

超軽量動力機のための木製双フロートの設計と製作（第2報）

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

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

Hirokazu Itoh¹⁾ Chohshun Miyagi²⁾ Koichi Murata³⁾ Tomihiko Ookubo⁴⁾
Hiroyuki Haruyama⁵⁾ Tetsuo Kanno⁶⁾

The wooden floats for the micro-light-airplane were designed after Cresswell Walker and built by hand. MAXAIR DRIFTER installing these floats succeeded in a series of the water taxing test. It was necessary to secure the safety of the flight test, (a) the load factor of taking off from the water / landing on the water, (b) the load above the water surface in the various condition, (c) the local pressure of the hull / the body surface of the float, and (d) the pressure distribution of the hull of the float were calculated following to Air Worthiness Regulation division second. As the result, the calculation models simulated the structural strength of the wooden floats were introduced, and there were clarified that the material strength of the wooden floats exceeded the results in stress. Furthermore, the calculating procedures of the weight center and the fore-and-aft inertia radius of the airplane equipped with the floats were mentioned.

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

1. ま え が き

飛行機は、耐空証明を受けなければ航空の用に供することが出来ないと航空法第10条第4項により規定されているが、地上の人および他の航空機に対する危険や環境問題などを惹起せず、搭乗者の安全を確保しうるものについては、同法第11条第1項但し書きの適用により、国土交通大臣の許可および制限の範囲内で耐空証明を得なくても飛行を可能とする特例がある。また、水上飛行機に関しては、国土交通大臣が離着水を禁止している水面以外では、水面管理者の承諾を得れば、離着水が可能である。

したがって、同法第11条第1項の超軽量動力機を水上運用可能に改造すれば、この種の飛行機の課題である飛行場用地の確保の必要性が弱まり、かつ、本但し書きに掲げられるわが国における航空活動のすそ野を構成拡大し、その健全な発達によって航空思想の普及と進歩発展に寄与することが出来る。

わが国において超軽量動力機を水上機に改造した例は数件報告されているが、いずれも機体製造者あるいはフロート製造者が設計製作したフロートを装着したもので、本件のように個人が設計製作した木製双フロートを装着して水上機に改造した前例は見当たらず、フロート式水上機に関する技術情報

は極めて少ない。そこで、著者らは、超軽量動力機を水上機に改造し、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⁽¹⁾を設計製作した。

2. 解析方針および条件

耐空証明を得るためには耐空性審査要領にしたがって機体全体の構造計算を行う必要があるが、本件のごとく航空法第11条第1項但し書きの適用によって飛行する超軽量動力機では耐久証明を取得する必要はない。しかし、超軽量動力機であっても、これを設計製作する場合、あるいは改造する場合には、地上(水上)試験を経て飛行試験を行い、不具合箇所の改善を行っていく必要があり、飛行試験の安全性を確保するために必要な構造計算や飛行規程(運用限界指示)を机上検討しておく必要がある。

本報告は、同項但し書きによる試験飛行等許可申請書(区分:改造)に添付した解析書の範囲内、すなわち自作木製フロートに関わる事項について、飛行の安全性を耐空性審査要領第II部(耐空類別普通N類の飛行機)⁽²⁾にしたがって解析検討したものである。

なお、我が国の耐空性審査要領は米国 FAR 25.521～25.537 (Water Loads), FAR 25.751～25.755 (Float and

1) 東京都立産業技術高等専門学校 教授 2) 新東洋機械工業株式会社 常務取締役
3) 富士重工株式会社航空宇宙カンパニー 主事 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

Hulls)に準拠しているが、解析計算式で用いられる単位系は FAR では速度 kt, 重量 lb, 長さ inch であるのに対し、耐空性審査要領では km/h, kgf, m である。このため、本報告では、試験飛行等許可申請書に添付した機体仕様書にしたがい、km/h, kgf, m 単位系で記述し、用いる用語や記号も耐空性審査要領に可能な限り準じた。

3. 解析結果

3.1 着水時の荷重倍数

耐空性審査要領第 II 部(耐空類別普通 N 類の飛行機)の 3-8 節では、「水上機の構造は、予想される最も過酷な海面状態において、常用運用状態における前進速度、降下率および姿勢での離水および着水の際に生じる水上荷重について設計しなければならない(一部略)」と規定しており、3-8-4 項で (a) 中部衝撃を生じる着水の場合、(b) 前部衝撃を生じる着水の場合、(c) 後部衝撃を生じる着水の場合の水面反力に対応する荷重倍数を以下のように定めている。

(a) 中部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_1

$$nw_1 = \frac{0.224 C_1 V_{SO}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}}$$

ここで、

C_1 : 経験上の水上機運用係数 (=0.012)

V_{SO} : 失速速度 (km/h)

β : 荷重倍数を算出する点におけるフロートの底こう配角度 (rad) (図 1 参照)

W : 設計水上着水重量 (kgf)

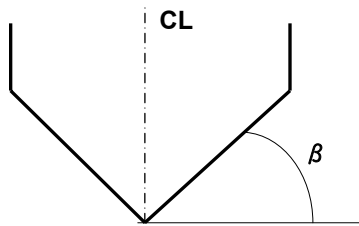


図 1 フロートの底こう配角度(フレアのない底部の場合)

表 1 中部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数

C_1	0.012	-	経験上の値
V_{SO}	64	km/h	失速速度*1
β	16 (0.2793)	deg (rad)	設計値*2
W	392	kgf	設計着水重量*3
nw_1	3.460	-	計算結果 >2.330

