T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	銅基粉末成形砥石に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	吉川昌範
Author(English)	
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第329号, 授与年月日:1970年10月21日, 学位の種別:論文博士, 審査員:浅枝 敏夫
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第329号, Conferred date:1970/10/21, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

347

銅基粉末成形砥石に関する研究

吉川昌範

東京工業大学 282917

銅基粉末成形砥石に関する研究

目　次

緒　言　1

第１章　銅基粉末の成形および焼結に関する研究　6

１．１　供試粉末　6

１．２　銅圧粉体の力学的性質　11

1.2.1　粉体の圧縮力とそれに直角な方向へ伝わる力の関係

1.2.2　粉体の圧縮力と剪断力の関係

1.2.3　粉体の圧縮力と押型材料の上をすべり出すときの摩擦力の関係

1.2.4　粉体の圧縮力と外型の各部へ伝わる力の関係

1.2.5　粉体の圧縮力と圧粉体密度の関係

1.2.6　圧粉体密度分布の力学的解析

１．３　銅圧粉体の密度分布　28

1.3.1　実験方法　1.3.2　実験結果および考察

1.3.3　まとめ

１．４　銅基圧粉体の焼結時の寸法変化　42

1.4.1　実験方法　1.4.2　銅圧粉体の寸法変化

1.4.3　銅－添加金属圧粉体の寸法変化

1.4.4　まとめ

１．５　銅基圧粉体の焼結時の拡散について　53

1.5.1　銅圧粉体－添加金属圧粉体の拡散

1.5.2　銅－アルミニウム圧粉体の拡散

１．６　銅－アルミニウム圧粉体の焼結現象について　64

1.6.1　合金相の生成　　1.6.2　示差熱分析
1.6.3　硬さ　　1.6.4・引張強さ
第２章　銅基粉末成形体の物性に関する研究　78
２．１　銅－ガラス粉末成形体について　78
2.1.1　供試粉末成形体　　2.1.2　実験方法
2.1.3　物理的性質および機械的性質　　2.1.4　摩擦特性
2.1.5　被削性　　2.1.6　まとめ
２．２　銅－アルミニウム粉末成形体について　99
2.2.1　加熱時の寸法変化　　2.2.2　示差熱分析
2.2.3　表面あらさ　　2.2.4　引張強さ　　2.2.5　まとめ
第３章　銅基粉末成形砥石の成形に関する研究　110
３．１　砥石の構成およびその性質　111
３．２　砥石の成形法　111
3.2.1　砥石の成形材料　　3.2.2　成形材料の混合
3.2.3　混合材料の成形　　3.2.4　砥石圧粉体の焼成
３．３　砥石の物理的性質および機械的性質　132
3.3.1　空隙率，抗折力，硬さ
3.3.2　切削量，砥石損耗量，仕上面あらさ
3.3.3　弾性率，固有抵抗，熱伝導率
3.3.4　寸法変化，膨潤性
3.3.5　模型による弾性率の考察
３．４　まとめ　164
第４章　銅基粉末成形砥石の仕上性能に関する研究　166
４．１　肌焼き鋼のホーン仕上　166
4.1.1　実験装置および供試砥石　　4.1.2　実験方法

4.1.3　実験結果　　4.1.4　まとめ
4．2　ニッケルクロム鋼の円筒超仕上　184
4.2.1　実験装置および供試砥石　　4.2.2　実験方法
4.2.3　実験結果　　4.2.4　まとめ
4．3　軟質金属の平面超仕上　190
4.3.1　供試砥石　　4.3.2　実験装置および実験方法
4.3.3　実験結果および考察　　4.3.4　まとめ
4．4　うねりを有する面の超仕上　202
4.4.1　実験装置および供試砥石　　4.4.2　実験方法
4.4.3　実験結果
4.4.4　うねり面形状にならって仕上げられることの考察
4.4.5　まとめ
4．5　ダイヤモンド砥石による超仕上　224
4.5.1　実験装置および供試砥石　　4.5.2　実験方法
4.5.3　実験結果　　4.5.4　まとめ
結　言　234

緒　言

粉末成形とは，粉末または所定の配合割合に混合撹拌した混合粉末を一般には常温で押型によって加圧成形して得られる圧粉体を，中性または還元性雰囲気中で高温（主原料粉の融点以下）に加熱焼成し，圧粉体の形状を保ったまゝで製品を製造する技術をいう。その製品の特徴は配合割合，成形圧力，焼成温度などの条件によって異なるが，基本的には主原料粉の特性に依存される。この製造技術の特徴は，切削加工を必要としないことにより材料の歩留まりが高くかつ工程の簡略化が促進され生産費が経済的であること，および融解法では製造することができない金属と非金属の混合製品を製造することができることにある。したがって，粉末成形は従来より構成機械部品の製造，およびメタルボンド砥石のような砥石の製造に応用されている。

さて，粉末成形に関する論文は1945～1949年の雑誌に数多く発表され，圧粉体密度分布[(1)(2)]，焼結機構[(3)(4)(5)(6)]などが明らかにされた。これらは当時の書物[(7)(8)]に集録されている。以後においても数多く発表[(9)(10)]

---

(1) H. Unckel, Archiv für das Einsenhüttenwesen, 18 (1945), 161
(2) P. Duwez · L. Zwell, Metals Transactions, 185 (1949-2), 137
(3) G. C. Kuczynski, Metals Transactions, 185 (1949-2), 169
(4) C. B. Jordain · P. Duwez, Metals Transactions, 185 (1949-2), 96
(5) P. Duwez · H. Martens, Metals Transactions, 185 (1949-9), 571
(6) A. J. Shaler, Metals Transactions, 185 (1949-11), 796
(7) H. H. Hausner, Powder Metallurgy - Principles and Methods, 1947 (New York)
(8) P. Schwarzkopf, Powder Metallurgy - Its Physics and Production, 1947 (New York)
(9) E. G. Schwartz · A. S. Weinstein, Journal of the American Ceramic Society, 48-7 (1965-7), 346
(10) J. G. Early · F. V. Lenel · G. S. Ansell, Transactions of A.I.M.E., 230 (1964-12), 1941

され，また書物[1][2][3]に集録されている。また，粉末成形に関する雑誌[4][5]が継続して出版されている。しかし，粉末成形体の寸法精度を向上させる目的で系統的に研究した論文はなく，高度の寸法精度を要求される場合には，焼結後再圧縮または機械加工を行なっているのが現状である。また，長寿命砥石および鏡面仕上砥石として優れている砥石も見あたらない。

そこで，筆者は銅基粉末成形体の寸法精度の向上を目的として，圧粉体密度分布，焼結時の寸法変化，成分金属間の拡散，合金相の生成などについて基礎的研究を行ない，圧粉体密度分布の不一様性を改善する圧縮法，圧粉体寸法と焼結体寸法とが等しくなる粉末成形法を明らかにし，焼結時の寸法変化を調整することに関する新しい理論を立てることができた。それにもとづき精密仕上用の銅基粉末成形砥石を試作し，この砥石が長寿命砥石および鏡面仕上砥石として優れていることを明らかにした。

本論文は4章より成る。第1章においては，銅圧粉体の密度分布を一様にする圧縮成形法を明らかにすること，および圧粉体寸法と焼結体寸法とが同一となる粉末成形法を明らかにすることを目的として行なった研究について述べてある。まず，圧粉体の密度分布を不一様にする要因を考察し，ついで粉体の力学的性質を明らかにすることにより密度分布を近似的に解析し，銅圧粉体の密度分布は銅粉の形状により異なることを明らかにした。ついで，樹枝状銅粉の圧粉体の密度分布を実験的に吟

---

(1) W. D. Jones, Fundamental Principles of Powder Metallurgy, 1960 (London)
(2) Höganäs Iron Powder Handbook, 1962 (Sweden)
(3) H. H. Hausner, Modern Developments Powder Metallurgy, 1966 (New York)
(4) 粉体粉末冶金協会，粉体および粉末冶金，1947より
(5) Powder Metallurgy, (London)

味し，潤滑剤を使用することによって密度分布が著しく改善されること，また潤滑剤の使用方法として低い成形圧力の場合には銅粉に潤滑剤を添加混合する方法の方がより改善されること，高い成形圧力の場合には型壁に潤滑剤を塗布する方法の方がより改善されることを明らかにした。また，潤滑剤を使用する場合には，銅圧粉体の密度分布が一様になる圧粉体厚さの限界値が存在することを明らかにし，その限界値を求めた。

つぎに，銅基圧粉体の焼結時の寸法変化を実験的に詳細に吟味し，それにより，添加金属の銅へ固溶する量が銅の添加金属へ固溶する量に比べて著しく大きい金属を添加した圧粉体は焼結時に膨張すること，相互に固溶する量が極めて小さい金属を添加した圧粉体は焼結時に収縮すること，添加金属の融点が銅の融点に比べて著しく高いかまたは相互に全域固溶する金属を添加した圧粉体は銅圧粉体の焼結時の寸法変化と同様の傾向を示すことを明らかにした。それにもとづき銅圧粉体と添加金属圧粉体間の拡散の状況を吟味し，焼結によって拡散層の生ずる銅基圧粉体では焼結時に膨張し，焼結によって拡散層の生じない銅基圧粉体では焼結時に収縮することを明らかにした。ついで，焼結時に膨張する銅－アルミニウム圧粉体について焼結時の成分金属間の拡散の状況を吟味し，アルミニウムはその融点以下の固相においても焼結の進行とともに銅中へ拡散し，アルミニウム粉の存在していた箇所が空所となることを確めた。それにより焼結時に膨張する要因の１つは，アルミニウムの銅中への拡散に起因すると考えられ，その結果空所が発生することを明らかにした。

第２章においては，銅－アルミニウム粉末成形体，銅－ガラス粉末成形体の物理的性質および機械的性質におよぼす成形条件の影響を明らかにした研究について述べてある。第１章において明らかにした焼結時に

急激な膨張を生ずる銅－アルミニウム圧粉体について加熱時の寸法変化がアルミニウム添加量，成形圧力，加熱速度によってどのように異なる吟味し，圧粉体寸法と焼結体寸法とが等しくなる粉末成形法を明らかにした。ついで，黒鉛を２％含有した銅－20％ガラス粉末成形体の摩擦特性について吟味し，ガラスが溶融流動して摩擦面の全面を覆い，それにより焼付荷重が増大し，摩耗量が減少することを明らかにした。

第３章においては，銅粉を砥粒保持体とした銅基粉末成形砥石の物理的性質および機械的性質と成形条件の関係を吟味した基礎的研究について述べてある。銅基粉末成形砥石は，砥石の切刃面より突出した砥粒を弾性的および塑性的に砥粒保持体である銅粉を埋め込ませ，砥粒切刃を砥石切刃面にそろわせることにより深い疵をつくることなく切削を行なうことを目的とした砥石である。この砥石の最適成形条件を明らかにするとともに，空隙率，硬さ，抗折力，弾性率，固有抵抗，熱伝導率，熱膨張率を測定し，銅基粉末成形砥石の性質を明らかにした。

第４章においては，第３章の研究成果にもとづいて試作した銅基粉末成形砥石の仕上性能をホーン仕上，超仕上について吟味した研究について述べてある。砥石の仕上性能を測定吟味し，いずれの仕上法の場合でも，銅基粉末成形砥石は長寿命砥石として，また鏡面仕上砥石として優れていることを明らかにした。すなわち，ホーン仕上に使用した場合従来のビトリファイド砥石に比して約50倍の寿命を有すること，軟質金属材料を超仕上する場合砥粒保持体としての金属粉の材料は加工物材料の硬さよりわずかに小さい硬さの材料が適していること，結合剤に合成ゴムを使用した銅基粉末成形砥石を用いて超仕上するとうねりを有する面をそれにならって形状を崩さずに仕上げることができること，ダイヤモンド砥粒の銅基粉末成形砥石を用いて超仕上すると硬脆材料から軟質

金属材料に至るまでのあらゆる材料を鏡面に仕上げることができることを明らかにした。

第1章　銅基粉末の成形および焼結に関する研究

高度の寸法精度を有する焼結体を得るためには，圧粉体の各部分での密度が一様であること，および圧粉体寸法と焼結体寸法とが等しいことが必要である。本章は，銅圧粉体の力学的性質および銅圧粉体の密度分布を測定吟味し，かつ銅粉と他種金属粉間の焼結現象を明らかにすることによって，銅を主成分とした，寸法精度の高い焼結体の成形法を確立することを目的として行なった研究である。

1．1　供試粉末

使用したCu粉は5種類で，粒度の異なる電解Cu粉Ⅰ，電解Cu粉Ⅱ，電解Cu粉Ⅲおよび噴霧Cu粉，搗砕Cu粉である。また，Cu圧粉体に添加した金属粉はSn，Bi，Cd，Pb，Zn，Sb，Mg，搗砕Al，噴霧Al，Ag，Si，Ni，Fe，Ti，W粉の15種類である。図1－1に供試粉末の形状を，図1－2に供試粉末の粒度分布を示す。粉末の形状は，研仕上およびバフ仕上によって粉末の断面を顕出させ，その面を光学顕微鏡によって観察したものである。粉末の粒度分布は，注意深く採取した200個の粉末の長径と短径を光学顕微鏡写真によって測定し，その平均値を，粉末の粒径として求めたものである。

図1－1より，電解Cu粉Ⅰ，Ⅱ，Ⅲは樹枝状，搗砕Cu粉は鱗片状，噴霧Cu粉は球状，Sn粉は鱗片状，Bi粉は粒状，Cd粉は粒状，Pb粉は鱗片状，Zn粉は粒状，Sb粉は粒状，Mg粉は鱗片状，搗砕Al粉は鱗片状，噴霧Al粉は粒状，Ag粉は鱗片状，Si粉は角状，Ni粉は樹枝状，Fe粉は樹枝状，Ti粉は角状，W粉は角状であることがわかる。また，図1－2より，電解Cu粉Ⅰの平均粒径は

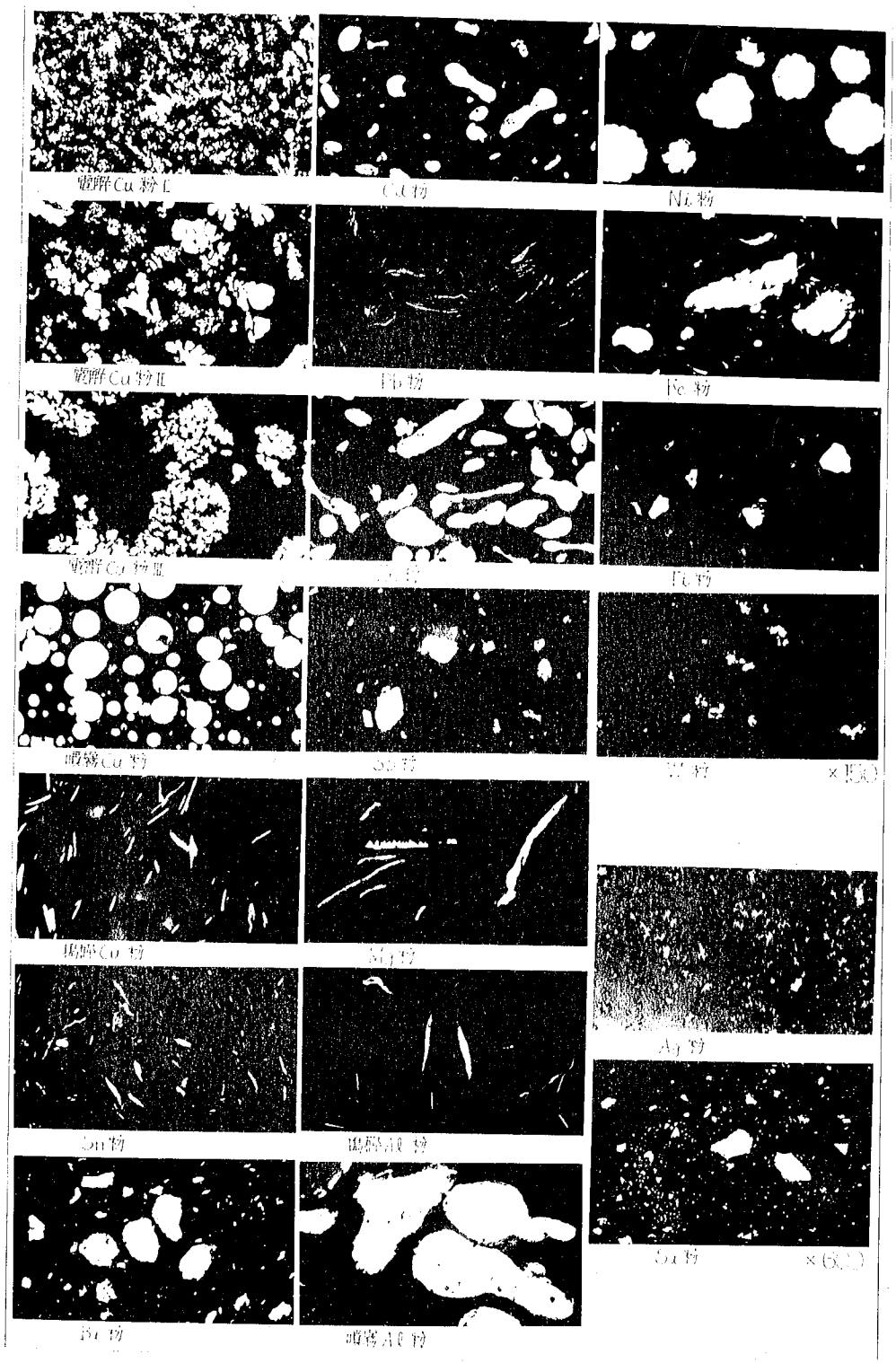


図1－1　供試粉末の形状　×2/5

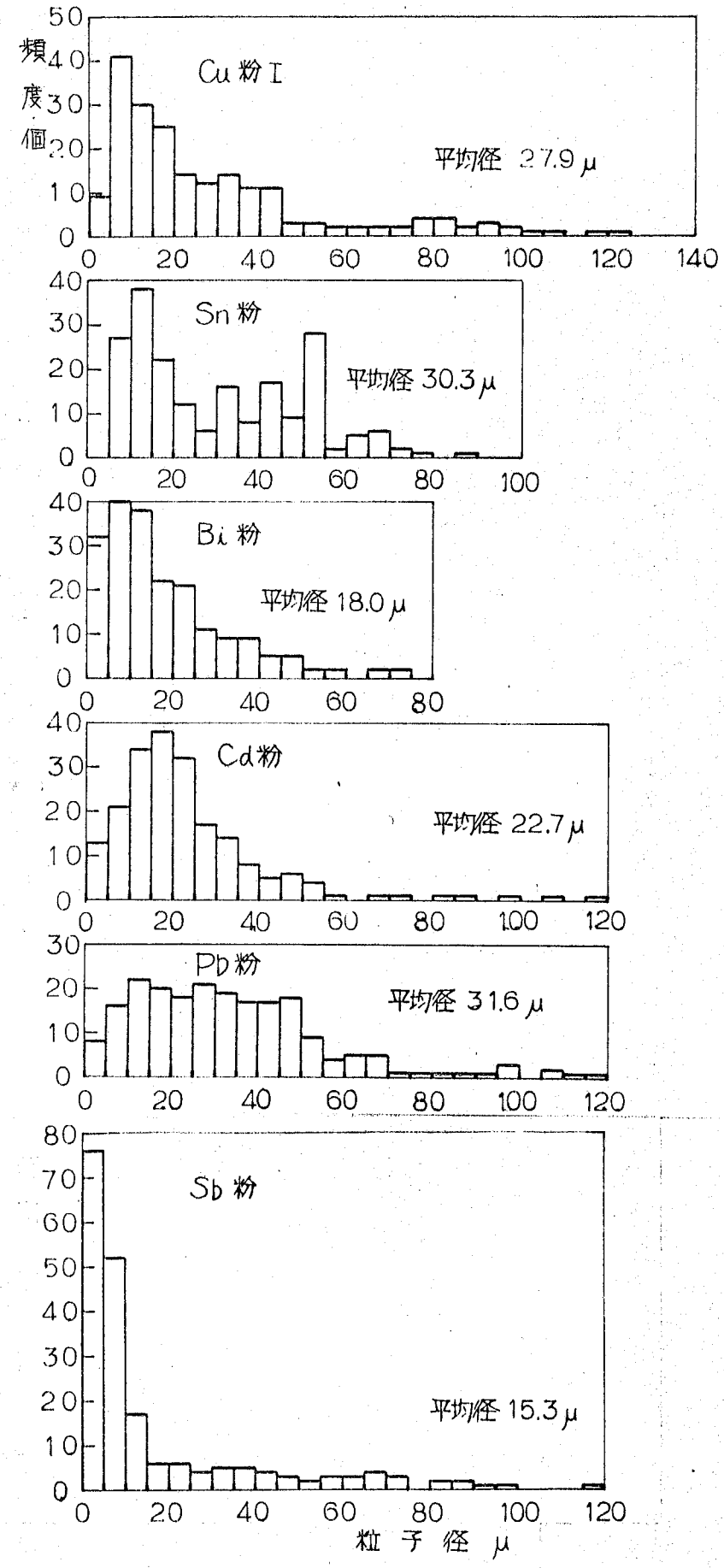


図1－2　供試粉末の粒度分布（その1）

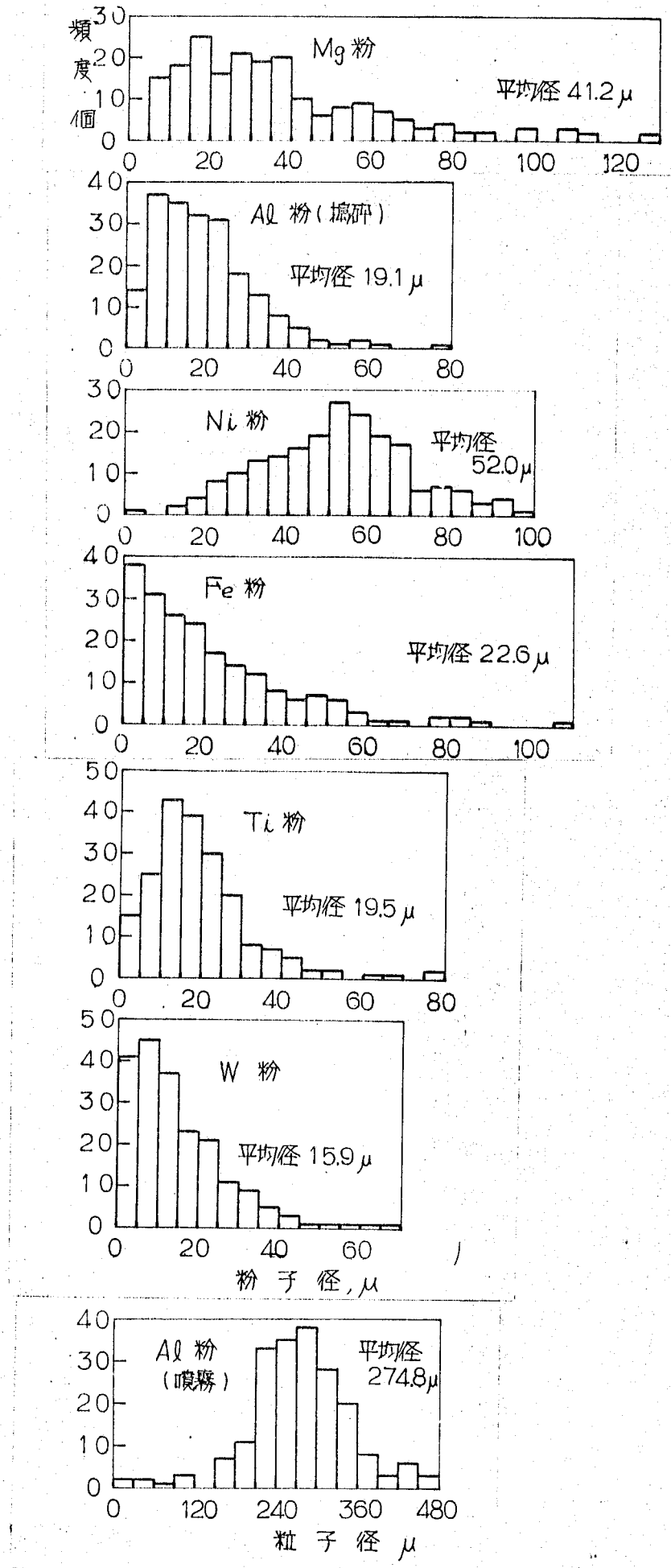


図1－2　供試粉末の粒度分布（その2）

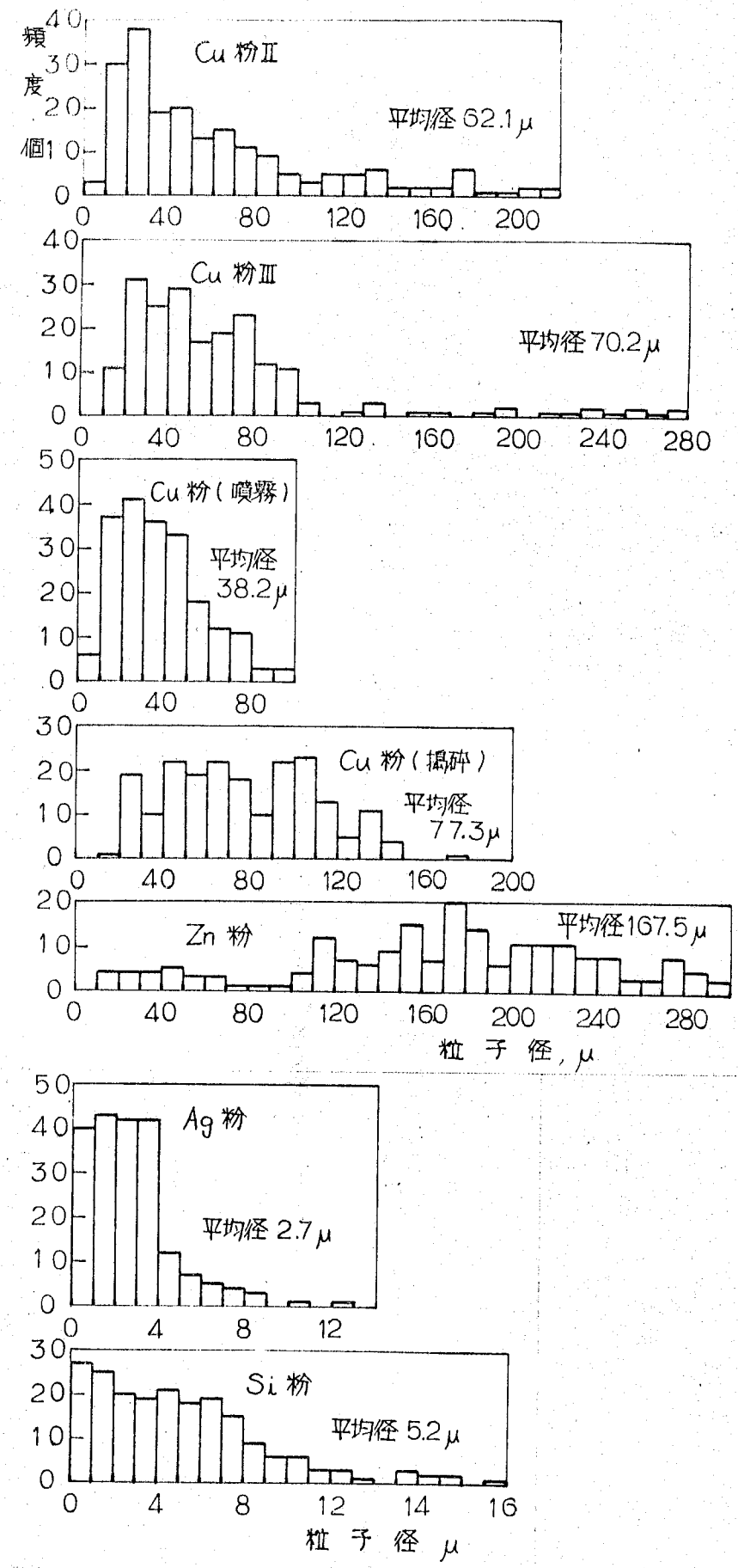


図1－2　供試粉末の粒度分布（その3）

27.9μ，電解Cu粉IIは62.1μ，電解Cu粉IIIは70.2μ，噴霧Cu粉は38.2μ，搗砕Cu粉は77.3μ，Sn粉は30.3μ，Bi粉は18.0μ，Cd粉は22.7μ，Pb粉は31.6μ，Zn粉は167.5μ，Sb粉は15.3μ，Mg粉は41.2μ，搗砕Al粉は19.1μ，噴霧Al粉は274.8μ，Ag粉は2.7μ，Si粉は5.2μ，Ni粉は52.0μ，Fe粉は22.6μ，Ti粉は19.5μ，W粉は15.9μである。

1．2　鋼圧粉体の力学的性質

一般に，圧粉体の密度分布は，粉体と外型壁面との摩擦，粉体と上型ポンチ面との摩擦，粉体同志の摩擦のために，不一様であり，それにより粉末成形法によってつくられる焼結体は寸法精度に劣っている。

圧粉体の密度分布および応力分布に関する研究は従来より行われている。Unckel[1]は圧粉体を約10 mmの立方体に切断して切出し片の密度を測定することにより密度分布を求めた。Kamm ら[2]，津和ら[3]は圧粉体に鉛の格子，あるいは鉛粒を挿入して圧粉体のX線透過写真を観察することにより密度分布を求めた。Kuczynski ら[4]は硬さを2.5 mm間隔に測定することにより密度分布を求めた。賀前ら[5]は二次元の場合に粉体に生ずる応力の関係を求めそれを応力関数で表わし，それを満足する微分方程式を導いた。森[6]は粉体の辷り線と主応力線とに

---

(1) H. Unckel, Archiv für das Eisenhutteuwesen, 18-7·8 (1945-1·2), 161
(2) R. Kamm・M. Steinberg・J. Wulff, Transactions of AIME, 171 (1947), 439
(3) 津和秀夫・明田勇蔵，精密機械，29-12 (1963-12), 945
(4) G.C. Kuczynski・I. Zaplatynski, Transactions of AIME, 206 (1956-2), 215
(5) 賀前睦夫・榎本英二，機械学会論文集，14-49 (昭23), 36
(6) 森芳郎，応用力学，4-23 (昭27), 73

より，西原ら[1]は剛体の円筒中に弾性体を圧縮した場合の弾性理論式を導くことにより，また西原ら[2]は粉体の変形量を対数ひずみにあてはめて弾性理論式を解くことにより，郡ら[3]は西島ら[1]の弾性理論式を更に発展させて直交異方性体として，応力分布を求めた。Schwartz ら[4]は外型の摩擦力および外型への垂直応力を測定することにより応力分布を求めた．また，最近，明田ら[5]は粉体の力学的性質を測定し，金属粉末の圧縮成形に Mohr's Theory が成り立つことを述べている。

しかし，これらの研究によって圧粉体密度分布の理論解析が確立したとは云い難く，また圧粉体の密度分布を不一様にする粉体の性質を究明したとは云い難い。そこで，密度分布を不一様にする粉体の性質を明らかにする目的で，粉体の力学的性質を表わす事項，すなわち，粉体の圧縮力とそれに直角な方向へ伝わる力の関係，粉体の圧縮力と剪断力の関係，粉体の圧縮力と圧縮下の粉体が押型材料の上をすべり出すときの摩擦力の関係，粉体の圧縮力と外型の各部へ伝わる力の関係，粉体の圧縮力と圧粉体密度の関係，を銅粉について実験的に測定し，これより片押加圧方式による銅圧粉体の密度分布を力学的に求め，密度分布を不一様にする粉体の性質を明らかにした。

使用した銅粉は5種類で，電解 Cu 粉Ⅰ，電解 Cu 粉Ⅱ，電解 Cu 粉Ⅲ，噴霧 Cu 粉，塊砕 Cu 粉である。使用した押型材料は炭素工具鋼3種相当のものを焼入れ・焼戻しして硬さをHRC 61 にしたものである．なお，粉体に接する面はWA 400砥粒でラップ仕上を行なった。潤滑剤

---

(1) 西原利夫・郡利矩，機械学会論文集，14－48（昭23），94
(2) 西原利夫・郡利矩・谷哲郎，機械学会論文集，21－91（昭29），208
(3) 郡利矩・増尾竜一，機械学会論文集，23－131（昭32－7），468
(4) E.G. Schwartz・A.S. Weinstein，Journal of the Ceramic Society，48－7（1965－7），346
(5) 明田勇蔵・津和秀夫，精密機械，1969－12（35－12），765

としては，ベンゼンに溶解したステアリン酸亜鉛を使用した。

1．2．1　粉体の圧縮力とそれに直角な方向へ伝わる力の関係

粉体が圧縮される場合，圧縮方向と直角方向に拘束物が存在しなければ，粉末は圧縮方向と直角方向に流動し，圧縮方向の変位は密度の増加を併なわない。しかし，拘束物が存在すれば，粉末は上記方向に流動せず，圧縮力は拘束物すなわち外型へ外力として伝える。そして，圧縮方向の変位は密度の増加を併なう。いま，圧粉体密度が一様である場合，単位面積当たりの圧縮力と外型へ伝わる単位面積当たりの力の比は，粉体の圧縮応力とそれに直角方向の応力の比に等しいと仮定し，圧粉体の密度分布を力学的に解析する場合，圧縮力と外型へ伝わる力の関係を，粉体の圧縮応力とそれに直角方向の応力の関係とした。

図1－3に，粉体を圧縮した時の，圧縮方向と直角方向に伝わる力の測定装置を示す。圧縮力は，島津製RH30型万能試験機で与えた。直角方向に伝わる力はそれによって生ずる外型のひずみをストレンゲージで測定することによって求めた。圧粉体厚さは，密度が一様になる6mmとした。図1－4(a)に，電解Cu粉Ⅰを3ton/cm²で圧縮した場合の測定結果を示す。これより得られる力を，粉体と外型とが接する面積で除し，その値を粉体の圧縮により圧縮方向と直角方向に伝わる単位面積当たりの力とした。

図1－5(a)，(b)に，圧縮方向と直角方向に伝わる力と圧縮力との関係を示す。同図(a)は，形状の異なる電解粉Ⅰ，噴霧粉，塊砕粉の場合である。いずれの粉体の場合でも，圧縮方向と直角な方向に伝わる力は圧縮力の増加とともにほゞ直線的に増大する。同図(b)は，粒度の異なる電解粉Ⅰ，電解粉Ⅱ，電解粉Ⅲの場合である。いずれの圧縮力の場合でも，圧縮方向と直角な方向に伝わる力は粒度によって変わらない。ま

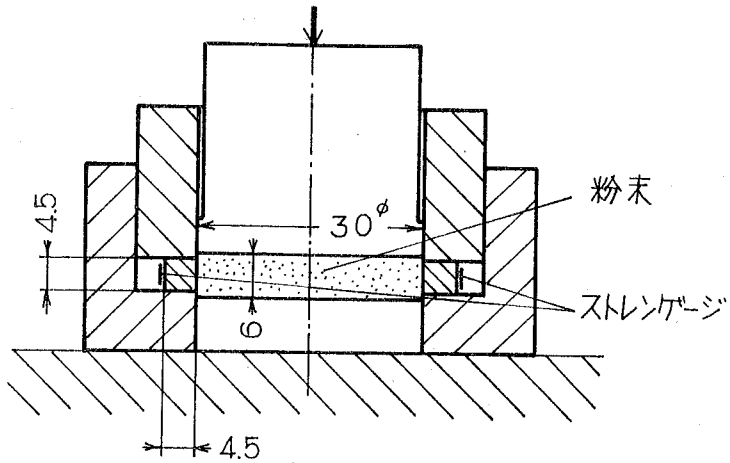
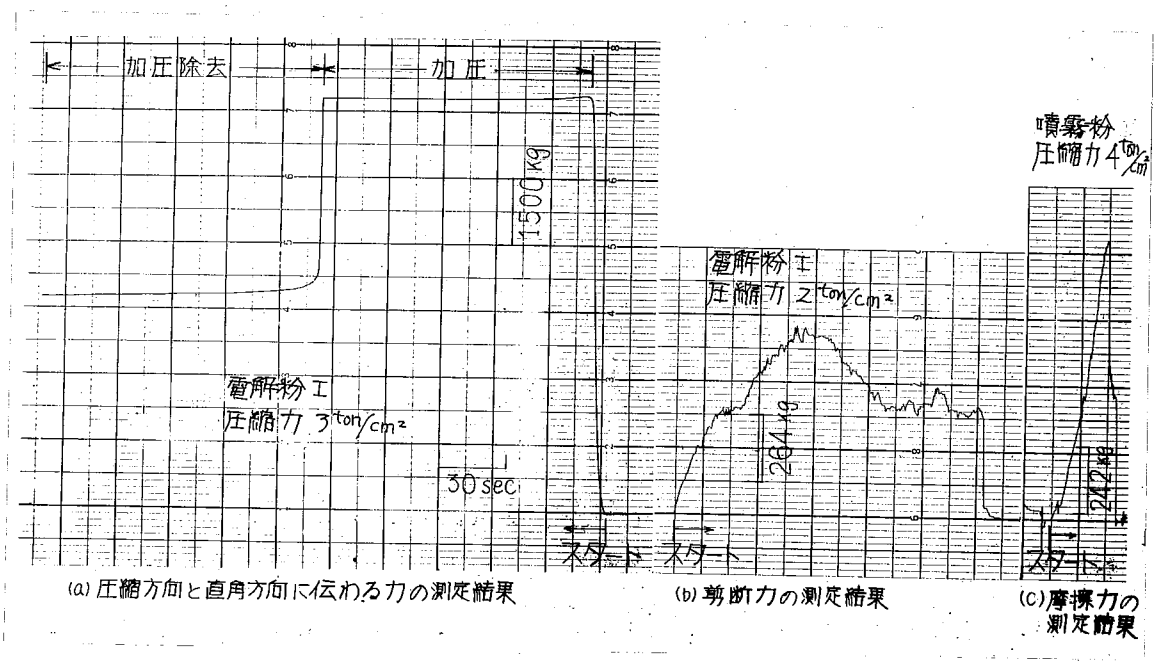
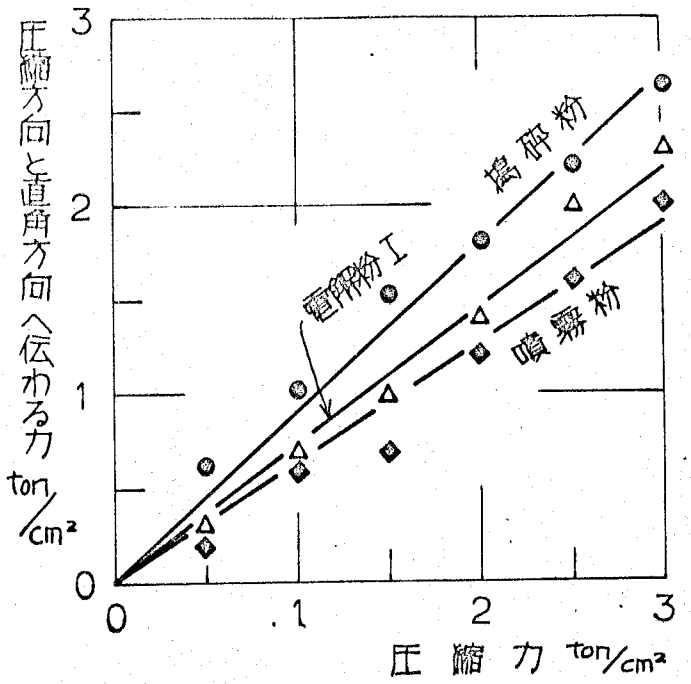


図1－3　圧縮方向と直角方向に伝わる力の測定装置

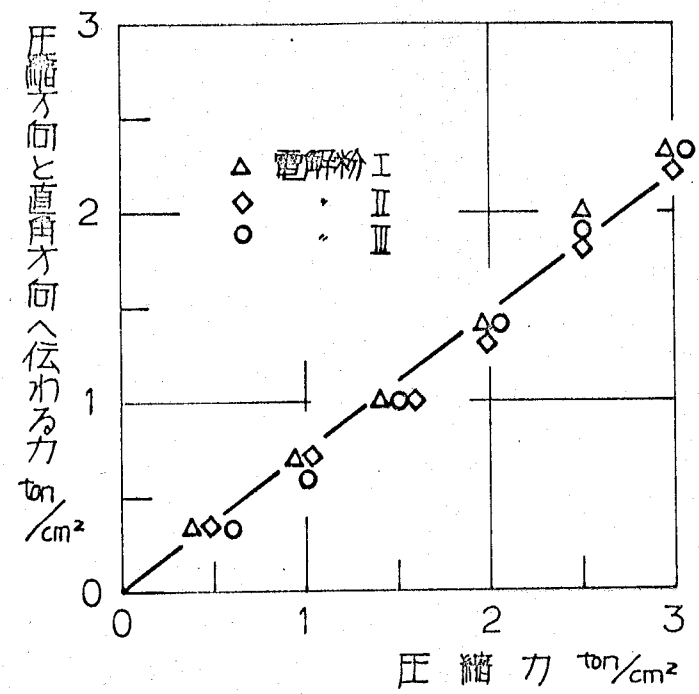


(a) 圧縮方向と直角方向に伝わる力の測定結果　(b) 剪断力の測定結果　(c) 摩擦力の測定結果

図1－4　測定結果例



(a) 粉末の形状を変えた場合



(b) 粉末の粒度を変えた場合

図1－5　圧縮方向と直角方向へ伝わる力と圧縮力との関係

た，いずれの粒度の場合でも，前述と同様に圧縮方向と直角な方向に伝わる力は圧縮力の増加とともにほゞ直線的に増大する。これより，いずれのCu粉の場合でも，圧縮方向と直角方向へ伝わる力をσ_r，圧縮力をσ_zとすると

$$\sigma_r = a_1 \cdot \sigma_z$$

の関係が成り立つと考えられる。

1．2．2　粉体の圧縮力と剪断力の関係

粉体は圧縮力によって粉末粒子の表面あるいは内部で剪断すべりを生じ，それにより密度が増加すると考えられる。この剪断すべりを生ずるに必要な力は，圧縮下での圧縮方向の剪断力に等しいと考えられる。いま，単位面積当たりの圧縮力と単位面積当たりの剪断力の比は，粉体の圧縮応力と剪断応力の比に等しいと仮定し，圧粉体の密度分布を力学的に解析する場合，圧縮力と剪断力の関係を，圧縮応力と剪断応力の関係とした。

図1－6に，粉体を圧縮した時の，圧縮方向の剪断力の測定装置を示す。圧粉体は直径30 mm，厚さ2 mmのものであり，剪断させる面は直径10 mmの円筒面である。上型ポンチおよび下型ポンチは，中央部および外周部のポンチより成り立ち，まず，両者によって粉体に圧縮力を与え，ついで，下型ポンチの中央部を取り除き上型ポンチの中央部を介して，ねじを締め付けることによって中央部の粉体に圧縮力を与える。この圧縮力は，中央部上型ポンチの上部にあるストレンゲージでひずみを測定することにより求められる。この圧縮力の最大値を，圧縮下での粉体の剪断力とする。図1－4 (b) に，搗砕Cu粉を2 ton/cm²で圧縮した場合の測定結果を示す。これより得られる剪断力を，剪断面積で除し，その値を圧縮下での粉体の単位面積当たりの剪断力とした。

図1－7に，剪断力と圧縮力との関係を示す。いずれの圧縮力の場合でも，剪断力は電解粉Ⅲがもっとも大きく，ついで電解粉Ⅱ，電解粉Ⅰ，噴霧粉，塊砕粉となる。すなわち，剪断力は粉末の形状および粒度によって異なり，形状については樹枝状のものがもっとも大きく，ついで粒状，鱗片状のものとなり，かつ粒度が大きいほど大きいことがわかる。また，いずれの粉体の場合でも，剪断力は圧縮力の増加とともにほゞ直線的に増大する。これより，剪断力を τ ，圧縮力を σ とすると，

$$\tau = a_2 \cdot \sigma$$

の関係が成り立つと考えられる。

1．2．3　粉体の圧縮力と押型材料の上をすべり出すときの摩擦力の関係

図1－8に，圧縮下の粉体が押型材料の上をすべり出すときの摩擦力の測定装置を示す。これは，押型材料の上下両面に粉末を充填し，押型材料と粉末との接触両面ですべらせるものである。圧縮力に直角方向の力は，ボルトを介して与え，ボルトのひずみをストレンゲージで測定することにより求められる。粉体がすべり出すときの上記の力を，摩擦力とした。図1－4 (c) に，押型材料に潤滑剤を塗布し，噴霧粉を4 ton/cm² で圧縮した場合の測定結果を示す。これより得られる摩擦力を，粉体と押型材料とが接する面積で除し，その値を圧縮下の粉体が押型材料の上をすべり出すときの単位面積当たりの摩擦力とした。

図1－9 (a), (b) に，摩擦力と圧縮力との関係を示す。同図 (a) は押型材料をベンゼンできれいに清浄した場合である。いずれの圧縮力の場合でも，摩擦力は電解粉Ⅲがもっとも大きく，ついで電解粉Ⅱ，噴霧粉，電解粉Ⅰ，塊砕粉となる。すなわち，摩擦力は粒度が大きいほど大きい。また，いずれの粉体の場合でも，摩擦力は圧縮力の増加とともにほゞ直

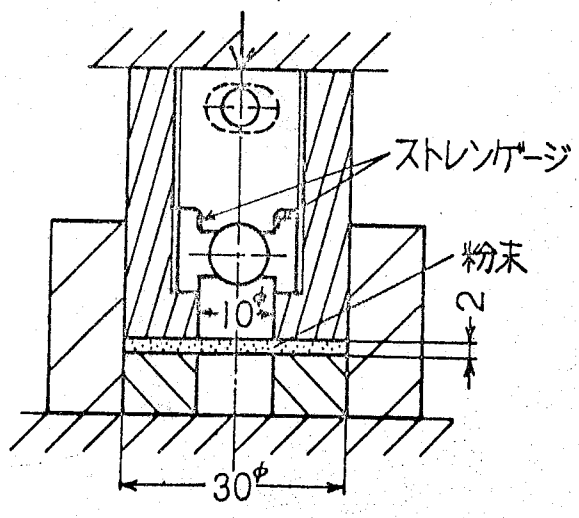


図1－6　剪断力の測定装置

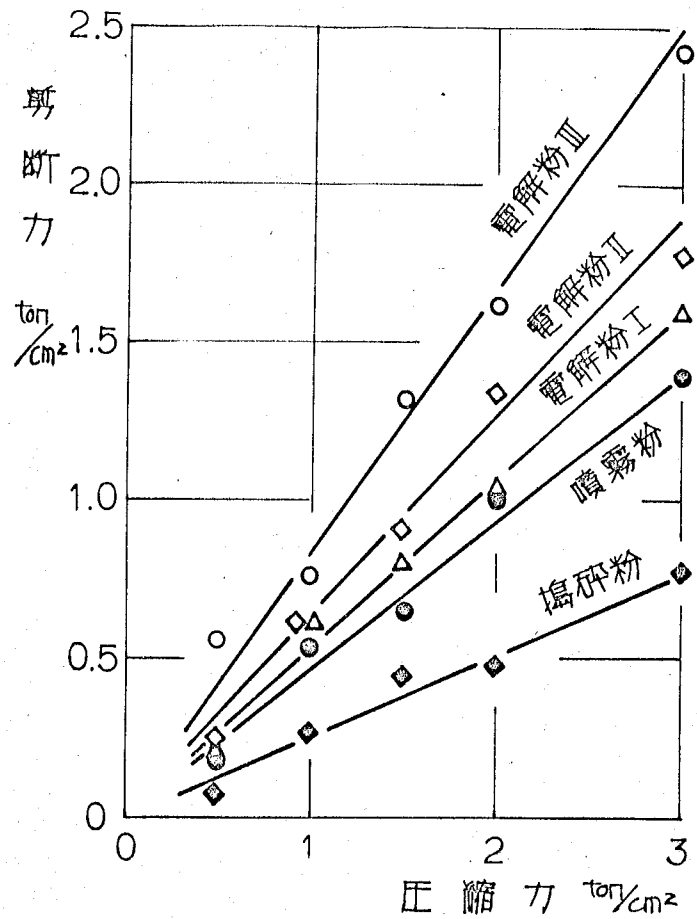


図1－7　剪断力と圧縮力との関係

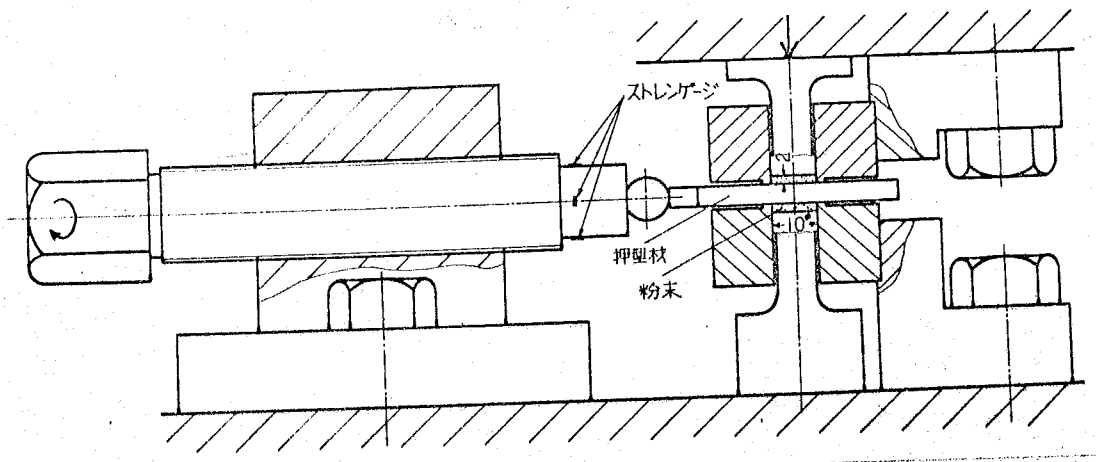
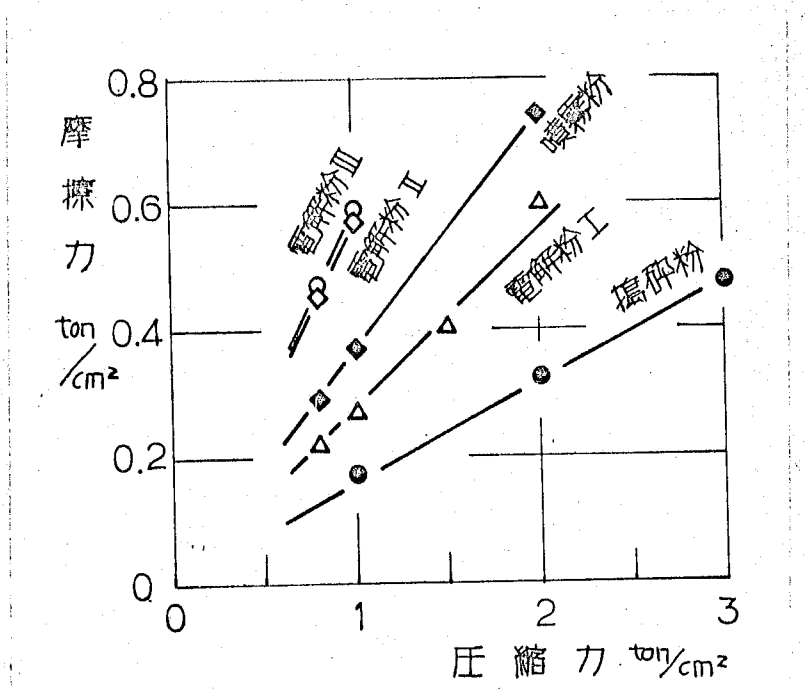
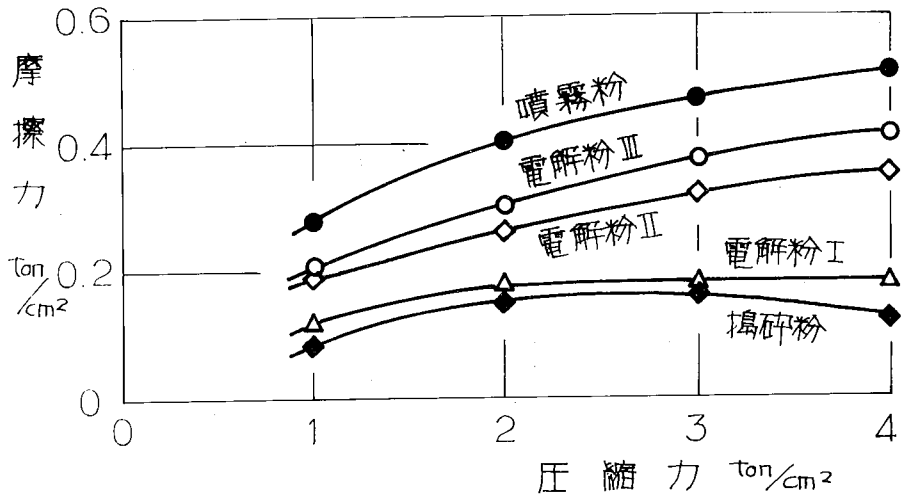


図1－8　摩擦力の測定装置



(a) 潤滑剤を使用しない場合



(b) 潤滑剤を使用した場合

図1－9　摩擦力と圧縮力との関係

線的に増大する。同図(b)は押型材料に潤滑剤を塗布した場合である。いずれの圧縮力の場合でも，摩擦力は噴霧粉がもっとも大きく，ついで電解粉Ⅲ，電解粉Ⅱ，電解粉Ⅰ，搗砕粉となる。すなわち，摩擦力は粉末の形状および粒度によって異なり，形状については粒状のものがもっとも大きく，ついで樹枝状，鱗片状のものとなり，かつ粒度が大きいほど大きい。以上より，押型材料に潤滑剤を塗布しない場合の本実験の圧縮力範囲では，摩擦力と圧縮力は近似的に直線の関係にあるといえる。これより，摩擦力を f ，圧縮力を σ とすると，

$$f = b_1 \cdot \sigma + b_2$$

の関係が成り立つと考えられる。

1．2．4　粉体の圧縮力と外型の各部へ伝わる力の関係

上型ポンチに与える圧縮力は，粉体を介して外型および下型ポンチに伝わる。いま，円筒圧粉体の密度分布を解析する目的で，円筒圧粉体を圧縮する場合，粉体を介して外型各部へ伝わる力を測定した。図1－10に，外型へ伝わる力の測定装置を示す。これは，下型ポンチの位置を外型に対して種々に変えて粉末を充填することにより，下型ポンチからの距離の異なる位置での外型へ伝わる力を求めることができるものである。

図1－11(a),(b),(c) に，圧縮力を2，4，6 ton/cm² に変え，潤滑剤を外型壁面に塗布した場合と潤滑剤を使用しない場合について，外型へ伝わる力と下型ポンチからの距離との関係を示す。なお，この時の圧粉体厚さは30 mm である。同図(a)は，電解粉Ⅰの場合である。いずれの場合でも，外型へ伝わる力は下型ポンチからの距離が大きくなると，距離に比例して大きくなる。[1] この増加の割合は圧縮力が大きいほど大

---

(1)　Duwez は，円筒圧粉体を圧縮することにより圧縮に直角な方向へ外型に伝わる力は，いずれの成形圧力の場合でも圧粉体の下部から上部へ向けて直線的に増大する，という実験結果を報告している。［Transactions of A.I.M.E, (1947－2), 137］

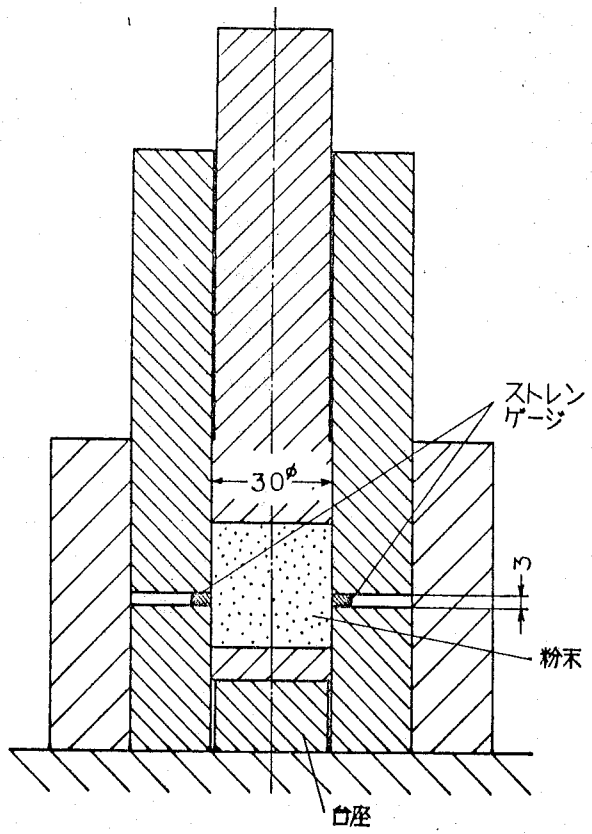
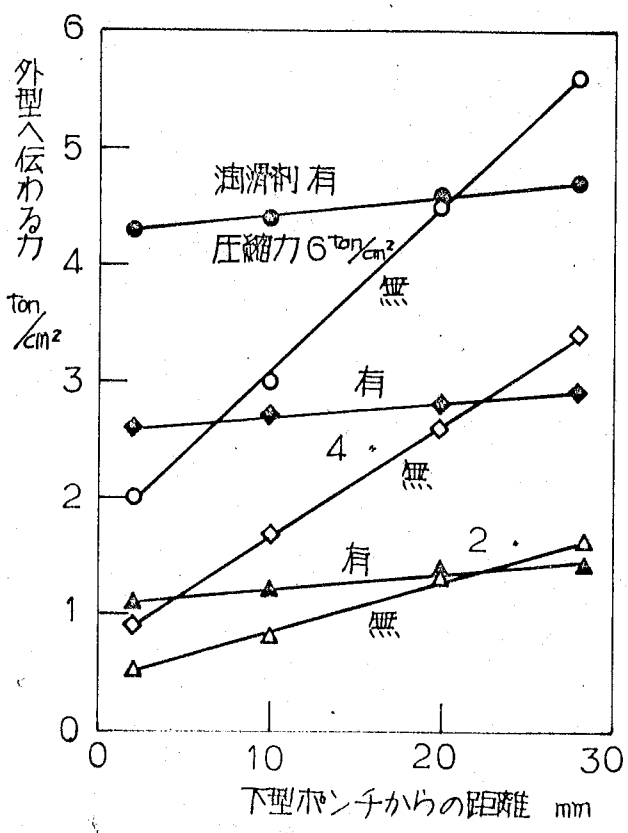
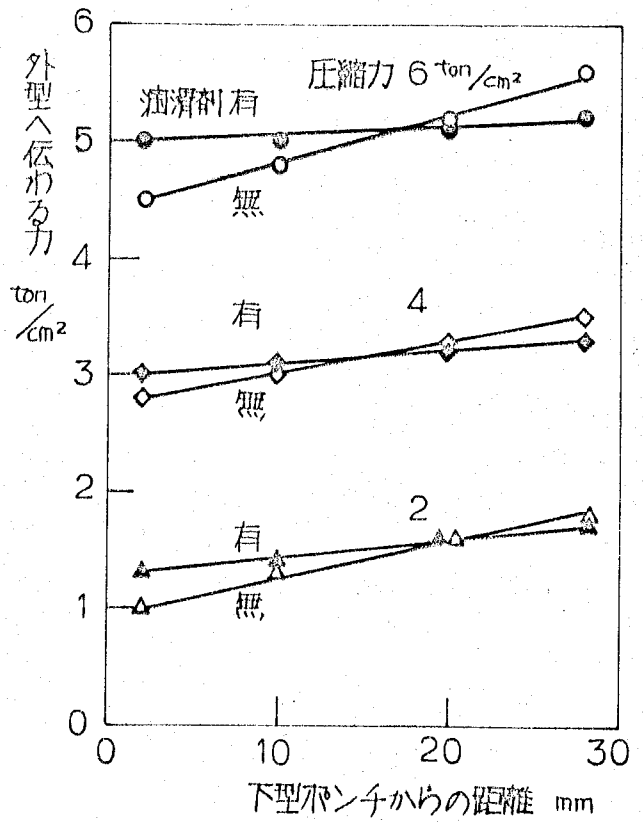


図1－10 外型へ伝わる力の測定装置

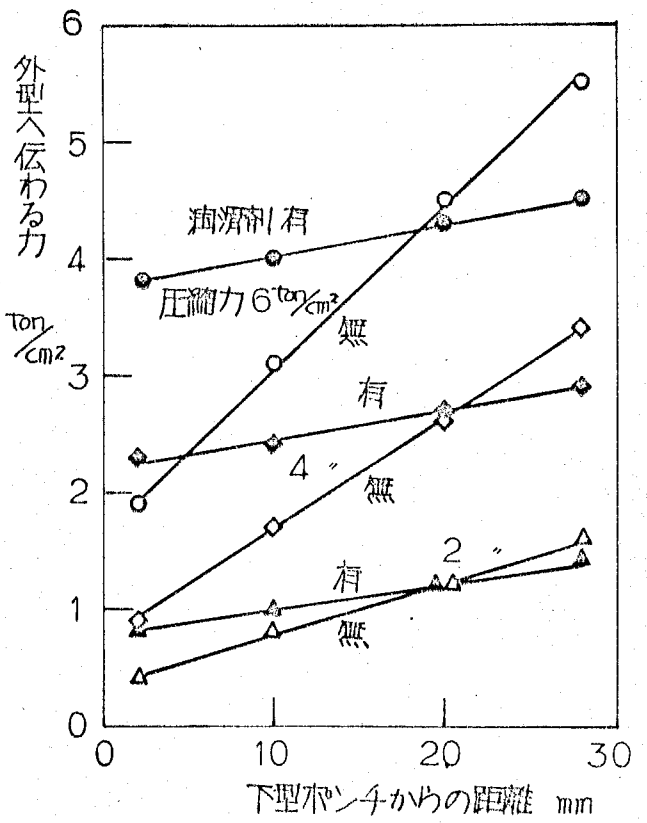


(a) 電解粉末の場合

図1－11 外型へ伝わる力と下型ポンチからの距離との関係（その1）



(b) 抱砂粉の場合



(c) 噴霧粉の場合

図1－11 外型へ伝わる力と下型ポンチからの距離との関係（その2）

きく，かつ潤滑剤を使用しない場合の方が，使用した場合より大きい。同図 (b) は，搗砕粉の場合である。いずれの場合でも，外型へ伝わる力は，電解粉工の場合と同様に，下型ポンチからの距離が大きくなると距離に比例して大きくなる。増加の割合についても，電解粉工の場合と同様のことが云える。しかし，電解粉工の場合と比較して，増加の割合はいずれの場合でも著しく小さい。同図 (c) は，噴霧粉の場合である。外型へ伝わる力は 電解粉工の場合の値とほゞ等しい。以上の結果より，いずれの粉体の場合でも，外型へ伝わる力は，下型ポンチからの距離の増加とともに直線的に増大する。これより，外型へ伝わる力を σ_r，下型ポンチからの距離を Z とすると，

$$\sigma_r = C_1 Z + C_2$$

が成り立つと考えられる。

1．2．5 粉体の圧縮力と圧粉体密度の関係

密度と圧縮力との関係についての研究は，従来より多くの研究者[(1)(2)]がおこなっている。Heckel[(3)] は比較密度と成形圧力とには，つぎの関係式が成り立つと述べている。

$$\ln(1-D) = -(d_1\sigma + d_2)$$

D：比較密度 g/cm^3
σ：成形圧力 ton/cm^2

この式において，圧粉体の密度を ρ，粉末金属の密度を ρ_0 とすると，上記の式は，

$$\ln(\rho_0 - \rho) = -d_1\sigma + (\ln\rho_0 - d_2)$$

---

(1) 川北国夫，粉体および粉末冶金，10－6（昭38），236
(2) W. D. Jones, Fundamental Principles of Powder Metallurgy, 1960, 270
(3) R. W. Heckel, Transactions of A.I.M.E, 221 (1961－10), 1001

となる。

本実験では，密度と圧縮力との関係について前述の式を適用し，$\ln(\rho_0-\rho)$ と σ とが比例関係になるように ρ_0 を定めた。図1－12に，それぞれのCu粉についての密度と圧縮力との関係を示す。ρ_0 の値として，電解粉Ⅰ，電解粉Ⅱ，電解粉Ⅲおよび噴霧粉では 9.0 g/cm³，振砕粉では 8.2 g/cm³ とした。

1．2．6　圧粉体密度分布の力学的解析

片押加圧方式による円筒圧粉体の密度分布を，これまでに求めた関係式より，力学的に求めた。粉体は粉末の集合体として存在するのであるが，力学的解析をおこなうにあたっては，粉末が集合した平面に働く平均的な力について吟味した。すなわち，粉体を連続体として取り扱った。

いま，円筒圧粉体の圧縮方向を z 軸，半径方向を r 軸とし，加圧面の中央を原点，厚さを Z，半径を R とすると，粉体の圧縮力と外型の各部へ伝わる力の関係についての実験結果より，

$r=R$ において

$$\sigma_r = k_1 - k_2 z \qquad (1\cdot1)$$

とおくことができる。また，粉体の圧縮力と圧縮方向と直角方向へ伝わる力の関係についての実験結果を，円筒圧粉体に適用すると，

$$\sigma_r = k_3 \sigma_z \qquad (1\cdot2)$$

となり，式（1・1）および式（1・2）より

$$\sigma_z = -\frac{k_2}{k_3} z + \frac{k_1}{k_3} \qquad (1\cdot3)$$

となる。これより，σ_z は z の1次式と仮定することができる。こゝで，σ_z が $r=0$ で有限値をもち，かつ近似的な解を求めるために r^2 以上の項を無視すると，

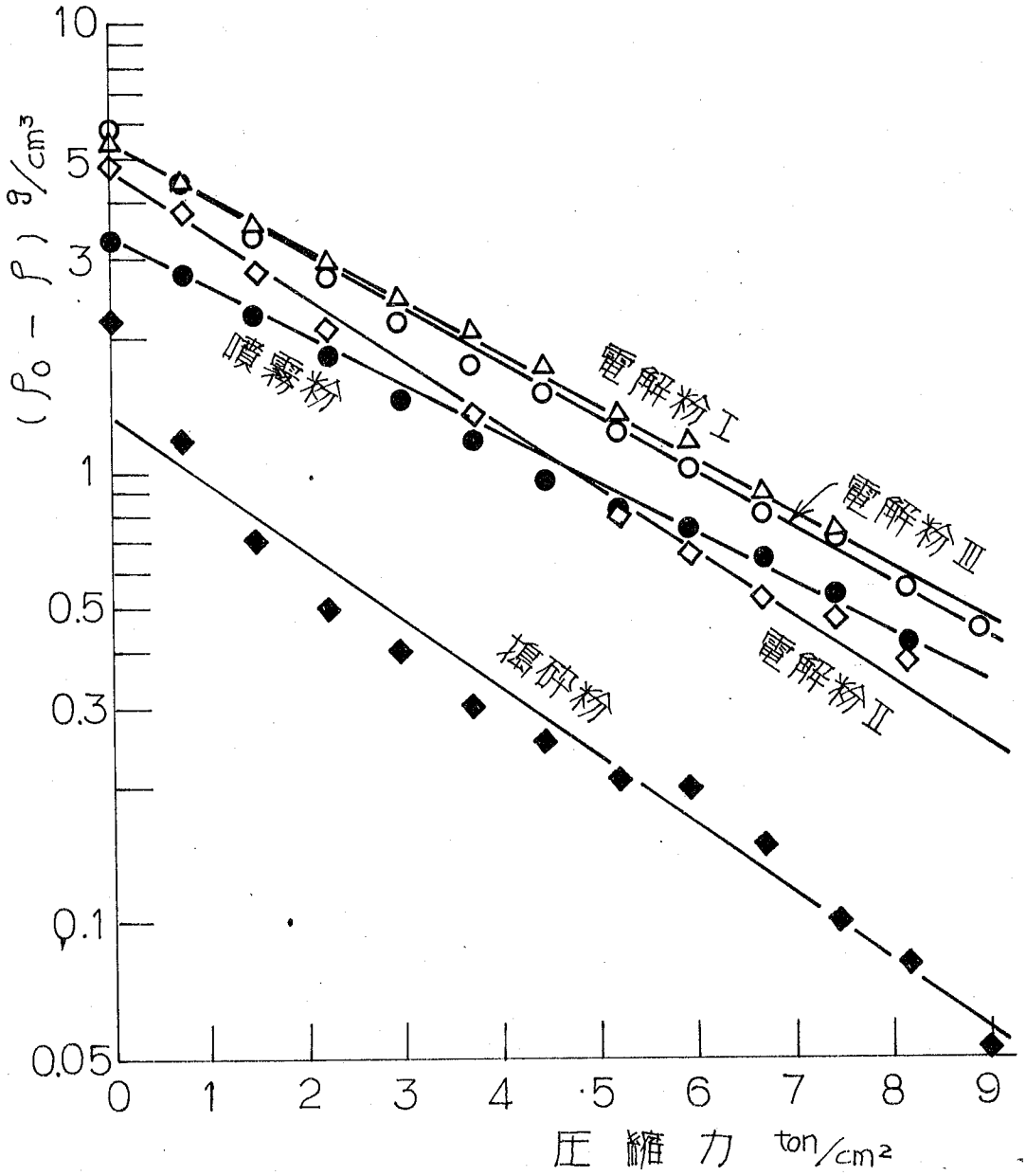


図1－12　圧粉体密度と圧縮力との関係

$$\sigma_z = (i_1 z + i_2) r + (j_1 z + j_2) \qquad (1 \cdot 4)$$

とおくことができる。

式（1・4）において，$r = R$ のとき，式（1・3）と式（1・4）は等しいので，次の関係が成り立つ．

$$-\frac{k_2}{k_3} = i_1 R + j_1 \qquad (1 \cdot 5)$$

$$\frac{k_1}{k_3} = i_2 R + j_2 \qquad (1 \cdot 6)$$

粉体の圧縮力と摩擦力の関係についての実験結果を，円筒圧粉体に適用すると，

$$f_z = -(k_4 \sigma_r + k_5)$$

となり，これに式（1・1）を代入すると，

$$f_z = k_2 k_4 z - (k_1 k_4 + k_5) \qquad (1 \cdot 7)$$

となる．

円筒圧粉体の上部加圧面において，σ_z の総和は圧縮力 P と円筒面積との積に等しいので，

$z = 0$ のとき

$$\pi R^2 p = \int_0^R 2\pi r \sigma_z \, dr$$

となり，式（1・4）を代入して，

$$p = \frac{2}{3} i_2 R + j_2 \qquad (1 \cdot 8)$$

となる。また，円筒圧粉体の底面において，σ_z の総和は前述の $\pi R^2 p$ と外型に失われた摩擦力との差に等しいので，

$z = Z$ のとき

$$\pi R^2 p + \int_0^Z 2\pi R f_z \, dz = \int_0^R 2\pi r \sigma_z \, dr$$

となり，式（1・4）および式（1・7）を代入して，

$$\frac{2}{3}(i_1 Z + i_2)R + (j_1 Z + j_2) = p + \frac{k_2 k_4}{R} Z^2$$

$$- \frac{2}{R}(k_1 k_4 + k_5) Z \qquad (1 \cdot 9)$$

となる。式（1・5），式（1・6），式（1・8）および式（1・9）より，

$$i_1 = \frac{6}{R^2}(k_1 k_4 + k_5) - \frac{3}{R}\left(\frac{k_2 k_4}{R} Z + \frac{k_2}{k_3}\right)$$

$$i_2 = \frac{3}{R}\left(\frac{k_1}{k_3} - p\right)$$

$$j_1 = 2\frac{k_2}{k_3} + \frac{3 k_2 k_4 Z}{R} - \frac{6}{R}(k_1 k_4 + k_5)$$

$$j_2 = 3p - 2\frac{k_1}{k_3}$$

となり，これを式（1・4）に代入することにより次式を得る。

$$\sigma_z = \left\{\frac{6}{R^2}(k_1 k_4 + k_5) - \frac{3}{R}\left(\frac{k_2 k_4}{R} Z + \frac{k_2}{k_3}\right)\right\} z r$$

$$+ \frac{3}{R}\left(\frac{k_1}{k_3} - p\right) r$$

$$+ \left\{2\frac{k_2}{k_3} + \frac{3 k_2 k_4 Z}{R} - \frac{6}{R}(k_1 k_4 + k_5)\right\} z$$

$$+ 3p - 2\frac{k_1}{k_3}$$

圧粉体密度分布と圧縮力の関係についての実験結果より

$$\rho_z = \rho_0 - \rho_0 e^{-(k_6 \sigma_z + k_7)}$$

であり，これに上式を代入することによって，圧粉体の密度分布を表わす式を得る。

いま，上式を用いて，成形圧力 2 ton/cm² で潤滑剤を使用しないで R＝15 mm，Z＝30 mm の形状に圧縮成形した場合の圧粉体の密度分

布を求める。図1－13に電解粉Fの場合，図1－14に塊砕粉の場合，図1－15に噴霧粉の場合の結果を示す。これより，密度分布のばらつきは，電解粉Fの場合がもっとも大きく，ついで噴霧粉の場合であり，塊砕粉の場合がもっとも小さい。また，いずれの粉体の場合も，密度のもっとも大きい箇所は上部加圧面の円周部，もっとも小さい箇所は底面の円周部である。そして，いずれの箇所でも，密度は塊砕粉の場合がもっとも大きく，ついで噴霧粉の場合であり，電解粉Fの場合がもっとも小さい。

