

くら形ノズルの切断加工及び多層溶接用ロボット

Industrial Robots for Gas Cutting and Multipass Welding Process of Nozzles

くら形ノズル，すなわち母管と枝管との継手接合部は，複雑な3次元曲線をなしており，その溶接には熟練を要する。このため，従来の産業用ロボットによる加工の自動化には，ティーチングに時間を要するなどの困難な点が多い。

日立製作所は，新しい概念の制御技術として自律形NC方式を開発し，くら形ノズルの切断及び溶接を行なうロボットを実現した。この方式は，ロボットの動作に必要な情報をすべてアルゴリズムによって求めるもので，これによりわずか数点のティーチングで作業を行なわせることができる。

本ロボット技術は，作業品質を含めた実用化試験を終え，既に压力容器などのノズルのガス切断及び多層溶接工程に適用され，効果をj確認している。

三宅徳久* Norihisa Miyake
土橋 亮** Akira Tsuchihashi
徳野隆輔*** Ryūsuke Tokuno
後藤浩二**** Kôji Gotô

1 緒 言

円筒状容器を母管とし，これに枝管として配管類を取り付けた形のノズルは，溶接構造物として一般的なものである。しかし，その継手接合部は，3次元の複雑なくら形曲線をなしているため，溶接条件，トーチ角度，溶接速度などの微妙な調節が必要で，熟練作業者にとっても難しいとされる作業対象である。

くら形ノズルの溶接をロボットにより自動化しようとする，これらに加えて溶接軌跡の正確な制御が必要となる。このため従来のプレイバック式ロボットでは，ティーチングに多大の工数を要し，大幅な適用効果は期待できない。更に，厚肉部材の場合には，従来のロボットではあまり行なわれていなかった多層溶接が必要である。

ロボットの動作制御技術は，人間の動きをそのまま再現するCP(Continuous Path)ティーチプレイバック方式から，動作経路上の主要点群を人間が与え，それらを補間して動作するPTP(Point to Point)ティーチCPプレイバック方式^{1),2)}へと進歩してきた。

日立製作所は，この技術を更に発展させ，自律形数値制御方式という新しい概念の制御技術を開発して，くら形ノズルの加工(溶接，切断)の自動化を達成した^{3),4)}。この制御技術を適用したロボットは，ごく少数の点をティーチするだけで，くら形ノズルの形状切断，開先加工，多層溶接などの作業を行なうことができる。

2 くら形ノズルと加工条件

母管と枝管との接合部は，図1に示すように馬の「くら(Saddle)」状の複雑な3次元曲線をなしており，くら形ノズルと呼ばれる。この継手部には同図に併記したように，(a)開先をもつもの，(b)枝管を母管上に乗せたもの(乗せ形式)，(c)母管に形成した穴に枝管を差し込んだもの(差し込み形式)などの形式があり，それぞれ溶接部の形状が異なっている。

また，くら形ノズルが構成される条件は，母管及び枝管の径を各々 D ， d とすると， $d/D \leq 1$ であるが，左辺の値が1に近いほどくら形曲線の起伏は激しくなる。図1のB点での母管表面の傾斜角(水平線と母管接線とのなす角度) β_m は， d/D の値と図2に示す関係をもつ。溶接基礎実験の結果， $\beta_m >$

45度の場合には，ビードのたれ落ち防止のために溶接電流値を低く取らねばならず，品質，経済性の面で不利との結論を得た。したがって，図2から， d/D の値が0.7以上のくら形ノズルでは，常に下向きの溶接姿勢となるように母管を回転することが必要な条件となる。

くら形ノズルの種類は，このように継手形状，母管・枝管径比によって分類できる。

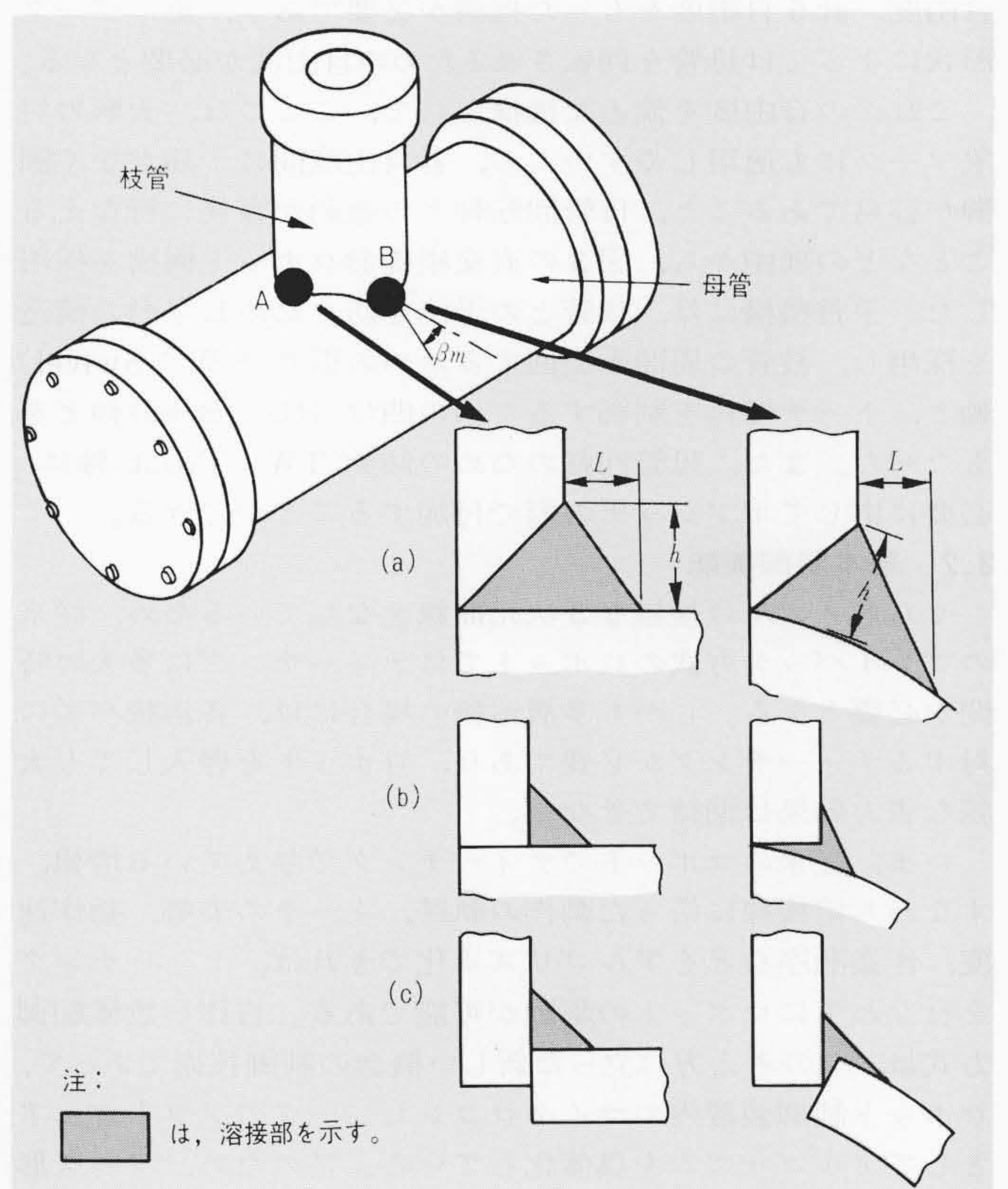


図1 くら形ノズル 母管と枝管との接合部は，複雑なくら形曲線をなす。継手部の構造には，(a)開先形式，(b)乗せ形式，(c)差し込み形式などがあり，母管の腹部と背部では溶接部形状が異なる。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所習志野工場 *** 日立製作所土浦工場 **** 日立製作所国分工場

