接点材料の最近の動向

佐 藤 充 典*

1. はじめに

電気接点は、電力用、自動制御用、情報伝達用の開閉器などの接触機器として広く用いられ、小型化、高精度化とともに信頼性の向上が要求されている。接触機器は電気回路の中で数少ない機械的な可動部分であり、機器の障害の多くがこの部分に起因していることをわれわれは日常数多く経験している。この接触機器の性能および寿命を決定するものは、接点であるといわれている。接点には、接触抵抗の安定性、耐溶着性、耐消耗性、耐アーク性などにすぐれていることが要求される。これらの特性には、材料の物理的、化学的諸因子、回路条件、雰囲気などが複雑に作用するために、多くの研究および解説もあるが十分な解析がなされていない部分が多い^{(1)~(9)}。

ここでは、代表的接点材料の特徴と用途について述べ接点材料の選定に資するとともに、接点の最近の動向と、しばしば問題になる接点障害とその対策について概説する。

2. 代表的接点材料の特徴と用途

表1には、代表的な接点材料の物理的性質、用途、特徴をまとめて示す^{(6)~(14)}。材料は構成元素別にAu系、Pt系、Pd系、Ag系などに分類した。接点特性およびその現象の解析に用いる物理的な諸性質は、多くの場合近似値で十分である。融解温度は、溶着現象と密接な関係をもつ固相線の値で示した。なお、軟化温度は、融解温度の約40%である。導電率は、Cu($1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)を100とした割合(IACS%)で表わした。比抵抗 ρ は、

$$\rho = \frac{1.7 \times 100}{IACS\%} (10^{-8} \Omega \cdot m) \quad (1)$$

から近似的に求められる。熱伝導率 κ については、多く

の測定値が報告されているが、熱に関する測定の困難さのためかばらつきが大きい。したがって、Wiedemann-Franzの式

$$\kappa = \frac{LT}{\rho} \quad (2)$$

ここで、 $L = 2.45 \times 10^{-8} (V/K)^2$

を用いるのが適当と考えられる。また、比熱 c は、接点の場合デバイ温度より高温で使用されるので、

$$c = \frac{25 \times 10^3}{\text{平均原子量}} (J/(kg \cdot K)) \quad (3)$$

から求められる。硬さは、焼鈍、加工、析出硬化などによって変化する範囲によって表わした。引張り強さ σ は、接点材料の場合

$$\sigma \approx 3 \text{ Hv (MPa)} \quad (4)$$

の近似が目安になると思われる。

3. 接点に対する最近の動向

近年、貴金属の高騰もあって、省貴金属化と代替材料の開発をはかり、かつ機器の性能を維持するために種々の対策がなされつつある。

(1) 省貴金属化

接点合金の貴金属含有量を低くし、より安価にするために、AgをAg-CuあるいはAg-Ni、PdをPd-Ag、AuをAu-Ag、Pt-IrをPd-Ru、AuめっきをSnめっきなどにする。また、接点性能への影響が少ない元素の添加によって、増量剤的な役割を期待する研究もなされている。さらに、接点を無垢で用いていたものをインレイ、エッジレイ、オーバーレイなどのクラッドあるいは部分めっきにして、接触部分のみを貴金属あるいはその合金とする⁽¹⁵⁾。このように省貴金属化された接点の性能の安定化のためには、多層クラッド、フラッシュめっき、酸洗いなどで、表面を貴金属化するなどが行われている。

(2) 内部酸化によるAg-酸化物系接点

負荷が大きく、寸法の大きな接点には、Ag地中に金属、化合物、酸化物を分散させた合金が用いられて

* 金属材料技術研究所電気磁気材料研究部主任研究官
Latest Tendency on Electrical Contact Materials; Mitsunori Sato (Electronic Materials Div., National Research Institute for Metals, Tsukuba, Ibaraki)
1981年2月4日受理

表 1 代表的接点材料の物理的性質, 用途, 特徴.

