

研究歴と研究概要

真貝寿明（大阪工業大学 教授）

2019年5月1日

私は、早稲田大学で、前田恵一教授の着任時、第1期の学生として卒業研究に配属され、そのまま大学院に進学し、95年に学位を取得した。一般相対性理論の広いトピックに興味をもち、数値解析を用いるダイナミクスに関連する研究を中心に行っている。大規模数値シミュレーションの経験もあるが、それを中心に据えているわけではなく、方法論的な研究や将来を見据えた試験的な研究も多く手がけている。現在、一般相対性理論の分野では、重力波観測の本格化の時代を迎えているが、最近の私は、データ解析方法論や、重力波観測から導かれる天体物理現象解析提案などを行っている。また、相対性理論以外のトピックで卒業研究を発展させたいくつかのトピックでの論文執筆のほか、趣味で江戸時代後期の物理学受容史研究も始めている。

以下では、トピックごとに、およそ経年順に研究歴を述べる。

1 初期宇宙研究・インフレーションモデルの初期条件一般性（学位論文）

インフレーション宇宙モデルは、ビッグバン宇宙モデルの原理的問題のいくつかを解決するものとして提案されたモデルである。インフレーションとは、時空の指数関数的膨張を意味し、現在の宇宙の一樣等方性や銀河形成の種を与えるモデルとして、現在では宇宙論の標準的シナリオとなっている。90年代半ばには、非一樣な時空でインフレーションが発生しうるのか、という点に関心が集まっていた。我々は数値シミュレーションにより、スカラー場や強い重力波が同在する場合でもインフレーション膨張が起き得ることを示した（研究業績リスト §1.1 原著論文の論文 [2, 3, 5], 以下同じ）。

論文 [2] の結果は、Anninos, Living Review of Relativity, 1998-2 にて, subsection を割いて紹介された。

2 数値相対論方法論の研究

学位論文にて、Einstein 方程式の数値シミュレーションを手がけたことから、一般相対性理論の数値計算手法そのものに興味をもつようになった。

Weyl テンソルの分解とその応用

通常のシミュレーションは、空間3次元を時間方向に積分することによってなされるが、4次元時空を光の伝播方向とそれらに垂直な2方向に分解する「2+2分解」(characteristic formulation) は、重力波を解析するときに非常に威力を発揮する幾何的な方法である。重力波の摂動方程式は「2+2分解」の1つである Newman-Penrose 形式で定式化されている。そこで、シミュレーションの結果を、重力波の解析に便利な時空の不変曲率量の計算に置換する簡潔な表現を与えた [4]。

この変換公式は直ちに米国の数値相対論グループで採用され、2つのブラックホールの正面衝突の解析などに応用された。また、私が渡米するきっかけを与えてくれた。現在でも cactus コード、EinteinToolKit コードの一部として実際に使われていて、数値計算結果から重力波を抽出する部分として使われ続けている。

Post-Newton 近似での数値相対論

渡米して加わった数値相対論のグループでは、中性子星連星の合体を取り扱うプログラムの「初期条件をどれだけ物理的な状態に設定できるか」という部分を担当した。並列計算で楕円型偏微分方程式を解く部分を担当したほか、Post-Newton 近似を用いた初期値設定が、フルに Einstein 方程式を解くシミュレーションとどこから接続できるか、という観点での研究を行った。また、球対称の中性子星の平衡解が、高次の Post-Newton 近似を行った際にどのように一般相対論の解に収束していくかを明らかにした [12]。

Ashtekar による一般相対論の拡張をダイナミクスへ応用する試み

一般相対論を、より広い複素多様体上で捉えなおした Ashtekar による記述法は、さまざまな利点を持ち、非摂動的な量子重力の研究の突破口として注目を集めた。それらの利点には、Einstein 方程式に伴う楕円型方程式を微分多項式に置き換える、時空の縮退点も取り扱うことができる、ゲージ場を物質場として取り込むのに適した形式である、などの点が挙げられていた。我々は、古典相対論の範囲内で、この Ashtekar 形式を応用することを考え、必要となる理論的な枠組みの整理および数値計算への初の応用を行った [6, 8]。

海外学振に採用されたことで、Ashtekar のいる研究グループに移り、多くの研究分野の見聞を広めた。

数値計算のための定式化問題：双曲型定式化

2000 年代始めは、Einstein 方程式の定式化の違いによる数値的安定性の問題が注目され、さまざまなグループが各々独自のコードで独自の問題を報告してきた。我々は、このような混沌とした状況を解決するために、数値計算の比較の土台となる共通問題を設定し、それを利用できる環境を提案した [25]。

