

水曜会誌

第23卷 第4号

目 次

総 説	
マイクロエレクトロニクス実装技術の現状と動向.....	貫井 孝..... 257
超清浄空間としての真空中で動かすには.....	土佐 正弘..... 272
無酸素銅の現況と今後の展望.....	矢島 健児 小出 正登..... 279 浅尾 晴彦
会 報	291
会員消息	297

平成13年3月15日発行

京 都 大 学

水 曜 会

総説

マイクロエレクトロニクス実装技術の現状と動向

貫井 孝*

Current Status and Trends of Microelectronics
Packaging Technology

by takashi NUKII

1. はじめに

エレクトロニクス機器は、時代と共に概ね次の様なステップを歩み、進展し続けて来た。

- ①人々は、本能的な欲求に基づく便利さを求めこれに見合う商品の登場を待つ。
- ②これが市場に出れば、機能（音質、画質等）の向上を求める。
- ③まもなく低価格化を待望し、この進行と共にマーケットは第1段の拡大を遂げる。
- ④使い易さ、コンパクト性への強い要求が新たな商品へと変遷せしめ、これが飽和状態に達すると、マーケットは第2段の拡大期を向かえ、やがて成熟期に入る。

この発展サイクルを担ってきたのが半導体／液晶ディイス技術とその実装技術であり、これらが相俟ってここ1/4世紀の間に日本のエレクトロニクス産業の発展に多大なる役割を果たしてきた。多くの人々の生活に利便性や楽しさを付与し、新たなライフスタイルを提供する民生機器や情報端末機器の実現にまで導いたのは、まさに実装技術の大いなる足跡である。

更に、現在はグローバルネットワークの急進展、多様なデジタル・モバイル商品の登場、通信インフラの整備／拡大の中で情報が瞬時に全世界を行き交う新・情報化社会にある。これに伴い、個人一人ひとりが情報の主役としていつでも、どこでも簡単に画像・音声・映像などリアルな情報のキャッチ・発信ができるパーソナル情報端末の創出が切望されている。この実現のために、多くの分野の技術の深化と融合が必要であるが、これら

の広範な要素技術をまとめ、ひとつの商品にまで仕立て上げる原動力をエレクトロニクス実装技術が担っており益々その真価を發揮すべき時代に入っている。

本稿では、まず、エレクトロニクス実装技術の本質・要素技術分野について概説し、次にとりわけその主軸をなすマイクロ接合分野に焦点をあて、技術体系、具体的な要素技術の内容と動向について述べることにする。

2. エレクトロニクス実装技術の本質と要素技術分野

実装技術の役割を具体的にみてとるため、今や情報機器には不可欠の存在となっているLCD (Liquid Crystal Display : 液晶ディスプレイ) のドライバーLSI実装技術¹⁾についてその変遷を歴史的に概観する。1888年に液晶が発見されてから、はじめてディスプレイに応用されたのが、1972年である。それ以降の動きを図1に実装技術の面から記している。更に、この変遷の要素をわかりやすく示したのが図2である。

当初、パッケージされたLSIがPWB (Printed Wiring Board : プリント配線基板) に搭載されたものがFPC (Flexible Printed Circuit : フレキシブル配線基板) によってパネルと接続されていた。次の段階ではモールドレジンを排し、LSIのペアチップを直接基板上に搭載し、細線ワイヤにより電極を結線するいわゆるCOB (Chip On Board : 配線基板上へのチップの直接搭載) 方式が用いられ、その基板は同じくFPCを介してLCパネルと接続される。そして更に、FPCを単なる接続用基板としてではなく、LSI搭載を兼ねるという考え方のもとTCP (Tape Carrier Package) に変貌をとげ、「TCPが異方性導電膜を介してLCパネルと接続される」現在の主流形態に至っている。次の段階では、更にフィルムも除去されLSIそのものがパネルの配線上に搭載されるCOG (Chip On Glass : ガラス上へのチップ

*シャープ㈱ A1210 プロジェクトチーム
(昭和48年・金卒)

液晶応用商品	電卓	腕時計	ラップトップコンピュータ	カラーLCDTV
実装構造断面図	<p>キーシート LCD FP ガラス</p>	<p>散乱板 LCD セラミック ゴムコネクタ</p>	<p>FPC FP LCD PWB</p>	<p>LCD TCP LSI PWB ソルダリング</p>
商品化時期	1973	1973	1984	1984
ドライバーLSIの形態	FP (Flat Package)	FP	FP	TCP (Tape Carrier Package)
メーカ	シャープ	セイコー・エプソン	シャープ	セイコー・エプソン
ドライバーLSIの接合方法	ソルダリング	ゴムコネクタ	導電性エラストマ &異方性導電膜	ソルダリング
液晶応用商品	B/W LC-TV	ワープロ	ビューファインダ (一体型VTR)	
実装構造断面図	<p>導電性ベースト LCD パンプ付き LSI</p>	<p>LCD TCP 異方性導電膜 PWB LSI</p>	<p>LCD モノリック ドライバー</p>	
商品化時期	1985	1986	1988	
ドライバーLSIの形態	パンプ付き LSI	TCP	ドライバー モノリシック	
メーカ	Citizen	シャープ	セイコー・エプソン	
ドライバーLSIの接合方法	導電性ベースト	異方性導電膜		

図1 液晶ディスプレイにおける実装技術の歴史

の直接搭載)方式へと発展する。そして、遂にはSiパルクのチップもなくなりパネル上に駆動用薄膜トランジスタを形成する形態の登場となる。

このようにある段階で本質的に不要(言い換えれば必要悪)なものが取り除かれ、あるいは削除され、商品性を上げて(額縁の極小化)きているのがわかる。

これは典型的な例であるが、電子回路モジュールは、基本的にはこの様な経緯をたどっている。しかし、ある

ものを削減しようとそれが持ち得ていた役割を他の領域でまかなう必要がある。それを可能とするためには、学術的背景を踏まえた広範囲の材料・工法・装置の革新的開発が必要であり、それが達成された時、ようやく「優れたコストパフォーマンス」「スリム」「コンパクト」といったキーワードを得ることができる。

これを一般的に表現すると図3の様になり、これが実装技術の本質である。

実装技術を具体的に研究・開発・応用していくためには多分野の学術的要素が必要であり、次の様な学術分野の蓄積・先端研究がベースとなって実装要素技術を支えている。

- (1) Micro interconnection: メタラジカル接合（金属学・物理学）、非メタラジカル接合（化学・材料力学）
- (2) Wiring substrate: 基板材料（化学・材料学）、配線形成（電気化学・物理学・材料学・金属学・化学）
- (3) Electronic component: 半導体パッケージ（電子工学・化学・物理学・材料学）、チップ部品／センサー（電気化学・物理学・材料学・電子工学）
- (4) Thermal management: 热設計（伝熱学・熱力学）

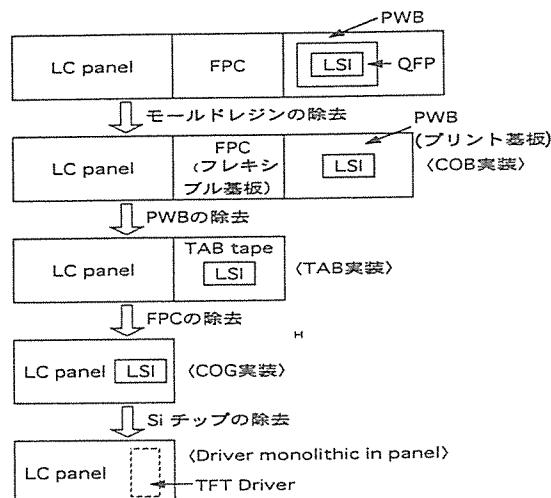


図2 液晶ディスプレイ用ドライバーIC実装技術の変遷要素

学・機械工学・金属学）、放熱材料（金属学・化学）

- (5) Design/Simulation: 回路設計（電子工学）、応力解析（力学・材料学）
- (6) Reliability: 寿命評価／予測（数理工学・力学・材料学）、故障解析（物理学・化学）
- (7) Equipment/Production: 生産装置（機械工学・電気／電子工学・金属学・力学・材料学）

従来、この領域はほとんど企業において実践されてきた傾向が強いが、日本の最も得意としていた当該領域が相対的に弱体化しつつあるとの認識から昨今では大学、公的機関での研究が急速に増え、また次世代に備えた国家プロジェクトも進行中である。

3. エレクトロニクス実装におけるマイクロ接合技術の体系と技術の潮流²⁾

SiやGaAsといった半導体ウェハ上に能動素子（場合によっては受動素子も）が形成され、電極部以外がSiNやSiO₂などの保護膜で覆われた状態以降、また受動部品や機能部品については、それぞれが機能をもちかつ電極を備えた状態に仕上げられた後、いかにして回路基板上に電気的、機械的に安定に搭載（接続）するかがこの範疇に入る。

さて、半導体デバイスの基板上への組み付け（マイクロ接合）は、ウェハプロセスが完了した後、各半導体チップ単位に分括されたところからはじまる。

ここから基板に取り付けられるまでの過程は大きく分けて、図4の様に3つに分類することができる。1つは、いったんパッケージに収め、これを基板に接続する方法、2つ目は複数個の半導体チップを高密度に1つの基板に搭載し、それぞれ相互結線したものを1つのパッケージとして扱い、これを本基板に接続する方法、3つ目は直

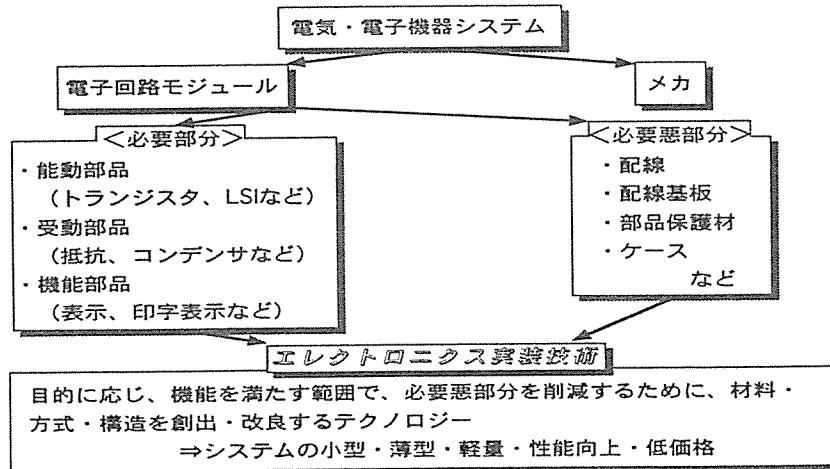


図3 エレクトロニクス実装技術の概念

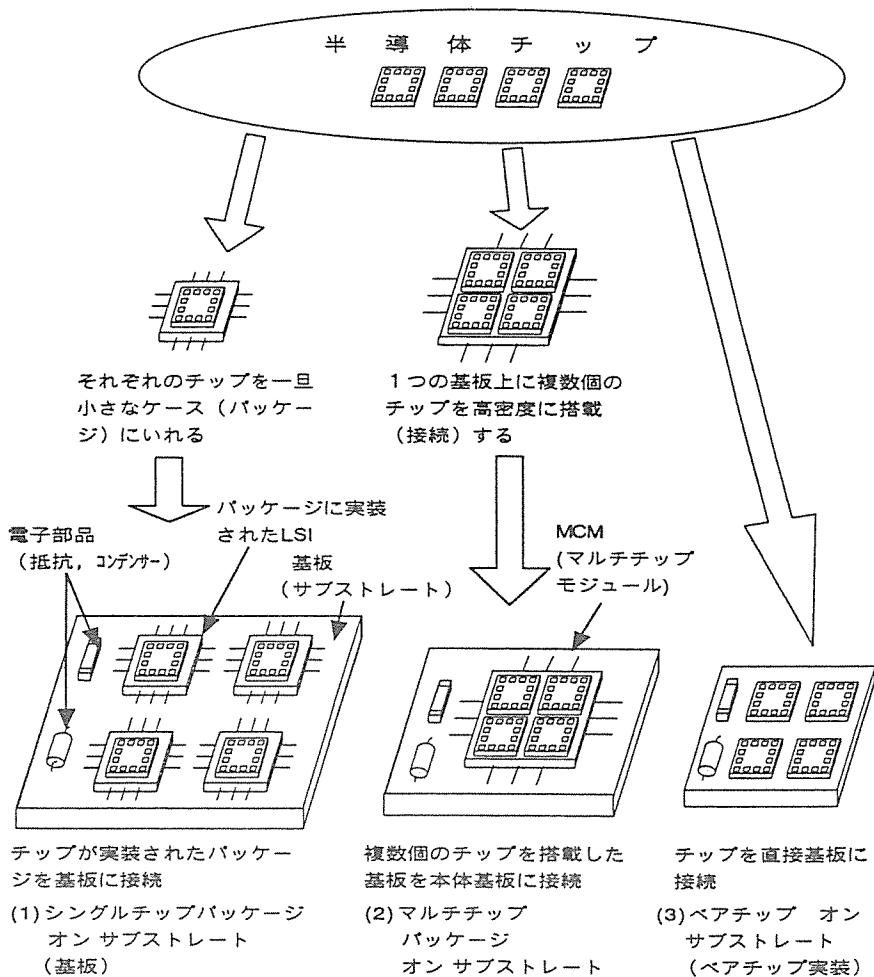


図4 半導体デバイスの回路基板上への搭載(接続)形態の分類

接、半導体チップを基板に接続する方法である。

ここでは、それぞれの形態を便宜的に(1)Single Chip Package on Substrate, (2)Multi Chip Package on Substrate (MCM), (3)Bare Chip on Substrateに分類し、配線基板上への組み付けについて説明する。なお(3)はベアチップ実装とも称される。

3.1 Single Chip Package on Substrate

3.1.1 汎用型半導体パッケージとその実装技術

これは、半導体チップを収納するパッケージの材料によって、3つに分けられる。樹脂モールドされたパッケージ、セラミック系材料によるパッケージ、さらには、金属系材料によるパッケージがある。まずリードフレーム(コバルト系やCu系材料)にチップを固定する。チップの固定には、Pd, Ag, ガラスなどの微小粒がエポキシ系樹脂やバインダに混合された接着剤(ペースト)を用いる方法やあらかじめリードフレーム上のチップ搭載部にコートされたAu膜とチップ(Si)とのAu/Si共

晶反応により固定する方法が主なものである。

この工程をダイボンディング工程と称する。次は、リードフレームのリード部とチップ電極とを結線するプロセスである。これには、通常Auの細線ワイヤ(約 $25\mu\text{m}\phi$ 程度)が用いられ、チップ電極であるAl膜(約 $1\mu\text{m}^4$)とリードのAuコート部を繋ぐ。通常のAl膜は大気中では薄い酸化膜に覆われているため、これを破壊しつつAl-Auの固相拡散を生じさせることが必要で、熱や圧力や超音波が加えられる。またリード側とはAu-Auの相互拡散を生じせしめるため、同様のエネルギーを加える。この工程はワイヤボンディング工程と称され、多くのマイクロ接合技術の中でも最も古く且つ長い実績を誇り、現在も数多く使われている。これに関して過去多くの金属学的見地からの研究の蓄積があり、Al-Au間の金属間化合物生成による信頼性上の課題も解決をみている。

これが完了すればチップ、ワイヤ及びその接合部を電

気的、機械的に外部環境から保護し、ユーザが使い易い様にする目的で樹脂封止される。樹脂封止にはトランスマールド法(粉末あるいはタブレット状の材料を金属のポット部より注入し、溶解流動させてキャビティ内で成形封止を行う方法)や流動浸漬法(流動粉末状態の樹脂に加熱したリード付LSIを浸漬させる方法)をはじめいくつかの方法があるが、トランスマールド法が圧倒的主流をなす。そして、最終的にモールド樹脂からリードが延在した形で打ち抜かれ、さらに次に示す基板上への搭載形態に応じて、リードフォーミングが行われる。

さて、基板への接続工程となるが、リードスルーリアルタイプと表面実装(SMT: Surface Mount Technology)タイプに分けられる。前者は、挿入機によって、あらかじめ基板配線の一部に設けられた穴(スルーホール)にパッケージリードが挿入され、一般に裏面(リードが突き出た面)から共晶はんだを用いたフローはんだ付けにより固定される。一方、表面実装タイプは、基板上のリード接続部にはんだペーストを印刷し、マウンタと称される装置によりパッケージを精度よく搭載した後、リフロー炉(炉内がはんだ融点以上の温度にコントロールされた炉)を通過させることにより、はんだ接続がなされる。

今日では、表面実装タイプが主流を成す。とりわけ、携帯型機器・情報端末機器・需要創造型商品といわれるものはほとんどがこのタイプと考えてよい。

1980年代のリードスルーリアルタイプ実装からSMTへの移行は、実装面積、電気特性・設計・生産性など多くの面で「モノづくり」の進化をもたらした。材料、設備、プロセス技術、チップ部品・半導体パッケージ技術のまさに協創が実装の原点をつくり、発展させた時代である。1980年前後から10年間でリードピッチ1.0mmから0.5mmに狭ピッチ化し、チップ部品面積も20%にまで減じた。当該手法は実用に供してからかなりの時を刻んでいるが今なお情報/携帯端末をはじめ民生機器実装のベースはSMTであり、工夫と改善が続けられている。

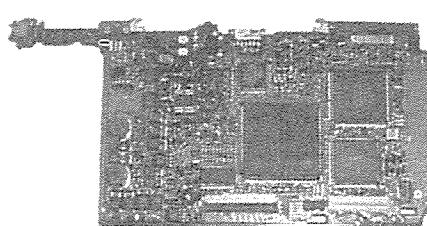
一例として、カラーPDAのメイン基板、サブ基板の概観と仕様をそれぞれ図5に、表1に記すが、合計部品点数1176点、はん付ポイント数5436ポイントというレベルに到っている。これを可能にするためには、①薄型多層基板への256pin(端子)LSIを含む高密度両面リフローのためのN²露囲気リフローシステムの開発、②はんだ量を安定化し、ブリッジを防止するための高品位はんだ印刷機・マスク・はんだペーストの開発を軸とする仔細なSMT要素の確立がベースとなっている³⁾。

3.1.2 超小型パッケージ:CSP (Chip Size Package) と実装技術

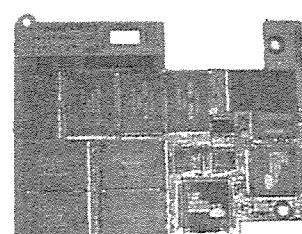
さて、90年代になって大型コンピュータ分野のダウンサイジング化、需要創造型民生商品の必要性、マルチメディア構想などの時代背景と共に、MCM(図4参照)が大きな話題となった。しかし、MCM開発/実用化の過程でその汎用化にあたっては、課題も大きくクローズアップされてきた。大きな魅力を感じつつもテスト/KGD(Known Good Die)、インフラ、コスト、設備投資などの問題に対面し躊躇する中で、4~5年前に登場したのが「極めて小さなパッケージ;CSP」である。(図6) ユーザ(基板実装側)からみれば、既存のSMTプロセスをベースにし、しかも小型化が可能という点で、大変受け入れられやすいものであった。現在、それを搭載

表1 カラーPDAの電子回路モジュール仕様例

	メイン基板	サブ基板
基板材質 (外形寸法)	ガラエボ6層0.8mm (155×78mm)	ガラエボ6層0.6mm (86×65mm)
部品点数	1004点	172点
計1176点		
半田付ポイント	3680ポイント	1756ポイント
	計5436ポイント	
最小ピッチIC搭載	0.4mmピッチ 256pinQFP	0.4mmピッチ 128pinQFP
最小チップ部品	1005	1005



メイン基板(IC実装面)



サブ基板(IC実装面)

図5 カラーPDAの電子回路モジュール外観

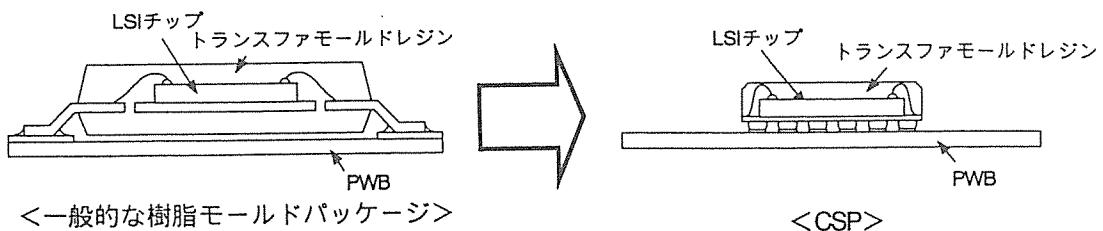


図6 CSP 実装の概念

表2 CSP による重量低減効果

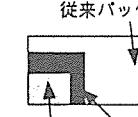
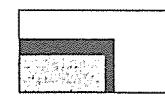
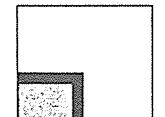
デバイス	8Mフラッシュメモリー (42端子)	5Mフラッシュメモリー (64端子)	ASIC (160端子)
従来 パッケージ	TSOP (Thin Small Outline Package) 周辺端子：ピッチ0.5mm	SSOP (Shrink Small Outline Package) 周辺端子：ピッチ0.5mm	QFP (Quad Flat Package) 周辺端子：ピッチ0.5mm
CSP	マトリックス端子 ：ピッチ1mm	マトリックス端子 ：ピッチ1mm	マトリックス端子 ：ピッチ0.8mm
従来パッケージ/ CSP実装面積比較	従来パッケージ  ICチップ CSP		
削減率	76%	64%	79%

