

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月 1日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2012

課題番号：20560054

研究課題名（和文）凝縮媒質中の衝撃波現象に関する数理工学的手法による総合研究

研究課題名（英文）Mathematical and Engineering Study of Shock Wave Phenomena in Condensed Matter

研究代表者

杉山 勝（SUGIYAMA MASARU）

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：20110257

研究成果の概要（和文）：凝縮媒質（液体や固体）の中を伝播する衝撃波に関する数理工学的方法を当初の予定通り遂行した。具体的には、以下の研究項目を、理論的及び数値的方法を有機的に統合することにより詳細に解析し、興味ある結果を得た。（1）凝縮媒質中の衝撃波現象における不連続量の間関係、すなわちランキン-ユゴニオの関係と衝撃波面構造の定量的解析、およびその力学的・熱的特性の解明。（2）衝撃波によって誘起される相転移現象の熱・統計力学的解析。（3）非線型波動（衝撃波と加速度波）の間の相互作用とそれらの安定性に関する解析。

研究成果の概要（英文）：Mathematical and engineering study of shock waves in condensed matter (liquid and solid) was successfully carried out. In particular, the following subjects were analyzed and clarified in detail by means of theoretical and numerical methods: (1) Studies of the Rankine-Hugoniot relations (i.e., relations among the discontinuous quantities) for shock waves in condensed matter and of the shock structure. And the study of their thermal and mechanical properties. (2) Thermodynamic study of phase transitions induced by shock waves. (3) Studies of the interaction between shock waves and acceleration waves, and of their stability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：分科（応用物理学・工学基礎）・細目（工学基礎）

キーワード：数理工学・衝撃波現象・凝縮媒質・非平衡熱統計力学・非線型波動

1. 研究開始当初の背景

凝縮媒質中を伝播する衝撃波に関する理論的な研究は、その基礎的あるいは応用的な

重要性にもかかわらず、気体中の衝撃波に比べ進展が遅れていた。しかし、近年、高圧科学における計測技術の発展と産業・医療応用

などの可能性の著しい増大により、凝縮媒質中の衝撃波に関する研究が、実験的にも理論的にも急速に進んできた。たとえば、この分野の総合報告シリーズ (J. R. Asay 他編集: High-Pressure Shock Compression of Solids Vol. I-VII, Springer, 1992-2003) も出版されるようになった。

本課題の研究代表者は、この分野の研究、特に、固体中の衝撃波に関する理論的研究を十数年間にわたり遂行してきた。その特色は、原子・分子レベルの微視的視点から連続体レベルの巨視的視点までを統一的に取り入れているところにある。これまでの成果および経験を踏まえ、上の「研究成果の概要」で述べた研究項目を具体的に・定量的に解析できるところまで研究のポテンシャルを上げてきていた。また、これらの研究項目を、マルチ・スケールの視点から総合・学際的に解析することは、研究代表者の知る限り、ほとんどなかったという状況であった。

2. 研究の目的

上記の3つの研究項目:(1)凝縮媒質中の衝撃波現象におけるランキン-ユゴニオの関係と衝撃波面構造の定量的解析、およびその力学的・熱的特性の解明、(2)衝撃波によって誘起される相転移現象の熱・統計力学的解析、(3)非線型波動(衝撃波と加速度波)の間の相互作用とそれらの安定性に関する解析、に関する理論および数値解析的な総合研究、すなわち数理工学的な研究を格段に進展させること。これにより、衝撃波現象の興味ある新しい知見を得、この知見を基礎とした新しい実験あるいは産業・医療等への応用可能性を提案することが目的である。

3. 研究の方法

以下の解析方法を有機的に統合した数理工学的手法を採る:

(1) 数学および物理学に基づく理論的解析。

(2) マルチ・スケール手法による数値解析(分子動力学法によるシミュレーションや有限要素法などを滑らかに組み合わせる)。特に、本研究に特化した計算機システムを構築することにより研究の効率化を図る。

4. 研究成果

(1) ランキン-ユゴニオの関係と衝撃波面構造の定量的解析、およびその力学的・熱的特性を解明することに関して、以下の①-③までの成果を得た。

① 剛体球系での衝撃波現象の解析

剛体球系におけるランキン-ユゴニオの関係を明らかにし、その物理的意味を詳細に検討した。この研究は、剛体球系それ自身の研究としての重要性のみならず、実在気体中の衝撃波を研究する際に、基準系として必要な情報源となる。

衝撃波面構造の研究に関しては、波面の熱・力学的性質を記述できるような非平衡熱力学理論を構築することから本研究を開始した。その結果、いわゆる「拡張された熱力学」に基づく理論、特に濃密気体に対する理論を構築することに成功した。この理論は、非平衡熱力学理論の研究分野で長年懸案であった課題を解決するものでもあり、多くの研究者の注意を引いた。

