TOHOKU
UNIVERSITY

ISSN 0286-7419

SENAC 2011—10

東 北 大 学
サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報

SENAC

Vol.44 No.4 2011—10

Supercomputing System
Cyberscience Center
Tohoku University
www.ss.isc.tohoku.ac.jp

大規模科学計算システム関連案内

＜大規模科学計算システム関連業務は、サイバーサイエンスセンター本館内の情報部情報基盤課が担当しています。＞

http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/

階	係・室名	電話番号(内線) e-mail	主なサービス内容	サービス時間 月～金
一階	共同利用支援係 （受　付）	022-795-3406(3406) FAX:022-795-6099 uketuke@isc.tohoku.ac.jp	各種申請書、講習会、利用相談、広報、センターへの質問や要望の受付等	8:30～17:15
	利用相談室	022-795-6153(6153) sodan05@isc.tohoku.ac.jp 相談員不在時 022-795-3406(3406)	計算機利用全般に関する相談 大判プリンタ、利用者端末等の利用	10:00～16:00 8:30～21:00
	利用者談話室	(3444)	各センター広報の閲覧	8:30～21:00
	展 示 室（分散コンピュータ博物館）		歴代の大型計算機等の展示	9:00～17:00
三階	庶務係	022-795-3407(3407) syomu@isc.tohoku.ac.jp	庶務に関すること	8:30～17:15
	会計係	022-795-3405(3405) kaikei@isc.tohoku.ac.jp	会計に関すること、負担金の請求に関すること	8:30～17:15
	共同研究支援係	022-795-6252(6252) rs-sec@isc.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに関すること	8:30～17:15
	共同利用支援係	022-795-6251(6251) uketuke@isc.tohoku.ac.jp	ライブラリ、アプリケーションに関すること	8:30～17:15
	ネットワーク係	022-795-6253(6253) net-sec@isc.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	8:30～17:15
四階	研究開発部	022-795-6095(6095)		
五階	端末機室	(3445)	PC端末機(X端末)	8:30～21:00

(　) 内は東北大学内のみの内線電話番号です。青葉山・川内地区以外からは頭に 92 を加えます。

本誌の名前「SENAC」の由来

昭和33年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメトロン式計算機の名前でSENAC-1(SENdai Automatic Computer-1)からとって命名された。

［共同研究成果］

地球磁気圏赤道領域におけるモード変換過程についての計算機実験

Kalaee, Mohammad Javad[1]、小野高幸[1]、加藤雄人[1]、熊本篤志[2]
1: 東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻
2: 東北大学大学院 理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター

地球磁気圏観測衛星あけぼの（EXOS-D）により、磁気圏の赤道領域を起源として電磁波モードのプラズマ波動が励起・放射されている様相が明らかとなっている。この波動はその特性から、プラズマ圏の境界･プラズマポーズ近傍でのモード変換過程により放射されると考えられている。本研究では、モード変換過程を取り扱う２次元の電子流体コードを用いて、観測結果から同定した初期条件の下で計算機実験を実施、あけぼの衛星により観測された波動の生成過程がモード変換過程により説明できることを定量的に示した。

1.　はじめに

電磁プラズマ不安定は、宇宙プラズマ中でのプラズマ波動—粒子間のエネルギー交換の素過程であり、定量的な議論においては計算機実験が大きな役割を果たしている。地球周辺の宇宙空間においても様々な電磁プラズマ不安定が生起しており、エネルギー交換過程の結果は、プラズマ粒子の加速や、大振幅のプラズマ波動の励起として、科学衛星による観測結果に現れる。典型例の一つが、地球磁気圏の赤道領域で観測される、モード変換過程による電磁波モードプラズマ波動の励起現象である。

地球磁気圏観測衛星あけぼの(EXOS-D)[1]は 1989 年に打ち上げられ、近地点 275km・遠地点 10,500km の長楕円軌道で、軌道傾斜角 75 度の準極軌道で地球内部磁気圏のプラズマ環境を観測している。あけぼの衛星による観測から、地球磁気圏赤道領域において電磁波モードのプラズマ波動が励起・放射されている様相が明らかとなっている。この波動は波動電磁場ベクトルが背景磁場に対して左回りに回転する L-O モード(Left-hand polarized Ordinary mode)の波動であり、発生源については、高密度の冷たいプラズマが地球を取り巻くように分布する領域・プラズマ圏の外側境界（プラズマポーズ）近傍であることが明らかとなっている。プラズマポーズでは、波動の伝播媒質である冷たいプラズマの数密度が急激に減少することから、波動の励起機構としては、プラズマ密度の空間勾配が存在する領域で生起するモード変換過程によるものであると考えられている。

モード変換過程とは、伝播媒質となるプラズマの空間的非一様性によりプラズマ波動の特性が大きく変化する過程であり、Oya[2]によって、熱的プラズマとの相互作用により発生した静電的プラズマ波動が、伝播の過程で高域混成共鳴周波数に繋がるブランチ(Upper-Hybrid モード)から L-O モードの電磁波へと変換されていくことが示されている。モード変換過程による Upper-Hybrid モードから L-O モードへの変換過程の模式図を図１に示す。モード変換過程は、宇宙プラズマ中での電磁波モードプラズマ波動の励起過程の一つとして研究が進められており、地球の他にも木星などの惑星磁気圏における電磁波放射機構について適用した例が報告されている[3]。過去の研究においては主に理論に基づく検討と飛翔体による観測結果との比較がなされ、波動エネルギーの変換効率等が議論されてきた。特に近年、磁気嵐など地球磁気圏・プラズマ圏の大規模変動時に、高効率なモード変換により生成されたと考えられる電磁波モードプラズマ波動の強い放射が観測されている。このような大規模擾乱時には、プラズマポーズ近傍に急峻な密度勾配が存在していると考えられるが、従来の理論ではこのような環境下での変換過程を議論することは難しく、観測結果の理解には計算機実験による定量的な評価が必要とされる。

このような背景の下、本研究では、モード変換過程を取り扱う２次元の電子流体シミュレーションコードを用いて、あけぼの衛星による観測結果から同定した初期条件・プラズマパラメータの下で計算機実験を実施した。計算機実験により再現された L-O モードのプラズマ波動の解析結

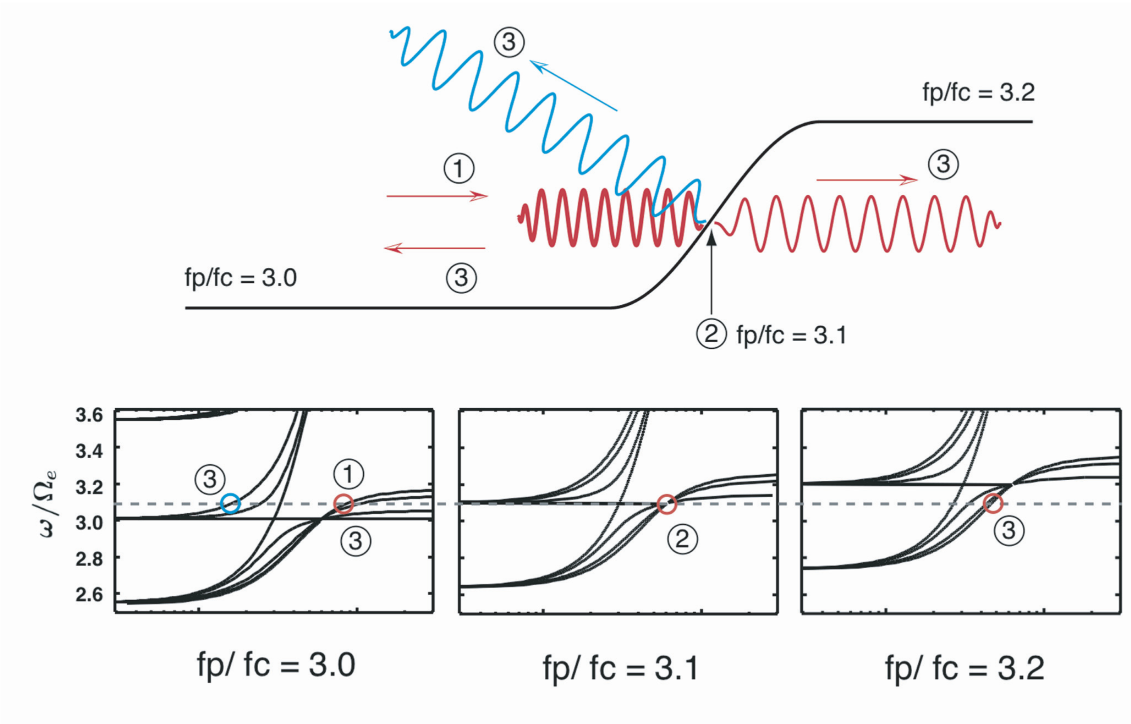


図１　モード変換過程によるUpper-Hybrid モードからL-O モードへの変換過程の模式図[4]。下段の３枚の図は､各領域でのプラズマ波動の波数と周波数の関係を示す（ω-k ダイアグラム）。伝播の過程で波動の周波数は同一で、波長が変わることでモードの変換が生じる。例として、fc の 3.1 倍の周波数を持つ波動が fp/fc が 3.0 から 3.2 に変化する領域を伝播する場合を考える。この図は①Upper-Hybrid モード（ω-k ダイアグラム中の赤丸）の波動がプラズマ密度の濃い領域に向かって伝播し、②波動の周波数とプラズマ周波数 fp が非常に近くなる領域に到達すると、③波動のエネルギーが反射波（Upper-Hybrid モードと L-O モード；ω-k ダイアグラム中の青丸）と透過波（fp/fc=3.2 の領域を伝播する Z モード）とに分配される様相を示す。

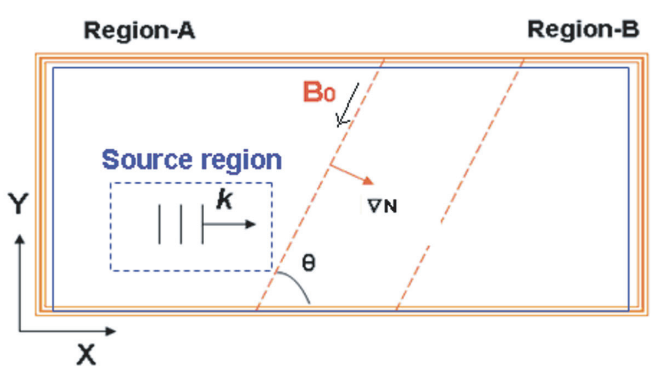


図２　シミュレーション空間の模式図

果から、あけぼの衛星により観測されたL-0モードの波動が、モード変換過程により生成された波動であることを定量的に示した。本稿ではシミュレーションモデルの概要と、得られた成果について述べる。

2.　シミュレーションモデルの概要

分散性媒質であるプラズマ中での波動伝播を解くためには、波動電磁場の時間・空間変動に対するプラズマの応答を、運動方程式により同時に解き進める必要がある。本研究で用いるシミュレーションコードでは背景の冷たいプラズマを流体として取り扱い、電子流体の運動方程式及び連続の式、並びにマクスウェル方程式を基礎方程式とする[4-6]。シミュレーション空間中にプラズマ密度の空間勾配を設定し、プラズマ波動のモード変換プロセスを含めた伝播の様相を解き進める。シミュレーション空間はＸ－Ｙ平面上の２次元とし、平面上に背景磁場をとる。図２に示されるように、プラズマの数密度が異なる領域ＡとＢを設定して、その境界を繋ぐように密度勾配領域を設定する。本シミュレーションでは背景磁場強度がシミュレーション空間内で一様としており、プラズマ波動の分散を決定するパラメータであるfp/fc（プラズマ周波数fpとサイクロトロン周波数fcの比）の空間変化は、シミュレーション空間中各点での電子の数密度のみに依存して変化する。なお、対象とする時間スケールに比べてイオンの運動の時間スケールは十分長いため、イオンの運動は無視し、電子の初期空間分布と同じ数密度で分布しているとする。

本研究課題では本コードを利用して、これまでに変換効率のパラメータ依存性に関する定量評価を実施しており、密度勾配の空間スケールが波動の波長スケール程度となる場合に高い変換効率を示すことなどの成果を得ている[5]。また、地球磁気圏プラズマポーズ近傍での直接観測結果に基づいて初期条件を設定、計算機実験を実施する試みも行っている。ここでは特に、顕著なモード変換過程が観測されたイベントを取り上げ、議論する。

3.　シミュレーション結果と観測との比較

図３に、あけぼの衛星搭載のプラズマ波動計測器PWS [7]による、プラズマポーズ近傍でのモード変換過程によるL-0モード発生の様相をとらえた波動観測結果の一例と、観測結果に基づく初期条件下での計算機実験の結果を示す。まず観測された波動スペクトルの解析から、高域混成共鳴周波数（fpとfcの自乗和の平方根で与えられる）を読み取り、その場の磁場強度の値を用いることで、その場のプラズマ密度を計算することができる。その結果から、発生領域でのプラズマ密度勾配の存在と、その空間スケールを定量的に同定する。この密度勾配を初期条件として計算機実験を実施、観測結果と比較することにより、変換効率の定量的な評価と、発生過程の詳細な物理過程を議論した。図３にその結果を示す。この計算機実験では、Region-A及びRegion-Bでのfp/fcの値をそれぞれ2.029、2.73とした。計算機実験の初期段階で、Region-A内にUpper-Hybridモードの波動を注入、Region-Bとの境界で生じるモード変換過程を再現する。注入するUpper-Hybridモードの波動の周波数および波面法線ベクトルについては、あけぼの衛星により観測されたUpper-Hybridモードの波動の電場各成分を、理論的に求められるプラズマ波動の分散関係と比較することで決定した。

シミュレーション結果では、注入したUpper-Hybridモードの波動が伝播し、密度勾配領域においてL-0モード波動に変換される様相が再現されている。波動のモードの決定は、それぞれの波動の波動特性や波数スペクトルを解析することで同定している。計算機実験により再現されたL-0モード波動の電場各成分を解析すると、あけぼの衛星で観測されているL-0モードの波動の値と一致することが示された。

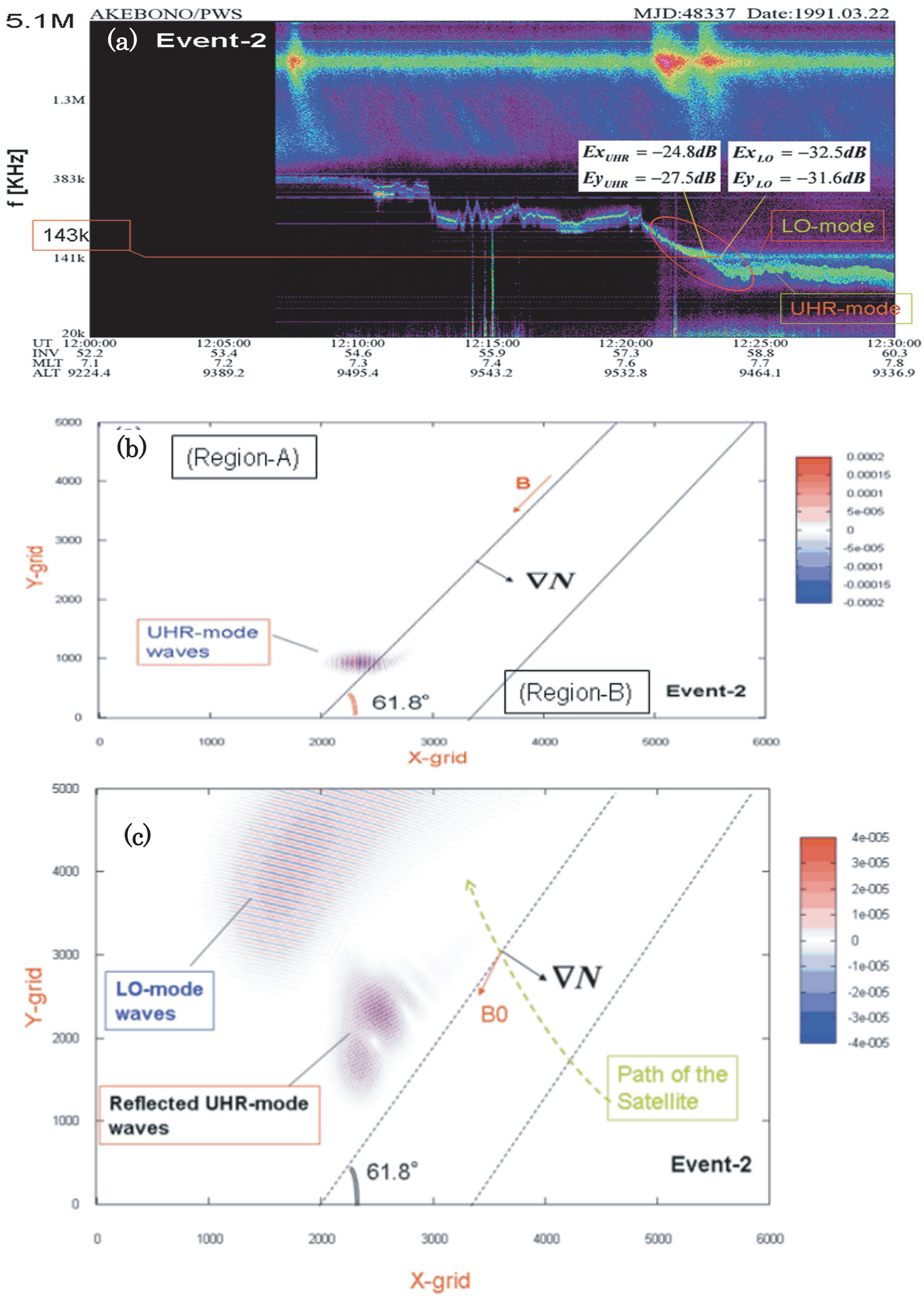


図３　(a) あけぼの衛星によるプラズマポーズ近傍での波動観測結果。
(b、c) 観測結果に基づいてプラズマ密度の空間勾配を設定したシミュレーション結果。印加した Upper-Hybrid モードの波動がシミュレーション空間中を伝播、密度勾配の存在する領域でのモード変換により、L-O モードの波動が生成される[5]。

		Comparison with dispersion relation Wave normal angle ($\theta°$) in Region-A	$(E_x/E_y)_{Dis.}$	$(E_x/E_y)_{Obs.}$	$(E_x/E_y)_{Sim.}$	Amplitude comparison $(E_{x\,Lo}/E_{x\,UHR})_{Obs.}$	$(E_{x\,Lo}/E_{x\,UHR})_{Sim.}$	$(E_{y\,Lo}/E_{y\,UHR})_{Obs.}$	$(E_{y\,Lo}/E_{y\,UHR})_{Sim.}$
Event-1	UHR	55	0.65	0.63	0.64	0.60	0.62	0.36	0.38
	LO	5.5	1.036	1.035	1.034				
Event-2	UHR	61.8	1.36	1.36	1.37	0.42	0.41	0.62	0.61
	LO	7.2	0.9	0.9	0.89				
Event-3	UHR	71	1.63	1.62	1.64	0.82	0.83	0.69	0.67
	LO	10	1.91	1.9	1.92				

表1: シミュレーション結果のサマリー。図 3 は Event-2 にあたる。(左)各イベントでの Upper-Hybrid モードおよび L-0 モード波動の波面法線ベクトルの方向ならびに波動振幅についての解析結果(添字 Obs.)と、シミュレーション結果(添字 Sim.)との比較。(右) Upper-Hybrid モードと L-0 モード波動の波動振幅に関する、シミュレーション結果と観測結果との比較。いずれの結果でも観測結果にほぼ一致した値となっている。

4.　まとめ

本研究課題では、地球磁気圏のプラズマポーズ近傍において生じるモード変換過程について、空間2次元の電子流体コードを用いた計算機実験を実施、Upper-Hybrid モードの波動から L-0 モードの波動への変換過程の効率に関する定量的な評価を行った。あけぼの衛星による観測結果を用いて、実際のプラズマポーズにおけるプラズマ密度の空間勾配を求め、それを初期値として実施した計算機実験結果との比較から、観測された L-0 モードの波動がモード変換過程により発生したものであることを定量的に示した。これまでに図3と同様の解析を、あけぼの衛星によるプラズマポーズ周辺で観測された2例のイベントに関して実施し、いずれの例でも観測結果を十分説明し得るシミュレーション結果が得られている。計算結果のサマリーを表1に示す。各イベントでの変換効率および生成した L-0 モードの波動の伝播角に関する考察と共に学術論文として報告している[6]。本研究の結果からは、プラズマポーズ近傍でのプラズマ密度の空間勾配が、プラズマ波動の波長スケール程度である場合には、モード変換の効率が非常に高くなることが示されている[5]。この結果は、地球を含む惑星からのモード変換による電磁波放射メカニズムの理解には、放射源近傍での詳細なプラズマ観測の必要性を指摘するものである[8]。地球内部磁気圏に関しては、2014年度の打ち上げを目指す ERG 衛星計画の準備が進められている。また、2020年代の実現を目指した木星磁気圏探査計画も検討されている。これらの探査計画による惑星内部磁気圏のプラズマ環境の詳細観測結果と、本研究による計算機実験結果との比較から、モード変換過程による惑星電波放射メカニズムの本質的な理解が進むと期待される。

謝辞

本研究は東北大学サイバーサイエンスセンターとの平成22年度共同研究課題「惑星磁気圏における電磁プラズマ不安定についての計算機実験」による成果であり、スーパーコンピュータを利用することで実現できた課題である。開発されたシミュレーションコードについては、同センターとの共同研究を通じて有益な助言と多大な協力をいただき、演算性能の向上において大きな効果を得ることができた。

参考文献

[1] Oya, H. and K. Tsuruda, “Introduction to the Akebono (EXOS-D) satellite observations”, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 367-370, 1990.

[2] Oya, H., “Conversion of electrostatic plasma waves into electromagnetic waves: numerical calculation of the dispersion relation for all wavelengths”, *Radio Sci.*, **22**, 1131-1141, 1971.

[3] Oya, H., “Origin of Jovian decameter wave emissions-Conversion from the electron cyclotron plasma wave to the ordinary mode electromagnetic wave”, *Planet. Space Sci.*, **22**, 687-708, 1974.

[4] 加藤雄人, 小野高幸, 飯島雅英, 「不均質媒質中でのプラズマ波動の伝播についての計算機実験」, *SENAC*, **37**(1), 13-19, 2004.

[5] Kalaee, M. J., T. Ono, Y. Katoh, M. Iizima, and Y. Nishimura, “Simulation of mode conversion process from UHR-mode wave to LO-mode wave in an inhomogeneous plasma with different wave normal angles”, *Earth Planets Space*, **61**, 1243-1254, 2009.

[6] Kalaee, M. J., Y. Katoh, A. Kumamoto, T. Ono, and Y. Nishimura, “Simulation of mode conversion process from upper-hybrid waves to LO-mode waves in the vicinity of the plasmapause”, *Ann. Geophys.*, **28**, 1289-1297, 2010.

[7] Oya, H., A. Morioka, K. Kobayashi, M. Iizima, T. Ono, H. Miyaoka, T. Okada, and T. Obara, “Plasma wave observation and stimulation experiments (PWS) using Akebono (EXOS-D) satellite – Instrumentation and initial results including discovery of the high altitude equatorial plasma turbulence”, *J. Geomagn. Geoelectr.*, **42**, 411-442, 1990.

[8] Kalaee, M. J., Study of the Mode Conversion Process of the Planetary Radio Emissions from Inner Magnetosphere, Ph. D. thesis, Tohoku Univ., 2009.

