

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289292

研究課題名(和文)ファインバブルの機能性解明と産業基盤技術の構築

研究課題名(英文)Elucidation of fine bubbles' functions and development of fundamental technology for industry

研究代表者

寺坂 宏一(Terasaka, Koichi)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：00245606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：ファインバブルの独特な機能性発現メカニズムの解明を行い、ファインバブル技術を基盤とした産業創生を促すために、水中に長期間存在するウルトラファインバブルの特性を明らかにするための基礎研究を行った。

とくに(1)可視化が困難なウルトラファインバブルの最適な計測技術、(2)ウルトラファインバブルによる壁面付着物の除去メカニズムの解明、(3)ウルトラファインバブル水のキャビテーションによるラジカル発生の検証、(4)ウルトラファインバブル水からのマイクロバブル発生の解明、(5)ウルトラファインバブル液相トレーサーの開発、を実施し成果を得た。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the unique functions of fine bubbles and to promote industrial applications based on fine bubble technology, the fundamental research to clarify the unique characteristics of ultrafine bubbles that suspend in water for a long residence time.

In this study, #1 Optimal measurement technology of ultrafine bubbles which are difficult to visualize, #2 Elucidation of removal mechanism of wall deposits by ultrafine bubble water, #3 Verification of radical generation by cavitation of ultrafine bubble water, #4 Elucidation of microbubble generation from ultrafine bubble water, #5 Development of ultrafine bubble tracer for moving liquid.

研究分野：化学工学

キーワード：ファインバブル ウルトラファインバブル マイクロバブル 気泡 超音波刺激 洗浄

1. 研究開始当初の背景

2013年6月に国際標準化機構(ISO)において『ファインバブル技術に関する新たな専門委員(TC281)』(Ref. 経済産業省ニュースリリース 2013年6月17日)が設立された。ファインバブルとは図1に示したようにマイクロバブル(以下 μB 略記、直径約 $1\sim 60\mu\text{m}$ 程度)とウルトラファインバブル(以下UFBと略記、直径 $1\mu\text{m}$ 以下で可視光波長では不可視)の総称で、ISOで定義された。

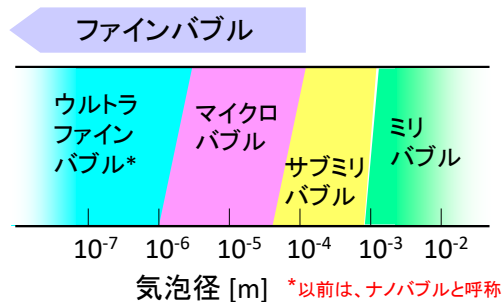


図1 気泡サイズの呼称

本ISO提案は研究代表者(寺坂)と連携研究者(矢部彰)が理事・会長を務めるファインバブル産業会と経済産業省が協力し日本主導で行われた。現在日本はファインバブル技術の世界最先端にあり、今後も日本の工業発展のためにも学術的にも世界をけん引していく位置づけにある。

研究代表者は各種 μB の発生メカニズムを整理分類し、その工業的有用性を詳細に紹介した。さらに最近ではUFBの存在を確認し、その有用かつ特異的な性質を紹介した。最近1~2年のUFB分析機器の発展は目覚しく、本研究分野が大きく進展する時期に達した現状にある。ファインバブルに関する学術的議論は、日本混相流学会や化学工学会(気泡・液滴・微粒子分散工学分科会)から始まり、1st~3rd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering(略称MMPE)へと広がった。

しかしながら研究代表者他多数の研究者の尽力により μB の化学工業分野への応用が進んでいるが、UFBについてはまだその存在状態の確認や、UFB固有の機能の解明が済んでいない。そのため μB のように応用が進んでいない。

そこで本研究では μB に加えてUFBのもつ独特な性質の解明を進め化学工学への応用を進める。

2. 研究の目的

ファインバブルの独特な機能性発現メカニズムの解明を行い、ファインバブル技術を基盤とした産業創生を促す。ファインバブルのなかでも特に微細なUFBの物性を測定し、学術的な裏付けを得るための基礎研究を行う。まず、ファインバブル径測定原理の最適化を行い、最も注目されている機

