

論文の内容の要旨

論文題目 表面効果翼船の飛行中ロール復原性と実船運用の研究

氏 名 金平 誠

水面近傍で翼の揚抗比が著しく向上することを利用した高速船に Wing In Surface Effect Ship (WISES)がある。WISES の現在想定する速度域は 100~500km/h である。現在海上輸送には航空機と船舶の 2 つの輸送手段に限られるが、速度、コストの面で両者の間に大きなギャップがある。このギャップに相当する速度域は、陸上輸送においてトラック、新幹線輸送が担っている。WISES は大規模な新規インフラ投資を必要とせず、この領域の潜在的な輸送需要を取り込めることから多く研究がなされている。

自航模型を用いた各種飛行試験により WISES の航行性能が調べられている。これには計測機器の搭載や、操縦性の向上のため模型の大型化が図られてきた。しかしこれに伴い問題が生じている。大型模型では野外実験が前提となるが、風向き、水面の状態等、計測条件の再現性の確保は困難である。また、模型の高速化に伴い伴走も困難となる。そこで本研究では、今後の WISES の運動性能評価に繋がる試みとして computational fluid dynamics (CFD)を用いる。これにより表面効果内における 3次元翼周り流れの解析を、任意条件下で実施することを目指す。また CFD 結果と対比するための曳航試験も実施する。

本研究は特にそのロール復原性に注目する。WISES は一般の航空機と比較し、主翼が低アスペクト比となること、客室内の加圧が不要であること、等の船体構造の単純化、低コスト化が期待される。しかしその一方、波浪を伴う海域では巡航時の安定性の確保が課題となる。このため大型の水平安定翼、補助翼等の付加物が必要となり、上記簡素性が損なわれる可能性がある。一方従来の WISES の試験航行から、表面効果内でロールに対し静安定であることが示唆される。これを船体の設計に取り入れ、船体の制御システムの簡略化、またはロール安定の向上に繋げることを目的とする。

海上輸送における次世代高速輸送機関として活躍が見込まれる WISES であるが、本格的な商用例は少ない。これは航空機が飛躍的に発展したために開発が中断されていることが要因の一つである。しかし近年、アジア地域の経済発展に伴い、各地域間の物資輸送を低コストで実現可能な WISES が注目されている。そこで日本における WISES の商用化に向け取り組む。その実航路を想定し、運航計画から採算性、環境負荷を検証する。これらを現行輸送機関と比較する。これにより WISES の優位性を示し、実用に向け各関連機関との連携を築く基盤とする。

日本の離島航路の運営には効率化の要望がある。本研究では外洋離島航路である東京-小笠原航路に着目する。本航路の距離は約 1000km であり上記アジア地域の主要区間距離の典型にあたる。これに WISES を使用する航路運営を検証する。本航路は年間の利用者数の変動が激しい。これは

季節性の観光目的の輸送が生じるためである。一方、生活航路としての定期運航も実施する必要がある。現行ではこれらを同一の輸送機関で実施しているための非効率が生じている。これに WISES の高速性を活かした小規模・多便数の運航計画を適用することにより消席率の向上を図る。更に実航路から要求される実機要目を推算し、上記運航計画と併せ採算性を検証する。検証には total operation cost (TOC)を用いる。また日本を含む先進国には、温室効果ガスの排出量を削減し、低炭素化社会を構築する国際的役割が求められる。そこで本航路の運営により生じる CO₂ 排出量を検証し、現行輸送機関と比較する。

CFD 解析には NACA3409s 翼型を用いる。これは表面効果内での縦の安定性を得るために翼後縁に逆キャンバーを設けたものである。また翼端板を付加したものについても検証する。CFD では非圧縮粘性流体の RaNS シミュレーションを実施する。格子の生成、解法には市販のソルバーを用いる。計算には有限体積法を使用する。翼表面は構造格子、翼端面には三角形の非構造格子を構成する。また、翼近傍を直方体のブロックで囲み、翼の高度、ロール角の変化をこのブロックの移動、回転で再現する。これにより、翼の姿勢の変化に対し、翼面近傍の解像度を一定に保つ。ロールの回転軸は、スパン中央の翼弦線とする。乱流モデルには $k-\omega$ SST モデルを用いる。これは翼面近くの低レイノルズ数流れにおける近似と、その外部に生じる伴流域での予測を段階的に切り替えることで計算精度と経済性を両立したハイブリッドモデルである。セル表面の補間には 2 次風上法を、圧力解法には SIMPLE 法を用いる。また、解析手法の妥当性を確認するため、得られた結果を既存の風洞試験結果と比較する。本風洞試験は模擬板により表面を再現し、模擬板上に発達する境界層はスリットと整流翼で除去している。この結果、巡航時の迎角付近で比較する場合、揚力係数 C_L は 3.0% の差異で風洞試験結果を再現可能である。また抗力係数 C_D についても僅かに差異が確認されるが、格子の解像度を増加させることにより削減可能なものと考えられる。CFD 結果が示す上記係数の迎角、高度に対する依存性は、風洞試験によるものとよく一致している、これにより本手法により巡航時の翼周りの流れの解析が可能であると考えられる。

