

ダクテッド・ロータ解析に向けた回転翼用 CFD ツールの開発

菅原瑛明, 田辺安忠
(株) 菱友システムズ, 宇宙航空研究開発機構

Enhancement of a Rotorcraft CFD tool for Ducted Rotors

by
Hideaki Sugawara, Yasutada Tanabe

ABSTRACT

A rotorcraft flow solver, rFlow3D, has been extended for ducted rotors. A circular grid topology has been implemented to enable a body grid solver to compute the duct shape. A background cylindrical grid is adopted for fine grid resolution of the clearance between the blade tip and the duct. Octree based interpolation processing is utilized for a fast interpolation between the body grid and the background cylindrical grid. The validation about the new adopted grid and the prediction accuracy of the ducted rotor performance is carried out based on an experiment of ducted rotor at Osaka University. A hovering rotor on a background cartesian and a cylindrical grid are simulated and compared reasonably well. The predicted ducted rotor performance is shown a good agreement with the experimental data.

1. はじめに

JAXA では、図 1 に示すようなコンパウンド・ヘリコプタの研究が行われている[1]。この機体の構成要素として、メイン・ロータ、アンチ・トルク用サイド・プロペラ、推進用尾部プロペラ、胴体、主翼、尾翼がある。それぞれの構成要素に対する技術課題に取り組むためのツールのひとつとして、JAXA では回転翼用 CFD ツール rFlow3D の開発を行ってきた[2-6]。

rFlow3D は、構造格子ベースの圧縮性 CFD ソルバーで、ヘリコプタのロータ・ブレードの移動を模擬するために移動重合格子法を採用している。実際の計算では、ブレードや機体等の物体格子と背景格子を重合させて計算を行う。データ構造として、物体格子は単一構造格子、背景格子は直交格子を採用している。そのため、単一構造格子ソルバーと直交格子ソルバーの2つが CFD ソルバーとして実装されている。このようなデータ構造を採用することで、補間処理に必要な格子探索を高速に行えるようになっている。また、補間処理では、物体格子同士の値の受け渡しは行わずに必ず背景格子を介して物理量のやり取りが行われる仕様となっている。

コンパウンド・ヘリコプタに対する検討課題のひとつとして、サイド・プロペラに対する高性能化や低騒音化、安全性向上のためのダクテッド・ロータが検討されている。また、ドローンのようなマルチ・ロータ機において、ロータを空力的に高性能化するために、ダクテッド・ロータが研究されている[7]。これらの検討手段のひとつとして、CFD を用いてダクテッド・ロータを評価したいというニーズが高まってきた。しかし、rFlow3D を用いたダクテッド・ロータの CFD 解析では、物体格子同士の補間を採用していないために、ブレードとダクトの隙間に背景格子をある程度配置する必要がある。その結果として、格子点数が莫大になり、実用的な計算が不可能になってしまうという課題がある。この課題の解決方法として、以下の方法が挙げられる。

- (1) 物体格子同士の物理量の補間を可能にし、複雑なホール・カットを行う
 - (2) 単一円筒格子を導入し、ブレードとダクトの隙間部分のみ格子を密に配置できるようにする
- 開発コストと実装の容易さ、また、(1)の方法では毎回ホール・カット情報を構築するために計算コストが(2)の方法より多いと考えられることから、本報告では(2)の方法を採用することとした。

本報告では、ダクテッド・ロータ解析に向けた回転翼用 CFD ツール rFlow3D を拡張した内容と検証計算を行った結果を報告する。



図 1 コンパウンド・ヘリコプタの概念図

2. rFlow3D の機能拡張

2. 1. 物体格子トポロジーの追加

rFlow3D の物体格子は格子トポロジーが固定で、対応している格子トポロジーは SOH 型(S:Singular, O:O-type, H:H-type)である。図 2 にブレード格子の例を示す。図中の i, j, k は格子インデックスの並びを示している。 i 方向はスパン方向に並び、両端を特異点で閉じる形、 j 方向は O 型格子、 k 方向は壁面境界から外部境界方向の並びになっており、 $k=1$ が壁面となる。このトポロジーでは、ダクトのような形状の格子を作成することは困難で、たとえ作成できたとしても格子の品質を保つことは難しいと考えられる。今回の拡張では、新たに OOH 型の格子トポロジーを追加することで、ダクト格子の計算を可能とした。図 3 に OOH 型で作成したダクト格子の例を示す。SOH と異なる点は、 i 方向が O 型に変更されただけである。

