

MATERIALS and PROCESSING



Materials and Processing
Division Newsletter October 2009

NO.38



日本機械学会
機械材料・材料加工部門ニュースレター

巻頭言

ナノ/マイクロオーダーの加工と評価技術



早乙女康典
東北大学 金属材料研究所

21世紀のキーテクノロジーとしてのナノテクノロジー宣言が行われた1999年の12月から、10年が経過しようとしています。現在のナノテクノロジーを予言した講演として、たびたび引用される「There's plenty of room at the bottom」というファイマン教授の講演が行われたのは、1959年のことですが、このことが具体性を帯びてきたのは1981年のことで、STM（走査トンネル顕微鏡）の発明によって物質表面の個々の原子が定量的に観測出来るようになりました。また、1986年にはAFM（原子間力顕微鏡）が発明されました。半導体製造技術から発展してきたMEMS技術についての初めての国際会議が開催されたのもこのころ（1987年）で、1989年には、STMを用いて原子を一つずつつまみ、文字の形に並べられました。このニュースは、全世界を駆けめぐり、やがて、ナノテク宣言へと発展してきました。

本特集では、マイクロからナノメートルオーダーの加工と材料、それらの評価法に関するトピックスを紹介していますが、除去加工、付加加工、変形加工について、目新しい原理に基づくものだけでなく、従来技術を局限化した技術の追求によって足を踏み入れたナノワールドでの、それぞれの著者の、「There's plenty of room at the bottom」の感動が伝わってきます。

さて、10月15-16日に第1回マイクロ・ナノ工学シンポジウムが、マイクロ・ナノ工学専門会議の企画として、電気学会センサ・マイクロマシン部門、応用物理学会集積化MEMS技術研究会との合同シンポジウムとして開催され、

多くの参加者を得て盛況でした。マイクロ・ナノ工学専門会議自体、日本機械学会の分野横断的な研究活動組織として3年前に発足し、現在12部門が参加して活動が行われています。（<http://www.jsme.or.jp/mnm/index.html>）。今回のシンポジウムでは、参加者の誰もが自分の専門分野からの視点と、関連分野についての好奇心から、ディスカッションを楽しんでいたように感じられました。ナノ・マイクロ領域は今後、幅広い分野での成長が期待されていますが、新しい領域であるがゆえに、その研究活動には特徴があります。つまり、それに関わっている研究者は、機能・構造設計からリソグラフィ、エッチングなどを含む微細加工、形状・機能計測に至る一連の全プロセスについて何らかの形で直接的に関わっていることが多いのではないのでしょうか。装置や加工法についての日ごろの苦勞体験があればこそ、上述の分野横断的なディスカッションに楽しみがあったのではないかと思います。それぞれの専門性とオリジナリティーを生かすためにも、こうした異分野との協同の機会は大切であり、改めて一連のプロセスを見直すよいチャンスであったように思われます。

さて、MEMSはいうまでもなく半導体製造技術から発展してきました。「小さいことはよいことだ」から、自然環境と安全・安心社会の実現にも大きく貢献するとして、高性能、高性能化が求められ、シリコン以外の材料にも目が向けられるようになってきました。また、「ナノ/マイクロ世界のものづくり」という観点からは、第1回のマイクロファクトリに関する国際ワークショップが1998年に発案者である日本の筑波で開催されました。その後、米国やヨーロッパで「ものづくり」に関するプロジェクトが発足し、米国では、NSF（National Science Foundation）が、先進的製造技術としてナノ・マニファクチャリングとその機械技術、材料加工の研究を推進しており、ヨーロッパ地域では、2004年～2008年までマイクロ量産加工（Mass-Manufacture of Miniature/Micro Products）プロジェクトとして、ユーロ13カ国、36研究拠点（内企業18社）で行

われ、現在は「European Network of Excellence in Multi Material Micro Manufacturing (4M)」としての活動が行われています。既に量産化プロセスとして確立されている従来技術と、様々な材料を用いたマイクロ製品とマイクロ加工技術の可能性を研究するとともに、これらに関する技術者の育成を目的としています。それゆえ、奇をてらった革新技術というよりは従来技術をベースに着実な技術の蓄積を計画的に行うプロジェクトで、マイクロメートルから数ミリメートルの加工品を当面の目標としています。上述のように米国でも同様のコンセプトでプロジェクトが行われており、「the Int. Conf. on Micro-Manufacture (ICOMM)」と、ユーロでの「the Int. Conf. on Multi-Material Micro-

Manufacture (4M)」との合同国際会議が本年はドイツで開催され、2010年5月には米国で開催されることになっています。このように世界的な研究ネットワークの連携が推進されており、アジア地域でも2010年10月にマイクロファクトリ国際ワークショップ (IWMF) が韓国で、また同月には「Int. Forum on Micro Manufacturing 2010」が日本で開催されることになっています。言うまでもなく、材料とその加工法は切っても切れない関係にあり、シリコンからポリマー、金属、セラミックス材料に至る材料挙動とそのナノ・マイクロマシニング技術に関する研究開発は益々重要となってきており、またこの新しい分野での分野横断的な協同と連携が求められています。

■特集：ナノ/マイクロオーダーの加工と評価技術

□ 特集 1 超精密機械加工機による加工事例 □

株式会社 小坂研究所
精密機器事業部 開発企画チーム
吉田 一朗

1. はじめに

超精密加工は、情報・通信、宇宙・航空、医療、バイオテクノロジーにおけるキーデバイスの製造に欠かせないのであり、先端技術産業を支える重要な技術である。この加工技術は、たとえば光ディスクのピックアップ用素子や光センサー用素子、液晶ディスプレイの導光板、球面・非球面などのミラー・レンズ、光通信用マイクロレンズなどの国際競争力の高い製品の開発・製造に大きく寄与している。

マイクロメートルからナノメートル領域における形状の超精密加工技術の例としては、半導体製造技術と超精密機械加工技術が挙げられる。半導体製造技術での形状加工は、リソグラフィやドライエッチングなどを利用したMEMS技術に代表され、数ナノメートルの加工が可能である。一方、機械加工による超精密加工は、サブマイクロからナノメートルオーダーの精度を実現でき、半導体製造技術では困難とされる複雑形状を加工できる。また、被加工材料の選択肢の自由度の高さや設備投資が比較的小さいというメリットもあげられる。本稿では、著者らがおこなった超精密加工による粗さ表面の高精度加工の事例などについて紹介する。

2. 超精密加工機

近年、工作機械メーカー各社から、1 nm前後の指令分解能、サブミクロンの真直度を有する超精密加工機が開発されている。特に90年代以降、3軸以上の同時制御が可能な超精密加工機が多く開発されるようになった。近年では、非球面や自由曲面など複雑形状の光学素子の設計がなされ、同時6軸制御の超精密加工機を必要とするものも多くある。本稿で紹介する加工事例では、**図1**に示す同時5軸制御が可



図1 ROBONANO

能な超精密加工機であるFANUC ROBONANO $\alpha\alpha$ -0iA (以下、ロボナノ)¹⁾によって加工をおこなった。

ロボナノは、直交3軸、回転2軸の5軸を有し全軸同時制御加工が可能であり、全5軸において静圧空気軸受を採用している。指令分解能は、X、Y、Z軸において1 nm、回転2軸において0.00001°である。真直度は、最大ストロークのX軸において0.2 $\mu\text{m}/200\text{ mm}$ であり、回転振れは、回転2軸ともに0.05 μm である。また、ロボナノの特長としては、加工機に取り付けるユニットによって、ミリング加工、シェーパー加工、ヘール加工、研削加工、旋盤加工が可能になることがあげられる。

3. 超精密加工機による加工事例

粗さ表面の加工では、数学モデルにより生成したランダムデータを設計データとして加工を行なった。**図2**と**図3**は、ミリング加工とシェーパー加工による粗さ表面の加工例(矢印指示部)であるが、本稿ではミリングによる加工結果について紹介する。ミリング加工用の設計データは生成した

三次元ランダムデータ²⁾であり、設計データの粗さパラメータは、算術平均粗さ Ra に相当する面領域粗さパラメータ Sa において $0.789\ \mu\text{m}$ であり、最大高さ粗さ Rz に相当するパラメータ Sz において $6.45\ \mu\text{m}$ である。ミリング加工において使用した工具は、単結晶ダイヤモンドボールエンドミル(工具先端半径: $50\ \mu\text{m}$)を使用した。加工条件は、工具回転数: $35000\ \text{min}^{-1}$ とし、送り速度は粗加工において $50\ \text{mm}/\text{min}$ 、仕上げ加工において $5\ \text{mm}/\text{min}$ とした。また、工具の回転中心付近では周速が非常に遅くなり加工性が悪くなるため、工具を $10\sim 20^\circ$ 傾斜させて加工をおこなった。被削材は、加工機の特徴や使用工具、硬さ、切削性などを考慮し、ステンレス材の表面に施したNi-Pメッキ層を採用した(メッキ厚: $60\ \mu\text{m}$)。

