

# 極端な気象現象を考慮した上での温暖化が農作物潜在生産性に及ぼす影響の評価

## Assessment of climate change impacts on grain production taking account of extreme weather events

04M43250 村井啓朗

Hiroaki Murai

指導教員 増井利彦

Adviser Toshihiko Masui

### SYNOPSIS

It is expected that climate change caused by the increasing GHGs concentration will affect productivity of agricultural crops not only through the change in mean climate but also through the change in frequency and magnitude of extreme climate events such as strong wind and heat wave. In this study, climate change impacts on rice productivity at global scale are estimated in consideration of future change in extreme climate events which were projected by the latest global climate model with high spatial resolution. For considering effects of typhoon and heat wave, rice productivity change functions are estimated from the historical data observed in Japan and they are applied to the global scale assessment. According to the simulation result assuming IPCC/SRES-A1B scenario relatively high estimates of future GHGs emissions, the damage caused by the heat wave will significantly increase all over the world by the middle 21st century, and the loss of productivity caused by the heat wave may reach 10 % in the regions most severely damaged.

### 1. 研究の背景と目的

近年、異常気象と呼ばれるような極端な気象現象が数多く観測されるようになってきており、2003年のヨーロッパにおける熱波や2004年の日本における台風の被害などを始めとして、世界各地で甚大な被害をもたらしている。IPCCの第三次評価報告書(IPCC, 2001)においては、極端な気象現象(extreme weather events)を気温、降水、熱帯低気圧、温帯低気圧、干ばつ・長雨、竜巻などその他の6つに分類し、その観測された傾向についてまとめている。その中で気温については、陸域で気温の日較差が縮小している。ほとんど全ての陸域で最高気温が上昇し、暑い日が増加した。ほとんど全ての陸域で最低気温が上昇し、寒い日、霜が降りる日が減少した。降水に関しては、期間降水量が増えた地域では、集中豪雨などの極端な降雨現象が増加している。集中豪雨など極端な降雨現象の件数は増加しているが、期間降水量の総量は減少している地域がある。としている。

また同報告書では、温暖化と極端な気象現象の関係性についても記述しており、温暖化によって局地的な豪雨や暴風雨、熱波などの現象の強度だけでなく、発生頻度も増大する可能性が高いと示している。その影響は、農作物生産や健康などの分野に広く及ぶと予想される(表1)。

以上の点から、温暖化の影響を精度良く見積もるためには、将来の平均気温の上昇による影響だけでなく、極端な気象現象による影響も同時に評価する必要があるといえる。しかしながら、従来の研究の多くは、平均的な気候変化のみを考慮し、極端な気象現象の生起・規模の将来変化については考慮せずに影響評価が行われてきた。本研究では、台風などの極端な気象現象を考慮した温暖化の影響を評価するためのモデルを構築し、東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所の共同研究により超高速スーパーコンピュータ地球シミュレーターを用いて行われた高解像度 GCM 実験(CCSR/NIES)による高空間解像度・高時間解像度の気候データを用いて、その影響を定量的に評価する。

影響評価の対象としては、将来の気候変化の影響を顕著に受けると思われる農作物の土地生産性を取り扱う。対象作物はイネとする。気温・降水等の気候因子の平均的な変化に加え、極端な気象現象としては台風、熱波の生起・規模の将来変化を考慮する。

表1 極端な気象現象とその影響(IPCC, 2001)

