

ロータ間の空力干渉における位相角差の影響に対する考察

○田中陸久（大阪府立大学大学院），田辺安忠（JAXA），砂田茂（名古屋大学），
米澤宏一（電力中央研究所），得竹浩（金沢大学），新井隆景（大阪府立大学）

Study of Influence of Phase-angle Differences on Aerodynamic Interactions between Rotors

Riku Tanaka (Osaka Prefecture Univ.), Yasutada Tanabe (JAXA), Shigeru Sunada (Nagoya Univ.),
Koichi Yonezawa (CRIEPI), Hiroshi Tokutake (Kanazawa Univ.), and Takakage Arai (Osaka Prefecture Univ.)

ABSTRACT

Aerodynamic interactions between 6 rotors on a multi-copter type drone are numerically simulated. The phase angles of the rotors and the pitch angles of the rotor blades are varied. The total thrust changes about 3% due to phase angle differences. With the phase angle differences between the neighboring rotors fixed to the smallest angle about 0 degrees (Worstcase), as the pitch angle approaches 16°, the oscillating forces become relatively low. This property of the oscillating forces depends on the phase angle differences between the rotors, which is considered to be due to the shape change of the tip vortices.

1. はじめに

マルチロータ型ドローン（マルチコプタ）は近年急速に普及しており，インフラ・産業用ロボットとしても活躍が期待されている．それらの用途では，安全性やペイロードの確保などから，6つ以上のロータ数を持つ機体も多数開発されている．

ドローンに期待される用途の一つは，空中からの撮影・監視であるが，カメラを搭載するにあたっては，振動対策としてダンパやジンバルといった装備が必要となる．振動の原因の一つにロータ間の空力干渉による非定常な力とモーメントによる加振がある．

マルチコプタの一般的な制御はロータ回転数を変化させるものであるが，モータの特性から応答性は高くない．これに対し現在，ロータのピッチ角を変えて，より高応答な飛行制御を実現しようとする研究が行われている[1]．回転数一定の条件では，ピッチ角の変化に従い，ほぼ線型的に推力を変えることができる．機構が多少複雑になるが，モータとプロペラの回転慣性モーメントと比べ，ブレードのフェザリング・モーメントが圧倒的に少ないため，より高効率で高応答の機体制御が可能となる．また推力を変化させるときには，ピッチ角を変えるだけでよいから，回転数を増加させるよりも必要パワーは減少する．

従来のマルチロータ機は回転数制御であるため，ロータの位相設定というものを考慮することはなかった．しかし，ピッチ角制御の場合，すべてのロータの回転数を一定にすることも可能なため，ロータの位相

設定を考慮し，ロータ間の空力干渉を検証する余地が出てきた．

本研究では，可変ピッチ制御の6つのロータ間の空力干渉について，異なるロータ位相設定とピッチ角の変化による加振力の変化を数値シミュレーションにより調べてきた．今回は，異なるロータ位相設定について4ケース(Bestcase, Worstcase, Psi0case, Psi0-90case)の計算結果を，ピッチ角の変化については位相設定Bestcaseでの計算結果を報告した[5]．今回は，異なるロータ位相設定について新たに1ケース(Psi_30delay)を追加したものを，ピッチ角の変化については位相設定Worstcaseでの計算結果を報告する．

2. 数値計算手法

JAXAでは回転翼航空機用の統合解析ツールとしてrFlow3Dという回転翼の空力・弾性・トリムの連成解析プログラムを開発している[2]．複数の回転翼を同時に解析できる能力を生かして，今回は6つのロータを有する機体の空力計算を試みた．

今回は初期計算段階で，ロータ間の干渉解析に集中する為にブレードを剛体と仮定し，ロータ以外はすべて除外した．本計算で採用したrFlow3Dの計算手法を表1にまとめた．

表1 用いたrFlow3Dの数値計算手法一覧

支配方程式	Euler 方程式
-------	-----------

空間離散化	Cell-vertex 有限体積法 (背景格子) Cell-centered 有限体積法 (ブレード格子)
時間積分法	4-stages Runge-Kutta法 (背景格子) LU-SGS/LU-DUR 陰解法 (ブレード格子)
非粘性流束	mSLAU
再構築法	4th order Compact MUSCL TVD interpolation法
乱流モデル	なし(擬似DNS)