［共同研究成果］

全球化学輸送モデルを用いた二酸化炭素のデータ同化実験

横尾好朗、岩崎俊樹
東北大学理学研究科

気候変動の視点から二酸化炭素の収支や濃度分布を知ることは大変重要である。これまで、濃度の観測は主に地表面における連続観測やフラスコサンプリングといったものが主流であった。さらに、近年のリモートセンシング技術の発達によって、衛星を用いた観測も盛んに行なわれており、これらの様々な観測データによって徐々に二酸化炭素の収支や濃度分布が明らかになってきている。しかし、それらの観測範囲は限定的なため、全球的な分布を知るのは難しい。一方、数値モデルの分野では、データ同化手法が近年急速に進歩している。データ同化は、数値モデルによる予測結果に観測データ情報を取り込み、実況値を推定する技術である。これにより、観測のない範囲にも観測情報が反映され、広い範囲において現実的な二酸化炭素濃度分布を推定できるようになる。本稿では、数値モデルに衛星観測データを同化させた時の影響を調べた。その結果、温室効果ガス観測衛星「GOSAT」により得られた観測データを用いた場合、地上観測データを同化させた場合に比べ広範囲を修正した。また、その修正範囲は地上観測の存在しない地域にも及んでいたことから、データ同化における GOSAT 観測データの有意性を確認できた。

1　はじめに

私たちは、様々な環境問題に直面している。特に地球温暖化問題については、気候変動や気象現象などに与える影響が大きいことから、近年大きく注目されるようになり、温暖化の原因となる二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの収支が盛んに研究されるようになった[1]。

二酸化炭素収支の研究は従来、地表面における連続観測やフラスコサンプリングを用いたものが主流であり、人為的な排出量と生物由来の排出･吸収量、海洋由来の排出･吸収量の積算により二酸化炭素収支を決定していた。これらは高精度の観測が可能であるが、地上観測は一部の地域に限定され、空間代表性などの問題があった。そこで、2009 年 1 月 23 日に温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）が打ち上げられた。GOSAT 観測は精度こそ従来の観測に少し劣るものの、代表性の良い観測が広い範囲で可能であり、新たな二酸化炭素観測手法として注目されている。

一方、大気大循環モデルや化学輸送モデルなどに代表される各種数値モデルを用いた研究も盛んに行なわれ、数値モデルの精度も向上している。このような中で、数値モデルの計算に観測情報を付加し、より現実的なシミュレーションを可能にするデータ同化技術が注目されている。データ同化実験では、予測された濃度分布が観測データと一致するように地表面フラックスを修正する。この手続きを繰り返すことによって、観測データのない地域の濃度や地表面フラックスを精度よく推定し、全球的な二酸化炭素収支を解明する。

本研究では、データ同化手法として LETKF(Local Ensemble Transform Kalman Filter)を用いる[2]。GOSAT 観測データを数値モデルに同化させ、二酸化炭素濃度分布の再現実験を行う。データ同化実験では、使用する観測データの精度や量が同化結果に如実に現れる[3]。また、先行研究によれば、各種観測データは単体で同化させるよりも各プラットフォームの観測データを組み合わせて使用することにより、空間的に情報を補い、観測データの影響をより効果的に反映させることができることが確認された[4]。これらを受け、本研究では、各観測データ、特に GOSAT 観測データが同化結果に与える影響について検証し、GOSAT 観測データの品質評価を行なう。また、それらの結果を基に、使用した LETKF のシステムについても評価を行なっていく。データ同化の過程で、メンバー数 24 のアンサンブル計算を行なう必要がある。この計算に約 50GByte の物理メモリを要するた

め、研究室のワークステーションでは計算できない。このため、サイバーサイエンスセンターの並列コンピューターを用い、一つのアンサンブル計算に対して 1cpu を割り当て計算させた。

２ 実験の概要

2.1 数値モデルについて

本研究で用いる数値モデルは気象研究所で開発された大気大循環−化学輸送結合モデル MJ98-CDTM である[3]。このモデルは大気の循環場と二酸化炭素の拡散を分離して計算しており、大気大循環モデルである MJ98 で循環場を、化学輸送モデルである CDTM で拡散を表している。より現実的な大気場を再現するため、下記の気象の三次元分布に対する再解析データである JRA25 の水平風をナッジングした[5]。 解像度は鉛直 30 層（σ=1~0.1）、水平 2.8° x2.8° である。二酸化炭素濃度の初期値として気象庁による二酸化炭素解析情報を使用していた。また、二酸化炭素の地表面フラックスの第一推定値には、気象研究所で使用されている二酸化炭素地表面フラックスの気候値を使用し、輸送モデルの下部境界条件とした。

2.2 使用したデータ同化手法

データ同化手法の一つである Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF)[4]を使用した。LETKF は Ensemble Kalman Filter (EnKF)をもとに開発されたデータ同化技術である。EnKF は予報·カルマンゲインの計算·解析の３つのプロセスの繰り返しで行なわれる。詳細な説明は省略するが、主要なプロセスは以下に示す通りである。

まず、線形モデル M を用い、現在の状態 x_i^f を一つ前の時刻の状態 x_{i-1}^a で表す。

$$x_i^f = Mx_{i-1}^a \tag{1}$$

a は解析、 f は予報と言う意味である。予報および解析には誤差が含まれると仮定すると、誤差共分散行列 P は

$$P \equiv x(x^T) \tag{2}$$

と表すことができる。(1)を利用すれば、

$$P_i^f = MP_{i-1}^a M^T + Q \tag{3}$$

と表すことができる。ここで M^T はアジョイントモデルと呼ばれるものであり、Q はモデル誤差の共分散行列である。

解析プロセスでは、予報を観測値 y^0 で修正する。

$$x_i^a = x_i^f + K_i(y_i^0 - Hx_i^f) \tag{4}$$

ここで、K は観測値をどの程度解析値に反映させるかを決定する線形変換であり、カルマンゲイン行列と呼ばれる。 H は観測演算子と呼ばれ、観測データのモデル変数への線形写像である。解析値の推定誤差は観測値との比較によって小さくなり、

$$P_i^a = [I - K_i H]P_i^f \tag{5}$$

となる。 I は単位行列である。観測がモデルの全格子点上の全変数について得られることは通常あり得ないため、観測データの次元は、モデル変数の次元と一致しない。カルマンゲイン K は

$$K_i = P_i^f H^T [HP_i^f H^T + R]^{-1} \tag{6}$$

で表される。ここでRは観測誤差共分散行列である。原理的にはこれで計算可能であるが、現実的には(3)で共分散を求める際にアジョイントを計算するのは大変である。そこで、誤差共分散はアンサンブル予報を用いて次の様に表す。

$$P \approx \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}\delta x^{(k)}\left(\delta x^{(k)}\right)^{T} \tag{7}$$

nはサンプル数、kはメンバーのサンプルナンバーであり、$\delta x^{(k)}$は各メンバーにおける誤差ベクトルである。ここで誤差共分散行列Pは非負の実対象行列であるので、実行列の平方根Eを持つ。

$$P = E(E)^{T} \tag{8}$$

つまり、Eは、

$$E = \frac{1}{\sqrt{n-1}}\left[\delta x^{(1)}\cdots\delta x^{(n)}\right] \tag{9}$$

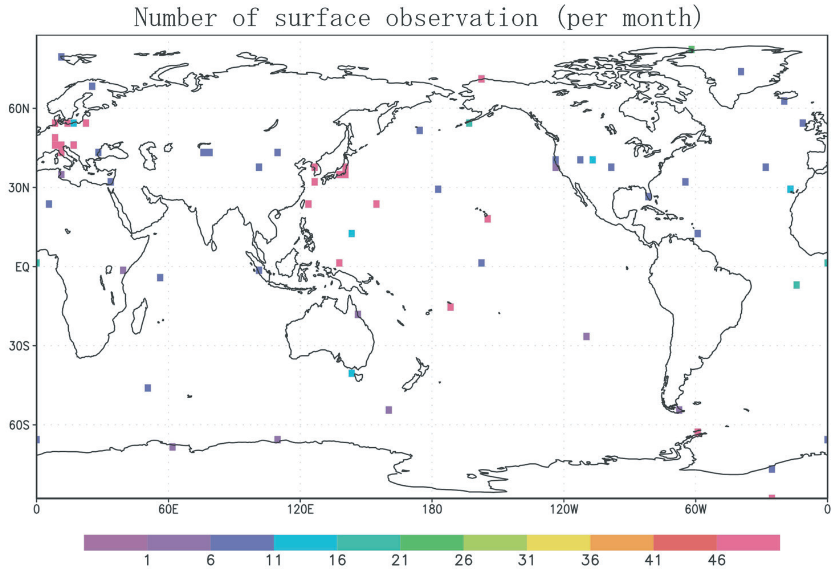
となる。あらゆる誤差を独立に表現するためには、変数の数だけメンバー数nが必要である。この時、Eは一辺nの正方行列となる。しかし、実際の数値モデルにおいて、nは 100 万を優に超えるので、この計算は実際には不可能である。一般に予報誤差は成長モードに支配される。Pを固有値分解

$$P = SDS^{T} \tag{10}$$

を行なうと、多くの固有値が０に十分近くなるため無視することができる。Dは固有値を各成分に持つ対角行列であり、Sは各固有値に対する固有ベクトルからなる直行行列である。このため、少ないアンサンブルメンバー数でもPをよく表すことが可能になる。本実験ではアンサンブルメンバー数を 24 とした。また、LETKF では、観測データの局所化の距離を設定することが可能である。この距離とは、一つの観測データの影響をどの範囲まで有効にするかを決定するものである。本実験では局所化の距離を 1000km としている。

2.3 データ同化に使用する観測データについて

本実験で使用する観測データは、連続観測やフラスコサンプリングに代表される地上観測と観測衛星 GOSAT による衛星観測の２種類を用いている[2]。それぞれの観測範囲については図１に示す。図１を見ると、地上観測は特に日本やヨーロッパなどに集中しており、とても限定的である。一方 GOSAT 観測では、全球的に観測点が存在し、地上観測では観測されていないアフリカや南アメリカにも観測点が存在することがわかる。



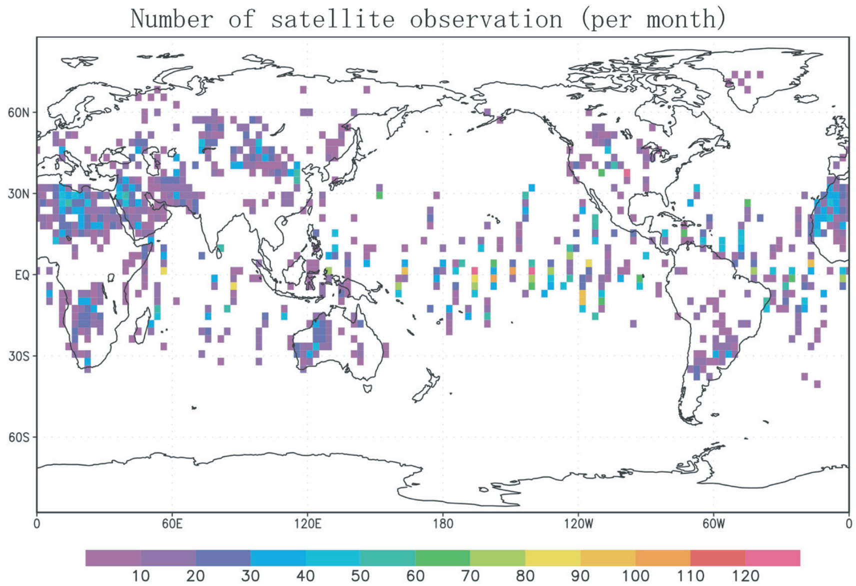


図１：各観測データの観測位置と観測個数。上部は地上観測、下部は GOSAT 観測。

３ 実験結果

3.1 各観測データが同化結果に与える影響

データ同化の結果を見る前に同化前のモデルの計算結果について説明する。図２はデータ同化を行なっていない数値モデルの 7 月の計算結果である。北半球は夏期であり、植物活動が活発なため、北半球の中高緯度地域では周囲に比べて二酸化炭素濃度が低くなっているが、人間活動の活発な地域（日本･アメリカ･ヨーロッパの工業地帯）では人間活動の影響により周囲よりも高くなっているのが特徴である。

図３は地上観測データのみを同化させた時に得られた二酸化炭素濃度の地表面分布と同化前と比較した時の変化量である。これらを見ると、観測データが存在するヨーロッパ周辺と北アメリカ大陸、日本周辺で大きな修正が加えられたことがわかる。特にカナダとアメリカではその効果が大きく、20ppm 以上の変化が確認できた。しかし、修正範囲としては観測地点周辺に限られ、広範囲の修正は期待できない。

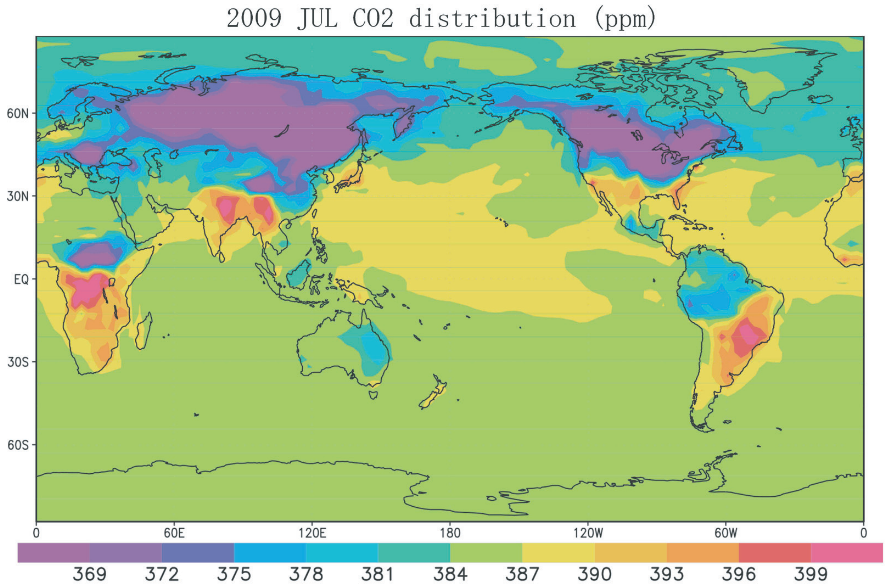


図２：2009 年 7 月におけるデータ同化前の二酸化炭素濃度の分布図。

図４は GOSAT 観測データのみを同化させた時に得られた二酸化炭素濃度の地表面分布とその変化量である。主に北半球の中高緯度で大きく修正されていることがわかる。また、地上観測の存在しないアフリカでも同化の効果が確認できる。修正量に関しても図３の地上観測データを同化させた場合とおおむね一致する。

地上観測データを用いた同化実験と衛星観測データを用いた同化実験を比較すると、修正範囲に大きな差が見られる。これはそれぞれの観測範囲を大きく反映するためである。地上観測では連続性の高いデータが得られるため、大きな修正が期待できるが、観測範囲が限定的であるため、広い範囲での修正は期待できない。一方、衛星観測は一度に広範囲での観測が可能なため、広い範囲での修正が期待できる。この二つを併用して同化させた結果を図５に示す。異なるプラットフォームの観測データを組み合わせて同化させることによって、空間的に補完し合い、単独で使用する場合よりも強く修正されることが期待される。図５では、図３・４に比べ全球的に大きく修正されているのがわかる。特にユーラシア大陸と北アメリカ大陸ではその影響は大きい。データ同化の影響を詳細に分析するため、

$$A = \frac{\sum \sqrt{(Flux_{(original)} - Flux_{(D.A)})^2}}{Num} \tag{11}$$

という値を導入する。この値 A はデータ同化により、使用した二酸化炭素フラックスがどの程度修正されたかを表すものである。つまり、データ同化の影響が強ければ値は大きくなる。表１に地上観測データのみ同化･衛星観測データのみ同化･両方を同化させた場合それぞれの A の値を示す。

表１：地上観測データと衛星観測データを同化した際の A の値

	JUL	OCT
Surface + GOSAT	2.74	2.10
Only surface	1.90	1.17
Only GOSAT	1.34	1.72

表 １ を見ると、７月･１０月どちらにおいても観測データを組み合わせて使用した結果の方が大きくなっている。これらより、異なるプラットフォームを使用することの重要性が確認できる。また、地上観測データに衛星観測データを組み合わせることで、修正量と範囲が大きく変化した。ここからデータ同化実験における衛星観測データの有意性が認められる。従来では観測することが難しかった地域において、衛星観測の果たす役割は非常に重要である。

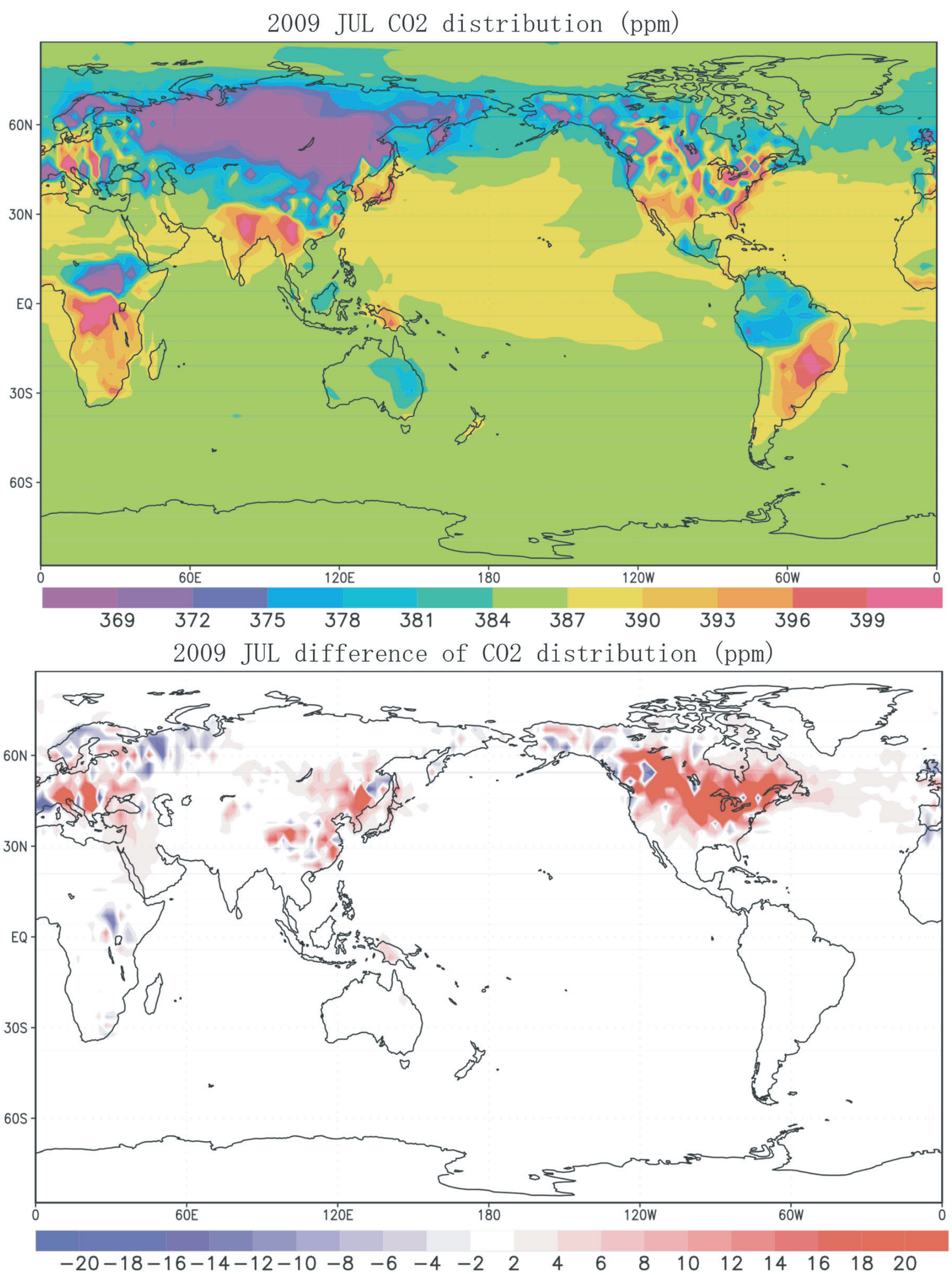
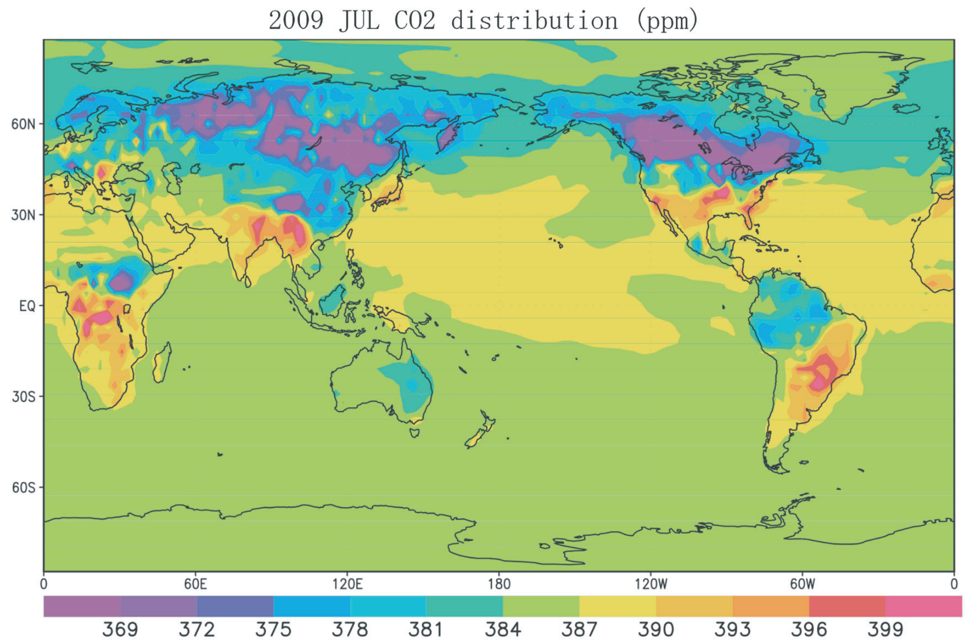


図３：（上部）２００９年７月における地上観測データのみを同化した場合の二酸化炭素濃度の分布図。（下部）データ同化後の二酸化炭素濃度分布と同化前の二酸化炭素濃度分布の差を取ったもの。



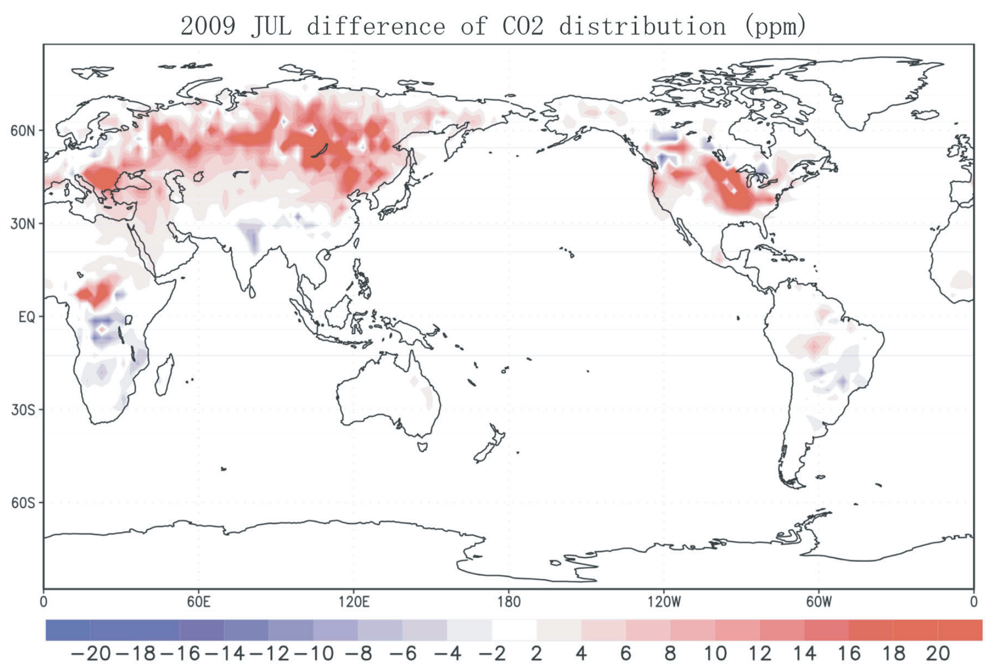


図４：（上部）２００９年７月における衛星観測データのみを同化した場合の二酸化炭素濃度の分布図。（下部）データ同化後の二酸化炭素濃度分布と同化前の二酸化炭素濃度分布の差を取ったもの。

3.2 データ同化システムの二酸化炭素フラックス依存性

十分な観測データが存在する同化実験（理想的な同化実験）では、第一推定値がどの様な値であっても観測データによって修正され、ある一定の値に収束するため、使用しているフラックスの気候値に依存しないはずである。そこで本項では、２種類の二酸化炭素フラックスを使用し、データ同化実験におけるフラックス依存性を検証した。２種類のフラ

ックスのうち、一つは気象研究所で使用されているフラックスであり、もう一つは海洋開発研究機構で使用されているフラックスである。本実験では前者をフラックス A、後者をフラックスＢとし、図５に示す。

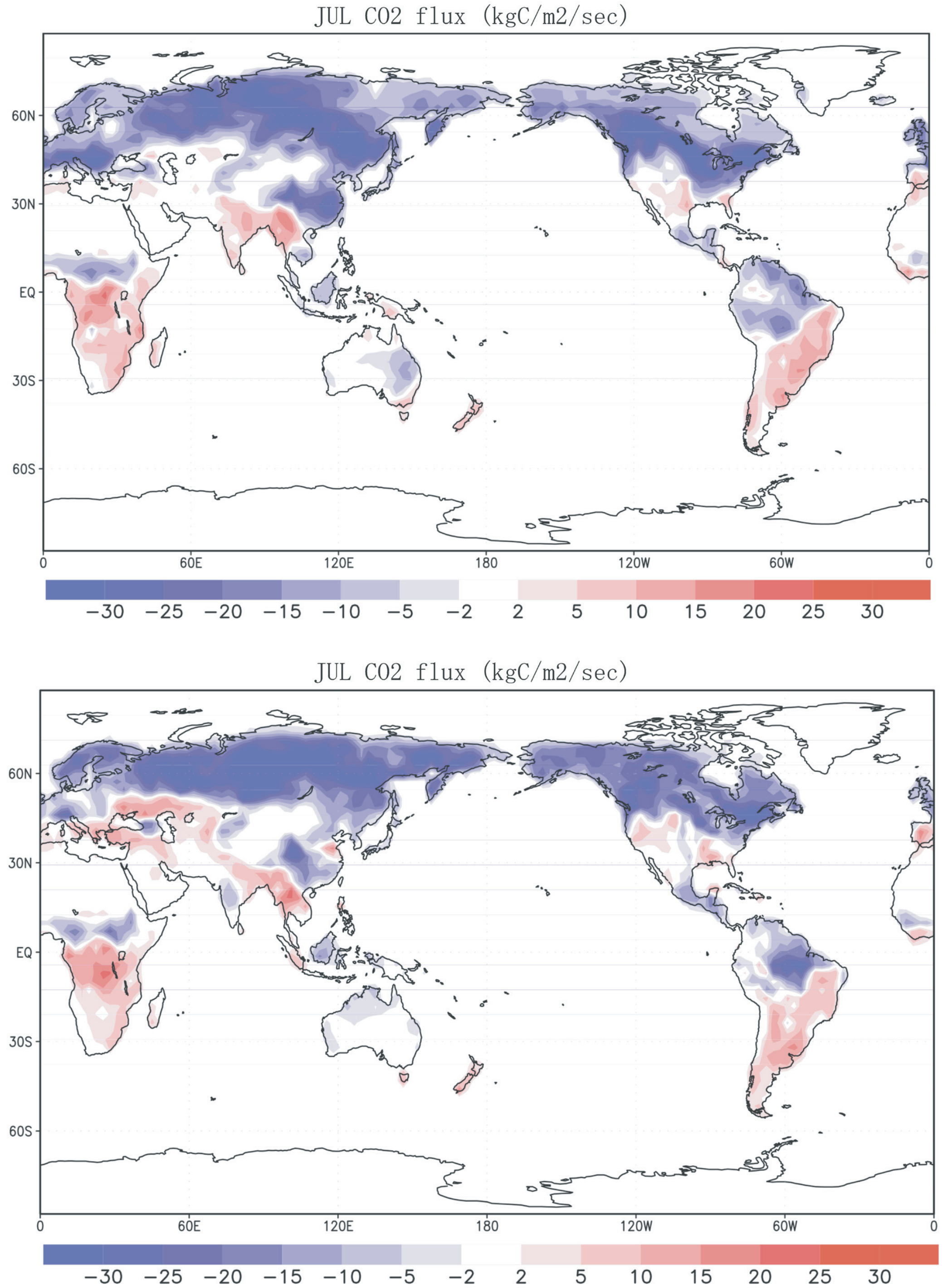
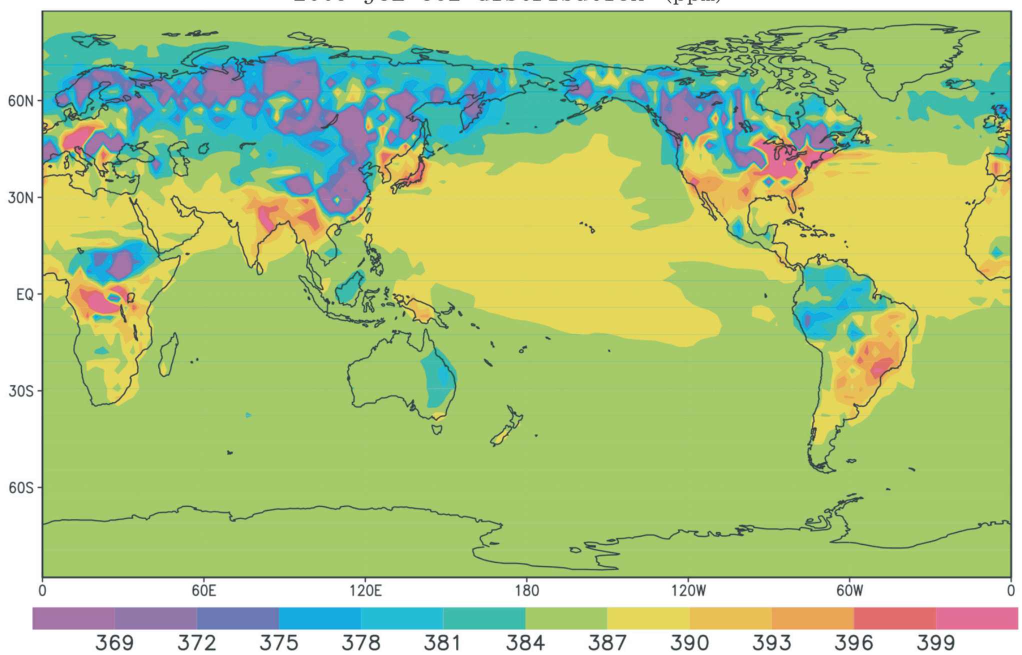


