

本資料は 年 月 日付で登録区分、  
変更する。  
2001. 6. 6

[技術情報室]

## F B R用中空ペレット製造技術開発（2）

### 中空ペレット成形用金型の開発（I）

#### 金型の設計・試作

1993年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
東 海 事 業 所

こ  
示す  
示又  
用し

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

限 定 資 料  
PNC N8410 93-228  
1 9 9 3 年 7 月



F B R用中空ペレット製造技術開発（2）  
中空ペレット成形用金型の開発（I）  
金型の設計・試作

報 告 者 野上 嘉能\*、宮本 寛\*、  
飛田 典幸\*、小幡 真一\*、  
山本 純太\*  
実施責任者 上村勝一郎\*

要 旨

F B R用中空ペレット製造技術開発の一環として、成形用金型を試作した。本報告書は、今後実施される中空コアロッドの性能評価試験に供するため、金型の設計および強度、寿命についての予測解析を行い、試作結果についてまとめたものである。

中空コアロッドの予備解析の内、座屈強度に関しては、超硬合金製では $\phi 1.50\text{mm}$ 以上、SKH製では $\phi 2.00\text{mm}$ 以上のものが使用可能であった。しかし、中空コアロッドに働く軸圧縮力の計算条件に推定値が入っているため、それらの解析を待って、再解析する必要があると考える。

疲労強度に関しては、超硬材製で $\phi 1.50\text{mm}$ 以上の場合 $4.9\text{kg/mm}^2$ 以上、SKH製で $\phi 2.00\text{mm}$ 以上の場合 $3.7\text{kg/mm}^2$ 以上の疲れ限度を有する材料であれば、使用可能と思われる。文献データから推定すると、SKH製で $\phi 2.00\text{mm}$ 以上の場合、疲労せず使用可能の見通しがある。超硬材製については、文献データからは推定できなかった。

耐摩耗性については、超硬材のAF1が一番耐摩耗性が良かった。（以下、D2⇒G5⇒GH880R⇒SKH51⇒GH96Rの順）

金型は、ウイズドロアル式プレス（Pu第1開発室R-125室既設）に取付けられるものであり、中空コアロッド、上・下パンチ、ダイスより構成される。試作金型は、予備解析及び使用実績等を基に各種超硬合金（4種類）及び高速度工具鋼（1種類）を用い、中空コアロッドのチップ径が $\phi 1.00 \sim \phi 2.50\text{mm}$ （0.5mmごと）のものを試作した。中空コアロッドは、チップ部の表面荒さを0.2S以内に抑え、目視上鏡面状態に仕上げた。

取扱性は、チップ部が超硬合金の場合、WC-COをベースにしているため、脆性破壊が予想されたにもかかわらず、指で3mm程度曲げたり、机の角部へ4～5cm上方から降り下ろしても破損せず、良好な状態であった。

今後は、試作した金型を用いて、座屈強度、疲労強度、耐摩耗性の試験を行い金型の性能評価を実施する予定である。

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 中空ペレット量産用金型の開発目的 .....	1
3. 中空ペレット用試作金型の概要 .....	1
4. 中空ペレット用試作金型の設計 .....	3
4.1 概念設計 .....	3
4.2 材質の選定 .....	5
4.3 形状の設計 .....	8
4.4 強度、寿命の予備解析 .....	12
(1) 中空コアロッドの座屈強度解析 .....	12
(2) 中空コアロッドの応力集中に対する強度解析 .....	21
(3) 中空コアロッドの疲労破壊に対する強度解析 .....	24
(4) 上・下パンチの座屈および圧縮強度に対する検討 .....	29
(5) 金型の強度評価の総括 .....	31
5. 中空ペレット用試作金型の製作結果 .....	32
5.1 試作金型の形状、寸法 .....	32
5.2 材料物性測定結果 .....	37
5.3 中空コアロッドの加工性について .....	37
5.4 中空コアロッドの取扱性について .....	38
6. 今後の課題と予定 .....	39
6.1 課 題 .....	39
6.2 予 定 .....	40
7. 資料集 .....	41
7.1 G-103カムプレス用中空金型の開発経過の抜粋 .....	42
7.2 現在までに使用実績のある中空コアロッド構造図 (G-108 ウイドオル式プレス用) .....	43
7.3 コアロッドの座屈解析 .....	44
7.4 耐摩耗性の測定方法 (CCPA方式によるabrasion-wear 測定法) .....	46
7.5 耐摩耗用超硬新材質の強度 (住友電工) .....	47
7.6 SKH51ミルシート .....	53
7.7 SKH51高速疲労試験データ .....	54
7.8 SKD11疲労試験データ .....	55
7.9 マルエージング鋼の中空コアロッド適用可能性試験 (摩耗試験) 結果 .....	57
8. 参考文献 .....	59

## 表 リ ス ト

表-1 想定中空ペレットの仕様	1
表-2 金型のチップ部材質と特性値	2
表-3 中空コアロッド設計のポイント	4
表-4 中空コアロッド用材料の絞り込み	5
表-5 金型選定材料の特徴	7
表-6 金型選定材料の特性値（カタログ値）	8
表-7 金型設計条件	9
表-8 形状設計のポイントとその具体策	9
表-9 各種材料のヤング率と圧縮強度	12
表-10 径毎の軸圧縮力（ $P^+$ ）	12
表-11 中空コアロッドの座屈荷重	16
表-12 曲げ応力に対する形状係数（ $\alpha_x$ ）	21
表-13 応力集中を考慮した径毎の軸圧縮力（ $P^+$ ）	21
表-14 中空コアロッド座屈荷重の安全率	23
表-15 中空コアロッドに働く軸圧縮応力 $\sigma_1$	27
表-16 試作中空コアロッドの材質、形状、製作数量一覧表	32
表-17 試作ダイス・パンチの材質、形状、製作数量一覧表	32
表-18 製品母材ロットの材料物性測定結果	37
表-19 取扱性確認用中空コアロッドの概要	38

## 図 リ ス ト

図-1 中空コアロッドに働く応力	4
図-2 成形時金型取り合い図	11
図-3 軸圧縮力推定モデル	12
図-4 一様断面中空コアロッドの座屈モデル	13
図-5 段付き中空コアロッドの座屈モデル	14
図-6 $\ell_1 = 20\text{ mm}$ の場合の座屈荷重	17
図-7 $\ell_1 = 10\text{ mm}$ の場合の座屈荷重	17
図-8 A F 1、G 5の座屈荷重	18
図-9 G H 8 8 0 Rの座屈荷重	18
図-10 G H 9 6 Rの座屈荷重	19
図-11 S K H 5 1の座屈荷重	19
図-12 中空コアロッドチップ部拡大図	22
図-13 段付部で応力が集中する様子	22
図-14 段付き丸棒の曲げ応力に対する形状係数	22
図-15 合金鋼の回転曲げ疲れ限度に及ぼす試験片直徑の影響	25
図-16 直徑の異なる平滑試験片の引張・圧縮疲れ試験	25
図-17 表面仕上げ粗さと試験片寸法の疲れ限度に及ぼす効果	25
図-18 Cr-Mo共析鋼の回転曲げ疲れ限度と形状係数、切り欠き効果の関係	26
図-19 段付き丸棒の曲げ疲れ限度	26
図-20 応力の種類と疲れ限度の例	26
図-21 鋼の硬度と疲れ限度との関係	26
図-22 下パンチの座屈モデル	30
図-23 中空コアロッド完成図	33
図-24 上パンチ完成図	34
図-25 下パンチ完成図	35
図-26 ダイス完成図	36
図-27 取扱性確認方法①	38
図-28 取扱性確認方法②	39
図-29 中空コアロッドの性能評価フロー	40

## 1. はじめに

本報告書は、今後実施される中空コアロッドの性能評価試験の計画、解析、評価に資するため、金型の設計及び強度、寿命について予備解析を行い、試作結果についてまとめたものである。

## 2. 中空ペレット量産用金型の開発目的

FBRがLWRに置き変わるには、安全性はもちろん経済性において、十分比肩するものでなければならない。経済性については、原子炉自体の建設コストの低減および燃料サイクルコストの低減の観点から、燃料の高性能化が考えられている。しかし、高性能化のためには燃料溶融およびPCMⅠ破損の観点からの対策が必要である。これらの対策としては、

- ① 燃料ペレット密度を低くする。
- ② 燃料—被覆管ギャップ幅を大きくする。
- ③ 中空ペレットにする。

の方法がある。これらの内、炉特性等を考慮して、燃料の高燃焼度化及び高線出力化に対する方策としては、中空高密度ペレットが有利であると考えられている。

しかし、この中空ペレットの製造実績は、PNCにおいては照射試験を目的とした小規模なロットしか有していない。乾式成形法を前提とした場合、中空ペレットの量産に最も障害となりそうな問題の一つに、金型の寿命がある。

このため、中空ペレットの量産時を想定した高寿命の金型の開発が求められている。

## 3. 中空ペレット用試作金型の概要

FBR実証炉用中空ペレットを想定し（表-1参照）、その成形用金型を試作した。

表-1 想定中空ペレットの仕様

ペレット直径	中 空 径	ペレット高さ	到達密度
約φ6.4mm	φ1.0～φ2.5mm	約9mm	約95%T.D.

この金型は、乾式成形法を前提とし、Pu第一開発室R-125室のウイズドロアル式\*プレスに取り付ける金型とした。

---

\* ウイズドロアル式とは、下パンチを固定し、ダイと上パンチを下降して成形する方法である。他に両押し式（ダイ固定、上下パンチがそれぞれ上下して成形する方法）や浮型式等がある。

中空ペレットの製造と比べ、中実ペレットの製造は「常陽」および「もんじゅ」ドライバー燃料などで十分実績がある。中空ペレット用と中実ペレット用の金型の相違点は、中空コアロッドの有無である。

中空コアロッドは、上下パンチに比べかなり細径となる。このため、金型の中で強度が最も弱くなるとともに、摩耗量に対する直徑の変位量（ロッドの細り）が、ダイス内面と比べ大きくなる。（何れも同じ材質で製作したと仮定したとき）

これらのことから、中空コアロッドの寿命が、ダイスや上下パンチと比べ最も短いことが、容易に想像される。したがって、中空コアロッドの寿命を、ダイスや上下パンチに近づけることが目標となる。

ここで、第3開発室の成形実績を調査した。第3開発室で使用中の金型のチップ部材質を、表-2に示す。

表-2 金型のチップ部材質と特性値

部品名	鋼種名	成分(%)		特 性 値		
		WC	Co	硬度(HRA)	抗折力(kg/mm <sup>2</sup> )	比重(g/cm <sup>3</sup> )
上パンチ 下パンチ ダイス	超硬合金GA30 (富士通シンタ製)	9.2	8	90.5	250	14.60

中実ペレットを成形する金型には、中空コアロッドが無いことが、今回試作する金型と大きく異なる点である。

第三開発室で中実ペレットを成形するとき、この金型を交換しないで連続成形した経験としては、最大で十数ロットであった。1ロット（約42kg）当たり、約 $1.1 \times 10^4$ 回の成形（2個取り）を行っており、全ロットの合計では、約 $1.1 \times 10^5 \sim 2.0 \times 10^5$ 回の成形回数になる。この程度の成形回数では、金型の内径が摩耗して大きくなり、成形品がスペックオーバーするようなことは無かった。むしろ、粉末条件や成形条件の違いによるスプリングバックによる直徑の膨張（数十μm）の方が、金型の内径の摩耗より十分大きい。

もんじゅ取替燃料の製造は、年間約100体を想定しており、1キャンペーンで50体の製造が予定されている。

ペレットが1ピン当り 114個、ピンが1集合体当り 127本、製品収率が75%と仮定すると50体の集合体に用いるペレットの成形に約 $1 \times 10^6$  回を要することになる。

したがって、中空コアロッドの摩耗による寿命は、 $1 \times 10^6$  回の成形に耐えることが、目標として妥当と考えられる。破損による寿命を含め、中空コアロッドの寿命の目標は、以下の2点が考えられる。

① 破損： $1 \times 10^6$  回プレスしても、座屈荷重や材料の疲労などに起因する金型の破損が発生しない。

② 摩耗： $1 \times 10^6$  回プレスしたとき、摩耗による製品のスペックアウトが発生しない。

中空径のスペック  $1.9 \pm 0.1 \text{ mm}$  と仮定すると、スプリングバックや収縮率を無視して考えた場合、中空コアロッドに許容できる摩耗量は、半径で  $50 \mu\text{m}$  である。

中空コアロッドの材質は、一般産業界で実績のある材質の中から、有望なものを幾つか選択した。

ロッド部の外径は、その成形限界や取扱性もチェックするため、予想される中空径（約 $\phi 2 \text{ mm}$ ）より小径のものも試作した。

#### 4. 中空ペレット用試作金型の設計

##### 4.1 概念設計

中空ペレット用金型の耐久性のポイントは、前述したように中空コアロッドの設計にある。

上パンチの穴と中空コアロッドのセンターがずれて金型が破損した場合は、装置へのセッティングに問題があるため、純粋な寿命とは切り離して考えるのが妥当である。

このため、中空コアロッドに働く荷重の内、寿命に係わってくる主な荷重を図-1に示す。

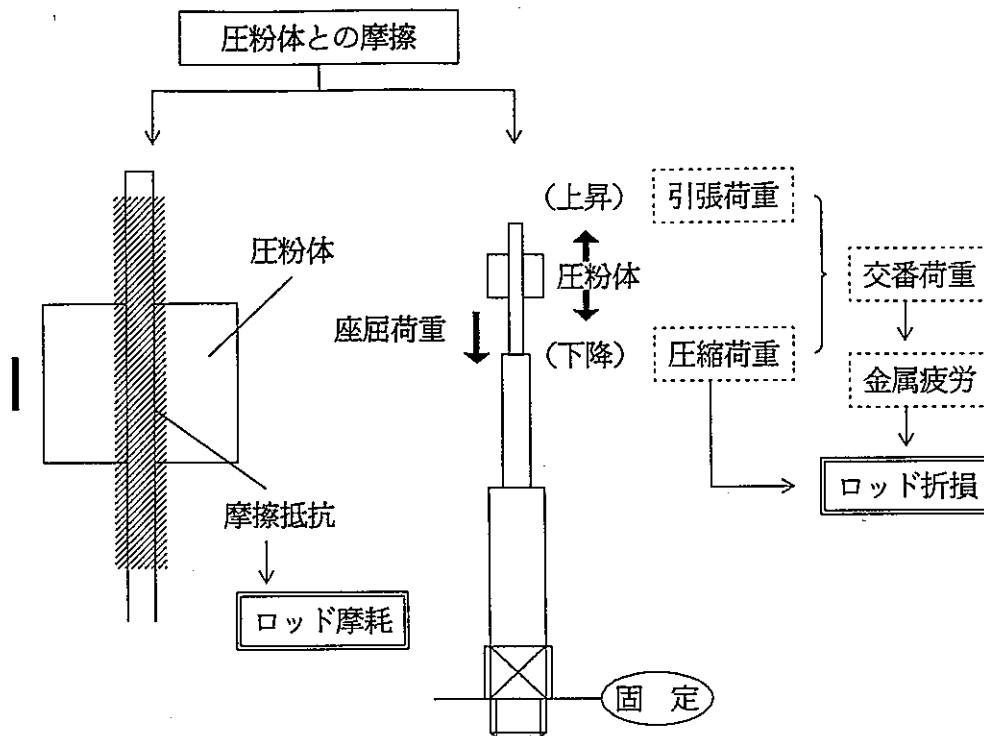


図-1 中空コアロッドに働く荷重

中空コアロッドの設計のポイントを表-3に示す。

表-3 中空コアロッド設計のポイント

寿命を決める要因	設計のポイント	
	材質	形状
MOX等との摩擦抵抗が小	・高硬度（硬度）	・表面粗さが極力滑らかであること
耐摩耗性が大	・高硬度（硬度）	・表面粗さが極力滑らかであること
座屈強度が大	・高強度（引張強度、圧縮強度、抗折力） ・高剛性（ヤング率）	・コアロッド部の短尺化
衝撃強度が大	・高衝撃強度（衝撃強度） ・高韌性（破壊韌性）	・応力集中しにくい形状
疲労しにくい	・高疲労強度（高疲労限） ・内部欠陥が少ない	・表面粗さが極力滑らかであること ・応力集中しにくい形状

## 4.2 材質の選定

材質の選定は、まず硬質材料として、一般産業界で実績のある材質から選定することとした。それらの中から、表-4に示すような絞り込みを行った。

表-4 中空コアロッド用材料の絞り込み

材 質	耐摩耗性	硬度	韌性	抗折力 <sup>*1</sup>	衝撃強度	剛性	その他の条件	判定
超硬合金	◎	◎	△	○	△	◎	○	○
高速度工具鋼 <sup>*5</sup>	○	○	○	○	○	○	○	○
ダイス鋼	△	△	○	○	○	○	○	△
ジルコニアセラミックス	◎	◎	△	△	○	○	× <sup>*2</sup>	×
ダイヤモンド焼結体	◎	◎	×	△	×		× <sup>*3</sup>	×
セラミックコーティング	◎	◎	×				× <sup>*4</sup>	×

\* 1 ; 高速度工具鋼、ダイス鋼については、引張強度。

\* 2 ; ① 中空コアロッドのような細径で長い物 ( $\phi 1.0 \times 100\text{mm}$ ) を、製造できない。

$\phi 1 \times 30 \text{ (mm)}$  } 程度が、製作限界(住友電工 談)。  
 $\phi 3 \times 50 \text{ (mm)}$

② 抗折力が、超硬合金の  $1/2 \sim 1/3$  と弱い。

\* 3 ; 中空コアロッドのような細径で長い物 ( $\phi 1.0 \times 100\text{mm}$ ) は、製造できない。

( $\phi 1 \sim \phi 50$ )  $\times 3 \text{ (mm)}$  程度が、製作限界(住友電工 談)。

\* 4 ; 耐摩耗性と韌性を両立させるためには、高韌性材料にセラミック・コーティング(CVD法、PVD法)を施すことが考えられる。

① コーティング膜は、薄膜 ( $50\text{ \AA}$ ) ~ 厚膜 ( $50\mu\text{m}$ ) まで可能だが、余り厚膜になると成形時の摩擦によって剝離するおそれが大きくなる。

② コーティング処理時、母材を  $400 \sim 650^\circ\text{C}$  に加熱する。この時、以下のような製品性能の低下が発生するおそれが高い。ただし、超硬材などでは発生しない。

- 既に入っている焼きがなまって、母材硬度が低下する。

- 反り、捩れ、垂れの発生により、製品精度が  $\pm 30 \sim \pm 50\mu\text{m}$  程度に低下する。

\* 5 ; 高速度工具鋼には、W系、Mo系、V系の3種類がある。いずれも優れた高温硬さ、耐摩耗性、良好な靭性を持つ高級工具鋼である。W系には、SKH-4(「INTA-2, B5D-1, 2」で使用実績がある。)があり、SKH-2がその標準型である。Mo系にはSKH-51(旧規格SKH-9)などがあり、他と比べて高い靭性を示す。V系はSKH-57などがあり、他と比べて高硬度にできるため、高い耐摩耗性を示す。今回採用したSKH-51は、高速度工具鋼の全鋼種中、一番高い靭性を示す鋼種である。もし、SKH-51より靭性が低下しても、耐摩耗性を向上したいと欲するときは、SKH-57を選定し、なるべく高硬度に焼き入れすれば良いと思われる。

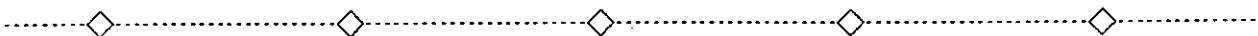


表-4以外では、靭性の低下を抑えながら強度を強化した超強力鋼(引張強度>140kg/mm<sup>2</sup>)がある。

これに分類される鋼種の一つに、ウラン濃縮の回転胴にも使用されているマルエージング鋼がある。平成4年度、このマルエージング鋼が中空コアロッドとして適用可能か否か検討した。詳細は、「7.9 マルエージング鋼の中空コアロッド適用可能性試験(摩耗試験)結果」に示す。

本試験の結果、マルエージング鋼は超硬合金、高速度工具鋼に比べて摩耗しやすいことが分かり、対象から外した。

複合材料やエンジニアリング・プラスチックなどについても有望な材料があるかもしれないが、耐摩耗性、硬度と靭性のバランスや耐放射線性、圧粉体に混入した場合の不純物による焼結挙動の変化など不明な点が多く、今回は対象外とした。

最終的に材質は、表-5に示す鋼種を選定した。これらの鋼種は、住友電気工業(株)で製造した。(SKH-51は母材を同社の協力会社で製造し、同社で加工したものである。)