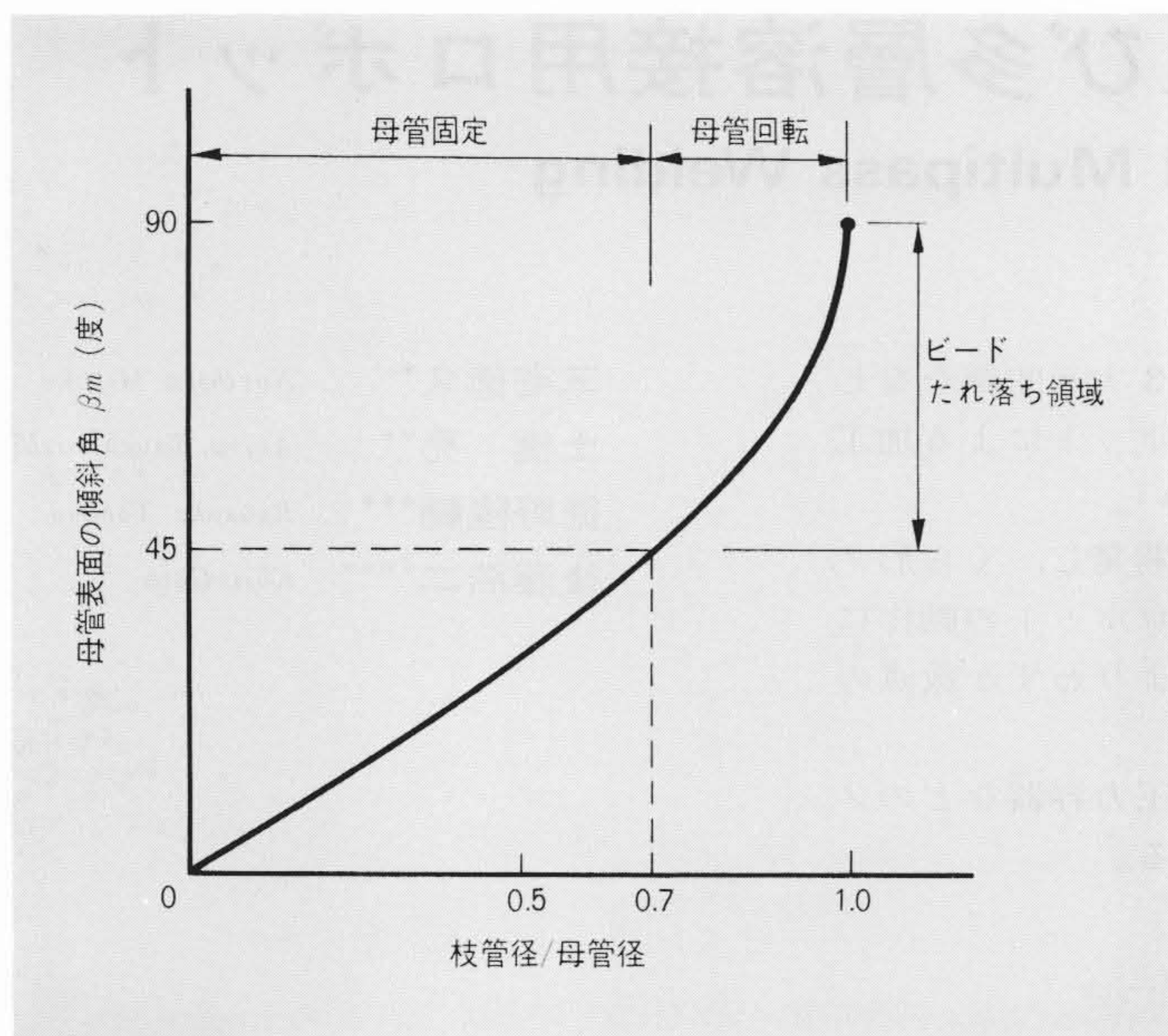


図2 母管・枝管径比と母管表面の傾斜角 β_m が45度を越えると、経済性・品質面で不利となり、母管を回転する必要が生ずる。

3 くら形ノズル加工に必要な機能

3.1 加工機のメカニズム

くら形ノズルの加工をロボットで行なうためには、図3に示すように、3次元曲線に沿ったトーチの位置決めに3自由度、枝管まわりのトーチの旋回及びトーチ仰角の制御に各1自由度、計5自由度をもった機構が必要であり、更にワーク形状によっては母管を回転させるための自由度が必要となる。

これらの自由度を備えた機構として、ここでは、大形の対象ワークにも適用しやすいこと、各自由度間に干渉がなく制御が容易であること、母管回転軸との連動が容易に行なえることなどの理由から、図3の直交座標形ロボット機構を採用した。手首機構には、枝管との干渉を防ぐためL字形の構造を採用し、枝管の周囲を旋回するための振り(SW:Swivel)軸と、トーチ仰角を制御するための曲げ(BD:Bend)軸とをもたせた。また、母管回転のための傾動(TW:Twist)軸は、必要に応じてポジションの形で付加することができる。

3.2 基本制御機能

くら形ノズルは複雑な3次元曲線をなしているため、従来のプレイバック方式のロボットではティーチングに多大の時間が必要となる。しかも多層溶接の場合には、各溶接パスに対するティーチングが必要であり、ロボットを導入しても大幅な省力効果は期待できない。

いま、従来のロボットでティーチングで与えている情報、すなわち溶接線に沿った動作の軌跡、トーチの姿勢、動作速度、作業順序などをアルゴリズム化できれば、ティーチングを行わずにロボットの駆動が可能である。自律形数値制御方式は、この考え方に立った新しい概念の制御技術であって、ロボット制御装置内のマイクロコンピュータのソフトウェアとしてアルゴリズムを具体化している。このため、ワーク形状誤差、作業条件の変動による加工誤差などに対する修正が実時間で容易に行なえることが特長であり、通常のNC(数値制御)方式とは異なる。

本方式をもとに、開先の切断成形加工及び溶接の一貫自動化を図ることにより、溶接時でのワークの精度が確保でき、センサを用いることなく良好な溶接が実現できる。

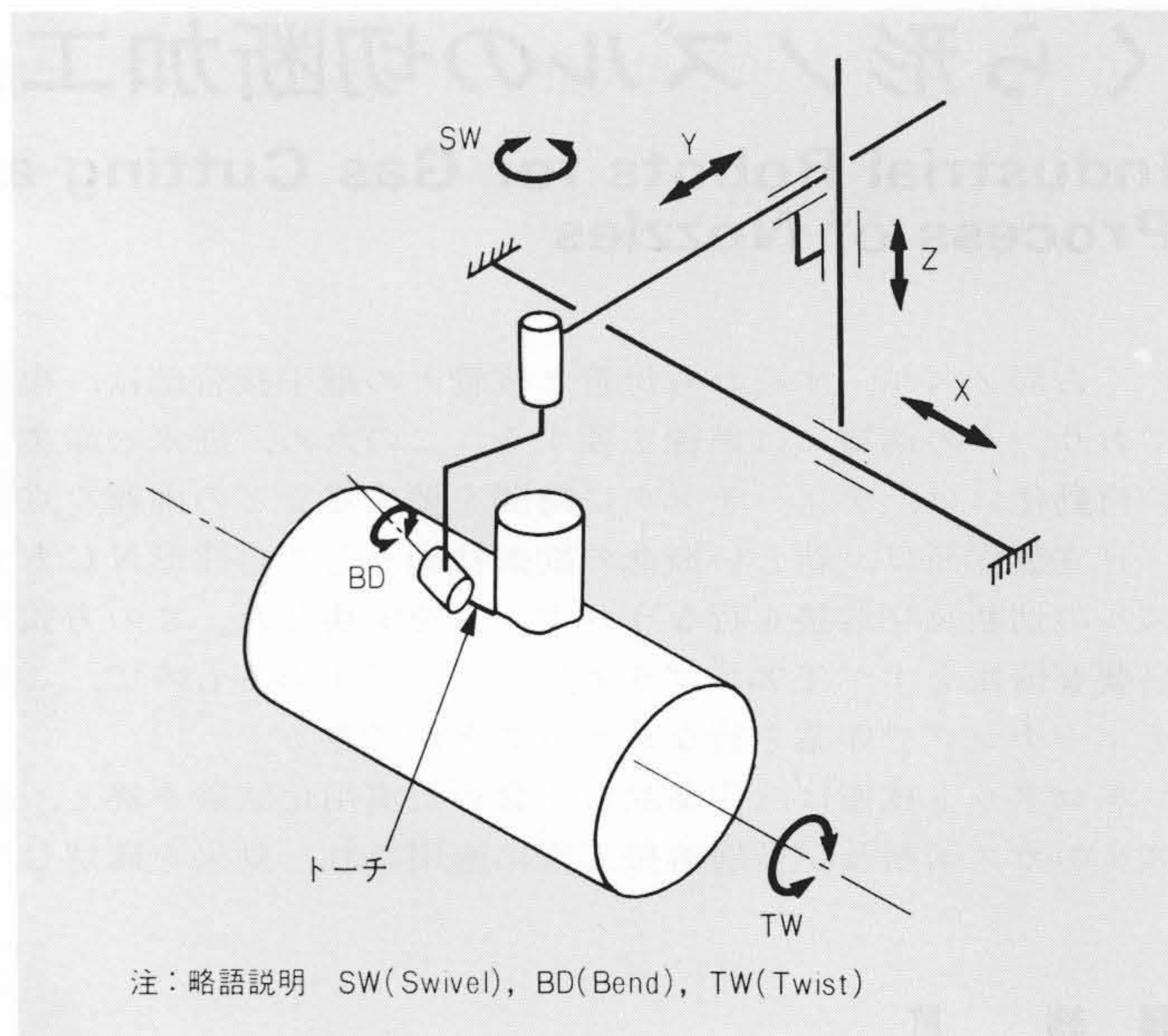


図3 ロボットのメカニズム 位置決め、トーチ姿勢の制御と、ポジションの計6自由度が必要である。

ロボットの動作は、ロボットの行なう作業の内容と密接な関係をもつ。このため、前章で分類したそれぞれのワーク種類に対して、ガス切断及び溶接に関する基礎実験を重ね、各々の制御アルゴリズムとそのパラメータを決定した。

4 制御方式

最適な制御アルゴリズムは、くら形ノズルの種類、あるいはガス切断と溶接とによりそれぞれ異なる。しかし、自律形NC方式としての基本的な考え方は等しいため、ここでは最も代表的な例として、開先をもつタイプで、母管を固定して溶接作業を行なう場合を取り上げて説明する。

