残留応力管理による現場装置の応力腐食割れ防止

武 川 哲 也*

*住友化学工業株式会社設備技術研究部 (千葉)

Residual Stress Control for Prevention of Stress Corrosion Cracking on Plant Apparatus

Tetsuya Takegawa*

*Plant Technology Department (Chiba), Sumitomo Chemical Co., Ltd.

Based on the stress classification data of stress corrosion cracking failures, we found that 70% to 80% of SCC could be attributed to the residual stress caused by welding or working process. Therefore, it is extremely effective for the prevention of SCC initiation to control residual stress quantitatively. However, there are few reports on the SCC susceptibility in relation to the stress of plant apparatus measured quantitatively.

Here, the role of residual stress was reviewed on the SCC failures of the materials; carbon steel, low alloy steel, stainless steel and Cu alloy. It was emphasized to obtain more correctly the SCC threshold stress and acceptable stress of structure materials in various environments by comparing the laboratory data with the field ones.

1. はじめに

残留応力が、有効活用されることもあるが、一般的には実装置の損傷に有害要因として作用することが多く、とくに主因として影響する損傷に、応力腐食割れ (以下 SCC) と遅れ破壊が挙げられる。SCC は化学プラント腐食損傷の約 40% を占め、経年的にも一向に減少の兆しがみえない¹⁾、応力要因についてみるならば、表 1^{2)~4)} のように溶接時あるいは加工時の残留応力に起因するものが、70~80% と圧倒的に多い。従って、残留応力管理に基づく機器・装置の SCC 防止対策は、損傷頻度の軽減に極めて効果的といえる。

残留応力に関する研究の歴史は古いが、実装置の損傷に対して定量的に評価された例は少ない。最近、化学装置の損傷と応力評価に関するシンポジウム⁵⁾が開催され、保全対策面から関心が深まりつつあるものの、なお、十分な管理体制がとられるまでには至っていない。

ここでは、実装置の定量的な残留応力評価と SCC 感受性について、実例を紹介しながら、SCC 発生防止に対する残留応力管理のあり方を述べてみたい。

2. 溶接による残留応力と SCC

2.1 炭素鋼・低合金鋼製装置

炭素鋼や低合金鋼鋼種の SCC 環境要因には、硝酸塩、シアン化物、アルカリ水溶液、CO-CO₂-H₂O、硫化水素あるいは液体アンモニアが挙げられる。化学プラント実装置で経験する損傷例も、頻度の大小はあるが多彩であり、機構的にも APC (active path corrosion) 型か HE (hydrogen embrittlement) 型か、明確さを欠く現象が、炭素鋼・低合金鋼種では目につく。

一方、力学的要因に着目すれば、向井ら⁶⁾が SCC に対する限界応力 σ_{th} を、耐力 $\sigma_{0.2}$ との関係で3群に分類整理している図1の概念が、実用的には有用である。とくに炭素鋼・低合金鋼種では、SCC 感受性を鋼種別に区分して評価するのではなく、強度別に分類してそれぞれの系に対する σ_{th} を求めていくことが、実用上の対策を講ずる場合に必要であると思われる。

液体アンモニアによる炭素鋼の SCC を例にとるならば、60 キロ高張力鋼を用いた船積用枕型貯槽の溶接部が、6年2箇月の使用時点で、最大7mm 深さの割れを無数に生じたことがある。一方、SB 49 アルミキルド鋼製の球形タンクは、溶接部で 30 kg/mm² に近い残留応力値が測定されているにもかかわらず、12年以上経

* 〒299-01 千葉県市原市姉ヶ崎海岸 5-1 (5-1, Anegasaki-kaigan, Ichihara-shi, Chiba, 299-01 Japan)

表 1 SCC 事例にみられる応力発生要因

区 分	発生要因	A 社 の 例		B 社 の 例		弊 社 の 例	
		件 数	比率%	件 数	比率%	件 数	比率%
残留応力	塑性加工	55	48.7	35	68.6	6	24.0
	溶接施工	28	24.8			17	56.7
	ライニング施工	7	6.2			—	—
	機器据付時の拘束	2	1.8			—	—
外部応力	作業時の熱応力	17	15.0	10	19.6	4	13.3
	作業時の作動応力	4	3.5	6	11.8	3	10.0
合 計		113	100	51	100	30	100

図 1 SCC 発生限界応力 σ_{th} と材料の降伏応力 σ_y との関係 (向井, 村田)