1．3　銅圧粉体の密度分布

片押加圧方式によるCu圧粉体の密度分布が，潤滑剤の有無，圧粉体厚さ，成形圧力によってどのように異なるかを実験的に検討した。

1．3．1　実験方法

使用した粉末は電解Cu粉Fである。使用した押型の形状を，図1－16に示す。押型の材質は炭素工具鋼3種相当のもので，その硬さはHRC61であり，外型の表面あらさ曲線を図1－17に示す。

粉末はつぎに示す順序にしたがって注意深く押型に充填した。図1－18において，

① 押型を倒立にし，80メッシュ金網を通して粉末を充填する。

② 外型の底面を基準にして，余分な粉末を掻き出す。

③ 粉体の上部に下型ポンチを置く。

④ 押型を正立にする。

⑤ 外型を下方へずらす。

なお，粉末の充填量は，外型と上型ポンチの相対的位置を調整することにより，種々に変えた。加圧成形は油圧プレスで行ない，加圧速度3ton/min，加圧時間5minとし，成形圧力は2，4，6ton/cm² の3

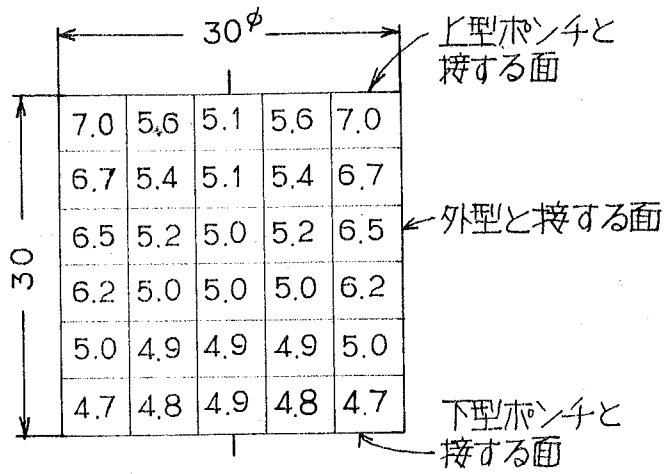


図1－13　電解Cu粉工圧粉体の密度分布
（単位：g/cm³）

7.6	7.5	7.5	7.5	7.6
7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
7.5	7.4	7.5	7.4	7.5
7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
7.3	7.4	7.4	7.4	7.3

図1－14　塊砕Cu粉圧粉体の密度分布

7.1	6.8	6.5	6.8	7.1
7.0	6.8	6.5	6.8	7.0
6.8	6.7	6.5	6.7	6.8
6.7	6.6	6.5	6.6	6.7
6.5	6.5	6.4	6.5	6.5
6.3	6.4	6.4	6.4	6.3

図1－15　噴霧Cu粉圧粉体の密度分布

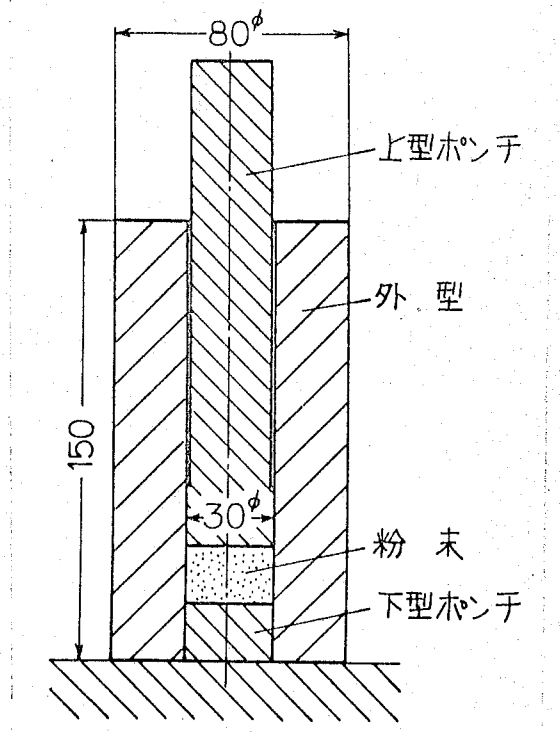


図1－16　圧粉体密度分布測定用押型

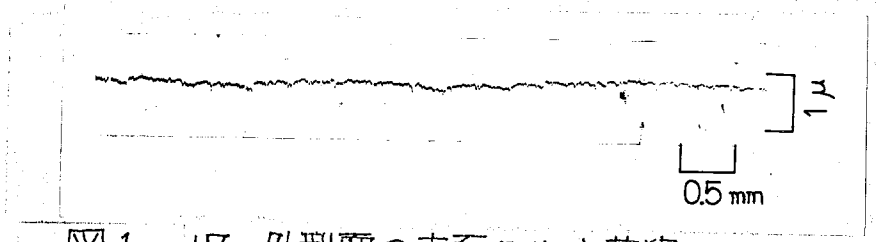


図1－17　外型面の表面あらさ曲線

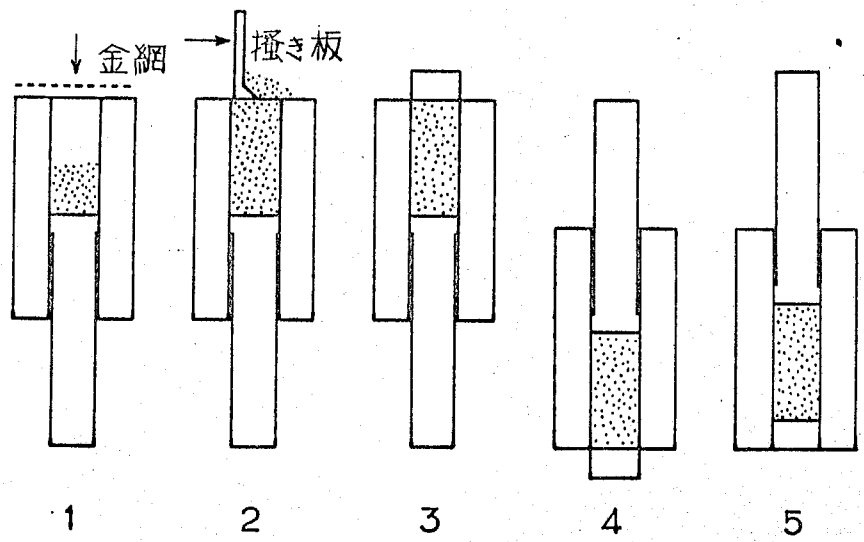


図1－18　粉末の充填方法

種に変えた。

密度は図1－19に示す位置から2×2×2 mm□ の測定試料を，0.4 mm 巾の砥石によって切断採取し，次式によって求めた。

$$\rho = \frac{W}{W_1 - W_2}$$

こゝで，

ρ：圧粉体密度，g/cm³
W：乾燥した試料の空気中における重量，g
W_1：油を含ませた試料の空気中における重量，g
W_2：油を含ませた試料の水中における重量，g

この密度測定法が適正であるかどうかを吟味するために，切断細分する前および後の密度を測定し，それらを比較した。切断細分前の密度は圧粉体重量を，圧粉体直径および厚さをマイクロメータで測定することにより求められる容積で除することによって求めた。切断細分後の密度は前述のようにして求めた2×2×2 mm□ の測定試料の密度の算術平均とした。なお，この時に使用した圧粉体は，後述するように密度が一様である場合，すなわち，外型にステアリン酸亜鉛を塗布し，圧粉体厚さ5 mm のものである。図1－20に，結果を示す。これより，成形圧力が1 ton/cm² までは両者の密度は等しく，成形圧力が1～8 ton/cm² の範囲では細分前の密度の方が細分後の密度よりわずかに大きいことがわかる。しかし，両者の密度は，いずれの成形圧力の場合でもほゞ等しいと云える。すなわち，前述の密度測定法によって求めた密度はほゞ正しい値を示すと云える。

押型によって金属粉を加圧成形する場合，前節で述べたように粉体と外型壁面との摩擦および粉末同志の摩擦によって，圧粉体各部の金属粉

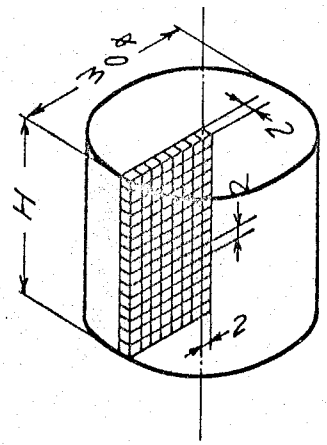


図1－19 密度分布測定箇所

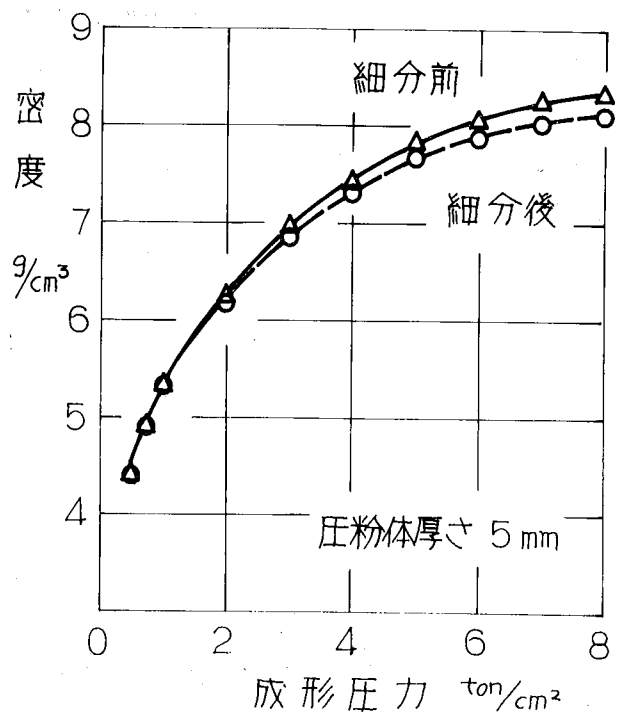


図1－20 細分前後の密度

に伝わる圧力が異なり，密度分布は不一様になる。これらの摩擦を軽減するには潤滑剤を使用することが有効であると考えられるので，潤滑剤の有無によって密度分布がどのように異なるかを測定吟味した。潤滑剤の使用方法としては，ベンゼンに溶解したステアリン酸亜鉛を外型壁面および上型ポンチ面に塗布する型壁潤滑と鋼粉にステアリン酸亜鉛粉を1 wt.% 添加混合する粉末潤滑とを採用した。

1．3．2　実験結果および考察

図1－21に，押型をベンゼンできれいに清浄して粉末を加圧成形した場合の，密度分布と成形圧力，圧粉体厚さとの関係を示す。いずれの成形圧力および圧粉体厚さの場合でも密度は一様でない。圧粉体厚さが一定の場合，成形圧力の増加とともに密度はいずれの箇所でも増大し，かつ最大密度差は増大する。成形圧力が一定の場合，圧粉体厚さの減少とともに圧粉体の密度は増大し，最大密度差は増大する．また，従来の多数の研究者[1][2]によって明らかにされているように，圧粉体の最大密度は上部加圧面の円筒部，最小密度は底面の円周部に存在し，圧粉体の中心線上では上部より下部へいくにしたがい密度は低下し，最下部ではわずかに増加するようである。

図1－22に，型壁潤滑によって粉末を加圧成形した場合の，密度分布と成形圧力，圧粉体厚さとの関係を示す。密度分布は前述の潤滑剤を使用しない場合とほゞ同様の傾向を示す。しかし，最大密度差は同一成形圧力および同一圧粉体厚さでは，潤滑剤を使用しない場合より著しく小さい。また，上部加圧面での密度の平均値は両者の場合ともほゞ等しく，

---

(1) H. Unckel, Archiv für das Eisenhutteuwesen, 18－7・8（1945－1・2），161

(2) G.C. Kuczynski・I.Zaplatynski, Transactions of A.I.M.E, 206（1956－2），215

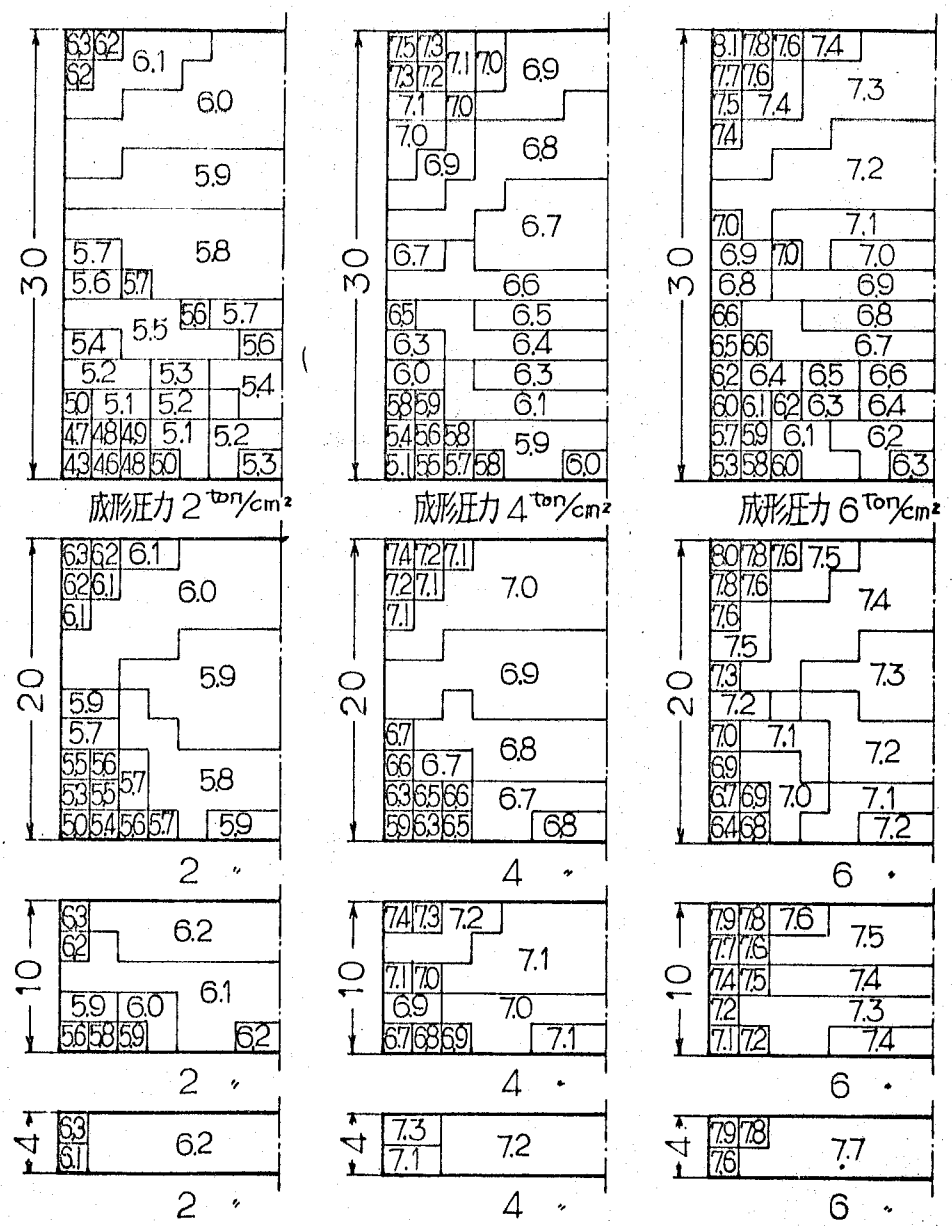


図1－21　圧粉体の密度分布
（潤滑剤を使用しない場合）

図1－22　圧粉体の密度分布
（上型ポンチおよび外型に
潤滑剤を塗布した場合）

底面でのそれは型壁潤滑によって加圧成形した場合の方が著しく大きい。最大密度差は，いずれの成形圧力でも圧粉体厚さの減少とともに減少し，圧形圧力1，2 ton/cm² の場合には圧粉体厚さ 14 mm，4 ton/cm² の場合には 12 mm，6 ton/cm² の場合には 10 mm で，密度は一様になる。

図1－23に，粉末潤滑によって加圧成形した場合の，密度分布と成形圧力，圧粉体厚さとの関係を示す。密度分布は潤滑剤を使用しない場合および型壁潤滑による場合とほゞ同じ傾向を示す。しかし，最大密度差は同一成形圧力および同一圧粉体厚さでは潤滑剤を使用しない場合より著しく小さく，型壁潤滑による場合よりわずかに大きい。また，最大密度差は型壁潤滑による場合と同様に，いずれの成形圧力でも圧粉体厚さの減少とともに減少し，成形圧力 2 ton/cm² の場合には圧粉体厚さ 12 mm，4 ton/cm² の場合には 10 mm，6 ton/cm² の場合には 6 mm で，密度分布は一様になる。そして，密度が一様になる圧粉体厚さは，型壁潤滑による場合より，いずれの成形圧力でもわずかに小さい。

前述のように，圧粉体各部分の最大密度は上部加圧面の円周部に存在し，最小密度は底面の円周部に存在する。図1－24(a)，(b) に，最大密度差と圧粉体厚さとの関係を示す。同図 (a) は成形圧力 4 ton/cm² で加圧成形し，潤滑剤を使用しない場合，型壁潤滑による場合および粉末潤滑による場合の，最大密度差と圧粉体厚さとの関係である。いずれの場合でも圧粉体厚さの増加とともに最大密度差は増大する。また，いずれの圧粉体厚さの場合でも最大密度差は潤滑剤を使用しない場合がもっとも大きく，ついで粉末潤滑による場合が大きい。同図 (b) は潤滑剤を使用しないで，成形圧力を 6，4，2 ton/cm² に変えた場合の，最大密度差と圧粉体厚さとの関係である。いずれの成形圧力の場合でも圧粉体厚

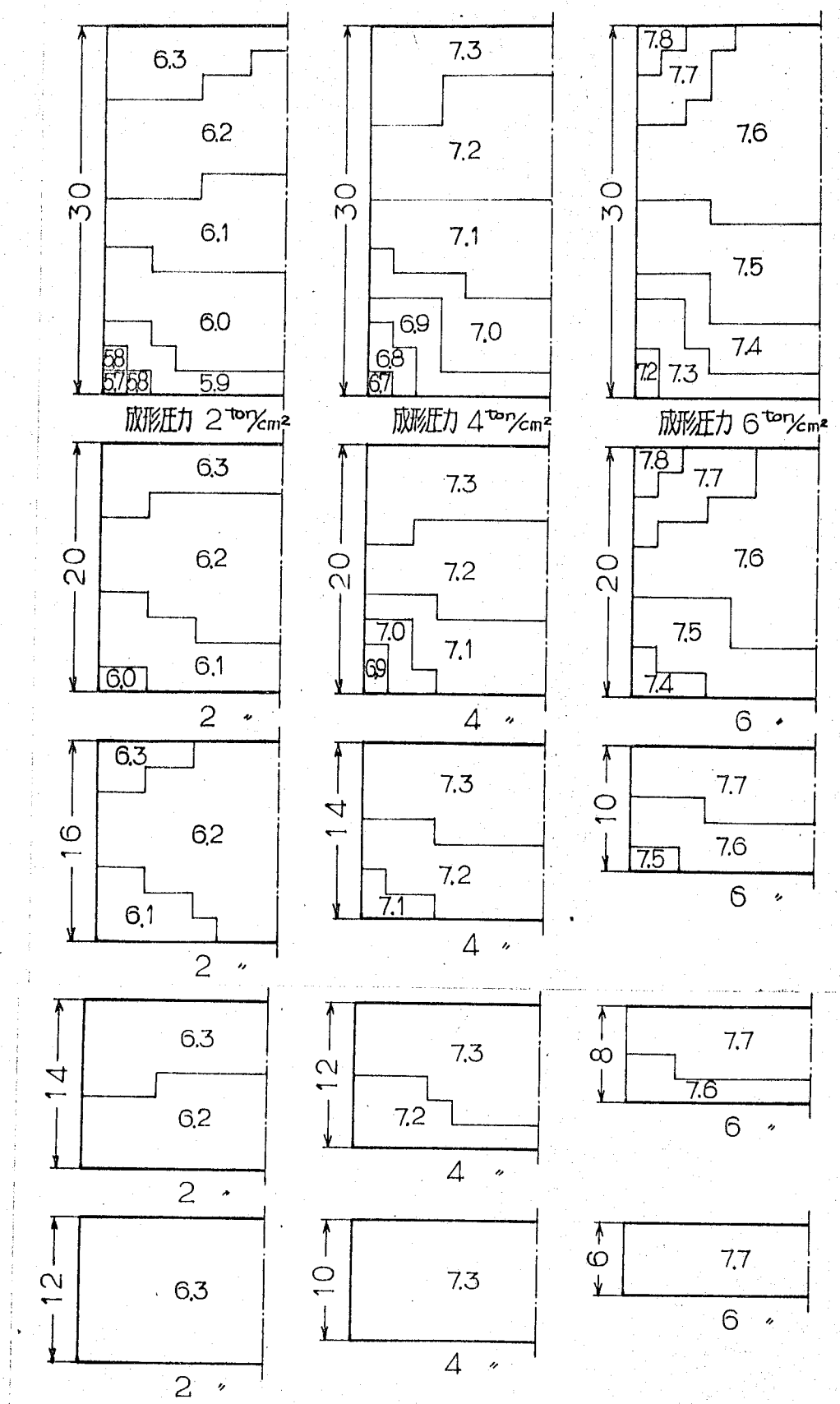
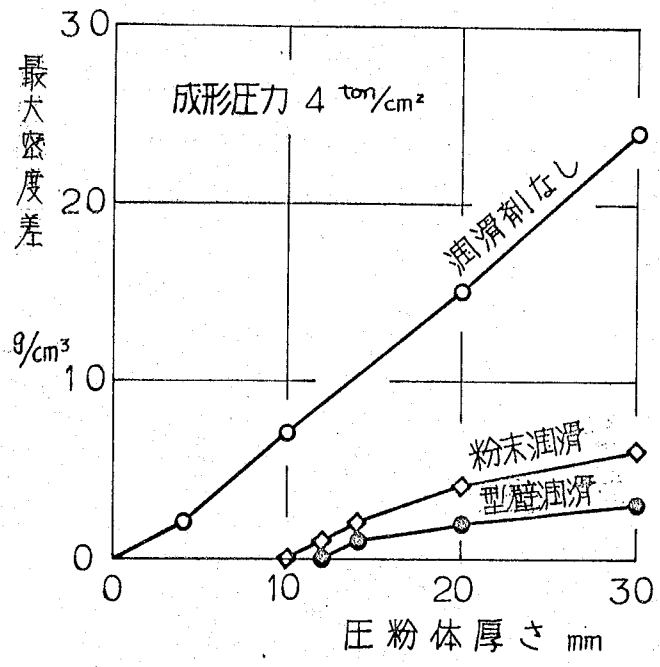
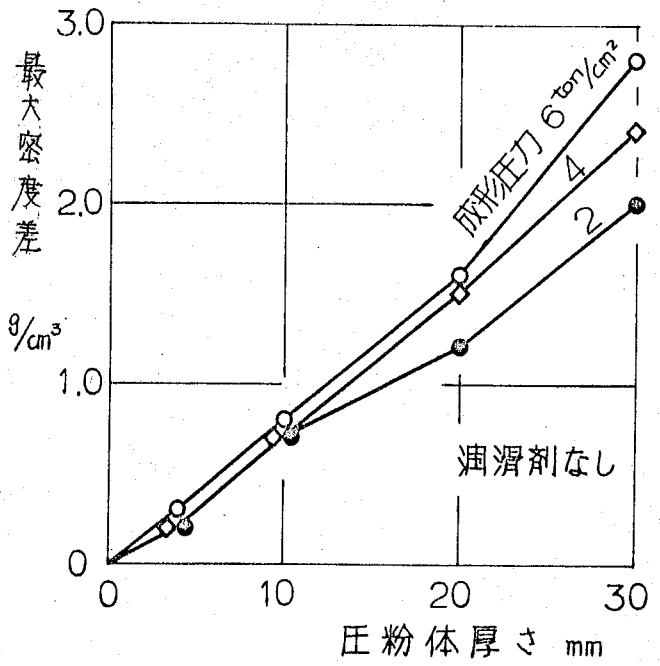


図1－23 圧粉体の密度分布
（粉末に潤滑剤を1 wt.%
添加混合した場合）



(a)



(b)

図1－24 最大密度差と圧粉体厚さとの関係

さの増加とともに最大密度差は増大する。また，いずれの圧粉体厚さの場合でも，成形圧力が大きいほど最大密度差は大きい。型壁潤滑による場合および粉末潤滑による場合でも，同様の結果が得られた。

前述のように，型壁潤滑による場合および粉末潤滑による場合では，最大密度差は著しく減少し，密度が一様になる圧粉体厚さが存在することを知った。密度が一様になる圧粉体厚さの限界線図を，図1－25(a)，(b)に示す。同図(a)は型壁潤滑による場合，同図(b)は粉末潤滑による場合である。密度が一様になる圧粉体厚さの限界値は成形圧力の増加とともに，いずれの場合でも減少する。また，成形圧力1 ton/cm² では両者の限界値は等しく，成形圧力2～7 ton/cm² の圧力範囲では限界値は型壁潤滑による場合の方が粉末潤滑による場合よりわずかに大きい。かつ，両者の限界値の差は，成形圧力の増加とともに増大する。

以上より，潤滑剤は圧粉体密度を一様にするために著しく効果のあることを知った。すなわち，潤滑剤の使用方法として，型壁潤滑と粉末潤滑による方法があり，成形圧力の小さい圧力範囲では両者はほゞ等しい効果を示し，成形圧力の大きい圧力範囲では型壁潤滑による方がより効果的である。これは，成形圧力の大きい場合，密度を一様にするためには粉末同志の摩擦より，粉体と外型壁面との摩擦を軽減する方が，より効果的であることを示していると判断される。

粉末潤滑の場合のように，基材粉末に他種粉末を添加混合し，混合粉末を加圧成形して得られる圧粉体は，圧粉体内に存在する基材粉末の割合は100%でない。そこで，基材粉末に潤滑剤を添加混合する粉末潤滑と基材粉末に潤滑剤を添加混合しない型壁潤滑によって加圧成形する場合，圧粉体内に存在する銅の割合，すなわち銅の充填率がどのように異なるかを測定吟味した。図1－26に，測定結果を示す。成形圧力2 ton/cm²

では，銅の充填率は粉末潤滑による場合の方が型壁潤滑による場合よりわずかに大きい。しかし，成形圧力4，6 ton/cm² では，粉末潤滑による場合の方がわずかに小さい。すなわち，いずれの潤滑使用方法の場合でも，銅の充填率は成形圧力の増加とともに増大し，その増大の割合は型壁潤滑による場合の方が粉末潤滑による場合より大きい。これは，潤滑剤の添加混合による粉末同志の摩擦の軽減によって生ずる銅の充填率の増加と，潤滑剤の添加混合による圧粉体内に存在する銅の充填率の減少とを比較して，成形圧力の小さい範囲では前者の方が後者より大きく，成形圧力の大きい範囲では前者の方が後者より小さいことを示していると判断される。

1．3．3　まとめ

以上の実験結果より，つぎのことがわかった。

(1)　圧粉体の密度は場所によって異なり，片押加圧方式によって加圧成形した場合，圧粉体の最大密度は上部加圧面の円周部に存在し，最小密度は底面の円周部に存在する。また，圧粉体の中心線上では上部より下部へいくにしたがって密度は低下し，最下部ではわずかに増加するようである。

(2)　ステアリン酸亜鉛を外型壁面に塗布して加圧成形した場合でも，銅粉末に添加混合して加圧成形した場合でも，ステアリン酸亜鉛を使用しない場合より，最大密度差は著しく減少する。

(3)　潤滑剤を使用して加圧成形する場合，圧粉体密度が一様になる圧粉体厚さの限界値が存在する。この限界値は，型壁潤滑によって加圧成形した場合の方が，粉末潤滑によって加圧成形した場合より大きく，かつ成形圧力の増加とともにわずかに減少する。

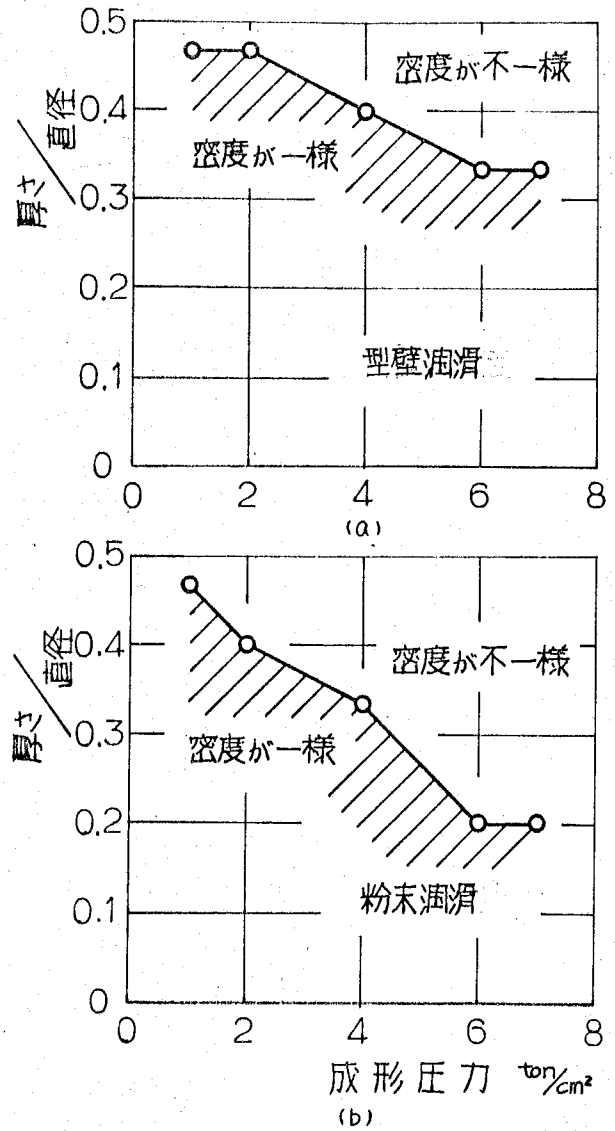


図1－25　密度が一様になる
厚さ／直径限界線図

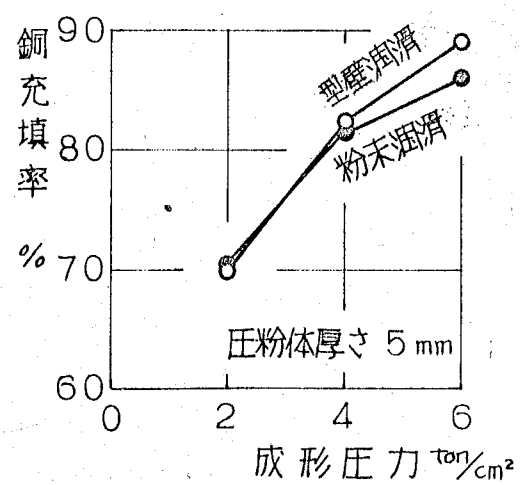


図1－26　潤滑剤の使用法と
銅充填率との関係

1．4　銅基圧粉体の焼結時の寸法変化

圧粉体の寸法変化を低下させることなく，焼結を行なうための基礎資料を提供する目的で，Cu粉を基材とした圧粉体の加熱時の寸法変化を実験的に測定吟味した。圧粉体の焼結時の寸法変化についての研究は，従来より行われている。Fe圧粉体について，Knopp[1]は炭素を添加することにより，また，Jamisonら[2]はCuを添加することにより，焼結時に膨張することを確かめ，藤井[3]はFe焼結体の寸法変化におよぼす添加金属の影響について吟味している。Cu圧粉体について，Duwezら[4]のCu－Zn圧粉体および三谷ら[5]のCu－Al圧粉体についての研究があり，Cu－Zn圧粉体では約650°F（約343°C）で急激な膨張を生ずること，またCu－Al圧粉体では548°Cで異常発熱が生じ，それにより急激な膨張を生ずることが明らかにされている。しかし，圧粉体と同一寸法精度の焼結体を得るという観点から，圧粉体の焼結時の寸法変化を系統的に吟味した研究はみられない。

1．4．1　実験方法

実験に使用した基材Cu粉は，粒度の異なる3種の電解Cu粉である。焼結時の寸法変化調整用に添加した金属粉は，Sn，Bi，Cd，Pb，Zn，Sb，Mg，Al，Ag，Si，Ni，Fe，Ti，W粉の14種である。加熱時の寸法変化測定用圧粉体試料は，Cu粉に上記の添加金属粉を混合攪拌後，押型に充填し図1－27に示す形状に，所要の圧力で加圧成形したものである。その際，一様密度の圧粉体試料を得る目的

---

(1) W.V. Knopp, Precision Metal Molding, 9 (1960), 55
(2) R.S. Jamison・E. Geijer, Progress in Powder Metallurgy, 16 (1960), 19
(3) 藤井康次，粉体および粉末冶金，11－5 (1964), 223
(4) P. Duwez・H. Martens, Transactions of AIME, 185 (1949－9), 571
(5) 三谷裕康・庄司啓一郎，粉体および粉末冶金，12－4 (1965), 152

で，粉末の加圧成形は，固体潤滑剤である黒鉛粉を一様に塗布した押型を使用して，フローティング加圧方式によって行なった。上述のようにして得られた圧粉体試料の加熱時の寸法変化を，試料の加圧方向，すなわち軸方向について，川崎製鉄製D－2型熱膨張計を使用して測定した。加熱は真空中（約10^{-2} mmHg）で行ない，加熱速度は4°C/min とした。温度は，圧粉体試料近傍の温度を熱電対で測定した。寸法変化および温度の記録は，自動平衡型電位差計によって行なった。

1．4．2　銅圧粉体の寸法変化

基材として使用したCu粉の圧粉体が，加熱によってどのような寸法変化をするか，またその寸法変化がCu粉の種類および成形圧力によってどのように異なるかについて吟味した。図1－2(7)に，平均粒径の異なる3種の電解Cu粉Ⅰ，Ⅱ，Ⅲを，それぞれ圧力4 ton/cm² で加圧成形した圧粉体試料の加熱時の寸法変化について測定した結果を示す。図において，正の寸法変化は膨張を，負の寸法変化は収縮を示す。いずれの圧粉体試料も，加熱初期においては温度の上昇とともに直線的に膨張する。このときの膨張係数は約1.0×10^{-5} °C^{-1}で，それはCuの膨張係数1.65×10^{-5} °C^{-1} (1) に比べてわずかに小さい。電解Cu粉Ⅰでは約300°Cに達すると徐々に収縮が始まり，約450°C以上では加熱温度の上昇とともに収縮の割合は増大し，加熱を完了した900°Cでの収縮率は約8.0%である。電解Cu粉ⅡおよびⅢの加熱にともなう寸法変化の状況は，電解Cu粉Ⅰのそれとほゞ同じである。しかし，収縮が始まる温度は電解Cu粉Ⅱでは約430°C，電解Cu粉Ⅲでは約520°Cであり，加熱を完了した900°Cでの収縮率は電解Cu粉Ⅱでは約3.9%，電解Cu粉Ⅲでは約1.5%である。これより，平均粒径の小さい粉末の圧粉体ほど，

---

(1)　金属学会編，金属便覧，(1960)，2，丸善

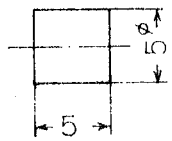


図1－27 寸法変化測定用
試料の形状

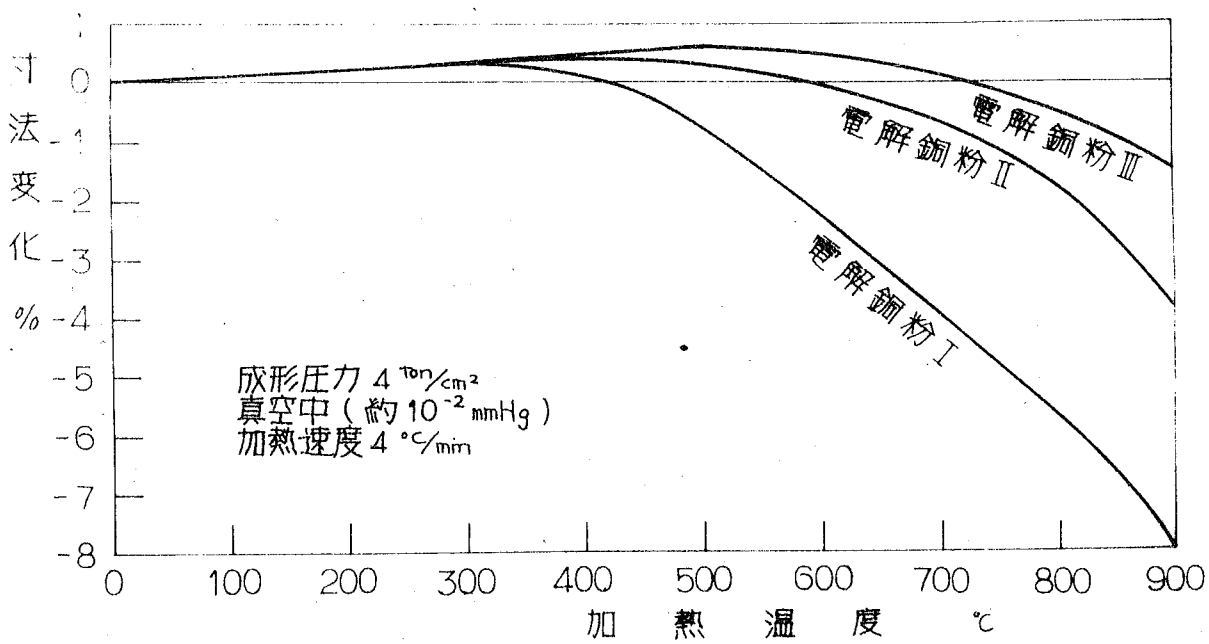
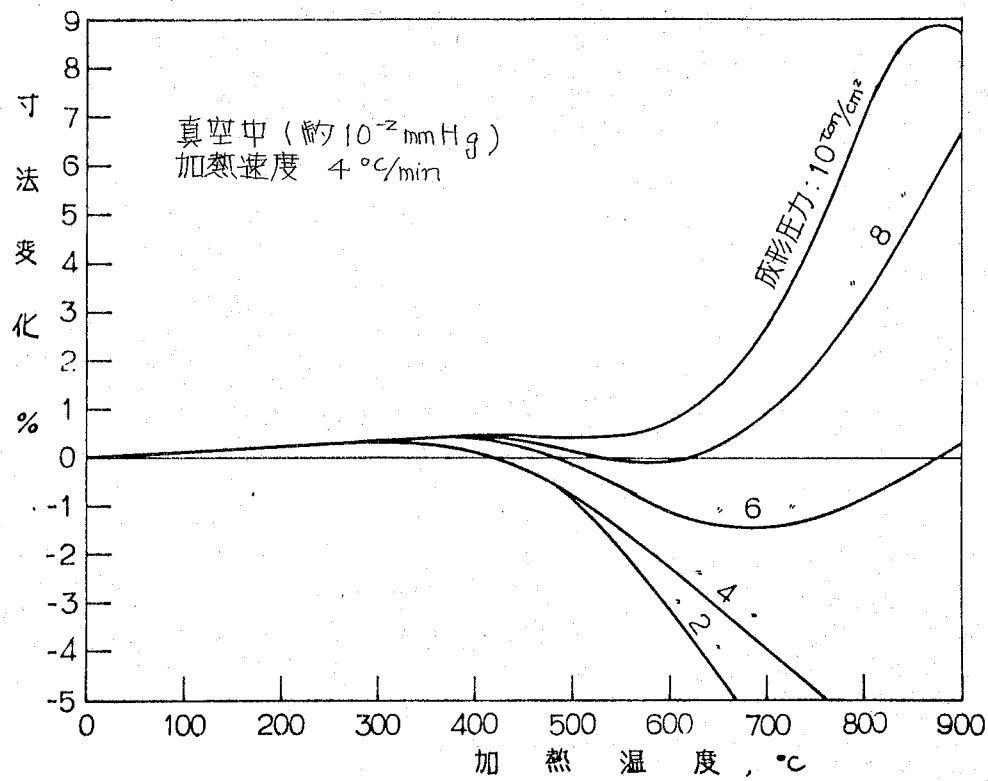


図1－27′ 寸法変化－加熱温度特性

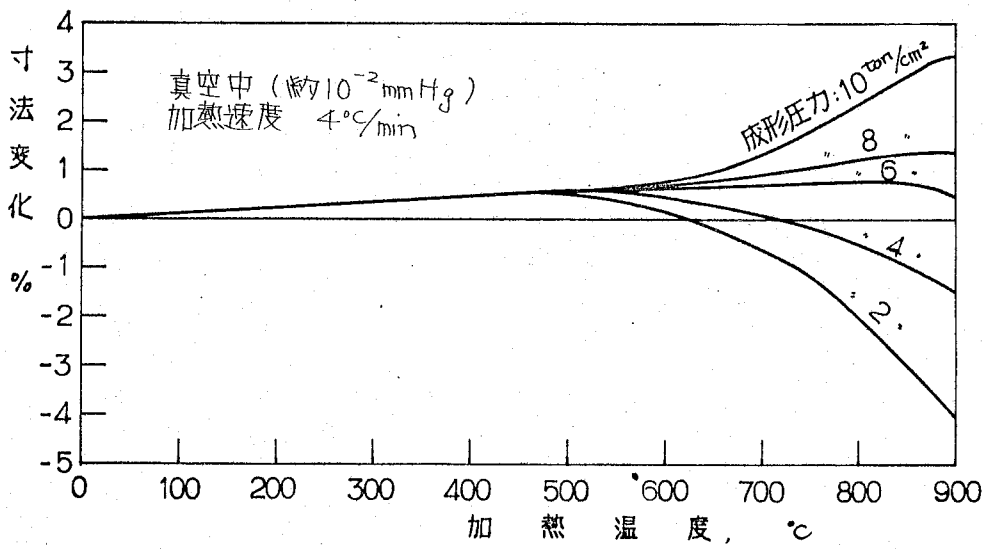
焼結時の収縮開始温度は低く，かつ900°C での収縮率は大きいことがわかる。

図1－28 (a)，(b) に，電解Cu粉Ⅰおよび Ⅲを，それぞれ圧力2，4，6，8，10ton/cm² で加圧成形した圧粉体の，加熱時の寸法変化を示す。同図 (a) は電解Cu粉Ⅰの場合である。成形圧力4ton/cm² までの圧粉体の加熱時の寸法変化の状況は前述のそれと同じであり，加熱による成形圧力の小さい方が大きい。しかし，成形圧力6ton/cm² 以上の圧粉体の加熱時の寸法変化の状況は，成形圧力4ton/cm² までの圧粉体と異なり，加熱温度の上昇とともに収縮率は増大するが，ある温度で収縮率は最大となり，それ以上の温度で再び膨張する。上述の収縮率が最大となる温度，すなわち膨張が開始する温度は成形圧力によって異なり，成形圧力6ton/cm² の場合では約670°C，8ton/cm² の場合では約580°C，10ton/cm² の場合では約550°Cであり，この膨張開始温度は，成形圧力が大きくなると低くなる。また，収縮率は，成形圧力が大きいほど小さく，上記温度以上での膨張率は，成形圧力が大きいほど大きい。同図 (b) は電解Cu粉Ⅲの場合である。成形圧力4ton/cm² までの圧粉体の寸法変化の状況は，電解Cu粉Ⅰのそれとほゞ同じであり，収縮が開始する温度は470°C～530°C である。しかし，成形圧力6ton/cm²以上の圧粉体の加熱時の寸法変化の状況は，4ton/cm² までの圧粉体および電解Cu粉Ⅰを6ton/cm²以上で加圧成形した圧粉体の場合と異なり，500°C以上の温度でも収縮することなく，温度の上昇とともに膨張する。その膨張量は成形圧力によって異なり，成形圧力の大きい圧粉体ほど大きい。

いま，電解Cu粉Ⅰを，成形圧力6ton/cm²，焼結温度900°C，焼結時間1hr で成形および焼結したものゝ加圧面表層部の断面を，顕微



(a) 電解銅粉Ⅰの場合



(b) 電解銅粉Ⅲの場合

図1－28 成形圧力による寸法変化－加熱温度特性の影響

鏡で観察した。図1－29に観察結果を示す。焼結体の加圧面にふくれが生じ，表層部にふくれが生じている。よって，成形圧力6ton/cm²以上の圧粉体の加熱時にみられる再膨張は，焼結過程で生成する圧粉体表層部のふくれによると考えられる。これは，加圧成形時に圧粉体内にとじ込められたガスおよび粉体表面に吸着しているガスが，加熱初期では圧粉体の連続気孔を通して圧粉体外へ放出されるが，収縮が始まる，すなわち焼結が始まる以上の温度では，粉末相互の結合が表層部において内部よりも早く進行し，表面に開口する気孔が閉じられ，圧粉体の表面からガスが放出されなくなり，表層部に大きな空孔を生じ，これが温度上昇によってふくれあがり，焼結後も焼結体の表層部に「ふくれ」となって残留することによると考えられる。Duwezら[1]も銅粉を約60,000 psi（約4.2 ton/cm²）以上の圧力で加圧成形した圧粉体を約1,600°F（約870°C）で焼結した場合，上述の膨張をみとめ，それは筆者と同じく焼結体表層部に生ずるふくれに起因するとしている。

上述の再膨張が，加熱時に放出するガスを吸着する物質を，銅圧粉体に添加することによって，除去できるかどうかを吟味した。ガス吸着物質として，気相状態でガスを吸着する分散ゲッタのMg，および固相状態でガスを吸着する接触ゲッタのTiを使用した。いずれの場合も添加量は0.6 wt.%とした。なお，それと比較する目的で，900°Cまでの温度ではCuと相互に拡散あるいは反応を生じないSiCを添加した圧粉体についても吟味した。図1－30に結果を示す。SiCを添加したCu圧粉体は，Cu圧粉体と同じように，加熱温度の上昇とともに膨張→収縮→膨張の寸法変化を示す。しかし，Mg，Tiを添加した圧粉体は，約550°Cまでは温度の上昇とともに膨張し，それ以上900°Cまで

---

(1) P. Duwez・H. Martens, Transactions of AIME, 18 (1949), 571

図1－29 加圧面表層部の断面
顕微鏡写真 ×(42×7/6)

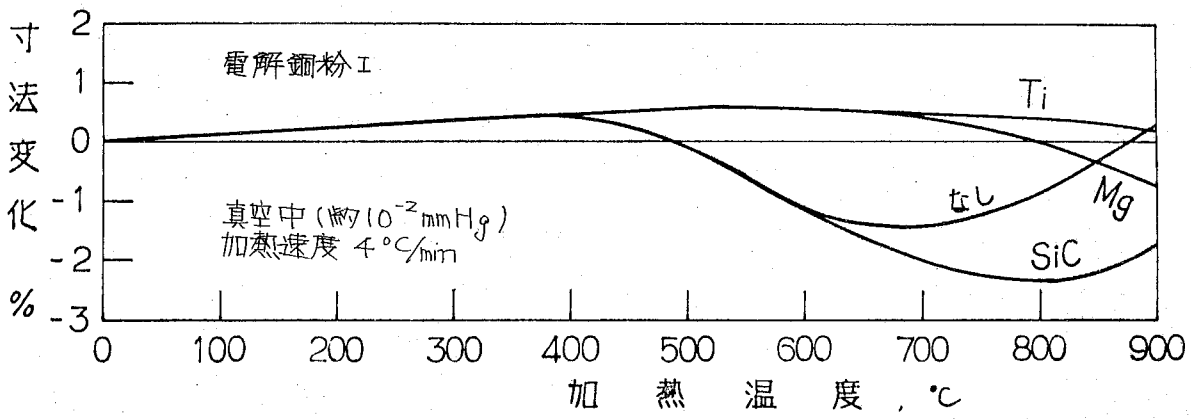


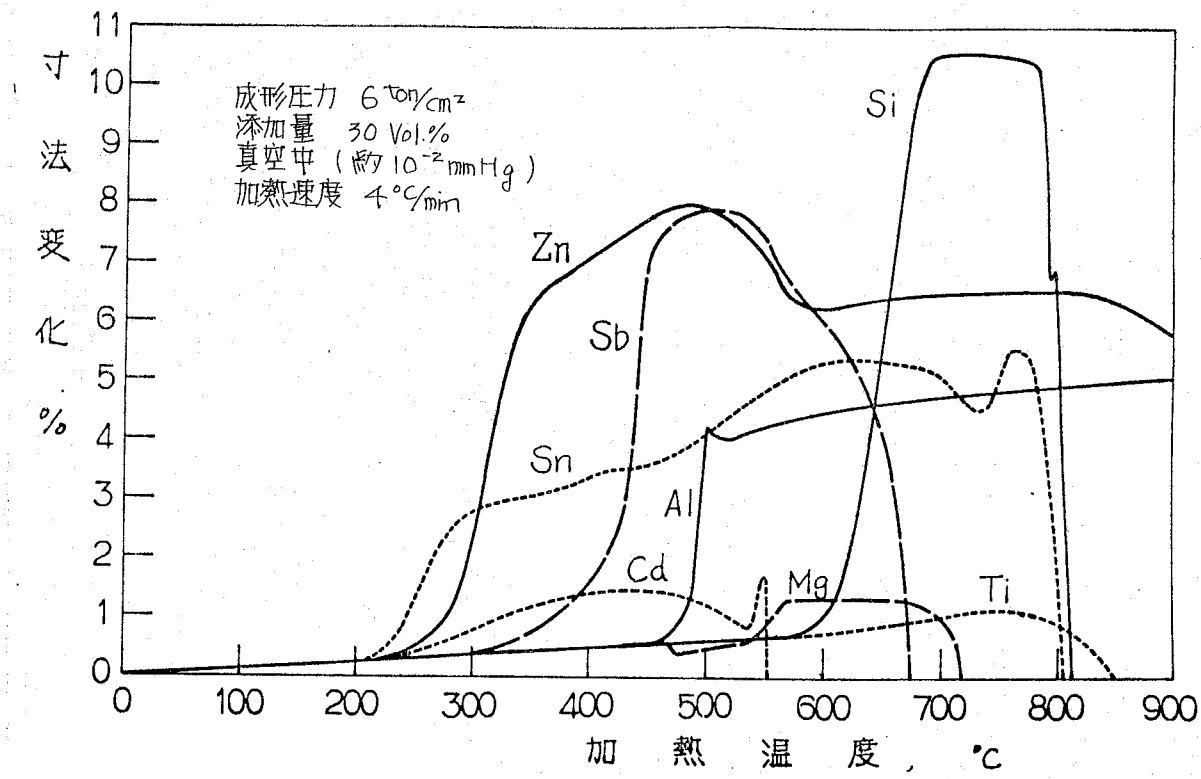
図1－30 添加物質による寸法変化－加熱温度特性の影響
(添加量 0.6 wt.%, 成形圧力 6 ton/cm²)

収縮し，膨張は生じない。また，Mg および Ti を添加した Cu 焼結体の断面を，顕微鏡で観察した結果，表層部に前述の空孔によるふくれはみとめられなかった。これより，成形圧力 6 ton/cm² 以上の Cu 圧粉体を焼結する場合に生ずる再膨張の原因となるガスは，Mg，Ti のようなガスを吸着する金属粉を添加することによって除去されることがわかる。

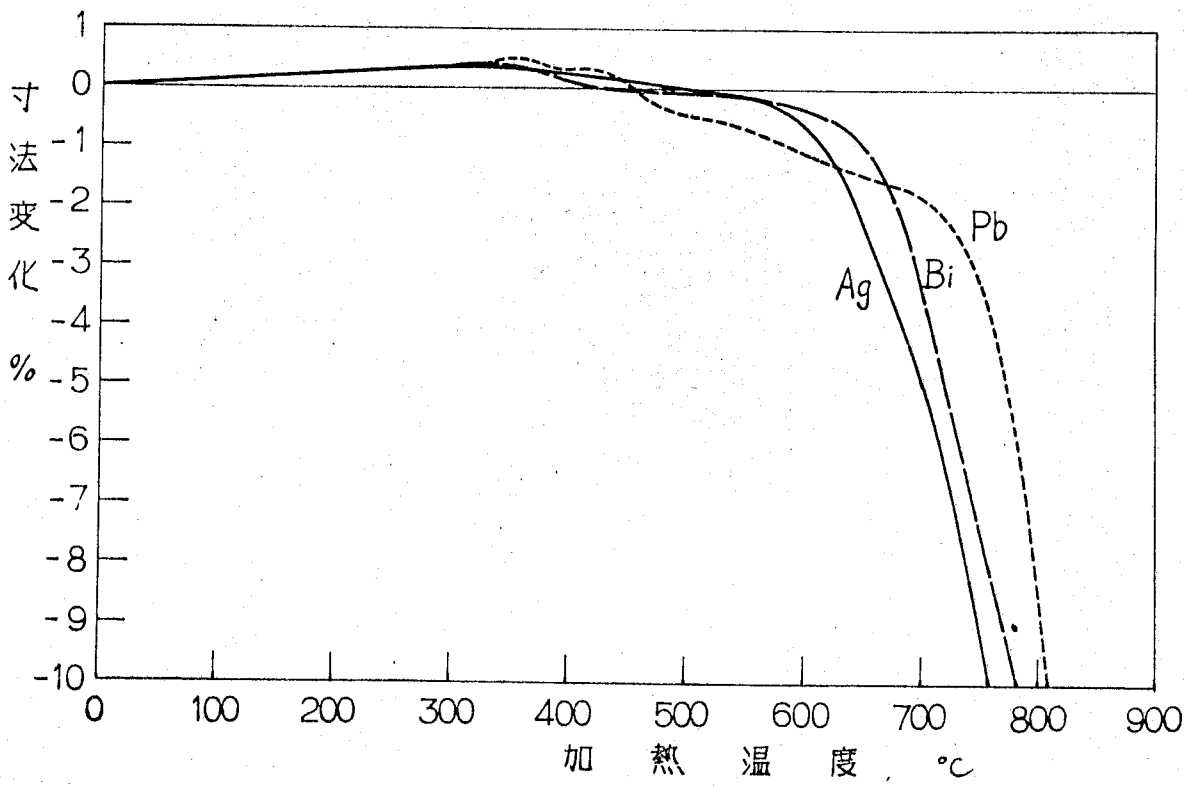
1．4．3　銅－添加金属圧粉体の寸法変化

電解 Cu 粉末に種々の金属粉を添加し，それを圧力 6 ton/cm² で加圧成形した圧粉体が，加熱によってどのような寸法変化を示すかについて吟味測定した。添加量は容量で 30 %に一定とした。図 1－31 (a), (b), (c) に結果を示す。同図 (a) は，電解 Cu 粉末の圧粉体の寸法変化の状況と異なり，加熱温度の上昇とともに比較的急激な膨張を生ずるもの＞寸法変化を示し，Sn，Cd，Zn，Sb，Mg，Al，Si，Ti を添加した圧粉体にみられる。同図 (b) は，加熱初期では温度の上昇につれてほゞ直線的に膨張し，ついで約 300°C 付近から温度の上昇とともに収縮し，600 ～ 700°C で急激に収縮するものの寸法変化を示し，Bi，Pb，Ag を添加した圧粉体にみられる。同図 (c) は，電解 Cu 粉の圧粉体の寸法変化とほゞ同様な寸法変化を示すものの寸法変化を示し，Ni，Fe，W を添加した圧粉体にみられる。

いま，添加金属の種類による上述の差異を吟味する目的で，添加金属の Cu への最大固溶量および Cu の添加金属への最大固溶量を表示すると，表 1－1 になる．これより，Sn，Cd，Zn，Sb，Mg，Al，Si，Ti のように，Cu 圧粉体へ添加することにより，加熱時にある温度で比較的急激に膨張する添加金属は，添加金属の Cu へ固溶する量が，Cu の添加金属へ固溶する量に比べて大きい場合の金属であることがわかる。また，Bi，Pb，Ag のように，Cu 圧粉体へ添加するこ

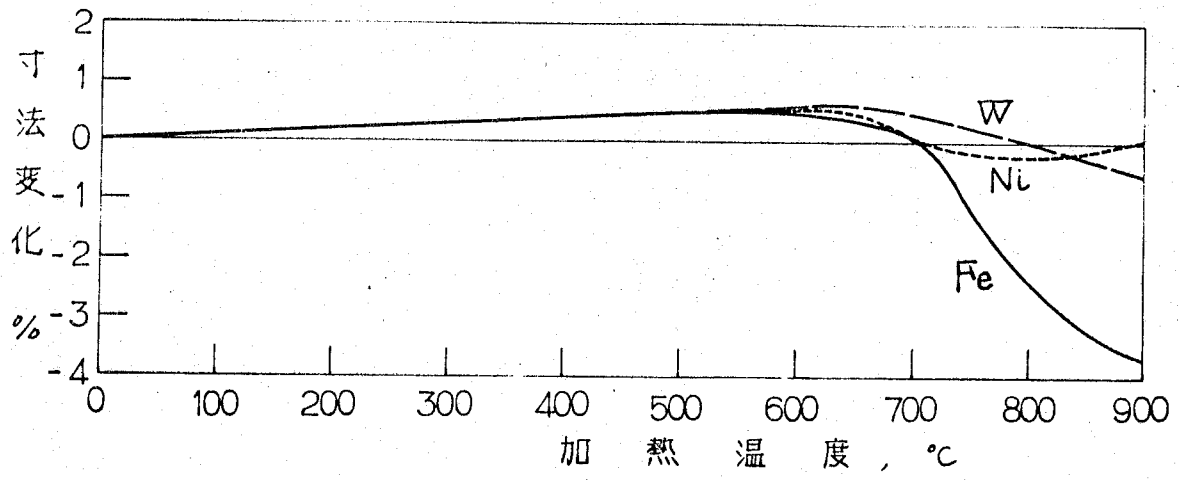


(a) 比較的急激な膨張を生ずる場合



(b) 急激な収縮を生ずる場合

図1－31 銅－添加金属圧粉体の寸法変化－加熱温度特性（その1）



(c) 銅圧粉体とほゞ同様な寸法変化を示す場合

図1－31 銅－添加金属圧粉体の寸法変化－加熱温度特性（その2）

表1－1 銅－添加金属合金の最大固溶量[1),2)]

添加金属	添加金属の銅への最大固溶量 at.%	銅の添加金属への最大固溶量 at.%
焼結時に膨張効果を示す添加金属		
錫	9.3 (520℃)	0.5
カドミウム	1.5 (549℃)	0.5
亜鉛	38.5 (454℃)	2.5 (424℃)
アンチモン	6.0 (645℃)	probably small
マグネシウム	6.5 (722℃)	0.01
アルミニウム	20.5 (565℃)	2.5 (584℃)
珪素	11.5 (842℃)	<2
チタン	5.6 (885℃)	1.6 (800℃)
焼結時に収縮効果を示す添加金属		
蒼鉛	<0.001	very small
鉛	0.01～0.02	very small
銀	5.4 (779℃)	14.1 (779℃)
焼結時に寸法効果を示さない添加金属		
ニッケル	全域固溶	全域固溶
鉄		
タングステン		

(1) 日本金属学会編，金属便覧，1960，丸善
(2) C.J. Smithells, Metals Reference Book, 1949

とにより，加熱時に600～700℃で急激に収縮する添加金属は，添加金属のCuへ固溶する量が，Cuの添加金属へ固溶する量に比べて小さい，あるいは相互に固溶する量が極めて小さくかつそれらの合金あるいは添加金属の融点が低い場合の金属である。また，Ni，Fe，Wのように，Cu圧粉体へ添加することによっても，Cu圧粉体の寸法変化とほゞ同様な寸法変化を示す場合の添加金属は，添加金属の融点がCuに比べて著しく高い，あるいはNiのように全域固溶する場合の金属である。

1．4．4　まとめ

以上の実験結果より，Cu圧粉体およびCu－添加金属圧粉体について，つぎのことがわかった。

(1)　Cu粉を加圧成形した圧粉体の加熱時の寸法変化の状況は，Cu粉の粒度および成形圧力によって異なり，成形圧力4ton/cm² 以下の圧粉では，加熱によって膨張→収縮の変化を示し，その収縮量は，粒度の小さい粉末の場合ほど大きい。成形圧力6ton/cm² 以上の圧粉体では，粒度の小さい電解Cu粉Ⅱの場合で膨張→収縮→膨張の変化を示し，粒度の大きい電解Cu粉Ⅲの場合では膨張だけの変化を示す。

(2)　上述の再膨張は，加圧成形時に圧粉体内にとじ込められたガスおよび粉体表面に吸着しているガスにより生ずる焼結体表層部のふくれによると考えられる。そのふくれは，Mg，Tiなどのガスを吸着する金属粉を添加することによって消去される。

(3)　Cu粉に異種の金属粉を添加したCu－添加金属圧粉体の焼結時の寸法変化の状況は，添加金属粉の種類によって異なり，つぎの3つに分類される。

①　添加金属のCuへ固溶する量が，Cuの添加金属へ固溶する量に

比べて著しく大きい金属，すなわちSn，Cd，Zn，Sb，Mg，Al，Si，Tiを添加した圧粉体は，焼結時に膨張する。

(ii) 相互に固溶する量が極めて小さい金属，すなわちBi，Pb，Alを添加した圧粉体は，焼結時に収縮する。

(iii) 添加金属の融点がCuに比べて著しく高い，あるいはお互いに全域固溶する金属，すなわちNi，Fe，Wを添加した圧粉体の寸法変化の状況は，Cu圧粉体の寸法変化の状況に似ている。

1．5 銅基圧粉体の焼結時の拡散について

前節で明らかになったCu－添加金属圧粉体の焼結時の膨張および収縮現象の要因を，X線マイクロアナライザを使用して，焼結後の金属の特性X線強度を測定することによって，それぞれの金属間の拡散の状態を吟味した。

1．5．1 Cu圧粉体－添加金属圧粉体の拡散

前節の実験結果にもとづき，Cu－添加金属圧粉体が焼結時に膨張する添加金属粉としてSn，Zn，Al，焼結時に収縮する添加金属粉としてPb，Agを取り上げ，Cu圧粉体と各種の添加金属圧粉体との接触境界面での，添加金属の特性X線強度を島津製作所製X線マイクロアナライザ（電子加速電圧：20KV，電子ビーム直径：3μ，試料送り速度：8μ/min，真空度：10^{-4}mmHg）によって測定した。供試Cu粉として，電解Cu粉Iを使用した。

使用した圧粉体試料の形状を図1－32に示す。試料の内部（図において実線で示す部分）は添加金属粉の圧粉体，周辺部はCu粉の圧粉体である。以下，試料の作成法について述べる。① 添加金属粉を押型に充填し，圧力5ton/cm²で加圧成形して，寸法26×13×5mmの圧粉

体をつくる。② 圧粉体の加圧面および下型面（26×13 mm の面）を超仕上によって平行に仕上げる。③ 圧粉体を真空中（10^{-2}mmHg）で 150°C にて2時間加熱し，超仕上に使用した灯油を蒸発除去する。④ 圧粉体を寸法 40×20 mm の押型中におき周辺に Cu 粉を充填し，圧力 4ton/cm² で加圧成形して，上記寸法の試料をつくる。

この試料を使用して，つぎの操作を行なった。① 試料を真空中（10^{-2} mmHg）で，4°C/mmの加熱速度で，所定の温度（拡散層が特性X線強度の測定によって比較的明瞭に顕出される温度，すなわち Cu－Sn 圧粉体では 550°C，Cu－Zn 圧粉体では 550°C，Cu－Al 圧粉体では 580°C，Cu－Pb 圧粉体では 700°C，Cu－Ag 圧粉体では 960°C）に加熱し，10 分間保持した後，試料を挿入した石英管ごと水中で冷却する。② a－a′面で切削し，切断面を超仕上およびバフ仕上して，それを腐食液によって腐食し，顕微鏡組織を顕出して，その面を測定面とする。③ 厚さ方向に，Al 特性X線強度を測定する。

図1－33に，Cu－Al 圧粉体焼結試料の，Al 特性X線強度およびそれと対応する箇所の顕微鏡組織を対比して示す。特性X線強度の100は，純 Al 金属の Al 特性X線強度を求め，その値を100とすることによって決定した。図において，a 点より左側では Al 特性X線強度は零，すなわち Cu 単体，b 点より右側では100，すなわち Al 単体である。また，a 点と b 点の間では，Al 特性X線強度は零と100の間を変動している。云い変えると，Cu と Al とが共存した組織である。これは，Cu と Al が相互に拡散して生じたものと判断される。そこで，a 点から b 点までを拡散層と呼ぶことにする。Al 特性X線強度と Cu－Al 系平衡状態図より判断して，顕微鏡組織で Cu 単体に隣接している部分は γ_2 相，それに続く白色部分は θ 相，黒色部分は η 相と判断され，

θ相とκ相は相互に層状をなしている。

図1－34に，Cu－Sn圧粉体の場合を示す。この場合には，拡散層にε相，η相が生成しており，顕微鏡組織で灰色のε相，Cuとの境界をはっきりと示す黒線で包まれた白色のη相がみられる。

図1－35に，Cu－Zn圧粉体の場合を示す。拡散層にγ相，ε相，η相が生成しており，顕微鏡組織で黒色のη相，白色粒状のε相がみられる。

図1－36に，Cu－Pb圧粉体の場合を示す。顕微鏡組織でところどころに白色の粒状にみえる組織がみられる。この組織のCu特性X線強度を測定した結果，零であり，Cuは存在しないことがわかった。したがって，この部分はCuとPbの拡散層ではない。拡散層は特性X線強度の立ち上がりのごく狭い範囲にのみみられる。

図1－37に，Cu－Ag圧粉体の場合を示す。CuとAgの境界面のCu側に，Agをわずかに含んだCu固溶体が生成している。この部分のCu特性X線強度は非常にわずかであるので，本実験では，この部分を拡散層としない。

以上を総括すると，表1－2になる。これより，Cu－Al，Cu－Sn，Cu－Zn圧粉体焼結試料では，いずれも明瞭に拡散層が生成しており，数種の合金相がみられる。この場合の混合圧粉体は焼結時に膨張することは前節で述べた。Cu－Pb，Cu－Ag圧粉体焼結試料では，拡散層はほとんどないので，拡散はほとんど行なわれない。ことに，Cu－PbではPbの融点327℃よりも高い温度で焼結しており，Cu－AgではAgの融点960℃で焼結しているにもかゝわらず，上記のように拡散がおこなわれていない事実は，これらの場合には拡散が極めておこなわれにくいことを意味する。この場合の混合圧粉体は焼結時に収縮するこ

