

特別講演

UDC 669.14.017 : 539.3 : 539.4 : 548

鉄 鋼 の 塑 性 加 工 の 研 究*

五 弓 勇 雄**

Studies on Plastic Working of Steel

Isao GOKYU

私は現在満 60 才でこの 3 月末に東大を定年になりました。くしくも日本鉄鋼協会と同年であり、この記念すべき機会に西山賞を受賞し得ました事を心から光栄と存じます。これは私が代表で戴いたものでこの 30 年間東大における多くの協同研究者の助力の賜と深く感謝しており、紙上を借りて関係各位に厚く御礼申し上げます。

そもそも私が塑性加工の研究を志した理由は終戦後荒廃した金属工業を見て少しでも工業に直接役立つ事をしたいという考えからです。そして工業的目的を持つた基礎的研究と応用的研究を始め各研究者には原則として基礎的テーマとそれに関係する応用的テーマを与えました。

ここで研究室の行き方には、2つの方法があると思います。その1つは1つのテーマを大勢で長年月詳しく研究する方式です。即ち一本の木を大きく育てるやり方で指導者は幹で協同研究者は枝にたとえられます。この方式は割合容易に大木にはなりますが枝と枝が競合して枯れるものも出てきますし又、枝はいつまでも枝であります。私は協同研究者の将来を考え枝で終らしてはいけないうと塑性加工という広い分野の中にそれぞれ異なつた種ないし苗を植えつけ、これを育てる努力を致しました。即ち林や森を作る思想であります。それぞれのテーマは塑性加工という関連性があり根では互にからみ合っておりますが各研究者の努力によつてはそれぞれ塑性加工の1分野で一流になり得るからであります。この種ないし苗は他所でいまだ手をつけていないものを選ばなくてはならない点に苦心致しました。この様な考え方で30年過しましたので五弓研で行ないました研究は塑性加工の中で焼鈍を含めて再結晶、集合組織、塑性条件、変形抵抗などの基礎から引拔、押出、圧延、板成形の力学的、材質的問題など広い範囲にわたっております。それぞれを担当した研究者は五弓研から離れてもその研究を延ばし他と競合することなく一本一本大きく成長して塑性加工工業にお役に立っていることは大変嬉しい事です。

そこで、この記念講演ではどんな種ないし苗を植えたか、即ち我が国ないしは世界で始めて手をつけた問題、

そして工業に役立つ問題を主として述べて見たいと思います。

尚、5年前に日本金属学会の本多記念講演で“塑性加工技術の研究開発、基礎と応用のつながり”の題で五弓研における20余りの技術開発を中心として技術開発の考え方の話をしましたし又昨年の鉄鋼共同研究会の圧延理論部会20周年記念講演で五弓研における圧延に関する研究を中心として“圧延技術に対する金属工学技術者の役割”の題で話しました事と幾分重複する所もありま

表 1 昭和 49 年のわが国鉄鋼生産

(単位 1 000 t)

	数 量	前年比 (%)
粗 鋼	117 113	98.2
普通鋼熱間圧延鋼材(一般)	89 585	98.4
条 鋼	26 950	92.1
うち 軌 条	485	83.2
形 鋼	9 627	82.4
棒 鋼	10 674	97.3
線 材	6 164	102.3
鋼 板 類	60 910	101.4
うち 厚 中 板	19 278	108.0
薄 板	636	73.4
広 幅 帯 鋼	39 358	100.5
帯 鋼	1 638	76.1
そ の 他	1 725	99.8
特殊鋼熱間圧延鋼材	9 289	101.4
うち 工 具 鋼	244	93.8
構 造 用 鋼	4 646	102.5
軸 受 鋼	512	112.8
ステンレス鋼	1 547	96.9
高 抗 張 力 鋼	990	97.7
普 通 鋼 熱 間 鋼 管	8 746	99.4
冷延鋼板、冷延広幅帯鋼	17 982	98.2

(注) 1. 形鋼には鋼矢板を含む
 2. 薄板には電気鋼板を含む
 3. 線材にはバーインコイルを含む
 4. その他は管材外輪の合計

* 昭和 50 年 4 月本会講演大会における西山賞受賞記念特別講演

** 東京大学名誉教授 工博 (現 日本大学教授)

すが御許し願います。

まず、我田引水かも知れぬが塑性加工の重要性、多彩性について述べよう。表1は昭和49年の鉄鋼生産量であるが、粗鋼生産11714万tに対し熱間圧延鋼材は特殊鋼その他を含めて10764万tである。即ち歩留も考えると粗鋼のほとんどすべてが熱間圧延され、又熱間圧延鋼板の約1/3は更に冷間圧延されている。

表2では製鋼分野と圧延分野の要点を比較した。製鋼関係者に異論があるかも知れないが圧延で作られるのは最終製品なので製鋼の場合より更に寸法精度、形状、表面状況、2次加工性などの要因が加わるだけ厄介になる訳である。更に2次3次加工まで考えると、例えば3mmφの木ネジ製造工程を表2に挙げてあるが連铸材から作ってもそれぞれ異なった孔型を使用する熱間圧延が31

表2 塑性加工の多様性

製鋼：品質，歩留，コスト
圧延：品質，歩留，コスト
寸法精度，形状，表面状況，二次加工性
プラス木ネジの製造工程
(連铸材) → <u>ビレット熱間圧延</u> → (ビレット) →
250□ 6 pass 100□
<u>線材熱間圧延</u> → (ワイヤロッド) → <u>冷間引拔</u> →
25 pass 5.5φ 5 pass
(ワイヤ) → <u>整直</u> → <u>せん断</u> → <u>冷間ヘッディ</u>
3.0φ
<u>ソグ</u> → <u>ネジ転造</u> → (製品)

逆張力附加引拔法の研究 (1952)

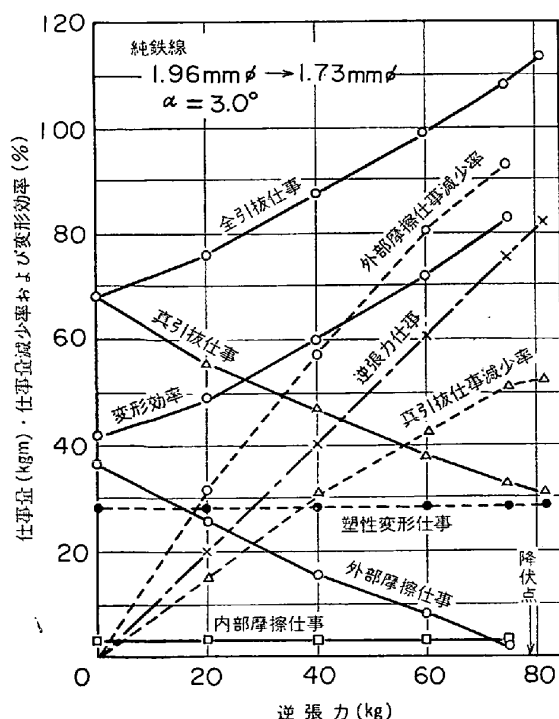
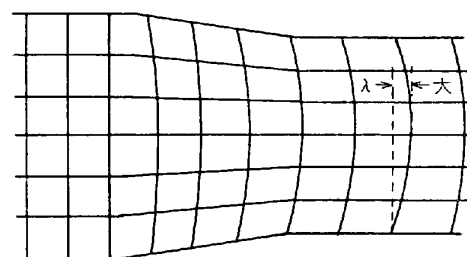


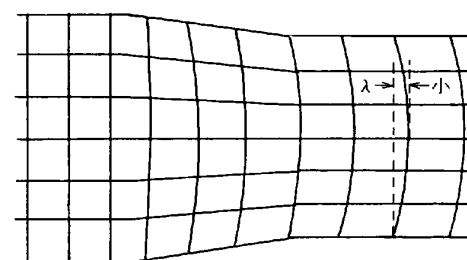
図1 逆張力附加による仕事量及び変形効率

回、冷間引拔5回、繰返し曲げの整直、1種の塑性加工である剪断、冷間ヘッディング、ネジ転造と素材からの塑性加工工程は40、異種の塑性加工法が6回も使用されている。この様に塑性加工は多様性がありそれぞれに基礎的研究および技術の向上が望まれる訳である。

さて、戦後間もない頃までは硬鋼線の引拔加工には、昔ながらの単釜でもつばらCr鋼の叩きダイスが使用されていた。そこで引拔の基礎研究として逆張力付加効果を力学的な面、金属学的面から研究した²⁾。図1によれば逆張力を増すにつれ、外部摩擦仕事量が急激に減少し、これに伴いダイス圧力は減少し、もし逆張力仕事量が回収できれば実際の仕事量も減少する事が明らかである。図2は材料の流れおよび剪断変形の減少を示しており、又この原因と更に摩擦による発熱の減少とにより図3に示すごとく線内部の硬度分布が均一になり更にはTextureの発達も著しく材質の向上が認められた。更に超硬合金使用の場合冷却の問題がある訳で図4は逆張力とダイス冷却の効果を検討した装置で④の第一ダイスで



普通引拔法



逆張力附加引拔法

図2 引拔線積断面の流線

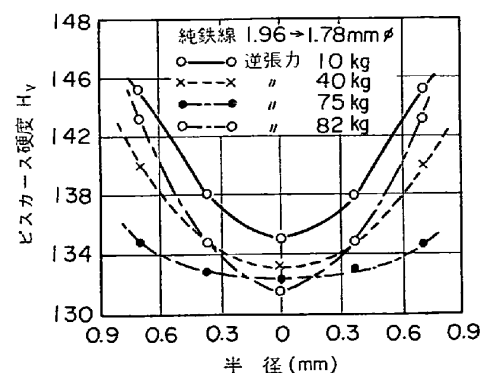


図3 引拔線横断面の硬度分布

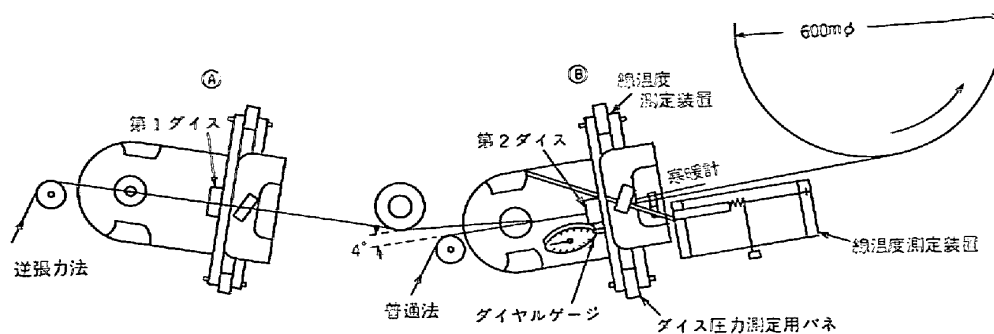


図 4 引 拔 装 置 全 体 図

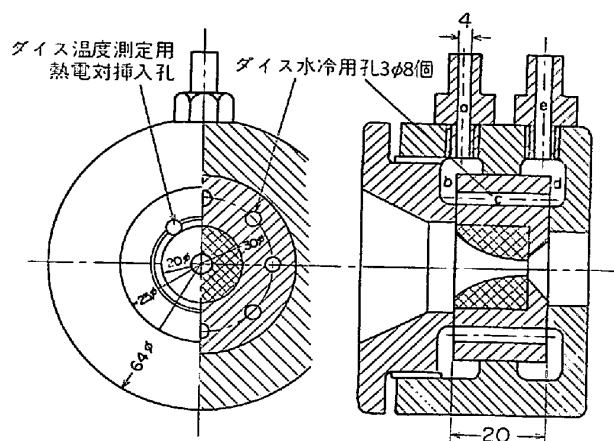


図 5 ダイス及びダイス水冷装置

表 3 各引拔法での第2段引拔時の
ダイス圧力の比較

普通法	ダイス冷却をした普通法	逆張力法	ダイス冷却をした逆張力法
100%	85%	67%	56%

表 4 各引拔法での消費仕事量

引 拔 方 消費仕事量法	普通法	ダイス冷却をした普通法	逆 張 力 法	ダイス冷却をした逆張力法
第1段引拔時の消費仕事量 (kgm)	737	588	767	612
第2段引拔時の消費仕事量 (kgm)	725	615	487	408
全 体 の 消 費 仕事量	1462	1203	1254	1020
同上の百分率 (%)	100	82	85	69

表 5 各引拔法によるダイスの摩耗量

引拔方法	普通法 (A)	ダイス水冷をした普通法 (B)	逆張力法 (C)	ダイス水冷をした逆張力法 (D)
摩 耗 量 (mm ³)	1.75	1.55	0.67	0
同上百分率 (%)	100	88	38	0

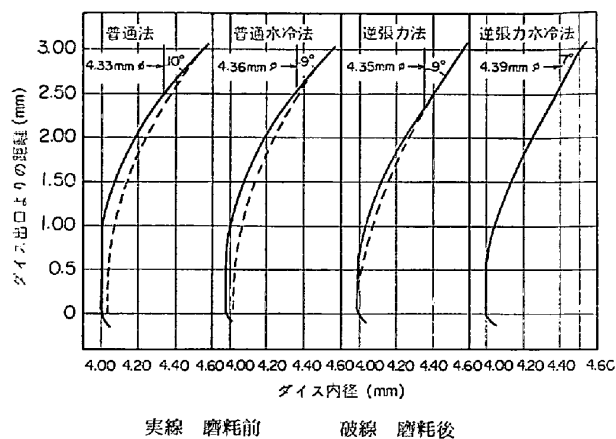


図 6 摩耗前後のダイスの孔形

の引拔力が②の第2ダイスへの逆張力として作動し、又、ダイス水冷を効果的に行なうため、図5のごとくマウント部に小孔をうがち水速を早くしてある。引拔速度は60m/minである。その結果表3に示すごとくダイス水冷逆張力法は普通法に比しダイス圧力は56%、引拔仕事量は表4に示すごとく69%に減少する。更に800kg引抜いた時のダイス摩耗量は表5に示すごとく0であり、その時の各方法のダイス摩耗状況を図6に示す。これらの結果から連続伸線機で逆張力を加えダイスを水冷する事により叩きダイスが超硬ダイスに代替され伸線能力の向上がはかられた訳である。

