

東アジア域内における高速海上旅客輸送の可能性

Possibility of high speed maritime transportation in East Asia region

秋元博路¹ 金平誠²

Hiromichi Akimoto¹, Makoto Kanehira²

¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

¹ Department of Systems Innovation, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

² 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

² Department of Environmental and Ocean Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract: Wing in surface effect ship (WISES) is a high speed marine transportation which utilize the enhance efficiency of aerodynamic wings in the proximity to water surface. We estimate the economic performance of a WISES with canard configuration in practical services. The result shows that the service of WISES is competitive among existing services of hydrofoil and aircrafts in the range around 1000km. The paper also shows a plan of small WISES for market entry. The series hybrid power train of the small ship makes it possible to use commercially available turbo shaft engines. It also shows the flexibility of power train layout in the small ship.

1. 緒言

日本における海上輸送のインフラ整備は、国内で製造された工業製品を北米と欧州へ輸出する事を前提に行われてきた。このため、主要な港湾は太平洋側に集中し、周辺のアジア諸国との輸送サービスの整備は遅れてきた。しかし、近年の中国を筆頭とする東アジア域内の経済規模は急速に拡大を続けており、2007年の日本、中国、韓国を合わせたGDPは全世界の16.4%に達し、既にドイツ、フランス、イギリスの合計15.9%を超えている。これは東アジアにEUに比肩する経済圏ができつつある事を示しており、これらを結ぶ物流および旅客輸送のネットワークを整備していく事が急務である。

この経済圏を結ぶ手段として、既存の航空路線は必ずしも最適なものではない。これは、航空機の輸送効率が高々度での長距離輸送で初めて発揮されるため、1000km程度の輸送距離では、その特長を十分に生かせないためである。そこで著者らは、1000kmまでの中距離での高速海上輸送システムとして、表面効果翼船(Wing In Surface Effect Ship; WISES)を提案している。

WISESは、地面近傍で翼の抵抗減少と揚力増加が生じる現象(地面効果、表面効果)を、海面上で利用する高速船舶である。WISESは航空機に類似の空中翼を持ち、水面から離水後、水面上数メートルの低高度を維持して浮上航行を行う。表面効果を利用する事により、WISESの主翼は製造容易な低アスペクト比のものでよく、低建造コスト、低運航コストの乗り物となる事が期待できる。また表面効果のもと

で、航空機、船舶の双方とも経済的な運航が困難な、100~400km/hの速度での運航が可能である。本論文では、著者らが提案するWISESの概要と、それを具体的な路線に投入した場合のコスト評価を示す。

2. 前翼型 WISES

WISESの研究開発の歴史は長く、冷戦時代の旧ソ連などで1960年代に大規模な開発が行われていた。ここで開発された大型船は、カスピ海の怪物と呼ばれ、現在主流となっているシステムの原型となっている(Fig. 1)。



Figure 4: Caspian sea monster, KM

これは、航空機と同様に主翼と水平尾翼を持つが、表面効果内での安定性を得るため、長大な尾部と、その頂部に取り付けた非常に大きな水平尾翼を必要としている。しかし水平尾翼は揚力を発生しないため、巡航時の抵抗と構造重量の増加につながってしまう。また離水直前の水上滑走において、長大な尾部は船体が大きな迎え角をとる障害となり、主翼の最大揚力を減じる。これは、離水速度の増加、水力荷重の増加、必要強度と構造重量の増加と続く負の

スパイラルに設計が陥り、表面効果のメリットを減殺してしまうことになる。

この問題を解消するため、筆者らは Fig. 2 に示す前翼型 WISES を提案している。これは水平安定翼を尾部ではなく船首に置き、前翼(canard wing)とし、プロペラ推進器も前方配置とするものである。この形態では尾部が短くなるため、従来の飛行機型コンセプトよりも容易に、水面上での高迎角をとる事ができる。高迎角では主翼上面の気流が翼面から離れ、失速に陥る危険性があるが、前方に配置した推進器の高速気流が翼面上に供給されるため、前翼および主翼の失速が回避される。大きな水平尾翼を用いずに縦安定性を確保するため、主翼の翼断面形状には、水面からの高度変化に対して揚力中心の移動が小さくなるように設計した S 字翼を利用する(Fig.3)。これは、NACA 4-digit 翼型の後部に逆キャンバーのプロファイルが付加したものである[1]。

