紹介

第3回日米複合材料会議報告

河田 幸三^{*1}, 小林 昭^{*2}, 高雄 善裕^{*3}, 福永 久雄^{*4}

塩田 一路^{*5}, 三木 光範^{*6}, 浜本 章^{*7}

序 文

すでに会員諸兄にお馴染みとなった日米複合材料会議の第3回目の報告を行なうことができるのは誠にご同慶の至りである。第1回(東京, 1981年1月)および第2回(Hampton, 1983年6月)よりいっそう充実した成果を得たといつてよいと思われる。

準備は、日本側組織委員会(Table 1)により米国側組織委員会(Table 2)の協力を得て進められた。全体の構成は Table 3 のとおりで、会議は1986年6月23日(月)~25日(水)の3日間であるが、22日(日)には、日米合同組織委員会(12~14時)、レセプション(17~19時)が、24日(火)にはバンケット(18~20時)が、25日(水)にはしめくくりの日米合同組織委員会(18:30~20:30)が開かれ、会議後の4日間にわたり、東と西の見学および観光ツアーが組まれた。会場は東京理科大学神楽坂キャンパスの1号館17階記念講堂および大会議室が使用された。同時に展示も併設された。Proceedingsは本年10月刊行の運びである。

論文数は、米側44編、日本側64編、計108編の多数に上り、2会場平行セッション制をとらざるをえなかった。日米両国の複合材料研究の現況を発表し合って忌憚らない討論が交わされ、科学的、工業的知識の交換と同時に両国研究者の理解と友情を深める点できわめて意義深いものであったと評価しえよう。ただ、米国内事情のために金属マトリックス複合材料の研究発表を制限されていたことは第2回と同様物足りない点であったといえる。

会議の討論のほか、食事、コーヒープレークの際の雑談、レセプション、バンケットを通じて、日本の社会、

文化にも米側参加者の興味を喚起しえたように思われる。以上の成果を得られたのも、ひとえに日米双方の組織委員、参加者全員、複合材料学会、東京理科大学、日本万国博覧会記念協会、事務面で支持された人々、の全部のご協力によるもので、ここに改めて厚く御礼申し上げる次第である。

(河田幸三)

6月23日 Room A (Session 1~4)

6月23日(月) Room A では、8:30よりまず開会式が、大会組織委員長の河田幸三東大名誉教授と、米側組織委員長の J.R. Vinson デラウェア大教授によって行なわれ、次いで、基調講演が、「日本におけるピッチ系炭素繊維の現状報告」と題し、群馬大大谷朝男助教授により講演された。すなわち、これまでわが国では PAN 系カーボンファイバーがリードしてきたが、過去5年間で、ピッチ系の参入が活発化して、注目を集め、非常に流動的であるが、あえて、現状を報告するとして、ファイバー・スピニング用のプレコーサー・ピッチ製作、ピッチ系ファイバーのスピニング法、組織、性質および生産規模と開発段階について述べている。

9:40からは、セッション1、ファイバーとファブリックで、まず「炭素繊維の性質への組織の関係」(Rensselaer 工大: Diefendorf) では、カーボン・ファイバーの引張り強度は、軸方向のみならず半径方向のマイクロ組織と欠陥の関数であり、基礎のマイクロ組織を改良するか、応力集中源の欠陥を減らすかすれば、引張り強度を増すことができるとし、圧縮強度は、低剛性ファイバーでは、マトリックスにより、高剛性ファイバーでは、内部のマイクロ座屈で決定されるとしている。

「ガラスコート・メルトスピニング法による高靱性金属繊維とその複合材の力学特性」(名工大: Goto, Yoshino & Nishio) は、この方法によって冷却率を 10^5 K/s 以上として、グレインサイズを微細化し、引張り強度 2 GPa 以上、伸び 10% 以上の高靱性フィラメントを得ることができたと述べている。

「多層多方向縦糸編み(MMWK)ファブリック強化複合材の組織と性質」(Drexel 大: Ko & Pastore, Dela-

^{*1} Kozo KAWATA: 東京理科大学理工学部, ^{*2} Akira KOBAYASHI: 東京大学工学部, ^{*3} Yoshihiro TAKAO: 九州大学応用力学研究所, ^{*4} Hisao FUKUNAGA: 航空宇宙技術研究所, ^{*5} Ichiro SHIOTA: 金属材料技術研究所, ^{*6} Mitsunori MIKI: 金沢工業大学材料システム研究所, ^{*7} Akira HAMAMOTO: 石川島播磨重工業(株)

Table 1 Japanese Organizing Committee.

K. Kawata*	(Chairman) Science University of Tokyo
T. Hayashi*	(Consultant) Japan High Polymer Center
A. Kobayashi*	(Secretary) University of Tokyo
H. Fukuda*	(Assistant Secretary), University of Tokyo
T. Akasaka*	Chuo University
R. Hayashi	Industrial Products Research Institute
M. Kato	Research Institute for Polymer and Textiles
Y. Minoda*	R & D Institute of Metals & Composites for Future Industries
S. Momoshima*	Composite Systems Corporation
M. Morita*	Toshiba Corporation
Y. Murakami	Kansai University
S. Sekino*	Nippon Steel Corporation
K. Shimizu	Mechanical Engineering Laboratory
E. Shin	Asahi Fiberglass Corporation
A. Shindo	Government Industrial Research Institute, Osaka
S. Umekawa*	Science University of Tokyo
O. Watanabe*	National Research Institute for Metals

* Executive Committee Member

ware 大: Yang & Chou) は, ファブリック・ブリフォーム特性を仮定し, 単位セルの構造形状を考慮に入れて, MMWK 複合材料を解析している. グラファイト/エポキシ MMWK 複合材の予備実験結果は, 比較的良かった. また, コンピュータ・シミュレーションにより, 針の貫入とファブリック形状との相互作用を調べている.