4.1 くら形軌跡の制御

図1に示したくら形ノズルの多層溶接を行なうに当たっては、溶接施工上から、各溶接パスの軌跡が枝管の周囲を一周する閉曲線となること、すなわち枝管円周上の各位置で溶接パス数が同一であることが要求される。したがって、ここでは枝管及び母管のそれぞれと同心状の円筒を考え、これら円筒面同士によって分割される環状部分の各々を1パスとして溶接する方法を開発した³⁾。

この場合、各溶接パスの動作軌跡は、図4に示すように母管及び枝管と同心の仮想的な円筒面同士の相貫曲線として次式で与えられる^{*)}。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 + (d_s/2) \cdot \sin \theta \\ Y &= Y_0 + (d_s/2) \cdot \cos \theta \\ Z &= Z_0 + \sqrt{(D_s/2)^2 - (d_s/2)^2 \cdot \cos^2 \theta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

ここに d_s : 仮想枝管径

D_s : 仮想母管径

θ : 枝管の動径角度(パラメータ)

(X_0, Y_0, Z_0) : 母管、枝管主軸の交点座標

4.2 積層位置の制御

溶接パスのビード形状、溶着量は、溶接電流、電圧、動作速度などの条件によって定まる。したがって、溶接部の形状

※) このとき、開先形状に対する条件として、枝管円周上の各位置での開先高さ h を一定とすることが必要となる。図1(a)は、これを考慮に入れた開先形状を示している。

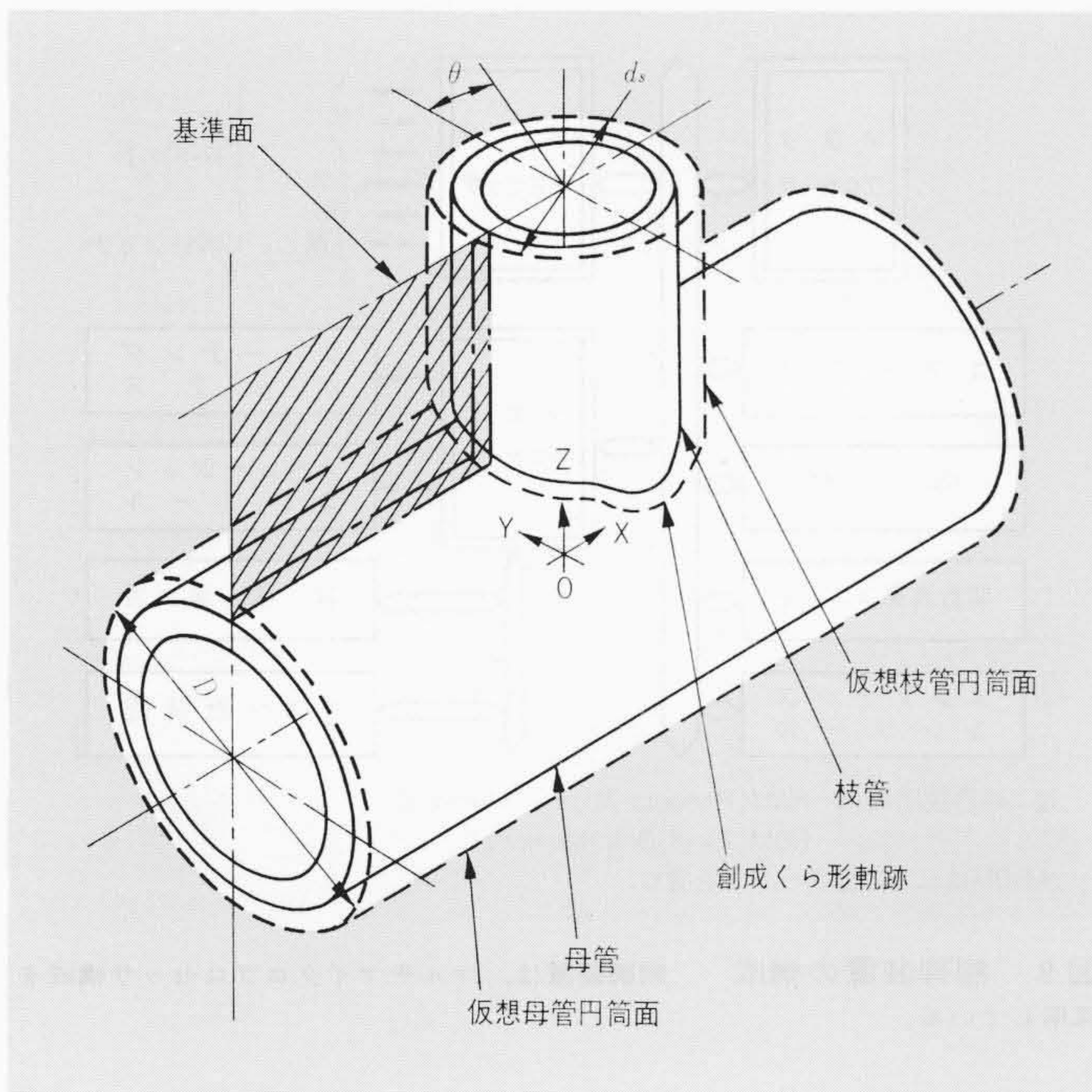


図4 くら形軌跡の制御 くら形曲線は、仮想母管円筒面及び仮想枝管円筒面の相貫曲線として決定される。

及び溶接条件が与えられれば、積層位置を決定できる。いま(1)式は θ の一価関数であるから、枝管円周上の1点の位置を与えれば、溶接パスの軌跡を一義的に定めることができる。ここでは図4に併記したように、母管と枝管の主軸を含む垂直面($\theta=90^\circ$)を基準面とし、この平面内での各パス積層位置を決定した。1パスの溶接ビード断面を幅 ΔR 、高さ ΔZ

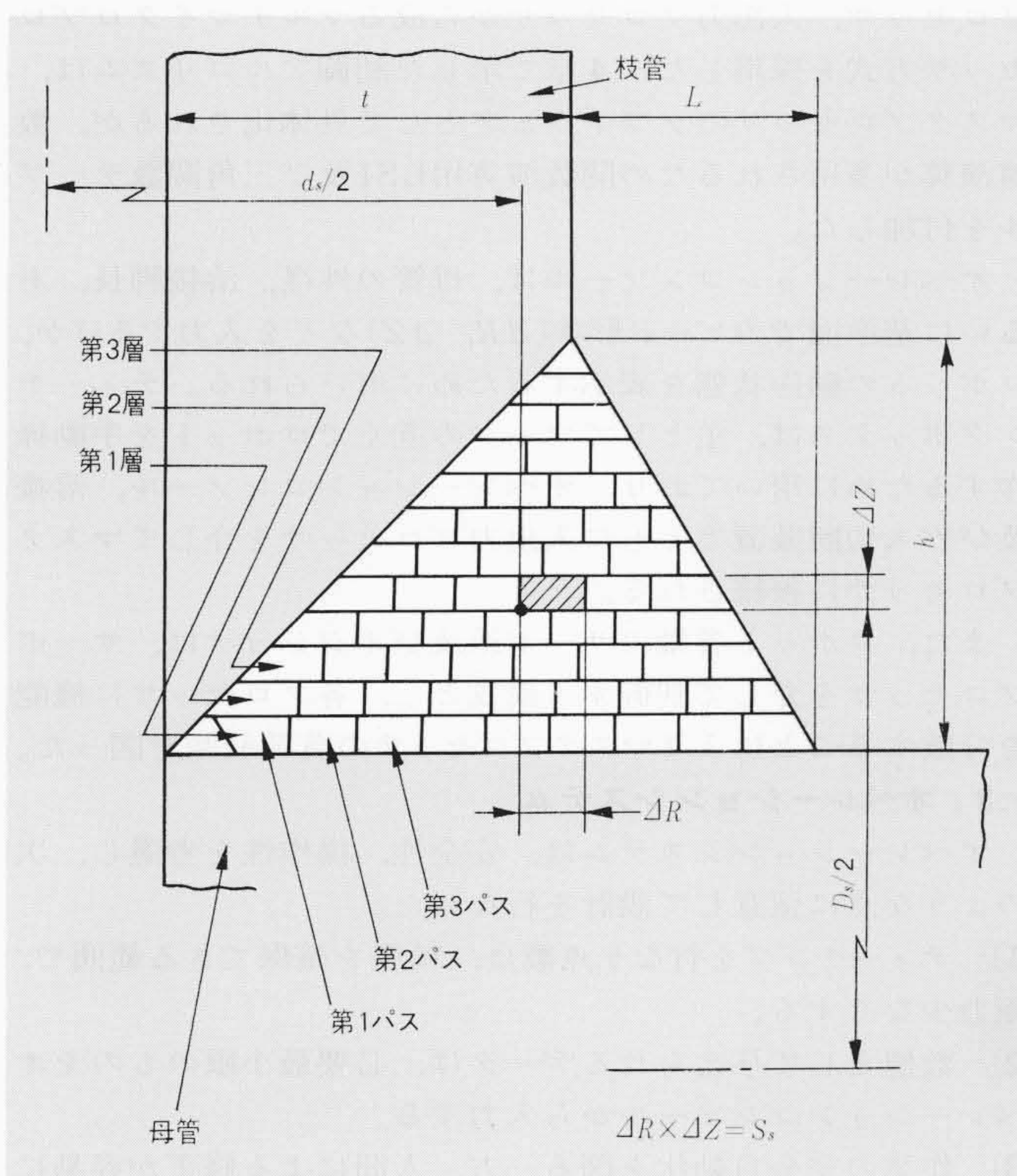


図5 積層位置の制御 積層は左から右へ、下から上へとビードを積み上げていく。

の長方形で近似し、図5に示すように基準面での溶接部断面をパス単位に分割すれば、(1)式の d_s 及び D_s は各要素の左下端の点に対応して次式により求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} d_s &= d_i + 2 \left[\Delta Z(n-1) \cdot t/h \right. \\ &\quad \left. + \Delta R(m-2) + \Delta R_f \right] \dots\dots\dots(2) \\ D_s &= D_0 + 2 \Delta Z(n-1) \end{aligned} \right\}$$

