紹介

第6回日米複合材料会議報告

小林 昭^{*1}, 奥村 秀人^{*2}, 平野 一美^{*3}, 森 井 亨^{*4}
浅 沼 博^{*5}, 西山 勝廣^{*1}

Overview : 6th J.-U.S. Conf. CM. Mater.

日米複合材料会議 (Japan-U.S. Conference on Composite Materials) は, 1981 年に第 1 回を開催, 以降, 表 1 のような経過をたどり, 第 6 回は 1992 年 6 月に米国で, フロリダ州オーランド (Orlando, Florida) のウォルト・ディズニー・ワールド・ビレッジ (Walt Disney World Village) のグロブナー・リゾート (ホテル) (Grosvenor Resort) で行われた。

オーランド国際空港から 17 マイルのグロブナー・リゾートへは, 空港から, ミアーズ・モーター・シャトル (Mears Motor Shuttle) (片道 12.5 ドル, 往復 22 ドル) が出ており, 40 分位で着く。6 月のオーランドの天気はどちらかというと, むし暑く, 午後には一時的に土砂降りもあった。しかし, ホテル内は, むしろ冷房のききすぎで, 終日, ホテルで会議に出席していると, 冷蔵庫の中にいるようで, 長袖ワイシャツ, 上衣もちゃんとつけてそれでも夕方近くになると冷え切ってしまう感じがであった。

会議参加登録者は, 123 名, 内, 日本からは 27 名で, 他に現地参加が若干あった。登録料は, 250 ドルで会議前夜のレセプション, コーヒーブレイク, 会期中の昼食, 晩餐会, プロシーディングを含む。宿泊ホテル代は, グロブナー・リゾート 1 泊ツインルームで 126.45 ドル (税・サービス料込み)。また, アブストラクト集が, あらかじめ配布された。

会議は, 表 2 のように, 二つの基調講演と, 二会場合計 20 セッションで 82 編が講演されたが, 内, 日本側は, 26 編であった。今回目立ったのは, キャンセルが多

く, 米国側で 6 編, 日本側で 1 編で, 合計 7 編になった。主催は, 日本複合材料学会, ASME, 米国複合材料学会で, スポンサーには, AFOSR, ARO, ONR, 3M, Virginia Institute for Material Systems, Center for Adhesive and Sealant Science at Virginia Tech. が名を連ねた。

なお, ポスト・コンファレンス・ツアーは, 6 月 25 日 (木) に 50 マイル程離れたケネディスペースセンターへ行き, 幸運にもコロンビア号の打ち上げを見ることができた。米国側組織委員会の御高配に, 謝意を表するものである。
(小林 昭)

Stress Analysis, Strength Analysis

第 6 回日米複合材料会議の Stress Analysis と Strength Analysis はそれぞれ 2 セッションずつ行われた。

Stress Analysis の米国側の講演では, 特に C.W. Bert 教授の V-22 航空機のティルトロータに適用するための曲げ-ねじりのカップリング効果を利用した回転軸の解析と A.C. Hansen 教授の新しい連続体複合理論に基づいた有限要素法による複合材の解析には, 日本側のみならず米国側の出席者の関心を集めていた。一方少ない日本側の中でも, 加部氏の FRR におけるコードとゴムの連成およびコードの干渉に関する解析は, 米国側出席者の興味を引いたものであった。その他米国側, 日本側ともに応力解析のほとんどがマイクロメカニックス的な局所応力解析に関するものであり, 列挙すると次のようになる。H.A. Hogan 教授, 門傳氏, F.G. Yuan 教授は, FEM によりそれぞれはく離, FRR, クラックにおける特異応力場の解析, M.W. Hyer 教授のせん断変形における非線形性の効果, E. Mahajerin 教授の選点法によるねじり問題の解析, 奥村の FEM によるチャネル波の解析に関するものであった。