*1 供試機体 Maxair 社 Drifter XP-R503L の諸元値

*2 耐空性審査要領第 II 部(N 類)3-8 節の附録 B 第 1 図によるフロート底こう配角度

*3 最大離着水重量から機体自重と燃料重量を差し引いた値

が最大搭乗制限重量となる

既報⁽¹⁾で述べたように木製双フロートの設計においては、実機既存フロートおよびカナダの Cresswell Walker⁽³⁾ の設計プランを参考とし、耐水合板での製作を考慮して直線および単純曲線でフロート外形を構成した。

これにともない断面形状は五角形、フロートの底こう配角度(デッドライズ角) β はすべて 16° の V 形とした。以上の設計値より中部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_1 を計算した結果を表 1 に示す。

(b) 前部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_2

$$nw_2 = \frac{0.224 C_1 V_{SO}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}} \cdot \frac{K_1}{(1 + \gamma_x^2)^{2/3}}$$

(c) 後部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_3

$$nw_3 = \frac{0.224 C_1 V_{SO}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}} \cdot \frac{K_1}{(1 + \gamma_x^2)^{2/3}}$$

ここで、

C_1, V_{SO}, β, W : 中部衝撃を生じる着水の場合に準じる

K_1 : 経験上の艇体荷重率

γ_x : 水上機の重心位置 CG から荷重倍数を算出する点までの機体基準軸に平行に測った距離 X の当該水上機の縦揺れ慣性半径 R (m) に対する比 (詳細は第 5 章で述べる)

なお、上記の式中の単位換算係数は、耐空性審査要領第 II 部(耐空類別普通 N 類の飛行機)の 3-8-4 項では kt を km/h に換算すべきところを、MPH を km/h に換算したため 0.297 となっているが、 $1kt=1.852km/h$, $1lb=0.454kgf$ であるから、次式より 0.224 が正しい。

$$\frac{V_{SO}^2}{W^{1/3}} = \frac{(1/1.852)^2}{(1/0.454)^{1/3}} = 0.224$$

前部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_2 を算出する際に用いる経験上の艇体荷重率 K_1 は、図 2 に示すように、フロート先端からステップまでの $1/5$ の位置における値を用いることが規定されている。Lf を前部艇体の長さ、La を後部艇体の長さ、b をステップから重心 CG までの距離とすると K_1 は次式となる。

$$K_1 = 1.5 - \left(\frac{1.0 - 0.5}{L_f - b} \cdot \frac{1}{5} L_f \right)$$

また、前部衝撃を生じる着水の場合、水上機の重心位置 CG から荷重倍数を算出する点までの機体基準軸に平行に測った距離 X は次式となる。

$$X = \frac{4}{5} L_f - b$$

一方、後部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_3 を算出する際に用いる K_1 は、図 2 に示すように、ステップからフロート先端までの 85% の位置における値を用いることが規定されて

いる。よって、この場合の K_1 および X は次式となる。表 2(a)に前部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_2 、表 2(b)に後部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数 nw_3 の計算結果を示す。

$$K_1 = \frac{(1-0.375)}{L_a} \cdot 0.85 + 0.375$$

$$X = 0.85 \cdot L_a + b$$

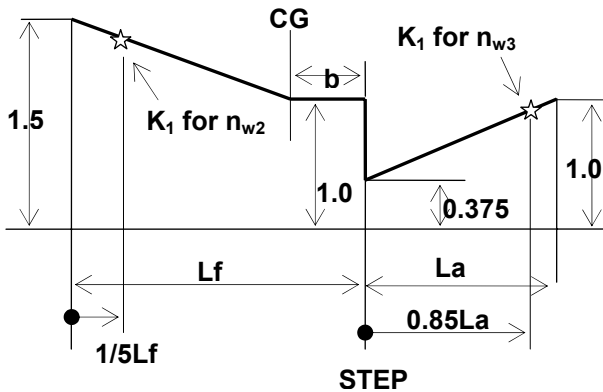


図2 垂直荷重に関する係数 K_1
(耐空性審査要領第Ⅱ部(N類)3-8節の附録B第2図による)

表2 前部および後部衝撃を生じる着水の場合の荷重倍数

C_1	0.012	-	経験上の値
V_{so}	64	km/h	失速速度
β	16 (0.2793)	deg (rad)	設計値
W	392	kgf	最大離水重量(機体仕様値)
L_f	1.81	m	設計値
L_a	2.02		
b	0.105		設計値より計算
R	1.33		
(a) 前部衝撃を生じる着水の場合			
K_1	1.39	-	図2参照
X	1.34	m	設計値より計算
γ_x	1.010	-	
nw_2	3.018	-	計算結果
(b) 後部衝撃を生じる着水の場合			
K_1	0.64	-	図2参照
X	1.82	m	設計値より計算
γ_x	1.370	-	
nw_3	1.091	-	計算結果

表3 主翼およびフロート取り付け部に適用する慣性荷重倍数

C_{T0}	0.004	-	経験上の値
V_{S1}	64	km/h	設計離水重量での失速速度*4

β	16 (0.2793)	deg (rad)	設計値
W	392	kgf	設計離水重量
nw_4	1.153	-	計算結果

*4 供試機体 Maxair 社 Drifter XP-R503L の諸元値(供試機体はフラップを装備していない)

3.2 着水時の水上荷重

耐空性審査要領第Ⅱ部(耐空類別普通 N 類の飛行機)の 3-8-3-3 および 3-8-3-4 では、着水時の水上荷重の合力を求める場合、片側のフロートあたり 1/2 の荷重とし、さらに主翼の揚力の 2/3 を差し引いた値を用いると規定しており、3-8-5-1 および 3-8-5-3 で、2つのフロートが同時対称に着水した場合と片側だけが先に着水した非対称着水の場合について検討することを求めている。

