

[共同研究成果]

Building-Cube Method による大規模流体解析データの圧縮法の開発

坂井玲太郎¹、大林茂²、佐々木大輔³、中橋和博⁴

¹ 東北大学大学院工学研究科、² 東北大学流体科学研究所

³ 金沢工業大学航空システム工学科、⁴ 宇宙航空研究開発機構

次世代の数値流体力学を目指して提案された手法 **Building-Cube Method** を通じ、実用的な大規模シミュレーションへの取り組みを航空分野を中心に進めている。その一方で大規模計算から得られる出力データの肥大化が新たな課題として顕在化しつつある。そこで本稿では **Building-Cube Method** の直交格子構造と画像符号化手法を組み合わせたデータ圧縮法を紹介し、それにより得られた圧縮結果について述べる。

1. 緒言

今日の数値流体力学 (**Computational Fluid Dynamics: CFD**) は実験と並んでツールとしての地位を確立しており、その用途に応じて境界適合格子もしくは非構造格子がよく用いられている。しかし近年では計算機の高性能化に伴い、**CFD** の黎明期に用いられた直交格子法が再び注目を集めている。直交格子法は過去に物体境界での精度などの理由で用いられなくなったものの、本手法には自動格子生成、高次精度解法といった特長はもとより、計算構造が圧倒的にシンプルにできるという大きな利点がある。将来的に計算が大規模化すればするほど、直交格子 **CFD** はその計算構造の単純さの点で有利になることが予想される。こうした観点から、直交格子法の利点を生かしつつさらに計算空間の解像度制御と組み合わせた手法として **Building-Cube Method (BCM)** が提案された [1]。本手法ではこれまでに複雑形状に対する高速でロバストな自動格子生成 [2]、大規模シミュレーションにおける高効率計算 [3] を達成したほか、航空機翼周りの非粘性流体解析 [4, 5]、航空機主脚周りの非定常流解析 [6, 7]、エンジンファンノイズの伝搬解析 [8] への応用が進んでおり、新たな **CFD** 技術としての基盤を確立しつつある。

一方、**BCM** を用いた大規模シミュレーションの実現に向けて進むなかで、実用性の観点からは出力データのサイズが無視できない問題として顕在化しつつある。オイラー方程式に基づく定常解析であればまだしも、非定常な流れ場の解析には時系列の膨大なデータが必要である。例えば前述の航空機主脚周りの非定常流解析 [7] では音響解析のための時系列データとして約 1000 ステップ分の時系列データを取得している。本解析における格子点数は約 1 億点であり、仮にこのステップ分だけ速度と圧力の物理量を保持しようとする、単精度換算でも約 1.6 TB と非常に膨大なものになってしまう。これら膨大なデータは単純にストレージを圧迫するだけでなく、シミュレーション中のデータ入出力にかかる時間が無視できなくなることから、計算効率を下げる要因にもなりうる。出力データサイズの問題は **BCM** に限らずあまねくシミュレーションに潜在し、シミュレーションの大規模化にあわせて直面を余儀なくされる課題であるといえる。

そこで本稿ではデータサイズの課題に対するこれまでの取り組みとして、**BCM** の直交格子構造と画像符号化手法を組み合わせたデータ圧縮法を紹介するとともに、その圧縮結果について述べる。**CFD** より得られた流体解析データの圧縮法として、これまでにウェーブレットを使った手法 [9] や、特異値分解を使った手法 [10] が提案されている。しかし **BCM** の特徴の 1 つに等方等間隔直交格子 (ボクセル) の採用があり、その格子はデジタル画像表現におけるピクセルの 3 次元への拡張と捉えることができる。さらに、画像符号化手法が画像の連続性を仮定してデータを圧縮する一方、流体もまた連続性をもっており、連続性について画像と流体のアナロジーが成立する。したがって **BCM** を用いた流体シミュレーションにとって画像符号化手法は容易に適用が可能であり、しかも画像圧縮に準じた圧縮率も期待できる有効な手法といえる。そこで本研究

では画像符号化手法として利用され、かつ CFD への応用事例を幅広く持つ離散ウェーブレット変換を中心にデータ圧縮法を構成した。そしてこれまでの BCM の応用事例から得られた圧縮性非粘性流体解析データ、および非圧縮性粘性流体解析データに適用し、その効果を検証した。

2. Building-Cube Method

本手法では計算領域全体で等方等間隔直交格子を採用することで、シミュレーションにおける前処理・数値計算・後処理のすべての段階で処理を単純化することを目指している。さらに局所細分化を格子ではなく計算小領域毎に適用し、小領域の演算量をみな等価にすることで、大規模並列計算への対応の容易さも狙っている。

