技術賞紹介

2003 年度 日本複合材料学会技術賞 受賞技術の概要

標記年度の日本複合材料学会技術賞は、学会賞委員会（谷本敏夫委員長）で選考が行われ、受賞 2 件が決定し、2004 年 5 月 24 日の日本複合材料学会総会の授賞式において、楯と賞状が贈られた。また、同年 10 月 28 日～29 日に沖縄青年会館で開催された日本複合材料学会の第 29 回複合材料シンポジウムで受賞講演が行われた。本号では、受賞技術 2 件の内容の概略を、受賞者に紹介して戴くこととした。

複合材料航空機胴体模擬構造を用いたデモンストレータ試験による損傷検知・損傷抑制及び騒音・振動低減技術の実証

田島 直之^{*1}, 櫻井 建夫^{*1}, 武田 展雄^{*2}, 長井 謙宏^{*3}, 木元 順一^{*4},
荻巣 敏充^{*5}, 山岸謙二郎^{*6}, 岸 輝 雄^{*1}

1. 結 言

省資源・省エネルギーの観点から、高速輸送システム等の軽量化のために先進複合材料の本格的適用を目指して、これらの材料・構造の信頼性や機能向上のために材料に知的機能を付与する事が期待されている。これに対応して、平成 10 年度から平成 14 年度までの 5 カ年に亘って「知的材料・構造システムの研究開発」プロジェクトが実施された。その中で、i) ヘルスマonitoring 技術の開発、ii) スマートマニファクチャリング技術の開発、iii) アクティブ・アダプティブ構造技術の開発、iv) アクチュエータ材料・素子の開発、の 4 つの要素技術開発が進められた。

これらの基礎要素技術を実構造レベルにおいて検証

し、かつ大型複合材料構造に組込むことにより問題点を把握し解決するためのデモンストレータ試験を実施した。本稿では、「知的材料・構造システムの研究開発」プロジェクトで実施したデモンストレータ試験の概要を紹介する。

2. デモンストレータ試験

デモンストレータ試験項目は次の 4 つの判断基準によって選定し、表 1 に示す 7 つの項目に絞り込んだ。

- 1) 技術的に先進性がある。
- 2) 航空機胴体に適用する明確なニーズがある。
- 3) 要素技術開発の成果が確認できる。
- 4) 研究開発スケジュールの点から妥当である。

デモンストレータ供試体は、図 1 に示すようにボーイング 737 級旅客機の胴体の約 1/3 スケール（直径 1.5 m、長さ 3 m）の航空機胴体模擬 CFRP 補強円筒構造とした。デモンストレータ供試体は 2 種類（2 体）とし、一体は「損傷検知・損傷抑制デモンストレータ」で試験項目 1～6 を実証、もう一体は「騒音・振動低減デモンストレータ」で試験項目 7 を実証するものとした。

3. 損傷検知・損傷抑制デモンストレータ試験

図 2 に損傷検知・損傷抑制デモンストレータ試験供試体の完成写真を示す。各種センサやコネクタ、ケーブルなどの埋込み取付けを考慮し、円筒構造は周方向に 4 分

Naoyuki TAJIMA,^{*1} Tateo SAKURAI,^{*1} Nobuo TAKEDA,^{*2} Kanehiro NAGAI,^{*3} Junichi KIMOTO,^{*4} Toshimichi OGISU,^{*5} Kenjiro YAMAGISHI^{*6} and Teruo KISHI^{*7}:^{*1} 助次世代金属・複合材料研究開発協会 (105-0001 東京都港区虎ノ門 3-25-2 プリダストン虎ノ門ビル), ^{*2} 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1), ^{*3} 三菱重工業㈱ (455-8515 名古屋市港区大江町 10), ^{*4} 川崎重工業㈱ (504-8710 各務原市川崎町 1 番地), ^{*5} 富士重工業㈱ (320-8564 宇都宮市陽南 1-1-11), ^{*6} 石川島播磨重工業㈱ (横浜市磯子区新中原町 1 番地), ^{*7} 御物質・材料研究機構 (305-0047 つくば市千現 1-2-1)

