

乱流の直接シミュレーションの現状と今後の展望

加藤 千幸 *

Present Status and Future Perspectives of Direct Numerical Simulation of Turbulence Chisachi Kato

1. はじめに

流れの数値解析が製品設計や研究開発に応用され始めたのは1980年代の終わりから1990年代の初めに掛けてのことであるが、その当時のスーパーコンピュータの性能と比べると今の性能は10億倍以上に向上しており、ポスト京時代にはさらにその数10倍から100倍の性能向上が期待されているのである。現在のCPUの性能は1テラ・フロップスに達しており、1ラック（筐体）で80テラ・フロップスの演算性能を提供できる。80テラ・フロップスといえは数年前の日本のトップクラスのスーパーコンピュータの演算性能（100から150テラ・フロップス）に準ずるものであり、1ラックで10億格子から最大100億格子を用いた流れの数値解析が可能である。スーパーコンピュータの性能は過去30年以上にわたり、3年間で約10倍、10年間で約1,000倍という割合で毎年着実に向上してきており、今後も2020年頃まではこのような性能向上が見込まれている。近い将来、1,000億を超える格子を用いた大規模計算も企業の設計や研究開発の現場で適用可能になる。本稿ではこのような状況の中、乱流の直接シミュレーションの産業応用に関して、その現状を概説するとともに、今後の発展を展望する。

2. 乱流の直接シミュレーション

乱流の直接シミュレーションという言葉は日本ではこれまで二つの意味で用いられてきた。一つは乱流モデルを使用しない計算という意味であり、1980年代の半ばから1990年代までこのような計算が盛んに行われた。もう一つは本当の意味での直接計算（Direct Numerical Simulation, DNS）であり、乱流の最小スケールまで計算する方法である。本稿で解説する直接シミュレーションも後者に属するものである。乱流の最小スケールはマクロな流れのレイノルズ数に大きく依存するスケールであり、レイノルズ数にほぼ反比例して、マクロなスケールに対する最小スケールの比は小さくなる。

乱流の最小スケールといっても実際にはいくつかのス

ケールが存在する。ひとつは絶対的な最小スケールであり、コルモゴロフスケールとよばれるものである。二つ目のスケールは散逸スケールとよばれるスケールであり、運動エネルギーから熱への変換が支配的になるスケールである。最後のスケールが生成スケールであり、乱流の生成に対して支配的なスケールである。これら3つのスケールの間にはそれぞれ5倍から10倍程度の開きがある。つまり、散逸スケールは生成スケールの1/8程度小さく、さらに、コルモゴロフスケールは散逸スケールの1/8程度小さい。本稿でいう乱流の直接シミュレーションは生成スケールまで計算格子で直接計算し、それよりも小さく、熱への散逸に対して支配的なスケール以下の渦をモデル化する方法であり、一般的にはLarge Eddy Simulation（LES）とよばれるものであるが、本稿では最小スケールの渦まで直接計算するLESという意味で直接シミュレーションと称している。

前記のように、乱流の生成スケールはマクロな流れのレイノルズ数に反比例して小さくなるため、高レイノルズ数の流体関連製品の流れの解析に対してこのようなLESが適用されることはこれまで行われていなかった。このような小さなスケールの渦をモデル化してLESの壁面境界条件として与えるか、壁面近傍の流れまでLESで直接計算することを諦め、壁面近傍の流れはレイノルズ平均ナビエストークス方程式（Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS）を用いて計算し、境界層以外の流れ、たとえば、後流の乱れのみをLESで計算するDES（Detached Eddy Simulation）などのハイブリッド計算手法が用いられてきた。これらの手法は解析領域全体をRANSで計算する場合と比べれば高精度な予測を実現できる可能性があるが、たとえば非失速状態にある翼まわりの流れを考えた場合、最も重要な部分は翼面近傍の境界層の遷移や発達、翼面からの境界層のはく離であり、この部分を壁面モデルやRANSに頼ることになるこのような計算手法にはおのずと予測精度の限界があり、完全に実験を代替する手法になることはない。これに対して、壁面近傍の生成スケールまで格子で直接計算するLESでは、散逸スケール以下の渦のみをモデル化してい

* 東京大学生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, E-mail: ckato@iis.u-tokyo.ac.jp）

るので、モデルへの依存度が低く、かつ、散逸過程は普遍性が高くモデル化し易いため、完全に実験を代替できる可能性を秘めている。前述のように計算機の性能は著しく向上しているので、このような LES により、自動車の風洞試験、船舶の曳航水槽試験、流体機械の性能試験などを代替することが期待されている。

