



入門講座

身近な鉄-4

ステンレス鋼のいろいろ

宇都宮武志

Takeshi Utsunomiya

日新製鋼(株) ステンレス事業本部

ステンレス総括部 ステンレス総括チーム 主任部員

Applications and Properties of Stainless Steels

1 はじめに

ステンレス鋼は、文字通り“さびにくい”性質を基本として、比較的容易にプレスや溶接などの加工ができることから、種々の用途展開が図られ現在に至っている。用途の拡大にともない耐食性、耐熱性はもとより、加工性の向上や高強度化など、用途に応じた機能性の付与が命題として与えられてきた。精錬技術を中心とした製造技術の進歩、ならびに合金元素の活用や組織制御などの材料開発の進展により、その解を導きだしてきた^{1,2)}。今日では、流し台や浴槽など、従来からなじみのある製品だけでなく、全自動洗濯機の洗濯槽や屋根材、自動車の排気系部材など多くの用途で使用されるようになってきた。

ここでは、ステンレス鋼を基本特性別分類し、その特徴と使用例を述べる。特に、耐食性と加工性については基礎的な事項を概説し、材料を取扱う(材料選定や加工など)ユーザーの皆様がステンレス鋼をより一層理解する上での一助としたい。

2 ステンレス鋼の分類

ステンレス鋼は、基本組成や金属組織によっていくつかの種類に分類される³⁾。基本組成、金属組織とJIS規格との対応、ならびに代表鋼種の結晶構造と主な物理的性質を

表1に示す。JIS規格で400番台の鋼種記号を有するCr系ステンレス鋼は、金属組織によって、マルテンサイト系とフェライト系のステンレス鋼に分類される。炭素を多く含有したマルテンサイト系ステンレス鋼は、焼入硬化能を有しており、硬さや耐摩耗性が必要な刃物やベアリング等に使用されている。低炭素のフェライト系ステンレス鋼は、11Cr系から30Cr系まで幅広い材料系に分かれ、多様な用途に展開されているが、代表鋼種のSUS430は絞り性に優れており、厨房機器や各種器物等に使用されている。

鋼種記号が300番台のCr-Ni系には、オーステナイト系ステンレス鋼と二相組織を有するオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼がある。オーステナイト系ステンレス鋼は、“18-8ステンレス”と称して広く使用されているSUS304に代表され、その優れた加工性によって幅広い用途に使用されている。二相系のステンレス鋼は優れた耐食性を活かして、各種プラント等に適用されている。この他、鋼種記号が600番台の析出硬化系ステンレス鋼があるが、本系鋼は、時効処理によって微細な析出物を析出させて高強度が得られる特徴を活かして各種ばね等に使用されている。

3 耐食用ステンレス鋼

素材メーカーに寄せられる質問の典型的なものに、ある装置や部品にステンレス鋼を使いたいが、大丈夫か、ある

表1 JIS規格で分類された各種ステンレス鋼の基本組成と物理的性質

基本組成	JIS 鋼種記号	分類(金属組織)	代表鋼種	結晶構造 ^{*1}	線膨張率 ^{*2}	磁性
Cr 系	400 番台	マルテンサイト系	SUS420J2 (0.3C-13Cr)	BCT	10.3	有り
		フェライト系	SUS430 (17Cr)	BCC	10.5	有り
Cr-Ni 系	300 番台	オーステナイト系	SUS304 (18Cr-8Ni)	FCC	17.3	無し
		オーステナイト・フェライト系	SUS329J4L (25Cr-7Ni-3Mo)	BCC+FCC	14.8	有り
	600 番台	析出硬化系	SUS630 (17Cr-4Ni-4Cu-Nb)	BCT	10.8	有り

*1 BCC: 体心立方晶、BCT: 体心正方晶、FCC: 面心立方晶

*2 線膨張率: $\times 10^{-6}/K$ ($0 \sim 100^{\circ}C$)