図５：本実験で使用する二酸化炭素地表面フラックス７月の気候値。上部は気象研究所で使用されているフラックス（フラックス A）であり、下部は JAMSTEC で使用されているフラックス（フラックスＢ）である。

図６は上記のフラックスを用いて、GOSAT 観測データのみを同化した時の地表面の二酸化炭素分布であり、図７はデータ同化により修正された後の二酸化炭素フラックスである。

2009 JUL CO2 distribution (ppm)



2009 JUL CO2 distribution (ppm)

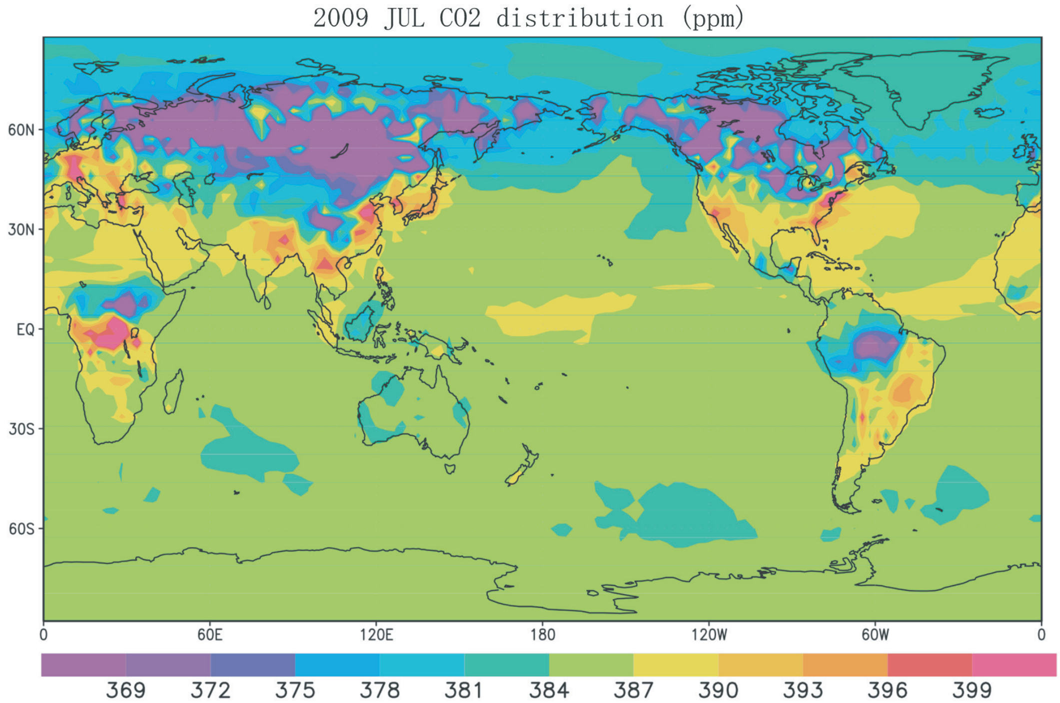


図６：フラックス A、フラックス B を用いて衛星観測データのみを同化した際に得られた二酸化炭素濃度分布の図。上部はフラックス A を使用したものであり、下部はフラックス B を使用したものである。

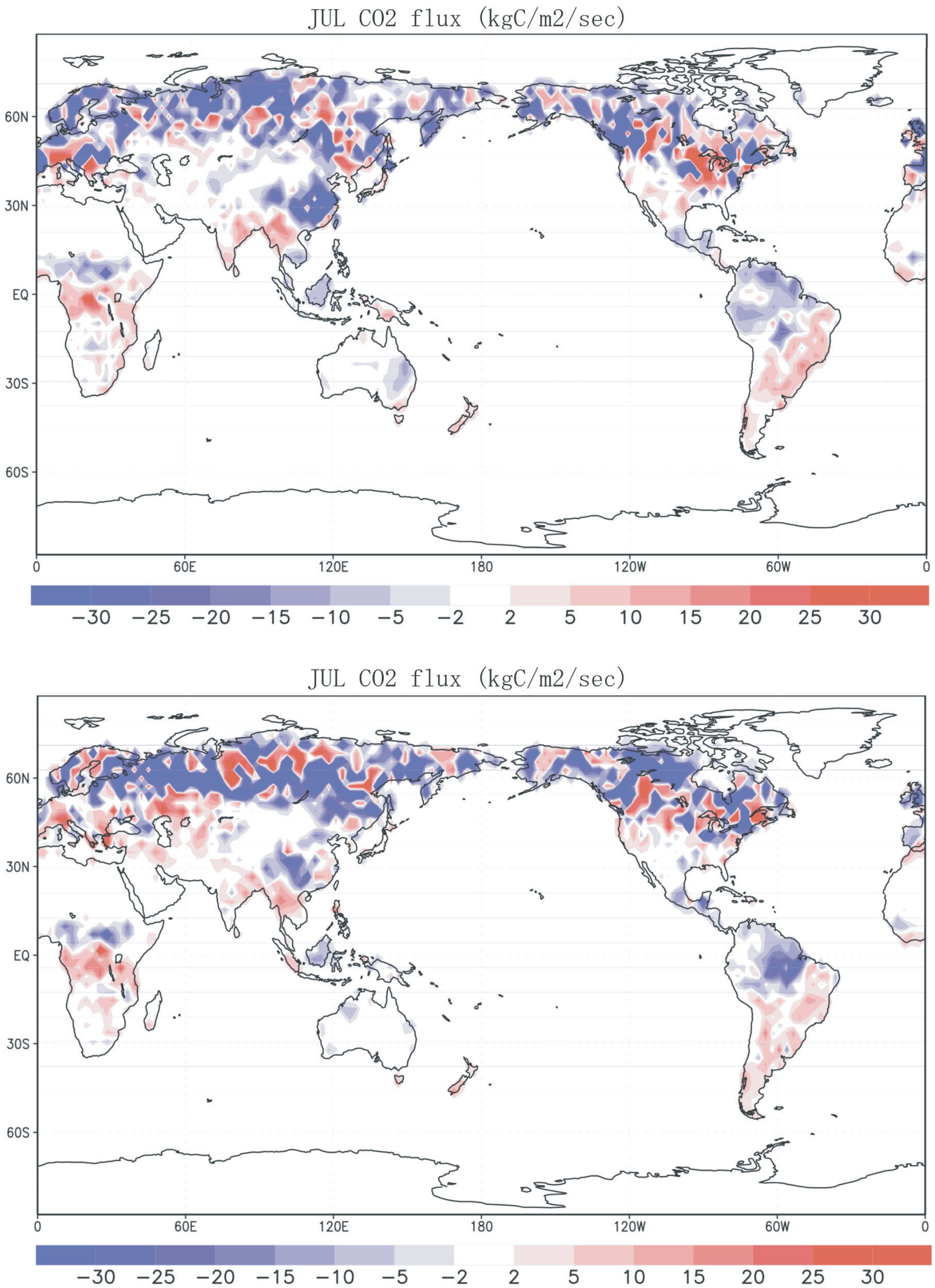


図７：データ同化後に修正された二酸化炭素地表面フラックス７月の気候値。上部は修正後のフラックスA、下部は修正後のフラックスBである。

図５を見る限り、二つのフラックスに大きな差はないが、中東などの一部の地域では差が見られる。これらの違いが影響するため、図６の二酸化炭素分布にも差が見られる。また、同化後に得られるフラックスも大きく異なっており、本システムでは、使用するフラックスに大きく依存しているように思われる。さらに詳しく依存性を検証するために、

$$B = \frac{\sum \sqrt{(Flux_{(MRI)} - Flux_{(JAMSTEC)})^2}}{Num} \tag{12}$$

という値を導入する。この値は二つのフラックスがどれだけ似ているかを表す値となっている。同化前と同化後のフラックスにおいてこの値を計算し比較する。理想的な同化実験であれば、同化前の値に比べて同化後の値の方が小さくなる。表２に７月と１０月における B の値を示す。どちらの月も同化後の値が同化前に比べ２倍以上になっているのがわかる。これより、本同化システムは使用するフラックスに大きく依存していることが明らかになった。詳しい理由はまだわからないが、何らかの非線形の効果が働いている可能性が高い。今後、その原因を解明するとともに、より安定したデータ同化システムの構築を目指していきたい。

表２：データ同化前と後における７月と１０月のＢの値

	JUL	OCT
Before D.A	1.59	1.27
After D.A	3.72	2.82

４ まとめ

地上観測、衛星観測により得られた二酸化炭素濃度データを用いてデータ同化実験を行なった。地上および衛星観測データを用いた同化実験では、地表面の二酸化炭素濃度分布をより現実的な値に修正することができた。特に衛星観測データを使用した場合は、広範囲にわたり大きく修正することが可能である。また、異なるプラットフォームの観測データを組み合わせて使用することで、より効果的に二酸化炭素濃度と地表面フラックスを修正できることが確認できた。これらより、現在使用可能な GOSAT データはデータ同化実験において大変有意義なものであることがわかる。しかし、その詳細な影響については詳しく理解されていないことから、更なる検証が必要である。現在のデータ同化システムでは、使用する地表面フラックスに大きく依存していることもわかった。リモートセンシング技術の発展により観測範囲や観測数は増加したものの、理想的なデータ同化実験を行なうにはまだ不十分である。次世代の衛星観測技術に期待すると共に、観測情報を活かせる様な同化システム構築し、二酸化炭素のフラックス推定や実況監視に貢献していきたい。

５ 謝辞

本研究を進めるにあたり、眞木貴史氏（気象研究所）と宮崎和幸氏（海洋研究開発機機構、オランダ王立気象局）に有益なご指導とご協力を頂いた。ここに謝意を表する。また東北大学サイバーサイエンスセンターの並列コンピューターを利用することにより実現することができた。

６ 参考文献

[1] IPCC,2007,Climate Change 2007; The Physical Science Basis.
[2] Miyoshi et al, 2007, Local ensemble transform Kalman filtering with AGCM at T159/L48 resolution : Mon.Wea.Rev.,vol 135, 3841-3861.
[3] Maki et al, 2010, New technique to analysis global distributions of CO2 concentrations and fluxes from non-processed observational data : Tellus B,62B,797-809
[4] Miyazaki et al, 2011, CO2 fluxes estimated with satellite, aircraft, and surface observations an ensemble-based 4D data assimilation system : JOURNAL OF

GEOPHYSICAL RESARCH
[5] Ogi et al, 2007, The JRA-25 Reanalysis : J. Metor. SOC. Japan, 85, 369-432.

［共同研究成果］

マルチビーズモデルを用いたトムズ効果に関する数値シミュレーション

歌田 裕太*　　岩本 薫*　　村田 章*
*東京農工大学　大学院工学府　機械システム工学専攻

1.　緒言

流体中に微量の直鎖状高分子やファイバ等の線状の添加剤を混入することにより，乱流域において摩擦抵抗が著しく低下する[1]．過去の実験や数値計算により，線状添加剤の長さを長くするほど摩擦抵抗低減効果が大きくなることが示されている．しかし，実験では高分子やマイクロファイバ等の添加剤の詳細な挙動の計測や観測が困難である．そこで添加剤を多数の離散要素モデルで近似しニュートン流体に加えた平行平板間乱流の直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation, DNS) が行われている[2][3][4]．この方法は要素のミクロな挙動と乱流場を分けて解析できる．この時用いた離散要素モデルでは，2 球の間を質量が無視され形状が流れ場に与える影響を考慮しないばねとダンパで接続している．そのため，2 球モデルを用いて要素の長さが摩擦抵抗低減効果に及ぼす影響を検討することは適切ではない．また，線状添加剤の形状の違いや変形が摩擦抵抗低減効果に与える影響とそのメカニズムは解明されていない．より効率的に大きな摩擦抵抗低減効果を得るため，異なる要素モデルを用いた計算が必要である．

本研究では，離散要素モデルとして多数の球をばねとダンパで接続したマルチビーズモデルをニュートン流体中に混入し，流れ場の DNS を行って解き，線状添加剤の長さの違いが乱流摩擦抵抗に与える影響を解明する．

2.　数値計算法

2.1　マルチビーズモデル

本研究では，ニュートン流体中に微量 (約 200ppm 程度) の高分子を添加した際のチャネル乱流 DNS を行う．図 1 に示すマルチビーズモデルを用いて高分子を再現する．高分子は流体中の微小な要素とみなすことができ，高分子間の絡み合いや干渉等の相互作用は発生確率が低いため無視できる．高分子はたくさんのモノマーと呼ばれる構造体が結合したものであり，非常に多くの自由度を持つ．数百の原子からなる主鎖の一部をビーズによって置き換え，そのビーズの中心に質量を集中させる．高分子内の駆動力として働く Brown 運動はビーズ間のばねにより表される．またビーズ間のばねにかかる荷重と変位の関係に非線形性を持たせ，ばねの長さに上限を設定する．高分子の粘性はダンパによって表す．高分子が溶媒中を動く際には抵抗力が働く．この抗力は要素の個々のビーズが球であると仮定すると Stokes の法則が適用できる．流体とマルチビーズモデルの相互作用は，要素モデルが流体から受ける力と要素モデルが流体に及ぼす力を考慮し数値計算を行う．

マルチビーズモデルの運動方程式を以下に示す．

1 個目のビーズ ($e=1$)

$$m\frac{dv_{[e],i}}{dt}=f_{[e],i}-\frac{k\xi_{[e]}}{1-\left(\xi_{[e]}/\xi_{\max}\right)^2}\frac{x_{[e]}-x_{[e+1],i}}{l_{[e]}}-\eta\left(v_{[e],i}-v_{[e+1],i}\right) \tag{1}$$

2～N_B−1 個目のビーズ ($e=2,3,\cdots,N_B-1$)

$$m\frac{dv_{[e],i}}{dt}=f_{[e],i}-\frac{k\xi_{[e-1]}}{1-\left(\xi_{[e-1]}/\xi_{\max}\right)^2}\frac{x_{[e]}-x_{[e-1],i}}{l_{[e-1]}}-\frac{k\xi_{[e]}}{1-\left(\xi_{[e]}/\xi_{\max}\right)^2}\frac{x_{[e]}-x_{[e+1],i}}{l_{[e]}}$$
$$-\eta\left(v_{[e-1],i}+2v_{[e],i}-v_{[e+1],i}\right) \tag{2}$$

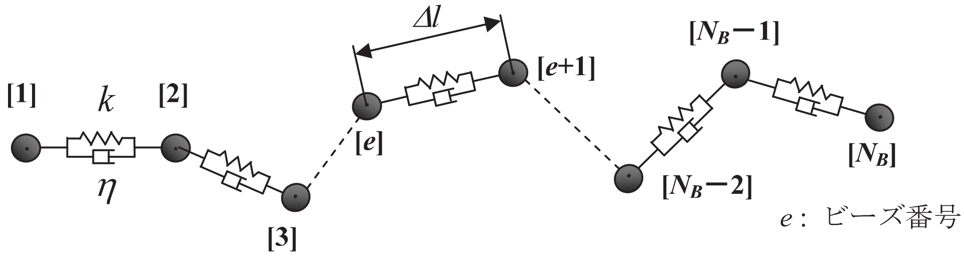


図 1　マルチビーズモデル.

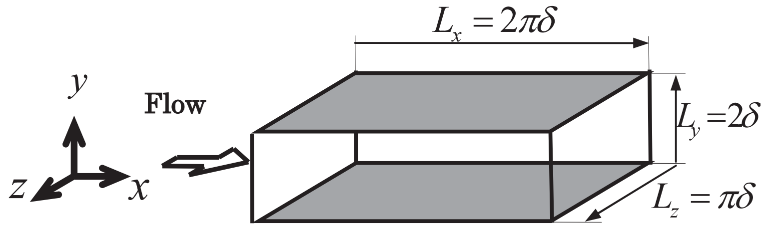


図 2　計算領域.

N_B個目のビーズ ($e = N_B$)

$$m\frac{dv_{[e],i}}{dt} = f_{[e],i} - \frac{k\xi_{[e-1]}}{1-\left(\xi_{[e-1]}/\xi_{\max}\right)^2}\frac{x_{[e]} - x_{[e-1],i}}{l_{[e-1]}} - \eta\left(v_{[e],i} - v_{[e-1],i}\right) \tag{3}$$

ここで，v は球の速度，m は球の質量， $\xi = l - l_0/\left(N_B - 1\right)$ はビーズ間の自然長 $l_0/\left(N_B - 1\right)$ からの伸び， $\xi_{\max} = l_{\max} - l_0/\left(N_B - 1\right)$ はビーズ間の最大伸びである．また，ばねの長さに上限を持たせるために非線形ばね (Finite Extensive Non-linear Elastic)[5] を用いている．球が流体から受ける力 f は Stokes 抵抗として近似される．球の半径を r，粘性係数 μ とするとそれぞれの球に流体から作用する力は以下の式となる．

$$f_{[e],i} = 6\pi\mu r\left(u_{[e],i} - v_{[e],i}\right) \tag{4}$$

u は球の中心位置における流体の速度である．

マルチビーズモデルのパラメータは，全体の自然長 L_{T0} [m]，ビーズ数 N_B [-]，ビーズ間隔の自然長 Δl_0 [m]，ばね係数 k [N/m]，ダンパ係数 η [N/m^2]，ビーズ半径 r [m]である．ビーズ数の違いを評価するためマルチビーズモデルの最大伸び b を規定とし，マルチビーズモデルの時定数 λ を一定とした．N_B 球モデルの時定数は，以下の式で決定される[6].

$$b_{N_B} = \frac{b}{\left(N_B - 1\right)} \tag{5}$$

$$\lambda_{N_B} = \frac{6\lambda}{N_B\left(N_B + 1\right)} \tag{6}$$

式 (5)，(6) より，ばね定数 k，球の半径 r は以下の関係において決定される．

$$k_{N_B} = \left(N_B - 1\right)k \tag{7}$$

$$r_{N_B} = \frac{6\left(N_B - 1\right)}{N_B\left(N_B + 1\right)}r \tag{8}$$

表 1　SX-9 利用時の Proginf.

CPU time [h : m : s]	9996 : 05 : 13	Memory Size [MB]	11328
MOPS	8025.02	MOPS (concurrent)	121548.65
MFLOPS	1612.71	MFLOPS (concurrent)	24426.48
A. Vector Length	247.70	V. Op. Ratio [%]	98.96

この時ビーズ数の増加に対し，ばね定数 k は線形に増加し，球の半径 r は減少する．今回，ダンパ係数 η は抵抗低減機構に本質的な影響を与えないため一定とした. このときの各パラメータは, $k^+=30$, $r^+=1.5$, $\eta^+=40.5$ とし，全体の自然長 $L_{T0}{}^+$ を 18，32，64 と変化させた.

2.2　流れ場の計算

流体の支配方程式には以下の連続の式と Navier-Stokes の式を用いる．

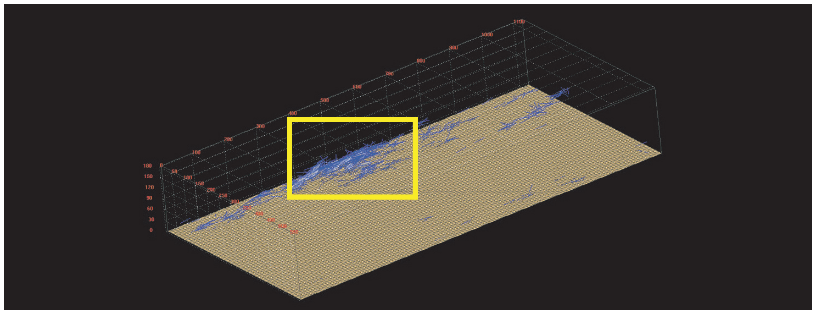
$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{9}$$

$$\rho_f\frac{Du_i}{Dt}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j\partial x_j}+\frac{1}{V}\sum_{x_{[e],i}\in V}(-f_{[e],i}) \tag{10}$$

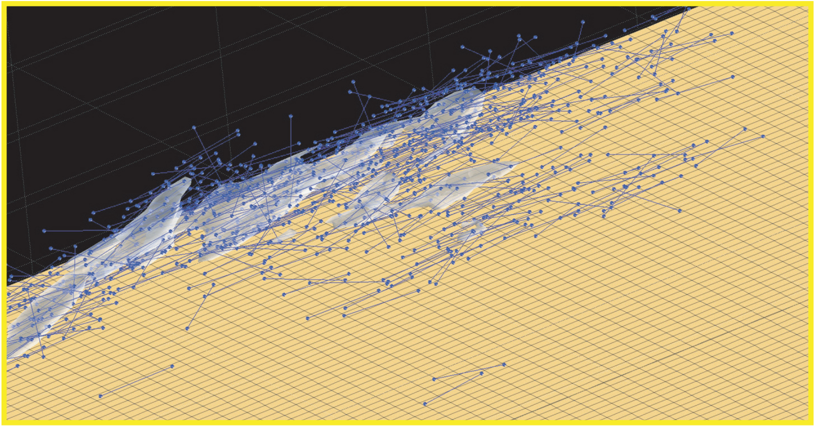
式 (10) の右辺第 3 項（相互作用項）は流体が要素から受ける力である．また，V [m^3] は要素からの反作用を考慮する格子体積である．計算領域を図 2 に示す．図中の δ はチャネル半幅を示す．初期条件として，平行平板間にマルチビーズモデルをランダムに配向，配置し，流体と離散要素モデルとの相互作用を考慮した計算を行う．流体の境界条件は，壁面上で滑りなし条件，流れ方向とスパン方向には周期境界条件とする．また，マルチビーズモデルの境界条件は，壁面では弾性反射条件，流れ方向とスパン方向には周期境界条件とする．x, z 方向は等間隔格子，壁に垂直な y 方向は壁面近傍で格子を密にした不等間隔格子を設定する．格子数は，x, y, z 方向それぞれ 128×96×128 とした．この時の格子解像度は $\Delta x^+ = 8.84$, $\Delta y^+ = 0.93$～5.97, $\Delta z^+ = 4.42$ となる．ここで，$(\,)^+$ は壁面摩擦速度 $u_{\tau0}$ [m /s] とニュートン流体の動粘度 ν で無次元化された量を表す．摩擦レイノルズ数は $Re_\tau = u_{\tau0}\delta / \nu = 180$ であり，流れを駆動させる平均圧力勾配一定とし $u_{\tau0}$ を算出した．

2.3　プログラム性能

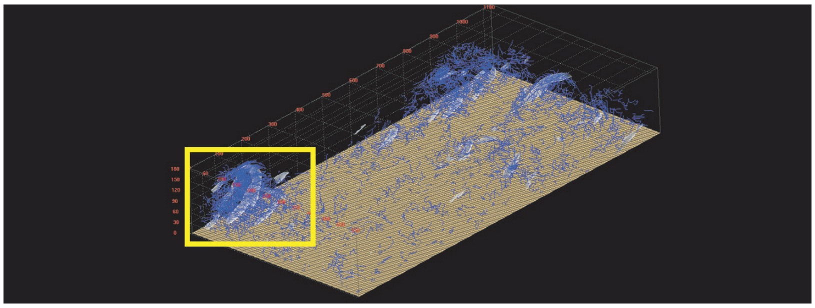
本計算において，Lagrange 的に扱うマルチビーズモデルを追跡するプログラムコードには，if 文の繰り返しが多い点，ベクトル化の困難なルーチンが存在する点により，Euler 的な扱いである流れ場の計算よりも当然，計算負荷が大きくなる．本計算プログラムでは，多数のマルチビーズモデルの運動を個々に計算するため, OpenMP を用いたノード内並列処理及びベクトル演算化を行った．表 1 に Proginf の一例を示す．ここで計算プログラムの解析条件は，摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 180$，総要素数 $N_e = 466{,}944$ とし，計算領域 L_x, L_y, L_z ＝ $2\pi\delta$, 2δ, $\pi\delta$ において，格子点数 $N_x\times N_y\times N_z = 256\times192\times256$，マルチビーズモデルの全体の自然長 $L_{T0}{}^+ = 32$，ビーズ数 $N_B = 17$ とし, 1920,000steps (無次元時間 $t^* = 40.8$) にわたって解析したケースと, 計算領域 L_x, L_y, L_z ＝ $2\pi\delta$, 2δ, $\pi\delta$ において，格子点数 $N_x\times N_y\times N_z = 128\times96\times128$，マルチビーズモデルの全体の自然長 $L_{T0}{}^+ = 64$，ビーズ数 $N_B = 17$ とし，1500,000steps (無次元時間 $t^* = 45.0$) にわたって解析したケースを行った．使用メモリは約12GBを要した．平均ベクトル長，ベクトル化演算率共に高い値を示しており, 本計算プログラムにおける並列化が有効に行われていることがわかる．



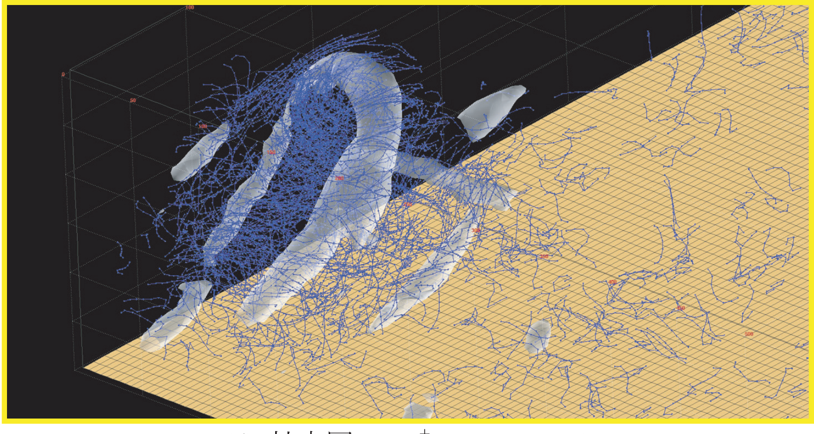
(a) 計算領域($L_{T0}^{+} = 32, N_B = 2$)



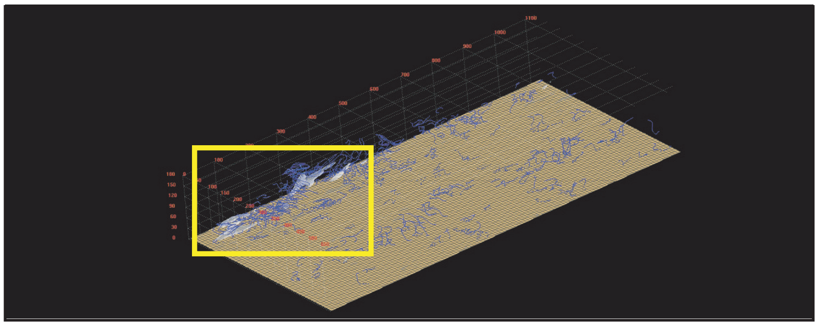
(b) 拡大図 ($L_{T0}^{+} = 32, N_B = 2$)



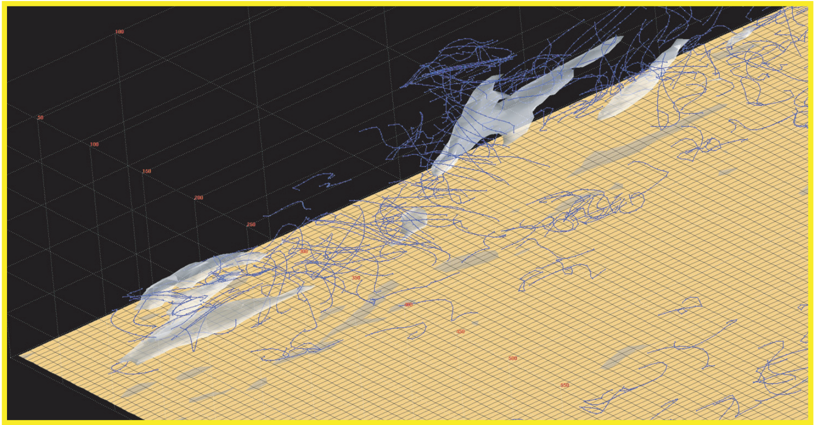
(c) 計算領域($L_{T0}^{+} = 32, N_B = 8$)



(d) 拡大図 ($L_{T0}^{+} = 32, N_B = 8$)



(e) 計算領域($L_{T0}{}^{+} = 64, N_B = 17$)



(f) 拡大図 ($L_{T0}{}^{+} = 64, N_B = 17$)

図 3　十分発達した流れ場の可視化; (a) 計算領域全体の可視化 ($L_{T0}{}^{+} = 32, N_B = 2$), (b) 渦近傍の拡大図 ($L_{T0}{}^{+} = 32, N_B = 2$), (c) 計算領域全体の可視化 ($L_{T0}{}^{+} = 32, N_B = 8$), (d) 渦近傍の拡大図 ($L_{T0}{}^{+} = 32, N_B = 8$), (e) 計算領域全体の可視化 ($L_{T0}{}^{+} = 64, N_B = 17$), (f) 渦近傍の拡大図 ($L_{T0}{}^{+} = 64, N_B = 17$); 青色線状物体, マルチビーズモデル ($Ed^{+} > Ed^{+}_{average}$); 白色等数値面, 渦構造 ($II^{+} = \left(\partial u_i^{+} / \partial x_j^{+}\right)\left(\partial u_j^{+} / \partial x_i^{+}\right) < -0.03$).

