

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 8 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287147

研究課題名(和文) 界面不安定性による磁化プラズマの乱流混合過程の解明とその実験的検証

研究課題名(英文) Turbulent mixing by the interfacial instabilities in magnetized plasmas

研究代表者

佐野 孝好 (Sano, Takayoshi)

大阪大学・レーザー科学研究所・助教

研究者番号：80362606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は磁化プラズマ中での界面不安定を数値計算及びレーザー宇宙物理実験を用いて解析した。理論的には、磁気流体シミュレーションと界面シートモデルを用いて、リヒトマイヤー・メシニコフ不安定における磁場の役割として、磁場増幅と不安定抑制の効果があることを明らかにした。理論モデルを検証するため、大阪大学の激光レーザーを用いたレーザープラズマ実験を実施した。平成29年度の実験では、可視光のシャドウグラフ計測で、界面擾乱が不安定成長する様子を捉えることに成功した。さらに、B-dotプローブを用いた磁場計測にも成功し、界面不安定によって駆動された乱流中で増幅された磁場の信号を捕らえることができた。

研究成果の概要(英文)：We have investigated interfacial instabilities, such as Richtmyer-Meshkov instability, in magnetized plasmas by numerical simulations and laboratory laser experiments. Theoretically, it is found that the magnetic field can reduce the growth of the Richtmyer-Meshkov instability significantly. When the seed field is relatively weak, it can be amplified by the fluid motions. The critical field strength is given by the Alfvén number defined by the ratio of the growth velocity and Alfvén speed at the interface. To confirm these effects, we performed laser plasma experiments by using the GEKKO laser system in Osaka University. The growth of the interface fluctuations has been observed successfully by optical radiography method. In addition, the B-dot probe have measured the signals of amplified magnetic field through the turbulent motions driven by the interfacial instabilities.

研究分野：天体プラズマ物理学

キーワード：レーザー宇宙物理学 磁気流体不安定 レーザー実験

## 1. 研究開始当初の背景

リヒトマイヤー・メシュコフ不安定(RMI)は、非一様な密度分布をしている媒質中を、衝撃波が伝播する際に発生する流体力学的不安定性である。衝撃波通過後に、界面の揺らぎが増幅し、マッシュルーム型に成長する。この不安定成長は、接触不連続面に瞬間的に発生する渦度に起因していることが特徴となっている。

1960年代の発見以降、RMIは理論的にも実験的にも研究され続けている。しかしながら、磁化プラズマ中のRMIに関しては、まだほとんど調べられていない。そのため、極めて基本的な系においてさえも、未着手の課題が多数残されている。そこで本研究は、「三次元磁気流体シミュレーション」と「レーザープラズマ実験」を研究手段として、RMIの非線形成長過程における磁場の効果を多角的に明らかにする。

この研究課題に焦点を当てる背景には、様々な分野においてRMIなどの界面不安定性と磁場との相互作用が、近年急速に注目を集めているという事実がある。

その一つが、宇宙プラズマである。磁場は様々な天体現象の進化や構造に大きな影響を与えている。星の進化の最終段階で起こる超新星爆発では、星間空間に衝撃波を放出する。この超新星衝撃波の近傍で、局所的に非常に強い磁場が存在することが、X線衛星の観測によって明らかにされた。その強度は、平均的な星間磁場と比べて数100倍にも及んでいる。

また、RMIによる乱流混合は、核融合プラズマにおいても注目されている。慣性核融合では、レーザーを用いて球殻状の多層ターゲットを爆縮させ、高温高密度状態を作り出す。ターゲットの層界面を衝撃波が通過する際に、もしRMI駆動の乱流が発生してしまうと、圧縮率が下がるという大問題が生じる。実際、アメリカ国立点火施設(NIF)では、この乱流混合の制御を最重要課題とした、キャンペーン実験が組み立てられている程である。

更に、大阪大学を中心に展開している高速点火方式では、追加熱用の高速電子の発散角度を抑えることを目的に、爆縮ターゲットに外部磁場の導入が検討されている。そのため、磁気流体的な乱流混合のモデル作りが急務となっている。

