

Introduction to Cross-Cutting Discussion on “Water Cycle Environmental Science”

Qoosaku MOTOKI*

* *Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15, Natsushima-Cho, Yokosuka-city, Kanagawa 237-0061, Japan.*

(Received 6 July 2009 ; Accepted 5 January 2010)

Contents

1. Masaru INATSU and Tomonori SATO : Downscaling —The Bigger the Better?—.
2. Toshihiko TAKEMURA : Estimating Aerosol Effects on Climate System.
3. Hirohiko MASUNAGA : Stratocumulus Clouds —A Missing Link between Meteorology and Climatology—.
4. Takemasa MIYOSHI : An Invitation to Data Assimilation.

4011 : 103 : 306 (ダウンスケーリング ; 分野横断研究 ; 学際研究)

1. 大は小を兼ねるのか：ダウンスケーリング

稲 津 将*・佐 藤 友 徳**

1. はじめに

ダウンスケーリングとは、統計的・物理的手法を用いたデータの空間詳細化，あるいは空間方向への補間のことである^{†1}。近年，気候モデルを用いた地球温暖化予測結果を産業や防災などの応用分野に利用するこ

とが強く求められている。しかしながら，多くの全球気候モデルは約250km程度の格子間隔で計算するため，それよりも小さな地域ごとの気候を表現することができない。従って全球気候モデルの結果をそのまま用いるのでは，より詳細な情報を必要とする応用分野の要請に応えることができない。このように，気候モ

* 北海道大学大学院理学研究院.
inaz@mail.sci.hokudai.ac.jp

** 北海道大学大学院地球環境科学研究院.
t_sato@ees.hokudai.ac.jp

© 2010 日本気象学会

^{†1} 空間方向に限らず，時間方向にもデータの詳細化や補間が可能であるが，ここでは簡単のため空間方向について説明する。

デルの出力解像度と各応用分野が必要とする解像度のギャップをなるべく合理的に埋めることがダウンスケーリングの使命といえる。

気候モデリングは地球全体やある地域の気候状態をシミュレートする方法である。気候モデルにおいては、風、気温、気圧、および水蒸気量などの気象要素は、質量保存式、運動方程式、状態方程式、熱力学方程式、および水蒸気保存式といった偏微分方程式によって記述される物理法則に則っている。これらの連立偏微分方程式に地面標高や地表面状態といった境界条件と適切な初期条件を課して解けば、気象場の時間発展を計算することができる。海洋についても同様の時間発展計算が可能である。ここで扱う微分を含む方程式を計算機で解くためには、差分を用いて空間方向には有限数の点で、時間方向には有限回の時間ステップとして近似する必要がある。全球の気候モデルでは計算機性能や目的に応じて変えることはあるが、空間方向には約250km程度の格子状に区切られた点でその付近の領域を代表し、時間方向には数十分ごとに、各変数の値を計算するのが一般的である。その際、積雲対流や地表面乱流拡散など、モデルの格子サイズ以下の現象で格子スケールの変数に影響を与えるものは、パラメタリゼーションと呼ばれる半経験的な手法によって推定する。このパラメタリゼーションには、ある条件のもとに物理法則を簡素化したものや経験式に基づくものが含まれる。気候モデルによる計算結果に不確定性を生じさせるのは、上述の有限回計算のための近似に加えて、パラメタリゼーションが大きな要因となっている。

一方で、応用分野が要請するデータは気候モデルの標準的な出力である約250 km 間隔よりはるかに高解像なデータである。たとえば、河川の氾濫リスク評価では流域の詳細な降水情報が必要であろうし、作物収量予測では圃場単位の降水、地表面気温や日照時間