3. 最小スケールと必要な格子点数

乱流の直接シミュレーションに関して、計算格子で捉える必要がある最小スケールは流れ場により異なるが、ここでは自動車やターボ機械などの流体関連製品に直接シミュレーションを適用することを念頭に、乱流境界層の中の最小スケールの大きさを見積もってみる。乱流境界層の発達には、摩擦抵抗を決めるだけでなく、マクロな流れのはく離や再付着と密接に関係し、大きな流れ構造にも影響を与える。したがって、これらの製品の空力特性や流体性能を高精度に予測するためには乱流境界層の予測が重要となる。

境界層の中で乱流の生成に支配的な役割を果たしていると考えられているのは壁面から壁座標で 30 程度以下の距離に存在する縦渦であり、この渦の直径、間隔、流れ方向の長さは壁座標でそれぞれ 30, 150, 300 程度である。乱流の直接シミュレーションではこの縦渦を計算格子で解像する必要がある。この縦渦が解像できない場合は壁面の摩擦応力が過少評価されるために境界層の発達が遅れるとともに、逆に、境界層内の乱れが過大評価される。このような計算では、実際の流れよりも境界層が物体表面からはく離し難くなり、大きな流れの構造も捉えられなくなる。また、乱れの過大評価は流体騒音や流体関連振動の過大評価にも繋がる。

壁面摩擦速度 u_τ がわかれば上記の縦渦のスケールを推定することが可能になるが、壁面摩擦速度は壁面摩擦応力係数 c_f を用いて以下のように書ける。

$$u_\tau \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_f}{2}} u_\infty$$

ここに、 τ_w は壁面摩擦応力、 ρ は流体の粘性係数、また、 u_∞ は主流速度である。 c_f の値は流れ場、特に、主流方向の圧力勾配により変化するが、第一近似としては平板境界層の値を用いればよく、かつ、レイノルズ数が変わってもあまり変化しないので、主流速度の 4% が摩擦速度の良い推定値を与える。

摩擦速度の値がわかれば上記の縦渦の直径 d 、間隔 s 、および長さ l はそれぞれ以下のように推定される。すな

わち、

$$d = 30 \frac{\nu}{u_\tau}, s = 150 \frac{\nu}{u_\tau}, l = 300 \frac{\nu}{u_\tau}$$

ここに、 ν/u_τ は粘性スケールとよばれる長さスケール

であり、前述のように主流速度 u_∞ に対する摩擦速度 u_τ

の比はレイノルズ数にはあまり依存しないので、粘性スケールはレイノルズ数にほぼ反比例して小さくなる。

代表的な流体関連製品として自動車まわりの流れを対象にこの縦渦のスケールやそれから決まる格子点数を見積もってみる。主流速度を 30 m/s (時速 108 km)、代表長さを車幅 1.5 m とするとマクロな流れのレイノルズ数 Re は 3×10^6 となる。摩擦速度は主流速度の 4% として、1.2 m/s と見積られる。空気の動粘性係数は $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ であるから、粘性スケールは $12.5 \mu\text{m}$ となる。したがって、縦渦は直径 0.375 mm、間隔 1.875 mm、長さ 3.75 mm となり、このような縦渦まで計算するために必要な格子点数は 2,100 億点程度になると見積もられる。同様に、それ以外の流体関連製品に関しても最小スケールの渦の大きさや必要な格子点数を見積もることが可能である。見積もった結果を Table 1 に示すが、詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。なお、この見積もりでは縦渦を流れ方向、スパン方向ともに 10 分割して捉える ($\Delta x^+ = 30$,

$\Delta z^+ = 15$) ことを仮定している。

Table 1 Size of streamwise vortices in turbulent boundary layers and number of necessary computational grids for typical flow-related products.