3. 計算結果

本研究で対象となるマルチコプタは図1に示すように、6つのロータがそれぞれ2枚のブレードを有しており、隣り合うロータは反対方向に回転している。

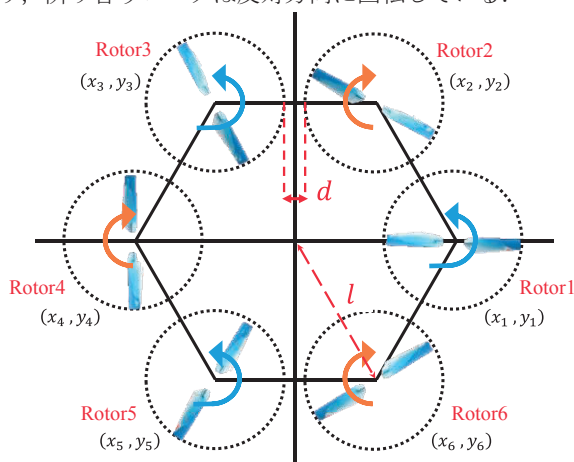


図1 6つのロータ配置

ロータに発生する力とモーメントは式(1)のように無次元化している。

$$\begin{aligned}
 C_X &= X / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2) \\
 C_Y &= Y / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2) \\
 C_Z &= C_T = Z / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2) \\
 C_{MX} &= M_X / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2 R) \\
 C_{MY} &= M_Y / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2 R) \\
 C_{MZ} &= -C_Q = M_Z / (\rho \pi R^2 V_{tip}^2 R) \\
 C_P &= P / (\rho \pi R^2 V_{tip}^3) = C_Q
 \end{aligned} \quad (1)$$

また、6つのロータの合計力とモーメントは式(2)のように計算される。

$$\begin{aligned}
 X_{sum} &= \sum_{i=1}^6 X_i \\
 Y_{sum} &= \sum_{i=1}^6 Y_i \\
 Z_{sum} &= \sum_{i=1}^6 Z_i
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 M_{X_sum} &= \sum_{i=1}^6 M_{X_i} + \sum_{i=1}^6 Z_i y_i \\
 M_{Y_sum} &= \sum_{i=1}^6 M_{Y_i} + \sum_{i=1}^6 -Z_i x_i \\
 M_{Z_sum} &= \sum_{i=1}^6 M_{Z_i} + \sum_{i=1}^6 \{-X_i y_i + Y_i x_i\}
 \end{aligned}$$

表2にロータの諸元データを示す。

表2 ロータ諸元

ロータ直径 D	0.330 m
ロータ半径 R	0.165 m
ロータ個数	6
ブレード枚数 (1ロータあたり)	2
翼端マッハ数	0.29412 (100 m/s)
ロータ間の間隔 d	0.063 m
中心からロータ中心までの距離 l	0.393 m

3.1 ロータ位相設定に伴う空力干渉の変化

ロータ位相を5ケース設定し、解析を実施した。表3にロータ位相設定のケース表を、図2に5ケースの位相設定を示す。

翼端同士が近くですれ違い、干渉が大きくなることは望ましくないと考え、隣接ロータとの位相差が最大となる位相差90度に設定したものをBestcase、位相差が最小となる位相差0度に設定したものをWorstcaseと名付けた。ここでいう位相差とは、原点とロータ中心を結んだ線とロータとのなす角(位相角)における隣接ロータとの差である。

Psi_30delayは隣接するロータ位相角を30度ずつずらした設定となっており、これにより個別ロータの振動波形も30度ずつずれ、全体としての加振力を抑えることができるのではないかと考え、今回計算に加えた。

表3 ロータ位相差設定ケース表

ケース名	備考
Bestcase	翼端同士が近くですれ違うことが無い
Worstcase	すべてのロータ干渉が同時に起こる
Psi0case	すべてのロータが初期角0度の状態からスタート
Psi0-90case	初期角0度と90度を交互に配置
Psi_30delay	隣接するロータの位相角が30度ずつずれている
全ケースでピッチ角は10°と設定	

