

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740154

研究課題名(和文) 3次元輻射磁気自己重力流体シミュレーションによる星形成の初期条件の解明

研究課題名(英文) Toward understanding the initial conditions of star formation using realistic magnetohydrodynamics simulations

研究代表者

井上 剛志 (Inoue, Tsuyoshi)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：90531294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：3次元磁気流体力学シミュレーションを用いて星形成に対する研究を行い、以下のような成果を得た。1) 星形成の現場である分子雲は中性水素雲の降着によって効率よく形成することが明らかとなった。特に熱的不安定が形成した中性水素雲の降着は分子雲に観測される超音速乱流の具体的起源であり、かつ原子ガス乱流が星形成を支配していることが明らかになった。2) 高速な分子雲衝突によるガス圧縮と磁場増幅がこれまで不明であった大質量星形成の引き金となることが明らかになった。3) 熱的不安定性に付随する構造形成が超新星残骸における粒子加速から初代銀河での星団形成に至るまで重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Using three-dimensional, realistic, magneto-hydrodynamics simulations, we studied star formation mechanism in our universe. The important findings obtained in this work are as follows: 1) Molecular clouds that are the site of star formation are found to be formed by accretion of interstellar atomic clouds. In addition, we showed that accretion of clumpy atomic clouds, which are formed as a consequence of thermal instability, is an important driver of supersonic turbulence in molecular clouds, and atomic gas component of turbulent gas dominate the dynamics of molecular clouds and controls star formation. 2) Intensive molecular cloud collision and resulting gas compression/magnetic field amplification is found to be a triggering mechanism of massive star formation in our galaxy. 3) Structure formation due to thermal instability is found to be playing impotent roles in particle acceleration in young supernova remnants and star cluster formation in the first galaxy.

研究分野：理論天体物理学

キーワード：星形成 磁気流体力学 衝撃波

## 1. 研究開始当初の背景

銀河で生まれる全ての星は分子雲と呼ばれる星間媒質の中で最も濃密で冷たいガス雲の中で生まれることが知られている。しかしながら、「星の種となる分子雲コアの形成過程」や、「そのサイズ分布(初期質量関数・IMF)の起源」、「星形成率をコントロールする」と考えられている超音速乱流の駆動及び維持機構、「磁場は星形成をコントロールする程に強いのか?」と言った天文学的に極めて重要な問題はほとんど未解明のまま残されていた。

## 2. 研究の目的

上述した問題の解決は単に宇宙の基本構成要素である星の起源を明らかにするだけでなく、銀河進化論や星形成史等の近接分野の発展にも多大な波及効果を与える重要な研究課題であると言える。本研究では必要とされる微視的物理過程をほぼ網羅した3次元の磁気流体力学シミュレーションを実行し、分子雲をその形成段階から自己無撞着に再現することで上述した問題を解決することを目的とした。

## 3. 研究の方法

研究代表者の過去の研究成果(Inoue & Inutsuka 2008, 2009, The Astrophysical Journal)から、分子雲の現実的な原材料は熱的不安定性によって形成された中性水素雲であることが示されている。従って本研究ではそれらがさらに星間衝撃波や自己重力によって集積した場合にどのように分子雲が形成されるのかについて研究を行った。また、分子雲形成の初期条件となる中性水素雲は銀河内のあらゆる場所に存在していることが期待される。したがって、中性水素雲が存在するような極めて非一様な星間媒質を初期条件として若い超新星残骸のような強い衝撃波が伝搬する様子についても研究を行った。さらに、分子雲同士の衝突が大質量星や星団の形成を促進していることが近年の観測的研究から明らかとなってきている。そこで、形成された分子雲同士の衝突が本当にそのような活発な星形成を誘発するのかや、誘発するとすればどのようなメカニズムによるものなのかについても研究を行った。最後に本研究の特徴である熱的不安定性がまだ金属量の少なかった宇宙初期においてどのような役割を演じているのかについても研究した。