このコンセプトは、従来の WISES の安定性確保の考え方から発想を転換し、単純な機構で高揚力を得るものである。経済性の悪化につながる離水用の補助動力や推力偏向機構も持たないため軽量化が可能であり、この種の船舶の商用利用に有望なコンセプトとなっている。

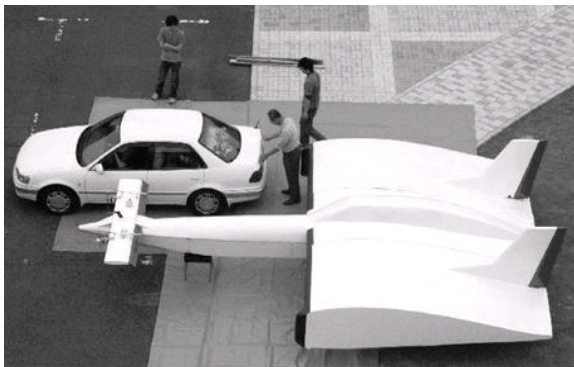


Figure 2: Canard type WISES (radio controlled model “Kaien-3”)

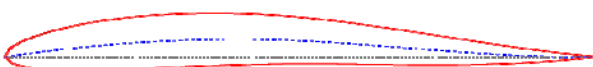


Figure 3: S-shaped wing section, NACA3409-s1 (modified NACA3409 with 1% reversed camber at tail)

3. WISES の総運航コスト

初期計画段階で、新規の輸送機関の経済性を評価する事は容易ではない。特に初期投資の大部分を占める船舶の建造・調達コストには不確実性が残る。ここでは、ロシアの高速船開発実績を基にした Nebylov and Wilson の方法[2]を用いて建造コストの評価を行う。

評価対象には 106 人乗り WISES モデルを用いる。これは、東京と小笠原諸島の 1000km ルートを結ぶ高速船サービスを想定したものであるが[3]、このルートを無給油で往復するに必要な航続距離 2000km は、東アジアの主要都市を結ぶにも十分なサイズとなっている。この船の諸元を Table 1 に示す。

Table 1: Main properties of 106-seat WISES.

	WISES106
passenger	106
length overall(m)	61.0
overall height(m)	4.3
wing area(m ²)	146.8
empty weight(t)	44.0
fuel on board(t)	6.9
engine power(ps)	1608
cruising speed(km/h)	400

現在、東京-小笠原航路では、排水量型船舶である「おがさわら丸」が、片道 25.5 時間の旅客サービスを行っている。この船の乗客定員は 1031 名、速度は 22.5 ノット(時速 42km)である。小笠原諸島の観光客数とその季節変動の実績をもとに、WISES サービスを検討したところ、2 隻の WISES(速度 216 ノット(時速 400km、106 人乗り)でスケジューリングする事で、現在の「おがさわら丸」の輸送能力を代替できる事が分かった。

Nebylov and Wilson の方法に基づき、2 隻の調達コストを算出する。この評価では、船体諸元をもとに以下の項目ごとに経験式によってコストを算出する。

1. 船体等の荷重を受ける主構造
2. 主機および推進機関
3. 電装品
4. 制御、航法、チェックシステム
5. 外部動力装置(離着水の補助)
6. ライフサポート、船内備品
7. 対象船の目的に応じた特殊装備
8. 製造、保守機器のための設計作業
9. 建造の付随業務および付属機器(工具、治具、消耗品、部屋、警備など)

この評価において、本研究の前翼型 WISES の特長は、航空機に比べてエンジンサイズが小さくなること、離着水時の補助動力装置が不要である事などが

織り込まれる。

このようにして求めた、第1船および第2船の建造コストは、それぞれ 8.24, 7.99 million USD である。製造者の利益を 15% と仮定すると、2隻分の調達にかかる初期投資は 18.7 million USD となる。初期投資額を基に、2隻による total operation cost(TOD)を Akagi[4]の方法により評価する。TOD のうち直接運航経費(direct operation cost; DOT)は、次の式となる。

$$DOC = \left[\left\{ \frac{1-r_v}{A} + r_{ins} + r_{int} \right\} + r_m \left[\left(\frac{K_s}{N_p V_s} \right) \frac{1}{T_a} + \left(\frac{C_{fu} M_f}{R N_p} \right) + \left(\frac{s_c N_c}{N_p V_s} \right) \frac{1}{T_a} \right] \right] \quad (3)$$

