

平成 29 年 9 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450342

研究課題名(和文) 超高解像度 GCM 出力の最適ダウンスケーリング開発と流域動態モデル統合化への応用

研究課題名(英文) Development of Best Method to Downscale Super High Resolution GCM Outputs and Its Application to Integration of River Basin Dynamic Models

研究代表者

浜口 俊雄 (Hamaguchi, Toshio)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：90263128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000 円

研究成果の概要(和文)：観測値とGCM出力値の差からGCM出力値を統計的ダウンスケーリングする既往補正手法に、地球統計学から推定された調整パラメータの空間分布を得て、任意点でのGCM出力値の最適な補正を行う提案をした。それで得られた同出力補正值を用いて気候変動による地下水への影響評価を、高知県物部川流域沿岸部の塩水侵入度合で算定したところ、現在気候の塩水侵入度合に比べ世紀末の将来気候では、降雨による地下水涵養量が減ることで更に内陸部へ深く塩水が侵入し、農地環境は悪化する可能性があるという結果を得た。海面上昇も考慮したならば更に悪条件となる。したがって沿岸部で同様の結果となる流域を他に特定して早期に策を打つべきである。

研究成果の概要(英文)：The geostatistical approach that statistically downscaling factors produced with the gap between observed data and GCM outputs are kriged at all output points is proposed in this research. The impact assessments to groundwater under climate change are carried out with the seawater intrusion travel. The Mononobe River Basin in Kochi Prefecture, with usual salt damages in the coastal area, is employed as a numerical case study. The appropriate index of the impact assessments to seawater intrusion is given through the reachable distance of the seawater intrusion from the sea based on the theoretical aspects of relationship between fresh- and sea- water in an aquifer. The annually averaged distances in the hundred-year-ahead future period are greater than in the present one. The reduction of groundwater recharges based on the future rainfall triggers off the expansion of the seawater intrusion there. We should specify any other similar catchments through this approach as soon as possible.

研究分野：流域水文学

キーワード：超高解像度 GCM 地下水 塩水侵入 シミュレーション ダウンスケーリング 流域動態 影響評価

1 . 研究開始当初の背景

近年の気候変動によって顕在化してきた地球温暖化現象は、このまま将来まで流域内の農地環境に大きな影響を及ぼすことは間違いない。特に、河川流量、水温、降水量、積雪・融雪量、気温、蒸発散量などの水文学・気象量のみならず、動植物の生態数、農産物、森林植生、季節植物特性(桜前線)などの分布が現在から将来に向けてどのように変化するかを予測して流域農地環境を評価することは農業分野にとって大変重要な因子となる。特に稲作や畑作においては、代かき・田植え時期、種蒔き時期、収穫時期など様々な稲作・畑作作業サイクルの最適な時期が温暖化による気温・水温・降水量など気象水文学量の変化によって、大きく変わっていく可能性がある。従って、そこには長期的視野に立った将来の気象予測結果が必要であるが、物理的な過程を考慮した地球規模の数値気象モデル(地球大循環モデル; GCM)でシミュレーションし、算出することが最善の手段である。

この研究に際し、平成 24 年度まで推進された文科省 21 世紀気候変動革新プログラムで最新 IPCC に採用された世界一精細な約 20km 格子の超高解像度 GCM 出力(気象研究所の MRI-AGCM Ver.3.2 と呼ばれるモデルが地球シミュレータで計算され、代表者所属の京都大学防災研究所など共同研究機関に提供されたもの)を利用しながら、過去から 100 年先までの気象量を抽出し、本課題の研究内容を検討する。現在はポスト革新プログラムで代表者も参画中の文科省気候変動リスク情報創生プログラムに関わることで一般非公開の最新の GCM 出力を入手して進めていくことができる。そのため、当初一般研究者が入手できない世界最先端 GCM 出力結果の入手も本代表者は容易に可能である。

