

## B-11 地球温暖化による水収支への影響評価に関する研究

### (1) 気象・水文モデルの利用による日本域の水文循環への影響把握に関する研究

研究代表者 建設省土木研究所河川部 寺川 陽

建設省 土木研究所

河川部水文研究室 寺川 陽・吉谷純一・渡辺明英・松浦達郎

平成5-7年度合計予算額 13,924千円  
(平成7年度予算額 3,306千円)

#### [要 旨]

本研究は、大気中の炭酸ガス等温室効果気体の濃度増加に起因する地球温暖化が、わが国の河川流域スケールでの水文環境にもたらす影響を予測することを目的としている。地球規模の気候変化の影響を把握するためには、GCMと呼ばれる数値解析モデルが用いられるが、計算機の能力等の制約から計算メッシュが粗く、日本のように狭い領域で複雑に地形が変化するところでは、河川流域スケールでの温暖化の影響評価が難しい。そこで2つのアプローチによる検討を行った。第1のアプローチは、過去の気圧配置等の気象パターンと各地点の降水量の関係を解析し、GCMの出力に基づく気象パターンの出現率の変化から、モンテカルロシミュレーションによって炭酸ガス濃度現状時と倍増時の降水量日系列を擬似発生させ、温暖化に伴う変化を予測する手法である。そして、第2のアプローチは、GCMによって大まかに求められた結果を境界条件として、日本域をより細かいメッシュ(60Km及び20Km)に分割し、かつ地表と大気間の水とエネルギーの相互移動を考慮したメソスケール水文・気象モデルによって、温暖化時の降水量や、表層土壌水分量の変化を予測する手法である。気象研究所の開発したMRI-GCMの出力を用いて上述の2つのアプローチによる予測を行った結果を総合すると、炭酸ガス濃度倍増に伴う温暖化によって、日本のかなりの地域で年間降水量が減少し、蒸発量の増加と相まって水資源賦存量が減少する傾向にあることが示された。

[キーワード] 温暖化、水文環境、GCM、水文・気象モデル、気象パターン

#### 1. 研究目的

温室効果気体の増加による地球温暖化や気候変化が生じる可能性が指摘されている。このような地球規模での気候の変化に伴って、流域スケールでの水文循環も変化する可能性があるため、河川・水資源に関する計画を立案するにあたって、それらの影響を把握しておく必要がある。本研究は、気候変化が日本域における水循環に及ぼす影響を評価することを目的としている。

#### 2. 研究方法

地球規模での気候変化を把握するためには、一般にGCMが用いられる。しかし、現行の計算機の能力等から格子網のサイズに制約が課せられるとともに、格子スケールよりも小さい現象をパラメータ化して取り扱う方法についても今も多くの問題が残されている。そのため、GCMで

は全地球的な現象については予測できても、地域的な降雨量を予測することは難しい。そこで、過去の気圧配置型等の気象パターンと降水量の関係について解析し、GCMによって計算された気候変化に伴う気象パターンの出現率の変化から地球温暖化に伴う降水量の変化を予測する方法及びGCMにネスティングしたメソスケール水文・気象モデルによって、温暖化時の降水量や表層土壌水分量の変化を予測する方法の2つのアプローチによって、わが国の河川流域スケールでの影響評価を試みた。

### 3. 気象パターン解析によるアプローチ

#### (1) GCMに見られる気象パターン出現率の変化

表1、に今回の解析に用いた吉野による気象パターン分類を示す<sup>1)</sup>。炭酸ガス濃度が現状と同様である場合と倍増した場合における各気象パターンの出現率を求めるため、気象研究所の開発したGCM(MRI-GCM-I)<sup>2)</sup>の出力結果に基づいて、等気圧線を表し、気圧配置や前線等を描き込んだ天気図を作成し、気象パターンの判別を行った。なお、このGCM上では低気圧は台風に発達しないので、赤道付近の太平洋上で発生した熱帯低気圧の内、北上したものを台風と見なした。図1は、炭酸ガス濃度現状時及び倍増時におけるGCM出力からみた各気象パターンの出現頻度の割合とともに、1976~1985年の10年間の平均値を示す。これによると、年間を通じてみるとV型を除いて大きな違いが生じていないこと、V型は炭酸ガス濃度倍増時に大きく増大していること及び炭酸ガス濃度の倍増に伴って日本へ来襲する台風の数が増加していることが見てとれる。

#### (2) 気象パターンと降水量の関係

気象パターンと降水量の関係を調べるために、日本の代表的な気候区分を代表するように選んだ15地点(図2)について、気象庁気象観測所で観測された1961年~1985年の25年間の日降水量について整理を行った。北海道では前線による降水は少なく、東北では前線により、降水が生じている。関東地方では、多くの降水は台風・前線・低気圧に起因して生じており、これらに明瞭な違いは見られない。中部地方と西南外帯においても、降水は主に台風・前線・低気圧によって生じている。そこでの降水量の大きさは、関東地方よりも大きい。日本海側の地域の特徴として冬期のI型での降水がある。これは、多くの場合、降雪と考えられる。金沢は特にI型での降水強度が高い。西南内帯では、台風による降水強度は小さく、前線による降水強度が他の場合と比べて大きい。

