

計算科学フロンティアの展開 その3
 ー地球流体力学における大規模数値計算ー

杉 本 憲 彦

日々の天気予報から将来の地球温暖化予測まで、地球大気の現象を扱う気象や気候学の分野は、大規模数値計算が最も盛んな研究分野の1つである。その中で、これらの予報・予測モデルの根幹をなす、大気・海洋等の地球流体運動の力学を研究する領域がある。近年、この研究領域で注目を集めているテーマの1つに、渦の流れからの自発的な重力波放射というものがある。本解説では、このテーマにおける大規模数値計算の例を、筆者のこれまでの研究を中心に紹介したい。

I. はじめに

大気中には重力による密度成層の効果により、浮力を復元力とする波動が存在し、大気重力波(図1, 左)と呼ばれている(宇宙物理学の重力波とは異なる)。例えば、山岳を過ぎる気流が存在すると、その後流領域には雲として可視化された重力波が観測されることがある(図1, 右)。重力波はエネルギーの小さい小規模な波であるため、日々の天気には直接影響を与えない。このため、気象学ではこれまで無視される存在であった。特に気象予報の数値計算を行う際には、重力波の伝播速度が日々の天気に影響する大規模な流れ(偏西風等)に比べて速いため、その時間刻みを細かくしなければならないという問題がある。実際、予報業務では長い間、重力波はノイズとして見なされ、重力波を除去する方向の研究(イニシャリゼーションやバランスモデル等)が過去に盛んになされてきた。

しかしながら、観測技術が向上した1980年代はじめ頃から、重力波の働きは次第に認識され

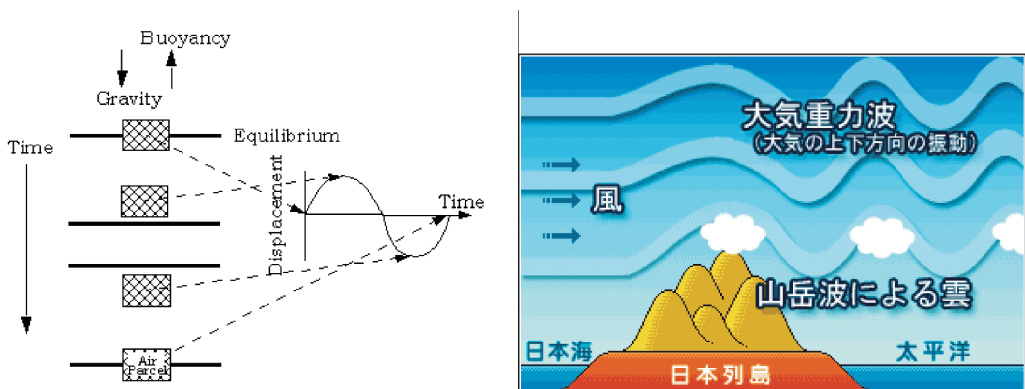


図1 重力波の概念図(左)と雲による重力波の可視化例[1](右)

るようになった。また、理論的にも大気大循環への役割が定式化された。下層より伝播した重力波は、密度の薄い中層大気で大振幅を持つ。このため、重力波は中層大気に運動量とエネルギーを輸送する働きを担う。その結果、中層大気の大循環は、重力波によって駆動されることがあきらかにされた [2]。図 2 に、重力波の中層大気での働きをまとめた概念図を示す。

中層大気の大循環は、オゾンや二酸化炭素の物質循環を通じて、地球の気候変動に重要なインパクトを与える。このため、将来気候を予測する気候モデルでは、中層大気の大循環を再現するため、その駆動源である重力波の励起・伝播・減衰を定量的に取り扱うが必要になる。しかしながら、現行の気候モデルでは、重力波の励起や減衰はグリッドスケール以下の現象をパラメタライズした方法でしか取り扱われておらず、今後のモデル開発の際の重要な課題の 1 つとなっている。