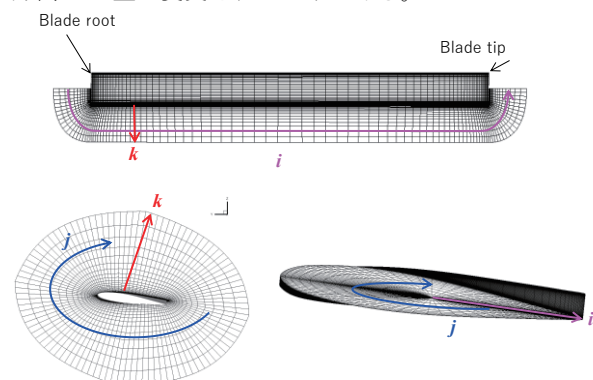


図 2 物体格子の SOH 型トポロジーの例

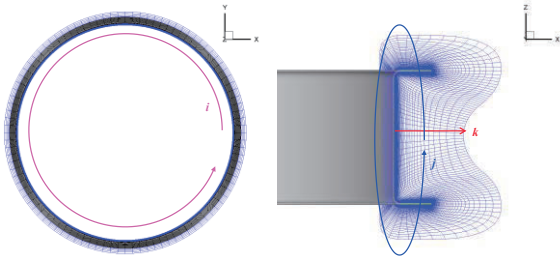


図3 物体格子のOOH型トポロジーの例

2. 2. 背景円筒格子の導入

前章で述べたとおり、rFlow3D は物体格子ソルバーと背景直交格子ソルバーがそれぞれ実装されている。単一円筒背景格子を導入するため、新たに背景円筒格子ソルバーを実装した。各ソルバーの計算手法を表 1 に示す。背景円筒格子ソルバーは、物体格子ソルバーをベースに構築している。背景円筒格子の格子トポロジーは物体格子と同様にSOH型を用いている。図4に背景円筒格子の格子トポロジー例、図5に物体格子との重合格子例を示す。図4および図5に示す背景円筒格子から見られるように、背景円筒格子の中心部に格子が集中するトポロジーになっている。そのため、背景直交格子で採用している4段階のレンゲ・クッタ法で計算を行うと、背景円筒格子の中心付近の格子サイズが小さいために、CFL条件から時間刻みを大きく取れないという問題が生じた。したがって、本拡張ではDual-time stepping/LU-SGS陰解法を採用することとした。

表1 rFlow3Dの計算手法

	背景直交格子	背景円筒格子	物体格子
支配方程式	3次元圧縮性Navier-Stokes方程式		
空間離散化	Cell-vertex	Cell-center	Cell-center
数値流束関数	mSLAU		
空間高次精度化	FCMT (Fourth Order Compact MUSCL TVD) 法		
粘性流束	2次精度 中心差分		
時間積分法	4-stage Runge-Kutta	Dual-time stepping/ LU-SGS	Dual-time stepping/ LU-SGS
乱流モデル	Spalart-Allmaras model Wilcox k- ω model Menter k- ω SST model		

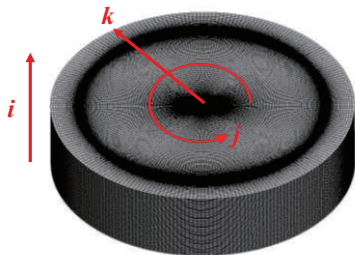


図4 背景円筒格子のSOH型トポロジーの例

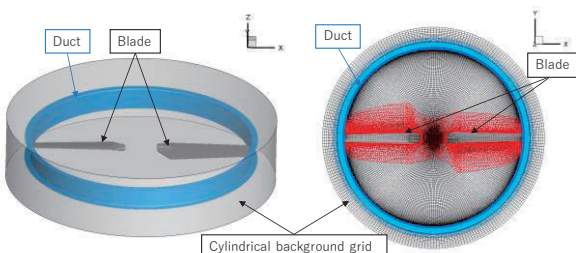


図5 背景円筒格子の配置例

制限事項として、物体格子同士は互いの壁面内部に干渉することをrFlow3Dでは考慮していない。これは、複雑なホール・カット処理を行わないためである。したがって、図6に示すようにブレード格子とダクト格子は互いに物体内部に格子が干渉しないように外部境界位置を定義して格子を作成する必要がある。

