

流体解析システム FrontFlow/Blue による ターボ機械分野の解析事例

山出吉伸ⁱ 加藤千幸ⁱⁱ

Validation Cases of Large Scale Fluid Computations about Turbomachinery using FrontFlow/Blue

Yoshinobu YAMADE Chisachi KATO

流体解析システム FrontFlow/Blue を活用したターボ機械関連の解析事例として、(1)遠心送風機から発生する空力騒音の音源の予測、(2)遠心ポンプの一般性能の予測、および(3)ポンプ吸込水槽に発生する吸込渦の起源の解明について紹介する。これらの解析はスーパーコンピュータ「京」を使用して実施したが、これらの大規模解析における課題および今後稼働するスーパーコンピュータ「富岳」への展望を示す。

(キーワード): 大規模流体解析, 遠心送風機, 遠心ポンプ, ポンプ吸込み水槽

1 はじめに

2020年6月に日本で開発されたスーパーコンピュータ「富岳」が High Performance Linpack (HPL) において、2位の Summit (米国) の2.8倍の415.5 PFLOPSを達成し、Top500 ランキングのトップとなった。図1に HPL の性能の推移を示す。図1の横軸は年であり1目盛り5年である。縦軸は性能をログでプロットしており1メモリ1,000倍である。下の青線は500位の性能、中央の○印は1位の性能、上の赤線は1~500位の性能の総和である。どのデータも1995年~2005年の10年でおおよそ1,000倍、2005~2020年の15年でおおよそ1,000倍の性能向上が確認できる。昨今、性能向上のペースが落ちているものの、計算機性能はこの25年で100万倍もの性能向上を果たしている。表2に日本のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ (以下, E.S.)」、「京」および「富岳」の性能比較を示す。これより、今回「富岳」が達成した HPL の性能 (415.5PFLOPS) は16年前の地球シミュレータの性能 (36TFLOPS) の10万倍以上、8年前の「京」の性能 (10.5PFLOPS) の約40倍である。今後「富岳」

の運用が開始されることにより、様々な分野での貴重な成果が創出されることが期待される。筆者は、「E.S.」、「京」に代表されるスーパーコンピュータを活用した大規模流体解析の実証解析に携わってきた。本稿では、スーパーコンピュータ「京」を活用した大規模流体解析事例を紹介するとともに、「富岳」活用を視野に入れた今後の展望を示す。

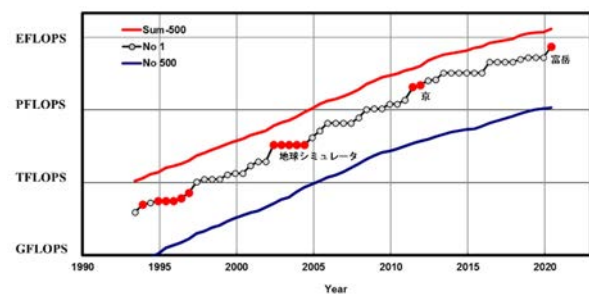


図1 Top500 ランキングにおける計算機性能の推移

ⁱ サイエンスソリューション部 サイエンスソリューション部 社会インフラチーム 課長 博士 (工学)

ⁱⁱ 東京大学生産技術研究所 教授

表 2 国内のスーパーコンピュータの性能の比較

	E.S.	K	Fugaku
Year	2002	2012	2020
Performance/node [GFLOPS]	8	128	3379.2
Num. of nodes	5120	88,128	152,064
Total performance [PFLOPS]	0.041	11.3	513.9
Performance in HPL [PFLOPS]	0.036	10.5	415.5

2 FrontFlow/Blue の概要

本稿で示す実証解析は、加藤ら^{1,2)}が開発した流体解析システム (FrontFlow/Blue, 以下 FFB) を用いた。FFB は乱流現象を高精度に予測することができる LES をベースとする有限要素法流れ解析コードである。本コードは空間フィルタ操作を施された速度 u_i および静圧 p に対する非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式(1)を連続の式とともに解く。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_{SGS}) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 ν_{SGS} は渦動粘性係数であり、式(2)で計算される。