3.　マルチビーズモデルが混入した流れ場

3.1　瞬時場の可視化

図 3 に，マルチビーズモデルの全体の自然長 $L_{T0}{}^{+} = 32$，ビーズ数 N_B=2，8 及び全体の自然長 $L_{T0}{}^{+} = 64$，ビーズ数 N_B=17 における，計算部での流れ場（瞬時の流れ場及びマルチビーズモデルの可視化）を示す．青い線状の物体は減衰エネルギ E_d が統計平均値以上のマルチビーズモデルを表し，白の等値面で表される渦の周りに多く存在している．このとき減衰エネルギ E_d は以下の式で定義される．

$$E_d = \sum_{e \in N_B - 1} \frac{1}{2} \eta \Delta v_{[e]}{}^2 \tag{11}$$

従来の 2 球の離散要素モデル (図 (a), (b)) と比べ今回のマルチビーズモデル (図 (c) ~ (f)) では要素の変形がよく表現できている．

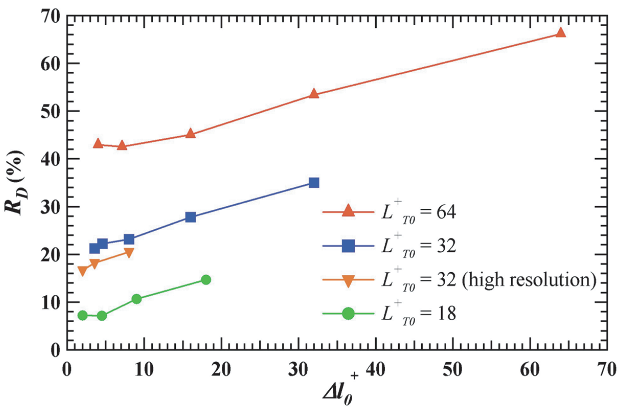


図 4　摩擦抵抗低減率と要素の自然長.

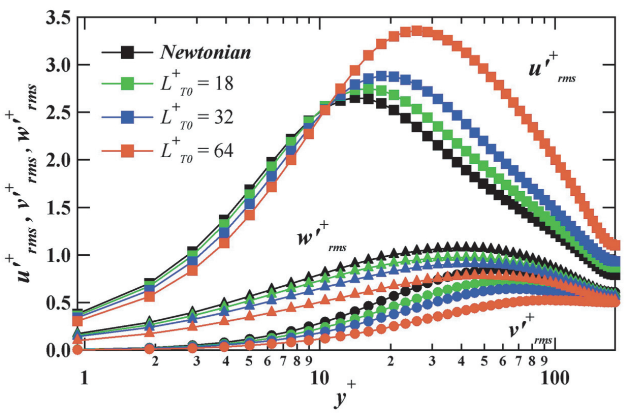


図 5　乱流強度分布.

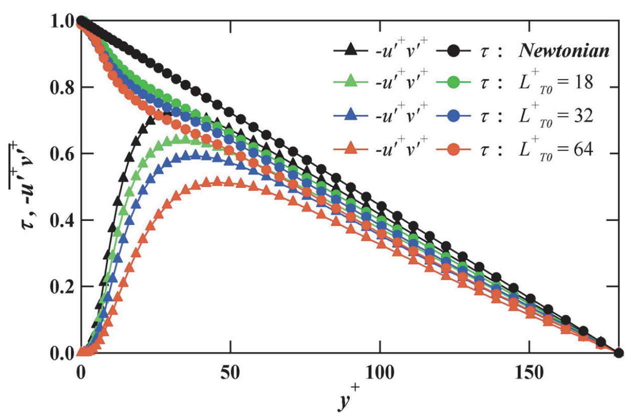


図 6　せん断応力とレイノルズ応力分布.

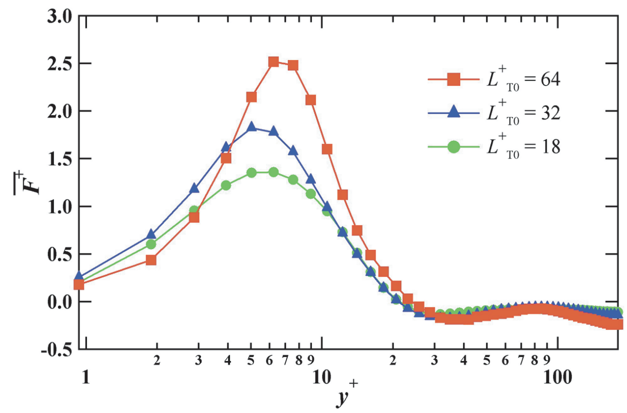


図 7　流体が要素から受ける力の分布

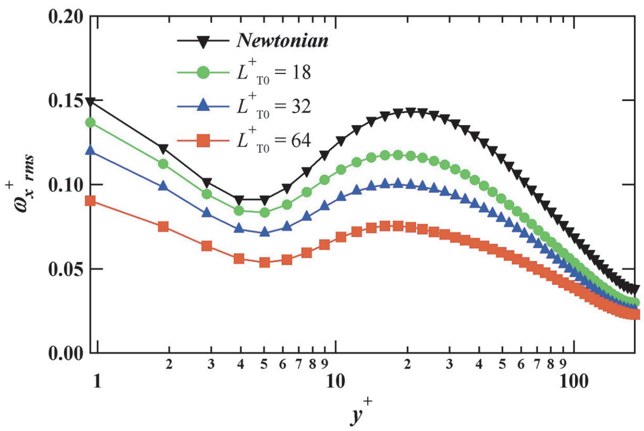


図 8　主流方向渦度強度分布.

3.2　流れ場の統計量

マルチビーズモデルのビーズ間隔 Δl_0 を決定するために, Δl_0 と摩擦抵抗低減率 R_D の関係を図 4 に示す. マルチビーズモデルのパラメータは, 各条件でモデルの全長を固定し, ビーズ数 N_B を変化させることで Δl_0 を変化させる. 図 4 より, ビーズ間隔の自然長 $\Delta l^+_0 < 4$ において, 摩擦抵抗低減率は要素の全長ごとにそれぞれほぼ一定値を示している. このとき摩擦抵抗低減率は, モデル全長 $L_{T0}{}^+ = 18$ の時, 約 7%, $L_{T0}{}^+ = 32$ の時, 約 21%, $L_{T0}{}^+ = 64$ の時, 約 42% である. またモデル全長 $L_{T0}{}^+ = 32$ の要素を計算する際に格子解像度の影響を調べるために x, y, z 方向に 256×192×256 とした計算を行った. この時の格子解像度は $\Delta x^+ = 4.42$, $\Delta y^+ = 0.47$ ～ 2.99, $\Delta z^+ = 2.21$ となる. 格子解像度を上げた計算では解像度に依存し摩擦抵抗低減率が低くなっている. この時 $\Delta l^+_0 < 4$ のモデルにおいても摩擦抵抗低減率は変化する. ビーズ間隔はスパン方向の格子解像度に依存することが考えられる. 以降, 格子解像度は $\Delta x^+ = 8.84$, $\Delta y^+ = 0.93$ ～ 5.97, $\Delta z^+ = 4.42$ とし, ビーズ間隔 Δl^+_0 を 4 程度として全長 L_{T0} の変化に関して比較検討する.

図 5 に変動速度強度分布を示す. マルチビーズモデルの全長 L_{T0} を長くすると流れ方向の変動速度 u'^+_{rms} は粘性低層で小さくなり緩和層から流路中央まで大きくなる. 流れ方向に直行する成分 v'^+_{rms}, w'^+_{rms} は全領域で減少している. この変動速度強度の変化は Toms 効果に現れる流れ場の特徴と一致する.

図 6 にレイノルズ応力 $-\overline{u'^+ v'^+}$ 及びレイノルズ応力と粘性応力の和 τ を示す. マルチビーズモデルの全長が長いほどレイノルズ応力の減少が見られ, ピーク位置が壁から離れる. またレイノルズ応力と粘性応力の和に見られる応力の欠損部分が大きくなる. この欠損部分はマルチビーズモデルに生じるせん断応力に分配される.

図 7 に流体がマルチビーズモデルから受ける力 F の分布を示す. この力 F は式 (10) の右辺第 3 項であり, 以下のように定義される.

$$F = \frac{1}{V} \sum_{x_{[e],i} \in V} \left(-f_{[e],i} \right) \tag{12}$$

図 7 より $y^+ > 20$ の壁から離れた領域では負の値をとっているが, $y^+ < 20$ の壁近傍では正の値をとっていることがわかる. 特に緩和層においてモデル全長 L_{T0} が長いほど流体はマルチビーズモデルから大きな力を受ける. これはマルチビーズモデルが流体の運動量を流路中央付近から緩和層への輸送する機構を備えていることを示している. この力の分布を流路全体で積分することでマルチビーズモデルにかかるせん断応力が求められ, このせん断応力がレイノルズ応力と粘性応力の和に見られる応力の欠損部分に当てはまる.

図 8 に流れ方向の渦度強度分布を示す. マルチビーズモデルが混入されることで全領域において渦度強度が小さくなっている. モデル全長 L_{T0} が長いほどその効果は顕著であり, 縦渦が多く存在する緩和層でより顕著に減少しているため, 縦渦を抑制する効果が大きい. 縦渦は摩擦抵抗を増加させる働きがあることが知られている. 縦渦の抑制効果は摩擦抵抗低減効果に影響を与えると考えられる.

4.　結論

全長を変化させたマルチビーズモデルをニュートン流体に混入したチャネル乱流 DNS を行い, 以下の結論を得た.

(1) マルチビーズモデルのビーズ間隔 $\Delta l^+_0 < 4$ の領域では, 抵抗低減率はビーズ間隔から大きな影響を受けないことを確認した.

(2) 抵抗低減率は, ビーズ間隔 $\Delta l^+_0 = 4$ モデル全長 $L_{T0}{}^+ = 18$ の時, 約 7%, $L_{T0}{}^+ = 32$ の時, 約 21%, $L_{T0}{}^+ = 64$ の時, 約 42%である.

(3) マルチビーズモデルは壁から離れた領域の流体の運動量を壁近傍へ輸送する効果を有し, その効果はモデル全長 L_{T0} が長いほど緩和層において顕著であると考えられる.

(4) 流れ方向の渦度強度の減少から縦渦の抑制が示唆され，抵抗低減効果に関連があることが考えられる．

謝辞

本研究は，東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算機システム及びスーパーコンピュータ SX-9 を利用することで実現した．また，研究にあたっては同センター関係各位に有益なご助言とご協力を頂いた．記して感謝の意を表す．

参考文献

[1] Toms, B. A. *et al.,* Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers, *Proceedings of the 1st International Congress on Rheology,* (1948), pp. 135-141.

[2] Kajishima, T. *et al.*, Drag Reduction by Polymer Additives in Turbulent Channel Flow Simulated by Discrete-Element Models, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series B, Vol. 64, No. 627 (1998), pp. 3636-3643.

[3] Kuroda, A. *et al.*, Mechanism of Drag Reduction by Addition of Dumbbell-like Small Elements in Turbulent Channel Flow, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B,* Vol. 70, No. 690 (2004), pp. 303-310.

[4] Koshi, M. *et al.*, Drag Reduction of Turbulent Channel Flow by Polymer Release from Wall, *Proc. of 6th Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer,* (2009), pp. 951-954.

[5] Jin, S. *et al.*, Dynamics of dissolved polymer chains in isotropic turbulence, *New Journal of Physics*, Vol. 9, No. 360 (2007).

[6] Bird, R. B. *et al.*, *Dynamics of Polymeric Liquids*, Vol. 2(1987), John Wiley and Sons, Inc.

［共同研究成果］

界面ナノスケールプロセスの第一原理シミュレーション

柳澤将[1,2]、稲垣耕司[1]、森川良忠[1]
[1]大阪大学大学院工学研究科、[2]琉球大学理学部

1.　緒言

1.1　有機–金属界面

Tang らによる初の有機電界発光(EL)素子の開発報告[1]以来、有機半導体を材料とする電子デバイスの研究開発が盛んに進められている。これらのデバイスに共通するのは、キャリア（電子・正孔）が、有機物と電極の接触する界面で出し入れされることであり、電極から有機層へのキャリア注入障壁がデバイスの性能・効率を本質的に支配する。有機物と金属電極表面の界面（有機–金属界面）における電子準位の接続を支配する電子的要因について、これまで実験的・理論的に詳細に調べられてきた結果、界面での準位接続は、界面の相互作用に由来する電気双極子層Δの効果で 1 eV 以上も影響を受けることが分かってきた[2]（図 1 左）。

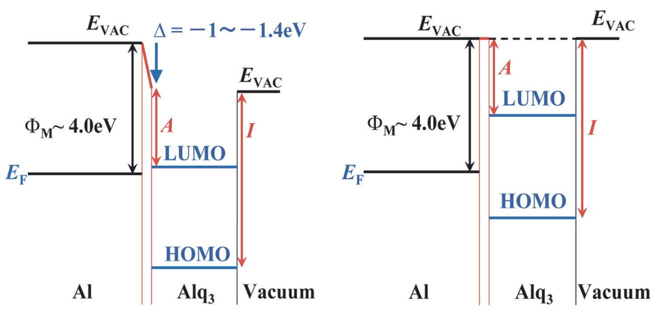


図 1 有機層(Alq_3)と金属層(Al)の界面での電子準位接続の模式図。E_Fは金属層のフェルミ準位。分子の最高占有・最低空軌道をそれぞれ HOMO、LUMO で表した。E_{VAC}は真空準位、Φ_Mは仕事関数。右は両層で共通の真空準位を仮定したのに対し、左は界面電気二重層の効果Δによる準位シフトを示す。数値は、筆者らによる、以前の第一原理計算の結果による[4]。

本グループではこれまで、有機電子デバイスと関連のある有機–金属界面での電子準位接続について、第一原理電子状態シミュレーションを用いて精査してきた。その中で、界面での原子・分子スケールの構造、すなわち有機分子の金属表面に対する配向や有機–金属表面間の距離などがΔを決定する重要な要素であることを示してきた[3,4]。したがって、第一原理計算による有機–金属界面の研究では、まず最安定なエネルギー構造を正確に予測・再現することが重要である。

1.2　第一原理電子状態計算法：LDA・GGA, vdW-DF

第一原理計算による物性の理論研究では、密度汎関数理論(DFT)の範囲内で、固体中の電子間の多体相互作用を、1 つの電子が感じる平均的な 1 電子ポテンシャルで近似する手法（局所密度近似(LDA)または一般化勾配近似(GGA)）が主に用いられてきた。これらの手法は一見、大胆な近似でありながら固体の電子物性を多くの場合、正確かつ効率良く再現でき、近年の計算機の急速な発展によって、よく規定された実験との直接比較が実材料の物性でも可能になってきた。

しかしながら、これらの方法で原理的に記述できない物性の問題には、一般に、より計算コストの大きい手法を要する。有機固体や有機–金属界面では、有機分子間または有機–金属間で電子雲同士が緩く結合する。この緩い引力は各電子雲内で瞬間的に自発分極が起こることによる双極子間の引力で、ファン・デル・ワールス(vdW)力または分散力と呼ばれる。有機物の物性探索では vdW 力を正確に再現して界面の構造を決定する必要があるが、LDA・GGA 法は 1 電子ポテンシャル

に基づくため vdW 力の記述は原理的に難しい。

計算対象の大きさ N（単位格子中の原子数など）に対して LDA・GGA 法では $O(N^{2\text{-}3})$ で計算コストが増えるのに対し、一般に vdW 力を正しく計算する手法では $O(N^4)$ 以上で計算コストがスケールする。そのため適用できる対象の大きさは LDA・GGA 法に比べ限られていたが、近年提案された vdW 密度汎関数(vdW-DF)[5,6]では、計算アルゴリズムの工夫により計算コストのスケールが $O(N^3)$ 程度まで抑えられつつある。本グループでは vdW-DF 法を、これまで開発してきた第一原理分子動力学プログラム STATE に組み込み、有機–金属界面の構造探索に使用している。

本研究では、GGA 法で決められた界面構造・電荷密度を使ってポストプロセス的に vdW-DF 法での電子エネルギーを評価し、最安定構造の評価を進めた。有機–金属界面系の構造探索では、NEC SX-9 や Express5800 で 32 コア程度の並列計算を通常行った。以降で紹介する、200 原子前後の単位格子からなる有機–金属界面系では vdW-DF 法での電子エネルギーの一回の評価に 32 コアの Express5800 で 20 分程の経過時間を要した。GGA 法でのエネルギー評価よりもやや時間がかかるが、現状のプログラムではプリファクターがやや大きい可能性もある。また、計算系の大きさ N に対するスケールは本研究の対象系で $O(N^{3\text{-}4})$ 程度であることを確認した。多くの場合、GGA 法による構造最適化で少なくとも準安定な構造が得られ、その構造を出発点として vdW-DF 法を適用するため、現状のプログラムの速度は現時点の研究目的に十分叶うレベルであった。

2.　計算結果：Alq_3 の金属表面への化学吸着におけるファン・デル・ワールス相互作用の重要性［7］

tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq_3)は、有機 EL 素子などの有力な電子注入材料の物質として知られる、大きな双極子モーメントを持つ分子である。これまで仕事関数の低い Al や Mg 表面との界面での電子的性質について盛んに研究がなされてきた。本グループでは以前からこの物質系の第一原理計算を進めてきた。その結果、Alq_3 分子が Al や Mg 表面上で化学吸着構造を作る際、分子双極子が界面第一層で向きを揃えることで大きな界面電気二重層を形成することを以前報告した[4,8]。

しかし、O 原子と表面金属原子間で一見強い化学結合を形成しながら（図 2）、吸着状態の安定性を通常の DFT-GGA 法では正しく説明できなかった。そこで GGA 法で得られた吸着構造の安定性を、vdW-DF 法で調べた。その結果を図 3 に示す。ここで吸着エネルギー **Ead** は、表面に吸着した単分子層を引きはがし、単分子層をさらに個々の分子に分解し、分子・基板表面ともに安定な原子配置になるのに要するエネルギーである。したがって、吸着エネルギーは、

I. 単分子層を引きはがすのに必要なエネルギー **Emol-sub**
II. 単分子層が個々の分子に分解されるのに必要なエネルギー **Emol-mol**
III. 分解された分子と引き離された表面が安定な原子配置になるのに伴うエネルギー変化 **Erelax**

の 3 種類に分解され、これらの和が **Ead** に等しい。エネルギーの符号は正が吸熱、負が発熱。

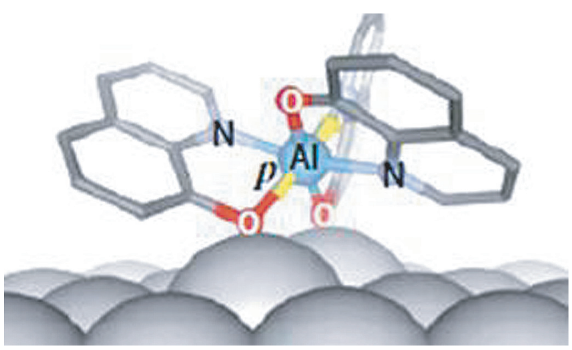


図 2　Alq_3 分子の、Mg(0001)表面への吸着構造。Mg 表面の原子位置が歪むほどに O 原子との間で強い化学結合が形成される。

図 3 の結果から、次のことが分かる。
1）化学吸着構造での **Emol-sub** は DFT-GGA 法でも 110 kJ mol^{-1} 以上と大きく、化学結合による

安定化がよく記述されている。
2) しかし、**Emol-sub** は、vdW 引力によって 70 kJ mol^{-1} 程度も増える。これは、表面とそれに向かい合う分子の芳香環との間で vdW 引力が少なからず働くことに由来している。
3) DFT-GGA 法による化学結合エネルギーのみでは、吸着に伴う分子や表面の歪み **Erelax** が大きく、安定化が打ち消されてしまう。結果、吸着エネルギーは 6 kJ mol^{-1} 程度にしかならない。
4) vdW 引力を取り込むと、吸着エネルギーは 94 kJ mol^{-1} となり、吸着による安定化が正しく説明される。計算された吸着エネルギー値は、実験による見積もり (〜100 kJ mol^{-1}) [9] にも近い。

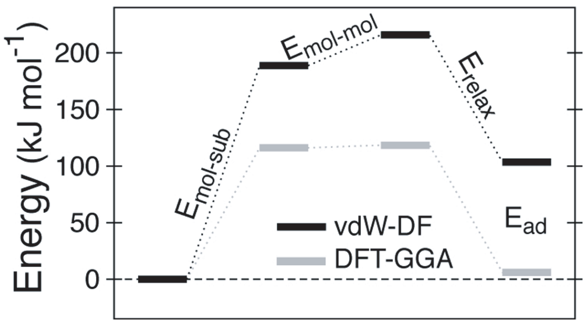


図 3 Alq$_3$/Mg 界面での吸着エネルギー、および各相互作用エネルギー。黒い太実線が vdW 引力を考慮した場合、灰色実線が DFT-GGA 法の場合。最も左が吸着状態で、最も右が、表面と分子が孤立した状態を表す。各相互作用エネルギーの説明は、本文を参照。

以上から、この系は化学吸着構造であるが、吸着の安定化には vdW 引力の寄与が重要であることが確認された。また、この有機−金属界面の安定性は、それに加えて化学結合や分子・表面のひずみのせめぎ合いによって決まっていることも分かった。

3.　今後の展望

本報告では、vdW 力の取り込みによる吸着構造の緩和を考慮した結果は示さなかったが、最近、海外の研究グループで公開されたプログラムではそのような計算が可能であり [10]、これを実際に適用したところ、O-Mg 結合で決まった吸着構造からの変化はわずかで、本報告の結論は変わらなかった [7]。構造緩和と電荷密度の緩和を完全に取り込んだ vdW-DF 法の計算は、現在でも計算コスト上容易ではなく、上述の計算プログラムでは原子を中心に広がる局在基底関数を使用して計算コスト軽減を図っている。しかし、エネルギーカットオフを高めれば完全系に近づくことを保証された平面波基底と違い、局在基底による簡略化では計算の正確さが失われる恐れがあるため注意が必要である。したがって将来的には、平面波基底またはそれ以外のよく規定された基底関数を使用し、緩和を完全に取り込んだ vdW-DF 法の計算が求められ、それに向けたより大規模な計算シミュレーションを可能にしていく必要がある。

本稿では触れなかったが、vdW-DF 法では vdW 力が重要な吸着エネルギー値を正しく計算する一方、吸着分子−表面間の吸着距離をやや過大評価する傾向があることが、本グループの研究で明らかになった [11]。この点について、最近、交換項を工夫することでより有機−金属界面系への適用性を高めた報告もあり [12]、より定量性を高めるための改善が求められている。

4.　反応障壁計算方法とエッチング加工法解析への応用

近年、表面加工の分野では原子レベルで平坦かつダメージのない表面の創成が要求されている。これを実現するには化学反応で原子を 1 つずつ除去するエッチングが最も望ましい。様々な平滑表面創成手法が提案されているが、要求される能率向上や環境負荷低減の方策を立て効率よく開発を進めるには、原子レベルでの化学反応などの現象の理解が不可欠である。ここでは CARE (CAtalyst Referred Etching) と呼ばれる加工方法の反応解析における化学反応の活性化エネルギー障壁を調べることにより反応過程を明らかにするという現在進行中の研究について紹介する [13]。

CARE 加工法とは、通常では起こらない（エッチング）反応を加工対象物に触媒を接近または接触させ活性化することによって、SiC や GaN などの難加工性材料を加工する方法である。通常のエッチングでは、加工対象物に必ず存在する結晶欠陥を起点に速度の速いエッチングが生じるため、表面粗さを小さくすることは難しい。一方、CARE では、室温下で平坦な板状の触媒を加工物にこすり付けて、接触点でのみ反応を進行させることにより凸部の位置が加工されるため平滑化される。(図 4) SiC の CARE 加工の場合、エッチング液にはフッ酸が用いられているので、エッチングはHF分子がSiCの共有結合を切断して解離吸着することにより進行していると考えられる。この反応はエッチング液に浸漬させただけでは生じないため、反応活性化のためのエネルギー障壁が高いはずであるが、触媒の作用による障壁の低下もしくは機械的な作用により反応が進行すると考えられる。以下この解離吸着反応過程のエネルギー障壁がどの程度であるかを調べた結果について述べる [14]。

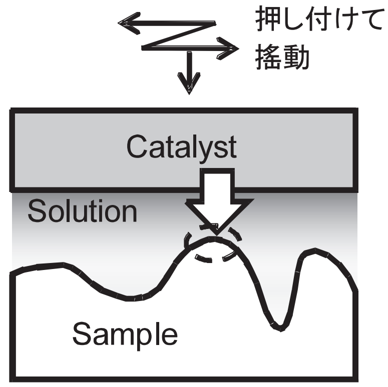


図 4　CARE 加工法の概念図
液中で触媒とサンプルを互いにこすり合わせ、接触点でのみエッチングを活性化することによりサンプル表面を平坦化する。

反応障壁の計算にはCI-NEB 法 [15] を用いた(図 5)。図の四角の各点は仮定された反応経路のサンプル点で、経路に垂直な方向には最小となるように、また反応経路の方向に等間隔に並ぶように少しずつ修正する計算を反復することにより、太線の反応経路に収束させることができる。サンプル点のうちエネルギーの最大の点のみ反応経路に沿ってエネルギーの大きな方向に動かすことによって障壁となる点 C の構造が求まる。NEB の計算では各サンプル点の修正計算を同時に進めていく必要があるので、計算能力の高いコンピュータシステムが有効である。

