

入門講座

圧延理論入門－5

連続圧延理論

The Theory of Tandem Strip Rolling

鎌田正誠

Masamoto Kamata

大分大学 地域共同研究センター
客員教授

1 まえがき

タンデム圧延機は圧延機が直列に配置されており、個々の圧延機を単独で考えることは出来ず、常に全スタンドの相互関係を考慮して運転する必要がある。この相互関係を理論的に解明する事を連続圧延理論と呼んでいる。

本講座においては、タンデム圧延のパススケジュールの計算方法、タンデム圧延の圧延因子の静的な相互関係を解析する静特性解析法、圧延因子の動的特性を解析する動特性解析法について解説し、最後に連続圧延理論を板厚制御へ応用した例について述べる。

本講座においては紙面の都合で、冷間タンデム圧延機を対象にして解説するが、熱間タンデム圧延機についても基本的には同じであり、熱間圧延の理論式を適用さえすれば、ほぼ同じ手法で解析が可能である。

2 記号の説明

P：圧延荷重、G：圧延トルク、E：圧延消費動力、
 h_i ：iスタンド出側板厚、 q_b ：後方張力、 q_f ：前方張力、
 v_i ：iスタンド出口材料速度、 μ ：摩擦係数、 ϕ ：先進率、
 v_r ：ロール速度、K：ミル剛性、k：変形抵抗、
 S：ロールギャップ、i：スタンド番号

3 パススケジュール計算

3.1 概論

タンデム圧延のパススケジュールの計算は、タンデム圧延作業にとって最も基本的作業である。すなわち原板厚み、鋼種、ロール径、モータ容量制限、圧延荷重制限等を考慮して最終タンデム圧延機出口で所定の目標板厚となるように、各スタンドのロールギャップとロール速度を決定することがパ

ススケジュール計算である。

パススケジュールを定めるということは、タンデム圧延機入口の原板板厚、タンデム圧延機出口の製品厚みが与えられたときに、原板厚みからの板厚縮減径路を決定することである。一般的に話を進めるため、nスタンドタンデム圧延機を想定する。図1に原板板厚から製品板厚へn個のスタンドで圧下する場合の板厚変化径路を示す。図1から解るように、原板板厚から製品板厚へ至る径路は無数にある。

この径路を一つに定め、かつ定められた径路の圧延を可能にするように、ロールギャップとロール速度を決定することが、パススケジュール計算の目的である。

無数にある圧下径路から1つの径路を選択するためには、制約条件を設定する必要がある。図1から解るように、nスタンドタンデム圧延機の場合、原板厚みから製品厚みまでの(n+1)個の厚みのうち、原板厚み、製品厚みは既知量なので、圧下径路を一義的に定めるためには、(n-1)個の制約条件を与える必要がある。

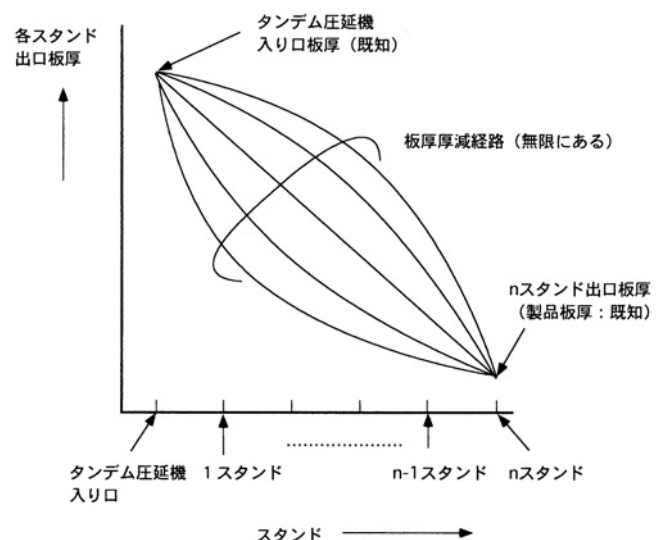


図1 タンデム圧延機における板厚厚減経路

制約条件については色々な考え方があるが、ここでは二つの考え方を紹介する。

第1は、タンデム圧延機各スタンドでの圧延消費動力配分率を制約条件とするパススケジュール計算法である。この方法は圧延機の動力を有効に活用するという素朴な考えに基づくものであるが、今でも多くの工場で採用されている。

第2は、タンデム圧延機各スタンドでの圧延荷重配分率を制約条件とするパススケジュール計算法である。近年圧延製品の形状と寸法とに対する要求が厳しくなって来たが、圧延荷重は、この製品の形状に大きな影響を持っているものであり、圧延荷重に着目し、それを規制することは、圧延機自体の強度上の観点ばかりでなく製品の形状に重点をおく場合に非常に重要な概念である。

