

# 我が国の災害環境への気候変動影響評価

Climate change impact assessment on Japanese disaster environment

中北英一\*, 革新プログラム京大グループ

Eiichi Nakakita and Kyoto university's group in Kakushin program

\*工博, 京都大学教授, 防災研究所 (〒611-0012 京都府宇治市五ヶ庄)

Under the KAKUSHIN Program, Meteorological Research Institute (MRI) of Japan Meteorological Agency, Disaster Prevention Research Institute (DPRI) of Kyoto University, and International Centre for Water Hazard and Risk Management (ICHARM) of Public Works Research Institute (PWRI) are performing climate projections for the near future and for the end of the 21st century using atmospheric models of unprecedented super-high-resolution. The climate change studies is mainly based on a global 20-km mesh atmospheric general circulation model (GCM); emphasis has been placed on extreme events, including tropical cyclones and heavy precipitation during the East Asian summer monsoon season.

*Key Words: Climate change, Impact assessment, GCM, RCM. Kakushin PROGRAM*

キーワード: 気候変動, 影響評価, GCM, RCM, 革新プログラム

## 1. はじめに

21世紀気候変動予測革新プログラムは、平成14～18年度において実施された人・自然・地球共生プロジェクトの温暖化予測「日本モデル」ミッション、いわゆる「共生プロジェクト」の成果を基盤とし、第3期科学技術計画の下で引き続き「地球シミュレーター」の活用をはかり、地球温暖化の将来予測に関し、我が国の大学、研究機関の英知を結集し、確度の高い予測情報を創出し、信頼度情報と併せて提供するとともに、極端現象の解析を行うことにより、新たに自然災害分野の影響評価に温暖化予測情報を適用することを目的とした、文部科学省による平成19年度からの5年間のプロジェクトである。

本稿は、土木学会誌で紹介した内容<sup>1)</sup>に加筆して、本プロジェクトのもとに進められている我が国の水災害への影響評価を紹介するとともに、今後に向けて考えなければならない点を整理するものである。

## 2. これまでの我が国への水災害環境への影響評価

これから紹介する革新プロジェクトの開始以前からも影響評価が実施されてきている。国土交通省では、1990年代後半に入り当時の建設省土木研究所が気温上昇や降水量変化が流域水収支や水利用パターンの変化を通して

水資源に及ぼす影響を評価している<sup>2),3)</sup>。2000年代に入り、上記共生プロジェクトで開発された全球気候モデルGCMや領域気候モデルRCMからの日雨量推測値をベースに、国土交通省国土技術政策総合研究所が気象庁気象研究所と共同して、近未来、21世紀末の季節降水量、月降水量、年最大日降水量の出現頻度を指標に、洪水リスク、渇水リスクの評価を実施している<sup>4),5),6)</sup>。2008年に