「複合材の新しいファブリック組織」(東レ: Nishimura & Aotani) では, 最近開発された新しいファブ

Table 2 U.S. Organizing Committee.

J.R. Vinson	(US Chairman), University of Delaware
M. Taya	(US Secretary), University of Washington, Seattle
C.W. Bert	University of Oklahoma
C.C. Chamis	NASA Lewis Research Center
A. Dhingra	E.I. DuPont de Nemours, Inc.
Y. Rajapakse	ONR
K.L. Reifsnider	Virginia Polytechnic Institute and State University
W.J. Renton	Cessna Aircraft Company
L. Roderick	NASA Langley Research Center
R.A. Schapery	Texas A & M University
R. Sierakowski	Ohio State University
R.A. Signorelli	NASA Lewis Research Center
W.J. Walker	Boeing Aerospace Co.
S.S. Wang	University of Illinois
J. Whitney	Air Force Materials Laboratory
C. Zweben	General Electric Company

リック組織, すなわち, stitched fabric, ヤーンの滑りに対する welded fabric, ちぢれない織られた fabric などを紹介している.

次の 11:00 からのセッション 2, マトリックスでは, 「エポキシ樹脂 (E828/DDM) および (E828/BF₃MEA) の基礎力学特性について」(高分子素材センター: Hayashi) では, E828/DDM は, ディアミノ・ディフェニール・メタン, E828/BF₃MEA は, ボロン・トリフルオリド・モノエチレン・アミンであるが, 引張り, 圧縮, 剪断の各力学特性を調べている.

「複合材料用可溶性イミド・プレポリマーの研究」(三菱化成: Koura, Ohashi, Hino, Satoh & Suzuki) は, この可溶性は芳香族ジアミンの分子構造からおもに派

Table 3 Schedule of Conference.

June 22 (Sun.)	12:00-14:00	Organizing Committee Meeting
1986	14:00-17:00	Registration
	17:00-19:00	Reception (Free)
June 23 (Mon.)	8:30-18:10	Conference
June 24 (Tues.)	9:00-17:10	Conference
	18:00-20:00	Banquet
June 25 (Wed.)	9:00-17:50	Conference
	18:30-20:30	Organizing Committee Meeting
June 26 (Thurs.)-June 29 (Sun.)		Post Conference Tour (U.S. participants only, optional)

生しているとし、また、カーボン/ポリイミド複合材の力学特性を求めている。

「TG-GCMS 系および赤外線によるビスナディミドの硬化過程」(東レ: Odagiri, Yamashita & Tobukuro) は、ビスナディミド(bisnadimide)の分解挙動と硬化メカニズムを、新しい TG-GCMS 系および熱制御セルの赤外線によって、調べている。

「熱安定エポキシ樹脂とその複合材料の開発」(帝人: Aito & Urasaki) は、ナフタリン環をもつ、ディアミノ・ディフェニール・スルホンで硬化した新しいエポキシ樹脂が、200°C でも従来型に比べて格段にすぐれた耐熱性を示すことを発表している。

12:20~13:40 の昼食時間の後のセッション3, 衝撃と応力波では、まず、「高歪速度引張り下の無機および有機ガラス状固体の力学挙動」(東理大: Kawata, Miyamoto & Hirayama, 東大: Hashimoto) では、パイレックスガラス、エポキシ、PMMA の $10^3/s$ の高速引張りを one-bar 法で行ない、準静的場合と比較している。

「先進複合構造の衝撃抵抗」(富士重: Takamatsu & Kimura, 航空機開発(協): Tsuda) は、6種の積層板の衝撃試験では、靱性が支配的因子で、ハイブリッド材が優れているとは認められないことなどを報告している。

「フライヤー板の衝撃によるガラス繊維積層板のスポール破壊メカニズム」(九大: Takeda, Komatsu & Takahashi) は、PMMA フライヤーにより、ガラス/ポリエステル積層板にスポールを生じさせ、微視的手法も併用して、破壊メカニズムを解明している。

「一方向 FRP の引張り破損過程の応力波伝播のシミュレーション」(東大: Kimpura & Ozaki) は、繊維の破壊と、繊維とマトリックス間の層間剝離を考慮した、新しい動的破損過程シミュレーションモデルを提案し、複合材の多重破壊の発生過程の説明に効果的と論じている。

「有限ブリズム法による繊維強化材内を伝播する応力波速度」(北見工大: Ohshima & Mikami, 日大: Nomachi & Kida) では、繊維強化複合棒と同心積層円筒とを、それぞれ、伝播する応力波にあらわれる応力波速度分散を、動的有限ブリズム法によって解析し、波長が増加すれば、厳密解に近づくことなどを報告している。

