

HPCI戦略プログラム
分野3
防災・減災に資する地球変動予測
補足説明資料
(気象気候関連質問回答参考資料)

平成28年4月26日

気象研究所 齊藤 和雄

【第2回質問】行政事業レビュー「公開プロセス」(1)のところに書いてある予測可能時間というキーワードに関連して、研究成果の冒頭でおっしゃった全球レベル0.87キロの格子で2日間を再現したという意味は、予測ではない。2日間予測したという事ではないのか。

(分野3)

計算の初期値として観測されたある日の大気データを用いているが、本研究の目的は予測ではなく、世界で初めてとなる0.87kmという高解像度格子で個々の積雲対流を含めて全球大気の計算を行い、さまざまな気象擾乱での雲や対流の役割を明らかにすることである。20km程度の計算格子で行われている現在の天気予報の将来の方向性を探るという実用的な意義に加え、積雲対流の多様性の解明、対流とより大規模スケールの相互作用の実態の解明、近年の雲観測衛星による検証研究の開拓等、科学的な意義も大きい。

分野3

「京」を駆使しての世界最高解像度
(870 m)の地球大気シミュレーション

「京」の20,000ノードを約72時間使用

結果: 台風や温帯低気圧などの気象擾乱に加え、個々の積雲対流の詳細な構造まで再現に成功

※積雲対流:

- 台風など雲擾乱の最小構成要素
 - 水平スケール~数km
- => 非常に重要なが、解像度=数kmは計算不可能であった

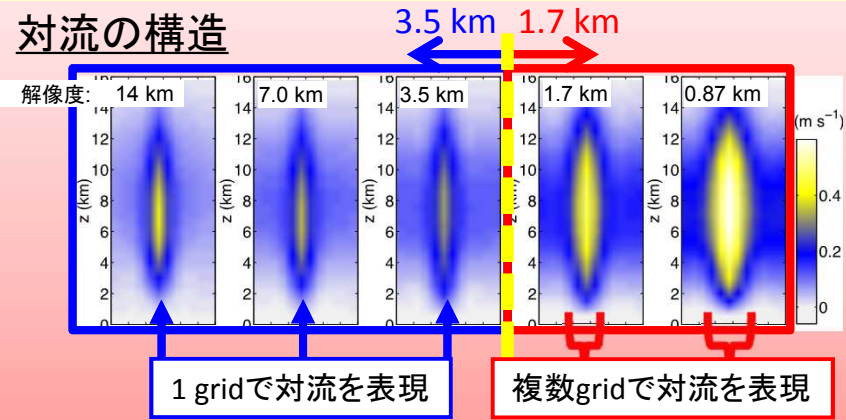
新たな発見

- 解像度1 kmを超える全球計算:
対流の詳細構造まで再現
地球上での対流の統計的性質を解明
- 対流の性質(構造・強度):
解像度3.5 km ⇔ 1.7 kmの間で変化
(対流の構造まで計算するためには約3 km以上の解像度が必要)

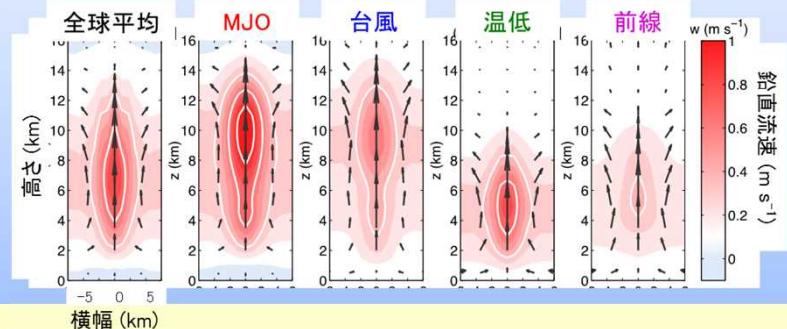
Miyamoto et al. (2014, 2015)



対流の構造



擾乱別の対流の構造



分野3

【第2回質問】データサイエンスや、ビッグデータ等に対応する研究においては、数学も必要。多量なデータから、重要な情報を取り出すことは、スーパーコンピュータの非常に重要な使い方の一つであるが、各分野においては、どの様な取り組みをおこなったか。

(分野3)

分野3のメソ課題では、集中豪雨など空間スケールの小さな激しい現象を高精度に予測する研究を行った。このような現象は時間スケールも小さいため、予測の結果は初期値に大きく依存する。精度の良い初期値を作成するためには、観測データの情報を適切に数値モデルに取り込むためのデータ同化といわれる数学的な手法を用いている。戦略課題研究では、従来の手法に加えてアンサンブル予報と変分法を組み合わせるハイブリッド変分同化法などの先端的な開発を行うとともに、決定論予測可能性と変分法データ同化の再定式化に関する理論研究も行った。後者については平成26年度気象学会論文賞を受賞している。

データ同化 4次元変分法

評価関数 : $J = J_b + J_o + J_c$

$$= \frac{1}{2}(x_0 - x_0^b)^T B^{-1}(x_0 - x_0^b) + \frac{1}{2}(HMx_0 - y^o)^T R^{-1}(HMx_0 - y^o) + J_c$$

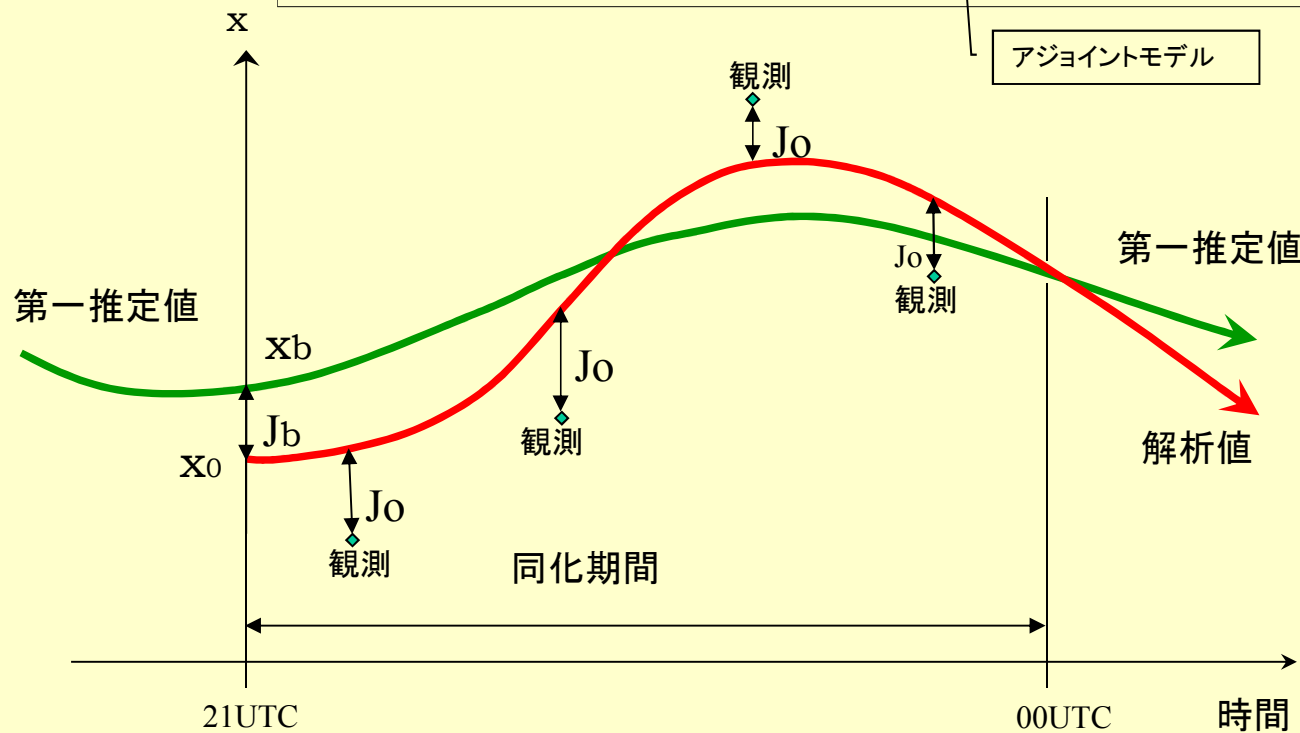
評価関数の勾配 : $\nabla_{x_0} J = \nabla_{x_0} J_b + \nabla_{x_0} J_o + \nabla_{x_0} J_c$

$$= B^{-1}(x_0 - x_0^b) + M^T H^T R^{-1}(HMx_0 - y^o) + \nabla_{x_0} J_c$$

数値モデル

ペナルティ項

アジョイントモデル



最小値探索

評価関数、勾配、 X_{0n}

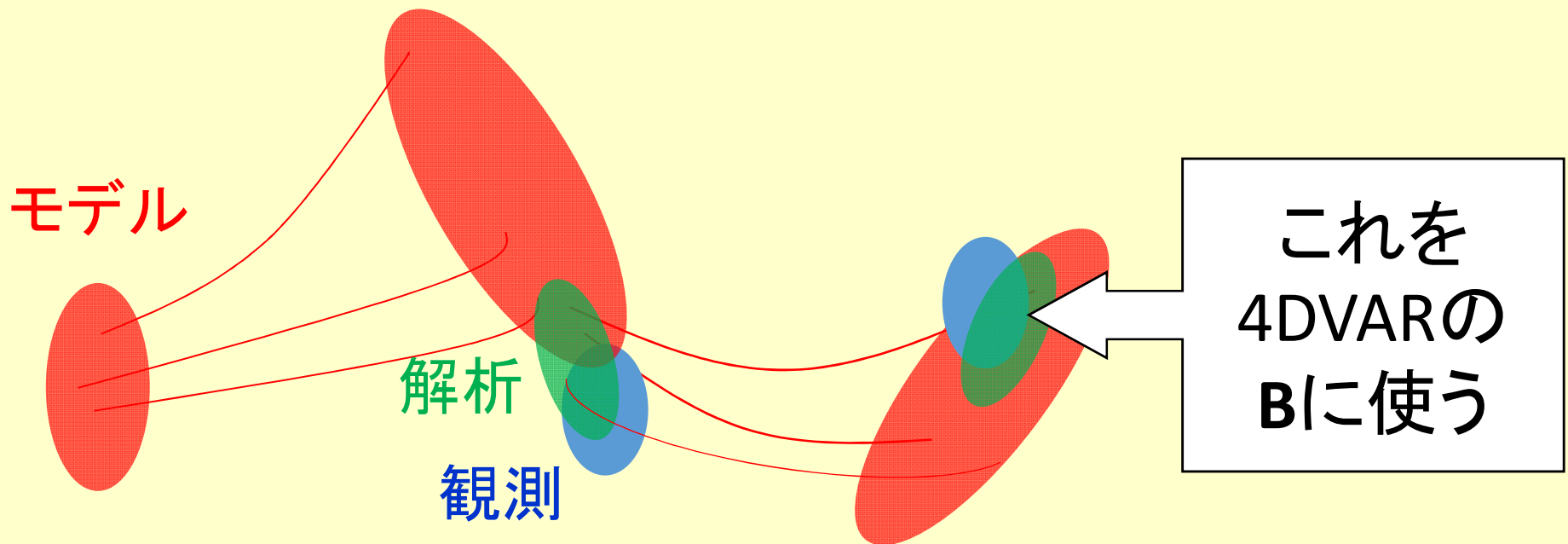
↓ 最適アルゴリズム
準ニュートン法、共役勾配法など

X_{0n+1} を決定する。

任意の観測時刻のデータをその時刻のデータとして同化することができる。
(実際のシステムではタイムスロットを決めておく。メソ解析では1時間おき)

Hybrid EnKF-4DVAR (Lorenc 2003; Wu et al. 2008)

- 4DVARでは事前にBを与えなければならない
- Bの構成方法
 - 従来: NMC法 B (過去の予報値の差を統計処理)
 - Hybrid法: EnKFに基づく B (時々刻々変化)



“Hybrid EnKF-4DVAR”