同じ頃、板の集合組織とその応用として方向性珪素鋼板や深絞りの耳の問題を採り上げた。その際描いた極点図は写真法で一つの極点図を描くのに数日もかかり、その描写法も補正を含めて厄介至極であつた。我が国での初期の極点図を図7に示す³⁾。これは3%珪素鋼板の1次冷延、中間焼鈍、2次冷延のものでこれから冷延時の(100)〈011〉方位が〈110〉軸の回転により(111)〈112〉を経て最終焼鈍で(110)〈001〉のGoss方位に変化するという説を出した。勿論現在の再結晶理論から考えれば幼稚なものである。

昭和23年頃の深絞り用鋼板は高級仕上鋼板と呼ばれ張力付加のない4段圧延機で作られており深絞り性、板面異方性ともArmco材に比し著しく劣っていたので、ま

珪素鋼板の集合組織の研究 (1948)

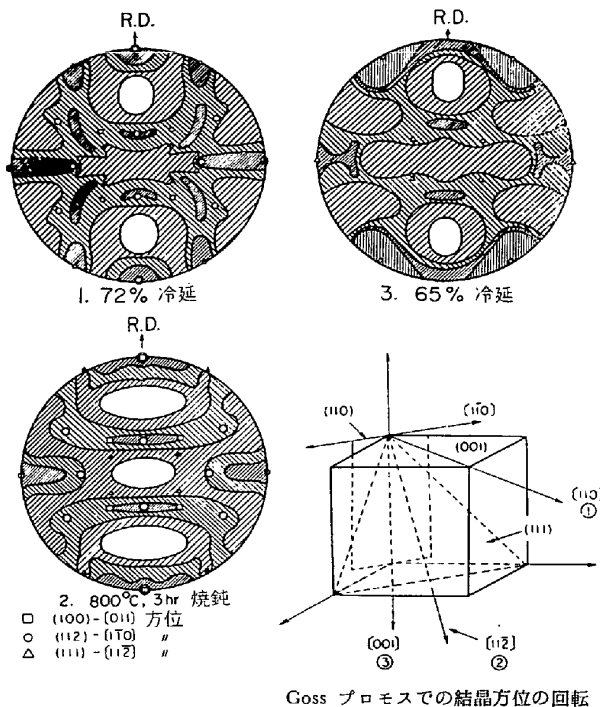
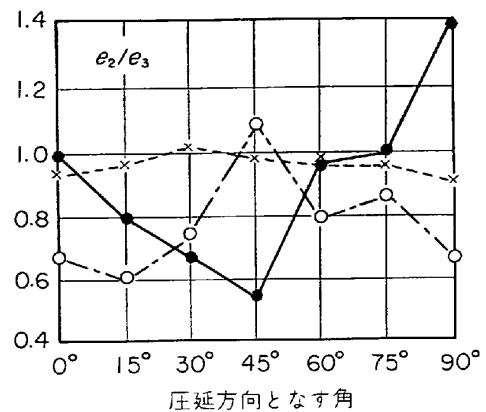


図 7 2.97% シリコン鉄の (110) 極点図

ズスクラップ事情から特に多かった S, Cu の影響について検討した。その際、集合組織より深絞り耳の発生を結晶学的に説明するとともにマクロ的には各方向の歪比を測定し(幅歪/厚さ歪)の最大の所に耳が発生し、最小の所が谷になる事を示した⁴⁾。その頃は外国文献の入手が困難であったので後にこの歪比が所謂ランクフォード値でありこの値が深絞り性に関連ある事を知った。図 8 はその時のデーターであるが圧延率はやっど 50% 内外であり歪比を現在の $\bar{r}$ にすると 1 以下で Δr が非常に大きく耳の高い事が明らかであり、これらを焼準すれば両者とも良好になる事が判る。

その後、深絞り用鋼板については福井教授の主唱で理研、東大、自動車会社、鉄鋼会社の共同研究が行なわれ、私も創立時から材質面でお手伝いして既に 20 有余年になる。この会は吉田清太博士の精力的な研究指導によりますます発展し現在の薄鋼板成形技術研究会として薄鋼板の性能向上とプレス技術の進歩に大いに貢献している。軟鋼板の集合組織と深絞り性については、私を含めてこの研究会メンバーによる多くの発表があるので省略しあまり今迄発表のなかったステンレス鋼板の深絞り性について述べよう。

18Cr ステンレス鋼板は安価であるが、従来深絞り性が良好でなかった。深絞り性を向上させるためには $\bar{r}$ を大きくすること、そのためには板面方位に (111) を多く (100) を少なくすればよく、そのためには 2 回冷延 2 回焼鈍を施すことと、後述するごとく冷延前の結晶粒を微細化すればよい事が軟鋼で示されている。18Cr ステン



52% 冷間圧延

	$\bar{r}$	Δr
● 焼鈍材	0.85	0.66
○ 未再結晶材	0.76	-0.41
× 焼準材	0.94	0.03

 e_2 幅ひずみ率 e_3 厚さひずみ率

図 8 深絞り用リムド鋼板の引張試験ひずみ率比 (1952)

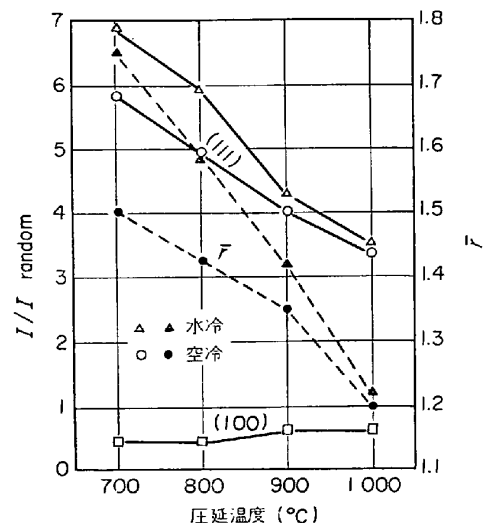


図 9 18Cr 鋼板の熱延温度による性質変化

レス鋼板においても 1 回冷延は勿論悪く $\bar{r} = 0.8 \sim 0.9$ で 2 回冷延の加工度の割合を種々変えても $\max \bar{r} = 1.1$ 位でありあまり向上は認められない。図 9 は熱間圧延温度をかえて結晶粒微細化を図ったもので低温の圧延程深絞り性良好であり、圧延温度から急冷する程よくなる事を示している。図 10 は熱延温度に関係なく $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 変態点以上から焼入して結晶粒微細化を図ったもので非常により深絞り性を示す⁵⁾。この様にして作った板は 18Cr 特有の Ridging も出現しない。以上は成分的には従来のままの板であるが、今度の大会では成分主として Ti による深絞り性向上の研究発表が多く見られる。図 11 は 18-8 ステンレスの集合組織である。18-8 は面心立方晶であるので集合組織もあまり尖鋭でなく、又図 12 に示すごとく (111) 方位も多くない。しかるに図 13 に示

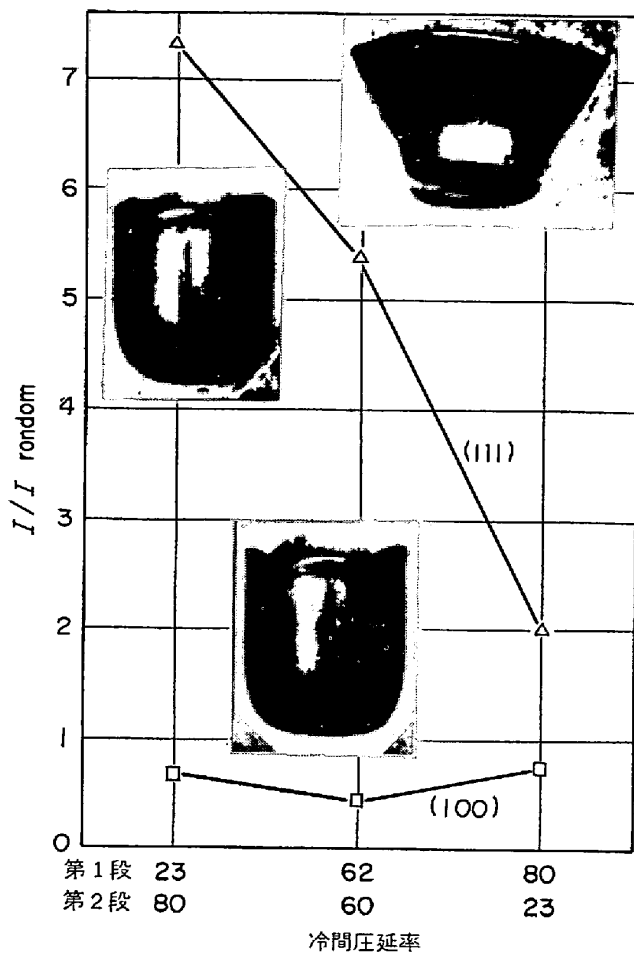


図 10 18Cr 鋼板の (α+γ) 処理による性質変化

18-8 ステンレス鋼板の深絞り性 (1972)

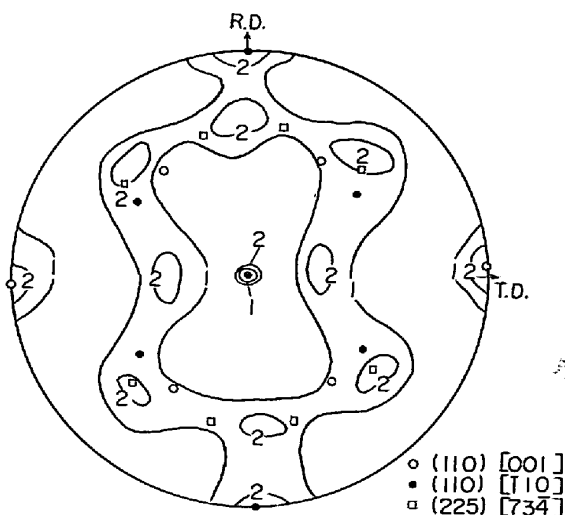


図 11 80% 圧延後 1100°C で処理した 18-8 ステンレス鋼板の (110) 極点図

すぐとく焼鈍温度の上昇により結晶粒は大きくなり、これに伴い図 14 に示すごとくコニカルカップ値は低下し成形性は良好となる。即ち 18-8 ステンレスにおいては

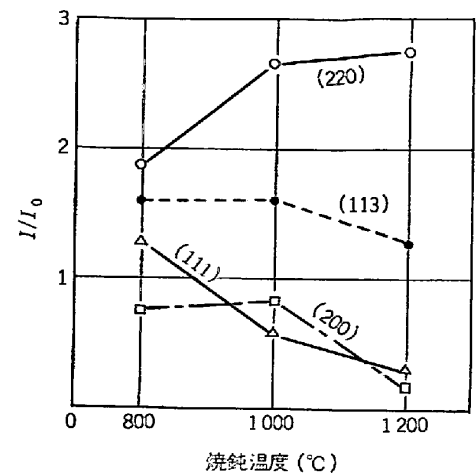


図 12 冷間圧延率 80% の 18-8 ステンレス鋼板における焼鈍温度と結晶方法

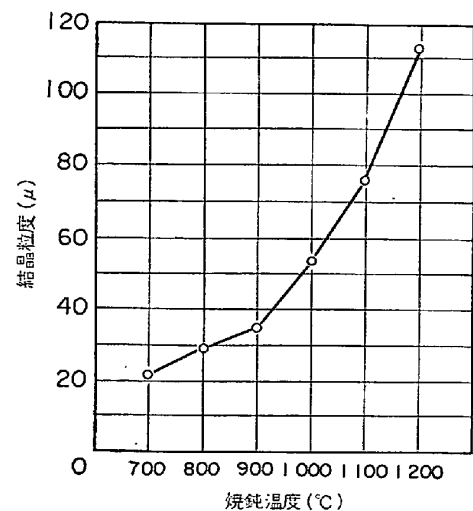


図 13 冷間圧延率 80% のステンレス鋼板を種々の温度で焼鈍したときの結晶粒の大きさ

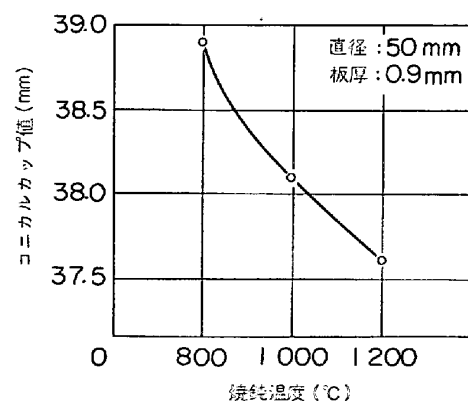


図 14 冷間圧延率 80% の 18-8 ステンレス鋼板における焼鈍温度とコニカルカップ値

成形性に対し集合組織の影響は極めて少なく結晶粒を肌荒の生じない程度に大きくすればよい事が判る⁶⁾。

昭和 25 年頃より各種金属の冷間衝撃押出の研究を始

めたがその際 100 t のプレスで軟鋼の冷間衝撃押出を行なったのが図 15 である⁷⁾。その際の力関係を示したのが図 16 で 74% 加工度で 250 kg/mm^2 以上の応力が加わっている。ここでポンチ及びダイスの設計が重要因子となってくる。衝撃押出は 1 種の穿孔であるが普通の上昇穿孔法は摩擦が大きく大きな力を要するがこの摩擦を少なくするため古くエルハルト穿孔法が開発された。これは図 17 に示すごとく 4 角の素材を用いて底付円筒を作る方法である。しかしこの方法の欠点は f/F_0 が 0.3 以上であると穿孔される前に圧縮されダイスを満しそれから上昇穿孔となり摩擦力の節減にはならない事である。私はこの欠点を逆に利用し異形の素材から底付円筒を作った⁸⁾。図 18 は 4 角および 6 角素材より底付円筒を作った例である。従来これら衝撃押出のブランクは板から丸形を打抜いていたが、これでは歩留は約 50% である。4 角ないし 6 角のブランクが使用できれば図 19 に示すごとく歩留 95% 以上に達する。尚ブランクの形状による耳が図 18 に示す如く発生するがそれによる歩留