	代表速度	代表長さ	Re 数	渦の直径	格子点数
ファン (直径 300mm, 900 rpm)	15 m/s	0.2 m	2×10^5	0.75 mm	1
船体 (1/50 スケールモデル)	1 m/s	5 m	5×10^6	0.75 mm	270
自動車 (時速 108km)	30 m/s	1.5 m	3×10^6	0.38 mm	2,100
ポンプ (直径 300mm, 1500 rpm)	25 m/s	0.15 m	4×10^6	0.03 mm	5,000

注：格子点数は億点

4. 大規模な流れの数値解析の適用状況

乱流の直接シミュレーションの応用事例として、船体の推進抵抗を評価する曳航水槽試験の代替えを目的として進めている研究事例を紹介する。Fig. 1 は船体周りの乱流境界層中の支配的な渦を直接計算した流体解析の例である^{2),3)}。解析に用いた格子点数は 320 億点であるが、

推進抵抗（左下図）やプロペラ面における速度分布（右下図）に関して実験値ときわめて良く一致する結果が得られている．将来的にはこのような解析は曳航水槽試験を代替えることが期待されているが、それだけではなく、船体まわりの流れの詳細な理解が進むことによる推進抵抗の低減も期待されている．なお、ここでは船体まわりの乱流境界層の計算例を示したが、別途、自由表面やプロペラ回転の影響も含めた解析を実施しており、これらの解析に関しても定量的な予測の目途が立っていることを付記する．また、この例以外にも自動車の風洞試験の代替えを狙った計算も別途進めているが、それらに関しては別の機会に報告したい．

乱流の直接シミュレーションは境界層中の微細な渦の変動まで計算するため、平均的な流れ場だけでなく、高周波数の流れの変動まで高精度に予測できる．このため、直接シミュレーションにより、流体騒音解析や流体構造連成解析を飛躍的に高度化することも期待されている．筆者らは多くの企業と連携してこのような連成解析の実証研究も進めている．Fig. 2, Fig. 3は自動車の車室内騒音の予測に取り組んでいる例である⁴⁾．この解析では、

まず騒音源として車両表面の圧力変動を LES により求め、次にボディの振動伝播を構造解析により求める．最後に、振動解析から求めたボディの内表面の振動速度を音響解析の境界条件（粒子速度）として与え、車室内の音場を求める．構造振動から流れ、あるいは、音から構造振動へのフィードバックは無いものと仮定して、一方向の連成解析を実施している．Fig. 2は流体解析結果の一例を示したものであるが、代表的な点において、実験値と良く一致する車両表面の圧力変動が求まっている．Fig. 3は構造解析により計算されたボディの瞬時の加速度分布（左上図）と、代表的な点において、計算された振動加速度を計測値と比較した結果であるが、計算結果は実測値と良く一致している．この解析では 4kHz までの音を予測することを狙っており、高周波数領域の構造減衰が合うようにレイリー減衰のパラメータを決定している．現在、音響解析も実施しているが、シートや内装パネルの吸音効果をどう取り込むかがこのような解析を実用化する上での課題になっている．

