

大となる位置は溝底ではないかという質問に対しては、溝底より 45° の方向であるという回答がなされ、統一した見解は得られなかつた。

#### 討16 マンドレルミルの計算機制御

住友金属工業(株)中央技術研究所 山田 建夫

フルフロートマンドレルミルを対象として、過渡現象(噛み込み、尻抜け)の解析方法および解析結果が示され、圧延材の長手方向寸法変動が論じられた。続いて、その寸法変動を均一化するための制御方法および計算機制御の実施例が示された。過渡現象の解析は、既報のストレッチレデューサーの管端厚肉化現象の解析に用いた方法、三次元塑性解析モデルを用いたものである。解析結果として、過渡現象ではマンドレルバーの速度に階段状の変動が生じること、噛み込み時には No. 1~2 スタンド間に圧縮力が生じること、尻抜け時の圧縮力は噛み込み時よりも大きくかつ生じる範囲が広いこと、管後端の方が増肉が大きいこと、スタンド間に圧縮力を与えた方が管後端の増肉が相対的に抑制されることが示された。また、過渡現象における回転数制御法としては、従来よりスタンド間張力の変動を防止するような制御が考えられていたが、より簡単な方法として、仕上げスタンドの荷重変動により長手方向の肉厚分布を予測し、それをキャンセルするように回転数のダイナミックコントロールを行う方法が紹介された。

これに対して、セミフロート方式の場合と回転数制御で対処する場合の効果の差について質問があり、長手方向肉厚分布の均一化に関する限りは同程度の効果が得られる、との回答があつた。続いて解析の具体的方法について種々の質問があり、その回答として、圧縮力による座屈、自由変形部での外径変化、異周速圧延の影響は考慮していないことが示された。次に、リテインドマンドレルミルとフルフロートマンドレルミルの比較について若干の議論がなされた。さらに、計算機制御の実施例についての質問に対して、管端部の未制部の影響は実用上無視できること、バーはレーザーを使用して 0.05 mm 程度の精度で外径が測定されながらピーストラッキングされていること、仕上げスタンドの荷重により肉厚のフィードバックが行われていることなどが回答された。最後に、潤滑剤の種類による摩擦係数の違い、発表中に示された各データの採取方法について質問があり、回答がなされた。

#### 討17 中径継目無鋼管圧延の自動制御システム

川崎製鉄(株)技術研究所 富樫 房夫

マンネスマン・プラグミル方式の中径継目無鋼管製造ラインに全圧延機の自動制御システムを導入することにより、製品寸法精度、歩留り、生産性向上、さらに省エネルギーにも大きな効果をもたらしたことが報告された。ピアサーおよびエロンゲータでは、ロット替わり、圧延ピッチの変動に対してミル設定値が自動的に変化

し、精度の高い素管が得られている。プラグミルは最終製品管材の長さや厚さがほぼ決定されるミルであるので、ロールギャップ修正を対象に種々の精度向上が図られている。リーラーは初期設定の他に、モーター圧延トルクから実績肉厚圧下量を予測し、これを一定とするダイナミック制御が行われ、管長手方向に均一な外径のパイプが得られるようになっていく。サイザーは熱間の目標仕上げ外径を圧延温度から 1 本ごとに設定し、各スタンドの影響係数を自己学習する機能になっており、外径目標値への収束性が非常に良いことが示された。

これに対して、各種センサーについて、その必要度や効果について質問があり、平均肉厚算出のために、測長計、外径計、ミルスプリングバック補正のための荷重計等が重要であることが回答された。また、リーラー出口側に設置されている熱間肉厚測定機については高い関心が示され、その精度や役割について質問があつた。その回答として、精度は 0.1 mm であり、熱間ラインでの偏肉状況の把握と、これへの対応が図られていることが述べられた。さらに、実操業上へのマニュアル介入や制御言語、さらに学習制御上のフィードバック方式に対する議論も行われた。

このシステムの考え方は、マンドレルミル製管法にも適用可能であり、高く評価できる。

以上のように、圧延の塑性解析の分野で出遅れていた感があつたカリバーローリングも、非常に高い水準の解析が可能になってきた。将来の製品に対するユーザーの要求としては、今後さらに高寸法精度、高強度、高耐食性の高合金鋼等が考えられるが、これらの問題も積極的に解決していく研究が進められるであろう。