ここでは償却期間を 10 年とし、 r_v は償却時の残存価値 (0.1), r_{ins} は保険費用年額 (0.015), r_{int} は利率 (0.05), r_m は保守費用比率 (0.03)、 A は償却期間(10 years). K_s は船舶の調達価格(18.7m\$), N_p は乗客数 (106), V_s は設計速度(400 km/h), T_a は年間稼働時間 (1732.5), C_{fu} は重量あたりの燃料価格 (1.16\$/kg), M_f は燃料重量 (1 往復 2605 kg), R は 1 航海距離 (1 往復 2000 km), s_c は乗員の平均賃金(7×10^4 \$), N_c は乗員数である。 N_c は、1隻あたりの乗員数を以下の式から 5名とした。

$$N_c = 2 + \text{integer} \left(\frac{N_p}{50} \right) \quad (4)$$

上記により算出した東京-小笠原航路の直接運航経費は、0.071 USD/seat×km である。総運航経費 TOC を DOC の 3.0 倍と概算すると、片道あたりの運賃 213USD が導かれる。これは、現状の「おがさわら丸」の運賃 212USD(2 等料金 22,570 円)とほぼ同じである。現在の料金水準は東京都の援助によって維持されたものであること、航行時間が現状の 25.5 時間が 2.5 時間に短縮されることを考慮すれば、WISES の運賃が、十分に競争力のあるものと言える。また最短でも 1 日おきであった航海が 4 便/日まで増加し、利便性も大きく向上している。

乗客 1 人あたりの燃料消費は、「おがさわら丸」が 75.4kg(C 重油)であるのに対し、WISES は 12.3kg (JP-4 燃料)である。これを CO2 排出量に換算すると、「おがさわら丸」の 236 kg-CO2 に対し WISES は 36kg-CO2 と、現行の 16%に排出を削減できる事が示された。

東京-小笠原航路で必要となる 2000km の航続距離は、東アジアの主要都市間の輸送にも利用可能であることを意味する。Fig. 4 に日本周辺の都市間を結ぶ海上航路の例を示す。ここに示した航路では、トラブルが発生した場合も、上記の航続距離により近隣の港への待避が可能である。また大都市間の路線であるため、航路の両端で給油が可能である。

航空機は、高速性を生かせる長距離輸送では優れた輸送機関である。しかし 1000km 程度の短距離輸

送では、燃料消費の少ない高々度の巡航飛行の割合が少なくなる。また空港は人口密集地を避けて建設するため、大都市であるほど都心から遠くなり、陸路の移動時間が長くなる。一方、多くの大都市が海港から発展したため、WISES は都市中心部近くでの離発着が可能である。

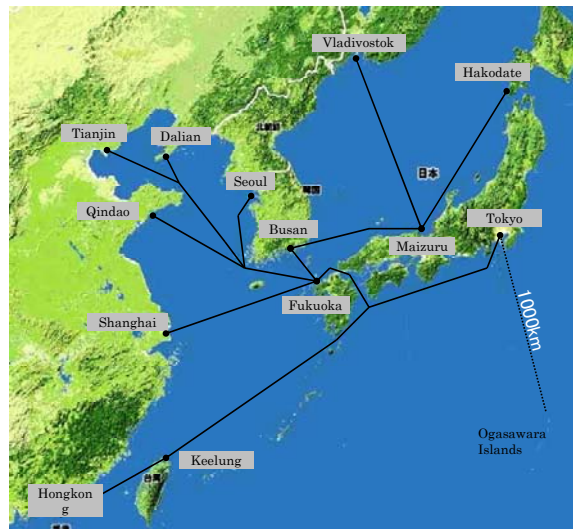


Figure 4: Connection of major cities in East Asia.

収益限界の乗船率を 60% とし、代表的な航路の片道運賃を前節と同様に推定したものを Table 2 に示す。

Table 2: Ticket price estimations of services.