なお、超硬合金の鋼種名は同社の製品名称である。

表-5 金型選定材料の特徴

鋼種名	分類	特徴	採用箇所
超硬合金	D 2	WC-Co合金 中粒 (< 2 μm)  ・代表的な耐摩耗工具用材料 ・脆性材料(以下の超硬合金も全て)	ダイス 上パンチップ 下パンチップ
	G 5	WC-Co合金 中粒 (< 2 μm)  ・代表的な耐摩耗工具用材料 ・D 2より高靭性	中空アロッド
	A F 1	WC-Co合金* 超々微粒新素材 (< 0.5 μm)  ・超硬合金の中で、最強抗折力 ・単純こすれ摩耗に優れた耐摩耗性	中空アロッド
	G H 9 6 R	WC-Co-Ni-Cr合金 粗粒 (< 7 μm)  ・耐熱衝撃工具用最強材質 ・硬度の割に高い耐摩耗性	中空アロッド
	G H 8 8 0 R	WC-Co-Ni-Cr合金 超粗粒新素材 (< μm)  ・熱間圧延ロール用最強材質 ・硬度の割に高い耐摩耗性 ・G H 9 6 Rより高い耐摩耗性	中空アロッド
合金鋼	S K H - 5 1	C-Cr-Mo-W-V添加 高速度工具鋼  ・靭性を必要とする一般切削用 (S K Hの中で一番高靭性) ・延性材料 ・P u開発室で特燃製造の実績有り (S K H - 4)	中空アロッド

\* A F 1 は、合金中にCrを0.85%含む。

金型選定材料の特性値（カタログ値）を表-6に示す。

表-6 金型選定材料の特性値（カタログ値）

鋼種名	特 性 値 （常温）								
	比重	硬度 HRA	抗折力 kg/mm <sup>2</sup>	ヤング率 (E×10 <sup>4</sup> ) kg/mm <sup>2</sup>	圧縮強度 kg/mm <sup>2</sup>	破壊靱性 $K_{1C}$ MN/m <sup>3/2</sup>	衝撃強度 kg·m cm <sup>2</sup>	耐摩耗性 ×10 <sup>4</sup> cc/rev	HIP の 有無
D 2	14.9	90.5	250	6.2	548	8.3	0.31	4.1	可
G 5	14.3	89.0	320	5.7	477	12.5	0.38	14.2	可
A F 1	14.1	93.0	450	5.7	580	8.7	—	1.5	有*
GH96R	13.0	81.0	250	4.6	289	29.5	0.62	70.0	可
GH880R	13.3	81.5	240	4.9	—	29.0	0.90	35.5	可
SKH-51	8.1	83.0	488	2.1	—	—	3.06	50.7	無し

\* H I P処理の有無；有=必ず処理する、可=必要に応じ可能（ただし、コストアップ）

- 注）・耐摩耗性の測定方法は、「7.4 耐摩耗性の測定方法」を参照のこと。  
 ・衝撃強度は、シャルピ衝撃試験の結果。  
 ・SKH-51の抗折力は、今回の製品の実測値。一般に延性材料では、抗折力という定義はない。  
 ・詳細は、住友電工(株)カタログ「塑性加工工具／耐摩部品」JP14(1990.7) I および「7.5 耐摩用超硬新材質の強度」参照のこと。  
 ・□でかこんだデータは、各特性の中で、一番中空コアロッドに適している値。

#### 4.3 形状の設計

金型は、ダイス、上・下パンチ及び中空コアロッドから構成される。これらをプレスに取り付けて、表-7の条件を満たすよう、各々の形状を設計した。その取り合いを図-2に示す。

表-7 金型設計条件

成形条件	金型条件
<ul style="list-style-type: none"> <li>・粉末充填深さ = 20 mm</li> <li>・圧縮量 = 10 mm</li> <li>・アンダーフィル = 5 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダイス穴径 = <math>\phi 7.50</math> mm</li> <li>・中空ロッドチップ径 = <math>\phi 1.00</math> mm = <math>\phi 1.50</math> mm = <math>\phi 2.00</math> mm = <math>\phi 2.50</math> mm</li> </ul>

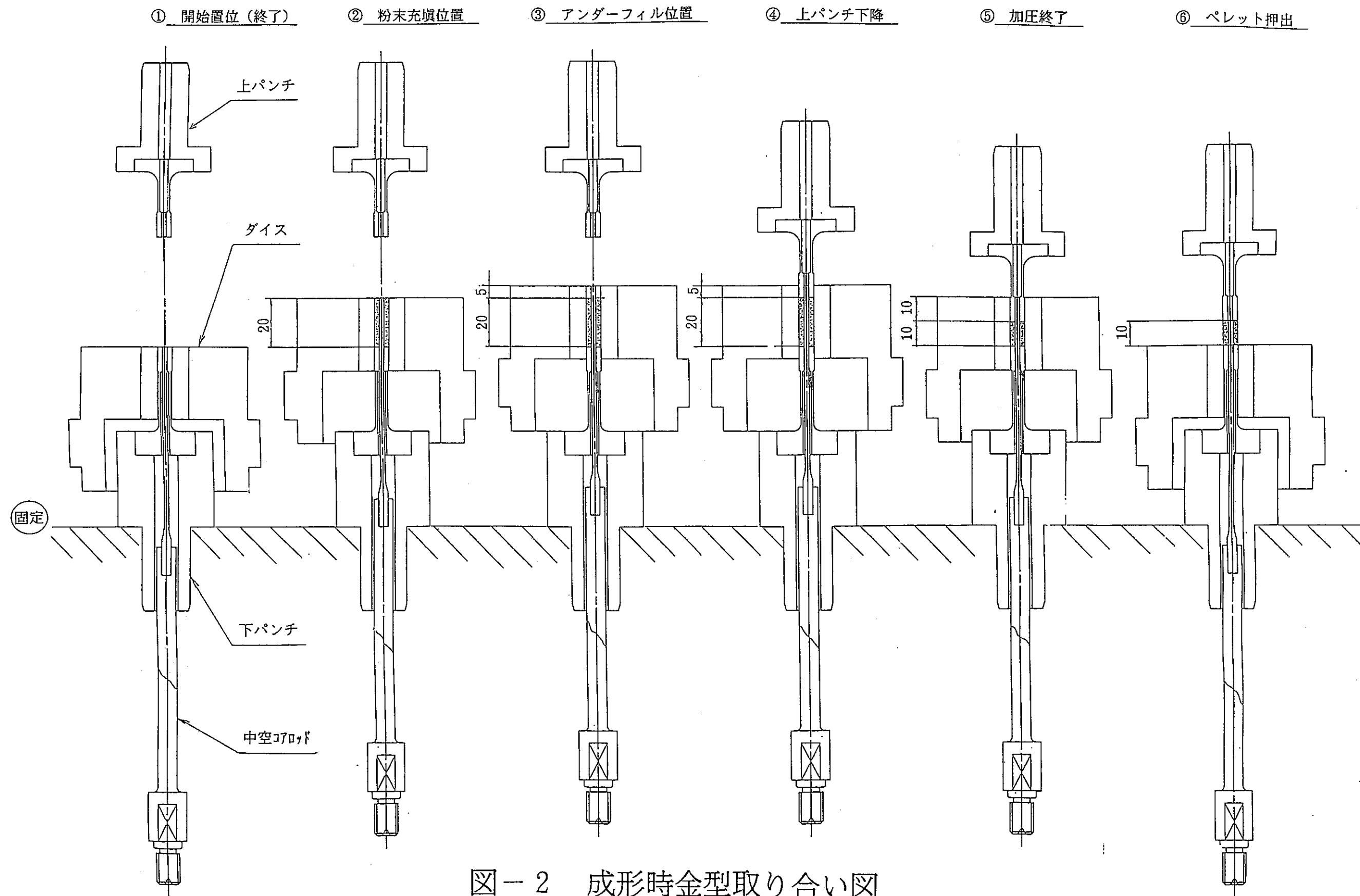
「表-7 金型設計条件」と、「表-3 中空コアロッド設計のポイント」に対する具体策を表-8に示す。

表-8 形状設計のポイントとその具体策

形状設計のポイント	具 体 策		
コアロッドの短尺化	現在、実績のある③と比較して、チップ長さを29~74mm短尺化した。		
	中空パレット試験、製造名称	中空コアロッド チップ長さ	参照先
	① G-103カムプレス 中空パレット試験 TYPE 1 TYPE 2 TYPE 3, 4	280 mm 強 265 mm 強 130 mm	7.1
	② 「FBR燃料用中空パレットの製造試験」	150 mm	7.2
	③ 「INTA-2, B5D-1, 2」 中空パレット製造	114 mm	7.2
	④ 今回試作した中空コアロッド チップ径 = $\phi 2.50$ mm (1段径)  " = $\phi 1.00 \sim \phi 2.00$ mm [ • 2段径の先端径 • 元の方の径は、すべて $\phi 2.50$ mm ]	85 mm  40 mm (先端径部) 85 mm (2段合計)	図-23

表-8 形状設計のポイントとその具体策（続き）

形状設計のポイント	具 体 策		
表面粗さが、極力滑らかであること。	表面粗さは、中空コアロッドのチップ部を現状より滑らかにした。 (中空ペレット試験、製造名称) (記号) (最終加工法) (表面あらさ)		
	①G-103カムプレス中テスト TYPE 1~4	▽▽▽▽▽ ラップ仕上げ	0.4-S
	③「INTA-2, B5D」中空ペレット製造	▽▽▽▽▽ 同 上	0.8-S
	④今回試作した中空コアロッド	L-5000 ▼▼	同 上 0.2-S
	(▼▼は、住友電工の社内規格。表面あらさは、JIS B0601 参照)		
応力集中しにくい形状であること。	チップと母材の接合部分は、R10 の加工をして、接合部分のチップに応力集中しにくい形状とした。（図-23参照） なお、従来のロッドは、すべてチップと母材の接合部分にR加工をしていなかった。このため、接合部分のチップに応力集中し易かった。（7.1、7.2 参照）		



## 4.4 強度、寿命の予備解析

## (1) 中空コアロッドの座屈強度解析

## ① 素材の強度

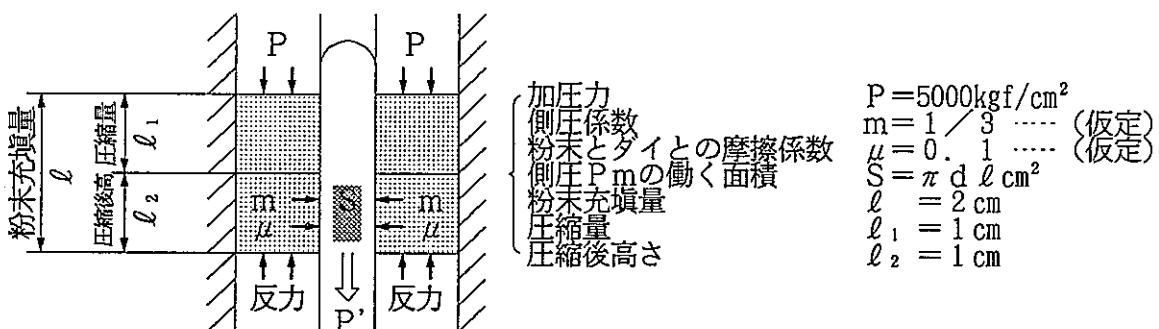
表-9に中空コアロッドに使用した素材のヤング率と圧縮強度を示す。

表-9 各種材料のヤング率と圧縮強度

素 材 材	超硬合金				高速度鋼
	AF1	GH880R	GH96R	G5	
材質名	AF1	GH880R	GH96R	G5	SKH51
ヤング率(kgf/mm <sup>2</sup> )	57000	49000	46000	57000	21000
圧縮強度(kgf/mm <sup>2</sup> )	580	-	289	47.7	-

## ② 中空コアロッドを圧縮する力（軸圧縮力）の推定

ダイに充填された粉末が上パンチの加圧力Pによって圧縮された場合、中空コアロッドに働く軸圧縮力P'を推定する。図-3に軸圧縮力推定モデルを示す。



軸圧縮力  $P'$  は、

$$P' = P \cdot m \cdot \mu \cdot S \quad (\text{kgf})$$

となる。 $P'$  の計算結果を表-10に示す。

表-10 径ごとの軸圧縮力 ( $P'$ )

中空コアロッドチップ径 $d$ (mm)	1.0	1.5	2.0	2.5
軸圧縮力 (kgf)	52.3	78.5	104.7	130.8

### ③ 中空コアロッドの座屈モデル

#### (1) 座屈モデルの考え方

中空コアロッドの  $\phi 8\text{ mm}$  以上の部分は剛体と考え、先端チップ部 ( $\phi 2.5\text{ mm}$  以下)について座屈限界を考えることとした。

一様断面中空コアロッドの座屈限界モデルを図-4に、段付き中空コアロッドの座屈限界モデルを図-5に示す。何方も、両端固定のモデルである。

先端チップ部の長さ  $l$  は、 $90, 80, 70, 60\text{ mm}$  について計算した。

図-2を見ると明らかなように、実際の成形時に最大の荷重が中空コアロッドに働くのは、「⑤加圧終了時」の時点である。この時中空コアロッドは、先端から $30\text{ mm}$ が上・下パンチ及び圧粉体で拘束されている。したがって、この場合の座屈強度は、 $l = 60\text{ mm}$ で計算するのが妥当である。

次に上パンチの突っ込み量について見てみると、図-2の「⑤加圧終了時」では $10\text{ mm}$ になっているが、実際の成形においては $0 \sim 10\text{ mm}$ の間で変動する。したがって、上パンチの突っ込み量 =  $0\text{ mm}$ の場合、つまり  $l = 70\text{ mm}$  の場合でも計算する必要がある。

なお、参考に  $l = 90, 80\text{ mm}$  の場合についても、計算することとした。

#### (2) 座屈モデルと計算式

##### ① 一様断面中空コアロッドの座屈モデルと計算式

一様断面中空コアロッドの座屈モデルを図-4に示す。

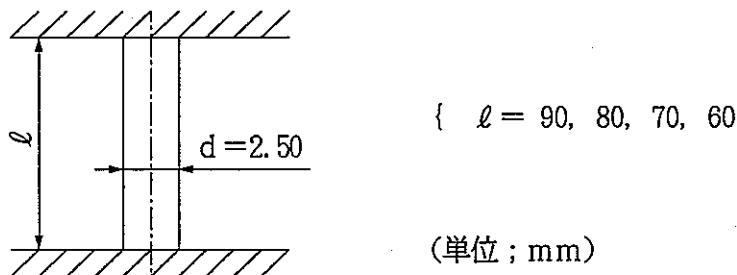


図-4 一様断面中空コアロッドの座屈モデル

座屈荷重は、(1)式(オイラー式)<sup>1)</sup>により計算した。

$$P = \frac{4 \pi^2 E I}{l^2} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P ; \text{座屈荷重 (kgf)} \\ E ; \text{ヤング率 (kgf/mm}^2\text{)} \\ I ; \text{最小断面二次モーメント (mm}^4\text{)} \\ I = \frac{\pi}{64} \cdot d^4 \\ l ; \text{チップ部長さ (mm)} \end{array} \right.$$

④ 段付き中空コアロッドの座屈モデルを図-5に示す。

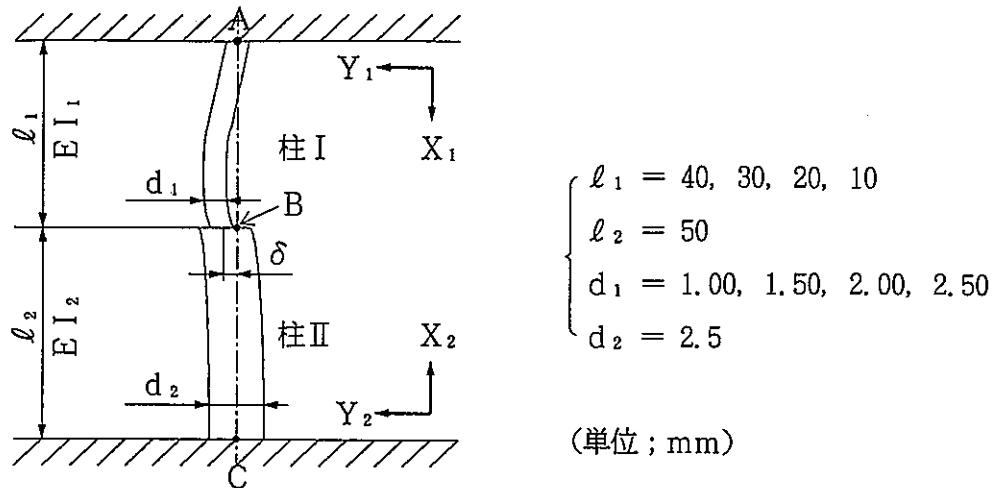


図-5 段付き中空コアロッドの座屈モデル

<式の導入>

図-4を参照して、柱I (AB) と柱II (BC) に分けて考える。

柱IについてはAを原点にX<sub>1</sub>座標、柱IIはCを原点にX<sub>2</sub>座標を選ぶと、応力と歪の関係から以下の二階微分方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} + K_1^2 (y_1 - \delta) &= 0, & K_1^2 &= \frac{P}{E I_1} & ; \text{柱I} \\ \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} + K_2^2 (y_2 - \delta) &= 0, & K_2^2 &= \frac{P}{E I_2} & ; \text{柱II} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $\delta$ は結合点Bにおける柱Iのたわみ、 $I_1, I_2$ は各々の柱の断面二次モーメント ( $I_{1,2} = \pi/64 \cdot d_{1,2}^4$ )、Eはヤング率(表-9参照)、Pは軸圧縮力。(表-10参照)

A点、C点で固定、すなわち  $y_1(0) = y_1'(0) = y_2(0) = y_2'(0) = 0$  を満たす解は、

$$\begin{aligned} y_1(x_1) &= \frac{\delta}{1 - \cos K_1 \ell_1} (1 - \cos K_1 X_1) \\ y_2(x_2) &= \frac{\delta}{1 - \cos K_2 \ell_2} (1 - \cos K_2 X_2) \end{aligned} \quad (3)$$

B点でたわみ角が連続、すなわち  $y_1'(\ell_1) = -y_2'(\ell_2)$  より、

$$\frac{\delta}{1 - \cos K_1 \ell_1} \sin K_1 \ell_1 = \frac{\delta}{1 - \cos K_2 \ell_2} \sin K_2 \ell_2 \quad (4)$$

(  $\delta \neq 0$  )

これを変形して、

$$K_1 \tan \frac{K_2 \ell_2}{2} + K_2 \tan \frac{K_1 \ell_1}{2} = 0 \quad (5)$$

(5)式を満たす最小のPが、座屈荷重となる。

#### ④ 中空コアロッドの座屈荷重

(1)式及び(5)式から求めた中空コアロッドの座屈荷重を、表-11に示す。

表-11 中空コアロッドの座屈荷重 (kgf) (括弧内は安全率)

ロッド径 <i>d</i> (mm)	コアロッド長さ (mm)		座 屈 荷 重					軸圧縮力 <i>P'</i> (kgf)	コアロッド 形状	
	<i>ℓ</i>	<i>ℓ<sub>1</sub></i>	AF1	GH880R	GH96R	G5	SKH			
$\phi 1.00$	90	40	26 ( 0.5)	22 ( 0.4)	21 ( 0.4)	26 ( 0.5)	10 ( 0.2)	52.3	段付き	
	80	30	43 ( 0.8)	37 ( 0.7)	35 ( 0.7)	43 ( 0.8)	16 ( 0.3)			
	70	20	86 ( 1.6)	74 ( 1.4)	70 ( 1.3)	86 ( 1.6)	32 ( 0.6)			
	60	10	292 ( 5.6)	251 ( 4.8)	236 ( 4.5)	292 ( 5.6)	108 ( 2.1)			
$\phi 1.50$	90	40	125 ( 1.6)	108 ( 1.4)	101 ( 1.3)	125 ( 1.6)	46 ( 0.6)	78.5	段付き	
	80	30	197 ( 2.5)	169 ( 2.2)	159 ( 2.0)	197 ( 2.5)	73 ( 0.9)			
	70	20	369 ( 4.7)	317 ( 4.0)	298 ( 3.8)	369 ( 4.7)	136 ( 1.7)			
	60	10	912 (11.6)	784 (10.0)	736 ( 9.4)	912 (11.6)	356 ( 4.3)			
$\phi 2.00$	90	40	325 ( 3.1)	280 ( 2.7)	262 ( 2.5)	325 ( 3.1)	120 ( 1.1)	104.7		
	80	30	466 ( 4.5)	401 ( 3.8)	376 ( 3.6)	466 ( 4.5)	172 ( 1.6)			
	70	20	718 ( 6.9)	617 ( 5.9)	580 ( 5.5)	718 ( 6.9)	265 ( 2.5)			
	60	10	1145 (10.9)	985 ( 9.4)	924 ( 8.8)	1145 (10.9)	422 ( 4.0)			
$\phi 2.50$	90	40	533 ( 4.1)	458 ( 3.4)	430 ( 3.3)	533 ( 4.1)	196 ( 1.5)	130.8	一様 断面	
	80	30	674 ( 5.2)	580 ( 4.4)	544 ( 4.2)	674 ( 5.2)	248 ( 1.9)			
	70	20	881 ( 6.7)	757 ( 5.8)	710 ( 5.4)	881 ( 6.7)	324 ( 2.5)			
	60	10	1199 ( 9.2)	1030 ( 7.9)	967 ( 7.4)	1199 ( 9.2)	442 ( 3.4)			
ヤング率 (kg/mm <sup>2</sup> )			57000	49000	46000	57000	21000			