セッション4, 疲労では、「積層複合材の疲労信頼性モデル」(デンマーク工大: Talreja) は、均質損傷(非交差型マトリックス・クラッキング)と非均質損傷(局所ゾーン内の相互影響クラッキング)の二段階をもつモデルを提案し、初期強さと疲労強さに対し、3個のパラメー

タのワイブル分布を用いる、信頼性評価法を提案している。

「大気中および水中での一方向 CFRP の剝離疲労クラックの限界伝播」(製科研: Hojo, Swedish Plastic & Rubber Institute: Gustafson, 京大: Tanaka) は、CFRP のきわめて低速の剝離疲労クラック成長実験を、23°C の大気中および 23°C の水中で行ない、エネルギー解放率との関連で検討を行なっている。

「疲労負荷下の複合材の残留強度劣化の統計的モデル化への破壊力学的アプローチ」(香川大: Ishikawa, 相模工大: Tanimoto, 京大: Tsurui, 四国工試: Utsumi) では、統計的モデルを提案、ガラス/ポリエステル積層板で良い実験的確認を得ている。

「複合材の疲労による累積損傷への微視的アプローチ」(東大: Akira Kobayashi & Ohtani) は、疲労による CFRP の強度および剛性の劣化を、微視的光学手法により、材料内部の層間剝離、繊維切断、マイクロクラック発生などとの関連で調べている。

セッション5, 振動では、「複合板の振動」(Georgia 工大: Wang, 清華大: Shaw) は、種々の組合せの支持条件をもつ積層矩形板の曲げ振動を、二重級数解をストークス変換に関連して、空間座標に使用して解析している。

「積層グラフィット/エポキシ円筒殻の振動特性」(東大: Shigeo Kobayashi & Nagashima) は、積層グラフィット/エポキシ円筒殻の振動特性を、固有値問題として厳密に解いて固有振動数を求め、また、剝離の非線形特性への影響などを調べている。

なお、最後の Fettahlioglu & Sayed の論文は、キャンセルされた。(小林 昭)

6月23日 Room B (Session 5~7)

午前のセッションは前半が複合材料に関するマイクロメカニクス4題、後半が複合材料構造要素の挙動に関する4題であった。午後のセッションは前半がマイクロな損傷の進行に関する4題、後半がより大きいスケールでの損傷進展や破壊に関する5題であった。

Kondo らは樹脂の偏在が弾性定数に与える影響について、ユニークな解析モデルを使った FEM 解析を行ない、影響を強く受ける定数・受けない定数を示した。解析モデル中の円形部分は繊維ではないのかという質問が繰り返された。Nemat-Nasser はマイクロなボイドや亀裂を含む複合材料の等価剛性を求める解析方法について述べた。そのなかのトピックの一つ periodic micro-structure 問題は解析対象・方法が次の発表者と同じで

結果が異なるということになった。Mura は等価介在物法を利用した最近の結果を発表した。periodic micro-structure 問題、剪断力を受ける介在物の応答、介在物の剪断変形が実は回転で可能とアブストラクトとは異なる話題の報告があった。アブストラクト最後の2行について、これは面白い結果だがおそらく計算間違いと発表者自身で宣言されたのは愉快であった。Hatta らは電気伝導性と繊維母相間接着性の制御を狙った皮膜繊維強化複合材の熱応力解析を報告した。マクロな熱勾配に対処するため、等価介在物法を使った解析に工夫が施されていた。

Bert らはガラス/エポキシ FW 材と翼型断面形状のガラス/ビニールエステル引抜き材に梁タイプの曲げ荷重を加えたとき、横方向に顕著な非線形性が生じることを示した。これに対する設計者の認識と理論の確立を求めた。Hayashi は楕円状あるいは矩形状(角には丸味)の穴がある積層板の応力集中問題を応力関数・写像・最小2乗法を併用し解いた。FEM 解析や実験による確認も行なっている。Gordaninejad はカーボン/エポキシ積層板の bimodulus を考慮した FEM 曲げ解析方法を報告した。板厚方向の高次の剪断変形を考慮した板理論も採用している。Yamashita らは一方方向ハイブリッド材の力学的挙動・引張り強度・圧縮強度・弾性率・層間剪断強度に関する実験的解析を発表した。ハイブリッド形態や熱応力の影響が検討された。

Allen らは積層板 90° 層に発生する曲線状横方向亀裂が全体剛性に与える影響を解析的に検討した。各層のマイクロクラックの効果を表現する内部状態量を2次元テンソルで定義し使用している。Sekine らは一方方向強化材に横方向荷重が作用した場合の亀裂発生に関して新しい破損基準を示した。亀裂先端の円形損傷領域中の繊維母相間界面垂直応力がそれで、既存の基準より実験結果に近い破壊靱性値を求めている。次の Reifsnider の発表はキャンセルされ、時間を繰り上げ、Takao によるハイブリッド材のミクロな損傷モデルについての解析的報告が行なわれた。各種損傷モデルに対し適合した損傷条件を考慮し、損傷の進展と巨視的な応力との関連が示され、繊維母相間の剪断抵抗の役割が強調された。Sierakowski らは連続体力学から導入された多くの破壊基準を祖上にのせ破壊条件に関するレビューを行なった。損傷や亀裂の進展に関する系統だった実験を行ない、まずは各場面場面での主要破壊モードを同定する必要性が一気に述べられた。