表3 CSP による実装面積削減効果

従来 パッケージ	タイプ	SOP	TSOP	TSOP	SSOP	QFP	QFP
	端子数	28端子 (周辺)	28端子 (周辺)	40端子 (周辺)	64端子 (周辺)	100端子 (周辺)	176端子 (周辺)
	重量	0.71(g)	0.38	0.451	1.61	0.60	2.43
CSP	サイズ	6×6(cm ²)	7×13	8×8	9×15	10×10	12×12
	端子数	28端子 (マトリックス)	28端子 (マトリックス)	40端子 (マトリックス)	64端子 (マトリックス)	100端子 (マトリックス)	176端子 (マトリックス)
	重量	0.06(g)	0.14	0.11	0.22	0.16	0.23
重量低減率		92%	63%	76%	86%	73%	91%

した商品も続々と登場し、爆発的な拡大をみせた携帯電話には早くから搭載され、薄型化・軽量化に寄与している。CSP化することにより、従来のQFPに比べ面積が

70～40%減じ、重量についてもそれ以上の削減効果のあることは周知の通りであり、またこれが大きな特長である。(表2, 表3)

しかしその一方で、QFPにおいて基板とパッケージを連結するリードが応力を緩和する効果を担っていた分をどう吸収していくかという課題がある。パッケージに占めるLSIの比率が増大していくにつれ(ペアチップはその究極であるが)、基板とデバイス側の熱膨張率をはじめとする物性の差が顕著になる。実装された状態での評価として温度サイクルテストによる熱疲労寿命の確認、改良は勿論のこと、実際のマウント工程から筐体への組みつける工程に到るプロセスに耐えられるか、或いは落下・衝撃に耐えられるか等、配慮が必要である。信頼性の向上のためには、パッケージ電極構造・材料、基板デザイン・構造・材料や実装プロセスなど、パッケージ/基板/実装をトータル的に観て、科学的アプローチに基づく解決が必要であり、多くの研究がなされている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。また、今後様々なCSPのラインアップがなされていく中で電極数、ピッチ、サイズ等が変化した場合、それぞれのPWB実装時(PWBも変わる場合があるだろう)の熱ストレスによる寿命を早く見極め商品化スピードを上げたいというユーザの願望もある。これに対応するため筆者らが研究開発した信頼性予測技術⁷⁾を以下に記す。

3.1.3 CSP実装における熱疲労信頼性予測技術

本方式は後述のフリップチップ実装と同様に、ほとんど半導体チップサイズで回路基板上に搭載し得る極めて有用な手法であるが、デバイス下面のボール状電極を介して回路基板に直接接合されるため、基板/デバイス間の熱膨張率差に伴う温度サイクル下での熱ストレスの蓄積により、はんだボール接合部が最終的に破断に到る熱疲労の課題を抱えている。この課題の解決には材料、プロセス、構造にいたる様々な観点から追究が必要であるとともにその結果、実用に供するか否かスピーディな判

断が求められる。

さて、熱疲労に関するCoffin-Mansonの低サイクル疲労破壊の経験則は、以下の式で表される。

$$N_f = (\Delta \varepsilon_{in} / \varepsilon_0)^n \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 N_f は疲労破壊に至る平均寿命温度サイクル回数、 $\Delta \varepsilon_{in}$ は、1回の温度サイクル負荷での非線形歪み振幅、 ε_0 とnは材料ごとに決まる値で一定の値である。そこで、シミュレーションで得られたはんだボール接続部の非線形歪み振幅と実験で得られた寿命のデータがCoffin-Mansonの経験則に合致し ε_0 とnを決定できれば、以後は、シミュレーションで非線形歪み振幅を計算すれば、接続部の寿命： N_f を予測できるのではないかという点に着目して検討を行ったものである。

具体的には、あるCSP実装体について温度サイクル試験(高温125°C、低温-40°C、1時間に1サイクル)と同じ温度負荷を与えシミュレーションを実施し、非線形歪み振幅を求め、もう一方で、それと同じCSP実装体を実際の温度サイクル試験にかけ、平均寿命を求める。以上の様にして、実装構造体の異なる7種類(表4)について平均寿命と非線形歪振幅を得た。そして、これらの値、寿命： N_f 、非線形歪振幅： $\Delta \varepsilon_{in}$ を両対数グラフにプロットしたものを図7に示す。これらのプロットした点を上述の①式：Coffin-Manson則に最小二乗法によりあてはめると、

$$\varepsilon_0 = 0.21 \quad n = -2$$

が得られ、その結果 ①式は、

$$N_f = (\Delta \varepsilon_{in} / 0.21)^{-2} \quad \text{--- (2)}$$

と、具体化することができる。図7からもわかる様に、

表4 温度サイクル試験結果に基づく平均寿命とシミュレーションに基づく非線形歪振幅

NO.	サンプル仕様	平均寿命(cyc.)	非線形歪振幅
(a)	CSPサイズ：12mm ² 、電極端子：0.8mmピッチ・176端子、はんだボール：0.45mm ² 、印刷ステンシル厚さ：0.15mm、温度サイクル試験：-40°C/125°C 1cyc./lh、実装構成：片面 〔標準サンプル〕	1109	0.00640
〔標準サンプル〕からの変更点			
(b)	はんだボール：0.35mm ²	442	0.01257
(c)	電極端子：92端子	603	0.00856
(d)	印刷ステンシル厚：0.10mm	874	0.00700
(e)	実装構成：両面	965	0.00697
(f)	CSPサイズ：16mm ² 、電極端子：280端子	1708	0.00509
(g)	温度サイクル試験：3cyc./lh	1280	0.00506

各プロット点はほぼ直線上にあり、②式を用いることによって CSP 実装における熱疲労寿命を予測することができる。

3.2 Multi Chip Package on Substrate

1つの基板上に、能動部品(IC, ワンチップ半導体など), 受動部品(抵抗, コンデンサなど)をはじめとする電子部品ができるだけコンパクトに集積化した状態で搭載し、一定の回路機能をもたせ、これを本体基板(マザーボード)に取り付ける構成は古くからあり、一般にハイブリッド IC と称されている。代表的な例は、セラミック基板上の Ag/Pd や Au などの厚膜配線に IC をダイボンディング、ワイヤボンディングし、さらに抵抗、コンデンサも厚膜やチップ部品として組み込んだものである。この類のものは現在でも自動車関係やオーディオ回路などに用いられている。しかし、もう少し狭義の意味で MCM を捉えると、大型コンピュータに端を発する。MCM は大型コンピュータの分野で半導体デバイスの高速性能を最も効果的に導き出し、多少のコスト

犠牲を払いながらも進展してきた。とりわけ、1980 年に IBM 社より発表された TCM モジュール (Thermal Conductive Module) は代表的なものである。しかし、最近では、民生・情報機器へ展開を試みる動きもある。

電子機器のデジタル化による LSI 比率の増加、また回路の動作スピードの向上が求められる今日、LSI を可能な限り高密度に搭載し、高放熱且つ高速動作を実現する構成として、MCM もその一手法として注目されている。

MCM の要素技術は、端的にいえば、LSI をペアチップ状態で搭載する技術、基板技術、放熱技術、パッケージング(封止、端子取り出しなど)技術である。しかし、その技術内容は民生用、OA 用、大型コンピュータ用、通信用などにより、様々なレベルがある。ペアチップ接続技術においては、後述のようなワイヤボンディング(Wire Bonding: WB), テープオートメーテッドボンディング(Tape Automated Bonding: TAB), フリップチップボンディング(Flip Chip Bonding: FCB)が用いられ、また基板技術においては Si, 金属、セラミック、ガラスエポキシなど幅広い材料の上に多層化をはかった基板を用いる場合が多い。放熱のためには、AlN 基材や、金属板を有効に構造化したものが検討されている。また、パッケージングに於いては、大掛かりなキャップ封止タイプから通常のトランスマルチドタイプまで、千差万別である。

これらの要素を目的(機能、コスト)に応じてどう組み合わせ、そしてこれらの要素をどうマッチングさせていくかが、MCM の最大のポイントである。

3.3 Bare Chip on Substrate

ペアチップを直接基板に搭載・接続(ペアチップ実装)する基本技術には、図 8 の様にワイヤボンディング方

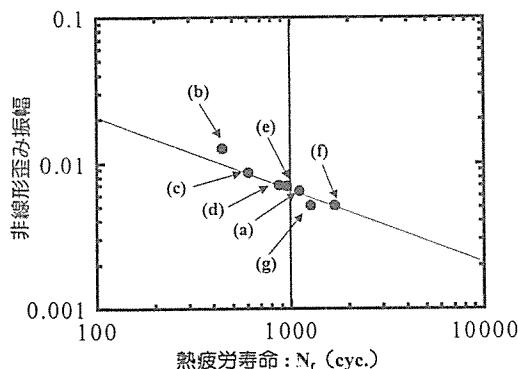
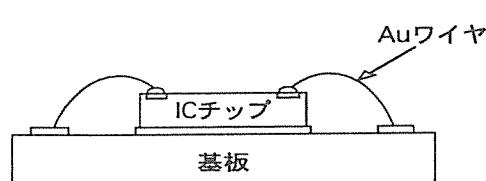
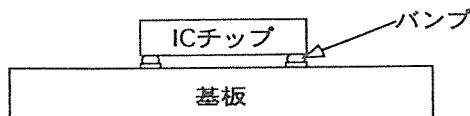


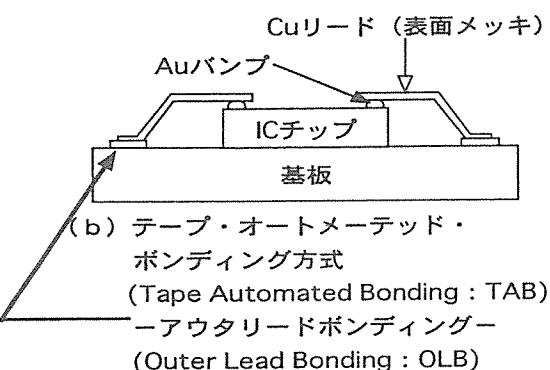
図 7 热疲労寿命と非線形歪振幅



(a) ワイヤボンディング方式
(Wire Bonding : WB)



(c) フリップチップボンディング方式
(Flip Chip Bonding : FCB)



(b) テープ・オートメーテッド・ボンディング方式
(Tape Automated Bonding : TAB)
—アウタリードボンディングー
(Outer Lead Bonding : OLB)

図 8 ペアチップ実装方式

式、TAB方式、フリップチップボンディング方式がある。それぞれについて以下に説明する。

3.3.1 ワイヤボンディング方式

これは、LSIのAl電極と基板配線電極とを、文字通りワイヤで結線する技術で最も歴史があり、長年の実績を有する。技術的には、 $40\mu m$ ピッチレベルが開発され、また材料面でも脱金化の観点からCuが検討された時期もあったが現在ではAuあるいはAlがほとんどである。なお、樹脂でワイヤをコートしたものも一部でつかわれている。

本技術は、ウェハから分離された半導体チップを特に電極処理をすることなく用いることができ、またWB技術の基本も確立されているため適用用途は幅広い。一般的な半導体チップのパッケージングに用いられるのはもとより、サーマルヘッドドライバやLEDプリンタ用ドライバおよびLEDのセラミック基板上への搭載、さら

にはICカードなどプリント配線板上へのCOB (Chip on Board) 実装にも用いられている。

3.3.2 TAB方式

この方式の基本は、まず配線を形成した長尺のフィルムキャリヤテープに、半導体チップを一旦接続し(通常これをILB: Inner Lead Bondingと称する)，表面部を簡単に樹脂コートした後その周辺部で打ち抜き、これを基板上に接続する(通常これをOLB: Outer Lead Bondingと称する)工程である。概念図を図9に示す。これらの工程はリール・ツウ・リールで連続的に作業がなされる。

さて、ILBであるが、これはテープのデバイスホール部に延在する金属めっきされたCuリードとLSIのAl電極とを突起物を介して接続する。突起物は、バンプと称されチップ側に形成する方法が一般である。ウェハ状態から出発し、中間金属層を介してめっきによりAuの

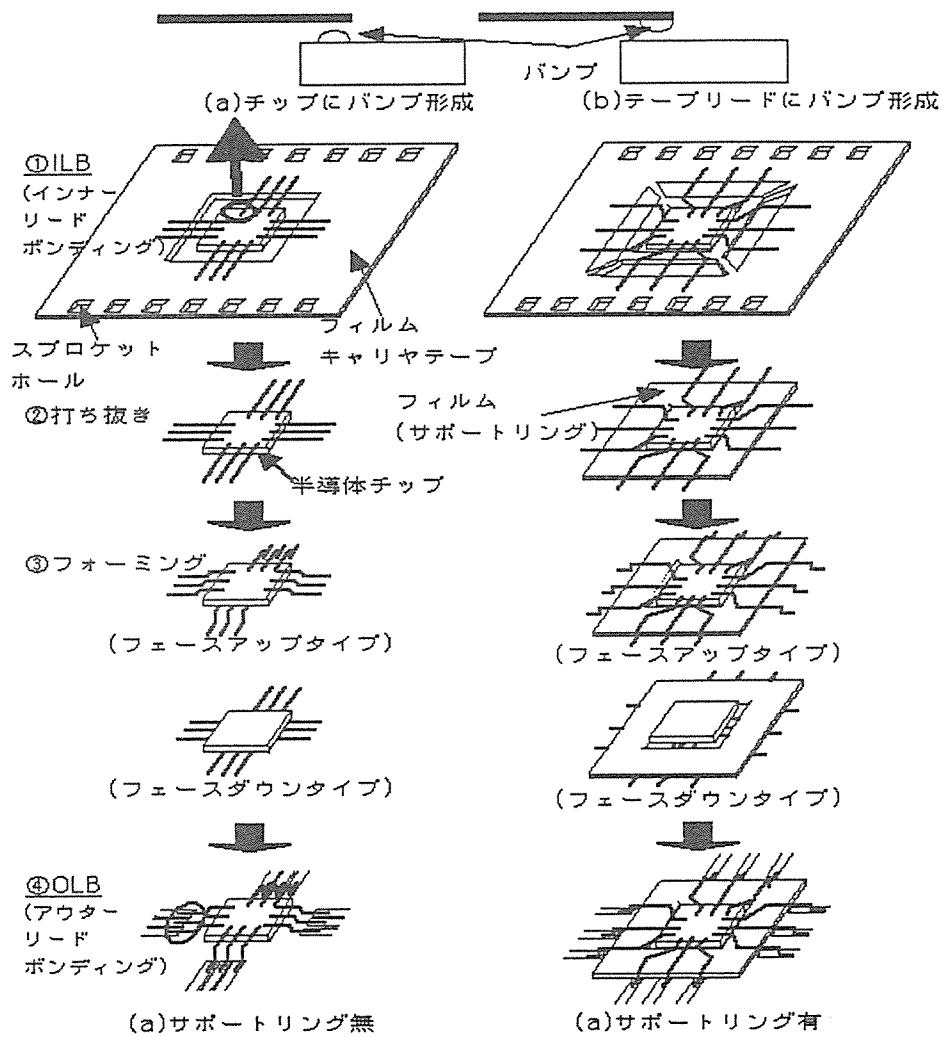


図9 TAB 基本プロセス

突起（約 15~20 μm¹⁾）を設ける。一方、リード側は通常 Cu リードに Sn めっきが施されており、Au/Sn 共晶接合のもとで ILB はなされる。Au めっき Cu リードとの間で Au/Au 熱圧着接合する場合もある。次に OLB であるが、図 9 の様に、半導体チップ+リードあるいは、半導体チップ+リード+テープの状態で打ち抜かれ、リードが基板配線にはんだ接続されるのが、通常である。

OLB には、アウターリードをフォーミングする方式とフォーミングしない（フォーミングレス）方式がある。前者は、応力緩和構造となるため、高精度リードを用いる微小ピッチ接続に適しているが、フォーミングに金型が必要で、その管理や精度に十分な注意が必要である。この方式で、リペアを可能とし、かつ信頼性に優れる世界最小の PWB 上 150 μm ピッチを可能とする技術が開発されている⁸⁾⁹⁾。後者は、逆に応力に対しては相対的に弱い反面、金型が不要で、生産する側からは都合の良いシステムである。この方式では 220 μm ピッチ 281 ピンを液晶タッチメモにて実用化され、これにより QFP 比で実装面積 1/4、実装厚 1/10、重量 1/70 が可能となっている¹⁰⁾。また、接続リード構造を工夫し、またははんだフィレット部の耐応力形状の研究の結果（図 10），強度を 1.6 倍、耐久性を従来の 10 倍以上に引き上げ 180 μm ピッチ接続実現されている¹¹⁾¹²⁾¹³⁾。更に、当技術は磁気ヘッドデバイスへも応用¹⁴⁾されている。

TAB 技術は、70 年代から存在する長い歴史を有する技術であるが、とりわけ日本では 80 年代後半の LCD という好ターゲットを得て、上述の回路基板への OLB から脱し、新たなコンセプトのもと急速に伸長してきた。そして LCD モジュール実装の中でその要求に対応しながらその技術も大きな発展を遂げている。TCP (Tape Carrier Package) とパネルの実装にあたって

は、TCP/パネル間の位置合わせマークや隣接 TCP 間のスペースが必要になり、TCP/パネル間の接続ピッチはドットピッチよりやや小さい値が必要である。即ち、50 μm ピッチ接続が要求される時代になっており、これと共に、ILB ピッチも 50 μm が必須となってきている。50 μm ピッチ ILB を達成するためには①インナーリードとバンプとのアライメントマージン確保、②インナーリードの引っ張り強度の向上が要求される。①のためには保管環境（湿度、温度）の最適化による TCP のインナーリードの累積精度の安定化やアライメントマークの適正化を行うと共に、②に対しては従来の 1.7 倍の高強度 Cu 箔を用いている。これにより、図 11 に示す様な 50 μm ピッチ ILB により TCP の量産化に到っている¹⁵⁾¹⁶⁾。

次に、この場合の OLB¹⁶⁾であるが、図 12 のプロセスの様にほとんどが ACF (Anisotropic Conductive Film : 異方性導電膜) を用い、熱と圧力でパネル電極に接合される。接合部は粒子を介した圧接構造となっている。

3.3.3 フリップチップボンディング方式

この実装形態は、チップの電極に突起を設け、配線基板の電極と対向させた状態で相互の電極を接合するものである。本技術の源流は、1963 年代前半、IBM 社のコンピュータに採用された SLT (Solid Logic Technology) にさかのぼる。これは Cu ポールをはんだで被ったような突起をチップ側に設け、基板の電極と加熱溶融接続するものである。これは C4 (Controlled Collapse Chip Connection)¹⁷⁾といわれる形態に発展し、時代とともに多様な展開を遂げている。以下に具体的な内容について若干触れてみる。

