

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：17204052  
 研究課題名（和文） 大出力レーザーを用いた無衝突衝撃波の形成と粒子加速物理機構の解明  
 研究課題名（英文） Study of Collisionless Shock and Particle Acceleration with Intense Lasers  
 研究代表者  
 高部 英明（TAKABE HIDEAKI）  
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
 研究者番号：20150352

## 研究成果の概要：

世界に 6 箇所しかない大型の高強度レーザーを用いて、宇宙物理などで極めて重要な無衝突衝撃波の生成の物理機構の解明と粒子加速の研究を理論的、実験的に行った。本事業により、従来の衝撃波生成のための外部磁場が内場合でも、プラズマ流の磁気不安定による、線形から非線形、最終的な自己構造形成により無衝突衝撃波がどんな条件下でも生成されうること示した。同時に、英国、仏国、中国の大型レーザーも用いた国際共同実験体制をこの 4 年間を通して構築することができた。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2006 年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2007 年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：宇宙物理、プラズマ、地球電磁気、宇宙線、量子ビーム

## 1. 研究開始当初の背景

大型レーザーを用いた「実験室宇宙物理」という新しい学術分野を世界に先駆けて提唱したのは申請代表者である。本事業開始までは主に米国、欧州での実験に先を越され、我が国は理論的可能性の研究にとどまる状態であった。本事業により、世界的にも大変ユニークな実験を開始できた。

## 2. 研究の目的

レーザーにより高温で超高速（1000km/s）のプラズマ流を生成し、対向流とし、無衝突の

条件で対向流同士が相互作用して磁場が発生し、その磁場の構造形成による衝撃波形成を干渉計測や影画法、陽子ビーム映像法などで観測し、無衝突衝撃波発生の実験的検証を行うこと。同時に、その衝撃波による粒子加速を計測すること。

## 3. 研究の方法

阪大の GXII レーザー、英国のバルカン、パリの LULI2000 レーザー、中国上海の神光 II 号レーザーを用いた国際共同実験の実施。それによる本事業の研究テーマの国際的共同研究体制の構築。本事業のための計測法は英

国、仏国、中国の法が優れており、衝撃波のイメージ取得に成功。本衝撃波は磁気駆動型ではなく、静電的衝撃波であることを確認。本事業費で阪大での計測系の改善を行った。

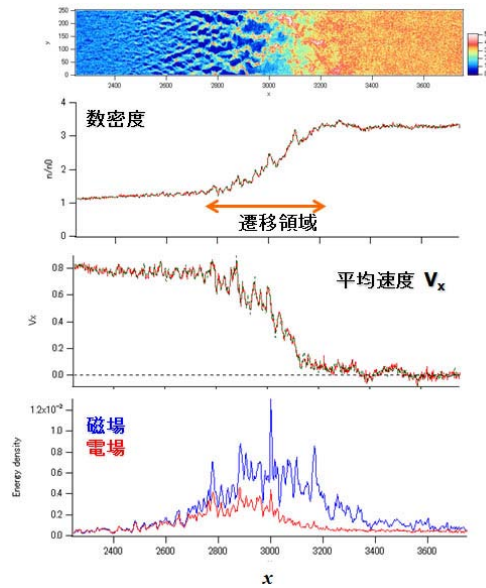
#### 4. 研究成果

本課題は代表者が世界に先駆けて約15年前に提唱した「実験室宇宙物理」[H. Takabe, Plasma Fusion Res. **69**, 1285-1300 (1993)]分野の中の最も重要な課題である。現在、米国、欧州、中国そして日本でこの新分野の様々な研究が進行中である。【代表者の本学術分野提唱は海外で評価が高く、2000年にはAPS Fellowの称号、2003年にはANSのE. Teller賞、2006年には中国科学院国家天文台名誉教授の称号が授与されている。また、2009年、中国・上海交通大学が始めた著名客員教授の第1号の榮譽を受けた】