ここに D_0 : 母管外径
 d_i : 枝管内径
 t : 枝管肉厚
 h : 開先高さ
 m : 開先奥部から外側に向かって数えたパス番号
 n : 下部から上方に数えた層番号
 ΔR_f : n 層目第1パスのビード幅

4.3 トーチ角度の制御

母管表面の傾斜角 β は、枝管円周上の各位置で異なる。このため、トーチ角度の連続制御が必要である。ここでは、均一な溶接品質を得るため、図6に示すように母管表面からの仰角 γ が一定となるように制御する。母管表面の接線方向の傾斜角 β は、

$$\beta = \tan^{-1} \frac{(d_s/2) \cdot \cos^2 \theta}{\sqrt{(D_s/2)^2 - (d_s/2)^2 \cdot \cos^2 \theta}} \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる。したがってトーチ角度 ϕ は、

$$\phi = \phi_s - \beta \dots\dots\dots(4)$$

ここに ϕ_s : 基準面でのトーチ角度($=\gamma$)
 として求められる。

4.4 溶接速度の制御

溶接部分の断面形状は、くら形曲線上の各位置で異なるが、図1(a)に示したように開先高さ h を一定とすれば、必要溶着量は容易に求められる。各位置での1パス溶接断面積 S は、

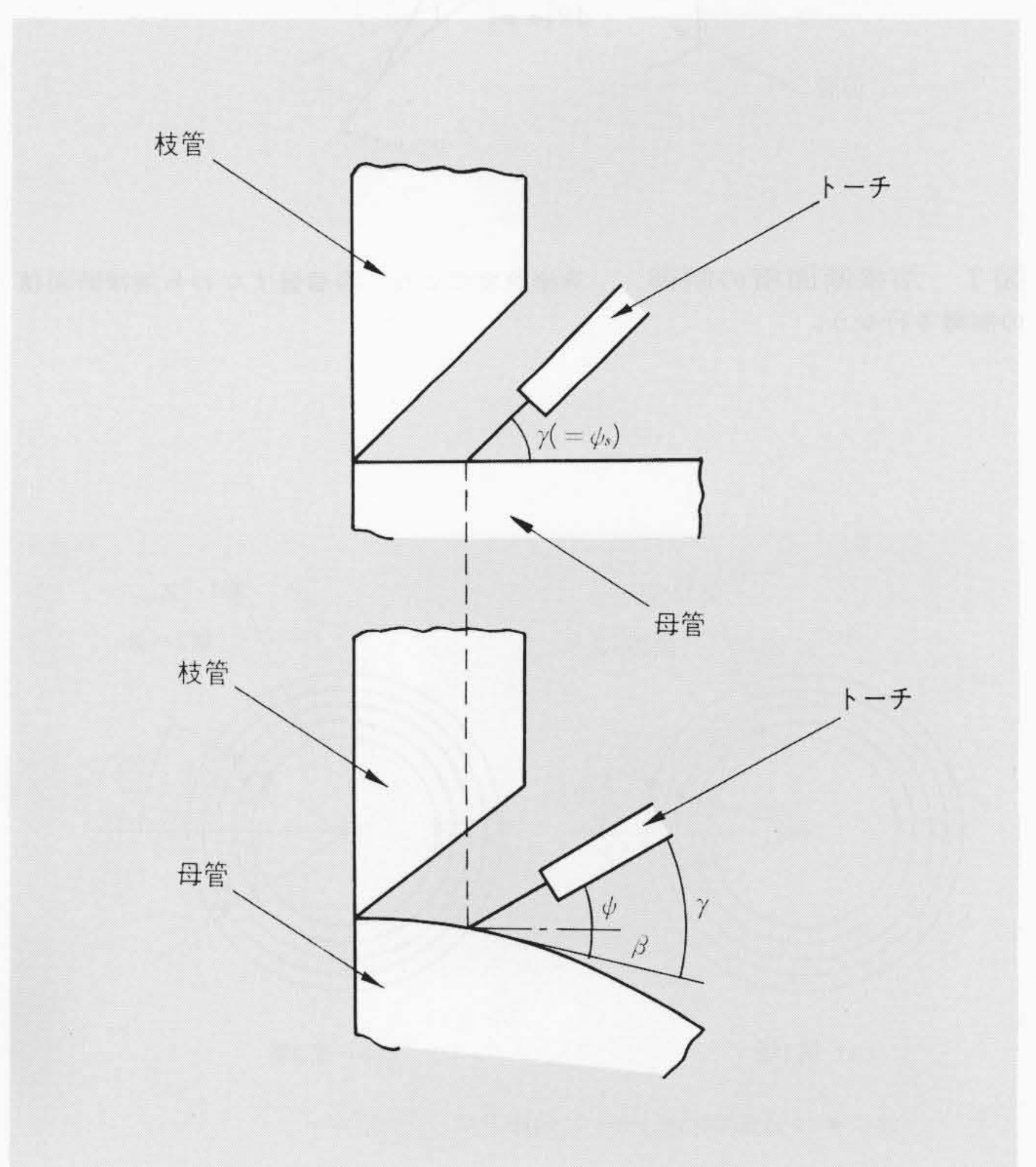


図6 トーチ角度の制御 トーチ角度は、母管表面からの仰角が一定となるように制御する。

図7に示すように次式で表わされる。

$$S = S_s / \cos \beta \cdots \cdots (5)$$

ここに S_s : 基準面でのパス断面積
いま、溶接条件を一定とすれば、溶着断面積は溶接速度と反比例の関係にある。したがって、溶接速度 V を次式の関係で制御し、各位置での適正溶着量を得るようにした。

