

第48号

令和6年10月7日

博士學位論文

内容の要旨及び審査結果の要旨

(令和6年度 前学期授与分)

金沢工業大学

目 次

◇博士

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)
博甲第 134 号	博士(工学)	濱本 佑典	ロータ・翼胴の空力干渉がコンパウンドヘリコプタの飛行性能に与える影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5
博甲第 135 号	博士(工学)	KHALID MUHAMMAD AFAQ	Influence of partial cover thickness on rebar corrosion in concrete under chloride attack and countermeasure effect using surface penetrants (塩害による鉄筋腐食に及ぼす部分的なかぶり不足の影響と表面含浸材による対策効果) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9

は し が き

本誌は、学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条の規定による公表を目的として、本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を収録したものである。

氏名	濱本 佑典 <small>はまもと ゆうすけ</small>
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第134号
学位授与の日付	令和6年9月12日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	ロータ・翼胴の空力干渉がコンパウンドヘリコプタの飛行性能に与える影響
論文審査委員（主査）	教授 吉田 啓史郎 教授 廣瀬 康夫 客員教授 岡本 正人 国立研究開発法人宇宙航空 研究開発機構 特任担当役 田辺 安忠 大阪公立大学大学院 航空宇宙海洋系専攻 教授 佐々木 大輔

論文内容の要旨

ヘリコプタは高いホバリング性能や垂直離着陸性能を持つため、救急救命や災害救助等に利用されている。しかし、ヘリコプタは飛行速度が固定翼機と比べて低く、高速化に限界がきているため、メインロータの下方に固定翼を備え、従来のヘリコプタより高速飛行可能なコンパウンドヘリコプタの研究開発が進められている。コンパウンドヘリコプタはメインロータと固定翼で飛行するが、メインロータ/翼胴間の空力干渉により特に高速飛行時に飛行性能が顕著に低下するため、コンパウンドヘリコプタの設計にはこの空力干渉の解明が重要である。

コンパウンドヘリコプタのロータ/翼胴間の空力干渉に関する先行研究では、特定の飛行速度において、この空力干渉が空力性能に与える影響について解明されてきた。しかし、コンパウンドヘリコプタが飛行する全速度域でのこの空力干渉や、これがコンパウンドヘリコプタの飛行性能に与える影響について解明されていなかった。また、コンパウンドヘリコプタの機体重量はペイロードや燃料重量等で変化するが、先行研究では機体重量を一定としてこの空力干渉について解明しており、機体重量変化におけるこの空力干渉や、これが飛行性能に与える影響について解明されていなかった。

本論文では、前進率（飛行速度とロータブレードの翼端速度との比）と機体重量を変化させ、ロータと翼胴周りの流れ場や実効揚抗比、トリム舵角および、ロータ/翼胴間の空力干渉がロータ・翼胴・全機（ロータ/翼胴）の空力特性に与える影響について、メインロータと翼胴の解析モデルを用いて数値流体解析で定量的に研究を行い、そのメカニズムを解明した。本論文の成果は、コンパウンドヘリコプタの設計及び運用における指針として有益な情報になった。

