



# 流体工学

## 7.1 まえがき

流体工学は機械産業を支える基盤的学術分野であり、わが国をとりまく経済・社会の「大変革時代」[1]の中で、当該分野の技術革新（技術イノベーション）を今後も持続的に推進するためには、研究動向を正確に把握し情報を共有することにより、適切にその成果の活用を図ることが重要である。しかしながら、流体工学に関わる範囲は多岐にわたり、その全範囲の動向調査は困難である。ここでは、限られたテーマではあるが、乱流（数値計算・実験）、混相流（数値計算・実験）、圧縮性流れ、非ニュートン流体、希薄気体・マイクロ流、拡散・混合・反応流、自然エネルギー、噴流、騒音、環境流、流れの可視化、生体流れ・医療応用を取り上げて、2016年における研究動向を示す。

乱流の節は、数値計算と実験の2つの項目に分けて動向調査が行われた。数値計算については、流体力学の代表的ジャーナルである *Journal of Fluid Mechanics* (JFM) に掲載された論文をもとに研究概観が行われ、壁乱流の起源や渦構造の抽出や分類、乱流制御や抵抗低減、乱流モデリングの動向などが紹介されている。乱流の実験については、Particle Image Velocimetry (PIV)/Particle Tracking Velocimetry (PTV) による3D/4D/ボリューム計測、圧力場、高周波数計測の動向、乱流制御、壁乱流や円管内流の流れの構造の研究、壁面摩擦速度の計測手法などに関する研究が紹介されている。混相流の節も数値計算と実験の2つの項目に分けて調査され、数値計算では、混相する各相をEuler的あるいはLagrange的に記述し、界面捕獲法あるいは境界埋め込み法を用いて相界面を捉える方法が多いことが指摘され、国内外の主要ジャーナルや国際会議での研究動向が紹介されている。混相流の実験については、主に、国際会議 International Conference on Multiphase Flow 2016 (ICMF2016) を基に研究動向が紹介されている。特に、分散した界面の問題を強く意識して、実験的にアプローチしようという研究例が増加しつつあることが指摘されている。圧縮性流れの節では、産業流体機器の高度化、高速化が指摘され、特に高速化の観点からは、ソニックブーム対策のための、圧縮波・衝撃波と乱流の干渉の実験的検証の必要性が示されている。非ニュートン流体の節で

は、高分子水溶液や界面活性剤水溶液、コロイド溶液に代表される粘弾性流体とそのレオロジーに関する研究動向が紹介されている。希薄気体流・マイクロ流の節では、国際会議第30回 Rarefied Gas Dynamics (RGD) での動向が紹介され、マイクロ流に関して、マイクロ流体デバイスの進展とともに、センサー、化学分析、医療応用などの応用研究が各種国際会議で数多く発表されている旨が紹介されている。拡散・混合・反応流の節では、燃焼を除く研究が紹介され、拡散・混合の研究として、マイクロチャンネル内混合、円柱後流の熱・運動量輸送の実験的研究、反応流については、酢酸と水酸化アンモニウムとの中和反応に関する実験的研究が紹介されている。なお、数値計算による研究として、新しい混合モデルの紹介がなされている。自然エネルギーの節では、風力、波力、潮力、水力（特にマイクロ水力）等の研究が紹介されている。噴流の節では、工学機器における混合・拡散を促進するための噴流流れの分析と制御に関する研究が紹介されている。騒音の節では、基礎研究、応用研究の両面からの研究紹介が行われ、特に数値解析手法の文献紹介が詳しく行われている。なお、燃焼や混相流場での空力音の研究が新たな課題となること等が指摘されている。環境流の節では、大気環境に関する研究動向を中心に、国内外での学術講演会や学術雑誌での研究紹介や大気環境影響評価で使用される気象モデル等が紹介されている。流れの可視化の節では、蛍光、燐光を利用した圧力や温度の可視化手法が紹介されている。また、マイクロ流への展開や流速の低い流れや大きなスケールの高速流れに対するPIVによる可視化研究が紹介されている。最後に生体流れ・医用応用の節では、循環系における血液流れに関するテーマの一つである脳動脈瘤に関する研究動向について紹介されている。

〔酒井 康彦 名古屋大学〕

## 文 献

- [1] 第5期科学技術基本計画（2016-12閣議決定）、内閣府 <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>（参照日2017年6月25日）。

## 7・2 乱流

## 7・2・1 数値計算

2016年は乱流および乱流の数値計算に関連する大規模な国際会議は狭間の年であるため開催されなかった。そこで本稿では、流体力学の代表的なジャーナルである *Journal of Fluid Mechanics* (JFM) に掲載された2016年の論文の中から乱流の数値計算に関係するものを概観する。

数値計算の援用で可能となり近年脚光を浴びている壁乱流の起源に関する研究として厳密秩序構造 (ECS) や自己維持過程 (SSP) の探求があるが、その発端となった「永田の解」の著者らによる [1] では回転および非回転チャネル流の解析から新たな3つの進行波解が示され、また [2] では壁乱流の遷移過程で観察される間欠性は壁の存在が本質ではなくせん断の存在のみで十分である事が示されている。

乱流の数値計算に関係する論文はJFM掲載論文の中でもかなり多数に亘るが、その中でも壁乱流に関するものは特に多く、近年はある程度高いレイノルズ数でのDNSが可能となってきた事もあり、[3]では速度勾配テンソルの不変量  $R$  と  $Q$  を用いた平板チャネル乱流の渦構造のマルチスケール解析、[4]では平板チャネル乱流での壁面摩擦則とエネルギー散逸関数の関係、[5]では平板チャネル乱流と円管内乱流の乱流統計量の違いや大スケール運動の違いが調査されている。乱流境界層については、[6]において外層の間欠領域におけるレイノルズ分解の問題点の指摘と非乱流領域の寄与を適切に除外する平均化手法の提案、[7]では時間発展の乱流境界層DNSの結果と空間発展DNSの結果との比較が行われている。また、[8]では人工ニューラルネットワークに基づく圧力勾配境界層での層流-乱流遷移の予測スキームが提案されている。

乱流制御や抵抗低減に関する研究も盛んに行われている。[9]では乱流境界層に対する2種類の局所的な抵抗低減コントロールの大域的効果が、[10]では超撥水性表面を模擬した壁面性状の平板チャネル乱流DNSで抵抗低減効果が調べられている。

乱流場の理解には渦や流れ構造などの抽出や分類が欠かせないが、エネルギーが低い組織渦構造の抽出が苦手のPODやDMDに替わるものとして[11]ではSPODが提案されている。また[12]では乱流境界層DNSによって乱流/非乱流界面のトポロジー特性が特定されている。

計算機の性能向上は、基本的な乱流場の高解像度化のみならず、壁面粗さや混相粒子を解像するDNSの実施も可能としている。[13]では球形粗さ要素を配置した壁面上の振動流の乱流、[14]では一様等方性乱流に対する非ストークス粒子の混相の影響が調べられている。同様に気液混相乱流のDNSも実施され、[15]では風波による気液界面で

の乱流熱輸送が、[16]では跳水現象によって生じる混相乱流の統計量が調べられている。

乱流モデリングに関する研究は近年少なくなっているが、[17]ではニューラルネットワーク法にガリレイ不変性を拘束条件として与えたレイノルズ応力の非等方成分のモデリング手法が検討されている。LESのSGSモデリングについては、[18]でDNSデータのアプリオリテストからSGS応力とひずみ速度の主軸の比較検討が、[19]ではSGS熱流束に関しSGSプラントル数の検討が行われている。また高レイノルズ数で壁面を解像するLESの数値計算手法として、[20]ではウエーブレット法と解適合格子に基づく手法で物体周りの流れが解析されている。

[森西 洋平 名古屋工業大学]

## 文 献

- [1] Wall, D.P., Nagata, M., Exact coherent states in channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.788 (2016), pp.444-468, DOI: [10.1017/jfm.2015.685](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.685).
- [2] Chantry, M., Tuckerman, L.S., Barkley, D., Turbulent-laminar patterns in shear flows without walls, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.791 (2016), R8, DOI: [10.1017/jfm.2016.92](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.92).
- [3] L-Durán, A., Holzner, M., Jiménez, J., Multiscale analysis of the topological invariants in the logarithmic region of turbulent channels at a friction Reynolds number of 932, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.803 (2016), pp.356-394, DOI: [10.1017/jfm.2016.504](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.504).
- [4] Abe, H., Antonia, R.A., Relationship between the energy dissipation function and the skin friction law in a turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.798 (2016), pp.140-164, DOI: [10.1017/jfm.2016.299](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.299).
- [5] Hwang, J., Lee, J., Sung, H.J., Influence of large-scale accelerating motions on turbulent pipe and channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.804 (2016), pp.420-441, DOI: [10.1017/jfm.2016.552](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.552).
- [6] Kwon, Y.S., Hutchins, N., Monty, J.P., On the use of the Reynolds decomposition in the intermittent region of turbulent boundary layers, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.794 (2016), pp.5-16, DOI: [10.1017/jfm.2016.161](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.161).
- [7] Kozul, K., Chung, D., Monty, J.P., Direct numerical simulation of the incompressible temporally developing turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.796 (2016), pp.437-472, DOI: [10.1017/jfm.2016.207](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.207).
- [8] Hack, M.J.P., Zaki, T.A., Data-enabled prediction of streak breakdown in pressure-gradient boundary layers, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.801 (2016), pp.43-64, DOI: [10.1017/jfm.2016.441](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.441).
- [9] Stroh, A., Hasegawa, Y., Schlatter, P., Frohnapfel, B., Global effect of local skin friction drag reduction in spatially developing turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.805 (2016), pp.303-321, DOI: [10.1017/jfm.2016.545](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.545).
- [10] Jung, T., Choi, H., Kim, J., Effects of the air layer of an idealized superhydrophobic surface on the slip length and skin-friction drag, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.790 (2016), R1, DOI: [10.1017/jfm.2016.36](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.36).
- [11] Sieber, M., Paschereit, C.O., Oberleithner, K., Spectral proper orthogonal decomposition, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.792 (2016), pp.798-828, DOI: [10.1017/jfm.2016.103](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.103).
- [12] Borrell, G., Jiménez, J., Properties of the turbulent/non-turbulent interface in boundary layers, *Journal of Fluid Me-*



chanics, vol.801 (2016), pp.554–596, DOI: [10.1017/jfm.2016.430](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.430).

[13] Weng, C., Boij, S., Hanifi, A., Numerical and theoretical investigation of pulsatile turbulent channel flows, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.792 (2016), pp.98–113, DOI: [10.1017/jfm.2016.73](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.73).

[14] Vreman, A.W., Particle-resolved direct numerical simulation of homogeneous isotropic turbulence modified by small fixed spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.796 (2016), pp.40–85, DOI: [10.1017/jfm.2016.228](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.228).

[15] Kurose, R., Takagaki, N., Kimura, A., Komori, S., Direct numerical simulation of turbulent heat transfer across a sheared wind-driven gas-liquid interface, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.804 (2016), pp.646–687, DOI: [10.1017/jfm.2016.554](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.554).

[16] Mortazavi, M., Le Chenadec, V., Moin, P., Mani, A., Direct numerical simulation of a turbulent hydraulic jump: turbulence statistics and air entrainment, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.797 (2016), pp.60–94, DOI: [10.1017/jfm.2016.230](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.230).

[17] Ling, J., Kurzwaski, A., Templeton, J., Reynolds averaged turbulence modelling using deep neural networks with embedded invariance, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.807 (2016), pp.155–166, DOI: [10.1017/jfm.2016.615](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.615).

[18] Yang, Z., Wang, B.-C., On the topology of the eigenframe of the subgrid-scale stress tensor, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.798 (2016), pp.598–627, DOI: [10.1017/jfm.2016.336](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.336).

[19] Li, D., Revisiting the subgrid-scale Prandtl number for large-eddy simulation, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.802 (2016), R2, DOI: [10.1017/jfm.2016.472](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.472).

[20] De Stefano, G., Nejadmalayeri, A., Vasilyev, O.V., Wall-re-

solved wavelet-based adaptive large-eddy simulation of bluff body flows with variable thresholding, *Journal of Fluid Mechanics*, vol.788 (2016), pp.303–336, DOI: [10.1017/jfm.2015.708](https://doi.org/10.1017/jfm.2015.708).

