

平成18年度「浮遊液滴非線形ダイナミクスWG」活動報告書

筑波大学大学院システム情報工学研究科・阿部豊

1. 構成メンバ

氏 名	所属
阿部豊	筑波大学
松本聡	宇宙航空研究開発機構
西成活裕	東京大学
渡辺正	日本原子力研究開発機構

2. 本年度 WG 会合開催実績

- (1) 第1回：平成17年 3月22日
- (2) 第2回：平成17年 6月28日
- (3) 第3回：平成17年 9月12日
- (4) 第4回：平成17年12月 6日
- (5) 第5回：平成18年 3月20日

3. 活動目的

本研究においては、微小重力環境を利用した新材料創生において鍵となる大型浮遊液滴の界面や内部での非線形でダイナミックな挙動を明らかにするために、静電浮遊を用いた浮遊実験（宇宙航空研究開発機構・松本聡）ならびに超音波浮遊技術を用いた液滴浮遊実験（筑波大学・阿部豊）を行うとともに、液滴界面の非線形を含む大変形挙動に関する理論解析（東京大学・西成活裕）ならびに浮遊液滴の界面大変形挙動と内部流動挙動に関する3次元非定常数値解析（日本原子力研究開発機構・渡辺正）とを、互いに強く連携しつつ実施する。これによって、大型浮遊液滴の界面変形や内部流動の非線形でダイナミックな現象を実験的に明らかとするとともに、その現象を記述するための非線形理論ならびに非線形で非定常な変動界面を多次元数値予測評価するための多次非定常数値解析手法を、あわせて構築することとしている。

4. 活動内容

本WGにおいては、異なる二つの浮遊方法による浮遊実験を同時に行うことで、その長所と特徴を生かしたそれぞれの結果を相乗するとともに、各装置が固有する微小重力での浮遊との違いの特徴を互いに補うこととしている。

・ 静電浮遊実験

静電浮遊炉を用いた実験においては、従来可能であった流体だけでなく、可視化透明な液滴を浮遊させることのできる静電浮遊装置を完成させた。

大振幅振動領域で、印加周波数を変化させた場合の振幅の応答性について、非線形の振幅ジャンプ現象、共振周波数シフトの理論との比較を行った。

また、回転を印加しつつ、かつ振動を印加した場合について、同様の実験を行って、共振周波数シフト、振幅応答性の変化、非線形性の出現について調べた。

その結果、浮遊液滴の回転が液滴界面の変形挙動に与える影響を明らかにするとともに、理論ならびに数値解析との比較検討を行うことによって、静電浮遊炉による実験結果が数値シミュレーションによって定性的に予測可能であることを示した。

更に、液滴回転実験については、粘性流体に回転を加えた際の形状変化について、非粘性流体の形状変化の理論計算結果との比較（粘性の影響により理論からどのようにずれるかを評価することができた。

その上で、これまで、表面張力に比べて、測定精度が不十分とさせている、粘性測定に対して、これまでの浮遊液滴界面での振動減衰時間からではない、異なる原理に基づく新たな粘性係数測定方法についての提案が行える可能性を示すことができた。

・超音波浮遊実験

超音波浮遊実験においては、大粒径透明液滴の浮遊実験を行うことのできる実験装置を整備し、変形と内部流動を通常重力ならびに DAS の航空機を用いた微小重力の両環境において、大粒径浮遊液滴の界面変形と内部流動を高速可視化観測するとともに、粒子画像追跡法 (PIV) を用いて、その詳細可視化計測を行った。

その結果、微小重力環境と通常重力環境の両環境の超音波浮遊実験において、大型浮遊液滴の内部に複雑な渦を有する内部流れの発生する場合のあること確認した。

浮遊液滴の界面変形に対しては、保持力との関係で扁平形状になるなど重力の影響が大きく関与しており、重力の有無が内部流動挙動に影響を及ぼす可能性が示された。界面変形ならびに安定性に関しては、液滴と周囲流体との相対速度に応じた不安定性によって浮遊液滴の安定保持が達成されている可能性を示した。

また、通常重力下と微小重力下の比較評価の結果、微小重力環境下においては、より小さな超音波の出力によって、より球形で大型の液滴が浮遊出来る事を示すとともに、界面変更と内部流動の関係を調べるためには、重力の影響を排除することができる微小重力実験が極めて有効であることを示した。

・理論解析

まずは、非粘性流体を対象として、液滴の固有振動数に対する回転の効果を理論計算するための定式化を行った。また、液滴の固有振動数に対する大振幅の効果を理論計算するための定式化を行った。その上で、液滴が回転しており、かつ大振幅のときの複合効果について理論計算を行うための基礎的検討を行った。

これらの知見に基づいて、回転を増したときの分裂現象の分岐理論による解析、ならびに、粘性による上記の影響と減衰係数の見積もりを行っている。これらの結果は、将来的には、表面張力の非一様性の影響（マランゴニ）を調べるために有用となるものである。

