

連続亜鉛めっき設備

Continuous Galvanizing Line for Mild Steel Strip

一般に亜鉛めっきを施した薄鋼板は、需要の多い最終成品であり高品質が要求される。その一つは、所定の厚みが均一な亜鉛皮膜を得ることであり、設備としても種々のくふうが凝らされている。この論文では、最近日立製作所が納入した最新鋭設備を例に取り、連続亜鉛めっき設備の問題点について述べる。

梅田 昭三* Shôzô Umeda
 秦 和宣** Kazunori Hata
 山口 輝雄** Teruo Yamaguchi
 今井 幸義** Yukiyo Imai
 江原 勝也*** Katsuya Ebara

1 緒 言

帯鋼の連続式亜鉛めっき設備には、センジマー方式、U.S. スチール方式、ホイーリング方式、シーラス方式などに代表される種々のプロセスがあるが、我が国においてはセンジマー方式が最も多く採用されてきている⁽¹⁾⁽²⁾。このうち、日立製作所ではU.S. スチール方式を除く各方式の製作、納入の経験を得ている。

亜鉛めっき設備は、最近まではほぼ完成された設備として定形化し、特に顕著な発展は見られなかった。その理由として、従来のめっき作業がシートめっきより発達したロール絞りによる経験的なものであって、めっき速度が90m/min付近を超えると、めっき帯鋼の外観が著しく低下することが主な原因となっていた。これらの技術的障害に関して、従来のロール絞り法に代わって気体絞りによるめっき方式が開発され、また後処理設備も新技術が開発され、この結果、最近の設備では120m/minが一般的となり、更に180～240m/minの高速設備が実用化されるに至り、各種の自動制御、電子計算機の導入と相まって亜鉛めっき技術の新時代到来の感がある。

高速化に伴う問題点を列記すると次のとおりである。

- (1) 気体絞り法の採用による高域限界速度とその製品品質
- (2) めっきの高速化と表裏一体の関係である冷却方法の改良
- (3) めっき設備に追従できる高速せん断機、及びそれに対応できる高速パイラの開発
- (4) 形状調整に対処できる理想的なテンションレベラの形式
- (5) 熱処理工程を含む高速通板の際の蛇行防止策
- (6) 最少人員による運転及び自動化とコストパフォーマンスの関係

この論文では亜鉛めっき設備で最も重要な(1)の問題について述べるとともに、日新製鋼株式会社へ納入した最新鋭設備を例に取りながら、他の問題についても若干触れる。

2 最新設備の構成

代表的なセンジマー方式を取りあげた場合、設備の配置は工場全体のレイアウトと関連して四つの形に大別できる。各配置の長所及び短所を図1に示す。

ここに図1(a)配置の変形として、日立製作所が日新製鋼株式会社へ納入し、最近、稼動を開始したセンジマー方式の設備につき新技術を投入したので、その機器の構成と自動化の概要につき紹介する。

この設備に気体絞り装置を採用していることはもちろんであるが、世界でも有数な高能率、高生産であること、最新の

機能を備え電子計算機を設備の制御用だけでなく、生産管理用としても広範囲に使用し、各ブロックごとの自動化を行なう段階まで進めたことを特長としている。

各セクションの特徴を紹介する。

2.1 エントリーセクション設備の主な特長

- (1) 電子計算機制御による減速停止の自動化を実現
- (2) ストリップの先端、後端を自動的に処理する端板処理設備の導入
- (3) バフ装置を前処理設備に設け、めっき性を阻害するストリップのさびやその他の付着物を除去し、表面調整

2.2 焼鈍炉セクション設備の主な特長

- (1) 排ガス式予熱ゾーンによる熱効率の向上
- (2) 排ガス吐出し口を予熱ゾーンの入口の両サイドのみに設け直火炉の寿命延長と、排ガスの屋内飛散防止を企画
- (3) 表面調整ゾーンを設けてストリップ表面の還元性を強化
- (4) 電子計算機制御による自動操業

2.3 センターセクション設備の主な特長

- (1) 気体絞り装置は、従来のものに更に改良を加え、装置の周辺は作業性に重点をおき、各装置の配置とスペースに考慮を払い、噴出気体の発生装置は熱効率、作業性、自動コントロールなどを特に考慮
- (2) 亜鉛浴は誘導加熱セラミックポット方式とし、その大きさ、誘導コイルの配置、レイアウトは亜鉛投入装置による亜鉛投入を便利にし、更に投入時にめっきに対する悪影響がなく、且つトップドロスの発生が少なく、作業性の良いように考慮
- (3) 放射線式めっき厚み測定計を設置し、将来気体絞り装置と組み合わせて亜鉛付着量を制御できるよう考慮
- (4) 化成処理は三つのストレージタンクを備え、それぞれ異なった処理液がセッティングされ、用途に応じ自動バルブ操作で処理液の切換え可能

2.4 デリベリーセクション設備の主な特長

- (1) 電子計算機制御による、減速停止、長さ(重量)分割、コイル尾端定位置停止の自動化
- (2) コイル搬走、結束、秤量、及び溶接端板、テストサンプルを採取する端板処理設備の自動化

表1にこの設備の主な仕様を示す。

また日立製作所が某社へ納入したセンジマー方式の設備では、出側巻取り部で、ストリップの走間分割を可能にした走間シャーと、テンションリールとして図11に示す連続巻取り

