FEM による水上飛行機用 FRP フロートの開発・設計

1. 緒言

日本は陸地面積が世界で 61 位であるのに対し海 洋面積は 6 位と,広い海洋を有している.この海洋 を有効に活用するには有効な輸送手段の確立が必須 である.そこで,水上飛行機に注目が集まりつつあ る.FRP(Fiber Reinforced Plastics,繊維強化プラ スチック)は比強度・比剛性,耐腐食性に優れ,重量 や腐食に敏感な水上飛行機用フロートとしては最適 の材料である¹⁾.

本研究では既存の陸上用超軽量飛行機 (Ultra Light Airplanes, ULP)を海や湖で使用するために FRP 製フロートの開発と設計を行う.そこで FRP 製のフロートを取り付けた場合の水上飛行機の着水 時の衝撃を動的陽解法有限要素法ソフト PAM-CRASH と,その中の機能の一つである SPH(Smooth Particle Hydrodynamics,平滑粒子流 体力学)法を用いて解析を行う.この解析結果から機 体軸に関しては対称であるが,フロート軸に関して 左右対称フロート(以下対称フロート)と左右非対称 フロート(以下非対称フロート)(Fig.1)について比較 し,非対称フロートの有用性を示す.また実際に製 作されたフロートの静的曲げ試験と,フロートと機 体を繋ぐFRP製の楕円円筒の圧縮試験を行った結果 についても報告する.



(a)Symmetric Float (b)Asymmetric Float Fig.1 Type of Float

2. 着水衝撃解析

左右非対称フロートは内側を平面にすることによ り着水時の内側の水飛沫が抑制され,その分外側に 飛ぶので,機体に取り付けられているエンジンやプ ロペラに水飛沫がかからない.このことで,機体の ライフサイクルが長くなり,経済的に利点となる. 2.1 解析モデル

着水衝撃解析を行うために,汎用有限要素プログ

日大生産工(院)	伊藤	佑造
日大生産工	邉 君	<u>-</u>

ラム ANSYS ver.9.0 を用い左右対称フロートと非対 称フロートと着水解析領域の FEM(Finite Element Method 有限要素法)モデルを作成した(Fig.2). それ ぞれのフロートは全長 4000mm と共通にしたが, そ の他の寸法は異なるため Table 1 に最大幅 最大高, 排水量,表面積を示す.フロート部についてはGFRP と発泡材のサンドイッチ構造で製作することが予定 されているが,第一段階として水飛沫の挙動と加速 度の傾向を明らかにするために,フロートはひとま ず剛体として扱う.着水領域を表現するために, ANSYS 上ではソリッド要素で全長 9000mm,幅 3600mm, 深さ 600mm の領域をメッシュサイズ 150mm でモデリングした.最後に,着水面以外の水 の周囲 5 面の壁を剛体のシェル要素でモデリングし た.対称・非対称フロートの要素数,節点数をTable 2 に示す.次に,モデリングした水のソリッド要素を PAM-CRASH で SPH 要素に変換し, 速度や境界条 件を設定した.水上飛行機には水平方向速度 5m/s, 垂直方向速度-0.5m/s を与え,水の周囲の壁は全自由 度を拘束した.また,解析の時間間隔は0.1msecと して,全体として1secの間解析した.

耐空性審査要領によれば,着水条件は前部・中部・ 後部着水,それぞれに対して機体軸に関して垂直に 着水する場合,傾いて着水する場合に分けられる²⁾. そのうち機体軸に関して垂直に着水する場合の解析 を行った.また,前部・後部着水に関しては水平軸 に対して 5°,10°傾けたモデルを製作し,中部着 水と合わせて合計5通りの解析を行った.



Fig.2 Model of Floatplanes by FEM

Table 1 Float Dimension

	Maximum Width (mm)	Maximum Height (mm)	Displacement Volume (litter)	Surface Area (m ²)
Symmeric Float	523	480	443	4.91
Asymmetric Float	450	580	430	5.03

Table 2 Number of Nodes and Elements

	Number of	Number of
	Nodes	Elements
Symmeric Float	67250	39942
Asymmetric Float	63762	37414

2.2 解析結果

着水の解析結果を Fig.3 に示す.中部着水条件に おける水飛沫の挙動を比較すると,対称フロートは 水飛沫が左右対称に飛び,両フロートの外側よりも 内側に多く集まっている.一方非対称フロートは両 フロートの外側に水飛沫が多く飛び,内側の水飛沫 が抑えられ,機体上方まで飛ばずエンジンやプロペ ラに水飛沫がかからないという結果が得られた.他 の着水条件に関しても同様の結果が得られた.また, 水上飛行機重心点での垂直方向最大加速度を Table 3 に示す.対称フロートは変動幅が大きく絶対値も 大きい値であったが,非対称フロートは変動幅が小 さく絶対値も小さいという結果が得られた.



