紹介

第9回国際複合材料会議報告 (The 9th International Conference on Composite Materials)

石川 隆司^{*1}, 武田 展雄^{*2}, 増田 千利^{*3}, 山口 泰弘^{*4}
 影山 和郎^{*5}, 笠野 英秋^{*6}

序および全体報告

今回スペインの首都マドリードで開催された ICCM-9 は、発表論文約 640、参加者約 850 名という大会議に成長し、5 会場並行セッションでも朝 9 時から夜 8 時まで昼食休憩はおろかコーヒープレイクもなくぎっしり講演がつまっているという、信じられないほどのハードな会議であった。講演予稿集も分厚いものが全 6 冊となり、持ち歩くのも大変であった。この ICCM-9 について、本号では、6 名の方をお願いして、ご出席セッションの中から印象に残った講演、目新しい講演等を中心に報告いただいた。本報告が本会議に出席できなかった会員諸兄の御参考になれば幸いである。また、ご多忙中にもかかわらず執筆を快諾くださった報告者各位には衷心からお礼申し上げます。

(邦文誌編集委員長 石川 隆司)

Numerical Modelling 等, Buckling, Compression および CMC 関係セッション報告

今回の ICCM-9 では、最近の報告者の興味を反映して、主に標記の分野を中心としたセッションを聴講した。これらの中で印象に残った発表について報告する。第三者からご覧になると、かなり変わったセッション選択と思われるかもしれないが、ご了解いただきたい。

Numerical Modelling, Thick Laminates

一般講演の最初に、VPI から Texas A & M に移っ

た著名な J.N. Reddy らの講演があった。彼らの開発した積層理論を用いて有限要素によるマトリックスクラックや層間剝離を平均的に取扱う破壊進行解析に適用しようというもので、大変趣旨の明解な講演であった。

それから、これらのセッションあるいは Strength and Failure を通じて今回感じた明瞭な傾向は、特に米国の発表においてであるが、潜水構造物の複合材化に関連したものと思われる曲面厚肉複合材構造物の圧縮強度に関連した論文の数が相当多かったことであった。ONR (海軍研究局) の研究管理者も相当来ており、国防研究斜陽の米国でも、この分野はまだ影響が少ないようである。

これらのセッションに入れられていたが、フランスの Metz 大学のグループの圧縮挙動に関する研究も興味深かった。この研究は CFRP の圧縮曲げが単なる圧縮よりもはるかに強度が高く出るという実験事実を端を発しているようである。ただ、著者らはこの説明をすべて 0° 方向繊維の圧縮座屈に求めているようであるが、自ら認めているように、それでは実験結果の説明はできない。発表者は口頭では触れていたが、繊維特性の非線形性を考慮する必要があるものと思われる。ただ、彼等の呈示していた実験結果のうちで、積層構成によって圧縮歪みがかかなり変わるという点は深く考えさせられた。

さらに、Thick Laminates のセッションでは、上述の動きに関係のある報告が ONR の Rajapakse および VPI の Hyer からなされた。後者は厚肉の円筒に成型等によって板厚方向に「しわ」ができたとき、強度すなわち限界外圧がどう変わるかというもので、いくつか興味深い点があった。

Buckling, Compression

これらのセッションの中で特に興味を引かれたのは、Kentucky 大学の Tauchert が報告したいくつかの高次板理論を用いた積層板の熱座屈解の比較である。彼自身、すべての変位成分が板厚方向座標の三次式で表され

^{*1} Takashi ISHIKAWA: 航空宇宙技術研究所,
^{*2} Nobuo TAKEDA: 東京大学先端科学技術研究センター, ^{*3} Chitoshi MASUDA: 金属材料技術研究所, ^{*4} Yasuhiro YAMAGUCHI: 三菱重工㈱名古屋航空機製作所, ^{*5} Kazuro KAGEYAMA: 東京大学工学部, ^{*6} Hideaki KASANO: 拓殖大学工学部