## 7・2・2 実験

ここ十数年で目覚ましい進歩を遂げている Particle Image Velocimetry (PIV)/Particle Tracking Velocimetry (PTV) を用いた研究が多数発表された。特に、3D/4D/ボリウム計測 [1, 2], 圧力場の推定 [2, 3], 高周波数計測 [4] 等、より高度な計測へ移行しており、この傾向は今後も続くと思われ。PIV/PTVの精度向上に関する研究も行われた [5]。一方、侵襲式ではあるが、優れた時間応答性を有する熱線流速計や冷線温度計も乱流計測には依然として不可欠であり、熱線と抵抗線群からなる新型プローブの提案 [6] や周波数応答改善の試み [7] が行われた。流体機械や輸送機器の効率の向上と関連して乱流制御に関する研究も活発に行われており、プラズマアクチュエータを用いた噴流やはく離流れの制御 [8, 9] や、添加物による摩擦抗力低減に関する研究が行われた [10, 11]。乱流境界層 [12, 13] や円管内乱流 [14] のような規範的な乱流場に対する研究も活発に行われた。関連して、壁面摩擦速度の計測手法の開発も行われた [15–17]。また、一様乱流生成の新しい

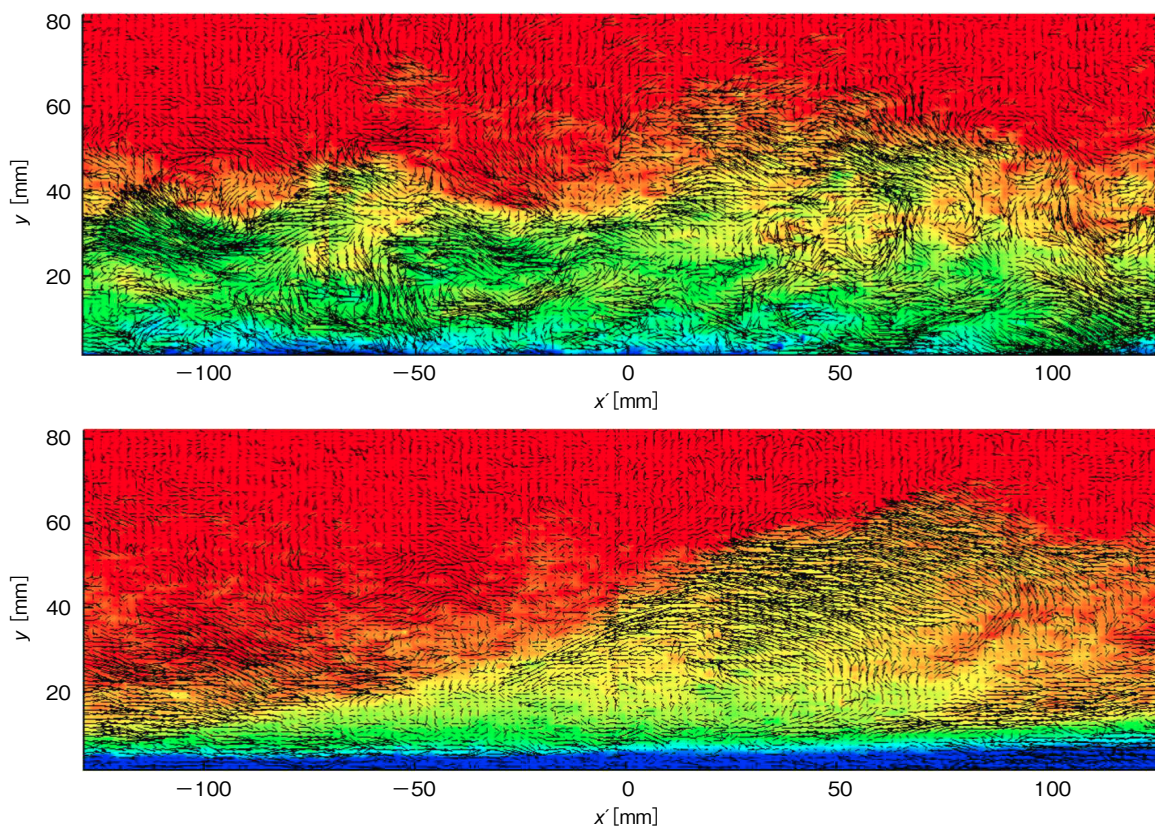


図1 界面活性剤なし（上図）および界面活性剤（500 ppm ODMAO）添加時（下図）の乱流境界層の PIV 計測結果 [10]

試みも行われた [18–20].

[長田 孝二 名古屋大学]

文 献

[1] Hirata, K., Shintani, A., Kawaguchi, R., Inagaki, K., Nagura, T. and Maeda, T., 3D-PTV measurement verified by UVP for unsteady and three-dimensional flow inside a suction sump, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 11, No. 3 (2016), Paper No.15-00336.

[2] Neeteson, N.J., Bhattacharya, S., Rival, D.E., Michaelis, D., Schanz, D. and Schröder, A., Pressure-field extraction from Lagrangian flow measurements: first experiences with 4D-PTV data, *Experiments in Fluids*, Vol. 57 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2170-4](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2170-4).

[3] Schneiders, J.F.G., Pröbsting, S., Dwight, R.P., van Oudheusden, B.W. and Scarano, F., Pressure estimation from single-snapshot tomographic PIV in a turbulent boundary layer, *Experiments in Fluids*, Vol. 57 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2133-9](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2133-9).

[4] Miller, J.D., Jiang, N., Slipchenko, M.N., Mance, J.G., Meyer, T.R., Roy, S. and Gord, J.R., Spatiotemporal analysis of turbulent jets enabled by 100-kHz, 100-ms burst-mode particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, Vol. 57 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2279-5](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2279-5).

[5] Wang, C., Gao, Q., Wang, H., Wei, R., Li, T. and Wang, J., Divergence-free smoothing for volumetric PIV data, *Experiments in Fluids*, Vol. 57 (2016), DOI: [10.1007/s00348-015-2097-1](https://doi.org/10.1007/s00348-015-2097-1).

[6] 保浦知也, 吉田峻, 田川正人, 熱線と抵抗線群からなる新型プローブによる2成分乱流速度測定, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集 (2016), Paper No. J0530206.

[7] 大庭勝久, 戸本佳佑, FPGA を用いた抵抗線温度計用の周波数補償系の構築, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 833 (2016), DOI: [10.1299/transjsme.15-00462](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00462).

[8] 田中直樹, 今野海航, 小室淳史, 高島圭介, 安藤晃, 金子俊郎, 浅井圭介, ナノ秒パルス電源駆動プラズマアクチュエータによる翼周り剥離制御の PIV 計測, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2016), Paper No. 0304.

[9] 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. 835 (2016), DOI: [10.1299/transjsme.15-00628](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00628).

[10] 桂川駿典, 玉野真司, 山田格, 森西洋平, 界面活性剤注入による抵抗低減乱流境界層流れにおける大規模乱流構造の PIV 計測, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2016), Paper No. 0318.

[11] 千田浩富, 今尾茂樹, 菊地聡, 小里泰章, 添加物による管内流の抵抗低減, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2016), Paper No. 0307.

[12] 和田裕貴, 辻義之, 井門敦志, 岩崎誠, 西岡通男, 大型風洞による高レイノルズ数乱流境界層実験の試み, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2016), Paper No. 1007.

[13] Jodai, Y. and Elsinga, G.E., Experimental observation of hairpin auto-generation events in a turbulent boundary layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 795 (2016), DOI: [10.1017/jfm.2016.153](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.153).

[14] Hellström, L.H.O., Marusic, I. and Smits, A.J., Self-similarity of the large-scale motions in turbulent pipe flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 792 (2016), DOI: [10.1017/jfm.2016.100](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.100).

[15] 小松原海, 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁, 熱式マイクロセンサを用いた壁面乱流噴流場における壁面せん断応力変動の

計測, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集 (2016), Paper No. J0530203.

[16] 澁谷祐太, 鈴木博貴, 望月信介, 画像解析を用いた壁面せん断応力計測法の開発, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2016), Paper No. 1018.

[17] Baars, W.J., Squire, D.T., Talluru, K.M., Abbassi, M.R., Hutchins, N. and Marusic, I., Wall-drag measurements of smooth- and rough-wall turbulent boundary layers using a floating element, *Experiments in Fluids*, Vol. 57 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2168-y](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2168-y).

[18] 高牟礼光太郎, 小園茂平, 少数周波数から成る擾乱により高レイノルズ数一様乱流を生成する試み, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 833 (2016), DOI: [10.1299/transjsme.15-00575](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00575).

[19] 清水優浩, 牛島達夫, 長谷川豊, 小物体を係留した格子によって生成される乱流に関する実験的研究, 日本機械学会流体工学部門講演会論文集 (2016), Paper No. 0229.

[20] Carter, D., Petersen, A., Amili, O. and Coletti, F., Generating and controlling homogeneous air turbulence using random jet arrays, *Experiments in Fluids*, Vol. 57 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2281-y](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2281-y).

## 7.3 混相流

### 7.3.1 数値計算

日本機械学会論文集および英文ジャーナルには、混相流の数値計算に関する学術論文が継続的に掲載されている。2016 年度は流体機械の性能分析 [1]、計算モデルや計算法の開発 [2, 3]、界面現象の計算 [4, 5] および赤血球と血管の相互作用 [6] と多岐にわたる。混相流の数値計算法は、注目する時空間スケールに適した計算法が選択・開発される傾向にあるが、近年は混在する各相を Euler 的に記述し、界面捕獲法あるいは境界埋め込み法を用いて相界面を捉える計算法が多いように思われる。

他の英文ジャーナルでもこの傾向は同じであり、Volume of Fluid 法 [7–9] や Level-set 法 [10, 11]、Front Tracking 法 [12]、Phase-Field 法 [13, 14] など従来の計算法に加えて、圧縮性流体の分野で衝撃波捕獲法として開発されてきた WENO 法を用いた研究もある [15]。Lagrangian 型の計算法である SPH 法も多用されている [16]。Euler 的に記述された式の離散化手法は、有限差分法や有限体積法が大半である。その一方で、Lattice-Boltzmann 法を用いた混相流の数値計算も活発に行われている [17, 18]。この傾向は、ここ十年の計算機の進展とも深く関係していると推察される。画像処理装置 (GPU) などのアクセラレータやベタ FLOPS 級のスーパーコンピュータが普及して高性能な計算環境が利用できるようになり、計算機の性能を引き出すために並列性の高いアルゴリズムを利用する研究者が増えたためであろう。界面の変形を伴う現象を精度良く計算できる基盤が整いつつあるが、混相流を取り扱う機器を実スケールで計算するにはさらなる計算機性能の向上が待たれる。



International Journal of Multiphase Flow では、他の論文誌よりも取り扱われる現象や計算法が広範である。分散相を質点として表現する Eulerian-Lagrangian モデルを用いた固気混相乱流の直接数値計算 [19, 20] や LES [21] も継続的に行われている。また、計算にオープンソース CFD ソフトウェア OpenFOAM を利用した論文が多くみられる [22, 23]。

混相流の数値計算は、現象のモデル化、構成式の離散化、計算条件など様々な要因で誤差が入り込むため、計算の妥当性の保証が単相流計算よりも困難である。数値計算法の評価 (Evaluation) [24, 25] やプログラムの妥当性検証 (Verification) [26] も数少ないが行われつつあり、多岐にわたる混相流の数値計算法に対する系統的な Verification & Validation 手法の確立が望まれる。実験的研究と相互補完的關係を築き、両輪で進展していくことを期待したい。

2016 年 5 月 22 日から 27 日にかけて、混相流分野で最も大規模な国際会議 International Conference on Multiphase Flow がイタリア、フィレンツェで開催され、800 件以上の口頭発表ならびに 70 件程度のポスター発表が行われた。数値計算に関連したセッションとして CFD Modeling of Multiphase Flow および Computational Techniques for Multiphase Flows があり、それぞれ 20 件および 50 件程度の発表が行われた。実際には他のセッションでも数値計算に関する発表が多く、混相流研究における数値計算の重要性をうかがい知ることができる。