図 1 に BCM で用いる計算格子を示す。流れ場は複数の立方体小領域に分割され、これら 1 つ 1 つを cube と呼んでいる (図 1 左)。それぞれの cube は各軸方向に格子点数の等しい直交格子、すなわち等方等間隔直交格子を内包しており、これを cell と呼んでいる (図 1 右)。BCM は直交格子が持つ特長をそのまま引き継いでおり、高品質格子の自動生成・高次精度解法の容易な導入・単純な計算構造といった利点を持つ。さらに BCM では cube 構造により局所細分化も容易に導入でき、かつ cube 毎の演算負荷が等しいことから高い並列化効率も期待できる。なお cube による小領域分割は数値計算面でのメリットだけではなく、計算領域を適切な粒度で分解できるという点で後処理においても恩恵を与える。とりわけ本稿の主題であるデータ圧縮においてはこの領域分割法が重要な役割を果たしており、詳細を次章で述べる。

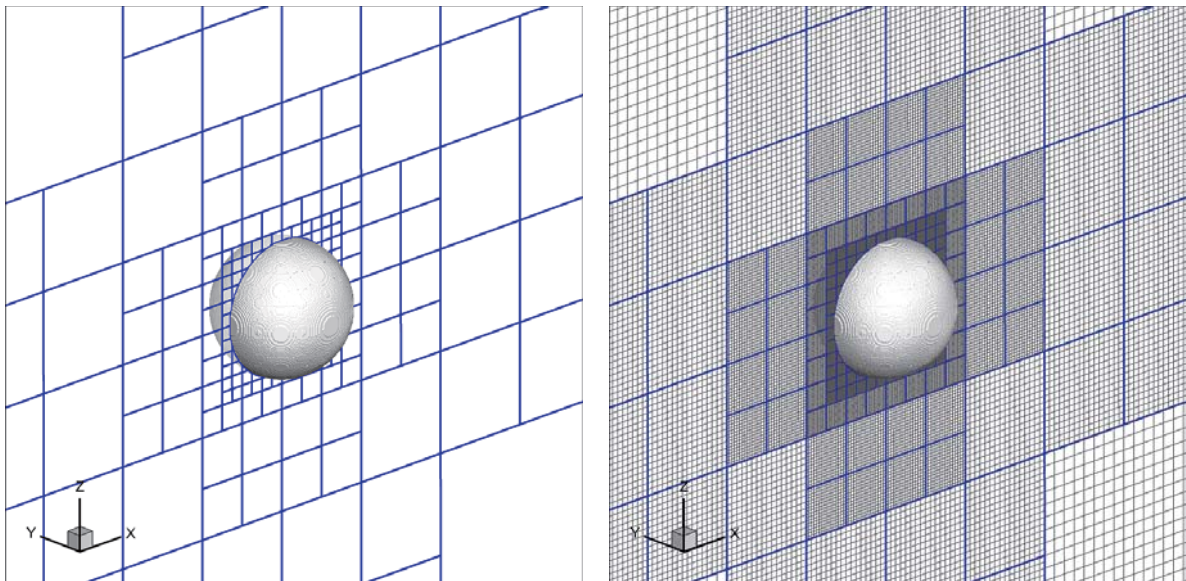


図 1 Building-Cube Method による球周りの格子生成例 (左 : cube、右 : cell)

3. データ圧縮手法

3.1 離散ウェーブレット変換と Embedded Zerotree Wavelet 符号化

離散ウェーブレット変換は幅広い工学分野で利用されている信号処理技術であり、特に CFD の分野においては格子細分化 [11]、衝撃波検出 [12]、乱流の渦抽出 [13] などに利用されている。本変換により入力信号は低周波数成分である近似成分と、高周波数成分である詳細成分に分解される。変換によって得られた近似成分に対して再帰的に変換を実行することで、信号を周波数に応じて分解することができる。

図 2 に 2 次元流体解析データに対して離散ウェーブレット変換を実行した結果を示す。ここでは等方等間隔直交格子を利用した円柱周りの流体解析データ（格子点数 256×256 ）のうち主流方向速度を例にとり（図 2 左）、変換を実行している。各軸の変換で得られた低周波数成分を近似成分とみなすことで、データは変換前の 4 分の 1 のサイズ（格子点数 128×128 ）の近似成分と、4 分の 3 のサイズ（格子点数 128×128 の 3 領域）の詳細成分に分離される（図 2 中央）。変換後のデータでは近似成分は変換前データとほぼ同じ分布を持つ一方、詳細成分の持つ値は小さくなっている。このことは、今回例にとった流れ場のエネルギーのほとんどが低周波数成分に集約されており、逆に高周波数成分のエネルギーが小さいことを示している。さらに近似成分に対して再帰的に離散ウェーブレット変換を実行することができ、信号は再び近似成分と詳細成分に分離される（図 2 右）。再帰的な変換においてもやはり詳細成分の持つ値は小さい。本例から示されるように、一般に連続性を持つ信号においては変換後の近似成分は大きく、詳細成分は小さくなる。