た時点でも健全に推移している。ほぼ同一レベルの残留応力状態、使用条件にある両貯槽の SCC 感受性に対する有意差は、材質強度レベルに依存しているにほかならない。

機構的には APC 型か HE 型か定説がないこの系での炭素鋼の SCC も、強度を硬さで評価するならば、Hv 200 付近を境に高強度側と低強度側に分けて対処できる。低強度側鋼種を適用する場合には、溶接ままの未焼鈍状態でも長期耐用が可能であるが、高強度側については、SCC 限界応力以下に応力除去が必要である。限界応力値は今後明確にされねばならないが、許容残留応力としては、一応 10 kg/mm² 以下とするのが妥当と考えている。

硬さレベル Hv 200 付近を境として、SCC 感受性に明確な有意差を認めた例を、GV (Giammarco Vetrocoke) 液とよばれる CO₂ 吸収用熱アルカリ (110℃, K₂CO₃ + As₂O₃) 環境で実施した、実地試験結果⁷⁾に挙げるができる。硬さレベルの異なる定歪型応力負荷試験片

表 2 CO₂ 吸収塔溶接部残留応力と SCC 感受性

溶接線 No.	測定位置 No.	残留応力 kg/mm ²	1 年後割れ 無○ 有×	備 考
C-13	18	22.0	×	補修溶接部
	44	24.0	×	"
	45	18.7	×	"
	46	11.2	○	溶接線直上母材
C-18	9	14.5	○	溶接線健全部
	12	14.6	○	"
	18	10.6	○	補修溶接部
	26	17.0	○	"
C-22	47	13.3	○	"
	1	6.5	○	炉内焼鈍部
	18	6.5	○	"

を、43,000 hr の長期試験したものであるが、Hv 200 付近を境に SCC 発生有無の明暗を分けた。従って、この系についても液体アンモニア環境と同様に、強度レベルで分類して SCC 限界応力値の設定を図る考え方が成立つ。

現実的には、この GV プロセスの CO₂ 吸収塔本体 (SB 49) 溶接部が、使用 9 年で SCC 損傷を経験している⁷⁾。SCC は現地施工された周方向 3 溶接線に限定して生じ、高さ 45 m の大型装置であることと、規格 (JIS Z 3702) に従って局部焼鈍による応力除去を図ったにもかかわらず、割れが発生したことで、問題を深刻化した。これが動機で、目にとまった可搬型 X 線応力測定装置を用いて、実装置の残留応力を測定した。測定装置は当時 (1976 年) 試作の域を脱したばかりで、大型化学装置の残留応力を定量的に実測された例は他になかったと思われる。残留応力値は現地溶接・局部焼鈍部が 15~25 kg/mm² に対して、工場溶接炉内焼鈍部が 5~7 kg/mm² と、明らかな有意差が得られた。

局部焼鈍によって応力が低下しない理由は、局部加熱

による円筒構造体の局部的熱膨脹で生じる、曲げモーメントが作用して、焼鈍後に残留応力が再分布するためと考察された⁷⁾。この理論に基づき、大型モデル実験を行って、局部焼鈍方法の改善を試み、問題解決までに3年を要した。この間貴重な技術データを得た。表2に示す例は、補修部も含む溶接部の残留応力測定値と、1年使用後の SCC 発生有無を対比した結果である。17 kg/mm² 付近の応力値を境に、割れ発生域と健全域が分かれているが、この値を σ_{th} とみなすのは尚早である。とくに、肉盛溶接部などは、S 40 C についての実験結果⁸⁾ からも伺われるように、溶接境界からいずれの方向へも高い残留応力 (25~30 kg/mm²) 状態となっており、二次元的応力評価も要する。その他実績結果も考慮して、ここでの応力許容値は 10 kg/mm² 以下と設定した。

そのほか、全体炉内焼鈍したにもかかわらず、アルカリ使用環境で SCC を生じた SM 50 製熱交換器チャンネルカバー溶接部の残留応力を測定した結果、15~25 kg/mm² の高い応力値を示した事例⁹⁾ がある。溶接補修後、厳重な温度管理下で焼鈍したが、結果は同じであった。このため別の炉で冷却速度を遅らせて、再焼鈍した結果、目標とする 10 kg/mm² 以下の応力レベルまで低下させることができたのであるが、理由は解明されていない。

応力除去熱処理は、SCC 発生防止対策として極めて有効であるが、SCC 環境で使用する装置については、X線法⁸⁾ にしろ、磁気ひずみ法¹⁰⁾ にしろ、残留応力値の定量的測定による焼鈍効果の確認が、必要と考えられる。