図7に計算空間全体の格子例を示す。実際の計算を行う際は、背景円筒格子の外側にさらに外側背景格子として背景直交格子を配置して計算を行う。時間精度は背景直交格子の方が高いことから、背景円筒格子の格子範囲は最小限にすることを推奨する[8]。

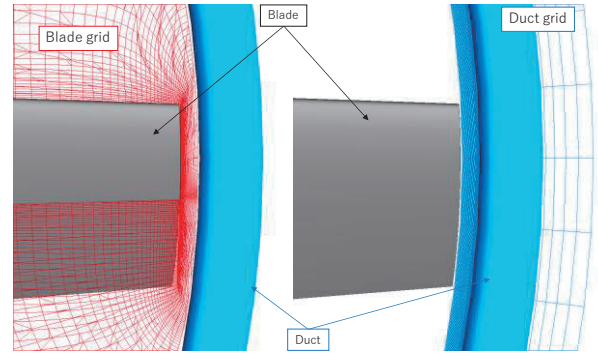


図6 ブレード格子とダクト格子の作成例
ブレード翼端部の拡大図

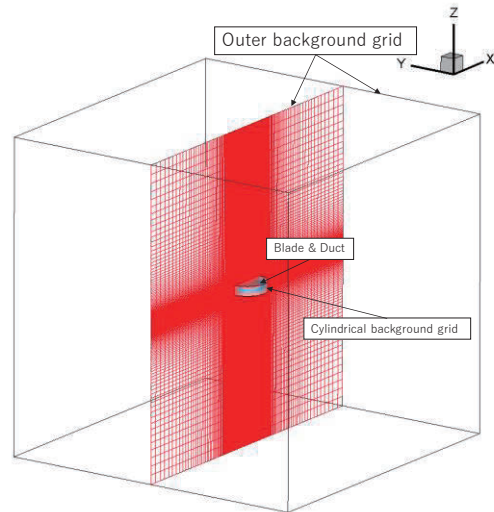


図7 格子全体図

2. 3. 格子間の物理量補間アルゴリズム

背景格子と物体格子の物理量の補間にはTri-linear補間を用いている。図8にTri-linear補間の概念図および、式(1)にTri-linear補間式を示す。

$$Q_p = \{ [Q(1-s) + Q_s](1-t) + \{Q_i(1-s) + Q_s\}t \} (1-u) + \{ [Q(1-s) + Q_s](1-t) + \{Q(1-s) + Q_s\}t \} u \quad (1)$$

ここで、 s, t, u は各方向の補間係数である。補間点が物理量をもつセル内に存在する場合は、 $0 \leq s, t, u \leq 1$ となるので、内外判定は係数の値を用いて行っている。

背景格子から物体格子への補間は、境界条件として物体格子へ物理量を与える。その際、外部境界から3点内側まで補間を行う。これは、空間高次精度化にFCMT法を使用しており、片側3点のステンシルが必要なためである[9]。

物体格子から背景格子へ値を渡す際には、すべての物体格子セルから重合している背景格子へ値を補間している。

物体内部に存在する背景格子の判定には、図 9 に示すように、単一構造格子の特性を利用して、壁面第 1 層格子のセル中心座標を用いて、仮想的な六面体を作成する。この仮想的な六面体内部に存在する背景格子を Tri-linear 補間の補間係数で判断し、存在する場合には非計算点に設定している。背景直交格子から物体格子への補間は、直交格子の特性を生かして、格子インデックス i, j, k を x, y, z 座標に対応させ、図 10 に示すように、各軸方向を順番に絞込んで補間処理を行っている。

物体格子から背景直交格子への補間は、物体格子から探すのではなく、背景直交格子のインデックスを絞込んでから補間を行っている。具体的には図 11 に示すように、物体格子のセル中心座標を使用して、周辺セル 8 点から仮想的な六面体を作成する。この仮想的な六面体に対して、最大・最小座標を使用した境界ボックスを作成し、背景直交格子のインデックスの絞込みを、境界ボックスの始点と終点に対して行い、補間処理を行っている。境界ボックスは AABB (Axis Aligned Bounding Box) を使用している。

