

# N R I M NEWS



科学技術庁 金属材料技術研究所

National Research Institute for Metals

## 特集 “強磁場研究のメッカを目指す”

- 強磁場施設の開放
- 強磁場マグネットの利用と運転
- さまざまな磁場—さまざまな用途
- 超伝導の応用・標準化
- 磁気分離—環境問題への挑戦
- 磁場で化学反応を制御する
- 新たな物質・物性を求めて

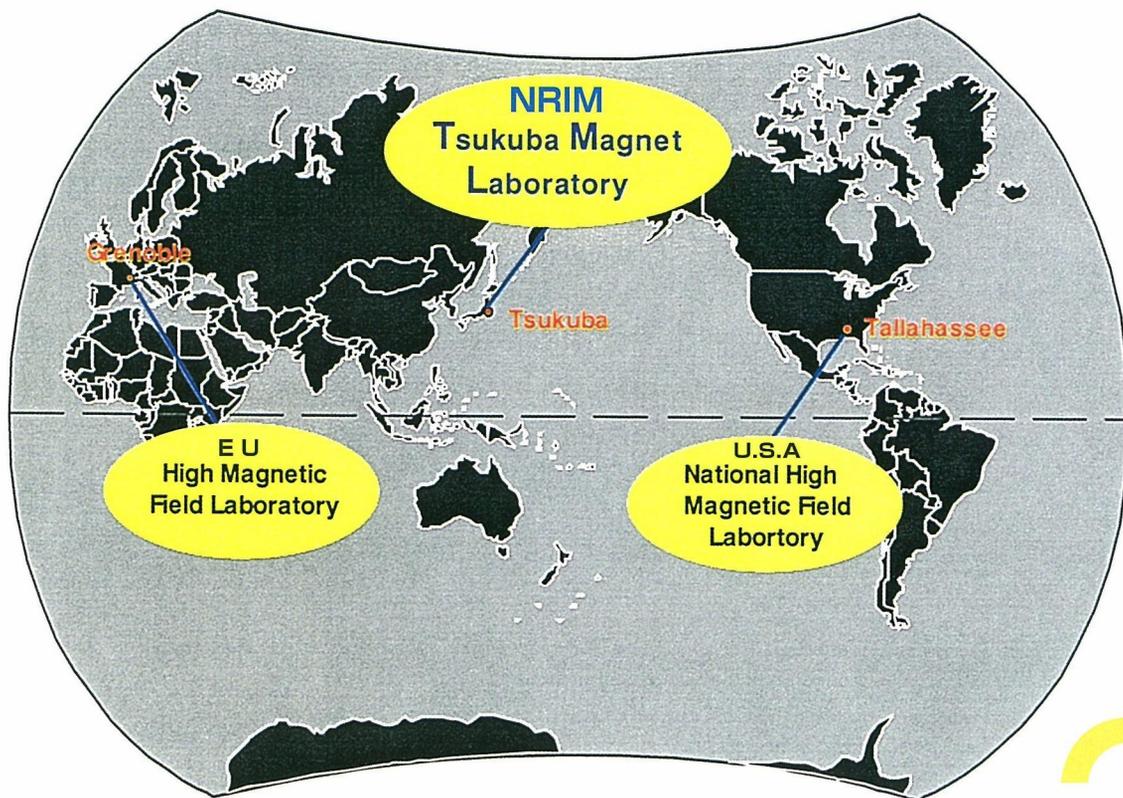
## 講演会報告

## 海外技術協力

## 研究最先端

- うさぎ体内で純チタン製ボーンプレート腐食・摩耗
- X線透過法によるSiC繊維強化アルミ合金複合材料の破壊過程の研究

## 私の実験室



# 2

1998 FEBRUARY

# 強磁場研究のメッカを目指す



極限場研究センター  
強磁場ステーション  
和田 仁

## 強磁場施設の開放

当研究所において、超伝導材料の研究が開始したのは1960年代です。優れた超伝導材料を開発するためには強い磁場が必要ですが、逆に、優れた超伝導材料を用いると強い超伝導マグネットを作ることができます。これまで、当研究所の超伝導材料研究から各時代における世界最高級の強磁場マグネットが生まれてきました。現在、桜地区の強磁場ステーション磁界実験棟には、36.5テスラの世界最高磁場を発生したハイブリッドマグネット、超伝導のみでは世界最高記録である22.8テスラを有する超伝導マグネットなどの強磁場マグネット群が集中配備されており、「Tsukuba Magnet Laboratory (TML)」の通称で国内外の研究者に知られています。

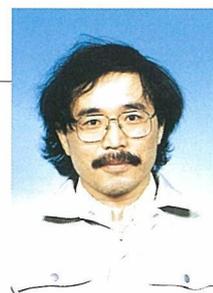
強磁場は、固体物性、化学、生化学、医学、材料プロセスなど多くの科学技術領域にとって有用な研究ツールであり、TML

でも、超強磁場マグネットの開発や超伝導の応用・標準化、固体物性の研究に加えて、磁場を利用した物質分離、化学反応制御および金属組織制御研究などが進行中です。このように多様な利用が可能なTMLのマグネット群に対して、外部の様々な分野の研究者から利用を希望する声が寄せられています。これらの強磁場マグネットの製作、運転には莫大な費用が必要ですから、同様のものを多数設置することは困難です。当研究所は、TMLの強磁場マグネット群を人類共通の資産であると捉え、1998年4月から共同利用型施設として外部研究者に開放することを決定しました。

現在、世界にはTMLに相当する規模の強磁場施設が他に2カ所あります。1つは米国フロリダ州タラハシー市の国立強磁場研究所、他の1つは仏国グルノーブル市にあるE U強磁場共同利用施設です。前者は数年前に設立されたばかりの新しい研究所であり、後者はノーベル賞受賞者をも輩出した伝統ある研究施設です。TMLはこれら両研究機関と緊密な協力関係にあり、政府間の科学技術協力合意に基づいて研究所間でも合意文書を交わすなど、活発に研究交流を実施しています。この強磁場研究施設の世界ネットワークが確立すると、強磁場に関する情報の交換、研究者・技術者の交流が活性化され、強磁場の科学技術が一層発展することが期待されます。



