

日本の飛行艇技術の歴史と系譜

1. 概要

飛行艇は、湖面や海面において胴体（特に艇体という）で滑走し離着水する飛行機をいう。自重を水の浮力で支えることが出来る飛行艇は、高揚力装置や降着装置の技術が未発達時代には飛行機の大型化に有利であり、第二次世界大戦頃までは長大な航続性能と搭載量をもって長距離輸送を中心に様々な用途に使用された。21世紀の現在でも、水上で離発着できる特性を活かして洋上救難や消防、離島への人員・物資輸送などで活躍している。

我が国独自の航空機関連技術のひとつに、戦前から受け継がれてきた飛行艇設計と運用のノウハウがある。本稿では、海上自衛隊の救難飛行艇 US-2（図1参照）に盛り込まれた日本が誇る STOL（Short Take-Off and Landing：短距離離着陸）飛行艇の技術を紹介するとともに、将来展望について述べる。



図1 救難飛行艇US-2

2. US-2 前史

2.1 川西航空機時代

US-2 を製造する新明和工業の前身川西航空機は、日本の航空機産業の草分けのひとつであり、主に旧帝国海軍のための飛行機を製作してきた。大型飛行艇としては英国ショート社の KF 型大型飛行艇の国産化（九〇式飛行艇 1932-33 年、計 4 機、図 2 参照）を皮切りに、九七式大艇（1936-42 年、計 179 機、図 3 参照）、次いで当時世界最高性能を持つ二式大艇（1942-45 年、131 機、図 4 参照）を生産した。これらは哨戒、偵察、爆撃、輸送、連絡等に用いられ、ハワイ夜間爆撃、コロンボ偵察、銀河特攻隊誘導など重要な任務を遂行した¹⁾。

外国からの技術導入でスタートした我が国の飛行艇技術が、僅か 10 年の間に独自の発展を遂げ世界を凌駕した要因について新明和工業の社史は次のように述べる。『KF 艇を唯一の例外として外国製の飛行艇を買わず、技術提携もしなかった。買ったそのものよりも研究開発の努力の過程にこそ価値と意義がある。自分たちもその努力を積み重ねなければ良い飛行艇は出来ない。』



図2 90式飛行艇



図3 97式大艇



図4 二式大艇

2. 2 STOL 飛行艇 PS-1/US-1

戦後、1952年に日本の航空活動が再開されると、新明和工業は飛行艇に高度なSTOL性を持たせる研究に着手した。

高波高海面に於ける着水でまず課題となるのは着水衝撃であり、次に艇体から巻き上がる海水飛沫の直撃による機体、プロペラの損傷や、吸入した飛沫によるエンジン性能の低下である。衝撃荷重は概ね対水速度の二乗に比例するので、著しい低速で離着水すれば着水衝撃が緩和できる。飛沫対策には特許技術にもなった溝型波消装置（図7参照）のアイデアがあった。

対潜哨戒飛行艇（Patrol Seaplane）PS-1は、この極低速離着水を実用化し、シーステート5（風速25ノット、波高3mの海面）の外洋運用を可能とした。これにより年間を通じて離着水可能な日数は318日（87%）に達する²⁾と試算され、シーステート3（波高1.5mの海面）に留まる他の飛行艇（168日（46%））に比べ、波の荒い外洋での運用範囲が大幅に拡大した。PS-1で開発・採用された主要要素技術は以下のとおりである。



図5 US-1A飛行艇

(1) 空力・操縦関係

- a. パワード・リフト高揚力装置(プロペラ後流偏向と低圧吹出し式境界層制御)
- b. 高翼・T尾翼配置(エンジン・プロペラ、舵面等を海水飛沫から隔離)
- c. ASE (Automatic Stabilization Equipment : 自動安定化装置) 等

(2) 水力関係

- a. 艇体形状・寸法(艇体細長比、艇底V角、ステップ高さ、キール角)
- b. 溝型波消装置(溝内部の大きさ、形状、波消し側面の小窓)
- c. 飛沫抑制デバイス(波押え板、スプレー・ストリップ)
- d. 離着水運動と衝撃荷重計算方法の確立 等

PS-1の初飛行は1967年10月に行われ、外洋での極低速離着水は波高4mの海面で実証された。引続き海上自衛隊において行われた「PS-1早期戦力化／能力評価」の中で、多くの離着水が試行され機体特性の把握と実運用のためのノウハウが取得された。日本近海の詳しい波浪データが加えられ、運用条件(波高、波長、風速、着水重量の限界)が確立した。PS-1は23機が製造され、海上自衛隊岩国航空基地で1989年まで運用された。