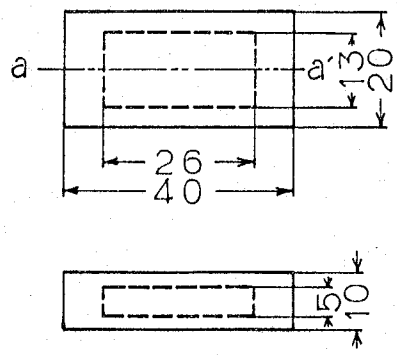


図1－32　圧粉体試料の形状

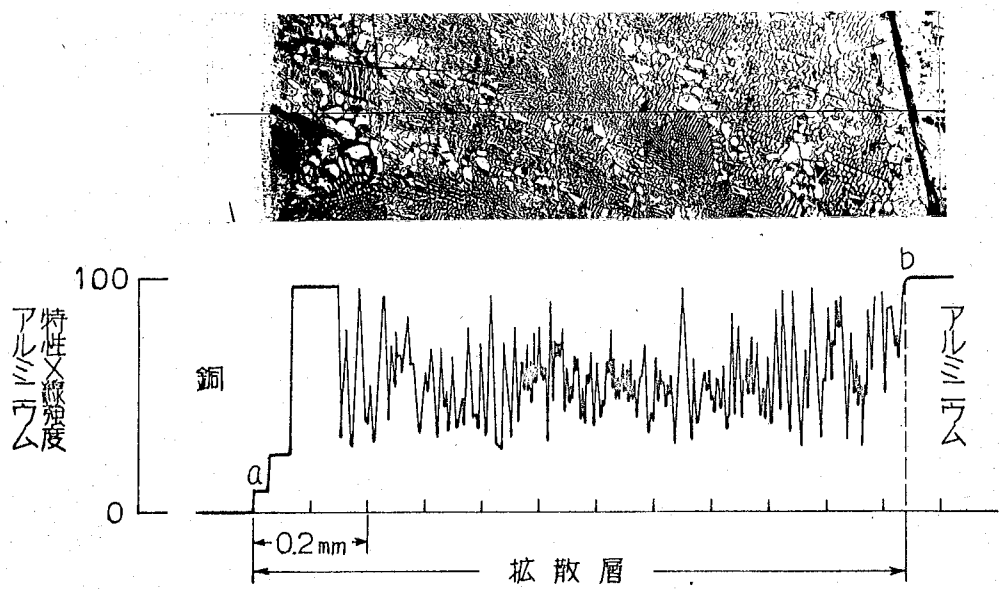


図1－33　Cu-Al圧粉体焼結試料の特性X線強度
および顕微鏡写真（焼結温度580°C）

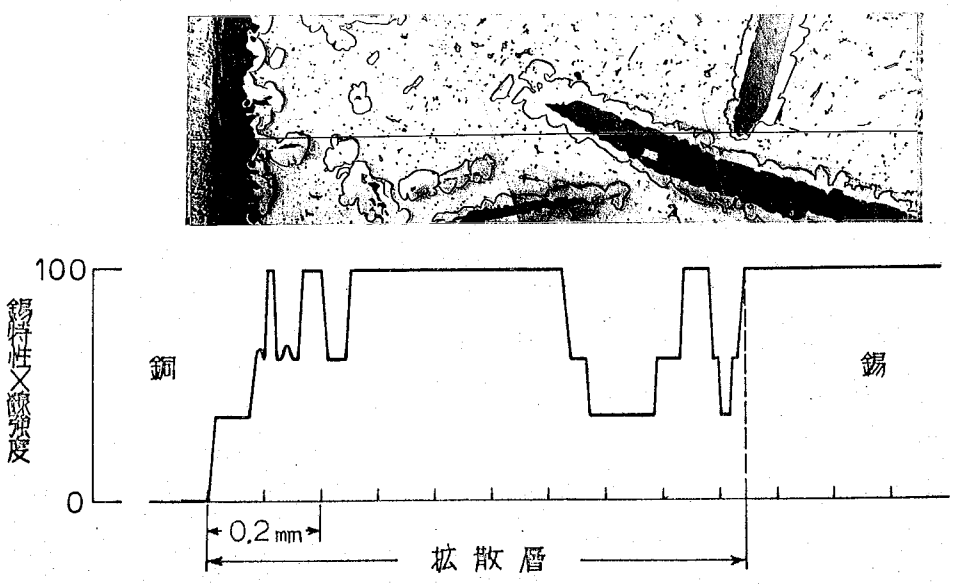


図1－34　Cu-Sn圧粉体焼結試料の特性X線強度
および顕微鏡写真（焼結温度550°C）

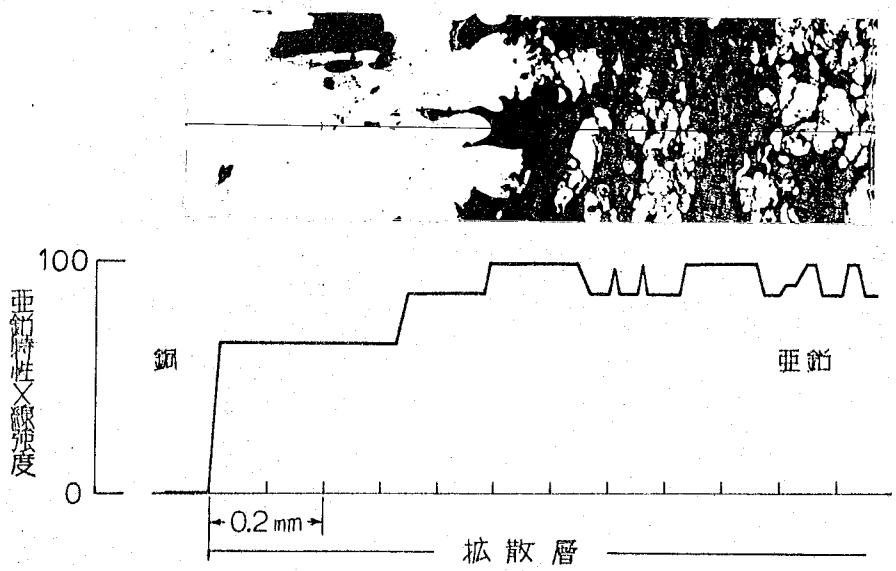


図1－35　Cu-Zn圧粉体焼結試料の特性×線強度
および顕微鏡写真（焼結温度 550℃）

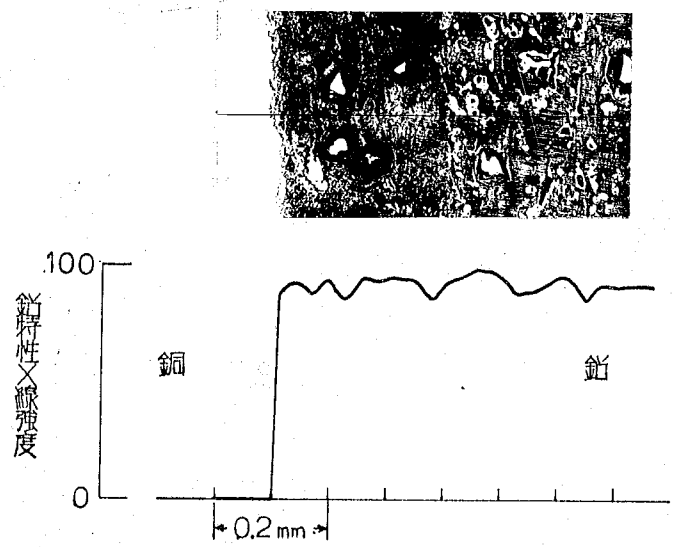


図1－36　Cu-Pb圧粉体焼結試料の特性×線強度
および顕微鏡写真（焼結温度 700℃）

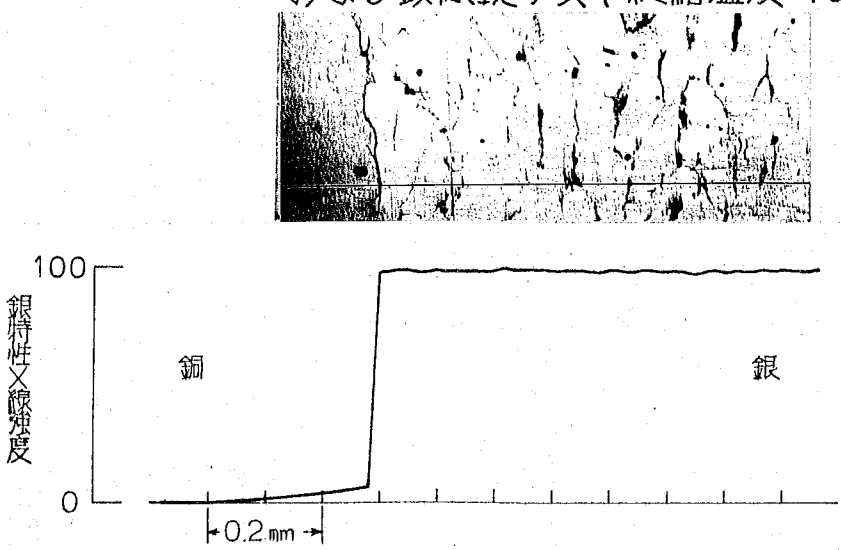


図1－37　Cu-Ag圧粉体焼結試料の特性×線強度
および顕微鏡写真（焼結温度 960℃）

とは前節で述べた。

以上の事実から，添加金属粉の種類により，焼結によって拡散層の生ずるCu－添加金属圧粉体では焼結時に膨張し，焼結によって拡散層の生じないCu－添加金属圧粉体では焼結時に収縮することがわかる。

1．5．2　Cu－Al 圧粉体の拡散

前節において，拡散がもっとも明瞭に確認されたCu－Al圧粉体について，拡散がどのように進行するかを焼結温度を変えて吟味した。圧粉体試料としては，Cu粉とAl粉を混合撹拌後加圧成形して得られるCu－Al混合圧粉体を使用し，Cu粉およびAl粉の接触面近傍での焼結後でのCuおよびAlの特性X線強度を測定した。

使用したCu粉は電解Cu粉Ⅰ，Al粉は光学顕微鏡によって観察しやすい噴霧Al粉である。試料はAl粉をCu粉に30 Vol.%混合し，成形圧力 6 ton/cm² で加圧し，2°C/minの加熱速度で，つぎに述べる温度に加熱し，10分間保持した後急冷して作成した。その形状は 5φ×5mm の円柱形である。上記Cu－Al圧粉体の寸法変化－温度特性を，前述と同様に熱膨張計を使用して測定した。図1－38に，結果を示す。図において，急激な膨張が500～600°C の間で生じている。これは鱗片状Al粉を使用した前述の場合と同様である。そこで，記録紙上で求めた膨張開始温度 528°C，膨張量の約 1/2 を示す膨張途中の温度 567°C，膨張完了温度 638°C，膨張完了後の温度 715°Cを，上記の4種の焼結温度とした。

図1－39に，Cu－Al混合圧粉体のCuとAlの特性X線強度および顕微鏡組織を示す。図において，ⅠはCu単体，ⅡはAl単体である。

図1－40に，膨張開始温度 528°C で焼結した場合を示す。ⅠはCu単体である。ⅡはCuの特性X線強度約75，Alの特性X線強度約8

表1－2　銅－添加金属圧粉体焼結試料の組織，拡散層厚さ

圧粉体	焼結温度 ℃	添加金属の融点 ℃	焼結体の組織	拡散層の厚さ mm	混合圧粉体の焼結時の寸法変化 %
Cu－Al	580	660	Cu γ_2 θ K Al	1.14	4.3
Cu－Sn	550	232	Cu ε η Sn	0.94	4.7
Cu－Zn	550	419	Cu γ ε η Zn	1.2以上	7.2
Cu－Pb	700	327	Cu Pb	0	－1.8
Cu－Ag	960	960	Cu Ag	0	－10以上

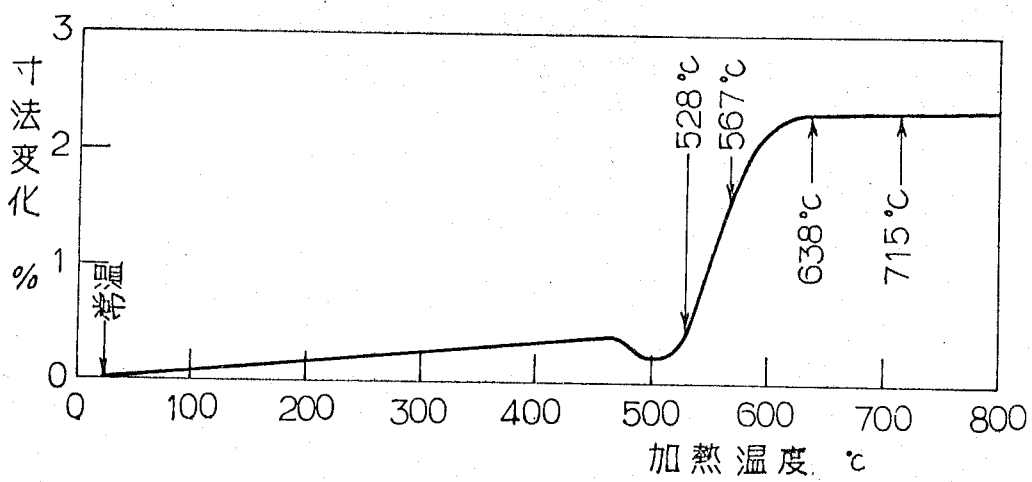


図1－38　Cu－30vol.%Al（噴霧粉）圧粉体の寸法変化－加熱温度特性（加熱速度 2℃/min）

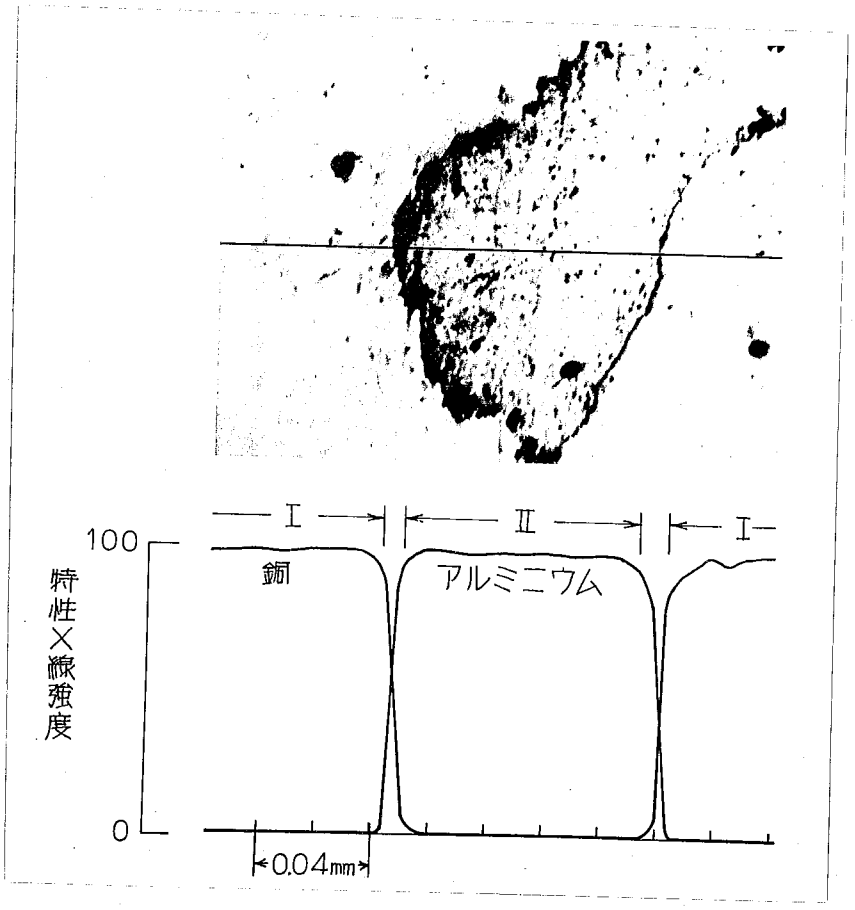


図1－39　混合圧粉体の特性X線強度および顕微鏡写真

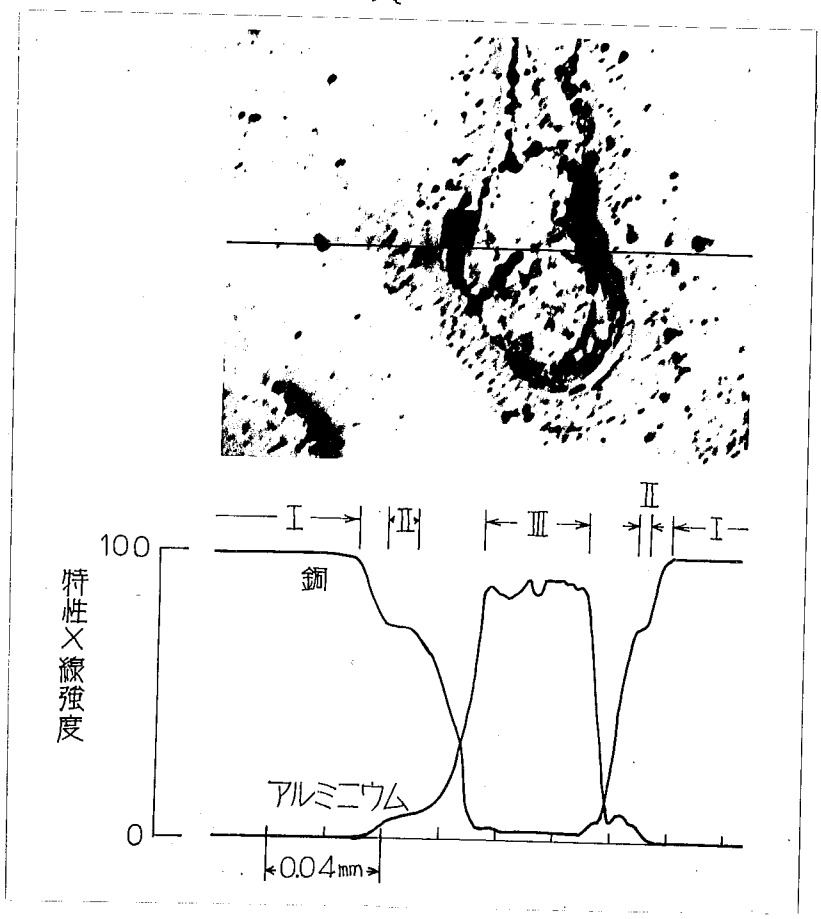


図1－40　膨張開始温度528℃で焼結した場合の特性X線強度　顕微鏡写真

であり γ_2 相と判断され，顕微鏡組織で灰色にみえる。Ⅲは Cu 約5，Al 約90 であり κ 相と判断され，顕微鏡組織で γ_2 相に囲まれた部分である。

図1－41に，膨張途中の温度567°C で焼結した場合を示す。図において，中央のⅤの部分，すなわち Cu および Al 特性X線強度がいずれもほゞ零を示す部分は Cu および Al のいずれも存在しない，すなわち，空所であると判断される。この空所の外側Ⅳは Cu 約47，Al 約27であり，θ 相と判断され，顕微鏡組織で白色にみえる。その外側Ⅲは Cu 約70，Al 約12 であり，η 相と判断され，顕微鏡組織で灰色にみえる。更に，その外側Ⅱは Cu 約75，Al 約8 であり，γ_2 相と判断され，顕微鏡組織で薄い灰色にみえる。更に，その外側Ⅰは Cu 100，Al 零であり，Cu 単体である。

図1－42に，膨張完了温度638°C で焼結した場合を示す。図において，Ⅰは空所である。それに隣接するⅡは Cu 約75，Al 約8 であり，γ_2 相と判断され，顕微鏡組織で灰色にみえる。その外側Ⅲは Cu 約96，Al 約5 であり α 相と判断され，薄い灰色の部分である。更に，その外側Ⅳは Cu 100，Al 零であり Cu 単体である。

図1－43に，膨張完了後の温度715°C で焼結した場合を示す。図において，Ⅰは空所である。それに隣接するⅡは Cu 84～86，Al 4～5であり，α 相と判断され，顕微鏡組織で灰色にみえる。その外側Ⅲは Cu 100，Al 零であり，Cu 単体である。また，Ⅱの部分に存在する Cu および Al 特性X線強度が減少している部分は空所と判断される。

以上を総括すると，表1－3になる。焼結しない圧粉体および焼結温度528°C の試料には空所は存在しないが，焼結温度567°C，638°C，

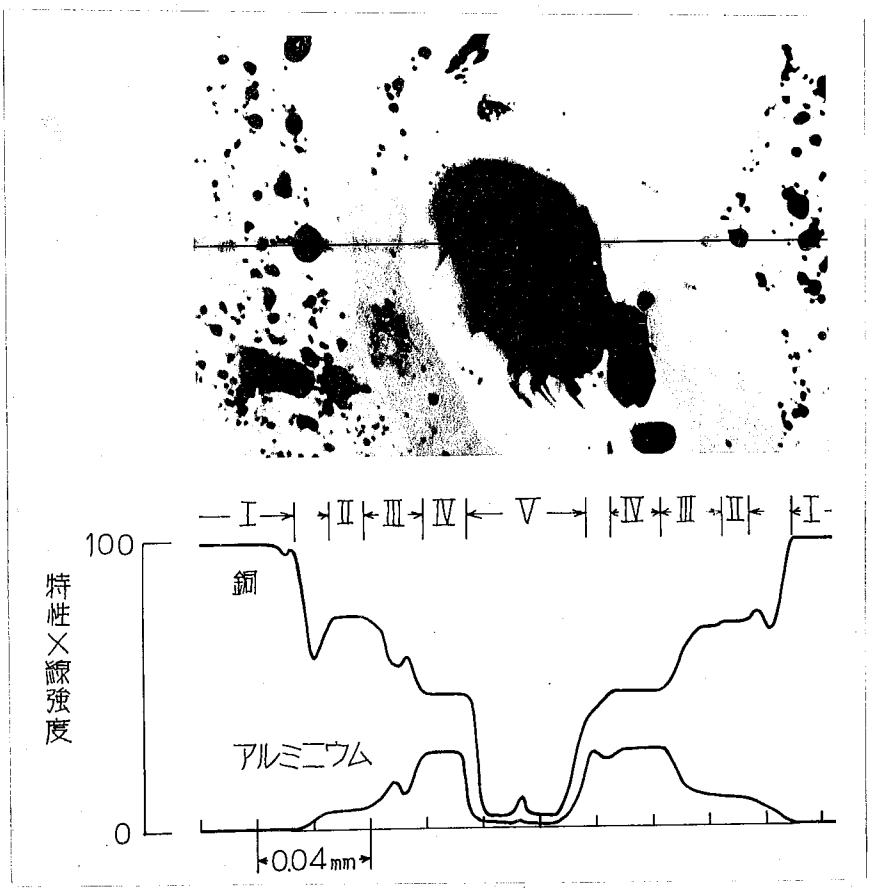


図1－41　膨張途中の温度567℃で焼結した場合の特性X線強度，顕微鏡写真

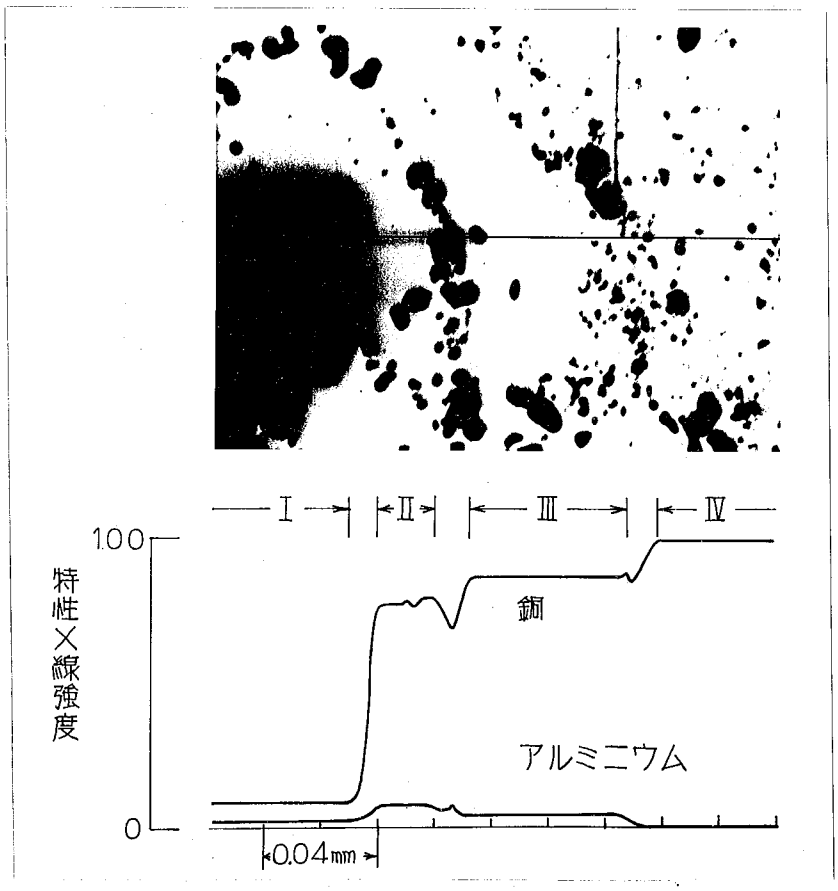


図1－42　膨張完了温度638℃で焼結した場合の特性X線強度，顕微鏡写真

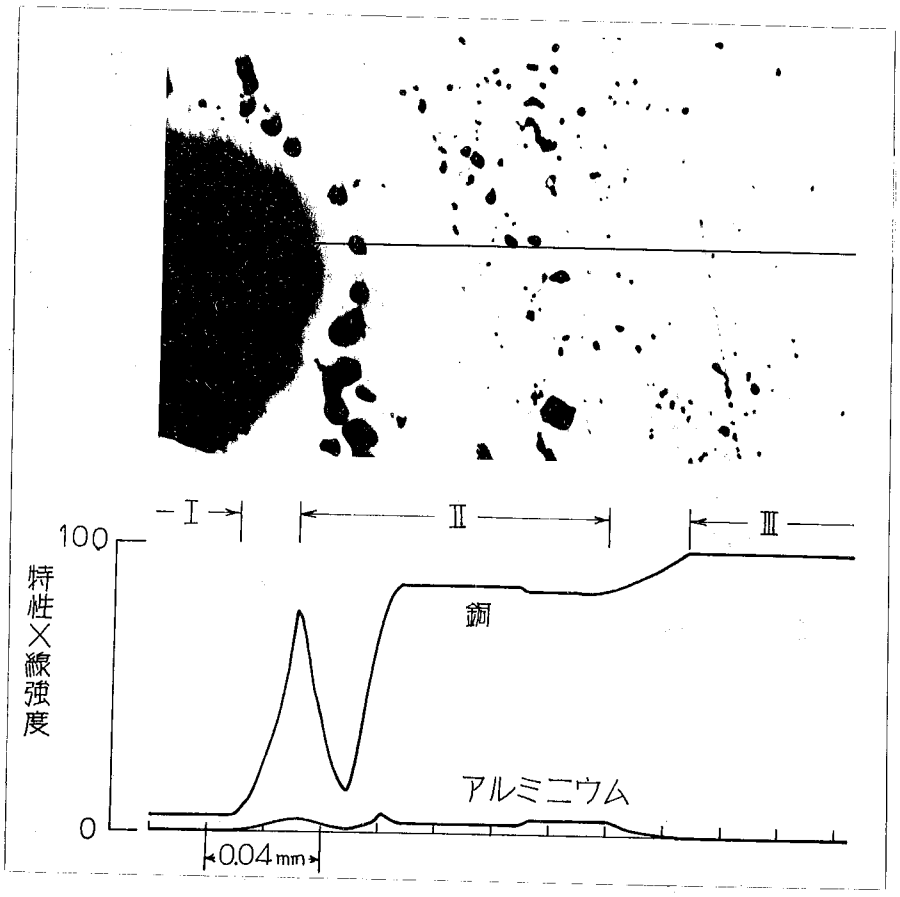


図1-43 膨張完了後の温度715℃で焼結した場合の特性X線強度，顕微鏡写真

表1-3 Cu-Al圧粉体焼結試料の組織

焼結温度℃	焼結体の組織	空所
焼結せず	Cu, Al,	無
528	Cu, γ_2, K,	無
567	Cu, γ_2, η, θ,	有
638	Cu, α, γ_2,	有
715	Cu, α,	有

715°Cの試料には空所が発生している。また，焼結温度567°Cの試料にはθ相，η相，γ_2相とAl含有量の多い相ほど空所に近い位置に配置している。そして，焼結温度567°Cで存在するθ相，η相が638°Cで消滅し，更にγ_2相が715°Cで消滅している。

これらの事実から，つぎのことがわかる。

① Cu－Al圧粉体は，焼結の進行とともに，焼結温度がAlの融点以下であっても，AlがCu中へ拡散し，Al粉の存在していた箇所が空所となる。[1]

② 焼結時に膨張する要因の1つは，空所の発生であると考えられる。

1．6 銅－アルミニウム圧粉体の焼結現象について

Cu－30Vol.%Al 圧粉体試料について，焼結の進行と合金相の生成，示差熱，硬さの関連を，それぞれX線回折装置，示差熱分析装置，高温微少硬度計によって測定吟味し，併せて焼結後の常温での合金相の生成，硬さ，引張強さを測定吟味した。試料として，Cu－Al 圧粉体を用いた理由は，Cu－Al 圧粉体が加熱時に500～600°Cで急激に膨張した後は温度上昇による寸法変化が小さいために，Al含有量および成形圧力を調整し，500～600°Cにおける急激な膨張量を調整することによって，焼結後の寸法変化を容易に調整し得るので，寸法精度を要求される精密部品材料として適切であるからである。使用した粉末は，電解Cu粉Iおよび塊砕Al粉である。

1．6．1 合金相の生成

---

(1) 渡辺伝尚氏はCu－Sn圧粉体について，焼結温度がSnの融点以上の場合，Sn粉の存在していた箇所に空所が生成することを報告している。〔日本金属学会誌，19，(1955)，415〕また，Fe－Cu圧粉体について，Cuの融点以上の場合，空所が生成することを報告している。〔粉体および粉末冶金，8－2，(昭36)，63〕

Cu－30 Vol.%Al 圧粉体を加熱することによって焼結中に生ずる合金相を，理学電機製高温X線回折装置（Target：Cu，Filter：Ni）によって調べた。試料は圧力 6 ton/cm² で加圧成形したもので，その形状は 20 × 10 × 1 mmの直方体である。加熱は真空中（約 10^{-4} mmHg）で，昇温速度 2°C/min で行ない，測定は 400°C から 650°C まで行なった。なお，圧粉体の加圧面を研摩紙仕上し，その面にX線を照射した。

焼結中の圧粉体試料の格子間距離 dÅ および回折線強度比 I/I_1 を，既知の物質のそれと対比することによって決定した金属および合金の回折線強度を，図1－44に示す。Al 単体は，400°Cから約 500°C まで回折線強度を変えることなく存在し，500°C 以上で徐々に減少し，約 530°Cで消滅する。Cu 単体は約 650°C まで存在する。650°C までの焼結中に，金属間化合物として，Al_4Cu_9（γ_2 相），Al_2Cu（θ 相），$AlCu_3$（β相）が生成する。Al_4Cu_9 は約 450°C で出現し，約 500°C より急激に増大して約 560°C で一定となり，約 585°C より急激に減少して約 640°C で消滅する。Al_2Cu は約 510°Cで出現し，約 560°C で消滅する。$AlCu_3$ は約 565°C で出現し，以後急激に増大し 650°C においても急激な増大を示している。また，約 560°C より出現し，以後温度の上昇とともに増大し，650°C においても増大する合金は，Cu－Al 系平衡状態図より判断して，ε 相であると考えられる。同図に，加熱温度による寸法変化線図を同時に示す．Al_4Cu_9 の生成する温度と急激な膨張を示す温度とは等しく，かつ Al_4Cu_9 の回折線強度の増加する温度範囲で膨張量も増大し，しかし，Al_4Cu_9 の増加する割合が零になる温度と急激な膨張が終了する温度とはほゞ等しいので，焼結時に生ずる膨張と Al_4Cu_9 の生成とは密接な関係にあることがわかる。前述で，Cu－Al 圧粉体の焼結時の膨張の要因の1つとして，

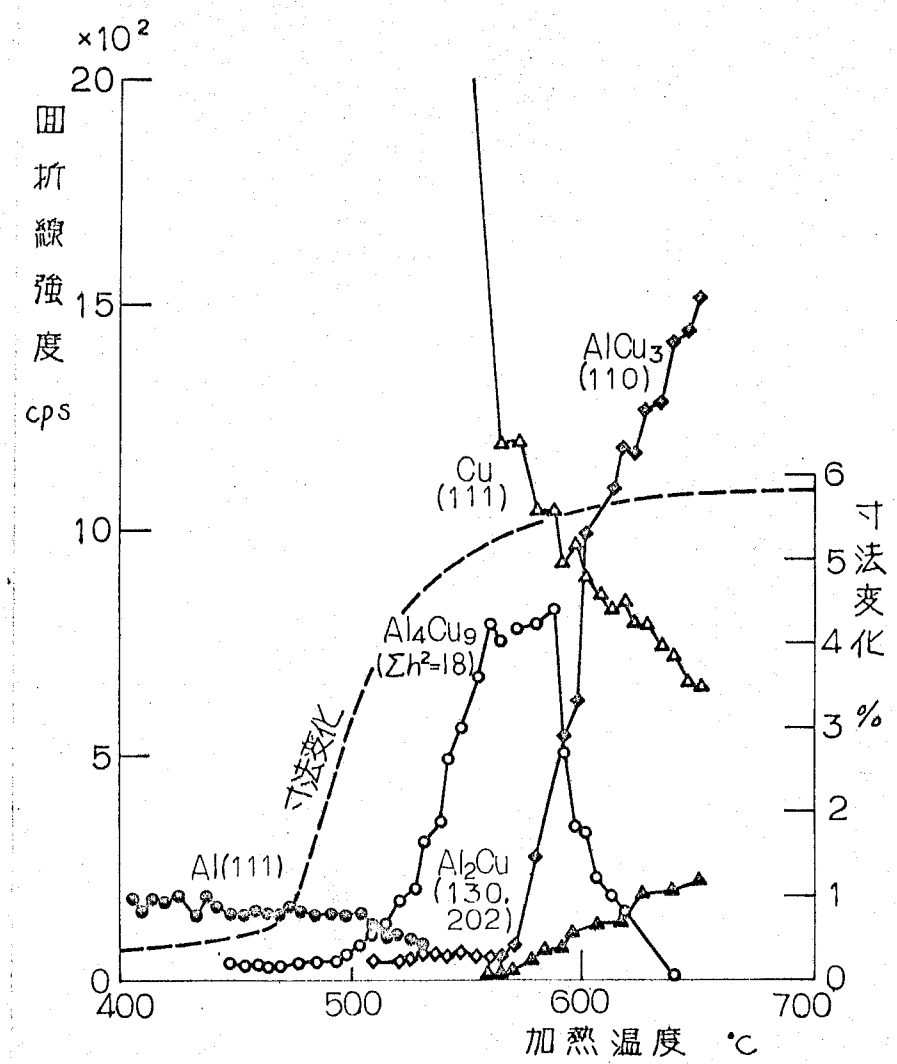


図1－44 Cu－30vol.%Al圧粉体の焼結中のX線回折結果

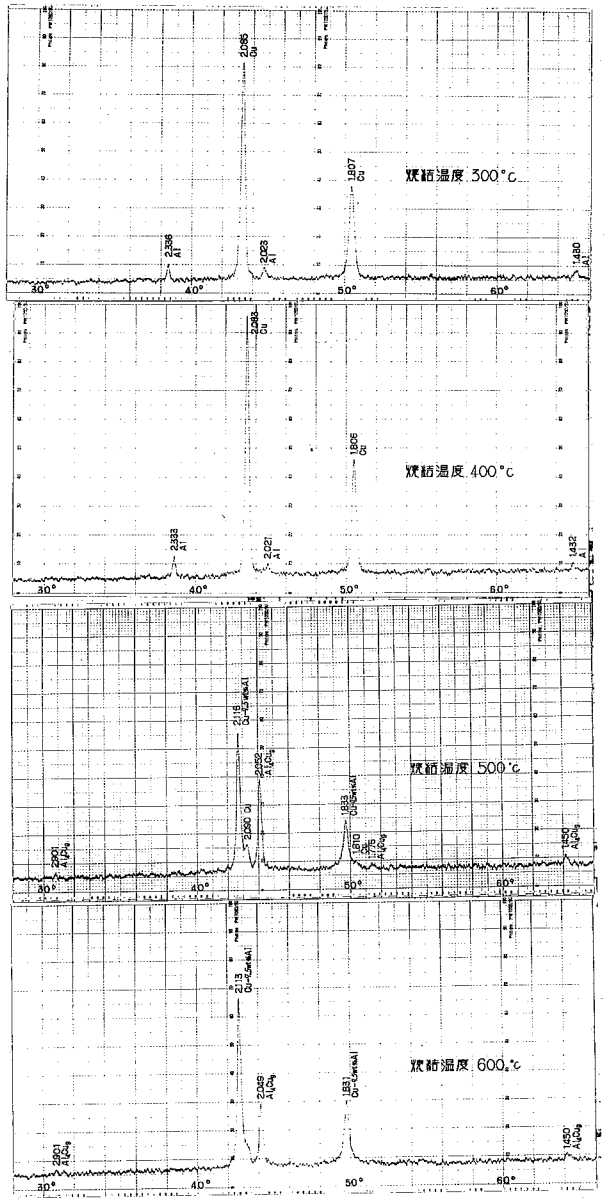
Al が Cu 中へ拡散し，Al 粉の存在していた箇所が空所となることをあげているが，上述の実験結果から，急激な膨張を示す温度範囲では拡散によって Al_4Cu_9 が生成していることになる．

つぎに，Cu－30Vol.% Al 圧粉体を焼結することによって生ずる合金相を，常温において Philips 製X線回折装置（Target：Cu，Filter：Ni）によって調べた。試料は，つぎのようにして作成した。① Cu 粉と Al 粉の混合粉を成形圧力 6 ton/cm² で加圧して圧粉体をつくる。その形状は，直径 5 mm，長さ 5 mm の円柱形である。② 圧粉体を真空中（約 10^{-2} mmHg）で，昇温速度 2 °C/min で加熱し，300，400，500，600，700，800，900 °C の7種の温度にそれぞれ10分間保持した後，圧粉体を挿入した石英管ごと水中冷却する。以上のようにして，焼結温度を7種に変えた試料を作成した。なお，加圧面を研磨仕上およびバフ仕上し，その面にX線を照射した。上記の試料を用いて，圧粉体の厚さとそれを焼結して得られた焼結体の厚さをマイクロメータで測定し，焼結によって生ずる寸法変化と焼結温度との関係を吟味した。

図1－45に，焼結後の常温での試料のX線回折結果を示す．ついで，この dÅ および I/I_1 を，既知の物質のそれと対比することによって決定した金属および合金の回折線強度と焼結温度との関係を求めた結果を，図1－46に示す。これより，焼結温度 300°C および 400°C の焼結体は Cu および Al 単体であり，焼結温度 500°C の焼結体は Cu，Cu－9.5 wt.% Al 固溶体および Al_4Cu_9 であり，焼結温度 600°C より 900°C までの焼結体は Cu－9.5 wt.% Al 固溶体および Al_4Cu_9 であることがわかる。なお，Cu－Al 固溶体の Al の含有量はX線回折結果より格子定数を求め，それを Al 含有量－格子定数線図[1]にあてはめて決定した。

---

(1) W. B. Person, Handbook of Lattice and Structure of Metals, (1958), 598



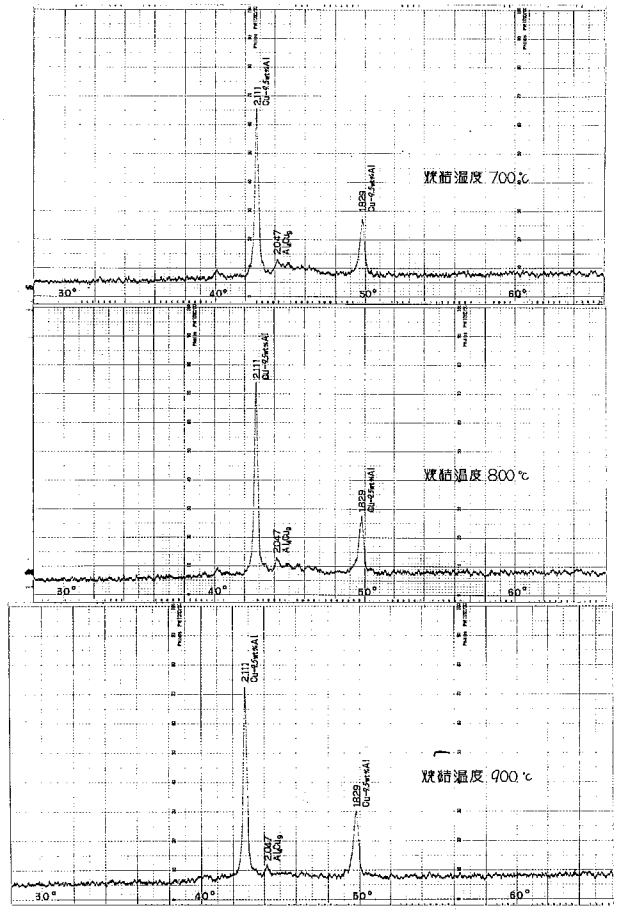


図1－45 Cu-30vol.%Al圧粉体の焼結後のX線回折データ

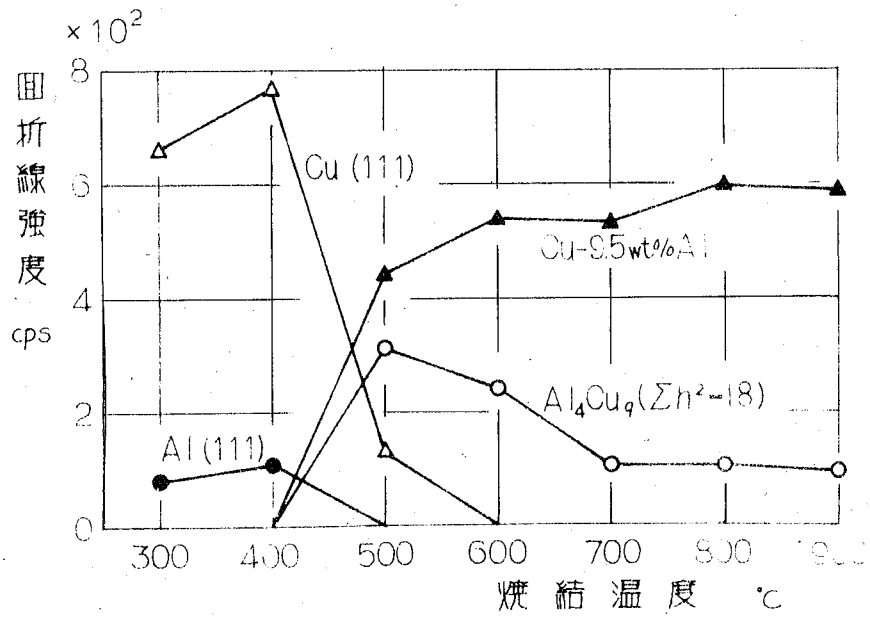


図1－46 Cu-30vol.%Al圧粉体の焼結後のX線回折結果

図1−47に，Cu−30 Vol.%Al 圧粉体を焼結することによって生ずる寸法変化が焼結温度によってどのように異なるかを測定した結果を示す。焼結温度500℃および600℃のものはそれぞれ約3%および5%の膨張を示す。焼結温度700℃，800℃，900℃のものは600℃の場合と同じく約5%である。膨張の割合が著しく増大する焼結温度500℃および600℃のものは焼結体にAl_4Cu_9が生成しており，前述の焼結中の場合と同様に，焼結後水中冷却して得た焼結体の寸法が膨張することと，金属間化合物Al_4Cu_9が生成することとは密接な関係にあることがわかる。

焼結中に生成している金属および合金と，焼結後水中冷却し常温に達したときに生成している金属および合金を，同時にまとめた結果を図1−48に示す。なお，焼結後において，Cu，Cu-Al 固溶体が存在するにもかゝわらず，焼結中ではCuだけが存在することは，高温での面間隔の測定における分解能が劣り，CuとCu−Al 固溶体の区別ができないためである。焼結中に存在するAl_2Cu，AlCuは焼結後に存在しない。また，焼結中700℃で存在しないAl_4Cu_9は焼結後常温において存在する。しかし，500℃ではいずれの場合でもAl_4Cu_9が生成しており，上述のように500℃附近で生ずる急激な膨張と，Al_4Cu_9の生成とは密接な関係にあると考えられる。

こゝで，CuおよびAlが金属間化合物Al_4Cu_9をつくるときの格子変態による寸法変化を，Cu原子4ヶおよびAl原子9ヶが混合されたと仮定した場合に原子1ヶのしめる平均長さと，Al_4Cu_9の原子1ヶのしめる平均長さとを常温での格子常数値を用いて比較検討した結果，CuおよびAlがAl_4Cu_9になる格子変態によって約1.3%の収縮を生ずることがわかった。よって焼結時に生ずる急激な膨張および焼結後水中冷却しても生じている膨張はCuおよびAlがAl_4Cu_9に変態するこ

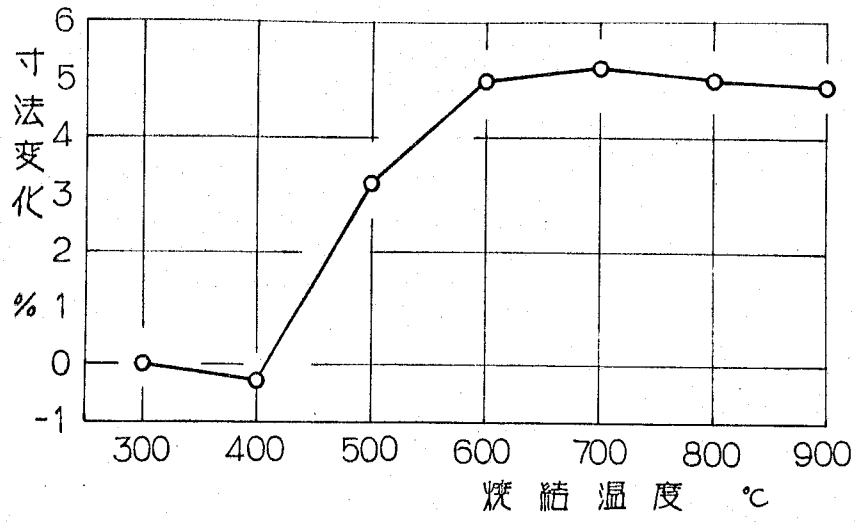


図1－47 Cu-30vol.%Al圧粉体焼結試料の焼結前後の寸法変化

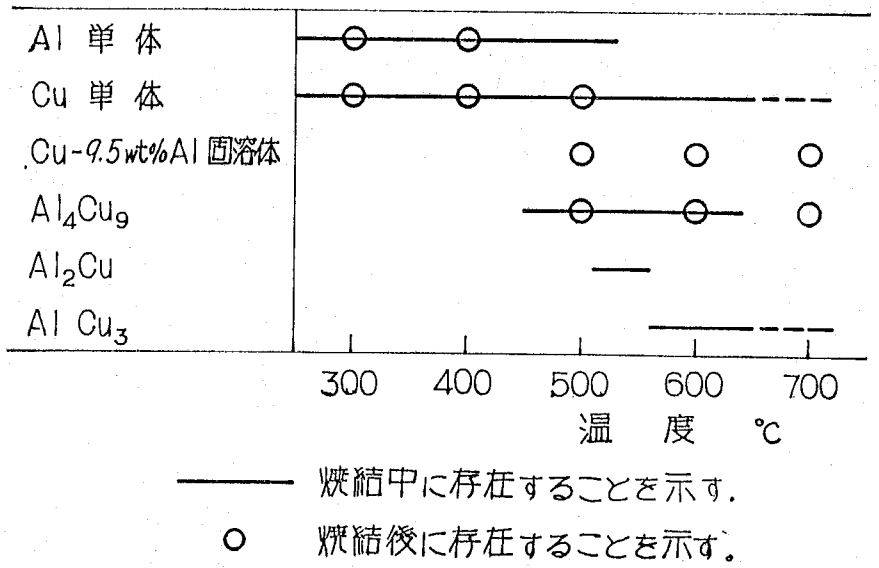


図1－48 焼結中に生成している金属と合金，および焼結後水中冷却し常温に達したときに生成している金属と合金

とによって生ずる寸法変化に基因するものではないと判断される。従って，上記の膨張の原因は，Al_4Cu_9の生成時に存在する他の現象に基因することになる。これに関しては，前節において，焼結の進行とともにAlのCu中への拡散により，Al粉の存在していた箇所が空所になり，この空所の発生が，膨張の要因の1つであることを確めている。

1・6・2　示差熱分析

金属間化合物が生ずる時，一般に発熱あるいは吸熱を伴なう。Cu−Al圧粉体について，三谷ら[1]はCu−Al合金の変態点548°Cで異常発熱を生じ，これによって急激な膨張を生ずると報じているが，この三谷らの実験では，加熱速度として10°C/minと大きい値にしており，また，温度測定にあたって試料に直接熱電対を接触せしめたものでなく，石英の保護管を介して行われ，従って炉内雰囲気の温度に支配されやすいという温度測定上の難点がある。そこで，本実験では，試料を図1−49に示す直径5mm，長さ5mmの円柱形とし，その中央に1.2mm$^{\phi}$の穴をあけ，これに熱電対を挿入して直接試料温度を測定し得る状態で示差熱を測定した。試料を作成する際の成形圧力は6ton/cm^{2}とした。示差熱測定用標準試料の形状は，測定試料のそれと同一で，材質は電気銅である。測定試料および標準試料を，図1−50に示す断熱用イソライトレンガでつくった保持具に設けた6mm$^{\phi}$の穴に挿入設置し，真空中（約10^{-2}mmHg）で，加熱速度2°C/minで加熱し，両試料の温度を同時に自動平衡型電位差計によって測定した。

図1−51に，Cu−30Vol.%Al圧粉体を加熱昇温中の示差熱を測定した結果を示す。同時に，加熱温度による寸法変化線図を示す。示差熱の発生開始温度は約465°Cで，終了温度は約530°Cである。開始温度465°Cは焼結時の膨張開始温度とほゞ等しく，また，図1−44の結果

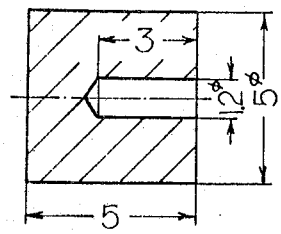


図1－49　示差熱測定用
試料の形状

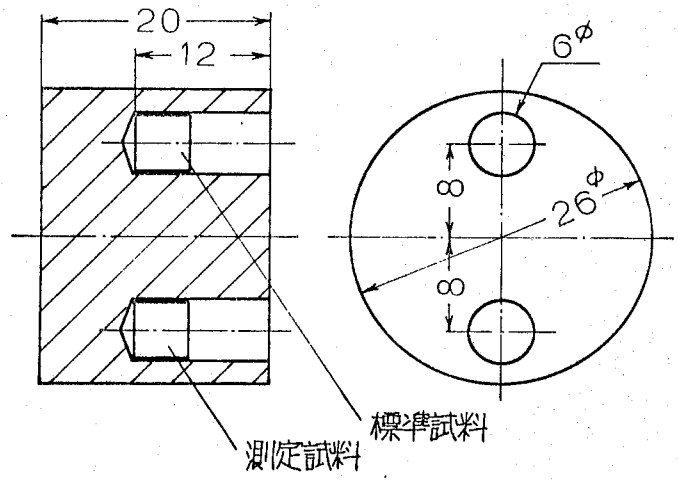


図1－50　試料の保持具

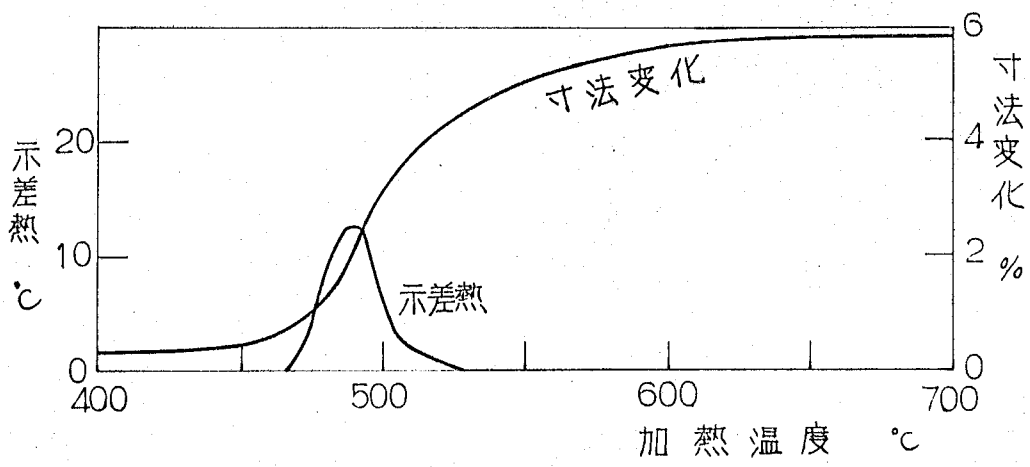


図1－51　Cu－30vol.%Al圧粉体の示差熱－温度特性および
寸法変化－温度特性（加熱速度 2℃/min）

と対比することによって，Al_4Cu_9の生成開始温度とはほゞ等しいことがわかる．Al_4Cu_9の生成熱は $-\Delta H_{298} = 5.5$ kcal/g·at[1]であり，示差熱の発生は Al_4Cu_9 の生成によるものと判断される。

1．6．3 硬さ

Cu－30 Vol.%Al 圧粉体の焼結中の硬さが，加熱温度によってどのように変わるかを吟味した。試料は成形圧力 6 ton/cm² で加圧した圧粉体で，その形状は直径 5 mm，長さ 5 mm の円柱形である。試料を真空中（約 10^{-4} mmHg）で加熱し，100，200，300，400，500，600，700，800°C のそれぞれの温度に5分間保持した後，その面の硬さを日本光学製EOF－4型高温微小硬度計を使用して，ビッカース硬度計（荷重 100 g）によって測定した。

図1－52に，Cu－30 Vol.%Al 圧粉体の焼結中の硬さを測定した結果を示す．硬さは加熱温度の上昇とともに減少し，約400°C で最小値を示した後，増大して500°C で最大値を示し，以後加熱温度の上昇とともに再び減少する。これは，400～500°C の温度範囲で硬さの高い金属間化合物が生成することに基因するものと考えられる。図1－44の結果と対比することによって，この金属間化合物が Al_4Cu_9 であると判断される。

つぎに，Cu－30 Vol.%Al 圧粉体の焼結後の常温での硬さが，焼結温度によってどのように変わるかを吟味した．試料はつぎのようにして作成した。① Cu 粉と Al 粉の混合粉を成形圧力 6 ton/cm² で加圧して圧粉体をつくる。その形状は直径 5 mm，長さ 5 mm の円柱形である。② 圧粉体を真空中（約 10^{-2} mmHg）で，加熱速度 2°C/min で加熱し，100，200，300，400，500，600，700，800，900°C の9種の温

---

(1) 井羽・横川・中村訳，金属熱化学，（昭43），170，産業図書

度にそれぞれ10分間保持した後，圧粉体を挿入した石英管ごと水中冷却する。以上のようにして，焼結温度を9種に変えた試料を作成し，その加圧面を研磨仕上およびバフ仕上して，その面の硬さをビッカース硬度計（荷重500g）によって測定した。

図1－53に，Cu－30Vol.%Al圧粉体の焼結後の常温での硬さを測定した結果を示す．硬さは焼結温度400°Cまでのものは約Hv50でほとんど変わらない。しかし，500°Cにおいて急激に増大して約Hv106になる。これは，この焼結温度で硬さの高い金属間化合物が生成していることに基因すると考えられる。図1－46の結果と対比することによって，この金属間化合物がAl_4Cu_9であると判断される。

1．6．4　引張強さ

Cu－30Vol.%Al圧粉体の焼結後の常温での引張強さが，焼結温度によってどのように変わるかを吟味した．試料は成形圧力6ton/cm²で加圧し，ついで真空中（約10^{-2}mmHg）で，加熱速度4°C/minで加熱し，300，400，500，600，700，800，900°Cの7種の温度にそれぞれ1時間保持した後，炉中冷却することによって作成した。図1－54に，試料の形状を示す。測定に使用した試験機は，新興通信工業製引張圧縮試験機である．また，上記試料の軸直角断面を研磨仕上およびバフ仕上し，その面を顕微鏡で観察した。

図1－55に，Cu－30Vol.%Al圧粉体の焼結後の常温での引張強さを測定した結果を示す．引張強さは焼結温度の高いものほど大きいが，500°Cの場合は著しく大きい値を示している。これは，この温度で何等かの組織変化が生じたことに基因すると考えられる。

図1－56に，焼結温度400°Cおよび500°Cの場合の上記試料の顕微鏡写真を示す．焼結温度400°Cの場合，顕微鏡写真で灰色にみえる

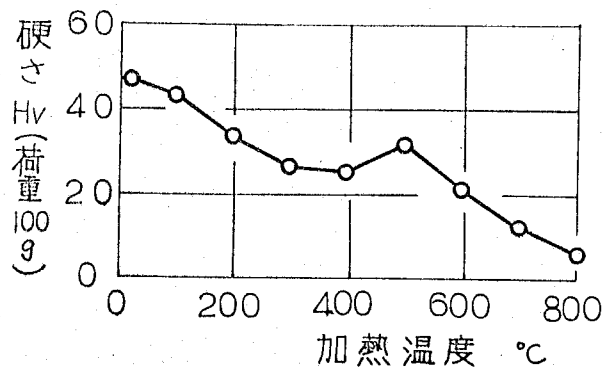


図1－52 Cu-30vol.%Aℓ圧粉体の硬さと加熱温度との関係

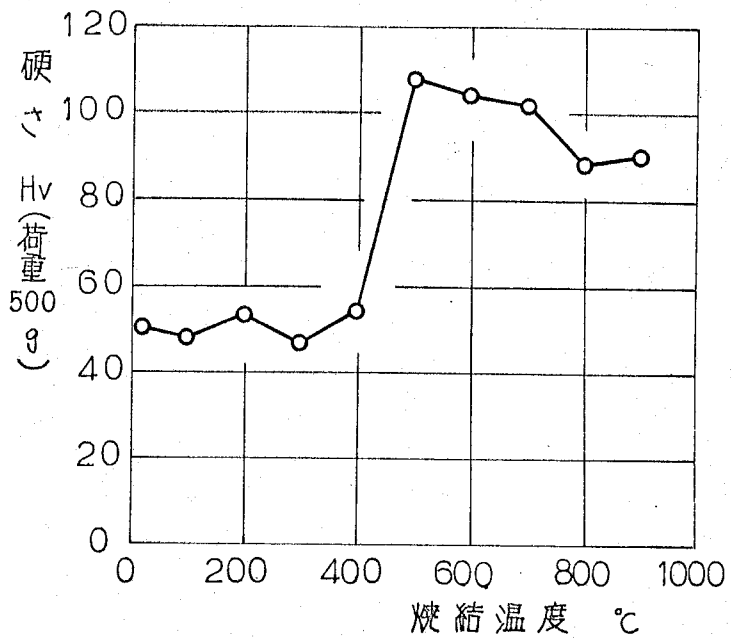


図1－53 Cu-30vol.%Aℓ焼結体の硬さと焼結温度との関係

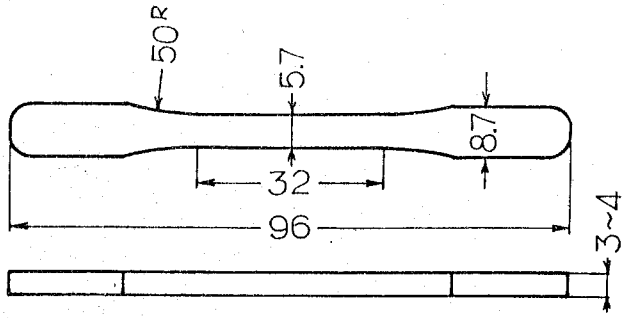


図1－54　引張強さ測定用試料の形状

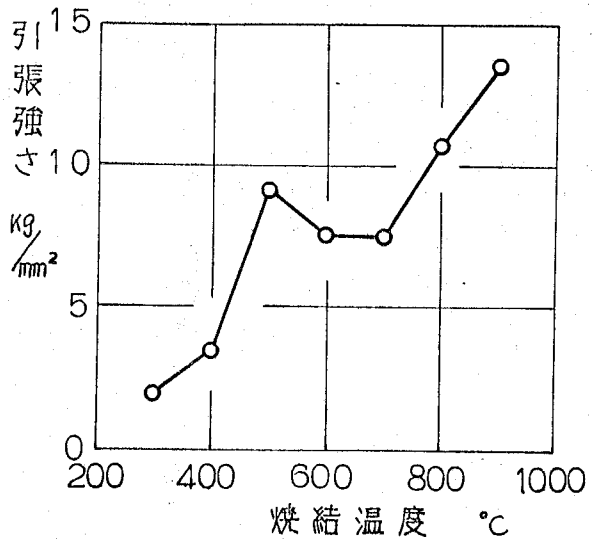
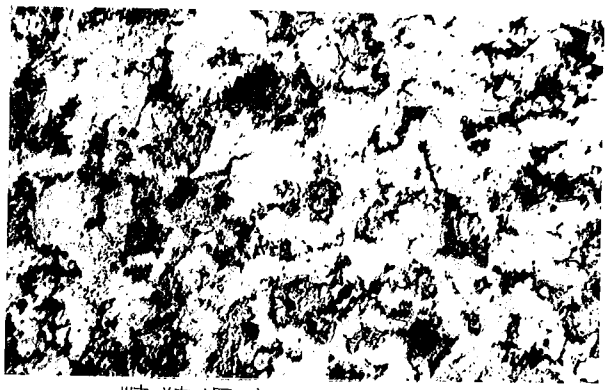
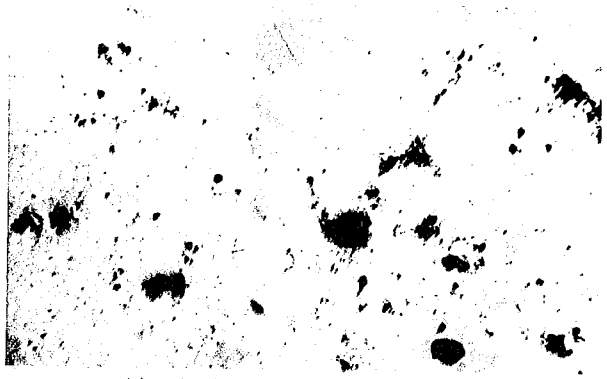


図1－55　Cu-30vol.%Al焼結体の引張強さと焼結温度との関係



焼結温度:400℃



焼結温度:500℃

図1－56　Cu-30vol.%Al焼結体の顕微鏡写真　×(150×8/10)

Al は粉末の形状のまゝで存在し，顕微鏡写真で白色にみえる Cu は Al を包むようにして存在している。焼結温度 500°C の場合には，図 1−46の結果より，焼結体には Cu，Cu−9.5 wt.%Al 固溶体および Al_4Cu_9 が存在している。Cu および Cu−9.5 wt.%Al 固溶体は顕微鏡写真で白色にみえ，Al_4Cu_9 は薄い灰色にみえる。これが，焼結温度 500°C のものの引張強さが著しく大きくなっている基因と考えられる。また，ところどころに穴が存在している。これは，前述したように，Al が Cu 中へ拡散することによって生じたものと考えられる。

第2章　銅基粉末成形体の物性に関する研究

前章の研究によって銅粉と他種金属粉との焼結現象を明らかにした。本章は，耐焼付性が優れている粉末成形体として，銅－ガラス粉末成形体が適しているかどうかを実験的に吟味し，かつ前章で述べた圧粉体寸法と焼結体寸法が等しくなる焼結法が銅－アルミニウム圧粉体に存在するかどうかを実験的に吟味した研究である。

2．1　銅－ガラス粉末成形体について

粉末成形体は軸受や摩擦材のような他金属とすべり接触する部材にひろく用いられる。それは，粉末成形体が多孔質に成形できること，用途に応じそれに適した物質を所要量配合できること，などの点にある。このような部材は，長時間連続使用しても焼付きを生じないことが使用の点から要求される。この要求に，潤滑剤としてのガラスの添加が適しているかどうかを，銅粉を基材とした粉末成形体について吟味した。

潤滑剤としてのガラスの使用は，鋼材の熱間押出におけるユーヂンセヂュルネー法[1]にみられる。それは，ガラスを，高温に加熱した押出し鋼材の表面に被覆し，それを素材と押出し容器壁面の間に介在せしめ，高温におけるガラスの粘性低下によって流動すること，0.0001 in 程度の薄層でも膜切れを生ずることなく素材表面を覆うこと[2]を利用したものである。一方，金属とガラスとの接合については，金属とガラスとがよくなじみ，かつガラスの熱膨張曲線が金属のそれによく適合する場合には，金属とガラスとはよく接合することが報告[3][4]されている。

---

(1)　川村宏矣，機械学会誌，62－489（1959），1528
(2)　J. Sejournet，Engineering，（1954－4），463
(3)　池田，窯業協会誌，72－2（1964），C51
(4)　森谷・ほか，ガラス工学ハンドブック，（昭38），512，朝倉書店

2．1．1　供試粉末成形体

供試粉末成形体は，銅粉，ガラス粉および固体潤滑剤である黒鉛よりなる。銅粉には電解銅粉を用い，ガラス粉には熱膨張係数 48.7×10^{-7} cm/cm·deg（50～400℃），軟化点 726℃（$10^{7.65}$ ポアズ）および密度 2.27 g/cm³ の硼珪酸ガラス粉を用いた。図2－1に，銅粉，ガラス粉および黒鉛粉の粒度分布を示す。銅粉は粒径 120 μ までの範囲にわたって分布し，平均粒径は 27.9 μ である。ガラス粉は粒径のそろった均一のもので，平均粒径は 3.2 μ である。黒鉛は粒径 10 μ 前後のものがもっとも多く，平均粒径は 12.8 μ である。

粉末成形体はつぎに述べる方法および条件で作成した。原料粉の所要量をそれぞれ秤量し，撹拌混合して得られる混合粉を押型に充填し，成形圧力 4 ton/cm² で 2 分間圧縮して所要形状の圧粉体を成形する。ついで，それを真空炉中（約 2×10^{-2} mmHg）で，昇温速度 200℃/hr で，850℃ に昇温し，60 分間保持して加熱焼成後，炉冷する。前述した焼成温度 850℃ はガラスの軟化点 726℃よりも高く，作業点 1135℃（10^{4} ポアズ）よりも低い温度である。このようにして得られた粉末成形体の顕微鏡組織を図2－2(a)，(b)に示す。同図 (a) は，基材銅粉のみから成るもので，焼結して得られる微細な空孔が一様に分布している。同図 (b) は，銅粉に 30 Vol.% のガラス粉を混合して得られるもので，ガラスは焼結された銅素地にほゞ一様に分布し，かつ銅素地とガラスの境界には空隙はみられない。これより，ガラスは加熱焼成により銅によく密着結合することがわかる。なお，銅素地中に分布するガラス部にはほゞ中央に球状の空孔が生じている。それは，図2－3に模型化して示すように銅粉の隙間に介在するガラス粉が加熱焼成により軟化し，銅と接触する方へ引き寄せられるために，ガラス粉が存在していた部分のほ

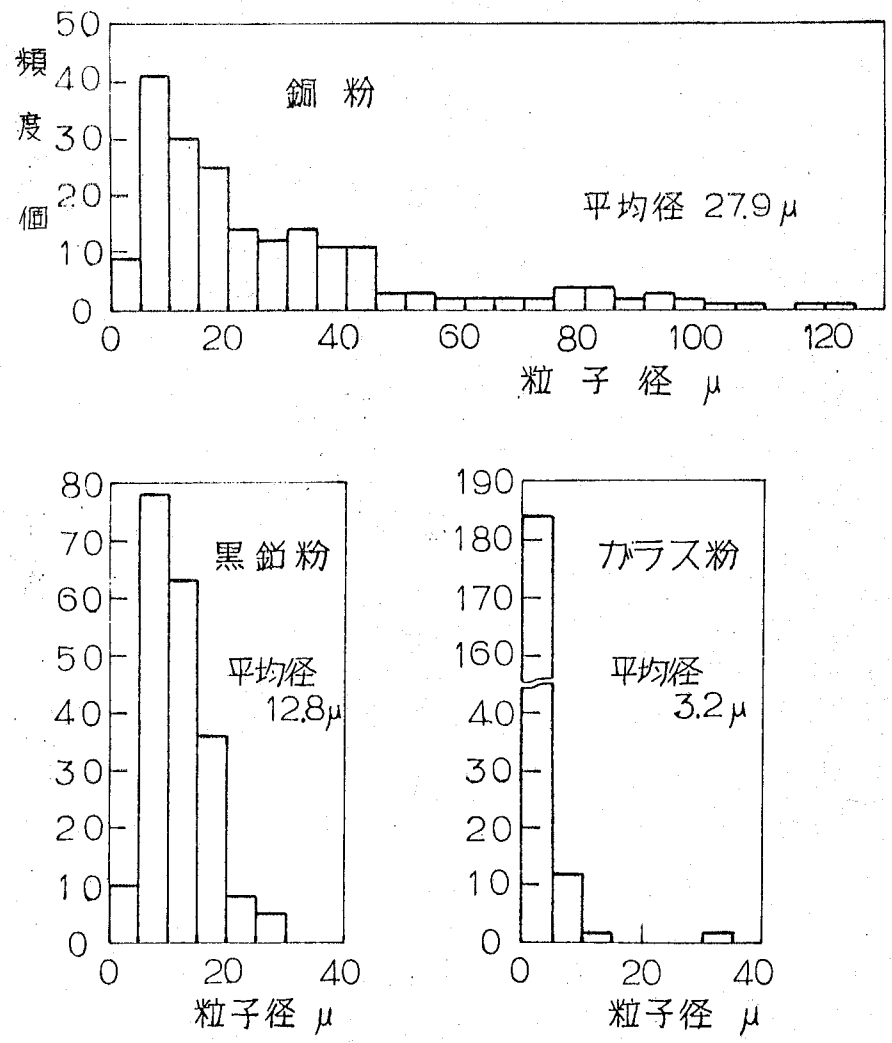
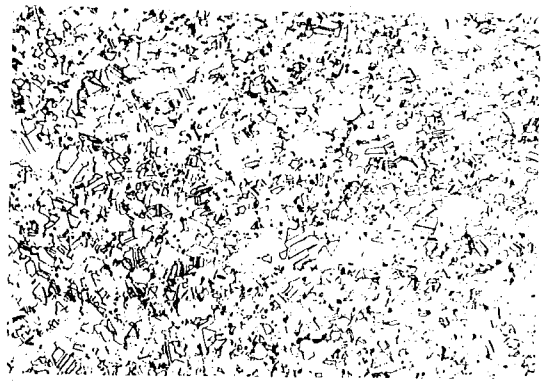
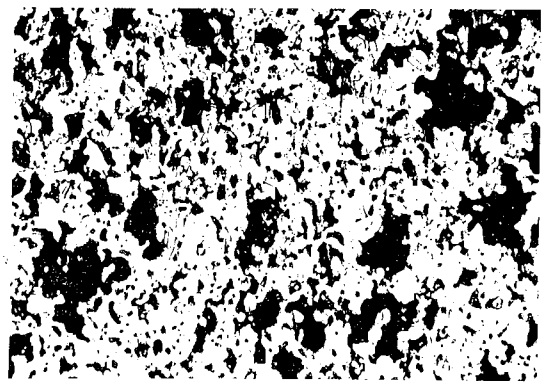


図2－1　使用粉末の粒度分布



(a) 銅粉末成形体



(b) 銅・30%ガラス粉末成形体

図2－2　粉末成形体の顕微鏡写真　×(150×7/10)