21世紀中に予想される極端な気象現象の変化とその可能性	予想される影響の代表的な事例
ほぼすべての陸域における最高気温の上昇、暑い日や熱波の増加(可能性がかなり高い)	・高齢者や都市の貧困者の死亡や重病発生の増加 ・家畜や野生生物の熱ストレスの増加 ・観光目的地の変更 ・多くの農作物の被害のリスクの増大 ・冷房による電力需要の増大とエネルギー供給の信頼性の低下
ほぼ全ての陸域における最低気温が上昇、寒い日、霜の降りる日、寒波の減少(可能性がかなり高い)	・多くの農作物の被害のリスクの減少、および、他の農作物リスクの増加 ・一部の害虫や病気を媒介する生物の生息範囲や活動の拡大 ・暖房エネルギー需要の減少
降水現象の強度の増大(多くの地域で可能性がかなり高い)	・洪水、地すべり、雪崩、泥石流といった被害の増加 ・土壌浸食の増加 ・洪水流量の増加とそれによる一部の氾濫原帯水層の涵養の増加 ・政府の民間洪水保険システムや災害救援への圧力の増大
中緯度大陸内部のほぼ全域における夏季の乾燥とそれに関連した干ばつのリスクの増加(可能性が高い)	・農作物生産性の減少 ・地面の収縮による建築物基礎への被害 ・水資源量の減少や水質の低下 ・森林火災のリスクの増加
熱帯低気圧の最大風速、平均・最大降水強度の増大(一部地域で可能性が高い)	・人命へのリスク、感染症の流行のリスク、そのほか、数多くのリスク増大 ・沿岸侵食や沿岸の建築物やインフラへの被害の増加 ・珊瑚礁やマングローブのような沿岸生態系への被害の増加
多くの異なる地域におけるエルニーニョ現象に関連した干ばつや洪水の強度の増大(可能性が高い)	・干ばつや洪水の多い地域における農業および放牧地生産の減少 ・干ばつの多い地域における水力発電ポテンシャルの減少 ・干ばつの多い地域における水力発電ポテンシャルの減少
アジアの夏季モンスーンの降水変動性の増大(可能性が高い)	・温帯・熱帯アジアにおける洪水や干ばつの規模の増大と被害の増加
中緯度の暴風雨の強度の増大(現在のモデル間での一致はほとんどない)	・人命や健康へのリスクの増加 ・財産やインフラの損失の増加 ・片岩生態系への被害の増加

## 2. 既存研究の整理と本研究の位置付け

### 2.1 既存研究

全球規模で温暖化による農業影響を評価した既存研究としては、FAOのAEZの手法を基礎として開発された潜在作物生産性モデルを用いた研究(Takahashi et al., 1997)やGAEZを用いた研究(Fischer et al., 2000)がある。気温、降水量、潜在可能蒸発散、光合成有効放射量、土壌の性質・地勢などのデータを入力情報とし、穀物の成長を生物学的にモデル化することで、前者では12種類、後者では154種類の作物の潜在生産性を全球レベルで定量的に評価している。しかしながら、両研究とも使用している気候情報は、月単位のデータであり、日単位の気候データでのみ考慮が可能な極端な気象現象の変化については、明示的に評価に含めていない。

農業部門への極端な気象現象の影響を定量的に評価した研究としては、気候変動によって、極端な降雨現象の頻度が増大した場合にアメリカのコーンベルトにおけるトウモロコシ生産額が、1年間に30億ドルの被害を受けることを、CERES-Maizeモデルを改良することで定量的に明らかにしたRosenzweig et al. (2002)の研究がある。また、Meams et al. (2001)は、空間解像度の低いGCM実験結果(CSIRO)と高解像度の地域気候モデルを用いてそれぞれ気候シナリオを作成した場合、アメリカ・グレートプレーンにおける農作物生産性に与える影響の差異に関して、EPICモデルを用いて評価した。しかしながら、両研究とも極端な気象現象の将来変化を地域気候モデルにより予測しているため、対象地域は限定的である。

### 2.2 本研究の特徴

本研究では、極端な気象現象として、台風、熱波の生起・規模の将来変化を考慮し、温暖化がイネの土地生産性に及ぼす影響を高精度に見積もる。また、影響評価モデルの入力因子となる将来の気候変化予測情報として、地域気候モデルの実験結果を用いず、高解像度GCM実験による高空間解像度・高時間解像度の気候データを用いることで、地域限定せずに全球を対象として評価を行う。それにより、極端な気象現象の変化を考慮しつつ、温暖化影響の地域格差を把握することが可能となる。

