



入門講座

鉄鋼材料編-7

次代を創造するステンレス鋼 —ステンレス鋼の特殊な機能—

植松 美博

Yoshihiro Uematsu

日新製鋼(株) 技術研究所 研究企画課 課長

Stainless Steels Create the Next Age.—Special Properties of Stainless Steels—

1 錆びない鉄の夢

錆びない鉄は人々の長い間の夢であったに違いない。その夢の実現はファラデーらの鉄合金の研究に始まるといわれている。彼らは鉄と貴金属(ニッケルや白金)の合金が錆びにくいことを1820年に報告した。その後、1911年にモンナルツは鉄に12%以上のクロムを合金化すると硝酸や水に対する耐食性が飛躍的に向上することを発見した。同じ頃、現在のステンレス鋼の原形となった13%Cr、18%Crおよび18%Cr-8%Ni鋼が次々に発明された¹⁾。ステンレス鋼の誕生である。

ステンレス鋼は錆びにくい性質ゆえに今では欠かすことのできない材料の一つになっている。身近なところでは流し台や浴槽などの水関連機器、自動車の排気ガス浄化装置、鉄道車両から遠くは原子力関連の部材までステンレス鋼が使われている。このように、ステンレス鋼はかなり一般的な材料になってきたが、ステンレス鋼の性質については「錆びにくい性質」を除くとあまり知られていないのではないだろうか。

ここでは、ステンレス鋼の様々な性質の中から基本的な機械的性質、物理的性質、耐食性、耐熱性および強度特性を取り上げ、その簡単な基礎と応用・用途について紹介したい。また、ステンレス鋼に「特殊な機能」を付与することによって次代の種々の技術的課題に備える取り組みが始まっていることについても触れてみたい。

2 ステンレス鋼の三つの顔

本題に入る前に簡単にステンレス鋼の代表的な顔と機械的性質の関係を眺めてみよう。ステンレス鋼とは鉄と12%以上のクロムを合金化したFe-Cr系とそれにニッケルを添加

表1 ステンレス鋼の代表的鋼種系と機械的性質(冷延鋼板)

鋼種系	代表成分	金属組織	機械的性質	
			引張り強さ	伸び
マルテンサイト系	13%Cr	Mr	1300	15
フェライト系	18%Cr	α	500	30
オーステナイト系	18%Cr-8%Ni	γ	600	60

Mr: マルテンサイト、 α : フェライト、 γ : オーステナイト

σ_b : 引張強さ(N/mm²)、 δ : 伸び(%)

(注) 13%Cr鋼は焼入れ焼戻し状態、18%Cr鋼と18%Cr-8%Ni鋼は固溶化熱処理状態

したFe-Cr-Ni系の総称で、基本的な鋼種系の分類としては金属組織の違いからマルテンサイト系の13%Cr系鋼(SUS410系)、フェライト系の18%Cr系鋼(SUS430系)およびオーステナイト系の18%Cr-8%Ni系鋼(SUS304系)とオーステナイト・フェライト2相系の25%Cr-5%Ni-Mo-N系鋼(SUS329系)および析出硬化型鋼(SUS630系)の5種類がある^{*1,2)}。ここでは、ステンレス鋼の基本的金属組織としてマルテンサイト、フェライトおよびオーステナイトの3種類を取り上げ、表1に、それらの代表鋼である13%Cr鋼、18%Cr鋼、18%Cr-8%Ni鋼の機械的性質の一例を示す。

マルテンサイト系ステンレス鋼は、高温のオーステナイト域から急冷するとオーステナイトからマルテンサイトに組織が変化し硬化する(焼きが入る)。マルテンサイトの硬さは固溶炭素量が多いほど高く、そのため硬さや耐磨耗性の必要な用途には高炭素のマルテンサイト系ステンレス鋼が使われる。

フェライト系ステンレス鋼は高温で焼鈍しフェライト組織としたもので、機械的性質は普通の鉄と本質的に似ている。軟質で延性に富んでいるが、加工硬化が小さく均一伸び^{*2)}は小さい。しかし、絞り加工性^{*3)}は優れているので厨房機器や各種器物に、また、最近では洗濯機の槽にも使用されている。