図 2 右で示した変換後の成分は図 3 に示すように、近似成分に近い側を親、遠い側を子とする木構造とみなすことができる。この木構造を応用した画像符号化手法が **Embedded Zerotree Wavelet (EZW)** 符号化 [14] である。先の変換例をふまえると、一般に連続性を持つ信号では木構造の根に近いノードでは値が大きくなり、逆に根から離れるほど値が小さくなる、という傾向がある。そして **EZW** 符号化ではこの偏りを利用することでデータを圧縮する。なお本符号化手法はもともと画像に対して提案されたものであり、2 次元ピクセルデータを対象としているが、これを **BCM** が取り扱う 3 次元ボクセルデータへと拡張するのは容易である。また図 3 から示されるように、離散ウェーブレット変換でバランスのとれた木構造を構築するには各軸方向で同じ数だけデータがなければならないという制約がある。しかし **BCM** においてはすべての **cube** が各軸で同数の **cell** を持っているため、この制約は問題にならない。図 4 に **BCM** を用いて得た 2 次元円柱周りの流体解析データ（主流方向速度）と、その離散ウェーブレット変換結果を示す。**BCM** の直交格子構造のおかげで離散ウェーブレット変換が **cube** 単位で実行できるだけでなく、常にバランスのとれた木構造を構築し効率的に符号化することが可能となる。

なお **EZW** 符号化では入力として整数をとる一方、圧縮対象の流体解析データは一般に実数であるため、前処理として量子化を実行している。量子化も含めた圧縮実行手順については次節で詳述する。