その他の制約条件も色々考えられるが、何れにしろ (n-1) 個の制約条件を設定し、圧延径路を確定する事が必要である。

このようにして圧延径路が決まると、次のステップとして、タンデム圧延のロールギャップとロール速度を計算する必要があるが、その場合には次の2点を考慮しなければならない。

- (1) 圧延中、各スタンド間でループまたは材料破断が発生せず、かつ適正張力が実現出来るように全スタンドにわたって、体積速度一定の関係を保つ必要がある (体積速度一定の条件)。
- (2) 圧延荷重による圧延機の変形を考慮して所定の板厚が得られるようにロールギャップを定める必要がある (ロールギャップの弾性変化式)。

3.2 具体的な計算方法

前章で述べた様に、パススケジュールを計算するときに考慮すべき条件は3個ある

(1) 体積速度一定の条件

各スタンド出口に着目すれば、ロール出口での材料速度は、先進率、ロール設定速度によって定まる。

$$v = (1.0 + \phi) \cdot v_r \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

そしてタンデム圧延機各スタンド出口での体積速度Uが一定とすると、次の式が成り立つ。

$$v_i \cdot h_i = (1.0 + \phi_i) \cdot h_i \cdot v_{ri} = U \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

(2) 圧延荷重によるロールギャップの弾性変化

ミル剛性をKとすると、各スタンド出口板厚 (hi) の関係は、次の式で表わされる。

$$h_i = S_i + P_i / K \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

(3) 圧延状態の制約式

これについては色々な考え方があるが、前述の圧延消費動力配分率と圧延荷重配分率を与える場合の計算方法について述べる。一般的な形式として、n スタンドタンデムミルを想定する。

(イ) 圧延動力配分率を与える場合

第i スタンドで消費される圧延動力の配分率を γ_i とし、全圧延動力を E_o とすると、次の式が各スタンドについて成り立つ必要がある。

$$AA_i \cdot G_i \cdot v_{ri} = \gamma_i \cdot E_o \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

(AA_iは圧延動力変換係数)

γ_i の全スタンドの和は1.0となる。すなわち

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = 1.0 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

の関係がある。

(ロ) 圧延荷重配分率を与える場合

第i スタンドの圧延荷重配分率を η_i とし全荷重を P_o とすると次の式がタンデム圧延機各スタンドについて成り立つ。

$$P_i = \eta_i \cdot P_o \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^n \eta_i = 1.0 \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

よってパススケジュールを計算するためには、制約式として圧延動力配分率を与える場合には (3.2) 式、(3.3) 式、(3.4) 式を解けば良い。また、圧延荷重配分率を与える場合には (3.2) 式、(3.3) 式、(3.6) 式を解けば良い。

(3.1) ~ (3.6) 式中のP、G、 ϕ などは、冷間圧延理論式を適用すれば良い。P、Gに関してはHill¹⁾の式、 ϕ に関してはBland & Fordの式²⁾等がよく用いられる。

そして、P、G、 ϕ 等の理論式は非線形なので、パススケジュールを求める事は、多元連立非線形方程式を解くことに帰着する。多元連立非線形方程式を解析的には解くことは不可能なので、コンピューターを用いて数値計算する事になるが、Newton-Raphson法がよく使われている。Newton-Raphson法を用いた具体的な計算方法については紙面の都合で割愛するが、参考文献3)を参照されたい。

以上、制約条件として圧延動力配分率と圧延荷重配分率を

与えた上で理論的にパススケジュール計算する方法を説明したが、制約条件の決め方については、経験値に依存している。

これらの経験値に対する依存からの脱却を目指した研究としてダイナミックプログラミングの手法を応用してパススケジュールを計算する手法⁴⁾やファジィ多目的計画法⁵⁾を用いて最適パススケジュールを決定する方法等が提案されている。

4 連続圧延における静特性解析

4.1 概論

連続圧延の特長はスタンド間張力を介して圧延の各因子が相互に影響を与え合うことにある。その結果、単スタンド圧延時の圧延現象と異なる連続圧延特有の現象が発生する。例えばコールドストリップミルにおいて、ロールギャップ変化が製品板厚に及ぼす影響は、製品に最も近い最終スタンドのロールギャップよりも最も遠いNo1スタンドの方が大きい。このような現象は、スタンド間張力を媒体として圧延因子が相互に影響を及ぼし合うことに起因しており、連続圧延特有のものである。このような特性を解析する手法を連続圧延の特性解析と呼んでいる。