2.2 ステンレス鋼製装置

化学装置の SCC 損傷事例の 70% をオーステナイト系ステンレス鋼が占め、しかもその 85% が塩化物 SCC である¹⁾。中でも多管式熱交換器管端溶接部の損傷例が多い。この傾向は、化学工学協会が実施したアンケート調査¹¹⁾ からもよくうかがわれる。

ステンレス鋼熱交管端部の SCC 防止対策として、管と管板のすきまを拡張して寿命延長を図った例¹²⁾ とか、つば付き管板と管の内面突合せ溶接法¹³⁾ などの構造改善と、残留応力緩和を図る方法が挙げられる。残留応力緩和に熱処理がよく適用されるが、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、600°C の加熱で応力除去率は 50%¹⁴⁾ とされ、25 kg/mm² 以上の応力を数 kg/mm² まで低下させるには、800°C 以上の高温が必要である。ほかに、蒲原¹⁵⁾ が提唱している管端溶接の拡管による応力緩和法も、SCC 防止対策に有効と期待される。図2は、SUS 304 ステンレス鋼の管端付近の残留応力を破壊法によって実測し、溶接後の拡管施工によって、30 kg/mm² もの高い残留応力が、数 kg/mm² 以下まで低下

図2 SUS 304 熱交換器管端部溶接ままと溶接後全面拡管した場合の残留応力分布 (蒲原)

図3 主応力座標で表わした残留応力をもつ溶接部材の SCC 安全域と危険域 (竹本)

することを示している。

多管式熱交換器管端部の SCC 感受性評価は、残留応力の非破壊的測定法が見当たらないところに難点がある。

反応器、分離器、精留塔などステンレス鋼製大型容器本体溶接部の SCC は、熱交の損傷に比べれば稀であるが、発生すれば重大な被害をもたらすことが多い。溶接補修しても、局部焼鈍による応力緩和も高温を要するだけに厄介である。有機合成反応塔底部鏡板溶接部の、副生重合物付着物下でのクエンチ水による SCC¹⁶⁾ とか、染色槽鏡板溶接部の塩素酸ソーダ溶液に起因する SCC¹⁷⁾ などの例が挙げられ、約 30 kg/mm² の高い残留応力値が実測されている。通常、応力除去焼鈍を前提として、新作更新されている。

一般に、応力面からみて SCC は最大主応力に直交して伝播すると、評価されている。しかし、向井¹⁸⁾ や竹本¹⁹⁾ は、構造物の表面に存在している残留応力は、二次元的に分布しているために、割れの発生には最大主応力

(σ_1) と、これに直交する最小主応力 (σ_2) も評価すべきであると主張している。このことは、現象論的に割れの発生を支配するものは、最大主応力ではなく、ひずみエネルギーであることを示唆するものとしている。これを前提に、竹本¹⁸⁾は図3に示した2軸主応力表示による304型ステンレス鋼のSCC感受性評価を試みている。とくに第2象限と第4象限の応力状態でSCCを発生させる引張応力が、単軸引張応力下での限界応力より小さいことは、実装置のSCC感受性を評価するに当って、注意せねばならぬことといえる。

3. 加工による残留応力と SCC

3.1 ステンレス鋼製装置

3.1.1 製管時の残留応力と SCC

ステンレス鋼管の残留応力は、管製作時のロール矯正段階で生ずるといわれる。今川ら²⁰⁾は、ロール矯正で生じた残留応力の異なる304型ステンレス鋼管について、 MgCl_2 試験を行ってSCC感受性を評価した結果、図4を得ている。この図から、周方向残留応力(Crampton法で測定)が 4.5 kg/mm^2 を越えるとSCCが発生しやすく、 2.5 kg/mm^2 以下になると発生しないことがわかる。

管自体の残留応力を応力要因とした、実装置ステンレス鋼管のSCC損傷は、ほとんどが多管式熱交換器である。固形物の管表面付着あるいは皮膜形成が、 Cl^- 分の濃縮場を与えているのが、特徴的にみられる。

図4 SUS 304 鋼管の硬さ並びに周方向残留応力と沸騰45% MgCl_2 1週間試験によるSCCとの関係(今川ら)