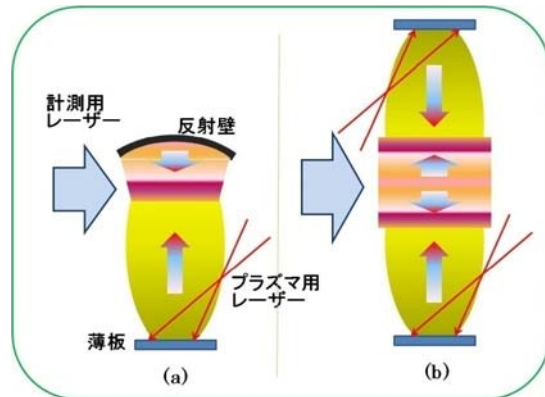
我が国における本格的実験には阪大レーザー研の大型レーザーが必須であったが、レーザー研においては核融合研究が主体で宇宙物理が本格的に取り上げられることはなかった。しかし、大学法人化、センターの全国共同利用化という時代の要請の変化の中で、「実験室宇宙物理」の重要性が認識され始めた。時を同じく、4年前に科研費・基盤Aが本課題に関連して採択され、少数ながら研究を立ち上げ、その推進が可能となった。星野氏を客員教授に招き、宇宙・惑星圏・太陽などのプラズマ物理研究者と研究会を重ねた。1912年のHessの宇宙線発見から約100年経つにもかかわらず、未だに宇宙線の加速機構が未解決である。

過去4年間の科研費（基盤A）では兒玉を中心に実験の立ち上げを行った。頃良く、プラズマ波動が専門の坂和がレーザー研に着任したため彼を中心に実験を開始することができた。実験では英国ヨーク大学のN. Woolsey教授達と共同研究を開始し、英国のレーザーも用いた国際共同研究を推進している。仏国エコール・ポリテクニクのM. Koenig教授達も参加している。ところが実験を始めたものの、阪大レーザー研の激光XII号は、20年にわたり、核融合に特化した実験を行ってきたため、本課題に最適な比較的希薄（密度が $10^{19-20} \text{cm}^{-3}$ 程度）なプラズマの画像計測装置が整っておらず、主に外国での共同実験でデータを蓄えてきた。

2次元プラズマ粒子シミュレーションの結果を図に示す（加藤）。高速流が図の左から右の壁に衝突し反射して二流体領域を時間的に広げていく。図は衝撃波が形成された時刻の分布である。上から密度の二次元分布、横方向（Y方向に平均）に平均化した密度分布、

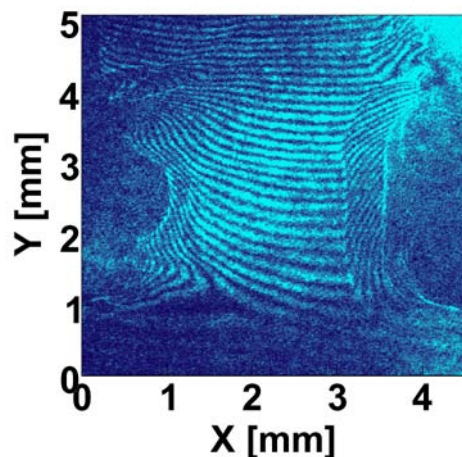


横方向に平均化した速度分布、横方向に平均化した電場、磁場のエネルギー密度分布である。強い衝撃波極限である密度上昇が3倍（三次元では4倍）まで、遷移領域（衝撃波面）を経て上昇している。ワイベール不安定の線形成長、非線形構造形成、飽和を経て、磁場のエネルギー密度はイオン流体の運動エネルギー密度の2%程度まで達している。この磁場が左から流入するイオンの軌道をラーモア運動で乱し、これが実質的な異常粘性の働きをし、衝撃波が形成されていることがわかった。