## 3. モデルの概要

### 3.1 使用するモデルの特徴

本研究では、既存の月別気候情報・土壌条件情報・灌漑・国別投入労力を入力レベルを入力条件としてイネ等の主要穀物の潜在生産性を推計する潜在作物生産性モデル(村井ら, 2005; 以下既存モデルと呼ぶ)を基礎として、さらに、日別気候情報を入力条件として極端な気象現象(台風と熱波)による被害を考慮できるように拡張したモデル(以下、日単位モデルと呼ぶ)を開発し、影響評価に用いた。図1は既存モデルのシミュレーションフローと本研究で改良する主要な点である。

既存モデルでは、各月内の日別の気候条件の変動については考慮せず、月平均値を用いて作物成長をシミュレートし、作物生産性を推計している。モデル中の作物別の成長特性パラメータ・栽培条件

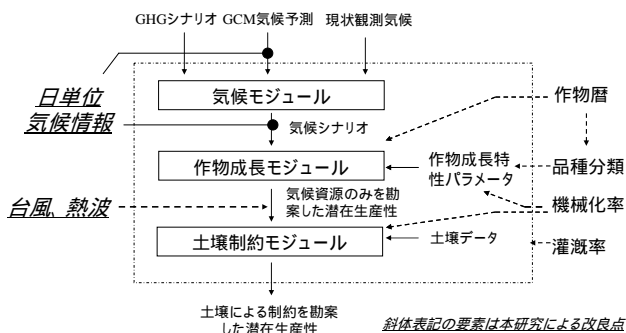


図1 既存モデルのシミュレーションフローと本研究での改良点

等については、入力情報として月平均値を用いることを前提として、設定されている。本研究では、連続した暑熱日、豪雨、連続無降水といった月内の日別の気候条件の変動を考慮すべくモデルを改良するにあたり、3.2.2にて説明するように現状の日単位の気候条件を入力した場合に従来の潜在作物生産性モデルにおける成長期間(Growing Period)とその期間中の平均気温が近づくように、作物別の成長特性パラメータ・栽培可能条件について再調整を行い、さらに3.2.3にて説明するように、台風・熱波による短期集中的な被害を考慮するためのモデル拡張を行い、その後に気候変化影響の評価作業に用いた。

### 3.2 モデルの改良

モデル改良は、次の3つの手順を踏んで行った。土壌傾斜制約と品種別の成長特性のモデルでの表現を改良し、月単位モデルの現状再現性を向上させる。月単位モデル(既存モデル)の出力結果と日単位モデルの出力結果のすり合わせを行い、日単位モデルの作物別の成長特性パラメータ・栽培可能条件について調整する。極端な気象現象(台風と熱波)による影響を明示的に取り込み、日単位モデルに組み込む。

#### 3.2.1 月単位モデルの改良

本研究では、モデルの現状再現性を向上させるために、まず、既存の月単位モデルにおける土壌傾斜による制約・品種別の成長特性の取り扱い方に改良を加えた。

##### 3.2.1.1 土壌傾斜制約条件

既存モデルでは、土壌傾斜を三段階(0-8%、8-30%、30%-)に分類し、作物別・投入労力別に土壌傾斜の制約条件を設定している。日本では、棚田の定義を傾斜率5%以上の水田としており、8%を越える地域も多数存在する。また、日本だけでなく、他のアジア各国においても傾斜の厳しい土地で棚田による生産は行われている。そこで、棚田における生産の可能性を反映させるべく改良を行った。

また、傾斜のある土地においては、表土や土壌中の養分が雨により流出してしまうため、生産性を減少させる要因を持っている。将来、降水強度が増大すれば、豪雨が作物本体に与える直接的な影響だけでなく土壌条件の悪化を通じた間接的な影響を受けることになる。

本研究ではGAEZの手法を参考に、土壌傾斜を七段階(0-2%、2-5%、5-8%、8-16%、16-30%、30-45%、45%-)に細分化し、作物・投入労力・降水強度それぞれの組み合わせで、棚田を勘案した制約条件を設定した。

