The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	遊星ボールダイスによるパイプの縮径加工に関する研究
Author(s)	金山, 公三
Citation	大阪大学, 1991, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3086290
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

遊星ボールダイスによる
パイプの縮径加工に関する研究

金　山　公　三

目　次

第１章　序　論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.1　緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.2　本論文の目的と構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

第２章　遊星ボールダイスによるパイプの縮径加工装置の試作 ・・・・ 4
2.1　緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.2　遊星ボールダイス ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.2.1　構造および加工の原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.2.2　縮径加工が可能なパイプ径とボール径・個数の関係 ・・ 6
2.2.3　ボールとパイプの接触状態 ・・・・・・・・・・・・・・ 8
2.3　加工装置の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
2.4　縮径加工実験による加工特性の概要把握 ・・・・・・・・・・ 18
2.4.1　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
2.4.2　加工状態 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 20
2.4.3　強度特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
2.4.4　変形特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
2.5　結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28

第３章　製品の表面形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
3.1　緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
3.2　幾何学的解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
3.2.1　ボールの公転角速度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29

3.2.2　表面のら線模様の山の高さ　・・・・・・・・・・・・・　31
3.3　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　32
3.4　実験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　33
3.4.1　ボール1ピッチあたりのパイプの送り量　・・・・・・・　33
3.4.2　表面粗さ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　35
3.5　ボール軌道のずれの影響　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　38
3.5.1　ずれ量の測定及び表示　・・・・・・・・・・・・・・・・・　38
3.5.2　パイプの表面形状　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　42
3.6　結　言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　50

第4章　押し込み力およびトルクの解析　・・・・・・・・・・・・・・・・・　51
4.1　緒　言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　51
4.2　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　51
4.3　エネルギ法による解析　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　53
4.3.1　パイプの変形状態　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　53
4.3.2　塑性変形仕事　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　56
4.3.3　せん断仕事　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　56
4.3.4　摩擦仕事　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　57
4.3.5　押し込み力FおよびトルクT　・・・・・・・・・・・・・・　57
4.4　実験値と解析値の比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　60
4.5　コニカルダイスとの比較　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　67
4.6　結　言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　68

第5章　加工限界　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　69
5.1　緒　言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　69

5.2　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 69
5.3　まくれ現象及び座屈 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 70
5.4　表面のはく離 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 71
5.4.1　はく離が発生する加工条件 ・・・・・・・・・・・・・ 71
5.4.2　加工の繰り返し ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74
5.4.3　圧縮及び摺動の繰り返し ・・・・・・・・・・・・・・・ 77
5.4.4　せん断の繰り返し ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.5　結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82

第6章　高速加工 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83
6.1　緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83
6.2　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 83
6.3　製品性状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86
6.4　ダイス強度の検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 86
6.4.1　ダイスのアウタレース自身の遠心力 ・・・・・・・・ 86
6.4.2　加工反力およびボールの遠心力 ・・・・・・・・・・・ 87
6.4.3　ダイスの寿命 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 91
6.5　内面溝付きパイプ製造への応用 ・・・・・・・・・・・・・・ 94
6.5.1　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 94
6.5.2　実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 95
6.6　結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 98

第7章　セラミックスと金属パイプの複合化 ・・・・・・・・・・・ 99
7.1　緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
7.2　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100

7.2.1　供試材料　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　100
7.2.2　複合パイプの製造と強度評価　・・・・・・・・・・・・・・　103
7.3　外層パイプの状態　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　104
7.3.1　表面粗さ　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　104
7.3.2　寸法変化　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　107
7.4　押し込み力及びトルク　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　109
7.5　かしめ強度　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　111
7.6　セラミックス材料の摩擦圧接への応用　・・・・・・・・・・・・　115
7.6.1　意義と問題点　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　115
7.6.2　実験方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　116
7.6.3　実験結果　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　118
7.7　結　言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　123

第8章　結　論　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　125

参考文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　128

謝辞　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　133

第1章　序　　論

1.1　緒　言

生産加工技術には，所要の形状や性質を備えた製品を能率及び経済性に優れた方法によって製造することが要求される．金属の塑性加工は，切削加工の場合のような加工屑がほとんど発生せず材料歩留まりが良いので，経済性が優れている．これは，素材の製造に費やされるエネルギをも考慮した生産に必要な全エネルギの節約にもつながり［1］，省エネルギ・環境保護へも寄与するものである．また，高速で塑性変形を与えられるので生産速度を高くすることができるうえに，寸法精度が優れているために仕上げ加工が少なくてすみ，加工能率も優れている．さらに，溶接構造に見られるようなメタルフローの不連続がなく，加工と熱処理を組み合わせることによって金属の微細組織を制御することもできるので，機械的特性の改善も可能である．これらのメリットを有することから，数多くの製品に塑性加工が利用されている．

パイプの製造においても，溶接部のある電縫管に比べて均質性が高いシームレスパイプの製造や，さらに二次加工によって異形管にする工程は塑性加工によって行われている．従来，パイプの断面形状を変化させる加工はコニカルダイスを用いて行われていたが，パイプの全周にわたって同時に加工されるために，大きな加工力が必要とされた．この加工力は，パイプを引張るか，または押し込むかによって与えられるので，被加工材の破断もしくは座屈の危険がある．また，ダイス面とパイプ表面とはすべり接触なので，潤滑剤の使用にもかかわらず摩擦力は大きく，さらにダイスの摩耗や焼き付きを生じ易い．

この解決策として，アッセルミル，ディッシャミル，3ロールプラネタリミル等のロールを利用した加工方法［2］や回転ダイスによる方法［3］が考案されている．これらの方法では，局部的な加工を累積していくので破断や座屈の危

険は減少する．また，部分的に転がり接触となり摩擦損失が軽減される．しかし，工具が高価なうえに，製品の寸法精度を確保するためには，工具の交換作業時の微調整には相当な時間と熟練した技術が必要とされる．また，ロールの駆動は個々のロールにつけた軸を介して行われ，回転の高速化にともなう遠心力の増大によってこの軸がたわむために回転速度が制限され生産能率を低くしている．そこで，局部的な加工を累積するという長所を損なうことなく，他の短所を克服する方法の開発が望まれる．

1.2　本論文の目的と構成

本研究は，図1.1に示すような遊星ボールダイスを提案し，パイプの直径を減少させる縮径加工技術を確立することを目的として行ったものである．すなわち，ロールの代わりに，寸法精度が優れているうえに安価なスチールボールを工具として利用する遊星ボールダイスを用いてパイプの縮径加工実験を行い，製品の機械的特性や必要な加工力について検討を行った．また，この加工法における製品表面のはく離や，座屈及びまくれの発生と加工条件の関係を明らかにした．さらに，高速加工，セラミックスと金属の複合パイプ作成技術への応用も行った．

本論文は８章から構成されており，第２章以下の概要は次の通りである．

第２章では，遊星ボールダイスの構造及び加工の原理を概説するとともに，ボールとパイプの接触面積に対する加工条件の影響について解析した結果を示す．また，加工装置を

図1.1　遊星ボールダイスの構造

設計・試作し，種々の条件下で加工を行って加工特性の概要を調べた結果についても述べる．

第３章では，製品特性として重要な項目である表面形状について幾何学的な解析を行い，実験値と比較した結果を述べる．さらに，工具の形状誤差が製品の表面形状の悪化に及ぼす影響について解析し，表面形状改善のための指針についても示す．

第４章では，加工に必要なトルク及び軸力をエネルギ法によって解析し，ボールの径及び個数，送り量，縮径率，摩擦係数等の加工条件の影響について，解析値と実験値とを比較した結果について述べる．また，コニカルダイスの加工力との比較を行い，遊星ボールダイスの優位性を示す．

第５章では，繰り返し加工による表面はく離や，座屈による多角形管化，回転鍛造におけるマッシュルーム変形［4,5］と類似の現象であるボールとの接触部近傍におけるパイプのまくれ等による加工限界について述べる．

第６章では，毎分20,000回転以上の高速でダイスを回転させ，毎分60m以上の速度での引抜き加工が可能となったことを実験で示すとともに，ダイス寿命の解析結果について述べる．さらに，溝付き浮きプラグを利用しての，内面溝付きパイプ製造への応用成果を示す．

第７章では，セラミックスと金属の複合パイプの製造へ遊星ボールダイスを応用し，高温での耐食及び耐摩耗性に優れたアルミナとステンレスの複合パイプを作成した結果について述べる．また，セラミックスの外周に延性金属材料をかしめることによって，セラミックスに対する応力集中，衝撃力，熱応力等の緩和を計り，成功例の無かったセラミックスの摩擦圧接を可能にした成果についても述べる．

第８章では，以上の研究成果を総括するとともに，今後の研究の展望について述べる．

第２章　遊星ボールダイスによる パイプの縮径加工装置の試作

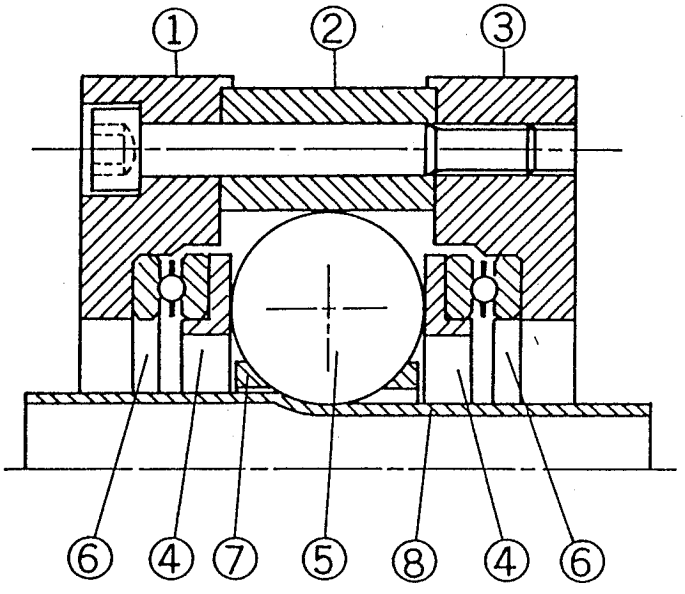
2.1　緒　言

遊星ボールダイスは，ボールがパイプのまわりを転がりながら局所的な加工を累積していくので，所要加工力の低減が期待できる．また，回転ダイス［1］，3ロール・プラネタリミル［2］，ロータリ・リングミル［3］，プラネタリー・ローラーレデューサー［4］などの回転工具に比べると，個々のボールに軸及び軸受けが不要なので，構造が簡単で，工具交換，軽量化，高速化等の面でも有利と考えられる．しかしながら，この簡単な構造の実現と引き替えに，ボールの駆動は外接するアウタレースによるトラクションドライブ［5］以外には得られないという問題を有することになる．このため，駆動力不足を生じて，ボールがパイプのまわりを公転できずに加工が行われない心配がある．摩擦力によるトラクションドライブについては未知な部分が多く，定量的に駆動力を求めることは困難である．そこで本章では，ダイスを試作して実験を行い，加工が可能なことを実証した．さらに，加工特性の概要を把握した．

2.2　遊星ボールダイス

2.2.1　構造及び加工の原理

図2.1に，パイプの縮径加工を目的として考案した遊星ボールダイスの断面図を示す．ダイスを回転させながら，その中にパイプを通すと，ボールがパイプのまわりを転がりながら局部的な加工を累積して縮径加工が行われる．前節で述べた種々の回転工具［1～4］は，各ロールごとに軸及び軸受けが必要なために，構造が複雑となり剛性も小さくなる．これに対して遊星ボールダイスは，個々のボールには軸をつけないので前述の工具に比べて剛性が高く，なおかつ構造が簡単である．それゆえ，軽量化ができ回転の高速化も可能となる．また，



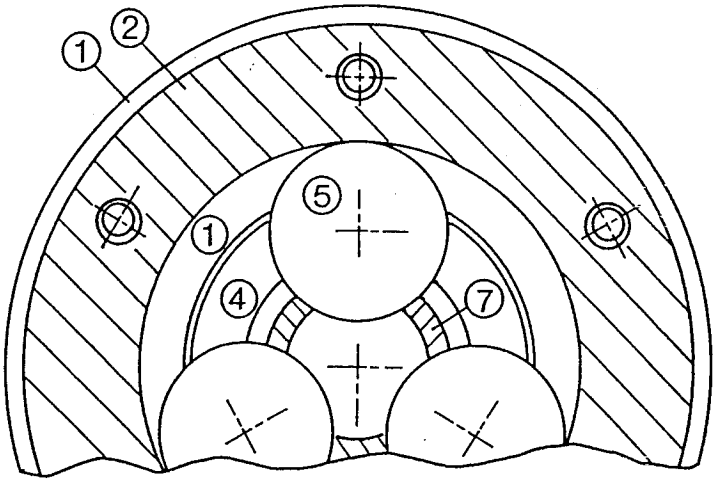


図2.1　遊星ボールダイスの断面図

①③：カバープレート（SNC2,HRC35），②：アウタレース（SKD11,HRC55）
④：受圧板（SKD11,HRC55），⑤：スチールボール，⑥：スラストベアリング
⑦：ボール保持器，⑧：パイプ

工具交換や，それに伴う微調整に要求される時間や技術レベルが軽減される．一方，ボールを駆動する軸が無いので，ボールの駆動はアウタレース内周面との摩擦力のみによって行われる．

2.2.2 縮径加工が可能なパイプ径とボール径・個数の関係

ボールの軌道半径を小さくしていくと，図2.2に示すようにボール同士が接触するので，これ以上にパイプ径を小さく加工することはできない．この時，

$$\overline{O_P O_B} \cdot \sin(\pi/n) = \overline{O_B B_C} \tag{2-1}$$

すなわち，加工後のパイプ半径をr_1，ボール半径をr_Bとすると，

$$(r_1 + r_B) \cdot \sin(\pi/n) = r_B \tag{2-2}$$

図2.2はr_1が最小になった状態を示しているので，式(2-2)より，

$$r_1 \geqq r_B \left\{ \frac{1}{\sin(\pi/n)} - 1 \right\} \tag{2-3}$$

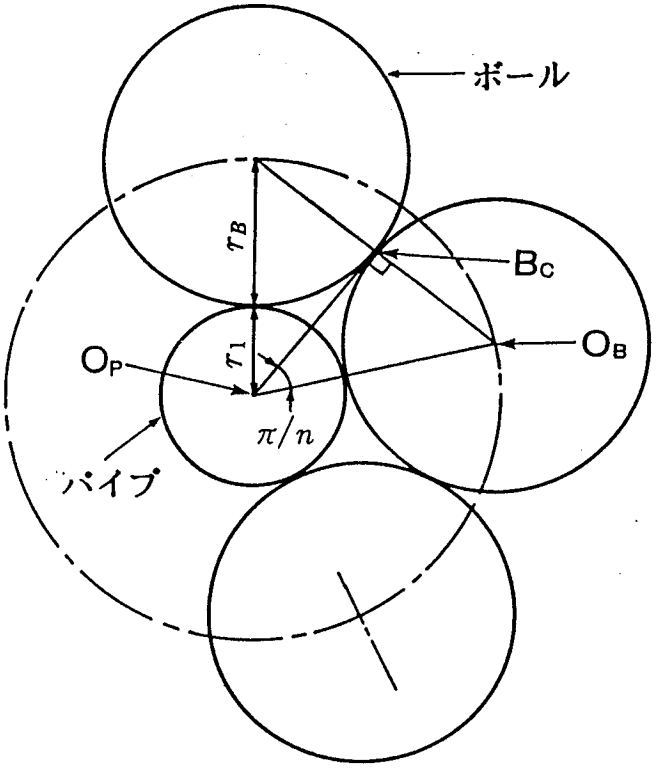


図2.2　加工可能なパイプ径とボールの径及び個数の幾何学的関係

ここで，縮径率ϕ_dは，加工前のパイプ半径をr_0とすると，

$$\phi_d = 1 - r_1/r_0 \tag{2-4}$$

によって定義されるので，

$$r_1 = r_0 \cdot (1 - \phi_d) \tag{2-5}$$

と書かれる．これを，式(2-3)に代入すると，

$$r_B \leqq \frac{r_0 \cdot (1 - \phi_d) \cdot \sin(\pi/n)}{1 - \sin(\pi/n)} \tag{2-6}$$

となり，これによって，許容される最大のボール半径が求められる．この式による計算例を，図2.3及び図2.4に示す．図2.3から，ボール個数が少ないほど，

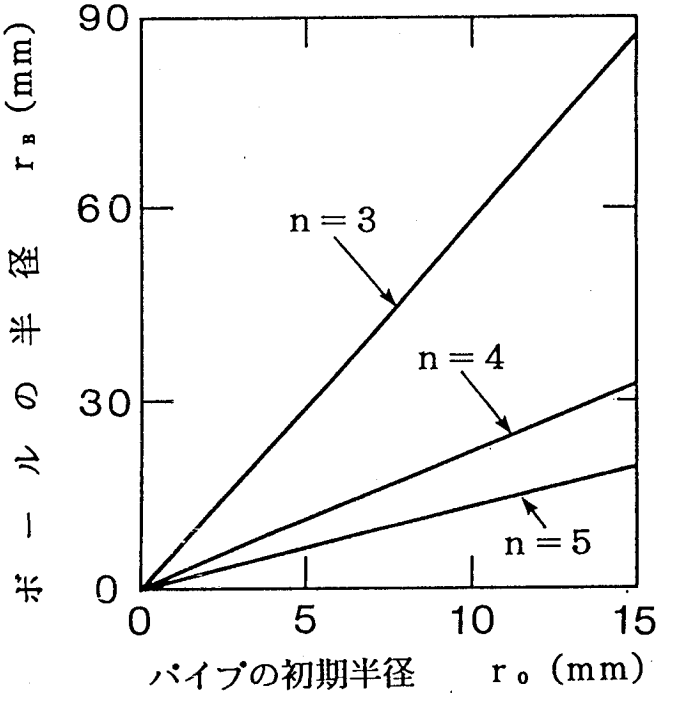


図2.3　使用可能なボール径に対するボール個数及びパイプ径の影響
（縮径率：ϕ_d = 10%）

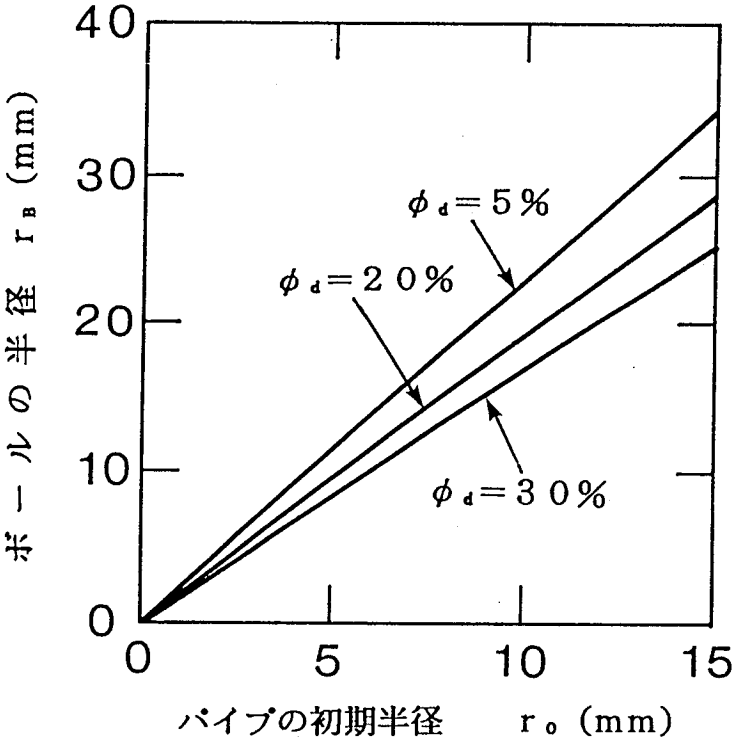


図2.4　使用可能なボール径に対するパイプ径及び縮径率の影響
（ボール個数：n = 4）

またパイプ径が大きいほど，使用可能なボール径の限界値は大きくなることが分かる．図2.4は，縮径率が小さいほど，またパイプ径が大きいほど，使用可能なボール径の限界値が大きくなることを示している．

2.2.3　ボールとパイプの接触状態

図2.5(a)に，ボールとパイプの軸方向の位置関係を示す．破線で示したFHが前回通り過ぎたボールによって加工された形状で，軸方向にm（$=\overline{EF}$）だけ送られてきた次のボールによって実線EGのように加工される．同図(b)は，(a)中のEG間の任意の点Cを含む軸直角断面である．

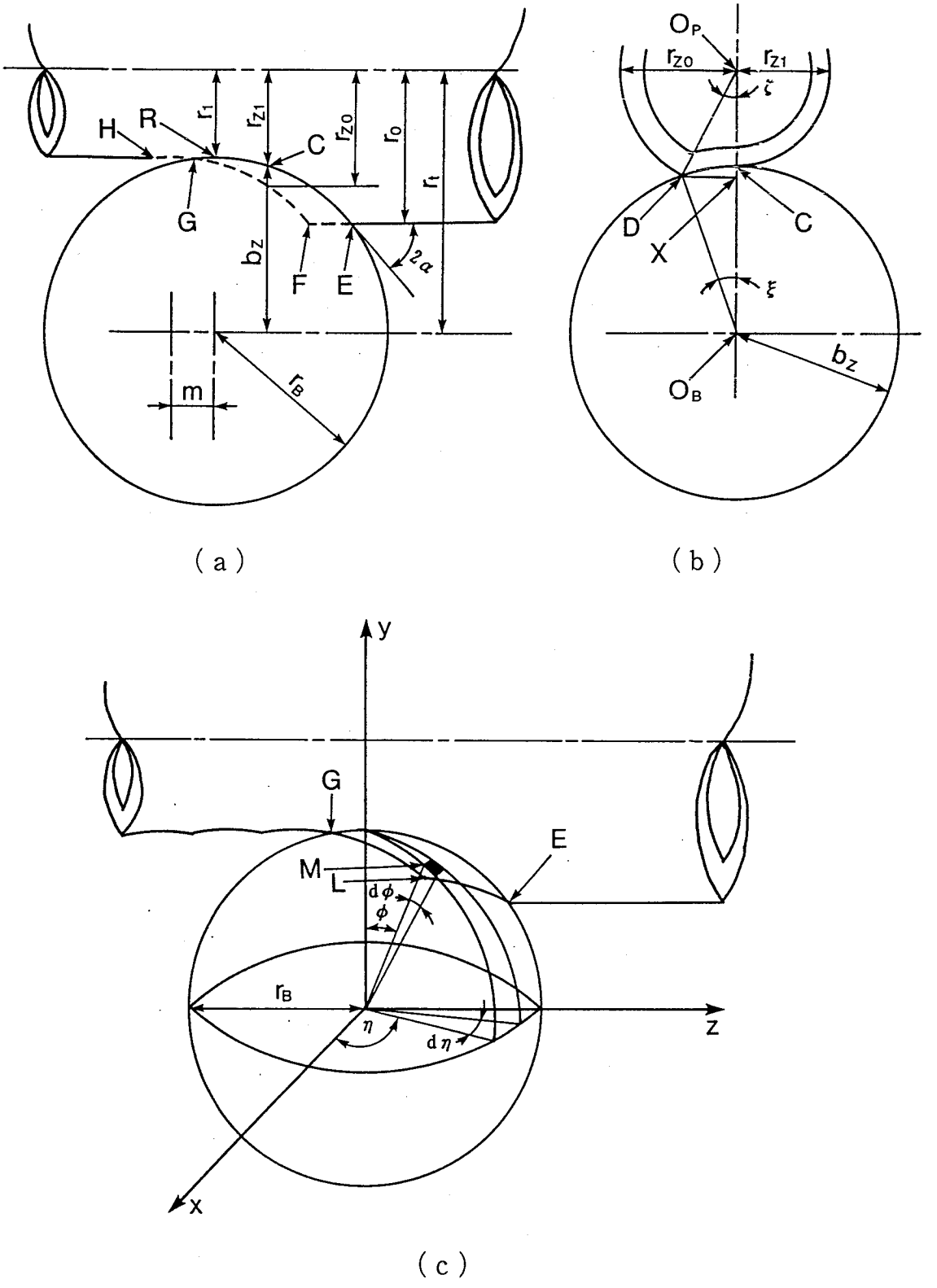


図2.5　ボールとパイプの接触状態を示す模式図
（a）y－z断面，（b）点Cを含むx－y断面，（c）立体図

また，同図(c)は，ボールとパイプの接触領域ELGEの立体図と座標系を示している．この接触領域のx，y及びz方向への投影面積 S_x，S_y及びS_zは，図中の微小部分（陰影部）の面積をdS とすると次式で表される．

$$S_x = \int_S \sin\phi \cos\eta \, dS \tag{2-7}$$

$$S_y = \int_S \cos\phi \, dS \tag{2-8}$$

$$S_z = \int_S \sin\phi \sin\eta \, dS \qquad (\eta \geqq 0) \tag{2-9}$$

そして，各面積は以下のようにして求められる．図2.5(b)において，点Xは点Dから直線$\overline{O_P O_B}$ への垂線の足である．従って，接触領域のx方向への投影面積S_xは，

$$S_x = \int_{Z_G}^{Z_F} \overline{CX} \, dz + \int_{Z_F}^{Z_E} \overline{CX} \, dz \tag{2-10}$$

で表される．ここで，ボール個数をn，ダイス1回転あたりのパイプの送り量をf_Dとするとピッチmは，

$$m = \frac{2 r_t f_D}{n(r_1 + 2r_B)} \tag{2-11}$$

であり［6］，このmを用いて，点E，F，Gのz座標は次式で表される．

$$Z_G = m/2 \tag{2-12}$$

$$Z_F = \sqrt{r_B{}^2 - (r_t - r_0)^2} \tag{2-13}$$

$$Z_E = m + Z_F \tag{2-14}$$

そして，$\overline{CX}$は，

$$\overline{CX} = \overline{O_PX} - r_{Z1}$$

$$= \frac{r_{Z0}^2 + r_t^2 - b_Z^2}{2r_t} - \left\{r_t - \sqrt{r_B^2 - (z - m)^2}\right\} \tag{2-15}$$

である．ここで，b_Z 及びr_{Z0}は，

$$b_Z = r_t - r_{Z1}$$

$$= \sqrt{r_B^2 - (z - m)^2} \tag{2-16}$$

$$r_{Z0} = r_t - \sqrt{r_B^2 - z^2} \qquad (Z_G \leqq z \leqq Z_F) \tag{2-17}$$

$$r_{Z0} = r_0 \qquad (Z_F \leqq z \leqq Z_E) \tag{2-18}$$

である．従って，

$$\overline{CX} = \sqrt{r_B^2 - (z - m)^2} - \sqrt{r_B^2 - z^2} + \frac{m(m - 2z)}{2r_t}$$

$$(Z_G \leqq z \leqq Z_F) \tag{2-19}$$

$$\overline{CX} = \sqrt{r_B^2 - (z - m)^2} + \frac{r_0^2 - r_t^2 - r_B^2 + (z - m)^2}{2r_t}$$

$$(Z_F \leqq z \leqq Z_E) \tag{2-20}$$

式(2-10)へ式(2-19)及び(2-20)を代入すると，

$$S_x = \frac{1}{2}\left[(z - m)\sqrt{r_B^2 - (z - m)^2} + r_B^2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{z - m}{r_B}\right)\right]_{Z_G}^{Z_E}$$

$$+ \frac{1}{2}\left[\frac{m\,z\,(m - z)}{r_t} - z\sqrt{r_B^2 - z^2} - r_B^2 \cdot \sin^{-1}\left(\frac{z}{r_B}\right)\right]_{Z_G}^{Z_F}$$

$$+ \frac{1}{2}\left[\frac{\left(r_0^2 - r_t^2 - r_B^2\right) z + \left(z - m\right)^3/3}{r_t}\right]_{Z_F}^{Z_E} \tag{2-21}$$

となる．

次にS_yは，図2.5(b)の記号を用いると，

$$S_y = \int_{Z_G}^{Z_F} \overline{DX}\, dz + \int_{Z_F}^{Z_E} \overline{DX}\, dz \tag{2-22}$$

と表される．ここで，

$$\overline{DX} = b_Z \cdot \sin \xi \tag{2-23}$$

$$\xi = \cos^{-1}\left(\frac{b_Z^2 + r_t^2 - r_{Z0}^2}{2 \cdot b_Z \cdot r_t}\right) \tag{2-24}$$

であり，r_{Z0}はS_xの場合と同様で，式(2-17)もしくは式(2-18)になる．従って，式(2-22)に，(2-23)及び(2-24)を代入して，シンプソンの公式を用いるとS_yが計算できる．

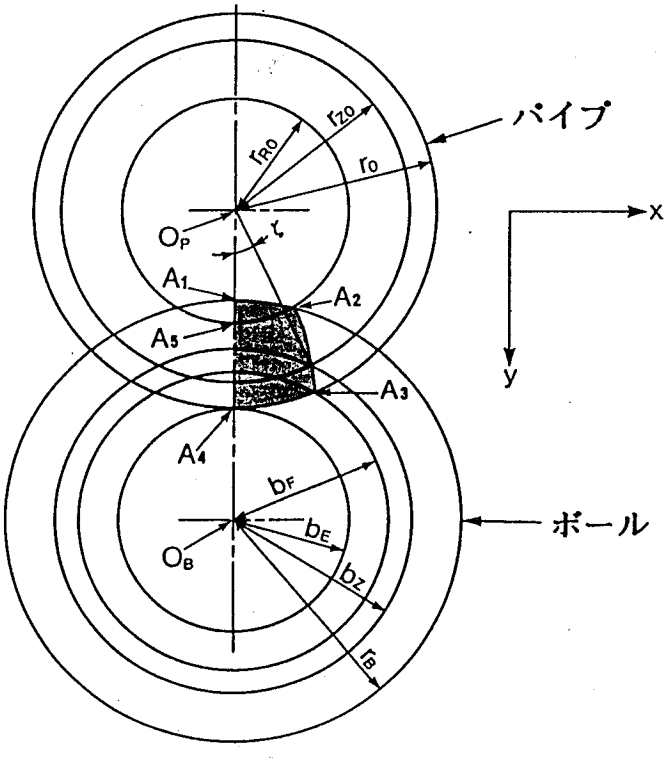


図2.6　ボールとパイプの接触部のｚ方向投影図

S_Zは，図2.6において$A_1A_2A_3A_4A_5A_1$で囲まれる部分となる． 図2.5(a)におけるR点で，加工前のパイプ半径は r_{R0}，ボールの断面の半径はr_B で交点が点 A_2である．そして，F点へ近づくにつれて，パイプの半径は大きくなり，ボールの断面半径は小さくなる．C点では，各々，r_{Z0}とb_0 となり，この交点が曲線A_2A_3上にある．そして，F点では，r_0とb_Fとなり，交点が点A_3である．これ以後は，パイプ半径はr_0のままで，ボールの断面の半径のみが小さくなり，E点でb_Eになる．S_zを2つの部分に分け，S_{z1} は$A_1A_2A_5A_1$，S_{z2} は$A_2A_3A_4A_5A_2$で囲まれる部分とすると，

$$S_{Z1} = \int_0^{x_2} y\, dx \tag{2-25}$$

$$S_{Z2} = \int_{r_{R0}}^{r_0} r_{Z0} \cdot \zeta\, dr_{Z0} \tag{2-26}$$

である．まず，式(2-26)中のζは，

$$\zeta = \cos^{-1}\left(\frac{r_{Z0}^2 + r_t^2 - b_Z^2}{2 \cdot r_{Z0} \cdot r_t}\right) \tag{2-27}$$

そして，式(2-27)中のb_Zは，次のようにして求める．z-y 平面内において，前回に通り過ぎたボールと今回きたボールは，各々，次式で表される．

$$z^2 + (y - r_t)^2 = r_B^2 \tag{2-28}$$

$$(z - m)^2 + (y - r_t)^2 = r_B^2 \tag{2-29}$$

式(2-28)において，$y = r_{Z0}$ の時のzは，

$$z = \sqrt{r_B^2 - (r_{Z0} - r_t)^2} \tag{2-30}$$

であり，式(2-29)において，zが式(2-30)の値をとる時に$y = r_{Z1}$ となるので，

$$b_Z = r_t - r_{Z1}$$

$$= \sqrt{r_B^2 - \left\{\sqrt{r_B^2 - \left(r_{Z0} - r_t\right)^2} - m\right\}^2} \tag{2-31}$$

で求められるので，式(2-26)に式(2-27)，(2-31)を代入し，シンプソンの公式を用いると，S_{Z2}が計算できる．なお，r_{R0}は，

$$r_{R0} = r_t - \sqrt{r_B^2 - m^2} \tag{2-32}$$

である．次に式(2-25)中のyは，

$$y = \sqrt{r_{R0}^2 - x^2} - \left(r_t - \sqrt{r_B^2 - x^2}\right) \tag{2-33}$$

であり，これを式(2-25)に代入して積分すると，

$$S_{Z1} = \frac{1}{2}\left[x\cdot\sqrt{r_{R0}^2 - x^2} + r_{R0}^2\cdot\sin^{-1}\frac{x}{r_{R0}} + x\cdot\sqrt{r_B^2 - x^2} + r_B^2\cdot\sin^{-1}\frac{x}{r_B} - 2r_t\cdot x\right]_0^{x_2} \tag{2-34}$$

となる．ここで，x_2は点A_2のx座標なので，2つの円の交点から，

$$x_2 = m\cdot\sqrt{1 - \frac{m^2}{4r_t^2} - \frac{\sqrt{r_B^2 - m^2}}{r_t}} \tag{2-35}$$

と求められる．従って，式(2-34)に式(2-32)，(2-35)を代入すれば，S_{Z1}が計算できる．

図2.7に，式(2-4)で定義した縮径率が接触面積におよぼす影響を示す．縮径率の増加とともに何れも増加し，特に，S_yの値が大きい．図2.8の送り速度の影響も，図2.7とほぼ同様の傾向を示す．

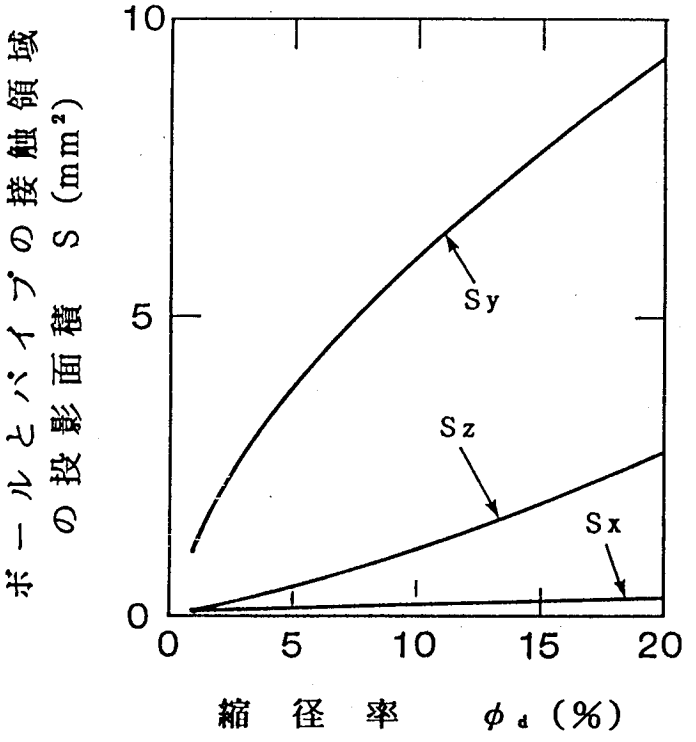


図2.7　ボール１個あたりの接触面積に対する縮径率の影響

（ボール径　　：$2 \cdot r_B = 38.1$mm
ボール個数　　：$n = 3$
パイプの初期半径　：$2 \cdot r_0 = 22.0$mm
パイプの送り速度　：$f_D = 1$mm/rev）

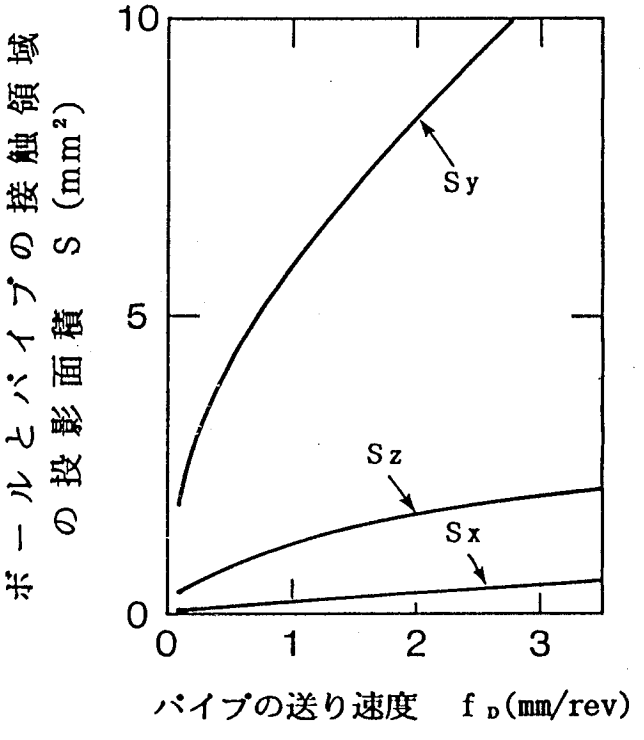


図2.8　ボール１個あたりの接触面積に対する送り速度の影響

（$2 \cdot r_B = 38.1$mm，$n = 3$，$2 \cdot r_0 = 22.0$mm，$\phi_d = 10\%$）

次に，ボール径が大きくなると，図2.9に示すようにS_yは増大するが，S_xとS_zは，わずかずつ減少する．ボール個数が増えると，図2.10に示すように何れの面積も減少する．しかし，これはボール1個あたりの面積であり，ボール個数を掛けたダイス全体での面積は，図2.11に示すようにボール個数の増加とともに増大する．

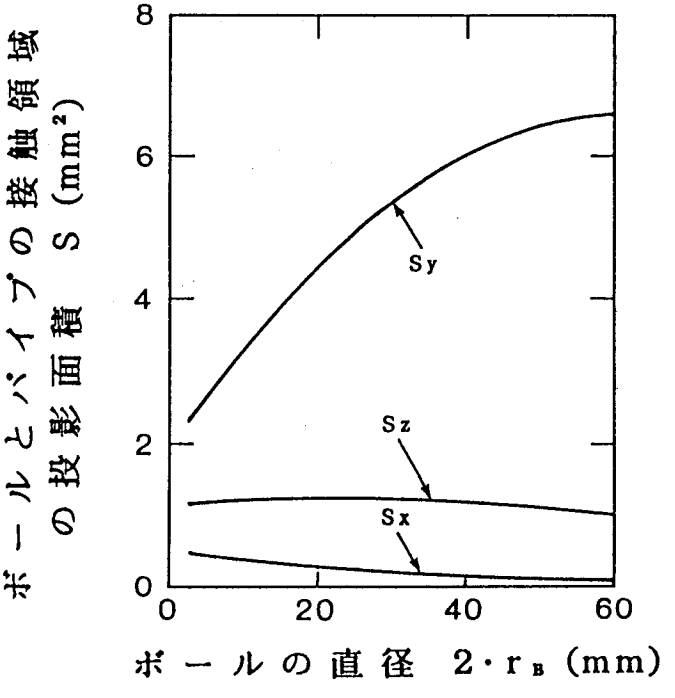


図2.9　ボール1個あたりの接触面積に対するボール径の影響
($2 \cdot r_0 = 22.0$mm，$\phi_d = 10\%$，$n = 3$，$f_D = 1$mm/rev)