[内山 知実, 出川 智啓 名古屋大学]

## 文 献

- [1] 谷萩 雄一朗, 西 泰行, 岡崎 貴, 稲垣 照美, 下掛け式クロスフロー水車の羽根車近傍の流れに基づく性能分析, 日本機械学会 論文集, Vol. 82, No. 841, (2016), 16-00271, DOI: [10.1299/transjsme.16-00271](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00271).
- [2] 江頭 竜, 藤川 俊秀, 藤川 重雄, 非平衡蒸発を伴う蒸気泡のキャビテーション初生に関する理論と数値解析, 日本機械学会 論文集, Vol. 82, No. 837, (2016), 16-00120, DOI: [10.1299/transjsme.16-00120](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00120).
- [3] 足立 理人, 大森 健史, 梶島 岳夫, 上昇気泡からの高シュミット数条件下における物質輸送の数値解析手法の開発, 日本機械学会 論文集, Vol. 82, No. 839, (2016), 16-00079, DOI: [10.1299/transjsme.16-00079](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00079).
- [4] 兼子 泰明, 大森 健史, 梶島 岳夫, 水面効果を受ける運動翼に働く流体力の数値解析, 日本機械学会 論文集, Vol. 82, No. 841, (2016), 16-00112, DOI: [10.1299/transjsme.16-00112](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00112).
- [5] Feng, J.J. and Chen, C.-Y., Interfacial dynamics in complex fluids, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 11, No. 4, (2016), JFST0021, DOI: [10.1299/jfst.2016jfst0021](https://doi.org/10.1299/jfst.2016jfst0021).
- [6] Yatsuyanagi A., Hayase, T., Miyauchi, S., Funamoto, K., Inoue, K., Shirai, A. and Brandt, L., Numerical analysis for elucidation of mechanical interaction between an erythrocyte moving in medium subject to inclined centrifugal force and endothelial cells on a plate, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 11, No. 4, (2016), JFST0029, DOI: [10.1299/jfst.2016jfst0029](https://doi.org/10.1299/jfst.2016jfst0029).
- [7] Ikebata, A. and Xiao, F., GPU-accelerated large-scale simulations of interfacial multiphase fluids for real-case applications, Comput. Fluids, Vol. 141, (2016), pp. 235–249, DOI: [10.1016/j.compfluid.2016.03.018](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.03.018).
- [8] Dabiria, S. and Bhuvankar P., Scaling law for bubbles rising near vertical walls, Phys. Fluids, Vol. 28, (2016), 062101, DOI: [10.1063/1.4948464](https://doi.org/10.1063/1.4948464).
- [9] Wang, X., Klaasen, B., Degève, J., Mahulkar, A., Heynderickx, G., Reyniers M.-F., Blanpain, B., and Verhaeghe, F., Volume-of-fluid simulations of bubble dynamics in a vertical Hele-Shaw cell, Phys. Fluids, Vol. 28, (2016), 053304, DOI: [10.1063/1.4948931](https://doi.org/10.1063/1.4948931).
- [10] Cottet, G.-H. and Maitre, E., A semi-implicit level set method for multiphase flows and fluid–structure interaction problems, J. Comput. Phys., Vol. 314, (2016), pp. 80–92, DOI: [10.1016/j.jcp.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.03.004).
- [11] Mirzadeh, M., Guittet, A., Burstedde, C. and Gibou, F., Parallel level-set methods on adaptive tree-based grids, J. Comput. Phys., Vol. 322, (2016), pp. 345–364, DOI: [10.1016/j.jcp.2016.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.06.017).
- [12] Feng, J., Muradoglu, M., Kim, H., Ault, J.T. and Stone, H.A., Dynamics of a bubble bouncing at a liquid/liquid/gas interface, J. Fluid Mech. Vol. 807, (2016), pp. 324–352, DOI: [10.1017/jfm.2016.517](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.517).
- [13] Fakhari, A., Geier, M. and Lee, T., A mass-conserving lattice Boltzmann method with dynamic grid refinement for immiscible two-phase flows, J. Comput. Phys., Vol. 315, (2016), pp. 434–457, DOI: [10.1016/j.jcp.2016.03.058](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.03.058).
- [14] Zhang, Q. and Wang, X.-P., Phase field modeling and simulation of three-phase flow on solid surfaces, J. Comput. Phys., Vol. 319, (2016), pp. 79–107, DOI: [10.1016/j.jcp.2016.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.05.016).
- [15] Shu, C.-W., High order WENO and DG methods for time-dependent convection-dominated PDEs: A brief survey of several recent developments, J. Comput. Phys., Vol. 316, (2016), pp. 598–613, DOI: [10.1016/j.jcp.2016.04.030](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.04.030).
- [16] Shadloo, M.S., Oger, G. and Le Touzé, D., Smoothed particle hydrodynamics method for fluid flows, towards industrial applications: Motivations, current state, and challenges, Comput. Fluids, Vol. 136, (2016), pp. 11–34, DOI: [10.1016/j.compfluid.2016.05.029](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.05.029).
- [17] Safi, M.A. and Turek, S., GPGPU-based rising bubble simulations using a MRT lattice Boltzmann method coupled with level set interface capturing, Comput. Fluids, Vol. 124, (2016), pp. 170–184, DOI: [10.1016/j.compfluid.2015.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.06.001).
- [18] Inamuro, T., Yokoyama, T., Tanaka, K. and Taniguchi, M., An improved lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, Comput. Fluids, Vol. 137, (2016), pp. 55–69, DOI: [10.1016/j.compfluid.2016.07.016](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.07.016).
- [19] Li, Z., Wei, J. and Yu, B., Analysis of interphase forces and investigation of their effect on particle transverse motion in particle-laden channel turbulence, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 88, (2017), pp. 11–29, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.05.009).
- [20] Saliakellis P. and Yiantsios, S.G., Macroscopic characteristics of heavy particle resuspension obtained from direct numerical simulations of pressure driven channel flow, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 84, (2016), pp. 188–203, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.05.002).
- [21] Breuer, M. and Hoppe, F., Influence of a cost-efficient Langevin subgrid-scale model on the dispersed phase of large-eddy simulations of turbulent bubble-laden and particle-laden flows, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 89, (2017), pp. 23–44, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.007).

- [22] Müller, T., Sängler, A., Habisreuther, P., Jakobs, T., Trimis, D., Kolb, T. and Zarzalis, N., Simulation of the primary breakup of a high-viscosity liquid jet by a coaxial annular gas flow, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 87, (2016), pp. 212–228, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.008](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.008).
- [23] Baldwin, E.T., Grover Jr., R.O., Parrish, S.E., Duke, D.J., Matusik, K.E., Powell, C.F., Kastengren, A.L. and Schmidt, D.P., String flash-boiling in gasoline direct injection simulations with transient needle motion, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 87, (2016), pp. 90–101, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.004).
- [24] Diggs, A. and Balachandar, S., Evaluation of methods for calculating volume fraction in Eulerian–Lagrangian multiphase flow simulations, *J. Comput. Phys.*, Vol. 313, (2016), pp. 775–798, DOI: [10.1016/j.jcp.2016.02.066](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.02.066).
- [25] Vazquez-Gonzalez, T., Llor, A. and Fochesato, C., Ransom test results from various two-fluid schemes: Is enforcing hyperbolicity a thermodynamically consistent option?, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 81, (2016), pp. 104–112, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.12.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.12.007).
- [26] Choudhary, A., Roy, C.J., Dietiker, J.-F., Shahnam, M., Garg, R. and Musser, J., Code verification for multiphase flows using the method of manufactured solutions, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 80, (2016), pp. 150–163, DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.12.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.12.006).

### 7・3・2 実験

混相流に関する講演会は混相流シンポジウムなど数多く開催されているが、2016年5月22日～27日、イタリア・フィレンツェで開催されたICMF 2016 (International Conference on Multiphase Flow 2016) [1]を基に研究動向を観ることにする。同国際会議では、Plenary lectures, Keynote lecturesならびに一般講演で365件の講演があり、実験系と数値解析・モデリング系とでほぼ半数ずつを分け合った。実験と数値解析の両分野が講演されているものの、発表数の割合が異なる3つのセッション「Boiling, Condensation, Evaporation (以下BCE)」、 「Cavitation/Nucleation (以下CN)」ならびに「Collision, Agglomeration and Breakup (以下CAB)」を分析することにする。BCEでの発表総数23、内実験系19、数値解析・モデリング4、CNでの発表総数11、内実験系5、数値解析・モデリング6、さらにCABでの発表総数14、内実験系6、数値解析・モデリング8となっている。BCEでは相変化ならびに界面の生成と成長を扱い、固体表面の性状(分子レベルの構造)、液体の性状(溶存気体、溶存物質)、熱の授受が支配因子となる。CABでは界面の合一と分離を扱い、既に界面は形成されている。CNでは界面そのものを扱うというよりも、圧力を精度良く扱うことに重点が置かれる。界面をどう扱うか、どう観るかは混相流の研究で重要あり、この界面の扱い方、観方の違いが上記3つのセッションでの実験系と数値解析・モデリング系の比率の違いとなって現れていると思われる。混相流の物質移動、熱移動、運動量交換は多くの場合、分散した界面を介して行われるものであることから、*International Journal of Multiphase Flow*, Experiments

in Fluids, *Chemical Engineering Science*, *Chemical Engineering Journal* など、混相流の論文が掲載されるジャーナルにおいても、混相流における分散した界面の問題を強く意識して実験によりアプローチしようという研究例が増加しつつある。Boilingでは個々の気泡に着目して種々のパラメータの影響を論じた研究[2]、界面運動ではコンタミネーションに着目して、界面運動と気泡あるいは液滴の重心運動との関係を捉えようとの研究例[3]、[4]が増えている。界面を厳密に扱うには、実験と数値解析との相互の議論が必要であり、講演会や国際会議での双方の立場を越えた前向きな議論が今後益々必要になると思われる。

[齋藤 隆之 静岡大学]

### 文 献

- [1] Proceedings of the 9th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2016) in Firenze (Italy), May 22–27, 2016.
- [2] Park, Y., Kim, H., Kim, J. and Kim, H., Measurement of liquid-vapor phase distribution on nano- and microstructured boiling surface, *Int. J. of Multiphase Flow*, 81, 67–76, (2016), DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.01.007](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.01.007).
- [3] Vi-Vie Ng, Sellier, M. and Nock, V., Marangini-induced actuation of miscible liquid droplets on an incline, *Int. J. of Multiphase Flow*, 82, 27–34, (2016), DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.02.013](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.02.013).
- [4] Huang, J. and Saito, T., Influences of gas-liquid interface contamination on bubble motions, bubble wakes, and instantaneous mass transfer, *Chemical Engineering Science*, 157, 182–199, (2017), DOI: [10.1016/j.ces.2016.05.013](https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.05.013).