また、Ashtekar 変数を用いることにより、各レベルの双曲形式を導き [11, 14]、数値計算による安定性の比較を行った [16]。強双曲型以上の方程式は、弱双曲型以上の良い振る舞いを示すことが見られたが、対称双曲型が必ずしもいつでも一番良いというわけではないことも確認された。この結果は双曲型運動方程式研究に一石を投じた。

数値計算のための定式化問題：数値的な破れが自己回復してゆくシステムの考案と実装

数値的にダイナミクスを解く場合、わずかながらの拘束条件の破れは、常に起こり得る問題である。我々は、このような破れが時間発展と共に自己回復していくような新しい運動方程式の組を Ashtekar 変数を用いて提案した [13]。この系は拘束条件式が満たされる空間、実数条件が満たされる空間が解としてアトラクターになっていて、実際の数値計算でこのシステムが機能することも確かめられた [17]。

そして、現在、主流となっている BSSN 形式と呼ばれる Einstein 方程式の定式化手法が、なぜ元の ADM 形式よりも優れているのか、という解析を拘束条件式の時間発展方程式を解析することによって明らかにし [19, 21, 23, 33]、さらにより定式化が存在する処方箋 [24, 26, 35, 39, 40] を示した。

論文 [16, 17] の結果は、当時、数値相対論の定式化問題解決の一手順として注目された。Lehner, *Class. Quantum Grav.* 18 (2001) R25 など随所に紹介された。その後、拘束条件破れ低減法として、2006 年の数値相対論業界でのブレイクスルーにつながるようになった。

3 修正重力理論でのダイナミクス

一般相対性理論以外の重力理論にも興味をもち、主に、数値解析を用いる手法によってさまざまなトピックでの研究も行った。

Brans-Dicke 重力理論での重力波

重力波の直接観測が可能になると、重力理論の検証を強い重力場の物理現象を用いて行うことが可能になる。我々は、Einstein の一般相対論の代替理論として有力視されていた Brans-Dicke 重力理論を用いて、回転ブラックホールからの重力波放出を摂動近似の範囲で調べ、一般相対論の場合との比較を行った [7]。

スカラーテンソル重力理論でのボゾン星

スカラーテンソル重力理論は、一般相対論に較べて余計な（重力）スカラー場の自由度を持つ理論である。そこで、（物質）スカラー場の自己重力で星を形成する、というボゾン星をモデルにして、どのようにスカラーテンソル理論の影響が現われるかに興味をもった初期値系列にカタストロフィー理論を応用した安定性の予測 [9] と、実際に時間発展計算を行ってその予測が正しいことを確認した [10].

4 「2 + 2 分解」された時空で追うダイナミクス

擬球対称近似

ブラックホールや中性子星合体の後に形成される最終的な時空は、回転するブラックホール解 (Kerr 解) であると考えられる。ここでは、通常の 3 + 1 分解で行った数値シミュレーション結果を、さらに 2+2 分解のヌル座標分解で計算を続け、重力波波形の非線形効果を長時間にわたって計算することを動機にして、2+2 分解された Einstein 方程式に「擬球対称近似」を提案し、この近似の有効性を示した [20].

ワームホールの不安定性

通過可能なワームホールという研究テーマは、Morris-Thorne によって 80 年代に浮上した。我々は、ワームホールとブラックホールの双対性を示すため、Morris-Thorne のワームホール解のダイナミクス研究を行った。そして、ワームホール構造は不安定であることをはじめて示し、エネルギー条件の正負によって、最終構造がまったく異なることを示した [22]. この結果は、いくつか別の方法で追試され確認されるとともに、その後さまざまな形で議論が発展しており、引用数も多い (Spires で 97).

我々は、「2 + 2 分解」計算コードを、その後、高次元時空へ応用したり、Gauss-Bonnet 高次曲率項を含めた形へと発展させている [43].

5 高次元時空でのダイナミクス

2000 年代初め、膜宇宙モデル (brane world) のパラダイムが注目を集め、一般相対性理論を高次元で取り扱うときの差異に関心が集まった。

膜宇宙モデルでのブラックホール

我々は、5 次元の Kaluza-Klein のバブル時空をモデルに高次元時空の安定性問題が数値的に取り扱えること [15] や、膜宇宙モデルをもとにした、帯電ブラックホールの 5 次元時空中での構造 [18] などを初期に示した。研究者人口が多い分野のため、引用数も多い (Spires で 153).

