

# 日本チームのバーチャル宇宙の解析に米国の2チームが挑戦

## —宇宙の根源的な謎に迫る精密宇宙論への確かな一歩—

### 概要

京都大学基礎物理学研究所 西道啓博 特定准教授（兼：東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) 客員科学的研究員）、Kavli IPMU 高田昌広 主任研究者をはじめ、スタンフォード大学、ニューヨーク大学、欧州原子核研究機構、プリンストン高等研究所、中国科学技術大学の研究者からなる国際共同研究チームは、コンピュータ上の仮想宇宙の銀河データを用いて、データ作成者と解析者を完全に分離した「宇宙論チャレンジ」を初めて行い、物理解析の手法で宇宙の誕生と進化を支配する宇宙論パラメータ<sup>(註1)</sup>を正しく測定することができるか検証しました。

日本チームは国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ II」<sup>(註2)</sup>を用いて、大規模かつ正確な宇宙の構造形成<sup>(註3)</sup>シミュレーションを実行しました。そして、得られた銀河の大域的空間分布パターンを特徴付ける統計量を、シミュレーションで使用された宇宙論パラメータや銀河の特徴に関する詳細情報は伏せた状態で、米国両海岸の2つの解析チームに引き渡し、両チームが宇宙論パラメータを独立に復元できるかテストを行いました。その結果、米側解析チームは、最も悪いものでも誤差1.3%の精度で、日本側が作成したバーチャル宇宙の情報を正しく復元しました。この結果は、これまでの宇宙論パラメータの決定精度と比較して1桁精度が向上したものになります。将来、宇宙論パラメータを更に精密に測定し、ダークマターやダークエネルギーの謎に迫るには、銀河大規模サーベイ観測のデータ解析に用いられる解析手法の精度を、解析の際に使用する計算法の提案者やデータ解析者自身とは独立に検証することが重要です。本研究は、宇宙論コミュニティ全体を巻き込んだ解析手法改善の新しい取り組みの第一歩と言えます。

本研究成果は、2020年12月28日に米国の物理学専門誌「Physical Review D」にオンライン掲載されました。

### 1. 背景

物理法則に基づく基礎理論と、近年の観測技術の目覚ましい進歩に支えられ、宇宙の基本的な枠組みを観測的に実証する「観測的宇宙論」は、科学者が扱うことのできる最大スケールの実証科学として成熟してきました。特に、2019年ノーベル物理学賞受賞者の James Peebles（ジェームズ・ピーブルス）氏の主な研究対象であるビッグバン宇宙の残光「宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)」に対する理論予言とその観測的実証は、宇宙論パラメータと呼ばれるわずかな数のパラメータのみで完全に記述される宇宙の「標準モデル」<sup>(註4)</sup>の確立という形で実を結びました。しかし、この宇宙標準モデルの枠内では、ダー

クマター・ダークエネルギーといった素粒子標準理論を越えた未知の要素が宇宙の大半を占めており、これらの性質の理解なしには真の意味で宇宙の基本的な成り立ちを解明したことにはなりません。

**CMB** と並び、近年重要性が再認識されているのが「宇宙の大規模構造」です。これは、近傍宇宙に存在する銀河が織り成す網の目構造のパターンのことを指します（図1参照）。**CMB** が誕生後間もない原始の宇宙の様子を映し出している一方で、大規模構造はその後現在に至るまで複雑な進化を経た後の様子を描いています。従って、これを詳細に観測し、分析することで、宇宙の進化に大きな影響を及ぼすダークマター・ダークエネルギーの謎に迫ることができると期待されています。実際、日本が主導するすばる望遠鏡に搭載した超広視野主焦点カメラ(**HSC**; ハイパー・シュプリーム・カム)を用いた大規模観測をはじめ、世界中で大規模観測計画が稼働中または計画中です。