Herakovich らは一方方向強化材の任意方向に入った亀

裂の進展方向およびその限界荷重を予測する方法を検討した。異方性弾性論の解を4種の破壊条件に適用して実験結果と比較し、Normal Stress Ratio に基づく方法を最良のものと述べた。Swanson らは引張りと圧縮の2軸応力が作用したカーボン/エポキシ積層板の実験結果を発表した。内圧と軸力を作用させる筒状試片の作成が注意深く行なわれた結果といえる。応力の干渉・破壊様式について多くの結果が述べられ、いわゆる Tsai-Wu の式が引張り-引張りの2軸応力ばかりでなく、引張り-圧縮の2軸応力下でも成立しないことが強調された。Moet らは複合材料の破壊が各種の破壊の組合せであるという観点から破壊靱性を評価する方法を述べた。これに使用する確率的な強度の場合は各種の亀裂伝播経路に統計的処理を施して得ている。Coppa はフライホイール高速運転時の強度上の問題について概説した。中央部が疑似等方性積層板(ガラス)、外周が FW 材(カーボン)で作られ3種の主要破壊モードが存在すること、樹脂中のミクロな亀裂が複数の悪影響を及ぼすことなどが述べられた。Fukuda は一方方向強化材の繊維間隔の乱れが強度にどう影響するかを調べた。Shear-Lag を使ったシミュレーションにより応力集中係数の確率分布を求め、繊維強度の分布を使い最終的な確率的強度予測を行なった。一様に分布する場合に比べわずかに強度が低下するという結果であった。(高雄善裕)

6月24日 Room A (Session 8A~10)

Session 8A Laminates and Joints 1

Narisawa ら(山形大)は CFRP 積層材のモードII破壊について報告した。アングルブライ材の繊維配向角の違いにより、モードII破壊靱性および破壊特性がいかに変動するかを、AE 計測結果を含めて検討している。Lagece ら(MIT)は CFRP 積層材について、繊維配向角の異なるブライ間に柔らかいフィルム接着層を挟むことにより、引張り強度が非常に増大することを示した。フィルム接着層は層間応力を減少させ層間剝離を抑止しており、層間剝離を防ぐ簡便な方法であると興味深く感じた。Rehfield ら(ジョージア工大)は積層材の層間応力およびエネルギー解放率を計算するいくつかの方法について比較検討を行なった。各方法の特性根による比較を行なうとともに有限要素法との数値的比較により、各方法の適用範囲について言及している。Kim ら(デイトン大)は積層材の層間剝離発生についての緻密な実験結果を示すと同時に、層間剝離発生を予測する解析を行なっている。層間垂直応力と層間剪断応力の組合せ応力状態

の剝離発生基準として、Tsai-Wu 則と平均応力基準を用いており、実験結果をよく予測できると報告した。この平均応力基準については、エネルギー解放率に基づく破壊基準との関連についての質問があった。このセッションでは積層材の層間剝離という基礎的でありまた実用上も重要な問題を扱っており、興味深く拝聴した。

Session 8B Laminates and Joints 2

このセッションでは、縫合効果と機械継手強度という実用上重要な問題について二つの報告があった。まず、Tada ら（航技研）はいくつかの異なる試験形状のCFRP 積層材について縫合の効果について報告した。種類の試験データに基づいて、縫合により損傷の進展を抑制したり最終破壊までの変形を増大できることを示した。Hamada ら（大市工研）はガラスマット FRP の機械継手強度について、有限要素法による解析結果と実験結果とを比較検討した。有限要素法では、ボルトをトラス要素で表わし荷重増加の際の応力再配分を考慮した緻密な解析方法を用いている。

Session 9 Flexible Composites

Akasaka ら（中大）はタイヤベルト構造について、コードとゴムとを別々に取り扱う離散モデルの解析方法を示した。最小ポテンシャルエネルギー原理に基づいて定式化を行ない、有限幅のコード・ゴム積層材の有効ヤング率、応力分布等を求め、積層理論による解との比較検討を行なっている。Takahashi ら（名工大）は繊維を曲線状に配置させることにより延性化させた複合材について、非線形構成方程式の解析方法を示した。このような曲線状の繊維配置により、剛性・強度特性を低下させることなく伸びを増大させている。Fukahori ら（ブリジストン）はゴム層とスチール層からなるゴムベアリングについて、ゴムの材料非線形性を考慮して有限要素法による解析を行ない、実験結果とよい一致を得ている。

Session 10 Compression/Shear

Lo ら（VPISU）は薄肉閉断面ビームカラムについて、Vlasov 理論に基づく一次元解析の妥当性を検討し、線形解析では誤差が大きい幾何学的非線形性を考慮すればかなり精度が向上することを示した。Suemasu ら（上智大）は剝離を有する積層板について、剪断座屈解析および座屈後解析を行なった。座屈時あるいは座屈後、剝離領域が局所的に接触する場合の解析方法を示している。また、座屈荷重および座屈後の平衡関係におよぼす剝離領域の大きさ・位置の影響を系統的に調べ、剪断荷重を受ける剝離板の応答について種々の知見を与えている。

（福永久雄）

6月24日 Room A, B (Session 11~12)