$$V = V_s \cdot \cos \beta \cdots \cdots (6)$$

ここに V_s : 基準面での溶接速度

4.5 溶接方向・開始点位置の制御

加工機のメカニズム、ケーブル処理などの関係上、溶接方向は1パスごとに反転する必要がある。この場合、溶接ビード継目部が1箇所集中すると、十分な継手強度が確保でき

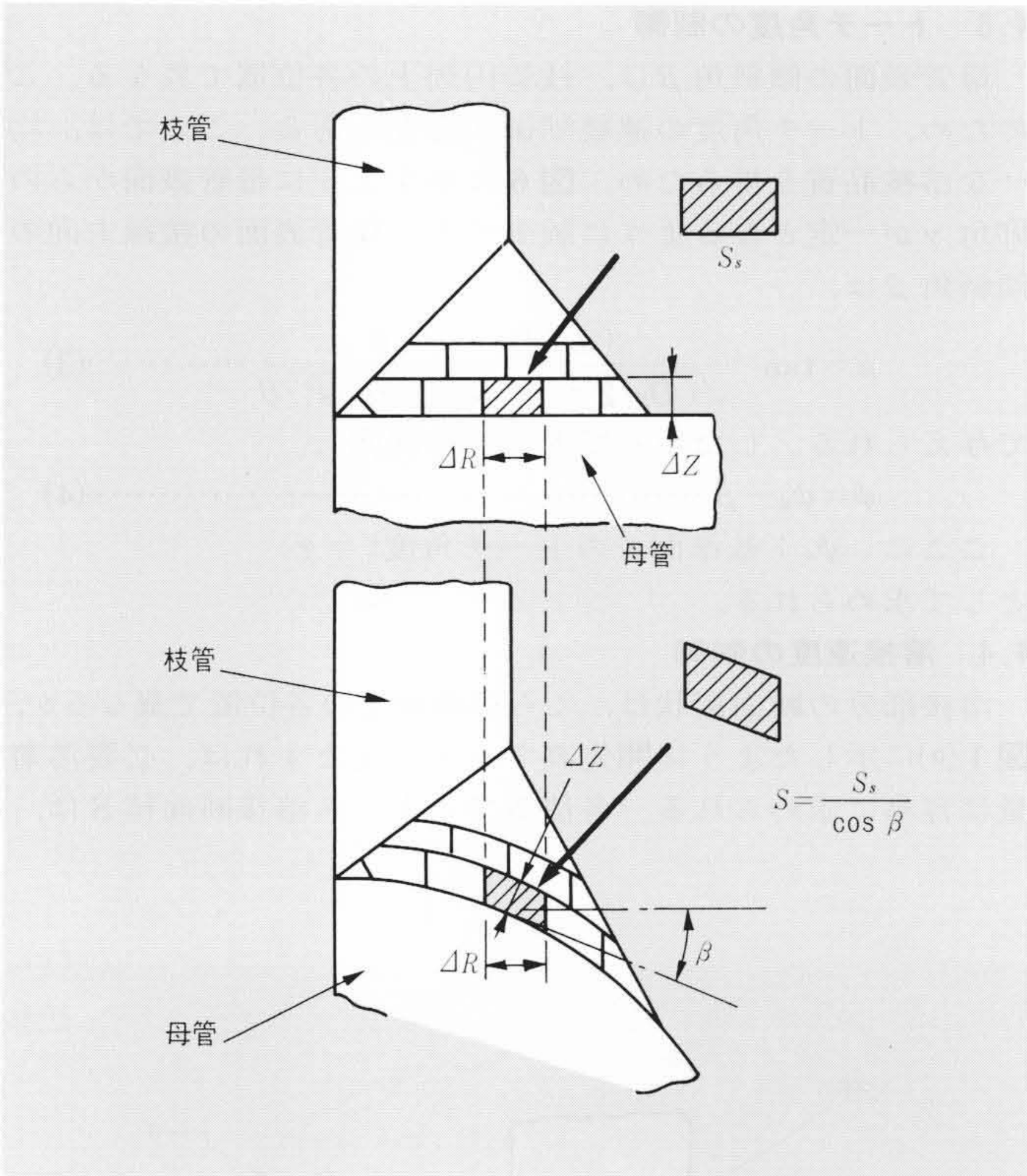


図7 溶接断面積の制御 溶接速度により、溶着量すなわち溶接断面積の制御を行なう。

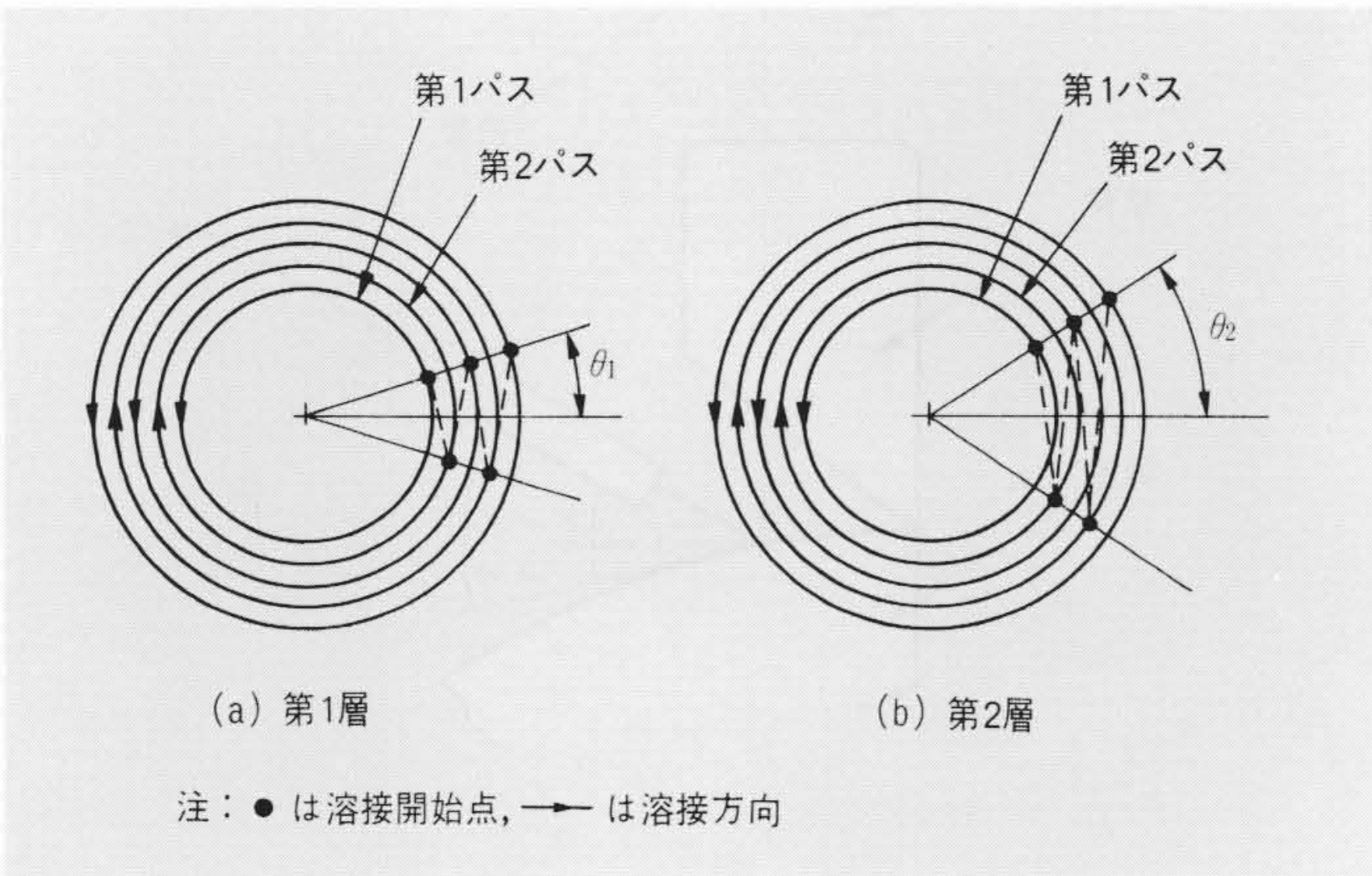


図8 溶接方向・開始点位置の制御 溶接開始点の角度位置は、一層ごとに θ_1 , θ_2 ($\theta_1 \neq \theta_2$) を繰り返し、パスの移動方向は1パスごとに反転させる。

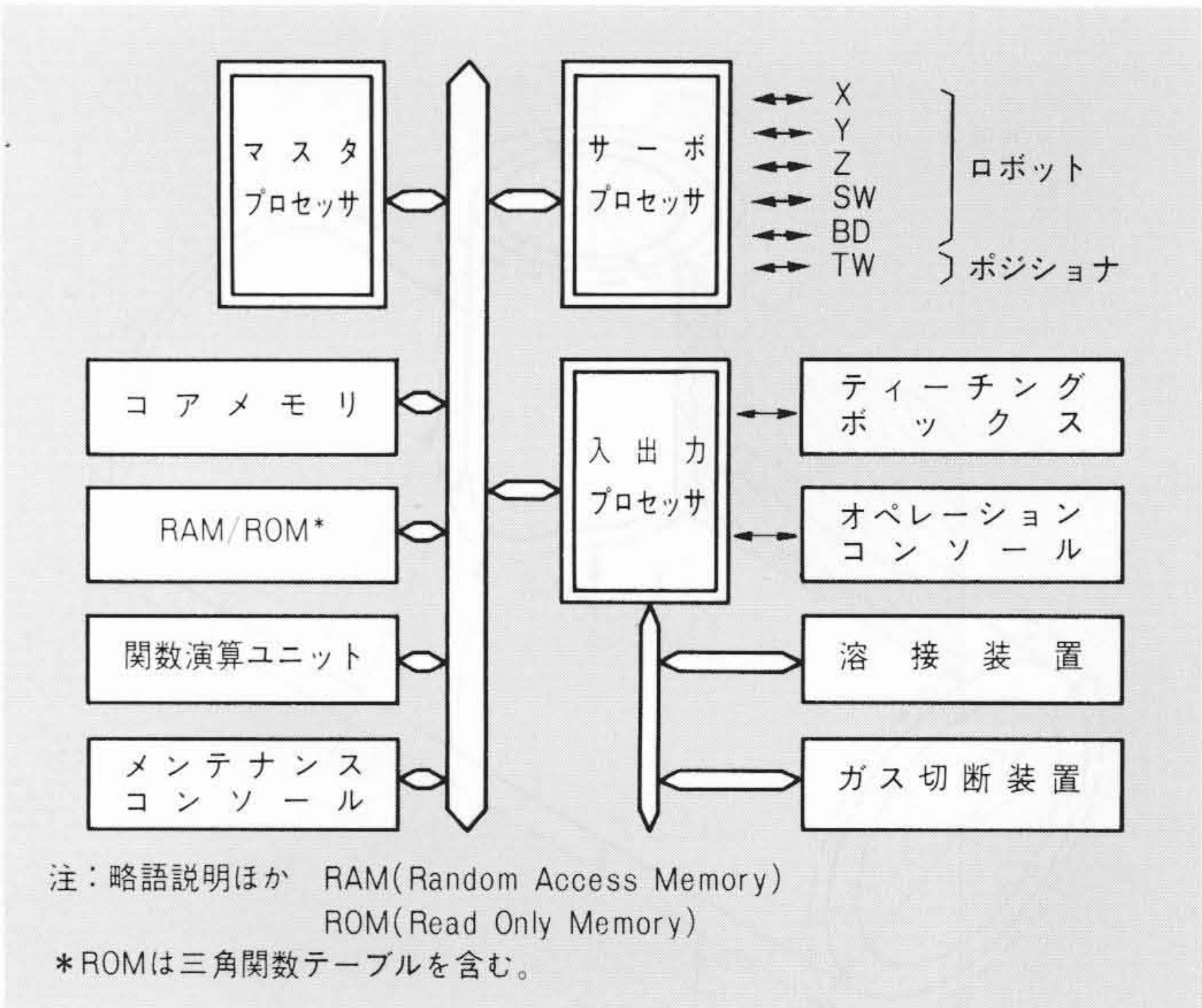


図9 制御装置の構成 制御装置は、マルチマイクロプロセッサ構成を採用している。

ないため、図8に示すように各層、各パスごとに溶接開始点の位置を変更する。

5 試作装置

5.1 メカニズム

前章までに示した結果に基づいて、くら形ノズル加工用ロボットを試作した。メカニズムの構成は図3と同一であり、駆動には電気-油圧サーボ方式を採用している。適用可能な母管、枝管径はそれぞれ最大1,500mm, 700mmである。