特性解析を大別すると時間の要素の入らない静特性解析と、時間の要素を入れた動特性解析の二つに分類できる。本章においては静特性解析に関して述べ、5章において動特性解析について述べる。

4.2 冷間圧延の静特性解析

定常圧延時にはタンデムミルのいずれの場所においても体積速度（板厚×板速度）は一定である。その状態からロールギャップ、ロール回転数などが変化すると定常状態が破れ、新しい定常圧延状態に移行する。静特性解析は、この二つの定常圧延状態間の関係を求めるものであり、新しい定常状態へ移行する過渡状態については取り扱わない。

(1) 基本方程式

(a) 体積速度一定の条件

体積速度一定の条件式は第1章のパススケジュール計算の時と同様であり (4.1) 式で表される。

$$v_i \cdot h_i = U \dots \dots \dots (4.1)$$

(b) スタンド出口材料速度の式

ロール出口材料速度は先進率とロール速度によってきまるが、これもパススケジュール計算の章で述べたものと同一で

あり、(4.2) 式で表される。

$$v_i = (1.0 + \phi_i) \cdot v_{ri} \dots \dots \dots (4.2)$$

(c) スタンド出口板厚の式

スタンド出口板厚はロールギャップと圧延荷重で決まるが、これもパススケジュール計算の章で述べたものと同一であり (4.3) 式で表される。

$$h_i = S_i + P_i / K \dots \dots \dots (4.3)$$

4.3 冷間圧延の影響係数計算法

コールドストリップミルにおいて定常圧延では4.2項で述べた基本方程式 (4.1) (4.2) (4.3) 式が全スタンドについて成り立つ。何らかの外乱もしくは人為的に圧延条件を変化させることによって前諸式の変数の幾つかが変化した場合、圧延状態が変化し、新たな安定状態に移行するが、新しい安定状態においても、(4.1) (4.2) (4.3) 式が全スタンドについて成り立っている。圧延条件を変更する前の安定状態及び圧延条件を変更した後の安定状態の圧延変数は数値そのものは異なっているが、いずれの場合にも (4.1) (4.2) (4.3) 式が成り立っているということは、圧延状態はどのように変化しても変数間の関係は一定であり (4.1) (4.2) (4.3) 式によって規制されていることを示している。例えば、ロール間隙量、ロール速度等が変化したときの他圧延変数の変化は (4.1) (4.2) (4.3) 式の非線形方程式を解くことにより求めることができる。非線形方程式をそのまま解く方法もあるが、この計算は計算量が膨大であり、かつ、その計算を行った条件下での圧延変数間の関係しか求められず、全圧延変数の相互関係を一度の計算で求めることはできない。圧延条件が微小変化したときの全ての変数関係を一度に求める手法に、影響係数法と称する手法がある。

これは圧延変数に関して (4.1) (4.2) (4.3) 式をTaylor展開して2次項以上を省略し圧延変数の微小変化量の相互関係を表す1次方程式を求め、この方程式を解くことによって圧延変数の相互の影響度（影響係数）を求めるものである。この解析法の利点は全圧延変数変化の影響係数が一度の計算で求められる事である。具体的な計算をする場合には、基本方程式 (4.1) (4.2) (4.3) をTaylor展開して2次項以上を省略して1次式を導く必要があるが、計算過程については、紙面の都合で割愛する。

計算方法を知りたい方は、文献6)を参照されたい。

(a) 体積速度一定条件、(b) スタンド出口材料速度式、(c) スタンド出口板厚式、のTaylor展開式はコールドストリップミルの各スタンドについて成り立つものであるからnスタ

ンド圧延機の場合は $3n$ 個の1次方程式を得る。

一方タンデム圧延における圧延変数の主なものを表1に示す。

表1から解る様に圧延変数の総数は $(7n+3)$ 個である。圧延変数は $3n$ 元連立方程式によって規制されているので $(7n+3)$ 個の圧延変数のうち $(4n+3)$ 個の変数は独立に変化させることはできるが、残りの $3n$ 個の変数は $3n$ 元連立方程式の解として求められ、独立に変化させることはできない。よって圧延変数 $(7n+3)$ 個のうち $(4n+3)$ 個の変数が独立変数となり、 $(3n)$ 個の変数が従属変数となる。従属変数matrixを X とし、独立変数matrixを B とするとTaylor展開式は次のように書くことができる。

$$A \cdot X = B \cdots \cdots (4.4)$$

この連立一次方程式をを解くことにより、変数 (B) を変化させたときに生じる圧延変数 (X) の変化を計算することができる。この場合解析の目的に応じて独立、従属変数を選択することにより、種々の圧延特性を計算することができる。