表 1 デモンストレーションテーマ及び検証目標

No.	デモンストレーションテーマ	検 証 目 標
①	複合材料埋め込み光ファイバセンサによる衝撃損傷検知	複合材構造に埋め込んだ光ファイバセンサシステムにより、衝撃損傷の発生位置を特定できることを実証する。
②	統合化 AE センサネットワークによる実用衝撃負荷の同定	実用時と同等なノイズ環境下において、AE センサネットワークにより、AE 発生位置を精度 1 cm 以下で特定できることを実証する。
③	分布型 BOTDR センサによる広領域ひずみ分布測定	BOTDR センサシステムにより、胴体構造全体にわたる広範囲のひずみを、精度 100 $\mu\epsilon$ 以下で特定できることを実証する。
④	炭素繊維の導電性を利用したセンサ(スマート・パッチ)による損傷検知	最大歪検出型スマートパッチにより 5000 $\mu\epsilon$ 以下の最大歪を検出できることおよび累積損傷型スマートパッチにより負荷サイクル数を検出できることを実証する。
⑤	SMA 箔を用いた損傷抑制	複合材構造に埋め込んだ形状記憶合金により、損傷の発生・進展を抑制できることを実証する。
⑥	低コスト RTM 一体成形パネルの知的成形	光ファイバセンサを埋め込んだ CFRP 構造部材を成形し、含浸、センサおよび出力コネクタが良好な状態であることを実証する。
⑦	振動・機内騒音軽減技術	アクティブ・アダプティブ構造を適用することにより、減衰係数を 20% 以上向上できること、ならびに、騒音レベルを 3 dB 以上軽減できることを実証する。

図 1 デモンストレータ供試体サイズ

割した。上面パネル1枚、下面パネル1枚、側面パネル2枚のCFRP複合材パネルを各々製作し、組み立てた。一端が固定された片持ち状態にて75 kPaまでの内圧負荷、または下面パネル評定部に最大3,600 $\mu\epsilon$ のひずみが生じるまでの曲げ荷重(約24トン)を油圧アクチュエータにより負荷した。上面パネルおよび側面パネルについては衝撃負荷試験も行った。

以下、各々の試験項目ごとに試験概要を示す。

1) 複合材埋込み細径光ファイバセンサによる衝撃損傷検知技術の開発では、要素技術で開発した細径光ファイバセンサを上面パネルに埋め込むとともに、データを解析/評価損傷の有無や位置を同定及び可視化できるシステムを新たに開発して、実構造レベルの複合材構造における目視発見困難な衝撃損傷の有無判定、損傷の発生部位/位置の同定を行った。試験結果を表2に示すが、評価した全ての目視発見困難な損傷(BVID: Barely Vis-

図 2 損傷検知・損傷抑制デモンストレータ外観写真

ible Impact Damage)を検知することができ、複合材料実構造レベルで、目視発見困難な衝撃損傷の有無判定、発生部位及び位置の特定ができることが確認できた。

2) 統合化 AE ネットワークシステムによる実用的衝撃負荷の同定では、胴体側面パネルに取付けた8個のAEセンサネットワークを用いて、負荷された衝撃の位置と大きさを実用時と同様のノイズ環境下において同定した。

3) 分布型 BOTDR センサシステムによる広領域ひずみ分布測定では、開発した BOTDR センサシステムを

表 2 衝撃損傷検知試験結果

試験名	衝撃負荷部位	損傷状態計測結果		損傷検知システム(DDS)による解析/評価
		損傷状態	凹み深さ mm	
T01	Mid-Bay Skin	BVID	0.1	○
T02	Mid-Bay Skin	BVID	0.6	○
T03	Mid-Bay Skin	BVID	0.1	○
T04	Mid-Bay Skin	VID	1.9	○
T05	Stringer Flange	BVID	0.0	○
T07	Stringer Center	BVID	0.0	○
T08	Mid-Bay Skin	BVID	0.4	○
T09	Mid-Bay Skin	BVID	0.1	○

用いて構造全域のひずみ分布が計測出来るかを実証するために、デモンストレータ供試体の上面パネルに 2 本、側面パネルに 8 本、下面パネルに 4 本の合計 14 本の光ファイバセンサを配置し、静的試験時に、最大負荷荷重を 22 トン (216 kN) 負荷し、発生したひずみを BOTDR システムおよびひずみゲージを用いて計測した。試験結果を図 3 に示すが、供試体全域に渡って、ひずみゲージのデータと良く一致しており、本システムにより構造全体のひずみ分布が精度良く計測できることが確認できた。

4) 炭素繊維の導電性を利用したスマートパッチセンサの実証では、引張りひずみを受ける下面パネルに接着した、一方向炭素繊維の繊維破断による電気抵抗変化を利用したスマートパッチセンサにより、供試体に加わった最大ひずみを検出できることを示した。