2 . 研究の目的

GCM 気象データは、様々な動態解析時の算定に使う 1km 格子、または、解析のために準備されたサイズ格子にダウンスケーリングされて利用されるが、スケラブルに対応した手法を開発してモデルバイアス補正を行えば利用しやすい。この地球統計学的ダウンスケーリングは世界でも類を見ない独創的な手法である。当該研究代表者はその基礎をすでに構築しており利用できる。あとは任意位置での地球統計学的ダウンスケーリングができるよう拡張開発していくことに専心する。その上で、既往研究では気候変動による影響評価をあまりなされていない分野に特に注目する。地下水動態の影響評価は元々地下水変化という減少自体が小さいものであるために同影響を評価しづらい。しかし、地下水位や地下水流量の変化が現象として現れ、それを検討しやすいものとして評価対象とでき得るのが、沿岸帯水層への塩水侵入

現象である。流域内の農地環境への影響としても塩害推定の元となる地下水への塩水侵入は適していると言える。本研究では塩水侵入の度合いを流域単位で評価できる手法を考案することを目的とした。

3 . 研究の方法

将来予測や所望時間の観測データ欠損の可能性も鑑みて、本研究では全球全時刻を取得できる GCM 出力を対象として考える。現在公開されているもので最小計算サイズの GCM 出力は 100km である。しかし研究代表者の所属機関では気象研究所と連携した文科省革新プログラムに基づく研究活動から、(当時)非公開の 20km サイズの出力を用いることが可能であり、これをベースに検討する。

地球統計学の一手法である kriging(クリギング)を用いるが、AGCM 出力では瞬時値に意味はなく、1 ヶ月以上の積算値を時間的にダウンスケーリングすることが必要になる。そこで、各観測点での月統計量(月平均値、月分散値、超過確率など)が空間分布するものとして kriging で空間推定し、その結果から AGCM 出力の各計算点での月統計量を算出したのち、両者を空間的に比較して、各計算点でのダウンスケーリングによる補正と AGCM のモデルバイアス補正を同時に行う。今回は先述の通り、AGCM 計算格子サイズが地表観測網間隔に近い値であることから、モデルバイアスが主な補正対象となってくる。

さらに、流出計算時には計算効率(計算負荷)と要求される計算精度を鑑みて、1km 程度の計算格子を用いることになる。したがって最小単位のセルを束ねて或る大きさにしたセルを流出計算に用意し、モデルパラメータはそのセルの積分平均値を使えばよいと考えられる。本研究では、積分平均値について「均質化値」として考える。つまり算術的な積分平均(相加平均)でなく、考察対象の流出量がパラメータを計算セルで均質化した場合も最小セルで検討した際と等価な応答・等価な流量を持つパラメータを理論的に導出して用いた。この際はパラメータをセル全体までアップスケーリングすることになる。

まず地表観測点間の各気象量空間相関を地球統計学的手法によって求め、それを基に観測値ベースの空間補間を行い、任意地点での疑似観測値分布を推定する。その上で計算格子上の AGCM 出力値とその地球統計学的補間値を比較することで、モデルバイアス補正が主となる統計的ダウンスケーリングによる AGCM 補正パラメータを決める。これを観測点毎に検討することで、その補正パラメータの空間分布が得られ、そのパラメータ分布を地球統計学的に空間補間して推定できるようにした。これにより、非観測域の任意位置での AGCM 出力値の補正が可能となり AGCM 補間値から直接統計的ダウンスケーリング

された値を求める事が出来る。AGCM データが非常に大きく、計算に多大な時間を要したが、実用に耐える結果がでてきた。

補正のために降水発生確率ならびに気温の確率密度関数を月単位で考え、その確率が同じになるように AGCM 出力の降水量ならびに気温に対して同関数へのスケール較正を行う。(図 1 参照)