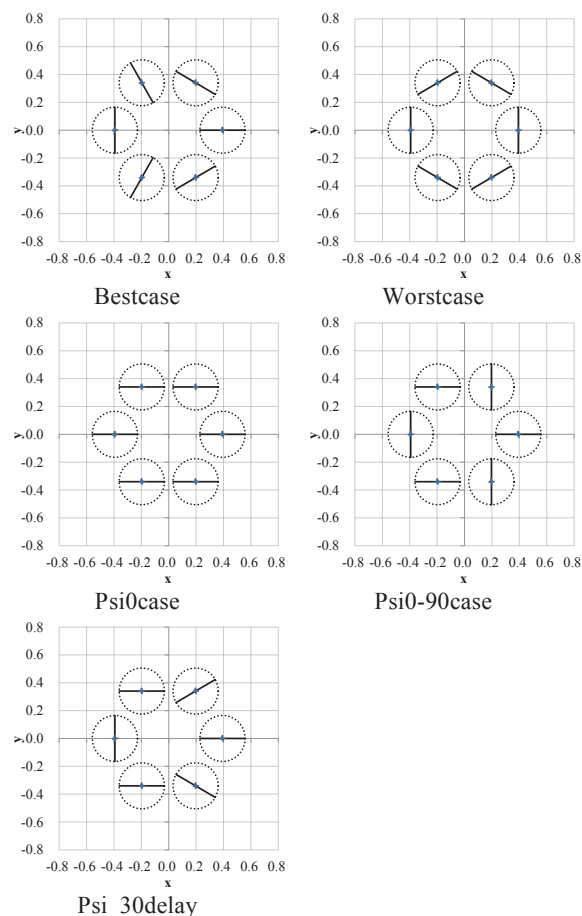


図2 位相差設定5ケース

図3に位相角による機体全体に働くX, Y, Z軸方向の力とモーメントの合計6分力の5回転分の平均値を示す。推力は各ケースで最大3%程度の違いが出た。

図4に平均推力に対する6分力の変動の割合を示す。縦軸ラベルの「SD」は標準偏差, 系列名の「_var」は変動の計算結果(標準偏差)を表している。モーメントについては, 代表長さはロータの半径であるので, 推力に半径をかけた量に対する割合として見る事ができる。推力変動は1~3%の範囲であり, モーメントは1%程度の変動である。これは6つのロータ全体としての結果であるため, 値が小さくなる理由としては, ロータの振動そのものが小さくなったことに加え, 個別のロータの振動が互いに打ち消しあった結果とも考えられ, このことについて調べる。

図5に個別ロータ毎の推力の変動の割合を示す。個別ロータでみると図4でみられるような, 各ケースで値が大きく異なるということはない。このことから, 個別ロータの振動の打ち消しあいにより変動量の差が生じていると考えられる。

図6に個別ロータで見た効率変化として Figure of Merit を示す。これは個別ロータの C_T , C_Q の平均値を用いて計算している。各ケースで最大4%程度の違いが出た。

図7に代表してBestcase とPsi_30delayにおけるロータ毎の推力の変動の様子を1回転分示す。この1回転分の様子は, 5回転分をensemble平均したものである。ロータの回転と推力の変動を観察したところ, ブレード先端が隣接ロータ区間に接近するとき, マルチロータ中心に接近したときで変動が生じていることが分かる。隣接ロータ間の空力干渉によって変動が生じることは既に知られている[3]。

図8に代表してBestcase とPsi_30delay の2ケースの流れ場を示す。図はQ定義法により, $Q=0.5$ とした時の等値面を表している。このシミュレーションでは, マルチロータ中心にはボディが存在せず, 中心領域は複雑な流れ場となっている。