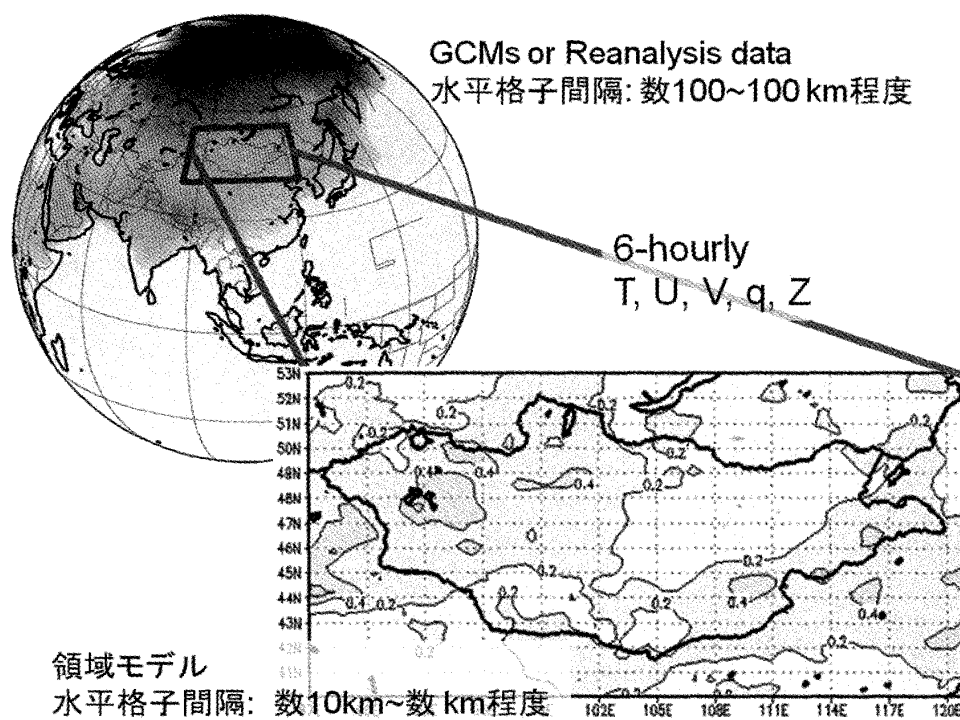
の情報が必要であろう。このように応用分野で必要とされる水平解像度は数 km や数百 m になることもある。

このような、気候モデルと応用分野が求める解像度のギャップを埋めることがダウンスケーリングの目的であり、その概念を第1図に示す。ダウンスケーリングは、力学的ダウンスケーリングと統計的ダウンスケーリングに大別される。次節ではそれぞれをごく簡単に解説する。

2. 力学的ダウンスケーリング

全球気候モデルよりも解像度の高い領域モデルを用いて、ある領域に限ってデータの空間詳細化を行うことを力学的ダウンスケールという。最も典型的な例は数値天気予報であり、気象庁では全球モデルの結果を境界値として日本付近を詳細に予測する領域モデル(メソモデル)を運用している。近年は地球温暖化による地域気候の変化予測や影響評価などの需要から幅広い分野で力学的ダウンスケールが行われるようになってきた。詳細な手法や将来展望は Wang *et al.* (2004) に詳しいが、ここでは一般的な利点や問題点を概説する。