これらの世界的な情勢を考慮し、本研究では、界面不安定による「乱流混合」と「磁場」の相互作用について、理論的・実験的研究の両面から迫っていく。

## 2. 研究の目的

「磁場」と「乱流混合」が様々なプラズマ現象でホットなキーワードとなっている。本研究は、界面不安定の一つであるリヒトマイヤー・メシュコフ不安定に着目する。まず、宇宙プラズマに見られる界面不安定駆動の「磁気乱流」の特性を理解し、観測される星間磁

場との比較を通して「乱流と磁場」の相互作用を明らかにする。そして、「磁化プラズマ中の乱流混合」を、制御できるまでに理解を深めることで、慣性核融合プラズマへの応用も視野に入れて研究を進める。本研究の最大の特色は、理論シミュレーションに加えて、レーザープラズマを用いた実験的検証も平行して行う点である。これらによって、観測や実験に裏付けられたロバストな理論モデルが構築できると確信している。

## 3. 研究の方法

プラズマ中におけるリヒトマイヤー・メシュコフ不安定の特性を理解するために、三次元磁気流体シミュレーションや解析的モデルなどを駆使して理論的研究を行う。まず、最も単純なシングルモード解析からスタートする。衝撃波速度や初期磁場形状などに対する依存性を、系統的かつ定量的に調べ、観測を再現できるモデルを構築する。そして更に、レーザー実験や慣性核融合ターゲットを模擬した、複雑な構造を持つ大局的シミュレーションへと展開していく。一方、大型レーザーを用いた実験的研究では、不安定成長に起因する乱流混合の様子や磁場の時間変化の計測に重点を置く。実験デザインの最適化と同時に、未だ確立されていない磁場の直接計測法の開発も最重要課題として取り組む。

## 4. 研究成果

本研究の最大の成果としては、リヒトマイヤー・メシュコフ不安定(RMI)を解析するための実験デザイン(レーザーを照射するターゲットの形状や計測器の配置など)が概ね決定できたことである。本研究で計測されたデータからは、初期に10ミクロン程度の振幅であった擾乱が、レーザー衝撃波の通過後に数100ミクロンを越える大きさまで増幅されていることが見て取れる。さらに、成長した擾乱の波長は、初期にターゲットに与えていた凹凸の波長と一致しており、観測された大振幅の擾乱がRMI起因であることを強く示唆している。

さらに計測技術の成熟によって、外部磁場中でのリヒトマイヤー・メシュコフ不安定の成長過程及び磁場の計測にも成功した。固体-ガス界面に初期に与えられた擾乱が、レーザー駆動衝撃波の通過によって不安定成長し、10倍以上の擾乱振幅の増大を観測した。その形状は指型に延びており、固体-ガス界面のように密度比の大きな界面における不安定性の特徴と一致している。また、0.1テスラ程度の永久磁石によって印可した外部磁場の有無によって、プラズマの持つ磁場強度に大きな違いがあることも明らかに出来た。

理論・シミュレーションに関しては、状態方程式依存性や界面以外の領域の渦度(バルク渦度)に着目した研究を進め、原著論文の出版や国際会議での口頭発表などを精力的

に行った。これらの効果は、レーザー核融合実験や超新星爆発などの天体プラズマ現象において無視できないことが予想されているにもかかわらず、現在までまだ十分な理論解析が行われていない。そこで、これらの効果について今後もさらに解析を進めていく予定である。

#### 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 15 件)

① Takayoshi Sano, Yuki Tanaka, Natsumi Iwata, Masayasu Hata, Kunioki Mima, Masakatsu Murakami, and Yasuhiko Sentoku, “Broadening of cyclotron resonance conditions in the relativistic interaction of an intense laser with overdense plasmas”. *Physical Review E*, vol. 96, 043209, 8 pp. (Oct 2017).