第1章では、本論文の研究背景と先行研究、ロータ/翼胴間の空力干渉の解明の重要性、既知の空力干渉現象、本論文の目的、論文の構成について述べた。

第2章では、Sikorsky社製UH-60Aを参考機体にし、解析モデルに用いたメインロータと翼胴の諸元について述べた。

第3章では、解析に使用した回転翼航空機向けの数値流体計算ツールであるrFlow3Dと、ロータ/翼胴の計算格子、解析条件、計算ツールの妥当性について述べた。

第4章では、ロータ・翼胴・全機の3形態を用い、前進率を最小0.1から最大0.7まで変化させて、流れ場と空力特性をそれぞれ比較し、ロータ/翼胴間の空力干渉がロータ・翼胴・全機に与える影響や次の成果を述べた。翼胴は前進率の増加と共にロータの空力的な影響が小さくなるが、この影響で左右の翼で流れ場が異なるため翼の空気が左右非対称になって翼胴にローリングモーメントが生じる。ロータは翼胴の空力的な影響で前進率の増加と共に主に逆流領域で抗力係数が増加する。全機の実効揚抗比はロータ/翼胴間の空力干渉により低下して高前進率側で最大18%減少するとともに、最大全機実効揚抗比における前進率が減速方向に移動する。したがって翼にエルロンを取り付ける方法やメインロータでリフトオフセットする方法などで全機のローリングモーメントをバランスさせることや、ロータブレードの翼根側でブレードねじり下げ角を小さくしてロータ抗力を軽減すること、空力干渉を考慮して全速度域で空力設計を行うことに留意する必要がある。

第5章では、参考機体の最大離陸重量を100%として機体重量を60~110%の6段階に変化させ、前進率に対する飛行性能やトリム舵角をそれぞれ比較し、ロータ/翼胴間の空力干渉が機体重量変化に与える影響や次の成果を述べた。全機実効揚抗比は、機体重量が大きいほど高前進率側で顕著に減少し、機体重量が過小な場合では、ロータの揚力が負になることで急激に減少する。また必要パワーは機体重量が過大な場合で最大28%増加する。さらにトリム舵角のコレクティブピッチ角と縦サイクリックピッチ角は一般的なヘリコプタと傾向が異なり、高前進率側でそれぞれ極大値と極小値をもち、機体重量が大きいほどこのトリム舵角が大きく変化する。したがってロータ/翼胴間の空力干渉を考慮してコンパウンドヘリコプタの機体重量や操舵角の運用範囲を設定するとともに、特にペイロード重量増加で離陸重量が大きい場合の航続性能の概算をすること、コンパウンドヘリコプタ特有の操舵特性に留意することが必要である。

第6章では、第4章と第5章で得られた成果をまとめ、本論文の結論と今後の展望を述べた。

論文審査の結果の要旨

ヘリコプタは高いホバリング性能や垂直離着陸性能を持ったため、救急救命や災害救助等に利用されている。しかし、ヘリコプタは飛行速度が固定翼機に比べて低く、その高速化も限界に達しているため、メインロータの下方に固定翼を備え、従来のヘコプタより高速飛行可能なコンパウンドヘリコプタの研究開発が進められている。コンパウンドヘリコプタはメインロータと固定翼で飛行するが、メインロータと翼胴間の空力干渉により特に高速飛行時に飛行性能が顕著に低下することが報告されており、この空力干渉現象を解明する必要がある。

コンパウンドヘリコプタのロータと翼胴間の空力干渉に関する先行研究として、特定の飛行速度域（例えばホバリングに近い飛行速度域、あるいは巡航に近い飛行速度域）において、空力干渉が機体の飛行性能に与える影響について調査した研究例がある。しかし、コンパウンドヘリコプタが飛行する全速度域での空力干渉やこれがコンパウンドヘリコプタの飛行性能に与える影響については十分に解明されていない状況にある。また、コンパウンドヘリコプタの機体重量はペイロードや燃料重量等で変化するが、先行研究では機体重量を一定として空力干渉について調査しており、機体重量の変化が空力干渉ひいては機体の飛行性能に与える影響については十分に解明されていない状況にある。

濱本氏は、前進率（飛行速度とロータブレードの翼端速度との比）と機体重量を変化させた場合の、ロータと翼胴周りの流れ場を数値流体解析により詳細に調査し、ロータと翼胴間の空力干渉がコンパウンドヘリコプタの飛行性能（例えば実効揚抗比やロータのトリム舵角等）に与える影響を明らかにすると共にその発生メカニズムを解明した。本論文は6章で構成されている。

第1章では、本論文の研究背景として、ロータと翼胴間の空力干渉現象を解明する重要性を述べ、空力干渉現象に関する研究例を示した上で、本論文の目的と論文の構成について述べている。