## 4. 研究成果

以下に示すような成果を得た。これらの成果は全て査読付きの欧文学術誌に掲載されている。また、本研究の成果によって研究代表者は2015年に日本天文学会研究奨励賞を受賞した。

### 1) 分子雲の形成に関して

上述したような中性水素雲が降着する様子を分子雲形成に必要な化学進化、輻射輸送、加熱冷却、熱伝導の効果を組み込んだ磁気流体力学シミュレーションで再現することに成功した。その結果、従来の常識とは大きく異なり、分子雲のシステムエネルギーは通常の一酸化炭素分子の輝線放射では観測されない暖かい原子ガスの乱流によって支配されていることが明らかとなった。これは分子雲の低い星形成率を説明する上で極めて重要な結果である。また、分子雲内部で形成された高密度クランプは特定の統計的性質を保ちながら徐々に質量を獲得して星形成を開始することが明らかとなった。これは典型的な星形成の初期条件が存在することを示しており、今後の星形成のシミュレーション研究に大きなインパクトを与えると予測される。

### 2) 分子雲衝突に関して

現実的な分子雲を模倣した非一様で磁場を帯びたガス同士の衝突過程について3次元の磁気流体シミュレーションを行った。その結果、衝突面で発生する強い衝撃波が分子雲クランプを圧縮することによって星形成が促進されるが、同時に磁場が強く増幅されることによって星形成の典型的サイズが上昇し、大質量の星形成コアが形成されることが明らかとなった。これは近年多数観測例が報告されている分子雲衝突による大質量星形成を理論的に支持する重要な成果となっている。

### 3) 熱的不安定性の星間媒質ダイナミクスにおける役割について

上述の熱的不安定を介した分子雲形成理論を応用して、若い超新星残骸における星間媒質の非一様性の効果について磁気流体シミュレーションを用いて研究を行った。その結果、熱的不安定で形成された中性水素雲を含むような非一様媒質と衝撃波の相互作用が超新星残骸に強い乱流を引き起こし、磁場の増幅や粒子加速を促進する効果があることを初めて3次元シミュレーションで示すことに成功した。現在この成果は、若い超新星残骸からの非熱的放射モデルのスタンダードな理論モデルとなっている。また、初期宇宙の低金属環境下における熱的不安定性の影響に関しても3次元の流体シミュレーションを行った。その結果、低金属な環境下であっても熱的不安定は成長が可能であり、初代星に汚染された金属量によっては初代銀河の星団質量関数が熱的不安定性によって決定されることを示した。また、シミュレーションを再現する理論式の提案も行った。この成果は今後初代銀河形成の物理を調べた最も基本的文献として参照されていくことが予想される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 18 件)

(1)"The Formation and Destruction of Molecular Clouds and Galactic Star Formation"

Shu-ichiro Inutsuka, Tsuyoshi Inoue, Kazunari Iwasaki & Takashi Hosokawa  
Astronomy & Astrophysics in press.  
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2015arXiv1505046961>

(2)"Thermal Instability and Multi-phase Interstellar Medium in the First Galaxies"  
Tsuyoshi Inoue & Kazuyuki Omukai  
The Astrophysical Journal, 805, 73, 2015  
DOI:10.1088/0004-637X/805/1/73

(3)"On Cosmic-ray Production Efficiency at Supernova Remnant Shocks Propagating into Realistic Diffuse Interstellar Medium"

Jiro Shimoda, Tsuyoshi Inoue, Yutaka Ohira, Ryo Yamazaki, Aya Bamba & Jacco Vink  
The Astrophysical Journal, 803, 98, 2015  
DOI:10.1088/0004-637X/803/2/98

(4)"A Detailed Study of Non-thermal X-ray Properties and Interstellar Gas Toward the -ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946"

H. Sano, T. Fukuda, S. Yoshiike, J. Sato, H. Horachi, T. Kuwahara, K. Torii, T. Hayakawa, T. Tanaka, H. Matsumoto, T. Inoue, R. Yamazaki, S. Inutsuka, A. Kawamura, H. Yamamoto, T. Okuda, K. Tachihara, N. Mizuno, T. Onishi, A. Mizuno, F. Acero, & Y. Fukui  
The Astrophysical Journal, 799, 175, 2015  
DOI:10.1088/0004-637X/799/2/175