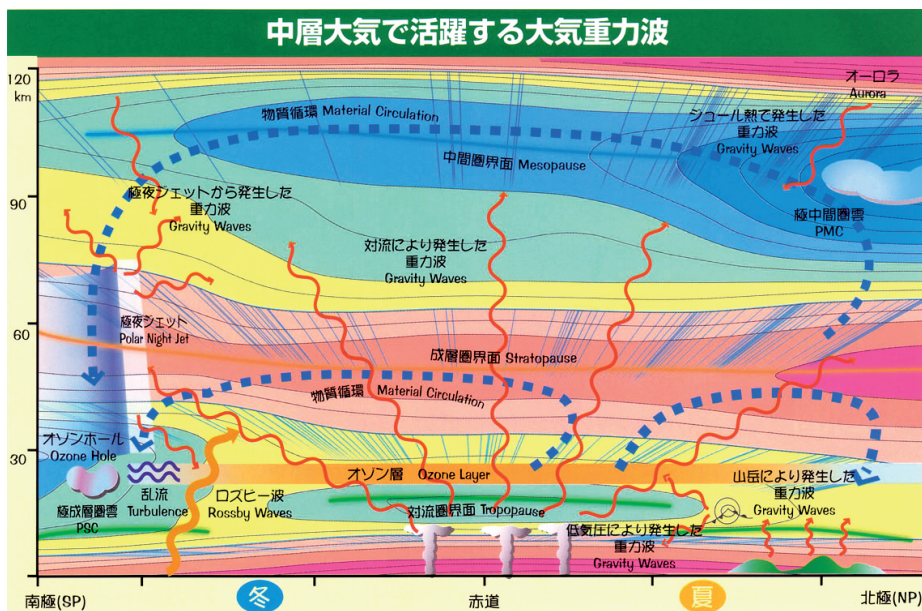


図 2 重力波の働きの概念図 (PANSY パンフレット [3])

重力波の励起源として、これまで山岳等の地形、積雲対流、前線などが考えられてきた。これらの励起源では、物理的な障害を気流が通過する際に生じた非平衡状態から、平衡状態（例えば地衡流）に遷移する過程で重力波が放射される（図 1, 右）と考えられ、地衡流調節過程と呼ばれてきた。一方、近年の観測による研究では、台風やジェット気流等の強い渦の流れからの重力波放射が報告されている。ここでは、平衡状態にある渦の流れの非定常な時間変動に伴って重力波が放射されるため、自発的な重力波放射過程と呼ばれている。最近、この自発的な重力波放射の研究が、さまざまな方向（理論、室内実験、数値実験）から盛んになされている。その理由には、現実的背景として気候変動等への重力波の重要性以外にも、理論的背景としてバランスモデルの妥当性や適用限界 [4] への興味という視点もあるが、ここでは詳細には触れない。

現在、渦の流れからの自発的な重力波放射の研究の主流は、大気大循環モデルや局地気象を予

測するメソスケールモデルを用いた数値的研究である。これらの研究は、ほとんどが特定の現象（低気圧の発達減衰過程や台風等）に着目し、個々の現象からの重力波放射を個別に調べている。しかしながら、これらのモデルには、自発的な重力波放射に直接かかわらない複雑な物理過程が存在するため、現象の本質を解明できていない。また、重力波は渦の流れに比べて、エネルギーが小さく位相速度も速いため、高精度かつ高解像度の数値計算が必要である。このため複雑なモデルでは、さまざまな現象及びパラメータでの自発的な重力波放射過程について、普遍的な性質を解明できない。現象の本質を抽出するための方法として、簡略化モデルを用いた方向性が考えられよう。

本解説では、まずII節で、筆者がこれまで行ってきた、地球大気の簡略化モデル、 f 平面浅水系を用いた大規模数値計算の結果を紹介する。つぎにIII節で、この系の拡張となる球面浅水系を用いた、最近の発展的研究の結果を紹介する。最後にIV節でまとめと今後の展望について述べる。

II. f 平面浅水系を用いた研究

f 平面浅水系は、地球回転の効果 (f : コリオリパラメータ) を接平面上の値で固定し、地球大気を1層の水面として近似した系である。密度成層の効果が強い成層圏の中高緯度において、地球規模の流体運動を議論する際には、このような大胆な近似がしばしば妥当である。ここで、大規模なジェット気流は渦の流れとして表現され、重力波は水面の収束発散により伝播する波としてあらわされる。この系は、我々の興味を中心である、渦の流れと重力波の両方を含む最も簡単な系である。また同時に、地球回転の効果を除くと2次元圧縮性流体と等価なため、これまでに培われてきた流体分野における、渦からの音波放射理論（ライトヒル方程式）の知見を援用することが可能になる。