る最も一般的な式を導き、これと既提案理論を比較している。結論は、一様温度場であれば Reddy の理論で充分なこと、Chang の理論は間違っていることである。これらのセッションでも VPI の Hyer のグループがなかなか面白い仕事をしているのが目についた。そのうちの一つは実用的な有孔板の座屈/破壊問題の解析と実験の比較であった。モード遷移そのものについては予測ができていないが、二つのモードに対する相対負荷変位と相対荷重値の曲線の予測は実験結果とそれなりに一致するという結果であった。これからまだ研究の進展が期待できる。

CMC

冒頭でも述べたように、先回の ICCM と比較して、講演数でも著しい伸びを示したのはこの分野である。最終日の昼頃からスタートするという悪条件にもかかわらず、かなりの聴衆を集めていた。まず目についたのは西独の Dornier 社の Haug らによる Nextel 糸を用いた UD 積層の CMC の製造と実機評価である。この材料について文献では見たことがあったが詳細を聞くのは初めてであった。発表者みずから認めるように、力学性能は強度 170 MPa 程度、使用温度域 900°C とそれほどではないが、相当の大きさの部品の製造に適していること、そして何より、実際のエンジン排気ダクトを製造し、実機に装着して評価を行っている点で、研究の進展ぶりを感じた。他には報告者の旧師である Delaware 大の Chou らが CMC の非線形挙動のシミュレーションの結果を発表しており、参考になる点がいくつかあった。報告者もこのセッションで 3 次元繊維強化高分子焼成法の CMC の力学挙動の発表を行い、手前味噌かも知れないが、質問の殺到ぶり、発表後に何人もから取囲まれたことなどから見て、相当のインパクトを与え得たものと思っている。ただ、時間的に別の日であったらさらに衝撃は大きかったかもしれない。本セッションを通じてもう一つ感じたのは、例えばオランダからの発表に見られたように、少なくともヨーロッパでは長繊維 CMC の力学的な研究をしようとするときにも、ほとんどすべて SEP 社製材料に頼りきっているところが見られ、ガラスマトリックスなどを使用するケースも多い米国の場合との歴然とした違いが見られたことである。報告者らの材料あるいは我が国の他材料が、このような事態を打破するきっかけを与え得れば大いに結構なことだと考えた。

(石川隆司)

スマート複合材料ほか

スマート複合材料関連では、Stanford 大の Springer が招待講演“スマート製造とスマート構造用埋め込みセンサ”において、複合材料内のひずみと温度を Fabry-Perot センサを用いて測定する原理と、センサ出力とひずみ・温度を関係づけるモデルおよびそれに基づく計算コードについて概説した。エレガントな定式化が目をついた。簡単な例についてモデルの妥当性を証明する実験結果が示されたが、二つ以上の測定量がある場合などについては今後の課題である。Drexel 大の El-Sherif and Ko は“光ファイバセンサを組み込んだスマート繊維複合材料”において、光ファイバセンサを内含した 3 次元組物複合材を製作し、彼らの開発した spatial modulation 法が適用できること、感度と動的測定範囲を上げるにはセンサの幾何学的位置を考慮すべきことを報告している。蒙 Monash 大の Tapanes らは“構造の実時間非破壊評価への複合材料パッチを用いた光ファイバセンサの応用”において、光ファイバセンサを埋め込んだ CFRP パッチを通常のひずみゲージのように構造に貼り付け、ひずみ、振動などを測定する方法を提案し、その利点を報告している。また McDonnell Douglas 社の Gackstatter らは“複合材料構造用埋め込みセンサ”において、構造健全性をモニターするための実用化研究を報告している。台湾成功大学の Jenq and Chang は、“振動、衝撃直接測定用ピエゾフィルムセンサの特性評価”において、3 kHz 以下の低周波数域の実験結果も説明できる定式化を行っている。その他、スマート製造法関連では、“PMR-15 の知的キュアプロセッシング”(Hart ら, William and Mary 大)、“積層複合材料の知的プロセッシング”(Kline ら, Oklahoma 大)、“光ファイバを埋め込んだカーボン/エポキシ積層材の製造に及ぼすキュアプロセスの影響”(Ferrer ら, Valencia 工科大)、“FTIR スペクトロスコーピーに基づく光ファイバセンサを用いた先進航空宇宙用複合材料の実時間、その場キュアモニタリング”(Tapanes ら, Monash 大)が報告された。複合材料構造のひずみ、温度応答や製造過程の知的モニタリング、知的コントロールなど、この分野への注目度がかかなり高いことを感じた。