アンサンブル変分同化法(EnVar)とは？

データ同化：第一推定値 x_0^f と観測値 y_t から「最適な値」 x_0 を求める

下記の評価関数 J が最小になる(勾配 ∇J が0になる)ような x_0 が「最適」

背景項

観測項

評価関数

$$J = \frac{1}{2} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^f)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^f) + \frac{1}{2} \sum_t [H(M_t(\mathbf{x}_0)) - \mathbf{y}_t]^T \mathbf{R}_t^{-1} [H(M_t(\mathbf{x}_0)) - \mathbf{y}_t]$$

評価関数の勾配

$$\nabla J \equiv \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}_0} = \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0^f) + \sum_t \left[\frac{\partial H(M_t(\mathbf{x}_0))}{\partial \mathbf{x}_0} \right]^T \mathbf{R}_t^{-1} [H(M_t(\mathbf{x}_0)) - \mathbf{y}_t]$$



$\nabla J=0$ をどう解くかによって複数の方法がある

	Bの与え方	$\nabla J=0$ を満たす x_0 の求め方	の計算方法
4DVar	気候値	陰に解く(非正規性を考慮)	線形近似したM,Hのadjoint
EnKF	アンサンブル(流れ依存)	正規化して陽に解く	アンサンブルにより近似
Hybrid-4DVar	アンサンブル(流れ依存)	陰に解く(非正規性を考慮)	線形近似したM,Hのadjoint
EnVar	アンサンブル(流れ依存)	陰に解く(非正規性を考慮)	アンサンブルにより近似

EnVarでは、adjointを用いることなく、陰に解析値が求まる

分野3

The screenshot shows a web browser window displaying the homepage of the Meteorological Research Institute (MRI). The URL is www.mri-jma.go.jp/Topics/H26/270320/Hyousyou20150320.html. The page features the MRI logo and name in both Japanese and English. A navigation menu includes links for 'TOP', '研究活動について', '研究部について', '刊行物', '気象研究所概要', and '案内・問い合わせ'. The main content area is titled '露木義気候研究部長が気象集誌論文賞を受賞' (Director of the Climate Research Department, Tsuyuki, receives the Meteorological Society of Japan Paper Award). The article text states that Director Tsuyuki received the award for his work on deterministic predictability and data assimilation. The award title is '日本気象学会気象集誌 (Journal of the Meteorological Society of Japan) 論文賞'. The award theme is '最も確からしい状態の決定論予測可能性と変分法データ同化の再定式化'. The awarding paper is cited as: Tsuyuki, T., 2014. Deterministic predictability of the most probable state and reformulation of variational data assimilation., *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 599-622, Special Edition on AICS International Workshop on Data Assimilation. <http://dx.doi.org/10.2151/jmsj2014-606>. A link for 'これまでの受賞者はこちら' (Previous award winners here) is provided at the bottom.

気象庁気象研究所 | x

www.mri-jma.go.jp/Topics/H26/270320/Hyousyou20150320.html

気象研究所
Meteorological Research Institute

サイト内検索 サイトマップ ENGLISH

TOP 研究活動について 研究部について 刊行物 気象研究所概要 案内・問い合わせ

TOP > トピックス > 露木義気候研究部長が気象集誌論文賞を受賞

露木義気候研究部長が気象集誌論文賞を受賞

このたび、露木義気候研究部長が「日本気象学会気象集誌論文賞」を受賞しました。

受賞者

露木 義 気候研究部長

賞の名称

日本気象学会気象集誌 (Journal of the Meteorological Society of Japan) 論文賞

受賞テーマ

最も確からしい状態の決定論予測可能性と変分法データ同化の再定式化

受賞論文

Tsuyuki, T., 2014. Deterministic predictability of the most probable state and reformulation of variational data assimilation., *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 599-622, Special Edition on AICS International Workshop on Data Assimilation. <http://dx.doi.org/10.2151/jmsj2014-606>

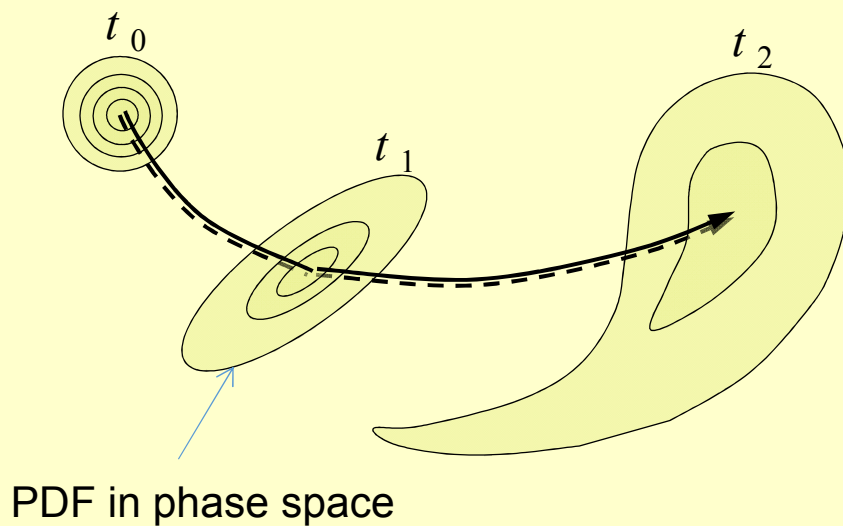
[これまでの受賞者はこちら](#)

Schematic diagram of the evolution of PDFs

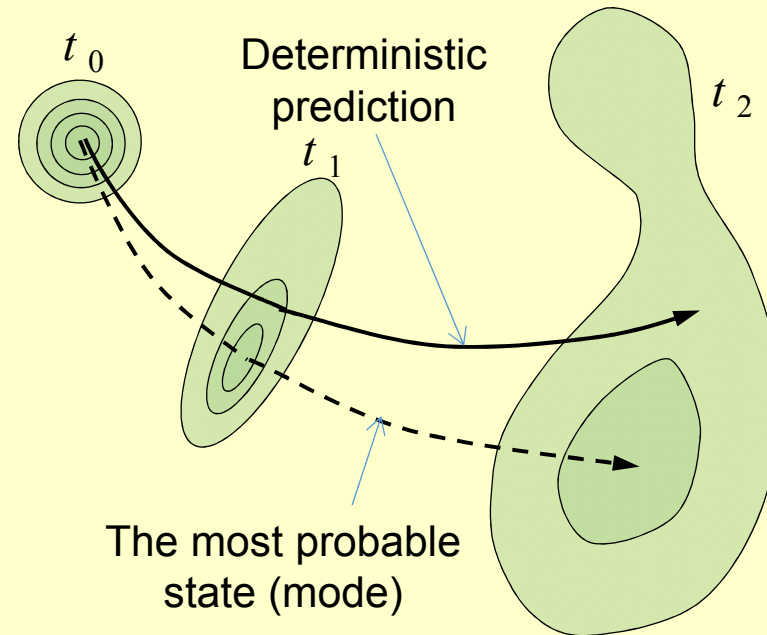
$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \operatorname{div} \mathbf{F} \equiv \mathbf{0}.$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, t).$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \operatorname{div} \mathbf{F} \neq \mathbf{0}.$$



- Canonical Hamiltonian system
- Quasigeostrophic equations



- **Cumulus convection**
- Climate system

【第2回質問】アカデミアの分野においても、具体的ニーズがあることを示す必要がある。各分野の基礎研究においてもインパクトのある課題があることを、日本が遅れを取っているということも含めて、分かりやすく説明する事が重要。

(分野3)

全球雲解像大気モデルでは、地球シミュレータ、「京」という資源に恵まれた日本が世界の研究をリードしている。これまでの全球大気計算で、半経験的にしか表現できていなかった対流雲の働きを直接計算できるため、天気予報や気候予測に革命的な進化をもたらすものとして世界中の気象・気候科学者の注目を集めている（例えばNature vol.453に、従来の延長ではない革新的な高解像度化の必要性を議論した世界モデリングサミットの記事）。



World Modelling Summit for Climate Prediction

ECMWF - Reading (UK), May 6-9, 2008

NEWS

NATURE | Vol 453 | 15 May 2008

They say they want a revolution

Climate scientists call for major new modelling facility.

Climatologists have called for massive investment in computer and research resources to help revolutionize modelling capabilities. The eventual aim is to provide probabilistic climate predictions that are as useful, and usable, as weather forecasts.

At the end of a four-day summit held last week at the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts in Reading, UK, the scientists made the case for a climate-prediction project on the scale of the Human Genome Project. A key component of this scheme, which would cost something up to, or over, a billion dollars, would be a world climate research facility with computer power far beyond that currently used in the field.

Questions on how severe the effects of global warming will be, and which regions will be hit in what ways, are beyond the capabilities of current climate science, at least in part because of computing constraints. Today's climate models are run on computers in the 10-teraflop range, meaning they are capable of 10 trillion operations a second. Despite this speed, models on these computers are still coarse-grained, cutting the world into cells more than 100 kilometres across.

Increasing computing power 10,000 times

"We need to be breathtakingly bold."
— Leo Donner

— to speeds in the hundreds of petaflops — would allow modellers to study simulations at the kilometre scale, enabling better predictions on the activity of hurricanes and, eventually, the local deep convection that transfers much energy into the upper atmosphere (see 'A real solution?'). This research could then be fed into operational models.

The scientists think they could answer at least some of the 'big' questions on the effects of global warming if the technology was available. But national climate-modelling efforts, such as those of the Met Office in Exeter, UK, or the National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado, aren't attracting the required level of funding. Although Japan's Earth Simulator in Yokohama was once the world's fastest computer, there are now 29 faster ones, with the first petaflop machines only months away.

"We need to be breathtakingly bold, frankly, in terms of some of the calculations that we're going to do in order to push the climate-prediction effort forward," says Leo Donner, a physical scientist at the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory of Princeton University, New Jersey. Antonio Navarra, a climate modeller at the National Institute of Geophysics and



Researchers from around the world gathered in Reading, UK, for the summit.

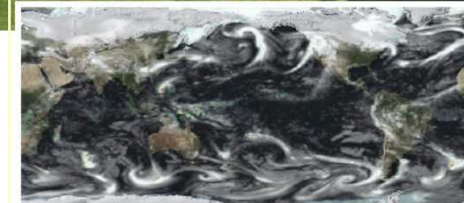
Volcanology in Bologna, Italy, spells out the implication: "We're reaching the point where national resources are insufficient to answer the scientific questions."

More money and cutting-edge challenges would also provide some hope of retaining highly trained programmers with expertise in climate modelling. Conference chair Jagadish Shukla of the Institute of Global Environment and Society in Calverton, Maryland, says this resource is "decreasing faster than the sea ice" as staff are lured from research by the financial rewards and job security provided by companies such as Google.

Addressing the summit on its opening day, economist Jeffrey Sachs, the director of the Earth Institute at Columbia University,



© HOPE/ECMWF



State of the art: a model (left) from the UK National Centre for Atmospheric Science and the Met Office running on Japan's Earth Simulator.

New York, said that there would be "a lot of interest among politicians in investing the hundreds of millions of dollars necessary, if scientists can provide answers to key questions... such as future food supply". Although governments are the obvious source of funding, Lawrence Gates, a now-retired climate scientist from the Lawrence Livermore National Laboratory in California, urged the attendees to explore philanthropic options.

How increased investment is divided between new facilities and existing ones is likely to be controversial. Some fear that a single global institute could threaten national centres, potentially taking the onus off governments to fund the institutions that are closest to stakeholders and could be expected to provide the predictions that have most real-world use. "Everyone is agreed that there needs to be a substantial investment in climate modelling, but whether a single centre is the solution is another question. There may be other ways," says John Mitchell, the chief scientist at the Met Office. Donner says that a sketch, presented on the conference's last day, of how the global facility might fit into the research world "seems to relegate national centres to little more than distributors of data".

However, Shukla was adamant that "every science breakthrough leads to the formation of an

a darwinian change in the way we are working and we shouldn't be afraid of that," says Navarra. The meeting could have come to grief on such differences, according to Julia Slingo, the director of the Centre for Global Atmospheric Modelling at the University of Reading, but in the end the level of consensus, she says, was "fantastic".

