jh170040 - NAH

反応・相変化を伴う多分散系混相流の大規模シミュレーション

松尾亜紀子 (慶應義塾大学)

相変化・反応によって多分散性を有する分散相と、連続相の二相からなる混相流問題 について、3つの研究課題に取り組んだ。本課題研究では、「A:爆轟燃焼波と液滴との 干渉」、「B:粉体の燃焼現象」、「C:水中高速飛翔体周りのキャビテーション現象」の3 点を対象とした

昨年度の「A:爆轟燃焼波と液滴との干渉」の解析コード MPI 実装化に引き続き、今年 度は「B:粉体の燃焼現象」及び「C:水中高速飛翔体周りのキャビテーション現象」につ いて、MPI の実装化を実現した。さらに、解析コードのベクトル化率及び並列化効率の 向上を行うことにより、数値解析の高速化に取り組んだ。その結果、計算コードの3次 元化や計算時間の短縮等、大規模スケールで高効率な計算が可能となり、工学的スケー ルにおける現象解析につなげることができた。

- 1. 共同研究に関する情報
- (1)共同研究を実施した拠点名

東北大学サイバーサイエンスセンター

- (2) 共同研究分野
 - 超大規模数値計算系応用分野
 - □ 超大規模データ処理系応用分野
 - □ 超大容量ネットワーク技術分野
 - □ 超大規模情報システム関連研究分野
- (3) 参加研究者の役割分担
 - 松尾亜紀子(慶應義塾大学理工学部) 研究総括
 - 江川隆輔(東北大学サイバーサイエンス センター)並列化処理
 - 小林広明(東北大学サイバーサイエンス センター)並列化処理
 - ・ 磯部洋子(東北大学サイバーサイエンス センター)並列化処理
 - ・奥野航平(慶應義塾大学理工学研究科)
 「C:水中高速飛翔体周りのキャビテーション現象」担当者
 - ・ 志村啓(慶應義塾大学理工学研究科)
 「B:粉体の燃焼現象解明」担当者
 - ・ 渡部広吾輝(慶應義塾大学理工学研究科)
 「A:爆轟燃焼波と液滴との干渉」担当者
 - ・ 笠原弘貴(慶應義塾大学理工学研究科)
 「A:爆轟燃焼波と液滴との干渉」担当者

2. 研究の目的と意義

1)研究目的

相変化・反応によって多分散性を有する分 散相と、連続相の二相からなる混相流問題に ついて、大規模スケールでの数値解析を行う ための OpenMP 並列/SIMD チューニングを 行うことを目指す。これらの現象は混相流の 中でも、相反応・反応が生じたことによって 分散相と連続相が同時に存在するために非 常に複雑な流れとなり、現象を工学的に再現 することが非常に難しい。そのため、本研究 ではこのような流れ場に対する大規模スケ ールでの数値解析手法を構築し、現象解明に つなげることを目的としている。

本課題研究では、「A:爆轟燃焼波と液滴と の干渉」、「B:粉体の燃焼現象」、「C:水中高 速飛翔体周りのキャビテーション現象」の3 点について扱う。Aは数µmの液滴が流れ場 に存在し、燃焼波と液滴が干渉する気液混相 反応問題であり、Bは数µmの粉体が燃焼す るとともに既燃ガスと相互干渉をする固気 混相反応問題、Cは蒸発によって生じた気泡 が周囲液体と干渉する気液混相問題である。 以下に各条件における状況及び学術的新規 性について述べる。

(A)「爆轟燃焼波と液滴との干渉」

マイクロメートルオーダーの液滴が浮遊し

ている状態において、伝播する燃焼波が通過 する。液滴は燃焼波通過後の高温気体によっ て加熱され蒸発するとともに、相変化時の吸 熱によって燃焼波に対して影響を与える。こ のような流れ場は、エンジン燃焼室内部にお いて多く生じているが、本研究においては燃 焼波がデトネーションである場合について 着目し、デトネーション波と液滴の干渉現象 を明らかにすることによって、デトネーショ ンの工業利用に貢献するとともに数値解析 手法の精度向上を目指す。

(B)「粉体の燃焼現象」

マイクロメートルオーダーの粉体が堆積 しており、その上部を衝撃波が通過すること によって粉体が巻き上げられ浮遊する。粉体 が可燃性粒子であった場合、粉体が高温気体 に晒されることによって燃焼を開始し、粉塵 爆発を生ずる。炭鉱の坑道においては微粉炭 の燃焼による被害が繰り返し発生しており、 この抑制は炭鉱施設において常に課題とし て挙げられている。そのため、粉塵爆発現象 の詳細を把握することは、安全防護技術を発 展させる上で必要とされている。本件では、 粒子群の挙動を代表粒子によって表すこと で粉体の動きを精度よく再現する計算手法 を確立することが目的の一部である。

(C)「水中高速飛翔体周りのキャビテーション現象」

水中を100 m/s 以上で移動する物体の表面 付近において生じるキャビテーション現象 に焦点を当てる。水中飛翔体の周囲では、一 時的な圧力の低下によってキャビテーショ ン気泡が発生し、飛翔体はキャビテーション に包まれることとなる。この際、気泡と水に おける粘性の差異によって飛翔体に加わる 水中抗力は大きく変化する。本件では、この ような高速飛翔体に加わる流体抵抗に対し て、キャビテーション現象が与える影響を調 査するとともに、水中高速輸送機関の実現へ 向けたキャビテーションの有効利用研究の 端緒とする。

2) 研究意義

多分散系の混相流は数多く存在するが、そ れらに対して実用的な計算コストで解析を 行うモデルは存在しない。本課題研究によっ て工学的スケールにおけるこれらの現象を 定量的に再現することのできる手法が開発 できれば、混相流現象を解明する一端とする ことが出来る。

本課題研究では特に3テーマに絞って解析 を行う事から、波及効果として以下の3点が 期待できる。

- デトネーションエンジンの実用化に向けた知見を収集し、推進機関の効率向上に 貢献する。
- ② 粉塵爆発現象の一端を解明し爆発現象に 対する安全・予防技術の発展に貢献する。
- ③ キャビテーションの有効利用に向けた提 言を行い、輸送機関の高速化に貢献する。
- 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義 本研究課題における研究対象は、産業・自 然界において広く散見される現象であり、小 規模スケールでの解析のみでは現象解明に つながらない。数値解析によって得られた知 見を反映することによって混相流体現象に 対する研究の進展に貢献するためには、工学 的スケールにおける現象解析が必要である。

本課題研究において用いる混相流解析コ ードの構築は既に着手しており、それぞれの 問題に対して二次元での解析能力があるこ とは小規模計算において確認している。しか し、工学的スケールにおける大規模計算を効 率的かつスピーディーに行うためには、ベク トル型コンピューターによる高並列計算を 行う必要がある。そこで、ベクトル型コンピ ューターの並列化性能を発揮させるため、自 主開発コードの OpenMP 並列/SIMD チュー ニングを行うものである。



図 2 15.5 ms における反応面付近の流れ場

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

(A)「爆轟燃焼波と液滴との干渉」

デトネーションを利用したエンジンに PDE(Pulse Detonation Engine)がある。PDE は、 デトネーションを繰り返し燃料器内で発生させ、 推力を得る内燃機関である。PDE の燃料供給 法に燃料・酸化剤以外の物質を用いない燃料 液滴パージ法が提案されている(図1)。

燃焼器形状が一次元的であり、デトネーシ ョンの現象も一次元的に捉える事が出来る 事より、一次元数値解析を実施した。酸化剤 供給全圧に対して燃焼器平均圧が高くなる 圧力ゲインな燃焼器実現のためには、燃焼 器を短く、酸化剤供給全圧を低く、点火位置 から酸化剤供給側に燃料・酸化剤混合気が 配置されている距離を大きく、当量比を高 くすることが有効であることが分かった。 (B)「粉体の燃焼現象」

炭塵爆発では炭塵は重力沈降によって堆 積していることが多いため、最初に燃焼波と の干渉により堆積した炭塵が巻き上がり、そ



の後に分散し炭塵が燃焼するという層状炭 塵爆発の過程をとる。本研究では、層状炭塵 爆発の初期過程を二次元数値解析により再 現し、火炎が加速する過程を観測することで その機構解明を試みた。

図2に15.5 msにおける反応面付近の流れ 場を示す。形成されている火炎(x=9.5 m) は、予め流れ場に存在する空気と炭塵の揮発 によって放出された CH4 が接する領域で生 じていることから、拡散火炎であるといえる。 火炎後方上部の領域(x=7.7-9.4 m)では CH4 移流速度は 1000 m/s と火炎移流速度

(600 m/s)を上回る速度で移流しており、CH4 移流が拡散火炎の超音速での移流を支持していることが分かった。

(C)「水中高速飛翔体周りのキャビテーション現象」

水中高速飛翔体周りに発生するキャビテ ーション現象の数値解析を行った。水中高速 飛翔体周りにスーパーキャビテーションが 現れる場合、気泡は先端部分から発生し、先 端形状により気泡半径や流体抵抗値が異な ることが先行実験により明らかになってい る。そこで本研究では、気泡半径及び流体抵 抗値を評価指標とし、水中高速飛翔体形状の 最適化について検討した。最適化の検討には、 他の値との優越を比較することで最適値を 決定するパレート最適手法を用いた.

本研究では、先端形状として図3に示すような尖頭形状(Ogival nose)、平頭形状(Flat



nose) 及びスパイク形状 (Spike nose) を用いた。 Flat nose は、Ogival nose の先端部を平らに切断 したもので、切断面の半径 (平頭半径) r_f をパラメ ータとた。Spike nose は Ogival nose の肩部の 外周を直角に切り欠いた形状をしている。切 り欠いた後の残った先端部をスパイク部と 呼ぶ。Spike nose では平頭部の半径 r_f 及びスパ イク部の半径 r_s をパラメータとした。

図4より、Spike nose の平頭半径やスパイク径 の値を調整することで、パレート最適解上で任 意の Cd 値と気泡半径を実現する水中高速飛 翔体形状を設計することが可能である。

5. 今年度の研究成果の詳細

(A)「爆轟燃焼波と液滴との干渉」

水液滴が噴霧された C2H4-air 混合気中を 伝播する気相デトネーションに関する二次 元数値解析を実施した.本研究の目的は水液 滴の挙動と水液滴が気相デトネーションの 伝播挙動とセル構造に与える影響を明らか にする事である.計算対象と境界条件を図5 に示す.

水液滴が存在する未燃混合気中を伝播す る場合でも気相デトネーションは安定に伝 播し、液滴が存在しない場合の CJ 速度と比 較して 3.2%までの速度欠損が確認された.デ トネーションと水液滴の干渉により主に衝 撃波面と音速線までの領域で気相から液滴 へとエネルギーが輸送される.エネルギー欠 損は水液滴が存在する未燃混合気中を伝播



 100
 0

 (a) Gas pressure [MPa]
 (c) Absolute vorticity [1/s]

 0.1
 6.0
 5.0 x 10⁵

 (b) Gas Temperature [K]
 (d) Gas velocity at shock

 300
 3500
 fixed frame [m/s]

 500
 1500

図7 流れ場 ($\varphi = 0.9, Y_{H20} = 0.0701$)

する気相デトネーションに速度欠損を生じ させたと考えられる.

図6にセル構造を示す最大圧力履歴を示す. 水液滴の存在によってセル構造が変化した. デトネーションと水液滴との干渉によって 弱い三重点は減衰した.速度欠損によって反 応誘導距離が増加し、セル幅がわずかに増加 したと考えられる.

図7にデトネーション波が水液滴が存在す る混合気中をおよそ100 mm 伝播した際の瞬 間の流れ場を示す. 衝撃波後方約10 mm の地 点で主に水液滴は蒸発し、蒸発している領域 はデトネーション波と同じ速度で伝播した. デトネーション後方の速度、渦度および温度 の変動は水液滴の蒸発によって抑制された.

(B)「粉体の燃焼現象」

二次元 CFD-DEM シミュレーションを実施し、 堆積炭塵による炭塵爆発現象に対する解析 を行った。計算条件および境界条件を図8に 示す。本条件は、先行研究における実験を模 擬して小スケールで再現したものである。解 析領域は18 m x 0.05 m であり、底面から2 mm まで炭塵が空隙率 0.47 で配置されてい る。解析領域の左端から2 m は CH4-Air 予 混合気が充填されており、以降の18 m は空 気で満たされている。

図 9 に衝撃波と燃焼波の伝播速度履歴を 示す。燃焼波の伝播速度は350 - 500 m/s で あり、大規模スケールでの実験結果と一致し た。一方で、衝撃波の伝播速度は500 m/s と なり、数値解析による先行研究よりも低い値 を示した。これは、炭塵粒子の巻き上げ挙動 が異なっているためである。本計算結果では 炭塵粒子が上壁に達するまで巻き上がった ため、燃焼波から生じた圧縮波は浮遊する炭 塵粒子との干渉によって減衰され衝撃波に 影響を与えなかった。

図 10 に燃焼波付近の流れ場を示す。燃焼 波面に対して、流体は前後から流入している。 このとき、燃焼波の左側からは揮発によって 生じた CH4 が流入し、右側からは予め存在し ている空気が流入する。これにより燃焼波は 拡散火炎の構造を持って伝播する。炭塵粒子



図 10 燃焼波付近の流れ場(16.0 ms) は、燃焼波に対して右側から左側へ流れてい くのみであり、拡散火炎の構造とは一致しな い。炭塵粒子は燃焼波面上で揮発を開始する のではなく、燃焼波の通過後に揮発を開始す る。このため、揮発によって生じた CH4 が燃 焼波の左側から燃焼波へ流入する形となる。 炭塵粒子は燃焼波に対して 400 m/s の速度で 学際大規模情報基盤共同利用·共同研究拠点 平成 29 年度共同研究 最終報告書 2018 年 5 月

流入するため、Dust-Air 予混合気を伝播する 層流火炎とは異なり、燃焼波の前面に予熱帯 を形成しない。

(C)「水中高速飛翔体周りのキャビテーション現象」

これまでは2次元解析によって得られた 流体力を基に剛体運動方程式を立て、飛しょ う軌跡及び姿勢を求めた。しかし、迎角を持 った軸対象物体の飛しょう安定性を検討す るためには3次元解析による流体力の算出 が必要である。そこで、本研究ではスーパー キャビテーションを伴う水中移動体の飛し よう安定性について、3次元計算コードによ り水中移動体の3次元的な姿勢及び速度の影 響を解析した。

迎角をパラメータとした気相体積分率の 結果を図 11 に、抗力、揚力、転倒モーメン トの値を表 1 に示す。迎角にかかわらず抗力 はほぼ同じ値となった。揚力及び転倒モーメ ントは水中移動体が気泡内にある場合は迎 角に比例して増加するが、水からはみ出した



図 11 迎角をパラメータとした気相体積分率

場合は急激に増加した。

水中移動体速度をパラメータとした気相 体積分率の結果を図 12 に、抗力、揚力、転 倒モーメントの値を表 2 に示す。抗力は水中 移動体速度に依存するが、キャビテーション 発生場所は速度にはほとんど影響を受けな いことが分かる。このことから、スーパーキ ャビテーションを利用した水中移動体の設 計においては、使用速度ごとに形状を変更す るという必要は少ないと考えられる。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

昨年度は「A:爆轟燃焼波と液滴との干渉」 の解析コードについて MPIの実装を実施した。 今年度は「B:粉体の燃焼現象」及び「C:水中 高速飛翔体周りのキャビテーション現象」に



図 12 水中移動体速度をパラメータとした 気相体積分率

表1	揚力、	抗力、	転倒モーメント	(各迎角)

AoA	Drag [N]	Lift [N]	Moment [Nm]
0 °	26,173	0	0
5 °	25,781	5,321	1,925
10 °	26,289	10,040	3,641
45 °	23,587	132,138	28,394

表2 揚力、抗力、転倒モーメント(各速度)

Velocity	Drag [N]	Lift [N]	Moment [Nm]
450 m/s	4,414	0	0
600 m/s	7,949	0	0
1000 m/s	26,173	0	0

ついて、MPIの実装を行う予定としていたと ころ、予定通り両方の解析コードへのMPIの 実装に成功した。

また、解析コードのベクトル化率及び並列 化効率の向上を行うことにより、数値解析の 高速化に取り組んだ。「B:粉体の燃焼現象」 を例に、その概要及び結果を示す。

(1) ベクトル化率の向上

「B:粉体の燃焼現象」の解析コードの中に は、ベクトル化率が低く、ベクトル長が短い サブルーチンが存在していた。当該サブルー チンの内部を詳細に解析したところ、ループ 内に依存関係があり、最内ループがベクトル 化されていないことが分かった(図13)。また、 最内ループは外側のループ毎にループ長が 異なり、かつそのループ長は短い。外側ルー プのループ長が長いため、外側ループを最内 ループに移動することで性能改善が期待で きる。

そこで、ループの一部を分割し、最内ループ のループ長のうち最大になるものを検索す る。次に、最内ループの終端を検索した最大 ループ長に変更し、ループ間の依存関係を解 消する。最大ループ長に満たないループはマ スクにより処理を行わないようにしている。 依存関係が解消したため、ループ交換を行い、 外側のループを最内側ループに移動するこ とでループ長を長く確保し、ベクトル化率を 高めた(図 14)。さらに、ベクトルプロセッサ に搭載されている ADB を有効に活用できる ように最内ループのブロック化を行う。SX-ACE は1命令で 256 要素を同時に演算でき るため、ブロック長は 256 とした(図 15)。

高速化後の性能を表 3 に示す。高速化によ りベクトル化率が12.23%から98.91%に改善し、 ベクトル長が 12.3 から 151.3 に伸びること で、サブルーチン単体で約6 倍の性能改善を 得ることができた。

V>	do np = 1, npmax iend=vox(np)
+>	do ilp = 0, iend-1
İl	
+	end do
V	end do
X	13 サブルーチンの初期コード

V>	do np = 1, npmax iend=vox(np)
İ	if(iend > maxiend) then
	end if
V>	end do do ilp = 0, maxiend-1
V>	do np = 1, npmax
	if(ilp < vox(np)) then
	alx = ax(1,mp(np)) - ax(1,np)
	:
	:
	end if
V	end do
+	end do

図 14 ベクトル化後のコード

	blksz=256
V>	do np = 1, npmax
	iend=vox(np)
	if(iend > maxiend) then
	maxiend=iend
	end if
V	end do
+>	do ilp = 0, maxiend-1
+>	do np_ = 1, npmax, blksz
V>	do np = np_, min(np_+blksz-1,npmax)
	j=np-np_+1
	iend_(j)=vox(np)
V	end do
V>	do np = np_, min(np_+blksz-1,npmax)
	j=np-np_+1
	if(ilp < iend_(j)) then
	alx = ax(1,mp(j)) - ax(1,np)
	:
	:
111	end if
V	end do
+	end do
+	end do

図 15 高速化後のコード

表3 サブルーチンの高速化効果

\geq	実行時間 [sec]	ベクトル 化率	ベクトル 長	加速率
before	1164.311	13.23	12.3	6 1 1
after	190.607	98.91	151.3	0.11



図 16 並列化性能

(2) 並列化率向上

並列化にはノード内のコア毎にプロセスを 処理するMPI並列を行うFlat MPI を用いた。 本コードの計算領域は1,901×161 の2 次 元空間で、この空間中に粒子が存在する。こ の2 次元空間中の熱や圧力等の計算後、粒子 の相互作用の計算を行う。並列化をするにあ たり、計算領域を分割し分割後の各領域に MPI のプロセスを割り当て、各領域の熱や圧 力等と存在する粒子に対して相互作用の計 算を行うように並列化を行った。

図 16 に並列化後の性能を示す。2 次元分割 を行うと計算の初期で粒子が存在しない領 域が多数存在し、プロセス間のインバランス が大きくなるため、計算領域を x 方向(1,901) での1 次元分割とする。高速化後のシングル コア実行に比較し、64 プロセス実行で約 9 倍の性能改善を得るにとどまった。実行後、 時間が経過すると、各領域に存在する粒子数 に偏りが発生し、プロセス間のインバランス により、性能向上が抑制されていると考えら える。

今後、さらなる高速化のため、多数の粒子が 存在する領域をさらに細かく分割すること や、ノード内の並列化に OpenMP を用いた Hybrid MPI などの検討が必要である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

 <u>奥野 航平</u>, <u>松尾 亜紀子</u>, 水中移動体の先端形 状が飛しょう安定性に与える影響に関する数値 解析, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 856, 2017

(2) 国際会議プロシーディングス該当なし

(3) 国際会議発表

- <u>Kei Shimura</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Numerical Investigation on the Effect of Particle Collisions in the Process of Dust Lifting, The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9), Okinawa, Japan, Oct. 27 - 30, 2017
- <u>Hiroaki Watanabe</u>, <u>Akiko Matsu</u>, Numerical investigation on the self-ignition behavior of high pressure hydrogen released from the tube, The 7th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2017), Hamburg, Germany, Sept. 11 - 13, 2017
- Ken Matsuoka, Haruna Taki, Jiro Kasahara, <u>Hiroaki Watanabe</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Takuma Endo, Study on a High-Frequency Pulse Detonation Operation, 1st International Constant Volume and Detonation Combustion Workshop, Poitiers, France, June 13 - 16, 2017
- <u>Hiroaki Watanabe</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Haruna
 Taki, Ken Matsuoka, Jiro Kasahara,
 Numerical Investigation on the Effect of
 Fuel Supply in High Frequency Pulse
 Detonation Operation, 1st International

学際大規模情報基盤共同利用·共同研究拠点 平成 29 年度共同研究 最終報告書 2018 年 5 月

Constant Volume and Detonation Combustion Workshop, Poitiers, France June 13 - 16, 2017

- Haruna Taki, Kazuyuki Takao, Naritoshi Hirota, Ken Matsuoka, Jiro Kasahara, <u>Hiroaki Watanabe</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Takuma Endo, Investigation of High-Frequency Pulse Detonation Cycle with Fuel Phase Transition, 31st International Symposium on Shock Wave, Nagoya, Japan, July 9 -14, 2017_
 - Haruna Taki, Naritoshi Hirota, Ken Matsuoka, Akira Kawasaki, Jiro Kasahara, <u>Hiroaki Watanabe</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Takuma Endo, Pulse Detonation Operation at Kilohertz Frequency, 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Boston, USA, July 30 - August 4, 2017
- <u>Kei Shimura</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Numerical Investigation of Dust Lifting Induced by Vertical Shock Wave, 31st International Symposium on Shock Wave, Nagoya, Japan, July 09 – 14, 2017
- <u>Kei Shimura</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Numerical Investigation on the Initial Development of Layered Coal Dust Combustion, 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive System, Boston, USA, July 30 - August 4, 2017
- <u>Hirotaka Kasahara</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, Numerical Investigation on the Effects of Air Dissociation upon Hypersonic Projectile in Standard Atmospheric Air, 31st International Symposium on Shock Wave, Nagoya, Japan, July 09 - 14, 2017
 <u>Hirotaka Kasahara</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, The Effect of Hypersonic Projectile Shape on Aerodynamic and Thermal Performance

Launched by Ground-based Railgun, AIAA

Scitech 2018, Florida, USA, Jan 8-12, 2018

 <u>Kohei Okuno</u>, <u>Akiko Matsuo</u>, 'The numerical analysis of the nose shape effect on the flight stability of the underwater projectile', The 3rd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows, Tokyo, Japan, June 26-29, 2017

(4) 国内会議発表

- <u>志村啓</u>,<u>松尾亜紀子</u>,CFD-DEM シミュレーショ ンによる衝撃波によって誘起される堆積炭塵 の燃焼に関する解析, 第 31 回数値流体力学シ ンポジウム,京都,2017 年 12 月
- 渡部広吾輝,松尾亜紀子,瀧春菜,松岡健, 笠原次郎,低背圧環境下で作動するパルスデ トネーション燃焼器の推力性能に関する数 値解析,第49回流体力学講演会/第35回航 空宇宙数値シミュレーション技術シンポジ ウム,東京,2017年6月
- 瀧春菜,松岡健,川崎央,笠原次郎,<u>渡部</u>
 広吾輝,松尾亜紀子,遠藤琢磨,パルスデ
 トネーション燃焼器の高周波数作動に関す
 る実験的研究,第49回流体力学講演会/第
 35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム,東京,2017年6月
 奥野航平,松尾亜紀子,水中移動体後端部が受ける水圧力による飛しょう安定性に関する数値解析,日本混相流学会 混相流シンポジウム 2017、東京、2017年8月

(5) その他(特許, プレス発表, 著書等) 該当なし