

討11 熱間圧延変形抵抗の数式モデル

東京大学工学部金属工学科

木原諒二

はじめに

炭素鋼の熱間圧延変形抵抗の測定は、金属材料の熱間変形能の研究が始められた時に始まった。すなわち変形能が材料の変形抵抗と混同というか、変形抵抗と変形能とが区別されていない研究の段階では、変形能は主として落重試験機により材料の鍛造量を測定して求められた。すでに凡そ15年程前に筆者はこのような消息について集録(1)したが、基本的にはこの時期から変形抵抗の検討が始まり、同一落重荷重・落下高さ、つまり同一圧縮エネルギーに対する圧下量で変形能が代表された。これはとりもなおさず平均変形抵抗と関係があるわけである。

実際の塑性加工の変形条件で材料を塑性変形した場合の応力-ひずみ曲線と求める方法で有名なのは1938年に発表されたNadaiとManjoineによる圓板円板の慣性を利用した衝撃引張試験である。また、落重型に変位測定と荷重測定の計器ととりつけた計器落重試験機によって荷重-変位曲線も求められるようになった。落重式はサブプレスの構造により圧縮変形及び引張変形の両方を行うことが可能であった。圓板円板の慣性を利用する方法は我国では作井らによって採用され、また落重式は、作井らをはじめとし、鈴木・橋本、井上、池島らにより使用された。

圓板円板の慣性・落重のような質量の衝突により材料を高速変形させる型式の試験機は、他に奈良や筆者らの使用した相打鍛造試験機による方法がある。また一方材料の荷重-変位曲線を求める試験機も電動機で駆動する型式も採用された。一方は高速ねじり試験機であり他の一方はカムプラスチックメーターである。材料は一般にねじり変形を加えた場合、初期からほぼ同じ幾何学的条件と力学的境界条件を保って変形を続けるものである。もとより、変形能の試験において、ねじり回転が増大するにつれて試験片に伸び縮みが生じたり、張力や圧縮力が生じる非定常的な現象の存在することは認められていた。しかし、圧縮変形や引張変形に比較して圧削的に大きな変形に至るまで外觀の幾何学的条件と力学的条件が保存される利点が見とめられ、多くの研究者はこの方法を採用して変形能や変形抵抗を測定して来た。

カムプラスチックメーターは、引張変形や圧縮変形が変形中に幾何学的変形条件を変化させ、また質量衝突型の試験機では変形速度の低下が起るなどの欠陥を解決するように開発された。この開発はE. Orowanの寄りによるものであり、J. P. Alderはこのカムプラスチックメーターにより、鉄鋼と銅の変形抵抗のひずみ速度依存性が変形温度とともに変化することを示した。カムプラスチックメーターはカムの偏心パターンを圧縮速度-圧縮変位パターンがひずみ速度一定パターン又は変形速度一定パターンなど望ましいパターンになるようにした偏心カムを用いている試験機である。

圓板円板の慣性を利用した試験機、落重型の試験機、相打鍛造試験機などは、速度の平方にエネルギーが比例するので、いずれも、高ひずみ速度範囲が得意な試験機である。これに対してカムプラスチックメーターやねじり試験機は試験機の動特性(歯車の歯、油膜厚の変動)や動的剛性、計器設備の欠陥などから10/s内外のひずみ速度が限界である。同時に10/sのひずみ速度といえども、圧延速度20m/sec入側板厚14mm 出側板厚7mm、D-ロール直径300mmの圧延で実現する程度の速度である。

一方、圧延荷重や圧延トルクから実際の圧延における変形抵抗を推定することも盛に行われた。この場合はホットスリップミルデーターとSimsの圧延理論がよく用いられた。いくつかの試験機による熱間変形抵抗の測定値や、実験の圧延荷重から推定された変形抵抗値のデータをもとにし、日本鉄鋼協会圧延理論分科会(現 圧延理論部会)は、低炭素鋼の熱間変形抵抗式を求めた。この式は住金の美坂の式

と呼ばれ、多くの技術者により活用されている。日立の志田はこの美次の式が変態点以下の温度で精度が悪くなることを改善するために、独自の変形抵抗の教式モデルを提案した。