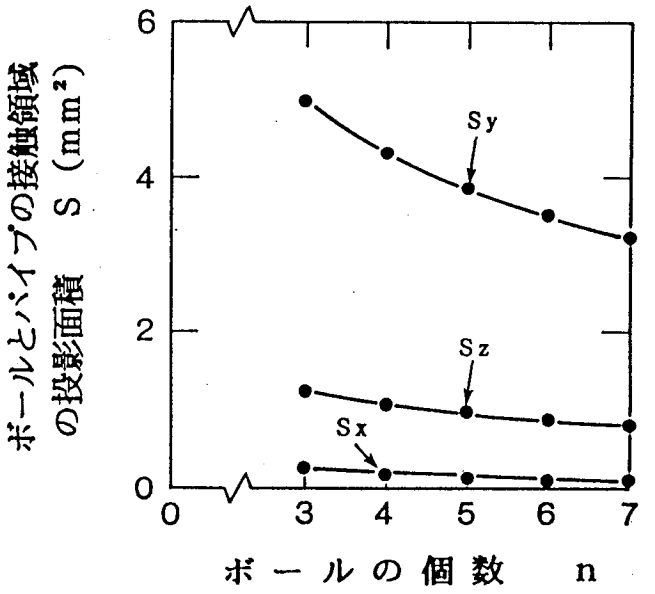


図2.10　ボール1個あたりの接触面積に対するボール個数の影響

（$2 \cdot r_0 = 22.0$mm，$\phi_d = 10\%$，$f_D = 1$mm/rev，$2 \cdot r_B = 50.8$mm）

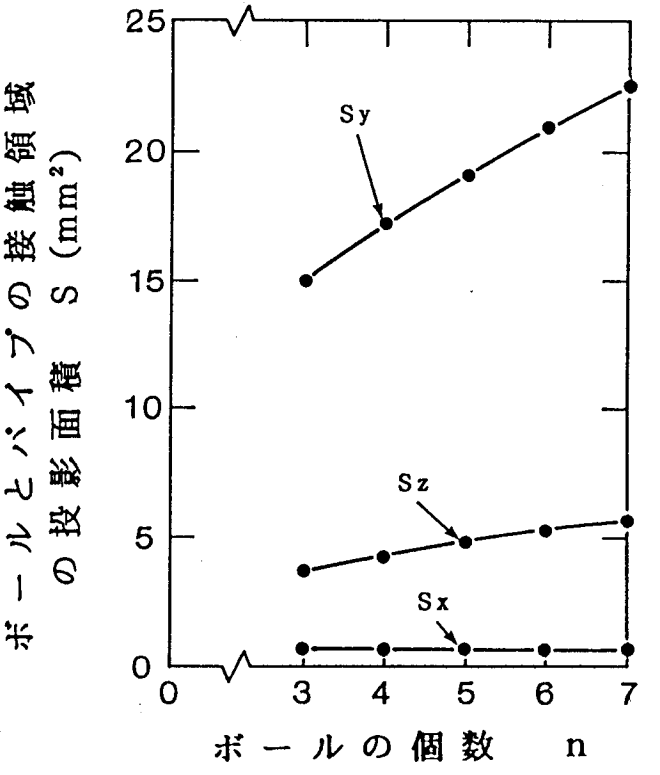


図2.11　全ボールの接触面積に対するボール個数の影響

（$2 \cdot r_0 = 22.0$mm，$\phi_d = 10\%$，$f_D = 1$mm/rev，$2 \cdot r_B = 50.8$mm）

2.3　加工装置の構成

実験装置の外観写真を図2.12に，その簡略図を図2.13に示す．遊星ボールダイス②を小型旋盤（豊和産業(株)製STRONG 650）のチャック①でつかんで回転させる．なお，芯だし精度は，アウタレース外周部にダイアルゲージをあてて5/100mm以内に調整する．工具台⑤にはロードセルを兼ねたパイプつかみ部④を固定し，これでパイプ③を支持する．そして，回転している遊星ボールダイス中に，工具台⑤の自動送りによってパイプを押し込んで縮径加工を行う．ロードセルには，軸力とトルクの測定用にひずみゲージを貼りつけ，動ひずみ計で信号を増幅した後に2ペンレコーダで各々を記録する．

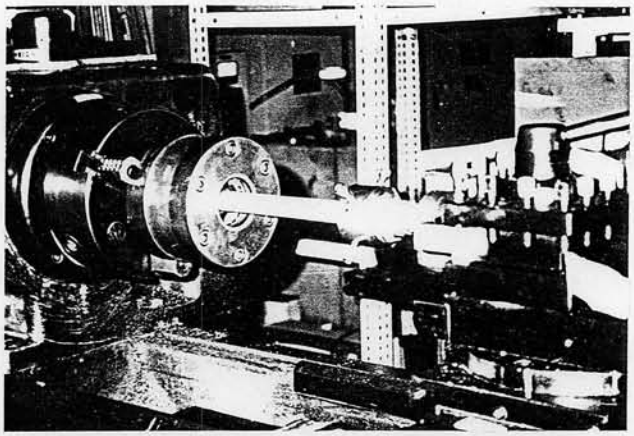


図2.12　遊星ボールダイスによる縮径実験装置の外観

2.4　縮径加工実験による加工特性の概要把握

2.4.1　実験方法

図2.1に示した遊星ボールダイスに内蔵するボールは，精密級のスチールボールを用いた．直径は38.1mmで，個数は3個とした．アウタレースの内径は，95，96，97mmの3種類に変化させた．パイプは純アルミニウム(A1050TD)，アルミ

ニウム合金(A6063TD)，銅(C1220)，ステンレス(SUS304)を用いた．パイプ外径は 22mmで，各アウタレースに対する縮径率は，14.5，10.0，5.0 %である．潤滑剤は，マシン油と二硫化モリブデンを用いた．リング圧縮試験［6］で求めた摩擦係数は，それぞれ，0.16 及び0.12である．ダイス1回転あたりの送り量f_Dは，0.1～3.0mm/revに変化させた．

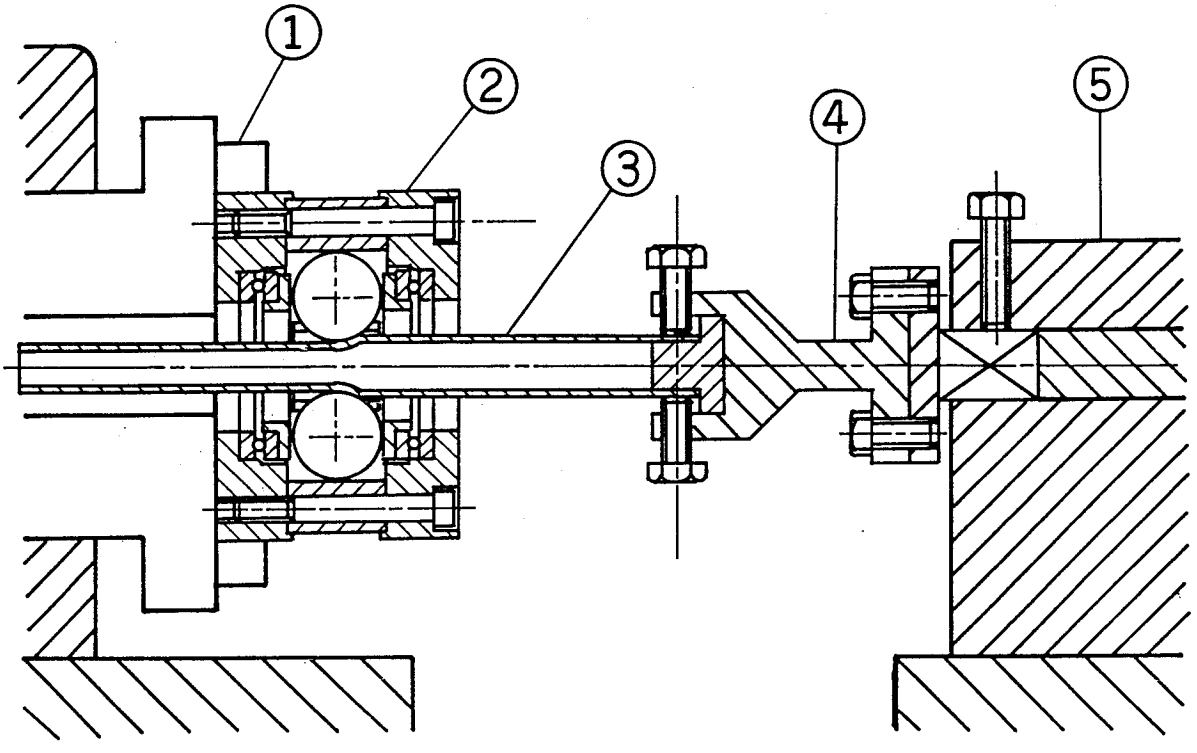


図2.13　遊星ボールダイスによる縮径実験装置の模式図
①：旋盤のチャック，②：遊星ボールダイス
③：パイプ，④：ロードセル，⑤：工具台

2.4.2 加工状態

加工したパイプの代表例を図2.14から図2.19に示す．送り量f_Dが大きい場合には，図2.14に示すようにスパイラルマークが明瞭に残るが，f_Dを小さくすると図2.15のように平滑な加工面が得られる．しかし，さらにf_Dを小さくすると，アルミニウム合金の場合には図2.16に示すようにパイプ表面のはく離（ピーリング）が発生して，表面状態が悪くなる．このようなことは，銅の場合にも同様であった．

次に，縮径率ϕ_d，送り量f_Dともに大きい条件では，アウタレースとボールの間で滑りが生じ，ボールがパイプのまわりを公転することなくパイプが押し込まれ，図2.17に示すように，ボールとの接触部分が辺の中央となる三角形になる．また，同じようにϕ_d，f_Dともに大きく，肉厚が小さい場合には，図2.18のように座屈が発生する．なお，ステンレスでは，f_Dを小さくしてもピーリングは発生せず，図2.19に示すように美しい加工面が得られる．この面のR_{max}は1μmよりも小さく，鏡面になる．

以上のように，ピーリングの発生，明瞭なスパイラルマークの発生，座屈による角管化，滑りによるボールの回転不良等の問題もあるが，加工条件をうまく選定することによって良好な加工を行うことが可能である．

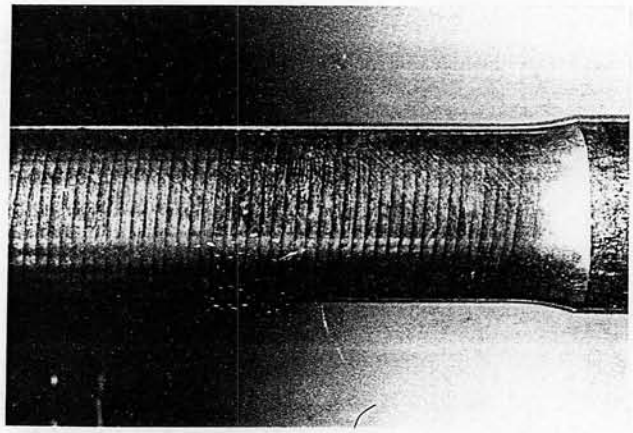


図2.14　スパイラルマークが残る加工例

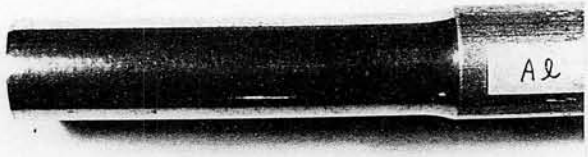


図2.15　成 功 例

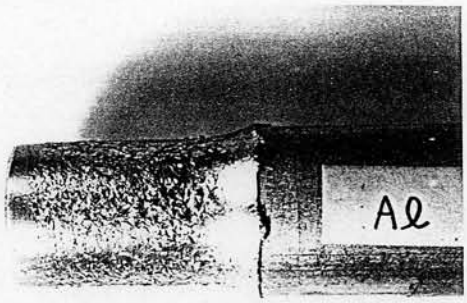


図2.16　表面はく離の発生例

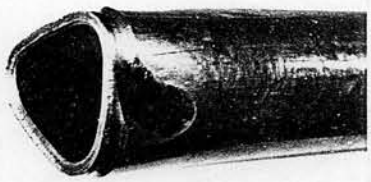


図2.17　ボールの回転不良による失敗例

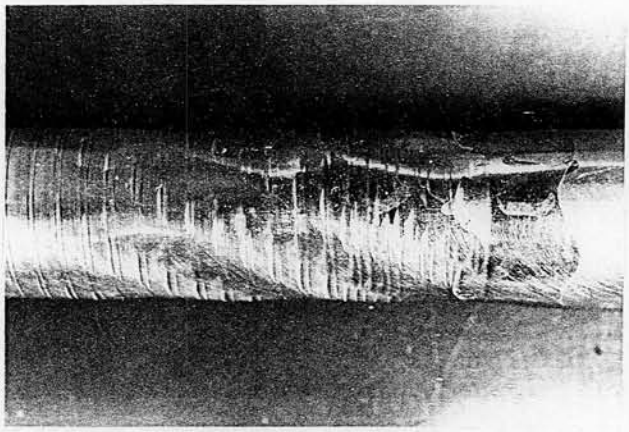


図2.18　座屈による失敗例

図2.19　鏡面になったステンレスの加工例

2.4.3 強度特性

図2.20に，パイプを輪切りにして，その軸直角断面内でビッカース硬度を測定した例を示す．いずれの条件の場合にも，肉厚方向には硬度の変化がほとんど見られない．納入状態のままのパイプを縮径加工すると，加工前後で硬さはほとんど変化しない．これは，納入状態のパイプがすでに大きく加工硬化しているためと考えられる．一方，400℃で2時間保持した後に炉冷したパイプの場合には，焼鈍されて硬度が低くなり，縮径加工によって再度加工硬化している．

図2.21に，加工前後のパイプの引張り試験における応力－ひずみ線図を示す．納入状態のままのパイプを加工した場合には，ほとんど加工硬化せず，加工による応力－ひずみ線図の変化もはわずかである．加工による特性変化が小さいのは，硬度の測定例の場合と同じ傾向である．一方，焼鈍材は耐力が小さく，ひずみの増加とともに加工硬化が進む．焼鈍後に縮径加工した場合には，焼鈍材と納入状態のままのパイプの中間となっている．このことから，納入状態のパイプは，遊星ボールダイスによる縮径加工（ϕ_d =10%）以上の加工をすでに受けているものと考えられる．

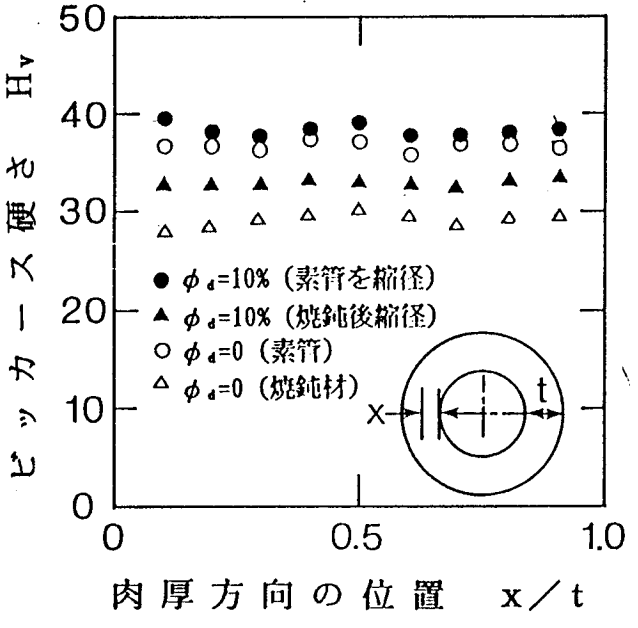


図2.20 加工にともなう肉厚方向硬度分布の変化
（材料：純アルミニウム A1050TD）

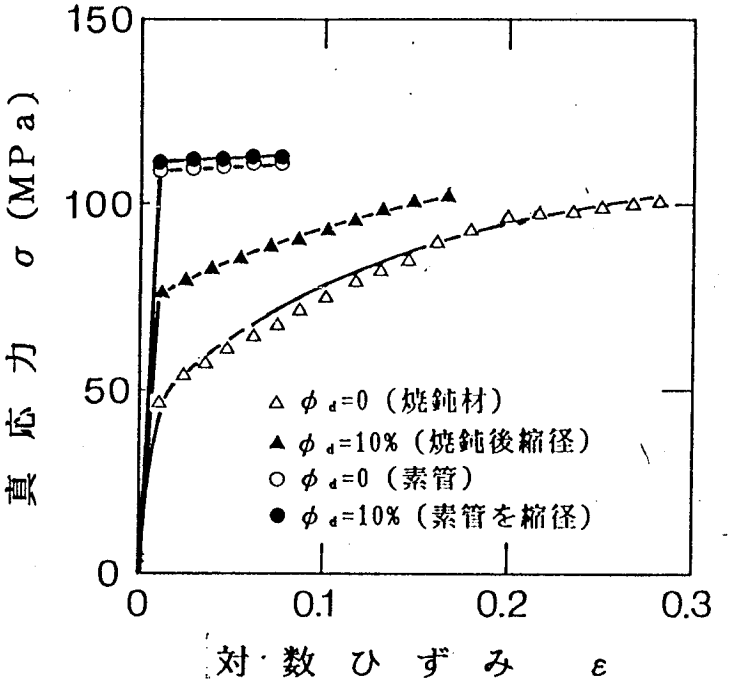


図2.21　引張り試験における応力－ひずみ線図

（材料：A1050TD，パイプの初期肉厚：t_0=2mm，$2 \cdot r_0$=22mm）

図2.22に，納入状態のまま加工したパイプと，焼鈍処理した後に加工したパイプの引張り強度を示す．焼鈍パイプは，縮径率を大きくすると徐々に引張り強度も増加する．これに対して，納入状態のままのパイプは，遊星ボールダイスによる加工を行う前の強度が，焼鈍パイプよりも大きくなっている．そして，さらに縮径加工を行っても，引張り強度はほとんど増加しない．

図2.23に，縮径率と引張り試験における全伸びの関係を示す．納入状態のまま縮径加工した場合には，縮径率の増加とともに，全伸びはわずかに増加する．これは，加工にともなってパイプの肉厚が増加するので，変形域の幅が肉厚にほぼ比例する局部くびれが増大するためと考えられる．一方，焼鈍材の場合には，縮径率の増加とともに急激に全伸びが減少する．これは，図2.20の応力－ひずみ線図から分かるように，加工硬化が進み納入状態のパイプに近づくためと考えられる．従って，さらに縮径率を大きくすると，納入状態のパイプの場合と焼鈍材の場合の値が一致すると推察される．

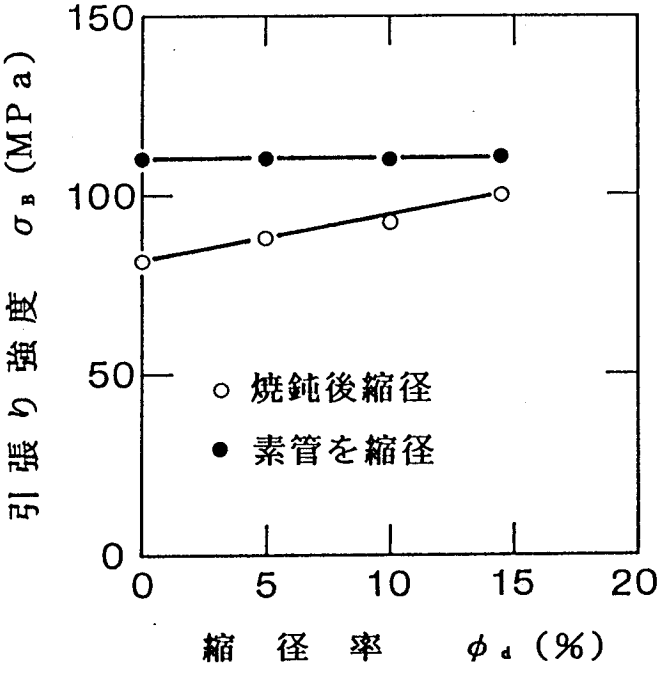


図2.22　加工にともなう引張り強度の変化

（材料：A1050TD，t_0=2mm，$2 \cdot r_0$=22mm）

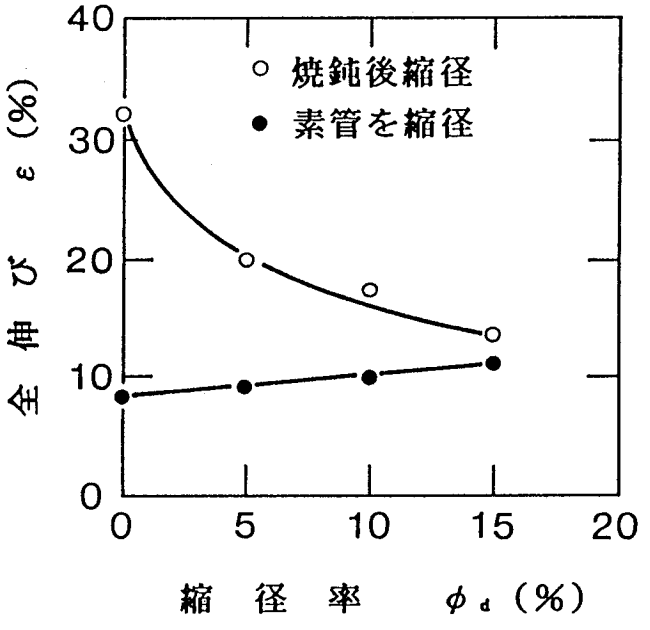


図2.23　加工にともなう全伸びの変化

（材料：A1050TD，t_0=2mm，$2 \cdot r_0$=22mm）

2.4.4 変形特性

図2.24に，縮径率ϕ_dと軸方向ひずみε_zの関係を示す．ϕ_dの増加とともにε_zはわずかに増加する傾向が見られるが，ε_zは0から0.035という小さい値であり，縮径加工によるパイプの長さ変化はわずかである．

図2.25に，縮径率ϕ_dとパイプ肉厚の関係を示す．軸方向ひずみは図2.24に示したようにほとんど0なので，体積一定の条件を満たすためには，縮径加工によるパイプ半径の縮小に見合う量だけ肉厚が増加することになる．従って，縮径率の増加とともに，肉厚は増大する．

図2.26に，縮径率ϕ_dと比ねじれ角θ_tの関係を示す．本加工法では，ボールがパイプのまわりを転がりながら，パイプ材料を軸方向や半径方向だけでなく円周方向へも流れさせるので，加工後にねじれ変形が残る．実験点は多少ばらつくが，おおむねθ_tはϕ_dに比例して増大する．

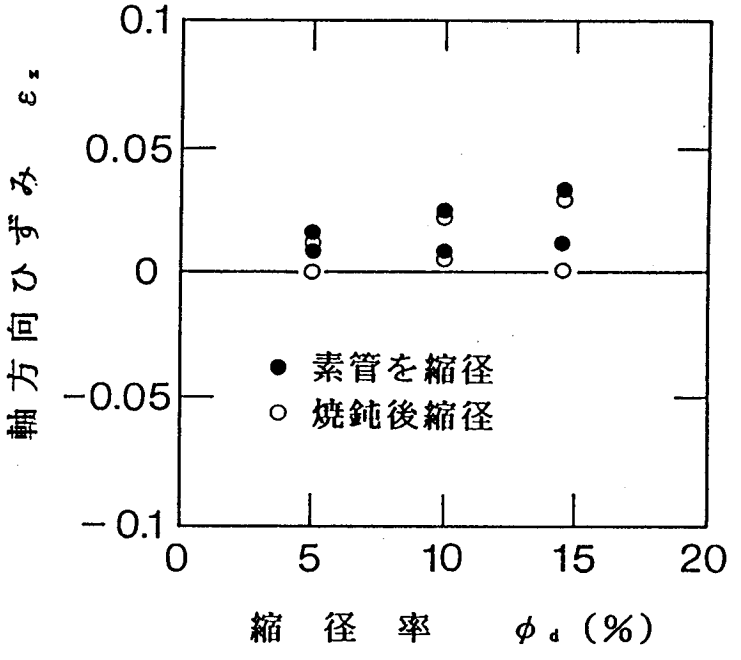


図2.24 縮径率と軸方向ひずみの関係
（材料：A1050TD，t_0=2mm，$2 \cdot r_0$=22mm）

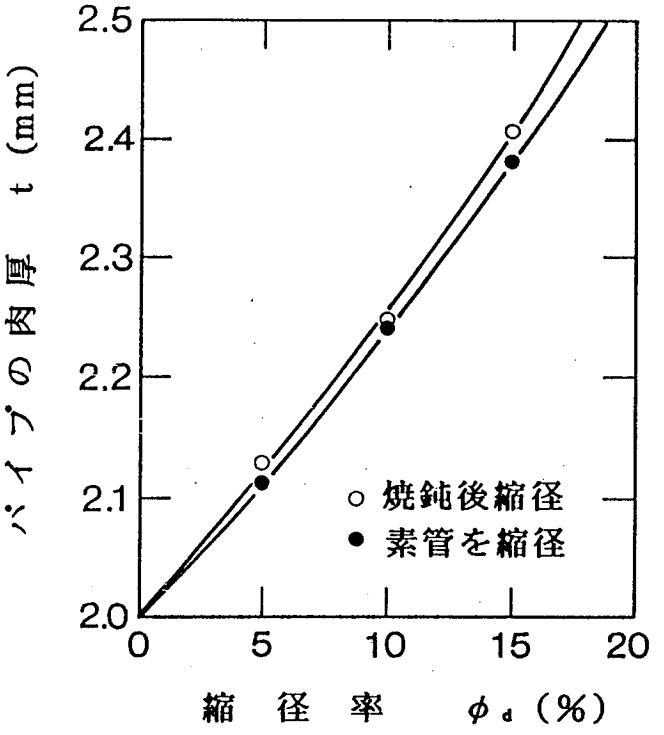


図2.25　縮径率と肉厚変化の関係

（材料：A1050TD，t_0=2mm，$2 \cdot r_0$=22mm）

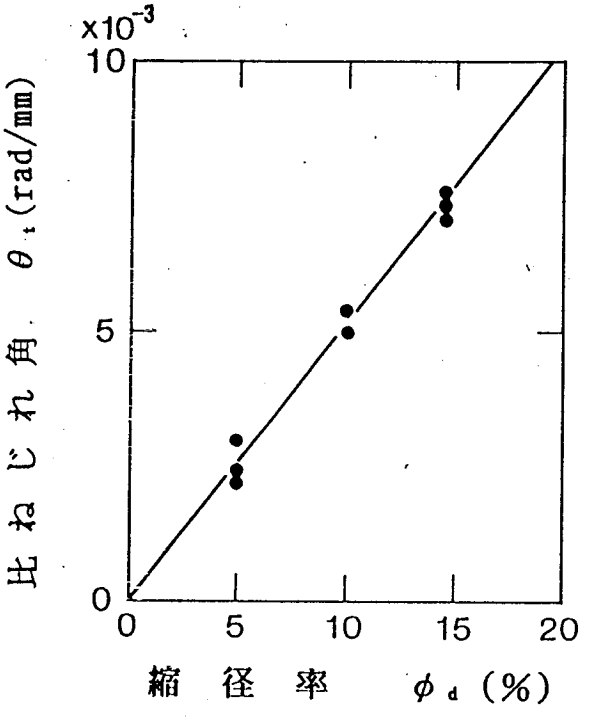


図2.26　縮径率と比ねじれ角の関係

（材料：A1050TD，t_0=2mm，$2 \cdot r_0$=22mm）

2.5 結　言

パイプの新しい縮径加工法として，遊星ボールダイスを提案した．本ダイスは，アウタレース（リテーナ）のなかにスチールボールを内蔵しており，個々のボールには軸及び軸受けが無く，摩擦力によってボールを駆動する簡単な構造である．また，ボールとパイプの接触面積は小さく，ボールがパイプのまわりを転がりながら局所的な加工を累積するので，加工力が小さくてすむ．しかし，摩擦駆動については未知な部分が多く，本ダイスによる加工の可否を理論的に予測することは困難なため，ダイスを設計・試作して加工実験を行い，加工が可能なことを実証した．

基本的な加工特性としては，送り量f_Dが大きいと加工面に明瞭なスパイラルマークが形成され，逆にf_Dが小さ過ぎるとピーリングが発生する．また，f_Dと縮径率がともに大きいと，パイプの座屈やボールの回転不良が生じる．しかし，加工条件をうまく選定することによって，良好な加工を行うことができる．

加工によってパイプは加工硬化し，縮径率の増大とともに引張り強度や全伸びが大きくなる．加工の前後でパイプの長さはほとんど変化せず，肉厚が増大する．そして，肉厚方向の硬度分布は，ほぼ均一である．加工にともなってねじれ変形が残り，その度合いは縮径率に比例して大きくなる．

第３章　製品の表面形状

3.1　緒言

遊星ボールダイスは，加工条件をうまく選ぶことによってパイプの縮径加工が可能で［1］，加工力が小さくパイプ破断の危険も少ない［2,3］．しかし，パイプのまわりをボールが転がることによって縮径加工が行われるため，加工後の製品表面には，ら線状の溝が形成される．表面性状は製品にとって特に重要な検査項目なので，本章では，パイプ材質，加工速度，ボールの径及び個数，加工装置の幾何学的誤差要因等が，表面性状に及ぼす影響について検討を行った．

3.2　幾何学的解析

3.2.1　ボールの公転角速度

パイプとボールとダイス相互は，図3.1に示すような点接触を仮定する．また，ボールとパイプの接点は図3.2に示すR点，すなわちボールの最下点とする．アウタレースを角速度ω_Rで回転させると，ボールは自転(角速度ω_C)しながら，パイプのまわりを公転(角速度ω_B)する．図3.1において，初めIの位置にあったボールがIIの位置まで転がったとすると，初めパイプと接触していたA点がパイプから離れ，逆に離れていたB点がパイプと接する位置に来る．ボールが滑ることなく転がると仮定すると，ボール上のA点からB点までの距離と，パイプ上のA点からB点までの距離は等しくなる．従って，アウタレースの内半径をr_R，ボールの半径をr_Bとすると次式が成立する．

$$\omega_C \cdot r_B = \omega_B \left(r_R - 2 \cdot r_B \right) \tag{3-1}$$

また，ボールとアウタレースの接点もC’点からD’点に移る．ボールが自転していなければ，ボールはIIIの位置においてC’点でアウタレースと接するが，自

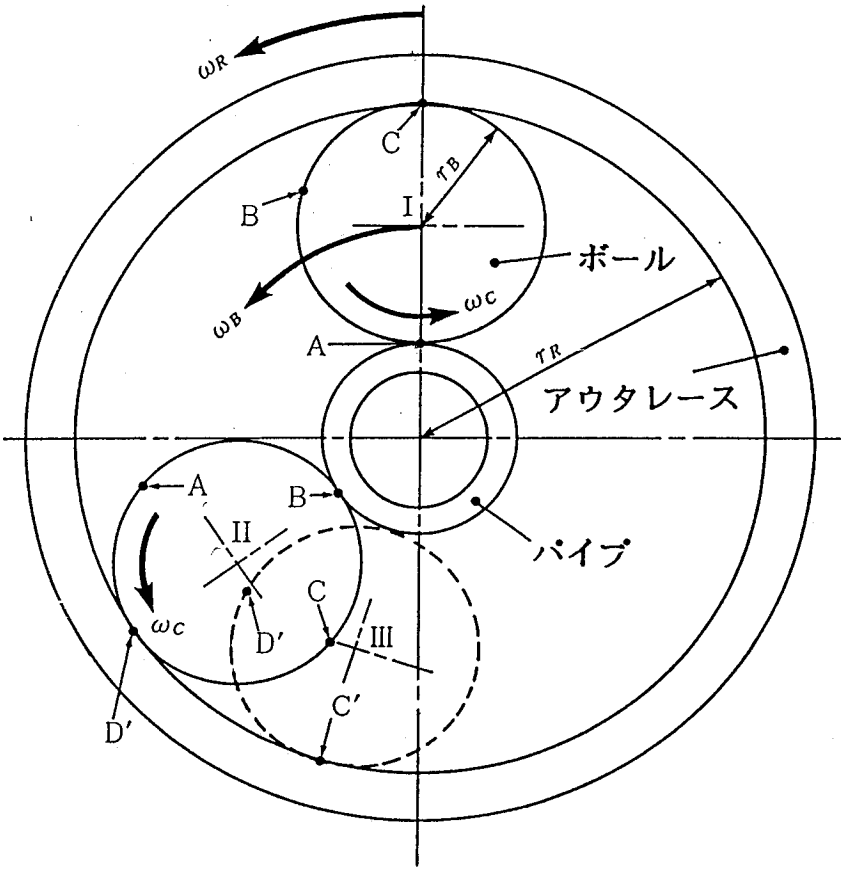


図3.1　遊星ボールダイスの回転にともなうボールの
公転を示す模式図

転のために公転角速度が小さくなり，IIの位置までしか到達せず，D’点で接する．すなわち，ボールは自転によって徐々にダイスの回転から遅れていく．自転によるボール上のC点からD’点までの距離と，公転の遅れであるアウタレース上のC’点からD’点までの距離は等しくなるので，

$$(\omega_R - \omega_B)\cdot r_R = \omega_C\cdot r_B \qquad (3\text{-}2)$$

となる．式(3-1)，(3-2)より，ボールの公転角速度ω_Bは，

$$\omega_B = \frac{\omega_R \cdot r_R}{2(r_R - r_B)} \tag{3-3}$$

と表される．

3.2.2　表面のら線模様の山の高さ

ボールが規則正しくパイプのまわりを転がって加工を進めていくと，製品表面には図3.2に示した高さhの山が形成される．hは，$\overline{PR}$から$\overline{PQ}$を減じた値なので，ボール径をr_B，ボール個数をn，ボールがパイプのまわりを1回公転する間にパイプが軸方向に送られる量をf_Bとすると，

$$h = r_B - \sqrt{r_B^2 - \left(\frac{f_B}{2n}\right)^2} \tag{3-4}$$

となる．ここで，f_Bとダイス1回転あたりのパイプの送り量f_D(工具台の送り)との関係は，

$$f_B = \frac{\omega_R}{\omega_B} \cdot f_D \tag{3-5}$$

である．式(3-5)に(3-3)を代入すると，

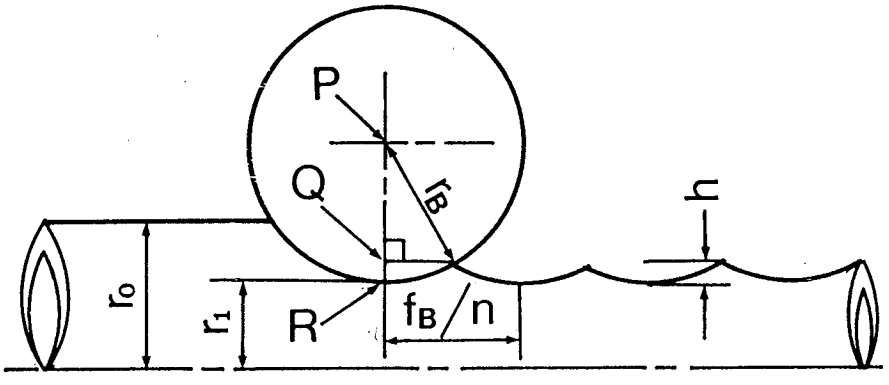


図3.2　縮径加工したパイプ表面形状の模式図

$$f_B = \frac{2\left(r_R - r_B\right)}{r_R} \cdot f_D \tag{3-6}$$

が得られるので，山の高さhは式(3-6)を(3-4)に代入すると求められる．

加工速度vは，ダイスの回転速度をNとすると，

$$v = f_D \cdot N \tag{3-7}$$

となるので，

$$\frac{v}{n \cdot N} = \frac{f_D}{n} \tag{3-8}$$

と書かれ，この関係とさらに f_D/n とhの関係を図示すると図3.3となる．すなわち，この図はvからそれに対応するhを求めるノモグラムである．加工速度を示す点Aから右へ進むと選定したn•Nの直線と点Bで交わる．次に上へ進むと選定したr_Bの曲線と点Cで交わり，ここから左へ進んだD点が山の高さhを示す．n•Nの値が小さいとB'，C'を経て点D'となり，更にr_Bも小さいとC"を経て点D"となる．従って，n，N，r_Bを大きくすれば加工後の表面の山の高さhは小さくなる．

3.3 実験方法

遊星ボールダイスのボール径は38.1mm，個数は3個とし，アウタレースの内径を95，96，97mmに変化させた．パイプは，アルミニウム合金(A6063TD)，銅(C1220)，ステンレス(SUS304)を用い，寸法は直径22mm，肉厚2mmである．従って，各アウタレースに対する縮径率は，14.5，10.0，5.5％になる．縮径加工は，遊星ボールダイスを旋盤のチャックでつかんで回転させ，パイプを工具台に固定し，自動送りを利用して押し込み加工を行った．ダイスの回転速度は141rpm，送り速度f_Dは0.1～3.0 mm/revに変化させた．なお，潤滑剤はマシン油を用いた．加工後のパイプの表面粗さは，軸方向に，触針式表面粗さ計(テイラーホブソン社製タリサーフ4)で測定した．

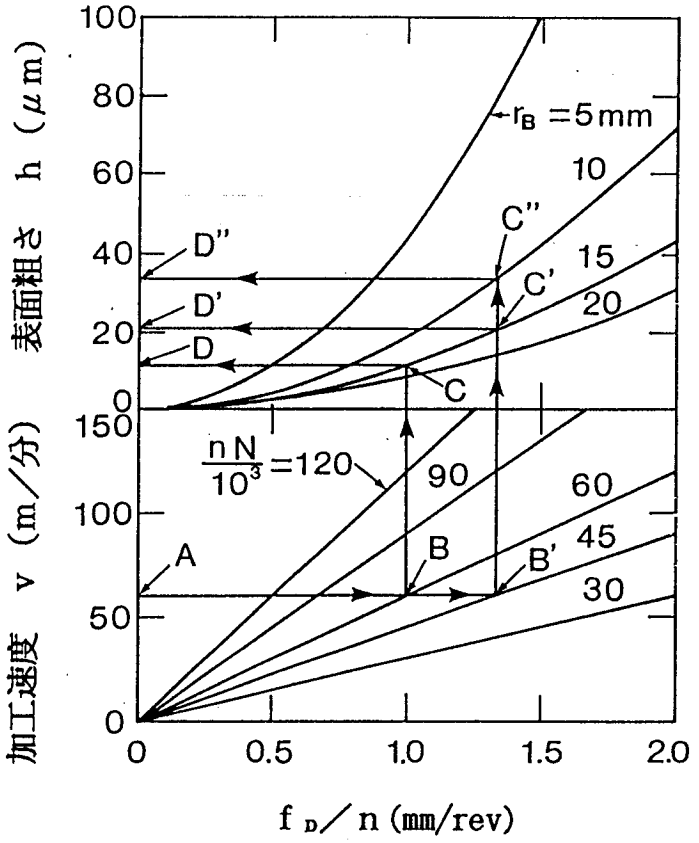


図3.3　縮径後の表面粗さを求めるノモグラム

3.4　実験結果

3.4.1　ボール1ピッチあたりのパイプの送り量

図3.4に，ダイス1回転あたりの送りf_Dとボール1公転あたりの送りf_Bの関係を示す．計算値は，ボールはパイプのまわりを滑ることなく回転すると仮定して求めた式(3-6)を

$$f_B = a \cdot f_D \tag{3-9}$$

$$a = 2 \cdot \left(1 - \frac{r_B}{r_R}\right) \tag{3-10}$$

と書き換えたものである．式(3-10)より，aはボール半径r_Bとダイスの内半径r_Rの比によって定まり，幾何学的な制約から値が規定される．すなわち，ボール径が限りなく小さくなった場合にaは最大値2になり，逆にボール径がダイスの

内半径と等しくなった場合($2 \cdot r_B = r_R$)にaは最小値1になる．従って，ボール径やダイス径を変化させても，図中のハッチング領域内で直線の傾きが変化するのみである．

使用したダイスは，$r_B = 19.05$mm，r_Rは47.5，48，48.5mmの3種類であり，aの値はほとんど変わらず，いずれも約1.2である．実験値は，山と山の間隔にばらつきがあるので，40個の山の間隔の平均値をプロットした．銅，アルミニウム合金ともに，実験値と計算値はよく一致している．そこで，ボールはほとんど滑ることなくパイプのまわりを回転しており，ボール1公転あたりの送りf_Bは式(3-9)によって計算される．

そして，f_Bをボール個数nで除した値は，ボール1ピッチあたりのパイプの送り量の平均値となる．平均値としたのは，図3.5に示すようにほぼ等しい間隔で山と谷が規則正しく繰り返される場合と，大きくばらつく場合があるためである．しかし，大きくばらつく場合にも，数える山の数を多くして平均値を求めると，計算値とほぼ等しくなる．