救難飛行艇(Utility Seaplane)US-1は、STOL飛行艇の用途展開のひとつとしてPS-1を母体に誕生した。PS-1は他に類を見ない高耐波性を有した飛行艇であったが、その脚は基地の傾斜路から進水・揚陸するためのビーチング・ギアであり、滑走路への着陸は出来なかった。PS-1の高耐波性を維持しつつ、陸上から運用可能とする水陸両用飛行艇として開発されたのがUS-1である。

PS-1からソナー、磁気探知装置等の対潜水艦用の兵装を取除き、遭難者を収容する12台の担架を設置した。間接救助装備として海上救難装備セットと投下装置等が、レスキューダイバーによる直接救助装備として船外機付きゴムボートが装備されている。

US-1は海上自衛隊において1976年から運用が開始され、当初約3,000shpのT64-IHI-10Eエンジンを装備していたが、離水性能向上のために約3,500shpのT64-IHI-10Jエンジンにパワーアップされた。7号機から型式名称がUS-1A(図5参照)となり、20機が製造されて現在に至っている。

3. 最新型STOL飛行艇US-2

US-2は洋上救難能力の維持・向上を図るため、US-1Aをベースとして改造開発された最新の救難飛行艇である。STOL性、耐波性を維持しつつ(図6、図7参照)、長距離かつ迅速な進出・帰投を可能とし、特に極低速飛行時の操縦性・安定性が向上しパイロットのワークロードが大幅に低減された。US-2は1996年10月末、防衛庁(当時)技術研究本部から試作機4機(強度試験用供試機2機を

含む) の発注を受け、2003 年 12 月に初飛行した。US-2 に新たに盛込まれた主な技術は以下の通り 3) である。

- a. 患者輸送環境の改善と、燃費が良く気象が安定した高々度飛行を可能とするための、機内の与圧化。
- b. 離水・上昇性能、推力余裕を増大するための、エンジン、プロペラの換装。
- c. FBW (Fly-By-Wire : フライ・バイ・ワイヤ) 操縦系統による、操縦・安定性の向上、高応答経路角制御機能及びエンジン故障補償機能の付与。
- d. 電子式統合計器板による飛行情報の統合表示等、アビオニクス近代化。
- e. 自重増大を抑制するための主翼インテグラル・タンク化、翼端浮舟複合材料化等。