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2)$$

Δ はグリッドフィルタ幅であり、本コードでは各要素を構成する辺の長さの最小値を用いている。 S_{ij} はひずみ速度テンソルである。 C_s はモデル係数であり本コードではダイナミックスマゴリンスキー^{3,4)}により計算する。FFB は実行時に計算格子を自動細分化する機能⁵⁾をサポートしており、この機能を実行時に反復利用することにより最大数千億グリッド規模の解析が可能である。

3 ターボ機械分野の解析事例

FFB の解析ターゲットはターボ機械、船舶、車両等であり、FFB はこれらの分野を対象とした製品への適用事例を多く有している⁶⁻¹⁶⁾。本節では、これらの事例のうち、遠心送風機、遠心ポンプおよびポンプ吸込水槽に対する解析事例を紹介する。

3.1 遠心送風機から発生する空力騒音の音源の予測

遠心送風機から発生する空力騒音を予測するため、遠心送風機内部流れの LES 解析を実施した¹⁵⁾。送風機の羽根車は直径 460 mm, 羽枚数 12, 回転数 3000 rpm であり、羽根車直径およびチップ周速を基準とするレイノルズ数は 2.2×10^6 である。図 2 に遠心送風機内部流れ LES 解析の計算モデルを示す。遠心送風機羽根車の壁面近傍には乱流境界層が発達し、境界層中の渦のスケールは直径でおよそ 0.15 mm, 渦の間隔で 0.75 mm と推定される。本 LES 解析ではこの渦のダイナミクスを直接計算するため、羽根車 1 枚あたり約 3 億グリッド、全体領域で約 50 億グリッドの計算格子を用いた。

図 3 に羽根車に発達する乱流境界層の可視化結果として、壁面における渦度絶対値の瞬時分布を示す。高さ 30 mm の羽根車壁面に対し 50 本ほどのストリーク構造が存在することと、前述の渦の間隔 (0.75 mm) が整合していることより、本 LES 解析により、羽根車壁面に発達する乱流境界層を適切に計算できているといえる。

空力騒音の予測のための音源データを取得するためには、長期間の積分を実施し、送風機内の圧力変動データを抽出する必要がある。計算リソースの都合により、50 億グリッドの計算を長期間継続できなかったため、6.4 億グリッドを用いた LES 解析を長期間 (羽根車 10 回転) 実施することにより、送風機内部の圧力変動データを取得した。図 4 に送風機ケーシング表面における圧力変動スペクトルの比較を示す。圧力変動スペクトルの予測結果は、計測データと良好に一致している。ここでは示していないが、他の計測点においても概ね、計測データとの一致を確認しており、羽根車に発達する乱流境界層を解像していない 6.4 億グリッドを用いた LES 解析においても、遠心送風機内の圧力変動を精度良く予測できることを確認された。