計算の結果得られた表面効果内でロール状態の NACA3409s 翼型に生じるローリングモーメント C_{Mx} を Fig.1 に示す。この結果から、表面効果内でロール状態の翼には、そのロールを復原する向きにローリングモーメントが生じていることが分かる。またその値はロール角- ϕ の増加に伴い非線形に増加する。また無次元化された翼後縁高度 h/c の低下に対しても非線形に増加する。また、翼端板を付加した場合このローリングモーメントの値は顕著に増幅される。その増加率は $h/c=0.15$ 、ロール角- $\phi=4.0\text{deg}$. の時、翼端板の無い場合と比較して 17 倍となる。翼表面の圧力分布を Fig. 2 に示す。この観察から、ロールにより生じる翼下面の圧力分布の偏りがローリングモーメントの発生に寄与している。また、翼端板を付加した場合は、スパン方向への流量が制限され、翼表面の圧力分布の偏りが増幅されることが分かる。

曳航試験は東京大学船型試験水槽で実施する。翼断面は NACA3409s 翼型とし、翼端板を付加する。曳航中の翼模型は水平であり、翼下方の表面模擬板を傾斜させることによりロール角を再現する。予め CFD によりローリングモーメントの検出量を予測している。この時検出量が微小であると予測されるため、計測に注意を要する。Fig.3 に曳航試験により得られた表面効果内におい

てロール状態の NACA3409s 翼型に生じるローリングモーメント C_{MX}' を示す。 C_{MX}' の $-\phi$ 、 h/c に対する振る舞いは CFD による解析結果と同様である。これにより実現象からも表面効果内における翼のロール復原性を確認できる。

この結果、WISSES のローリングモーメントに関するモデルは、通常の航空機のものと比較し、ロール角、高度変化により生じるローリングモーメントが加わる形となる。

東京-小笠原航路に WISSES105 を使用する場合には、年間に輸送容量の異なる 4 つの運航期間を設ける。各期間にそれぞれ 1 日あたりの往復回数、輸送用量を定め、これを年間の利用者数の変動予測に合わせ適用する。また、適用期間の容量が 2004 年～2008 年の過去の実績を満たすものとする。この結果、2008 年から過去 5 年間の平均で、消席率は 36.6%から 60.0%に向上する見込みを得る。

TOC の推算から、本航路の片道あたりの搭乗代は 29.8 千円/seat となる。これには 105 人乗り WISSES を 2 台運用することを考える。この時の実船モデルの外観を Fig.4 に示す。この結果、片道あたりの搭乗券代は現行輸送機関の最も安価なものと比較し、約 5.3 千円増額となるが、航海時間は 22 時間の短縮となる。この結果が得られる要因には以下の 3 点が挙げられる。1 つ目は消席率が向上したこと。2 つ目は航続時間の削減に伴い燃料消費が低減したこと。3 つ目は、船内泊の設備がなくなり、輸送機関が簡略化されたことである。これらから、十分現行輸送機関と競争可能であることが分かる。また離水時の必要推力は $10.2 \times 10^3 \text{PS}$ となり、搭載主機で出力可能であること。有義波高 3.0m における 100 分の 1 最大波高を巡航高度とした場合、過去の外洋波浪図から就航率は 72%程度となることが推算される。一方、伊豆諸島海域を航行する東京-利島間のジェットフォイルの、同期間における就航率は 58%である。

CO₂ 排出量の検証は、提案する WISSES の主要目、運航計画から年間の排出量を推算する。これを現行輸送機関と比較し 58%削減できる見込みを得る。この要因には以下の 2 点が挙げられる。1 つ目は上記 TOC の比較同様、航続時間の削減に伴い燃料消費が低減したこと。2 つめは使用主機をターボプロップエンジンとすることで、使用燃料が CO₂ 排出係数の低いジェット燃料に変更されることが挙げられる。

離島航路の運営には、島民の生活安定への貢献が求められる。上記に示す経済性の確保と環境負荷の低減は、定期運航を実施した上での結果であることが重要である。

本研究では CFD により WISSES のロール復原性を確認した。また曳航試験による実現象の観察においても、同様の結果を確認することができた。今後はこれを基に WISSES の実設計に繋げることを考える。

WISSES を使用した外洋離島航路の運用例からは、更に詳細な運用計画を策定するための基礎データとして関係各機関に喚起できる結果が得られた。