

# 超軽量動力機のための木製双フロートの設計と製作（第3報）

## Third Report: A Design and Built of Wooden Floats for Micro-Light-Airplane

伊藤 宏一<sup>1)</sup> 村田 光一<sup>2)</sup> 宮城 調春<sup>3)</sup> 大久保 富彦<sup>4)</sup> 春山 浩之<sup>5)</sup> 菅野 哲夫<sup>6)</sup>

Hirokazu Itoh<sup>1)</sup> Koichi Murata<sup>2)</sup> Chohshun Miyagi<sup>3)</sup> Tomihiko Ookubo<sup>4)</sup>

Hiroyuki Haruyama<sup>5)</sup> Tetsuo Kanno<sup>6)</sup>

The wooden floats for the micro-light-airplane were designed after Cresswell Walker and built by hand. The construction of the wooden floats was completed and a series of the water taxiing test on MAXAIR DRIFTER installing these floats were carried out. As a result, it was clarified that there was some room for improvement to (1) spraying to the propeller, (2) handling on the water, and (3) pitching angle on the high speed water taxiing. This report described some engineering knowledge we got in the process of taking measures to cope with the condition. We discussed a mechanism of the high speed water taxiing, and explained the reason to equip with the step which was the characteristic structure of seaplane floats. The improved water-rudders had a good effect on handling, and the spray dam added on the floats decreased the spray to the propeller.

Keywords: design, built, wooden floats, micro-light, airplane

### 1. ま え が き

著者らは、超軽量動力機を水上機に改造し、航空局より試験飛行許可を取得、実際に飛行することを目的として超軽量動力機のための木製双フロートを設計製作した<sup>(1)</sup>。本報では、2006年12月の進水以降に行った水上試験および問題点改善の過程で得られた知見について報告する。

### 2. 水上試験と問題点の対策

表1に試験記録を示す。木製フロートの完成から約1年をかけて、延べ3時間の水上滑走と38回の高速水上滑走を実施し、不具合箇所の改善と操縦技量の向上を図った。水上滑走試験は霞ヶ浦西岸にある大山スロープ(ピッコロ水上飛行場)で実施し、ビデオカメラによる映像を記録した。また、風速、風向きなどの気象データは、霞ヶ浦臨湖実験施設の霞ヶ浦西岸150m沖合の取水塔における観測結果を利用した。一連の試験結果から、(1)水飛沫、(2)操舵性、(3)ピッチング姿勢(ポーポイジング)が課題であることが明らかとなり、その対策方法を検討し、改善策を施した。

#### 2.1. 静的姿勢および水上滑走試験

2006年12月に進水した。静的には設計通りの浮力が確保されており、喫水線、乾舷の高さ、機体のピッチング姿勢

が計算通りであることを確認した。次に、低速で水上滑走を行い、旋回時の復原力があること、フロート内部への水漏れや支持金具の振れや破損が無いことを確認した。なお、2007年6月の第7回までは、主翼を取り付けずに試験を行った。

2007年3月、簡易型水中ラダーを装着し、はじめての高速滑走試験を実施した。その結果、水が飛沫し、高速回転中のプロペラに当たってブレード先端を傷つけてしまうことが判明した。写真1は、ビデオ画像から作成した静止画であるが、フロートから発生した飛沫がプロペラ後流に沿って尾翼まで達していることが分かる。そこで、高速滑走のメカニズムを考察し、その結果にもとづいて飛沫対策を行った。



写真1 高速滑走中で問題となった水飛沫

1) 東京都立産業技術高等専門学校 教授 2) 富士重工株式会社航空宇宙カンパニー 主事  
3) 新東洋機械工業株式会社 常務取締役 4) 東京都立産業技術研究センター 主任研究員  
5) ムーニーフライングクラブ 6) 木製フロート同好会

## 2.2. 高速滑走のメカニズム

機体静止時では、最大浮力はフロートの排水量に等しく2本で784kgfである。機体の速度を徐々に増していくと、図1に示すようにフロート船首部の船底に水流が当たり、一部はフロートの下に潜り込み、一部は空中に飛散すると考えられる。上下に分かれる水流の速度がゼロとなる部分が淀点となり、高い圧力が発生するため、フロート船底に揚力と抗力が発生すると考えられる。