例えば、圧延機各スタンドのロールギャップ、ロール速度等が変化したとき、製品の板厚、張力がどのように変化するかについて解析する場合はロールギャップ、ロール速度等を独立変数にし、製品の板厚、張力に関する変数を従属変数にして(4.4)式を解くことにより目的の解を得ることができる。また、逆に製品板厚やスタンド間張力を所定の量だけ変更するために必要なロールギャップ、ロール速度等の操作量を求めるためには製品の厚み、スタンド間張力に関する圧延変数を独立変数とし、圧延操作変数(ロールギャップ、ロール速度等)を従属変数とすればよい。ただし、従属変数、独立変数の数は先に述べた数に一致させる必要がある。

静特性計算の具体的な計算例(含む従属変数&独立変数の選び方)やその活用方法については第6章において述べる。

表1 圧延変数一覧

iスタンド出側板厚変化： Δh_i ($i=0 \sim n$)
iスタンド出側張力変化： Δqfi ($i=0 \sim n$)
iスタンド材料変形抵抗変化： Δki ($i=1 \sim n$)
iスタンド摩擦係数変化： $\Delta \mu_i$ ($i=1 \sim n$)
iスタンドロール速度変化： Δvri ($i=1 \sim n$)
iスタンド出側材料速度変化： Δvi ($i=1 \sim n$)
iスタンドロールギャップ変化： ΔSi ($i=1 \sim n$)
体積速度変化： ΔU
但し $i=0$ は第1スタンド入り口状態を表す

5 連続圧延における動特性解析

5.1 概論

外乱などで、圧延条件が変化した場合、定常状態から過渡状態に移行し、一定時間経過すると、圧延は定常状態へ復帰する。

動特性解析は、種々の圧延外乱、または圧延操作により安定圧延状態が破れて、次の安定状態が復活するまでの過渡特性を求める手法である。動特性解析は、これらの外乱が発生したときの圧延状態変化を求めることが出来る。また、色々な制御システム(板厚制御システムやスタンド間張力制御システム等)を適用した時の圧延挙動が計算出来るので、制御システム最適化の必須手段となっている。

5.2 基本方程式

静特性解析と異なる点は、体積速度一定の関係は過渡時には成り立たないことである。その他は静特性解析とほぼ同じである。すなわち、材料速度式、板厚の式については(4.2)式(4.3)式を用いる。

そして、体積速度一定の代わりにスタンド間張力の変化を記述する式及びスタンド間の材料移送式が必要となる。

5.2.1 スタンド間張力変化記述式

スタンド間張力の取り扱い方については種々の考え方があるが、次の二つの方法が良く用いられる。

(1) 最も単純化したモデル

この考え方はスタンド間での材料の圧延方向変形を隣接するスタンドの入、出側の材料速度差の積分から求めるものである。

$$\Delta qfi = \frac{E}{L} \int_0^t (\Delta v_{in,i+1} - \Delta v_{out,i}) dt \cdots \cdots (5.1)$$

$v_{in,i+1}$ ： $i+1$ スタンド入り口速度、

$v_{out,i}$ ： i スタンド出口速度

E ：ヤング率、 L ：スタンド間距離

この方式は計算が簡単な利点があり、よく用いられているが、これとは別に、本城らの提案したスタンド間での板厚分布を考慮した厳密なモデルもある⁷⁾。

(2) スタンド間で材料は剛性体であるとする考え方

スタンド間の材料の弾性的伸縮を無視し、 i 番目のスタンドの材料流出速度は $i+1$ 番目のスタンドへの流入速度に等しいとする考え方である。この考え方は阿高、鈴木⁸⁾によって提案され、次の様に記述される。

(a) i スタンドロールバイトの中でのマスフロー一定の式
 (圧延機全体におけるマスフロー一定則は成り立たないが、各スタンドロールバイトの中でのマスフロー一定則は成り立っていると考える)

$$v_{i-1} \cdot H_i = v_i \cdot h_i \dots\dots\dots (5.2)$$

(H_i : i スタンド入り口板厚)

(b) 張力のつり合い式 (i スタンド出口 & i+1 スタンド入り口の間)

$$h_i \cdot q_{fi} = H_{i+1} \cdot q_{b_{i+1}} \dots\dots\dots (5.3)$$

(H_{i+1} : i+1 スタンド入り口板厚)

この方法の特長は、(1)の方法とは異なり、スタンド間張力が(5.1)式のような積分計算を行うことなく代数計算によって求められることである。阿高、鈴木論文では上記関係式を線形化して1次元多変数解析として取り扱っているが、非線形計算を適用してもよい。