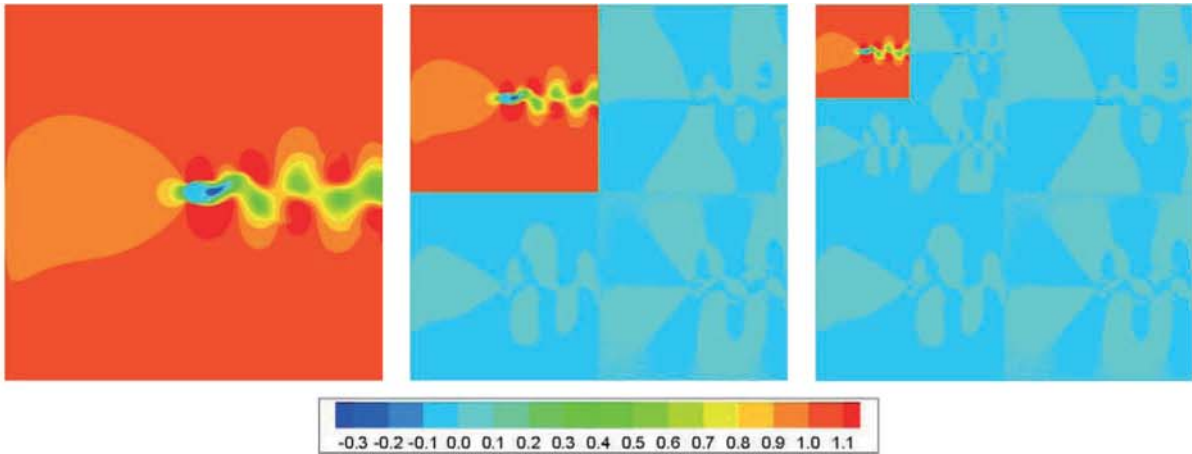


図2 2次元流体解析データ（主流方向速度）に対する離散ウェーブレット変換の適用
（左：変換前、中央：1回変換後、右：2回変換後）

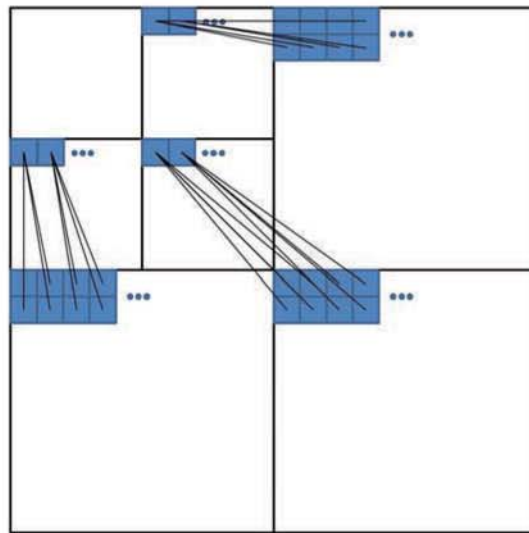


図3 近似成分に対する再帰的な離散ウェーブレット変換より構築される木構造

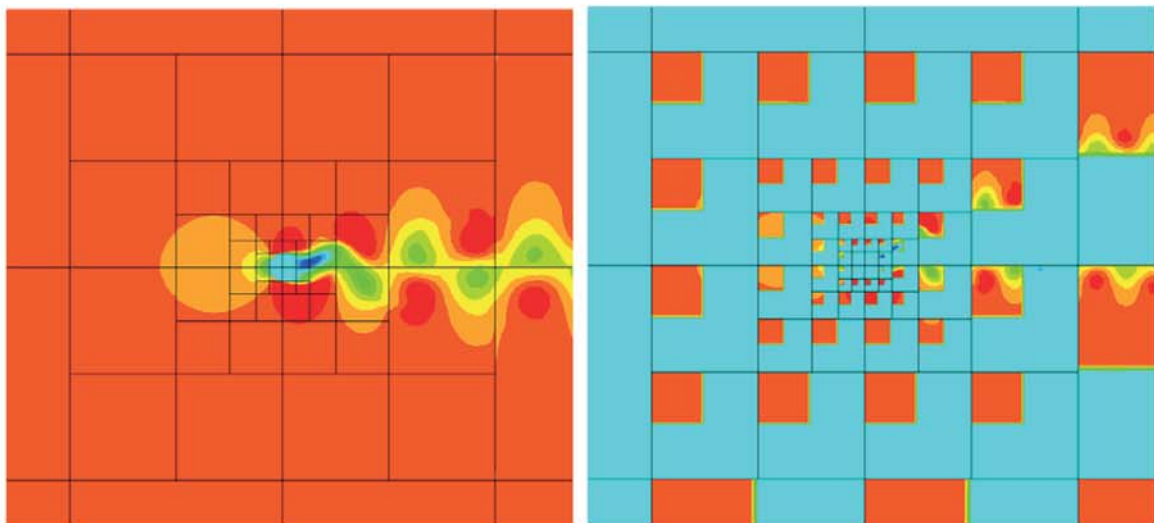


図4 2次元BCM流体解析データ（主流方向速度）に対する離散ウェーブレット変換の適用
（左：変換前、右：1回変換後）

3.2 データ圧縮手順

データ圧縮のメインプロセスは前節で紹介した離散ウェーブレット変換と続く EZW 符号化であり、前処理として量子化、後処理としてデータサイズをさらに削減するためのエントロピー符号化を設けている。本研究では離散ウェーブレット変換に Cohen-Daubechies-Feauveau 9/7 ウェーブレット [15]、エントロピー符号化にレンジコーダー [16] を用いている。また量子化は以下の式で表される：

$$q_{integer} = \text{round} \left(\frac{q_{real}}{\Delta_q} \right) \quad (1)$$

上式において q_{real} は入力信号としての実数、 $q_{integer}$ は出力としての整数、 round は四捨五入整数化の関数である。量子化を通じて入力データは非可逆に圧縮され、 Δ_q が量子化後のデータサイズとデータ品質のトレードオフを決定する。 Δ_q が小さいほど量子化後のデータ品質は維持されるが、出力される整数の幅が大きくなることからデータサイズは大きくなる。逆に Δ_q が大きい場合には量子化後のデータサイズは小さくなるものの、そのデータ品質は低くなってしまう。本稿で示す圧縮事例においては量子化ステップサイズを一樣流音速もしくは一樣流速度を基準として $\Delta_q = 1.2 \times 10^{-4}$ とし、さらに Capizzano [17] の局所細分化の指標を参考にして流れ場の様相に応じて量子化ステップサイズに重み付けを行なっている。

4. データ圧縮結果

4.1 ONERA M6 翼周りの流れ計算結果データの圧縮

BCM 非粘性圧縮性流体解析コード [4] を用いて ONERA M6 翼周りの流れ場を計算し、得られた流体解析データを圧縮した。計算に用いた総 cell 数は約 2100 万点で、相当するデータサイズは 1 物理量あたり約 85 MB (単精度換算) である。保存量である密度、運動量 (3 成分)、エネルギーの計 5 物理量を保存する場合、合計のデータサイズは 1 ステップあたり約 430 MB となる。シミュレーションにおけるマッハ数と迎え角は実験条件に基づき、それぞれ 0.84 と 3.06° と設定した。