#### (3) 擬似降雨シミュレーション方法

まず、炭酸ガス濃度現状時及び倍増時の3年間分の気象パターン図から、日単位での気象パターン遷移確率行列を作成し、それを用いて各シナリオ下での200年分の気象パターンを擬似発生させた。次に、前項で述べた過去の気象パターンと日降水量の関係を用いて、日々の気象パターンに対し、確率的に降水の有無を判定し、降水が生じると判定された場合の日降雨強度をHayらによって提案された<sup>3)</sup>式(1)によって計算した。

$$R = R_{a,i} \{ -\ln(\text{Rnd}_1) \} (1 + \text{Rnd}_2) \quad (1)$$

ここに、 $R_{a,i}$ : 場所a 気象パターンi に対する平均降水強度、 $\text{Rnd}_1$ : (0,1] の一様乱数、 $\text{Rnd}_2$ : [-1, 1] の一様乱数である。式(1)の平均値は、概ね平均降水量と一致するように設定されている。

擬似降雨発生モデルの妥当性については、土木研究所裏筑波流出試験地の降雨データを用いて検証した<sup>4)</sup>。

表 1 解析に用いた気象パターン分数（吉野）

I	西高東低	
II	気圧の谷 (低気圧)	a. 北海道または樺太付近を東進
		b. 日本海から北東に進む
		c. 台湾から日本の太平洋岸を 東～東北東に進む
		d. 2つ玉、または日本海と太平洋
III	移動性 高気圧	a. 日本の北東または北部を東進
		b. 日本列島、主に本州上を進む
		c. 帯状高気圧
		d. 太平洋岸または南方を東進
IV	主として 停滞性の 前線	a. 日本列島上を ほぼ東西方向に走る
		b. 太平洋岸または日本南方を ほぼ東西方向に走る
V	南高北低	原則として北太平洋高気圧 が日本列島を支配
VI	台風	a. 南九州より南方の海上
		b. 本州及びその沿岸地帯
		c. 北日本