■ ■ ■ ■ ■ ; 安全率 (座屈荷重 *P* / 軸圧縮力 *P'*) ≥ 2

表-11の計算結果をグラフ化し、図-6～11に示す。

図-6には、鋼種をパラメータとした $\ell_1 = 20\text{mm}$ の場合の座屈荷重を示す。

図-7には、鋼種をパラメータとした $\ell_1 = 10\text{mm}$ の場合の座屈荷重を示す。

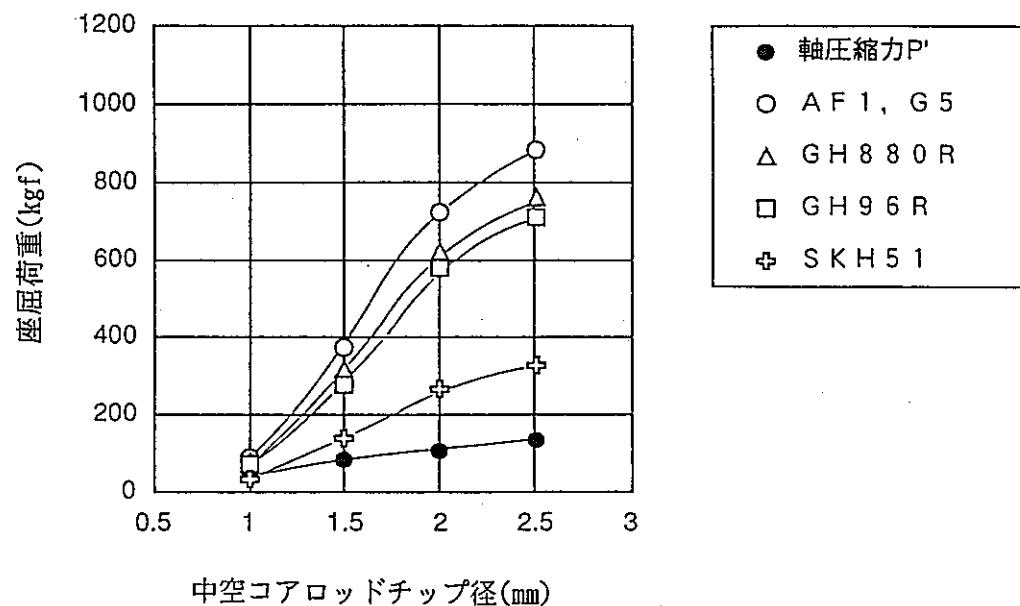


図-6  $\ell_1 = 20\text{mm}$  の場合の座屈荷重

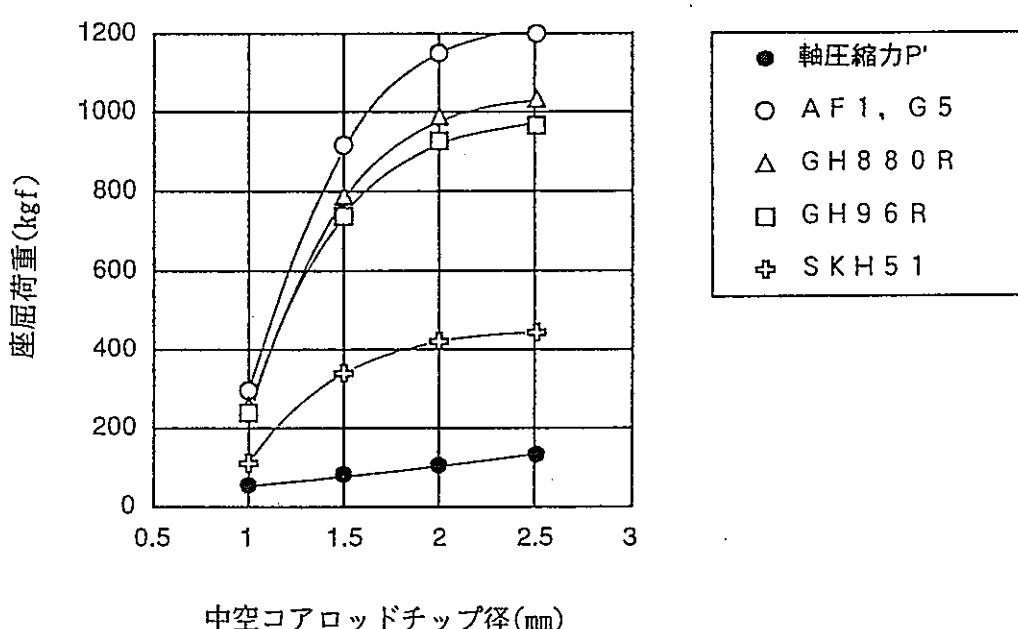


図-7  $\ell_1 = 10\text{mm}$  の場合の座屈荷重

図-8には、 $\ell$ に長さをパラメータとしたAF1、G5の座屈荷重を示す。

図-9には、 $\ell$ に長さをパラメータとしたGH880Rの座屈荷重を示す。

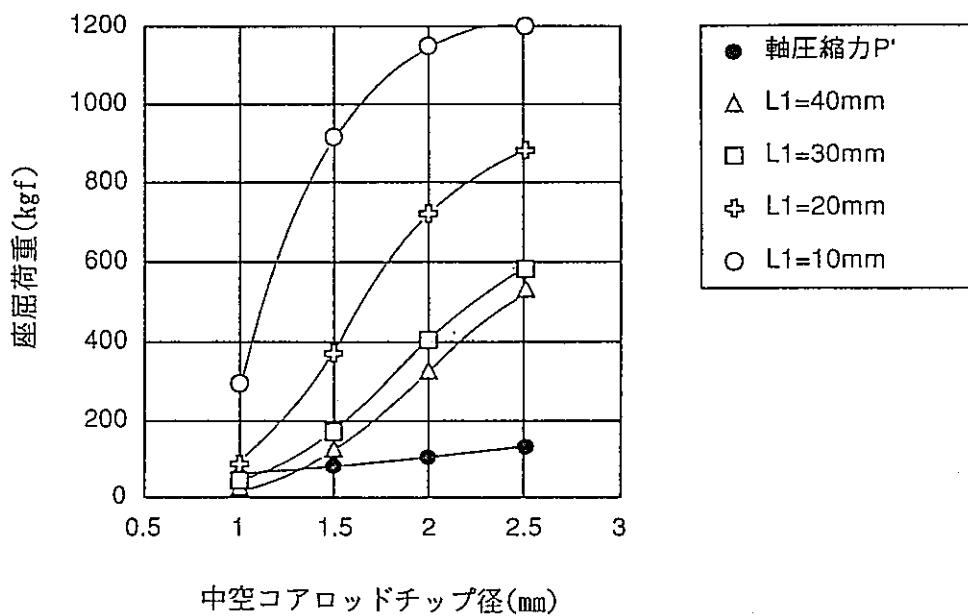


図-8 AF1、G5の座屈荷重

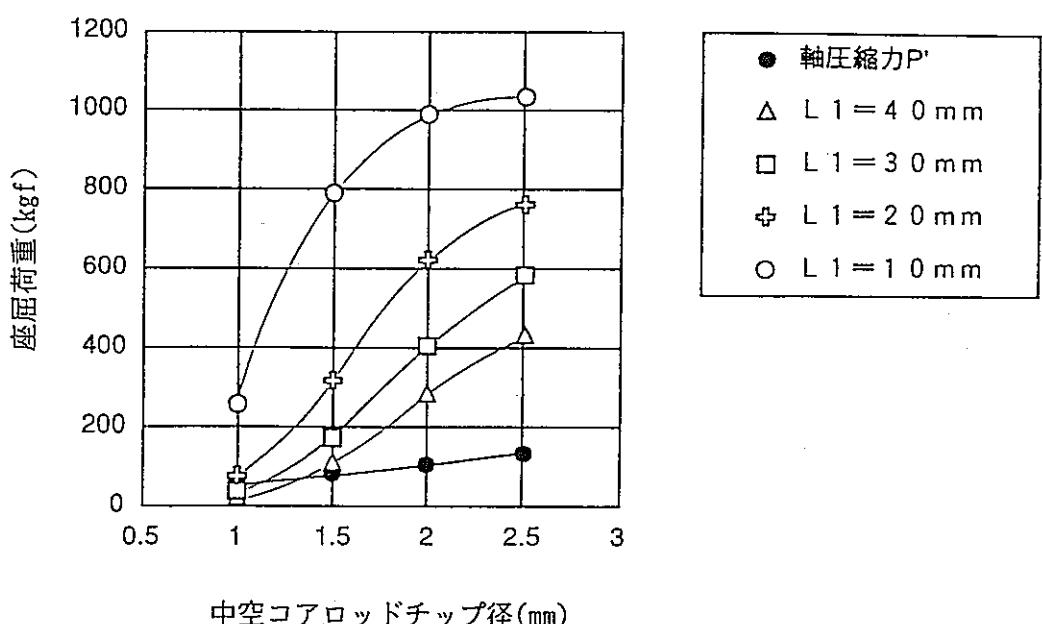


図-9 GH880Rの座屈荷重

図-10には、 $\ell$ に長さをパラメータとしたGH 9 6 Rの座屈荷重を示す。  
 図-11には、 $\ell$ に長さをパラメータとしたSKH 5 1の座屈荷重を示す。

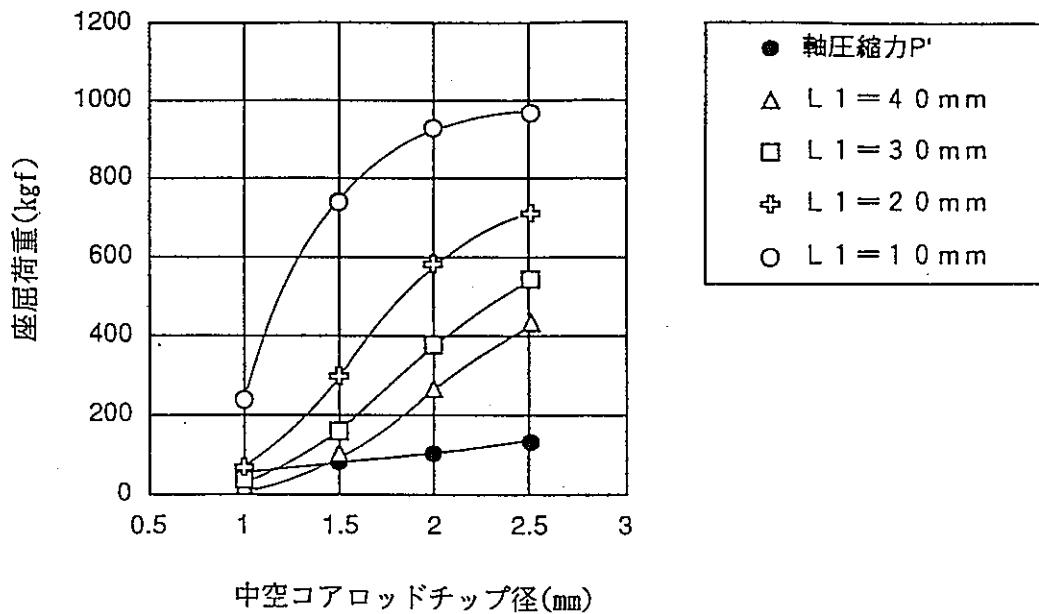


図-10 GH 9 6 Rの座屈荷重

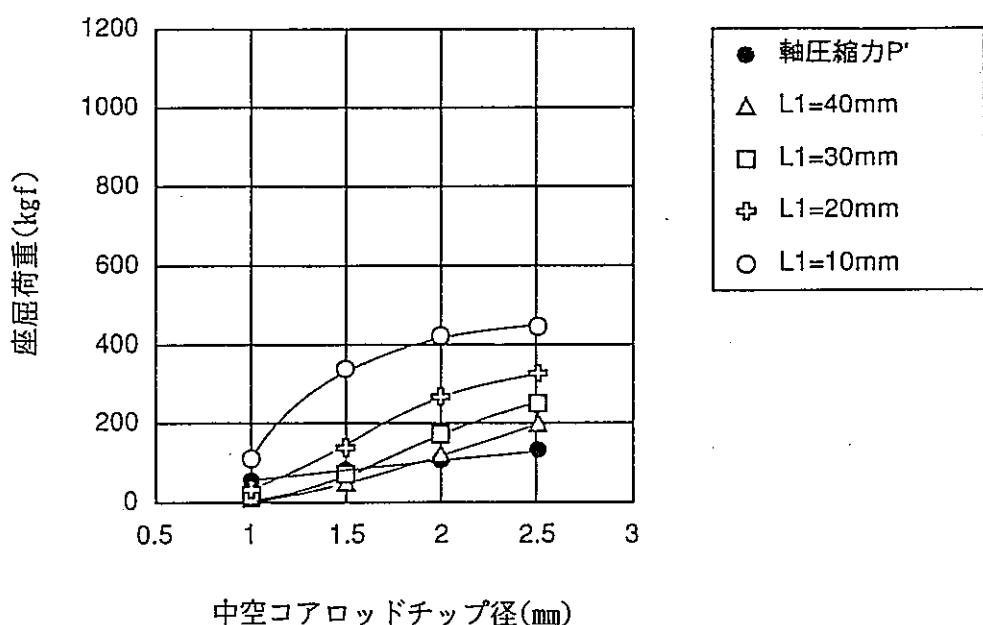


図-11 SKH 5 1の座屈荷重

## ⑤ 中空コアロッドの座屈荷重解析結果

### (1) 結 果

(1)式及び表-11より次のことが言える。

- ・中空コアロッドのヤング率Eが高いほど、座屈荷重Pも高い。
- ・中空コアロッドチップ部の直径dが大きいほど、座屈荷重Pも高い。
- ・中空コアロッドチップ部 $\ell_1$ が短いほど、座屈荷重Pが高い。

表-11及び図-6、7より次のことが言える。

- ・ $\ell_1 = 20\text{mm}$  の場合、SKH51の $d = \phi 1.00\text{mm}$  のもの以外はすべて、座屈限界荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。
- ・ $\ell_1 = 10\text{mm}$  の場合、すべての中空コアロッドで座屈荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。

表-11及び図-8~11より次のことが言える。

- ・AF1、G5の場合、 $[\ell_1 = 30, 40\text{mm} \text{かつ } d = \phi 1.00\text{mm}]$  以外のすべての条件で、座屈荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。
- ・GH880R及びGH96Rの場合、 $\ell_1 = 10, 20\text{mm}$  の条件では、すべての径dで座屈荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。
- ・ $\ell_1 = 10, 20\text{mm}$  の条件では、 $d = \phi 2.00\text{mm}$ 以上で座屈荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。
- ・SKH51の場合、 $\ell_1 = 10\text{mm}$  の条件では、すべての径dで座屈荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。
- ・ $\ell_1 = 20\text{mm}$  の条件では $d = \phi 1.50\text{mm}$ 以上、 $\ell_1 = 30$  及び $40\text{mm}$  の条件では $d = \phi 2.00\text{mm}$ 以上で座屈荷重Pが軸圧縮力P'を上回った。

### (2) まとめ

これまで考えてきたのは、静荷重における座屈荷重である。実際の成形時における荷重の掛かり方は、静荷重ではなく急速荷重<sup>1)</sup>に相当する。

急速荷重の応力 $\sigma$ は、静荷重の2倍になる<sup>1)</sup>ことから、表-15の安全率2以上のものが、座屈強度解析上、使用可能と判断すべきである。

安全率2以上のものは、 $\ell_1=10\sim20\text{mm}$ の場合、以下の中空コアロッドとなる。

- ・AF1、G5、GH880R、GH96R ;  $d \geq \phi 1.50\text{mm}$
- ・SKH51 ;  $d \geq \phi 2.00\text{mm}$

## (2) 中空コアロッドの応力集中に対する強度解析

① 形状係数<sup>1), 4), 5)</sup>

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (6) \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha_k \\ \sigma_{max} \\ \sigma_n \end{array} \right. ; \quad \begin{array}{l} \text{形状係数 (応力集中の程度を表す係数)} \\ \text{最大応力 (kg/mm²)} \\ \text{平均応力 (kg/mm²)} \end{array}$$

$$\therefore \sigma_{max} = \alpha_k \times \sigma_n \quad (7)$$

形状係数  $\alpha_k$  の値<sup>1)</sup> を表-12に示す。形状係数  $\alpha_k$  は、 $\rho/d$  が十分大きいため、図-14を外挿すると、すべての条件で  $\alpha_k$  は約 1.1 になる。

表-12 曲げ応力に対する形状係数 ( $\alpha_k$ )

中空コアロッド 直径 d (mm)	中空コアロッド 断面積 A (mm²)	段部の曲率半径 $\rho$ (mm)	D/d	$\rho/d$	形状係数 $\alpha_k$
φ 1.0	0.79	10	2.50	10	1.1
φ 1.5	1.77	10	1.67	6.7	1.1
φ 2.0	3.14	10	1.25	5.0	1.1

## ② 強度解析結果

応力集中は、断面積によらず形状係数によって変化する。

φ 1.50 も φ 2.00 も形状係数が同じなので、応力集中の度合いは同じと考えて良い。

したがって、本試作金型の強度解析をする際、最大応力 ( $\sigma_{max}$ ) は、外径によらず平均荷重 ( $\sigma_n$ ) を、1.1倍して計算すれば良い。

表-10径ごとの軸圧縮力 (P') は、応力集中を考慮すると、表-13のとおりとなる。

表-13 応力集中を考慮した径ごとの軸圧縮力 (P')

中空コアロッドチップ部外径 (mm)	1.0	1.5	2.0	2.5
軸圧縮力 (kgf)	58	86	115	144

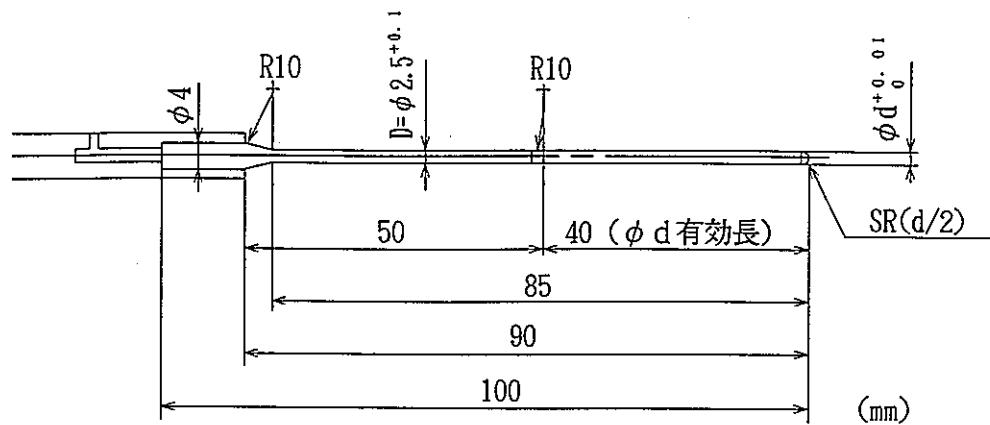


図-12 中空コアロッドチップ部拡大図

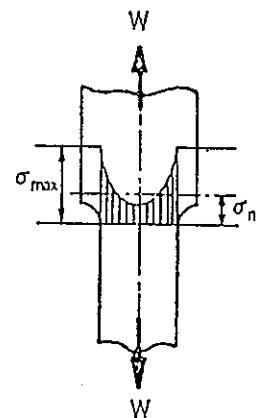


図-13 段付部で応力が集中する様子<sup>1)</sup>

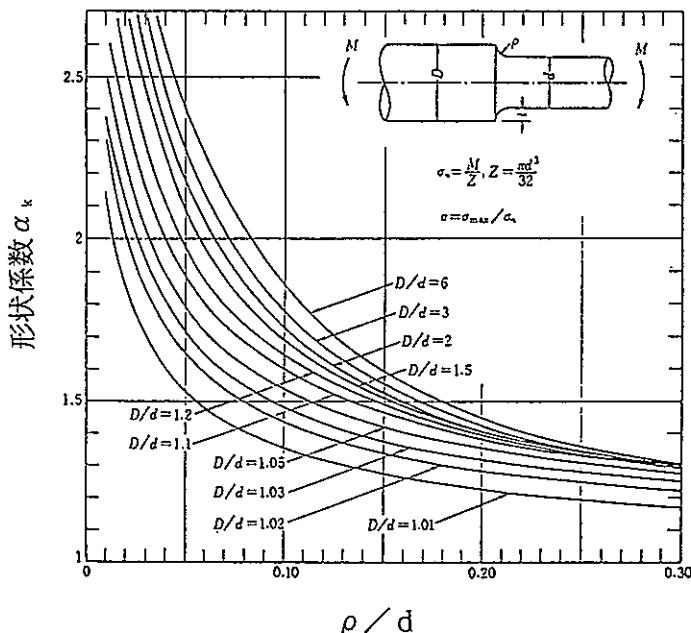


図-14 段付き丸棒の曲げ応力に対する形状係数<sup>4)</sup>

応力集中を考慮した軸圧縮力に対するコアロッドの座屈荷重の安全率を表-14に示す。

表-14 中空コアロッド座屈荷重の安全率 (kgf)