いはい何年もつかといったものや、どのような鋼種を使用すればよいか、などがある。装置や部品の耐久性を、材料だけで判断することは困難で、構造、施工方法、使用環境の把握が重要となる。すなわち、構造面では、隙間構造の有無、施工方法では溶接施工の有無、環境条件としては、使用温度や水質などによって、ステンレス鋼の耐食性が左右される。

ただし、粒界腐食については、C、Nの低減やTi、NbなどC、Nを無害化する元素の添加など、材料面の対策によって、ほとんど解決されている。しかし、溶接方法や入熱の違い、あるいは使用条件によっても必要な安定化元素の量は異なる⁴⁾。従って、加工用に開発されたTi含有量の少ない鋼を腐食用途に使用する場合や、溶接後の使用条件が鋭敏化の温度域(オーステナイト系で700℃付近、フェライト系で500℃付近)に近い場合には注意が必要である。

腐食は、水環境における腐食と大気環境における腐食に分けることができる。以下に各々の環境における代表的な用途について述べる。なお、水環境には海水や酸などのプラント用途もあるが、ここでは、身近な水道水の環境に話を絞り、主な用途である温水器や屋内配管に使用されるステンレス鋼を中心に説明する。

3.1 温水器・配管用ステンレス鋼

水環境で発生する腐食事例の内、40%以上は応力腐食割れ(SCC)に起因した腐食であるといわれている¹⁾。特に、比較的高温で使用される熱交換器や配管には、応力腐食割れの事例が報告されている。温水機器の缶体材料においても、当初はSUS304が使用されていたが、応力腐食割れの問題が生じたため、応力腐食割れの無いフェライト系の材料が使用されるようになった経緯もある。

温水器は、電気温水器と石油炊き温水ボイラーに大別される。電気温水器の缶体は、比較的単純な構造であるため、フェライト系のSUS444系(19Cr-2Mo-Nb、Ti)のステンレス鋼が使用されている。一方、石油炊き温水ボイラーは、構造が複雑で、溶接箇所も多いことから、加工性と溶接性に優れたオーステナイト系のステンレス鋼が用いられている。最近では、図1に示すように、合金元素としてCuあるいはCuとSiを添加し、耐応力腐食割れ性を改善したSUS315J1、SUS315J2などのオーステナイト系ステンレス鋼が開発されている⁵⁾。

屋内配管は、給水・給湯に代表される衛生配管と冷却水配管に代表される空調配管に大別され、SUS304、SUS316などの汎用鋼が使用されている。環境条件としては、冷水から温水、さらに殺菌のために添加される残留塩素の影響もあるため複雑である。本用途に関する研究例⁶⁾を紹介し、

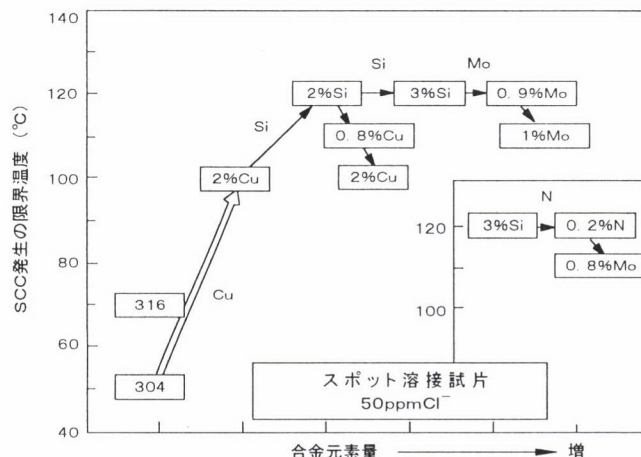


図1 耐応力腐食割れ性におよぼす合金元素の影響

ステンレス鋼の実環境における適用性を判断する方法について概説する。

実使用環境におけるステンレス鋼の適用性の基本的判断は、図2の模式図に示すように、使用環境における自然電位と、その環境において材料の有する局部腐食発生電位(孔食や隙間腐食の発生する電位)を比較して行う。すなわち、自然電位よりも材料の局部腐食発生電位が高ければ、局部腐食は発生せず、その材料は使用可能であることがわかる。

