解説

スマートコンポジット—V.

——スマートコンポジット応用技術 (1) 航空・宇宙関連——

山 口 泰 弘*

1. はじめに

機能と構造を融合し構造物に生体システムと類似の役割をもたせる Smart Structural System (知的構造システム) は、究極の省資源省エネルギーを可能とし人と自然に優しい構造システムとして、今後の社会経済の発展を大きく支えるものと期待を集めている。その応用を目ざした研究開発は、航空宇宙、土木建設建材分野で先行しているが、さらに、自動車・鉄道車両、船舶、発電、エネルギー機器、産業機械など広範囲の産業製品に拡大しつつある。なかでも、強化材/母材から成る複合材料をホスト材料/構造とするスマートコンポジットが、素材から構造体への融合成形過程が比較的容易なことから最も注目を浴びている。

本解説では、このスマートコンポジットについて、前回迄の「概要」「研究動向」「センサ」「アクチュエータ」に引続き、航空宇宙分野での応用研究事例を中心に図を多用して紹介する。スマートコンポジットの航空宇宙製品への応用ニーズは、下記に述べる ① スマートマニファクチャリング ② ヘルスモニタリング ③ 損傷制御 ④ 振動騒音制御 ⑤ 形状制御に集約される。

① スマートマニファクチャリング

高効率・高性能な母構造/センサ/アクチュエータ統合化構造体成形技術

② ヘルスモニタリング

損傷の種類、位置、サイズを精密同定し、破壊メカニズムとセンサ情報の相関性から構造健全性をリアルタイムで自己検知・診断する技術

③ 損傷制御

損傷の発生・進展メカニズムにもとづき安全限界を自己判断し、母構造に内蔵した形状記憶合金等のアクチュエータにより損傷の拡大を防止する破壊制御

技術

④ 振動騒音制御

分布系センサ/アクチュエータにより能動適応的に振動や騒音を低減する構造システム技術

⑤ 形状制御

内蔵型分布系アクチュエータにより外部環境に適応して最適形状に制御する可変柔構造システム技術

以上のスマートコンポジットの構成と相関を知的機能材料も含め図1に示す。

2. 航空機への応用

軽量高強度高剛性の構造材料を必要とする航空機へ複合材料の適用が拡大しているが、さらに整備も含めたコストの低減と安全性・性能の向上が求められている。このための技術として、複合材料の中にセンサ、プロセッサ、アクチュエータを融合化し構造の健全性を監視・保証したり構造の形状や振動音響を制御するスマートコンポジットへの期待が高まっている。スマートコンポジットの航空機への応用部位を図2に示す。

このうち、複合材料の成形素材の中にセンサを埋め込み、複合材の誕生(成形加工)段階から機体としての退役迄の監視を行う構造・材料健全性監視技術(前述の① スマートマニファクチャリングと② ヘルスモニタリングの組合せ)は最も実用化に近い技術である。特に、スマートマニファクチャリングの一部であるインプロセスモニタリングは従来から研究開発が進められている。複合材料成形中の温度・圧力に加えマトリックス樹脂の粘度・硬化度等の物理化学反応迄もオンラインでモニタして成形条件の最適化と硬化時間の短縮を図る手法で、製造コスト低減と製品の品質向上を目指す技術である。すでに、複合材料成形時にセンサを外部に装着してモニタする手法については、樹脂の硬化反応を誘電特性・電気抵抗の変化として把握して最適加圧時間を設定する方法などが試行されている。

このようなゆりかごから墓場までの管理を目指すスマ

* Yasuhiro YAMAGUCHI: 三菱重工業(株)名古屋航空宇宙システム製作所 研究部 (455 名古屋市港区大江町 10)

図1 スマートコンポジットの構成と技術の相関¹⁾ 図2 スマートコンポジットの航空機への応用²⁾

ートマニファクチャリングとヘルスモニタリングは、構造材料中に挿入されたセンサにより、製造中の品質管理のみならず運用中の荷重、歪、温度、欠陥の発生等を監視し、突発的な破壊による事故を防ぐとともに定期点検回数を減らせるので整備コストの低減にも効果がある。また、航空機個機ごとに寿命を管理し機体の寿命を最大限に活用することにより、ライフサイクルコストの低減と省資源・省エネルギーを図ることができる。図3にヘルスモニタリングの効果を、図4に点検・整備のひん度低減例を、図5に光ファイバ埋込み試行例を示す。

このヘルスモニタリング手法は、スマートコンポジットとしての複合材料構造のみならず、金属構造経年航空機対策としての実用化研究も活発である。

さらに、複合材料中に形状記憶合金などのアクチュエ

ータを埋込み、はくりやき裂の欠陥が生じた時に検知と同時に形状記憶効果により欠陥の進展を防止する損傷制御技術については、未だ、基礎研究段階で航空機への実用研究例はみられない。損傷制御の概念と課題を図6に示す。本技術は航空機疲労設計の革新的コンセプト(図