能である洗浄効果のメカニズム解明に取り組む。一方でファインバブルを液中でのラジカル発生源として適用し、化学反応系へ適用するために、超音波照射を利用したソノケミカル効果を解析する。以上の研究を推進することにより、ファインバブル工学を確立し、産業応用に寄与する理論とプロセス設計手法を構築する。

3. 研究の方法

(1)可視化が困難なウルトラファインバブルの最適な計測技術

水中でのUFBの生成メカニズムおよび存在状態の確認および実証は本研究の根幹である。ナノサイズ固体粒子分析装置の選択と比較、それぞれの調整や改良によって最適かつ信頼できる測定原理を選定する。

(2)ウルトラファインバブル水による壁面に付着した無機塩結晶の除去

UFB水が洗浄効果を発揮する際には、液体が静止しておらず流動していることが重要である。そこで図2に示した試験方法を提案する。傾斜角可動な斜面に無機塩結晶を洗浄対象物として付着させる。UFB水が付着物に接触するときの速度を傾斜角で調整し、洗浄により溶解した塩濃度を下流の電導度計で測定する。

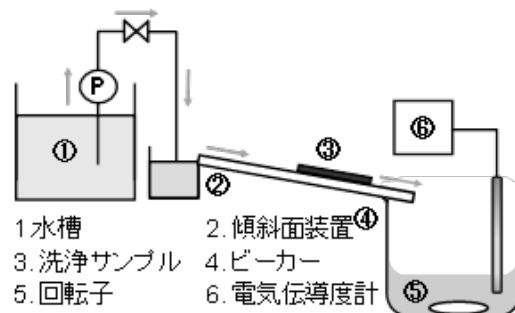


図4 ウルトラファインバブル水洗浄実験装置案

図2 UFB水による壁面洗浄試験装置

UFB水による洗浄(溶解または剥離など)経過を超高速度ビデオカメラ撮影で撮影・解析し、付着無機塩結晶の状態を電子顕微鏡による観察により仮説の実証を行う。

(3)ウルトラファインバブル水への超音波照射によるラジカル生成

高橋(J. Phys. Chem. B111-6, 1343-1347(2007))はUFBの圧壊によるラジカルの発生を報告している。また矢部らは、アルミナ微粒子が付着したシリコンウエハー上に超純水またはUFB水を衝突させ、ウエハー平面上の状態をSEMで観察した。

本研究ではUFB水のラジカル生成の検証のためにソノケミストリーの分野で頻繁に使用されるKI法を用いる。

(4)ウルトラファインバブル水からのマイクロバブル発生の可視化

水中から超音波などの刺激によって μB が

誕生する非常に短い時間で起こる現象を各種の刺激を与えて μB の析出状況より高性能な超高速ビデオカメラで捉え、UFB による洗浄および μB 発生メカニズムの解析を行う。さらに UFB 水中にその現象に関与する UFB 水中の UFB 個数や溶存酸素濃度の影響を詳細に検討する。

(5) ウルトラファインバブルによる液相トレーサーの開発

UFB は μB と異なり、水中で数か月以上の寿命がある。また非常に微細であるために水中を浮遊する際には浮上することなく液相と同じ流線をたどって移動する。一方、UFB は緑色レーザー光を散乱し軌跡が観測できる。これを利用すれば液相を薬品や微粒子などで汚染することなく液相の運動を可視化できる。

本研究協力者であるドイツ・ハンブルク工科大学の Schlüter 教授との国際共同研究によって UFB を利用した気液混相流の可視化技術開発を目指した研究会を開催する。