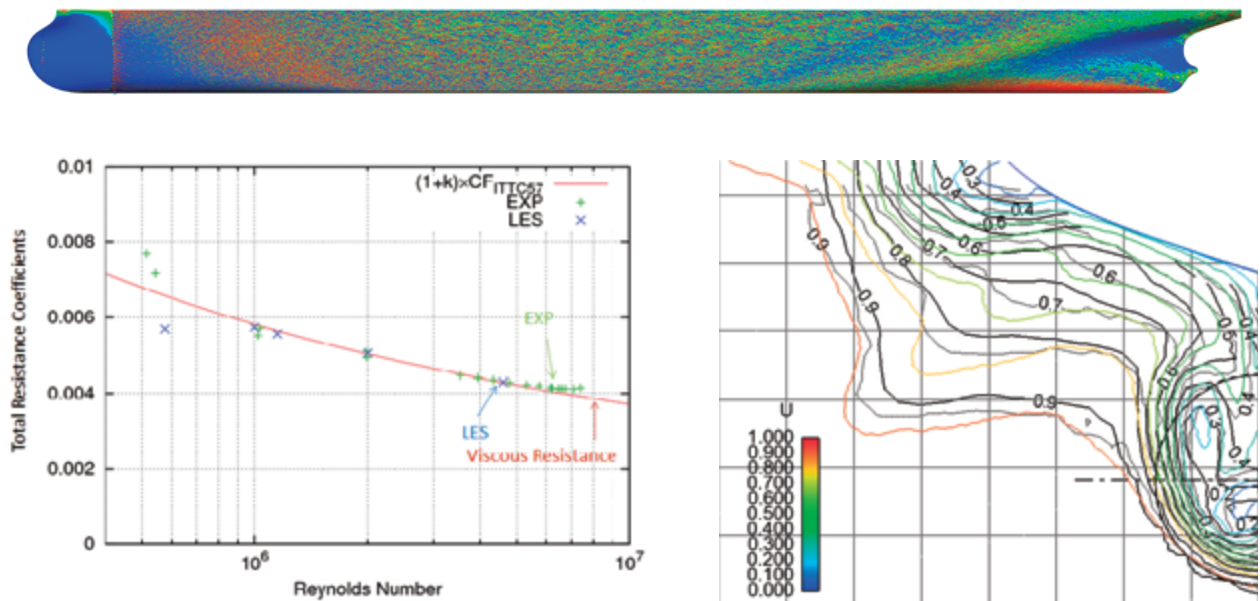


Fig. 1 Example of fully-resolved LES applied to ship hydrodynamics^{2), 3)}

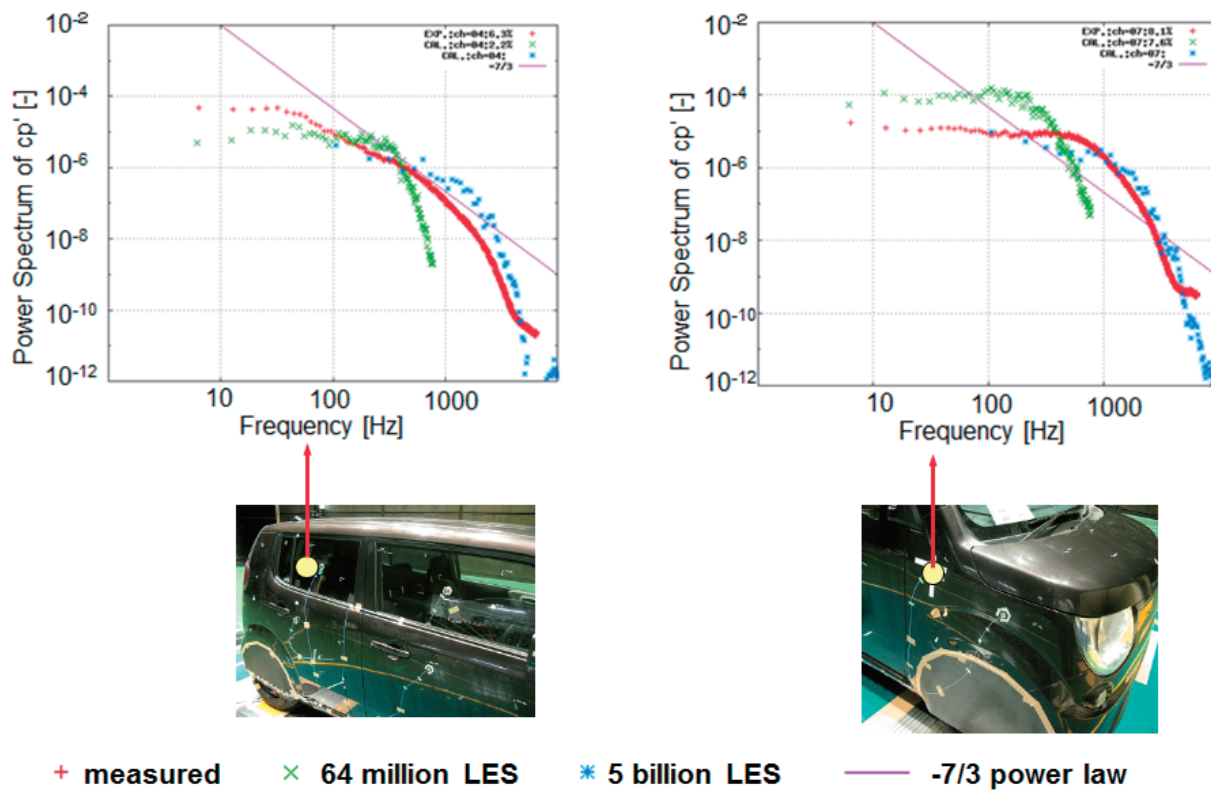


Fig. 2 Surface-pressure fluctuations of an automobile computed by 5 billion-grid LES⁴⁾