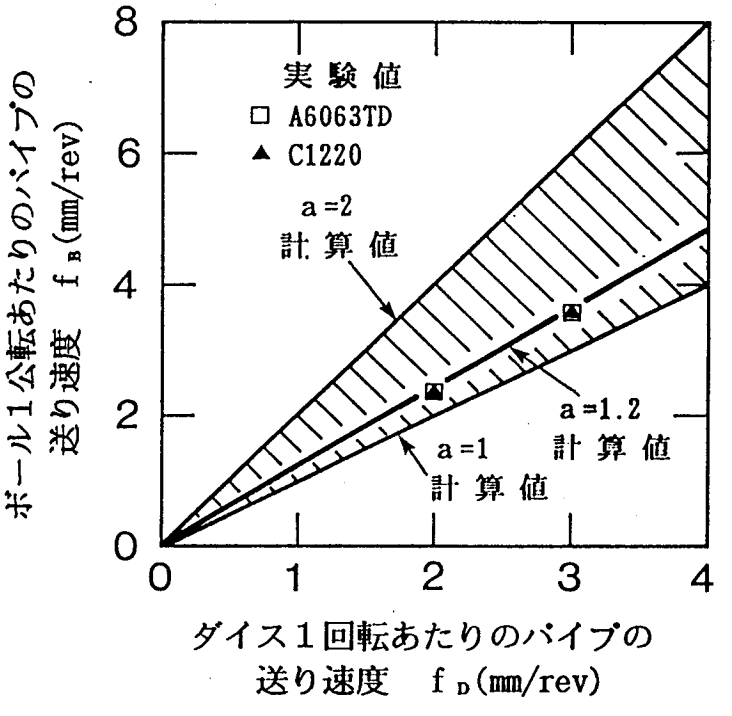


図3.4　ダイス1回転あたりのパイプの送りとボール1公転あたりの送りの関係

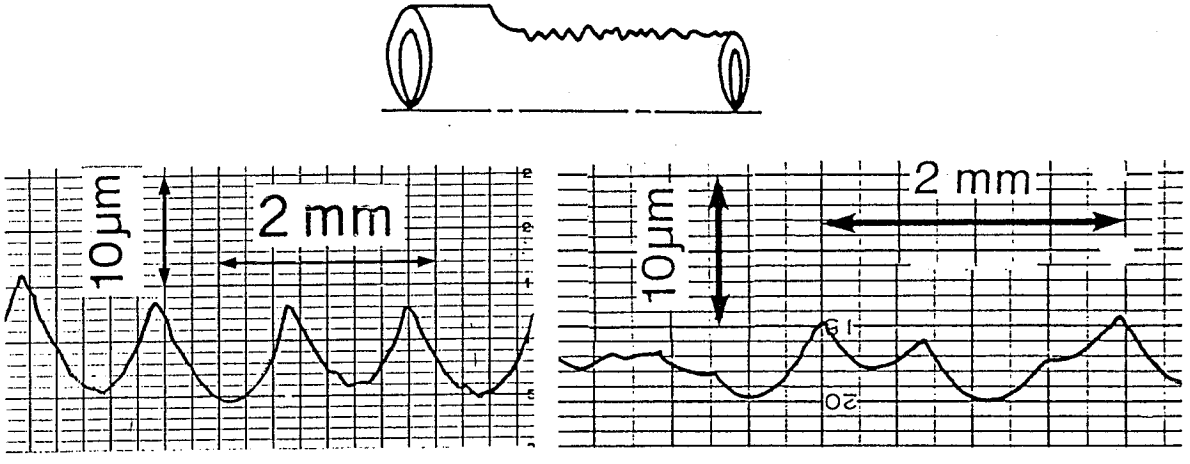


図3.5　縮径後の表面形状の測定例

3.4.2　表面粗さ

図3.6(a)，(b)，(c) にf_Dと加工後の表面粗さR_{max}の関係を示す．(a)はステンレス，(b)はアルミニウム合金，(c)は銅パイプである．実線で示した計算値は，式(3-4)のhをR_{max}としたものである．なお，計算値は，$2 \cdot r_R$＝97mmの場合であり，96や95mmの場合にはわずかに小さな値となる．例えば，f_D＝1.0mm/revにおいて0.02及び0.03μm小さくなる．

表面粗さは，計算値よりも実験値の方が大きいうえに相当大きなばらつきが認められる．しかし，ダイス1回転あたりの送りが小さいほど表面粗さは小さくなるという定性的な傾向は一致している．

アルミニウム合金や銅の加工では，送り量を小さくし過ぎると，図3.7に示すように表面はく離が発生して，かえってR_{max}が大きくなる．しかし，ステンレスの場合には，R_{max}が1μm以下にもなり，ローラバニッシング［4］と同等以上の加工が可能であり，図3.8に示すような鏡面が得られる．

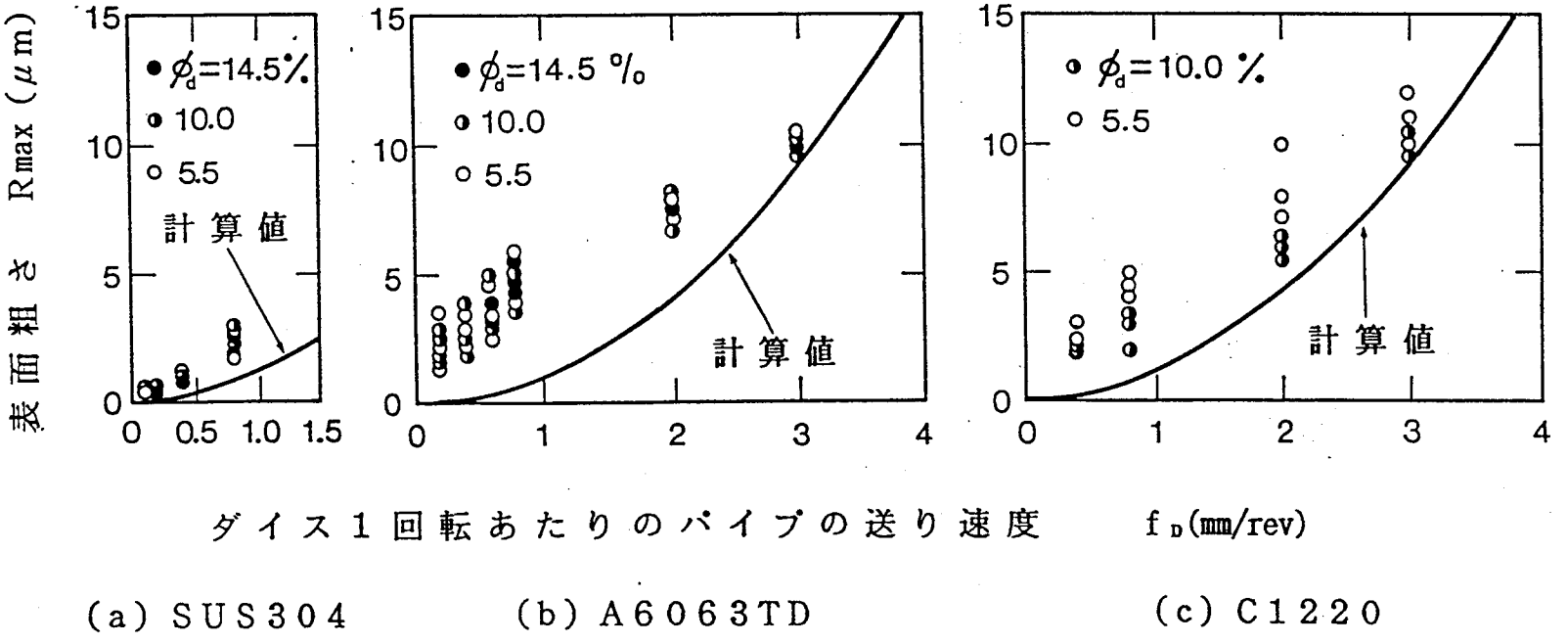


図3.6 加工後の表面粗さに対する送り速度の影響

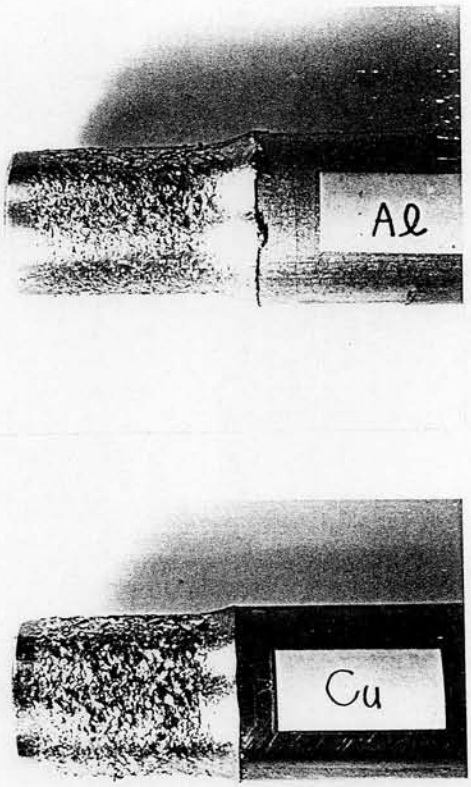


図3.7　表面はく離を生じたパイプの外観写真

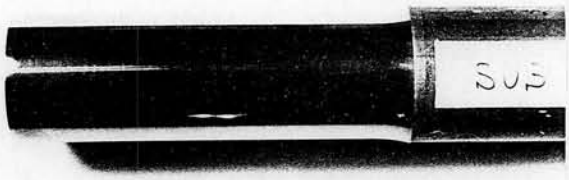


図3.8　縮径加工したステンレスパイプの外観写真

3.5 ボールの軌道のずれの影響

3.5.1 ずれ量の測定及び表示

加工後のパイプの表面粗さは，図3.6に示したように，幾何学的に求めた計算値に比べて実験値の方が大きくなる．この原因は種々考えられるが，両者の差はR_{max}で数μmにもなるので，潤滑剤のトラップ［5］やボールの表面粗さおよび真球度等よりも重要な因子が他にあると考えるべきである．

パイプの送り速度が小さい領域では繰り返し加工による表面はく離の発生［6］が主な原因である．本節では，送り速度が大きく，表面はく離が発生しない加工条件における面粗さ悪化の原因として，パイプの軸方向および半径方向へのボール軌道の変動に注目し，これがパイプの表面形状に及ぼす影響について検討した．

ダイスをつかんだ旋盤の3本爪のチャックの1ケ所に紙をはさんでダイスの芯ぶれ量を変化させ，その量は図3.9に示すようにアウタレース外周面にダイアルゲージをあてて測定した．

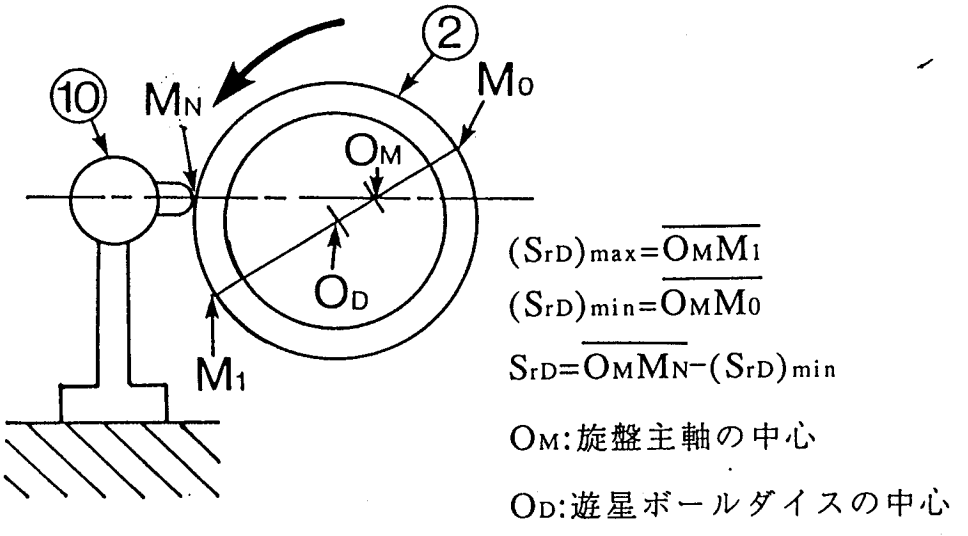


図3.9 ダイスの芯ぶれの測定方法
②：アウタレース，⑩：ダイアルゲージ

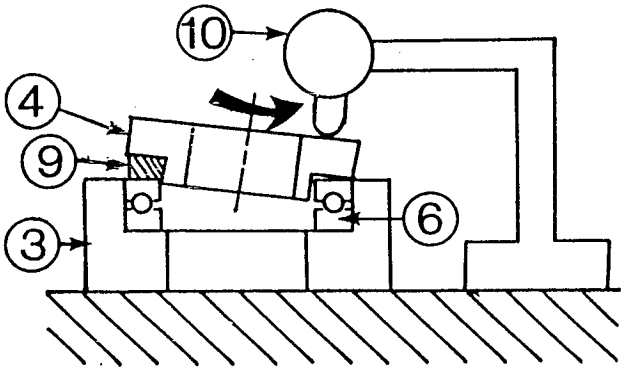


図3.10　ダイス軸方向の幾何学的誤差の測定方法
③：カバープレート，④：受圧板，⑥：スラストベアリング
⑨：アルミホイル，⑩：ダイアルゲージ

また，受圧板④とベアリング⑥の間にアルミホイルをはさんで受圧板④を傾斜させることによって，ボール軌道をダイス軸方向に変動させた．変動量の測定は，図3.10に示すように③ ④ ⑥を定盤上に置いて，受圧板④を回転させて行った．

図3.11に，アウタレース外周部における芯ぶれ量の測定例を示す．アウタレースの芯ぶれ量 S_{rD}は，その最大値を$(S_{rD})_{max}$，ダイスの回転角度をθ_Dとすると，

$$\frac{S_{rD}}{(S_{rD})_{max}} = \left| \sin\left(\frac{\theta_D}{2}\right) \right| \tag{3-11}$$

によっておおむね近似できる．ボールは公転とともに自転もするので，ボールの公転角速度ω_Bとダイスの自転角速度ω_Rは異なり，その比aは式(3-9)と同様に次式で表される．

$$a = \frac{\omega_R}{\omega_B}$$

$$= 2\cdot\left(1 - \frac{r_B}{r_R}\right) \tag{3-12}$$

式(3-11)，(3-12)より，ダイス半径方向へのボールの軌道の偏差 S_{rB} は，

$$\frac{S_{rB}}{(S_{rD})_{max}} = \left|\sin\left(\frac{a\cdot\theta_D}{2}\right)\right| \tag{3-13}$$

となる．ボール個数をnとすると相互の間隔は2π／n なので，j番目にやって来るボールの偏差 $(S_{rB})_j$ は式(3-13)において，$\theta_D = \theta_0 + (2\pi/n)\cdot j$として，

$$\frac{(S_{rB})_j}{(S_{rD})_{max}} = \left|\sin\left\{\frac{a}{2}\cdot\left(\frac{2\pi j}{n} + \theta_0\right)\right\}\right| \tag{3-14}$$

で表される．ここでθ_0 は初期値である．

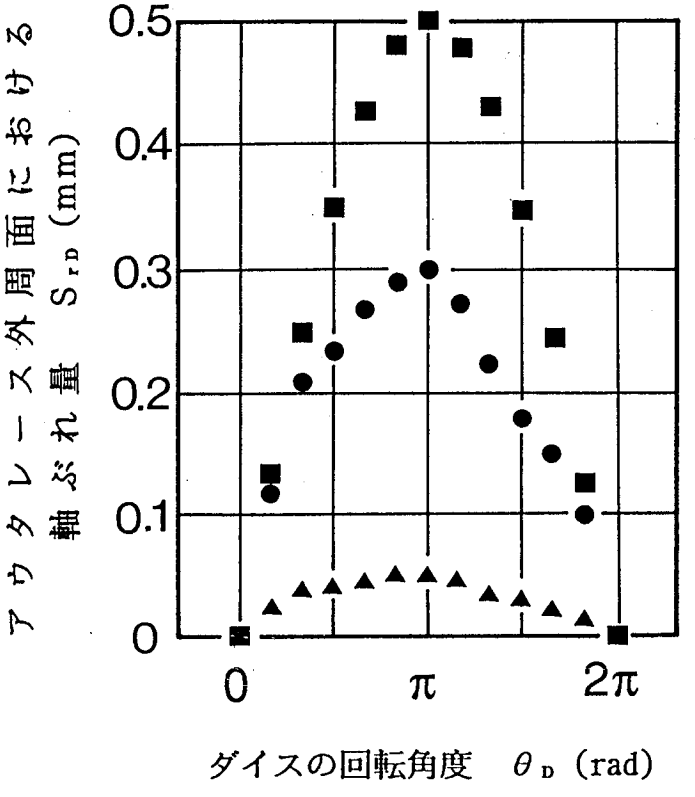


図3.11 ダイスのアウタレース外周面における回転半径の偏差の測定例

この式の関係を，r_R＝48mm，r_B＝19.05mm，n＝3として図示すると，図3.12になる．ダイスには3個のボールが内蔵されているが，2回転する間に6個ではなく，ほぼ5個のボールによって加工が行われていることが分かる．式(3-14)より，a･j/nが整数に近い値となる最小の整数 j_r が，$(S_{rB})_j$ の1周期中に通過するボール個数となる．従ってj_rは，aを定める式(3-12)中のr_Rとr_Bの値及びボール個数nによって変化する．

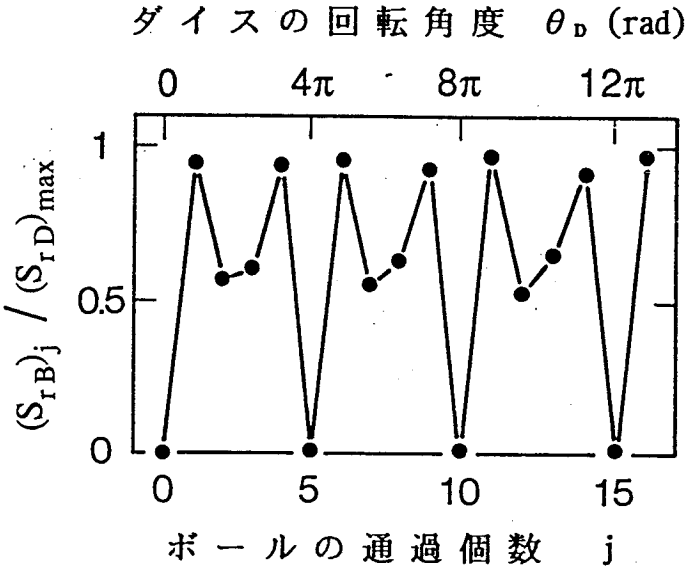


図3.12　ボールの公転半径の偏差の計算例

次に軸方向の偏差は，受圧板④における偏差の最大値を$(S_{zP})_{max}$，j番目のボールの偏差を$(S_{zB})_j$とすると，

$$\frac{(S_{zB})_j}{(S_{zp})_{max}} = \left| \sin\left(\frac{\theta_0}{2} + \frac{\pi \cdot j}{n}\right) \right| \tag{3-15}$$

で表される．ボール⑤と受圧板④の接点よりもスラストベアリングの方が転がり易いので，ここでは，⑤と④の接点位置は変化せずに⑤と④が一体となって回転すると仮定している．この仮定に基づけばボールの公転角速度ω_Bと受圧板の自転角速度ω_Pは等しくなる．また式(3-15)から，j / n が整数となれば$(S_{zB})_j$は1周期するので，ボールの個数nにかかわらず，1周期中に通過するボール個数j_zはnに等しくなる．

3.5.2 パイプの表面形状

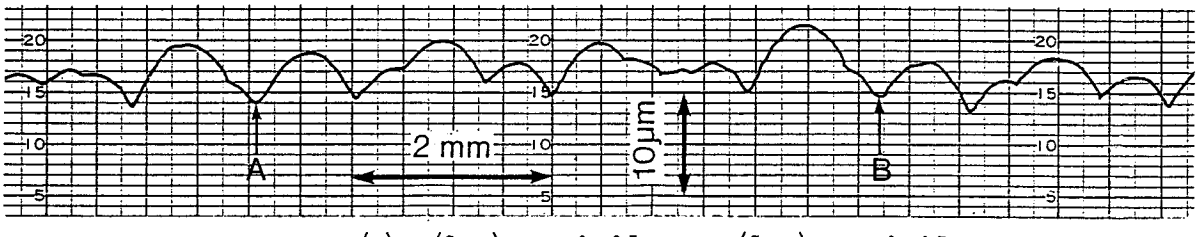
ボールが滑ることなくj回通過して加工する長さw_jは，

$$w_j = m \cdot j$$

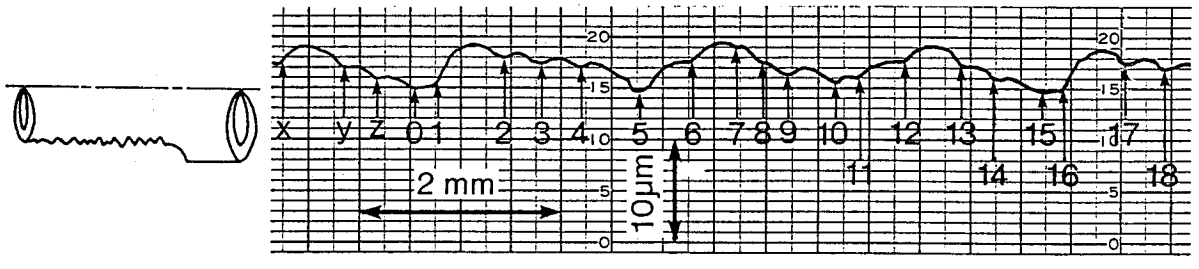
$$= a \cdot \frac{f_D}{n} \cdot j \qquad (3\text{-}16)$$

と表される．ここでmはボール1個あたり，f_Dはダイス1回転あたりのパイプの送り量である．今，r_R＝48mm，r_B＝19.05mm，n＝3の場合については式(3-15)よりj_z＝3，図3.12よりj_r＝5として，最小公倍数15がパイプの表面形状の1サイクルに対応すると考えられる．そこで，式(3-16)に，j=15，n＝3，f_D＝1mm/rev，a＝1.206を代入すると，1周期で加工される長さは，w_j＝6.03mmとなる．

ところで，ボールはアウタレースとの接触面を介してのトラクションドライブによって駆動されているので，この接触面で僅かに滑りが発生し［7］，実際の送り量は式(3-16)の値よりも大きくなる．図3.13(a)に示した加工後パイプの表面形状の 2つの山である点AB間が約6.15mmであり，式(3-16)から求めた値



(a) $(S_{rD})_{max}$=0.25mm，$(S_{zp})_{max}$=0.05mm



(b) $(S_{rD})_{max}$=0.05mm，$(S_{zp})_{max}$=0.05mm

図3.13　縮径したパイプの表面形状の例
(f_D=1mm/rev，r_B=19.05mm，n=3，r_R=48mm)

よりも僅かに大きい．さらに，点Aを平行移動して点Bに重ねると，周辺の山や谷の形状が互いに酷似している．従って，AB間を1つのサイクルとみなすことができる．山の数が15よりも少ないのは，本来は山として残るべき場所が，ボール軌道の偏差のために，さらに加工を受けて山の数が減少したためである［8］．

次に，半径方向偏差が小さい場合の図3.13(b)では，番号0と15の間の距離が約6.20mmで，w_jの計算値の6.03mmに比べて僅かに大きい．そして，12から15とxから0，15から18と0から3の間の形状がそれぞれ類似しているので，これが1サイクルと考えられ，15個の山も判別される．従って，j_rとj_zの最小公倍数がパイプの表面形状の1サイクルと対応している．

図3.14に，軸方向の偏差を固定して半径方向の偏差を変化させた場合の表面粗さを示す．半径方向，軸方向ともに偏差が無い場合の計算値hは式(3-4)で表される．これに比べると，5回の測定の平均値をプロットした実験値のR_{max}の方

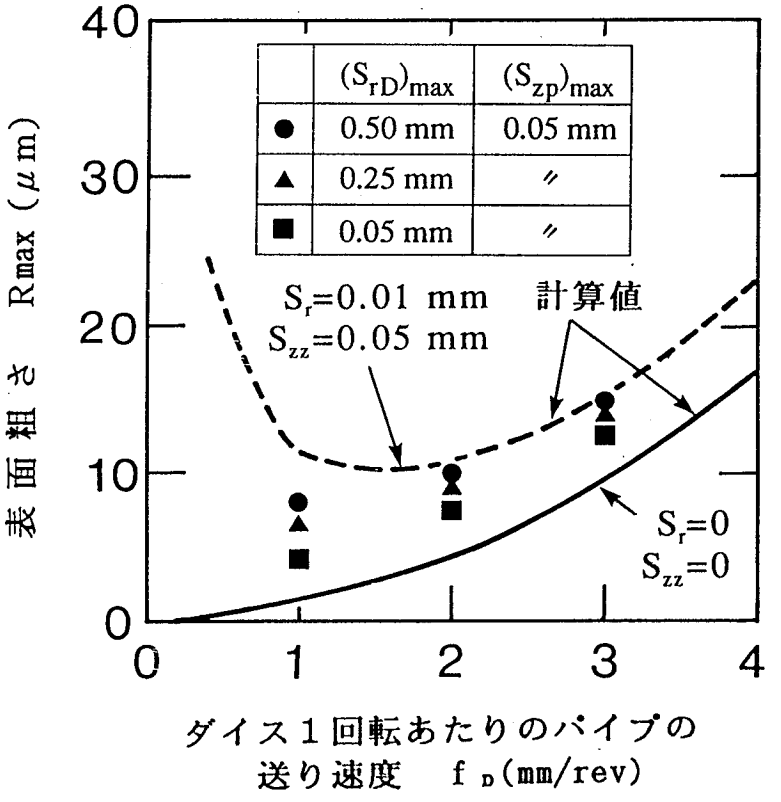


図3.14　加工したパイプの表面粗さに対するボール軌道の半径方向偏差の影響

が大きくなっている．これは，図3.15に示すように，偏差が無い場合のパイプとボールの交点Qよりも偏差がある時のR点の方が山の高さが大きくなるためである．その山の高さh_sは次式で表される．

$$h_s = r_B - \sqrt{r_B^2 - x_R^2} \tag{3-17}$$

ただし，

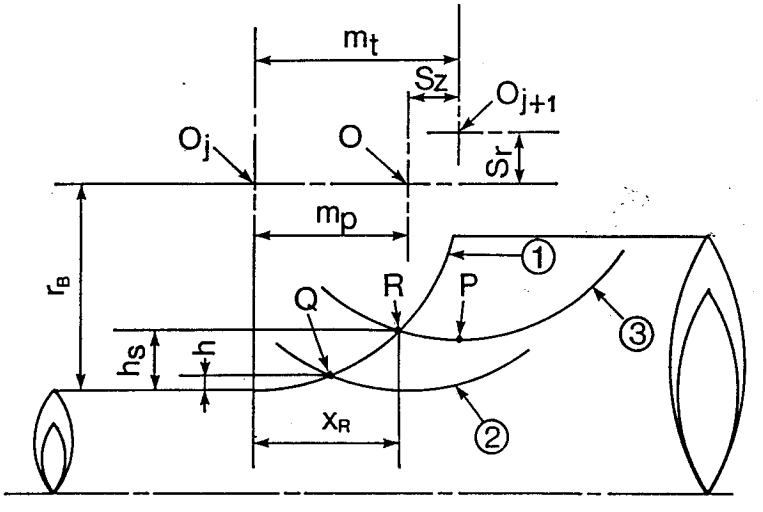
$$x_R = \frac{1}{2}\cdot\left(m_t + S_r\cdot\sqrt{\frac{4r_B^2}{m_t^2 + S_r^2} - 1}\right) \tag{3-18}$$

$$S_r = (S_{rB})_{j+1} - (S_{rB})_j \tag{3-19}$$

$$m_t = m_p + S_{zz} \tag{3-20}$$

$$S_{zz} = (S_{zB})_{j+1} - (S_{zB})_j \tag{3-21}$$

ここで，S_rは図3.15に示すように，続けて通過するボールの軌道半径の差である．また，m_pは設定した送り量なのでm_tは軸方向偏差を加えた真実の送り量を



①：点O_jを中心とする半径r_Bの円弧
②：点Oを中心とする半径r_Bの円弧
③：点O_{j+1}を中心とする半径r_Bの円弧

図3.15　遊星ボールダイスによって縮径したパイプの表面形状の模式図

示す．なお，S_rは図3.12から分かるように$(S_{rD})_{max}$とほぼ等しい値となり得るのに対して，S_{zz}の最大値は，以下に示すように$(\sqrt{3}/2)(S_{zp})_{max}$である．式(3-15)と式(3-21)より，

$$\frac{S_{zz}}{(S_{zp})_{max}} = \left|\sin\left(\theta_j + \frac{\pi}{n}\right)\right| - \left|\sin\theta_j\right| \tag{3-22}$$

ここで，$\theta_j = \theta_0/2 + \pi \cdot j/n$である．$\left|\sin\theta_j\right|$の周期は$\pi$で前半は単調増加，後半は単調減少なので，式(3-22)の最大値を求める時に考慮すべきθ_jの領域はkを自然数として，

$$k \cdot \pi \leqq \theta_j \tag{3-23}$$

$$\theta_j + \pi/n \leqq (k + 1/2) \cdot \pi \tag{3-24}$$

より次のようになる．

$$k \cdot \pi \leqq \theta_j \leqq (k + 1/2 - 1/n) \cdot \pi \tag{3-25}$$

式(3-25)の領域においてS_{zz}は単調減少なので，$\theta_j = k\pi$を式(3-22)に代入すると次式で示す最大値が求められる．

$$\left(\frac{S_{zz}}{(S_{zp})_{max}}\right)_{max} = \left|\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)\right| \tag{3-26}$$

従って，ボール個数nが増えればS_{zz}の値も減少することになる．図3.14中に破線で示したのは，

$$S_r = (S_{rD})_{max} \tag{3-27}$$

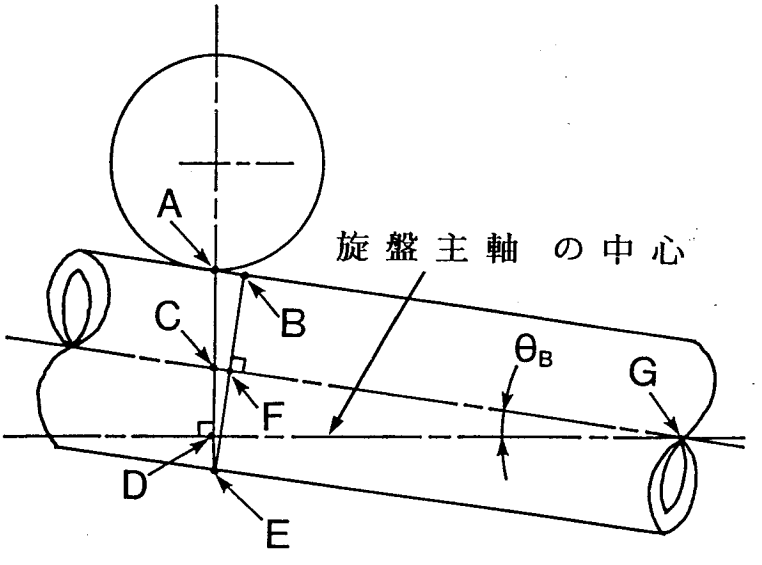
$$S_{zz} = \left(\sqrt{3}/2\right)\ (S_{zp})_{max} \tag{3-28}$$

として計算したものである．R_{max}は極小値をとった後にf_Dの減少とともに増大する．この原因は，図3.15においてはボールの最下点Pよりも左側のR点がパイ

プとボールの交点になっているが，f_Dが減少してPがRに一致するとR_{max}が極小となり，続いて増加に転じるためである．しかし実際には，次に来るボールによって，この点は再び加工されるので［8］，このようにf_Dの減少とともにR_{max}が急増することはない．

なお，この計算値は図3.15に示したように連続して通過する2つのボールによって形成される最大の山の高さである．従って，多くのボールによって加工が続けられた時のR_{max}に比べると小さな値となる．にもかかわらず，$S_r=10\mu m$の計算値の方が$(S_{rD})_{max}=0.5mm$の場合の実験値よりも大きな値となっている．これは，ダイスの芯ぶれに追従してパイプが首を振ることによって偏差が補正されるためである．加工中に目視によってパイプの首振りが確認されるが，その量には，偏差以外にパイプの真円度や固定方法，ボールの径や真円度および相互の位置関係等が複雑に影響をおよぼしていると思われる．

半径方向偏差S_{rB}を補正するためのパイプの首振りによって，パイプの中心軸と旋盤主軸のなす角度がθ_Bだけ傾く．これにともなって，図3.16に示すように



$$S_{rB}=\overline{CD}=\overline{DG}\cdot\tan\theta_B \qquad S_{zB}=\overline{AB}=\overline{BE}\cdot\tan\theta_B$$

$$L_z=\overline{DG}=\overline{FG} \qquad 2\cdot r_1=\overline{BE}$$

図3.16　半径方向偏差と軸方向偏差の関係を示す模式図

軸方向偏差S_{zB}が発生することになる．この両者の関係は幾何学的に次式で表される．

$$S_{zB} = \frac{2 \cdot r_1 \cdot S_{rB}}{L_z} \tag{3-29}$$

小型旋盤を流用して実験を行ったためにL_zが短く，約250mmしかない今回の実験でさえ，r_1＝9.9mmを式(3-29)に代入するとS_{zB}＝0.08S_{rB}となる．生産現場で使用される連続高速抽伸機(ブルブロック)ではL_zがさらに長くなるので，パイプの首振りにともなうS_{zB}の増加はさらに小さくなる．すなわち，半径方向偏差が補正されることに伴う軸方向偏差の増加量は僅かである．

図3.17に，半径方向の偏差を固定して軸方向の偏差を変化させた場合の表面粗さを示す．軸方向偏差が大きいほどR_{max}も大きくなり，偏差の増加が僅かでもR_{max}は大きく増加する．例えば，図3.14に示したように半径方向偏差が0.05から10倍の0.5mmになった場合よりも，図3.17において軸方向偏差が0.05から5倍の0.25mmになった場合の方がR_{max}の増大は大きい．これは，軸方向偏差の場合には，半径方向の場合のパイプの首振りに相当する補正がなされにくいためと考えられる．

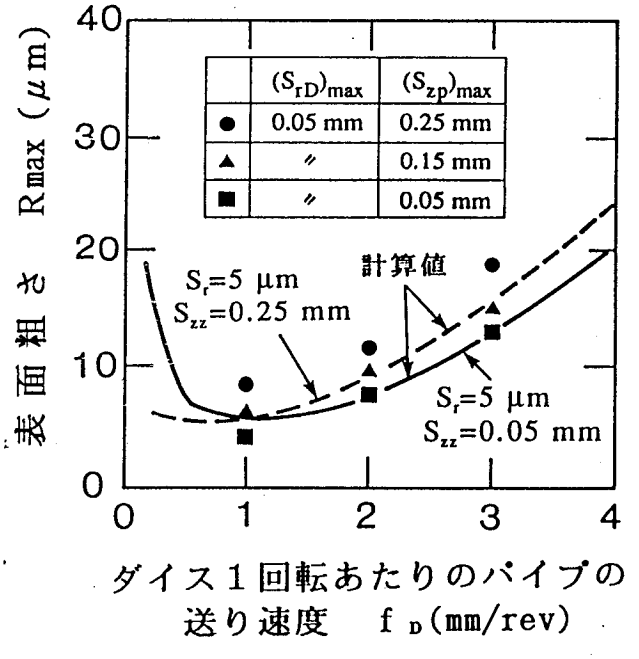


図3.17　加工したパイプの表面粗さに対するボール軌道の軸方向偏差の影響

図3.18に，表面粗さに対するボールの径および個数の影響を示す．アウタレースの内径とボール径が同じならば，式(3-12)で定義したaの値は一定なので，式(3-16)から求められるボール1個あたりの加工長さ$a \cdot f_D/n$ はnが大きいほど小さくなる．また，式(3-26)より，nが大きくなると軸方向の偏差は小さくなる．従って，nが大きいほど式(3-20)のm_tが小さくなり，形成される山の高さも低くなることが計算で求められる．そして，実験値も同様の傾向を示している．

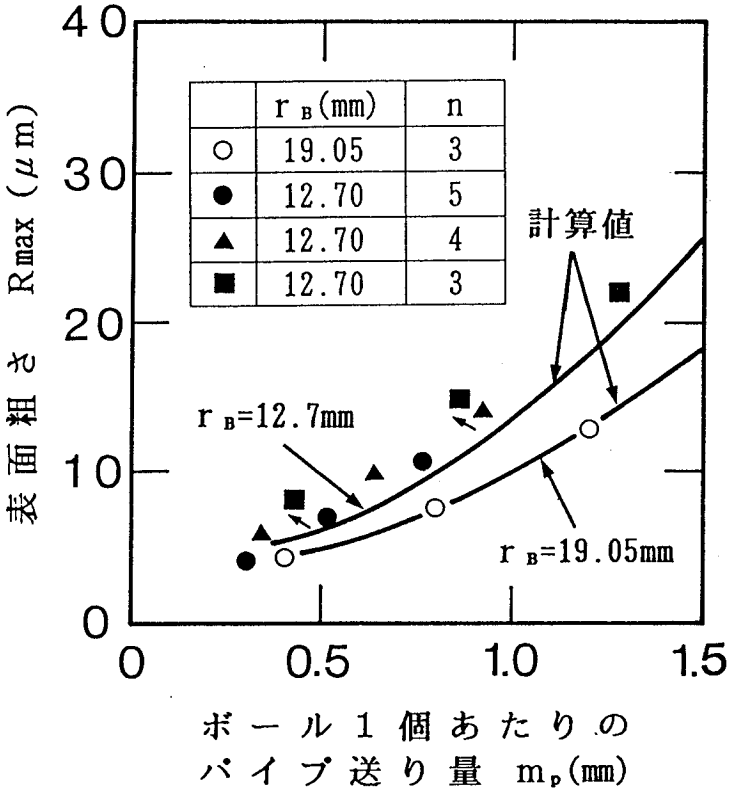


図3.18　加工したパイプの表面粗さに対する
ボールの径及び個数の影響
(ボール軌道の半径方向偏差の最大値：$(S_{rD})max=0.05mm$
ボール軌道の軸方向偏差の最大値　：$(S_{zp})max=0.05mm$)

m_pが0.5および0.9付近(図中の2箇所の矢印)においてm_pが減少しているにもかかわらずR_{max} が増大している箇所がある．この原因は，前者ではボール個数nが5から3へ，後者では4から3へ減少しているためと考えられる．すなわち，式

(3-26)から分かるように，nの減少によって軸方向偏差は大きくなり，R_{max} を増大させる．逆にnの増加によって表面粗さは良好になるが，同時に所要加工力も増大すること［3］に留意してnの値を決めることが肝要である．

また，遠心力低減を図るためにボール径を小さくすると［9］，図から分かるように計算値，実験値ともに表面粗さが大きくなることにも注意が必要である．

図3.19に，パイプ径を変化させた場合の表面粗さの計算値を示す．軸方向および半径方向偏差の現実的な値として0.05mm及び5μmを設定して，加工後に形成される山の高さを式(3-17)で計算した．パイプの小径化にともなってアウタレース径も小さくなるので，式(3-12)から分かるようにaの値が小さくなる．すなわち，ボールの公転角速度が大きくなってダイスの自転角速度に近づき，ボール1個あたりのパイプ送り量が減少するのでR_{max}も小さくなる．

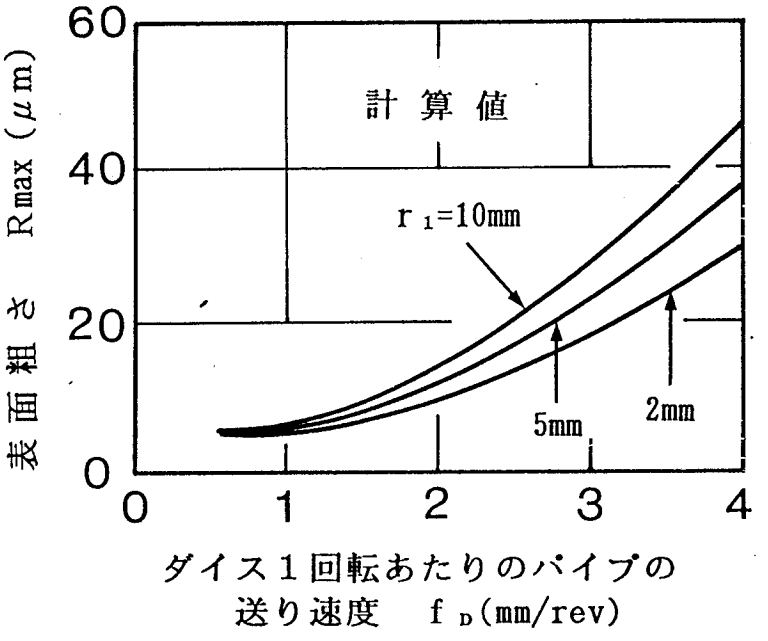


図3.19 パイプ径を変化させた場合の表面粗さの計算値

$(S_{rD})max=5\mu m$, $(S_{zp})max=0.05mm$

$r_B=6.35mm$, n=4

3.6 結　言

遊星ボールダイスを試作して縮径加工を行い，加工後のパイプの表面性状について検討した．その結果をまとめると次のとおりである．

(1) 幾何学的な解析では，ダイス1回転あたりのパイプの送り量が小さいほど表面粗さは小さくなる．実験値も定性的には解析値と同様の傾向を示すが，その絶対値は実験値の方が大きくなる．