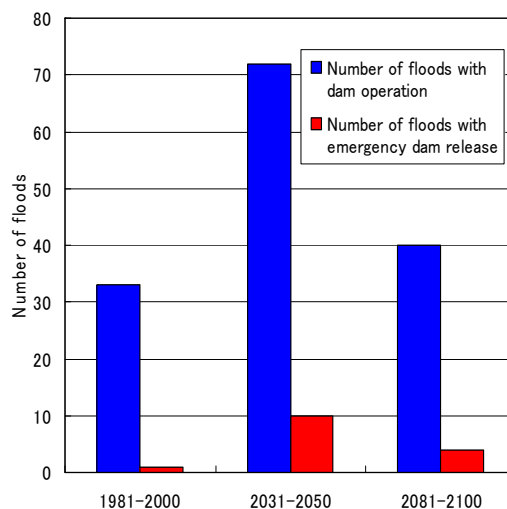


図-1 通常ならびに緊急ダム操作を必要とする洪水の発生頻度の気候モデル出力を用いた推算例<sup>9)</sup>。

表-1 21世紀気候変動予測革新プログラム研究体制

チーム名	研究内容
A. 地球環境予測	CO <sub>2</sub> についての大気・海洋の化学的過程や陸域・海洋の生態系を気候モデルに取り入れた「地球システム統合モデル」を開発し、大気中 CO <sub>2</sub> 濃度を安定させるためには、人為起源の CO <sub>2</sub> の排出がどこまで許容できるかなどを調べる長期予測実験を行なう。
B. 近未来気候予測	大気・海洋結合モデルをこれまでになく高解像度化し、エアロゾルなどの気候変化要因をより詳しく扱い、計算手法も高度化する。増大傾向の人為起源要因の下で、2030年頃の近未来での異常気象の変化や水災害などを中心に調べる予測実験を行なう。
C. 極端現象予測	20kmの超高解像度の全球大気モデルを不確実性の低減により高度化し、台風・ハリケーンや梅雨の近未来・世紀末での予測実験を行なう。日本付近の集中豪雨などの詳細に関しては数 km の領域モデルを活用し、防災対策につなげる。
D. 雲解像モデリング	気候モデルにおいて、不確実性の高い雲の振る舞い(物理プロセス)を改善するため、雲を解像できるモデルを高度化して物理プロセスの解明を行なう。さらに、気候モデルへの取り入れ方について開発を進め、それを確かめる実験を行う。
E. 海洋微生物過程	海洋の表層混合層や深層対流の不確実性を解消して、気候予測の高精度化に資することをめざす。表層混合層・深層対流域における微生物過程を扱う高度な乱流モデルを開発し、海洋モデルや大気・海洋結合モデルに組み込んだ実験を行なう。

は国土交通省河川局において、全国 82 水系各流域の計画対象降雨量の世紀末までの変化を概算推定した上で、治水安全度の低下量を推定している<sup>7)</sup>。一方、国土交通省土地・水資源局では温暖化が河川流況に及ぼす影響を全国主要流域について推定し、農業用水の需要期に影響があることを懸念している<sup>8)</sup>。

さて、以上は日雨量をベースにした推測であるが、我が国の河川流域ではピーク流量を再現するためには時間雨量系列が必要不可欠であり、後述するように革新プログラムでは全地球に渡って時間雨量の推測値が計算されている。そういった時間雨量出力値が利用可能となるまでは、日雨量値から時間雨量値系列を確率的に模擬発生させたり<sup>9)</sup>、気圧分布パターン等からの統計的に推定(統計的ダウンスケール)する手法を通して影響評価が行われてきた<sup>10),11)</sup>。図-1は、共生プロジェクトによる RCM 出力日降雨量をベースに淀川流域の部分流域の大雨時に限定した時間雨量系列を多数確率的に模擬発生させ、貯水池操作を組み込んだ流出モデルを通して、各ダム貯水池が洪水調節に入る頻度を、現気候、近未来、21世紀末と比較したもので、将来ダム操作頻度が増すことを示

している。こういった、確率的模擬発生あるいは統計的ダウンスケールは生起する極端現象の確率評価が可能であるという利点を有する。

### 3. 革新プロジェクトの目的と構成

確度の高い予測情報を国内外の地球温暖化対応に関する検討の場に提供し、気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書 (IPCC AR5, 2013年頃予定) への寄与をはじめ、気候変動に対する政策検討、技術的対策の立案に資することが期待されている。

プログラム全体としては、縦の軸として、課題1「温暖化予測プログラムの高度化」/ 課題2「予測モデルの不確実性の定量化・低減」/ 課題3「自然災害分野への適用」の3課題で構成されているのと同時に、これら各研究課題の計画的・効率的な研究推進を容易にするため、横の軸として表-1に示す研究チームを編成し実施する体制となっている。ただし、縦の軸が設けられているのは研究チームA~Cで、D・Eは単独課題である。