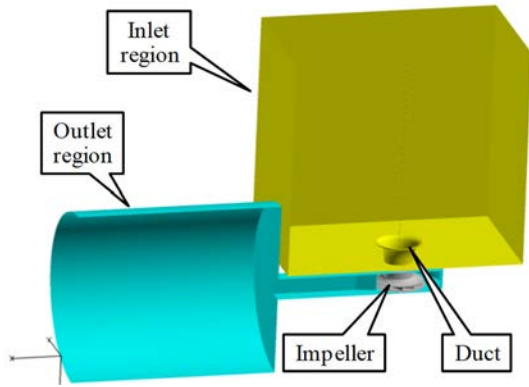


図2 遠心送風機内部流れ LES 解析の計算モデル

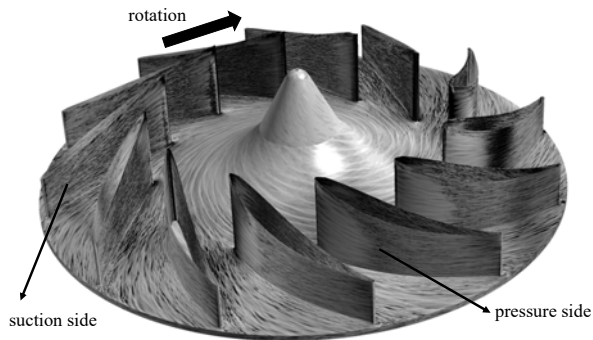


図3 遠心送風機羽根車内部の渦度絶対値の瞬時場

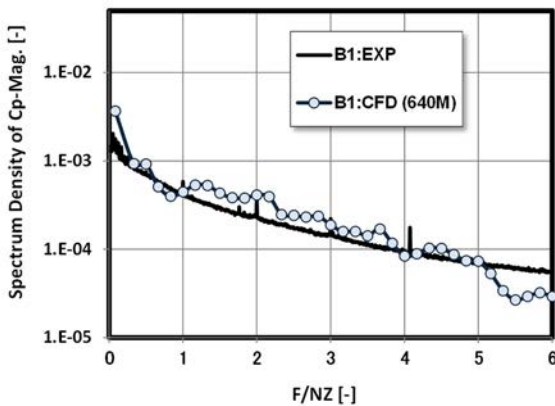


図4 遠心送風機内部の圧力変動スペクトルの比較

3.2 遠心ポンプの一般性能の予測

遠心ポンプに作用する流体力を、非定常特性も含め高精度に予測する技術を確認するため、羽根車直径 318 mm、回転数 1600 rpm、羽根車翼枚数 7、ディフューザ翼枚数 11 の単段遠心ポンプの内部流れの LES 解析を実施した¹⁶⁾。テストポンプの外観を図 5 に示す。計算モデルでは、軸スラストを評価するため、吸込配管、羽根車、ディフューザおよび吐出配管といった主要流路に加え、羽根車背面流路、ライナーリング、バランスピストンおよび戻り流路といった漏れ

流路の流れも解析対象である。

ポンプ直径およびチップ周速を基準とするレイノルズ数は 2.2×10^6 であり、ポンプ水力部の壁面には乱流境界層が発達する。羽根車内部の主流速度スケールをチップ周速の 30%、壁面摩擦速度を主流速度の 4% であると仮定すると、壁面近傍に発達する乱流境界層中の渦スケールは直径で 0.1 mm 程度と推定される。本 LES 解析で使用した計算グリッドは全体で 1.8 億グリッドであり、上記した渦のダイナミクスを解像するには十分でなく、本 LES 解析の位置づけは、将来的に実施する乱流境界層を解像した Wall-Resolved LES の準備計算である。

設計点流量以下、10%流量までの全流量域に対する内部流れの LES 解析を実施し、全揚程、軸動力、戻り流量を評価した。これらを実験値と比較した結果を図 6 に示す。全揚程に関しては実験値とよく一致している。実験値では流量比 30%以下で右上がりの特性となっているが、計算においてもその傾向をとらえている。軸動力に関しては設計点で 6%過大評価しており、低流量側ほど実験値との差異は大きくなっている。戻り流量に関しては全体的に過大評価しているものの低流量側で戻りが増える傾向はとらえられている。

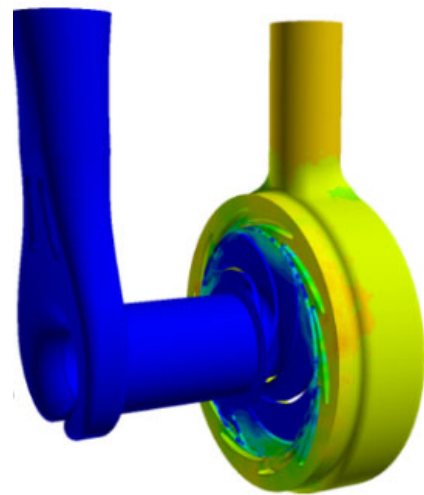
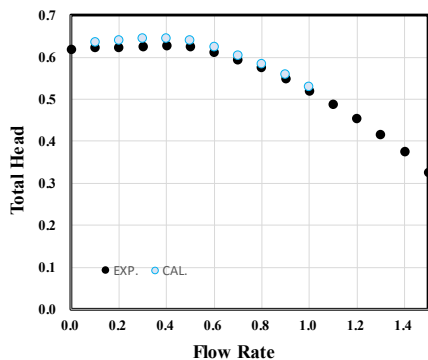
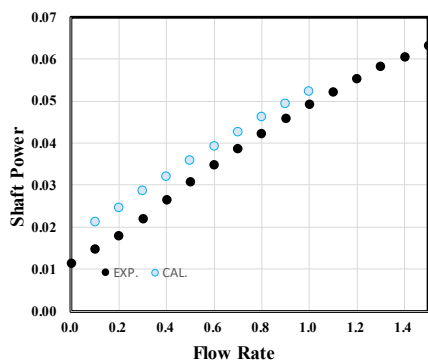