一般に、試験溶液中の塩素イオン濃度が高いほど材料の孔食電位や隙間腐食電位は低下する。温度についても同様で、温度が上昇すると、局部腐食の発生電位は低下する。しかし、水環境における自然電位は、表2に示すように必ずしも単純ではない。自然電位は、水の温度や流動状態、さらには殺菌のために添加された残留塩素などの酸化剤の有無によって大きく変わる。循環水を用いる空調配管は、残留塩素も添加されていないため自然電位は0 V付近であ

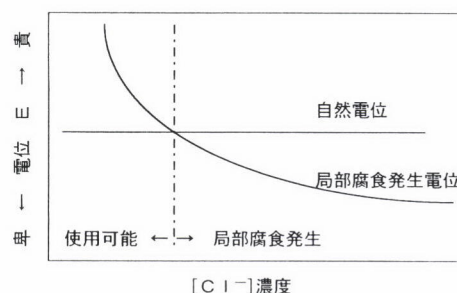


図2 局部腐食発生電位と自然電位との関係から求めた使用可能範囲(模式図)

表2 ステンレス鋼配管の使用環境と自然電位の関係⁶⁾

(SUS304TPD)				
区分	使用温度	流動状態	残留塩素濃度	最高到達自然電位
給水配管	平均 20℃	流動	0.1~0.5ppm	0.4 V, SCE
給湯配管	平均 60℃	流動	0.1~0.5ppm	0.25 V, SCE
空調配管	最高 40℃	循環、静止	添加なし	0.02 V, SCE

り、腐食環境としてはマイルドである。一方、給水配管は、給湯配管に比べて温度が低く、残留塩素が安定して残存しており、給湯配管よりも自然電位は高い。

次亜塩素酸ソーダなどの添加により、残留塩素濃度が1 ppm近くになる屋内プールの環境や、貯水槽のように気相部において塩素の濃縮が生じる環境では、さらに電位は上昇し、厳しい腐食環境となっているものと推察される。いずれにしても、実際に使用する装置、部位の環境条件と材料の耐局部腐食性を把握した上で材料を選定する必要がある。

3.2 屋根外装用ステンレス鋼

建設用のステンレス鋼は、ステンレス鋼板の用途分野の中では最も著しい需要の伸びを示している分野である。受注量でみると最近の20年間で約4倍に増大しており、需要構成でみると20年前の約10%から現在では約20%になり、重要な需要分野に成長した⁷⁾。建材用のステンレス鋼は、建物のフロント回りのサッシやドアなどから発展し、使用される材料はほとんどSUS304であった。しかし、最近では大型の公共物件の屋根に無垢のステンレス鋼が使用され、中でも高Crフェライト系ステンレス鋼の適用が目立っている。

図3は、山間と海岸に暴露した各種ステンレス鋼の耐候性を、孔食指数(Cr+3Mo)とレーティング・ナンバー(SA RN)の関係で整理した結果である⁸⁾。山間に比べて海塩粒子が飛来する海岸では、全般的にレーティング・ナンバーは低く、発錆が進行している。また、同一の孔食指数(Cr+3Mo)で比較した場合、オーステナイト系ステンレス鋼に比べて、フェライト系ステンレス鋼のレーティング・ナンバーは高く、優れた耐候性を有していることがわかる。

これらのフェライト系ステンレス鋼は、耐候性に優れているだけでなく、熱膨張係数が小さく、長尺の屋根材に適している。図4にSUS445J1系(22Cr-1.2Mo-Nb-Ti-Al)のステンレス鋼⁹⁾が採用された西武ドーム球場の屋根を示す。同鋼種は、長さが165mにも達する埼玉アリーナの長尺屋根材にも使用されており、施工コスト低減の面からも今後の需要拡大が期待される。

これらの材料の表面仕上げには、ダル仕上げという防眩性を付与した仕上げが採用されている。これら屋根外装用の材料開発のポイントは、いかに耐候性を損なうことなく、意匠性を付与するかにある。また、上述の屋根材には、保護フィルムを使用しなくても成形時の疵付きを防止できる表面処理が適用されており、環境面での配慮もなされている。