3.2.1 対称着水時

対称着水における中部、前部および後部衝撃着水時の水上荷重 F_m 、 F_f および F_a は各着水形態によって以下の値となる。

$$F_m = nw_1 \cdot \frac{W}{2} - \frac{2}{3} \frac{W}{2} = 547 \text{ kgf}$$

$$F_f = nw_2 \cdot \frac{W}{2} - \frac{2}{3} \frac{W}{2} = 461 \text{ kgf}$$

$$F_a = nw_3 \cdot \frac{W}{2} - \frac{2}{3} \frac{W}{2} = 83 \text{ kgf}$$

3.2.2 非対称着水時

耐空性審査要領第Ⅱ部(耐空類別普通 N 類の飛行機)の 3-8-5-3 では、非対称着水した場合、「3-8-4 項の規定により得られる中部衝撃荷重に 0.75 を乗じた上方荷重が各フロートのステップに、 $0.25 \tan \beta$ を乗じた側方荷重がフロート 1 個あたりに加わるものとし、この側方荷重の作用点の前後方向の位置は、上方荷重の場合と同じとし、その作用線はキール線とチャイン線との中程の点において、対象面に垂直に内向きに働くもの」と規定している。

したがって、非対称着水した場合、先に着水したフロートに働く上方荷重 F_U 、側方荷重 F_S は次式の値となる。

$$F_U = 0.75 \cdot nw_1 \cdot W - \frac{2}{3} W = 756 \text{ kgf}$$

$$F_S = (0.25 \tan \beta) \cdot nw_1 \cdot W - \frac{2}{3} W = -164 \text{ kgf}$$

3.3 離水時の荷重倍数と水上荷重

耐空性審査要領第Ⅱ部(耐空類別普通 N 類の飛行機)の 3-8-6 項では、水上機の主翼およびその艇体またはフロートへの取り付け部の設計にあたっては、次式によって求めた慣性荷重倍数 nw_4 に対応する離水時の下向き慣性力に耐えることを要求している。なお、原典 3-8-6 項のタイトルにある「単フロ

ート)は正しくは「主フロート」の誤記と思われる。

$$nw_4 = \frac{0.224 C_{T0} V_{S1}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}}$$

ここで、

C_{T0} : 経験上の水上機運用係数 (=0.004)

V_{S1} : 設計離水重量での失速速度 (km/h)

β : 主ステップ位置におけるフロートの底こう配角度

W : 設計水上離水重量 (kgf)

離水時、水上機の主翼およびフロートの取り付け部に作用する下向き慣性力に対する慣性荷重倍数 nw_4 を計算した結果、表 3 に示すように 1.153 となり、このときの水上荷重 F_T は次式の値となる。

$$F_T = nw_4 \cdot \frac{W}{2} = 1.153 \times \frac{392}{2} = 226 \text{ kgf}$$

3.4 フロート局部底部圧力

耐空性審査要領第 II 部 (耐空類別普通 N 類の飛行機) の 3-8-7 項では、フロートの底部外板などの設計に関して、離水および着水時における局部底部圧力 P_K を考慮することを求めている。図 3 に示すように、フレアのない底部の場合には、チェーンにおける圧力 P_{CH} はキールにおける圧力の 0.75 倍とし、キールとチェーンとの間で圧力は直線的に変化するものとみなし、次式によって局部底部圧力 P_K を求める。

$$P_K = \frac{0.0206 C_2 K_2 V_{S1}^2}{\tan \beta_K}$$

ここで、

P_K : 局部底部圧力 (kgf/cm²)

C_2 : 経験上の水上機運用係数 (=0.00213)

K_2 : 経験上の艇体荷重率 (図 4 参照)

V_{S1} : 設計水上離水重量での失速速度 (km/h)

β_K : キールにおけるフロートの底こう配角度

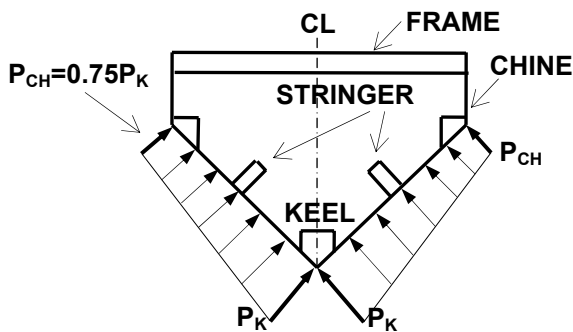


図 3 局部底部圧力 P_K を算出する際の底部圧力分布 (耐空性審査要領第 II 部 (N 類) 3-8 節の附録 B 第 3 図による)

なお、上記の式中の単位換算係数は、耐空性審査要領第 II 部 (耐空類別普通 N 類の飛行機) の 3-8-7 項では 0.027 となっているが、1kt=1.852km/h, 1lb=0.454kgf, 1in=2.54cm であるから、下式より 0.0206 が正しい。

$$V_{SO}^2 \cdot \frac{W}{L^2} = (1/1.852)^2 \frac{0.454}{2.54^2} = 0.0206$$

フロート底部局部圧力 P_K およびチェーンにおける圧力 P_{CH} の計算結果を表 4 に示す。フロート先端部 (BOW) で最大局部圧力を示すが 1.254 kgf/cm²を超えないことが確認された。