組 成 (質量%)	融解 温度 (固相) (K)	導電率 IACS (%)	硬さ, Hv	密度 10^3 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	負荷	用 途	摘 要
Au	1336	75	25~65	19.3	軽負荷	コネクタ, ロケット用接点, 音響用接点など.	粘着し易い. めっき接点として主 に用いられる. 耐食性にすぐれ, 接触抵抗が低く安定である. ノイ ズが少ない. 表面に硫酸アンモニ ウムが生成され易い.
90Au-Ag (GS 合金, 3 号合 金)	1320	16	30~90	17.8	軽負荷	通信機用継電器, 交換器, 電圧調整器, スリップリン グ, ブラシ, ポテンショメ ータなど.	耐食性にすぐれる. 耐硫化性には 70Au 以上が必要である. Au よ り耐粘着性が改善される.
60Au-Ag (ネイオロ 28)	1285	19	90~ 140	14.9			
69Au-25Ag-Pt (PGS 合金, 1 号 合金)	1350	11	60	16.0	軽負荷	通信機用継電器, 制御機器, スイッチ, ドライ回路用接 点など.	耐食性にすぐれ, 接触抵抗が低く 安定である.
70Au-10Ag-5Pt- 14Cu-1Ni (ネイオロ G)	1228	13	300~ 390	15.9	軽負荷	摺動接点, VTR 用スリッ プリング, マイクロモータ 用ブラシ, 摺動用抵抗など.	析出硬化型. 耐摩耗性, 耐食性に すぐれる. バネ性が高い. 接触 抵抗が安定である.
Pt	2043	16	38~ 110	21.4	軽負荷	通信機用継電器, 信号機器, 高級計測器, 制御器, 高信 頼性スイッチ, 火災報知器 など.	有機性ガスによりポリマーが生成 され, 活性化され易い. 耐食性に すぐれる. 接触信頼性にすぐれ る.
90Pt-Ir	2060	7.0	120~ 200	21.6	軽負荷	ガバナ接点, 航空機およ び自動車フラッシャー, 警 報器, 電圧調整器, スイッ チなど.	耐食性に極めてすぐれる. 機械的 強度が大きく衝撃に耐え, 移転量 も少なく, 耐アーク性にすぐれ る. 接触抵抗も安定である. 30Ir を越えると加工が困難になる.
70Pt-Ir	2250	4.9	280~ 400	21.7			
Pd	1823	16	40~ 110	12.0	軽負荷	電話器, 継電器, 通信機用 接点など.	Pt の代替として用いられる. 触媒 性がある. 耐食性にすぐれるが, 620 K 以上で酸化する. 開閉頻度 が高く接触信頼性が特に要求され るところに用いられる.
60Pd-Ag	1590	4.0	90~ 200	11.4	軽負荷	継電器, 交換機, 工業計器, 信号装置, ガバナ接点, サーモスタット, ポテンシ ョメータ, 摺動材など.	Pd の代替として 60Pd-Ag が多く 用いられる. Pd の含有によって Ag の耐硫化性が改善され, 40Pd 以上で効果が顕著である. Ag の 含有によって触媒性が改善され る.
40Pd-Ag	1510	3.8	100~ 180	11.1			
40Pd-30Ag-Cu	1340	5.0	200~ 450	10.6	軽負荷	高弾性摺動材, ブラシ, 継 電器, ガバナ接点など.	析出硬化型. 高弾性である. 耐酸 化性が Pd-Ag より劣る.
90Pd-Ru	1960	4.8	160~ 340	12.0	軽負荷	ガバナ接点, バイブレー タ, 電圧調整器, スイッチ など.	析出硬化型. Pt-Ir の代替として 用いられる. 耐食性にすぐれる. 移転, 消耗が少なく, 安定な接触 を行う. Pd より接触抵抗が高い. Ru の含有量が増えると加工が困 難になる.
45Pd-30Ag- 20Au-5Pt (バリネイ M)	1644	4.3	100~ 150	12.8	軽負荷	バイブレータなど.	Pt あるいは Pd の代替として用い られる. 耐食性にすぐれる. 高温 酸化に強い.
42~44Pd-38~41 Ag-16~17Cu-0~ 1Pt (バリネイ 6)	1350	6.0	300	10.9	軽負荷	低電圧直流回路用接点, バ イブレータなど.	析出硬化型. 耐食性および耐摩耗 性にすぐれる.
35Pd-30Ag-10Pt- 10Au-14Cu-1Zn (バリネイ 7)	1308	5.4	270~ 410	11.9	軽負荷	ポテンショメータ, プリント 回路用摺動接点, 低電圧 直流回路用開閉接点など.	析出硬化型. 硬さ, 引張り強さ, ばね性は Cu-Be に匹敵する. 耐食 性にすぐれる. 耐摩耗性にすぐれ, 低接触力でも安定な接触状態が保 たれる. 加工硬化が高い.