*日新製鋼株式会社企画調査部 副部長

**日立製作所日立工場

***日立製作所日立研究所

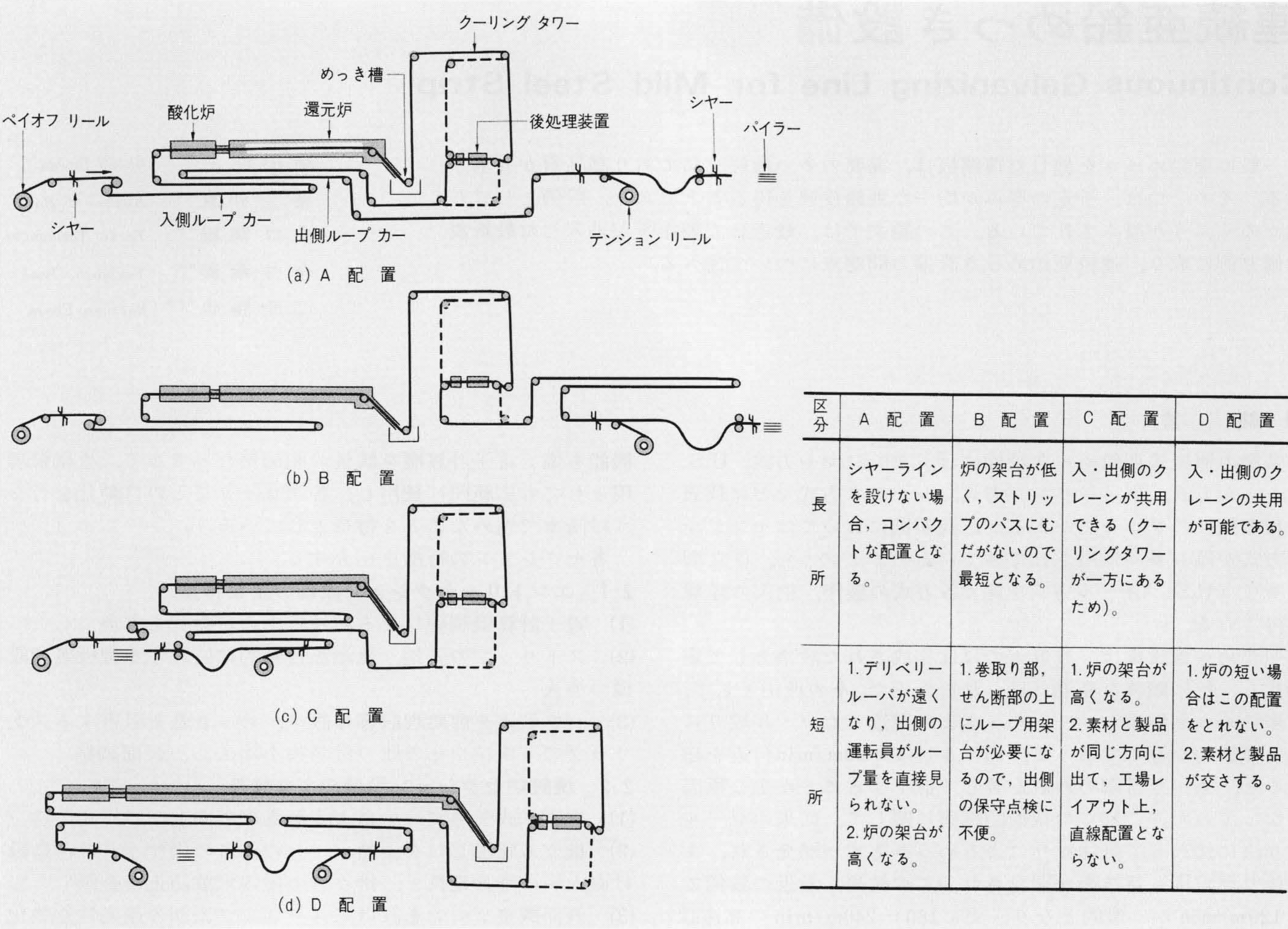


図1 連続亜鉛めっき設備の配置 日新製鋼株式会社納めの設備は、A配置の変形で、2ペイオフリール及び2テンションリールを配置、シャーラインは付属していない。

可能な新しい形のカラーゼル形リールを採用することにより、従来、配置上図1に示すようにむだなスペースを取り、また設備費の増大や蛇行の原因となっていた出側ループカーが簡略でき設備全長を縮小し、併せて建設費の低減を図っている。

3 気体絞り装置

3.1 従来のロール絞り法と気体絞り法

三十数年前に連続溶融亜鉛めっき設備が実用化されて以来、亜鉛の付着量の制御にはめっき浴の出口に設けられた一對の絞りロールが用いられてきた⁽⁴⁾。すなわち、めっきロールの径、めっき浴に対するロールの高さ、ロールの周速、ロールの外周に切ったみぞの形状と配置、ストリップの速度、めっき浴の流動性などを経験的に組み合わせて最適条件とする方法である。しかしこの方法では、次のような種々の欠点があり、これを基本的に解決し得なかった。

- (1) ロール外周には亜鉛の通過を許容するみぞが切っており、これが製品の表面にグループマークとして残る。この部分は平滑部より亜鉛の付着が20%程度少なく⁽⁵⁾、したがって、この分だけ寿命が短くなる。
- (2) ストリップの中央部に比べ、両端部の付着量が多くなる。
- (3) 最小付着量は0.35~0.4oz/ft²が限界である。
- (4) 高速では付着量を少なくするためにロールの押し付け力を強くすることが必要であり、板切れなどの問題でめっき速度に限界が生ずる。

(5) 絞りロールの補修のために短い周期で交換しなければならず、取替え後はロールが亜鉛になじむまで不良が発生し、歩どまりが低下する。

(6) これらの諸条件を定量的に把握することは難しく、熟練作業者の勘に頼るところが多い。

気体絞り法はこのようなストリップと絞りロールの直接接触による不具合を、非接触形の絞り法を採用することにより解消し得るという考えで開発したもので、日新製鋼株式会社と共同で種々の実験を繰り返して完成し、表2に示すように既に多数の納入実績を持っている。

3.2 気体絞り装置の概要

気体絞り法では図2に示すように亜鉛浴から引き上げられたストリップに対して、浴面近くに設置したノズルにより、ストリップの両側から気体を吹き付けて付着量を制御する。この場合の作業条件として、気体の温度、気体の圧力及びラインスピードの関係は傾向として図3に示すようなものである。

この気体絞り法の採用により、めっきの挙動を勘に頼らず定量的に把握することが可能になってきたのでその一部を紹介する。

3.3 ノズル特性

気体絞り法による絞り効果は、ストリップ面に付着した亜鉛を噴流により圧縮して、亜鉛を押し下げる作用によるものである。したがって、ノズルから噴射された気体の動圧がど

のように変化しているかということが、絞り効果を知るうえで重要である。ここでは、実験装置を用いてノズルの諸特性について調べた結果を述べる。

3.3.1 実験装置及び実験方法

幅150mmのスリットを切ったノズルを使用した。流量は入口パイプ内のオリフィスにより、入口の静圧(空気の圧力)はノズルヘッド出口にて、噴流の動圧はピトー管を移動することによりそれぞれ測定した。流体としては常温の空気をを用いた。

3.3.2 実験結果と考察

(1) 動圧分布

図4は動圧とノズルギャップを無次元化して整理したものである。同図よりヘッド出口の静圧及びスリットギャップの変化にかかわらず、ある幅を持つ1本の直線でまとめることができ、噴射口付近の核流部と遷移部を除いた部分について

表1 日新製鋼株式会社納め亜鉛めっき設備仕様 本設備は気体絞り装置を採用しているほか、設備全体をコンパクトにまとめた点、各ブロックごとのクローズドループコントロールの段階までに自動化している。

項 目		仕 様
取扱い 材 料	材 料	冷間圧延未焼鈍普通鋼ストリップ 酸洗済調質熱延普通鋼ストリップ
	板 厚	0.27～1.6 mm
	板 幅	762～1,240 mm
素 材 コイル	内 径	508 mm φ, 762 mm φ
	外 径	最大：2,100 mm φ
	重 量	最大：22,400kg
製 品 コイル	内 径	508 mm φ, 610 mm φ, 762 mm φ
	外 径	最大：1,800 mm φ
	重 量	最大：20,000kg
ライン 速 度	エントリーセクション	20～235 m/min
	センターセクション	20～180 m/min
	デリベリーセクション	20～270 m/min
炉生産 能 力	焼 鈍 サ イ ク ル	38.5T/H
	予 熱 サ イ ク ル	57.0T/H