の低下はわずかである。底付高压容器はその頃図 20 の上部に示す如く冷延鋼板の焼鈍材から深絞り法で作られていたが、これを素材費が約 1/2 である熱延鋼材から冷間押出で作る事を試みた。図 21 は住友金属で実際化された例で底部にメタルフローを通すため 4 角素材を横にして押出した。成分は押出の困難な中炭素鋼で押出応力はやはり 250 kg/mm^2 位であったので工具の設計などに研究室での経験が大いに生かされた。これらが現在自動車部品の製造などに広く用いられている鋼の冷間鍛造のはしりである。4 角素材を利用する方法は熱間ではあるが現在不二越鋼材で図 22 のごとく板からボール軸承

軟鋼の冷間後方衝撃押出の研究 (1955)



図 15 押し出されたシエル (20 mmφ) とブランク
シエルの加工度はそれぞれ 74, 64, 53%

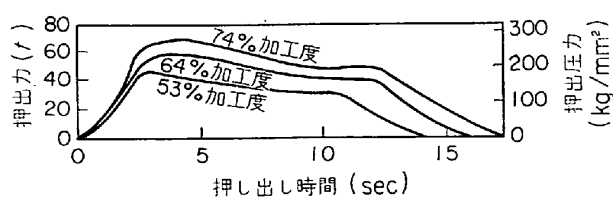


図 16 鋼シエルの冷間衝撃押出時の力と時間の関係

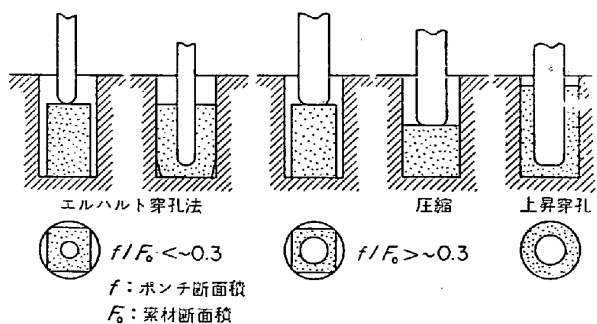


図 17 四角素材の穿孔

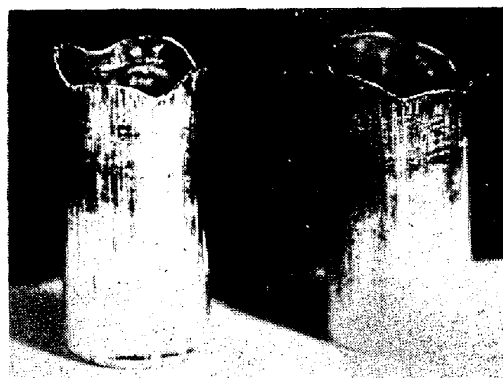


図 18 ブランク形状による耳

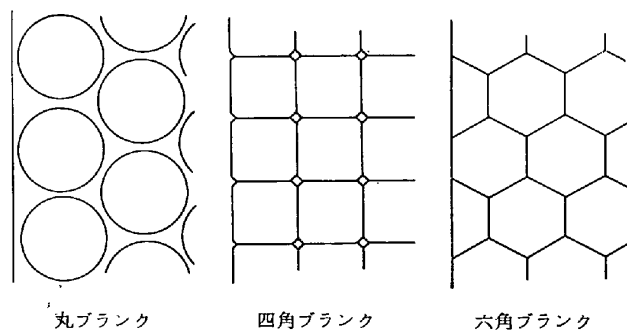


図 19 板より各種ブランクの打抜

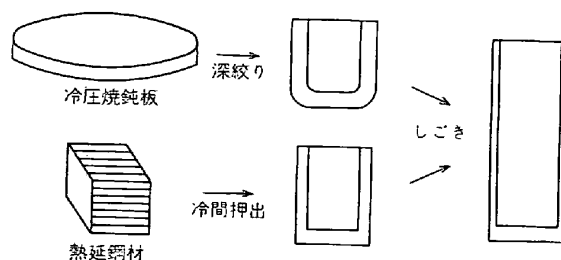


図 20 鋼製底付高压容器の製造法

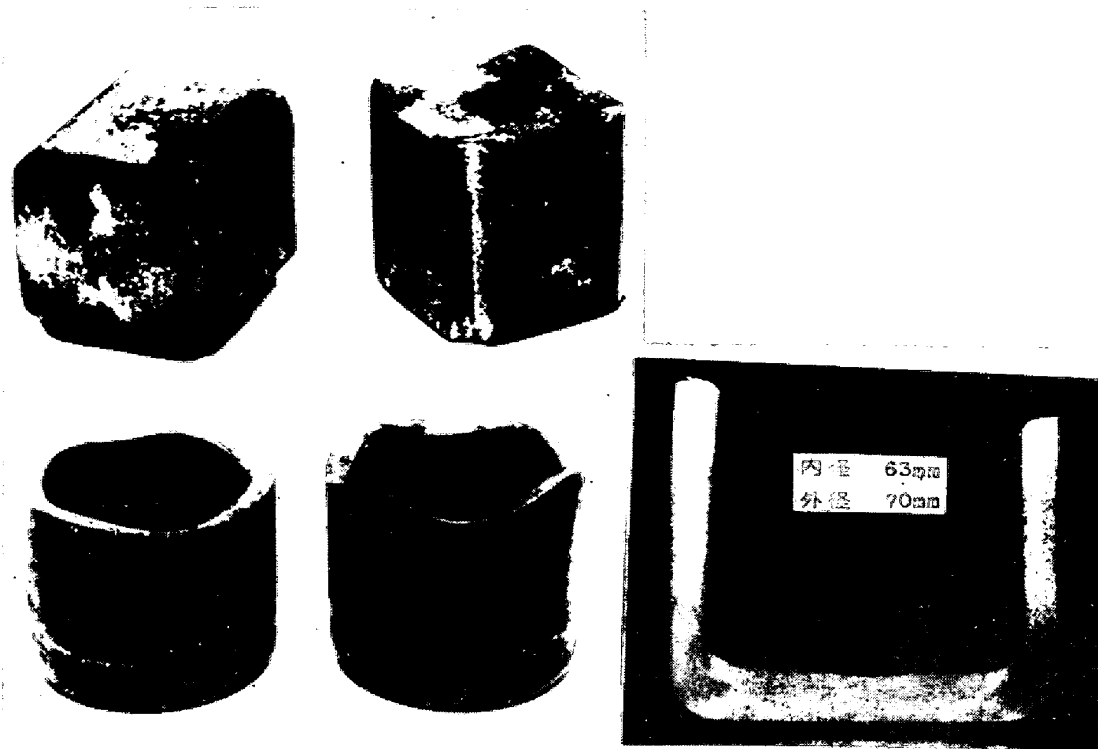


図 21 2000 t プレスによる冷間押出 (1955)

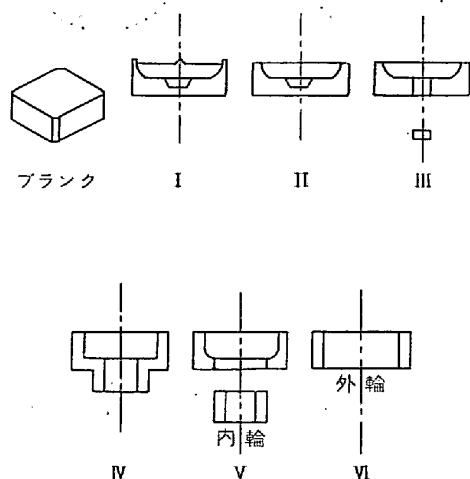


図 22 板材よりボール軸承内外輪成形工程

の内外輪製造に利用され、6角素材は松下電工で亜鉛乾電池殻を製造するのに大いに用いられている。

昭和 28 年頃私の持論である塑性加工における摩擦を減少させる意図から図 23 のごとく 2 対のローラーを互いに直角に組合せ丸-口唇状オーバール-丸の変形をさせるローラーダイ引抜法を開発した⁹⁾。この詳細については本会香村賞受賞講演で述べたのでその後の経過について述べる。種々の型式のローラーダイを出したが標準的

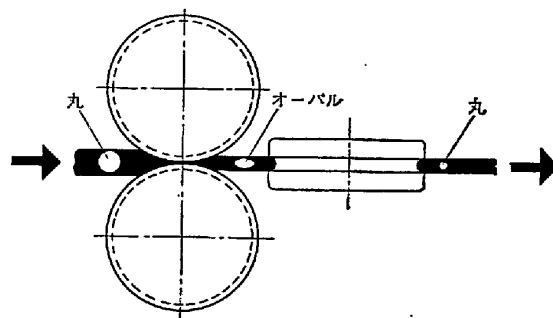


図 23 丸線用ローラーダイの原理

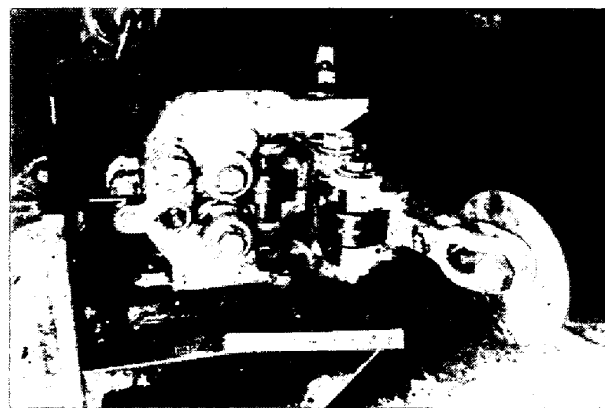


図 24 著者の開発のローラーダイ (第1段ローラーを開いた状態)

なものは図 24 に示す如く圧下を Rohn 式にしたもので
 大小合わせ国内で 300 台以上、米国を始め 20 数カ国に

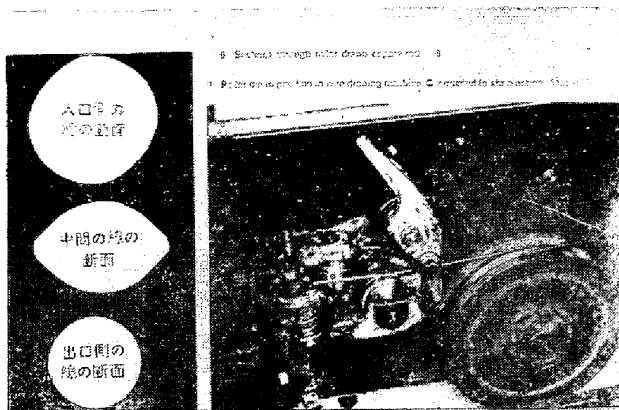


図 25 Marshal Richard 社 (英) 製ローラーダイ
 (連伸機に取付けた状態)

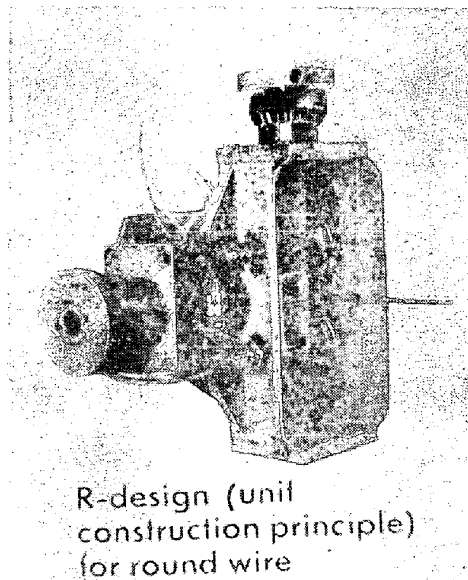


図 26 Karl Fuhl 社 (西独) 製ローラーダイ
 (丸線用 R 型)

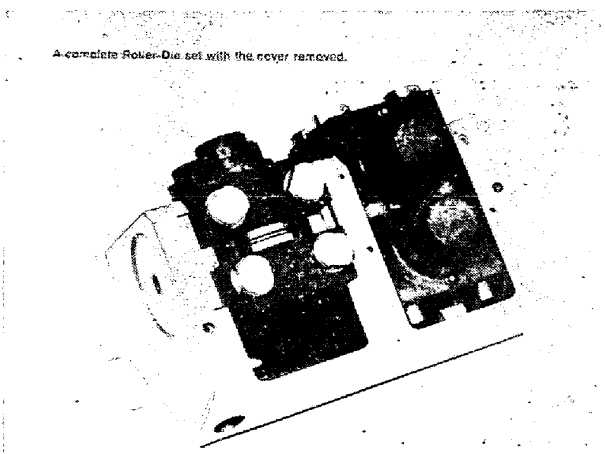


図 27 Arboga 社 (スウェーデン) 製ローラーダイ

200 台以上輸出された。簡単な機械なのでスケッチされて
 各所で製作されている様である。例えば図 25 は英国
 Marshal Richard 社製で全く同じである。又独国 Karl
 Fuhl 社製ローラーダイは図 26 のごとく圧下が普通の圧
 延機型式であり、図 27 のスウェーデンの Morgardshammor
 社系の Arboga 社のものはプレストレスを加え剛性を大
 にして精度をよくしている。剛性を大にするには圧下に
 Senzimir 圧延機の偏心軸を使う方式が考えられる。図
 28 はこの原理とこれを利用した多段ローラーダイを示
 しこれらは硬質金属の引抜に適している。最近この原理