図3 ヘルスモニタリングの効果²⁾ 図4 ヘルスモニタリングによる点検・整備の低減²⁾

7) として今後の研究の発展が望まれている。

航空機構造を能動・適応的に変形させたり剛性やダンピング特性を変化させる形状制御・振動騒音制御技術は、スマートコンポジットに最も期待される。複合材料

図 5 ヘルスモニタリング試行例²⁾

図 6 スマートコンポジット損傷制御の概念と課題³⁾

図 7 航空機疲労設計コンセプトのスマートコンポジットによる革新化³⁾

と一体となった圧電材料，形状記憶材料，電歪磁歪材料などの機能材料により，静的動的に構造を変化させ，最適な空力形状の翼として振動や騒音を低減させる技術である。

すでに，翼型の能動制御については基礎的研究が進められており，金属翼を油圧アクチュエータで制御したり形状記憶合金ワイヤで制御する手法が実験室レベルで評価されている（図 8）。複合材翼については，ヘリコプタ

図 8 形状記憶合金ワイヤ利用翼型制御例⁴⁾

図 9 ヘリコプタブレード スマートコンポジット応用例⁵⁾

ブレードでの研究開発が最も進んでいる。 piezoceramics や形状記憶合金のアクチュエータ材を GFRP 積層間に配置して制御し、ブレード全体をねじったりフラップを設けて翼型を部分的に変化させて、空力特性や振動特性の最適化を目指している。応用例を図 9 に、振動低減の効果例を図 10 に示す。一部ではすでにこのスマートロータブレードで風洞試験、回転試験を終え、実機レベルのホバリング試験迄進んでいる例もある。また、ごく最近の国際学会で⁶⁾、小型航空機の翼後縁への適用を目的としたスマートウィングの風洞模型が展示されるなどこの分野の実用化研究が活発となっている。

実用化のためには、複合材料と機能材の一体化技術をはじめ多くの課題が山積しているが、センサ・アクチュ

エータなどの機能材に負うところが大きい。大きさ・重量・強度剛性・耐環境性などに加え、特にアクチュエータ材には、高出力・大変位・高応答(周波数)などの基本特性にブレークスルーが不可欠である。

将来航空機の代表である超音速旅客機(HSCT)でも、スマートコンポジットは HSCT を成立させるための、キーテクノロジーのひとつとして認識され⁷⁾、客室内騒音低減、ヘルスマニタリング、構造とアンテナの一体化、フラッタ抑制などの研究開発が急務とされている(図 11)。

図 10 スマートコンポジットロータによる振動低減³⁾

図 11 HSCT へのスマートコンポジット(知的構造)の適用

図 12 宇宙構造物大型化・軽量化とスマートコンポジットへのニーズ²⁾

図 13 ピエゾ素子利用制振実験例⁵⁾

3. 宇宙機器への応用

宇宙機器では宇宙ステーション及び軌道上実験等の開発の進展にともない、軽量化・耐環境性・低コスト化はもとより宇宙インフラの大型化、一方では衛星機器の機能集約小型化等のニーズが急増している。一例として大型化軽量化でのニーズを図12に示す。これらの技術要求を実現する革新的技術のひとつにスマートコンポジット構造が考えられている。特に、宇宙構造物で課題とされる振動制御と形状制御での効果が最も期待されるの

で、一部ではすでにピエゾ素子を用いたトラス構造物の制振実験などの研究が進められている（図13）。将来の宇宙構造物適用構想例として、大型構造物の太陽発電システムと小型構造物の人工衛星を図14と図15に示す。

一方、宇宙輸送機分野でもスマートコンポジット応用の動きが活発になっている。再使用型ロケットタンクのヘルスマonitoring（図16）や打上げロケットフェアリングの音響・振動制御（図17）などが具体的に検討されており実用化が近いものと考ええる。

図14 太陽発電システムへのスマートコンポジットへの応用³⁾

図15 高性能（＝機能集約型）小型衛星システムにおけるスマートコンポジットの適用イメージ

図 16 再使用型ロケット DC-XA 複合材タンクヘルスマニタリング⁶⁾ 図 17 ロケットフェアリングの音響・振動制御¹⁾

4. おわりに

以上スマートコンポジットの応用として、筆者が関与している先導研究における航空宇宙分野でのニーズを主体に研究例を混じえ紹介した。したがって、個々の事例での定量的数字を示すことは避けた。詳細は参考文献4)などを参照されたい。2項でセンサ・アクチュエータ材への要求について若干触れたが、スマートコンポジットを航空宇宙構造に応用するには、ブレークスルーすべき技術課題が多い。このため欧米では、すでに国家プロジェクト (MONITOR, Smart Wing プログラムなど) としてスマートコンポジットの航空機への実用化を目指

した大規模な研究開発が開始されている。幸い国内でも大型プロジェクト化を目指す動きがあり、また、国際的な学会も年々盛んになっているなど、研究者も学際領域的に増加している。今後の発展に大いに期待し、スマートコンポジットエアプレーンの実現を夢みるものである。

最後に、国際学会動向など最新の情報を提供頂いた関係諸氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) NEDO H8fy 先導研究報告書, NEDO-PR-9611, NEDO (1997).
- 2) NEDO H7fy 先導研究報告書, NEDO-PR-95011, NEDO (1996).
- 3) 知的構造システム国際シンポジウム講演論文集, NEDO (1997).
- 4) 航空機へのインテリジェントコンポジットシステムの適用に関する調査報告書, 日本機械工業連合会 (1995).
- 5) 米国・カナダにおける知的構造システム研究開発の現状と研究協力の可能性, 日本貿易振興会 (1995).
- 6) SPIE'S 4th Annual on Smart Structures and Materials, SPIE (1997).
- 7) D.L. Grande: Application of smart materials & structures to a high speed civil transport, First US-Japan Workshop on Smart Materials and Structures (1995).