図5 ステンレス鋼管製管時の残留応力に起因するSCC事例

- a. SUS 304 熱交鋼管外面側付着スケール下に生じたSCC
- b. 通水停止時に充満したスチームに起因して生じた20合金熱交管のSCC
- b'. 同上断面ミクロ組織
- c. 純水加熱器 SUS 304 加熱管内面 SiO_2 皮膜下に生じたSCC

例えば、図 5-a は横型 U 字管式熱交の SUS 304 ステンレス鋼管の外面側の SCC を示す。冷却水中のインヒビター変更後、付着が著しくなったスケール下で、 Cl^- イオンが濃縮して高温側が 9 箇月で、貫通割れを生じている。

図 5-b および b' は、直列 4 段の冷却水熱交の条件変更で、一時通水を中止していた 2 段が、スチーム充満状態となったのが原因で、20 合金管の外面側が全面的に著しい SCC をこらむった例である。管の周方向残留応力は Crampton 法によって、最大 4.8 kg/mm^2 、平均 3.6 kg/mm^2 を得ている。

また、図 5-c は、純水中から析出した非晶質 SiO_2 によって管内表面に厚く形成された堅い皮膜下で、 Cl^- イオンの濃縮場となって、22 箇月で貫通割れを生じた純水加熱用堅型熱交 SUS 304 加熱管の内面状況を示す。 Cl^- 分は供給純水中 0.0 ppm 以下、器内循環水中 14 ppm、皮膜中 70 ppm が検出されている。同種の管について、周方向残留応力を Crampton 法で測定の結果、4~10 kg/mm^2 の値を得ている。

以上の事例からも、水の系におけるステンレス鋼管の SCC 限界応力は、かなり低いと判断され、図 4 の実験室データの現場装置への適応性は高いと評価できる。

3.1.2 冷間曲げ加工による残留応力と SCC

図 6 は、90°C の合成樹脂重合体スラリー中の Cl^- 分に起因する、SUS 316L ステンレス鋼配管の SCC 状況を示す。割れは曲部外周側軸方向に貫通した主割れと、これと 45° 方向に走る無数の分枝状割れを伴っている。割れ形態から二次元的応力分布の影響がうかがわれ、計算上周方向に 16 kg/mm^2 、軸方向に 14 kg/mm^2 の高い残留応力が求められている。この高い残留応力は砂詰め冷間曲げ加工時に生じたもので、応力主導型の SCC をもたらしている。割れ部は活性面を思わせる平滑美麗な表面状態であったが、有機溶媒に微量水分が含まれる系

図 6 重合体スラリーライン SUS 316L ステンレス鋼管冷間曲げ曲管部に生じた SCC

での、オーステナイト系ステンレス鋼の SCC に、よくみられる特徴である。溶媒と遊離して壁面に付着した水分が、微量であるがために溶解する Cl^- 濃度が高く、著しい割れを生ずると考えられ、ここでは 1 箇月で肉厚を貫通している。応力除去焼鈍は容易で、むしろ事前評価が重要である。

3.1.3 研削・研磨による残留応力と SCC

反応効率上あるいは製品汚染防止上、器壁面への固形物付着を嫌う化学装置では、表面が研磨加工される。また、機器製作時や補修時の溶接施工におけるアークストライクを、研削除去して表面を平滑に仕上げることも多い。

研削に伴って形成される変質層や残留応力についての

図 7 研削加工による残留応力 (H. R. Letner)

図 8 SUS 316L 洗浄塔底面グラインダー研削加工部に選択的に生じた SCC
a. 外観, b. 断面割れ状況ミクロ組織

表 3 SUS 316L 鋼管の表面研磨と残留応力および SCC 感受性

種 類	管 径	残留応力 kg/mm^2		SCC試験 沸騰35%MgCl ₂
		円周方向	軸 方 向	
研 磨 管 (300#)	4" ϕ	2.6	7.2	割れ (90~175 hr)
	6/8" ϕ	-4.1	2.1	割れ (222~346 hr)
未研磨管	4" ϕ	1.4	0.25	健全 (>175 hr)
	6/8" ϕ	-7.9	1.5	健全 (>514 hr)

残留応力 円周方向：Crampton 法

軸 方 向：Anderson Fahlman 法

研究は古くからあるが²¹⁾、残留応力は、表面部の局部的発熱や、材質、加工など諸条件の影響で複雑に挙動する。しかし、変質層の深さは 0.5 mm 程度までであり、図 7²²⁾の工具鋼の例では、残留応力の急変は 50 μm 深さまでである。