今回の会議はすでに3回目とあってなごやかな雰囲気であった。全3日間2会場のうち、MMC は5セッションで1会場を丸1日使い、セラミック複合材料と MMC の界面については各1セッションが設けられた。いずれもディスカッションはなかなか熱のこもったものとなり、有意義であった。

1. MMC

MMC では18講演が予定されていたが、日米各1件の講演取消しがあり、計16件の講演が行なわれた。そのうち2件のみが米国からの発表であった。米国における MMC の研究はかなり行なわれていると推察されるにもかかわらず、このように件数が少ないのは、その発表に対する制限が厳しいことをうかがわせる。講演の内容は、製法を中心とした研究発表が4件、強度に関するものが4件、熱応力に関するもの3件、その他中性子線照射、振動減衰能、レーザ加工、エロージョン、MMC の現状と展望について各1件の発表があった。

製法を中心とした研究では、B の酸化反応および Al への拡散の検討、拡散接合法で作られた B/Al の強度特性について、また SiC (whisker)/Al については、高温押出し、高温加圧、高圧溶浸で製造し、たとえば高圧溶浸した場合は Vf 28% で 350 MPa の強度のものが得られたと報告された。高圧鑄造により黒鉛長繊維または SiC 長繊維と、SiC (whisker) または SiC (粒子) を同時に Al 合金に複合化したハイブリッド MMC ではウィスカーまたは粒子が亀裂の拡大を抑制し、強度が向上することが示された。MMC としてはやや特殊であるが、WC 等の粒子をアモルファス合金中に分散させた線材およびリボンに粒子を含まないアモルファス合金と同等の塑性変形と曲げ延性を有したと報告された。

強度に関する研究においては、SiC/Al 系についてのみの報告がなされている。その一つは、マトリックスに合金化または時効硬化を行なう場合、繊維とマトリックスの熱膨張係数の差から多大の転位を発生し、残留応力が小さい場合にマトリックスの強度向上が大きいことが示された。試験片形状ではなく、実際に SiC (whisker)/6061 Al 合金製のボルトとしたものは、400°C までの高温において Al 合金のみの物に比較して1.4倍の強度をもち、また200°C までのクリープ特性、疲労特性も優れていたと報告された。高圧鑄造で作った SiC (whisker)/Al の強度および信頼性に関する研究では、平均曲げ強度は 746 MPa、Weibull 関数の形状母数は 12.1、尺度

母数は 778 MPa であり、破壊は表面欠陥に依存すると報告された。SiC (pc 系)/Al の MMC について検討した結果についての報告では、高強度、高破壊靱性の MMC を得るためには延性マトリックス金属を用いるのがよいと述べている。

熱応力に関しては、C/Al に室温と 350°C の間の繰返し加熱を与えたものについて 3 点曲げ破壊エネルギーを検討し、MMC に損傷が起こっていたという報告がなされた。また短繊維を含む MMC に熱履歴を与えた場合の繊維の周囲の転位の発生を、熱膨張係数と温度差および部分的な塑性変形から検討した結果、ミスマッチ歪みが大きくなるほどパンチング距離が大きくなるが、繊維のアスペクト比の増加とともにパンチング距離が減少すると報告されている。また他の報告では繰返し加熱を与えた試料の変形について、理論および実験により、1 回の加熱ごとの塑性歪みの蓄積は内部応力の緩和によること、および外部応力がない場合でも超塑性変形（熱ラチェット変形）が起こることを示した。

中性子線照射に関しては、講演にあたって若干表題が変わったが、SiC (pc) に中性子線を照射すると非晶質 SiC の中に微細な SiC 結晶が生ずると報告された。

振動減衰能は、B₄C/Al, SiC/Al について測定された。その結果によると繊維とマトリックスの界面で若干の迂りを許す製法を選ぶと、ヤング率の低下なしに振動減衰能を高めることができると報告された。

レーザを用いた MMC の加工については、ビームのエネルギー密度を適正に選ぶことにより MMC でも通常の金属と同等の切断速度が得られ、またエネルギー密度を低めに設定すればマトリックスのみが溶解し、溶接が可能であると報告された。

FPAlumina/Al についての繰返し衝撃とエロージョンとの機構についての研究では、クレータは繊維の破壊およびその破片を含んだマトリックス金属の溶解と半径方向への流れによって起こることが報告された。

若干特殊な報告であるが、研究の方向を考える上に重要な MMC の現状分析と展望について述べられた。

2. セラミック系複合材料

セラミック系複合材料については日本側からのみ 4 件の報告があった。

ピッチコークとメソフェース・カーボンを用いた炭素繊維強化炭素 (C-C) 複合材料では市販の C-C 複合材料に比較し、1.5 倍もの比強度のものが得られたと報告された。2 ホウ化チタンは焼結性が低いという問題点がある。これに対して、5% の Ni-B 合金または 0.5%

Ni₇Zr₂ 合金を添加することは焼結性の向上にきわめて有効であり、得られたものは硬度、強度、酸化抵抗が高いことが報告された。

他の三つはセメント・マトリックス複合材料に関する報告である。その一つはポリマーを含浸した物であり、もう一つの報告は連続炭素繊維で強化した物である。前者の圧縮強度については複合則が成立することが示された。また後者についてはエポキシ樹脂を含浸した炭素繊維ストランドを格子状にしたものにエポキシと微細な砂で被覆したものをモルタルの強化材として用いるのが有効であると報告された。

