

気候変動研究と水文学

東京大学 生産技術研究所
沖 大幹

1. はじめに

そもそもの発端は、2007 年 5 月より、土木学会水工学委員会水文部会の部会長を仰せつかったことである。単に年次講演会と水工学講演会の際に水文部会を開いてお弁当を食べるだけでは芸がない、と思ったのである。

いろいろ考えた末に思いついたのが、この、「気候変動将来推計情報の水文分野での利用促進シンポジウム」という説明調の長いタイトルのシンポジウムである。実は、このシンポジウムにはモデルがある。それは、1992 年に水文・水資源学会が開催した「気象予測とその水文・水資源学への応用」というセミナーである。そこで筆者は「水文・水資源学のための気象予測概論」というタイトルで講演させてもらい、水文分野で気象予測がなぜ必要か、大気の数値モデルをどう理解すればよいか、についてとうとうと 28 ページにわたる予稿もしたためたのであった。

すでに 16 年前の文章ではあるが、水文分野の研究者にとって大気大循環モデル(GCM)の概要を理解するには未だに入門編としては悪くないと思われる。

<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~taikan/Publication/Abstract/nyumon92.pdf>

上記 URL に当時そのままの文書ファイルを置いているので、木本先生や鬼頭先生の説明がとっつきにくく感じた場合などには大気数値モデルの基本について、適宜参照いただければ幸いである。(ページ数が許せば資料に添付予定)

さて、本シンポジウム開催を思い立った動機はもうひとつある。それは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第 4 次報告書(AR4)、第 2 作業部会(WGII)第 3 章「淡水資源とそのマネジメント」に主要執筆者(LA; lead author)として参加した体験から、もっと日本の水分野の気候変動に関わる研究論文が引用されて欲しいし、気候変動が水分野に及ぼす影響について多角的な観点からの研究がもっと盛り上がって欲しい、としみじみ感じたことからである。

そのためには、自分達のグループだけ頑張るのではなく、大勢でわいわいと様々な視点から取り組むのが良いのではないかと考えたのであった。もちろん、全員が同じ研究を志向することは極めて不健全であるが、様々に変化が見込まれる将来の懸念に対して水分野の将来展望を作成し、対処方針を定めるのに資する研究は、多様性が保たれたままで興隆可能だと思うのである。

さらには、AR4 の公開によって、地球温暖化対策の必要性があたりまえのように認知さ

れるようになり、それまで全く検討していなかったわけではないが、とうとう国交省が本腰を入れて治水、利水に及ぼす気候変動の影響評価に乗り出したのが 2007 年度であった。

気候変動に関してはすでに書籍も多く出ており、また、専門的知見に関しては AR4 やそこに引用されている論文を読めばよいのであるが、専門分野外にとっては、どうすれば新たに価値ある気候変動研究ができるのか、自分自身が理解できているかどうかかわからない、ということになりがちである。

そこで、本シンポジウムは、一般的な地球温暖化、気候変動研究の最前線を紹介してもらうというのではなく、いかにすれば隣接分野の研究者が GCM の計算値を用いて温暖化関連研究が可能であるか、その入り口の理解と留意点に絞ったつもりである。そういう意味では、「水文分野での」とはなっているが、気温や降水量など水文気象に関わる量を用いて影響評価をしたり、温暖化の兆候を発見したり、といった研究を志す農業、健康、生態系、エネルギーなどの分野の研究者の方々にもそれなりに資するのではないかと期待している。

こうしたアイディアをお話しすると、周囲の方々には大変好評で、水文部会としてだけではなく、水文・水資源学会も共催となっていただくことができた。また、木本先生、鬼頭先生をはじめとする講師の先生方にも快く出講をお引き受けいただき、また、お忙しい中、普段とは違う、「気候変動研究や GCM には疎いが研究に関してはそれなりのプロ」という聴衆に対して、書き下ろしを大幅に交えて予稿を作成いただけた。そうした経緯もあって、両先生が IPCC 第 5 次報告書(AR5)へ向けてより精緻な将来気候推計を行おうとしている「21 世紀気候変動予測革新プログラム」も共催ということにさせていただいた。

当初は、もう少し水分野における影響評価研究の実例を紹介していただく時間と講師の先生を増やそうか、という意見もあったが、逆にそれらは普段の学会などでも聴く機会があるだろう、ということで風間先生にごく簡単にお話いただくこととなった。また、なんとしてでも AR5 に多くの日本の研究が貢献して欲しい、ということから、高橋先生には現在どういう風に準備が進んでいるのか、をご紹介いただき、スケジュールやシナリオ、気候予測データの取り扱いなどに関して聴衆のみなさんに実感をもていただければ、と言う風に設定した。