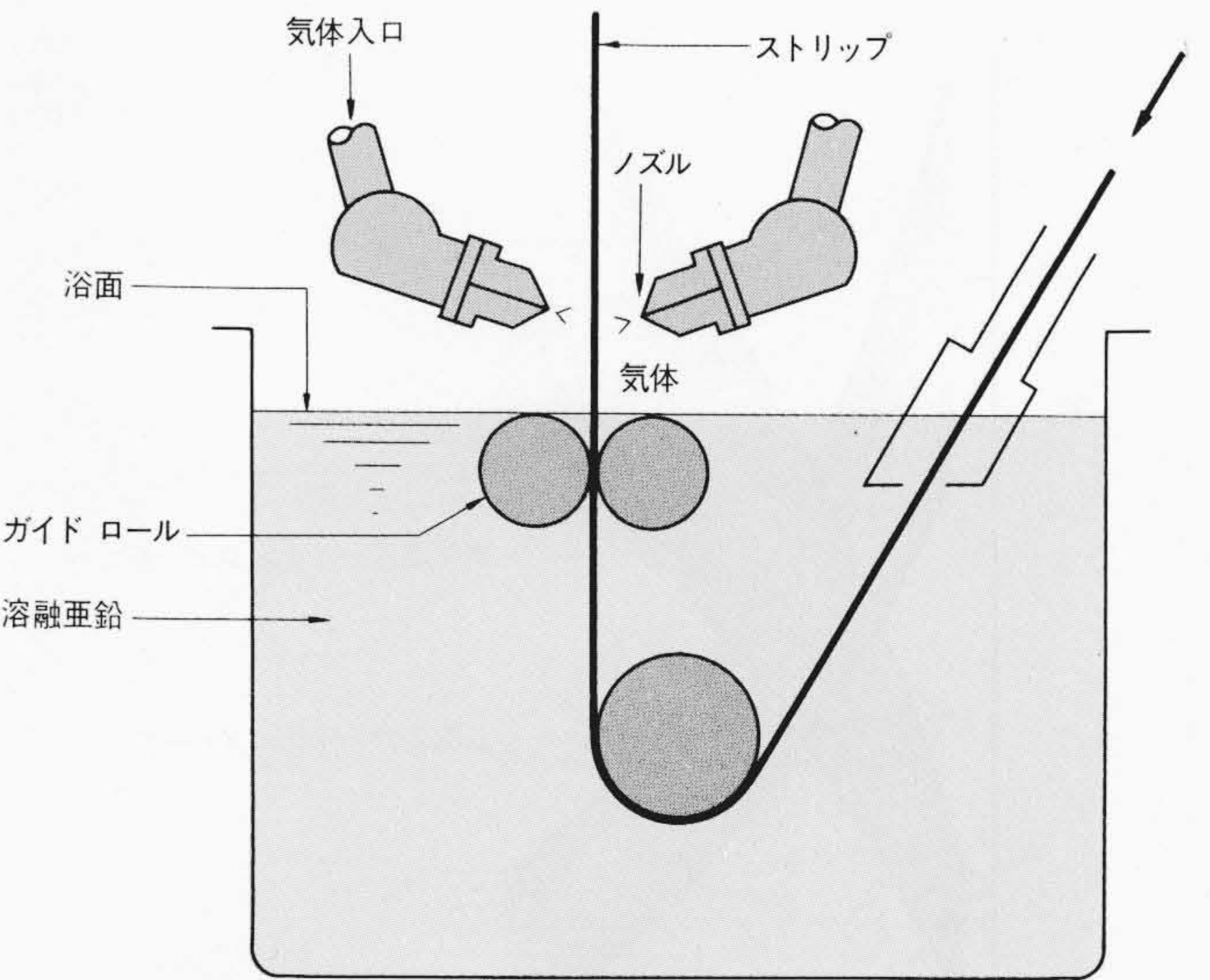


図2 気体絞り法によるめっき装置 亜鉛浴出口のノズルからの噴流により亜鉛を絞る。

次のような実験式が得られた。

$$p = p_0 k (\delta / x) \quad (\text{ただし, } x / \delta \geq 8) \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $k = 4.7 \sim 5.4$ (式中記号説明は、図4 参照)

直線が圧力によってある幅を持つのは、高压側で核流部の長さが短くなる傾向にあるためである。この結果は、動圧が距離に反比例することを示しており、静止流体中へ二次元噴流が噴き出す場合の理論式と一致する。

動圧を有効に使うためにはノズルギャップを小さくしたほうがよいが、核流部分と遷移部分は避けなければならない。また、ストリップとノズルの接触、あるいは吹き飛ばされた亜鉛がノズルへ付着するのを防止できるギャップが必要であり、更にノズルギャップが大きくなると、気体圧力、ノズルギャップとも動圧に対する影響が少なくなるので、この点でも制限がある。気体圧力が高い場合には、気体圧力の変化とノズルギャップの変化は同程度に動圧へ影響するが、気体圧力が低い場合には、ノズルギャップの動圧に対する影響が非

表2 気体絞り装置納入実績 国内大部分のユーザーは、気体絞り装置を採用している。

納 入 先	納入年	ラインスピード (m/min)	ストリップ厚さ (mm)	ストリップ幅 (mm)	設 備
日新製鋼株式会社	昭-41	50	0.17～0.4	600～1,000	スラックス方式(簡易方式)(尼崎)
	"	90	0.25～1.0	～1,000	ホイーリング方式(日新方式)(大阪)
	昭-42	150	0.20～1.2	610～1,230	センジマー方式(堺)
	昭-44	90	0.25～1.0	～1,000	ホイーリング方式(日新方式)(尼崎)
	昭-49	180	0.27～1.6	762～1,240	センジマー方式(市川)
新日本製鐵株式会社	昭-41	91.4	0.24～1.6	508～965	センジマー方式
	昭-42	"	"	"	"
	"	"	0.26～2.8	508～1,244	"
	"	"	0.22～3.2	914～1,829	"
日本鋼管株式会社	昭-43	152	0.25～1.3	500～1,240	"
	昭-42	91.4	0.20～1.6	508～1,219	"
	昭-43	120	0.20～1.0	610～1,220	"
住友金属工業株式会社	昭-46	91.5	0.30～4.5	610～1,880	"
	昭-45	"	0.35～3.2	610～1,230	"
株式会社淀川製鋼所	昭-44	100	0.90～2.2	500～1,067	"
	昭-45	180	0.15～0.60	610～1,230	"
イゲタ鋼板株式会社	昭-44	80	0.14～0.27	～1,000	フラックス方式(簡易方式)
株式会社中山製鋼所	昭-49	40	1.00～4.5	400～1,000	シーラス方式