ロッド径 $d$ (mm)	コアロッド長さ(mm)		座屈荷重の安全率					軸圧縮力 $P'$ (kgf)	コアロッド 形状	
	$\ell$	$\ell_1$	AF1	GH880R	GH96R	G5	SKH51			
$\phi 1.00$	90	40	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	52.3	段付き	
	80	30	0.7	0.6	0.6	0.7	0.3			
	70	20	1.5	1.3	1.2	1.5	0.6			
	60	10	5.0	4.3	4.1	5.0	1.9			
$\phi 1.50$	90	40	1.5	1.3	1.2	1.5	0.5	78.5	段付き	
	80	30	2.3	2.0	1.8	2.3	0.8			
	70	20	4.3	3.7	3.5	4.3	1.6			
	60	10	10.6	9.1	8.6	10.6	3.9			
$\phi 2.00$	90	40	2.8	2.4	2.3	2.8	1.0	104.7		
	80	30	4.1	3.5	3.3	4.1	1.5			
	70	20	6.2	5.4	5.0	6.2	2.3			
	60	10	10.0	8.6	8.0	10.0	3.7			
$\phi 2.50$	90	40	3.7	3.2	3.0	3.7	1.4	130.8	一様 断面	
	80	30	4.7	4.0	3.8	4.7	1.7			
	70	20	6.1	5.3	4.9	6.1	2.3			
	60	10	8.3	7.2	6.7	8.3	3.1			
ヤング率(kg/mm <sup>2</sup> )			57000	49000	46000	57000	21000			

■ ■ ■ ■ ■ ; 安全率(座屈荷重  $P$  / 軸圧縮力  $P'$ )  $\geq 2$

表-11で安全率が2以上となっている条件は、1条件 [ $d = \phi 1.00$ 、 $\ell_1 = 10$ 、SKH51] を除いて、表-14でも同じく安全率が2以上となっていた。

この結果から応力集中を考慮した場合、座屈強度解析上、使用可能と判断されるのは、以下の中空コアロッドとなる。なお、この結果は、5.3-(3)-⑤-(口)のまとめと同じであった。

$$\ell_1 = 10 \sim 20 \text{ mm} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{AF1, G5, GH880R, GH96R} \quad ; \quad d \geq \phi 1.50 \text{ mm} \\ \text{SKG51} \quad ; \quad d \geq \phi 2.00 \text{ mm} \end{array} \right.$$

### (3) 中空コアロッドの疲労破壊に対する強度解析

#### ① 疲労破壊について

材料に変動負荷、あるいは繰返し荷重が連続して働くときは、材料の内部に生ずる応力が弾性限度を越えなくても、材料はだんだん弱くなり遂には破断する。

ある値以下の荷重であれば、繰返し荷重が働いても破損しない値がある。この値を疲れ限度という。

中空コアロッドの疲れ限度に影響を与える要因は、以下のものがある。<sup>1), 2)</sup>

#### (i) 寸法効果

径が太くなるほど、疲れ限度が低下する。（図-15、16参照）<sup>2)</sup>

中空コアロッドのような小径のものについては、無視するほうが安全側である。

#### (ii) 表面効果

材料の表面が平滑に仕上げるほど、疲れ限度が向上する。（図-17参照）<sup>2)</sup>

中空コアロッドは、表面粗さを 0.2 S で製作しており、試験片を同等又はこれより粗めにすれば、安全側の評価ができる。

#### (iii) 切り欠き効果

切り欠きや段付き部があると、疲れ限度が低下する。

ただし、 $\rho/d > 1$  であれば、ほとんど問題にしなくてもよい。（図-18、19参照）<sup>2)</sup>

その他、応力の種類によっても疲れ限度が異なる。<sup>1, 8)</sup> したがって、中空コアロッドの疲れ限度を測定しようとした場合、実際と同じ引張・圧縮応力を掛けられる単軸圧縮疲労試験機を用いて測定することが望ましい。（一般的疲労試験データは、回転曲げ試験がほとんどで、引張・圧縮・ねじり試験などは遙に少ない。一般に、回転曲げの疲れ限度が一番大きく、引張圧縮、ねじりの順で小さい値を示す。図-20参照）

引張強さは、硬度とともに増加するが、ある限度を越せばむしろ低下する。<sup>1, 8)</sup>（図-21参照）

速度効果は、400 ~10000サイクル/min程度の通常の疲労試験の範囲ではほとんど現れないが、極低速では疲れ限度が低下して現れ、逆に15000サイクル/min以上の高速では、速度の上昇とともに疲れ限度が増すことが知られている。<sup>3)</sup>

中空コアロッドの材質は、超硬材など疲れ限度が現れないものもある。SKH51もかなり高硬度材料であり、疲れ限度が現れない可能性がある。

中空コアロッドの座屈強度解析上、使用可能と判断されたものについて、「材料の疲れ限度 > 中空コアロッドに働く軸圧縮応力」であれば、疲労破壊せず使用可能と判断できる。逆に、「材料の疲れ限度 < 中空コアロッドの軸圧縮応力」であれば、疲労する可能性があると判断される。

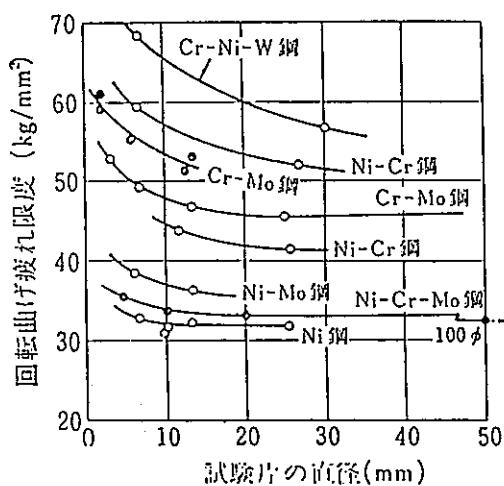


図-15 合金鋼の回転曲げ疲れ限度に及ぼす試験片直徑の影響<sup>2)</sup>

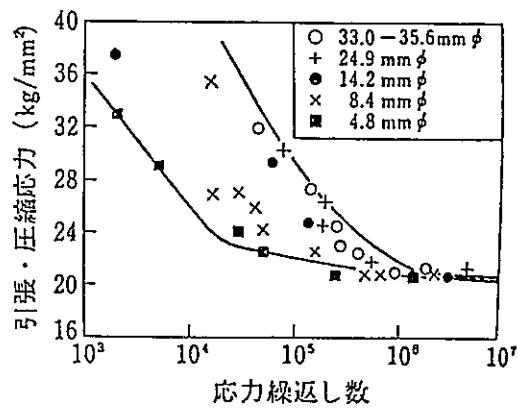


図-16 直径の異なる平滑試験片の引張・圧縮疲れ試験<sup>2)</sup>

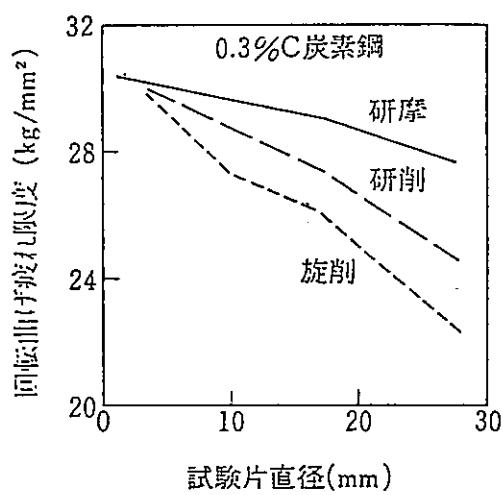


図-17 表面仕上げ粗さと試験片寸法の疲れ限度に及ぼす効果<sup>2)</sup>

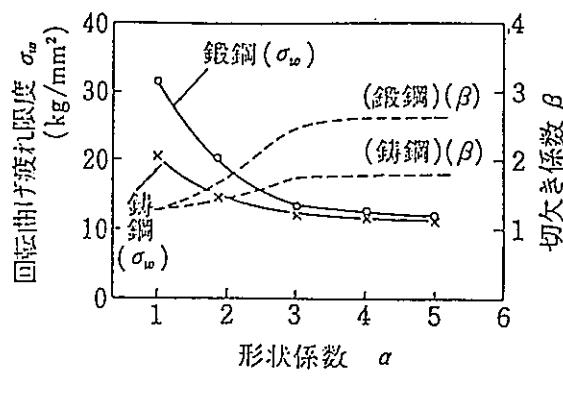


図-18 Cr-Mo共析鋼の回転曲げ疲れ限度と  
形状係数、切り欠き効果の関係<sup>2)</sup>

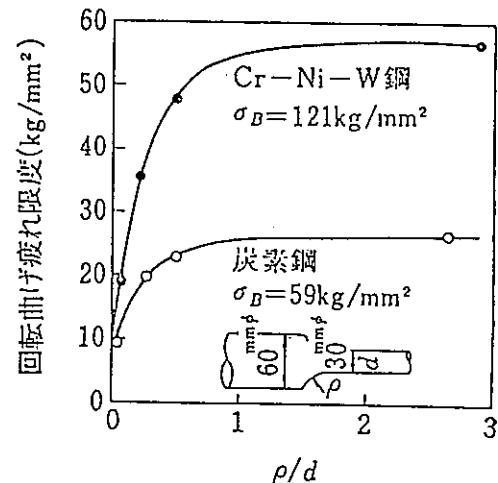
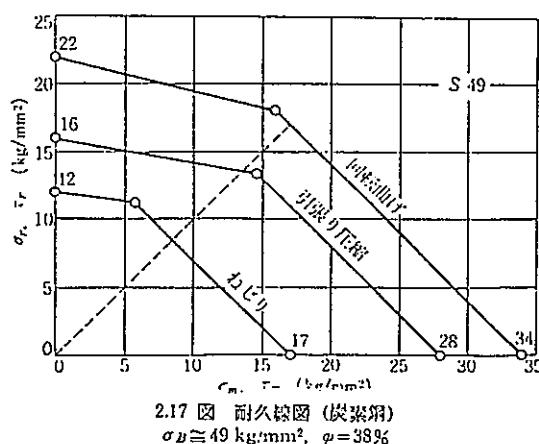


図-19 段付き丸棒の曲げ疲れ限度<sup>2)</sup>



2.17 図 耐久線図(炭素鋼)  
 $\sigma_B \cong 49 \text{ kg/mm}^2, \rho = 38\%$

図-20 応力の種類と疲れ限度の例<sup>18)</sup>

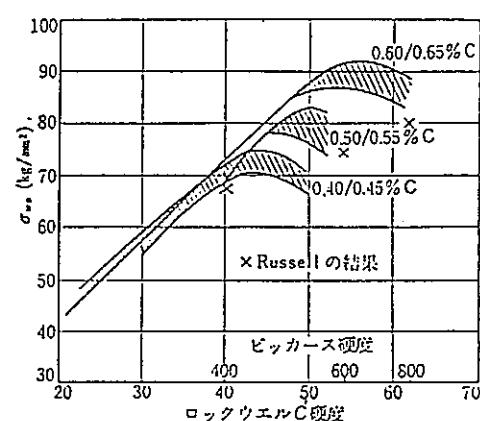


図-21 鋼の硬度と疲れ限度との関係<sup>18)</sup>

## ② 中空コアロッドの疲労強度解析

### (イ) 軸圧縮応力の推定

表-13のデータから求めた中空コアロッドに働く軸圧縮応力 $\sigma_1$ を、表-15に示す。

表-15 中空コアロッドに働く軸圧縮応力 $\sigma_1$

中空コアロッドチップ外径(mm)	1.00	1.50	2.00	2.50
軸圧縮応力 $\sigma_1$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	74	49	37	30

### (ロ) 中空コアロッドの疲労強度解析

表-15の軸圧縮応力 $\sigma_1$ よりも中空コアロッドの疲労強度が高ければ、疲労破壊せず使用可能である。

座屈強度解析上、使用可能と判断した中空コアロッドは、超硬材の場合チップ外径が $\phi 1.50\text{mm}$ 以上のもの、SKH51の場合、外径が $\phi 2.00\text{mm}$ 以上のものであった。

よって、超硬材でチップ外径が $\phi 1.50\text{mm}$ 以上のものは $49 \text{ kgf/mm}^2$ 以上、SKH51でチップ外径が $\phi 2.00\text{mm}$ 以上のものでは $37 \text{ kgf/mm}^2$ 以上の疲れ限度を有する材料であれば、使用可能と判断する。

## ③ SKH51製中空コアロッドの疲れ限度の推定

中空コアロッドの疲れ限度を正確に知るためにには、実際の成形状態に近い単軸疲労試験機に中空コアロッドの試作体をセットして、疲労試験を行うしかない。

しかし、①で列記したような効果を無視すれば、文献から得た同材質の疲労試験データと軸圧縮応力を比較することで、ある程度の寿命の評価が可能であると思われる。

中空コアロッドの寿命評価は、成形時に働く軸圧縮応力（表-15参照）と疲れ限度の何方が大きいかで判断することが目的であり、①で列記したような効果を詳細に調査し、関係を把握することが目的ではない。

よって、以下に文献データから求めたSKH51製中空コアロッドの疲れ限度について、推定してみた。

### (イ) SKH51高速疲労試験データから見たSKH51製中空コアロッドの疲れ限度の推定

座屈強度評価上使用可能と判断したのは、SKH51の場合 $\ell_1=10\sim20\text{mm}$ かつ、 $d \geq \phi 2.00\text{mm}$ の中空コアロッドであった。（表-18及び5.3-(3)-⑤-⑩参照）

表-19の該当箇所を見ると、軸圧縮応力 $\sigma_1$ は $30\sim37 \text{ (kgf/mm}^2)$ となっている。

ここで、SKH51の高速疲労試験データ<sup>3)</sup>を見ると、 $\sigma_2 = 110 \sim 120 \text{ kg/mm}^2$  のとき、 $6.56 \times 10^4$  サイクルで疲労破壊している。（資料集-7.7 参照）

よって、

$$\text{軸圧縮応力 } \sigma_1 < \text{疲労破壊時の応力 } \sigma_2$$

となり、少なくとも $6.56 \times 10^4$  サイクルまでは、成形可能と推定される。

この値は、目標である $1 \times 10^6$  サイクルを満足していない。

#### (b) SKD11疲労試験データから見たSKH51材の疲れ限度の推定

SKHに近い材料で疲れ限度を求めたデータが有った。SKD11は、SKH51よりヤング率が低い材質である。したがって、SKH51より座屈強度、疲労強度とも弱いことが予想される。よって、SKD11の疲労試験データから試算し、疲れ限度が十分であれば、SKH51でも十分である可能性も高くなる。

SKD11の疲労試験データ<sup>3)</sup>を見ると、疲れ限度は $21 \sim 65 \text{ kg/mm}^2$ となっている。（資料集7.8 参照）

(i)に示したように、座屈強度評価上使用可能と判断したSKH51、 $\ell_1 = 10 \sim 20 \text{ mm}$ ,  $d \geq \phi 2.00 \text{ mm}$ の中空コアロッドに成形時に働く軸圧縮応力は、 $30 \sim 61 (\text{kgf/mm}^2)$ と推定される。この値とSKD11の疲れ限度を比較すると、以下のようになる。

$$\text{軸圧縮応力 } \sigma_1 \text{ (30~37)} > \text{疲れ限度① (21)}$$

$$\text{軸圧縮応力 } \sigma_1 \text{ (30~37)} > \text{疲れ限度② (27)}$$

$$\text{軸圧縮応力 } \sigma_1 \text{ (30~37)} < \text{疲れ限度③ (65)} \quad (\text{単位: kgf/mm}^2)$$

したがって、SKH51の疲れ限度が①、②と同等であれば、疲労破壊が発生する可能性があり、③と同等であれば、疲労破壊が発生しないと推定される。

③の材料は、目標である $1 \times 10^6$  サイクルを満足できると推定される。

SKH51製中空コアロッドの疲れ限度が①の材料と同じと仮定した場合、資料集7.8のFig. II-16・1から、以下のことが推定される。

- 中空コアロッドに $30 \text{ kgf/mm}^2$ の応力が働いたと仮定すると、 $2 \times 10^5$ 程度まで成形可能である。この値は目標である $1 \times 10^6$ を満足していない。

- 中空コアロッドに $37 \text{ kgf/mm}^2$ の応力が働いたと仮定すると、 $5 \times 10^4$ 程度まで成形可能である。この値は目標である $1 \times 10^6$ を満足していない。

同様に、SKH51製中空コアロッドの疲れ限度が②の材料と同じと仮定した場合、資料集7.8のFig. II-16・1から、以下のことが推定される。

- 中空コアロッドに $30 \text{ kgf/mm}^2$ の応力が働いたと仮定すると、 $3 \times 10^5$ 程度まで成形可能である。この値は目標である $1 \times 10^6$ を満足していない。

- ・中空コアロッドに  $37 \text{kgf/mm}^2$  の応力が働いたと仮定すると、 $2 \times 10^5$  程度まで成形可能である。この値は目標である  $1 \times 10^6$  を満足していない。

#### (b) 超硬材の疲れ限度について

超硬材は、その疲れ限度の測定例が非常に少なく、参考となるようなデータを見当たらなかった。

その理由の一つには、超硬材を含むセラミックスの破壊が脆性的であり、製品固有の欠陥（ポア、加工による小さな傷など）によって発生するため、その再現性がしばしば問題となり、そのような材料を疲労が問題となるような箇所（例えば、エンジンなど）に採用することがためらわれてきたことによる。（よって、材料の疲労試験データが少ない。）

一般にも、セラミックス材料の疲労試験は、金属材料の疲労試験の実績と比べて、まだまだヨチヨチ歩きといった状況にある。

よって、超硬材の疲れ限度についても、中空コアロッド試作品のそれについても、試験片の把持方法、試験機の選定（引張・圧縮、回転曲げ）、材料試験の試験片形状及び寸法など、検討とR&Dを重ねるとともに、破壊確率を考慮した統計的処理を行わないと、正しい評価が行えないおそれがある。

なお、SKH51製中空コアロッドの疲れ限度との比較においては、超硬材の方がヤング率で2～3倍高いため、疲れ限度もSKD11やSKH51より高いことが予想される。したがって、超硬材でチップ外径が  $\phi 1.50 \text{mm}$  以上の中空コアロッドは、使用できる可能性が高い。

#### (4) 上・下パンチの座屈および圧縮強度に対する検討

上パンチと下パンチとは、長さを除いて同一寸法であるので、全長が長く、座屈荷重のより小さな下パンチについてのみ検討する。

検討に使用した数値は次の通りである。

パンチ外径 $d_1$	$\phi 7.4$ (端面径でなく、一番細い部分の外径)
パンチ内径 $d_2$	$\phi 3.0$ (端面径でなく、一番太い部分の外径)
パンチ部長さ $l$	45 mm
パンチ材質	G5 (超硬合金 縦弾性係数 $E = 57000 \text{kgf/mm}^2$ ) " " 圧縮強度 $\sigma_1 = 477 \text{kgf/mm}^2$

##### ① 上・下パンチに作用する軸圧縮力

上・下パンチに作用する軸圧縮力は、次のように仮定した。

$$\text{加圧応力 } \sigma_2 ; 50 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{加圧力の作用面積 } S_1 ; \quad \pi / 4 \cdot d_0^2 = 44.2 \text{ mm}^2 \quad \left[ d_0 = \phi 7.5 ; \text{パンチ外径} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{軸圧縮力 } P_1 &= \sigma_2 \cdot S_1 \\ &= 2210 \text{ kgf} \\ &= 2.21 \text{ tonf} \end{aligned}$$