オーステナイト系ステンレス鋼は高温で焼鈍しオーステナイト組織としたもので、軟質であるが加工硬化が大きい

*1: 鉄鋼のJIS規格ではステンレス鋼は鋼材(記号はSUS)、铸鋼品(SCS)、耐熱鋼(SUH)などの製品別に分類されている。そのうち、冷間圧延鋼板及び鋼帯(SUS)を例にステンレス鋼の金属組織からの分類を見ると、オーステナイト系(35鋼種)、オーステナイト・フェライト系(3鋼種)、フェライト系(12鋼種)、マルテンサイト系(7鋼種)および析出硬化系(2鋼種)の5種類に分類され、合計59鋼種が規格化されている。他に、AISI(アメリカ)やDIN(ドイツ)などの規格がある。詳細は文献1)~3)参照。

*2: 引張試験の応力-ひずみ曲線で、降伏後、ひずみの増加とともに応力が上昇する挙動を加工硬化、最大荷重点での応力を引張強さ、最大荷重点までの伸びを均一伸び、最大荷重点の後くびれを生じ破断までの伸びを局部伸びとそれぞれ呼んでいる。均一伸びと局部伸びの合計を全伸び(単に伸び)と称す。SUS304系鋼の均一伸びはおおよそ40%、SUS430系鋼の均一伸びは18~20%程度である。

*3: 絞り加工性については文献5)を参照。TiやNbを添加したフェライト系ステンレス鋼では集合組織を制御して(111)面の集積度を高めて、ランクフォード値を1.8程度まで向上させた深絞り用鋼が開発されている。

表2 結晶構造と物理的性質（ステンレス鋼、軟鋼、アルミとの比較）

種類	結晶構造	熱伝導率	熱膨張率	磁性
SUS430	BCC	24	11	有り
SUS304	FCC	16	17	無し
軟鋼	BCC	80	11	有り
アルミ	FCC	210	24	無し

BCC：体心立方晶（マルテンサイトは体心正方晶）

FCC：面心立方晶

熱伝導率：W/m・K（100℃）

熱膨張率： $\times 10^{-6}/K$ （0～100℃）

で均一伸びが大きく張り出し加工性に優れている。この優れた加工性を生かして流し台や浴槽などに汎用されている。

本稿では詳細は述べないが、上記の三鋼種を基本として、さらに種々の合金元素の添加により、耐食性や耐熱性のみならず、その他の多様な機能がステンレス鋼に付与されている^{6),7)}。また、加工熱処理で強度⁸⁾や加工性の向上が図られたり、各種の表面調整によって意匠性や機能性向上が行われている⁹⁾。

3 ステンレス鋼の二つの体

ステンレス鋼を構成する相の基本的な結晶構造は体心立方晶と面心立方晶であるが、この結晶構造の違いによって物理的性質が大きく異なっている。SUS430(18%Cr鋼)で代表されるFe-Cr系のステンレス鋼は体心立方構造で普通鋼に似た物理的性質を有し、磁性がある、熱伝導率が高い、熱膨張率が小さいなどの特徴がある。これに対し、SUS304(18%Cr-8%Ni鋼)で代表されるFe-Cr-Ni系のステンレス鋼は面心立方構造で、非磁性である⁴⁾、熱伝導率が小さい、熱膨張率が高い、などの特徴がある。SUS430とSUS304の物理的性質を軟鋼およびアルミニウムと比較して表2に示す。

物理的性質を利用した例としてフェライト系ステンレス鋼・アルミニウムの複合鋼板を電気炊飯器の内釜に使用している例が挙げられる⁹⁾。フェライト系ステンレス鋼の磁性による電磁誘導発熱とアルミニウムの熱伝導性を利用して加熱調理すると言うものである。また、超高速輸送として実験・開発中のリニアモーターカーの分野では強力な磁場を乱さない高強度非磁性鋼が求められている。ここでは磁性のないオーステナイト系の高強度ステンレス鋼が注目されている¹⁰⁾。