(a) Symmetric Float (b) Asymmetric Float Fig.3 Behavior of Water

Table 3 Maximum Acceleration (Vertical Direction)

		Symmetric Float	Asymmetric Float
北	5°	26.9	15.4
^{BU EID} 10 °		14.7	15.9
中部		15.5	16.4
编加	5°	25.8	16.8
AD 281	10 °	36.4	14.1
			unit [m/s ²]

3. フロート静的曲げ試験

3.1 試験概要

実際に対称フロートを製作し,水上に静止してい る時の場面を想定したフロートの静的曲げ試験を行 った(Fig.4).フロートは支点間距離1200mmの単純 支持とし、荷重は1つ2.5kgの鉛弾帯を乗せていく. また,各荷重でのたわみをダイヤルゲージによって 測定した.フロート前方からのダイヤルゲージの位 置をTable 1 に示すが,No.2 とNo.4 のダイヤルゲ ージは支持点で計測している.ここでフロート先端 から No.2 の支持点までを前部,支持点間を中央部, No.4 の支持点からフロート後部までを後部と呼ぶ.



Fig.4 Overall View of Float

Table 4 Position of Dial Gages

	Position of Dial Gages [mm]
No.1	500
No.2	1500
No.3	2000
No.4	2700
No.5	3500

3.2 弾性試験

3.2.1 中央部に荷重をかけた場合

まずは弾性域内で荷重をかけていく.中央部に 0kg から 20kg ごと 100kg までの荷重をかけ,100kg から 20kg ごと 0kg まで除荷した場合の荷重 - たわみを Fig.5 に示す.中央部のダイヤルゲージ No.3 の位置で 最大たわみ 0.3mm を得た.100kg までは荷重とたわ みは比例関係を示している.



3.2.2 前部に荷重をかけた場合

フロートの後部が持ち上がらないようにするため 後 部に鉛弾帯を載せて, 10kg 間隔で 40kg まで鉛弾帯を 乗せていく.10kg ごとにダイヤルゲージを読んでいっ た結果の荷重 - たわみ線図を Fig.6 に示すが,この場合 も大体,比例変形を示している.



Fig.6 Load vs. Deflection (Front Loading)

3.3 破壊試験

続いて破壊に至るまで鉛弾帯を乗せ荷重をかけてい く.破壊は No.2 のダイヤルゲージを設置した支点付近 で生じ,その時の全荷重は 900kg であった.荷重分布 を Table 5 に,破壊様相を Fig.7 に示す.破壊直前にガ ラス繊維が破壊する音が聞こえ,さらに樹脂の白化が見 受けられ,その後圧縮応力が作用する下側で FRP 層の 座屈破壊が生じ,亀裂が進展していったが,フォーム層 の破損は観察されなかった.

Table 5 Distribution of Load on Failure of Float

前部	中央部	後部	合計
520	220	160	900
			(unit:kg)



Fig.7 Fracture of Float

4. FRP 楕円円筒圧縮試験

4.1 試験概要

試験体は内径の長径 400mm,短径 300mm,幅 100mm の楕円形で ULP とフロートを結合する機能を 有する .厚さは公称 5.25mm(ガラスクロス 21PLY)であ るが,実測6mmである(Fig.8).ほぼ同寸法の試験体2 つについて圧縮試験を行った.ただし片方の FRP 楕円 円筒にはひずみゲージを貼った ひずみゲージは試験体 の長径外側,長径内側の位置に2軸ひずみゲージを貼 り,周方向と軸方向のひずみを,合計 8ch 測定した. ひずみゲージの名称を 試験機に向かって右側の長径外 側の周方向ひずみを「右外周」,同様に右外側軸方向を 「右外軸」のように呼ぶ.ひずみゲージを貼ってない試 験を圧縮試験 A,貼って行った試験を圧縮試験 Bとす る.試験機はオートグラフ,圧縮治具には球座式圧盤を 使用した.まず,スプリングが動かないよう,初期荷重 (0.02kN)を加え圧盤間で固定する(Fig.9). 試験速度は 圧縮試験 A が 5mm/min, 圧縮試験 B が 10mm/min と し,室温で試験を行った.試験は初期破損が起こっても 荷重を加え続ける.