高次元でのブラックホール地平面形成

また、4 次元時空では、物質分布が極端に細長いときに、重力崩壊によってブラックホール地平面が形成されず、時空特異点が形成されることが、Shapiro-Teukolsky (1991) によって示されている。この計算を再現し、さらに、5 次元時空にしたときにどのような差異が得られるかを明らかにした。高次元になれば、重力波の自由度が増えることから、重力崩壊はより球形に近く進み、したがってブラックホール地平面の形成条件は初期条件に対してより広がること（時空特異点は形成されにくくなること）を確認した [36, 37].

高次元ワームホールの不安定性

我々が Morris-Thorne のワームホールが不安定であることを示してから、ワームホールの安定性問題に注目が集まり、さまざまなモデルが提案されるようになった。ワームホールの喉部分を固定して摂動解析して安定性を議論する誤った方法が発表されていたので、それを是正し、高次元へも拡張することで、Morris-Thorne タイプのワームホール解は高次元化するほど不安定さが増すことを示した [41].

Gauss-Bonnet 重力理論でのダイナミクス

弦理論の低エネルギー極限として得られる高次曲率項を含む Gauss-Bonnet 重力理論は、量子重力理論効果を議論する重要な試金石となる。我々はダイナミクスを議論するための定式化を行う [34] とともに、実際に数値シミュレーションを行って、Gauss-Bonnet 曲率項を含めることにより、特異点形成条件が緩められる実例を示した [43]。

6 中間質量ブラックホールの合体モデル

銀河中心に存在する超大質量ブラックホール (Supermassive BH; SMBH) の起源は、いまだに論争が続いている。そのモデルの一つに、中間質量ブラックホール (Intermediate mass BH; IMBH) の合体モデルがある。理化学研究所の基礎科学特別研究員に採用され、所属した戎崎宇宙計算物理研究室にて、銀河形成のシミュレーションが精力的に行われており、また、2002年にIMBHの候補天体が報告されたことから、このモデルの検証可能性に興味をもった。そして将来、宇宙空間での重力波観測でモデルの判別ができること [27]、および現在の LIGO/Virgo/KAGRA 干渉計でのブラックホール観測数予測を行った [42]。

また、光格子時計を宇宙空間に配置して重力波観測を行う構想を発表し、そこでのブラックホール観測数予測も行った [46]。

7 日本の干渉計プロジェクト TAMA, DECIGO, KAGRA

一般相対性理論研究に携わる者として、重力波検出実験に関わることは重要である。2000年代に国立天文台で TAMA が稼働した折には、観測シフトに参加し、データ取得を行った [28, 29, 30]。また、宇宙空間での重力波観測提案 DECIGO にも参加した [31, 38]。2015年に KAGRA プロジェクトに参加し、2017年に私が科学部門委員長 (the chair of the board, KAGRA Scientific Congress) に選出されて以降は、KAGRA 全体論文執筆 [44, 45, 47] をリードする立場になった。KAGRA は、現在建設と機器インストールを完了し、2019年秋からの実観測開始に向けて、最終調整を始めている。私は、米欧の LIGO/Virgo との共同観測に向けた組織代表としての取り決めに奔走している。

8 その他

卒業研究のテーマを発展させたもので、邦文報告がいくつかある。とくに、数独パズルの自動解答プログラムをもとにした『数独パズルの難易度判定 — 解法ロジックを用いた数値化の提案 —』(大阪工業大学紀要, 2011) は反響が大きかった。数学の答案作成プログラムは、人工知能学会での発表も行った。

また、文系の研究者との交流から、『天文文化学』創設も画策している。個人的には、江戸時代後期の日本での西洋天文学・物理学の受容過程に興味をもち、『麻田剛立とケプラーの惑星運動第3法則』(大阪工業大学紀要, 2017) を発表している。