その後、15年が経過したがその間変形抵抗に及ぼすパススケジュールの影響、例えば、パス間の空過時間と次パスでの変形抵抗の関係、温度が変化する場合の変形抵抗の推定など、圧延の総合特性の精度を向上させるための変形抵抗の教式モデルの改善のために多くの研究者が関心を抱いた問題がある。また、その間、グリーンブル試験機や電気油圧サーボ機構などの進歩により、変形のプログラムに従って試験をすることのできる装置が開発され、パス間の空過時間の影響を正しく評価することも可能となった。

本報告は、熱間変形抵抗の教式モデルに関する基礎的課題を提起し、本討論会に資する目的をまとめたものである。したがって内容は多少抽象的であると思われるが、今後の研究の方向を示すことができれば幸甚である。

圧延理論と変形抵抗

圧延荷重や圧延トルクを剛塑性体に関して力学的理論に基づいて決定することは、スラブ法やエネルギー法などの多くの仮定を含んだ方法によってしか、未だなすことができない。まして、変形抵抗が温度、ひずみ、ひずみ速度によって変動し、圧延される材料中に温度分布、ひずみ分布、ひずみ速度分布が存在する場合には、完全な理論解を求めることは殆んど不可能に近い。そこで材料の変形抵抗に関しては、剛塑性体に関して求めた圧延荷重・トルクの理論に適合するように平均化しなければならぬ。適切な平均変形抵抗の求め方は、実はそれ自体、正しい圧下力関数と求めることとなる。このことを本項で論じることとする。

材料の平均変形抵抗を求めるためには、まず変形する物体の平均ひずみ乃至ひずみ分布が判らなければならぬ。この平均ひずみと平均変形抵抗とは不可不離の関係にある。圧延と同様の定常加工プロセスである引板を例にとってみると、塑性仕事率 \dot{W} は外力のなす引板仕事に等しいから、後方張力がない場合には、引板応力を σ_f 、出側の断面積を S_1 、引板速度を U とすると

$$\dot{W} = \sigma_f S_1 U \quad \dots\dots (1)$$

となる。この \dot{W} の内訳は、材料内部で消費される塑性仕事消散と、ダイスと材料との接触面で消費される摩擦仕事消散の速度である。 A はダイスと材料との接触面、 V は塑性変形を起している体積、 ΔV はダイスと材料との間の相対速度、 τ_f はダイスと材料との間に作用する摩擦応力とする。 \dot{W}_1 は摩擦仕事消散の速度、 \dot{W}_2 は塑性仕事消散の速度とすると、 $\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$ となり、

$$\dot{W}_1 = \int_A \tau_f \Delta V dA \quad \dots\dots (2)$$

$$\dot{W}_2 = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV \quad \dots\dots (3)$$

となる。材料が完全剛塑性体の場合には、材料の変形抵抗を R_f とすると(3)式は

$$\dot{W}_2 = R_f \int_V d\bar{\epsilon}/dt \cdot dV \quad \dots\dots (4)$$

と書き直される。ここで $\bar{\epsilon}$ は相対ひずみである。引板応力 σ_f のうち塑性仕事消散速度に対応する成分を σ_f' とすると定常変形であるから

$$\sigma_f' = R_f \int_V d\bar{\epsilon} \cdot dV/dt = R_f \frac{d}{dt} \int_V \bar{\epsilon} dV / \frac{dV}{dt} = R_f \int_V \bar{\epsilon} dV / V \quad \dots\dots (5)$$

と変形され、 σ_f'/R_f は引板された材料の平均ひずみという物理的意味をもつ。もし、丸棒の引板工の場合であるならば、(5)式の $\int_V \bar{\epsilon} dV / V$ は $\ln(S_0/S_1)$ (但し S_0 :引板前の棒の断面積、 S_1 :引板後の棒の断面積)で表した値は、引板というプロセスでの変形の余剰倍率をあらわしている。

圧延の場合として、平圧延で幅広がりがない簡単な例について考察する。(1)式に対応して、圧延ト

ルクとT, ロールの角速度を $\dot{\omega}$ とおくと, ロールの仕率率はTとロール一本当たりのトルクとして

$$\dot{W} = 2T\dot{\omega} \quad \dots (6)$$

Aとロールと材料との接触面, Vと塑性変形を起している体積, Δv とロールと材料との間の相対速度, τ_f とロールと材料との間の摩擦応力とする。 \dot{W} から摩擦応力によりなされる摩擦仕率消散速度と差引いた仕率率 \dot{W}_2 とし, \dot{W}_2 に対応するロール一本当たりのトルク T' とする。

$$\dot{W}_2 = 2T'\dot{\omega} = \int_V \sigma_{ij} (d\epsilon_{ij}/dt) dV \quad \dots (7)$$

