環境工学専攻

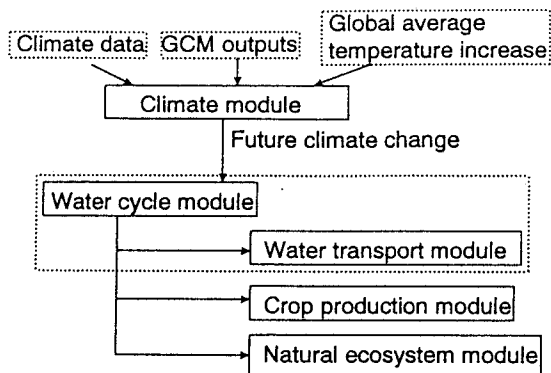


図1 本研究の影響評価フレームワーク

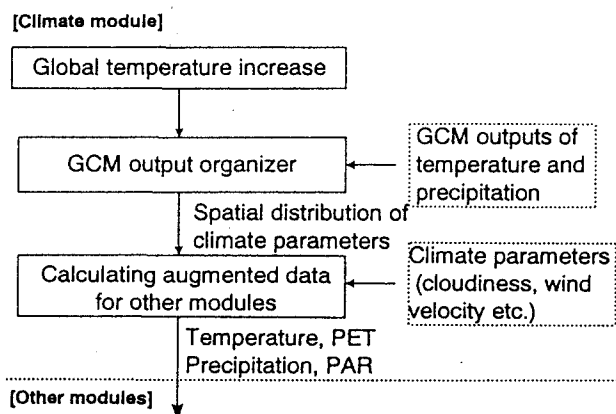


図2 気候モジュール

表1 本研究で用いられた GCM 出力

Climate model	Calculated date	lat. x long.(°)	ΔT (°C)	Reference
CCC	Nov-89	3.75x3.75	3.5	Boer et al., 1989
GISS	1982	7.83x10.0	4.2	Hansen et al., 1984
GFDL	1984-85	4.44x7.50	4.0	Wetherald & Manabe, 1986
GFDL R30	May-89	2.22x3.75	4.0	Wetherald & Manabe, 1989
GFDL Q-flux	Feb-88	4.44x7.50	4.0	Wetherald & Manabe, 1989
OSU	1984-85	4.00x5.00	2.8	Schlesinger & Zhao, 1989
UKmet	Jun-86	5.00x7.50	5.2	Wilson & Mitchell, 1987
UIUC	Sep-96	4.00x5.00	3.4	Schlesinger, 1996
GISS	1995	4.00x5.00	3.6	Miller and Russell, 1995
MRI	1994	4.00x5.00	2.5*	Tokioka et al., 1995
GFDL100	1991	4.50x7.50	3.2*	Manabe et al., 1992

ΔT =Equilibrium surface temperature change on doubling CO₂

ΔT^* =Warming surface temperature change at the getting out period for this study

せられ、図1下半分の影響算定で必要となる情報を生成する。世界平均気温変化は0.5～4℃と仮定した。気候データの空間的な分布については、表1に示す11のGCMの出力が用いられた。図2中、GCM出力統合モジュール(GCM output organizer)では、GCM出力の空間解像度は影響算定用には粗いため補間処理が行われ、更に仮定された世界平均気温変化と組み合わせることにより、将来気候データが生成される。気温についてはスプライン補間、降水量については1/r²重み付け補間により0.5°メッシュに補間される。その後、次式に従い各月各グリッドの将来気候データが計算される。

$$\text{気温: } T(t) = T(\text{present}) + (T(\text{perturbed}) - T(\text{base})) \times \frac{T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})}{\Delta T} \quad (1)$$

$$\text{降水量: } \log P(t) = \log P(\text{present}) + \frac{T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})}{\Delta T} \times \log \left[\frac{P(\text{perturbed})}{P(\text{base})} \right] \quad (2)$$