(2) アルミニウム合金や銅の場合には，送り量を小さくし過ぎると表面はく離が発生して表面性状が悪化する．一方，ステンレスパイプでは，R_{max} が1μm以下の平滑面が得られる．

(3) ボールは公転とともに自転するので，アウタレースの回転から徐々に遅れていく．このために，ダイス1回転あたりのパイプの送り量よりも，ボール1公転あたりの送り量の方が大きくなる．

(4) 表面粗さが小さい加工面を得るためには，軸方向へのボール軌道のずれを小さくすることが重要である．これは，半径方向への偏差はパイプが首を振ることによって補正されるのに対して，軸方向偏差は補正がなされにくいためである．

(5) 半径方向偏差は，ボールの個数および径とアウタレースの内径によって周期が定まる．軸方向偏差の周期は，ボールの個数とは関係なく，その公転周期と等しい．この2つの周期の組み合わせによってパイプ表面形状の周期が定まる．

(6) ボール径が大きいほど，また個数が多いほど表面形状は良好になる．しかし，径の増大にともなう遠心力，個数の増加による加工力の増大に留意する必要がある．

第４章　押し込み力およびトルクの解析

4.1　緒　言

遊星ボールダイスによるパイプ加工では，ボールがパイプの外周を転がりながら局部的な加工を累積していくので，コニカルダイスの場合に比較して所要加工力が小さくパイプ破断の危険が少ない［1,2］．また，力が局所的にしか作用しないので，セラミックスのような脆性材料でも破壊を生じさせることなしに，その外層に金属パイプを強くかしめて複合パイプを作ることも可能である［3］．さらに，個々のボールには軸及び軸受けを組み込む必要がなく構造が簡単で軽量化できるので，3ロール法［4］に比べて工具交換や加工速度の高速化において優れている［5,6］．この利点を生かして，溝付き浮きプラグと組み合わせて空調用内面溝付きパイプの製造にも利用され始めている［7］．

このように種々の利用が行われているが，装置を設計するためには必要な加工力やトルクを見積もることが不可欠である．そこで本章では，エネルギ法による所要加工力の解析を行った．また，ボールの径及び個数，縮径率，パイプの肉厚，送り速度を変化させて実験を行い，解析値との比較を行った．さらに，潤滑剤も変化させ，摩擦係数の影響についても検討した．

4.2　実験方法

縮径実験には小型旋盤を利用し，チャックで遊星ボールダイスをつかんで回転させ，工具台に固定したロードセルの先端でつかんだパイプを，自動送りによって押し込んで加工を行い，軸方向推力とトルクを測定した．スチールボールの直径は，12.7，25.4，38.1及び50.4mm，個数は3，4及び5個に変化させた．縮径率ϕ_dは内径の異なったアウタレースを使用することによって，5.5，10.0，14.5％の3種類の実験を行った．ダイスの回転速度は毎分140回転，ダイス1回転あたりのパイプの送り量は，1，2，3 mm/revに変化させた．

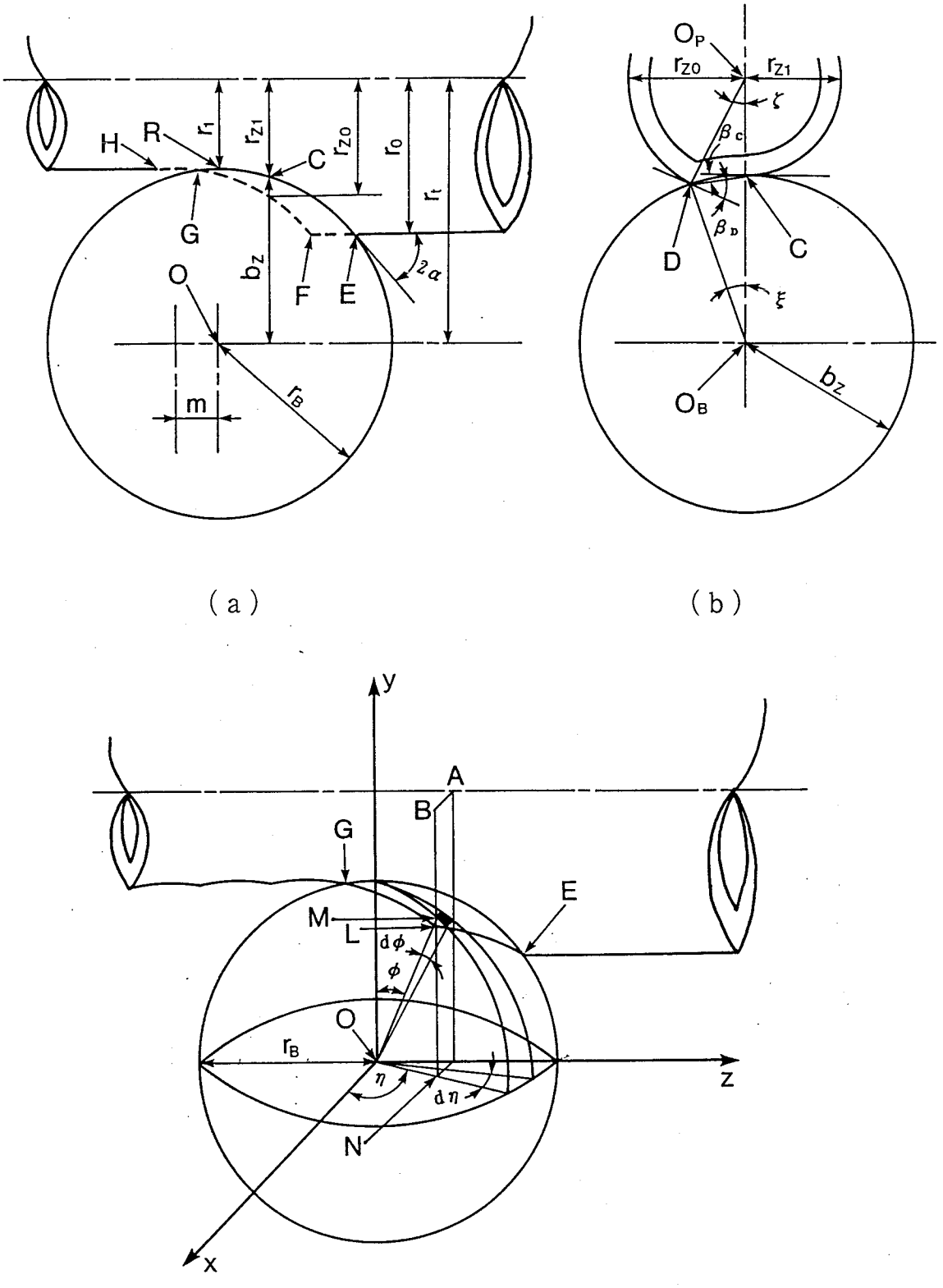


図4.1　パイプの変形及びボールとパイプの接触状態の模式図
（a）y－z断面，（b）x－y断面，（c）立体図

供試材料は，アルミニウム合金引抜き管(A6063TD)を用いた．肉厚は，1，1.5，2及び3mmの4種類，外径は22mmである．この材料からJIS12A型試験片を切り出して引張り試験を行った結果，耐力は200MPaで，加工硬化特性を，$\sigma = F\varepsilon^n$で表す場合のn値は0.10，F値は370MPaであった．潤滑剤は，マシン油もしくは二硫化モリブデン(モリコートGペースト)を使用し，リング圧縮試験［8］で求めた各々の摩擦係数は0.16及び0.12であった．

4.3　エネルギ法による解析

4.3.1　パイプの変形状態

図4.1(a)にボールとパイプの軸方向の位置関係を示す．破線で示したFHが前に通り過ぎたボールによって加工された形状で，軸方向に1ピッチ m (= EF)だけ送られてきた次のボールによって実線EGのように加工される．同図(b)は，任意の点Cを含む軸直角断面である．また，同図(c)は接触領域ELGEの立体図と座標系を示している．なお，図中の1ピッチmとダイス1回転あたりの押し込み量f_D(工具台の送り)との関係は，第3章より次式で近似できる．

$$m = \frac{2(r_1 + r_B) f_D}{(r_1 + 2r_B) n} = \frac{2(r_R - r_B) f_D}{r_R \cdot n} \tag{4-1}$$

図4.1(a)において，ボールの弧EGになじむ形にパイプは変形するが，弦ERで近似することにする．また，同図(b)においても，接触弧DCを弦DCで近似する．さらに，肉厚方向のひずみ分布は無視し，肉厚方向中心位置の値によって代表されるものとする．添字については，z，θ，tは，パイプの軸方向，円周方向，肉厚方向を表すものとする．これらの定義及び仮定より，入り口E，出口Rにおける軸方向の付加的せん断は，

$$(\gamma_{zt})_E = (\gamma_{zt})_R = \tan\alpha \tag{4-2}$$

$$d\gamma_{zt} = 0 \tag{4-3}$$

$$\tan\alpha = \frac{r_{0s} - r_{1s}}{\sqrt{r_B{}^2 - (r_t - r_0)^2}} \tag{4-4}$$

ここで，パイプの平均半径の加工前後における値 r_{0s}，r_{1s} 及びボールの軌道半径 r_tは，加工前のパイプの外半径及び肉厚をr_0及びt_0，加工後の外半径をr_1とすると，

$$r_{0s} = r_0 - t_0 / 2 \tag{4-5}$$

$$r_{1s} = \frac{r_1 + \sqrt{r_1{}^2 - r_0{}^2 + (r_0 - t_0)^2}}{2} \tag{4-6}$$

$$r_t = r_1 + r_B \tag{4-7}$$

点D，Cにおける円周方向の付加的せん断は，

$$(\gamma_{t\theta})_D = \tan\beta_D \tag{4-8}$$

$$(\gamma_{t\theta})_C = \tan\beta_C \tag{4-9}$$

$$d\gamma_{t\theta} = 0 \tag{4-10}$$

$$\beta_D = \frac{\xi}{2} + \zeta \tag{4-11}$$

$$\beta_C = \frac{\xi}{2} \tag{4-12}$$

パイプ上の点は何回かの加工の繰り返しによって，半径r_{0s}からr_{1s}に縮径されるが，ここでは簡単のために一度で加工が行われるとすると，

$$\xi = \cos^{-1}\frac{r_{Bs}{}^2 + r_t{}^2 - r_{0s}{}^2}{2\cdot r_{Bs}\cdot r_t} \tag{4-13}$$

$$\zeta = \cos^{-1}\frac{r_{0s}^2 + r_t^2 - r_{Bs}^2}{2 \cdot r_{0s} \cdot r_t} \tag{4-14}$$

$$r_{Bs} = r_B + \frac{t_0}{2} \tag{4-15}$$

次に，パイプは加工によって軸方向にはほとんど伸縮しないので［9］，

$$d\varepsilon_z = 0 \tag{4-16}$$

さらに，体積一定の条件より，

$$d\varepsilon_t = -\,d\varepsilon_\theta \tag{4-17}$$

また，パイプのねじれ変形は円周方向ひずみに比例すると仮定すると，

$$d\gamma_{\theta z} = b \cdot d\varepsilon_\theta \tag{4-18}$$

この比例定数bは，縮径率をϕ_dとすると実験値より［9］，

$$b = \frac{0.0514 \cdot \phi_d \cdot r_1}{\ln(r_1 / r_0)} \tag{4-19}$$

以上より，相当ひずみ増分$d\varepsilon_{eq}$は，

$$d\varepsilon_{eq} =$$

$$\frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(d\varepsilon_t - d\varepsilon_\theta)^2 + (d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_t)^2 + \frac{3}{2}(d\gamma_{t\theta}^2 + d\gamma_{\theta z}^2 + d\gamma_{zt}^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{4 + b^2}{3}(d\varepsilon_\theta)^2} \tag{4-20}$$

ここで，ε_θは円周方向の対数ひずみであるから，

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{r_{1s}}{r_{0s}}\right) \tag{4-21}$$

となり，負の値である．

4.3.2　塑性変形仕事

使用したパイプの変形抵抗については異方性の影響が少ないので［10］，等方性とする．さらに，降伏応力Yの剛完全塑性体とすると，単位体積あたりの理想変形仕事w_1は，

$$w_1 = Y\int_v d\varepsilon_{eq}$$

$$= Y\int_0^{\ln(r_{1s}/r_{0s})} \sqrt{\frac{4+b^2}{3}}\,(-d\varepsilon_\theta)$$

$$= Y\cdot\ln\left(\frac{r_{0s}}{r_{1s}}\right)\cdot\sqrt{\frac{4+b^2}{3}} \qquad (4\text{-}22)$$

ただし，ここで用いる降伏応力Yの値は，耐力Y_1と，加工後の変形抵抗Y_2の平均である．すなわち，

$$Y = \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} \qquad (4\text{-}23)$$

なおY_2は，

$$\varepsilon_{eq} = \ln\left(\frac{r_{0s}}{r_{1s}}\right)\cdot\sqrt{\frac{4+b^2}{3}} \qquad (4\text{-}24)$$

としてn乗硬化則によって求めた変形抵抗である．

4.3.3　せん断仕事

図4.1(a)及び(b)の弧EG 及びDC をそれぞれ弦ER 及びDC で近似したので，点E，R，D及びCにおいて付加的せん断がなされる．ミーゼスの説に従うとすると，せん断降伏応力は$Y/\sqrt{3}$ なので，単位体積あたりの付加的せん断仕事w_2は，

$$w_2 = \frac{Y}{\sqrt{3}}\left\{(\gamma_{zt})_E + (\gamma_{zt})_R + (\gamma_{t\theta})_D + (\gamma_{t\theta})_C\right\}$$

$$= \frac{Y}{\sqrt{3}}\left\{2\tan\alpha + \tan\left(\frac{\xi}{2}+\zeta\right) + \tan\left(\frac{\xi}{2}\right)\right\} \qquad (4\text{-}25)$$

4.3.4 摩擦仕事

摩擦係数をμ，ボール個数をnで表し，ボールとパイプの接触面圧は一様にpと仮定し，図4.1に示すように記号を定めると，1ピッチmだけ送られた時の軸方向の滑りによる摩擦仕事W_3は，

$$W_3 = m \cdot n \cdot \mu \cdot p \cdot \int_S \frac{\sin\eta}{\sqrt{\sin^2\eta + \tan^2\phi}} dS \tag{4-26}$$

ここで，本加工ではη は$\pi/2$に近い値となるので，$\sin\eta = 1$と近似すると，

$$\begin{aligned} W_3 &= m \cdot n \cdot \mu \cdot p \cdot \int_S \cos\phi \, dS \\ &= m \cdot n \cdot \mu \cdot p \cdot S_y \end{aligned} \tag{4-27}$$

なおS_yは，第2章で求めたように，図4.1(C)に示すパイプとボールの接触部のy方向への投影面積である．

4.3.5 押し込み力FおよびトルクT

1ピッチ送られた時に加工される体積Vは，

$$V = m \cdot \pi \cdot \left\{ r_0^2 - (r_0 - t_0)^2 \right\} \tag{4-28}$$

であるから，パイプが1ピッチmだけ送られた時になされる仕事W_mは，

$$W_m = V \cdot (w_1 + w_2) + W_3 \tag{4-29}$$

この仕事はトルクTと押し込み力Fによってなされる．そして，T及びFは変形やせん断に必要なT_p及びF_pと，摩擦に費やされるT_μ 及びF_μとからなる．

パイプの円周方向について考えると，ボールとパイプの接触面で差動滑り［11］が発生し，摩擦力の向きが中立点をはさんで逆転して，接触面全体としては摩

擦力が相殺されていると考えることができる．そこで，$T_\mu = 0$ として，

$$T = T_p \tag{4-30}$$

$$F = F_p + F_\mu \tag{4-31}$$

パイプが1ピッチmだけ送られた時の仕事と，T及びFのした仕事が等しいとおくと，式(4-29)，(4-30)，(4-31)より，

$$V \cdot (w_1 + w_2) = m \cdot F_p + \frac{2\pi}{n} \cdot T_p \tag{4-32}$$

$$W_3 = m \cdot F_\mu \tag{4-33}$$

が得られる．次に軸方向力F_pは，ボールとパイプの接触領域内で接触面圧pのz方向分力を積分した値となるので，図4.1(c)の記号を用いると，

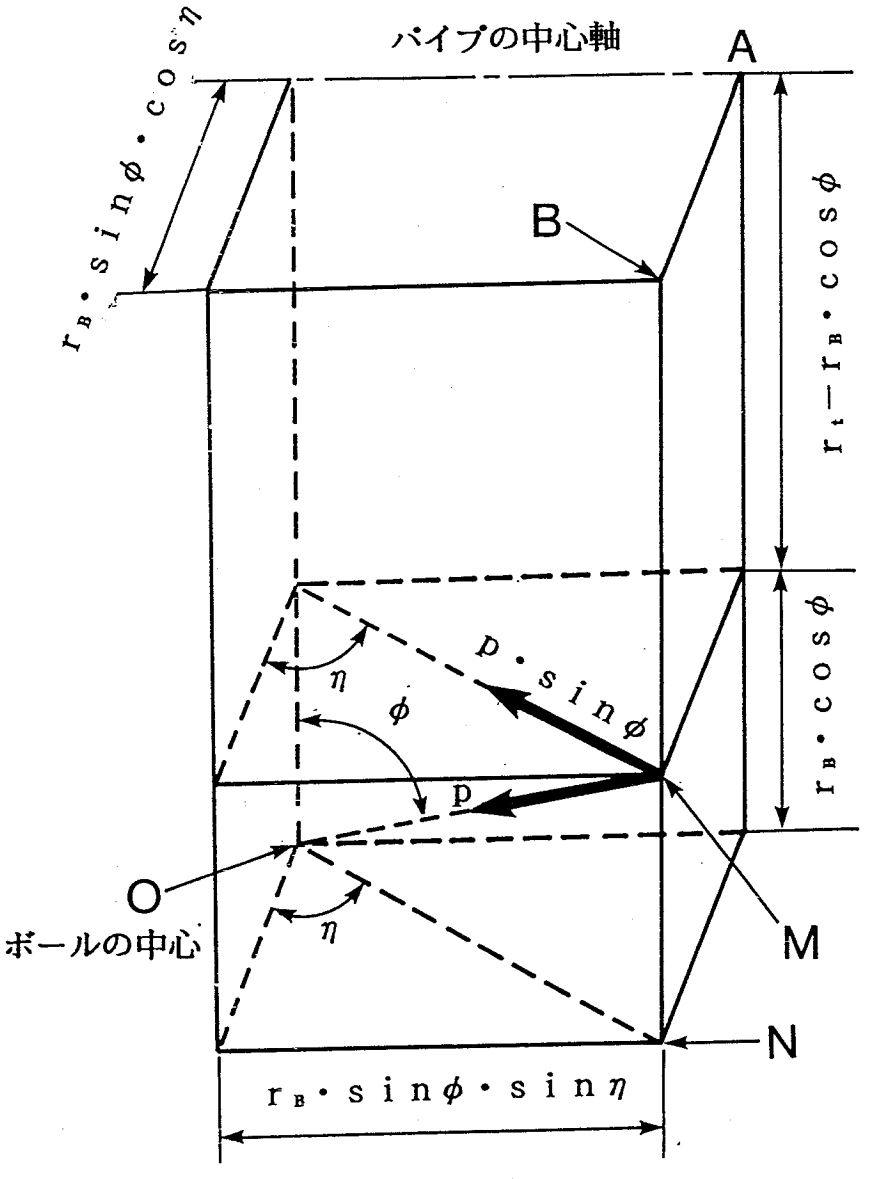
$$\begin{aligned} F_p &= n \cdot \int_S p \cdot \sin\phi \cdot \sin\eta \, dS \\ &= n \cdot p \cdot S_z \qquad (\eta \geqq 0) \end{aligned} \tag{4-34}$$

一方トルクは，図4.1(c)のボールとパイプの接触部の1つの頂点Mを含んで，角度や長さを立体的に表した図4.2を参考にすると，次式で書かれる．

$$\begin{aligned} T_p &= n \cdot \int_S p \cdot \left(\sin\phi \cdot \cos\eta \cdot \overline{BM} + \cos\phi \cdot \overline{AB} \right) dS \\ &= n \cdot p \cdot r_t \cdot S_x \end{aligned} \tag{4-35}$$

ここで，S_z及びS_xは，第2章で求めたボールとパイプの接触部のz及びx方向への投影面積である．式(4-34)，(4-35)より，

$$F_p = \frac{S_z \cdot T}{(r_1 + r_B) \cdot S_x} \tag{4-36}$$



$\overline{OM}$：ボールの半径 r_B

図4.2　　ボールとパイプの接触状態を示す立体図

また，接触面圧pは，式(4-34)，(4-36)より，

$$p = \frac{T}{n \cdot (r_1 + r_B) \cdot S_x} \tag{4-37}$$

式(4-36)を(4-32)に代入すると，トルクは，

$$T = T_p = \frac{V \cdot (w_1 + w_2)}{\dfrac{m \cdot S_z}{(r_1 + r_B) \cdot S_x} + \dfrac{2\pi}{n}} \tag{4-38}$$

次に押し込み力Fは，式(4-31)，(4-36)，(4-33)，(4-27)，(4-37)より，

$$\begin{aligned} F &= F_p + F_\mu \\ &= \frac{(S_z + \mu \cdot S_y) \cdot T}{(r_1 + r_B) \cdot S_x} \end{aligned} \tag{4-39}$$

式(4-38)及び(4-39)で，加工に必要なトルクと押し込み力が求められる．

4.4　実験値と解析値の比較

図4.3及び図4.4に，ダイス1回転あたりのパイプの送り量f_Dと押し込み力F及びトルクTの関係を示す．f_Dの増加とともに，何れの摩擦係数の場合にもF及びTが増大する．摩擦係数μが大きくなると，Fは大きくなるがTはほとんど変化しない．このことは，差動滑りによって，パイプの円周方向の摩擦力は相殺されるという仮定を支持している．なお，実験点は3回の実験値の平均値をプロットしたものである．

図4.5及び図4.6に，縮径率ϕ_dとF及びTの関係を示す．f_Dの場合と同様に，何れの摩擦係数でもϕ_dの増加とともにF及びTも増大する．また，摩擦係数が大きいほどFの計算値は大きく実験値に近づく．なおTについては，図4.4の場合と同様に摩擦の影響はほとんど受けない．

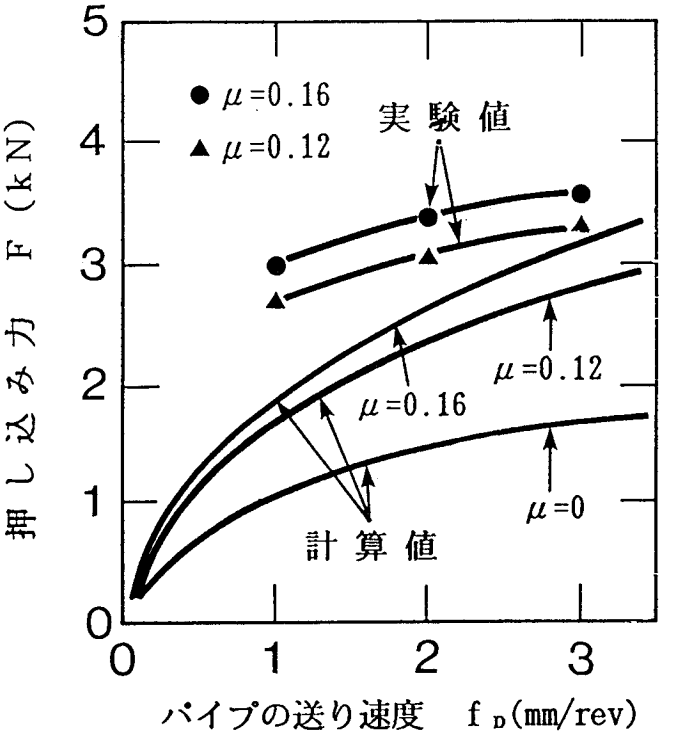


図4.3　送り速度と押し込み力の関係

（ボール個数：n=3，ボール半径：r_B=19.05 mm
縮径率：ϕ_d=10.0 %，パイプの初期半径:r_0=11 mm
パイプの初期肉厚：t_0=2 mm ）

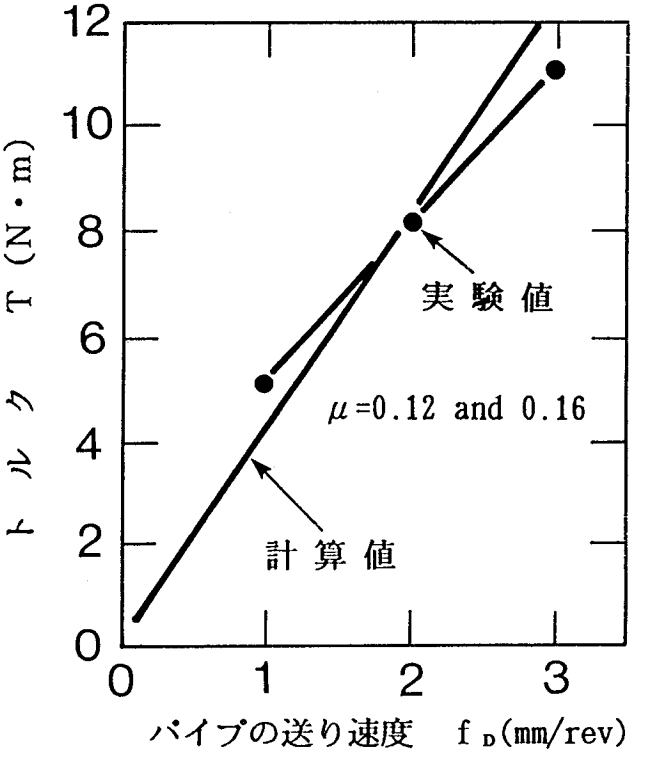


図4.4　送り速度とトルクの関係

（n=3，r_B=19.05 mm，ϕ_d=10.0 %，r_0=11 mm，t_0=2 mm）

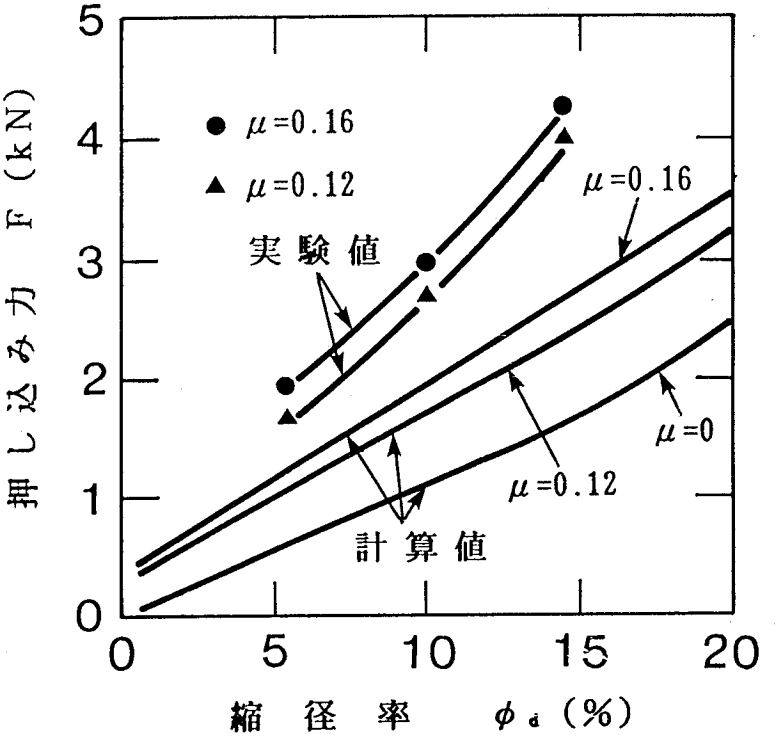


図4.5　縮径率と押し込み力の関係

(n=3, r_B=19.05 mm, r_0=11 mm, t_0=2 mm
パイプの送り速度：f_D=1 mm/rev)

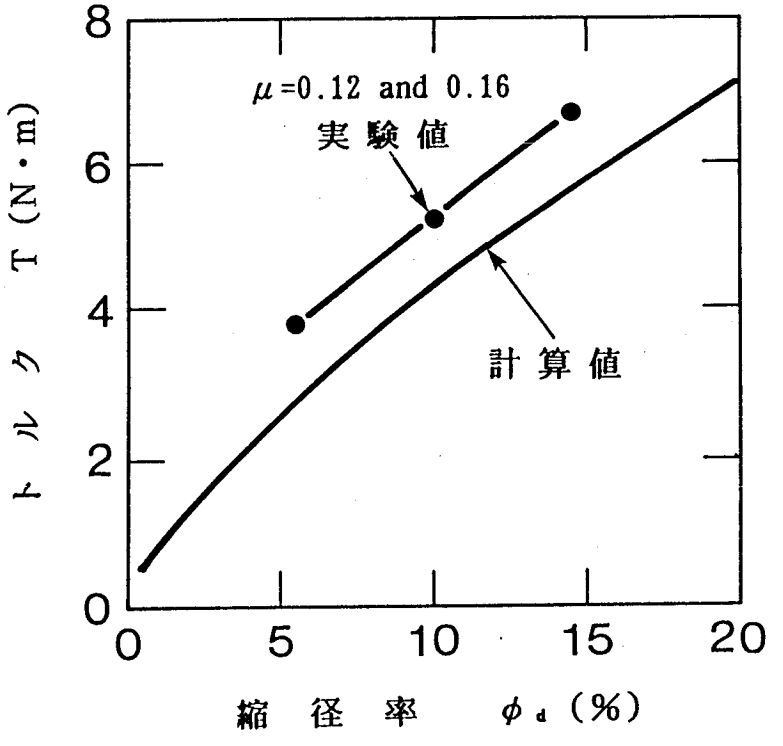


図4.6　縮径率とトルクの関係

(n=3, r_B=19.05 mm, r_0=11 mm, t_0=2 mm, f_D=1 mm/rev)

図4.7及び図4.8に，ボール径 $2 \cdot r_B$ とF及びTの関係を示す．ボール径が大きいほどF及びTは小さくなる．しかし，ダイスを高速回転させるとボールの遠心力が急激に増大するので［6］，ボールの大径化は高速加工には不利である．逆にボール径を小さくすると，ボールとアウタレース内周面の間で滑りが発生し，パイプのまわりを転がることができなくなる．

この滑りは，縮径率が一定の場合にはボール径が減少すると発生し，また，ボール径を固定した場合には縮径率が増大すると発生する［5］．この傾向から，ボールがパイプにせん断加工を加えながらパイプのまわりを転がっていくために必要な力が増大し，アウタレース内周面によるトラクションドライブ［12］の限界値を越えると滑りが発生すると考えられる．この限界値を大きくするためには摩擦係数を大きくすれば良いが，それに伴って加工力も増大することを考慮して潤滑剤を選択する必要がある．

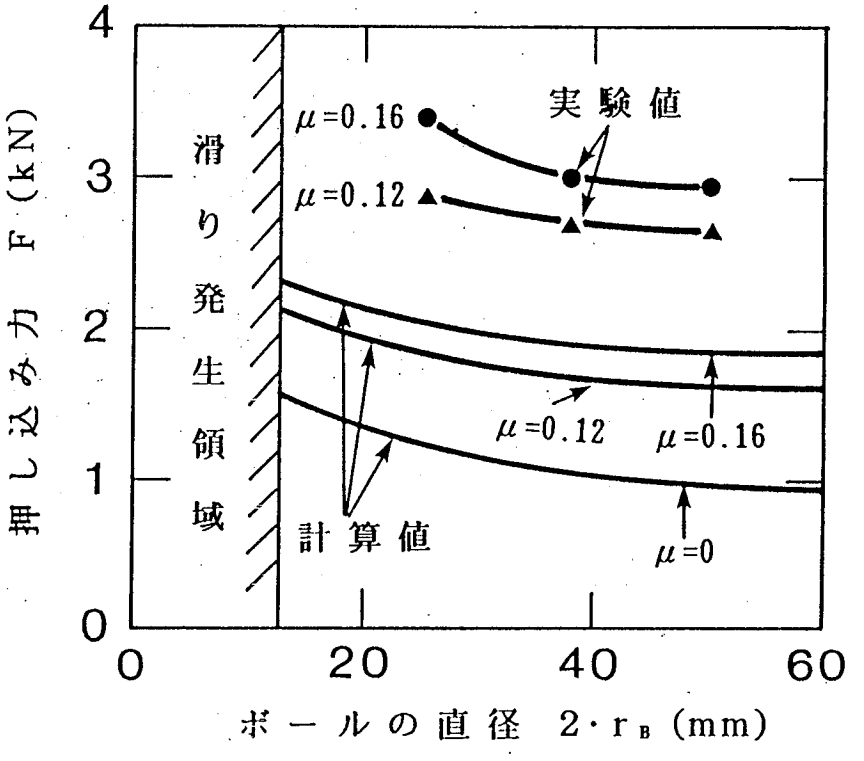


図4.7　ボール径と押し込み力の関係

（n=3，r_0=11 mm，t_0=2 mm，f_D=1 mm/rev，ϕ_d=10.0%）

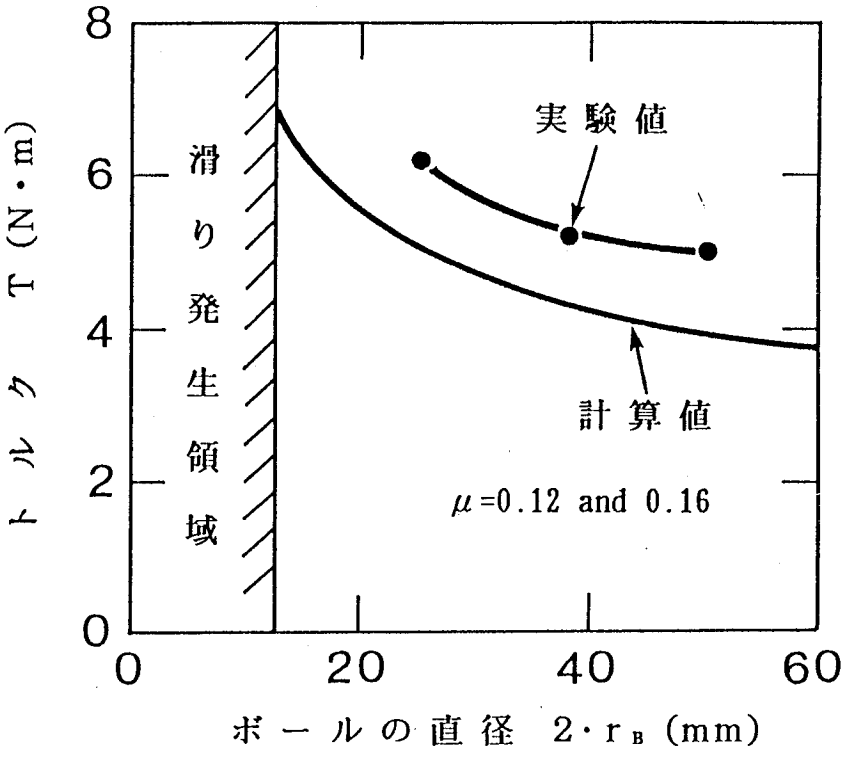


図4.8　ボール径とトルクの関係

(n=3, r_0=11 mm, t_0=2 mm, f_D=1 mm/rev, ϕ_d=10.0%)

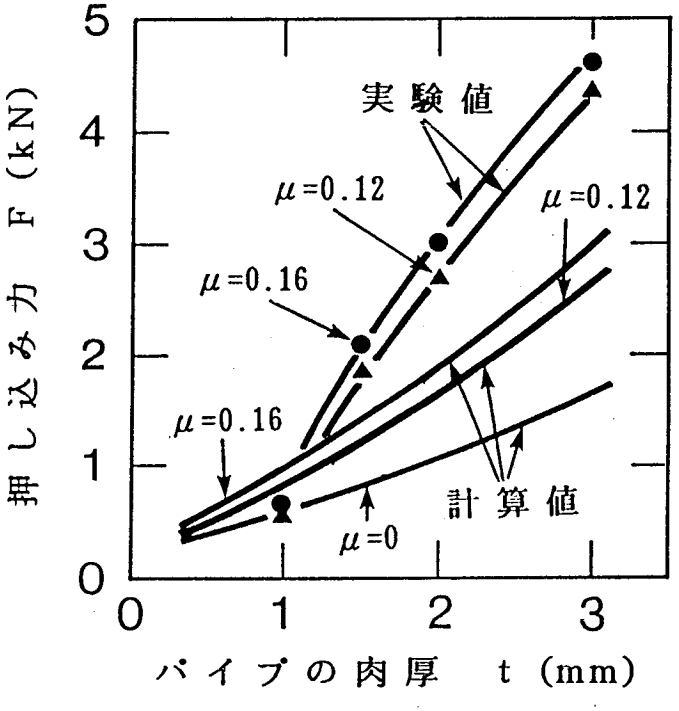


図4.9　パイプ肉厚と押し込み力の関係

(n=3, r_B=19.05 mm, r_0=11 mm, f_D=1mm/rev , ϕ_d=10.0 %)

図4.9及び図4.10にパイプの肉厚tとF及びTの関係を示す．tの増加とともにF及びTも増加する．そして，tが大きいほどF，Tともに実験値と計算値の差が大きくなる．これは，tが大きくて加工力が増大すると，回転鍛造におけるマッシュルーム変形［13,14］と類似のまくれ現象が顕著になり，ボールとパイプの接触面積が増大するためと考えられる．まくれ現象の例を図4.11に示す．

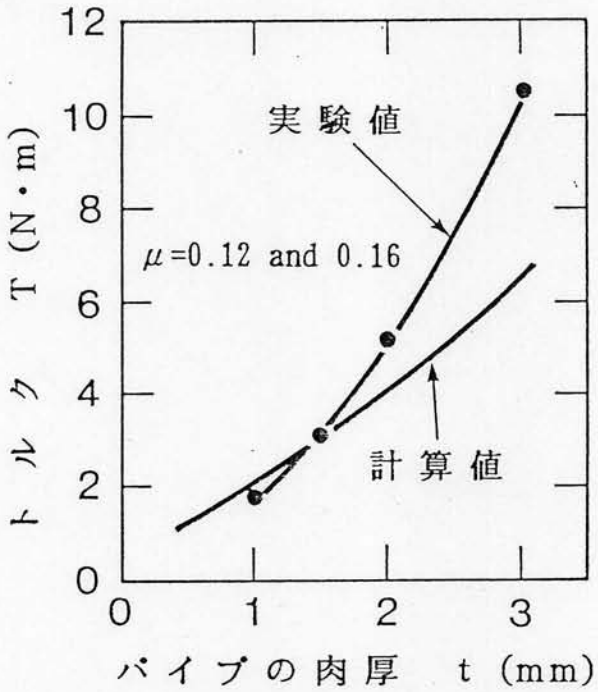


図4.10　パイプ肉厚とトルクの関係

(n=3，r_B=19.05 mm，r_0=11 mm，f_D=1mm/rev，ϕ_d=10.0 %)