Various attendees expressed frustration at the fact that the new facility could not be funded purely on the basis of the world-class science it would do — and indeed the fact that it would produce great research might count against it, making it seem more like a "toy for the boys" than a policy-informing instrument.

"If we just ask for enhanced understanding, then we have very little chance of getting the necessary funding," warned Shukla. But as Mitch Moncrieff from NCAR put it "we need a quantum leap in research to provide better predictions, even if the politicians don't get that". And there was widespread agreement that they need to get it fast. "We need a revolution as it has got to be done extremely quickly," said Brian Hoskins, director of the Grantham Institute for Climate Change at Imperial College London, UK.

Olive Heffernan

A real solution?

Is the answer to climate prediction sitting in your pocket? Lenny Oliker, John Shalf and Michael Wehner of the Lawrence Berkeley National Laboratory in California think it could be. In a proposal discussed at the Reading climate-modelling summit (see main story) they suggest that the very small processors in mobile phones might be ideal components for very large climate computers — if 20 million of them could be wired together in the right way.

To run at the sort of kilometre-scale resolution that could accurately model cloud processes, they argue, a computer has to be able to run

at a sustained speed of around 10 petaflops, and a peak speed of perhaps 20 times that or more. If built with traditional high-performance chips such as AMD's Opteron or Intel's Xeon, such a machine would be extremely expensive and power-hungry — perhaps requiring as much as 100 megawatts. Processors developed for cell phones are small — less than a square millimetre in area — and frugal in their power requirements, needing less than a tenth of a watt each. These advantages, the researchers argue, far outweigh the slower speed at which such processors work and would permit

construction of a multi-petaflop computer that was much cheaper both to build and to run. In some ways this is an extrapolation of the approach that IBM has taken to its successful Blue Gene line of supercomputers, which also rely on many relatively small and slow processors. But it goes further in the sheer number of processors and in an architecture designed specifically for the demands of climate calculations, rather than general-purpose computing. Per Nyberg of Seattle-based supercomputer makers Cray — which, like rivals IBM and NEC, sent speakers to the summit with an eye to business opportunities

— was understandably sceptical. "You can come up with back-of-an-envelope calculations about how cheaply you can build a computer but you have to be very, very careful." He argues that radical approaches can founder on software and on efficiency of usage, with a useful rate of number crunching far below the peak speed. And if the machine doesn't work as advertised, the expense of developing programs for it could be wasted. Wehner acknowledges the risks, but thinks careful prototyping and code development could minimize them. "We should build it and see," he says. **Oliver Morton**

【第2回質問】「京」において、ニーズインの開発として、各分野における学術研究のために「京」が必要だということを示す必要がある。

(分野3)

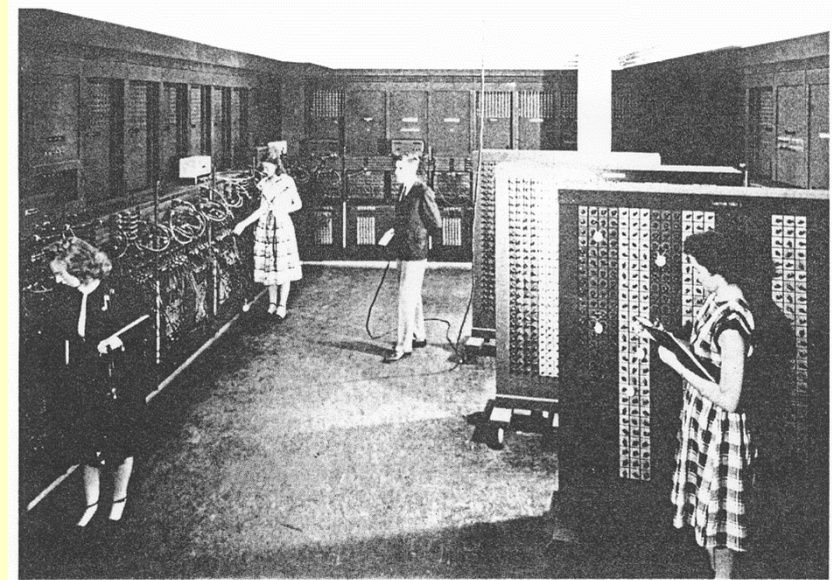
気象予測は、電子計算機の黎明期から計算科学の最も重要な適用分野となってきたおり、「京」のような先端スパコンにおいてもそのことは変わっていない。気象は非常に自由度が大きく、水の相変化・放射・熱伝導など様々な物理プロセスを含んでいるため、直接計算は不可能である。パラメタライズなどの粗視化は免れないが、気象予測精度の改善というニーズにこたえるためには、物理プロセスの正しい理解という学術研究が不可欠で、「京」のようなスパコンが必要である。

電子計算機による数値予報の開始

1946年 アメリカのペンシルバニア大学、
デジタル計算機エニアック(ENIAC)を
製作

メモリーは 23 個、真空管 18800個
(300FLOPS)

ノイマン(von Neumann) 数値予報への応
用を提案



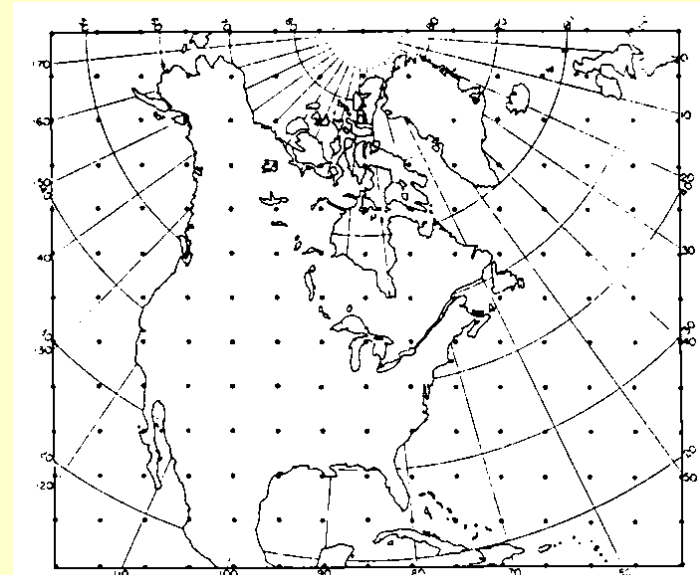
1950年、チャーニーら エニアックを使い、
24時間の数値予報に成功

格子間隔 45°Nで 736km、
格子点の数は15×18個(右図)

500hPaでの大気の流れを予報
二次元、非圧縮性の順圧モデル

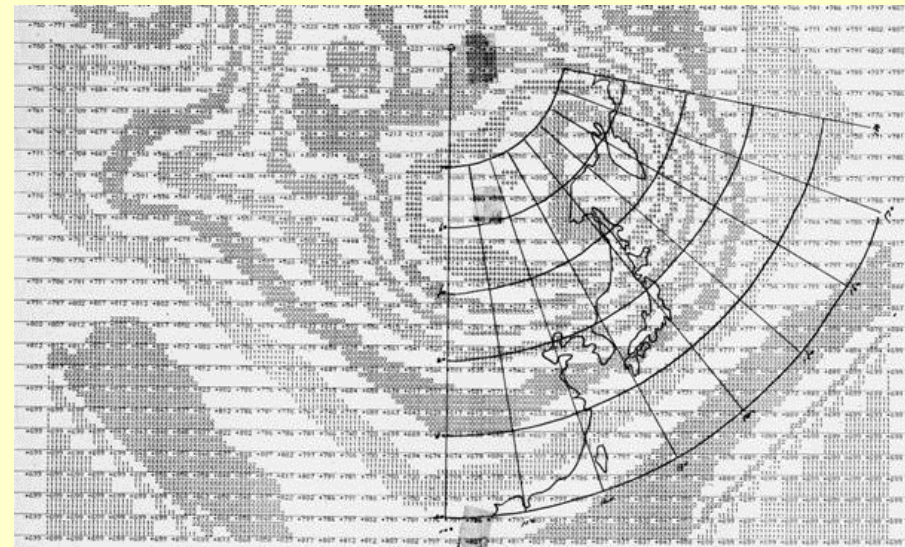
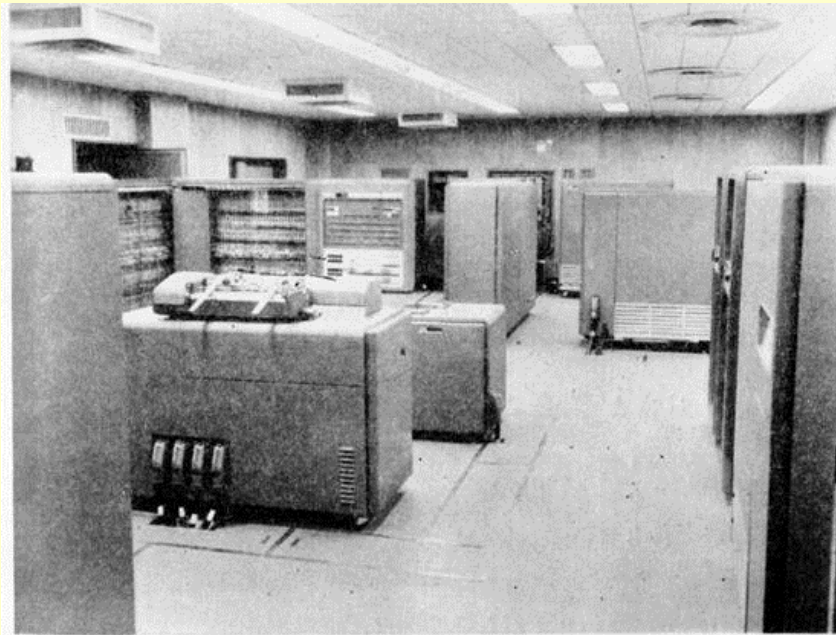
$$d/dt(f+\zeta) = 0$$