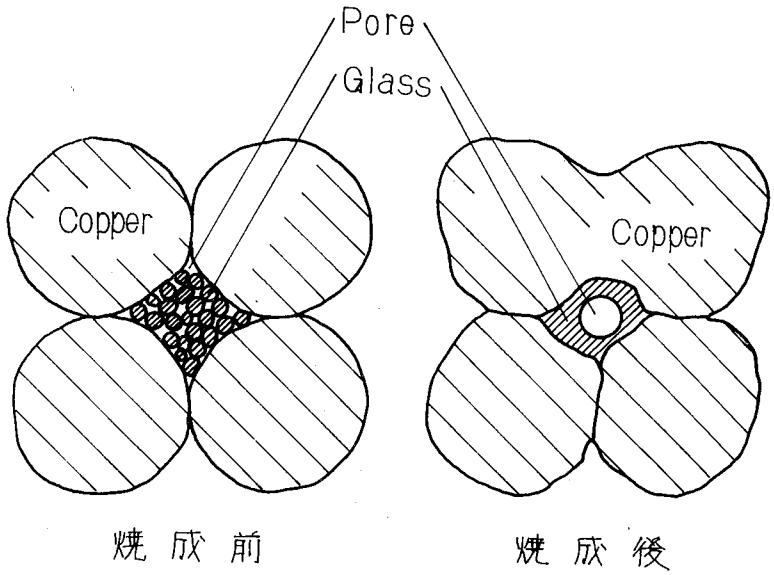


図2－3　銅－ガラス粉末成形体の焼成前後でのガラスおよび空孔の状態変化

ぼ中央に空孔が生じたものと考えられる。

2．1．2　実験方法

上述のようにして得られる粉末成形体の物理的性質，機械的性質，摩擦特性および被削性が成分の配合割合によってどのように異なるかを，つぎに述べる方法により吟味した。物理的性質としては，焼成による寸法変化，多孔率および有効多孔率を，図2－4(a),(b)に示す測定片を用いて測定した。焼成による寸法変化は圧縮に平行な方向および圧縮に直角な方向の両方向について測定した。機械的性質としては，硬さ，抗折力，引張強さおよび圧縮強さを，同図(b),(c),(d)に示す測定片を用いて測定した。硬さは加圧面についてロックウエル硬度計Hスケールを用いて測定した。抗折力は図2－5に示す抗折力測定治具を取り付けた島津製作所製RS－2型万能試験機を用いて測定した。引張強さおよび圧縮強さは前述の試験機を用いて測定し，のびは標点間距離を1 in としてマルテンス鏡ひずみ計によって測定した。摩擦特性としては，図2－6に示す試作した摩擦試験機で，図2－4(b)に示す試験片を用いて，焼付き荷重，摩耗量および摩擦係数を測定するとともに，摩擦面を観察した。摩擦試験機は，試験片を425 rpm（摩擦速度40 m/min）で回転させ，その外径40 mm，内径20 mmの回転平面に，7/16″直径の球軸受用鋼球を押し付けて摩擦させ，1.2 kg/minで連続的に増加する摩擦荷重と摩擦力を弾性環によって，同時に測定できるものである．摩擦荷重と摩擦力の測定結果例を30%ガラス含有量について図2－6に示す。焼付き荷重は摩擦力およびその変動が急激に増大する時を焼付き開始点とし，そのときの摩擦荷重で示した。摩耗量はいずれの試験片においても焼付きを生じない摩擦荷重，すなわち摩擦荷重1 kgになるまでの試験片の重量減少量で示した。摩擦荷重はいずれの試験片についても焼付き開始まではほゞ等しい値を示すので焼付き開始までの動摩擦係数の平

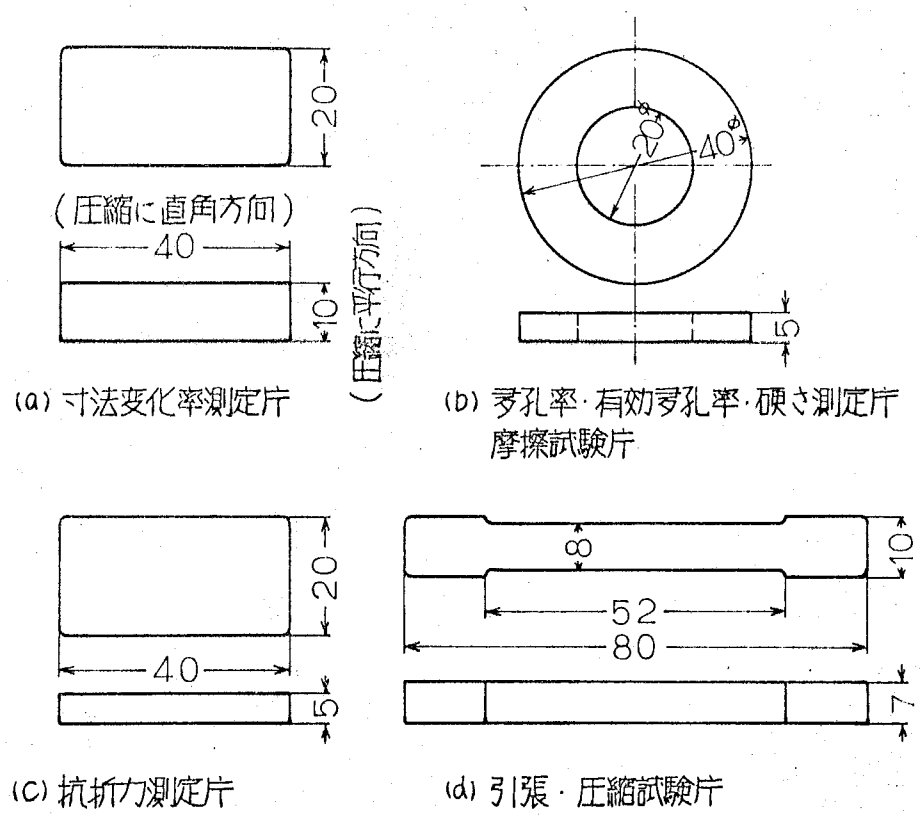


図2－4　粉末成形体試験片の形状

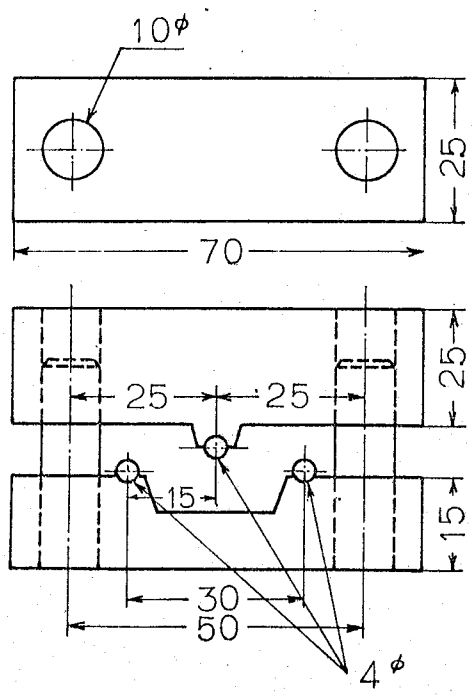
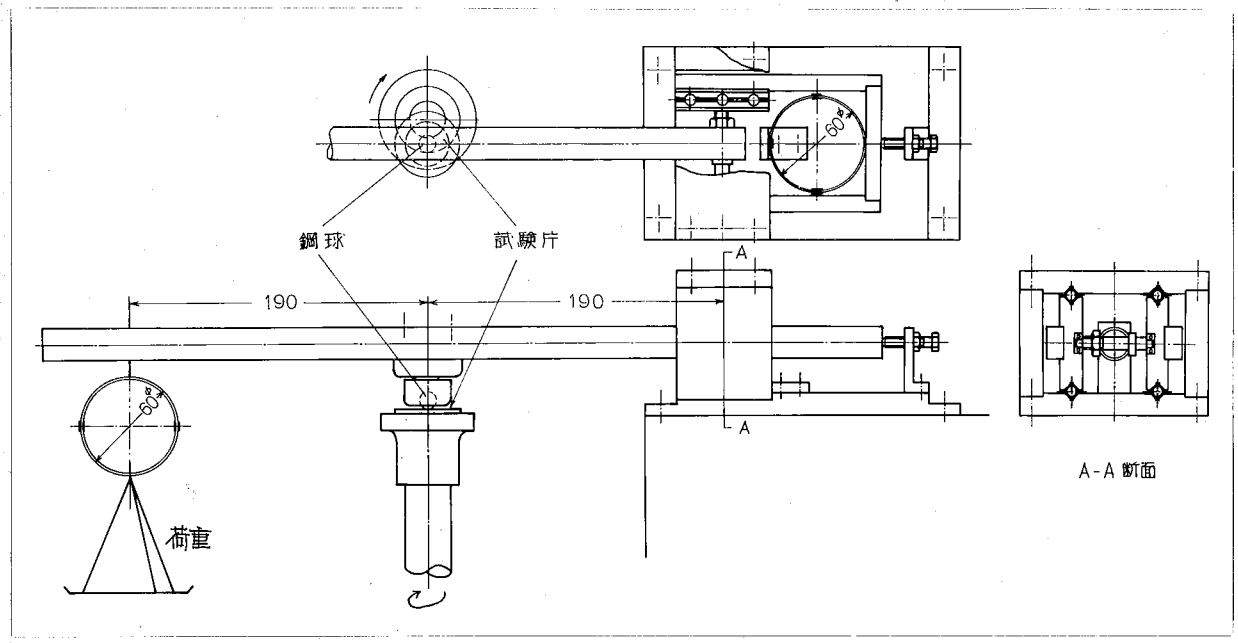
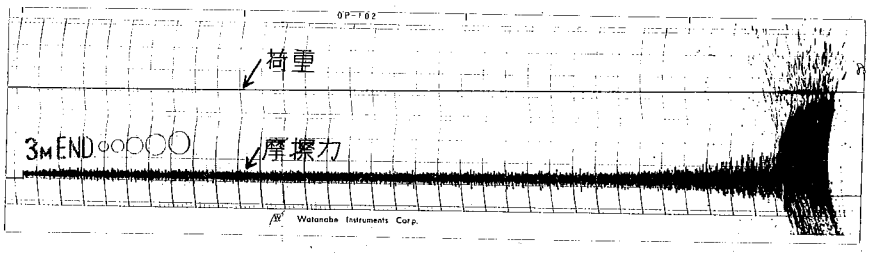


図2－5　抗折力測定用治具



摩擦速度 40 m/min
鋼球直径 7/16″
摩擦荷重増加速度 1.2 kg/min

図2－6 摩擦試験機



銅・30%ガラス粉末成形体の場合

図2－6′ 測定結果例

均値で示した。

被削性の実験は昌運工作所製旋盤を使用し，切削速度 434 m/min ，送り 0.1625 mm/rev ，切込み 0.1 mm に一定として行なった。使用したバイトは超硬（G1）バイトで，その形状は刃先角 90°，刃先丸味半径 1.5 mm ，すくい角 5°，逃げ角 5° である。切削面あらさ曲線は切削に直角方向および切削方向について，小坂式仕上面検査機を使用して記録した。

2．1．3　物理的性質および機械的性質

図2－7に，銅－ガラス粉末成形体の多孔率，有効多孔率および焼成による寸法変化が，ガラス含有量によってどのように異なるかを示す。これより，多孔率はガラス含有量の増加とともにわずかに増大するが，有効多孔率はほとんど変わらない。それは，前述の銅－30 Vol.% ガラス粉末成形体の顕微鏡観察から明らかなように，空孔がほとんど独立して存在していることによるものと考えられる。焼成による寸法変化は，測定片の圧縮に平行な方向と圧縮に直角な方向について測定した。図において，負の寸法変化率は焼成による収縮の割合を表わす。いずれの方向についても焼成によって収縮し，収縮の割合はガラス含有量の増加とともにわずかであるが増大する。かつ，圧縮に平行な方向の収縮の割合の方が，圧縮に直角な方向のそれより小さい。

図2－8および図2－9に，銅－ガラス粉末成形体の機械的性質が，ガラス含有量によってどのように異なるかを示す。図2－8は，銅－ガラス粉末成形体の引張応力－ひずみ線図である。いずれの粉末成形体においても明瞭な比例限および降伏点はみられないが，約0.002以上のひずみではガラス含有量が増加するにつれて同一のひずみを生ずる応力は大きくなる。一方，引張強さもガラス含有量の増加とともに低下する。

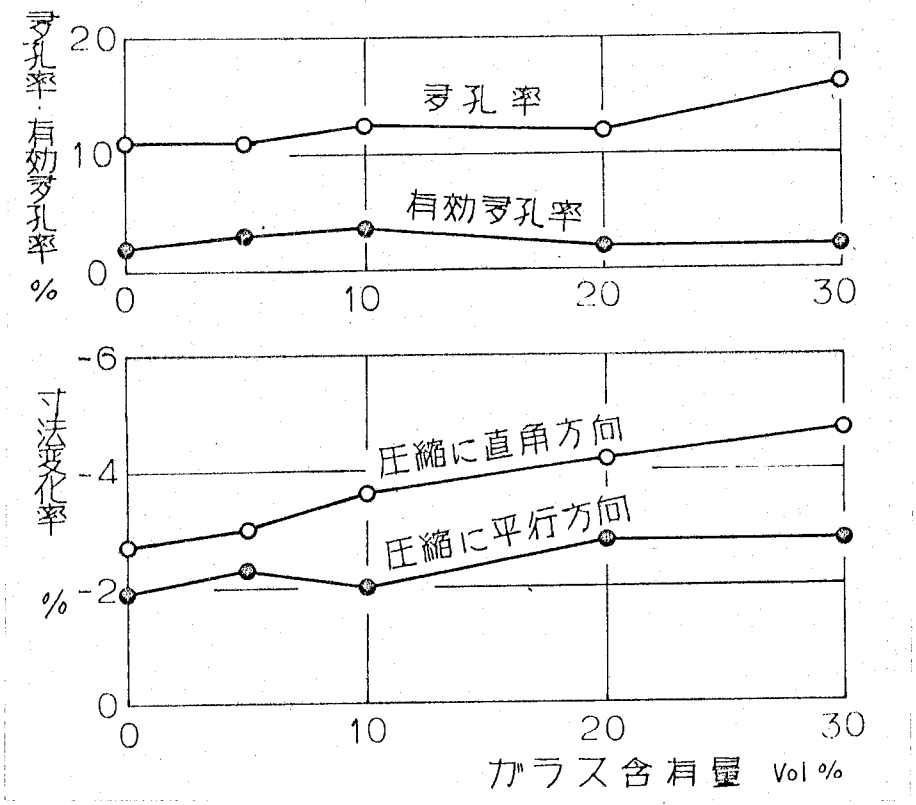


図2－7　孔率・有効孔率・寸法変化率とガラス含有量との関係

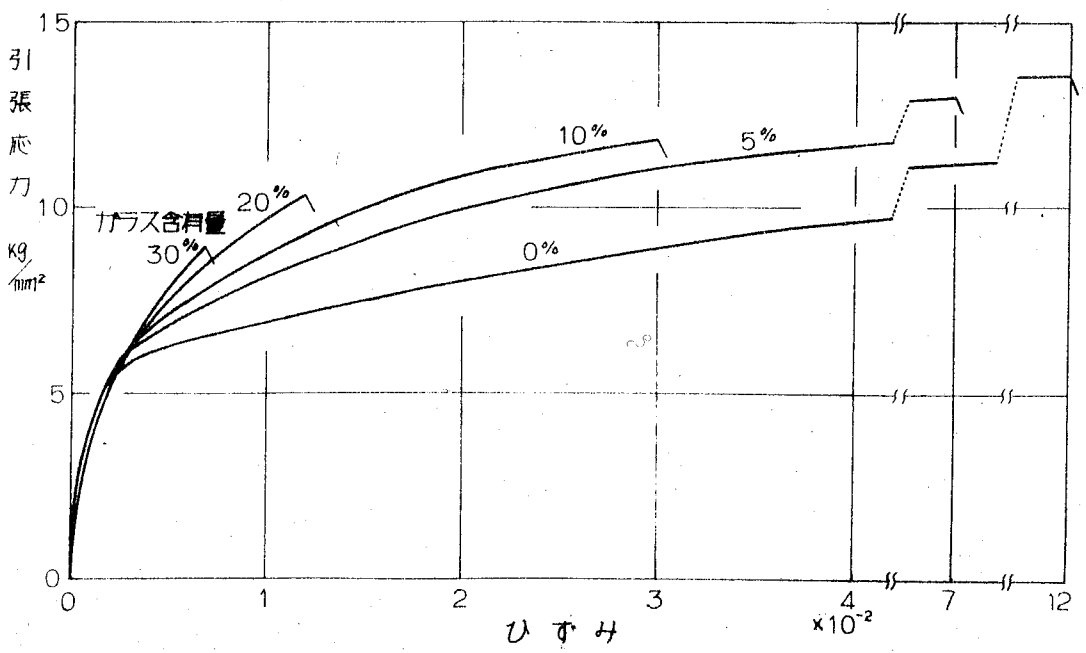


図2－8　銅－ガラス粉末成形体の応力－ひずみ線図

これより，ガラス含有量が増加するにつれて，銅－ガラス粉末成形体は脆化することがわかる。図２－９は，銅－ガラス粉末成形体の抗折力，引張強さ，圧縮強さおよび硬さである。抗折力，引張強さおよび圧縮強さはいずれもガラス含有量の増加とともに低下する。硬さはガラス含有率 20 %までは，含有量の増加とともに増大して HRH 83 となるが，それ以上の含有率 30 % ではわずかに低下して HRH 72 となる。ガラス含有量の増加とともに硬さが増大することは，すでに述べたようにガラスの増加とともに，粉末成形体は変形し難くなることによるものと考えられる。しかし，ガラス含有量の多い銅－30 Vol.% ガラス粉末成形体では，硬さ測定における鋼球が，空孔を押しつぶしつつ，かつガラス部を破壊しつつ押し込まれると考えられるので，見掛け上の硬さは小さいものと考えられる。

図２－10に，上述の銅－ガラス粉末成形体に固体潤滑剤である黒鉛を添加した場合，粉末成形体の機械的性質が黒鉛の含有量によってどのように異なるかを，ガラス含有率 10 % の場合について示す。黒鉛添加による硬さの変化は黒鉛を含まない粉末成形体で約 HRH 77 であり，0.5 % 黒鉛含有量のものでは急激に低下して約 HRH 55 となる。それ以上黒鉛含有量が増加すると，硬さはわずかに増大する。抗折力は硬さのそれとほゞ同じで，黒鉛を含まない粉末成形体の抗折力は 29 kg/mm² であるが，0.5 % 黒鉛含有量のもののそれは急激に低下して 14 kg/mm² となり，それ以上黒鉛含有量が増加すると，抗折力はわずかに増大する。引張強さも，硬さ，抗折力とほゞ同じで，黒鉛を含まない粉末成形体の引張強さは 11.5 kg/mm² であるが，0.5 % 黒鉛含有量のもののそれは急激に低下して 8.5 kg/mm² となり，それ以上黒鉛含有量が増加すると，引張強さはわずかに増大するようである。

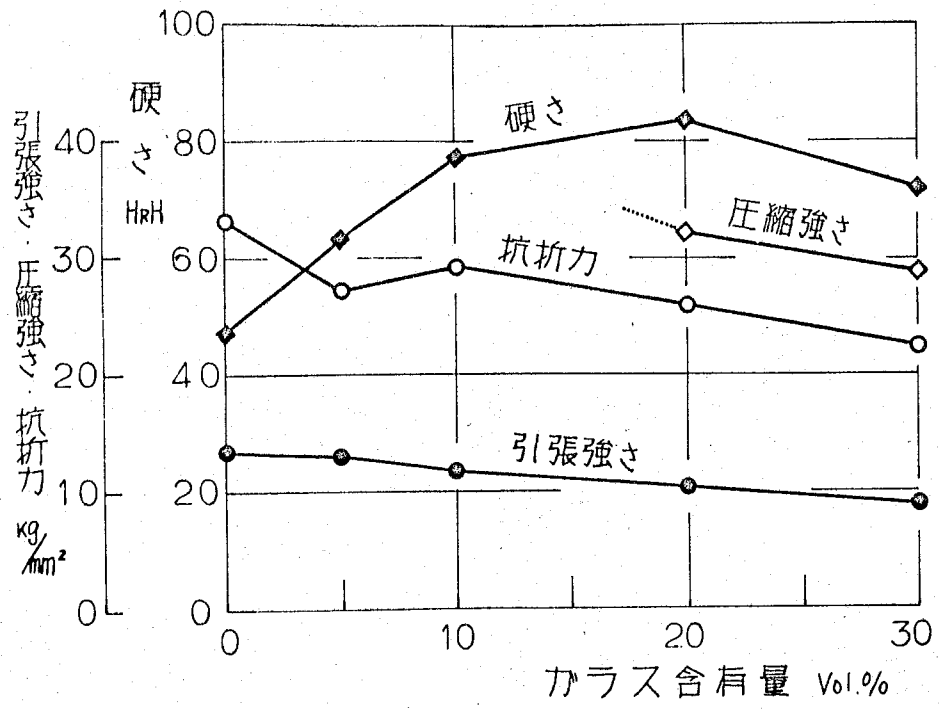


図2－9　引張強さ・圧縮強さ・抗折力・硬さとガラス含有量との関係

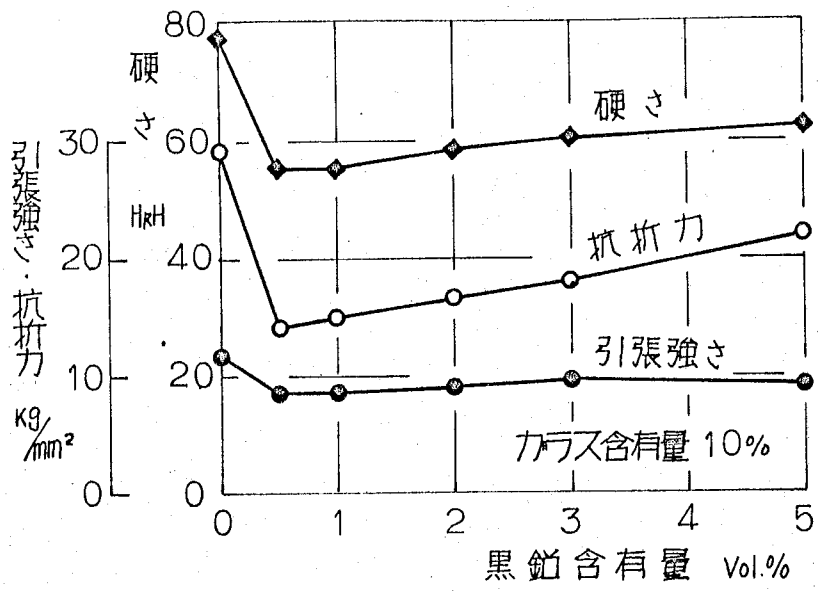


図2－10　引張強さ・抗折力・硬さと黒鉛含有量との関係

2．1．4　摩擦特性

ガラス含有量および黒鉛含有量が粉末成形体の摩擦係数，焼付き荷重および摩耗量におよぼす影響を図2－11～13に示す。図2－11は，黒鉛を添加しないでガラス含有量を変えた粉末成形体のそれである。摩擦係数は，銅粉末成形体では0.3であるが，それにガラスを添加することによって低下し，ガラス含有量5%のものでは0.22，それ以上のガラス含有量のものでは約0.24である。これより，ガラスの添加によって粉末成形体の摩擦係数は低下することがわかる。それに対して，焼付き荷重は，銅粉末成形体では33kgであり，5%ガラス含有量のものではそれとほとんど差異はみとめられない。しかし，10%ガラス含有量のものでは急激に低下して1.5kgとなる。それ以上ガラス含有量が増加しても，焼付き荷重には著しい差異はみとめられない。摩耗量は，ガラス含有量の増加につれてわずかに増大する。これは，図2－9に示した粉末成形体の引張強さがガラス含有量の増加につれてわずかに減少することによるものと考えられる。

図2－12は，ガラス含有率を10%に一定として黒鉛含有量を変えた粉末成形体のそれである。摩擦係数は，黒鉛を含まない粉末成形体で0.23であり，それにガラスを添加した粉末成形体においてほとんど差異はみとめられなかった。焼付き荷重は，黒鉛を含まない粉末成形体で1.4kgであるが，黒鉛を添加することによって急激に増大し，0.5%黒鉛含有量のものでは5.8kg，1%黒鉛含有量のものでは7.8kgとなる。それ以上黒鉛含有量が増加しても，焼付き荷重には著しい差異はみとめられない。摩耗量は黒鉛含有量の増加とともに増大する。

図2－13は，黒鉛含有率を2%に一定としてガラス含有量を変えた粉末成形体のそれである。摩擦係数は，ガラスを含まない粉末成形体で

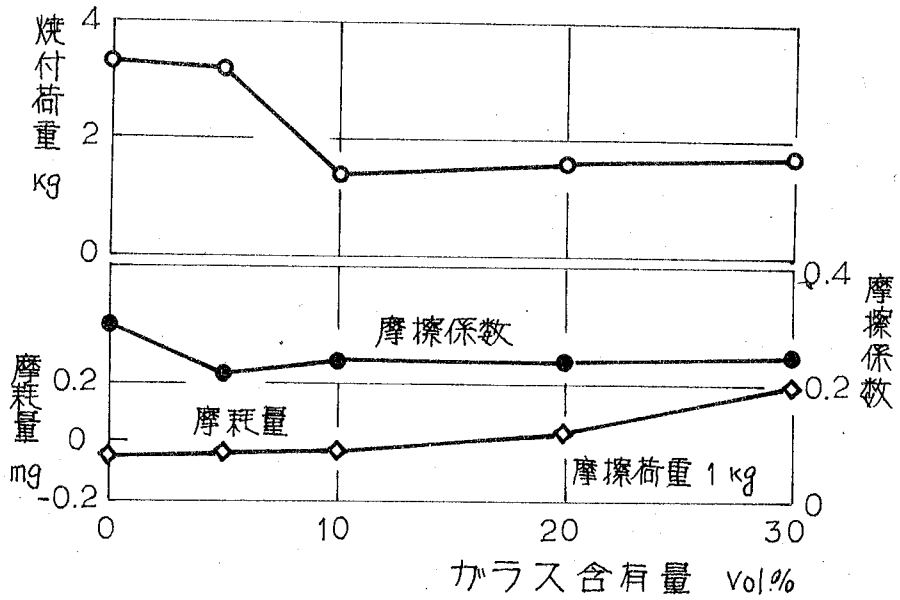


図2−11 摩耗量・焼付荷重・摩擦係数とガラス含有量との関係

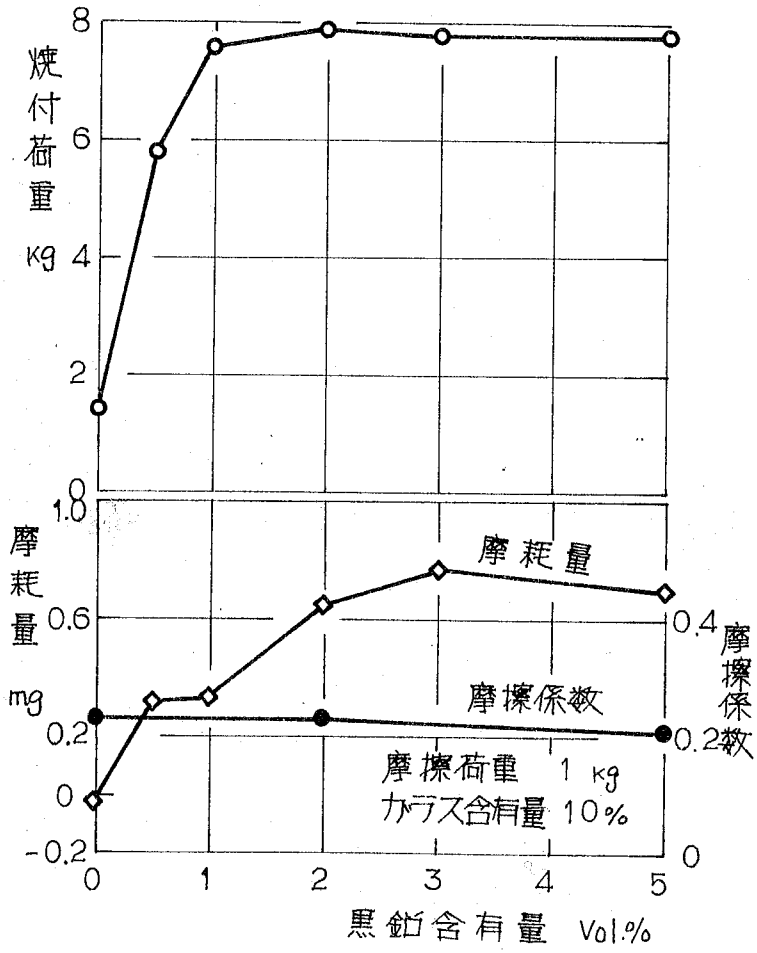


図2−12 摩耗量・焼付荷重・摩擦係数と黒鉛含有量との関係

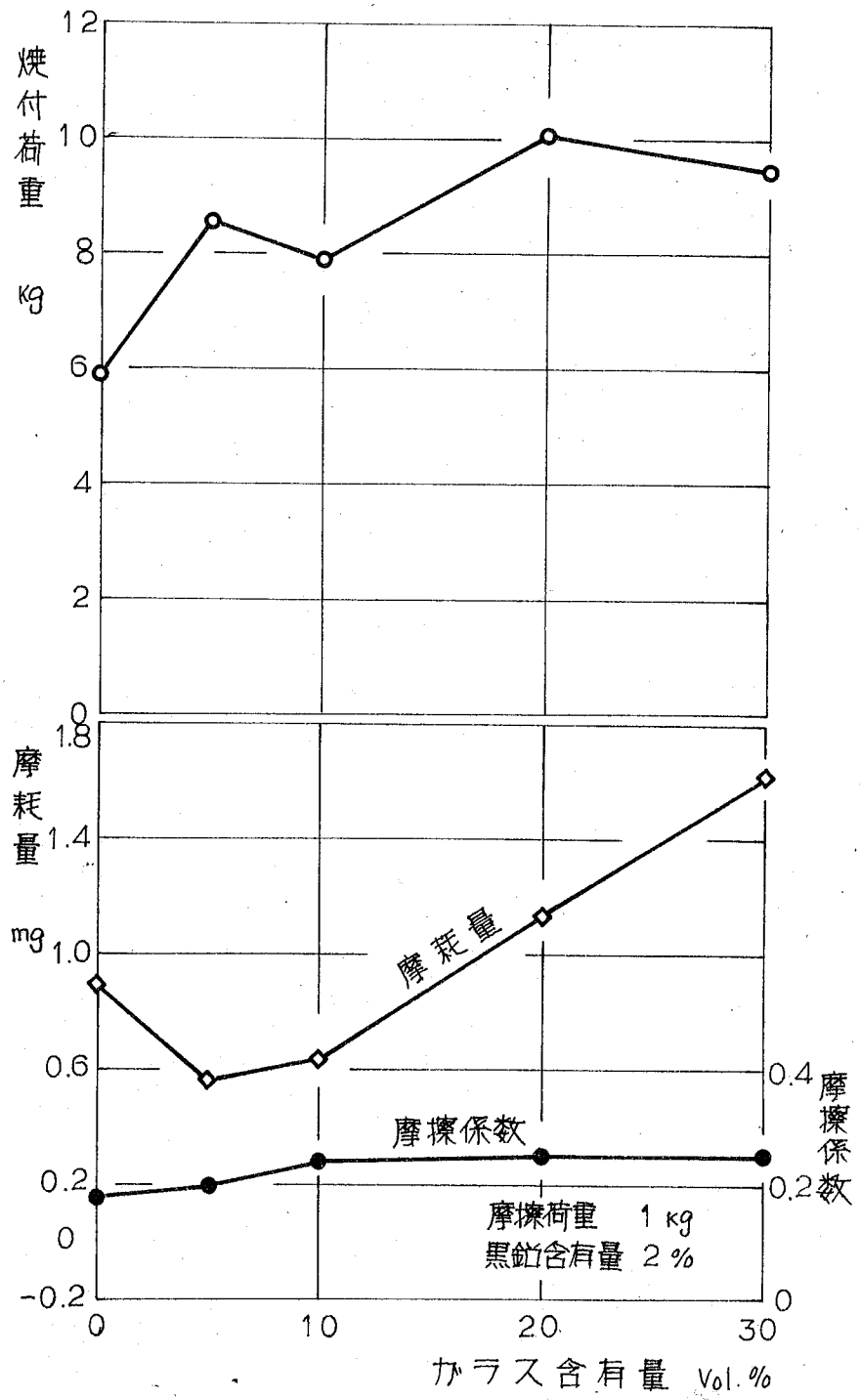


図2−13 摩耗量・焼付荷重・摩擦係数とガラス含有量との関係

0.18 であるが，それにガラスを添加することによって増大し，ガラス含有率５％のものでは0.20，それ以上のガラス含有量のものでは0.25である。これより，ガラスの添加によって粉末成形体の摩擦係数は増大することがわかる。焼付き荷重は，ガラスを含まない粉末成形体で5.9 kgであり，ガラス含有量の増加とともにわずかに増大する。摩耗量は，ガラスを含まない粉末成形体で0.9 mg であり，５％ガラス含有量のものは急激に低下して0.56 mg となる。それ以上ガラス含有量が増加すると摩耗量は増大し，増大の割合は黒鉛を含まない粉末成形体より黒鉛を２％含有した粉末成形体の方が大きい。

上述のように粉末成形体の摩擦係数，焼付き荷重および摩耗量はガラス含有量および黒鉛含有量によって著しい差異のあることがみとめられたが，それは摩擦面の状態によるものと考えられるので，摩擦面を光学顕微鏡によって観察した。

図２－14に，粉末成形体摩擦面の顕微鏡写真を示す。このときの摩擦荷重は，黒鉛を含まない粉末成形体で１kg，黒鉛を含有した粉末成形体で５kg である。銅粉末成形体では，摩擦条痕に直角の微細な損傷がみられる。黒鉛を含まないでガラスを10％および20％含有した粉末成形体では，ガラスが溶融流動していないことがわかる。また，銅－20％ガラス粉末成形体では，ガラスが掻り起こされている。これは，図２－11に示したように摩耗量がガラス含有量の増加とともに増大することを示している。ガラスを含まないで黒鉛を２％含有した粉末成形体では，黒鉛がよく表面を覆っており，写真で白くみえる銅の露出している面はわずかである。これは，図２－11および２－13に示したようにガラスを含まない粉末成形体では，黒鉛を含まない粉末成形体より黒鉛を２％含有した粉末成形体の方が，焼付き荷重は大きいことを示している。

ガラスを10％，黒鉛を2％含有した粉末成形体では，ガラスが溶融流動して粉末成形体の摩擦面を全面にわたって覆っており，かつ流動しているガラスは損傷していないことがわかる。これは図2－13に示したように黒鉛を2％含有した粉末成形体では，ガラスが溶融流動していないことがわかる。また，銅－20％ガラス粉末成形体では，ガラスが掘り起こされている。これは，図2－11に示したように摩耗量がガラス含有量の増加とともに増大することを示している。ガラスを含まないで黒鉛を2％含有した粉末成形体では，黒鉛がよく表面を覆っており，写真で白くみえる銅の露出している面はわずかである。これは，図2－11および2－13に示したようにガラスを含まない粉末成形体では，黒鉛を含まない粉末成形体より黒鉛を2％含有した粉末成形体の方が焼付き荷重が大きいことを示している。ガラスを10％，黒鉛を2％含有した粉末成形体では，ガラスが溶融流動して粉末成形体の摩擦面を全面にわたって覆っており，かつ流動しているガラスは損傷していないことがわかる。これは，図2－13に示したように黒鉛を2％含有した粉末成形体では，ガラスを含まない粉末成形体よりガラスを10％含有した粉末成形体の方が焼付き荷重は大きく，かつ摩耗量は小さいことを示している。このときの鋼球表面を観察した結果を図2－14に示す。鋼球はほとんど損傷していない。ガラスを20％，黒鉛を2％含有した粉末成形体では，ガラスは溶融流動せず掘り起こされており，黒鉛が摩擦面を覆っている。

図2－15(a),(b)に，焼付き開始直後の粉末成形体の，摩擦面に直角な方向の断面顕微鏡写真を示す。同図(a)は，銅粉末成形体の場合であり，表面より約70μの深さまで結晶は微細化していることがわかる。同図(b)は，銅－20％ガラス粉末成形体の場合であり，表面より約20μの深さまで微細化していることがわかる。すなわち，銅粉末成形体にガラスを添加することにより，表面層の結晶変形深さは減少する。

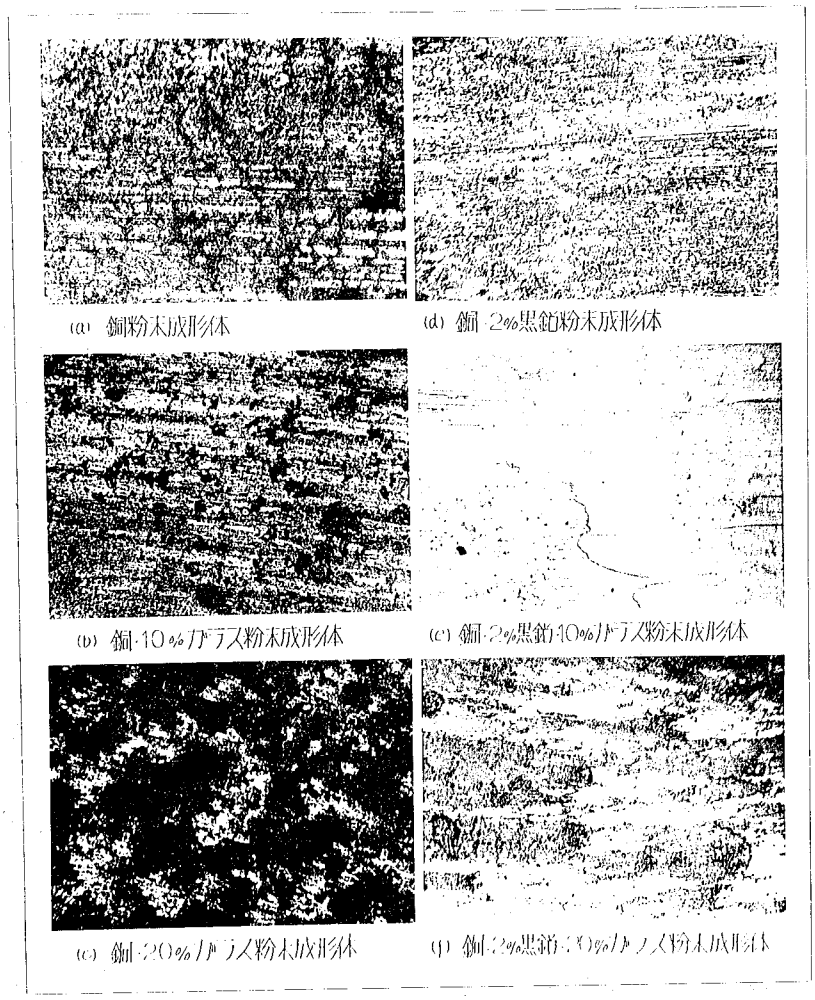
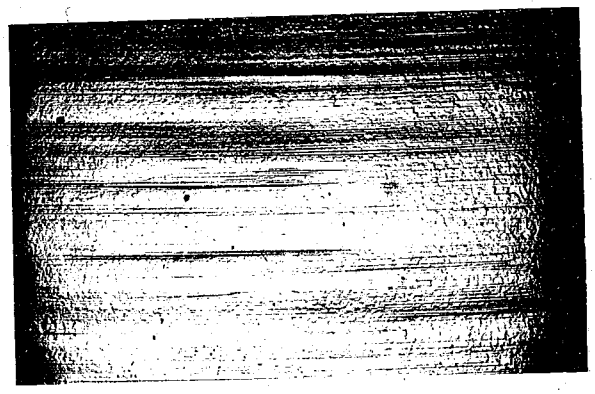


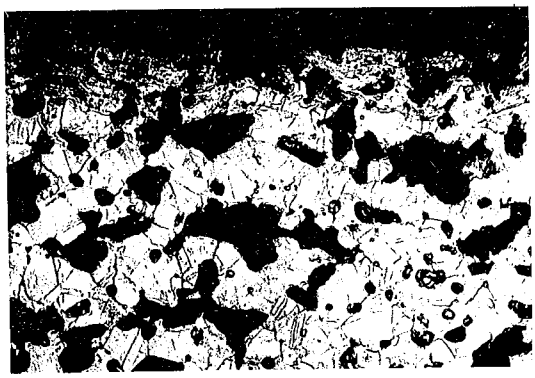
図2－14　摩擦面の顕微鏡写真　　×(100×1/2)



銅-2%黒鉛-10%ガラス粉末成形体を摩擦した場合

図2－14′　鋼球表面の顕微鏡写真

(a) 銅粉末成形体



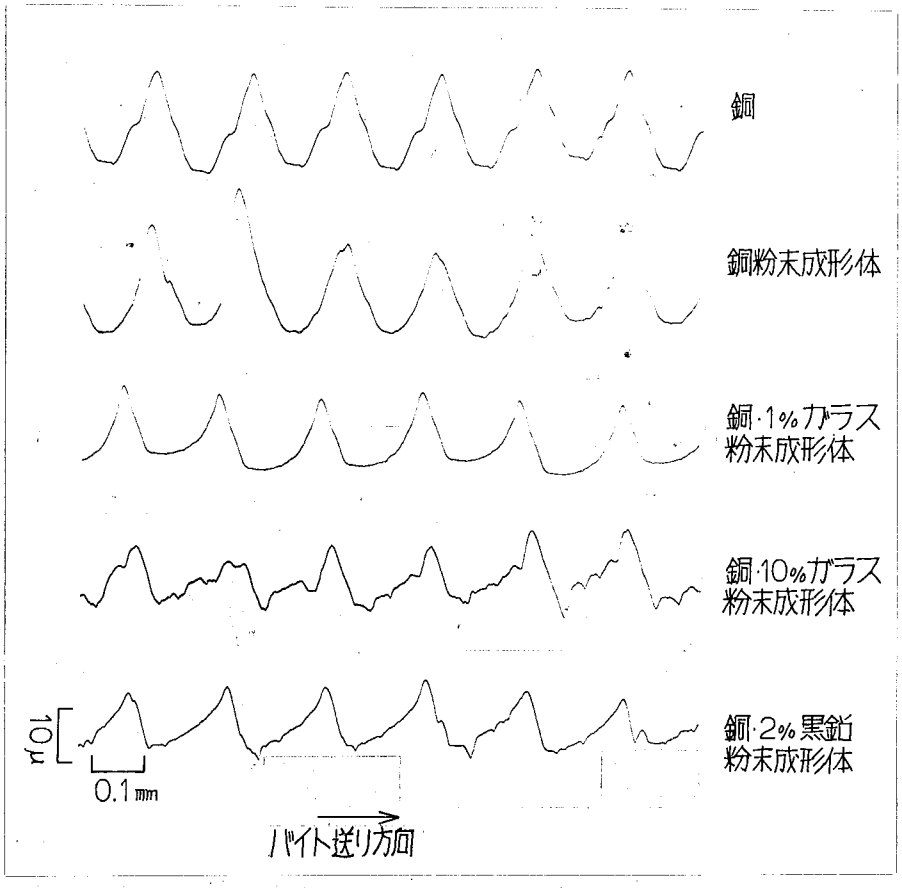
(b) 銅·20%ガラス粉末成形体

図2－15　摩擦面に直角方向の断面顕微鏡写真

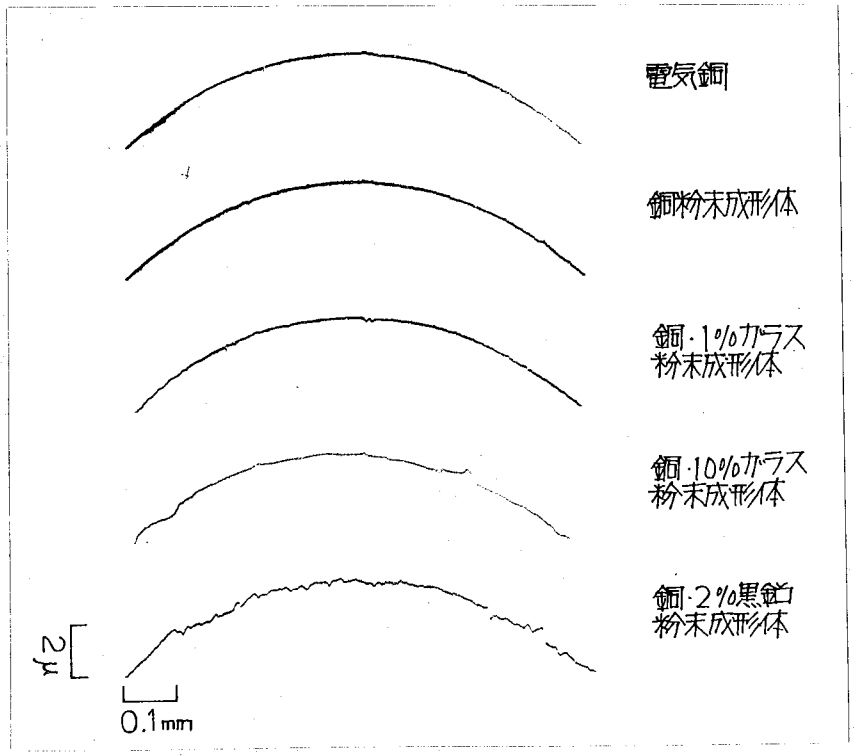
2．1．5 被削性

粉末成形体の被削性を，切削面の形状および切りくずの形状より吟味した。なお，粉末成形体と比較検討するために，850℃で焼鈍した電気銅についても吟味した。図2－16(a)，(b) に粉末成形体の切削面の形状を示す．同図(a) は切削に直角方向，同図 (b) は切削方向の形状である。いま，切削面を形成する1つの凹部の形状を観察すると，電気銅のそれはバイトの形状とほゞ等しい。銅粉末成形体のそれはバイト迎え側にわずかな崩れがみられる。銅－1％ガラス粉末成形体のそれはバイト迎え側でバイトの形状とわずかに異なるが崩れはみられなかった。銅－10％ガラス粉末成形体および銅－2％黒鉛粉末成形体のそれはバイト迎り側に著しい崩れがみられる。切削方向のあらさは電気銅，銅粉末成形体，銅－1％ガラス粉末成形体でなめらかであり，銅－10％ガラス粉末成形体，銅－2％黒鉛粉末成形体でわずかなおうとつを有する。

切削時に得られた切りくずの形状を図2－17に示す。電気銅の切りくずの長い渦巻状であり，銅粉末成形体のそれは曲率半径の大きい円弧状である。銅－1％ガラス粉末成形体のそれは銅粉末成形体のそれとほゞ同様の長さで，かつ電気銅のそれと同様の渦巻状である。銅－10％ガラス粉末成形体および銅－2％黒鉛粉末成形体のそれは銅粉末成形体のそれより短かい，かつ曲率半径の小さい円弧状である。これよりつぎのことがわかる。銅粉末成形体の切削面はわずかに凹凸の崩れた面であり，切りくずは曲率半径の大きい円弧状，すなわち変形の小さいものである。しかし，銅－1％ガラス粉末成形体の切削面はなめらかな面であり，切りくずは曲率半径の小さい円弧状，すなわち変形の大きいものである。このような面は黒鉛を含有した粉末成形体では得られなかった。しかし，ガラス含有量の多い粉末成形体の切削面は著しくあらさ凹凸の崩れた面



(a) 切削に直角方向



(b) 切削方向

図2－16 切削面の形状曲線

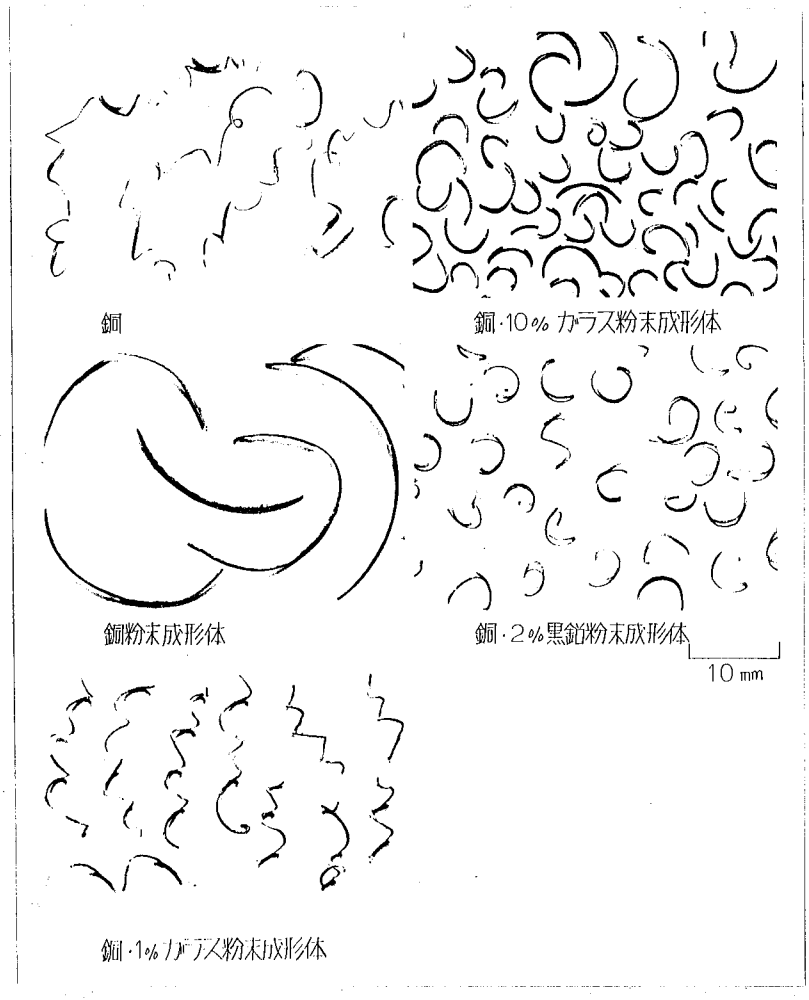


図2－17　切りくずの形状

である。

2．1．6　まとめ

銅にガラスおよび黒鉛を添加した粉末成形体の物理的性質，機械的性質，摩擦特性および被削性について実験的に吟味した結果，つぎのことがわかった。

(1)　銅粉末成形体にガラスを添加させると，含有量の増加とともに抗折力および引張強さは減少し，硬さは 20％ガラス含有量まで増大し，30％ガラス含有量では低下する。また，焼付き荷重は減少し，摩耗量はわずかに増大する。

(2)　銅粉末成形体にガラスを 10％含有し，それに黒鉛を添加させると，黒鉛含有量の増加とともに硬さ，抗折力および引張強さはわずかに減少し，焼付き荷重および摩耗量は増大する。

(3)　2％黒鉛含有量の銅粉末成形体にガラスを 10％含有させると，ガラスを含まない粉末成形体より焼付き荷重は大きく，摩耗量は小さい。この粉末成形体の摩擦面では，ガラスが溶融流動して摩擦面を全面にわたって覆っている。

(4)　銅粉末成形体にガラスを添加することにより，焼付き開始直後での表面層の結晶変形深さは減少する。

(5)　銅粉末成形体にガラスを 1％添加することにより，切削面はなめらかになり，かつ切りくずは変形の大きいものとなる。

2．2　銅－アルミニウム粉末成形体について

粉末冶金法の進歩にともない，高度の寸法精度を要する機械部品を，粉末冶金により製作するようになってきた。機械部品を粉末冶金により製作する場合，焼結後，機械加工を必要としない寸法精度が要求される。

そのためには，押型の精度を向上させることにより，高精度の圧粉体を成形し，その精度を焼結によって低下させることなく，圧粉体と同一精度の焼結体を得ることが必要であると考えられる。

前章で明らかになったように，加熱時に500～600℃で急激に膨張した後，温度上昇による寸法変化が小さいために，500～600℃における急激な膨張量を調整することによって焼結後の寸法精度を，容易に調整し得る銅－アルミニウム圧粉体について，加熱時の寸法変化の状況が，アルミニウムの添加量，成形圧力および加熱速度によってどのように異なるかを吟味し，圧粉体寸法と焼結体寸法が等しくなる焼結法を見い出すことを目的として本実験を行なった。併せて，示差熱，引張強さおよび表面あらさについて吟味した。使用した銅粉は前述した電解粉Ⅰ，アルミニウム粉は搗砕粉である。

2．2．1　加熱時の寸法変化

Cu粉にAℓ粉を1，2.5，5，7.5，10 wt.%添加し，圧力6 ton/cm²で加圧成形したCu－Aℓ圧粉体の，加熱時の寸法変化を図2－18に示す。加熱開始後400℃までは，いずれも温度の上昇とともに直線的に膨張し，膨張係数は約1.0×10^{-5} ℃$^{-1}$で，銅圧粉体のそれにほゞ等しい。約450℃に達すると，Aℓ添加量1，2.5，5%の圧粉体では，温度の上昇とともに膨張の割合は増大し，約600℃に達するとほゞ一定となる。また，この膨張の割合はAℓ添加量の大きい圧粉体ほど大きい。

Aℓ添加量が7.5%以上の圧粉体では，約450℃に達すると膨張の割合が急激に増大し，約490℃から約500℃の間で直線的に急激な膨張を生ずる。その後わずかに収縮し，ついで徐々に膨張する。上述の温度範囲で生ずる急激な膨張の割合は，Aℓ添加量7.5%および10%の圧粉体とも同一であるが，膨張量はAℓ添加量の大きい圧粉体ほど大き

い。このAℓ添加量7.5%および10%の圧粉体にみられる，約490℃から約500℃の間で急激に膨張した後，わずかに収縮し，ついで再び徐々に膨張する特異な現象を，筆者は〝過膨張〟と称する。この過膨張が添加量だけでなく，成形圧力および加熱速度に依存する現象かどうかについて吟味した。

図2-19に，Cu粉にAℓ粉を10 wt.%添加し，圧力2，4，6，8，10 ton/cm²で加圧成形したCu－Aℓ圧粉体の，加熱時の寸法変化を示す。加熱開始後約450℃までは，加熱温度に比例して膨張し，約450℃に達すると，温度の上昇とともに膨張の割合は徐々に増大する。成形圧力2 ton/cm²の圧粉体では，約600℃で膨張の割合がほゞ一定となる。しかし，成形圧力4 ton/cm²以上の圧粉体では，約490℃になると直線的に急激な膨張を生じ，約500℃で膨張が停止した後，わずかに収縮し，再び温度の上昇とともに徐々に膨張する。すなわち，前述の過膨張現象がみられる。

つぎに，焼結のように，その過程で拡散がともなうものは，加熱速度によって寸法変化の状況が異なると考えられるので，加熱速度によって過膨張現象が生ずるかどうかについて吟味した。図2－20に，Cu粉にAℓ粉を10 wt.%添加し，圧力6 ton/cm²で加圧成形したCu－Aℓ圧粉体を，1，2，4，8，16 ℃/minの速度で加熱したときの，加熱時の寸法変化を示す。これより，膨張の割合が増大する温度は，加熱速度によって異なり，加熱速度1 ℃/minでもっとも低く約380℃であり，加熱速度16 ℃/minでもっとも高く約460℃であり，加熱速度が大きいほど膨張の割合が増大する温度は高くなることがわかる。また膨張量は加熱速度が大きいほど小さいことがわかる。そして，加熱速度の大きい4，8，16 ℃/minでは，前述した過膨張現象がみられる。

東京工業大学 282917

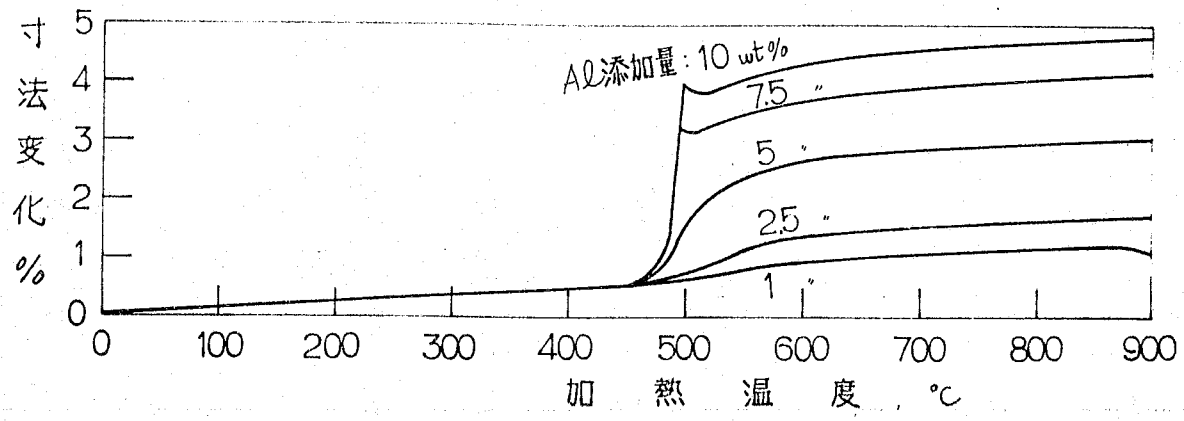


図2－18 Aℓ添加量による寸法変化－加熱温度特性の影響
（成形圧力6 ton/cm²，加熱速度4 °C/min）

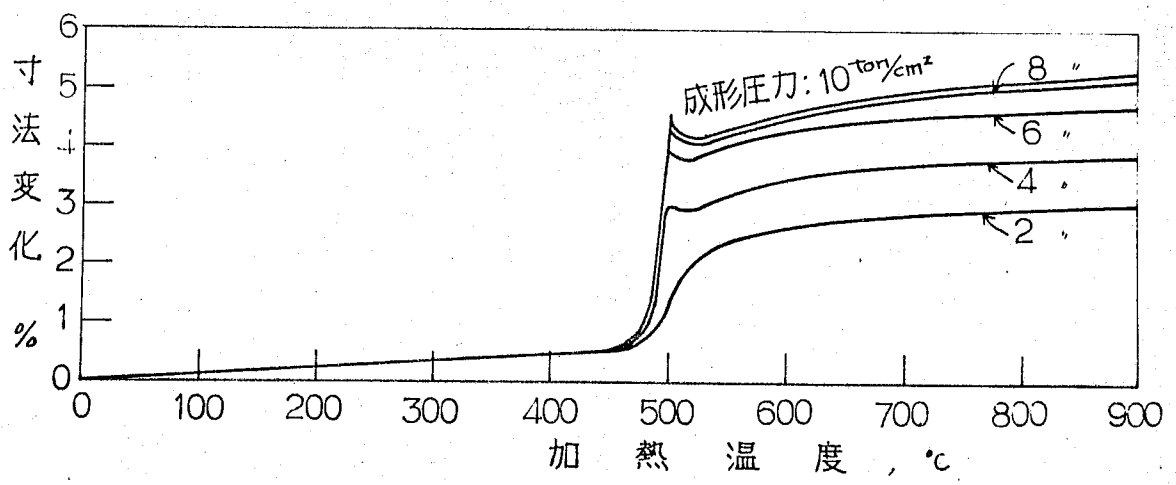


図2－19 成形圧力による寸法変化－加熱温度特性の影響
（Aℓ添加量10 wt.%，加熱速度4 °C/min）

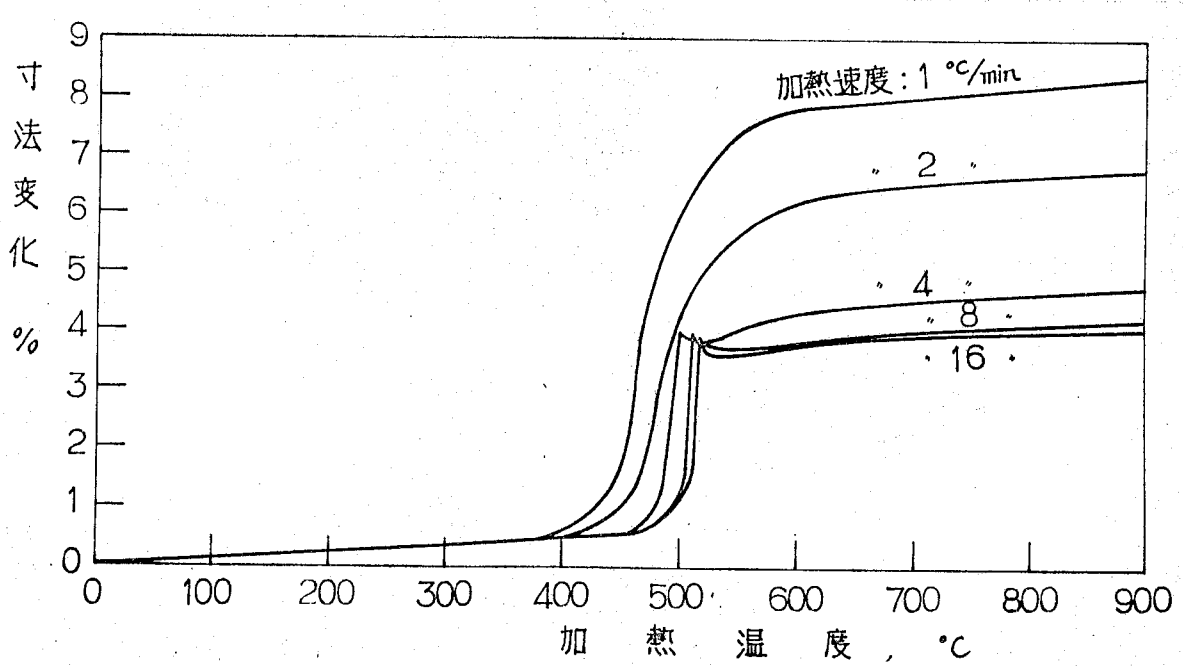


図2－20 加熱速度による寸法変化－加熱温度特性の影響
（Aℓ添加量10 wt.%，成形圧力6 ton/cm²）

Cu－Al 圧粉体の寸法変化の状況が，Al 添加量および成形圧力によって異なる。そこで，加熱温度900℃における寸法変化が，圧粉体密度比（圧粉体密度／真密度）によってどのように異なるかを，Al 添加量1，5，7.5，10 wt.%について測定した。図2－21に，結果を示す。同一成形圧力でも，Al 添加量によって圧粉体密度は異なるので，成形圧力の変わりに，圧粉体密度比を横軸に表示した。いずれの添加量の Cu－Al 圧粉体においても，900℃における寸法変化は圧粉体密度比の増加とともに，ほゞ直線的に増大し，増大の割合は Al 添加量の大きいほどわずかに大きい。

以上の実験結果を参考にして，Cu－Al 圧粉体を加熱速度4℃/min で900℃まで加熱し，以後同じ速度で冷却した場合の圧粉体寸法と焼結体寸法とが等しくなる Al 添加量を明らかにすることを目的として，添加量を変えた Cu－Al 圧粉体の寸法変化線図を記録した結果，Al 添加量として1.3 wt.%が適していることがわかった。その場合の加熱時の寸法変化を図2-22に示す。この線図は，冷却後，寸法変化が零になり圧粉体寸法と焼結体寸法が等しいことを示している。

2．2．2　示差熱分析

前章で明らかになったように，Cu－Al 圧粉体を加熱したとき，加熱温度の上昇とともに示差熱は増大し，最大値を示した後減少する。この最大値を仮りに最高示差熱と呼び，Cu－Al 圧粉体の加熱時の最高示差熱が Al 含有量によってどのように異なるかについて測定吟味した。図2-23に，測定結果を示す。Al 含有量の増加とともに，最高示差熱は増大することがわかる。すなわち，Al 含有量が増加すると発熱が増大すると考えられる。

つぎに，加熱速度によって示差熱－加熱温度線図がどのように異なる

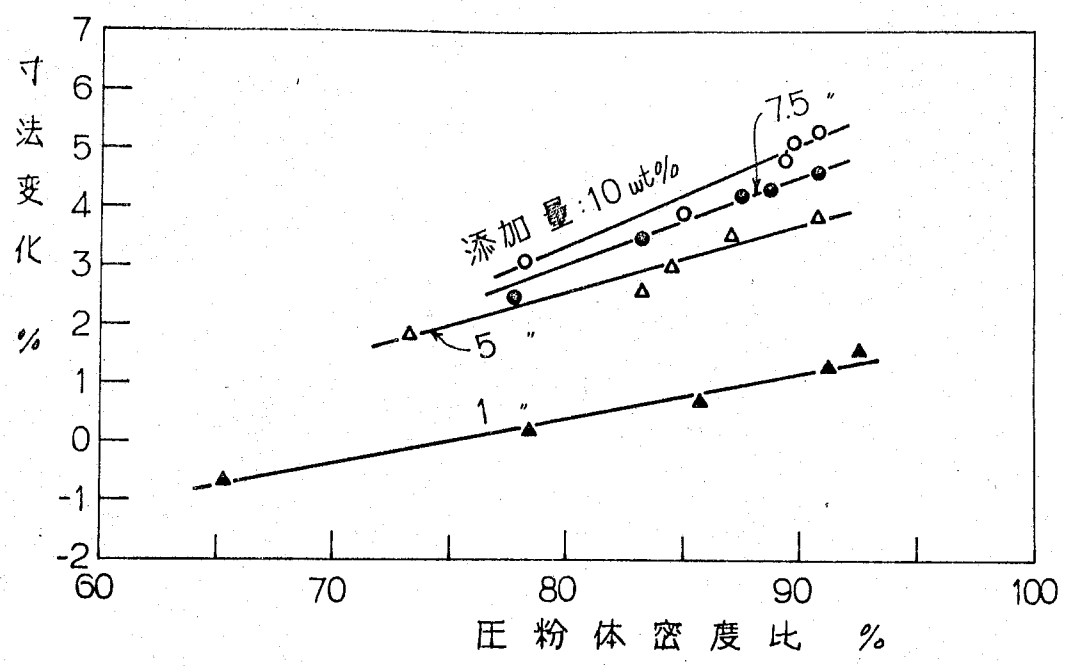


図2-21 Cu-Al圧粉体の温度900℃での寸法と加熱前の寸法との変化率

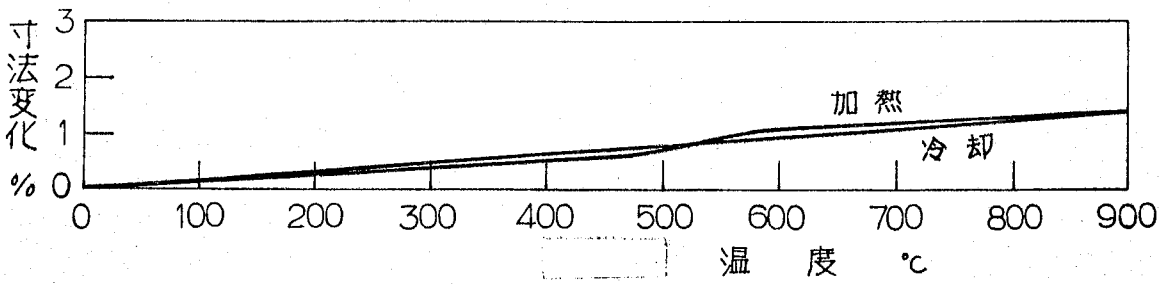


図2-22 加熱前後の寸法が変化しない場合の寸法変化－温度特性（電解銅粉I－1.3wt.%アルミニウム，成形圧力6ton/cm²，加熱速度4℃/min）

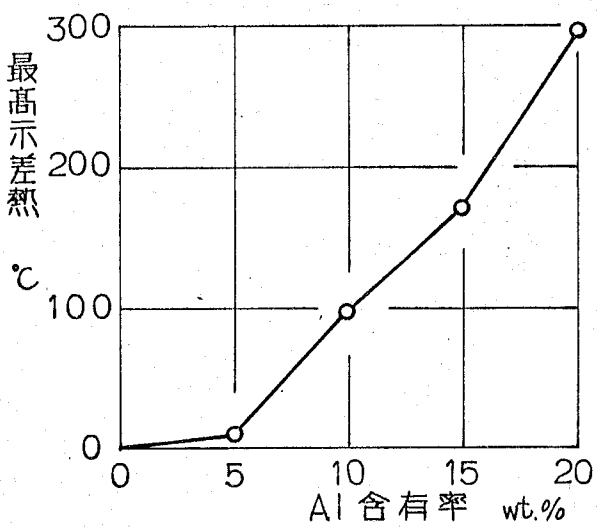


図2-23 最高示差熱とAl含有率との関係（加熱速度2℃/min）

かを測定吟味した。図2－24に，測定結果を示す。加熱速度が1℃/minの場合には示差熱は生じない。加熱速度が2℃/min以上では示差熱が生じ，加熱速度が増加するとともに，最高示差熱は上昇し，かつ最高示差熱を示すときの標準試料の温度も上昇する。この最高示差熱の出現する傾向と前述した過膨張の出現する傾向とは同じ，すなわち，いずれも加熱速度の大きい場合に生じ，かつ加熱速度の増加とともに出現する温度が上昇するので，両者は密接な関係にあると考えられる。そして，前述の過膨張は，上記の示差熱によって生ずる温度膨張によるものと判断される。

2．2．3　表面あらさ

前章によって，Cu－Al圧粉体のAlの存在していた箇所は焼結によって空所になることを知った。そこで，Cu－Al圧粉体を焼結した場合，圧粉体の表面に存在しているAlが拡散によって生ずる空所によって焼結体の表面あらさが，どのような影響を受けるかAlの含有量を変えることによって吟味した。試料として，1，5，10，15，20 wt%の5種にAlの添加量を変え，成形圧力6 ton/cm²，焼結温度900℃，焼結時間1 hrで作成した焼結体を使用した。表面あらさは小坂式仕上面検査機を使用して，縦倍率×500，横倍率×10で測定した。

図2－25に結果を示す。Alを含まないCu焼結体の表面は凹凸の大きい面となる。これは，前章で述べた焼結体表層部の空孔によるものであると考えられる。Cu－1 wt% Al焼結体はもっとも小さな表面あらさを示し，約2μ Hmaxである。それ以上Al含有量が増加すると，焼結体表面に小さな穴を生じ，穴の数および深さはAl含有量の増加とともに増大する。

2．2．4　引張強さ

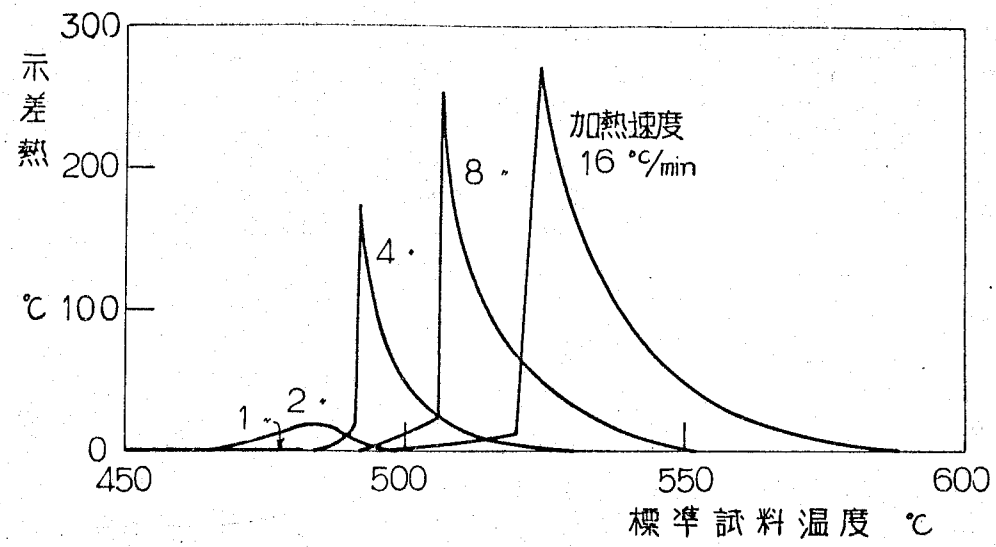


図2－24 加熱速度による示差熱－温度特性の影響
（Al含有率 15 wt.%）

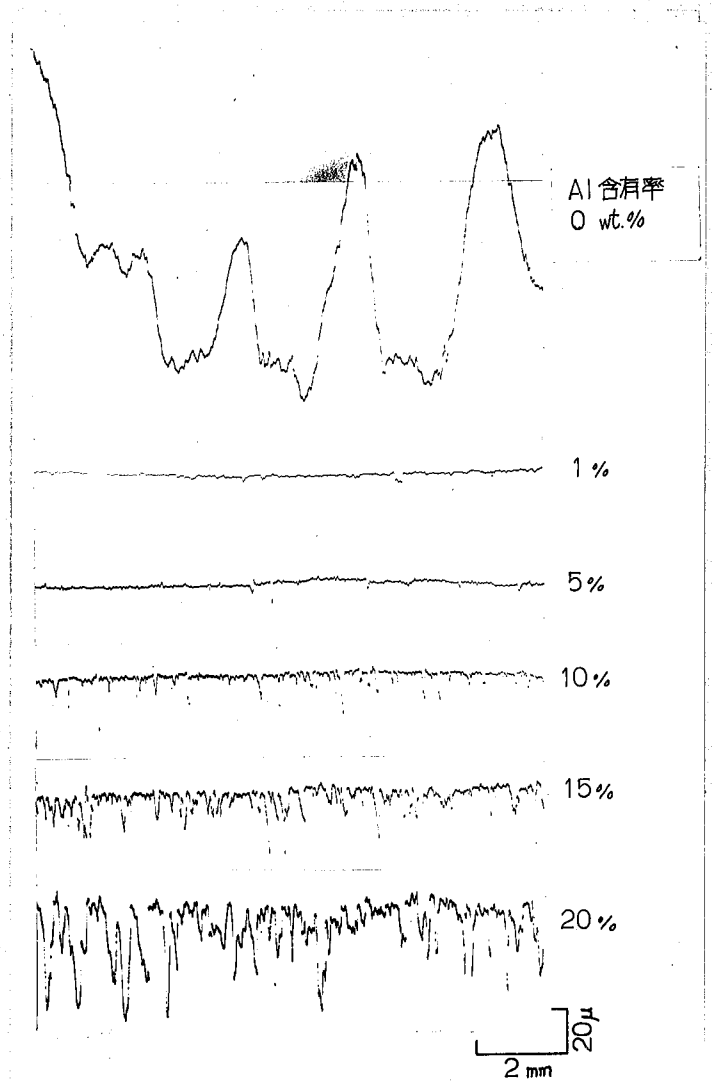


図2－25 Cu-Al焼結体の表面あらさ曲線
（成形圧力 6 ton/cm², 焼結温度 900°C,
焼結時間 1 hr）

Al 含有量が Cu − Al 焼結体の引張強さにどのような影響をおよぼすかについて吟味した。図2−26に結果を示す。引張強さは Al を含まない Cu 焼結体で 9.6 kg/cm² であり，Al を添加することにより急激に増大する。これは，Al を含有しない焼結体では前述した表層部に生じている空孔によって見掛上の断面積が大きいこと，および空孔が切り欠き効果の作用をするために引張強さが小さく，Al をわずかに含有した焼結体では表層部の空孔が生じないために，引張強さが大きいことによると考えられる。そして，Al 含有量 2.5% の場合に最大値を示し 16.2 kg/cm² となる。それ以上 Al 含有量が増加すると，引張強さは増大する。