5) SMA (形状記憶合金) 箔埋込みによる損傷抑制技術の開発では、デモンストレータ供試体の下面パネルに予ひずみを付与した SMA 箔を埋め込んだ CFRP 積層板のエリア (以後、知的エリア) 及び従来の CFRP 積層板であるエリア (以後、従来エリア) を設置して、荷重制御にて、3,000 $\mu\epsilon$ までは 250 $\mu\epsilon$ ステップ、それ以降は 200 $\mu\epsilon$ ステップでひずみを増加させ、各負荷除荷サイクルの終了毎に、下面パネルの知的エリア及び従来エリアに設けた評定部 (1 インチ孔) の端面に発生する損傷を観察した。試験結果を図 4 に示すが、従来エリアでは 2,500 $\mu\epsilon$ の負荷ひずみにおいて 2 カ所、3,200 $\mu\epsilon$ の負荷ひずみにおいて 4 カ所のトランスバースクラックの発生が観察されたのに対し、知的エリアでは 3,200 $\mu\epsilon$

図 3 BOTDR センサによる分布ひずみ計測結果

図 4 トランスバースクラック発生状況写真

で初めてトランスバースクラックが 1 カ所発生するにとどまった。さらに 200 $\mu\epsilon$ ステップでひずみを増加させて負荷除荷して各ステップ間で層間剥離の発生状況を観察した結果、従来エリアでは 4,000 $\mu\epsilon$ の負荷ひずみで層間剥離が発生したのに対し、知的エリアでは供試体が破壊した 5,200 $\mu\epsilon$ まで層間剥離が発生せず、層間剥離の発生に対しても SMA 箔による抑制効果のあることが確認できた。

6) スマート RTM 製造技術では、開発した成形制御技術を実構造レベルで検証するために、開発した知的成形プロセスを用いて製作した損傷検知・損傷抑制デモンストレータ隔壁部のアクセス用パネルを用いて目視検査及び超音波探傷試験を実施した結果、検証目標である $\Phi 5$ mm 以上のドライスポットがないことを確認した。その後、製作した圧力隔壁パネルを損傷検知・損傷抑制デモンストレータ試験供試体に組み付け、内圧負荷試験時に、内部に埋め込んだ通常径 FBG 光ファイバセンサを用いてパネル内部ひずみ測定を実施し、パネルに貼り付けたひずみゲージの出力と比較した。結果を図 5 に示すが、計測した全領域にわたり内部ひずみが精度良く計測され、内部に埋め込まれたセンサが有効に機能することが確認できた。

図5 内圧試験結果

図7 PZT センサ/アクチュエータの配置状況

表3 内部騒音低減量の試験及び計算結果比較

制御則		センサ/アクチュエータ		内部騒音低減量	
名称	概要	センサ種類/ 観測量	アクチュエータ	計算結果	試験結果
ゲイン制御Ⅰ (構造振動に対するモデル制御)	PZTセンサで計測した室にゲイン定数、重み関数を掛けた値をPZTアクチュエータへ入力。構造振動制御による内部騒音低減。	PZT/室	PZT	騒音レベル 3.6dB 使用PZT数量:480EA	騒音レベル 4.0dB 振動レベル 3.9dB
フィードフォワード制御	内/外部マイクロホンで計測した音圧から計算して、内部音圧を小さくする音場を発生するようPZTアクチュエータへ入力。音響制御による内部騒音低減。	マイクロホン/ 音圧	PZT	~6.4dB 使用PZT数量:192EA	騒音レベル 3.6dB
ゲイン制御Ⅱ (内部空気振動に対するモデル制御)	内部マイクロホンで計測した内部空気の振動状況から、各空気振動モードを抑えるように対応するPZTアクチュエータ群へ入力。音響制御による内部騒音低減。	マイクロホン/ 音圧	PZT	~5.6dB 使用PZT数量:128EA→ゲイン制御Ⅰと比べて、アクチュエータ用PZT数量を67%削減

図6 騒音・振動デモンストレータの外観写真

4. 騒音・振動低減デモンストレータ試験

図6に騒音・振動低減デモンストレータ試験供試体の完成写真を示すが、供試体は直径1.5m、長さ3.0m、板厚2.3mmの複合材(CFRP)製胴体と胴体の両端を塞ぐアルミ合金製バルクヘッドから構成し、円筒構造は周方向に4分割、長手方向にも4分割した合計16枚のCFRP複合材パネルを製作して組立てた。供試体内表面にはセンサ用とアクチュエータ用PZT(圧電材料)として本プロジェクトで開発した $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ 系PZTを5枚一組で96カ所に添付(図7参照)したが、製造期間の制約から既存PZTである富士セラミックス(株)製C-91Hも混用した。また供試体内部には騒音センサ用のマイクロフォンを設置しアクティブ・アダプティブ構造とした。