- ・はんだバンプ形成法：メタルマスクを用いた蒸着法、フォトプロセスを用いためっき法、はんだワイ

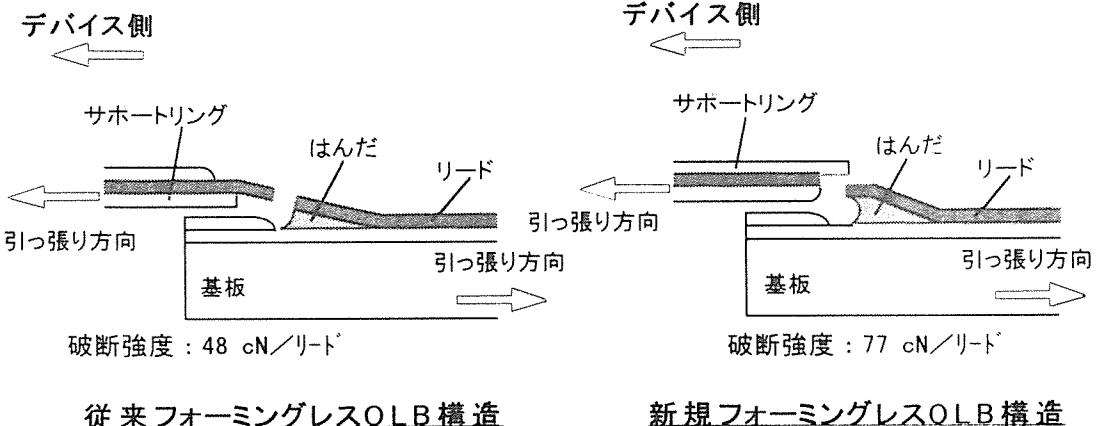


図 10 高信頼性 TAB/OLB 構造

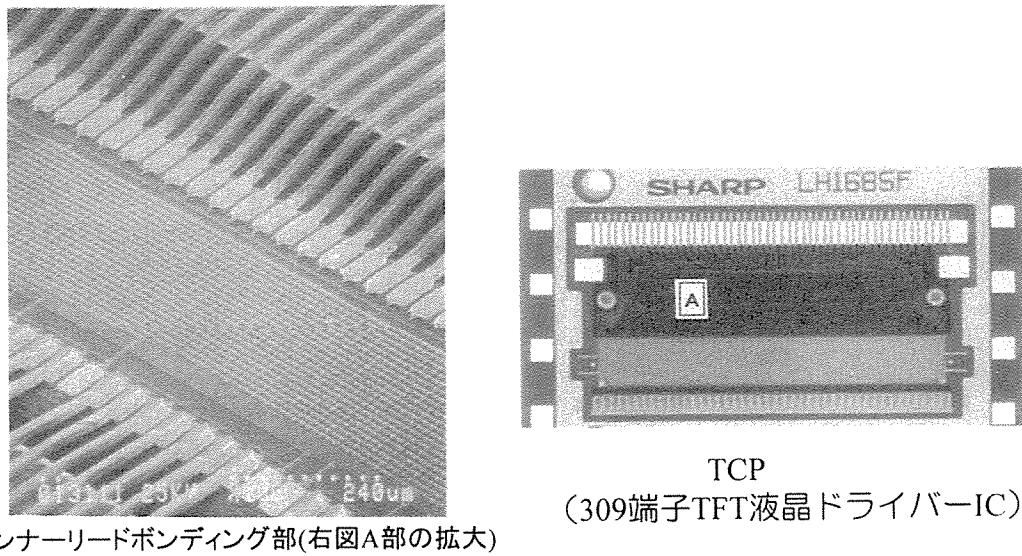


図 11 微細接続 (50μm ピッチ) TCP

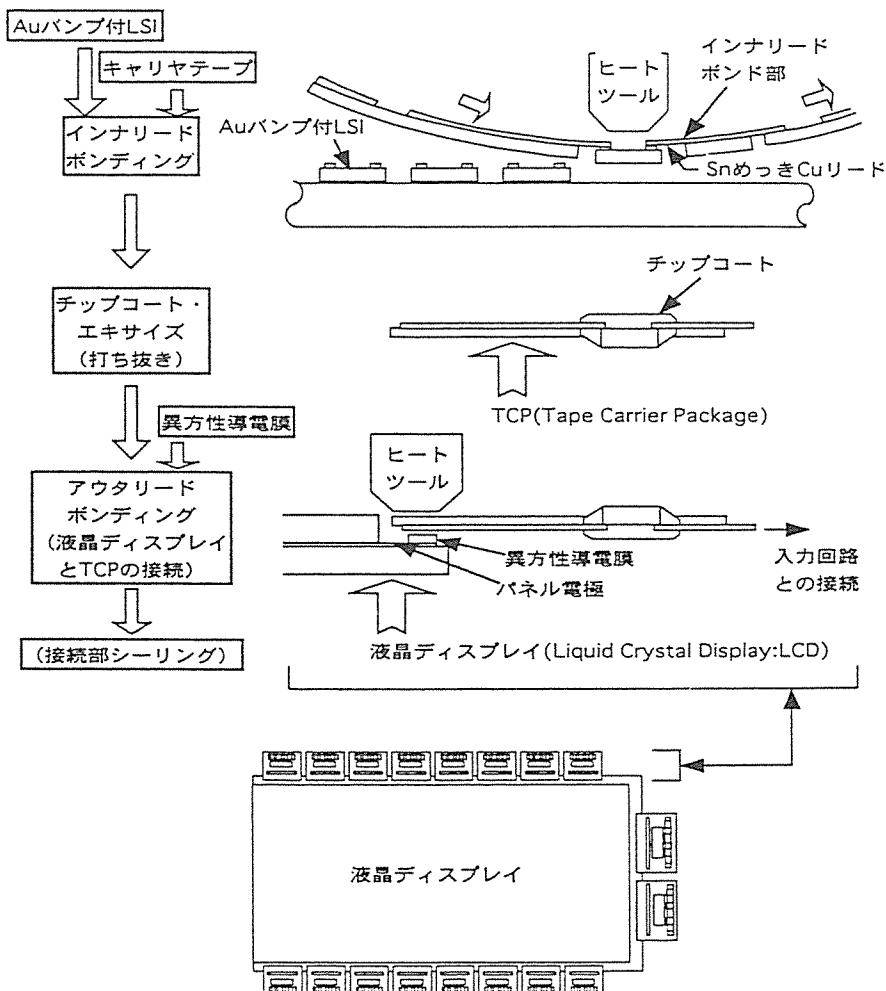


図 12 異方性導電膜による液晶ドライバーLSI実装

ヤによるボールポンディング法、ディッピング法などがある。現在では前二者が主流をなす。図13にフォトプロセスを用いためっき法による共晶はんだバンプを示す。不活性雰囲気中で加熱溶融させることによりはんだの表面張力により球状のバンプ電極が形成される。

- ・はんだバンプ構成：通常、チップのAl電極上には直接はんだ形成することは少なく、密着性、相互拡散、はんだの濡れを考慮した中間金属層（バリヤメタル層）を介して、はんだが形成されるが、この中間金属層の構成は様々な系が提案され、実用化されている。一例としてCr-Cu-Au（一部混合層あり）、Al/Ni-Ni-Cuなどがある。
- ・基板材料：従来、セラミックが一般的であったが、最近では樹脂系回路基板にフォーカスした例が多い。

これらの個々の要素を組み合わせてはんだバンプフリップチップ実装は成る。

本技術の最大の課題は、前述のCSP実装の場合と同様にこの場合もデバイスが直接回路基板と接続されるため、Siチップと基板材料の熱膨張率の差に起因する温度サイクル時のバンプ接合部の熱疲労寿命である、この改善のために、上に述べた各要素を中心とする研究開発¹⁸⁾¹⁹⁾に多くの力が注がれている。

筆者らは、とりわけ民生機器では不可避の「樹脂系基板（PWB）上でのフリップチップ実装の実用化」を目指し、この熱疲労寿命を可能な限り長くするため様々な角度から研究を行い、実用性を明らかにしている²⁰⁾²¹⁾²²⁾²³⁾。その一つが界面樹脂封止構造による熱疲労寿命の向上である。以下にその概要を記す。

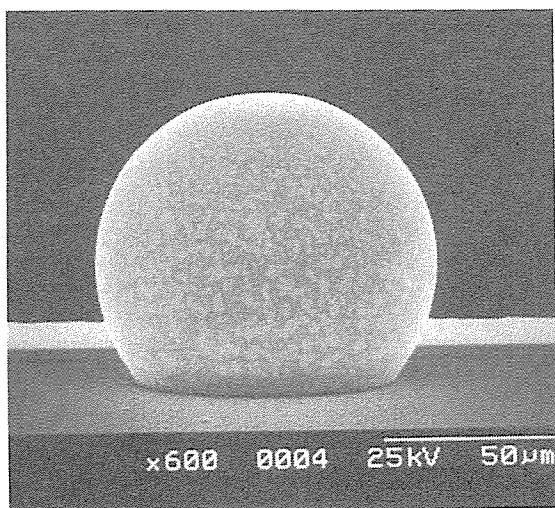


図13 共晶はんだバンプ外観

実装構造的観点からバンプに加わる応力低減策として界面に樹脂を充填封止した構造モデルのもと、応力分散の可能性を樹脂系基板の場合についてシミュレーションにより追求した結果、はんだに近い樹脂物性のもと 6 mm²チップのフリップチップ実装体を 183°Cから -65°Cに接続後温度降下させた場合バンプ根元部的最大主応力は非界面樹脂構造のそれに比べ 1/8 に減じており、大きな改善効果が見込まれることが判明した。界面樹脂のない場合は、Siチップ／基板との熱膨張率の差ははんだバンプの変形という形で発現しているのに対し、界面樹脂のある場合には、実装系全体が一体的に変形するため、はんだバンプの変形が少なくなっていることがその要因であると思われる。

前述の検討結果を踏まえ、PWBを対象とした界面樹脂封止型フリップチップ実装の熱疲労寿命を実験的に求めた結果、図14のようになり、次のことがわかった。

1. 9 mm²以下のチップサイズにおいて非界面樹脂構造の場合の熱疲労信頼性が 100 サイクル以下であるのに対し、界面樹脂封止型の場合は 15 mm²、12 mm²という大きなチップサイズでさえ熱疲労信頼性は 10000 サイクルを突破する。（実用的には大凡 1000 サイクルを越えることが一つの目処とされる）
2. 従来型のPWBのもとで高信頼性フリップチップ実装構造の実現は可能で、界面樹脂封止型デバイスの熱疲労寿命は、チップサイズにほとんど依存しない。

このことは、ローコストのもとで超小型電子回路モジュールが実現できることを示唆している。

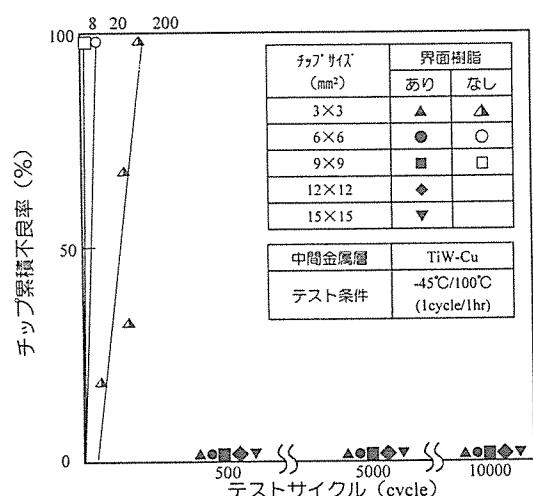
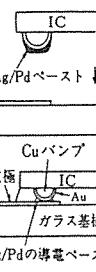
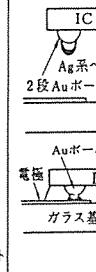
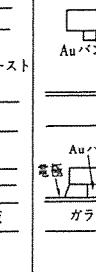
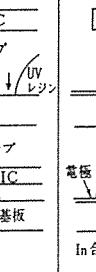
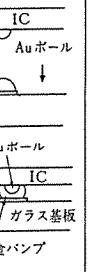
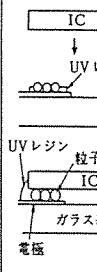
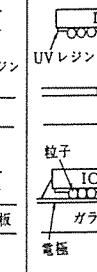


図14 温度サイクルテストにおけるチップサイズ、界面樹脂有無とチップ累積不良率

表5 各種COG接続方式

方 式	導電性ベースト接合	バンプ圧接	低融点バンプ接合	導電性粒子介在圧接		
接続ピッチ(μm)	216	70(千鳥)	63.5	500	134	120
接続抵抗(Ω/パッド)	<5	<1	6×10^{-3} (25μm ² あたり)	2×10^{-2}	—	—
接続温度(℃)	80~120	100	室温	150	150~200	室温
バンプ高さ(μm)	30~50	60	10	40	7.5 (接合部粒子径)	5 (接合部粒子径)
基板電極	ITO	ITO	Au	In合金バンプ/Au	Au/Ni/ITO	Au
実装構造						
       						
備 考						
・最も長い量産実績		・40μmピッチ千鳥接続の報告もあり	・10μmピッチ接続の報告もあり ・上記LCDモジュールの例	・CCDモジュールを試作	・12インチカラーLCD試作例もあり	・純ITO(100μmピッチ)平均0.9Ωの報告もあり

さて、フリップチップボンディングといえば、以上のようなC4に源流をおく形態を指す時代が長年続いてきたが、最近では接合メカニズムの概念を変える方式も多く登場し、ますます多様化してきている。この引き金になったのは1980年代半ばの液晶テレビの登場であり、ITO(Indium Tin Oxide), Mo, Tiなどといったはんだ接続に適しない電極にいかにしてチップを接続するかという課題に端を発している。フリップチップ実装の中でもCOG(Chip on Glass)という概念が本格化したものもこの項である。

具体的な方法については、接合メカニズムのいくつかを表5に記す。はんだバンプ接合がメタラジカルな接合であるのに対しこれらは非メタラジカル接合²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾を基本にするものが多い。

なお、TAB方式の項で記した異方性導電膜は材料が大幅に進化し、このCOG構造にも適用され、実用に供している。更に筆者らは、この異方性導電膜を用いて、樹脂基板へのフリップチップ実装の研究を行い、非メタラジカル接合による高信頼性フリップチップ技術を確立している²⁸⁾²⁹⁾。また、Auバンプを用い樹脂基板にメタラジカル接合を行うフリップチップ実装方式についても優れた研究成果³⁰⁾³¹⁾³²⁾が発表されている。

最後に特殊用途ではあるが超高周波デバイス対応としてAuバンプを直接セラミック基板にメタラジカル接合することにより特性向上を果たした研究成果³³⁾³⁴⁾があることを付記しておく。

4. おわりに北一電子システムインテグレーションの構築に向けてー

1970年代のIC登場の初期には、「実装」を「電子機器の総合的立場から機能を十分に発揮できる様な各種設計を包含した機器の構成・組立工法技術」と捉えていた。これはよりシステム志向的な斬新な説明(IC化実装技術:工業調査会, 1979)である。しかし、IC/LSI化が進み成熟化した結果、専門性が色を濃くしあり徐々に純デバイス設計屋、純デバイスプロセス屋、デバイス実装屋など、いわゆる分業概念が強まっていった。個別要素技術は強くなり、その中で日本のマイクロエレクトロニクス産業が世界に先駆けて突き進んできたのは事実であろう。それぞれが自らの領域をまとうすれば、コトはなんとか済み、ある意味ではそれぞれの手離れが良かった時代であったとも言える。

しかし、時の流れはドラスティックな状況の変化をもたらしている。①通信・放送における変革(デジタル化、融合など), ②半導体技術における変革(超高集積化、高速化など), ③これらに伴うネットワーク・モバイル商品群の登場, ④環境・安全問題の急浮上(鉛フリー, EMIなど), ⑤生産の海外展開など我々を取り巻く環境は、マイクロエレクトロニクス産業に大きな課題を提示している。とりわけ、実装技術に関しては、コミュニケーション手段の多様化や「ネットワークライフ」の生活への浸透の中で、商品に求められる要求事項は、従来の「軽薄短小」だけではすまなくなっている。

これらに、対応していくためには、もはや從来のあまりに専門化してしまった枠組みを外し、材料・システム構成・生産技術・設計など幅広い総合的見地からの「エレクトロニクス実装技術」の取り組みが不可避になっている。即ち、「システムデザイン且つシステム集積化技術」と位置づけ、システムを最適化するための課題の抽出とその解決・実現（いわゆる電子システムインテグレーション技術）にあたる旗頭として、機能することが求められる時代になっている。このためにはデバイスから商品を連結する思想を持ち、トータルシステムの最適化を求めて科学的・学術的アプローチを産・官・学が一体となって研究推進することが必要であろう。この様な取り組みこそが、21世紀のエレクトロニクスの中核を担うのではないかと期待する次第である。

参考文献

- 1) 貫井孝：民生機器／携帯端末機器の実装技術－現状と将来－，JPCA国際シンポジウム予稿集，JPCA，(1997. 1. 20)
- 2) 貫井孝：概論－半導体デバイス・一般電子部品の実装技術－「エレクトロニクス実装技術基礎講座」，(社)ハイブリッドマイクロエレクトロニクス協会編，(株)工業調査会，PP. 11-30 (1994)
- 3) 尼崎清次：携帯情報端末に見る高密度実装技術，電子材料，5月号別冊，(株)工業調査会，(1998. 5)
- 4) Y. Yamaji, H. Juso, Y. Ohara, Y. Matsune, Y. sota, A. Narai, T. Kimura, K. Fujita, M. Kada: Development of Highly Reliable CSP, Proc. of 1997 Electronic Components and Technology Conference (ECTC), PP. 1022-1028 (1997)
- 5) M. Sumikawa, Y. Saza, T. Sato, C. Yoshioka, A. Rai and T. Nukii: Reliability of Soldered Joints in CSPs of Various Desings and Mounted Conditions, Proc. of the 1998 IEMT/ IMC (International Electronic Manufacturing Technology/International Microelectronics Conference) Symposium, IEEE CPMT and IMAPS-JAPAN, PP.230-235 (1998)
- 6) T. Sato, K. Tanaka, M. Sumikawa, C. Yoshioka, K. Yamamura, T. Nukii: Reliability and Fatigue Life Prediction of Mounted CSP, Proc. of the 1998 International Symposium on Microelectronics (IMAPS), PP.557-561 (1998)
- 7) 住川雅人，田中和美，安田昌生，佐藤知稔，吉岡智良，山村圭司，貫井孝：CSP はんだ接合部の疲労寿命予測技術，Proc. of the 5th Symposium on 'Microjoining and Assembly Technology in Electronics (MATE)' ,PP. 143-148 (1999)
- 8) H. Matsubara, Y. Sakamoto, K. Yamamura and T. Nukii: Fine Pitch TAB/OLB (Tape Automated Bonding/Outer lead Bonding) Technology by Soldering Method through Non-Cleaning Process, 1995 Japan International Electronic Manufacturing Technology (IEMT) Symposium, IEEE-CPMT, PP.72-76 (1995)
- 9) 坂本泰宏，松原浩司，山村圭司，貫井孝：150μm ピッチ TAB/OLB 技術の接続特性，第 10 回回路実装学術講演大会講演論文集，(社)回路実装学会，ISSN 0916-0043, PP.191-192 (1996)
- 10) 坂本泰宏，松原浩司，山村圭司，貫井孝：フォーミングレス TAB/OLB 実装技術の開発，電子情報通信学会 1995 年総合大会講演論文集エレクトロニクス 2, C-449 (1995)
- 11) 坂本泰宏，住川雅人，松原浩司，山村圭司，貫井孝：耐応力構造フォーミングレス TAB/OLB 技術，第 7 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES1997), PP. 105-108 (1997)
- 12) 坂本泰宏，住川雅人，松原浩司，山村圭司，貫井孝：フォーミングレス方式高精細リード TAB/OLB 技術，第 11 回回路実装学術講演大会講演論文集，(社)回路実装学会，ISSN 0916-0043, PP. 173-174 (1997)
- 13) 坂本泰宏，住川雅人，松原浩司，山村圭司，貫井孝：微小ピッチ TAB/OLB 技術，回路実装学会誌，Vol. 13 No. 1, PP. 30-36 (1998)
- 14) 柿本典子，山村圭司，松原浩司，追田直樹，貫井孝：TAB (Tape Automated Bonding) 方式による薄膜磁気ヘッド実装技術，第 5 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES1993), PP. 259-262 (1993)
- 15) 千川保憲：液晶ディスプレイにおけるドライバ LSI 実装技術，Journal of SHM Vol. 13 NO. 2, PP. 34-40 (1997)
- 16) 貫井孝：液晶ドライバ LSI の実装技術，エレクトロニクスセミナーテキスト，CQ 出版社，(1998. 5. 30)
- 17) L. F. Miller: Controlled Collapse Reflow Chip Joining, IBM Journal of Research and Development 13, PP. 239-250 (1969)

- 18) Y. Tsukada, S. Tsuchida and Y. Mashimoto: Surface Laminar Circuit and Flip Chip Attach Packaging, Proceedings of the 7th International Microelectronics Conference (IMC), PP. 252-258 (1992)
- 19) 曽我太佐男, 天城滋夫, 児玉弘則, 沢畠守, 小山徹, 本莊浩: フリップチップ実装の高信頼化に及ぼす樹脂補強効果, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J73-C-II, No. 9, PP. 516-524 (1990. 9)
- 20) A. Rai, Y. Dotta, H. Tsukamoto, T. Fujiwara, H. Ishii, T. Nukii and H. Matsui: COB (Chip On Board) Technology-Flip Chip Bonding onto Ceramic Substrates and PWB (Printed Wiring Boards), Proc. of the 1990 International Symposium on Microelectronics (ISHM), PP. 474-481 (1990)
- 21) 賴明照, 土津田義久, 貫井孝, 大西哲也: PWB 上へのフリップチップ実装, プリント回路学会誌「サーキットテクノロジー」, Vol. 4 No2, PP. 136-143 (1993)
- 22) T. Sato, A. Rai, Y. Dotta, H. Makita, Y. Taniguchi, T. Ohnishi, M. Nishikawa and T. Nukii: Development of Non-cleaning Flip Chip COB for Use on PWB and IC Memory Card, Proc. of the 8th International Microelectronics Conference (IMC), PP. 17-21 (1994)
- 23) 賴明照, 佐藤知稔, 土津田義久, 玉置和雄, 貫井孝: フリップチップ方式による MCM-L 技術の開発, 第 6 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES1995), PP. 151-154 (1995)
- 24) Y. Bessho et al: Chip On Glass Mounting Technology of LSIs for LCD Modules, Proc. of 6th IMC (SHM), PP. 183-189 (1990)
- 25) 斎藤雅之: インジウム合金バンプを用いたCCD-COG 実装技術, 第 29 回 SHM 技術講演会 講演予稿集 (SHM), PP. 21-26 (1991)
- 26) K. Sakuma et al: Chip On Glass Technology with Standard Aluminized IC chip, Proc. of the 1990 Int. Symposium On Microelectronics (ISHM), PP. 250-256 (1990)
- 27) 高橋涉他: 導電性粒子を用いた COG 実装技術の検討, 1991 年電子情報通信学会春季全国大会講演論文集 (5), SC-7-17, PP. 309 (1991)
- 28) 坂本泰宏, 岡野哲之, 玉置和雄, 賴明照, 貫井孝: 微細ピッチワイヤバンプと ACF を用いたペアチップ実装, 第 10 回回路実装学術講演大会講演論文集, (社) 回路実装学会, ISSN 1341-3716, PP. 163-164 (1998)
- 29) Y. Sakamoto, H. Matsubara, K. Yamamura and T. Nukii: Flip Chip Bonding Technology using Resin for Adhesion, Proc. of the 1999 International Symposium on Microelectronics (IMAPS), PP. 143-148 (1999)
- 30) 荘司郁夫, 藤原伸一, 清野紳弥, 小林紘二郎: Au と In-48Sn はんだの界面における金属間化合物成長過程, 回路実装学会誌 13, [1], PP. 24-29 (1998)
- 31) 荘司郁夫, 折井靖光, 小林紘二郎: Au バンプを用いたフリップチップ接合部の組織と熱疲労特性, 溶接学会論文集, 第 16 集第 2 号, PP. 215-222 (1998)
- 32) 荘司郁夫, 折井靖光, 小林紘二郎: フリップチップ接合用はんだのせん断特性と熱疲労強度との関係について, Proc. of the 4th Symposium on 'Microjoining and Assembly Technology in Electronics (MATE)', PP. 199-204 (1998)
- 33) K. Yamamura, H. Atarashi, N. Kakimoto, N. Sakota, H. Sato, M. Miyauchi, K. Naito and T. Nukii: Flip-Chip Bonding Technology for GaAs-MMIC Power Devices, Proc. of the 1993 International Symposium on Microelectronics (ISHM), PP. 433-438 (1993)
- 34) 北岡幸喜, 追田直樹, 柿本典子, 山村圭司, 貫井孝: アンテナ一体型ミリ波伝送モジュール技術, 第 9 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集 (MES1999), PP. 81-84 (1999)