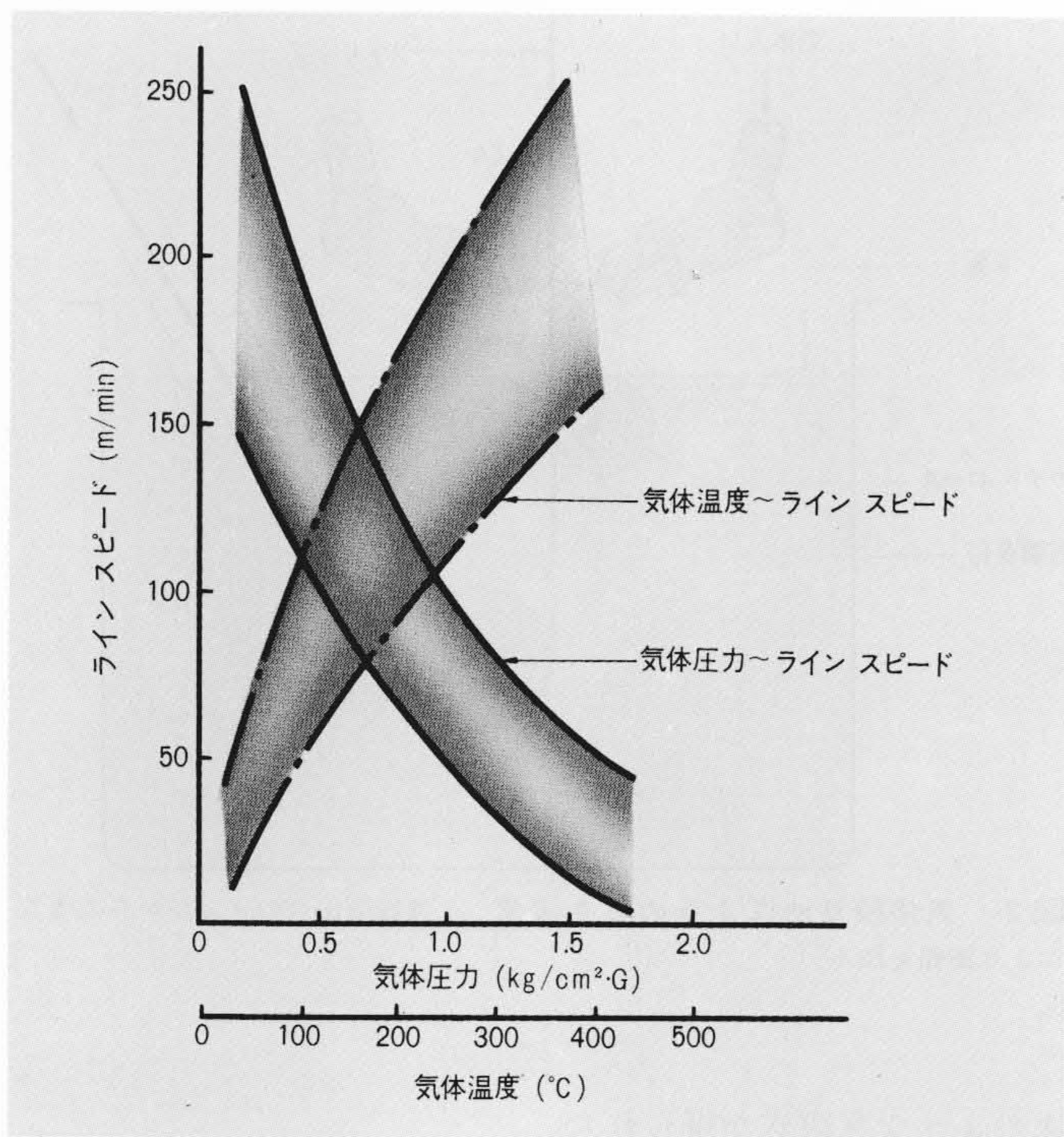


図3 めっき作業条件の関係 気体絞り法における気体温度、気体圧力およびラインスピードの関係を示したものであり、付着量の定量的な制御が可能となった。

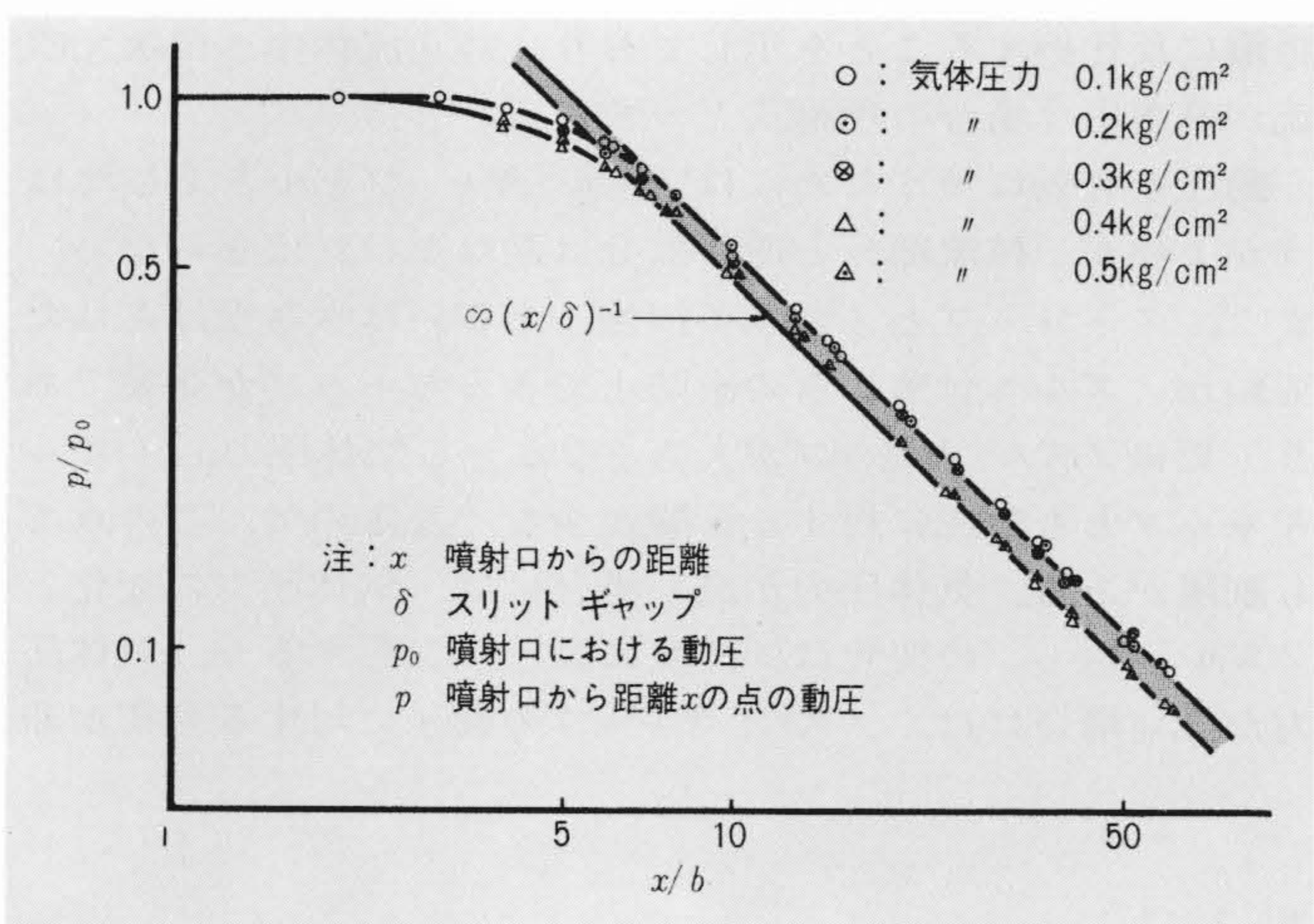


図4 スリットギャップと動圧の関係 スリットギャップと動圧の間には、ほぼ直線的な関係がある。

常に少なくなるので、ストリップの振動に対して大きな付着量の変化を起こさず、これらの点より気体圧力とノズルギャップの最適な組合せがあることが分かる。

(2) スリットギャップ

図5に示すように、同じ気体圧力に対しても、スリットギャップの大きさによって動圧は変化する。この大きさは、消費流量と実作業の関係で最適値が選ばれている。

(3) スリット平行部の長さ

図6はスリット平行部の長さと動圧の関係を示したものである。別の実験で、この長さは噴流の広がりには影響しないことを確かめているので、この結果は平行部の長さの圧力損失に及ぼす影響を示したものである。