## ② 上・下パンチの座屈強度についての検討

上・下パンチとダイスのクリアランスが小さいので、両端固定の座屈のモデルとして、検討した。下パンチの座屈モデルを図-22に示す。

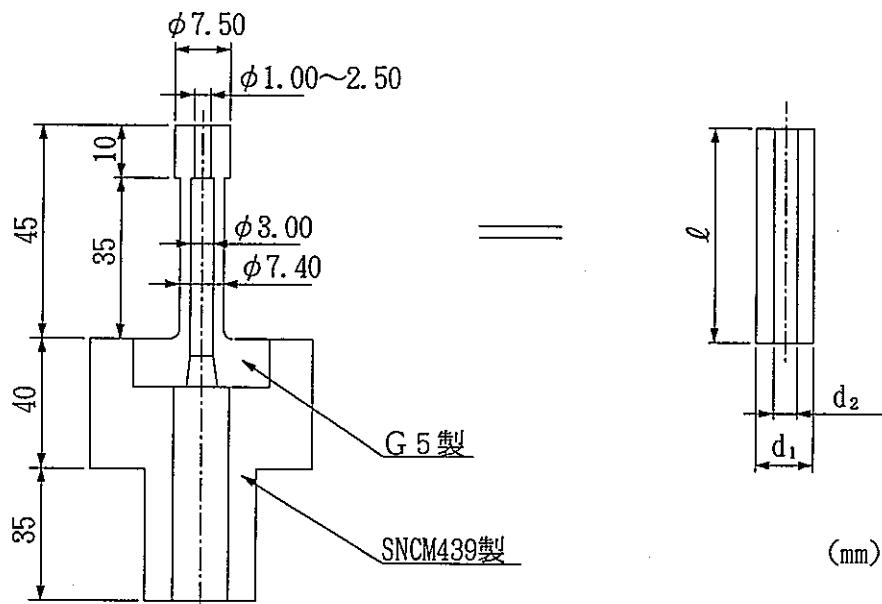


図-22 下パンチの座屈モデル

(1)式(オイラー式)により、図-28の座屈モデルの座屈荷重を計算すると次のようになる。

$$P_2 = \frac{4\pi^2 EI}{\ell^2} \quad (1)$$

$$= 159 \text{ tonf}$$

$P_2$  ; 座屈荷重 (kgf)  
 $E$  ; ヤング率 (kgf/mm<sup>2</sup>)  
 $I$  ; 最小断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)  
 $\ell$  ; チップ部長さ (mm)

$I = \frac{\pi}{64} \cdot (d_1^4 - d_2^4)$

参考のため、片端固定のモデルで計算すると

$$P_2 = 9.9 \text{ tonf}$$

上・下パンチに作用する軸圧縮力  $P_1$  に対して、下パンチの座屈荷重の方が十分大きい。従って、上・下パンチの座屈破壊は生じないと推定される。

### ③ 上下パンチの圧縮強度についての検討

上下パンチ断面に作用する圧縮応力を計算すると次のようになる。

$$\begin{aligned}\text{圧縮応力 } \sigma_3 &= \frac{P_1}{\left\{ \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \right\}} \\ &= 61 \text{ kgf/mm}^2\end{aligned}$$

超硬合金G5の圧縮強度 $\sigma_1$ は、 $477 \text{ kgf/mm}^2$ であるので、圧縮強度 $\sigma_1$ の方が圧縮応力 $\sigma_3$ より十分大きい。したがって、上・下パンチの圧縮破壊は生じないと推定される。

### ④ 上・下パンチの座屈および圧縮強度に対する検討結果

上・下パンチの強度については、仮定した軸圧縮力での使用には耐え得ると推定される。

## (5) 金型の強度解析の総括

### ① 中空コアロッド

#### (1) 座屈強度解析

以下の中空コアロッドは、座屈強度解析上、使用可能である。

- AF1、G5、GH880R、GH96R ; チップ外径 $d \geq \phi 1.50 \text{ mm}$
- SKH51 ; チップ外径 $d \geq \phi 2.00 \text{ mm}$

#### (2) 応力集中に対する強度解析

応力集中による強度解析は、中空コアロッドチップ径によらず、軸圧縮力が1.1倍されて働くと考えればよい。この場合でも、(1)座屈強度解析の結果に変化は無い。

#### (3) 疲労破壊に対する強度解析

チップ外径が $\phi 1.50 \text{ mm}$ 以上のものは $49 \text{ kgf/mm}^2$ 以上、チップ外径が $\phi 2.00 \text{ mm}$ 以上のものでは $37 \text{ kgf/mm}^2$ 以上の疲れ限度を有する材料であれば、使用可能である。

ただし、座屈強度解析上使用可能と判断した材質、寸法のもの((1)参照)でなければならない。

ちなみに文献データによれば、SKH51よりヤング率の低いSKD11の疲れ限度には、 $65 \text{ kgf/mm}^2$ と十分な疲れ限度を有するものもあった。よって、SKH51で $\phi 2.00 \text{ mm}$ 以上の中空コアロッドは、使用できる可能性が高い。

超硬材については、文献データが見当たらず推定できなかった。しかし、いずれの超硬もSKH51よりヤング率が約2～3倍も高いため、疲れ限度もSKD11やSKH51より高いことが予想される。したがって、超硬材でチップ外径がφ1.50mm以上の中空コアロッドは、使用できる可能性が高い。

## ② 上・下パンチ

### (1) 座屈強度解析

軸圧縮力より座屈荷重の方が十分大きく、座屈強度解析上、使用可能である。

### (2) 圧縮強度解析

圧縮応力より圧縮強度の方が十分大きく、圧縮強度解析上、使用可能である。

## 5. 中空ペレット用試作金型の製作結果

### 5.1 試作金型の形状、寸法

完成図を図-23～図-26に示す。

金型の寿命のポイントになる中空コアロッドの材質、形状、製作数量を表-16に示す。

上下パンチ、ダイスの材質、形状、製作数量を表-17に示す。

表-16 試作中空コアロッドの材質、形状、製作数量一覧表

ロッド先端チップ材質 (型番)	シャンク部材質	ロッド先端 チップ直径	製作数量
超々微粒超硬合金 (AF1)	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM 439)	φ1.00 mm	材質×チップ直径×2=総製作数量  5×4×2=40本
中粒超硬合金 (G5)		φ1.50 mm	
粗粒超硬合金 (GH96)		φ2.00 mm	
超粗粒超硬合金 (GH880)		φ2.50 mm	
高速度工具鋼 (SKH51)			

表-17 試作ダイス・パンチの材質、形状、製作数量一覧表

名称	チップ材質 (型番)	シャンク部材質	チップ直径	製作数量
上パンチ、 下パンチ	中粒超硬合金 (G5)	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM 439)	φ7.50mm	材質×ロッド直径×2=総製作数量 1×4×2=8本
ダイス	中粒超硬合金 (D2)			

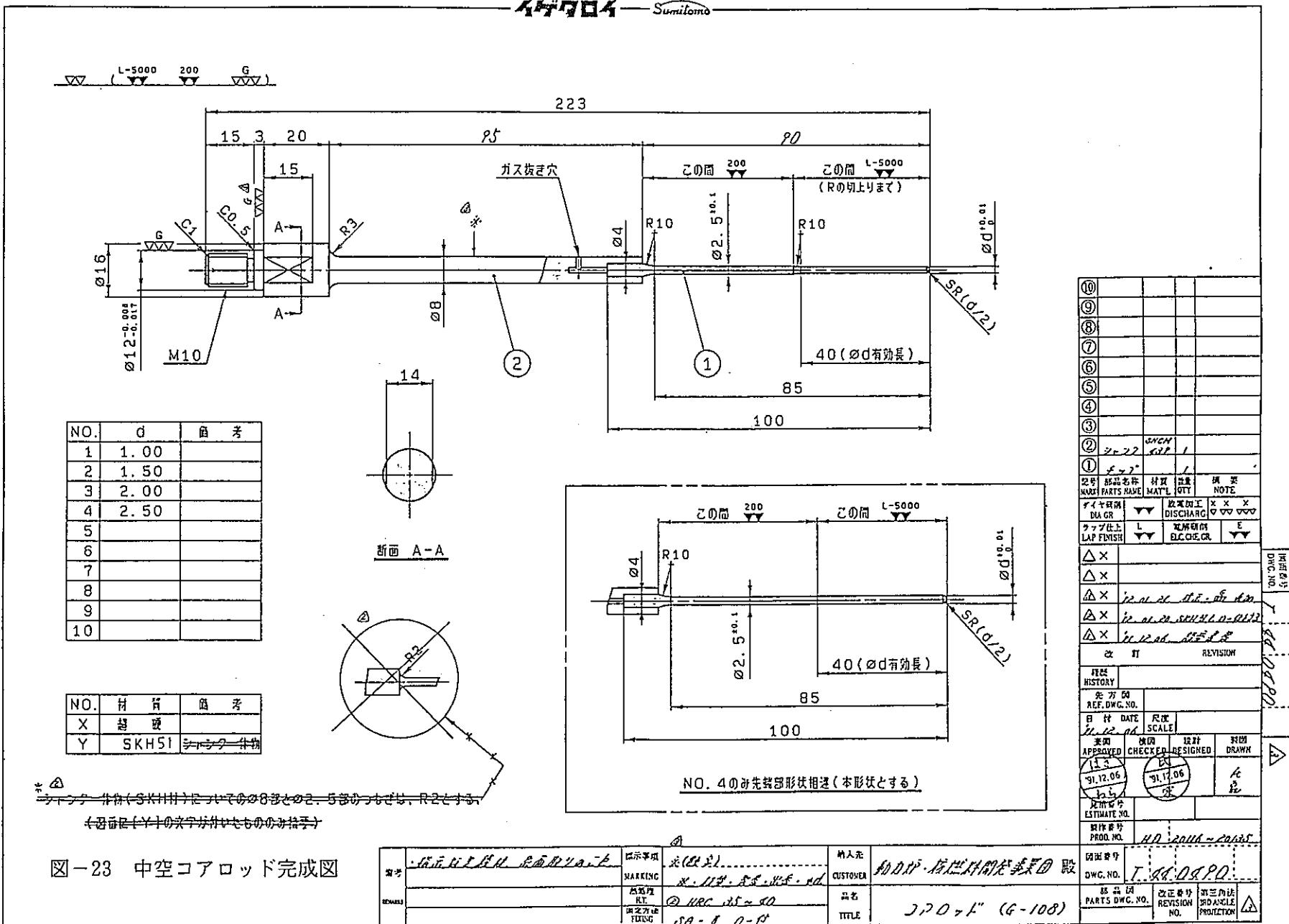


図-23 中空コアロッド完成図

K774A — Sumitomo —

( L-5000 800 200 G )

料番 NO.	D	P	Q	備 考
1	7.50	1.00		
2	7.50	1.50		
3	7.50	2.00		
4	7.50	2.50		
5				
6				
7				
8				
9				
10				

DWG. NO. 1-840XP.3

REV. II

HISTORY

先方用 REF. DWG. NO.

日付 DATE 比例 SCALE

実次 APPROVED CHECKED DESIGNER DRAWN

見積会員 ESTIMATE BY

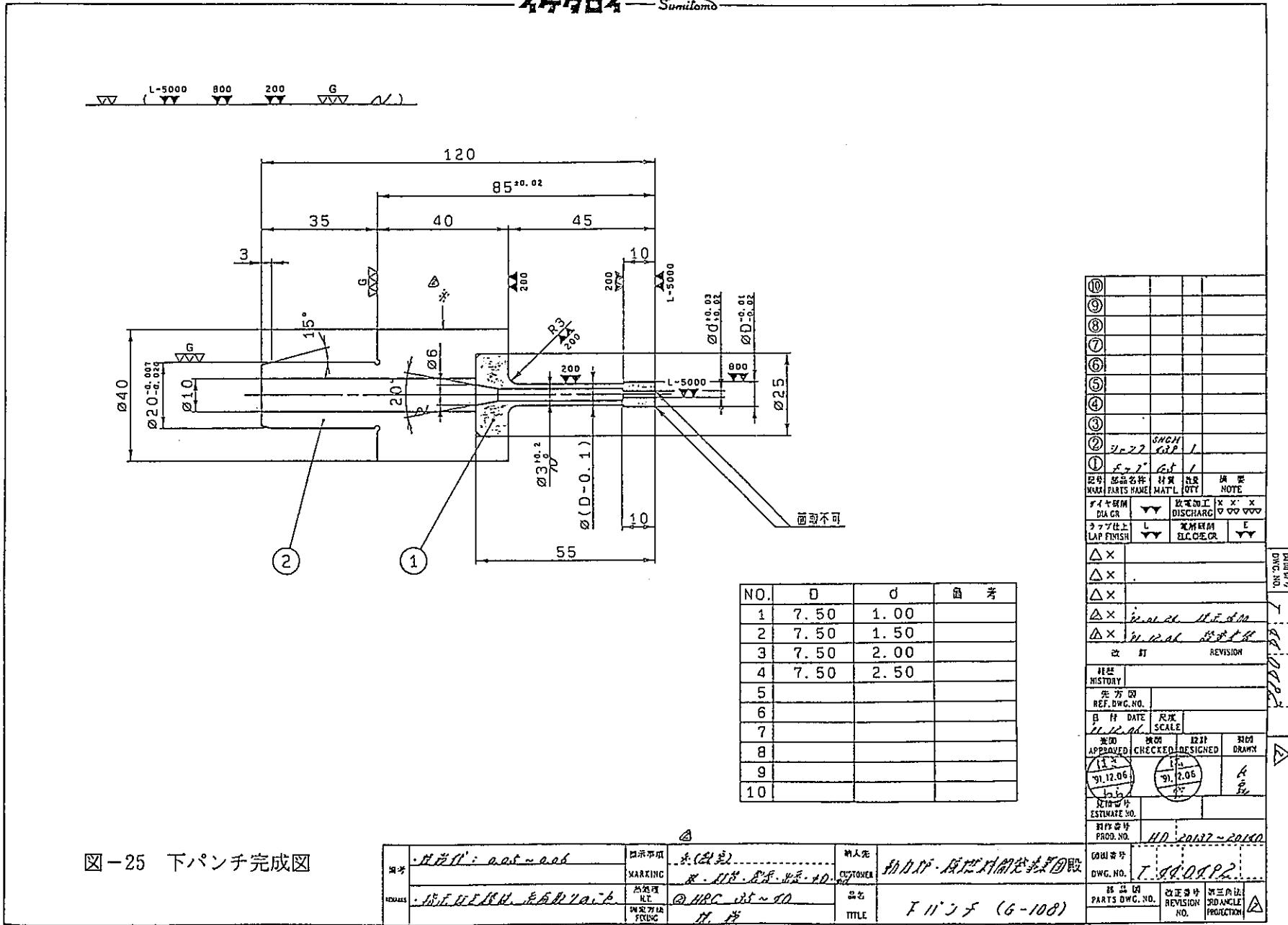
実行者 PROD. BY

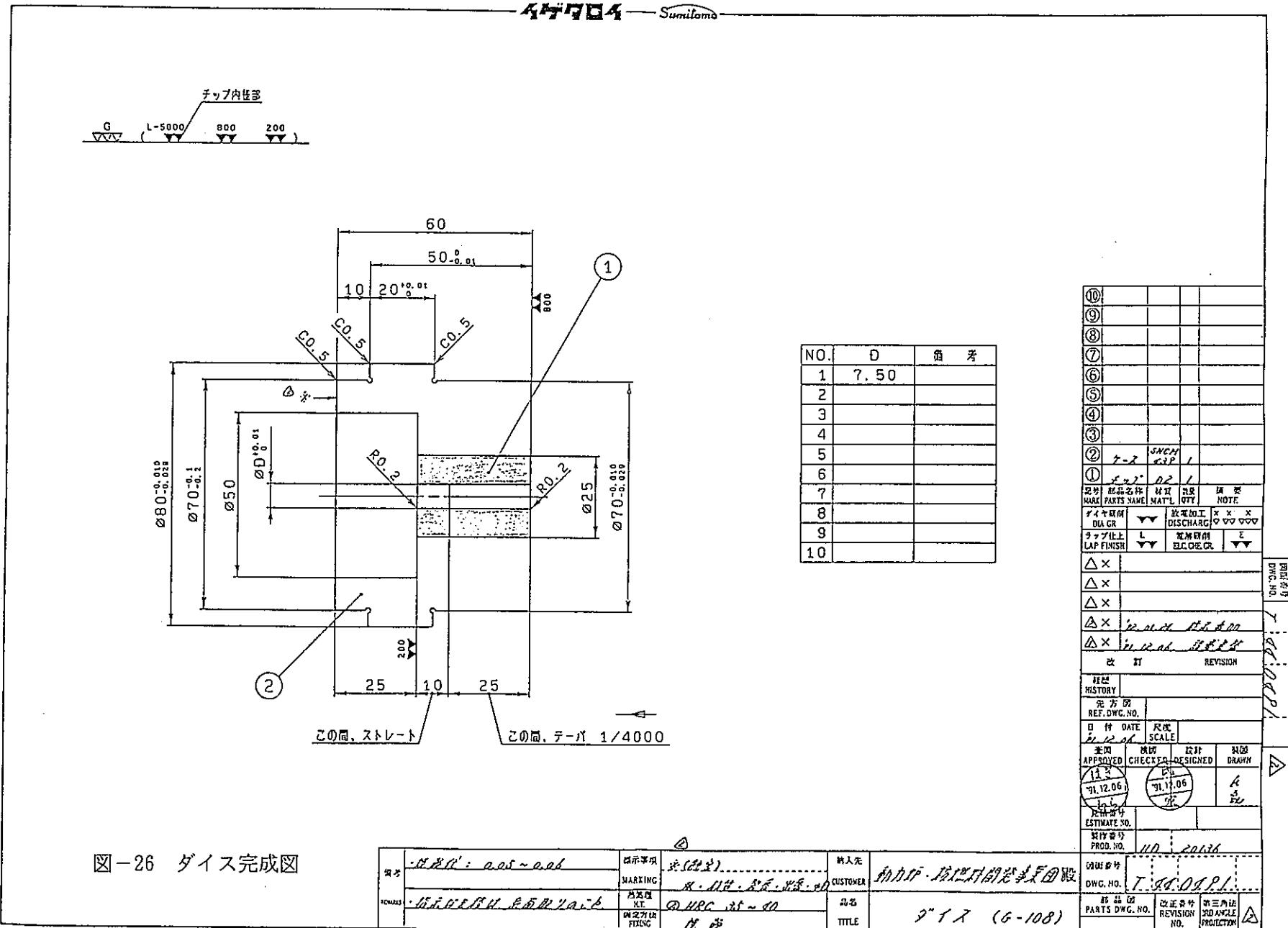
出荷番号 DWG. NO. 1-840XP.3

品番 PARTS DWG. NO. 改正番号 REVISION NO. 第三角度 PROJECTION

規格 MARKING	スクリュードリル	納入先 CUSTOMER	住友電気工業株式会社	
材質 MATER.	SKH51-80-10-10	品名 TITLE	上パンチ (G-108)	
熱处理 HT	2 HRC 55~60			
内火力 FIRING	NE-10			

図-24 上パンチ完成図





## 5.2 材料物性測定結果

製品母材ロットの材料物性測定結果を表-18に示す。

表-18 製品母材ロットの材料物性測定結果

項 目		測 定 値					
		D 2	G 5	A F 1	GH96R	GH880R	SKH-51
物 性 的 性 質	比 重	14.88	14.36	14.12	13.10	13.26	8.09
	硬 度(HRA)	90.9	88.6	92.5	81.4	81.0	83.0
	抵抗率(kg/mm <sup>2</sup> )	281	345	433	274	204	488
	衝撃強度 (kgf · m/cm <sup>2</sup> )	—	—	—	—	—	3.06
	耐摩耗性 (×10 <sup>-4</sup> cc/rev)	—	—	—	—	—	50.7
顕微鏡観察(巢)		A02以下 (良)	A02以下 (良)	A02以下 (良)	A02以下 (良)	A02以下 (良)	—
成 分  Wt %	WC	93	88	87.6	74	77	—
	Co	7	12	12.0	20	17	—
	その他	0	0	0.4	6	6	—

SKH 5 1材については、ミルシートの写しを資料集7.6に示す。

## 5.3 中空コアロッドの加工性について

住友電工では、新超硬材のA F 1を、今回のような細径でかつ 100mm以上のロッドに加工した経験が無かったが、その他の材質を含め、設計どおりに加工することができた。

超硬材の加工上、一番問題となるのは、微小な傷である。靭性が一般の鋼に比べて劣るため、多少の衝撃でも製品の破損に至る。住友電工の経験では、かなり肉厚のある製品でも、輸送して開梱したら破損していたケースがあつたらしい。この脆性破壊の発端になりやすいのが、製品表面の微小な傷である。この微小な傷を作らないことがチップの表面加工に求められる。

チップの表面加工は、素材(Φ 3.0mm)を旋盤で回しながら研磨(粗い砥粒→細かい砥粒)

し、目標の径近くに加工した。最後に、ダイヤモンド粉でラップして、目標の表面粗さに仕上げた。これらは、すべてベテラン職人の手作業によるものである。目視すると、チップ表面が鏡面状に仕上げられており、INTA-2、B5D-1、2用に製作した中空コアロッドと比べても、非常にきれいに仕上がっていいる印象を受けた。表面粗さは、INTA-2、B5D-1、2用が0.8-S、今回試作したものが0.2-Sであり（表-8参照）、その差が目視でも確認されたものと考える。

#### 5.4 中空コアロッドの取扱性について

(1)でも述べたように、超硬材の取り扱いは、慎重に行わないとならない。資料-1）にも示したように、受入検査中に折損させた経験もある。資料-1）TYPE2 のチップ部長さ約250mmに対し、今回の中空コアロッドのそれは最大約85mmと約1/3になっており、構造的にも取り扱い易くなっている。事実、工場検査、受入検査及び輸送中の折損は無かった。