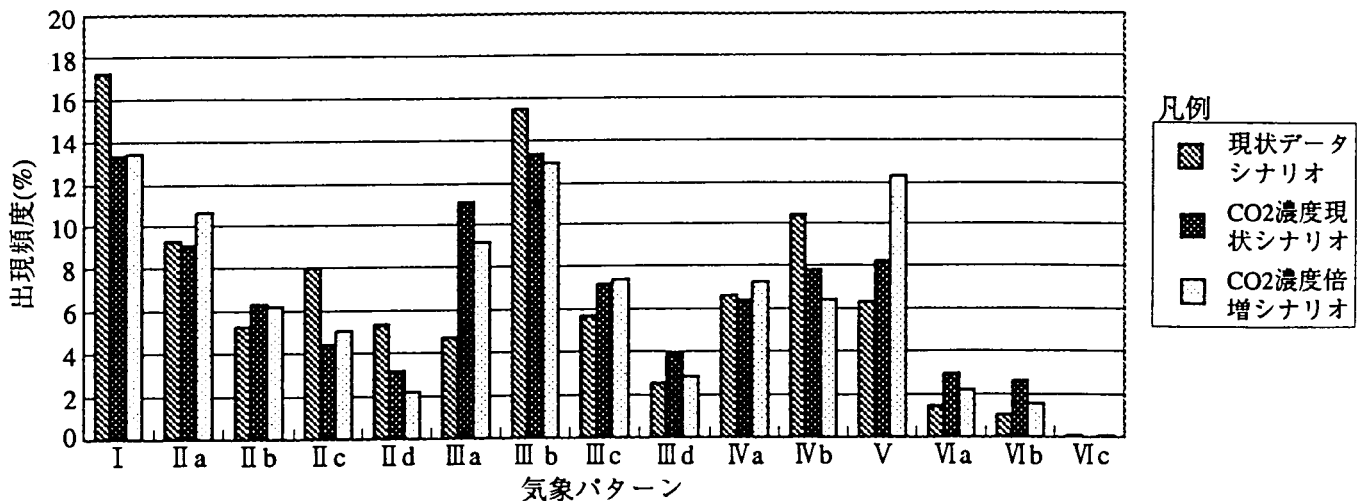


図 1 各シナリオにおける気象パターンの年間出現頻度

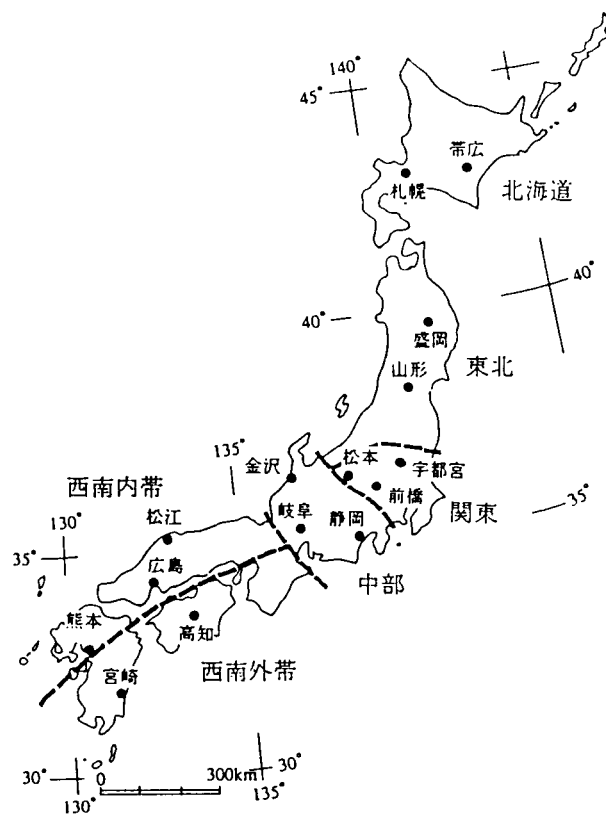


図2 解析に用いた気象庁観測所の位置

#### (4) 擬似降雨シミュレーション結果

先に示した15地点において、炭酸ガス濃度現状シナリオ、倍増シナリオ及び過去の実績シナリオ下での年間降水量を図3に、また炭酸ガス濃度倍増に伴う変化を図4に示す。これによると、炭酸ガス濃度の倍増に起因した年間降水量の変化はそれほど大きいものではない。これより、関東地方・中部地方及び西南外帯では降水量が低下し、一方、北海道、東北地方、西南内帯では降水量は1～2%の増加もしくは、わずかな減少傾向を示している。

これらの降水量の変化は、気象パターンの出現率の変化に起因している。図5は、盛岡、静岡、高知における気候変化に伴う年間降水量の差を気象パターン毎に示したものである。炭酸ガス濃度の増加に伴い、一般的に、V型と前線(IVa型)による降水量は増加し、日本に来襲する台風の数減少に伴って、台風に起因した降水量が減っている。盛岡では、元々台風(VIa, VIb型)による降雨の期待値が小さいので、静岡や高知と比べて、台風に起因した降水量の減少の割合が小さい。前線とV型の場合における降水量の増加は場所によってそれほど変わっていない。盛岡でのこれらの和は台風による降水量の減少と同程度か多少大きい程度である。また、低気圧時の降水量は全体的に増加傾向にあり、高気圧時の降水量は減少傾向にある。

以上より、炭酸ガス濃度現状シナリオの条件下で、台風による降水量が大きい場所で、炭酸ガス濃度倍増時に年間降水量が減少している。逆に、炭酸ガス濃度通常シナリオの条件下で、台風による降水量が元々少ない場所では、炭酸ガス増加時においても降水量はそれほど減少しない。したがって、平均年間降水量の増減に台風が与える影響が非常に大きいことがわかる。ただし、これは平均値であるから、実際には年毎に日本にくる台風の数によって大きな変動が生じることが予想される。

