

2021 年 1 月 29 日（金）

国立研究開発法人 国立環境研究所 気候変動適応センター主催
令和 2 年度 気候変動適応研修（中級コース）

講義解説資料

講義 1

「気候変動予測の背景」

気象庁気象研究所 高薮 出

本講義解説資料は、講義の口頭説明を事務局で編集したものです。

1. はじめに

本講義では、まず気候シナリオと、データ提供の流れ、ダウンスケーリングの仕組みを説明したあと、これらを踏まえて再度データの提供の流れをご紹介します（図 1）。

まず、一般に地球温暖化は地球全体を対象とした大きな全球モデルで計算しますが、そのままでは日本やその中の自治体といった対象を見るには解像度が粗いため、高解像度のデータを求めるためのダウンスケーリングの技術が必要となります。本講義では、この中でも、数値モデルで高解像度化を行う力学的ダウンスケーリングについて扱います。力学的ダウンスケーリングは、地域的な気候を表すことができますが、表せるものと表せないものがあります。最後にこれらを踏まえて、データセットがユーザに届くまでの流れを、再度まとめます。

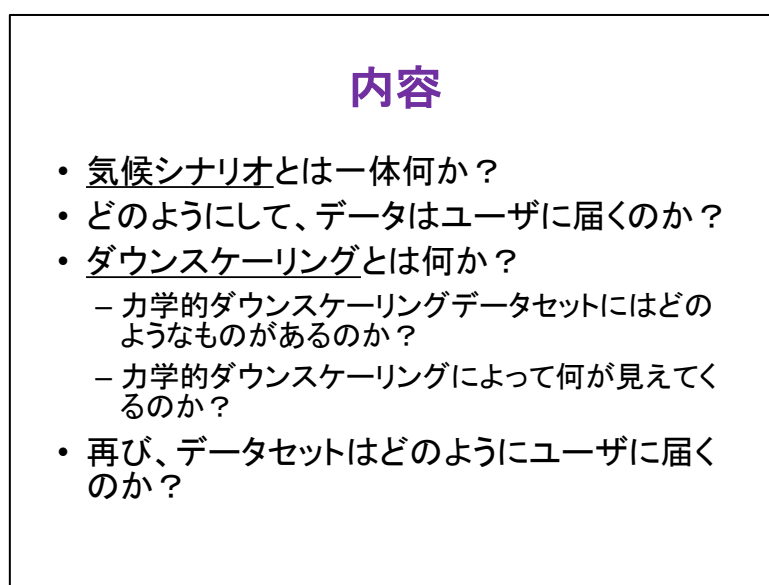


図 1 講義の内容

2. 気候シナリオとは一体何か？

次の IPCC の第 6 次評価報告書では、CMIP6（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6、結合モデル相互比較計画）の新しい温暖化シナリオが主として用いられることとなりますが、現在は CMIP5 の排出・濃度経路シナリオとして 4 つの RCP（Representative Concentration Pathway、代表的濃度経路）に基づく計算結果（RCP シナリオ）*（脚注）が用いられています。これらの将来の排出及び濃度の推移を示すシナリオは将来予測計算にとって、劇やテレビドラマで必要な脚本と同じような役割を持つもので、RCP シナリオは温暖化予測の出発点となる非常に大事な前提条件を示しています。RCP の後の数値が大きいほど温室効果ガスの排出が多い条件となり、CMIP5 では 2.6、4.5、6.0、8.5 の 4 種が用意されています。「なりゆきシナリオ」とも呼ばれる RCP8.5 は今までと同様に温室効果ガス

を排出するシナリオで、反対に将来的に 2.0℃程度の気温上昇となると言われている RCP2.6 は排出を大きく削減するシナリオです。温暖化による明確な変化（シグナル）が見えやすいこともあり、現在は RCP8.5 の結果でダウンスケーリングを行うことが多いようです。

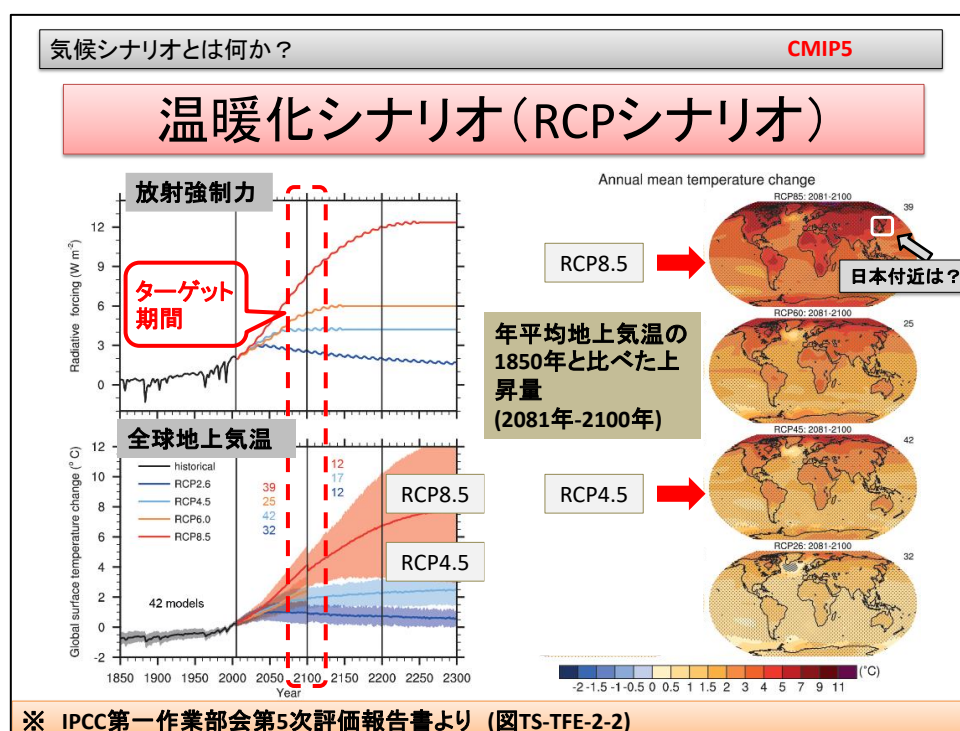


図 2 気候シナリオとは何か？

これらの RCP シナリオは、将来予測計算に用いる CO_2 等の温室効果ガスの排出を調整しており、このように調整された排出に基づき、地球全体を対象とした数値モデル（全球モデル）による気候変動予測を行います。CMIP5 には世界各国の数十の全球モデルが参加し、工業化前の 1850 年から 2300 年頃までが計算されました。この CMIP5 の全球の地上気温の推移を表したものが図 2 の左下です。なお、今年発表される新しい CMIP6 には、恐らく 100 ぐらいのモデルが参加するだろうと言われていますが、こちらも同じくシナリオ（SSP-RCP シナリオ）を決めて条件を揃えて計算します。