総 説

超清浄空間としての真空中で動かすには

土 佐 正 弘*

Smooth Motion and Transfer in a Vacuum as Super Clean Circumstance

by Masahiro TOSA

1. はじめに

物質を構成する原子の配列や構造を設計図に基づいて単原子レベルで制御して新材料を創製することができることは材料を開発するものにとっては一つの夢であろう。このような単原子分子レベルで材料を取り扱うためには同レベルでの汚染となる気体分子の吸着を極力排除しなければならない。雰囲気からの気体吸着による表面汚染の問題点は気圧が 10^{-10} Pa 以下となる極限環境(自然界では高度 3 万 6 千 km 以上の衛星軌道上), すなわち、極高真空を提供することで解決できる。極高真空空間では 1 mm³ 中には数個～数十個程度しか気体分子が存在しないためにその表面吸着による汚染は原子レベルでは無視できる。したがって、極高真空中では材料を単原子スケールで取り扱うことが可能になり、あたかも機械構造図面や建築設計図をもとに一箇ずつ原子を結晶格子に組み上げて、特殊な人工的構造を持つ次世代材料を自由に創製できるであろう。

しかしながら、材料としての性能を評価できるレベルまで新材料を形作るためには、超清浄空間である極高真空中で試料表面の清浄化、蒸着、加工、特性分析、性能評価等のすべての多段操作を行える一貫プロセスが不可欠であり、プロセスで各操作を行う機器装置の間を試料がその表面や雰囲気の超清浄性を損なわずに円滑に搬送と受け渡しを行えることが要求される。このような超清浄な真空雰囲気を劣化させる汚染源としては、ガス放出源として、主に真空容器壁系、真空計電子源フィラメント系、真空排気系などがあげられるが、特に、メートル単位の試料移動装置、および、インチワームやピエゾで

は時間がかかりすぎるセンチメートルレベルの作動距離が必要な試料位置決めステージ等駆動系では、真空環境特有の摩擦・摩耗の増大により、ガス放出のみならず、微粒子等のダスト発生、さらに最悪の場合には、摩擦増大による駆動部の焼き付けによる動作不能に陥る。

そこで、この超清浄空間を汚染しうる摩擦現象を抑制もしくは排除するために、精密駆動を行う必要のある試料ステージ系では、ガス放出汚染源となる有機系潤滑油を用いないで摺動における低摩擦化を実現できる固体潤滑材¹⁾による被覆技術や表面改質法の開発が、また、長距離高速運搬を行う必要のある搬送系では無接触で摺動が伴わない搬送システムの開発がそれぞれ必要不可欠となる。ここでは、超清浄空間としての極高真空を原子レベルでの材料開発環境として実現するべく金材研でこれまで行ってきた低摩擦超高真空摺動材料の開発と磁気浮上型極高真空一貫プロセスの構築についてまとめて紹介したい。

2. ステンレス鋼の低摩擦化

2.1 表面研磨した SUS304 ステンレス鋼の摩擦特性

代表的な真空用材料である SUS304 ステンレス鋼について表面研磨による表面粗さ形態の違いが真空中摩擦特性に及ぼす影響について検討した²⁾。304 鋼板を 0.5 μm 径のアルミナ研磨剤で鏡面に機械研磨した試料 (MP)，さらに、これを 1 (硝酸) : 2 (塩酸) : 3 (蒸留水) の腐食液に 3 min 浸漬した化学研磨試料 (CP)，および、電解複合研磨試料 (ECB) の 3 種類の表面処理試料とした。

この試料について、SUS304 鋼製の鏡面研磨球圧子 (3.175 mm 径, Ry = 60 nm), 印加荷重 0.49 N, すべり速度 0.5 mm/sec, 摩擦距離 5 mm の条件にて、同一場所を同一方向に繰り返し、大気圧および真空圧力を変

*文部科学省金属材料技術研究所極高真空場ステーション

えた雰囲気で摩擦測定を行った。用いた摩擦測定器は、基本的な計測システムとして確立されているバウデンレーベン型摩擦試験器を改造して真空中で作動できるように構成部品を真空対応にしたものである。摩擦力は、ステッピングモーター駆動による一軸移動ステージ、バランスアームに取り付けたボール圧子、および、この直上に取り付けた分銅皿に分銅の乗せ換えるによる印加荷重によって、動歪みゲージで検出できるよう設計した。なお、最大表面粗さ (R_y) は触針式表面粗さ測定器で、また、硬度はビッカース硬度計を用いてそれぞれ測定した。

真空摩擦の測定結果を図1に示す。窒素中（大気圧： 1.013×10^5 Pa）における3種類の試料は、摩擦係数 μ は、0.1～0.25の範囲にあったが、雰囲気圧力を下げていき、超高真空域 (10^{-6} Pa) になると、いずれの試料の μ も0.4前後の値となり、試料による差はほとんど認められなかった。しかしながら、高 μ 値に移行する真空圧力域は、試料によって明確な違いが見られ、ECB試料が1Pa、MP試料が 10^{-1} Pa、CP試料が 10^{-5} Paの順に μ の増加が観察された。なお、各試料の硬度 (H_v) は、ECB試料が262、また、MPが244、さらに、CPが257とほとんど同一硬さであった。

図2に表面荒さプロファイル (H_v 値も併せて表示) 測定結果を示す。ECB試料表面がきわめて平滑で、ついでMPもやや表面平滑であるが、CPはかなり凹凸があり複雑な表面形状をしていることがわかる。なお、各試料の最大表面粗さ (R_y) は、ECB試料が $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 、MPが $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 、CPが $0.14\text{ }\mu\text{m}$ であった。

このような μ の増加する真空域の違いの原因としては、試料のサブミクロンレベルでの表面粗さに起因する表面吸着物の離脱性にあると考えられ、そこで、表面粗さを精密に形態制御して大気中と 10^{-6} Pa台の超高真空

中で摩擦 μ を測定した結果を図3に示す。処理方法に関わらず $70\text{ nm} \sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ のレベルの表面粗さを持つ試料が超高真空中でも低摩擦が得られることがわかる。これは、 70 nm 以下の表面粗さでは、表面が非常に平滑になり、炭化水素系吸着物や汚染層が比較的真空空間へ脱離しやすくなり、摺動により超高真空中では清浄表面が現れやすく、一方、 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以上の表面粗さでは、吸着物が試料表面凸部分に供給されにくくなり、この凸部分の清浄面を圧子先端面が直接摺動するために摩擦 μ が増大するものと考えられ、潤滑を促進すると考えられる吸着物の接触部への供給の大小が摩擦の違いに影響したものと推測される。

2.2 セラミックコーティング SUS304ステンレス鋼の摩擦特性

エッティング液や研磨剤など用いない環境にやさしいドライクリーンプロセスにより簡便に表面を改質すること

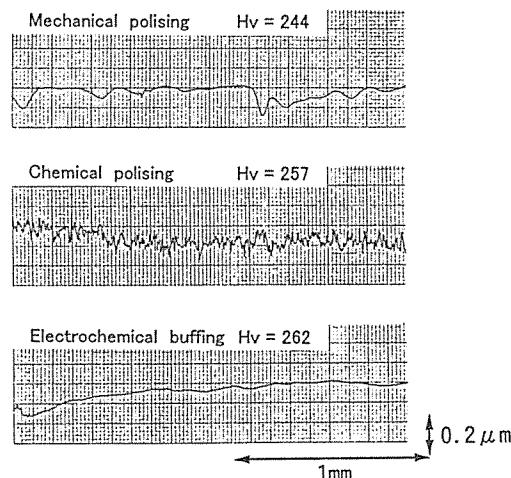


図2 表面研磨したステンレス鋼の表面粗さ (R_y)

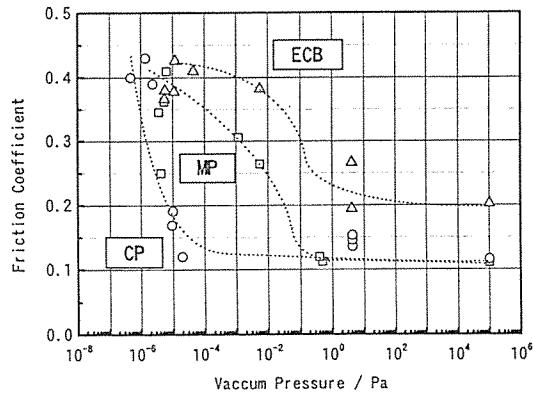


図1 表面研磨したステンレス鋼の真空摩擦 (μ) の測定結果

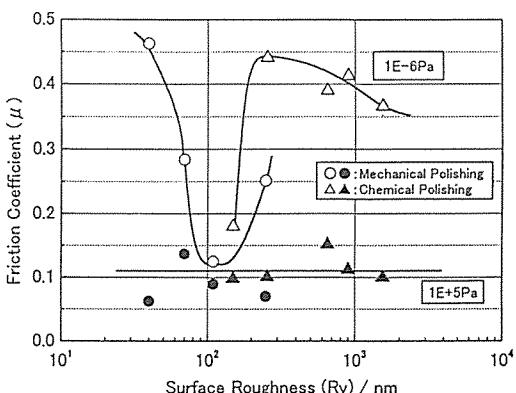


図3 表面粗さの真空摩擦に及ぼす影響

により低摩擦化を検討した³⁾。古典的な凝着理論によれば、摩擦 μ は剪断強さが小さいほど硬ければ硬いほど小さくできるため、真空材料の水素透過遮蔽コーティング材料として用いられている窒化チタン (TiN)⁴⁾ を硬質被膜として、また、同じく真空材料の低ガス吸着コーティング材料として用いられている層状化合物である六方晶窒化ホウ素 (BN)⁵⁾ を剪断されやすい材料として用い、被覆法には高周波マグネットロンスパッタ蒸着プロセスを用いた。

図 4 に TiN コーティング試料の真空摩擦 μ の測定結果を示す。蒸着時間を使って膜厚の異なる試料を作成したが、膜厚と同時に表面粗さも異なった皮膜が形成された。図中に表面粗さと膜厚を記載する。膜厚が小さくても $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の表面粗さを有する TiN 被覆試料が超高真空中でも摩擦が低くなることがわかる。

図 5 に BN コーティング試料の真空摩擦 μ の測定結果を示す。なお、BN 単体では鋼基板との密着性が芳しくないため銅と共にスパッタ蒸着することにより高い

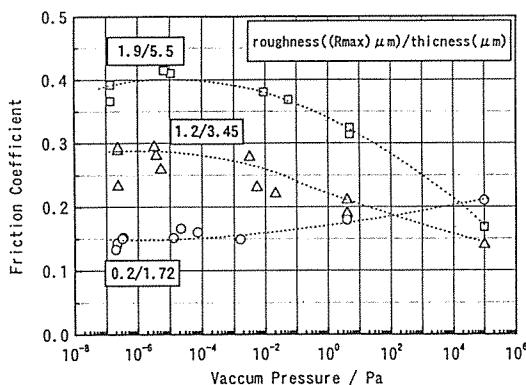


図 4 TiN 被覆したステンレス鋼の真空摩擦 (μ) の測定結果

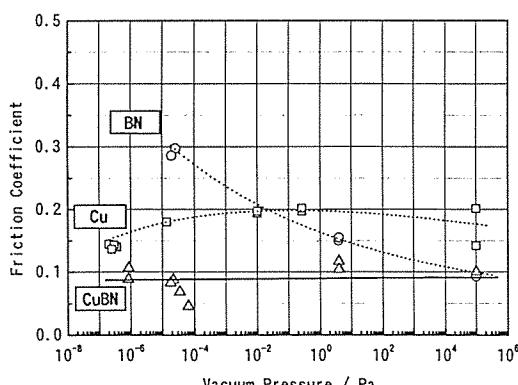


図 5 BN 被覆したステンレス鋼の真空摩擦 (μ) の測定結果

密着性の混合被膜 (CuBN) を作製した。CuBN 被覆試料は、中、高、超高の各真空域において大気圧雰囲気とほぼ同じ 0.1 以下と低い摩擦係数となることがわかる。

表面粗さが $0.2\text{ }\mu\text{m}$ となる TiN コーティング試料の低真空摩擦のメカニズムは、研磨したステンレス鋼表面における場合と同じで潤滑を促進する吸着物の凸部接触部分への適度な供給あると考えられ、また、BN コーティング試料では、潤滑を促進する BN の銅凸部接触部分への供給あると考えられる。

3. 極高真空一貫プロセス

3.1 極高真空の発生

金材研で構築した磁気浮上搬送極高真空一貫プロセス⁶⁻⁸⁾は、長距離搬送用の本線系(約 10 cm 径、長さ 1.7 m の円筒管真空容器ユニットが 4 本直列接続される)、本線チャンバー同士をつなぐ連結系(約 10 cm 径、高さ 25 cm の円柱真空容器ユニットが 5 基)、および、接続装置に試料を出し入れする引込み支線系(約 15 cm 径、長さ : 1.8 m の円筒管真空容器が 5 本)の 3 系から構成される。極高真空プロセスの全体写真を図 6 に、また、その構成を図 7 に示す。

各線のチャンバーは、内壁表面からのガス放出を抑制するために SUS316L ステンレス鋼を用いた。316L 鋼を用いたのは、ニッケルの 12% 添加により溶体化処理時に磁化しやすいフェライト相が形成しにくい点と、炭素の低含有量により溶接部での粒界腐食が起こりにくいという 2 点である。各チャンバー内壁の表面処理としては表面切削、および、電解研磨(磷酸系)処理を行った後 450°C で真空脱ガス熱処理を行った。各ユニットを急激な真空圧力上昇から保護するために各支線ユニットチャンバーを仕切る真空隔離バルブとしては金属製圧空式ゲートバルブを用いて高温ベイキングとガス放出の低減をはかった。

真空排気システムとして、本線系の円管容器ユニット 4 本および支線系の円管容器ユニット 5 本にそれぞれ一台ずつ設置し、総計 9 台のイオンポンプ(排気速度 : $0.2\text{ m}^3/\text{s}$ 以上)を常時動作させ、さらに、各イオンポンプに内蔵されているチタンゲッターポンプ($1.6\text{ m}^3/\text{s}$ 以上)を随時動かすことにより 10^{-10} Pa 以下の極高真空が安定して発生することができる。図 8 に本線および支線の各 1 ユニット分の容器内空間を担当する真空排気系統図を示す。このユニット 1 基に対して薄膜作製装置や表面分析機器などの真空機器を 1 台接続することができ、基板試料についてその作製した超清浄表面を維持しながら接続機器装置間での受け渡しが実現される。さらに、このユニットを追加連結していくことで、接続機器

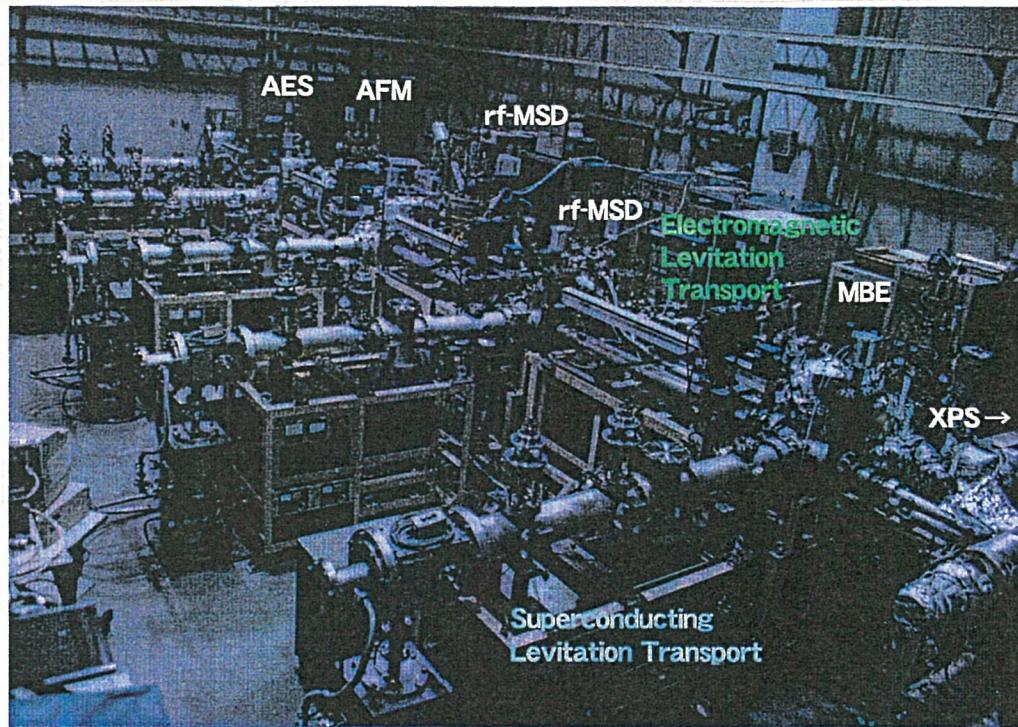


図6 極高真空一貫プロセスの外観

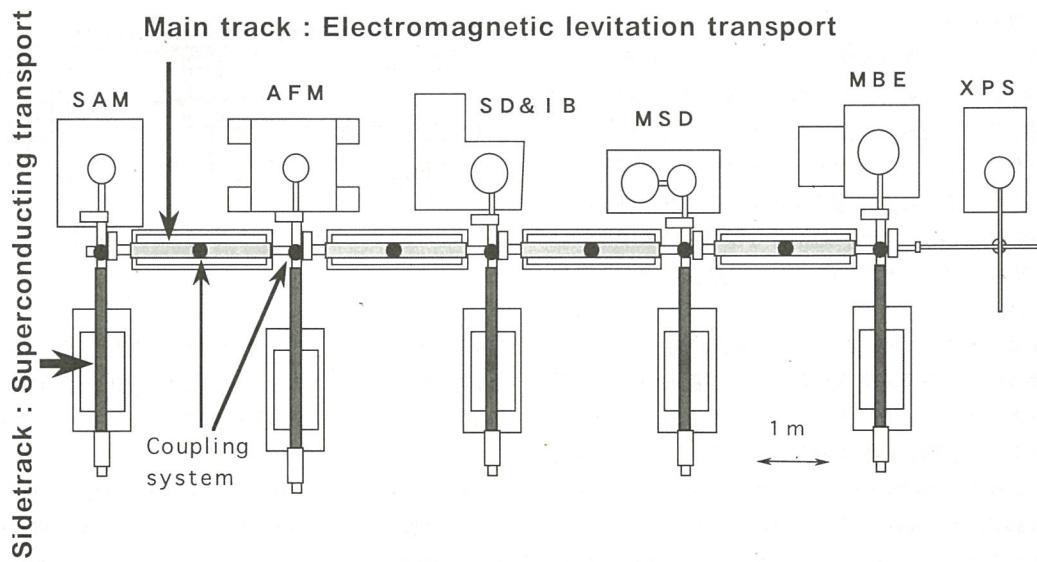


図7 極高真空一貫プロセスの構成

を何台も何十台も増設していくことが可能となる。大気から超高真空までの粗引き真空排気用としては、タンデム型ターボ分子ポンプ（排気速度 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ と $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ の2台を直列連結して排気）を採用した。ターボ分子ポン

プを直列に配置したのは、水素に対する圧縮比を増大させることにより超高真空排気性能を向上するためである。また、雰囲気の圧力の測定は極高真空領域でも高感度のエクストラクターゲージを用いた。