この手法では水平分解能の高い数値モデルを用いる



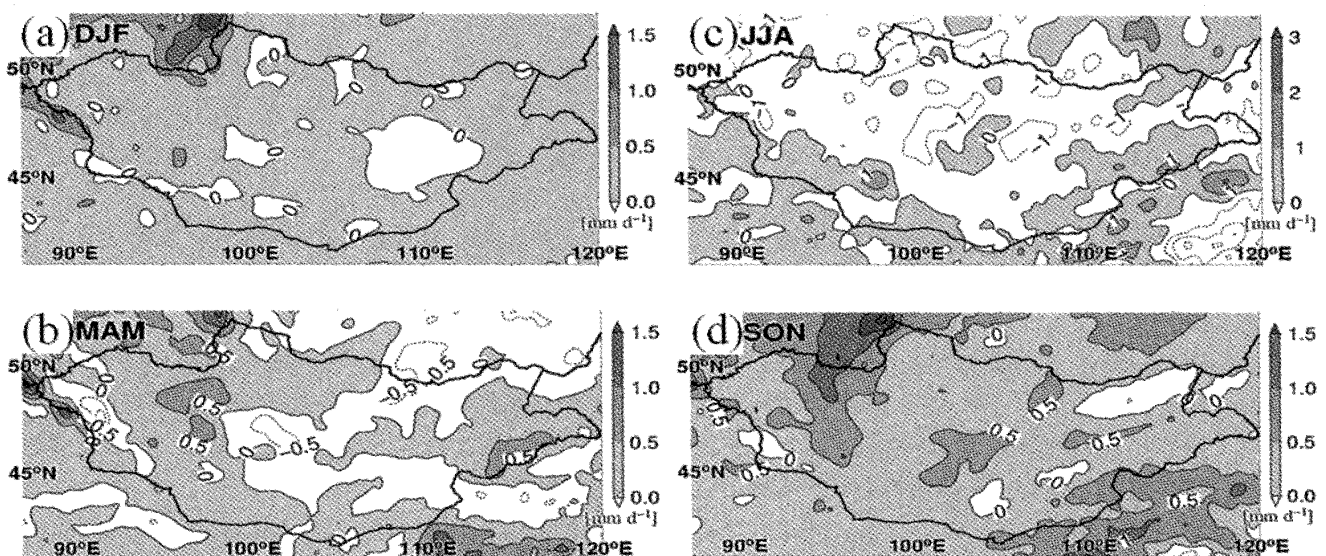
第1図 ダウンスケーリングの概念図。

ことから、分解能の粗い全球気候モデルが不得意とする現象（例えば、地形性降水、時空間スケールの小さな現象、局地的な強制による応答）の再現に役立つと考えられている。反面、領域モデルは側面の境界条件を必要とするため、境界値が持つ空間的なズレ（例えば、全球モデルにおける強雨帯のわずかなずれや、全球モデルで用いられる地形データと実際の地形の違いに起因する気温のずれなど）は、ダウンスケールした結果へほぼそのまま引き継がれることになる。また、領域モデルにおいても、格子サイズよりも小さな現象が存在するため、パラメタリゼーションが用いられる。従って、領域モデルによる結果には、全球気候モデルと領域モデルの双方における不確実性を含むことに十分注意しなければならない。これらの不確実性を低減する方策の1つとして、複数の領域モデルや複数の全球気候モデルを用いた、幾つかの組み合わせで力学的ダウンスケールを行い、それらをアンサンブル平均すること（マルチモデルアンサンブルと呼ぶ）が挙げられる。こうしたマルチモデルアンサンブルによる力学的ダウンスケールは国内外で近年盛んに行われている取り組みである（例えば、高薮・大楽 2008）。また、複数の気候モデルによる地球温暖化予測結果から、温暖化気候と現在気候の差を現在気候の時系列データに足した擬似温暖化データを作成し、これを領域モデルの境界条件とした実験も行われている。この擬似温暖化実験の手法は既存のデータを生かした空間

詳細化のアイディアの1つであり、大スケールの気候変化が梅雨やハリケーンをどのように変えるかといったテーマに有効であることが示唆されつつある（Kawase *et al.* 2008；Knutson *et al.* 2008）。

このように力学的ダウンスケールは大スケールの現象により決定される境界条件に対して、力学的に整合性のある地域気候の応答を得ることができる。この特徴を生かして地域気候の変動メカニズムの研究にも利用することができる。例えば、「冬季における日本海側の豪雪が気候変動とどのような関係にあるか？」などの問いに対して力学的ダウンスケールを用いて答えることで、何が地域の気象特性に支配された現象で、何がグローバルな気候変動と結びついた現象であるか、を考えることができる。

一方で領域モデルは、水平解像度に応じて時間積分のステップを小さくする必要があることなどの理由により、利用者の満足が得られるような高い空間解像度で十分に広い領域のダウンスケールを行おうとすると計算コストが大きくなってしまふ。したがって、領域モデルの長期積分は困難であることが多い。このことから、地球温暖化予測のダウンスケールを行う際、全球モデルによる予測の中のある一定期間に限って力学的ダウンスケーリングを行うことが多い。気候の長期変動の研究においては、現在の気候と温暖化後の気候など異なる代表的な気候状態のもとでそれぞれ力学的ダウンスケールを行い、両者の差から気候変化による



第2図 力学的ダウンスケールによる1990年代と比較した2070年代のモンゴル周辺における降水量の増減。(a)12-2月、(b)3-5月、(c)6-8月、(d)9-11月。0.5mm d⁻¹ごとの等値線と陰影は、2070年代に増加する値を正とした降水量の変化を示す。Sato and Kimura (2006) による。

地域気候へのインパクトを調べるなどの工夫も必要になる（第2図；Sato and Kimura 2006）。あるいは、応用分野が100年以上の地域気候の連続的な変化や1 km程度以下の解像度でダウンスケールされた気象データを求めているような場合、次に述べる計算コストの小さな統計的ダウンスケールの利用が有効になる。

3. 統計的ダウンスケーリング

統計的ダウンスケーリングでは、広域の気象場とローカルな気象要素との経験的あるいは統計的関係を仮定し、その関係式に基づいて空間解像度の低いデータから空間解像度の高いデータへの変換を行う。力学的ダウンスケーリングに比べて計算コストが低く、バイアス補正も同時に行われることから、統計的ダウンスケーリングは古くから様々な応用分野に用いられてきた。特に力学的ダウンスケーリングでは計算が困難なほどに、データを空間詳細化したい場合には有効な方法である。統計的ダウンスケーリングの解説はWilby *et al.* (2004) に詳しい。

