

課題名	RF-070 自己組織化マップを用いた気候変動の評価に関する研究		
課題代表者名	杉本憲彦（慶應義塾大学法学部日吉物理学教室・専任講師）		
研究期間	平成19-20年度	合計予算額	5,270千円（うち20年度 2,470千円） 「上記の合計予算額には、間接経費1,216千円を含む」
研究体制	<p>研究体制</p> <p>（1）自己組織化マップを用いた気候変動の評価に関する研究（慶應義塾大学法学部）</p>		
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. 序（研究背景等）</p> <p>地球温暖化の要因を研究する際、多次元の気候データから主要な変動を抽出し、2次元平面へ可視化表現する手法として、EOF解析(主成分分析)が伝統的に用いられてきた。例えば、Corti et al. (1999)では、過去および近年の気候データにEOF解析を行った結果、近年の温暖化が人為的影響による新たな温暖化モードの出現ではなく、既存の温暖化モードの出現頻度の上昇に起因する、と結論付けている。また、気候モデルを用いた温暖化予測実験においても、EOF解析によって抽出されたA0の出現頻度の増加に伴う温暖化が予測されている。しかしながら、2次元平面への線形写像を行うEOF解析では、第二主成分までの寄与率は高々27%であり、EOF解析が非線形な気候データから正確に主要モードを抽出しているとは言い難い。</p> <p>一方で、地球温暖化の将来予測のために、気候モデルを用いた数値実験が精力的になされているが、モデル間のばらつきは依然大きく、モデルの評価基準が欠如していることが大きな問題となっている。また、より正確な予測を得るため、気候モデルは高解像度化する一方で、その出力データは膨大になり、従来手法での解析がますます困難になってきている。例えば、温暖化による台風の出現頻度や強さ・大きさの影響は活発に議論されているが、高解像度モデルの出力データから台風を自動的に抽出すること自体が、数値実験と同様に非常に困難な作業になってきている。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>上記背景より、本研究ではEOF解析に代わる新たな解析手法として、自己組織化マップを提案し、気候データからより正確に気候変動の主要モードを抽出することを目的とする。また、個々の気候モデルについて、主要モードの再現性の観点から評価を行うことで、モデルの評価基準を与えることも目標である。上位のモデルの温暖化予測実験の結果から、温暖化の要因となる主要変動の特定と精度の高い将来予測が可能である。また、上位と下位のモデルの要因を調べることで、今後の気候モデルの開発方針に関する知見を与えることも目的である。</p> <p>自己組織化マップは、神経細胞のモデルであるニューラルネットを用いて非線形写像を獲得するもので、既に画像処理やゲノム解析等の幅広い分野でその有用性が示されている。しかしながらこれまで、大規模な気候データへの適用は計算コストの面から困難であった。そこで本研究では、まず初めに、動的なニューロンの生成による新手法を提案(Tachibana and Furuhashi, 2007)し、従来の数万倍の高速化を実現した。本研究では、この高速な球面自己組織化マップの解析手法を、気象分野に広く普及させることも目的の一つである。</p> <p>同時に、新たな解析手法も随時提案・併用し、様々な角度から気候モデルの評価を行う。今後ま</p>		

すます高解像度化していくと予想される、気候モデルの大規模データの解析を念頭に、高速な新解析手法の開発と検証、新手法による解析と気候モデルの評価、そして新手法の普及活動を行うことが、本研究の大きな目標である。本研究の流れを図1に示す。

3. 研究の方法と結果

(1) 自己組織化マップを用いた気候変動の評価に関する研究

本研究では、大規模な気候データに高速な球面自己組織化マップを適用する。はじめに、観測データの解析に本手法を用い、手法の有効性を示す。次に、気候モデルの現在気候再現データに本手法を用い、気候の自然変動の主要モードを抽出する。さらに、温暖化実験データの解析を行い、温暖化時の主要モードを抽出する。また、各気候モデルデータの解析を行い、モデルの再現性を評価する。

1) 観測気候データ(NCEP再解析データ)の解析 (Sugimoto and Tachibana, 2008a)

まず、全球の地表面気温の日変化(1日4回観測)データ1月分を解析した。第2主成分までを用いたEOF解析では、観測時刻に伴う4つのクラスター領域に分類される。一方、本手法を用いた場合には、観測時刻に伴う4つのクラスター領域の分類に加え、空間構造の類似性も考慮できる(図2)。すなわち、グレースケールで示される観測時刻の異なるクラスター領域内であっても、観測データは類似性を保ちながら配置される。例えば、図2の中心部の黒●2点は観測時刻が異なるが近傍に配置され、実際その空間構造は非常に類似したものである。EOF解析では2点は明確に分離されており、このような類似性は予想できない。