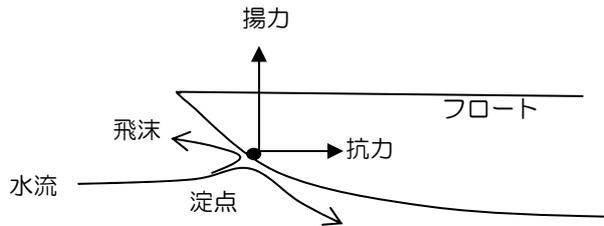


図1 滑走時の揚力と飛沫の発生メカニズム

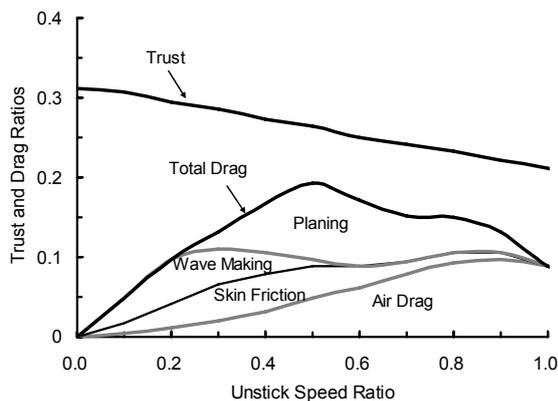


図2 離水するまでの速度と抵抗の関係  
(文献2より引用)

図1では水流を模式的に1本の線で示したが、実際には多数の流線による合力として作用する。中央部から後部船底には水流による負圧が発生するため、ステップを設けることで空気を吸い込ませ、水流の流線を破壊して負圧を減少している。これが、水上飛行機のフロートに特徴的なステップという構造が必要な理由である。

水上飛行機が離水するまでの速度と抵抗の関係を図2に示す<sup>(2)</sup>。フロートが滑走すると摩擦抵抗と造波抵抗が増加する。造波抵抗は、船首と船尾より水面に隆起する横波によって発生し、速度と喫水線長との関係から船首と船尾に生じる横波が干渉し、同調すると波は大きくなり、打ち消し合うと波は小さくなる<sup>(3)</sup>。フロートに作用する全抗力は速度とともに増減し、最大となる速度はハンプ(Hump)速度と呼ばれる。

フロートの船底に作用する揚力によりフロート全体が水面

上に持ち上げられ、浸水表面積が減って摩擦抵抗が小さくなると同時に、船底の勾配が流線と平行に近づき、造波抵抗も減少する。高速滑走はハンプ速度を超えてフロートへの全抗力が減少する速度領域を利用して行われる。

以上をまとめる、水上飛行機は静止時から離水時までの間に、フロートの排水量による浮力から水流によってフロートに作用する揚力に移行して高速滑走状態に入り、気流が主翼に作用する揚力を使って離水すると言える。

もし、飛沫の向きを横にそらすため、あるいは着水時に船底に与える衝撃圧を減らすために船底勾配(デットライズ角)  $\beta$  を大きくすると、フロートに作用する揚力の向きが図3のフロート断面における内側に傾き、左右ベクトル同士の相殺量が増加する。このため、ハンプ速度に到達する前に余剰推力が不足すれば高速滑走状態に入れないことになる。

一般的に船底勾配(デットライズ角)  $\beta$  は、10~25degの範囲で設計されることから、今回製作した木製双フロートでは16degとしているが、今後、ジャンプ飛行を行う際に揚力と耐波性とのバランスを検証していく必要があると考えている。