次に Strength Analysis の二つのセッションでは,

^{*1} Akira KOBAYASHI : 東京理科大学, ^{*2} Hidehito OKUMURA : 航空宇宙技術研究所, ^{*3} Kazumi HIRANO : 機械技術研究所, ^{*4} Toru MORII : 湘南工科大学, ^{*5} Hiroshi ASANUMA : 千葉大学,
^{*1} Katsuhiko NISHIYAMA : 東京理科大学

表 1 日米複合材料会議実績

回	時 期	場 所
1	1981 年 6 月	神田・学士会館（東京）
2	1983 年 6 月	NASA ラングレー研究センター
3	1986 年 6 月	東京理科大学（東京）
4	1988 年 6 月	ローズ・ランファン・プラザ（ワシントン D.C.）
5	1990 年 6 月	パルテノン多摩（東京）
6	1992 年 6 月	グロブナー・リゾート（オーランド）

米国側として D. Cohen 氏のマルチファスナの損傷に関するクライテリオンの提案と実験による検証についての内容は、実用価値のあるものであった。さらに P.K. Dutta 氏の低温における一方向材の引張り強度に関する内容を聴き、他の会議の情報と合わせると、日本でも高温のみならず低温における複合材の研究・開発および応用をさらに進めなければならないのではと考えさせられた。これに対し、日本側の発表には出席者の関心を集めたものが多くあった。吉野教授の FRP リンクチェーンに関する強度解析と実験、関根教授の確率モデルを用いた短繊維複合材における tension-softening の解析は、米国側に引けを取らない内容であった。また大平教授はクロスプライ積層材に対する新しい 2 次元 shear-lag モデルにより、従来の解析法の不備なところを指摘され、大いに気を吐いておられたのは印象的であった。この他米国側では E.A. Armanios 教授の複合材 Rotor Hub の設計に使用する複合材のねじり強度、K.C. Gramoll 助教授のフィラメントワインディングの圧力容器に関するものがあった。また日本側では鐘氏の HTPB 推進剤用固着材についての高速引張り試験に関するものがあった。

最後に、個人的な意見であるが、Hyer 教授の内容および来年の SES-ASME-ASCE の合同会議における「複合材料の力学-非線形効果」と題するシンポジウムの広告によっても窺えることであるが、テーマの設定とともに会議やシンポジウムを各学協会合同で企画することが、従来にも増して重要になってきていることを痛感した。（奥村秀人）

Interface, Micromechanics

界面特性、マイクロメカニクスは複合材料全般に関連しているが、ここでは Interfaces and Material Systems I, II および Micromechanics I, II の四つのセッションを中心として、紹介者が聴講した範囲内において

米側の研究発表から印象に残った 2~3 の講演について紹介し、標題関連の第 6 回日米複合材料会議報告とする。したがって、会議全体を通しての標題関連の報告ではないことを最初にお断りしておきたい。耐熱複合材料に本会議の一つのポイントが置かれたこともあり、標題関連の研究発表にもそのことが色濃く反映されていた。なお、マイクロメカニクスに関しては上述した一般のテクニカルセッション以外に会議最終日のキーノート・アドレスがある。

最近、セラミックスや金属間化合物等脆性材料をマトリックスとする複合材料で高靱性・高耐久性化を図る材料設計の一つとして延性高靱性な金属繊維あるいは金属相で強化する試みがなされている。そのことに関連して界面特性で印象に残った研究発表の一つとして S.G. Fishman (Office of Naval Research) による「Recent Opportunities in Composite Interfaces」が挙げられる。Al₂O₃ や金属間化合物 NiAl₃ 等のマトリックスと Nb および Ni 等の金属系強化繊維の界面特性に関する研究報告がなされ、新しい複合材料の可能性について言及された。