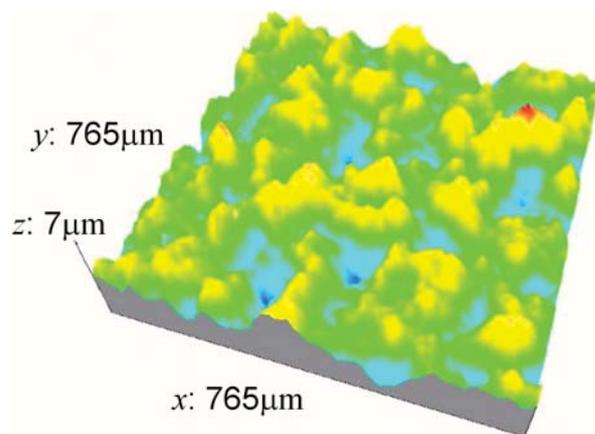


図4 粗さ表面の設計データ

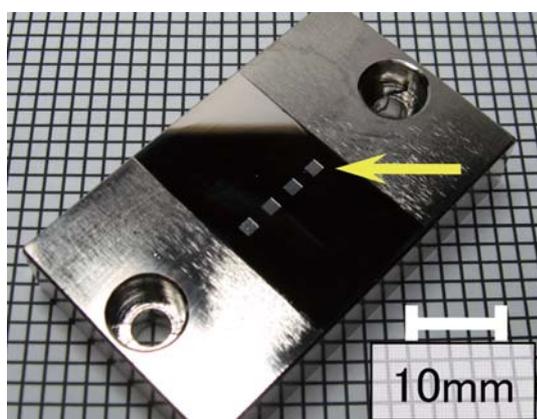


図2 粗さ表面加工例(ミリング)

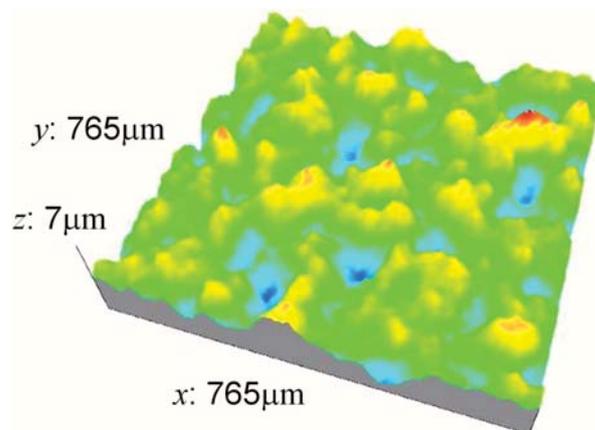


図5 ロボナノによる粗さ加工面の測定結果

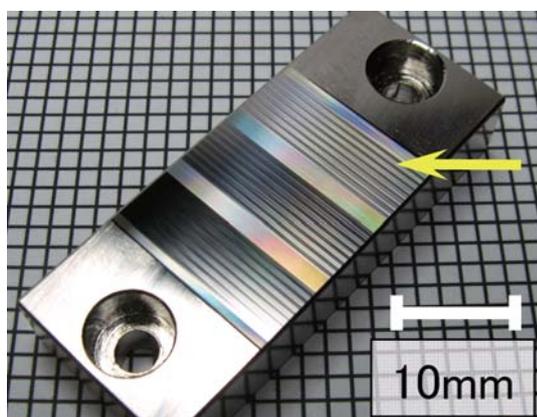


図3 粗さ表面加工例(シェーパ)

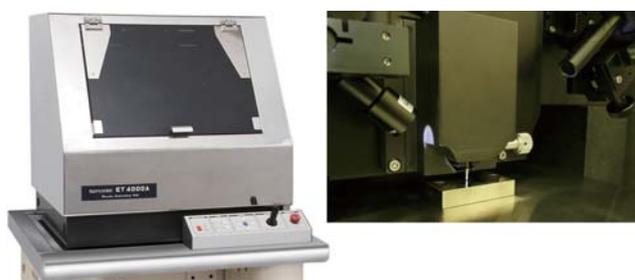


図6 微細形状測定機 ET-4000A

ランダムな粗さ表面の鳥瞰図を図4, 図5に示す。図4は粗さ表面の設計データの鳥瞰図であり、図5は加工した粗さ表面の測定結果である。粗さ表面の測定では、図6に示す触針式微細形状測定機ET-4000A(ダイヤモンド触針, 最小触針先端半径: $100\ \text{nm}$, 最小接触力: $0.5\ \mu\text{N}$)³⁾をはじめ、光学式表面性状測定機などを使用した。各測定機による検証の結果、粗さパラメータ Sa は $0.783\ \mu\text{m}$ 前後となり、設計値の Sa に対し1%以下、数値にして $10\ \text{nm}$ 以下の差異の加工を実現した。

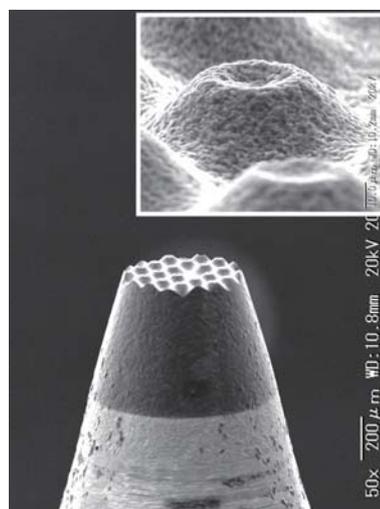


図7 複雑形状の微細 PCD 工具(螺髪・フジツボ形状)

4. 超精密加工機と精密加工工具

機械加工における超精密加工では、工作機械の母性原理によるところが大きく、機械要素の運動精度がそのまま転写されるような加工となるため、サブマイクロ領域の運動精度が要求される。また、これに並ぶ重要な要素のひとつとして、切削工具が挙げられる。ナノ領域の精度が要求される加工では、工具の切れ刃の稜線の「きれいさ」と工具の摩耗は非常に重要な課題である。特に、難削材への加工のニーズが高まっていることから、それらの加工において耐摩耗性の高い工具が求められている。

現在、超精密機械加工においては、その切れ刃稜線のシャープさから単結晶ダイヤモンド工具が最も多く利用されている。そのほかには、バインダレスcBN工具、焼結ダイヤモンド（PCD）工具、CVDダイヤモンド工具なども利用されている。バインダレスcBN工具は、現時点ではガラスの切削加工に最も適していると考えられている。前述の難削材への加工や耐摩耗性に対応する目的で、図7に示すような複雑形状の微細PCD工具⁴⁾も開発されている。また最近では、新たな工具材料としてグラファイトを出発物質としたダイヤモンド単相の高純度多結晶体（ナノ多結晶ダイヤモンド：NPD）を利用した精密加工工具の研究⁵⁾も進んでいる。NPD工具の開発もまた、超硬合金の切削や耐摩耗性の向上を目的としている。

5. おわりに

超精密加工機のひとつであるロボナノによる加工事例について紹介した。近年、超精密機械加工の用途は拡大しており、加工精度だけでなく加工高速化や難削材の高精度加工・複雑形状加工などへのニーズが高まっている。

これらの市場のニーズにこたえ、国際競争力のある製品を生み出すためには、超精密機械加工分野とその超精密加工を実現する工具分野と、それら加工機、加工工具、加工物を測定・評価可能とする計測分野との連携がますます重要になってゆくと考えられる。

- 1) ファナック 株式会社, FANUC ROBONANO α -0iA カタログ.
- 2) 内館道正, 清水友治, 岩渕明, 非因果的二次元ARモデルによる三次元ランダム表面粗さデータのモデリングと生成(第2報), トライボロジスト, 46, 10 (2001), 814-820.
- 3) 株式会社 小坂研究所, ET-4000 シリーズ カタログ (<http://www.kosakalab.co.jp/product/precision/minute/>).
- 4) 有限会社 三井刻印, 微細・小径 PCD 工具カタログ (<http://www.kokuin.co.jp/PCD.htm>).
- 5) 仙波卓弥, 岡崎隆一, 角谷 均, ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 2009年精密工学会秋季大会講演論文集 (CD), A20 (2009-09), 29-30.