# 強磁場研究のメッカを目指す



強磁場ステーション  
佐藤 明男

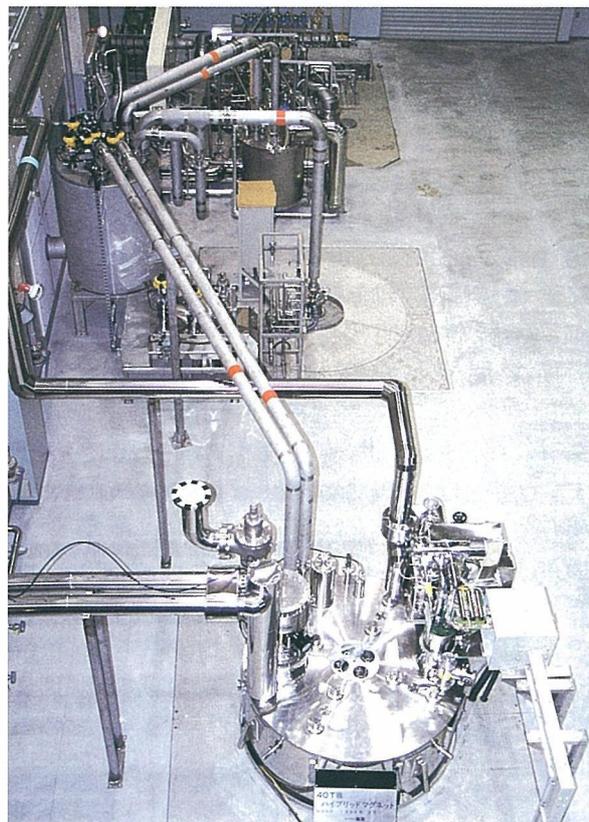
## 強磁場マグネットの利用と運転

### —外部研究者による利用—

当研究所は、毎年度秋に、次年度の外部研究者の実験テーマの提案を国内外で公募します。提案されたテーマは、大学および外部国立研究機関の研究者を含む「強磁場部会」において審査、選定します。当研究所は選定されたテーマを共同研究の形で受け入れます。

TMLでは、ハイブリッドマグネットなどの大型のマグネットについては、専門の運転チーム（通称MOHLT）が運転に当たります。テーマが採択された外部研究者はMOHLTと相談して利用時間を決めることとなります。

指定された大型マグネット以外のマグネットを利用する場合、外部研究者はそれぞれのマグネットの担当者と利用時間について相談し、マグネットの運転は原則として自分で行います。外部研究者は



強磁場ステーション（TML）の主要マグネット

	発生磁場 (T)	口径 (mm $\varnothing$ )	備考
<b>大型マグネット</b>			
ハイブリッドマグネット	36.5★	30	ヘリウム3クライオスタット
	32.4★	50	温度可変クライオスタット
水冷銅マグネット	29	32	
21T 超伝導マグネット	21.7★	61	15 T (314 mm $\varnothing$ )、18 T (160 mm $\varnothing$ )
<b>パルスマグネット</b>			
ロングパルスマグネットA	73.4★	10	液体窒素冷却、パルス幅 5 ms
ロングパルスマグネットB	63.5	16	液体窒素冷却、パルス幅 100 ms
水冷パルスマグネット	40	60	開発中、パルス幅 20 ms
<b>精密超伝導マグネット</b>			
20T 精密超伝導マグネットA	20	52	磁場均一度 $10^{-4}/10\text{mmDSV}$
20T 精密超伝導マグネットB	20	52	磁場均一度 $10^{-3}/10\text{mmDSV}$
16T 精密超伝導マグネット	16	65	磁場均一度 $10^{-4}/10\text{mmDSV}$
固体 NMR 用超伝導マグネット	15.5	70	磁場均一度 $10^{-6}/10\text{mmDSV}$
溶液 NMR 用超伝導マグネット	11.75	89	磁場均一度 $2.6 \times 10^{-6}/20\text{mmDSV}$
<b>小型超伝導マグネット</b>			
18T 汎用超伝導マグネット	18	50	4.2 K 専用
15T 超伝導スプリットマグネット	15	(44)	温度可変クライオスタット (試料空間 25 mm $\varnothing$ )
無冷媒 10T 超伝導マグネット	10	100	縦・横置可能、試料空間は室温

★: 世界記録

その他に、超伝導マグネットの予冷、あるいは実験用液体ヘリウムの提供などのサービスをMOHLTから受けることができます。

### —超低温発生技術の確立—

マグネットとその冷却システムを運用するMOHLTは、強磁場マグネットを効率的に運転するための、実験用の磁場空間を有効に利用するための、超制御冷却技術低温発生技術の研究を行っています。

# 強磁場研究のメッカを目指す

## さまざまな磁場—さまざまな用途



強磁場ステーション  
木吉 司

### — 強磁場の追求 —

強磁場ステーションの強磁場マグネット群は、金属材料技術研究所のもつ高い材料研究ポテンシャルの成果として開発されてきました。超伝導マグネットとしては、世界で唯一21テスラ以上の磁場を発生することが可能な21テスラ超伝導マグネットには、当所で開発したTi添加Nb<sub>3</sub>Sn線材が使用されています。やはり当所で開発した高強度高電導度の銅銀合金は、パルスマグネットおよび水冷銅マグネット用に世界中で使用されています。現在は、当所で発見したBi系酸化物超伝導材料（高温超伝導材料）を用いた1GHz（中心磁場23.5テスラ）級超伝導NMRマグネットの開発が進行中で、さらに、25テスラ超伝導マグネットや40テスラ級ハイブリッドマグネットの性能向上など、より強い磁場を発生する計画も進めています。

### — 多様な磁場の提供 —

私たちは、より強い磁場を追求するとともに、さらに一步踏み込んで、つぎのような多種多様な磁場を設計することに研究領域を広げつつあります。

**【均一磁場】** 私たちは、上で述べた1GHz級超伝導NMRマグネットでは、磁場の強さだけでなく、空間的に非常に均一で時間的安定性も高い磁場を発生する必要があり、磁場を補正するコイルの設計も必要となります。

**【均一磁気力】** 私たちは生命科学の研究者と協力して、均一な磁気力の場において良質なタンパク質の結晶を得る研究を行っています。そこでは、磁場ではなく磁気力（磁場×磁場勾配に比例）が試料

空間内で均一となる磁場環境を設計することに取り組んでいます。均一でかつ強い磁気力を発生することが要求されています。

**【局所磁気刺激】** 生体にパルス磁場を与えて神経を刺激する磁気刺激では、局所的な刺激が可能な磁場を設計することが非常に重要です。私たちは医学分野の研究者と協力しながら、磁場とそれによって生じる渦電流を3次元的に解析し、より局所的な刺激を与えることのできるコイル配置を研究しています。

強磁場ステーションのマグネットが多様な科学技術分野の研究者に利用されるようになると、要求される磁場の強さ、分布、形状なども、ますます多様になると思われます。私たちは、そのような状況に対応していくために、これまでの材料開発・マグネット開発の経験を踏まえて、さまざまな磁場を設計し、広い分野の研究に提供したいと思っています。