(5)"Evaporation of Grain-surface Species by Shock Waves in Protoplanetary Disk"

Takuhiro Aota, Tsuyoshi Inoue & Yuri Aikawa  
The Astrophysical Journal, 799, 141, 2015  
DOI:10.1088/0004-637X/799/2/141

(6)"Critical Magnetic Field Strength for Suppression of the Richtmyer-Meshkov Instability in Plasmas"

Takayoshi Sano, Tsuyoshi Inoue, & Katsunobu Nishihara  
Physical Review Letters, 111, 205001, 2013  
DOI:10.1103/PhysRevLett.111.205001

(7)"Non-thermal X-rays and Interstellar Gas Toward the Gamma-ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Evidence for X-ray

Enhancement Around CO and HI Clumps"

H. Sano, T. Tanaka, K. Torii, T. Fukuda, S. Yoshiike, J. Sato, H. Horachi, T. Kuwahara, T. Hayakawa, H. Matsumoto, T. Inoue, R. Yamazaki, S. Inutsuka, A. Kawamura, H. Yamamoto, T. Okuda, N. Mizuno, T. Onishi, A. Mizuno, & Y. Fukui  
The Astrophysical Journal, 778, 59, 2013  
DOI:10.1088/0004-637X/778/1/59

(8)"Thermal Instability behind a Shock Wave in HI and Molecular Clouds"

Takuhiro Aota, Tsuyoshi Inoue & Yuri Aikawa  
The Astrophysical Journal, 775, 26, 2013  
DOI:10.1088/0004-637X/775/1/26

(9)"Formation of Massive Molecular Cloud Cores by Cloud-cloud Collision"

Tsuyoshi Inoue & Yasuo Fukui  
The Astrophysical Journal Letters, 774, L31, 2013  
DOI:10.1088/2041-8205/774/2/L31

(10)"The Origin of Radially Aligned Magnetic Fields in Young Supernova Remnants"

Tsuyoshi Inoue, Jiro Shimoda, Yutaka Ohira, & Ryo Yamazaki  
The Astrophysical Journal Letters, 772, L20, 2013  
DOI:10.1088/2041-8205/772/2/L20

(11)"Explicit-Implicit Scheme for Relativistic Radiation Hydrodynamics"

Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yuichiro Sekiguchi, Tsuyoshi Inoue, & Kengo Tomida  
The Astrophysical Journal, 764, 122, 2013  
DOI:10.1088/0004-637X/764/2/122

(12)"Richtmyer-Meshkov Type Instability of a Current Sheet in a Relativistically Magnetized Plasma"

Tsuyoshi Inoue  
The Astrophysical Journal, 760, 43, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/760/1/43

(13)"Formation of Turbulent and Magnetized Molecular Clouds via Accretion Flows of HI Clouds"

Tsuyoshi Inoue & Shu-ichiro Inutsuka  
The Astrophysical Journal, 759, 35, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/759/1/35

(14)"Magnetic Field Amplification Associated with the Richtmyer-Meshkov Instability"

Takayoshi Sano, Katsunobu Nishihara, Chihiro Matsuoka, & Tsuyoshi Inoue

The Astrophysical Journal, 758, 126, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/758/2/126

(15)"Enhanced Dissipation Rate of Magnetic Field in Striped Pulsar Winds by the Effect of Turbulence"

Makoto Takamoto, Tsuyoshi Inoue, & Shu-ichiro Inutsuka

The Astrophysical Journal, 755, 76, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/755/1/76

(16)"Toward Understanding the Origin of Turbulence in Molecular Clouds: Small Scale Structures as Units of Dynamical Multi-Phase Interstellar Medium"

Kengo Tachihara, Kazuya Saigo, Aya E. Higuchi, Tsuyoshi Inoue, & Shu-ichiro Inutsuka