### 4. 極端現象予測チーム

京都大学防災研究所が中心となって進めている「流域圏を総合した災害環境変動評価」は研究チームCの中の課題3に属し、気象研究所(課題1, 2を担当)、土木研究所(課題3を担当)、国土総合技術研究所(課題3を担当:平成20度から)と密に連携を図ってきている。基本的には、課題1, 2の全球気候モデル(GCM)や領域気候モデル(RCM)から提供される現気候(1979~2003年)、近未来(2015~2039年)、21世紀末(2075~2099年)それぞれ25年間の1時系列ずつの大気情報をベースに課題3が災害環境評価を実施し、加えて課題1にフィードバックするという構図となっている。プログラム5年間の前半が共生で改札されたGCM, RCMによる予備評価、後半が革新プログラムによってアップグレードされたGCM, RCMによる本評価という計画となっている。

特に、気象研究所が提供する超高解像度(20km格子)のGCM出力によって防災に関する影響評価が可能になったと言っても過言ではない。この超高解像度の計算は、大気中の温室効果ガス濃度が21世紀末頃に20世紀末の約2倍に抑えられるというA1Bシナリオを仮定し、現在気候では全球観測情報、将来気候ではIPCC4参加GCM群からの出力値をベースに作成した全球海面水温分布とその時間変化を境界条件として与えることにより実現している。加えて、日本周辺の暖候期(6月~10月)は5kmおよび2格子のRCMによる、その中でも複数の多雨事例に関してのみ1km格子のRCMによる物理的ダウンスケールが実施される。さらに、初期情報および境界条件としての海面温度や物理スキームに摂動を与えた60km格子のGCMによるアンサンブル計算も実施されGCM