次に、500hPa高度場の月平均観測データ50年分を解析した。各観測月のペアについて、第2主成分までを用いた場合のEOF平面上の距離と、実空間での積算距離(L2ノルム)との関係を調べた。その結果、実空間ではお互いに非常に異なる空間構造をもったペアの月であっても、EOF平面上では近傍に配置される可能性があることがわかった。一方、本手法を用いた場合には、類似性を保った分類結果が得られた。

上記の結果は、本解析手法がEOF解析の補完・代用的な分類結果を与えることを示しており、その有用性が確認された。そこで、次節以降では本手法を気候モデルデータに適用した結果を示す。

2) 気候モデルの産業革命前気候データの解析 (Sugimoto et al., 2008c)

国立環境研究所の気候モデル(NIES-AOGCM)の産業革命前気候データ(3600年分)を解析した。月平均500hPa高度場について、本手法を用い主要モードの抽出を行った。各クラスター領域の中心決定には、隣接するニューロンとの類似性を評価する指標を用い、その極小値を探索した。その結果、極小値となるニューロンの空間構造として、気候の自然変動の主要モードとされるPNA及びNAOパターンの卓越した構造を抽出することに成功した(図3)。

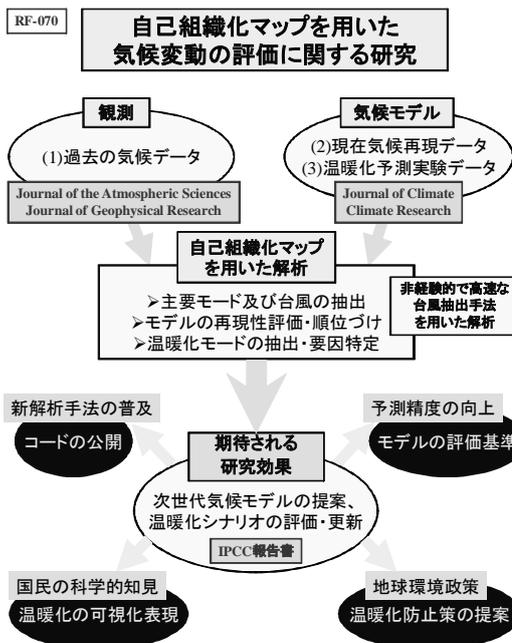


図1: 「自己組織化マップを用いた気候変動の評価に関する研究」の流れ。

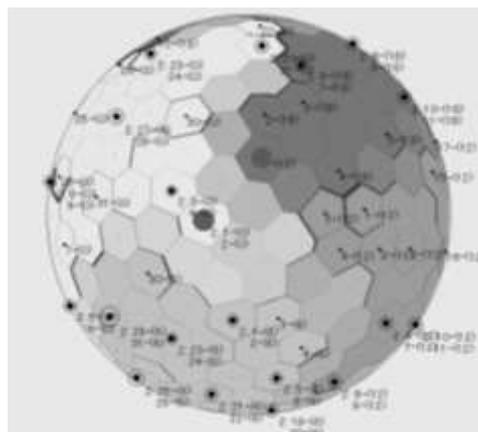


図2: 地表面気温の観測データに本解析手法を用いた結果。六角形は各ニューロンで、日付-(時刻)で示される各観測データが配置されている。

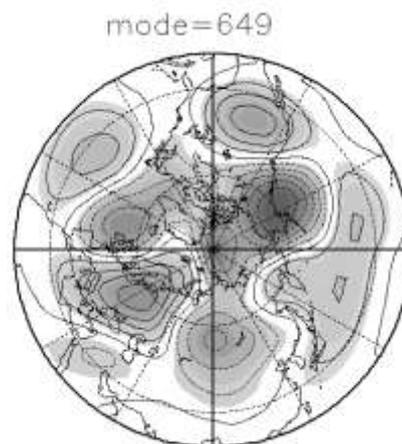


図3: 産業革命前気候データより抽出された主要モードの空間構造(北半球)。実線・破線は正・負偏差を示す。PNAとNAOパターンの卓越が確認できる。

3) 気候モデルの温暖化実験データの解析

(Tachibana et al., 2009b)

同様に国立環境研究所の大気海洋結合モデル (NIES-AOGCM) のSRES-A1B温暖化実験データ (2000年以降の300年分) を解析した。月平均500hPa高度場について、本手法を用いた可視化分類を行い、主要モードを抽出した結果、極小値となるニューロンの空間構造として、A0(環状)モードが得られた(図4)。