となる。材料が完全剛塑性体で変形抵抗が k_f であれば, $2T'\dot{\omega} \leq 1.15 k_f \ln(1/r) (dv/dt)$ で除した値は引抜の場合と同じく, 圧延における変形の余剰倍率となる。また, $2T'\dot{\omega}/k_f$ は圧延された材料のうける平均ひずみである。

このように, 材料が完全剛塑性体であれば加工プロセスに対応して平均ひずみを定義することができる。また, 先に注意深く摩擦仕率率を除外して平均ひずみを定義したが, 摩擦仕率率は大体摩擦係数または摩擦定数($\tau_f = mR$ の m, R :降伏せん断応力)が一定であれば, 材料の変形抵抗に比例するのであるから, 全体の塑性仕率の余剰倍率をもってひずみの倍率として平均ひずみを定義してもかまわないであろう。いわば拡張された平均ひずみの概念である。

このような平均ひずみは初等理論あるいは数値解析などによって, 所定の摩擦条件に対応して求めることができる。そして, 平均ひずみが定義できれば, 材料の塑性曲線をもとに平均変形抵抗を定義することができる。単位体積当たりの塑性仕率消費量が $k_{fm} \cdot \bar{\epsilon}_m$ (k_{fm} :平均変形抵抗, $\bar{\epsilon}_m$:平均相当ひずみ)と求まる。 $\bar{\epsilon}_m$ が摩擦仕率を含んで定義されていれば, これから直ちにロールのトルクが計算され, トルクアーム係数を介して圧延荷重を算定することができる。

以上は, 材料の加工硬化挙動により材料の流れが変化しない場合であったが, 材料の自由面が大きくロールからの拘束の小さい場合には, 材料の加工硬化挙動が流れに影響する。しかしこの場合も材料の変形抵抗について十分なデータがあれば, 実験的に圧延の力学的パラメータを定めることが可能である。その求め方を図1に示す。

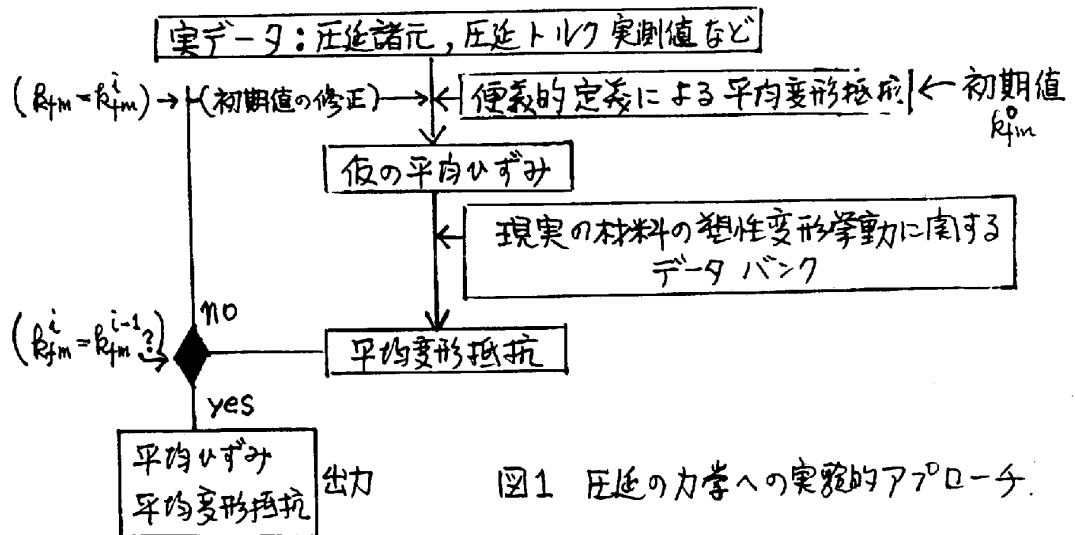


図1 圧延の力学への実験的アプローチ

最後に求められた平均ひずみと平均変形抵抗のうち, 力学的に重要なのは平均ひずみである。材料の塑性変形挙動, 摩擦条件によりこの平均ひずみの値がどのように変動するかを論理的かつ系統的に記述することができるれば, 種々の仮説を含む理論を作るよりも有意義である。そのためには, 材料の塑性変形挙動の定量的把握と正確な数式モデルの作成が必要である。