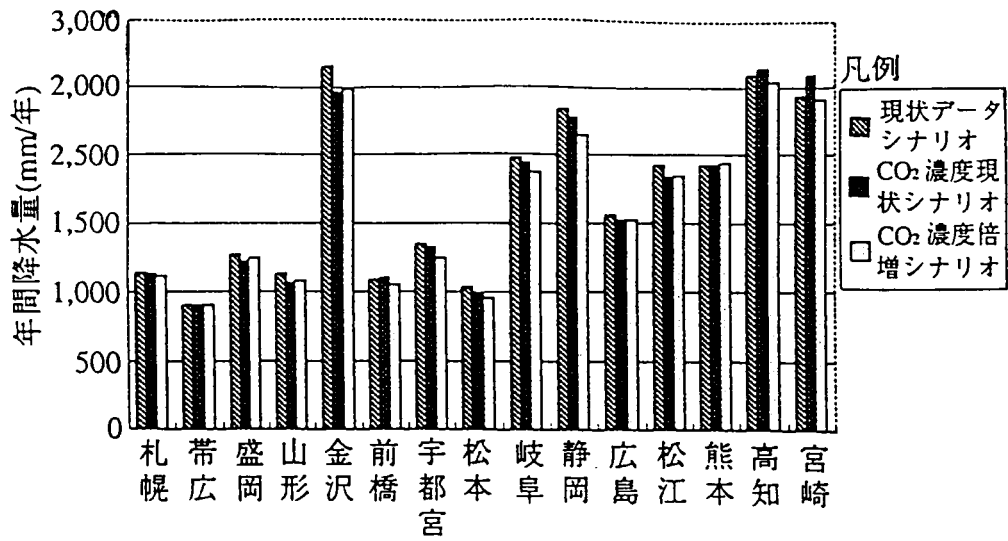


図3 各シナリオのもとでの年間降水量

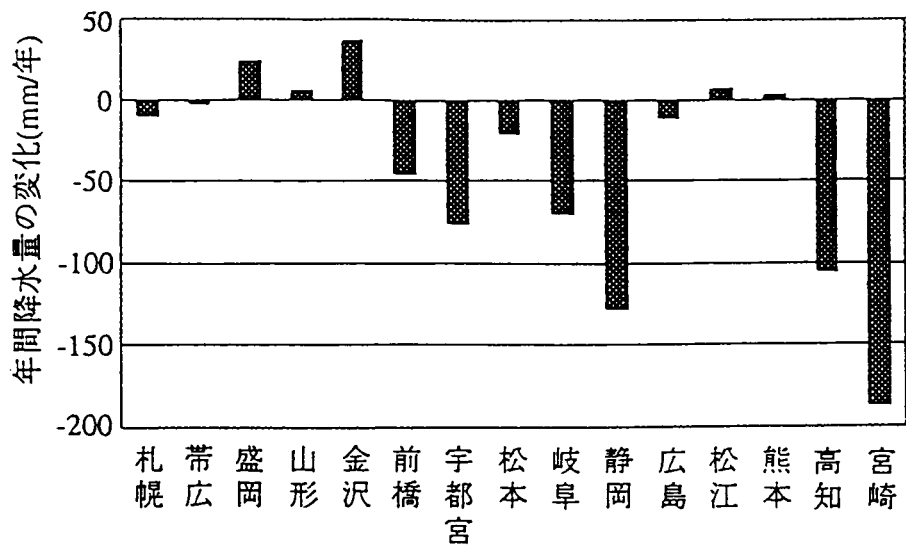


図4 気候変化に伴う年間降水量の変化

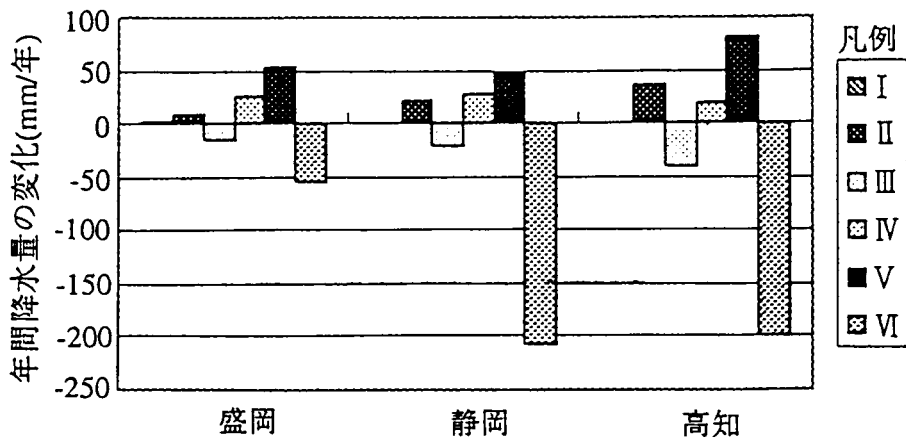


図5 気候変化に伴う年間降水量変化の気象パターン別内訳

#### 4. メソスケール水文・気象モデルによるアプローチ

米国カリフォルニア大学デービス校カバス教授との共同研究により、日本域を20 kmメッシュに分割し地形と風向の影響を物理的に表現できるメソスケール水文・気象モデルを開発し、降雨特性変化を予測した。このモデルでの地球規模の気候変化の影響は主に境界条件で決定され、境界条件はGCMシミュレーション結果を用いることができる。さらに、予測の精度を高めるため、地表と大気間の水や熱の相互作用もモデルに組み込んだ。

##### (1) 計算の手順

降雨等の変化は気候変化がない条件を境界条件に用いた計算結果と二酸化炭素倍増時の気候予測結果を境界条件とした結果の差として求める。その研究は試行錯誤の結果、最終的に以下の手順で実施された。