(次頁へつづく)

組 成 (質量%)	融解 温度 (固相) (K)	導電率 IACS (%)	硬さ, Hv	密度 10^3 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	負荷	用 途	摘 要
Rh	2230	35	100~ 110 めっき 700~ 900	12.4	軽負荷	摺動接点, リードスイッチ, コネクタなど.	耐食性, 耐摩耗性にすぐれる. 接 触抵抗が安定である. 870 K 以上 で酸化する. めっきが多用される.
Ru	2520				軽負荷	リードスイッチなど	めっき接点として今後使用される 可能性がある.
Sn	505				軽負荷	コネクタなど	めっきが多用される. ウィスカー が発生し易い. コネクタの場合挿 抜力が大きい.
Ag	1234	106	25~45	10.5	軽~ 中負荷	電話機, 継電器, マイクロ リレー, スイッチ, コネク タ, サーモスタット, プラ ズソケット, ロータリース イッチなど.	代表的接点材料, めっき接点とし ても用いられる. 耐硫化性に劣 る. 硫黄濃度数 ppm 以上でウィ スカーが発生する. 絶縁体表面に マイグレーションを起こし易い. 加工性にすぐれ, クラッドが容易 である. 時効軟化し易く, 機械的 強度に劣る.
92.5Ag-Cu (スターリングシ ルバー)	1073	82~98	43~ 170	10.4	軽~ 中負荷	サーモスタット, 継電器, 家庭用スイッチ, 自動販売 機, 過負荷継電器, マイク ロモータ整流子, スリッ ピング, ロータリースイ ッチなど.	8Cu 以下では析出硬化型. 耐酸化 性および耐食性に乏しいが, 耐摩 耗性があり, 摺動をともなう接点 にも適する.
90Ag-Cu (コインシルバー)	1052	82~98	43~ 113	10.3			
60Ag-Cu	1052	80~90	90	9.8			
92Ag-6Cu-Cd 77Ag-Cd-Ni	1070 1100	43 30	65 120	10.2 10.0	軽~ 中負荷	電圧調整器, スイッチ, サ ーモスタット, バネ接点, 摺動用フィンガー, 過負荷 継電器, 制御用継電器など.	接触抵抗が比較的安定である.
95Ag-CdO	1233	88	50~ 110	9.5~ 10.3	軽~ 重負荷	継電器, 制御器, サーモス タット, 電圧調整器, 遮断 器, 起動器, 電磁開閉器, ブレーカーなど.	中負荷領域で広く用いられてい る. 耐溶着性, 耐消耗性にすぐれ, 再点弧も起こし難い. 直接のろう 付け, 溶接が困難である. 大きな 遮断電流のところでは Sn などを 添加した合金が用いられる. 内部 酸化法あるいは焼結法によって製 造される.
92Ag-CdO	1233	80	50~ 110				
87Ag-CdO	1233	73	65~ 130				
85Ag-CdO	1233	65	115				
Ag-SnO ₂ 系 Ag-ZnO 系 Ag-CuO 系 Ag-Sb ₂ O ₃ 系 Ag-La ₂ O ₃ 系 Ag-(Sn-In) ₂ O ₃ 系	1233 1233 1233 1233 1233 1233				軽~ 重負荷	小型遮断器, 電磁開閉器, ブレーカーなど.	主に Ag-CdO 系の代替として開 発されたものである. 耐溶着性は 酸化物含有量の増加とともに向上 する. 第3, 第4元素の添加によ り特性の改善が可能である. 内部 酸化法あるいは焼結法によって製 造される.
90Ag-Ni	1233	91	65~ 115	10.3	中~ 重負荷	電圧調整器, 継電器, サー モスタット, 電磁開閉器, 遮断器など.	接触抵抗が低く, 耐消耗性にすぐ れるが, 耐溶着性が十分でない. ヘッダー加工ができる. 焼結法に よって製造される.
80Ag-Ni	1233	83	80~ 135	10.1			
95Ag-C 90Ag-C	1234 1234	60 50	30~50 30~50	8.7 7.0	中~ 重負荷	信号継電器, 電圧調整器, ブラシ, ブレーカーなど.	耐溶着性にすぐれる. 接触抵抗が 安定である. 耐消耗性に劣る. 自 己潤滑性がある. 焼結法によって 製造される.
65Ag-W 35Ag-W	1230 1230	75 52	90 120	12.5 14.9	重負荷	遮断器, 電磁開閉器, 重負 荷スイッチなど.	耐アーク性, 耐溶着性にすぐれる. 焼結法によって製造される.
60Cu-W 30Cu-W	1355 1355	72 55	130 160	11.2 14.5	重負荷	油中遮断器, 油中接触器, 変圧器タップなど.	油中使用に適する. 耐溶着性にす ぐれる. 耐衝撃性が大きい. 接触 抵抗が変動し易いので摺動を多少 ともなうとよい.