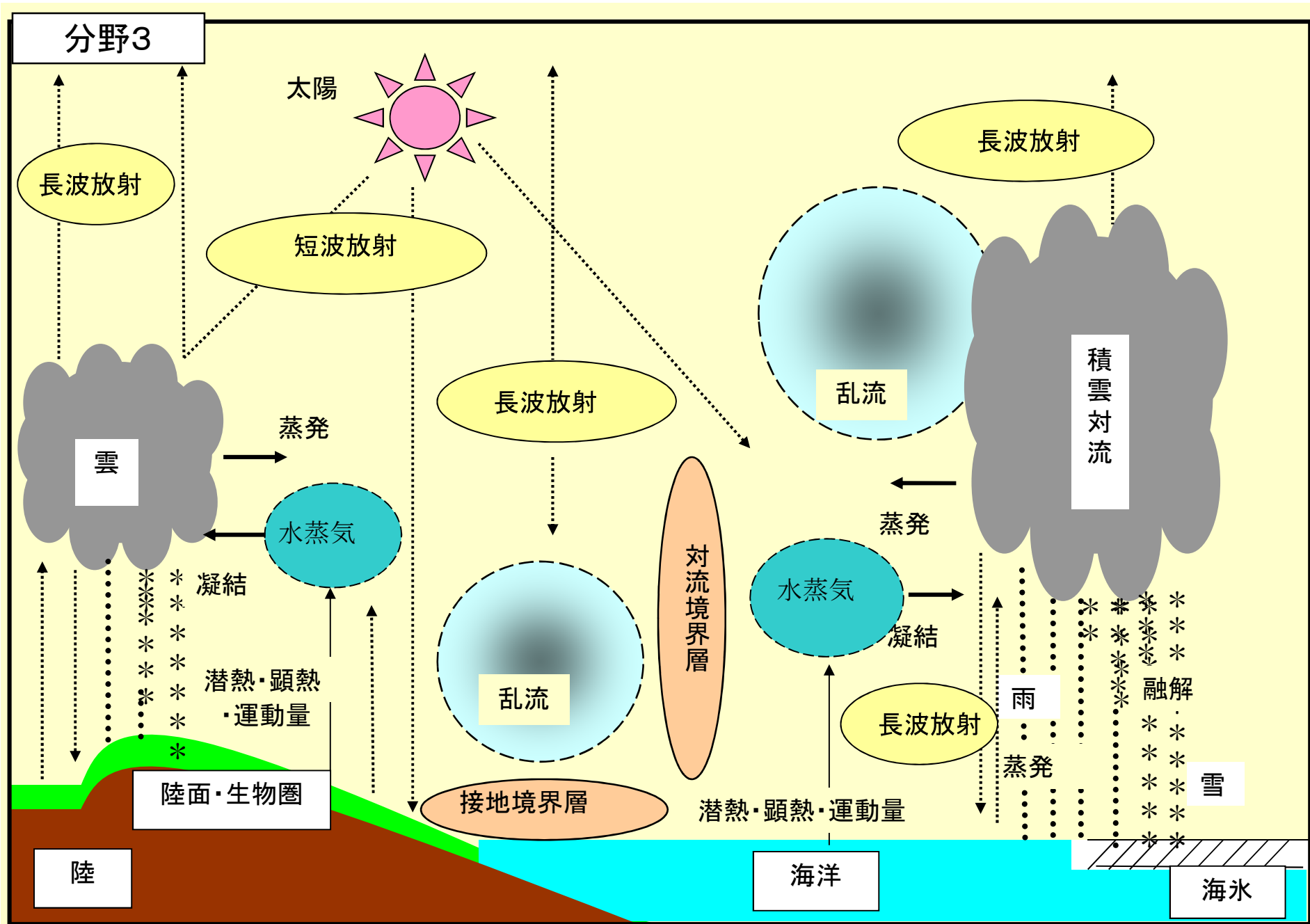
24時間予報2例を計算するのに35日



日本での数値予報の業務化開始

- 1955年 米国気象局がIBM704を導入、北半球順圧モデル(一層)を業務化
- 1959年 気象庁が日本の国家機関として初めてIBM704を導入
- 1960年 北半球順圧モデル業務化(381 km、1層)





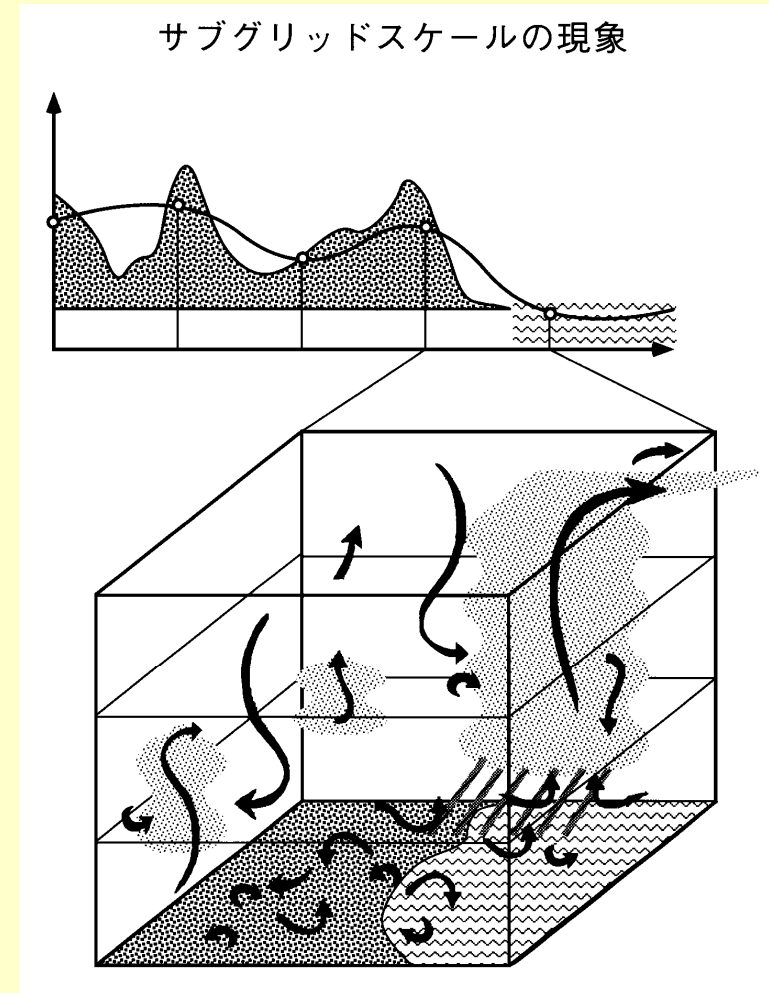
大気中の物理過程

パラメタリゼーション

大気の支配方程式:

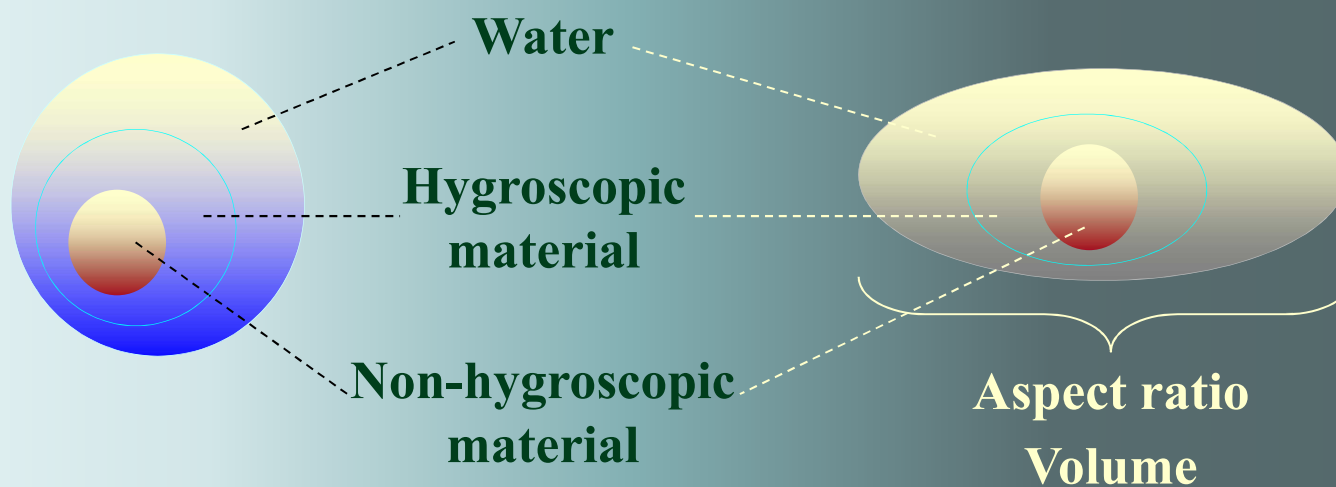
- 1) クロージャ問題が存在するため平均場についてしか計算できない
- 2) 放射や水の相変化など、現実大気の物理過程は複雑

モデルの時空間分解能以下の大気中の現象(例えば乱流、個々の降水粒子、等)は格子点上の値だけではこのような現象は表現できないので、サブグリッドスケールの現象がモデル大気に及ぼす効果を、格子点上の物理量で評価する。



Water

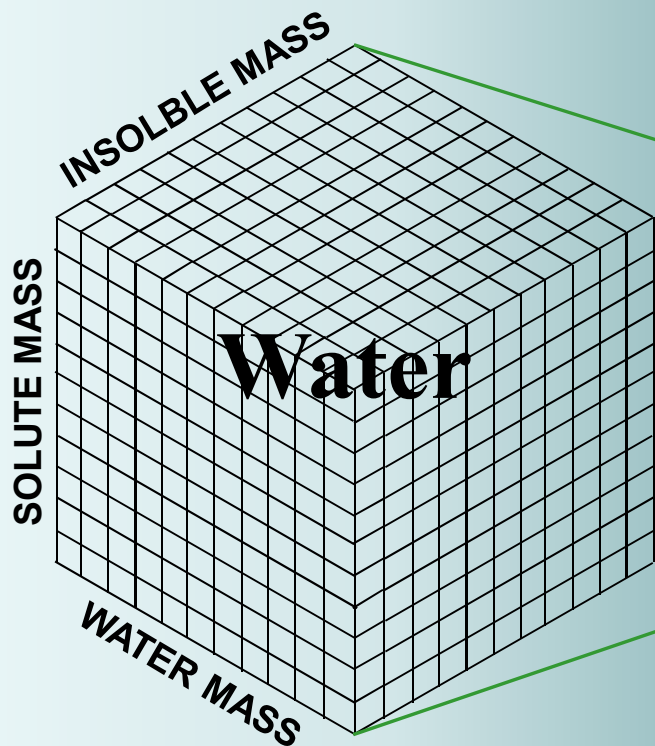
Ice



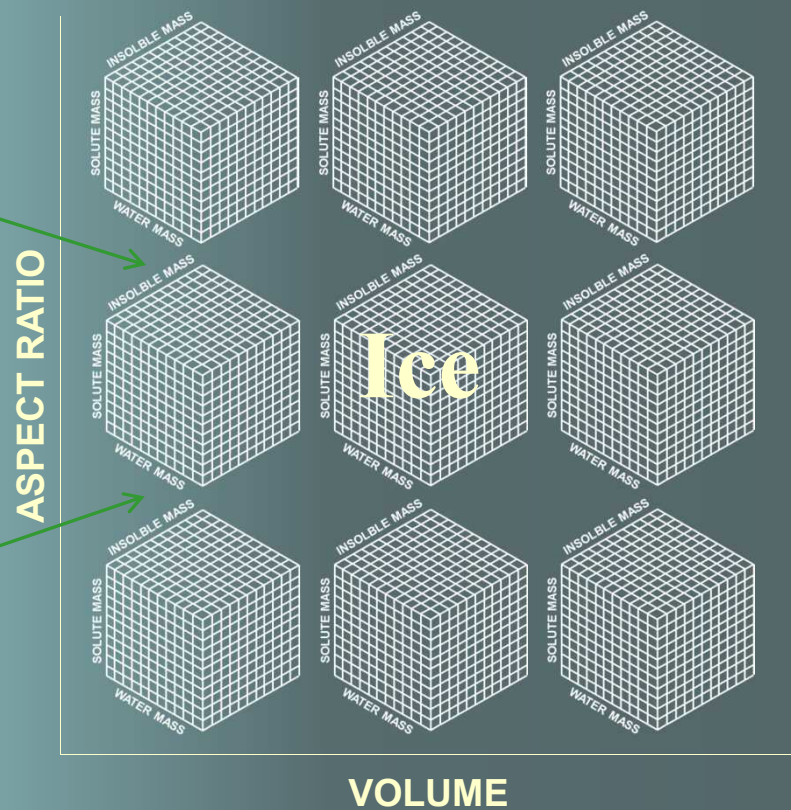
Three properties

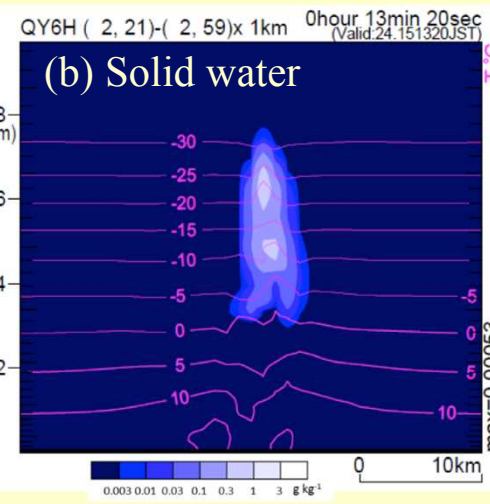
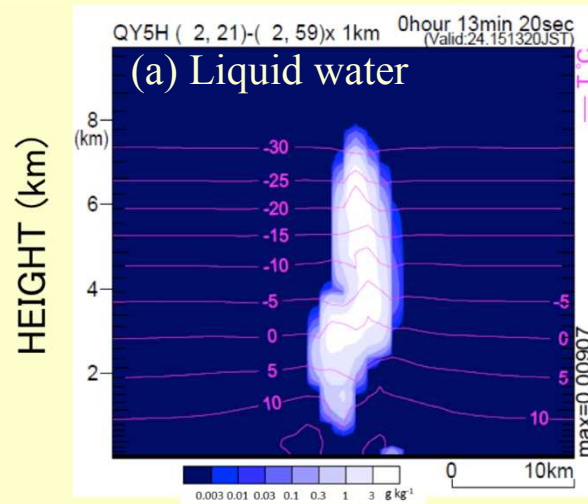
Five properties