背景円筒格子から物体格子への補間には、背景直交格子のようなインデックスの絞込みは困難である。今回の拡張では、背景円筒格子が単一構造格子である特性を利用して、格子インデックス i, j, k をそれぞれ分割する八分木(Octree)のデータ構造を採用した。インデックス分割による八分木構造の概念図を図 12 に示す。ツリーの各ノードには、各インデックスの始点・終点番号と境界ボックス(AABB)を持たせている。補間点探索の際には、このツリーを使用して、AABB で領域を絞っていき、リーフノードに達したところで、Tri-linear 補間係数を計算して、セルの内外判定を行う。

物体格子から背景円筒格子への補間も同様に、物体格子の八分木データを作成し、補間処理を行っている。物体内部の内外判定では、図 9 に示す仮想的な 6 面体の始点・終点位置情報から八分木探索を行い、内外判定を行うインデックス範囲を絞り、Tri-linear 補間係数から内外判定を行っている。

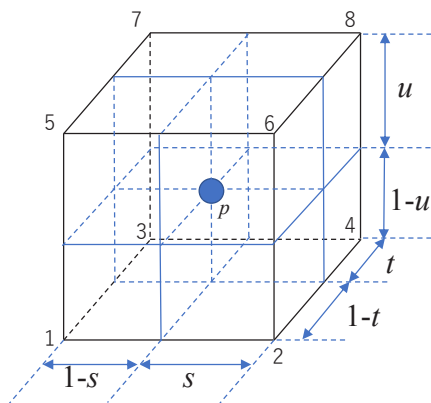


図 8 Tri-linear 補間の概念図

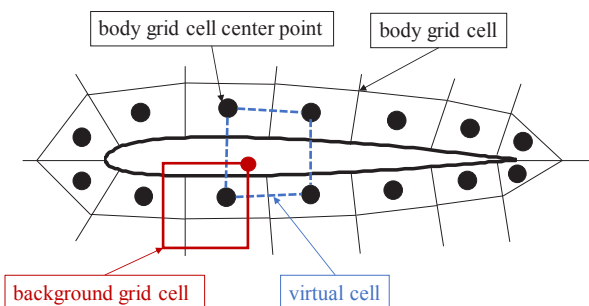


図 9 物体内外判定の概念図

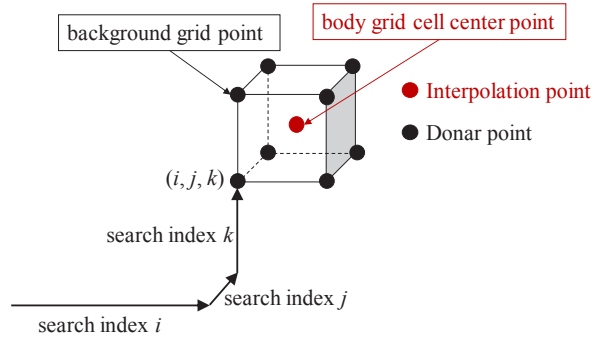


図 10 背景直交格子から物体格子への補間処理時の補間相手探索方法の概念図

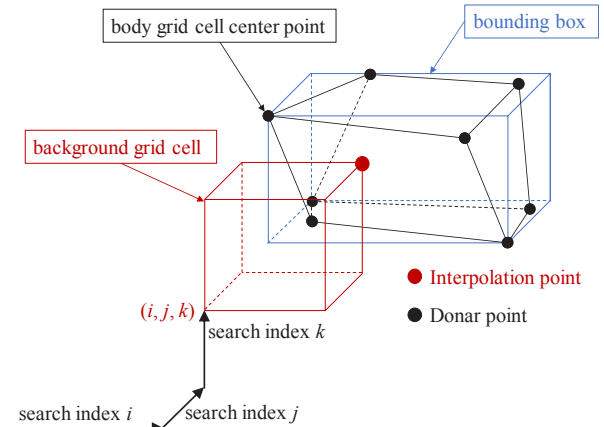


図 11 物体格子から背景直交格子への補間処理時の補間相手探索方法の概念図

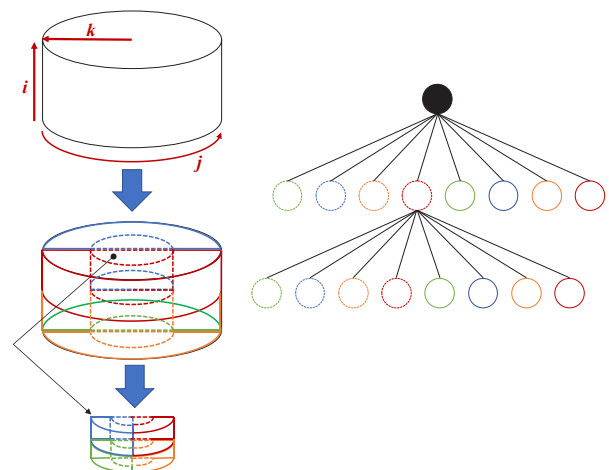


図 12 インデックス分割による八分木構造の概念図

3. 検証計算

検証計算は大阪大学で行われた実験に基づいて行った[7]。ブレード枚数は 2 枚で、ロータ回転数は約 5800RPM、ホバリング条件で試験が行われている。ロータ諸元を表 2 に示す。本報告では、背景円筒格子導入の効果を確認するため、ロータ単体性能予測における背景直交格子と背景円筒格子のそれぞれの結果の比較とダクテッド・ロータ性能予測の結果を示す。ダクテッド・ロータに関する実験結果は参考文献 7 を参照されたい。計算で用いたブレード形状とダクテッド・ロータ形状を図 13 に示す。