3. MMC の界面

このセッションでは日本側から 3 件の報告がなされたが、これらは相互に連携した研究である。それを要約すると、MMC においては繊維とマトリックスの結合はある程度強くないほうがよい。そのような MMC を実現するために炭素繊維に熱分解黒鉛または Ti-B などを 2~3 層重ねて被覆したものを強化材として Al 基の MMC を作った。その結果 2~3 層重ねて被覆した繊維を用いた場合に強化の効果が大きかったと報告されている。

以上を通じて、MMC においては短繊維に関心がもたれていること、セラミック系複合材料は実用化されている物とこれからの物との差が大きいこと、等の印象を受けた。

(塩田一路)

6月25日 Room A (Session 13~15)

6月25日 Room A はセッション 13 の Fabrication から始まった。まず、「大規模宇宙構造物のための薄肉 CFRP パイプの連続成形」(三菱電機: Murayama ら) では (0₄/±60°) や (0₄/±45°) などの積層で、2.0 m/h の成形速度が達成され、引張り弾性率は ROM の 94~97% になったことなどが報告され、「長繊維強化熱可塑性プラスチックの成形中のマトリックスと繊維の分離」(東北大: H. Hojo, E-Gon Kim ら) では成形中の繊維にかかる重力、抗力、浮力などの解析により、繊維配向や繊維とマトリックスの分離が生じることが報告された。また「熱可塑性樹脂マトリックス複合材料」(デュポン: I.Y. Chang) では長繊維 FRTP の静的力学的特性のデータベースの開発について報告があり、マトリックスの弾性率が複合材料の圧縮強度の鍵となる議論があった。また、「ガラス繊維強化熱可塑性プラスチックの再利用に関する基礎的研究」(京工繊大: Maekawa ら) では、GRTP を何度も成形し、そのたびごとに強度がど

う変動してゆくかについて報告があり、チャージ率が100%では10回位までは再利用できることを示した。

続いてセッション14, Testingでは3件の発表が予定されていたが、テキサスA & M大学のV.K. Kinraらによる「複合材料超音波非破壊試験」はキャンセルされ、「複合材料のAE特性と構造因子との関係」(京工繊大: M. Suzukiら)と「AEを用いた金属マトリックス複合材料の力学的挙動の研究」(カリフォルニア大: C. Johnson, K. Onoら)の2件だけとなった。前者では、AE信号の周波数解析により、特定の破損様式(繊維断断、引き抜き、マトリックス亀裂、剝離など)が特定のAE周波数に対応していることが示され、後者では、AEの発生パターンがSiCウィスカの破壊やSiC粒子のまわりの破損に対応していることが示された。

午後にはセッション15A, Design Iと15B, Design IIが開かれた。「積層複合材料の剛性および/または強度の最適化」(航技研: H. Fukunaga)では積層パラメータの概念を用いて面内荷重下での最大強度を達成する積層構成などが報告され、「面内剪断負荷を受ける三角トラスコア複合材料サンドイッチパネルの最小重量設計」(デラウェア大: J.R. Vinson)では、全体的パネルの不安定、局所的表面材剪断不安定、そしてトラスの剪断不安定の三つの破損モードを同時に生じるとして重量最小を達成し、「軸圧縮荷重を受ける繊維積層複合材料平板の最適設計」(金沢工大: M. Miki)では、曲げ積層パラメータの概念を用いて座屈に対して最適な繊維配向角を求める設計法が提案された。一方、「構造用複合材料の自動車への応用—設計と製造規準」(フォード社: P. Beardmore)では、将来の課題とFRPの潜在的有用性が議論され、「商業輸送航空機の垂直フィンのための新しいグラファイト/エポキシ材料の応用研究」(日本航空機製造: N. Tsudaら)では慣用材料にかわってCFRPを用いるための実用データの収集、そして設計基準の確立について報告があった。

設計の後半セッションでは4件の発表があった。まず、「宇宙構造物のためのフルスケール展開CFRPトラスの開発」(三菱重工: Y. Sakataniら)では軸方向配列のCFと平織りのGFからなる薄肉パイプを組み合わせたトラスの製造とその試験について報告があり、展開のようは16mm映画でも紹介され、注目を集めた。続いて、「ゼロまたは任意の熱膨張係数をもつティラード積層板」(航技研: T. Ishikawaら)では積層パラメータの概念を熱膨張に導入し、各温度で熱膨張がゼロになる積層構成を見いだした。また、「FW圧力容器にお

けるアラミド繊維の性能」(デュボン社: G.E. Zahrら)では衝撃損傷後の破壊圧力はGraphiteよりKevlarのほうが高く、そしてHigh Performance Kevlarでは著しく良いことなどが報告された。また最後の「軸方向圧縮された複合材料円筒のマイクロコンピュータによる最小重量設計」(Compiègne工科大学: K. Kaminura)では非線形数値計画法を用いて、板厚、繊維配向角、スチフナの間隔などの設計変数を最適化するコンピュータプログラムが開発されたとの報告があった。