強度・破壊関連では、Purdue 大の Chu and Sun は“中央円孔を有する積層板の初期破損と最終強度に及ぼす自由縁、サイズ効果”において、簡便な解析法を提案している。まず、off-axis 荷重下の平滑試験片の強度に及ぼすサイズ効果を実験的に求める。つぎに、この強度

と孔まわりのフープ応力を比較することにより、孔上の破損開始点を決め、対応する強度を初期破損強度とする。その後の破損進展は古典的積層破損理論により行う。彼らは擬似等方性積層板と直交積層板の実験結果により理論の妥当性を示している。孔まわりの複雑な3次元応力分布による破損解析が必ずしも妥当な結果をもたらすとは限らないことが指摘されている。東レの北野らは“CFRP 直交積層板の Transverse Cracking に及ぼす試験片端面処理効果”において、端面処理が Transverse Crack 発生密度、最終破損強度に大きく影響することを示し、定性的説明を行っている。

衝撃関連では、スタンフォード大の Lee and Chang は“高靱性化界面をもつ積層複合材料の衝撃損傷抵抗”において、数種の高靱性化 CFRP 材について衝撃による層間剝離の実験結果と FEM 計算結果との比較を行っている。米陸軍寒域研究所の Dutta らは“積層複合材料のエネルギー吸収に及ぼす低温の効果”において、ホプキンソン棒法を応用した短時間の横衝撃を受ける擬似等方性 CFRP 積層板の衝撃実験結果を、上記同様、FEM 計算結果と比較し、低温効果を説明している。また、仏 CER de Bordeaux の Lataillade らは“直交積層材の高ひずみ速度下の損傷試験-層内剪断応力の効果”において、中ひずみ速度下で油圧式試験機を、高ひずみ速度下でホプキンソン棒装置を用いて、 $[\pm 45]_s$ 材の損傷進展過程に及ぼす非線形の層内剪断応力の効果を明らかにしている。単純な応力状態での衝撃試験により、計算機コードにも使える構成方程式が得られるとともに、衝撃パルスの制御により損傷進展過程も観察できることは注目すべきである。

(武田展雄)

金属基複合材料関係

1. ま え が き

ICCM9 における金属基複合材料 (MMC) 関係の報告はブローチングの1巻に納められているだけでも102件に達し、かなり多いと感じた。地理的關係から当然ではあるが、ヨーロッパからの発表が多かった。なお内容としては1) MMC の挙動 (論文数 46件)、2) 疲労、摩耗、クリープ (論文数 12件)、3) 破壊 (論文数 12件)、4) 界面 (論文数 7件)、5) プロセス (論文数 25件) に分けられていた。ここでは各セッションの内容と特に個人的に印象に残った論文に関しては以下にまとめてご報告したい。

2. 内 容

2.1 MMC の挙動関係

ここでは上記の2)、3)、4)、5)に含まれない MMC の特性等が含まれている。引張り変形および特性、衝撃特性、高温変形、熱処理の影響、濡性、弾性率計測、エロージョン、変形の解析、粒子の溶湯への進入解析等である。また強化材で分けるとタイトルからだけでも粒子分散強化 MMC や不連続繊維強化 MMC に関する論文が約20件、内容的に見ると合計33件と非常に多いことがわかる。

特に興味を引いたのはアルミナ繊維強化アルミ MMC の繊維廻りのボイド生成に及ぼす温度の影響を検討した報告である。これによるとまず当然であるがひずみ量が増すと、ボイドの量が増加する。また同一ひずみ量に対して温度が上昇すると増える場合と、減少する場合がある。球状アルミナの場合には90度付近で最大となり、220、350度では室温よりボイド形成量が減少して最小になっている。また粒子の含有量が増すとボイド量も増加する傾向が報告されている。角ばった粒子と球状粒子の場合でのボイド形成に及ぼす影響は前者のほうが同一ひずみに対して多い傾向があるが、あまり明瞭ではなかった。また粉末法と鋳造法では前者の方が同一ひずみに対してボイド量は多かった。