5.2 制御装置

制御装置は、図9に示すようにマスタープロセッサ、サーボプロセッサ、入出力プロセッサから成るマルチマイクロプロセッサ方式を採用した。4章で示した制御アルゴリズムは、マスタープロセッサのソフトウェアとして具体化されるが、数値演算が多用されるため関数演算用LSI及び三角関数テーブルを付加した。

オペレーションコンソールは、母管の外径、溶接脚長、あるいは基準面でのビード形状(ΔR , ΔZ)などを入力するほか、ロボットの動作状態を表示するために用いられる。ティーチングボックスは、主としてワークの近くでロボットを手動操作するために用いており、オペレーションコンソール、溶接及びガス切断装置とともに入出力プロセッサを介してマスタープロセッサに接続される。

また、ロボット各軸のサーボ系及びポジショナは、サーボプロセッサを介して制御する構成とし、各プロセッサに機能を分散することによりマスタープロセッサの負荷軽減を図った。

5.3 オペレーションシステム

オペレーションシステムは、安全性、操作性を考慮し、次のような点に留意して設計を行なった。

- (1) ティーチングを行なう点数は、精度を確保できる範囲で、極力少なくする。
- (2) 数値として与えられるデータは、必要最小限のものをオペレーションコンソールから入力する。
- (3) 作業の完全自動化を図る一方、人間による修正が容易に行なえるようにする。
- (4) 溶接条件、切断条件などは、ロボットの動作中でもリア

ルタイムで修正可能とする。

(5) 作業開始点までの動作，溶接パスの更新動作などは，経路を演算により創成して自動的に実行させる。

(6) 厳密なエラーチェックを行なう。

(7) 長時間作業のため，中断，再開が容易に行なえるようにする。

5.4 ソフトウェア

マスタプロセッサのソフトウェアは，全体を統括するPMS（プロセスモニタシステム），各種の作業を実行するタスク及びタスクに從属したサブルーチンモジュールから構成される。前章で説明した制御アルゴリズムは，サブルーチンの形で具体化するとともに，ロボット駆動処理と並行して同時に実行できるような構成とした。なお，アルゴリズム演算の精度は0.1mmであり，溶接，ガス切断の許容誤差0.5mmに比較して十分な精度である。

主なタスクとしては，次に示すものが挙げられる。

(1) 手動運転

ティーチングボックスの押しボタン操作により，ロボットの各軸を駆動する。ティーチングあるいは手動による位置修正などに用いる。

(2) ティーチ

ロボットの位置を記憶する。ワークの絶対位置，開先の形状などを与えるために用いる（通常のプレイバック方式での軌跡のティーチとは異なる）。

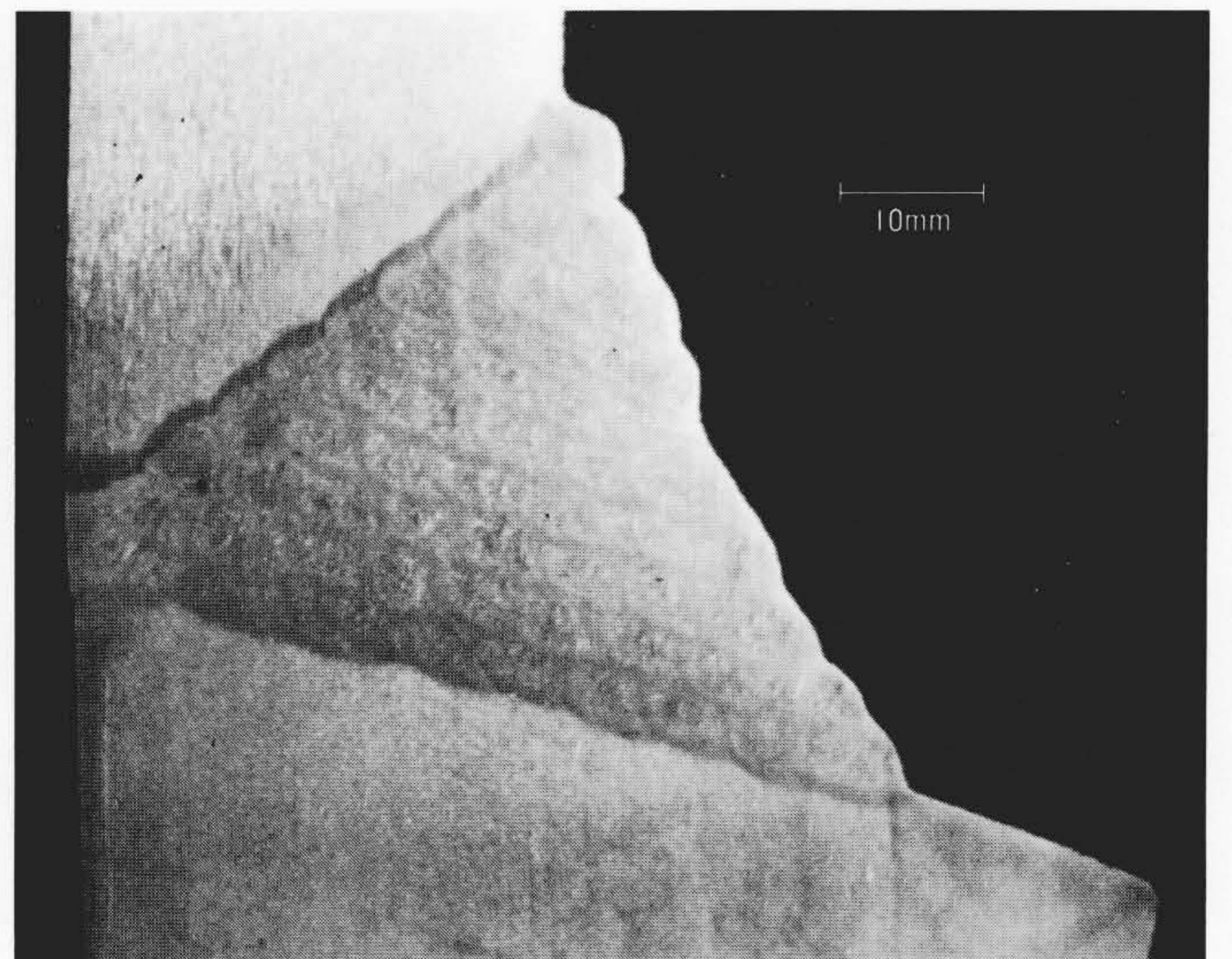


図11 多層溶接結果の断面マクロ写真 母管表面の傾斜角がほぼ15度の場合である。積層位置及び断面積の制御機能によって，50パス以上の溶接ビードが整然とした層状を呈している。

(3) パスチェック

ロボットを指定された軌跡上の一点に位置決めする。アルゴリズムによる演算結果と実際のワークとの誤差をチェックし，作業を確認するために用いる。

(4) 自動運転

ガス切断，多層溶接などの作業を実行する。

作業は，わずか3点ないし5点のティーチングと，数値データを入力するだけで，図10に示す自動運転フローに従って実行される。この間40項目を超えるエラーチェックが行なわれており，更に人間の操作による修正も常時可能である。

5.5 溶接及びガス切断装置

溶接機はパルスミグ(MIG: Metal Inert Gas)電源を用い，ガス組成は95%Ar+5%CO₂，心線径は1.6mmとした。溶接トーチは狭い開先にも適用できる二重シールド形カーブドトーチとし，ガス切断トーチと合わせて開発した。

5.6 実験結果

溶接基礎実験の結果，最適多層溶接条件として，平均電流200A，平均電圧24V，溶接速度300mm/min，トーチ角度45度前後進角0度（基準面で）を得た。このときのビード幅 ΔR 及びビード高さ ΔZ は，それぞれ6.0mm，3.2mmである⁴⁾。

この条件を用い，各種モデル実験を行なってアルゴリズムの妥当性を確認した。一例として母管外径 $D=1,000\text{mm}$ ，枝管外径 $d=400\text{mm}$ ，枝管肉厚 $t=35\text{mm}$ ，開先高さ $h=35\text{mm}$ ，脚長 $L=25\text{mm}$ （図4，5参照）の場合の溶接部断面を図11に示す。積層は11層約55パスであり，断面マクロ試験の結果は無欠陥である。なお，アークタイムは約7時間であった。

6 適用例とその結果

試作結果をもとに，くら形ノズル加工用ロボットの実用化を行なった。図12はその一例を示すもので，枝管乗せ形式及び差し込み形式を対象とし，ポジションの設置により $d/D=1$ のワークまで適用可能である。適用対象は比較的薄肉のタンク類で，溶接パス数は3～5パスのものが多く。