これらの大規模観測からのデータを分析し、宇宙の根源的な謎に対する新たな知見を引き出すためには、物理理論に基づき、宇宙の構造進化に対して正確な予測を与える必要があります。ここ10年余りの観測技術の飛躍的進歩と、そこから得られる多様な観測量を解釈する理論研究の発展のおかげで、宇宙論パラメータの範囲が絞られ、今や「精密宇宙論」と呼ばれる域に達しています。観測データが質的にも量的にも向上するのに応じて、理論研究者側に求められる予測の正確性も大変シビアなものとなりました。今後一層の観測の大型化にともない、我々がアクセスできる情報量が飛躍的に増えるものと期待されます。ここで重要となるのは、膨大な観測データから正しく宇宙論パラメータを引き出す解析手法自体の精度を担保することです。しかしこれまでは、既に別の観測で得られている宇宙論パラメータに近い値を解析者が先入観から信用してしまう「確証バイアス」が問題とされてきました。さらに、一つの解析手法に対して限られた種類の宇宙データでしか検証がなされていなかったため、その手法がどのような宇宙データに対しても普遍的に適用できるかどうかの検証は十分に行われていませんでした。

## 2. 研究手法・成果

このような流れのなかで、コンピュータ・シミュレーションによって作られた模擬的な宇宙について、どれだけ宇宙論パラメータを正確に求めることができるのかという新しい挑戦が、日本と2つの米国の研究チームによって行われることとなりました。まず、本研究に参加した日本チームは、国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイ II」を用いて実行された、一辺約400億光年にも及ぶ立方体に相当する宇宙のシミュレーションデータを用意しました（図1中央）。これは、宇宙論研究者が現時点までに構築してきた解析手法が、これまで以上に巨大な領域を調査する、究極の観測計画に対してどの程度通用するのかを明らかにするためのデータです。これまでに行われた類似の研究では、構造形成を正確に追いかける計算にかかるコストの高さが障壁となっており、これに代わる近似的な計算によって作られた模擬宇宙データが用いられてきました。しかし本研究では、これまで日本チームが整備してきた信頼性の高いシミュレーション技術と、アテルイ II が可能にする大規模計算によって、現在類似の研究で用いられているものでは最大でかつ精巧な模擬宇宙データを用意することができたのです。こうして作られ

た模擬宇宙から実際の観測を模した銀河データを作成し、宇宙論パラメータの導出のために使われる基本的な統計量であるパワースペクトル<sup>(註5)</sup>を測定しました。日本チームは、コンピュータ・シミュレーションのなかで仮定されている宇宙論パラメータや、模擬銀河カタログ構築の詳細<sup>(註6)</sup>を伏せた状態で、パワースペクトルのデータを米国の2つのチーム（プリンストン高等研究所を中心とする米東海岸チームとスタンフォード大学を中心とする米西海岸チーム）に提供し、宇宙論パラメータを正しく復元できるかのテストを開始しました（図2参照）。

米両海岸チームはこれまで独立に、場の量子論の分野で用いられてきた「有効場の理論」<sup>(註7)</sup>と呼ばれる手法を宇宙の構造形成に応用する研究を進めてきました。今回、米国の2チームはこの手法を用いて日本チームの提供したパワースペクトルを分析し、宇宙論パラメータの推定を行いました。その結果が出た後の2019年6月4日、日本チームと米国の2チームとがビデオ会議を行い、伏せられていた宇宙論パラメータと、米国チームの解析結果を突き合わせました。その時の条件は、米国チームが日本チームに解析結果を報告した後には一切の変更は認められないこと、どんな結果が出ても最終結果として世に公開することでした。

米国の2チームが最終的に報告した宇宙論パラメータの値は、両チームとも誤差1%程度で真の値を再現しており、これは従来の宇宙論パラメータの決定精度の誤差を1桁向上した高精度な結果となりました。最も大きな誤差を示したものは模擬宇宙のダークマターの総量で、報告された値は2チームとも真の値から1.3%離れていました。しかし、これに関しても完璧に正しい解析をしたとしても約15%の確率で起こり得るものであり、概ね成功と言えるものでした。

今回の研究で重要だった点は、まず、アテルイ II を使ってこれまでにないほど巨大な模擬宇宙データを作ったことです。このおかげで、模擬宇宙データの統計的ばらつきに起因する誤差を小さくすることができ、宇宙論パラメータを導き出す解析手法そのものに起因する誤差を検証できました。また、この模擬宇宙データは米国の2チームがそれぞれの解析手法の検証に使ってきた宇宙シミュレーションデータとは異なり、宇宙論パラメータの値はもちろん、模擬銀河データ構築にかかる仮定が米国チームにはふせられていました。これによって、確証バイアスを排除するとともに、どんな銀河サンプルに対しても適用できるというという意味での普遍性を確認することができたのです。