参考文献

- [1] Bistability in an Ising model with non-Hamiltonian dynamics
J.R.Heringa, H.Shinkai, H.W.J.Blöte, A.Hoogland and R.K.P.Zia, *Physical Review* **B 45** (1992) 5707-5709
- [2] Can gravitational waves prevent inflation?
H. Shinkai and K. Maeda, *Physical Review* **D 48** (1993) 3910-3913
- [3] Generality of inflation in a planar universe
H. Shinkai and K. Maeda, *Physical Review* **D 49** (1994) 6367-6378
- [4] A ‘3+1’ method for finding principal null directions
L. Gunnarsen, H. Shinkai and K. Maeda, *Class. Quantum Grav.* **12** (1995) 133-140
- [5] Dynamics of topological defects and inflation
N. Sakai, H. Shinkai, T. Tachizawa and K. Maeda, *Physical Review* **D 53** (1996) 655-661
- [6] Constraints and reality conditions in the Ashtekar formulation of general relativity
G.Yoneda and H.Shinkai, *Class. Quantum Grav.* **13** (1996) 783-790
- [7] Gravitational waves in Brans-Dicke Theory : analysis by test particles around a Kerr black hole
M. Saijo, H. Shinkai and K. Maeda, *Physical Review* **D 56** (1997) 785-797
- [8] Tric for passing degenerate metrics in the Ashtekar formulation
G. Yoneda, H. Shinkai and A. Nakamichi, *Physical Review* **D 56** (1997) 2086-2093
- [9] Generation of scalar-tensor gravity effects in equilibrium state boson stars
G.L. Comer and H. Shinkai, *Class. Quantum Grav.* **15** (1998) 669-688
- [10] Dynamical evolution of boson stars in Brans-Dicke theory
J. Balakrishna and H. Shinkai, *Physical Review* **D 58** (1998) 044016 (13 pages)
- [11] Symmetric Hyperbolic System in the Ashtekar formulation
G. Yoneda and H. Shinkai, *Physical Review Letter* **82** (1999) 263-266
- [12] Truncated post-Newtonian Neutron Star Model
H. Shinkai, *Physical Review* **D 60** (1999) 067504 (4 pages)
- [13] Asymptotically constrained and real-valued system based on Ashtekar’s variables
H. Shinkai and G. Yoneda, *Physical Review* **D 60** (1999) 101502 (Rapid Communication, 5 pages)
- [14] Constructing hyperbolic systems in the Ashtekar formulation of general relativity
G. Yoneda and H. Shinkai, *Int. J. Mod. Phys.* **D9** (2000) 13-34
- [15] Fate of the Kaluza-Klein bubble
H. Shinkai and T. Shiromizu, *Physical Review* **D62** (2000) 024010 (8 pages)
- [16] Hyperbolic formulations and numerical relativity: Experiments using Ashtekar’s connection variables
H. Shinkai and G. Yoneda, *Class. Quantum Grav.* **17** (2000) 4799-4822

- [17] Hyperbolic formulations and numerical relativity II: Asymptotically constrained systems of the Einstein equations
G. Yoneda and H. Shinkai, *Class. Quantum Grav.* **18** (2001) 441-462
- [18] Charged brane-world black holes
A. Chamblin, H. S. Reall, H. Shinkai and T. Shiromizu, *Physical Review D* **63** (2001) 064015 (11 pages)
- [19] Constraint propagation in the family of ADM systems
G. Yoneda and H. Shinkai, *Physical Review D* **63** (2001) 124019 (9 pages)
- [20] Quasi-spherical approximation for rotating black holes
H. Shinkai and S.A. Hayward, *Physical Review D* **64** (2001) 044002 (8 pages)
- [21] Adjusted ADM systems and their expected stability properties: constraint propagation analysis in Schwarzschild spacetime
H. Shinkai and G. Yoneda, *Class. Quantum Grav.* **19** (2002) 1027-1049
- [22] Fate of the first traversible wormhole: black-hole collapse or inflationary expansion
H. Shinkai and S.A. Hayward, *Physical Review D* **66** (2002) 044005 (9 pages)
- [23] Advantages of modified ADM formulation: constraint propagation analysis of Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura system
G. Yoneda and H. Shinkai, *Physical Review D* **66** (2002) 124003 (10 pages)
- [24] Diagonalizability of constraint propagation matrix
G. Yoneda and H. Shinkai, *Class. Quantum Grav.* **20** (2003) L31-36 (Letter)
- [25] Toward standard testbeds for numerical relativity
M. Alcubierre, G. Allen, C. Bona, D. Fiske, T. Goodale, F.S. Guzman, I. Hawke, S. Hawley, S. Husa, M. Koppitz, C. Lechner, D. Pollney, D. Rideout, E. Schnetter, E. Seidel, H. Shinkai, D. Shoemaker, B. Szilagyi, R. Takahashi, and J. Winicour
(Mexico Numerical Relativity Workshop 2002 Participants),
Class. Quantum Grav. **21** (2004) 589-613.
- [26] Constraint propagation in $(N + 1)$ -dimensional space-time
H. Shinkai and G. Yoneda, *Gen. Rel. Grav.* **36** (2004) 1931-1937
- [27] Gravitational radiation from mergers of intermediate-mass black-holes
T. Matsubayashi, H. Shinkai and T. Ebisuzaki, *Astrophys. J.* **614** (2004) 864-868
- [28] Observation results by the TAMA300 detector on gravitational wave bursts from stellar-core collapses with the TAMA collaboration
Physical Review D **71** (2005) 082002 (17 pages)
- [29] Upper limits from the LIGO and TAMA detectors on the rate of gravitational-wave bursts with LIGO Scientific Collaboration, TAMA Collaboration
Physical Review D **72** (2005) 122004 (16 pages)
- [30] Joint LIGO and TAMA300 Search for Gravitational Waves from Inspiralling Neutron Star Binaries with LIGO Scientific Collaboration, TAMA Collaboration
Physical Review D **73** (2006) 102002 (10 pages)