図13の適用例は，開先をもつノズルを対象とし，ガス切断及び溶接の一貫加工を行なうもので，ワークは固定して設置する。適用対象は厚肉の圧力容器類で，30～50パス程度の多

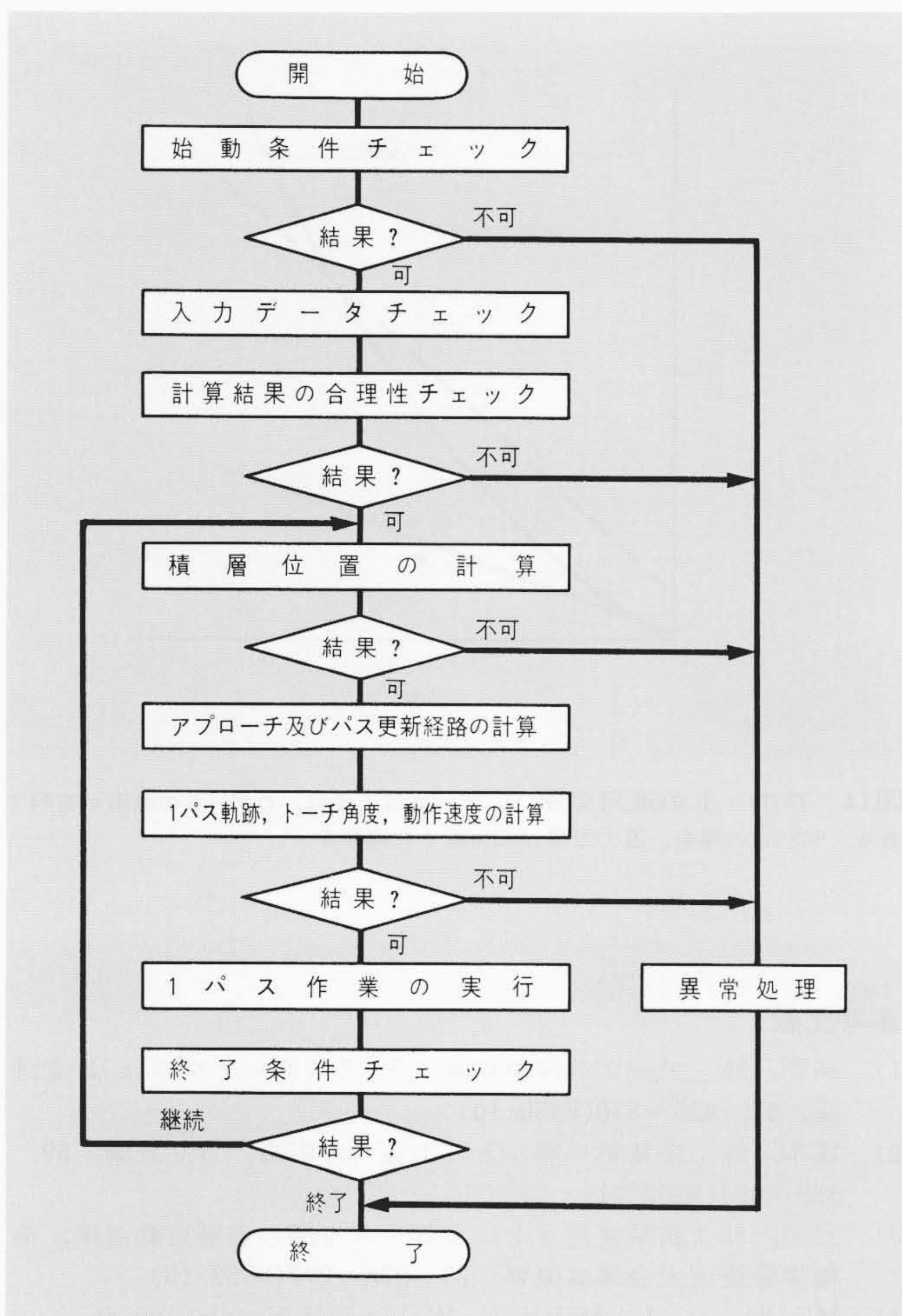


図10 自動運転のフローチャート 多様なチェックを行ない，安全性に留意している。

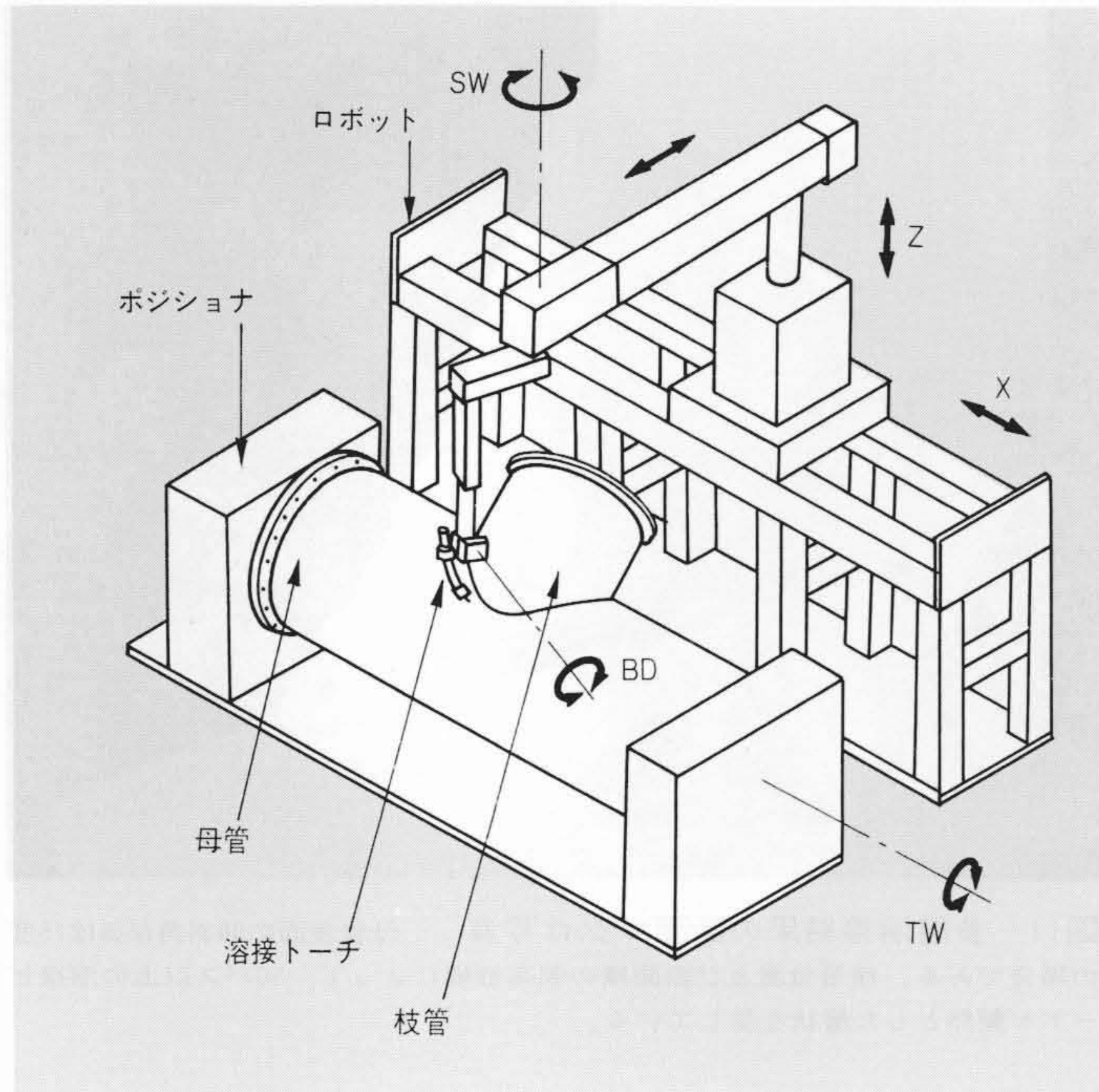


図12 薄肉ノズルへの適用例 母管をポジショナで回転し、 $d/D=1$ までのノズルを溶接できる。

層溶接を行なうが、最大では300パスの実績をもつ。

これらのロボットによるガス切断、溶接の結果はいずれも良好であり、放射線検査、超音波探傷検査とも欠陥は発見されなかった。

これらのロボットは、既に生産現場に導入されており、実製品の切断加工、多層溶接に適用されている。

図14は、これらのロボットの適用実績を作業時間と溶接パス数との関係で整理したものである。人間の場合、高温悪環境下で疲労が蓄積されるため、パス数の増加に伴い作業効率が低下する。また、従来形ロボットの場合には各パスごとにティーチングが必要であり、導入による大幅な省力効果は期待できない。これらに対して、本制御方式によるロボットではティーチングの工数増加はほとんど見られず、その有効性が明らかに認められる。