PMC の界面特性関連では、P. Commercon and J.P. Wightman (Virginia Polytechnic Institute) によりプラズマ表面処理を施した炭素繊維を用いた CFRP における界面剝離特性に及ぼす焼きなましの影響についての報告がなされた。また、S.P. Wilkinson (Virginia Polytechnic Institute) らにより高靱性ビスマレイミドをマトリックスとした CFRP の破壊靱性等の力学特性について報告がなされ、主として界面特性からマトリックスの高靱性化が CFRP の力学諸特性に及ぼす影響について議論がなされた。

マイクロメカニクス関連では複合材料の応力-ひずみ関係の解析的評価研究が多かった。J. Jortner (Jortner Research & Engineering, Inc.) により平織 C/C 複合材料の応力-ひずみ関係における非線形挙動につい

表 2 第6回日米複合材料会議プログラム等

6/22 (月)	8. 15	開会 * 5 篇から4 篇になったことを示す。キャンセル1 篇である。			
	8. 30~9. 30	基調講演「ゴム系複合材料の構造力学の進歩」赤坂 隆 (中央大学)			
		セッション	米国側	日本側	合 計
	10. 00~12. 00	1 A 応力解析 I	5→4*	0	4
		1 B 試験法 I	4	2	6
	13. 30~15. 30	2 A 応力解析 II	2	3	5
		2 B 界面と材料システム I	4→2	1	3
	16. 00	3 A スマート構造	2→1	0	1
		3 B 界面と材料システム II	3	1	4
6/23 (火)	8. 30~10. 10	4 A セラミック基 CM	2	2	4
		4 B 耐久性：予知と観察 I	4	1	5
	10. 40~12. 00	5 A セラミック基 CM	3	1	4
		5 B 耐久性：予知と観察 II	2	2	4
	13. 30~15. 30	6 A MMC I	1	4→3	4
		6 B マイクロメカニクス I	4	2	6
	16. 00~	7 A MMC II	3	0	3
		7 B マイクロメカニクス II	2→1	1	2
	19. 00~	晚餐会 講演「カーボン・カーボン：市場への参入」 E.F. ジャウプ (B.F. グッドリッチ)			
6/24 (水)	8. 30~9. 30	基調講演「複合材料の力学：歴史的展望」J.M. ホイットニー (デイトン大学)			
	10. 00~12. 00	8 A 構造解析，設計最適化 I	5	1	6
		8 B 試験法 II	5	1	6
	13. 30~15. 30	9 A 構造解析，設計，最適化 II	3	1	4
		9 B 強度解析 I	3	3	6
	16. 00	10A データー・ベース	3	0	3
		10B 強度解析 II	2→1	1	2
	19. 30~21. 30	日米合同組織委員会	10 名	6 名	16 名

ての解析的なモデル化および予測値と実験結果との比較検討が報告された。A.K. Kaw (University of South Florida) らは脆性材料をマトリックスとする一方向連続繊維強化材のマトリックス内の周期的平行無限クラック列に対する解析的研究を行っている。き裂長さが界面からの距離と同程度であればき裂先端の応力拡大係数はほとんど影響を受けないこと、およびき裂先端が界面に近

づけば近づくほど応力拡大係数が減少することが示された。すなわち、強化繊維の弾性率がマトリックスのそれと比較して小さければき裂進展挙動はより安定的になることが解析的に確認された。また、強化繊維の異方性を考慮することにより McCartney の解析モデルを発展させた、一方向連続繊維強化複合材料における破断繊維近傍の応力解析についても J.M. Whitney (University of

Dayton) により報告された。さらに、当日の講演はキャンセルされたと聞いているが、W.C. Carter (Rockwell International Science Center) らによる—Micromechanical Simulation of Elastic and Fracture Behavior in 3D Woven Composites—は3次元 C/C 複合材料の損傷解析に関する有用な研究論文である。会議に配布されたアブストラクトにもかなり詳細な記述があるのでぜひ一読を勧めたい。なお、G. Taggart (University of Rhode Island) による—Microstructure-Property Relations in Discontinuous SiC Aluminum Composites—の講演もマイクロメカニクス関連で印象に残った。SiCp/Al および SiCw/Al の応力-ひずみ曲線について実験とマイクロメカニクスによる解析結果の比較検討がなされた。