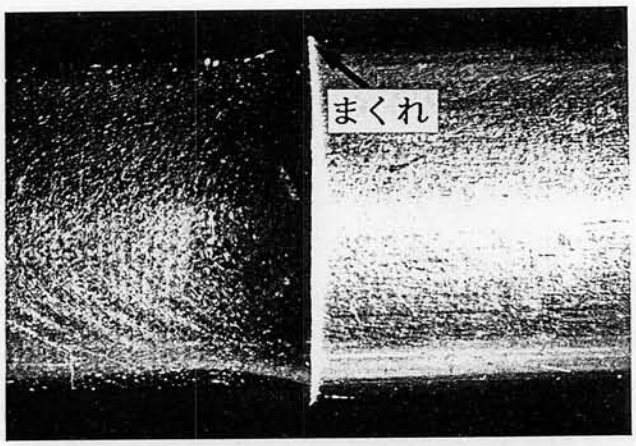


図4.11　まくれ現象を示す写真

図4.12及び図4.13に，ボール個数nとF及びTの関係を示す．nが大きくなるとFは大きくなるがTはほとんど変化しない．これは，nを増大させると個々のボールにとっては送り量が小さくなって仕事が減少するが，その減少傾向がFとTでは異なるためである．

図4.4に示したように，送り量とTの関係はほぼ直線なので，n がA倍になって送り量が1/Aになるとボールn個が受け持つトルクは1/Aに減少するが，全てのボールでの所要トルクはこの値をA倍した値なので元の値と等しくなる．一方Fは図4.3に示したように，上に凸の曲線なので送り量が1/Aになっても，ボールn個が受け持つ押し込み力Fは元の値の1/Aにはならず，それよりも大きくなる．従って，その値をA倍すると元の値よりも大きくなる．

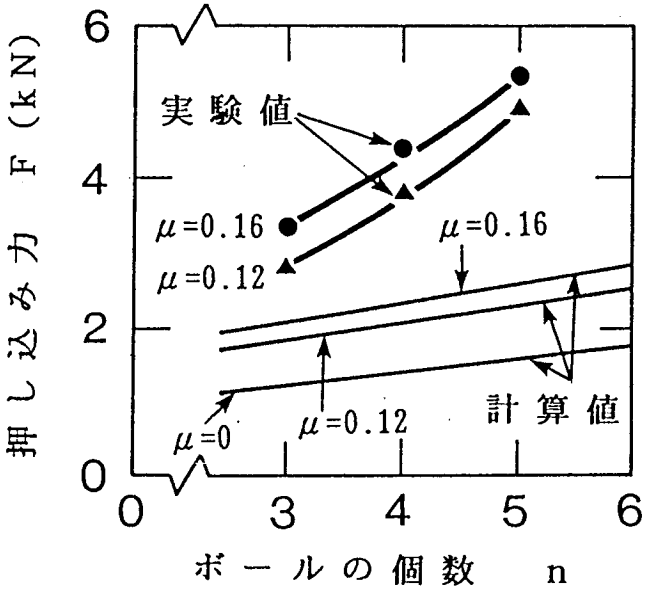


図4.12　ボール個数と押し込み力の関係
(r_B=19.05 mm, r_0=11 mm, t_0=2 mm, f_D=1mm/rev, ϕ_d=10.0 %)

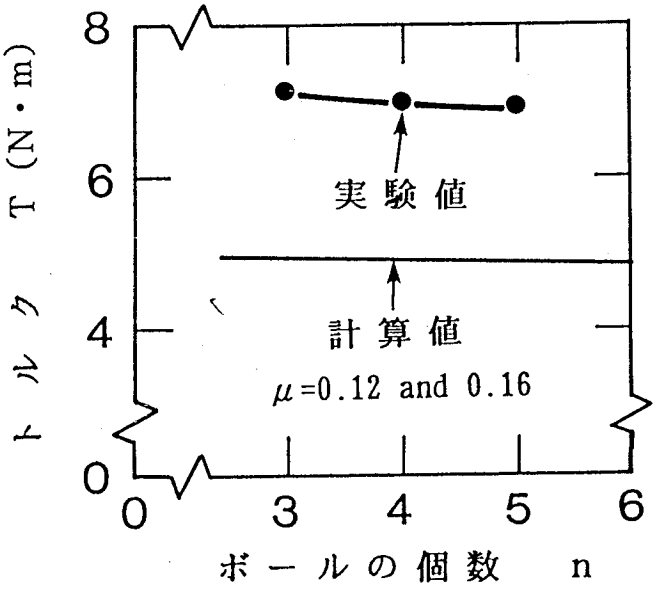


図4.13　ボール個数とトルクの関係
(r_B=19.05 mm, r_0=11 mm, t_0=2 mm, f_D=1mm/rev , ϕ_d=10.0 %)

4.5　コニカルダイスとの比較

図4.14に，コニカルダイスを用いた場合の所要軸力と，遊星ボールダイスの実験値の比較を示す．前者の値は，変形だけでなく付加的せん断と摩擦力も考慮した引抜き力の算出式［15］で求めた．ここで摩擦係数μは 0.05 から 0.15までの3通りに変化させ，ダイス半角αは30° 以下の領域について計算した．

遊星ボールダイスではコニカルダイスのダイス角の定義を適用できないので，実験値を斜線領域で示した．この値は，コニカルダイスの最適ダイス角における値の半分以下であり，遊星ボールダイスの方が，所要軸力がはるかに小さいことが分かる．なお，今回の実験範囲内では，加工による温度上昇はほとんどなく，変形抵抗の低下はなかったと考えられる．

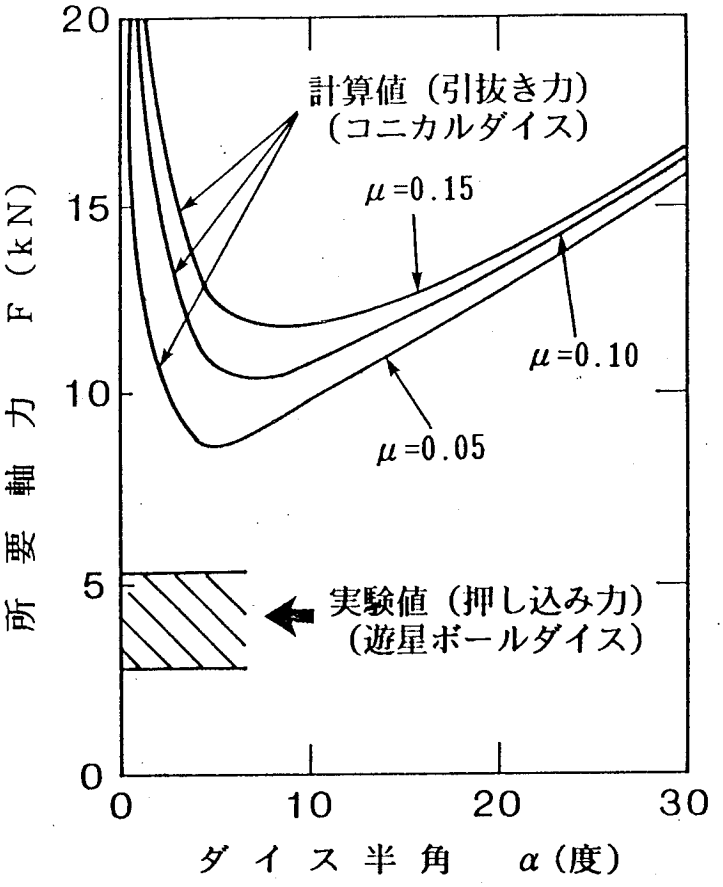


図4.14　コニカルダイスと遊星ボールダイスの軸力の比較
（r_0=11 mm，t_0=2 mm，ϕ_d=10.0 %，平均変形抵抗：Y=254MPa）

4.6　結　言

遊星ボールダイスによる縮径加工に必要な加工力について，摩擦力を考慮してエネルギ法による解析を行った．また，潤滑剤を変化させて実験を行い，解析値との比較を行った．その結果，次のことが明かとなった．

(1) 押し込み力は，コニカルダイスの場合の半分以下である．

(2) 押し込み力は摩擦係数が大きいほど大きくなるが，トルクは摩擦係数の影響をほとんど受けない．

(3) 縮径率，パイプの肉厚及び加工速度(軸方向の送り)が大きいほど，押し込み力及びトルクは大きくなる．

(4) ボール径が大きいほど，押し込み力及びトルクは小さくなる．

(5) ボール個数が多くなると，押し込み力は大きくなるがトルクはほとんど変化しない．

第５章　加工限界

5.1　緒　言

遊星ボールダイスによる加工は，局所的な加工を累積してパイプの縮径を行うので，同一箇所が繰り返して加工され，表面にはく離が発生することがある．大きな塑性変形を伴わないベアリングレース等の疲労によるフレーキング［1,2］，せん断変形のみの繰り返しによる破壊［3］，ロール圧延による欠陥発生［4］，曲げ加工における破壊条件［5］，しごき加工と製品表面の関係［6］等に関しては研究が行われている．しかし，圧縮，せん断，摺動の全てが繰り返される本加工のような場合についての研究は見あたらない．そこで，はく離が発生する加工条件について，実験的に検討するとともに解析を行った．

さらに，本加工法においては，加工条件によっては座屈による多角形化やまくれ現象が発生することがある．これらについては，ローラ工具を用いて意識的に3～7角形のパイプを成形する研究［7～11］や，まくれ現象と類似の変形と考えられるロール加工にともなう材料の押しもどし流れの報告［12］がある．そこで，工具がローラの替わりにボールとなった場合の加工限界を，実験を行い明らかにした．

5.2　実験方法

遊星ボールダイスを旋盤のチャックでつかんで回転させ，工具台の自動送りを利用してパイプを押し込んで縮径加工を行った．直径 38.1mmの精密級のスチールボール3個を用い，アウタレースの内径は 95，96，97mmの3種類に変化させた．ダイス1回転あたりのパイプ送り量の設定は 0.05から 3.0mmの間で8段階とした．回転数は毎分140，潤滑剤はマシン油とした．パイプは，第４章と同じアルミニウム合金引抜き管 (A6063TD)を使用した．外径は，22 及び 25 mm，そして肉厚は，各々，1.0，1.5，2.0及び 3.0mmである．なお，ボール径の影

響について検討するために，直径 25.4及び 50.8mmのボール3個を内蔵するダイスで，直径 22mm，肉厚 2mmのパイプを，縮径(ϕ_d=10%)する加工も行った．

5.3　まくれ現象及び座屈

図5.1及び図5.2に，まくれ現象及び座屈が発生した例を示す．図5.3は，まくれ発生後も縮径を続けると生じることが多い，はく離も発生した例である．そして図5.4に，これらが発生する加工条件を示す．図中△印は座屈発生，●印はまくれ現象，○印は良好な加工を示している．従って，図中の右上がりの線は座屈発生限界を表し，右下がりの線はまくれの発生限界を示す．

そこで，これらの線よりも下側の領域で，良好な加工が行われることになる．パイプの直径に比べて肉厚が小さいと座屈，肉厚が大きいとまくれが発生しやすい．また，どちらも，縮径率が大きいほど発生しやすい．座屈は，縮径による円周方向応力が限界値を越えると発生すると考えられる．一方，まくれ現象は，ボールによるパイプ材料の押しもどし流れ［12］によるものである．

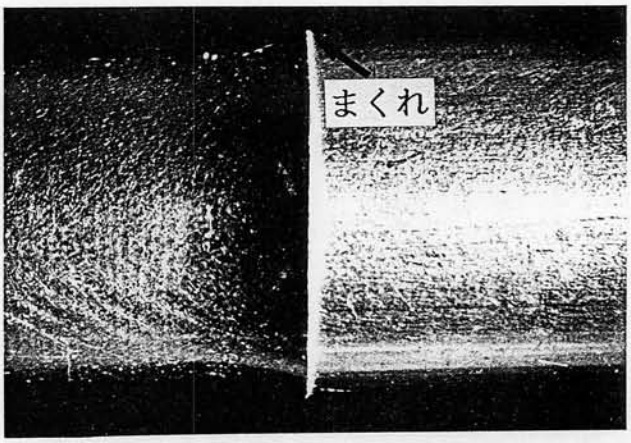


図5.1　まくれ現象を示す写真

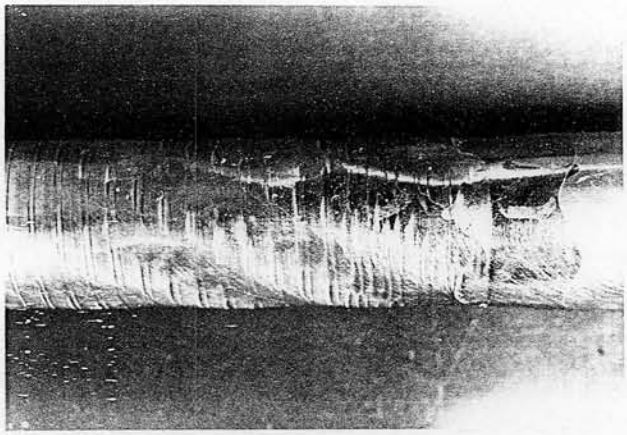


図5.2　座屈現象を示す写真

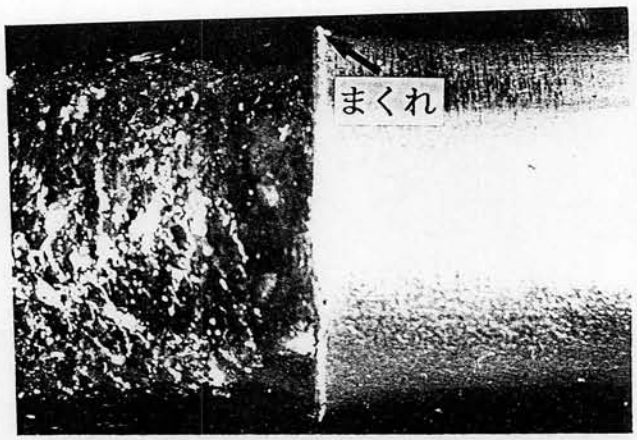


図5.3　まくれと同時にはく離が発生した写真

5.4　表面のはく離

5.4.1　はく離が発生する加工条件

図5.5に，パイプの送り速度と，加工後の表面粗さの関係を示す．送り速度が小さくなるほど，計算値(第3章参照)も実験値も表面粗さは小さくなる傾向にある．しかし，図中にハッチングで示した限界以下に送り速度を小さくした場合には，図5.6に示すようにパイプの表面ではく離が発生する．

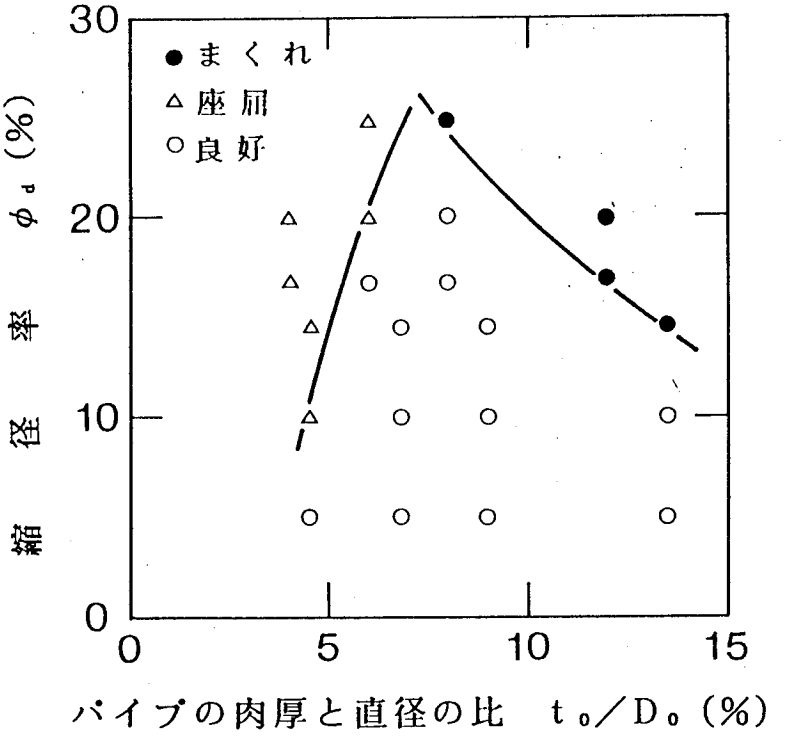


図5.4 まくれ及び座屈による加工限界

($2 \cdot r_B$=38.1mm, n=3, f_D=0.7mm/rev)

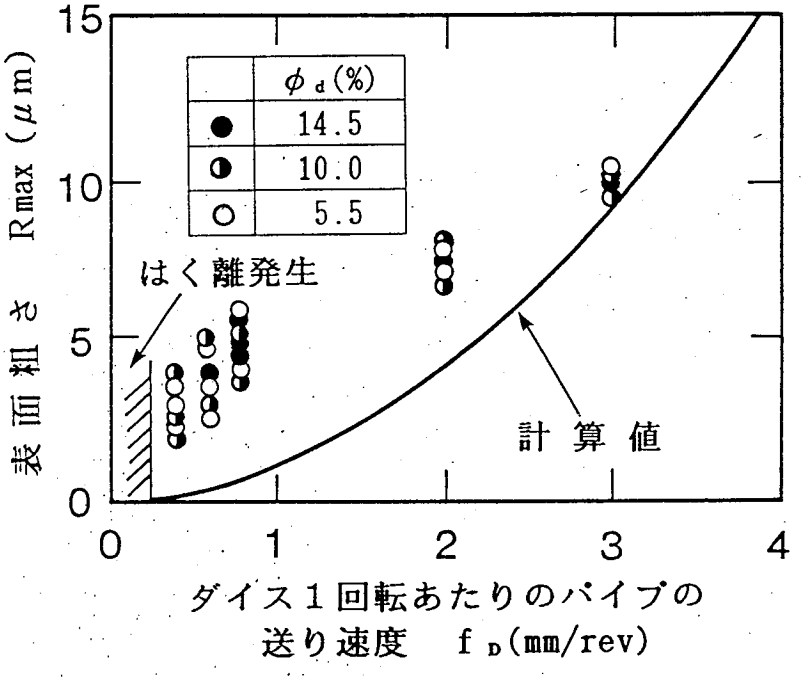


図5.5 パイプの送り速度と加工後の表面粗さの関係

($2 \cdot r_0$=22.0mm, t_0=2mm, $2 \cdot r_B$=38.1mm, n=3)

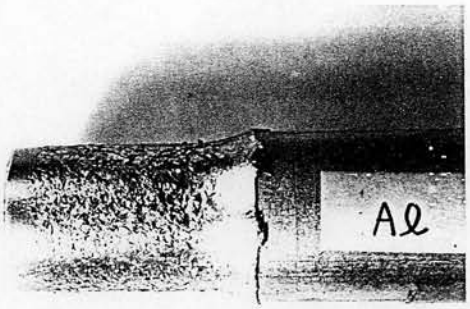


図5.6　はく離現象を示す写真

この発生条件を少し詳しく調べた結果を図5.7に示す．○と×が重なっている点は，はく離が発生することもあるが，おおむね発生することなく良好な加工が行われる加工条件である．そこで，曲線よりも右側が良好な加工条件と考えられる．送り速度が小さいほど，また縮径率が大きいほどはく離が発生しやすい．

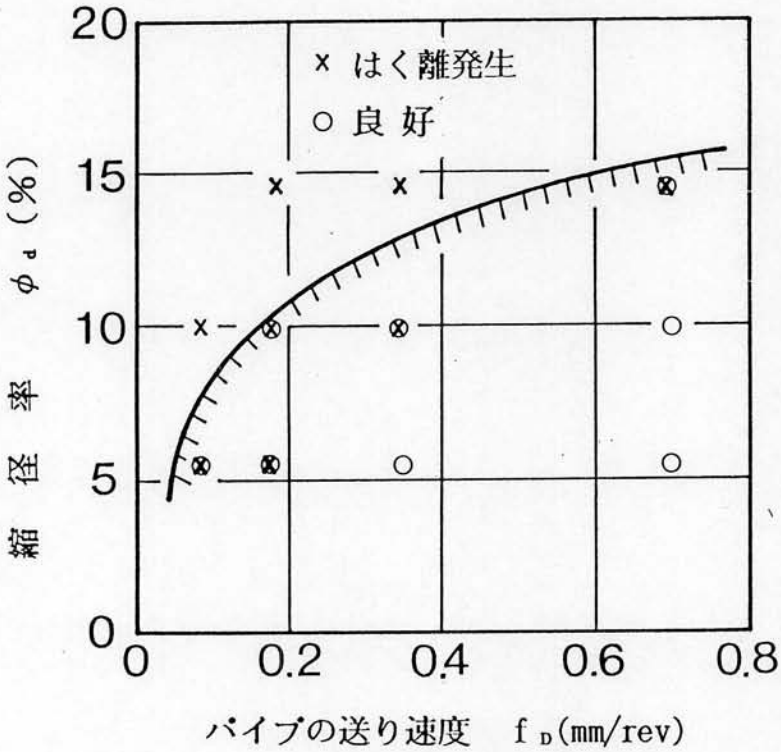


図5.7　はく離発生に対する縮径率と送り速度の影響
($2 \cdot r_B$=38.1mm，n=3，$2 \cdot r_0$=22.0mm，t_0=2mm)

5.4.2 加工の繰り返し

パイプは，図5.8に一例を示すようにボールが繰り返して通過することによって，点A_1から点A_6へ少しずつ縮径が進められ，その表面は，ボールが通過するたびに圧縮，せん断及び摺動を受けることになる．

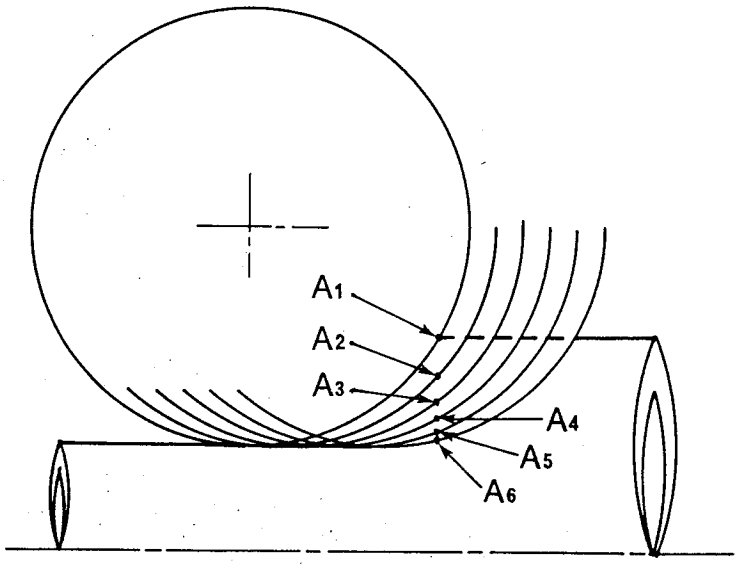


図5.8　繰り返し加工の説明図

まず，ある点の縮径が完了するまでにボールがその点の上を通過する回数N_rは，次のようにして求められる．パイプの軸方向断面を示す図5.9(a)において破線FHの形状に加工するボールの番号を1とすると，その後に続いて来るi番めと(i-1)番めのボールの交点のz座標Z_iは，

$$Z_i = (i - 1.5)\,m \tag{5-1}$$

である．ここでボールの送りmは，ダイス1回転あたりの送りf_Dと図5.9(a)の記号を用いて次式で表される．

$$m = \frac{2 \cdot r_t \cdot f_D}{n \cdot (r_1 + 2 \cdot r_B)} \tag{5-2}$$

点Fのz座標をZ_fとすると，点Fが繰り返して加工される条件は，

$$Z_i \leqq Z_f \tag{5-3}$$

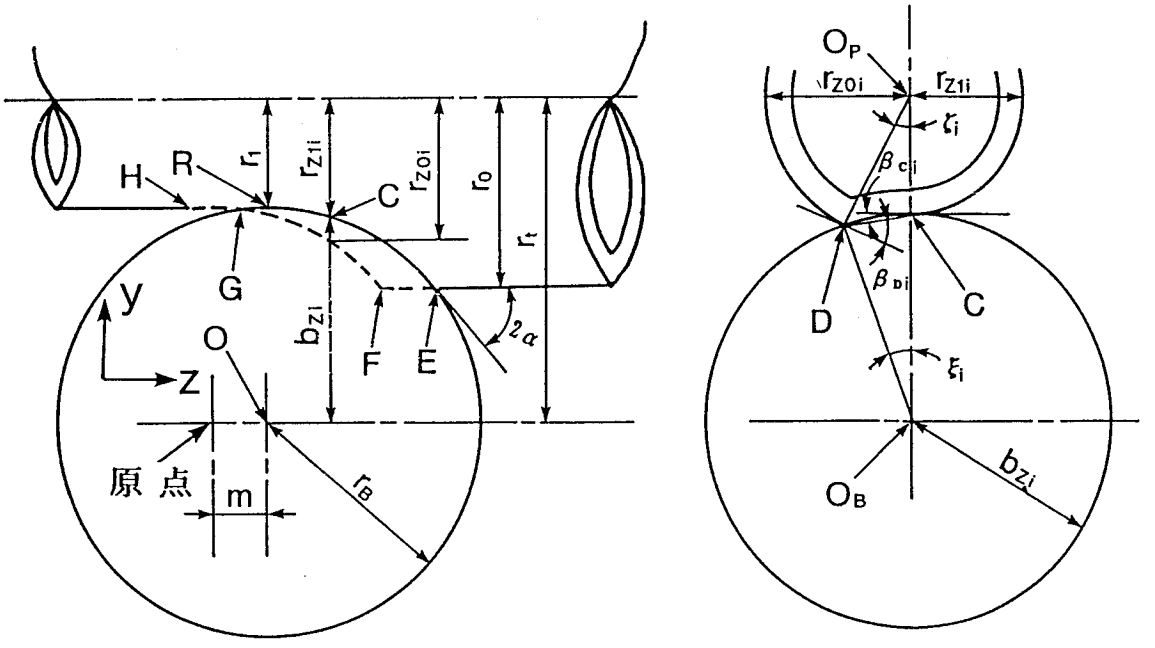


図5.9　ボールとパイプの接触状態の模式図

ただし，

$$Z_f = \sqrt{r_B{}^2 - \left(r_t - r_0 \right)^2} \tag{5-4}$$

式(5-1)及び(5-3)より，

$$i \leqq 1.5 + Z_f / m \tag{5-5}$$

で加工が繰り返され，加工回数N_rは i 以下の最大の整数である．図5.10に，加工繰り返し数N_rに対する，ボール径と送り量の影響を示す．ボール径が大きく，送り量が小さいほどN_rは大きくなる．

次に図5.11に，N_rに対する縮径率と送り量の関係を示す．送り量の減少とともに，N_rは急激に増大する．●印は図5.7から求めたはく離発生限界を示しており，縮径率ϕ_dが小さいほど，はく離が発生するN_rは大きくなる．これは，ϕ_dが小さいほど，パイプが受ける加工量が小さいためである．従って，N_rのみによって，はく離発生限界を定めることはできない．

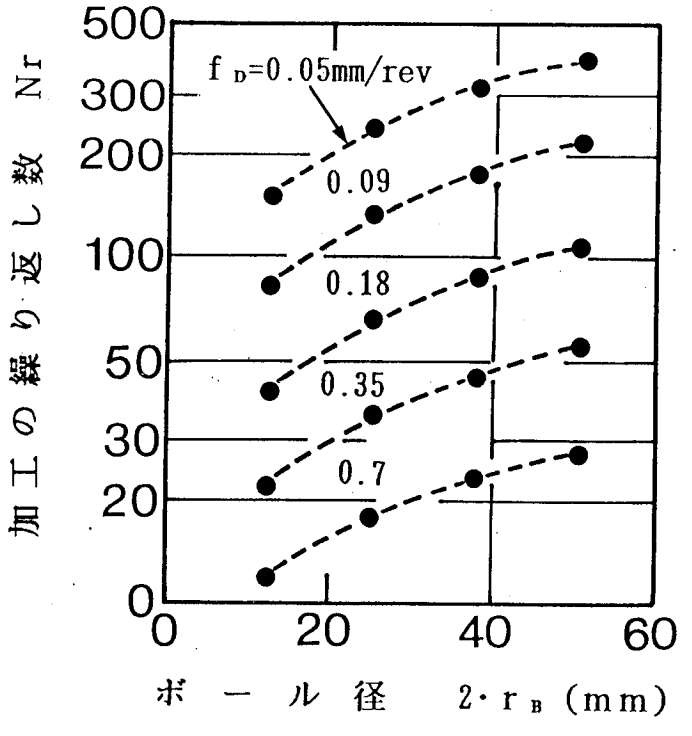


図5.10　加工繰り返し数に対するボール径と送り量の関係
($2 \cdot r_0$=22.0mm, ϕ_d=10%, n=3)

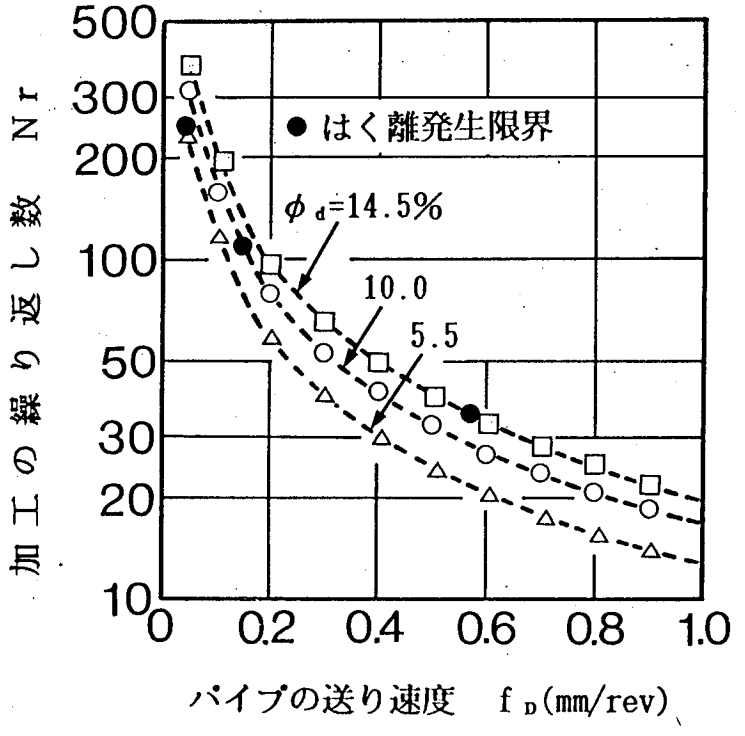


図5.11　加工繰り返し数に対する縮径率と送り量の関係
($2 \cdot r_0$=22.0mm, $2 \cdot r_B$=38.1mm, n=3)

5.4.3 圧縮及び摺動の繰り返し

縮径加工中に，ダイスの回転は継続しつつパイプの送りを停止すると，トルクは激減するが零にはならない．これは，パイプのスプリングバックの影響である．スプリングバックの量を0.2%とすると，半径が約10mmに縮径されたパイプは，ボールの通過のたびに半径方向に0.02mmの伸縮を繰り返すことになる．

この値から，せん断変形の繰り返しはごくわずかと考えても良い．一方，圧縮応力は，加工硬化した状態での変形抵抗に見合う値となるので，縮径加工中の値に比べて大幅に小さくなることはない．これは，摩擦(摺動)についても同様である．

そこで，縮径途中でパイプの送りを止めてダイスの回転だけを続けることによって，圧縮応力及び摺動が，はく離発生に及ぼす影響について調べることができる．図5.12に，その結果を示す．

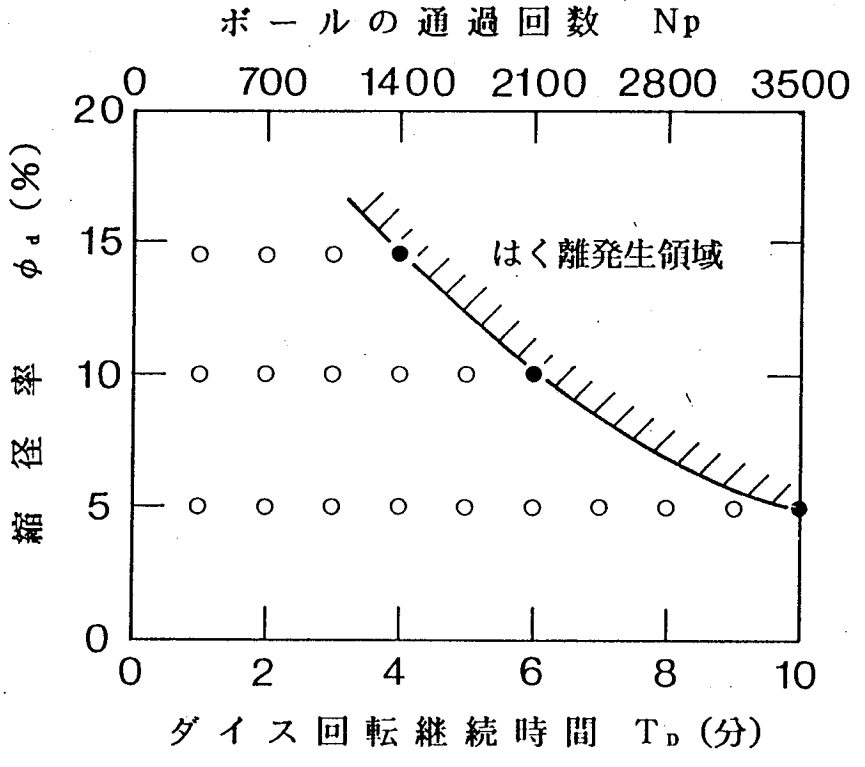


図5.12 圧縮と摺動の繰り返しによるはく離発生条件
($2 \cdot r_0$=22.0mm，t_0=2mm，$2 \cdot r_B$=38.1mm，n=3)

ここでは，図5.6に示したような大きなうろこ状のはく離に至る前の微小な粉末の発生をはく離発生限界とした．にもかかわらず，図5.11のはく離発生条件のボール通過繰り返し数に比べると，はるかに大きな値となっている．従って，はく離の発生には圧縮応力や摺動の繰り返しの影響は少なく，せん断の繰り返しによってはく離が生じると考えられる．

5.4.4 せん断の繰り返し

せん断ひずみの繰り返しによる破壊に関しては，佐藤ら［3］によって，1回のせん断ひずみが大きく，繰り返し数が少ない場合の破壊条件式が提案されている．この条件式は，Pugh［13］らが引張り試験において破壊条件に対して静水圧成分の影響を考慮したのと同様に，せん断破壊においても静水圧成分を考慮したものである．

しかし，佐藤らの破壊条件式では，実験によって種々の材料定数を定めねばならず，また，遊星ボールダイスによる加工では静水圧成分は小さく，さらに，せん断が一方向ではなく同時に軸方向及び円周方向にせん断される．その上，せん断の繰り返しによって破断に至るのではなく，表面ではく離が生じるのみである．従って，佐藤らの破壊条件式をそのまま適用するには無理がある．

そこで，せん断の繰り返しによるはく離発生は，個々の微小なせん断エネルギの総和が限界値を越えると生じるものとして，次の簡単な条件式を提案する．

$$W_s = C \tag{5-6}$$

ここで，W_sは単位体積あたりのせん断エネルギの総和で，この値が限界値Cを越えるとはく離が発生する．W_sは，

$$W_s = W_z + W_\theta \tag{5-7}$$

と書かれ，W_z及びW_θは，軸方向及び円周方向のせん断エネルギである．せん断

については，第４章の加工力の解析の場合と同様に，図5.9(b)のボールの弧DCを弦DCで近似し，軸方向についても図5.9(a)の弧ERを弦ERで近似することにする．また，変形抵抗は式(4-22)で表され，ミーゼスの説に従うものとすると，せん断抵抗 k は

$$k = \frac{Y}{\sqrt{3}} \tag{5-8}$$

となるので，W_z 及びW_θ は，以下の式で表される．まず，W_z は仮定に基づくと点E 及び点R で各々角度αずつせん断されることになるので，

$$W_z = 2k \cdot \tan \alpha \tag{5-9}$$

$$\tan \alpha = \frac{r_{0s} - r_{1s}}{\sqrt{r_B{}^2 - \left(r_t - r_0\right)^2}} \tag{5-10}$$

次にW_θ は，i=1 で半径r_0の点Fが，i=N_rで半径r_1 の点R にまで縮径され，途中のi番目のボールの通過によって点D及び点Cにおいて角度β_{Di}及びβ_{Ci}ずつせん断されるので，この総和を求めることになる．従って，

$$W_\theta = k \sum_{i=1}^{N_r} \left(\tan \beta_{Di} + \tan \beta_{Ci} \right) \tag{5-11}$$

$$\beta_{Di} = \frac{\xi_i}{2} + \zeta_i \tag{5-12}$$

$$\beta_{Ci} = \frac{\xi_i}{2} \tag{5-13}$$

$$\xi_i = \cos^{-1} \frac{b_{zi}{}^2 + r_t{}^2 - r_{z0i}{}^2}{2 \cdot b_{zi} \cdot r_t} \tag{5-14}$$

$$\zeta_i = \cos^{-1} \frac{b_{z0i}{}^2 + r_t{}^2 - b_{zi}{}^2}{2 \cdot r_{z0i} \cdot r_t} \tag{5-15}$$

$$b_{zi} = \sqrt{r_B^2 - \left\{z_F - (i-1)m\right\}^2} \tag{5-16}$$

$$r_{z0i} = r_t - \sqrt{r_B^2 - (z_F - im)^2} \tag{5-17}$$

ここで，z_Fは点Fのz座標である．以上より，パイプが半径r_0からr_1まで縮径加工される間に受ける付加的せん断エネルギの総和W_sは式(5-7)で計算され，これを図5.13に示す．

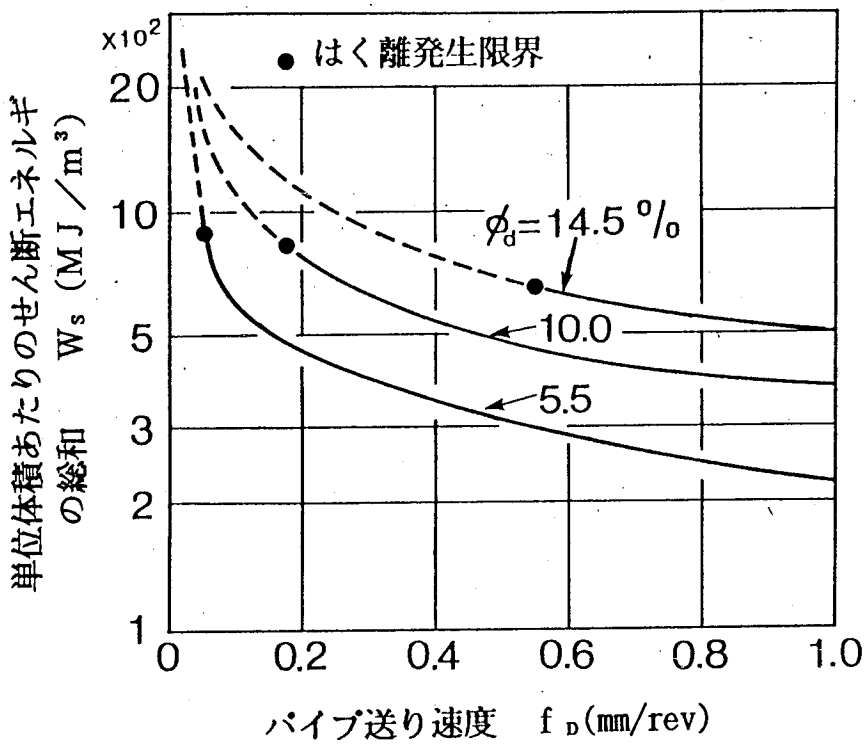


図5.13　せん断の繰り返しによるはく離発生に対する縮径率の影響
($2 \cdot r_B$=38.1mm，n=3，$2 \cdot r_0$=22.0mm，t_0=2mm)

はく離が発生するW_sは，縮径率が小さいほど，わずかに増加していることが分かる．これは，仮定で弧を弦で近似したために，縮径率が大きくなるほど，実際のひずみよりも計算値の方が小さくなるためである．

図5.14は，縮径率を10％に固定してボール径を変化させた場合のはく離発生限界を示しており，ボール径が小さいほど，はく離発生限界のW_sは小さい．縮径率の場合と同様に，弧を弦で近似したことによって実際のひずみよりも計算値の方が小さくなる．この傾向はボール径が小さくなるほど顕著となるので，図5.14のようなボール径による差が生じる．

以上より，弧を弦で近似することに起因する限界値の差は見られるものの，図5.13及び図5.14に示すように，せん断エネルギの総和によって，はく離発生限界を規定することが可能である．