② M. Koenig, Th. Michel, R. Yurchak, C. Michaut, B. Albertazzi, S. Laffite, E. Falize, L. Van Box Som, Y. Sakawa, T. Sano, Y. Hara, T. Morita, Y. Kuramitsu, P. Barroso, A. Pelka, G. Gregori, R. Kodama, N. Ozaki, D. Lamb, and P. Tzeferacos, “Interaction of a highly radiative shock with a solid obstacle”. *Physics of Plasmas*, vol. 24, 082707, 6 pp. (Aug 2017).

③ N. Khasanah, C. W. Peng, C. H. Chen, T. Y. Huang, N. Bolouki, T. Moritaka, Y. Hara, H. Shimogawara, T. Sano, Y. Sakawa, Y. Sato, K. Tomita, K. Uchino, S. Matsukiyo, Y. Shoji, S. Tomita, S. Tomiya, R. Yamazaki, M. Koenig, and Y. Kuramitsu, “Spatial and temporal plasma evolutions of magnetic reconnection in laser produced plasmas”. *High Energy Density Physics*, vol. 23, pp. 15-19 (Jun 2017).

④ K. Matsuo, H. Nagatomo, Z. Zhang, P. Nicolai, T. Sano, S. Sakata, S. Kojima, S. H. Lee, K. F. F. Law, Y. Arikawa, Y. Sakawa, T. Morita, Y. Kuramitsu, S. Fujioka, and H. Azechi. “Magnetohydrodynamics of laser-produced high-energy-density plasma in a strong external magnetic field”. *Physical Review E*. vol. 95, 053204, 6 pp. (May 2017).

⑤ Chihiro Matsuoka, Katsunobu Nishihara, and Takayoshi Sano. “Nonlinear dynamics of non-uniform current-vortex sheets in magnetohydrodynamic flows”. *Journal of Nonlinear Science*. vol. 27, pp. 531-572 (Apr 2017).

⑥ Y. Kuramitsu, A. Mizuta, Y. Sakawa, H. Tanji, T. Ide, T. Sano, M. Koenig, A. Ravasio, A. Pelka, H. Takabe, C. D. Gregory, N. Woolsey, T. Moritaka, S. Matsukiyo, Y. Matsumoto, and N. Ohnishi. “Time evolution of Kelvin-Helmholtz vortices associated with collisionless shocks in laser-produced plasmas”. *Astrophysical Journal*, vol. 828, 93, 10 pp. (Sep 2016).

⑦ Youhei Masada and Takayoshi Sano. “Spontaneous formation of surface magnetic structure from large-scale dynamo in strongly stratified convection”. *Astrophysical Journal Letters*. vol. 822, L22, pp. (May 2016).

⑧ Y. Kuramitsu, N. Ohnishi, Y. Sakawa, T. Morita, H. Tanji, T. Ide, K. Nishio, C. D. Gregory, J. N. Waugh, N. Booth, R. Heathcote, C. Murphy, G. Gregori, J. Smallcombe, C. Barton, A. Diziere, M. Koenig, N. Woolsey, Y. Matsumoto, A. Mizuta, T. Sugiyama, S. Matsukiyo, T. Moritaka, T. Sano, and H. Takabe. “Model experiment of magnetic field amplification in laser-produced plasmas via the Richtmyer-Meshkov instability”. *Physics of Plasmas*. vol. 23, 032126, 6 pp. (Mar 2016).

⑨ X. X. Pei, J. Y. Zhong, Y. Sakawa, Z. Zhang, K. Zhang, H. G. Wei, Y. T. Li, Y. F. Li, B. J. Zhu, T. Sano, Y. Hara, S. Kondo, S. Fujioka, G. Y. Liang, F. L. Wang, and G. Zhao. “Magnetic reconnection driven by Gekko XII lasers with a Helmholtz capacitor-coil target”. *Physics of Plasmas*. vol. 23, 032125, 5 pp. (Mar 2016).

⑩ Hideo Nagatomo, Tomoyuki Johzaki, Takashi Asahina, Atsushi Sunahara, Takayoshi Sano, Hitoshi Sakagami, Kunioki Mima, Shinsuke Fujioka, Hiroyuki Shiraga, and Hiroshi Azechi. “Computational study of magnetic field compression by laser driven implosion”. *Nuclear Fusion*. vol. 55, 093028, 5 pp. (Sep 2015).