### 7・4 圧縮性流れ

産業流体機器の高度化、高速化に伴い、圧縮流れの重要性はますます高まっている。

圧縮性流れを利用した産業機器として、集塵機フィルターに付着したフューム(油分を含んだ金属粉)を衝撃波発生原理を利用して除去する装置が考案され[1]、製品化されている。本装置は、円筒形フィルターの内部に極く短時間だけ噴流を作用させ、非定常的に衝撃波圧縮を実現するものであり、産業現場から見出された、学術的にも新しい手法であると評価できる。現在、圧縮流れの観点から現象の詳細な解明と更なる応用展開が模索されている。

2016年の学術誌発表として、国内での論文発表はそれほど多くはなかった。文献[2]では、差分格子ボルツマン法における高次の非線形スキームにおける圧縮性の影響が、検証された。これに対して、例えば、ASMEでの論文発表を見ると、リヒトマイヤー-メシコフ不安定性(Richtmyer-Meshkov instability)に関する研究[3]など、幅広い分野での問題に対する研究発表がなされている。今後は、圧縮性流れについて機械工学の応用範囲をより広範に広げ、その価値を高めていくことにも積極的に取り組むことが好ましい。

高速化の観点で象徴的なのは、コンコルド以来となる超音速旅客機の再来について、研究者レベルの国際的な協力がなされ、日本も国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) を中心に静粛超音速機の飛行実証実験、国際ベンチマークテストモデルの提供など、重要な役割を担っていることである。当該技術の開発の最重課題の一つがソニックブーム対策である。ソニックブームとは、超音速飛行時の機体から発せられる衝撃波が、結合して落雷に似た爆音を発生させる現象である。これが騒音として人間の居住地区に到達すると環境問題を引き起こし、その上空を飛行することが認められなくなる。居住地域の上空を飛べない飛行機は、商業路線としての価値が極端に狭まり、多様化する需要の中も、特に富裕層のニーズを満たすことができなくなる。したがって、ソニックブームの解決が、民間超音速旅客機の実現に不可欠である。JAXAは、2015年7月24日に、スウェーデン・エスレンジ実験場において、低ソニックブーム設計概念実証プロジェクト第2フェーズ試験 (D-SEND#2) の飛行試験を現地時間に実施したが、マイクロホン計測で取得したデータの解析に半年近くの期間を要し、その結果が公表されたのは2015年12月であった [4]。公表された圧力履歴のデータは、当初の設計波形とは大きく異なるものであり、当該報告書ではそれを大気乱流に起因するものであると位置付けた。ソニックブームを引き起こす圧縮波は、機体近傍で発生した衝撃波が地上に到達するまでの伝播の過程で分子の振動緩和によって圧力勾配が緩やかになったものであり、過剰圧力のピーク値、圧力の時間勾配がソニックブームの大きさを決める重要な要素となっている。ただ、実測データはこれらの圧力特性に対して大気乱流が決定的な影響を及ぼしていることを示唆したものだが、実は圧縮波・衝撃波 (圧力上昇が分子の平均自由行程の10倍程度の短いスケールで起こる圧縮波) が乱流と干渉すると、圧力場、乱流場にどのような影響を及ぼすかについて、その知見は確立しておらず、特に実験検証が重要になっている。当該問題に対して、近年研究が盛んになっており、2016年にも研究発表がなされた [5, 6]。

[佐宗 章弘 名古屋大学]

## 文 献

- [1] 川崎広勝, 家弓昌也, 丹波高裕, 岩川輝, 佐宗章弘, 山下哲哉, 古田義則, 矩形管内の高速噴流及び衝撃波の挙動, 平成27年度衝撃波シンポジウム (2016), 2A1-6.
- [2] Wilson, B.M., Mejia-Alvarez, R., Prestridge, K.P., Single-Interface Richtmyer-Meshkov Turbulent Mixing at the Los Alamos Vertical Shock Tube, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 138 (2016), 070901-1-9, DOI: [10.1115/1.4032529](https://doi.org/10.1115/1.4032529).
- [3] 國嶋雄一, 梶島岳夫, 葛原道久, 差分格子ボルツマン法における高次の非線形スキーム (チャンネル乱流のDNSによる評価), 日本機械学会論文集, Vol.82, No.840 (2016), DOI: [10.1299/transjsme.16-00204](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00204).
- [4] D-SEND#2 プロジェクト第2フェーズ試験 D-SEND#2 試

験サイト, 研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 <http://www.aero.jaxa.jp/spsite/d-send2/> (参照日 2017年4月19日).

- [5] Kitamura, T., Nagata, K., Sakai, Y., Sasoh, A., Ito, Y., Rapid distortion theory analysis on the interaction between homogeneous turbulence and a planar shock wave, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 802 (2016), pp. 108-146, DOI: [10.1017/jfm.2016.313](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.313).
- [6] Tamba, T., Furukawa, D., Aoki, Y., Kayumi, M., Iwakawa, A., Sasoh, A., Matsunaga, T., Izumo, M., Sugiyama, Y., Matsuura, T., Nakayama, Y., Field experiment of blast wave pressure modulation past a turbulent flow, *Science and Technology of Energetic Materials*, Vol.77, No.4 (2016) pp 91-97.

## 7.5 非ニュートン流体

非ニュートン流体は複雑流体とも呼ばれ、粘性と弾性を有する流体である粘弾性流体と外部刺激により特定の性質・機能を示す流体である機能性流体とに大別できる。また、非ニュートン流体はそのレオロジー特性が複雑なゆえに、単純な流れ場であっても特異な流れ挙動を示す。ここでは、高分子水溶液や界面活性剤水溶液、コロイド溶液に代表される粘弾性流体とそのレオロジーに関する研究動向を紹介する。

2016年の特徴として、レオロジーに関する国際会議である The XVIIth International Congress on Rheology (ICR2016) [1] が京都で開催されたことが挙げられる。ICR2016は4年に一度開催されるレオロジーに関する最大規模の国際会議であり、18ものオーガナイズドセッション (OS) から成る。その中でも、「Non-Newtonian Fluid Mechanics」は「Suspensions, Colloids, and Granular Materials」と並び、発表件数が50を超える最大規模のOSであり [2]、レオロジー分野において現在最も盛んな研究分野であると言える。ICR2016における非ニュートン流体のOSの詳細な分析が鳴海 [3] によりなされているが、その中で large-amplitude oscillatory shear (LAOS) と呼ばれる大振幅振動せん断による流動現象の検討が多くなっていることが特徴の一つとして指摘されている。流体に関する代表的なジャーナルである *Journal of Fluid Mechanics* において、非線形な流動現象を伴うレオロジー計測である LAOS をさらに非線形性が強い領域まで発展させた extra-extra-large-amplitude oscillatory shear (XXLAOS) [4, 5] が「Focus on Fluids」として紹介されていることもそのことを裏付けている。また、レオロジーに関する代表的なジャーナルである *Journal of Rheology* において、「Shear Banding in Complex Fluids」の特集号 [6] が発刊されている。一様なせん断流において異なるせん断速度領域が共存する「シアバンド」は複雑流体に特有の代表的な流動現象であり、2016年の Annual Review of Fluid Mechanics においてレビュー [7] が掲載されていることから、非ニュートン流体の研究分野において2016年に注目されたトピック



クスであると言える。さらに、日本機械学会のジャーナルである Journal of Fluid Science and Technology において、「複雑流体の界面力学」に関するレビュー [8] が報告されている。ニュートン流体と比べて現象が複雑で考慮すべき物理量が多くなることから、チャレンジングな研究課題の一つであると言える。

2016年の国内の動向に目を向けると、日本機械学会主催の講演会である年次大会において、OS「複雑流体の流動現象」で15件の発表とワークショップ「複雑流体の新展開」が企画されている。また、流体工学部門講演会において、OS「非ニュートン流体の流動現象」では15件、OS「流れの制御・抵抗低減」でも関連する研究が5件発表されている。さらに、日本レオロジー学会誌において、「希薄溶液の流動学」に関する特集号 [9] が発刊されている。高分子や界面活性剤を含む溶液は低濃度であっても非ニュートン流体となり、特異な流動を示すことが知られており、特集号ではマイクロ、液滴、乱流抵抗低減、数値解析、計測手法など幅広い内容が取り上げられている。日本機械学会論文集においても、2015年ではあるが「複雑流体の流動現象」の特集号 [10] が発刊されている。

以上、非ニュートン流体に関して、国内外において多数の講演発表がなされ、特集号の企画が続いていることから、今後も本研究分野が活発に展開していくものと予想される。

[玉野 真司 名古屋工業大学]

## 文 献

- [1] The XVIIth International Congress on Rheology (ICR2016) <http://icr2016.com/> (参照日 2016年4月21日)。
- [2] Masubuchi Y., The XVII<sup>th</sup> International Congress on Rheology (ICR 2016), Applied Rheology, Vol.26, No.5 (2016), pp.52-54.
- [3] 鳴海敬倫, 複雑流体研究の紹介, 日本機械学会 2016年度年次大会講演論文集, No. W053001 (2016)。
- [4] Ewoldt R.H., Predictions for the northern coast of the shear rheology map: XXLAOS, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 798 (2016), pp.1-4, DOI: [10.1017/jfm.2016.265](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.265).
- [5] Khair, A.S., On a suspension of nearly spherical colloidal particles under large-amplitude oscillatory shear flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol.791, R5 (2016) [10.1017/jfm.2016.77](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.77).
- [6] Fielding, S.M., Editor's preface to the special issue: shear banding in complex fluids, Journal of Rheology, Vol.60, No.5 (2016), pp.819-820, DOI: [10.1122/1.4961479](https://doi.org/10.1122/1.4961479).
- [7] Divoux, T., Fardin M.A., Manneville S., and Lerouge S., Shear banding of complex fluids, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.48 (2016), pp.81-103, DOI: [10.1146/annurev-fluid-122414-034416](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034416).
- [8] Feng, J.J. and Chen C.-Y., Interfacial dynamics in complex fluids, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.11, No.4 (2016)。
- [9] 玉野真司, 日出間り, 希薄溶液の流動学特集号に添えて, 日本レオロジー学会誌, Vol.44, No.3 (2016), p.117.
- [10] 蝶野成臣, 鳴海敬倫, 山本剛宏, 「複雑流体の流動現象」特集号発刊にあたって, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823

(2015), DOI: [10.1299/transjsme.15-pre01](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-pre01).

## 7・6 希薄気体流・マイクロ流

希薄気体流については、主要な国際会議のひとつである第30回RGD [1] が開催され、最新の研究が数多く報告された。希薄気体流とマイクロ気体流のどちらにおいても、流体を構成する分子の平均自由行程の系の代表長さに対する比であるクヌッセン数が大きい高クヌッセン数流れとなることが知られている。そのため、この国際会議においても従来からのテーマである低密度である希薄気体流に関する研究発表のみならず、マイクロ気体流、マイクロデバイスや多孔質体内流などのセッションも数多く設けられた。数値解析においては直接シミュレーションモンテカルロ(DSMC)法、ボルツマン方程式に対するモデル方程式などから分子動力学法など様々な手法に関する研究が報告されており、格子ボルツマン法の利用に関する研究発表も増えてきている。一方で実験に関する発表件数はあまり多くないものの、希薄気体流よりはマイクロ気体流に関する報告が増えてきている。欧州では2008年から2012年にかけて実施されてきたGASMEMS (Gas Flows in Micro-Electro-Mechanical Systems) に引き続き、2015年より2019年までHorizon 2020 研究およびイノベーション分野の枠組の中でMIGRATE (Miniaturized Gas flow foR Applications with enhanced Thermal Effects) [2] の名称で、マイクロスケールにおける気体の熱流動に関して、研究および教育のネットワークを構築して活発な活動が行われている。大学、研究機関及び企業が、理論、数値解析、実験、応用の観点から協力し合い、特に博士課程、ポスドクの若手研究者の育成に力を入れたプロジェクトである。

マイクロ流に関しては、マイクロ流体デバイスの研究の進展とともに、流体工学の視点にたった研究のみならず、センサー、化学分析、医療応用など非常に多岐に渡る応用研究も非常に精力的に進められている。そのため、流体工学を主体とする国際会議や学術雑誌のみならず、熱工学、化学工学、マイクロ加工工学など幅広い分野を主体とする、MEMS2016 [3] や $\mu$ TAS2016 [4] をはじめとする数多くのマイクロスケールに関する国際会議やMicrofluidics and Nanofluidics [5] をはじめとする様々な学術雑誌においても数多くの研究が報告されている。また、日本機械学会マイクロ・ナノ工学部門主催でマイクロ・ナノ工学国際シンポジウム [6] が開催され、ここでもマイクロ流に関連するセッションが設けられ、18件の口頭発表が行われている。なお、マイクロ流をマイクロスケールの流れと考えた場合に、従来の流体工学の分類で考えた混相流、圧縮性流れ、非ニュートン流体、拡散・混合・反応流、噴流、流れの可視化、生体流れ・医療応用などの幅広い分野の流れの微小化に伴う研究が行われており、マイクロ流という観点のみ



ならずそれぞれの分野におけるマイクロスケール化という観点からも注目されたい。例えば、機械学会論文集では、マイクロジェットに関する報告や [7], 微小生物の推進機構に関する報告 [8], マイクロチャンネル内の流動に関する報告 [9] が行われている。

[山口 浩樹 名古屋大学]

文 献

[1] A. Ketsdever and H. Struchtrup, ed., 30th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics: RGD 30, AIP Conference proceedings 1786 (2016). <http://conferences.uvic.ca/index.php/rgd/RGD30/index> (参照日 2017 年 4 月 13 日).