□ 特集2 マイクロメカニカル接合による極細電線の端子への接続 □

東京工業大学大学院
鈴木暁男

1. はじめに

集積回路・集積チップ等に適用されるマイクロ接合技術としては、マイクロソルダリング（はんだ付）技術をはじめとして、様々な接合技術が実用化されている。これに対し、図1に示すような超小型チョークコイル等の電力系・電波系の部品では、部品の一部である極細電線の太さが数10 μ mオーダー（毛髪太さの数分の一:図2）になると、極細電線を端子や基板へはんだ付けする際、熔融はんだと極細電線との金属反応により、極細電線が熔融する（図3）危険性がある。そのため、はんだ付けによる実装が難しく、実用化を遅延させる一因となっている。



図1 小型インダクタ（約1.0×1.0×5.0mm）
（西北電気機器（株）HPより）

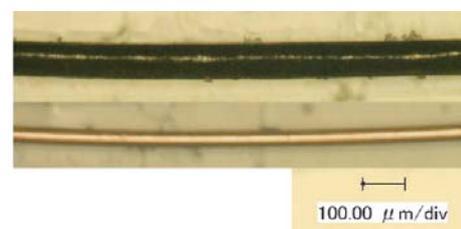


図2 毛髪（上：直径約 Φ 120 μ m）と極細電線
（下：直径30 μ m）との比較

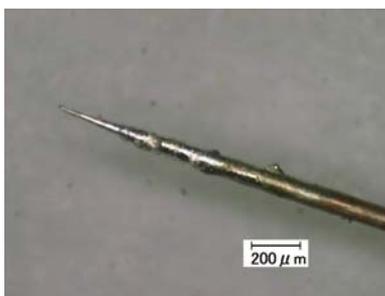


図3 溶融はんだによる極細電線の溶融・破断

2. マイクロメカニカル接合法の概念

このような極細電線に対しては、金属・合金の溶解を伴うはんだ付けではなく、端子側接合部を微細に塑性変形させ、極細電線を端子側金属で包み込むように接合する機械的接合法が有効であると考えられる、その概念の一例を図4に示す。図4に示す接合部の形状は、マイクロメカニカル接合に必要な接合部形状の一例に過ぎないことを付言しておく。

単に機械的に保持することによって達成される接合は、一般にメカニカル接合と呼ばれるが、サブミリ～ミクロンオーダーでこれを実現させる技術はこれまでに報告が見あらず、新規性の高い技術といえる。ここでは、まず有限要素解析により接合に必要な諸元を明らかにしたうえで接合装置を開発し、実験によりその有効性を確認した。

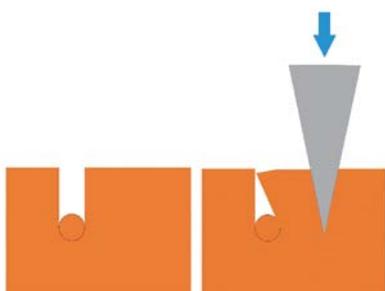


図4 マイクロメカニカル接合法概念図

3. 弾塑性解析による接合状況の検討

マイクロメカニカル接合法による接合部の状況を予測するために、まず有限要素解析によるシミュレーションを行い、接合強度を達成するための具体的な接合部形状・寸法について検討した。有限要素解析領域、および楔型のプロジェクションツールを溝側面より200μmの位置に400μm押込んだ場合のvon Mises等価応力図を図5に示す。極細電線に応力集中部を発生させることなく接合が可能であることが分かる。

種々の接合条件に対し解析を行った結果、極細電線を設置する溝の幅および深さ、楔形プロジェクションツールの押し込み位置および押し込み深さによって、接合状況は大きく変わることが示された。

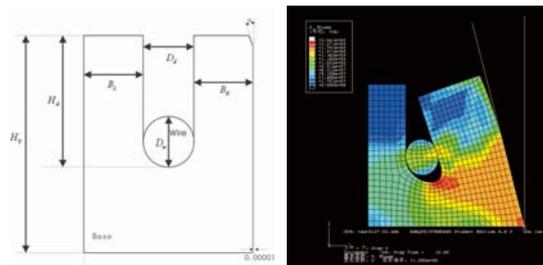


図5 有限要素解析領域およびシミュレーション結果の例

4. 接合実験結果・考察

上記に示すような有限要素解析による多数のシミュレーション結果を基に、実際に接合装置を組立てて作成したマイクロメカニカル接合部の断面写真を図6に示す。シミュレーションの妥当性が確認できる。

種々の接合条件により作製した接合部に対し、溝に対して垂直方向への引張り荷重、および溝に対して水平方向への引抜き荷重を測定し、極細電線自体の引張り強さと比較した。溝深さを200μmおよび300μmに設定した場合のプロジェクションツール押し込み位置と引抜き荷重の関係を図7に示す。溝深さを300μmに設定することにより大幅に接合性が改善されることが分かる。また、この場合にはプロジェクションツールの押し込み位置を200μmに設定することにより最大引抜き荷重が得られている。図7において最大引抜き荷重が得られた押し込み位置200μmの場合に対して、プロジェクションツールの押し込み深さを変化させた場合の引抜き荷重を測定した結果を図8に示す。押し込み深さが約300μmの場合に引抜き荷重は最大値を示し、ほぼ極細電線自体の引張り強さに匹敵する接合強さが得られることが分かる。すなわち、本研究により開発されたマイクロメカニカル接合技術は、極細電線の端子への接合技術として、十分な接合強度を発揮できることが分かる。

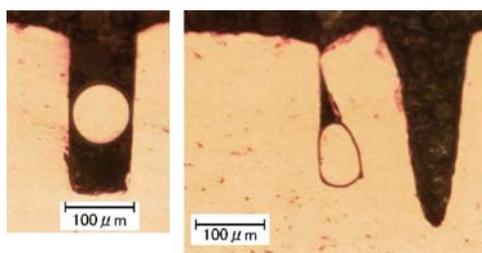


図6 マイクロメカニカル接合部断面写真

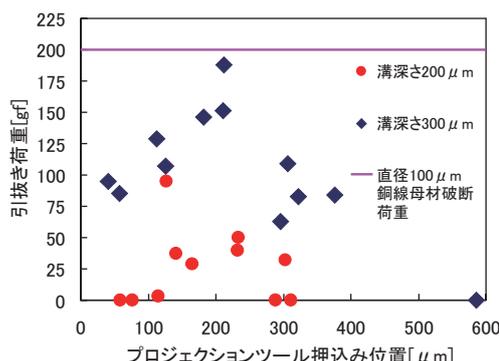


図7 ツール押し込み位置と引抜き荷重の関係 (溝深さ:200μm, 300μm)

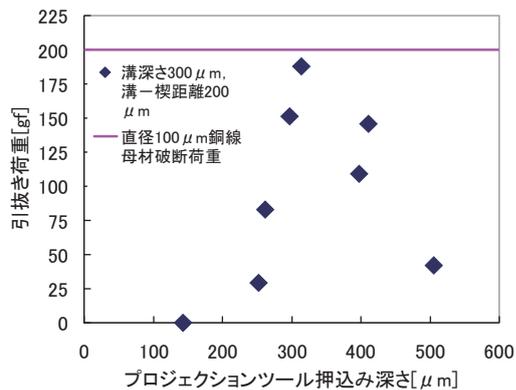


図8 ツール押し込み深さと引抜き荷重の関係
(押し込み位置:200μm)

5. 結言

以上、接合部形状及び接合条件の一例を示したが、実用

部品に対しては種々の周辺条件に対応させて、接合部形状・接合条件を探索した上で、各製品に適用する必要がある。また、実用化に向けて、さらに詳細な各接合パラメータの確立、接合工程の自動化、接合品質保証システムの検討などが今後の課題となる。一方、はんだレスによる接合技術という観点から、環境問題に対する貢献も期待される。

- 1) 特願 2007-123463, 特開 2008-282573
- 2) T.T. Ikeshoji, A. Suzumura, K. Shimotake, T. Yamazaki, T. Noda; Robustness of Micro-Mechanical Joining for Micro Copper Wire, Proc. 8th Int'l Welding Symposium by JWS, Nov 2008.
- 3) 鈴村, 野田, 池庄司, 山崎; 銅細線の端子固定用マイクロメカニカル接合法の研究, 日本機械学会第14回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 06-56, pp. 111-112 (2006)