一方粒子分散アルミ基 MMC の応力下での内部損傷を中性子線を用いて評価している報告があった。これによるとアルベクト比により損傷の度合いが異なること、また3.7% ひずみでは約20%の粒子が破壊していることなどが示されている。

実用化のために問題となる接合技術に関する報告があった。3 μm の SiC 粒子を25、30、35% 含有する A 2124 MMC を用いて拡散接合し、せん断試験により強度を評価している。その結果含有率が増加するとせん断強度は低下する傾向になっていた。

2.2 疲労・摩耗・クリープ関係

ここでは摩耗関係が3件、疲労関係が3件、クリープ関係が2件、疲労・クリープ関係が1件、引張り特性1件、傾斜機能材料が1件ある。

材料としては短繊維強化 MMC が3件、不連続繊維強化 MMC が3件であった。この中で特に興味を持ったのは $\sigma\text{-SiC/Ti-6Al-4V}$ MMC の疲労き裂成長特性を調べた報告であった。これらは日本ではあまり報告がない例である。繊維の長手方向に対して直角に付した切り欠き底から発生したき裂の成長状況を観察し、応力条件、繰返し周波数等との関連で調べた。最小応力と最大応力との比

で表される応力比 R が 0.1, 0.5 の 2 条件で調べた結果、それぞれき裂が繊維により妨害されて停止してしまい、その後応力の繰返しにより成長が認められない場合と、切り欠き底から発生したき裂が急速に成長して破断に到る場合に分けて最大応力拡大係数 K_{max} を求めた結果、き裂長さ a と板幅 w との比が 0.05~0.25 の範囲で a/w によらずほぼ一定で、それぞれ約 27.5 および 29.5 MPa/ $m^{1/2}$ あった。これから両者の差は約 2 MPa/ $m^{1/2}$ と非常に狭いことが分かる。これは実験を行う上で非常に注意を要する。またき裂の長さを正確に測定することが重要となるが、その点に関する質問が多かった。

この他にウイスカ及び粒子強化 Ti-6-4 MMC のクリープひずみ速度をしらべた論文がある。これではウイスカ強化 MMC がマトリックス材に比べて、クリープひずみ速度が 1/2 まで低下していた。なお粒子強化 MMC ではひずみ速度の低下は非常に小さい。

2.3 破壊関係

ここでは疲労破壊、恒温酸化、破壊プロセス、変形、残留応力、AE 計測、等が含まれている。このうち他の分類に含まれると思われる論文がかなり多い。特に目立ったのは、チタン合金系の MMC に関する報告が多いことである。Ti-6-4, Ti β 21S, Ti-24-11, Ti $_3$ Al, TiAl 等をマトリックスとした MMC である。疲労のところで触れたが、マトリックスの影響を見たほかは、類似の特性を調べた報告もあった。疲労き裂成長特性を検討するには、試験片内部のき裂長さも含めて調べるかに依存していると思われた。

このほかに高温酸化特性を $Al_2O_3/TiAlMMC$ で調べた例が報告された。それによると、 ZrO_2 を含む場合には酸化速度が大きいが、純アルミナ繊維ではそれは小さくなる。酸化の機構についても検討している。

この他に残留応力の評価に中性子線を用いた例が報告されている。これではかなり厚板の材料でも測定可能である点が、従来の X 線応力測定法と異なる。残留応力と疲労き裂の開閉口挙動との関係を検討していた。

2.4 界面

ここでは製造段階での界面反応、界面特性の疲労き裂成長挙動に及ぼす影響などに関する報告があった。製造段階での界面反応を極力抑えるために、短時間で MMC を製造する方法の提案があった。また界面特性を熱処理により変え、pull-out 法で評価し、疲労き裂特性との関連を検討した。その結果 peak-aged 材ではき裂成長速度が増し、破断までの寿命が減少していた。