以上スタンド間張力の計算方法について二つの方法を述べたが、実際の計算を行うときには、目的に応じた計算方法を採用すべきである。

(1)の方法は最も計算が簡単であるので、板厚変化が余り大きくない場合の圧延特性の大略の傾向を調べるときに用いるのがよい。

(2)の方法はスタンド間張力を積分計算を行うことなく代数計算で求めることができることに特長がある。

5.2.2 スタンド間の材料移送式

これについては、次の様に表される

$$H_{i+1} = h_i \cdot e^{-s \cdot t_s} \dots\dots\dots (5.4)$$

但し t_s は材料のスタンド間移送時間を表している。

よって、(1)の方法においては(4.2)(4.3)(5.1)(5.4)式を連立させて解き、(2)の方法においては(4.2)(4.3)(5.2)(5.3)(5.4)を連立させて解けば良い。

以上述べた式を具体的に解く手段については、紙面の都合で割愛するが、詳しい事を知りたい方は、参考文献⁹⁾を参照されたい。

動特性計算の一例を図2に示す。これは、原板素材の板厚がステップ的に増加したときのタンデム圧延各スタンドにおける板厚挙動を計算したものである。

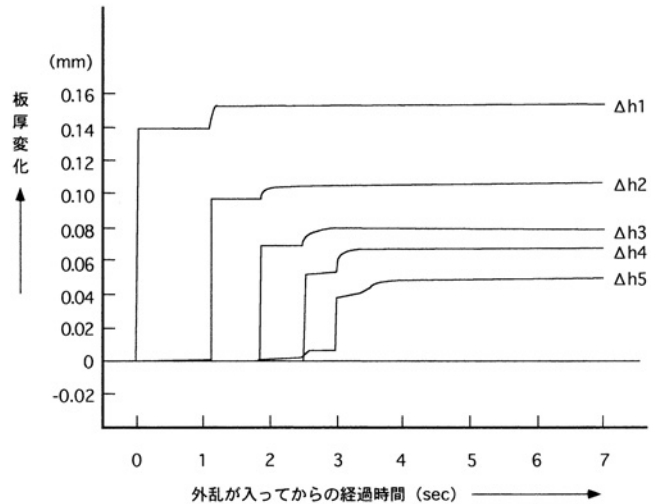


図2 圧延機入り側板厚ステップ変化 ($\Delta H_0 = 0.28\text{mm}$) に対応する各スタンド出口板厚変化

6 冷間タンデム圧延の板厚制御 (静特性解析と動特性解析の応用例)

6.1 概論

連続圧延理論の応用例として、板厚制御設計へ静特性解析と動特性解析を適用する例を示す。

冷間タンデム圧延においては、材料の変形抵抗が大きいことからロールで押しつぶすだけでは圧延荷重が過大になり、所定の圧下率がとれなかったり、薄肉製品を得られない事が起きる。その為、材料に大きなスタンド間張力をかけて圧延が行われる。このような事情で冷間圧延においては、スタンド間張力が大きな役割を果たしている。そしてこの張力の扱い方が重要で、張力制御の方式が変わると圧延特性が大きく変化し、板厚制御の考え方も根本的に異なってくる。

6.2 スタンド間張力制御方式による圧延特性の違いについて

タンデム圧延におけるスタンド間張力の取り扱い方は、次の二つに大別される。

(1) スタンド間の張力を制御しないケース

(実際には、スタンド間張力を全く制御しないと言う事ではなく、目標張力範囲から大きくはずれた場合のみ、張力制御を行なう方式である)。

(2) スタンド間張力をロール速度で厳密に制御するケース

この二つの張力制御方式を適用した場合の圧延特性は、前述の静特性解析を用いて計算することが出来る。計算に際しては、張力の取り扱いに対応して、独立変数、従属変数に分類することが必要である。

表2、表3に各々の場合の独立変数、従属変数を示す。これから解る様に、自由に変えられる圧延変数を独立変数とし、独立変数を自由に変えた時の結果として現れる変数を、従属

表2 張力制御を行わない場合の特性解析

独立変数

各スタンドロールギャップ変化: ΔS_i ($i=1\sim5$)
 各スタンドロール速度変化: Δv_{ri} ($i=1\sim5$)
 各スタンド摩擦係数変化: $\Delta \mu_i$ ($i=1\sim5$)
 各スタンド材料変形抵抗変化: Δk_i ($i=1\sim5$)
 素材板厚変化 (Δh_0)
 タンデム圧延機入口&出口張力 (Δq_{f0} & Δq_{f5})
 但し $i=0$ は第1スタンド入り口状態を表す