□ 特集3 ナノインデント法を用いたカーボンナノチューブの選択成長 □

要約

Co薄膜(厚さ数nm)をSi表面に形成した後、局所的な圧力加工によりSi表面の結晶相転移を起こす。この構造に対してアニール(温度600℃)を行うと、CoとSiの化合条件が圧力加工の有無によって大きく変化する。選択的に圧力加工した場所では、Siの結晶相転移によってCoとの合金化条件が変化し、純度の比較的良好なCo微粒子が残り、これがカーボンナノチューブ(CNT)の形成起点となる触媒微粒子として機能したと考えられる。Coの純微粒子の選択的な形成は、CNTの選択的な形成によって間接的に確認されたこと¹⁾だが、過去に報告された、ナノインデントーションによるSi表面での結晶相転移の報告例²⁾と圧力条件が一致し、Si表面の欠陥からのCNT形成³⁾と類似の現象と考えられる。本研究によって、CNTの形成開始場所を選択的に制御できる上に、比較的品质の良いCNTが形成出来る独自の簡易プロセス法を確立できた。

内容

1. CNT形成プロセスとCNTの形成状態

CNTの形成は、熱CVD法を用いた。詳細は既発表論文[1]を参照ください。Co(厚さ数nm)/Si基板に対して選択的にナノインデント加工を行い、加工領域のみSi相転位を起こし、SiとCoとの化合条件を変える。CNT形成過程の温度条件(600℃)により、非インデント部はSiとCoが化合し、触媒機能を消失させるが、インデント部ではそれらの化合条件が異なり、Coの自己凝縮によりCNT形成起点となる触

長岡技術科学大学

機械系

安井 孝成

媒機能を温存できる。図1に示すように、ナノインデント加工場所のCNTの形成の有無は、インデンターの形状と印加した荷重により異なった。「115° Indenter」は汎用のパーコピッチ圧子であり、「90°」のそれは特注圧子である。それぞれ同一荷重で圧力が異なるため、前者で確認できるSi表面の圧痕(図1, 上の3つの画像)に加えて、後者(図1, 下2つの画像)では亀裂やPile upなどの発生が確認できる。これらの内、CNTの形成が確認できたのは、前者の圧子のみであり、後者の圧子ではCNTは形成できなかった。これらが示唆するのは、Si表面を加工する圧力条件がCNTの触媒起点となるCo微粒子の純度と大きく関係することである。

2. 荷重-変位曲線

図1で確認された、圧子形状の相違による加工圧力の差は、荷重-変位曲線から推定できる。図2は、「115° Indenter」(実線)、「90° Indenter」(波線)の荷重-変位曲線の一例である。前者ではSiにおいて既に報告例があるpop-out現象⁴⁾が確認され、ナノインデント加工によりSiの結晶構造変化が起きている²⁾が、後者では荷重-変位曲線の特異な変化は確認できない。「90° Indenter」ではSi表面への形状変化のエネルギーは亀裂進展やPile upなどの破壊現象に消費され、Siへの圧力効果による結晶相転位が起きなかったと考えられる。

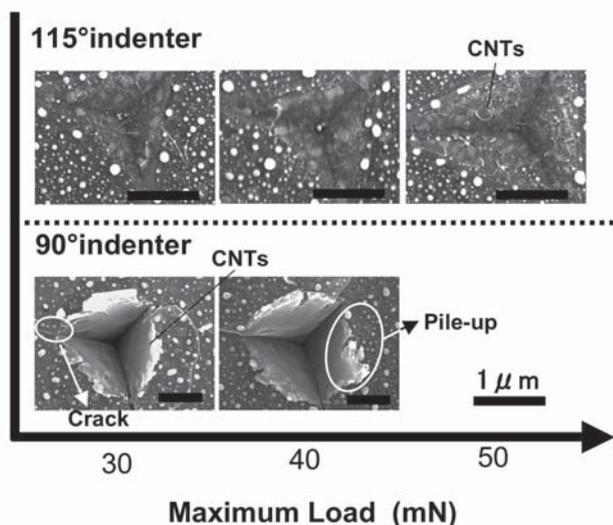


図1 CNT形成後、インデント部のSEM観察像。

「115° Indenter」(上3つ), 「90° Indenter」(下2つ)で、あり、左右に荷重条件が異なる

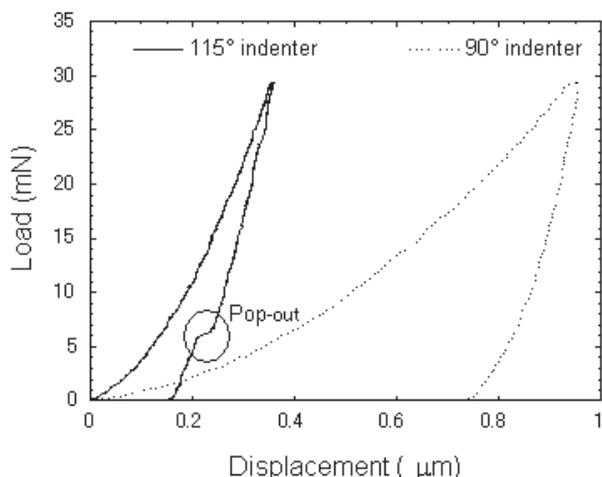


図2 ナノインデント加工による「115° Indenter」(実線)と「90° Indenter」(波線)の荷重-変位曲線の一例

3. 加工圧力とCNT形成数

亀裂進展に関する古典的な経験式 $\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi a}}$ ⁵⁾を用いて、ナノインデント加工による局所加工圧力を推定し、形成されたCNTの数密度との関係を図3にまとめた。この式で、 σ は fracture stress per crack, a は亀裂長さ, K はstress intensity factorで, Siに対する0.9 (MPa \cdot m $^{1/2}$)⁶⁾を採用した。この結果は、圧力閾値8GPa以上でのみCNTが形成され、その領域では、CNTの形成起点となるCo触媒微粒子がその直径と同程度の大きさを持ち、Siと化合しないで純度を保持していたことを意味する。この圧力閾値は、過去に報告されたナノインデント加工による結晶相転移が発生する圧力範囲(7GPa以上)²⁾と非常によく一致している。これらから、本手法による局所的なSiの構造相転移が、Coとの化合条件を変化させ、圧力印加位置にのみCoが自己凝縮し、Siと化合しないで純度の比較的高いナノ微粒子が

CNT形成における触媒機能を果たしたと考えられる。

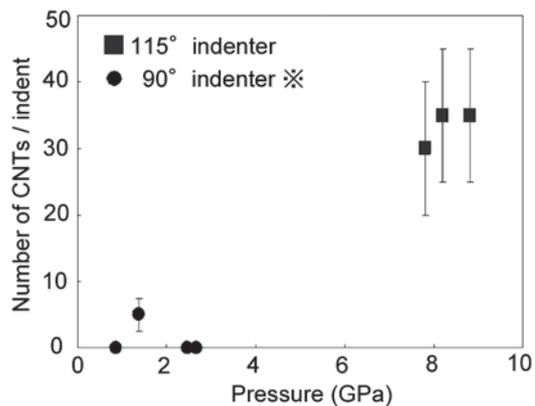


図3 ナノインデント加工による圧力(横軸)とインデント部分に形成されたCNT本数密度(縦軸)との関係

4. CNTの品質と選択形成

顕微ラマン分光の結果(図4)、孤立したSWNTsがインデント内部に選択成長でき、面内均一性も良好であった。左のラマンスペクトルから、インデント位置(A~D)ではG-BandおよびそのサブピークによってCNTの成長が確認でき、非インデント部(E)ではCNTが確認できない。スペクトルも均一であり、これらのことから、CNTが選択的に成長できており、面内均一性も良いことが確認できた。さらにD-Band(1340から1350cm $^{-1}$)がほとんど確認されていないので、CNTの欠陥が非常に少なく、高品質のCNTが選択的に形成できていることが確認できる。