# 極端現象に伴う災害発生変動評価

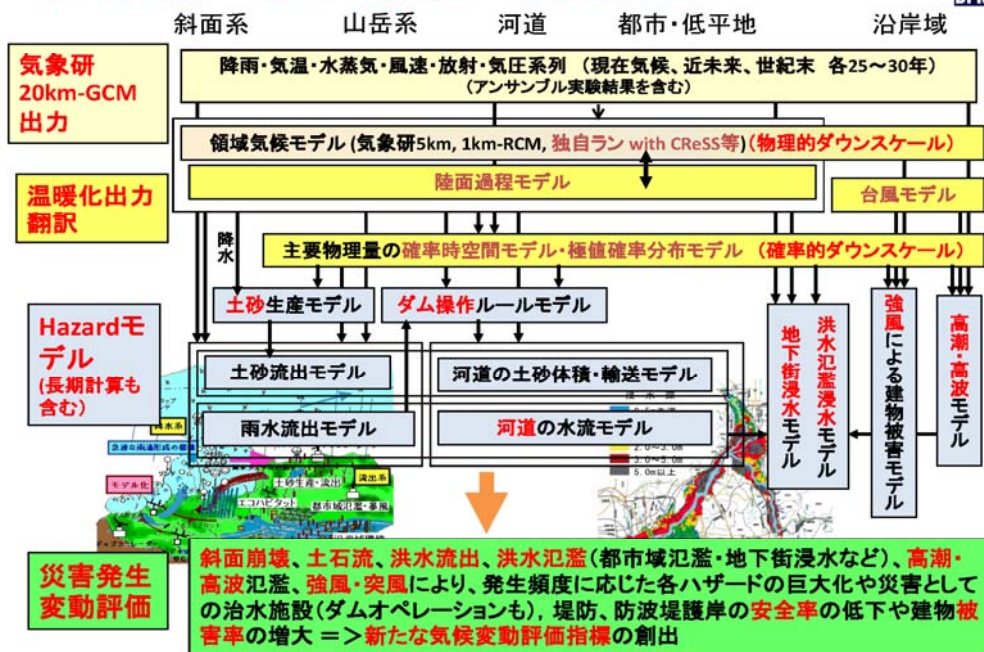


図-2 「流域圏を総合した災害環境変動評価」の研究内容

出力の不確実性も解析が可能な体制となっている。

災害環境への影響評価では、土木研究所 ICHARM が「気候変動に伴う全球および特定脆弱地域への洪水リスク影響と減災対策の評価」という課題のもと、気候変動による世界規模での洪水リスク増大の懸念が広がっていることを背景に、超高解像度大気モデルの出力成果と分布定数型の洪水解析技術を組み合わせて、世界の洪水リスクの変化予測を行っている。すなわち、(1)まず気候変動予測に基づき洪水外力の変化を分析し、また社会的データに基づき社会の洪水脆弱性を分析して、これらを合わせ、現在から近未来・21世紀末に至る10~40kmメッシュでの、洪水リスク変化に関する世界地図を作成し、(2)特に危険な流域については、1kmメッシュでリスク増大の詳細を分析している。(3)加えて、リスク増大に適応するために、洪水の利益も考慮しつつ、必要な対策シナリオを提案し、そのコストも算定することを目的としている。

## 5. 流域圏を総合した災害環境変動評価のターゲット

京都大学防災研究所グループとしては、国内での災害環境の影響評価を目的に、これまで研究開発してきた災害環境の評価手法群を発展・連携させて、流域圏すなわち山地斜面~沿岸域の災害環境の変化をその不確実性ととも予測することを目的としている。具体的には以下の2つが柱となる。(1)大気モデルによる地球温暖化予測実験の結果を用い、雨の地域的・時間的な降り方や雪

解けがどのように変化するのか、台風の発生・進路・強度がどのように変化するかなどを様々な確率的な指標で評価する。(2)日本の土砂災害、洪水・氾濫災害、渇水災害、高潮・高波災害、強風災害の環境変化を不確実性ととも予測する。たとえば、河川流量については現気候、近未来、世紀末ごとに約25年間の連続計算を山地~下流域にかけて行い、洪水や渇水に対する安全度の変化を予測する。

所内横断的を最もベースに気象・水象災害研究部門、流域災害研究センター、水資源環境研究センターで構成される大気・水グループと総合防災グループの社会防災部門、それに京都大学工学研究科や他大学とが総力をあわせて進めている。これだけ一連の災害環境評価や、貯水池操作を含めた河川流量等の長期連続計算(各気候条件下の25年程度)を通しての時間積分型の影響評価は防災研究所にしかできないキーポイントでもある。また、研究は項目ごとにサブグループを設けて推進している。

図-2は、各研究項目の相互の繋がりを示している。基本的には、気象研究所が提供する大気ならびに陸面に関する出力や、アンサンブル予測から得られる不確実性情報を用いて、防災研究所のハザードモデル(風水害評価モデル)を通して災害外環境の変動評価を行なう。加えて、適応策の研究・提案も行なっている。本プロジェクトで気象研究所に希望した物理量は、本当に必要かと当初は疑問視されるほど、3次元空間・時間の様々なスケールにおいての大気~陸面物理量に及ぶ。たとえば降雨に関しては、20km-GCMからは全球の時間雨量、