↓ 4・4式
 従属変数

各スタンド出側板厚変化: Δh_i ($i=1\sim5$)
 各スタンド出側張力変化: Δq_{fi} ($i=1\sim4$)
 各スタンド出側材料速度変化: Δv_i ($i=1\sim5$)
 体積速度変化: ΔU

表3 ロール速度で張力制御を行う場合の特性解析

独立変数

各スタンド材料変形抵抗変化: Δk_i ($i=1\sim5$)
 各スタンド出側張力変化: Δq_{fi} ($i=0\sim5$)
 各スタンド摩擦係数変化: $\Delta \mu_i$ ($i=1\sim5$)
 各スタンドロールギャップ変化: ΔS_i ($i=1\sim5$)
 素材板厚変化 (Δh_0)
 第1スタンドロール速度変化 (Δv_{r1})
 但し $i=0$ は第1スタンド入り口状態を表す

↓ 4・4式
 従属変数

各スタンド出側板厚変化: Δh_i ($i=1\sim5$)
 各スタンドロール速度変化: Δv_{ri} ($i=2\sim5$)
 各スタンド出側材料速度変化: Δv_i ($i=1\sim5$)
 体積速度変化: ΔU

変数に選ぶ必要がある。

上記2つの張力制御を適用した時の圧延特性の計算結果について以下少し解説する。

(イ) ロールギャップの影響

図3に、タンデム圧延機各スタンドのロールギャップ変化が、製品板厚へ及ぼす影響の計算結果を示す。図から解る様に、張力制御を行わないケースにおいては、製品板厚への影響はNo.1スタンドのロールギャップが一番大きく、No.5スタンドのロールギャップの影響は小さい。張力制御をロール速度

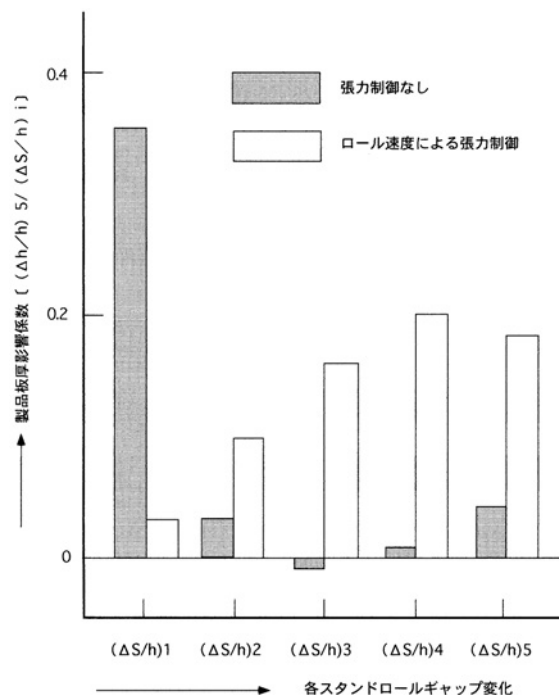


図3 各スタンドロールギャップ変化が製品板厚に及ぼす影響

で行う場合は、張力制御を行わない場合とは逆にNo.3、No.4、No.5スタンドのロールギャップの影響が大きく、No.1スタンドのロールギャップの影響は小さい。

(ロ) ロール速度の影響

図4に、各スタンドのロール速度変化が、製品板厚に及ぼす影響についての計算結果を示す。図から解る様に、張力制御を行わない場合はNo.1スタンドとNo.5スタンドのロール速度が製品板厚に大きな影響を与え、2・3・4スタンドの速度は、製品板厚にあまり大きな影響を及ぼさない。

(ハ) 外乱が製品板厚に及ぼす影響 (例えばロール材料間摩擦係数の影響)

図5に各スタンドの摩擦係数変化が製品板厚に及ぼす影響についての計算結果を示す。図から解る様に、張力制御を行わない場合は、No.1スタンドの摩擦係数変化が製品板厚に対して大きな影響を与える。これに対してロール速度で張力制御を行う場合には、No.3、No.4、No.5スタンドの影響が大きい。