### 3. 波及効果・今後の展望

今回のチャレンジによって、解析手法がもつ宇宙論パラメータの決定精度を客観的に担保することが可能となりました。つまり、実際の観測データを用いた解析でも、今回得られたものと同程度の精度で宇宙論パラメータを決定することが保証されるのです。さらに、解析手法の誤差を定量的に見積もることができたことにより、現在の解析手法をさらに向上させる手がかりも得ることができました。今回米国2チームが用いた手法は、小さいスケールの構造を解析するほど大きな誤差が現れ、模擬宇宙の小さいスケールのデータが持つ情報をまだ十分に引き出せていないことがわかったのです。将来、観測デー

タから得られる情報を余すことなく取り出すためには、さらなる解析手法の改善が期待されます。

さらに、今回構築された模擬宇宙データは、日本が主宰するチャレンジプログラムとして引き続き宇宙論パラメータを伏せた状態で公開されており（関連リンク参照）、世界中の研究者が新たな解析手法をテストできる状態となっています。実際、本研究成果を公開した後、新たに米カリフォルニア大学バークレー校のチームが挑戦し、その結果に基づいて新たな高精度計算法が考案されるなど、宇宙論研究者コミュニティ全体を巻き込んだ展開に発展しつつあります。このように、今後の大規模観測データを用いた宇宙論パラメータの精密測定において避けては通れない、精密宇宙論を実現するための最終試験として注目を集めています。世界中で競って行われている宇宙のダークマター・ダークエネルギーの謎に迫る研究において、得られた観測データから情報をより多く、またより正確に取り出す手段を確立するために、本研究の模擬宇宙データが役立てられることが期待されます。

#### 4. 本研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構 AIP 加速課題 (20317829、代表：吉田直紀)、科学研究費補助金 新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか?-徹底的究明と将来への挑戦-」総括班 (15H05887、代表：村山斉)、国際活動支援班 (15K21733、代表：村山斉)、計画研究 (15H05893、代表：高田昌広)、科学研究費補助金 若手研究 (B) (17K14273、代表：西道啓博)、基盤研究 (A) (19H00677、代表：高田昌広) の援助を受けています。

#### <用語解説>

**注1) 宇宙論パラメータ**：宇宙の誕生から現在までを物理法則に従って記述する「宇宙モデル」には、その性質を決める基本的な物理パラメータ（宇宙論パラメータ）が存在する。これらは、宇宙の全エネルギーに対してダークマターなどの諸成分が占める割合、宇宙の膨張速度、宇宙初期に生み出された「原始揺らぎ」の大きさや距離依存性などがある。

**注2) スーパーコンピュータ「アテルイ II」**：国立天文台天文シミュレーションプロジェクトが運用する、シミュレーション天文学専用のスーパーコンピュータ。岩手県奥州市の国立天文台水沢キャンパスに設置され、3.087ペタフロップス（1秒間に約3000兆回の浮動小数点演算を行う）の理論演算性能をほこる。  
<https://www.nao.ac.jp/research/telescope/aterui2.html>

**注3) 宇宙の構造形成**：ビッグバン直後の高密度の宇宙では、光は頻繁に散乱され、真っ直ぐ進むことができなかったが、やがて宇宙が膨張して温度が冷えていくと、この状況が解消され、光は真っ直ぐに進めるようになった（宇宙の晴れ上がり）。この宇宙の晴れ上がり後には、重力が主たる役割を果たして宇宙の構造形成が始まった。宇宙の平均と比べて僅かに密度が高い領域は重力により周囲の物質をかき

集め、逆に密度の低い領域からは物質は周囲に吸い出される。このような過程を通じて、初期宇宙の微小な揺らぎ(注1参照)が徐々に増幅された。そして現在では、多数の銀河が密集した銀河団や超銀河団、それらを結節点として、空間上に糸のように張り巡らされたフィラメント、そして、広い領域にわたってほとんど銀河が存在しないボイドなど、豊かな構造が形成されたと考えられている。

