

る。ルーパ系のシミュレーターと非線形計画法とを結合して制御性の評価を行い上記の圧延方法を選択した。下流スタンドでのルーパレス圧延を、圧延中に制御モデル式の係数を逐次推定することで可能とした。さらにルーパ制御では、積分型最適レギュレーターを適用することによつて効果を上げた。

討論ではまず制御理論を適用する上でのむずかしさが議論の対象となつた。実機では非線形性が顕在化するために非線形補償を入れたことや、操業中の調整を可能とするためにバックアップシステムを採用したことなどが紹介された。次に当技術のポイントとなつたトルクアームの推定方法や、制御モードの考え方についての質疑があつた。クロスコントローラーと積分型最適レギュレーターの比較についても討論がなされた。

(討16) は、大形仕上圧延機 (ユニバーサルミル) の自動厚み制御の開発に関するものである。当圧延機ではウェブとフランジが一体として圧延されるために、互いの厚み制御間に相互干渉が発生する。そこで非干渉制御理論を適用した自動厚み制御を行うことによつて良好な厚み制御を可能にした。フランジ・ウェブの干渉を考慮して圧延現象を解析し、圧延反力非干渉制御を導入した圧延制御モデルを構築して実機化した。

この構演に対し、制御システムの狙いと考え方、制御系設計に係る極配置の決定方法、(討15) と同じくクロスコントローラーと状態フィードバックによる非干渉制御についての比較、などについて討論された。制御から新しい圧延理論を生んだことに注目したい。

(討17) は、最適化手法と現代制御理論を各圧延プロセスに適用した板厚制御法に関するものである。熱延仕上圧延での予測適応制御とパススケジュール最適化にそれぞれ山登り法と GRG 法 (一般化縮小勾配法) を適用した例、厚板油圧 AGC の制御ゲインの最適設計に最適レギュレーターを適用した例、AGC の主要機能であるロール偏芯制御にカルマンフィルターを適用した例に対して、制御系の具体的な設計方法と、シミュレーションや実機適用時の評価について報告した。

討論では、各手法の採用理由、設計の方法や数式の解法、適用した制御ロジック、調整の方法と発生した問題点等について全面的な質疑が交された。パススケジュールの最適化において、仕上ミルより上流側にも範囲を拡大して多目的問題を効率よく解くことを考慮したこと、AGC の最適ゲイン設計において、調整時の目安を与えるという点でも採用した方法が有効である等、講演者からいくつかの見解が示された。また制御系設計においてシミュレーションが大きな要素であること、シミュレーションで事前評価していても調整段階では種々の問題が発生しシステムチックな調整はまだむずかしいことが、討論を通じて指適された。

(討18) は、省エネルギーや多品種少量生産を旨とし

て新しく建設された、鋼片工場の生産システムとそれを構成する各制御サブシステムに関するものである。加熱炉燃焼制御のブルーム温度推定計算で差分式モデルを用い、最適目標昇温パターンはオンラインで線形計画問題を解くことによつて求めている。VH ミルのインパクトドロップ補償にオブザーバー制御を採用している。VH タンデムミルで製品オーバー寸法を一定とするために、V ミルで補償する高精度断面形状制御を開発している。

討論では、燃焼制御のモデルチューニングの方法と精度を上げるための手法、温度推定における具体的計算方法、オブザーバー制御の評価等について質疑があつた。数式モデルの予測精度を向上させるために、多大の努力がなされていることが明らかにされた。

(討19) は、マイクロコンピューターを圧延計測制御に適用した例に関するものである。鉄鋼の生産管理とプロセス制御には多数のコンピューターが使用されているが、筆者らは、計測器からプロコンに至るまでマイクロコンピューターを適用することを指向している。厚板圧延のプロコンシステムという大規模なシステムに、マイクロコンピューターを全面採用した適用例を紹介し、標準化やシステムの信頼性についての評価と今後の課題について講演した。

討論では、ソフトウェア開発とメンテナンスの問題、マイコン間のインタフェイスやネットワークでの問題に議論が集中した。講演者からは、前者に対しては開発システムを作りテスト環境を整備することによつて、後者については標準化を進めることによつて問題を克服し、開発効率・拡張性・信頼性等について満足できる成果を得たという回答が示された。