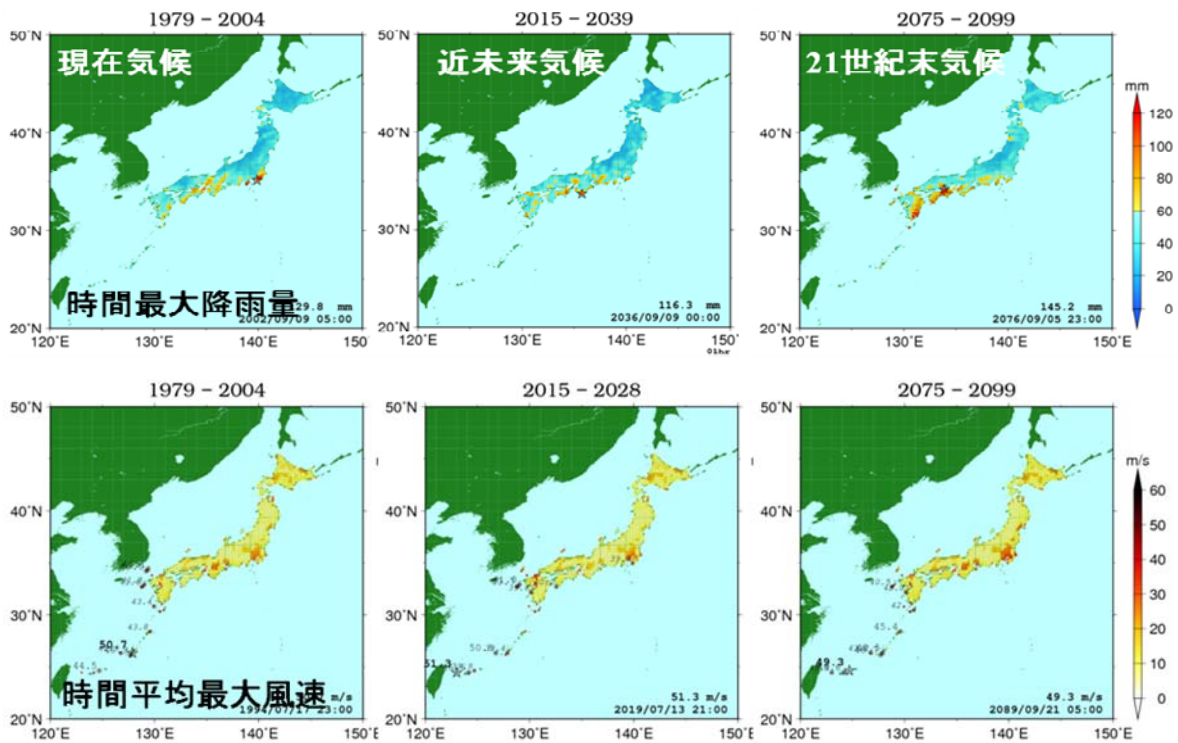


図-3 年最大時間降雨量,風速の, 現在, 近未来, 21世紀末気候条件での20km-GCMの結果<sup>12)</sup>

5km-RCM (旧共生プロジェクトでは日雨量どまり)からは日本周辺の30分雨量(旧共生プロジェクトでは日雨量どまり), 2km-RCM, 1km-RCMからは20, 10分雨量の出力を希望し, 出力プログラムを変更の上で地球シミュレーターで計算を実施してもらっている。

## 6. 水災害に着目した影響評価

現在, 詳細な解析が進行中で, また論文執筆中のメンバーも多いため必ずしも図は掲載できないが, これまで進めてきた予備評価の結果概要を以下に示す。

### 6.1 降雨量の将来変化

まず, 図-3に年最大時間平均風速とともに年最大時間降雨量の現在気, 近未来, 21世紀末気候条件での20km-GCMによる出力結果を示す。ともに, 現気候に比して近未来, 21世紀末では, 関東から九州に至る太平洋岸で増大することを推測している。これらは, 20km-GCMの空間分解能から主に台風による影響を表現していると考えられる。ゲリラ豪雨や梅雨による集中豪雨の細かな計算は20km-GCMでは不可能であるので, それらへの影響評価は今後RCMの出力結果を評価してゆかねばならない。大枠で現在推測されている梅雨への影響には, 梅雨明けが遅くなること, 梅雨が明けても再び梅雨の様相を呈することがある, などがある。