J.M. Whitney 教授によるキーノート・アドレサー Mechanics of Composites—では複合材料の力学全般についての歴史的な発展過程と将来展望についての講演があり、その中で複合材料のマイクロメカニクスが取り上げられた。

なお、日本側からは標記四つのセッションにおいて、平野（機械技研）、好満（広島西部工業センター）、武田（東大先端研）および木村（東工大）（発表順）により計4編の研究報告がなされ、活発な討論も交わされた。日本における標記関連分野の研究開発の一端が紹介できた。

最後に、このことはすべての研究分野に共通することではあるが、紹介者が日本における MMC の試験評価方法の標準化動向について簡単に紹介したところ米側参加者の数人から講演後にも強い関心が示された。同様のことをヨーロッパでも経験しており、試験評価方法の標準化については二国間の研究交流に留まらず今後世界的視野から推進すべき研究課題であることを痛感したことを付記したい。

（平野一美）

Durability, Smart Structures, Structural Analysis

初日に行われた Smart Structures, 2 日目に行われた Durability: Prediction and Observation I, II および Structural Analysis, Design, and Optimization I, II の各セッションについて以下に報告する。

まず Smart Structures のセッションでは、近年盛んに研究が行われている分野であるにもかかわらず、発表件数は1件のみ（プログラムでは2件であったが、1件がキャンセルとなった）と非常に寂しいセッションとなった。唯一行われた講演は、低速度衝撃をうけるスマー

トコンボジット構造材における圧電センサの特性評価に関するものであった。圧電センサには高分子材料およびセラミックスの2種類を用い、積層板およびサンドウィッチ材について試験を行ったものであり、衝撃試験における衝撃位置およびエネルギーとセンサの応答との関係について議論された。特にセンサの種類、サイズ、方向性および境界条件の影響について検討され、衝撃エネルギーの増加につれて、センサの出力波形は変化せず、振幅のみが増大することを明らかにした。

Durability: Prediction and Observation I, II のセッションでは、疲労・クリープなどにおける寿命予測や損傷挙動に関する9件（米国側6件、日本側3件）の講演が行われた。特にIのセッションでは疲労・クリープ寿命や損傷状態をシミュレーションする解析手法に関する講演が行われ、IIのセッションでは損傷進展・疲労・熱変形に関する実験的評価および解析に関する講演が行われた。これらの中でいくつかの興味深い講演について以下に紹介する。

NASA ルイス研究所で開発された解析コード PICAN (Probabilistic Integrated Composite Analysis code)

は、確率論に基づき、材料変数および成形に起因する変数を組み込み、構成素材（繊維、マトリックス）の微視的レベルから積層材へと順次スケールを大きくしながら確率密度関数・累積分布関数を各ステップで求める解析手法である。この解析手法により種々の材料特性のばらつきを考慮した解析が可能となる。また熱可塑性樹脂複合材料のクリープ挙動のシミュレーションに関する研究では、クリープを負荷初期段階と安定状態の二つの段階に分類し、これらから全体のクリープひずみの変化を求めている。Iのセッションにおける講演全体を見ると、損傷進展や寿命予測のシミュレーションにおいては、微視力学的観点から行う手法が主流となっているように思われる。またこれにより複合材料の挙動を忠実に表そうとする傾向が強くなっているようである。

IIのセッションにおける興味深い講演は、熱可塑性複合材においてしばしば生じる層のうねりに着目した研究で、うねりが圧縮疲労特性に及ぼす影響について検討したものである。その結果わずかなうねりでも、うねりがないものに比較し、疲労寿命が1/5程度になることが報告された。IIのセッションにおける講演では、4件の講演中2件が長繊維熱可塑性複合材の疲労に関するものであり、熱可塑性複合材の用途の拡大に伴い、研究分野も実環境に近い分野のものとなっているようである。