4. 研究成果

(1) 可視化が困難なウルトラファインバブルの最適な計測技術

UFB 径の測定に用いられる代表的な計測装置の原理を比較した。図 3 はナノ粒子ブラウン運動追跡法、図 4 にレーザー回折・散乱法の原理を示した。

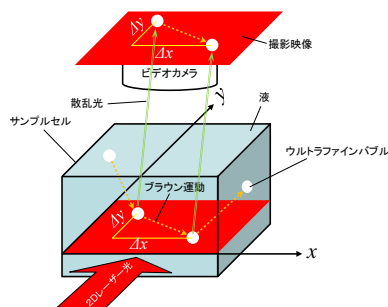


図 3 ナノ粒子ブラウン運動追跡法の原理

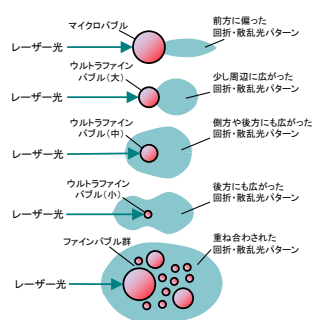


図 4 レーザー回折・散乱法の原理

各原理とも一長一短があり用途や測定レンジに応じて使い分けることが必要である。

(2) ウルトラファインバブルによる壁面付着物の除去メカニズムの解明

ガラス平板に付着させた食塩結晶上を UFB 水を流下し洗浄除去される挙動を高速ビデオを用いて撮影・解析し、図 5 に手ア

ったメカニズムを得た。

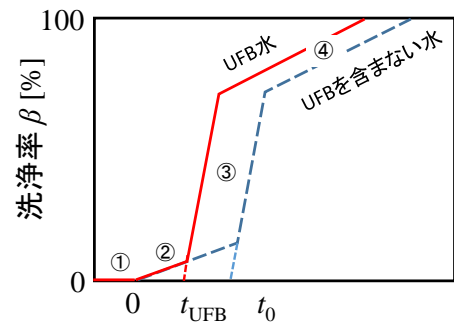
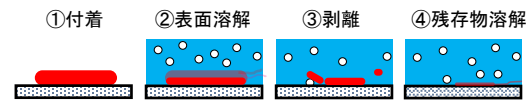


図 5 UFB 水による壁面付着塩の洗浄過程

(3) ウルトラファインバブル水のキャビテーションによるラジカル発生量の検証

図 6 に UFB 水への超音波照射によるラジカル生成量と超音波照射時間との関係を示した。UFB の存在によってラジカル生成量は向上した。

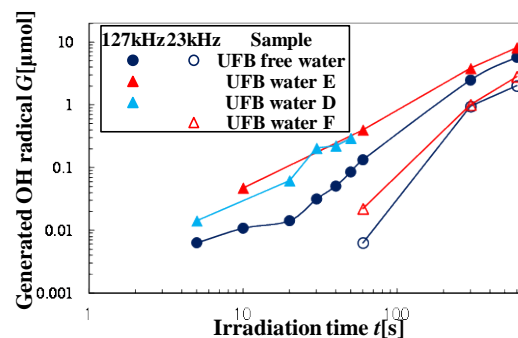


図 6 超音波照射による UFB 水からのラジカル生成

(4) ウルトラファインバブル水からのマイクロバブル発生量の解明

図 7 に透明な UFB 水中への超音波照射により UFB が核となって μB が大量に発生し白濁する現象を捉えた連続写真を示した。発生する μB 量は溶存ガス濃度と超音波照射出力に依存することを明らかにした。

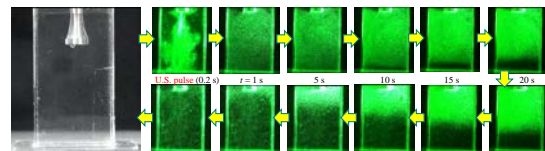


図 7 超音波照射による UFB 水からのラジカル生成

(5) ウルトラファインバブル液相トレーサーの開発

UFB を液相トレーサーとして利用する技術開発のため、ドイツ・ハンブルク工科大学 Schlüter 教授との共同研究が実施された。図 8 に示したように、水中で UFB は透明な粒子

として浮上も沈降もせずに長期間滞在し、短波長の緑色レーザーを散乱しUFBの位置が観測できる。



図8 超純水中でのUFBのレーザー散乱
(左：超純水、右：UFBが浮遊する超純水)