噴流の方向を正しく保ち、摩耗や変形を少なくするために、平行部には圧力に関連した最適範囲があるが、これは図より

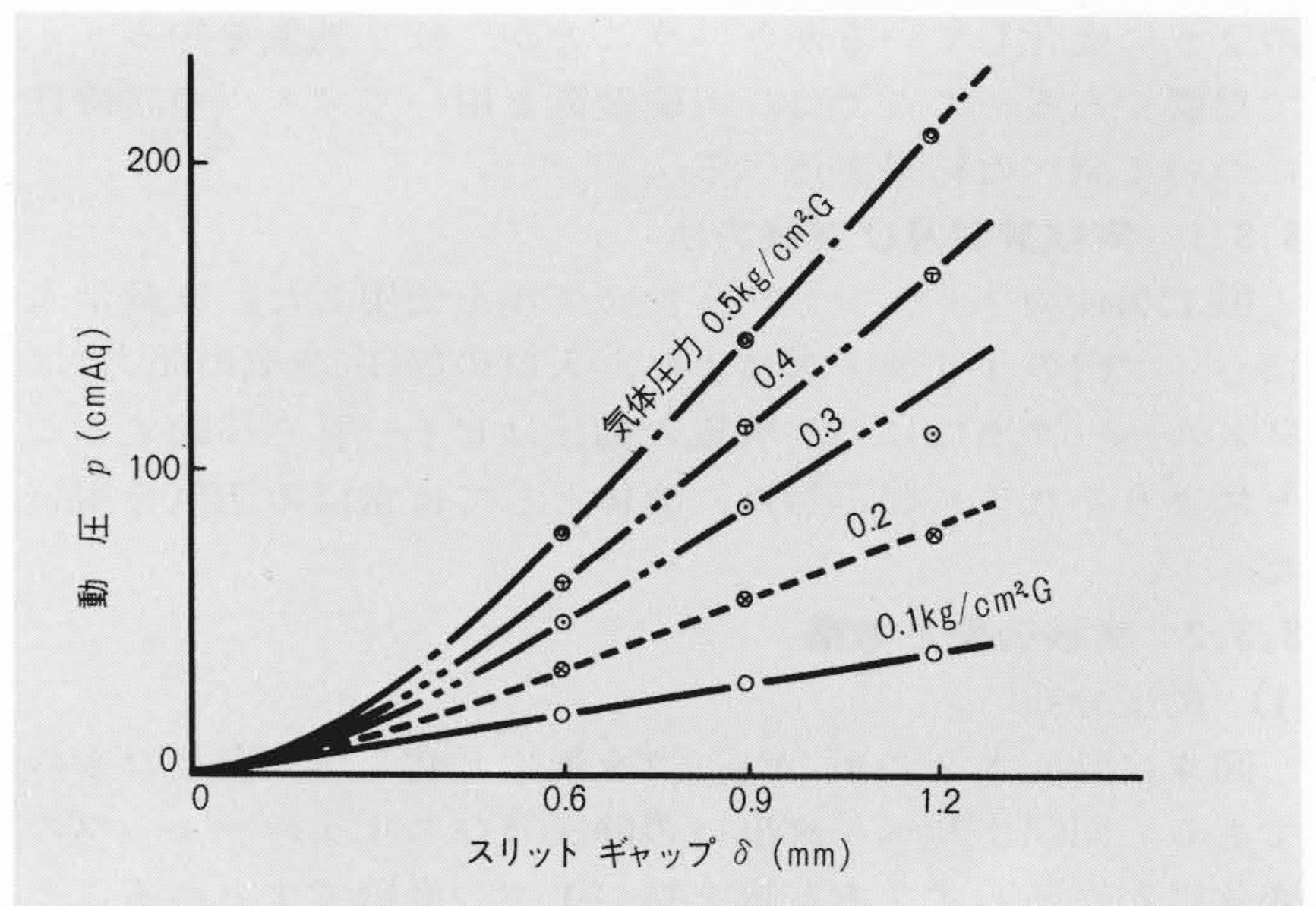


図5 噴射方向の動圧分布 ノズル噴射口の近くでは、核流部分と遷移部分があるので、めっき作業はこれを避けて行なう。

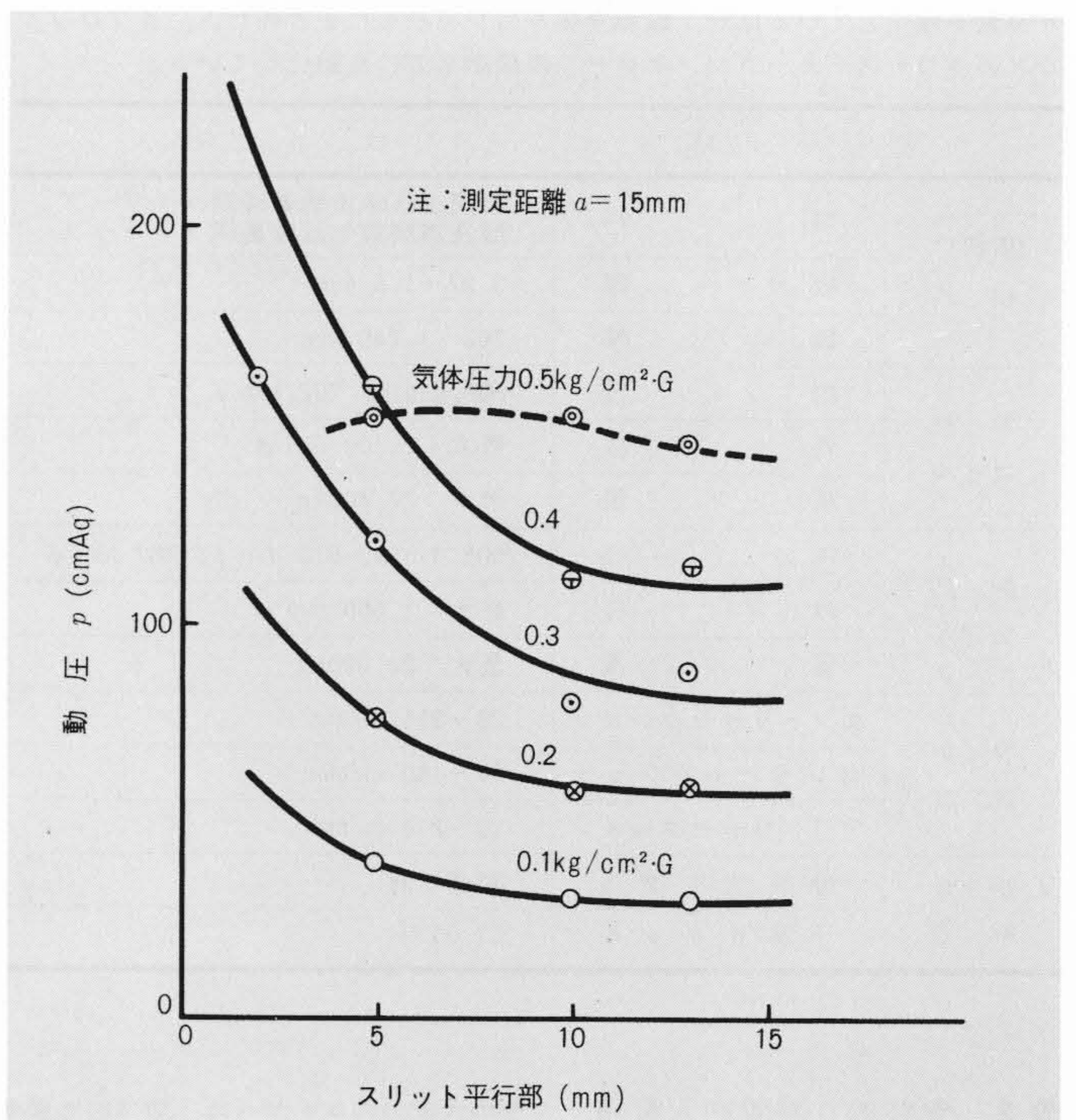


図6 スリット平行部と動圧の関係 スリット平行部が10mm前後で動圧は安定する。

10mm前後である。

(4) ノズル幅方向の圧力分布

スリットギャップが幅方向に一樣なノズルでめっきを行なうと、ロール絞りの場合より格段によいが、わずかにストリップの両端でオーバーコーティングとなることがある。

この原因として、

- (a) 動圧が両端部で小さくなる。
- (b) 気体の温度が両端部で低くなる。
- (c) ストリップの両端部が中央部より早く冷える。
- (d) 吹き飛ばされた垂鉛が拘束力の小さい両側に向けて流れる。

などが考えられるが、このうち(a)の事実があるかどうかを確かめたのが図7に示した。ノズルの両端部を特に入念に測定したが、同図から分かるように端から約30mmを除いた内側では、

一様な圧力分布となっており、実用機ではストリップの幅に対してノズルの幅は十分余裕を取ってあるので、ストリップの両端部で動圧が下がることはないと言える。

次に図8は、実際に使用されているノズルについてノズル幅方向の温度分布を測定したものであるが、同図から分かるようにノズルの端部の温度は下がっておらず、上記(b)に述べたような事実はない。

したがって、オーバ コーティングの原因は、上記(c)(d)のいずれか、又はこれらの複合したものであることが予想されるので、この点については今後の検討を要する。実機に使用しているノズルは、これらを考慮して中央に平行な部分があり、両端ではこれより若干大きいスリットを採用している。これによりオーバ コーティングは、従来のものに比べ格段に少なくなっている。

3.3.3 めっき厚さの理論的検討

近い将来、めっき厚さの自動制御が実用化されるであろうことは疑いのないところであり、気体絞り法は自動制御に適していることは前にも述べたが、ここでは噴流によるめっき厚さ制御について基礎的な解析を行なったので、その概要について紹介する。