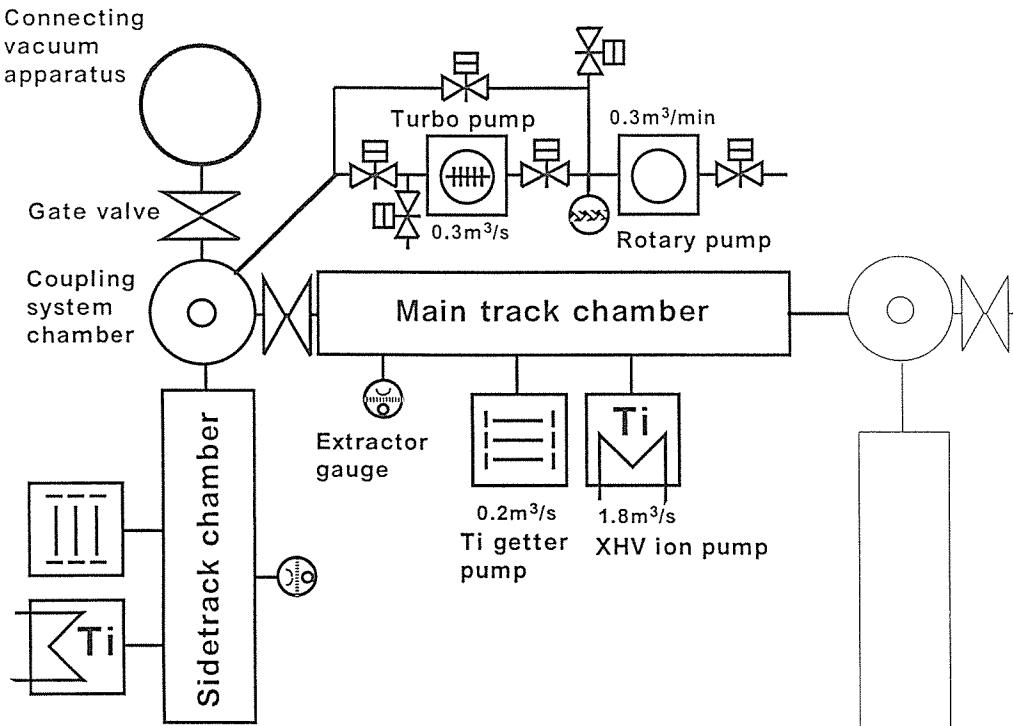


図 8 真空排気系統図

3.2 浮上搬送

極高真空対応の搬送機構として磁気浮上式の搬送システムが注目されている。この搬送の様式は、電磁気の力をを利用して試料を運ぶ移動子を浮上させ、この浮上した移動子をリニアモーターなどの駆動機構によって浮上走行させるものである。摩擦や摩耗をともなう接触箇所が駆動時に存在しないため、超清浄な極高真空環境や試料表面を損なうダスト粒子の発生やガス放出がほとんど起こらない。

搬送装置として一貫プロセスの本線には、長距離の浮上搬送が行える電磁力吸引浮上型の電磁石浮上式搬送機構を組み込み、また、支線には強力な制動力が得られる酸化物超伝導浮上搬送機構を採用した。支線の移動子と本線内の移動子との間の試料の移し換え、および、本線内での搬送方向の転換のために、上下方向へ駆動するエアーシリンダ方式のホイスト機構を採用した。

本線系を構成する電磁石搬送機構は、4連の直列ユニットからなり、各搬送ユニットは、図9に内部構造を模式的に示すように、真空容器外部のリニア駆動の固定子と真空容器内の浮上搬送移動子から構成される。固定子底部の電磁石が真空容器内の移動子上部の電磁鋼板を磁力により吸引することで移動子が浮上し、固定子が真

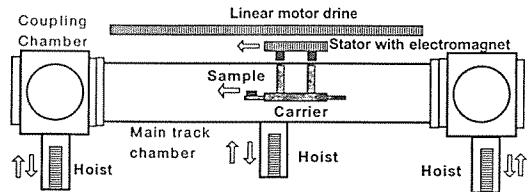


図 9 電磁石浮上搬送機構の模式図

空容器上部を走行することで移動子が浮上走行する。主な浮上搬送性能としては、搬送距離 210 cm、浮上高 4 mm、可搬重量 50 g、搬送速度 5 cm/sec、位置精度 ±0.5 mm である。

支線系を構成する超伝導式の搬送装置は、搬送ユニットごとに図10の内部構造図に示すように冷却槽(90 K以下まで冷却)に内蔵する $Yba_2Cu_3O_{7-x}$ 系の酸化物超伝導磁石と移動子下部のサマリウムコバルト磁石との超伝導相互作用(ピン止め効果)による磁束分布保持現象による生ずる強固な復元力によって移動子が浮上し、電動モーターにより走行する超電導磁石に牽引されて試料を浮上搬送することができる。このため、電磁石を用いた常伝導磁気浮上に比べて、浮上高を制御したり振動を防止したりするための制御装置などを必要とせず、比較的

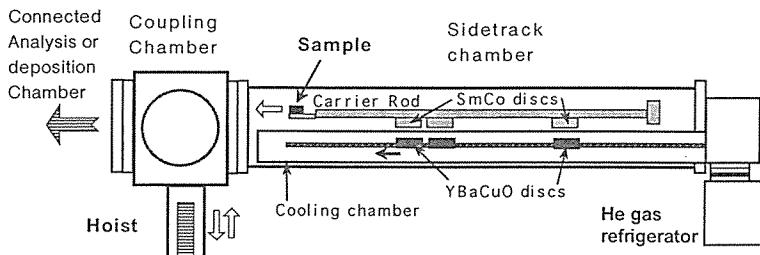


図10 超伝導浮上搬送機構の模式図

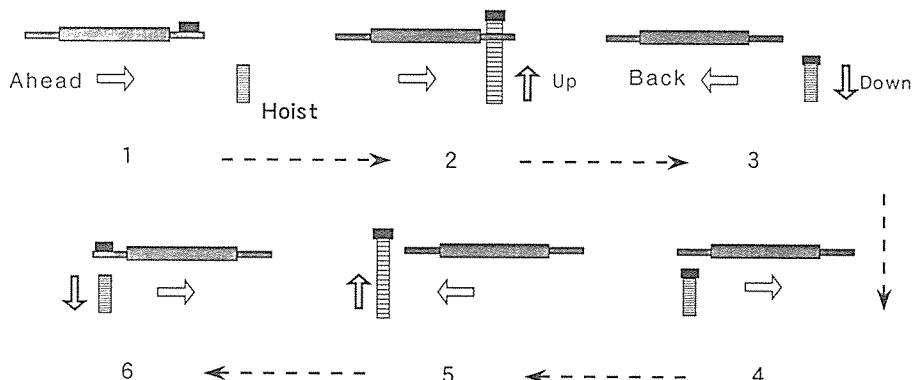


図11 試料方向転換の一連の操作

装置本体が小型化できる。減圧冷却したヘリウムガス(ガス圧約1kPa)を超伝導体が配置された冷却槽内に充填することにより、超伝導体を遷移温度の90K以下まで冷却した。主な浮上搬送性能としては、搬送距離1m、浮上高5mm、可搬重量100g、搬送速度3cm/sec、位置精度±1mmである。

本線と支線との試料の受け渡し、および、本線内での試料搬送方向の転換にはホイスト機構を用いて行った。図11に試料搬送方向転換の一連の操作を示す。移動子一端のフォークに搭載される試料ホルダーが一連のホイストの上下操作により移動子の他端のフォーク上へ移すことによって、試料搬送の方向を換えるとともに、各連結ユニットでこの動作を繰り返すことにより長距離を搬送していくことができる。また、突発的な停電に対処するために無停電源を配置した。この補助電源の緊急作動により、走行中に停電しても移動子が速やかに初期位置まで移動した後緩やかに着地するために、落下の衝撃による装置の損傷の危険性を回避することができる。

接続真空装置として一貫プロセスには、走査型オージェ電子分光分析装置(SAM)、薄膜作製装置(MBE)、および、表面原子間力顕微鏡(AFM/STM)など総計6

台の超高真空機器を接続され、この装置機器間で磁気浮上搬送により自由に所定の接続真空機器試料ステージから他の試料ステージまで試料を超清浄表面のまま搬送授受できる。

3.3 超清浄搬送

試料を浮上搬送させて受け渡しを行う操作として、超伝導磁気浮上型の搬送装置内のステージから常伝導磁気浮上型の搬送装置内のステージまでエアーシリンダ式ホイスト機構を介して試料を受け渡すことを試みた。超伝導磁気浮上型の搬送移動子から常伝導磁気浮上型の搬送移動子へ試料を受け渡しする際にホイストの上下駆動時のみ 10^{-9} Pa若干圧力上昇が観察されたが、超伝導磁気浮上型の搬送、および、常伝導磁気浮上型の搬送のいずれの駆動様式においても圧力変動は 10^{-10} Pa以下の極高真空圧力域の圧力変動以下に押さえることができた。

オージェ電子分光分析器内で銅基板をアルゴンイオンエッティングし超清浄表面になったことをオージェスペクトルとして確認した後、スパッタ蒸着ステージまで約6mの距離を磁気浮上往復搬送し、搬送前後の試料表面組成をオージェ分析した結果を図12に示す。搬送後の試料表面でも炭化物系汚染および酸素系の吸着物等は測定限界以下であり、したがって、本一貫プロセスは表面

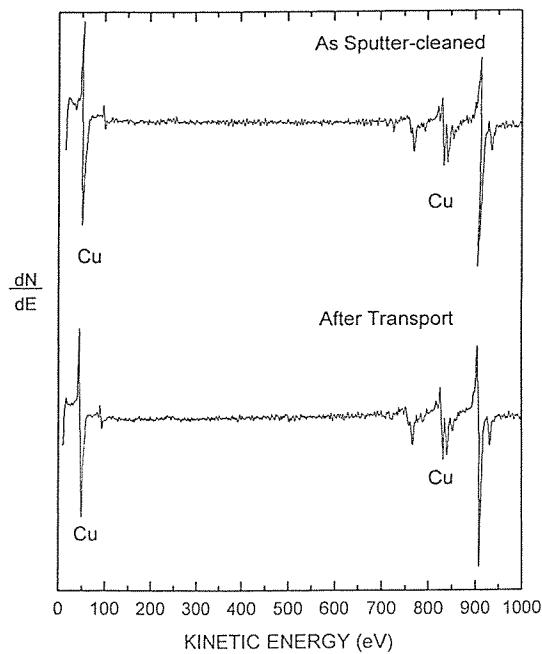


図 12 搬送前後の銅清浄表面のオージェスペクトル

分析器レベルでは超清浄試料搬送が実証されたといえる。

4. おわりに

精密位置決め試料ステージ系の摺動の低摩擦化のための表面改質法、および、無接触で摺動が伴わない長距離磁気浮上搬送システムを開発し、超清浄空間としての極

高真空環境の汚染源である摩擦現象を抑制もしくは排除するめどがつくとともに、さらに、常伝導磁気浮上長距離用搬送装置と超伝導磁気浮上短距離用搬送装置の2方式の搬送装置を大型極高真圧システムに組み込んでガス放出を起こさず極高真圧力域の変動以下で浮上走行させ超清浄試料搬送することに成功した。このように極高真圧一貫プロセスの構築および関連技術等に成功したことにより、近い将来極高真空中で一貫した操作、特に、原子レベルで新材料を創製していく次世代材料開発プロセスの実現が期待される。

参考文献

- 1) 西村允, 真空, 42 (1999), 791
- 2) 笠原章, 金龍成, 土佐正弘, 吉原一紘, 真空, 43 (2000), 986
- 3) 土佐正弘, 笠原章, 金龍成, 吉原一紘, 表面科学, 21 (2000), 44
- 4) 池田佳直, 斎藤一也, 塚原園子, 一村信吾, 国分清秀, 平田正紘, 真空, 41 (1998), 507
- 5) 土佐正弘, 板倉明子, 吉原一紘, 日本金属学会報, 32 (1998), 775
- 6) 土佐正弘, 笠原章, 吉原一紘, 真空, 40 (1997), 156
- 7) 土佐正弘, 笠原章, 李京燮, 吉原一紘, 真空, 42 (1999), 443
- 8) M. Tosa, Kyung Sub Lee, A. Kasahara and K. Yoshihara, Vacuum, 60 (2001), 167

総 説

無酸素銅の現況と今後の展望

矢島 健児*, 小出 正登**, 浅尾 晴彦***

The Present and Latest Technological Development
in Oxygen Free Copper

by Kenji YAJIMA, Masato KOIDE and Haruhiko ASAOKA

1. 緒言

銅は優れた電気伝導性・熱伝導性および良好な加工性、耐食性を有し広く電気電子工業材料分野で使用されている。銅の種類には純銅、黄銅、青銅そして各種銅基銅合金などがあり、JIS (Japanese Industrial Standard: 日本工業規格) と開発銅合金合せて国内には200種類以上の銅がある。その銅の中で無酸素銅は耐水素脆化性を有し、非磁性そして良好な加工性を持つことから我が国の電子産業界発展を支える重要な基礎素材として成長し続けてきた。

近年我が国での先端技術分野に必要な大型加速器、放射光実験設備の構成部材として、さらには電子産業界の高度技術化要求に沿って、超高真空・超高電圧機器・超伝導器部材、高集積IC搭載用リードフレーム用銅素材、そして半導体の本体内部に形成される銅配線用銅素材、またIT世界を支える移動体通信基地アンテナ部材、ITのグローバル化を支える海底ケーブルのシールド材として無酸素銅は用いられ、現在も幅広い材料特性の改良並びに製造技術の開発が押し進められている。

我が国においては無酸素銅の量産化の歴史は比較的浅く、1966年三菱金属鉱業(株)(現在の三菱マテリアル(株))の技術陣により、小名浜製錬(株)で生産能力2,000t/月の規模で開始され、同時に生産を開始した日立電線(株)との二社が、無酸素銅の供給を続けてきた。現在世界伸銅業界の無酸素銅の供給能力は大手9社合せて100万t/年以上であり、世界的にも無酸素銅は工業的基礎素材、特に電子産業分野での基礎素材として広く用いられ発展

を遂げている。

本報告では純銅を代表する無酸素銅を中心に、その製造から材料開発における現況を述べると共に今後の技術展開について紹介する。

2. 純銅とは

現代社会において銅は鉄、アルミニウムについて三番目に多く使用されている金属である。一般的に金属は工業的に純金属の状態よりも合金として使用されることが多い。しかしながら銅の場合には合金としてよりもむしろ純銅のまま使用される量が圧倒的に多い。その理由としては、純銅が良好な加工性を有し、銀に次いで良好な電気伝導性・熱伝導性を有し適度にバランスの取れた材料であるからである。

工業用純銅の用途は、現代社会を支える電気および熱の伝送媒体として使用される電線素材と伸銅品とに大別される。ここでは圧延、押出しの方法で板・条・棒・線・管などに加工される伸伸材用素材としての伸銅品用純銅を中心にして紹介する。純銅はJIS-H-2123では三種類: 酸素含有量はJISに規定はないが、普通0.025~0.05%に制御されたタフピッチ銅(ETP; Electrolytic Tougu Pitch Copper: JIS合金番号C1100)、非金属のリンを脱酸剤として酸素含有量を低減したリン脱酸銅(C1201, C1220, C1221)さらに酸素濃度を0.001%(10ppm)以下とした無酸素銅(C1011, C1020)に大別される。これらの化学成分および用途を表1¹⁾にまとめて示した。

タフピッチ銅は電解精製されたカソード銅をシャフト炉で溶解し、酸素含有量を0.025~0.05%に調整後連続铸造圧延法により電線素材である直径8~22mm ϕ 銅荒引線として製造される。また、押出素材として円柱状のビレットあるいは圧延素材として断面が長方形形状のケ

*三菱マテリアル(株) 総合研究所 主任研究員

**三菱マテリアル(株) 堺工場 製造課長

***三菱マテリアル(株) 執行役員 工学博士

表1 各種純銅の種類及び化学成分

種類		化学成分 %				参考	参考
名称	合金番号	Cu	P	O	その他	用途例	特種及び用途例
無酸素形銅	1種 C1011	99.99以上	0.0003以下	0.001以下	Pb 0.001 以下 Zn 0.0001以下 Bi 0.001 以下 Cd 0.001 以下 Hg 0.0001以下 S 0.0018以下 Se 0.001 以下 Te 0.001 以下	電子管用の棒・線・管など 電子管用の板・条など	電気・熱の伝導性、展延性、絞り加工性に優れ、溶接性・耐食性・耐候性がよい。 還元性雰囲気中で高温に加熱しても水素脆化を起こすおそれがない。 電気用、化学工業用など。
	2種 C1020	99.96以上	-	0.001以下	-	線・棒・管・スバーなど 板・条・スバーなど	
タフピッチ形銅	C1100	99.90以上	-	-	-	棒・線・管・スバーなど 板・条・スバーなど	電気・熱の伝導性に優れ、展延性・絞り加工性・耐食性・耐候性がよい。 電気用、蒸留がま、建築用、化学工業用、ガスケット、器具など。
	1種 C1201	99.90以上	0.004以上 0.015未満	-	-	棒・線・管・スバーなど 板・条など	展延性・絞り加工性・溶接性 耐食性・耐候性・熱の伝導性がよい。 C1201は、還元性雰囲気中で高温に加熱しても水素脆化を起こすおそれがない。
リン脱酸形銅	2種 C1220	99.90以上	0.015~0.040	-	-	棒・線・管など 板・条など	C1201は、C1220及びC1221より電気の伝導性がよい。 ふろがま、湯沸器、ガスケット、建築用、化学工業用など。

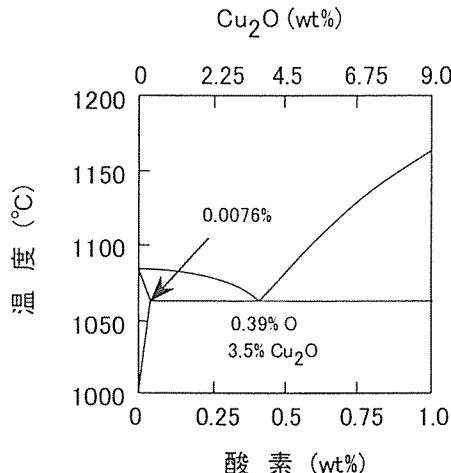


図1 銅-酸素系状態図

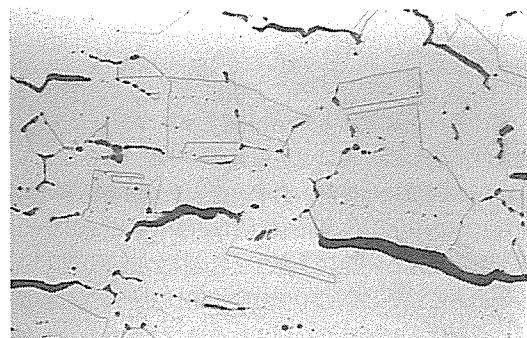


写真1 タフピッチ銅の水素脆化組織

クに鋳造され、その後の圧延加工を経て各種スバー等の導電材料に広く使用されている。タフピッチ銅の特徴は導電率が 101 % IACS (International Annealed Copper Standard: 焼鉄した軟銅について 20°Cにおける固有抵抗が 1.7421 $\mu\Omega\text{cm}$ であり、これを標準として 100 % IACS と 1913 年に定められた単位²⁾) と高く、熱伝導性も高いことである。図 1³⁾に銅-酸素の状態図を示す。酸素は銅中に極わずかの溶解度を持っているが大部分の酸素は Cu₂O-Cu の共晶となって晶出し、粒界粒内に分散する⁴⁾。また、酸素は銅中に含まれれ不純物元素を酸化物として固定するので一般的に有益とされている。一方、ロウ付け処理に代表される水素を含有する還元性ガス中でタフピッチ銅を加熱すると水素は、銅中に拡散して、Cu₂O として存在する酸素と Cu₂O + H₂ \rightarrow 2Cu + H₂O ↑ の反応によって水蒸気となる。そして写真 1 に示すいわゆる水素病(水素脆化)を引き起こし、割れなどの欠陥原因となる。この対策として酸素含有量の少

ない銅が必要となり、リン脱酸銅・無酸素銅が開発された。

リン脱酸銅は一般的にはシャフト炉出の銅溶湯にリンを添加して作られるが、その添加量の多少により材料特性も変わる。リン脱酸銅中のリンは 0.004 から 0.04 %までの範囲で調整されている。リンは銅中に固溶すると導電率を低下させるので高導電率を要求する材料には用いられないが、還元性雰囲気中ロウ付けを必要とする素材には水素脆化を引きさず、その良好な加工性と合せ、優れた純銅である。普通リン脱酸銅はリン添加量を 0.02 %程度としたものが多く使用されており、この場合導電率は 90 %IACS 程度である。鈴木・上田等⁵⁾はリン添加量と絞り加工性について検討した。彼等は 0.02 %リン添加により、積層欠陥エネルギーを低下させ再結晶組織の方位として絞り性に有害な {100} 方位を減少させ加工性を向上させた。現在リン脱酸銅はこれらの特徴を生かし、エアコンなどに用いられる肉厚の薄い熱交換器用配管材、さらには内面溝付き配管材、給水給湯用途に使われる建設用配管材として加工使用されている。

タフピッチ銅、リン脱酸銅、無酸素銅の常温から

700°Cまでの高温引張特性を図2に示す。タフピッチ銅と無酸素銅では400°C付近での中間温度脆性（伸び、絞りの値がその温度付近で小さくなること。）を示しているが、リン脱酸銅ではこの現象が認められず、いずれの温度でも加工性が良好であることがうかがえる。