**注4) 宇宙の標準モデル：**ダークエネルギーとしてアインシュタインの宇宙定数  $\Lambda$  (ラムダ) を、ダークマターとして温度が無視でき重力以外の力を全く感じない冷たいダークマター (Cold Dark Matter = CDM) を仮定したモデルを  $\Lambda$ CDM (ラムダシーディーエム) モデルと呼ぶ。このモデルは CMB をはじめとして多数の観測事実を矛盾無く説明する現代の標準モデルと考えられている。今回のチャレンジプログラムでは  $\Lambda$ CDM モデルに含まれる6つの宇宙論パラメータのうち、ダークマターの密度パラメータ、宇宙膨張の速度、原始揺らぎの大きさの3つを復元することを目的に設定した。

**注5) パワースペクトル：**大規模構造における銀河の密度の濃淡(揺らぎ)を異なる波長の波に分解し(フーリエ解析)、波の波長毎に揺らぎの大きさを見たもの。大きなスケールにおいてはこの統計量が銀河の空間分布が持つ統計的情報の大部分を有していると考えられており、宇宙論解析の際に標準的に用いられる。

**注6) 模擬銀河カタログ構築の詳細：**銀河形成に関わる物理過程を直接解くことは難しいため、その代わりに、重力によって作られた高密度領域に銀河を置く簡便な手法がしばしば取られる。この際、銀河ができる判定されるために満たすべき条件として様々な可能性が検討されているが、今回は SDSS により観測された銀河に似た性質を持つように調整された「レシピ」を採用した。有効場の理論に基づく解析が正しく機能しているのであれば、このレシピの詳細に依らず宇宙論パラメータを正確に引き出すことが期待される。図2の左上パネルに示された色付きの丸印は、このレシピに従って日本チームが同定した銀河を表す。

**注7) 有効場の理論：**星形成、超新星爆発、超巨大ブラックホールの活動などを伴う銀河の形成・進化に代表される、比較的小さなスケール(数100万光年程度のスケール)の複雑な物理過程を適切にモデリングすることが、銀河の分布を通して見た宇宙の大規模構造の計算における障壁となっている。本稿における「有効場の理論」は、こういった複雑でスケールの小さい過程の詳細に立ち入ることなく、大きなスケールで見た時の大規模構造が従うべき法則のみを手がかりに、銀河分布の統計的性質について具体的な計算を行うための手法を指す。

### <研究者のコメント>

この研究は、2018年にスロベニアで行われた国際会議の食事の席での「賭け」に端を発しています。日本チーム2名と米東西海岸チームの代表が同席し、日本側からの挑戦を米側が受けるという形でスタートしました。最終結果は、解析手法の確かな綻びを明らかにしたものの、将来観測の要求水準は満たすという玉虫色のものでしたが、米側参加者は研究開始当初の自信に満ちた表情とは裏腹に、ホッと胸を撫で下ろした様子でした。この研究で得られた知見が精密宇宙論の新たな展開へと繋がるものとなるのではないかと期待しています。

### <論文タイトルと著者>

タイトル : Blinded challenge for precision cosmology with large-scale structure: results from effective field theory for the redshift-space galaxy power spectrum (大規模構造の精密宇宙論解析チャレンジ : 赤方偏移空間の銀河パワースペクトルの有効場の理論による解析結果)

著者 : Takahiro Nishimichi (1,2), Guido D'Amico (3,4), Mikhail M. Ivanov (5,6), Leonardo Senatore (3,7), Marko Simonovic (8), Masahiro Takada (2), Matias Zaldarriaga (9), and Pierre Zhang (10,11,12)

著者所属 :

1 Center for Gravitational Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan

2 Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo, Chiba, Japan

3 Stanford Institute for Theoretical Physics, Physics Department, Stanford University, Stanford, USA

4 Dipartimento di SMFI dell' Universita' di Parma & INFN Gruppo Collegato di Parma, Parma, Italy

5 Center for Cosmology and Particle Physics, Department of Physics, New York University, New York, USA

6 Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, 60th October Anniversary Prospect, Moscow, Russia

7 Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, SLAC and Stanford University, Menlo Park, USA