- [31] The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO
with DECIGO collaboration
Class. Quantum Grav. **23** (2006) S125-S132
- [32] Results of the search for inspiraling compact star binaries from TAMA300's observation in 2000-2004
with TAMA Collaboration
Physical Review D **74** (2006) 122002 (8 pages)
- [33] Numerical Experiments of adjusted BSSN systems for controlling constraint violations
with K. KIUCHI
Physical Review D **77** (2008) 044010 (11 pages)
- [34] $N + 1$ formalism in Einstein-Gauss-Bonnet gravity
with T. TORII
Physical Review D **78** (2008) 084037 (13 pages)
- [35] Formulations of the Einstein equations for numerical simulations
Journal of Korean Physical Society **54** (2009) 2513-2528, [arXiv:0805.0068]
- [36] Black Objects and Hoop Conjecture in Five-dimensional Space-time
with Y. YAMADA
Class. Quantum Grav. **27** (2010) 045012 (15 pages)
- [37] Formation of naked singularities in five-dimensional space-time
with Y. YAMADA
Physical Review D **83** (2011) 064006 (5 pages)
- [38] The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO
with DECIGO collaboration
Class. Quantum Grav. **28** (2011) 094011 (12 pages)
- [39] Constraint propagation of C^2 -adjusted formulation – Another recipe for robust ADM evolution system
–
with T. TSUCHIYA AND G. YONEDA
Physical Review D **83** (2011) 064032 (10 pages)
- [40] Constraint propagation of C^2 -adjusted formulation II – Another recipe for robust BSSN evolution
system –
with T. TSUCHIYA AND G. YONEDA
Physical Review D **85** (2012) 044018 (12 pages)
- [41] Wormholes in higher dimensional space-time: Exact solutions and their linear stability analysis
with T. TORII
Physical Review D **88** (2013) 064027 (6 pages)
- [42] Gravitational waves from merging intermediate-mass black holes : II Event rates at ground-based
detectors
with N. KANDA and T. EBISUZAKI
Astrophys. J. **835** (2017) 276 (8 pages)

- [43] Nonlinear Dynamics in the Einstein-Gauss-Bonnet gravity
with T. TORII
Physical Review D **96** (2017) 044009 (14 pages)
- [44] Construction of KAGRA: an Underground Gravitational Wave Observatory
with KAGRA Collaboration
Prog. Theor. Exp. Phys. (2018) 013F01 [arXiv:1712.00148]
- [45] KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector
with KAGRA collaboration
submitted to Nature Astronomy (Perspective article)
- [46] INO: Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks
with T. EBISUZAKI , H. KATORI , A. NODA , J. MAKINO , T. TAMAGAWA
Int. J. Mod. Phys. D (2019) 1940002 [arXiv:1809.10317]
- [47] First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA
with KAGRA COLLABORATION
accepted for publication in Class. Quant. Grav. [arXiv:1901.03569]
- [48] Comparison of various methods to extract ringdown frequency from gravitational wave data
with H. NAKANO , T. NARIKAWA, K. OOHARA, K. SAKAI, H. TAKAHASHI, T. TANAKA, N. UCHIKATA,
S. YAMAMOTO, T. S. YAMAMOTO
accepted for publication in Physical Review D [arXiv:1811.06443]