## IV. 鋼の腐食の確率論的評価

座長 東京大学生産技術研究所

増子 昇

孔食やすき間腐食などの局部腐食現象や鋼材の環境強度に対する確率論的評価に関しては、我が国の研究が世界に先駆けて進展しており、ここ 30 年位の間にその応用例が目覚しく充実してきている。柴田教授(阪大・工)、石川氏(日立・機械研)を始めとする、この方面の有力な研究者が一堂に会することで、現在の到達点を確認し、将来の飛躍のための足場を築くことのねらいがほぼ達成された。

討論論文の発表者は以下の 7 氏である。

- |     |                  |      |
|-----|------------------|------|
| 討18 | 石川島播磨重工業(株)技術研究所 | 明石正恒 |
| 討19 | 東京芝浦電気(株)重電技術研究所 | 服部和治 |
| 討20 | 日本鋼管(株)技術研究所     | 木田正春 |
| 討21 | 新日本製鉄(株)基礎研究所    | 伊藤 徹 |
| 討22 | 大阪大学工学部          | 柴田俊夫 |
| 討23 | (株)日立製作所機械研究所    | 石川雄一 |
| 討24 | 東京大学工学部          | 辻川茂男 |

[討 18] および [討 19] は沸騰水型原子炉の一次系環境を模擬した高温純水中における鋭敏化 304 鋼の粒界応力腐食割れ寿命の確率分布について検討したものである。

[討 18] では粒界応力腐食割れが定常成長を開始するためには限界割れ深さ  $50 \mu$  が存在し、これをこえると割れは一定の速度 ( $\sim 2 \times 10^{-9}$  m/s) で成長することが示された。全体の SCC 寿命が古典的な指数分布によく適合することから、深さ  $50 \mu$  以下の非成長性き裂が合体し、成長を開始する過程がポアソン過程に従うことで SCC 寿命分布が支配されるものと考えた。従来 SCC 寿命は最弱リンクモデルに基づくワイブル分布などを用いて解析されて来たが、明石らの結果は、ワイブル分布への適合性を否定している点で示唆に富むものである。他の系にもより基本的な寿命分布である指数分布による見直しを行つてみることの興味が討論された。

[討 19] では Post [討 19 の文献 7] が用いた手法を適用して、基準材としての 304 鋼と代替材の実パイプ比較試験を行い、寿命評価を行った。この際最弱リンクモデルの不成立を考慮して第 1 漏洩時間のみでなく第 3 漏洩時間までのデータを用いて解析した点で Post の取り扱いを進展させている。代替材の寿命が基準材と同じ対数正規分布に従うものとし、標準偏差も基準材と同じであると仮定して、代替材の 304 NG 鋼、316 NG 鋼の寿命改善度がそれぞれ 20 倍以上、30 倍以上であることを確認した。この比較試験では代替材には割れ発生がおこらないにもかかわらず、改善度が計算できる点で応用範囲の広い手法となろう。代替材の寿命改善度とサンプルサイズの関係が討議された。

[討 20] および [討 21] は炭素鋼の局部腐食の寿命解析に関するものである。[討 20] では、まずパイプラインの内面の最大孔食深さが第 1 漸近近似の最大値分布 (極値分布) に従うことが示され、孔食深さの時間変化として対数関係 ( $V = b \cdot \log t + c$ ) を与えた。全長 68 km のパイプラインの上流、中流、下流位置での孔食進行度の差が流体中の酸素量の変化で説明されるとした。確率論の応用に当たつても、たえず腐食反応の基本に立ち戻ることの重要性は変わらない。次いで土壌配管の漏洩期間に対する第 3 漸近近似の最小値分布 (ワイブル分布) の適用例を示した。

[討 21] では建設後 14 年経過した 5000 kl 重油タンク底板 (6 mm 厚) 裏面の調査結果をもとに、残存肉厚を等高線図によつて表示した。この事例では 12 箇所の貫通孔が存在する。このような現実の全調査結果をもとに、極値統計分布を応用した残存肉厚推定結果との対比を試みた。代表値を求めるためのサンプリング面積の大きさ、およびサンプル採取場所のグループ分け等の難しい問題が残されることを指摘した。