##### 3.2.1.2 品種分類

現実に栽培されている作物種・品種の気象に対する生物学的な反応を基礎として作成されたGAEZの品種分類を本研究のモデルで使用するためにパラメータの調整を行い、適用した。GAEZでは、成長期間中の積算気温と気候帯などの情報からイネは3種類(Indica\_wetland, Indica\_dryland, Japonica)に分類している。一般的にJaponica種は日本を始めとした温帯地域が主要な生産地域である。一方、Indica種は熱帯・亜熱帯地域において最適な品種で、高温耐性を有している。

調整したパラメータは、作物成長をシミュレートする際に重要な要素である成長期間の決定要因である、品種ごとの成長可能な上限気温と下限気温の2種類である。

### 3.2.2 日単位モデルの構築

日単位モデルの作成にあたっては、3.2.1において作成された月単位モデルから計算された成長期間およびその期間中の平均気温の再現力に着目し、誤差が最小となるようにパラメータの値を決定し

<sup>1</sup> 降水強度: 
$$\text{降水強度} = 12 \sum_{i=1}^{12} \frac{\text{月降水量}}{\text{年間降水量}}$$

た。変更したパラメータ・栽培可能条件としては、成長期間の長さ  
に大きな影響を与える温度条件と土壌の水分条件に関わる4種類と  
した。温度条件としては、品種ごとに作物成長特性パラメータによ  
り設定されている成長可能な上限気温と下限気温、さらに成長期間  
中に気温がその上限気温と下限気温の範囲から外れた場合にも成長  
期間を継続させることができる日数の3つとした。一方、水条件に関  
しては、従来の月単位モデルでは成長期間中は常に満足されてい  
なければならなかったが、日単位気候情報を使用する際には厳しい  
制約となってしまうため、条件の緩和を行った。

### 3.2.3 極端な気象現象の表現

極端な気象現象による影響を潜在作物生産性モデル(村井ら, 2005)の拡張により表現するには、光合成や呼吸などのプロセスに  
関する生物学的知見に基づき作物の成長速度を表現するモデルに改  
良を加える方法と過去の統計的關係から作成する被害関数を用いる  
手法があると考えられる。極端な気象現象が作物成長のプロセスに  
及ぼす影響に関する既存の知見の多くは、実験室的な研究によるも  
のであり、現実の農地にそのまま適用することはできない。そこで  
本研究においては、後者の手法を採用することとした。なお、各国  
の実態値のデータが整備されていないため、日本を対象とした被害  
関数を推計する。ただし、日本においては風水害の被害を軽減する  
ための品種改良や植付け時期の分散化などを行っているため、被害  
が過小評価されている可能性は残されている。

#### 3.2.3.1 台風被害関数の推定

台風によって代表される風水害は、強い雨と強い風が複合的に作用する  
ことで、農作物に倒伏・浸水・冠水・塩害などの影響を与え、大き  
な被害を発生させる。本研究では、台風が農作物に与える影響関数  
を推定し、その関係式をモデルシミュレーションにおいて割引因子  
として与えることで、台風の影響を評価できるモデルを構築する。

被害関数の作成には、日本における農業被害に関する統計情報と  
被害発生時の気象情報データを用いた。農業関連統計は、農林水産  
省の農作物災害種類別被害統計、および作物統計を使用し、以下の  
被害率を作成した。10a 当たり年収量とは、作物の栽培を開始す  
る以前に、その年の気象の推移や被害の発生状況等を年並みとみ  
なし、最近の栽培技術の進歩の度合や作付変動を考慮し、実収量の  
すう勢を基にして作成した、その年に予想される 10 a 当たり収量  
である。i は都道府県、j は年度、k は災害を受けた台風・風水害を  
示している。

$$\text{被害率}_{i,j,k}[-] = \frac{\text{被害量}_{i,j,k}}{\text{作付面積}_{i,j} \times 10a \text{ 当たり年収量}_{i,j}}$$

気象情報に関しては、気象庁のアメダス観測データから、降水量  
と風速を使用した。台風の発生から消滅までの期間に関する情報は、  
気象庁の台風経路図を使用した。降水量に関しては台風発生期間中  
の総降水量とし、風速は台風発生期間中の日平均風速が最大となる  
日の値を抽出した。なおアメダスは地点単位のデータであるので、  
各都道府県内の降水量および風速の上位5地点を都道府県の代表値  
とした。