21T超伝導マグネット  
のコイル本体

強磁場

均一磁場

タンパク質

均一磁気力

局所磁気刺激

# 強磁場研究のメッカを目指す

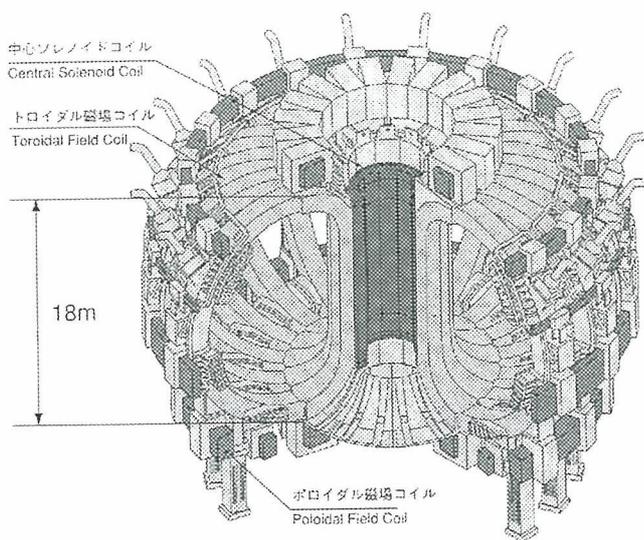
## 超伝導の応用・標準化



強磁場ステーション  
竹内 孝夫

### —超電導の応用—

強い磁場を発生する大型の超伝導マグネットは、エネルギー発生・貯蔵・伝達、交通輸送、医療診断など人類の社会生活に大きなインパクトをもつ様々な分野に応用されることが期待されています。中でも、私たちが、科学技術庁の研究機関として重要な分野と考えているのが核融合炉用超伝導マグネットです。強磁場によってプラズマを閉じこめるトカマク型核融合炉では、非常に複雑で大型の超伝導マグネットが使用され、超伝導材料は大きな力と中性子照射に曝されます。このため、核融合炉用超伝導マグネットを設計・製作するには、核融合炉内の厳しい環境に耐える超伝導材料を開発するとともに、これらの環境下での超伝導材料の挙動を正確に知ることが重要です。私たちは、TMLの強磁場マグネットを用いて、応力下での超伝導性を測定・評価するとともに、Nb3Alなどの新しい超伝導材料を、核融合炉に応用するための研究を



核融合炉用超伝導マグネット

行っています。

この他、私たちは、高エネルギー物理への応用にも関心をもっています。世界の研究者が協力して新しい素粒子発見に挑戦している欧州原子核共同研究機構の大型素粒子加速器には、新しい超伝導材料を用いたマグネットが必要とされています。私たちの超伝導マグネット用材料の開発能力が発揮できる分野です。

### —超電導材料の標準化—

私たちは、TMLの強磁場マグネットを用いて、超伝導材料の試験方法を確立し、標準化する研究についても力を注いでいます。試験方法が標準化されると、材料開発の効率化や信頼性の向上、ひいては超伝導の応用、普及に大いに役立つのです。私たちは、先進材料の標準化に関する国際研究プロジェクトであるVAMAS (Versailles Project on Materials and Standards) に積極的に参加し、超伝導材料WGの議長機関として国際的な試料持ちまわり試験などを主宰して、国際的な立場から標準的な試験方法の確立を図っています。その結果これまでに、ニオブ・スズ線材の臨界電流標準測定法、および酸化物超伝導材料であるビスマス系銀シース線材の臨界電流測定ガイドラインを提案することができました。これらは国際規格の審議機関であるIEC (International Electrotechnical Commission) に原案として採用され、現在、国際規格として成文化されつつあります。



VAMASのロゴマーク

# 強磁場研究のメッカを目指して



強磁場ステーション  
小原 健司

## 磁気分離—環境問題への挑戦

産業の急速な発展と人口の急増あるいは高密度化によって、生活環境への有害廃棄物の放出・放棄が、深刻な問題となっています。このような有害微粒子を分離する技術の中で、「磁気分離技術」が注目され、実用化と普及が待望されています。

### —磁気分離とは？—

磁石が鉄粉を吸着することは誰でも知っています。ではアルミニウム粉や銅粉はどうでしょうか？最近、強磁場と分離作用材（強力な磁気力発生のための強磁性金属メッシュ）を用いて吸着可能になりました。このように磁気力を利用して、空気、水、海水、油、有機溶媒などに含まれている微粒子を分離回収あるいは除去する方法を磁気分離と呼びます。鉱石選別には、150年以上の昔から使用されています。最近では、紙のコーティング材料のカオリン粘土の精製（白色粘土中に含まれる微量の有色鉱物の除去）に、超伝導磁石を使用した磁気分離技術が実用されています。

### —磁気分離技術の長所は？—

微粒子に分離力の磁気力を直接作用させて分離することから、従来型のろ過や沈殿法の十倍～数百倍程度的高速分離が可能です。従来技術では経済的に不可能な希薄な懸濁系の大量処理ができます。しかも分離後磁場を切ると、簡単に分離力が消え、被

分離物質を離脱でき、分離作用材の繰り返し使用が可能です。この結果二次廃棄物の排出を効果的に低減できるので、環境保全に大きく貢献します。

### —超伝導磁石がなぜ必要か？—

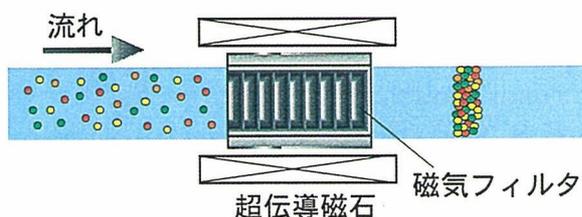
磁気分離装置の省エネルギー化、コンパクト化、さらに経済的に採算の合う処理の高速・大容量化には、電力損失のない超伝導磁石が必要不可欠です。

### —水処理法としての磁気分離法の開発—

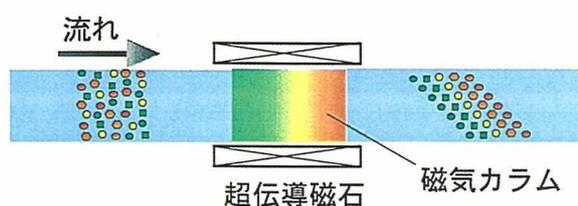
私たちは、液体ヘリウムを使用しないで運転できる可能性をもつ高温酸化物超伝導体の超伝導磁石を水処理に用いることを検討しています。磁気分離性能と機構を解明するための計算機シミュレーション技術の開発とともに、磁気分離用超伝導磁石を含む実験装置の開発を行っています。

### —分析法としての磁気クロマトの実証—

さらに、私たちは、従来の磁気分離法では分離できない微細粒径粒子の種類を分析することのできる「磁気クロマトグラフィー法」を新たに提案し、TMLのダイポール型超伝導マグネットなどを利用して、この方式の実証を目指しています。これが実用化できると、例えば、有害不純物粒子を環境へ拡散させることなく組成分析できる装置となり、様々な応用が期待できます。



磁気分離の動作概念



当所で実証研究中の磁気クロマトグラフィー動作概念

# 強磁場研究のメッカを目指して



強磁場ステーション  
阿部 晴雄

## 磁場で化学反応を制御する

### —磁場で化学反応を変えられるか？—

「化学反応」と言うと何やら難しそうですが、日常生活において、マッチに火を点けたり、お米を炊いてご飯にしたり、また、自動車のエンジンでガソリンを爆発させたり、ありとあらゆるところで化学反応は起こっています。化学反応とは、原子同士を糊のようにくっつけて分子を作っている電子の組み替えが起こり、新しい分子が出来ることです。人間は、いろいろな工夫をして化学反応の際に出るエネルギーを利用したり、有用な物質を作り出してきました。通常、原料となる分子に火を点けたり、熱や圧力を加えたり、光をあてたりして化学反応を起こします。このように、化学反応が起こるためにはきっかけとなるエネルギーが必要です。ところで、身の回りには2、3の金属を除くと磁石にくっつく物質はほとんどありません。つまり、磁場は普通の物質にはほとんどエネルギーを与えないのです。このことから、長い間、化学者は磁場が化学反応に影響することは無いと考えてきました。