図 8 は、アークストライクの研削除去加工部に選択的に生じた、有機合成系の SUS 316L ステンレス鋼製洗浄塔底部の SCC 状況を示す。鱗片状の割れは、いったん肉厚内部に入った割れが、板面方向に径路を変えたことによるもので、応力分布の影響が如実に現われている。悪質の損傷ではないとしても、二次的損傷への引き金になることもあり、好ましいものではない。

研削表面の引張残留応力が漸減する領域は、乾式研削の方が湿式研削よりやや深く、表面応力値は乾式で約 70 kg/mm^2 、湿式はそれより約 10 kg/mm^2 低いといわれる²³⁾。また、サンドペーパー仕上げは引張残留応力であるが、ラップ仕上げでは表面圧縮残留応力が誘起されるとしている²¹⁾。SUS 316L ステンレス鋼板材試験片の一面を二分割して、湿式と乾式に分けて研磨し、MgCl₂試験によって、SCC 感受性に明確な有意差を生じた簡単な実験例¹⁰⁾もある。

研削にゴム質ボンドによる砥石を適用すると、研削時のせん断は小さく、かつ圧縮力が大きいくにより、大きな圧縮応力 (-23 kg/mm^2) となり、SCC 防止対策に有効とされる²⁴⁾。

バフ研磨による残留応力が、SCC の発生をもたらし

こともある。合成樹脂製品乾燥用ロータリードライヤーに適用の、SUS 316L ステンレス鋼加熱管に生じた SCC がその例である¹⁰⁾。製品流体中に混入の触媒に由来する塩分が、湿分の多い入口付近の管表面付着物で濃縮して、著しい SCC 損傷を起こしたものである。バフ研磨管と未研磨管の残留応力値は表に示すとおりで、SCC 感受性の差は明確である。

研削研磨による残留応力に基づく SCC に対しては、その手法の工夫次第で、防止対策を図ることが可能である。

3.2 銅合金製装置

アンモニア雰囲気で銅合金が SCC を生ずることは、古来より周知のこととして、その環境での銅合金の適用は、あらかじめ避けられてきた。従って損傷例も少ない。

銅合金の SCC 損傷が大きく取上げられたのは、1960 年代初期で、石油精製プラントや石油化学プラントあるいは火力発電所の熱交換器に使用されている、アルミニウム黄銅管である。SCC は多管式熱交換管端外面冷却水側で、各所で頻発した。当時、常温付近の淡水が、銅合金に SCC を発生させるとはみなされていなかったために、組織的な実状調査も行われている。

腐食因子として、微量アンモニア、溶存酸素の共存、あるいは硫化水素などが挙げられたが、正確な要因はまだよく知られていない。この場合の対策は、主として材質面、構造面から検討されている。

黄銅管は通常管板に拡張管接合されるが、この際生ずる応力は二通りに分類される。一つは、拡張管の際個々の管の拡張部近傍に生ずる応力で、他の管と関係なく生ずる。他の一つは、管束組立てに際して、各管相互の間に作用する拘束応力であり、それぞれ詳細な報告^{25)~27)}がある。

管束組立て時の応力実測例によると、1.5 m 長さの管 150 本を組立てた場合、単純引張応力として約 3 kg/mm^2 、管板近傍では曲げ応力として約 5 kg/mm^2 、計 8 kg/mm^2 の引張残留応力が生じたといわれる²⁶⁾。これに対して、拡張管が一度全部終了後、外周部のはじめに拡張

表 4 管束組立時 (拡張作業時) に生ずる応力と軽減対策

残 留 応 力 発 生 の 様 式	対 策
拡張部独自の 応力の発生	カ ラ 拡 げ
	管板外まで拡張しないこと
	過 大 拡 張
	減肉量 5% 程度 10% を越えない
管束における 応力の発生	間 隙 過 大
	管外径/管板孔径間隙は外径の 1% 以内
	ローラー傾斜過大
	テーパの緩いローラーを用いる
管束における 応力の発生	全長にわたる引 張 と 曲 げ 応 力
	拡張順序を外周から内部へ 拡張を 2 度に分ける