6.3 具体的な板厚制御システム

以上述べたことから、板厚制御の基本的な枠組みが決まる。

(1) 張力制御を行わない場合の板厚制御システム

この場合の圧延特性は、静特性解析から次のようにまとめられる。

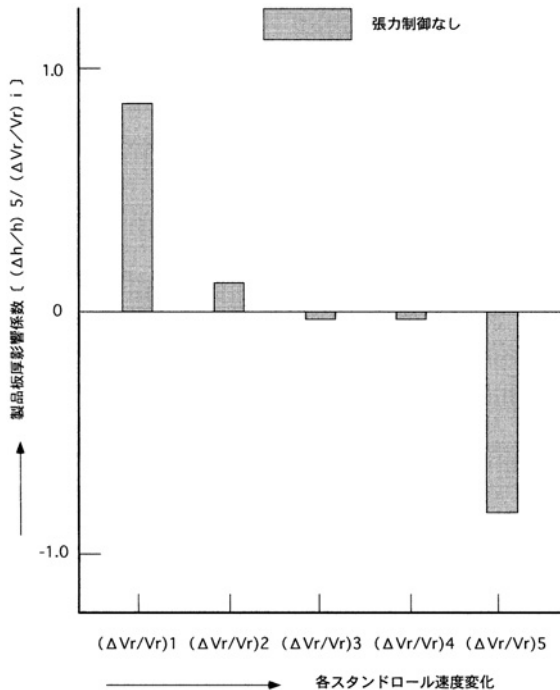


図4 各スタンドロール速度変化が製品板厚に及ぼす影響

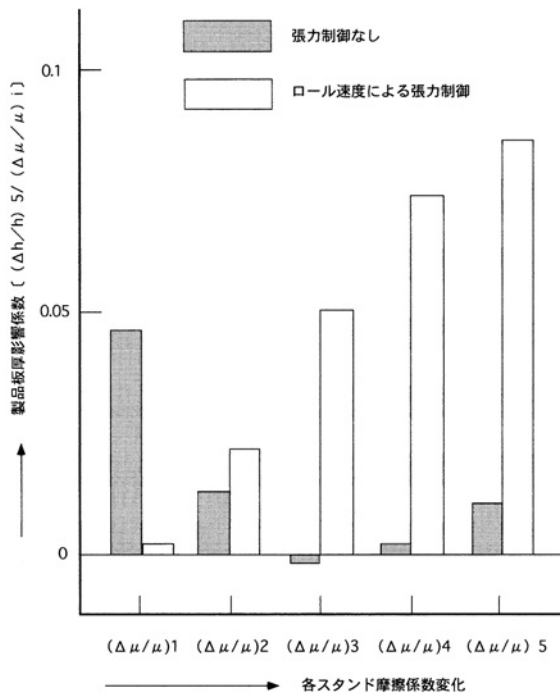


図5 各スタンドの摩擦係数変化が製品板厚に及ぼす影響

最終スタンド出口板厚（製品板厚）に大きな影響を与える圧延因子は、次の4項目である。

- (イ) No.1スタンドロールギャップ変化
- (ロ) No.1スタンドロール速度変化
- (ハ) No.5スタンドロール速度変化
- (ニ) No.1スタンドで発生する圧延外乱（熱延原板板厚変動、No.1スタンドでの摩擦係数変化、No.1スタンドでの変形抵抗変化等）

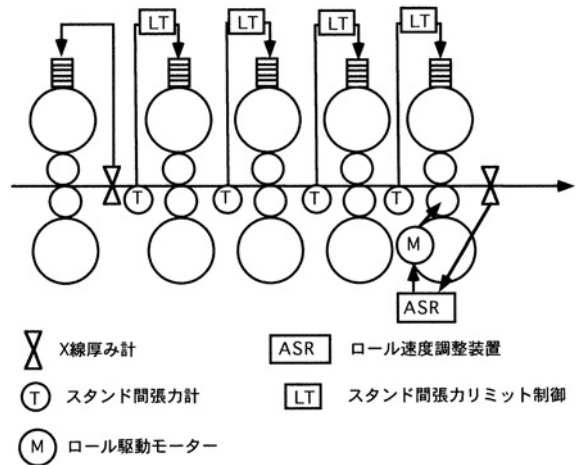


図6 自動板厚制御システム (Type1)

抗変化等)

この様な圧延特性から板厚制御システムは次の様になる。
No.1スタンドでの外乱による板厚変動を押さえ込む事が重要なので、No.1スタンド出口に板厚測定器を設置し、No.1スタンドロールギャップを制御することにより、板厚一定制御を行なう。精密製品板厚制御は、No.5スタンド出口に設置された板厚計からの板厚偏差信号により、No.5スタンドロール速度を制御することによって行われる。この板厚制御の制御系統図を図6に示す。

この場合のスタンド間張力の取り扱い方については、スタンド間張力が目標張力範囲に入っている場合は制御を行わず、目標張力範囲からはずれた場合のみ、ロールギャップをアクチュエーターとして張力制御を行う方式（張力制限制御と称す）を適用することが多い。

(2) ロール回転数変更によりスタンド間張力を一定に保つ場合の板厚制御方式

この場合板厚を制御する主役は、前述の静特性解析から明らかのようにタンデム圧延機後段スタンドのロールギャップ（No.3、4、5スタンドロールギャップ）である。板厚測定器も後段スタンドに集中的に配備される。もちろん、スタンド間張力はロール速度を制御することによって行われる。図7にスタンド間張力制御系及び板厚制御系を示す。