実験設定として、周期境界を持つ矩形領域を設定し、東西方向に流れるジェット流を配置した。ジェットが渦状に不安定発達するのに対して、ジェットを維持する緩和強制を加えることで、ジェットの継続的な時間変動を再現した。日本上空で春先によく見られる移動性高低気圧をイメージしていただきたい。図3は流れ場のスナップショットである。ジェット流をあらわすポテンシャル渦度（図3, a）の非定常変化に伴い、重力波を意味する収束発散（図3, b）が南北に伝播する様子がわかる。ジオポテンシャル（図3, c）は渦の流れにバランスする水面の変位（高低気圧）を意味する。（図3, d）と（図3, e）はジェットの領域の拡大図で、（図3, e）のカラーは渦からの音波放射理論の援用により導出した重力波ソース、コンターはポテンシャル渦度である。重力波ソースはポテンシャル渦度の強い領域に局在していることがわかる。本研究ではさらに、重力波ソースの解析を行い、近傍場と遠方場それぞれについて近似モデルを導出することに成功した [5]。ここでは詳細については割愛する。

上記の計算には、当時の京都大学のベクトル型スーパーコンピュータ VPP800 を用いた。格子点数 64×16384 で80000時間ステップの計算に、スペクトル法 [6] を用いて約30時間を要した。南北方向の格子点数を極端に多く設定したのは、重力波の伝播速度が速いために、広い領域が必

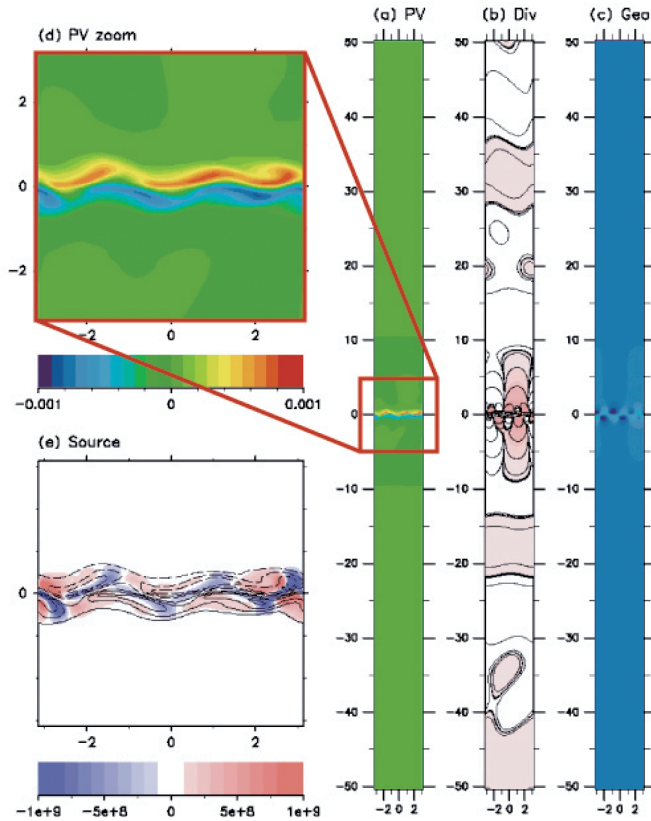


図3 f平面浅水系における重力波放射のスナップショット

要なこと、さらに周期境界を横断する重力波を消去するために、広大なスポンジ領域が必要であったことによる。

続いて、重力波放射への地球回転の効果と水深の深さの影響を調べるために、広範なロスビー数 (Ro : コリオリ項に対する移流項の比) とフルード数 (Fr : 重力波の位相速度に対する流速の比) でのパラメータ走査実験 ($Ro \times Fr \sim 約 10 \times 10$ 個) を行った。渦からの音波放射理論では、小さなマッハ数 (M : 音波の位相速度に対する流速の比) での音波放射に M のべき則が成り立つことが知られている。本研究で用いた系では、 Fr が M に相当する。このため、まず地球回転の効果によるべき則の変化 (Fr 依存性) を調べた。また Fr を固定した条件下での、重力波放射に関する地球回転依存性 (Ro 依存性) も調べた。