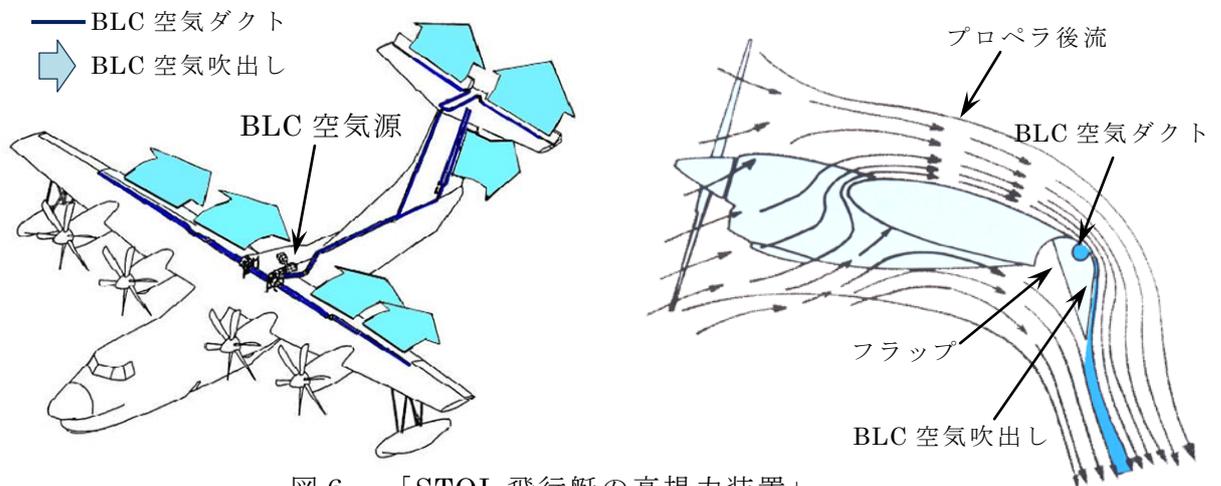


図 6 「STOL 飛行艇の高揚力装置」



図 7 「STOL 飛行艇の水力デバイス」

3. 1 艇体与圧化

与圧がない US-1A までは搭乗員を低酸素症から守るため、高度 10,000 ft (約 3,000 m) 以下を飛行するか、酸素マスクを使用した。低高度では乱気流に遭遇する機会が多く、積乱雲や前線の迂回が迅速な進出・帰投を妨げる。最大 10 時間にも及ぶ長距離救難任務における搭乗員の負担軽減と作業性向上、患者の救護環境向上のため、操縦室、収容室及び搭乗員室を与圧区画とし、飛行高度 30,000 ft に於いて機内高度 8,000 ft を確保した。

3. 2 エンジン、プロペラの換装

離水秒時の短縮、離着水時のパワー余裕の増加、高高度での飛行性能向上等を図り、米国ロールス・ロイス社の AE2100J ターボ・プロップエンジン (軸馬力 : 4,591 shp) を 4 基搭載した。プロペラは英国ダウティ社の R414 で、複合材製 6 翅のブレードは外洋着水に於ける波叩きを考慮して補強されている。本エンジンは FADEC (Full Authority Digital Engine Control : 全デジタル電子式エンジン制御) 方式であり、パワー・レバー操作によりエンジン燃料流量やプロペラ・ピッチ角等が自動的に制御される。また FADEC は、MIL-STD-1553B データ・バスを介して計器・警報表示のためのエンジン、プロペラ諸元を出力する。エンジン選定で一番主眼を置いたのは低速時の応答であった。STOL 飛行艇の深いバックサイド⁴⁾領域 (図 8 参照) の着水アプローチでは、飛行経路はエンジン推力で制御され、また、1 エンジン停止時は対抗操作のため迅速な推力応答が必要である。本エンジンは着水アプローチ時に回転数が低下せず、スロットル・コントロールに対する推力変化が極めて早い。洋上救難においては着水後、洋上にて前進、後進、旋回、静止の機動を行い、遭難者に対してベストのポジションを確保する。US-1A ではパワー・レバーとプロペラ・ピッチ・レバーの同時操作が必要であったが、US-2 ではパワー・レバー操作のみでプロペラ・ピッチを制御して推力設定が可能である。地上、水上でエンジンを運転したままプロペラを停止するホテル・モードがあり、高波高海面で波叩き防止のためプロペラを停止しても発電機、油圧ポンプなどの補機類が継続して使用出来るようになった。また、プロペラ回転の同調により機内騒音・振動レベルが低減し、搭乗員及び患者の生理的負担を軽減した。

3. 3 デジタル FBW 操縦系統

STOL 飛行艇は、衝撃を和らげるために約 55 kt (約 100 km/hr) という極低速で着水する。そのため PS-1 以来、離着水形態においてプロペラ後流を揚力の一部として使う、パワー効果が極めて大きいパワード・リフトを採用している。極低速で機首上げ角が大きくなると誘導抵抗の増加が形状抵抗の減少を上回る。形状抵抗+誘導抵抗が最小となる速度より高速側を“フロントサイド”、低速側を

“バックサイド”と呼ぶ⁴⁾。フロントサイドでは操縦桿引きで減速すると抗力が減じパワーが余り上昇するが、深いバックサイド領域では、操縦桿を引くと抵抗が増加しパワーが不足して降下する（図8参照）。パイロットの操舵意図と飛行経路が逆向きになるうえ、この応答は極めて急激に起きるため経路角の制御が非常に難しい。また、エンジン不時停止の際の空力変化も極めて大きくなる。