丸一日話を聞いただけで気候変動研究ができるのなら博士課程はいらない、と、同僚の鼎先生が喝破するのにも一理あり、このシンポジウムに参加しただけですぐに AR5 に引用されるような研究をするのは難しいだろうが、どういう関連書籍や論文を読めばよいのか、また、それらを読み進める際のヒントが得られ、日本における気候変動研究がいささかなりとも盛り上がれば幸いである。

2. GCM 算定値を利用するにあたっての留意点

留意点は発表スライドにあげたとおりであるが、なんといってもまず指摘しておきたい

のは、GCM、特に海洋も時間発展を内部で計算する大気海洋結合モデルの場合には、モデルシミュレーションで例えば 2008 年 4 月 3 日といっても、それは必ずしも現実の 2008 年とはかかわりがなく、という点に注意が必要だ、ということである。気候シミュレーションというのは、天気予報のように、ある時点の(ある場所)の大気状態をシミュレートしようというわけではなく、大気中の温室効果ガスや人為起源のエアロゾル濃度、あるいは土地被覆や海陸分布といった条件に対して気候システムが概ねどのように振舞うかを統計的に把握しようとしているのである。

この点が理解できれば、一週間後の天気もわからないのに 100 年後の気候がわかるわけがない、という懐疑論が当を得ていないことがわかるだろう。また、100 年後の気候に関するだいたいの統計的な状況を知るのに、2081 年から 2100 年までを 1 度だけシミュレートした結果だけではなかなか安定した統計値を得ることができない。特に、めったにないような極端な現象に関しては、影響評価にとっては重要であるにも関わらず、単一のシミュレーション結果だけから安定した推定値を算出するのは至難の業である。そこで、アンサンブルシミュレーションといって、初期値などをややずらしたシミュレーションを何度も 2081 年～2100 年の境界条件に対して計算することが行われるのである。そのひとつひとつのシミュレーションをアンサンブルメンバ、平均をアンサンブル平均(mean)と呼ぶ。

また、GCM に限らず、大気の数値シミュレーション結果はしばしば誤差を含んでいるので、その算定値を観測値と同じように考えて取り扱ってはいけない、というのも大事な点である。モデル算定値の絶対値は信用せず、その変化成分のみを抽出して情報を得る、といったことも行われるが、例えば気候変動に対して必要な堤防のかさ上げ高、といった影響評価では定量的な精度が十分でないと現実的な推計は難しい。そこで、誤差を打ち消す様々な手法が適用されることになる。

誤差を打ち消す手法には、単に一次モーメント(平均値)が合うようにバイアス誤差を足したり、係数をかけたりといったものから、高次のモーメントまで合うように頻度分布を変換するものまで様々考えられている。

問題は、多くの研究で、そうした誤差打消し手法が天下りのように用いられていて、検証されていないことである。将来の推計値が正しいかどうか、実際には観測されてからでないとわからないが、擬似的に、例えば、1961～1980 年で誤差特性を抽出し、1981 年～2000 年のシミュレーション結果に対して誤差打消し手法を適用し、実際の観測値とどの程度合致するか、といった検討はすべきである。

さらに、空間解像度に関しても注意が必要である。「気象屋にとっては計算格子は波を表現するためなんだけど、水文屋さんにとっては、各格子の値に意味があるんだねえ」と、亡くなられた武田喬男名古屋大学名誉教授が生前おもしろそうに話されていたのが思い出される。理論的にも大気中の波を表現するには 2 格子必要であり、実際には 5～10 格子くらいないと、大気中を伝播する波は適切に表現できないというのが気象学の常識である。したがって、例えば、20km 格子の気候モデルでは、20×20km の各格子の降水量や流出量

などが的確に計算できているはずだ、というのは期待しすぎだ、ということになる。つまり、20km 格子のモデルでは、100km スケールくらいの現象(例えば台風)が一番小さい大気擾乱としてモデルの中で表現されている、と考えねばならないのであって、20×20km にちょうど入るくらいの盆地や鶴見川流域の局地風や水循環が適切に計算されると思ってはいけないのである。