夕方からKeynote Speechとして「複合材料: 次は何?」(米空軍: M.J. Salkind)があり、複合材料が将来航空機と自動車に多用される見通しであることが述べられた。とくに、金属と複合材料(FRP)の比較では、前者の材料費は安い労働集約型であること、一方後者は材料費は高いが、省力化が可能で、費用も1990年以降は全体として安くなるだろうこと、そしてFRPの靱性は金属と根本的に異なり、クラック先端をいかに鈍化させるかにかかっていることなどが述べられた。なお、このspeechは少し長いjokeから始まったが、私も含めて多くの日本人はその内容がわからず、後で日本語訳の解説がなされた。それを聞いてもjokeとは思えなかったが、米国人からも「誰か英語で解説してくれないか」といった声がきかれたのは楽しい光景だった。あれは本当にjokeだったのだろうか。(三木光範)

6月25日 Room B (Session 16~20)

Session 16 Fiber-Matrix Interface (4編)

Uematsuら(三菱化成)は、ピッチ系カーボン繊維の表面処理の程度が高いほど、エポキシ樹脂との界面剪断強度が高いことを示した。さらに、この界面剪断強度とCFRPとしての引張り強度の関係を調べ、界面剪断強度が高過ぎると、CFRPの強度が低下することを示し、そのメカニズムについて考察を加えた。Shindoら(大工試)は、PAN系カーボン繊維の比表面積、活性表面積などの表面特性を測定し、これら諸特性と、単繊維を埋め込んだ樹脂試験片の引張り試験により得られた界面剪断強度との関係を調べた。Nakaoら(岐阜大)は、カーボン繊維とエポキシ樹脂の接着強度評価のための新しいピール試験法と剪断試験法を開発し、これらの試験法を用いて、マトリックス樹脂の弾性率とピール強度および剪断強度との関係を明らかにした。Nakaoら(岐阜大)は、著者らが開発した試験法により、ニトリルゴム変性エポキシ樹脂をマトリックスとするCFRPのピール強度と剪断強度について調べ、これらの強度とCTBN

の配合比との関係を明らかにした。

Session 18 Environmental Effects (5編)

Weitsman ら (テキサス A & M 大) は, CFRP およびそのマトリックスである樹脂単体の吸水特性に及ぼす応力の影響を, 実験により調べた。樹脂の場合には, 応力を負荷することによって飽和吸水量が増加し, 一方, CFRP では吸水, 乾燥過程すべてに影響を及ぼし, いずれの場合にも Fick 則からはずれることが示された。Gandhi (ミシガン州立大) は, 高分子系複合材料の吸水性に関するモデル化の手法を示した。複合材料と水分の集合体とみなしたこのモデルでは, 吸水の挙動, 飽和吸水量, 水分の拡散に及ぼす応力の影響などが求められる。Loken ら (デュボン) は, 複合材料を表板とするサンドイッチ構造の耐環境性を向上させるための, アラミド facesheet について紹介した。Wang ら (イリノイ大) は, 熱可塑性樹脂マトリックス複合材料の弱点である層間クリープ変形と層間破壊について実験と解析を行なった。これらの実験はいくつかの温度レベルで行なわれており, 解析結果との検討を通じて, 層間クリープ変形と破壊の基本的なメカニズムに関する知見を得ている。Hyer ら (メリーランド大) は, 非対称に積層された CFRP 平板の面外変形の曲率と温度の関係について解析と実験を行ない, この関係が古典積層板理論で得られる直線関係とはならないことを示した。さらに, 変形の曲率は, 材料の不均一性, 繊維配向のわずかなずれなどの影響を強く受けることを明らかにした。

Session 19 Equipment Design/Physical Properties (3編)

Onooka ら (織高研) は, 紫外線および電子線照射下における CFRP の劣化について検討し, これをもとに宇宙環境試験装置を設計製作した。この装置は万能引張り試験機に組み込まれ, 宇宙環境で使用される CFRP の機械特性, 化学特性, 熱特性の評価に用いられる。Nomura ら (テキサス大) は, 複雑な形状をした有限領域の複合材料について, 過渡的な熱伝導を求める解析法を示した。また, この数値解析で使用したソフトウェア, REDUCE-3 についても言及した。Morita ら (東芝) は, 磁性合金粉末と樹脂からなる磁性複合材料を開発し, その製法, 成分の含有率と諸特性の関係などが紹介された。

Session 20 Education

Sierakowski (オハイオ州立大) と Vinson (デラウェア大) により, 米国における複合材料教育の現状が, 紹介された。工学系の学部学科を有するすべての大学につ

いて, 複合材料関係の教職員数, 学部, 大学院における複合材料に関する講義数, これを聴講する学生数, 複合材料をテーマとしてとり上げた学位論文の数などを, 地域別 (東部, 中部, 山岳, 西部の四標準時間帯に分けて) に調査した結果が示された。 (浜本 章)

お わ り に

会員各位のご賛同とご協力により, また, 会議関係者各位の献身的なご努力により, 本会議を盛況裡に終えることができた。厚く御礼申し上げる次第である。

頁数の都合上, 多くを記すことはできないが, 以下に簡単に経緯について記す。

前回 (第2回) 日米複合材料会議の米国側組織委員長 Jack R. Vinson デラウェア大学教授の来日のチャンスをとらえて, 1984年11月14日に, 竹橋会館において, 第1回実行委員会を開催し, 1986年6月に東京で行なうことに決定, 米国側からの参加者30名とふみ, 発表論文は日米あわせて, 総数60篇を シングル・セッションで3日間で行なうことを予定した。