ここで $T(t)$ [°C]、 $P(t)$ [mm/month] はそれぞれ t 年における気温と降水量、 $T(\text{perturbed}) - T(\text{base})$ [°C]、 $P(\text{perturbed}) / P(\text{base})$ [-] はそれぞれ GCM 計算によって得られた各グリッドの大気中二酸化炭素濃度一倍時 (base) と二倍時 (perturbed) の間の気温差、降水量変化率である。 ΔT [°C] は GCM 計算による世界平均気温の変化である。 $T_{\text{mean}}(t) - T_{\text{mean}}(\text{base})$ [°C] は仮定される基準年と t 年の間の世界平均気温変化であり、0.5～4℃の0.5℃刻みを仮定した(以降 ΔT_{assume} と表記)。つまり、8(気温上昇仮定) × 11(GCM)

=88 の気候ケースについて、それぞれの影響予測が行われた。

2.2 水資源モジュール

水文事象の大きさ、頻度、継続時間の変化は、水資源の利用度、洪水強度、農業、生態システムなどに影響を与える。AIM/影響モデルの水資源モジュールは、土壌水分バランスと水輸送によって構成され、その他の影響の算定モジュールに水文情報を提供する。特に、地表面流出、土壌水分量、蒸発散量、河川流量の高解像グリッド情報を生成する。野外容水量（土壌の保水能）は現在の植生分類と土壌の粒度を用いて計算された。潜在可能蒸発散（PET）の計算には、FAO24 または Thornthewaite 法に基づいた 2 つのモジュールから選択できるようにした。データの入手性によりどちらかが選択される。

2.3 農作物生産モジュール

農地の生産性は気候変動に大きく左右される。この影響を評価するために、気候変動による潜在作物生産性の変化を推定した。作物の栽培に適した日数（成長期間）が気候データから数えられ、その成長期間中の作物の成長が各作物に与えられた成長特性パラメーターに従って生物学的にシミュレートされる。図 3 は作物生産性推定のフレームワークを示している。本モジュールは毎日平均気温、日中平均気温、降水量、PET、光合成有効放射量（PAR）、土壌特性を入力データとして必要とする。これらのデータの多くは気候モジュールと水資源モジュールから導かれる。大気中二酸化炭素濃度の作物への直接影響（肥沃化効果）は本論文では考慮しない。イネ、冬コムギ及びトウモロコシの潜在生産性が農作物生産の指標として選択された。土壌については、土壌単位、土壌フェイズ、粒度、傾斜の 4 つの土壌特性データを用いて栽培適性が考慮された。土壌制約の空間的な多様性を反映させるために、高分解能（5 分メッシュ）のグリッドデータが用いられた。

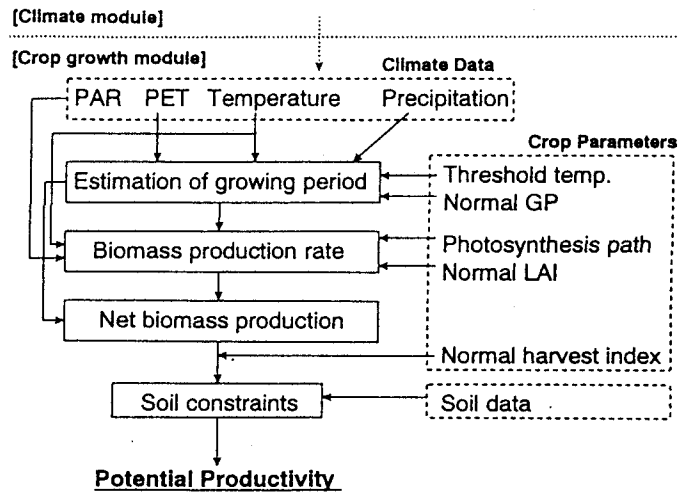


図 3 農作物生産モジュール

2.4 自然生態システムモジュール

気候変動による自然生態システムへの影響を評価するために、Holdridge による植生分類が用いられた。本法では、生物温度、降水量、及び PET と降水量の比という生態気象学的指標を用いて植生区分を行う。生物温度は、一年分の日平均気温について 0°C を超えるものの総和を取り、これを 365 で割ることによって得られる。気候は生物温度によって 7 段階に分類される。さらに降水量及び PET によって 37 段階に分類される。Holdridge の方法による分類は、気候に基づいた潜在的な植生を示す。