圧縮前後でのマッハ数分布および表面圧力係数分布の比較をそれぞれ図 5、6 に示す。圧縮後のデータからは、圧縮前のデータとほぼ同じ分布が得られていることが見て取れる。また図 7 に 65% および 90% スパン断面での圧力係数プロットを示す。それぞれの断面において圧縮後のデータから得られるプロットは、圧縮前のデータのプロットを良く再現している。これらの結果から、本圧縮手法より得られる圧縮データが定性的・定量的に妥当な品質を持つことを確認した。一方でデータサイズについては、圧縮後のデータサイズは 5 物理量の圧縮で合計約 15 MB となり、圧縮前データサイズ (約 430 MB) の約 3.5% まで小さくすることができた。

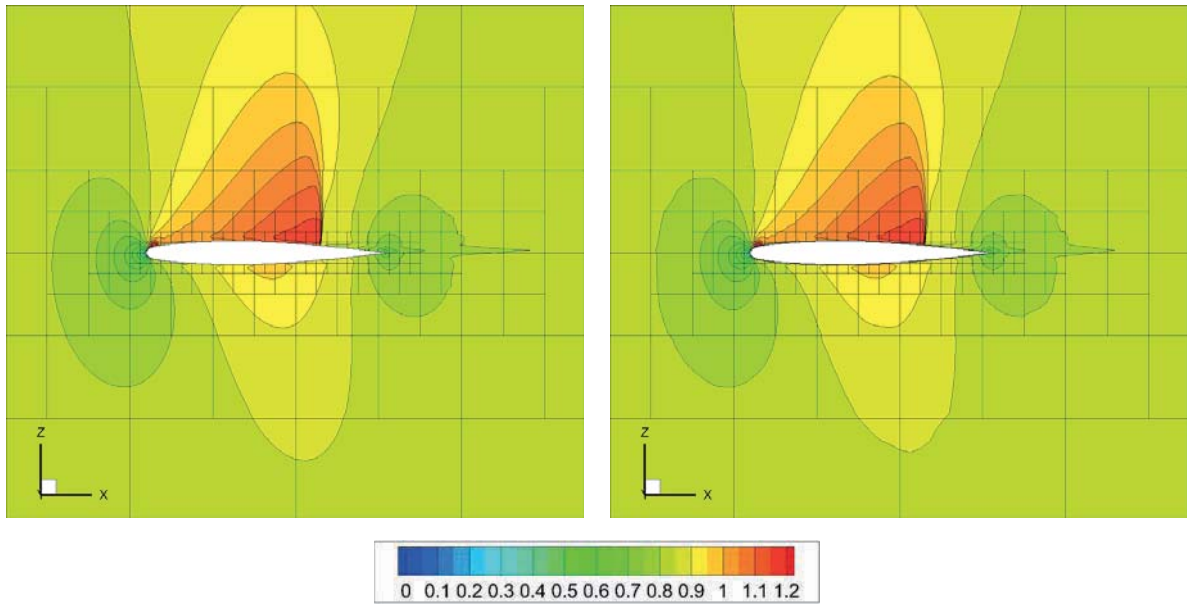


図5 ONERA M6 翼断面マッハ数分布比較 (左：圧縮前、右：圧縮後)