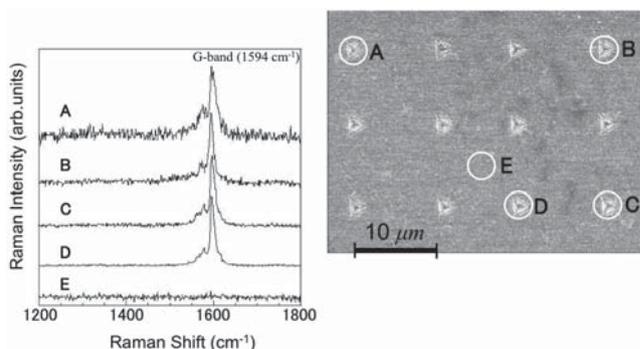


図4 ラマンスペクトル(左図)と分析位置のSEM像(右図)まとめ

ナノインデント法を用いて、Co/Si基板上のインデント領域のみにCNTを選択的に成長するプロセスを開発した。顕微ラマン分光の結果、インデント内部にのみCNTを選択成長でき、面内均一性も良好であった。CNTの数密度は、インデント圧力に依存し、8GPa以上の領域でのみCNTが形成された。インデントによって選択性が起きた理由として、Si結晶相の相転位によってCoとの化合条件が変わり、インデント領域のみにCoの自己凝縮およびSiとの化合が抑制され、Coの触媒機能が働いたと解釈できる。

1) T. Yasui, S. Nishimura, "Indent-Induced Selective

- Growth of Carbon Nanotubes", Jpn. J. Appl. Phys. 45, pp. L800-L803 (2006) ; T. Yasui, Y. Nakai, Y. Onozuka, "Selective-Catalyst Formation for Carbon Nanotube Growth by Using Indent Local Pressure", Thin Solid Films 516 (2008) 859-862.
- 2) D. Ge, V. Domnich, Y. Gogotsi, J. Appl. Phys. 95 (2004) 2725
- 3) Y. Chen, J. Yu, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 033103
- 4) W. C. Oliver, G. M. Pherr, J. Mater. Res. 7 (1992) 1564.
- 5) I. N. Sneddon and M. Lowengrub, in: R. F. Drenick, H. Hochstadt, D. Gillette (Eds.), Crack Problems in the Classical Theory of Elasticity, The SIAM Series in Applied Mathematics, John Wiley and Sons, Inc., 1969, p. 1-18.
- 6) C. P. Chen and M. H. Leipold, American Ceramics Society Bulletin 59 (1980) 469.

□ 特集4 マイクロエッジインデント法によるはく離強度評価 □

広島大学
加藤 昌彦

1. はじめに

各種金属材料の耐摩耗性・耐食性、耐疲労性等を向上させるため、硬質薄膜コーティングが施される場合があるが、使用中に熱的・機械的・化学的な負荷にさらされると薄膜がはく離する場合がある。薄膜がはく離すると改質効果が消失するので、薄膜そのものの特性のみならず、薄膜のはく離強度向上が不可欠になる。したがって、はく離の起こりにくい薄膜を開発するには、薄膜のはく離強度をどのような手段で評価するかも重要になるが、膜厚が高々数ミクロンでしかない薄膜のはく離強度評価は困難であり、確立された方法はないようである。

2. マイクロエッジインデント法

我々の研究グループではこれまでに、薄膜のはく離強度を定量的に評価する方法として、基材に引張荷重を加えて薄膜をはく離させる引張試験法を提案している¹⁾。しかし、この方法は基材が硬い工具などには適用できない。これとは別に、溶射皮膜(膜厚数100 μm)のはく離強度を簡便に評価する方法として、「エッジインデント法」^{2), 3)}を提案している。これは、ファインカッターなどにより溶射皮膜に直線状の溝またはエッジを設けた後、圧縮試験機に取付けた円錐ダイヤモンド圧子をエッジ近傍に押し込み、皮膜をはく離させる方法である。

「エッジインデント法」をスパッタ薄膜のはく離強度評価に適用できるよう、エッジの加工精度、圧子の押し込み精度をサブミクロンオーダーに向上させた「マイクロエッジインデント法」の概略を図1に示す。(a) 集束イオンビーム装置(FIB)により、試験片表面にミクロンオーダーの直線溝をつけ、溝の縁から距離 x の位置にマイクロインデントにより円錐状ダイヤモンド圧子(頂角 $\alpha=120^\circ$)を高精度に押し込む。

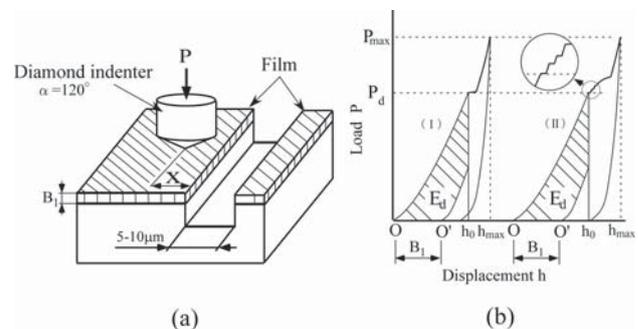


図1 マイクロエッジインデント法の概略

マイクロエッジインデント試験により得られる荷重 P -変位 h 曲線の2つの代表例を図1(b)に示す。圧子荷重 P の増加に伴い圧子変位 h も増加するが、ある荷重 P_d に達すると、薄膜がはく離して圧子変位が急激に増加するか(I)、曲線の勾配が徐々に低下する(II)。薄膜のはく離エネルギー E_d を次式²⁾により算出できる。

$$E_d = \frac{\int_0^{h_0} P dh - \int_0^{h_0-B_1} P' dh}{S} \times \frac{2\theta}{2\pi}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{S}{x^2} \quad (1)$$

ここで、 h_0 は薄膜はく離荷重点 P_d までの変位、 2θ は、はく離部分(面積は S)を二等辺三角形で近似したときの頂角である。

Ti基材上に膜厚 $B_1=2\mu\text{m}$ のSiC薄膜を、種々の温度 T で加熱しながらスパッタコーティングした試験片で、マイクロエッジインデント試験を行って得られた圧子荷重-変位曲線および薄膜はく離の代表例を、図2に示す。SiC薄膜の圧子変位は圧子荷重の増加とともに増加し、ある荷重で薄膜が三角形にはく離し、圧子荷重-変位曲線上には変位の不連続増加が認められる。

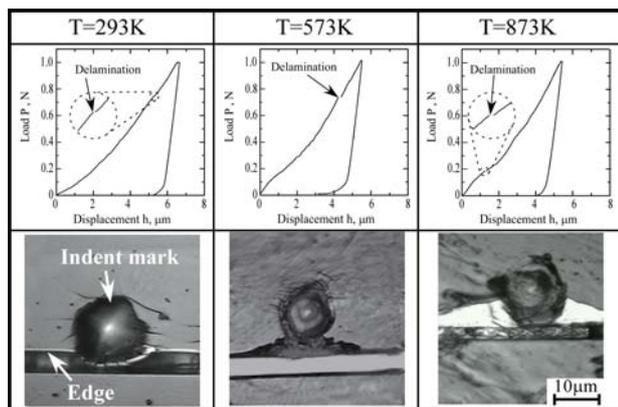


図2 マイクロエッジインデント試験により得られた圧子荷重-変位曲線および薄膜はく離の様子

式(1)を用いて算出したSiC薄膜(Ti基材)のはく離エネルギー E_d と基板加熱温度 T の関係を図3に示す。SiC薄膜の E_d は T の上昇とともに低下している。ただし、非加熱SiC薄膜($T=293K$)では、圧子をエッジ近傍に押込まないと薄膜はく離せず、高いはく離強度を有することがわかる。これら薄膜のピン・オン・ディスク方式摩耗試験を行った結果、 E_d と薄膜のはく離寿命には高い相関が認められた⁴⁾。

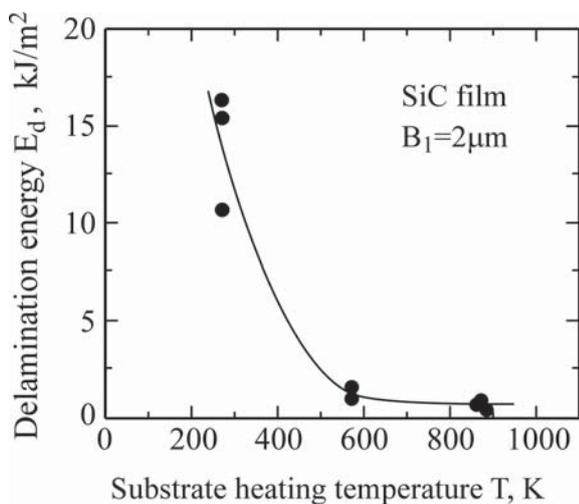


図3 成膜時基板加熱温度とはく離エネルギーの関係

2. はく離エネルギーの破壊力学的検討

我々のこれまでの解析および観察によると、薄膜のはく離は図4のように起こると考えられる³⁾。薄膜に圧子を押しこむとすぐに(はく離荷重よりもかなり低い押し込み荷重)、(a) 圧子押し込み直下近傍の引張り応力が最大となる位置で薄膜に割れが生じ、界面にまで達する。(b) さらに圧子を押し込むと、圧子押し込み力の水平分力によりき裂は界面を安定に進展する。(c) やがて限界に達するとき裂は不安定伝ばを開始し、薄膜のはく離に至る。