また、気候モデルは 10 年といった長い期間の平均値は観測値と合うように工夫が施されているのが普通だが、年、月といった単位の平均降水量分布が現実的であるからといって日、時間単位の降水量変動、あるいは頻度分布が現実的であるかどうかに関してはほとんど検証されていないと思ったほうがよい。GCM などと算定される降水量は数 10km×数 10km といった大きな領域の平均降水量を表現しているので、雨量計で測定される降水強度の頻度分布に比べると弱い強度の雨が極端に多いのが普通である。ただ、これが、単に空間スケールの問題だけなのか、大気モデルの誤差も関係しているのか、に関してはよくわからない。

また、バイアス除去以外にも、特に河川流量の将来推計にあたっては、どうやって的確な将来値を得るかある意味で哲学的な観点から考えねばならない。普通に考えると、GCM で算定された河川流量のバイアス誤差を除去して使う、ということになるだろう。しかし、そのためには対象領域の河川流量観測値が必要であり、特定の流域だけを対象とする場合には大丈夫だが、全球を対象とする場合には観測がまばらであるため、流量のバイアス補正は容易ではないという難点がある。

河川流量は気候モデラーの興味関心にはなかったため、以前はそもそも応用研究用に出力されていなかったり、データ量の制約から出力されていなかったりしたこともあった。そのため、気温や降水量に関する GCM 算定値を用いて再度水収支モデルなどにより流出量を求める、といったこともよく行われていた。この場合、気温や降水量についてはグローバル推計値があるためバイアス補正も比較的容易に可能であり、よくチューンされた水収支モデルであれば現実的な流量値を推計できる、という利点もある。ただし、GCM の中で算定されている陸面水収支とは異なる推計値となっている可能性が高い、という気持ち悪さが残ることになる。

GCM 計算値には定量的な精度は期待せず、しかし、その GCM 計算値同士の現状と将来算定値の比や増分といった変化は正しい、あるいは実際に生じるであろう変化を忠実に再現しているとみなす手法もある。これはある意味バイアス補正そのものであり、その蓋然性をきちんと検証する必要がある。もちろん、たとえ 1961～1980 年の誤差統計が 1981～2000 年のバイアス補正に適切に機能したとしても、それが 21 世紀に対するシミュレーションでも機能するという保証はないのであるが。

バイアスと共に、“downscaling”も GCM 計算値を使う場合の技術的な主要テーマである。空間的なダウンスケーリング手法としては、広域の GCM 算定値(気圧配置、降水量分布)などと細かいスケールの気象要素(気温、降水量など)とを結びつける統計的ダウンスケーリン

グ手法と、広域の粗い格子間隔の大気モデルの算定値を側面境界条件とし、より細かい格子間隔で計算する大気モデル(領域気候モデル)を走らせるネスティングと呼ばれる力学的ダウンスケーリング手法とに大きく分けられる。

統計的ダウンスケーリングでは、モデル出力と実際の観測値とが結び付けられるため、バイアス補正も渾然一体として含む形になる。特に、地形の影響をいかに的確に取り込むかが重要で、高解像度で表現される地形に合わせて気温や気圧、降水量、風向風速などを細かい空間スケールで与えるか、はまだまだ技術的に改良の余地がある。

一方で、時間的なダウンスケーリングが必要となることもある。GCM 内部ではその空間解像度に対応して数十分から数時間の時間ステップごとに将来計算をしているのが普通である。しかしながら、出力ファイル容量や流通可能なデータ規模などの制限により、日単位、月単位といった区切りごとに集計した値のみが利用可能な場合も多い。また、過去の観測値に関しては気温や降水量に関しても数十年といった長期にわたって利用可能なデータセットは月単位でしか作成されていない。月単位から日単位への変換は、特に降水量に関して時間変動が重要であり、頻度分布が現実と対応するように、マルコフ過程など統計的な手法を用いてダウンスケーリングする必要がある。

いずれにせよ、モデル算定値のバイアス除去やダウンスケーリングは大きなテーマであり、それだけでも研究の価値は十分にある。ぜひいい手法を開発して論文を発表し、かつその手法を適用した「使えるバイアス除去済みデータセット」を公開共有していただきたいものである。

3. 水文分野における気候変動研究のチャンス

水分野でできる気候変動に関連した研究はまだまだ山ほどある。影響評価が手薄な感はあるが、過去から現在までの水循環変動の変化に関して、GCM で推計されているような変化が実際に生じているかどうか、観測データに基づいて実証するのは非常に重要な研究であり、緻密かつ斬新な研究成果であれば *Nature* や *Science* に掲載されることも夢ではないだろう。特に、豪雨など、極端な現象(extreme event)に関して、温暖化と長期変動との関連が見出されるとインパクトが大きいのは間違いない。