このように同じ排出・濃度経路シナリオを使っても、モデルによって気温上昇等の計算結果には差が出ます。図 2 の左下で各 RCP シナリオの中心付近の太線が平均的な結果、周囲の同系色の領域が各 RCP の振れ幅を示しています。幅が大きく見えるかもしれませんが、それでも CO_2 をどんどん出す RCP8.5 シナリオでは地上気温は顕著に上昇することはわかりますし、 CO_2 をそれなりに抑える RCP2.6 は気温上昇も抑えられるという結果が得られています。

なお、一般的に温度上昇の記述では、現在を基準として〇℃上昇とする場合と、1850年頃の工業化前から〇℃上昇とする場合がありますので、注意して見てください。図2の場合はCMIP5が発表された2008年が基準となっています。

(脚注) RCPとは、気候モデルを用いた気候予測実験で、その実験出力の比較評価が可能になるよう、共通利用されるモデル入力データとして用意された、温室効果ガス排出及び大気中濃度の将来変化想定のこと。ただし、この排出・濃度シナリオを入力条件として実施された気候予測実験の出力についても、「RCPシナリオを前提として予測された気候シナリオ」を略して慣習的に「RCPシナリオ」と呼ばれる。

3. どのようにして、データはユーザに届くのか？

図3は、一番上の排出シナリオから計算を行い、最後に温暖化適応諸対策につなげるまでを模式的に示した図です。まずCMIPという枠組みの下、世界各国で同じシナリオの条件(境界値)で、全球モデルを用いて計算します。日本国内でも、これらのプロジェクトに貢献するモデルが複数ありますが、CMIPには世界の数十の異なるモデルが参加していますので、計算結果は幅が出ます。

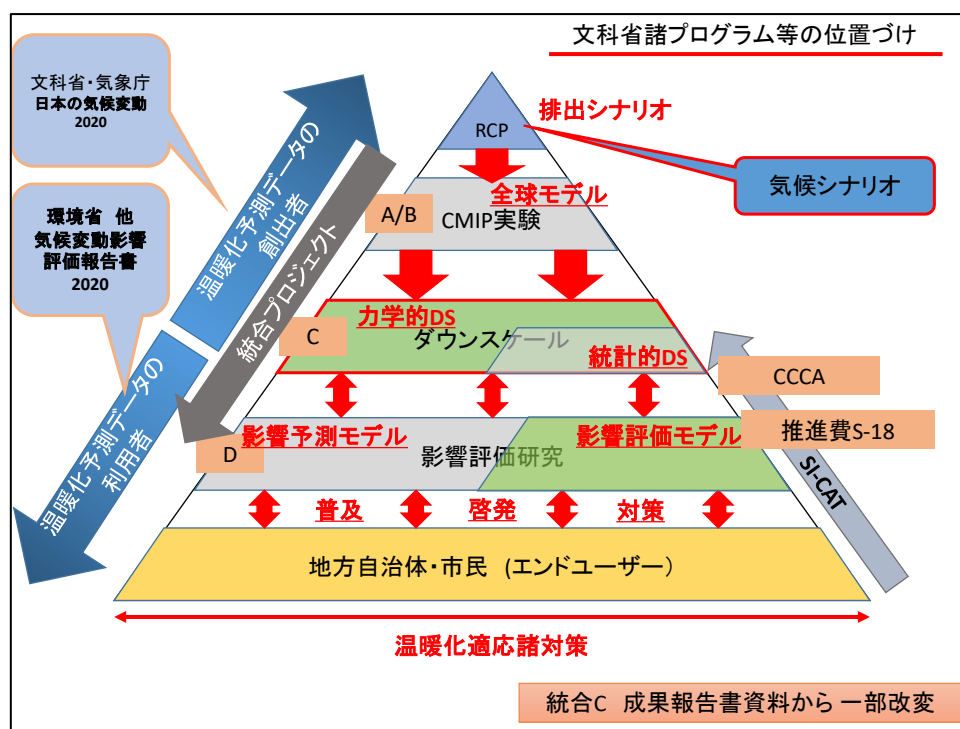


図3 文科省諸プログラム等の位置づけ

次に、日本付近をより細かく見るためにダウンスケール（高解像度化）という手法をとります。ダウンスケールには、数値モデルを使った力学的ダウンスケール手法と、統計解析による統計的ダウンスケール手法の二つがあります。このようなダウンスケーリングにより、日本付近の気象の状況を把握した上で、特定の対象への影響評価を行うことができます。気候変動予測は、あくまで温度や降水量といった気象要素の予測ですので、これらの予測を使って、更に暑熱環境、ヒトに対する被害などへの翻訳や、洪水が起きる確率、氾濫の起こりやすさなどの評価を行います。このような評価まで落とし込んで、初めて普及、啓発、対策など、地方自治体や市民の皆さんのようなエンドユーザが使える形でデータが提供できる、という流れになっています。影響評価は、ユーザの目的に応じていろいろな方法がありますが、気候変動適応の諸対策は非常に幅広いものの、出発点はRCPなどの気候シナリオです。シナリオを決めることは、将来の社会経済状況の想定を決めることに相当します。

図3の左側に、現在日本で提供されている諸情報をまとめました。国内について力学的ダウンスケーリングした結果は、文科省、気象庁が発刊した『日本の気候変動2020』の詳細版及び要約版にまとめられています。環境省等の影響評価関係省庁がまとめた『気候変動影響評価報告書2020』は、『日本の気候変動2020』と対になるもので、ダウンスケーリングされた気候変動予測を使っていろいろな分野の評価をまとめた報告書です。