The Astrophysical Journal, 754, 95, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/754/2/95

(17)"A Detailed Study of the Molecular and Atomic Gas Towards the Gamma-ray SNR RX J1713.7-3946: Spatial TeV Gamma-ray and ISM Gas"

Y. Fukui, H. Sano, J. Sato, H. Horachi, T. Hayakawa, K. Torii, N. M. McClure-Griffiths, G. Rowell, T. Inoue, S. Inutsuka, A. Kawamura, H. Yamamoto, T. Okuda, N. Mizuno, T. Onishi, A. Mizuno and H. Ogawa

The Astrophysical Journal, 746, 82, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/746/1/82

(18)"Toward Understanding The Cosmic-ray Acceleration at Young Supernova Remnants Interacting with Interstellar Clouds: Possible Applications to RX J1713.7-3946"

Tsuyoshi Inoue, Ryo Yamazaki, Shu-ichiro Inutsuka, & Yasuo Fukui

The Astrophysical Journal, 744, 71, 2012  
DOI:10.1088/0004-637X/744/1/71

〔学会発表〕(計 28 件)

\*国内での発表に関しては主要講演のみ抜粋

(1)(Invited Talk)"Dynamical Evolution of the Magnetized Interstellar Medium"

Tsuyoshi Inoue

"Nagoya Workshop on the Interstellar Hydrogen", Nadya Park, Nagoya (Japan), Mar. 26-28, 2015

(2)"Formation of Massive Filamentary Cloud Cores behind Shock Wave"

Tsuyoshi Inoue & Yasuo Fukui

"Star Formation Across Space and Time", European Space Agency, Noordwijk (Netherlands), Nov 11-14, 2014

(3)"Formation of Massive Molecular Cloud Cores by Cloud Collision"

Tsuyoshi Inoue & Yasuo Fukui

"East Asia Numerical Astrophysics Meeting", Kyung Hee University, Suwon (Korea), Sep 15-19, 2014

(4)(Invited Talk)"MHD Simulations of Shock-cloud Interaction"

Tsuyoshi Inoue

"Birth and Death of High-mass Stars: Lessons on Newly Explored Phases of the Interstellar Medium", Nagoya University, Nagoya (Japan), Jan 8-11, 2014

(5)(Invited Talk)"Cosmic Rays and Their Impact on the ISM"

Tsuyoshi Inoue

"Physical Processes in the ISM", Garching (Germany), Oct 21-25, 2013

(6)(Invited Talk)"The Role of MHD Turbulence behind Astrophysical Shock Waves"

Tsuyoshi Inoue

"12th International Workshop on Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space", Hakuba Tokyu Hotel, Nagano (Japan), Jul 1-5, 2013

(7)(Invited Talk)"Formation of Massive Molecular Cloud Cores Induced by Cloud-cloud Collision"

Tsuyoshi Inoue

"Cloud Collisions and Triggered High-mass Star Formation", Nagoya University, Nagoya (Japan), Dec 20-21, 2012

(8)"Formation of Massive Molecular Cloud Cores Induced by Cloud-cloud Collision"

Tsuyoshi Inoue

"Star Formation Workshop 2012", NAOJ, Tokyo (Japan), Dec 10-12, 2012

(9)"Formation of Turbulent and Magnetized Molecular Clouds"

Tsuyoshi Inoue

"East Asia Numerical Astrophysics Meeting", Yukawa Institute, Kyoto University, Kyoto (Japan), Oct 29- Nov 2, 2012

(10)(Invited Talk)"Generation of Turbulence and Magnetic Field Amplification behind Shock Wave in the ISM"

Tsuyoshi Inoue

"Magnetic Fields in the Universe III",

Zakopane (Poland), August 21-27, 2011

(11)(Invited Talk)"Generation of Turbulence and Magnetic Field Behind Astrophysical Shock Waves"

Tsuyoshi Inoue

"MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas", Peking University, Beijing (China), June 6-9, 2011