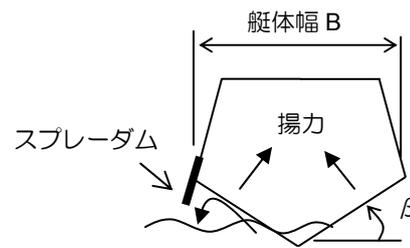


図3 船底形状とスプレーダム

## 2.3. 実施した飛沫対策

以上のような考察から揚力を確保しつつ飛沫がプロペラに当たらない対策を施す必要がある。今回行った具体的な改善策は、

(a) スプレーダム(Spray Dam)と呼ばれる垂直板を装着し、船底から一度空中に飛び出した飛沫を受け止めて偏向させるとともに、飛沫を水面に突入させる反力により揚力をさらに増やすことを狙った。写真2に示すように、機体内側(左フロートの右舷側、右フロートの左舷側)に高さ約20mmの防水ベニヤ板で製作したスプレーダムを取り付け、ポリエステル系FRPによって補強した。

(b) 喫水が深い場合から浅い場合までの全てに対して効果を発揮させるため、スプレーダムを船首からステップまで続けて配置した。

(c) 飛沫の主な発生源は、前述のようにフロートの船底であるが、ピッチング動揺時に後脚スプレッダー(左右のフロートをつなげる支持パイプ)が水面下にわずかに潜って飛沫を高く上げる現象が確認された。これは喫水線の問題であり後

述のピッチング姿勢で対策することにした。

2007年4月に行った第4回水上滑走試験では、(a)から(c)の対策による効果が認められ、双フロートの外側には大粒の飛沫が連続して跳ね上がるのに対し、双フロートの内側では細かい飛沫しか発生しないことが確認された。また、2007年8月に行った2名搭乗による高速水上滑走試験でも、船底からの飛沫がプロペラに当たることは無くなった。



写真2 左フロートに装着したスプレーダム

## 2.4. 設計段階で考慮すべき飛沫対策

ここで、開発当初あるいは設計段階で考慮しておくことと良い飛沫対策について言及する。

(A) フロートの喫水線長を長くすると、水の抵抗を減少させ飛沫を低減させる効果がある。ハンプが現れる速度は喫水線長に関係することから、喫水線長を長くすれば船首と船尾に発生する横波同士の干渉を低減させることができる。船舶の場合、喫水線長  $L$  と艇体幅  $B$  の比は、一般的には  $L/B=6\sim 10$  くらいであるが、9以上になるとロール方向の復原力の確保が難しくなると言われる。高速ヨットに見られるカタマラン(双胴艇)は、 $L/B$  を大きな値にすることで復原力を確保しながら、走行抵抗を減少し、飛沫の発生を低減していると考えられる。この場合の最適値は片ハル当たり16~20と言われている(文献4の図20)が、著者らの設計した木製双フロートの場合、 $L/B=3730\text{mm}/539\text{mm}=6.9$  である。

船底面積を一定にして  $L/B$  を大きくすることは、フロート容積を一定にして図3に示す断面積を小さくできることになり、空力抵抗の減少も期待できるが、水上飛行機に適用する場合、飛沫対策だけでなく空中での安定性や操縦性との兼ね合いがある(文献4の図19)。

(B) 水の摩擦抵抗は速度の1.825乗に比例<sup>(6)</sup>し、浸水表面積に比例する。主翼にフラップなど高揚力装置を装備したり、機体重量の低減によって離水・着水速度を低下させることで、フロートによる揚力から主翼による揚力に早く移行させ、艇体荷重を小さくすることで飛沫の減少を図ることができると考えられる。これは、着水時の水上荷重の低減や離水・着水

距離(時間)の低減にもなる。

(C) スプレーダムと同様な効果を期待できる構造として、スポンソン(Sponson)がある。ステップ付近の舷側を張り出すことにより飛沫の運動エネルギーを受けとめるもので、水上バイクの船尾などに採用されている<sup>(6)</sup>。

(D) 艇体荷重係数=重量 $W$ /(比重 $\gamma$ ・艇体幅 $B^3$ )という無次元量の値が大きいと、飛沫の量と飛散高さが大きくなり、経験的に1.0以下が望ましいとされている(文献3の図16)。前席1名搭乗時の場合、全重量が約310kgfであるので、片フロート当たり155kgf、 $B=539\text{mm}$ より艇体荷重係数=0.99となる。 $W$ を最大離水重量の392kgf(ドリフターの諸元)で計算すると、片フロート当たり196kgfとなり、艇体荷重係数=1.25となる。1.0を超えることから、2名搭乗などで重量増加した場合は飛沫が問題になる可能性が示唆される。