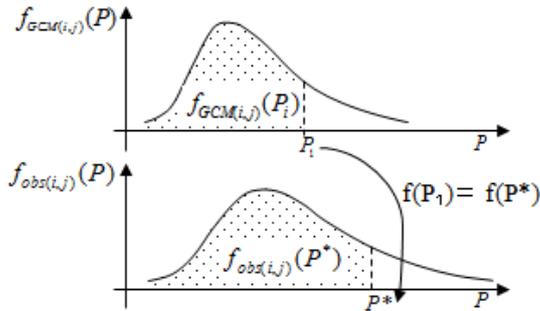


図 1 降水発生確率の確率密度関数補正

この較正係数が空間分布していると考え、各観測地で同係数を求めた後、それをベースとして kriging で空間分布を算出推定した。kriging において、観測値の空間平均値は、例えば平均がスカラーとすると、

$$a^*(x, y) = a_0 + c(x, y)^T C^{-1} w \quad (1)$$

となり、観測値の分散平均値は

$$\sigma^{*2}(x, y) = \sigma_0^2 + g(x, y)^T G^{-1} z \quad (2)$$

となる。ここに a_0 , σ_0^2 はそれぞれの空間平均値、 C, G はそれぞれの観測点の各 2 点間の空間相関関係を表す共分散関数値の行列、 $c(x, y)$, $g(x, y)$ はそれぞれの観測点と推定地点間の空間相関関係を表す共分散関数値のベクトル、 w, z はそれぞれの観測点でのランダム成分値 (観測値マイナス平均値) を表す。これより、考察対象値が任意地点でも得られるようになる。つまり x, y に AGCM 計算点の座標値を入れれば、較正係数が得られ、AGCM 出力各点での値は直ちに補正可能となる。

続いて、帯水層への塩水侵入評価であるが、塩水侵入現象による塩分分布を調べてみれば、沿岸線からくさび状に塩分濃度の濃い部分が存在して、そこから上流に向かって徐々に塩分濃度が薄くなり、同時に、帯水層底部から濃い濃度部分の厚みが薄くなる。つまり、塩水侵入域の大まかなかたちは非線形のくさび状であるがはっきりした真水と塩水の界面はないため、どこまで塩水侵入しているかを検討する際に評価しづらい。そこで、理論的に検討した場合は界面が存在して実際のような真水と塩水の混合域が存在しないとして立式する。その場合は沿岸線からどれくらいの距離にくさび界面の最下点があるかを算定できる。そのくさび界面はだいたい塩分の分散拡散域 (混合域) の中央点付近と

なっているのは予想に難くないことから、上記最下点の位置を塩水侵入度合いとなる評価指標値としてよい。これを用いれば、沿岸地下水域を、複雑な計算過程となる三次元シミュレーションを経由せずに簡便に塩水侵入度合いを評価できることになり、複数の流域での塩水侵入影響評価にも適していることになる。

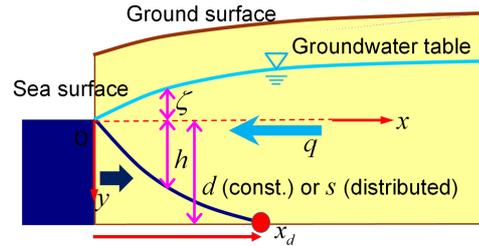


図 2 沿岸部帯水層断面の塩水くさび

流域沿岸部における帯水層は塩水くさびが図 2 のように侵入しているとする。ただし、本来の地下水への塩水侵入現象は、地下水ならびに塩水の非定常挙動、海水潮汐、真水と塩水の濃度差による塩分拡散現象などから真水と塩水が混合した汽水状態にある界面帯を形成する。しかしながら、塩水侵入現象をモデルベースに理論的検討を行うため、実際の濃度分布と異なっても界面帯中心に真水と海水の界面があって、真水と海水は混合しないものとおき、その界面が断面のどこに形成されるかを理論的に求める。この理論的に求めた界面は界面域平均的挙動を示すものと言える。これまでの成果から、海面からの塩水くさび深度 h が式(3)で与えられる。特徴として、地下水表面と海面の接触地点で真水地下水の流積が存在するように右辺平方根内の第一項で是正している式となっており、これが従来第二項のみで過小評価になる h を是正出来ている。

$$h = \sqrt{\frac{q^2}{2k^2\omega^2} + \frac{2qx}{k\omega}} \quad (3)$$

(ここに $\omega = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$)