対象期間は 1994 ~ 2004 年、サンプル数は 482 である。生データ  
を回帰分析すると、決定係数が低く、台風の被害は、降水量や風速  
だけでなく、地域特有の条件など他の要因にも大きく依存している  
と考えられる。例えば、栽培地域の地理的な特徴や台風通過後の対  
策の有無、リスク軽減のための植付け時期の分散化などが挙げられ  
る。そこで、その他因子の効果を平均化し、強い降水量・風速と被  
害率の間の関係を抽出するために、降水(0-100mm, 100-200mm,  
200-300mm, 300-400mm, 400-mm) 風速(0-4m/s, 4-6m/s,  
6-8m/s, 8-10m/s, 10-m/s) とともに5段階のカテゴリーに分類し、  
再度回帰分析を行った。自由度修正済み決定係数は、0.653 であり、  
( ) 内の値は t 値である。

$$\text{Damage}_{Ty} = 0.002994 \times \text{rain} + 0.173568 \times \text{wind} - 1.18914$$

$$(4.378) \quad (3.588) \quad (-3.056)$$

rain は台風期間内総降水量のカテゴリー内平均値[mm]、wind は日  
平均風速のカテゴリー内平均値[m/s]である。Damage<sub>Ty</sub> は被害率  
[%]であり、組み合わせ (rain, wind) の場合の被害率平均値であ  
る。式を台風被害関数とする。

#### 3.2.3.2 熱波被害関数の推定

熱波は、高温や乾燥などにより作物に被害を与える。本研究では、  
熱波の高温による障害に着目し、台風と同様の手法を用いて被害関  
数を推計し、潜在作物生産性モデルの割引因子とする。

熱波被害関数の作成には、農林水産省の作物統計と気象庁のアメ  
ダスを使用した。熱波被害に関しては、作物統計から都道府県単位  
の1年間の高温障害によるイネの被害量、作付面積、10a 当たり平  
年収量を用いて、式の被害率を作成した。気象条件としては日平  
均気温を使用し、アメダスデータから年間最高気温( )を抽出し  
た。本来必要なデータは、成長期間中の最高気温であるが、日本  
においてはイネの栽培は夏を含むため、年間最高気温を採用している。  
対象期間は 2002 ~ 2004 年、サンプル数は 67 であった。台風同様、  
全サンプルで回帰分析を行うと説明力が低かったため、28.5 以上  
のサンプルに対して 0.25 区切りでカテゴリー化し、再度回帰分析  
を行った。決定係数は 0.949 であった。なお、( ) 内の値は t 値で  
ある。

$$\text{Damage}_{Hw} = 0.54468 \times \text{temperature} - 15.5886$$

$$(12.191) \quad (-11.813)$$

temperature は年間最高気温のカテゴリー内平均値[ ]、  
damage<sub>Hw</sub> は被害率[%]で各 temperature カテゴリー内の平均被  
害率である。式を熱波被害関数とする。

### 3.3 モデル改良の結果

改良を加えた月単位モデルおよび日単位モデルの現状再現性につ  
いて評価を行い、将来評価の前段階としてそれぞれのモデルが持つ  
誤差・不確実性を把握した。現状再現性の評価には、生産地域の再  
現性、成長期間の再現性、および収量の再現性など複数の基準とな  
る指標が存在しているが、本研究ではモデル改良の際のパラメータ  
調整に、現実の成長期間を用いたので、収量の再現性の側面から検  
証を行った。

FAO による過去の農作物国別収量統計とモデルシミュレーション  
の出力結果である生産性の比を取り、1981 ~ 1990 年の 10 年間の  
変動係数(CV)を用いて評価した。変動係数は、標準偏差を平均値で  
割ることにより、平均値の大きさに依存しない形で散らばりを示し  
たものである。その結果、日単位モデルは月単位モデルよりも変動  
が全体で 3%程度小さく、実際の収量の年々の変動の再現性が向上  
していることが示された。さらに、日単位モデルの中でも、台風と  
熱波の両方の被害を考慮した場合のモデルが最も変動が小さく、本  
研究で使用するモデルの説明力が高まったことがわかった。