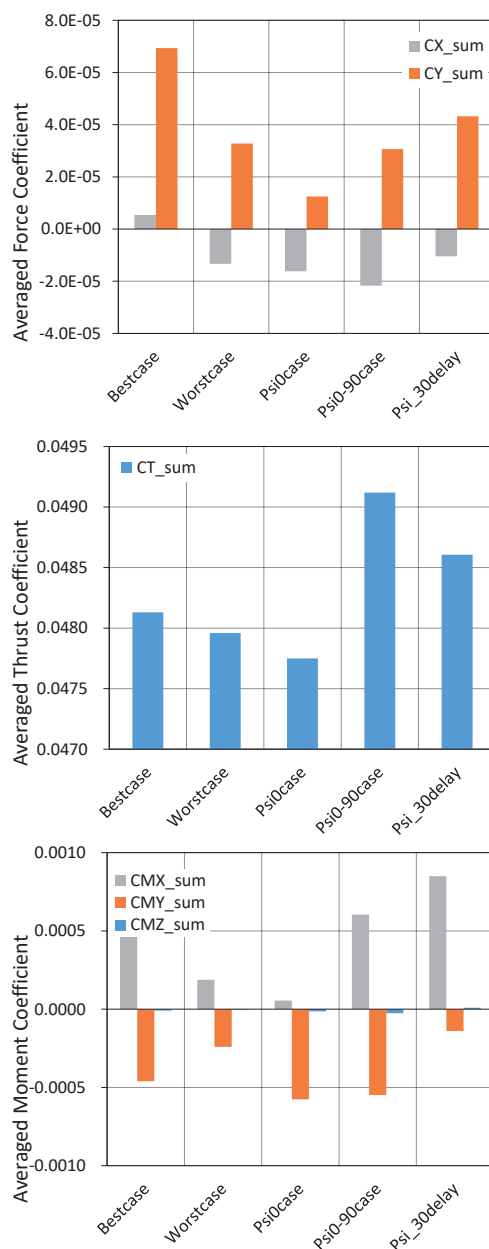


図3 位相角差による6分力の平均値

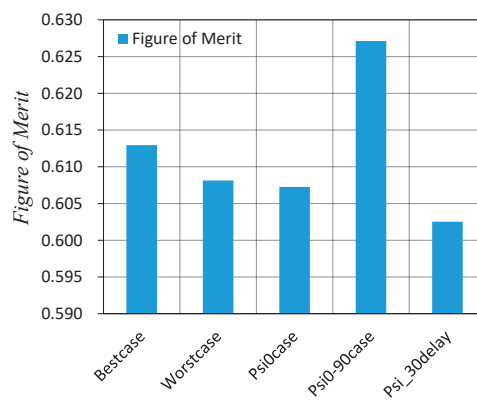
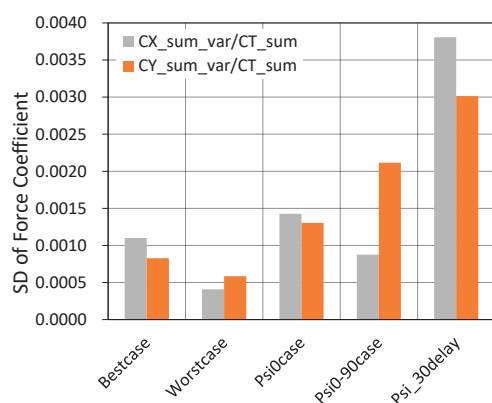


図6 個別ロータで見た効率変化

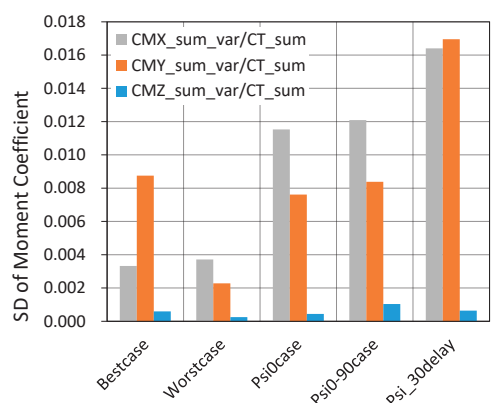
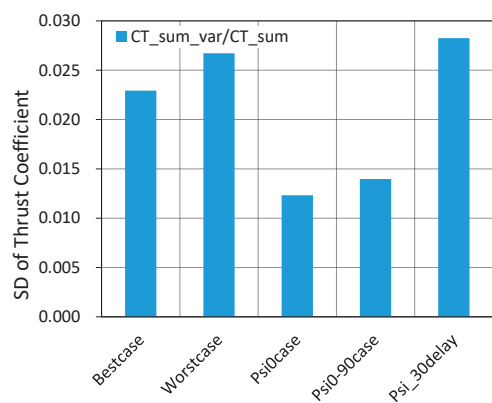