最近、社会ストックとしての土木、建築の長寿命化が議

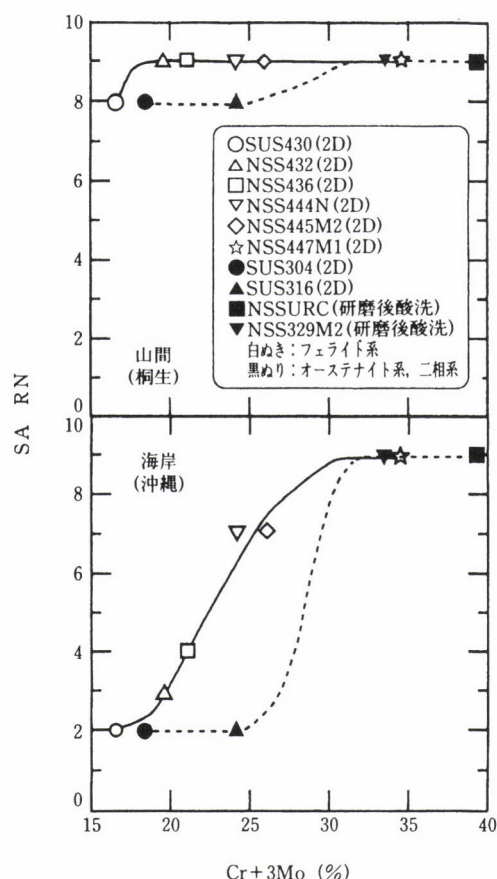


図3 各種ステンレス鋼の山間および海岸環境における耐候性におよぼす孔食指数の影響



図4 SUS445J1(22Cr-1.2Mo-Nb-Ti-Al)を用いた西武ドーム球場の屋根

論され始めている。すでに公共施設などのメンテナンス費用は急増しつつあり、2010年には公共事業費の1/2、2025年には3/4を占めるとの試算もある⁷⁾。長期的な観点からメンテナンスや廃棄・再生コストまで考慮した、いわゆるライフサイクルコスト(LCC)対応が必要になると想定され、ステンレス鋼のようなメンテナンスフリー素材の活用が期待される。

4 加工用ステンレス鋼

ユーザーからの質問の中には、うまく成形できないので加工性の良い材料を紹介してほしい、というものがある。成形上のトラブルについても、スプリングバックによって寸法精度がでないものや、プレス時のネッキングによる割れなど問題点も様々である。また、加工方法によって適正な材料も異なる。ここでは、各種材料の成形性に関する特性の違いや進歩、ならびに素材特性に起因した加工上の問題点について述べる。

プレスなどの成形加工用途においては、SUS430に代表されるフェライト系ステンレス鋼とSUS304に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼が主に使用される。表3に、両鋼種の機械的性質と成形性指標の一例を示す。オーステナイト系のSUS304は、フェライト系のSUS430に比べて加工硬化が大きいと、耐力や引張強さが高く、伸びも大きい。しかし、縮みフランジ性の指標であるランクフォード値(r値)については、SUS430の方が高い値を有している。これは、機械的性質や物理的性質を支配する結晶構造の違いによるものであり、加工性向上に対する方策も異なる。すなわち、フェライト系ステンレス鋼は、普通鋼と同様、集合組織制御に基づくr値の向上、オーステナイト系ステンレス鋼では成分調整による使用目的に応じた加工硬化指数(n値)の制御により、成形性の改善、向上が図られてきた¹⁰⁾。

4.1 フェライト系ステンレス鋼

フェライト系ステンレス鋼においては、SUS430冷延鋼板の加工性改善を目的として、C、Nを低減し、Ti、Nbなどの安定化元素を添加したSUS430LX系の材料が開発されている。本系鋼はr値が1.5を超えるものもあり、業務用流し台のシンクなど深絞り用途において多用されている。また、製造面からもr値の異方性を改善するための適正圧延率の設定など製造条件の改善も進んでいる。

フェライト系ステンレス鋼の加工用途における問題点としては、リジングの発生が挙げられる。リジングは、プレス成形などにより鋼板に引張り変形が加わると圧延方向に平行に生じる表面起伏であり、著しい場合には冷間圧延ま