この新しい非平衡熱力学理論を用いて、剛体球系における衝撃波構造の熱・力学的解析をすることができるようになった。これに関する研究は、まだ緒についたばかりではあるが、今後、著しく発展することは間違いないと考える。

また、気体分子の内部自由度が衝撃波現象に及ぼす影響を考察した。すなわち、分子の回転と振動のモードからの影響である。特に、媒質の比熱が温度に依存する場合としない場合についてその違いを明確にした。

さらに、これら全ての場合について、衝撃波の安定性に関する、数理的判定条件を詳細に検討した。

② 実在気体系での衝撃波現象の解析

剛体球系で得られた結果を基準として、液体物理学で用いられている摂動理論を援用し、実在気体中の衝撃波現象を定量的・系統的に解析した。

実在気体系においては分子間相互作用を考慮する必要がある。このような気体中の衝撃波現象の、相互作用ポテンシャルへの依存性を明確にした。

また、この場合においても、衝撃波の安定性に関する条件を検討した。そして、衝撃波が不安定化した場合での、数値計算と理論との比較を行った。

さらに、マッハ数が増加するにつれて密度が減少するといった新奇な衝撃波を発見した。このような衝撃波(compressive upper

shock) は理想気体では見られなかった新しい実在気体効果である。

図1の赤線 α が、密度と圧力による相平面での compressive upper shock のランキン-ユゴニオ曲線である。Ccoe と示された曲線が気体-液体共存曲線を表す。マッハ数が十分大きい場合、マッハ数が大きくなるにつれて密度が減少することが読み取れる。

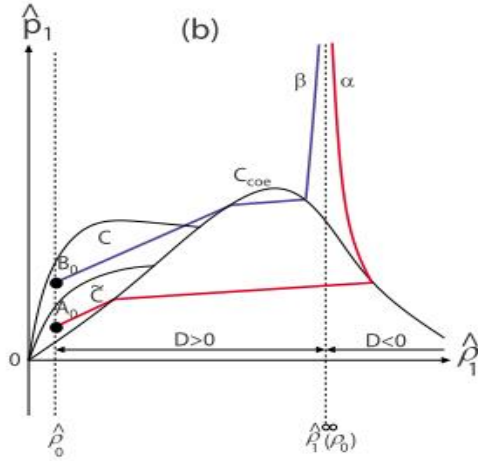


図1 新奇な衝撃波

③ 結晶性固体における衝撃波現象の解析

結晶性固体中の衝撃波現象の研究については、研究代表者のこれまでの研究、すなわち、熱振動を考慮に入れた結晶性固体に対する衝撃波現象の解析をさらに発展させることが課題である。

固体の融点近傍での、衝撃波の挙動の温度依存性や、衝撃波内部での原子の熱振動に関し、興味ある知見を得た。

さらに、融点に近い結晶性固体における衝撃波の伝播挙動、そして境界面での反射時における固体の破壊等について数値計算を行い、新しい結果を得た。

(2) 衝撃波によって誘起される相転移現象の熱・統計力学的解析に関する研究。

この研究は、言葉を変えていえば、衝撃波面の前後で相が異なる場合の研究である。したがって、そのような場合のランキン-ユゴニオ関係式を理論的・数値解析的に明らかにすることが重要である。そして、この場合の衝撃波の安定性に関しては、Liu 条件と呼ばれる安定判別法に注目した。研究結果は以下の①-③のようにまとめることができる。ここでも、剛体球系の場合と実在気体系の場合、そして固体相も含む場合に分けてまとめることとする。

① 剛体球系の場合

剛体球系は、密度を増加させた場合、流体相から固体相へ転移（アルダー転移）する。この転移を、衝撃波を用いて誘起した場合、どのような特性を持つかということを確認にした。特に、可能な全ての転移について分類をすることができた。そして、それぞれの場合の衝撃波の安定性について、Liuの判定条件を明確にすることにより、詳細に検討をした。

この研究においても、まず、剛体球内部には自由度がない場合を考察した。その後、内部自由度がある場合を考察し、衝撃波現象が内部自由度にどのように依存するのかが明確にすることができた。

② 実在気体系の場合

実在気体系として、剛体球的な分子間相互作用に、引力を摂動として取り入れた場合を考察した。これにより、分子間相互作用の引力による部分が、衝撃波により誘起された相転移にどのような影響を及ぼすのかが明らかになった。