図4 平均推力に対する6分力の変動の割合

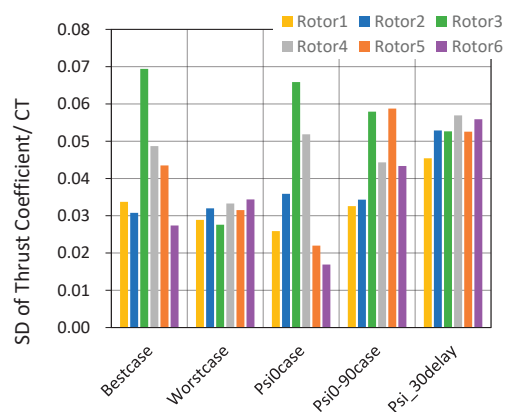


図5 個別ロータ毎の平均推力に対する推力の変動の割合

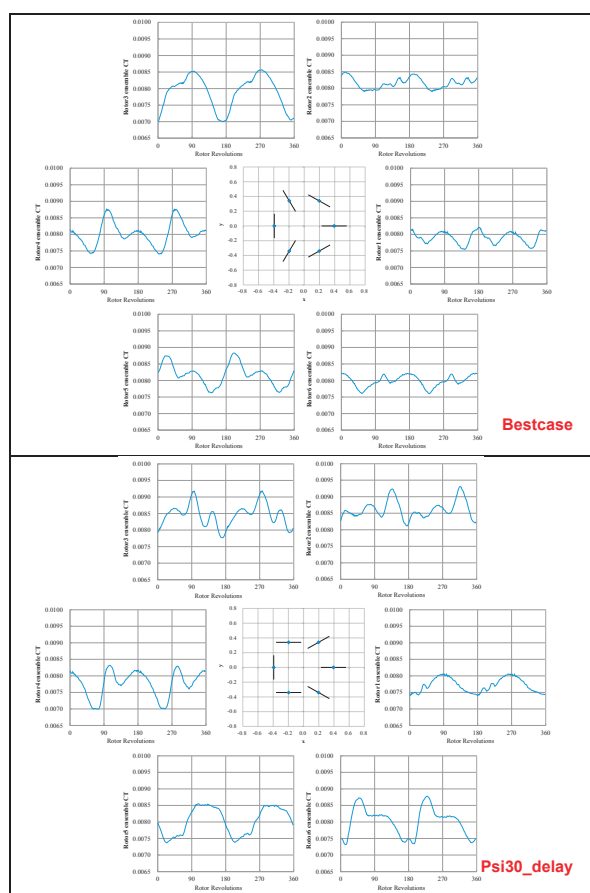
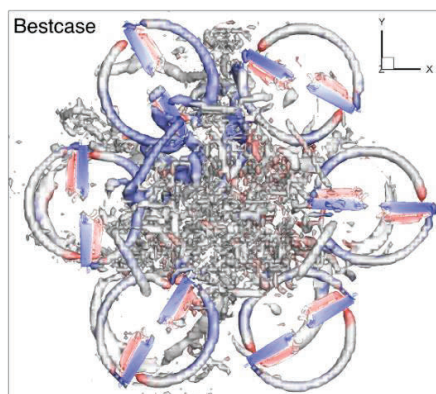


図7 BestcaseとPsi_30delayのロータ毎の推力変動の様子



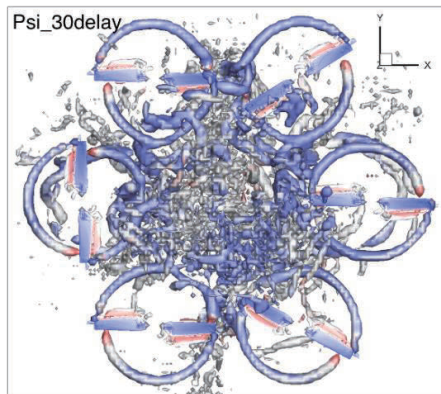


図8 BestcaseとPsi_30delayの流れ場

Bestcase, Worstcase, Psi0case, Psi0-90case, Psi_30delayの5ケースに関して計算を行った。前述したようにロータ干渉が望ましいものではないと想定していたことから、Best, Worstと称したが、ロータ干渉の影響が出るであろう6分力の変動量（図4）をみると、その名の通りの性能を示していない。これは、6分力の変動量がロータ干渉の度合いよりも、個別ロータの振動の打ち消しあいの影響をより強く受けるためと考えられる。

Psi_30delayは隣接するロータ位相角を30度ずつずらした設定となっており、これにより個別ロータの振動波形も30度ずつずれるのではないかと考えていたが、そうはなっていない。

ロータからの後流は翼端渦輪の不安定性[4]から、常に一定の変動量を有しており、今回のように6個のロータからの後流が干渉し合うようなケースでは、流れ場が対称性を維持することが困難である。特に今回の数値シミュレーションは非定常CFD解析の手法を取っており、物理的にも発生している流れ場の不安定性をそのまま予測している。この流れ場の不安定性が、Psi_30delayの振動波形を予想とは異なったものにしている。

ロータ位相設定を評価する際は、振動を減らすという観点から、平均推力に対する変動量の割合が最も大きい推力の変動量を基準として考えるとよいだろう。今回の5ケースでは、Psi0caseが望ましいといえる。

3.2 ピッチ角変化に伴う空力干渉の変化

ピッチ角を12°~20°まで変化させたときの、マルチロータの空力特性について調べた。Bestcaseについては既に計算を行っており[5]、今回はWorstcaseに関して計算を行った。