4 自然の肌が錆びに強い

モンナルツの見いだしたFe-Cr合金の優れた耐食性は大気中、水あるいは硝酸など酸化性の環境下で発現する。

酸化性環境下ではステンレス鋼の表面にナノメータオーダのクロムの酸化皮膜が形成され、この皮膜が安定なため優れた耐食性を示す。この現象は**不動態化**¹¹⁾と呼ばれステンレス鋼の耐食性の基礎になっている。何らかの理由で不動態皮膜に傷が

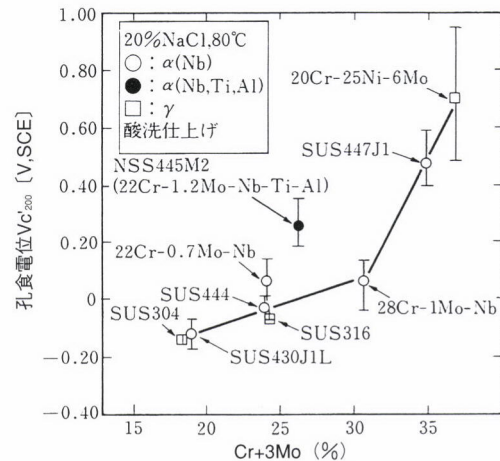


図1 ステンレス鋼冷延鋼板（酸洗仕上げ）の孔食電位^{*)}に及ぼす合金元素の影響¹²⁾（NSSは日新製鋼規格、(Nb)および(Nb,Ti,Al)は微量の合金添加元素を示す）
α：フェライト系、γ：オーステナイト系

ついてもその部分にはまた新しい酸化皮膜が形成され（再不動態化）耐食性が持続する。これに対し、塩酸や硫酸などの還元性環境下では安定した酸化皮膜が出来ず耐食性が得られない。

酸化性環境下で形成された不動態皮膜でも、塩素イオンが存在すると皮膜が局所的に破壊されピット状の腐食（孔食）を生じる傾向がある。ステンレス製品なのに錆びたと苦情がでるのは塩分の付着に起因することが多く、家庭の厨房でこぼれた醤油を放置して錆を生じるのはこの例である。

塩の付着による錆の典型的な事例は海塩粒子の多く飛来する海浜地区の建築物にも見られる。そこで、最近注目されているウォーターフロント開発を例に、ステンレス鋼の耐候性についてもう少し詳しく見てみよう。

各種のステンレス鋼の**耐候性**を評価するために、市街地、工業地帯、山間部、海浜地区など腐食環境の異なる場所を選んで長期間の暴露試験が行われている。その結果、海浜地区を除く環境下ではSUS304やSUS430は十分な耐候性を持つことが示されている。しかし、海浜地区ではSUS304やSUS430でも発錆が見られる。海塩粒子を含む水分がステンレス鋼に付着するとその乾燥過程で高濃度の塩素イオンを含む水滴を形成し、さらに水滴中の酸素濃度の差によって局所的な酸素濃度電池ができる。高濃度の塩素イオンと局部電池の作用でステンレス鋼の不動態皮膜が局所的に破壊され¹³⁾、そこに孔食を生じ赤錆が発生する。ステンレス鋼を使用しているのに赤錆を生じたのではせっかくの意匠が台無しである。そこで、どうにかして不動態皮膜を強化しピットの発生を抑えようと多くの研究がなされている。一例として図1¹²⁾に80℃・20%NaCl水溶液中での**孔食発生電位**と（Cr+3Mo）量の関係を示す。この結果より、塩環境での孔食の防止にはCr量を増し、さらにMoの添加が有効であることが分かる^{4),5)}。

これらの研究成果として最近、各種の高Cr-Moフェライ

*4：オーステナイト系ステンレス鋼でもNi量の少ない鋼種は加工すると一部マルテンサイトに変態し磁性を生じる（図5参照）。

*5：孔食電位とは電気化学的に測定された孔食の発生電位で、孔食電位が高いほど不動態皮膜の耐孔食性が優れることを示している。暴露試験での耐候性の傾向とも良く一致するので、ステンレス鋼の耐候性の指標としても使われる。