理論構築に当たっては、流体の式だけでなく、微分幾何、ソリトン理論、あるいはバネなどによるモデル化なども用いている。理論だけでの定式が限界の部分については、途中の式の一部を数値評価して計算している。

・数値解析

浮遊液滴の界面変形と内部流動を多次元的に評価・検討するために、流動を表すナビエストークス方程式と界面の挙動を表す方程式とを連立させ、レベルセット法により数値計算を行う三次元計算コードを完成した。この計算コードを用いて、液滴の変形による形状振動の計算ならびに回転のある場合の振動を計算した。これによって、振幅が小さい場合は、振動周期及び減衰は線形理論と一致し、振幅が増加するとともに振動数が減少し、実験結果と良く一致する結果となることが分かった。

5. 成果 原著論文

- Yutaka ABE, Daisuke Hyuga, Shogo Yamada, Kazuyoshi Aoki, "Study on Internal Flow and Surface Deformation of Large Droplet Levitated by Ultrasonic Wave", Annals of New York Academy of Sciences 1077:49-62(2006)
- 阿部豊、山本憲一、中谷文人、足立和成、”音響定在波による気泡制御手法に関する研究”、日本機械学会論文集(B編)、71巻、705号、pp.77-84、(2005-5)。
- Yutaka ABE, Daisuke HYUGA, Shogo YAMADA, Kazuyoshi AOKI: Study on Internal Flow and Surface Deformation of Large Levitated by Ultrasonic Wave, Proceedings of the Interdisciplinary Transport Phenomena in Microgravity and Space Sciences Conference IV, pp.1-27-1-32, 2005.
- S. Matsumoto, S. Awazu, T. Ishikawa, S. Yoda, T. Watanabe, Y. Abe: Effect of Amplitude on Frequency in Oscillating Liquid Drop,

Bulletin of the American Physical Society,
Program of 58th Annual Meeting of the
Division of Fluid Dynamics, Vol. 50, No. 9,
pp.130, 2005.

- K. Nishinari, Y. Okada, A. Schadschneider and D. Chowdhury: Intra-cellular transport of single-headed molecular motors KIF1A, Phys. Rev. Lett., 95, pp. 118101, 2005.
- M. Kanai, K. Nishinari and T. Tokihiro: A stochastic optimal velocity model and its long-lived metastability, Phys. Rev. E, 72, pp. 035102(R), 2005
- Y. Abe, D. Hyuga, S. Yamada, K. Aoki: Study on Internal Flow and Surface Deformation of Large Droplet Levitated by Ultrasonic Wave, The New York Academy of Sciences, 2005.
- H. Onodera, S. Matsumoto, T. Ishikawa, P.-F. Paradis, S. Yoda, K. Wakashima, Study on Non-Linear Behavior of Liquid Drop Oscillation, AIAA, 2005-0723, pp.1-7, 2005.
- 阿部豊, 青木一義: 超音波を用いた浮遊液滴制御に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, 70 巻、692 号 pp. 242-247, (2004-4)
- Kazuyoshi AOKI, Shogo YAMADA, Masahiro KAWAJI, Yutaka ABE: Study on Characteristic of Droplet Levitation by Ultrasonic Wave, Abstract of the 5th International Conference on Multiphase Flow, pp.120, 2004.
- Shogo YAMADA, Kazuyoshi AOKI, Masahiro KAWAJI, Yutaka ABE: Study on Levitated Droplet Surface Behavior by Ultrasonic Wave, Abstract of the 5th International Conference on Multiphase Flow, pp.121, 2004.

口頭発表

- 阿部豊, 日向大輔, 栗津茂, 松本聡, 西成活裕, 榎勇作, 渡辺正: 浮遊液滴非線形ダイナミクスワーキンググループ活動報告, 宇宙利用シンポジウム (第 22 回), pp.59-62, 2006.
- 栗津茂, 松本聡, 阿部豊: 静電浮遊液滴の大

振幅振動挙動に関する研究, 日本機械学会
関東学生会第 45 回学生員卒業研究発表講演
前刷集, pp.291-292, 2006.

- 日向大輔, 栗津茂, 阿部豊: 大粒径浮遊液滴の流動挙動に関する研究, 日本機械学会関東支部第 12 期総会講演会講演論文集, pp.149-150, 2006.
- 阿部豊、日向大輔、栗津茂“超音波による大粒径浮遊液滴の流動挙動に関する研究”日本混相流学会年会講演会 2006 講演論文集、pp.180-181、(2006-8)
- 阿部豊、栗津茂、松本聡“浮遊液滴の非線形挙動に関する研究”日本混相流学会年会講演会 2006 講演論文集, pp.336-337、(2006-8)
- Yutaka Abe, Daisuke Hyuga, Shigeru Awazu, Shogo Yamada, Kazuyoshi, "Study on Hydrodynamic of Large Droplet Levitated by Ultrasonic Wave", 8th Drop Tower Days 2006 in Japan, 311, (2006-10)
- 阿部豊, 山田章吾, 日向大輔, 川路正裕: 大粒径浮遊液滴の界面変形と内部流動に関する研究, 宇宙利用シンポジウム (第 21 回), pp.113-116, 2005.
- 日向大輔, 山田章吾, 阿部豊: 超音波による大粒径液滴の浮遊に関する研究, 関東学生会第 44 回学生員卒業研究発表講演前刷集, pp.5-6, 2005.
- 阿部豊, 日向大輔, 山田章吾, 青木一義: 微小重力環境下における大粒径液滴の超音波浮遊に関する研究, 日本混相流学会年会講演会 2005 講演論文集, pp.161-164, 2005.
- 阿部豊, 日向大輔, 山田章吾, 青木一義: 音場浮遊のための超音波変動場の数値解析, 第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp.405-406, 2005.
- 青木一義, 阿部豊: 超音波変動場中の浮遊液滴に働く力解析, 第 18 回計算力学講演会講演論文集, pp.407-408, 2005.
- 阿部豊, 山本憲一, 中谷文人, 足立和成, 音響定在波による気泡制御手法に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, 71 巻, 705 号