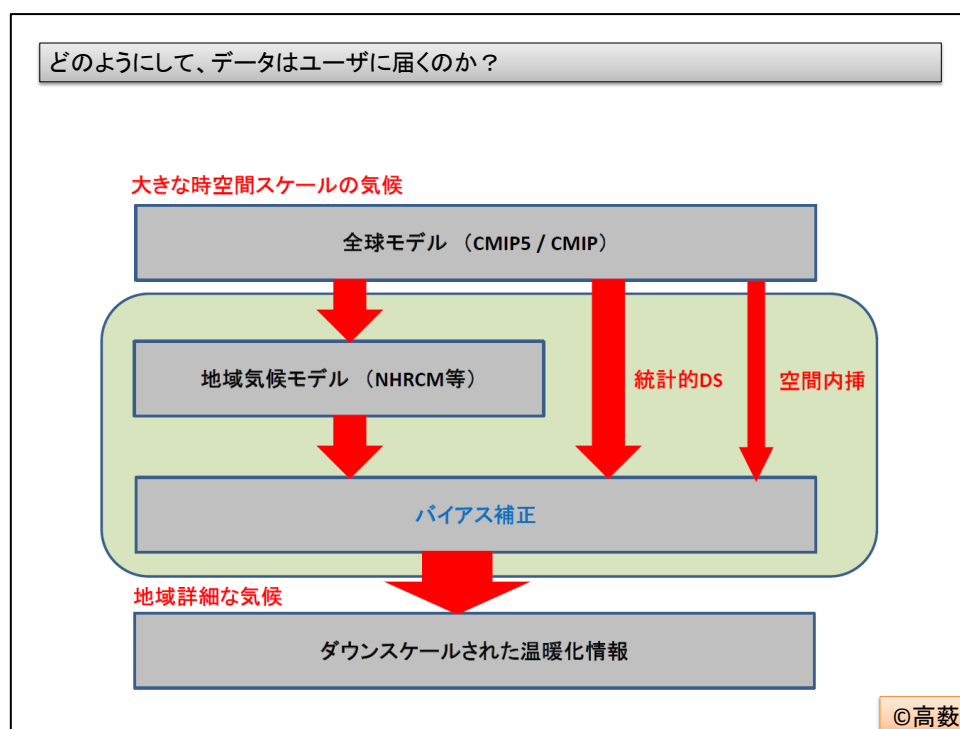


図4 どのようにしてデータはユーザに届くのか？

今度は同じ内容を、技術面から見た流れを図 4 に示します。まず、CMIP5 や CMIP6 の取り決めに基づき、排出シナリオに従って全球モデルを動かします。この段階のモデルは地球全体を対象とした全球モデルで、空間解像度がそれほど高くないため、例えば日本の日本海側と太平洋側の天気の違いのようなコントラストは議論できません。そのような違いを計算するために、より解像度の高い数値モデルである地域気候モデルによりダウンスケールを行い、情報が見えるようにします。これが力学的ダウンスケーリングの手法です。

一方、この地域気候モデルを使わず、統計的にダウンスケーリングする方法もあります。高解像度の力学的ダウンスケーリングは高性能のコンピュータでも計算時間が掛りますが、統計的ダウンスケーリングは比較的少ないコストで実施できます。

なお、数値モデルによる計算は、いろいろな原因によりどうしてもバイアスが残ります。そのため、最終的にダウンスケールされた温暖化情報も、補正した上で使わないといけません。このダウンスケーリングの手法はユーザから見えにくく、いきなり結果が提供されるように思えるかもしれませんが、用途によって適切なダウンスケーリングや補正の手法も異なりますので、注意が必要です。

4. ダウンスケーリングとは何か？

図 5 はダウンスケーリングの感覚を掴んで頂くために、10 年位前に作ったスライドです。左上の写真が全球モデル、つまり CMIP 実験の元の解像度の低いオリジナルデータに対応します。本当は右下の写真のように、机の上にはダックが載っているのですが、左上の解像度では、机の上に何かが載っていることしかわかりません。おそらく自治体は自分たちの地域に何が起きるかということが知りたいので、右下の解像度が高い情報が知りたいものと思います。一方で、CMIP の全球モデルで与えられる情報は左上の図程度なので、住民が欲しいものと全球モデルの気候シナリオの計算結果からわかることに、大きなギャップがあります。

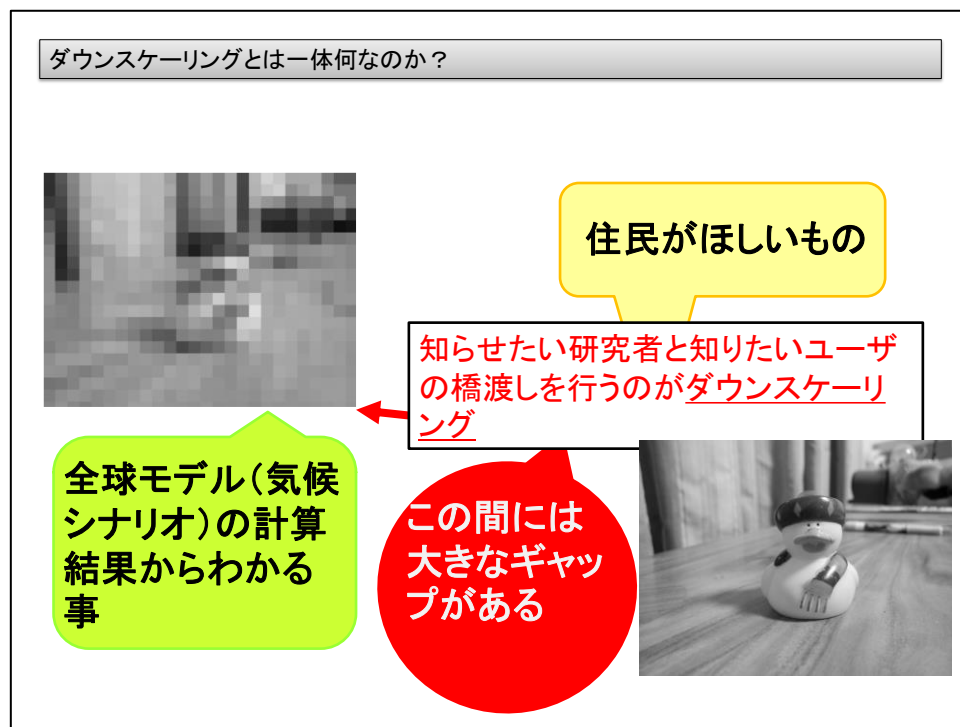


図 5 ダウンスケーリングとはいったい何なのか？

このギャップを埋める方法の一つがダウンスケーリングですが、魔法の方法ではありません。この左上の写真のようなモザイクの情報だけでは、どんなに頑張って加工しても、右下のダックになりません。このような細かい情報をもたらすために、解像度の粗い情報に様々な地域の詳細な情報を追加することで初めて計算できるようになります。