また、GCM の計算結果を使うばかりではなく、GCM の計算精度が少しでも現実に近いように、その改良に貢献することもまた重要かつやりがいのある研究である。大気へのフィードバック過程としては海洋ほどには効かないようなので、気候モデラグループではあまり熱心には研究開発されない陸面過程のサブモデル部分の計算を良くする、ということでも良いだろうし、湖沼、水質、植生との相互作用などを付け加えていく、というアプローチもあるだろう。GCM が地球表層環境変動シミュレータとしての役割を負わされる場合には、植生の成長、土地被覆の変化、現在はほとんどの GCM で無視されている地下水、あるいは灌漑や取水、貯留など人間活動による水循環への作用も考慮できることがしばし

ば求められるので、そういった部分のモデリングに関して、適切な複雑さ、衛星観測などパラメータの客観的な決定法を持ったモデルを構築して提供すると喜ばれることであろう。

影響評価に関しては、洪水や渇水だけではなく、農業生産、健康維持、エネルギー生産(水力発電、火力発電の冷却用水取水)、土砂輸送、水質変化、水道取水、生態系などへの変化影響をきめ細かく推計する必要がある。特に、これらの影響評価においては、日単位の水循環変動がどのように現在から将来へ向けて変換するのか、といった情報をいかに的確に GCM 算定値から抽出して用いるかがブレークスルーにつながるものと期待される。

また、影響評価も、洪水被害人数、給水制限日数、安全度を現在と同じに保つためのコストなど、実感としてわかりやすい指標として示せるように研究を進める必要がある。しかし、これは実は容易ではなく、どのくらいの極端現象が生じればどのくらいの水災害が起こるか、という現状の水災害リスクに関しても良くわかっていないのが実情だからである。水循環の変動と、実際の水災害を結びつける研究もまた、気候変動研究に大いに資することが期待できることが想像できるであろう。

さらには、緩和策と適応策の融合、あるいは二律背反に関しても研究がまだまだ進められる可能性がある。例えば、水循環の変化に対してもサービスレベルを落とさずに上下水道分野における温室効果ガスの排出量をいかに削減するか、あるいは、淡水資源が極めて枯渇している沿岸域でも清浄な淡水が得られる海水淡水化施設導入とエネルギー消費(温室効果ガス排出)のトータルとしての適否の検討などが考えられる。

4. AR5 を目指して

まずは、英語で査読付きの学術雑誌に論文を掲載することである。IPCC のポリシーとしては、英語でなくとも査読付きであれば良いことになっているし、適応策など政策に関連した分野などに関しては **gray paper** と呼ばれる査読なしの文献でも引用してよいことになっている。しかし、各章に必ず日本人の担当者(LA)がいるわけではないので、現実には英語でないと読んでもらえない。また、査読なしの文献に基づいて何か重大なメッセージを主張することになると、各国政府や専門査読者の格好の餌食になってしまう。逆に言うと、学術雑誌の格が低くとも、査読付きで英語であれば、重要なメッセージを含む論文は引用される可能性が高い。

もちろん、そのためには、AR5 に関わる LA の目に触れなければならない。幸い、メンバーは公表されるので、自ら送りつけるか、政府レビューの際にコメントとして自分の論文を強く推すような文章を入れてもらうようにする必要がある。こうした行為は自己主張が激しいととられるとは限らない。Lead author 側も、必ずしも担当分野の主要文献すべてが頭に入っているわけではないので、数回に及ぶ査読コメントとのやり取りを通して重要文献に触れたり、その位置づけが理解できたりしているのである。

また、単一モデルのただ一回のシミュレーション結果に基づく影響評価などは、今後の

IPCC では見向きもされなくなる可能性が高い。複数のアンサンブル、シナリオ、モデル結果に基づいて不確実性や信頼性を明らかにし、もちろん変化の統計的有意度をきちんと検定した結果でないとともに相手にはしてもらえなくなるであろう。IPCC に引用されることを狙わない場合でも、こうしたアプローチは今後ますます重要になるものと思われる。