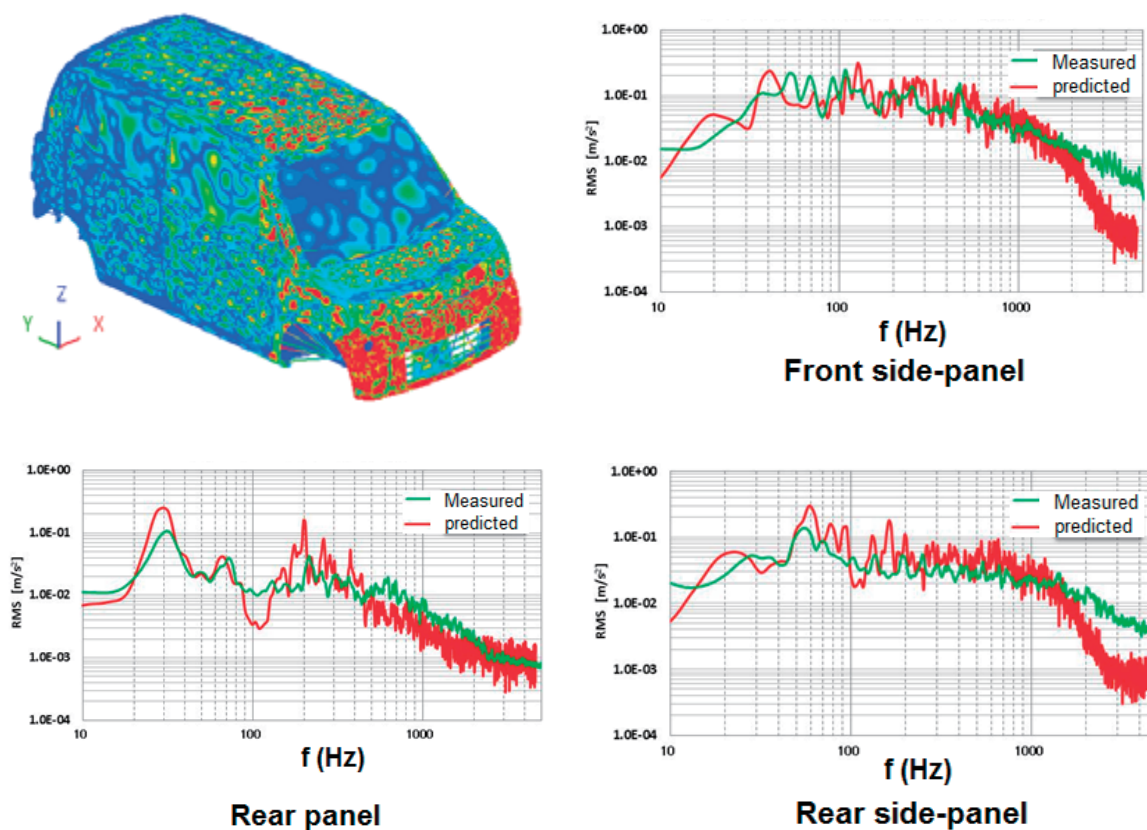


Fig. 3 Vibration analysis of car body up to 4 kHz⁴⁾

5. 乱流の直接シミュレーションの実用化の課題と今後の展望

本稿の最後に、乱流の直接シミュレーションの実用化を進める上での課題と今後の展望に関して筆者の考えを示す。まず、乱流の直接シミュレーションを実用化するための課題であるが、たとえば、風洞試験や曳航水槽試験を代替えるためには、このようなシミュレーションを実施するための実施手順の確立が重要となる。各社で風洞試験や性能試験を実施する場合は必ず、実施方法に関するルールがあり、そのルールに従えば、実施するエンジニアがかわっても同じ結果が得られるようになっている。数値計算（数値実験）に関しても、実施する担当者が変わることにより結果が変わってしまうようでは実用化できない。数値計算の実施手順として最も重要な点は格子の作成である。このような計算では、計算格子の品質により計算結果が大きく変化してしまうからである。対象製品毎に、計算結果の信頼性を担保できる計算格子を短時間に、しかも、ルーティンワーク的に作成できる格子生成方法を確立しなければこのような直接シミュレーションを実用化することはできない。なお、計算機自体に関しては、たとえば、本稿に示した船体まわりの乱流境界層の直接計算には京の2万ノード（16万コア、ピーク性能は約2ペタ・フロップス）を用いている。ポスト京の時代となる2020年頃の計算の性能と単価は、1ラック1ペタ・フロップス、5,000万円程度になるものと推定されている。したがって、ここに示したような計算であれば2ラックもあれば実施できることになり、これ自体は実用化を進める上で大きな障害にはならない。さらに、最終的に欲しいのはモデル船の推進抵抗ではなく、実船の推進抵抗であるが、曳航水槽試験でもFig. 1に示した赤線の相関曲線を用いて、モデル船の推進抵抗の測定値から実船の推進抵抗を推定している。Fig. 1からわかるように、モデル船のレイノルズ数の範囲では、レイノルズ数によらず、実験値、計算値ともこの相関曲線の上に乗っている。したがって、たとえば、レイノルズ数を半分にした計算を実施すれば格子点数は40億点程度となり、この程度の格子点数であれば2020年まで待たなくとも実用化することができる。