UFBは液体の移動に伴うので、UFBを可視化すれば透明な液の運動を追跡できる。

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2件)

- ①岩切扶樹、寺坂宏一、藤岡沙都子、M. Schlüter、S. Kastens、田中俊也、水中を収縮しつつ浮上する単一マイクロバブルからの物質移動、混相流、査読有、Vol. 30、2017、pp. 529—535
- ②寺坂宏一、超音波刺激によるウルトラファインバブルからマイクロバブルへの変化、日本ソノケミストリー学会誌、査読無、11巻、2017、pp. 1-8
ISBNコード：2424-001X

[学会発表] (計45件)

- ①K. Terasaka、Applications of Fine Bubble Technology for Wall Cleaning、22nd International Symposium on Fluidization and Particle Processing (招待講演)、2016年12月8日、東京大学駒場キャンパス(東京都・目黒区)
- ②K. Terasaka、Fine bubbles and Chemical Engineering、The 2nd Symposium on the Union of Fine Bubble Scientists and Engineers (招待講演)、2016年12月7日、東京大学駒場キャンパス(東京都・目黒区)
- ③K. Terasaka、Fine bubble technology toward to fine bubble science、The 8th International Symposium on Fine Bubbles (招待講演)、2016年12月6日、慶應義塾大学三田キャンパス(東京都・港区)
- ④M. Watanabe、K. Terasaka and S. Fujioka、Storage and dilution of ultrafine bubble water、International Workshop on Process Intensification 2016、2016年9月29日、Manchester (UK)

- ⑤H. Yoda、K. Terasaka and S. Fujioka、Ultrafine bubble separation from water by slow freezing and melting、International Workshop on Process Intensification 2016、2016年9月29日、Manchester (UK)
- ⑥T. Shigehisa、S. Fujioka and K. Terasaka、Generation of High-Concentration Spot by Rapid Gas Dissolution from a Shrinking Single Bubble into Water、International Workshop on Process Intensification 2016、2016年9月29日、Manchester (UK)
- ⑦M. Iwakiri、K. Terasaka、S. Fujioka、S. Kastens and M. Schlüter、Mass Transfer at Shrinking Single Microbubble Rising in Water、11th European Fluid Mechanics Conference、2016年9月15日、Seville (Spain)
- ⑧米山雄也、寺坂宏一、藤岡沙都子、オゾンマイクロバブルによる水中大腸菌の殺菌、化学工学会第48秋季大会、2016年9月6日、徳島大学(徳島県・徳島市)
- ⑨川端雅大、寺坂宏一、藤岡沙都子、壁面付着微細気泡による熱伝達抑制、化学工学会第48秋季大会、2016年9月6日、徳島大学(徳島県・徳島市)
- ⑩村上大地郎、寺坂宏一、藤岡沙都子、水平摺動するノズルからの微細気泡生成、混相流シンポジウム2016、2016年8月8日、同志社大学(京都府・京都市)
- ⑪岩切扶樹、寺坂宏一、藤岡沙都子、水中を収縮しつつ浮上する単一マイクロバブルからの物質移動、混相流シンポジウム2016、2016年8月8日、同志社大学(京都府・京都市)
- ⑫清水健一郎、寺坂宏一、藤岡沙都子、ウルトラファインバブル水によるガラス面付着微粒子の洗浄、混相流シンポジウム2016、2016年8月8日、同志社大学(京都府・京都市)
- ⑬K. Terasaka、N. Harasawa、I. Yamazaki and S. Fujioka、Microbubble generation from ultrafine bubble water by ultrasonic stimulation、9th International Conference on Multiphase Flow、2016年5月25日、Firenze (Italy)
- ⑭宮田翔司、藤岡沙都子、寺坂宏一、マイクロバブルまたはマイクロビーズ添加によるハイドロゲル粒子からの薬物放出制御、化学工学会第81年会、2016年3月15日、関西大学(大阪府・吹田市)
- ⑮K. Terasaka、Polluted water treatment and cleaning with fine bubble water (招待講演)、Second International Symposium on Advanced Water Science and Technology、2016年2月15日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)
- ⑯K. Terasaka、I. Yamazaki and S. Fujioka、Microbubble generation from gas