製造中に不良となった中空コアロッド（表-19参照）が有ったので、貰い受けて取扱性をチェックした。

表-19 取扱性確認用中空コアロッドの概要

チップ部材質	チップ部外径	表面加工	材質の特徴
G 5	φ1.0 mm	研磨中 (未ラッピング)	代表的な耐摩耗材料 SKHより高硬度、高耐摩耗性
SKH 5 1	φ2.5 mm	ラッピング済	高級工具鋼 超硬材より高衝撃強度、高抵抗力

方法は、図-27に示すように中空コアロッドの根元を手で持ち、4～5cm上方より、机の角部（AI製）に最も細いチップ部の根元が当たるよう、降り下ろした（自量+α程度の力）。

この程度では、どちらの中空コアロッドとも破損しなかった。G 5の方が細くて硬いため、破損するかと予想したが、全く問題なかった。

この程度の振動で破損しなければ、金型の着脱中に極端に誤った取り扱いをしない限り、これまでの経験上破損することは無いと考えられる。

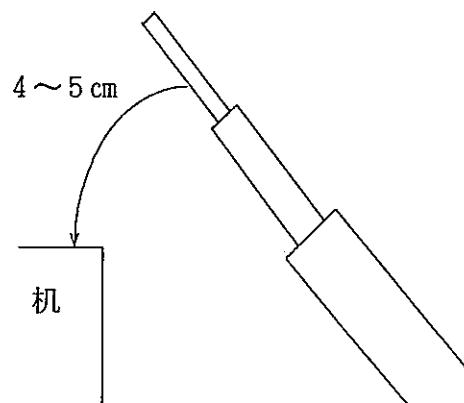


図-27 取扱性確認方法①

さらに、曲がり量についても図-28に示すよう  
に、手で机に押しつけて、チップ部を約3mmまで  
曲げたが、破損せず元の状態に戻った。

SKH51の方は、バネのような感じを受けた。G5の方は、SKH51よりかなり硬い感じ  
でしたが、この程度の曲がり量には余裕を感じ  
られた。チップ部が約3mm程度の変形に耐えられ  
れば、金型の着脱中に破損することは無いと考え  
る。さらに成形時においても、そのようなレベル  
での変形が発生することは上下パンチとのクリア  
ランスから考えられない。

以上の結果から、中空コアロッドの取扱い性  
は問題ないと考える。

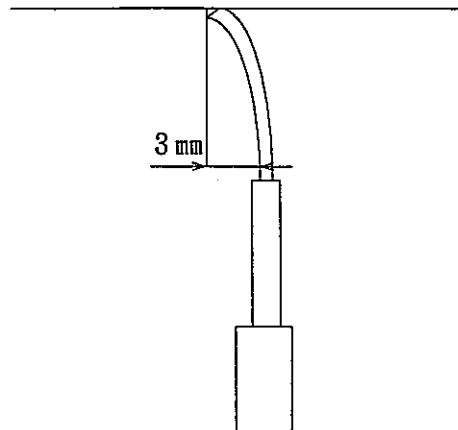


図-28 取扱性確認方法②

## 6. 今後の課題と予定

### 6.1 課題

#### (1) 座屈強度の評価

座屈強度の評価には、成形時に中空コアロッドに働く軸圧縮力を把握する必要がある。

今回の座屈強度解析では、側圧係数mと粉末とダイとの摩擦係数 $\mu$ は実測に基づか  
ない推定値を用いており、実測によってこれらの値を確認し、そのデータに基づいて軸圧  
縮力を推定し、座屈強度評価を行う予定である。

側圧係数mと粉末とダイとの摩擦係数 $\mu$ は、粉末圧縮試験機を新規製作し、グローブ  
ボックスに据え付けて、MOX粉末等を測定して得る予定である。

#### (2) 疲労強度の評価

疲労強度は、材料の疲労強度を実測する予定である。側圧係数mと粉末とダイとの摩擦  
係数 $\mu$ を実測によって確認し、そのデータに基づいて、軸圧縮応力を推定し、疲労強度を  
評価する予定である。

#### (3) 耐摩耗性の評価

耐摩耗性の評価は、実際にUO<sub>2</sub>粉末等を用いて成形を行い、中空コアロッドの直径の  
減肉や荒れを、レーザー寸法測定器による直径測定や表面粗さ測定器の粗さ（うねり）及

び重量測定などから、評価する予定である。

## 6.2 予 定

今回試作した金型の性能評価は、図-29のフローに従って各種試験・計算を実施する予定である。

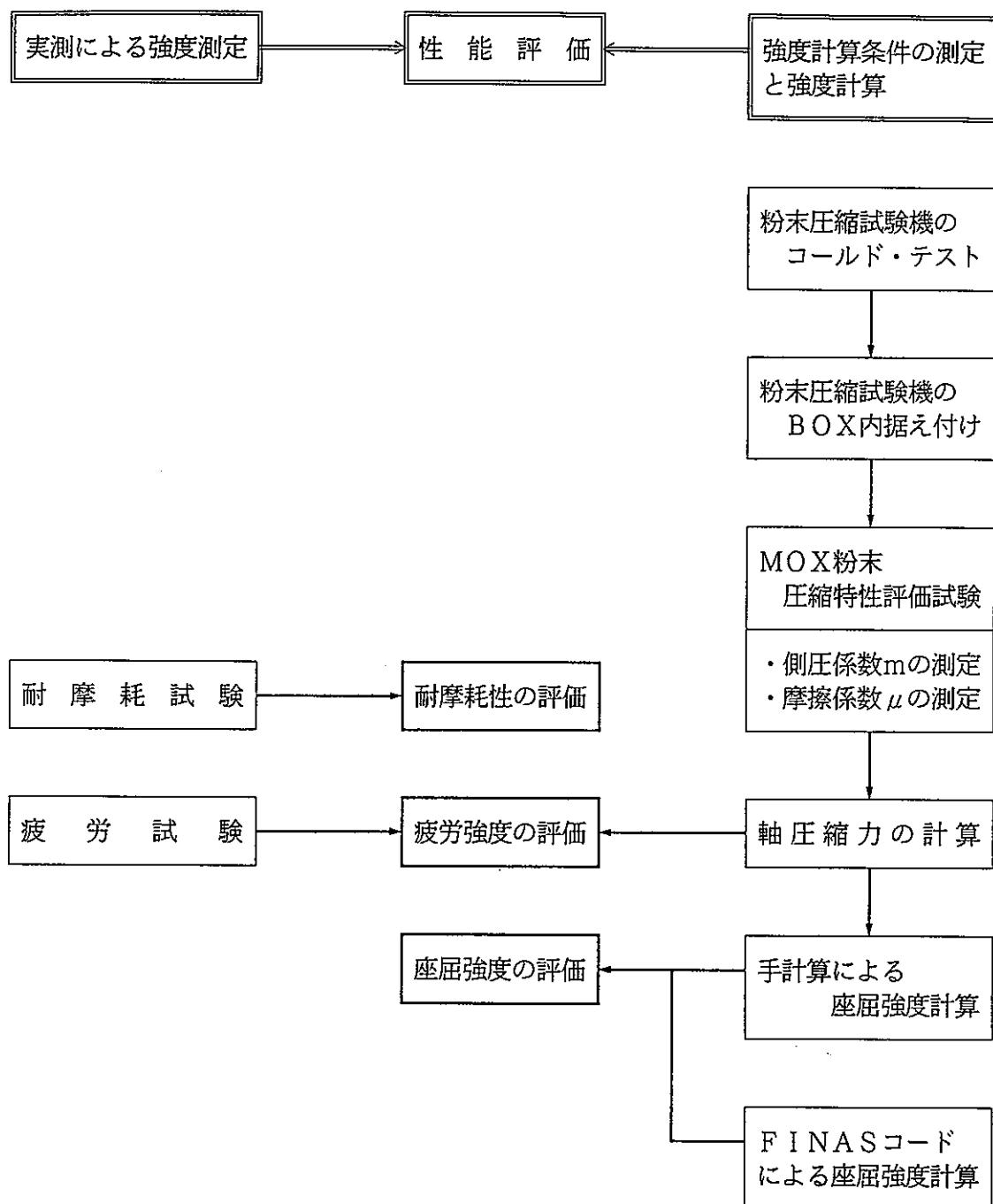
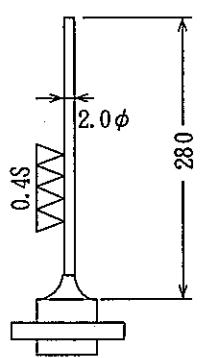
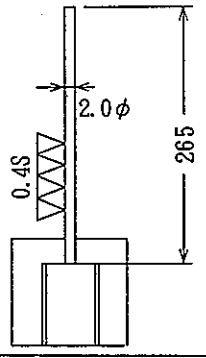
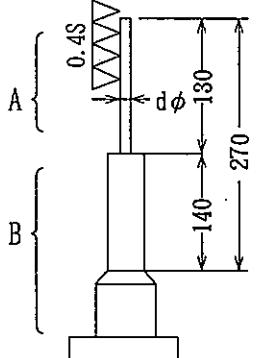
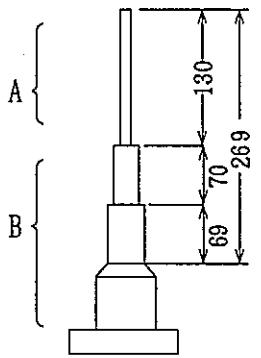


図-29 中空コアロッドの性能評価フロー

7. 資 料 集

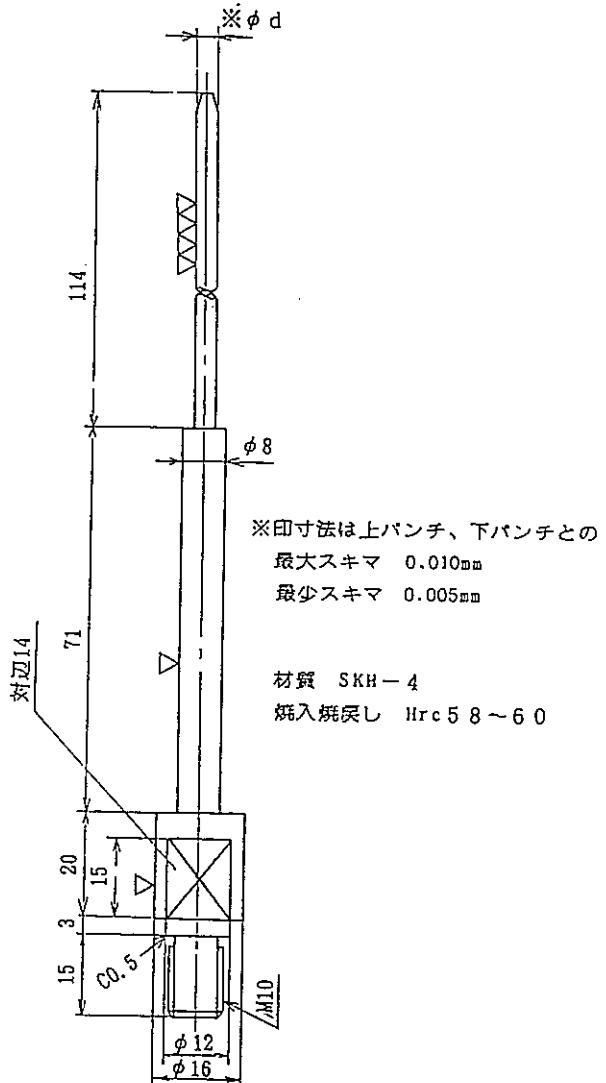
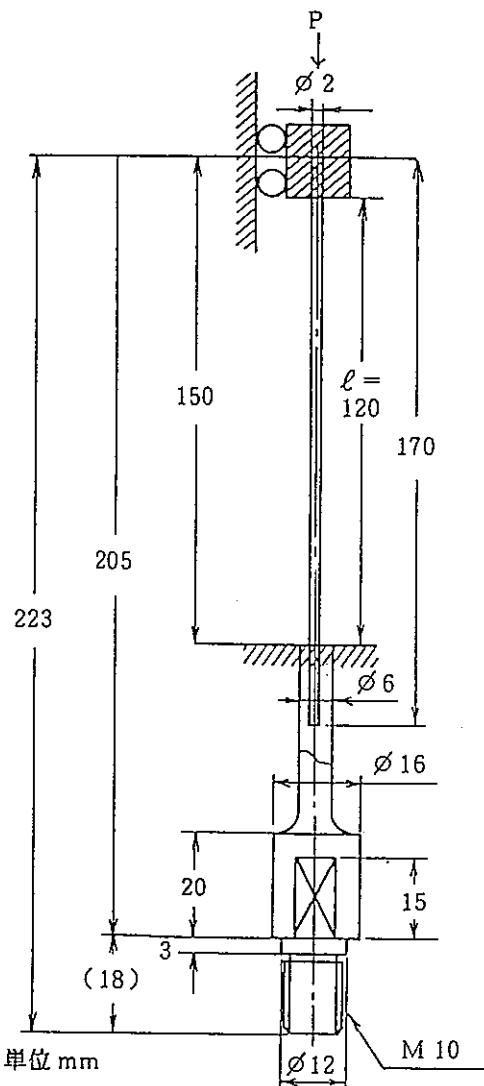
## 7.1 G-103 カムプレス用中空金型の開発経過の抜粋

(単位mm)

形 状	特 徴	結 果
TYPE 1 中空テスト用	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・材質 SKD-11 (焼き入れなし)</li> <li>・加圧時の逃げとして、材質は弾性のあるものとした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・弾性をもたせたことが裏目になり、ロッドのわずかな振れでも上パンチにふれてしまい破損。</li> </ul>
TYPE 2 中空テスト用	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・材質 WC-Co</li> <li>・ロッド先端は球面ケンマ</li> <li>・ロッドは剛性に近いものにした。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・受入れ検査中に折れてしまったものもあり、曲げに弱すぎて使用不可。</li> </ul>
TYPE 3 試験製造用	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・材質 A部 W.C-Co B部 SKD-11</li> <li>・ロッド先端は球面ケンマ</li> <li>・dφは中空用 4.24φ 3.60φ T.E.用 1.78φ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・T.E.用の1.78φロッドがプレス中に折れる。ダイス内に粉末が均一に充填されていない時剛性の高いWCでは曲げに弱い。</li> </ul>
TYPE 4 本番用	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・材質 中空用A部 W.C-Co B部 SKD-11 T.E.用A部 SKH-4 B部 SKD-11</li> <li>・ロッド先端は球面ケンマ</li> </ul>	・良好

7.2 現在までに使用実績のある中空コアロッド構造図

(G-108 ウイズドロアル式プレス用)



「FBR燃料用中空ペレットの製造試験」  
で使用した中空コアロッド構造図

「INTA-2、B5D-1、2」中空ペレット製造  
で使用した中空コアロッド構造図

(東研報PNC ZN843-84-02参照)

## 7.3 コアロッドの座屈解析

大きな軸力が作用する棒の曲げに対する基礎式は、以下の形でまとめられる。

$$\left. \begin{aligned} M &= EI \frac{d^2v}{dx^2} \\ F &= EI \frac{d^3v}{dx^3} + P_B \frac{dv}{dx} \\ P &= EI \frac{d^4v}{dx^4} + P_B \frac{d^2v}{dx^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$P_B$  ; 座屈荷重  
 $v$  ; 変位量

座屈に入る限界の状態（下図）の条件式は、(1)式の第3式において等分布荷重を0として得られる。

$$EI \frac{d^4v}{dx^4} + P_B \frac{d^2v}{dx^2} = 0 \quad (2)$$

この4階の線形齊次微分方程式の一般解は、

$$\alpha^2 = \frac{P_B}{EI}$$

として、次の形で得られる。

$$V = C_1 \sin \alpha x + C_2 \cos \alpha x + C_3 x + C_4 \quad (3)$$

(3)式に図に示す座屈形の端末条件を与える。

条件	$x = 0$ で	$V = 0$	$V' = 0$
	$x = l$ で	$V = 0$	$V' = 0$

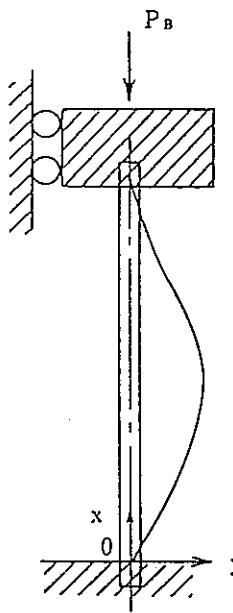


図 座屈形モデル

$$\left. \begin{array}{l} C_2 + C_4 = 0 \\ \alpha C_1 + C_3 = 0 \\ \sin \alpha l \cdot C_1 + \cos \alpha l \cdot C_2 + l C_3 + C_4 = 0 \\ \alpha \cos \alpha l \cdot C_1 - \alpha \sin \alpha l \cdot C_2 + C_3 = 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

したがって、座屈条件式は以下の形となる。

$$\left| \begin{array}{cccc} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \alpha & 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha l & \cos \alpha l & l & 1 \\ \alpha \cos \alpha l & -\alpha \sin \alpha l & 1 & 0 \end{array} \right| = 0 \quad (5)$$

(5)式を展開し、変形すると(6)式が得られる。

$$4 \alpha \cdot \sin \frac{\alpha \ell}{2} \cdot \left( \sin \frac{\alpha \ell}{2} - \frac{\alpha \ell}{2} \cdot \cos \frac{\alpha \ell}{2} \right) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

(6)式の最小限は、 $\sin(\alpha \ell / 2) = 0$ であることから、 $\alpha \ell / 2 = \pi$   $\dots \dots \dots \quad (7)$

したがって、座屈の限界値 ( $P_{bc}$ ) は、

$$P_{bc} = \frac{4 \pi^2 E I}{\ell^2} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

となる。また、(4)式に(7)式を代入すると、 $C_1 = C_3 = 0$ 、 $C_2 = -C_4$  の関係が得られる。したがって、座屈の形は、

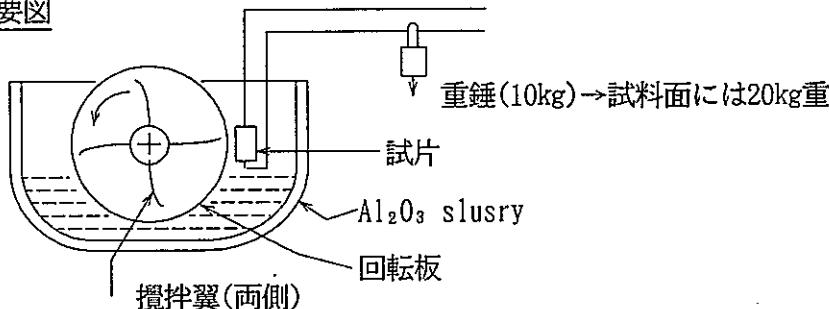
$$\begin{aligned} V &= C_2 (\cos \alpha x - 1) \\ &= C_2 \left\{ \cos \left( 2 \pi \frac{x}{\ell} \right) - 1 \right\} \end{aligned}$$

となり、これは図の黒線で示した形である。

## 7.4 耐摩耗性の測定方法

— &lt;CCPA\*方式によるabrasion-wear測定法&gt; —

## 1. 概要図



## 2. テスト条件

(table-1)

	C, C, P, A, standard	住友電工法
Slurry	A30 grain $\text{Al}_2\text{O}_3$ (Norton's Alumdum B) 水 1cc/4g	日本研磨材工業製 アフラックス N 30 # 水 1.04cc/4g 水 650cc アングル2.5kg
Specimen	厚み : 3/16" (4.76mm) 巾 : 摩耗が試料のedge内 表面粗 : 重要でない 平行 : $\leq 0.004/1\text{inch}$	5~11mm Max 30×43 Min 13×20~30 Dia #200
Vessel	高さ : 3/16" (4.76mm) 巾 : 8 3/4" (222.25) 深 : 9 3/4" (247.65) : 2 1/4" (57.15) : 5 1/2" (139.7)	同 左
Steel wheel	材質 : annealed AISI. 1020 (JIS S20C) 回転 : 100rpm 径 : 6 5/8" ~ 6 1/2" 巾 : 1/2"	普通炭素鋼 100rpm 167mm 13mm
Test-time	13min	13min

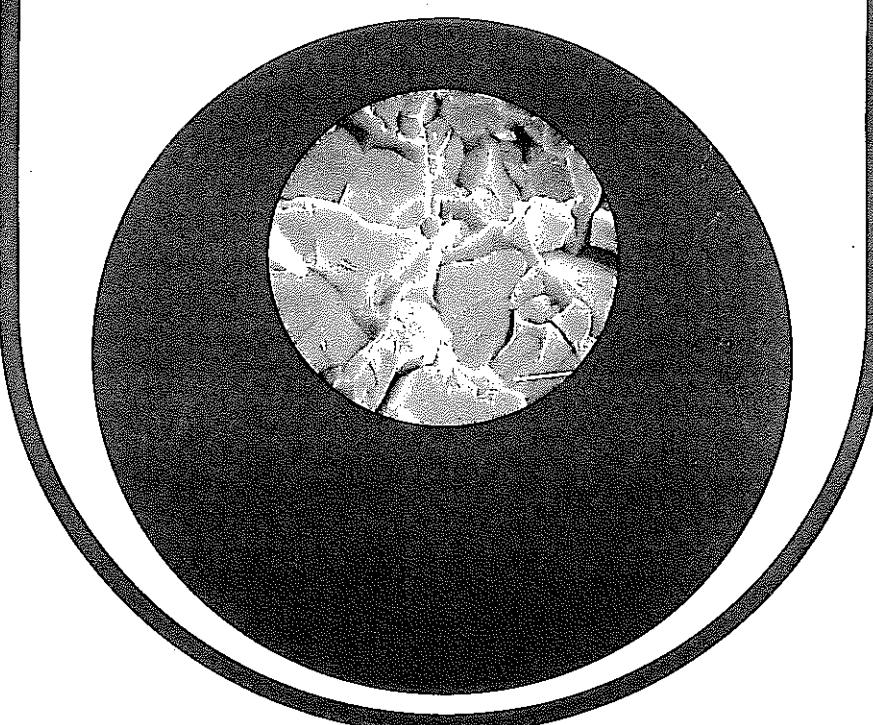
## 3. 摩耗量

$$\cdot \text{abrasion factor(g/rev)} = \frac{\text{Weight loss in grams} \times 10^4}{100 \times 13 \text{ rev}}$$

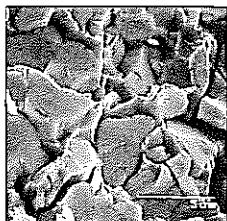
$$\cdot \text{abrasion resistance(cc/rev)} = \frac{\text{Weight loss in grams} \times 10^4}{100 \times 13 \text{ rev} \times \text{density of specimen}}$$

\* CCPA P-112 A PROCEDURE FOR THE DETERMINATION OF ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF CEMENTED TUNGSTEN CARBIDES

## 7.5 耐摩用超硬新材質の強度



住友電工



## 耐摩用超硬新材質の強度

山本英司・中垣博司・丸山正男

New Super-Hard Cemented Carbides for Increased Wear Resistance — by E. Yamamoto, H. Nakagaki, M. Maruyama — Although various different characteristics are demanded of cemented carbides for wear-resistant tools according to application, in recent years there has been an ever-increasing demand for difficult characteristics which previously were not available; especially high strength. However, there has been little study conducted concerning the evaluation of the strength of cemented carbides, and what has been done has been fragmentary. As a result, it appears that when considering using cemented carbides in new applications, because the factors relating to strength characteristics were unclear, it is currently common for there to be hesitation to use these materials or for them to be used incorrectly. Furthermore, if the strength of the revolutionary new materials which have already been announced, such as Igetalloy AF1, the M Series, and the GH000R series, can be utilized to greater advantage, it would contribute to an increase in applications. In this report, as a result of our investigation of the correlations between strength and the binder layer and grain size, it was confirmed that evaluating the correlation between wear resistance properties and fracture toughness is valuable when making the selection of new cemented carbides for wear-resistant tools.