2.5 製造方法

MMC の製造法としては高圧鋳造法, comp casting 法, アトマイジング法, 超音波浸透法, in-situ 法, spray co-deposition 法等に関するものが報告された。これらはいずれも日本でも、よく知られた方法と考えここではその詳細についての記述は省いた。

3. まとめ

以上のように MMC に関してはかなり多くの論文が報告された。このために 1 会場を使って期間中毎日報告がなされ、大変驚いたというのが実感であった。このほか Invited lecture, smart materials の中でも MMC に関するものがあつた。

(増田千利)

航空機応用関連のセッションを中心に

1. はじめに

約 600 件の講演のうち Application のセッションでは 30 件程度と全体に占める割合は少なかったが、特別講演・招待講演 14 件のうち 7 件は Application に関するもので、出席者も多く関心を集めていた。このうち筆者の専門から聴講した航空機関連のなかで、印象に残った講演 (表 1) について概要を紹介する。

2. 各 論

- (1) P. Muñoz (CASA) らによる複合材料部品製造工程の自動化 (表 1-1)

表 1 航空機応用関連の代表的講演

- 1) P.L. Muñoz, Automation of processing of composite materials.
- 2) J. Brandt, Present and future of composite materials for aeronautic applications.
- 3) J. Brandt, The use of high-performance thermoplastic composite for structural aerospace applications.
- 4) H. Fenbert, Composites in commercial aircraft—a production cost prospective
- 5) K. Schreiber, The Boeing 777 empennage.
- 6) M. Van Tooren, Towards an all composite aircraft fuselage.
- 7) C. Carre, Discontinuous reinforced aluminium matrix composites for aerospace applications.
- 8) R.V. Praag, Fiber-Metal Laminates, workshop properties.

図1

全講演のトップをきり地元スペインの航空機メーカー CASA から、エアバス A330/340 の尾翼での実例を示しながら低コスト化のための自動化技術の紹介があった。CAD による設計、治工具設計、材料管理を含む成形プロセス、機械加工、検査の全工程を自動化（図1）することにより、従来の金属部品と同様のコストで製造できるとしており、自動化のためのキーポイントは設計の適正化と生産量にかかっていると提言している。スキンパネル用のストリング・リブを Hot forming で自動化したり、オートクレーブ成形後の脱型や治具の清浄作業をも自動化している点は、低コスト化の上で注目に値する。こうして製作された水平尾翼のスキンパネルの実物が、ICCM-9 会場のコンベンションセンタの入口に展示（図2）され出席者の注目を集めており、地元開催企業の意気込みを感じた。

(2) J. BRANDT (DASA) による複合材料応用の現状と将来動向（表 1-2）

A310, 320, 330, 340 での複合材料適用の実例を示しながら将来への予測がなされた。エアラインからの機体取得価格・維持費の低コスト化ニーズが高まっているので、複合材部品に対しての要求も従来の重量軽減第一の

図2

考え方から、製造コスト・メンテナンスコスト低減が第一に変わってきており、そのための設計・材料/プロセス上の工夫が必要としている。特に民間機構造用複合材料には、素材の低コスト化・易成形化・損傷許容性向上の課題を提示し、これをクリアできれば、主翼や胴体への適用も可能と述べ、計画中の UHCA（スーパージャンボ）も複合材料の適用が不可欠としている。

(3) J. BRANDT (DASA) による熱可塑性複合材の応

図3

用 (表 1-3)

CF/PEEK を中心とした紹介があった。戦闘機の翼前縁や扉に適用されているものの、高材料コスト・難成形性の点から予測された程度応用は進んでいない。単純形状にする設計や Thermoforming・Textile Preform などの成形法の開発がさらに必要と課題を提起している。

(4) H. FENBERT (Boeing) による民間機用複合材料部品の製造コスト (表 1-4)

727 から最新の 777 に至る複合材料の紹介に引き続き、民間機で重要な製造コスト低減について論じた。適用拡大のためには、アルミ合金製と同レベルのコストにすることが不可欠とし、製造法を十分考慮した設計や自動化プロセスの開発、統計手法を十分活用した品質管理により可能としている。また、開発費低減のための大学や研究機関との共同研究の促進、および地球環境保護や作業者の健康を勘案した材料・プロセスの適用も今後の課題として強調した。今後このような動きが加速されるものと予測される。