ただし、 x : 海岸からの距離、 k : 透水係数、 q : 真水の地下水流量、 ρ_s : 海水密度、 ρ_f : 真水密度を表す。 d : 海面下の帯水層厚として、この式に $x=x_d, h=d$ を代入することで、塩水くさびの侵入長 x_d が式(4)のように得られる。

$$x_d = \frac{k\omega d^2}{2q} - \frac{q}{4k\omega} \quad (4)$$

これは従来なら第一項のみとなるところを、本研究成果の 1 つである第二項が存在することで、塩水侵入が $q > 0$ で生じるという条件から $0 < q < \sqrt{2k\omega d}$ で生じるという条件になることも特徴と言える。本研究では、これを塩

水侵入度合いの指標として評価すべく、地下水解析を行って海岸部の q を求める。地下水は不圧モデルを採用し、基礎式には平面二次元線形化ブーシネスク式(5)を用いた。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} = kd_0 \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \varepsilon \quad (5)$$

ここに、 λ : 有効間隙率、 d_0 : 地下水深、 ε : 単位面積地下水涵養量である。これを有限要素法で空間離散化し、時間差分を取って展開したものを整理する。ベクトルまたは行列を太字で表し、

$$\mathbf{h}_{t+\theta} = \mathbf{A}^{-1} (\mathbf{B}\mathbf{h}_t + \mathbf{q}_{t+\theta}) \quad (6)$$

[地下水頭境界以外にて]

$$\mathbf{q}_{t+\theta} = \frac{1}{\theta} \{ \mathbf{A}\mathbf{h}_{t+\theta} - \mathbf{B}\mathbf{h}_t - (1-\theta)\mathbf{q}_t \}$$

[地下水頭境界上にて]

となる。ただし、これらは水頭境界値で縮約済みの式である。ここに、 \mathbf{h} : 水頭ベクトル、 \mathbf{q} : 流量ベクトル、 θ : 時間差分パラメータであり、

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{M} + \theta \mathbf{S}, \quad \mathbf{B} = \frac{1}{\Delta t} \mathbf{M} - (1-\theta)\mathbf{S},$$

$$\mathbf{M} = \int_V \lambda \boldsymbol{\phi}^T \boldsymbol{\phi} dV, \quad \mathbf{S} = \int_V kd_0 \boldsymbol{\phi}^T \nabla^T \nabla \boldsymbol{\phi} dV, \quad (7)$$

$$\mathbf{q}_{t+\theta} = \int_V \varepsilon \boldsymbol{\phi}^T dV$$

である。式(6)で得られる各節点の q を、単位奥行きあたりの流量に直してから式(4)に代入し、 x_d を求める。

4. 研究成果

評価事例として、昔から農地に塩害が生じること有名な高知県沿岸部に着目した。塩害が出る理由の塩水侵入は塩水の河川遡上と帯水層の塩水くさびであり、ともに顕著な挙動が生じていると予想されるが、今回は後者についての考察となる。つまり降水量や気温の変化に応じて塩水くさびが変化した挙動を検討対象としている。いま対象流域として、大きな都市部を広く含まない物部川流域(図3)を選定した。そこは流域面積が 508 km²、幹川流路延長が 71 km である。また、様々な地盤資料を基に、同流域河口部基盤高には T.P. マイナス 58m を与えた。