図 6 は、縦軸を時間スケール、横軸を水平スケールとして、気象の現象のスケールを表しています。一般に、気象現象は、地球全体に影響を与えるような大きなスケールの現象は非常に長い時間継続して、小さなスケールの現象は短い時間しか継続しません。地球スケールでは、エルニーニョ、ラニーニャ、ブロッキングなど、日本スケールの現象としては、低気圧、高気圧などがあります。都道府県スケールの現象は更に小さい現象となります。

もっと細かいスケールで、町内程度のスケールや、校庭スケールの現象もあります。これは、運動会でつむじ風が起きて校庭のテントが倒れるようなケースが相当します。校庭の風であれば、せいぜい 50 (m) x 50 (m) 程度の空間で発生し、持続時間も短い現象です。もっと小さければ、風鈴がチリンチリンと鳴るようなスケールの風鈴スケールの現象もあります。

このように、いろいろな水平スケールの現象がありますが、それぞれの現象の継続時間、すなわち寿命は概ね決まっています。地球スケールの現象で見ると、エルニーニョ現象自体は数カ月単位で発生しますし、エルニーニョやラニーニャのサイクルは数年程度の現象です。一方、日本スケールの現象は、強い低気圧が来てもいつまでも居座るわけではなく、数

日すれば抜けていく数日の現象で、都道府県スケールは、もっと時間は短くなり、校庭におけるつむじ風なら、多分数十秒か10数秒です。

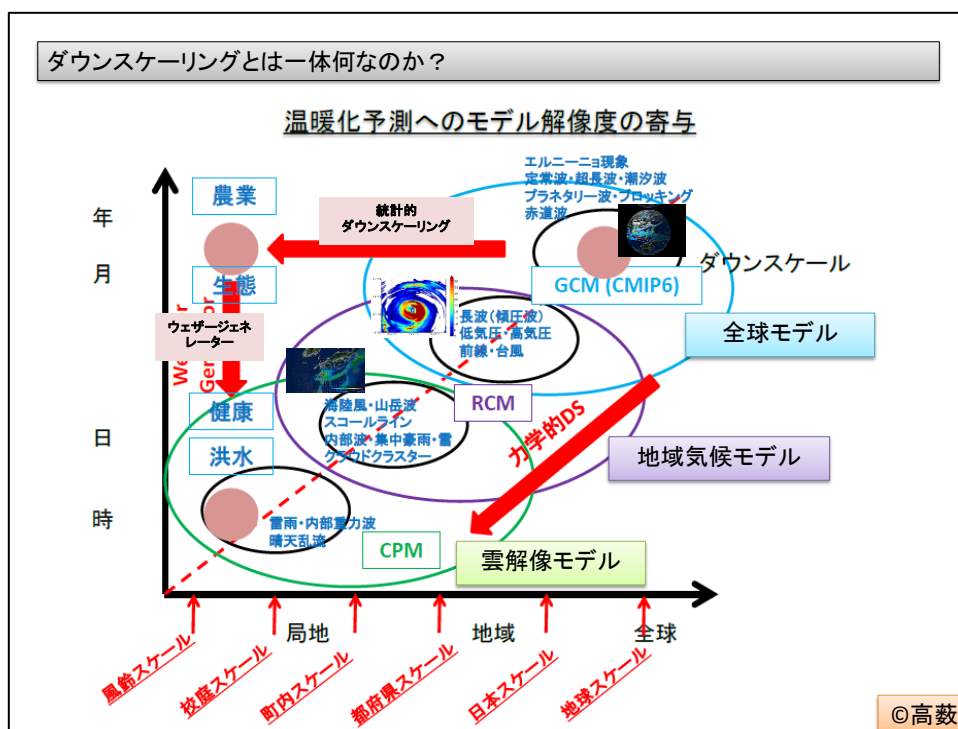


図 6 ダウンスケーリングとは一体何なのか？

ところで、全球モデルはエルニーニョ、ラニーニャのようなスケールの現象は得意ですが、集中豪雨のようなスケールの現象は、全球規模の現象ほどには得意ではありません。最近かなり性能が向上して、台風の発生頻度が議論できるようになってきていますので、そのレベルまでは一応全球モデルの対象にぎりぎり入れています。

より解像度が高い地域気候モデルは、台風や同一地域で次々に積乱雲が発生する線状降水帯も表現できますので、これらの現象の温暖化による変化も議論できますし、温暖化によって変化したそれらの現象によって引き起こされる災害も評価できます。全球モデルの結果を、地域気候モデルを使って力学的ダウンスケーリングすることで、細かい都道府県スケールの議論もできるようになる、という仕組みになっています。

もう一つのダウンスケーリング手法である、統計的ダウンスケーリングでは、全球モデルの結果から、直接小さな空間スケールまでダウンスケーリングすることが可能です。さらにウェザージェネレーターという気象データの生成装置のような手法を使うことで、時間スケールの短い現象のデータを作成することができます。

図 6 の左側には、農業、生態系、健康、洪水の大まかな時間スケールを記載しました。対象によってこの限りではないかもしれませんが、例えば洪水では、時間雨量のような短い

時間スケールの現象が非常に大切ですし、健康の夜間や昼の気温の影響を見る場合は、かなり短い時間スケールになります。このような空間的に細かく短い時間スケールの現象は力学的ダウンスケーリングが得意としています。一方、農業は作物の生育から収穫までの気候が関わる長い時間スケールですが、空間的には田畑等の検討のために細かいスケールが必要となります。空間スケールが小さくても時間スケールが長い場合は、統計的ダウンスケーリングが得手です。

現在、日本で流通している様々な力学的ダウンスケーリングのデータセットを図 7 に示します。高解像度化のための地域気候モデルには、日本の気象庁が天気予報で使っていた一世代前の大気モデルである NHRCM が主に使われています。NHRCM は日本付近の天気予報のためにチューニングされたモデルであり、日本付近のダウンスケーリングに適していると言えるでしょう。なお、大気モデルの計算に必要な海洋の情報は、IPCC の報告書から得られたものを使用しています。