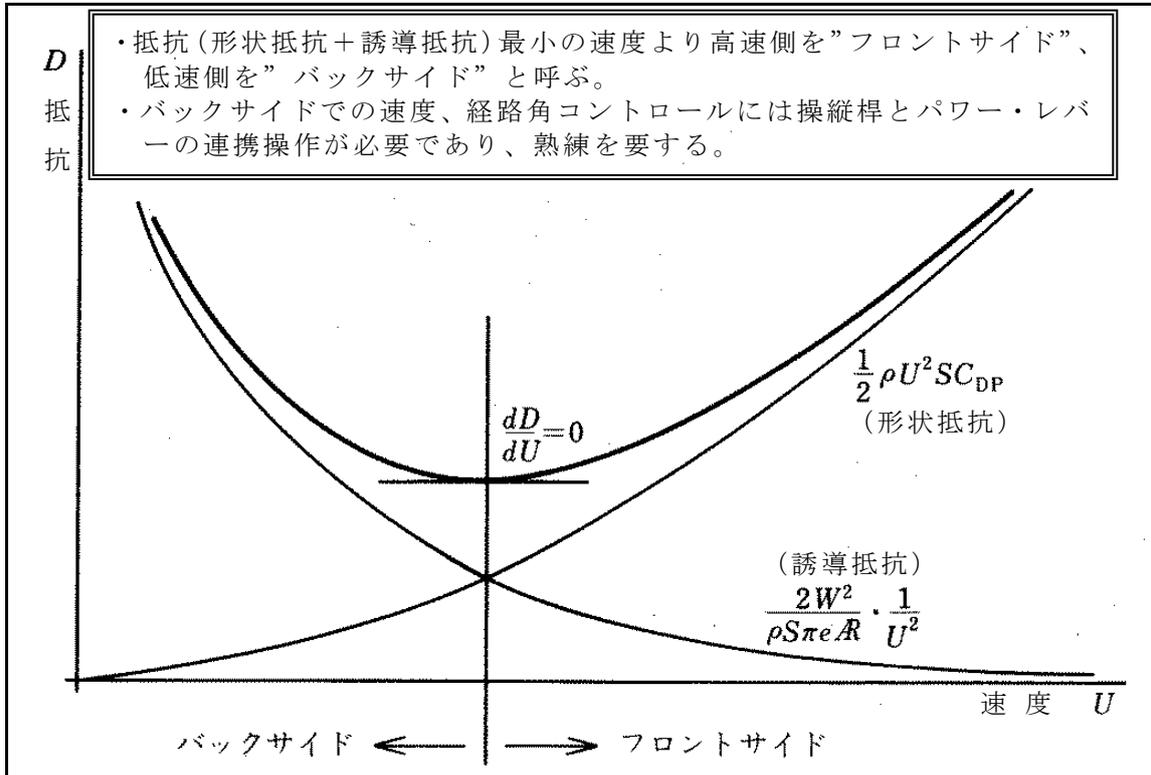


図8 「抵抗－速度曲線」⁴⁾

これらを改善するために、US-2ではパイロットの操縦装置と舵面の間にコンピュータを置き、飛行姿勢他の飛行情報やパイロットからの入力をコンピュータ内で処理し、特に極低速飛行時の操縦性・安定性の向上及びパイロットのワークロード低減を図った。

主操縦系統は3重デジタルFBW系統とメカニカル・バックアップ系統で構成され、昇降舵、方向舵、補助翼、外側フラップ及びスポイラの制御を行う。デジタルFBW操縦系統は、ソフトウェア変更により各飛行モードに応じた制御則に対応できる柔軟性がある。

(1) FPC (Flight Path Control : 経路角制御) 機能

極低速の着水アプローチ時は昇降舵操作による降下率制御が難しく、バックサイドでの飛行経路操縦はスロットル操作で行う。US-1Aでも降下率制御にATS (Auto Throttle System : 自動推力制御) を用いたが、操縦入力に対するエンジ

ンの追従性が悪く操縦性に影響していた。US-2では、FBW操縦系統が高度変化率の指令値との偏差を基にパワー・レバーをモータで駆動するとともに外側フラップ操舵により、高応答の経路角制御を実現した。操縦桿入力をエンジン制御にフィードバックせず、パワー・レバーを直接操作する方法を採ったのは、パイロットがパワー・レバーの動作を監視し、非常時にはオーバーライド出来るようにしたものである。

(2) EFC (Engine Failure Compensation : エンジン故障補償機能)

STOL 飛行艇の極低速飛行を可能としているのはプロペラ後流偏向方式のパワード・リフトであり、着水アプローチ中のエンジン不時停止は、極めてクリティカルな事象である。

FBW 操縦系統は、エンジンの故障信号を検出すると自動的に補助翼と外側フラップ、方向舵を操舵して機体姿勢を補正すると共に、残存エンジンのパワー・レバーを作動させ推力を増大させる。これによりパイロットに回復操作の時間的余裕を確保し、安全性を向上させた。

3. 4 アビオニクス近代化

US-2では操縦系統、航法系統、通信系統の情報量増大に対処するため、データのデジタル化を行い、MIL-STD-1553B データ・バスを採用した。これらの情報は電子式統合計器に統合表示される。データ・バス採用により航法及び通信情報処理能力を向上させ、ワークロードを軽減した結果、航法員、通信員を統合し搭乗員1名を省人化した。