同流域で、GCM 出力の現在気候(2079-2003年)と将来気候(2075-2099年のアンサンブル平均)の各データを用いて SVAT モデルによる熱収支計算を経て降雨量、融雪量、蒸発散量を入力データとして、1 日間隔での地下水涵養量 ε を算定した。そこでは、全国の土壤雨量指数を検討する際に用いるタンクモデルとそのパラメータを用いて同量を推定している。なお、地下水頭境界は海面と接する最下流部であるが、その海面位置は現在でも将来でも同

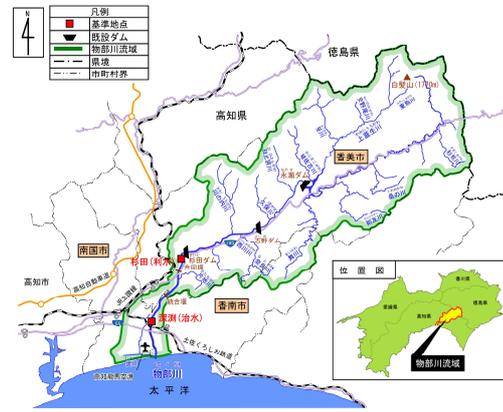


図3 物部川流域

じとした。本来は海面も気候変動により海面上昇をすると推察されるが、確かな上昇量の計算結果が得られていないことや、純粋に降雨特性の変化による塩水侵入影響評価を行いたいことから海面は動かさずに同じ位置とした。地下水解析では Δt を 1(day)として、式(6)で q を日単位で算出し、これから求めた x_d の年平均値を図化した。その現在・将来気候の結果をそれぞれ順に図4, 5に示す。

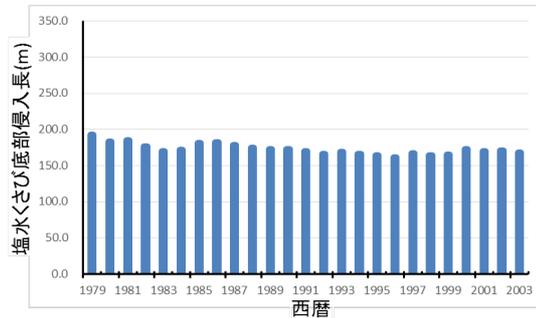


図4 塩水くさび侵入長：現在気候

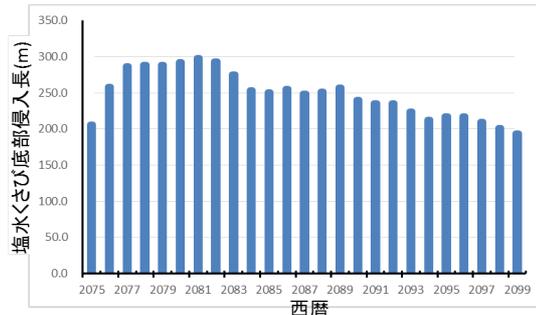


図5 塩水くさび侵入長：将来気候

図4,5から、将来気候では塩水侵入長が170mから190mの間で変化しているのに対して、将来気候では200mから300mの変動幅を持つようになっているのが見て取れる。式(4)からも分かるように、真水(地下水)の塩水侵入を押し返す流体力(流量)が増えれば侵入長が短くなり、流体力が減少すれば侵入長は長くなる。両図を比較すれば現在より将来の方が全体的に侵入長は全体的に長くなっていることから海への地下水流出量 q は将来ひとまわり減少していると言える。将来気候

での q が現在気候での流量の40%程度まで減少した際は300m程度まで塩水が侵入した。以上より、物部川流域の塩水侵入は世紀末頃には現在より奥深くなり、最長では倍近い侵入長となる時期も出ると予想される。

今回は涵養量(地下水流量)の変化による塩水くさび侵入長の変動に着目するため、海面上昇を入れずに涵養量のみ変化させて算定したが、それだけでも世紀末期にはかなり塩水侵入が進んだ。世紀末までに甘い見積りで20cm、厳しい見積りで50cmの海面上昇があると予想されていて、次の解析には海面上昇の条件を地下水解析条件に反映させていくと更にシビアな結果となることが予想できる。おそらく地下水面と海面との水位差がより小さくなる(地下水流量が減少する)上に流出部の通水断面積が大きくなるため塩水侵入長はこの結果以上に増大すると予想されるためである。