つぎに，成形圧力が Cu−1 wt.% Al 焼結体の引張強さにどのような影響をおよぼすかについて吟味した。図2−27に結果を示す。併せて，焼結密度を測定した結果についても示す。成形圧力の増加とともに引張強さは増大し，成形圧力 6 ton/cm² の場合の引張強さは 15.2 kg/cm² となる。成形圧力の増加による引張強さの増大は，焼結密度の増加と密接な関係にあると考えられる。

2．2．5 まとめ

銅にアルミニウムを添加した粉末成形体の加熱温度による寸法変化，示差熱，表面あらさおよび引張強さについて吟味した結果，つぎのことがわかった。

(1) Cu − Al 圧粉体を加熱するとき，500 °C ～ 600 °C で急激な膨張を示す。このときの膨張量は Al 含有量の多いほど，かつ成形圧力の大きいほど，かつ加熱速度の小さいほど大きい。

(2) 圧力 6 ton/cm² で成形した Cu − 1.3 wt.% Al 圧粉体を，加熱速度 4 °C/min で 900 °C まで加熱し，以後同じ速度で冷却した場合，圧粉

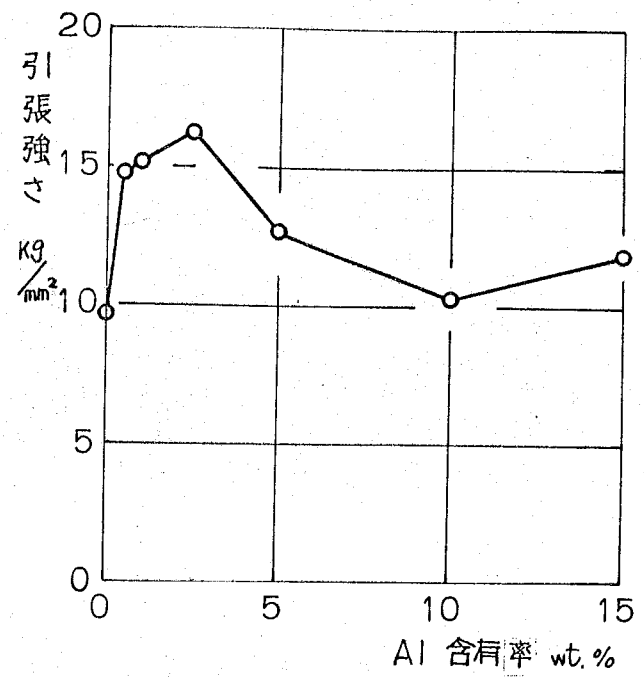


図2－26 引張強さとAl含有率との関係
（成形圧力6ton/cm²，焼結温度900℃
焼結時間1hr）

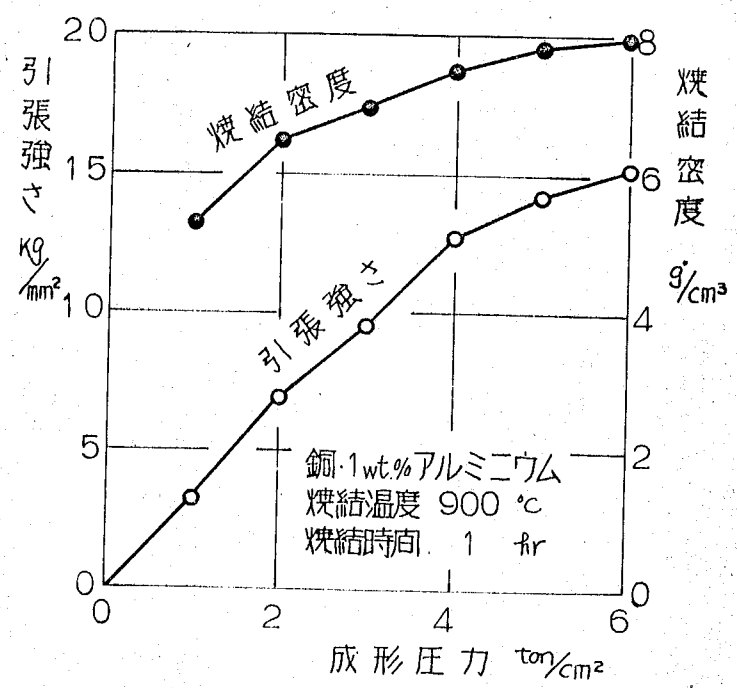


図2－27 引張強さ・焼結密度と成形
圧力との関係

体寸法と焼結体寸法とは等しい。

(3) Cu−Al圧粉体を加熱するとき，500℃～600℃で示差熱を生ずる。このときの最高示差熱温度はAl含有量が多いほど，かつ加熱速度が大きいほど高い。

(4) Cu−Al焼結体の表面あらさはAl含有量が1 wt.%の場合にもっとも小さい。

(5) Cu−Al焼結体の引張強さはAlを添加することによって増大し，Al含有量が2.5 wt.%の場合にもっとも大きく，16.2 kg/cm²となる。

第3章　銅基粉末成形砥石の成形に関する研究

前章は粉末成形法によって製造することができる銅粉を基材とした粉末成形体について行なった研究である。他方，粉末成形法によって製造することができる成形体として，研削砥石がある。砥石としては，従来より，ビトリファイドボンド砥石，シリケートボンド砥石，レジノイドボンド砥石，メタルボンド砥石，PVA砥石などがある。ビトリファイドボンド砥石[1][2]は長石，陶石，黄土，石灰石，滑石，蛙目粘土，珪石の所要量を混合攪拌し砥粒とともに成形した後，1300～1350℃で焼成して磁器化することによって砥粒を結合した砥石である。シリケートボンド砥石[3]は珪酸ソーダ，珪石末，亜鉛華を混合し，砥粒とともに成形したものを，260～300℃で焼成することによってつくられる砥石である。レジノイドボンド砥石[4]は熱硬化性樹脂であるフェノール樹脂を結合剤として，約180℃で焼成した砥石である。メタルボンド砥石は粉末冶金法または電鋳法[5]によって銅，黄銅，ニッケル，鉄などで砥粒を結合した砥石である。PVA砥石[6]はポリビニールアルコールをフォルムアルデヒドでアセタール化したポリビニールアセタールを結合剤として，砥粒を混入した状態で発泡させてスポンジ状に成形した砥石である。しかし，ビトリファイドボンド砥石およびシリケードボンド砥石は長寿命砥石および鏡面仕上砥石として，またレジノイドボンド砥石およびメタルボンド砥石は切屑の排出の点において，PVA砥石は仕上面の形状精度の点で不充分であると考えられる。

---

(1)　伊藤幸夫，ビトリファイド研削砥石に関する研究
(2)　窯業協会編，窯業工学ハンドブック，(昭37)，960，技報堂
(3)　砥粒加工研究会編，砥粒加工技術便覧，(昭40)，38，日刊工業
(4)　小林昭，機械と工具，(1961－2)，113
(5)　岸・他3名，機械試験所報告，56(昭40－10)
(6)　井上賠，機械学会誌，57－421(1954)

そこで，長寿命砥石として，かつ鏡面仕上砥石として適した，粉末成形法によって製造した銅基粉末成形砥石を新しく開発した。従来の砥石は，いずれも砥粒，結合剤，気孔の３要素より構成されているが，銅基粉末成形砥石は上記３要素に砥粒保持体を加えた４要素より構成されている。本章は銅基粉末成形砥石の成法法について行なった研究である。

３．１　銅基粉末成形砥石の構成およびその性質

銅基粉末成形砥石は，砥粒，それを保持する金属粉および結合剤を混合撹拌後，成形および焼成することによってつくられる。その特徴は，砥石の切刃面より突出した砥粒を弾性的および塑性的に砥粒保持体である金属粉に埋め込ませ，砥粒切刃を砥石切刃面にそろわせることにより深い疵をつくることなく切削を行なうこと，および結合剤としてフェノール樹脂を使用して結合を強靭にすることにより砥石損耗の著しく少ないことである。

銅基粉末成形砥石は，砥粒，結合剤，砥粒保持体および気孔の４要素より構成される。図３－１に，銅基粉末成形砥石の構成の模型図を示す。砥粒は切削作用を行ない，砥粒保持体は砥粒の支持および砥粒へかゝる圧力の調整を行ない，結合剤は砥粒の支持および自生発刃速度の調整を行ない，気孔は切屑の逃げおよび加工液の貯蔵の場所となる。

３．２　銅基粉末成形砥石の成形法

銅基粉末成形砥石は，図３－２に示す成形工程によりつくられる。まず，使用目的に適する種類の，かつ砥石形状によって定められる量の砥粒，砥粒保持体および結合剤を混合撹拌し，ついで，砥石形状に応じた押型に充填し，油圧プレスによって所定の圧力で加圧成形する。成形さ

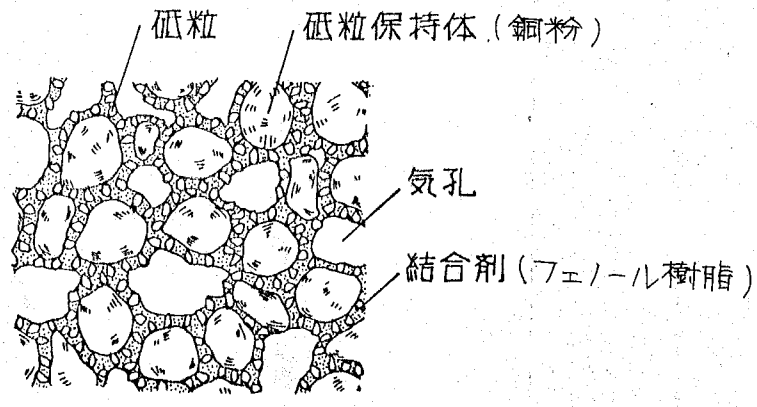


図3－1　銅基粉末成形砥石の構成

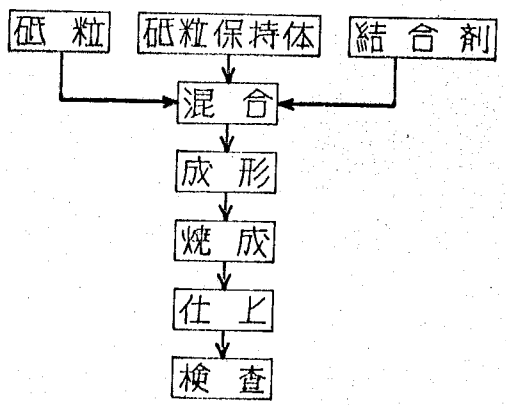


図3－2　銅基粉末成形砥石の成形工程

れた砥石圧粉体を押型より取り出し，電気炉で所定の温度で焼成した後，仕上，検査を経て砥石となる。

3．2．1　銅基粉末成形砥石の成形材料

銅基粉末成形砥石は，前述のように，砥粒，結合剤のフェノール樹脂および砥粒保持体の銅粉より成る。

砥粒

実験に使用した砥粒は，白色溶融アルミナ（WA）砥粒，ダイヤモンド（以後Dと略す）砥粒および緑色炭化珪素（GC）砥粒の3種類である。WA砥粒としては，#240，#400，#600，#1000，#1500，#3000，#4000の7種類の粒度の異なる砥粒を使用し，D砥粒としては，#280，#400，#1000，4～8μの4種類の粒度の異なる砥粒を使用し，GC砥粒としては，#1000砥粒を使用した。WA400，WA600，WA1000，WA1500，WA3000，WA4000砥粒の粒度分布および平均径を，図3－3に示す。粒度分布はつぎのようにして求めた。注意深く採取した200個の砥粒の，長径および短径を顕微鏡で測定し，その平均値を砥粒粒径とすることによって，粒度分布を求めた。これより，WA400砥粒の平均径は43.1μ，WA600砥粒は29.5μ，WA1000砥粒は17.1μ，WA1500砥粒は10.1μ，WA3000砥粒は3.7μ，WA4000砥粒は2.2μである。

結合剤

実験に使用した結合剤は，熱硬化性樹脂のフェノール樹脂である。フェノール樹脂として，液状フェノール樹脂および粉末フェノール樹脂を併用した。液状フェノール樹脂は，石炭酸およびホルマリンをアルカリ触媒で反応させたレゾール型の樹脂であり，これを使用した目的は，砥粒保持体表面に均一に塗布して湿潤させ，つぎに添加混合する砥粒およ

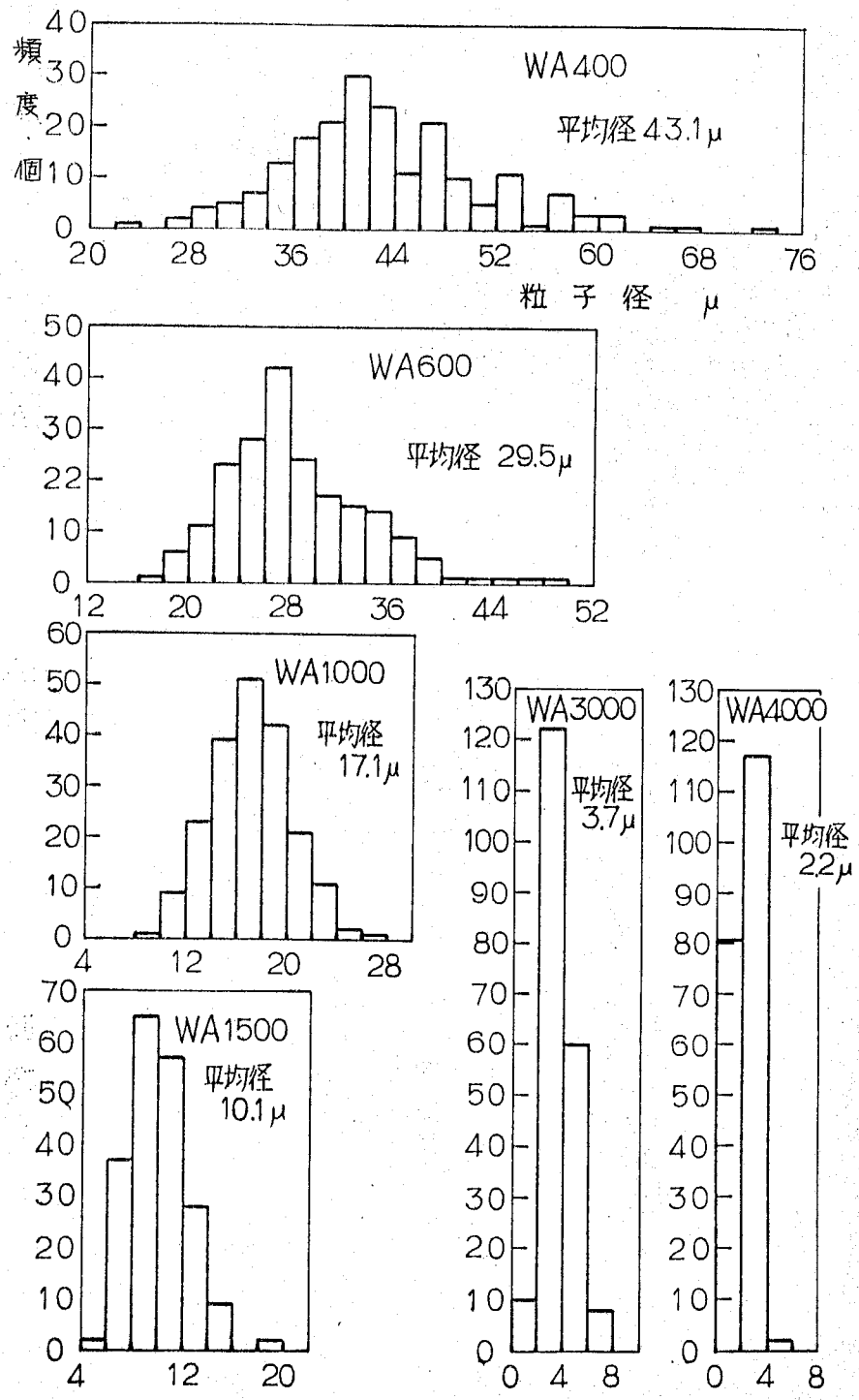


図3－3　使用砥粒の粒度分布

び粉末フェノール樹脂を均一にまぶして成形を容易にすること，および砥石の強度を強めることにある。粉末フェノール樹脂は石炭酸およびホルマリンを酸性触媒で反応させたノボラック型の樹脂に，硬化剤のヘキサメチレンテトラミンを混合したものである。使用したフェノール樹脂の性質を表3－1に，粉末フェノール樹脂の粒度分布を図3－4に示す。

また，特に銅基粉末成形砥石に弾性を付与する目的で，ブタジエン・アクリロニトリル合成ゴムを結合剤として成形した銅基粉末成形砥石を試作した。

砥粒保持体

実験に使用した砥粒保持体は，樹枝状の電解銅粉である。その粒度分布および平均径を，図3－5の上段に示す。砥粒保持体材料の硬さが，試作砥石の切削性能に与える影響を吟味する目的で，硬さの異なる塊砕アルミニウム粉，噴霧錫粉，噴霧鉛粉を，砥粒保持体として使用した。特に，切削量を増加させる目的で，鉄粉，ベンガラも使用した。アルミニウム粉，錫粉，鉛粉の粒度分布および平均径を，同じく図3－5に示す。銅粉の平均径は27.9μ，アルミニウム粉は33.6μ，錫粉は14.8μ，鉛粉は31.6μである。

結合剤のフェノール樹脂が，銅粉および砥粒の表面にどれだけの厚さで覆われているかを吟味する目的で，銅粉およびWA4000砥粒の，単位重量当たりの表面積を，BET法[(1)(2)]によって測定した。表3－2に結果を示す。銅粉は37.7 cm^2/g，WA4000砥粒は25.4 cm^2/gであり，銅粉の方がWA4000砥粒より，比表面積は大きい。

3．2．2　成形材料の混合

---

(1)　菅孝男，化学と工業，3－12，387
(2)　高木・慶伊；米本・松元，触媒，2－4（1959），473

表3－1　フェノール樹脂の諸性質[1]

	液状樹脂	粉末樹脂
外観	黄褐色透明液体	白色または淡黄色粉末
比重，25℃	1.190±0.01	
粘度，25℃	23±4 sec	
融点		90±5 ℃
膠化時間，150℃	15±5 min	100±15 sec
加熱減量，230℃	25.5% (1℃/min)	5% (1℃/min)
不揮発分	73±3 %	
水分		1% 以下

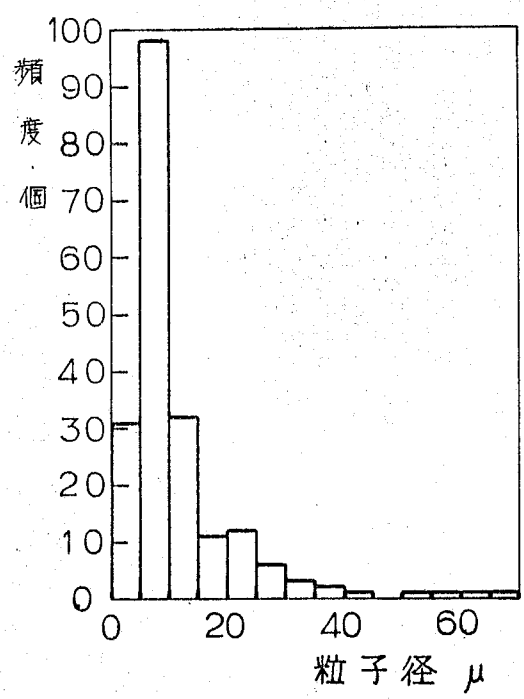


図3－4　粉末フェノール樹脂の粒度分布

(1) 住友ベークライト技術資料より

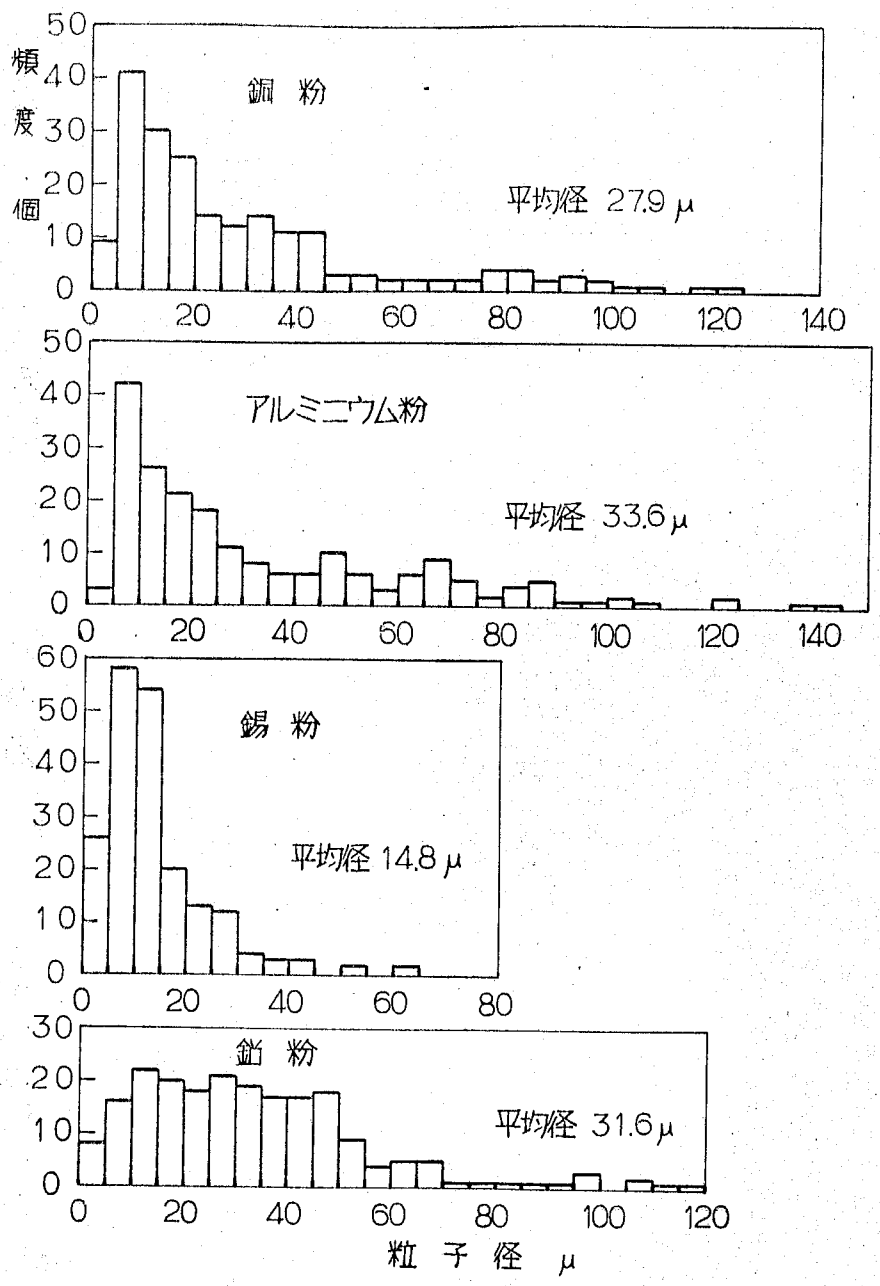


図3－5　使用金属粉の粒度分布

表3－2　銅粉および砥粒の比表面積

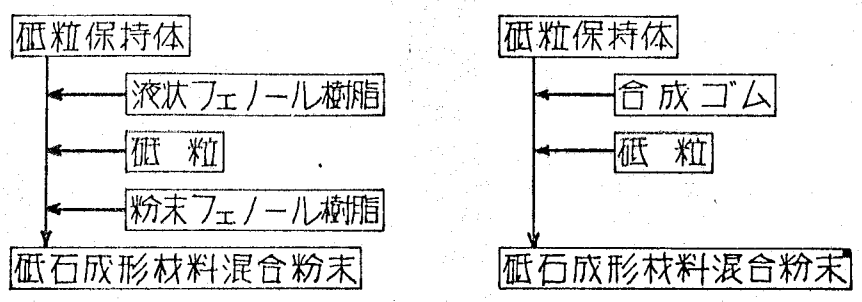
粉　末	比表面積 cm²/g
銅　粉	37.7
WA4000砥粒	25.4

前述した銅基粉末成形砥石の成形材料を，図３－６（a）に示す順序で混合撹拌する。撹拌に使用した機械は，石川式第18号撹拌擂潰機であり，乳鉢および乳棒としてセト製，撹拌棒としてファイバー製を使用した。まず，砥粒保持体の銅粉と液状フェノール樹脂を混合撹拌し，液状フェノール樹脂を銅粉表面に一様に塗布して湿潤させる。ついで，それに砥粒を混合撹拌して，液状フェノール樹脂を塗布した銅粉の表面に一様にまぶす。ついで，それに粉末フェノール樹脂を混合撹拌して，砥石成形材料の混合粉末をつくる。この混合粉末は均一であり，かつその少量を強く握り締めるとようやく塊りになる程度の湿り気を有する。以上のようにしてつくられる砥石成形材料の混合粉末を，50メッシュの篩を通して塊りをほぐす。

弾性を付与した銅基粉末成形砥石では，図３－６（b）に示す順序で混合撹拌する。まず，砥粒保持体の銅粉と合成ゴムを混合撹拌する。ついで，それに砥粒を混合撹拌して，砥石成形材料の混合粉末をつくる。

３．２．３　混合粉末の成形

前述のようにしてつくられる砥石成形材料の混合粉末を押型に充填する。粉末を一様に充填するために粉末充填装置を試作し，それにより充填した。図３－７に粉末充填装置の外観を，図３－８に構成図を示す。混合粉末はホッパよりバイブレーティングフィーダを通って，シュートよりベルトフィーダに落下し，それより回転している押型に落下して充填される。そして，上方向の移動速度が充填量によって調節され，かつ振動している掻き板によって，混合粉末は押型に一様に充填される。この充填装置を使用して混合粉末を充填した後，後述するように成形および焼成してつくられる外径130 mm，内径70 mm，厚さ7mmの銅基粉末成形砥石の硬さ分布を測定した。図３－９に結果を示す。硬さのもっ



(a) フェノール樹脂を使用した場合　(b) 合成ゴムを使用した場合

図3－6　砥石成形材料の混合順序

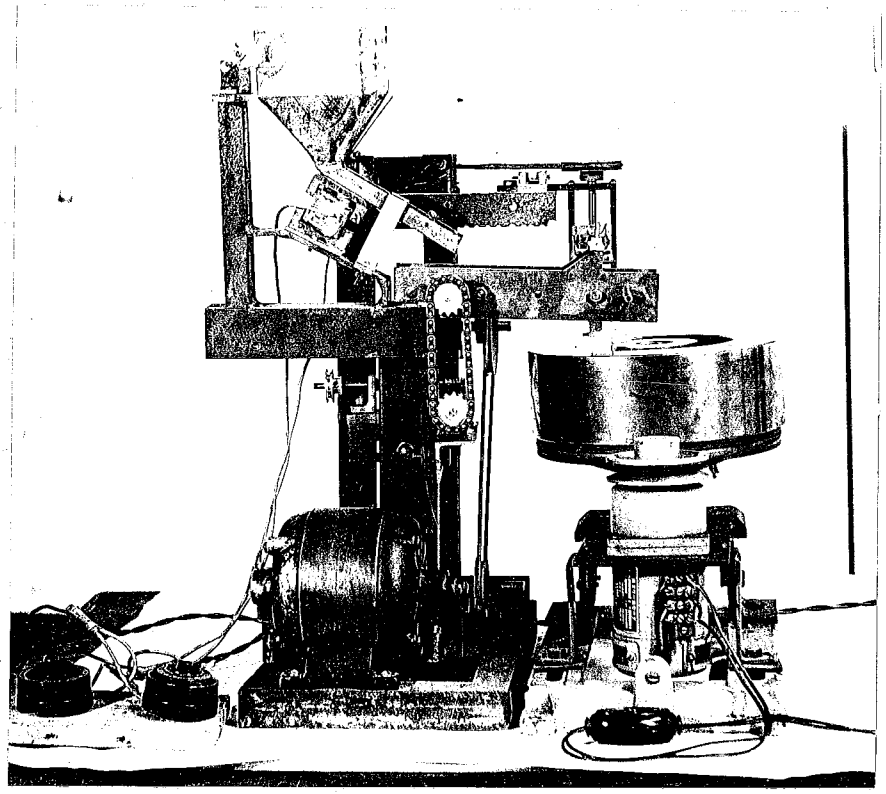


図3－7　粉末充填装置の外観

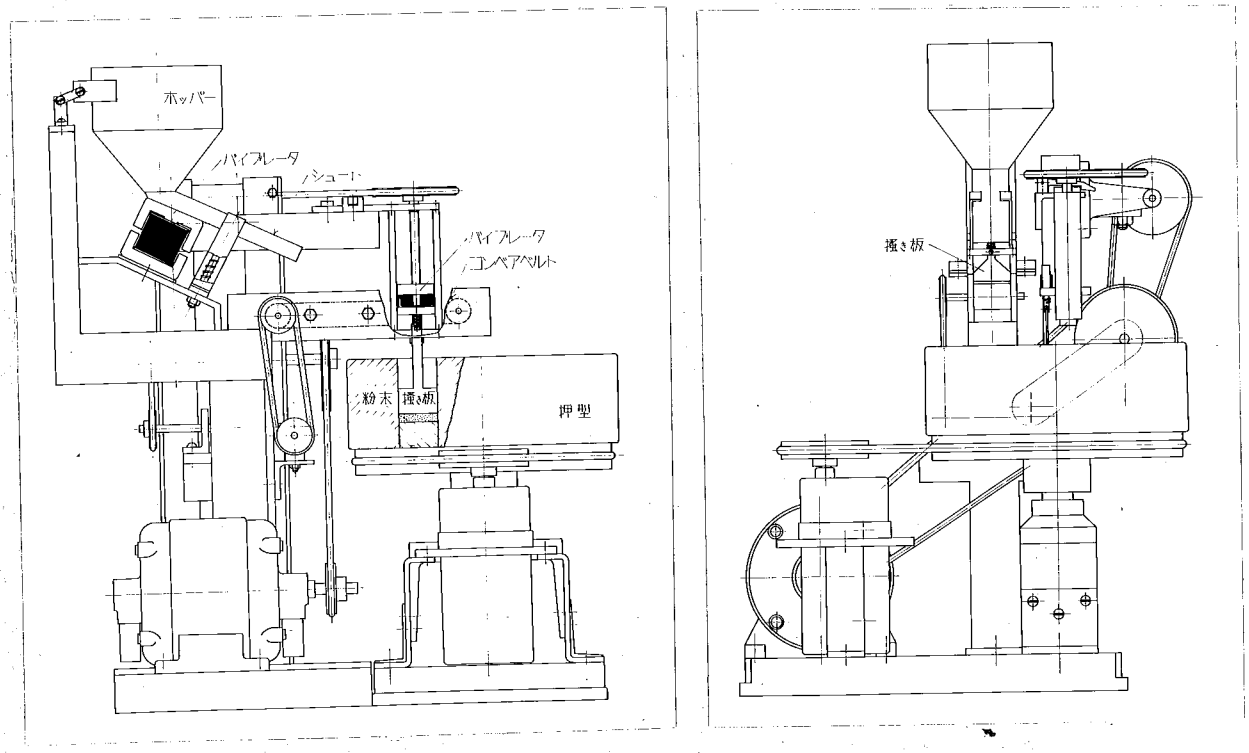


図3－8　粉末充填装置の構造図

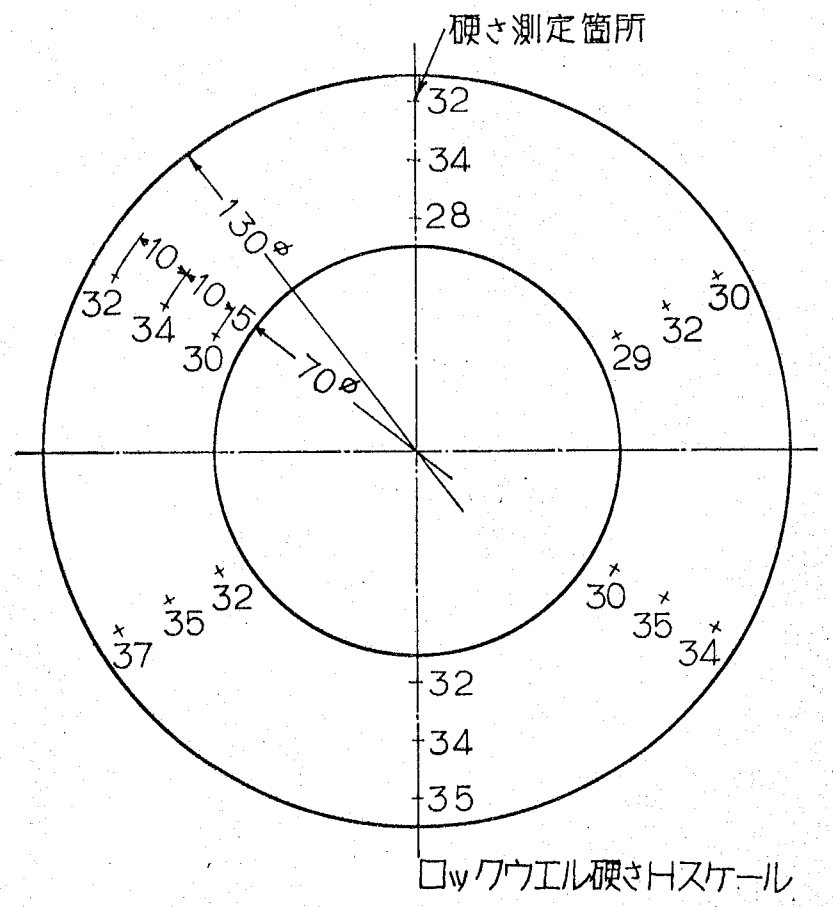

硬さ測定箇所
32
34
28
130φ
10
10
5
32
34
30
70φ
30
32
29
30
35
34
32
35
37
32
34
35
ロックウエル硬さHスケール

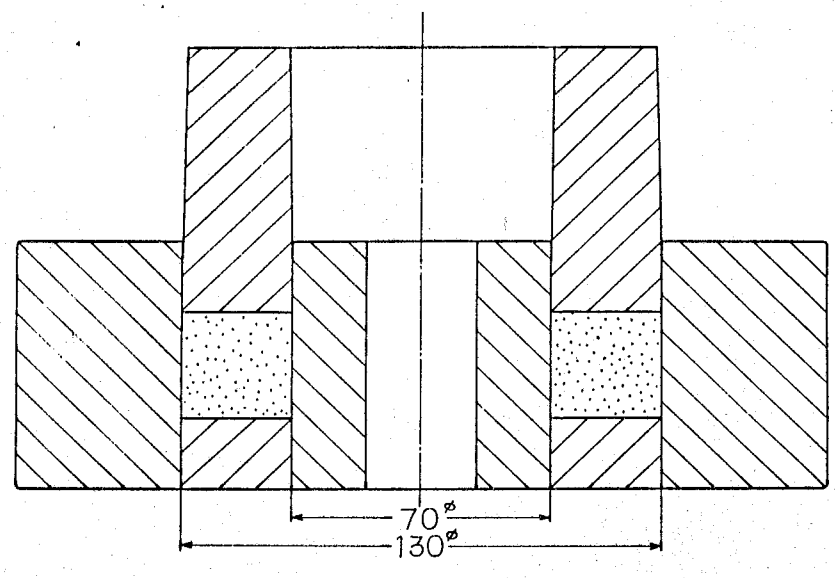
図3－9　砥石の硬さ分布

とも大きい箇所でHRH37，もっとも小さい箇所でHRH28となり，場所による硬さの差はほとんどなく，混合粉末がほゞ一様に充填されているものと考えられる．図3－10に，使用した押型の形状を示す。同図(a)は小金井製作所製高速鏡面仕上機に取り付ける砥石を加圧成形する場合に用いる押型である。同図(b)はホーニング砥石を加圧成形する場合に用いる押型である。同図(c)は円筒超仕上用砥石を加圧成形する場合に用いる押型である。同図(d)は試作砥石の空隙率，抗折力を測定するための砥石試験片を加圧成形する場合に用いる押型である。同図(e)は試作砥石の引張強さ，固有抵抗，寸法変化を測定するための砥石試験片を加圧成形する場合に用いる押型である。同図(f)は試作砥石の熱伝導率を測定するための砥石試験片を加圧成形する場合に用いる押型である。同図(a)の材質はS55Cである。同図(b)～(f)の材質はSK5であり，焼入れ，焼戻し後，その硬さをHRC50～55にしたものである．

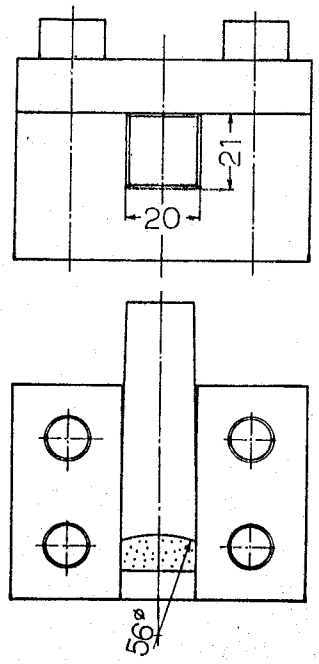
ついで，片押油圧プレスで，表3－3に示す条件で加圧成形した後，押型より砥石圧粉体を取り出し，平板の上に置く。本実験では，成形圧力として0.4 ton/cm² に一定とした。加圧時間はつぎのようにして決定した。加圧時間を種々に変えて砥石成形材料の混合粉末を加圧成形してできる砥石圧粉体の密度を測定した結果，密度は加圧時間の増加とともに増大し，加圧時間2分以上では一定となることがわかる。すなわち，一定の成形圧力で，砥石圧粉体の密度がもっとも大きく，かつ短かい時間で加圧成形を終了するためには，加圧時間として2分が最適であると考えられる。

3．2．4　砥石圧粉体の焼成

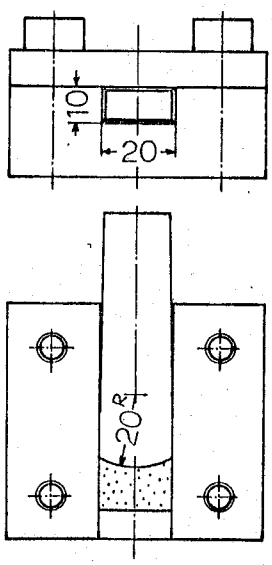
前述のようにしてつくられる砥石圧粉体を焼成する。焼成は，図3－11(a)に外観を，同図(b)に構造図を示す試作した電気炉で行なう。こ



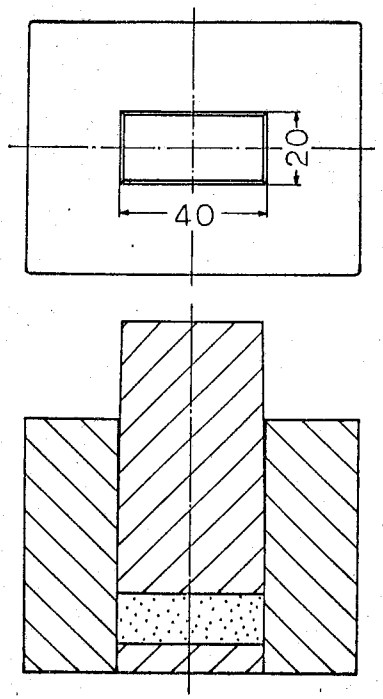
(a)



(b)

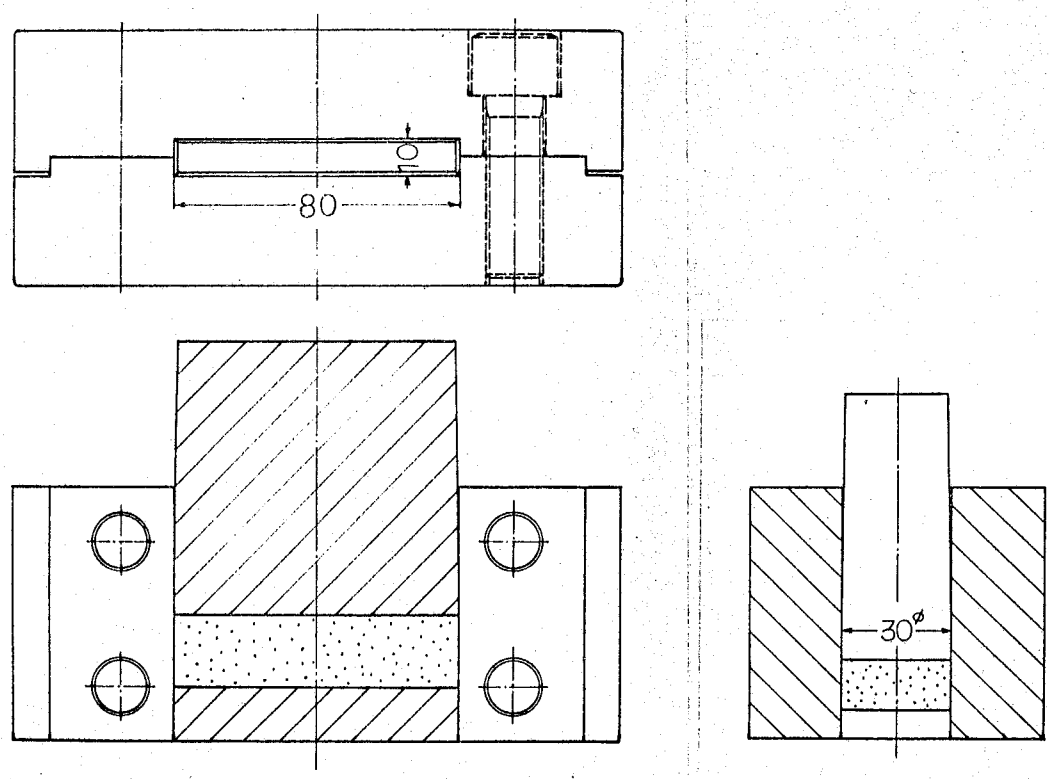


(c)



(d)

図3−10 使用した押型の形状（その1）



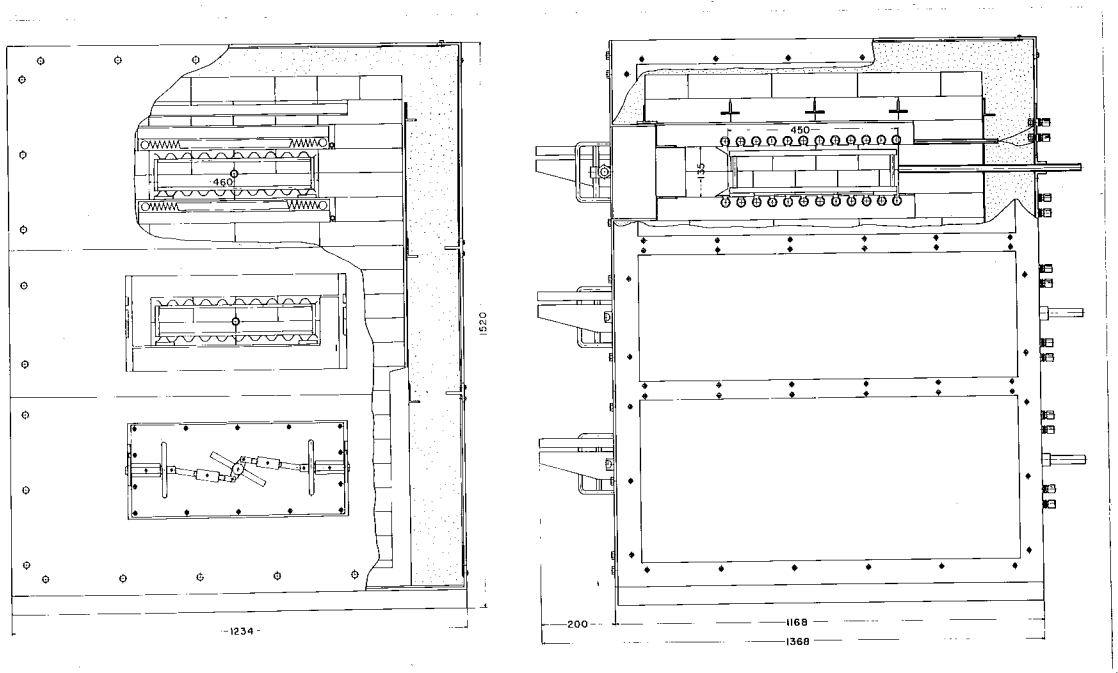
(e) (f)

図3−10 使用した押型の形状（その2）

表3−3 銅基粉末成形砥石の最適成形条件

成形温度	常　温
成形圧力	0.4 ton/cm²
加圧時間	2 min

(a) 電気炉の外観



(b) 電気炉の構造図

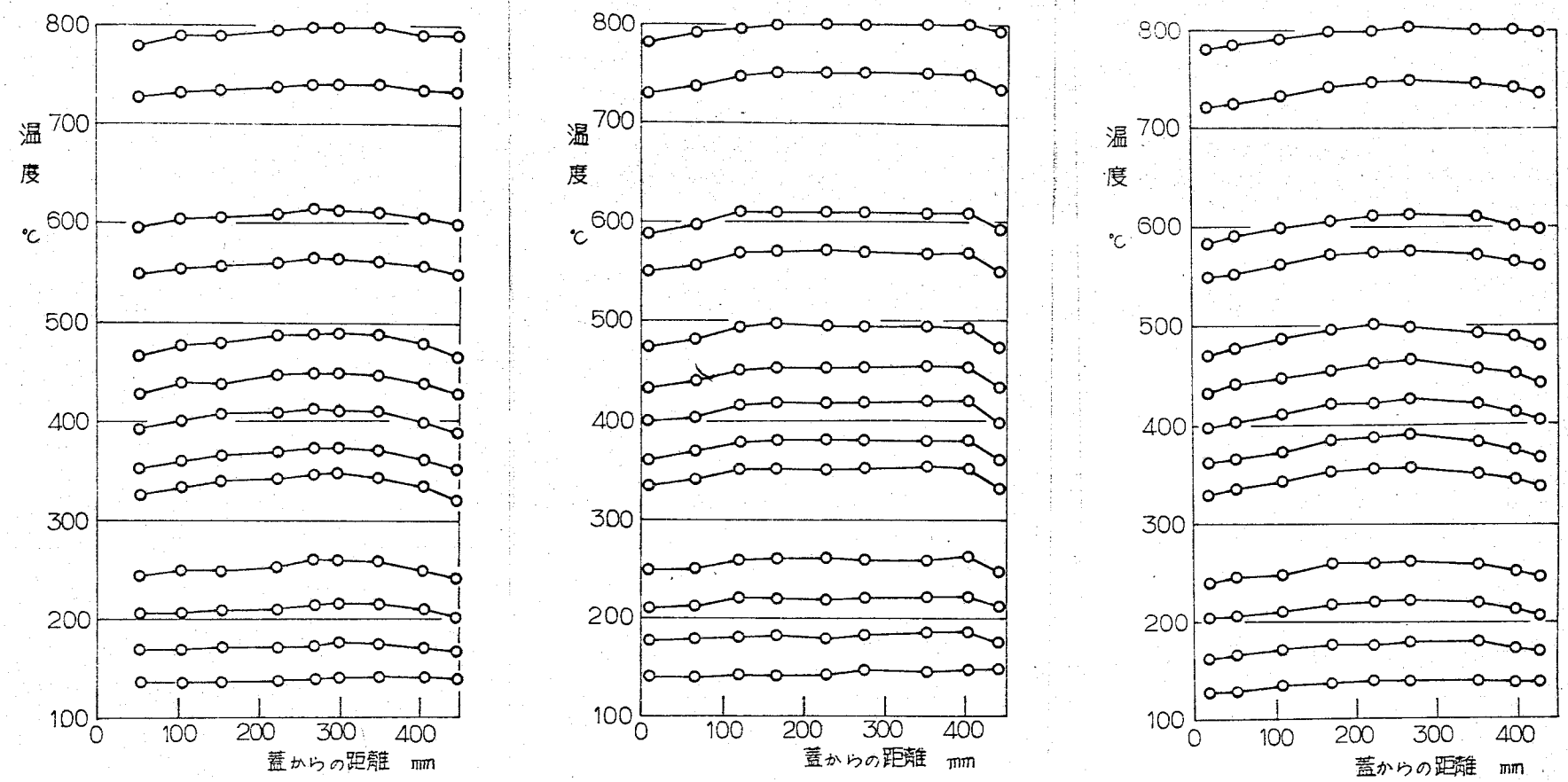
図3－11 試作電気炉

の電気炉は3つの炉室を有し，それぞれ独立して温度制御ができる。炉の最高使用温度は800℃，最高昇温速度は50℃/hr である。また，発熱体としてカンタル線を使用し，発熱体の断線の際には発熱体を容易に交換できるように設計した。一般に，炉内の温度差は発熱体のない蓋と直角方向に著しく有するものであると考えられるので，試作した電気炉内の温度差が，蓋からの距離によってどのようであるかを，測定吟味した。図3－12(a), (b), (c) に，それぞれの温度の場合の，各部での温度を測定した結果を示す。同図 (a) は上段炉，同図 (b) は中段炉，同図 (c) は下段炉の温度である。これより，炉の中央部での長さ 200 mm 範囲での温度差は，いずれの炉でも約2℃ 以下であり，以後に述べる砥石および砥石試験片を焼成する際の，各箇所での温度差はほとんどないことがわかる。

砥石圧粉体を焼成する際の焼成条件を決定することを目的として，結合剤のフェノール樹脂が焼成温度によって硬化の状況がどのように異なるかを吟味した。フェノール樹脂の硬化の度合は，アセトン抽出率および硬さによって表示できる[1]ので，アセトン抽出率および硬さを測定することによって，フェノール樹脂の硬化の状況を吟味した。未硬化のフェノール樹脂は，アセトンによって溶解されるので，アセトンに溶解される樹脂量を測定することによって，焼成後の未硬化のフェノール樹脂の割合を知ることができる。この値をアセトン抽出率という。また，フェノール樹脂は，結合反応の進行とともにその硬さを増し，かつ温度が高すぎると脆弱になりその硬さを低下するので，焼成後の硬さを測定することによって，結合反応の状況を知ることができる。図3－13(a), (b) に，焼成温度を変えた場合のフェノール樹脂のアセトン抽出率および硬

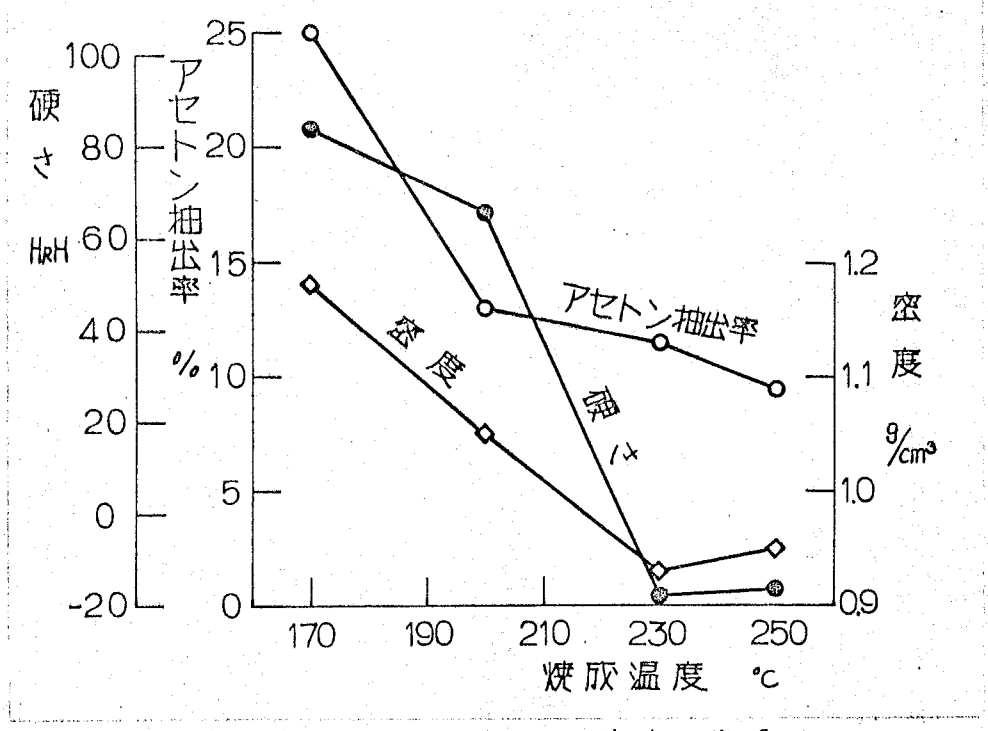
---

(1) 村井新一，フェノール樹脂，(昭39)，160，日刊工業

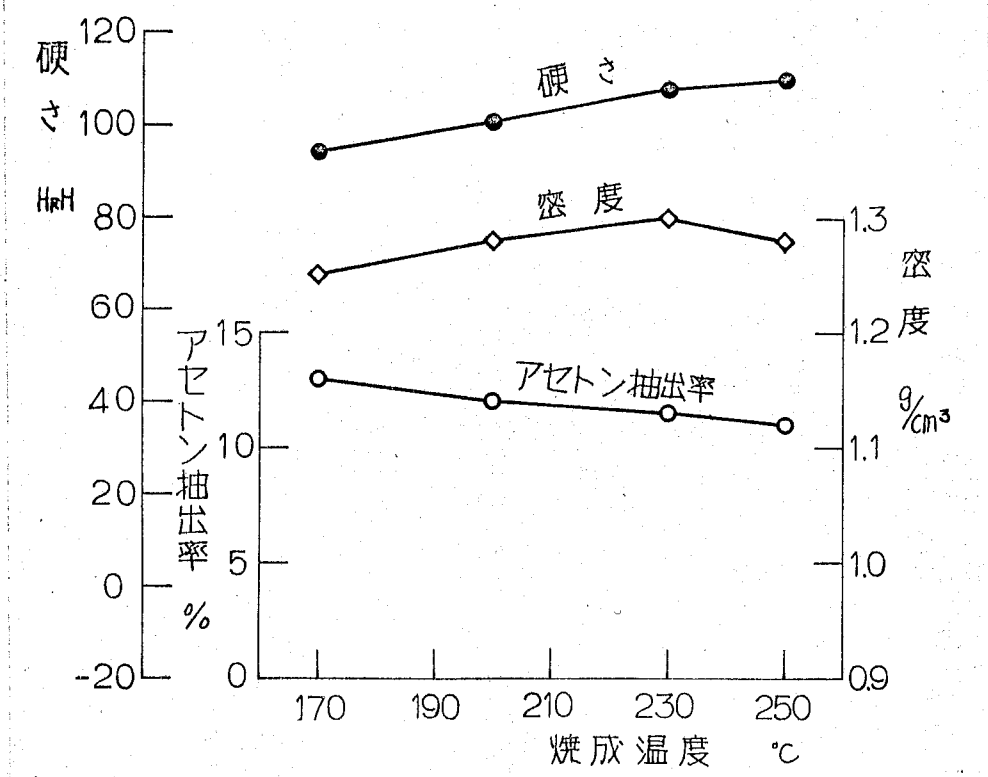


(a) 上段炉　　(b) 中段炉　　(c) 下段炉

図3－12　試作電気炉の温度分布



(a) 粉末フェノール樹脂の場合



(b) 液状フェノール樹脂の場合

図3-13 アセトン抽出率，硬さ，密度と焼成温度との関係

さを測定した結果を示す。また，フェノール樹脂は硬化中に空気，水蒸気およびその他の揮発分を発生し，それがふくれとなり，見掛密度を低下させるので，焼成後のフェノール樹脂の密度を測定することによってふくれの状況を知ることができる。焼成後の密度を測定した結果を，同じく図3－13(a)，(b) に示す。測定試料はつぎのようにして作成した。フェノール樹脂をガラス製容器に入れ，それを 80°C/hr で 90°C に昇温し，90°C に2時間保持した後，80°C/hr で所定の温度に昇温し，所定の温度に 20 分間保持した後，炉より取り出して空中冷却し，試料を作成した。同図 (a) は粉末フェノール樹脂の場合である。硬さおよび密度は焼成温度の上昇とともに，温度 230°C まで減少し，以後 250°C までほとんど変化しない。アセトン抽出率は焼成温度の上昇とともに，温度 200°C まで急激に減少し，以後徐々に減少する。アセトン抽出率－焼成温度特性より，粉末フェノール樹脂は 200°C まで急激な硬化反応を示し，以後 250°C までは徐々に進行することがわかる。また，密度－焼成温度特性より，温度 230°C までは焼成によるふくれが増大し，以後 250°C まではほとんど変わらないことがわかる。同図 (b) は液状フェノール樹脂の場合である。硬さは，焼成温度の上昇とともに，徐々に増加する。密度は，焼成温度の上昇とともに，温度 230°C まで徐々に増加し，以後 250°C まで徐々に減少する。アセトン抽出率は，焼成温度の上昇とともに，徐々に減少する。これより，液状フェノール樹脂の硬化反応は，250°C まで徐々に進行することがわかる。

つぎに，粉末フェノール樹脂および液状フェノール樹脂の最適混合割合を選定する目的で，粉末フェノール樹脂と液状フェノール樹脂を混合し，ついで，温度 230°C で 20 分間焼成した混合フェノール樹脂のアセトン抽出率が，その混合割合によってどのように異なるかを測定吟味

した。図3－14に測定結果を示す。粉末フェノール樹脂および液状フェノール樹脂の混合割合として，粉末フェノール樹脂：液状フェノール樹脂＝2：1，1：1，1：2，1：5（重量比）の4種に変えた。また，同時に液状フェノール樹脂だけのものおよび粉末フェノール樹脂だけの結果についても示した。これより，液状フェノール樹脂だけおよび粉末フェノール樹脂だけの場合より，混合フェノール樹脂の方が，アセトン抽出率は小さいことがわかる。また，その混合割合として，液状フェノール樹脂：粉末フェノール樹脂＝1：2の場合にもっともアセトン抽出率は小さく，ついで1：1の場合に小さい。

フェノール樹脂を使用した従来のレジノイドボンド砥石を作成する場合，焼成温度および焼成時間として185℃で5時間，[1]あるいは185℃で6時間[2]が推奨されているが，銅基粉末成形砥石では，砥石に存在する砥粒保持体の銅粉が砥石に靭性を与えるので，結合剤のフェノール樹脂は幾分の脆性を有することが，切削性能に良い効果を与えると考えられる。そこで，銅基粉末成形砥石の焼成温度として，フェノール樹脂が幾分脆性する温度の230℃とし，焼成時間として20分とした。以上より，砥石圧粉体を焼成する際には，図3-15に示す条件で焼成した。まず，昇温速度80℃/hrで90℃に昇温し，90℃に20時間保持した後，同じく80℃/hrで230℃に昇温し，230℃で20分間保持する。ついで，炉より取り出し，空中冷却して銅基粉末成形砥石となる。

混合粉末を加圧成形する際，混合攪拌した後の混合粉末が強く握り締めるとようやく塊りになる程度の湿り気を有することが，操作上必要である。上記の湿り気を有し，かつアセトン抽出率が小さい，液状フェノ

---

(1) 住友ベークライト，ベークレポートより
(2) 村井新一，フェノール樹脂，（昭43），338，日刊工業

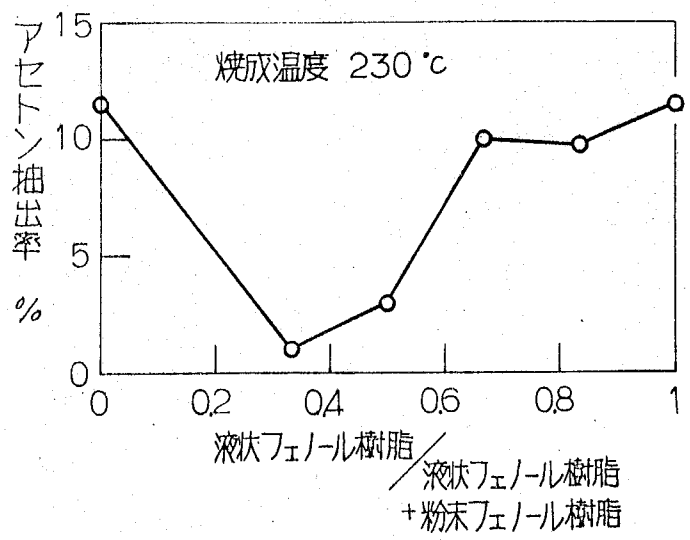


図3－14 アセトン抽出率と，液状フェノール樹脂と粉末フェノール樹脂の配合割合との関係

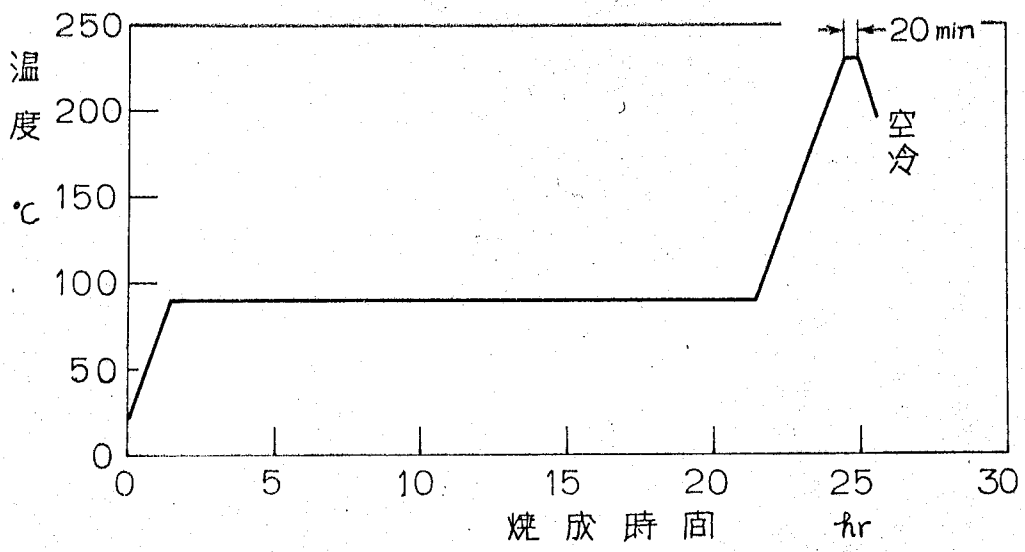


図3－15 銅基粉末成形砥石の最適焼成条件

ール樹脂と粉末フェノール樹脂の混合割合として，両者が等重量であることが適切であると判断した。そこで，液状フェノール樹脂と粉末フェノール樹脂の混合割合として，両者の重量を等しくした。

3．3　銅基粉末成形砥石の物理的性質および機械的性質

銅基粉末成形砥石の最適成形条件を選定するためには，砥石の組成と砥石の物理的性質，機械的性質および切削性能との関係について明らかにする必要がある。物理的性質として空隙率，機械的性質として抗折力および硬さ，切削性能として切削量，砥石損耗量および仕上面あらさを測定することによって銅基粉末成形砥石の最適成形条件を選定し，更に最適成形条件で作成した砥石の弾性係数，熱膨張率，熱伝導率および固有抵抗を測定し，膨潤性を測定吟味した。

3．3．1　空隙率，抗折力，硬さ

銅基粉末成形砥石は，砥粒，砥粒保持体，結合剤および気孔の4要素より構成される。気孔は切屑および工作液のたまり場所となるもので，切屑の排除および工作液の冷却作用に大きな影響をおよぼす。銅基粉末成形砥石の空隙率がフェノール樹脂量，砥粒と銅粉の混合割合，砥粒々径によってどのように異なるかを測定吟味した。使用した試料の形状を図3－16に示す。空隙率Pは，次式より求めた。

$$P = 1 - \frac{\dfrac{W_g}{\rho_g} + \dfrac{W_c}{\rho_c} + \dfrac{W_p}{\rho_p} + \dfrac{W_l}{\rho_l}}{\dfrac{W}{\rho}}$$

こゝで，　W，ρ　---------砥石の重量，砥石の密度

W_g，W_c，W_p，W_l ---砥粒，砥粒保持体，粉末フェノール樹脂，液状フェノール樹脂の充填重量

ρ_g, ρ_c, ρ_p, ρ_l …… 砥粒，砥粒保持体，粉末フェノール樹脂，液状フェノール樹脂の密度

いま，ρ_g として酸化アルミニウムの密度 3.9 g/cm³，ρ_c として銅の密度 8.9 g/cm³，ρ_p として図3-13より求められる焼成温度 230°C の場合の粉末フェノール樹脂の密度 0.93 g/cm³，ρ_l として上記と同様に求められる液状フェノール樹脂の密度 1.30 g/cm³ として，Pを求めた。

空隙率がフェノール樹脂量によってどのように異なるかを吟味する前に，焼成後，砥石表面に樹脂がにじみ出ないフェノール樹脂の含有限界量を求めた。図3-17に，WA 600砥粒を使用して砥粒と銅粉との配合割合を変えた場合の結果を示す。銅粉に対して砥粒の割合が増加すると，焼成中に，砥石表面に樹脂がにじみ出るに必要なフェノール樹脂量は増大する。これは，加圧成形および焼成によってつくられるMP砥石では，銅粉より砥粒の方が樹脂をよく含むことを示している。

図3-18に，WA600砥粒を使用して銅粉と砥粒との混合割合を銅粉：砥粒＝4：6（容積比）として，フェノール樹脂を変えた場合の空隙率を測定した結果を示す。前述のように粉末フェノール樹脂と液状フェノール樹脂は等量づつ混合するので，それぞれの重量を横軸に示した。フェノール樹脂量の増加とともに，空隙率はほゞ直線的に減少することがわかる。

図3-19に，銅粉 20 g に対して粉末フェノール樹脂と液状フェノール樹脂をそれぞれ 1 g として，砥粒と銅粉の混合割合を変えた場合の空隙率を測定した結果を示す。銅粉に対して砥粒の割合が増加するとともに，空隙率は増大することがわかる。

図3-20に，砥粒々径によって空隙率がどのように異なるかを測定し

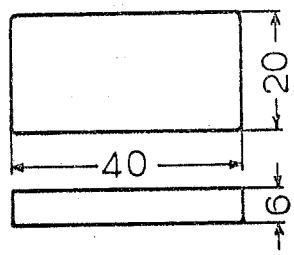


図3－16　空隙率，抗折力，硬さ測定用試験片の形状

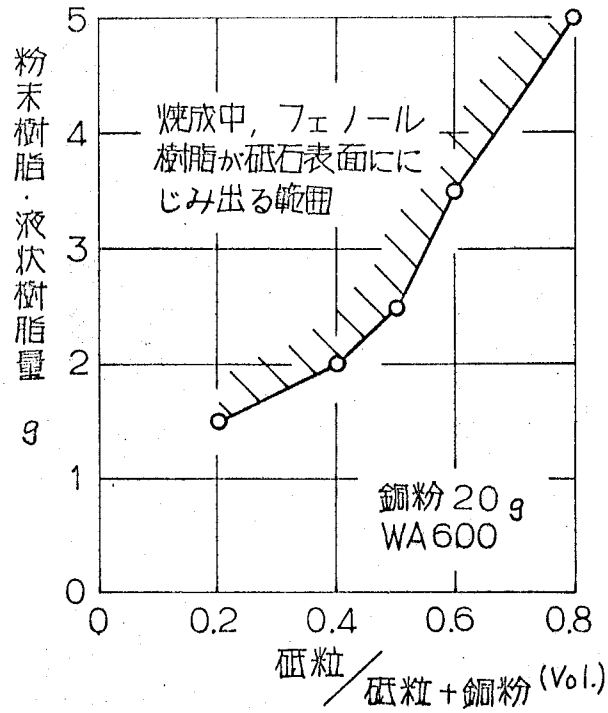
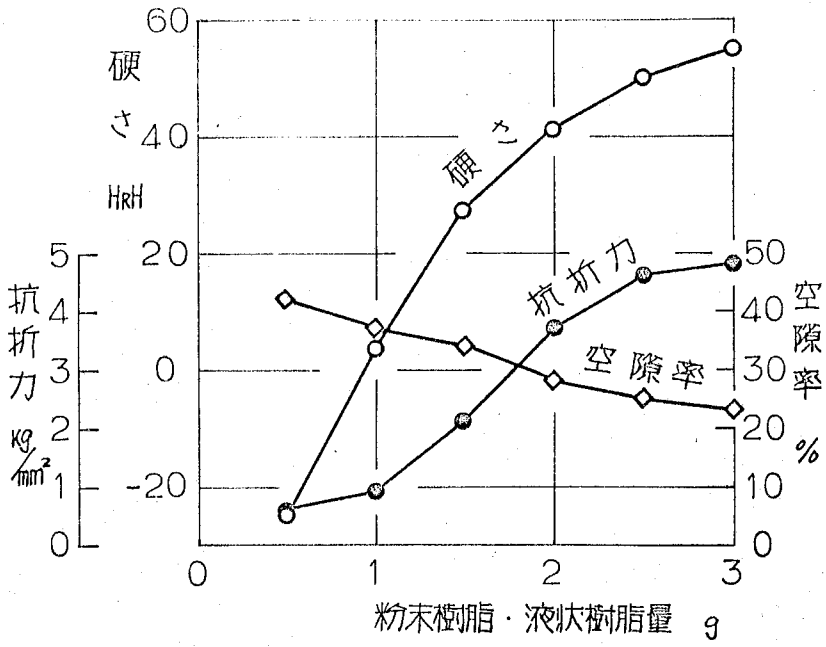
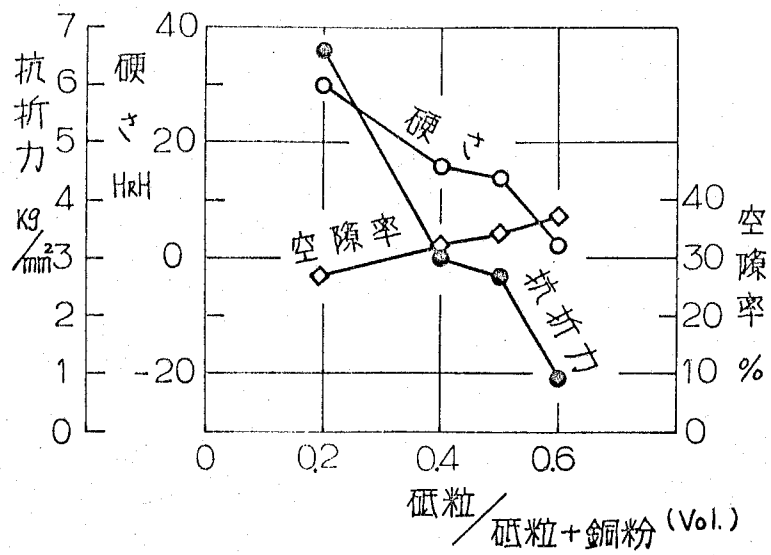