その結果、まず重力波フラックスの Fr 依存性では、地球回転の効果が無視できる高 Ro で、渦からの音波放射理論と一致した Fr のべき則が成立した。一方低 Ro では、地球回転の効果の増加により渦の相互作用距離が減少し、 Fr のべき則が崩壊した [7] (図4, 左)。つぎに Ro 依存性では、高 Ro で一定、低 Ro で急激に減少したが、中間の Ro では高 Ro よりもむしろ大きい極大を持った (図4, 右)。これらの結果は、重力波ソースの時間スペクトル解析によって説明できた [8]。低 Ro での減少は、地球回転の効果による重力波放射のカットオフに起因し、中間 Ro

での極大は、地球回転の効果を含むソース項が卓越することに起因していた。この極大の領域では、これまでの知見に反して、地球回転の効果がむしろ重力波放射を促進するセンスに働くことになる。同時に1パラメータ実験 [5] で提案したソースの近似モデルの妥当性についても調べ、その適用範囲を拡張することに成功した [9]。

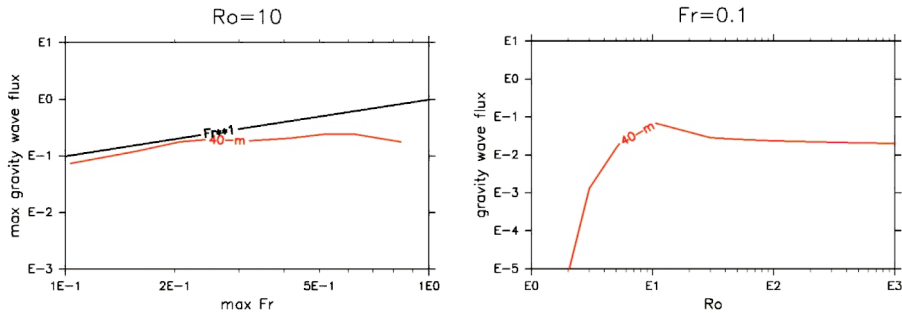


図4 重力波フラックスの Fr 依存性 (左) と Ro 依存性 (右)

計算は当時在籍していた京都大学大学院理学研究科の気象学研究室のPCクラスターにて行った。パラメータ走査実験に際して、写像変換を用いてグリッド間隔を不等間隔に設定でき、境界での重力波の反射を抑えることのできるスペクトルモデル [10] を新たに開発設定して使用した。格子点数 64×1024 で75000時間ステップの1パラメータ計算に、約25時間を要した。この際、スペクトル法のコード (FFT) がベクトル型計算機向きにチューニングされていたために、リプレイスされた京都大学のスカラー型スーパーコンピュータ HPC2500 では計算速度及び並列化効率があり出なくて苦労した。問題はFFTの際に、データ長が長くキャッシュに乗り切らないためであったが、これについては未解決のままである。

Ⅲ. 球面浅水系への拡張

これまでのf平面浅水系の知見が、地球回転の効果が緯度変化する球面上において、どの程度まで適用できるかは自明ではない。また、これまでのスペクトル法による数値モデルは、スカラー型計算機との相性が良くないため、定量的評価のための高精度高解像度な数値計算が困難であった。近年、スカラー型計算機との相性が良い高精度な差分法として、結合コンパクト差分法が注目されている。また、パラメータの調整により、スペクトルの解像度を持つものが提案されている [11]。

本研究では、この手法を実装した球面浅水系を用いて、渦からの自発的な重力波放射を調べた。これまで同様、東西にジェット流を配置し緩和強制を加えることで、渦の流れの時間変動に伴う継続的な重力波放射を再現した。図5は流れ場の一例である。f平面同様、渦度 (図5, 左) の非常に変化に伴い、重力波である収束発散 (図5, 中) が伝播することがわかる。

また本研究では、地球回転の効果が緯度変化することに着目し、ジェットの緯度変化に伴う重力波の伝播特性の変化を解析した。地球回転の効果が無視できる高 Ro では、重力波フラックス