図2 22Cr-1.2Mo高耐候性フェライト系ステンレス鋼の屋根施工例
(沖縄総合運動公園屋内運動場)¹²⁾

ト系ステンレス鋼が開発されウォーターフロントで屋根材として使用されている(図2¹²⁾)。フェライト系ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼に比べ熱膨張が小さく長尺屋根に適している。また、Niを含まないので省資源型の鋼であり、今後の展開が期待されている。

5 耐熱服を着たステンレス鋼

ステンレス鋼の特徴を二つあげるとすれば耐食性と耐熱性であるが、耐熱性は耐食性に比べてなじみが薄いのではないだろうか。耐熱性とは一般に、高温強度特性(高温強度、クリープ強度、疲労強度)、耐高温酸化特性、耐高温腐食特性などの特性の総称である。しかし、実際にステンレス鋼はその優れた高温強度特性や耐高温腐食特性を生かして、発電やゴミ焼却プラントで耐熱鋼として広く使われている。また、耐高温酸化性を生かして、石油ストーブのチムニーや電熱器具、各種バーナーなど身近にも多くの使用例を見つけることができる。ここではステンレス鋼の耐高温酸化性について見てみよう。

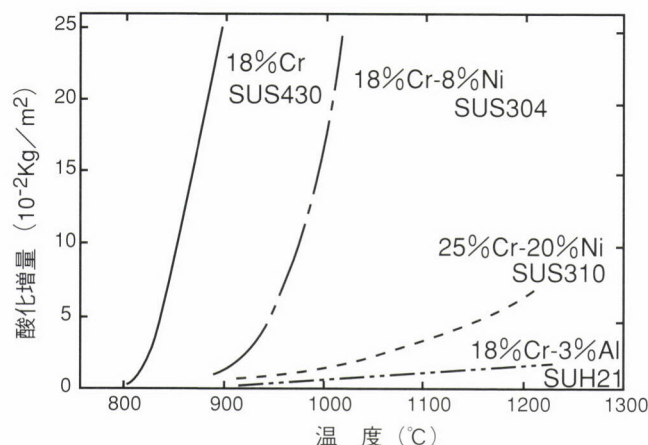


図3 各種ステンレス鋼の大気中高温連続酸化特性の比較(各温度100Hr試験)

ステンレス鋼を大気中で連続的に加熱して酸化による重量増加を連続測定すると、酸化増量は時間に対して放物線的に増加する傾向を示し、酸化速度は酸化の進行とともに低下することが分かる。このような酸化挙動は放物線酸化則と呼ばれ、それは酸化によってできたクロム系の酸化物皮膜が緻密で皮膜中の金属イオンの拡散が遅く酸化の進行が抑制されるためと考えられている。その結果、普通の鉄では大気中の単純な加熱でも簡単に酸化されてしまうが、ステンレス鋼であれば少なくとも800°C程度の赤熱温度域でも十分な酸化抵抗を持っている(図3参照)。ステンレス鋼の耐熱服は、高温酸化によって形成されるこのクロム酸化物皮膜と考えることができる。

もっと高温になるとクロム酸化物は不安定になりクロム量の低いステンレス鋼では鉄系の酸化物が急速に成長し、酸化抵抗は著しく落ちる。クロム量を増加していくとクロム酸化物は安定化し再び酸化抵抗が増すが、クロム酸化物と鉄系の酸化物はお互いに固溶体を作りスピネル型酸化物となる傾向があるので¹³⁾、1000°C以上の超高温域になるとクロム系酸化物の耐熱服のみではやはり限界がでてくる。この限界を破ったのはアルミナ系の酸化物皮膜である。

ステンレス鋼にアルミニウムを添加した鋼(図3では一例としてSUH21系鋼の18%Cr-3%Al鋼を示す)はきわめて優れた耐酸化性を示し、この系列の鋼の中には1300°Cまで放物線酸化則にしたがった酸化挙動を示すものがある。現在、ステンレス鋼の中で最も優れた耐酸化性を示す鋼はこのFe-Cr-Al鋼と言える。