##### 1) メソスケール水文・気象モデル領域の設定とモデル作成

この時点では、地表面過程をいっさい含まないモデルを60 kmメッシュで作成した。

##### 2) 検証と分解能の修正

60 kmメッシュでは日本の地形の影響を十分に表すことができないため、20 kmメッシュの小領域モデルを作成し、60 km領域に組み込んだ。

##### 3) 大気・水文相互作用のモデル化

モデルの精度向上のため地表面と大気の相互作用のモデルを加えた。

##### 4) 検証と実計算

最終的なモデルの検証と実計算の詳細な手順は以下のとおりである。

1) 日本域を対象とした小領域メソスケールモデルを過去のある期間(1989年1月)へ適用する。

2) つくば地点および気象官署での雨量、気温、風速、相対湿度、気圧について実測結果とモデル計算結果を比較することによってモデル検証を行う。

3) 同モデルを用いて、炭酸ガス濃度現状時と倍増時の2種類のシナリオのもとで計算する。

4) これらの計算結果の差を炭酸ガス濃度倍増に起因する温暖化による変化量とみなす。

研究に用いたメソスケール水文・気象モデルの概要は以下のとおりである。

範囲と分解能：図6のとおり

初期条件 大気変数についてはNMC(アメリカ気象センター)のデータを内搜

地表面についてはアメダスデータを内搜

初期条件は月の最初に与える

このモデルは他の世界中の大気モデルにない以下の特徴を有する。

##### 1) 地表面過程と大気の相互作用

##### 2) その平均化によるスケールの問題の解決

である。大気と地表面間の水の移動、すなわち降水と蒸発散は、従来のモデルでは固定した状態量で決定されたが、実際は蒸発量は降雨履歴及び土壌と大気の状態に依存し、大気の状態は蒸発量と降雨の有無に依存するといったように相互に依存し合うため、全ての状態は簡単には決まらない。今回開発したモデルではこのフィードバック効果が組み込まれているので、対流性降雨のような降雨も精度良く再現されているものと思われる。平均化とは、例え

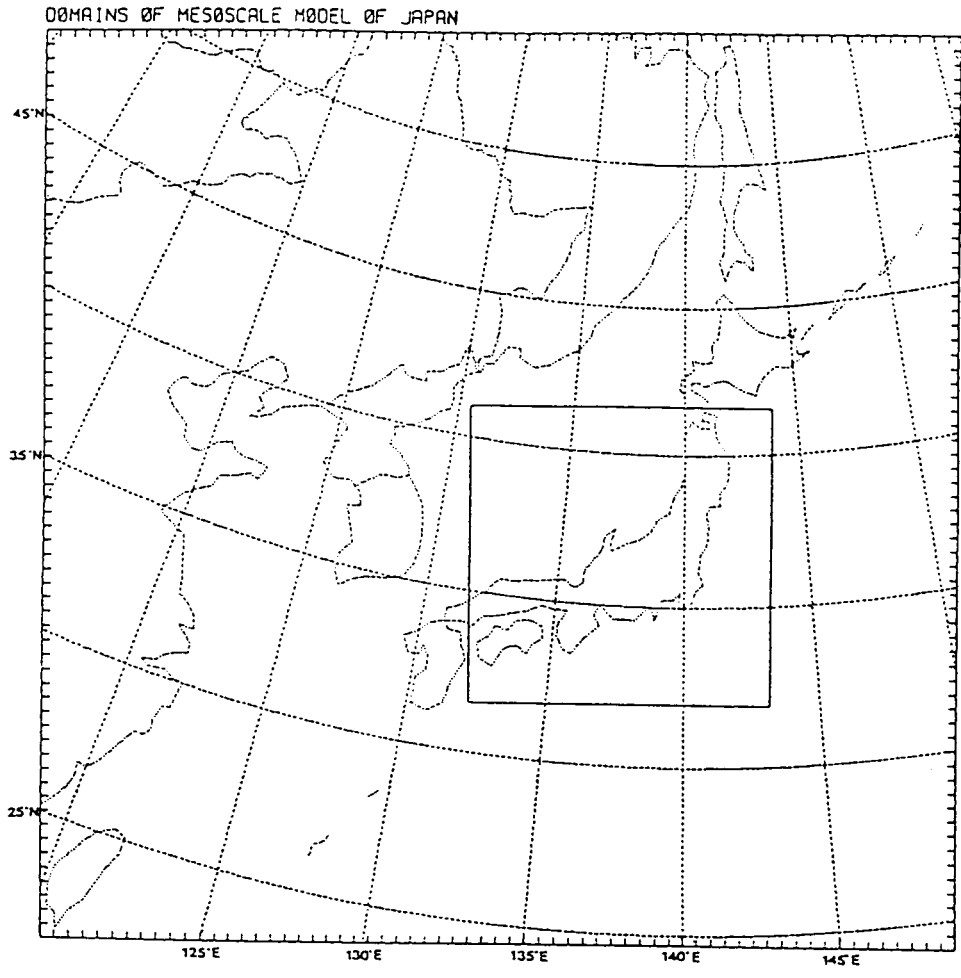
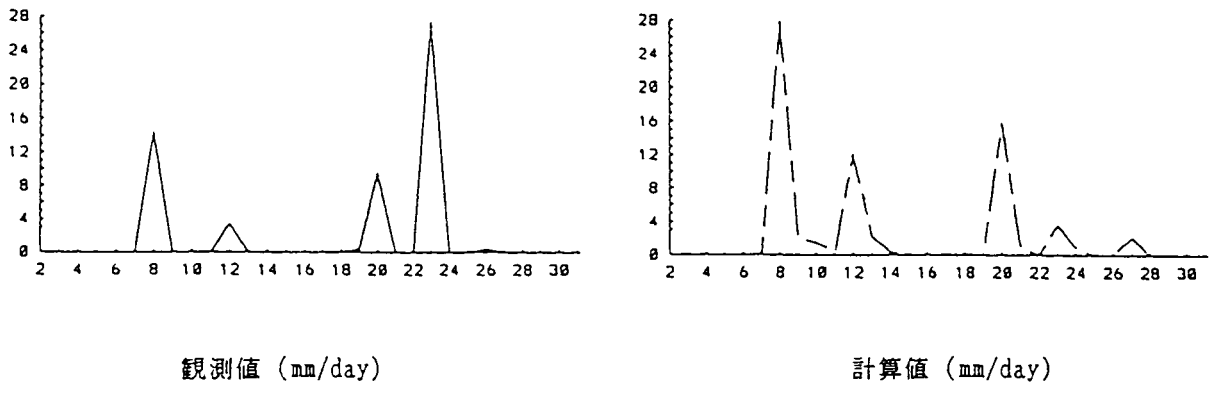