[2] <http://www.migrate2015.eu/> (参照日 2017 年 4 月 13 日).

[3] 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (2016). <http://www.mems2016.org/> (参照日 2017 年 4 月 13 日).

[4] Proceedings of 20th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2016) (2016). <http://www.microtas2016.org/> (参照日 2017 年 4 月 13 日).

[5] <http://link.springer.com/journal/10404> (参照日 2017 年 4 月 13 日).

[6] Proceedings of International Symposium on Micro-Nano Science and Technology 2016 (2016). <http://www.iwaselab.amech.waseda.ac.jp/mnm2016/> (参照日 2017 年 4 月 13 日).

[7] 河本仙之介, 早坂啓祐, 野口悠斗, 田川義之, レーザー誘起マイクロジェットの体積, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No.838 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00094.

[8] 白井敦, 井上浩介, 早瀬敏幸, 須藤誠一, 水棲微小生物の繊毛遊泳脚による推進機構に関する数値解析 (単一遊泳脚モデルの繊毛間隔が推進力に与える影響), 日本機械学会論文集, Vol. 82, No.840 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00099.

[9] 山本憲, 廣瀬雄哉, 武澤英之, 小方聡, 気泡トラップによるマイクロチャンネル内スリップ流形成過程の可視化, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No.841 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.16-00164.

下流における線状加熱源による熱拡散の実験 [4] や, フラクタル格子乱流中のスカラー混合層の LES (ラージ・エディ・シミュレーション) を行った研究 [5] がある。

また, 反応流の研究としては, 端面が回転する円筒キャビティにおいて PIV (Particle Image Velocimetry) と PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) を組み合わせて, 酢酸と水酸化アンモニウムの中和反応の濃度を実験と数値計算により比較した研究 [6] がある。乱流拡散・混合の問題に対しては, 高シュミット数 ( $Sc=600$ ) の液相において, 乱流格子下流に生成される反応性スカラー混合層に対して, LES と Lagrange 粒子計算 (Lagrangian-Particle-Simulation) を組み合わせて, 各種反応速度に対する数値計算が行われている [7]。さらに, この Lagrange 粒子計算における分子拡散のモデルとして, 多粒子相互作用に基づく Mixing Volume Model (MVM) モデルが提案されている [8]。

以上のように, 拡散・混合・反応流の研究は実験および数値計算により着実に進められている。DNS を行うことが困難な, 高プラントル数, 高シュミット数の拡散・混合現象については, 今後も実験的研究や LES などの数値モデルの開発が期待される。

[久保 貴 名城大学]

文 献

[1] Chen, X., Li, T., Zeng, H., Hu, Z. and Fu, B., Numerical and experimental investigation on micromixers with serpentine microchannels, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 98 (2016), pp. 131–140, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.041.

[2] Rahmani, M., Seymour, B.R. and Lawrence, G.A., The effect of Prandtl number on mixing in low Reynolds number Kelvin Helmholtz billows, Physics of Fluids, Vol. 28, 054107 (2016), DOI: 10.1063/1.4949267.

[3] Chen, J.G., Zhou, Y., Zhou, T.M. and Antonia, R.A., Three-dimensional vorticity, momentum and heat transport in a turbulent cylinder wake, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 809 (2016), pp. 135–167, DOI: 10.1017/jfm.2016.664.

[4] Nedic, J. and Tavoularis, S., Measurements of passive scalar diffusion downstream of regular and fractal grids, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 800 (2016), pp. 358–386, DOI: 10.1017/jfm.2016.385.

[5] Watanabe, T., Sakai, Y., Nagata, K., Ito, Y. and Hayase, T., Implicit large eddy simulation of a scalar mixing layer in fractal grid turbulence, Physica Scripta, Vol. 91, 074007 (2016), DOI: 10.1088/0031-8949/91/7/074007.

[6] Sancho, I., Varela, S., Vernet, A. and Pallares, J., Characterization of the reacting laminar flow in a cylindrical cavity with a rotating endwall using numerical simulations and a combined PIV/PLIF technique, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 93 (2016), pp. 155–166, DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.011.

[7] Watanabe, T. and Nagata, K., LES-Lagrangian-Particles-Simulation of Turbulent Reactive Flows at High Sc Number Using Approximate Deconvolution Model, AIChE Journal, Vol. 62, No. 8 (2016), pp. 2912–2922, DOI: 10.1002/aic.15261.

7.7 拡散・混合・反応流

本節では主に物質の拡散・混合の研究を対象とするが, 一部熱の拡散についても紹介する。反応流については, 燃焼を除く化学反応を対象とする。

まず層流中の拡散・混合研究として, 矩形状, 波状, ジグザグ状などの各種マイクロチャンネルにおける混合に対するレイノルズ数の影響等を実験と数値計算で研究した例 [1] がある。さらに, 時間発展混合層における混合に対するプラントル数の影響を DNS (直接数値計算) によって調べた研究 [2] がある。

一方, 乱流中の研究としては, 加熱円柱の後流において, 4 個の X 型熱線と 4 本の冷線を使って速度, 渦度および温度を同時測定した研究 [3] が注目される。この複雑なプローブを使った測定結果から, 円柱後流の熱・運動量輸送の概念モデルを提案している。高効率な混合が期待されるフラクタル格子については, 通常格子とフラクタル格子

- [8] Watanabe, T. and Nagata, K., Mixing model with multi-particle interactions for Lagrangian simulations of turbulent mixing, *Physics of Fluids*, Vol. 28, 085103 (2016), DOI: 10.1063/1.4960770.

## 7・8 自然エネルギー

再生可能エネルギーの中でも、流体エネルギーを利用するものとしては、風力、波力、潮力、水力（とくにマイクロ水力）等がある。

風力分野として、国外でもっばら実施されているのは、大形風車や大規模ウインドファームの研究であり、大形風車の荷重推定のためのシミュレーション [1]、大規模ウインドファームの発電量推定のための大気安定性や後流に関する研究 [2]、洋上ウインドファームのためのドップラ・ライダによる風況観測手法の高度化 [3] などがある。国内の研究としては、水平軸風車と垂直軸風車の研究に分けることができる。水平軸風車の研究では、風車周囲の速度場を解析する基礎研究、プラズマ気流制御による翼面流れの改善研究、ドップラ・ライダによる風車流入風の計測や出力制御、ピッチ角制御による翼荷重低減のための研究、1本のタワーに複数の水平軸風車を設置するマルチ風車システムなどの多様な研究が行われた。一方、垂直軸風車では、垂直軸風車によりダクト排気のエネルギーを回収する研究、特殊な翼断面形状を有する垂直軸風車の性能評価、リンク等のピッチ角可変機構による垂直軸風車の性能改善、波状翼を採用した垂直軸風車の性能解析などの独創的なアイデアに基づく研究が多くなされた。

波力分野として、国外で行われている研究としては、様々な構造や原理の波力発電システムの開発が主流であるほかに、波浪スペクトルが浮体式波力発電装置の発電量推定に及ぼす影響 [4] や、浮体式波力発電装置上に洋上風車を搭載してコストメリットを生み出す研究 [5] も行われた。国内の研究としては、衝動タービンとウエルズタービンの研究に分けることができる。衝動タービンの研究では、翼枚数や取付角の最適化による性能改善、流体力学的な付加部品による性能改善、流体スイッチングによるツイン衝動型タービンの開発などの模型実験が主に行われた。一方、ウエルズタービンの研究では、翼の三次元形状化、セレーションによる騒音低減、幅広い流量域でウエルズタービンの性能を改善するために衝動タービンを補助に用いた研究などが行われた。その他、波浪ブイ式の波力発電機や垂直軸タービンを用いた波力発電機の研究も行われた。なお、潮流分野では、往復流型衝動タービンを用いた潮流発電システム、シュラウドやディフューザを用いたタービンによる潮流発電システムの研究が行われた。

水力分野として、国外で行われている研究は、低流量・低落差・部分負荷というマイクロ水車特有の課題を補うためのシステム開発が多い。水道管内へのプロペラ水車の設

置 [6] や二重反転ランナを用いた水道管内のエネルギー回復 [7]、アルキメデスらせん水車の実験と理論研究 [8]、低落差水車に及ぼす自由表面の影響に関する研究 [9] などがある。国内では、開水路にプロペラ水車やダリウス水車を設置するときの性能解析、衝動タービンのノズルとランナの最適化の研究などが行われた。

〔前田 太佳夫 三重大学〕

## 文 献

- [1] Sayed, M., Lutz, T. and Kramer, E., 3-D time-accurate CFD simulations of a multi-megawatt slender bladed HAWT under yawed inflow conditions, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.749, No.1, 012008 (2016), 13p.
- [2] Schmidt, J., Chang, C., Dörenkämper, M., Salimi, M., Teichmann, T. and Stoevesandt, B., The consideration of atmospheric stability within wind farm AEP calculations, *Journal of Physics: Conference Series* Vol.749, No.1, 012002 (2016), 9p.
- [3] Schmidt, M., Trujillo, J.J. and Kuhn, M., Orientation correction of wind direction measurements by means of staring lidar, *Journal of Physics: Conference Series* Vol.749, No.1, 012005 (2016), 10p.
- [4] Bretl, J.G., Edwards, K.A., Montgomery, J.M., Parsa, K. and Mekhiche, M., Effect of wave spectra on power predictions for an OPT PowerBuoy, *The Proceedings of The Twenty-sixth International OCEAN AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE*, Vol.1 (2016), pp.649-651.
- [5] Soerensen, H.C., Friis-Madsen, E. Russel, I., Parmeggiani, S. and Fernández-Chozas, J., Feasibility and LCA for a Wave Dragon platform with wind turbines, *Proceedings of The Twenty-sixth International OCEAN AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE*, Vol.1 (2016), pp.570-575.
- [6] Samora, I., Hasmatuchi, V., Münch-Alligné, C., Franca, M.J., Schleiss, A.J. and Ramos, H.M., Energy production with a tubular propeller turbine, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol.49, 102001 (2016), 8p.
- [7] Andolfatto, L., Vagnoni, E., Hasmatuchi, V. and Munch-Alligné, C. and Avellan, F., Simulation of energy recovery on water utility networks by a micro-turbine with counter-rotating runners, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol.49, 102012 (2016), 8p.
- [8] Dellinger, G., Garambois, P-A., Dufresne, M., Terfous, A., Vazquez, J. and Ghenaïm, A., Numerical and experimental study of an Archimedean Screw Generator, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol.49, 102002 (2016), 10p.
- [9] Pelz, P.F. and Froehlich, T., Free surface influence on low head hydro power generation, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol.49, 102005 (2016), 7p.