### 1. 緒 言

超硬合金としては世界最高の抗折力強度を有する超々微粒新材質AF1、耐食非磁性新材質WC-Ni-Cr合金Mシリーズ、熱間圧延用新材質超粗粒GH000Rの開発により機械的熱的化学的特性について報告したが<sup>1)-6)</sup>これらの新材質の登場により耐摩工具用としての超硬合金の使用用途はさらに拡大している。近年、益々従来の超硬合金の常識では考えられない厳しい条件への適用、寿命改善、精度改善等のニーズが高まりこれらに対応する必要がある。金属材料、超硬合金の強度に関する報文<sup>7), 8)</sup>をさらに実用性との観点から総合的に掘下げる。

### 2. 耐摩用合金の強度

本報では、耐摩用イゲタロイ超硬合金のWC粒度が超々微粒0.5 μmから超粗粒7 μmまでの5種の粒度で、結合相量5~25%、結合相組成Co、Co+Ni+Cr、Ni+Crを選定し、超々微粒合金と粗粒WC-Co-Ni-Cr合金および超粗粒合金はHIP処理を行った試験片を用いた。また、熱伝導率の一部のデータは、前報<sup>5)</sup>のデータを使用し、その他は、本報のために測定を行った。

#### 2-1 抗折力と粒度の相関について

##### (1) 測定方法

CIS-026-1983試験片形式J、研削肌試験片による抗折力試験。

##### (2) 測定結果

図1に抗折力と粒度の関係を示す。WCが微粒な程抗折力は高くなり粗粒になるに従い低くなる一般的傾向と一致している。結合相組成の影響は特に認められない。また図2に応力-歪み曲線の測定結果を示す。結合相が20%超で僅かに塑性変形を認めた。試験後の試験片の状態を写真1に、試験片の破断面のSEM写真を写真2に示す。

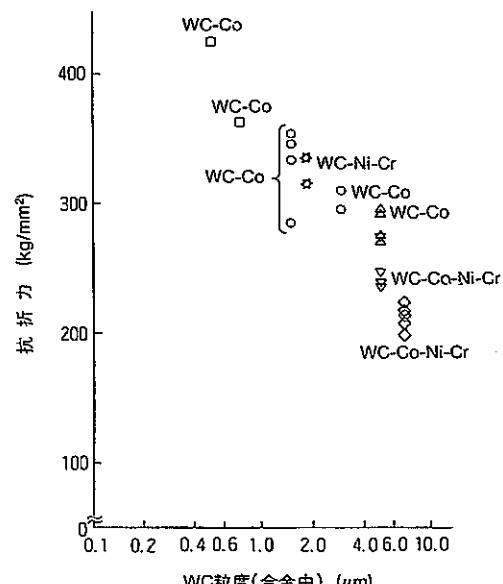


図1 抗折力とWC粒度の関係

## 2-2 破壊革性と粒度の相関について

## (1) 測定方法

破壊革性(以下  $K_{Ic}$ )の測定に用いられる主な方法は2つある。ピッカース硬度測定の圧痕のコーナーから発生する亀裂の長さおよび荷重から算出する方法は十分な長さの亀裂を必要とし、また予めクラックを導入した試験片による破壊試験から算出する方法は正しい  $K_{Ic}$  値を得るために材質固有の臨界曲率半径よりも十分に小さい曲率半径のクラックの導入が不可欠であり表面状態も大きく作用するので測定値のバラツキが大きく技術的な困難が伴う。そこで著者らは予め導入したクラックに引っ張り応力を加え臨界応力で  $\text{Pop In}$  させ試験片中央部で進展停止させた亀裂を

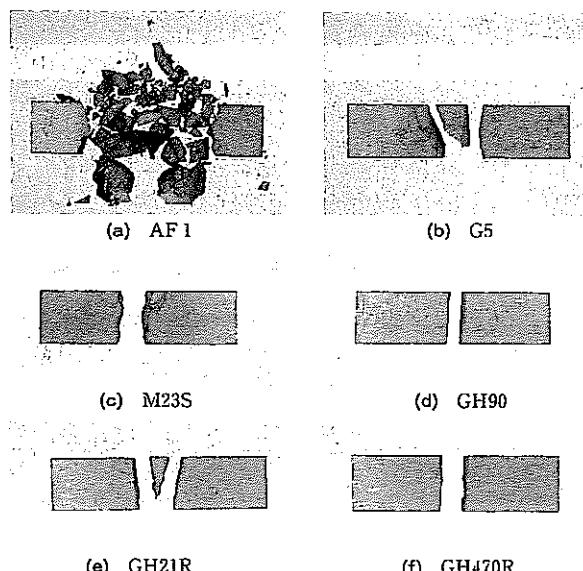


写真1 抗折試験後の試片

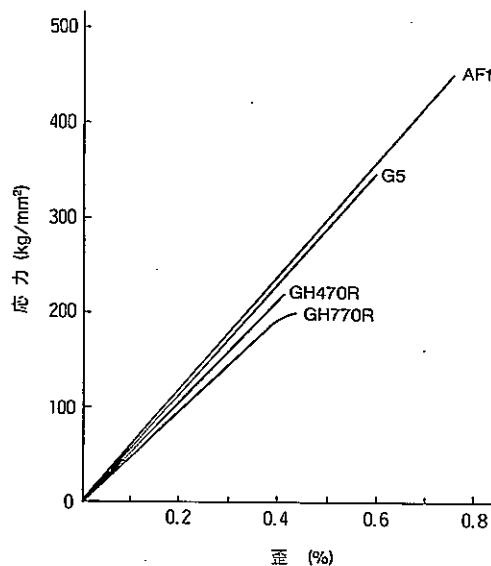


図2 抗折力の応力-歪曲線

予備亀裂とし、これを3点曲げ試験にかけることにより  $K_{Ic}$  値を算出する方法を採用した。Bridge Indentationと呼ばれるこの方法は簡単かつ再現性が高い優れた特長を持つ。図3にその概略を示す。

## (2) 測定結果

$K_{Ic}$  と WC粒度、結合相量の関係を図4に示す。結合相量が同程度の場合超々微粒、中粒、粗粒と値に差はあるが超々微粒と中粒の差は顕著ではない。また中粒でははっきりとした差の出ていなかった結合相組成の差が粗粒合金では単純な WC-Co系よりも WC-Co-Ni-Cr系が高い値を示す傾向として表れた。この傾向は  $K_{Ic}$  とピッカース硬度との関係において認められ結果を図5に示す。この現象は、CoはWCとの濡れ性に優れているのと比較し Co-Ni-Cr系は劣る。このことは亀裂がWCと結合相の

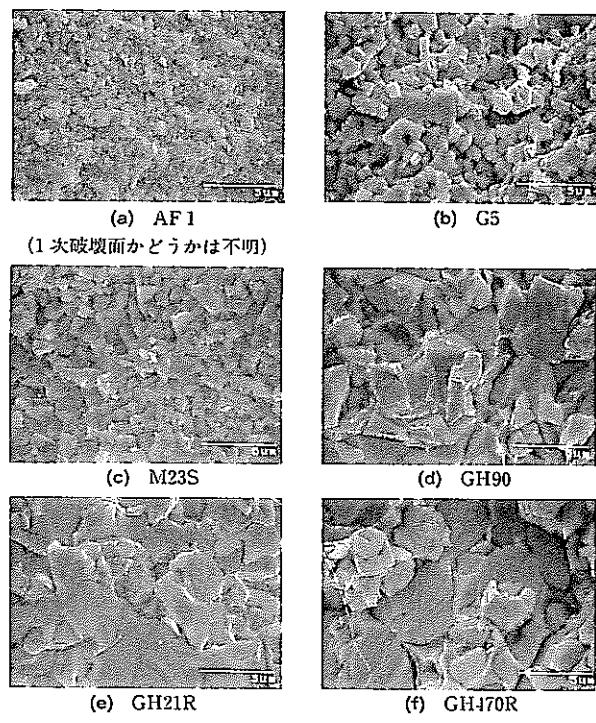
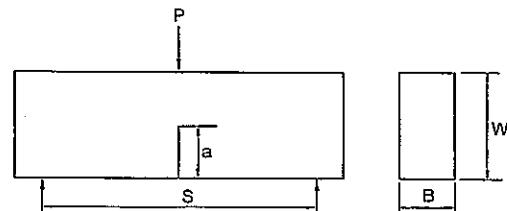


写真2 抗折試験後の破断面



$$K_I = \sigma \sqrt{a} \times (1.73 - 0.76\alpha + 1.78\alpha^2 - 0.31\alpha^3 + 10.15\alpha^4) \quad (0 \leq \alpha \leq 0.7)$$

ここで、 $K_I$  は応力拡大係数、 $\sigma$  は応力、 $a$  はき裂の大きさ、 $\alpha$  は  $a/W$ 、 $W$  は試験片の幅である。

図3  $K_{Ic}$  の測定方法

界面に達したとき前者の場合は密着性が良いため亀裂はWCの粒子を破壊し直進するのに対し、後者は密着性が劣る分破壊のエネルギーが界面において分散されるので結果として高い $K_{Ic}$ 値を示したと考えられる。

### 2-3 シャルピー衝撃値と粒度について

#### (1) 測定方法

シャルピー衝撃試験機により、振子重量=2.124 kg, アーム長さ=0.4218 m, ハンマー初期振上げ角=157.7°の条件下で測定した。この衝撃値は測定毎のバラツキが大きいため対象とするものは同時測定が原則となる。

#### (2) 測定結果

図6に測定結果を示す。図1に示した抗折力の結果と同

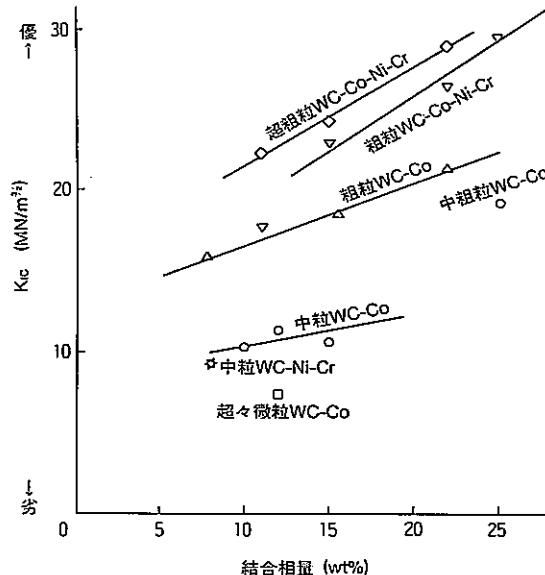


図4  $K_{Ic}$  と結合相量の関係

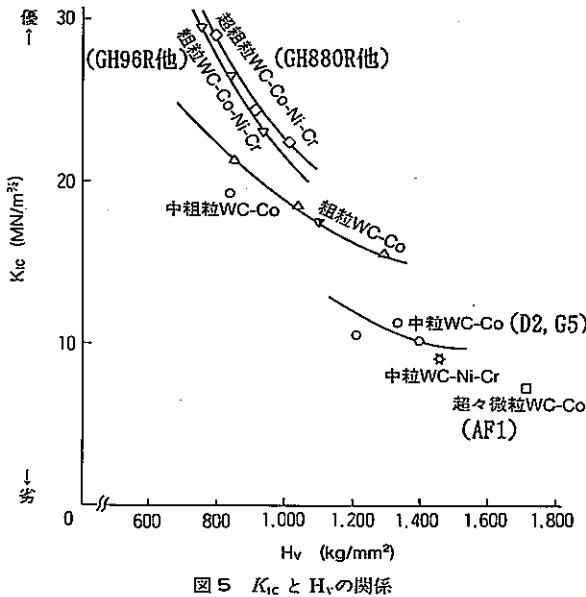


図5  $K_{Ic}$  と  $H_v$  の関係

様に超粗粒は中粒より低い値を示した。測定試片の破断面のSEM写真を写真3に示す。

### 2-4 熱伝導率とWC粒度の相関について

#### (1) 測定方法

前報<sup>3)</sup>で使用したレーザーフラッシュ法により、超硬材質の熱伝導率を測定した。サンプルサイズは、 $\phi 10 \times t 2$  (mm) であり、測定温度は、25°Cである。

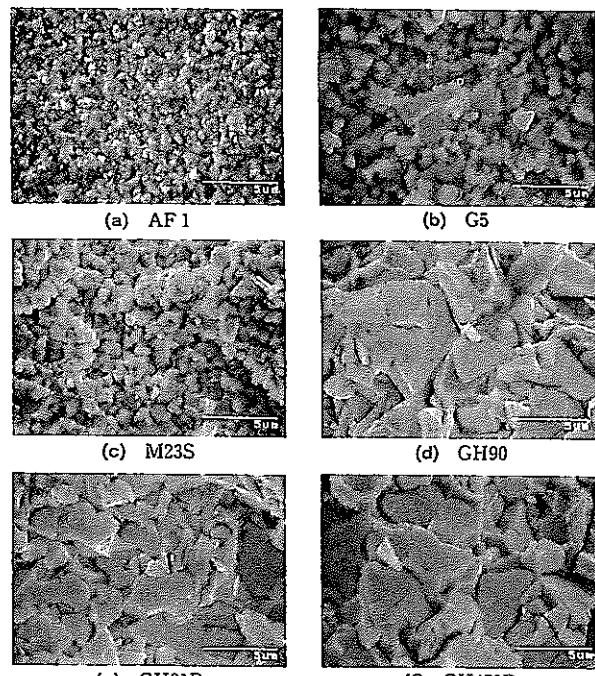


写真3 衝撃試験後の破断面

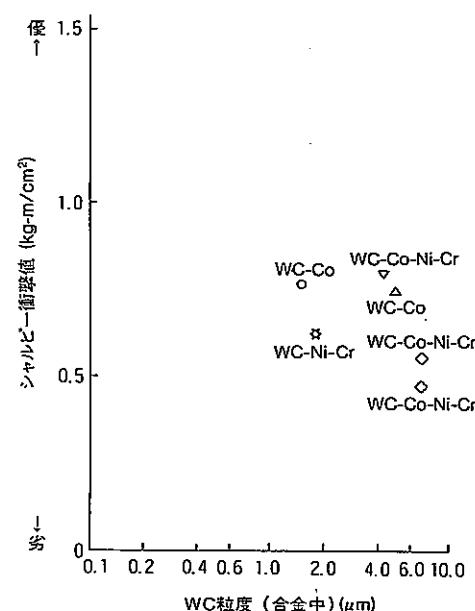


図6 シャルピー衝撃値とWC粒度の関係

## (2) 測定結果

超硬材質の熱伝導率と WC 粒度の関係を図 7 に示す。WC が微粒と粗粒の材質では微粒材質の方が、熱伝導率は低い値を示している。これは、熱を伝えると思われる結合相が、WC 粒子と結合相との界面によって、格子振動の伝播を妨げられているからと思われる。また、結合相が Co のみの材質より、W を多く固溶する Ni を結合相に含んでいる材質は、熱伝導率が低くなっている。但し、この場合 Cr も同時に含んでいるため、Cr による影響とも考えられるが、現在のところ何方の効果が大きいかは定かではない。粗粒 WC を有する材質は、結合相量が増えると熱伝導率が低くなる傾向が強い。これは、粗粒材質の結合相の平均自由行程が結合相量に強く依存していることによる。

## 2-5 ヤング率と結合相の相関について

## (1) 測定方法

ヤング率の測定は、引張試験、圧縮試験および曲げ試験で試片を弾性変形させ、その時の弾性歪みと負荷応力から求められるが、超硬合金の場合、高弾性であること、および剛性の高い引張治具や試験機を用いなければ信頼性の高いデータを測定することは困難であることから今回は前報<sup>2)</sup>同様、超音波法を用いてヤング率の測定を行った。サンプルサイズは<sup>3)</sup>  $15 \times 10$  (mm) で  $25^{\circ}\text{C}$  の測定値である。

## (2) 測定結果

ヤング率と結合相量(重量%)の関係を図 8 に示す。ヤング率は、WC 粒度および結合相の組成(Co, Ni)によらず、測定した結合相量の範囲内では、結合相量に対して 1 次の相関があることが判る。これは、Co と Ni のヤング率がほぼ同じ値であることと、Co と Ni が全率固溶体を形成することによるものと思われる。また、この結果は Baskin<sup>10)</sup>らの WC-Co 合金における理論式にも良く一致する。

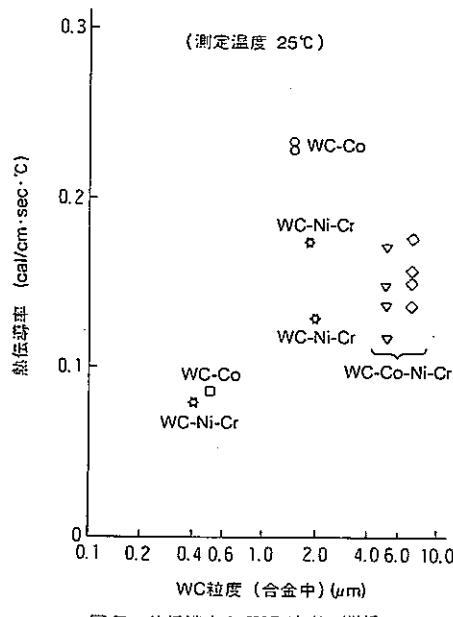


図 7 热伝導率と WC 粒度の関係

2-6  $K_{ic}$  と耐摩耗性の相関について

## (1) 測定方法

耐摩耗性の測定は CCPA P-112 に準じた。サンプルサイズは<sup>4)</sup>  $20 \times 40$  (mm) である。 $K_{ic}$  については、前項(2-2)に記す。

## (2) 測定結果

$K_{ic}$  と耐摩耗性の関係を図 9 に示す。超粗粒材質は、図 9 からもわかるように、耐摩耗性を有し、亀裂の進展性に対しても抵抗力がある材質である。事実、実用上においても超粗粒材質は、鋼線材用熱間圧延ロールに適用し、優れた性能を発揮している。 $K_{ic}$  が高いことは(2-2)で述べたが、超粗粒材質は硬度が低い割に、耐摩耗性に優れている。これは、粗大な WC 粒子を有しているため、結合相中に埋まっている WC 粒子の体積が大きく、外部からの圧力に対して WC 粒子が脱落し難いことに起因している。また、摩耗