(5) K. SCHREIBER (Boeing) 氏による B777 複合材尾翼

'95 年運航を目標に開発が進められている B777 の複合材尾翼のうち水平尾翼を中心に、設計、材料・成形加工法、開発試験 (図 3) の紹介があった。材料には衝撃損傷に強いタフ CFRP (東レ製) をスキンパネルとスパーに用い、自動成形しやすい設計上の配慮により低コスト化を図るなどし、従来の金属製と変わらぬコストで、20% の重量軽減を達成している。このような低コスト化のための設計が積極的に採用されており、積層パターンや部品形状の単純化、目視点検を重視した配管類の配置、ファスナによる修理など注目すべき点が多い。

3. その他

その他では、M.V. TOOREN (Delft 大学) によるサン

図4

ドイッチ構造航空機胴体の提案 (表1-6) と R. PRAAG (Delft 大学) による繊維/金属積層材 (Fiber Metal Laminate) の航空機部品適用成形加工法研究 (表 1-8) が興味を引いた。特にこの FML 材は、金属より軽く複合材より安価なことを特長に耐損傷許容性、疲労強度に優れることから、航空機胴体への適用を目指した多くの研究発表 (Hybrid のセッション) があった。一方、筆者が「Void Behavior in Composite Processing」と題して講演発表した Processing のセッションでは、同様の研究発表が Dr. Wood (英, Surry 大学) から行われたり、厚板成形や熱可塑成形をモデル解析する研究の紹介があり、従来経験を主にノウハウ的に扱われてきたプロセスの分野にも、より科学的手法での現象解明の研究が増加していることが伺えた。

また、以上は樹脂系複合材料の応用に関するものであるが、その他のマトリックス系の航空機応用については、C. CARRÉ (Aerospatiale) 氏による金属系複合材料 (表 1-7) が興味深い。SiC 粒子強化アルミ系で、比剛性が高く、加工が従来の金属同等に扱える特長を生かし、剛性標定の各種ヘリコプタ部品 (A350 Non Rotating Star, TIGER Housing) へ適用し重量軽減とコスト低減 (チタン比) を図っている。

4. おわりに

以上筆者の印象に残った航空機応用関連の講演を紹介した。航空機業界の動向を反映して、今まで重量軽減第一で優遇されてきた複合材料も低コスト化が適用拡大のキーワードとなっていることが改めて認識された。前述の FENBERT 氏の講演にもあったように、低コスト化を図るための、学会をはじめとする大学・研究機関、産業界での国際共同研究・開発がますます重要となると思われる。この点でも本 ICCM は非常に有意義であり、今後航空機関係者の参加を是非奨めたい。最後に会議の

進行に大活躍されたスタッフを紹介(図4)して終わりとする。

(山口泰弘)

強度と破壊

強度と破壊を狭義に考えても、関係するセッションは Strength and Failure, Fracture, Delamination, Damage Tolerance, Impact and Dynamic, Compression および Fatigue の七つが挙げられ、Proceedings に掲載された論文数は合計 112 編となる。限られた紙面では到底すべてを紹介できないので、筆者が興味を持っている層間高靱化と混合モード破壊関連の論文を紹介したい。

インターリーフあるいはインターレイヤによる層間の高靱化に関する研究

インターリーフ(熱可塑性あるいは熱硬化性樹脂フィルム)あるいはインターレイヤ(熱可塑性樹脂の微細粒子とベース樹脂の混合層)をカーボン/エポキシ等の熱硬化性樹脂系複合材料の層間に挿入した場合の層間の靱性の向上については、すでに Isai, Sela, Carlsson, Akey らの高靱化メカニズムに関する研究が知られており、Dow らはインターリーフ、インターレイヤの種類が有孔板の圧縮/引張り特性、CAI 特性に及ぼす影響を調べている。ICCM/9 では、さらに応力勾配の影響、衝撃疲労特性、衝撃損傷解析モデル、静的/疲労特性に関する研究成果が報告されている。