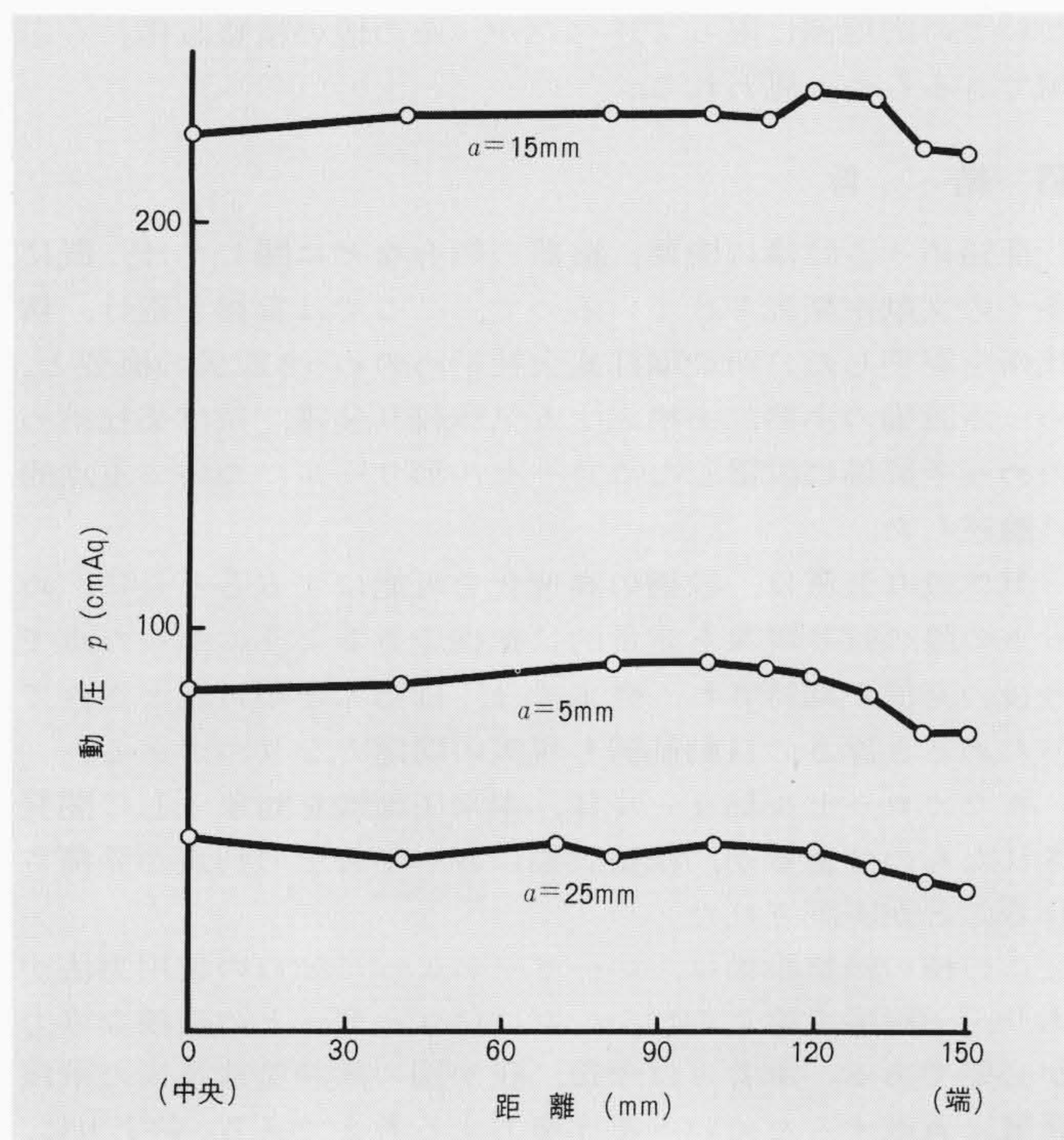


図7 幅方向の動圧分布 端部30mmぐらいでは動圧が落ちるが、その内側では一様である。

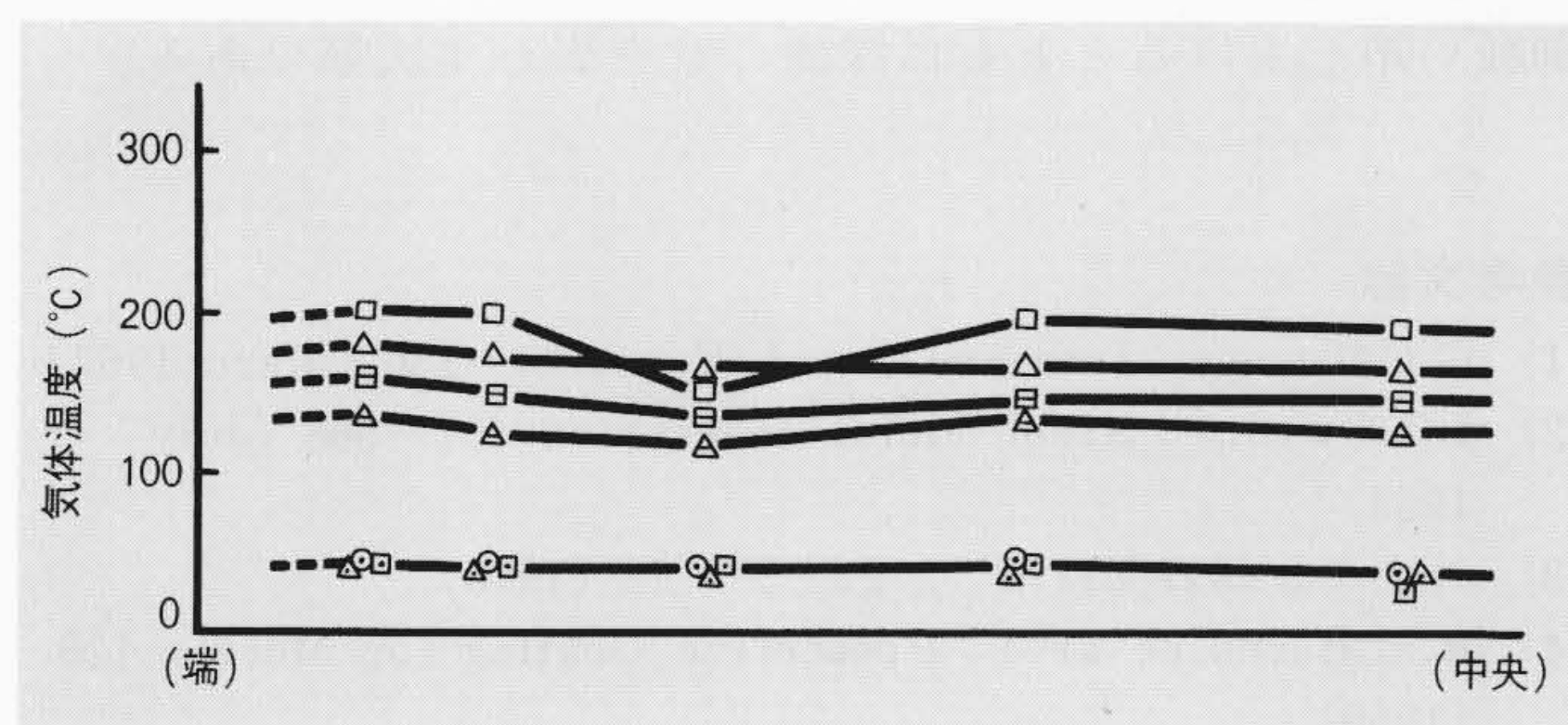


図8 ノズル幅方向の温度分布 ノズル端部で噴流の温度降下はみられない。

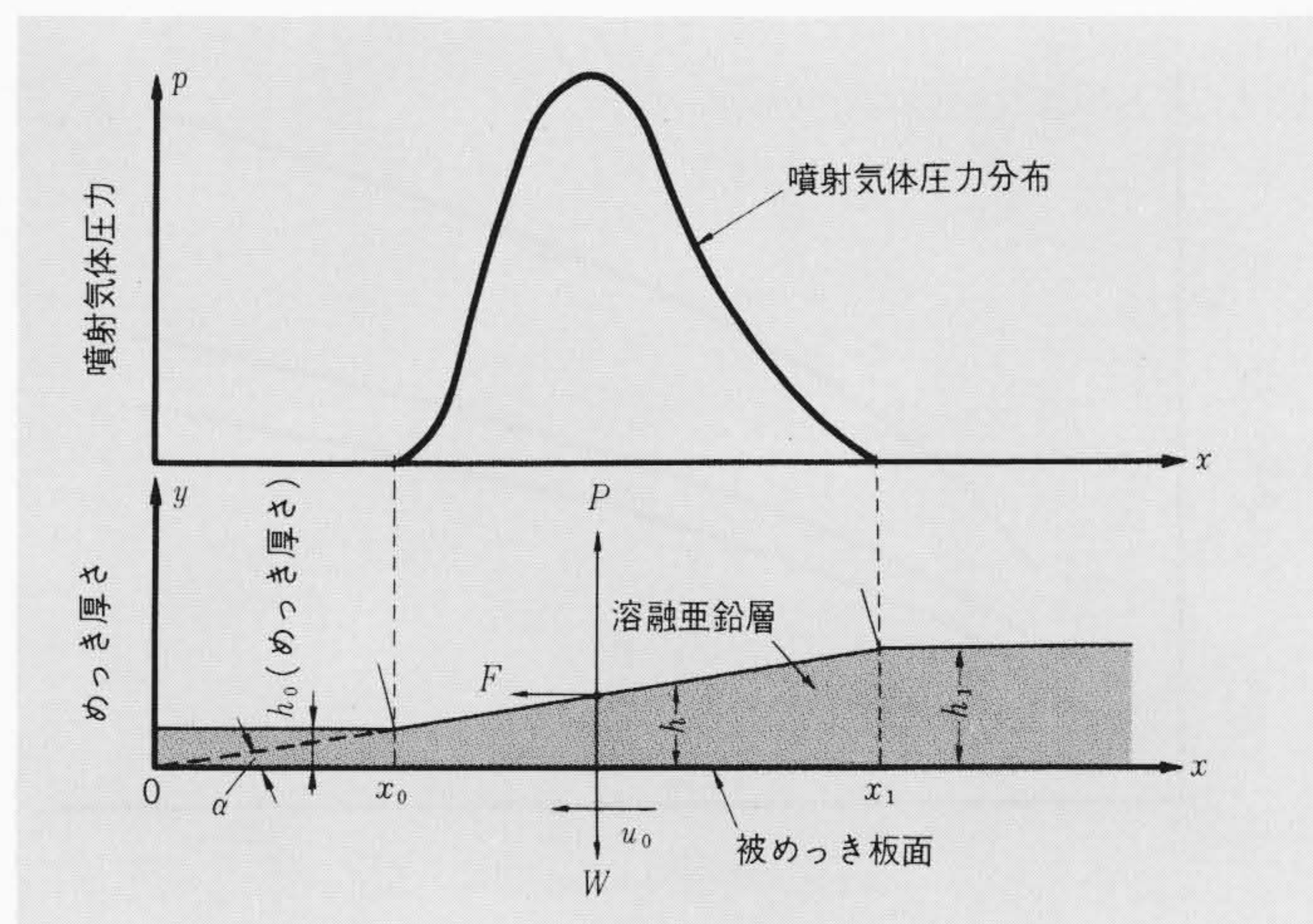


図9 亜鉛の絞り状態 亜鉛浴を出たストリップには、片側に h_1 の厚さの亜鉛が付着しており、気体圧力により h_0 に絞られる。

溶融亜鉛が噴射気体によって絞られ、所定の厚さにめっきされる状態を模型的に図9のように示して考える。ここでは x 軸と一致した平面を被めっき板とし、被めっき板は u_0 の速度(ライン スピード)で動き、溶融亜鉛は噴射気体の圧力により同図の濃い網目部で示したように絞られ所定のめっき厚さ h_0 になるものと考え。ここで、溶融亜鉛の流れの状態を二次元の粘性流体と考え、運動方程式としてNavier-Stokesの方程式を使って境界条件を入れると、亜鉛めっき厚さ h_0 は次式であらわすことができる。

$$h_0 = \sqrt{0.16 \times \frac{\mu u_0 l^2}{P}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 P ：めっき表面に働く全圧力

l ：噴流がめっき面に作用する範囲

μ ：亜鉛の粘性係数 $3.24 \times 10^{-4} \text{ kg-s/m}^2$ (6)
(450°Cにて)

図10は上記の式の計算例である。実際のめっき作業では前処理の影響やめっき釜の形式、浴の組成などにより、各の設備の特性により、必ずしもこの計算式どおりのめっき厚さにはならないが、多くの作業データを集めて補正係数を作り、信頼性のあるめっき厚み計との組合せができた段階で実用できるものと考えられる。

3.4 めっき速度及び付着量の限界