これは、重量と揚力とのバランスを検討する係数であり、本来ならば設計段階で検討すべき事項であるが、その重要性に気が付いたのは水上滑走試験を始めてからであった。

## 2.5. 操舵性

舵の効きが良い条件は、舵面積が大きく、機体重量が軽く、艇速が速く、船尾トリム(ピッチング姿勢が船首上げ)の場合である。写真3に示すように、2007年3月の高速滑走試験では、簡易的に製作した水中ラダーを垂直尾翼の真下に1本だけ取り付けて実施したが、舵面積が不足し、波による動揺によって水中ラダーが水面上に出てしまうことであった。



写真3 尾翼に装着した水中ラダー

陸上飛行機と比較すると、フロートの側面が受風面積に加わり、なおかつ地上用のタイヤに比べてヨーイング方向の側力が小さいため、水上飛行機では静止時および低速時に機首が風上に向く傾向が強く現れる。このため、水上旋回性が悪くなりやすく、最悪の場合、風上から風下に方向転換できなくなる恐れがある。また、横風を受ける場合には、いわゆる「艇の風流れ」と同様に機体が横滑りするが、搭載重量が軽

くて喫水が浅いほどフロートの側面積が増えるため、この影響が現れやすくなる。湖面では風向きと直角に波が立つため、ローリング方向に傾いたときに主翼に風がはらんで横滑りと同時に横転する恐れがある。

写真4に示すように、2007年5月の高速滑走試験では、この点を改善するために両フロートに水中ラダーを追加した。追加した水中ラダーの舵面積は $0.06\text{m}^2$  (幅200mm×高さ300mm)が2枚である。参考までに、実機用市販品の最大排水量1500lbのフロートの舵面積は $0.1\text{m}^2$  (幅300mm×高さ340mm)である。

舵面は、低速滑走(アイドルタクシー)時には下げておき、高速滑走(ステップタクシー)時には抵抗およびキャビテーションの原因となるため引き上げ、垂直尾翼のラダーだけで舵効きを行うようにした。スプリングにより舵面を引き下げる機構にすることで、水流により意図せず跳ね上がるのを防いでいる。コントロール・ケーブル(φ2.5mm)は滑車を用いて図4のように配索し、舵切り角度の調整は、ラダーの支点からワイヤ取付け位置までの距離を調整することで行えるようにした。なお、今後の運用では陸上での取り回し性を改善するため、揚陸用車輪(ビーチングギア)を追加する必要がある。



写真4 フロートに追加装着した水中ラダー

## 2.6. ピッチング姿勢

2007年5月の高速水上滑走試験において全てのエンジン回転数域において、フロートの船首が水面より上向きになることを確認した。向かい波に当たるタイミングによっては波高30cmくらいを乗り越えた時もあったが、波に突っ込むことなく乗り越えることを確認した(写真5)。このとき、フロートのステップから前方部分が一旦空中に飛び出し、直後に水面に叩きつけられ、船底に衝撃圧がかかるスラミング(Slamming)を経験したが、試験終了後の機体点検で、船底や脚支持部に損傷は見受けられなかった。

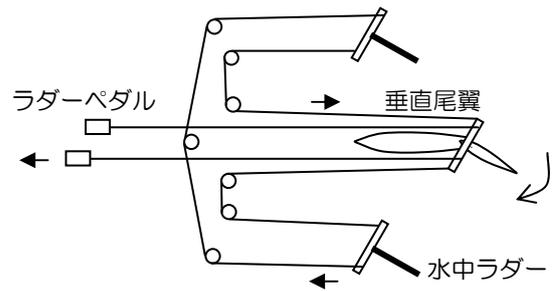


図4 水中ラダー用コントロール・ケーブルの配索法  
(矢印の向きは左に舵切りした時の張力方向)

また、この日の試験では、万が一の救助を想定して、ゴムボート(艇長:2.75m, エンジン:8HP)による曳航訓練も実施し、風速6m/s程度の風上への曳航も可能であることを確認した。