Route	Voyage time (one way)	Number of round trips per day for a ship	Ticket price (one way)
Fukuoka-Busan	0.6 hrs	6	38USD
Fukuoka-Seoul	2.1 hrs	2	123USD
Fukuoka-Shanghai	4.4 hrs	1	267USD
Maizuru-Vladivostok	2.3 hrs	2	133USD

福岡-釜山航路は、全没型水中翼船である Jetfoil が競合サービスとして存在する。このサービスの片道運賃は、割安な往復割引運賃 24,000 円の半額とすると 144USD である。利便性の点から WISES はこれ以上の価格設定が可能である一方、運航経費は 38\$ であるため、十分な収益の余地を示している。福岡-ソウル間は航空機と競合し、その運賃は格安サービスの存在により 189~340\$ と多様であるが十分に競争が可能である。また WISES のサービスでは、空港から都心への移動時間と運賃が不要となる事もメリットである。

4. 中型旅客用 WISES

WISES の旅客サービスは有望であるが、新規性の高い輸送システムの開発にはリスクが伴う。このため、より小型の船舶によるサービスをまず展開して実績を積み、問題点を抽出する事が望ましい。しかし、本研究で提案している前翼型コンセプトは推進器を前方に配置するため、エンジン重量が相対的に大きくなる小型船の計画が困難である。また適当な小型のターボプロップエンジンが見つからないため、これを重量の大きなガソリンエンジンに置き換えると性能は著しく低下する。この問題を解決するため、著者らは電動モーターとガスタービンエンジンのハイブリット駆動を提案している。

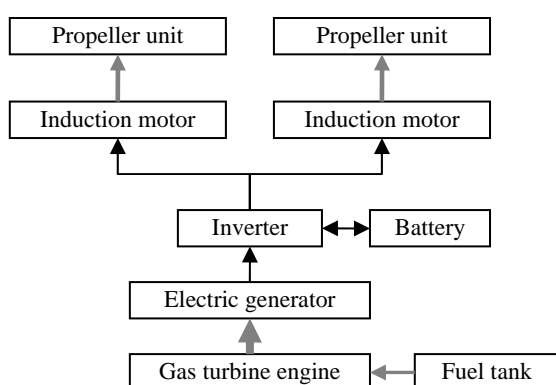


Figure 5 Series hybrid system for a small WISES.

本コンセプトの動力系統を Fig. 5 に示す。これは自動車と言うシリーズハイブリット方式であり、1基のターボシャフトエンジン(小型ヘリコプタ用)で発電機を駆動し、2基の電動モーターとバッテリーに電力を供給する。電力による伝達は、従来の回転シャフトを使ったトルクによる動力伝達に比べて構造の軽量化が容易である。またエンジン、発電機等の配置が自由になるため、船体内の空間をより有効に利用する事ができる。バッテリーは波浪上飛行でのプロペラ出力変動を吸収し、ガスタービンエンジンの出力を一定に保つ効果もある。

Fig. 6 にこの WISES の概観を、Table 3 に諸元を示す。Tesla Motors Inc. が販売している Tesla Loadstar と同サイズのモーター2基でプロペラを回す。電力を供給する発電機とターボシャフトエンジンは後方に配置し、エンジンの吸気口は船体の後部上面に開口している。ターボシャフトエンジンは、Bell-427 などの量産型ヘリコプターに使われるエンジンであり、国内での保守整備も容易である。