図3－17　砥石表面にフェノール樹脂がにじみ出ない限界量



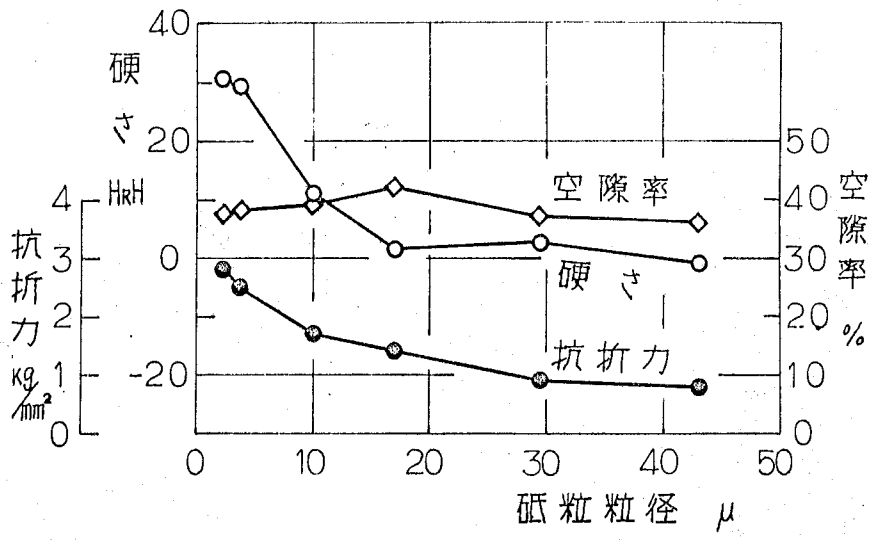
砥　粒　WA600
砥石配合割合
銅　粉　20 g
砥　粒　13 g

図3－18　空隙率，硬さ，抗折力と，フェノール樹脂量との関係



砥 粒　WA600
砥石配合割合
銅 粉　20 g
液状フェノール樹脂　1 g
粉末フェノール樹脂　1 g

図3－19　空隙率，硬さ，抗折力と，砥粒と銅粉の配合割合との関係



砥石配合割合
銅 粉　20 g
砥 粒　13 g
液状フェノール樹脂　1 g
粉末フェノール樹脂　1 g

図3－20　空隙率，硬さ，抗折力と砥粒々径との関係

た結果を示す。空隙率は使用した砥粒の粒径によってほとんど変化しないことがわかる。

結合剤の砥粒結合力を測定するためには，引張試験による方法が最適であると考えられるが，引張試験の際，試験片の取り付け部で破壊がしばしば生じ，測定精度を悪くするので，引張試験を行なうことはあまり望ましくない。フェノール樹脂を結合剤とした砥石の圧縮強さと抗折力とを比較した場合，一般に圧縮強さの方が著しく大きい[1]ので，その砥石の抗折力は引張破壊が生じたときの強さを示すと考えられる。また，抗折力の測定は引張強さの測定より精度よく行なうことができるので，本実験では抗折力を測定することによって，試作砥石の結合剤による砥粒結合力の大小を比較した。抗折力は，図3－16に示す砥石試験片を使用して前章で述べた方法によって測定した。図3－18にフェノール樹脂量を変えた場合の抗折力，図3－19に砥粒と銅粉の混合割合を変えた場合の抗折力，図3－20に砥粒々径を変えた場合の抗折力を測定した結果を示す。抗折力は，フェノール樹脂の増加とともに増大する。この増大の割合は，樹脂の少ない場合および多い場合に小さく，粉末フェノール樹脂と液状フェノール樹脂がそれぞれ1.5～2.0gの場合にもっとも大きい。また，抗折力は銅粉に対して砥粒の割合が増加するとともに減少し，砥粒々径が大きくなるとともに減少する。

押し込み深さも，砥粒の結合力を表わすのにしばしば測定される。試作砥石試験片のロックウェル硬さが，フェノール樹脂量，砥粒と銅粉の混合割合，砥粒々径によってどのように異なるかを測定吟味した。使用した砥石試験片の形状を図3－16に示す。図3－18にフェノール樹脂量を変えた場合の硬さ，図3－19に砥粒と銅粉の混合割合を変えた場合の

---

(1) 小林昭，精密機械，20－3（昭29），89

硬さ，図3−20に，砥粒々径を変えた場合の硬さを測定した結果を示す。硬さは，フェノール樹脂量が増加すると増大する。この増大の割合は，フェノール樹脂量が少ない場合に大きく，樹脂量の増加とともにわずかに減少する。また，銅粉に対して砥粒の割合が増加するとともに減少し，砥粒々径が大きくなるとともに減少する。そして，硬さの大小は，抗折力の大小にほゞ等しい。なお，後述する最適配合割合で成形したWA 1500 銅基粉末成形砥石試験片の空隙率は33%，硬さはHRH 18，抗折力は2.8 kg/mm であった。

3．3．2 切削量，砥石損耗量，仕上面あらさ

銅基粉末成形砥石の砥石割合割合および砥粒々径によって，切削量，砥石損耗量および仕上面あらさがどのように異なるかを，超仕上法によって測定吟味し，銅基粉末成形砥石の最適配合割合を選定した。

実験に使用した超仕上機は，小金井製作所製 SF615型高速鏡面仕上機である。加工物試料として，アームコ鉄（Hv137）を使用した。その形状は直径10 mm，長さ10 mm の円柱形で，仕上げるべき面はその端面である。加工物試料は，WA 600 MP砥石を使用して，砥石圧力 0.5 kg/cm²，砥石回転数 80 rpm，加工物振動数 1500 cpm，仕上時間 5 min で前加工した。それをつぎに示す条件で超仕上した。

超仕上条件

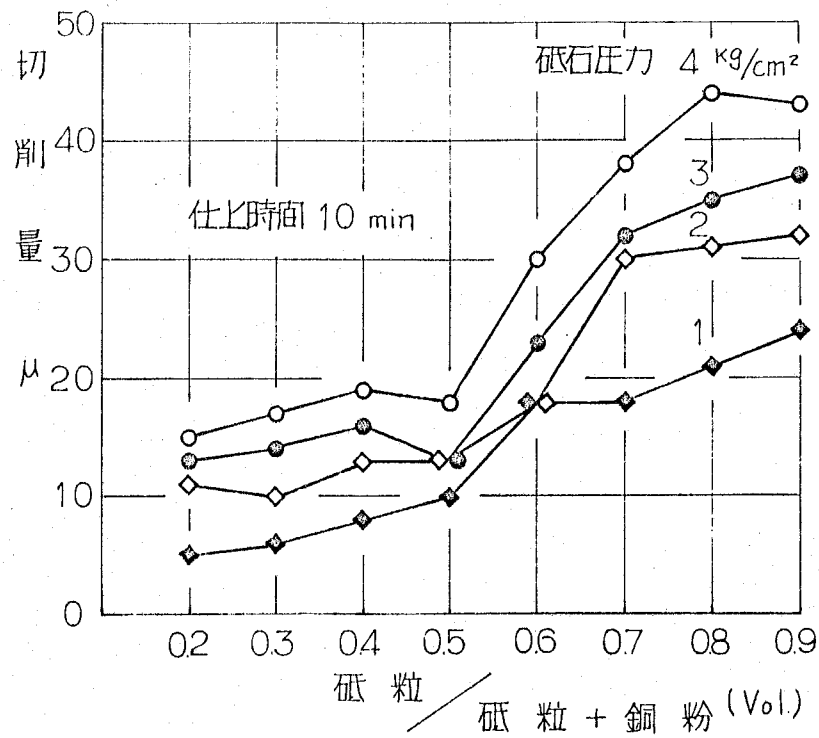
砥石圧力	：	1，2，3，4 kg/cm²
仕上時間	：	10 min
砥石回転数	：	80 rpm
加工物振動数	：	1500 cpm
加工液	：	灯油1号

切削量はメトラー式直示天秤を使用して加工前後の重量を測定し，それにより得られる重量減少量を，密度と仕上面々積で除することによっ

て求めた。砥石損耗量は，加工前後の砥石面を，小坂式仕上面検査機を使用して倍率×500で半径方向について記録し，加工前後の砥石面の形状曲線を重ね合わせることによって得られる深さ減少量によって求めた。仕上面あらさは，TALYSURF を使用して縦倍率×10,000 ，横倍率×100で測定し，Hmax で表示した。

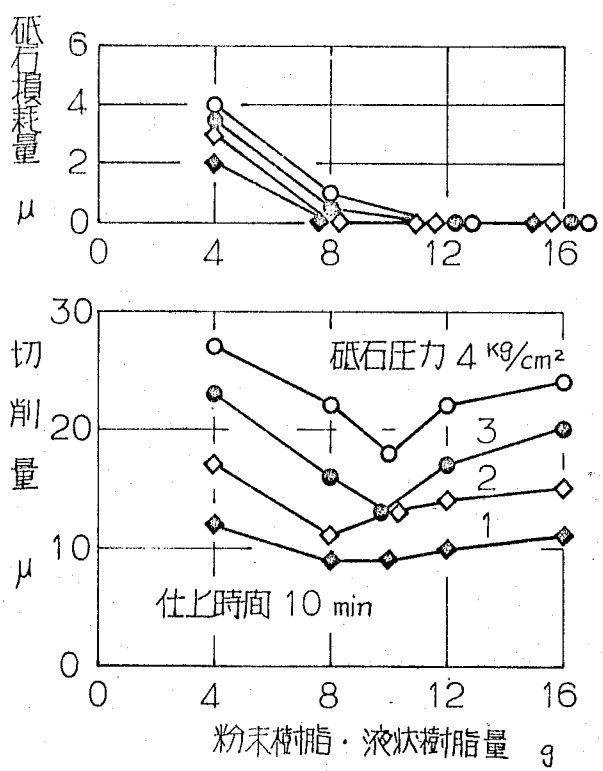
図3－21に，砥石配合割合を変えることによってそれぞれの砥石圧力で，切削量がどのように異なるかを測定した結果を示す。砥粒としてWA1500砥粒を使用し，砥石配合割合として砥粒と銅粉を合わせた容積，液状フェノール樹脂，粉末フェノール樹脂をそれぞれ一定としながら，砥粒と銅粉の混合割合を砥粒：銅粉＝2：8より9：1（容積比）までの8種類に変えた。切削量は，いずれの砥石圧力でも砥粒の増加とともに砥粒：銅粉＝1：1までは除々に増大し，それ以上砥粒が増加すると急激に増大する。また，いずれの砥石配合割合でも，切削量は砥石圧力の大きい方が大きい。

図3－22に，砥粒と銅粉の混合割合を砥粒：銅粉＝1：1（容積比）と一定にして，樹脂量を変えることによって切削量と砥石損耗量がどのように異なるかを測定した結果を示す。なお，図3－21と図3－22の砥石配合割合の表示法は異なっているが，砥粒60g と銅粉170g の和の容積は35 cm^3 であり，図3－22の砥粒60g ，銅粉170g ，液状フェノール樹脂10g ，粉末フェノール樹脂10g の配合割合のMP砥石と図3－21の砥粒：銅粉＝1：1，液状フェノール樹脂10g ，粉末フェノール樹脂10g の配合割合のMP砥石とは同一のものである。砥石配合割合として，砥粒および銅粉をそれぞれ60g ，170g に一定として，液状フェノール樹脂および粉末フェノール樹脂をそれぞれ4，8，10，12，16gの5種類に変えた。使用した砥粒はWA 1500 で，仕上時間は



砥石配合割合
砥粒＋銅粉　35 cm³
液状フェノール樹脂　10 g
粉末フェノール樹脂　10 g

図3－21　切削量と，砥粒と銅粉の配合割合との関係



砥石配合割合
砥粒　60 g
銅粉　170 g

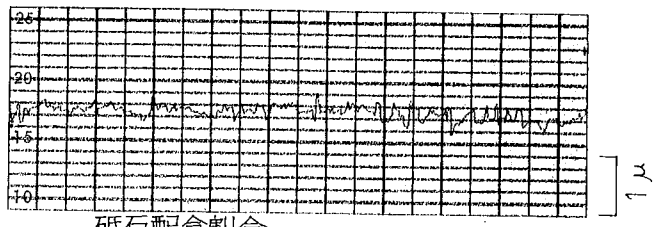
図3－22　切削量，砥石損耗量とフェノール樹脂量との関係

10 分である。切削量は，砥石圧力 1，2 kg/cm² の場合では樹脂量の増加とともに減少し，樹脂量 8g で最小値を示した後，樹脂量の増加とともに増大する。砥石圧力 3，4 kg/cm² の場合では樹脂量の増加とともに減少し，樹脂量 10g で最小値を示した後，樹脂量の増加とともに増大する。砥石損耗量は，砥石圧力 1，2 kg/cm² の場合では樹脂量 4g でそれぞれ 3μ，2μ の値となり，樹脂量 8g ではいずれも零である。砥石圧力 3，4 kg/cm² の場合では樹脂量の増加とともに減少し，樹脂量 12，16g では零である。

それぞれの樹脂量が 4，10，16g の配合割合の銅基粉末成形砥石を使用して，砥石圧力 1 kg/cm² で仕上げた仕上面あらさを，図 3－23 に示す。上段は樹脂量 4g の砥石の場合で，仕上面あらさは約 0.3μHmax である。中段は樹脂量 10g の砥石の場合で，0.1μHmax 以下で著しく小さい。下段は樹脂量 16g の砥石の場合で，約 0.1μHmax であり，ところどころに深い疵を有する。

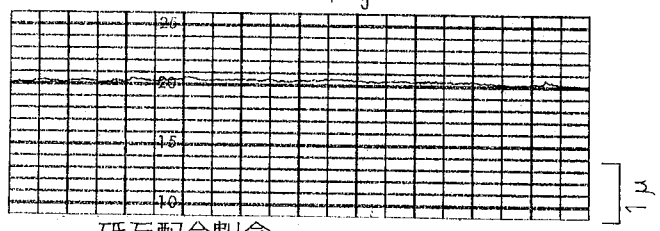
以上の実験結果より，樹脂量 4g の銅基粉末成形砥石は，砥石損耗量が大きく，かつ仕上面あらさが大きいことより判断して，砥粒の結合力が弱く砥粒の脱落を生じていると考えられる。樹脂量 16g の砥石は，ところどころに深い疵を生ずることより判断して，気孔が少なく切屑の排出が良好でないと考えられる。樹脂量 10g の砥石は，砥石損耗量が少なく，かつ仕上面あらさが著しく小さいことより判断して，鏡面仕上砥石および長寿命砥石として最適であると考えられる。よって，以後の銅基粉末成形砥石の配合割合は，表 3－4 に示すものである。

図 3－24 に，砥粒々径によって，切削量，仕上面あらさがどのように異なるかを測定した結果を示す。いずれの砥石圧力でも，砥粒々径が大きいほど切削量は大きい。また，砥石圧力 1 kg/cm² では，仕上面あら



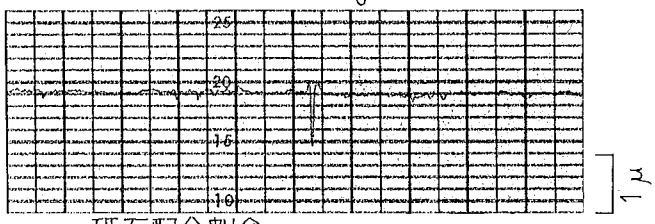
砥石配合割合

砥　粒	60 g
銅　粉	170 g
液状フェノール樹脂	4 g
粉末フェノール樹脂	4 g



砥石配合割合

砥　粒	60 g
銅　粉	170 g
液状フェノール樹脂	10 g
粉末フェノール樹脂	10 g



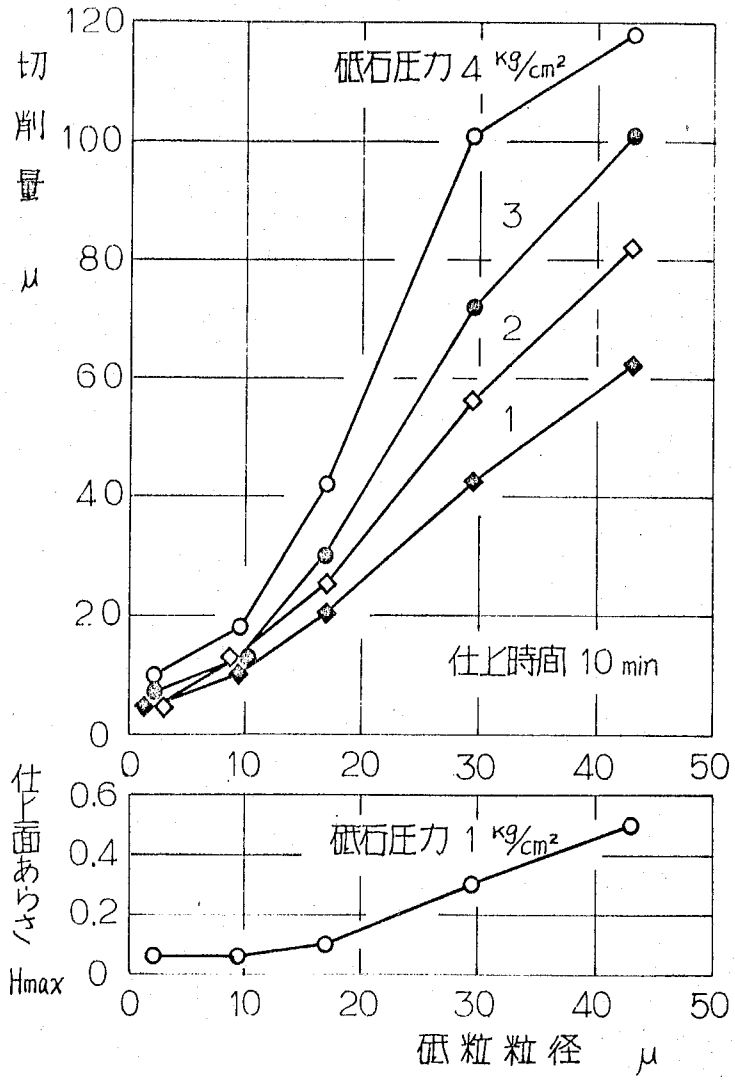
砥石配合割合

砥　粒	60 g
銅　粉	170 g
液状フェノール樹脂	16 g
粉末フェノール樹脂	16 g

図3－23　銅基粉末成形砥石による仕上面あらさ

表3－4　銅基粉末成形砥石の最適配合割合

砥石成形材料	配合量 g
砥　粒	60
銅　粉	170
液状フェノール樹脂	10
粉末フェノール樹脂	10



砥石配合割合

砥粒	60 g
銅粉	170 g
液状フェノール樹脂	10 g
粉末フェノール樹脂	10 g

図3−24 切削量，仕上面あらさと砥粒々径との関係

さは砥粒径の大きいほど大きい。そして，砥石圧力が1～4 kg/cm² の範囲では，いずれの砥粒径の場合でも，砥石圧力によって仕上面あらさはほとんど変わらない。

3．3．3　弾性率，固有抵抗，熱伝導率

銅粉，砥粒，液状フェノール樹脂，粉末フェノール樹脂を，表3－4に示す配合割合で，表3－3に示す成形条件および図3－15に示す焼成条件で作成した砥石試験片の弾性率，固有抵抗および熱伝導率を測定した。

弾性率はつぎのようにして測定した。その際使用した砥石試験片の形状を図3－25に示す。島津製作所製RS－2型万能試験機を使用して，砥石試験片の引張応力とひずみの関係を求め，かつ別の砥石試験片の圧縮応力とひずみの関係を求め，両者より弾性率を求めた。この際，のびの測定は標点間距離1 in としてマルテンス鏡ひずみ計によって行なった。図3－26に，WA1500銅基粉末成形砥石についての測定結果を示す。ひずみが 6×10^{-4} までは引張応力－ひずみ線図は直線で，これより求められる弾性率は 6.1×10^{4} kg/cm² である。また，ひずみが -4×10^{-4} までは圧縮応力－ひずみ線図は直線で，これより求められる弾性率は 6.1×10^{4} kg/cm² であり，両者は等しい。

固有抵抗は，図3－27に示す固有抵抗測定装置によって測定した。これは砥石試験片に一定電流を通じ，その2点間の電位差を自動平衡型電位差計によって測定することにより2点間の抵抗を求め，それより固有抵抗を求めるものである。使用した砥石試験片の形状を図3－28に示す。

図3－29に，砥粒と銅粉の配合割合を変えた場合の，WA1500およびWA600銅基粉末成形砥石の固有抵抗を測定した結果を示す。WA600銅基粉末成形砥石の場合は，砥粒：銅粉＝1：3（容積比）で 1.16×10^{-2} Ω·cm

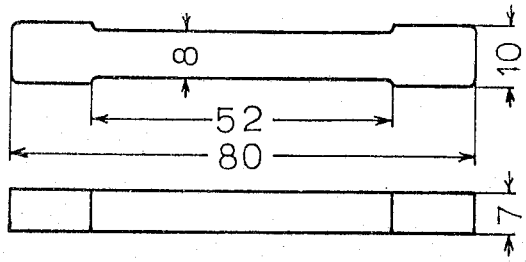


図3－25　弾性率測定用試験片の形状

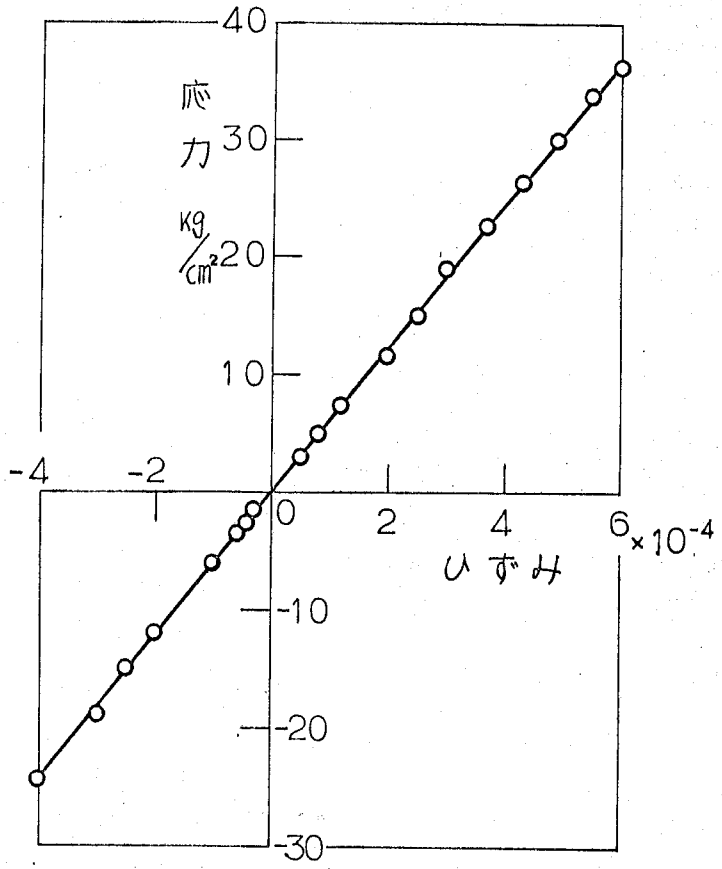


図3－26　銅基粉末成形砥石の応力－ひずみ線図

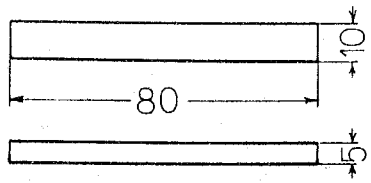


図3－28　固有抵抗測定用
試験片の形状

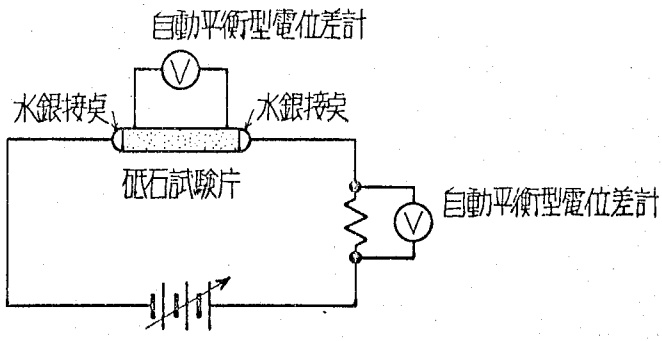
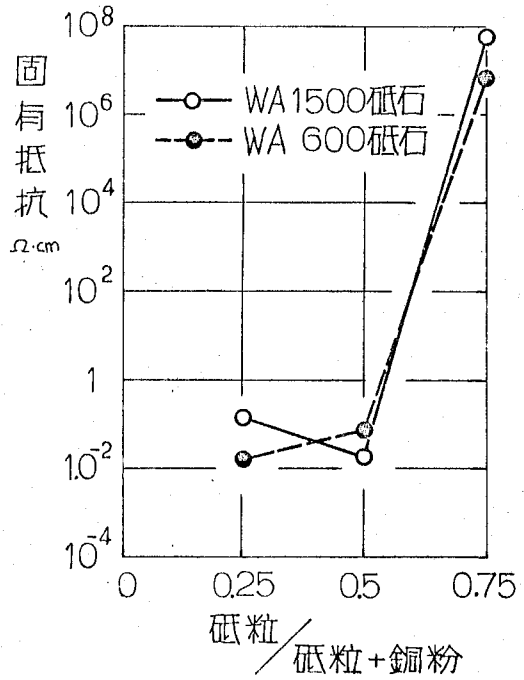


図3－27　固有抵抗測定装置



砥石配合割合

銅　粉	17 g
液状フェノール樹脂	1 g
粉末フェノール樹脂	1 g

図3－29　固有抵抗と，砥粒と銅粉
の配合割合との関係

砥粒：銅粉＝1：1で$6.05\times10^{-2}\Omega\cdot cm$であり，両者はほゞ等しいが，砥粒：銅粉＝3：1で$6.4\times10^{6}\Omega\cdot cm$となり著しく大きい。WA 1500銅基粉末成形砥石の場合も，ほゞ同様の傾向を示す。また，前述した最適配合割合で成形した銅基粉末成形砥石の固有抵抗は，WA 600砥石で$6.05\times10^{-2}\Omega\cdot cm$，WA1500砥石で$1.11\times10^{-2}\Omega\cdot cm$である。

図3-30に，砥粒と銅粉の割合を砥粒：銅粉＝3：1，1：1，1：3（容積比）および銅粉のみの4種に対して，それぞれの樹脂量を0.5～2gに変えた場合の固有抵抗を測定した結果を示す。砥粒：銅粉＝3：1および1：1で，それぞれの樹脂量が0.5gの場合には結合剤の樹脂量が少ないために圧粉体が崩れてしまい成形することはできなかった。いずれの樹脂量の場合でも，樹脂量を一定にした場合，銅粉の配合割合が多いほど固有抵抗は小さい。また，銅粉と砥粒の混合割合にかゝわらず，それぞれの樹脂量が1.5gの場合に固有抵抗は小さい。

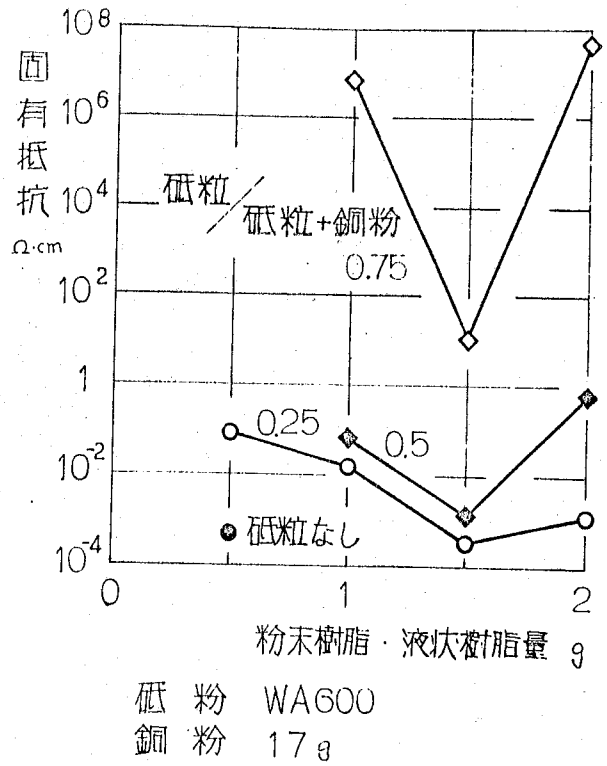
砥石試験片の熱伝導率は，熱伝導率が既知の標準試料と砥石試験片とを軸方向に接触させ，それぞれに同一の熱量を流し，それぞれの温度勾配を測定することによって求めた。流れる熱量が一定となったとき，流れる熱量q，温度降下T，熱伝導率λの間には，つぎの関係式が成り立つ。

$$q=\frac{\lambda_1 A_1 \Delta T_1}{\Delta L_1}=\frac{\lambda_2 A_2 \Delta T_2}{\Delta L_2}$$

故に，

$$\lambda_2=\lambda_1\cdot\frac{A_1}{A_2}\cdot\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\cdot\frac{\Delta L_2}{\Delta L_1}$$

こゝで，添字1は標準試料に対する諸量，添字2は測定試料に対する諸量を示す。



砥 粉　WA600
銅 粉　17 g

図3-30　固有抵抗とフェノール樹脂量との関係

本実験に使用した砥石試験片の形状を図3-31に，使用した熱伝導率の測定装置を図3-22に示す。標準試料として，直径30 mm，長さ30 mmの純アルミニウムを使用し，その熱伝導率は0.53 $cal \cdot cm^{-1} \cdot sec^{-1} \cdot (°C)^{-1}$（～20°C）[1]である．砥石試験片と標準試料とを熱伝導率測定装置に挿入し，標準試料の一端をヒータによって加熱する。標準試料とヒータの間には，標準試料の半径方向の温度勾配を小さくするために，熱伝導性の良い標準試料と接触させて置き，純銅とヒータの間に絶縁のためにアスベストを置いた。また，砥石試験片の一端を，水冷してあるアルミニウムに接触させることによって冷却し，砥石試験片および標準試料内の温度勾配を大きくした。横方向の熱流を小さくするために，砥石試験片および標準試料の側壁を，直径120 mmのイソライト断熱レンガで覆った。また，砥石試験片と標準試料との接触面での隙間を小さくするために，標準試料の端面を超仕上し，かつ重さ300 gのおもりを上部に置いた。温度は，砥石試験片の上面，砥石試験片と標準試料との境界面，標準試料の下面の3ヶ所について，0.3 mm$^{\phi}$のアルメル－クロメル熱電対によって測定した。この測定法の精度を吟味するため，まず標準試料と同種のアルミニウムの熱伝導率を測定し，その値を100とした場合の比で砥石試験片の熱伝導率を表示した。

図3-33に，砥粒と銅粉の配合割合を3種に変えたWA600およびWA1500砥石の熱伝導率を測定した結果を示す。いずれの砥石配合割合の場合でも両者の熱伝導率はほゞ等しい。また，いずれの砥粒の場合でも，砥粒の配合割合が増加すると熱伝導率は減少する。前述した最適配合割合で成形した銅基粉末成形砥石の熱伝導率は，WA600砥石で27，WA1500砥石で26である。

---

(1) 金属学会編，金属便覧，（昭40），3，丸善

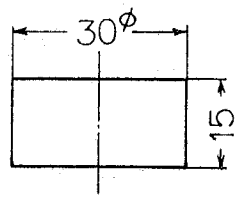


図3－31　熱伝導率測定用試験片の形状

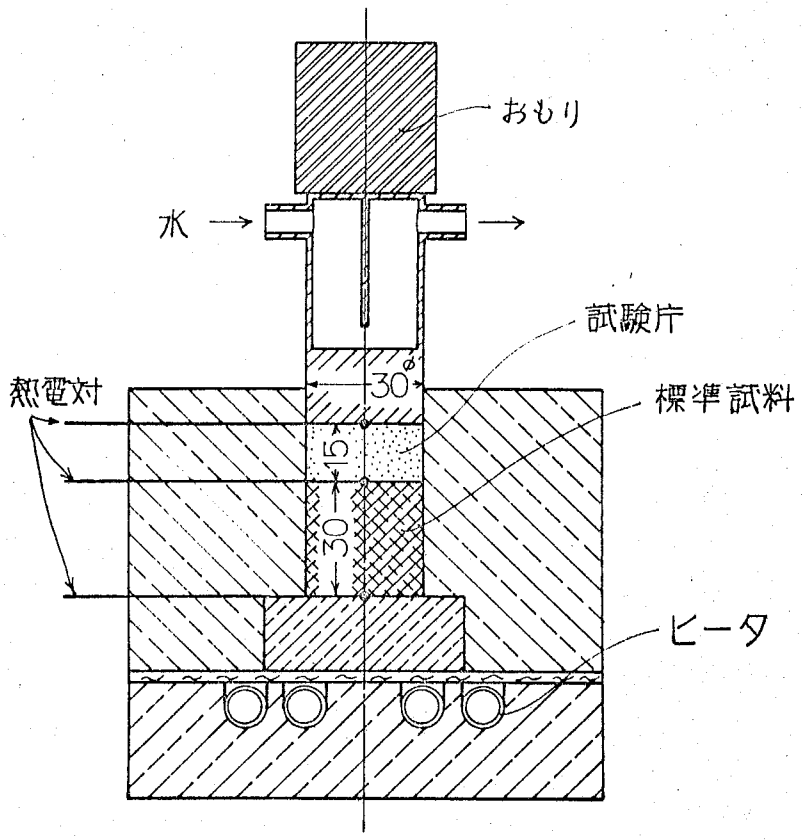
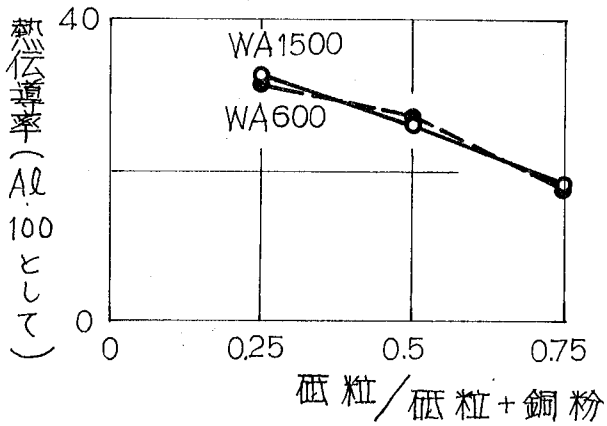


図3－32　熱伝導率測定装置



砥石配合割合

銅粉	17 g
液状フェノール樹脂	1 g
粉末フェノール樹脂	1 g

図3－33　熱伝導率と，砥粒と銅粉の配合割合との関係

図3-34に，砥粒と銅粉の配合割合を，砥粒：銅粉＝3：1，1：1，1：3（容積比）および銅粉のみの4種に対して，それぞれの樹脂量を0.5～2gに変えた場合の熱伝導率を測定した結果を示す。砥粒と銅粉の配合割合にかゝわらず，それぞれの樹脂量が増加すると，熱伝導率はわずかに減少する。

3．3．4　寸法変化，膨潤性

前述した最適配合割合で成形した試作砥石の大気中および減圧中での寸法変化－温度特性，大気中，水中，灯油中での膨潤性を吟味した。それぞれの測定に使用した砥石試験片は，固有抵抗測定に使用したものと同一形状のものである。使用した砥粒はWA 1500 砥粒である。

寸法変化－温度特性は，成瀬科学器械製本多佐藤式熱膨張計によって測定した。測定時の加熱速度および冷却速度は2.5 °C/min に一定とした。図3-35に，砥石試験片を大気中に放置後，大気中で温度を上昇した場合の寸法変化を示す。温度の上昇とともに約30°Cまで温度膨張によって寸法はわずかに膨張し，約30°Cより約70°C の温度範囲では収縮する。それ以上約100°Cまでほとんど寸法変化を示さない。ついで，約100°Cより150°Cの温度範囲では再び膨張する。150°C に達した後温度を降下した場合，120°C以下の温度範囲では，温度の降下に比例して寸法は収縮する。この冷却時の30°Cより120°Cの温度範囲での熱膨張率は約$0.11\times10^{-4}(°C)^{-1}$である。

図3-36に，砥石試験片を成形後，たゞちにデシケータに挿入し，湿り気の影響を受けないように保存した後，減圧中（約5mmHg）で温度を上昇した場合の寸法変化を測定した結果を示す。温度の上昇とともに，100°Cまで温度膨張によって寸法は膨張し，この加熱時の熱膨張率は約$0.088\times10^{-4}(°C)^{-1}$である。100°C に達した後，温度を降下した場合

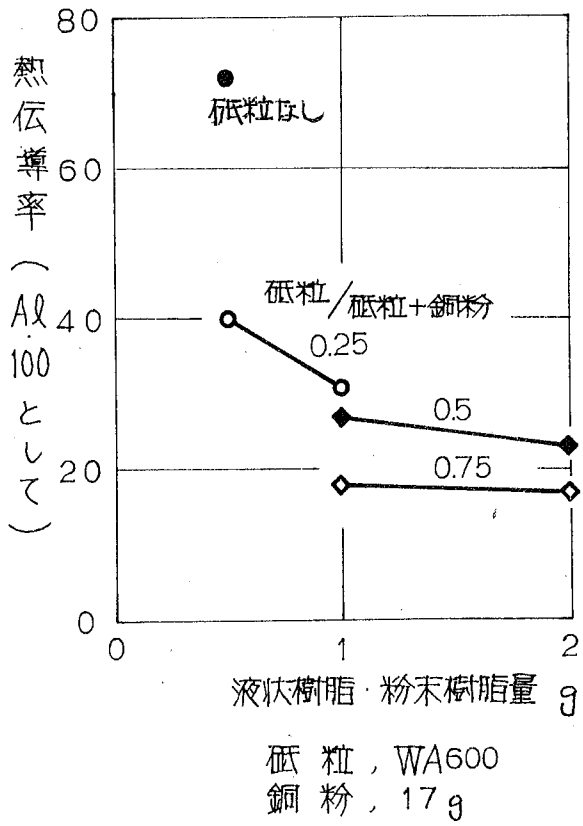


図3－34 熱伝導率と，フェノール樹脂量との関係

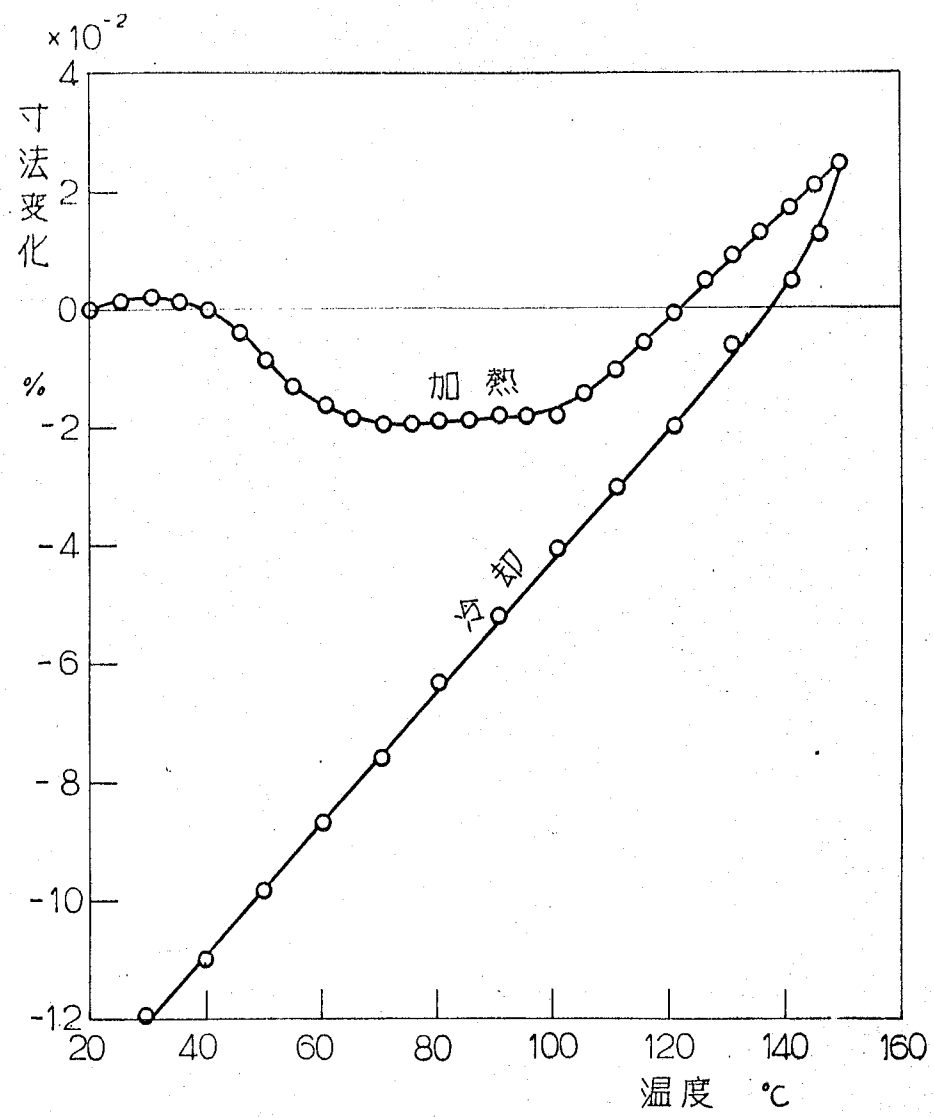


図3－35 鋼基粉末成形低石の寸法変化－温度線図
（大気中に放置後，大気中で測定）

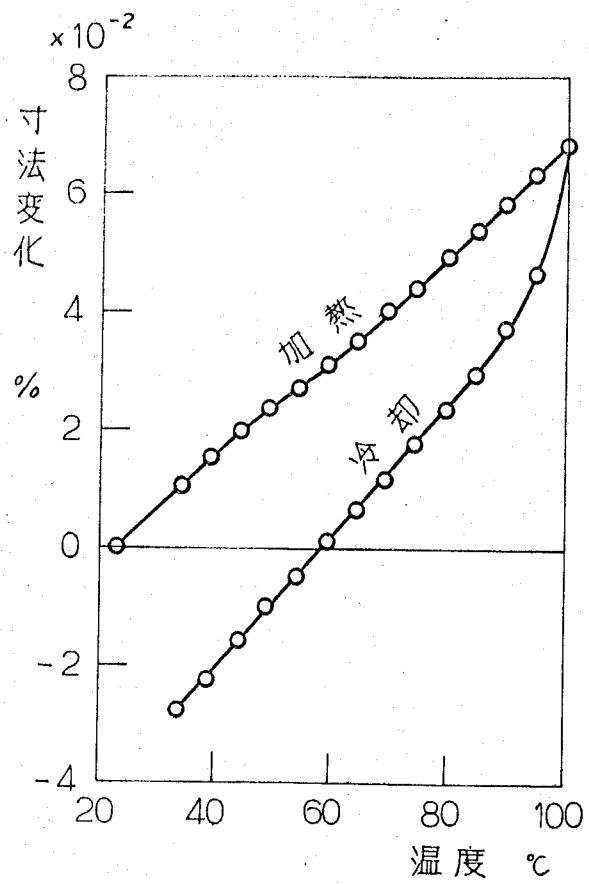


図3－36 銅基粉末成形砥石の寸法変化－温度線図（デシケータに保存後，減圧中(5 mmHg)で測定）

90℃以下の温度範囲では，温度の降下に比例して寸法は収縮する。この冷却時の熱膨張率は約0.11×10^{-4} ℃$^{-1}$であり，図3-35より求めた大気中で測定した冷却時の熱膨張率と同じであることがわかる。また，図3-35と図3-36を対比することによって，大気中に放置後加熱した銅基粉末成形砥石が約30℃より約70℃の温度範囲で収縮し，かつそれ以上約100℃まではほとんど寸法変化を示さないことは，銅基粉末成形砥石が大気中より吸収した水分を加熱とともに排出し，それによって収縮するためであると考えられる。

砥石の結合剤に使用したノボラック樹脂の粉末フェノール樹脂はヘキサメチレンテトラミンによって，レゾール樹脂の液状フェノール樹脂は加熱によって，焼成後架橋し，ついで硬化する．しかし，硬化後の樹脂は親水性の基 OH を有する[1]ので，水あるいは水素結合を形成する溶媒に膨潤する。[2] そこで，銅基粉末成形砥石が大気中の水分，水および加工液の灯油によって膨潤されるかどうかを，それぞれの雰囲気中で，銅基粉末成形砥石の時間の経過による寸法変化を測定することによって吟味した。寸法変化の測定は，大気中および水中での測定の場合には変化量が比較的大きいためにダイヤルゲージを使用し，灯油中での測定の場合には変化量が比較的小さいためにマルテンス鏡ひずみ計を使用して行なった。なお，ダイヤルゲージの測定圧は約100g であり，測定圧による砥石部の変形を防止するために，図3-37に示すように砥石上部に保持具を取り付け，ダイヤルゲージの測定端子と保持具とを接触させて測定した。

図3-38に，大気中での銅基粉末成形砥石の寸法変化および水中での

---

(1) 井本・斉藤・藤代，高分子化学，(1963)，12，槇書店
(2) 佐藤・山下訳，高分子の化学，(昭23)，134，技報堂

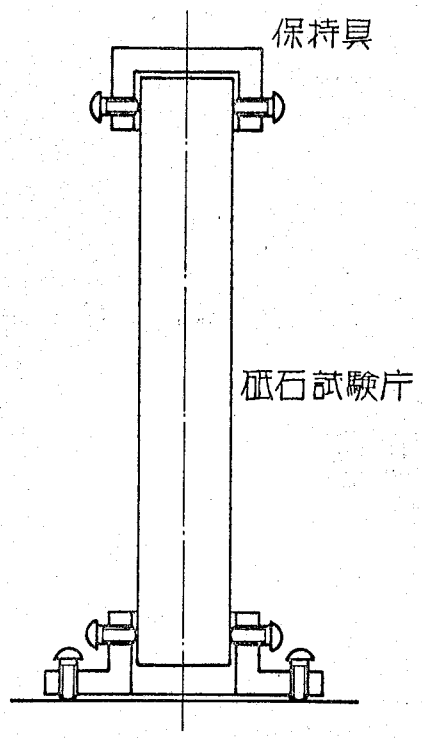


図3－37　寸法変化測定用砥石保持具

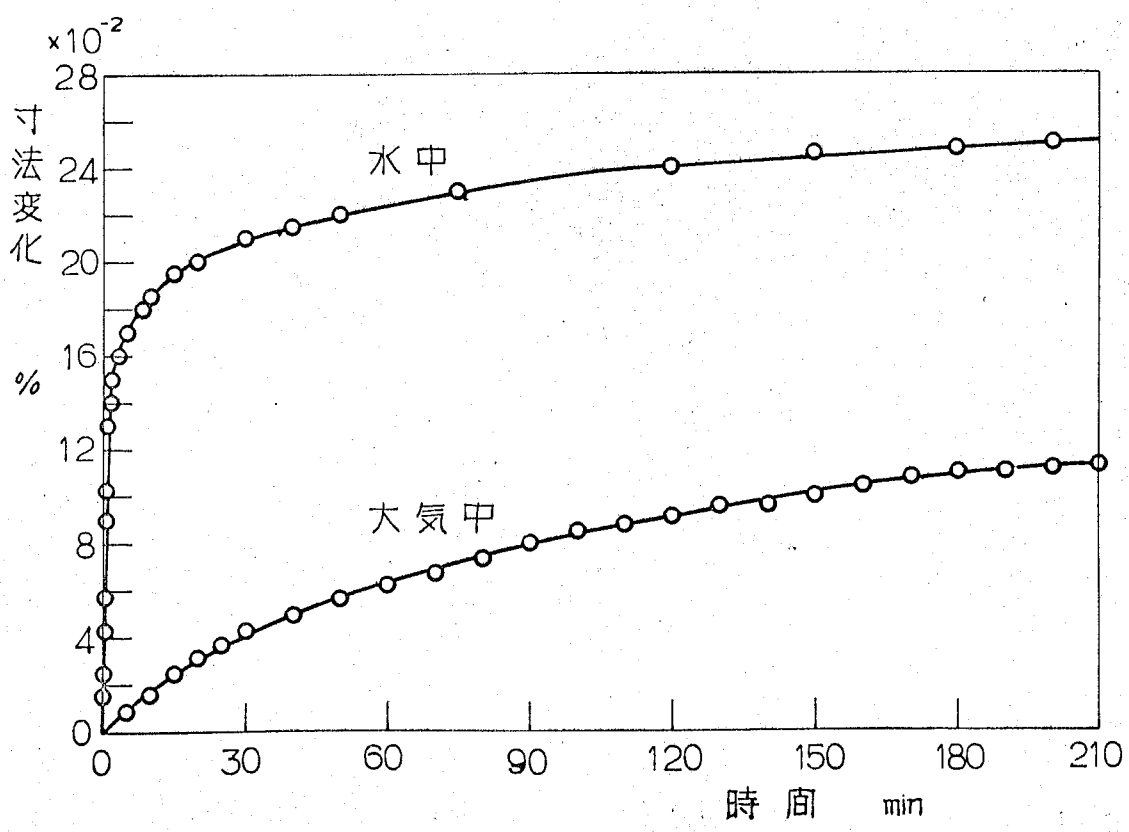


図3－38　銅基粉末成形砥石の大気中（気温12.5～13.3°C，湿度80%）
および水中（水温10～15°C）での寸法変化

寸法変化を測定した結果を示す。大気中での寸法は，時間の経過とともに膨張し，膨張の割合は時間の経過とともに減少するが，210分経過後も膨張している。水中での寸法は測定開始後著しく膨張し，5分後で寸法変化率は約17×10^{-2}%となる。以後時間の経過とともに膨張の割合は減少する。そして，20,000分間水中に放置した時の寸法変化率は0.4%であった。この試料，すなわち20,000分間水中に放置した砥石を，減圧容器中（5mmHg）に挿入し，寸法変化を時間の経過とともに測定した結果，180分経過したとき，寸法は収縮し，寸法収縮率は約0.33%であった。これより，水中に放置することにより生じた寸法の膨張は減圧容器中で水分を除することによってほとんど消滅し，放置前の寸法にほとんど同しくなることがわかる。また，前述した砥石試験片を大気中に放置した後加熱した場合，30～70°Cの温度範囲で寸法が収縮することは，吸収した大気中の水分を温度上昇とともに排出することによると考えられる。

図3-39に，灯油中での銅基粉末成形砥石の寸法変化を測定した結果を示す。時間の経過とともに寸法は膨張し，23日経過後で寸法変化率は3.5×10^{-2}%となり，まだ膨張途中である。その値は大気中および水中での場合より著しく小さい。以上より，銅基粉末成形砥石は大気中，水中および灯油中で，それぞれ膨潤し，寸法は膨張することがわかる。

3.3.5 模型による弾性率の考察

銅基粉末成形砥石の弾性率を，それぞれの成分の特性値を知ることによって求めることができるかどうかを，模型によって吟味した。

まず，結合剤が砥粒および砥粒保持体の表面に，どれほどの厚さで覆っているかを吟味した。液状フェノール樹脂は，砥粒および砥粒保持体とともに，撹拌擂潰機によって充分に混合撹拌されるので，砥粒および

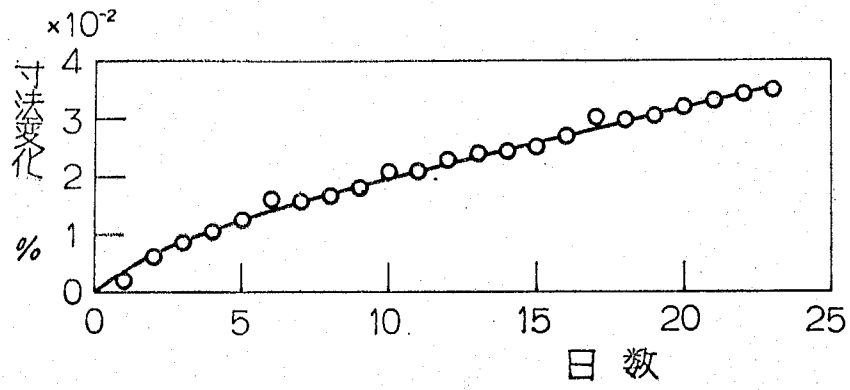


図3－39 銅基粉末成形砥石の灯油中（液温10～15°C）での寸法変化

砥粒保持体の表面に一様な厚さで覆うと考えられる。また，粉末フェノール樹脂は，砥粒および砥粒保持体の表面を一様に覆っている液状フェノール樹脂に一様にまぶされ，ついで焼成によって加熱流動するので，砥粒および砥粒保持体の表面を一様の厚さで覆っていると考えられる。そこで，表3－4に示した配合割合のWA4000 MP砥石の結合剤の厚さは，粉末フェノール樹脂と液状フェノール樹脂との容積の和を，砥粒と銅粉の表面積の和で除することによって求めることができ，その値は2.3μである。なお，前述のように粉末フェノール樹脂の密度は0.93 g/cm³，液状フェノール樹脂の密度は1.3 g/cm³とした。

銅基粉末成形砥石の弾性率をつぎに示す模型を用いて計算で求めた。砥粒保持体は図3－40に示すような正立方体の頂点に存在するように分布し，砥粒は砥粒保持体の存在しない場所で，やはり正立方体の頂点に存在するように分布し，砥粒保持体および砥粒の存在しない場所では，フェノール樹脂と気孔が図3－41に示すようにお互いに並列に存在している模型を考えた。

断面積が等しく，それぞれの長さが l_1, l_2, …… l_n である物体が直列に連なっている場合，それぞれの弾性率を E_1, E_2, …… E_3 とすると，全体の弾性率 E は

$$E = \frac{\Sigma\, l_i}{\Sigma\left(\frac{l_i}{E_i}\right)} \qquad (3 \cdot 1)$$

である。また，長さが等しく，それぞれの断面積が S_i, S_2, …… S_n である物体が並列に連っている場合，それぞれの弾性率を E_1, E_2 …… E_3 とすると，全体の弾性率 E は

$$E = \frac{\Sigma\, E_i S_i}{\Sigma\, S_i} \qquad (3 \cdot 2)$$

である。

いま，図3-42に示す一辺の長さが a の正立方体abcdefghの弾性率を求める。これは，正立方体の一頂点を中心とした半径 r（$r<a$）の球をなす物質と，それと重なって正立方体をなす物質とから成り立っている。前者の弾性率を E_1，後者の弾性率を E_2 とし，辺cgより x だけ離れたところの厚さ dx の円筒の $1/4$ の微少部分 A の弾性率 E'' は式3・1を用いて

$$E''=\frac{a}{\frac{1}{E_1}\sqrt{r^2-x^2}+\frac{1}{E_2}\left(a-\sqrt{r^2-x^2}\right)}$$

となる。よって，辺cgを軸とした半径 r，高さ a の円柱の $1/4$ の部分の弾性率 E' は，式3・2を用いて

$$E'=\int_0^r \frac{\frac{\pi}{2}\cdot x\cdot E''}{\frac{\pi r^2}{4}}\,dx$$

$$=\frac{2a}{r^2\left(\frac{1}{E_1}-\frac{1}{E_2}\right)}\left[r-\frac{a}{\left(\frac{E_2}{E_1}-1\right)}\ln\left(1+\frac{r\left(\frac{E_2}{E_1}-1\right)}{a}\right)\right]$$

となる。よって，正立方体abcdefghの弾性率 E は，式3・2を用いて，

$$E=\frac{1}{a^2}\left\{\frac{\pi r^2}{4}\cdot\frac{2a}{r^2\left(\frac{1}{E_1}-\frac{1}{E_2}\right)}\left[r-\frac{a}{\left(\frac{E_2}{E_1}-1\right)}\ln\left(1+\frac{r\left(\frac{E_2}{E_1}-1\right)}{a}\right)\right]\right.$$

$$\left.+\left(a^2-\frac{\pi r^2}{4}\right)E_2\right\}$$

$$=\frac{r\pi}{2a\left(\frac{1}{E_1}-\frac{1}{E_2}\right)}+E_2-\frac{\pi r^2}{4a_2}\cdot E_2$$

$$-\frac{\pi}{2E_2\left(\frac{1}{E_1}-\frac{1}{E_2}\right)^2}\cdot\ln\left(1+\frac{r\left(\frac{E_2}{E_1}-1\right)}{a}\right)\quad(3\cdot3)$$

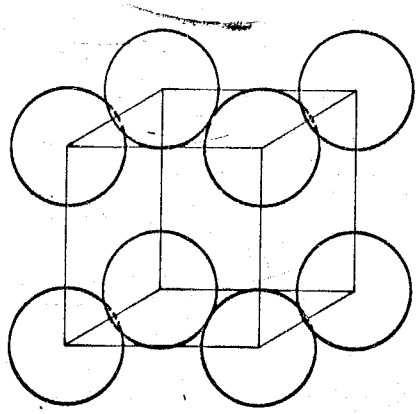


図3−40

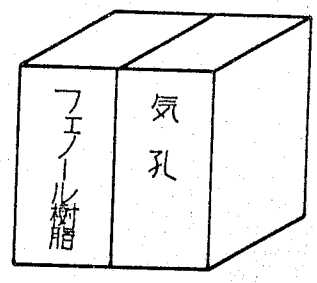


図3−41

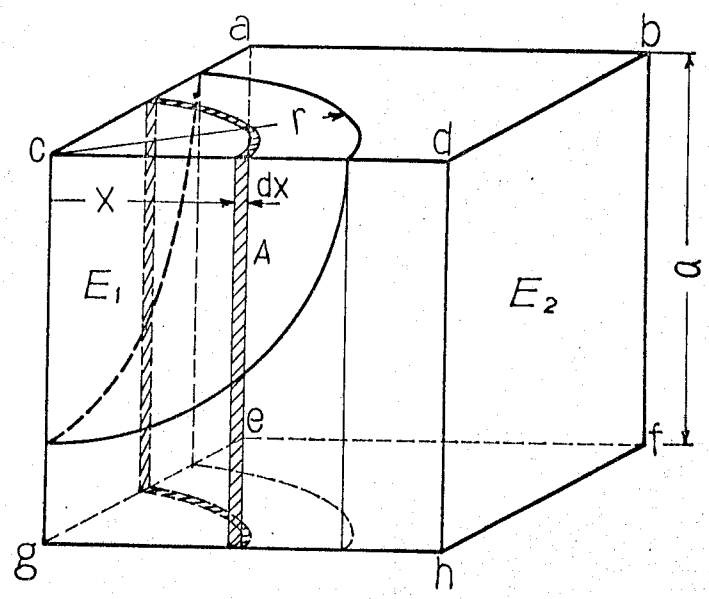


図3−42

となる。

つぎに，銅基粉末成形砥石の弾性率を求める。砥石材料の砥石中にしめる容積と弾性率を，それぞれ砥粒保持体について V_a，E_a，砥粒について V_b，E_b，フェノール樹脂について V_c，E_c とし，気孔の砥石中にしめる容積を V_d とする。

フェノール樹脂と気孔の混合体の弾性率 E_e は，式3・2より

$$E_e = \frac{V_c}{V_c + V_d} E_c$$

となる。そして，砥粒が図3−42に示す正立方体の各頂点に存在し，その他の場所にフェノール樹脂と気孔との混合体が存在する場合の，砥粒・フェノール樹脂・気孔の混合体の弾性率 E_f は，砥粒間の距離を $2a_1$，砥粒の半径を r_1 とすると，式3・3より

$$E_f = \frac{r_1 \pi}{2a_1\left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{E_e}\right)} + E_e - \frac{\pi r_1^2}{4a_1^2} E_e$$

$$- \frac{\pi}{2E_e\left(\frac{1}{E_b} - \frac{1}{E_e}\right)^2} \cdot \ln\left(1 + \frac{r_1\left(\frac{E_e}{E_b} - 1\right)}{a_1}\right)$$

となる。こゝで，一辺の長さが $2a_1$ の正立方体中に砥粒が1ヶ存在することになるので，

$$\frac{(2a_1)^3}{\frac{4}{3}\pi r_1^3} = \frac{V_b + V_c + V_d}{V_b}$$

故に，
$$\frac{a_1}{r_1} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \cdot \frac{V_b + V_c + V_d}{V_b}}$$

の関係式が成り立つ。

砥粒保持体も，砥粒と同様に正立方体の各頂点に存在し，その他の場

所に砥粒・フェノール樹脂・気孔との混合体が存在する場合の，砥粒保持体・砥粒・フェノール樹脂・気孔の混合体，すなわち銅基粉末成形砥石の弾性率 E_g は，砥粒保持体間の距離を $2a_2$，砥粒保持体の半径を r_2 とすると，式3・3より，

$$E_g = \frac{r_2\pi}{2a_2\left(\frac{1}{E_a}-\frac{1}{E_f}\right)} + E_f - \frac{\pi r_2^2}{4a_2^2}E_f - \frac{\pi}{2E_f\left(\frac{1}{E_a}-\frac{1}{E_f}\right)^2}\cdot \ln\left(1+\frac{r^2\left(\frac{E_f}{E_a}-1\right)}{a_2}\right) \qquad (3\cdot 4)$$

となる。こゝで，前述と同様に，

$$\frac{(2a_2)^3}{\frac{4}{3}\cdot\pi r_2^3} = \frac{V_a+V_b+V_c+V_d}{V_a}$$

故に，

$$\frac{a_2}{r_2} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6}\cdot\frac{V_a+V_b+V_c+V_d}{V_a}}$$

の関係式が成り立つ。

いま，表3－4に示す配合割合のWA1500銅基粉末成形砥石の弾性率を，銅，酸化アルミニウム，フェノール樹脂の弾性率を知ることによって式3・4より求める。この砥石の気孔率は測定の結果，35％であった。銅の弾性率は 11.3×10^5 kg/cm²，[1]酸化アルミニウムの弾性率は 51×10^6 psi[2]（3.6×10^6 kg/cm²），フェノール樹脂の弾性率は 5.8×10^4 kg/cm²（実測値）である。以上より，

$$V_a = 170/8.9 = 19.1 \text{ cm}^3$$

---

(1) 金属学会編，金属便覧，（昭40），3，丸善
(2) 島貫；城戸・国谷訳，高温工学，（昭40），482，コロナ

$$V_b = 60/3.9 = 15.4\ cm^3$$
$$V_c = 10/0.93 + 10/1.3 = 18.5\ cm^3$$
$$V_d = 28.5\ cm^3$$
$$E_a = 11.3 \times 10^5\ kg/cm^2$$
$$E_b = 3.6 \times 10^6\ kg/cm^2$$
$$E_c = 5.8 \times 10^4\ kg/cm^2$$

であり，これより

$$E_g = 6.6 \times 10^4\ kg/cm^2$$

となる。一方，上記砥石の実測した弾性率は，図3−26により，$6.1 \times 10^4\ kg/cm^2$ であり，実測した値と計算によって求めた値はほゞ等しいことがわかる。

3．4　まとめ

以上より銅基粉末成形砥石の最適成形条件はつぎのとうりである。

配合割合

銅　粉	170 g
砥　粒	60 g
粉末フェノール樹脂	10 g
液状フェノール樹脂	10 g

成形条件

成形温度	室　温
成形圧力	0.4 ton/cm²
成形時間	2　min

焼成条件

昇温速度	80 °C/hr
焼成温度	230 °C
焼成時間	20　min

また，上記成形条件で作成したWA 1500 銅基粉末成形砥石試験片の物理的性質および機械的性質はつぎのとうりである．

空隙率	33 %
硬　さ	HRH 18
抗折力	2.8 kg/mm^2
弾性率	6.1×10^4 kg/mm^2
固有抵抗	1.11×10^{-2} $\Omega \cdot cm$
熱伝導率	26（Al を100として）
熱膨張率（0 ～ 100°C）	0.88×10^{-4} $°C^{-1}$

第4章　銅基粉末成形砥石の仕上性能に関する研究

前章の研究によって銅基粉末成形砥石の成形法を明らかにした。本章は銅基粉末成形砥石のホーン仕上および超仕上による仕上性能について吟味し，ついで銅基粉末成形砥石が長寿命砥石および鏡面仕上砥石として適するか否かについて吟味した結果である。なお，以後において結合剤にフェノール樹脂を用いた銅基粉末成形砥石をMP砥石，合成ゴムを用いた銅基粉末成形砥石をMPR砥石とよぶ。

4．1　肌焼き鋼のホーン仕上

ホーン仕上の目的は，仕上面の表面あらさを低減して摩擦力の低下をはかるとともに，前加工の加工層を除去することによって耐摩性を向上することにある。ときには，前加工の形状精度，すなわち真円度および真直度を向上させる目的で行なうこともある。従来，主としてビトリファイド砥石が使用されているが，損耗が比較的大きく，作業能率の点からも好ましくないので，寿命の長い砥石が望まれている。[1] 寿命の長い砥石として，電着結合砥石についての報告[2]がある。それによると，ダイヤモンド砥粒を用いた電着結合砥石では，ビトリファイド砥石に比較して15～20倍の寿命を有する。また，単結晶アルミナ砥粒を用いた電着結合砥石では，黄銅の仕上に適するが，鋳鉄の仕上にはかなりの発熱をともない，かつ寿命の点でも必ずしも有利ではないと報告されている。また，焼入れ鋼のホーン仕上に対して，青銅結合ダイヤモンド砥石を推奨している。[3] また，鋳鉄シリンダライナのホーン仕上に，ダイヤモンド砥石が砥石寿命の増大に効果的であるという報告[4]がある。一方，

---

(1)　機械試験所資料，48（昭41－3），19
(2)　岸・他3名，機械試験所報告，56（昭40－10）
(3)　R.Rosenberger，Werkstattechnik，52－2（1962），55
(4)　И.Е.Фрагин，Станки и инструмент，36－1（1965），3

高度の仕上面が要求されるころ軸受の軸受内面にホーン仕上を行なった報告[1]もある。しかし，上記の報告には，いずれもホーン仕上によって0.1μ以下の仕上面あらさが得られた報告はない。また，ホーン仕上自身によって生成される加工層についての吟味を行なった報告も見当たらない。

そこで，砥粒保持体として銅粉を使用したMP砥石が，上述のような長寿命砥石として，また0.1μ以下の仕上面あらさが得られる鏡面仕上砥石として，適するか否かを吟味する目的で実験を行なった。

4．1．1　実験装置および供試砥石

実験に使用したホーニング盤は，Gehring社製KS250－201型ホーニング盤で，ホーンは図4－1に示すような円周上に4個の砥石を配置した，油圧拡張方式の加圧機構を有するものである。

供試砥石の種類を表4－1に，寸法を図4－2に示す。MP砥石の砥粒としては，WA，GCおよび砥石損耗を少なくする目的でダイヤモンド（以後Dと略す）砥粒の3種を使用した。

4．1．2　実験方法

実験に使用した加工物試料は図4－3に示すような寸法のもので，仕上げるべき面の内径×長さは56×20 mmである。材質はクロムモリブデン鋼22種（SCM22）で，加工後，930°Cでガス浸炭を行ない，つぎに840°Cで油焼入れを行ない，さらに－80°Cでサブゼロ処理を行なって，160°Cで焼戻ししたものである。ホーン仕上を行なう内径56 mmの穴は上記の熱処理後，WA60GV砥石を使用して，研削仕上（砥石回転数1500 rpm，加工物回転数200 rpm）を行なったもので，それにより得られる仕上面あらさは1.0～1.6 μHmaxである。そ

---

(1) Werkstattechnik，53－4（1963），174

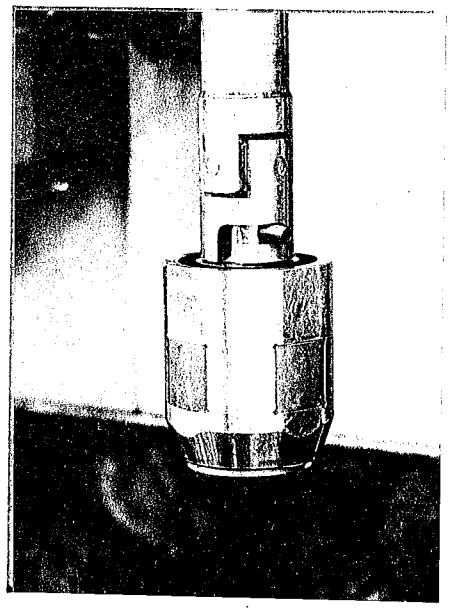


図4－1　実験に使用したホーン

表4－1　供試砥石の種類

名　称	砥　粒	粒度番号	ロックウエル硬さ Hスケール
MP砥石	WA	240	20
	WA	400	15
	WA	1000	5
	D	280	20
	D	400	20
	D	1000	5
	GC	1000	5
ビトリファイド砥石	WA	600	45

れをつぎに示す条件でホーン仕上を行なった。

ホーン仕上条件

ホーン回転数 ： 165 rpm
ストローク数 ： 200 行程/min
ストローク長 ： 15 mm
砥石圧力 ： 4 kg/cm²
仕上時間 ： 0.5，1，2，3，5，10 min
加 工 液 ： マクロンA（シェル石油）
ドレッシングは行なわない