ところが、約20年前にロシアと日本の二つの研究グループは独立に、ある光化学反応に磁場が本当に影響を与えることを発見しました。それ以来、磁場が影響を与える化学反応が次々に発見されました。

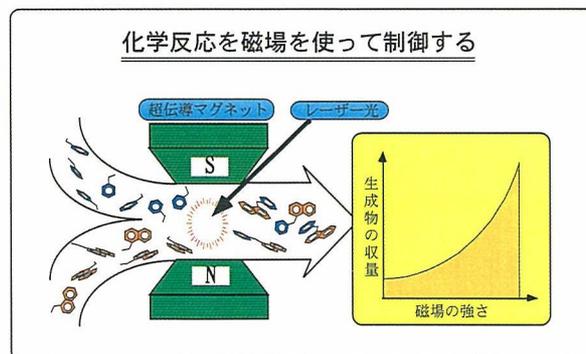
### —なぜ磁場が化学反応に影響するのか？—

分子は、電子や原子核からできていますが、もともとの電子や原子核のいくつかは小さな磁石（スピン）としての性質を持っています。では、どうして分子になると磁石にくっつかなくなるかというと、S極とN極が引き合う磁石と同じように、分子の中では二つの電子が対になって磁石の性質をちょうど打ち消し合っているのです。ところが、

磁場効果が発見された反応例を調べてみると、反応の途中で1秒の100万分の1の短時間ですが、化学結合が切れて電子の対が破れた分子の破片（ラジカル）が出来ることが分かりました。この場合、破片同士の距離がある程度以上長くなると、磁場の僅かなエネルギーでもこの電子スピンの方向を逆転させることができ、これがその後続く化学反応の速度や生成物の収量に大きな影響を与えるのです。

### —強磁場によって何をするのか？—

これまでこの分野の研究は通常の電磁石を使った2テスラー以下の弱い磁場で行われてきました。より強い磁場を使えばもっと制御効率を上げられたり、これまで知られていない機構による磁場効果の発見が期待できます。そこで当研究所では、TMLが提供する40テスラー以上の強磁場を使用して、化学反応の強磁場効果の発見とその機構を解明する研究をしています。現在、有機分子（ベンゾフェノンなど）の石鹼水溶液中での光化学反応や、気体分子（一酸化窒素など）の高エネルギー状態から起こる反応を強磁場領域で測定しています。強磁場を使って化学反応を人為的に制御することで、反応の高効率化や新規物質の大量合成などを目指しています。



# 強磁場研究のメッカを目指す



機能特性研究部

木戸 義勇

## 新たな物質・物性を求めて

私たちは、TMLの強磁場マグネットを積極的に活用した固体物性の研究に集中的に取り組んでいます。

### —物性研究と強磁場—

物質の性質は多くの場合、電子がどのような運動をしているかによって決まっています。電子を強磁場下におくと、動いている電子が力を受け（ローレンツ力）軌道が曲げられたり電子のもつスピン状態が影響を受けたりすることで電気抵抗や磁化率といった物性が変化します。この変化を詳細に調べることが物質の電子状態の解明に有効であることから、磁場は伝統的に物性研究の有効な手段として用いられてきました。特に、近年注目されている高温超伝導体や半導体低次元電子系（例えば表面電子）での量子ホール効果などの複雑な振る舞いを示す状態では、物質中での電子間相互作用の解明が重要であると言われています。こういった電子間相互作用の解明には、従来より強い磁場が必要であり、強磁場の利用は物性研究において不可欠な手段の一つといっても過言ではありません。

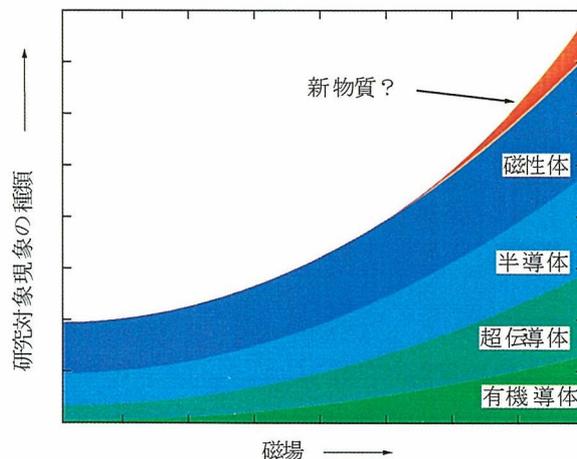
### —物性測定装置の開発—

強磁場を用いた固体の物性研究を広範囲にわたって行なうためには、磁石の開発と同様に測定装置の開発に力を注ぐ必要があります。特に、大型マグネットやパルスマグネットなどでは、磁場を上げ下げする速度や磁場の均一な空間及び測定に使用できる空間のサイズなどの変化に応じて、測定精度を向上させるための様々な工夫が必要です。すなわち、磁場発生の方法に適した測定装置の開発、改善を絶えず行わなければなりません。私たちは、磁場の均一な空間と絶対温度0.1K以下の極低温装置を組み合

わせた量子振動現象の精密測定法の確立や、パルス磁場を用いて瞬間的に磁化率、電気伝導度、光学スペクトルの測定を高速、高感度、低雑音で行なうための測定系の開発を行なっています。こうした物性測定方法をさらに高度化、精密化することによって、これまでに得られなかった多くの情報が得られるようになりつつあります。

### —物質探索と試料作製—

研究対象である物質も磁場の増大に従って広範囲になっています。強磁場下では、ローレンツ力によって電子が小さな領域に閉じ込められ、狭い領域での電子と電子、電子と不純物イオンとの相互作用が重要になるため、半導体微細加工技術によって作成された微小デバイスや、磁性原子不純物を添加した試料などで新しい物理現象が期待されます。私たちは、こういった物質を探索、作製し、TMLにおいてのみ可能な強磁場を用いた測定によって物性物性を明らかにします。このようにして現在、強い電子間相互作用が実現している半導体微細構造などの物質系を中心に研究を進めています。



## 講演会報告

## 超鉄鋼ワークショップ'98



評価ステーション  
高橋 稔彦

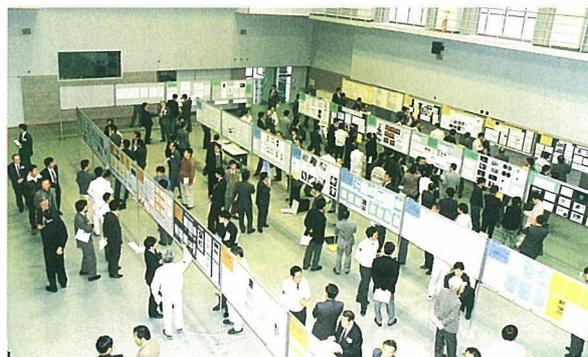
去る1月19日につくばの金属材料技術研究所において、超鉄鋼ワークショップ'98が、「超鉄鋼材料：実現への萌芽技術」と題して開かれました。