統計的ダウンスケーリングは大きく分類して、回帰モデル、ウェザージェネレータ、及び天気図分類法の3種類が存在する（本節では紙数の都合により、回帰モデルについてのみ説明する）。それらのすべての方法に共通することは、説明変数（独立変数）として気候モデルの出力や再解析データなどから得られる大規模場の気象要素（風、気温、等圧面高度、海面更正気圧、湿度など）をとり、目的変数（従属変数）としてある特定の地点のローカルな気象要素（降水量、地表面気温、日最高気温、日最低気温、日射量など）をとって、説明変数と目的変数との間に何らかの統計的関係を仮定する点である。統計的ダウンスケーリングにおける計算は、関心のある地点において立てられる統計的な関係式に基づいて説明変数から目的変数を推定することである。このような統計的な関係式を構築する背景には、ローカルな気象要素は大規模な気象場とローカルな場（地形や土地利用など）の双方から影響を受けているという考え方がある。統計的ダウンスケーリングはいったん統計的な関係を求めてしまえば計算コストが非常に低いという長所があり、複数の気候モデルの出力をダウンスケーリングした結果の比較や、複数の統計的ダウンスケーリング手法による結果の比較も容易である。ただし、仮定した統計的関係の普遍性については議論が必要である。例えば、中緯度

で適用可能な統計的な関係式が熱帯域にも適用できるとは限らない。また、現在気候に基づいて構築された統計的関係が地球温暖化時にも適用できるとは限らない。したがって、目的とする気象要素に応じて前提となる統計的な関係を吟味しなければならない。また、統計的ダウンスケーリングはデータの空間詳細化あるいは気候モデルのバイアス補正の手続きであって、データの不確定性を低減する手続きではないことに注意しておく必要がある。

ここでは、最も原始的な統計的ダウンスケーリングを紹介する。まず、ある地点で観測された地上気温の時系列 $T_o(t)$ と気候モデルの格子点上に対応する時系列 $T_s(t)$ がともに過去のある一定期間について得られているとする。このとき、モデルの格子点データ $T_s(t)$ に基づく観測地点における地上気温の推定値 $T(t)$ は次のように表すことができる。

$$T(t) = \frac{\sigma(T_o)}{\sigma(T_s)} (T_s(t) - \langle T_s \rangle) + \langle T_o \rangle$$

ここで $\langle \rangle$ はカッコ内の変数の時間平均を表し、 $\sigma()$ はカッコ内の変数の標準偏差を表す。ここで $T(t)$ の平均値と標準偏差は観測値のそれらと一致する。たとえば、温暖化シミュレーションの結果から得られた約250km程度の粗い格子上の $T_s(t)$ をこの統計関係式に当てはめれば、この観測点における温暖化時の地上気温 $T = T_f(t)$ を統計的に推定することができる。モデルの格子内に利用可能な過去のデータの蓄積がある観測点が N 点あるとすれば、1つの $T_s(t)$ から各観測点に対応する複数の $T_s^k(t)$ ($k=1, 2, \dots, N$) が得られ、これによって空間詳細化を行うことができる。また、モデルのバイアスが、平均と標準偏差の観点で観測データに一致するよう補正されていることも明らかである。

この原始的な方法の拡張が回帰モデルである。最も簡単な推定法は、1つの説明変数と1つの目的変数との間の統計関係式である単回帰モデルであるが、通常は、複数の説明変数と複数の目的変数との間の統計関係を求める正準相関分析が用いられる。つまり、説明変数にも目的変数にも複数の観測地点における複数の気象要素が変数として含まれる。

正準相関分析の好例として von Storch *et al.* (1993) によるイベリア半島における地球温暖化時の降水変化の研究が挙げられる。もし気候モデルだけをを用いて直接降水変化を計算しようとしても、気候モデ

ルにおいてイベリア半島はわずか4つの格子でしか計算されないため、観測値と整合的な結果を得ることは困難である。また、気候モデルで用いる標高データは大変滑らかであるため、イベリア半島の降水の地域特性を表現するのに十分ではない。そこで、彼らは、イベリア半島の各地点の降水量は北大西洋の海面気圧と関係が深いと仮定して（観測値を用いた仮定の検証は行っている）、両者の間の統計関係を正準相関分析によって求めた。大規模な海面気圧パターンが第3図上段のような場合に、第3図下段のような降水パターンになりやすいという対応関係を過去のデータに基づいて示している。気候モデルで地球温暖化によるイベリア半島の降水変化を直接的に求めることは難しいが、北大西洋の海面気圧変化を求めることは計算上容易である。彼らは、気候モデルが見積もった北大西洋の海面気圧変化を、観測値から求めた統計関係式に代入し