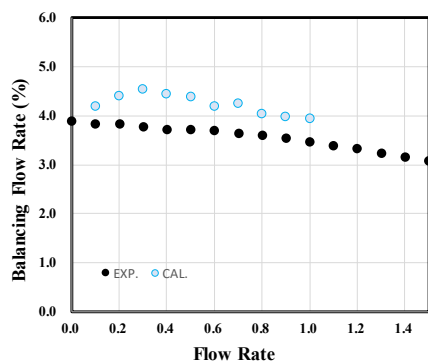
図5 遠心ポンプの外観



(a) Total head



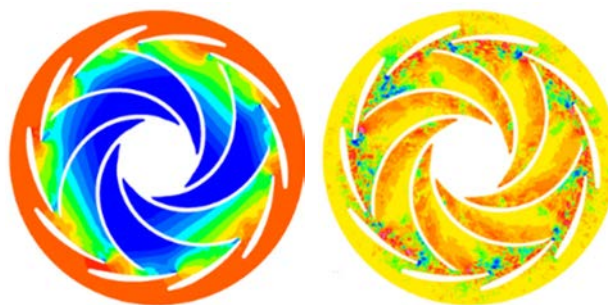
(b) Shaft power



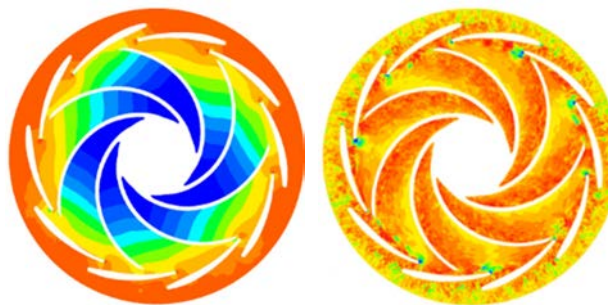
(c) Balancing flow rate

図6 遠心ポンプの一般性能の比較

流れ場の可視化結果例として、羽根車およびディフューザの中央高さ断面における静圧および半径方向速度の瞬時分布を図7に示す。流量比50%では一部のディフューザの前縁において逆流が生じており、流量比10%ではこれがほぼ全周にわたって確認できる。ディフューザからの逆流により羽根車背面流路に角運動量が輸送され、これにより羽根車背面流路の圧力分布が変わり、軸スラストの変動が生じていると推定される。

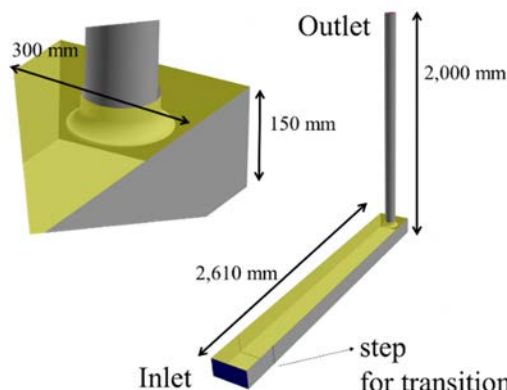


(a) $Q/Q_0=10\%$



(b) $Q/Q_0=50\%$

図7 遠心ポンプの羽根車およびディフューザにおける静圧分布および半径方向速度分布



S S

図8 ポンプ吸込水槽の内部流れ LES 解析の計算モデル

3.3 ポンプ吸込水槽に発生する吸込渦の起源の解明

ポンプ吸込水槽に発生する吸込渦の起源を解明するため、テストポンプ吸込水槽の内部流れの LES 解析を実施した⁷⁻⁹⁾。テストポンプ水槽は Okamura らが実施したベンチマークテスト¹⁵⁾で扱ったモデルと同じ水槽である。本 LES 解析では流入速度 0.37 m/s、水槽底面から水面までの距離 150 mm の条件（水槽底面からベルマウス入口までの距離 100 mm、ベルマウス入口から水面までの距離 50 mm）における流れを詳細に分析した。この条件においては、水中渦が発