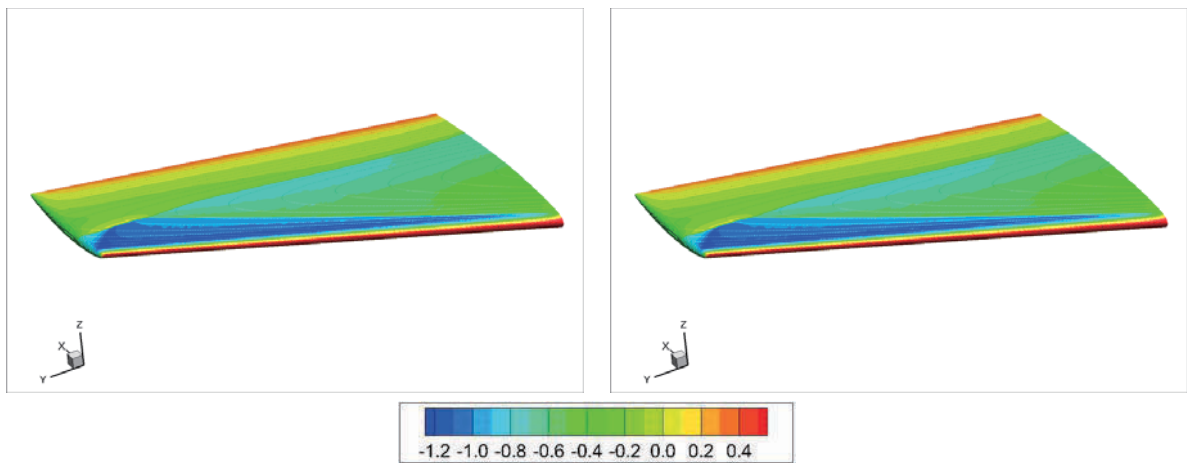


図6 ONERA M6 翼表面圧力係数分布比較 (左：圧縮前、右：圧縮後)

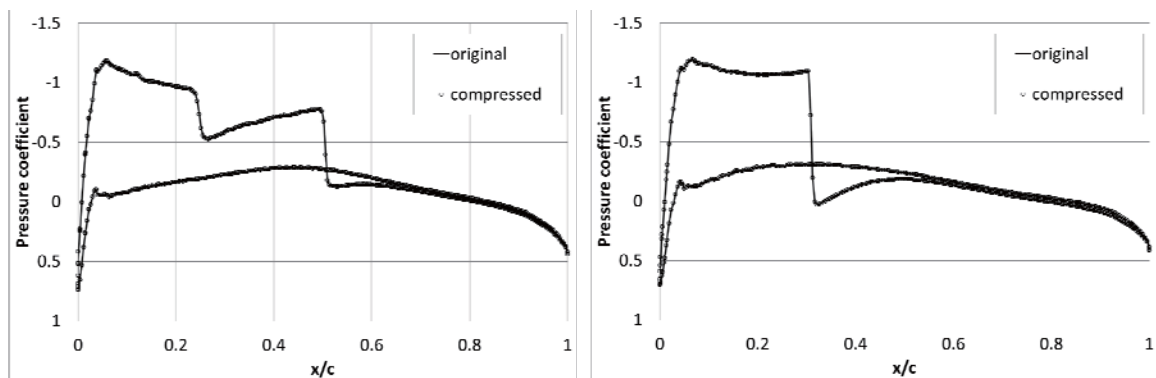


図7 ONERA M6 翼表面圧力係数プロット比較 (左：65%スパン断面、右：90%スパン断面)

4.2 F1 レーシングカー周りの流れ計算結果データの圧縮

BCM 粘性非圧縮性流体解析コード [7] を用いて F1 レーシングカー周りの流れ場を計算し、得られた流体解析データを圧縮した。計算に用いた総格子点数は約 2.4 億点で、相当するデータサイズは 1 物理量あたり約 970 MB (単精度換算) である。流体の非圧縮性の仮定から密度は常に一定とし、速度 (3 成分) と圧力の計 4 物理量を保存する場合、合計のデータサイズは 1 ステップあたり約 3.8 GB に達する。シミュレーションにおけるレイノルズ数は車体長を基準として 1.5×10^7 と設定した。本レイノルズ数においては物体表面の境界層は即座に乱流に遷移し、車体形状ともあいまって非常に複雑な流れ場を形成する。

圧縮前後での主流方向速度分布の比較を図 8 に示す。複雑な流れ場ながらも圧縮後のデータから圧縮前のデータと遜色のない結果が得られていることが見て取れる。また図 9 には、主流方向速度分布に渦度等値面を重畳した結果を示している。流れ場と同様に等値面は非常に複雑な構造ではあるものの、圧縮後のデータからも良く再現されていることがわかる。一方でデータサイズについて、圧縮後のデータサイズは 4 物理量の圧縮で合計約 140 MB となり、圧縮前データサイズ (約 3.8 GB) の約 3.7% まで小さくすることができた。前節の圧縮事例では非粘性流体を取り扱っていたために物理量の変化は物体近傍に限られていたが、本節の圧縮事例からは後流も含めた高レイノルズ数非定常流れについても良好な圧縮率と圧縮後データ品質を示すことができた。

本計算事例において、緒言で述べた主脚の非定常解析事例にならって仮に 1000 ステップ分のデータを出力する場合、そのデータサイズは合計で約 3.8 TB にまで達する。これに対して本節で示した圧縮率が流体計算を通じて保たれると仮定するならば、圧縮によりデータサイズを約 140 GB まで抑えることができる。これにより、流体解析データの取り回しについて劇的な改善が期待できる。