Three-dimensional bin



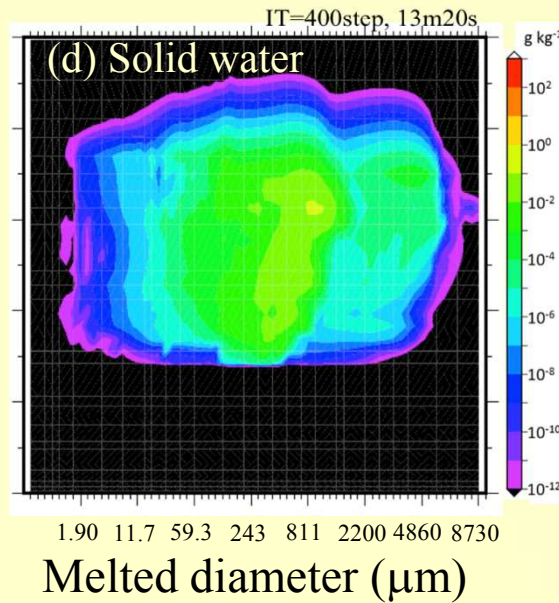
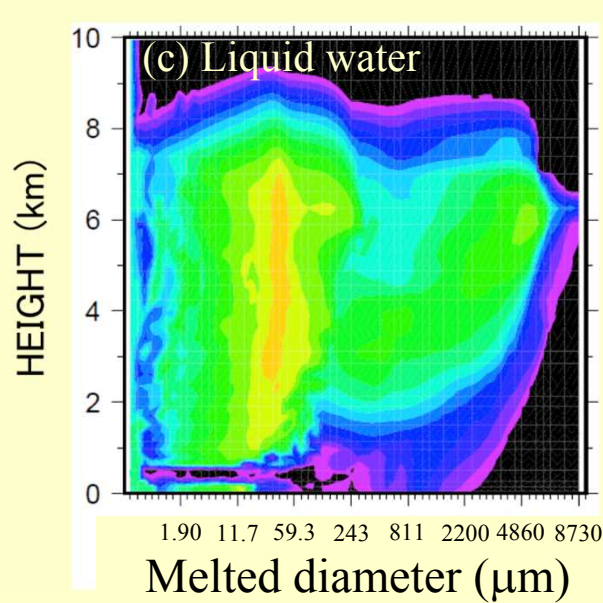
Five-dimensional bin





80x3x38 spatial grids
64x3x8x8x3 bins

Mixing ratio



Number concentration

【第2回質問】シミュレーションの検証には実験が必要。得られた結果はどの様にチェックしているか。

(分野3)

分野3で研究対象としている気象・気候や地震・津波の現象については、初期値の作成や結果の検証に必要なデータが気象庁などによってほぼ整えられており、シミュレーション結果の定量的な評価に活用している。例えば、台風、集中豪雨や竜巻、地震波や津波水位など。

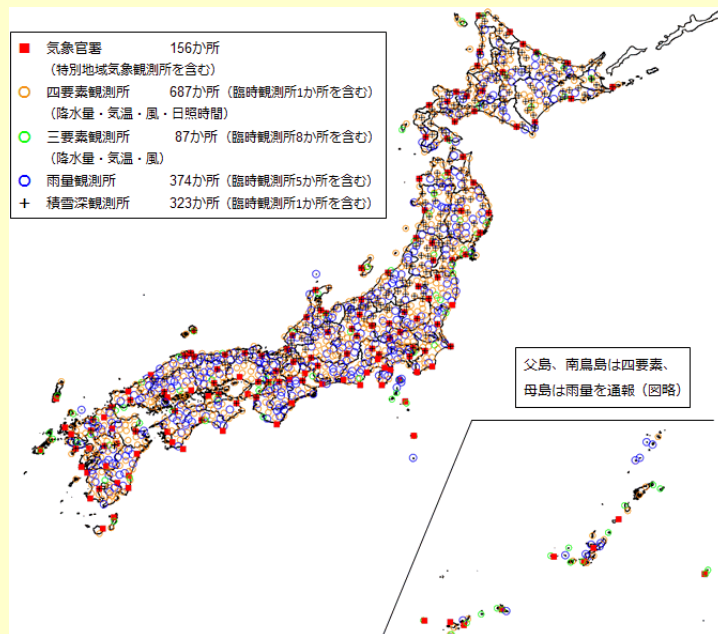
分野3



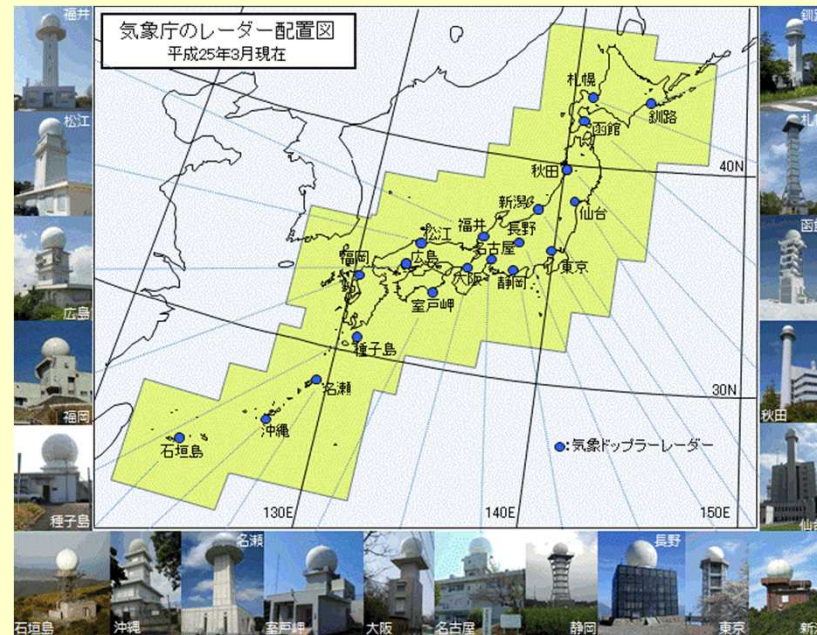
高層気象観測



ウインドプロファイラ



地上気象観測



気象庁レーダーの全国配置図

【第2回質問】各課題において、ターゲットとなるマーケットは、設定されているか。

(分野3)

気象予報、気象情報提供事業、地球温暖化適応事業、気象と水文の高精度予測による防災・減災対策、交通、農業生産、再生可能エネルギー、熱中症対策、大気汚染、国や地方自治体が進める地震被害想定と適切な被害軽減施策の策定。

天気予報

出来ていること、出来ないこと、出来ていないこと

- ・ある程度の精度で出来ていること(全球モデル20km、メソモデル5km)
地球を取り巻く大循環の数日先までの予報
1-2日先までの天気(府県単位での降水の有無)、台風進路予報
- ・出来ないこと
現象の時間スケールを超える決定論的予報
(2週間以上先の天気予報、半日以上前の個々の積乱雲の予測、乱流渦の数値予報)
- ・出来ていないこと
精度の良い週間予報、台風強度の予測
高精度のメソスケール予測
(災害につながる雨の予測、市町村単位の降水や日照、霧の正確な予測)

高精度気象予測の重要性

- ・集中豪雨/局地的大雨の予測は防災・減災に直結
- ・風や視程の予測は航空機(や鉄道)の安全運航に不可欠
- ・「でんき予報」に代表される都市の電力需要予測(気温)
- ・再生可能エネルギー(水力、風力、太陽光)の供給予測(降水、風、日照)
- ・火山灰など(や放射性物質)の移流拡散予測(風だけではなく降水の予測が重要)
- ・国防上の最重要な情報の一つ

⇒いずれも精度とともに、予測誤差(信頼度)の正確な評価が、有効な対策(効率的なリスクマネジメント)につながる

分野3

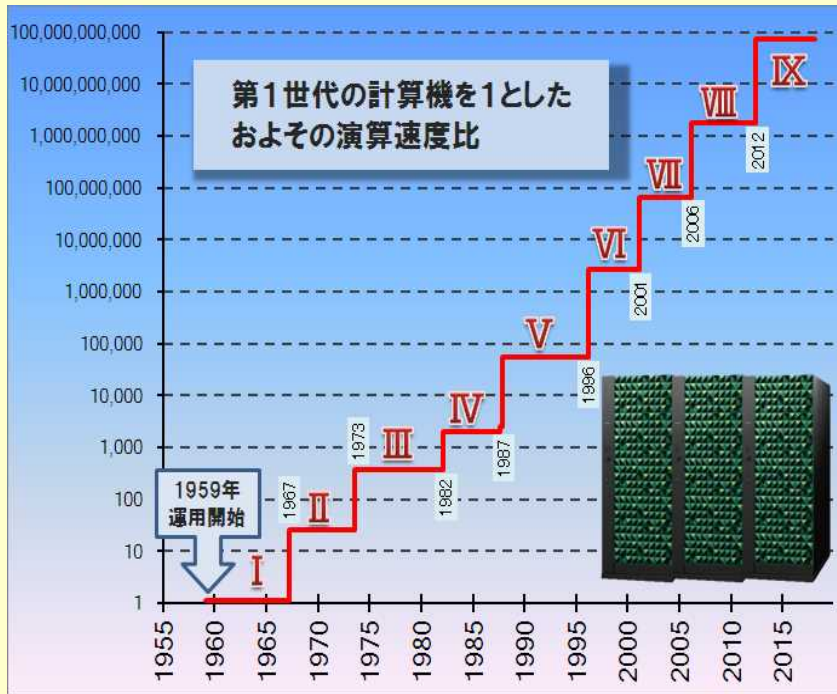
課題名	ターゲットとしているマーケット	市場規模・出典	得られた効果・今後期待される効果
地球規模の気候・環境変動予測に関する研究 研究代表者：木本昌秀（東大気海洋研）	気象予報、気象情報提供事業 地球温暖化適応事業	<p>自然災害による被害総額：10,000億円 防災関連予算：32,000億円 【出典】平成26年度特許出願技術動向調査報告書（概要）防災・減災関連技術（特許庁） https://www.jpo.go.jp/shiryuu/pdf/gidou-houkoku/26_5.pdf</p> <p>気象情報提供事業市場規模：300億円 【出典】気象情報の 産業的活用の拡大 - 三井物産戦略研究所 http://mitsui.mgssi.com/issues/report/r1305q_hirata.pdf</p>	<p>得られた効果： 戦略プログラムの研究成果について、気象庁開発部門との連絡を密に行っている。</p> <p>今後期待される効果： 次期IPCC報告書等を通じた成果の発信により、国内外の温暖化適応策推進への貢献が期待される。 気象庁の次世代気象予測システムの設計に貢献が期待される。 熱帯諸国への延長予測の発信が加速されると期待される。</p>
超高精度メソスケール気象予測の実証 研究代表者：斉藤和雄（気象研）	気象と水文の高精度予測に防災・減災対策（事前避難、ダム管理等治水） 交通（航空、道路、鉄道）、農業生産、再生可能エネルギー（太陽光、風力）、熱中症対策、大気汚染	<p>自然災害による被害総額：10,000億円 防災関連予算：32,000億円 【出典】平成26年度特許出願技術動向調査報告書（概要）防災・減災関連技術（特許庁） https://www.jpo.go.jp/shiryuu/pdf/gidou-houkoku/26_5.pdf</p> <p>風水害等による保険金の支払い（自動車）：60～270億円 【出典】風水害等による保険金の支払い（一般社団法人日本損害保険協会調べ） http://www.sonpo.or.jp/archive/statistics/disaster/</p> <p>農業総産出額（平成26年）：8.36兆円 【出典】農林水産基本データ集（農林水産省） http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/pdf/kihon_160301.pdf</p> <p>再生可能エネルギーの電力コスト（2013年度）：5000億円 【出典】再生可能エネルギー投資の現状と課題（三井住友トラスト基礎研究所） https://www.smtri.jp/report_column/infra_ivst/pdf/InfraUPD-ATES_Renewable.pdf</p>	<p>得られた効果： 戦略プログラムには気象研究所を含む気象庁開発部門が中心的メンバーとしても参加しており、気象庁との研究懇談会や施設等研究発表会、数値予報課コロキウムなどで随時情報提供を行っている。 これまでに平成26年12月15日に気象庁大会議室で開催された「平成26年度観測部・予報部と気象研究所の研究懇談会」において「HPCI戦略プログラム 超高精度メソスケール気象予測の実証」の演題で実施責任者が講演を行い、当該プログラムでの科学目標について説明するとともに、アンサンブルカルマンフィルタを用いた平成24年九州北部豪雨と平成24年5月のつくば竜巻についての同化・アンサンブル予報実験、平成26年8月広島での土石流災害の豪雨についての超高解像度数値予報実験に関する成果を紹介した。また平成28年1月13日に気象庁講堂で行われた「平成27年度気象庁施設等機関研究報告会」においても同様の演題で講演を行い、上記に加えて大気海洋結合モデルによる多数例の台風強度予報の結果、平成25年10月の伊豆大島での土石流災害の豪雨についての超高解像度数値予報実験を含む当該プログラムの成果について講演した。これらの会合には、気象庁長官・予報部長など気象庁幹部および予報部数値予報課長・数値予報班長を含む気象庁開発部門の責任者が出席している。また数値予報課コロキウムや気象庁技術開発推進本部モデル部会メソモデルグループ会合などでも、大気海洋結合モデルや観測空間での局所化を取り入れたアンサンブル変分同化法などに関して実務者間でより詳細な技術情報の提供を行っている。</p> <p>今後期待される効果： 高精度数値予報に関する科学的知見は気象庁短期数値予報システム、観測システムの将来設計に貢献する。 数値予報の精度向上を通じた治水対策と予測に基づくダム管理 数値予報の精度向上を通じた交通システムの最適化と堅牢化 再生可能エネルギー（太陽光、風力）発電量と電力需要の高精度予測に基づく受給管理や火力発電の調整、 農業生産の向上、熱中症対策の高度化、 大気汚染（PM2.5、原発事故時の放射性物質の移流拡散予測）への応用</p>