組成 (質量%)	融解 温度 (固相) (K)	導電率 IACS (%)	硬さ, Hv	密度 10^3 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	負荷	用 途	摘 要
W	3673	31	300~ 500	19.2	重負荷	電圧調整器, バイブレータ, 点火装置など.	耐溶着性, 耐消耗性, 耐アーク性にすぐれるが接触抵抗が高い. 低電流の多断続回路に用いられる. 酸化し易い.
C	3973	0.12		2.2		ブラシなど.	溶着しない. 接触通電が確実である. 耐消耗性に劣る. 摺動接点として多用される.

いる。ここで、内部酸化による Ag-酸化物系接点が注目され、Ag-CdO 系接点が広い範囲で実用され、Ni, Sn などの第 3 元素の添加によってさらに性能が改善されている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。接点性能の改善によって接点の寸法を小さくする要望と、Cd の人体への影響が問題視されることから、Cd を含まない Ag-酸化物系接点合金の開発研究が続けられている。Ag-酸化物系接点には、耐溶着性、耐消耗性、接触抵抗の安定性のほかに耐アーク性が要求され、これらの特性は酸化物の種類とその分散状態に支配される^{(11)~(14)(16)(17)}。これらの条件を考慮すると、酸化物にはつぎのような諸性質が要求される。(a) Ag とかなり広い組成範囲にわたって、溶解法によって合金ができる元素の酸化物である。(b) 酸化物になる元素の広い合金組成範囲で、内部酸化が可能である。(c) Ag との親和力が小さく反応しにくい。(d) 水溶性でなく、吸湿性が小さい。(e) 接触面への酸化物の堆積を防ぐため、蒸気圧が高く昇華し易い。(f) 熱電子の放出量が増加して再点弧を起こさないために、融解温度あるいは昇華温度が低い。以上の条件をほぼ満たすのは、Cd, Zn, Sn, In, Te, Cu, Sb, Mn などの酸化物である⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。これらの酸化物が Ag 地中に均一に分散すれば、その合金はすぐれた接点性能を示すことが期待される。しかし、Cd をのぞくこれらの元素と Ag との 2 元合金を内部酸化させた試料は、広い組成範囲にわたって Ag 地中に酸化物が分散する組織が得られず、針状、層状あるいは粒界に酸化物が析出し、要求される接点性能を発揮し得ない。したがって、多元合金の内部酸化によって酸化物の均一分散をはかった Ag-(Sn-In) O_x 系、Ag-(Zn-Te) O_x 系、Ag-(Zn-Sn-Te) O_x 系、Ag-(Zn-Sn-In-Te) O_x 系などの開発がなされている^{(11)~(14)(19)(20)}。Ag-(Sn-In) O_x 系においては、Ag-CdO 系より接点の寸法を小さくできるとの報告もあり、接触抵抗がやや高いが実用の段階に入っている。