5. 結論

BCM の直交格子構造を活用して画像符号化手法を応用したデータ圧縮手法を構成し、非粘性流体ならびに粘性流体の解析データに適用した。その結果、データサイズは圧縮前の 4% 以下まで圧縮できることを示すとともに、圧縮後のデータからは圧縮前のデータと遜色のないマッハ数分布、圧力係数分布、速度分布が得られることを確認した。今後は圧縮処理の時間短縮を図るとともに、領域毎の重み付けを最適化することでさらに効率的な圧縮を図り、実用的なツールとして発展させていく予定である。

謝辞

本研究は東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また研究にあたっては同センター関係各位にご指導とご協力をいただいた。本研究は科研費 (21226018) の助成を受けたものである。記して謝意を表す。

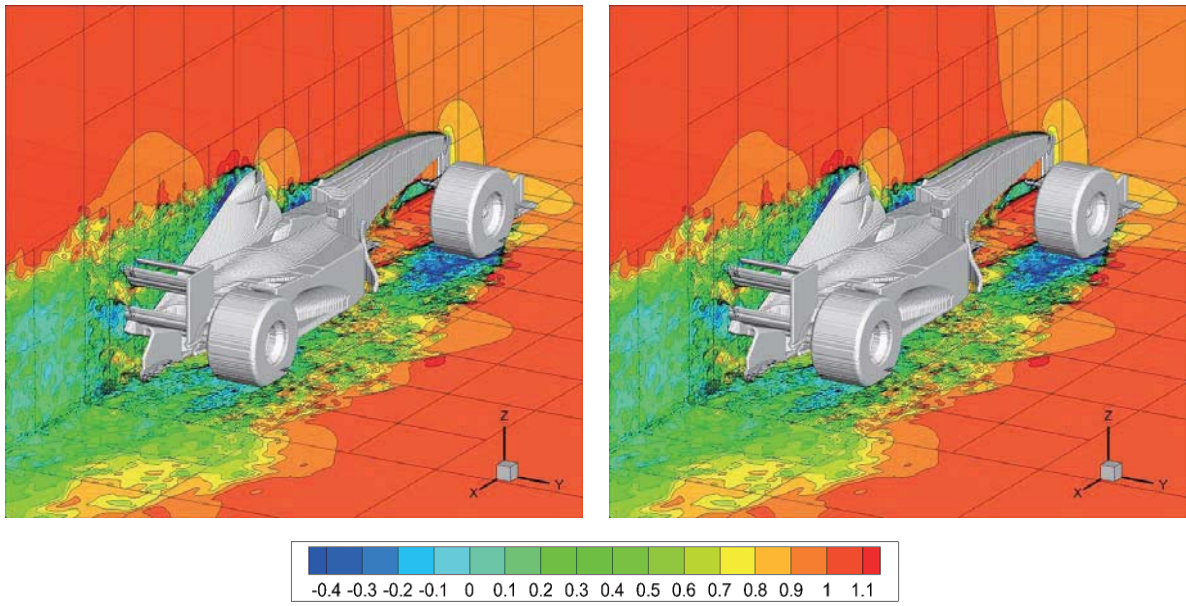


図8 F1 レーシングカー周りの主流方向速度分布
(左：圧縮前、右：圧縮後)