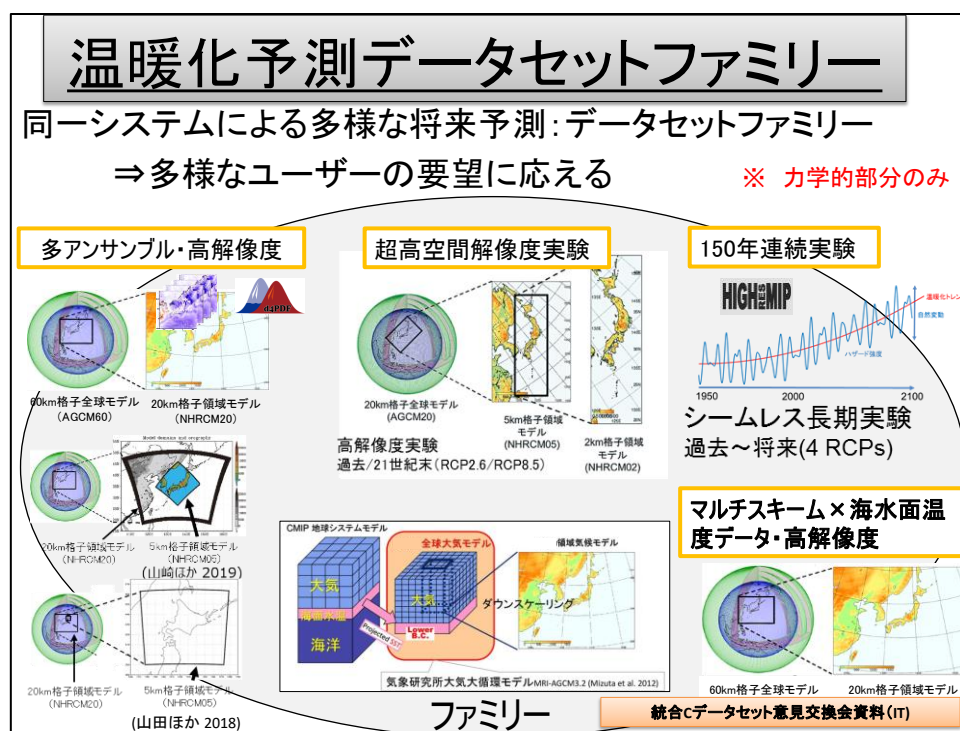


図 7 温暖化予測データセットファミリー

ここにはいくつかの実験が描かれていますが、一つは超高空間解像度実験と呼ばれる、20km の全球モデルから 5km の領域モデル、さらに 2km の領域モデルという小さい空間スケールのダウンスケーリングをしたデータセットです。このほかに、計算開始時の値等にわずかな違いを与えて同じ条件で多数のケースを計算するアンサンブルという手法を用いて、確率的な情報を得るデータセットもあります。特定の条件で多数の計算を行う d4PDF

という多アンサンブル・高解像度実験のシリーズは、たくさんの事例を計算するため解像度を抑え、60km 格子の全球モデルの結果を 20km 格子の領域モデルでダウンスケーリングしています。現在では 60 年実験を 90 から 100 ケースで計算していますが、夏の豪雨のようなまれにしか起こらない極端な現象を扱う場合でも、同じ条件の数千年分の夏のデータが使えるため、ある程度の発生件数が確保できます。なお、文部科学省の SI-CAT という研究プログラムでは、これをさらに 5km までダウンスケーリングする実験も行いました。

数値モデルによる力学的ダウンスケーリングは、計算機資源をたくさん使うので世紀末の 20 年や世紀の半ば 20 年など、一部の期間のみ計算していることが多いのですが、例えば水資源への影響評価などで、引き返せない状況が起きるティッピングポイントの時期を知りたい場合など、長期的な連続実験も必要とされています。まだあまり揃っていませんが、連続実験も実施しています。

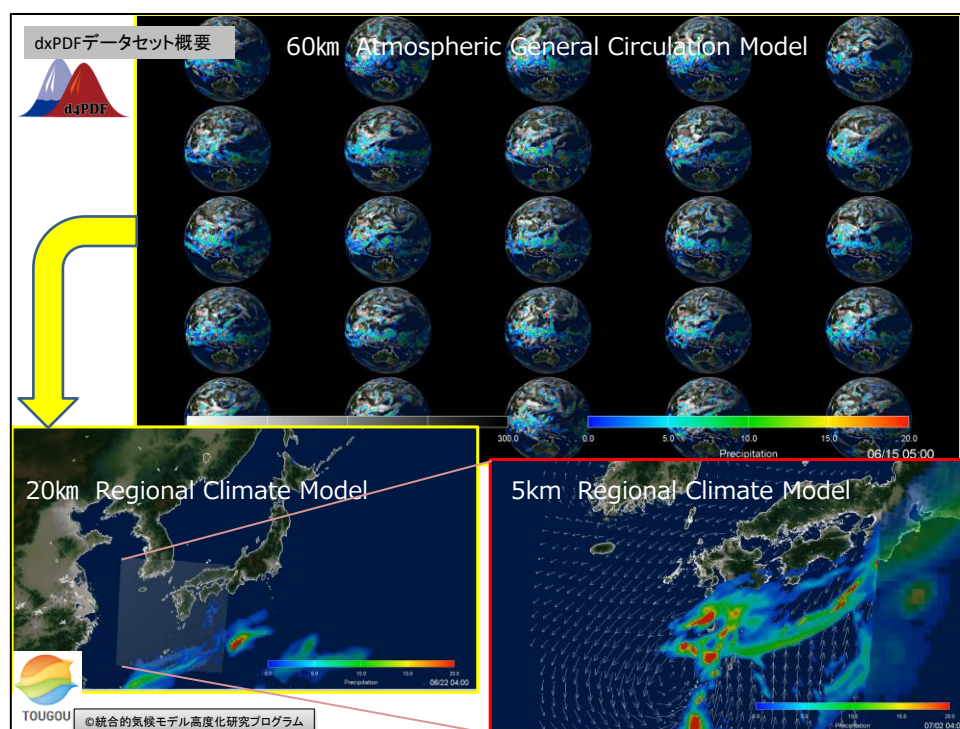


図 8 d4PDF 及び d2PDF の概要

図 8 は d4PDF データセットの紹介です。この元の図では 60km の全球モデル計算 100 ケース（アンサンブルメンバー）の一部が示されていますが、一見結果は似ているものの、よく見ると全部計算結果が異なります。そして、その一つ一つの結果に 20km の地域気候モデルを埋め込んで、ダウンスケーリング計算を行い、更に 5km のモデルでダウンスケーリングを行います。例えば、20km の結果から九州地域をさらに 5km のモデルでダウンスケーリングすると、線状降水帯のような現象も表現されますので、いろいろな災害の議論に