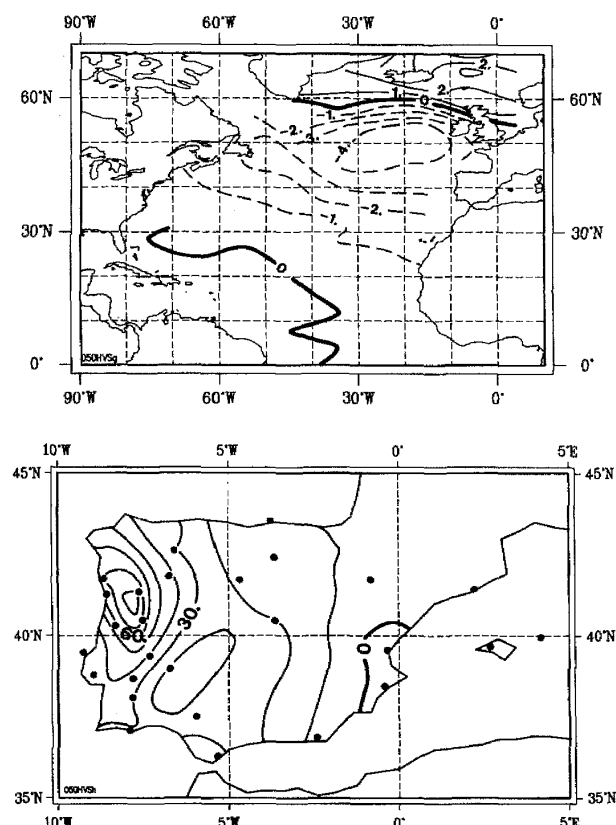
て、イベリア半島の降水変化を見積もった。このようにすれば、複雑な地形によって降水分布が左右される地域であっても、その特性を保持したまま温暖化に起因する降水量の変化を見積もることができる。ただし、降水変化予測の正確さは気候モデルの予測精度に強く依存する。また、現在気候から得た統計関係が地球温暖化後の気候においても成り立つかどうかは、別途議論が必要である。その議論を行う上で、前章で解説した力学的ダウンスケーリングとの比較は今後取り組んでいくべき課題であろう。

謝 辞

執筆に当たり飯泉仁之直博士（農業環境技術研究所）、服部美紀博士（海洋研究開発機構）から小論の初稿をお読みいただいた上、有益なコメントをいただきました。

参 考 文 献

- Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, B. Ailikun, F. Kimura and T. Yasunari, 2008 : Downscaling of the climatic change in the Mei-yu rainband in East Asia by a pseudo climate simulation method. SOLA, 4, 73-76.
- Knutson, T. R., J. J. Sirutis, S. T. Garner, G. A. Vecchi and I. M. Held, 2008 : Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. Nature Geosci., 1, 359-364.
- Sato, T. and F. Kimura, 2006 : Regional climate simulations to diagnose environmental changes in Mongolia. Bull. Terr. Environ. Res. Cent., Univ. of Tsukuba, 7, 59-69.
- 高藪 出, 大楽浩司, 2008 : EU ENSEMBLES 第4回全体会合参加報告. 天気, 55, 907-910.
- von Storch, H., E. Zorita and U. Cubasch, 1993 : Downscaling of global climate change estimates to regional scales : An application to Iberian rainfall in wintertime. J. Climate, 6, 1161-1171.
- Wang, Y., L. R. Leung, J. L. McGregor, D.-K. Lee, W.-C. Wang, Y. Ding and F. Kimura, 2004 : Regional climate modeling : Progress, challenges, and prospects. J. Meteor. Soc. Japan, 82, 1599-1628.
- Wilby, R. L., S. P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton and L. O. Mearns, 2004 : Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 27pp.



第3図 正準相関解析によって得られた12月から2月までの北大西洋の海面気圧偏差とイベリア半島の降水量との統計的關係。上図は大規模スケールのデータによる説明変数としての海面気圧偏差の分布であり、下図はローカルスケールのデータによる目的変数としての降水量の分布である。von Storch *et al.* (1993) による。