当研究所では、来る新世紀の社会インフラを構築する革新的な鉄鋼材料の創造を目指した基礎研究を行うべく、昨年4月に「新世紀構造材料(超鉄鋼材料)研究プロジェクト」をスタートさせました。このワークショップは、「超鉄鋼材料プロジェクトの狙いと1年目の成果」を紹介し、併せてコメンテーターを含む所外の方々から本プロジェクトに関わる話題を提供していただき、超鉄鋼の実現に向けて議論を深めることが目的でした。

当日は、外部からの参加者が181名と予想をはるかに越え、補助席も満員で立ち見が出る盛況でした。産業界からは120名の参加者がありましたが、鉄鋼、重工メーカーはもとより自動車、建築、電気などの鉄鋼材料の最終ユーザーの方にも参加いただきました。また、大学、官庁、協会からも50名を越える参加をいただきましたが、多忙な時期にも拘わらず10名を越える学生の参加があったことも特筆されます。

午前中は、フロンティア構造材料研究センター長ならびに4人のタスクフォースリーダーから、プロジェクトの狙いとこれまでに得られた成果の概要が紹介されました。

午後はまず最初の2時間を使ってポスターセッションが開かれました。外部からの16件を合わせて54件の研究成果が披露され、時間いっぱい熱心な質疑が展開されました。



その後3時からは、九州大学の高木節雄、大阪大学名誉教授で発電設備技術検査協会足崎試験研究センター長の松田福久、東京工業大学の松尾孝同じく東京工業大学の水流徹の各先生から話題を提供いただき、今後の研究の進め方に関する討論が行われました。

全体を通して、「国研としての意思が理解できた」、「単発技術ではなくストーリーを持って総合技術を作り上げようと努力している、金材技研も変わった」、「非常に有意義なポスターセッションで次回は自分も発表したい」などの、金材技研の研究者には面はゆい感想が多く寄せられました。最後に、外部からの参加者を代表する形で新日鐵の阿部顧問から、「金材技研が日本の鉄鋼材料の研究センターに育って欲しい。そのためにまずこのプロジェクトを成功させてください」という力強いコメントをいただきました。

私たちは、構造材料の基礎研究に寄せる期待が予想を越える大きさと広がりを持っていることを実感し、改めて責任の大きさを痛感しました。プロジェクトを成功させ、更に多くの方々に集っていただける研究所を目指して努力してまいります。

最後に、つくばまで足を運んでいただいた皆様に衷心より感謝し、併せて今後ともご指導、ご鞭撻を賜ることをお願い申し上げます。また、本ワークショップをご後援いただいた、(社)日本機械学会、(社)日本金属学会、(社)日本鉄鋼協会、(社)腐食防食協会、(社)溶接学会に厚くお礼申し上げます。





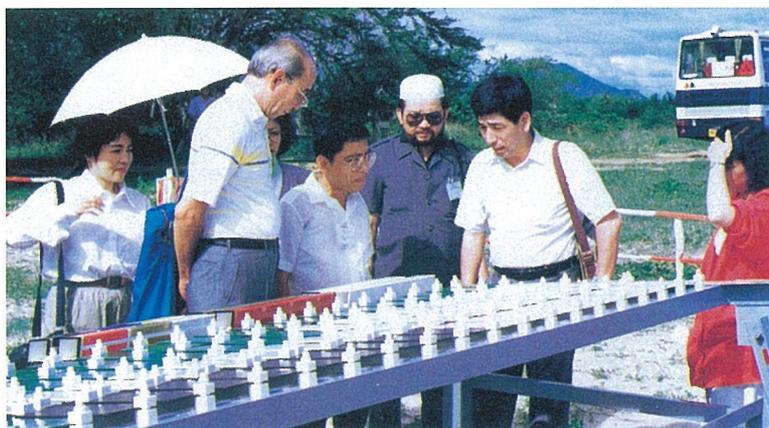
特別研究官  
小玉 俊明

## 暴露試験の仲間たち

材料の耐久性を実環境で試験するのが暴露試験ですので、これが行われる環境としては海水、淡水、土壌、あるいは高温材料の場合には高温燃焼ガス環境など千差万別です。その中でもっとも一般的に行われるのが大気暴露試験で、とくに構造材料の評価法として基本的なものです。近年では酸性雨をグローバルな現象として捕らえねばならないと同様な意味で、材料と環境との耐久性評価は地球規模的視点が要求されます。したがって、その研究やデータベース作りに、国際的な協力が不可欠であります。ここでは比較的グローバルな視点で大気腐食試験を進めていて、我々と関係のあったいくつかの国立研究所の仲間とその活動を紹介します。

金属の大気暴露試験で国際協力試験のかなめとしての役割を担ってきたのがチェコ・プラハにある材料防護研究所です。ここでは古くからDr.V.Kceraのもとで特に酸性雨との関連で大気腐食試験を実施してきましたが、代わって現在はDr.Dagmar Knotkovaが活躍しています。彼女は国際規格であるISOの腐食関連の技術委員会作業部会の主査として活躍中です。記憶に残ることとして日本も含めた主に先進国からなる14カ国が参加して実施した共同試験ISOCORRAGのリーダーとして活躍したことです。これにより、まがりなりにも全世界の金属大気腐食地図ができました。また彼女は国連欧州経済委員会のもと大気中の窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）濃度の関数として全欧州腐食地図の作成に指導力を発揮しました。

ISOの世界大気腐食地図で欠落していた熱帯のデータを取り込もうと金材研では国際協力事業団（JICA）の資金援助を受けタイの科学技術研究所（TISTR）とフィリピンの工業技術研究所（ITDI）と共同で両国各4カ所において大気腐食試験を1988から1993年まで実施しました。これはJICA協力ですから政府開発援助（ODA）の一面があったわけですが。共同で実験を行うとともに、技術移転、研究機材の供与、研究施設拡充の役割も担われました。もちろん、これには金材研だけで100%関与することはできないため、技術移転の専門家をお願いして、現地に常駐する形式でプロジェクトを進めた訳です。タイ、フィリピンの上記国立研究所、それにインドネシアの国立科学院（LIPI）の研究所ではJICAプロジェクトを通して設備と研究スタッフを拡充し、材料の耐久性評価試験を日本からも依頼を受けて実施するまでになっています。アセアンは日本にとって工業製品の重要な輸出相手ですから、この地域での材料の耐久性データは商取引上も貴重なものであるわけですが、研究の立場からいっても熱帯の高温多湿な気候と強い太陽光は材料の耐久性能試験に



としては最も魅力的な環境であります。この地域でのわれわれの長い研究協力が材料の耐久性評価に関する研究ネットワーク造りに貢献したものと自負しています。特にタイ工業技術研究所副所長のDr.Ladawal C.とはODAの関係が終了した現在も研究協力を進めています。