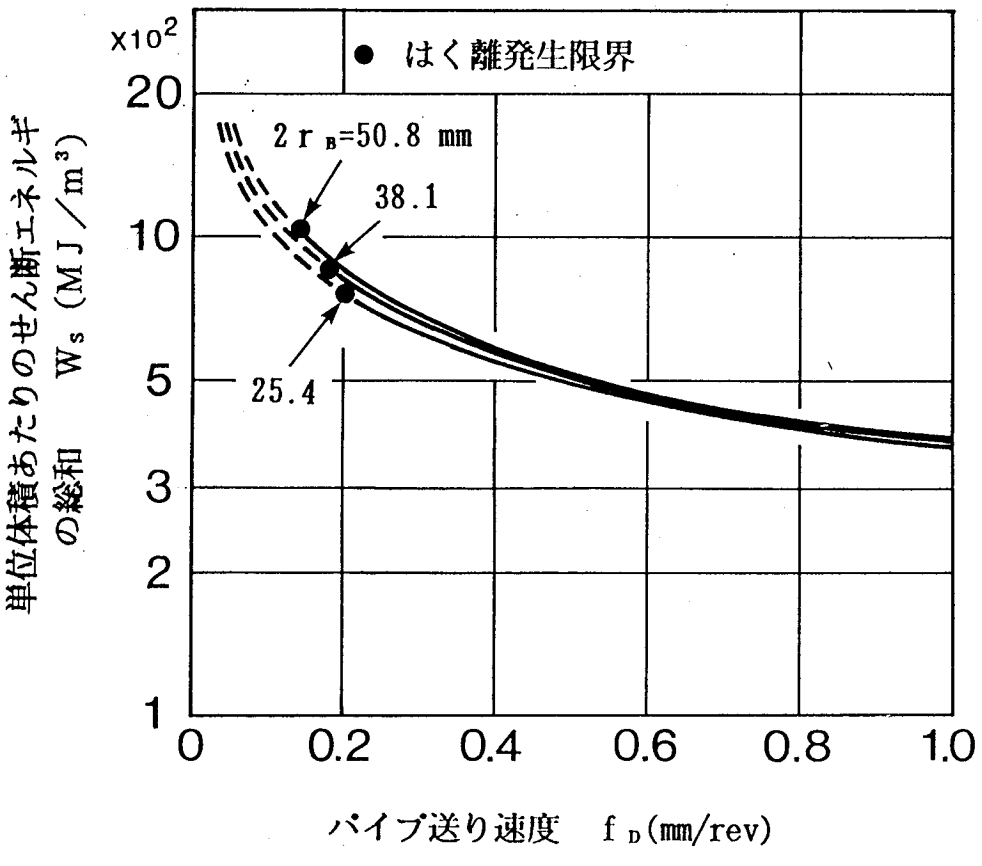


図5.14　せん断の繰り返しによるはく離発生に対するボール径の影響
(ϕ_d=10%，n=3，$2 \cdot r_0$=22.0mm，t_0=2mm)

5.5 結　言

遊星ボールダイスによる縮径加工における加工限界として，パイプのまくれ，座屈，表面はく離の発生について検討した．その結果をまとめると以下の通りである．

(1) パイプの直径に比べて肉厚が小さいと座屈，肉厚が大きいとまくれが発生しやすくなる．また，どちらも縮径率が大きいほど発生しやすい．

(2) ボールが繰り返し通過して少しずつ縮径加工が進められるが，ボール径及び縮径率が大きく，パイプの送り速度が小さいほど，加工の繰り返し数は増加する．

(3) ボールが通過するたびに，パイプは圧縮，摺動，せん断を受けるが，表面はく離の発生に対しては，圧縮及び摺動の影響は小さい．

(4) 繰り返し加工によってパイプが受けるせん断エネルギの総和が限界値を越えると，表面はく離が発生する．

第6章　高速加工

6.1　緒　言

パイプの直径を大きな縮径率で減少させ，同時に肉厚も減少させる方法として，マンドレルと3ロール・プラネタリミル［1］を組み合わせた方法が実用化されている．一方，縮径率は小さいが高速で加工する場合には，3ロール法［2］によって行われているが，個々のロールに軸及び軸受けを組み込む構造のために剛性が小さく，高速回転の遠心力に耐えられず，6,000～8,000rpmが限界とされている．

これに対して，遊星ボールダイスは，軸を介することなくトラクションドライブ［3,4］によって工具であるボールを駆動するので，構造が簡単で大きな剛性を維持したまま軽量化が図られる．このため，3ロール法よりも高速回転での加工が期待できる．そこで，20,000rpm以上での加工実験を行い，本ダイスの優位性を実証した．また，高速加工時におけるダイスの強度や寿命について，ボールの遠心力，アウタレース自身の遠心力，パイプの加工反力等を考慮して解析を行った．さらに，最近需要の多い空調用内面溝付き銅パイプの製造［6］への応用についても検討した．

6.2　実験方法

図6.1の模式図に示す連続高速抽伸機(ブルブロック)に，従来の3ロールの替わりに遊星ボールダイスを組み込んで実験を行った．先端を細く押しつぶして口付け(ポインティング)したパイプを，遊星ボールダイス中に通した後に，ロール②に巻き付け，外側からパッド③を押しつけて，遊星ボールダイスを回転させながらロール②でパイプを巻きとって引抜き加工を行った．

なお，ロール②に，加工されたパイプが巻き付けられていくと，両者の間の

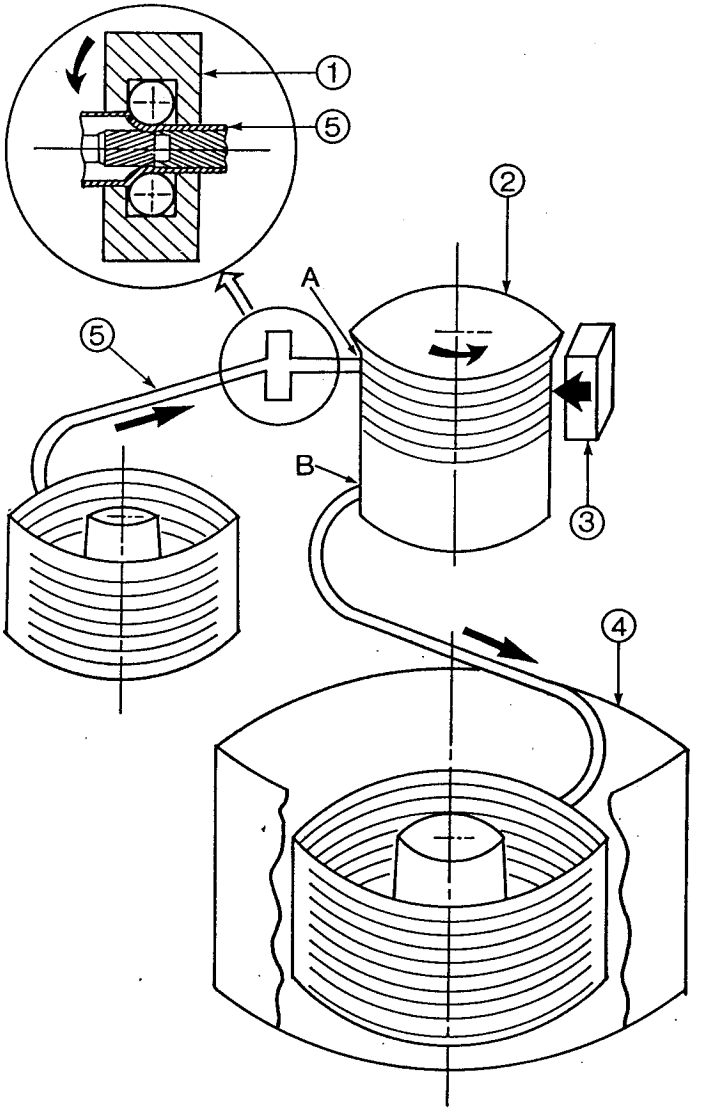


図6.1　連続高速抽伸機(ブルブロック)の模式図
①遊星ボールダイス，②巻き取りロール
③パッド，④ケージ，⑤パイプ

摩擦力はパイプの長さに比例して増大していく．そこで，この摩擦力の方が，遊星ボールダイスにおける縮径加工に必要な引抜き力よりも大きくなると，パッド③の押しつけを解除しても，加工は続行される．そして，加工されて点Aにおいてロール②と接触を始めたパイプは，点Bでロールから離れて，下のケージ④内に巻き取られていく．

材料は，外径11mm，肉厚1mm，長さ5,000m／本の銅パイプを用いた．遊星ボールダイスの回転速度は，N＝20,000rpmとし，60m/分で引抜き加工を行った．

遊星ボールダイスは小型化し，ボール径は30.0mm，個数は3個で，アウタレースの内外径は各々，70及び100mmとした．この寸法より，縮径加工後のパイプ外径は10mmで縮径率は9.1％となる．ダイス内はマシン油で強制潤滑し，冷却及び微小な摩耗粉の排出を行った．潤滑油の循環経路には，オイルクーラー，微粉末除去用のフィルタ及び磁石を設けた．

加工されたパイプの表面粗さは，触針式表面粗さ計で測定を行った．ダイスの寿命は，高速回転中の異常音や振動によって判定した．また，ボール表面やアウタレース内周面の摩耗状況の観察を行うとともに，加工されたパイプの渦流探傷［5］によって，銅パイプへのスチールボールやアウタレースの摩耗粉のかみ込み検出も行った．なお，内面溝付きパイプの製造方法は，6.5.1に記述する．

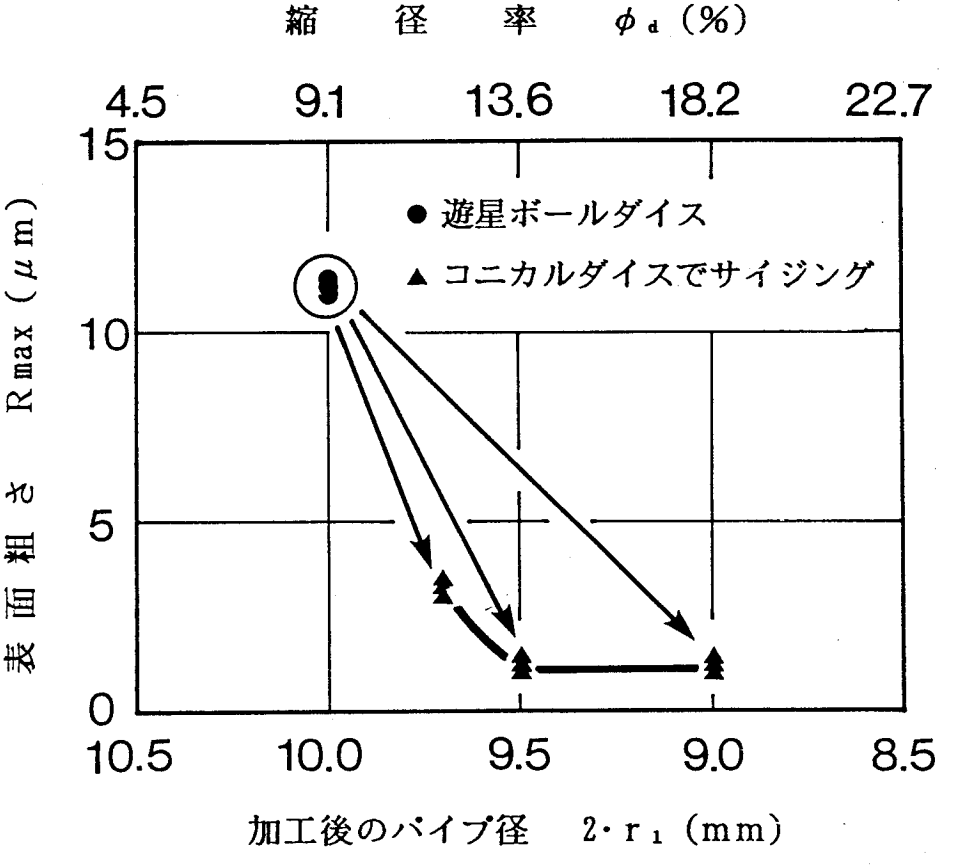


図6.2　コニカルダイス併用によるパイプ表面粗さの改善

6.3 製品性状

図6.2に，加工後のパイプ表面のR_{max}を示す．遊星ボールダイスのみの加工では，約11～11.5μmであり，式(3-4)から求めた計算値の10.9μmとほぼ一致し，ばらつきも少ない．r_B＝15mm，f_D＝3mm/revという本章の加工条件では，表面粗さはやや大きいものとなっているが，f_Dを小さくするかr_Bを大きくするとR_{max}が小さくなり，製品の表面性状の改善が可能である．しかし，f_Dを小さくすると引抜き速度v（＝f_D・N)が犠牲となるので，遊星ボールダイスの直後にサイジング用のコニカルダイスをセットした．遊星ボールダイスで外径10.0mmに加工されたパイプは，9.7mmに再絞りすることによって表面粗さが改善され，R_{max}＝3.0～3.6μmとなった．さらに，再絞り量が大きい9.5mmや9.0mmの場合には，R_{max}＝1.0～1.5μmの非常に良好な加工品が得られた．

6.4 ダイス強度の検討

6.4.1 ダイスのアウタレース自身の遠心力

高速引抜き加工の場合，ダイスが高速で回転するため，アウタレースには，加工反力の他にボールおよびアウタレース自身の遠心力が作用し，アウタレースの強度が問題となる．アウタレースの肉厚は軸方向に一様なので，遠心力による軸方向の応力成分は無視することができ，半径方向応力と円周方向応力の平面応力問題として応力を求めると，内周面における円周方向応力が最大で，次の式で与えられる［7］．

$$(\sigma_\theta)_{max} = \frac{\gamma_0}{g}\left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \frac{3+\nu}{4}\left\{1+\frac{1-\nu}{3+\nu}\left(\frac{r_a}{r_b}\right)^2\right\} r_b^2 \qquad (6\text{-}1)$$

ここで，r_aおよびr_bはアウタレースの内半径および外半径であり，g(重力加速度)は9.8m/sec^2，γ_0(アウタレースの密度)は7.8g／cm^3，ν(ポアソン比)は0.3として計算した例を図6.3に示す．回転速度が速く，ダイスの半径が大きいほど応力は大きくなる．

本章のダイスによる加工の場合には，r_a＝35mm，r_b＝50mm，N＝20,000rpmであり，$(\sigma_\theta)_{max}$ =77.9MPaとなり，十分に安全な値である．さらに，30,000rpmに増速しても応力的には安全範囲であることが図から分かる．

$(\sigma_\theta)_{max}$ はNやr_aおよびr_bの2乗に比例するので，高速化にあたっては，Nの影響を相殺するためにダイスの小型化が必要である．

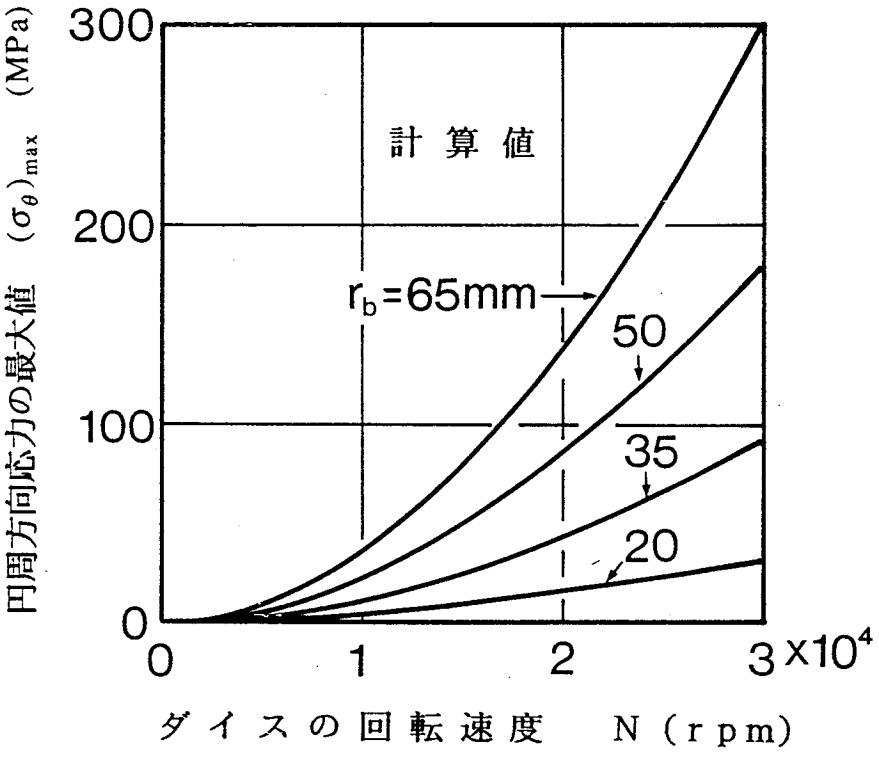


図6.3 アウタレースの遠心力による最大引張り応力に対するレース径と回転速度の影響
(r_a/r_b=0.7，r_a：アウタレースの内半径，r_b：アウタレースの外半径)

6.4.2 加工反力およびボールの遠心力

ダイス内壁面に作用する外力は，パイプの加工反力W_wとボールの遠心力W_gである．まず，W_wは，ボールとパイプの接触面の外周長さlとパイプの厚さtとせん断降伏応力τの積で表すと実験値とよく一致するので［8］，

$$W_w = l \cdot t \cdot \tau \qquad (6\text{-}2)$$

とした．ここでlは次のようにして求められる．ボールとパイプの接触領域をy方向から見ると，図6.4(a)のABNCAとなる．x_Nは，任意の点Nを含むz軸直角断面(c)に示すx_Nに対応しており，パイプおよびボールの断面外周を示す円の交点のx座標である．接触境界線の長さlは，点A，B，Cのz座標をZ_A，Z_B，Z_Cとすると，

$$l = (Z_A - Z_C) + \int_{Z_C}^{Z_B} \sqrt{1 + (dx/dz)^2}\,dz + \int_{Z_B}^{Z_A} \sqrt{1 + (dx/dz)^2}\,dz \qquad (6\text{-}3)$$

である．ここで点Oを原点とすると，

$$Z_C = m/2 \qquad (6\text{-}4)$$

$$Z_B = \sqrt{r_B{}^2 - \left(r_t - r_0\right)^2} \qquad (6\text{-}5)$$

$$Z_A = m + Z_B \qquad (6\text{-}6)$$

である．ボールの断面の外周円は，

$$x^2 + \left(y - r_t\right)^2 = r_B{}^2 - \left(z - m\right)^2 \qquad (6\text{-}7)$$

パイプの外周円は，

$$x^2 + y^2 = r_0{}^2 \qquad (Z_B \leqq z \leqq Z_A) \qquad (6\text{-}8)$$

$$x^2 + y^2 = \left(r_t - \sqrt{r_B{}^2 - z^2}\right)^2 \qquad (Z_C \leqq z \leqq Z_B) \qquad (6\text{-}9)$$

で表されるので，dx/dz は次のようになる．

$$\frac{dx}{dz} = \frac{-A(z - m)}{r_t\sqrt{r_0{}^2 - A^2}} \qquad (Z_B \leqq z \leqq Z_A) \qquad (6\text{-}10)$$

$$\frac{dx}{dz} = \sqrt{\frac{(2z - m)\cdot m}{2r_t}}\cdot\frac{dB}{dz} + \frac{B\sqrt{m}}{\sqrt{2(2z - m)\cdot r_t}} \qquad (Z_C \leqq z \leqq Z_B) \qquad (6\text{-}11)$$

ただし，

$$A = \frac{r_0^2 + r_t^2 - r_B^2 + (z - m)^2}{2r_t} \tag{6-12}$$

$$B = \left\{2r_t - 2\sqrt{r_B^2 - z^2} - \frac{(2z - m)\cdot m}{2r_t}\right\}^{1/2} \tag{6-13}$$

$$\frac{dB}{dz} = \left(\frac{z}{\sqrt{r_B^2 - z^2}} - \frac{m}{2r_t}\right)\cdot\left(2r_t + \frac{m^2}{2r_t} + C\right)^{-1/2} \tag{6-14}$$

$$C = -\left(\frac{z\cdot m}{r_t} + 2\sqrt{r_B^2 - z^2}\right) \tag{6-15}$$

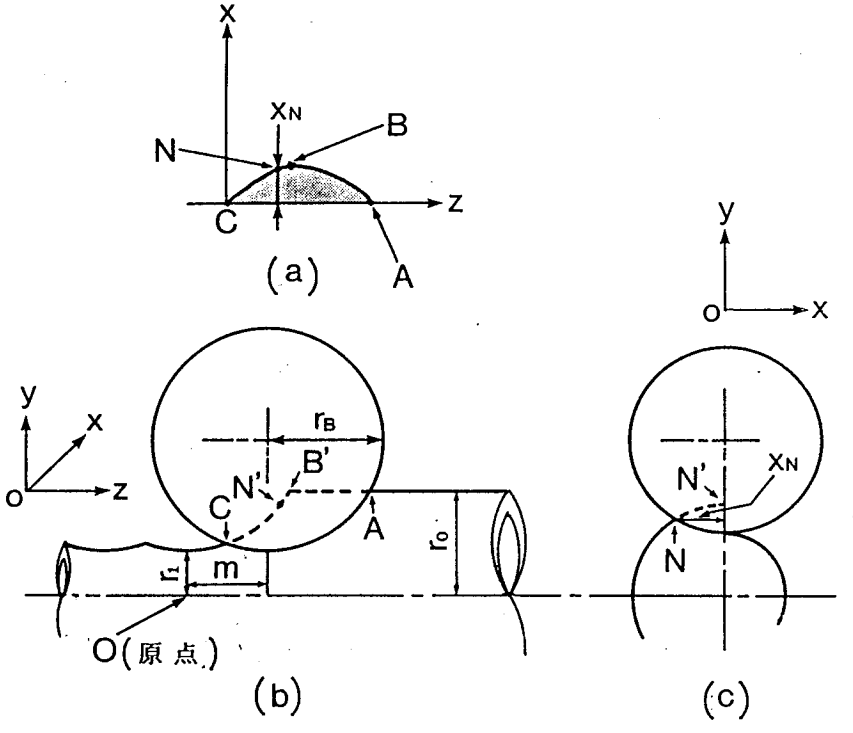


図6.4　ボールとパイプの接触境界を示す模式図

式(6-3)に式(6-4)～(6-6)及び(6-10)～(6-15)を代入し，シンプソンの公式を用いると，接触境界線の長さlが求められる．銅パイプのτの値を150MPaとした場合の計算例を図6.5に示す．前記の高速加工は，ボール径が30mm，縮径率が9.1％であるから，W_wは約1.4kNとなる．

図中の黒丸印は許容される最小ボール径を示している．この値は加工前後の

パイプ径r_0とr_1の差が，ボール半径r_Bよりも大きくなる加工は幾何学的に不可能という条件から計算したものである．なお，実際の加工ではさらにボール径を大きくしなければ，パイプにまくれ現象が発生する．

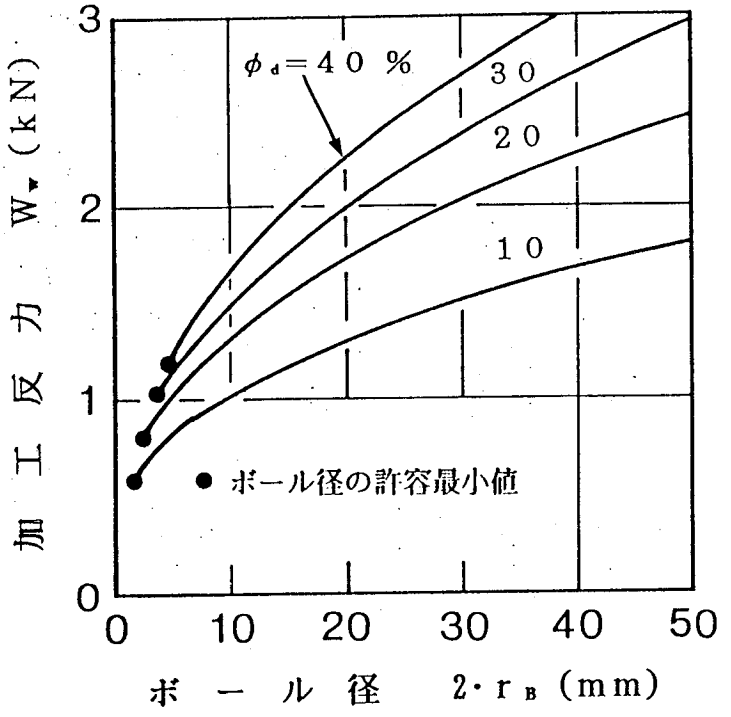


図6.5　加工力に対するボール径及び縮径率の影響

次にW_gは，

$$W_g = \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \cdot \frac{V \cdot r \cdot \gamma_B}{g} \tag{6-16}$$

で求められる．ここで，γ_B及びVはボールの密度及び体積，rはダイス軸からボール中心までの距離である．図6.6に種々の条件に対する計算例を示す．図から分かるように，ボール径が大きいほど，また回転速度が速いほどW_gは急激に大きくなる．今回の実験では，ボール径が30mm，回転速度が20,000rpmなので，ボール1個当たり約10kNの遠心力が働いており，加工力の約7倍の値である．すなわち，高速加工においては，遠心力は加工力に比べてはるかに大きな値となる．

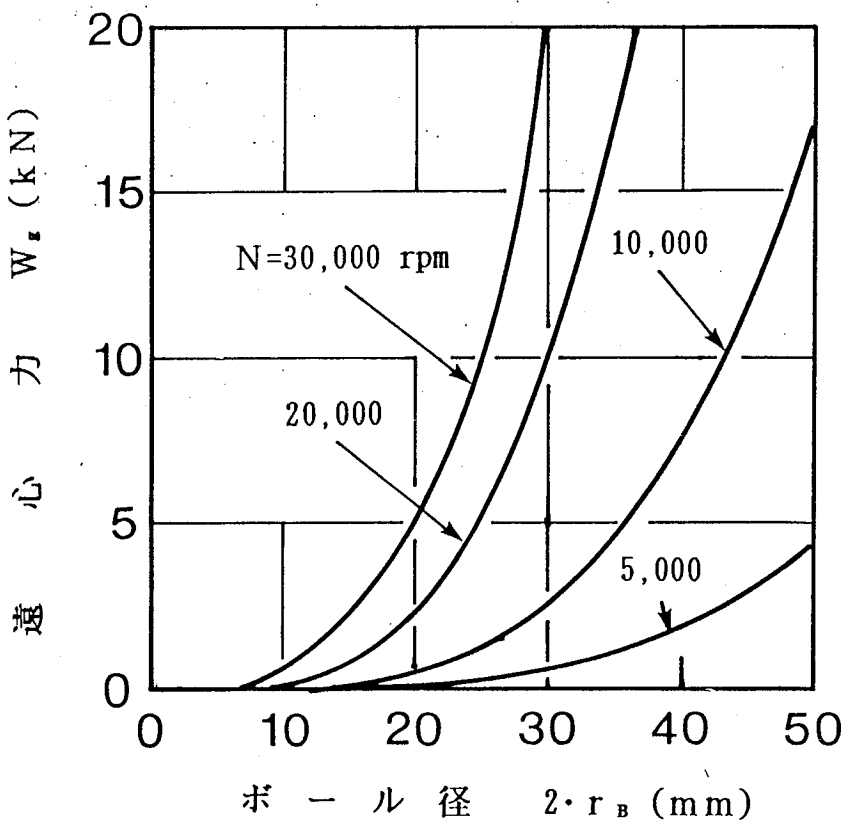


図6.6　ボールの遠心力に対する径及び回転速度の影響
(r_1=5mm)

6.4.3　ダイスの寿命

回転の高速化にともなう遠心力の増大によって，アウタレースの欠陥発生確率は増加する［9］．そこで，転がり軸受けの定格寿命計算式を用いて，本ダイスの寿命を検討した．基本定格寿命L_{10}は，

$$L_{10} = (C_r / P_r)^3 \cdot 10^6 \tag{6-17}$$

で計算される［10］．ここで，P_rは動等価ラジアル荷重であり，本ダイスでは，前項 6.4.2 のW_wとW_gより，

$$P_r = n\,(W_w + W_g) \tag{6-18}$$

で求められる(ボールの自重は無視する)．次に，C_rは基本定格荷重であり，次式で求める［10］．

$$C_r = f_c\,(i\cdot\cos\alpha)^{0.7}\cdot n^{2/3}\cdot D^{1.8}\cdot 9.8\cdot 10^{-3} \qquad (D\leqq 25.4\mathrm{mm}) \tag{6-19}$$

$$C_r = 3.647\cdot f_c\,(i\cdot\cos\alpha)^{0.7}\cdot n^{2/3}\cdot D^{1.4}\cdot 9.8\cdot 10^{-3} \qquad (D>25.4\mathrm{mm}) \tag{6-20}$$

iは転動体の列数，αは呼び接触角，nは1列あたりの転動体の数，Dは玉の直径である．また，f_cは軸受各部の形状，加工精度および材料によって決まる係数であり，遊星ボールダイスでは次のようにして値を求めた．

実験では，長さ5000mのパイプを160本，すなわち800kmの加工を行ったが，ダイスの振動，音，摩耗やパイプの渦流探傷による異常は認められなかったので，ダイスの寿命はさらに長いと考えられる．加工長さを送り速度f_Dで割ると回転数となるので，$800\times10^6/3(=267\times10^6)$回転以上の繰り返し運転に耐えることになる．従って，式(6-17)より，

$$C_r \geqq P_r\cdot 267^{1/3} \tag{6-21}$$

である．また，上で求めたように，$W_g=10\mathrm{kN}$，$W_w=1.4\mathrm{kN}$なので，式(6-18)より，

$$P_r = 34.2\mathrm{kN} \tag{6-22}$$

である．また摩擦を無視すると，$\alpha=0$となるので，式(6-19)より，

$$C_r = 3.647\cdot f_c\cdot 1^{0.7}\cdot 3^{2/3}\cdot 30^{1.4}\cdot 9.8\cdot 10^{-3} \tag{6-23}$$

であるから，式(6-21)，(6-22)，(6-23)より，

$$f_c \geqq 25.3 \tag{6-24}$$

が得られる．式(6-17)に，式(6-19)もしくは(6-20)と式(6-18)を代入すると，L_{10}が求められる．ボール径とL_{10}の関係を，f_cが一定($f_c=25$)として計算した例を図6.7に示す．加工後のパイプ表面の溝高さhを小さくするには，ボール個数を多

くするのが有利なので，図には，ボールの個数を4個とした場合の計算値も示した．

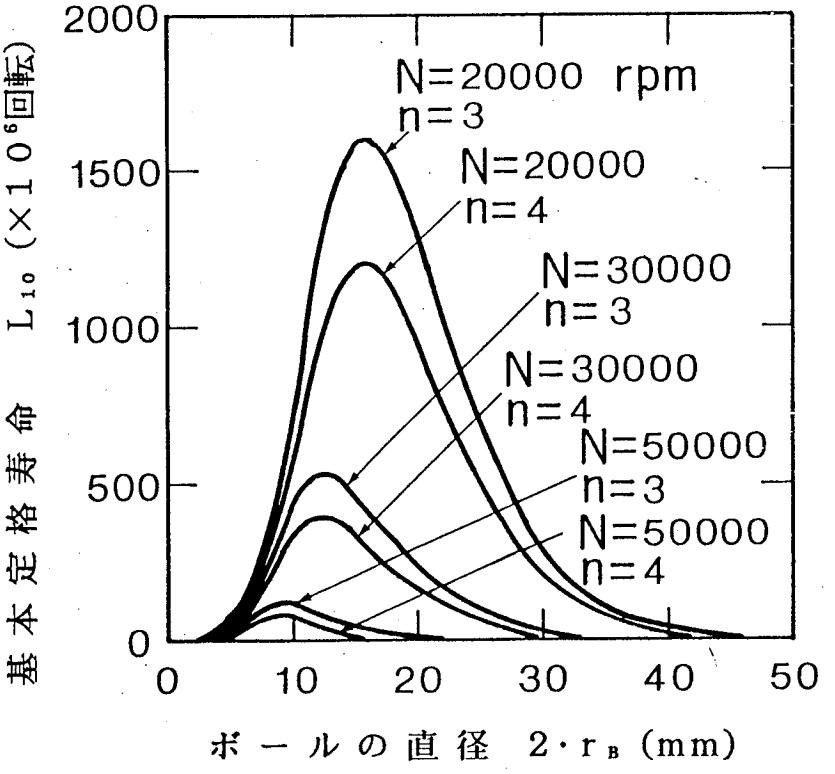


図6.7　アウタレースの寿命に対するボール径及び回転速度の影響

ダイスの回転速度Nが大きいほど，またボール個数が多いほどL_{10}は小さくなる．各Nにおいて，L_{10}が極大となるボール径$2r_B$が存在し，Nが大きいほど，その$2r_B$の値は小さくなる．本章の高速加工条件は，$2r_B$＝30mm，N＝20,000rpmであり，ボール径の選択が大き過ぎたことがわかる．ボール径を$2r_B$＝13mmとすれば，N＝30,000rpmで，より高速の加工を行っても，上記の加工の場合以上の寿命が期待できる．さらに，寿命は半減するがN＝50,000rpmの加工も可能と考えられる．

現在，単位としてmmを用いて表した軸受内径の値dと，rpmで示した回転速度Nの積(dn値)の上限が 2×10^6 程度の高速軸受も実用化されているので［11］，軸受製造技術を応用すれば，本ダイスの高速化も容易に行うことができると考えられる．ここで，高速になるほど，W_wに比較してW_gが大きくなるので，W_g

を小さくするためには，開発が進められ，摩耗特性や疲労特性についても検討が始められているセラミックボール(SiC，Si_3N_4等)［12～16］のように密度が小さい材質のボールの使用が，期待される．

6.5　内面溝付きパイプ製造への応用

6.5.1　実験方法

図6.8に示すように，遊星ボールダイスの前後に1つずつコニカルダイスをセットした．コニカルダイス⑤は，溝付きプラグ④を連結した浮きプラグ⑥を支持し，コニカルダイス①は，加工後のパイプの表面粗さを改善するためのものである．加工実験は，図6.1に示したブルブロックを利用して，N＝26,000rpm，v＝60m/分で引抜き加工を行った．ボール径は21/32インチ，個数は4個とした．銅パイプは，外径が9.3～12.7mm，肉厚が0.3～0.8mm，長さは5000mのものを用いた．

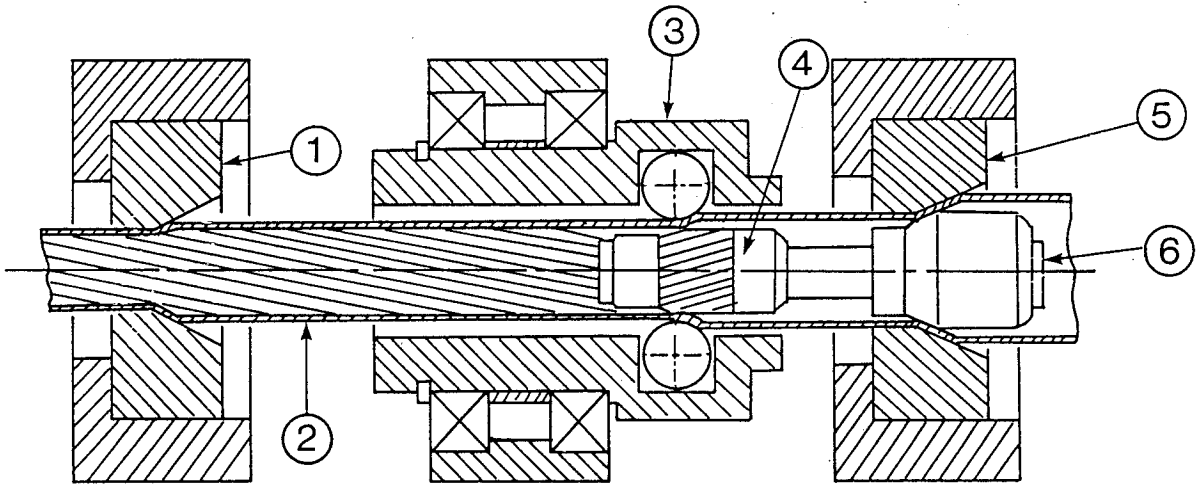


図6.8　内面溝付きパイプ製造方法の模式図
①サイジングダイス，②パイプ，③遊星ボールダイス，
④溝付きプラグ，⑤絞りダイス，⑥浮きプラグ

6.5.2 実験結果

図6.9に製品の外観写真の一例を示す．また図6.10はパイプを軸方向に半割りにして，内面に形成された溝を写した写真である．このように，内面に規則正しく溝を形成し，かつ外面は平滑な表面を持つパイプの製造を行うことができた．

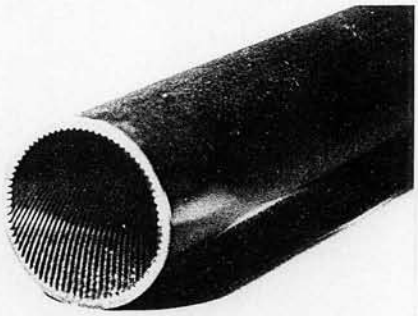


図6.9　内面溝付きパイプの外観写真

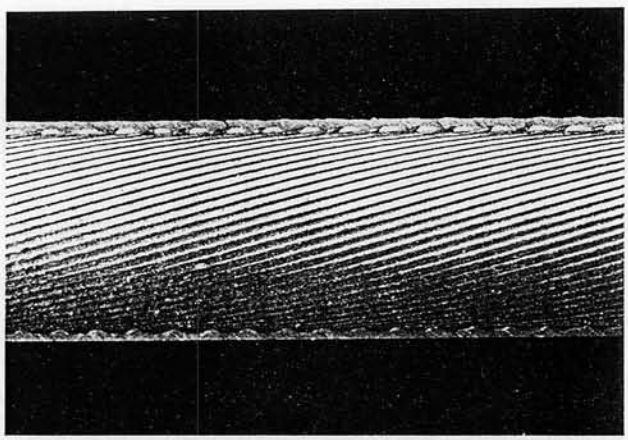


図6.10　内面溝付きパイプの断面写真

しかし，ボールおよびアウタレースの寿命は短く，各々パイプ6本および20本の加工が平均寿命である．さらに，ボールはパイプ1本の加工によって，図6.11に示すような「はちまき」状の摩耗を生じることがある．これは，ボールがパ

イプの軸方向には全く回転することなしに，加工が行われたことを示している．ボールは，アウタレース，パイプ，スラスト軸受けの受圧板の3点で支持されており，各点での力の大小関係によって，回転するか否かが決まるので，今後，この解析が必要である．

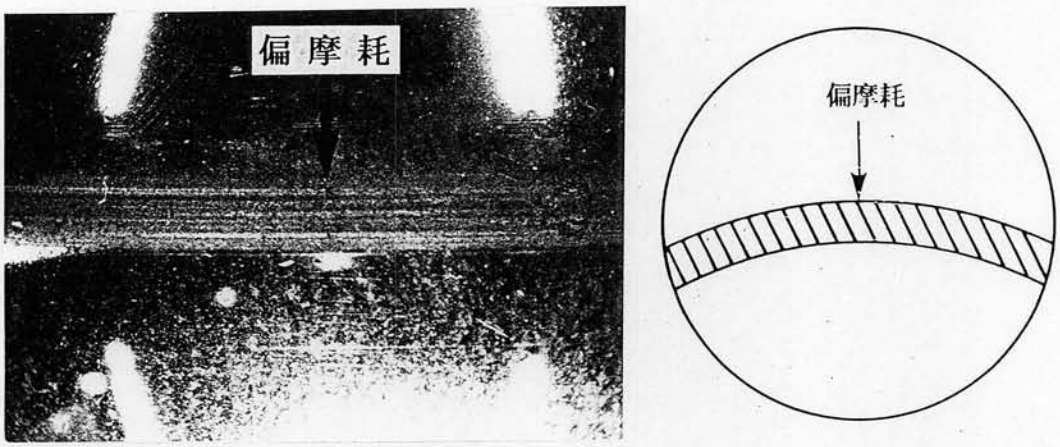
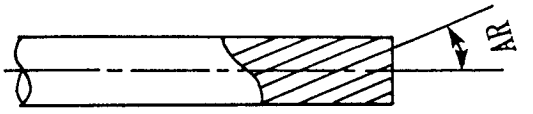