表3 ステンレス鋼の機械的性質と成形性指標の一例

(1.0mm 冷延鋼板)

鋼種	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	硬さ (HV)	加工硬化指数 (n値)	ランクフォード値 (r値)
SUS430	270	520	30	155	0.20	1.3
SUS304	310	620	60	170	0.45	1.0

まや冷延焼鈍後の調質圧延後にも観察される場合がある。その発生原因としては、鑄造組織や熱延板組織に由来する変形挙動の異なる単位領域が冷延焼鈍後も存在することが主な原因と考えられている。従って、この単位領域を粉碎、微細化する観点から各種のリジング改善方法が提案、実施されている。

4.2 オーステナイト系ステンレス鋼

オーステナイト系ステンレス鋼は、オーステナイト安定度によって大きく二つに分類される。オーステナイト相の一部がプレスなどの塑性加工を受けることによってマルテンサイト相に変化(加工誘起変態という)しやすい準安定系と、変態が生じにくい安定系である。加工誘起変態のしやすさの指標としては、オーステナイト安定度のMd30*などが用いられ、Md30が大きいほどオーステナイトが不安定で、加工誘起変態が生じやすい。加工誘起変態によって生じる延性の著しい向上は、変態誘起超塑性TRIP(Transformation Induced Plasticity)と呼ばれる。

準安定系の材料は、加工で変形の生じた部分が加工硬化し、ネッキングによる破断が抑制され、大きな均一伸びが得られる。SUS304にCuなどを添加し、Md30を調節したSUS304J1系の材料の加工例としてガスバーナーの火口などがある。このような高い張出し性が要求される用途に適用できるのは、TRIP効果によるものである。

準安定オーステナイト系ステンレス鋼は高加工性を有するが、その加工度が限界を超えると時期割れと呼ばれる遅れ破壊が生じる場合がある。影響因子としては、オーステナイト安定度Md30の他に、C、Nの影響が大きく、表4に示すように、準安定系の材料でも時期割れを改善した材料が開発されている¹¹⁾。

安定系ステンレス鋼は、加工硬化しにくく、その特性を活かした軟質なステンレス鋼が開発されている。図5に安定オーステナイト系ステンレス鋼の機械的性質に及ぼす合金元素の影響を示す¹²⁾。C、Nなどの侵入型元素だけでなく、置換型元素の多くは添加することによって、耐力は上昇する。しかし、CuやNi、Mnなど一部の元素では、添加量によっては軟化が生じる場合がある。これらの元素を有

表4 オーステナイト系ステンレス鋼における時期割れ限界絞り比の比較

鋼種	成分	時期割れ限界絞り比
SUS305	LowC, N, Si-17Cr-12Ni-1.6Mn-1.9Cu	2.86
SUS304J1	LowC, N-17Cr-7.5Ni-1.4Si-1.9Cu	>3.35
SUS304	0.06C-0.03N-18Cr-8Ni	2.40

* Md30は、真ひずみ0.30の引張変形を与えた時、オーステナイト相の50%がマルテンサイト相に変態する温度を意味し、Md30が大きいほどオーステナイト相が不安定でマルテンサイト変態が生じやすい。

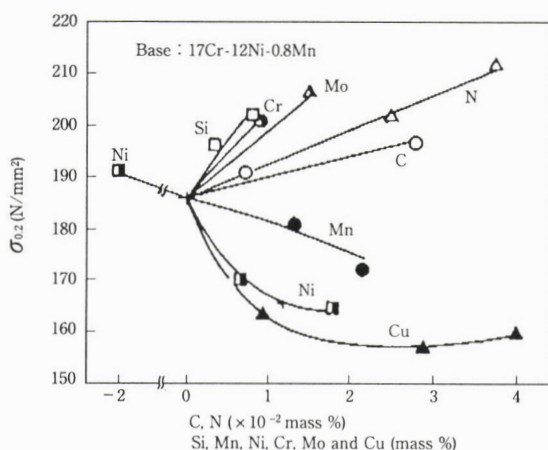


図5 安定オーステナイト系ステンレス鋼の0.2%耐力におよぼす合金元素の影響

効に活用して軟質ステンレス鋼が開発され、コイン用ステンレス鋼に使用され刻印性の向上に寄与している。また、成形後の形状凍結性に優れていることから、普通鋼やCu合金などが使用されている用途においても代替需要が期待される。