表4にピッチ変化のケース表を示す。

表4 ピッチ角ケース表

ピッチ角	12, 14, 16, 18, 20 deg
位相角差	Worstcase

図9にピッチ角による機体全体に働くX, Y, Z軸方向の力とモーメントの合計6分力の5回転分の平均値を示す。ピッチ角が大きくなるにつれ推力が増加していることがわかった。また、推力以外では若干の変動が見られた。

図10にピッチ角による平均推力に対する6分力の変動の割合を示す。ピッチ角16°に近づくにつれ加振力は減少している。この現象が個別のロータの振動が互いに打ち消しあっているのか、また、位相角差に依存しているのかについて調べた。

図11に個別ロータ毎の推力の変動の割合を示す。個別ロータでみてもピッチ角16°における値が相対的に低いことから、各ロータ振動の打ち消しあいでないことがわかる。

図9, 図10の推力に関するグラフに、位相角差設定Bestcaseにおける値を追加したものを図12に示す。

Bestcaseでは、発生推力はWorstcaseのものと同程度である。一方で、Bestcaseの平均推力に対する6分力の変動の割合はWorstcaseとは異なった傾向を示している。Bestcaseでは全体的に見ればピッチ角が大きくなるにつれ、加振力が増加しているが、ピッチ角18°のときのみ、相対的に低くなっている。このことから、加振力の減少は位相角に依存している現象であるといえる。

図13にBestcase, 図14にWorstcaseでのピッチ角12°, 16°, 18°, 20°における翼端渦を示す。図はQ定義法により、Q=3.5とした時の等値面を表している。Bestcaseの翼端渦の観察から、隣接するロータを繋ぐようにロータ上部にできる翼端渦（以下、ブリッジ状翼端渦）の存在が加振力に関係していると考えているが[5]、Worstcaseの場合も同じことがいえるかを確かめる。

比較的変動割合の大きい、Bestcaseピッチ角16°, 20°とWorstcaseピッチ角12°, 18°, 20°ではブリッジ状翼端渦が発生している。一方、比較的変動割合の小さい、Bestcaseピッチ角12°, 18°とWorstcaseピッチ角16°ではブリッジ状翼端渦がほとんど発生していない。このことから、ブリッジ状翼端渦の存在が加振力に関係していることがWorstcaseの場合も確認できた。

翼端渦の形状が変化した原因は、まだ特定できていない。

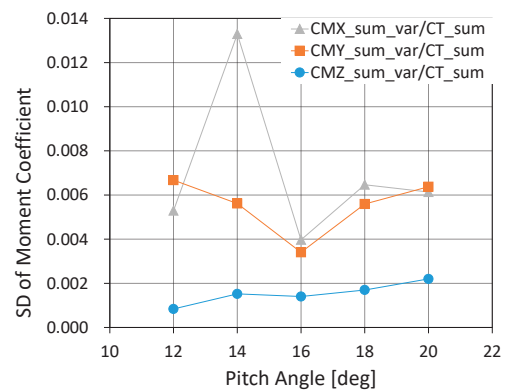
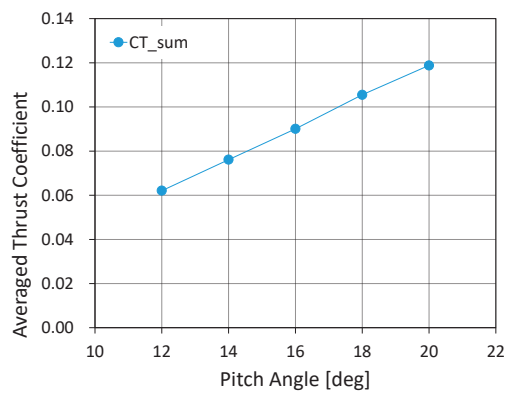
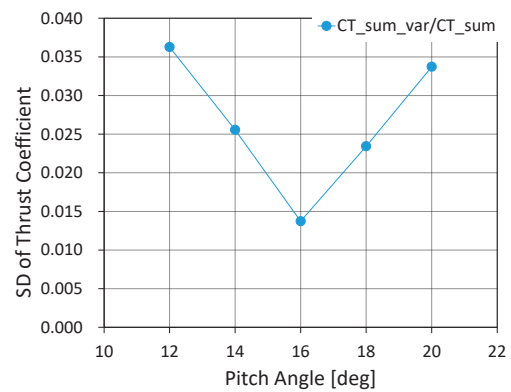
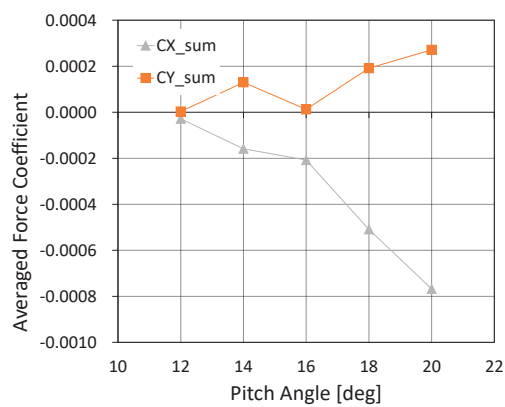