使えるようになります。アンサンブルメンバー毎に 60km から 20km、そしてさらに 5km と連続的にダウンスケーリングしていますので、粗い解像度の結果で特定のアンサンブルメンバーを抽出し、それらの高解像度の結果を利用することもできます。

次に、解像度を上げること、すなわち計算の格子間隔を小さくすることの利点をお話します。まず、フィリピンで 7000 人ほどの死者を出した台風ハイエンという非常に大きな台風を例としてご紹介します（図 9）。まず 20km の格子間隔のモデルで実験した台風の図を見てください。色のついている部分が雨ですが、台風の眼の様子がはっきり見えません。これを 5km までダウンスケーリングすると、かなり詳細な眼の構造が出てきますが、実は降水の多い赤い部分が南側に偏っており、実際の状況と異なります。これをさらに 1km モデルで詳細にダウンスケーリングすると、ものすごく強い台風となり、小さな眼ができていくことまで表現できています。

これらのシミュレーションによるハイエンの生涯最低中心気圧、すなわちこの台風が一番発達したときの気圧は 20km モデルでは 980hPa 程度でしたが、5km モデルで 950hPa 程度になり、1km の詳細なモデルでは 905hPa まで下がりました。なお、衛星観測からドボラック法という推定手法から求めた値では、ハイエンは 895hPa まで下がったことがわかっています。このことから、強い台風を再現するためには、非常に細かいスケールのモデルが必要だということがわかります。

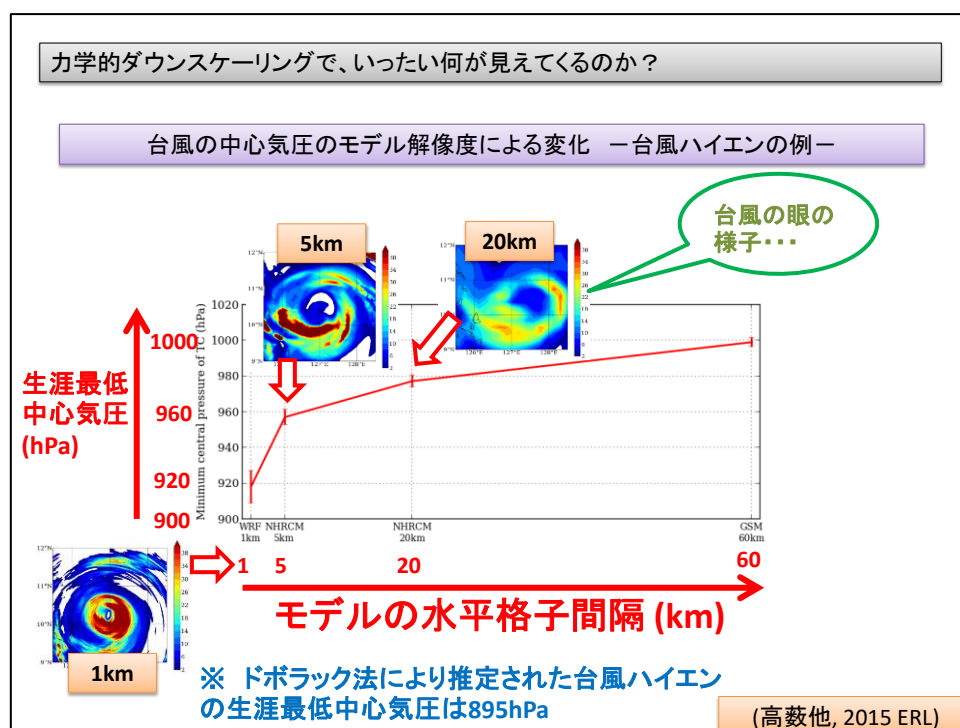


図 9 力学的ダウンスケーリングで何が見えるのか？（1）

ただ、どのような用途でも、この程度の高解像度の結果を使う必要がある訳ではありません。デジタルカメラでも、プロの写真家と我々では必要な画素数が違うと思いますが、1kmだとプロの写真家が使うような詳細な画素のカメラと同じで、データ量は膨大ですし計算時間も掛かります。そこまでの解像度でなくても評価ができる対象であれば、高解像度データを利用する必要はないことにご留意ください。

例えば、台風ハイエンの再現では、この結果を使って高潮の計算も行いました。高潮は、980hPaの弱い台風では適切に表現できませんので、このような場合は、高解像度データが必要ということになります。

もう一つ、高解像度の利点をお示しします(図10)。図10は、東京大手町の降水量について、再現している時間の逆数を横軸に、パワーを縦軸に示したものです。ここで、パワーは対象となる時間単位において、現象のシグナルがどの程度結果に含まれるかを示したもので、数値が大きいほどモデル内での現象の発生が多いことを示しています。なお、右に行くほど短時間の現象を表しており、左から1日の継続、12時間の継続、6時間継続、3時間継続、2時間継続の降水量のシグナルがどのぐらい出ているかということがわかります。