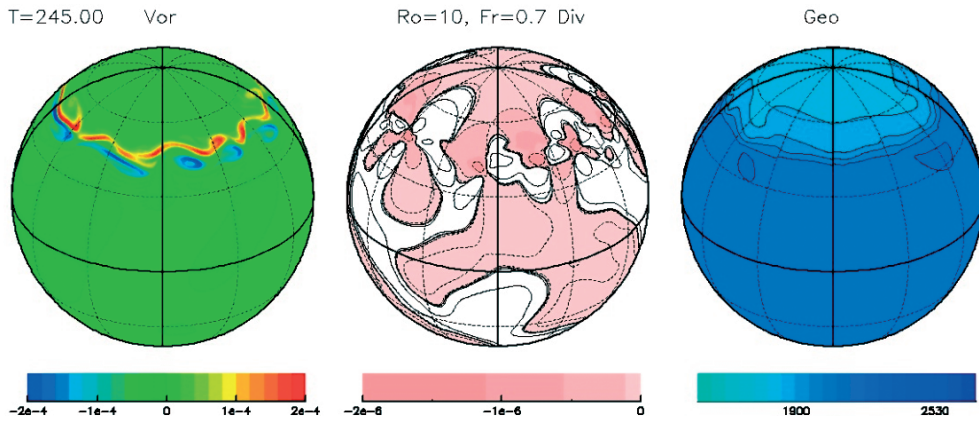


図5 球面浅水系における重力波放射のスナップショット

はジェットの緯度変化にほとんど影響されない (図6, 左)。一方で, 低 Ro では, 高緯度ジェットからの重力波が放射されないのみならず, 低緯度ジェットからの重力波が高緯度まで伝播できないことがわかった (図6, 右)。詳細は割愛するが, f 平面浅水系の知見を援用して, 重力波ソースを導出, その時間スペクトル解析を行うことで, これらの結果の議論が可能である [12]。

計算は名古屋大学情報連携基盤センターのスカラー型スーパーコンピュータ HPC2500 にて行った。格子点数 256×512 で 300000 時間ステップの 1 パラメータ計算に, 16 並列で約 30 時間を要した。球面上では格子間隔が不等間隔になり, 極域で格子点の集中が起こる。対策として, 数値フィルタにより高波数成分を除去しているが, それでも時間ステップを十分細かくとらないと計算が破綻する。このため, 簡略化モデルを用いた計算でも, このような大規模数値計算が必要になる。

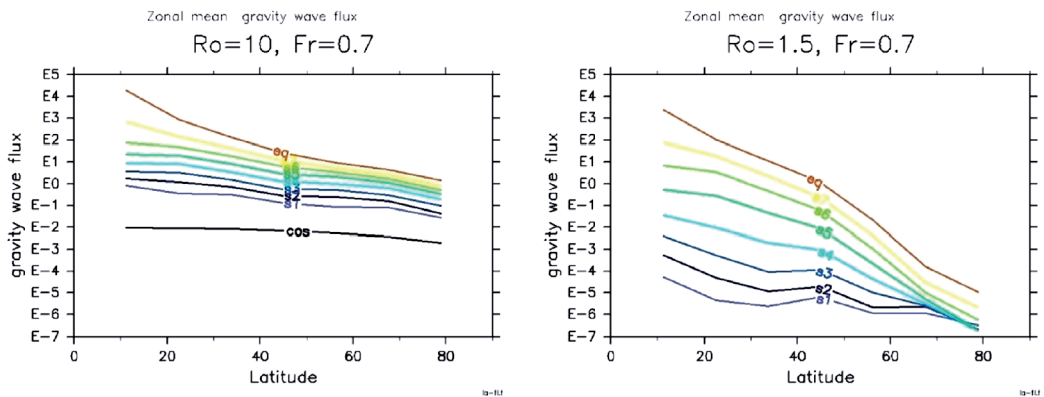


図6 重力波フラックスのジェットの緯度依存性, $Ro=10$ (左) と $Ro=1.5$ (右)。各色は観測緯度をあらわし, 赤道 (赤) から南半球高緯度 (青) である。

IV. おわりに

近年、地球流体力学の分野で注目される、渦の流れからの自発的な重力波放射過程について、その背景と簡略化モデルを用いた大規模数値計算による研究を紹介した。渦と波の非線形相互作用の数値的に研究するには、それぞれの速度やエネルギーが大きく異なるために、高精度高解像度な数値モデルが必要である。また、地球流体では地球回転の効果や成層の効果のパラメータが存在するため、さまざまな現象を普遍的に理解するには、広範なパラメータ走査実験が必要である。このため、簡略化モデルの基礎的な計算であっても、かなりの計算コストが必要になってくる。筆者らの研究は、従来不可能であった渦と波の非線形相互作用という難題を、日進月歩で進歩する大型計算機の力を援用し、開拓していく点で、計算科学のフロンティアと呼べるものではないかと考えている。