適当な付着量にコントロールしながらめっき速度をどこまで上げられるかを見究めることは今後のめっき設備の発展を考える場合、極めて重要な問題である。気体絞り法では、ノズルの浴面に対する高さを高くし、気体圧力を高くすることにより180m/minのめっき速度に達することができた。非接触形の絞り法であるため、めっき装置自体については200m/minを超えるめっきも可能である。このような高速では、ガイドローラとして浴面下で使用される絞りロールは、ストリップへ付着してくる亜鉛のしゃへいを行ない、薄めっきを可能とするのに良い効果を発揮する。

最小付着量については、作業条件を選ぶことにより0.2oz/ft²までの実績を得ている。付着量の上限についてはめっき釜の特性とも関連してくるが、ロール絞り法で得られる程度の付着量は可能で、2～3oz/ft²程度である。

3.5 気体絞り法の特徴

以上述べたことを整理する意味で、ロール絞り法に対する気体絞り法の特徴をまとめると以下のようなになる。

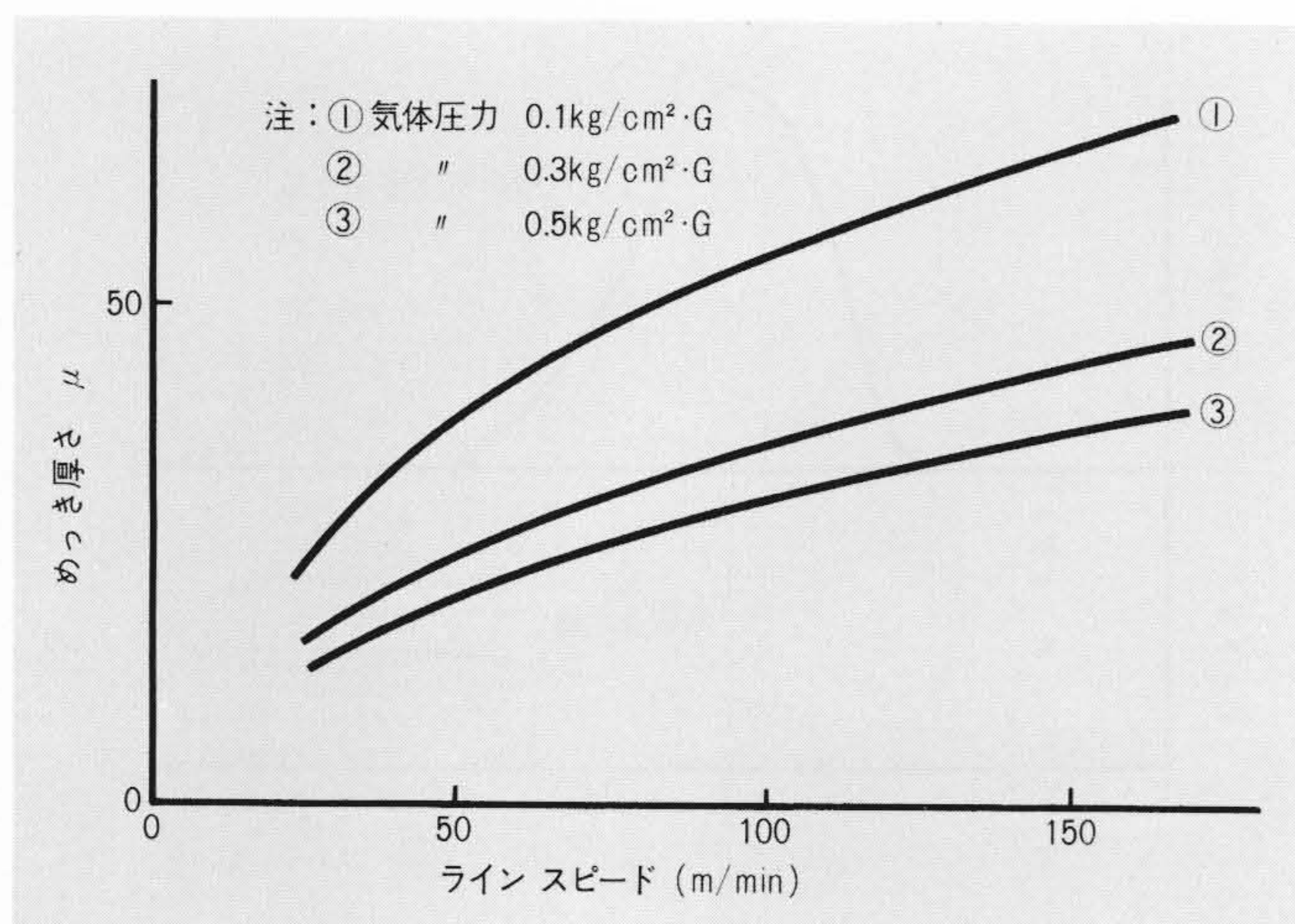


図10 計算によるめっき厚さとライン スピードの関係 現状では計算値と実測値の間にはかなりの差があるので、データを集めて補正することが必要である。

- (1) 付着量の均一性が向上し、同一付着量でもグループ マークがないので耐食性が増大する。また、亜鉛の損失も少なくなる。
- (2) 薄めっきから厚めっきまで調節が容易で、適当な作業条件の設定により差厚めっきも可能である。
- (3) 非接触形であるため、めっき速度の制約を受けることが少ない。
- (4) ノズルはある周期で補修を要するが、めっきロールのように頻繁な交換の必要がない。また、めっき作業としても経験的要素が少なく、作業人員も少なくて済むので、不良製品の発生、亜鉛の損失が少なくなることで併せて生産効率が向上する。
- (5) ロール絞りの併用も可能である。
- (6) ライン速度に応じて気体の活性度を調節でき、製品の表面品質を保証しながら経済的な運転が可能である。
- (7) めっき板の各種比較テストを行なった結果、めっきの光沢、均一性、スパンクル、耐はく離性などいずれも他方式に比べて優れた結果を示している。