最後に今後の計算機の発達とそれに伴う流れの数値計算の進展に関してコメントしておく。前述のように、過去30年余りの期間にわたって計算機のピーク性能は3年間で約10倍というペースでコンスタントに向上してきたが、このような性能向上がこれからも永久に続き、そのうちに、計算格子の点数は何千兆（ 10^{15} 乗のオーダー）となり、どんなレイノルズ数の流れの直接計算も可能になるかという、残念ながらそうではない。というのは、2020年頃の計算機では、ゲート長が10ナノ・メートル以下の半導体が見込みであり、これ以上の微細化による性能向上は一般的に難しいと予想されているからである。そもそも計算機の性能向上は一言で

言うとも半導体の微細化により達成されてきたが、この微細化が2020年頃に限界に達するということである。もっとも、計算機の演算性能自体は微細化により向上してきたのであるが、メモリーのデータの転送能力などは必ずしも計算機の演算性能の向上ほどは向上してなく、30年前と比べると演算性能に対する相対的なメモリー転送能力は数10分の1に低下している。それに関してはアプリケーション・ソフトウェア側でさまざまな努力をして、計算機の演算速度に見合った実効性能の向上を実現してきた歴史がある。しかしながら、2020年頃には演算性能自体の向上が見込まれなくなることである。現在の半導体にはシリコンが使われているが、シリコンにかわる、移動度が桁違いに速い半導体を実用化することにより、計算機の動作周波数を2桁程度上げるための研究などが行われているが、残念ながらまだ実用化の目途は立っていない。今まで主として計算機の性能向上に伴い発展してきた流れの数値計算に関してもそろそろ将来の方向性を考え直す時期に来ていると言える。

6. おわりに

今から30年ほど前に筆者が会社に入社した当時は想像もつかなかったことであるが、自動車、船、ターボ機械などを対象とした乱流の直接シミュレーションが可能になりつつある。直接シミュレーションに対して必要となる格子点数は対象とする製品の形状やそのレイノルズ数により大きく異なるが、機械工学分野で問題となる多くの製品に対しては1億点から5,000億点程度である。1億点の直接計算であれば、計算時間的には今すぐにも実用化でき、5,000億点の直接計算でも5年以内には実用化できる。ただし、このためにはそれぞれの対象製品に対して、高品質な計算格子を短時間に作成することが重要な課題となる。また、計算結果を製品の開発や設計に反映させるための方法論の検討も必要となる。このような計算が本当に実用化できるかどうかはそれらの解題が解決できるかどうかにかかっているといっても過言ではない。乱流の直接シミュレーションは境界層中の微細な渦の変動まで計算するため、平均的な流れ場だけでなく、流れの高周波数の変動まで高精度に予測でき、熱流体の設計を大きく変革できる可能性を秘めている。

本稿で示した計算事例はいずれも、文部科学省高性能汎用計算機高度利用事業「HPCI戦略プログラム」分野4次世代ものづくりの補助を受け実施したものである。また、計算には（独）理化学研究所計算科学研究機構が運用する京スーパーコンピュータ用いた（課題番号：hp140226）。また、船体まわりの流れのLES解析は東京大学と（財）日本造船技術センターとの共同研究において実施されたものであり、本稿に掲載した図は同財団の西川達雄博士から提供されたものである。車内騒音の解析は東京大学、豊橋技術科学大学、ならびに（株）ス

ズキとの共同研究において実施したものである。関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 加藤千幸：直接シミュレーションによる乱流解析，ターボ機械，第24巻第5号（2014）pp.290-296.
- 2) Nishikawa, T., Yamade, Y., Sakuma, M., and Kato, C.: Application of Fully-resolved Large Eddy Simulation to KVLCC2 –Bare Hull Double Model at Model Ship Reynolds Number–, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 16 (2012) pp. 1-9.
- 3) Nishikawa, T., Yamade, Y., Sakuma, M., and Kato, C.: Fully Resolved Large Eddy Simulation as an Alternative to Towing Tank Resistance Tests – 32 Billion Cells Computation on K computer, 16th Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS'13), Duisburg, Germany (September 2013).
- 4) 飯田明由, 加藤千幸, 他：空力・構造振動・音響連成解析による自動車車室内騒音の予測, 第27回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学 (2013年12月).