⑪ Takashi Minoshima, Shigenobu Hirose, and Takayoshi Sano. “Dependence of the saturation level of magnetorotational instability on gas pressure and magnetic Prandtl number”. *Astrophysical Journal*. vol. 808, 54, 17 pp. (Jul 2015).

⑫ J. Gustavo Wouchuk and Takayoshi Sano. “Normal velocity freeze-out of the Richtmyer-Meshkov instability when a rarefaction is reflected”. *Physical*

Review E. vol. 91, 023005, 12 pp. (Feb 2015).

⑬ Youhei Masada and Takayoshi Sano. “Long-term evolution of Large-scale magnetic fields in rotating stratified convection”. Publications of the Astronomical Society of Japan. vol. 66, S2, 7 pp. (Dec 2014).

⑭ Yohei Masada and Takayoshi Sano. “Mean-field modeling of  $\alpha^2$  dynamo coupled with direct numerical simulations of rigidly rotating convection”. Astrophysical Journal Letters. vol. 794, L6, 5 pp. (Oct 2014).

⑮ Chihiro Matsuoka, Katsunobu Nishihara, and Takayoshi Sano. “Nonlinear motion of non-uniform current-vortex sheets in magnetohydrodynamic flows”. Fluid Dynamics Research. vol. 46, 031416, 11 pp. (Jun 2014).

[学会発表] (計 21 件)

① Takayoshi Sano. “Interfacial magnetohydrodynamic instabilities in laser plasmas”. Turbulent Mixing and Beyond, 6th International Conference 10th Anniversary Program “Non-Equilibrium Transport across the Scales”. Trieste, Italy (Aug 14-18, 2017).

② Takayoshi Sano, Katsunobu Nishihara, Chihiro Matsuoka, Tsuyoshi Inoue, and J. Gustavo Wouchuk. “Richtmyer-Meshkov instability in plasmas - Magnetohydrodynamic evolutions and the dependence on equation of state”. Turbulent Mixing and Beyond Workshop “Mixing in Rapidly Changing Environments - Probing Matter at the Extremes”. Trieste, Italy (Aug 4-9, 2014).

③ 佐野孝好. 「レーザープラズマにおける界面流体不安定とその応用」. Plasma Conference 2017. 姫路 (2017年11月21日-24日).

④ 佐野孝好. 「磁気回転不安定と最新の実験室天体プラズマ」. 「磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象」研究会. 東京 (2017年8月28日-30日).

⑤ 佐野孝好. 「強磁場中におけるレーザープラズマ実験とその応用」. 日本天文学会 2016 年春季年会. 八王子 (2016年3月14日-17日).

⑥ 佐野孝好. 「強磁場下での流体不安定」. Plasma Conference 2014 シンポジウムキロテスラ級磁場で拓く新しいプラズマ科学-核融合

エネルギーから宇宙まで-. 新潟 (2014年11月18日-21日).

⑦ Takayoshi Sano. “Broadening of cyclotron resonance conditions in the relativistic interaction of an intense laser with overdense plasmas”. JIFT Japan-US workshop on Theory and simulation on the high field and high energy density physics. Hiroshima, Japan (Mar 27-28, 2018).

⑧ Takayoshi Sano, Yuki Tanaka, Tomohito Yamaguchi, Masakatsu Murakami, Natsumi Iwata, Masayasu Hata, and Kunioki Mima. “High power laser-plasma interaction under a strong magnetic field”. 58th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics. San Jose, USA (Oct 31-Nov 4, 2016).

⑨ Takayoshi Sano, Yuki Tanaka, Tomohito Yamaguchi, Masakatsu Murakami, Natsumi Iwata, Masayasu Hata, and Kunioki Mima. “High power laser-plasma interaction under a strong magnetic field”. 6th East-Asia Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas, Tsukuba, Japan (Jul 11-16, 2016).

⑩ Takayoshi Sano, Katsunobu Nishihara, and J. Gustavo Wouchuk. “Impact of bulk vorticity generated by rippled shock waves on the evolution of Richtmyer-Meshkov instability”. 9th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. Bellevue, USA (Sep 20-25, 2015).