【第2回質問】今後5～10年先を見越した開発が重要と考えるが、各分野はどのような様な認識で進めてきたか。

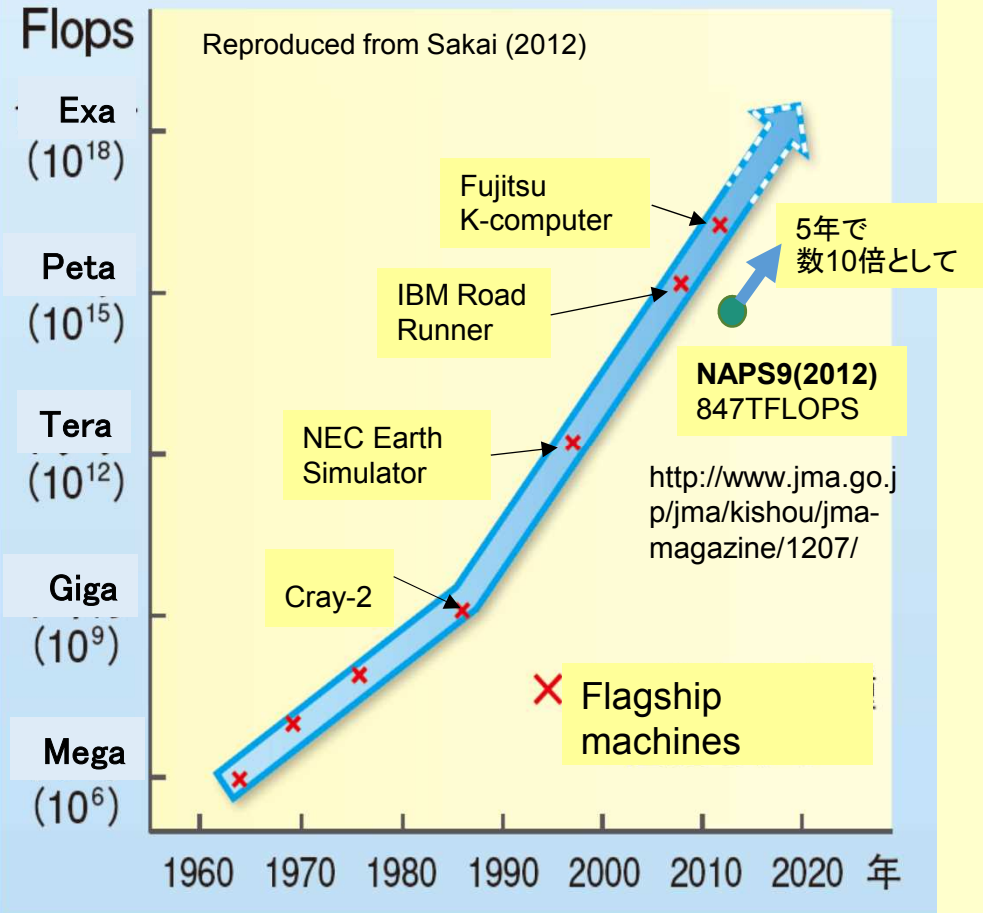
(分野3)

現業的な気象予測は、気象庁が業務としてスパコンを用いて行っており、予測精度の改善に向けた開発も行われている。「地球シミュレータ」や「京」のようなその時代におけるフラッグシップ機の性能は5～10年後に気象庁の業務に使われるスパコンに反映してきている。本課題では、「京」の計算資源を生かして先端開発や学術的研究を行うとともに、将来の気象庁における数値天気予報のあり方に重要な科学的知見を提供することを強く意識して研究を進めてきた。

気象庁のスパコンとフラグシップスパコン



<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-2.html>



5年で数10倍の性能のコンピュータが導入されるとすると、NAPS10では京に近いものになりそう。

気象庁の業務への貢献

- 将来の気象庁現業数値予報システムに向けて、高解像度数値予報やデータ同化・アンサンブル予報に関する技術、目指すべき方向性についての重要な科学的知見を提供。
- HPCI戦略プログラムで利用している「京」コンピューターのような次世代スパコンが、5年後、10年後に気象庁に導入される可能性。
- 開発や得られた科学的知見は、気象研究所での重点研究「メソスケール気象予測の改善と防災気象情報の高度化」等とも成果を共有。



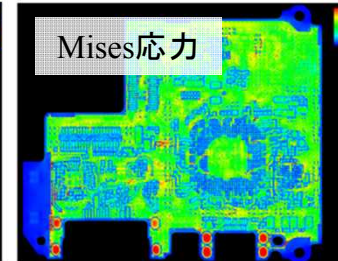
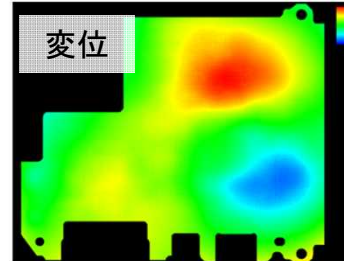
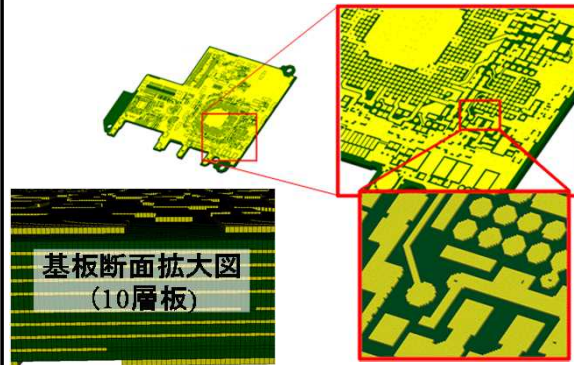
HPCI戦略プログラム
分野4
次世代ものづくり
補足説明資料

平成28年4月26日
東京大学教授 生産技術研究所
革新的シミュレーション研究センター長
統括責任者 加藤千幸

重点課題⑧ものづくり・製造「京」における研究開発の実績

産業界と密に連携しながら、FrontISTR (フロントイスター) によって、
微細な内部構造を有する実モデルの応力解析を実現

電子基板の熱応力 (約20億要素)

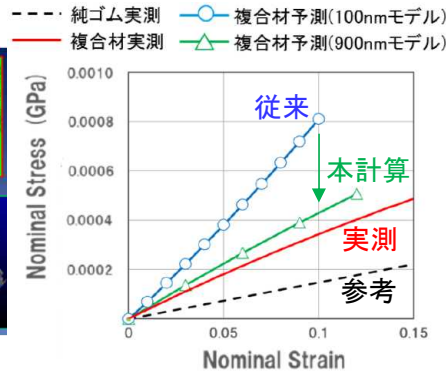
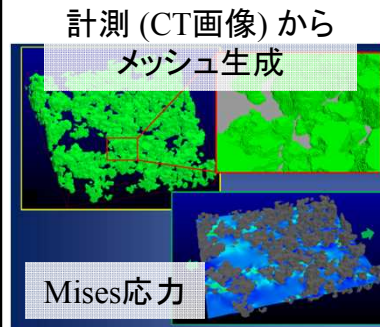


- ・ L2キャッシュを利用した並列計算の最適化
- ・ 対ピーク性能 4.2%

初めて簡略化しない配線構造を有する実機の計算、
実測と定性的に一致

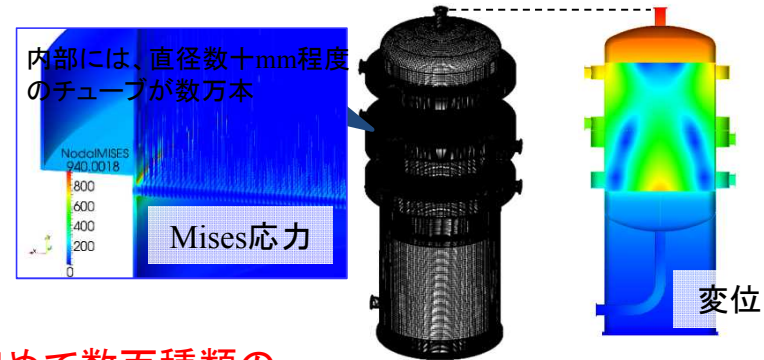
反りの小さい配線構造を有する電子基板の製造へ

フィラー充填ゴムの大変形 (約1億要素)



初めて全計測領域 (幅900nm) を計算、
従来より実測に近い複合材物性を評価
タイヤの転がり抵抗・耐摩耗性メカニズム解明へ

大型多管式反応器の熱応力 (約2億要素が目標)

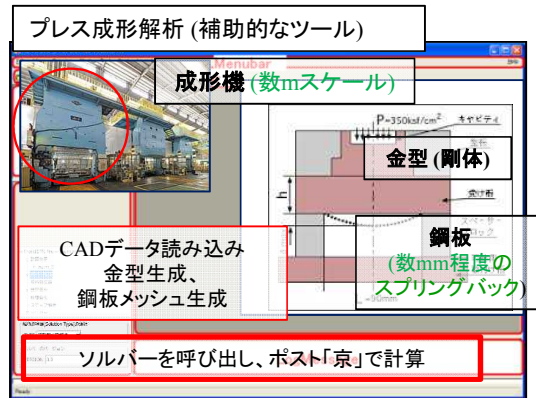


初めて数百種類の微細部品のアセンブリを計算 (部品の簡略化なしの計算)、つなぎ目での応力は定性的に一致
次世代型プラントの設計へ

「FrontISTR」ベースの超大規模・高精度強連成解析ソルバー

- ✓ **アセンブリ／接触問題の大規模解析が可能な並列反復法**：
自動車／重機械フレーム全体に存在する溶融部の解析
数m規模の解析領域に対して、数 μm の解像に必要な要素数
= 数千億～数兆要素 (メッシュの粗密あり)
「京」では1日で十億要素の静解析が限界
- ✓ **大規模強連成解析手法 (熱弾塑性・相変態)**：解析モデル全体を一括して計算、新材料の構成則に対応
「京」では1日で数億要素規模の弱連成解析でも不可能
- ✓ **プレス成形のスプリングバックを考慮した溶接解析**：一連の工程を解析可能なプリ・ポストプロセッサの利用が可能
従来はスプリングバックを無視した溶接解析のため、正確な溶接隙間量や逆ひずみを計算するのが困難