今後の方向性として、地球大気の成層の効果を考えるために、2層モデルへの拡張を計画している。2層の浅水系では、日々の天気重要な影響を与える高低気圧発達概念モデルである傾圧不安定が存在できる。また、層間を伝播する伝播速度の遅い内部重力波も存在する。高低気圧からの自発的な内部重力波の放射過程という、より現実的な現象に、これまで得られてきた知見がどの程度、拡張可能であるかを今後検討していきたい。

これから先、計算機能力はますます向上することが期待される。現在の簡略化モデルで表現される渦の流れからの自発的な重力波放射過程が、近い将来、気候予測モデル等の大気大循環モデルで扱えることが可能になるかもしれない。今後の気候変動を予測するモデルの開発や、それを用いた将来の温暖化予測の研究の際に、筆者らの簡略化モデルを用いた基礎的研究の知見が、なにがしかの貢献をもたらすことを期待したい。

謝辞

ここで紹介した研究とその発展は、現在も情報連携基盤センターの大型計算機を使用し、名古屋大学 COE プログラム「計算科学フロンティア」[13] 及び科研費（若手研究 B19740290）の助成を受けて進行中である。また、本原稿の作成にあたって、工学研究科計算理工学専攻の山本有作准教授、情報連携基盤センターの石井克哉教授のご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 情報通信研究機構 (NICT), <http://salmon.nict.go.jp/snews/airglow/>
- [2] D. C. Fritts and M. J. Alexander, "Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere", *Reviews of Geophysics*, 41 (1), 1003 (2003)
- [3] 佐藤薫, 他 5 名, 「21 世紀の極域科学—今なぜ南極観測なのか—」 7. これからの南極観測—南極昭和基地大型大気レーダー計画—, *天気*, 50, (2003), p619-624
- [4] N. Sugimoto, K. Ishioka, and S. Yoden, "Balance regimes for the stability of a jet in an

- f-plane shallow water system”, Fluid Dynamics Research, Vol. 39, No. 5, (2007), p353-377
- [5] N. Sugimoto, K. Ishioka, and S. Yoden, “Gravity wave radiation from unsteady rotational flow in an f-plane shallow water system”, Fluid Dynamics Research, (to appear)
 - [6] K. Ishioka, “ispack-0.61”, <http://www.gfd-dennou.org/arch/ispack/>, GFD Dennou Club, (2002)
 - [7] N. Sugimoto, K. Ishioka, and S. Yoden, “Froude Number Dependence of Gravity Wave Radiation From Unsteady Rotational Flow in f-plane Shallow Water System”, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 54, (2005), p299-304
 - [8] N. Sugimoto, K. Ishioka, and K. Ishii, “Parameter Sweep Experiments on Spontaneous Gravity Wave Radiation From Unsteady Rotational Flow in an F-plane Shallow Water System”, Journal of the Atmospheric Sciences, (accepted)
 - [9] N. Sugimoto, K. Ishioka, and K. Ishii, “Source models of gravity waves in an f-plane shallow water system”, Proceedings of International Symposium on Frontiers of Computational Science 2005, (2007) p221-225
 - [10] K. Ishioka, “A Spectral Method for Unbounded Domains and its Application to Wave Equations in Geophysical Fluid Dynamics”, Proceedings, IUTAM Symposium on Computational Physics and New Perspectives in Turbulence, Springer, Nagoya, Japan, (to appear)
 - [11] T. Nihei and K. Ishii, “A fast solver of the shallow water equations on a sphere using a combined compact difference scheme”, Journal of computation physics, 187, (2003) p639-659
 - [12] N. Sugimoto and K. Ishii, “Numerical Experiments on Spontaneous Gravity Wave Radiation in an Shallow Water System on a Rotating Sphere”, Journal of the Atmospheric Sciences, (in preparation)
 - [13] 名古屋大学 COE プログラム 「計算科学フロンティア」, <http://fcs.coe.nagoya-u.ac.jp/>

(すぎもと のりひこ：名古屋大学大学院工学研究科 計算理工学専攻
21 世紀 COE プログラム 「計算科学フロンティア」 COE 研究員)