### 6.2 台風の将来変化

台風, サイクロン, ハリケーンを総称して熱帯低気圧

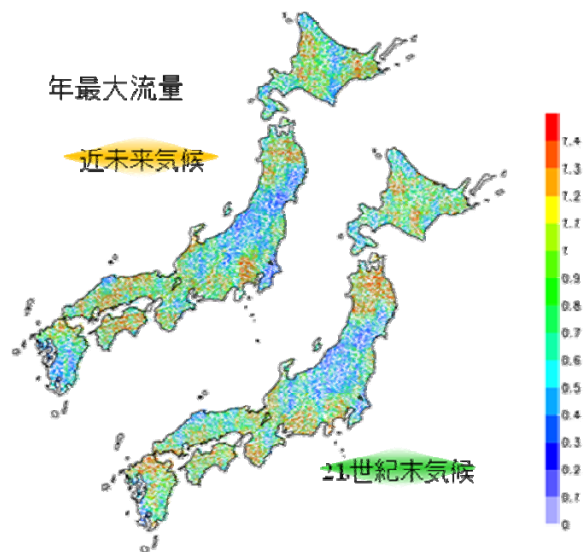


図-4 確率年を100年としたときの年最大流量の現在気候に対する増加比率<sup>13)</sup>

よばれるが, 世界で熱帯低気圧の発生個数が減少し, 中心気圧の極端に低いものが散見されるようになる(規模が大きくなるわけではない)というのが気候研究者の共通認識になっているようである。台風に関しては, 21世紀末には海面高温域の移動によりその発生域が東北東にシフトすることが推測されている。また, その発生数が1800年代末から減少してきているという推測もされている。

我が国へ台風の到来数(接近・上陸数)やその中心気圧への影響評価には, 過去約50年間の観測コースや20km-GCM出力をベースに作成した台風の確率モデルを

用いる。それによって 100 年間 100 本にわたる台風の振る舞いを模擬発生させることによって到来数やそのときの中心気圧の確率分布を得る。現時点では、大阪、伊勢、東京の 3 大湾に到来する台風の個数が増えること、また平均的な中心気圧には変化はないが、920hPa 前後をもつ台風の到来頻度が幾分増加するとの推測がなされている。今後は本評価としてこれらを再算定し、高潮・高波の影響評価へ進む予定である。

さて、台風の中心気圧、地形性降雨、強風は、より空間分解能の高い RCM によってより極端な値が算定される可能性がある。表-1 の D：雲解像度モデリンググループでは、これまで総降水量があまり多くない東北地方でも 500mm 以上の総降水量がもたらされる可能性のあることを推測している。

### 6.3 河川流量への影響評価

河川流量への影響評価は、ダム操作や蒸発散量を含めた分型流出モデルを用いて、20km-GCM から出力される各気候区分内 25 年の一連の陸面過程に関する出力(降雨・降雪・蒸発散量等)を入力に連続計算を行った上で実施している。その評価例として図-4 には、流量計算と Jackknife 法によるリサンプルを実施して求めた、確率年を 100 年としたときの年最大流量の将来変化比率の算定結果を、近未来気候と 21 世紀末に対して示している<sup>13)</sup>。洪水リスクが増大する流域は全国的に現れるが、場所や流域スケールに依存した形で一様に増大するわけではないことがわかる。また、現在気候に比べて近未来、21 世紀末でのダム操作の必要回数が増大する結果が得られていることも図-1 に示したとおりである。

一方、渇水流量(年上位から 355 番目の日流量)は全国至る所で低下するという結果も得られている。また、詳細な流出解析による結果では、ダム総操作をどのように変更しても、現在の水需要を満たすことが不可能になると推測される大流域もある。

積雪・融雪への影響も大きい。特に中部東北以南の日本海側では、冬期の降雪・積雪の減少により融雪出水が世紀末では消滅する。これは、融雪出水を灌漑用水に用いてきたこれまでのパターンが崩されるという、水資源としては大きなインパクトのあるものである。一方、北海道では降雪・積雪は引き続きもたらされるものの、気温上昇により融雪出水が早期化し、かつこれまでより短期間に出水し、洪水危険度が増すとの推測がされている。このように、降雪・積雪・融雪への影響は場所によって大きく異なることを認識しておく必要がある。