第2章では、研究対象とするコンパウンドヘリコプタ（以下参考機体）の選定理由を述べ、参考機体の解析モデルを作成する際使用したメインロータと翼胴の諸元を示している。

第3章では、数値解析に使用した回転翼航空機向けの数値流体計算ツールである rflow3D について、実験結果と比較した既報の研究結果を整理して示し、計算ツールの妥当性を確認している。また、ロータと翼胴の計算格子や境界条件などの解析条件について述べている。

第4章では、ロータのみ、翼胴のみ、ロータと翼胴（以下全機）の3形態について、前進率を0.1から0.7まで変化させて流れ場と空力特性を比較し、ロータと翼胴間の空力干渉が全機の空力特性に与える影響について調査している。そして、前進率の増加と共にロータと翼胴間の空力干渉は減少する傾向にあるが、左右の翼で流れ場の差が大きくなり翼の空気力の左右非対称が強まり、翼胴にローリングモーメントが生じることを明らかにしている。またロータについては、前進率の増加と共に主に逆流領域で抗力係数が増加することを明らかにしている。さらに全機の実効揚抗比はロータと翼胴間の空力干渉が無い場

合に比べて最大 18%減少し、また、全機実効揚抗比が最大となる前進率が、ロータと翼胴間の空力干渉が無い場合に比べて低速側へ移動することを明らかにしている。そして、飛行特性に与えるこれらの影響を軽減する方策を提案している。例えば全機のローリングモーメントをバランスさせるため、翼にエルロンを取り付ける方策やメインロータでリフトオフセットするなどの方策を提案している。

第 5 章では、参考機体の最大離陸重を量 100%として機体重量を 60~110%の 6 段階に変化させ、機体重量変化がロータと翼胴間の空力干渉ひいては機体の飛行性能に与える影響について調査している。そして、全機実効揚抗比は、機体重量が大きいほど高前進率の場合に顕著に減少することを明らかにしている。またにトリム舵角のコレクティブピッチ角と縦サイクリックピッチ角は一般的なヘリコプタと傾向が異なり、高前進率の場合にそれぞれ極大値と極小値をもち、機体重量が大きいほどこのトリム舵角が大きく変化することを明らかにしている。そして、特に重量増加時に全機実効揚抗比の減少により航続性能が悪化する点やコンパウンドヘリコプタ特有の操舵特性が生ずる点など、コンパウンドヘリコプタの設計及び運用における留意点について述べている。

第 6 章では、本論文を総括し、第 1 章から第 5 章までをまとめ本論文の結論を述べている。以上、救急救命や災害救助において従来のヘリコプタより高速飛行可能なコンパウンドヘリコプタのニーズが高まる中、本論文ではロータと翼胴間の空力干渉について詳細な研究を実施し、コンパウンドヘリコプタの設計及び運用における有益な指針を与える成果を得ている。これは工学的にも工業的にも有用な研究成果であると判断する。また濱本氏は本学大学院博士課程在学中に、査読有り論文 2 編、国際学会発表 1 件、国内学会発表 3 件で本研究成果を発表しており、その成果は学協会でも高く評価されている。

なお、技術者倫理における高度な倫理観についても確認済みである。

よって本論文は博士（工学）の学位に十分に値すると判断する。

氏名	かりど ムハンマド アファック Khalid Muhammad Afaq
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲 第135号
学位授与の日付	令和6年9月12日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項相当
学位論文の題目	Influence of partial cover thickness on rebar corrosion in concrete under chloride attack and countermeasure effect using surface penetrants (塩害による鉄筋腐食に及ぼす部分的なかぶり不足の影響と表面含浸材による対策効果)
論文審査委員（主査）	教授 宮里 心一 教授 田中 泰司 教授 高橋 茂樹 静岡理工科大学 理工学部 土木工学科 教授 西田 孝弘

論文内容の要旨

適切な強度と耐久性を有する鉄筋コンクリート（RC）は、建設分野で多用されており、一般的な施工条件および環境下において所定の耐用年数に亘り設計どおりに機能する。ただし、貧配合、かぶり不足や、塩分を含む海砂により、早期劣化が発生する。これは、日本などの先進国やパキスタンなどの発展途上国の沿岸都市を含む世界中で、現代社会における最も深刻な問題の一つになっている。例えばパキスタンの海岸沿いの実橋調査によると、その実際の耐用年数は25～30年であり、設計で想定していた耐用年数の50年より大幅に短かった。