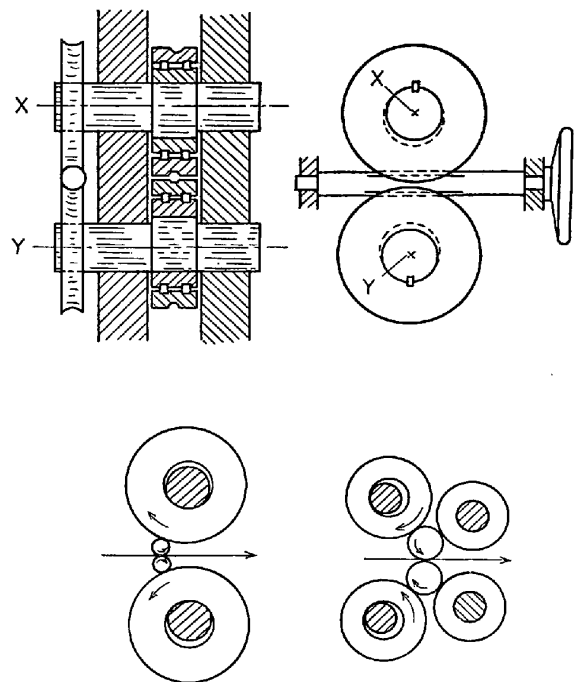


図 28 偏心軸圧下ローラーダイ



図 29 住友金属中研ローラーダイ

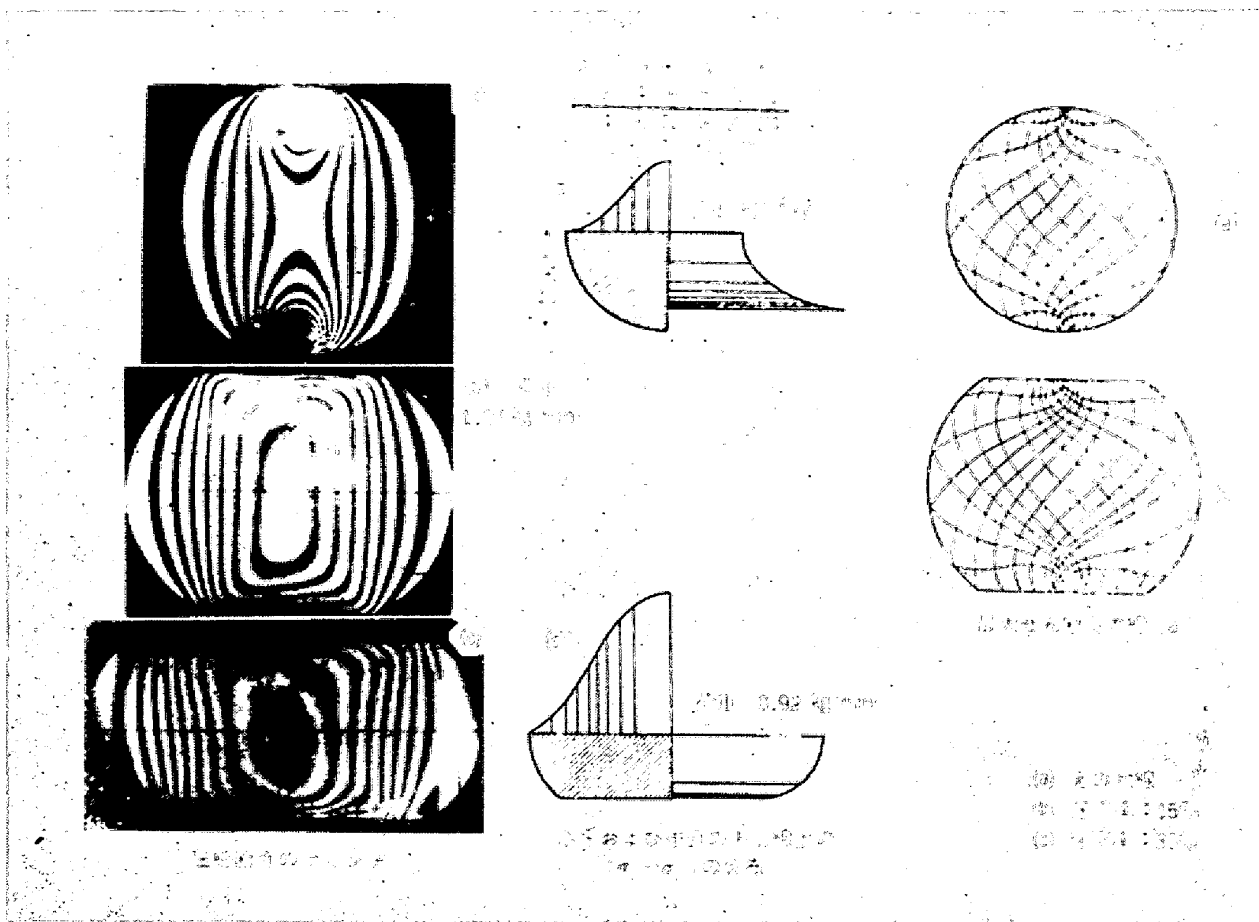
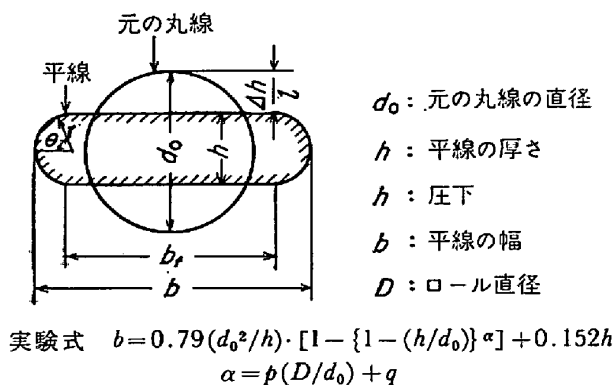


図 30 平線圧延の応力分布

平線圧延に関する研究 (1956)

表 6 平線の幅に対する実験式



ワイヤーの種類	ワンパスの圧下量	p	q
冷間加工材	大	0.0276	1.49
焼鈍材	大	0.0200	1.58
冷間加工材	小	0.0270	1.30
焼鈍材	小	0.0207	1.43

$$\begin{array}{l}
 0.4\text{C-鋼} \quad (D/d_0) \quad 2.80 \\
 0.1\text{C-鋼} \quad (D/d_0) \quad 2.72 \\
 \text{Al} \quad (D/d_0) \quad 2.67
 \end{array}$$

を用い又孔型合せに工夫をこらした図 29 のごとき細線用ローラーダイが住金中研で開発された。尚約 10 年前

ロール面圧力分布の研究 (1961)

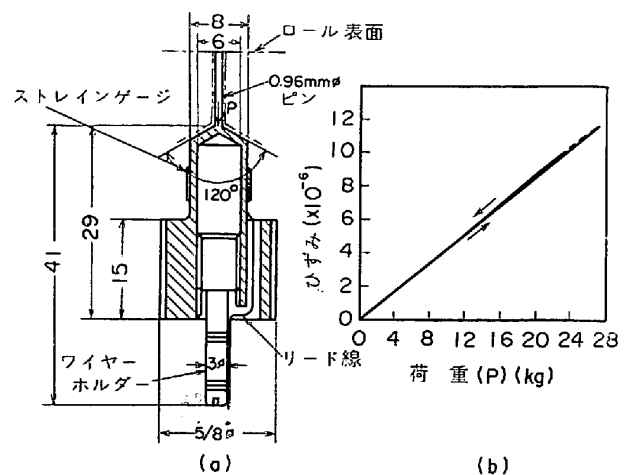


図 31 (a) 圧力測定ブロックと (b) その校正曲線

より毎年刊行される Wire Industry Handbook に Roller Die の項目が設けられ日本で開発されたと明記してありローラーダイ引抜法は世界的に認識されている。

さて圧延の研究の手始めは約 20 年前の丸線をリボン状にする平線圧延である¹⁰⁾。まず形状をとりあげ多くの実験の結果表 6 に示すごとくりボンの幅に対する実験式を確立しロール直径と線材直径の比の大きい程、1 パス

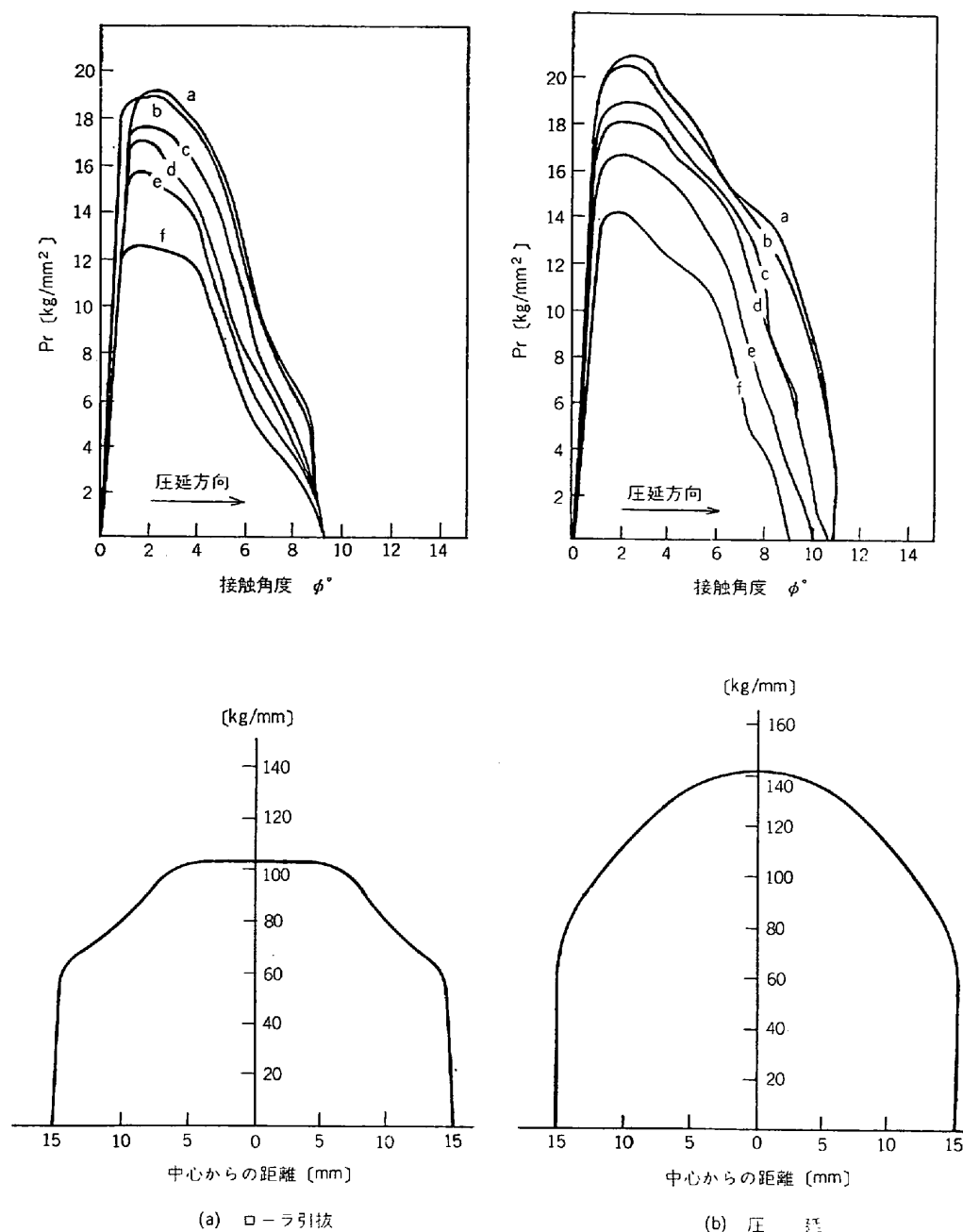


図 32 単位幅当たり圧下力，板幅方向の変化

圧下率の大きい程幅拡りが大きくなる事を示した。更に応力関係を見るため図 30 に示すごとく始めて塑性加工に光弾性を利用し各部の剪断応力を求め円形断面と平面断面との変形の差異を明らかにするとともに最大剪断応力線を求め材料の流れを検討した。その後平線圧延については見るべき発表がない。

圧延の基礎研究の重要項目の1つとしてロール面圧力分布の測定がある。我が国で初めて図 31 に示すピンによる方法で実験し信頼し得る値を得る条件を発表した¹¹⁾。その結果数年後各所でピン接触法による圧力分布の測定が盛んになった。圧力分布測定の例として図 32 には平板の圧延とローラー引拔の差を示した。ローラー

引拔が全体として圧力が小さく特に板幅中央部の減少が著しいのでローラーの摩耗も少いはずである。更に孔型圧延の際の圧力分布を測定したが1例としてボックス孔型について図 33 に示す¹²⁾。図 34 はこの孔型圧延と平圧延の圧力分布の差異を示してある。ともにピーニング効果による入口側の山が出ているがボックス圧延の場合は幅拡りが押えられるため全体として平圧延より圧力は高い事が判り、従って摩耗も大きくなる。

更にこのピン接触法を引拔に利用し孔型内部での応力を測定した¹³⁾。図 35 に示すごとくピンをダイスのアプローチ部に3本、ベヤリング部に1本挿入し、計4点測定した。その結果からベヤリング部でも相当な応力が加