新しくアセアンのメンバーとなったベトナムは熱帯気候と長い海岸線を有し、油田開発が原動力となって腐食研究が盛んです。この研究のトップにあるのは前首相の夫人でありハノイ工科大学教授でもある Dr. Phan Luon Cam です。またハノイの熱帯技術研究所では所長の Dr. Bui Thi An らが塗装鋼の大気腐食試験を各地で実施しています。これら多くのベトナムの研究者はロシアや東欧で教育を受け、その技術と資金がここでの研究を支えてきました。代わって日本や西側諸国との協力を熱望しているように思われます。

大気腐食分野で金材研と海外研究機関との国際協力はインドの国立金属研究所 (National Metallurgical Laboratory, NML) との関係確立から開始しました。この研究所では、日本よりも早くインド国内の腐食地図を主に大気中のSO<sub>x</sub>や海塩量との関連で作成していたのです。ここの腐食チームのリーダーはDr.Inder Singhであり、かつて金材研に数ヶ月滞在したことがあります。この研究所は製鉄の町で大気汚染の激しい、Jamshedpurにあるのですがベンガル湾沿いにも海洋試験所を持っています。

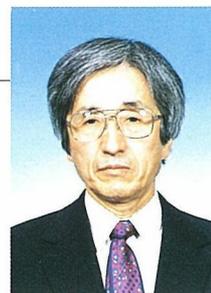
アジア太平洋地域での腐食研究で特にアセアンへの影響力を含めて日本と競合するのがオーストラリアです。ここの科学技術研究機構 (CSIRO) の建築部門では、Dr.I.S.Coleらが海塩やぬれ時間と金属の腐食との関連で活発に研究を進めています。この国は北部に熱帯海洋環境を東海岸に亜熱帯海洋環境を有し、大気腐食研究を進める

上で強みとなっています。

台湾の新竹という研究学園都市でありハイテクの町に工業技術研究院工業材料研究所があります。ここの洪健龍博士は台湾11ヵ所で暴露試験を行い、特に海洋環境と大気腐食の関係を明らかにしていきました。ここでは日本の国立研究所と比べて、産官の共同研究が徹底しており、この暴露試験もすべて民間資金によって実施されたものようです。したがって、暴露試験も比較的短期間で終え、同博士は現在では別の研究に挑んでいます。この研究所がきわめて活力に富むものであるとの印象を受けました。

中国東北部瀋陽には中国科学院金属腐食防護研究所があります。この研究所と金材研とは応力腐食割れの研究で長い交流があるのですが、ここにも大気腐食研究グループがあります。ここでの主関心はSO<sub>x</sub>の金属腐食に及ぼす影響です。特に金属、コンクリートあるいは大理石などは酸性環境に弱いことが知られています。この研究所の報告では中国内陸部のある工業都市では鋼の大気腐食速度が日本の典型的値の10倍にも達していることがわかります。酸性雨が構造物の耐久性への影響を考えると、中国の研究所とこの分野での研究の連携を密にして行く必要があると考えています。





生体融和材料研究チーム  
角田 方衛

## うさぎ体内で純チタンは腐食・摩耗

—周辺生体組織に異常は見られず—

生体内は金属材料にとっては腐食性の苛酷な環境です。比較的耐食性の優れたチタン合金でさえ、1年近く体内に埋め込むと、腐食するという報告があります。

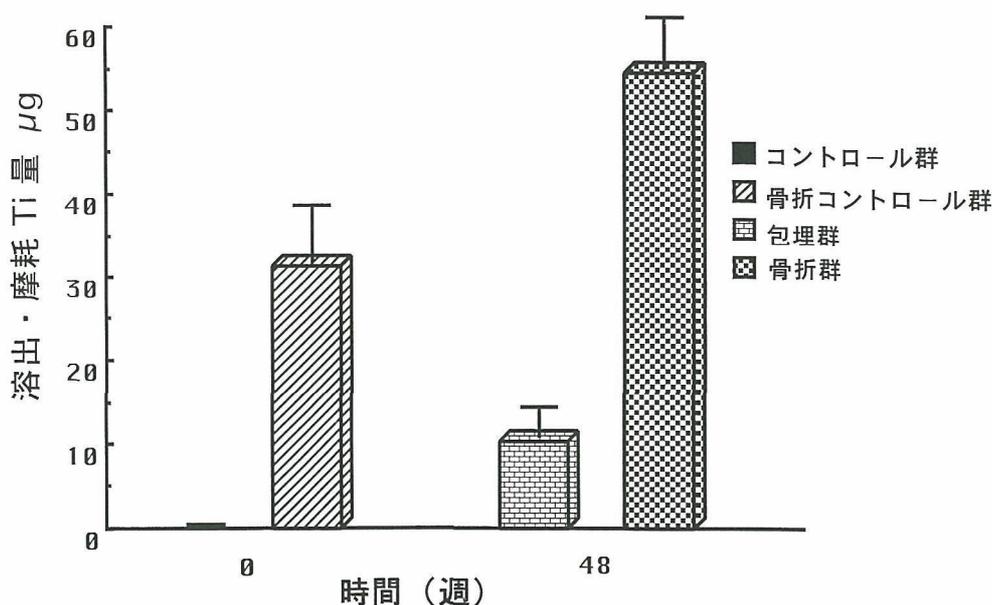
金属材料は高分子材料やセラミック材料に比べて、強度や靱性が高いので生体材料としては骨や歯のように荷重のかかる部分に使われる場合が多く、また電気伝導性が優れているので生体センサーとしても使用されています。

生体材料は使用中に破損すると、再埋め込み手術をしなければなりません。再手術は患者に経済的・肉体的負担を強いるだけでなく、合併症や感染症のリスクを伴います。また、再手術すると、一般に最初の埋

入時に比べて不都合を生じやすくなります。耐用年数を縮める原因に、フレッティング（摩耗の一種）や腐食を伴った疲労があります。これは人工股関節のステム、ボーンプレート（骨折固定金具）、ワイヤー等の破損の主な原因になっています。

生体内の金属材料にフレッティング部があると、腐食は加速されるだけでなく、摩耗粉が体内に蓄積するおそれがあります。生体内における金属材料の腐食や摩耗の問題は、単に耐久性の問題であるだけでなく、アレルギー、炎症、発癌等の生体に対する毒性の問題でもあります。

そこで、当研究所では、金属系生体材料の生体内での腐食・摩耗挙動とそれらの生



純チタン製ボーンプレートとスクリューのうさぎ体内埋め込み試験後の脛骨および周辺組織中のチタン量。

コントロール群：ボーンプレート(B)とスクリュー(S)の埋め込みなし

骨折コントロール群：BとSを右脛骨に内固定術直後に摘出

包埋群：右脛骨周辺の筋肉にBとSを48週埋め込み（フレッティング部なし）

骨折群：右脛骨骨折部にBとSで固定後48週埋め込み（フレッティング部あり）

体への影響を調べるために、生体適合性に優れ、そして使用量が増えている純チタン製のボーンプレート（長さ約28mm、幅約3mm）とスクリュー（ボーンプレートを骨折部に固定するねじ）をうさぎ体内に埋め込む試験を、中外製薬株式会社と共同で行いました（図1）。