宇宙での無衝突衝撃波は外部磁場の中で形成されるというのが定説であった。しかし、磁場生成不安定（ワイベール不安定）の非線形過程から自己構造形成が起こり、無衝突衝撃波が形成されるという新説を我々は提唱し、現在、宇宙物理で大きな話題となっている。我々の理論結果のスケール則から、大出力レーザーで模擬実験が可能であることがわかり、実験を中心に阪大、英国、仏国、中国で行った。その結果、超新星残骸の典型的な流速1000km/sの対向流を上図に示すようなレーザー照射実験で計測できた。また、干渉計測、プロトン影絵もフランスの実験で得

ることができた。しかし、スケール則からレーザーエネルギーが欧州、アジアのレーザーでは不足で、下図に見られるような①静電衝撃波の生成、②静電衝撃波の斜め伝搬イオン波による消滅、③磁気不安定の成長によるフィラメント構造の計測、までのデータを得ら



れたにとどまった。21年度は米国の巨大レーザーNIFなど用い、磁気不安定から衝撃波生成を確認は課題として残った。米国のNIFを用いて共同実験すべく交渉中である。衝撃波生成が観測できるとその宇宙物理、惑星間物理、地球磁気圏物理などへの強烈なインパクトが期待できる。

#### 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 33 件)

1. Nonthermal Acceleration of Charged Particles due to an Incoherent Wakefield Induced by a Large-Amplitude Light Pulse  
Y. Kuramitsu, Y. Sakawa, T. Kato, H. Takabe, and M. Hoshino  
The Astrophysical Journal Letters Volume **682**, Issue 2, Page L113-L116, Aug 2008
2. Non-relativistic Collisionless Shocks in Unmagnetized Electron-Ion Plasmas  
Tsunehiko N. Kato and Hideaki Takabe  
The Astrophysical Journal Letters Volume **681**, Issue 2, Page L93-L96, Jul 2008
3. Interaction between Alternating Fields and a Relativistic Collisionless Shock  
K. Nagata, M. Hoshino, C. Jaroscheck, and H. Takabe  
The Astrophysical Journal, Volume **680**, Issue 1, Page 627-638, Jun 2008 (2008)
4. Spectrum modulation of relativistic electrons by laser wake-field  
N. Nakani, K. Kondo, Y. Mori, E. Miura, Y. Kuramitsu, K. Tsuji, K. Kimura, S. Pukumochi, M. Kashihara, T. Tanimoto, H. Nakamura, T. Ishikura, K. Takeda, M. Tampo, H. Takabe, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. Mima, and K. A. Tanaka  
Applied Physics Letters **93**, 081501, (2008)
5. Laboratory Experiments to Study Astrophysical Shock and Jets  
Y. Sakawa, A. Oya, S. Dono, T. Kimura, N. Ozaki, B. Loupiau, J. Waugh, H. Nagatomo, K. Shigemori, H. Takabe, T. Norimatsu, R. Kodama, M. Koenig, and N. Woolsey,  
Journal of Physics: Conference Series **112**, 042020 (2008)
6. Plasma jet experiments in vacuum and in ambient medium using high energy lasers,  
B. Loupiau, 18 authors, Y. Sakawa, H. Takabe and R. Kodama,  
Journal of Physics: Conference Series **112**, 042022 (2008)
7. High-Mach Number Collisionless Shock and Photo-ionized Non-LTE Plasma for Laboratory Astrophysics with Intense Laser  
H. Takabe, T. N. Kato, Y. Sakawa, Y. Kuramitsu, T. Morita, T. Kadono, K. Shigemori, K. Otani, H. Nagatomo, T. Norimatsu, S. Dono, T. Endo, K. Miyanishi, T. Kimura, A. Shiroshita, N. Ozaki, R. Kodama, S. Fujioka, H. Nishimura, D. Salzman, B. Loupiau, C. Gregory, M. Koenig, J. N. Waugh, N. C. Woolsey, D. Kato, Y-T Li, Q-L Dong, S-J Wang, Y. Zhang, J. Zhao, F. Wang, I. H. -G. Wei, J. -R. Shi, G. Zhao, J-Y Zhang, T-S Wen, W-H Zhang, X Hu, S-Y Liu, Y K Ding, L Zhang, Y-J Tang, B-H Zhang, Z-J Zheng, Z-M Sheng, and J. Zhang  
Plasma Physics and Controlled Fusion **50**, 124057 (2008)
8. The structure of accretion disks formed by merging of white dwarfs  
T. Shioya, T. Sano, H. Takabe, and T. Tsuribe