3. 推定結果

図 4、図 5 はそれぞれ気温と降水量の変化の各国平均を示している。この図で示されるのは $\Delta T_{\text{assume}} = 2^{\circ}\text{C}$ を仮定した場合であり、○は 12 月－2 月の 3 ヶ月の平均、●は 6 月－8 月の 3 ヶ月の平均である。これらの記号は 11 の GCM の中央値にプロットされている。11 の GCM の最大・最小値は、横線の両端である。各国の気温変化の中央値は 1.3～2.7°C であるが、予測は 0.1～3.6°C の幅を持つ。同様に、降水量変化の中央値は +1～17% であるが、全ての GCM を見てみると -14%～+47% の幅を持つ。冬期の気温変化は夏期に比べ大きい。インド、ネパール、バングラデシュなどのインド亜大陸では、目立った降水量変化が見られる。

図 6 は $\Delta T_{\text{assume}} = 2^{\circ}\text{C}$ での表面流出量変化の各国平均である。各国の中央値は -8～67% である。インド、ネパール、バングラデシュでは 30% 以上の増加が見込まれる。ヒルマでは 20% の増加であり、その他の国では ±5% である。図 7 は各国平均流出量の ΔT_{assume} による変化を示したものである。中央値は ΔT_{assume} に比例して単調に増加する傾向が見られるが、幅にはそのような傾向は見当たらない。

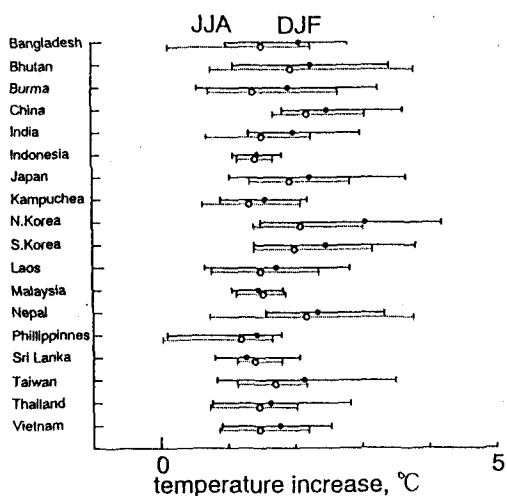


図4 各国の気温変化 ($\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$)

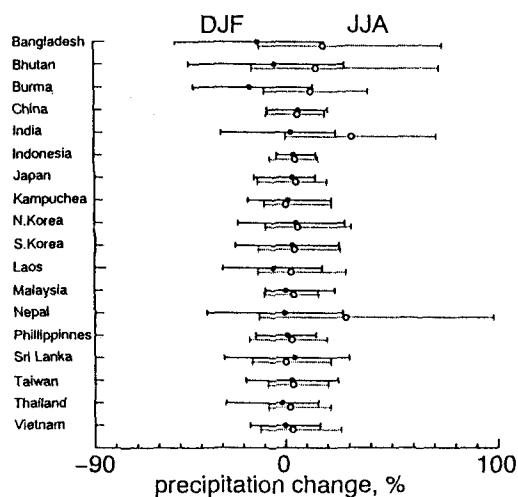


図5 各国の降水量変化 ($\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$)

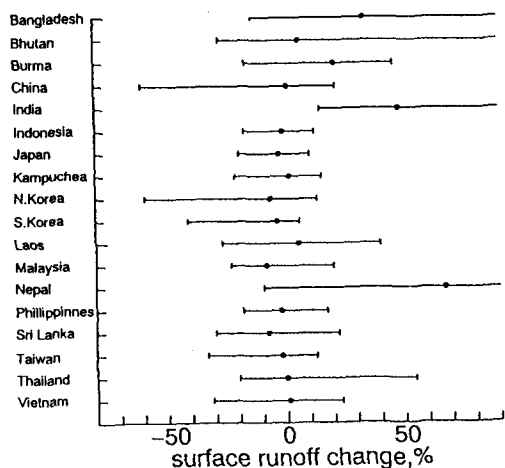


図6 各国の流出量変化 ($\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$)