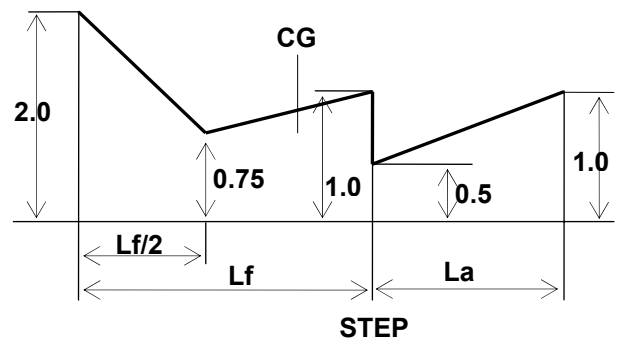


図 4 底部局部圧力に関する係数 K_2

(耐空性審査要領第 II 部 (N 類) 3-8 節の附録 B 第 2 図による。なお、原典では「垂直荷重」と表記されているが「底部圧力」が正しい)

表 4 底部局部圧力の計算結果

C_2	0.00213	-	経験上の値
V_{SO}	64	km/h	失速速度
β_K	16 (0.2793)	deg (rad)	設計値
K_2	BOW	2.0	図 4 参照
	Lf/2	0.75	
	Lf	1.0	
	STEP	0.5	
	STERN	1.0	
P_K	BOW	1.254	kgf/cm ² 計算結果
	Lf/2	0.470	
	Lf	0.627	
	STEP	0.313	
	STERN	0.627	
P_{CH}	BOW	0.941	kgf/cm ² $P_{CH}=0.75P_K$
	Lf/2	0.353	
	Lf	0.470	
	STEP	0.235	
	STERN	0.470	

3.5 フロート圧力分布

耐空性審査要領第Ⅱ部(耐空類別普通N類の飛行機)の3-8-7項では、フレーム、キールおよびチャインの構造設計にあたっては、離水および着水時における圧力分布を考慮するように求めており、図5(a)のようにフロート底面の圧力分布が対称とみなせる場合は次式で算出することを規定している。また、図5(b)のように非対称圧力の場合はフロートの片側に基準圧力P、反対側に0.5Pの圧力がかかるとして計算する。計算結果を表5に示した。

$$P = \frac{0.0206 C_4 K_2 V_{S_0}^2}{\tan \beta}$$

ここで、

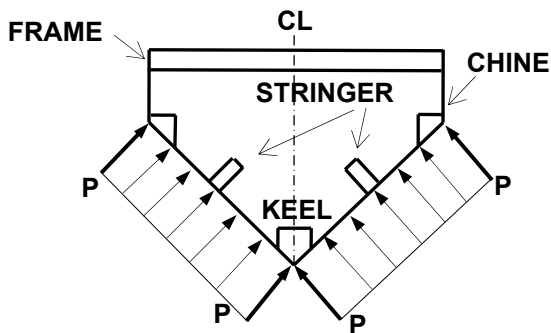
P:フロート構造設計時の基準圧力(kgf/cm²)

C₄:0.078C₁=0.000936

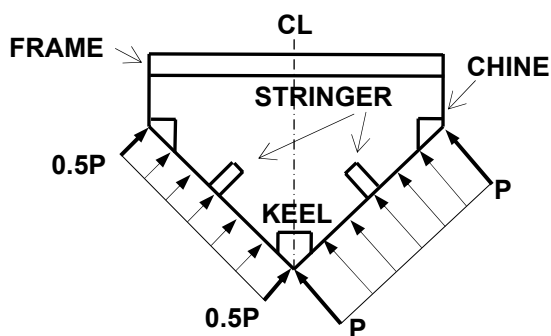
K₂:経験上の艇体荷重率(図4参照)

V_{S0}:プロペラ後流の影響を考慮しない場合の失速速度(km/h)

β:適当な位置におけるフロートの底こう配角度



(a) 対称圧力分布



(b) 非対称圧力分布

図5 圧力分布Pを算出する際の圧力分布(耐空性審査要領第Ⅱ部(N類)3-8節の附録B第3図による。なお、原典の「P₂」は「P/2」が正しい)

表5 フロート構造計算のための基準圧力

C ₄	0.000936	-	0.078C ₁	
V _{S1}	64	km/h	設計離水重量での失速速度*4	
β	16 (0.2793)	deg (rad)	設計値	
K ₂	BOW	2.0	-	
	Lf/2	0.75		
	Lf	1.0		
	STEP	0.5		
P	STERN	1.0	図4参照	
	BOW	0.551		kgf/cm ²
	Lf/2	0.207		
	Lf	0.275		
STEP	0.138			
P/2	STERN	0.275	kgf/cm ²	
	BOW	0.276		
	Lf/2	0.104		
	Lf	0.138		
P/2	STEP	0.069	上欄Pの0.5倍	
	STERN	0.138		
	BOW	0.276		
	Lf/2	0.104		

4. 構造強度

前述の荷重倍数をもとに文献4の2-1-3節および2-1-5節を参考に、著者らが製作した木製双フロートの構造強度を前部、中部および後部衝撃着水した場合を想定して検討した。

陸上機での運用経験から離着陸時のピッチ角は5deg前後であるが、水上運用時に予想される最も過酷な水面状態(波高30cm)を考慮すると最大9deg前後を想定する必要がある。したがって、着水時の水面反力の方向はピッチ角だけ傾くが、鉛直分力との比は1.013にすぎない。そこで計算モデルではピッチ角をゼロとし、水面反力および前後の脚支持力はすべて鉛直方向に作用するとみなして、力のつりあいおよび回転モーメントのつりあいを考えた。