Structural Analysis, Design, and Optimization I, II

のセッションでは、複合材料による構造物の解析、設計および最適化に関する 10 件 (米国側 8 件, 日本側 2 件) の講演が行われた。特に I のセッションでは複合材の部分的補強に関する解析, 種々の構造物の最適設計に関する講演が行われ, II のセッションでは航空機・医療用機器への複合材料の応用や複合材料のリペアに関する講演が行われた。これらの中で最適設計に関する講演では, 複合材料のミクロおよびマクロなモデル化・CAE ツール (形状のモデル化および自動メッシュ作成)・有限要素法 (FEM) による解析・数値解析による最適設計を結合したシステムにより, 構造物の形状・プライの厚さや配向角・微視的な材料特性 (繊維含有率や界面の諸特性) を最適化する手法に関するものがあり, これからの最適設計の新しい方向として注目すべきものであった。構造物の解析手法においては, 作用する複雑な荷重を単純な荷重に区分し, 最後にこれらを組み合わせることにより最終的な結果を得るという手法が多くなっているようである。また II のセッションにおける講演は, 複合材料が今後も航空・宇宙分野のみならず様々な分野に利用されるようになるであろうことを示唆するものであった。複合材料のリペアの手法やその後の材料特性に関する講演が 2 件なされたが, このようなリペア手法が信頼できるものとなれば, 大型構造物への複合材料の適用もこれまで以上に容易なものとなるであろうことを大いに感じさせるものであった。

(森井 亨)

Ceramic & Metal Matrix Composites

CMC, MMC 関連はセッション 4A~7A の 4 セッションで構成された。講演件数は米国側 10 件, 日本側 6 件である。他のセッションにおいても関連の講演が数件あったため, 全体 (約 90 件) に占める CMC, MMC 関連の割合は 2 割強であった。

それらの講演を対象材料で整理すると図 1 のようになる。マトリックス材として最も多かったのはアルミニウム系 (米国側 2 件, 日本側 2 件) である。その強化素材の中心は連続繊維からウイスカに移行してしまっていることがわかる。Near Net Shape の製法を主とする連続繊維強化材はすでにスペースシャトルなどにおける素晴らしい実用例があるものの一般の用途には高根の花であり, より経済的な MMC として, 準粉末として扱うことができかつ複合化後は塑性加工にも耐えうるという SiC ウイスカによる強化材についての製法や性質に関する検討結果が報告された。ステンレス鋼繊維を用いた研究も連続繊維であるにもかかわらず塑性加工 (二次成形)

図 1 本会議で報告のあった材料系

に関するものである。

チタンマトリックス系の研究 2 件はいずれも米国側によるもので, SiC_{CVD} 連続繊維強化材が極超音速飛行中に高温で繰返し応力を受けるときの挙動などその工業化を目指した具体的な検討がなされている。

金属間化合物 (日本側 2 件) に関しては, 1 件は超耐環境性先進材料 (複合材料) としての研究開発状況ということで TiAl 系および NbAl 系について, もう 1 件は NiAl 系を対象に短繊維, ウイスカとの複合化とその諸性質について報告された。

セラミックス (米国側 3 件) に関しては, 2 件は連続繊維で強化したムライトにおける亀裂の生成挙動やその諸特性について, 他の 1 件はガラスと強化繊維との界面の力学的挙動に関する基礎研究について報告された。

C/C 複合材料については超耐環境性先進材料 (複合材料) としての研究開発状況, 宇宙往還機の一次構造部材の開発ということで日本側から 2 件講演があったほか, バンケット時に Carbon-Carbon: Bringing it to the Marketplace と題したユーモラスなイラストを映し出しながらの米国側の講演があり, 関心の高さがうかがわれた。