## 4. 将来シミュレーション

### 4.1 将来シナリオの作成

気候シナリオに関しては、現状観測気候情報である CRU (New, et  
al., 2002) の月単位気候情報と CCSR/NIES モデルによる IPCC の  
SRES-A1B シナリオシミュレーションの出力結果による日々の変動  
を含んだ気候変化を足し合わせることで作成した。気温・気温日内  
較差・降水量・風速・水蒸気圧・雲量の6つのパラメータに関して、  
2051 ~ 2060 年までの期間日単位で作成した。

また、気候資源以外の潜在作物生産性モデルの入力として必要な  
灌漑率および投入労力のシナリオに関しては、村井ら(2005)の手  
法を用い、灌漑率は 1990 年代の変化トレンドを延長することで、

また投入労力に関しては国別の一人あたり GDP の関数として示した機械化率を投入労力の代替的な指標とすることで作成した。

#### 4.2 シミュレーション結果

##### 4.2.1 台風・熱波の被害

台風被害は、南米大陸北部やインド北東部といった非常に限定的な地域において大きく見積もられたが、その他地域においては、0.1%程度と非常に小さい(図2)。熱波に関しては、台風と比して多くの地域において、被害を及ぼし、最大で10%程度の被害が見積もられた。全球レベルでは、2.5%程度であった(図3)。

##### 4.2.2 極端な気象現象の寄与度

アフリカ中央部、アメリカ合衆国中央部において、全温暖化影響に占める極端な気象現象による影響の寄与度が高い(図4)。また、南米やインド北部でも比較的高く見積もられている。これらの地域では、平均的気温上昇の影響と比較して極端な気象現象の影響が大きいと言える。一方、ロシアをはじめとした高緯度地域では、温暖化の平均的な温度上昇の影響が大きく、極端な気象現象の影響は小さいと言える。つまり、極端な気象現象の影響が全体の温暖化影響に対して相対的に大きい地域、小さい地域の両方が存在していることがわかる。

##### 4.2.3 極端な気象現象を考慮した温暖化影響

極端な気象現象として台風と熱波の両者を勘案した場合の現状から将来への潜在生産性変化の地域平均を図5に示す。世界全体では、20%程度生産性が向上する。アフリカでは、将来機械化などの投入労力が大幅に高度化するとされることによるプラスの効果も勘案しても生産性は減少している。なお、INNIRNとは、灌漑率・機械化率は現状のままの場合、INYIRYとは、4.1において作成した将来の灌漑率・機械化率シナリオの場合である。

## 5. 結論と今後の課題

本研究では、極端な気象現象として台風と熱波を考慮した上での温暖化影響を定量的に評価するために日単位気候情報を入力条件にできるモデルを開発し、極端な気象現象の生起・規模の将来変化を定量的に評価した。熱波による作物への高温障害は、全球レベルで出現し、生産性を最大10%程度減少させる要因であるが、地域格差は比較的小さいことがわかった。しかしながら、極端な気象現象として取り上げた台風による被害は、地域格差が非常に大きく、大半の地域では被害率が0.1%未満と小さいことがわかった。その原因としては入力情報となるGCMおよび被害率を推定する被害関数の2つの側面が考えられる。前者は、高解像度なGCMであっても依然としてメッシュが粗く、極端な降水や風速が平均化されている現象が起きていることである。後者は、台風被害関数側の要因としては、本研究で使用した推計式は、日本における統計情報から作成したため、日本の台風災害に対する耐性は、他国と比較して大きい可能性があることである。