- Publ. Astron. Soc. Japan, **59**, 753-761 (2007)
9. Nonlinear Dynamics of Ionization Fronts in HII Region  
Akira Mizuta, Jave O. Kane, Marc W. Pound, Bruce A. Remington, Dmitri D. Ryutov, and **Hideaki Takabe**,  
Astrophysics and Space Science, Volume **307** 183-186(2007)
  10. All on Plasma Energy (*in Japanese*)  
**H. Takabe**, Edited by Japan Soc. Plasma Fusion  
(Nihon-Jitugyou-Sha Publ., Tokyo, 2007)
  11. Model Experiment of Astrophysics with Intense Laser (*in Japanese*)  
**H. Takabe**  
J. Plasma Fusion Res. Vol. **83**, 465-471(2007)
  12. 高部英明、「高強度レーザーを用いた宇宙物理模擬実験」プラズマ・核融合学会誌、**83**, 465-471(2007)
  13. Frontiers of Basic Science  
**H. Takabe**, N. G. Luong, and Y. Onuki  
(Osaka University Press, Osaka, 2006)
  14. Formation of Pillars at the Boundaries between H II Regions and Molecular Clouds  
A. Mizuta, J. O. Kane, M. W. Pound, B. A. Remington, D. D. Ryutov, and **H. Takabe**,  
The Astrophysical Journal, 647:1151-1158, 2006
  15. Nonaxisymmetric Magnetorotational Instability in Proto Neutron Stars  
Youhei Masada, Takayoshi Sano, and **Hideaki Takabe**,  
The Astrophysical Journal, volume 641, part 1 (2006), pages 447-457
  16. Hydrodynamic Instability of Ionization Fronts in H II Regions  
Akira Mizuta, Jave O. Kane, Marc W. Pound, Bruce A. Remington, Dmitri D. Ryutov, and **Hideaki Takabe**,  
The Astrophysical Journal, volume 621, part 1 (2005), pages 803-807
  17. Hydrodynamic Instability of Ionization Front in HII Regions: From Linear to Nonlinear Evolution,  
Akira Mizuta, **Hideaki Takabe**, Jave O. Kane, Bruce A. Remington, Dmitri D. Ryutov and Marc W. Pound,  
Astrophysics and Space Science, Volume 298, Numbers 1-2, 197-202 (2005)
  18. Eagle Nebula Pillars: From Models to Observations  
Marc W. Pound, Jave O. Kane, Bruce A. Remington, Dmitri D. Ryutov, Akira Mizuta and **Hideaki Takabe**,  
Astrophysics and Space Science, Volume 298, Numbers 1-2, 177-181 (2005)
  19. X-ray Line and Recombination Emission in the Afterglow of GRB  
S. Sugiyama, S. Yamada and **H. Takabe**,  
Astrophysics and Space Science, Volume 298, Numbers 1-2, 323-326 (2005)
  20. 高部英明、「高強度レーザーを用いた実験室宇宙物理学」、プラズマ核融合学会誌 **81**, Suppl. Pp. 150-160 (2005).
- [学会発表] (計 44 件)
- (以下、多数につき、代表者、招待講演のみ)
- 2008**
1. **H. Takabe**; “Laboratory Astrophysics for Intense Laser Science”, The 4<sup>th</sup> Asia Symposium on Intense Laser Science, Gwangju, Korea, November 3-6, 2008
  2. **H. Takabe**, “New Approach to Astrophysics with Intense Lasers: Topics on High-Energy Astrophysics and X-ray Astronomy”, Japan-France Workshop on High Energy Density Science., Tokyo, October 9-10, 2008
  3. **H. Takabe**: “High-Mach Number Collisionless Shock and Photo-ionized Non-LTE Plasma for Laboratory Astrophysics with Intense Laser”, 35<sup>th</sup> EPS Conference on Plasma Physics, Hersonissos, Crete, Greece, June 9-13, 2008
  4. **H. Takabe**: “Experimental and Computational Analysis of Photo-ionized Non-LTE Plasma Produced by Intense Laser”, 2008 APS April Meeting and