以上、講演と討論内容の概略を記した。この講演と討論を通じ、1) 圧延の計測と制御に対する要請が急であること、2) 先端技術と新しい手法を取り入れながら開発が進められていること、3) これらの開発が着実に実用化に結びつけられ成果を生んでいること、などが明らかになつた。また計測制御の論理性が高まり、システムとしても高度で広範囲となつてきていることをあらためて認識させられた。この討論会のテーマは、技術範囲の広いものであつたが、主として圧延の制御について現状の技術レベルと今後の方向が明確になつたといえよう。

最後に講演者各位、質問状を寄せられた方々ならびに会場で熱心に討論に参加された皆様に厚くお礼申し上げます。

IV. 油井管における最近の進歩

座長 名古屋大学工学部

細井 祐三

油井の深井戸化、局地化に伴い、その環境はますます高温高圧となりまた硫化水素、塩素イオン、炭酸ガスを

多量に含むようになり、材料にとり非常に苛酷な使用条件となつてきた。そのため高合金化による耐食性能の向上、高強度化が図られ、合金開発が進められている。本討論会ではこのような油井環境における環境因子と材料因子の相互作用の基礎的な把握、材料の評価法の検討、材料開発の現状などを総合的に討論し、問題点の整理、解析、将来の技術の動向などを明らかにしようとしたものである。

以下に本討論会における講演内容と進行の概略を紹介する。

(討20) 高強度油井用鋼管の耐 SSCC 性に影響する冶金的因子

(川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 元田ほか)

降伏強さ 550~900 MPa の低合金鋼 6 鋼種および 13Cr 鋼, 22Cr 二相ステンレス鋼の各種油井管について、NACE, DCB, シェルベンドの各試験法で耐硫化物応力割れ性(耐 SSCC 性)を調べ、SSCC に対する金属学的因子を検討している。とくに二相ステンレス鋼の割れ挙動を低合金鋼と比較しその特徴を示した。低合金鋼の SSCC に対する金属学的因子としては、組織の効果の重要性とくにマルテンサイトを 99.9% にすることにより K_{Isc} および S_c 値が大幅に向上することおよび炭化物を微細、球状、均一に分散させることによる改善効果の再確認が示され、そのためには Ti, V, Nb の一種または二種の添加が極めて有効であることが指適された。二相ステンレス鋼はシェルベンド試験では割れず、割れ評価は Cl^- の存在が必要であることが強調された。すなわち二相ステンレス鋼では、まず Cl^- による局部溶解、次いでアノード SCC, 割れ先端での pH 低下と水素侵入、その結果水素脆化により割れがおこると述べ、 H_2S の役割として不動態皮膜の不安定化と Cl^- による皮膜破壊の助長にあると考察している。

これに対し、 σ_{th} , S_c , K_{Isc} と金属学的要因との関係、最適な SSCC 評価法への見解および二相ステンレス鋼における割れメカニズムに対する環境因子の作用の仕方などにつきコメント、質疑応答があつた。

(討21) 高強度鋼の硫化物応力割れ抵抗性におよぼす金属学的要因

(新日本製鉄(株)八幡技術研究部 朝日ほか)

降伏強さ 700~800 MPa の高強度低合金鋼の油井管の SSCC に対する抵抗性は、鋼の粒界強度と密接な関係があることを、降伏強さの水準と粒界割れ破面率および P, Mn, Mo の影響の解析により明らかにしたものである。すなわち、ある臨界の強度以下では粒内割れ破面率は 100% であり、臨界強度以上では降伏強さの上昇と共に粒界割れ破面率が増加し、 σ_{th} (定荷重式試験で求めた割れをおこす限界応力) が低下することを示している。この臨界強度は粒界強度に依存し、P は粒界に偏析して粒界強度を下げ、Mo は P の

粒界偏析を抑制して粒界強度を上げ、すなわち SSCC 抵抗性を向上し、Mn は P の粒界偏析を助長するか、それ自体の効果により粒界強度を下げ SSCC 抵抗性を弱めると考察している。さらに水素濃度に関しては、水素濃度の高いほど臨界強度は低くなり、臨界強度以上では水素濃度が高いほど SSCC 抵抗性が減少することを示している。このように本研究では SSCC 抵抗性におよぼす元素と強度の影響のデータを解析して SSCC 抵抗性を支配する機構を提唱している。