7 結 言

新しい概念のロボット制御技術として、動作内容をすべてアルゴリズム化し、制御装置のプログラムとして内蔵した自律形NC方式を開発した。この技術を用い、複雑な3次元曲線をもつくろ形ノズルのガス切断及び溶接用ロボットを実現した。このロボットでは、動作の軌跡、速度、トーチの姿勢などのほか、積層位置、動作のシーケンスなどが基礎実験あるいは解析の結果に基づいてアルゴリズム化されている。このため、従来のプレイバック方式のロボットと異なり、軌跡のティーチングを行なうことなく作業を実行することが可能である。

このロボットは、作業品質を含めた実用化試験を終え、現在既に圧力容器などの実製品の製造工程に適用され、効果を発揮している。

今回開発した制御技術は、対象を単にくろ形ノズルだけに限るものではなく、また作業を溶接、ガス切断に限るものでもない。今後は、このような意味で、対象、作業の両面から本技術の応用範囲拡大に努力してゆきたいと考える。

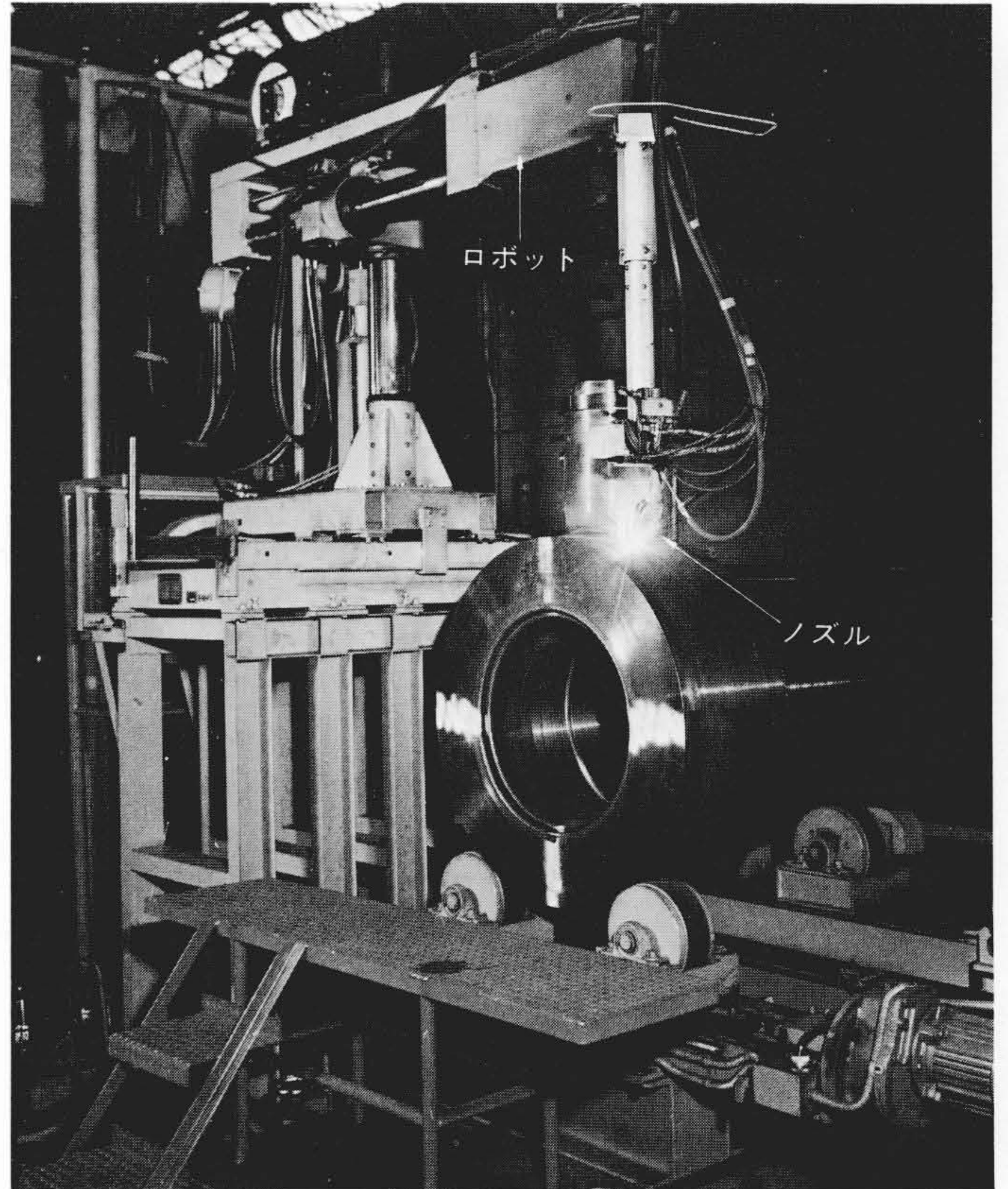


図13 厚肉ノズルへの適用例 多層溶接の状況を示すが、溶接トーチとガス切断トーチとの交換により、一貫加工が可能である。

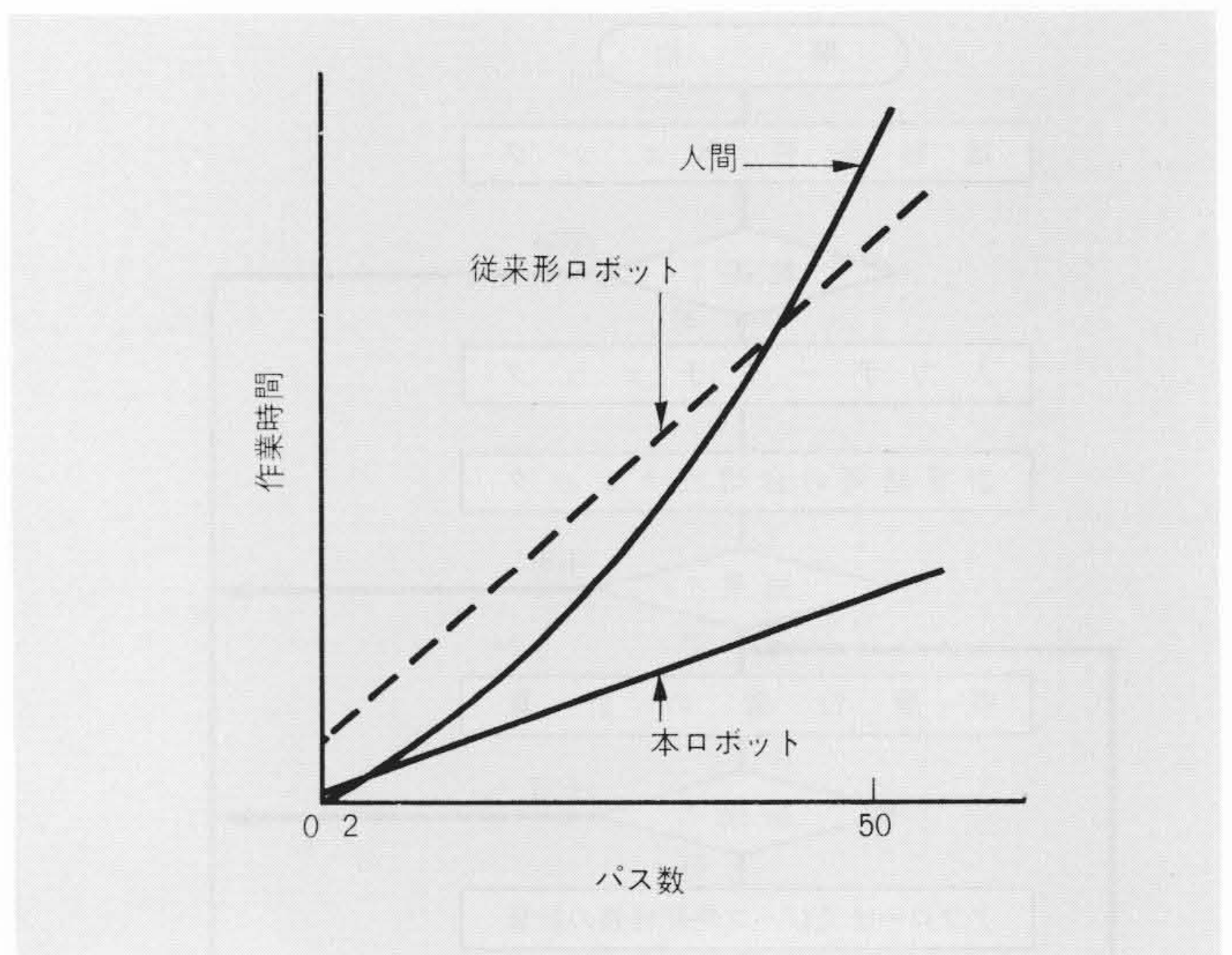


図14 ロボットの適用効果 2パス以上では、ロボットの適用が有利である。50パスの場合、省力効果は70%近くに達する。

参考文献

- 1) 高野, 外: アーク溶接用ロボット「ミスターアロス」, 日立評論, 57, 825~830(昭50-10)
- 2) 榎本, 外: 産業用ロボットの塗装への応用, 日立評論, 59, 889~894(昭52-11)
- 3) 三宅, 外: 産業ロボットによるノズル部の多層自動溶接, 溶接学会全国大会講演概要, 23, 274~277(昭53-10)
- 4) Miyake, et al.: Multipass Welding of Nozzles by an Industrial Robot, Proc. 10th Int. Symp. on Industrial Robots 51~59(1980-3)