Fe-Cr-Al鋼の酸化皮膜は α -アルミナであるが、このアルミナ皮膜の優れた耐高温酸化性と酸化物としての特性を生かしてセラミックスの代替にしようとする試みがなされている。それは自動車の排気ガス浄化装置に使われる触媒コンバーターの基材(担持体と呼ばれる)である。触媒コンバーターは射出成型で作ったハニカム状のセラミックス担持体に多孔質の γ -アルミナをコーティングし、それに貴金属の触媒を含浸

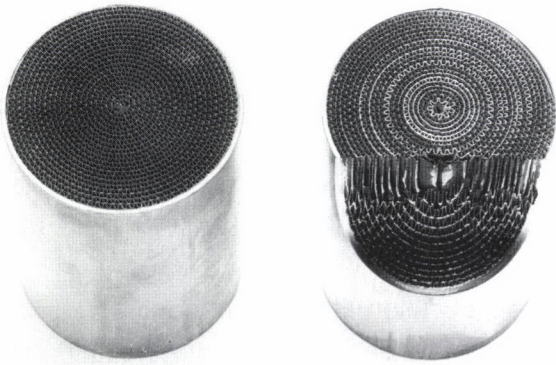


図4 自動車排気ガス浄化装置の触媒コンバーター用メタル担持体¹⁴⁾
(内筒は図のように平板と波板を積層し巻き上げてハニカム構造にする。)

させたものであるが、セラミックス担持体に代えて20%Cr-5%Alの箔帯で成形した担持体(図4¹⁴⁾)を使おうという試みである。セラミックスに比べメタルは加工の自由度がある、熱伝導がよい、薄くできる、熱衝撃に強い、コンパクトにできるなど多くのメリットがある。

自動車排気ガスの浄化効率を向上させることは、水素炭化物などによるオゾン層の破壊や窒素酸化物による酸性雨など地球環境保全対策として重要な課題になっている。メタル担持体による触媒コンバーターの開発もその取り組みの一端を担っている。

6 強さの秘密は体質改善

錆びにくくいつまでも美しいステンレス鋼の中に強さや硬さを備えた種類がある⁸⁾。良く知られているのは刃物などに使われるSUS420系(13%Cr-0.2~0.4%C)の高炭素マルテンサイト

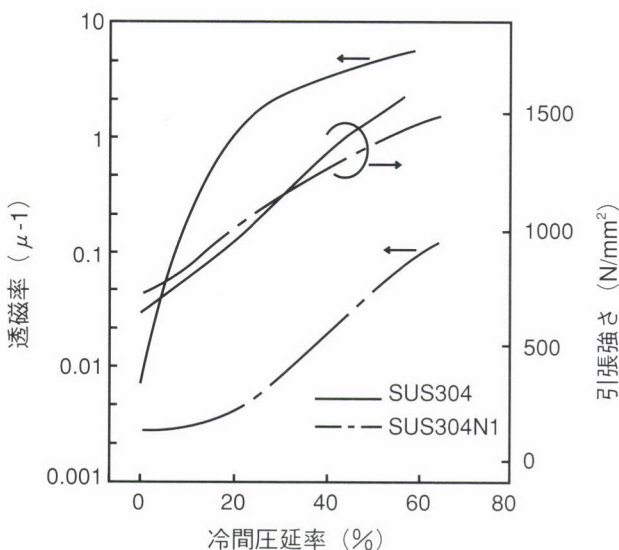


図5 オーステナイト系ステンレス鋼の強度と磁性に及ぼす冷間圧延率の影響
SUS304 (18.3%Cr-8.2%Ni)：準安定オーステナイト系ステンレス鋼^{*6}
SUS304N1 (18.3%Cr-10%Ni-0.15%N)：安定オーステナイト系ステンレス鋼

ト系ステンレス鋼や鉄道車両でおなじみのSUS301L系(17%Cr-7%Ni-0.15%N-0.01%C)の加工硬化型オーステナイト系ステンレス鋼である。また、各種の薄板ばね用にはSUS630系(16%Cr-4%Ni-4%Cu-Nb)の低炭素マルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼も使われている。これらは呼び方がそれぞれ異なっているが、それは強さを出す機構が異なるためである。

高炭素マルテンサイト系ステンレス鋼は普通の高炭素鋼と同様に、焼入れにより強度の高いマルテンサイトとした後、中間温度で焼戻して、きわめて硬い炭化物が分散した金属組織としたものである。