生することが確認されている。図 8 の水槽内部流れ LES 解析の計算モデルを示す。流入境界から吸込配管中心軸までの距離と入口流速を基準とするレイノルズ数はおよそ 1.0×10^6 である。実験において水槽の底面および側面に発達する境界層が層流であるか、あるいは乱流に遷移しているかは不明であるが、本 LES 解析では境界層が層流および乱流の両方の場合を考慮した。境界層が乱流の場合、渦スケールは直径で約 2 mm、流路幅方向の間隔で約 10 mm 程度である。本 LES 解析では、この渦のダイナミクスを解像するため解像度 0.225 mm の計算格子を用いた。グリッド数は約 20 億グリッドである。

吸込渦の起源を調査するため、水槽中の境界層が乱流の場合 (Case A)、層流の場合 (Case B) および境界層が発達しない場合 (Case C) の 3 ケースの計算を実施した。Case A において境界層を乱流に遷移させるため、入口境界の 300 mm 下流に高さ 5 mm の角柱形状のステップを設置させた。Case C の条件は実験において容易には実現できないが、Case A、Case B の計算結果と Case C の計算結果を比較することにより、水中渦の発生に対する、境界層内の平均速度勾配の関与の有無を調査することができる。Case A から Case C の場合に計算された、典型的な瞬時の流れ場において吸込渦を可視化した結果を図 9 に示す。水槽の壁面に境界層が発達する Case A と Case B の場合は渦糸の一方の端が水槽の底面にある水中渦の発生が確認された。一方、水槽の壁面近傍には速度のシアが存在しない Case C の場合には水中渦は見られない。これらの結果より、水中渦の起源は水槽底面に発達する境界層中の速度シアであることがわかった。また、乱流境界層中の縦渦は水中渦の発生に直接的には寄与していないことがわかった。

本 LES 解析により、ポンプ吸込水槽に発生する水中渦の起源を解明できたが、計算で再現された水中渦の中心における静圧降下量はおよそ 4~5 kPa であった。実験で観測される水中渦の中心とその近傍には気相 (キャビテーション) が発生し、そこでの静圧は飽和蒸気圧まで下がっていることが推定されるため、静圧降下量は大気圧、すなわち、100 kPa 程度と推定される。したがって、本 LES 解析は渦の中心近傍の静圧降下量を大幅に過小評価していると考えられる。この過小評価の理由は渦中心の解像度不足であることがわかっている。本稿では省略するが、計算領域を水中渦まわり近傍のみに簡略化した簡易計算モデルに対し、格子解像度 0.015 mm の計算格子を用