### 6.3 土砂災害への影響評価

土砂災害や氾濫災害の影響評価は、河川流量への評価のように、各気候区分 25 年間の一連の計算を実施することは不可能であるし、また無意味である。

土砂災害の場合、2009 年の台風 8 号(Morakot)によりも

たらされた台湾南部の災害は記憶に新しいところである。3 日間で 3000mm 近い総降水量がもたらされた中で大深層崩壊がもたらされた。斜面崩壊は、ある程度の総降水量の中で大きな短時間降雨量もたらされると急な斜面で浅層崩壊が生じ、総降水量が甚大となると比較的緩やかな斜面でも深層崩壊がもたらされる。20km-GCM による九州のある地点での予備的な影響評価によれば短時間降雨量が増加する場合もあれば、総降水量が増加する降雨事例もある。いずれにしても斜面崩壊の危険性が増す可能性が示されているが、詳細はより空間分解能の高い RCM 出力による解析が必要となる。

## 7. GCM, RCM による影響評価に潜在する不確実性

### 7.1 認識すべき不確実性

以上、主に 20km-GCM を用いた災害環境への影響評価例を示した。前述したように、20km-GCM によって出力される時間雨量によって初めて我が国の災害環境への影響評価が可能になった。これは革新プロジェクトによる大きな前進と言える。加えて、より集中的な豪雨による中・小河川流量や土砂災害への影響評価は 5km, 2km, 1km-RCM による出力を用いて実施可能であり、現在進行中である。

その中、究極の影響評価を進めるに当たり、様々な不確実性が未だ存在する。すなわち、

- 1) 積雲パラメタリゼーション等による気候モデルの不確実性
- 2) 各気候区分に対する、単独モデルの出力一時系列 25 年によって影響評価をしなければいけないというサンプル数の不足

が主要な不確実性の原因となっている。もちろん二酸化炭素の将来排出シナリオによっても大きな差が生じるが(図-5 のシナリオの不確実性)、極端現象予測チームではもっともあり得ると考えられている A1B シナリオを用いていることから、ここでの議論からは除外する。

1)に関しては、世界の様々な GCM モデルによってその扱い方が異なるため、マルチモデルアンサンブルによる評価する必要があり、現在進めているところである。しかし、採用されている物理的プロセスの違いがあるため、確率的に同質なアンサンブル実験としての評価を行

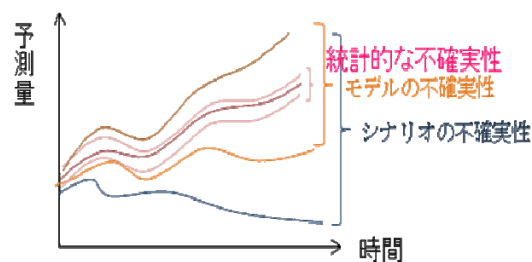


図-5 ランダムアンサンブルとマルチモデルアンサンブル

うことはできない(図-5のモデルの不確実性)。したがって、確率的評価ではなく、あくまで扱う物理プロセスによって、どちらかという後述するリスクマネジメントとしてどこまで起こりえる可能性の幅があるかの適応策に結びつけるべき不確実性であると考えている。これに関しては、現在世界中の GCM 計算が見込まれる中、まずもって影響評価に取り込める期待がある。

一方、2)に関しては、サンプル数の不足を補うために、前述したように影響評価において確率台風モデルによる模擬発生、リサンプリング、統計的ダウンスケール等を実施している。また、気象研究所がアンサンプル実験を実施していることは既に述べたが、しかし、残念ながら計算機資源の限界から、細かくて 60 km 空間分解能によるアンサンプル実験である。もちろんこれによる不確実性評価を最大限今後実施して行かねばならない。

しかし、現革新プログラムでは実現しなかったものの、理想としてはランダムアンサンプル数を増やす事が望まれる。すなわち、初期値摂動等による多数のランダムアンサンプル計算(図-5の統計的不確実性)を通して、偶発的な振れ(極端現象の発現)をできるだけ取り込んで、できる限り十分な精度をもった「再現期間に対応した値」(リターン値)を「デザイン規模」として算定する事が革新プログラム以降に望まれるところである。