わっていること、ダイス入口で非常に高い応力部分がある事が証明され前者は線径の太りに後者はダイス入口のリング状摩耗の原因を明らかにする事ができた。

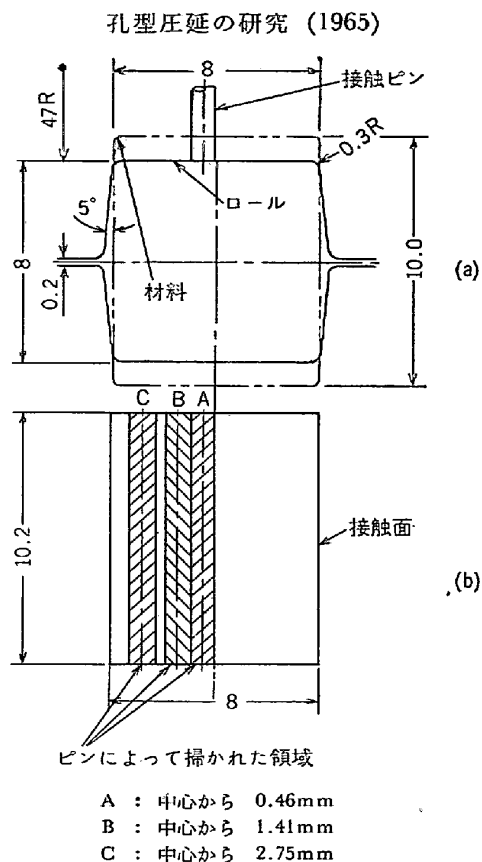


図 33 穴型のみぞのプロフィル(a)と接触面上でのピンの横方向の位置

ダイス面圧力分布の研究 (1966)

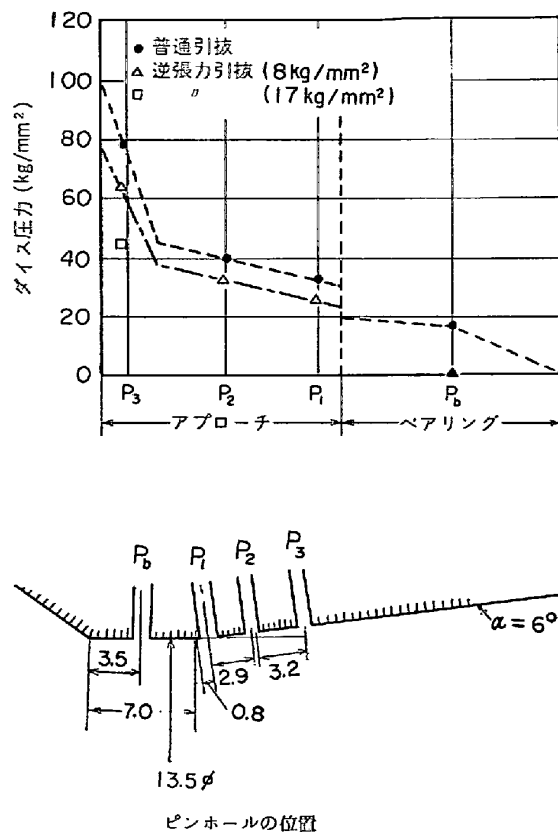


図 35 下の4点の位置でのダイス圧力の測定 (破線は計算によるダイス圧力分布)

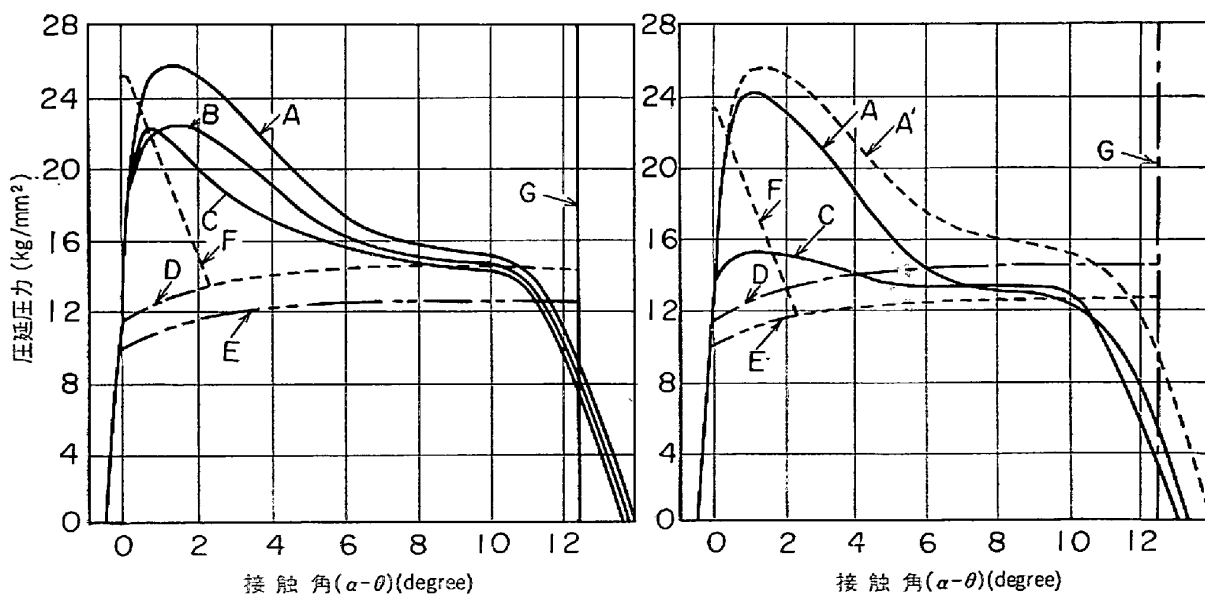


図 34 冷間加工したアルミニウム線材を穴型圧延した時の接触角での圧延圧力分布

冷間加工したアルミニウム線材を平圧延した時の接触角との圧延圧力分布

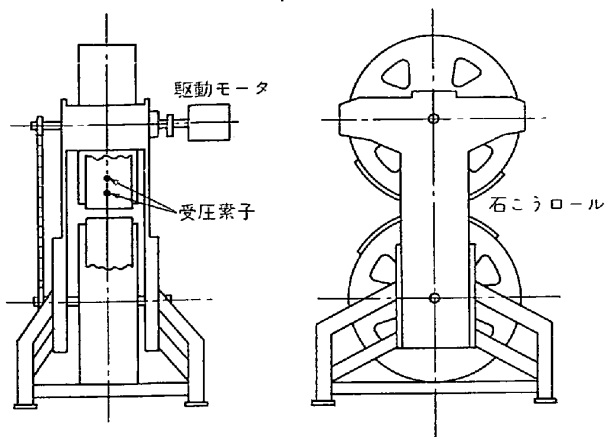
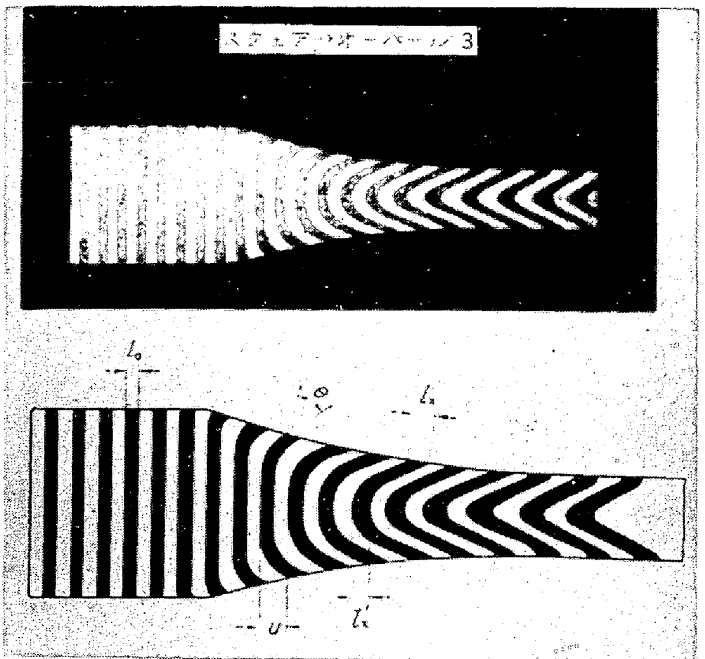


図 36 プラスチシン実験用圧延機

孔型圧延の材料の流れを調べるのに鋼の熱間変形と常温で同じ挙動を示すプラスチシンを使い出したのは10数年前である¹⁴⁾。図36は模型圧延機で孔型には石膏を使用した。その研究の1例として図37にスクエアオーバーバル変形を示す。これから伸び歪、剪断歪などが正確に測定できる。その後これら模型実験が各製鉄所でも広く行なわれ新孔型の設計には欠くべからざる方法となっている。

又、ピン接触法による圧力分布の測定は大きい費用と技術を要するので何とかプラスチシンによる材料の流れと同時に圧力分布測定はできないかと考え土圧計法を考え出した¹⁵⁾。図38はその例でこれによれば1回で各所の圧力分布が同時に測定し得る。その土圧計の構造は図39に示す。その後更に図40に示す小型摩擦力計を利用しロールと材料間の摩擦力も測定し得る様になった。これらで測定した結果の1例の圧力分布を図41に摩擦力分布を図42に示す。各位置における両者の比をとれば摩擦係数になる訳でこの場合ほとんど一定であつた。

更に同じ手法で三本ロールによる線材圧延の様相を研究したのが図43である¹⁶⁾。三本ロール圧延方式は鉄鋼のKockr₁圧延機および非鉄のProperizi圧延機で採用



u : 垂直線の偏差, $\epsilon_x = l_x/l - 1$: 伸びひずみ, θ : 接触面上のせん断角

図 37 プラスチシンによる流れ模様とその流れ図の解析を説明する模写図

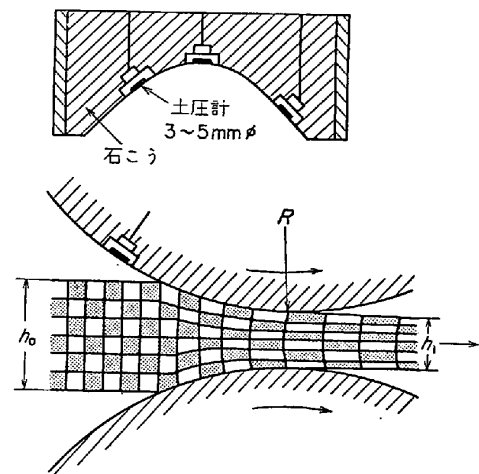


図 38 圧力分布測定プラスチシン-土圧計法

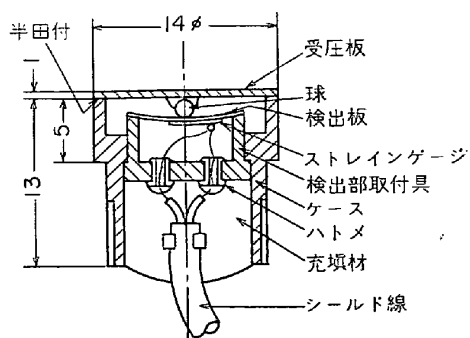


図 39 小形圧力計

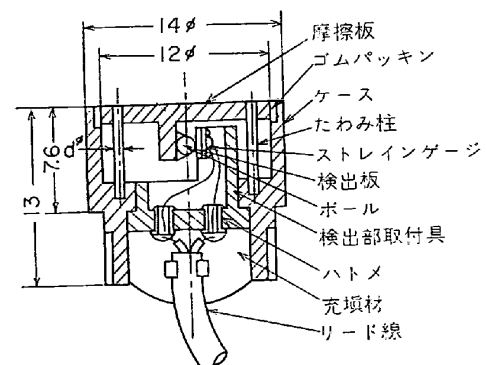
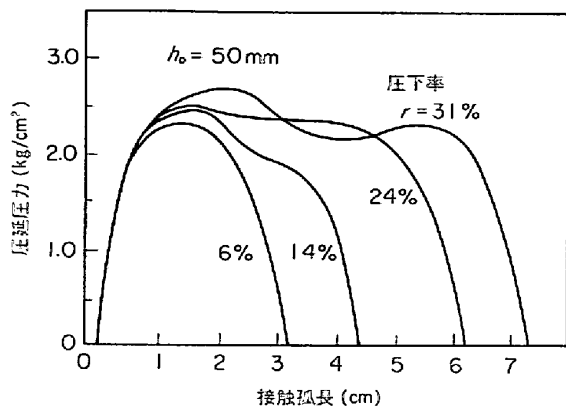
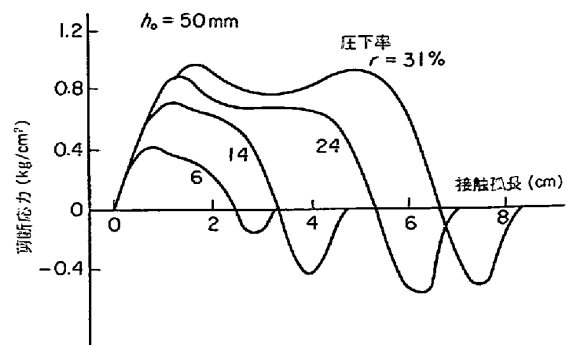
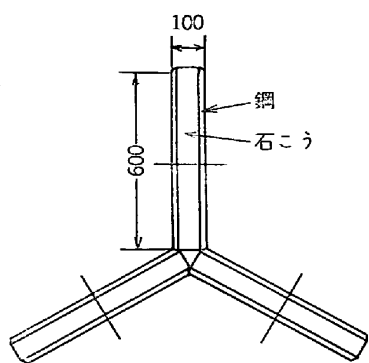
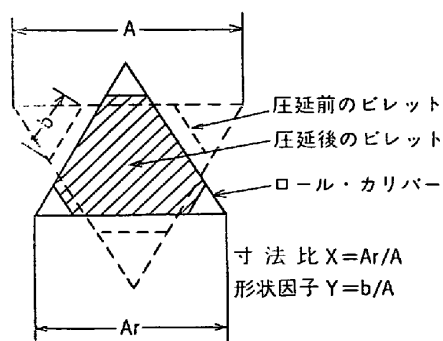