## 7・9 噴流

工学機器において混合・拡散を促進するため、噴流の流れに関する分析と制御がこれまでに行われてきた。自由噴流に関する基礎的な統計特性に関して、円形噴流のせん断層におけるエネルギー収支とその自己相似性に関する評価 [1] が行われた。また周囲流体との混合や噴流自体の拡散に関する物理現象の理解とともにモデリングの観点から



## 文 献

も噴流外縁に形成される乱流・非乱流界面について注目が集まっており、平面噴流の速度・圧力同時計測による界面付近での統計量が評価された [2]。実用では単一の自由噴流だけではなく多数の噴流が配置される状況も多い。特に多重噴流の性能向上において噴流間の干渉が重要な因子となることから、噴流間隔に対する多重噴流の流動特性が調べられた [3]。さらに工学的な混合・拡散とは別に、多重噴流を対向して配置し、個々の噴流をランダムに制御して均質乱流を生成する研究 [4] や、複数噴流を複数物体に噴射することにより、非接触で物体の移動・位置を制御する研究 [5] が新しい試みとして行われた。

自由噴流の流れを制御する研究もこれまでどおり活発に行われている。受動的な制御方法として円形噴流のノズル出口周囲に振動する半デルタ翼が取り付けられた場合における混合・拡散特性の評価 [6] や、能動的な方法として DBD プラズマアクチュエータを長方形噴流のノズル入口部に配置し、対向するアクチュエータに位相差を設け間欠的に噴出制御された場合の拡散特性の評価 [7]、円形噴流のノズル出口周囲でパルス状に微小噴流を噴出する方法によりヘリカルや軸対称モード励起し、形成されたこれらモードによる混合特性に関する研究 [8]、円形噴流の出口周囲に2つの微小噴流を対向させて配置し、パルスの吹き付けた場合に対する開・閉ループ制御した制御特性に関する研究 [9] が行われた。

物体からの剥離を制御する有効な手段として周期的に流体を吸引/噴出するシンステックジェット (SJ) の研究がこれまでに進んできた。制御デバイスとして SJ 自体を機能強化するために、SJ の吸引/噴出の一周期内に噴出口径の開口率を変化させる方法による噴出特性の向上に関する研究 [10]、2本の SJ を配置し干渉させた場合に生じる SJ のベクトリング (偏向) による拡散特性の向上に関する研究 [11]、プラズマ DBD による SJ の機能改善に関する特性評価 [12] が行われた。また、SJ を利用した流動制御もこれまでどおり行われており、2本の SJ を利用した剥離流れの制御特性に関する研究が行われた [13]。

噴流を固体壁面に衝突させる衝突噴流については伝熱特性を含めてこれまで多くの研究が行われてきた。特に流動特性に関する研究に着目すると、衝突させる自由噴流に対し、受動制御としてノズル形状を楕円形にした噴流 [14]、円形ノズル内にフラクタル格子を配置した噴流 [15]、パルス状に印加されたかく乱により能動的に制御された噴流 [16] による流動特性に関する評価が行われた。さらに複数の円形噴流が列に配置された多重衝突噴流について噴流間干渉などの流動特性が評価された [17]。このほか基本的な噴流の流れとして、横断流れに置かれた噴流 [18] や壁面噴流 [19] についても研究が行われた。

[辻本 公一 三重大学]

- [1] Hamed Sadeghi, Philippe Lavoie, Andrew Pollard, Scale-by-scale budget equation and its self-preservation in the shear-layer of a free round jet, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 61 (2016), pp. 85–95, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.03.005](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.03.005).
- [2] Osamu Terashima, Yasuhiko Sakai, Kouji Nagata, Yasumasa Ito, Kazuhiro Onishi, Yuichi Shouji, Simultaneous measurement of velocity and pressure near the turbulent/non-turbulent interface of a planar turbulent jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.75 (2016), pp.137–146, DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2016.02.007](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.02.007).
- [3] Klas Svensson, Patrik Rohdin, Bahram Moshfegh, On the influence of array size and jet spacing on jet interactions and confluence in round jet arrays, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.138, No. 8 (2016), DOI: [10.1115/1.4033024](https://doi.org/10.1115/1.4033024).
- [4] Douglas Carterm, Alec Petersen, Omid Amili, Filippo Coletti, Generating and controlling homogeneous air turbulence using random jet arrays, *Experimental in Fluids*, Vol.57, No.189 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2281-y](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2281-y).
- [5] 松下 翼, 土橋 直晃, 岩城 敏, 高木 健, 小作 敏晴, 複数の空気噴流による平面上物体の非接触操作 (4本のエアジェットノズルを用いた複数物体制御方式の実験的検討), *日本機械学会論文集*, Vol.82, No.835(2016), DOI: [10.1299/transjsme.15-00459](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00459).
- [6] 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2報: 温度場の統計量による評価), *日本機械学会論文集*, Vol.82, No.838 (2016), DOI: [10.1299/transjsme.16-00087](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00087).
- [7] Yasuaki Kozato, Satoshi Kikuchi, Shigeki Imao, Yoshihisa Kato, Katsumi Okayama, Flow control of a rectangular jet by DBD plasma actuators, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 62 (2016), pp. 33–43, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.09.014](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.09.014).
- [8] Shanying Zhang, John T. Turner, On the development of a turbulent jet subjected to aerodynamic excitation in the helical mode, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.78 (2016), pp.278–291, DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2016.06.016](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.016).
- [9] Z. Wu, Y. Zhou, H.L. Cao, W.J. Li, Closed-loop enhancement of jet mixing with extremum-seeking and physics-based strategies, *Experimental in Fluids*, Vol.57, No.107 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2194-9](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2194-9).
- [10] Spencer O. Albright, Stephen A. Solovitz, Examination of a variable-diameter synthetic jet, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 138, No.12 (2016), DOI: [10.1115/1.4033912](https://doi.org/10.1115/1.4033912).
- [11] Tim Berk, Guillaume Gomit, Bharathram Ganapathisubramani, Vectoring of parallel synthetic jets: a parametric study, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 804 (2016), pp. 467–489, DOI: [10.1017/jfm.2016.559](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.559).
- [12] Haohua Zong, Yun Wu, Huimin Song, Min Jia, Efficiency characterized of plasma synthetic jet actuator driven by pulsed direct-current discharge, *AIAA Journal*, Vol.54, No.11 (2016), pp. 3409–3420, DOI: [10.2514/1.J054987](https://doi.org/10.2514/1.J054987).
- [13] Xin Wen, Hui Tang, Fei Duan, Interaction of in-line twin synthetic jets with a separated flow, *Physics of Fluids*, Vol. 28, 043602 (2016), DOI: [10.1063/1.4946800](https://doi.org/10.1063/1.4946800).
- [14] J. Long, T.H. New, Vortex dynamics and wall shear stress behaviour associated with an elliptic jet impinging upon a flat plate, *Experimental in Fluids*, Vol.57, No.121 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2206-9](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2206-9).

- [15] Gioacchino Cafiero, Carlo Salvatore Greco, Tommaso Astarita, Stefano Discetti, Flow field features of fractal impinging jets at short nozzle to plate distances, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.78 (2016), pp. 334-344, DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2016.06.009](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.009).
- [16] Sina Ghadi, Kazem Esmailpour, S.M. Hosseinalipour, Arun Mujumdar, Experimental study of formation and development of coherent vortical structures in pulsed turbulent impinging jet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.74 (2016), pp. 382-389, DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2015.12.007](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.12.007).
- [17] Alexandros Terzis, On the correspondence between flow structures and convective heat transfer augmentation for multiple jet impingement, *Experimental in Fluids*, Vol.57, No.146 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2232-7](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2232-7).
- [18] L. Gevorkyan, T. Shoji, D.R. Getsinger, O.I. Smith, Transverse jet mixing characteristics, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 790 (2016), pp. 237-274, DOI: [10.1017/jfm.2016.5](https://doi.org/10.1017/jfm.2016.5).
- [19] Ahmed Kaffel, Jean Moureh, Jean-Luc Harion, Serge Russeil, TR-PIV measurements and POD analysis of the plane wall jet subjected to lateral perturbation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.78 (2016), pp. 278-291, DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2016.06.016](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.016).

## 7・10 騒音

流れから発生する音に関する研究は、基礎研究、応用研究の両面から進められており、特に数値解析関係の進歩が著しい。自動車や新幹線などの輸送機器、送風機やファンなどの流体機械では、流れのマッハ数が小さいため、空力音の音圧レベルは、流れ場の圧力変動と比較すると極めて小さい。このため、空力音の数値解析では、精度の高い解析が必要となる。現在、空力音の解析で主流となっているのは、流れと音を別々に解析する分離解法 [1, 2]、圧縮性 NS 方程式 [3-6] や格子ボルツマン方程式 [7, 8] を計算して、空力音を予測する直接解法がある。コンピュータ・リソースの問題から従来は分離解法が主流であったが、近年のコンピュータの高性能化に伴い直接解法による解析が増えてきている。低マッハ数の空力音の解析には、圧縮性 NS 方程式を高次精度コンパクトスキームを用いて解く方法が主流になりつつある。これらの技術を複雑形状の工業製品や移動物体の解析に適用するため、埋め込み境界法を用いた研究が進められており、振動角柱から放射される空力音場の予測、リコーダー周りの音場の解析などが行われている。企業（特に自動車関連企業）では、格子ボルツマン法を用いた空力音の解析が広く行われるようになってきている。格子ボルツマン法の利点として、流れと音を直接解析できることだけでなく、同じ規模の NS 方程式の解析に比べて演算数が少なく済むこと、メモリ使用量が小さいこと、並列解析に適していることなどがあげられる。また、市販ソフトでは直交格子を簡便に生成することが可能となっており、この点が企業で広く利用される一因となっている。

空力音が問題となる現象として、燃焼や混相流が新たな

課題となっている。燃焼場や、気泡、水流などを含めた音の直接計算は今後の課題と考えられるが、燃焼場では、非圧縮性燃焼解析で得られた圧力場をもとに波動方程式を用いて音場を計算し、音波による圧力変化を用いて事前に非圧縮性解析で求めた圧力場を修正し、配管の音響モードを考慮する解析なども行われている [9, 10]。この解析手法では、化学反応が生じているような火炎近傍や壁面近傍の微細格子で解析している領域で音波をもとにしたクーラン数が1を超えてしまうという課題があるが、配管系が燃焼場全体に及ぼす影響を調べるのが可能となっており、今後、燃焼場や混相流の解析においても音場の影響を考慮した解析が増えてくると思われる。

自動車などの空力音の解析では数百億要素の大規模解析が行われ、外部音場だけでなく、車体周りの流れと車体構造振動、室内音響を連成させた解析が行われている [10-14]。航空機の空力音に関しては、エンジン（ファンノイズ）、エアフレーム（スラット、フラップ、ギア）境界層騒音（キャビンノイズ）が、問題となっており、ファンノイズとエアフレームノイズは離着陸時の空港騒音に寄与し、境界層騒音は室内音 [15] に対する課題となっている。

実験技術としては、PIVを用いた渦度と音の関係に関する研究 [16]、マイクアレイを用いた研究が行われている [17]。感圧塗料を用いた表面圧力変動計測 [18, 19]、またプラズマアクチュエータ等を用いた空力音の制御に関する研究 [20-22] も多数行われている。

騒音関連の国際会議である INTER NOISE では、空力音に関係する多数のセッションが開かれ活発な議論が行われている。国内では機械学会年次大会、流体工学部門、環境工学部門において空力音に関する研究発表が行われている。

〔飯田 明由 豊橋技術科学大学〕

## 文 献

- [1] 岩瀬 拓, 尾原 秀司, 山出 吉伸, 郭 陽, 加藤 千幸, 空調用多翼ファンにおける流れ場と空力騒音の計算, 日本機械学会年次大会, J0520402.
- [2] Clemens Junger, Florian Zenger, Aaron Reppenhagen, Manfred Kaltenbacher and Stefan Becker, Numerical Simulation of a Benchmark Case for Aerodynamics and Aeroacoustics of a Low Pressure Axial Fan, INTENOISE 2016, 2016.
- [3] 西川幸成, 服部裕司, 埋め込み境界法による空力音直接数値解の研究, 第29回数値流体力学シンポジウム A04-1.
- [4] 若松 裕紀, 渡邊 裕章, 井上 洋平, 前川 博, 壁面近傍のスキームが壁面近傍渦運動から発生する空力音の数値計算に与える影響, 日本機械学会論文集 Vol. 81 (2015) No. 823, DOI: [10.1299/transjsme.14-00544](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00544).
- [5] 横山 博史, 篠原 大志, 中島 崇宏, 宮澤 真史, 飯田 明由, 層流境界層中におかれた折れ部を上流に有する曲面端部から生じるフィードバック音の直接計算, 日本機械学会論文集 Vol. 81 (2015) No. 826, DOI: [10.1299/transjsme.15-00148](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00148).
- [6] Hiroshi Yokoyama, Akira Miki, Hirofumi Onitsuka, and Akiyoshi Iida Direct numerical simulation of fluid-acoustic interactions in a recorder with tone holes *The Journal of Acousti-*