なお、耐空性審査要領第Ⅱ部(耐空類別普通N類の飛行機)の3-8節の規定にしたがい、片側フロート当りの着水重量は、設計着水重量の1/2である196kgfとし、フロート構造材の強さは表6に示す値を基準とする。

4.1 前部衝撃着水の場合

前部衝撃着水を想定した計算モデルを図5に示す。前部水上荷重の合力点と前脚支持点間の距離L₁は、耐空性審査要領の規定によって、フロート先端からステップ間の距離の1/5の位置と定められており、設計値より892mmである。また、前脚支持点と後脚支持点間の距離L₂は1320mmである。

3.2.1項で求めた前部衝撃水上荷重F_Fが水面反力として作用し、前脚支持部に最大曲げモーメントが生じる。

前脚支持点回りの回転モーメントのつりあいと力のつりあい

の式を連立することで、前脚支持力 F_1 および後脚支持力 F_2 は次式より求められる。

$$F_1 = F_f \frac{(L_1 + L_2)}{L_2} = 772 \text{ kgf}$$

$$F_2 = \frac{F_f L_1}{L_2} = 311 \text{ kgf}$$

一方、前脚支持点回りの曲げモーメント M_1 は次式となる。

$$M_1 = F_f L_1 = 411 \text{ kgfm}$$

前脚支持点回りの曲げモーメント M_1 による圧縮を受け持つのは 24mm角の檜の縦通材 3 本と 3mm厚ラワン合板の外板であり、外板の圧縮有効断面積は座屈補強された 3 本の縦通材付近の厚さの 30 倍とみなした⁽⁴⁾。また、引張を受け持つのは、24mm角の檜の縦通材 2 本、幅 12mm高さ 24mmの檜の縦通材 2 本、幅 24mm高さ 60mmの檜のキール材 1 本、3mm厚ラワン合板の外板(幅 558mm)とみなした。ここで、前脚支持点を通る断面を断面A-A'と呼ぶと、上述の構造材の設計値よりA-A'断面におけるデッキの圧縮部材の総面積 A_{c1} 、底の引張り部材の総面積 A_{t1} はそれぞれ 2538mm²、4842mm²となる。

断面A-A'における圧縮部材と引張り部材間の距離 h_1 は、設計値より 425mmであるから、A-A'断面に生じる力 P_1 は次式となる。

$$P_1 = \frac{M_1}{h_1} = 967 \text{ kgf}$$

A-A'断面にあるデッキの圧縮部材だけで P_1 を受け持った場合の応力 σ_{c1} およびA-A'断面にある底の引張り部材だけで P_1 を受け持った場合の応力 σ_{t1} は次式となる。

$$\sigma_{c1} = \frac{P_1}{A_{c1}} = 0.38 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{t1} = \frac{P_1}{A_{t1}} = 0.20 \text{ kgf/mm}^2$$

一方、側壁高さ 419mmの 70%と幅 12mm高さ 24mmの檜の縦通材 1 本がせん断を受け持つとみなすと、両舷側壁のA-A'断面におけるせん断部材の面積 A_{s1} は 2336mm²となる。側壁高さ 70%の範囲におけるせん断応力分布は均一とみなすと、側壁のA-A'断面にあるせん断部材だけで P_1 を受け持った場合のせん断応力 τ_1 は次式となる。

$$\tau_1 = \frac{P_1}{A_{s1}} = 0.41 \text{ kgf/mm}^2$$

安全率を終極荷重倍数÷制限荷重倍数(=1.5)に余裕率 1.1 を乗じて 1.65 と見積ると、表 6 に示したフロート構造材の最小許容応力⁽⁶⁾は 0.75 kgf/mm² ÷ 1.65 = 0.455 kgf/mm²となる。したがって、A-A'断面にあるデッキの圧縮部材に生じる応力 σ_{c1} 、側壁のせん断部材に生じるせん断応力 τ_1 、底の引張り部材に生じる応力 σ_{t1} はいずれもフロート構造材の最小許容応力を超えない範囲にある。

表 6 フロート構造材の強さ

材質	備考	kgf/mm ²
ラワン合板*5	圧縮強さ*6	2.53
	引張強さ*6	5.12
	せん断強さ*7	1.27
檜*8	圧縮強さ	4.00
	引張強さ	12.00
	曲げ強さ	7.50
	せん断強さ	0.75