計算条件は、ブレード・ピッチ角をそれぞれ 5, 10, 15, 20° で計算を行い、結果の比較を行った。

表 2 ロータ諸元

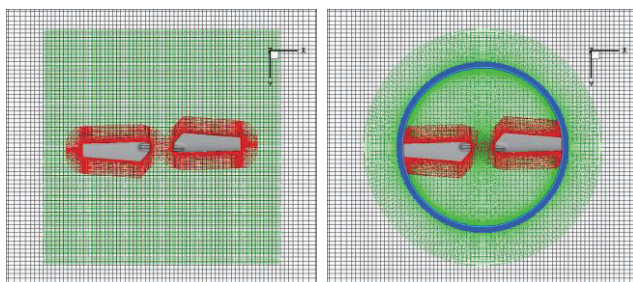
ロータ直径	0.33 m
翼根コード長	0.043 m
翼端コード長	0.029 m
ルート・カット	0.25 [R]
翼型	NACA0009
翼端速度	100 m/s



(a) ブレード形状

(a) ダクトド・ロータ形状
図 13 計算モデル

計算格子は、外側背景直交格子、内側背景直交格子、内側背景円筒格子、ブレード格子、ダクト格子を用いた。図 14 に計算格子の様子を示す。図 14 の黒い線が外側背景直交格子を示し、緑が内側背景直交格子と内側背景円筒格子を示す。また、赤がブレード格子、青がダクト格子である。内側背景直交格子の格子解像度は、翼端コード長の 20% で等間隔格子となっている。図 14 の内側背景円筒格子の図には、ダクトも含まれており、ブレード翼端とダクトの隙間の格子は密な配置になっている。内側背景円筒格子は格子のトポロジー上、等間隔で作成することはできないため、ブレード翼端部分の格子幅を翼端コード長の 20% とし、そのまま外部境界まで格子線を伸ばしている。したがって、直交格子に比べて円筒格子の方が、ブレード翼端側で若干粗く、ブレード翼根側では格子が密な配置になっている。各格子の格子点情報を表 3 に示す。表 3 内の括弧内の数字はセル数を示している。内側背景円筒格子とブレード格子、ダクト格子はセル中心による離散化のためである (表 1 参照)。



(a) 内側背景直交格子 (b) 内側背景円筒格子

図 14 計算格子の様子

表 3 各格子の格子点数

	$i \times j \times k$	Total
外側背景直交格子	139 x 139 x 111	2,144,631
内側背景直交格子	85 x 85 x 29	209,525
内側背景円筒格子	107 x 181 x 135	2,614,545 (2,556,720)
ブレード格子	91 x 121 x 51	561,561 (540,000)
ダクト格子	101 x 209 x 41	865,469 (832,000)

計算手法は表 1 の通りで、本検証では乱流モデルに Menter $k-\omega$ SST 2003 model を使用した。レイノルズ数はブレードコード長基準でおよそ 2.0×10^5 である。