- supersaturated water by ultrasonic stimulation、Pacificchem 2015、2015 年 12 月 19 日、Honolulu (USA)
- ⑰ K. Terasaka、Outlook and International Standardization of Fine Bubble Technology (招待講演)、The 5th International Symposium on Fine Bubbles、2015 年 12 月 17 日、東京大学(東京・文京区)
- ⑱ 寺坂宏一、ファインバブルを利用した化学工学的なアプローチ(招待講演)、第 1 回ファインバブル学会連合シンポ、2015 年 11 月 27 日、大阪大学銀杏会館(大阪府・吹田市)
- ⑲ K. Terasaka、Development and Applications of Fine Bubble Technology (招待講演)、The 6th International Symposium on Fine Bubbles、2015 年 11 月 26 日、大阪大学銀杏会館(大阪府・吹田市)
- ⑳ 寺坂宏一、ファインバブルの基礎と工業利用、第 3 回混相流に関する最先端科学技術シンポジウム(招待講演)、2015 年 11 月 20 日、(株)構造計画研究所レクチャールーム(東京都・中野区)
- ㉑ 寺坂宏一、ファインバブルの創り方と使い方、第 5 回開放環境科学専攻 C S J 化学フェスタ 2015(招待講演)、2015 年 10 月 14 日、タワーホール船堀(東京都・中野区)
- ㉒ A. Tanaka、K. Terasaka and S. Fujioka、Separation of Albumin Suspended in Water with Submilli-bubbles、APCChE2015、2015 年 10 月 1 日、Melbourne (Australia)
- ㉓ S. Fujioka、K. Ikeda and K. Terasaka、Dissolution and Shrinking Behavior of a Microbubble in a Microchannel、2015 年 10 月 1 日、Melbourne (Australia)
- ㉔ 上村愛優、寺坂宏一、藤岡沙都子、ウルトラファインバブル水による回転円盤付着デンプンの洗浄、化学工学会第 47 秋季大会、2015 年 9 月 9 日、北海道大学(北海道・札幌市)
- ㉕ 田中嘉一、寺坂宏一、藤岡沙都子、スチームおよびマイクロバブルによる低密度ガム質フロックによる植物油生成、日本食品工学会第 16 回年次大会、2015 年 8 月 10 日、広島市立大学(広島県・広島市)
- ㉖ 奥村勇太、寺坂宏一、藤岡沙都子、化学工学会第 80 年会、2015 年 3 月 20 日、芝浦工業大学(東京都・江東区)
- ㉗ 寺坂宏一、ファインバブルの基礎と動向～ウルトラファインバブル水洗浄～、第 22 回開放環境科学専攻静岡フォーラム・第 47 回研究交流セミナー(招待講演)、2014 年 11 月 25 日、アクトシティ浜松(静岡県・浜松市)
- ㉘ 寺坂宏一、ファインバブルによる廃水浄化と壁面洗浄、グリーンイノベーション EXPO2014(招待講演)、2014 年 11 月 12 日、東京ビッグサイト(東京都・江東区)
- ㉙ 丸山諒、寺坂宏一、藤岡沙都子、超音波および他の方法によるウルトラファインバブル脱泡、第 23 回開放環境科学専攻ソノケミストリー討論会、2014 年 11 月 1 日、秋田市にぎわい交流会 AU(秋田県・秋田市)
- ㉚ 寺坂宏一、ウルトラファインバブル水を用いた洗浄(招待講演)、2014 年 10 月 17 日、東京ビッグサイト(東京都・江東区)
- ㉛ K. Terasaka and S. Fujioka、Applications of Fine Bubble Technology for Industry (招待講演)、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㉜ S. Fujioka、N. Myoga and K. Terasaka、Development of Static Mixer for Emulsification and Dispersion、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㉝ K. Shibata、K. Terasaka、S. Fujioka、Building Up of the CFD Model for Spiral Flow Aeration Tank、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㉞ Y. Oeda、K. Terasaka、S. Fujioka、A. Handa、Removal of Egg Yolk Contaminated in Egg White Using Microbubble Flotation、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㉟ N. Kurabe、K. Terasaka、S. Fujioka、Reduction of Excess Activated Sludge by Inducing Ozone Microbubbles、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㊱ K. Ikeda、S. Fujioka and K. Terasaka、Shrinking Microbubble in Microchannel Made of PDMS、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㊲ N. Namai、S. Fujioka、K. Tanaka and K. Terasaka、Development of Bubble Shearing Model to Design Aerated Stirred Tank、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㊳ M. Iwakiri、K. Terasaka、Y. Wakasa and S. Fujioka、Production of Hollow Silver Particles Using Microbubbles、2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering、2014 年 9 月 25 日、Hamburg (Germany)
- ㊴ T.-N. Tzeng、S. Fujioka、K. Terasaka、M. Schlüeter and H. K. Trieu、Investigation on Defouling of