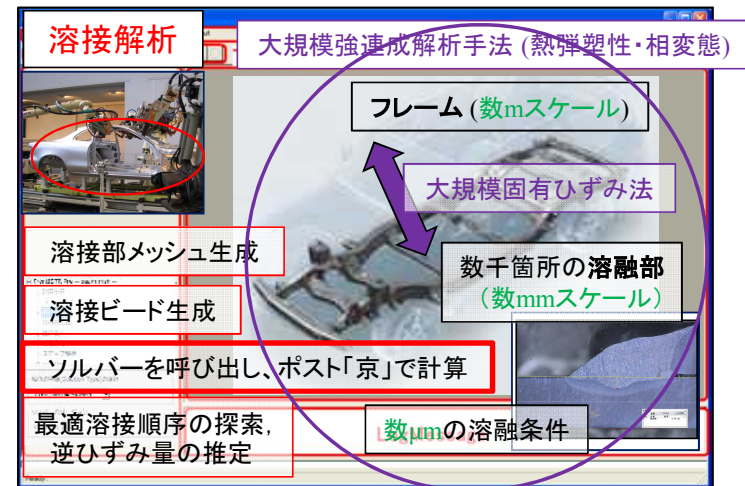
高度成形・溶接シミュレータ専用のプリポストを用意



一つのシステムで
一連の工程を解析可能

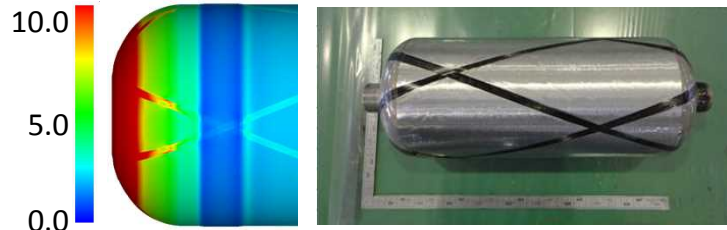


プレス成形の寸法精度
(スプリングバックによる
変形量) を渡す

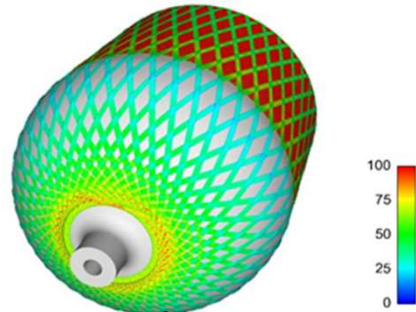


燃料電池自動車の普及に不可欠な炭素繊維強化プラスチック製高圧水素容器の合理的軽量化設計に貢献

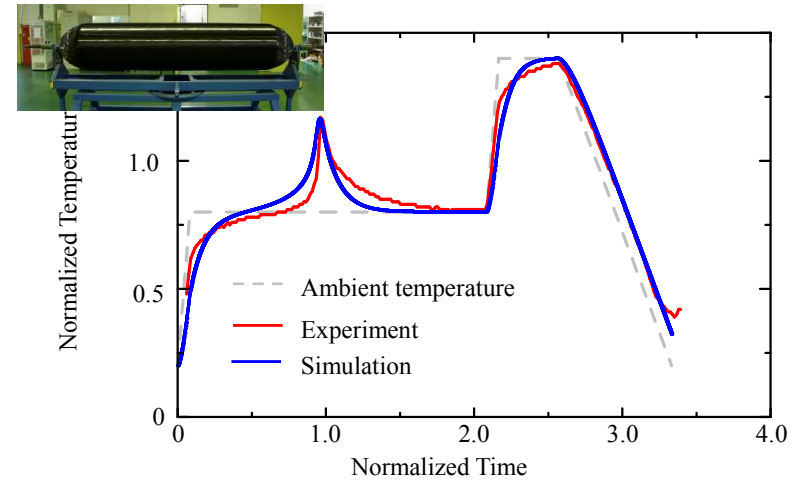
- メゾスケールモデルを機軸とした強度評価シミュレーションにより高圧水素タンクの重量10%低減に目途をつけた



繊維束強度評価検証



フルラップ容器の
(8600万要素)強度評価

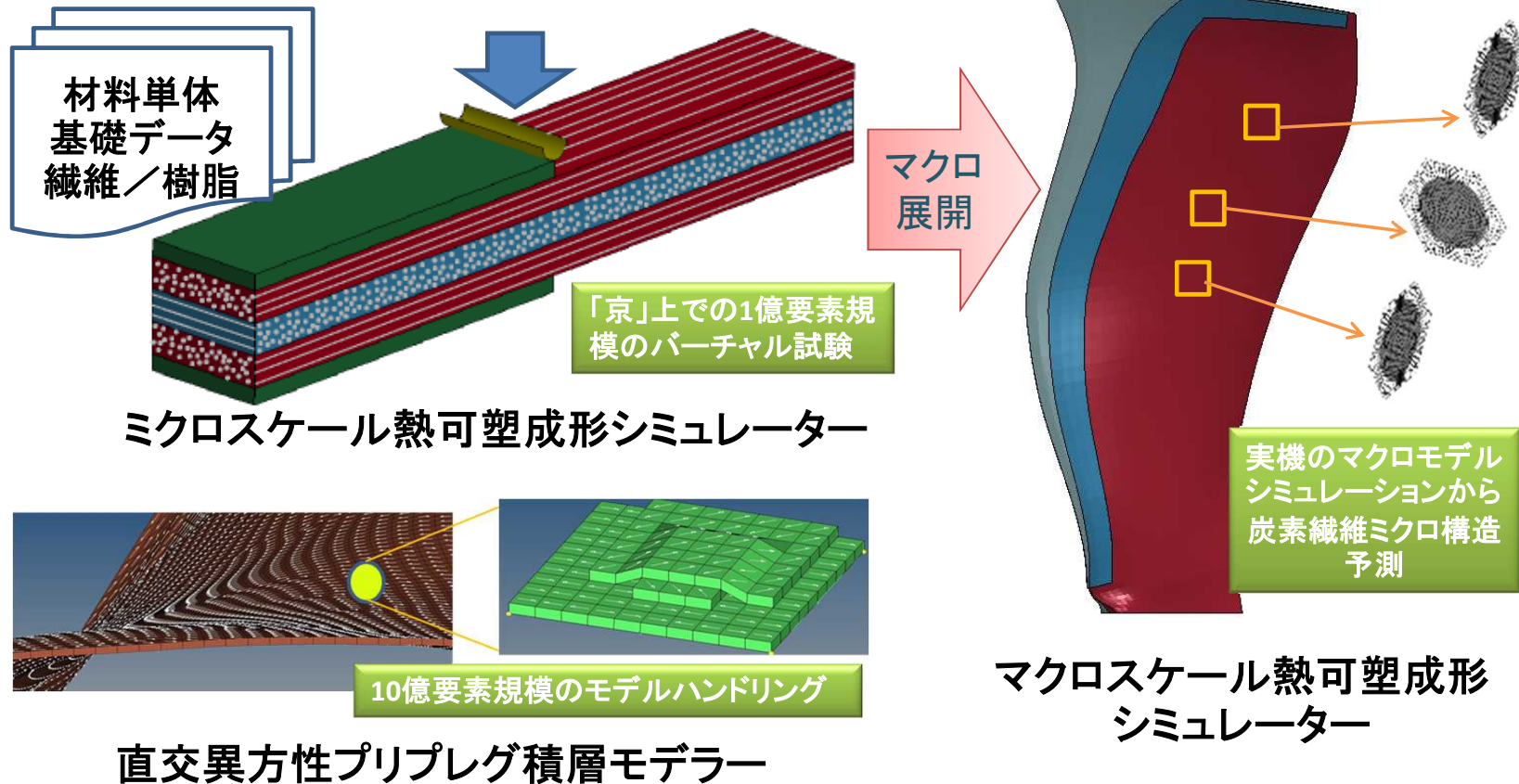


熱硬化時の過昇温評価検証

自動車メーカーと協力し平成27年度産業利用枠で実用化研究を展開予定

重点課題⑧ものづくり・製造 開発するアプリケーションシステム

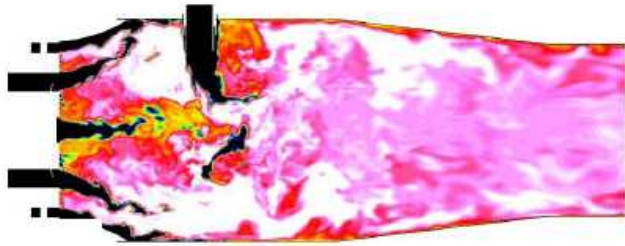
- 熱硬化性樹脂対応のFrontCOMPシステムを熱可塑樹脂対応に展開
- 炭素繊維と樹脂を区分したマイクロスケールモデルによる第一原理的成形シミュレーション結果をマクロスケール展開するマルチスケール成形シミュレーター



想定されるポスト京の成果（重点課題⑥クリーンエネルギー）

京以前（過去）

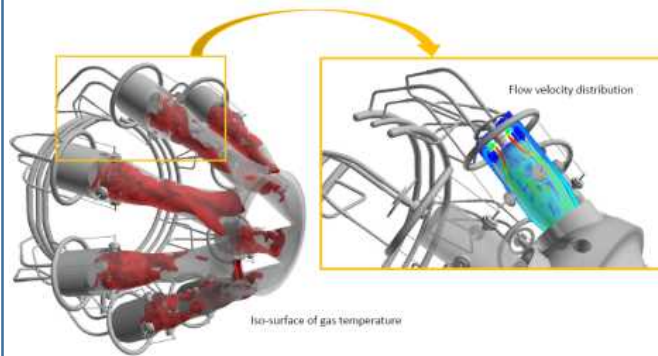
実機燃焼器内のガス、噴霧、微粉炭燃焼のLES解析は行われていたが、対象は大気圧(0.1MPa)条件下の単缶もしくは燃焼器の一部に限られていた。



単缶型ガスタービン燃焼器のLES
(提供 京大)

京時代（現在）

3.0MPa程度までの亜臨界状態における実圧の実機燃焼器内のガス、噴霧、微粉炭燃焼のLES解析が可能となった。

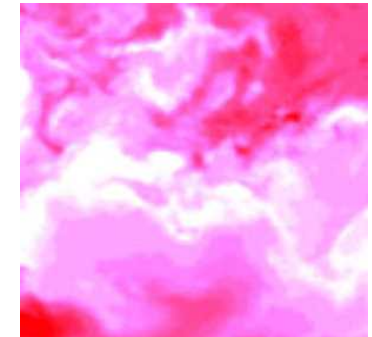


8缶型ガスタービン燃焼器のLES
(提供 京大、川崎重工)

ポスト京時代（将来）

30MPa程度までの超臨界状態における実圧の実機燃焼器内の燃焼LES解析が可能となる。これにより、あらゆる条件下における燃焼挙動の把握、燃焼器の設計、および最適操作条件の選定を支援し、クリーンエネルギーシステムの実用化に貢献する。

←→ 数十μm



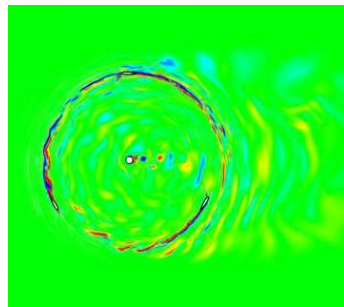
乱流燃焼のイメージ(温度): 圧力の上昇に伴い乱流の最小スケールが小さくなる
(提供 京大)