*5 パーチ三枚合わせ合板、厚さ 3.125mm、芯板 1.524mm、含水率 15%、比重 0.494

*6 試験体長軸と表板の繊維方向は直交

*7 表層繊維方向でせん断 *8 無欠点気乾材、比重 0.44

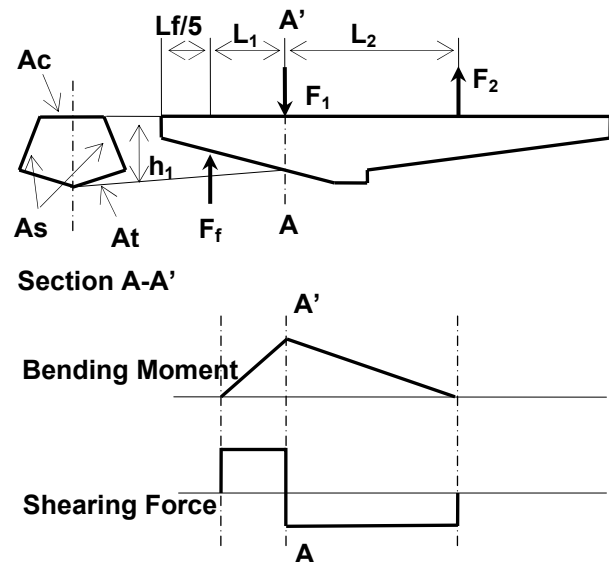


図 5 前部衝撃着水時の計算モデル

4.2 中部衝撃着水の場合

中部衝撃着水時を想定した計算モデルを図 6 に示す。中部水上荷重の合力点(重心)と前脚支持点間の距離 L_3 は、設計値より 445mmであり、前脚支持点と後脚支持点間の距離 L_2 は 1320mmである。中部衝撃水上荷重(水面反力) F_m によって重心回りに最大曲げモーメントが生じる。よって、重心回りの曲げモーメント M_G 、前脚支持力 F_3 、後脚支持力 F_4 は次式より求まる。なお、 M_G は負の曲げモーメントとなる。

$$F_4 = \frac{F_m L_3}{L_2} = 185 \text{ kgf}$$

$$F_3 = F_m - F_4 = 363 \text{ kgf}$$

$$M_G = -F_3 L_3 = -162 \text{ kgfm}$$

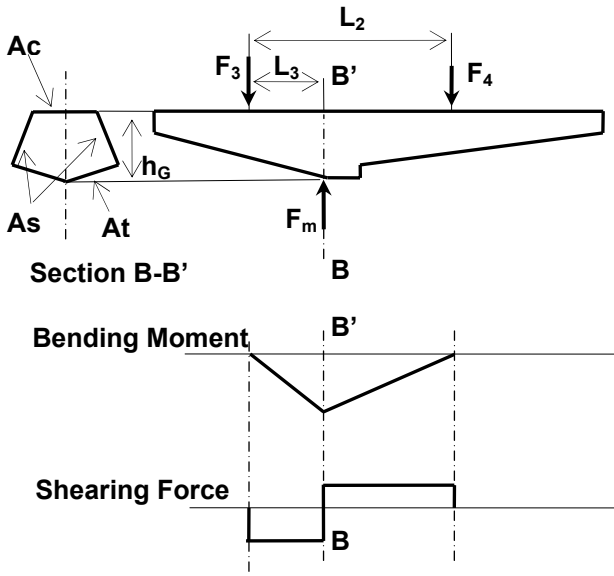


図6 中部衝撃着水時の計算モデル

重心CGを通る断面をB-B'断面と呼ぶと、4.2節の場合と縦通材の寸法および数量は同じだが、外板の幅の違いがあるため設計値より計算すると、B-B'断面にあるデッキの引張部材の総面積 A_{cG} 、底の圧縮部材の総面積 A_{tG} は、それぞれ 2397mm^2 、 4518mm^2 となる。B-B'断面における圧縮部材と引張部材間の距離 $h_G (=425\text{mm})$ であるから、B-B'断面に生じる力 P_G は次式となる。

$$P_G = \frac{M_G}{h_G} = -380 \text{ kgf}$$

B-B'断面にあるデッキの引張部材だけで P_G を受け持った場合の応力 σ_{cG} およびB-B'断面にある底の圧縮部材だけで P_G を受け持った場合の応力 σ_{tG} は次式となる。

$$\sigma_{cG} = \frac{P_G}{A_{cG}} = -0.16 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{tG} = \frac{P_G}{A_{tG}} = -0.08 \text{ kgf/mm}^2$$

側壁高さ419mmの70%と幅12mm高さ24mmの檣の縦通材1本がせん断を受け持つとみなすと、両舷側壁のB-B'断面におけるせん断部材の面積 A_{sG} は 2336mm^2 となる。側壁高さ70%の範囲におけるせん断応力分布は均一とみなすと、側壁のB-B'断面にあるせん断部材だけで P_G を受け持った場合のせん断応力 τ_{sG} は次式となる。

$$\tau_{sG} = \frac{P_G}{A_{sG}} = -0.16 \text{ kgf/mm}^2$$

前述のごとくフロート構造材の許容応力は最も小さく見積もっても 0.455kgf/mm^2 であるから、B-B'断面にあるデッキの引張部材に生じる応力 σ_{cG} 、側壁のせん断部材に生じる応力

τ_{sG} 、底の圧縮部材に生じる応力 σ_{tG} はいずれもフロート構造材の最小許容応力を超えない範囲にある。

4.3 後部衝撃着水の場合

後部衝撃着水時を想定した計算モデルを図7に示す。後部水上荷重の合力点は、耐空性審査要領の規定によって、ステップよりフロート後端までの距離の85%の位置と定められており、この合力点から後脚支持点間の距離 L_4 は、設計値より875mmとなる。また、前脚支持点と後脚支持点間の距離 L_2 は1320mmである。後部衝撃水上荷重(水面反力) F_a によって後脚支持点回りに最大曲げモーメントが生じる。よって、後脚支持点回りの曲げモーメント M_6 、前脚支持力 F_5 、後脚支持力 F_6 は次式より求まる。

$$F_6 = \frac{F_a(L_4 + L_2)}{L_2} = 138 \text{ kgf}$$

$$F_5 = \frac{M_6}{L_2} = 55 \text{ kgf}$$

$$M_6 = F_a L_4 = 73 \text{ kgfm}$$

後脚支持点を通る断面を断面C-C'と呼ぶと、4.2節の場合と縦通材の寸法および数量は同じだが、外板の幅の違いがあるため設計値より計算すると、C-C'断面にあるデッキ部の引張部材の総面積 A_{c6} 、底にある圧縮部材の総面積 A_{t6} はそれぞれ 2538mm^2 、 4470mm^2 となる。C-C'断面における圧縮部材と引張部材間の距離 $h_6 (=270\text{mm})$ であるから、C-C'断面に生じる力 P_6 は次式となる。

$$P_6 = \frac{M_6}{h_6} = 270 \text{ kgf}$$

C-C'断面にあるデッキの引張部材だけで P_6 を受け持った場合の応力 σ_{c6} およびC-C'断面にある底の圧縮部材だけで P_6 を受け持った場合の応力 σ_{t6} は次式となる。

$$\sigma_{c6} = \frac{P_6}{A_{c6}} = 0.11 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\sigma_{t6} = \frac{P_6}{A_{t6}} = 0.06 \text{ kgf/mm}^2$$