[討 22] では孔食発生が電位に依存する定常残存確率

を有する実験事実をもとに、孔食発生確率が非孔食状態から孔食状態に遷移する確率  $\lambda$  と逆に孔食状態から非孔食状態に遷移する確率  $\mu$  の 2 つのパラメータで記述できる出生死滅過程として記述できることを示した。 $\lambda$ 、 $\mu$  は共に電位の関数として求められ、孔食電位が  $\lambda = \mu$  を与える電位として意味づけられることを示した。ステンレス鋼の孔食に及ぼす合金元素の影響をこの 2 つのパラメータへの影響を通して解析した。すなわち Cr、Ti、Nb は  $\mu$  を変化させずに  $\lambda$  を減少させ、Mo は  $\lambda$  を減少させるとともに  $\mu$  を増大させる。孔食電位  $E_{crit}$  は次式で表される。 $E_{crit} = -1.284 + 0.0769 \text{ Cr}$ 、eq. Cr、eq はクロム当量を意味し、 $\text{Cr} + 4.98 \text{ Ti} + 1.39 \text{ Mo} + 0.55 \text{ Nb}$  で表される。

[討 23] および [討 24] はすきま腐食の発生確率に関するものである。[討 23] では一定条件の試験液中に浸漬した 304 鋼および 18Cr-2Mo 鋼のすきま腐食発生時間を調べ、各種の確率分布への適合性を判定した結果、第 3 漸近近似の最大値分布に最も良く適合することを見出した。これはすきま内溶液の成分濃度および pH が徐々に変化し、ある臨界値 (最大値) で腐食が発生するという複数の確率過程が並列に結合した綱モデルによつて記述できることを意味している。一方 200 日後のすきま腐食侵食深さの分布は 2 つの対数正規分布で近似され、また最大深さは第 1 漸近近似の最大値分布によく合うことが示された。

[討 24] では 444 鋼 (高純度 18Cr-2Mo 鋼) について 80°C NaCl 溶液中における金属-金属すきままでの腐食発生時間を定電位条件で調べた。すきま再不動化電位  $E_R$  の近傍では、[討 22] と同じように定常残存確率が見出されている。また成長性すきま腐食の判定基準として  $40 \mu$  以上に成長したすきまが進行を継続する。この条件での  $E_R$  は  $-0.20 \sim -0.22 \text{ V (vs SCE)}$  であり、 $E_R$  以下の条件では  $40 \mu$  以上に成長したすきま腐食は見出されず、 $E_R$  とすきま腐食発生下限電位  $V_{rev}$  が一致していることがわかった。 $180 \text{ mV (vs SCE)}$  での 15 時間試験の結果得られる最大侵食深さは第 1 漸近近似の最大値分布に適合した。このような解析はすきま腐食試験法における試験条件の設定に際して有力な根拠を提供する。

本シンポジウムの参加者はあくまでも腐食現象の理解の手段として確率過程論を利用しようとしているので、確率論的な考え方に対するなじみの格差から来る議論の行き違いは仕方がないことである。たとえば多くの参加者は [討 22] における死滅過程確率  $\mu$  を、一旦現実には発生した孔食がある時間たつてから死滅するものとのイメージで理解したようであるが、これは実験条件を検討すれば誤解であることがわかる。

われわれの討論には実験条件の設定や結果の解釈に対する材料学的ないしは物理化学的な内容の絡んだ不透明

な部分がついてまわつたために、恐らく純粋な確率論の専門家には「よくわからない」ものであつたと思うが、それはむしろこのシムホジウムの健全性を意味するものと考えている。

## V. 制御圧延・制御冷却をめぐる諸問題

座長 川崎製鉄技術研究所

田中 智夫

ラインハイク用厚板や 50 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼を製造する技術として、制御圧延が適用されていることは周知の事実である。制御圧延による鋼材の強靱化をさらに有効たらしめる方法として、制御圧延に引き続き加速冷却を鋼材に付加する方法が制御圧延・制御冷却である。制御冷却の研究は 1960 年代に BISRA (英国) で本格的に開始され、実用化研究が日本を中心に勢力的に進められ、1970 年代末には完成した。すなわち他の多くの技術同様に、制御圧延も外来技術である。それに対して制御圧延に制御冷却を重畳させる方法は日本で研究が開始され、日本で開発した独自技術として誇るに足る技術である。この新しい技術に対する研究・開発はソフトとハードを含めて鉄鋼各社で強力に進められている。本討論会はこのような背景のもとに開催されたものであり、特に 50 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力厚鋼板の品質向上を中心課題にすえて、制御圧延・制御冷却の主要工程因子、冶金学的因子を明確化すること、また制御圧延・制御冷却材の材質上の特質を製造者側および使用者側の双方から評価することを目的とした。