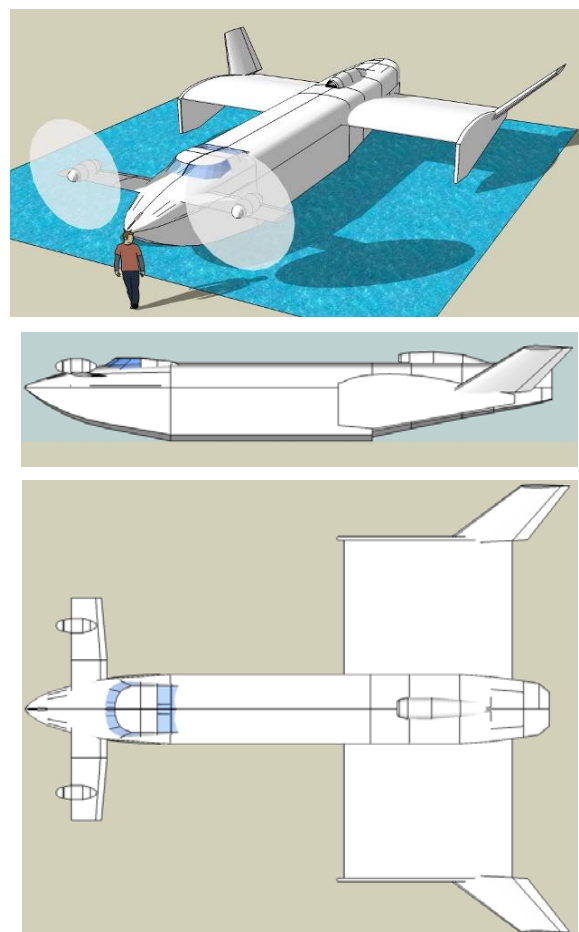


Figure 6: Canard type WISES with hybrid power train.

Table 3: Principal particulars of electric motor driven WISES.

Electric motor	AC induction motor (189kW, 34kg) ×2
Gas turbine engine	P&W PW207D Takeoff power: 572shp (421kW) Dimension: 500×566×912mm Weight: 110kg
Electric generator	70kg weight
Li-ion batteries	135kg in total
Fuel	700kg (JPL) for 1750km range
Takeoff weight	5860kg
Wing area	Main wing: 40.7m ² Canard: 3.1m ²
Speed	Cruising: 154kt (80% gas turbine output) Takeoff: 73kt
Payload	Crew/passengers: 1/17 or cargo 2000kg
Length	14.5m
Width	9.0m (=main wing span)

Table 4: Principal particulars of a typical aircraft, Piper PA-42 Cheyenne.

Turboprop engine	TPE331-14A/14B 1000shp(735kW) ×2
Fuel	2195 litre (1646kg)
Range	2650km
Takeoff weight	5466kg
Wing area	27.2 m ²
Speed	Cruising: 351kt Stall: 84kt
Payload	Crew/passengers: 1/10
Length	13.23m
Width	14.53m



Figure 7: Piper PA-42 Cheyenne

参考文献

- [1] H. Akimoto, M. Kawakami and S. Kubo. 'Self-propulsion model test of a wing-in-surface-effect-ship with canard configuration, part3', Proc. FAST2007, pp. 258-263, Shanghai, China, 2007
- [2] A. V. Nebylov, P. A. Wilson, 'Ekranoplanes, Controlled flight close to the sea', WIT press, 2002
- [3] . Hiromichi Akimoto and Makoto Kanehira. Possibility of super high-speed maritime transportation of low environmental load: Wing in surface effect ship. In The proceedings of international symposium on ship design and construction 2009 (ISSDC2009) -Environmentally Friendly Ship-, 9 2009
- [4] S. Akagi, 'A study of transport economy and market research for high speed marine passenger vehicles', Proc. FAST'93, vol. 2, pp. 1129-1142, 1993

WISES の特長を理解するため、ほぼ同重量の双発ターボプロップ航空機 PA-42 Cheyenne の諸元を Table 4 に示す。離陸重量あたりのエンジン出力は、PA-42 の 269kW/t に対して WISES は 72kW/t であり、必要な出力は 27% である。これは低速であるために巡航出力が小さい事と、滑走路長の制限が無いと、離陸時の急加速が不要であることによる。

旅客が許容できる航行時間には限界があるため、航空機に比べて低速な WISES の航続距離は短くなるを得ない。また空港にしか降りられない航空機に対し、通常の港が利用できる WISES は、燃料の余裕を小さくできる。これにより搭載燃料が減るため、結果的に WISES のペイロードまたは乗客数は、航空機よりも大きくなっている。PA-42 に比較して、WISES の搭載燃料は 43% であり、その分が乗客定員の 70% 増に振り向けられている。

5. 結言

商用運航の採算性を前翼型 WISES コンセプトについて評価し、既存の船舶および航空旅客サービスとの比較を行った。建造コストと運航コストから得られる運賃は、既存のサービスと十分に競争可能なレベルとなっている。また、市場投入のリスクを軽減するため、一般的なヘリコプター用ターボシャフトエンジンを利用可能とする小型 WISES のプランを示した。今後は船体の設計をより詳細にし、コスト推定の精度向上とともに、WISES に適した構造および製造法を検討していく予定である。