2007年6月に、初めて主翼を取り付けた水上飛行機としての正規状態で高速水上滑走試験を実施した。このとき問題となったのが、滑走艇としても大切な性能諸元であるハンブ速度と余剰推力が把握されていなかったことである。

陸上飛行機の高速滑走では空気抵抗が増加するだけなのにに対し、水上飛行機では図2に示す抵抗の増減とハンブ速度を超えてからのポーポイズング現象(ピッチングのリズミカルな動的変化)が発生する。エンジンのスロットルを絞ると、ハンブ速度を下回った途端に抵抗が急増し、ピッチング姿勢の変化も大きく現れ、水上飛行機の高速滑走は陸上飛行機より難易度が高いことを実感した。唯一、水上飛行機が有利なのは広い滑走エリアを確保できることである。

操縦法は、滑走開始直後は、エレベータをフルアップしてフロートの船首を上げておき、ハンブ速度に達したらエレベータをニュートラルに戻す。このとき、ポーポイズングする領域としない領域(スイートスポット)をエレベータの前後操作で探していく。2007年8月の試験では、離水速度に達してもジャンプしないように離水直前にスロットルとエレベータで押さえ込みながら高速滑走試験を行った。

高速滑走を維持しているときに問題となったことは、ピッチング姿勢であった。図5(a)に示すように、垂直尾翼の下部が水面に接しながら滑走する状態があり、図中②のように後脚スプレッダーも水面に接し飛沫を上げ、これがプロペラに当たることがあった。原因には以下のことが推察される。

- (a) 機体(フロートを含む)の重心とフロートの浮力中心との関係から船尾トリムとなり、ピッチング方向の復原力によって機首上げとなった。
- (b) 主翼のキャンパーラインとフロートのステップ部分のキールラインとの関係による空力的な作用によるもの。
- (c) 陸上機を水上飛行機へ改造したため、水平尾翼の面積が不足していた。
- (d) エレベータ操作における引き上げ量が過剰であった。

ここで、(a)から(c)は機体側の要因であり検討の必要があるが、操縦者の慣熟度が高まるにつれ、エレベータ操作で制御できるようになり、現在では写真6および図5(b)に示すような滑走姿勢を得ることができている。また、余剰推力については2名搭乗時でも離水速度に達することが確認できている。



写真5 高速滑走試験時の波の状態



写真6 改善後の高速滑走姿勢

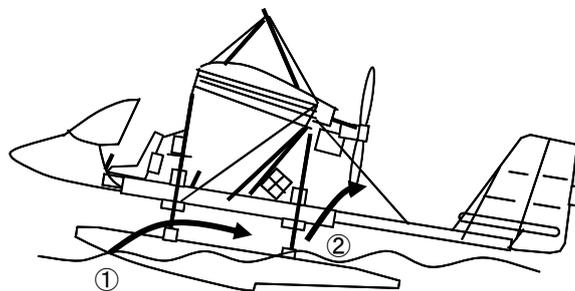
### 3. あとがき

木製双フロートを装着した供試機は2006年12月に霞ヶ浦で進水したのち、各種水上試験によって問題点の抽出とその改善を図ってきた。すでに東京航空局より航空法第11条但し書きによる試験飛行許可を取得しており、今後の飛行試験で得られた知見は追って報告する。

超軽量動力機に木製自作フロートを装着し、水上機に改造して航空局より試験飛行許可を取得した前例は見当たらない。本報告が後進の参考になることを期待する。

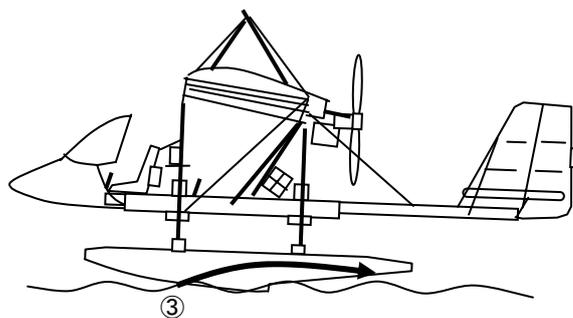
最後に、フロート製作に協力して頂いた都立産業技術高等専門学校の学生諸君、野島工業株式会社 代表取締役