脛骨近辺の筋肉中にボーンプレート1枚とスクリュー4本を互いに接触しないように48週埋め込んだ場合（包埋群）、周辺組織（長さ約30mmの脛骨と30X20X2mmの筋肉）中に約10 $\mu$ gのチタンが検出されました。リンゲル液のような塩水中ではほとんど溶出しな純チタンが生体中で溶出する理由として、マクロファージが分泌する活性酸素による溶出（金材技研ニュース1997年1月号）や体内のアミノ酸等とチタンイオンとの結合（錯体の形成）が考えられます。

脛骨骨折部をボーンプレート1枚とスクリュー4本で固定することにより、うさぎ体内にフレッティング疲労部をつくり、48週埋め込んだ場合（骨折群）、体内から約24 $\mu$ gのチタンが検出（チタン量の骨折群と骨折コントロール群の差）されました（骨折コントロール群とは、骨折群と同様に骨折固定後直ちに摘出した群のことです）。この値は包埋群のチタン量に比べて、2.4倍高い値を示しています。このように高くなったのは、フレッティング部で生じた摩耗粉とフ

レッシングにより生じた新生面でのアノード溶解のためです。骨折部を固定したボーンプレート上に覆い被さった筋肉にはチタン摩耗粉が付着していました（写真1）。摩耗粉の分布は、ボーンプレートの穴の位置に対応しています。

48週の埋め込み試験終了後、ボーンプレート周辺の骨および筋肉組織を光学顕微鏡で観察して異常の有無を調べたところ、破骨細胞、マクロファージ、リンパ球等の免疫細胞の浸潤（異常に多数の細胞が集合した状態、炎症所見）や細胞の癌化等の異常は観察されませんでした。

以上のように48週にわたる純チタンを用いた骨折モデル試験では、チタンの溶出や摩耗がありました。安全性には特に問題になるような所見は得られませんでした。しかし、チタンの生体材料としての安全性を保証するにはもう少し長い期間の埋め込み試験が必要です。さらに、包埋群のチタン分析において、ボーンプレートと直接接触していない脛骨中にも約2 $\mu$ gのチタンが検出されました。このことから、溶出したチタンは体内を移動し特定の臓器に濃縮する可能性は否定できません。今後チタンの特定の臓器への濃縮の有無の調査とともに、安全な生体材料としてのチタンの耐食性及び耐摩耗性の向上が必要であります。



骨折部を固定したボーンプレートに付着した筋肉上のチタン摩耗粉

## わたしの実験室

生体融和材料研究チーム  
山本 玲子

## 金材研で細胞？

わたしの実験室は、金材研の中でおそらく最も清潔な実験室だと思う。

入口の扉を開けると簀の子があり、中履きやスリッパが並んでいる。中に入るには靴を履き替え、両手を石鹸で洗わなければならない。室内には大きなクリーンブースがあり、無塵衣という、静電気を防ぎ埃を寄せ付けない特別な白衣を着て入る。さらに、実験中は何度も両手をアルコールで消毒する。勿論、実験器具はすべて予め滅菌されたものを用い、実験台も、使用前と使用後は紫外線ランプで殺菌する。細胞を培養する為には、このくらいの注意が必要なのだ。

金材研で細胞培養を始めて四年経ったが、今でもよく色々な人から「金材研で細胞？」と訊かれる。わたしは今、金属系の生体材料が体内に埋め込まれた時に生体に与える影響を予測する為に、金属元素の毒性を培養細胞を使って調べているのだ。本当は人体に対する影響を知ることが重要なのだが、まさか人間の体を使って実験をする訳にはいかないの、人間や哺乳動物の細胞で実験しているという訳である。ここまできれば聞いている相手もなるほど、と「金材研で細胞」の理由を納得してくれるのだが、しかし、「金材研で細胞」を培養するには他の実験とはまた違った苦労があった。

まず、金材研には細胞を培養するために必要な設備がなかった。例えばわたし達の体は全て細胞（と細胞が作り出したもの）で出来ているのだが、ということは、細胞を培養する為には、わたし達の体の中と同じ環境が必要だということである。具体的には、温度は37℃、炭酸ガス濃度も大気中より高め5%にし、細胞が干からびてしまわないように、ほぼ100%近い湿度を保つ。これは炭酸ガス培養機という装置を用いれば、簡単に達成できる。しかし、この環境は、カビや大腸菌等の細菌にとっても、極めて好都合なのである。実際に、細胞を培養しているシャーレにパンやみかん等で馴染みのある青カビが出現したときは、とても悲しかった（当然、実験はや

り直しである）。これをコンタミネーション（略してコンタミ）と呼ぶのであるが、細胞を培養する場合、このコンタミを避けるべく、極端に衛生条件に気を配らなければならないのである。しかし、一番苦労したのは、細胞について詳しい人がわたし自身を含めて身近に誰もいない、ということだった。本だけを頼りに、何もかも手探りで始めなければならず、当初は解らないことの連続だった。

細胞を培養していて思うのは、細胞はこのようにデリケートに扱ってやらなければならないのに、細胞が集まって出来ているわたし達の体は、この実験室よりもずっと汚い（過酷な）環境の中で、ちゃんと生きていくことが出来るという不思議についてである。外が寒くても暑くても、体温はちゃんと37℃に保たれているし、多少ならば細菌やウイルスが体内に侵入してきても、それらを退治することが出来る。一種類の細胞だけを培養している状態よりもずっと丈夫であり、また多様な能力を発揮できるのだ。

そう考えてみると、研究も一人でコツコツと積み重ねるばかりでなく、多くの人間で役割を分担しながら進めていった方が、より大きな仕事が出来のかもしれない、と思える。四年前は、ほとんど一人でしか使っていなかった細胞培養室も、今では四人の人間が使用するようになった。その意味では、「金材研で細胞」を使った研究も、少しは定着してきたのかもしれない。



X線透過法によるSiC繊維強化  
アルミ合金複合材料の破壊過程の研究構造体化ステーション  
劉 玉付

材料中の各種欠陥や損傷評価を行うための非破壊検査は従来から超音波やX線探傷法などは用いられてきたが、定量的な欠陥や損傷評価が難しい。最近では、X線法を発展させたものとしてX線CT法は分解能が向上して医療などの分野に応用されているが、金属基複合材料のような先端材料定量的な欠陥や損傷評価に利用する報告が非常に少ない。一方、金属基複合材料は高温でも優れる強度と剛性を持つために、航空宇宙関連および高温機器の構造材料として期待されている材料の一つである。しかし金属基複合材料の実用化を考えると、その信頼性の向上が不可欠である。そのためにはデータの蓄積、破壊機構の解明が重要となる。ここでは破壊プロセスを観察し、破壊機構を検討するために、モデル試料としてSiC連続繊維強化アルミ合金複合材料(SiC/A6N01)を作成し、切欠き試験片に引張り荷重負荷中にX線透過法によるその場観察を行った。また、実験結果に基づき3次元の有限要素法による解析を行った。

金属基複合材料は、シート状のSiC連続繊維(SCS-6)1層を、マトリックスのA6N01合金板の間に挟んでホットプレスにより作成した。その場観察は、連続的に引張負荷を与え、切欠き部付近の2次元X線透過像をVTRに記録して、破壊プロセスの観察を行った。実験は高エネ