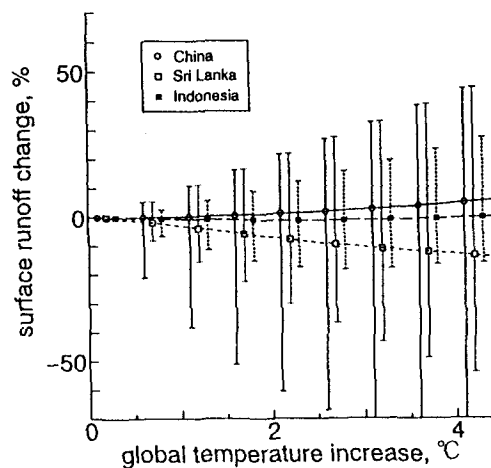


図7 各国の流出量変化 ($\Delta T_{\text{assume}}=0.5\sim 4^{\circ}\text{C}$)

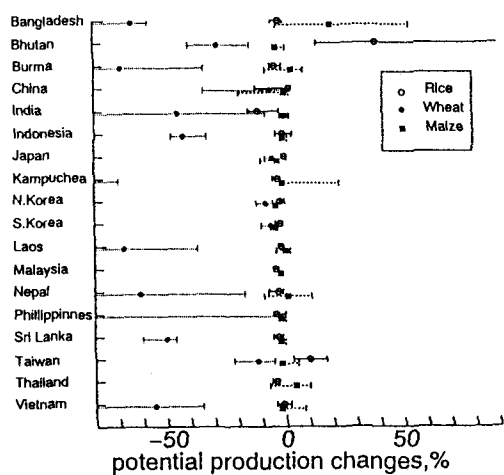


図8 農作物潜在生産性の変化 ($\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$)

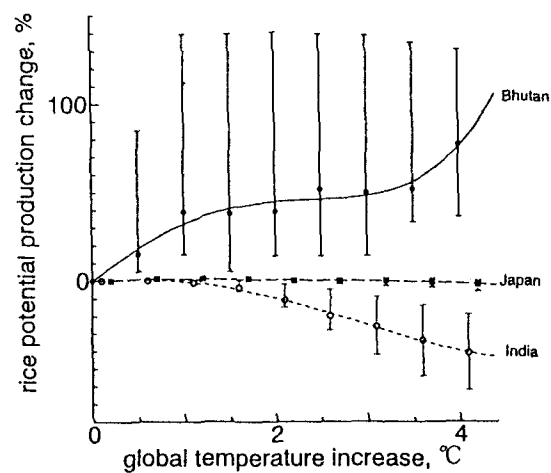


図9 イネの潜在生産性の変化 ($\Delta T_{\text{assume}}=0.5\sim 4^{\circ}\text{C}$)

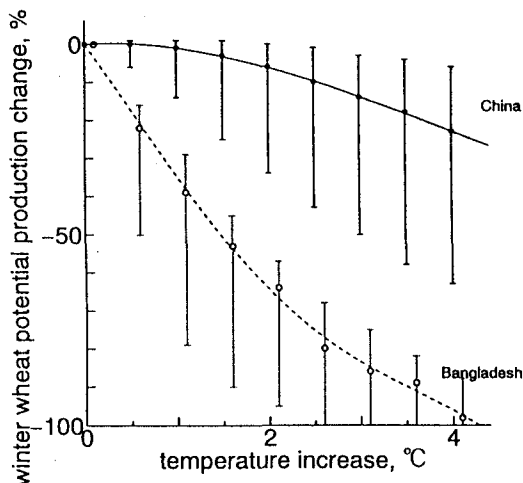


図10 冬コムギの潜在生産性変化($\Delta T_{\text{assume}}=0.5\sim4^{\circ}\text{C}$)