砥石圧力は，ホーンに与える油圧のゲージ圧力から，コーンと砥石間の摩擦係数を0.16[1]として計算によって求めた値である。

加工物試料については，切削量・仕上面あらさ・真円度・仕上面加工層深さを測定し，仕上面を観察した。砥石については，砥石損耗を測定した。切削量は，空気マイクロメータを使用して加工前後の穴径を測定し，それより求められる半径増加量で求めた。仕上面あらさは，TALY-SURFを使用して縦倍率×50,000，横倍率×100で断面曲線を記録し，それより得られる最大高さあらさHmaxで求めた。真円度は，TALY-RONDを使用して半径方向倍率×4,000で測定した。仕上面加工層の深さは仕上面表層部の組織および硬さ分布から求めた。なお，表層部組織の観察は，図4－3に示す箇所から採取した試料より，深さ方向の拡大率を増すために図4－4に示す断面について行ない，仕上面表層部の硬さ分布は，この組織観察面について表面から内部へ向けて微少硬度計で測定して求めた。砥石損耗は，砥石高さ6mm（図4－2において）が4mmに損耗するまでに仕上げた加工物の数量を求め，それより求められる加工物1個を仕上げるのに損耗する砥石の厚さ減少量で表わした。

---

(1) F.D. Bowden・O. Tabor, The friction and lubrication of solids, (1954), 313

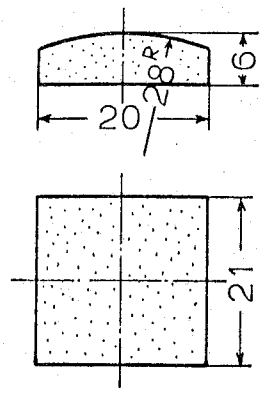


図4－2　砥石の寸法

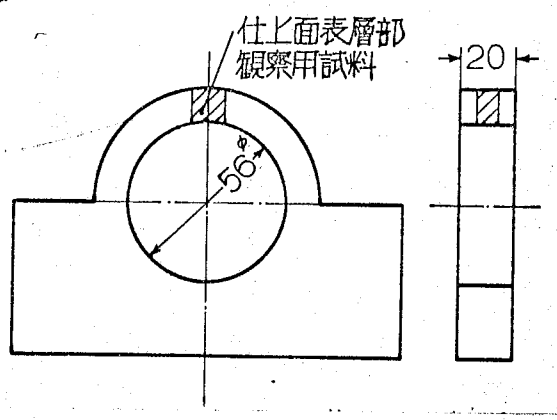


図4－3　加工物の寸法

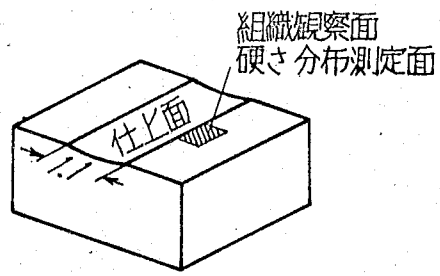


図4－4　組織観察面および
硬さ分布測定面

4．1．3　実験結果

切削量および仕上面あらさ

WA240，WA400，WA1000砥粒を用いたMP砥石およびWA 600砥粒を用いたビトリファイド砥石の場合についての切削量および仕上面あらさと仕上時間との関係を図4－5に示す。図示のように，MP砥石による切削量は砥粒粒度があらいほど大きく，かつ仕上時間に比例して増大している。また，このうちで切削量のいちばん大きいWA 240のMP砥石でも，粒度の細かいWA 600ビトリファイド砥石より切削量は小さいことがわかる。しかし，ビトリファイド砥石による切削量の仕上時間に対する割合は仕上時間の増加とともに減少している。仕上面あらさは，MP砥石の場合でもビトリファイド砥石と同じく，ある仕上時間でほゞ一定となり，その値はWA 240では0.08 μHmax，WA 400では0.06 μHmax，WA 600では0.04 μHmax と粒度が細かくなるにつれて小さな値となる。そしてこの粒度範囲では，どの粒度の砥石を用いても仕上面あらさは0.1 μ Hmax 以下で，ビトリファイド砥石による仕上面あらさ 0.3 μHmax より小さな値を示し，従来，ビトリファイド砥石では得られなかった平滑な仕上面が得られることがわかった。これはMP砥石が，砥粒を剛性的に結合したビトリファイド砥石に比べて切削量は少ないが，砥粒切刃が砥石切刃面にそろうことにより深いきずをつくることなく切削を行なうことによるものと考える。また，仕上面あらさが一定になるまでに要する仕上時間は，WA 240では 0.5 min，WA 400では2 min，WA 1000では 10 min であって，前加工の研削面あらさ 1.0 ～ 1.6 μ の凹凸の山が切削されるに要する仕上時間を，切削量曲線から求めた値にほゞ等しい。これより，MP砥石を用いて仕上時間を短縮するには，砥粒粒度として#1000 よりも#240の方が効果的であり，

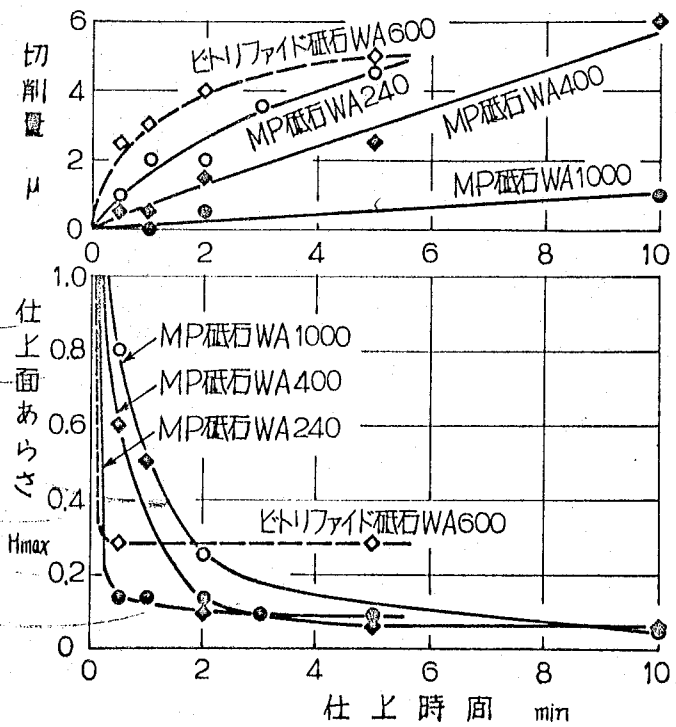


図4－5　切削量および仕上面あらさと仕上時間との関係（WA砥粒を用いたMP砥石，ビトリファイド砥石の場合）

しかも両者において仕上面あらさは大差のないことがわかる。

つぎに，D280，D400，D1000砥粒を用いたMP砥石の場合についての，切削量および仕上面あらさと仕上時間との関係を図4－6に示す。切削量は，WA砥粒の場合と同じく粒度があらいほど大きく，同じ砥石粒度ではWA砥粒のほゞ2倍の大きさを示す。仕上面あらさはD400，D1000ではある仕上時間でほゞ一定となり，その値は，D400ではWA400よりも大きく0.12μHmax，D1000ではWA1000と等しい0.04μHmax となる。しかし，D280では，仕上時間2min まで減少し0.2μHmax の値を示すが，それ以後増大するようである。また，切削量をD400のMP砥石とWA 600のビトリファイド砥石とについて比較すると，仕上時間1 min までほゞ同じ大きさを示すが，仕上時間の増加とともにD400のMP砥石の方が切削量は大きくなっていく。

砥粒の種類による仕上面あらさの差異を，粒度#1000 の砥石について示したものが図4－7である。仕上面あらさがほゞ一定となる仕上時間は，D砥粒の場合がもっとも短かく，WA砥粒，GC砥粒の場合がこれにつぐ。その仕上面あらさは，10 分後ではD砥粒，WA砥粒はほゞ等しく，GC砥粒の場合はそれより大きい。

仕上面表層部

実験に使用した加工物は，前述のように表面浸炭を行なって，それを焼入れ，焼戻ししたものであるから表面硬化層が存在する。この硬化層の厚さおよび硬さを調べたところ，図4－8に示すように，厚さは約0.5 mm，硬さはHv 950であった。従って，以下に述べる仕上面加工層の厚さ約2～3μは，上述の表面硬化層の厚さ約0.5 mm に含まれることになる。前加工の研削仕上による仕上面表層部の組織写真および硬さ分布の測定結果を図4－9に示す。顕微鏡写真において示した縦方向

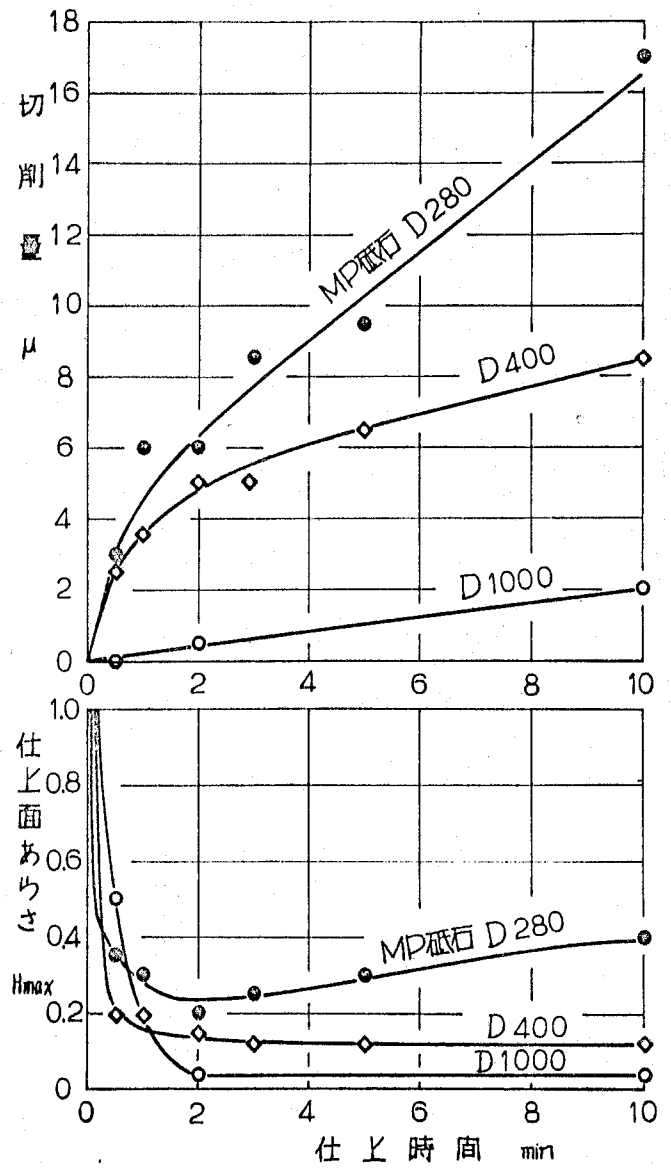


図4－6 切削量および仕上面あらさと仕上時間との関係（D砥粒を用いた場合）

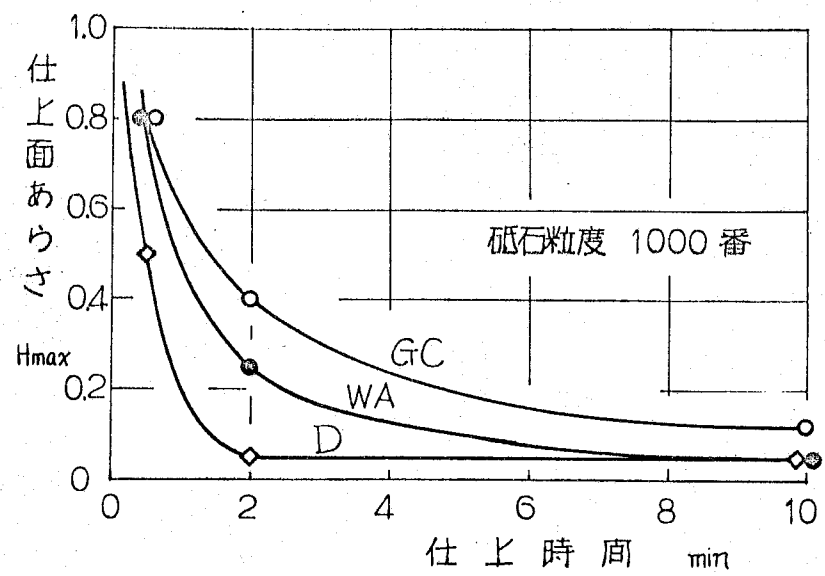


図4－7 砥粒の種類による仕上面あらさ

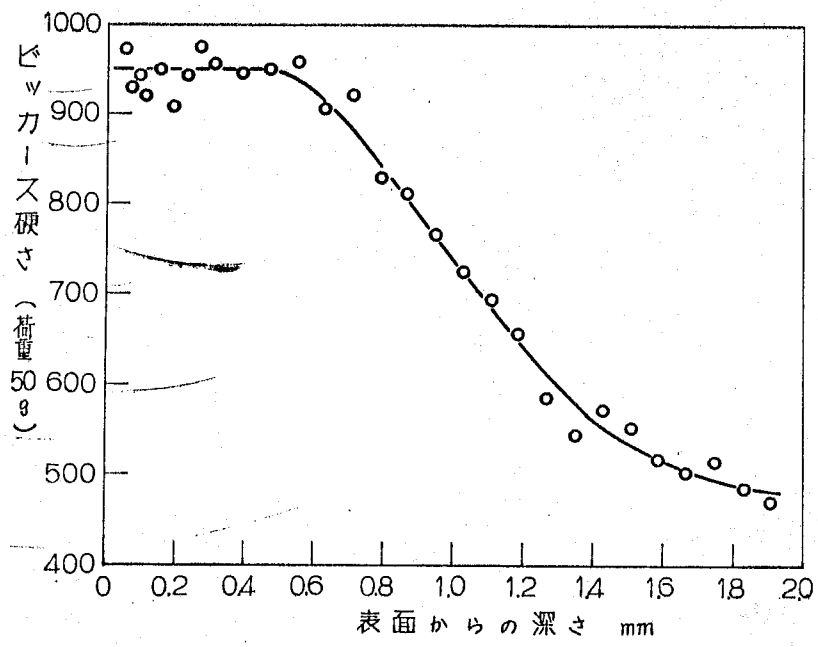


図4－8 加工物表面硬化層の硬さ分布

の尺度は穴の半径方向の深さの尺度を示す。組織写真より，表層部には仕上面ののこ歯状のあらさ凹凸に沿って，写真で針状の腐食されない白い部分を含んだマルテンサイト素地の内部組織とは異なる加工層が生じており，その深さは約1.5μである。また，内部素地ではHv 800であるが，約2μの深さから加工硬化による硬さ上昇を示し，約1μの深さで最大Hv 880となる。そこから表面に向けて，研削熱による硬さ低下を示し，表面附近で最小となる。従って，上述の仕上面表層部の組織写真において，仕上面のあらさ凹凸に沿って白い素地の見えない表層部は，硬さが低下していることになる。また，研削仕上による仕上面加工層を除去するには，約2μ以上の切削量が，ホーン仕上に必要であることになる。

つぎに，各種砥石のホーン仕上による仕上面表層部の組織写真および硬さ分布の測定結果を，図4－10(a), (b), (c), (d), (e) に示す。顕微鏡写真において示した縦方向の尺度は，図4－9と同じように，穴の半径方向の深さの尺度を示す。各種砥石の仕上時間は，上述の研削仕上による加工層深さ約2μが除去されるに要する仕上時間を，図4－5および図4－6の切削量曲線より選定し，D280，D400のMP砥石およびWA 600のビトリファイド砥石では0.5分，WA 240のMP砥石では1分，D1000のMP砥石では10分とした。それぞれの組織で明らかなように，表層部には腐食されにくい写真では白っぽく見える組織層がみとめられる。この白色組織層の深さは砥石によって異なり，MP砥石のWA 240では約1μ，D280では約2.5μ，D400では約1μ，D1000では約0.1μおよびWA 600のビトリファイド砥石では約1μである。一方，硬さ分布の測定結果より，MP砥石のWA 240およびD280では約3μ，D400では約2μ，D1000では約0.1μおよびWA 600の

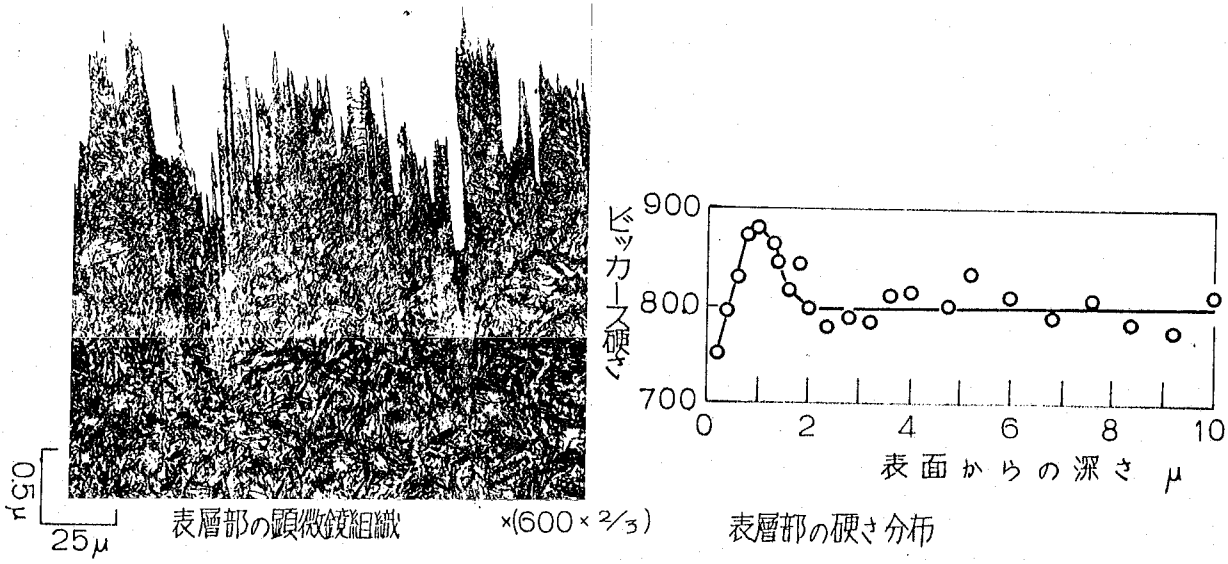


図4－9　研削仕上面表層部の顕微鏡組織および硬さ分布

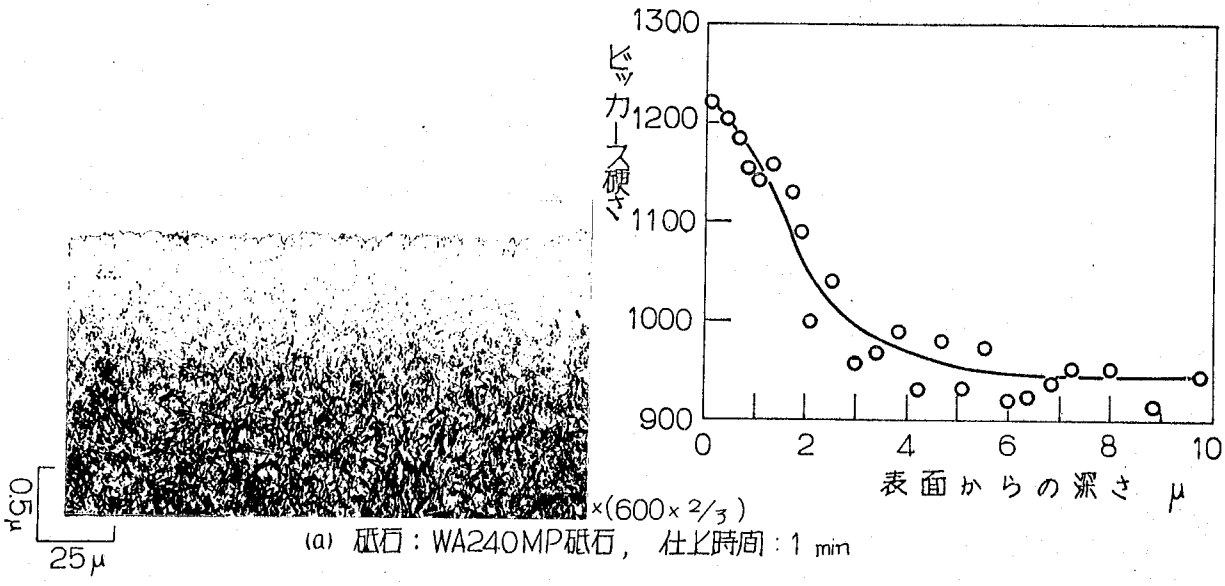
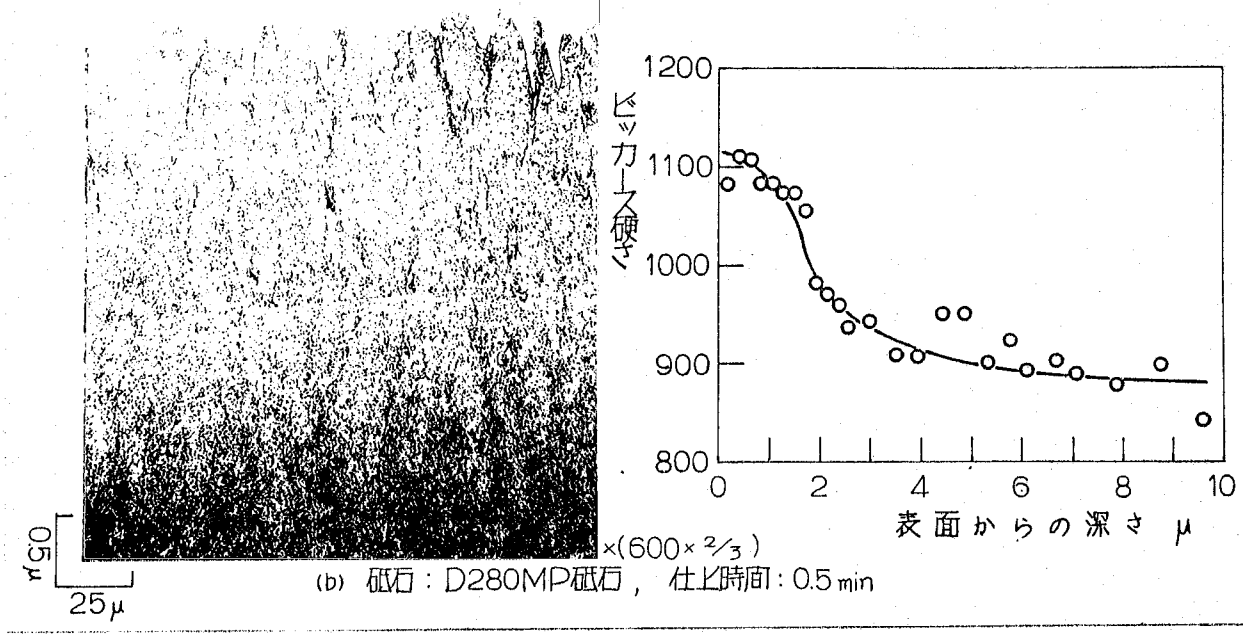
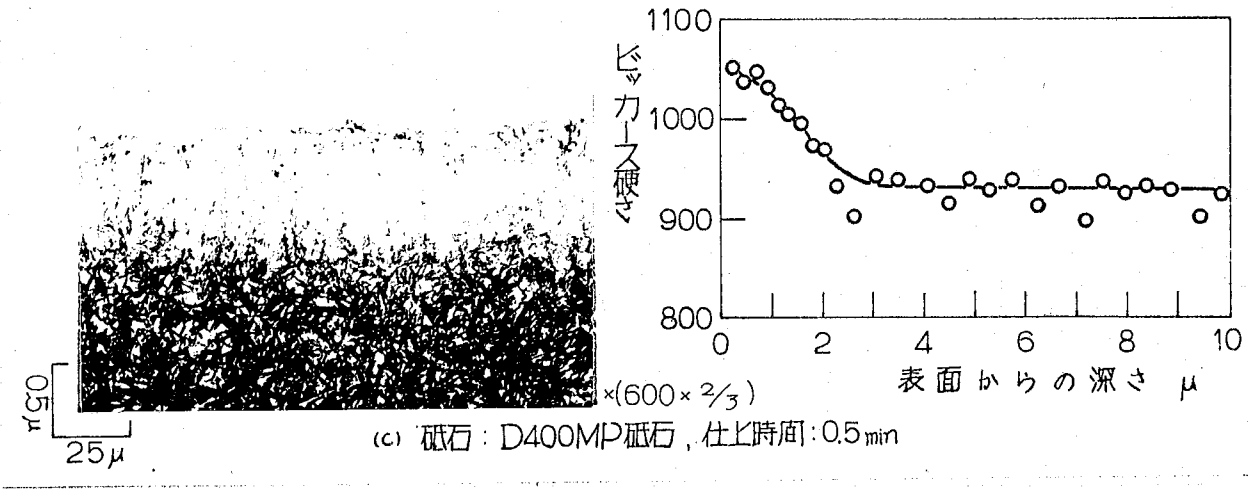


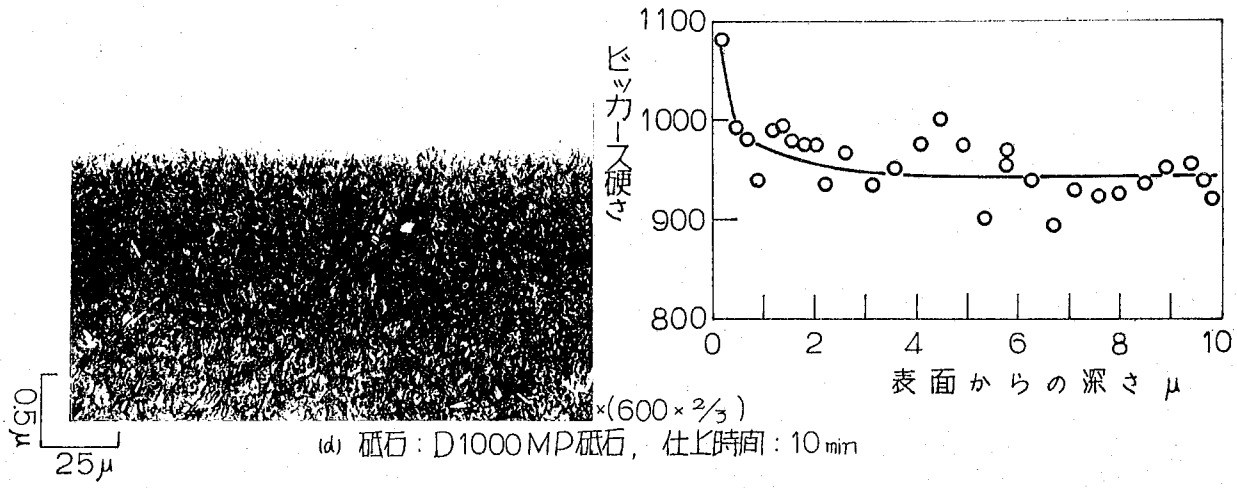
図4－10　各種砥石によるホーン仕上表層部の顕微鏡組織および硬さ分布（その１）



(b) 砥石：D280MP砥石，仕上時間：0.5 min



(c) 砥石：D400MP砥石，仕上時間：0.5 min



(d) 砥石：D1000MP砥石，仕上時間：10 min

図4－10　各種砥石によるホーン仕上表層部の顕微鏡組織および硬さ分布（その2）

ビトリファイド砥石では約3μの深さまで，素地より表面に向かって硬さがしだいに上昇していることがわかる。これは，前述のように加工硬化によるものと考えられる。この加工硬化層は，上述の白色組織層とほゞ等しいか，あるいは若干大きい深さの層であることがわかる。つぎに，白色組織層の腐食のされやすさを吟味するために，一例として，WA 240のMP砥石による仕上面表層部について腐食速度を測定した。腐食速度の測定は，試料仕上面を 22 °C に保持した10 %硝酸アルコール溶液中に浸し，1分ごとの腐食による試料の重量減少量を測定し，それを試料の密度と表面積とで除して，腐食深さを求め，それを単位時間あたりの腐食速度とした。その測定結果を図4－11に示す。腐食速度は，腐食時間が経過するにつれてしだいに増大し，ある腐食時間でほゞ一定の腐食速度となる。この一定となるときの腐食深さ約3.2μは，加工硬化層の深さ約3μにほゞ等しい。そして，上記の硬化層より深さの小さい白色組織層は，いずれにしても内部組織よりも腐食されにくいことがわかる。以上の結果より，砥石により深さの差異はあるが，ホーン仕上面の表層部には腐食されにくい加工硬化層が生じていることがわかる。この加工層深さについて，組織観察および硬さ分布より求めた値を，一括して表4－2に示す。D砥粒のMP砥石では粒度の細かくなるほど加工層深さは小さくなるが，WA 240，WA 400のMP砥石およびWA 600のビトリファイド砥石では加工層深さはほゞ等しい。また，同じ粒度のWA 砥粒と D 砥粒のMP砥石では加工層の生成にあまり差異はないことがわかる。

仕上面観察

WA 240，D1000のMP砥石およびWA 600のビトリファイド砥石による仕上面を，光学顕微鏡によって倍率×150で，および電子顕微鏡

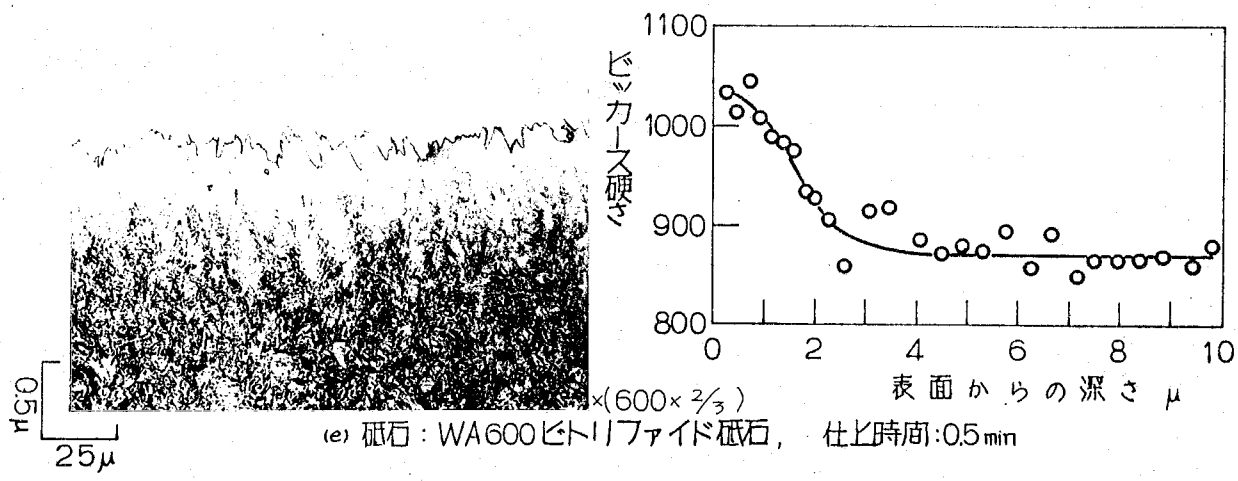


図4－10　各種砥石によるホーン仕上表層部の顕微鏡組織および硬さ分布（その3）

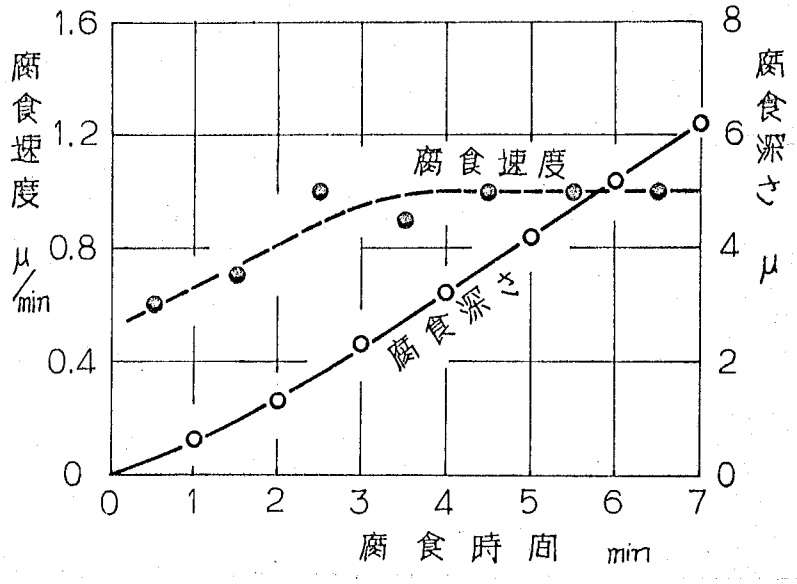


図4－11　ホーン仕上表層部の腐食速度（WA240MP砥石の場合）

によって倍率×8,000で観察した。その結果を図4－12(a), (b), (c) に示す。これより，切削痕の巾はWA 240のMP砥石による場合には約1.7μ，WA 1000 のMP砥石による場合には約0.5μ，WA 600のビトリファイド砥石による場合には約2.0μであることがわかる。これより，切削痕の巾はMP砥石による場合の方が，ビトリファイド砥石による場合より小さいことがわかる。一方，前述のように，仕上面あらさはMP砥石による場合の方が，ビトリファイド砥石による場合より小さい。以上より，MP砥石は，切削にあずかる砥粒切刃を切削面にそろうことにより，深い痕をつくることなく切削を行なうと考えられる。

真円度および砥石損耗

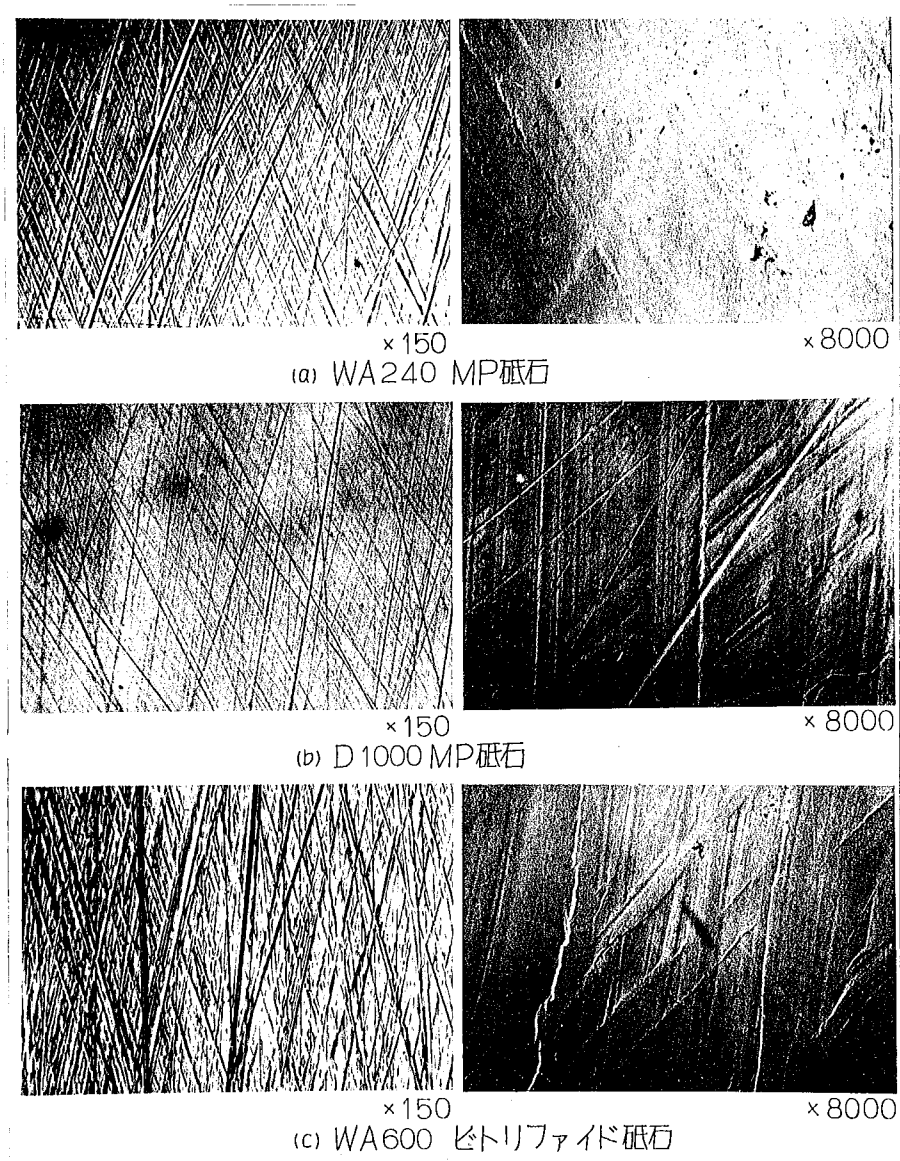
表4－3に，ホーン仕上前後の真円度の測定結果を示す。いずれの砥石でも真円度の値はホーン仕上によって減少し，GC 1000 のMP砥石を除いては，0.4 ～ 1.2 μにおさまることがわかる。

つぎに，MP砥石の損耗を，WA240，D280，D400砥粒の場合について，WA 600のビトリファイド砥石と比較した。表4－4に，砥石の高さ6 mm が4 mm に損耗するまでに仕上げた加工物の数量および加工物1個を仕上げるのに損耗する砥石の厚さ減少量を示す。こゝで，仕上時間はすべて30 秒とした。ビトリファイド砥石よりMP砥石の方が，同じ粒度の砥粒で，仕上げた加工物の数量は約5倍も多く，能率的な連続作業を可能ならしめることがわかる。また，MP砥石において，WA砥粒より D 砥粒を用いた方が，砥石損耗は約 1/10も少なくなることがわかる。そして，D280 のMP砥石より D400 のMP砥石の方が砥石損耗の少ないのは，D280 の方が単位時間当たりの切削量の多いにもかゝわらず，仕上時間を一定にしたためと考えられる。

4．1．4　まとめ

表4－2　各種砥石のホーン仕上による加工層深さ

供試砥石	仕上時間 min	加工層深さ μ 組織観察	硬さ測定
MP砥石 WA240	1	1	3
WA400	2	1	3
D 280	0.5	2.5	3
D 400	0.5	1	2
D1000	10	0.1	0.1
ビトリファイド砥石 WA600	0.5	1	3



×1/2

図4－12　各種砥石による仕上面

表4－3　各種砥石によるホーン仕上前後の真円度

供試砥石		仕上時間 min	真円度 μ 前加工	真円度 μ ホーン仕上
MP砥石	WA 240	1	1.4	0.8
	WA 400	10	3.3	0.4
	WA1000	10	1.8	0.4
	D 280	0.5	3.2	1.2
	D 400	0.5	2.8	0.8
	D 1000	10	2.6	0.7
	GC1000	10	2.8	2.6
ビトリファイト砥石 WA600		0.5	2.1	0.5

表4－4　各種砥石の加工物仕上個数
および砥石損耗

供試砥石	仕上個数, 個	砥石損耗 μ
MP砥石　WA 240	1500	1.3
MP砥石　D 280	14000	0.14
MP砥石　D 400	16000	0.13
ビトリファイド砥石 WA600	300	6.7

以上の実験結果より，MP砥石によるクロムモリブデン鋼22種のホーン仕上についてつぎのことがわかった。

(1) MP砥石を使用すると，ビトリファイド砥石では得られなかった0.1μHmax以上の小さな仕上面あらさが得られた。

(2) 研削仕上面表層部は，研削加工による加工硬化によって内部素地よりも若干硬さが高く，さらに，その表面は，研削熱によって内部素地よりも若干硬さが低くなっている。これをホーン仕上した仕上面の表層部は，ホーン仕上によって加工硬化を呈し，しかも，腐食のしにくい白色組織層となり，その深さはMP砥石とビトリファイド砥石においてほゞ等しく0.1～3μである。

(3) MP砥石は砥石損耗が少なく，WA砥粒の砥石でビトリファイド砥石の約1/5，D砥粒の砥石で約1/50となる。

(4) 真円度はホーン仕上によって向上し，その値は0.4～1.2μに低下する。

4．2 ニッケルクロム鋼の円筒超仕上

超仕上は，クランク軸，[1][2]圧延ロール，[3]などの円筒外面の仕上におもに行われる。このような仕上において，生産性の向上のために短かい時間で仕上げること，かつ加工法の自動化にともない砥石寿命の長いことが要求される。従来，主として，ビトリファイド砥石が使用されているが，損耗が比較的大きく作業能率の点からも好ましくないので，切削性の良い，かつ寿命の長い砥石が望まれている。そこで，MP砥石が上記のような長寿命砥石として，かつ鏡面仕上砥石として適するか否か

---

(1) 浅枝敏夫，生産技術，4－8（昭24），1　4－9（昭24），7
(2) 楠本　亮，機械学会誌，55（1952），127
(3) 中里昭二・松井正己，超仕上作業とその原理，（昭40），66，養賢堂

を吟味する目的で実験を行なった。

4．2．1　実験装置および供試砥石

実験に使用した超仕上装置は，小金井製作所製 SF 115 型超仕上機で，これを池貝製作所製A 20 型旋盤に取り付けて超仕上を行なった。

供試砥石の種類を表4－5に，寸法を図4－13に示す。MP砥石の砥粒としては，WA 240およびD280の2種類を用い，砥粒保持体としては，銅，鉄およびベンガラを用いた。また，MP砥石の性能を比較するために，WA 240のビトリファイド砥石を用いた。

4．2．2　実験方法

実験に使用した加工物試料は図4－14に示す寸法のもので，仕上げるべき面の直径×長さは 40 × 20 mm である。材質はニッケルクロム鋼21種（SNC 21）で，加工後，浸炭および焼入れ，焼戻しを行ない，表面硬度をHv 800にしたものである。超仕上を行なう直径40 mm の面はWA 60 JV砥石を用いて，砥石回転数 1660 rpm，加工物回転数 62 rpm で研削仕上したもので，それにより得られる仕上面あらさは，約 1.8 μ Hmax である。それを，つぎに示す条件で超仕上を行なった。

超仕上条件

加工物回転数	：	80，130，320，560，1400 rpm
砥石圧力	：	5.5 kg/cm²
砥石振巾	：	1 mm
砥石振動数	：	1350 cpm
仕上時間	：	30 sec
加工液	：	マクロンA，0.1～0.15 ℓ/min

加工物試料については，切削量および仕上面あらさを測定し，仕上面を観察した。砥石については，砥石損耗量を測定した。切削量はパッサメータを使用して，加工前後の直径を測定し，それより求められる半径

表4－5　供試砥石の種類

名　称	砥粒保持体	砥　粒	粒度番号
MP砥石	銅	WA	240
	銅	D	280
	鉄	WA	240
	ベンガラ	WA	240
ビトリファイド砥石	——	WA	240

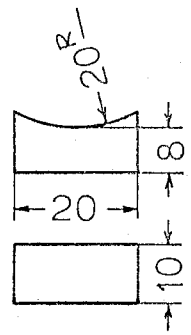


図4－13　砥石の寸法

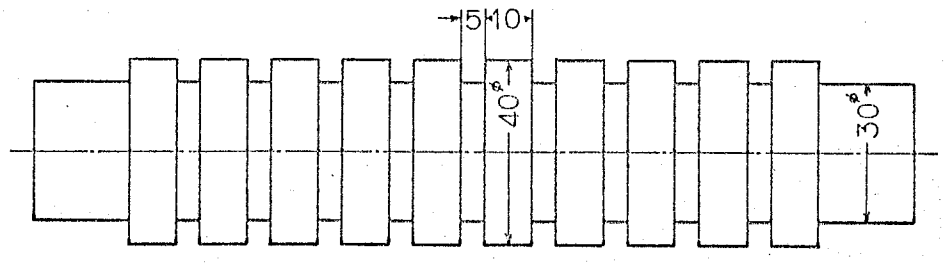


図4－14　加工物の寸法

減少量で求めた。仕上面あらさは小坂研究所製 SD－5 型仕上面検査機を使用して縦倍率×10,000，横倍率×100で断面曲線を記録し，それより得られる最大高さあらさ Hmax で求めた。砥石損耗は加工物に砥石を一定荷重加えたときの，加工前後の刃物台の移動距離より求めた。仕上面はオリンパス製万能金属顕微鏡を使用して倍率×600で観察した。

4．2．3　実験結果

超仕上において，砥石面上の砥粒が工作物表面上に画く切削痕の軌跡は，正弧波曲線である。それ故，砥粒に働く切削力の方向変化の範囲が大きいほど，すなわち正弧波曲線の最大傾斜角が大きいほど，砥粒の破砕は活発となり，切削量は大きくなる。[1] 最大傾斜角は加工物回転数を 80，130，320，560，1400 rpmの5種に変えることによって変化させ，その場合の各種砥石についての切削量を測定した。図4－15に，結果を示す。砥石振巾および仕上時間が一定で，加工物回転数が増加すると，最大傾斜角は減少し，かつ切削長さは増大する。図において，加工物回転数，最大傾斜角および切削長さを，横軸に示す。いずれの砥石においても，最大傾斜角が15°において最も切削量は大きい。また，ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石，D 砥粒を用いたMP砥石およびビトリファイド砥石では，切削量は最大傾斜角の増加とともに，最大傾斜角が15°まで増大し，それ以後わずかに減少する。鉄を砥粒保持体としたMP砥石および銅を砥粒保持体としたMP砥石では，切削量は最大傾斜角によってほとんど変わらない。銅を砥粒保持体としたMP砥石では，WA砥粒よりも D 砥粒を用いた砥石の方が切削量は著しく大きいことがわかる。また，WA砥粒を用いたMP砥石では，砥粒保持体の種類により切削量は異なり，ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石がもっ

---

(1)　浅枝敬夫，東京工業大学学報，A－2（1952），35

とも切削量は大きく，ついで鉄を砥粒保持体としたもので，銅を砥粒保持体としたものがもっとも切削量は小さい。すなわち，砥粒保持体として硬い物質を用いたMP砥石の方が，それによって得られる切削量は大きい。

本実験における前加工は研削仕上であり，それによって得られる仕上面あらさは約1.8μであるので，仕上時間30秒で前加工痕が消去されるためには，ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石，D砥粒を用いたMP砥石およびビトリファイド砥石を使用しなければいけない。前加工痕の消去される上記の砥石によって得られる仕上面あらさを，表4－6に示す。ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石によって得られた仕上面あらさはもっとも小さく，ついでビトリファイド砥石であることがわかる。このときの仕上面を顕微鏡で観察した結果を，図4－16に示す。銅を砥粒保持体としたMP砥石および鉄を砥粒保持体としたMP砥石においても，前加工痕のない面が一部で得られたので，その仕上面を観察した。銅を砥粒保持体としたMP砥石および鉄を砥粒保持体としたMP砥石によって得られる仕上面は，切削痕のほとんどない面であり，ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石によって得られるそれは，平滑で，かつよく切削された面である。D砥粒を用いたMP砥石によって得られる仕上面は，切削痕の深い，かつ非常によく切削された面である。ビトリファイド砥石によって得られる仕上面は，よく切削された面であり，かつところどころに脱落した砥粒によって切削されたようなむしれがみられる。

以上より，ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石によって仕上げた面がもっとも平滑であり，かつ仕上面あらさが小さいことがわかる。また，D砥粒を用いたMP砥石は，切削痕の深いこと，ビトリファイド砥石

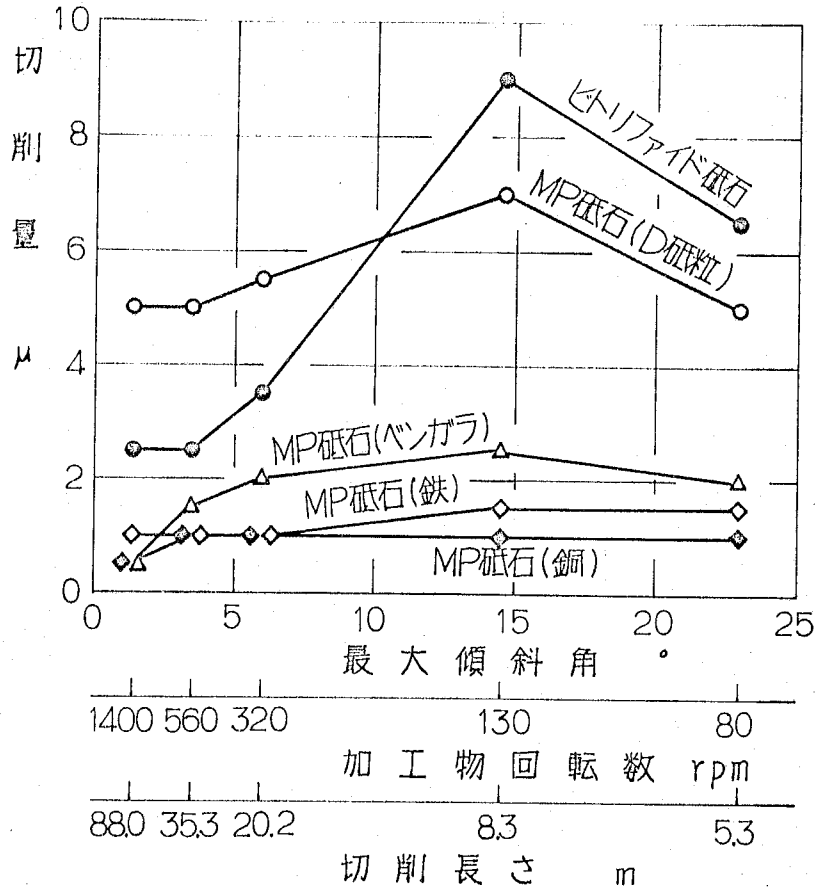


図4－15 各種砥石による切削量

表4－6 各種砥石による仕上面あらさ

供試砥石	仕上面あらさ Hmax, μ
MP砥石 WA240 (保持体:ベンガラ)	0.2
MP砥石 D (保持体:銅)	1.0
ビトリファイド砥石	0.6

仕上条件

加工物回転数	130	rpm
砥石圧力	5.5	kg/cm²
砥石振巾	1	mm
砥石振動数	1350	cpm
仕上時間	30	sec

の場合とほゞ同様の切削量を示すこと，仕上面あらさの大きいことより判断して，砥粒保持体の効果，すなわちそれの弾性的および塑性的変化を行なうことを軽減していると考えられる。

つぎに，MP砥石の損耗をビトリファイド砥石と比較した。表4－7に，加工物15個を仕上げるのに損耗する砥石の厚さ減少量を示す。これより，いずれのMP砥石の場合でも，砥石損耗はないことがわかる。また，ビトリファイドの場合では，砥石損耗は大きく，6.2 mmの厚さ減少を示す。よって，砥石寿命は，MP砥石の方がビトリファイド砥石より著しく優れていることがわかる。

4．2．4　まとめ

以上の実験結果より，MP砥石によるニッケルクロム鋼の円筒外面の超仕上について，つぎのことがわかった。

(1)　ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石を使用すると，ビトリファイド砥石では得られなかった0.2 μHmax の小さな仕上面あらさが得られた。

(2)　いずれのMP砥石の場合でも，ビトリファイド砥石と比較して，砥石損耗は著しく小さい。

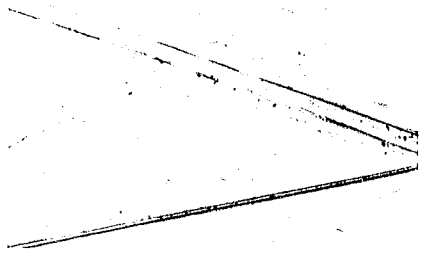
(3)　MP砥石によって得られる切削量は，砥粒保持体の物質によって異なり，ベンガラを砥粒保持体としたMP砥石がもっとも大きく，ついで鉄を砥粒保持体としたMP砥石であり，銅を砥粒保持体としたMP砥石がもっとも小さい。

4．3．軟質金属の平面超仕上

従来，研摩紙，バフ仕上などによって仕上げていた軟質金属を，砥石によって仕上げることが望まれてきた。軟質金属を砥石によって仕上げ

(a) 砥石：MP砥石 ×600
（砥粒保持体：銅）

(d) 砥石：MP砥石 ×600
（砥粒：ダイヤモンド）



(b) 砥石：MP砥石 ×600
（砥粒保持体：鉄）

(e) 砥石：ビトリファイド砥石 ×600

(c) 砥石：MP砥石 ×600
（砥粒保持体：ベンガラ）

仕上条件

加工物回転数	130	rpm
砥石圧力	5.5	kg/cm²
砥石振巾	1	mm
砥石振動数	1350	cpm
仕上時間	30	sec

図4-16 仕上面の顕微鏡写真（×600×1/2）

表4-7 各種砥石の砥石損耗

供試砥石	砥石損耗 mm
MP砥石 WA240（保持体：銅）	0.0
MP砥石 D 280（保持体：銅）	0.0
MP砥石 WA240（保持体：鉄）	0.0
MP砥石 WA240（保持体：ベンガラ）	0.0
ビトリファイド砥石	6.2

仕上個数 15 個

仕上条件

加工物回転数	130	rpm
砥石圧力	5.5	kg/cm²
砥石振巾	1	mm
砥石振動数	1350	cpm
仕上時間	30	sec

ることの困難さは，砥粒の切込み量が大きいこと，低い砥石圧力でも砥粒の切削作用が行われること，砥石面に切りくずが粘着しやすく，それによる引掻き疵を生じ易いことなどにある。銅および黄銅の研削仕上にPVA砥石を使用して良好な面を得た報告[1]がある。また，黄銅の超仕上にシリケートボンド砥石を使用して良好な面を得た報告[2]がある。また，グラニットの超仕上にポリエステルボンド砥石を使用して1μHmax以下の仕上面を得ている。[3] しかし，いずれの場合でも，仕上面あらさが0.1μHmax以下の鏡面が得られた報告はない。

そこで，砥粒保持体を用いたMP砥石が，軟質金属を鏡面に仕上げる砥石として，適するか否かを吟味する目的で実験を行なった。

4．3．1　供試砥石

砥粒保持体は，前述のように砥石切刃面より突出した砥粒が弾性的および塑性的に砥粒保持体に押し込まれ，砥粒切刃が砥石切刃面にそろうことにより深い疵をつくることなく切削を行なうことを目的としている。この目的に適した砥粒保持体は，加工物試料と同等かあるいはそれ以下の押し込み硬さであることが望ましいと考えられる。そこで，本実験では，砥粒保持体として加工物試料と同種の銅粉，アルミニウム粉，錫粉および鉛粉を用いた。実験に使用した砥石の物理的性質および機械的性質を，表4－8に示す。砥粒として，WA4000砥粒を用いた。いずれの砥石でも，砥材料は14～21％，保持体率は27～46％，気孔率は24～35％であり，ほゞ等しい。砥石の硬さは，銅を砥粒保持体としたMP砥石がもっとも高く，ついでアルミニウムを用いた砥石，錫を

---

(1) 井上　賭，機械学会誌，57－421（昭29－2），131
(2) 松井正己，精密機械，28－2（1962），79
(3) 松井正己，精密機械，32－8（1966），545

用いた砥石，鉛を用いた砥石の順となり，砥粒保持体の硬さの順に等しいことがわかる。

4．3．2　実験装置および実験方法

実験に使用した超仕上機は，小金井製作所製 SF 615 型高速鏡面仕上機である。加工物試料として，軟質金属の電気銅，純アルミニウム，純錫，純鉛を用いた。表4－9に，その密度および硬さを示す。その形状は，直径 10 mm，長さ 10 mm の円柱形で，仕上げるべき面はその平面である。前加工は，銅を砥粒保持体としたWA 1500 MP砥石を使用して，砥石圧力 0.5 kg/cm², 砥石回転数 80 rpm，加工物振動数 1500 cpmで超仕上を行なった。それを，つぎに示す条件で超仕上を行なった。

超仕上条件

砥石圧力	：	0.25，0.5，0.75，1，2，3，4 kg/cm²
仕上時間	：	1，3，5，10，20 min
砥石回転数	：	80 rpm
加工物振動数	：	1500 cpm

加工物試料について，切削量および仕上面あらさを測定し，仕上面を顕微鏡によって観察した。切削量はメトラー式直示天秤（1 DIV ＝ 1 mg）を使用して加工前後の重量を測定し，それにより得られる重量減少量より求めた。仕上面あらさについては，TALYSURF を使用して縦倍率×10,000，横倍率×100 で断面曲線を記録し，中島式表面検査機を使用してNF粗度[1]を読み，顕微干渉計を使用して干渉縞を観察した。

4．3．3　実験結果および考察

図4－17(a)，(b)，(c)，(d) に，各種砥石を使用して，銅，アルミニウム，錫，鉛を仕上げた場合の，切削量と砥石圧力との関係を示す。仕上

---

(1)　浅枝敏夫，東京工業大学学報，A－3（1952），21

表4－8　供試砥石

砥　石	砥粒保持体	砥材率 %	保持体率 %	気孔率 %	ロックウエル硬度 HRH	弾性係数 kg/mm²
WA4000MP砥石	銅	21	27	35	29	0.6×10^3
	アルミニウム	17	46	24	23	1.2×10^3
	錫	17	46	27	-39	0.8×10^3
	鉛	14	37	30	-57	0.7×10^3

表4－9　加工物試料

加　工　物	密　度 g/cm³	ビッカース硬さ（荷重200g）
電気銅	8.9	91
純アルミニウム	2.7	43
純錫	7.3	10
純鉛	11.2	6

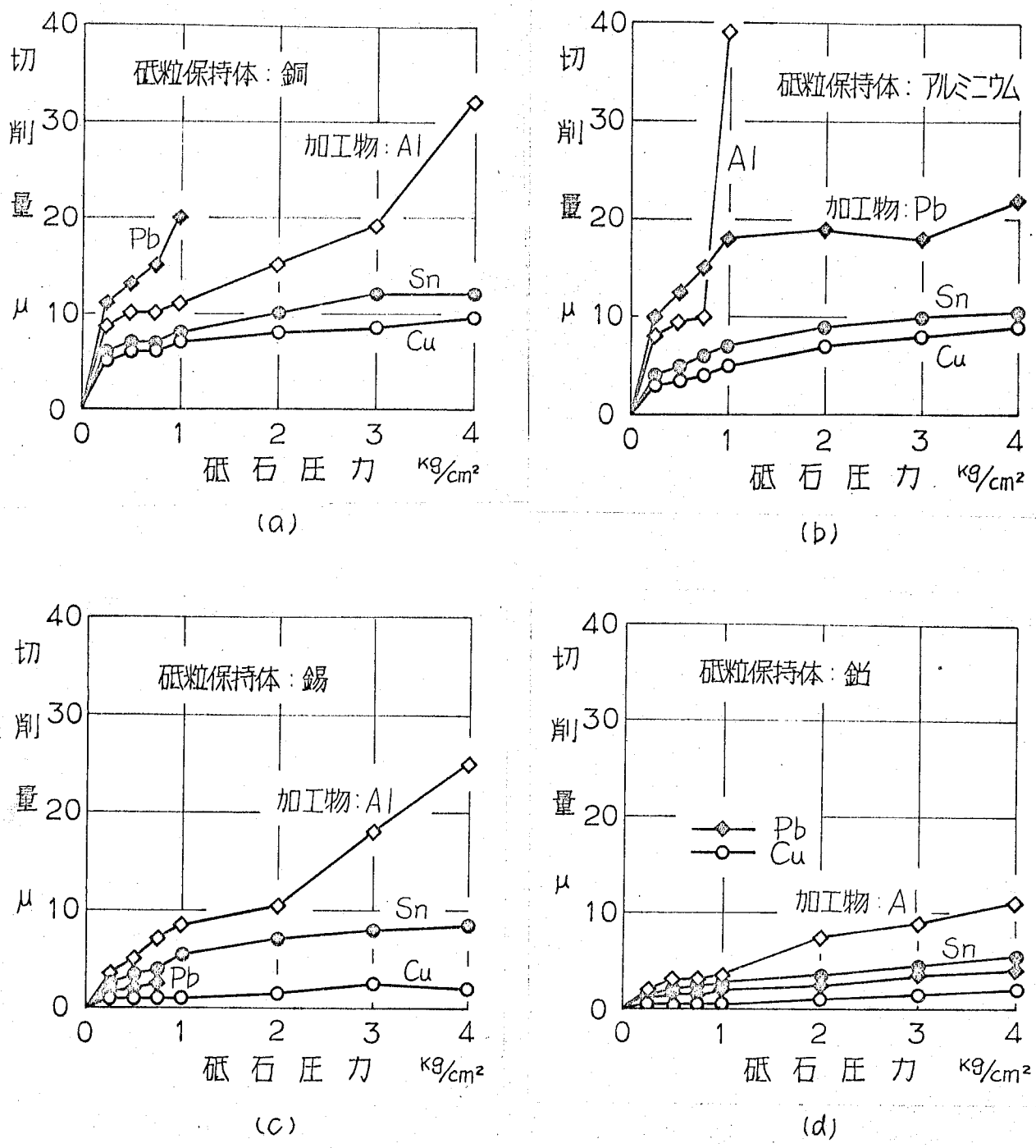


図4－17　各種砥石による切削量と砥石圧力との関係

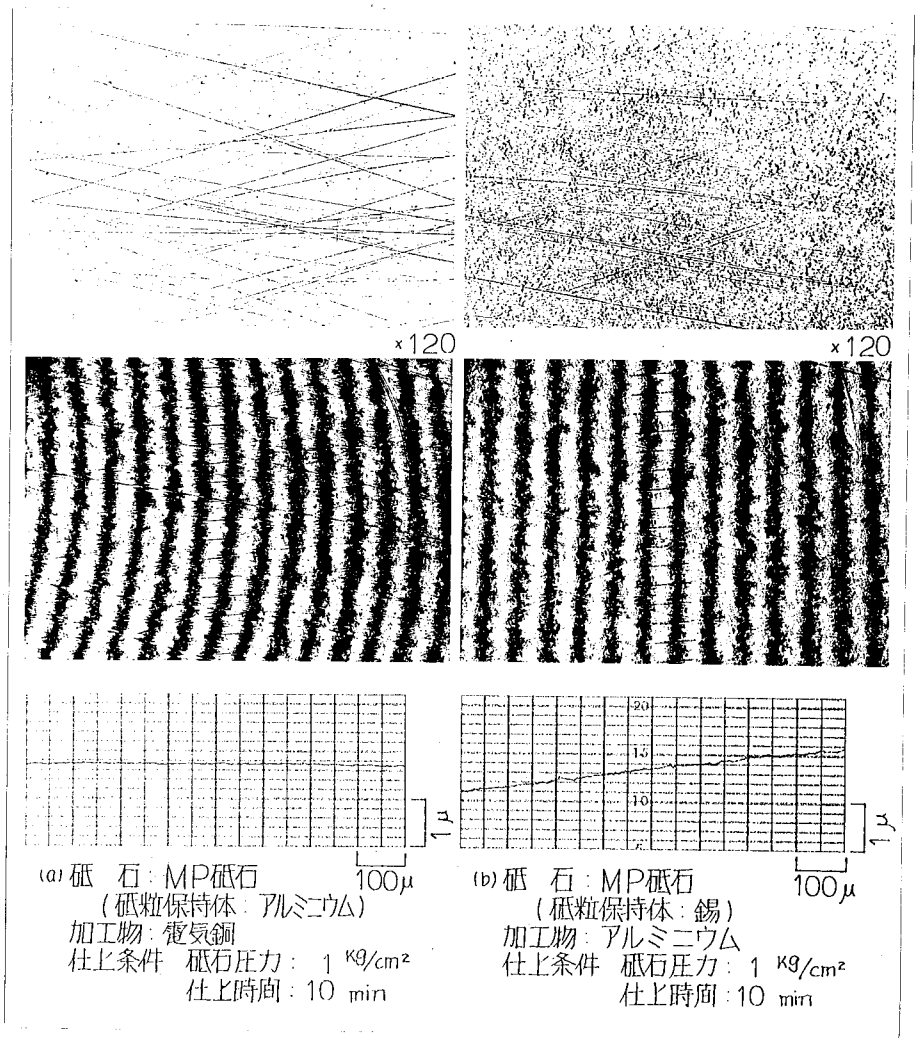
時間はいずれの場合も5分である。同図(a)は，銅を砥粒保持体としたMP砥石についての結果である。切削量はいずれの砥石圧力でも，鉛加工物がもっとも大きく，ついでアルミニウム，錫，銅の順に小さくなる。そして，砥石圧力1 kg/cm² 以上では，鉛加工物の切削量は急激に増大し，かつその仕上面は，深い引掻き疵を有し，銅を付着した面である。また，砥石圧力4 kg/cm² では，アルミニウム加工物の切削量は増大し，かつその仕上面は，光沢のない，銅を付着した梨地面である。これより，鉛およびアルミニウムを仕上げる場合，上記仕上条件で，砥粒保持体の銅と加工物とが粘着結合することがわかる。このときの切削量は著しく大きく，かつ仕上面は深い引掻き疵を生ずる面，あるいは梨地面となる。同図(b)は，アルミニウムを砥粒保持体としたMP砥石についての結果である。切削量は，砥石圧力 0.75 kg/cm² までは，銅を砥粒保持体としたMP砥石の場合と同様に，いずれの砥石圧力でも，鉛加工物がもっとも大きく，ついでアルミニウム，錫，銅の順に小さくなる。しかし，砥石圧力1 kg/cm²以上では，アルミニウムの切削量は急激に増大し，かつ仕上面および砥石面に非常に深い引掻き疵を生ずる。これは，加工物のアルミニウムと砥粒保持体のアルミニウムとが粘着結合するために生じたものと考えられる。同図(c)は，錫を砥粒保持体としたMP砥石についての結果である。切削量は，いずれの砥石圧力でも，アルミニウム加工物がもっとも大きく，ついで錫，鉛，銅の順に小さくなる。鉛は，砥石圧力が 0.75 kg/cm² までは，切削されずにこすられたような，仕上面に錫を付着した鏡面になる。砥石圧力1 kg/cm² 以上では，仕上面に深い引掻き疵を有する。同図(d)は，鉛を砥粒保持体としたMP砥石についての結果である。切削量は，錫を砥粒保持体としたMP砥石の場合と同様に，いずれの砥石圧力でも，アルミニウム加工物がもっとも大き

く，ついで錫，鉛，銅の順に小さくなる。鉛加工物は，錫を砥粒保持体としたMP砥石を使用して仕上げた場合と同様に，切削されずにこすられたような，ところどころに深い引掻き痕を有する仕上面になる。

また，いずれの加工物試料の場合でも，加工物金属と砥粒保持金属とが粘着結合しない砥石圧力範囲では，砥粒保持体金属の硬さが大きいほど，MP砥石による切削量は大きい。

上述の仕上面を，顕微鏡および顕微干渉計によって観察し，かつ仕上面あらさを測定した。図4－18(a)，(b)，(c)，(d)，に結果を示す。同図(a)は銅加工物の仕上面，同図(b)はアルミニウム加工物の仕上面，同図(c)は錫加工物の仕上面，同図(d)は鉛加工物の仕上面である。それぞれの上段に，仕上面の顕微鏡写真を示す。銅，アルミニウム，錫の仕上面は微細な切削痕からなる鏡面光沢を有する平滑面である。鉛の仕上面は微細な切削痕からなる平滑面であるが，ところどころに粘着結合した砥粒保持体のアルミニウムがみられる。中段および下段に，仕上面の顕微干渉縞および仕上面あらさ曲線を示す。銅およびアルミニウムの仕上面あらさは0.1 μHmax以下，錫の仕上面あらさは約0.1 μHmax，鉛の仕上面あらさは約0.2 μHmaxである。

各種加工物試料の仕上面のNF粗度を，表4－10に示す。いずれの砥粒保持体の場合でも，NF粗度は銅加工物がもっとも小さく，ついでアルミニウム，錫，鉛の順である。また，銅加工物ではアルミニウム，錫，鉛を砥粒保持体とした砥石，アルミニウム加工物では錫，鉛を砥粒保持体とした砥石，錫加工物では鉛を砥粒保持体とした砥石，鉛加工物では鉛を砥粒保持体としたMP砥石による面が，NF粗度はもっとも小さい。これより，NF粗度はいずれの加工物の場合でも，硬さの小さい物質を砥粒保持体としたMP砥石による方が，小さいことがわかる。

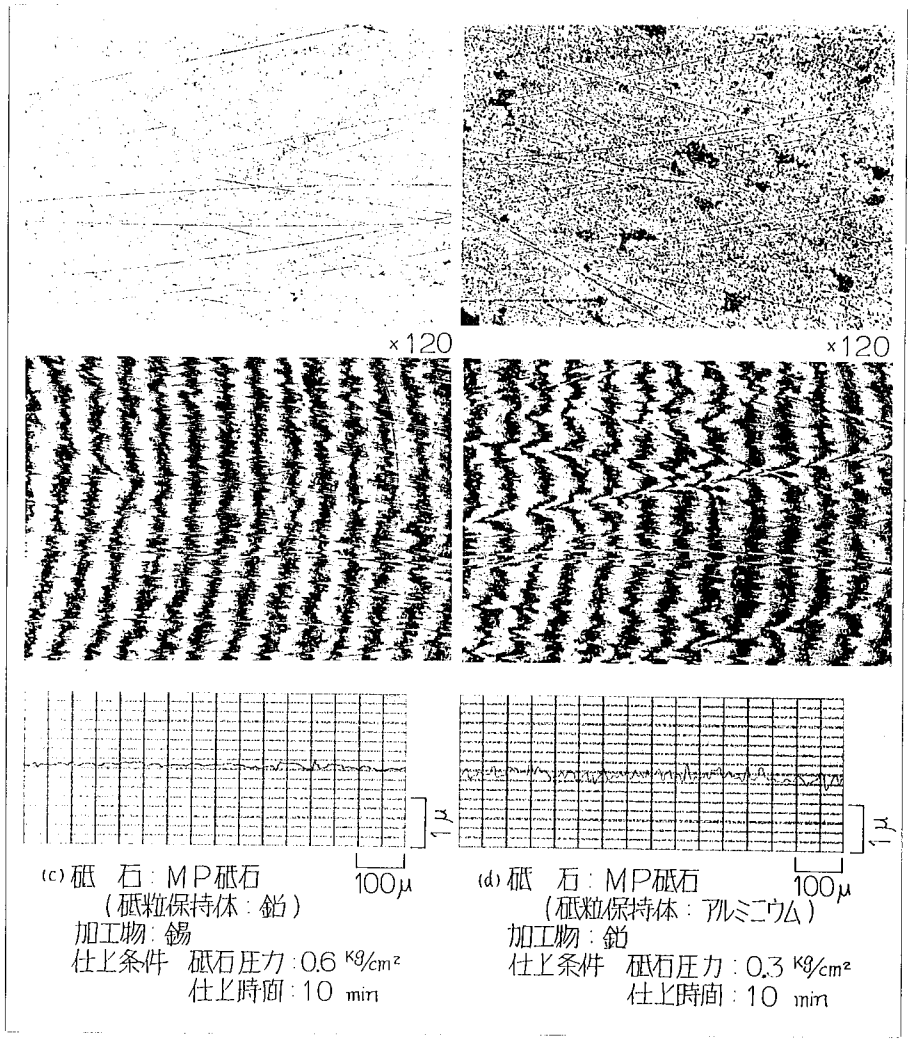


(a) 砥　石：MP砥石
（砥粒保持体：アルミニウム）
加工物：電気銅
仕上条件　砥石圧力：1 kg/cm²
仕上時間：10 min

(b) 砥　石：MP砥石
（砥粒保持体：錫）
加工物：アルミニウム
仕上条件　砥石圧力：1 kg/cm²
仕上時間：10 min

×1/2

図4－18　仕上面の顕微鏡写真，干渉縞
および仕上面あらさ（その1）



(c) 砥　石：MP砥石
（砥粒保持体：鉛）
加工物：錫
仕上条件　砥石圧力：0.6 kg/cm²
仕上時間：10 min

(d) 砥　石：MP砥石
（砥粒保持体：アルミニウム）
加工物：鉛
仕上条件　砥石圧力：0.3 kg/cm²
仕上時間：10 min

×1/2

図4－18　仕上面の顕微鏡写真，干渉縞
および仕上面あらさ（その2）

以上の実験結果より，砥粒保持体金属の硬さが小さいほど，切削量は小さく，仕上面は良好であることがわかる。しかし，前述のように鉛加工物を，錫および鉛を砥粒保持体としたMP砥石で仕上げると，切削されずにこすられたような面になるので，鉛加工物を上記砥石で仕上げることは望ましくない。以上より，短時間に，かつ平滑に軟質金属を仕上げるためには，加工物試料として，銅加工物の場合にはアルミニウムを砥粒保持体としたMP砥石，アルミニウム加工物の場合には錫を砥粒保持体としたMP砥石，錫加工物の場合には鉛を砥粒保持体としたMP砥石，鉛加工物の場合にはアルミニウムを砥粒保持体としたMP砥石が最適であると考えられる。図4－18(a)，(b)，(c)，(d) に示した仕上面は，上記砥石による仕上面である。