このようにして、静特性解析をする事により、制御形態の大略を求める事が出来るが、実際の制御系を設計する為には、より細かな制御定数を決める必要がある。実際の制御系を設計する時には、まず、上記のような静特性解析を行い、制御の大綱を定め、次に、動特性解析を行い制御系の種々の制御定数を求めるのが一般的な手法である。図8に制御系設計のフローチャートを示す。

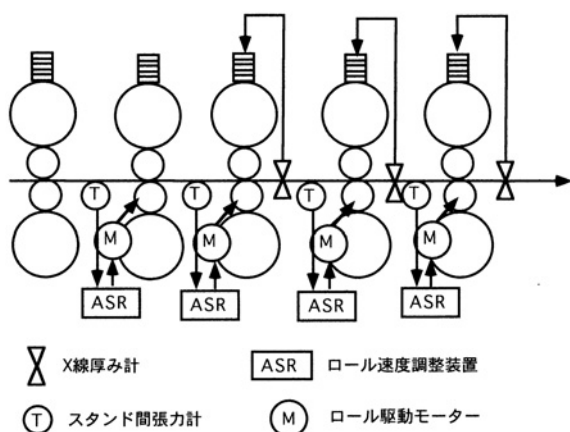


図7 自動板厚制御システム (Type2)

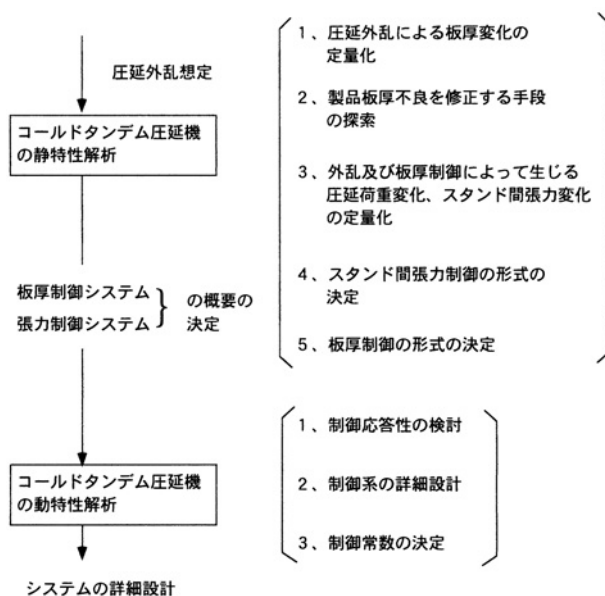


図8 コールドタンデム圧延機板厚制御系設計手順

7 むすび

以上、連続圧延理論について述べた。紙面の制約もあり、応用として定常圧延中の板厚制御システムの解説しか出来なかったが、この他、加減速時や通板尻抜き時のなど非定常時の板厚制御システム、完全連続式タンデムミルの走間板厚変更制御などタンデム圧延機の新しい運転法案の導出に当たっては連続圧延理論が常に使われてきた。

今後も、色々な運転方法や制御システムが検討されるであろうが、重要な事は連続圧延理論を活用して、無駄のない検討を行う事である。

本講座については、紙面の制約もあり、駆け足の記述となってしまった事を申し訳無く感じているが、詳しい事を知りたい方は参考文献10)を参照されたい。

参考文献

- 1) R. ヒル：塑性学，培風館，驚津・山田・工藤共訳，(1954)，195.
- 2) H. Ford, F. Ellis and D. R. Bland：J. Iron & Steel. Inst, 168 (1951) 5, 57.
- 3) 鈴木 弘，鎌田正誠：塑性と加工，8 (1967) 80, 460.
- 4) 岡戸 克，鈴木 弘：塑性と加工，10 (1969) 106, 808.
- 5) 北村 章，植崎博司，小西正躬，坂和正敏：鉄と鋼，79 (1993) 3, 100.
- 6) 例えば，鎌田正誠：薄板圧延技術，鉄鋼協会監修，地人書館，(1997)，67.
- 7) 本城 恒：石川島播磨技報，12 (1972) 5, 515.
- 8) 阿高松男，鈴木 弘：塑性と加工，11 (1970) 116, 676.
- 9) 例えば，鎌田正誠：薄板圧延技術，鉄鋼協会監修，地人書館，(1997)，93.
- 10) 例えば，鎌田正誠：薄板圧延技術，鉄鋼協会監修，地人書館，(1997)

(2002年2月28日受付)