これに対し、加工硬化型オーステナイト系ステンレス鋼は冷間圧延によって強度を出している。この加工によってオーステナイトの組織は一部マルテンサイトに変化し^{*6}、硬さの源はこの加工によって誘起されたマルテンサイトと加工によって導入されたひずみである。鉄道車両用のSUS301L高強度ステンレス鋼はこのようにして強化されている。マルテンサイトは磁性があるので加工後に磁気を測定すると加工誘起マルテンサイトの量を測定することができる。一方、リニアモーターカー部材やオーディオ機器部材では用途上、非磁性が要求される場合がある。このような場合、加工誘起マルテンサイトによる強化が使えないので、鋼種としては安定オーステナイト系ステンレス鋼^{*6}を用い、冷間加工によるオーステナイトの加工硬化とN添加によるオーステナイトの固溶強化(基質の強化)によって強化している。図5に強度と磁性に及ぼす窒素添加と冷間圧延率の影響をSUS304およびSUS304N1を例に示す。他に、MnやNを添加した各種の高強度非磁性鋼が開発されている¹⁰⁾。

低炭素マルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼は焼入れマルテンサイトの基質に電子顕微鏡オーダーの微細な析出物を分散させたものである。この析出物の結晶格子の大きさは

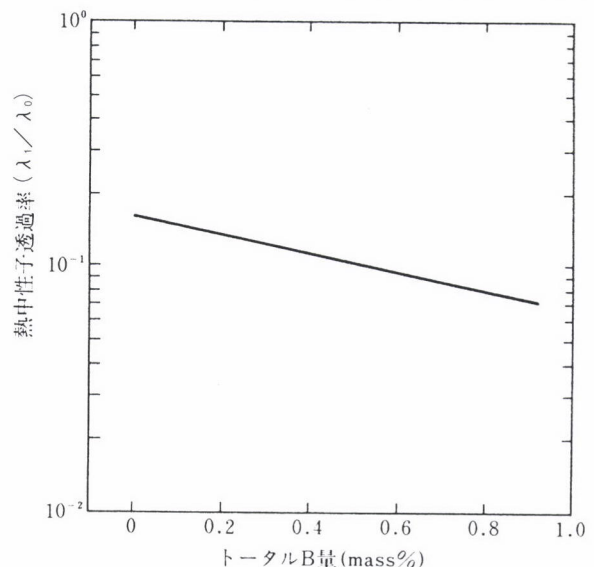


図6 SUS304系鋼の熱中性子吸収能とボロン量の関係(天然ボロン中に約20%含有される¹⁰Bは熱中性子吸収能が大きい)¹⁵⁾
(λ_0 ：入射中性子線量, λ_1 ：透過中性子線量)

^{*6}：加工によってマルテンサイトを誘発する系を準安定オーステナイト系と呼び、マルテンサイトを誘発しない(しにくい)安定オーステナイト系と区別する場合がある。準安定オーステナイト系鋼の加工時のマルテンサイト変態の指標としてMd30(°C)が用いられる。Md30(°C)については文献⁴⁾、p.361を参照。

マルテンサイトの結晶格子の大きさに近く、析出物の寸法が小さいときは周囲のマルテンサイトの結晶を弾性的に歪ませて強度を高める働きをしている。この鋼の特徴は、低炭素なので焼入れ時のマルテンサイトが比較的軟質で軽度の加工ができ、その後の析出処理で強度が飛躍的に向上する点にある。この特徴を生かし、各種の機械部品に使用されている。

7 熱中性子を吸収するステンレス鋼

原子力発電での使用済み燃料の保管用ラックに特殊なステンレス鋼が使われている。使用済み核燃料は熱中性子を放射するので、従来のSUS304では熱中性子を減衰させるために板厚を厚くする必要があり、そのため保管スペースが狭くなるといった構造上の問題があった。図6^{*)}に示すように、SUS304系鋼にボロン(B)元素を添加すると熱中性子の吸収率が向上し、ボロンを多量に添加したSUS304系ステンレス鋼を製造できれば熱中性子を効率良く減衰させ、保管ラックの板厚を薄く出来ると期待されてきた。ボロンを多量に添加するとステンレス鋼の熱間での加工性が著しく低下し製造が困難であったが、最近のボロン鋼の製造性に関する研究結果から、成分と熱間加工温度を厳密に管理すれば製造が可能であることが明らかになり、現在では高い熱中性子吸収能と耐食性、強度を兼ね備えたボロン添加型304系鋼が開発され、保管ラック材として実用化されている。