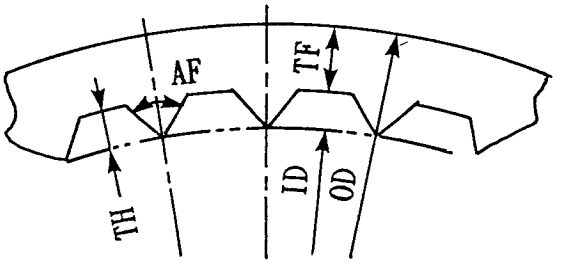
図6.11　偏摩耗が生じたボール

図6.12の模式図に示した内面溝のリード角(ねじれ角AR)は，図6.8中の溝付きプラグ④ のリード角とは異なる．これは，内面溝が形成された後にコニカルダイス①(サイジングダイス)によって再び縮径されるためである．サイジングダイス①で外径は縮径されるが，図6.12の底肉厚TFやフィン高さTHは，ほとんど変化せず，パイプの断面積は減少し軸方向に伸びる．通常の引抜き加工では，引き太りで肉厚が大きくなるが，コニカルダイス①に対して遊星ボールダイス③がバックテンションを加えるために，パイプの断面積が減少すると考えられる．そこで，体積一定の条件より，縮径率の増大とともにパイプの伸びも増大し，リード角が減少することになる．

図6.13に，サイジングダイスによる縮径率とリード角の変化の関係を示す．縮径率が大きくなると，それにともなってリード角は小さくなっている．



(a) リード角



(b) 溝直角断面

(AR:リード角,AF:フィン頂角,TF:底肉厚
TH:フィン高さ,ID:内径,OD:外径)

図6.12　内面溝付きパイプのリード角の溝寸法

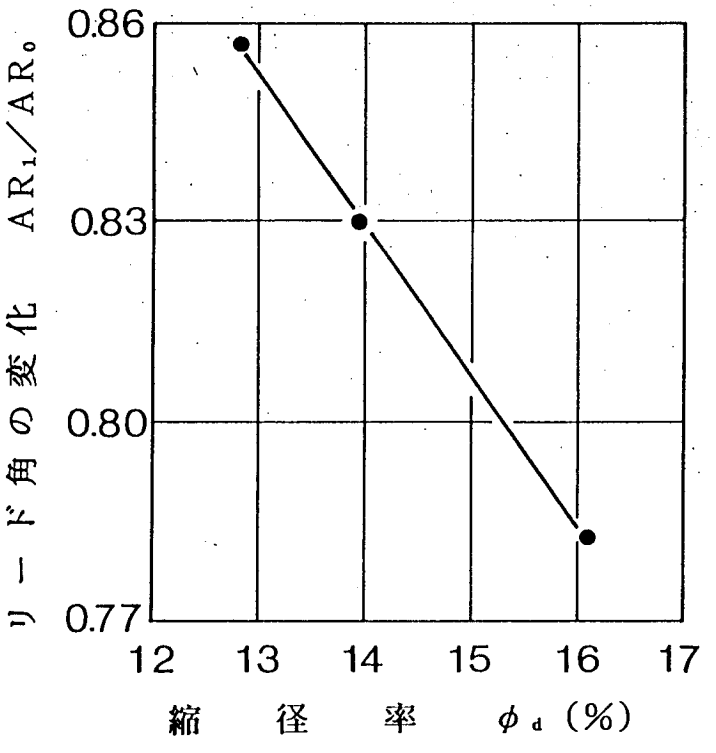


図6.13　サイジングダイスによるリード角の変化

6.6 結　言

高速加工を行い，加工後の表面性状およびダイスの強度について検討した．また，熱交換器用部品として需要の多い，内面溝付き銅パイプの製造に対する遊星ボールダイスの適用を試みた．その結果をまとめると次の通りである．

(1)　ボールの直径および個数が30mmおよび3個の遊星ボールダイスを用いて，N＝20,000rpm，v＝60m／分の加工条件で，外径11mm，肉厚1.0mmの銅パイプを外径10mmに連続的に加工することができた．この時のダイス寿命は長く，延べ800kmのパイプを加工しても，異常音や振動は発生しなかった．

(2)　ダイス自身の遠心力がダイス強度に及ぼす影響は小さい．しかし，ボールの遠心力は，回転速度Nと共に急激に増大し，加工反力よりもはるかに大きな値となり，ダイス強度に及ぼす影響も大きい．

(3)　60m／分の高速加工を行うと，遊星ボールダイスのみでは，表面粗さが10μm以上になるが，サイジングダイスを併用することによって，表面粗さR_{max}が1～1.5μmのパイプが得られた．

(4)　遊星ボールダイスの前にコニカルダイスを設置し，ボールダイス部分に溝付きプラグを支持することによって，内面溝付き銅パイプの製造を試みた．その結果，ボールやアウタレースの寿命は縮径加工のみの場合よりも短くなったが，内面に規則正しい溝を有し，外表面の性状が良好なパイプを製造できることが示された．

第７章　セラミックスと金属パイプの複合化

7.1　緒　言

最近，セラミックスは耐熱性，対摩耗性，耐食性などに優れた構造用新素材として注目されている．そして，これらの特性を生かし，引抜き工具［1,2］，鍛造型［3,4］，切削工具等［5,6］に対するジルコニア，炭化ケイ素，アルミナ，窒化ケイ素，cBN（立方晶窒化ホウ素）等の適用に関する研究が活発に進められつつある．化学工業や食品工業の分野においても，耐熱性や耐食性の要望が強く，アルミナパイプの実用化が始まっている．ところが，セラミックスは衝撃強度が低く，さらに接合が難しいという欠点を有している．

このため，外層を金属で被覆した複合パイプにすることによって外部からの衝撃力を緩和したり，金属部分を利用して接合を行ったりしている．複合パイプ製造方法としては，焼ばめ，接着，鋳ぐるみ［7］，コニカルダイスによる引抜きを利用したかしめ［8］，磁力によるかしめ［9,10］，遠心テルミット法［11］等の方法が行われている．しかしながら，熱応力，工程の複雑さ，大きな加工力，かしめ力の不足，遠心テルミット法におけるセラミックスの強度不足等が問題となっている．

そこで，本章では遊星ボールダイスによる縮径加工を利用してセラミックスと金属の複合パイプを製造する方法を試みた．遊星ボールダイスによる加工は，必要な力が小さいうえに，高速加工が可能なので高効率で簡単に加工が行なえる．従って，複合パイプの工業的製造に有用と考えられる．

本章では，内層にアルミナ，外層にアルミニウム合金，純銅，ステンレスのいずれかを組合わせた2層のセラミックス－金属複合パイプについての製造実験を行った．アルミナの表面形状，外層パイプの材質やその縮径率及びしごき率が，必要な加工力，かしめ強度，パイプの変形状態に及ぼす影響について検討

した．そして，本方法は，小さな加工力によって，かしめ強度の大きな複合パイプを製造するための有望な方法であることを示した．

7.2　実験方法

7.2.1　供試材料

内層には純度95％のアルミナ（日本特殊陶業製KP95）のパイプを用いた．寸法は，外径16.3mm，内径5mm，長さ50mmである．かしめ力に対する表面形状の影響を調べるために，表面粗さR_{max}は約3μmと約10μmの2種類に変化させた．さらに，後者については幅が2もしくは1mm，深さが1もしくは0.5mmの円周溝を加工した試料も準備した．この材料の特性値を表7.1に示す．機械的強度が大きいと同時に，電気絶縁性や耐酸及び耐アルカリ性にも優れた材料である．

表7.1　アルミナパイプの材料特性

ヤング率	E_c	320 GPa
ポアソン比	ν_c	0.25
比重		3.7
ヌープ硬度	(4.9N)	1500
圧縮強度		>2 GPa
曲げ強度		350 MPa
熱膨張率	α_c (25～800℃)	7.8×10^{-6} ℃$^{-1}$
比抵抗	(25 ℃)	$>10^{14}$ Ω·cm
耐薬品性		アルカリ，酸

外層に用いたパイプは，アルミニウム合金（A6063TD），銅（C1220），ステンレス（SUS304）である．外径が22mm，内径が16及び18mmの引抜きパイプの内外径を旋削加工し，表7.2に示す10種類の寸法を準備し，縮径率及びしごき率を変化させた．なお，NO.6～10はアルミニウム合金のみ行った．また，いずれのパイプも縮径加工前には焼鈍処理は施さなかった．各材料の機械的特性値を表7.3に示す．引張り試験は，パイプからJIS 12A型試験片を切出して行った．なお，ステンレスのn値は，ひずみ量依存性が大きいので［12］，軸方向ひずみが0.2以下の領域における値を示した．

表7.2　金属パイプの寸法と縮径率及びしごき率

番　号	パイプの初期内径 $2 \cdot r_{a0}$ (mm)	パイプの初期外径 $2 \cdot r_{b0}$ (mm)	しごき率 $\eta=1-t_1/t_{01}$ (%)	縮径率 $\phi_d=1-r_{b1}/r_{b0}$ (%)
1	18.0	22.0	21.2	10.0
2	18.0	21.9	18.6	9.6
3	18.0	21.8	15.9	9.2
4	18.0	21.7	13.0	8.8
5	18.0	21.6	10.2	8.3
6	16.3	20.6	20.4	3.9
7	16.3	20.5	18.0	3.4
8	16.3	20.4	15.5	2.9
9	16.3	20.3	12.8	2.5
10	16.3	20.2	10.0	2.0

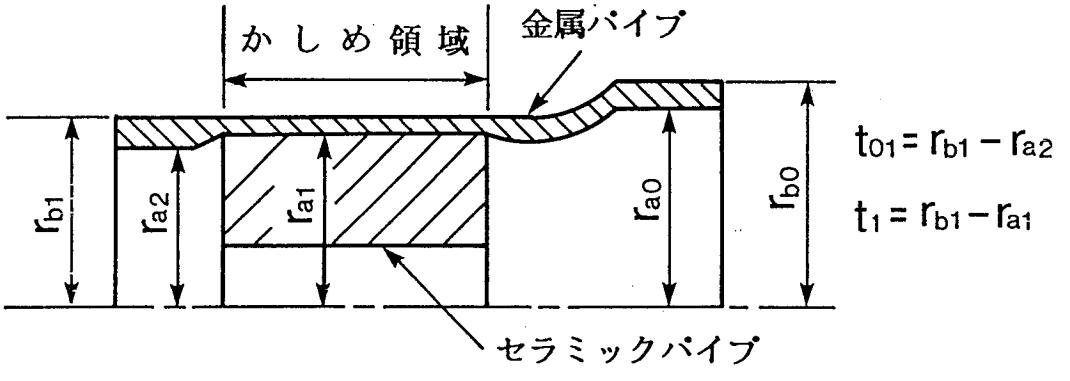


表7.3　外層金属パイプの材料特性

材　料	アルミニウム合金(A6063)	銅 (C1220)	ステンレス鋼 (SUS304)
ヤング率　E_m (GPa)	72	125	210
ポアソン比　ν_m	0.33	0.33	0.30
熱膨張率　α_m (℃$^{-1}$)	23.8×10^{-6}	16.8×10^{-6}	16.4×10^{-6}
降伏応力　Y (MPa)	200	250	320
加工硬化指数　n	0.10	0.11	0.26 (ε<0.2)

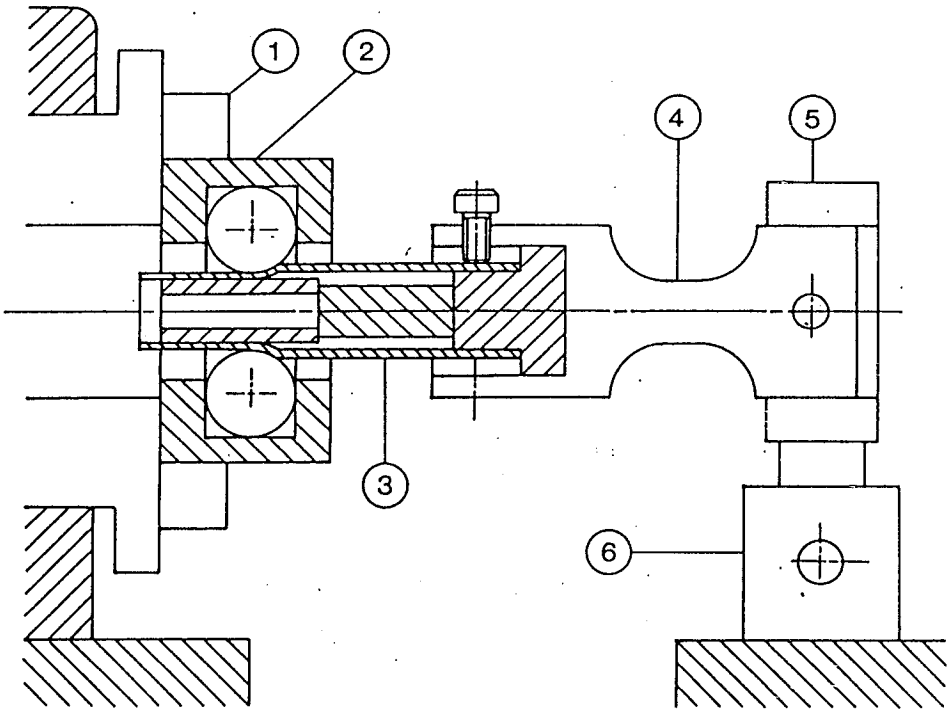


図7.1　遊星ボールダイス（ＰＢＤ）によるかしめ加工の実験装置
①旋盤のチャック，②ＰＢＤ，③パイプ，④ロードセル
⑤サポート，⑥工具台

7.2.2　複合パイプの製造と強度評価

加工には，アウタレースの内径96mm，ボール径が38.1mmで個数は3個の遊星ボールダイスを使用した．図7.1に示すように，このダイスを旋盤のチャックでつかんで回転させ，図7.2のようにロードセルに固定したパイプをダイス中に押し込んで，外層の金属パイプを縮径することによって複合パイプの製造を行った．ダイスの回転速度は200rpm，ダイス1回転当りのパイプの送りは0.5mm/revとし，潤滑剤はマシン油を用いた．

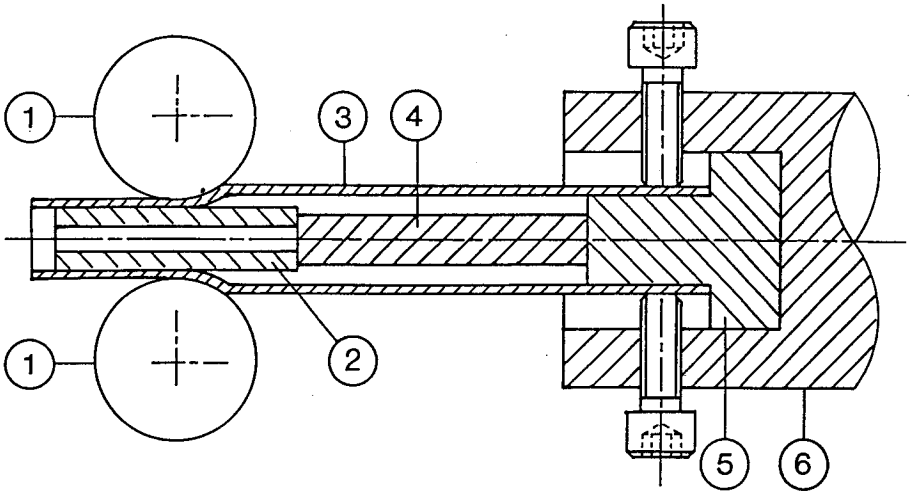


図7.2　かしめ加工の模式図
①スチールボール，②セラミックパイプ，③金属パイプ，
④鋼棒，⑤ストッパー，⑥ロードセル

外層パイプのひずみは，パイプ内表面につけた標点によって軸方向ひずみε_zを，切断研磨した軸直角断面から肉厚ひずみε_tを求めた．また，加工後の表面粗さは，軸方向に切断したパイプを，触針式表面粗さ計（テイラーホブソン社製タリサーフ4）によって内外面ともに測定した．

パイプのかしめ強度は，図7.3（a）に示すようにセラミックスパイプを押し抜き，必要な荷重F_cによって評価した．なお，外層金属は図7.3（b）中の陰影部以外を旋削した後に試験を行った．また，試験温度は，室温から300℃まで変化させた．

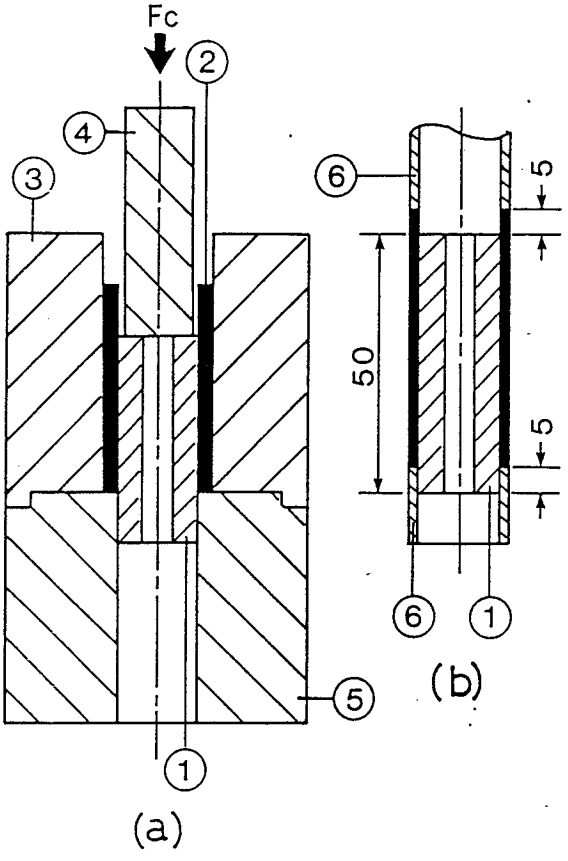


図7.3　　かしめ強度の測定方法
①セラミックパイプ，②金属パイプ，③ガイドシリンダ
④パンチ，⑤ダイス，⑥旋削で除去する部分

7.3　外層パイプの状態

7.3.1　表面粗さ

図7.4にアルミナーステンレス複合パイプの製造例を示す．電磁力を利用した場合には，しわの発生が問題となるが［9］，本加工法ではステンレス以外のアルミニウム合金や銅の場合にも，そのような問題は生じなかった．特に，ステンレスでは図に示すように美しい鏡面が得られた．

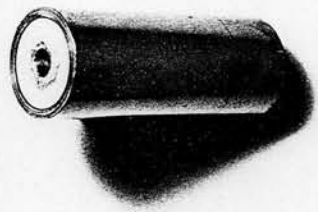


図7.4　　アルミナとステンレス鋼の複合パイプの写真

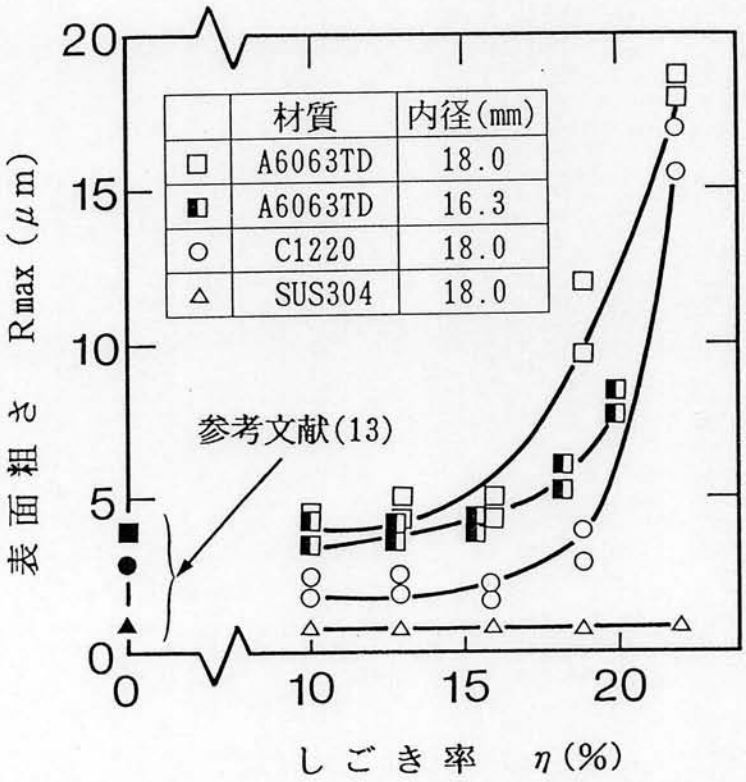


図7.5　　縮径されたパイプの表面粗さに対するしごき率の影響

図7.5に，かしめ加工後の金属パイプの外表面の粗さを示す．ステンレスのR_{max}は，ほぼ1μmの一定値となった．かしめを伴わない縮径加工のみの場合には，中黒印で示すようにR_{max}はかなり小さい［13］．しかし，今回の加工ではアルミニウム合金や銅の場合には表面が荒れ易く，初期外径が大きい領域では，はく離も生じた．これは，かしめと同時にしごき加工も行われ，強加工になるためと考えられる．パイプの初期寸法としごき率ηの関係の計算値は，表7.2に示す通りである．ηは，しごき加工前後の肉厚t_{01}及びt_1によって次の式で定義される．

$$\eta = 1 - \frac{t_1}{t_{01}} \tag{7-1}$$

ここで，t_1は表7.2の記号を用いて，

$$t_1 = r_{b1} - r_{a1} \tag{7-2}$$

で求められる．一方t_{01}は，内層にアルミナパイプが無い状態で外層パイプの縮径加工のみが行われた場合の肉厚を示す．その場合にはε_zが零であるから［14］，体積一定の条件から，$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_t$が成立つ．従って，

$$t_{01} = r_{b1} - \sqrt{r_{b1}^2 + r_{a0}^2 - r_{b0}^2} \tag{7-3}$$

で求められる．表7.2に示すように，NO.1～5では縮径率は8.3～10.0％と少ししか変化しないが，しごき率は10.2～21.2％と2倍以上の差がある．NO.6～10も同様の傾向を示すが縮径率の絶対値が小さく，このことが，図7.5のアルミニウム合金の表面粗さの差の原因と考えられる．

図7.6に，加工後の金属パイプの内表面の粗さを示す．アルミニウム合金，銅，ステンレスの順に大きく，初期外径の増加と共に増大する傾向を示している．なお，NO.6～10のアルミニウム合金の場合は，図示したNO.1～5の値とほとんど同一である．すなわち，外層金属の降伏応力が小さく，しごき率が大きいほど内表面の粗さは増大している．

また，アルミナの表面粗さが大きい場合には，金属パイプの内表面の粗さも大きくなっている．以上の傾向は，硬度が大きく剛体とみなせるアルミナの表面の形状が，かしめ加工によって金属パイプの内面に転写されるためと考えられる．

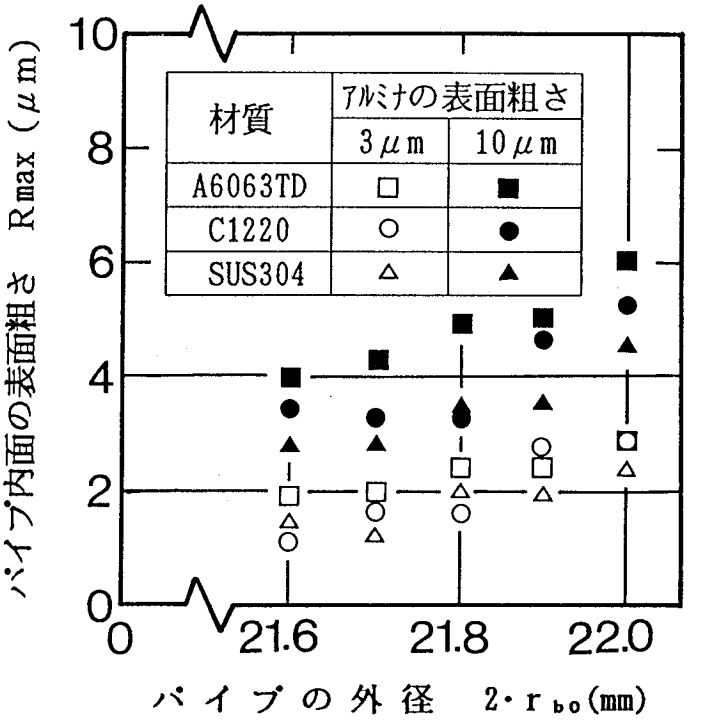


図7.6　アルミナの外表面の粗さと縮径された金属パイプ内表面の粗さの関係

7.3.2　寸法変化

図7.7に金属パイプの初期外径と軸方向ひずみε_z，肉厚ひずみε_t，円周方向ひずみε_θの関係を示す．加工前後の長さをl_0及びl_1，内半径をr_{a0}及びr_{a1}，外半径をr_{b0}及びr_{b1}，肉厚をt_0及びt_1とすると，

$$\varepsilon_z = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \tag{7-4}$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)$$

$$= \ln\left(\frac{r_{b1} - r_{a1}}{r_{b0} - r_{a0}}\right) \tag{7-5}$$

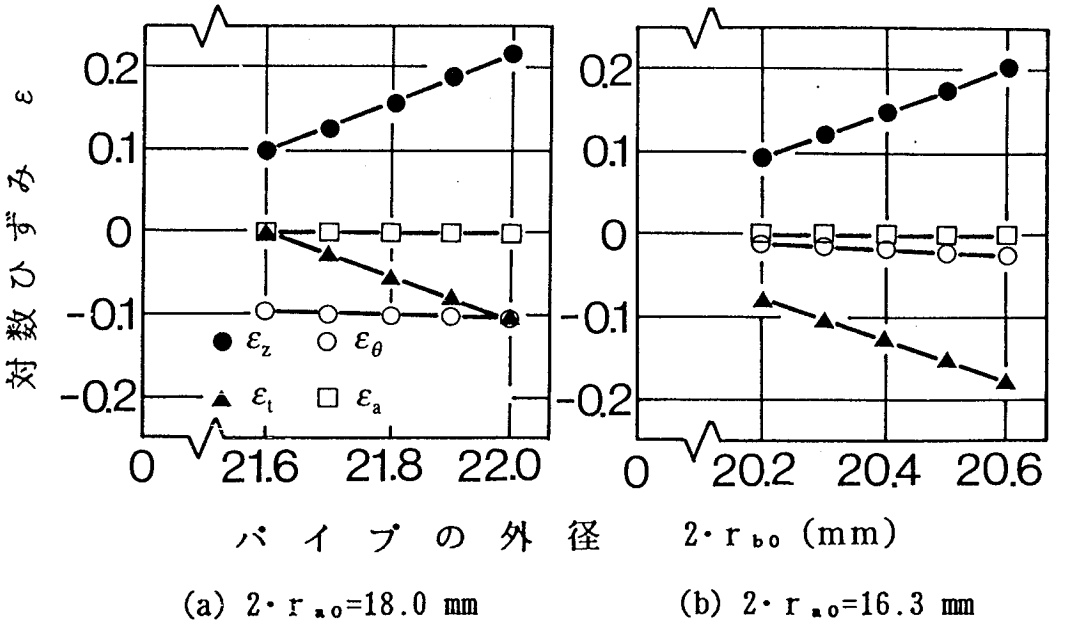


図7.7　パイプの初期外径と縮径後のひずみの関係
（2・r_{a0}：初期内径，　ε_z：軸方向ひずみ，
ε_θ　：円周方向ひずみ，ε_t：肉厚ひずみ，
ε_a　：垂直ひずみの和）

と表される．また，ε_θは，肉厚方向中央部分で代表し，次式で表すことにする．

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(\frac{r_{a1} + r_{b1}}{r_{a0} + r_{b0}}\right) \tag{7-6}$$

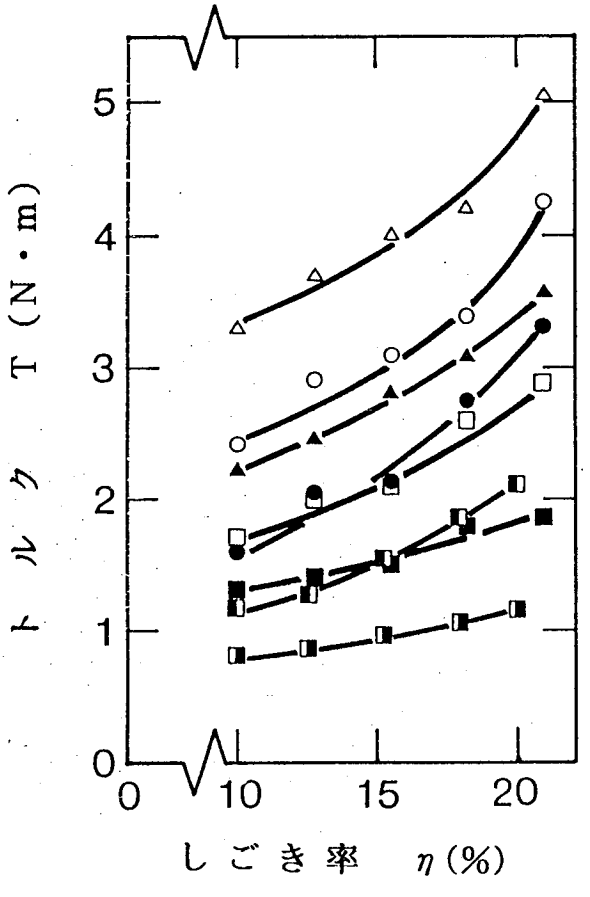
いずれのパイプ外径の場合にも，加工後のパイプ内径は，内層のアルミナの外径に等しく16.3mmとなり，外径は遊星ボールダイスの寸法から幾何学的に求められる19.8mmとなった．初期内径の異なる図7.7(a),(b)ともに，ε_θ，ε_tは負の値で初期外径にほぼ比例して大きくなった．内側のアルミナがプラグとして作用し外層パイプは縮径されると同時にしごき加工を受け，材料は軸方向にも流れる．従って，初期外径が大きく肉厚が厚いパイプほど，ε_zは大きな正の値となった．そして，図から分かるように全てのパイプで体積一定の条件がほぼ満足された．従って，長さl_1の製品を得るために供給すべきパイプの長さl_0は，

$$l_0 = l_1 \frac{r_{b1} - r_{a1}}{r_{b0} - r_{a0}} \tag{7-7}$$

で求められる．

7.4　押し込み力及びトルク

図7.8及び図7.9に，加工に必要なトルク及び押し込み力を示す．かしめを行うか否かにかかわらず，加工量が大きいほど，トルク，押し込み力ともに増大する．また，かしめの有無によるトルク及び押し込み力の差は，多少のばらつきは有るがステンレス，銅，アルミニウム合金の順に大きく，これは各材料の降伏応力の大小に対応している．なお，図示はしていないが，アルミナパイプの表面粗さの差は約7μmと小さく，これによるトルク及び押し込み力の差は認められなかった．



記　号

	かしめ有り	かしめ無し	内径(mm)
SUS304	△	▲	18.0
C1220	○	●	18.0
A6063TD	□	■	18.0
A6063TD	◧	◨	16.3

図7.8　加工に要するトルクに対するしごき率の影響

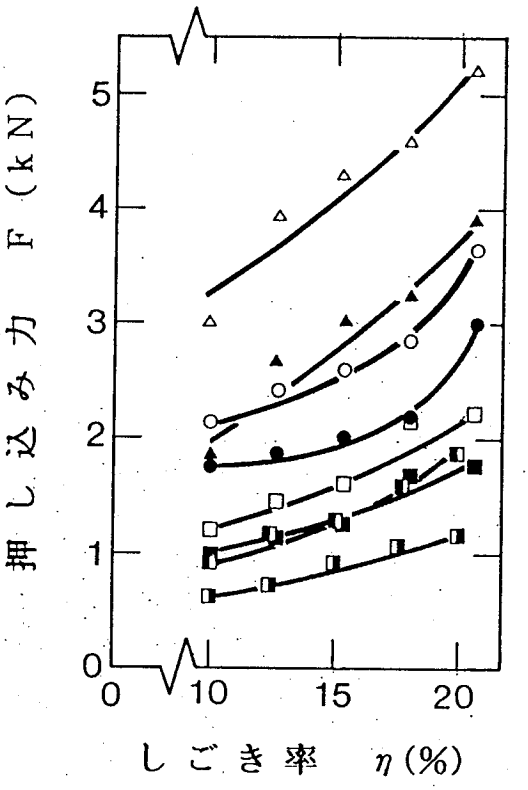


図7.9　加工に要する押し込み力に対するしごき率の影響
（記号は図7.8と同じ）

図7.10に，コニカルダイスと遊星ボールダイスの軸方向推力の比較を示す．遊星ボールダイスの値は，せん断降伏応力τが引張り降伏応力Yの $1/\sqrt{3}$ になるとして，図7.9の実験値から換算した．コニカルダイスの場合の引抜き力F_Dは，加工硬化及びせん断変形を無視して次式で計算した［15］．

$$F_D = 2\pi \cdot D \cdot t_1 \cdot \tau \cdot (1 + \mu \cdot \cot\alpha) \times \ln\frac{t_{01}}{t_1} \qquad (7\text{-}8)$$

ここで，Dはパイプの平均直径，μは摩擦係数，αはダイスの半頂角である．コニカルダイスによるしごき率が約10～20％の場合に対して，所要軸力が低くなる条件として，ダイス角α＝10度［16］，μ＝0.05として計算した．この場合においても，遊星ボールダイスの方がコニカルダイスに比べて約1/2から1/3の小さな所要軸力の値を示している．特に，パイプ径が大きくしごき率が大きくなるほど，遊星ボールダイスの優位性が顕著となっていく．

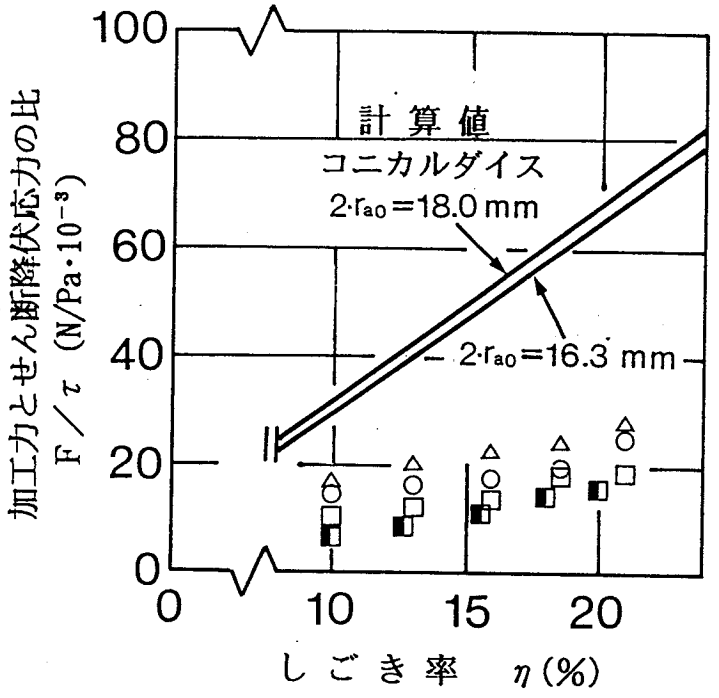


図7.10　遊星ボールダイスとコニカルダイスの所要軸力の比較
（ダイスの半頂角：α=10°，摩擦係数：μ=0.05
F：所要軸力，τ：せん断降伏応力）

7.5　かしめ強度

図7.11に，室温におけるかしめ強度を示す．縮径率やしごき率が大きいほど，かしめ強度も大きくなっている．特徴的なことは，アルミナのR_{max}の僅かな差によって，かしめ強度に大きな差が生じることである．これは，図7.6に示したように外層パイプの内周面に，アルミナの表面形状が転写されることに関連していると考えられる．

図7.12に，かしめ強度の温度による変化を示す．温度の増加と共に，かしめ強度は低下する．かしめ強度F_Cは，内層セラミックスと外層金属との接触面圧をp，接触長さをl，摩擦係数をμ_{mc}，真実接触率をβとすると，

$$F_c = 2\pi \cdot r_{a1} \cdot l \cdot \mu_{mc} \cdot p \cdot \beta \qquad (7\text{-}9)$$

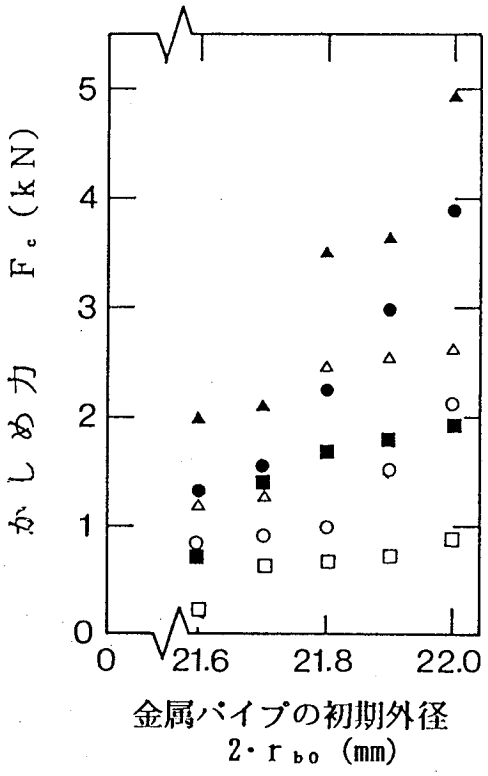


図7.11　アルミナの外表面の粗さとかしめ強度の関係
（記号は図7.6と同じ）

で近似できる．pは，

$$p = \frac{\delta \cdot k_m \cdot k_c}{k_m + k_c} \tag{7-10}$$

で求められる．ここで，δ は，しめしろを示す．また，k_m及びk_cは，金属及びセラミックスのパイプの半径方向の変形に対するばね定数に相当する値［17］である．温度が上昇すると，熱膨張率の違いのためにδが減少し，その減少量$\Delta\delta$は，温度変化を$\Delta\theta$，金属及びセラミックスの熱膨張率をα_m及びα_cとすると，

$$\Delta\delta = r_{a1} \cdot \Delta\theta \cdot (\alpha_m - \alpha_c) \tag{7-11}$$

となる．アルミニウム合金では，200～300℃の間でδが零になるので式(7-11)よりδの値は，0.026～0.039mmの範囲内と考えられる．μ_{mc}を約0.3［10］として，上のδの値を用いて式(7-9)によって計算したF_cと，室温における実験値（約2kN）が一致するためには，真実接触率βは約 8～11％となる．これは，電

磁力を利用したかしめの場合と同程度の値［10］である．外層パイプの内周面に内層パイプの形状が転写されているにもかかわらずβがこのように小さな値を示すのは，加工後のスプリングバックに起因すると考えられる［9］．

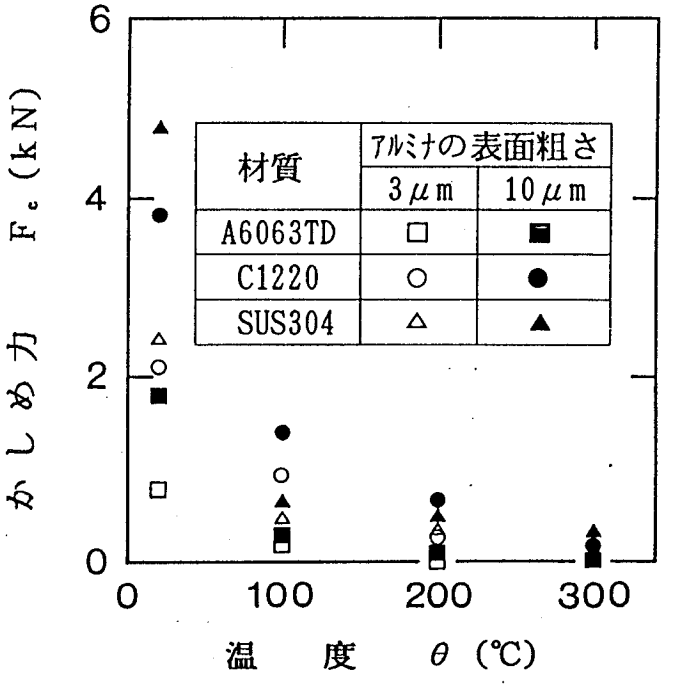


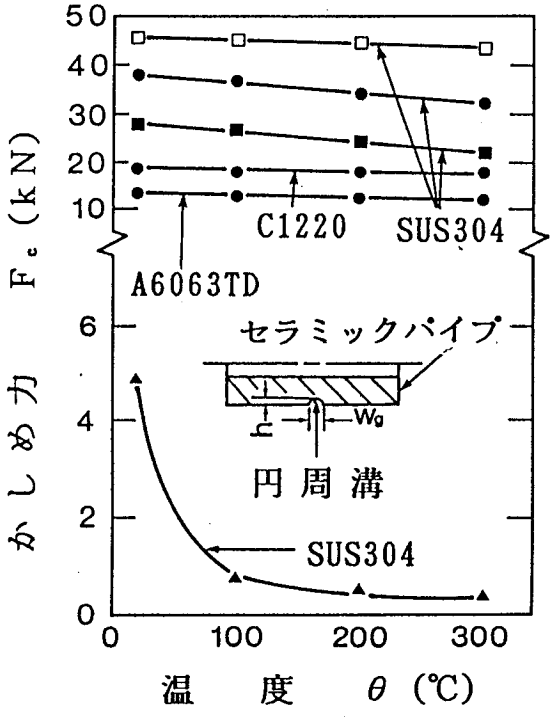
図7.12　かしめ強度に対する温度の影響
($2 \cdot r_{b0}$=22mm，$2 \cdot r_{a0}$=18mm)