また、2)の産業革命前気候データ(3600年)の本手法による分類結果に、温暖化実験データを射影した。その結果、温暖化時では主要モードの出現頻度が現在気候と異なることが明らかになった。これらの結果は、温暖化に伴って自然の内部変動の出現頻度が変化し、特にA0モードの出現頻度が増加傾向にあると報告した先行研究の結果と整合的である。

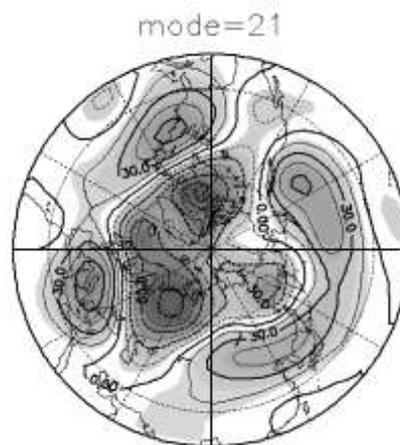


図4: 温暖化実験データより抽出された主要モードの空間構造(北半球)。実線・破線は正・負偏差を示す。A0パターンの卓越が確認できる。

4) マルチ気候モデルの過去気候再現及び温暖化実験データの自己組織化マップを用いた解析

(Sugimoto et al., in preparation)

IPCC-AR4に用いられた各気候モデルの過去気候再現実験データ(1900年以降の100年分)及びSRES-A1B温暖化実験データ(2000年以降の100年分)の月平均500hPa高度場を解析し、各気候モデルの過去気候と温暖化時の主要モードを抽出した。その結果、各気候モデルの主要モードは過去気候、温暖化時ともに大きく異なり、モデル間のばらつきが依然として大きいことが示された(図5)。

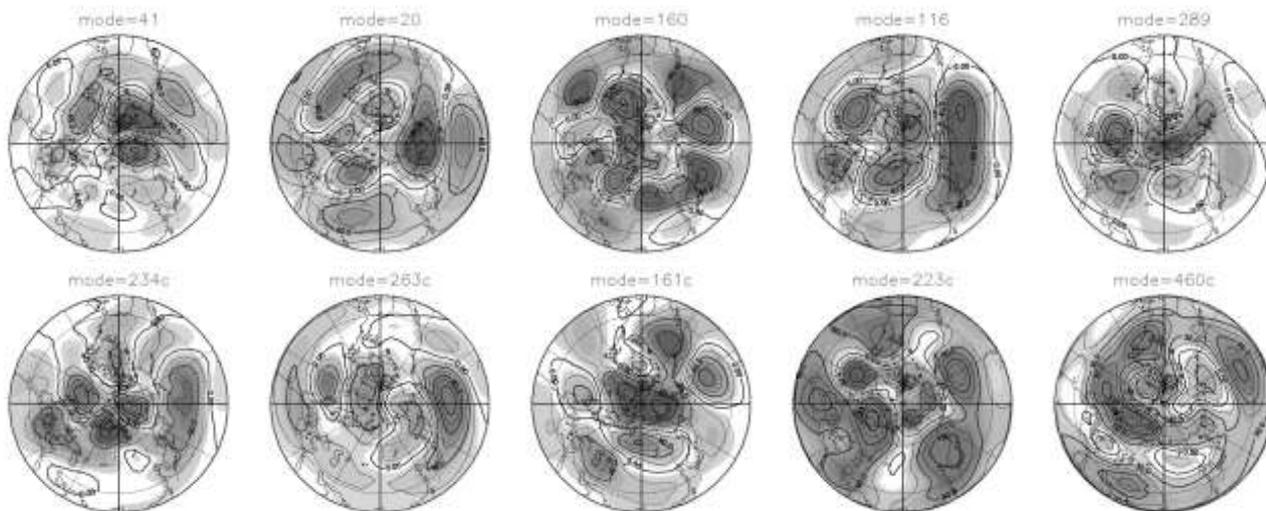


図5: マルチ気候モデルの過去再現実験(上段)及び温暖化実験(下段)データから得られた主要モードの空間構造(北半球)。実線・破線は正・負偏差を示す。左からECHAM、MIROC、NCAR、UKMO、GFDLのモデルである。各モデル間の主要モードのばらつきが大きいことがわかる。

(2) 高速な台風抽出手法に関する研究

本研究では、大規模な気候データ中から高速に渦を抽出する手法を新たに提案する。はじめに、観測データを用いた解析により、本手法が従来手法に比べて高速かつ高精度に渦を抽出できることを示す。次に、新手法を拡張し、抽出した渦の危険度や影響半径を自動評価する。さらに、高解像度気候モデルのデータを用い、大規模データへの本手法の適用可能性を検討する。