Lagacy らは、応力勾配のある場合のはく離損傷進展に及ぼすインターリーフの影響を調べている("Suppression of Delamination in a Gradient Stress Field in Graphite/Epoxy Laminates", Vol. VI, pp. 705)。偏心圧縮荷重を受ける帯板試験片を用いて、板厚方向に応力勾配を生じさせ、樹脂割れと層間のはく離の発生と成長がインターリーフによって大幅に抑制されることを示している。ただし、最終強度についてはインターリーフ挿入による板厚の増加を考慮する必要があり、板厚増加の理由としては、インターリーフによる増加ばかりでなく、板厚方向の樹脂流れがインターリーフによって制限されるためカーボン/エポキシ層の繊維体積含有率が低くなる効果も無視できない。また Tanimoto ら (Vol. VI, pp. 714) は疑似等方積層のインターリーフ材の静的破壊強度と疲労特性を調べているが、日本からの発表であり、ここでは省略する。

Yuan と Karger-Kocsis は、シャルピーおよび落錘式衝撃試験機を用いて、インターリーフがカーボン/エ

ポキシ (0/90) 積層板の衝撃疲労損傷と寿命特性に及ぼす影響を調べている ("On the Impact Fatigue Performance of Interleaved Cross-ply CF/EP-Laminates", Vol. VI, pp. 739)。落錘衝撃試験結果によれば、インターリーフの挿入される層間の増加とともに衝撃疲労寿命が増大すること、ハンマー先端の曲率半径の小さいシャルピー衝撃試験はく離損傷を生じさせるという観点からは適切な試験方法ではないとしている。

Lee と Chang は、3次元衝撃解析を行っている ("Impact Damage Resistance of Laminated Composites With Toughened Interfaces", Vol. V, pp. 307)。熱硬化性インターリーフおよびインターレイヤで高靱化したカーボン/エポキシ積層材 (T300/976+FM300 と T800H/3900-2) の衝撃損傷面積と衝撃速度の関係をカーボン/PEEK と比較しながら解析している。

Straznicky ら ("Impact Damage in Composite Laminates", Vol. V, pp. 386) はインターレイヤ強化の T800H/3900-2 の衝撃変形挙動と損傷挙動について実験と有限要素解析による比較検討を行っている。Tsai-Wu モデルと動的有限要素による衝撃変形/損傷過程の数値シミュレーション結果は実験結果とおおむね一致している。

混合モード層間破壊特性

従来の層間破壊特性に関する研究は、純粋なモード I あるいは純粋なモード II の荷重が単独に作用する場合がほとんどであった。しかし、設計上は複数のモードが同時に作用する混合モード層間破壊特性が重要と考えられる。Reeder と Crew による MMB (Mixed Mode Bending) 試験方法の考案以来、モード I と II の混合モード荷重下の層間破壊特性が明らかにされつつある。ICCM/9 から混合モード層間破壊関係の報告を紹介する。

Hong らは、上下分割はりの板厚を変えた変形 DCB 及び変形 ENF 試験片の有限要素解析を行っている ("Evaluation of Strain Energy Release Rates of Mixed-Mode Fracture Specimen for Laminated Composites", Vol. V, pp. 779)。エネルギー解放率およびモード比に及ぼす板厚比の影響を調べ、分割はりの板厚が異なる場合、有限要素解析と比較しては理論の解が必ずしも有効でないことを示している。

Benzeggagh らは、MMB 試験の有効性をガラス/エポキシ材を用い、種々の視点から検討している ("Mixed Mode Delamination in Unidirectional Glass/Epoxy Composite under Static and Fatigue Loading", Vol.