野島幸雄氏、貴重なご助言を頂いた守谷飛行連盟理事長樋口今朝信氏、ピッコロ水上飛行場の桐島弘之氏はじめ関係各位にこの場を借りて御礼申し上げます。



(a) 改善前

(フロント先端部で発生する飛沫①, 後脚スプレッダーが水面に接し発生する飛沫がプロペラを直撃②)



(b) 改善後

(スプレードラムの装着とピッチ姿勢の改善によって、飛沫の進行方向が③となった)

図5 ピッチング姿勢と飛沫の発生状況

### 参考文献

- (1) 伊藤宏一ほか:超軽量動力機のための木製双フロートの設計と製作, 東京都産技術高等専門学校研究紀要第1号, pp.52-89, 2006年3月
- (2) Darrol Stinton: Aero-Marine Design and Flying Qualities planes and Flying Boats, Darrol Stinton Limited, Surrey England, March 1987
- (3) 池田良穂:図解雑学 船のしくみ, ナツメ社, pp.42, 2006年
- (4) Ernest G. Stout:Development of High-Speed Water-Based Aircraft, Vultee Aircraft Corporation, August,1950
- (5) 面田信昭:船舶工学概論, 成山堂書店, 1998年3月
- (6) 滑走型高速艇用スポンソン, 特許出願 特開2000-272576

表 1 木製フロート・ドリフターの水上滑走試験記録  
 場所:霞ヶ浦西岸(大山スロープ/ピッコロ水上飛行場)

番号	年		時刻	時間	高速滑走回数	試験内容	搭乗者前/後	波高 cm	風速 m/s	風向
	月	日								
1	2006		13:57~14:07	0 10	0	初進水, 浮力, 喫水線および静止時のピッチング姿勢確認	M	10	2.0	ESE
	12	3								
2	12	3	14:10~14:40	0 30	0	離岸, 着岸, 低速滑走および八の字旋回, 浸水・破損確認	M/K	10	2.3	ESE
3	2007		15:35~15:45	0 10	2	高速水上滑走(主翼取付無, 簡易型水中ラダー装着)	M	20	4.9	ENE
	3	4								
4	4	29	16:00~16:10	0 10	2	スプレーダムを追加, および高速水上滑走(主翼取付無)	M	20	5.2	SSW
5	5	13	15:30~15:50	0 20	5	・左右の各フロートに水中ラダー装着操舵性確認 ・高速水上滑走(主翼取付無)	M	30	4.8	NE
6	5	13	15:50~16:00	0 10	0	ゴムボートによる曳航実験	M	30	5.9	NE
7	6	24	13:25~13:35	0 10	2	主翼取付状態で高速水上滑走	M	10	1.2	ENE
8	6	24	14:00~14:15	0 15	2	主翼取付状態で高速水上滑走	M	10	0.9	NE
9	8	26	13:20~13:35	0 15	10	主翼取付状態で高速水上滑走	M	10	1.9	E
10	8	26	13:50~14:05	0 15	3	2名搭乗条件の余剰推力確認	M/H	10	2.3	ENE
11	8	26	14:05~14:10	0 05	1	Hの旋回・滑走の操作慣熟	H/M	10	2.3	ENE
12	8	26	14:50~15:10	0 20	7	ポーポイズの処置操作確認	M/K	10	2.2	E
13	8	26	15:25~15:40	0 15	4	高速水上滑走	H	20	6.1	SSE
合計				3 05	38					

備考:

搭乗者体重 M:62kg, K:60kg, H:78kg

時刻は, ビデオカメラ, デジタルカメラによる撮影記録による

波高:目視(cm), 風速:平均風速(m/s), 風向:最多風向(16方位)

風速と風向の気象データは, 霞ヶ浦臨湖実験施設(<http://www-cger.nies.go.jp/kasumi/>)により, 霞ヶ浦西岸(大山)から 150m 沖合にある取水塔(北緯 36°00.22', 東経 140°22.85')にて観測