他に, 短繊維配向角の定量的評価に関する理論的研究, マグネシウム基複合材料の電気化学的腐食に関する研究, セラミックマトリックス複合材の無加圧焼結に関する理論的研究, SiC_{CVD} 繊維の直径と特性に関する研究などが報告された。

以上報告させていただいたように, 総数 16 件の講演内容は実にバラエティに富んでいるものの, 研究開発動

向をバランス良く反映しているように思われた。

本会議においてはアットホームな交流も随所に見られた。今後は本会議が日米の共同研究を推進する母体となりその有意義な研究成果の発表の場となることを期待する。(浅沼 博)

Test Methods, Data Bases

第6回日米複合材料会議では、Test Methods は2セッション(6月22日, 24日)、米国側9件、日本側3件、計12件の論文発表が行われた。この他にポスターセッションとして米国側から2件の論文発表があった。一方、Data Bases は1セッション(6月22日)、3件(米国側)の発表が行われた。

Test Methods の発表論文(ポスターセッションを含む)について、傾向別に内容を分類して述べると概ね以下のとおりである。

(1) 圧縮強度に関する測定法(4件)

PMC の圧縮強度の測定法は、技術的にはなかなか難しいものであり、個人的にはこの分野に関連する研究が興味深かった。PMC 積層板の圧縮強度の測定法として、S.E. Hahn 氏と K.L. Reifsnider 教授から、ELSS 測定法を改良した 'Combined Shear and End Loaded Compression Strength Testing Method' が提案された。このほか、D. Goetz 氏らによる PMC 積層板の母相のモデュラスと圧縮強度の関係、M.G. Abdalla 氏らによる PMC 薄肉リングに外部から静水圧を加えた場合の力学挙動、Z.J. Wang 氏らによる IITRI 試験法と二軸圧縮試験法による比較など、いずれも興味深いものであった。

(2) 損傷評価法(3件)

尾崎氏と金原教授は、CFRP の内部に介在する欠陥を AE を用いて検出するシステムを報告した。このほか、J.M. Pereira 氏らはテープ状の PMC の FWT 強度試

験法について、M.J. Sundaresan 氏らは微小欠陥の周りの歪場の測定法についての論文発表があった。

(3) 弾性係数およびダンピング測定法(3件)

D. Hui 教授らの PVDF センサーを用いた FRP の弾性係数およびダンピング特性の測定法、D.K. Hsu 氏らの超音波測定による薄肉板の弾性係数とフローサイズの決定法が報告された。このほか、西山と梅川教授らによる PMC の母相に用いられる素材のダンピング特性と弾性係数の関係を調べた論文発表があった。

(4) 破壊靱性測定に関する測定法(1件)およびレビュー(1件)

破壊靱性に関しては、K. Tanaka 氏(代読、武田助教授)の PMC の層間破壊靱性モード II の安定性に関する論文発表があった。特に T. Tohdo 氏らの PMC 層間破壊靱性に関する review paper は有益であった。

(5) 残留歪み測定法(1件)

A. Saigal 氏により中性子回折を用いた SiC/Ti-Al-Nb 系複合材料の種々の熱処理条件に伴う残留歪みの測定法についての論文発表があり、活発な討論がなされた。

(6) 樹脂の化学反応に関する測定法(1件)

J.F. Fu 氏らは、近赤外スペクトロメータを用いてエポキシ系樹脂のキュアー時の化学反応を *in situ* 的に調べる方法について明らかにした。

Data Bases に関しては、発表論文が3件(いずれも米国)と少ないのが気掛りであった。データベースは一朝一夕では実現できないことから、わが国におけるこの分野への積極的な支援が、学会としても必要ではないかと感じた。

会期中、MTS System 社と Instron 社による材料試験装置の写真と解析ソフトの展示、パソコンレベルで利用可能な Metal Matrix Composites Information Analysis Center のデータベースのデモンストレーションが行われ、花を添えた。(西山勝廣)