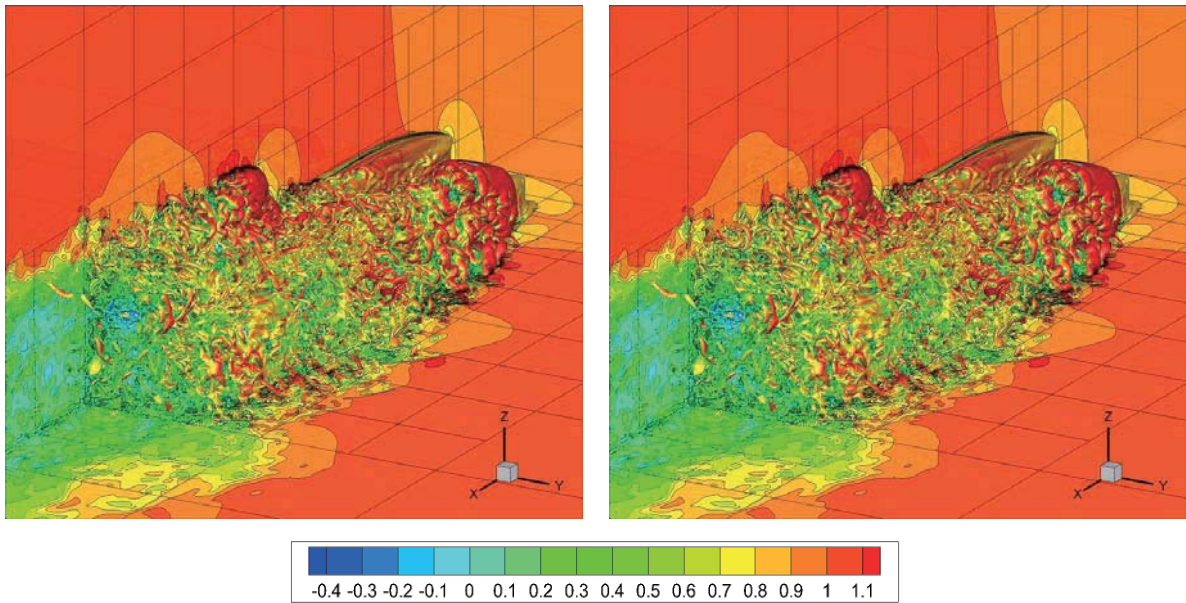


図9 F1 レーシングカー周りの主流方向速度分布と渦度等値面の重畳
(左：圧縮前、右：圧縮後)

参考文献

- [1] Nakahashi, K., "High-Density Mesh Flow Computations with Pre-/Post- Data Compressions," AIAA Paper 2005-4876, 2005.
- [2] Ishida, T., Takahashi, S., Nakahashi, K., "Efficient and Robust Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method," *Journal of Computational Science and Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 435-446, 2008.
- [3] 高橋俊, 石田崇, 中橋和博, 小林広明, 岡部公起, 下村陽一, 曾我隆, 撫佐昭裕, "大規模非圧縮性流体シミュレーションの工学問題への応用," SENAC Vol. 42, No. 1, pp. 107-114, 2009.
- [4] Nakahashi, K., "Immersed Boundary Method for Compressible Euler Equations in the Building-Cube Method," AIAA Paper 2011-3386, 2011.
- [5] 西村康孝, 佐々木大輔, 中橋和博, "圧縮性 Building-Cube Method を用いた翼周りの非定常非粘性流れ解析," 第 25 回数値流体力学シンポジウム講演集, 2011.
- [6] 佐々木大輔, 恩田博, 中橋和博, "Building-Cube 法による非定常流体解析と空力音推定," SENAC Vol. 44, No. 1, pp. 33-45, 2011.
- [7] Deguchi, A., Sasaki, D., Nakahashi, K., Murayama, M., Yamamoto, K., Yokokawa, Y., "Aeroacoustic Simulation of JAXA Landing Gear by Building-Cube Method and Non-compact Curle's Equation," AIAA Paper 2012-0388, 2012.
- [8] Fukushima, Y., Sasaki, D., Nakahashi, K., "Code Development of Linearized Euler Equation on Block-Structured Cartesian Mesh for Complicated Geometries," AIAA Paper 2012-0832, 2012.
- [9] Kang, H., Lee, D., Lee, D., "A Study on CFD Data Compression Using Hybrid Supercompact Wavelets," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1784-1792, 2003.
- [10] Lorente, L.S., Vega, J.M., Velazquez, A., "Compression of aerodynamic databases using high-order singular value decomposition," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 14, pp. 168-177, 2010.
- [11] Vasilyev, O., Paolucci, S., "A dynamically adaptive multilevel wavelet collocation method for solving partial differential equations in a finite domain," *Journal of Computational Physics*, Vol. 125, pp. 498-512, 1996.
- [12] Gerritsen, M., "Designing an efficient solution strategy for fluid flows," Ph.D. Thesis, Stanford University, 1996.
- [13] Farge, M., Schneider, K., Pellegrino, G., Wray, A.A., Rogallo, R.S., "Coherent vortex extraction in three-dimensional homogeneous turbulence: Comparison between CVS-wavelet and POD-Fourier decompositions," *Physics of Fluids*, Vol. 15, No. 10, pp. 2886-2896, 2003.
- [14] Shapiro, J.M., "Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients," *IEEE transactions on signal processing*, Vol. 41, No. 12, pp. 3445-3462, 1993.
- [15] Cohen, A., Daubechies, I., Feauveau, J.C., "Biorthogonal Bases of Compactly Supported Wavelets," *Communication on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 45, pp. 485-560, 1992.
- [16] Martin, G.N.N., "Range encoding: an algorithm for removing redundancy from a digitized message," Video and Data Recording Conference, 1979.
- [17] Capizzano, F., "Turbulent Wall Model for Immersed Boundary Methods," *AIAA Journal* Vol. 49, No. 11, pp. 2367-2381, 2011.