日程は, 1985年9月15日発表論文 アブストラクト締切り, 10月末採否通知, 1986年6月1日登録申込締切りであった。

ところが, 予期に反して, 当初予定のほぼ倍近くの論文発表申込みがあり, しかも, いずれも貴重な研究成果の賜物で, 甲乙つけがたく, 却下するにしのびず, はじめ前回と同じ神田学士会館を会議場に予約していたのを, 急遽, 東京理科大学の高層の1号館17階記念講堂に変更し, 二つのセッションで同時に行なうパラレル・セッション3日間で, 総論文108篇 (うち, 海外から44篇) をこなすことになった。また, 1985年12月になって, 米国側から急に Keynote speech の要望があったりして, プログラムがやっと最終的に決定, 普通講演では, 1人20分となった。一方, 米国側よりの要望で竹橋会館に宿泊予約を打診したところ, 方針変更により, 外国人団体客の予約は受け付けられなくなり, これまた, 他に採さざるをえなくなり, 妥当な室料との注文もあり, また, 40室もの多数の予約が必要なため, 結局, オープン1年位の大規模ビジネスホテルの新宿ワシントンホテルにきめた。このホテルは, 新宿駅南口より歩いて8分だが, 外貨交換がフロントでできないので, わざわざ銀行まで出むかねばならず, とくに, 前日の6月22日が, 日曜日のため, 米国側参加者には迷惑をかけた向きもあったことを反省している。なかなか, 妥当な室料と便利さとを両立させるのは, むずかしいことである。

財政的には、幸いにして、日本万国博覧会記念協会より、200 万円の補助金を受けることができた。

日本側の実行委員会は、合計 9 回、日米合同の組織委

員会 2 回、日本側の最終組織委員会 1 回をそれぞれ、開催した。

(小林 昭)

紹介

繊維補強セメントおよびコンクリートに関する 国際シンポジウムに出席して

魚 本 健 人*

英国のシェフィールド大学において、7 月 14 日から 7 月 17 日までの 4 日間、第 3 回の繊維補強セメントおよびコンクリートに関する国際シンポジウムが開催された。この国際シンポジウムは、1975 年に第 1 回目がロンドンで開催され、今回は第 2 回目と同じシェフィールドで開催されることになった。主催は RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions) の 49-TFR 技術委員会であるが、ACI, ASTM, JCI 等もこのシンポジウムを共催している。

今回のシンポジウムには、32 カ国から 200 人以上の参加者があり、わが国からも 10 人以上出席していた。大半は欧州諸国からの参加者であるが、アメリカ、アジア、アフリカ、オセアニアからも参加者があった。

公表された論文は、表 1 に示すように 88 件であったが、発表者の都合で発表されなかった論文もある。また、それぞれの論文で対象とした繊維ごとにまとめると、表 2 に示すように 17 種類にも及んだ。なお、この表では異なった種類の繊維が同じ論文で扱われている場合には、それぞれを 1 件として数えているので、公表論文数よりも多い数となっている。

これらの表からもわかるように、公表された論文の約半数は鋼繊維を使用したものである。とくに表 1 の「8. 構造特性」に分類された、構造物材としての利用に関するものの大半は、鋼繊維を使用している。これは、建設材料として見た場合、現在最も可能性の高い繊維は鋼繊維であると考えられていることを示しているが、ただたんにマトリックスの補強という面ばかりでなく、経済性等

も加味されていると思われる。

ガラス繊維に関しては万遍なく研究が行なわれているが、セメントからのアルカリによる劣化防止が最も大きな問題とされていた。公表された論文でも、セメントのアルカリを減少させたり、ガラス繊維表面に保護膜等を設ける方法等が出されていたが、ガラスそのものの品質改善方法についても種々検討されていた。

わが国ではあまり多くの研究がなされていないポリプロピレン繊維に関する研究が、諸外国ではかなり研究されている。これはおもにアスベストの代替品としての利用が目的である。この繊維の長所としては、鋼繊維やガラス繊維に比べ安価であり、腐食しにくくアルカリにも強いことがあげられているが、大きな問題点としては耐熱性がある。この繊維の場合、短繊維として使用する方法と連続繊維として使用する方法があるが、後者はこの繊維を多層配置させる方法である。多層配置の場合、何十層かを 5 mm 以下の厚さで作成するため、製造上のノウハウが重要となっている。

近年、わが国でよく研究されるようになってきた炭素繊維やアラミド繊維に関しては、諸外国ではそれほど多くの研究が行なわれているわけではない。しかし、何本もの繊維を束ね、樹脂で固めた短繊維または長繊維 (FRP ロッド等) としての利用方法について報告があり、わが国と似た研究傾向であった。

天然の植物性繊維の利用に関しては、わが国ではほとんど研究発表がなされていないが、開発途上国等におけるアスベスト代替品としての研究が発表されていた。この繊維の場合、耐久性が問題となるが、ヤング率が小さいにもかかわらず、マトリックスと複合化させると、かなり高い曲げ耐力、変形能を有することなど興味ある報告がなされている。このように、地域に合わせた開発研

* Taketo UOMOTO: 東大生産技術研究所 (106 東京都港区六本木 7-22-1)