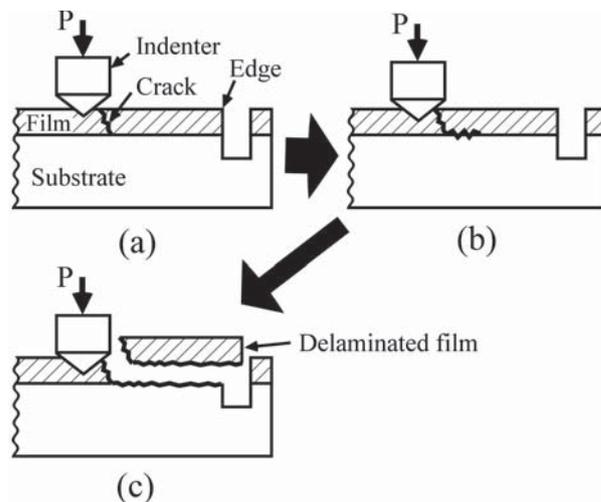


図4 薄膜のはく離過程

いくつかの仮定のもとでき裂が不安定伝ばを開始するときのエネルギー解放率(界面破壊じん性値) G_{C12} を計算すると、以下ようになる。

$$G_{C12} = \frac{P_d^2 \cos^2 \theta}{8\pi^2 a_f^2 B_1 E_{e1} \tan^2 \alpha} \quad (2)$$

ここで、 a_f は不安定き裂伝ば開始時の界面き裂長さ、 E_{e1} は薄膜の弾性係数である。

式(1)の E_d は薄膜はく離までの全ひずみエネルギーであるのに対し、式(2)の G_{C12} は、き裂伝ばのエネルギー解放率の限界値であるので、両者の意味は異なる。しかしながら、エッジインデント試験から求めた E_d は G_{C12} と関数形においてほぼ対応していることを確認しており³⁾、 E_d は界面き裂伝ば特性を表わすと考えられる。

3. おわりに

マイクロエッジインデント法は、薄膜のはく離強度を定量的に評価することが可能である。また、マイクロエッジインデント法は、試験片の制約がほとんどなく実機からの切り出し試験や、局所的な評価も可能であるので、これらを目的とした場合、有力な選択肢となる。

参考文献

- 1) 中佐啓治郎, 高田宗一郎, 市後博造, 材料, 44, 321 (1995).
- 2) 中佐啓治郎, 加藤昌彦, 張東坤, 田坂圭一郎, 材料, 47, 413 (1998).
- 3) 張東坤, 加藤昌彦, 中佐啓治郎, 材料, 49, 572 (2000).
- 4) 鄭錦華, 加藤昌彦, 竹添星児, 中佐啓治郎, 材料, 54, 1022-1029 (2005).

□ 特集5 薄膜アモルファス合金のコンビナトリアル評価法 □

東京工業大学
青野 祐子, 秦 誠一

1. はじめに

近年, MEMS材料や, 超精密切削加工を必要とする光学素子用ガラス成形型材料として, 薄膜アモルファス合金の研究が進められている^{1)・2)}. このような用途に薄膜アモルファス合金を選択する大きな要因として, 結晶による異方性や結晶粒界の効果が無いことによる, 均一性, 耐腐食性, 切削加工性等が本質的に優れていることが挙げられる. これまでに, 多くの合金系で薄膜アモルファス合金が発見されているが, 実際に材料を応用する際に, いかに迅速に要求される特性を満たすアモルファス合金を探索するかが, ひとつの課題である.

この材料探索のひとつのアプローチとして, コンビナトリアル手法による薄膜アモルファス合金の探索法が研究されている³⁾. コンビナトリアル手法とは, 異なるサンプルを集積して一括製作し, これを高速評価し, その中から要求を満たすサンプルを選択する, 高効率な材料探索手法である⁴⁾. コンビナトリアル手法による薄膜アモルファス合金の探索は, 筆者らのグループにより, いくつかの合金系ですでに報告されている^{5)・6)}. しかし, 集積された薄膜サンプル群(薄膜ライブラリ)を高速評価する手法(コンビナトリアル評価法)は, 市販の測定装置や従来の測定方法が適用可能な, 組成や相, 電気抵抗率等の数種類の物性に限られている. そのため, コンビナトリアル評価法が確立されていない物性については, コンビナトリアル評価可能な項目を測定した薄膜ライブラリの中から, 候補となる数サンプルを選定し, 逐次スパッタ法でその組成を再現し, 従来法による測定が必要となる. この組成の再現プロセスは, 薄膜ライブラリを用いたコンビナトリアル手法による合金探索の効率向上を阻害している. より多様な物性のコンビナトリアル評価法が実現できれば, コンビナトリアル手法のさらなる効率化が期待できる.

ここでは, 新しいコンビナトリアル評価法の一例として, 薄膜アモルファス合金の結晶化開始温度(T_x)のコンビナトリアル評価について概説する. 薄膜アモルファス合金を実用化する上で, その熱的安定性は重要な物性であるが, その測定法は, これまで示差走査熱量計(DSC)が主に用いられてきた. 薄膜ライブラリ上のサンプルは, 厚さ数マイクロメートル, 面積数ミリメートルオーダーと微小であるため, 従来のDSCでの測定は困難である. そこで, サーモグラフィを用いた全く異なる測定法を考案することにより, T_x のコンビナトリアル評価を実現した⁷⁾.

2. 測定原理

サーモグラフィは, 赤外線分布を検知し, その温度分布を表示する装置である. 実際の温度(T)とサーモグラフィ

の指示温度(T_a)は比例関係であり, その係数は物体の放射率(ε)に依存する($T_a \propto \varepsilon T$). 相変態が発生しないとき, 薄膜サンプルの放射率は一定値なので, $T-T_a$ 曲線は直線となる. しかし, 結晶化のような相変態が発生すると, 放射率が変化し, $T-T_a$ 曲線の傾きの変化が発生する. この変化を結晶化として検知する.

実際に, サーモグラフィと真空赤外線加熱装置を用いたPd₇₇Cu₆Si₁₇at.%の薄膜アモルファス合金で $T-T_a$ 曲線の測定を行った(サンプルサイズ7×16 mm², 膜厚4 μm). その結果, 図1のように結晶化と思われる明確な傾きの変化が見られた. この $T-T_a$ 曲線の傾きの変化が生じる温度は, 同時に測定した電気抵抗率の変化や, 同サンプルのDSC測定による T_x の測定結果とも非常によく一致した.

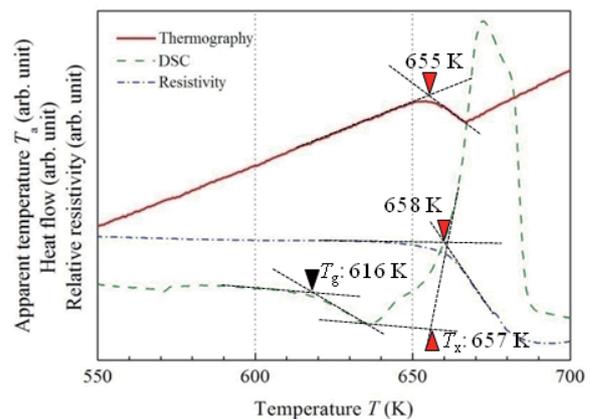


図1 各測定法での T_x の比較

3. コンビナトリアル評価への適用

薄膜ライブラリはコンビナトリアルアークプラズマ蒸着装置⁶⁾を用いて製作し, 20 mm角のアルミナ基板上に1 mm角の組成の異なる薄膜サンプルを集積した(図2). 組成はエネルギー分散型蛍光X線分析装置, 相はイメージングプレートX線回折装置でそれぞれ測定を行った.

また, 本測定用の薄膜ライブラリには, 各サンプルの温度を正確に測るため, サンプル上に一定間隔で温度参照部を配置した. この参照部は, 基板のアルミナが露出しており, 熱電対を利用してアルミナの放射率を同定することで, 各参照部の温度をサーモグラフィの表示値から知ることができる. サンプル間隔は0.2 mmであるが, この部分からの赤外線放射を抑えるために, 低放射率のタンタルを成膜した.