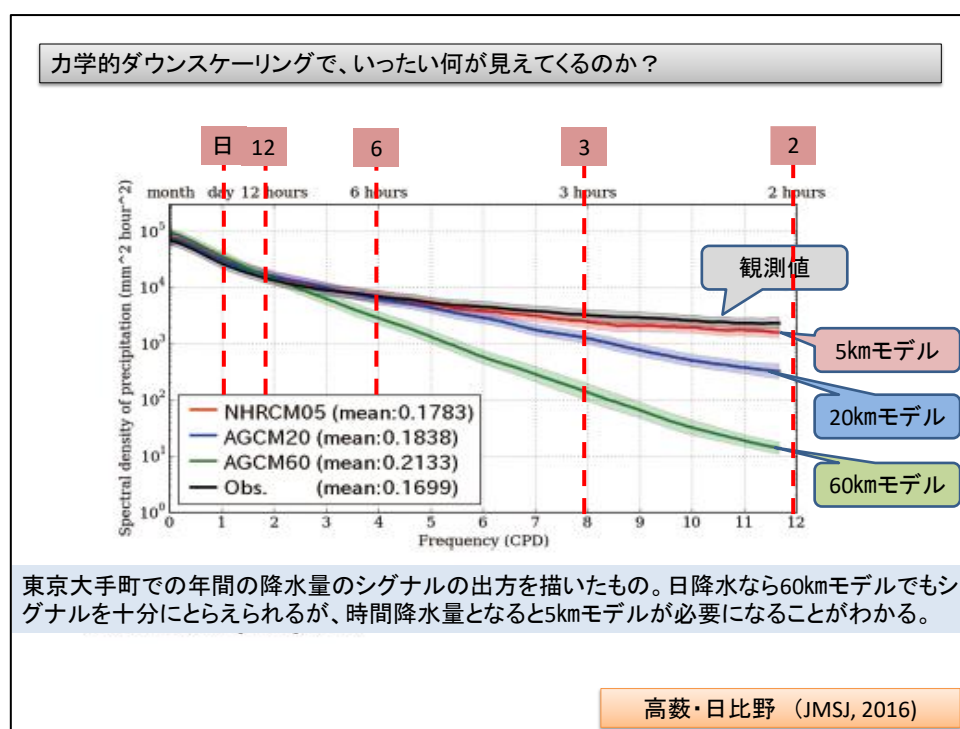


図10 力学的ダウンスケーリングで何が見えるのか？ (2)

黒の実線はアメダスによる大手町の観測データですが、全球モデルで使われる程度の60kmモデルでは、1日雨量、12時間雨量までならよく表現できていますが、その後はパ

ワーがどんどん落ちて観測値と乖離していきます。これは解像度が粗く、時間的に細かい雨を再現できないためです。同様に 20km モデルでは6時間雨量までは頑張っていますが、やはりその後落ちてきます。このことから、このような粗いモデルでは、中小河川の洪水などの現象は議論できないことを示しています。

次に 5km モデルの結果を見ると、5km モデルであれば中小河川の洪水のような短い時間スケールまで議論することができることがわかります。気象モデルの研究者はこのような現象のスケールと解像度の関係を念頭に、適切な解像度のモデルを使っています。

次に、いくつかの大きなスケールの全球モデルに対して、図 11 はそのような複数のダウンスケーリングによる結果の誤差要因を示したものです。左は誤差の発生のうちの全球モデルの寄与、右は地域気候モデルの寄与を示しています。地域気候モデルの寄与の結果からは、どの地域領域モデルを使うかで、陸地の結果に差が出ることがわかります。理由の一つとしては、地形の表現が領域モデルによって若干違うことが挙げられます。同じ解像度でなぜ違うのかと思われるかもしれませんが、モデル毎に細かな違いや特徴があります。また、どんなに細かくしても、格子が 20km であれば 20km 四方、5km であれば 5km 四方の平均的な状況しか表せないことにも留意が必要です。陸上の雨は、そのような地形の表現などに大きく依存しており、またモデルによって降雨のメカニズムにも個性がありますので、この程度の差は出てくるものなのです。

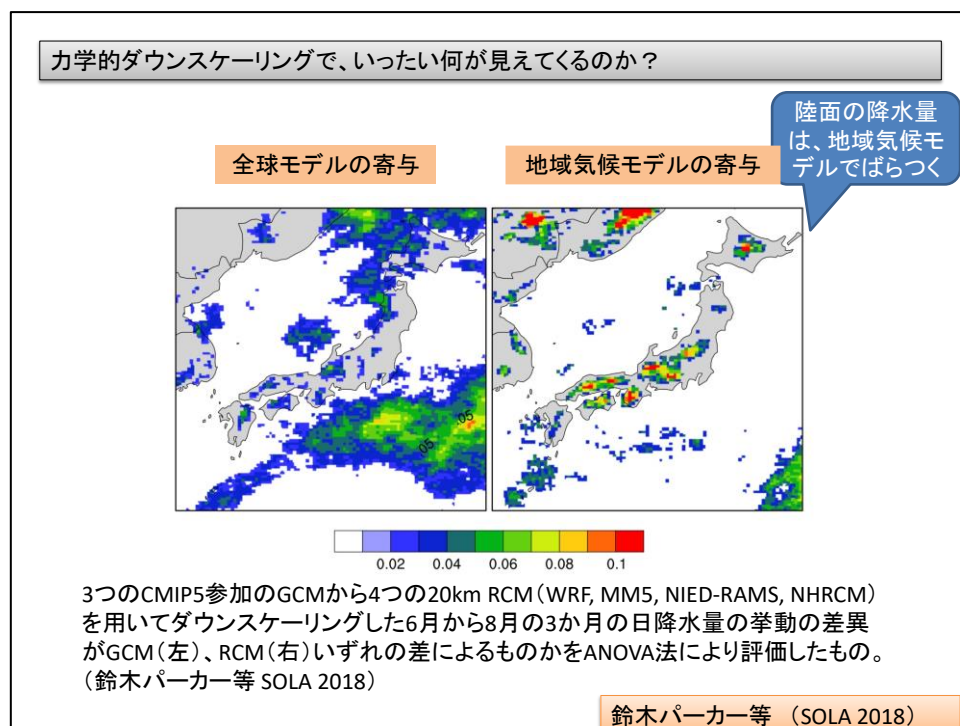


図 11 力学的ダウンスケーリングで何が見えるのか？ (3)

5. 再び、データセットはどのようにユーザに届くのか？

最後に、図 12 に気候シナリオからのデータの流れを簡単に示しました。気候の変化のシグナル（気候シグナル）の検討を考えてみます。まず全球モデルを使って気候シナリオが計算されますが、この計算結果の変化傾向は、大きく分けると長期の温暖化トレンドと極端事象の変動という二つから成り立っています。影響評価に必要な情報が長期の温暖化トレンドだけであれば、統計的なダウンスケーリング手法でも抽出が可能です。一方、豪雨などの極端事象の変動を見るためには、やはり力学的ダウンスケーリングが必要です。統計的ダウンスケーリング手法による長期の温暖化トレンドは、水資源、農業等々の影響評価や予測モデルに使えますし、力学的ダウンスケーリングによる極端事象のデータは、洪水、熱波等々の極端な現象の評価に使えます。ダウンスケーリングはこの二つが両輪となります。