図6 20 Kmメッシュモデルの対象領域

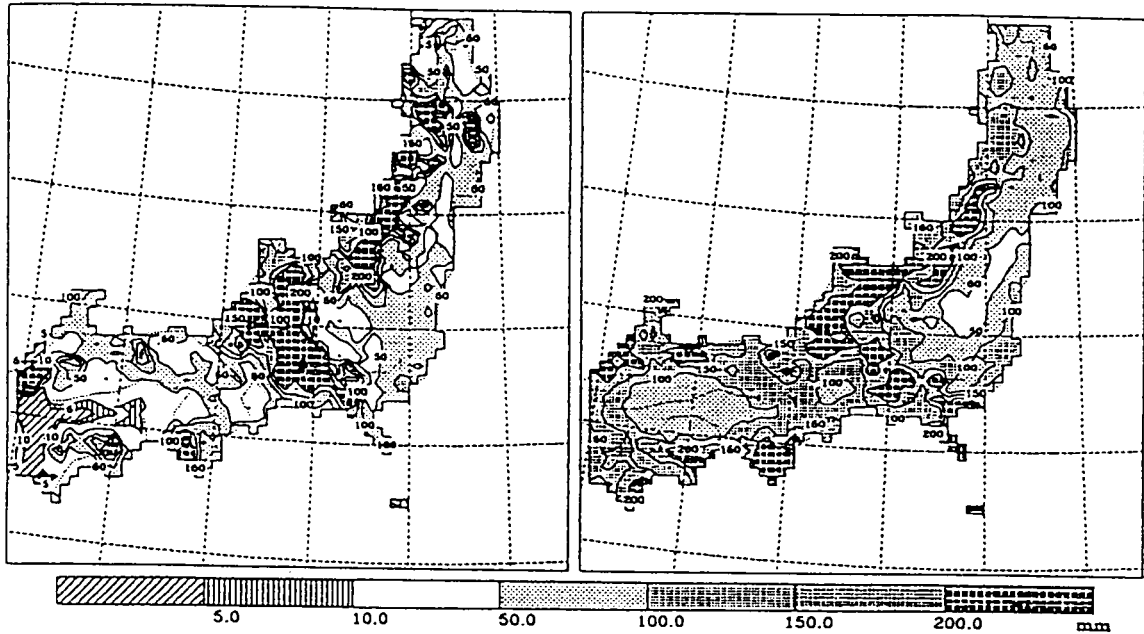


観測値 (mm/day)

計算値 (mm/day)

図7 つくばにおける日雨量観測値と計算値 (1989年1月)

Jan 89 Precipitation (Simulation vs Observation)