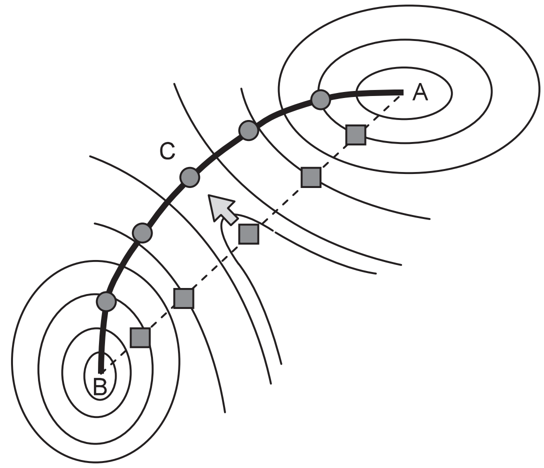
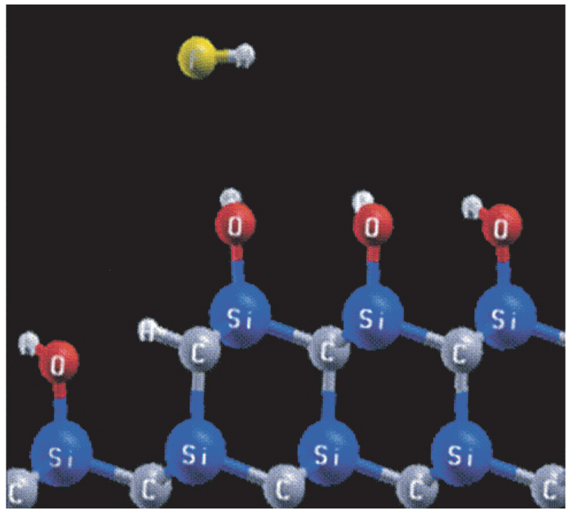


図 5　CI-NEB 法による反応障壁の探索　物質の様々な構造に対応するエネルギーの大小を表す等高線図。
A、B は準安定構造で、A→B と化学変化する反応において、等高線に直交する実線 A→B がエネルギー増加が最少となる最も起こりやすい反応経路である。C は経路中の最大エネルギー点で活性化障壁である。四角は解析のため設定されるサンプリング点であり、丸は各点を反応経路と垂直の方向へエネルギーが下がるように step-by-step で最小化し、探索した最終結果である。

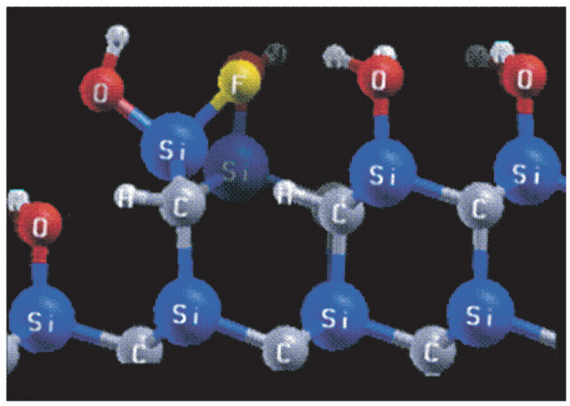
図6はSiC とHF 分子の解離吸着過程を解析した結果である。3C-SiC(立方晶)表面の(111)ステップ端の Si-C 結合を切断して HF 分子が解離吸着する反応で、可能性のある反応ポイントが 2 か所あるため、両方について検討している。図 6-(2), (3)はそれぞれステップ端 Si 原子のテラス側(2)とステップ端沿い(3)の結合に解離吸着した場合である。(2)(3)は両方とも準安定構造であるが、(2)の方が 2eV 弱エネルギーが低く、生成可能性が高いことが分かった。CI-NEB 法による反応障壁の解析では両方とも 2eV 程度の障壁があり、かつほとんど差がなかったため、両方とも SiC を HF 水溶液に浸すといった通常の条件下では起こらない反応と結論され、現実と合致している。またこの障壁は CARE 法で考えうる様々な効果（触媒効果、外力効果）により十分打ち勝てることが期待できるほどの低い障壁であり、

エッチング現象が起こりうる可能性を示したともいえる。現在、CARE におけるエッチングメカニズムを解明するため、触媒による障壁低減効果あるいはこすり付けによる機械的外力の解析を進めているところである。

(1)



(2)



(3)

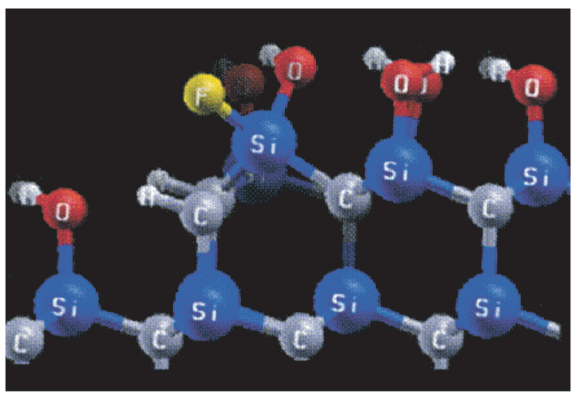


図 3 3C-SiC(111)ステップ端での HF 解離吸着反応の解析　反応前(1)、テラス側の SiC 結合を切断して HF が解離吸着(2)、ステップ端に沿った SiC 結合を切断して HF が解離吸着(3)。

謝辞

本研究では、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピューターNEC SX-9 と Express5800 を使用させて頂きました。有機金属界面の研究は、東北大学 WPI-AIMR の濱田幾太郎助教、米 Rutgers 大の Lee Kyuho 博士研究員との共同研究により進められました。

参考文献

[1]. C. W. Tang and S. A.VanSlyke,“Organic electroluminescent diodes”, Appl. Phys. Lett. 51, 913 (1987).

[2]. H. Ishii, K. Sugiyama, E. Ito and K. Seki, “Energy Level Alignment and Interfacial Electronic Structures at Organic/Metal and Organic/Organic Interfaces”, Adv. Mater. 11, 605 (1999), and *references therein*.

[3]. Y. Morikawa, H. Ishii and K. Seki, “Theoretical study of *n*-alkane adsorption on metal surfaces”, Phys. Rev. B 69, 041403 (R) (2004).

[4]. S. Yanagisawa, K. Lee and Y. Morikawa, “First-Principles theoretical study of Alq_3/Al interfaces: Origin of the interfacial dipole”, J. Chem. Phys. 128, 244704 (2008).

[5]. M. Dion et al., “Van der Waals Density Functional for General Geometries”, Phys. Rev. Lett. 92, 246401 (2004).

[6]. T. Thonhauser et al., “Van der Waals density functional: Self-consistent potential and the nature of the van der Waals bond”, Phys. Rev. B 76, 125112 (2007).

[7]. S. Yanagisawa, I. Hamada, K. Lee, D. C. Langreth and Y. Morikawa, “Adsorption of Alq_3 on Mg(001) surface: Role of chemical bonding, molecular distortion, and van der Waals interaction”, Phys. Rev. B 83, 235412 (2011).

[8]. S. Yanagisawa and Y. Morikawa, "Theoretical investigation on the electronic structure of the Alq_3/Mg interface", J. Phys.: Condens. Matter 21, 064247 (2009).
[9]. W. Zhao, W. Wei and J. M. White, "Thermal Desorption of Tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (III) (Alq_3) on Cu(111)", Chem. Mater. 15, 4819 (2003).
[10]. G. Román-Pérez and J. M. Soler, "Efficienct Implementation of a van der Waals Density Functional: Application to Double-Wall Carbon Nanotubes", Phys. Rev. Lett. 103, 096102 (2009).
[11]. K. Toyoda, I. Hamada, K. Lee, S. Yanagisawa and Y. Morikawa, "Density functional theoretical study of pentacene/noble metal interfaces with van der Waals corrections: Vacuum level shifts and electronic structures", J. Chem. Phys. 132, 134703 (2010).
[12]. I. Hamada and M. Otani, "Comparative van der Waals density-functional study of graphene on metal surfaces", Phys. Rev. B 82, 153412 (2010).
[13]. K.Inagaki, Bui-Van Pho,K.Yamauchi and Y. Morikawa. To be published.
[14]. H. Hara, Y. Sano, K. Arima, K, Yagi, J. Murata, A. Kubota, H. Mimura, K. Yamauchi, Sci.and Technol. of Adv. Mater. 8 (2007) 162, K. Arima, H. Hara, J. Murata, T. Ishida, R. Okamoto, K. Yagi, Y. Sano, H. Mimura, K. Yamauchi, Appl. Phys. Lett. 90, (2007) 202106.
[15]. S. J. Schoell, J. Howgate, M. Hoeb, M. Auernhommer, J. A. Garrido, M. Stutzmann, M. S. Brandt, I. D. Sharp, Appl. Phys. Lett. 98 (2001) 182106.

［研究成果］

海溝付近で発生する浅部ゆっくり地震の特徴

－ Characteristics of shallower slow earthquakes occurring near the trench －

有吉 慶介[*1]・堀 高峰[*1]・中田 令子[*1]・金田 義行[*1]
Jean-Paul Ampuero[*2]
松澤 暢[*3]・日野 亮太[*3]・長谷川 昭[*3]

[*1] 独立行政法人 海洋研究開発機構 地震津波・防災研究プロジェクト
[*2] カリフォルニア工科大学
[*3] 東北大学大学院理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター

西南日本をはじめとする世界各地の沈み込みプレート境界面上で発生する深部“ゆっくり地震”は，巨大地震発生前になると，発生時間間隔が短く，伝播速度が速く，モーメント解放時間率が増加することが期待されることを数値シミュレーションから示した [1]. 本稿では，近年になって観測されている海溝に近い浅部で発生する“ゆっくり地震”について特徴を調べ，深部との違いを比較すると共に，東南海沖で敷設が進められている地震・津波観測監視システム (DONET) の地震予知に向けた活用について，大規模数値シミュレーションから考察を行う.

１．はじめに

通常の地震よりも卓越周波数の低い (時間周期の長い)“ゆっくり地震”と呼ばれるものが 10 年ほど前から世界各地で観測されるようになった [2].“ゆっくり地震”は規模の大きい順に, スロースリップイベント・超低周波地震・低周波微動などから構成されており [3], 図 1 に示すように，巨大地震発生域の浅部と深部の遷移域で発生していると考えられている [2].

しかし，浅部と深部の“ゆっくり地震”では，大きく異なる特徴がみられる．[1] の図 1 では, 深部ではプレート境界面の等深線 30 km にほぼ沿って帯状に震源が分布しているが, 浅部側では震源分布に締りが見られない．このような違いの原因としては，規模の小さい超低周波地震や低周波微動の場合，シグナルが微弱のため，地震計が稠密に配置されている陸域直下で発生したものでないと精度良く観測するのが困難となる点の他，分岐断層 [4, 5] やデコルマ (水平断層) で発生しているという指摘もある.

深部側で発生する“ゆっくり地震”については, 沈み込みプレート境界面の等深線に沿った移動現象が，世界各地の陸域の観測網によって捉えられている [2]. 巨大地震の発生直前や大規模なスロースリップイベントに伴って，その周辺の活動が一時的に活発化する観測

例も報告されている [6, 7]．一方で，浅部側で発生する “ゆっくり地震” では，そのような特徴はまだ確認されていないのが現状である．

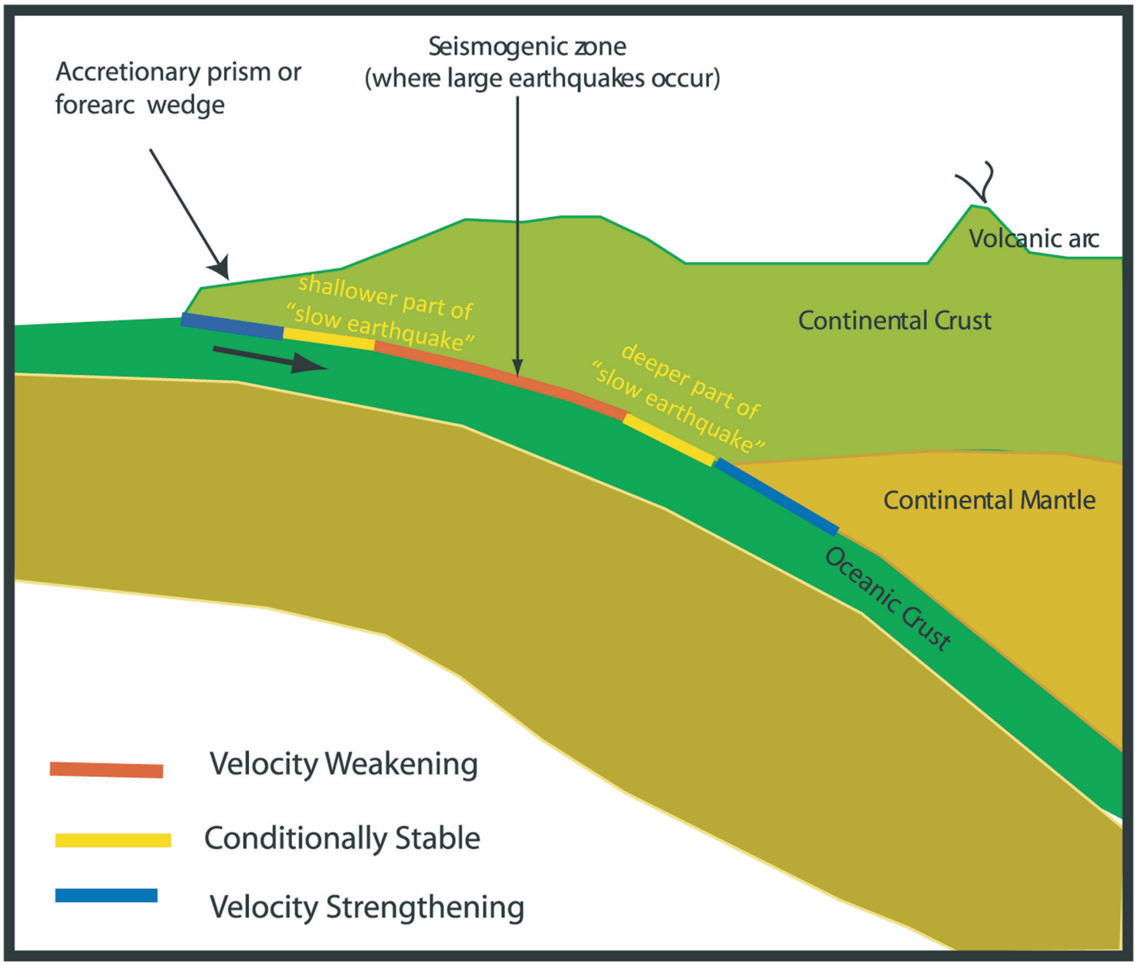


図 1．世界各地で観測されている，沈み込み帯における “ゆっくり地震 (黄色部分)” の分布の模式図 ([1] を一部改編)．赤い領域は海溝型巨大地震の震源域を示す．

そのような状況の中で，近い将来に巨大地震が発生すると指摘されている東南海沖周辺において地震・津波観測監視システムが 2011 年 7 月 31 日に完全稼働を開始した (図 2 の DONET 1).

そこで本研究では，数値シミュレーションを用いて，深部側に類似した物理条件の下で浅部 “ゆっくり地震” をモデル化し，両者の特徴の違いを比較することを試みる．さらに，その結果に基づいて，海底観測網から期待される浅部 “ゆっくり地震” の活動に注目した地震予測の可能性を探る．

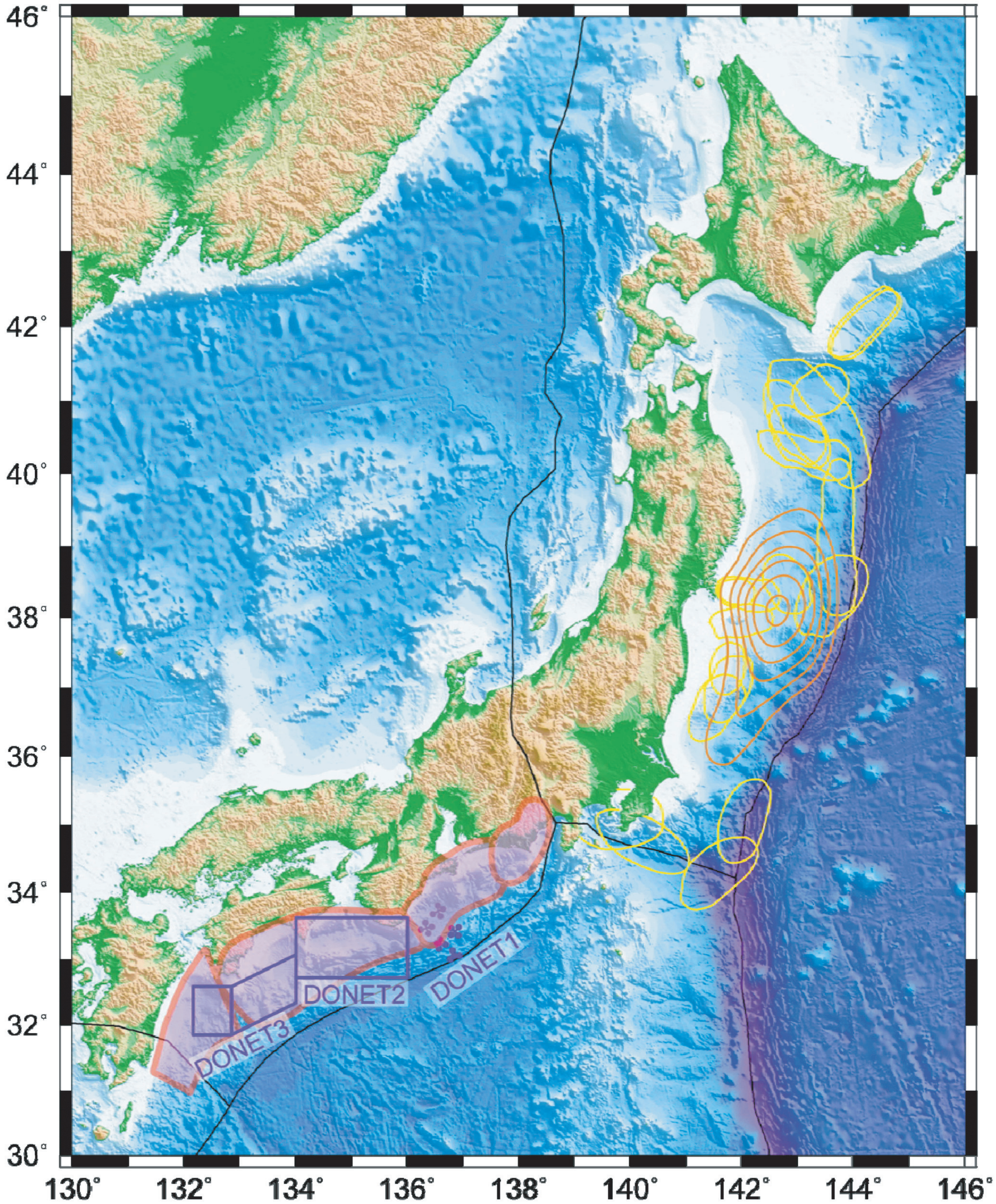


図 2．日本海溝と南海トラフ沿いにおける巨大地震震源域の地図．主要なプレート境界 (黒線)，過去に発生した津波を伴う海溝型巨大地震の震源域 (黄色楕円)，東北地方太平洋沖地震のすべり分布 (橙色 4m 間隔)，東海・東南海・南海・日向灘の想定震源域 (桃色)，DONET の観測展開エリア (紫色) を併せて示した．DONET 1 周辺領域については，図 3 を参照．

２．東南海地震震源域周辺における３次元沈み込みプレート境界モデル

図 1 の沈み込み帯で発生する浅部 “ゆっくり地震” のうち，本研究では DONET が敷設された東南海沖周辺をモデルの対象領域とした (図 3)．この領域内では，1944 年に東南海地震が発生し，M_w 7.9 の海溝型巨大地震が発生したことが知られている [8]．また，東側には東海地震，西側には南海地震の震源域がそれぞれ隣接し，2004 年のスマトラ沖地震や 2011 年の東北地方太平洋沖地震のように，東海～南海～日向灘にかけて連動型巨大地震が発生する可能性も指摘されている [9].

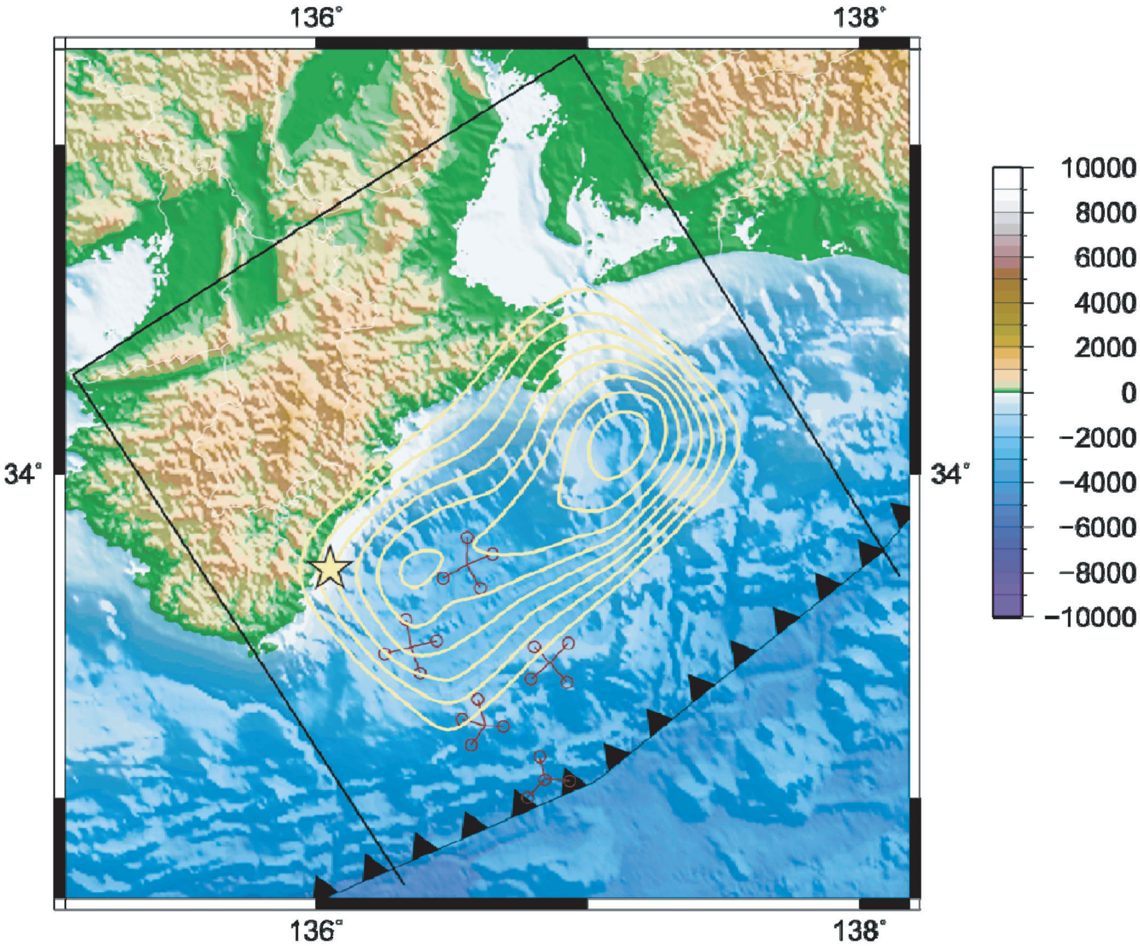


図 3．東南海地域における沈み込みプレート境界面の対象領域 (海溝軸と黒実線で囲まれた領域)．黄色線は [8] によって推定された 1944 年の東南海地震時におけるすべり量 (実線：0.5m 間隔)と，震央 (★) を表わす．赤丸 20 点は DONET の観測点，それらを結ぶ実線はサイエンスノードを示す．ゆっくり地震の震源分布については，[1] の図 1 を参照.

本研究では，図 3 の東南海地震を単純化したかたちでモデル化を図り，浅部低周波地震の特徴を理解するため, 図 4 に示すプレート境界面およびアスペリティマップを想定した.