無酸素銅は文字通り酸素濃度が極めて少なく、水素脆化がなくまた導電率も100% IACS以上で、タフピッチ銅の水素脆化とリン脱酸銅の導電率の低下といった短所を改善した純銅として、当初は真空管用材料などに使用されてきた。そして、その量産技術としては真空溶解法にかわって、電気炉溶解を使いCOガスで純銅溶湯中の酸素を還元する製法が1932年にU.S Metals Refining Co.によって開発された⁹⁾。1948年にはASTM(American Society for Testing and Materials) B 224で無酸素銅の規格が制定された。1977年JISでも無酸素銅の板・条の規格が制定され、国内でも本格的な供給体制が整った。JIS-H-2123,JIS-H-3100規格では耐水素脆性、高導電率性を保証するために酸素含有量を0.001% (10 ppm)以下、低融点金属のPb, Znなど8種類の不純物元素含有量が規定されている。

3. 伸銅品の生産推移

図3⁷⁾に主要国伸銅品生産推移を示した。生産量では米国が圧倒的に一位で、1999年には約180万tを生産した。日本は最高量を記録した1991年のみトップとなつたが、最近では米国に大きく水をあけられている。1999年の主要国品種別生産量を図4⁸⁾に示した。ドイツでは合金管（黄銅管）のウェイトが他国に比べ高く、イタリアは世界最大の合金棒（黄銅棒）の生産国となっ

ている。米国と日本と比較した場合、日本が上回っているのはほぼ銅板条のみである。図5⁸⁾には日本国内の主要品種別生産量の推移を示したが、ほぼ銅条だけが順調に伸びていることが分かる。銅条のほとんどはICリードフレーム材、端子コネクターなど電子部品として消費されており日本の伸銅業が電子産業に牽引されていることがうかがえる。

4. 無酸素銅の製造工程

三菱マテリアル(株)での無酸素形銅の製造工程概要を

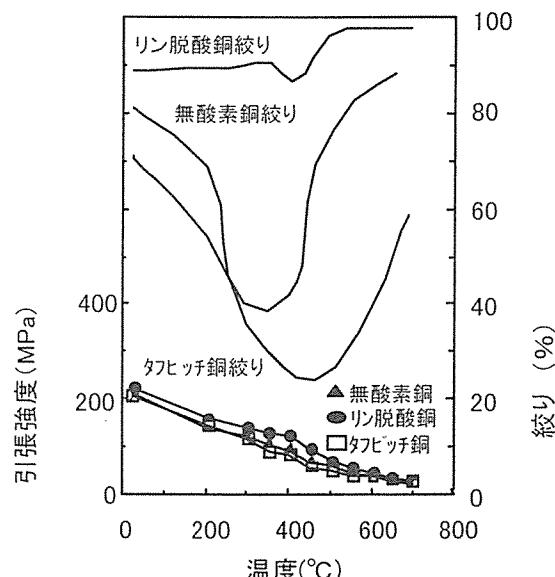


図2 各種純銅の高温引張特性

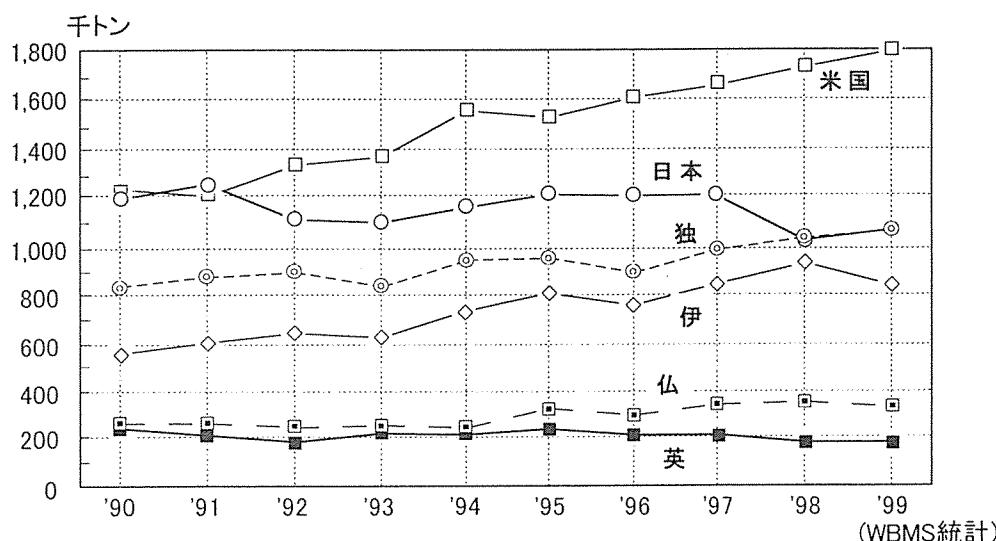


図3 主要国伸銅品生産量

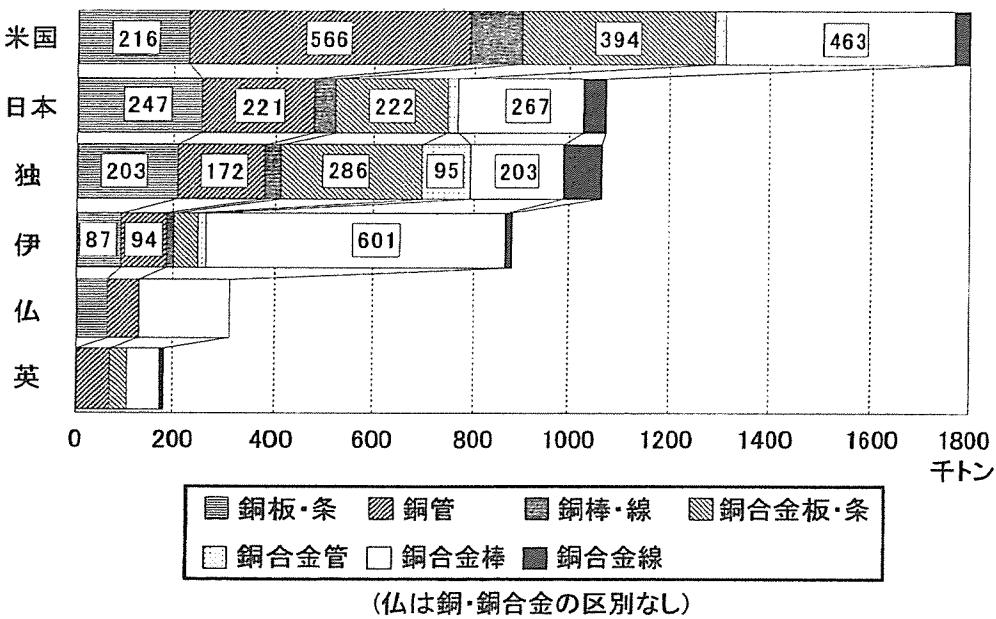


図4 1999年品種別生産量

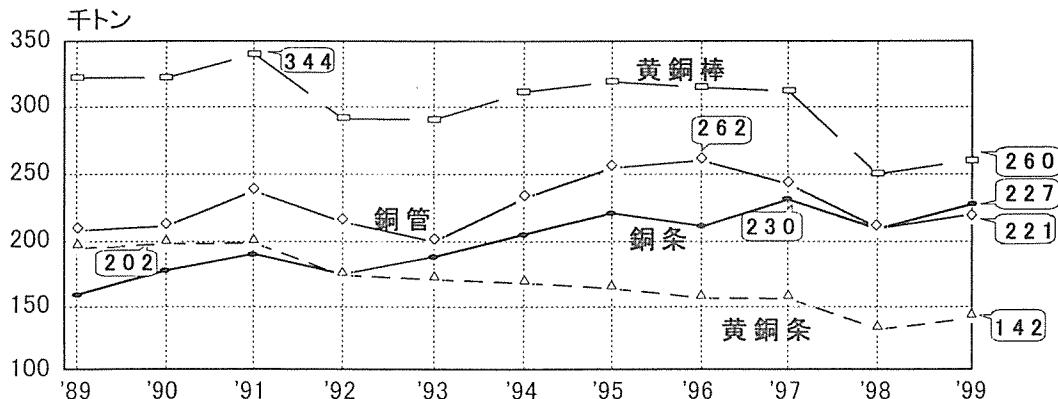


図5 日本国内の品種別生産推移

図6⁹⁾に示す。本工程では原料カソード銅（約 1000 mm × 1000 mm × 15 mm 約 200 kg/枚）を、液化天然ガス燃焼タイプのプレヒータ内で約 1170 K まで予備加熱して、連続的に溝形低周波誘導炉（1000 kw × 2 基）で 10 t/h の溶解速度で溶解する。その後溶銅は不活性ガスでシールされた移送槽を通りタンディッシュを経て水冷ジャケット形の鋳型を持つ鋳造機に導かれ各種断面形状を持つ形銅に鋳造される。鋳造中モールド内湯面は連続的にセンサーで一定レベルとなるよう制御されている。鋳塊は水冷後所定の長さで切断され、コンベアーにより地上レベルまで搬送される。その後

所定の検査を経て出荷される。現在製造可能な最大寸法は、ケーク鋳塊では 260 mm × 1050 mm またはビレットでは直径 385 mm である。そして、長さは最大で 6000 mm、重量では 10 t/本のものまでが鋳造可能となっている。

無酸素銅の酸素濃度をできるだけを低下させて安定的に鋳造するには、溶銅を雰囲気中の酸素、水素に汚染されることなく取り扱うガスシール技術そしてホール等のガス欠陥の少ない鋳造技術の開発を必要とした。

溶銅中の水素と酸素は溶銅の接している雰囲気中の水蒸気と次の平衡式に従う¹⁰⁾。

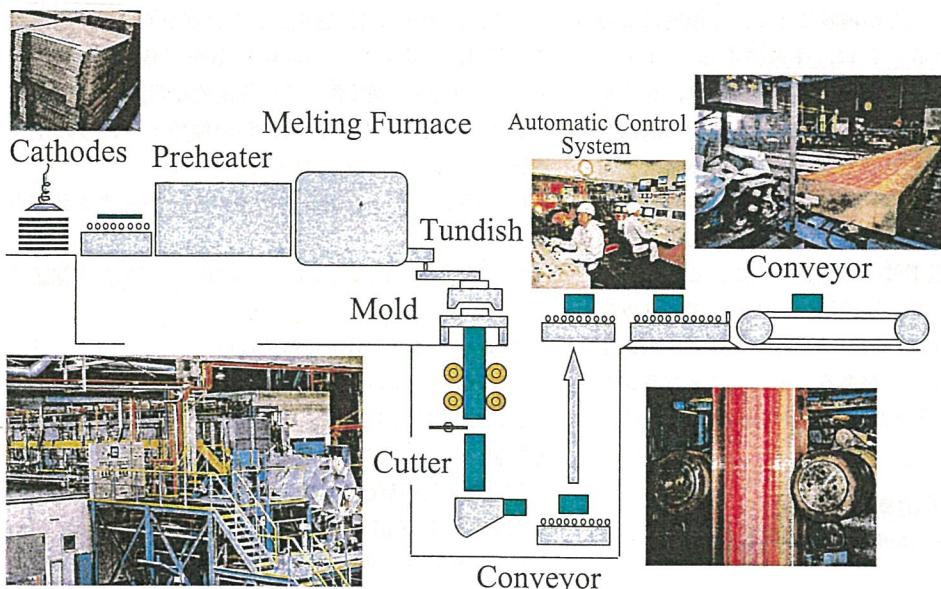


図6 無酸素形銅の製造工程

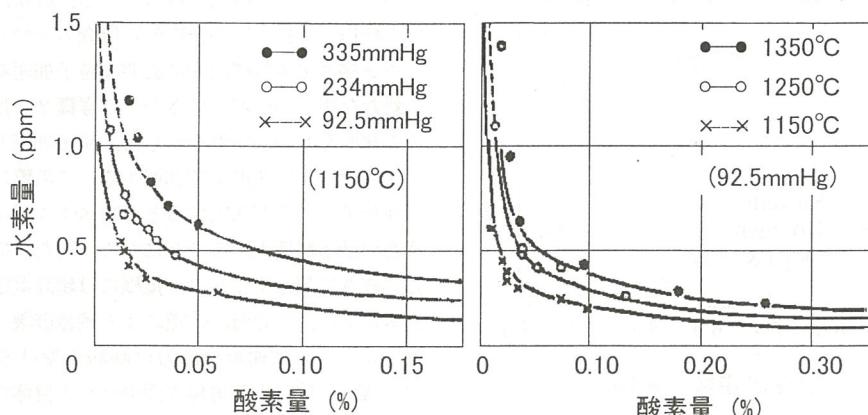


図7 溶銅中の水素および酸素量と水素気圧との関係



平衡定数 K は (2) 式で示される。

$$K = \frac{[\text{H}]^2 \times [\text{O}]}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2)$$

[H] : 溶銅中の水素濃度

[O] : 溶銅中の酸素濃度

P_{H₂O} : 霧囲気中の水蒸気分圧

図7に溶銅中の水素、酸素量と水蒸気圧との関係を示した。この図から霧囲気中の水蒸気分圧が一定の場合、酸素濃度が低下すると平衡する水素量は高くなる。また溶銅の温度が低い程、同じ酸素濃度であればそれに平衡す

る水素量は低くなることを示唆している。

一般に溶融金属中の水素ガス量は Sieverts の法則に従う¹¹⁾。

$$H = K \sqrt{P_{\text{H}_2}}$$

ここで H: 溶湯中の水素量

P_{H₂}: 霧囲気中の水素分圧

K: 定数

溶銅中の水素を低減するためには、空気を遮断する還元霧囲気中の水素分圧を低減する必要があることが直感的に分かる。また図8¹²⁾に純銅の水素溶解度における温度の影響を示したが、これより溶銅の温度が高い程、

水素溶解度が高くなることが理解できる。工業的には溶銅の温度を低下させることは、移送極あるいはタンディッシュでの熱バランスがとれず限界があり、シールガス中の水蒸気分圧の低減化および水素分圧の低減化を図り、無酸素銅の酸素濃度を低減し、同時に水素濃度の低減を図る。現在、シールガスの性状設備の改良により溶銅の酸素濃度は1 ppm以下、また水素濃度も0.2 ppm程度まで低減可能な操業技術が開発されている。

その他無酸素銅荒引線の製造法としては、アメリカのG.E (General Electric) 社において開発された DIP 法 (Dip Forming Process) がある。また、フィンランドのOutokumpu社で開発された Outokumpu 法と呼ばれ製造法がある¹³⁾。

5. 無酸素銅について —特性と用途—

無酸素銅の一般的な分類は JIS-H-2123 に記述され

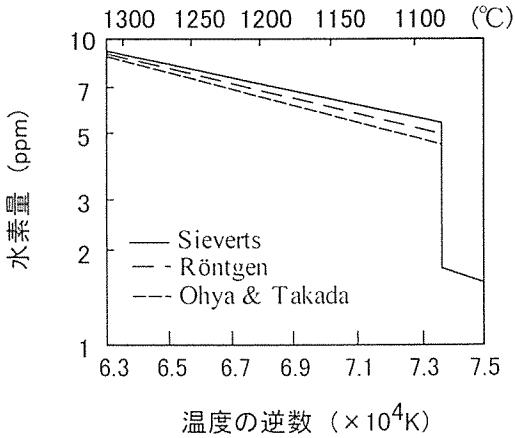


図 8 純銅の水素溶解度におよぼす温度の影響

ているが、現在は各用途別にさらに細かく分類できる。ここでは、三菱マテリアル(株)の MOF (高性能無酸素銅のブランド名)の使用例とその技術的な背景を俯瞰する。

表 2 に当社の高性能無酸素銅の種類とそれらの主な用途をまとめた。これらの特徴としては

- 1) ASTM F68 Class の規格を充分満足する品質を有する。
- 2) RRR (残留抵抗比) を、>300 (>500) を保証する。
- 3) 真空中でガス放出量が少ない。
- 4) 導電率が高い。(102.3 %IACS)

とまとめることができる。また各規格値と各種 MOF の分析値の一例を表 3¹⁴⁾にまとめ示した。

5.1 電子管用無酸素銅

電子管には送信管、受信管、マイクロ波管などがある。その中で主に無酸素銅が使用されているのは大電力送信管やマイクロ波管の真空容器を兼ねた外部陽極である。電子管用無酸素銅は優れた電気・熱伝導性、耐水素脆化性、異種材料との良好な接合性、真空中でガス放出量が少ないなどの特性を持っている。近年、これらの特性を利用して我が国の先端分野研究の一つである高エネルギー物理学の基礎研究に必要な粒子加速器用材料として新たな用途が広がってきた¹⁵⁾。写真 2 には粒子加速器の加速器空洞の設置例を示した。粒子加速器は電子、陽子を光速に近い速度まで加速する。この際、僅かな残留気体分子に粒子が衝突するとそのエネルギーを失い、加速器の効率が低下することになる。また、加速性能は電界の強さに依存するから、電極には超高電圧を負荷する必要がある。この時、放電による絶縁破壊が起こる臨界電圧によって加速器の能力は制約を受ける。臨界電圧は、残留気体および電極表面やバルク自体の清浄度に依存すると言われている。従って、これらの材料には高真

表 2 高性能無酸素銅の種類

種類	特徴	製品形状	用途
電子管用無酸素銅 (MOF for Electron)	・酸素濃度が低い ・水素脆化を生じない	・ビレット、ケーク ・鋳造部品 ・押出部品(線・棒)	・電子部品 ・ガスケット ・真空環境 ・高温電極溶接 ・パッキングプレート
マグネットロン用 無酸素銅 (MOF for Magnetron)	・酸素濃度、水素濃度ともに特に低い ・加熱時のガス放出が少ない ・水素脆化を生じない	・ビレット ・鍛造品または機械加工部品	・マグネットロン ・高真空環境 ・高電圧電極
超伝導用無酸素銅 (MOF for Superconductivity)	・残留抵抗抗 RRR>300(>500) ・水素脆化を生じない ・不純物濃度が極端に低い	・ビレット ・押出部品(線・棒)	・超伝導安定化材料 (MRI等)
ASTM F68 クラス1 (MOF-SOF STM F68 Class1)	・酸素濃度、水素濃度ともに特に低い ・水素脆化を生じない ・加熱時のガス放出が少ない ・理想的な金属学的組織	・ビレット、ケーク ・鍛造部品 ・押出部品(線・棒)	・粒子加速器 ・高真空環境 ・高電圧電極

表3 MOFの化学成分(無酸素銅の規格との比較)

Standard	Copper	O	Pb	Zn	Cd	Hg	P	S	Bi	Se	Te	Sb	As	Mn	Sn	Fe	Ag	Si	H	Ni
Oxygen Free Copper																				
CDA C10200																				
ASTM B170(Grade 2)																				
MOF OF	>99.997%	2	2	0.2	<0.1	-	3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	-	0.2	3	8.2	NS	0.9		
OFC for Electron Devices																				
CDA C10100																				
ASTM B170(Grade 1)																				
MOF for Electron	>99.997%	1	1.8	0.2	<0.1	<0.1	NS	4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	<0.1	0.1	1.8	8	1.0	0.5	0.9
MOF for Magnetron	>99.998%	1	1.0	0.2	<0.1	<0.1	NS	3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	<0.1	0.1	0.7	8	<1.0	0.3	0.5
MOF for Superconductivity																				
Stabilizer for superconductivity RRR ≥ 300(RRR ≥ 500)																				
Class 1 OFC																				
Total <40ppm																				
CDA C10100																				
ASTM F68 Class 1																				
MOF-SOF	>99.998%	1.5	1	0.1	<0.1	<0.1	3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	<0.1	0.1	1	8	<0.1	0.4	0.5
6-Nine OF Copper	>99.999%	<1	<0.03	<0.05	<0.08	<0.1	0.01	0.1	<0.01	<0.06	<0.05	<0.02	0.05	<0.01	<0.05	0.1	0.09	0.02	-	0.02
MOF 6-Nine	>99.9999%	<1	<0.03	<0.05	<0.08	<0.1	0.01	0.1	<0.01	<0.06	<0.05	<0.02	0.05	<0.01	<0.05	0.1	0.09	0.02	-	0.02

(注) MOFの値は代表値、NS:規格なし、RRR:Residual Resistivity Ratio



写真2 粒子加速器

空保持のため、上述した特性中でも特に放出ガス特性が重要となる。従って、材料の残留ガスが少ないとあるいはペーリングによる残留ガスの除去が容易であることなどの特性を持ち、しかも清浄度の高い無酸素銅が必要となつた¹⁶⁾。

無酸素銅から真空中に放出されるガスの殆どは水素ガスであるため、原料素材の鉄塊中の水素濃度を低減することが重要である。しかし、放出ガス特性は水素濃度のみに依存するわけではなく、水素と相互作用する固溶酸素濃度の影響も受ける。無酸素銅鉄塊中の酸素と水素との存在状態を観察した結果を図9に示す。測定はCAMECA社製投影型SIMSを用いて行った。スパッタリング開始直後には認められなかった位置に10分後O⁻、H⁻イオン像が現れている。これらの位置は一致しており、H⁻イオン像のみ検出されることはなかった。このことから、鉄塊中のミクロホールは凝固時に放出される水素と酸素との相互作用によるH₂Oガスであることが十分予想される。

次に図10に酸素を2 ppm以下で変量した無酸素銅鉄塊を10⁻¹⁰Torrの真空中で773Kに加熱したときの水素ガス放出速度を示す。図中 As cast材の水素ガス放出

速度と酸素濃度との間に相関はないが、測定前に773K×60 minの脱ガス処理を施した場合、酸素濃度が少ないほど加熱30 min後の放出ガス速度が小さくなっている。