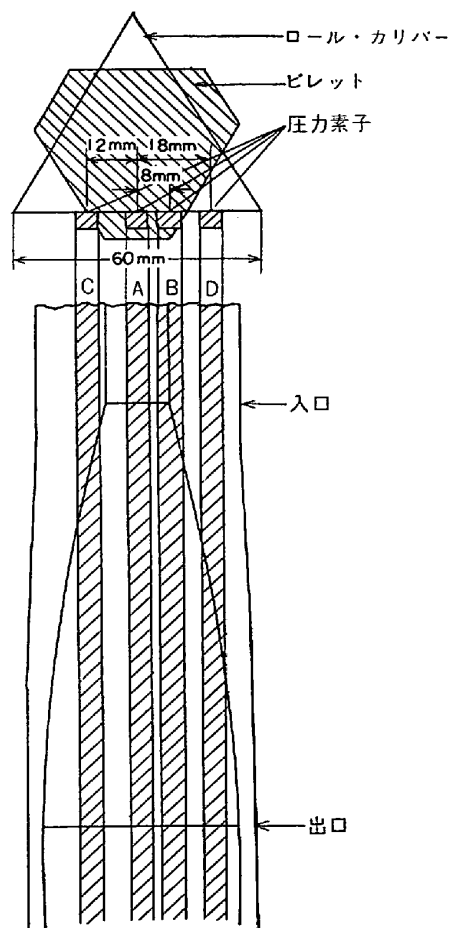
図 40 小形摩擦力計

図 41 圧延圧力分布 ($h_0 = 50 \text{ mm}$)図 42 剪断応力分布 ($h_0 = 50 \text{ mm}$)

a) 実験用三方ロール・システムの模式図



b) ビレットとロールカバーの幾何学的関係



c) 測定部の位置

図 43 三方ロール圧延の諸元

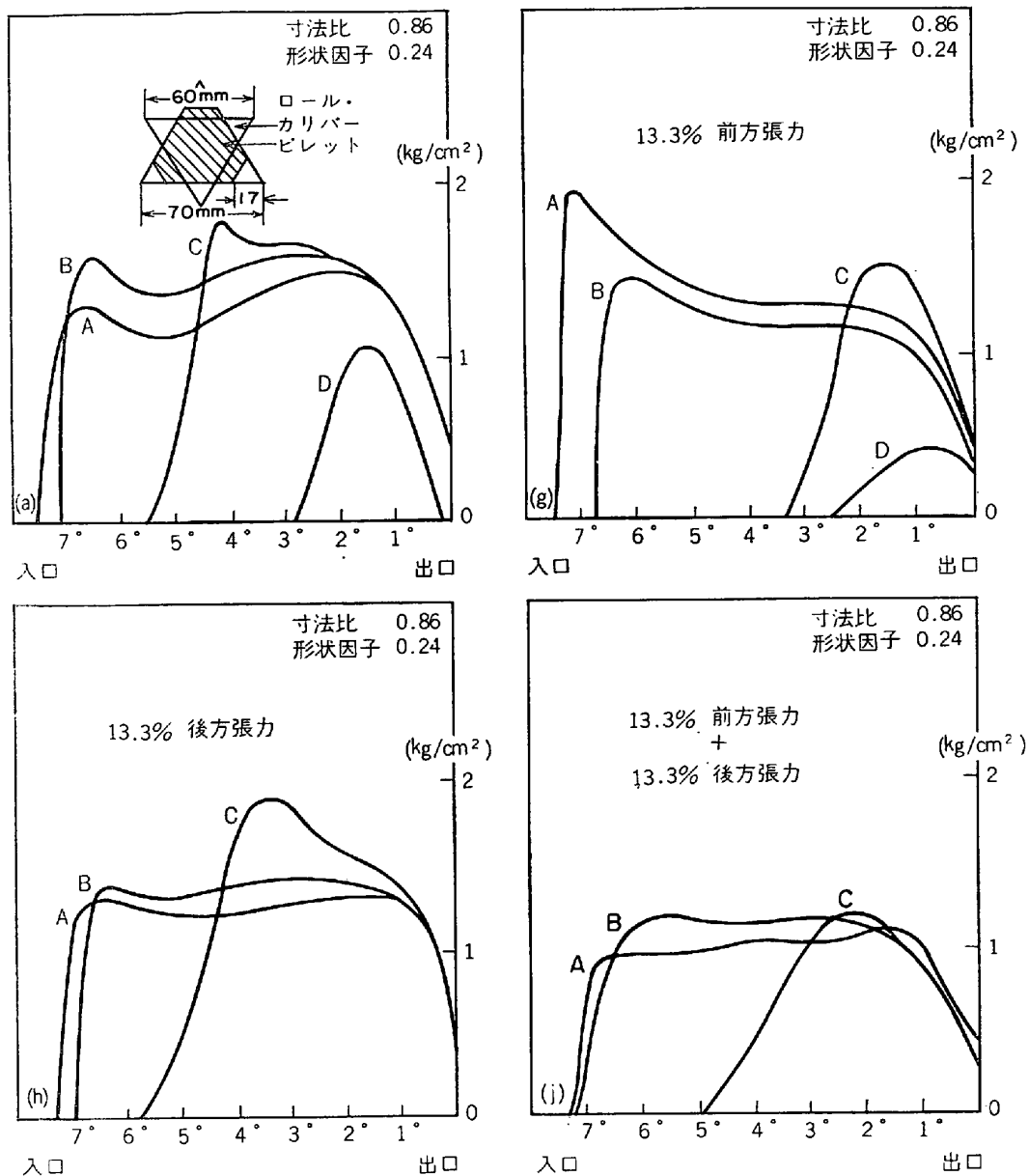


図 44 三方ロール圧延の接触圧力の分布

されているが孔型の設計，材料の変形過程など基礎的研究は皆無である．図 44 には各部の圧力分布を示し，図 45 には材料の変形の模様を示してある．横断面では材料は図のごとき 4 とおりの変形部分に分けられる．

次に鋼の温間加工の研究であるが，これは本多記念講演でやや詳しく述べたので不足点についてふれる．図 46 はピアノ線の引抜加工材の性質の比較である¹⁷⁾．温間引抜材が冷間引抜ないしはこれにブリーイングを加えたものよりはるかに強度が大であり，又，リラクゼーションは小さく PC 鋼線として有用な事を示している．しかし温間引抜はその時点では米 Lasalle 社の特許に抵触する事と，作業が厄介であるので私は温間整直即ち繰返し曲げ加工を考えついた．図 47 は小型 I ビームに必ず実施される矯直の際 300°C に加熱することにより簡

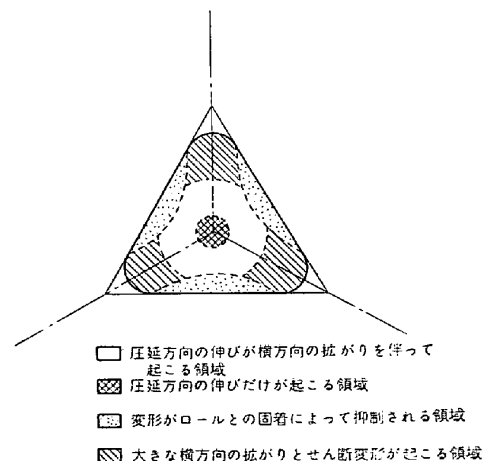


図 45 三方ロール圧延後のビレット内部の変形の模式的表示

温間加工法の研究 (1964)

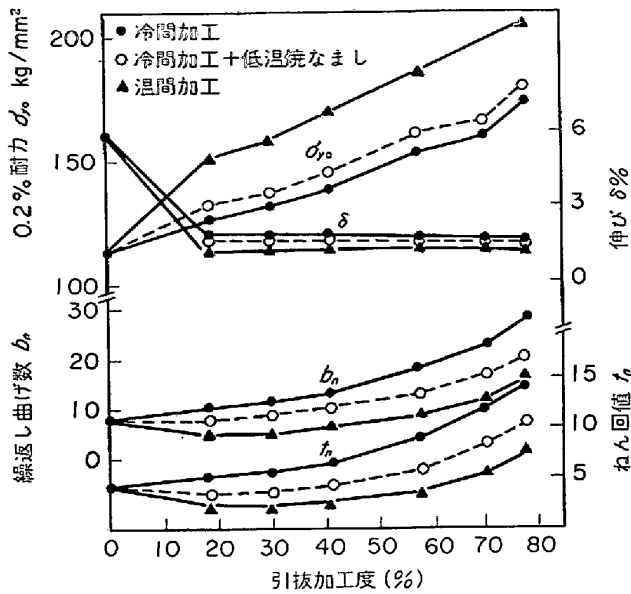


図 46 0.8% C パテンティング材の引抜加工

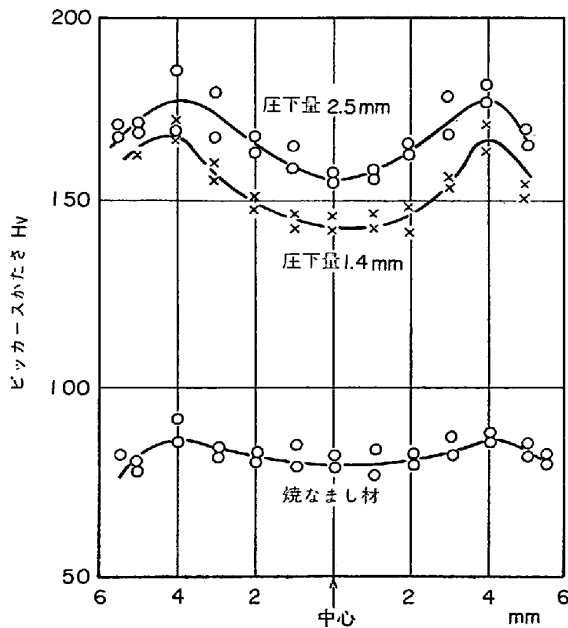


図 47 温間繰返し曲げ加工材の断面かたさ分布 (0.1% C I ビーム)

単に強度が上昇する事を示している¹⁸⁾。図 48 は高炭素鋼の 60% 引抜加工線を冷間整直、ブリューイング、温間整直した場合の性質の比較である。温間整直材は強度特に降伏点が大で伸びも相当にあり、又リラクゼーションも小さくなる¹⁹⁾。そこでこの方法が工業化された。図 49 は日本コンクリートで実施されている PC 鋼線の温間矯直法で加熱は高周波を用い次にインデントして矯直機にかけると振り作用によりインデントが螺旋状に配列しコンクリートとの付着力を高めるものができる。尚、温間サーフェス圧延については本多記念講演以後、国鉄

パウレンガー効果の研究 (1969)

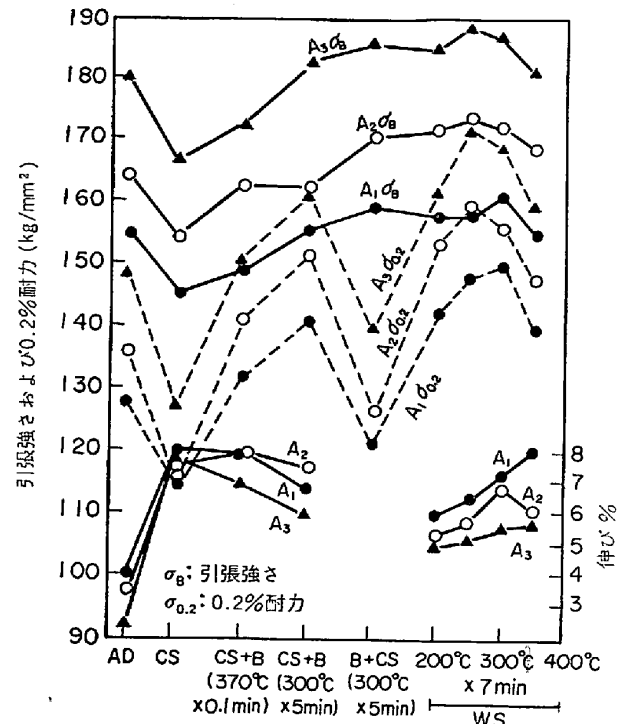


図 48 高炭素鋼線の各種整直法における機械的性質の変化 (AD: 引抜のまま, CS: 冷間整直, B: ブリューイング, WS: 温間整直)