⑪ Takayoshi Sano, Katsunobu Nishihara, and J. Gustavo Wouchuk. “Impact of bulk vorticity generated by a rippled shock wave on the evolution of Richtmyer-Meshkov instability”. 14th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing. San Francisco, USA (Aug 31-Sep 5, 2014).

⑫ 佐野孝好, 西原功修, 松岡千博, J. Gustavo Wouchuk. 「磁化プラズマ中でのリヒトマイヤー・メッシュコフ不安定の非線形成長と磁場増幅」. 日本物理学会第73回年次大会. 野田 (2018年3月22日-25日).

⑬ 佐野孝好. 「レーザー衝撃波を用いた磁化プラズマ中でのリヒトマイヤー・メッシュコフ不安定実験」. 平成29年度衝撃波シンポジウム. 仙台 (2018年3月7日-9日).

⑭ 佐野孝好, 玉谷昇平, 村上匡且, 松尾一輝, 下河原浩志, Rajesh Kumar, 坂和洋一. 「レーザー駆動衝撃波を用いた磁場中における界面不安定に関する実験的研究」. 日本物理学会第72回年次大会. 豊中 (2017年3月17日-20日).

⑮ 佐野孝好, 田中勇氣, 山口智士, 村上匡且, 岩田夏弥, 畑昌育, 千徳靖彦, 三間國興. 「キロテスラ級の強磁場中における高強度レーザーの伝播特性について」. レーザー学会学術講演会第38回年次大会. 徳島 (2017年1月7日-9日) 佐野孝好, 田中勇氣, 山口智士, 村上匡且, 三間國興. 「高密度磁化プラズマ中の大振幅ホイッスラー波の伝播特性について」. 日本物理学会2016年秋季年会. 金沢 (2016年9月13日-16日).

⑯ 佐野孝好, 田中勇氣, 山口智士, 村上匡且, 三間國興. 「強磁場中でのレーザー・プラズマ相互作用による相対論的電子のサイクロトロン共鳴」. 日本物理学会第71回年次大会. 仙台 (2016年3月19日-22日).

⑰ 佐野孝好, 西原功修, J. Gustavo Wouchuk. 「リップル衝撃波が生成するバルク渦度によるリヒトマイヤー・メッシュコフ不安定の抑制」. 日本物理学会2015年秋季年会. 吹田 (2015年9月16日-19日).

⑱ 佐野孝好, 村上匡且, 岩田夏弥, 森高外征雄, 三間國興. 「レーザー駆動イオン加速における外部強磁場の効果」. 日本物理学会2015年秋季年会. 吹田 (2015年9月16日-19日).

⑲ 佐野孝好, 坂和洋一, 蔵満康浩, 森田太智, 藤岡慎介, Zhe Zhang, 原由希子, 近藤さらな, 松尾一樹, 坂田匠平, 小島完興, 重森啓介, 弘中陽一郎, 尾崎典雅. 「レーザー実験による磁化プラズマ中におけるRichtmyer-Meshkov不安定」. 日本天文学会2015年春季年会. 豊中 (2015年3月18日-21日).

⑳ 佐野孝好, 政田洋平. 「対流を模擬した鉛直シア一流による磁気回転不安定の抑制」. 日本天文学会2015年春季年会. 豊中 (2015年3月18日-21日).

㉑ 佐野孝好. 「プラズマ中におけるリヒトマイヤー・メッシュコフ不安定の磁気流体的進化」. 日本地球惑星科学連合2014年大会. 横浜 (2014年4月28日-5月2日).

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐野孝好 (SANO, Takayoshi)

大阪大学・レーザー科学研究所・助教

研究者番号: 80362606

### (2) 研究分担者

西原功修 (NISHIHARA, Katsunobu)

大阪大学・レーザー科学研究所・名誉教授

研究者番号: 40107131

坂和洋一 (SAKAWA, Youichi)

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号: 70242881

森田太智 (MORITA, Taichi)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号: 30726401