今日における変形抵抗の数学モデルにおける問題点

Q. 実操業における温度とひずみ速度の評価

揃うまでもなく、熱間圧延される材料の温度は表層から内部にわたって変化している。前節において述べたような実験的に又は実操データに立脚してプロセスの力学的数学モデルを確立する場合には、圧延材の温度に対応するパラメータを定める必要がある。いけば平均温度である。これは材料各部の温度の算術的平均ではなく、変形抵抗の重みとかけた平均でなければならぬ。今、加工度一定、加工速度一定の場合の平均変形抵抗 R_{fm} が

$$R_{fm} = f(T) \quad \dots (8)$$

で表わされるとする。この場合の平均温度 T_m は塑性変形域の体積 ϵV として

$$f(T_m) = \int_V f(T) dV / V \quad \dots (9)$$

から計算される T_m でなければならぬ。また、材料各部のひずみ速度も分布する。代表値としてのプロセスのひずみ速度を定めなければならぬ。しかし、ひずみ速度としては最大に近い速度を選べばよいことは、Wの評価の上から理解できることである。今日のところは、ロールギャップ内に存在する体積を全側の体積速度で除した、滞留時間 t と、圧延加工度から余剰変形を考慮しないで定めた全ひずみ ϵ_t とから ϵ_t/t によりひずみ速度を評価するのがよいであろう。

b. パス間時間の次パスにおける変形抵抗への影響の評価

普通鋼の熱間変形抵抗の数学モデルとして評価されている住金の美攻の式や日立の志田の式も、一パスの変形に対応できる数学モデルである。従って、熱間ストリップ圧延におけるように、タンデム圧延機のスタンド間での滞留時間における変形の回復を考慮することが必要とされた。そこで、残留ひずみという概念が用いられ、前スタンドでの圧下量にある率を乗じた圧下量と次スタンドにおける圧下量に加えて、あるいはその量を予変形量として扱って、次スタンドの変形抵抗の推定を行うのが普通であろう。筆者らは電磁サーボ式の熱間加工再現装置により、変形停止時間の次パスの加工硬化挙動に及ぼす影響を S45C 相当材について調査したことがある。前パスの変形を約 20%、ひずみ速度 0.1/sec で与え、1 sec から 10 sec 変形を停止した後、同じひずみ速度で変形を再開した。その結果、1 sec 変形を停止すると 2% ひずみでもとの加工硬化曲線に追いつく加工硬化挙動を有することが判った。これは 900°C から 1200°C までの β 相の温度範囲で同じであった。現在のホットストリップミルのスタンド間間隔と圧延速度とも考慮すると、仕上げタンデムでは全体として 1 パスの圧延として見なして、温度変化とひずみ速度変化だけを考慮すればよいといえる。また、パス毎のひずみ速度の影響は、次パスのひずみ速度が小さくなる場合についてだけ調査したが、この場合も非常に小さいひずみのうちに、そのひずみ速度及び温度における加工硬化曲線に漸近し、その後一収することも判った。このことは、実操を制御するための変形抵抗の数学モデルとしては、1 パス大ひずみの試験値をベースとして作製すれば間に合わせることをできるといえることを意味している。

C. より高温における変形抵抗の数学モデル

圧延もいずれは連続鑄造とプロセスとして連続化一体化されることもあろう。この場合には凝固時からの変形挙動を变形能・変形抵抗の両面から定量的に把握しておく必要がある。圧延の面からは 1100°C ~ 1400°C に至る温度範囲で材料のハンドリングを考之れば $10^{-4}/s$ から加工を考之れば $10^2/s$ のひずみ速度範囲での変形抵抗の数学モデルを得る必要がある。筆者らは 1100°C と越える β 相の変形抵抗に及ぼす C 量の影響は無視できることを見出した。

(1). 五五, 木原 ; 塑性と加工 6 (1965) P. 403