- cal Society of America 138, pp.858–873 2015, DOI: [10.1121/1.4926902](https://doi.org/10.1121/1.4926902).
- [7] 草野 和也, 山田 和豊, 古川 雅人, 格子ボルツマン法による半開放形プロペラファンから発生する乱流騒音の直接数値解析, 日本機械学会九州支部講演論文集 2014 (67), 124-124-2, 2014.
- [8] 國嶋 雄, 葛原 道久, 橋爪 祥光, 熊野 宜弘, 前田 裕樹, 差分格子ボルツマン法による流れ方向に斜めに配置された2次元フィン列を過ぎる流れから生じる空力音の直接計算, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015) No. 825, DOI: [10.1299/transjsme.14-00467](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00467).
- [9] Tomoaki Kitano, Keisuke Kaneko, Ryoichi Kurose, Satoru Komori, Large-eddy simulations of gas- and liquid-fueled combustion instabilities in back-step flows, *Combustion and Flame* 170 (2016) 63–78, DOI: [10.1016/j.combustflame.2016.05.005](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.05.005).
- [10] Shigeru Tachibana, Kinya Saito, Takeshi Yamamoto, Mitsumasa Makida, Tomoaki Kitano, Yoichi Kurose, Experimental and numerical investigation of thermo-acoustic instability in a liquid-fuel aero-engine combustor at elevated pressure: Validity of large-eddy simulation of spray, combustion, *Combustion and Flame* 162 (2015) 2621–2637, DOI: [10.1016/j.combustflame.2015.03.014](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.03.014).
- [11] 飯田 明由, 加藤 千幸, 吉村 忍, 飯田 桂一郎, 橋爪 祥光, 山出 吉伸, 秋葉 博, 恩田 邦蔵, 流れに起因する自動車車内騒音の予測, *ながれ*, pp.34 (2), 143–148 2015.
- [12] Kiichiro Iida, Kozo Onda, Akiyoshi Iida, Chiachi Kato, Prediction of aeroacoustical noise of a car, Part 2 Structural and acoustical analysis, SEA Woerld Congress 2016, 2016.
- [13] Yoshinobu Yamade, Chisachi Kato, Akiyoshi Iida, Shinobu Yoshimura, Keiichiro Iida, Prediction of aeroacoustical noise of a car, Part 1 Prediction of Pressure fluctuation, SEA Woerld Congress 2016, 2016.
- [14] Masaaki Mori, Takayuki Masumoto and Kunihiko Ishihara, Study on Acoustic, Vibration and Flow Induced Noise Characteristics of Tshaped rectangular cross-sectional pipe, *INTENOISE 2016* (2016).
- [15] Sebastian Ghinet, Andrew Price, Viresh Wickramasinghe, Yong Chen and Anant Grewal, Cabin noise exposure assessment of the Royal Canadian Air Force CH-147F helicopter through flight testing *INTENOISE2016* (2016).
- [16] Lars Siegel, Klaus Ehrenfried, Arne Henning, Gerrit Lauenroth and Claus Wagner, Acoustic Particle Velocity Investigations in Aeroacoustics Synchronizing PIV and Microphone Measurements *INTENOISE2016* (2016).
- [17] Alessandro Di Marco, Lorenzo Burghignoli, Francesco Centracchio, Roberto Camussi, Thomas Ahlefeldt, Arne Henning and Jürg Müller, Phased Array Aeroacoustic Measurements of an Unmanned Aerial Vehicle Mapping of contributions from car-exterior aerodynamic sources to an in cabin, *INTENOISE2016* (2016).
- [18] 中北 和之, 空力騒音を伴う非定常圧力変動流れ場の非定常PSP計測精度向上, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 1006-1–1006-2, 2015.
- [19] 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 (2015) No. 826, DOI: [10.1299/transjsme.15-00058](https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00058).
- [20] 楠本 誠, 横山 博史, David ANGLAND, 飯田 明由, プラズマアクチュエータによる平板列から発生する空力騒音の制御, 日本機械学会論文集 Vol. 83 (2017) No. 847, DOI: [10.1299/transjsme.16-00364](https://doi.org/10.1299/transjsme.16-00364).
- [21] 佐藤 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐, 空力騒音の低減を目的としたキャビティ内流れの制御, 日本機械学会流体工学

部門講演会講演論文集 1210-1–1210-2, 2015.

- [22] 小林 将志, 浅井 雅人, 層流境界層における突起音の発生に対する突起傾斜の影響, 日本機械学会論文集, Vol. 81 (2015) No. 822, DOI: [10.1299/transjsme.14-00482](https://doi.org/10.1299/transjsme.14-00482).

## 7.11 環境流

地球環境, 大気環境, 海洋・河川環境, 室内環境中の流れである環境流は多岐に渡り研究が行われている。本章では大気環境に関する環境流を中心に研究動向を調べてみた。

本学会が主催する学術講演会や環境流に関連する学術講演会で多数の研究発表が行われた。2016年度日本機械学会年次大会では, 植物後流の構造, 丘状地形上の大気拡散風洞実験, 構造物周りの積雪分布に関して3件, 日本流体力学会年会2016では, 31件(海洋・河川環境9件, 大気・気象14件, 大気境界層や都市境界層7件, 室内空間1件), 2016年度建築学会大会学術講演会では環境工学分野のリモートセンシング, 都市気象解析, 都市気候シミュレーション, 風・大気環境, 風洞実験, CFD(乱流モデル・濃度拡散・室内気流)セッションで40件, 第57回大気環境学会年会では大気質シミュレーションや大気境界層・都市境界層内の大気拡散に関して14件の発表があった。

国内の学術誌では, 本学会が発行している2016年の日本機械学会論文集と流体工学関係の英文誌 *Journal of Fluid Science and Technology* には環境流に関する論文は見られなかったが, 日本建築学会環境系論文集には住宅の換気, 環境汚染物質の発生源同定, ヒートアイランド解析など5編, 大気環境学会誌には冷却塔排気拡散に関して1編, 「ながれ」には津波の越流に関して1編, 風工学会論文集には竜巻の渦構造に関して1編の研究論文が掲載されている。

国外の学術誌では, *Annual Review of Fluid Mechanics* に海洋気候変動のモード予測が1編, *Journal of Fluid Mechanics* には, 植物キャノピー周りの流れの組織的構造, 氷の溶解に及ぼす塩水濃度勾配の影響や氷層のダイナミクス, 安定成層した大気境界層中の鉛直速度分布とスケールに関する研究など16編, *Physics of Fluid* には, 山岳波, 植生周りの重力流, 海流中の非線形波, 2次元キャノピーの抗力測定に関する研究など6編が掲載されている。また, *Boundary-Layer Meteorology* には複雑地形の流動解析, 大気境界層の温度成層影響や大気拡散, 温度成層場や都市キャノピーの風洞実験に関する研究など24編が掲載されている。

大気環境影響評価で実施される大気質シミュレーションでは, 米国ペンシルバニア州立大学とNCAR(アメリカ大気研究センター National Center for Atmospheric Research)で共同開発された気象モデルWRF(Weather Research and Forecasting Model) [1]や米国EPA(アメリカ合衆国環境保護庁 Environmental Protection Agency)が中心と

なって開発している化学輸送モデル CMAQ (Community Multiscale Air Quality) [2] がよく用いられるが、温度成層を伴う大気境界層に WRF と LES (ラージ・エディ・シミュレーション) を接続した研究 [3] や LES による実在都市内の流動解析 [4]、建屋周囲の局所的な大気拡散 [5] や大気境界層の温度成層影響 [6] を DNS (直接数値シミュレーション) により調べた研究もあり、都市キャノピー周囲の流動解析 [7] や大気拡散予測 [8, 9] には CFD (数値流体力学) が使用されている。

[神崎 隆男 大同大学]

## 文 献

- [1] WRF Model Users' Page <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> (参照日 2017 年 4 月 25 日).
- [2] CMAQ Modeling System for Air Quality Management <https://www.epa.gov/air-research/community-multi-scale-air-quality-cmaq-modeling-system-air-quality-management> (参照日 2017 年 4 月 25 日).
- [3] Udina, M., Sun, J., Kosović, B. and Soler, M.R., Exploring vertical turbulence structure in neutrally and stably stratified flows using the Weather Research and Forecasting-Large-Eddy Simulation (WRF-LES) model, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 161, Issue 2 (2016), pp. 355-374, DOI: [10.1007/s10546-016-0171-8](https://doi.org/10.1007/s10546-016-0171-8).
- [4] Giometto, M.G., Christen, A., Meneveau, C. and Fang, J., Spatial characteristics of roughness sublayer mean flow and turbulence over a realistic urban surface, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 160, Issue 3 (2016), pp. 425-452, DOI: [10.1007/s10546-016-0157-6](https://doi.org/10.1007/s10546-016-0157-6).
- [5] Goulart, E.V., Coceal, O., Branford, S. and Thomas, T.G., Spatial and temporal variability of the concentration field from localized releases in a regular building array, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 159, Issue 2 (2016), pp. 241-257, DOI: [10.1007/s10546-016-0126-0](https://doi.org/10.1007/s10546-016-0126-0).
- [6] Mellado, J.P. and van Heerwaarden, C.C., Near-surface effects of free atmosphere stratification in free convection, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 159, Issue 1 (2016), pp. 69-95, DOI: [10.1007/s10546-015-0105-x](https://doi.org/10.1007/s10546-015-0105-x).
- [7] Goodfriend, E., Chow, F.K. and Vanella, M., Large-eddy simulation of flow through an array of cubes with local grid refinement, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 159, Issue 2 (2016), pp. 285-303, DOI: [10.1007/s10546-016-0128-y](https://doi.org/10.1007/s10546-016-0128-y).
- [8] Michioka, T., Takimoto, H. and Ono, H. and Sato, A., Effect of fetch on a mechanism for pollutant removal from a two-dimensional street canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 160, Issue 1 (2016), pp. 185-199, DOI: [10.1007/s10546-016-0136-y](https://doi.org/10.1007/s10546-016-0136-y).
- [9] Tomas, J.M., Pourquie, M.J.B.M. and Jonker, H.J.J., Stable stratification effects on flow and pollutant dispersion in boundary layers entering a generic urban environment, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 159, Issue 2 (2016), pp. 221-239, DOI: [10.1007/s10546-015-0124-7](https://doi.org/10.1007/s10546-015-0124-7).

## 7・12 流れの可視化

分子から放出される蛍光や燐光には流れの圧力や温度などの情報が含まれおり、CCD カメラなどの撮像装置を用いて蛍光・燐光強度分布を取得することで流れを計測でき

る。このような手法の一つである感圧塗料 (PSP: Pressure-Sensitive Paint) を用いると壁面圧力分布を高い空間分解能で可視化できる。現在、数十  $\mu\text{s}$  の応答時間を有し、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) [1] が注目を集めている。しかし、この塗料は短時間の励起光照射で発光強度が大きく低下する欠点がある。この欠点を解消する塗料として、ポリマー粒子感圧塗料 (PP-PSP: Polymer-Particle Pressure-Sensitive Paint) [2] が 2016 年に提案されている。

近年、蛍光・燐光を利用した手法を用いて高速の非定常流れを可視化・計測した研究が数多く見られる。2016 年には、衝撃波管における壁面熱流束分布の時間変化を感温塗料 (TSP: Temperature-Sensitive Paint) で鮮明に可視化した研究 [3] や 25 kHz で振動する超音速キャビティ流れにおいて伝播する圧力波を感圧塗料で捉えた研究 [4] などがある。また、圧力変動の小さい低速流れに感圧塗料を用いると、取得した画像のノイズに圧力変動の情報が埋もれてしまうため、非定常圧力計測が困難になる。この問題を解決するために固有直交分解 (POD: Proper Orthogonal Decomposition) を応用し、ノイズを効果的に除去した例 [5] が 2016 年に報告されている。

流れがマイクロスケールになると、圧力孔を介した計測やプローブを挿入する計測、さらには光の干渉や屈折を利用した光学計測が極めて困難になる。したがって、分子の蛍光や燐光を“イメージング”する手法がマイクロ流れの計測には有効である。2016 年には、分子タグ流速測定法 (MTV: Molecular Tagging Velocimetry) を用いて、マイクロノズル内における超音速流れの速度を計測した例 [6] が報告されている。また、アセトンを発光分子としたレーザー誘起蛍光 (LIF: Laser-Induced Fluorescence) 法を用いてマイクロノズル内の不足膨脹流れに特有な現象を明らかにした研究 [7] や感圧塗料を用いて急激な収縮部のあるマイクロ流路内の圧力分布を可視化した研究 [8] がある。