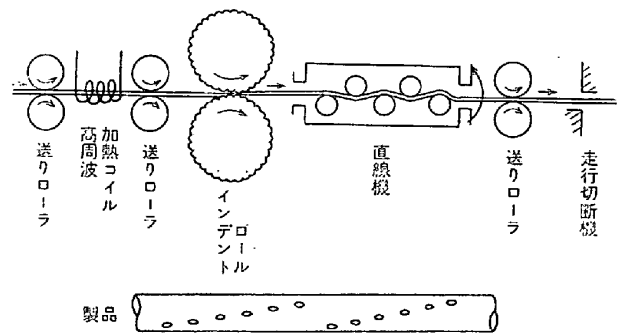


図 49 温間矯直による PC 鋼線の製造

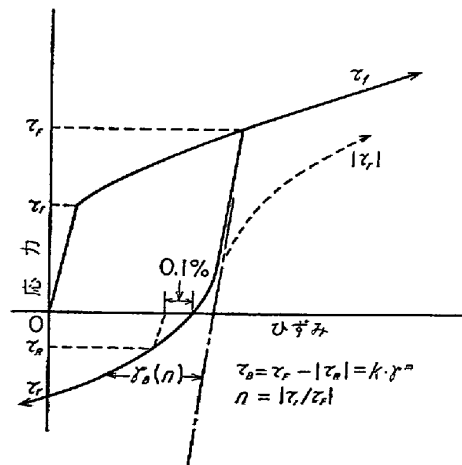


図 50 模式的な応力-ひずみ曲線

で詳細な研究を行なっている。

さて図 48 で冷間整直すると降伏点が急減する。これは古くから知られているバウシinger効果のためである。即ち図 50 に示すごとく例えば引張塑性変形した降伏点 τ_F の材料を逆に圧縮変形させるとその降伏点 τ_R は著しく低くなる現象でその差 $\tau_B = \tau_F - |\tau_R|$ をバウシinger応力といっている。この現象に対し従来金属学的に解明したものはなかった。そこで多くの金属、種々の組織の材料について研究し金属学的因子のこの効果に及ぼす影響を解明し進んではバウシinger効果を含む降伏条件式を確立した²⁰⁾。その研究の1例を図 51 に示す。これは予歪とバウシinger応力の関係であるがこれから $\tau_B = k \cdot r^m$ のバウシinger効果係数 k 、バウシinger効果指数 m を求めたのが表 7 である。これらから明かなごとく純鉄より炭素量が多くなるにつれ、又結晶粒が微細になる程バウシinger効果は大きく、又同一炭素量でも組織によつて著しく異なる事が判る。当然添加元素によっても異なる。バウシinger効果は大径管の製造のごとく

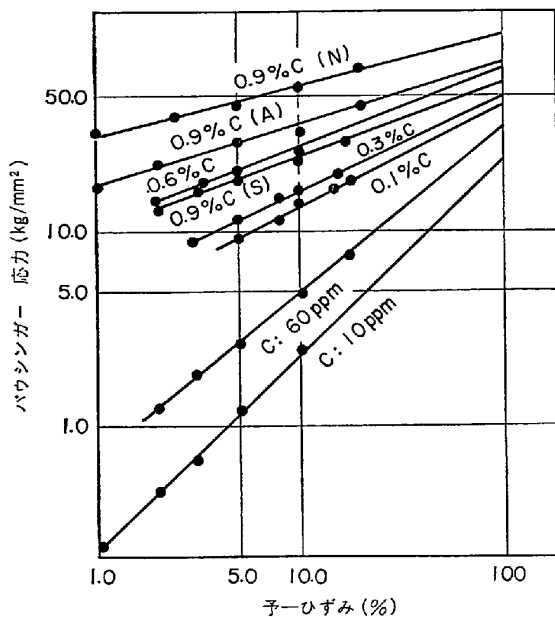


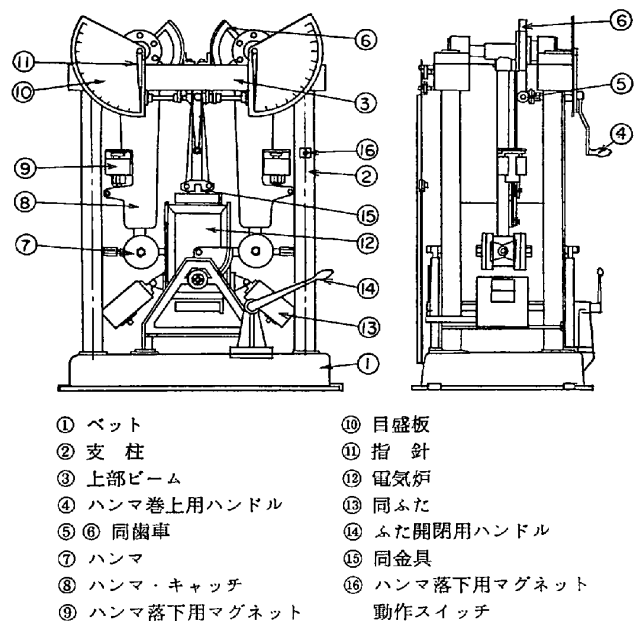
図 51 鉄と鋼の予ひずみとバウシinger応力との関係

表 7 バウシinger効果定数 k とバウシinger効果指数 m

	k (kg/mm ²)	m
脱炭鉄 (C: 10 ppm)	21.0	1.00
純鉄 (C: 60 ppm)	32.0	0.83
0.1%C-steel { 50 μ	44.0	0.55
{ 120 μ	38.2	0.50
0.3%C-steel	49.2	0.55
0.6%C-steel	67.0	0.54
0.9%C-steel { 球状化焼鈍	58.0	0.44
{ 焼鈍	70.1	0.35
{ 焼準	100.0	0.27

製造工程中種々の異なる変形を受ける場合に重要な意味を持つものなのでこの研究以後各製鉄会社で各種の鋼について研究される様になった。

さて塑性加工の材質の基礎としては変形抵抗の問題がある。この変形抵抗 $\bar{K}_f$ は材質、加工温度 T 、歪 ϵ^n 、歪速度 $\dot{\epsilon}^m$ 、摩擦係数 μ に関係してくる。この値は古くから多くの人々により各種の鋼について実験により出されているが、その実験の多くは歪速度 100/sec 以下である。しかるに現在の圧延の歪速度は 100~1000/sec で 1桁早くなっている。そこで昭和 35 年頃従来より歪速度をあげる事と圧延に近い対称的変形を与える事を目的として図 52 に示すごとき水平相打ハンマーを作った²¹⁾。この装置は小型で試料は炉内で叩くので加工温度は正確であり、試料も少量でよく、振動も皆無で、非常に有効に働きこれにより多くの基礎データが得られ、現在でも外部からの利用頻度も多い。試料が小さくてよい特長を活した実験例として 18-8 ステンレス柱状晶の変形に



- ① ベット
- ② 支柱
- ③ 上部ビーム
- ④ ハンマー巻上ハンドル
- ⑤ ⑥ 同歯車
- ⑦ ハンマー
- ⑧ ハンマー・キャッチ
- ⑨ ハンマー落下用マグネット
- ⑩ 目盛板
- ⑪ 指針
- ⑫ 電気炉
- ⑬ 同ふた
- ⑭ ふた開閉用ハンドル
- ⑮ 同金具
- ⑯ ハンマー落下用マグネット
- ⑰ 動作スイッチ

図 52 水平相打ハンマー

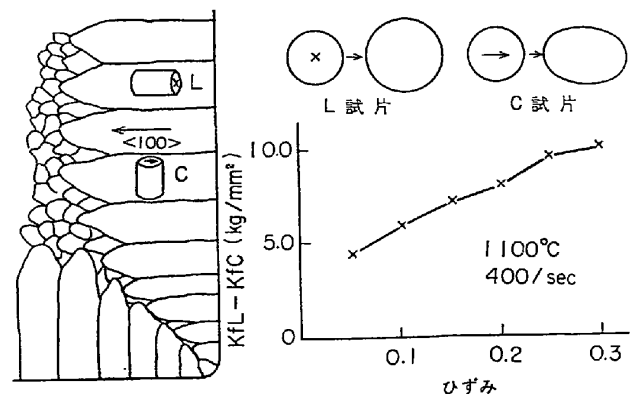


図 53 18-8 ステンレス鋼柱状晶の変形

ついて述べる. 図 53 に示すごとく鑄塊の柱状晶方向とこれと直角方向の棒状試片を鍛造してその差を調べて見ると, 前者は断面が円形, 後者は楕円形となる. この事は鑄塊の柱状晶のぶつかり合う所では圧延により異状な

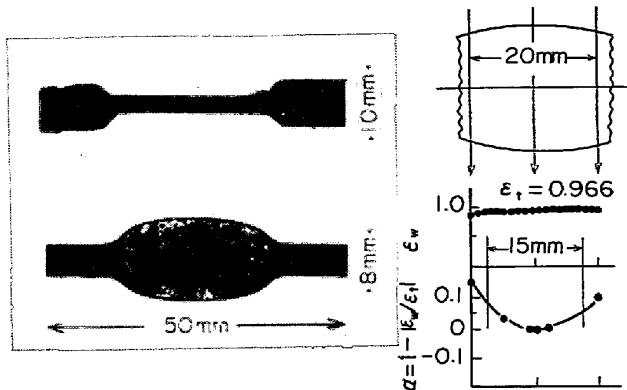


図 54 平面歪鍛造した試料 (ϵ は平面歪よりのずれ)

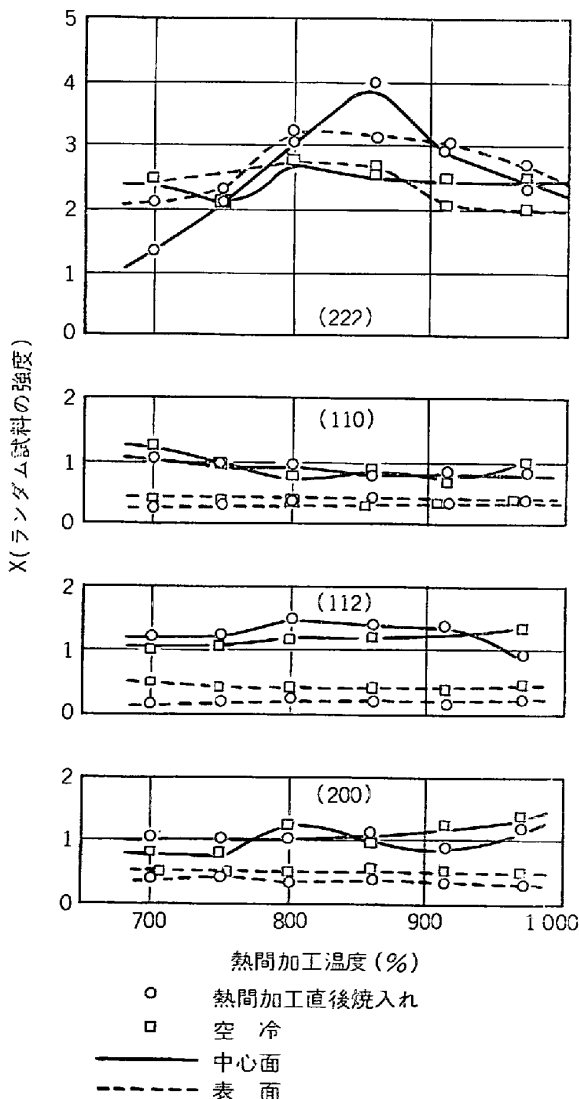


図 55 80% 冷延, 680°C, 1 時間焼鈍後の試料面に平行な低指数面密度と熱間加工温度の関係

変形が起こり割れを生ずる可能性があるので結論としては柱状晶の発生を防止し結晶粒を微細化する事が望ましい事になる.

この相打ハンマーで円筒試料を叩くと 3 次元変形であるが 4 角棒を側面から鍛造すると図 54 に示すごとくほとんど 2 次元変形となり材料の流れは圧延の場合と同じになる. この方法によって熱間圧延温度とその後の冷延, 再結晶状態の集合組織の関係を求めたのが図 55 である²²⁾. この場合最適な仕上温度は 850°C 内外で急冷した方がよい事が判る. 又図 56 に示すごとく熱延温度を変化させ冷延前の結晶粒を微細にしたもの程 (111) が

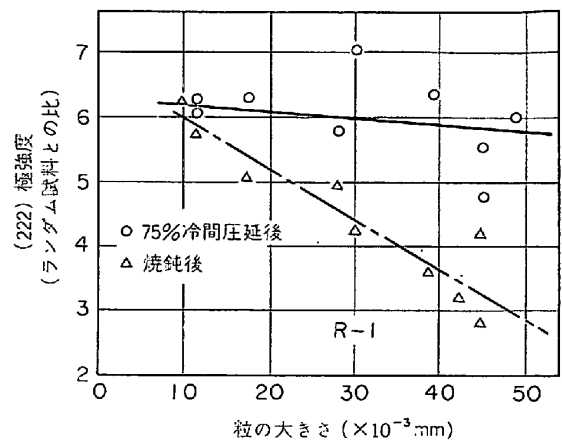


図 56 板中心面の (222) 極強度と熱間圧延後の粒の大きさの関係

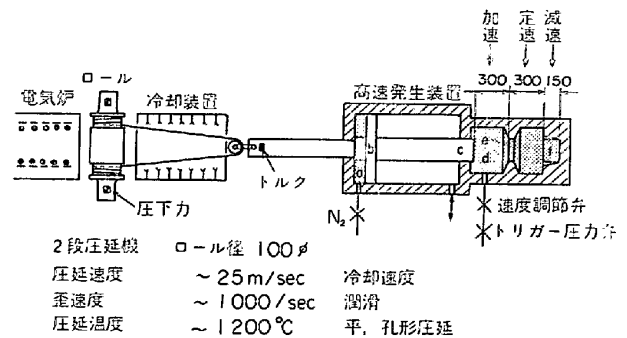


図 57 研究用高速圧延機

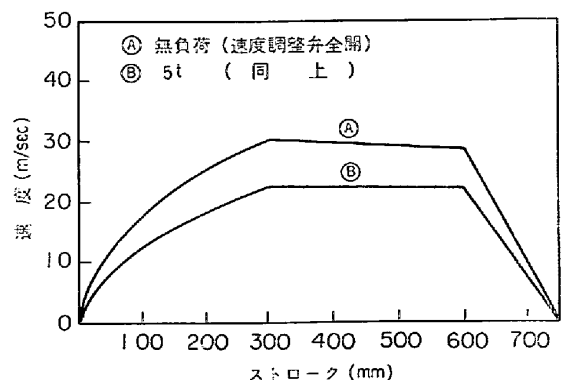


図 58 高速圧延機のストローク-速度線図

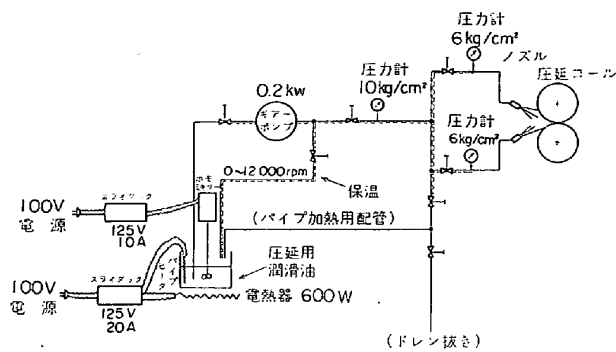


図 59 圧延油供給シミュレート装置系統図

多くなり深絞り性が向上するなどの重要な結果が得られた。

しかし上記方式による圧延の研究には試料の大きさ、摩擦の問題などに限度があるので昭和 43 年に現場の圧延条件を満足し、しかも安価な世界で始めての高速試験圧延機を開発した。その要点は図 57 に示すごとく油圧による高速直線運動をワイヤロープを介してロールの回転に導くもので圧延速度は 0~25m/sec である。図 58 にその工程を示すがこの定速 30cm の間に圧下力、トルクなども測定し、30cm の試料で材質試験が行なわれる。これに図 59 に示すとき潤滑装置をつければ潤滑も現場の条件を再現できる。これによる μ の測定値と実機のストリップミルにおける μ とはよく一致し、又圧延速度過大の際生ずる圧延板の friction pick up (表面欠陥) の状況も実機と全く同じに現われ実機のモデル実験用として最適である事が確められた²³⁾。この圧延機は日本鋼管を始め数社も研究に利用し多くの貴重な結果を出しているが、これに刺激され電動機による高速試験圧延機が 2, 3 設置されたがあまり活発に動いていない様である。