(12)(招待講演)「分子雲衝突による衝撃波の物理とコア形成」

井上 剛志

日本天文学会 2015 年春期年会、大阪大学(大阪府豊中市)、2015 年 3 月 18-21

(13)(招待講演)「衝撃波による星間磁気乱流の生成と天体現象への応用」

井上 剛志

Plasma Conference 2014、新潟コンベンションセンター(新潟県新潟市)、2014 年 11 月 18-21

(14)(招待講演)「星間磁気乱流」

井上 剛志

High-Energy Astrophysics and Astroparticle Physics 2014、高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)、2014 年 10 月 14-16

(15)(招待講演)「分子雲の磁気流体ダイナミクス」

井上 剛志

名古屋大学南半球研究センター研究会「惑星から大質量星の形成までを俯瞰する」、名古屋大学(愛知県名古屋市)、2014 年 10 月 1-3

(16)(招待講演)「星間媒質の動的進化過程」

井上 剛志

日本天文学会 2014 年秋期年会、山形大学(山形県山形市)、2014 年 9 月 11-13

(17)(招待講演)「分子雲衝突による大質量フィラメント形成」

井上 剛志

分子雲衝突ワークショップ 2015、名古屋大学高等研究院(愛知県名古屋市)、2014 年 8 月 26

(18)(招待講演)「3次元シミュレーションで探る分子雲のダイナミクス」

井上 剛志

野辺山ユーザーズミーティング、野辺山宇宙電波観測所(長野県南牧村)、2014 年 7 月 23-24

(19)(招待講演)「乱流水素ガスの磁気流体力学理論」

井上 剛志

水素の挙動を軸とする精密な宇宙物理学の展開、名古屋大学(愛知県名古屋市)、2014 年 4 月 25

(20)(招待講演)「分子雲シミュレーション：形成と内部構造」

井上 剛志

NRO 銀河面サーベイワークショップ -ALMA を見据えたサイエンス検討-、国立天文台(東京都三鷹市)、2013 年 11 月 8

(21)(招待講師)「星間衝撃波の物理と天文学的応用」

井上 剛志

2013 年度第 43 回天文天体物理若手夏の学校、宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城県蔵王町)、2013 年 7 月 29-8 月 1

(22)(招待講演)「SNR のシンクロトロン電波偏光遷移：効率の宇宙線加速の証拠か？」

井上 剛志、霜田治朗

ALMA Workshop「ALMA で探る超新星とその残骸」、青山学院大学(神奈川県相模原市)、2013 年 5 月 23-24

(23)(招待講演)「The Role of Richtmyer-Meshkov Instability in Astrophysics」

井上 剛志

Laboratory Astrophysics Workshop 2013、大阪大学 銀杏会館 三和銀行ホール(大阪府吹田市)、2013 年 5 月 8-9

(24)(招待講演)「星間天体現象における磁気乱流の役割」

井上 剛志

日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学(広島県東広島市)、2013 年 3 月 26-29

(25)(招待講演)「分子雲形成シミュレーション：分子雲の形成過程と星形成の初期条件」

井上 剛志

第 25 回理論懇シンポジウム「計算機宇宙物理学の新展開」、つくば国際会議場(茨城県つくば市)、2012 年 12 月 22-24

(26)(招待講演)「超新星残骸と分子雲を中心とした星間媒質の MHD ダイナミクス」

井上 剛志

日本 SKA サイエンス会議「宇宙磁場」、福岡県割烹旅館まさご屋(福岡県福岡市)、2012 年 6 月 25-26

(27)(招待講演)「多相星間媒質中での乱流と粒子加速」

井上 剛志

天文学を中心とした理工学での乱流研究会、東京大学生産研(東京都目黒区)、2011 年 10 月 28-29

(28)(招待講演)「磁気乱流と CMB: ISM と磁気乱流の基礎」

井上 剛志

CMB 前景放射・初期宇宙論ワークショップ、  
名古屋大学(愛知県名古屋市)、2011年10月  
24

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/inouety/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 剛志 (INOUE, Tsuyoshi)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：90531294