RC構造物のかぶり厚さは、外的要因による腐食から鉄筋を保護し、構造物の耐久性と安全性に大きな影響を与える。施工段階では、スペーサーのズレや施工中の型枠の変形により、設計どおりのかぶり厚さを確保できない箇所が発生する場合がある。そのため、所定のかぶり厚さが構造要素の様々な部位において均一に維持されず、ばらつきが生じる。これにより、コンクリート内の鉄筋では、電気化学的な電位差が生じ、腐食が発生する可能性がある。さらに、異なるかぶり厚さは、塩化物イオン、酸素、および水分の不均一な浸透を誘発し、腐食を加速させる可能性がある。これは、鉄筋のアノード反応とカソード反応を促進するマクロセルの形成によって発生し、腐食速度を大幅に促進させる。すなわち、このマクロセル腐食は、鉄筋の孔食を引き起こし、構造物の早期劣化につながる。

以上の背景を踏まえて本研究では、部分的なかぶり不足とモルタルの品質が塩害による鉄筋腐食に及ぼす影響を評価する。実験では、従来の研究を踏まえて、モルタルの品質として0.30と0.70の2つの異なる水セメント比（W/C）を設定した。また、7.5 mmの均一なかぶり不足、7.5 mmと20 mmで異なる部分的なかぶり不足、および全面で十分な

20 mm のかぶり厚さの 3 種類の異なる供試体を作製した。その中心には、直径が 10 mm で長さが 25 mm で全長が 180 mm の 6 個のセグメント化された鉄筋要素を埋設した。これによる、局所的な腐食の測定が本研究の特長である。なお、モルタルには、予め塩化物イオンを含有し、塩分環境を模擬した。また、部分的および完全なかぶり厚さのモルタルを接続した 2 つの部分で供試体を構成し、その半分には 15 kg/m³ の塩化物イオンを含有した。20°C で RH95% の環境に 28 日間および 91 日間に亘り暴露した後、マクロセル腐食電流、分極抵抗に基づくマイクロセル腐食電流、分極曲線などを測定した。同時に、モルタルの圧縮強度と電気抵抗率も測定した。これらの結果によれば、従来の研究とは異なり、0.30 という低い W/C の場合でも、部分的なかぶり不足を有すれば、腐食速度は高くなることが明らかになった。また、腐食速度は、全面的に十分なかぶり厚さに比べてのみならず、均一に短いかぶり不足に比べても、部分的なかぶり不足の場合に速くなることが明らかになった。

ところで、RC 構造物のメンテナンスには、予防保全と事後保全の 2 種類がある。前者は、構造物の状態を維持し、長持ちさせるために予防的に補修や点検を行うことである。一方、後者は、劣化が顕在化した後に補修が行われる対策であり、現在のパキスタンで実施されている。ここで、中長期的に亘る戦略的な維持管理マネジメントを鑑みると、鉄筋の腐食を防止し、その後の腐食速度を遅らせ、構造物を延命することが重要であり、1) 断面修復、2) 腐食抑制剤、3) 電気防食、4) 表面被覆、5) 表面含浸材、などの多数の方法がある。この研究では、塗布プロセスが簡単であること、将来のメンテナンスのために表面を変えることなく母材を元の状態に維持できること、および数十年に亘る耐久性を理由に、表面含浸材による予防保全を選択した。そこで、シラン系、けい酸塩系、および腐食抑制剤になり得る亜硝酸リチウムゲルを含む表面含浸材を使用して、部分的なかぶり不足の供試体に対する補修効果を評価した。すべての表面含浸材は、W/C が 0.50 および塩化物イオンが 2.5kg/m³ で、部分的なかぶり不足の供試体に適用した。なお、塗布前に 28 日間の初期養生を、および塗布後に 28 日間の暴露を、20°C の RH95% で実施した。また、マクロセル腐食電流、マイクロセル腐食電流、分極曲線、電気抵抗率を測定し、効果を検証した。