8 次代を創造するステンレス鋼

最近、ステンレス鋼はその基本的機能である耐食性や耐熱性に加え強度特性、加工性、物理的性質との組み合わせで種々の新しい用途が創出されてきた。すなわち、ステンレス鋼の多機能性を生かした新しい利用の仕方が始まっているといえる。

21世紀を直前に控え社会資本の充実、生活環境の向上、資源問題・環境保全など多くの社会的課題を抱えているが、限られた資源を有効に活用し環境をいかに守っていくかが技術的にも社会的にも問われている。これに答えるためには、材料的に見れば、より厳しい使用条件に耐えるために極限環境下での特性を向上させたり、新しい機能の組み合わせ^{*)}を工夫して技術的壁を壊すことが必要になってくると予想される。そのような次代の要請にステンレス鋼が果たす役割は大きいと考えている。

参考文献

- 1) JISの分類に従ったステンレス鋼の実用的な解説書としては、例えば、ステンレス鋼の選び方・使い方、田中良平編、JIS使い方シリーズ、(1994)、日本規格協会、がある。ステンレスの

歴史は、p.15を参照。

- 2) JISハンドブック鉄鋼、日本規格協会編、(1995)
- 3) ステンレス鋼の金属組織、結晶構造、物理的性質などの基礎的事項は
ステンレス鋼便覧—第3版—、ステンレス協会編、(1995)、日刊工業新聞、第Ⅱ編材料の基礎(I) 1. 金属組織を参照。
- 4) ステンレス鋼の金属組織の基礎については、例えば、W.C.レスリー：鉄鋼材料学、丸善株式会社、(1985)、p.351,を参照。
- 5) 矢田浩：ふえらむ、1(1996)3, p.185
- 6) 例えば、建材、自動車、耐熱性、耐食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)、に集約されている。
- 7) 最新のステンレス鋼の鋼種開発の状況は下記の国際学会のProceedingが参考になる。
Pro.I.N.C.on Stainless Steels'91,(1991),Japan
Pro. Application of Stainless Steel'92,(1992),Sweden
Pro.Innovation of Stainless Steel'93,(1993),Italy
- 8) 村田康、大橋誠一、植松美博：高強度ステンレス鋼の最近の進歩、鉄と鋼、78(1992)、p.346
- 9) 土居大治、鶴田忠、難波晴海、八尋昭人、平原一雄：住友金属、45(1993)、p.145
- 10) 日本鉄鋼協会基礎研究会 非磁性鋼調査研究部会：非磁性鋼における最近の進歩（高Mn鋼、ステンレス鋼、鉄基超合金）、(1990)、p.55
- 11) ステンレス鋼の不動態についての解説は、
H.H.ユーリック、R.W.レヴィー：腐食反応とその制御（第3版）、(1989)、産業図書株式会社、p.62,を参照。
ステンレス鋼の耐候性研究については、
ステンレス鋼の耐候性研究会報告書、日本鉄鋼協会、ステンレス協会編、(1995)、を参照。
ステンレス鋼の孔食発生機構については、
松島 巖：ふえらむ、1(1996)4, p.250
- 12) 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)、p.45
- 13) N.Birks and G.H.Meier:金属の高温酸化入門、(1988)、p.116,丸善株式会社
- 14) 平松直人、宮楠克久、植松美博：日新製鋼技報、63(1990)、p.145
- 15) 山崎和信、武本敏彦：日新製鋼技報、70(1994)、p.109

(1996年5月23日受付)

^{*)}：合金設計や加工熱処理に加えて、各種の表面処理（めっき、塗装、スパッタリングなど）や複合化（積層鋼板）による多機能化の検討もされている。一例として、建材分野での開発例は文献6),p.223を参照。