1) 台風抽出手法の提案と観測データを用いた従来手法との比較・検証(Sugimoto et al., 2008b)

まず、大規模な気候データから高速に台風を抽出する新手法を提案した。従来の台風抽出手法は、経験的条件を用いて全地点を探索するため、高解像度な大規模気候モデルデータへの適用が困難である。また、経験的条件の設定で抽出結果も変化する。本手法では、曲率を強調した流線を用い、いくつかの初期位置から追跡探索することで、経験的条件を用いず、また全探索もせず高速に台風を抽出する。最初に、観測データ(NCEP再解析データ)を用いた台風抽出検証実験により、新手法は抽出精度においても従来手法を上回り、その有効性を示すことに成功した。

2) 台風抽出手法の渦の危険度評価手法への拡張(Sugimoto et al., 2009a)

次に、新提案手法を、発見した渦の危険度を自動評価する手法へと拡張した。発見した渦の中心より水平・鉛直方向に順次半径・高度を増加させ、その風速ベクトルを計算し、影響半径や危険度を評価した(図6)。その結果、抽出した渦の中には2006年のサロマ湖竜巻の親渦となった、強い低気圧なども存在した。これらの結果は、本手法が気候データ中から、台風のみならず、危険な低気圧も高速抽出し、かつ危険度も自動評価できる手法として、有効であることを示している。

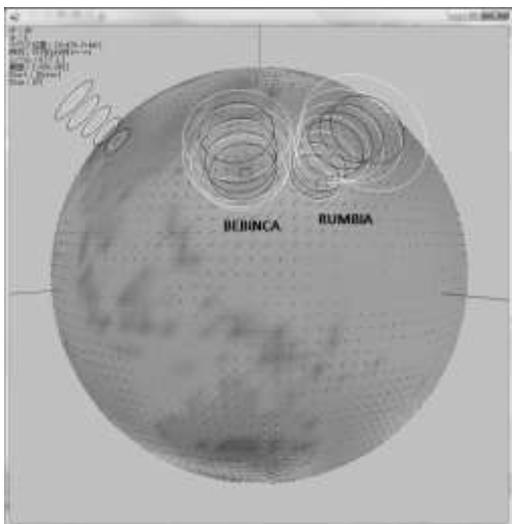


図6: 観測データを用いた台風の自動危険度評価の例。

白円は影響半径、黒円は最大風速の半径をもつ円。

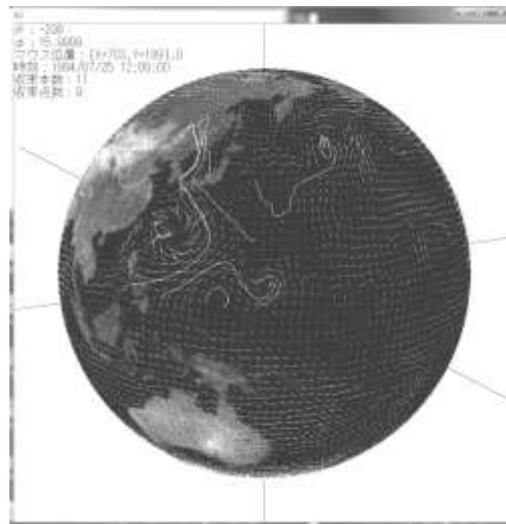


図7: 高解像度気候モデルデータから台風を自動抽出し

た例。白線は曲率強調流線の探查経路を示す。

3) 高解像度気候モデルデータの解析(Sugimoto et al., in preparation)

また、気象研究所の高解像度気候モデルデータ(MRI-AGCM、20kmメッシュ)から、本手法を用いて台風を抽出した(図7)。その結果、本手法は大規模な気候データにおいても、計算コストがほとんど増加しないばかりか、解像度を落としたデータであっても、台風の抽出精度が維持されていた。

4. 考察

上記、自己組織化マップを用いた大規模データの解析は、本解析手法の高速化によって初めて実現した。観測データの解析により、本提案手法が各観測データの空間構造の類似性を保った非線形な分類手法として、EOF解析の補間的及び代用的な利用に有効であることを示した。また気候モデルデータの解析では、抽出された自然変動の主要モードの空間構造を、観測データで得られた結果と比較することで、モデルの再現性の評価が可能であった。このことは、本手法を用いることで、現在気候の主要変動の再現性から、様々な気候モデルの評価を行えることを意味する。また気候モデルを開発する際にも、本手法によって抽出した主要モードの比較検討が有効であり、温暖化予測の精度向上へ繋がる気候モデルの開発指針を提供可能である。本手法の弱点として、2次元の可視空間に各データを配置するため、特異な空間構造をもつデータが局在する可能性がある。このため分類後の空間構造の確認は必須であり、得られた結果の妥当性の評価が必要になる。