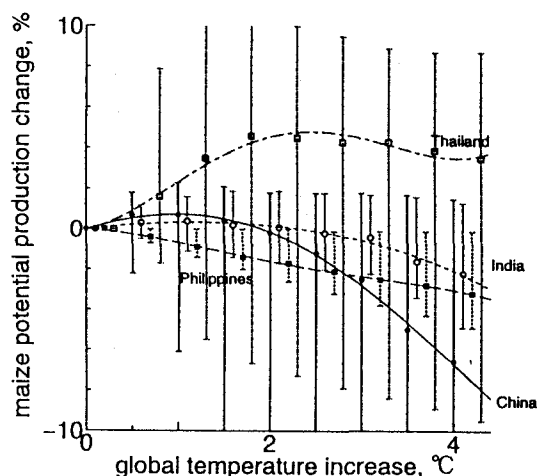


図11 トウモロコシの潜在生産性変化($\Delta T_{\text{assume}}=0.5\sim4^{\circ}\text{C}$)

$\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$ での農作物の潜在生産性の変化が図8に示される。ブータンと台湾において大増加がみられるが、その他ほとんどの国でイネの潜在生産性は若干の減少である。冬コムギの潜在生産性はバングラデシュ、インド、その他の熱帯国において大きな減少が見られる。中国ではそれほど大きな影響を受けないかもしれない。トウモロコシ（熱帯性栽培種）については、バングラデシュにおいて生産性の増加が期待される。その他の国々での影響は $\pm 5\%$ 以内である。GCM間の生産性変化のばらつきは大きい。ただし、異なるGCM間でも生産性変化の方向については一貫性が見られる。作物種や国毎に、 ΔT_{assume} に対して一定の関数形を示すということにはなかった。図9～11はそれぞれイネ、コムギ、トウモロコシの潜在生産性の ΔT_{assume} による変化を示している。 ΔT_{assume} の増加に対して、単調に反応するもの、閾値を持った反応を示すもの、さらには一度増加した後減少するものも存在する。

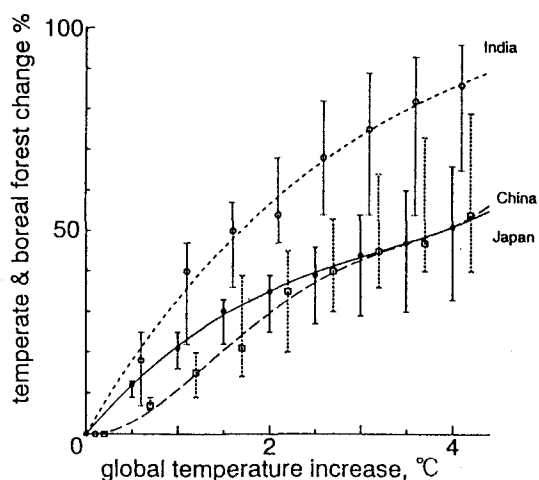


図12 温帯林・冷帯林の減少($\Delta T_{\text{assume}}=0.5\sim4^{\circ}\text{C}$)

自然生態システムについては、森林地域の分析を行った。図12は現在の温帯／冷帯林が、気候変動によってその他の分類に変化する割合を示したものである。日本・中国では、 $\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$ で35%、 $\Delta T_{\text{assume}}=4^{\circ}\text{C}$ で50%以上の温帯／冷帯森林地帯がその他の分類に変化する。その変化のほとんどは熱帯林への移行である。

4. 考察

表2にここまで示した結果をまとめた。マラリア影響の評価は、Matusoka and Kai (1995)より得た。本表では、各影響が $\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$ の仮定の下で評価され、重要度がランク分けされている。表2から、インド亜大陸が様々な直接影響を受ける可能性が高いことがわかる。小麦生産に適した土地の減少、温帯林の減少、マラリア発生の可能性を持った地域の増加などである。東アジアなどその他地域では、インド亜大陸と