左図：計算による1989年1月の月降水量

右図：実測（アメダス）による1989年1月の月降水量

図8 月降雨量分布の計算値と観測値（1989年1月）

Annual Precipitation

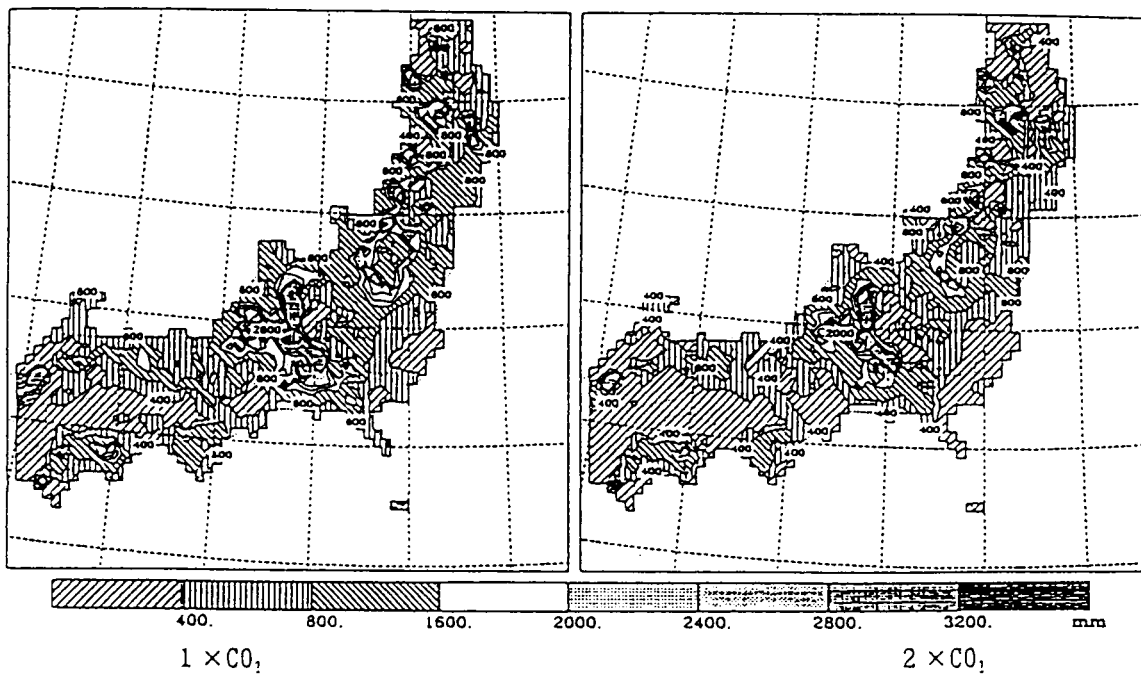


図9 CO<sub>2</sub>濃度現状シナリオと倍増シナリオ下での年降水量計算結果



Monthly Precipitation in February

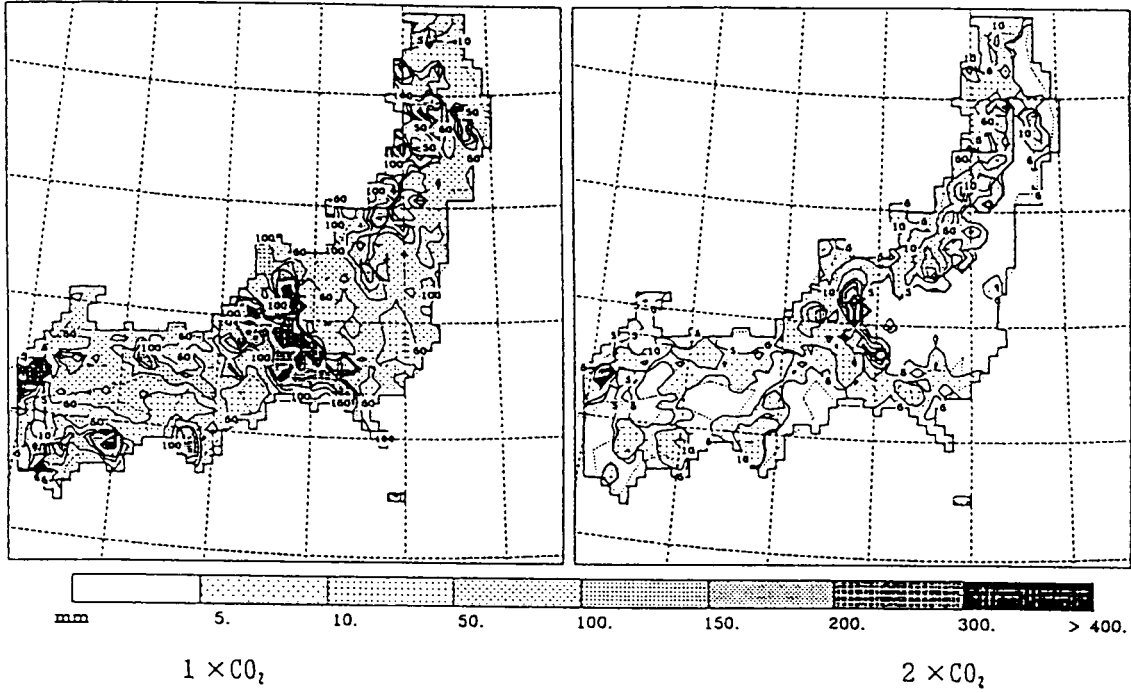


図10 CO<sub>2</sub>濃度現状シナリオと倍増シナリオ下での2月の降水量計算結果

Monthly Precipitation in August

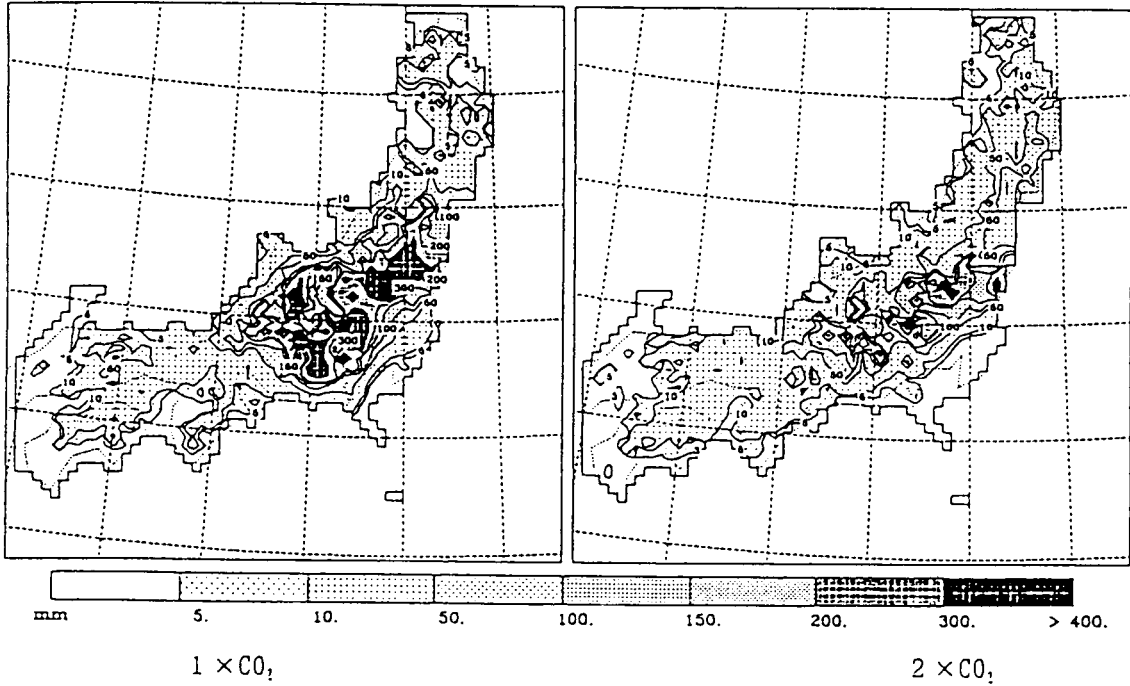


図11 CO<sub>2</sub>濃度現状シナリオと倍増シナリオ下での8月の降水量計算結果

ば蒸発に影響を与える土壌水分を例にとると、1辺が20kmのメッシュ内部(400km<sup>2</sup>)ですべてが一様なことはあり得ない。しかし浸透現象は非線形性の強い現象なので算術平均はできないし、モンテカルロシミュレーションのようなパラメータの値をランダムに変化させて数多くのケースについての計算結果を統計的に処理する手法も多くの計算時間を要する点から現実的でない。それを解決する簡易な計算手法を組み込むことにより、メッシュ内部の不均一性の影響を表した。

## (2) 検証

茨城県つくば市に位置する筑波大学で観測された日降水量をモデルの当該メッシュでの値と比較した結果を図7に示す。この期間、つくば市では4回のまとまった降水があり、それぞれの一雨雨量は16、4、10、および28mmであり、モデルはこれらの降水期間をほぼ再現している。量についてはメッシュ値と地点観測値の違いを考慮していないこともあるが、再現した降水量は相当の誤差を含んでいる。図8は1989年1月の月降水量の計算値と観測値(アメダス資料より作成)である。冬の季節風の影響を受けて日本海側で降水があること、長野県の山岳地域や御前崎付近や伊勢・志摩で降水量が多い傾向はこのモデルでよく再現されている。これは従来の気候変化予測モデルから見ると格段の進歩である。これと同様に、気象官署における日降水、日蒸発散、日平均地表面気温、日平均地表風速、日平均相対湿度、日平均地表面気圧についても比較を行い、気候変化予測モデルとして満足できる整合性が得られた。