討論論文の発表は以下の 9 件である。

- 討25 制御冷却による強靱性変化とその応用法  
住友金属工業(株)中央技術研究所 橋本 保
- 討26 制御圧延・制御冷却鋼の強度靱性と微細組織  
日本鋼管(株)技術研究所 稲垣 裕輔
- 討27 制御圧延-制御冷却したフェライト・マルテンサイト鋼の強度と延性・靱性  
(株)神戸製鋼所浅田研究所 柚島 登明
- 討28 制御冷却材の機械的性質とマイクロ組織  
(株)神戸製鋼所中央研究所 町田 正弘
- 討29 制御圧延後の冷却速度および冷却停止温度が材質特性に及ぼす影響  
川崎製鉄(株)技術研究所 志賀 千晃
- 討30 厚板製造における制御圧延および制御冷却の冶金学的特性におよぼす影響  
新日本製鉄(株)生産技術研究所 尾上 泰光
- 討31 オンライン加速冷却材の機械的性質と適用効果  
日本鋼管(株)技術研究所福山研究所  
東田幸四郎
- 討32 使用者側から見た制御圧延材・制御冷却材の評価

石川島播磨重工業(株)技術研究所 河野 武亮  
討33 制御圧延・制御冷却型 50 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼の諸強度特性

三菱重工業(株)長崎研究所 矢島 浩

上記諸討論のうち、討 25, 26, 27 は制御圧延・制御冷却の基礎編とも言うべき内容であり、制御冷却により得られるマイクロ組織、およびマイクロ組織と強度・靱性との関係等の冶金学的な内容を討じたものである。討 28~31 は応用編であり、制御圧延・冷却を支配する工程要因を主に取り扱っている。特に討 30, 31 は生産ラインで製造した制御冷却材の諸特性を概説したものである。討 32, 33 は制御圧延・冷却材を使用者として評価したものであり、前者は溶接性の観点から、また後者は破壊靱性の立場から、それぞれ材料特性を論じている。

主な討論点はつぎのごとき諸項目にまとめられる。

- 1) 制御圧延と制御冷却の役割
  - 2) 制御圧延・制御冷却の工程要因
  - 3) 制御圧延・制御冷却材の冶金学的特性
  - 4) 制御圧延・制御冷却材の材料特性
  - 5) 制御圧延・制御冷却材の使用性能
- 1) 制御圧延と制御冷却の役割

制御圧延は未再結晶オーステナイト域で多大の圧下を付加することを中核にした技術であるが、このことが圧延機に過度の負担をかけ、また生産能率を阻害する要因ともなっている。したがって、制御冷却の採用によつて制御圧延の大幅な緩和が期待されたわけであるが、この期待は各討論者により明確に否定された。すなわち制御圧延と制御冷却はそれぞれ別個の役割を有しており前者は靱性向上を、また後者は強度上昇を分担している。さらに敷衍するならば制御圧延による結晶粒の微細化が靱性を支配し、加速冷却によるマイクロ組織の変化(マルテンサイトおよびベイナイト組織の混入)が強度を支配する(討 25, 27, 28, 29)。

### 2) 制御圧延・制御冷却の工程要因

最終製品のマイクロ組織、強度、靱性を支配する因子が明確化された。圧延仕上げ温度(≒冷却開始温度)は強度と靱性に大きな影響を与える。 $\Delta r_1$  点近傍の温度で強度と遷移温度は最低値を示すが、細粒化の観点から仕上げ温度(≒焼入温度)は $\approx 800^\circ\text{C}$  が望ましい(討 28, 29, 31)。冷却停止温度によつても強度、靱性は大きく変化する。すなわち停止温度の低下とともに強度は上昇するが、遷移温度は $\approx 500^\circ\text{C}$  まではほぼ一定値を維持し、 $\approx 500^\circ\text{C}$  以下になると温度低下とともに急激に上昇する。したがって冷却停止温度は $\approx 500^\circ\text{C}$  とすることが望ましい(討 28, 29, 30, 31)。制御冷却における冷却速度はマイクロ組織、強度、靱性のいずれにも大きな影響を与える。冷却速度の増加につれて強度は単調に増大する。他方遷移温度は $15^\circ\text{C/s}$  まではほぼ一定値を維持するが、それ以上の冷却速度では急激に上昇する。したが