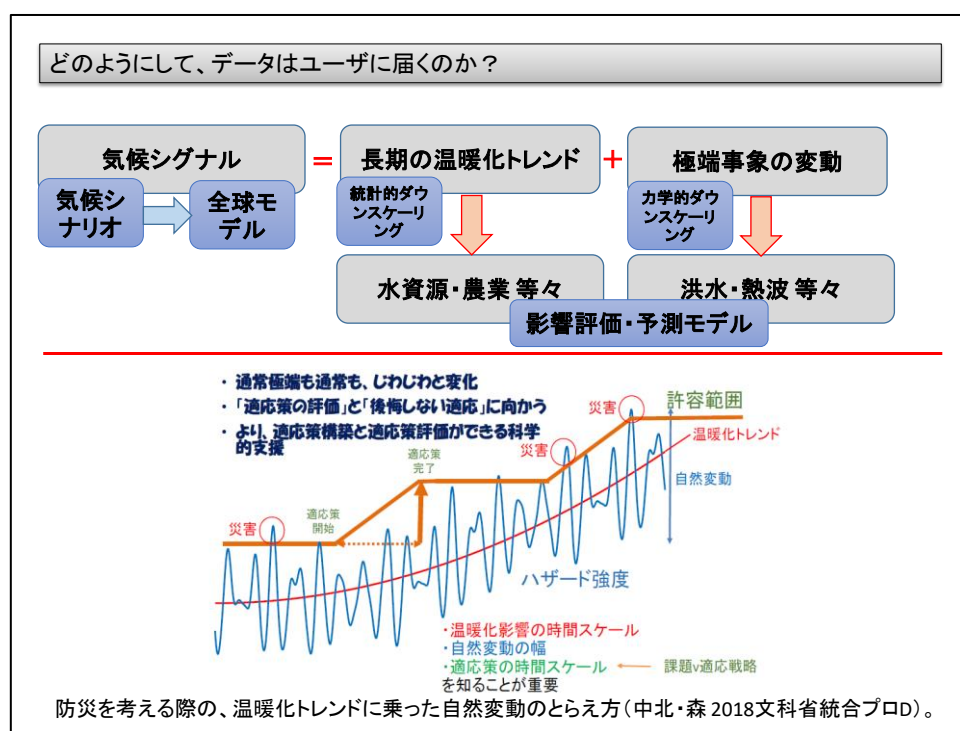


図 12 どのようにして、データはユーザに届くのか？

図 12 の下の図で、温暖化トレンドが赤の実線で示されていますが、水害は平均的な温暖化トレンドだけを見てもわかりません。例えば、堤防の設計に当たっては、まれに起きる極端な洪水が影響するため、青の実線で示された極端事象の変動も考慮する必要があります。このように、温暖化による災害リスクの評価では、現象の発生メカニズムを踏まえて、温暖化トレンドだけでなく、極端事象の変動も合わせて見なければいけません。そのような用途であれば、お金はかかりますが、力学的ダウンスケーリングのデータを適切に使って頂きたいと思います。一方、リンゴやミカンといった作物の適地を評価する場合は、長期的

な温暖化トレンドを見る方が大事ですので、統計的ダウンスケーリングで有効な評価が得られるでしょう。まだまとめ切れていませんが、そのような情報はダウンスケーリングデータの提供側で早くきちんと整理して、ユーザにお示すべきと思っています。

(以上)

【用語解説】

放射強制力	温室効果ガスや土地利用などの変化等の気候に影響を及ぼす要因による、放射エネルギーの変化量
CMIP (シーミップ)	結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project)。IPCC 評価報告書の気候変動予測は主に CMIP を元に行っている。
RCP シナリオ	目安となる将来の複数の放射強制力の値から代表的な濃度経路を定めたシナリオ。RCP の値が大きいほど温室効果ガス排出が多い。
ダウンスケーリング	高解像度化
パリ 協定	2020 年以降の温室効果ガス排出削減のための全ての国が参加する国際的枠組の協定。2015 年 COP21 (パリ) で採択された。
全球モデル	地球全体を対象として計算するモデル
統合プロジェクト	文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム (TOUGOU、2017-2021 年度)
CCCA	国立環境研究所 気候変動適応センター (Center for Climate Change Adaptation)
推進費 S-18	環境研究総合推進費 S-18 気候変動影響予測・適応評価の総合的研究 (2020-2025 年度)
SI-CAT	気候変動適応技術社会実装プログラム。自治体の検討に向け気候変動予測技術や適応策評価技術を開発
力学的ダウンスケーリング	物理法則に基づく数値モデルを用いた高解像度化手法
統計的ダウンスケーリング	低解像度データを統計的關係に基づき高解像度化する手法
地域気候モデル	領域モデルを気候評価のために長期積分できるように調整したもの
空間内挿	観測等で得られている複数の点の情報を用いて、その内側に位置する情報を推定すること
バイアス	系統的な誤差、偏り
エルニーニョ	太平洋赤道域東部を中心に海面水温が平年より高くなる現象。数年おきに数か月から 1 年程度続く。
ラニーニャ	太平洋赤道域東部を中心に海面水温が平年より低くなる現象。数年おきに数か月から 1 年程度続く。
ブロッキング	ジェット気流の南北の大きな蛇行に伴い停滞する高気圧もしくは低気圧、もしくはその現象

線状降水帯	数時間にわたり同じ場所に留まり、大雨を生じさせる線状の降水域
ヒートウェーブ	高温の期間が続くこと。熱波。
コーディング	プログラムコードを記述すること
IPCC	気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change）。3つの作業部会と1つのタスクフォースで構成。
アンサンブル	異なる初期値などのわずかな差を与えた計算を多数行い、そのばらつきや平均等の統計情報を利用する手法
d4PDF	文部科学省のプロジェクトで開発された4℃上昇時の条件でアンサンブルを行ったデータセット
ティッピングポイント	激的な変化を起こす転換点
GCM	全球気候モデル（Global Climate Model）
RCM	地域気候モデル（Regional Climate Model）
ANOVA 法	分散分析法。複数の母集団の平均の差の有無を検討する手法。