このように、IPCC に引用されるかどうか、に関しては一定のルールもあり、また、目標も比較的明確だという点では、スポーツのような研究が求められていると言えよう。例えば、IPCC レポートが、排出量削減という非常にシビアな判断に用いられ、かつ、政策決定者にもわかりやすく、ということからすると、全球平均気温が何度あがればどのくらいのインパクトがあるのか、といった図にまとめられるとわかりやすい。いずれ 2012 年ごろに定められるであろう、期日に間に合わなければどんなに目覚しい論文でも AR5 には引用されない、という点でもルールは明確である。ちなみに、スポーツ的研究の逆は芸術的研究であり、ルールも目的も不明、その代わり、いい成果が出てもその時代で正当に評価されるとは限らず、いつまでも終わりがなく、という代物である。

5. GCM 将来算定値の入手について

では、最後に、気候変動に関わる研究をしなくなって、GCM のデータを利用したい場合にはどのようにして入手すればよいのだろうか。

日本では東京大学気候システム研究センター(CCSR)と国立環境研究所と海洋研究開発機構(JAMSTEC)のグループと、気象庁気象研究所の 2 つのグループが別個 GCM を開発運用して気候変動計算を実施している。世界の他の機関を凌駕するようなアンサンブル計算や高解像度計算をするためには日本が誇る地球シミュレータを用いる必要があり、自前で GCM を持っていたとしても、AR5 向けの計算ができるのはこの 2 グループに限られるだろう。したがって、今回の講師のいずれかに、共同研究を申し込む、というのがまずは考えられる方策である。ただし、今回参加の数十機関が殺到することになるのは迷惑なだけであるし、純粋な研究機関用以外に、民間業務用をどう考えるか、など考慮せねばならない点もあると思われるので、あまり現実的ではない。

実際、AR4 へ向けた過程では、気象庁において「統一シナリオ」と呼ばれる主に影響評価用の日本域高解像度気候変動推計データセットが作成され、希望者には DVD で配布された。国際的には、IPCC の活動として GCM の将来推計値に関するデータセンターを作り、研究者なら申請すれば基本的には誰でも各国各機関から提出された温暖化実験結果を利用できる、という仕組みができていた。AR4 の際にはアメリカ合衆国のローレンスリバモア国立研究所に置かれた PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)がその役目を担っていた。AR5 へ向けても順次こうした仕組みが作られる見込みである。

また、全球地球観測システム(GEOSS; Global Earth Observation System of Systems)の

構築に貢献するために国家機関技術「海洋地球観測探査システム」の基幹要素として 2006 年度より実施されているデータ統合・解析システム(DIAS; Data Integration and Analysis System)では、地球観測データに加えて、再解析データや地球温暖化シミュレーション結果も取り込んだデータベースを構築している。DIAS はその名の通り、データセンターとして様々なデータを保管し、検索に応じて配布するだけではなく、解析も行う機能を備えている。

これは、地球観測データにせよ、温暖化シミュレーション結果にせよ、テラバイト単位の大容量データであり、ユーザがダウンロードして手元で計算する、という通常の形態による研究では途中の通信手段やデータ格納資源などの無駄につながる、という発想などに基づいている。また、例え日本の狭い領域に対する月降水量の変化のみに基づいて影響評価研究を行うにしても、従来だと必要なデータを切り出すためにどうしても UNIX/Linux 系の OS に関する知識などが必要であったが、DIAS では、そうした作業はダウンロード前にサーバー側で平易に行えるようになって、ユーザは Windows しか使えなくともそれなりの研究ができるようになるかもしれない。

残念ながら、DIAS は現在まだ構築途上であり、広く研究者コミュニティに解放されているというわけではないが、数年以内、AR5 へ向けた研究成果を出す最終段階より前には完成し利用可能となることが期待される。

6. おわりに

幸い、日本においてこれ以上の方々はいない、という講師陣の先生方に、たつぷりと時間をとって話していただけたこととなった。快くお引き受けいただいた先生方に深く感謝いたします。また、準備段階から当日まで、煩瑣な作業をこなしてくださった研究室の塚田由紀さん、黒澤綾子さんにも感謝の意を表します。そして何より、ウェブの設定から告知周知、予稿の印刷や登録など、全般を切り盛りしてくれた木口雅司さんに深く感謝します。木口さんなしにはこの企画もアイディア倒れで実現しなかったことと思います。最後に、参加していただいた皆様にもお礼申し上げます。本日の知見を周囲の方々にも広げていただき、気候変動研究を発展させていただければ幸いです。

(最近不勉強なので、reference list がなくてすみません。ご容赦ください。

あえて言うならば、IPCC AR4 の参考文献をどうぞご覧ください。)