内部酸化によって析出する酸化物粒子の分散状態は、合金の組成と内部酸化条件によって変化し、溶媒と溶質を定めると、析出する酸化物粒子の大きさは、溶質濃度および内部酸化温度が低く、酸素圧の高いほど小さくなる。さらに、酸化が内部に進むにしたがって、析出する酸

化物粒子が粗大化し、酸化層中心部に酸化物粒子のほとんど存在しない希薄層が形成される。酸化物粒子の分散状態が内部酸化層内の場所によって異なると、開閉による消耗の進行とともに接触個所の酸化物粒子の分散状態が変化し、耐溶着性などの特性に影響を与える^{(7)(16)(21)~(24)}。酸化物粒子の分散状態を内部酸化層全域にわたって均一に制御できれば、特性が安定し、信頼性が向上するとともに接点の寸法も小さくすることができる。雰囲気酸素圧を時間とともに連続的に変化させて、片面から内部酸化させると、酸化物粒子の大きさが表面近傍から内部まで均一になる。すなわち、一定酸素圧 P_a で内部酸化するとき、表面からの深さ X_a の位置に分散析出する酸化物粒子の大きさに、内部酸化層全域の粒子がなるようにするためには

$$P = \frac{K^4 P_a^2}{4 X_a^4} t^2 \quad (5)$$

のように、酸素圧 P を内部酸化時間 t とともに連続的に変化させればよい。ここで、 K は、内部酸化層生成の速度定数で、組成および内部酸化温度によって定まる⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

4. 接点障害現象とその対策

(1) Ag の硫化とウィスカー

Ag は、酸素に対する親和力が小さく、大気中 390 K を越えると酸化銀が存在できない。しかし、硫黄に対する Ag の親和力は著しく大きく、室温において微量の H_2S , SO_2 などによって容易に硫化されて、 Ag_2S の皮膜あるいはウィスカーを生長させる。

硫化膜の成長速度は、濃度、湿度、温度、光、表面の状態などの影響を大きく受ける。この硫化膜は、硬度が低く、かなりの導電率をもつといわれている。しかし、軽負荷接点においては、これが接触障害の原因になる。

図 1 には、Pd あるいは Au を含有させることによって、耐硫化性を改善させた Ag-Pd および Ag-Au 合金の硫化皮膜の厚さと硫黄雰囲気中放置時間との関係を示す⁽²⁷⁾。Pd の方が Au より耐硫化性に対する添加効果が大い。30 質量%Pd 以下の合金では、十分な耐硫化

性を示さないが、40 質量%Pd を越える合金は、すぐれた耐硫化性を示す。

Ag の硫化の過程でしばしばウィスカーが生長し、これが接触障害の原因になる場合がある。写真 1 には、硫化銀のウィスカーを示す。ウィスカーの結晶体は、 Ag_2S が主体のアカントタイト単斜晶型の単結晶 ($a=9.52 \times 10^{-10} \text{ m}$, $b=6.93 \times 10^{-10} \text{ m}$, $c=8.29 \times 10^{-10} \text{ m}$, $\beta=2.162 \text{ rad}$) で、5% 以下の Ag_2O が含まれていることが知られている⁽⁸⁾⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。このウィスカーは、ppm オーダーの濃度になると発生するケースが多く、その長さは、図 2 に示すように、成長時の温度によって異なる⁽²⁹⁾。ここで、保護継電器のパッキン材のネオプレンに含まれた硫黄分によってウィスカーが発生し、接点が開いてもウィスカーによって回路が短絡された例もある⁽³⁰⁾。Ag 系接点を使用するような開閉器においては、雰囲気中に硫黄分が含まれないように、絶縁体など周囲の部品材料の選択に十分な配慮をする必要がある。また、Ag-Pd, Ag-Au 接点に