管した管にもう一度拡管する，いわゆる二段拡管法を適用すると，曲げおよび引張り残留応力が軽減するとしている。

表 4 に，材質，施工上の対策を総括したが，この改善策が効を奏したのか，その後この種の SCC 損傷は，陰をひそめた。

その他，銅合金では高圧給水加熱器用モネル (Ni-Cu) 管の冷間 U 曲げ部に生じた，SCC 損傷例が報告されている²⁸⁾。X 線応力測定法によって，U 曲げ管の外側約 45° の位置が，最大引張応力となることを確認しており，曲げ半径の小さいほど残留応力も大きく，曲げ半径 40 mm で 10~20 kg/mm² になることを確認している。また漏洩損傷も曲げ半径，すなわち残留応力とよく対応している。この種 U 曲げ加工管については，焼鈍に基づく残留応力緩和が，SCC 防止対策として容易であり，かつ有効である。

4. おわりに

内容の詳述はできなかったが，実装置における SCC の発生を未然に防止する観点から，残留応力の定量的評価について的一端を述べた。現実的には，実装置の SCC 感受性を，残留応力と関係づけた実績データは乏しく，設備管理基準として充実させるのは，今後の課題である。

力学的側面からの SCC の研究による機構の解明も，逐次進展している。一方，測定技術の進歩に伴って，定量的な力学的情報も次第に蓄積されつつあるように思われる。両者相互の連携が深まれば，現場環境における各種材料の SCC 限界応力の設定もでき，信頼性の高い設備管理基準化が期待できる。

今後，SCC 発生の防止とともに，割れ進展性からみた有害度評価技術の確立にも努めるならば，設備改善策の余地は多く残されており，まだまだ SCC 損傷の軽減を図ることが可能である。(1982 年 3 月 3 日受理)

文 献

- 1) 武川哲也，三木正義，石丸 裕：化学工業，**44**，No. 3，128 (1980).
- 2) 石丸 裕，武川哲也：日本機械学会“残留応力とその対策調査研究分科会報告”投稿中。
- 3) 横田孝三：“オーステナイト系ステンレス鋼の事故調査結果”日本溶接協会化学機械委員会資料。
- 4) 藤咲 衛：化学装置，**14**，No. 12，23 (1972).
- 5) 化学工学協会：“化学装置の損傷と応力評価に関する最近の進歩”シンポジウム Sept. 25 (1981) 東京。
- 6) 村田雅人，向井喜彦：日本金属学会誌，**44**，No. 3，230 (1980).
- 7) 武川哲也，石丸 裕：アンモニアと工業，**33**，No. 3，12 (1980).
- 8) 白岩俊男，阪本喜保：住友金属，**23**，No. 4，515 (1971).
- 9) 例えば 上原勝景，小木曾克彦：材料，**26**，No. 280，1 (1977).
- 10) 例えば 吉永昭男，滝沢千嘉子，吉井徳治：非破壊検査，**28**，No. 8，491 (1979).
- 11) 化学工学協会ほか編：“多管式ステンレス鋼熱交の SCC 使用実績データ集”(1979).
- 12) 武川哲也，石丸 裕：防食技術，**25**，No. 7，457 (1976).
- 13) 清水茂樹，村上孝士：高温学会誌，**2**，No. 2，74 (1976).
- 14) H. Thielsh: *Welding J.*，**29**，577s (1950).
- 15) 蒲原秀明，吉富雄二，杉原元雄，台 宏明：圧力技術，**14**，No. 1，19 (1976).
- 16) 武川哲也：化学装置，**14**，No. 12，28 (1972).
- 17) 加藤 享，松本弘治，室地幹夫，松尾光恭，北川 茂：材料，**25**，No. 268，33 (1976).
- 18) 渡辺正紀，向井喜彦：日本機械学会誌，**77**，670，977 (1974).
- 19) 竹本幹男，青木陽一：“’81 春期学術講演大会 予稿集”腐食防食協会，p. 9 (1981).
- 20) 今川博之，山岡五雄，山口 旻：防食技術，**29**，No. 5，233 (1976).
- 21) 日本熱処理技術協会ひずみ研究会編：“残留応力” p. 154 (1964).
- 22) H. R. Letner & H. J. Snyder: *Trans. ASME*，**75**，No. 7，873 (1953).
- 23) 小田 明，田口紘一，宮川英明：材料，**26**，No. 280，11 (1977).
- 24) 国谷治郎，正岡 功，佐々木良一，中川雄策，成瀬明輔：防食技術，**27**，No. 8，393 (1978).
- 25) 三村恵輪：石油学会誌，**6**，No. 12，932 (1963).
- 26) 嘉瀬 達：同上，937 (1963).
- 27) 小泉 弘：同上，942 (1963).
- 28) 河合健一，滝沢与志夫：“第10回材料強度に関する討論会予稿”日本材料学会，p. 21 (1973).