5 耐熱用ステンレス鋼

耐食性と並んで、ステンレス鋼の基本的な特性に耐熱性がある。自動車の排気系部材や電気製品における使用環境の多様化、過酷化とともに、材料の特性向上に関する開発が進められてきた。

電気製品における耐熱用ステンレス鋼は、石油ファンヒーターの燃焼筒や反射板、あるいは電子レンジの内装用材料として使用されている。燃焼筒には異常酸化防止のために高Al含有フェライト系ステンレス鋼が使用されており、反射板もSUS430系の中でも耐熱性に優れたものが適用されている。燃焼温度の高温化に伴い、耐酸化性や赤熱性を改善したステンレス鋼が開発されている。

自動車排気系部材におけるステンレス化は、耐久性の問題から湿食部位のマフラーから始まった。さらに、自動車の軽量化、耐久性向上あるいは排ガス温度の上昇に伴い、セラミックスが使用されていたコンバータの担持体に20Cr-5Al系のステンレス鋼が使用され、鋳物が使用されていたエキゾーストマニホールドにSUS430J1L系あるいはSUS444系のステンレス鋼が使用されるようになった。また、SUS430J1L系と同等レベルの特性を有する14Cr系の材料も開発されており、自動車排気系材料のコストダウンに寄与している。

エキゾーストマニホールドでは、耐酸化性だけでなく、高温強度や熱疲労強度が重要な材料選択のポイントとな

り、熱膨張係数の小さいフェライト系のステンレス鋼が適用されている。また、耐酸化性においても酸化増量だけでなく、生成したスケールの耐剥離性がより重要なポイントとなる。

6 高強度ステンレス鋼

高強度ステンレス鋼と言えば、通常、SUS420J2など高Cの焼入れ硬化型のステンレス鋼や、SUS301に代表される加工硬化型のステンレス鋼、あるいはSUS630、SUS631などの析出硬化ステンレス鋼が一般的である。中でもSUS301はSUS304と同等の耐食性を有するとともに、同一材料で圧延率を変化させることにより種々の硬さレベルが得られ、バネやメタルガasketあるいは各種ベルト用の材料として広く使用されている。

SUS301の1/4Hや3/4H材が使用される用途向けに、フェライト・マルテンサイトの複相組織ステンレス鋼が開発された¹³⁾。この材料は図6に示すように、強度と延性のバランスに優れており、SUS420J2やSUS630などの従来鋼のように、客先で熱処理を施す必要がなく、省エネ、省工程タイプの高強度鋼といえる。

7 機能性ステンレス鋼(トピックス)

7.1 抗菌ステンレス鋼

最近の衛生への関心の高まりの中で、抗菌ステンレス鋼が開発されている。CuやAgが抗菌性を有することは従来から知られていた。しかし、単に固溶した状態では安定した抗菌性は得られないため、熱処理によってε-Cu相として析出させ、安定した抗菌性を発現する材料が開発されている¹⁴⁾。また、抗菌製品技術協議会などによる自主規制も定着