測定された, T_x の分布を, 図3に示す. 測定対象の107個のアモルファスサンプル中, 95個のサンプルで T_x を一括評価することに成功した. この結果では, Aの領域(Si: 10 ~ 20 at.%)では T_x は650 K前後であるのに対し, Bの領域

(Si: 30 ~ 40 at.%) では530 K程度と、100 K以上の急峻な分布が発生した。それぞれの領域は、Pd-Si平衡状態図の深い共晶点(A)と、高融点の組成(B)に対応している(図4)。一般に、合金は、共晶組成付近でアモルファス相になりやすく、共晶組成から離れると、アモルファス相の安定性は低く、アモルファスサンプルは得られにくくなる。そのため、Bの領域ではCuの作用によりアモルファスサンプルを得ることはできたが、Aの領域と比較するとアモルファス相の安定性は低く、より低温で結晶化したと考えられる。

最後に、カルーセル型スパッタ装置による回転成膜で得たPd₄₄Cu_{34.5}Si_{21.5}at.%薄膜についてDSC試験を行ったところ、 $T_x = 612$ Kであり、図3の直近の組成Pd₄₆Cu₃₄Si₂₀at.% ($T_x = 620$ K)の結果と近い値となることを確認した。

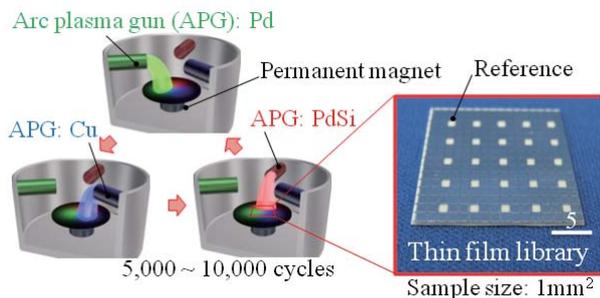


図2 薄膜ライブラリの製作

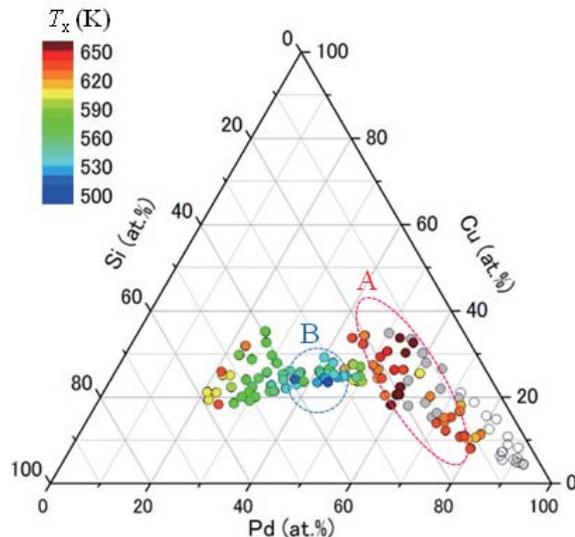


図3 T_x の分布

4. おわりに

本稿では、コンビナトリアル手法による高効率薄膜アモルファス合金探索における研究課題のひとつである、コンビナトリアル評価について、結晶化開始温度測定を例に紹介した。結晶化開始温度のコンビナトリアル評価を実現したことにより、今後、ガラス成形用金型など高温での使用が要求されるような薄膜アモルファス材料についても、結晶化の点から適切な材料探索を効率的に行うことが可能となる。

しかし、薄膜アモルファス合金の探索を完全にコンビナトリアル手法で行うには、コンビナトリアル評価可能な測定項目に依然として不足があるのが現状である。たとえば機械強度、耐食性、薄膜金属ガラスの判定とそのガラス転移温度の測定などの要求があるが、いずれも、従来の測定装置を薄膜ライブラリに適用するのが難しい物性である。今後、新しい測定法の開発あるいはMEMSと融合した新しい薄膜ライブラリの開発等による、これらの物性のコンビナトリアル評価の早期実現が期待される。

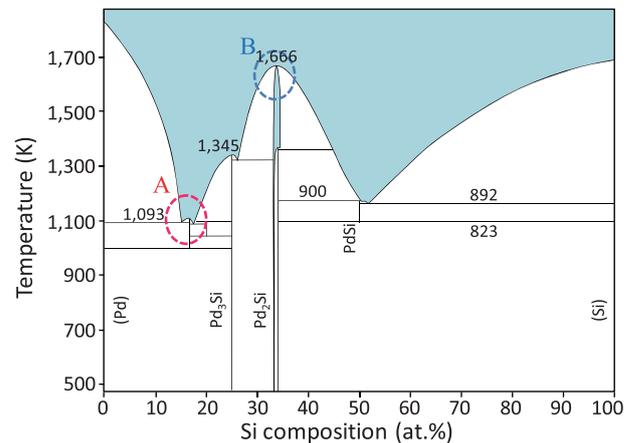


図4 Pd-Si合金平衡状態図

5. 参考文献

- 1) 秦 誠一, 新機能材料 金属ガラスの基礎と産業への応用, (株)テクノシステム (2009), (基礎 31. 薄膜化, 応用 10. マイクロアクチュエータ 分担) .
- 2) J. Sakurai, S. Hata, R. Yamauchi and A. Shimokohbe, Characterization of the Pt-Hf-Zr-Ni thin film amorphous alloys for precise optical glass lens mold, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.3, No.8 (2009) , pp.1022-1032.
- 3) S. Hata, R. Yamauchi, J. Sakurai and A. Shimokohbe, Combinatorial arc plasma deposition of thin films, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.4 (2006) , pp.2708-2713.
- 4) I. Takeuchi , J. Lauterbach, and M. J. Fasolka, Combinatorial material synthesis, Materials Today, Vol.8 (2005) , pp.18-26.
- 5) J. Sakurai , S. Hata, R. Yamauchi and A. Shimokohbe, Searching for Novel Ru-Based Thin Film Metallic Glass by Combinatorial Arc Plasma Deposition, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.4 (2007) , pp.1590-1595.
- 6) S. Hata, J. Sakurai, R. Yamauchi and A. Shimokohbe, Search for novel amorphous alloys with high crystallization temperature by combinatorial arc plasma deposition, Applied Surface Science, Vol.254, No.3 (2007) , pp.738-742.
- 7) S. Hata , Y. Aono, J. Sakurai, and A. Shimokohbe,

Measurement of crystallization temperature for thin film amorphous alloy samples, Applied Physics

Express, Vol.2 (2009) pp.036501.

機械材料・材料加工部門「部門賞・一般表彰」公募のお知らせ

機械材料・材料加工部門では、第87期部門賞および部門一般表彰候補者を下記の要領で公募します。自薦他薦を問わず奮ってご応募ください。

- *公募締切： 平成21年12月4日（金）厳守
- *推薦書類： 日本機械学会・各賞推薦書に準じます。
(以下の申請・報告用紙をダウンロードしてお使い下さい。)
部門賞 一般・論文 一般・技術 一般・ポスター
- *被推薦者資格：各賞とも日本機械学会会員であることが受賞資格となります。
- *提出先： 日本機械学会 機械材料・材料加工部門
(担当者 石澤章弘)
160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5階
FAX：03-5390-3508 E-mail：ishizawa@jsme.or.jp

推薦された候補者は第3技術委員会で審査され、部門運営委員会で決定します。結果は、今年度中に本人に連絡し、次期（平成22年度）のニュースレターに掲載します。また、受賞者は2010年度年次大会時に表彰する予定です。

なお、本件に関するご質問・お問合せは、第3技術委員会委員長（京極秀樹、近畿大学工学部、TEL：082-434-7000、E-mail：kyogoku@hiro.kindai.ac.jp）までお願いいたします。