なお，軟質金属をMP砥石で超仕上する場合，砥石圧力および仕上時間が適していないと，仕上面に，前述のような砥粒保持体金属の付着物，ピッチあるいは焼けが観察される。図4－19に，ピッチが生じた仕上面の一例を示す。ピッチは加工物試料と同等あるいは硬い金属を砥粒保持体としたMP砥石を使用して，砥石圧力が大きくかつ仕上時間が長い場合に観察される。これは砥石に目詰まりが生じることによるためと考えられる。図4－20に，焼けが生じた仕上面の一例を示す。焼けは加工物試料より著しく軟かい金属を砥粒保持体としたMP砥石を使用して，砥石圧力が大きくかつ仕上時間が長い場合に観察される。これは砥石に目詰まりが生じることによるものと考えられる。

4．3．4　まとめ

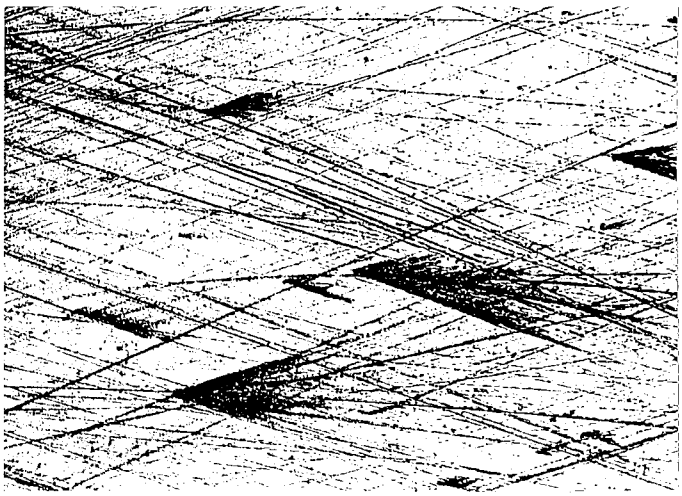
以上の実験結果より，MP砥石による軟質金属の超仕上についてつぎのことがわかった。

(1)　MP砥石を使用すると，銅加工物およびアルミニウム加工物は

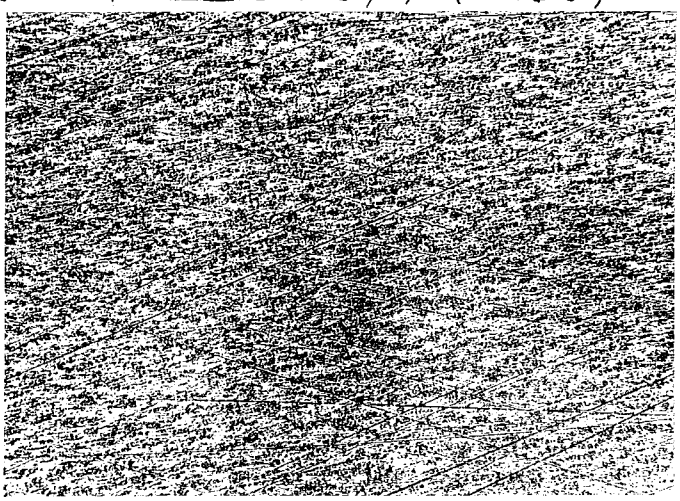
表4－10　仕上面のNF粗度

砥粒保持体＼加工物	銅	アルミニウム	錫	鉛
銅	18	20	20	43
アルミニウム	17	20	20	40
錫	17	19	21	38
鉛	17	19	19	34

仕上条件
砥石圧力：0.2 kg/cm² (加工物：錫・鉛)
1.0 〃 (〃 銅・アルミニウム)
仕上時間：10 min



砥石：MP砥石（砥粒保持体：銅）
加工物：電気銅
図4－19　仕上面のピッチ（×180）



砥石：MP砥石（砥粒保持体：鉛）
加工物：電気銅
図4－20　仕上面の焼け（×180）

0.1μHmax 以下，錫加工物は約0.1μHmax，鉛加工物は約0.2μHmax の小さな仕上面が得られた。

(2) 切削量は硬い金属を砥粒保持体とした砥石による方が大きく，仕上面は軟かい金属を砥粒保持体としたMP砥石による方が良好である。

(3) 銅加工物を短時間に，かつ平滑な鏡面を得るためには，アルミニウムを砥粒保持体としたMP砥石が最適である。アルミニウム加工物のためには，錫を砥粒保持体としたMP砥石が，錫加工物のためには，鉛を砥粒保持体としたMP砥石が，鉛加工物のためには，アルミニウムを砥粒保持体としたMP砥石が最適である。

4．4 うねりを有する面の超仕上

溶融紡糸用ノズルの穴形状は図4－21に示すようにテーパ型と直筒形の2種類あり，[1] いずれの形状においても吐出部の穴径および長さの精度，および紡口面の穴周辺のだれのないことが紡糸の点から重要であると云われる。ステンレス鋼板製紡糸ノズルの紡口面のように，必ずしも平坦な面でなく，若干のうねりを有する面を，その面にならって全面平滑に仕上げることが必要である。このような面を砥石で仕上げるためには，砥石切刃面を加工物表面の面形状にならって変形させながら仕上げることが必要である。

そこで，MPR砥石を使用してうねりを有する面を超仕上し，面形状にならって全面平滑に仕上げることができるかどうかについて実験的に吟味するとともに，この砥石の仕上性能を切削量および仕上面あらさの点から実験的に吟味した。

4．4．1 実験装置および供試砥石

---

(1) 江見，繊維学会誌，21－5（昭40－5），S128

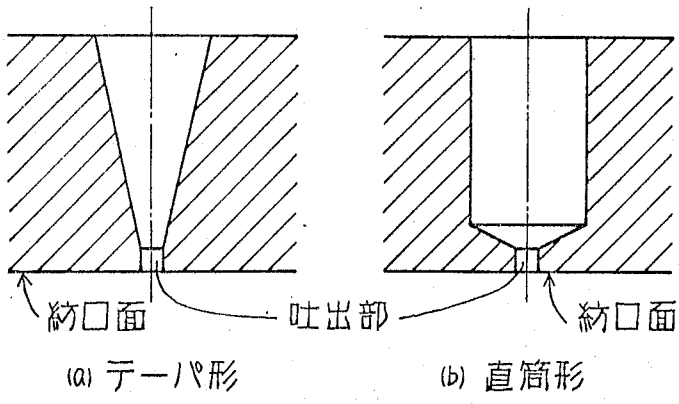


図4-21　溶融紡糸用ノズルの穴形状

実験に使用した超仕上機は，小金井製作所製SF 615 型高速鏡面仕上機で，それに使用する砥石およびその保持板の形状を，図4－22に示す。砥石の配合割合を変えることにより，表4－11に示すように弾性係数の異なる2種類のMPR砥石を試作した。なお，この砥石の性能を比較する目的で使用したMP砥石の弾性係数を，同表の最下段に示す。砥石の砥粒はいずれもWA 600である。上述の弾性係数は，砥石と同一配合割合の寸法30$^{\phi}$×6 mm の砥石試験片について，新興通信工業製TOM10000 SA型万能引張圧縮試験機を使用して，圧縮試験により求めた。砥石試験片として，乾燥状態のものだけでなく，使用時の状態を考慮して超仕上時に加工液として用いる灯油中に約50 時間浸漬し灯油を湿潤させたものの両者を用いた。図4－23に，砥石の圧縮応力－ひずみ線図を示す。これより，いずれの砥石試験片でも圧縮応力が50 kg/cm^{2}までは，ほゞ直線的にひずみは増大し，応力とひずみの間には比例関係が成立していることがわかる。そして，弾性係数は，砥石の種類によって異なり，MPR砥石NO.1がもっとも小さく，MP砥石がもっとも大きい。また，いずれの砥石の場合でも，弾性係数は乾燥状態のものより，灯油中に浸漬したものの方がわずかに小さい。すなわち，MPR砥石およびMP砥石は，灯油の湿潤によって弾性係数が減少し，変形しやすくなる。

4．4．2　実験方法

実験に使用した加工物試料の材質は，JIS ステンレス鋼棒29種に相当するものである。加工物試料としては，実験目的により，つぎの3種のものを使用した。

① 仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができるかどうかを吟味するための加工物試料は，直径12 mm 丸棒の端面に，うね

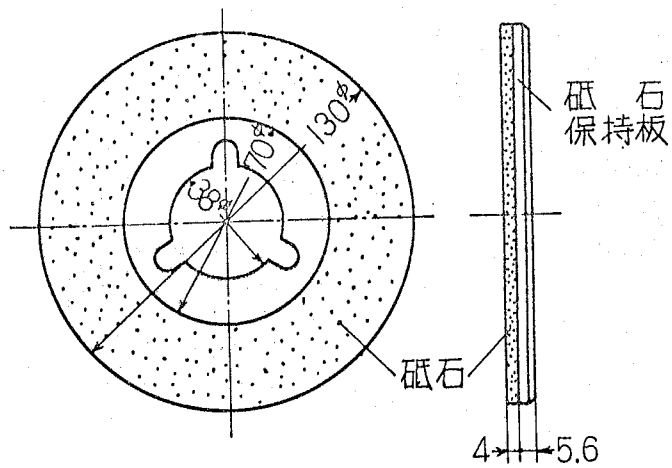


図4－22　砥石およびその保持板の形状

表4－11　供試砥石の種類および
その弾性係数

供試砥石	弾性係数 kg/cm²	
	乾燥状態	湿潤状態
MPR砥石 NO.1	8200	7600
MPR砥石 NO.2	14000	12000
MP砥石	53000	16000

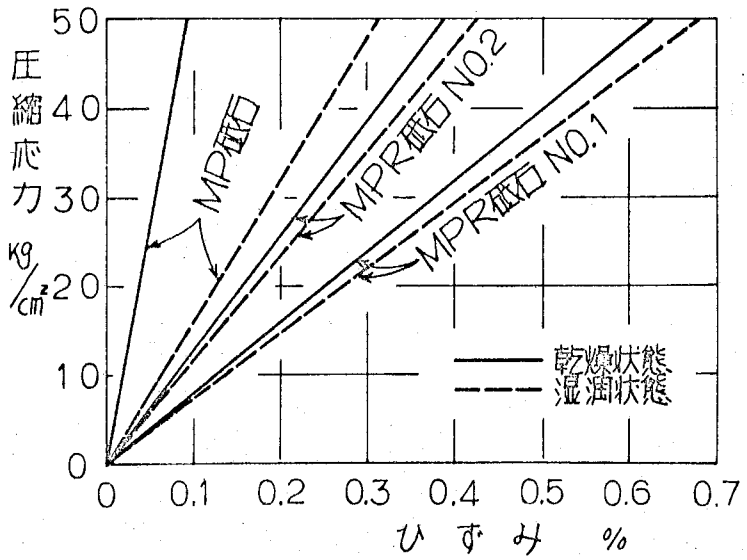


図4－23　供試砥石の圧縮応力－ひずみ線図

リの1つの山に相当する凸面を有するものである。凸面はWA 600砥粒を使用して湿式ラップ仕上により成形し，山の高さが異なる数種の凸面を有する試料を作成した。

② 切削量および仕上面あらさが仕上条件によってどのように異なるかを吟味するための加工物試料は，直径10 mm 丸棒の端面を，WA400 MP砥石を使用して，平面に超仕上したものである。

③ 仕上げることによる穴周辺のだれを観察するための加工物試料は，直径12 mm 丸棒の端面の中心に直径0.5 mm の穴をあけ，その面を②の試料と同じくWA 400MP砥石を使用して，平面に超仕上したものである。

上述のようにして作成した加工物試料の端面を，MPR砥石およびMP砥石を使用して，つぎに示す条件で超仕上を行なった。

超仕上条件

砥石圧力	: 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 3, 4 kg/cm^2
仕上時間	: 2.5, 5, 7.5, 10 min
砥石回転数	: 80 rpm
加工物振動数	: 1500 cpm
振巾	: 2.5 mm
加工液	: 灯油1号

①の直径12 mm の加工物試料については，仕上前後の凸面形状を半径方向に小坂式仕上面検査機を使用して縦倍率×1000，横倍率×10で記録し，仕上げにより凸面の形状に変化があるがどうかを吟味した。すなわち，端面の周辺0.5 mm を除く11 mm 間の凸面の形状を，仕上前後について，ラップ仕上の方向に記録した。なお，超仕上はラップ仕上の方向と超仕上時の加工物振動の方向が一致するようにして行なった。図4－24(a),(b) に，仕上前後について凸面形状を記録した結果の一例

を示す。同図(a)が仕上前，同図(b)が仕上後の凸面の形状である。両者の凸面形状が一致するかどうかを重ね合わせることによって調らべ，凸面の形状が一致した，すなわち面形状にならって全面平滑に仕上げることができた凸面の数値的表示として，凸面の中央の高さを用いた。以後，この高さを「うねり高さ」と称する。

切削量は，②の試料の仕上前後の重量を，メトラ直示天秤を使用して測定し，仕上げによる重量減少量で表わした。仕上面あらさは小坂式仕上面検査機を使用して，縦倍率×10,000，横倍率×50で記録した．なお，仕上前，すなわち前加工面のあらさ曲線を，図4−25(a)，(b)に示す。同図(a)は凸面平滑仕上用加工物試料のあらさ曲線で，同図(b)は切削量および仕上面あらさ測定用加工物試料のそれである。仕上による穴周辺のだれは，オリンパス顕微干渉計（波長0.6μ，スケール0.1 mm）を使用して観察した．仕上前，すなわち前加工による穴周辺のだれを観察した結果を，図4−26に示す。

4．4．3　実験結果

凸面の平滑仕上においては，砥石面の状態が仕上時の砥石と加工物との接触状態に影響をおよぼすので，それにより面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さは異なると考えられる．そこで，ドレッシング方法およびドレッシング条件を変えて凹凸の異なる砥石切刃面をMPR砥石No.1について作成し，それにより面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さがどのように異なるかを吟味した。ドレッシング方法としては，メッシュドレッサを使用して行なう方法と，外径40 mm，内径20 mmのリング型WA 600MP砥石を回転させながら行なう方法とを採用した。以後，前者をメッシュドレッサ法，後者を回転ドレッサ法という。メッシュドレッサ法では，砥石回転数を600 rpm,

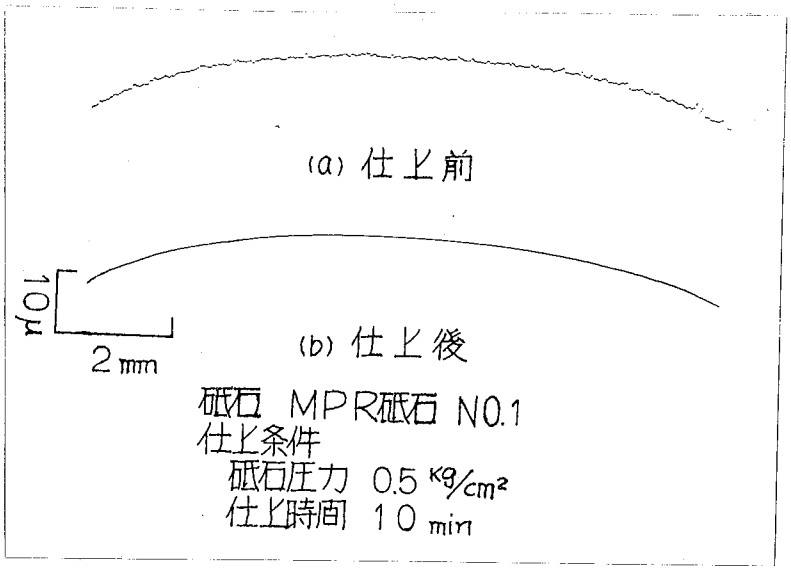


図4－24 仕上前後のうねり面形状

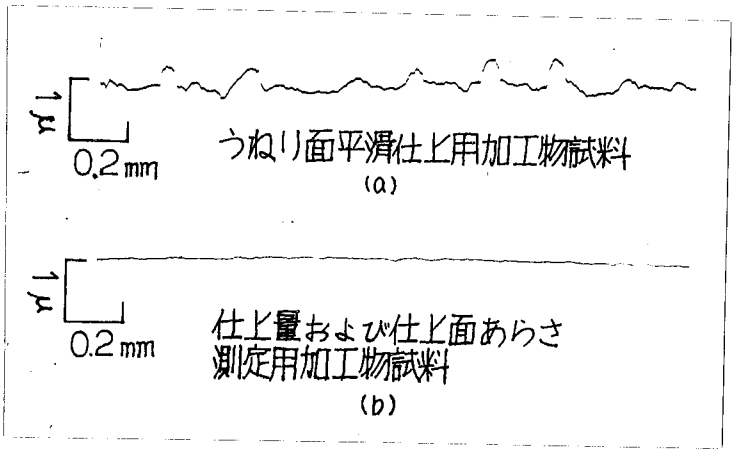


図4－25 加工物試料の前加工面
あらさ曲線

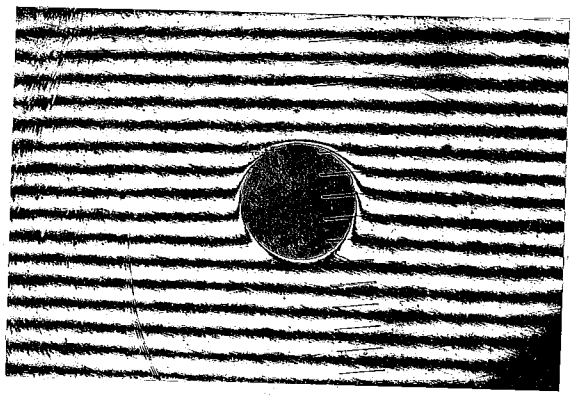


図4－26 加工物試料の前加工面干渉縞

切込みを0.05 mmに一定として，送り速度を3，18，36 cm/minの3種に変えた。回転ドレッサ法では，砥石を80 rpmで回転させ，回転ドレッサを0.2 kgで押し付けるとともに約30 rpmで回転させながら，ドレッシングを行なった。このようにして得られた砥石面形状を，半径方向について小坂式仕上面検査機を使用して，縦倍率×1,000，横倍率×50で記録した。図4-27に，結果を示す。これより，回転ドレッサ法によりドレッシングした砥石面は，メッシュドレッサ法によるそれと比較して，凹凸の小さい比較的なめらかな面であることがわかる。また，メッシュドレッサ法による砥石面の凹凸は，メッシュドレッサの送り速度が大きいほど大きい。上述のようなドレッシング方法およびドレッシング条件でドレッシングした砥石により，面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さを，表4-12に示す。なお，仕上後の砥石面形状を半径方向について，上述と同じく記録した結果を，図4-27の右側に示す。同表より，メッシュドレッサ法によりドレッシングした場合，面形状にならって仕上げることのできる最大うねり高さは，送り速度3 cm/minでは8.2 μで，送り速度の大きい18 cm/minおよび36 cm/minでは増大して11.0 μとなる。これに対して，回転ドレッサ法によりドレッシングした場合5.6 μで，メッシュドレッサ法の場合と比較して著しく小さい。これより，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができる最大うねり高さは，同一の砥石を使用しても，ドレッシング方法およびドレッシング条件によって異なることがわかる。すなわち，この実験範囲では，面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さは，ドレッシングによって生ずる砥石面の凹凸が大きいほど大きい。また，図4-27より，砥石面凹凸の大きさは仕上前後においてほゞ等しく，仕上げによって変化しないことがわかる。これより，MPR砥石で

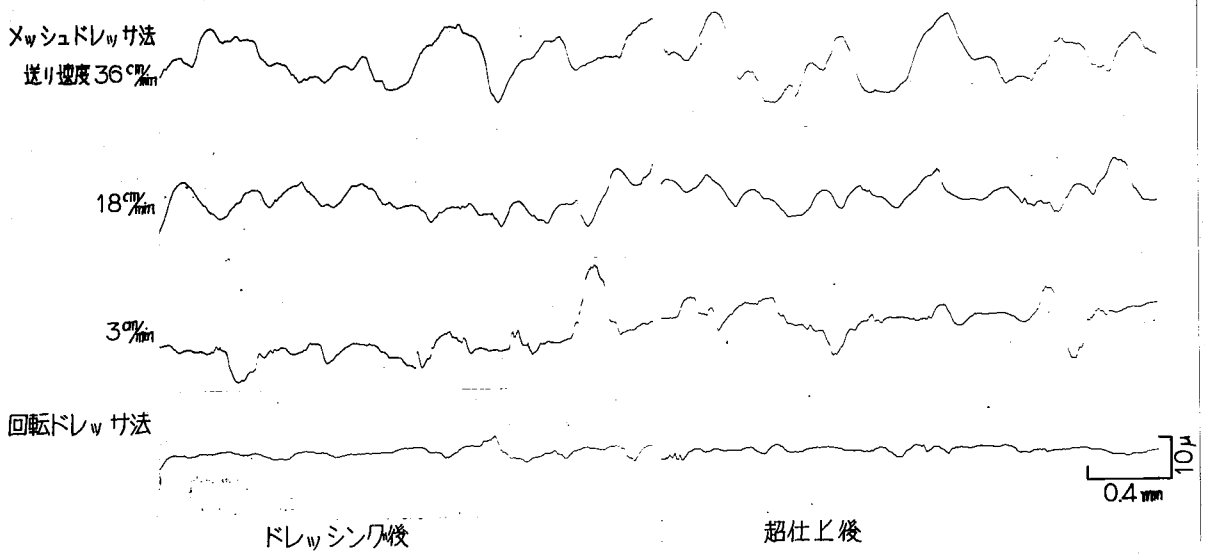


図4－27 ドレッシング後および超仕上後の砥石面形状

表4－12 ドレッシング方法および
ドレッシング条件を変えた場
合の仕上げ得る最大うねり高さ

ドレッシング方法	送り速度 cm/min	仕上げ得る最大うねり高さ μ
メッシュドレッサ法	36	11.0
	18	11.0
	3	8.2
回転ドレッサ法	——	5.6

砥 石： MPR砥石 NO.1
仕上条件
砥石圧力 0.5 kg/cm²
仕上時間 10 min

は，仕上時のそれと加工物試料の接触部は，弾性接触に近いものであると考えられる。

つぎに，砥石のドレッシング方法およびドレッシング条件により，すなわち，砥石面凹凸の差異により切削量がどのように異なるかを，MPR砥石No.2 を使用して，砥石圧力を10 種に変え，その他の条件は一定として超仕上を行ない，測定吟味した。図4−28に，結果を示す。切削量はいずれの砥石圧力の場合でも，凹凸のもっとも小さい回転ドレッサ法によりドレッシングを行なった砥石の場合にもっとも小さい。メッシュドレッサ法による場合には，ドレッシングの送り速度によって，切削量に著しい差異を生ずる。砥石圧力が1 kg/cm² までは，ドレッシングの送り速度が大きいほど，すなわちそれにより生ずる砥石面の凹凸が大きいほど，切削量は大きい。しかし，1 kg/cm² より大きい砥石圧力範囲では，送り速度18 cm/min の場合が，切削量はもっとも大きい。送り速度36 cm/min の場合，切削量は砥石圧力1 kg/cm² で極大となり，それ以後，砥石圧力の増加とともに減少して砥石圧力1.5 kg/cm² で極小となり，ついで再び増大する。このようにMPR砥石を使用する場合，砥石切刃面の状態および砥石圧力により切削量が異なるのは，弾性を有する砥粒保持体により砥粒が結合されていることによると考えられる。すなわち，加工物を砥石に単に押し付けた状態では，砥粒は図4−29 (a) に示すように，加工物に対して δ_1 の深さまで喰い込むが，超仕上時では，砥粒はそれに作用する切削分力により起因する回転モーメントにより，同図 (b) に示す方向に回転を生じ，砥粒の切り込みは減少して δ_2 となる。すなわち，$\delta_1 > \delta_2$ となり切削量は減少する。上述の砥粒の回転は，砥粒保持体部での変形のほかに，砥石面凹凸の大きい場合には，凸状保持体部の曲げ変形が付加され，砥石面凹凸が大きいほど大き

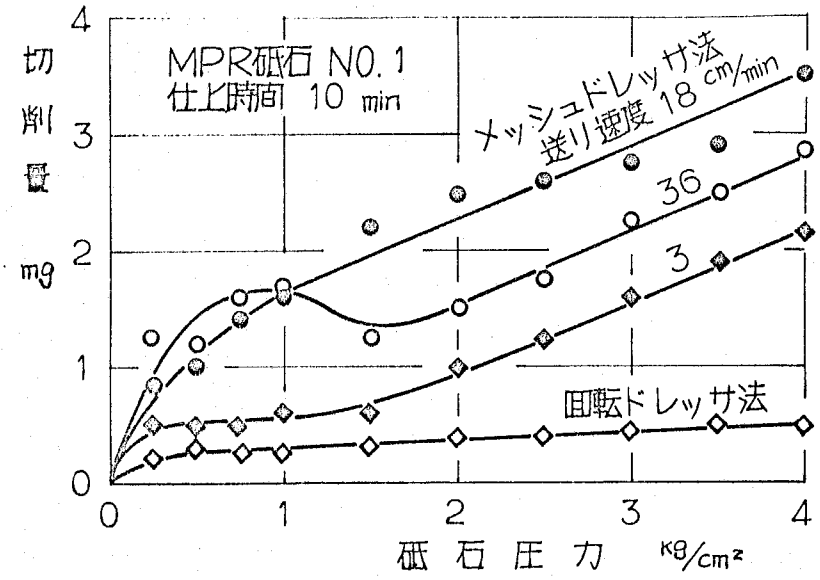


図4-28 ドレッシング方法およびドレッシング条件を変えた場合の切削量と砥石圧力との関係

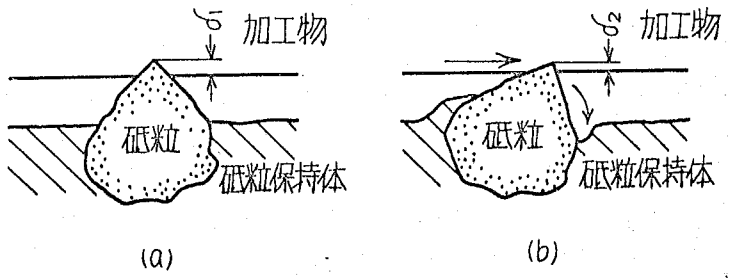


図4-29 弾性砥石の砥粒の挙動

くなる。そこで，砥石面凹凸の大きい，すなわち送り速度 36 cm/min で，砥石圧力が 1 kg/cm² より大きい場合には，砥粒の回転が著しく大きくなるために，切削量は減少するものと考えられる。なお，弾性係数の大きいMPR砥石No.2 の場合で，上記ドレッシング条件および砥石圧力の範囲では，上述の切削量の極大値を示さなかった。これはこの砥石では砥石圧力の増加によって砥粒の回転が著しく増大することがないことによると考えられる。

以上の実験結果より，以後の実験におけるドレッシングは，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることのできる最大うねり高さが大きく，かつ切削量が砥石圧力の増加とともに増大する，メッシュドレッサ法により送り速度 18 cm/min で行なった。

つぎに，上述の条件でドレッシングした弾性係数の異なる2種の砥石について，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができる最大うねり高さが，砥石の弾性係によってどのように異なるかを，砥石圧力および仕上時間を種々に変えて吟味した．表4－13に，結果を示す．これより，弾性係数の小さいMPR砥石No.1 の方が，弾性係数の大きいMPR砥石No.2 よりも仕上前の面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さは大きいことがわかる．かつ，MPR砥石No.1 およびNo.2 のいずれの場合でも，本実験の砥石圧力範囲では，仕上前の面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さは，砥石圧力が大きいほど大きい。しかし，仕上時間による差異はあまりなかった。なお，MP砥石を使用した場合には，小さなうねりを有する面をも，それにならって仕上げることはできなかった．

切削量が，砥石の弾性係数によりどのように異なるかを，砥石圧力および仕上時間を種々に変えて，測定吟味した。図4－30および図4－

表4-13 MPR砥石を用いた時に仕上げ得る最大うねり高さ

砥石圧力 kg/cm²	仕上げ得る最大うねり高さ μ	
	NO.1 砥石	NO.2 砥石
0.5	11.0	9.2
1	11.6	9.5
2	12.3	10.1
4	13.8	11.9

仕上時間 10 min

仕上時間 min	仕上げ得る最大うねり高さ μ	
	NO.1 砥石	NO.2 砥石
5	11.4	9.2
10	11.6	9.5
20	11.8	9.6
30	11.8	9.8

砥石圧力 1 kg/cm²

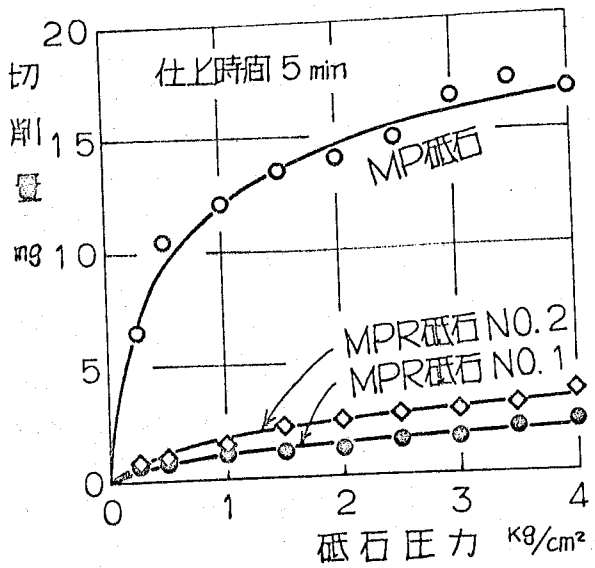


図4-30 切削量と砥石圧力との関係

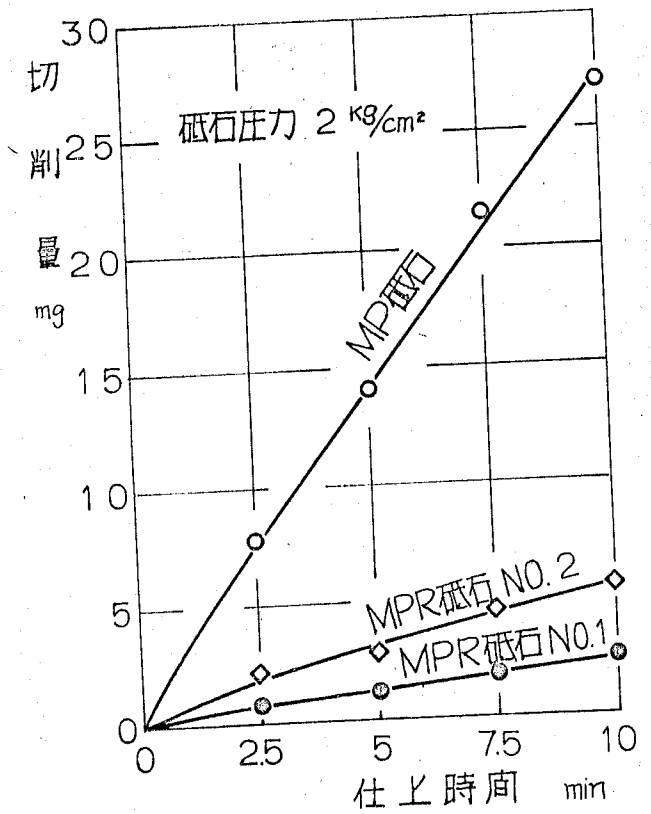


図4-31 切削量と仕上時間との関係

31に，結果を示す．いずれの砥石圧力および仕上時間の場合でも，弾性係数の小さいMPR砥石による切削量は，弾性係数の大きいMP砥石によるそれと比較して著しく小さい。また，MPR砥石についても，弾性係数の大きいMPR砥石No.2の方が，弾性係数の小さいMPR砥石No.1より，切削量は大きい。これより，弾性係数の大きい砥石の方が，切削量は大きいことがわかる。これは，上述した切削分力に起因する砥粒の回転が，弾性係数の大きい砥石の場合に小さいために，砥粒の切り込みが弾性係数の小さい砥石より大きいことによると考えられる。

つぎに，仕上面あらさ曲線を記録した結果の一例を，砥石圧力1 kg/cm²，仕上時間10 minの場合について，図4-32に示す。MPR砥石No.1およびNo.2によって得られる仕上面あらさは，いずれの場合でも0.1 μHmax以下で極めて平滑な仕上面であるが，MP砥石によって得られる仕上面あらさは約0.1 μHmaxで，MPR砥石によって得られる仕上面あらさよりも大きい。砥石圧力および仕上時間が異なっても，いずれの砥石についても，仕上面あらさは上記とほゞ同様の結果が得られた。

端面の中央に穴のある試料を，MPR砥石No.1およびNo.2により仕上げを行ない，穴周辺部のだれを観察した結果を，図4-33に示す。穴周辺部には，いずれの場合もだれを生じ，そのだれの大きさは，砥石の種類および砥石圧力によりほとんど差異がない。なお，穴周辺部のだれは全周一様でなく，場所によって異なり，砥石進入側の端部でのだれはもっとも大きく，その大きさは0.6～0.9 μであり，端から約0.2 mmまでだれを生じている。仕上前のだれの大きさおよび巾は，それぞれ約0.6 μおよび約0.05 mmであるから，MPR砥石No.1およびNo.2を使用して仕上げることにより，だれの巾は増大する。しかし，砥石送

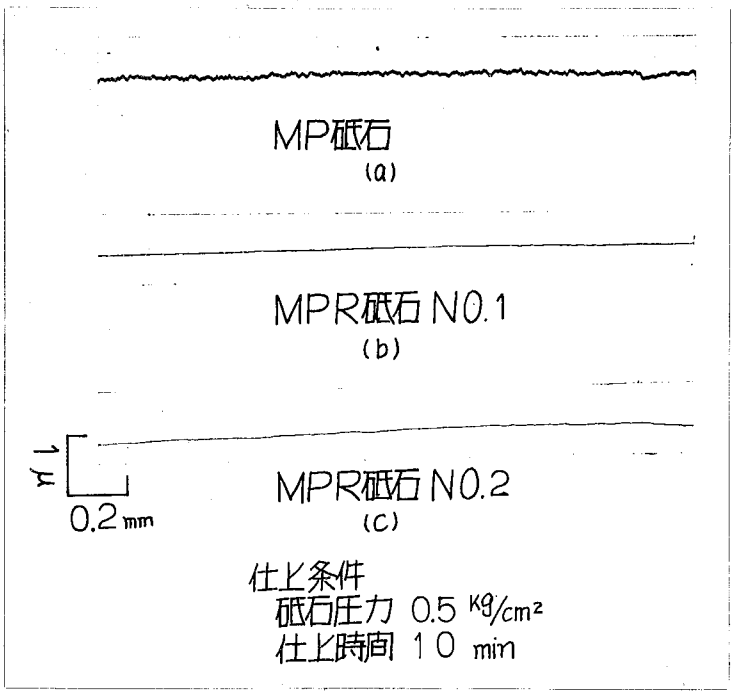


図4－32 仕上面あらさ

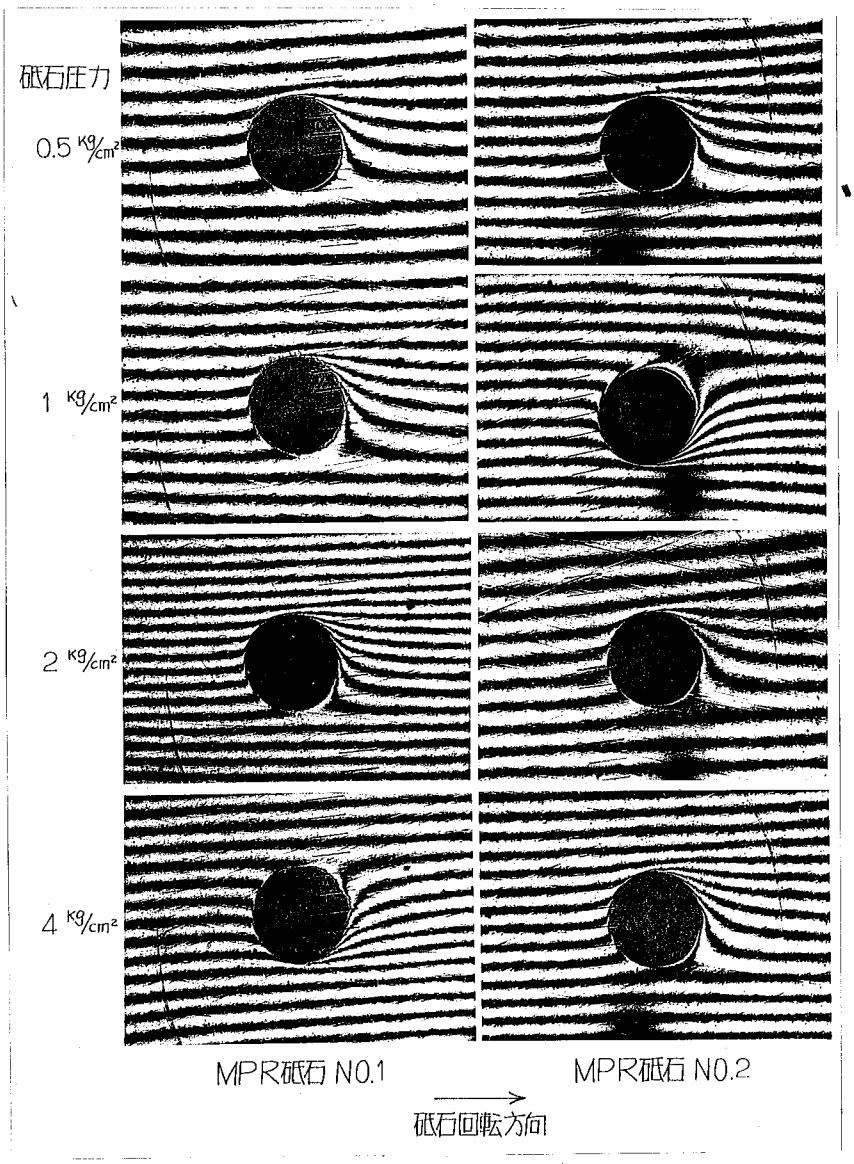


図4－33 穴周辺部のだれ

り側の端部でのだれは，仕上前に比べてほとんど変化していない，あるいはわずかに減少している。

4．4．4　うねり面形状にならって仕上げられることの考察

MPR砥石を使用した超仕上により，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができる因子について考察した。使用した高速鏡面仕上機は加工物試料振動用揺動腕と振動中心軸との嵌合物に若干の隙間があり，それにより剛性砥石を使用しても小さなうねり高さを有する面ならば，それにならって仕上げられることが考えられる。そこで，剛性砥石であるWA15000Lapo砥石を使用して，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることのできる最大うねり高さを求めた。表4－14に，結果を示す。なお，実験にあたっては，砥石損耗による最大うねり高さにおよぼす影響を除去するために，1分間ごとにドレッシングを行ない，砥石面を平面に保持した。この値を，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げられることのできる最大うねり高さから差引いた値が，砥石切刃面の変形によって仕上げることのできる最大うねり高さである。それは，砥石のつぎの2つの性質に起因するものと考えられる。すなわち，

① 砥石面凹凸部を除いた砥石部の変形

② ドレッシングによって生じた砥石面凹凸部の変形

上述の砥石切刃面の変形のほかに，超仕上法においては砥石の回転運動のほかに，加工物試料に振動が附加されるので，それが仕上げることのできる最大うねり高さにおよぼす影響について吟味した。表4－15に，加工物に振動を与えた場合および与えない場合に，面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さを求めた結果を示す。これより，加工物試料に振動を与える超仕上によれば，面形状にならって仕上げるこ

とができる最大うねり高さは，振動を与えない砥石加工に比べて著しく大きいことがわかる。それは，両者において砥石と加工物との接触状態が異なるからであると考えられる。振動のある場合は，図4－34 (a) に示すように，加工物を砥石に押し込んだときに両者が全面接触しなくとも加工物に振動を与えることによって加工物と砥石との接近距離に相当したうねり高さまで仕上げることができると考えられる。すなわち，仕上げることのできる最大うねり高さは，加工物と砥石との接近距離に等しいと考えられる。この距離はヘルツの公式[1]によって求められる。振動のない場合は，同図 (b) に示すように，加工物を砥石に押し込んだときに両者が全面接触する範囲で，加工物が砥石に押し込んだ深さに相当したうねり高さまで仕上げることができると考えられる。すなわち，仕上げることのできる最大うねり高さは，砥石への加工物の押し込み深さに等しいと考えられる。

いま，砥石面が完全平面であると仮定し，これに曲率半径 R の球面を有する加工物が弾性接触する場合，砥石と加工物との接近距離 δ は，次式によって与えられる。

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9}{16}\cdot\frac{P^2}{R}\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1}+\frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^2}$$

こゝで，

E_1 , E_2 ： 加工物および砥石の弾性係数
ν_1 , ν_2 ： 加工物および砥石のポアソン比
P ： 砥石に作用する荷重

である。また，

$$E_1 \gg E_2$$

---

(1) S.Timoshenko・J.N.Goodier, Theory of Elasticity, (1951), 375

であるから，上式は

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9}{16}\cdot\frac{P^2}{R}\left(\frac{1-\nu_z^2}{E_z}\right)^2} \qquad (4\cdot1)$$

となる。この場合，δ は加工物が砥石面に荷重 P で押し付けられたときの，砥石面のくぼみ変形の深さに等しいと考えられる。また，図4－35に示すような丸棒半径 r，球面半径 R，高さ h の間には，次式が幾何学的に成り立つ。

$$h(2R-h) = r^2$$

こゝで，　$2R \gg h$

であるから，

$$2Rh = r^2 \qquad (4\cdot2)$$

となる。いま，砥石面が上述のような弾性接触により変形して，そのくぼみ変形の深さと加工物曲面の高さとが等しくなる，すなわち，

$$\delta = h$$

となる荷重 P と砥石・加工物間の接近距離 δ の関係を求めると，（4．1），（4．2）式より次式が得られる。

$$\delta = \frac{3\sqrt{2}}{4}\cdot\frac{P}{r}\cdot\frac{1-\nu_z^2}{E_z}$$

本実験では　$r = 5.5$ mm，$\nu_z = 0.2$（実測値）であるから，

$$\delta = 0.185\,\frac{P}{E_z}$$

となる。これより，面形状にならって仕上げることのできる最大うねり高さは，加工物に作用する荷重に比例することがわかる。いま，E_z として切削油に浸漬した後の値を代入すると，δ は図4－36(a)，(b) に示すようになる。同図 (a) はMPR砥石 No.1 を用いた場合，同図 (b) はMPR砥石 No.2 を用いた場合である。

表4-14 Lapo砥石を用いた場合に仕上げ得る最大うねり高さ

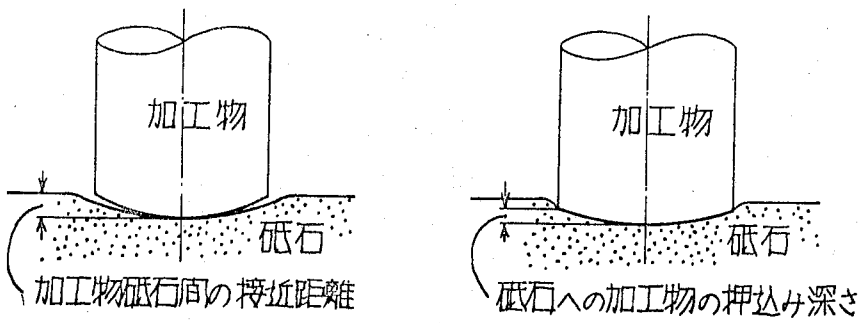
砥石圧力 kg/cm²	仕上げ得る最大うねり高さ μ
0.5	3.5
1	2.5
2	2
4	2

砥 石：WA1500Lapo砥石
仕上時間 10 min

表4-15 加工物に振動を与えた場合および与えない場合に仕上げる最大うねり高さ

砥石圧力 kg/cm²	仕上げ得る最大うねり高さ μ	
	振動あり	振動なし
0.5	11.0	4.0
1	11.6	4.5
2	12.3	4.5
4	13.8	5.5

砥 石 MPR砥石 NO.1
仕上時間 10 min



(a) 振動のある場合　　(b) 振動のない場合

図4-34

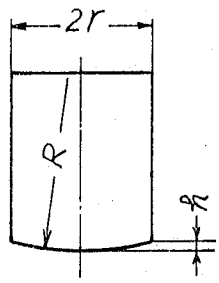


図4-35

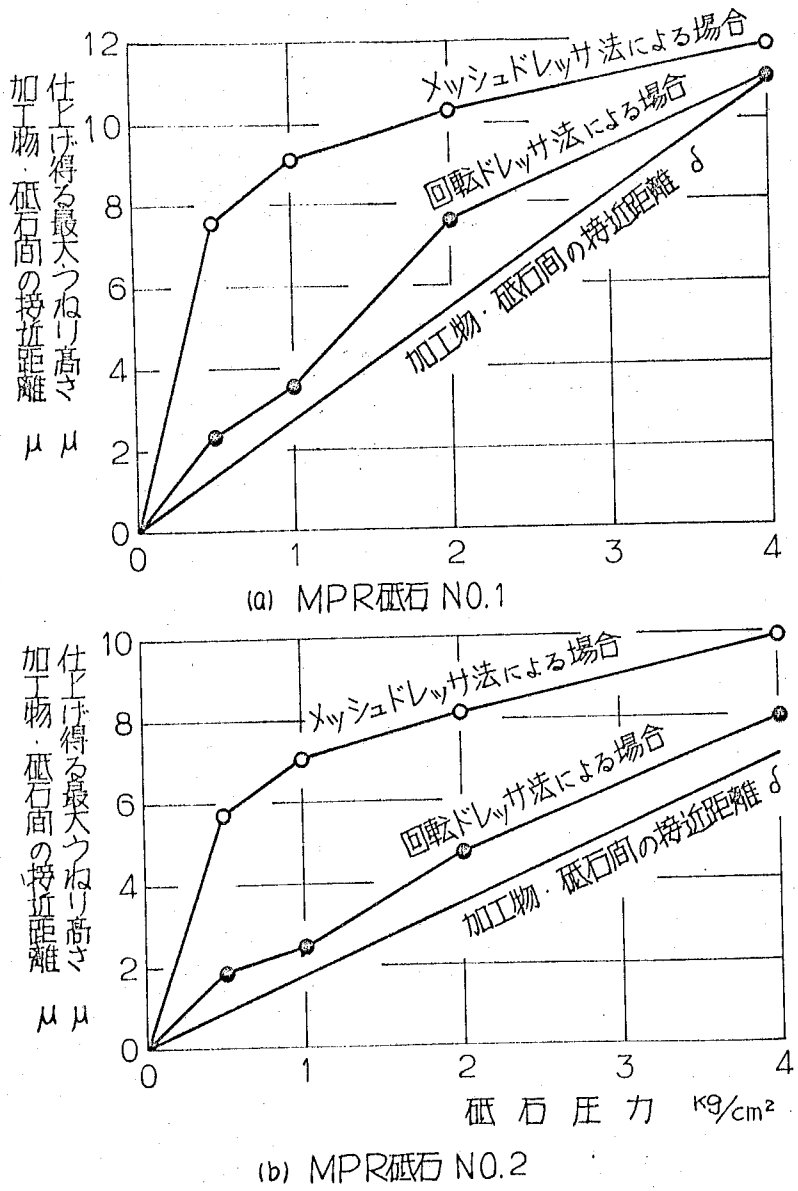


図4-36 加工物・砥石間の接近距離と仕上げ得る最大うねり高さ

この値と実験値とを比較する目的で，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができる最大うねり高さから，表4－14に示す値を差引いた値を，同図(a)，(b) に示す。いずれのドレッシング法の場合についても，上述の実験により得られた値の方が，加工物と砥石間の接近距離 δ より大きい。その差異は，砥石面凹凸の大きいメッシュドレッサ法の方が砥石面凹凸の小さい回転ドレッサ法より大きく，かつ砥石圧力の増加につれて減少する。この差異は，⑪項に示したドレッシングによって生じた砥石面凹凸部の変形によるものと考えられる。すなわち，砥石面凹凸部の大きい方が凸部の変形は大きく，それが砥石面を平面にした場合の接近距離に重畳されることによると考えられる。

4．4．5　まとめ

以上の実験結果および考察より，つぎのことがわかった。

(1)　MPP砥石の圧縮応力－ひずみ線図は，圧縮応力が 50 kg/cm² まではほゞ直線で，その弾性係数は NO.1 砥石で 8,200 kg/cm²，NO.2 砥石で 14,000 kg/cm² である。

(2)　MPR砥石を使用した超仕上により，仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができる。この仕上げることができる最大うねり高さは，同一の砥石を使用してもドレッシング方法および条件によって著しく異なり，ドレッシングによって生ずる砥石面凹凸が大きいほど，大きい。また，加工物に振動を与える超仕上によってうねり面を仕上げると，振動を与えない砥石加工によって仕上げる場合より，面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さは，著しく大きい。

(3)　メッシュドレッサ法で，送り速度 18 cm/min でドレッシングした砥石を使用して，砥石圧力 4 kg/cm² で仕上げた場合，仕上前の面形状にならって仕上げることができる最大うねり高さは，MPR砥石NO.1

で13.8μ，MPR砥石No.2で11.9μである。

(4) 仕上前の面形状にならって全面平滑に仕上げることができる最大うねり高さは，砥石のつぎの2つの性質に起因すると考えられる。

① 砥石面凹凸部を除いた砥石部の変形

② ドレッシングによって生じた砥石面凹凸部の変形

4．5 ダイヤモンドMP砥石による超仕上

ダイヤモンド砥石は従来，超硬合金，[1][2]セラミックス[3]などの硬脆材料の加工におもに使用されてきた。しかし，ダイヤモンド砥石の，単位時間当たりの切削量の大きいこと，および切削中のエネルギ消費量の小さいことにより，人造ダイヤモンドの合成を契機として，あらゆる加工材料の仕上に使用されようとしている。

そこで，ダイヤモンド砥粒を用いたMP砥石が，硬脆材料から軟質金属材料までのあらゆる材料を，短かい時間で，かつ鏡面に仕上げることができるかどうかを，超仕上によって，実験的に吟味した。

4．5．1 実験装置および供試砥石

実験に使用した超仕上機は，前述の小金井製作所製SF 615型高速鏡面仕上機である。使用した砥石は，粒径4～8μのD砥粒とWA 3000砥粒の混合砥粒（混合比；D：WA＝3：7 容積比）のMP砥石（以後，ダイヤモンド砥石という）である。また，上記ダイヤモンド砥石の性能を比較する目的で，WA 3000のMP砥石（以後，WA砥石という）を使用した。

---

(1) G.Pahlizsch・G.Raffenbeul, Werkstatt und Betrieb, 91 (1958), 249
(2) 田中義信・井川直哉，精密機械，26（1960），149
(3) 今中治，セラミックス，1－10（1966－10），749

4．5．2　実験方法

実験に使用した加工物試料は，直径 10 mm，長さ 10 mm の円柱形で，仕上げるべき面はその端面である。加工物試料の種類，密度および硬さを，表4－16に示す。密度はメトラ直示天秤を使用して測定した重量を，マイクロメータを使用して求めた体積で除することによって求め，硬さはビッカース硬度計およびマルテンス引掻硬度計を使用して測定した。いずれの硬度計の場合でも，超硬がもっとも硬く，ついで高速度鋼，アームコ鉄，電気銅の順である。前加工として，超仕上を行なう面を，WA 1500 砥粒を使用してラップ仕上を行なった。それを，つぎに示す条件で超仕上した。

超仕上条件

砥石圧力	：	0.5，1.0，1.5，2.0 kg/cm²
仕上時間	：	5，10，15，20 min
砥石回転数	：	80 rpm
加工物振動数	：	1500 cpm
最大傾斜角	：	13.5°
加工液	：	灯油1号

ドレッシングは外径 40 mm，内径 20 mm のリング型 WA 1500 MP 砥石を回転させ，0.2 kg で押し付けながら行なった。

加工物試料について，切削量および仕上面あらさを測定し，仕上面を顕微鏡で観察した。切削量は，メトラ直示天秤を使用して加工前後の重量を測定し，それより得られる重量減少量を，密度および仕上面面積で除することによって求めた。なお，仕上時の，仕上げるべき面と砥石面とが同一平面であることが必要であるので，図4－37に示す加工物保持具を使用して加工物を固定し，前加工面と仕上げるべき面とが同一の位置になるようにした。仕上面あらさは，TALYSURF を使用して，縦

倍率×10,000，横倍率×100で断面曲線を記録し，それより得られるHmax で求めた。

4．5．3　実験結果

図4－38に，ダイヤモンド砥石およびWA砥石による各種加工物試料の，切削量と砥石圧力との関係を示す。上段はダイヤモンド砥石による場合である。いずれの加工物試料の場合でも，砥石圧力の増加とともに切削量は増大する。また，いずれの砥石圧力の場合でも，切削量はアームコ鉄がもっとも大きく，ついで電気鋼，超硬の順であり，高速度鋼がもっとも小さい。すなわち，ダイヤモンド砥石による切削量の大小は，表4－16に示した加工物試料の硬さの大小と関係ないことがわかる。下段はWA砥石による場合である。電気鋼，アームコ鉄では，砥石圧力の増加とともに，切削量は増大する。しかし，高速度鋼，超硬では，切削量は零である。すなわち，WA砥石による切削量の大小は，加工物試料の硬さの大小と同一である。また，いずれの加工物の場合でも，ダイヤモンド砥石の方がWA砥石より，切削量は著しく大きい。

図4－39に，ダイヤモンド砥石およびWA砥石による各種加工物試料の，切削量と仕上時間との関係を示す。上段はダイヤモンド砥石による場合である。いずれの加工物試料の場合でも，仕上時間の増加とともに切削量は増大する。下段はWA砥石による場合である。電気鋼，アームコ鉄では，仕上時間の増加とともに切削量はわずかに増大するようである。高速度鋼では，仕上時間10分まで切削量は零であるが，仕上時間20分では2μとなる。超硬では，本実験の仕上時間範囲で，切削量は零である。

前述のように高速度鋼および超硬は，ダイヤモンド砥石によって切削されるが，WA砥石によっては，本実験の砥石圧力範囲および仕上時間

表4-16. 加工物試料の種類，密度，硬さ

加工物	密度 g/cm³	ビッカース硬さ（荷重 200g）	マルテンス引掻き硬さ
超硬（S1）	14.6	1433	43
高速度鋼（SKH3）	7.7	897	12
アームコ鉄	7.7	137	7
電気銅	8.9	101	4

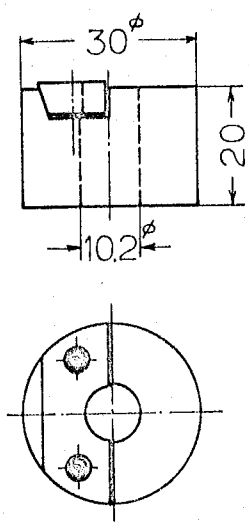
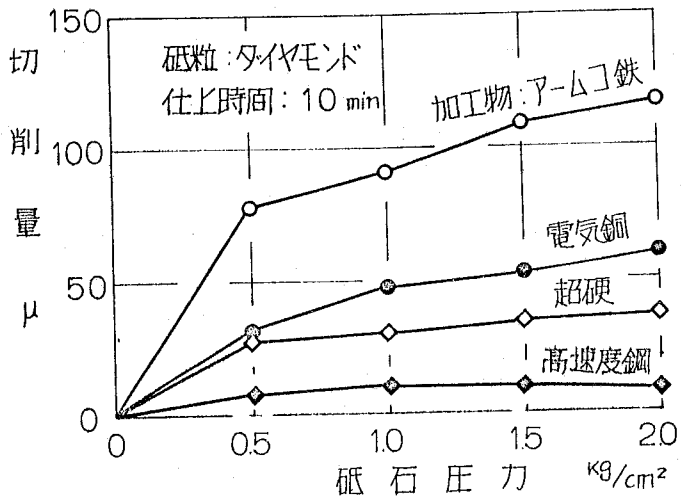


図4-37 加工物保持具の形状



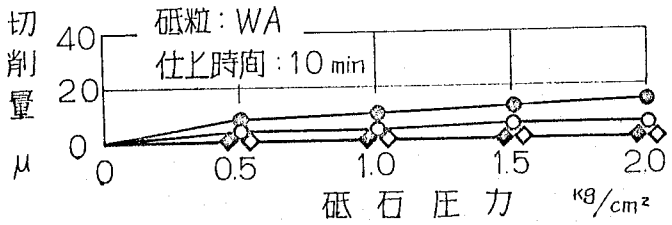


図4-38 切削量と砥石圧力との関係

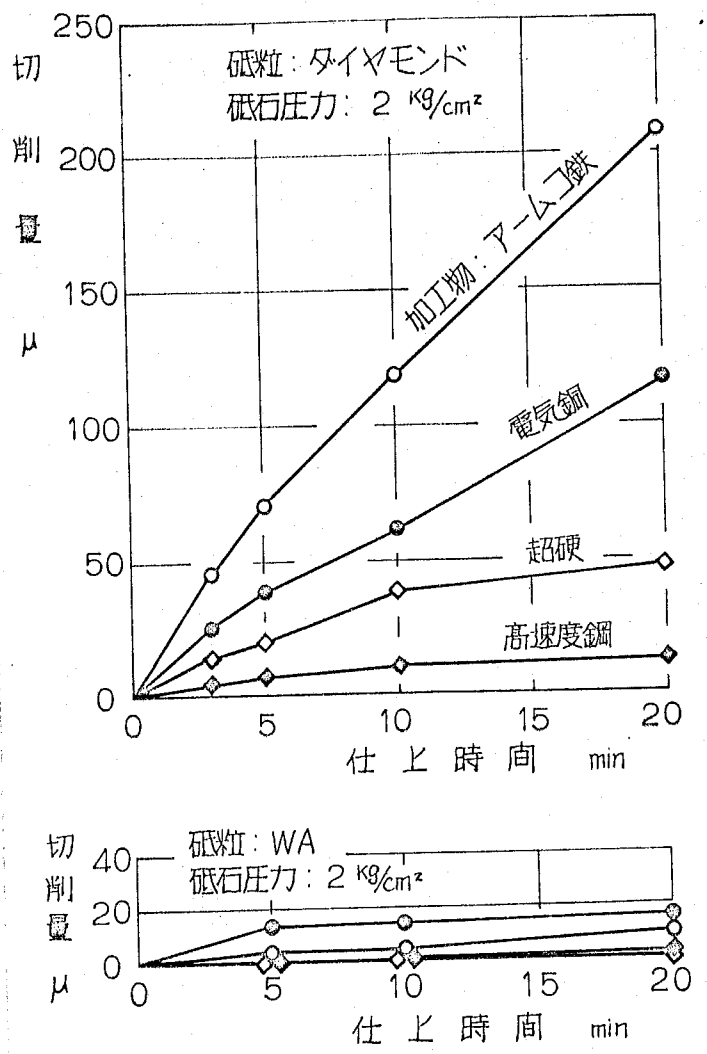


図4-39 切削量と仕上時間との関係

10分までの範囲では，切削されない。そこで，高速度鋼がMP砥石によって切削されない原因を吟味するために，砥石圧力 1.0 kg/cm² ，仕上時間10分で超仕上した高速度鋼の仕上面を顕微鏡で観察した。図4−40に，観察結果を示す。ダイヤモンド砥石による仕上面は鏡面光沢を有する平滑面である。しかし，WA砥石による仕上面は全面にわたって一様に焼けが生じている。すなわち，仕上面の焼けと切削されない原因とは密接な関係があると考えられる。

図4−41に，ダイヤモンド砥石による超硬，高速度鋼，アームコ鉄および電気銅の超仕上面を示す。それぞれの上段は電子顕微鏡で観察した仕上面，それぞれの下段は顕微干渉計で観察した干渉縞を示す。加工物試料によって切削痕は異なり，超硬では切削痕は細く，かつむしられて観察される。高速度鋼，アームコ鉄，電気銅では太く観察される。また，干渉縞より，超硬，高速度鋼の仕上面は極めて平滑であり，アームコ鉄，電気銅のそれはところどころに深さ0.1 ～ 0.2 μの痕を有していることがわかる。

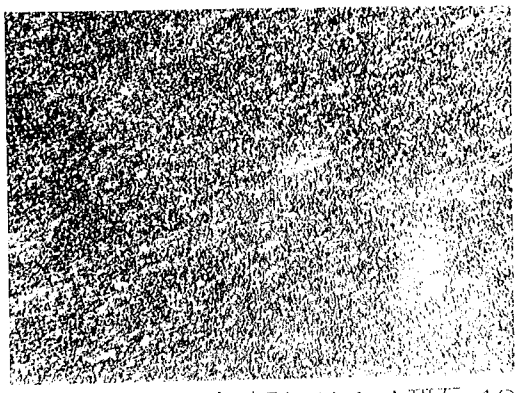
この仕上面のあらさを記録した結果を図4−42に示す。いずれの加工物でも，ダイヤモンド砥石によって仕上げた面は 0.1 μHmax 以下の極めて平滑な面である。

4．5．4　まとめ

以上の実験結果より，ダイヤモンド砥粒を用いたMP砥石による超硬，高速度鋼，アームコ鉄および電気銅の超仕上について，つぎのことがわかった。

(1)　ダイヤモンドMP砥石によって超硬，高速度鋼，アームコ鉄，電気銅を超仕上すると，0.1 μHmax以下の小さな仕上面あらさが短時間に得られた。

(a) 砥　石：ダイヤモンド砥石　×120
加工物：高速度鋼

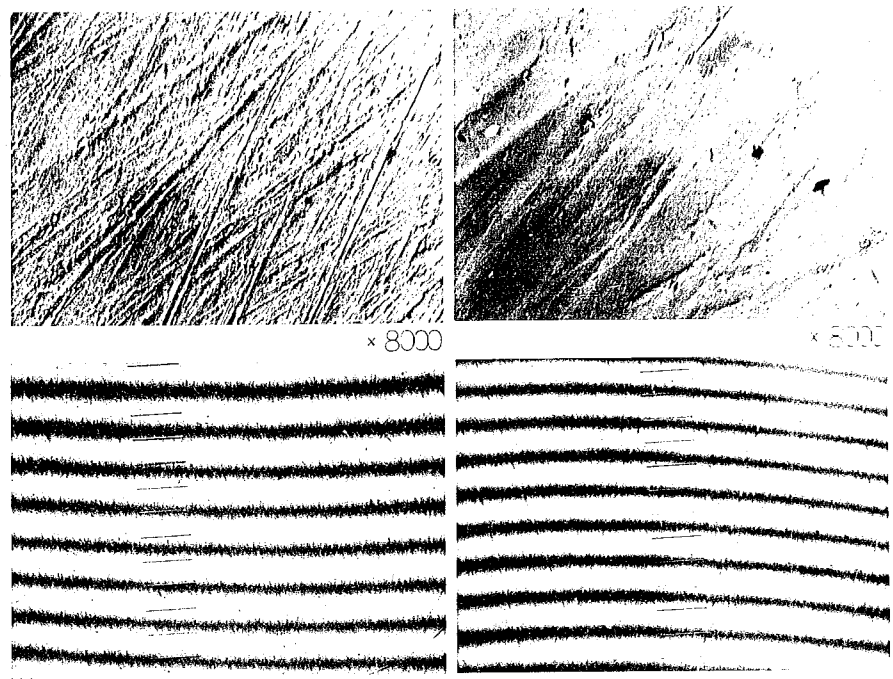


(b) 砥　石：白色溶融アルミナ砥石×120
加工物：高速度鋼

仕上条件
砥石圧力　1.0 kg/cm²
仕上時間　10 min

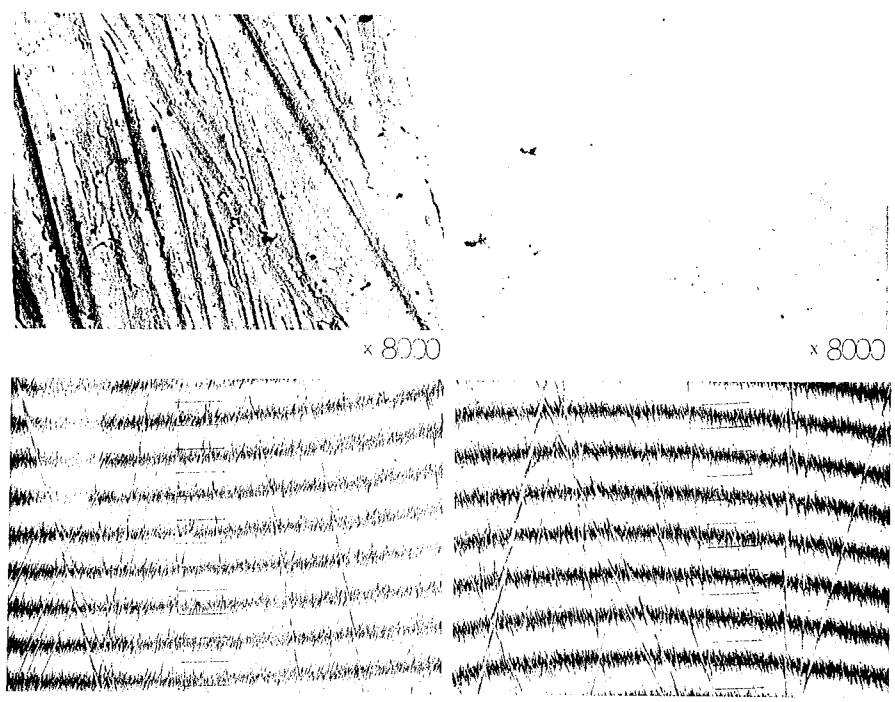
×1/2

図4－40　D砥石，WA砥石による
高速度鋼の超仕上面



超 硬　　高速度鋼

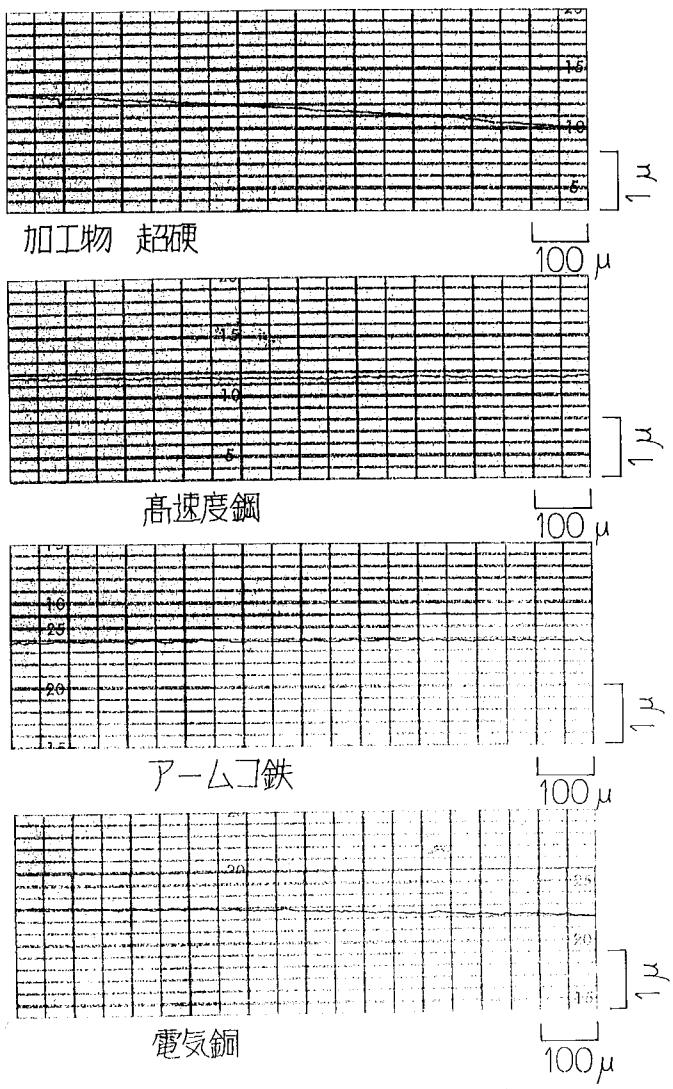
仕上条件
砥石圧力 1.0 kg/cm²
仕上時間 10 min



アームコ鉄　　電気銅

×1/2

図4－41 D砥石による超仕上面の電子顕微鏡写真および干渉縞



仕上条件
砥石圧力 1.0 kg/cm²
仕上時間 10 min

図4－42　D砥石による加工物試料の仕上面あらさ

(2) ダイヤモンドMP砥石による切削量は，アームコ鉄がもっとも大きく，ついで電気銅，超硬，高速度鋼の順となり，加工物試料の硬さの大小とは関係しない。

結　言

本研究により銅圧粉体の密度分布の不一様性を改善する圧縮成形法および圧粉体寸法と焼結体寸法とが同一となる粉末成形法を明らかにすることができた。この基礎的研究にもとづき，銅－アルミニウム粉末成形体および銅－ガラス粉末成形体の諸性質を明らかにし，ついで銅粉を砥粒保持体とした銅基粉末成形砥石を試作し，それが長寿命砥石および鏡面仕上砥石として優れていることを明らかにした。

本研究は東京工業大学工学部長浅枝敏夫教授，西本兼教授の御指導の賜である。また，研究を進めるにあたっては東京工業大学近藤巌助手，伊東誼助手，吉田誠，鈴木郁男の諸氏より多大の御教示と御援助を賜った。また，長期にわたる実験は奥山勝治，芹沢敏夫，津堅忠明，本田技研工業原田政男の諸氏並びに伊丹桂，森田茂，沼崎正德，小笠原勝夫，三浦宏元，三沢康雄，宮地利彦，白鳥武，中村信二郎，大塚捷德，横田信行，野崎昇，青木秀哉，山田保夫の諸君その他機械工学科の各位並びに小金井製作所，理学電機の御協力によるものである。また，本文を草するにあたっては東京工業大学室田忠雄教授，石井勇五郎教授，高橋恒夫教授に貴重な御教示と御校閲をいただいた。こゝに記して深甚なる感謝の意を表する。

なお，本研究の一部は文部省科学研究費によって行なったものである。