## (3) 降雨変化

現状のCO<sub>2</sub>濃度とCO<sub>2</sub>倍増シナリオのもとでの年降水量計算結果を図9に示す。これによると本州中央部の年降水量が多い地域と関東平野で年降水量の減少傾向が見られる。

降水を月単位で比較した結果のうち2月と8月の例を図10、11に示す。この計算では全体としてCO<sub>2</sub>倍増シナリオで降水量が減少する傾向が見られる。特に2月の関東平野で100~300mmあった月降水量は5~50mm以下に減少している。ただし、先に述べたとおり、このモデルは降水の量を高精度で予測できるものではないので、この関東平野の降水量減少は、このシナリオのもとでの変化の傾向として解釈すべきである。

## 5. まとめ

GCMの出力に基づく温暖化時の気象パターンの出現率変化から擬似降雨を発生させる方法及びGCMにネスティングさせた水文・気象モデルによって温暖化時の降水量や蒸発散量を予測する方法の2つのアプローチにより、日本流域における温暖化による水収支への影響評価を試みた。その結果、解析手法の前提条件を用いたGCMの精度の制約条件下ではあるものの、気温の上昇に伴う日本上空の大気中の相対湿度が減少すること、および日本に來襲する台風の数により、関東、中部、西南部等において降水量が減少し、気温上昇による蒸発散量増加とも相まって、全体的に水資源賦存量が減少する方向にシフトすることが示された。

### [引用文献]

1)吉野正敏(1978):気候学、大明堂

2) 気象庁予報部(1984) : 気象研究所

大気大循環モデル(MRI-GCM I), 気象研究所技術報告第13号

3) L.E.Hay, G.J.McCabe Jr, et.al.(1991) : Simulation of precipitation by weather pattern analysis., Water Res., Vol.27-4, pp.493-501.

4) 藤兼雅和・益倉克成(1993) : 地球温暖化が河川流量に及ぼす影響把握のための擬似降雨モデルの開発、水文・水資源学会1993年研究発表会要旨集, pp.98-99.