試験は無響室内の中空にワイヤで固定した供試体の側面約1mの位置から2個の大型スピーカで0~500kHzの音響を負荷し、供試体内部の騒音と構造の振動を計測

しそのデータをもとにPZTアクチュエータにより騒音と振動の低減制御を「ゲイン制御Ⅰ」及び「フィードフォワード制御」の2種類の制御則を用いて行った。

振動/騒音制御試験結果とその制御シミュレーションによる計算結果の比較を表3に示す。ゲイン制御Ⅰでは、騒音低減量の試験結果4dBに対し計算結果は3.6dBであり、試験結果と計算結果は良く一致した。一方、フィードフォワード制御では、制御シミュレーションによる計算結果で6dBの内部騒音低減を予想していたが、試験結果は3.6dBの低減と大きく異なった。これは制御対象とした3つの空気の振動モードとも計算通り10dB程度、ピーク値が低減されていたが、制御対象外の空気の振動モードで計算より大きい音圧レベルのものが存在したことがこの差異の一因であったと考える。

PZTによるセンサ/アクチュエータ一体化構造を用いたアクティブ・アダプティブ構造技術を実用化するためには、PZT数量をできる限り少なくしてシステムを簡素化し、システム重量を軽減することが望ましい。そこで、PZT数量を削減するための制御方法として、供試体内部空気振動モードの音圧分布の規則性を利用し、音圧信号を特定の振動モードに分類して、その空気モードをそれぞれ制御するゲイン制御Ⅱを適用した。ゲイン制御

II による制御シミュレーション解析に基づく騒音低減量の計算結果を表 3 の下欄に示すが、本制御では PZT 数量 128 枚のシステムで最大 5.6 dB の騒音低減量となった。

この騒音低減量は前述のゲイン制御 I の計算結果である 6.4 dB と同程度であり、ゲイン制御 I の PZT アクチュエータ使用数量のわずか 1/3 の PZT 数量で目標である 3 dB 以上の騒音低減の達成が期待できることを確認した。

以上の結果より、デモンストレータに適用したアクティブ・アダプティブ構造により、減衰係数の 20% 以上向上及び騒音レベルの 3 dB 以上低減を実証するとともに、試験で取得したデータを反映した制御シミュレーション解析により PZT 数量削減の可能性を示すことができた。

5. 結 言

損傷検知・損傷抑制デモンストレータ試験においては、本プロジェクトで開発した世界的にも注目される高

性能センサシステム等を実構造部材レベルである航空機胴体構造に組み込み、衝撃損傷の検知や構造内部の発生ひずみ検出が実機レベルで可能なことを実証した。このことは、航空機機体の軽量化を実現すると共に、航空機機体の安全性の確保が期待できるなど、その意義は大きい。

騒音・振動低減デモンストレータ試験では、本プロジェクトで開発した PZT アクチュエータ材料等を実構造部材レベルである航空機胴体構造に組み込み、実構造レベルで航空機機体内部での騒音、振動レベルが低減することを実証した。このことは、航空機利用の際の快適性が向上することを意味し、航空機需要の増大に寄与することから大きな意義がある。

本研究は通商産業省（現、経済産業省）の新規産業創出型産業科学技術研究開発制度により、新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託を受けて実施したものである。関係各位に謝意を表する。

知的応答型スパイクピンの開発

山 田 溥

1. は じ め に

高分子物質の T_g は、プラスチックは「プラス」領域に位置し、ゴムは「マイナス」領域に位置する。

まず、弾性状態から低温側に移行すると、静的条件下で柔軟性を失い始める「1 次転移点」から動的条件下で分子の回転を停止する「2 次転移点」に進み、さらにガラス状「脆化」領域に到達する。

T_g の従来概念は図 1 に示すように、製品の使用限界温度の尺度として利用されてきたが、新機能発現に応用した技術例は余り見当たらず、この T_g を積極的に活用した『知的応答型スパイクピン』の開発（図 2）を紹介します。

2. スパイクピンへの応用

地球上の氷雪は 0°C 以下の固体であることに着目し、加硫ゴム組成物の 2 次転移領域を 0°C 近傍に垂直型に制御すれば、常温では弾性ゴムとして機能し、氷点下では金属並の剛性を発現し、粉塵公害を発生しないゴム製スパイクとなる。表 1 は T_g 制御した配合例、図 3 は温度応答性、図 4 は圧力応答性を示す。

3. 新概念のスパイク

露出路面のスパイクの先端は、常にタイヤ表面と同一に座屈し磨耗も均一に進行させる。一方、氷雪路の接地面では、スパイクは剛直し、タイヤ側が座屈するため、先端部の座屈差が氷雪層を突き刺す突出量の確保となる。図 5 は、必要な時にピンを飛出させる新概念の取付け構造を示す。

Hiroshi YAMADA：ジ・エコ㈱（650-0045 神戸市中央区港島 9 丁目 1 神戸インキュベーションオフィス 106）