流れの密度変化にともなう屈折率変化によって生じる背景画像の変化から流れを可視化する BOS (Background-Oriented Schlieren) の研究が現在盛んに行われている。2016 年には、この手法で多方向から撮像した BOS 画像をもとに噴流の三次元構造を可視化した研究 [9] や水中衝撃波により誘起された圧力場を可視化した研究 [10] などがある。

粒子の追従性が問題とならない流速の低い流れや大きなスケールの高速流れにおいては、PIV (Particle Image Velocimetry) は流れの構造を詳細に知る上で非常に有効な手段である。近年ではトモグラフィック (Tomographic) PIV により流れの詳細な三次元構造を明らかにした研究が数多く報告されている。2016 年には、この手法により層流境界層内に発生させたヘアピン渦の発達過程を三次元的に可視化した研究 [11] や出口直径 50.8 mm のノズルから生じるマッハ 1.4 の超音速噴流における乱流強度や渦度の



三次元分布を計測した研究 [12] などがある。

〔半田 太郎 豊田工業大学〕

## 文 献

- [1] Pandey, A. and Gregory, J.W., Frequency-response characteristics of polymer/ceramic pressure-sensitive paint, *AIAA Journal*, Vol.54, No.1 (2016), pp.174-185, DOI: [10.2514/1.J054166](https://doi.org/10.2514/1.J054166).
- [2] Matsuda, Y., Uchida, K., Egami, Y., Yamaguchi, H., and Niimi, T., Polymer-particle pressure-sensitive paint with high photostability, *Sensors*, Vol.16, No.4 (2016), DOI: [10.3390/s16040550](https://doi.org/10.3390/s16040550).
- [3] Ozawa, H., Experimental study of unsteady aerothermodynamics phenomena on shock-tube wall using fast-response temperature-sensitive paints, *Physics of Fluids*, Vol.28, No.4 (2016), DOI: [10.1063/1.4947040](https://doi.org/10.1063/1.4947040).
- [4] Oka, T., Handa, T., Matsuda, Y., Egami, Y., Akagi, F., Yamaguchi, S., Yamabe, K., and Masuda, Y., Investigation of supersonic mixing enhanced by cavity-induced oscillatory flow using AA-PSP, *Proceedings of the 27th International Symposium on Transport Phenomena*, (2016), Paper No. ISTP27-086.
- [5] Peng, D., Wang, S., and Liu, Y., Fast PSP measurements of wall-pressure fluctuation in low-speed flows: improvements using proper orthogonal decomposition, *Experiments in Fluids*, Vol.57, No.4 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2130-z](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2130-z).
- [6] Yamaguchi, H., Hayashida, K., Ishiguro, Y., Takamori, K., Matsuda, Y., and Niimi, T., Micro-molecular tagging velocimetry of internal gaseous flow, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol.20, No.2 (2016), DOI: [10.1007/s10404-015-1700-3](https://doi.org/10.1007/s10404-015-1700-3).
- [7] Handa, T., Matsuda, Y., and Egami, Y., Phenomena peculiar to underexpanded flows in supersonic micronozzles, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol.20, No.12 (2016), DOI: [10.1007/s10404-016-1831-1](https://doi.org/10.1007/s10404-016-1831-1).
- [8] Huang, C.-Y., Chen, Y.-H., Wan, S.-A., and Wang, Y.-C., Quantitative visualization of asymmetric gas flow in constricted microchannels by using pressure-sensitive paint, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.26, No.10 (2016), DOI: [10.1088/0960-1317/26/10/105002](https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/10/105002).
- [9] Nicols, F., Todoroff, V., Plyer, A., Le Besnerais, G., Donjat, D., Micheli, F., Champagnat, F., Cornic, P., and Le Sant, Y., A direct approach for instantaneous 3D density field reconstruction from background-oriented schlieren (BOS) measurements, *Experiments in Fluids*, Vol.57, No.1 (2016), DOI: [10.1007/s00348-015-2100-x](https://doi.org/10.1007/s00348-015-2100-x).
- [10] Hayasaka, K., Tagawa, Y., Liu, T., and Kameda, M., Optical-flow-based background-oriented schlieren technique for measuring a laser-induced underwater shock wave, *Experiments in Fluids*, Vol.57, No.12 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2271-0](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2271-0).
- [11] Sabatino, D.R. and Rossmann, T., Tomographic PIV measurements of a regenerating hairpin vortex, *Experiments in Fluids*, Vol.57, No.1 (2016), DOI: [10.1007/s00348-015-2089-1](https://doi.org/10.1007/s00348-015-2089-1).
- [12] Wernet, M.P., Application of Tomo-PIV in a large-scale supersonic jet flow facility, *Experiments in Fluids*, Vol.57, No.9 (2016), DOI: [10.1007/s00348-016-2228-3](https://doi.org/10.1007/s00348-016-2228-3).

## 7・13 生体流れ・医療応用

生体流れは、大きくは循環器系と呼吸器系に分類され、それぞれの分野において様々な研究がなされている。しかし本節では、紙面の都合上、循環器系における血液流れに関するテーマの一つである、脳動脈瘤に関する近年の研究動向について述べる。脳動脈瘤の破裂は重篤な病態であり、治療方針としては膨張・破裂を未然に防ぐことに焦点が置かれている。脳動脈瘤の膨張・破裂には瘤内の血流が深く関与していると考えられていることから、治療指針としては、瘤内への血流の浸入を低減させることに主眼が置かれている。その方法として一般的なのは、血管側からカテーテルを使って瘤内にコイルやバルーンを詰めることにより血流を変化させる低侵襲性の血管内治療である。例えば Nair ら [1] は、血管分岐部にできる脳動脈瘤のサイズや血管形状、またコイルの密度が血流および血管形状に及ぼす変化を明らかにした。その結果、コイルの密度により瘤内の血流変動や瘤壁面におけるせん断応力が大きく変化するのに対して、瘤のサイズは瘤内への血流浸入量に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。また血管分岐角度の影響は小さいことも示した。しかし、ネック部が直径 4 mm 程度以上の比較的大きな脳動脈瘤では、瘤内に挿入したコイルが親動脈内に逸脱してしまう恐れがある。そこで、ステントをネック部に留置し、ステントメッシュの間からコイルを挿入し塞栓するステントアシストコイル塞栓術が主流となっている。Alghamdi ら [2] は、小血管においては Low-profile Visualized Intraluminal Support (LVIS) Junior stent を用いると予後の経過が良いことを示した。

一方コイルを用いない手法として近年実用化されたのが、フローダイバー型ステント留置術である [3-5]。この手法はステントそのものによって瘤内への血流浸入を抑制しようとするものであり、上記のアシストステントに比べて閉塞率が 10 倍程度大きい。この治療法も予後の経過が順調であるという報告がある反面、特に瘤が大きな場合には瘤内の血栓化が促進されないことが問題とされてきた [6, 7]。そこで Ito ら [8] は、直径が 6 mm の脳動脈瘤に対してフローダイバー型ステントを留置した場合における瘤内の血行状態を調査した。その結果、ステント留置を留置しない場合にはいわゆるキャビティ流れのような流れが生じるのに対して、ステントを留置した場合にはその流れの回転方向が逆になり、上流側から血流が瘤内に流入、下流側から流出することを明らかにした。この原因は、ステントに血流がぶつかることで高い圧力場が生じる瘤内外での大きな圧力差が原因であること [9] を示した。さらにこれに伴い瘤内への血流流入量がステント留置により増大する場合があることや、血管内皮細胞の配列が乱れにつながる指標とされる Oscillatory Shear Index (OSI) が悪化することも示した。

上記のように様々な治療法が確立されつつあるものの、多様性や生体特有の複雑さから、完璧な治療法を確立するのは簡単ではない。また十年以上の長期的な影響をも考慮する必要があるが[10]、これを短期的研究で明らかにすることは困難である。一方、近年の医学分野においては、Watson (IBM 社) に代表されるように、クラウドコンピューティングによる膨大なデータの蓄積と人工知能が数々の新発見や新治療法の提案という実績を残しつつある。よって、この積極的な活用が医工学研究を加速させると期待される。

[伊藤 靖仁 名古屋大学]

## 文 献

- [ 1 ] Nair, P., Chong, B.W., Indahlastari, A., Ryan, J., Workman, C., Farsani, H.Y., Baccin, C.E., Frakes, D., Hemodynamic Characterization of Geometric Cerebral Aneurysm Templates Treated With Embolic Coils, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol.38 (2016), 021011, DOI: [10.1115/1.4032046](https://doi.org/10.1115/1.4032046).
- [ 2 ] Alghamdi, F., Mine, B., Morais, R., Scillia, P., Lubicz, B., Stent-assisted coiling of intracranial aneurysms located on small vessels: midterm results with the LVIS Junior stent in 40 patients with 43 aneurysms, *Neuroradiology*, Vol.58 (2016), pp.665–671, DOI: [10.1007/s00234-016-1668-z](https://doi.org/10.1007/s00234-016-1668-z).
- [ 3 ] Petr, O., Brinjikji, X.W., Cloft, X.H., Kallmes, D.F., Lanzino, G., Current Trends and Results of Endovascular Treatment of Unruptured Intracranial Aneurysms at a Single Institution in the Flow-Diverter Era, *American Journal of Neuroradiology*, Vol.37 (2016), pp.1106–1113, DOI: [10.3174/ajnr.A4699](https://doi.org/10.3174/ajnr.A4699).
- [ 4 ] Wang, C., Tian, Z., Liu, J., Jing, L., Paliwal, N., Wang, S., Zhang, Y., Xiang, J., Siddiqui, A.H., Meng, H., Yang, X., Flow diverter effect of LVIS stent on cerebral aneurysm hemodynamics: a comparison with Enterprise stents and the Pipeline device, *Journal of Translational Medicine*, Vol.14 (2016), pp.199–209, DOI: [10.1186/s12967-016-0959-9](https://doi.org/10.1186/s12967-016-0959-9).
- [ 5 ] Zhou, G., Yin, Y.L., Li, M.H., Flow Diversion for Cerebral Aneurysms: A Promising Therapy Needs Full Evaluation, *World Neurosurgery*, Vol.85 (2016) pp.252–262, DOI: [10.1016/j.wneu.2015.09.088](https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.09.088).
- [ 6 ] Cebral, J.R., Mut, F., Raschi, M., Scivano, E., Ceratto, R., Lylyk, P., Putman, C.M., Aneurysm Rupture Following Treatment with Flow-Diverting Stents: Computational Hemodynamics Analysis of Treatment, *American Journal of Neuroradiology*, Vol.32 (2011), pp. 27–33.
- [ 7 ] Rouchaud, A., Brinjikji, W., Lanzino, G., Cloft, H.J., Kadirvel, R., Kallmes, D.F., Delayed hemorrhagic complications after flow diversion for intracranial aneurysms: a literature overview, *Neuroradiology*, Vol.58 (2016), pp.171–177, DOI: [10.1007/s00234-015-1615-4](https://doi.org/10.1007/s00234-015-1615-4).
- [ 8 ] Ito, Y., Matsuda, T., Goyodani, T., Sakai, Y., Iwano, K., Effects of Stent Placement on Hemodynamics in Cerebral Aneurysm, *Proc. of the 13th International Conference of Fluid Dynamics*, (2016), pp.274–275.
- [ 9 ] Bouillot P., Brina O., Ouared R, Lovblad K., Farhat M., Pereira V.M., Hemodynamic transition driven by stent porosity in sidewall aneurysms, *Journal of Biomechanics* Vol.48, No.7 (2015) pp.1300–1309, DOI: [10.1016/j.jbiomech.2015.02.020](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.02.020).
- [10] Kayan Y., Delgado A.J.E., Fease J.L., Tran K., Milner, A.M., Scholz, J.M., Incidence of delayed ipsilateral intraparenchymal hemorrhage after stent-assisted coiling of intracranial

aneurysms in a high-volume single center, *Neuroradiology*, Vol. 58 (2016), pp.261–266, DOI: [10.1007/s00234-015-1624-3](https://doi.org/10.1007/s00234-015-1624-3).