側壁高さ261mmの70%と幅12mm高さ24mmの檣の縦通材1本がせん断を受け持つとみなすと、両舷側壁のC-C'断面におけるせん断部材の面積 A_{s6} は 1672mm^2 となる。側壁高さ70%の範囲におけるせん断応力分布は均一とみなすと、側壁のC-C'断面にあるせん断部材だけで P_6 を受け持った場合のせん断応力 τ_{s6} は次式となる。

$$\tau_{s6} = \frac{P_6}{A_{s6}} = 0.16 \text{ kgf/mm}^2$$

フロート構造材の許容応力は最も小さく見積もっても 0.455kgf/mm^2 であるから、C-C'断面にあるデッキの引張部材に生じる応力 σ_{c6} 、側壁のせん断部材に生じる応力 τ_{s6} 、底の圧縮部材に生じる応力 σ_{t6} はいずれもフロート構造材の最小許容応力を超えない範囲にある。

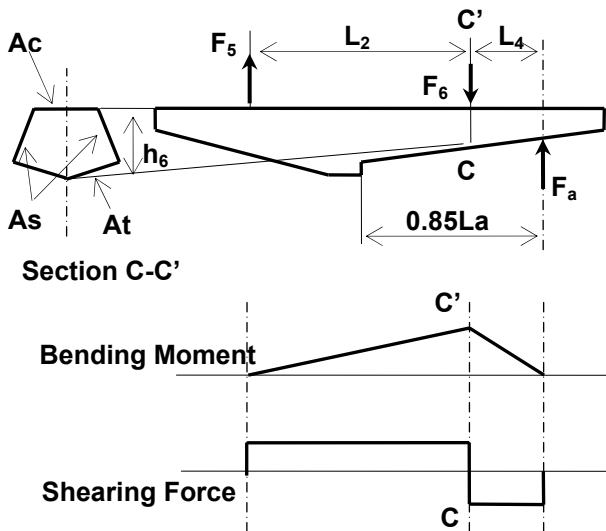


図7 後部衝撃着水時の計算モデル

5. 重心位置と縦揺れ慣性半径

機体モデルを図8に示す。測定基準点(図中WLとFSTAの交点)から各構成部品の重心までの水平、垂直距離をそれぞれ X_i' 、 Z_i' (ステーションと呼ぶ)、重量を W_i とすると、測定基準点からみた機体の重心位置 X_{CG} 、 Z_{CG} は次式で求められる。

なお、左右のフロートおよび水中ラダーはXZ平面上では1つに合体して取り扱った。また、計算にはサーキュラー No.1-007の「重量・重心位置および主翼面積の計測方法について」にしたがい、長さの単位にcmを使用した。

$$X_{CG} = \frac{\sum (W_i \cdot X_i'^2)}{\sum W_i} = 52\text{cm}$$

$$Z_{CG} = \frac{\sum (W_i \cdot Z_i'^2)}{\sum W_i} = 28\text{cm}$$

機体の重心位置から各構成部品の重心までの直線距離 r_i は次式で求められる。ここで、 x_i 、 z_i は機体重心から各構成部品の重心までの水平距離および垂直距離である。

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + z_i^2}$$

$$x_i = X_i' - X_{CG}$$

$$z_i = Z_i' - Z_{CG}$$

次に、各構成部品の形状を幅 ΔX_i 、高さ ΔZ_i の長方形で近似すると、各構成部品の機体重心からみた慣性モーメント J_i は、各構成部品の質点とみなした慣性モーメント J_i' と各構成部品自身の重心回りの慣性モーメント J_i'' の和となり、次式で求められる。

$$J_i = J_i' + J_i'' = W_i \cdot r_i^2 + \frac{W_i}{12} (\Delta X_i^2 + \Delta Z_i^2)$$

各構成部品の機体重心まわりの慣性モーメント J_i の総和が、機体全体の重心まわりの慣性モーメント J であり、機体の縦揺れ慣性半径 R は、この J と設計離着水重量 W_1 の比の平方根となる。さらに、着水時の荷重倍数を計算する際に必要な γ_x は、次式により求められる。ここで、前部衝撃着水時の荷重倍数 n_{w2} を計算するときは、この X に水上機の重心位置CGから前部衝撃荷重倍数を算出する点までの機体基準軸に平行に測った距離 $X(=1.34\text{m})$ を用い、後部衝撃着水時の荷重倍数 n_{w3} を計算するときは、後部衝撃荷重倍数を算出する点までの機体基準軸に平行に測った距離 $X(=1.82\text{m})$ を用いる。

$$J = \sum J_i = 7040000\text{kgfcm}^2 = 704\text{kgfm}^2$$

$$W_1 = \sum W_i = 392\text{kgf}$$

$$R = \sqrt{\frac{J}{W_1}} = \sqrt{\frac{\sum J_i}{\sum W_i}} = 133\text{cm} = 1.33\text{m}$$

$$\gamma_x = \frac{X}{R}$$

6. あとがき

著者らが設計製作した木製双フロートを装着した超軽量動力飛行機の飛行安全を確保するため、耐空性審査要領第II部(耐空類別普通N類の飛行機)の3-8節を適用して解析し、設計結果の安全性を確認した。しかしながら、実際に製作した木製双フロートが設計どおりの強度をもっているか否かは、使用した材料、製作方法および製作技術に左右されるため、最終的には陸上および水上試験で検証していく必要がある。