最後にこの試験圧延機で材料とロール間の摩擦係数を測定した結果について述べる。摩擦係数の算出には付加的剪断変形を考慮にした次の BLAND and FORD の式を用いた。

$$\text{圧延応力 } P = f_3 \cdot k_m + \frac{h_m}{4ld} \cdot k_m \quad \dots \dots \dots (1)$$

k_m : 二次元拘束平均変形抵抗

h_m : 平均試料板厚

l_d : 接触弧長さ

f_3 は圧延圧力分布に関するもので摩擦係数 μ 、ロール半径、圧延前後の板厚の関数である。計算の手順は μ を仮定して (1) 式より P を計算し、この値と実測値が一致する μ を求める。

この際の圧延試料の平均変形抵抗は次の五弓、木原の式 (1968 年)²⁴⁾を基にして計算する。

$$k_f = k_{st} + e^{6.5} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{kT/0.14} \quad \dots \dots \dots (2)$$

k_{st} : 温度、歪速度に依存しない成分

$\dot{\epsilon}_0$: 前指数係数、 ϵ にのみ依存する

k : ボルツマン定数

この式は鋼の変形機構が Peierls-Nabarro 機構であるという Conrod の考え方に基づいて実験的に具体化したもので歪速度および温度の影響を考慮した動的変形抵抗の数式表示として精度のよい事が各所で証明され、また日本鋼管福山の世界唯一の完全連続冷間ストリップ圧延

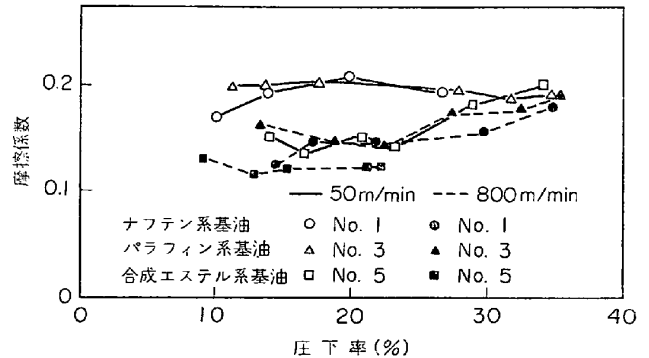


図 60 潤滑基油による摩擦係数と圧下率の関係

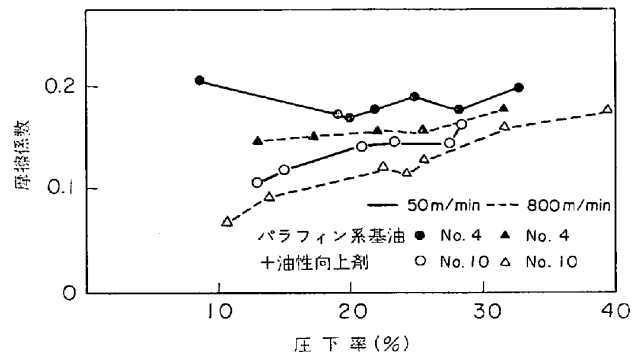
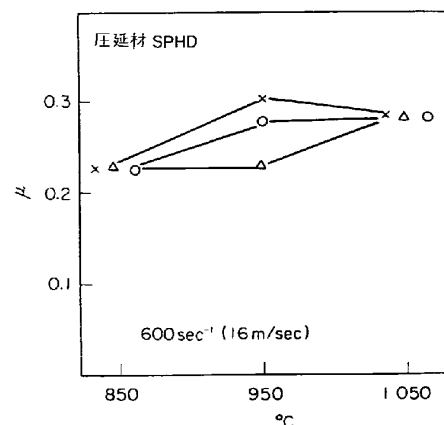


図 61 油性向上剤による摩擦係数と圧下率の関係



潤滑油の種類	含有成分wt%	ヒマン油	
		4.7	1.7
x—x	GG	7.5	2.4
o—o	N	34.0	0.7
△—△	GH		

図 62 市販熱延潤滑油の摩擦係数

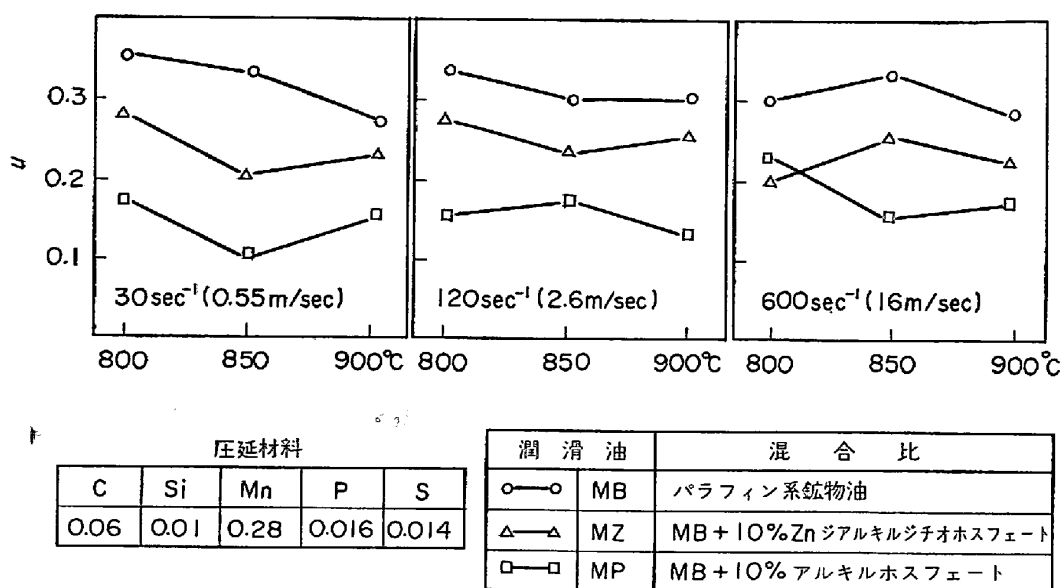


図 63 熱間圧延油に対する油膜強化剤の影響

の完成にも重要な役割をはたした式でありミクロ的基礎の考えを応用に結びつけたものである。この式の k_{st} と ϵ_0 の歪に対する変化を求めるには与えられた材料(材質, 組織および予歪量などが入っている)を室温で単軸引張試験を2つの歪速度で行ない同一温度における2つの歪速度に対する変形応力から求めるので精度がよい。

上記の式を用い各種潤滑剤の μ に対する圧下率, 圧延速度の影響を検討した結果の数例を次に示す²⁵⁾。図 60 は冷延の場合の基油の種類による差を示したもので合成エステル系が最も良好である。図 61 によれば油性向上剤添加により μ の低下が著しい事が判る。図 62 は市販熱間圧延油の性能である。ヒマシ油の量が異なり 950°C 位では, これがきいて μ の低下が見られるが 850°C, 1050°C ではほとんど変らない。図 63 は油膜強化剤添加の影響であるがその効果が低速高速ともにはっきり現われている。以上の様にこの高速試験圧延機は少量の潤滑剤を使用して現場と全く同条件を現出し得るので圧延油の試験機としても高く評価されている。

以上 30 年にわたる五弓研における研究の一端を述べたがその根底にはいつも工業に役立つ技術を開発するという目標を持って来た。最近特に必要と叫ばれている独創的技術開発という観点から私なりに技術者, 研究者を大別すると第一に一型がある。これは色々の事柄を万遍なくよく知っているが深みがない, いわゆる物知りで便利ではあるが技術開発の可能性は少ない。次は I 型で一つの事を深く究めているが他の事は見向きも知らない型でこれも技術開発には不向きである。更に悪いのは L 型で専門を深く掘っている内に細かい枝葉の問題を見つけて横穴を掘ってしまう人で, 他所が全然見えないからである。少なくとも技術開発を志すならば T 型でなくてはならない。即ち自分の専門は相当な深みを持ち, いつも頭

は穴の外に出し専門以外の技術のキーポイントをつかまえている人である。更によいのは II 型で最近のごとく技術が複雑化し境界領域が大切な時代には専門を2つ位持ち大地にしっかりと立つてその上専門以外のキーポイントをも多く身につけている人であろう。塑性加工は主として機械, 金属の総合した技術なので特にその感が深い。

私は今まで塑性加工の研究, 教育に半生を過ごしたがいまだやりかけの技術開発や着手したいテーマが相当あるので西山賞受賞を機会に更に心を新にし, 頭を柔軟にしてこれらに取組みたいと思っている。この拙文が何か御参考になれば幸いである。

文 献

- 1) 日本金属学会会報, 9 (1970) 8, p. 465
- 2) 日本金属学会誌, 16 (1952) 12, p. 674
 〃, 16 (1952) 12, p. 679
 〃, 17 (1953) 1, p. 40
 〃, 17 (1953) 1, p. 43
- 3) 日本金属学会誌, 13 (1949) 12, p. 9
 〃, 14 (1950) 1, p. 68
- 4) 自動車技術会自動車性能向上鋼板技術委員会報告書 (1953-3), p. 26
- 5) Technocrat, 1 (1968) 4, p. 56
 日本金属学会誌, 34 (1970) 4, p. 452
 〃, 34 (1970) 5, p. 516
 〃, 34 (1970) 5, p. 520
- 6) 塑性と加工, 14 (1973) 145, p. 168
- 7) 日本金属学会誌, 19 (1955) 10, p. 575
- 8) 〃, 18 (1954) 5, p. 321
- 9) 日立評論, 別冊 15 号 (1956), p. 7
 鉄と鋼, 49 (1963) 8, p. 1110
- 10) 日本金属学会誌, 22 (1958) 11, p. 572
 〃, 22 (1958) 11, p. 576
- 11) 塑性と加工, 3 (1962) 13, p. 73

- 12) 日本金属学会誌, 29 (1965) 10, p. 1 005
 - 13) 日本金属学会誌, 31 (1967) 1, p. 83
 - 14) 鉄と鋼, 53 (1967) 6, p. 599
 - 15) 第 20 回塑性加工連合講演会論文集 (1969), p. 5
 - 16) 日本金属学会誌, 33 (1969) 8, p. 889
Trans Iron & Steel of Japan, 11 (1971), p. 645
 - 17) 塑性と加工, 5 (1964) 45, p. 643
 - 18) 日本金属学会誌, 31 (1967) 4, p. 357
 - 19) " , 32 (1968) 3, p. 289
 - 20) 塑性と加工, 10 (1969) 107, p. 863
日本金属学会誌, 34 (1970) 2, p. 161
" , 34 (1970) 2, p. 154
 - 21) 塑性と加工, 3 (1962) 23, p. 825
 - 22) 日本金属学会誌, 31 (1967) 1, p. 63
" , 31 (1967) 2, p. 148
" , 33 (1969) 11, p. 1 303
 - 23) 塑性と加工, 13 (1972) 143, p. 919
" , 14 (1973) 144, p. 12
" , 14 (1973) 145, p. 160
 - 24) Trans JIM, 9 (1968), p. 427
2nd Inter Conf. Strength of Metals of Alloys, 1 (1970), p. 146
 - 25) 第 23 回塑性加工連合講演会講演集, (1972), p. 339
塑性と加工, 15 (1974) 160, p. 400
第 25 回塑性加工連合講演会講演集, (1974), p. 45, p. 49
塑性と加工, 16 (1975) 168, p. 18
- 引用論文は直接本文と関係あるものに限った。その他間接に関係あるものを含めるとその論文総数は約 190 でその内訳は次のとおりである。
- | | |
|----------------------|--------|
| 1. 変形抵抗と強度関係 | 約 15 件 |
| 2. バウシINGER効果と降伏条件関係 | 約 15 件 |
| 3. 鍛造および押出加工関係 | 約 20 件 |
| 4. 圧延加工関係 | 約 35 件 |
| 5. 引抜加工関係 | 約 15 件 |
| 6. 板成形加工関係 | 約 35 件 |
| 7. 加工熱処理関係 | 約 15 件 |
| 8. 再結晶および集合組織関係 | 約 40 件 |