図 1 硫化皮膜の厚さと時間の関係⁽⁵⁾⁽²⁷⁾。
 $\text{N}_2-200_2-6 \text{ ppbS}_8$ 雰囲気, 温度 303 K

写真 1 硫化銀のウィスカー。
硫黄粒子を封入した雰囲気, 温度 500 K,
時間 1800 s

図 2 ウィスカーの成長におよぼす温度の影響⁽²⁹⁾。
 $7 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 中に $0.5 \sim 100 \times 10^{-6} \text{ kg}$ の硫黄粒子を封入した雰囲気

するか、Au, Rh などのめっきをして耐硫化性を向上させると、ウィスカーの発生を防ぐことができる。

(2) Ag マイグレーション (Ag 移行)

電気機器が小型化されるにともない、Ag 電極に直流が印加されるとき、電極間の絶縁体表面に Ag のマイグレーションによって樹枝状 Ag が生長し、絶縁劣化を起こす障害がしばしば現われている。これはフェノール系樹脂を積層あるいはモールドとして使用する場合、特に発生しやすいといわれている。このマイグレーション現象は、電気分解作用によるものである^{(31)~(35)}。写真 2 に示すように、Ag 電極間に直流電圧が印加され、絶縁体に水分が吸着すると、Ag は陽極面で、 $\text{Ag} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ + e^-$ に電離し、陰極方向に移動する。この Ag^+ は途中絶縁体に含まれる OH^- あるいは水分の分解による OH^- と結合して、 $\text{Ag}^+ + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{AgOH}$ となる。この AgOH は非常に不安定であり、 $2\text{AgOH} \rightleftharpoons \text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ となって陽極近傍に析出する。さらに Ag_2O は、酸化物の生成自由エネ

写真 2 Ag のマイグレーション。
セロハン紙, 直流電圧 45 V, 湿度 98%,
温度 305 K, 時間 $2.16 \times 10^4 \text{ s}$

ルギーが、 $-13 \times 10^3 \text{ J/mol}$ より小さいために容易に分解され、

の過程で、 Ag_2O と Ag のコロイドから最終的に Ag^+ となり陰極方向に移動して、陰極で放電して Ag となり、陽極に向って樹枝状に成長する。この現象は Ag および Ag 合金独特のものであり、 Cu , Sn , Ni , Au などの電極材料では特殊な条件をのぞいて発生しない。マイグレーションを防止するためには、つぎのような対策が行われている。(a)めっきには Ag , Sn , Ni , Au , Rh などがある。 Sn にはウィスカー、 Ni には半田付け性の問題があるが、可能な場合は Ag めっきの代替として他のめっきにする。また、絶縁体と接する部分の Ag めっきを止める。バルクで用いる場合には、合金化が有効である。すなわち、10 質量%程度の Cu を含む Ag-Cu 合金にすることによって、マイグレーションを 0.1~1% 程度に抑制することができるという。(b)フェノール樹脂やセロファンなどの OH 基を含むものおよび親水性(吸湿性、水分の吸着など)の大きなポリエステル、ポリアミドなどは、マイグレーションを発生し易い。エポキシ樹脂は、 OH 基を含むが吸湿性が小さいので、フェノール樹脂よりマイグレーションが発生しにくい。これの発生しにくいジアリルフタレート、ポリカーボネート、ポリアセタール、ポリスチレンなどの樹脂にかえる。また、マイグレーションの発生し易い絶縁材料を止むを得ず使用する場合は、抑制能力の高いアクリル系、エポキシ系、イオン交換系などの樹脂を塗布する。(c)湿度は、図3に示すように、マイグレーションに大きく影響をおよぼす⁽³¹⁾。相対湿度が 70% を越すとマイグレーションが発生し易くなり、湿度の上昇とともに成長速度が大きくなるので、これらを考慮して防湿を行う。(d)電位傾度が大きくなるほどマイグレーションの成長速度が大きくなり、細長い樹枝状線が成長し易く、絶縁破壊に至るまでの時間

が短くなる。したがって、電位傾度が小さくなるように設計するなどの配慮が必要である。(e) SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- などのイオンを発生するようなガス、じんあい(吸湿するとかなり強い酸性)の付着は、マイグレーションが生長し易くなるので、雰囲気注意到意する。