一方、曲率を強調した流線を用いた新台風抽出手法は、経験的条件を用いずに、観測データから高速かつ高精度に台風や低気圧を抽出できた。これにより、抽出した台風の統計からも気候モデルの評価が行える。また、本手法は全探索を行うわけではないので、より高解像度の気候データにおいても、計算コストがほとんど増加しない。このため、今後ますます高解像度化が進む気候モデルにおいて、本解析手法が台風や低気圧の抽出手法として、将来的にも有効であると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで気候データに適用が困難であった自己組織化マップを、本研究では高速化することに成功し、これによって大規模な気候モデルデータの解析を初めて可能にした。そして、本手法がEOF解析の補間的かつ代用的な利用に有効であることを示した。また長期間の気候モデルデータからも主要モードが抽出でき、他の手法と整合的な結果を得た。これらの成果は、新たな解析手法の導入という意味で科学的意義が大きく、その功績はIEEEの若手研究賞としても評価された。またCD-ROMを含む著書「自己組織化マップとそのツール」を分担執筆・出版し、手法の普及にも努めた。

さらに、曲率を強調した流線を用いた高速な新台風抽出手法の提案と、その手法の有効性を示し

た。このことは、高解像度モデルの大規模データ解析への先駆的な研究成果である。

これらの成果は、気候モデルデータの新たな解析手法の方向性を示した点で科学的な意義が大きい。将来的にも有効な本手法の今後の適用範囲の拡大が期待される。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究によって得られた、気候データから自然変動や温暖化の要因につながる主要変動の空間構造を特定することは、温暖化シナリオの見直しや改善に結びつくことが期待され、今後の地球温暖化対策の提案に繋がるものである。また、主要変動や台風・低気圧の再現性による気候モデルの評価基準の制定は、将来の高解像度気候モデルの開発指針を提供する点でも、重要な貢献をもたらす。今後、気候モデルはますます高解像度化し、データの大規模化が予想されるため、高速な新解析手法の需要はさらに高まることが期待され、その貢献は広く浸透していくことが期待される。

6. 研究者略歴

課題代表者：杉本憲彦

1977年生まれ、京都大学理学研究科修了、理学博士、
名古屋大学工学研究科COE研究員、現在、慶應義塾大学法学部専任講師

主要参画研究者

(1) : 杉本憲彦 (同上)
: 橘完太

1974年生まれ、名古屋大学工学研究科修了、工学博士、
名古屋大学工学研究科COE研究員、現在、名古屋大学工学研究科特任准教授

7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 1) K. Tachibana and T. Furuhashi: Self-Organizing Map with Generating and Moving Neurons in Visible Space, *Journal of the Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 11, No. 6: 626-632, (2007).
- 2) N. Sugimoto and K. Tachibana: A First Attempt to Apply High Speed Spherical Self-organizing Map to Huge Climate Datasets. *SOLA (Science Online Letters on the Atmosphere)*, vol. 4: 41-44, (2008a).
- 3) N. Sugimoto, T. M. Pham, K. Tachibana, T. Yoshikawa, and T. Furuhashi: High speed non-empirical tropical cyclone identification method in huge climatology data, "Hurricanes and Climate Change", *J. B. Elsner and T. H. Jagger (Eds.), Proceedings of 1st International Summit on Hurricanes and Climate Change, Springer-Verlag*: 251-263, (2008b).
- 4) N. Sugimoto, K. Tachibana, H. Shioyama, and T. Nozawa: Application of high speed spherical self-organizing map to climate research, *Proceedings of Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*: 1574-1579, (2008c). (Young Researcher Award from IEEE Computational Intelligence Society)
- 5) N. Sugimoto, T. M. Pham, K. Tachibana, T. Yoshikawa, and Takeshi Furuhashi: High speed method of detecting vortex without empirical conditions - Application to risk-assessment of tropical cyclone -, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 57: 297-307, (2009a).
- 6) K. Tachibana, N. Sugimoto, H. Shioyama, and T. Nozawa: Visualization of Huge Climate Data with High-Speed Spherical Self-Organizing Map, *Journal of the Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 13, No. 3: 210-216, (2009b).

(2) 査読付論文に準ずる成果発表 (社会科学系の課題のみ記載可)
特になし。