図10 平均推力に対する6分力の変動の割合 (Worstcase)

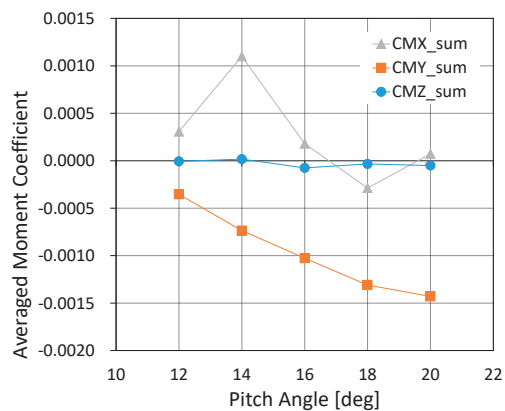


図9 ピッチ角による6分力の平均値の変化 (Worstcase)

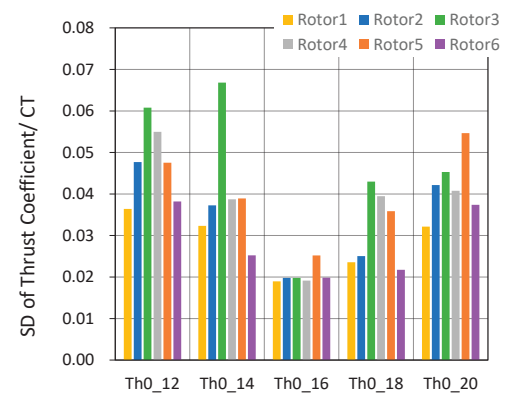
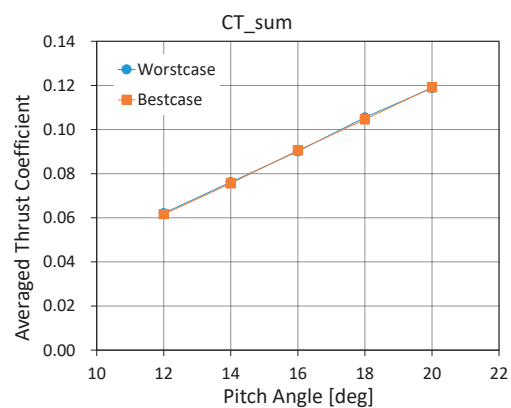
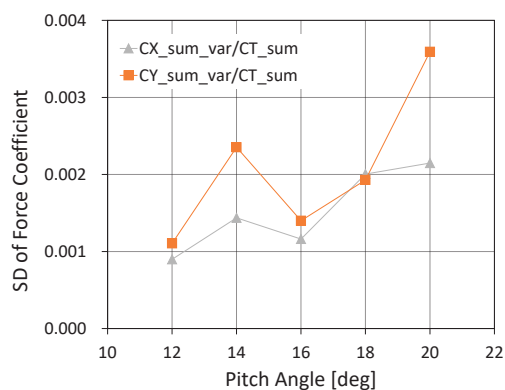


図11 個別ロータ毎の平均推力に対する推力の変動の割合(Worstcase)