HEDP/HEDLA Meeting, St. Louis, Missouri, USA, April 11-15, 2008

## 2007

5. H. Takabe: “Laboratory Plasma Astrophysics with Intense Lasers”, Asia Pacific Meeting on Frontier of Plasma Physics, (October 31-November 3, 2007) and Conference in Honor of CN Yang 85<sup>th</sup> Birthday Swissotel Merchant Court, Singapore, 31 October-3 November 2007

6. H. Takabe: “Dawn of New Astrophysics Research with Intense Lasers”, UK-Japan High Energy Density Science Workshop, British Embassy Office in Tokyo, September 18-19, 2007

7. H. Takabe: “Turbulence in Laser Produced Plasma and Laser Astrophysics”, Japan-Korea Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas, Daejeon, Korea, April 5-6, 2007

8. H. Takabe: “Shock Wave by Extremely High Pressure and Related Complex Physics induced by Intense Lasers”, Shock Phenomena in Extreme Universe, Tokyo Institute of Technology, Japan, February 20-22, 2007

## 2006

No presentation

## 2005

9. H. Takabe: “Interdisciplinary Prospects on High Energy Density Physics at ILE, Osaka University”, 2005 ICFA Joint Workshop, NTU, Taipei, December 12-16, 2005

10. H. Takabe: “Laboratory Astrophysics and Nuclear Physics with Intense and Ultra-intense Large Scale Laser Systems” International Meeting on Frontiers of Physics 2005, Maine Beach Resort & Spa, Kuala Lumpur, Malaysia, July 25 - 29, 2005

11. H. Takabe: Laboratory Astrophysics

with Intense Lasers

Magnetic Reconnection 2005, Minami-Awaji Royal Hotel, Awaji, Japan, March 8 - 10,

[図書] (計3件)

高部英明著、「レーザー核融合から新しい宇宙物理学の誕生へ」、立花隆編「宇宙の核融合・地上の核融合」(クバプロ社刊、2008) pp. 153-172. 2008年3月20日刊行

高部英明著「光で生み出す実験室宇宙物理 - レーザー宇宙物理 -」、2007年科学セミナーテキスト、(社団法人日本物理学会、2007年8月)

高部英明(共著)プラズマ核融合学会編、「プラズマエネルギーのすべて」(日本実業出版) 2007年3月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高部 英明(TAKABE HIDEAKI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 20150352

### (2) 研究分担者

坂和 洋一(SAKAWA YOUICHI)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授  
研究者番号: 70242881  
加藤 恒彦(KATOU TSUNEHICO)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
研究者番号: 90413955  
蔵満 康浩(KURAMITSU YASUHIRO)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員  
研究者番号: 70456929

### (3) 連携研究者

児玉 了祐(KODAMA RYOUSUKE)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 80211902  
中井 光男(NAKAI MITSUO)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授  
研究者番号: 70201663  
重森 啓介(SHIGEMORI KEISUKE)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授  
研究者番号: 50335395  
佐野 孝好(SANO TAKAYOSHI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号：80362606

金道 浩一(KINDO KOICHI)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：20205058

星野 真弘(HOSHINO MASAHIRO)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号：90241257

高原 文郎(TAKAHARA FUMIO)

大阪大学・理学系研究科・助教

研究者番号：20154891