いることにより、渦中心の静圧降下量が 100 kPa に達し、キャビテーションが発生する条件を再現できることを確認している。

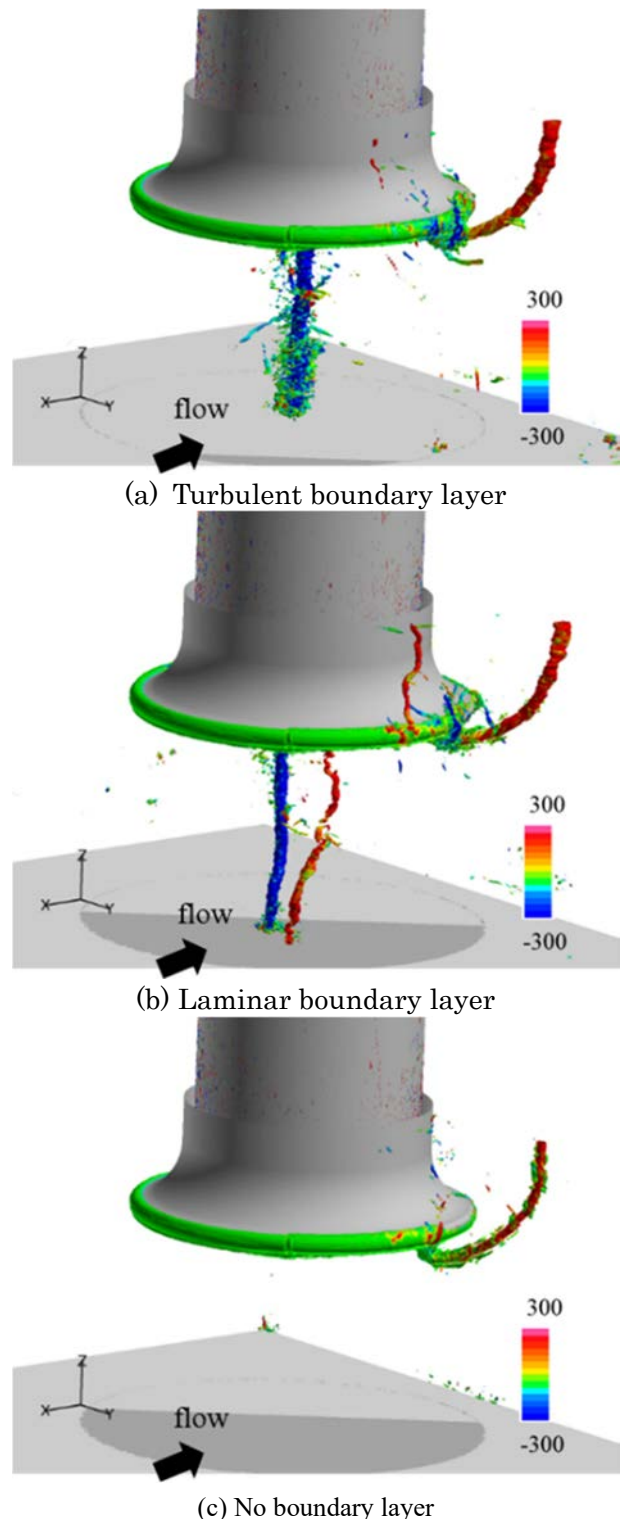


図 9 ポンプ吸込水槽内部に発生する吸込渦の可視化結果

引用文献

4 今後の展望

本稿では、流体解析システム FrontFlow/Blue (FFB) を活用したターボ機械に関する大規模流れ解析の実証解析事例として、遠心送風機から発生する空力騒音の音源予測、遠心ポンプ内部流れの性能予測、ポンプ吸込水槽に発生する水中渦の起源の解明を紹介した。これらの解析事例を通して、ターボ機械の非定常特性の予測や、複雑な現象の解明に、数億グリッドから数十億グリッドを用いた大規模流体解析の有用性を確認した。

これらの解析には「京」を用いた。「京」を用いることにより、数十億グリッド規模の流体解析が可能となったが、計算リソースの制限による課題も確認できた。たとえば、遠心送風機に内部流れ LES 解析では、乱流境界層を解像する 50 億グリッドを用いた Wall-Resolved LES (WR-LES) 解析を実施したが、計算リソースの制限により音源データを取得するための長期間計算は実施できなかった。遠心ポンプ内部流れの LES 解析では 1.8 億グリッドを用いた準備計算により、ポンプ性能を予測できることを確認したが、WR-LES を実行するために 1,000 億グリッド規模の解析が必要であり、これも計算リソースの制限により「京」では実行できなかった。ポンプ吸込水槽に関しては、WR-LES 解析により水中渦の起源を解明できたが、水中渦の静圧降下を定量的に予測するためには、格子解像度を 0.25 mm から 0.015 mm まであげる必要があることがわかっており、格子解像度 0.015 mm の計算格子を吸込水槽全体に適用すると、計算規模は 2,000 億グリッド規模になりため「京」では実行できない。

前述した通り、2020 年 6 月に世界最高性能を達成した「富岳」のノード性能は、「京」に対し 26.4 倍である。「京」および「富岳」において同等のピーク性能比を達成できるとすると、これまで「京」を用いた解析を「富岳」で実行すれば、同じ計算規模であれば、計算時間が約 1/26 になり、同じ計算リソース（ノード数と計算時間の積）で 26 倍の計算規模の解析が実行できることを意味している。今後、「富岳」の利用により、「京」において確認された、主に計算リソース不足に起因する課題が解消され、WR-LES を容易に実施できるようになり、この実用化が促進されることが期待される。