これに対し、 σ_{th} の試験法による差、鋼管と鋼板における SSCC に対する P, Mn, Mo の効果の相異の可能性、見解などについて質疑応答が行われた。

(討22) オーステナイト系高合金油井管の機械的性質
(日本鋼管(株)中央研究所 石沢ほか)

約 25% 以上の Ni と Cr, Mo を含有するオーステナイト系高合金鋼の加工硬化による強化挙動と延性、靱性への影響を検討したもので、高合金油井管の高強度化への方策を示している。加工硬化は冷間引抜きおよび冷間ピルガー圧延により行われ、断面収縮率約 30% の冷間引抜きにより 1000 MPa の降伏強さが得られ、この強化は見掛けと Ni と Mo の含有量の増すほどまた N の添加により大きくなることを見出している。加工硬化に伴い、延性、靱性は低下するが、800 MPa 程度に強化されたオーステナイト系合金は C-Mn 鋼と同程度の破壊靱性値を有し、油井管として使用に十分耐え得ると述べている。しかし冷間加工により強化された合金管には、降伏強さが管周方向と管軸方向で異なるという強度の異方性や残留応力の存在、およびそれによる歪み時効現象の起生という欠点を内包することが指摘されている。加工硬化利用による強化法については、今後さらに詳しい検討、解析が必要であることを示唆している。

これに対し、破壊靱性値評価として dJ/da の重要性が指摘され、冷間加工による dJ/da の変化、N 添加による強化が dJ/da に与える影響について討議が行われ、また冷間加工による耐食性の低下、冷間加工材の応力緩和現象についてコメントが出された。

(討23) H_2S - CO_2 - Cl^- 環境下における高合金油井管の腐食挙動について

(住友金属(株)中央技術研究所 池田ほか)

商用の二相ステンレス鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、Ni 基耐食合金二種および実験室溶製の Cr-Ni-Mo 合金を用いて、 H_2S - CO_2 - Cl^- 環境下における高合金油井管材料の腐食挙動におよぼす環境因子の効果、合金元素の役割について検討を加えている。環境因子としては温度、pH の影響が大きいことを示し、温度に対しては Cr 量の多い方が、pH に関しては Mo 量の多い方が抵抗性を増すことを明らかにしている。また Ni 量の増加は粒内応力腐食割れを抑制するのに有効であるが、60% 以上の Ni 量になると水素脆性感受性を高め

る傾向があることを指摘している。表面生成被膜構造を主として IMMA により解析し、耐食性能と表面被膜とは密接な関係があり、Cr, Ni はそれぞれ Cr-O 被膜, Ni-S 被膜を形成し、その相乗効果が耐食性向上に極めて重要であることを示している。また Mo の役割は Cl⁻ のアタックを防止し、Cr-O 被膜の安定化に寄与することにあるとしている。

これに対し、合金元素、とくに Mo の H₂S 環境での耐食性に与える効果の温度依存性などについて質疑があり討論された。

(討24) 高合金油井管の耐食性に与える H₂S の影響

(日本鋼管(株)中央研究所 正村ほか)

高 Ni 合金の継目無管より試験片を切り出し、耐応力腐食割れ性と耐孔食性におよぼす H₂S の影響および合金元素の効果を検討した報告である。成分範囲は Ni 25~50%, Cr 22~25%, Mo 3~7% であり 5 種類のオーステナイト合金を用いている。Cリングによる応力腐食割れ試験によると、Ni 量の増大するほど割れ限界温度は高くなり、H₂S 分圧が高くなると割れ限界温度は低くなることを見出している。また分極測定により、H₂S は活性態の溶解電流を増し、不動態の生成あるいは再不動態化を阻害する作用があることを示し、これらが材料の耐応力腐食割れ性、耐孔食性を劣化させるとしている。H₂S のこの作用は塩化物の存在するときのみに観測され、H₂S の存在下でも不動態皮膜の崩壊は塩化物により引き起こされ、H₂S はこの過程を促進するものであると指摘している。さらに酸化剤のない H₂S 環境では孔食は不動態皮膜の break through によるのではなく、硫化物皮膜の生成、崩壊によるとの考え方を提出している。Mo の効果としては、耐孔食性を向上させることを通じて耐応力腐食割れ性を改善すると考察している。