8 Theoretical Physics Department, CERN, Geneva, Switzerland

9 School of Natural Sciences, Institute for Advanced Study, Princeton, USA

10 Department of Astronomy, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, China

11 CAS Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, University of Science and Technology of China, Hefei, China

12 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, China

雑誌名 : Physical Review D

DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.123541> (2020年12月28日掲載)

\* 論文のアブストラクト (Physical Review D のページ)

<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.102.123541>

\* プレプリント (arXiv.org のウェブページ)

<https://arxiv.org/abs/2003.08277>

<参考図>

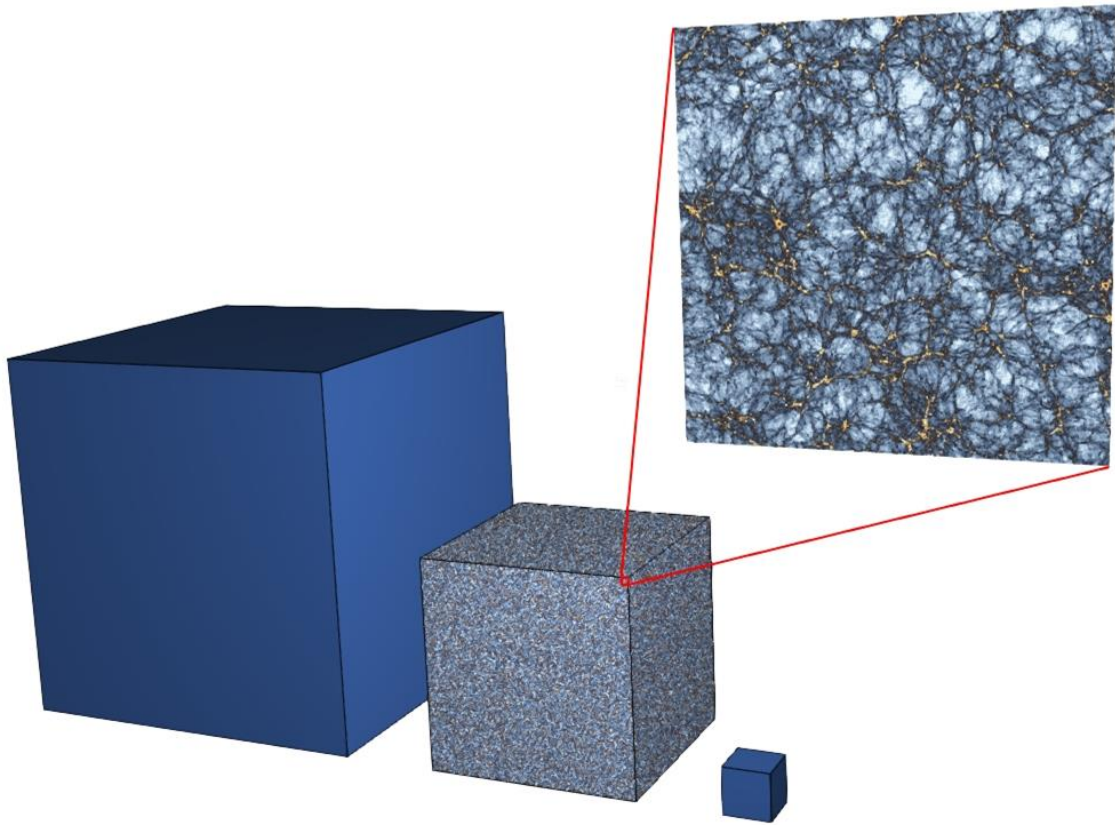


図1

本研究で日本チームがチャレンジプログラムとして構築した模擬宇宙に広がる大規模構造（中央）を光で観測可能な領域に相当する体積（左）、実際の観測の中でも最大の銀河サーベイであるスローン・デジタル・スカイサーベイ（SDSS）が観測した体積（右）と比較したもの。全ての体積は立方体で表しており、辺の長さは左から順に約750億光年、400億光年、90億光年に相当する。本研究で計算された模擬宇宙はSDSSが観測した体積よりもはるかに大きく、まだ光で観測可能な宇宙全体とまではいかないが、その大きさに近づきつつある。模擬宇宙の色はダークマターを主成分とする物質密度の濃淡を表し、赤い部分が高密度、青白い部分が低密度領域に対応している。右上に示した断面の拡大図からは、ネットワーク状に広がる複雑な構造が確認できる。（Credit: 西道啓博）