4 カラーゼル形リール

カラーゼル形リールは、図11に示すように2本のドラムを持ち、公転機構により交互に連続的に巻出しあるいは巻取りを可能にしたものである。

亜鉛めっき設備のような連続処理を行なう設備では、入側出側セクションのコイルの処理が連続作業の障害になり、中央セクションの連続作業を保持するために、ループカーあるいはループタワーなどのアキュムレータを設けるのがこれまでのやり方であった。しかし、これらのアキュムレータは、スペースを多く取るばかりでなく、ストリップの蛇行の原因となったり、ループカーの慣性力のためにテンション変動が生ずるなど不つごうが多く、特に出側のアキュムレータはスペースがないだけにプラント設計時処置に困るものであった。このため、アキュムレータなしで連続処理できる設備の出現が期待されていた。

前述の某社納めの設備では、出側セクションの巻取機としてカラーゼル形リールを採用し、出側ループカーを著しく簡略化することに成功したものである。

出側セクションの連続運転を可能とするためには、リール

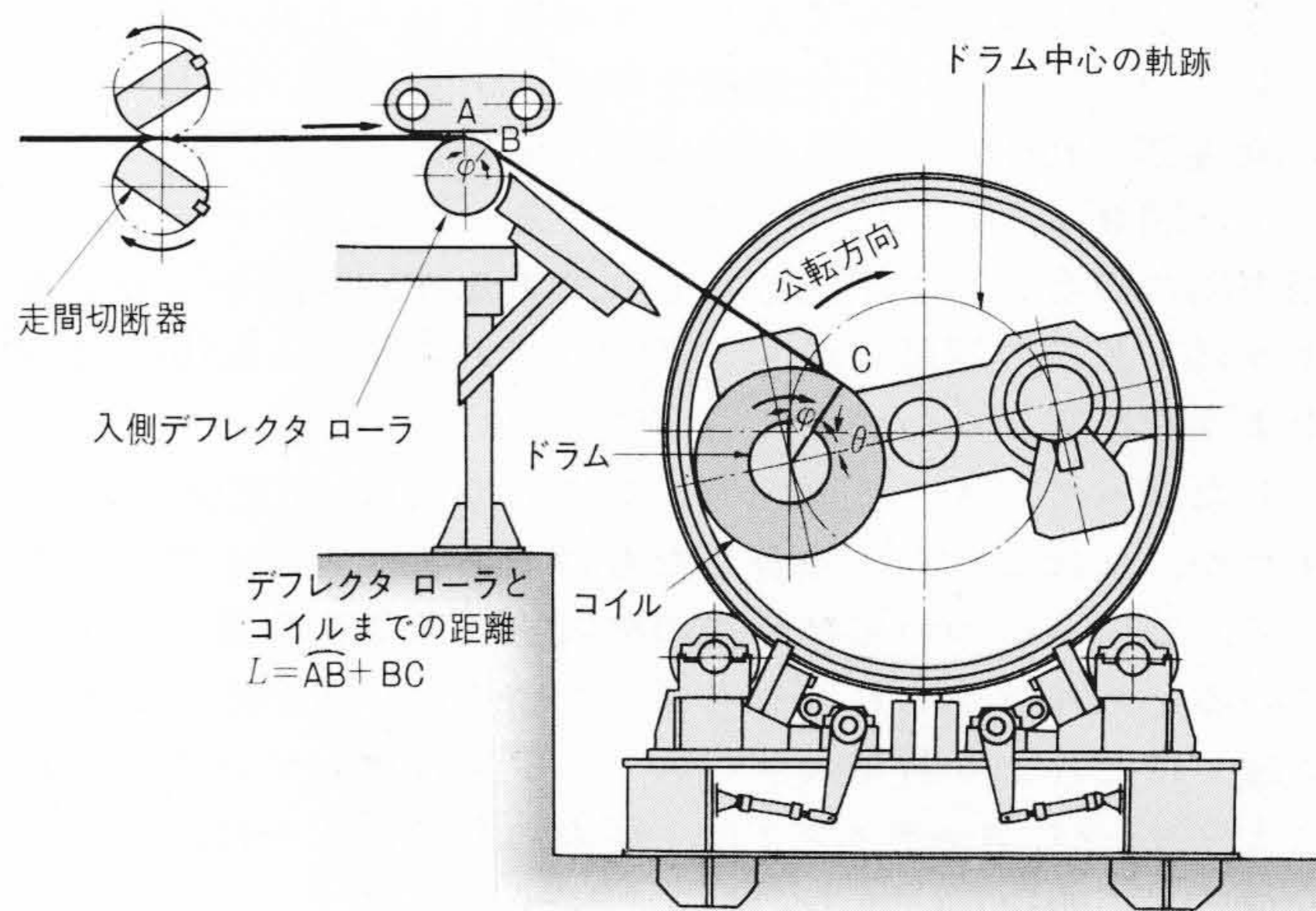


図11 カラーゼル形リール 2本のドラムを持ち、公転機構により同じ位置で交互に巻取りを行なう。走間切断のため、ループなしで連続運転が可能である。

前の分割シャワー、ベルト ラッパーあるいはコイルカーにも特別の配慮が必要であったが、これらについては別の機会に述べたい。また、ここではカラーゼル形リールのめっき設備についての応用例に限って述べたが、その他の精整設備にも応用できるものと思われる。

5 結 言

亜鉛めっき設備の概要、機器の紹介などに関しては、既に多くの文献が発表されているので、ここでは重複を避け、新技術を駆使した日新製鋼株式会社納めのめっき設備の概要と、めっき設備の主要部を構成する気体絞り装置、及び某社納めのめっき設備に設置したカラーゼル形リールについて重点的に論述した。

気体絞り装置は、設備の高速化を可能にするとともに、めっきの際の絞り現象を定量的に把握できるようになった点で今後の発展が期待され、従来では、ほとんど不可能とされていためっき厚さの自動制御も現実の問題となりつつある。

またカラーゼル形リールは、本来圧延機を対象として開発されたものであるが、精整設備においてもその利点が発揮されることが実証された。

この種の精整設備は、ユーザーによって独自の使用方法があり、一般論で論じられないだけにユーザーとの密接な協力が必要である。筆者らは今後、我が国の鉄鋼製造技術の飛躍発展に貢献するためいっそう努力する考えである。終わりに、日新製鋼株式会社より気体絞り装置について懇切な御指導をいただき、またカラーゼル形リールの採用については某社より終止有益な御意見をいただいた。今後とも各位の御指導を御願い申しあげるとともに深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- (1) G.C.Turner : Iron and Steel Eng. 123~130 (March 1963)
- (2) I.C.Gwynne : Steel Metal Industries 497~506 (July 1958)
- (3) 外山 : 金属表面技術 2-21 38~42 (1970)
- (4) R.M.Burns et al 1 : Protective Coating for Metals 128 (1955)
- (5) 岩崎 : 金属 43 (1968-7)
- (6) エリ・ア・ヴェルテ : 溶融金属の電磁移送 (1969-4)