- 1) Kato, C., Kaiho, M. and Manabe, A., An overset finite-element large-eddy-simulation method with application to turbomachinery and aeroacoustics, *Transactions of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 70 (2003), pp. 32–43.
- 2) Kato, C., Yamade, Y., Wang, H., Guo, Y., Miyazawa, M., Takaishi, T. and Takano, Y., Numerical prediction of sound generated from flows with a low Mach number, *Computers & Fluids*, Vol. 36, No. 1 (2005), pp. 53–68.
- 3) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., A dynamic subgrid-scale eddy-viscosity model, *Physics of Fluids A*, Vol. 3, No. 7 (1991), pp. 1760–1765.
- 4) Lilly, D. K., A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure model, *Physics of Fluids A*, Vol. 4, No. 3 (1992), pp. 633–635.
- 5) 吉村忍, 徳永健一, 杉本振一郎, 奥田洋司, 末光啓二, 加藤千幸, 山出吉伸, 吉村英人, 並列モデル細分化による大規模有限要素解析の効率化, *日本計算工学会論文集* (2013), Paper No. 20130012.
- 6) O. Pacot, C. Kato, Y. Guo, Y. Yamade, and F. Avellan, “Large Eddy Simulation of the Rotating Stall in a Pump-Turbine Operated in Pumping Mode at a Part-Load Condition,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 138, no. 11, (2016), pp.111102-1-111102-11.
- 7) Y. Yamade, C. Kato, T. Nagahara, and J. Matsui, , 2020, “Suction Vortices in a Pump Sump -Their Origin, Formation and Dynamics-,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 142, no. 3, (2020), pp. 031110.
- 8) 山出吉伸, 加藤千幸, 長原孝英, 松井純, ポンプ吸込水槽における吸込渦発生のメカニズム, *日本機械学会論文集*, Vol.85, No.875, (2019).
- 9) 山出吉伸, 加藤千幸, 長原孝英, 松井純, ポンプ吸込水槽に発生する水中渦の流れ構造, *本機械学会論文集*, Vol.85, No.878, (2019).
- 10) T. Makihara, T. Kitamura, T. Yamashita, K. Maeda, C. Kato, T. Takayama, K. Yamamoto, Y. Yamade, and Y. Suzuki, “Identification of Vortical Structure that Drastically Worsens Aerodynamic Drag on a 2-Box Vehicle using Large-scale Simulations,” *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, vol. 9, no. 2: doi:10.4271/2016-01-1585., (2016).
- 11) T. Yamashita, T. Makihara, Y. Saito, C. Kato, R. Takayama, T. Takayama, and Y. Yamade, “Effects

- of Moving Ground and Rotating Wheels on Aerodynamic Drag of a Two-Box Vehicle,” SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., vol. 11, no. 5, pp. 415–428, doi:10.4271/2018-01-0730., (2018).
- 12) T. Nishikawa, Y. Yamade, M. Sakuma, and C. Kato, “Application of Fully-resolved Large Eddy Simulation to KVLCC2 – Bare Hull Double Model at Model Ship Reynolds Number-,” Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, vol. 16, pp. 1-9. (2012).
 - 13) T. Nishikawa, Y. Yamade, M. Sakuma, and C. Kato, “Fully Resolved Large Eddy Simulation as Alternative to Towing Tank Resistance Tests- 32 Billion Cells Computation on K computer,” 16th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS'13), Duisburg, Germany, (2013).
 - 14) T. Nishikawa, “Application of Fully resolved Large Eddy Simulation to Self-Propulsion Test Condition of Double-Model KVLCC2”, 14th international conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'15), pp.191-199, Ulrichshusen, (2015).
 - 15) Yoshinobu Yamade, Taku Iwase, Yutaka Ohta, Yang Guo and Chisachi Kato, Prediction of Pressure Fluctuation in a Centrifugal Blower by Large Eddy Simulation, Proc. of The 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, (2015), Tokyo, Japan
 - 16) 山出吉伸, 加藤千幸, 渡邊啓悦, 有限要素法流れ解析ソルバーにおける陰的オーバーセット手法, (2020), 72 巻 1 号 pp. 87-91
 - 17) Okamura, T., Kamemoto, K. and Matsui, J., CFD prediction and modeling experiment of suction vortices in pump sump, Proceeding of the 9th Asian International Conference on Fluid Machinery (2007), Paper No. AICFM9-053.