3. 5 機体重量の軽減

エンジン換装、与圧化による機体重量の増大は、着水速度の増加を招き飛行艇の運用範囲を狭める。従って重量増加を極力押さえるために、以下に示す重量軽減が行われた。

- a. 主翼燃料タンクのインテグラル・タンク化 (ゴム製燃料タンクの廃止)
- b. 翼端浮舟の複合材化
- c. 波消板のチタン合金化

3. 6 海上自衛隊における運用

US-2は2004年に初号機が納入され、防衛省の技術試験、実用試験を経て2007年3月に防衛大臣の部隊使用承認を得た。海上自衛隊はその後1年半に渡って運用試験を実施し、新たに搭載された赤外線暗視装置や洋上の遭難者をロックオンする目標位置捕捉指示装置を活用した搜索、救助や、人員・物資の輸送等、US-2の有効な運用方法が確立された。

最初の出動は2009年3月、南鳥島の工事現場で発生した負傷者の搬送であり、迅速な進出・帰投と機内救護が奏功し、患者は無事羽田空港で東京都の救急車に引き渡された。

US-2が5機となり自衛隊航空部隊の洋上救難に備える傍ら、小笠原諸島などの離島や日本近海の船舶で発生した急患輸送等の災害派遣で実績を積み上げてきた。中でも2013年6月に日本から1,200 kmの太平洋上で発生した著名ジャーナリストらのヨット遭難事件では、海上自衛隊救難飛行艇部隊の練度と国産のSTOL飛行艇の性能に注目が集まった。

現場海域は前線帯付近で風速30 kt (15.4m/s)、最大波高3.8 mに達し、一直機（最初に現場に到着した機）は着水不可と判断した厳しい海面であった。周辺海域の調査と前線の移動速度から着水可能となるタイミングを割り出し、ついに二直機（現場で一直機と交替した機）が日没直前に着水し救命筏の遭難者2名の収容に成功した。

STOL飛行艇による捜索・救難方法は、海上自衛隊が試行錯誤の末に確立した我が国独自のノウハウである。2014年7月には出動回数が累計1,000回に達し、本稿執筆時点では1,011件、救助・保護された人命は995名を数える。また、1992年1月には事故で太平洋上に脱出した米軍機パイロットの救助にも成功しており、航空救難システムとしてSTOL飛行艇の有効性が証明されている。

US-2は現在6号機が新明和工業において製造中である。

4. US-2の輸出に向けて

4. 1 防衛省開発機の民間転用

水陸両用機として比類なき性能を誇るUS-2であるが、耐用命数や定期修理間隔もUS-1Aから延長されたため、製造会社では繁忙期と閑散期の作業量の差異が拡大して設備や人員の維持が厳しくなり、性能向上の結果、生産ラインの継続が困難になるという状況にある。さらに冷戦後の環境変化と厳しい財政状況のなかで防衛費が抑制され、装備品購入予算が減少していることから、海上自衛隊の救難飛行艇部隊を直ちに増勢することも難しい。

このような背景のもと、防衛省開発機の民間転用の検討が開始され、2010年には防衛省に「防衛省開発航空機の民間転用に関する検討会」が設置された。なお、ここで「民間転用」とは防衛省開発機を製造会社が自社製品として防衛省以外の顧客に販売することをいい、必ずしも防衛省機を民間型に改造することではない。検討会は5回に渡り開催され、US-2の他、XC-2及びXP-1（次期輸送機及び次期哨戒機、ともに川崎重工業が製造）について市場規模の見通しや型式証明取得など事業化の可能性と、防衛省技術資料の開示や利用料など民間転用を実現させるための諸制度の基本的考え方について議論された。

民間転用により生産・販売機数が増えることにより、

- a. 我が国の防衛生産・技術基盤が維持・強化される
- b. 防衛省機と民間転用機の量産効果により、防衛省機にかかる価格（航空機購入費、後方経費（技術維持費・治工具維持費））が低減する
- c. 防衛省機による民間転用機の MRO（Maintenance, Repair, Overhaul：整備、修理、オーバーホール）設備の利用が可能になる

といったメリットが期待されている。

4. 2 インド国防省への輸出に向けた取り組み

民間転用に関する検討会の翌年、2011年1月にインド海軍から水陸両用機に関する RFI（Request For Information：情報提供依頼書）が発出されたことにより、US-2 輸出の議論が大きく動き始めた。RFI は物資・人員輸送も可能な救難機を想定しており、US-2 から大きな改修を伴わずに対応出来、海軍が相手であれば民間機の型式証明も必要ない。