Microfluidic Channels with Ultrafine Bubble Technology, 2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, 2014年9月25日、Hamburg (Germany)

- ④① T. Shimanouchi, T. Tanifuji, Y. Kataoka, S. Ueno, S. Fujioka and K. Terasaka, Use of Liquid-Liquid Slug Flow in Micro Capillary for Reaction and Separation of Fructose Derivative under Subcritical Water, 2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, 2014年9月25日、Hamburg (Germany)
- ④① Y. Matsukuma, N. Shimada, K. Terasaka, S. Iwata, M. Ohta, S. Fujioka, S. Honma, and K. Mizuta, New Electricity Generation System Using a Bubble Column, 2nd International Symposium on Multiscale Multiphase Process Engineering, 2014年9月25日、Hamburg (Germany)
- ④② 田中亜実、寺坂宏一、藤岡沙都子、マイクロバブルによる生活排水からのたんぱく質浮上分離、化学工学会第46回秋季大会、2014年9月17日、九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市)
- ④③ 寺坂宏一、ファインバブル水による壁面洗浄技術、東工大・JSA 標準化討論会 (招待講演)、2014年9月1日、東京工業大学大岡山キャンパス (東京都・目黒区)
- ④④ 前田重雄、小林秀彰、柏雅一、井田勝久、西原一寛、藤田俊弘、後藤邦彰、綾信博、寺坂宏一、2種類の原理の計測法を用いた ultrafine GaLF により生成したウルトラファインバブルの数密度測定、混相流シンポジウム、2014年7月28日、札幌道民センター (北海道・札幌市)
- ④⑤ 寺坂宏一、ファインバブル技術の国際標準化と応用研究、化学工学会反応工学部会反応の場の工学分科会 (招待講演)、2014年7月28日、千葉工業大学 (千葉県・習志野市)

[図書] (計2件)

- ① 寺坂宏一、氷室昭三、安藤景太、秦隆志、ファインバブル入門、日刊工業新聞社、pp. 1-37, pp. 93-139, pp. 167-262、2016
- ② 興津健二、安井久一、寺坂宏一、日本ソノケミストリー学会ニュースレター (第4号)、pp. 1-8、日本ソノケミストリー学会、2016

[その他]

ファインバブル基盤技術開発に関する研究
<http://www.kll.keio.ac.jp/kif/project.htm#project1>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺坂 宏一 (TERASAKA KOICHI)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 00245606

(2) 研究分担者

藤岡 沙都子 (FUJIOKA SATOKO)
慶應義塾大学・理工学部・専任講師
研究者番号: 50571361

(3) 連携研究者

五島 崇 (GOSHIAMA TAKASHI)
鹿児島大学・理工学研究科・助教
研究者番号: 90709560
矢部 彰 (YABE AKIRA)
独立行政法人産業技術総合研究所・理事
研究者番号: 40358221

(4) 研究協力者

シュルーター ミヒヤエル (Schlüter Michael)
ハンブルク工科大学・混相流研究科・教授