ルギー物理学研究所放射光施設BL-8C2で行った。

図1にSCS-6/A6N01試験片の破断直後のX線透過像を示す。これは、X線透過強度の2次元分布画像を示し、物質のX線吸収係数が高いと黒目に観察される。上下方向が荷重方向である。写真で左右の端が試験片の側面である。また中央部に1mm四方の白く見える部分が、切欠き部である。上下方向にわずかに白く細く線状に見えるのが、SCS-6繊維の芯線であるカーボン繊維(直径 $30\mu\text{m}$ )である。切欠き部の周囲に長さ約 $900\mu\text{m}$ の白くみえる部分が繊維が破壊して引き抜けた部分である。破断した繊維の端部付近で、マトリックスと繊維との間に白目に細長く見えるのが、界面剥離である。またそれとは別に水平方向に細かな白い筋状の線が見えるが、繊維が破壊しているが、引き抜けが生じていないものである。荷重レベルがより低い条件下での観察写真とあわせて判断すると、まず切欠き部の下部に認められる繊維の破断が生じていたが、最終的にはそれからき裂が成長しないで、切欠き部近傍において生じている。

有限要素法の解析モデル化は切欠きに最も近い繊維1本に注目し、繊維の体積含有率から平均の繊維間距離を求め(約繊維の直径の2倍)、切欠き先端の位置を繊維の中間の位置とし、

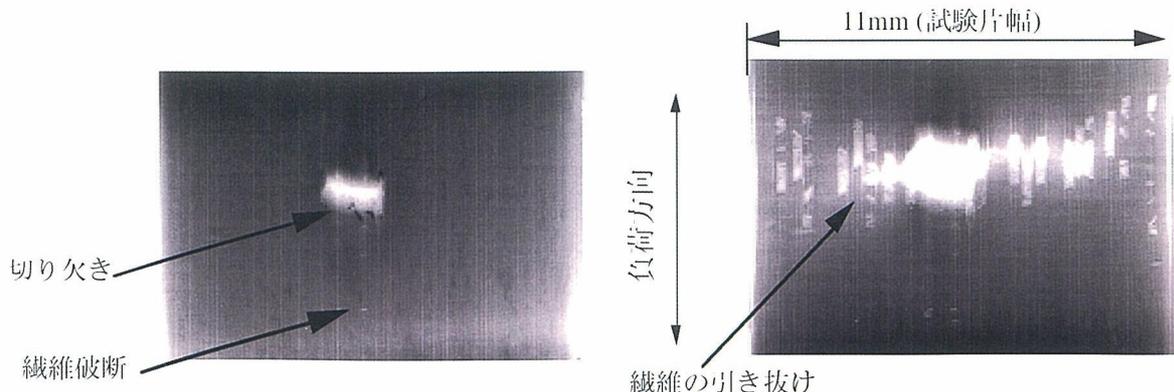


図1 X線透過法によるSiC繊維強化アルミ合金複合材料の破壊過程の観察

材料作成時にマトリックスと繊維の熱膨張の違いにより形成した熱応力を考慮した。初期ノッチの近傍および繊維の周辺要素分割は細かく行った。有限要素法の解析結果から、残留応力のみで繊維周辺及び切欠き先端部に塑性領域が生成することが分かった。また、負荷ひずみの増加に従って、き裂先端と繊維周辺の塑性領域が拡大し、最終的に連結した。奥行の繊維軸方向でも塑性領域が同様に拡大、連結している挙動を確認した。図2は引張り試験の過程において、繊維の破断とはく離が起きる前に負荷荷重と実測された切欠きの近傍のローカルひずみとの関係を示した。残留応力とマトリックスの塑性変化によりこの曲線がかなり早い段階から非線形となった。また、実線のひずみゲージからの計測値と黒丸の有限要素法の解析値とがよく一致している。

これらの解析結果は一本の繊維モデルに基づいたものであるが、多数繊維から構成される実際の複合材料についても以上に述べた塑性領域の発生、拡大および結合の挙動が同様に起こるものと考えられる。また、塑性領域の変化とともに、繊維とマトリックスの界面上に作用する剥離応力とせん断応力により、界面剥離を誘起して進展することが予想される。

同時に繊維の受ける負荷応力も大きく繊維の破断につながり、最終的に全体の試験片がマトリックス中に塑性変形が広がることにより破断したものと考えられる。これらの損傷機構の解析により、実験により得られた応力-ひずみ曲線との関連が説明できた。これにより、本研究を通じSCS-6/A6N01の破壊機構が明らかになった。また、X線CTの実験と有限要素法のシミュレーションを合わせて考えると種々の金属基複合材料と様々の寸法の破壊機構の定量化が可能となった。

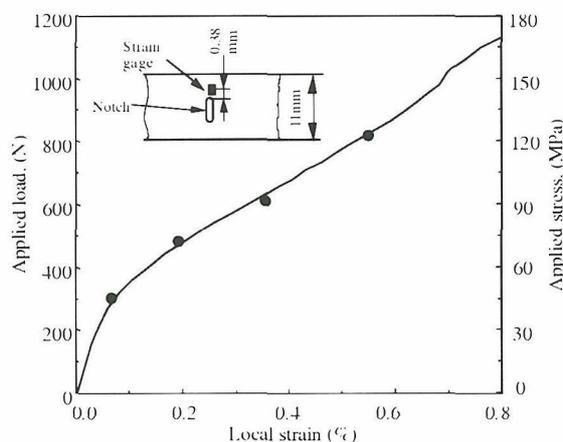


図2 負荷応力と実測(実線)のローカルひずみ曲線 (黒丸は有限要素法の解析結果)



### 量子ホール効果

1980年に発見された「低温強磁場中の2次元電子系で、ホール抵抗が磁場の変化に対して正確に飛び飛びの値をとる現象」で抵抗標準として利用出来ることを示した。この発見によりフォンクリッテン氏はノーベル物理学賞を受賞した。2次元電子系とは電子がシート状の面内では運動できないような状態をいい、半導体の表面電子などに見いだされる。これに対し、通常のホール効果は物質に流す電流方向(x方向)に垂直に磁場を加えると(z方向)、両方に直角な方向(y方向)に電流と磁場の積にほぼ比例する連続的な電圧を生じる現象を指す。これはホール素子として磁場センサーに利用されている。

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

### 表紙説明

世界の強磁場研究をリードする3大拠点を現しています。この3機関は常に連携協力しながら研究を進めています。

### 編集後記

1月号はいかがでしたか？まずは好評のようで、関係者一同ほっとしております。

2月号は16頁建てとなりました。顔写真が載るようになったせいか、執筆者も随分力が入ってきました。今月号から新連載の「私の実験室」は、実験室で悪戦苦闘する若手研究者の生活模様を紹介するものです。お楽しみください。

発行所 科学技術庁金属材料研究所  
〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1  
TEL.(0298)59-2045 FAX.(0298)59-2049  
ホームページ <http://www.nrim.go.jp>

通巻 第471号 平成10年2月発行  
編集兼発行人 細川洋治  
印刷所 前田印刷株式会社