検証項目として、推力係数 C_T およびトルク係数 C_Q 、ロータ性能を示す Figure of Merit の 3 つについて主に検証を行った。推力係数 C_T およびトルク係数 C_Q 、Figure of Merit (FM) の定義を以下に示す。

$$C_T = \frac{T}{\rho \pi R^2 (\Omega R)^2} \quad (2)$$

$$C_Q = \frac{Q}{\rho \pi R^2 (\Omega R)^2 R} \quad (3)$$

$$FM = \frac{C_T^{3/2} / \sqrt{2}}{C_Q} \quad (4)$$

ここで、 T はロータ推力、 Q はロータトルク、 ρ は空気密度、 R はロータ半径、 Ω はロータ角速度である。

図 15 から図 18 にロータ単体における背景直交格子と背景円筒格子のそれぞれを用いた計算結果と実験値との比較を示す。黒シンボルが実験データ、赤シンボルが背景直交格子を用いた計算結果、青シンボルが背景円筒格子を用いた計算結果を示している。図 15 より、計算結果で得られた各ピッチ角に対する推力は実験値より過大評価していることが見て取れる。低ピッチ角側ではおよそ $1^\circ \sim 2^\circ$ 程度のずれとなっている。図 17 のロータ性能曲線より、推力に対するトルクが低ピッチ角側で良く一致しているおり、推力とトルクの関係は良好に予測できていることがわかる。高ピッチ角側のずれについては、ブレード上の剥離の影響が計算では捉えられていないためと考えられる。図 18 のロータ性能を示す Figure of Merit の比較では、高ピッチ角側でブレードの失速が遅く予測されているため、性能低下する推力係数がずれているが、全体的にはおおよそ傾向が捉えられている。

背景直交格子と背景円筒格子の結果を比較すると、若干のずれが見られる。原因としては、格子の説明でも触れたとおり、格子の解像度が同じではないこと、また、時間積分法が異なるため、時間精度が異なっていることが理由として考えられる。背景直交格子では 4 次精度[8]、背景円筒格子では 2 次精度である。図 19 にピッチ角が 10° の時のそれぞれの背景格子における流れ場の様子を示す。この図は Q 値の等値面を表しており、等値面を過度でコンターをつけている。等値面の値は同じ値をとっており、 $Q=0.1$ としている。円筒格子の方が直交格子より翼端渦の拡散が早いのが見て取れる。また、円筒格子の方が翼端付近で格子が密なため、渦の大きさ大きい。これらから、ブレードから放出された渦の解像度が異なり、渦から誘起される誘導速度が異なるために誤差となっていると考えられる。しかし、ロータの空力の傾向は良く捉えられており、新たに追加した補間処理も正しく動作していることがわかる。