今後の課題は、より高精度な台風の被害を見積もるべく、以上に挙げた原因を解消するための気候シナリオの作成などが挙げられる。

また、対象作物を増やすことや、適応策を勘案することなども行う必要があると考えられる。

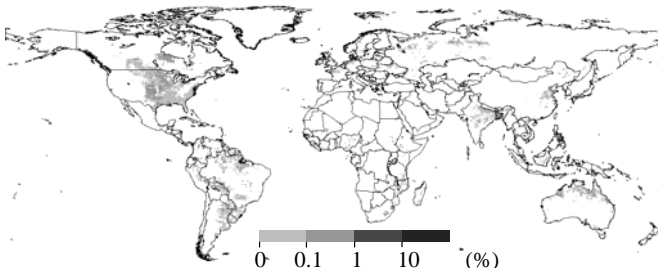


図2 台風被害率

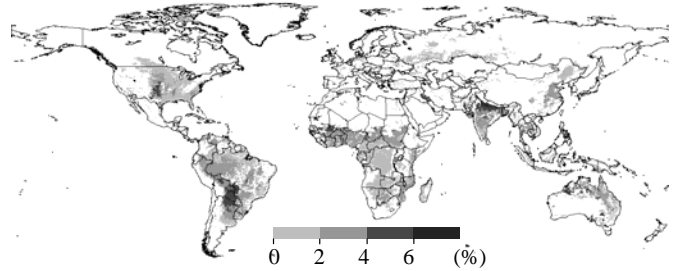


図3 熱波被害率

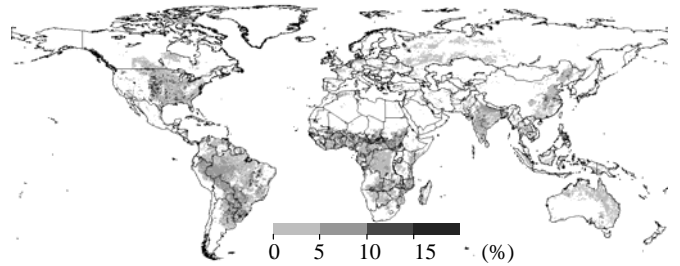


図4 全温暖化影響に占める極端な気象現象の寄与度

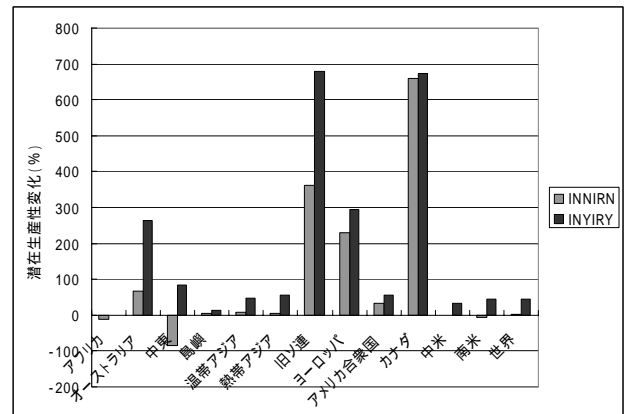


図5 極端な気象現象を考慮した潜在生産性変化の地域平均

### 主要な参考文献

- 1) IPCC : IPCC 地球温暖化第三次レポート - 気候変化2001 -、中央法規出版、2002。
- 2) Takahashi, K, Harasawa, H, and Matsuoka, Y : Climate change impact on global crop production, Journal of Global Environmental Engineering, 3, pp.145-161, 1997.
- 3) Fiscer, G., Velthuisen, H. and Nachtergaele, F., 2000, Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results, International Institute for Applied Systems Analysis,
- 4) Rosezweig, C., Tubiello, F.N., Goldberg, R., Mills, E. and Bloomfield, J., 2002, Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change, Global Environmental Change Vol.12, 197-202
- 5) Mearns, L.O., Easterling, W., Hays, C., Marx, D., 2001, Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: part1. The uncertainty due to spatial scale, Climatic Change 51, 131-172
- 6) 村井啓朗, 高橋 黎, 増井利彦, 原沢英夫, 松岡譲, 2005, 適応策を考慮した上での温暖化が農作物潜在生産性に及ぼす影響の評価, 環境システム研究論文集 Vol.33, 97-104