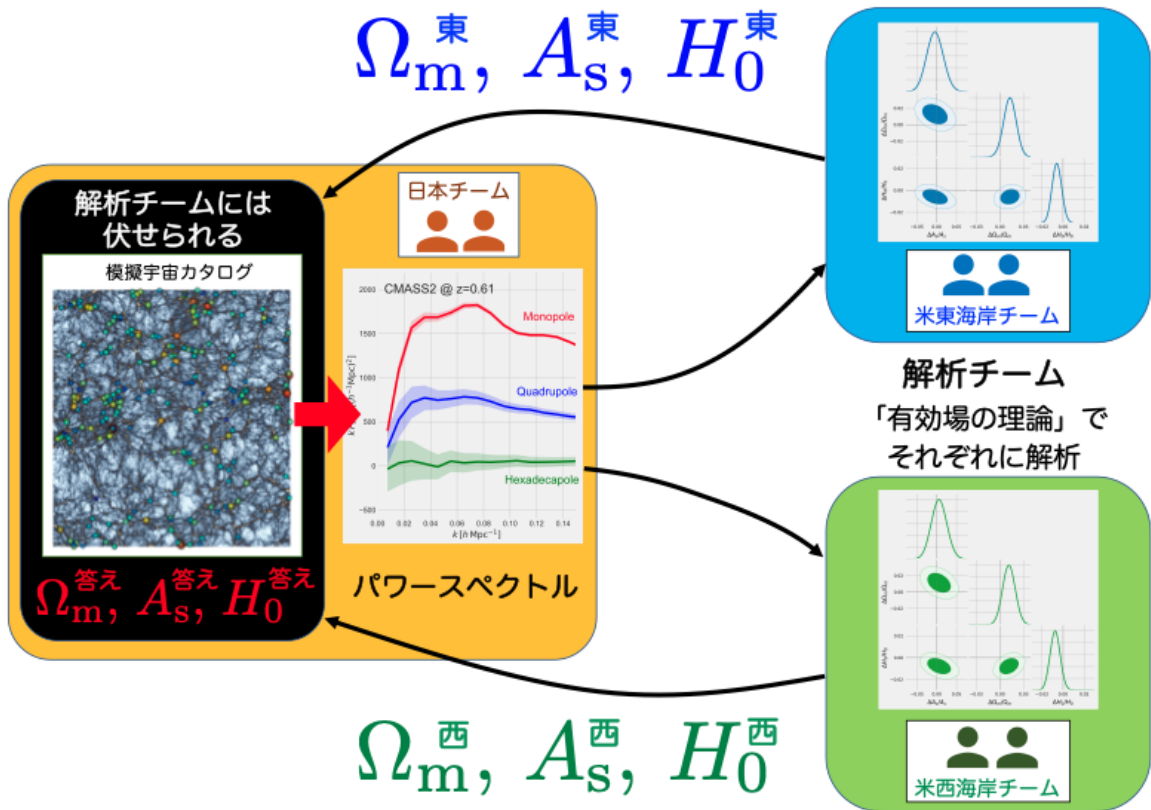


図2

本チャレンジプログラムの概要。日本チームは図1のような立方体状の領域から銀河を同定し（左パネル「模擬宇宙カタログ」で色付きの丸印で表したものが銀河に対応）、銀河の分布を特徴付ける統計量「パワースペクトル」を測定、それを米両海岸チームに引き渡した。米両海岸チームはこのデータを有効場の理論に基づいて分析し、導かれた宇宙論パラメータを日本チームに提出。模擬宇宙の中で仮定されていた数値と比較し、その一致の良さを確かめた。これによって、それぞれの解析チームが用いた解析手法の妥当性が検証された。（Credit: 西道啓博、高田昌広）

<関連リンク>

日本チームが主催するチャレンジプログラムのウェブサイト（英語）  
<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~takahiro.nishimichi/data/PTchallenge/>