## 7.2. 最悪シナリオとしての影響評価

繰り返しになるが、25年間の推測からは強大台風等がたまたま算定されない危険性がある。そこで、気象学的根拠をもった最悪シナリオを作成しての災害環境への影響評価も実施している。一般的なもの疑似温暖化実験といわれる、将来の環境場で過去の強大台風等を領域モデルで再現し直すものである。一方、防災研究所では、20km-GCMで出力された極端台風の進路が対象流域の最悪進路にずれた場合、どういった降雨分布や流量になるかの検討も、気象学・水文学のしっかりした根拠を持った形で実施している。その結果、現在の基本高水の2倍程度の流量が計算される事例もある。この最悪シナリオ評価方法は、高潮・高波災害、氾濫災害、土砂災害との複合災害にも適用して行く予定である。

## 8. おわりに デザインレベルとリスクマネジメント

以上のハザードへの影響評価をどう適応策の立案に結びつけるかは土木工学にとって重要である。そのためには、将来変化が有意となる空間スケールを明らかにしながら、加えて 1) 不確実性が伴う確率評価(リターン値の算定)と、2) 確率評価はできないが物理モデルから算定される最悪シナリオ、の使い分けが重要と考えている。本来は、最悪シナリオの確率評価もできるのが理想でありそれに向けた研究も進めるが、1)、2)の情報を如何に使い切るかも重要である。個人的には、デザインとリス

クマネジメントの区別を再認識することが、気候変動による適応策を考えるにあたって最も重要と考えている。すなわち、1) はデザイン規模の設定のための一指標、2) はそれを越えたリスクマネジメントの指標として、両者併せてどう活かすかが重要となってくると考えている。

## 参考文献

- 1) 中北英一：将来の極端気象を知る～21世紀気候変動革新プログラム～、特集 極端気象に備える、土木学会誌、Vol.95, No.8, pp.18-20, 2010.
- 2) 建設省土木研究所、北海道開発庁土木研究所：地球温暖化による水収支への影響評価に関する研究、環境庁地球環境研究推進費終了研究報告書、246pp., 1996.
- 3) 建設省土木研究所ダム部水工水資源研究室：地球温暖化が水資源に及ぼす影響に関する考察、土木研究所資料、3478, 74pp., 1997.
- 4) 和田一範、村瀬勝彦、富沢洋介：地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水・渇水リスクの評価に関する考察、水工学論文集、49, pp.439-498, 2005.
- 5) 和田一範、村瀬勝彦、富沢洋介：地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集、No.796/II-72, pp.23-27, 2005.
- 6) 和田一範ら：高解像度全球モデルおよび地域気候モデルを用いた地球温暖化に伴う洪水リスク評価、水文・水資源学会誌、21(1), pp.12-22, 2008.
- 7) 国土交通省河川局：第5回気候変動に適応した治水対策検討小委員会、資料6, 2008.
- 8) 国土交通省土地・水資源局：平成19年度版日本の水資源について、2008.
- 9) 佐山敬洋、立川康人、寶馨、増田亜美加、鈴木琢也：地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、21(4), pp.296-313, 2008.
- 10) 藤原洋一、渡邊紹裕、長野宇規、田中賢治、小尻利治、全球大気海洋結合モデル MIROC 出力のダウンスケールと流域内降水量の推定、応用水文、pp.44-53, 2007.
- 11) 小林孝、小尻利治、野沢徹、全球大気海洋結合モデル MIROC 出力のダウンスケールと流域内降水量の推定、水文・水資源学会誌、21(6), pp.423-438, 2008.
- 12) 奥勇一郎、Sunmin Kim、中北英一：高解像度全球大気モデルの温暖化予測実験データを用いた日本陸域の極端気象現象の抽出方法、京都大学防災研究所年報、第52号、pp.439-441, 2009.
- 13) 滝野昌平、立川康人、椎葉充晴：地球温暖化に伴う日本の河川流況変化の推計、極端現象とその気候変動による影響評価に関するシンポジウム報告書、p.69., 2010.

(2010年11月15日受付)