酸素濃度の高い無酸素銅ではバルク中の水素がバルク外へ拡散離脱しようとする時に酸素と遭遇すると、そこにH₂Oを形成してボイドとなりバルク内にトラップされると考えられる。そして、H₂Oボイドを形成してバルク中に捉えられた水素は長期的に見ればゆっくり解離、離脱するスローリーク現象となり、いわゆる枯れにくい材料となる。逆に、酸素濃度が低い無酸素銅ほど水素が酸素にトラップされる確率が低くなるので容易に拡散除去することが可能で、より超真空材料に適しているといえる¹⁷⁾。

電子管用無酸素銅の米国規格ASTM F68-82ではマイクロポロシティをコンタミネーションとよび、1123K×30 min水素ガス気流中で熱処理した金属組織を顕微鏡観察して無酸素銅素材をClass1～Class5に分類することを規定している。Class1の組織はコンタミネーションがほとんどなく清浄で結晶粒が300～350 μmに均一に粗大化していることに特徴がある。これらの一例を写真3に示した。コンタミネーションは鉄塊の酸素、水素濃度の多少によるものと考えられる。つまり、酸素濃度が高いと水素濃度の多少に関係なく、水素気流中の熱処理によりマイクロポロシティが多数発生する。一方無酸素銅の酸素以外の不純物元素はコンタミネーションの原因とはなりにくいか、再結晶粒の成長抑制に関与することが予想される。例えば、鈴木・菅野等¹⁸⁾の研究では微量のTi、Zr、Vなどの添加により純銅の再結晶促進作用が生じるのは不純物Sと添加元素Sとが結合して硫化物を形成し固溶S量を減少させたために生じることを見い出した。さらに、宅野・石田等¹⁹⁾は723K熱処理後の無酸素銅粒界をSIMSで観察した結果Sが粒界偏析することを直接観察することを見い出した。S

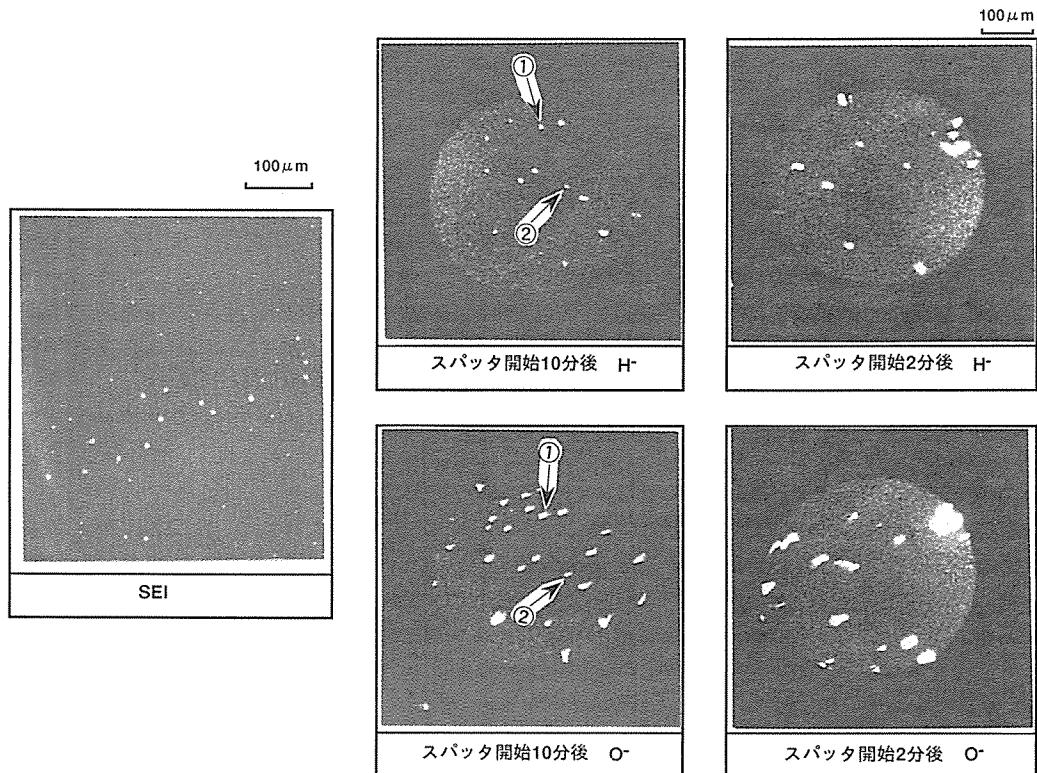


図9 無酸素銅の酸素と水素の分布

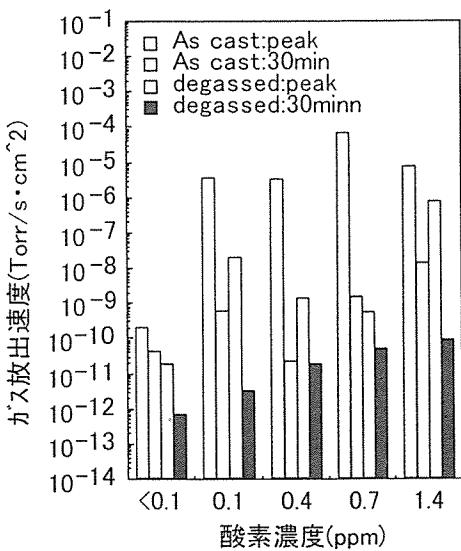


図10 無酸素銅のガス放出速度

を析出させた無酸素銅は水素気流中での焼純後に結晶粒の著しい粗大化が起こるとした。今後さらに無酸素銅中に ppm クラスで存在する不純物元素の影響を検討することが重要と思われる。

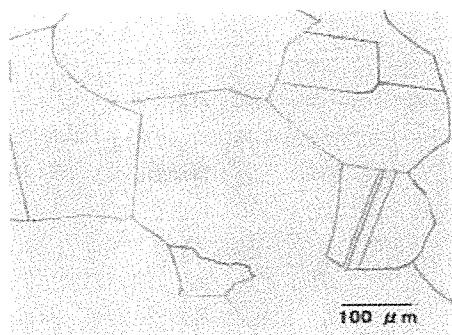


写真3 class 1 無酸素銅の金属組織

5.2 超電導用安定化材用無酸素銅

無酸素銅のもう一つの先端技術分野での用途である超電導用安定化材について述べる。安定化材の役割は超電導状態に局部的破壊が起きた時に、定常電流をバイパスさせ、元の超電導状態に早期に復帰させることである。この安定化材に無酸素銅が使用されており、極低温下での無酸素銅の導電性が極めて重要となっている。

極低温下の電気抵抗特性は 室温と液体ヘリウム温度の 4.2 K での比抵抗の比；残留抵抗比 ($\rho_{298K}/\rho_{4.2K} = RRR$; Residual Resistivity Ratio) で評価され、

この値が大きい程優れた特性とされている。ところで、金属の電気抵抗 ρ (T) はフォノンに基づく抵抗 ρ (L), 空孔・転位による抵抗 ρ (D), 不純物に基づく抵抗 ρ (I) の和として示される。この関係をマティーセンの法則 (Matthiessen's rule) という²⁰⁾。

$$\rho(T) = \rho(L) + \rho(D) + \rho(I)$$

銅が銀に次ぐ高い電気伝導性を有するのは、フォノンによる抵抗 ρ (L) が他の金属より小さいためである。十分に焼純を施せば空孔・転位による抵抗 ρ (D) は無視することが出来る。また、温度が決まれば ρ (L) は一定となり、 ρ (T) は不純物に基づく抵抗 ρ (I) のみの関数となる。従って、絶対温度 0Kにおいては $\rho(L)=0$ となり、 ρ (I) だけが存在するので、残留抵抗 (Residual Resistivity) ρ_R は $\rho_R=\rho(I)$ となる。単一の合金元素に対しては、x を濃度とすれば、 $\rho_R(x)=Ax(1-x)$ で示される。この関係をノルドハイムの法則 (Nordheim's rule) と呼ぶ。A は溶媒原子と溶質原子によって決まる定数で、両者の原子価および原子半径の差が大きい程大きくなる。 $x < 1$ のような希薄合金では $\rho_R(x) \approx Ax$ となる。図 11²¹⁾ に銅の電気比抵抗 ρ_R (298K) におよぼす微量固溶元素の影響を示した。比抵抗 ρ_R は、合金元素量とともに増加し、 ρ (L) は一定であるから、直線的増加は ρ_R に対する濃度依存性を示している。S, P, Fe などが銅の電気抵抗を増大させ、一方 Cd, Ag, Zn の影響は小さい。ここに示されたデータは各元素単独の効果であり、元素間の相互作用による影響は考慮されていない。図 12 には表 2 に示した 6N-Cu (Cu > 99.9999 %) 無酸素銅

に Fe, S を 1 ppm 以下で変量した場合の RRR の測定結果を示した。Fe, S はこのレベルの含有量でもかなりの影響があることが確認された。特に Fe は近藤効果を示す元素であり、その元素の磁気能率により電気的に異常を示しやすいために極微量の存在で極低温の導電性を著しく低下させやすいと考えられる。Fe はもともとカソード銅中には存在せず、溶解時の炉材工場環境からの汚染が主な原因と考えられる。従って超電導用安定化材用無酸素銅の製造にあたってはより厳密な操業管理および品質管理を施し RRR が 500~600 のものが供給されている。

6. 無酸素銅合金

導電材料における銅合金の発展は電気伝導率、熱伝導率をできるだけ犠牲とせずに強度向上を目指すことが最重要課題となっている。特に、半導体リードフレーム材あるいは端子コネクター材の開発分野でこの傾向は顕著である。

半導体デバイスには小さくすればする程性能(高速化)が向上し、容量も増加するばかりでなく、省エネルギーにも寄与するというスケーリング則がある。過去 20~30 年間の傾向をたどっても、スケーリング則に従い、デバイスの設計サイズは 3 年間で 30 %ずつ縮小し、マイクロプロセッサ上のトランジスター数も 3 倍ずつ増加の傾向をたどっている²³⁾。このような半導体の高集積化の進展により、従来写真 4²²⁾ に示したようなリードフレーム材の材料厚さは 0.25 mm が標準であったものが、0.15, 0.125, 0.1 mm と薄肉化の傾向にある。この薄肉化による構造上の強度低下を材料の高強度化によって補

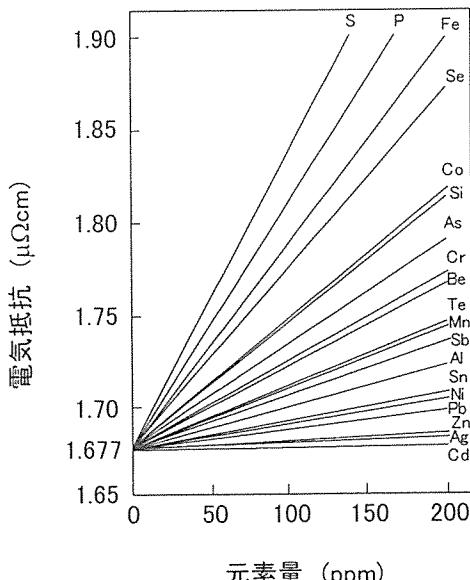


図 11 銅の電気抵抗に及ぼす微量固溶元素の影響

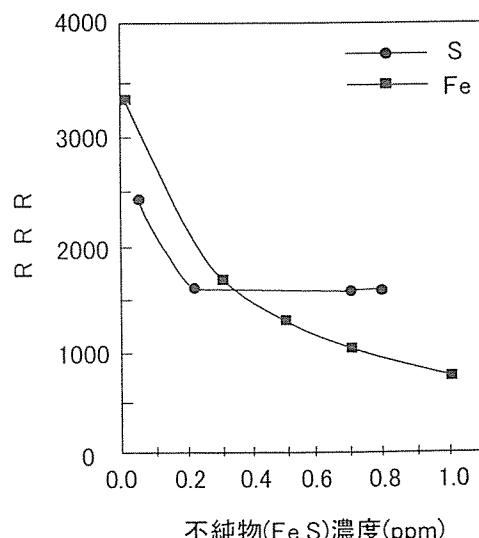


図 12 高純度銅の RRR におよぼす Fe, S の影響

い、さらに高集積化による単位当たりのジュール熱による素子の温度上昇を速やかに放熱する必要があることからリードフレーム材には高熱伝導性も要求される。

図13には各種銅合金の引張強度と導電率との関係を示した。銅合金の強化策として実用化されているものと

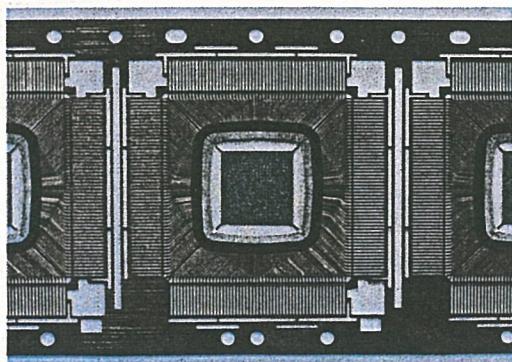


写真4 銅合金製リードフレーム材

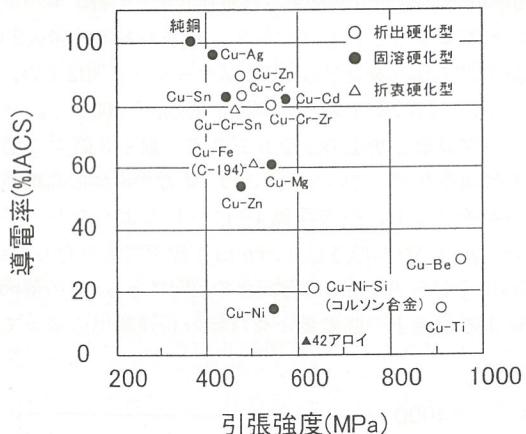


図13 各種銅合金の強度と導電率

しては固溶硬化、時効析出硬化そしてこれらの折衷タイプのものがある。合金開発初期の段階は Sn, Zn, Ag, Ni, Al などタフピッチ銅ベースでも合金化技術が確立できた固溶硬化型のものが主流であった。しかしこれらの合金化元素を強度向上のため高濃度になると、導電率は著しく低下してしまう。一方析出硬化型銅合金では添加元素として、Cr, Zr, Ti、および Ni-Si (コルソン合金) が代表的なものである。コルソン合金以外の Cr, Zr, Ti は活性度が高く、それらの銅合金自体は古くから知られていたが、従来は銅に添加した場合に酸化させずに安定的に多量に生産する技術がなかった。近年、無酸素銅の生産技術をベースとした溶解・鋳造時の還元雰囲気中でこれら活性元素を添加し、高品質な合金を多量に鋳造する技術が確立されており、各種活性元素を添加した銅合金形銅が鋳造されるようになった。表4には三菱マテリアル㈱で溶解・鋳造されている無酸素銅ベース銅合金の一覧表を示した。現在これらの銅合金をベースに約50種類以上の銅合金が連続鋳造技術により生産されている。

図14に銅および銅合金の板・条の代表的な製造工程を示した。析出硬化型銅合金板・条の製造では特性を十分引出すため、一旦溶体化処理をかけて高温に再加熱し、冷間圧延を経て最終的には時効処理を施すなど、追加プロセスが必要である。材料的には、合金添加元素が析出分散するため素地は純化してかなり高い導電率が得られる。従って、導電率・強度の両特性をバランスよくした材料を開発する場合、この析出硬化型銅合金が、今後の主流をなしていくものと思われる。

7. 新しい展開

7.1 6N銅

6N銅とは、水素・窒素・酸素などガス成分を除き、各用途別に現在規格による指定は無いが、20~40種類の不純物元素の分析値合計が1 ppm以下の純銅をさす。

表4 MOF合金表

ブランド名	合金番号	化学組成 (wt%)	使用例
MOF-Ag	C10400,C10500,C10700	Ag 0.025-0.200	IC devices
MOF-Ap		Ag 0.025-0.200,P 0.004-0.015	Copper radiators for power IC
MOF-AL		Al 0.500-2.000	Precision terminals and connectors
MOF-Cr	C18200,C18400,C18500	Cr 0.500-1.500	Terminals in the pressing process
MOF-CZ		Cr 0.500-1.500,Zr 0.050-0.150	Leadframe material
MOF-FP	C19210,C19400	Fe 0.100-3.000,P 0.005-0.010	High quality electrolytic plated strip
MOF-MP		Mg 0.010-0.800-P 0.005-0.010	Copper foil wire shield
MOF-Ni	C70200,C70500 C70690,C70700	Ni 0.010-11.000	Mold for the steel industry
MOF-NX		Ni 0.500-2.000,Sn 0.100-2.000,P 0.020-0.050	Mold for non-ferrous
MOF-Sn	C50100	Sn 0.100-0.200	Backing plates
MOF-SP	C50200	Sn 0.100-0.200,P 0.003-0.010	Electrical resistant electrode
MOF-TP	C14500	Te 0.400-0.600,P 0.004-0.012	Trolley wire
MOF-Z	C15100,C1500	Zr 0.015-0.150	Gas shield arc
			Switch parts

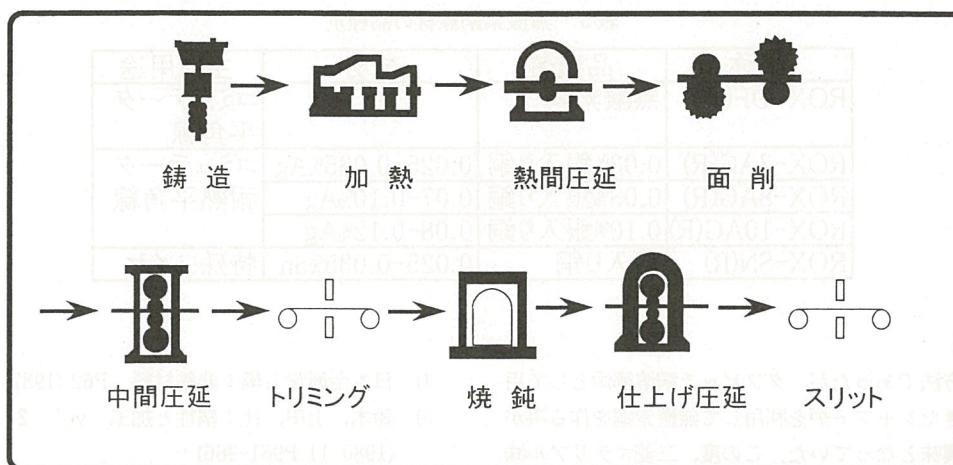


図 14 銅板材の製造工程

これら不純物元素は GD-MS (グロー放電質量分析器)により 1 億分の 1 の ppb オーダで分析されることが必要となっている。この銅は通常製造される電解カソード銅を電解精製あるいはゾーンメルティングなどの精製技術により作られるため、かつては非常にコストの高いものであった。しかし最近では製造技術のめざましい発展により、製造コストそのものは徐々に低下している。

6N 銅の不純物の合計は 1 ppm 以下と極微量であり、前述した RRR は通常の無酸素銅の RRR=300 前後より 1 オーダー以上高い値となる。また、6N 銅と通常レベルの 4~5N 銅との焼鈍軟化特性を図 15 で比較すると再結晶温度が 50 K 以上低下している。さらに強加工度を施した 6N 銅は数日経過すると常温でも自己軟化することが確認でき、不純物元素の固溶による結晶歪が極めて小さくなっていることが予想される。これらの特色を生かし現在は高級オーディオ用ワイヤー、あるいは半導体銅配線用ターゲット素材あるいは半導体銅配線用メッキアノード素材に利用が広がっている。

シリコンチップの配線材料としては長年アルミニウムあるいはアルミニウム合金が用いられてきたが、更なる高速化、高集積化の技術対応として 1997 年米国 IBM 社がこれをアルミニウムに比べ導電率が約 1.7 倍高い銅に置き換える方向性を発表し、現在の銅フィーバーの口火が切られた。IBM 社が発表した銅配線のイメージを写真 5 に示した。

シリコンチップへの銅配線技術については配線形成法あるいは、銅の極薄膜としての特性改善、特にエレクトロマイグレーションの改善など銅材料そのものの研究課題が多数残されている²³⁾。

7.2 ROX プロセス

近年までの無酸素銅の製造プロセスは、電気炉を溶解

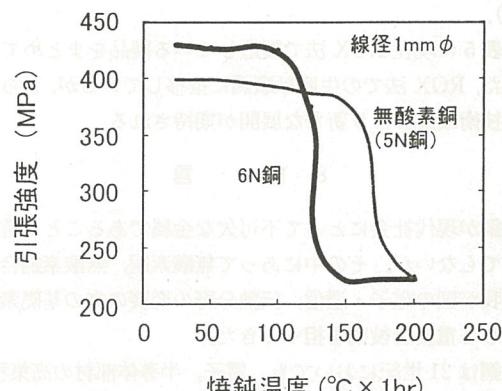


図 15 6N 銅の焼純軟化特性

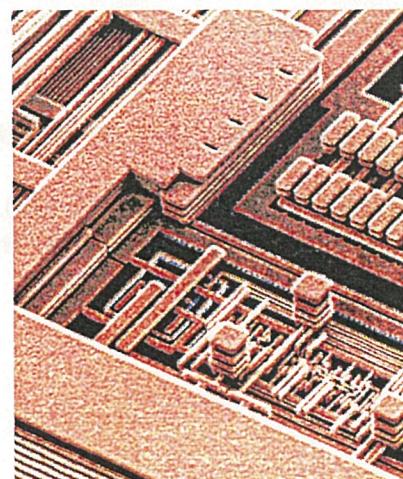


写真 5 IBM 社半導体銅配線例

表 5 無酸素銅線材の品種別

呼称	品種名	成分	主な用途
ROX-OF(R)	無酸素銅	-	コミュニケーション 平角線
ROX-3AG(R)	0.03%銀入り銅	0.025-0.035%Ag	コミュニケーション
ROX-8AG(R)	0.08%銀入り銅	0.07-0.10%Ag	耐熱平角線
ROX-10AG(R)	0.10%銀入り銅	0.08-0.12%Ag	
ROX-SN(R)	錫入り銅	0.025-0.035%Sn	特殊ワイヤ