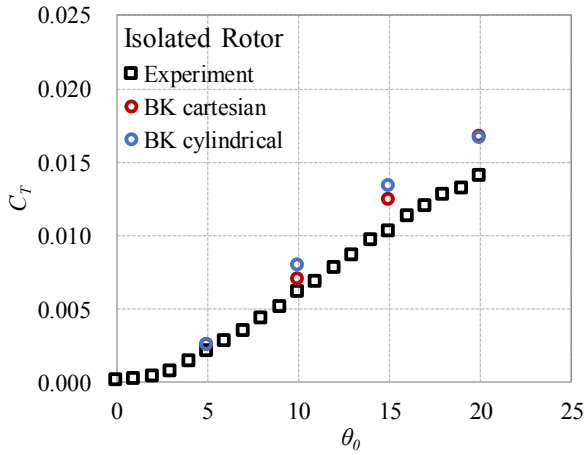


図 15 背景格子の違いによる C_T - θ_0 の比較

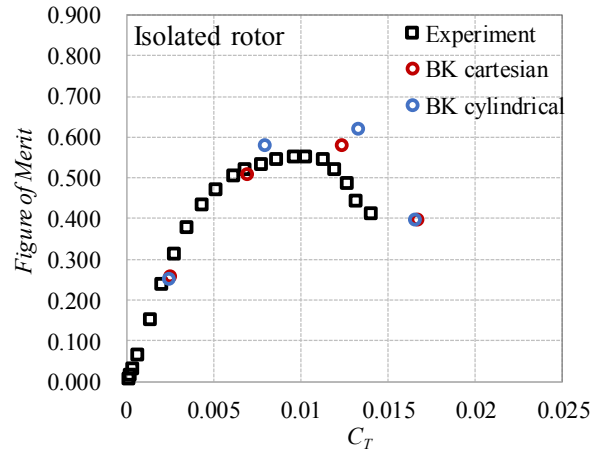


図 18 背景格子の違いによる Figure of Merit の比較

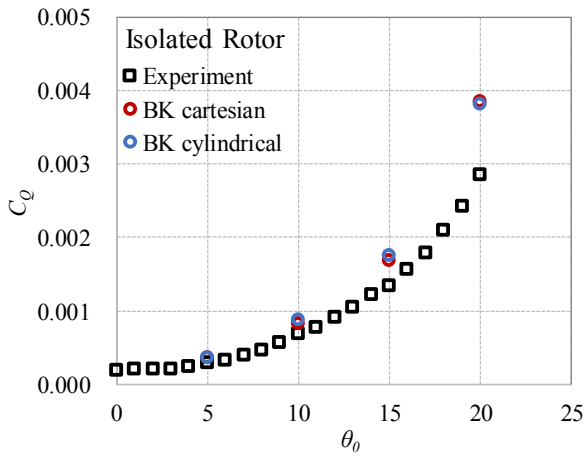
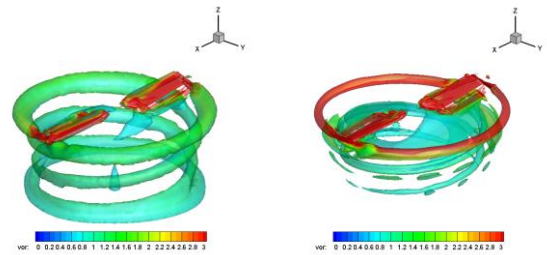


図 16 背景格子の違いによる C_Q - θ_0 の比較



(a) 背景直交格子 (b) 背景円筒格子
図 19 背景直交格子と背景円筒格子の流れ場の比較 ($\theta_0=10^\circ$)

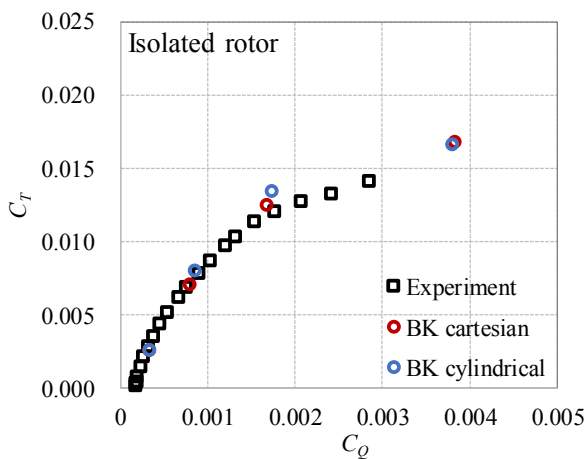


図 17 背景格子の違いによる C_T - C_Q の比較

図 20 と図 21 にダクテッド・ロータにおける実験値と計算結果の比較を示す。図中の黒色シンボルが実験値、赤色シンボルが計算結果を示している。また、シンボルの塗りつぶしが無いものが、ロータ単体性能を示し、シンボルの塗りつぶしがあるものが、ダクテッド・ロータの結果を示している。図 20 より、ダクテッド・ロータにおける推力に対するトルクが実験と良く一致している。ただし、高ピッチ角側では、ロータ単体の時と同様に実験と異なる傾向を示した。しかし、実際に使用するピッチ角の範囲における予測精度は十分得られている。図 21 の Figure of Merit の比較から、ダクトによる性能向上の割合を非常に良く予測できていることがわかる。