比較すると受ける影響は小さい。地域的にはコムギの生産性が低下するが、国別に平均をとると生産性が高くなる地域と相殺されあまり大きな影響が出ない。温帯／冷帯林に適した土地は東アジアにおいて大幅に減少し、 $\Delta T_{\text{assume}}=2^{\circ}\text{C}$ で40%も減少する。更に大きい気温上昇においては、各種影響は複雑な反応を示しながら増加する。そのような変化は図9～11で見うけられる。

表2 アジア太平洋地域における気候変動の影響（-/0/+の見方については下段に説明）

Country	Climate		Water resource Runoff	Crop production			Vegetation	Health
	Temp.	Precip.		Rice	Wheat	Maize	Temp. Forest	Mararia
Bangladesh	0	++	++	0	---	++		0
Bhutan	0	0	0	+++	---	0	--	0
Burma	0	0	+	0	---	0		--
China	+	0	0	0	-	0	-	---
India	0	+++	+++	---	---	0	--	---
Indonesia	0	0	0	0		0		---
Japan	0	0	0	0	0	0	-	
Kampuchea	0	0	0	0		0		
N. Korea	++	0	0	0	-	0	0	
S. Korea	+	0	0	0	-	0	0	
Lao_PDR	0	0	0	0		0		0
Malaysia	0	0	0	0		0		0
Nepal	0	+++	+++	0	---	0	---	---
Philippines	0	0	0	0		0		0
Sri Lanka	0	0	0	0		0		-
Taiwan	0	0	0	+	---	0		
Thailand	0	0	0	0		0		0
Vietnam	0	0	0	0		0		-

notation	---	--	-	0	+	++	+++	note
Temperature				-0.5~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	>1.5	Additional increase, °C
Precipitation	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	percent change
Runoff	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	percent change
Crop production	<-20	-20~-10	-10~-5	-5~5	5~10	10~20	>20	percent change
Forest change	<-60	-60~-40	-40~-20	-20~0				percent change
Malarial area	>+20	+20~10	+10~+5	+5~0				percent change

本研究では、11のGCM出力を空間的な気候変動のパターンとして用いて、それに基づき計算された影響の中央値を代表値として評価に用いた。世界平均気温変化を同じ値に設定して計算を行った場合でも、用いられたGCM出力によって推定される影響は大きなばらつきを示す。また、これらGCM出力はモンスーン、ENSOといった気象現象を表現する能力に乏しい。その種の現象は推定結果に大きく作用するかもしれない。

近年アジア太平洋地域の温暖化の直接影響については多くの研究が行われている（例えば ADB 1994, Erda *et al.*, 1996）。これらの分析結果には、対象を直接影響に限定しても大きなばらつきがある。この種の推定をより現実的なものにするために、地理的な解像度は重要なファクターの一つである。物理学的反応、生物学的反応に関する基礎的な知見の統合も重要である。よって、統合評価モデル（IAM）をより現実的で予測性の高いものとするためには、十分な地理的精度を持ったプロセススペースのモデルを統合モデルのサブモジュールとして組み込んでいくことが必要となる。そのようなモデルにより、複数の排出シナリオ下での影響算定を行い、空間的な比較を行うことが可能となると考えられる。

なお本論文で報告された研究は一部環境庁地球環境研究総合推進費により遂行された。

引用文献

- Asian Development Bank (1994): *Climate change in Asia*, Manila, Philippines.
- Lin Erda, W.C. Bolhofer, S. Huq, S. Lenhart, S.K. Mukherjee, J.B. Smith and J. Wisniewski (1996): *Climate change vulnerability and adaptation in Asia and Pacific*, Kluwer.
- Matsuoka, Y. and K. Kai (1995): An Estimation of Climatic Change Effects on Malaria, *J. Global Environment Engineering*, 1, 43-57.
- Matsuoka, Y., T. Kainuma and T. Morita (1995): Scenario Analysis of Global Warming Using the Asian-Pacific Integrated Model (AIM), *Energy Policy*, 23 (4/5), 357-371.