新明和工業は 2012 年 4 月に「飛行艇民転推進室」を設置し、インド（デリー）にも現地法人を開設して本格的な営業活動を開始した。

US-2 の輸出に当たって解決すべき課題は多々ある⁵⁾。特にインドにおいては契約額の 30% に相当するオフセット（インド企業への相殺取引）要求があるが、インドの航空産業は発展途上であり、技術と経験を有する会社は現状極めて少ない。更に、インド軍向けビジネスでは、応札から契約まで 6 年に及ぶこともあり、全ての入札が固定価格の一括契約でなければならないことから、価格変動に対するリスクも高い。

また、海面に着水して遭難者を直接救助する救難飛行艇は、我が国の海上自衛隊しか持たない装備品である。搜索・救難方法や腐食管理といった運用ノウハウや、進水・揚陸に必要なスリップウェイ、揚陸後に用いる機体水洗浄設備等のインフラを含む救難飛行艇システムの輸出となり、単に機体を製造・販売するだけでは終わらない。搭乗員や整備員の教育・訓練、両国における運用データの共有などが必要であり、日本国政府と一体となった事業推進が必要である。

2013 年 5 月にシン印首相（当時）が来日し、日印首脳会談において「US-2 飛行艇に関する協力の態様を模索する JWG（Joint Working Group：合同作業部会）」の設置が宣言され、これまで日印において US-2 の体験搭乗や製造会社の工場視察を含む JWG が開催されている。2014 年 9 月にはモディ印新首相が来日し、日印の関係当局に対し議論の加速が指示された。いまや US-2 の輸出は一企業のビジネスを超えた、日印防衛協力・産業協力の象徴的プロジェクトとして位置付けられている。

5. おわりに

傑作機二式大艇を開発した日本の独創的技術が、世界で唯一波高 3m の外洋離着水可能な STOL 飛行艇を生み出した。実用中の STOL 機が現在でも他には米軍の C-17 と V-22 に留まるなか、日本の STOL 飛行艇だけが 1967 年以來、約半世紀に渡って運用され続け、成熟してきたことは特筆に値する（表 1 参照）。

US-2 に救助された前述のジャーナリストは記者会見で「本当に、この国の国民で良かった。」とコメントした。日本の、この STOL 飛行艇でしか出来ない任務は確かにある。

対潜哨戒飛行艇、救難飛行艇の開発と運用を通じて蓄積された STOL 飛行艇の設計と運用のノウハウは、我が国の固有技術として今後も維持・継承され、海外輸出を通じて多様なニーズに対応しながら、これからも発展していくに違いない。

表 1 主要諸元・性能比較表

機種	US-2 救難飛行艇	Be-200 多用途飛行艇	CL415 消防飛行艇	MV-22 ティルトローター機	UH-60J 救難ヘリコプタ
全長	33.25 m	32.05 m	19.82 m	17.47 m	19.76 m
全幅	33.15 m	32.78 m	28.63 m	25.78 m	5.43 m
全高	10.06 m	8.90 m	8.98 m	6.73 m	5.13 m
最大離陸重量	47.7 ton	37.2 ton	19.9 ton	27.4 ton	10.0 ton
最大速度	約 580 km/h	約 700 km/h	約 380 km/h	約 520 km/h	約 265 km/h
航続性能	約 4,700 km	約 3,600 km	約 2,300 km	約 3,900 km	約 1,300 km
巡航高度	9,100 m	7,900 m	2,400 m	—	—
機内与圧	与圧あり	与圧あり	与圧なし	与圧なし	与圧なし
運用可能海面波高	3 m	1.2 m	1.2 m	—	—
生産国	日本	ロシア	カナダ	米国	日本(*)

* : ライセンス国産

参考文献

- 1) 月刊 JADI 「飛行艇の歴史と技術的展望」(2003 年 6 月号、7 月号)
- 2) 日本航空学会 「新しい STOL 飛行艇の設計」(1966 年 2 月)
- 3) 日本航空宇宙学会第 45 回飛行機シンポジウム「救難飛行艇 (US-2) の開発」
- 4) 加藤寛一郎・大屋昭男・柄沢研治 「航空機力学入門」東京大学出版会
- 5) 財経済産業調査会 「飛翔 航空産業公式ガイドブック」

▶ 解説概要一覧に戻る

この解説概要に対するアンケートにご協力ください。

▶ アンケート開始