地下水モデルのパラメータは、空間分布するために均質パラメータ化した際の最適化は難題の1つであるが、代表者が開発したFE-BCO(有限要素-ミツバチコロニー最適化)手法を用いることで、最適化が可能となる。BCOの方法の詳細は参考文献に譲るが、BCOを有限要素方程式に応用し、同式を条件式として用いた最適化手法である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

T. Hamaguchi, T. Sumi and S. Tanaka : Parameter Design Using Artificial Swarm Intelligence Scheme in Dam Engineering, Proceedings of ICWRE 2016, pp. (g03-06-1)-(g03-06-6), 2016, 京都テルサ(京都府京都市)にて発表も有, 査読有。

T. Hamaguchi, T. Sumi and S. Tanaka : APPLICABILITY OF ARTIFICIAL SWARM INTELLIGENCE TO GRAVITY DAM DESIGN AND GROUNDWATER MODEL IDENTIFICATION, Proceedings of IAHR-APD 2016, pp. (3A014-1)-(3A014-8), 2016, ガラダリホテル(スリランカ国コロンボ市)にて発表も有, 査読有。

浜口俊雄・角 哲也・田中 茂信: ミツバチコロニー最適化手法を用いた重力ダム基本断面設計法, 京都大学防災研究所年報, 第59号, pp. 497-507, 2016, 査読無。

浜口俊雄・角 哲也・田中 茂信: 人工群知能を用いた重力ダム設計基本断面の最適化と長期ダム安定性管理への応用, 京都大学防災研究所年報, 第58号, pp. 433-440, 2015, 査読無。

浜口俊雄・田中 茂信・角 哲也・鈴木靖・佐藤嘉展・竹門康弘・田中拓馬: 流域圏環境統合モデリング構築に関する基礎的研究, 京都大学防災研究所年報, 第

57号, pp.462-467, 2014, 査読無。

〔学会発表〕(計 6件)

浜口俊雄・角 哲也・田中茂信: 重力ダム基本断面設計に対するミツバチコロニー最適化手法の適用と優位性, 水文・水資源学会 2016 年度研究発表会要旨集, コラッセ福島(福島県福島市), 2016.9.17.
浜口俊雄・角 哲也・田中茂信: 流重力ダム基本断面設計への人工群知能適用と堆砂容量変化の考察, 水文・水資源学会 2015 年度研究発表会, 首都大学東京南大沢キャンパス(東京都八王子市), 2015.9.11.

T. Hamaguchi, T. Sumi and S. Tanaka : Parameter Design of Basic Section for Gravity Dam through Particle Swarm Optimization Approach considering Long-term Sediment Management under Climate Change, AOGS 2015, SUNTEC Singapore (シンガポール国シンガポール市), 2015.8.6.

浜口俊雄・田中茂信・角 哲也: 流域圏環境統合モデリングへの理論的アプローチ, 水文・水資源学会 2014 年度研究発表会, 宮崎グリーンズフィア壱番館(宮崎県宮崎市), 2014.9.25.

草刈智一・寒川典昭・浜口俊雄・中屋眞司・田中克樹・山崎基弘: GCM データを用いた年降水量の非定常頻度分析~新潟県を例として~, 土木学会第69回年次学術講演会, -071, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府豊中市), 2014.9.10.

T. Hamaguchi, A. Kamal, T. Sumi, S. Tanaka and K. Tanaka : Numerical modeling of groundwater system in the Nile Delta considering climate change impacts, AOGS 2014, ロイトン札幌ホテル(北海道札幌市), 2014.7.29.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
特になし

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浜口 俊雄 (HAMAGUCHI Toshio)
京都大学・防災研究所・助教
研究者番号: 90263128

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
なし