もうひとつの実在気体モデルとして、ファン・デル・ワールス流体系を採用した。この系を用いることにより、可能な衝撃波誘起相転移の全ての可能な型を分類することに成功した。特に、いわゆる、ネガティブショック (negative shock) と呼ばれる衝撃波、すなわち衝撃波通過後、密度が増加せず逆に減少する衝撃波の発生可能条件を明確にすることができた。その分類結果の概念図を図2に示す。この図も密度と圧力による相平面を示しており、COE 曲線は気体-液体共存曲線である。negative shock と指示された領域に非摂動状態をとれば negative shock が発生する。

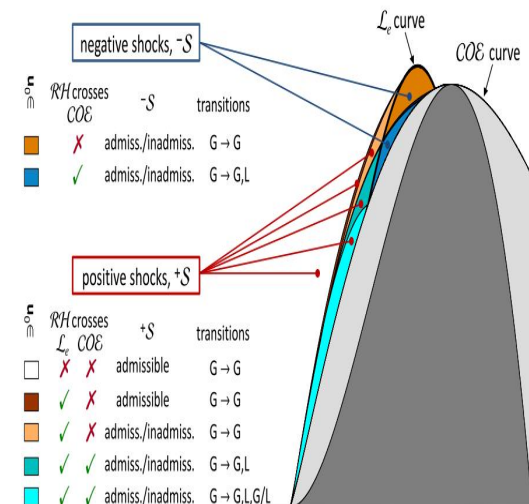


図2 ネガティブ衝撃波

③ 固体相も含む系の場合

剛体球系を非摂動系として引力を摂動近似により導入した系を用いて、気体、液体、固体の3相を統一적으로取り扱うことができる。このモデルに基づいて、衝撃波により誘起された相転移のいくつかの特徴を明確にすることができた。

図3に、典型的な場合のランキン-ユゴニオ曲線を示す。横軸が温度、縦軸が圧力を示している。色付の曲線がランキン-ユゴニオ曲線であり、黒色の曲線が相境界線である。ランキン-ユゴニオ曲線が3つの相に関係しながら変化していることがわかる。

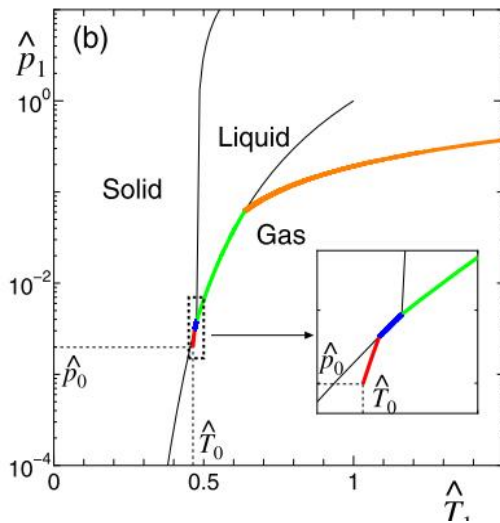


図3 気体-液体 - 固体相が関わる衝撃波

(3) 非線型波動（衝撃波と加速度波）の間の相互作用に関する研究。

理想気体中の非線型波動（衝撃波と加速度波）の相互作用については明確な結果が得られている。一方、実在気体中の相互作用の一般的な解析については、理論および数値解析ともに、未だ満足できる段階にいたっていない。今後の発展を期待せねばならない。本研究においては、ファン・デル・ワールス流体系における非線型波動の相互作用について解析を実行した。

単一の衝撃波の安定性については、上述のように、それぞれの研究課題の中で十分に明確にすることができた。

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20件)