図から分かるように，300℃においてはステンレスでさえ，かしめ強度が小さく使用には耐えないと思われる．かしめ加工後の熱処理によって強度を増大させる方法［9,10］があるが，本研究では，エネルギ消費の抑制と，かしめ強度の大幅な増大を目的として，アルミナパイプに溝をつける方法を試みた．

この効果を図7.13に，溝付きのアルミナパイプ及び加工後の外層パイプの断面を図7.14に示す．溝部分へ材料が流れ込んでおり，その高さはアルミニウム合金と銅は約0.19mm，ステンレスは約0.11mmであった．この流れ込んだ材料は，かしめ強度の測定によってリング状にせん断された．このことから，溝をつけることによるF_cの増加量F_{c1}は，溝の幅をw_gとすると，

$$F_{c1} = 2\pi \cdot r_{a1} \cdot w_g \cdot \tau \tag{7-12}$$

で求められる．この式で求めた値は，アルミニウム合金及び銅に対しては図7.13の室温における実験値とかなり良く一致するが，ステンレスの場合には加工硬化量が大きいために実験値の方が大きくなる．



	h (mm)	w_g (mm)	n
▲	――	――	0
■	0.5	1	1
□	0.5	1	2
●	1.0	2	1

図7.13　かしめ強度に対する温度の影響
（セラミックスに円周溝を加工した場合）
n：溝の数

また，幅が2mmの溝1本よりも，幅を半分の1mmにして条数を2本にした場合の方がF_cは大きくなった．今回の実験では溝加工を行うためのダイヤモンド工具の都合で幅を決めたが，最適な幅［18］を選べば，さらに強度の増加が期待できる．

また，実験結果が示すように，溝の深さは0.2mm以下でも十分な効果が得られる．なお，温度の増加に伴って材料が軟化するのでF_cも減少するが，300℃においても，溝無しの場合に比較して大きな強度を維持しており，十分実用に耐えると思われる．

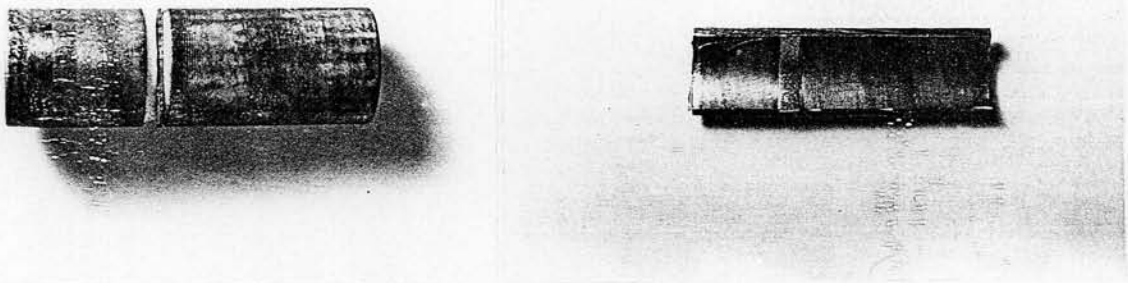


図7.14　円周溝を加工したアルミナパイプと外層金属の内周面の写真

7.6　セラミックス材料の摩擦圧接への応用

7.6.1　意義と問題点

セラミックスは構造用新素材として注目されているが，複雑形状や大型の部材を作り出すためにはセラミックス同士や金属との接合技術が不可欠である．ホットプレスによる方法［19,20］や，超高圧技術の利用［21］による接合の検討が行われているが，加工能率が非常に悪いという問題がある．

そこで，能率の良い摩擦圧接法によるセラミックスの接合は，工業的な意義が大きい．しかし，脆性材料であるセラミックスの接合に成功した報告はない．この原因は，まず，材料の接触開始時に作用する強大なトルクによって材料とチャックの間で滑りが発生することが多く，これを防ぐためにチャックによって大きな締め付け力を加えるとセラミックスに破壊を生じ易いためである．また，滑らない場合には，強大なトルクによる衝撃破壊が発生する．さらに，温度勾配に起因する熱応力による破壊も発生しやすい．

これらの問題を克服するために，遊星ボールダイスを用いてセラミックスの丸棒やパイプの外層に金属パイプをかしめ，さらにそのパイプを利用して端面に衝撃力緩和用の金属円板を固定して，セラミックスの摩擦圧接を可能にした．

7.6.2　実験方法

摩擦圧接機は，試作した連続駆動式の横型圧接機［22］を使用した．セラミックス試料は，アルミナ丸棒（直径16.3mm，長さ50mm）とパイプ（外径16.3mm，内径5.0mm，長さ50mm），窒化ケイ素丸棒（直径15.0mm，長さ50mm）及びジルコニア丸棒（直径17.0mm，長さ50mm）を用いた．各々の材料特性を表7.4に示す．

表7.4　摩擦圧接試料の材料特性

材　料	アルミナ	ジルコニア	窒化ケイ素	純アルミニウム	インコネル718
曲げ強度 (MPa)	350	1000	800	100(*)	1300(*)
ヤング率　(GPa)	320	200	300	72	220
熱膨張率($℃^{-1}\times10^{-6}$)	7.8	9.2	3.2	23.0	11.2
熱伝導率 (cal/cm・sec・K)	0.05	0.007	0.04	0.57	0.12

*引張り強度

これらの外層に，遊星ボールダイスを用いてアルミニウム合金パイプをかしめ，その延性によって，圧接用試料を固定するための締め付け力によるセラミックスの破壊を防いだ．また，金属パイプによって軸方向の熱伝導を促進し，温度勾配やそれに起因する熱応力の緩和も図った．

さらに，図7.15に示すように接合端面には，インサート材として純アルミニウムの円板(直径16.3mm，厚さ2mm)またはリング(外径16.3mm，内径7.0mm，厚さ2mm)をはめ込み，接触開始直後の強大なトルクによる衝撃割れを防止した．このインサート材は，その摩擦熱によってセラミックスを予熱して熱応力を低

減する効果も兼ねている．

なお，窒化ケイ素の接合の場合には，窒化ケイ素とぬれ性の良いニッケルを溶射してから純アルミニウムをセットした．実験は，セラミックス同士だけでなく，一方を金属（純アルミニウム，インコネル718）とした接合も行った．

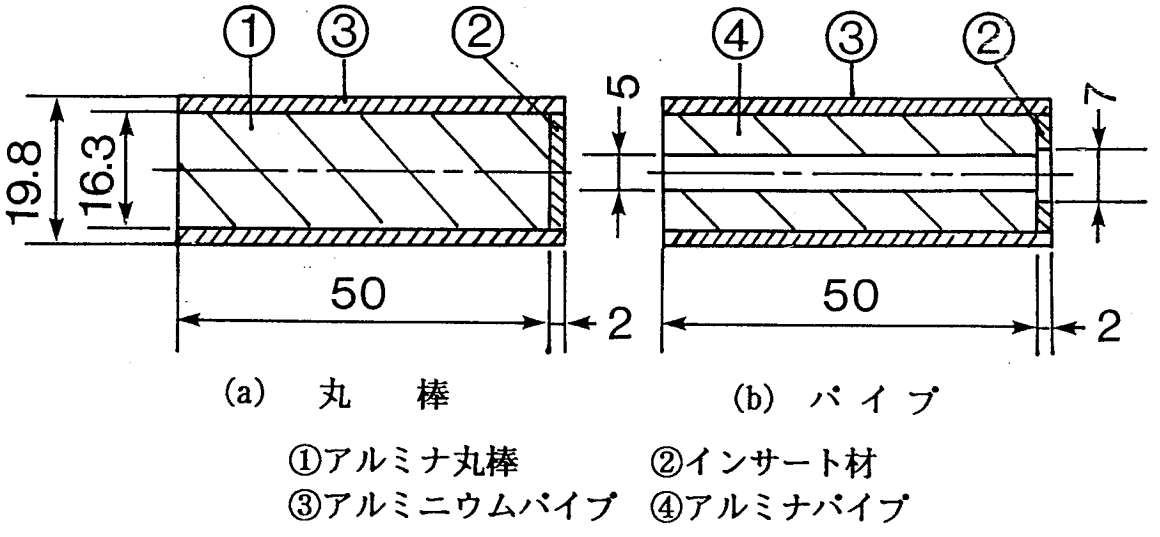
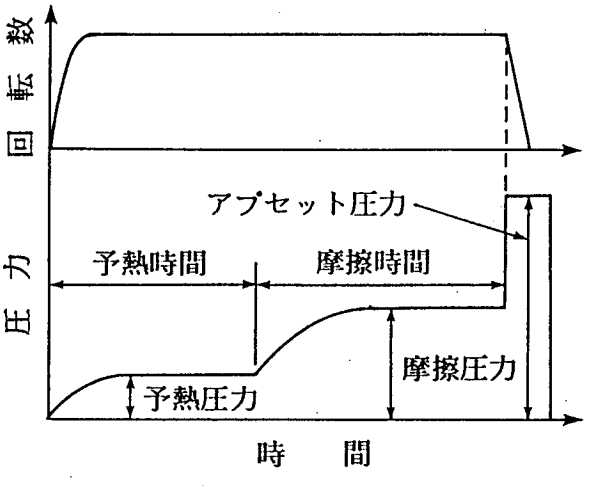


図7.15　圧接材の構成

表7.5　圧接条件

予熱圧力 (MPa)	予熱時間 (秒)	摩擦圧力 (MPa)	摩擦時間 (秒)	ｱﾌﾟｾｯﾄ圧力 (MPa)	回転速度 (rpm)
0～3	0～20	10～20	10～30	15～40	4,000



圧接条件を表7.5 に示す．通常の延性金属材料の圧接の場合には接触初期の衝撃力や熱応力による破壊が発生しないので，予熱時間が無く，摩擦圧力が大きく摩擦時間も短い．これに対して，セラミックスを接合するためには，低い圧力で長い時間摩擦を続けることによって，急な負荷及び温度の上昇を避けることが必要である．

圧接後には，引張り試験及び接合断面の顕微鏡観察を行った．

7.6.3　実験結果

図7.16に接合例を示す．純アルミニウムのインサート及び外層のアルミニウム合金が摩擦熱によって軟化し，一部がばりとなって排出されて，新生面同士が接合される．ばりの排出にともなって材料の軸方向長さは減少し，この減少量を，寄りしろとよぶ．

図7.17に摩擦時間と寄りしろの関係の一例を示す．時間の増加とともに，寄りしろもわずかに増加していく．セラミックパイプの場合の方が短時間で寄りしろが多くなるのは，丸棒ではインサート材が外周部に向かってのみ排除されるのに対して，パイプ材では図7.18に接合部付近の断面を示すように，内部の穴へも排除されるためである．

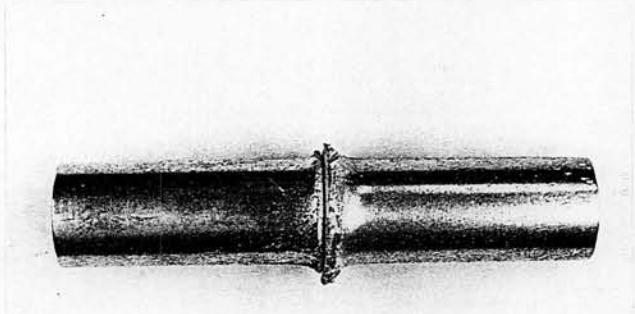
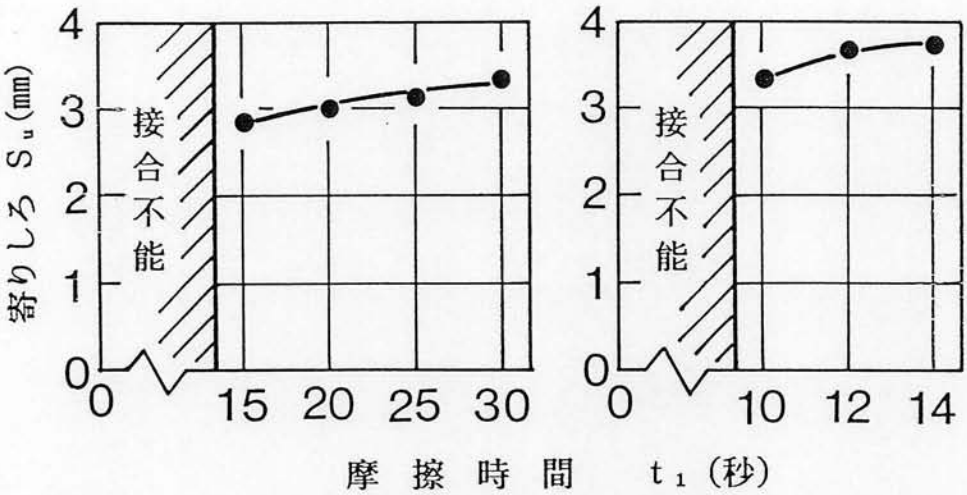


図7.16　外層にアルミニウムパイプをかしめて摩擦圧接した外観写真



(a) 丸棒
P_1=20 MPa
P_2=30 MPa

(b) パイプ
P_1=10 MPa
P_2=15 MPa

図7.17　摩擦時間と寄りしろの関係
P_1：摩擦圧力
P_2：アプセット圧力

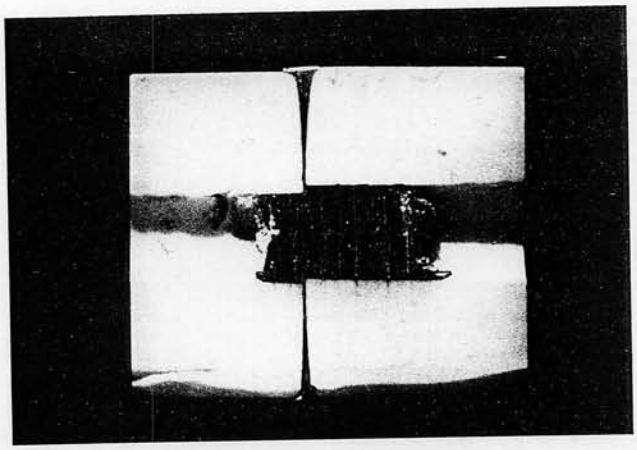


図7.18　摩擦圧接したアルミナパイプの接合部の断面写真

図7.19に接合後のインサート材の厚さ分布の一例を示す．外周部に比較して中央部の方が薄くなる傾向が認められる．このため，接合時間をのばすと内周部からセラミックス同士の接合が始まるが，ほとんどの場合，破壊に至った．これは，今回用いた装置では表7.4の付図に示されているように，アプセット負荷中にも試料に回転力が作用することが多く（ブレーキの時間遅れのため），これによって脆性材料であるセラミックス同士の接合が破壊されるためである．

図7.20に接合部のばりや，外周にかしめた金属を旋削で除去した中実丸棒継ぎ手の引張り試験片を示す．一般にセラミックス丸棒の引張り試験は非常に困難なので［23］，便宜的方法ではあるが，図7.20の状態で試験を行った．図7.21に示すように接合部付近で破断したが，この近傍における母材破断も認められた．なお，破断応力は，σ_B＝48～78MPaであった．

図7.22にアルミナと純アルミニウムの接合部の断面写真を示す．図7.20と同様の加工をして引張り試験を行うと，脆性材料であるにもかかわらず，セラミックス側がカップ状となるカップアンドコーン的形状の破断が見られることが多い．これは，熱応力によってセラミックスに生じたクラック［24］が原因と考えられる．

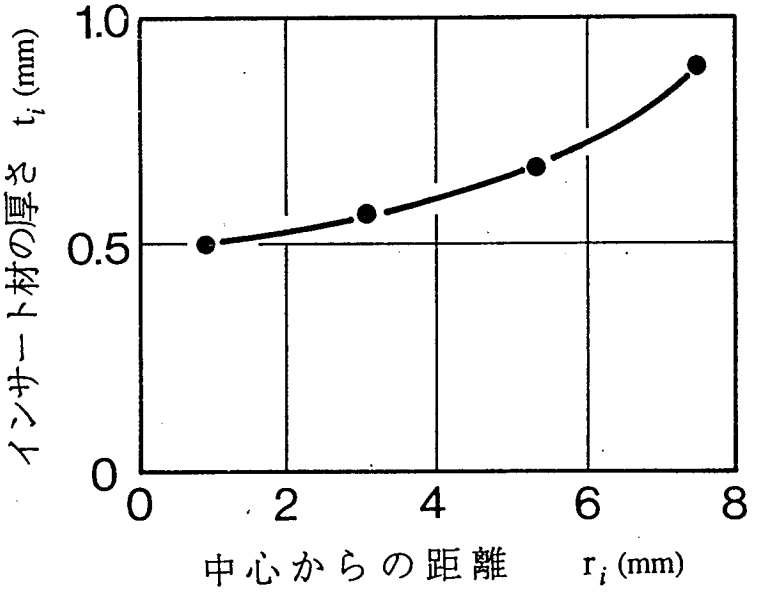


図7.19　圧接後のインサート材の厚さ分布
(P_1=20 MPa，P_2=30 MPa，t_1=20 秒)

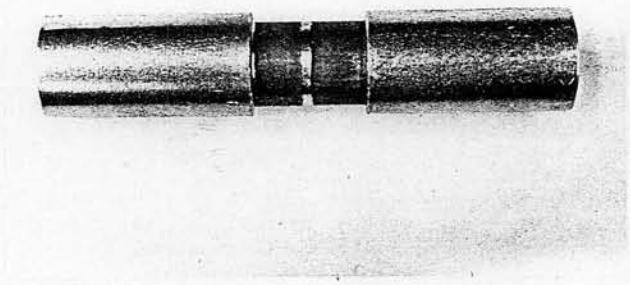


図7.20　　旋削加工した引張り試験片の外観写真

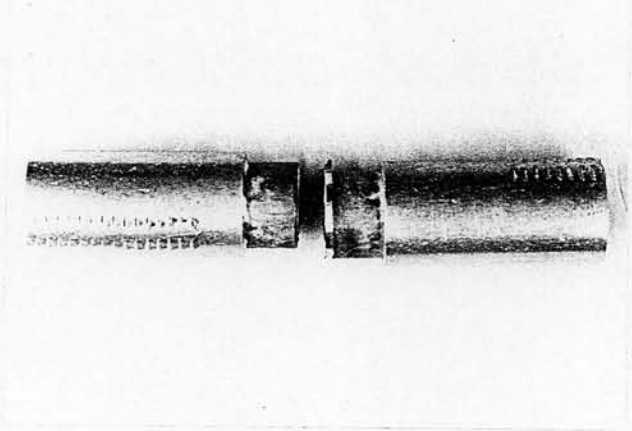


図7.21　　引張り試験後の外観写真

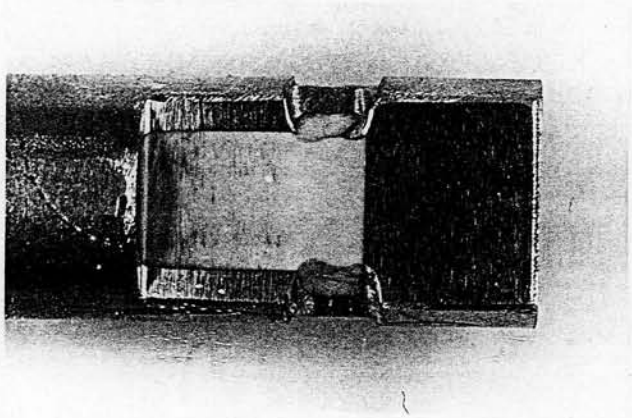


図7.22　　アルミナと純アルミニウムの接合部の断面写真

図7.23にジルコニアと純アルミニウム接合部の顕微鏡写真を示す．写真では全くクラックは観察されないが，引張り試験を行うとアルミナの場合と同様の破壊を生じる．表7.4に示したようにジルコニアは熱膨張率が大きく金属の値との差が小さいので，この差に起因する応力は小さい．しかし，熱伝導率が他のセラミックスに比べて一桁小さく，熱応力によって微細なクラックが発生すると思われる．また，接合部近傍で黒っぽい変色部があるのは，摩擦熱で高温になり酸素欠損状態の黒化ジルコニア［25］に変質しているためである．これにより強度も僅かながら低下する．

図7.24に高温強度の優れた材料である窒化ケイ素とインコネルの接合部の顕微鏡写真を示す．純アルミニウムの層が残存しているが，摩擦圧力及び時間やアプセット圧力を精密に制御することによって，この層は排出され，ニッケルがインコネルに拡散して接合が行われると考えられる．

なお，窒化ケイ素の方が径が小さい場合には，ほとんど割れが発生すること無く接合できたが，逆の場合には高い確率で破壊した．窒化ケイ素の方が熱膨張率が小さいので，後者の組み合わせでは，冷却過程においてインコネルの径が小さくなるのにともなって窒化ケイ素に大きな引張り応力が作用することが原因と思われる．

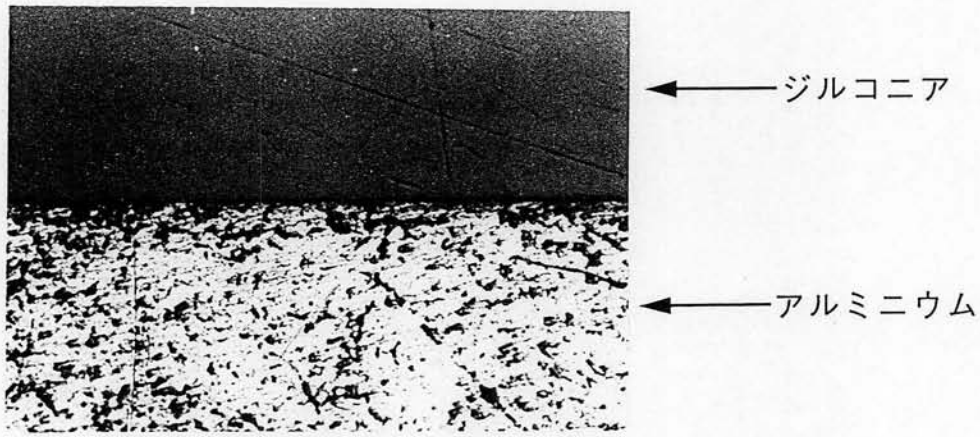


図7.23　ジルコニアと純アルミニウム接合部断面の顕微鏡写真

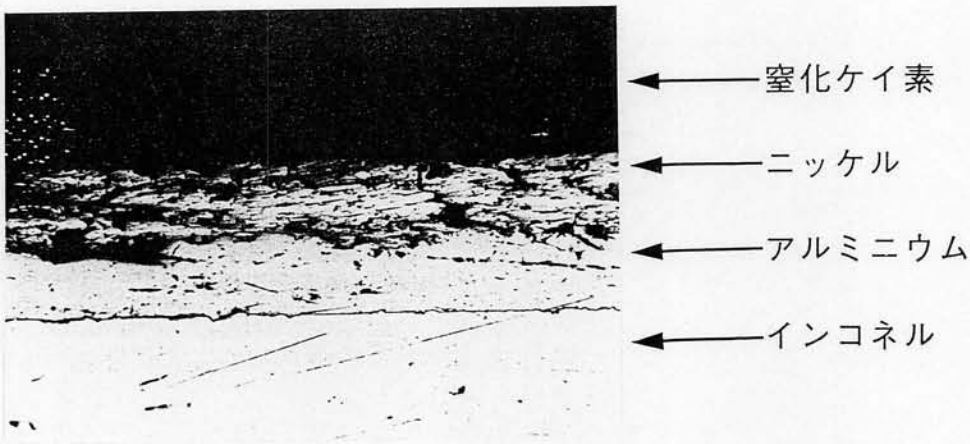


図7.24　窒化ケイ素とインコネル718接合部断面の顕微鏡写真

7.7　結　言

遊星ボールダイスを用いて金属パイプの縮径としごきを同時に行うことによって，アルミナパイプに金属をかしめる実験を行った．そして，種々の加工条件と加工力，かしめ強度及びパイプの変形状態の関係を明らかにした．さらに，アルミナパイプに円周方向溝を加工することによって，かしめ強度を向上させる方法についても検討した．また，従来不可能と考えられていたセラミックスの摩擦圧接を，セラミックスの外周に金属パイプをかしめて補強することによって試みた．その結果，次のことが明らかとなった．

(1)　遊星ボールダイスによってセラミックスと金属の複合パイプを簡単に製造することができる．

(2)　金属パイプの変形抵抗，縮径率やしごき率が増大すると，加工力，かしめ強度ともに増大する．

(3)　ステンレスパイプを用いると，かしめ強度が強く，$R_{max}<1\mu m$の平滑な表面をもつ複合パイプが得られる．

(4)　加工に必要な力は，コニカルダイスの1／2 から1／3 程度である．

(5) アルミナの表面粗さが大きくなると，かしめ強度は増大する．セラミックスの外周に円周溝を加工すると，かしめ強度は外層金属材料のせん断強度に達することが確認された．

(6) セラミックスの外周に金属パイプをかしめ，さらに端面に金属円板をセットすることによって，摩擦圧接初期の衝撃力や急激な温度勾配を緩和して，セラミックスの接合が可能となった．本方法によって，セラミックスとしてアルミナ，ジルコニア及び窒化ケイ素，金属としてアルミニウム及びインコネルのセラミックス－金属接合に成功した．

第８章　結　論

本論文は，パイプの新しい縮径加工方法として遊星ボールダイスを考案し，装置を設計・試作して加工が可能なことを実証し，さらに，加工特性及び所要加工力を明らかにして，応用として，高速加工や複合パイプの作成についても検討したものである．以下に各章の概要を記す．

第１章は序論であり，パイプの縮径加工方法に関する現状を整理するとともに，本研究の目的と意義を明らかにした．

第２章では，遊星ボールダイスの構造及び加工原理について述べるとともに，設計・試作した加工装置を用いて行った実験から，以下に述べる加工特性の概要を把握した．加工条件をうまく選定すれば良好な加工が行われるが，ダイス１回転あたりのパイプの送りf_Dが大きいと加工面に明瞭なスパイラルマークが形成され，逆に小さすぎると表面はく離が発生する．また，f_Dと縮径率がともに大きいと，パイプの座屈やボールの回転不良が生じる．加工によってパイプの長さはほとんど変化しないが，縮径率に比例してねじれ変形が残る．

第３章では，加工したパイプの表面性状について，幾何学的に解析するとともに，実験を行いその結果との比較を行った．ボール径が大きく，かつ個数が多いほど表面性状は良好になった．また，パイプの送り速度が小さいほど表面粗さも小さくなるが，限界値以下に小さくすると表面にはく離が発生して逆に性状が悪化することが分かった．さらに，工具形状の幾何学的誤差がパイプの表面性状に及ぼす影響についても検討し，ダイスの軸方向へのボールの軌道のずれを小さくすることが，表面性状改善にとって重要であることを示した．

第４章では，必要な加工力について，摩擦及び付加的せん断も考慮してエネルギ法による解析を行うとともに，潤滑剤を変化させて押し込みによる縮径加工実験を行って，解析値と比較検討して以下のことが分かった．押し込み力は，

摩擦係数とともに増大するが，トルクは摩擦係数の影響をほとんど受けない．ボール径が大きくなると，押し込み力，トルクともに小さくなる．一方，ボール個数が多くなると，押し込み力は大きくなるがトルクはほとんど変化しない．さらに，コニカルダイスの場合の加工力の計算値と遊星ボールダイスの実験値の比較を行い，後者は前者の半分以下に低減されることも示した．

第５章では，本ダイスによる加工の限界として，パイプのまくれ，座屈，表面はく離の発生について検討を行い，以下の結果を得た．パイプの直径に比べて肉厚が小さいと座屈，肉厚が大きいとまくれが発生しやすくなり，この傾向は縮径率が大きいほど顕著になる．ボールが繰り返し通過して少しずつ縮径が進められるので，パイプは圧縮，摺動，せん断を繰り返して受けることになる．このうち，圧縮と摺動は，表面はく離に対する影響が小さく，せん断の繰り返しがはく離発生の主原因である．

第６章では，構造が簡単で高い剛性を保ったまま軽量化が可能な本ダイスの特長を生かし,高速加工を試みた．直径30.0mmのボール3個を組み込んだダイスを毎分20,000回転以上で回転させ，従来の加工法の約4倍の毎分60mの速度で銅パイプの引抜き実験を行って加工が可能なことを実証するとともに，ダイス寿命について検討した．その結果，ボール径を15mm程度に小さくすると，ダイス寿命が極大となることが解析的に示された．他の応用として，材料が円周方向へも流れることを生かし，溝付き浮きプラグを利用して内面にらせん溝を形成する加工が可能なことも示した．

第７章では，本ダイスの応用として，セラミックスの外層に金属パイプをかしめて複合パイプを作成する技術について検討した．その結果，コニカルダイスを用いる場合の半分以下の加工力によって，かしめ強度が強く，表面も美しい複合パイプを簡単に作成できることが示された．本ダイスでは，ボールによって加工されている微小部分のみに力が作用するので，脆性材料であるセラミ

ックスの破壊の危険が軽減される．そこで，セラミックス自身の強度は低下させるが，かしめ強度を大幅に改善する円周溝をセラミックスの外周部に加工した複合パイプの作成を試み，300℃においても実用に耐えるかしめ強度の維持を可能にした．さらに，不可能とされていたセラミックスの摩擦圧接を，外層に金属をかしめることによって衝撃力や熱応力の緩和を図り，接合に成功した．

以上のように，本論文においては，パイプの縮径加工方法として遊星ボールダイスを提案し，加工が可能なことを実証した．そして，加工後のパイプの表面形状，加工限界，必要な加工力を明らかにしたので，加工装置の製作や加工条件の選定にあたって適切な指針を与えられるであろう．

また，応用として高速加工と複合パイプの作成の２例について検討したが，さらに，ステンレスを初めとする難加工材料のバニッシングやしごき加工への応用も期待される．また，温間加工及びセラミック工具の検討も興味深いテーマである．最後に，ボールの運動及び空転の解析や，ダイス寿命について，トライボロジの観点からの研究も重要である．

- 参考文献 -

第１章

1) K.Lange：塑性と加工，20-220(1979),350.

2) E.Bretschneider：Proc. of the 3rd I.C.R.M.P.,(1984),375.

3) 井上威恭・葉山益次郎・柴田富士男・目代充信：塑性と加工，7-62(1966),115.

4) R.A.C.Slater・N.K.Baroah・E.Appleton & W.Johnson:Proc.Int.Mech.Eng.,184(1969/70),577.

5) R.A.C.Slater・E.Appleton:Int.J.M.T.D.R.,10(1970),1117.

第２章

1) 井上威恭・葉山益次郎・柴田富士男・目代充信：塑性と加工，7-62(1966),115.

2) 青柳幸四郎・太田国照：塑性と加工，24-273(1983),1039.

3) 吉原征四郎・川並高雄：塑性と加工，26-299(1985),1163.

4) 木内学・新谷賢：39回塑加連講論，(1988),443.

5) 例えば，村木正芳：精密工誌，56-9(1990),1585.

6) K.Osakada・T.Kawasaki・K.Mori：Ann.CIRP,30(1981),135.

第３章

1) 吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：28回塑加連講論，(1977),273.

2) 吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：29回塑加連講論，(1978),393.

3) 金山公三・吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：塑性と加工,28-319(1987)，825.

4) R.L.Murthy・B.Kotiveerachari：Precision Engineering，3-3(1981),172.

5) 河合望・堂田邦明・斉藤正美・林伸和・王志剛：機論C，55-519(1989), 2885.

6) 金山公三・重松一典・平井幸男・中村守：第49回名古屋工技試講概，(1990), 68.

7) 例えば，村木正芳：精密工誌，56-9(1990)，1585.

8) 金山公三・田崎義男・藤本孝・福田正成：昭61春塑加講論，(1986),331.

9) 金山公三・田崎義男・福田正成：名古屋工技試報告，37-9(1988),241.

第4章

1) 吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：第29回塑性加工連合講演会講論, (1978),393.

2) 金山公三・吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：塑性と加工，28-319 (1987),825.

3) K.Kanayama・Y.Hirai・M.Nakamura・I.Shigematsu・K.Kubo：INDUSTRIAL CERAMICS，11-1(1991),29.

4) 例えば，青柳幸四郎・太田国照：塑性と加工，24-273(1983),1039.

5) 金山公三・田崎義男・福田正成：塑性と加工，29-333(1988),1049.

6) 金山公三・田崎義男・福田正成：名古屋工技試報告，37-9(1988),241.

7) 例えば，大谷忠男：塑性と加工，30-339(1989),505.

8) K.Osakada・T.Kawasaki・K.Mori：Ann.CIRP,30(1981),135.

9) 金山公三・吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：名古屋工技試報告, 36-10(1987),252.

10) 真鍋健一・西村尚：アマダ技術ジャーナル，19-93(1986),19.

11) 例えば，松原清：トライボロジ，産業図書，(1983),113.

12) 例えば，相原了：精密工誌，56-9(1990),1593.

13) R.A.C.Slater・N.K.Baroah・E.Appleton & W.Johnson:Proc.Int.Mech.Eng.,

184(1969/70),577.

14) R.A.C.Slater・E.Appleton:Int.J.M.T.D.R.,10(1970),1117.

15) 前田禎三：機械工作法2塑性加工，誠文堂新光社，(1972),107.

第5章

1) 三由久：機論C，45-400(1979),1382.

2) H.Poritsky：Trans.ASME(Applied Mechanics),72-6(1950),191.

3) 佐藤悌介・大矢根守哉：塑性と加工，14-148(1973),367.

4) 福山敏・御園生一長：塑性と加工，25-285(1984),899.

5) 小野宗憲・石川豊・牧野内昭武：機論A，57-533(1991),72.

6) 河合望・堂田邦明・斉藤正美・林伸和・王志剛：機論C，55-519(1989),2885.

7) D.Lee・L.F.Coffin Jr.：Trans. ASME.,92-B(1970),146.

8) 田中政夫・中村貞男・津田滉：25回塑加連講論，(1974),153.

9) 田中政夫・中村貞男・津田滉：28回塑加連講論，(1977),312.

10) 田中政夫・中村貞男・津田滉：昭54春塑加講論，(1979),158.

11) 津田滉・高津正秀・中村貞男・朝倉健二・田中政夫：塑性と加工，30-346(1989),1504.

12) 諸星昭夫・宮川松男：塑性と加工，15-166(1974),918.

13) H.LI.Pugh：Mechanical Behaviour of Metals under Pressure,(1970)258, Elsevier Pub.Co.

第6章

1) E.Bretschneider：Proc. of the 3rd I.C.R.M.P.,(1984),375.

2) 例えば，青柳幸四郎・太田国照：塑性と加工，24-273(1983),1039.

3) 例えば，村木正芳：精密工誌，56-9(1990)，1585.

4) W.M.Kacmarsky・L.O.Hewko：Trans. of ASME(Lubrication Technology), (1971),11.

5) 例えば，大谷忠男：塑性と加工，30-339(1989)，505.

6) JIS G0583

7) 例えば，平修二監修：現代材料力学，(1970),204,オーム社.

8) 井上威恭・葉山益次郎・柴田富士男・目代充信：塑性と加工，7-62(1966), 115.

9) A.B.Jones：Trans. of ASME(Applied Mechanics),74-7(1952),695.

10) JIS B1518

11) 角田和雄：機論C，52-477(1986),1487.

12) L.D.Wedeven・T.A.Harris：Machine Design, August 6(1987),72.

13) 川口格・東浦義彦・中野庸二・竹林博明：精密工学会関西支部講演概要, (1990),37.

14) 森元時夫・玉村謙太郎：精密工学会関西支部講演概要，(1990),35.

15) 武藤睦治・田中紘一・山岸健司・上之原貢：機論C，56-524(1990),958.

16) 竹林博明・上田浩一：機械の研究，39-12(1987),1301.

第7章

1) 佐藤悌介・多田吉宏：塑性と加工，28-323(1987),1289.

2) 佐藤悌介・多田吉宏：塑性と加工，27-306(1986),833.

3) 小坂田宏造・白石光信・国松朋秀：昭62春塑加講論，(1987),285.

4) K.Osakada,M.Shiraishi：Proc.2nd Int.Conf.Tech. Plasticity, II (1987),925.

5) 宮城明雄：型技術，3-7(1988),32.

6) 町田充秀・梶原弘・金山公三・中村守：名古屋工技試報告，35-8(1986), 309.

7) 小松康彦：金属会報，18-1(1979),48.

8) 中村雅勇・牧清二郎・真鍋孝・高橋延明・安冨一嗣：38回塑加連講論，(1987),185.

9) 村田眞・根岸秀明・鈴木秀雄：塑性と加工，25-283(1984),702.

10) 佐野利男・高橋正春・村越庸一・寺崎正好・松野建一：塑性と加工，28-322(1987),1192.

11) 小田原修・池内準：金属会誌，45-3(1981),316.

12) チューブフォーミング分科会：チューブフォーミング技術資料集，(1986),14,日本塑性加工学会.

13) 金山公三・田崎義男・福田正成：塑性と加工，29-333(1988),1049.

14) 金山公三・吉岡紘二・藤本孝・高倉章雄・福田正成：塑性と加工，28-319(1987),825.

15) 例えば，益田森治・室田忠雄：工業塑性力学，(1976),199, 養賢堂.

16) 山口克彦・井上尚和・福田正成：36回塑加連講論，(1985),197.

17) 例えば，平修二：現代材料力学,(1974),200,オーム社.

18) 吉富雄二・蒲原秀明・大村慶次・高田忠：塑性と加工，28-322(1988),1128.

19) 井関孝善・荒川健二・松崎浩・鈴木弘茂：窯業協会誌，91-8(1983),349.

20) 神崎修三・田端英世：窯業協会誌，91-11(1983),520.

21) 菅沼克昭・島田昌彦・岡本平：工業材料，31-9(1983),93.

22) 安藤国輔・田崎義男・平井幸男：名古屋工技試報告，11-8(1962),446.

23) 例えば，田中道七・境田彰芳：材料学会33期講論，(1984),147.

24) 中村守・伊藤正治・大司達樹・平井幸男・金山公三・田端英世：窯業協会誌，94-8(1986),926.

25) 吉岡俊朗・小林忠司・田中義弘・山本恭永・宮崎俊行：精密工学会誌，55-7(1989),1277.

謝　　辞

本研究を進めるにあたり，終始ご懇切なご指導ならびにご鞭撻を賜りました大阪大学小坂田宏造教授に深甚なる感謝の意を表します．

また，有益なご助言と詳細な検討をしていただきました大阪大学小倉敬二教授，福岡秀和教授，森謙一郎助教授に感謝致します．

さらに，ご指導ならびにご鞭撻を賜りました京都工芸繊維大学福田正成名誉教授，山口克彦教授，高倉章雄助手に厚くお礼申し上げます．

また，有益なご助言とご協力をいただいた京都工芸繊維大学吉岡紘二（元研究生），藤本孝（元大学院生）に感謝致します．

本研究の遂行にあたり，常にひとかたならぬご指導，ご便宜，励ましを賜りました名古屋工業技術試験所久保勝司機械部長に厚く御礼申し上げます．

また，本研究にご協力をいただいた名古屋工業技術試験所平井幸男主任研究官及び中村守主任研究官，さらに，研究の遂行のみならず論文の作成に多大なご協力をいただいた名古屋工業技術試験所重松一典研究員に感謝致します．