ここで計算領域の外側は，back slip モデル [10] を適用して計算していないため，定常的な沈み込み速度でプレート運動が続いていることになる．

プレートの形状は，沈み込み方向にのみ折れ曲がる構造とし，その傾斜角は 4-27^{o} と徐々に急峻になっており，エアガンなどの物理探査結果に基づいている [11]．また，(沈み込み方向と直交する) 断層の走行方向については，周期境界条件を課した．これは，東南海地震が東海・南海地震と隣接している条件を近似したものである．これら 2 つの条件は，断層面上のせん断すべりを計算する際に，FFT を用いて高速化することができる [1]．

本研究では，東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究によって開発された，SX-9 向けに最適化された FFT の計算プログラムコードを活用することで，前回のモデルよりも小アスペリティの大きさをさらに縮小させ，巨大アスペリティと小アスペリティのスケールが 30 倍も異なるモデルを構築し，かつ浅部と深部の小アスペリティが共存する，94 万個もの計算メッシュを有する大規模シミュレーションを実施することが可能となった．

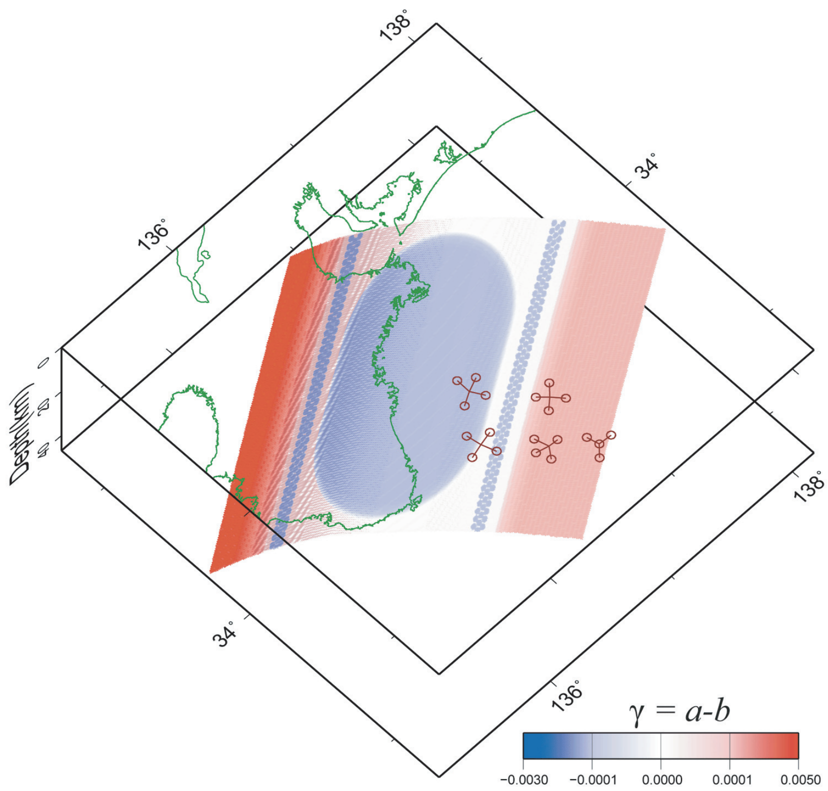


図 4．図 3 の対象領域内に想定したプレート境界面と摩擦特性 (*a-b*) の空間分布図．青色の領域がアスペリティに対応している．折れ曲がりの効果を視覚化するために，投影効果を加えているが，浅部と深部の小アスペリティでの *a-b* の値は同一である．赤丸 20 点は DONET の観測点，それらを結ぶ実線はサイエンスノードを示す．2 本の黒矢印については，図 7 を参照．

有効法線応力 (σ_i) については，間隙水圧 ($\rho_w gz$) が深さ (z) と共に変化するモデル [12 Ariyoshi] を想定し，$\sigma_i(z) = \kappa(\rho_{rock}\text{-}\rho_w)gz$ で表わされるものとして，深さ 27-33km の範囲では流体（主に水）が存在するために，有効法線応力が局所的に 34-76 MPa と低くなる，κ = 7-13% を与えた．他の領域では，余効すべりの伝播速度から推定した κ の値 [12] を参考にして κ = 1/3 とした．この場合，深部小アスペリティ帯の有効法線応力に対する浅部の比は 3/4 となる．特徴的すべり量については，有効法線応力の比に応じて，浅部側の小アスペリティで 0.3 mm，深部側で 0.4 mm とし，摩擦不安定性が同一となるようにした．また，巨大アスペリティでは，1 cm とした．

３．数値シミュレーションによって再現された海溝型巨大地震

本章では計算結果の概略を述べる．数値シミュレーションで再現された“東南海地震”は，モーメントマグニチュード (M_w) が 7.9，発生時間間隔が 113 年となった．これまでの東南海地震は 100-150 年の周期で発生しており，1944 年に観測された東南海地震の M_w は 7.9 [8] のため，同程度の規模となっているが，東海～南海地震が連動した 1707 年の宝永地震 (M8.6) よりは 12 倍程度小さいものである．図 5 に地震性すべりのプレート境界面上における分布を示す．

図 5 では，卓越したすべりが図 3 のような二つ目玉とはなっておらず，周期境界条件によって紀伊半島南端付近からもすべりの染み出しが若干みられるが，量としては最大で 3.5 m となっており，図 3 とほぼ一致している．

図 4 で小アスペリティがなく単独の巨大アスペリティしかない場合，左右対称に分布した．このことから，地震性すべりの分布が不均一となっているのは，図 4 で示された小アスペリティの分布にわずかな非対称性があり，その応力揺らぎの影響を大アスペリティに与えていると考えられる．図 5 の震源位置は地震性すべり分布域の西縁に位置しており，図 3 の特徴と整合している．

以上の結果より，本研究でシミュレートされた海溝型巨大地震は，1944 年に発生した東南海地震の特徴を近似的に再現することができたといえよう．

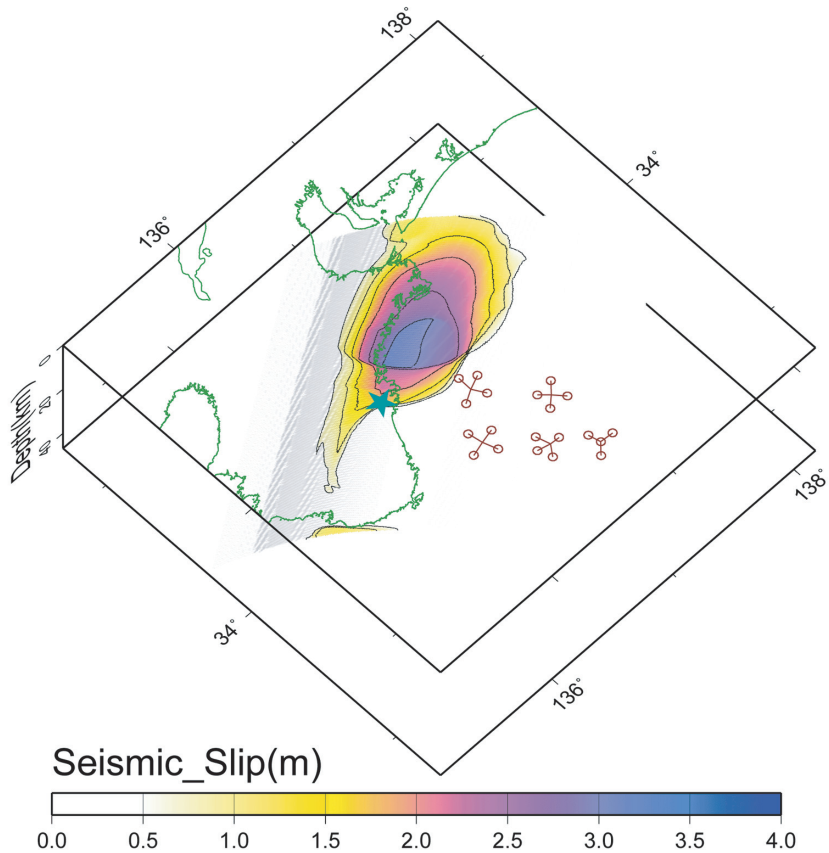


図 5．沈み込みプレート上における地震性すべりの空間分布図．ここで地震性すべりを 4cm/sec より高速のすべり成分とした．コンターは 0.5m として暖色→寒色の順にすべり量が多くなるように色をつけて示している．★は，震源を表わす．

４．浅部ゆっくり地震の特徴と深部との違い

図 6a は東南海地震が発生してから約 20 年経過し，巨大アスペリティが固着している期間，図 6b は巨大アスペリティの固着が剥がれ始めた巨大地震発生直前 (2.5 年前) における，プレート境界面上のすべり速度のスナップショットである．

2 つの図を見比べてみると，固着期間 (図 6a) では，巨大アスペリティの固着の影響が浅部側の方で顕著のため，浅部ゆっくり地震が定常的に活動する領域は巨大アスペリティの縁側部に限られ，中央付近では不活発となっている．一方で図 6b より，東南海地震発生が近づいて固着の剥がれが進行すると，固着の影響は巨大アスペリティ域内に限られるため，浅部ゆっくり地震の活動は全体的に活発となり，深部ゆっくり地震との類似性が高まることが分かる．

(a)

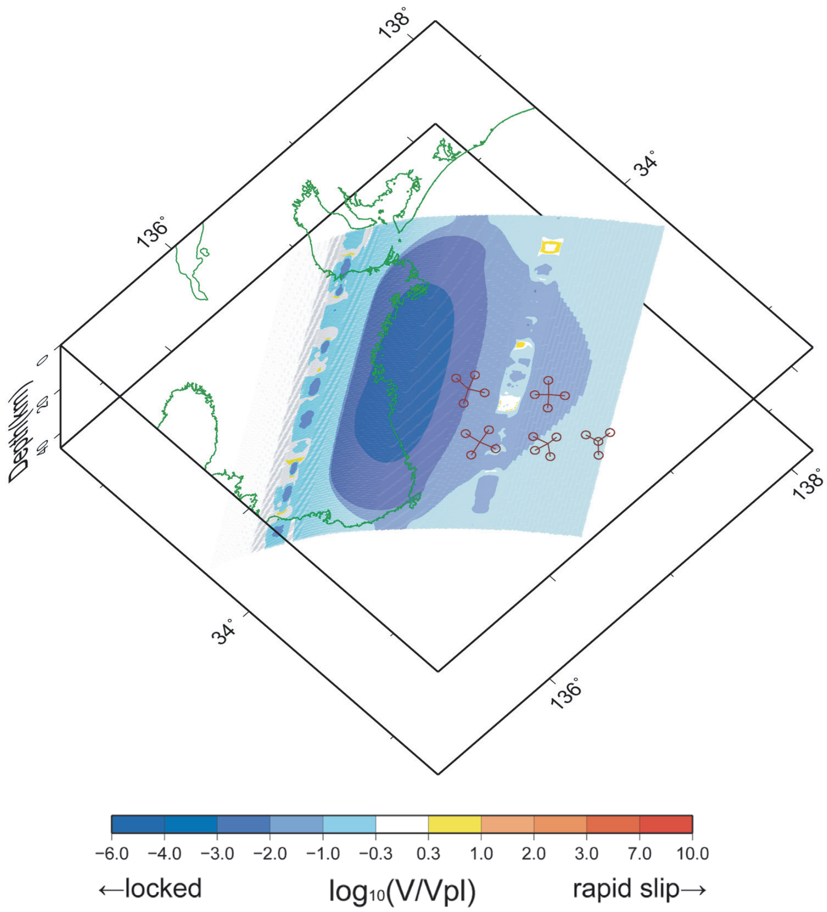


図 6.　(a) 固着期間 (東南海地震発生から 20 年経過) (b) 東南海地震発生直前 (約 2.5 年前) における，すべり速度のスナップショット．寒色系は固着，黄・橙色はゆっくりしたすべり，赤色は地震性の高速すべりに相当．赤丸 20 点は DONET の観測点，それらを結ぶ実線はサイエンスノードを示す．

(b)

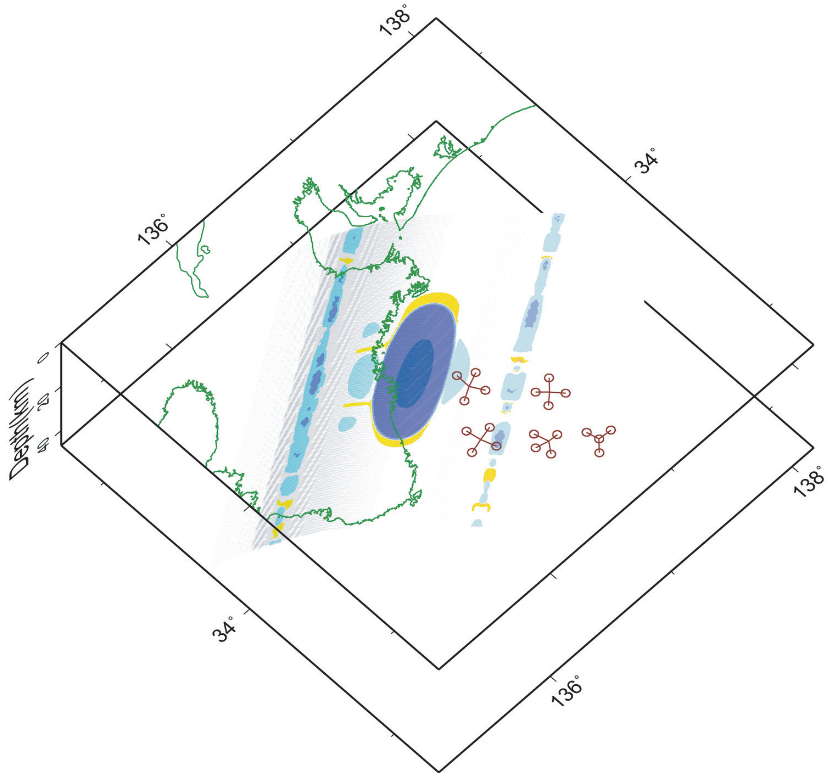


図 6b. （続き）

図 7 (巨大アスペリティの固着期間) と図 8 (巨大地震発生前) に，小アスペリティ帯（図 3 の 2 つの矢印付近）における，すべり速度の空間履歴を示す．赤い色をした部分がゆっくり地震に相当し，発生時間間隔・伝播速度（黄・橙色の傾きから求める）を視覚的に捉える事ができる．巨大アスペリティが固着している期間は発生間隔が長く，伝播速度が遅いが，巨大地震発生が近付くと，次第に発生間隔が短くなり，伝播速度が速まると共に移動距離が長くなる傾向がみられる性質は共通しているが，その変化の度合いは浅部の方が有意に顕著であることが，図 7 と図 8 を見比べることで分かる．

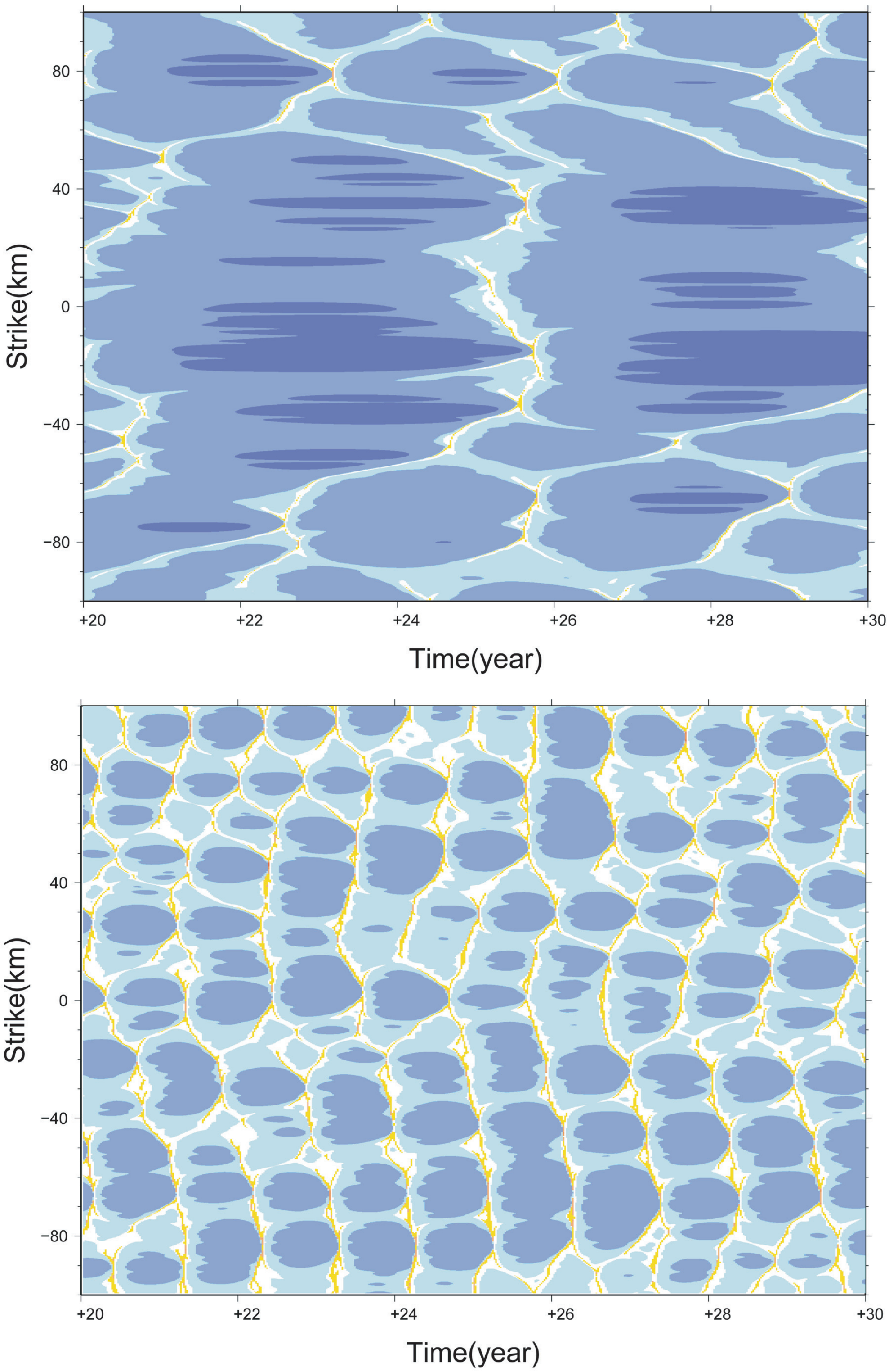


図 7. 図 4 の矢印で示した浅部 (上図) と深部 (下図) の小アスペリティ帯でのすべり速度について，巨大アスペリティが固着している期間での空間履歴．カラースケールは図 6 と同じ．赤色がゆっくり地震，青色が固着に相当する．横軸の時間は，海溝型巨大地震の発生時刻を原点とし，縦軸の原点は巨大アスペリティの中央に位置する．

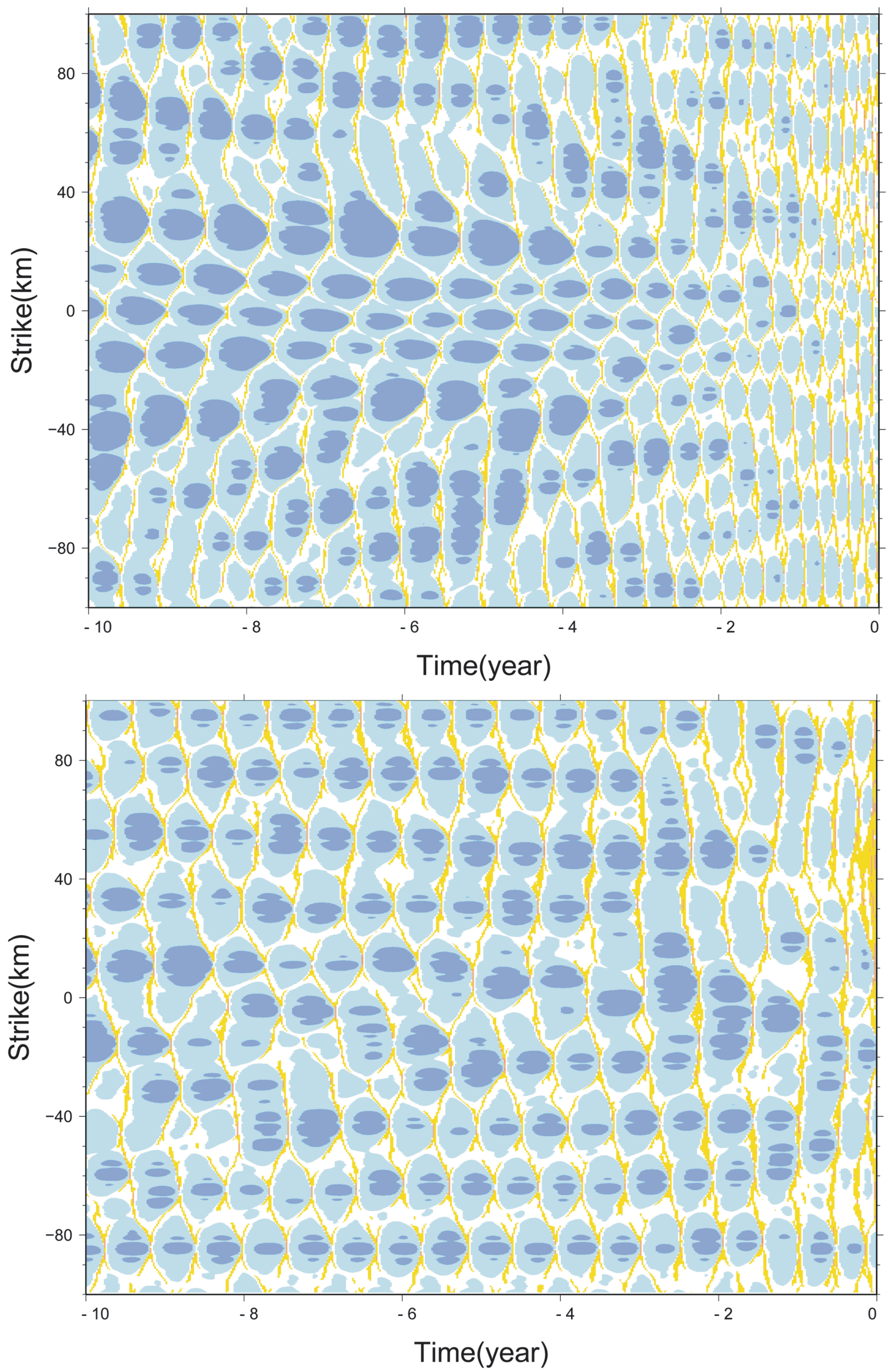


図 8．海溝型巨大地震発生直前における，浅部側 (上図) と深部側 (下図) での小アスペリティ帯でのすべり速度の空間履歴．説明については，図 7 を参照．

５．まとめ

図 7 によると，浅部ゆっくり地震の活動は巨大アスペリティの中央付近で 5 年ほどの発生間隔となっており，移動距離は極めて短い．このことは，現状では浅部ゆっくり地震が不活発で移動現象が捉えられていないことと整合する．従って，東海～南海沖の巨大地震は，まだ固着状態にあるのかも知れない．一方で図 8 によると，海溝型巨大地震の発生時期が近付くと，浅部では深部よりも活動が活発になることから，その変化を観測から事前に捉えられる可能性がある．

図 9 の履歴では，869 年の貞観地震の後に 887 年の仁和地震が発生したとされている．同じような地震活動が繰り返されるとすると，2011 年の東北地方太平洋沖地震の後に，図 2 で示された東海～南海～日向灘まで連動した地震が起きる可能性がある．従って，今後は，前駆的な変化の検出や巨大地震発生後の正確な津波予測をするためにも，DONET のような海底観測網を着実に展開する必要があろう．

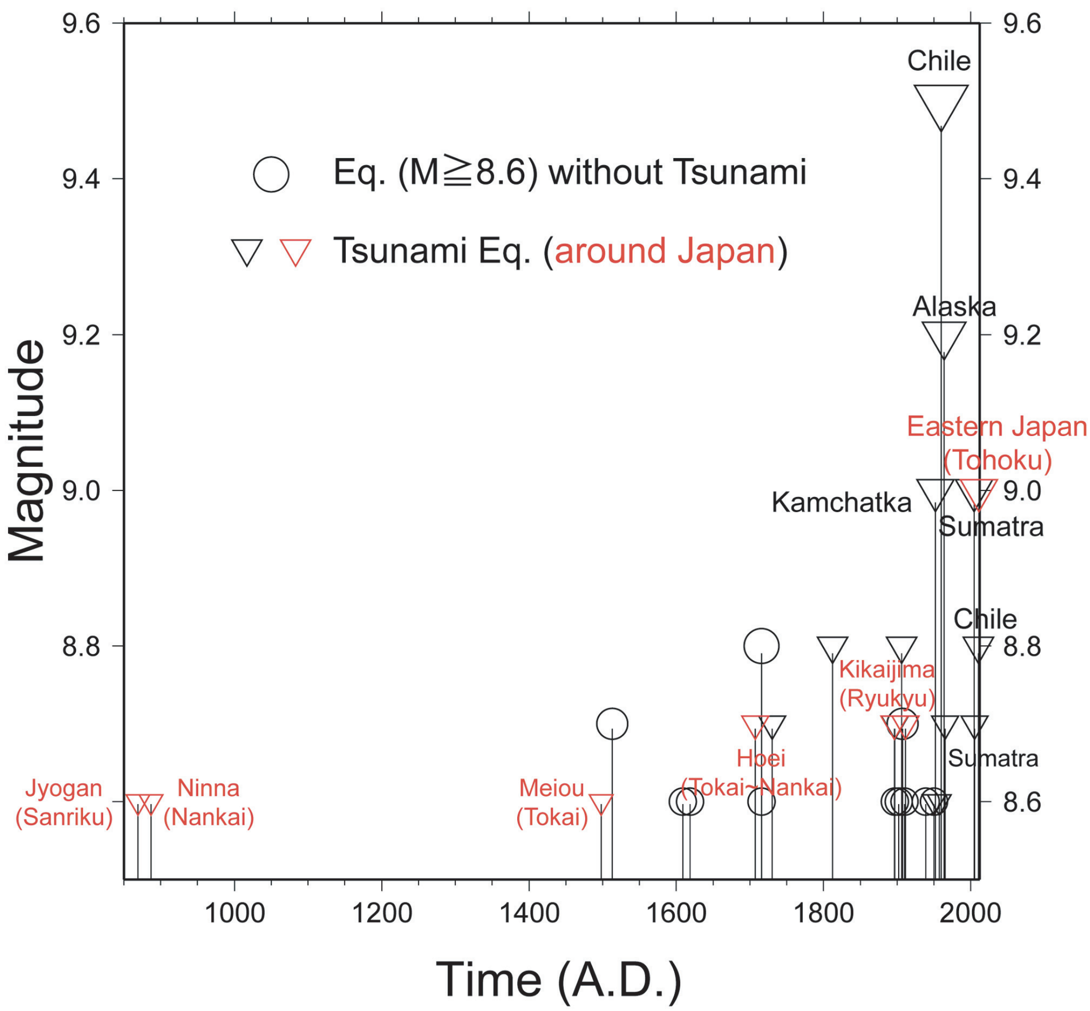


図 9．M8.6 以上の超巨大地震の履歴 [13]．○は津波を伴わない地震，▽は津波を伴う地震，赤は日本周辺の地震を表わす．

謝辞

本研究は，「海溝型巨大地震の事前検知能力を高める観測点配置と対策：十勝沖・宮城沖の事後検証」(若手研究 B) の成果の一部であり，南海トラフ沿いの海溝型巨大地震については，DONET の研究成果に基づいている．

参考文献

[1] 有吉 慶介・堀 高峰・金田 義行・Jean-Paul Ampuero・松澤 暢・日野 亮太・長谷川 昭, 2009. 連鎖反応モデルから想定される深部低周波微動の特徴, SENAC **42**, 19-25.

[2] Schwartz, S. Y., and J. M. Rokosky, 2007. Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones, Rev. Geophys. **45**, RC3004, doi:10.1029/2006RG000208.

[3] Ide, S., G. C. Beroza, D. R. Shelly, and T. Uchide, 2007. A scaling law for slow earthquakes, Nature **447**, 76-79, doi:10.1038/nature05780.

[4] Ito, Y. and K. Obara, 2006. Dynamic deformation of the accretionary prism excites very low frequency earthquakes, Geophys. Res. Lett. **33**, L02311, doi:10.1029/2005GL025270.

[5] Obana, K. and S. Kodaira, Low-frequency tremors associated with reverse faults in as shallow accretionary prism, 2009. Earth Planet. Sci. Lett. **287**, 168-174.

[6] Shelly, D. R., 2009. Possible deep fault slip preceding the 2004 Parkfield earthquake, inferred from detailed observations of tectonic tremor, Geophys. Res. Lett., **36**, L17318, doi:10.1029/2009GL039589.

[7] Obara, K., 2010. Phenomenology of deep slow earthquake family in southwest Japan: Spatiotemporal characteristics and segmentation, J. Geophys. Res. **115**, B00A25, doi:10.1029/2008JB006048.

[8] Kikuchi, M., M. Nakamura, K. Yoshikawa, 2003. Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms, Earth Planets Space **55**, 159-172.

[9] Furumura, T., K. Imai, and T. Maeda, 2011. A revised tsunami source model for the 1707 Hoei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan, J. Geophys. Res., **116**, B02308, doi:10.1029/2010JB007918.

[10] Savage, J. C., 1983. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, J. Geophys. Res. **88**, 4984–4996.

[11] Nakanishi, A., S. Kodaira, S. Miura, A. Ito, T. Sato, J.-O. Park, Y. Kido, and Y. Kaneda, 2008. Detailed structural image around splay-fault branching in the Nankai subduction seismogenic zone: Results from a high-density ocean bottom seismic survey, J. Geophys. Res., **113**, B03105.