また、本報告ではフロート支持脚の強度検討について言及できなかったが、追って報告したい。本報告が後進の参考となることを期待する。最後に、ご多忙中、貴重なご助言とご指導を賜りました都立産業技術高等専門学校 大貫貴久准教授にこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 伊藤宏一ほか:超軽量動力飛行機のための木製双フロートの設計と製作 I, 都立産業技術高等専門学校紀要第1号, P52-89, 2006.3
- (2) 航空局検査課監修:耐空性審査要領, 鳳文書林
- (3) Cresswell Walker: Muk-Tuk Takes to the Water, Kitplanes, USA, P76-79, May 1997
- (4) 鳥養鶴雄, 久瀬伸三:飛行機の構造設計, 日本航空技術協会, 1992
- (5) 浅原照三ほか編:無機有機工業材料便覧, 東洋経済新報社, P710 および 764, 1959

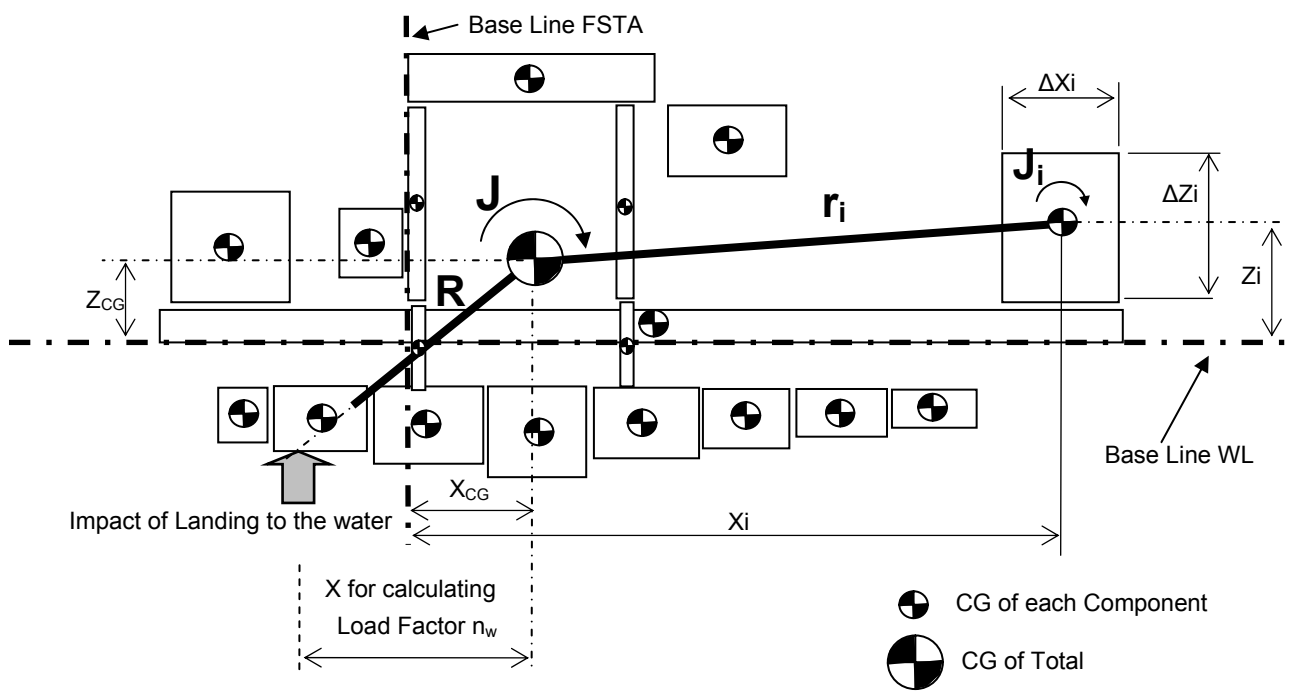


図 8 重心および縦揺れ慣性モーメント計算のための機体モデル

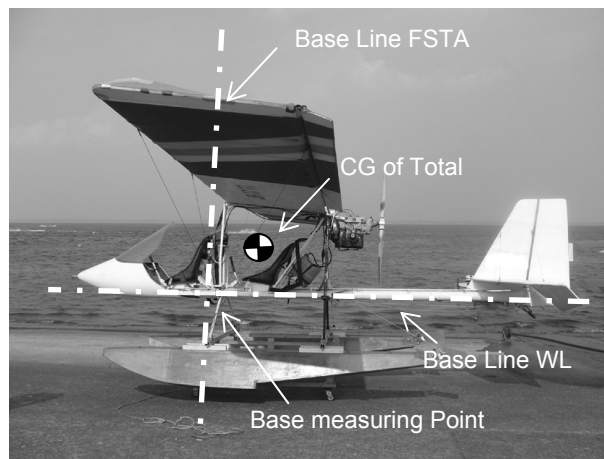


写真 1 実際の機体