に用いる方法であったが、タフピッチ銅溶解炉として用いられてきたシャフト炉を利用して無酸素銅を作る事が世界的な興味となっていた。この度、三菱マテリアル(株)はタフピッチ銅荒引線を連続的に作る製造工程であるSCR工程(Southwire continuous rod system)において、長年の無酸素銅溶湯処理技術をベースにして無酸素銅線(8~22φ)を製造する技術を開発した(ROX法)。

表5に現在ROX法で製造している製品をまとめて示した。ROX法での生産は順調に推移しているが、さらなる技術改良により新たな展開が期待される。

8. 結 言

銅が現代社会にとって不可欠な金属であることは言うまでもないが、その中にあって無酸素銅、無酸素銅合金は我が国の電子・通信、伝熱分野の発展の為の基礎素材として重要な役割を担ってきた。

銅は21世紀においても電子、半導体部材の高集積、高速化、小型化を通して、ますます発展する情報通信社会(IT革命の時代)にあっても、さらには高エネルギー分野、ナノメタラジー分野での未知なる世界でも大きな働きをすることになろう。その意味で古くて、新しい素材である銅の基礎研究もますます必要とされよう。

文 献

- 1) JIS-H-2123形銅、JIS-H-3100銅及び銅合金の板及び条
- 2) 日本銅センター：銅と技術 No21(1978), 1
- 3) 社団法人日本シェルモールド協会編：銅合金鋳物のガスに関する文献集, 8

- 4) 日本国金属学会編：非鉄材料 P62(1987)
- 5) 鈴木、上田、辻：塑性と加工 vol. 21 No.238 (1980-11 P961-966)
- 6) 森永卓一：銅及び銅合金
- 7) 伸銅月報 7号(2000)
- 8) 伸銅月報 2号(2000)
- 9) Yuyaka Koshiba, Tsutomu Ma and Norihisa Iida: TMS. 2000
- 10) 社団法人日本シェルモールド協会編：銅合金鋳物のガスに関する文献集, 40
- 11) 美馬源次郎：金属組織学(1960), 361
- 12) 雄谷重夫、高田孝保：鋳物 49(1977), 100
- 13) 日本伸銅協会編：銅及び銅合金の基礎と工業技術(1994), 72, 68
- 14) 三菱マテリアル(株)技術カタログ
- 15) 矢島、石田、前、浅尾：資源と素材'94(秋季大会) 20
- 16) 岩村卓郎：新素材 No5(1991), 49
- 17) 矢島、前：金属 vol. 66(1996) No1
- 18) 鈴木、菅野：鉄と鋼 vol. 70(1984) No. 15
- 19) 宅野、矢島、前、石田：伸銅技術研究会誌 35巻(1996), 204
- 20) 村上陽太郎、亀井満：非鉄金属材料学(1985), 13
- 21) P.Gregory, A.J.Bangay and T.L.Bird: METALLURGIA May(1965), 207
- 22) 三菱伸銅(株)技術データ
- 23) 守山実希、村上正紀等：まりあ vol39, N011(2000), 901
- 24) 守山実希、村上正紀等：まりあ vol39, N011(2000), 903

会報

平成12年度水曜会大会

- 日 時 平成12年10月14日(土)
- 会 場 学士会館

20世紀最後の水曜会大会は、平成12年10月14日(土)に学士会館で開催された。土曜日の午後5時開催ということで参加者数が心配されたが、128名もの出席者があり、古い歴史を誇る水曜会の層の厚さを印象づけた。

以下に大会の次第とその内容を紹介する。

1. 総会 司会 高山新司(法政大学)

会長挨拶 小野勝敏

まず名誉会員の推挙を行った。水曜会ならびに教室に特別の功労のあった方々として、平成12年停年退官された工学研究科資源工学専攻 菊池宏吉、同材料工学専攻 小岩昌宏、エネルギー科学研究所エネルギー応用科学専攻 八田夏夫各名誉教授を特別名誉会員に、同じく平成12年停年退官の工学部附属メゾ材料研究センター 諸岡 明講師を名誉会員に推挙し、永年に亘る大学の教育と研究に尽力されたことに謝意を述べた。

次に会計報告は、平成12年3月31日現在の報告を村上正紀会計幹事同席のもと行われた。

水曜会会計報告

平成12年3月31日現在

収 入	支 出
前 年 度 繰 越 金 16,417,298 円	会誌印刷代 (製版・郵送料込)
会 費 4,028,720	23巻1号 1,898,853円
会誌広告掲載料 (製版代込)	23巻2号 1,969,275
22巻10号 200,815	印刷代 (封筒他) 94,868
23巻1号 944,270	100周年記念事業経費 (平成11年6月18日) 8,308,808
23巻2号 338,400	編集委員会経費 98,082
会誌論文別刷代 74,130	会誌原稿料 240,000
名簿売上 44,670	通信費 99,671
会誌売上 15,000	事務人件費 461,080
100周年記念事業パーティー会費 2,488,000	文具、コピー代等 29,653
100周年記念事業寄付 30,000	弔慰費 (鈴鹿氏) 10,500
預金利息 11,424	その他 (6号館設置碑移設一式) 184,800
収入合計 24,592,727 円	小計 13,395,590円
	次年度への繰越金 11,197,137円
	内訳 銀行普通預金 800,683
	銀行定期預金 10,000,000
	郵便振替預金 343,456
	手持現金 52,998
	支出合計 24,592,727円

上記の通り会計報告致します。

平成12年6月7日

会計幹事 村上正紀

以上の通り相違ございません。

会計監事 斎藤敏明

また、近年の大学組織改組により、水曜会の基盤となる教育・研究組織が複雑になり説明を求められることが多いので、この機会に学部と大学院、研究所の講座の変遷と改組後の水曜会新入会員の資格を説明した。

最後に水曜会規約の一部改正を提案し、了承された。すなわち現在までの規約は昭和42年に改正されたものが残っているため、現実に則した内容に変更するものであり、以下に新旧の会則を並記する。

水曜会旧会則(昭和42年6月3日改正)

第1 名 称

第1条 本会を水曜会と名付ける。

第2 目 的

第2条 本会は地下資源の開発、金属の製錬・加工および金属材料などに関する学術および技術の進歩をはかることを目的とする。

第3 会 員

第3条 会員を分けて特別名誉会員、名誉会員、正会員、学生会員とする。

第4条 特別名誉会員は本会ならびに京都大学工学部資源工学、冶金学および金属工学教室に特別の功労のあった者で、また、名誉会員は本会に功労のあった者で、評議員会が推薦した者とする。

第5条 正会員は三教室の教官、かつて教官であった者、三教室の出身者、および本会の目的に賛同する者で本会が入会を認めた者とする。

第6条 学生会員は三教室に属する学部学生とする。

第4 役 員

第7条 本会は次の役員をおく。

会長 1名

副会長 2名

会計監事 2名

幹事 7名

評議員 40名

第8条 会長は会務を総轄し本会を代表する。会長は評議員会が正会員中より選出する。任期は2年とし重任を妨げない。

第9条 副会長は会長を補佐し会長に事故のあった時その職務を代行する。副会長は評議員会が正会員中より選出する。任期は2年とし

重任を妨げない。会計監事は会計の監査を行ない、任期は2年とし重任を妨げない。幹事は会長副会長を補佐し会務を処理する。幹事の任期は1年とする。

第10条 評議員は評議員会を構成し、本会の重要事項の審議を行なう。評議員は正会員を地区別に分け、各地区的会員によって選出する。任期は2年とし重任を妨げない。

第5 総 会

第11条 総会は毎年1回開催する。

第6 事 業

第12条 本会は毎年講演大会を開催し、学術研究の発表、特別講演などを行なう。

第13条 本会は会誌を発行する。会誌は学術論文、本会の事業ならびに会務に関する諸報告その他参考となる事項を掲載する。

第14条 本会は以上ほか本会の目的を達成するのに必要な事業を行なう。

第7 経 費

第15条 本会の経費は会費、寄附金その他の収入で支弁する。

第8 支 部

第16条 本会は必要に応じて支部を設けることができる。

第9 会 友

第17条 会員以外の会誌購読希望者は会友とし会誌を頒布する。たゞし会誌代を徴収する。

第10 会 則 変 更

第18条 本会の会則は評議員会で議決し総会の同意を得て変更することができる。

以上

水曜会 新会則 (平成12年10月14日改正)

第1 名 称

第1条 本会を水曜会と名付ける。

第2 目 的

第2条 本会は資源、エネルギー、材料に関する学問、技術ならびに経済の進歩をはかることを目的とする。

第3 会 員

第3条 会員を分けて正会員と学生会員とする。

第4条 正会員は以下の各項のいずれかに該当する者とする。

- 1 京都大学工学部旧資源工学科、旧鉱山学科、旧冶金学科、旧金属加工学科の学部または大学院を卒業あるいは修了した者。
- 2 上の各学科の後身である講座（または分野）において学部教育あるいは大学院教育を受けて卒業あるいは修了した者。

第5条 学生会員は、第4条の条件を満たす講座（または分野）に所属する学部在籍学生または大学院生。

第4 役 員

第6条 本会には以下の役員を選出する。任期は2

年とし、重任を妨げない。

会長 1名

副会長 2名

会計監事 2名

幹事 若干名

第7条 会長は本会を総括し、本会を代表する。会長は正会員の互選により水曜会総会において選出する。副会長以下の役員は会長が指名する。副会長は会長に事故のあった場合、その職務を代行する。会計監事は会計の監査を行う。幹事は会長、副会長を補佐し、会務を処理する。

第5 総 会

第8条 総会は毎年1回開催する。

第6 事 業

第9条 本会は会誌「水曜会誌」を発行する。

第10条 本会はその他本会の目的を達成するに必要な事業を行う。

第7 経 費

第11条 本会の経費は会費、寄付金その他の収入により支弁する。

第8 会 則 変 更

第12条 本会の会則は総会の議決を経て変更することができる。

2. 講演会

「京都帝国大学水曜会所蔵日本刀の保存について」

京都大学助教授 富井洋一氏

「守ろう地球めざそう宇宙」

宇宙開発事業団 菊山紀彦氏

講師の菊山紀彦氏は宇宙開発事業団種子島宇宙センター所長、筑波宇宙センター所長を歴任され、日本における宇宙開発の第一人者として活躍してこられた。本講演は出席者に多大の感銘を与えたことを特筆したい。その講演の要旨は以下の通りである。

講演要旨

守ろう地球めざそう宇宙

宇宙開発事業団 菊山 紀彦

1998年10月、77歳のジョン・グレン宇宙飛行士はスペースシャトルに乗って36年ぶり、2度目の宇宙飛行に旅立った。1962年2月、ジョン・グレン宇宙飛行士は1人乗りの宇宙船「フレンドシップ7」で地球を3周した。スペースシャトルの飛行中に行われた軌道上記者会見で、ジョン・グレン宇宙飛行士は「36年前は宇宙船が狭かったので、宇宙の無重力状態を楽しむことはほとんどできなかったが、今回のスペースシャトルでは無重力状態の楽しさを充分に味わっています」と語った。

ジョン・グレン宇宙飛行士の最初の宇宙飛行は、米ソの冷戦の中で米国の国家の威信を賭けて行われた。冷戦が終わった現在では宇宙開発は世界各国が協同して行われている。

そのような協同作業の頂点が「国際宇宙ステーション」計画である。米、ロシア、欧州、カナダと日本の世界16カ国が協同して、高度400kmの軌道上に2室の「居住モジュール」と7室の「実験モジュール」、2個の「補給モジュール」を備えた恒久的な有人宇宙施設を建設しようとする計画である。

1998年11月、国際宇宙ステーションの最初のモジュール「ザリヤー」が無人で打ち上げられ、続いて12月に「ユニティー」が7人の宇宙飛行士と共にスペースシャトルで打ち上げられた。

宇宙軌道でスペースシャトルは「ザリヤー」とドッキングし、二人の宇宙飛行士が3回の船外活動を行って「ザリヤー」と「ユニティー」を結合した。1998年12月12日、7人の宇宙飛行士は結合された「ザリヤー」と「ユニティー」の室内に入り、国際宇宙ステーションの最初の一歩が踏み出された。

現在「ザリヤー」と「ユニティー」は無人で高度400kmの軌道を周回しているが、このあと食事、睡眠、トイレなどの居住機能を持った「サービスモジュール」が打ち上げられ結合されると、国際宇宙ステーションに3名の宇宙飛行士が常時滞在できるようになる。

日本が提供する実験モジュールの打ち上げは2001年に予定されている。

2005年に国際宇宙ステーションが完成すると、6~7名の宇宙飛行士が6ヶ月ごとに交替しながら、10年以上にわたって滞在し、地球観測、天体観測、材料実験、生命実験などを行うこと

になっている。

日本人宇宙飛行士も毎年一人の滞在が予定されている。

1999年1月、ジョン・グレン宇宙飛行士と共にスペースシャトルで飛行した船長のブラウン宇宙飛行士、二度目の宇宙飛行となった向井千秋宇宙飛行士ら7人の乗組員を東京に迎えて歓迎会が開かれた。その席上でジョン・グレン宇宙飛行士は「宇宙から地球を見ると、地球を取り巻いている大気の層があまりにも薄いことに驚かされます。地球をバスケットボールとすれば、それをバケツに浮かべてくるりと廻したとき、ボールの表面にできる水の膜が大気の厚さです」と語ってくれた。

われわれが暮らしている現代文明は科学と技術を利用してめざましい発展をとげてきた。1903年、ライト兄弟が初の動力飛行に成功したが、それから66年後、1969年に人類が月に降り立っていた。そしていま宇宙ステーションを建造するまでにいたった。

その一方で現代文明は地球環境を急速に破壊しつつある。宇宙から地球を観測すると環境破壊が想像以上の規模で急速に進んでいることがわかる。南極の上空には南極大陸をすっぽりと覆うほどのオゾンホールが生まれている。アマゾン川流域をはじめ、地球上の熱帯雨林は毎年、九州ほどの面積が伐採され消滅している。地球の陸地の三分の一がすでに砂漠化し、砂漠は毎年拡大を続けている。

われわれの文明が今後も順調な発展を続ければ、150～200年後、人類は宇宙空間に人工の都市「宇宙コロニー」を建造し完全に宇宙人へと進化する可能性を秘めている。

1927年、リンドバーグが大西洋を横断して英雄となってからわずか5、60年後には航空機による世界旅行は日常茶飯事となった。科学技術は夢のような未来を実現させる魔法のような力を持っているのである。

われわれの文明がこの薄くはない大気層を守り地球と共生することができたとき、われわれの文明は永続でき、宇宙人への進化というバラ色の夢を150年後の子孫にプレゼントできるのである。

③ 懇親会

小野会長の挨拶ののち、近藤良夫名誉教授の乾杯音頭で夜の7時から始まり、9時過ぎまで実に賑やかな親交を暖めかつ情報を交換する場となった。また出席者のスピーチとして年令層別に、最長老の高嶋 宏氏(昭和15冶金卒)、新日鐵常務取締役月志郎氏(昭和40年資源卒)、衆議院議員中塚一宏氏(平成2年冶金)にお願いしたが、それぞれユニークかつ有意義な話しに拍手喝采であった。

最後に本大会では、東京近辺に在住の若い水曜会会員10数名に受付、大会の進行の世話をしていただいた。謝意を表したい。

会員消息

**昭和37年鉱山学科卒クラス会
「東北旅行」**

平成12年10月7~9日、卒業以来初の2泊3日のクラス会で岩木山、八甲田山、八幡平などを巡り、紅葉温泉、ドライブ、カラオケ、囲碁等を楽しみながら、昔に返って親睦を深めた。従来、クラス会は1、2年毎に京都か東京で開催していたが、8月に東京で開催の折りに話がでて、急遽実現した。まだまだ現役

が多い中で、関西の3名を含めて9名が参加。

10月7日JR盛岡駅集合。レンタカーを借り2台の車に分乗。現地、秋田県大館市駐在の青江良和君（元・三菱マテリアル、現・日本アンホ火薬製造（株）常務）の先導で、スタート。温泉に2泊。

10月9日には「マイインランド尾去沢」で旧鉱山の坑内を見学し、八幡平では「地熱発電所」を訪れたりして学生時代の見学実習旅行を、彷彿と思い出すひとときもありました。

(片岡 記)



左側／左より丸岡政彦、井出謙三、常盤健、日比野敏

右側／前より片岡隆昭、山口善郷、大迫省治、菅原弘志、青江良和

卒業 55 周年記念懇親会（昭和 20 年冶金学科卒）

去る平成 12 年 8 月 29 日午後 6 時に、栄家に懐かしい顔ぶれが揃い、川床を吹きぬける涼風に杯を傾けながらの語らいは、夜の更けるまで尽きることはませんでした。

翌 30 日は朝一番に南禅寺の瓢亭に集合、さすが 300 年の伝統の流れを感じさせる静寂の趣をたたえ、打水に濡れた苔、風雪に耐えぬいた木々に囲まれ、一同心洗われる思いで、

朝がゆを戴きました。食後バスで大原をへて比叡山に向かい、久方ぶりに根本中堂を拝観、1200 年の法灯を守りつづけた名刹は私達を圧倒するものがありました。一同で記念撮影の後、バスにて下山し午後 1 時に京都駅に到着しました。

今回は位崎未亡人が初めて参加され、ご婦人方 7 名を含め総勢 21 名で、近況報告や京都時代の思い出話など、時の経つのも知らず、一同名残りを惜しみつつ、次回洛塵会での再会を約して散会しました。

（幹事：近藤、高井、下川、梅原記）



洛塵会

平成 12 年 8 月 30 日

於根本中堂

逝去会員				
平成3年1月	近藤 裕史	昭58・金	平成12年3月6日	西山 悟 昭28・治
平成4年	久保田賢二	昭42・治	平成12年4月23日	新居 充暉 昭20・治
平成10年2月	森内 明郎	昭34・治	平成12年4月24日	松野 望 昭20・治
平成11年1月17日	笠原 文雄	昭16(3月)・治	平成12年5月3日	松岡 貞勝 昭8・採
平成11年1月20日	亀井 清	元教官	平成12年6月1日	油口 良弘 昭41・金
平成11年1月24日	野田 雅男	昭16・治	平成12年6月1日	増田 惣一 昭33・治
平成11年2月16日	清水 英男	昭37・治	平成12年6月1日	高野 国夫 昭24・鉄
平成11年3月15日	坪田 浩二	昭47・資	平成12年7月9日	大西 与三 昭28・鉄
平成11年5月9日	後藤 重夫	昭37・鉄	平成12年7月26日	花田 佳典 平11・工
平成11年5月21日	山際 幾雄	昭29・旧治	平成12年8月7日	竹崎 徳男 昭25・鉄
平成11年7月8日	福田 次郎	昭22・鉄	平成12年8月9日	孝橋 要二 昭23・治
平成11年11月12日	舛林 善尚	昭28・治	平成12年8月12日	福岡 利和 昭27・治
平成11年11月19日	福本 徳長	昭22・鉄	平成12年10月13日	柏木 健 昭22・治
平成12年2月	伊東 潤二	昭21・鉄	逝去年月日不明	津田 義夫 昭14・採
平成12年2月16日	中林 一郎	昭35・鉄	逝去年月日不明	足立 求 昭36・鉄
平成12年2月23日	平田 茂仁	昭55・資	ご逝去を悼み、ご冥福をお祈り申し上げます。	

平成11年度水曜会誌編集委員

委員長	足立 裕彦	塙田 和彦	酒井 明
幹事	乾 晴行	岡口 秀治	上原 一郎
委員	菊地 潮美	下 東 昭浩	畠野 等
	小出 康夫	岡本 浩志	西山 孝
	工藤 壽美生	河原 敏博	
	村上 建夫	喜多 治之	野世 溪卓也

平成13年3月10日印刷 平成12年3月15日発行

編集兼
発行者 小野 勝 敏
印刷者 小林 生 男

日本印刷出版株式会社

553-0006 大阪市福島区吉野1丁目2番7号

電話 大阪(6441)6594~7

FAX 大阪(6443)5815

発行所 京都大学工学部

水曜会

606-8501 京都市左京区吉田本町

振替口座 京都 01090-8-26568 電話 (075) 753-7531 (大代表)

銀行口座 第一勵業銀行百万辻支店

普通 476-1242526 水曜会



12

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL
ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Review

Current Status and Trends of Microelectronics Packaging Technology	Tkashi NUKII.....	257
Smooth Motion and Transfer in a Vacuum as Super Clean Circumstance	Masahiro TOSA.....	272
The Present and Latest Technological Development in Oxigen Free Copper	Kenji YAJIMA Masato KOIDE Haruhiko ASA0	279
Suiyōkwai Information		291
Letters to Editor		297

Kyoto University
Japan