これに対し、腐食挙動におよぼす H₂S 分圧の影響と孔食電位の変化との関係、孔食電位におよぼす CO₂ の作用などにつき、コメント、質疑応答が行われた。

(討25) 油井環境における高合金の使用限界条件の設定

(新日本製鉄(株)鋼管研究センター 伝宝ほか)

H₂S 環境における高合金の不動態化挙動を解析し、自己不動態化能を基準とした材料の新たな評価法を提示した報告である。不動態皮膜の生成と破壊に関し、Depassivation pH (pH_D) の測定、定電位アノード酸化後の電位変化、self-activation time の測定、孔食電位の測定を行うと共に高温高圧 H₂S 中での浸漬試験と割れ試験を実施している。pH_D は H₂S により高 pH 側に移り、H₂S の存在により不動態化能が低下すること、(Cr+3Mo+0.5Ni) の値が約 80 になると pH_D は 1 以下となり耐食性が向上することなどを示している。pH_D より pH が低い環境では不動態皮膜は還元型 breakdown により破壊され、H₂S 濃度と共に加速される。pH_D より pH が高い場合には H₂S が存在しても不動態は保持され

る。この場合は、不動態の破壊は H₂S の影響はうけず主として Cl⁻ 濃度の影響を受け、酸化型 breakdown の一形態である孔食を発生する。材料が使用可能な環境の範囲は、少なくとも pH が pH_D より高い領域に設定することが必要であることを指摘し、pH_D を指標とした自己不動態化能を基準とすることによる材料の選択あるいは使用限界の設定が可能であると結論している。

これに対し、H₂S 環境中における自己不動態化現象の機構ならびに pH_D と耐食性の関係について質疑応答が行われ、また SCC 発生限界の考え方、E_{crit} と使用限界条件などについて討論された。

(討26) H₂S-CO₂-Cl⁻ 環境におけるオーステナイト合金の耐食性におよぼす合金元素の影響

((株)神戸製鋼所材料開発センター 泊里ほか)

H₂S-CO₂-Cl⁻ 水溶液中において、すきま腐食試験、応力腐食割れ試験および水素脆性試験を広範囲な合金組成で行い、合金元素の効果を整理解析し、高強度、高耐食性で経済的なオーステナイト合金の基本組成を提示した。耐すきま腐食性に関しては、250°C までの環境温度では Cr+3Mo≥40% を満足することにより優れた特性が得られ、より高温高圧 H₂S 分圧下では、さらに Cr≥22% および Ni≥30% を同時に満足させる必要があることを示している。皮膜解析の結果、前者では Cr₂O₃ 皮膜の耐食性により耐すきま腐食性が支配されるためであり、後者の環境では Cr₂O₃ と共に NiS と MoS₂ の保護性が加わる必要のあるためと論じている。耐応力腐食割れ性については 250°C までは Cr+3Mo≥40% を満足させ、より高温高圧 H₂S 分圧ではさらに Ni(+Co)+3Mo≥40% であつて Cr≥24% を同時に満足させる必要のあること、また水素脆性に対しては、Ni≤50% あるいは Fe≥20% を満足させる必要があることを示し、結論的に 25Cr-40Ni-5Mo 系合金を提示している。

これに対し、耐応力腐食割れ性と Cr 量の関係、水素脆性の限界条件について質問があり、また表面生成皮膜の NiS, MoS₂ の保護性について討論が行われた。

以上のように本討論会において、油井管の高強度化、高耐食性化に関する基本的要因を環境側、材料側よりかなり明らかにし得たことは意義深く、有益であつた。とくに合金元素の役割を明確にし、メカニズムにもとづく評価法、材料選定の一基準を示し得たことは、今後の新合金開発の上で指針の一つを示すものとして効果があると思われた。今後実環境での実績データとの対応により本分野の研究開発がさらに発展することを期待したい。

終わりに、講演者ならびに討論者をはじめ本討論会に参加協力していただいた各位に深く感謝する。