(3) Sn めっきのウィスカー

接触部品には、接触の安定性(耐食性)と半田付け性を保持させるために、めっきがなされる場合が多い。近年コネクタなどにおいて Au および Ag めっきに代って、挿抜力の大きい欠点があるが、 Sn めっきが多く使われている。この Sn めっきにおいては表面にウィスカーが生長し、これが回路の短絡などの障害を発生させる事例が数多く報告されている。ウィスカーは、通常直径 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ m}$ の体心正方の単結晶で、断面は四角形で $\langle 001 \rangle$ および $\langle 101 \rangle$ 結晶軸が生長の方向である。このウィスカーの生長には、析出物およびめっき層中の応力が大きく影響をおよぼしている。これを防止するためには、つぎのような対策が行われている。(a)浴組成、浴温、電流密度に注意する。(b)めっき時に超音波をかけ、めっき層への水素の浸入を防ぐ。(c)黄銅系基板の場合、 Zn のめっき層への拡散を防ぐため Cu あるいは Ni の下地めっきをする。(d)光沢めっきは不純物が混入するのでなるべく無光沢めっきにする。(e)電気めっきの場合、薄いところで応力が大きくなるので、 $8 \times 10^{-6} \text{ m}$ 以上の厚さにする。(f)5 質量% Pb 程度の合金めっきにする。あるいは半田付けの問題がなければ、 Ni との合金めっきにする。(g)電気めっきより応力の小さい溶融浸漬にする。(h)450~470 K, 3.6 ks 程度の熱処理をする。(i)応力(内部、外部)がかからないようにする。(j)雰囲気ガスに注意する。(k)99.99%以上の純度のめっきにする。これらの対策は、一項目では十分でなく、可能ないくつかを組み合わせて行う必要がある^{(36)~(38)}。

(4) そ の 他

さらに、(a) Au 系接点の粘着⁽³⁹⁾。(b)白金族接点の触媒能によるポリマーの生成と活性化^{(40)~(43)}。(c)貴金属接点のメカノケミカル反応による酸化⁽⁸⁾⁽⁴¹⁾⁽⁴⁴⁾。(d) Au 接点表面での硫酸アンモニウム^{(45)~(47)}の生成などの現象は、接点障害の原因となる場合が非常に多いので十分な配慮が必要である。

5. お わ り に

今後、他の電子部品との対応から、ますます小型化、高精度化、省貴金属化が要求され、接点は、雰囲気および絶縁体など部品材料の影響をより大きく受けるようになると思われる。したがって、より信頼性の高い材料が開発されるとともに、使用目的に応じて最適な材料の選

図3 絶縁抵抗(マイグレーション)におよぼす湿度の影響⁽³¹⁾。
クラフト紙、直流電圧 45 V、温度 308 K

定ができるような環境試験も含めたデータの確立が期待される。なお、サイリスタなどのスイッチング素子へ移行できる部分もあるが、簡単な機構で回路を完全に開閉できることから、その使用はむしろ増加すると思われる。