[12] Ariyoshi, K., T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2007. The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic slip propagation on a subduction plate boundary, Earth Planet. Sci. Lett. **256**, 136-146, doi:10.1016/j.epsl.2007.01.019.

[13] 有吉 慶介・松澤 暢・矢部 康男・加藤 尚之・日野 亮太・長谷川 昭・金田 義行, 2011. 東北地方太平洋沖地震・スマトラ島沖地震における連動型地震の考察, JAMSTEC Rep. Res. Dev., **13**, 17-33.

［大規模科学計算システム］高速化推進研究活動報告第５号より転載

並列コンピュータ Express5800の高速化

スーパーコンピューティング研究部　江川隆輔　岡部公起
情報部情報基盤課　伊藤英一　小野敏　山下毅
日本電気株式会社　撫佐昭裕　神山典　小久保達信
吉村健二　坂本英顕　金野浩伸
NEC システムテクノロジー株式会社　曽我隆

5.1 Express5800 の特徴

Express5800/A1080a-D（以下，Express5800）は，ノードあたり Intel Xeon X7560 プロセッサ（以下，X7560）を４台搭載し，512GB の主記憶装置を有するスカラ型コンピュータである．東北大学サイバーサイエンスセンターは，Express5800 を６ノード導入している．表 5.1-1 に Express5800 の主要諸元を示す．

表 5.1-1 Express5800 主要諸元

項目		諸元
最大演算性能		289.92GFLOPS
CPU 数		4
コア数		32
CPU	名称	Intel Xeon X7560
	動作周波数	2.26GHz
	最大演算性能	9.06GFLOPS（コアあたり） 72.48GFLOPS（CPU あたり）
	QPI	25.6GB/s
	キャッシュ	L1：コアあたり 32KB(命令)+32KB(データ)
		L2：コアあたり 256KB(命令/データ共用)
		L3：CPU あたり 24MB
主記憶装置	容量	512GB
	最大データ転送能力	34.1GB/s（CPU あたり）

X7560 は８コアを有する Intel 社製の 64bit プロセッサであり，メモリコントローラを CPU に内蔵し，CPUー主記憶装置間を直結している．また，QPI（quick path interconnect）アーキテクチャを用い，CPU 間の転送性能は，25.6GB/s である．図 5.1-1 に Express5800 のプロセッサ構成を示す．

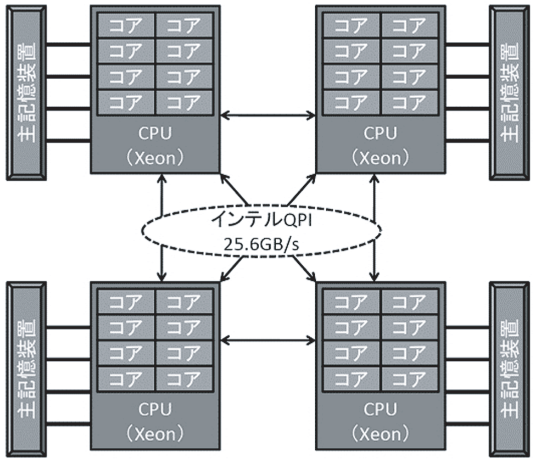


図 5.1-1 Express5800 のプロセッサ構成図

5.2 高速化技法

Express5800 で高い性能を得るためには，キャッシュの適切な利用とベクトル命令の活用が重要になる．ここでは Express5800 が搭載する X7560 の特性を活かした最適化手法を説明する．

5.2.1 キャッシュ・ブロッキングによる高速化

X7560 と主記憶装置間のメモリバンド幅は，34.1GB/s である．プロセッサあたりの理論ピーク性能が 72.48GFLOPS であることから，演算性能あたりのメモリバンド幅(Byte/FLOP)は 0.46 となり，SX-9 の 2.5 と比較してデータ供給能力が低いことがわかる．そのため，Express5800 ではキャッシュを有効に用いて，データ供給能力を補う工夫が必要になる．本節では，キャッシュ・ブロッキングによりキャッシュ内のデータを利用し，メモリのアクセス回数を削減する最適化手法について説明する．

(1) X7560 のキャッシュ構造

X7560 は，図 5.2-1 に示すように主記憶装置との間に L1 キャッシュ，L2 キャッシュ，L3 キャッシュの 3 階層のキャッシュを有している．L1 キャッシュと L2 キャッシュは各コアが個別に有しているが，L3 キャッシュは 8 つのコアで共有している．

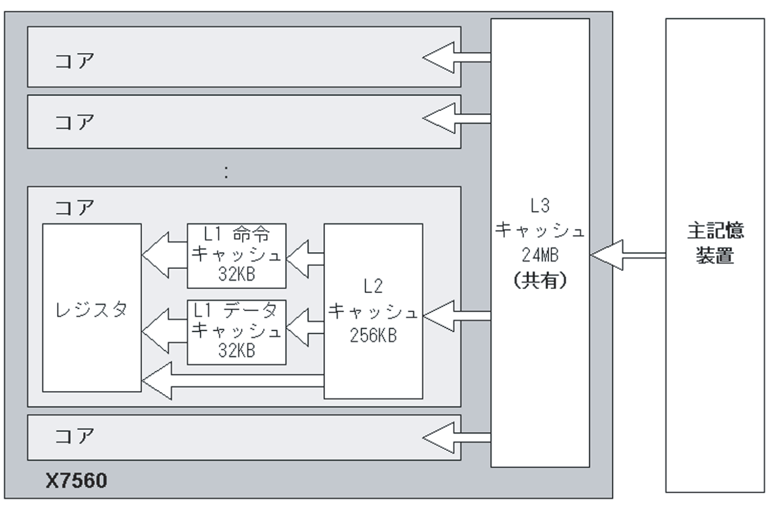


図 5.2-1 X7560 のキャッシュ構成図

キャッシュの特性として，L1，L2，L3 キャッシュの順にレジスタへ高速なデータ転送が可能である．したがって，プログラムの実効性能を向上させるためには，L1 キャッシュおよび L2 キャッシュを効果的に用いることが必要である．図 5.2-2 にキャッシュとプログラムの実効性能の関係を示す．この図は c=c+a(i,j)*b(i,j)の計算を行うループに対して，配列 a と配列 b の合計のメモリサイズを横軸に，実効性能を縦軸に取ったグラフである．配列 a と配列 b のデータが L1 キャッシュに乗っている間は高い性能を示しているが，データのサイズが L2 キャッシュの大きさになると性能は低下し，L3 キャッシュの大きさになるとさらに低下する．この結果から，高い実効性能を得るためには配列 a と配列 b のデータを L1，L2 キャッシュに乗せることが重要であることがわかる．

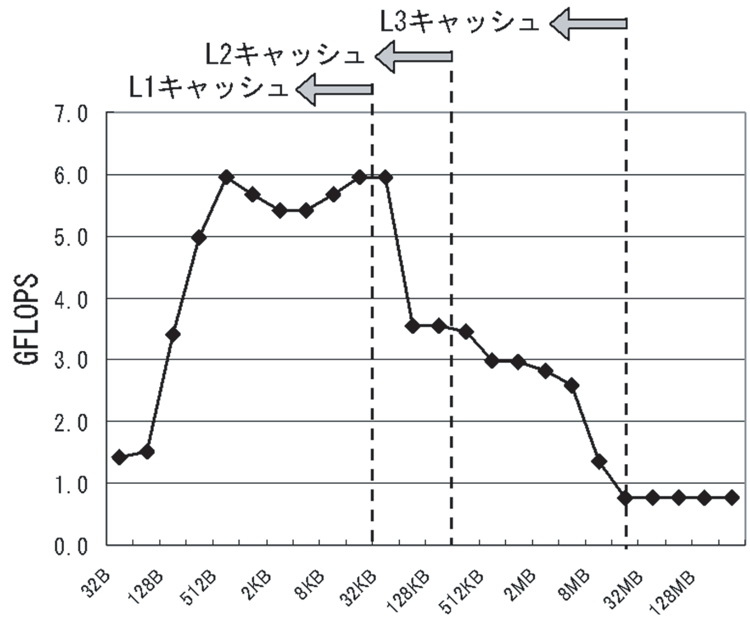


図 5.2-2 c=c+a(i,j)*b(i,j)の実効性能

(2)　キャッシュ・ブロッキング

キャッシュ・ブロッキングとは，キャッシュ上にあるデータの再利用性を高めるため，DO ループをキャッシュサイズに合わせて分割する手法である．

図 5.2-3 に行列積を行うループのコードを示す．この DO ループは配列 a と配列 b の積を配列 c に集計する 3 重ループ構造である．最内の i の DO ループで，配列 a と配列 c の要素に連続アクセスしている．配列 b は i の DO ループに依存していないので，この最内側ループが実行されている間，配列 b は同じ要素が利用される．以下にキャッシュ・ブロッキングにおけるループ長の決め方と手順を示す．

配列 a は j の DO ループに依存していないので，j の DO ループを実行している間，一次元目の要素数（n=1,000 の場合，倍精度実数で 8,000 バイト）だけアクセスする．このサイズであれば配列 a は L2 キャッシュ上に乗せることができる．しかし，配列 c の全データがアクセスされるため，配列 a のデータは L2 キャッシュから追い出される．

```
parameter(n=1000)
   :
do k=1,n
  do j=1,n
    do i=1,n
     c(i,j) = c(i,j) + a(i,k)*b(k,j)
    enddo
  enddo
enddo
```

図 5.2-3 オリジナルの行列積ループ

ここで k の DO ループを実行している間，配列 a のデータを L2 キャッシュに留め置くために， j の DO ループを分割し，配列 c がアクセスする範囲を制限する．L2 キャッシュのサイズは 256KB であり，32,768 個の倍精度実数データを乗せられる．最内の i のループ長が 1,000 の場合，j のループの長さを 25 にすれば，配列 a と配列 c の両方でアクセスする要素数は 26,000 個となり L2 キャッシュに乗せることができる． そこで図 5.2-4 に示すように，j と k の DO ループの外に増分 25 のループを設け，j の DO ループをループ長 25 でブロッキングする．

```
parameter(n=1000)
   :
do j2=1,n,25          
  do k=1,n             } j の DO ループでキャッシュ・ブロッキング
    do j=j2,j2+24     
      do i=1,n
       c(i,j) = c(i,j) + a(i,k)*b(k,j)
      enddo
    enddo
  enddo
enddo
```

図 5.2-4 j の DO ループでブロッキングする行列積ループ

(3) 性能評価

表 5.2-1 にキャッシュ・ブロッキング前後の性能結果を示す．キャッシュ・ブロッキングの結果，メモリアクセス回数が削減され，1.22 倍の性能向上が得られている．

表 5.2-1 行列積ループにおけるキャッシュ・ブロッキングの効果

	実効性能(GFLOPS)
キャッシュ・ブロッキング前の行列積ループ	2.24
j の DO ループでキャッシュ・ブロッキング	2.74

5.2.2 ベクトル命令の利用

X7560 のコアは，1 クロックサイクルあたり最大 4 演算を実行可能なアーキテクチャを採用している．このアーキテクチャを最大限に活用するため，コンパイラによるベクトル化が重要となる．

(1) ベクトル化の利用方法

コンパイラがベクトル化を行うのは，最内の DO ループに対し，以下の条件を満たす場合である．

① データの定義・引用に依存関係がないこと
② ループ中に複数のデータ型の演算(倍精度実数と単精度実数など)が混在しないこと
③ 間接参照によるメモリアクセスがないこと

Express5800 用のコンパイラ f95 は，コンパイルオプションを指定しなくても，ベクトル化可能なループをベクトル化する．プログラム中の DO ループがベクトル化されることは，コンパイル時にオプション「-vec-report3」を指定することで確認できる．図 5.2-5 にベクトル化される例と，図 5.2-6 にベクトル化されない例を示す．

図 5.2-5 では，DO ループがベクトル化の必要要件を満たしているので，コンパイラはベクトル化を行う．しかしながら図 5.2-6 では，ループ中の配列 c が配列 itbl を用いた間接参照となるので，コンパイラがデータの依存関係を解析できないため，ベクトル化が行われない．

```
      subroutine sub(n,a,b,c)
      real*8 a(n,n),b(n,n),c(n,n)
       do j=1,n
         do i=1,n
           c(i,j) = c(i,j) + a(i,j)*b(i,j)     ベクトル化された
         enddo
       enddo
       return
       end

test.f(7): (col. 7) remark: loop was not vectorized: not inner loop.
test.f(6): (col. 9) remark: LOOP WAS VECTORIZED.
```

図 5.2-5 ベクトル化が行われる例

```
       subroutine sub(n,a,b,c,d)
       real*8 a(n,n),b(n,n),c(n,n)
       integer*4 itbl(n)
       do j=1,n
         do i=1,n
           c(itbl(i),j) = c(itbl(i),j) + a(i,j)*b(i,j)    配列 c の依存関係が解析できないため
         enddo                                             ベクトル化できない
       enddo
       return
       end

test.f(8): (col. 7) remark: loop was not vectorized: not inner loop.
test.f(7): (col. 9) remark: loop was not vectorized: existence of vector dependence.
test.f(6): (col. 11) remark: vector dependence: assumed ANTI dependence between c line 6 and c line 6.
test.f(6): (col. 11) remark: vector dependence: assumed FLOW dependence between c line 6 and c line 6.
```

図 5.2-6 ベクトル化が行われない例

(2)　ベクトル化による性能

図 5.2-3 のコードを用いて，ベクトル化される場合と，ベクトル化を抑止する場合の性能差を示す．なおベクトル化を抑止するため，コンパイルオプション「-no-vec」を利用している．表 5.2-2 に示しすように，ベクトル化を行うことで 1.66 倍の性能差になることがわかる．

表 5.2-2 行列積がベクトル化された場合とベクトル化されない場合の実効性能

	実効性能(GFLOPS)
ベクトル化を抑止する場合	1.35
ベクトル化される場合	2.24

［報　告］計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用報告

実験Ｄにおけるスパコンを使ったシミュレーション演習

佐藤　昭
東北大学　電気通信研究所

東北大学工学部では、４年生を対象に「実験Ｄ」という授業を行なっている。これは、研究室に新たに配属された学生に、その研究室が行なっている研究の基礎理論を教え、また研究手法（理論解析・シミュレーション・実験手法等）を習得してもらうことを目的としている。我々の研究室では、化合物半導体ヘテロ接合およびグラフェン中の二次元電子ガスのプラズモン共鳴を利用したテラヘルツ波デバイスの研究を、実験と理論の両面から行なっている。本年度からイバーサイエンスセンターの「計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供」の制度を利用させていただき、我々が研究で行なっているシミュレーション手法を学生に学習してもらった。

我々の研究テーマの一つとして、数百 nm の長さ・間隔を持った周期格子金属ゲート構造にちょうど差周波数がテラヘルツ帯になるような可視光・赤外領域の２波長の電磁波を照射し、透過成分によってゲート直下の二次元プラズモンを励起させる、というものがある。格子ゲートの長さ・間隔・厚さ、あるいはゲート金属の種類によっては金属中の表面プラズモンによる異常透過が起こり、それによって二次元プラズモン励起効率を高めることが期待できる。この系の解析に、我々は FDTD 法を用いている。今回初めてサイバーサイエンスセンターのスパコンを使用するにあたり、フリーの FDTD シミュレータである Meep を並列コンピュータ Express5800 上にインストールし、並列実行を行なった。学生にはインストール作業も手伝ってもらうことで、スパコンの使い方に慣れてもらった。なお、スパコン利用の際には、Windows 環境においては Tera Term、Linux 環境においては ssh コマンドを用いてスパコンにリモートログインを行なった。（失敗談として、互換性のなさが原因で Meep を SX-9 上に移植することが出来なかった。そこで、後述するように、この研究テーマとは違うテーマで使っている自作のシミュレータを SX-9 に移植し、学生に使ってもらった。）

学生には、複数組の構造パラメータに対し、シミュレータを実行し、出力を画像に変換するという一連の作業を繰り返してもらった。典型的な電磁波透過の様子を図１に示す。理論的に頭で分かっていることであっても、実際に現象を可視化された形で見ることにより、より深く理解ができたのではないかと思う。

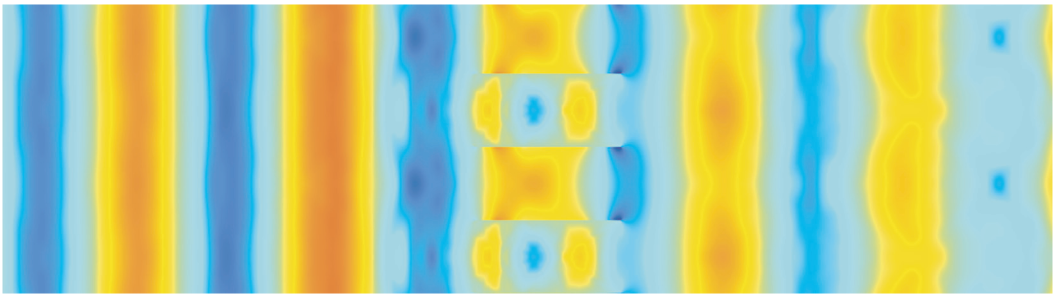


図１．周期格子金属ゲート構造における、電磁波の透過の様子。左から入射、中央が格子ゲート。

また、SX-9 にも触れてもらうため、グラフェン内での電子間散乱を解析するシミュレータを移植し、Express5800 と SX-9 での実行速度の比較をしてもらった。この問題は電子間散乱の散乱積分（三重積分）を数値的に求める部分がボトルネックであり、本来は超並列コンピュータ向きの計算であるが、CPU 数の関係もあり、使用制限の範囲内では SX-9 でベクトル化させた方が速かった（計算効率としては、7GFLOPS/CPU と性能をフルに発揮できていない状況であった）。

謝辞

最後に、貴重な資源を使わせていただき、また学生に有益な経験を与えていただいた東北大学サイバーサイエンスセンターの皆様に感謝いたします。

［報　告］計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用報告

産学連携 PBL による人材育成のためのスーパーコンピュータ利用の報告
― Sendai Scheme の出前インターンシップ ―

曽根秀昭*1，中尾光之*2，林優一*3，庄子栄光*4，村上隆生*5
*1 東北大学サイバーサイエンスセンター／大学院情報科学研究科
*2 東北大学大学院情報科学研究科
*3 東北大学大学院工学研究科
*4 （株)仙台ソフトウェアセンター(NAViS)
*5 （株)サイエンティア

1. はじめに

東北大学大学院情報科学研究科は，企業原理に基づく透過的で効率的なシステム構築技術を大学院生に修得させることを目的として，経済産業省の産学人材育成パートナーシップ事業の支援を受けて，コスト意識や研究開発の透過性などの企業原理を大学での研究に持ち込む「出前インターンシップ」を地元企業技術者のインストラクタの下に実施してきた。企業の現場で実施する通常のインターンシップと異なって，企業からのインストラクタが大学に赴いて学生の訓練に参加するので，「出前インターンシップ」と称している。

平成 22 年度に産学連携 PBL の「電磁情報セキュリティのための解析ソフトウェアの高精度化」を実施した際に，東北大学サイバーサイエンスセンターが試行する「計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供」を申し込んで，スーパーコンピュータ SX-9 をソフトウェア開発の実践的教育に利用した。本稿では，そのカリキュラムを紹介し，SX-9 を利用した人材育成の結果について報告する。

2. 出前インターンシップによる産学連携 PBL の特徴

上述の産学連携 PBL は，経済産業省の産学人材育成パートナーシッププログラム「産学連携を担う創造型 IT・エレクトロニクス人材育成体系の形成」を構成する一部である。このプログラムが実施するカリキュラムは， IT・エレクトロニクスに関する先端技術の基礎と実践に関する知識の習得，マーケティング，製品企画から技術経営まで企業家としての基礎知識の習得，および企業技術者の視点を導入した研究型 PBL による研究プロジェクト管理能力の醸成を経て，IT・エレクトロニクス企業が求める企業マインドと研究開発能力を備えた人材の育成を目指すものである。プログラムの全体の特徴として，地元の大学・高専等と地元企業などが参加して協同で運用する，プロジェクト遂行型のグループワークを中心とした独自開発の産学連携教育プログラム（Sendai Scheme 仙台スキーム）に基づいている[1]。

このプログラムのカリキュラムとして，東北大学大学院情報科学研究科は平成 22 年度に専門予備教育講義と産学連携の PBL を実施した。専門予備教育講義（各 15 コマ／セメスター）は「高信頼システムデザイン」と「技術者のためのビジネス入門」の２科目である。産学連携の PBL は「リアルタイムシステムのためのソフトウェアの高信頼化」と「電磁情報セキュリティのための解析ソフトウェアの高精度化」の２コースであり，情報科学研究科内の各研究室レベルで１年間かけて実施し，受講対象はそれぞれの PBL について修士課程１年次の学生２～３名を予定して計画した。

産学連携 PBL は，企業で実際のシステム開発で用いられている開発プロセスを大学の研究開発の中に取り入れ，学生が研究を進める中で企業の開発プロセスを長期間にわたり実際に体験でき

る。特に，事前の計画立案，定期的な報告と文書化，レビューを通した多角的検討，確立されたプロセスによる効率的作業という大学で経験できない企業の業務遂行プロセスを経験できる。さらに，企業の開発プロセスを未解決の研究課題の解決に利用する方法を考えることをとおして，開発プロセスを深く身につけ，課題に応じて応用できる柔軟性を獲得できる。企業の開発プロセスは，継続性のあるシステム開発を前提にしており，これまで研究者や学生個人の資質に依存し，属人性の高かった研究用ソフトウェアの開発を組織の力に革新できる。そのため，大学における研究の効率化，迅速化を進めることができる点で大学関係者にとっても意義のあるものである。

学生の企業における業務体験であるインターンシップは，学生に企業で業務を体験させることで，大学で学んでいる知識の応用力を身につけたり，業界や企業の業務内容を体験したり，企業で業務を行うことで大学とは異なる社会規律（挨拶や時間を守ることなど）や業務の進め方（報告や文書化など）を体験することで就職や職業観の確立に役立てることを目的に行われている。その一方で，体験期間が短く現実的な業務体験ができないことや情報関連企業では守秘義務の関係から顧客業務の開発に従事することが難しいという問題を抱えている。

本カリキュラムの「出前インターンシップ」は，連携する企業の技術者が大学に出向き，大学教員の与える研究テーマを顧客要求としてとらえて学生に企業内と同じ業務の進め方（開発プロセス）に従事させることでインターンシップと同じ体験をすることができる。すなわち，事前に計画を策定し，進捗にあわせて定期的に報告を行い，成果を文書化し，工程ごとにレビューによる承認を受けるという企業内の業務と同じプロセスを長期間にわたり体験することで，これらの業務内容を確実に身につけることができる。さらに，企業の技術者と大学内とはいえ，一緒に作業を行うことにより，社会規範を身につけることができる。大学で学んだ知識の応用分野は，大学の研究テーマに沿っており，まったく異なる分野よりも深い応用力を修得できる。専門予備教育は，企業の一線で活躍する技術者と密に交流する機会を提供することで業務や業種の間口を広げるだけでなく，インフォーマルなコミュニケーションによるこれらの情報の補完に効果的である。このように，「出前インターンシップ」は，これまでのインターンシップの課題を解決しつつ，同等以上の効果をあげることができるものである。

3. 産学連携 PBL のカリキュラム

今年度の PBL で情報科学研修 A の一部として実施した「電磁情報セキュリティのための解析ソフトウェアの高精度化」コースの内容は，以下の通りである。

電磁情報セキュリティ環境を解析するソフトウェアを開発する中で，提携先企業から実践的教育の支援を得，設計から検査までのソフトウェア開発プロセスの知識と作法を習得する。電磁環境と情報セキュリティを融合させる研究テーマ[2]に，修得したスキルを応用し，物理現象を高精度で解析するソフトウェアの信頼性を向上させる手法と高信頼性解析ソフトウェアを使用した研究の高精度化を進める。

講師は情報科学研究科教員と企業講師である。教員は自身が作成した電磁界シミュレータを用いた研究経験が有り，電磁気理論およびプログラミング技法に通じている。企業講師はソフトウェアプロダクションの実践的プロセス管理を指導できる。

教員はソフトウェア構築の課題を与え，高精度な解析手法を教授する。

企業講師はソフトウェア開発の実践的管理技術と信頼性確保技術を指導する。情報科学研究科教員と企業講師が連携し，信頼性の高いソフトウェアを開発すると同時に，開発が極めて困難で企業における研究開発が進んでいない高精度な解析ソフトウェア開発における信頼性確保手法の確立に取り組む。

講座の内容は，以下のとおりである。

（1）システムエンジニアとマネージメント能力（情報科学研究科教員，企業講師）

・なぜプロジェクトマネジメントが重要でそれを学ぶ必要があるのかを企業エンジニアの経験を踏まえて講義

・引き続いて行われる体験学習のモチベーションを高める
（２）FDTD 法(時間領域差分法)プログラム基礎（情報科学研究科教員）
・FDTD 法プログラム
・高精度数値計算プログラミング
（研究課題となる電磁情報セキュリティに関して必要な知識は既習とする。）
（３）ソフトウェア開発工程（情報科学研究科教員，企業講師）
・ソフトウェア開発プロセス
・ソフトウェア開発体制
・ソフトウェア開発モデル
（４）開発計画と要求分析（システム分析，アーキテクチャ分析）工程（企業講師）
●開発計画
・開発対象/開発体制（PL/SE/PG 等，リソース確保）/開発スケジュール
・開発におけるリスク要因の分析，開発予算/利益目標
・納品物の定義
●要求分析
・ドメインに基づいた要求分析
・ユースケース図，コミュニケーション図，コンポーネント図，クラス図，状態マシン図による要求分析法
・アーキテクチャ設計
（５）開発計画・要求分析の演習（情報科学研究科教員）
・電磁情報セキュリティ環境を解析する為のソフトウェアの基本仕様となる解析モデルと解析すべき問題を与え，それを対象に開発計画，要求分析の演習を週１回（約１ヶ月）の間隔で行う。演習では以下の内容に力点をおく。
・全体的な開発手順
・要求分析と要求定義
（６）基本設計と詳細設計工程（情報科学研究科教員，企業講師）
●基本設計
・システム全体の概要図（モデル）
・機能定義
・単体テスト仕様書の作成
●コーティング規約を含め開発環境仕様に記載されている内容を解説
●WBS(Work Breakdown Structure)/開発スケジュール詳細版の作成方法について説明
●詳細設計
・モジュールレベルの設計仕様書の作成
・単体テスト仕様書の作成
（７）基本設計と詳細設計の演習（情報科学研究科教員）
・解析モデルと解析すべき問題が与えられた電磁情報セキュリティ環境の高精度解析ソフトウェアを対象に基本設計，基本設計に基づく詳細設計の演習を週１回（約１ヶ月）の間隔で行う。特に，各設計書の作成，作業報告書の作成に重点をおいて演習を行う。
（８）プログラム実装と単体テスト工程（情報科学研究科教員，企業講師）
●詳細設計書に基づいて，対象機能の実装を行うプログラム実装について，その留意点を講義する。
●単体テスト（モジュールテスト/ユニットテスト等）では，実装されたモジュールを単体テスト仕様書に基づきテストを行い，単体テスト結果報告書を作成することを講義する。
（９）プログラム作成から単体テストケース作成の演習（情報科学研究科教員）
・電磁情報セキュリティ環境の高精度解析ソフトウェアを対象に，設計内容に基づくプログラムの作成から単体テストケースの作成，実機を用いた単体テストの実施までの一連の演習を週