- ① S. Taniguchi and M. Sugiyama: Shock-induced phase transitions in systems of hard spheres with attractive interactions, *Acta Applicandae Mathematicae*, Vol. 122 (2012) 473-483. DOI: 10.1007/s10440-012-9757-4. 査読有
- ② T. Arima, S. Taniguchi, T. Ruggeri and M. Sugiyama: Extended thermodynamics of dense gases, *Continuum Mech. Thermodyn.*, Vol. 24 (2012) 271-292. DOI: 10.1007/s00161-011-0213-x. 審査有
- ③ A. Ikoma, T. Arima, S. Taniguchi, N. Zhao, M. Sugiyama: Fluctuating hydrodynamics for a rarefied gas based on extended thermodynamics, *Phys. Lett. A*, Vol. 375 (2011) 2601-2605. DOI: 10.1016/j.physleta.2011.05.057. 審査有
- ④ S. Taniguchi and M. Sugiyama: Shock-induced phase transitions from gas phase to solid phase, *J. Phys. Soc. Japan*, Vol. 80 (2011) 083401 (4 pages). DOI: 10.1143/JPSJ.80.083401. 査読有
- ⑤ N. Zhao, A. Mentrelli, T. Ruggeri and M. Sugiyama: Admissible shock waves and shock-induced phase transitions in a van der Waals fluid, *Phys. Fluids*, Vol. 23 (2011) 086101 (18 pages). DOI: 10.1063/1.3622772. 査読有
- ⑥ S. Taniguchi, A. Mentrelli, N. Zhao, T. Ruggeri and M. Sugiyama: Shock-induced phase transition in systems of hard spheres with internal degrees of freedom, *Phys. Rev. E.*, Vol. 81 (2010) 066307 (13 pages). DOI: 10.1103/PhysRevE.81.066307. 審査有
- ⑦ Y. Zheng, N. Zhao, T. Ruggeri, M. Sugiyama and S. Taniguchi: Non-polytropic effect on shock-induced phase transitions in a hard-sphere system, *Phys. Lett. A.*, Vol. 374 (2010) 3315-3318. DOI: 10.1016/j.physleta.2010.06.016. 審査有
- ⑧ S. Taniguchi, A. Mentrelli, T. Ruggeri, M. Sugiyama and N. Zhao: Prediction and simulation of compressive shocks with lower perturbed density for increasing shock strength in real gases, *Phys. Rev. E.*, Vol. 82 (2010) 036324 (5 pages). DOI: 10.1103/PhysRevE.82.036324. 審査有
- ⑨ C. Curro, G. Valenti, M. Sugiyama and S. Taniguchi: Propagation of an

acceleration wave in layers of isotropic solids at finite temperatures, Wave Motion, Vol.46 (2009) 18-121. DOI: 10.1016/j.wavemoti.2008.09.003. 審査有

〔学会発表〕(計30件)

- ① 有馬隆司(杉山勝): 拡張された熱力学に基づく多原子分子希薄気体中を伝播する縦波と横波の解析、日本物理学会第68回年次大会、広島大学、東広島キャンパス、2013年3月27日。
- ② 杉山勝: Extended thermodynamics of dense gases. Part I: Macroscopic approach, 日本航空宇宙学会関西支部分科会(第16回)、京都大学桂キャンパス、2013年3月4日。
- ③ M. Sugiyama: Extended thermodynamics of dense gases: Theory and its applications, The 6th China-Italy Colloquium on Applied Mathematics, Hudan University (Shanghai, China), 2012年10月24日 (招待講演)
- ④ M. Sugiyama: Extended thermodynamics of dense gases, Trends in Thermodynamics and Materials Theory 2011, TU Berlin (Berlin, Germany). 2011年12月15日
- ⑤ 谷口茂(杉山勝): 気相から固相への衝撃波誘起相転移、日本物理学会、富山大学、2011年9月24日
- ⑥ M. Sugiyama: Extended thermodynamics of dense gases, ISTITUTO NAZIONALE di ALTA MATEMATICA Non Linear Hyperbolic Systems of Balance Laws in Extended Thermodynamics and Kinetic Theory, Cortona (Italy). 2011年9月6日 (招待講演)
- ⑦ M. Sugiyama: Fluctuating hydrodynamics based on extended thermodynamics, XVI Conference on Waves and Stability in Continuous Media WASCOM 2011, Brindisi (Italy). 2011年6月17日 (招待講演)
- ⑧ 谷口茂(杉山勝): 実在気体における新しい種類の衝撃波: Compressive upper shock, 日本物理学会、大阪府立大学、2010年9月25日
- ⑨ S. Taniguchi (M. Sugiyama): Shock-induced phase transitions and stability of a shock wave in real gases, ISWI Conference 2010: The Shock and High Strain Rate Properties of Matter, University of Cambridge (UK). 2010年9月8日
- ⑩ 谷口茂(杉山勝): 剛体球系を基準とした

摂動論モデルによる衝撃波誘起相転移、日本物理学会、岡山大学、2010年3月23日

- ⑪ 谷口茂(杉山勝): 内部自由度を持つ剛体球系中を伝播する衝撃波、平成21年度衝撃波シンポジウム、埼玉大学、2010年3月17日
- ⑫ 谷口茂(杉山勝): 内部自由度がある剛体球系中を伝播する衝撃波の安定性、日本物理学会、熊本大学、2009年9月28日
- ⑬ M. Sugiyama: Shock waves in real gases, XV Conference on Waves and Stability in Continuous Media WASCOM 2009, Palermo (Italy). 2009年6月29日 (招待講演)
- ⑭ 杉山勝: 衝撃波に誘起される相転移について、統計物理学研究会、グリーンホテル会議室(愛知県額田郡幸田町)、2008年11月21日

〔その他〕

ホームページ等

<http://researcher.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 勝 (SUGIYAMA MASARU)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号: 20110257

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし