



流体工学

7.1 まえがき

流体工学は機械工学を支える基礎的な学問の一角をなし、発電、動力、輸送機器、電子・精密機器、医療、生体など多岐にわたる分野にかかわっている。ここでは、乱流、噴流、圧縮性流れ、混相流、キャビテーション、燃焼流、流体音、流体機械、自然エネルギーの利用、生体・生物流れ、流体計測・可視化を取り上げて、2015年における研究動向を示す。

乱流の節では、高レイノルズ数の乱流現象自体を解明する研究と、それから得られた知見を利用して工学的・工業的に望ましい方向に乱流を制御するための研究が紹介されている。噴流の節では、噴流の渦構造制御による混合の促進、噴流による流れの制御、および壁面噴流に関する研究が紹介されている。圧縮性流れの節では、衝撃波を伴う超音速流れ、圧縮性流れにおける流体制御、および高速鉄道列車に関連した研究などが紹介されている。混相流の節では、主な学術論文誌と国際会議における我が国の研究者による発表について紹介されている。キャビテーションの節では、気泡力学や流体機械など翼周りのキャビテーションとともに、医療分野および材料改質への応用、マイクロ・ナノスケールのキャビテーションに関する研究が紹介されている。燃焼流の節では、高速燃焼流についてDDT (Deflagration-to-Detonation Transition) とその応用としてのデトネーションエンジンに関する研究が紹介されている。流体音の節では、非定常流動現象と音響現象の数値解析と実験解析、騒音の低減化、および流体機械の音響に関する研究などが紹介されている。流体機械の節では、ポンプや水力発電などの水力機械、ならびに圧縮機や送風機などの空気機械に関する研究が紹介されている。自然エネルギーの利用の節では、海洋エネルギーを中心にして開発の動向が紹介されている。生体・生物流れの節では、衝撃波の再生医学への応用として衝撃波の力学的刺激による細胞の時間的変化、昆虫や鳥類の飛翔時の流れ場に関する研究などが紹介されている。流体計測・可視化の節では、感圧塗料 (PSP: Pressure Sensitive Paint) による圧力計測、高速流れ場の計測法として、分子をトレーサとした分子タグ流速測定法 (MTV: Molecular Tagging Velocimetry) および BOS

(Background-Oriented Schlieren) による密度測定法に関する研究が紹介されている。

[古川 雅人 九州大学]

7.2 乱流

2015年は、流体工学に関わる大きな国際会議として、ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (AJK2015-FED) が日米韓の機械学会流体工学関連部門で共同開催された [1]。この会議は34のテクニカルトラックで構成され、流体工学に関連する多岐にわたる研究成果の発表が各国研究者から行われた。テクニカルトラックの中には、「6th International Symposium on Turbulent Flows: Issues and Perspectives」や「10th Symposium on DNS, LES, and Hybrid RANS/LES Methods」といった乱流現象や乱流シミュレーション技術を直接対象とした内容のトラックも含まれており、乱流に関連する問題について活発な議論が行われたことは想像に難くない。また、AJK2015-FEDでは3件のPlenary Lecturesと3件のKey-note Lecturesが行われたが、そのうちの幾つかは乱流に深く関連するものであり、種々のアクチュエータを用いた乱流の能動制御に関する実験的研究の成果 [2]、乱流特性量の積分表現の関係式を基にした乱流制御に関する研究成果 [3]、および乱流のバイパス遷移に関する現象論と数値シミュレーションを行う際の実用的な乱流モデリングに関する研究成果 [4] の講演が含まれていた。一般セッションにおいても、流体騒音、混相流、ターボ機械の内部流れといった各種流体現象には乱流が深く関係しており、これらのセッションにおいても現象解明や流れの予測・制御において乱流の影響が重要な要素となっている。

一方で、乱流関連分野の世界的な状況を知るための一助として、代表的なジャーナルである Journal of Fluid Mechanics および Physics of Fluids の2015年に掲載された論文を見渡してみると、乱流構造やそれと密接に関係している乱流統計量の特性を詳細に議論するものが多く見られた。特に、近年報告が増えてきている比較的高レイノルズ数の壁乱流を対象としたDNS (直接数値シミュレーション) に関する研究成果は注目に値すると考えられる。例えば、チャンネル乱流では摩擦速度を基準としたレイノルズ数

で $Re\tau=5200$ の DNS が実施され [5], 円管乱流でも $Re\tau=3008$ の DNS の結果が報告されている [6]. これらの研究では, 壁面近傍領域と壁から離れた領域での渦構造のスケール分離に関する議論や, 対数速度分布におけるカルマン定数の見積りとといった, これまで主に高レイノルズ数の壁乱流に対する実験的研究から報告されてきた知見を改めて確認するとともに, 空間的・時間的に詳細なデータが得られる DNS の特性を活かして, これらの知見をより深化させることを試みている. なお, 文献 [5] の論文に記載されている WEB サイトにアクセスすれば, DNS の結果から得られた乱流統計量の数値データも入手することが可能であり, これらは乱流現象のより詳細な理解や乱流モデルの新たな展開に向けての検証データとして大いに役立つことが期待される. また, 上記以外にも高レイノルズ数乱流に対する高解像度の LES (ラージ・エディ・シミュレーション) の結果やそれらを用いた現象解明の試みも数多く報告されており, CFD (数値流体力学) を活用した乱流研究が今後も引き続き活発に展開されていくことが予想される.

以上のことからわかるように, 近年の乱流研究においては渦構造や統計量の詳細な議論に高精度の DNS から得られたデータを用いることが増えてきている. この理由としては, DNS では考察に必要なすべての物理量の空間的・時間的な分布が漏れなく得られることに加えて, 微分や積分といった処理が実験データよりも比較的容易に高精度で実施できることが考えられる. 他方, 実験的研究についても, AJK2015-FED の Plenary Lecture [2] で報告された乱流制御のような実用的なトピックを取扱った研究はもちろんのこと, 高解像度の PIV 計測のように物理量の空間的・時間的な分布を高いレベルで獲得できる手法も発展してきており, 今後も DNS とともに有益な知見を提供していくと考えられる. このように 2015 年の乱流関連研究は, 高レイノルズ数の乱流現象そのものを解明していく試みとともに, 得られた知見を利用して工学的・工業的に望ましい方向に乱流を制御するための研究が精力的に進められてきたと言える.

[安倍 賢一 九州大学]

文 献

- [1] ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (2015) <http://www.ajk2015-fed.org/> (参照日 2016 年 5 月 6 日).
- [2] Honami, S., Active Flow Control in Fluid Engineering by New Generation Actuators, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (2015), Plenary Lecture.
- [3] Fukagata, K., Flow Control Based on Some Integral Relationships, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (2015), Keynote Lecture.
- [4] Durbin, P., The Phenomena and Practical Modeling of Bypass Transition, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (2015), Keynote Lecture.

- [5] Lee, M., Moser, R.D., Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re\tau$ approximate to 5200, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 774 (2015), pp. 395–415, DOI: [10.1017/jfm.2015.268](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.268).
- [6] Ahn, J., Lee, J.H., Lee, J., Kang, J.H., Sung, H.J., Direct numerical simulation of a 30R long turbulent pipe flow at $Re\tau = 3008$, Physics of Fluids, Vol. 27 (2015), DOI: [10.1063/1.4922612](https://doi.org/10.1063/1.4922612).

7.3 噴流

噴流・後流・せん断流に関する国際会議 ICJWSF2015 [1] が開催され, 流れの機構, 工業応用の研究が多く発表された.

噴流の渦構造を能動的に励起・かく乱して混合を促進する研究として, 円形噴流ノズル出口の周囲に取付けた振動する半デルタ翼 [2], 小フラップとシンセティック・ジェットとの組合せ [3], 絞り機構による半径・周方向かく乱 [4] が調べられた. また, DBD プラズマによる長方形噴流の拡がりの制御 [5] が研究された.

噴流による流れの制御については, 隙間からの噴流による後方ステップ再循環領域の機械学習による制御 [6], 簡易自動車模型の抗力低減 [7] が研究された. また, シンセティック・ジェット (SJ) による振動翼の動的失速の抑制 [8], NACA0025 翼のはく離の再付着 [9], 平板層流境界層上の SJ とボルテックス・ジェネレータの組合せ [10], DBD プラズマによる仮想ガーニー・フラップの効果 [11] が研究された. 流れの振動励起装置としての, SJ の三次元渦構造 [12], SJ と流体素子ポンプを組合せたハイブリッド SJ の特性 [13], プラズマ SJ の解析モデル [14] が調べられた.

壁面噴流について, 下流における漸近特性 [15], 平板に平行に噴出する円形噴流 [16], 二次元オフセット噴流 [17] が研究された. また, 平行 2 噴流の物質混合 [18], 二次元噴流中の乱流・非乱流界面での物質混合・反応 [19] も詳細に研究された.

[高曾 徹 九州大学]

文 献

- [1] Segalini, A. (Ed), Proceedings of the 5th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2015) (Springer Proceedings in Physics), Springer (2016).
- [2] 三浦 健介, 伊藤 靖仁, 酒井 康彦, 岩野 耕治, 長田 孝二, 半デルタ翼形状を有するボルテックスジェネレータによる軸対称噴流の制御に関する研究 (第 1 報: 速度場の統計量による評価), 日本機械学会論文集 Vol.81, No.828 (2015), DOI: [10.1299/transjsme.15-00306](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00306).
- [3] Müller-Vahl, H., Nayeri, C.N., Paschereit, C.O., Greenblatt, D., Mixing enhancement of an axisymmetric jet using flaplets with zero mass-flux excitation, Experiments in Fluids (2015) 56:38, DOI: [10.1007/s00348-014-1889-z](https://doi.org/10.1007/s00348-014-1889-z).
- [4] Ahmed, A., Weiner, A.J., Axisymmetric Jet Subjected to Radial and Azimuthal Forcing, Journal of Propulsion and Pow-

- er, Vol.32, No.2 (2016), pp.311-324, DOI: [10.2514/1.B35690](https://doi.org/10.2514/1.B35690).
- [5] 加藤 佳久, 伊藤 宏太, 今尾 茂樹, 菊地 聡, 小里 泰章, DBD プラズマアクチュエータを用いた長方形噴流の制御, 日本機械学会論文集 Vol.81, No. 825 (2015), DOI: [10.1299/transjsme.14-00695](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00695).
- [6] Gautier, N., Aider, J.-L., Duriez, T., Noack, B.R., Segond, M., Abel, M., Closed-loop separation control using machine learning, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.770 (2015), pp.442-457, DOI: [10.1017/jfm.2015.95](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.95).
- [7] Barsotti, D.L., Divo, E.A., Boetcher, S.K.S., Optimizing Jets for Active Control of Wake Refinement for Ground Vehicles, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.137 (2015), p.121108, DOI: [10.1115/1.4030913](https://doi.org/10.1115/1.4030913).
- [8] Taylor, K., Amitay, M., Dynamic stall process on a finite span model and its control via synthetic jet actuators, *Physics of Fluids*, Vol.27, 077104 (2015), DOI: [10.1063/1.4927586](https://doi.org/10.1063/1.4927586).
- [9] Feero, M.A., Goodfellow, S.D., Lavoie, P., Sullivan, P.E., Flow Reattachment Using Synthetic Jet Actuation on a Low-Reynolds-Number Airfoil, *AIAA Journal*, Vol.53 (2015), No.7, pp.2005-2014, DOI: [10.2514/1.J053605](https://doi.org/10.2514/1.J053605).
- [10] Van Buren, T., Whalen, E., Amitay, M., Interaction between a vortex generator and a synthetic jet in a crossflow, *Physics of Fluids*, Vol.27, 107101 (2015), DOI: [10.1063/1.4932359](https://doi.org/10.1063/1.4932359).
- [11] Feng, L.H., Choi, K.S., Wang, J.J., Flow control over an airfoil using virtual Gurney flaps, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.767 (2015), pp. 595-626, DOI: [10.1017/jfm.2015.22](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.22).
- [12] 長谷川 裕晃, 宮腰 哲弥, シンセティックジェットの三次元渦構造に及ぼすオリフィス形状の影響, 日本機械学会論文集 Vol.81, No.831 (2015), DOI: [10.1299/transjsme.15-00301](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00301).
- [13] Broučková, Z., Travnicek, Z., Visualization study of hybrid synthetic jets, *Journal of Visualization*, Vol.18 (2015), pp 581-593, DOI: [10.1007/s12650-014-0256-8](https://doi.org/10.1007/s12650-014-0256-8).
- [14] Zong, H.H., Wu, Y., Li, Y.H., Song, H.M., Zhang, Z.B., Jia, M., Analytic model and frequency characteristics of plasma synthetic jet actuator, *Physics of Fluids*, Vol.27, 027105 (2015), DOI: [10.1063/1.4908071](https://doi.org/10.1063/1.4908071).
- [15] Gersten, K., The asymptotic downstream flow of plane turbulent wall jets without external stream, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.779 (2015), pp.351-370, DOI: [10.1017/jfm.2015.409](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.409).
- [16] Di Marco, A., Mancinelli, M., Camussi, R., Pressure and velocity measurements of an incompressible moderate Reynolds number jet interacting with a tangential flat plate, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.770 (2015), pp.247-272, DOI: [10.1017/jfm.2015.149](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.149).
- [17] 小川 洋平, 田村 渥, 佐野 正利, 二次元オフセット噴流の流動特性と熱伝達, 日本機械学会論文集 Vol.81, No. 825 (2015), DOI: [10.1299/transjsme.15-00066](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00066).
- [18] Soltys, M.A., Crimaldi, J.P., Joint probabilities and mixing of isolated scalars emitted from parallel jets, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.769 (2015), pp.130-153, DOI: [10.1017/jfm.2015.113](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.113).
- [19] Watanabe, T., Naito, T., Sakai, Y., Nagata, K., Ito, Y., Mixing and chemical reaction at high Schmidt number near turbulent/nonturbulent interface in planar liquid jet, *Physics of Fluids*, Vol.27, 035114 (2015), DOI: [10.1063/1.4915510](https://doi.org/10.1063/1.4915510).

7・4 圧縮性流れ

衝撃波に関する国際学会 The 30th International Symposium on Shock Waves (ISSW30) が、2015年7月にイスラエル・テルアビブにて開催された。衝撃波の反射干渉系

39件, 超/極音速流れ系29件, デトネーション・化学反応系40件, 混相流・凝縮系21件など約280件の講演発表が行われた。次回ISSW31は、2017年7月に名古屋大学にて開催の予定である。国内では、平成27年度衝撃波シンポジウムが2016年3月に熊本大学にて開催された。国内外より約140件の講演発表が行われた。

衝撃波を伴う超音速流れに関する研究は現在も多くなされておき、極超音速流中に置かれた二重傾斜壁/円錐における衝撃波と境界層の干渉現象 [1], 延長壁を持つ長方形ノズルからの不足膨張噴流 [2] などが実験的に調べられている。直線壁を持つランプノズル内の衝撃波を伴うはく離流れの非定常遷移 [3], シェブロンおよび円形ノズルからの噴流における音響特性の数値解析 [4], 衝撃波連成騒音における噴流温度の影響 [5] などが研究されている。将来の超音速輸送機やスペースプレーンのエンジンとして開発が行われているスクラムジェットエンジンに関連して、インテークの始動時の挙動に関する実験 [6], キャビティを持つ超音速ダクト内振動流れのフィードバック機構の理論解析 [7] やキャビティ内外のPIV計測 [8] などがある。超音速噴流と物体との干渉問題としては、適正膨張噴流と斜め平板の衝突より生じる音響現象 [9], 不足膨張噴流と円筒物体の衝突における衝撃波構造とその不安定性 [10] に関する研究などがある。

圧縮性流体の流体制御について、超音速流れの制御 [11], 流れ中に発生する衝撃波をコントロールするための壁面に設置するバンプ [12], 壁面における衝撃波はく離を低減するためのボルテックスジェネレーター VG [13] などに関する総説やレビューがある。マイクロVGを用いた軸対称な物体上の層流境界層の制御 [14], マイクロ噴流を用いた衝撃波と境界層の干渉の制御 [15] などが実験的に調べられ、超音速噴流に対する定常/非定常インジェクションを用いた噴流騒音制御がLESと実験 [16] により詳細に調べられている。最近ではアクチュエータを用いて流れを能動的に制御する方法が数多く開発されており、その中の誘電体バリア放電を利用したプラズマアクチュエータ PA を超音速境界層の遷移コントロールに適用した報告 [17] がなされている。

高速鉄道列車に関連して、渦発生タイプ PA を高速列車のパンタグラフから渦放出の抑制に適用した報告 [18], トンネル内を高速列車が通過するときのトンネル内の波動の伝播特性が数値解析 [19] により調べられている。また、伝播する衝撃波と物体との干渉問題として、液滴を含むガス柱と伝播衝撃波との干渉現象が数値解析と実験 [20] により詳細に検討されている。

〔青木 俊之 九州大学〕

文 献

- [1] A.B. Swantek and J.M. Austin, Flowfield Establishment in Hypervelocity Shock-Wave/Boundary-Layer Interactions,

- AIAA Journal, 53-2 (2015), 311–320, DOI: [10.2514/1.J053104](https://doi.org/10.2514/1.J053104).
- [2] Parviz Behrouzi and James J. McGuirk, Underexpanded Jet Development from a Rectangular Nozzle with Aft-Deck, AIAA Journal, 53-5 (2015), 1287–1298, DOI: [10.2514/1.J053376](https://doi.org/10.2514/1.J053376).
- [3] Y. Yu, J. Xu, K. Yu, J. Mo, Unsteady transitions of separation patterns in single expansion ramp nozzle, Shock Waves, 25 (2015), 623–633, DOI: [10.1007/s00193-015-0595-y](https://doi.org/10.1007/s00193-015-0595-y).
- [4] N.K. Depuru Mohan, A.P. Dowling, S.A. Karabasov, H. Xia, O. Graham, T.P. Hynes, and P.G. Tucker, Acoustic Sources and Far-Field Noise of Chevron and Round Jets, AIAA Journal, 53-9 (2015), 2421–2436, DOI: [10.2514/1.J052973](https://doi.org/10.2514/1.J052973).
- [5] Ching-Wen Kuo, Dennis K. McLaughlin, Philip J. Morris and K. Viswanathan, Effects of Jet Temperature on Broad-band Shock-Associated Noise, AIAA Journal, 53-6 (2015), 1515–1530, DOI: [10.2514/1.J053442](https://doi.org/10.2514/1.J053442).
- [6] Andreas K. Flock and Ali Gülhan, Experimental Investigation of the Starting Behavior of a Three-Dimensional Scramjet Intake, AIAA Journal, 53-9 (2015), 2686–2693, DOI: [10.2514/1.J053786](https://doi.org/10.2514/1.J053786).
- [7] Taro Handa, Hiroaki Miyachi, Hatsuki Kakuno, Takaya Ozaki and Shinji Maruyama, Modeling of a Feedback Mechanism in Supersonic Deep-Cavity Flows, AIAA Journal, 53-2 (2015), 420–425, DOI: [10.2514/1.J053184](https://doi.org/10.2514/1.J053184).
- [8] Steven J. Beresh, Justin L. Wagner, Brian O.M. Pruet, John F. Henfling, and Russell W. Spillers, Supersonic Flow over a Finite-Width Rectangular Cavity, AIAA Journal, 53-2 (2015), 296–310, DOI: [10.2514/1.J053097](https://doi.org/10.2514/1.J053097).
- [9] Masahito Akamine, Yuta Nakanishi, Koji Okamoto, Susumu Teramoto, Takeo Okunuki and Seiji Tsutsumi, Acoustic Phenomena from Correctly Expanded Supersonic Jet Impinging on Inclined Plate, AIAA Journal, 53-7 (2015), 2061–2067, DOI: [10.2514/1.J053953](https://doi.org/10.2514/1.J053953).
- [10] N. Mason-Smith, D. Edgington-Mitchell, N.A. Buchmann, D.R. Honnery and J. Soria, Shock structures and instabilities formed in an underexpanded jet impinging on to cylindrical sections, Shock Waves, 25 (2015), 611–622, DOI: [10.1007/s00193-015-0561-8](https://doi.org/10.1007/s00193-015-0561-8).
- [11] S.B. Verma and A. Hadjadj, Supersonic flow control, Shock Waves, 25 (2015), 443–449, DOI: [10.1007/s00193-015-0587-y](https://doi.org/10.1007/s00193-015-0587-y).
- [12] P.J.K. Bruce and S.P. Colliss, Review of research into shock control bumps, Shock Waves, 25 (2015), 451–471, DOI: [10.1007/s00193-014-0533-4](https://doi.org/10.1007/s00193-014-0533-4).
- [13] Neil Titchener and Holger Babinsky, A review of the use of vortex generators for mitigating shock-induced separation, Shock Waves, 25 (2015), 473–494, DOI: [10.1007/s00193-015-0551-x](https://doi.org/10.1007/s00193-015-0551-x).
- [14] D. Estruch-Samper, L. Vanstone, R. Hillier and B. Ganapathisubramani, Micro vortex generator control of axisymmetric high-speed laminar boundary layer separation, Shock Waves, 25 (2015), 521–533, DOI: [10.1007/s00193-014-0514-7](https://doi.org/10.1007/s00193-014-0514-7).
- [15] S.B. Verma, C. Manisankar and P. Akshara, Control of shock-wave boundary layer interaction using steady micro-jets, Shock Waves, 25 (2015), 535–543, DOI: [10.1007/s00193-014-0508-5](https://doi.org/10.1007/s00193-014-0508-5).
- [16] Haukur E. Hafsteinsson, Lars-Erik Eriksson, Niklas Andersson, Daniel R. Cuppoletti and Ephraim Gutmark, Noise Control of Supersonic Jet with Steady and Flapping Fluidic Injection, AIAA Journal, 53-11 (2015), 3251–3272, DOI: [10.2514/1.J053846](https://doi.org/10.2514/1.J053846).
- [17] M. Denison and L. Massa, Compressibility Effects on Di-
- electric Barrier Discharge Actuation and Boundary-Layer Receptivity, AIAA Journal, 53-8 (2015), 2186–2202, DOI: [10.2514/1.J053620](https://doi.org/10.2514/1.J053620).
- [18] Haruhiko GEJIMA, Ryo TAKINAMI, Koji FUKAGATA, Takeshi MITSUMOJI, Takeshi SUEKI and Mitsuru IKEDA, Suppression of vortex shedding from a pantograph head using vortex generator-type plasma actuators, Journal of Fluid Science and Technology, Bulletin of the JSME, 10-1 (2015), 1–12.
- [19] 齊藤 実俊, 飯田 雅宣, トンネル内列車通過時圧力変動の数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, 81-825 (2015), 1–12, DOI: [10.1299/transjsme.14-00689](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00689).
- [20] M. Anderson, P. Vorobief, C.R. Truman, C. Corbin, G. Kuehner, P. Wayne, J. Conroy, R. White and S. Kumar, An experimental and numerical study of shock interaction with a gas column seeded with droplets, Shock Waves, 25 (2015), 107–125, DOI: [10.1007/s00193-015-0555-6](https://doi.org/10.1007/s00193-015-0555-6).

7・5 混相流

混相流に関して 2015 年の機械学会論文集に掲載された学術論文は 3 編 [1–3]、同英文ジャーナルには 2 編 [4, 5] のみである。この数から判断すると混相流の研究は衰退かと思われそうであるが、筆者はそのようには見ておらず、むしろ関わる研究領域は拡大し盛んになっているようにさえ思える。そこで、混相流に関して我が国の研究者が発表している主な学術論文誌と国際会議論文集を調べてみた。

学術論文誌のうち国内では混相流に 15 編が、国際では International Journal of Multiphase Flow に 9 編が掲載されている。そのほかの学術誌については国内誌では少なく、国際誌では 20 編以上の論文が掲載されているようである。

国際会議では、9th Int. Symp. on Measurement Techniques (9月23日–25日, 札幌) において 44 件, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conf. (7月26日–30日, 韓国・ソウル) において 37 件, 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting (10月11日–15日, スイス・ツェルマツト) において 22 件, Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics (5月10日–15日, 米国・ウエストラファエツト) において論文 20 件, 23th Int. Conf. on Nuclear Engineering (5月17日–21日, 千葉) において 16 件, 6th Int. Symp. on Transport Phenomena (9月27日–10月1日, オーストリア・レオーベン) において 5 件, Int. Conf. on Power Engineering (11月30日–12月4日, 横浜) において 5 件が発表され、これらだけで 149 件が発表されたことになる。これら以外にも、様々な国際会議において論文が発表されているので、総数は 160 件以上と見込める。

国内会議では混相流シンポジウム 2015 (8月4日–6日 高知) の発表件数が最多であり、マイクロ・ナノバブルの科学と技術的展開 22 件, 界面の物理と流れ 20 件, 混相流れのダイナミクス 15 件, 微小重力下沸騰・二相流と宇宙システム 12 件, 混相流の産業利用 10 件, 相変化を伴う混

相流の熱流動10件, 混相噴流・後流・はく離流れの流動と制御9件, 自然現象の混相流8件, サステナブル異分野融合型混相流8件, 粒子系混相流および粒状体挙動のモデリングとシミュレーション8件, 原子力分野における混相流技術と応用6件, ミニ・マイクロスケールの混相流4件, 物質輸送と水処理3件と一般セッション9件の合計114件であった。これ以外でも, 機械学会の年次大会, 支部講演会, 部門講演会などで合計100件近くが発表されているに違いない。

上記のように国内外で多数の研究発表がなされているにも関わらず, 本機械学会の論文集と英文ジャーナルへ投稿されないのは機械学会として問題であり, 何らかの対策を講じるべきではなからうか。終わりに, 上記の会議における件数は筆者が会議に参加せずに参加者から教えてもらって書いたものもあるので, 多少の誤差はご容赦願いたい。また, ご教示いただいた方々に感謝する。

[佐田富 道雄 熊本大学]

文 献

- [1] 太田光浩, 稗田泰文, 徳井紀彦, 岩田 修一, 粘弾性特性を有する高分子溶液中を上昇する単一気泡の運動特性, 日本機械学会論文集, **81**-823 (2015), 1-11, DOI: [10.1299/transjsme.14-00612](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00612).
- [2] 角田 勝, 藤本太郎, 製紙用パルプ液の円管内流動特性, 日本機械学会論文集, **81**-823 (2015), 1-12, DOI: [10.1299/transjsme.14-00242](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00242).
- [3] 石川温士, 内藤正則, 吉田憲司, 片岡 勲, 気泡流の界面積濃度輸送に関する実験と解析, 日本機械学会論文集, **81**-831 (2015), 1-23, DOI: [10.1299/transjsme.15-00303](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00303).
- [4] Arai, T., Furuya, M., Kanai, T., Shirakawa, K. and Nishi, Y., Multi-dimensional void fraction measurement of transient boiling two-phase flow in a heated rod bundle, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal, **2**-5 (2015), 1-10, DOI: [10.1299/mej.15-00163](https://doi.org/10.1299/mej.15-00163).
- [5] Sato, K., Abe, Y., Kaneko, Y., Kanagawa, T. and Mori, M., Two-phase structure and operating characteristics of supersonic steam injector, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal, **2**-5, (2015), 1-14, DOI: [10.1299/mej.15-00004](https://doi.org/10.1299/mej.15-00004).

7・6 キャビテーション

キャビテーションは, 本現象が発見されて以来100年以上に渡る歴史を有する研究分野である。現在は, 気泡力学, 翼周りや流体機械内部のキャビテーションに代表される伝統的な対象に加え, 医療分野への応用やキャビテーションによる材料改質, マイクロ・ナノスケールのキャビテーションなど, 比較的新しい研究も進められており, 前者の伝統的な対象への継続的研究と, 後者の新たな応用または原理の発見に向けた研究が, 並行して進められている。上記をはじめとする各研究について, 2015年も継続して様々な報告が各論文誌でなされた。このうち本会の論文集では, 材料特性に注目したキャビテーション壊食の基礎研究 [1], 壊食部に対するピーニングによる疲労強度向

上 [2] や材料への水素侵入防止 [3], 高い加工能力を有するアプレシブサスペンションジェットの切断特性 [4] やキャビテーション特性を考慮した噴射ノズルの設計 [5], ロケットポンプを想定したキャビテーション不安定に対する一次元予測モデル [6], 二次キャビテーションの初生条件解明を目的とした圧力場予測の数値解析 [7] や, 表面張力を考慮した圧力ベース型数値解法の研究 [8], などが報告されている。また, 国内外の主要な論文誌では, 壁面近傍における気泡群の成長・崩壊メカニズムに関する基礎研究 [9], 医療分野で重要となる粘弾性流体中の気泡挙動 [10] や, HIFU 治療に向けたキャビテーション制御法 [11] およびモニタリング手法 [12] の検討, また流体機械で重要となる渦キャビテーションの詳細計測 [13-15] および数値解析 [16], インデューサで発生するキャビテーション不安定に及ぼす形状依存性 [17] やその抑制法 [18, 19] などの研究について, 報告がなされている。また, 他分野と同様に, 数値シミュレーションの重要性は飛躍的に増大しており, 均質媒体モデルに立脚した RANS ベースのキャビテーション解析は, 特に網羅的な実験データの取得が困難な流体機械等の研究において, 実験的に取得した情報を補う手段としての活用が国内外を問わずほぼ完全に普及したと言える。一方, 普遍的に適用が可能なキャビテーションの計算手法は未確立であり, 特にモデリングが難しいとされるキャビテーション乱流については, 既往のモデルをチューニングして比較するなどの研究が依然として主流である。ただし, キャビテーションに適用可能な DNS スキームの検討など, 萌芽的な取り組みを見せる報告 [20] もなされており, 今後の進展に期待がもたれる。

さて, 2015年12月に, キャビテーションに関する最も大きな国際会議である International Symposium on Cavitation (第9回) が, スイスのEPFLでおこなわれた。「気泡力学」のセッション数が6つと最も多く, 続いて「シート・クラウド・スーパーキャビテーション」や「流体機械」のセッション数が多かったが, これらとは別に「燃料システムのキャビテーション」に関するセッションが5つ設けられたのは, 本会議の非常に大きな特徴となった。また, 混相流の分野ではマイクロ・ナノスケール気泡の諸現象やその応用が注目されて久しいが, キャビテーションについても分子シミュレーションに代表されるミクロな解析手法を専門とする研究者の参入 [21, 22] が着実に増えてきており, 研究の裾野がさらに広がってきていることが伺えた。なお, 日本からの参加者数は, 開催国であるスイス, および中国に次いで3番目となっており, 国内グループによる本分野への持続的貢献が期待される。

[津田 伸一 九州大学]

文 献

- [1] 服部 修次, 紅谷 英祐, 阮 文祥, 須田 康晴, 竹内 遼太, 岩田 知和, ライニング鋼管用ポリエチレンとクロロプレングムの

- キャビテーション壊食, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 824, (2015), 14-00526, DOI: [10.1299/transjsme.14-00526](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00526).
- [2] 林 義一郎, 半田 充, 菅田 淳, 超音波ショットピーニングによる水車ランナベーン溶接補修部の疲労強度の向上, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 821, (2015), 14-00199, DOI: [10.1299/transjsme.14-00199](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00199).
- [3] 高桑 脩, 眞野 優太, 祖山 均, キャビテーションピーニングによるオーステナイト系ステンレス鋼への水素侵入抑制, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 821, (2015), 14-00638, DOI: [10.1299/transjsme.14-00638](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00638).
- [4] 清水 誠二, 西方 博紀, 彭 國義, 小熊 靖之, アプレシブサスペンションジェットの水中切断特性, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 831, (2015), 15-00361, DOI: [10.1299/transjsme.15-00361](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00361).
- [5] 玉木 伸茂, 西河 和麻, 直噴式ディーゼル機関用高分散微粒化ノズルの設計 (噴射ノズルの噴孔形状・寸法が噴霧特性と流量特性に及ぼす影響), 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 825, (2015), 14-00228, DOI: [10.1299/transjsme.14-00228](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00228).
- [6] 志村 隆, 川崎 聡, 内海 政春, 旋回キャビテーションの一次元マルチドメイン解析, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015) No. 825, 15-00125, DOI: [10.1299/transjsme.15-00125](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00125).
- [7] 田中 萌子, 小笠原 紀行, 高比良 裕之, 気泡界面での圧力波の後方散乱に関する数値シミュレーション, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015) No. 825, 15-00034, DOI: [10.1299/transjsme.15-00034](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00034).
- [8] Yoshimoto, T. and Ooida, J., A pressure-based method for solving low Mach number two-phase flows with surface tension, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 10, No. 1, (2015), JFST0008, DOI: [10.1299/jfst.2015jfst0008](https://doi.org/10.1299/jfst.2015jfst0008).
- [9] Tiwari, A., C. Pantano, C. and Freund, J.B., Growth-and-collapse dynamics of small bubble clusters near a wall, *J. Fluid Mech.*, Vol. 775, (2015), pp. 1–23, DOI: [10.1017/jfm.2015.287](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.287).
- [10] Hamaguchi, F. and Ando, K., Linear oscillation of gas bubbles in a viscoelastic material under ultrasound irradiation, *Phys. Fluids*, Vol. 27, (2015), 113103, DOI: [10.1063/1.4935875](https://doi.org/10.1063/1.4935875).
- [11] Goto, K., Takagi, R., Miyashita, T., Jimbo, H., Yoshizawa, S. and Umemura, S., Effect of controlled offset of focal position in cavitation-enhanced high-intensity focused ultrasound treatment, (2015), *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7, (2015), DOI: [10.7567/JJAP.54.07HF12](https://doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF12).
- [12] Iwasaki, R., Nagaoka, R., Takagi, R., Goto, K., Yoshizawa, S., Saijo Y. and Umemura, S., Effects of cavitation-enhanced heating in high-intensity focused ultrasound treatment on shear wave imaging, (2015), *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, No. 7, (2015), DOI: [10.7567/JJAP.54.07HF11](https://doi.org/10.7567/JJAP.54.07HF11).
- [13] Pennings, P.C., Bosschers, J., Westerweel, J., van Terwisga, T.J.C., Dynamics of isolated vortex cavitation, *J. Fluid Mech.*, Vol. 778, (2015), pp. 288–313, DOI: [10.1017/jfm.2015.379](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.379).
- [14] Pennings, P.C., Westerweel, J., van Terwisga, T.J.C., Flow field measurement around vortex cavitation, *Experiments in Fluids*, Vol. 56, (2015), DOI: [10.1007/s00348-015-2073-9](https://doi.org/10.1007/s00348-015-2073-9).
- [15] Tan, D., Li, Y., Wilkes, I., Vagnoni, E., Miorini, R.L. and Katz, J., Experimental Investigation of the Role of Large Scale Cavitating Vortical Structures in Performance Breakdown of an Axial Waterjet Pump, *Journal of Fluids Engineering - Trans. ASME*, Vol. 137, No. 7, (2015), 111301.
- [16] Zhang, D., Shi, L., Shi, W., Zhao, R., Wang, H., van Esch, B.P.M., Numerical analysis of unsteady tip leakage vortex cavitation cloud and unstable suction-side-perpendicular cav-
itating vortices in an axial flow pump, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 77, (2015), pp.244–259, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.006).
- [17] Pace, G., Valentini, D., Pasini, A., Torre, L., Fu, Y. and d'Agostino, L., Geometry Effects on Flow Instabilities of Different Three-Bladed Inducers, *Journal of Fluids Engineering - Trans. ASME*, Vol. 137, No. 4, (2015), 041304.
- [18] 山本 航平, 石坂 公一, 渡邊 聡, 津田 伸一, 古川 明徳, 障害板付設による3枚翼インデューサに生じるキャビテーションサージの抑制の検証, *ターボ機械*, Vol. 43, No. 7, (2015), pp. 425–432.
- [19] Tsubouchi, K., Sakaguchi, K., Toyoshima, M., Horiguchi, H., Sugiyama, K., Suppression of Cavitation Instabilities in an Inducer by Circumferential Groove with Swirl Breaker, *Proc. 13th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM13)*, (2015), AICFM13-120, pp.1–7.
- [20] Znidarcic, A., Coutier-Delgosha, O., Marquillie, M., Dular, M., An algorithm for fast DNS cavitating flows simulations using homogeneous mixture approach, *Journal of Physics: Conference Series (Proc. 9th International Symposium on Cavitation)*, Vol. 656, (2015), 012143.
- [21] Giacomello, A., Amabili, M. and Casciola, C.M., How to control bubble nucleation from superhydrophobic surfaces, *Journal of Physics: Conference Series (Proc. 9th International Symposium on Cavitation)*, Vol. 656 (2015), 012124.
- [22] Suh, D., Nakamura, M. and Yasuoka, K., Heterogeneous nucleation of bubbles by molecular dynamics, *Journal of Physics: Conference Series (Proc. 9th International Symposium on Cavitation)*, Vol. 656 (2015), 012037.

7・7 燃焼流

流体と燃焼が相互に関連する研究は幅広いが、2015年度における燃焼流のなかでも特に高速燃焼流について述べる。高速燃焼流に関する最新の研究動向については、国内では日本航空宇宙学会の流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム、燃焼学会の燃焼シンポジウム、衝撃波研究会の衝撃波シンポジウムなどで把握できる。国外では、2015年8月にイギリスのリーズで開催されたICDERS (International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems) や2016年1月にサンディエゴにて開催されたAIAA Science and Technology Forum and Exposition 2016などで把握できる。

ICDERSでは口頭発表が211件、ポスター発表が63件あった。研究動向として、DDT (Deflagration-to-Detonation Transition) や応用としてのデトネーションエンジンに関する研究成果が活発に発表された。DDTの数値計算に関して、デトネーションへの遷移と火炎伝播速度に対して、格子解像度の依存性が非常に強いことが分かっている。そのため、火炎厚さを適切にコントロールすることにより、格子解像度の依存性を減らす手法 (ATF: Artificial Thickening Model) が注目を浴びていた [1]。

一方、AIAA SciTech 2016ではデトネーションエンジンの発表のみでも31件あり、実用化に向けて、特にアメリカで研究が継続的に進めている印象があった。デトネー

ションを航空宇宙用エンジンに応用したものとして、近年は回転デトネーションエンジン (Rotating Detonation Engine, RDE) が盛んに研究されているが、実験では安全性の問題から燃料と酸化剤は別々に燃焼器に噴射する機構となっている。CFD の検証データとして提供することを目的として、RDE の噴射器から噴射する気体をエチレン/空気予混合気として実験を行うことに成功したとの報告があった [2]。

[坪井 伸幸 九州工業大学]

文 献

[1] Yu, S. and Navarro-Martinez, S., Large Eddy Simulation of deflagration to detonation transition using artificial thickening, No. 169, 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (2015), Paper No. 169.
 [2] Andrus, I.Q., King, P.I., Polanka, M.D., Schauer, F.R., and Hoke, J.L., Experimentation of a premixed rotating detonation engine utilizing a variable slot feed plenum, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting (2016), AIAA paper 2016-1404.

7・8 流体音

流れに起因する流体音については、発生源となる流れ、発生した音の性質、音の低減に関してさまざまな分野で研究が進められている。2015年に開催された機械学会の講演会では、全国大会や流体工学部門講演会、環境工学シンポジウムにおいて流体音関係の発表が流体関連のうち4~7%見られる。そのほか、音響学会やターボ機械などの学協会においても流体音関係の発表がある。国際会議においては、internoise2015やICSV22、FAN2015などの国際会議において流体音の発表が見られる。Internoise2015では700近くの講演のうち、流体音に関するものは10%程度である。ICSV22 (The 22nd International Congress on Sound and Vibration) では1000近くの講演のうち30%程度が流体音関係である。

発表内容は、非定常流れの現象に関するシミュレーション、実験による解析を組み合わせたものが多くなってきている。翼や管路内などの流体の基本的な構成要素からの境界層騒音の研究 [1]、また車や鉄道・航空機などの複雑化した対象についてのものがある。自動車に関しては、ドアミラーやピラー等の騒音の発生について、実験とシミュレーションが進められた [2]。航空機の騒音に関しては、モデル解析に基づくもの [3] やシミュレーションによる音源解析、実験と組み合わせた解析などがある [4]。発生音の伝播に関しては、音源の特性を把握することも含めて、近距離音場の性質に関する研究が増えており、マイクロフォンアレイによる音源解析や移動音源の探査がある [3, 5]。騒音の低減化に関するものでは、アクティブ制御技術による乱流騒音の低減や、マフラー等の消音装置に微細孔

を持つ壁の効果を利用したもの [6, 7]、キャビティ音の制御 [8] などについて解析と実験の両面から進められている。流体音に関するシミュレーションは、RANSやuRANSによる流れ解析にLighthillの音響アナロジーを適応して音場解析を行うことが一般化されてきている [9]。一方で、LESや音響解析で注目されてきている格子ボルツマン法 (LBM) による騒音予測も盛んに行われている [10, 11]。

流体機械の音響に関する研究も、活発に行なわれている。FAN2015 (International Conference on Fan Noise, Technology, and Numerical Methods) では全体の60%以上が騒音関係の発表である。軸流ファンでは、ダクトを有するもののほかに、オープンタイプあるいは半オープンタイプで音源と放射音の関係が比較的理解しやすいものが多い。実験による音源探査 [12] やLESによるシミュレーションとFWHを基にした音の伝播特性を組み合わせた騒音予測 [13]、翼面流れと騒音の周波数特性の関係をLESで解析したもの [14]。格子ボルツマン法による騒音予測 [15] などがある。遠心ファンやクロスフローファン、車搭載型HVACでは、システム全体の騒音に関するもの、ファンの部分要素に関するものなどがある。騒音の予測 [16] や伝播を含めたシステムの騒音評価 [17, 18] などの研究がある。流体機械の騒音の低減のための各要素の改良も、LBMやLES等を用いたシミュレーションや理論により進められている [19, 20]。風車騒音に関しては、複数の風車により騒音が住民へ及ぼす影響についての解析などがある [21, 22]。

[林 秀千人 長崎大学]

文 献

[1] Seung Tae Hwang, Young J. Moon, Turbulent boundary layer noise in pipe flow, AJK2015—FED, AJKFluids2015-12603, 1004-1005 (2015.7).
 [2] Simon Watkins, In-cabin car wind noise: predictions from external pressure fluctuations, ICSV22, 665, 1-8 (2015.7).
 [3] Philip Nelson and Keith Holland, Aeroacoustic source characterization using inverse methods, ICSV22, 1129, 1-7 (2015.7).
 [4] Ingrid LeGriffon, Aircraft noise modelling and assessment in the IESTA program with focus on engine noise, ICSV22, 249, 1-8 (2015.7).
 [5] Tabuchi Satoshi, Yamaguchi Zenzo, Kinoshita Shinichi, Sound source reconstruction techniques for jet noise by inverse acoustic analysis, ICSV22, 1060, 1-8 (2015.7).
 [6] Cédric Maury, Teresa Bravo, Cédric Pinhède, Micro-perforated silencers for ducted systems: optimization study in linear and non-linear regimes, ICSV22, 151, 1-8 (2015.7).
 [7] 栗原, 天野, 藤, 佐々木, 石井, 長井, 大石, 吸音パネル形状のジェットエンジンファン騒音の吸音性能に与える効果, 機械学会 2015 年次大会, J1050106, 1-5 (2015.9).
 [8] 安達, 横山, 飯田, 大規模構造渦の制御がキャビティ音の抑制に及ぼす役割, 機械学会 2015 年次大会, J1050102, 1-5 (2015.9).
 [9] Matthias Tautz, Stefan Becker, Kerstin Besserer, Numerical

- scheme for acoustic source term calculation in Lighthills analogy, ICSV22, 1223, 1-8 (2015.7).
- [10] Danilo Di Stefano, Aldo Rona, Edward Hall, Guillaume Puigt, Implementing the FLOWCS WILLIAMS and HAWKINGS acoustic analogy in antares, ICSV22, 1325, 1-8 (2015.7).
- [11] Damiano Casalino and Andreas Hazir, Computation of dual-stream unsteady jet flows and noise, ICSV22, 881, 1-8 (2015.7).
- [12] Gert HEROLD, Ennes SARRADJ, Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans, FAN2015, B1, 1-9 (2015.4).
- [13] Sergei G. CHUMAKOV, Yoon Shik SHIN, Guillaume A. BRÈS, Frank E. HAM, Joseph W. NICHOLS, Noise prediction from low-mach number axial fan with LES and BEM, FAN2015, D1, 1-11 (2015.4).
- [14] Manuel HENNER, François FRANQUELIN, Bruno DEMORY, Youssef BEDDADI, Charles ROLAND, Aurélien SER-RAN, Hump-shaped broadband noise on a fan at off-design conditions, FAN2015, D2, 1-10 (2015.4).
- [15] Kazuya KUSANO, Kazutoyo YAMADA, Masato FURUKAWA, Numerical analysis of unsteady three-dimensional flow in a propeller fan using multi-scale lattice Boltzmann method, FAN2015, F1, 1-10 (2015.4).
- [16] Taku IWASE, Daiwa SATO, Hideshi OBARA, Hiroyasu YONEYAMA, Prediction of aerodynamic noise for centrifugal fan of air-conditioner, FAN2015, C1, 1-12 (2015.4).
- [17] Maxime LEGROS, Jean Michel VILLE, Solène MOREAU, Xavier CARNIEL, Acoustic synthesis of an automotive HVAC, FAN2015, A1, 1-12 (2015.4).
- [18] 郭陽, 加藤, 山出, 太田, 岩瀬, 高山, 遠心送風機の内部流れからの音の計算, 機械学会 2015 年次大会, J1050205, 1-5 (2015.9).
- [19] Romain PAIN, Vincent LE GOFF, Franck PEROT, Andrea SHESTOPALOV, Amanda LEARNED BOUCHER, Min-Suk KIM, Xavier CARNIEL, Yvon GOTH, Numerical optimization of the tonal noise of a backward centrifugal fan using a flow obstruction part II: flow obstruction optimization, FAN2015, F1, 1-13 (2015.4).
- [20] Tao ZHU, Thomas H. CAROLUS, Experimental and numerical investigation of tip clearance noise of an axial fan using a lattice Boltzmann method, FAN2015, A3, 1-11 (2015.4).
- [21] Gaetano Licitra, Paolo Gallo, Diego Palazzuoli, Sensitivity analysis of modelling parameters in wind turbine noise assessment procedure, ICSV22, 1220, 1-8 (2015.7).
- [22] Ramani Ramakrishnan, Vipul Seharwat, Evaluation of sound propagation from wind farms, ICSV22, 296, 1-8 (2015.7).

Conference on Fluid Machinery (AICFM13) が 9 月に早稲田大学で、関連する国際会議として 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015) が 12 月に EPFL (スイス連邦工科大学ローザンヌ校) で開催されており、それぞれにおいて水力機械に関する数多くの報告がなされている。また、最近では中国の研究機関・組織が主催する国際会議が急増しており、10 月に 7th International Conference on Pumps and Fans (ICPF2015) が杭州で開催された。なお、ICPF では欧米および日中韓から数多くの招待講演が行われるのが通例であり、ICPF2015 では 2.5 日間で全 11 件の招待講演がなされている。

以上の国際会議の講演内容および国内外の主要な雑誌論文から水力機械の研究状況を概観すると、まずポンプに関する研究としては、CFD をベースにした流体設計 [1] や最適化設計を実施した報告 [2] に加えて、部分流量時の不安定流動やキャビテーションによる非正常現象 [3] に関する報告が非常に多く、この辺りは例年の傾向とあまり変わらない。一方で、多段ポンプ軸系に作用する非正常流体力 [4] や振れ回り運動時のインデューサに作用するローターダイナミック流体力の計測 [5]、バランスピストンやバランスドラムの動特性に関する研究 [6, 7] など、機器全体の信頼性に寄与する研究も数多く行われている。また、大規模数値流体解析の機器設計への適用を視野に、国内ではターボ機械 HPC (High Performance Computing) プロジェクト [8] が各流体機器を対象に実施されたが、ときを同じくして埋込み境界法 (IBM) を用いた斜流ポンプの 5 億節点数規模の LES 解析 [9] や、格子ボルツマン法によるポンプ吸込み水槽の解析 [10] が実施されるなど、国外においても HPC の積極的利用に向けた取り組みが進められているようである。

一方、水車および水力発電の分野では、国内では通常の大規模水力の開発はほとんど見込めないものの、多くの水力発電所で機器の置き換えのタイミングを迎えていることから、リノベーションに向けた研究開発が行われ、実施例が報告されている [11]。また、再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT 制度) [12] の後押しにより中小水力の新規開発が好調であり、それに関連してシュラウドレスフランシスランナの開発 [13] がなされ、「中小水力発電所向け低コスト、高効率シュラウドレスフランシス水車の開発」がターボ機械協会の技術賞を受賞している。さらに、大学等研究機関では、河川や用水路などの超低落差水力の有効利用 [14, 15] を目指した研究が多いのが我が国の特徴であろう。一方、欧州では、風力等の再生可能エネルギーの系統電力への大量導入を視野に入れ、揚水発電所を、不規則に変動する再生可能エネルギーによる電力供給と消費者側の需要のバランス、すなわち系統電力の安定化に迅速に対応可能な、大規模なエネルギーストレージとして活用するための取り組みが各所で行われている。EPFL が主催するコンソーシアム HYPERBOLE [16] では、

7・9 流体機械

7・9・1 水力機械

2015 年は、水力機械に関連する国際会議として、AJK2015 (ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015) の中で、毎年開催の 27th Symposium on Fluid Machinery, 16th Symposium on Turbomachinery Flow Predictions and Optimization に加えて、4 年毎開催の 8th International Symposium on Pumping Machinery (PMS8) が行われ、水力機械の研究開発に関して非常に多くの講演がなされた。加えて、13th Asian International

ALSTOM (現 GE Renewable Energy), ANDRITZ, VOITH の 3 大水車メーカーと 5 つの研究機関を含む 10 機関が参画しており、モデルを用いた模型試験、現象解析のみならず、実プラントを用いた大規模な実験が計画されている。揚水発電による大規模なエネルギーストレージの実現のためには、これまでにない低部分負荷 (30%以下) から高負荷 (110%) に至るまでの広い運転範囲ならびに負荷の急変に対応する過渡条件下での安定運転が求められるため、フランス水車のドラフトチューブのボルテックスローブによる圧力脈動に関する研究が例年以上に活発に行われるとともに (例えば [17]), キャビテーションの予測 [18] やキャビテーション発生下の水車の動特性に関する研究 [19], CFD と有限要素解析の One-way 連成によるフランス水車ランナの寿命予測 [20] など、高度な実験・解析技術に基づいた現象解明、モデリング、予測ツール開発が行われている。

[渡邊 聡 九州大学]

文 献

- [1] Cooper, P., Schiavello, B., Hosangadi, A. and McGuire, J.T., CFD-aided hydraulic development of a steam generator feed pump, ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference (2015), DOI: [10.1115/AJKFluids2015-33419](https://doi.org/10.1115/AJKFluids2015-33419).
- [2] van der Schoot, M. and Visser, F., Efficiency upgrade of a double-case pump using CFD-based design optimization and scaled model tests, ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference (2015), DOI: [10.1115/AJKFluids2015-33379](https://doi.org/10.1115/AJKFluids2015-33379).
- [3] Tan, D., Li, Y., Wilkes, I., Vagnoni, E., Miorini, R.L. and Katz, J., Experimental investigation of the role of large scale cavitating vortical structures in performance breakdown of an axial waterjet pump, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.137, No.11 (2015), Paper No: FE-15-1005, DOI: [10.1115/1.4030614](https://doi.org/10.1115/1.4030614).
- [4] Yamashita, T., Watanabe, S., Hara, Y., Watanabe, H. and Miyagawa, K., Measurements of axial and radial thrust forces working on a three-stages centrifugal pump rotor, ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference (2015), DOI: [10.1115/AJKFluids2015-33515](https://doi.org/10.1115/AJKFluids2015-33515).
- [5] Valentini, D., Pace, G., Torre, L., Pasini, A. and d'Agostino, L., Influences of the operating conditions on the rotordynamic forces acting on a three-bladed inducer under forced whirl motion, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.137, No.7 (2015), Paper No: FE-14-1160, DOI: [10.1115/1.4029887](https://doi.org/10.1115/1.4029887).
- [6] 平木博道, 内海政春, バランスピストン機構の軸方向固有値に関する理論的研究, ターボ機械, 第 43 巻 6 号 (2015), pp.358-366.
- [7] Untaroiu, A., Morgan, N., Hayrapetian, V. and Schiavello, B., Dynamic response analysis of balance drum labyrinth seal groove geometries optimized for minimum leakage, ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference (2015), DOI: [10.1115/AJKFluids2015-33423](https://doi.org/10.1115/AJKFluids2015-33423).
- [8] ターボ機械協会, 特集: ターボ機械 HPC プロジェクト~ その概要と得られた成果~, ターボ機械, 第 43 巻 8 号 (2015), pp.520.
- [9] Posa, A., Lippolis, A. and Balaras, E., Large-eddy simulation of a mixed-flow pump at off-design conditions, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.137, No.10 (2015), Paper No: FE-14-1593, DOI: [10.1115/1.4030489](https://doi.org/10.1115/1.4030489).
- [10] Schneider, A., Conrad, D. and Böhle, M., Lattice Boltzmann simulation of the flow field in pump intakes - a new approach, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.137, No.3 (2015), Paper No: FE-13-1549, DOI: [10.1115/1.4028777](https://doi.org/10.1115/1.4028777).
- [11] ターボ機械協会, 特集: 我が国の水力 III, ターボ機械, 第 44 巻 3 号 (2016), pp.129.
- [12] なっとく! 再生可能エネルギー, 経済産業省資源エネルギー庁 http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/ (参照日 2016 年 5 月 10 日).
- [13] Nakamura, Y., Shima, R., Komatsu, H., Shiratori, S. and Miyagawa, K., Development of shroudless Francis turbine, ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference (2015), DOI: [10.1115/AJKFluids2015-02352](https://doi.org/10.1115/AJKFluids2015-02352).
- [14] Katayama, Y., Uio, S., Veerapun S. and Uchiyama T., Investigation of blade angle of an open cross-flow runner, International Journal of Turbo and Jet-Engines, Vol. 32, No. 1 (2015), pp. 65-72, DOI: [10.1515/tjj-2015-0005](https://doi.org/10.1515/tjj-2015-0005).
- [15] 松下大介, 古川明德, 渡邊 聡, 堰止め式ダリウス形水車の開水路への設置と流量変動に伴う運転に関する一考察, ターボ機械, 第 43 巻 12 号 (2015), pp.721-729.
- [16] Hydropower plants PERFORMANCE and flexiBLE Operation towards Lean integration of new renewable Energies (HYPERBOLE), ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (EPFL) <https://hyperbole.epfl.ch/SitePages/Home.aspx> (参照日 2016 年 5 月 10 日).
- [17] Favrel A., Müller, A., Landry, C. Yamamoto, K. and Avellan, F., Study of the vortex-induced pressure excitation source in a Francis turbine draft tube by particle image velocimetry, Experiments in Fluids, Vol. 56 (2015), DOI: [10.1007/s00348-015-2085-5](https://doi.org/10.1007/s00348-015-2085-5).
- [18] Wack, J. and Riedelbauch, S., Numerical simulations of the cavitation phenomena in a Francis turbine at deep part load conditions, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 656, 012074, 9th International Symposium on Cavitation - CAV2015 (2015), DOI: [10.1088/1742-6596/656/1/012074](https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012074).
- [19] 山本啓太, Müller, A., 芦田拓也, 米澤宏一, Avellan, F., 辻本良信, 水車の伝達マトリックスの計測, ターボ機械, 第 43 巻 4 号 (2015), pp.205-214.
- [20] Doujak, E. and Eichhorn, M., A Method to Evaluate the Lifetime of a High Head Francis Runner, 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC16) (2016), F16.

7・9・2 空気機械

空気機械に関する研究は、京コンピュータに代表される大規模数値解析 [1] や、多数の形状探索を数値計算のみで行う多目的最適化 [2] などが実設計に応用されるなど、ますます計算負荷が高くなってきている。

大規模数値解析として、サージや旋回失速などの非定常不安定流動を解明するために、実機軸流圧縮機全周 7 段の非定常解析を 20 億セルの計算格子により詳細に理解したもの [3] が発表され、従来の RANS 解析では明らかにできなかった非定常現象が、DES および LES 解析により明らかにされつつある。空気機械で DNS 解析は未だ実用的ではないとしても、DES および LES の利用率が高くなってきていることに注目 [4] されたい。遠心圧縮機において

も、サージ初生を実験と大規模数値解析 [5] により求められ、ディフューザ失速を生じてサージへと至るメカニズムが明確になりつつある。ターボチャージャーに用いられる遠心圧縮機でも、羽根なしディフューザにおける失速が問題となっており、油膜法や PIV を用いた計測 [6] が試みられている。掃除機用の遠心ブロワでは、透明なシユラウドケーシングおよびディフューザ翼により PIV 計測を可能とし [7]、インペラーおよびディフューザの相互干渉は、非定常数値解析 [8] および実験により明らかになりつつある。従来は CFD でしか流れ場を予測できなかった狭い流れ場においても、PIV 計測ができるようになり、羽根先端漏れ渦の非定常挙動までもが PIV 計測 [9] により明らかになりつつある。そのほか、ターボ機械における内部流れ計測をまとめた報告 [10] を参照されたい。さらに、DBD プラズマアクチュエータによる羽根先端漏れ流れの改善効果について、PIV によるバースト駆動効果検証 [11] および実機軸流圧縮機を用いた失速抑制成果 [12] が報告され、能動的制御による失速抑制が目される。大規模数値解析を用いた騒音の解析においては、遠心送風機やファンを対象とした報告 [13] が行われ、広帯域騒音の定量的予測が数値計算により可能になりつつある。

多目的最適化分野では、空気機械の設計を遺伝的アルゴリズムにより全方位探索を行うことが実用化されており、蒸気タービンやガスタービン [14]、圧縮機、送風機 [15] や風車 [16] の設計例が報告されている。最適化設計法は、空力的最適化と材料力学的最適化を組み合わせた複合領域（学際的）最適化、設計点および非設計点での多点同時効率改善のための設計ツールとしての利用が期待される。また、設計点効率と騒音を目的関数としてプロペラファンを最適化した事例 [17] が報告され、深野理論 [18] でモデル化されたように、騒音に対して感度の高い相対速度や後流幅の流動改善形状を探索することにより実設計における最適設計を可能としている。今後、随伴方程式を解くことにより多目的最適化を効率的に行うことができるようになると考えられ、軸流圧縮機羽根車設計への応用 [19] など注目される。

[坂口 大作 長崎大学]

文 献

- [1] ターボ機械, 特集: ターボ機械 HPC プロジェクト~その概要と得られた成果~, ターボ機械, 第 43 巻 9 号 (2015) 520-573.
- [2] ターボ機械, 特集: ターボ機械の最適化設計, ターボ機械, 第 43 巻 10 号 (2015) 579-642.
- [3] Yamada, K., Furukawa, M., Nakakido, S., Matsuoka, A. and Nakayama, K., A Study on Unsteady Flow Phenomena at Near-Stall in a Multi-Stage Axial Flow Compressor by Large-Scale DES with K Computer, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo, Paper No.85 (2015) 1263-1270.
- [4] 船崎健一, タービンの CFD 解析, ガスタービン学会誌,

Vol.43, No.6 (2015) 402-408.

- [5] 古川雅人, 遠心圧縮機サージ予測, ターボ機械第 43 巻 9 号 (2015) 521-527.
- [6] 玉木秀明, 過給機用遠心圧縮機羽根無しディフューザ内部流れ計測, ターボ機械第 43 巻 11 号 (2015) 680-685.
- [7] 本多武史, 遠心ブロワの内部流動計測と研究開発事例, ターボ機械第 43 巻 11 号 (2015) 661-667.
- [8] 藤澤信道, 原昇太郎, 太田有, 羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機に発生する失速と前縁渦の関係, 日本機械学会論文 集, Vol.51, No.829 (2015) 16 pages, DOI: [10.1299/transjsme.15-00194](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00194).
- [9] David, Tan., Yuanchao, Li., Ian, Wilkes., Rinaldo L., Miorini. and Joseph Katz., Visualization and Time-Resolved Particle Image Velocimetry Measurements of the Flow in the Tip Region of a Subsonic Compressor Rotor, Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery, 137 (4) (2015) 041007-1-041007-11.
- [10] 速水洋, ターボ機械内部流れ計測の今昔, ターボ機械, 第 43 巻 11 号 (2015) 645-650.
- [11] 大塚駿, 佐野正利, 野木優佑, 本阿弥真治, バースト駆動を用いたプラズマアクチュエータによる後向きステップ流れの制御, 日本機械学会論文 集, Vol.82, No.845 (2016) 16 pages, DOI: [10.1299/transjsme.15-00628](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00628).
- [12] Farzad, Asharafi., Mathias, Michaud., Fuu Duc Vo., Delay of Rotating Stall in Compressor Using Plasma Actuators, Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery 138 (9) (2016) 091009-1-091009-12.
- [13] 岩瀬拓, ファン性能と騒音の予測, ターボ機械, 第 43 巻 9 号 (2015) 537-543.
- [14] 妹尾茂樹, 大山宏治, 蒸気タービン・ガスタービンにおける設計最適化, ターボ機械, 第 43 巻 10 号 (2015) 618-626.
- [15] Min, Thaw, Tun., Daisaku, Sakaguchi., Optimization and Validation of Secondary Flow Effect for Flow Range Enhancement in a Low Solidity Circular Cascade Diffuser, Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015AJKFluids2015-02174 (2015) 42-51.
- [16] 吉田茂雄, 風力発電における最適化と課題, ターボ機械, 第 43 巻 10 号 (2015) 634-642.
- [17] 岩瀬拓, 岸谷哲志, 効率と騒音を目的関数とした数値最適化手法による空調機用半開放形プロペラファンの開発, ターボ機械, 第 43 巻 6 号 (2015) 325-335.
- [18] 深野徹, 児玉好雄, 低圧の軸流および斜流送風機騒音の音圧レベルの予測, 日本機械学会論文 集 B 編, 51 巻 466 号 (1985) 1825-1832, DOI: [10.1299/kikaib.51.1825](https://doi.org/10.1299/kikaib.51.1825).
- [19] Benjamin, Walther., Siva, Nadarajah., Optimum Shape Design for Multirow Turbomachinery Configurations Using a Discrete Adjoint Approach and an Efficient Radial Basis Function Deformation Scheme for Complex Multiblock Grids, Transaction of the ASME, Journal of Turbomachinery 137 (8) (2015) 081006-1-081006-20.

7・10 自然エネルギーの利用

自然エネルギー [1] には太陽光発電, 風力発電, バイオマスエネルギー, 太陽熱発電・太陽熱利用, 海洋エネルギー, 地熱発電・地中熱利用, 中小水力発電が挙げられる。1970 代の二度にわたる石油危機を契機に自然エネルギーへの関心が高まりを見せ、その後、地球温暖化、環境問題も相まって、普及の推進が成されてきている。

7・10・1 太陽光発電

太陽光発電とは半導体の一種で、光エネルギーを直接電気(直流)に変える太陽電池を用いた発電である。この発電システムは太陽電池と、その電気を直流から交流に変えるインバータなどで構成されている。

7・10・2 風力発電

風力発電は「風」の力で風車を回転させ、発電機を駆動して発電する方式で、水平軸型と垂直軸型がある。最近では、陸上における適地の減少や洋上の安定した風況などを理由に、大規模な洋上windファームの建設が成されている。これに伴い、風車も大型化し、福島沖の実証プロジェクトでは直径167 m, 7 MWの風車が設置されるに至っている。

7・10・3 バイオマスエネルギー

バイオマスエネルギーは石油や石炭などの化石資源と対比し、地球規模で見てCO₂ バランスを壊さない持続性のあるエネルギーである。単に燃やすだけの熱利用から、メタンやメタノールなどの化学的精製による自動車用燃料としての活用や発電へと利用分野が広がっている。

7・10・4 太陽熱発電・太陽熱利用

米国やスペイン等では、太陽光を反射板等によって集光することで高温集熱し、得られた高温蒸気によりタービンを回転させ発電する太陽熱発電のプラントも建設されているが、日本ではより身近な給湯や冷暖房に利用できる太陽集熱器の開発が進んでいる。

7・10・5 海洋エネルギー

海洋エネルギーを利用した発電方式には、波力発電、潮流・潮汐・海流発電、海洋温度差発電がある。

(1) 波力発電

波力発電は波のエネルギーを利用して発電するシステムである。発電方式は、波の上下動を水面に設置した空気室で往復空気流に変換し、空気タービンを回転させる「振動水柱型」、可動物体の運動を油圧に変換して発電する「可動物体型」、波を貯水池等に越波させて貯留し、水面と海面との落差を利用して水車を駆動し発電する「越波型」の3種類に区分される。

(2) 潮流発電・潮汐発電・海流発電

潮流発電は潮流の運動エネルギーにより、水車を回転させて発電する方式である。潮流は月と太陽の引力で生じる周期的な変動である潮汐によって起こり、潮の干満による規則的な流れである。流速は地形の影響を受け、海峡や水道等流路幅が狭い地点では速くなる。海流発電は海流を利用した発電方式で、原理的には潮流発電と類似である。なお、潮の干満差の位置エネルギーを使った発電は「潮汐発

電」と定義され、潮流発電とは区別される。潮汐発電は潮汐に伴う潮位差によりタービンを駆動して発電する方式で、水車は低落差の水力発電と類似である。

(3) 海洋温度差発電

海洋温度差発電(OTEC)は、海面付近の温かい海水(表層水)と深海の冷たい海水(深層水)との温度差を利用する発電技術である。深層600~1000 mに存在する1~7℃程度の深層水を取水し、表層との低温度差でアンモニアなどの作動流体を蒸発、凝縮させてタービンを駆動し、発電する方式である。

7・10・6 地熱発電・地中熱利用

地熱発電はマグマ溜まりの熱により加熱された熱水が溜まる地熱貯留層まで井戸を掘り、熱水や蒸気を汲み出して利用する発電方式で、天候に左右されることなく安定した電力供給が可能である。

地中熱は地熱と比べると低温熱エネルギーであるが、地中の温度が土壌の断熱機能により大気との温度変化による影響を受けにくく、一年を通してほぼ一定であることを生かし、古くから食品や氷の保存に地中熱が利用されてきた。2012年に開業した東京スカイツリーでは国内初となる地中熱利用による「地域冷暖房システム」が採用されている。

7・10・7 中小水力発電

中小水力発電は、水の力を利用して発電する水力発電の中でも中小規模のものである。水の利用面に着目した分類では、流れ込み式、調整池式、貯水池式および揚水式の4種類の方式となる。中小水力発電としての明確な定義はなく、1万kWから5万kWの間で中小水力と大規模水力の境界が設定されることが多い。

[鈴木 正己 琉球大学]

文 献

[1] NEDO 再生可能エネルギー技術白書第2版, 新エネルギー・産業開発機構編 (2013-12).

7・11 生体・生物流れ

7・11・1 生体流れ・医療応用 —衝撃波の再生医療工学への応用—

近年、流体工学の生体流れ・医療応用で主流となっているのが、循環器流れを中心とした分散性流体やレオロジー的特性を含む血液流れの解析や人工臓器開発にともなう流れ解析などであるが、一方、圧縮性流れの1つである衝撃波の医療応用も盛んに行われている。この衝撃波技術は、医療の分野において実用化されている収束衝撃波結石破碎治療をはじめとして、骨形成、血栓治療、ドラッグデリバリシステム [1] などさまざまな応用研究がなされている。

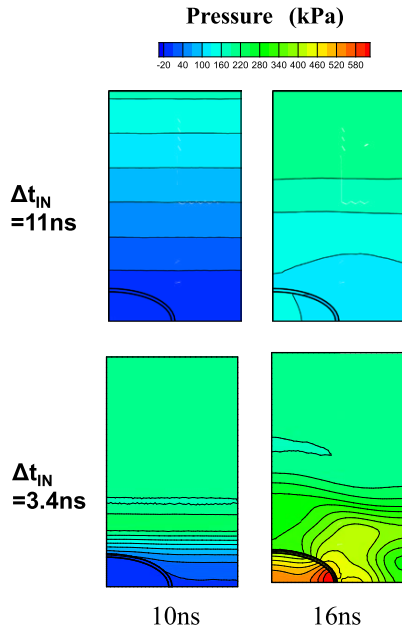


図1 立ち上がり時間 Δt_{IN} の違いによる圧力・応力分布への影響

その中でも、心臓の冠状血管を対象として、体外集束衝撃波発生装置の照射部付近の血管網が増殖するという報告 [2] が注目され、衝撃波技術の再生医工学としての応用が期待されている。

これまでの研究により、無隔膜式衝撃波管によって平面衝撃波を生成し、培養したブタの血管内皮細胞に作用させ、作用後の細胞の時間的な変化を調べることで、細胞数の増加割合および増殖因子である細胞内遺伝子量が衝撃波の作用（力学的刺激）によって増加していることが示されている [3]。また、衝撃波管内の駆動気体を変更し衝撃波（圧力）の立ち上がり時間を短くすることで、増殖率が上がっていることが示されている。すなわち、立ち上がり周波数の影響があることが、衝撃波を増殖に用いる場合の特筆すべき点である。この点を明らかにするため、壁面に接着する培養細胞に衝撃波を作用させる過程を、数値計算上で個体・流体の連成解析を行い、衝撃波立ち上げ時間による細胞内伝播応力波への影響を調べた（図1）。図は最大200 kPaの水中衝撃波の立ち上がり時間を3.4, 11 nsと変化させて下部にある細胞膜と内部からなる細胞に作用させたときのモデルに作用させたとき計算結果例であり、立ち上がり時間による瞬間的な圧力・応力分布の違いを示している。この結果から、立ち上がり時間が短い方がその後の応力履歴の振動の周波数・振幅ともに大きくなることがわかった [3, 4]。したがって、立ち上がりが短い水中衝撃波の生成によって、より大きな刺激が細胞へ与えられることが予測される。また、これらの刺激の技術応用については、圧電素子、爆薬、レーザーなどの衝撃波の発生源によっても圧力波形が異なるため、これらの圧力波形と細胞刺激についても研究の発展が期待できる。

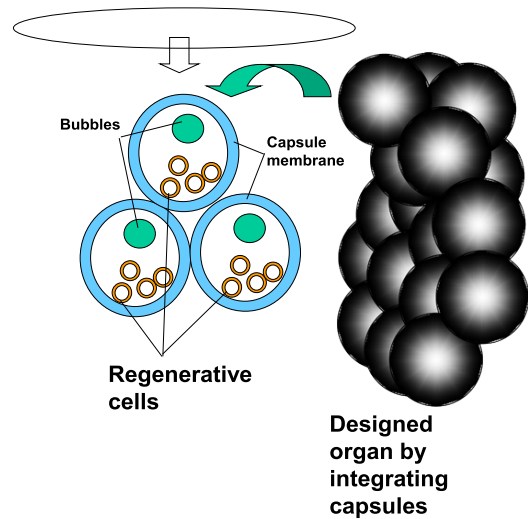


図2 衝撃波による細胞培養促進用気泡・細胞内包マイクロカプセル [6]

一方、再生医療工学への3Dプリンターの利用の研究が盛んに行われているが [5]、衝撃波による高周波圧力の細胞刺激による増殖機構と、ドラッグデリバリーシステム（DDS）用のカプセルの融合技術として、3次元臓器再生用気泡・細胞内包マイクロカプセルの開発が提案され [6]、衝撃波強さの強弱によるカプセル破膜機構と細胞刺激の最適化が行われている（図2）。これらの基礎的研究ならびに基礎技術の組み合わせによって、今後は、カテーテルのような体内やESWLのような体外からの再生医療用衝撃波デバイスなどのこれまでになかった新規医療機器などの開発が期待できる。

〔玉川 雅章 九州工業大学〕

文 献

[1] Tamagawa M, Yamanoi I, Matsumoto A, Fundamental Investigation for Developing Drug Delivery Systems and Bioprocess with Shock Waves and Bubbles, JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No.4 (2001), pp. 1031-1040, DOI: 10.1299/jsmec.44.1031.

[2] Nishida T, Shimokawa H, et al., Extracorporeal Cardiac Shock Wave Therapy Markedly Ameliorates Ischemia-Induced Myocardial Dysfunction in Pigs in Vivo, Journal of the American Heart Association-Circulation, Vol. 9 (2004), pp.3055-3061.

[3] 玉川雅章, 西川雅祥, 大谷清伸, 高度物理刺激と生体応答 (5) 第3章 力学刺激による細胞応答と応用, 機械の研究 第67巻・第12号 (2015), pp.1067-1069.

[4] 石松憲和, 山野井一郎, 玉川雅章, 高須登実男, 衝撃波を用いた細胞への力学的刺激時の応力波解析, 生体医工学 Vol.46, No.2 (2008), pp.261-267.

[5] Christopher Barnatt, 3D Printing: Second Edition, ExplainingTheFuture.com (2014).

[6] 玉川雅章, 水中衝撃波による再生医療用気泡内包マイクロカプセルの破壊制御技術の開発, 2015 科学研究費実績報告書 (挑戦的萌芽研究).

7・11・2 生物流れ

光学的計測手法の急速な発展に伴い、これまでに困難とされてきた生物まわりの流れ場について様々な報告がなされている。ステレオ PIV 計測とスキャニング PIV 計測により、自由飛翔する蝶の後流構造と後流に生成される増速流を捉え、蝶の生み出す揚力および推進力生成メカニズムについて議論され [1]、携帯型赤外線を用いたトモグラフィック PIV 計測により、海洋の酸性化により絶滅の危機に直面しているカメガイまわりの流れ場を捉え、翼状の側足の運動による流体力の生成メカニズムが報告されている [2]。また、ウズユキバトとキンカンチョウの羽根まわりの PIV 計測結果は、羽根の運動解析結果と関連付けられ、その挙動と流れ構造が明らかにされている [3]。鳥類については、飛翔するノドアカハチドリ of 頭部、腹部、尾部および羽根の運動解析より、乱流中で飛翔する際の安定性と制御機構も報告されている [4]。さらには、ステレオ PIV 計測により飛翔する蝙蝠の後流構造を捉え、その揚力および推進力を概算し、羽根の運動と関連付けて報告されている [5]。実験的計測手法と同様に急速に発達している数値シミュレーションも生物流れの解明に貢献している。蝙蝠の羽根まわりの流れ場を、境界埋め込み法による数値シミュレーションにより捉え、前縁はく離渦の挙動と揚力が関連付けて報告されている [6]。飛翔する昆虫および温血脊椎動物まわりの流れの数値シミュレーションにより、流体力の生成メカニズムだけでなく、その安定性およびダイナミクスが明らかにされ、また、流体力を生み出す翅(羽根)を動かす筋肉、さらには、そのセンシング機能とも関連付けて報告されている [7]。飛翔する昆虫の翅を模倣したモデルまわりの流れ場に関する研究も行われており、PIV 計測による翅モデルのアスペクト比と渦の動的挙動の関連付け [8] および翅モデルのアスペクト比と前縁はく離渦の動的挙動 [9] が報告され、さらには、翅モデルの流れ場の数値シミュレーションにより揚力および抗力の生成メカニズムも報告されている [10]。また、遊泳する水棲生物の尾ひれモデルの流れ場に関する実験的計測も行われ、尾ひれモデルの形状と推進力特性が明らかにされている [11]。2015 年度には、日本機械学会論文集に「生物・生体に関する流れ」が特集され、葉脈のネットワーク構造 [12]、血管内皮細胞表面近傍の物質濃度分布計測 [13] も報告されている。

[瀧脇 正樹 九州工業大学]

文 献

- [1] 瀧脇正樹, 田中和博, 自由飛翔する蝶の後流の三次元渦構造, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-00425.
 [2] Adhikari D., Webster D.R., P. and Yen J., Portable infrared tomographic PIV and 3D kinematics measurement of swimming sea butterfly, 11th International Symposium on Parti-

cle Image Velocimetry (PIV15), (2015), pp.1-12.

- [3] Crandell K.E. and Tobalske, B.W., Kinematics and aerodynamics of avian upstrokes during slow flight, The Journal of Experimental Biology, Vol. 218 (2015), pp.2518-2527, DOI: 10.1242/jeb.116228.
 [4] Ravi S., Crall J.D., McNeilly L., Gagliardi S.F., Biewener A.A. and Combes S.A., Hummingbird flight stability and control in freestream turbulent winds, The Journal of Experimental Biology, Vol. 218 (2015), pp.1444-1452, DOI: 10.1242/jeb.114553.
 [5] Hedenström A. and Johansson L.C., Bat flight: aerodynamics, kinematics and flight morphology, The Journal of Experimental Biology, Vol. 218 (2015), pp.653-663, DOI: 10.1242/jeb.031203.
 [6] Wang S., Zhang X., He G. and Liu T., Numerical simulation of unsteady flows over a slow-flying bat, Theoretical and Applied Mechanics Letters, Vol. 5, (2015), pp. 5-8, DOI: 10.1016/j.taml.2015.01.006.
 [7] Shyy W., Kang C.K., Chirattananon P., Ravi S. and Liu H., Aerodynamics, sensing and control of insect-scale flapping-wing flight, Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol.472, (2016), DOI: 10.1098/rspa.2015.0712.
 [8] Han J.S., Chang J.W. and Cho H.K., Vortices behavior depending on the aspect ratio of an insect-like flapping wing in hover, Experiments in Fluids, Vol.56, No.181, (2015), DOI: 10.1007/s00348-015-2049-9.
 [9] Phillips N., Knowles K. and Bomphrey R.J., The effect of aspect ratio on the leading-edge vortex over an insect-like flapping wing, Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 10, (2015), DOI: 10.1088/1748-3190/10/5/056020.
 [10] Jones S.K., Laurenza R., Hedrick T.J., Griffith B.E. and Miller L.A., Lift vs. drag based mechanisms for vertical force production in the smallest flying insects, Journal of Theoretical Biology, Vol. 384, (2015), pp. 105-120, DOI: 10.1016/j.jtbi.2015.07.035.
 [11] 中島充博, 窪田佳寛, 望月修, 魚の尾ひれ形状に模した薄板による推力発生に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-00407.
 [12] 佐藤慧拓, 窪田佳寛, 望月修, 葉脈のネットワーク構造, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-00386.
 [13] 松本浩乃, 窪田佳寛, 大石正行, 望月修, リングの袋掛けと強風落下との関係, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-00389.

7・12 流体計測・可視化

7・12・1 圧力場計測

空気流中における固体表面上の圧力分布計測手法として、本質的に点計測である圧力プローブに代わり、感圧塗料 (Pressure Sensitive Paint: PSP) による手法が注目されている。PSP は酸素消光作用を有する発光色素分子を塗料として固体表面上に塗布し、表面上の圧力計測へ適用するための技術であり、圧力分布を本質的に面情報として得られる利点を有する。さらに、PSP は分子の発光を利用したセンサーであり、原理上は光の波長程度の空間分解能が実現できるため、この分子センサーとしての特性を活かし、

マイクロ流路を対象とした圧力場計測への適用も進められている [1].

2015年現在において、高速流れ場を対象としたPSPは既に実用段階にあり、高速噴流衝突試験における共鳴振動解析へPSPを適用した例 [2] などが報告されている。一方、機械工学分野で重要となる低速流れ場を対象とした計測への適用を主眼として、ポリマー型高圧力感度PSPの時間応答性の検証 [3]、高速応答性を有するシリカナノ粒子PSPの湿度特性検証 [4]、マイクロ流れ場への適用へ向けた自己組織化単分子膜PSPの開発 [5] などが進められてきている。また、火星風洞のような低酸素環境におけるPSPの適用 [6] や、高速応答PSPとTSPの微細塗り分けを実現するインクジェット式塗布法の開発 [7] も近年のトピックである。

なお2015年中は、国内外の会議においてPSP関連の研究に関連するOSが多数開催され、本研究分野に関する活発な議論が行われた。2015年11月に東京理科大学にて開催された本会流体工学部門講演会 [8] では、本分野の研究に関連したOSとして、「蛍光燐光を用いた熱流体可視化技術とその応用」が開催され、6セッションにわたり31件（キーノート1件含む）の講演が行われた。本OSは2016年度も引き続き開催予定である。なお本講演会の前日には、JAXA調布航空宇宙センターにて、第11回「学際領域における分子イメージングフォーラム」が開催され [9]、本フォーラムでは招待講演4件およびポスター発表16件の発表があり、PSPを中心とした分子センサーによる計測技術について、参加者間で深い議論が交わされた。そのほか、本会年次大会や可視化情報学会可視化情報シンポジウムなど各種国内学会においても、本分野に係る多くの研究発表がなされている。また国外においては、流れの可視化計測を主題とする国際会議である the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP10) が2015年6月にイタリアのナポリで開催され、招待講演1件 [10] およびLIF/PSPのセッションにおいて、本分野に関する研究発表が行われた。

[森 英男 九州大学]

文 献

- [1] Huang, C.Y., Matsuda, Y., Gregory, J.W., Nagai, H. and Asai, K., The applications of pressure-sensitive paint in microfluidic systems, *Microfluidics and Nanofluidics*, 05/2015, Vol. 18, No. 5 (2015), DOI: [10.1007/s10404-014-1510-z](https://doi.org/10.1007/s10404-014-1510-z).
- [2] Davis, T., Edstrand, A., Farrukh, A., Cattafesta, L., Yorita, D. and Asai, K., Investigation of impinging jet resonant modes using unsteady pressure-sensitive paint measurements, *Experiments in Fluids*, Vol. 56, No. 101 (2015), DOI: [10.1007/s00348-015-1976-9](https://doi.org/10.1007/s00348-015-1976-9).
- [3] 森英男, 前田恭平, 川幡宏亮, 古川雅人, 秋吉雅夫, 文吉周, ポリマー型感圧塗料を用いた低周波数低振幅の非定常圧力変動計測, *日本機械学会論文集*, Vol.81, No.826 (2015), DOI: [10.1299/transjsme.15-00058](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00058).
- [4] Kameda, M., Yoshida, M., Sekiya, T. and Nakakita, K., Hu-

midity effects in the response of a porous pressure-sensitive paint, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 208 (2015), pp. 399–405, DOI: [10.1016/j.snb.2014.11.052](https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.11.052).

- [5] Sakamura, Y., Suzuki, T. and Kawabata, S., Development and characterization of a pressure-sensitive luminescent coating based on Pt(II)-porphyrin self-assembled monolayers, *Measurement Science and Technology*, Vol. 26, No. 6 (2015), DOI: [10.1088/0957-0233/26/6/064002](https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/6/064002).
- [6] Anyoji, M., Numata, D., Nagai, H. and Asai, K., Pressure-sensitive paint technique for surface pressure measurements in a low-density wind tunnel, *Journal of Visualization*, Vol. 18, No. 2 (2015), pp. 297–309, DOI: [10.1007/s12650-014-0239-9](https://doi.org/10.1007/s12650-014-0239-9).
- [7] Egami, Y., Ueyama, J., Furukawa, S., Kameya, T., Matsuda, Y., Yamaguchi, H. and Niimi, T., Development of fast response bi-luminophore pressure-sensitive paint by means of an inkjet printing technique, *Measurement Science and Technology*, Vol. 26, No. 6 (2015), DOI: [10.1088/0957-0233/26/6/064004](https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/6/064004).
- [8] 日本機械学会 第93期 流体工学部門講演会, 日本機械学会 (2015) <http://www.jsme.or.jp/conference/fedconf15/> (参照日 2016年5月13日).
- [9] 第10回学際領域における分子イメージングフォーラム, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-15-020, ISSN 1349-113X (2015).
- [10] the 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (2015) <http://www.psfvip10.unina.it/ocs2/index.php/2015/index/pages/view/PlenarySpeakers> (参照日 2016年5月18日).

7・12・2 高速流れ場計測

高速流れの流速測定に、粒子画像流速測定法 (PIV: Particle Image Velocimetry) やレーザードップラー流速計 (LDV: Laser Doppler Velocimetry) などの粒子をトレーサとした手法を用いると、粒子の追従性の問題で正しい流速が得られない。高速流れの流速測定には分子をトレーサとした測定法が有効で、近年では分子タグ流速測定法 (MTV: Molecular Tagging Velocimetry) が注目されている。2015年には、一酸化窒素 (NO) をトレーサとした MTV でマッハ 10 の極超音速流れの境界層速度分布を計測した例 [1] やクリプトン (Kr) をトレーサとした MTV で不足膨張噴流の速度分布を計測した例 [2] が報告されている。さらに、アセトン (CH_3COCH_3) をトレーサとした MTV を用いて超音速流中の PIV 粒子の追従性を評価した研究がある [3]。この研究によると、オリフィスから発生する圧力比 10 (上流よどみ圧力 81 kPa) の不足膨張噴流中では、流速が不連続的に変化するマッハディスクの背後だけでなく、流速が連続的に変化するマッハディスク上流の領域においても粒子 (サイズ $1.3\ \mu\text{m}$ の DOS 粒子) は流れに全く追従しない (図 3)。この領域において粒子の速度は気体の速度に対して 120 m/s 程度低くなる。MTV では分子からの微弱な蛍光やりん光をカメラで検出するので、光子統計的な雑音の影響によりカメラで取得した画像から正しい流速データを得られない場合がある。2015年には、光子統計的な雑音があっても正しい流速データを求められる方法として、画像の輪郭抽出に用いられるハフ変

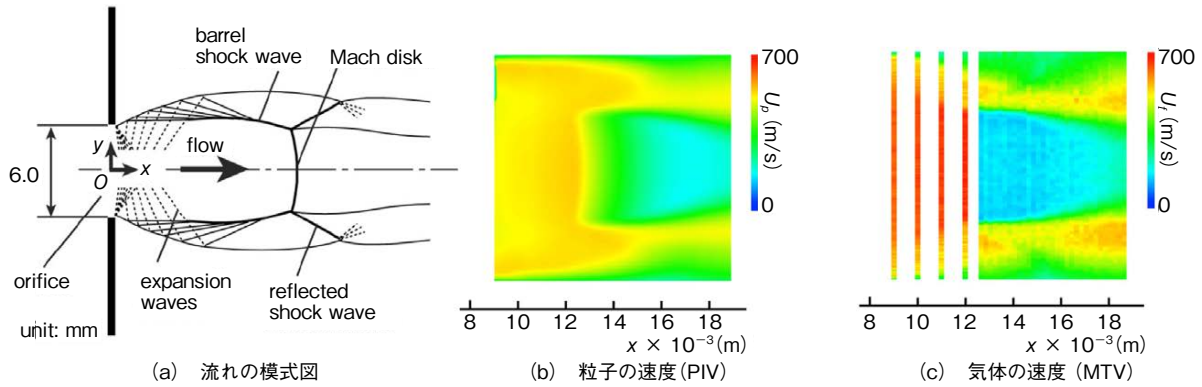


図3 不足膨張噴流中の粒子と気体の速度分布の比較 [3]

換を応用した手法が提案されている [4].

高速流れの密度計測に関しては、屈折率の変化にともなう背景画像の変化から流れの密度を求める BOS (Background-Oriented Schlieren) の研究が盛んであり、高空間分解能化に関する研究 [5] や水中衝撃波を BOS により可視化した研究 [6] がある。高速流れの密度計測では、一般にシュリーレン法や干渉計などの流れの密度変化にともなう光の屈折率の変化を利用した手法が用いられる。しかしながら、これらの手法を高速のマイクロ流れに適用すると、流れが微小なために取得画像のコントラストを得るのに十分な光路長さを確保できず、計測が極めて困難となる。したがって、シュリーレン法や干渉計以外の密度計測法が望ましく、アセトンシード分子としたレーザー誘起蛍光法を用いて出口高さ 500 μm のマイクロノズル内における超音速流れの密度を計測した研究がある [7].

感圧塗料は流れ内にある物体表面の圧力分布を高空間分解能で計測する手段として極めて有効であり、衝撃波が振動する遷音速流れ [8] や超音速衝撃噴流の振動現象 [9] などを計測した結果が報告されている。しかしながら、高速非定常流れの圧力場を計測する上では、感圧塗料の時間応答性の問題があり、さらなる研究開発が必要である。2015 年には、高速応答性を有し、スプレーで塗布できるポリマー/セラミック感圧塗料 (PC-PSP: Polymer/Ceramic Pressure-Sensitive Paint) の応答特性を衝撃波管により調べた研究がある [10]. また、拡散方程式に基づいて陽極酸化アルミ被膜型感圧塗料 (AA-PSP: Anodized Aluminum Pressure-Sensitive Paint) の応答遅れを補正する手法も提案されている [11].

[半田 太郎 豊田工業大学]

文 献

[1] Arisman, C.J., Johansen, Bathel, B.F., and Danehy, P.M., Investigation of gas seeding for planar laser-induced fluorescence in hypersonic boundary layers, *AIAA Journal*, Vol.53, No.12 (2015), pp.511–520, DOI: [10.2514/1.J053892](https://doi.org/10.2514/1.J053892).
 [2] Parziale, N.J., Smith, M.S. and Marineau, E.C., Krypton tagging velocimetry of an underexpanded jet, *Applied Optics*,

Vol.15, No.6 (2015), pp.5094–5101, DOI: [10.1364/AO.54.005094](https://doi.org/10.1364/AO.54.005094).
 [3] Sakurai, T., Handa, T., Koike, S., Mii, K. and Nakano, A., Study on the particle traceability in transonic and supersonic flows using molecular tagging velocimetry, *Journal of Visualization*, Vol.18, No.3 (2015), pp.511–520, DOI: [10.1007/s12650-015-0286-x](https://doi.org/10.1007/s12650-015-0286-x).
 [4] Sanchez-Gonzalez, R., McManamen, B., Bowersox, R.D.W. and North, S.W., A method to analyze molecular tagging velocimetry data using the Hough transform, *Review of Scientific Instruments*, Vol.86, No.12 (2015), pp.511–520.
 [5] Ota, M., Leopold, F., Noda, R. and Maeno, K., Improvement in spatial resolution of background-oriented schlieren technique by introducing a telecentric optical system and its application, *Experiments in Fluids*, Vol.56, No.3 (2015), DOI: [10.1007/s00348-015-1919-5](https://doi.org/10.1007/s00348-015-1919-5).
 [6] Yamamoto, S., Tagawa, Y. and Kameda M., Application of background-oriented schlieren (BOS) technique to a laser-induced underwater shock wave, *Experiments in Fluids*, Vol.56, No.5 (2015), DOI: [10.1007/s00348-015-1960-4](https://doi.org/10.1007/s00348-015-1960-4).
 [7] 半田太郎, 田中晃平, 神原秀二, LIF 法による超音速マイクロ内部流れの密度計測法に関する研究, 平成 26 年度衝撃波シンポジウム講演論文集 (2015), Paper No. 019.
 [8] Merienne, M.-C., Molton P., Bur, R. and Le Sant, Y., Pressure-sensitive paint application to oscillating shock wave in a transonic flow, *AIAA Journal*, Vol.53, No.11 (2015), pp.3208–3220, DOI: [10.2514/1.J053744](https://doi.org/10.2514/1.J053744).
 [9] Davis, T., Edstrand, A., Alvi, F., Cattafesta, L., Yorita, D. and Asai, K., Investigation of impinging jet resonant modes using unsteady pressure sensitive paint measurements, *Experiments in Fluids*, Vol.56, No.5 (2015), DOI: [10.1007/s00348-015-1976-9](https://doi.org/10.1007/s00348-015-1976-9).
 [10] Pandey, A. and Gregory, J.W., Step response of polymer/ceramic pressure-sensitive paint, *Sensors*, Vol.15, No.9 (2015), pp.22304–22324, DOI: [10.3390/s150922304](https://doi.org/10.3390/s150922304).
 [11] Yamabe, K., Masuda, Y., Oka, T., Handa, T. and Sakaue, H., Study on the method for the correction of delay in AA-PSP data measured in high-frequency oscillatory flows, *Proceedings of the 12th International Conference on Flow Dynamics (ICFD)* (2015), Paper No. GS1-59.