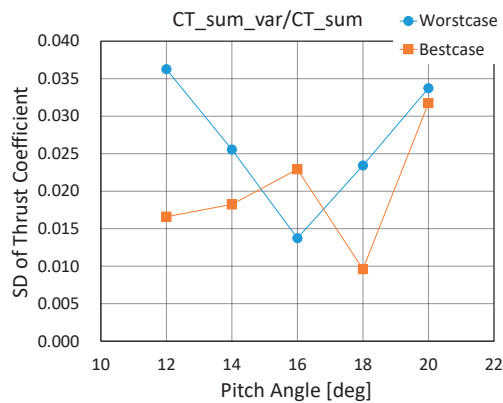


図12 ピッチ角変化に対するWorstcaseとBestcaseの比較

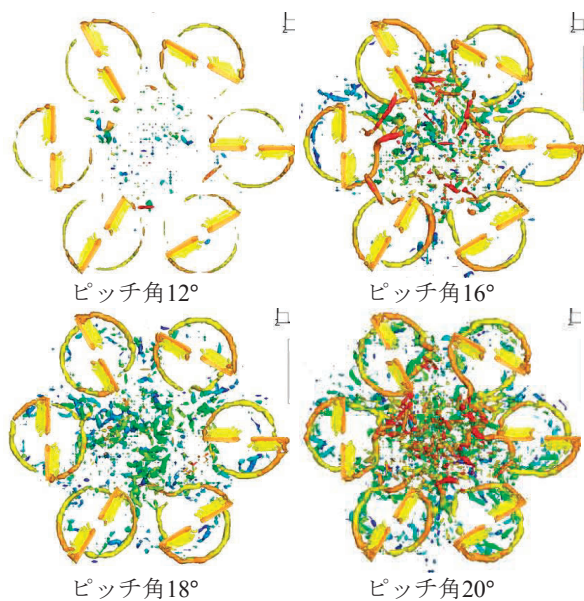


図13 Bestcase ピッチ角12°, 16°, 18°, 20°における翼端渦

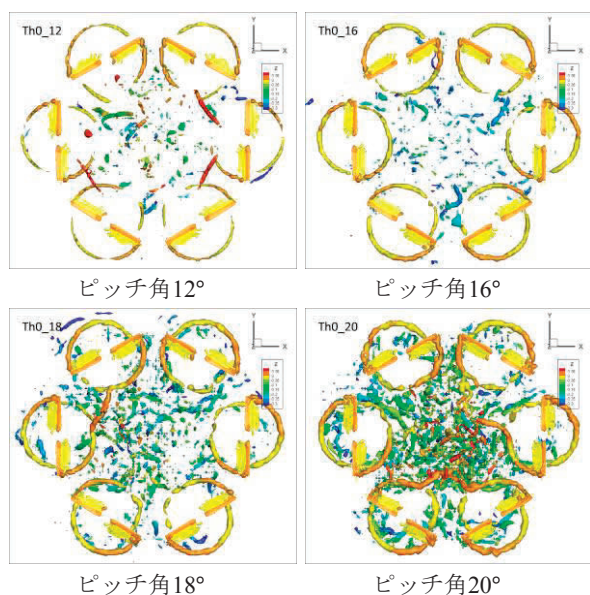


図14 Worstcase ピッチ角12°, 16°, 18°, 20°における翼端渦

4. まとめ

可変ピッチ制御の6つのロータ間の空力干渉について、異なるロータ位相設定とピッチ角の変化による加振力の変化を数値シミュレーションにより調べた。

位相設定を変えた場合、今回調べた位相設定5ケースでは、推力に約3%程度の違いがみられた。

6分力の変動量はロータ干渉の度合いよりも、個別ロータの振動の打ち消しあいの影響をより強く受ける。

ロータ位相設定を評価する際は、平均推力に対する変動量の割合が最も大きい推力の変動量を基準として考えるとよく、今回の5ケースでは、Psi0caseが望ましいといえる。

ロータのピッチ角を変化させた場合、ピッチ角が大きくなるにつれ推力は線形的に増大するが、振動レベルは位相設定により異なる傾向を示す。これは、翼端渦の形状が変化したことが原因であると考えられる。

謝辞

本研究は、革新的研究開発プログラムImPACTの支援を受け、実施したものである。

参考文献

- [1] 砂田, 田辺, 米澤, 得竹, “ピッチ角制御方式への変更とモータ集約化によるミニサーバイヤーの機動性向上—ミニサーバイヤーの利用拡大を目指して—”, ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, パシフィコ横浜, 2016年6月8日—11日.
- [2] 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, NL, September 4-7, 2012.
- [3] 田辺, 青山, 杉浦, 菅原, 砂田, 米澤, 得竹, “マルチコプタのロータ間の空力干渉”, 第48回流体力学講演会2016, 金沢歌劇座, 2016年7月6日—8日.
- [4] Johnson, W., "Rotorcraft Aeromechanics," Cambridge University Press, 2013, p.335.
- [5] 田中, 田辺, 砂田, 米澤, 得竹, “ロータ間の空力干渉における位相角差の影響について”, 第48期年会講演会2017, 東京大学山上会館, 2017年4月13日—14日.