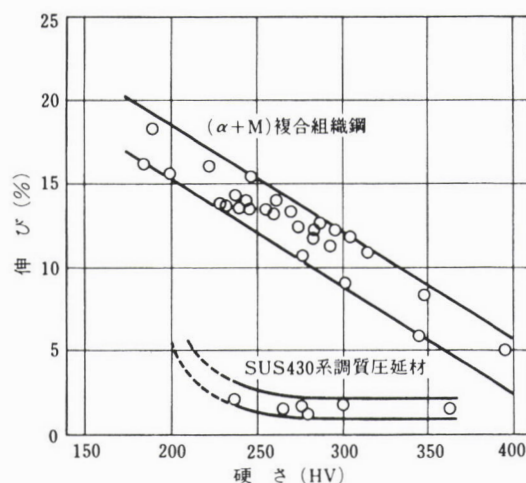


図6 (α+M)複相組織鋼と調質圧延材の強度-延性バランス

しており、JIS化の動きもあることから、今後この系統の材料の発展が期待される。

7.2 表面処理ステンレス鋼

近年、環境問題がクローズアップされ、ステンレス鋼の素材では出せない機能を、表面処理による樹脂との組合せによって生みだそうとする動きが活発になっている。ステンレス鋼のプレス加工時には、金型のカジリやスリ疵を防止するため、あるいは、材料の流れ込みを良くするために、潤滑油を塗布したり、塩化ビニールやオレフィン樹脂の保護フィルムを鋼板表面に被覆して加工を行っている。そのため、潤滑油の脱脂に用いる有機溶剤(トリクロロエチレンなど)による職場環境の悪化や廃液処理の問題、保護フィルムの廃棄処理の問題が生じていた。加工性に優れたSUS304J1系の材料をベースに、ワックスを含んだアクリル樹脂を鋼板の表面に塗布した潤滑鋼板など、種々の表面処理ステンレス鋼が開発されている。

7.3 高強度非磁性ステンレス鋼

最近の話題として、欧州合同原子核研究機関(CERN)向けの粒子加速器用の高強度非磁性ステンレス鋼の採用が挙げられる。使用される材料は、高Mnオーステナイト系ステンレス鋼で、極低温における安定した非磁性が評価されたものである。今後よりニアモーターカー関連の材料としての需要が期待される。

8 おわりに

以上、ステンレス鋼を耐食性や加工性などの基本的な特性から分類し、材料別にその特徴と使用例を述べてきた。しかし、多くの用途においては、単一の特性だけで、その用途に適用できることはまれであり、いくつかの特性が要求される。耐食用のステンレス鋼においても、製品に加工できるレベルの加工性は必要であり、耐熱性も必要とされる場合もある。今後、適用用途が広がるにつれて複合的な

特性を要求される用途は増大していくものと思われる。

以上、開発されたステンレス鋼の多くは、ユーザーからの意見や要望に基づいて素材メーカーが対応してきた結果、生まれた産物ともいえる。ユーザーからの率直なニーズが、より良いステンレス鋼を生み出す源であることを申し添えて終わりたい。

参考文献

- 1) 例えば、建材、自動車、耐食性、耐熱性などの用途分野や特性ごとの最近の進歩は、第151・152回西山記念技術講座「ステンレス鋼の製造・利用技術の進歩」、日本鉄鋼協会、(1994)にまとめられている
- 2) 植松美博：ふえらむ、1 (1996)、602.
- 3) 田中良平編：JISの使い方シリーズ ステンレス鋼の選び方・使い方、日本規格協会、(1994)
- 4) 宇都宮武志、古木寿之、足立俊郎：日新製鋼技報、71 (1995)、53.
- 5) 足立俊郎、西川光昭、林 公爾：日新製鋼技報、63 (1990)、109.
- 6) 西川光昭、原田和加大、足立俊郎、名越敏郎：日新製鋼技報、77 (1998)、25.
- 7) 村中 裕：特殊鋼、47、10 (1998)、4.
- 8) 白山 和、宇都宮武志、名越敏郎：日新製鋼技報、75 (1997)、46.
- 9) 宇都宮武志、杉本育弘、足立俊郎、植松美博：日新製鋼技報、70 (1994)、45.
- 10) 鈴木 聡：第176回塑性加工シンポジウム、(1997)、9.
- 11) 星野和夫、井川 孝：日新製鋼技報、34 (1976)、72.
- 12) 大久保直人、宮楠克久、植松美博：CAMP-ISIJ、5 (1992)、933.
- 13) 宮楠克久、藤本 広、田中照夫：日新製鋼技報、60 (1989)、115.
- 14) 大久保直人、中村定幸、山本正人、宮楠克久、長谷川守弘：日新技報、77 (1998)、69.

(1999年11月1日受付)