さらに、供試体における腐食速度の実験データに基づいて、海岸線付近の橋梁を対象にしたシミュレーションをケーススタディとして実施した。これによれば、部分的なかぶり不足が耐用年数を短縮すること、および表面含浸材の塗布により腐食の開始を遅らせて耐用年数を大幅に延長できることが明らかになった。

この研究では、部分的なかぶり不足に注目し、高強度コンクリートであっても部分的なかぶり不足を回避すべきことを、現場の技術者等に警告すべき重要事項として明らかにできた。また、表面含浸材による予防保全が耐用年数を延長できることも明らかにした。この研究が日本やパキスタンの海岸沿いの将来のインフラプロジェクトに適用されることを祈念する。

論文審査の結果の要旨

鉄筋コンクリートのかぶり（埋設された鉄筋よりも外側〔躯体の表面側〕にあるコンクリート）は、海からの飛来塩分の浸透に伴う腐食から鉄筋を保護し、耐久性の向上に寄与する。ただし、施工不良によるスペーサーのズレや型枠の変形により、設計どおりのかぶり厚さを確保できない箇所が発生する場合がある。特に、部分的なかぶり厚さの不足は、塩化物イオンや酸素の不均一な浸透を誘発し、マクロセルの形成により腐食を加速させ、構造物の寿命を短縮する可能性がある。

以上の背景を踏まえて申請論文では、部分的なかぶり不足とモルタル（複合材料としてのぼらつきを低減すべく、コンクリートから砂利を除いたセメント硬化体）の品質が塩害による鉄筋腐食に及ぼす影響を評価し、その対策として含浸工法の効果を検証し、さらにそれらの実験データを入力値としたシミュレーションにより寿命を試算した。

第 1 章では、序論として、研究の背景、目的および構成についてまとめた。

第 2 章では、既往の文献を調査した。

第 3 章では、「モルタルの品質と部分的なかぶり不足が腐食に及ぼす影響」に関して、実験的に解明した。ここでは、モルタルの品質として、0.30（高品質）と 0.70（低品質）の 2 水準の水セメント比を設定した。また、7.5mm の均一なかぶり不足、7.5mm と 20mm で異なる厚さの部分的なかぶり不足、および全面で十分な 20mm のかぶり厚さの 3 種類の供試体を作製した。さらに、マクロセル腐食電流、ミクロセル腐食電流、分極曲線と電気抵抗率を測定した。その結果、水セメント比が 0.30 の高品質なモルタルでも、部分的なかぶり不足を有すれば、腐食速度は高くなることを明らかにできた。また、部分的なかぶり不足を有する場合の腐食速度は、全面的に十分なかぶり厚さを有する場合に比べてのみならず、均一に短いかぶり不足の場合に比べても、速くなることを明らかにできた。

第 4 章では、「部分的なかぶり不足を有するモルタル中の鉄筋腐食に及ぼす表面含浸材の塗布による予防保全効果」に関して、実験的に評価した。ここでは、シラン系、けい酸塩系、および腐食抑制剤になり得る亜硝酸リチウムジェルを含む表面含浸材を使用した。その結果、表面含浸材の塗布は、防食効果を有することを検証できた。

第 5 章では、「沿岸部の実構造物に対するケーススタディ」により、3 章と 4 章の測定データを用いた寿命の試算を行った。その結果、部分的なかぶり不足が耐用年数を短縮すること、および表面含浸材の塗布により腐食の開始を遅らせて耐用年数を延長できることを明らかにできた。

第 6 章では、総論として、各章の総括と今後の実に装向けた展望についてまとめた。

申請論文は、2 編の国際的なフル査読論文、1 編の簡易査読論文ならびに 3 編の国際会議での発表に基づいており、海外でも高く評価されている。

以上を総じて、申請論文は博士（工学）の学位として十分に値すると判断する。