文 献

- (1) R. Holm : *Electric Contacts Handbook*, Berlin, (1958).
- (2) F. L. Jones : *The Physics of Electrical Contacts*, Oxford, (1957).
- (3) 鳳 誠三郎 : 電気接点と開閉接触子, 金原出版, (1956).
- (4) J. D. Cobine : *Gaseous Conductors*, Dover Publications, New York, (1958).
- (5) 真野国夫他 : 接触部品の信頼性, 総合電子出版, (1976).
- (6) 坂本光雄 : 新しい接点材料, 工業日日新聞社, (1965).
- (7) 土屋金弥 : 電気接点技術, 総合電子出版, (1980).
- (8) ASM Committee on Electrical Contact Materials : *Metals Handbook*, (1955), 801.
- (9) 佐藤充典, 山本博信, 奈良 喬 : 電気材料マニアル, 新技術開発センター, (1978), 583.
- (10) K. E. Pitney : *NEY Contact Manual*, (1973).
- (11) M. Poniatowski, K. H. Schröder and E. D. Schulz : Proc. 8th Intern'l Conf. Electrical Contact Phenomena, (1976), 353.
- (12) M. Iida : Proc. 8th Intern'l Conf. Electrical Contact Phenomena, (1976), 347.
- (13) 佐藤充典, 土方政行, 森本一郎 : 日本金属学会誌, **36** (1972), 410, 765, 770.
- (14) 五十嵐 廉他 : 日本金属学会誌, **44** (1980), 378, 501.
- (15) 阪本睦夫, 仲村恭衛, 島内義風 : 継電器研究会資料 287-3 (1980).
- (16) 森本一郎, 佐藤充典, 土方政行 : 日本金属学会誌, **32** (1968), 597.
- (17) 五十嵐 廉他 : 日本金属学会誌, **44** (1980), 1217, 1224.
- (18) M. Sato, M. Hijikata and I. Morimoto : Proc. 8th Intern'l Conf. Electrical Contact Phenomena, (1976), 19.
- (19) 佐藤充典, 土方政行 : 日本金属学会誌, **43** (1979), 1095.
- (20) 土方政行, 佐藤充典 : 日本金属学会誌, **44** (1980), 569.
- (21) E. Vinaricky and U. Harmsen : *Metall*, **25** (1971), 749.
- (22) 後藤正治, 幸田成康 : 日本金属学会誌, **32** (1968), 334.
- (23) 樺山資章, 上條栄治 : 日本金属学会誌, **32** (1968), 1204.
- (24) 道上 修, 山本昭一 : 日本金属学会誌, **41** (1977), 551.
- (25) C. Wagner : *Z. Elektrochem.*, **63** (1959), 772.
- (26) 佐藤充典 : 日本金属学会誌, **44** (1980), 576.
- (27) W. H. Abbott : Proc. Holm Semi. Electric Contact Phenomena, Illinois Institute of Technology, (1969), 1.
- (28) 大鉢 忠 : 固体物理, **7** (1972), 340; **8** (1973), 225.
- (29) 春日部 進, 田中 稔 : 電子通信学会技術研究報告, EMC80-19 (1980), 1.
- (30) 神谷昌宏, 矢野義章 : 電子通信学会技術研究報告, EMC78-44 (1979), 19.
- (31) G. T. Kohnmann, H. W. Hermance and G. H. Downes : *Bell Syst. Tech. Jour.*, **34** (1955), 1115.
- (32) 小柳進一 : 電気化学, **25** (1957), 489.
- (33) E. Tsunashima : *IEEE Trans. Components, CHMT-1* (1978), 182.
- (34) H. M. Naguib and B. K. MacLaurin : *IEEE Trans. Components, CHMT-2* (1979), 196.
- (35) 森田好彦 : OHM, 24 No. 4 (1979), 84.
- (36) 清水直十 : 電気学会金属材料研究会資料, MR-75-5 (1975).
- (37) 枝並範治 : 電気学会金属材料研究会資料, MR-75-4 (1975).
- (38) 二瓶公志 : 電気学会金属材料研究会資料, MR-75-3 (1975).
- (39) H. C. Angus : *J. Phys. D*, **2** (1969), 831.
- (40) H. W. Hermance and T. F. Egan : *Bell Syst. Tech. Jour.*, **37** (1958), 739.
- (41) 下里敏一 : 日本金属学会誌, **36** (1972), 610.
- (42) 鈴木 元, 長山忠洋, 宮田裕之, 園 靖之助 : 電子通信学会技術研究報告, EMC79-35 (1979), 37.
- (43) 竹内豊三郎 : 表面, **15** (1977), 73.
- (44) 久保輝一郎 : メカノケミストリー概論, 東京化学同人, (1971).
- (45) 矢野総一, 岸本保夫, 宮田裕之 : 電子通信学会技術研究報告, R75-38 (1976), 35.
- (46) 鷺見久美子, 松村 弘, 石井篤雄 : 電子通信学会技術研究報告, R75-39 (1976), 45.
- (47) 荻野義定 : 日本金属学会会報, **17** (1978), 986.