想定されるポスト京の成果（重点課題⑥クリーンエネルギー）

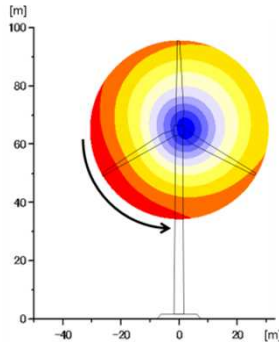
「高効率風力発電システム構築のための大規模数値解析」が拓く次世代風力発電システム

京以前（過去）

風車の設計には実験・観測データに基づく経験則が利用されており、数値解析は補助的な役割として利用されていた。風車単体の定常解析が中心であり、風況や地形の影響を考慮した数値解析は限られた条件のみで実施されており、実験の代替には至らなかった。



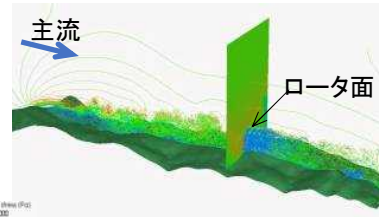
風車単体解析



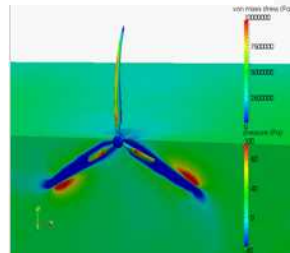
FAST(実験データベース)に基づく風車騒音予測

京時代（現在）

風車単体の大規模な非定常解析が可能となり、さらに空力・構造連成解析による風車の構造解析も可能となった。風車の後流の影響や地形の影響を考慮した非定常解析が可能となった。しかし、ウィンドファームのような風車群の流れ解析最適設計のための解析は実現できていない。



複雑地形上に設置された風車後流の可視化



流体・構造連成解析（風車単体）

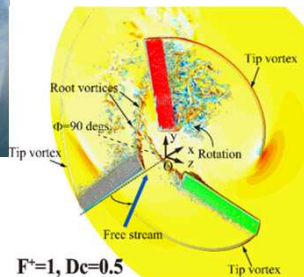
ポスト京時代（将来）

大気境界層、地形を考慮した大規模ウィンドファームにおける風車間の流れの相互干渉を解析することにより、発電量の向上、ブレードの寿命改善、低コスト化が可能となる。これらの技術によって環境に優しい安定した電力供給を実現すると共に我が国の風力発電産業の競争力向上に貢献する。



洋上WFIにおける風車後流(DK)

ポスト京で対象とする流れ



風車性能改善のための制御技術の開発

HPCI戦略プログラム
分野5
物質と宇宙の起源と構造
補足説明資料

平成28年4月26日

高エネルギー加速器研究機構
橋本省二

体制構築として他分野と連携



2

＜人的ネットワークの形成＞

- 分野2との分野横断型研究会の開催など**他分野との連携を推進**
 - 素粒子原子核分野では、共通する研究手法をもつ分野2と連携
HPCI戦略プログラム分野2×分野5異分野交流研究会を3回開催(139名参加)、10sor network workshopを分野2と2回共催
 - 量子多体問題解法は方程式や計算手法に共通部分があり交流
 - 格子QCDと統計模型の間にも共通する問題があり、定期的に情報交換
- ダークマター大規模シミュレーションコードの技術開発をベースに、理研AICSで汎用性のある大規模粒子シミュレーションフレームワークの開発を進め、分子動力学の他、工学系とも連携

＜研究成果の普及＞

- 広報においては、広報責任者会議やメーリングリストを通じて、5分野、理研AICS、RISTと情報共有・連携(最終成果報告会、記者勉強会、一般向シンポ開催、国際会議SC・一般公開出展など)

平成28年3月24日
国立大学法人 千葉大学
国立大学法人 東京大学

太陽最古の謎 解決に王手

スーパーコンピュータ「京」による世界最高解像度計算で 太陽の磁場生成メカニズムを世界で初めて解明

千葉大学大学院理学研究科の堀田英之特任助教らの国際チームは、スーパーコンピュータ「京」で可能になった超高解像度計算により、**太陽活動11年周期**を作るような大規模な磁場構造を生成・維持するメカニズムを世界で初めて解明しました。本研究成果は、米科学誌『Science』（25 March 2016, VOL. 351）で発表されます。

■ 研究の背景 ～地球環境に大きな影響を及ぼす黒点の11年周期の謎

太陽には黒点という強磁場領域があり、その科学的観測はガリレオ＝ガリレイが400年以上前に始めて以来、現在に至るまで継続されています。この黒点数は11年の周期で変動していますが、そのメカニズムは未だ明らかになっておらず「太陽最古の謎」と呼ばれます。また、1600年代中頃から70年程度黒点がなかった時期があり、その期間には地球が寒冷化していたことが示唆されています。謎の解明は地球環境を考える上でも急務だと考えられています。

太陽内部は乱流で占められており、この乱流運動が磁場を生成していると考えられています。太陽内部に存在する高度なカオス的運動をする小スケールの乱流の中から、11年の周期を生み出す秩序立った大規模磁場を生み出す過程が大きな謎でした。ここで高度な乱流とはより小さなスケールまで乱れた流れが混在する状態をあらわします。

■ 研究の成果 ～スーパーコンピュータ「京」を用いた超高解像度計算

スーパーコンピュータ「京」のような大規模計算機を効率的に扱うために、研究チームが独自に開発した計算法「**音速抑制法**」※を用いることで可能になった超高解像度計算により、カオス的小スケールの乱流から大規模な磁場を生成するメカニズムが明らかになりました。

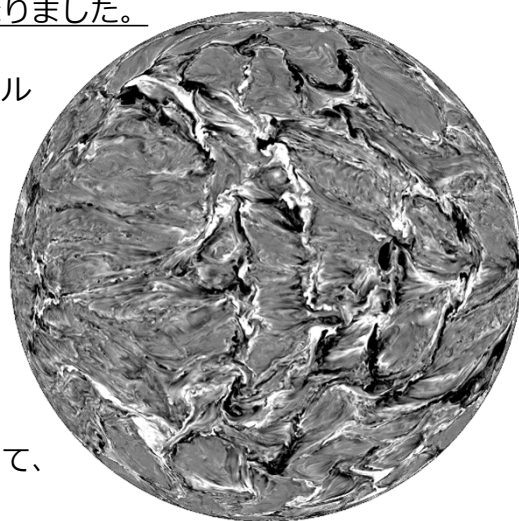
計算では、カオス的狀況を維持しながらも10年スケールの磁場活動の周期を再現しました。超高解像度計算では小スケールの磁場生成が活発になることで流れ場を強く抑制し、秩序立った大スケールの流れのみが許されるようになります。

その結果、カオス的狀況の中でも秩序立った磁場が生成されることが明らかになりました。

※音速抑制法とは、計算負荷軽減のために実効的な音速を遅くする方法である。
これまでの手法に比べて大規模計算機を効率的に使える。

■ 研究者の想い(堀田英之 特任助教)

この成果により、太陽磁場生成メカニズムの重要な部分が明らかになりました。これからは衛星を中心とする観測によって、今回発見した理論の詳細を確かめることで、太陽最古の謎の本格解決を目指したいと思います。



計算で再現された太陽内部磁場の様子

本件に関するお問い合わせ・取材のお問い合わせ
千葉大学 理学研究科 堀田英之 特任助教
TEL: 043-290-2749 メール: hotta@chiba-u.jp

分野5

■ 研究詳細

背景

太陽は、その中心で核融合によりエネルギーを生成し続けており、そのため太陽内部の外側30%はお湯を沸かしたように**熱対流**で埋め尽くされています。駆動された熱対流は、非常に小さい粘性のために地球上では存在しえない非常に**高度な乱流状態**になっています。

太陽活動周期を駆動する磁場は、この乱流的なプラズマの運動による引き伸ばしによって生成されると考えられています。しかし、乱流による磁場生成は、カオス的な状況が発達すればするほど**小さいスケールが支配的**となり、太陽周期を駆動するような大きなスケールの磁場構造が作られなくなっていくことが知られていました。実際の太陽では、乱流は非常に高度にカオス的になっており、このような状況下で**どうやって周期活動を駆動するか**が大きな問題となっていました。

結果

本研究では、スーパーコンピュータ「京」を用いることで**初めて可能になった超高解像度計算**で、上記の謎に迫りました。太陽のように高度に発達した乱流状況を調査するには、非常に多くの計算コストを必要とします。

計算の結果、ある程度の解像度まではこれまでの予測の通り、乱流が高度になればなるほど小さいスケールの磁場が支配的となり、大規模な磁場は作られなくなりました。しかし、今回可能になった超高解像度では、小スケールの磁場生成が非常に活発になり、小さいスケールの乱流運動のエネルギーを上回りました。その結果、小さいスケールでの乱流運動は強く制限されて、あたかも低解像度で計算をしているような状況が実現しました。つまり、**高解像度であるにもかかわらず、乱流が高度でなくなった**のです。その結果、太陽のような高度に乱流が発達した状況でも大スケールの磁場が発達することができました。

このメカニズムは、これまで誰も考えすらしていませんでしたが、実際の太陽でも働くはずであり、**太陽活動周期の問題解決のための基本的で重要な機構を明らかにした**といえます。

■ 研究チーム

- ・千葉大学 大学院理学研究科 堀田英之 特任助教
- ・米国HAO/NCAR Matthias Rempel博士 Senior Scientist(主任科学者)
- ・東京大学 大学院理学系研究科 横山央明 准教授

本リリースに関する動画等の資料は、下記ウェブページからダウンロードしていただけます。

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/~hotta/press/2016/index.html>

■ 論文情報

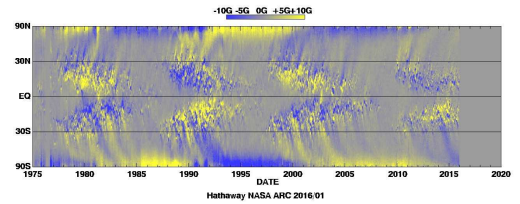
掲載誌：Science

論文タイトル：Large-scale magnetic fields at high Reynolds numbers in magnetohydrodynamic simulations

著者：H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama

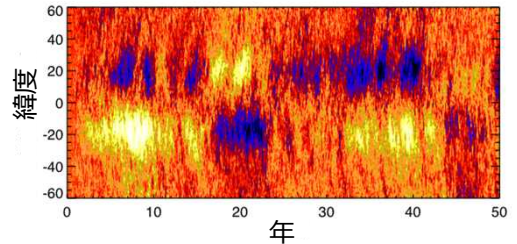
DOI：10.1126/science.aad1893

本研究は、文部科学省HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」における「ダークマターの密度ゆらぎから生まれる第1世代天体形成」(課題番号hp140212、hp150226課題代表者：牧野淳一郎)の計算資源を利用して実施したものです。また、新学術領域「太陽地球圏環境予測：我々が生きる宇宙の理解とその変動に対応する社会基盤の形成」の支援を受けました。

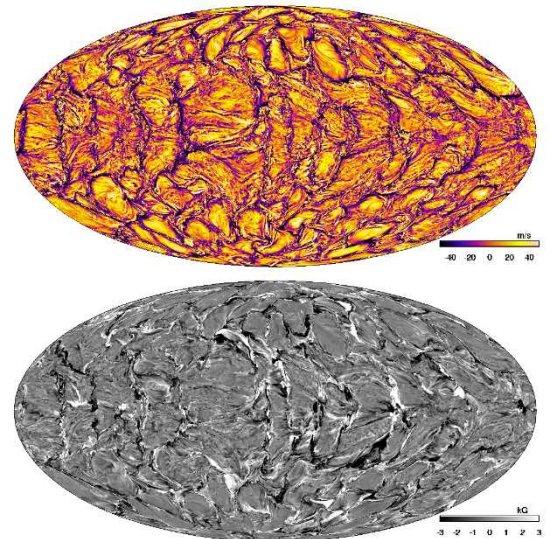


実際の太陽表面で観測される磁場の様子
NASA webサイト

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/magbfly.jpg>



高解像度計算で明らかになった太陽内部の磁場の様子。全球スケールの磁場が周期を持っていることがわかる。



計算によって得られた乱流(上)と磁場(下)の様子。非常に小さいスケールの磁場が発達していることがわかる。