Fig.8 Test Piece

Fig.9 Fixed Test Piece

4.2 試験結果

まずは圧縮試験 A の荷重 - たわみ線図を Fig.10 に示 す.荷重を加えていくと,荷重 1.4kN,たわみ 84mm あたりで右内側の樹脂の白化が起こり始めた.さらに荷 重を加えていくと,2.02kN,119.3mm で右内側から破 損が起こり,外側のガラス繊維が軸方向に破断した (Fig.11)ことで一度荷重は 1.35kN まで落ちるが,左側 が荷重を受け持ち,1.56kN,147.1mm で右側の破壊と 同様に左内側で破壊が起こり外側のガラス繊維が軸方 向に破断した.最後は楕円が折りたたまれ,1.15kN, 213.1mm で下部の圧盤箇所で破壊した 第一破断点と, 第二,第三破断点での荷重とたわみを Table 6 に示す.

次に圧縮試験 Bと破壊試験 Aとを比較した荷重 - た わみ線図を Fig.12 に示す 圧縮試験 B は 0.7kN A1mm あたりで小さなピキピキという音(ガラス繊維と樹脂が はく離する音)が聞こえ始め, 1.2kN, 80mm あたりで 左右内側の樹脂層の白化が生じた(Fig.13).以降,次第 にピキピキという音が大きくなり 右内側から破損が起 こり始め,1.84kN,117mmの時右外側の繊維が軸方向 に破断した(Fig.14)ことで一度荷重は落ちるが, 左側が 荷重を受け持ち再び荷重は上昇し左内側から破損が起 こり, 1.36kN, 132mm で左外側の繊維が軸方向に破 断した.最後は楕円が折りたたまれ,1.06kN,253mm の時上部圧盤箇所で破断した(Fig.15).第一破断点と第 二,第三破断点での荷重とたわみを Table 2 に示す.複 合材料では一般に圧縮強さは引張強さより小さい 3)た め、これらの破壊形態は妥当なものであるといえる.ま た,各位置での周方向のひずみを Fig.16 に示す.外側 周のひずみゲージの値は引張を 内側周方向のひずみゲ ージは圧縮を示した.右内周のひずみゲージの値が急激 に変化しているが、この時の荷重 0.76kN あたりで樹脂 層の白化が起こり始めており、ひずみゲージに影響を与 えていると考えられる.

周方向ひずみより 引張ひずみと曲げひずみを求める ことができるが ,今回の試験では曲げが支配的であった.



Fig.10 Result of Compression Test A



Fig.11 First Load of Glass Fiber Breakage in FRP

Table 6 Loads of Glass Fiber Breakage in FRP



Fig.12 Comparison of Test A and Test B



Fig.13 Whiting Phenomenon



Fig.14 First Glass Fiber Breakage in FRP



Fig.15 Third Load of Glass Fiber Breakage in FRP

Table 7 Loads of Glass Fiber Breakage in FRP





Strain [%] Fig. 16 Load vs. Strain (Circumferential Direction)

5. 結言

着水衝撃解析により 水飛沫の挙動と加速度の傾向に ついて非対称フロートの有用性を明らかにした .今後は フロートを弾性体とし,材料物性値を与え,応力値の観 点からも有用性を明らかにする.また,解析時間縮小の ため対称条件を用いて要素数を減らすことを検討する. 一方で SPH 要素数を増やし,実際の水に近似させるモ デルを製作することも課題となる またフロート静的曲 げ試験とスプリング圧縮試験を行い強度評価すること によって今後解析していくにあたって有用なデータを 得ることができたが、今後は実験値と FEM による解析 値を合わせていき 様々な境界条件下での強度評価を行 っていく.

謝辞

本研究を進めさせていただくにあたってご助力いた だいた(社)強化プラスチック協会の水上飛行機開発プ ロジェクト参加企業の方々に感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 邊吾一: FRP 水上飛行機開発プロジェクトの概 要,51st FRP CON-EX 講演要旨集,(2006)
- 2) 運輸省航空局航空機安全課: 耐空性審査要領, 鳳文書林出版販売,(2003)
- 3) 福田博, 邉吾一: 複合材料の力学序説, 今古書 院, 1989, PP47-48