1回の間隔で約2ヶ月行う。これらの演習結果に対して，必要に応じてレビューを実施する。

（１０）プログラム結合テストと性能評価工程（情報科学研究科教員，企業講師）

●結合テスト（システムテスト）では，実装されたモジュール群を開発環境上で一連の機能として実現できているかを確認するための結合テスト仕様書を作成し，作成した結合テスト仕様書に基づきテストを実施し，結合テスト結果報告書を作成することを講義する。

●総合テストでは，実運用環境上で本番運用を考慮したテストケースを総合テスト仕様書として作成し，それを用いてテストを行い，テスト結果を総合テスト結果報告書にまとめることを講義する。さらに，性能評価が必要な際は，このフェーズで負荷テストも行うことも解説する。

（１１）テストと性能評価（情報科学研究科教員）

・単体テストが完了した電磁情報セキュリティ環境の高精度解析ソフトウェアを対象にプログラム結合テストと総合テストのテストケースを作成し，実機を用いたこれらのテストと性能評価を行う。これらを週1回（約1ヶ月）の間隔の演習として実施する。

最初の講座（1）は2つのコースで共通で行い，後の演習は各コースのグループごとに設計等を演習した。演習の成果物は，PBL 用 trac サーバを利用して，受講者が成果物をコミットし，企業講師がレビューを実施する方法をとった。

プログラム実装およびテスト等の演習において，東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-9 を使用した。

trac の画面の例

講義の風景

演習の風景（前年度）

4. 評価

今年度の受講者は２名であり，募集時の２，３名の想定通りであった。人数が少ないことの理由は，専門分野が関係するので，講座の第４回以降は参加者が限られることである。研究に必要な基礎スキルを得るために覚悟して受講し，充実した研修が展開できた。一方で，ソフトウェアの品質等に関する第２，３回は自由聴講公開講座の可能性が広い。出席率は100%であり，少人数講座であるため，柔軟なスケジュール調整ができた。

受講学生の満足度は，アンケート評価の結果，「想像より非常に良かった」である。高い評価の理由は，電磁情報漏洩の研究に必要な基礎スキルを得るとともに，不足していたプログラミングスキルおよびマネージメントスキルを得ることができたためである。また，企業の講師の「現実で通用する」技術を知ることができ，また，レビューでは実際のトラブルの例など「生きた」知識を得ることができ，得る物が多かったと，受講者の評価が高い。

このPBLが目標とした通りに，受講者は，電磁情報セキュリティ向けの信頼性の高い解析ソフトウェアを開発でき，精度と信頼性の高度な要求に応える解析ソフトウェアを実現するためのアイデアを自ら創出するだけでなく，他の人のアイデアを適切に評価できるようになり，企業の実践的手法を取り入れ，作業の計画性，管理性，可視化が向上した。

学生，運営，大学，および産業界の立場から目標達成度を見れば，以下のような評価である。

（１）学生に関する観点

これまで研究室で行ってきたソフトウェア開発法は，テストフェーズを明確に設けていないため，完成度の低いプログラムにとどまっていた。企業で実施されている効率的なソフトウェア開発法を学ぶことにより，これまでのプログラムに比べ完成度の高いプログラムを目指す事が可能となった。

本課題で開発するFDTDプログラム作成では，スパイラルモデルを用い，モジュールもしくは段階に応じたテストフェーズを実施する事により完成度の高い，再利用可能なプログラムの作成が可能であることを理解した。

正しく動く小規模なプログラムの積み重ねにより，スケジュールに従ってプログラムの作成が可能となった。

企業の現場におけるプロジェクト管理技術を実際的に知り，演習することができた点で，カリキュラムが意図した効果が得られた。

納期を意識したスケジュール管理を徹底し，受講者各自が責任を持って分担タスクを実行した。また，受講者同士のディスカッションを積極的に行うことで，問題点を自己解決できる能力も得た。目標を概ね達成している。

スケジュールの遅れが多少生じたが，企業側・大学側講師の助言を生かした仕様見直しにより，最終工程の納品にまで至った。講座第５回以降で，次回開催までの間に済ませるべき設計やコーディング等の「宿題」の負荷が想定よりも大きかった。これは進捗の障害になるおそれがあるので，多少の高精度化等を犠牲にしてでもコンパクトな課題を設定すれば本来の研修目的に注力してカリキュラムの効果が高まるものと期待できる。

すべての学生が，実用的な技術を得ることができ極めて有意義な講座であったと述べている。教育効果の観点からは目標を十分達成している。

（２）運営に関する観点

前年度には，演習のための事前準備の見積が不適切であったために，プログラミング言語の習得，数値解析手法FDTD法の習得，及びスパコンの利用法の習得に予想以上に時間を取られ開発に遅延が生じた。スパイラルモデルでの開発を考える際に，中間目標の設定が困難であったためである。実践的教育の演習課題として取り上げる問題について，受講者および企業講師に過度の負担とならないように適度な規模とするよう，カリキュラムを見直す等の改善を行い，今年度には課題の選定にとくに配慮し，適切な課題設定になった。

多人数での知識共有や各自の行動の重要性など，企業の講師の「現実で通用する」技術がよく

わかる PBL 教育であり，また，レビューでは実際のトラブルの例など「生きた」知識を得ることができ，企業講師による実践的教育によって企業人材の基礎スキルを学習させることができた。

一方で，プログラム開発手法以外の知識について，たとえば企業内での他のマネージメント要素(企業経営的な視点など)との位置づけを理解させる視点が足りなかったところもある。これについて，産業人材の育成を考えるならば，企業運営の視点も含めた幅広い「企業の仕組み」を伝える必要があり，来年度の課題であると考える。

（３）大学に関する観点

本学は，実学主義の教育目標を掲げ実践的技術者の養成を行い，また，地域企業との産学連携を重視しており，本研修における地域企業との連携による実践的教育は極めて意義深い。

しかし，本大学院研究科では，これまでソフトウェアに関する実践的技術の教育ならびに地域企業との産学連携に基づく教育をほとんど行ってこなかったが,「ソフトウェア開発工程」および「開発計画と要求分析（システム分析，アーキテクチャ分析）工程」の講座への関心は高く，学内教育体系への位置づけと組み入れの検討は意義深いものと思われる。

（４）産業界に関する観点

企業講師の研修分析シートにおいて，教育の高い効果および企業としての社会貢献に対する意識が述べられており意義深いと期待する。

コース終了後の成果発表会において，講師派遣企業および受講者による報告を行って参加者と意見交換し，有意義であった。

（５）今後の課題

企業内におけるマネージメント要素(企業経営的な視点など)について，産業人材の育成の中に位置付けて，企業運営の視点も含めた幅広い実践スキル習得のための教育と評価の方法の開発が課題である。

本プログラムによって多人数でのプロジェクト運営スキルを早期に習得することにより，研究活動を通したスキルの反復学習を行うことができる。企業人材の育成を通して，副次的に研究室での知の共有の円滑性を高めることも期待できるため，今回と同様な研究基礎スキル習得を通した PBL 企業人材教育を実施することが必要である。

本課題ではテストを行う際，得られた計算結果と物理現象を比較し結果の妥当性を検証する必要がある。そのため，開発を行ったモジュールに対応した物理現象を得るために必要な物理モデルの検討を行う必要がある。

5. おわりに

産学 PBL の実施により，これまで我流で行っていたソフトウェア開発に比べ，テスト工程，プログラムの細分化を行うことにより，信頼性が高く再利用可能なソフトウェアが完成すると期待される。これまで修士論文等で用いられたプログラムは作成者が卒業すると同時に高度のメンテナンスが難しい状態に陥っていたが，企業で実施されているプログラム開発手法を取り入れることで研究を引き継いだ者がメンテナンス可能なプログラムが可能となると予想される。

本プログラムは，東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。

参考文献

[1] 庄子栄光，宮西洋太郎，樋地正浩，岩本正敏，脇山俊一郎，富樫敦，曽根秀昭，中尾光之，“理念共有型の地域産学協同 IT 人材育成体系の形成”，第 9 回情報科学技術フォーラム　FIT2010, RO-003 (2010.9.7-9).

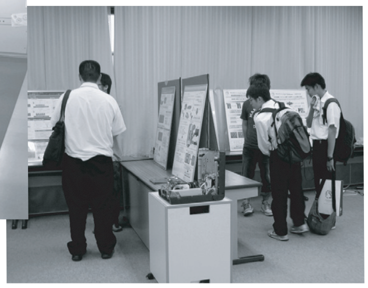
[2] Yu-ichi Hayashi, Hideaki Sone, “The Effect of Position of a Connector Contact Failure on Electromagnetic Near-Field around a Coaxial Cable,” IEICE Trans. Commun., Vol. E92-B, No. 6, pp.1969-1973 (June 2009).

［報　告］

サイバーサイエンスセンター　オープンキャンパス報告

江川隆輔
スーパーコンピューティング研究部

2011年7月27日から28日にかけて、東北大学では、主に入学を希望されている皆さんの進路選択の一助となること、日頃の教育・研究活動を広く一般に公開することを目的に、オープンキャンパスを開催しました。当センターでも、大規模科学計算システムを構成するスーパーコンピュータ、大学のネットワークインフラを支える機器、コンピュータ博物館の展示に加え、ネットワーク研究部、スーパーコンピューティング研究部、先端情報技術研究部の研究活動の一般公開を行いました。今年度は、例年の2倍以上の見学者が訪れ、若い皆さんの活気と熱意に満ち溢れたオープンキャンパスになりました。初めてスーパーコンピュータを見た学生さん達は、そのスケールの大きさ、一定温度に保たれた計算機室の涼しさ？に驚きながら、スーパーコンピュータの用途や、必要性、自分の持っているパソコンとの違いなど、積極的に説明員に質問する姿が見受けられました。また、研究開発部の展示では、実際に大学で研究に取り組んでいる大学院生や学生さんと直接触れあい、入学試験の対策、大学生活や研究について話す良い機会になったようです。近い将来、訪れてきた皆さんと東北大学でお会いできるのを、楽しみにしています。



［報　告］

東北大学サイバーサイエンスセンター講習会 in 会津大学の開催報告

水木 敬明
ネットワーク研究部

東北大学サイバーサイエンスセンターは、会津大学情報センター（情報処理センター）との交流を深めることを目的として、全国共同利用である東北大学大規模科学計算システムに関する講習会を企画し、平成 23 年 9 月 21 日（水）に会津大学研究棟において標記講習会を開催しました。

本講習会では、ベクトル並列型スーパーコンピュータ SX-9 の紹介、システムの運用や研究開発、利用方法の説明ののち、会津大学のみなさまに端末室にて実際に東北大学のスパコンに遠隔ログインして利用を体験していただきました。

今回の講習会では、会場となりました会津大学情報センター（情報処理センター）のスタッフのみなさまに大変お世話になり、厚く御礼申し上げます。また、このような機会を通じて、東北地区における大規模科学計算利用がますます発展していくことを期待いたします。

講習会のプログラム：

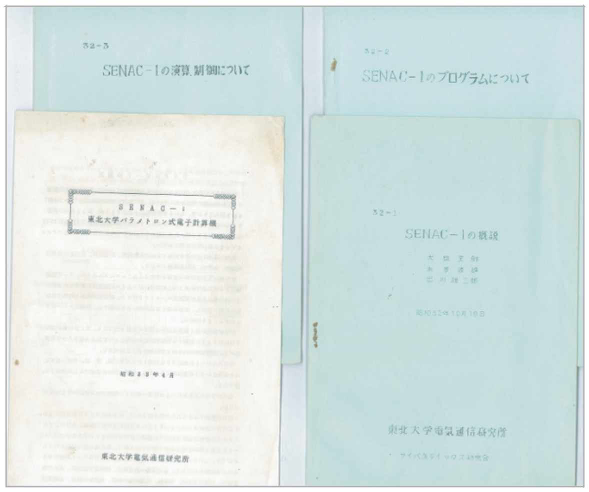
主催：東北大学サイバーサイエンスセンター、会津大学情報センター（情報処理センター）
日時：平成 23 年 9 月 21 日（水）　9:00 ～ 12:00
会場：会津大学研究棟 2F CALL 教室 1

9：00～10：00
「東北大学大規模科学計算システムの運用とベクトルコンピューティングに関する研究開発」
東北大学サイバーサイエンスセンター　小林広明
10：00～10：30
「東北大学のスーパーコンピュータの利用手続きや負担金等について」
東北大学情報部情報基盤課　小野敏
10：40～12：00
「スーパーコンピュータの体験利用」
東北大学情報部情報基盤課　大泉健治、小野敏
東北大学サイバーサイエンスセンター　水木敬明

[展示室便り②]

SENAC-1（続）

今回はSENAC-1に関する印刷物の展示品を紹介いたします。展示品１はSENAC-1を開発した東北大学電気通信研究所が発行した資料です。「SENAC-1　東北大学パラメトロン式計算機」は学内へのSENAC-1の広報活動か、啓蒙活動用に作られたものと思われます。内容は読み易く書かれており、SENAC-1の性能、機器構成、利用法、利用可能分野、そしてプログラミングの例が記載されています。紹介されているプログラミング言語は機械語のようです。当時の読者は、この機械語の意味を理解できたのでしょうか。最後に全文を掲載いたしました。この資料から、計算機の構成とその利用環境など、当時の計算機センターの雰囲気を感じていただけたらと思います。他の資料、「SENAC-1演算制御について」では、演算回路とその制御回路の概略、「SENAC-1のプログラムについて」では、数値計算を念頭においた機械語によるプログラムと数式の自動プログラムが説明されています。「SENAC-1の概説」では、開発目的、基本設計、諸元について書かれており、その内容は前回紹介いたしました。ちなみに、機械語という表現は筆者が記したものであり、今回紹介した資料では、見当たりませんでした。多くはInstruction Code、命令、Register、Memory、記憶装置という表現でだけ説明されています。



展示品１　電気通信研究書　発行資料

計算センターで活動する電子計算機

日本IBMにIBM650を主体とした，計算センターが10月１日から開設された。また日本電子工業振興協会では国産の電子計算機を使った計算センターを11月１日から開設，さし当って日本電気，富士通信機製の計算機が備えつけられて動きはじめた。リレー式の計算機による計算センターはすでに２年前から動いているが，国産電子計算機による計算センター開設はこれがはじめてである。各企業での要求がふえたことがこうしたセンターを設置させる理由となったのであろうが，日本の電子計算機が試作の段階を脱して，いまや商品化，実用化の段階に達したことを示すものとも考えられる。ここに，計算センターにデビューした電子計算機を紹介しよう。

上　東北大学の電気通信研究所に設置されたＳＥＮＡＣ－１の全景。中央が操作卓，手前右が入力装置，左が出力装置。後方が演算制御および記憶装置。右端に見えるのは自動電源電圧調整装置。

右　磁気ドラム記憶装置。この中に命令，数値が蓄えられる。透明容器の中の黒色部分が本体で回転数１分間約20,000，記憶容量176語。これだけがアメリカ製で，現在代りの磁気ドラムを国内メーカーが製作中である。

展示品２　雑誌の記事

展示２は、当時の雑誌の記事です。雑誌名は不明です。この中に「計算センターで活動する電子計算機」の記事があり、そのトップにSENAC-1が紹介されています。次のページはIBMの計算センターが載っています。

ＳＥＮＡＣ－１の概要

ＳＥＮＡＣ－１はパラメトロン式電子計算機であつて、科学用電子計算機として世界一流の能力を有している。その取扱う数の範囲は10^{-39}～10^{+39}という膨大なもので、しかも有効桁数は十進法で１３桁、即ち１兆円の計算を１円の精度で行なえるものである。その計算速度は加減算で１秒間約1,000回、乗算で約３００回、除算で約１００回という相当な高速度で、且パラメトロンを使用したため誤りがない。

本機の構成は図の示すが如く大体演算制御部、記憶装置、直流及び高周波電源部、操作卓、入出力装置よりなる。

計算機の入力は印刷電信用６単位さん孔テープにさん孔され、テープ読取機により電気信号に直され、計算機に送り込まれ記憶装置に貯えられる。そこで操作卓にある計算開始のスイッチを押すと、計算機は演算制御部で自動的に計算を遂行し、所要の答えを印刷機により印刷する。同時にテープにさん孔することも出来る。

電子計算機の最も重要な部分は種々の計算を行つたり、又その計算が正しく行われるように制御する演算制御部の機能によつて定まるのであつて計算機が人工頭脳と呼ばれるのもこの部分をさすのである。

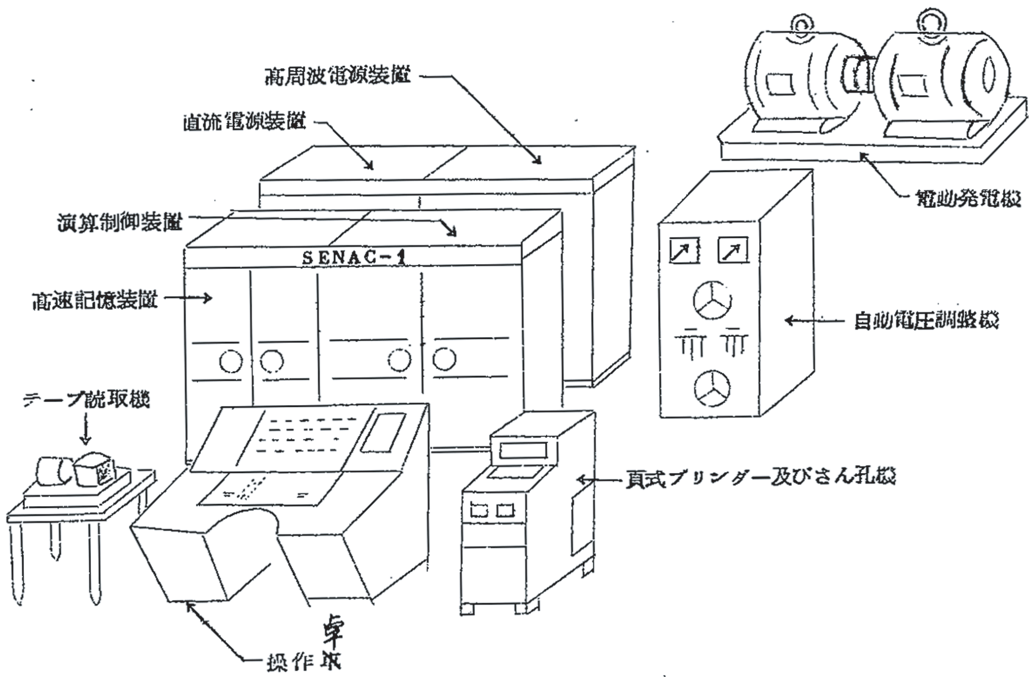
ＳＥＮＡＣ－１の遂行できる機能（例えば加、減、乗、除、自乗、などこれを命令という）の数は約２００ある。世界一流の計算機でもこの数は１００位である。

したがつてＳＥＮＡＣ－１は世界一頭のよい機械であるといつても過言ではない。

電子計算機で与えられた計算を行うには、命令を組合せて計算手順を定め、（これをプログラミングという）これを計算の最初に計算機に入力としてあたえると計算機は以後手順通りに忠実に計算を遂行するのであるが、SENAC－１は多種多様の命令を数多く持つているので、あらゆる種の計算を行うことができ、しかもプログラミングが簡単である。ＳＥＮＡＣ－１の遂行できる主なる計算をあげると、多元連立一次方程式、行列及び行列式、高次代数方程式、微積分方程式、補間法、任意函数の展開、複素数の演算、論理演算

等のプログラミングが極めて容易にできる。従つてその応用範囲も、電気通信、電力、原子力、航空、造船、光学、機械、土木、河川、建築等の工学部門はもとより、物理化学、天文気象、地球物理、地質、測量等の理学部門や、経済、統計等の人文科学部門等のあらゆる部門にわたつて使用できる。

SENAC－1配置図



プログラミングの例

或る人の原稿料が1枚につきA会社でX円、B社でY円である。今A社にa枚、B社にb枚の原稿を送つたとすると、この人の原稿料の手取りMは源泉徴収を、15%とすると

$$M=(1-0.15)(aX+bY)=0.85(aX-bY)$$ である。

これをこの計算機で計算するには、記憶装置の0、1、2、3、4番地に夫々a、X、b、Y、0.85の数値を入れて置けば

命令は　50・0　0番地の内容aを累算機に置く
　　　　26.1　a×Xを行う
　　　　5K.2　乗数registorにbを置く
　　　　22.3　aX＋bYが出来る
　　　　26.4　0.85(aX+bY)の結果が累算機上に出る。

これで計算は終りである。

「SENAC-1 東北大学パラメトロン式計算機」（全文）

[共同利用支援係]

[Web 版大規模科学計算システムニュース]より

大規模科学計算システムニュースに掲載された記事の一部を転載しています。 http://www.ss.isc.tohoku.ac.jp/tayori/

コンパイラアップデートのお知らせ（No.125）

■2011 年 10 月 17 日に並列コンピュータ用のコンパイラ、ライブラリを以下のバージョンへアップデートします。

Fortran コンパイラ Version 12.1
C/C++コンパイラ Version 12.1
MPI Version 4.0
MKL Version 10.3

■コンパイラのバージョンアップに伴い、既存のソースコードは再コンパイルして実行することをお勧めいたします。

Fortran コマンド名：f95
C/C++コマンド名：cc
オプションの説明は、-help オプションでも参照できます。

MPI を利用する場合
Fotran コマンド名:mpif95
C/C++コマンド名:mpicc
オプションの説明は、-help オプションでも参照できます。

■機能の詳細については下記ディレクトリにコンパイラ、ライブラリごとにリリースノート（和文）を置いてありますので、ご参照ください。

gen: /usr/ap/Par-manual/

（共同利用支援係、共同研究支援係）

― SENAC 執筆要項 ―

１．お寄せいただきたい投稿内容

次のような内容の投稿のうち、当センターで適当と判定したものを掲載します。その際に原稿の修正をお願いすることもありますのであらかじめご了承ください。

・一般利用者の方々が関心をもたれる事項に関する論説
・センターの計算機を利用して行った研究論文の概要
・プログラミングの実例と解説
・センターに対する意見、要望
・利用者相互の情報交換

２．執筆にあたってご注意いただく事項

(1)原稿は横書きです。
(2)術語以外は、「常用漢字」を用い、かなは「現代かなづかい」を用いるものとします。
(3)学術あるいは技術に関する原稿の場合､200 字～400 字程度のアブストラクトをつけてください。
(4)参考文献は通し番号を付し末尾に一括記載し、本文中の該当箇所に引用番号を記入ください。
　・雑誌：著者, タイトル, 雑誌名, 巻, 号, ページ, 発行年
　・書籍：著者, 書名, ページ, 発行所, 発行年

３．原稿の提出方法

原稿のファイル形式は Word を標準としますが、PDF での提出も可能です。サイズ*は以下を参照してください。ファイルは電子メールで提出してください。

－Word の場合－
　・用紙サイズ：A4
　・余白：上＝30mm　下＝25mm　左右＝25mm　綴じ代＝0
　・標準の文字数（45 文字 47 行）

＜文字サイズ等の目安＞
　・表題＝ゴシック体 14pt 中央　・副題＝明朝体 12pt 中央
　・氏名＝明朝体 10.5pt 中央
　・所属＝明朝体 10.5pt 中央
　・本文＝明朝体 10.5pt
　・章・見出し番号＝ゴシック体 11pt～12pt
　　*余白サイズ、文字数、文字サイズは目安とお考えください。

４．その他

(1)執筆者には、希望があれば別刷 50 部を進呈します。50 部を超える分については、著者の実費負担とします。別刷の希望部数等は投稿の際に申し出てください。
(2)投稿予定の原稿が 15 ページを超す場合は以下まで前もってご連絡ください。
(3)初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
(4)原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内　情報部情報基盤課共同利用支援係
e-mail　uketuke@isc.tohoku.ac.jp
TEL　022-795-3406

編 集 後 記

今号も多くの利用者の皆様に記事をお寄せいただき、内容のとても充実したボリューム満点の広報誌 SENAC となっています。

この広報誌 SENAC は年に 4 回発行されており、SENAC 編集部会が中心となり、その編集にあたっています。号ごとに開催される編集部会の会議に参加していつも思うのは、毎度多くの原稿を集めることが出来るのはすごいなぁ、ということです。(私はネットワーク研究部なので、少し“ひとごと”のような書き方ですみません；実際は決して“ひとごと”ではなく、ちょっとは実働しています、念のため…。) これを実現可能にしている一つの理由は、大規模科学計算システムが非常に層の厚い利用者の皆様に貢献し、そして支えられていることがあるのだと思われます。今後もますます充実した SENAC となりますよう、利用者の皆様からの更なるますますご投稿を期待しています。

本業（？）である某 TAINS ニュースの発行もがんばろうと、毎回の編集部会で思いを新たにする昨今です。(T.M)

暑かった夏が嘘のように涼しくなりましたね。電力使用制限令も前倒しで解除され、どうなることかと思われた大規模科学計算システムの運用も無事行うことができました。東北では、芋煮、はらこ飯等が美味しい季節です。例年そうですが、この季節になるにつれ（秋から年度末にかけて)、システムは利用者ジョブで混み合います。ちょっとだけ早めに計画を立て、大規模科学計算システムをご利用いただければ幸いです（ちなみに、春も夏も美味しい季節ですよ)。(K.O)

サイバーサイエンスセンター東隣に地震で被災した研究室が入るプレハブの研究棟が完成(平成 23 年 10 月)

SENAC 編集部会

小林広明　曽根秀昭　水木敬明　後藤英昭
江川隆輔　早坂哲夫　大泉健治　小野　敏
高橋洋一　斉藤くみ子

平成 23 年 10 月発行
編集・発行　東北大学
サイバーサイエンスセンター
仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
郵便番号　980-8578
印　　刷　大成印刷株式会社

システム一覧

計算機システム	ホスト名	機　種
スーパーコンピュータ	super.isc.tohoku.ac.jp	SX-9
並列コンピュータ	gen.isc.tohoku.ac.jp	Express5800

サービス時間

利用システム名	利用時間帯
スーパーコンピュータ	連　続　運　転
並列コンピュータ	連　続　運　転
館 内 利 用	月曜日～金曜日は 8:30～21:00、 土・日・祝日は閉館

ジョブクラスと制限値

計算機システム	処　理	ジョブクラス	ＣＰＵ時間	メモリ容量
スーパーコンピュータ	会話型	(4cpu)	1 時間	8GB
	バッチ処理	ss (4cpu)	1 時間	256GB
		s (4cpu)	無制限	32GB
		p8 (8cpu)	〃	512GB
		p16 (16cpu)	〃	1024GB
		p32 (32cpu)	〃	1024GB×2
		p64 (64cpu)	〃	1024GB×4
並列コンピュータ	会話型	(4 並列)	1 時間	8GB
	バッチ処理	as (非並列)	無制限	16GB
		am (Marc 専用)	〃	16GB
		am2 (Marc 専用)	〃	128GB
		a8 (8 並列)	〃	128GB
		a16 (16 並列)	〃	256GB
		a32 (32 並列)	〃	512GB

目次

東北大学サイバーサイエンスセンター
大規模科学計算システム広報　Vol.44 No.4　2011−10