各賞の概要

- (1) 功績賞：機械材料・材料加工分野に関する学術・教育・出版など諸般の活動において、本部門の発展と進歩に積極的な貢献または顕著な業績のあった者に授与する。
- (2) 業績賞：機械材料・材料加工分野に関する研究または技術開発において、顕著な業績のあった者に授与する。
- (3) 国際賞：機械材料・材料加工分野における学術・教育・出版などに関する国際的な活動を通し、本部門の発展と進歩に積極的な貢献または顕著な業績のあった者に授与する。
- (4) 部門表彰（優秀講演論文部門）：当該年度に開催された本部門企画、担当、主催または共催の講演会において発表された機械材料・材料加工分野の講演論文中、学術・技術の進歩発展に寄与し、特に優秀と認められる論文の著者を対象とする。
- (5) 部門表彰（新技術開発部門）：機械材料・材料加工分野において本部門企画、担当、主催または共催の集会、出版物等において発表された新技術、新製品の開発者中、工業技術の進歩発展に特に貢献した者を対象とする。
- (6) 部門表彰（優秀ポスター発表部門）：当該年度に開催された本部門企画、担当、主催または共催の講演会において発表された機械材料・材料加工分野のポスター発表中、学術・技術の進歩発展に寄与し、特に優秀と認められるポスター発表の著者を対象とする。
- (7) 部門表彰（国際貢献部門）：本部門の国際会議や国際交流に関し、特に優れた貢献のあった者を対象とする。

2009 年度年次大会 in イーハトープのご報告

第86期第1技術委員会(年次大会担当)
村岡 幹夫(秋田大学)

2009年度の年次大会は2009年9月13日(日)~16日(水)に岩手大学(盛岡市)で開催されました。機械材料・材料加工部門では、以下のような講演セッションと特別企画行事を開催し、皆様の絶大なるご協力により無事に終了したことをご報告いたします。

- [G0400] 機械材料・材料加工(一般セッション, 9件)
- [S0401] 粉末成形とその評価(7件)
- [S0402] 表面改質および薄膜コーティング(3件)
- [S0403] 新機能多孔質材料の創製と評価(4件)
- [S0404] 衝撃問題の新たなる展開と応用(9件)
- [S0405] セラミックスおよびセラミックス系複合材料(9件)
- [S0406] プラスチック基複合材料の加工と評価(12件)
- [J0401] 生体材料およびその表面改質材(27件)
- [J0402] 締結・接合部の力学・プロセスと信頼性評価(13件)
- [J0403] 工業材料の変形特性とそのモデル化(5件)
- [J0404] 粒子積層による膜創製の学理(8件)

- [J0405] 知的材料・構造システム(26件)
- [J0406] 超音波計測・解析法の新展開(24件)
- [J0407] バイオマス由来材料の成形加工と特性評価(8件)
- [T0401] 金属ナノ材料の創製と展開(11件)
- [T1101] マイクロ理工学:nmからmmまでの表面制御とその応用(企画協力, 16件)
- [K0401] 「最近の粉末成形加工技術の動向」京極秀樹(近畿大)
- [K0402] 「発砲アルミニウム充填円管の衝撃圧縮変形特性」小林秀敏(阪大)
- [F0401] 「エネルギー維新と知的材料システム」(4件)
- [W0401] 「粉末成形加工の新展開」(5件)
- [W0402] 「知的材料システムのエネルギー維新への貢献」(6件)

(S:部門単独セッション, J:他部門との共同企画セッション, T:大会テーマセッション, K:基調講演, F:先端技術フォーラム, W:ワークショップ)

ASMP2009 を終えて

ASMP2009 実行委員長 大竹尚登(東京工業大学)

本部門がアジアに焦点をあてた第2回の国際会議であるASMP 2009(2nd Asian Symposium on Materials and Processing)/RAMM 2009(4th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment)は、2009年6月1日から3日に、マレーシアペナン島のBayview Resortで開催されました。今回は、アジアにおける機械学会材料系の協調を鑑み、材料力学部門も共催となりました。

インフルエンザの影響で1ヶ月前までは開催自身が危ぶまれる状況でしたが、終わってみれば全体で参加登録者約390名、論文件数は355件と予測の約2倍の規模を得て成功裏に閉会しました。日本からの参加登録者は51名(大学関係49名、企業2名)で、新型インフルエンザの影響で日本からの発表キャンセルが7件ありました。同じ理由で会議自身も準備不足であったことを否認せず、プログラム開示が開催1週間前になり、しかも不十分な内容であるなど、御参加の方々にはご不便をお掛けしました。

肝心の会議自身は、武田展雄先生(東大)による航空機材料のヘルスマニタリングに関するKeynote speechから始まり、井原郁夫先生(長岡技科大)のInvited talk、三浦秀士先生(九大)、谷口幸典先生(奈良高専)、大津雅亮先生(熊本大学)、安田清和先生(名大)のJSME Invited talkなど日本勢の活躍は顕著でした。安田先生と佐々木さん(長岡技

科大)は優秀ポスター賞にも輝きました。これに対して、マレーシアをはじめとする各国のプレゼンにも技術的に面白い内容がちりばめられていて、参加した日本人の間でも全体としてレベルの高い会議に仕上がったとの感触を共有しました。これらの論文内容の一部はJSMMEの特集号として来春発刊される予定です。

さて、今回の会議にはAbstract bookにRazakマレーシア首相からの言葉を頂くと共に、会議第2日のConference DinnerにはAbbasペナン州知事夫妻にご出席いただき、日



Conference 風景

本機械学会への謝意も頂戴するなど、マレーシア国を挙げたの支援を頂戴しました。本会議へのASEAN諸国の理解が深まっているのは部門としても嬉しい限りです。

今後、Bangkokでの第1回ASMP及び今回の成果を基礎として、ASMPを通じたASEAN諸国とのより良い協力関係の

構築の進むことを期待しています。第3回ASMPは2012年開催予定です。読者の皆様とご一緒できれば幸いです。最後に、本会議を陰に表に支えて下さった長岡技科大の武藤睦治先生並びに最後まで献身的に準備を進めて下さった熊本大学の天津雅亮先生に感謝します。terima kasih

2010 年度年次大会開催のご案内と特別企画のご提案のお願い

第1 技術委員会委員長 名古屋工業大学 北村憲彦

2010年9月5日（日）～8日（水）に名古屋工業大学（名古屋市）にて標記大会を開催します。名古屋駅から7分（JR中央線）で鶴舞駅、駅より大学正門まで700 mです。駅から大学までは、花壇や噴水の美しい鶴舞公園を散策しながら、お越してください。名古屋周辺には自動車、航空機、工作機械などの関連会社も多く、打合せのついでのご参加も歓迎です。また、名古屋城、徳川美術館、現存最古級の犬山城などの日本史やトヨタテクノミュージアム産業技術記念館など産業史などもついでにお訪ねになっても良いところです。

当部門では、すでにOSとして以下の9件（仮の題目、他部門共催含む）が予定されています：表面改質および薄膜コーティング、工業材料の変形特性とそのモデル化、粉末成形とその評価、超音波計測・解析法の新展開、締結・接合部の力学と評価、知的材料・構造システム、固相粒子成膜技術とその応用、セラミックスおよびセラミックス系複合材料、プラス

チック基複合材料の加工と評価。

さて今回のご案内は、次に上げる6分類の特別企画関係の募集です。できれば複数部門にまたがる部門横断企画をご検討頂ければ幸いに存じます。

- 1 基調講演の企画
- 2 先端技術フォーラムの企画
- 3 ワークショップの企画
- 4 部門同好会の企画
- 5 新技術開発レポートの企画
- 6 新企画行事の企画

部門の皆様の多くのご参加をお待ちしております。締切は2009年12月18日（金）です。奮ってご提案ください。特別企画のご提案やお問合せがございましたら、第一技術委員会の北村（kitamura.kazuhiko@nitech.ac.jp）または山下（minoruy@gifu-u.ac.jp）までご連絡ください。



尾張名古屋は城で持つと謳われた名古屋城の本丸



名古屋工業大学正面から2号館

編集後記

M&Pニュースレター No.38を発行するにあたり、執筆依頼から原稿提出まで短い時間であるにもかかわらず、ご多忙の中、お引き受けいただきました先生方には心より感謝申し上げます。また、本ニュースレターの発行作業を通じ、広報委員会委員の結束力、M&P部門委員の皆様の方強いご支援を強く感じました。ご協力いただきました方々に御礼申し上げます。今回の特集記事は、本部門において重要な、加工、材料、評価を取り入れた内容であり、多くの委員の方々にとって役立つ情報提供となりましたら幸いです。本ニュースレターに関するご意見、お問合せは、広報委員会幹事（宮下：miyayuki@mech.nagaokaut.ac.jp）までお願いいたします。

発行 発行日 2009年10月30日

〒160-0016 東京都新宿区信濃町35信濃町煉瓦館

(社)日本機械学会 機械材料・材料加工部門

第87期部門長 服部 敏雄

広報委員会委員長 荻原 慎二

Tel. 03-5360-3500 Fax. 03-5360-3508