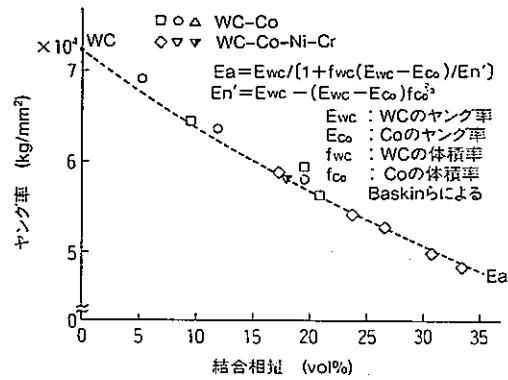
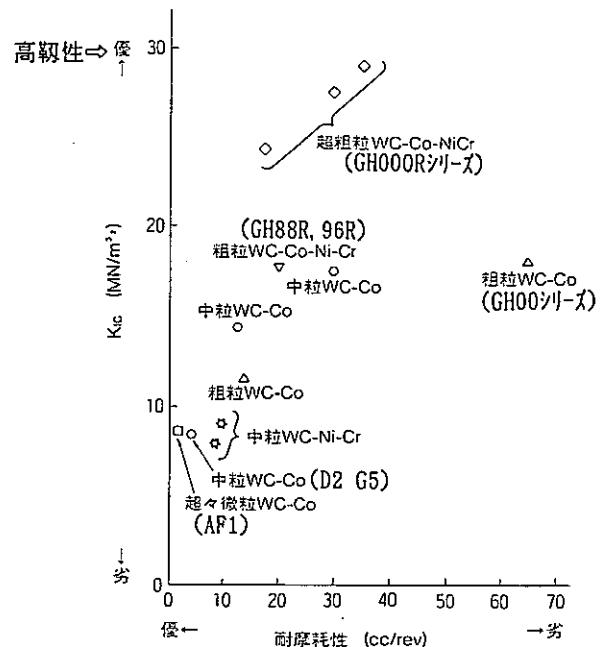


図 8 ヤング率と結合相量の関係

図 9  $K_{ic}$  と耐摩耗性の関係

は結合相から始まり、ある程度表面近傍の結合相が減少すると、外部の圧力は硬い WC 粒子が受けることになり、結合相を保護するようになってくる。そのため、摩耗が進行しないのである。さらにこのことより、圧延ロールでワークと接するカリバーは、偏摩耗を起さず、また、カリバーの肌荒れの進行を抑えることになる。

また、超々微粒材質は極めて優れた耐摩耗性を有しており、単純こすり摩耗が発生する工具には、優れた性能を持っていることがわかる。

### 3. 結 言

耐摩工具用の新用途、性能改善の推進のためには超硬合金の強度の掘下げが重要であり抗折力、破壊靭性等個々の特性の改善のみでなく、耐摩耗性と破壊靭性との相関位置付けで評価することが実用性能を予測する上で有効である。イゲタロイ AF 1, M シリーズ、GH シリーズはいずれもこれらの位置付け上、一般材質にはない特徴を有することが確認された。また今後の材質開発に必要な方向付けも得られた。

### 参 考 文 献

- (1) 丸山、中垣他：住友電気第 130 号、P145～154 '87.
- (2) 丸山他：住友電気第 131 号、P152～156 '87.
- (3) 丸山他：住友電気第 132 号、P123～128 '88.
- (4) 丸山他：住友電気第 133 号、P142～148 '88.
- (5) 丸山、中垣他：住友電気第 134 号、P210～218 '89.
- (6) 丸山、中垣他：住友電気第 135 号、P185～189 '89.
- (7) 鈴木他：超硬合金と焼結硬質材料 丸善.
- (8) 日本金属学会強度委員会編：金属材料の強度と破壊.
- (9) 井村他：結晶の強度 朝倉書店.
- (10) M. L. Baskin, et. al : Phys. Met Metallogr., 16 (1963), 95.

### 執筆者

山本 英司：粉末合金事業部 生産技術開発部  
中垣 博司：粉末合金事業部 生産技術開発部 主査  
丸山 正男：粉末合金事業部 生産技術開発部 主席

## 7.6 SKH-51 ミルシート

御中

注文番号

## 試験成績表

規格	溶解番号	寸法	納入状態	納入数量	成績及番号	発行年月日												
YXM1	49697	RG4.5	A		09030662	89/03/24												
化 学 成 分 (%)																		
元素名	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Mo	V	Co	CU						
規格																		
レードル	0.83	0.28	0.35	0.020	0.002		4.09	6.09	4.91	1.87								
試験項目							熱処理試験											
項目	試験内容	単位	規格	結果	項目	単位	規格	結果										
マクロ観察法					最高または真四辯化													
ミクロ組織				GOOD	温度	°C		1220										
脱炭		HM		0	時間	SEC		45										
結晶粒度					冷却			OC										
納入硬度		HV		243-248	時間	分		560										
					冷却	MIN		60										
					回数	回		AC										
					硬さ	KHV		2										
								65.5										



7.7 SKH51 高速疲労試験データ<sup>3)</sup>

特殊鋼 SKH9 高速疲労

## A 材料 MATERIAL

資料番号  
DATA NO. IV-3

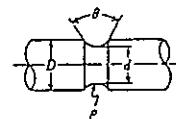
鋼種規格 TYPE OF MATERIAL	SKH9	溶解炉の形式 TYPE OF STEEL MELTING FURNACE	電気炉5t	鋼塊の大きさ SIZE OF INGOT	1t		
溶解条件 MELTING PRACTICE	大気中	脱酸条件 DEOXIDATION PRACTICE	AIキルド	鍛込条件 POURING PRACTICE	大気中		
粗材の形状 寸法・質量 SIZE AND WEIGHT OF PARENT STOCK	-	鋳鋼・鍛鋼・ 圧延材の別 CAST, WROUGHT OR ROLLED	-	鍛鍊・圧延比 REDUCTION RATIO	-		
化学成分 CHEMICAL COMPOSITION [wt%]				熱処理 HEAT TREATMENT			
MATERIAL NO.	C	Si	Mn	P	S	1240°C×3min O.Q. → 560°C×1hr A.C. (2回)	TM
1	-	-	-	-	-		

## 振り試験、硬さおよび衝撃試験成績 TWISTING, HARDNESS AND IMPACT PROPERTIES

MATERIAL NO.	振り 降伏点 TORSIONAL YIELD POINT (kg/mm <sup>2</sup> )	硬さ HARDNESS	試験片採取 位置・方向 POSITION AND DIRECTION IN PARENT STOCK FROM WHICH SPECIMEN WAS TAKEN	試験片寸法 SIZE OF IMPACT SPECIMEN	衝撃値 IMPACT VALUE (kg·m/cm <sup>2</sup> )		遷移温度 TRANSITION TEMPERATURE (°C)			
					AT 0°C	AT °C	ENERGY TRANSITION T <sub>re</sub>	FRACTURE TRANSITION T <sub>rs</sub>	15ft-lb TRANSITION T <sub>ris</sub>	T <sub>r</sub>
1	-	HRC64.0	-	-	-	-	-	-	-	-

## 疲労試験成績 FATIGUE PROPERTIES

MATERIAL NO.	試験片採取 位置・方向 POSITION AND DIRECTION IN PARENT STOCK FROM WHICH SPECIMEN WAS TAKEN	試験片の種類 寸法 TYPE AND SIZE OF SPECIMEN	表面処理 および仕上 SURFACE TREATMENT AND FINISHING	試験温度 TESTING TEMPERATURE (°C)		雰囲気 ENVIRONMENT	耐久寿命 NUMBER OF CYCLES TO FAILURE (cycle)	切欠係数 FATIGUE NOTCH FACTOR	試験機の形式 容量 TYPE AND CAPACITY OF TESTING MACHINE	換返し速度 CYCLIC SPEED (cpm)
				試験片 SPECIMEN	雰囲気 ATMOSPHERE					
1	L	平滑 1x5x40mm #000エメリ-	砥石研摩 #000エメリ-	室温	-	-	6.56×10 <sup>4</sup>	-	電磁界疲労試験 $\sigma=110-120 \text{ kg/mm}^2$	5.6×10 <sup>4</sup>

備考  
REMARKS

7.8 SKD11 疲労試験データ<sup>3)</sup>

特殊鋼 SKD11 热处理

## A 材料 MATERIAL

										資料番号 DATA NO.	II-16		
鋼種規格 TYPE OF MATERIAL		SKD11				溶解炉の形式 TYPE OF STEEL MELTING FURNACE		電気炉式 ELECTRIC FURNACE TYPE		鋳塊の大きさ SIZE OF INGOT			
溶解条件 MELTING PRACTICE		大気中				脱酸条件 DEOXIDATION PRACTICE		Alキルド		鋳込条件 POURING PRACTICE			
粗材の形状・寸法・重量 SIZE AND WEIGHT OF PARENT STOCK		(1) 400kgインゴット→370φ×22mm切出 (2) 250kgインゴット→600φ×200mm分塊 →230φ×25mmすきこみ (3) 250kgインゴット→170kg圧延				鉄鋼・鋳鋼・ 圧延材の別 CAST, WROUGHT OR ROLLED		(1) C (2) F (3) F*		鍛造・圧延比 REDUCTION RATIO			
試験用 MATERIAL		化 学 成 分 CHEMICAL COMPOSITION [wt%]										熱 处 理 HEAT TREATMENT	
試験用 MATERIAL		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V		組織 METALLURGICAL STRUCTURE	
1		1.49	0.23	0.41	0.018	0.008	0.09	11.24	1.02	0.35		500C×1hr → 800C×5min → 1010C×4min → O.C.(250C 5min) → A.C. 200C A.C.	
2		"	"	"	"	"	"	"	"	"		500C×1hr → 800C×5min → 1010C×4min → O.C.(300C×4min) → A.C. 200C A.C.	
3		1.56	0.29	0.49	0.024	0.002	0.08	11.90	0.88	0.26		1025C A.C. 180C×1hr A.C.	
試験用 MATERIAL		結晶粒度 GRAIN SIZE		平均フェライト距離 MEAN FREE FERRITE PATH		非金属介在物 NON-METALLIC INCLUSION						その他欠陥 OTHER DEFECTS	
		AUSTENITE	FERRITE										
備考 REMARKS		†( )内の数字は試料番号を示す。 * 浸伸材											

## B 性質 MECHANICAL PROPERTIES

引張試験成績 TENSILE PROPERTIES												
試験用 MATERIAL NO.	試験片採取位置・方向 POSITION AND DIRECTION IN PARENT STOCK FROM WHICH SPECIMEN WAS TAKEN	試験片寸法 SIZE OF SPECIMEN	標点距離 GAGE LENGTH [mm]	試験温度 TESTING TEMPERATURE [°C]	引張強さ ULTIMATE STRENGTH [kg/mm²]	降伏点 YIELD POINT		引張力 PROOF STRESS [kg/mm²]	伸び ELONGATION [%]	絞り REDUCTION IN AREA [%]	真実断応力 TRUE FRACTURE STRESS [kg/mm²]	
						上 UPPER	下 LOWER					

試験用 MATERIAL NO.	捩り 降伏点 TORSIONAL YIELD POINT [kg/mm²]	硬さ HARDNESS	試験片採取位置・方向 POSITION AND DIRECTION IN PARENT STOCK FROM WHICH SPECIMEN WAS TAKEN	試験片寸法 SIZE OF IMPACT SPECIMEN	衝撃値 IMPACT VALUE [kg·m/cm³]		遷移温度 TRANSITION TEMPERATURE [°C]			
					AT 0°C	AT °C	ENERGY TRANSITION Tr <sub>e</sub>	FRACTURE TRANSITION Tr <sub>f</sub>	15ft-lb TRANSITION Tr <sub>15</sub>	T <sub>r</sub>
1	-	HRC60~60.7	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	HRC61.4~62.4	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	HRC62.7	-	-	-	-	-	-	-	-

疲労試験成績 FATIGUE PROPERTIES									
MATERIAL NO. 試験片採取位置・方向 POSITION AND DIRECTION IN PARENT STOCK FROM WHICH SPECIMEN WAS TAKEN	試験片の種類・寸法 TYPE AND SIZE OF SPECIMEN	表面処理 お上げ仕上 SURFACE TREATMENT AND FINISHING	試験片 SPECIMEN	試験温度 TESTING TEMPERATURE [°C]	雰囲気 ENVIRONMENT	耐久限 FATIGUE LIMIT [kg/mm²] $\sigma_u$	切欠保証 FATIGUE NOTCH FACTOR	試験機の形式 容量 TYPE AND CAPACITY OF TESTING MACHINE	終返し速度 CYCLIC SPEED [cpm]
1 T(板材) 方向に直角)	平滑 平行部8φ×16I	べーバー仕上	室温	-	空気中	21	-	小野式10kg·m	3400
2 "	"	"	"	-	"	27	-	"	"
3 L(鍛伸方向)	"	"	"	-	"	65	-	"	"
備考 REMARKS	試料番号(1)(2)の試験片採取は粗材I方向に直角に半径方向 下図を参照して下さい。 結果は鍛造ままのものと鍛造したものと比較を示す。								
	試料番号 (1)	370	試料番号 (2)	230	(鍛鋼)	(鍛鋼)			

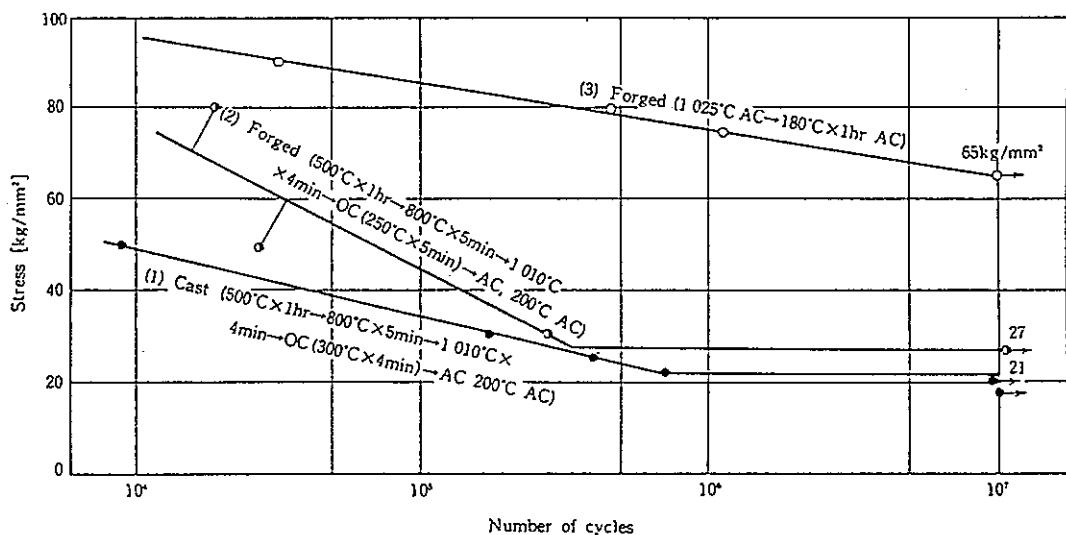


Fig. II-16-1 S-N Curve

## 7.9 マルエージング鋼の中空コアロッド適用可能性試験（摩耗試験）結果

### (1) 試験の概要及び目的

F B R用中空ペレットの内径は、約2mm程度と小さく、グリーンペレットを粉末よりプレスする場合には、その中空部を成型する中空ロッドに高い圧力が作用する。そのため粉末の特性により圧力が一様に作用しない場合には、プレス時に中空コアロッドが破損する可能性がある。したがって、中空ペレットの量産化においてはプレス時の中空コアロッドの破損防止対策が必要である。

この破損防止対策の1つとして、中空ロッド材質の最適化がある。

本試験では、濃縮部門で高強度、高韌性材料として開発されたマルエージング鋼について、中空ロッド材質として適用可能性の有無を検討するために簡易的な方法で摩耗試験を実施した。

### (2) 試験方法

現在、金属材料の耐摩耗性を一般的にあらわすに足る試験法、表示法は存在しない。

(J I S等) 摩耗に大きな影響を与える因子として、相手摩擦材料、摩擦面の形状、その大小、摩擦速度、荷重、摩擦距離がある。本試験では、材質の違いのみを因子として、その他の因子は同一条件で試験を実施した。

#### ① 同一形状の摩耗試験サンプルの作成

現在新濃縮室にあるマルエージング鋼の素管を使用して、摩耗試験用サンプルを作成した。材質の違いの比較のために、平成3年度試作した住電製超硬合金のサンプルも作成した。以下マルエージング鋼サンプル作成手順について説明する。

(イ) マルエージング鋼の素管を新濃縮室の放電加工機を使用して試験サンプルの形状に加工する。（φ5mm×10mmのサンプル）

(ロ) 新濃縮室の時効硬化処理炉を使用して、真空雰囲気で510°C×10hr熱処理を実施する。

(ハ) 試験サンプルの摩擦面を一定条件の表面粗さに加工する。（建工室にて▽▽▽まで加工）

(チ) 比較検討のため、住電製の超硬合金（平成3年度試作分）もメーカーで加工し、PNCの建工室で同一の表面粗さに加工する。（▽▽▽まで加工）

#### ② 摩耗試験の実施

濃縮仕様マルエージング鋼と住電製超硬合金のサンプルを、R-134室の金相研磨機を使用して実施した。

試験条件は以下のとおりで実施した。

- (I) 相手摩擦材料 ..... 目の粗い研磨紙 # 400 (SiC)  
 (II) 摩擦面の形状 ..... 直径 5 mm の円柱状  
 (III) 摩擦環境 ..... 空気雰囲気 (乾式)  
 (IV) 摩擦速度 ..... 最大回転数 400 r p m  
 (V) 摩擦時間 ..... 3 分間  
 (VI) 荷重 ..... 1 kg f  
 (VII) 試験材質 ..... (i) マルエージング鋼 (時効前)  
                          (ii) SKH 51  
                          (iii) AF 1  
                          (iv) GH 880R  
                          (v) GH 96R  
                          (vi) G 5

試験の評価は、摩耗試験前後の重量減で行った。

### ③ 試験結果

濃縮仕様マルエージング鋼と住電製超硬合金のサンプルを、R-134室の金相研磨機を使用して実施した結果を以下に示す。

表 7.9 摩耗試験結果

No.	試験材質	試験前重量(g)	試験後重量(g)	重量減少率(%)
①	マルエージング鋼	1.5678	1.5243	2.77
②	高速度工具鋼 (SKH 51)	1.0035	0.9950	0.85
③	超硬合金 (AF 1)	1.8039	1.8014	0.14
④	超硬合金 (GH 880R)	1.6983	1.6969	0.08
⑤	超硬合金 (GH 96R)	1.6686	1.6676	0.06
⑥	超硬合金 (G 5)	1.8304	1.8292	0.07

本試験の摩耗条件では、マルエージング鋼は超硬合金、高速度鋼に比べて摩耗しやすい。

## 8. 参考文献

(文献名称)	(発行)	(著者)
1) 機器現場の基礎物理① 「はじめて学ぶ材料力学」	技術評論社	山田 義昭
2) 材料試験法	内田老鶴園	須田 一
3) 金属材料の強度および疲労資料集成	丸善(株)	日本学術振興会 金属材料の強度と疲労 129委員会
4) 強度設計データブック	(株)裳華房	強度設計データブック 編集委員会編
5) 機械工学便覧	(社) 日本機械学会	(社) 日本機械学会
6) 機器工学基礎講座 3 「材料力学」	朝倉書店	大久保 肇
7) PNC ZN843-84-02 「FBR燃料用中空ペレットの製造試験報告」	Pu燃部設計開発課	横内 洋二 他
8) 第3回無機ファイン新材料セミナー 「セラミックの強度評価」	(社) 粉体粉末冶金協会	阿部 弘 (旭硝子(株))
9) 第3回粉体粉セミナー 「粉体成形の現状」	(社) 粉体粉末冶金協会	吉田 克裕 (TDK(株))
10) 工業材料 (1991年12月別冊) 「絵でみる工業材料辞典」複合材料編	日刊工業新聞社	藤吉 敏生
11) 工業材料 (1991年5月号 P. 94~) 「強度と韧性」	日刊工業新聞社	新井 和喜 (金属材料技術研究所)
12) 「増強」材料強度学要論	マグローヒル出版(株)	小寺沢良一
13) 粉粒体の耐摩耗設計	(株)粉体と工業社	橋本 建次
14) 粉体工学便覧	日刊工業新聞社	粉体工学会
15) 金属便覧	丸善(株)	(社) 日本金属学会
16) J I Sハンドブック 「鉄鋼」	(社) 日本規格協会	(社) 日本規格学会
17) J I S 鉄鋼材料入門	(株)大河出版	大和久重雄
18) 金属の疲労と破壊の防止	養賢堂	石橋 正