(2005-5), pp. 1293-1300.

- ・ 松本聡, 小野寺博樹, 石川毅彦, 依田眞一, 若島健司: 浮遊液滴の振動挙動に関する研究, 第 21 回宇宙利用シンポジウム講演論文集, Vol. 21, pp.121-123, 2005.
- ・ 山田章吾, 青木一義, 阿部豊, 川路正裕, 西成活裕: 超音波による浮遊液滴の界面変形挙動に関する研究, 日本機械学会関東支部第 10 期総会講演会講演論文集, pp.605-606, 2004.
- ・ 青木一義, 山田章吾, 川路正裕, 阿部豊: 音響定在波中の浮遊液滴に働く物体保持力に関する研究, 日本混相流学会年会講演会 2004 講演論文集, pp.193-196, 2004.
- ・ 山田章吾 青木一義, 阿部豊, 川路正裕, 西成活裕: 超音波による浮遊液滴の界面変形挙動に関する研究, 日本混相流学会年会講演会 2004 講演論文集, pp.197-198, 2004.
- ・ 小野寺博樹, 松本聡, 小宮敦樹, 石川毅彦, Paul-Francois Paradis, 依田眞一, 若島健司: 液滴振動法による表面張力測定における振幅の影響、第 41 回日本伝熱シンポジウム講演論文集、Vol.1, pp. 73-74, 2004.
- ・ 小野寺博樹, 松本聡, 石川毅彦, Paul-Francois Paradis, 依田眞一, 若島健司: 液滴振動法による物性計測に及ぼす液滴挙動の影響, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2004 講演論文集, pp. 371-372, 2004.
- ・ 山田章吾, 青木一義, 阿部豊: 超音波を利用した過冷却凝固に関する研究, 関東学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演前刷集, pp.175-176, 2003.
- ・ 青木一義, 山田章吾, 阿部豊: 超音波による物体保持ならびに非接触での物性測定に関する研究, 日本機械学会関東支部第 9 期総会講演会講演論文集, pp.483-484, 2003.
- ・ 阿部豊, 青木一義, 山田章吾: 超音波を用いた流体制御に関する研究, 日本混相流学会年会講演会 2003 講演論文集, pp.171-174, 2003.
- ・ 阿部豊, 青木一義, 山田章吾: 超音波を利用

した過冷却凝固に関する研究, 日本混相流学会年会講演会 2003 講演論文集, pp.175-176, 2003.

- ・ 青木一義, 山田章吾, 川路正裕, 阿部豊: 超音波による液滴浮遊の特性に関する研究, 日本マイクログラビティ応用学会第 19 回学術講演会講演論文集, pp.12, 2003.
- ・ 山田章吾, 青木一義, 川路正裕, 阿部豊: 超音波による浮遊液滴の界面挙動に関する研究, 日本マイクログラビティ応用学会第 19 回学術講演会講演論文集, pp.13, 2003.
- ・ 阿部豊: 音場による流体制御のための超音波発生システム, 日本マイクログラビティ応用学会誌 Vol.20, pp.212-217, 2003.

学位論文

青木一義、平成 15 年度筑波大学修士論文「超音波による液滴浮遊に関する研究」

山田章吾、平成 16 年度筑波大学修士論文「大型浮遊液滴の界面変形と内部流動に関する研究」

日向大輔、平成 18 年度筑波大学修士論文「超音波による大粒径浮遊液滴の界面変形と内部流動に関する研究」

受賞

日本混相流学会学生優秀講演賞受賞、(栗津茂、平成 18 年 8 月)

競争的資金獲得

- ・ 平成 16-17 年度科学研究費補助金基盤研究 B、「大粒径浮遊液滴の界面大変形と内部流動挙動に関する研究」、代表者: 阿部豊
- ・ 平成 17-18 年度宇宙フォーラム地上研究公募「浮遊炉による大型浮遊液滴の界面大変形と内部流動に関する研究」、代表者: 阿部豊
- ・ 平成 18-19 年度科学研究費補助金基盤研究 B、「浮遊液滴の非線形ダイナミクスに関する研究」、代表者: 阿部豊