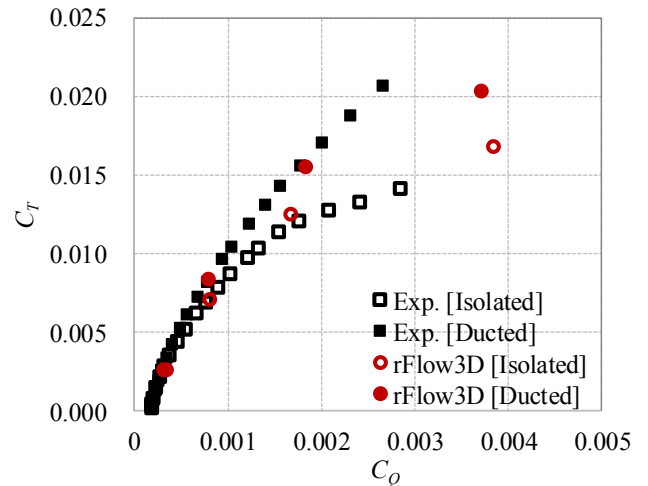


図 20 ダクテッド・ロータにおける C_T - C_Q の比較

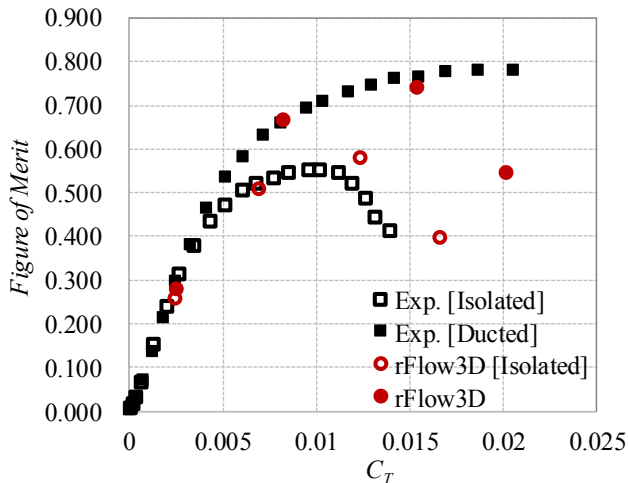


図 21 ダクテッド・ロータにおける Figure of Merit の比較

4. まとめ

ダクテッド・ロータ解析に向けた回転翼用 CFD ツール rFlow3D の拡張を行った。拡張内容は下記の通りである。

- (1) 物体格子ソルバーにダクト形状の計算を可能にした。
- (2) 背景格子に円筒格子を採用し、高速な補間処理のために八分木データ構造を採用した。

検証計算から、背景直交格子と背景円筒格子はおおよそ一致した結果が得られ、新規拡張した機能が正しく動作していることを確認し、ダクテッド・ロータの実用的な計算が可能となった。

ダクテッド・ロータ性能予測の検証では、高ピッチ角側を除いて、ダクテッド・ロータにおける推力とトルクの関係、ロータ性能を示す Figure of Merit の値が実験と非常に良い一致を示した。高ピッチ側では、異なる傾向を示したが、設計点や実運用範囲での予測精度は十分得られている。

今後は、コンパウンド・ヘリコプタのダクテッド・ロータに関する設計検討やマルチ・ロータの性能向上のためのダクテッド・ロータ解析に応用していく予定である。

参考文献

- 1) Tanabe, Y., Aoyama, T., Kobiki, N., Sugiura, M., Miyasita, R., Sunada, S., Kawachi, K., and Nagao, M., "A Conceptual Study of High Speed Rotorcraft", 40th European Rotorcraft Forum, Amsterdam, Netherlands, 2014.
- 2) Tanabe, Y. and Saito, S., "Significance of All-Speed Scheme in Application to Rotorcraft CFD Simulations", 3rd International Basic Research Conference on Rotorcraft Technology, Nanjing, China, October 14-16, 2009.
- 3) Tanabe, Y., Saito, S. and Sugawara, H., "Construction and Validation of an Analysis Tool Chain for Rotorcraft Active Noise Reduction", 38th European Rotorcraft Forum, Amsterdam, Netherlands, 2012.
- 4) Tanabe, Y., Saito, S., Takayama, O., Sasaki, D. and Nakahashi, K., "A New Hybrid Method of Overlapping Structured Grids Combined with Unstructured Fuselage Grids for Rotorcraft Analysis", 36th European Rotorcraft Forum, Amsterdam, Netherlands, 2010.
- 5) Sugiura, M., Tanabe, Y. and Sugawara, H., "Development of a Hybrid Method of CFD and Prescribed Wake Model for Helicopter BVI Noise Prediction", the AHS 69th Annual Forum, Phoenix, Arizona, May 21-23, 2013.
- 6) 菅原瑛明, 田辺安忠, 杉浦正彦, "高速ヘリコプタに適用する CFD 解析技術の開発", 第 53 回飛行機シンポジウム, 2015.

- 7) 米澤宏一, 吉田直生, 松本紘典, 杉山和靖, 田辺安忠, 得竹浩, 砂田茂, マルチコプター用ダクテッドロータの空力特性, 第 49 回流体力学講演会/第 35 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2017.
- 8) Jameson, A and Baker, T., J., "Solution of the Euler Equations for Complex Configurations", AIAA Paper 83-1929, 1983.
- 9) Yamamoto, S. & Daiguji, H., "Higher-Order-Accurate Upwind Schemes for Solving the Compressible Euler and Navier-Stokes Equations," Computers & Fluids, Vol.22, No.2/3, pp.259-270, 1993.