VI, pp. 752). 混合モードエネルギー解放率の計算方法, はく離き裂長さ評価へのコンプライアンス法の適用, 疲労試験への適用とはく離き裂進展速度のコンプライアンス法による評価等 MMB 試験片の静的および疲労試験への適用可能性を検討している。

(影山和郎)

Impact and Dynamic

このセッションで実際に講演された論文は 21 件であり, 大別すると, 貫通を含む高速衝撃ならびに高速ひずみ速度下での力学挙動 (5 件), 低速衝撃による損傷や衝撃特性の評価 (12 件), 応力波伝播の純理論解析 (2 件), 界面き裂進展の動的解析 (1 件) および応用 (1 件) である。これらの研究では主として CFRP と GFRP の積層平板を対象とし, その内容は, 高速衝撃における残存貫通速度の予測法, 高ひずみ速度下の応力-ひずみ関係, 衝撃試験における動的効果とスケールアップ効果, 界面の高靱性化法, 衝撃吸収エネルギーに及ぼす温度の影響, 低速衝撃におけるはく離損傷形成の FEM 解析や顕微鏡観察, 層間破壊靱性と衝撃特性の相関性, 損傷発生を解析的予測法, 衝撃後の GFRP 積層円筒の残存座屈強度, GFRP チューブのクラッシュアブソーバーへの応用などきわめて多岐にわたっている。そこで, ここでは, 筆者の興味と関心だけを基に印象に残った講演を紹介する。C.T. Sun らは積層平板の高速衝撃による貫通過程は準静的な場合と本質的に類似であるという仮定を基に, パンチによる静的貫通試験より得られる荷重-変位曲線から, 高速衝撃物体の貫通後の残存速度を予測する式を提示した。そして, この式から予測される残存速度は実験値よりも少し大きくなるが, 板厚が薄くなるにつれて両者の差は小さくなり, 簡便かつ安価な近似式として利用できることを明らかにした。S.R. Swanson は衝撃試験における動的効果とスケールアップ効果について考察した結果, 衝撃物体の質量と有効構造質量の比は動的効果を評価するうえで簡便な指標となること, また, 衝撃によるはく離損傷の大きさはモデル試験片のサイズに依存するのに対して, 繊維破断にはこのようなサイズ効果は見られないことなどを明らかにした。P.K. Dutta らは修

正ホブキンソンバー法を用いて, 低速衝撃下における衝撃吸収エネルギーに及ぼす温度の影響を考察した結果, 温度が低下すると, 比較的低速域では吸収エネルギーは減少し, 逆に高速域では増加することを明らかにした。これは衝撃エネルギーの吸収メカニズムの違いに起因すること, すなわち, 前者は積層板の剛性増加に伴うヘルツの接触圧による変形エネルギーの減少, 後者は衝撃強度低下に伴う損傷量の増加から説明できることを示した。CHR. Fischer らは DCB, ELS, ENF などの破壊靱性試験片から得られた層間破壊靱性の温度依存特性と各温度レベルでの衝撃試験データを比較して, 破壊靱性と衝撃応答の相関性を調べた。その結果, 落錘による薄板 (flexible structure) の衝撃応答とモード II 破壊靱性, およびシャルピー衝撃試験による厚板 (stiff structure) の応答とモード I 破壊靱性の間にはそれぞれよい相関性があること, しかし, 衝撃後の残存圧縮強度についてはいずれの破壊靱性とも明確な相関は見られないことなどを明らかにした。D. Delfosse らはモード重ね合わせ法 (modal superposition technique) に基づく解析モデルから計算した荷重の時間変動と実験結果を比較することにより, 損傷の発生はこれら二つの結果がかい離を始める瞬間として定義できること, そして, この時の積層板の衝撃裏面での繊維方向のひずみ値は衝撃エネルギーや衝撃速度の大きさにかかわらず一定であり, したがって衝撃負荷をうけた任意の積層平板の繊維損傷の発生を解析的に予測する尺度として利用できることを示した。その他, PMMA/鋼界面のき裂進展現象を高速カメラと CGS (coherent gradient sensing) 法を用いて観察した A.J. Rosakis らの研究, 内部に埋め込んだマンガンゲージによって衝撃時の層間界面垂直応力の時間変動を測定した J. Kate らの研究や光ファイバーセンサーによってはく離領域を検出した R.C. Tennyson らの研究, さらに GFRP チューブを自動車用クラッシュアブソーバーに適用することを目的に, その可能性を計算機シミュレーションならびに実験によって検討した P. Bravo らの研究も興味深い。

(笠野英秋)