



入門講座

鉄鋼の日本工業規格—2

JIS ステンレス鋼の特性

Properties of Stainless Steels in Japanese Industrial Standards

宇城 工
Takumi Ujio

JFEテクニサーチ(株) ソリューション本部(千葉)
腐食防食部長
耐候性評価センター長

1 はじめに

ステンレス鋼が開発されて約100年が経過した。人類が鉄という材料を利用し始めて以来、錆びるという問題が常に存在しており、結果的に錆びない鉄であるステンレス鋼が開発されたのは、西暦1911～1912年とされている。この開発の経緯は「ステンレス鋼発明史」¹⁾に詳しく解説されており、興味のある方は一読されたい。ステンレス鋼は高合金の鉄鋼材料であり多くの合金元素を含んでいる。また、組織的にもオーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、二相系、析出硬化系など多種にわたっている。ここではJISに分類された各種ステンレス鋼の組織上の違いを説明した後、合金元素が大きく影響する耐食性、耐酸化性、機械的性質の特徴を解説する。

2 ステンレス鋼の定義とJIS分類

ステンレス鋼とは、「Cr含有率を10.5%以上、C含有率を1.2%以下とし、耐食性を向上させた合金鋼」と定義されている²⁾。何故10.5%かというと、Cr量が10%となるあたりから表面に生成する不動態皮膜の安定性が增大して耐食性が大き

く向上するためである。不動態皮膜とは、Fe-Cr合金表面に生成するCrを濃縮し、結晶水を含有する水和オキシ水酸化クロム主体の非晶質皮膜のことである。Cr量の増加と共に、結晶性スピネル構造から非晶質構造に変化し、12～19%Cr以上はほぼ非晶質となる。厚さは約3nm前後であり、高Cr鋼ほど皮膜は薄くなる傾向がある。不動態皮膜の模式図とSUS304に生成した不動態皮膜を最新の高分解能透過電子顕微鏡により観察した写真を図1、2に示すが^{3,5)}、これはあくまで模式図であり、真の構造は未だに完全には解明されていない。10%Crあたりから不動態皮膜中のCrが急激に濃縮する様子を図3に示す⁶⁾。不動態皮膜は酸化により生成する安定な皮膜であるため、傷が入っても自己再生能力がある。条件にもよるが、おおよそ分のオーダーで不動態皮膜は再生する。この結果ステンレス鋼は加工しても、研磨しても美しい金属光沢を保持することが出来るわけである。

ステンレス鋼は組織的に大きく分けて、オーステナイト(γ)系、フェライト(α)系、マルテンサイト(α')系、二相(α-γ)系、析出硬化系の5種類があり、JIS上もこれらに分類されている。ステンレス鋼は耐食性や加工性の向上のためにCr、Ni、Mo、Si、Mn、N、Cu、Ti、Nb、Alなど多くの合金元素が添加される。これらの合金元素に関して、フェライト相(α相)を生成しやすい元素とオーステナイト相(γ相)を

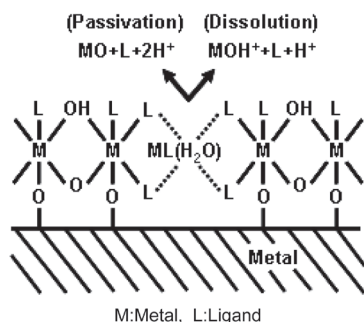


図1 不動態皮膜の模式図^{3,5)}

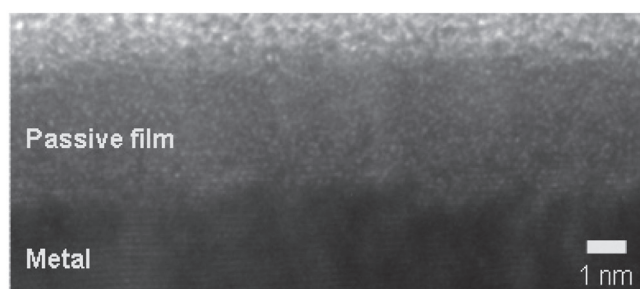


図2 SUS304に生成した不動態皮膜の高分解能透過電子顕微鏡像⁴⁾

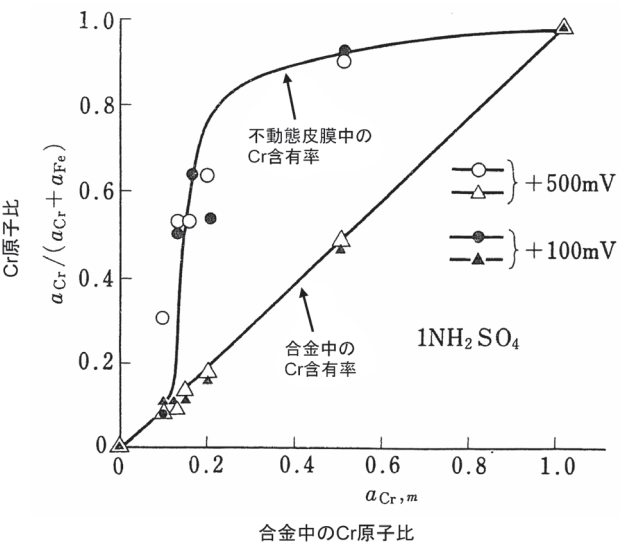


図3 不動態皮膜中のCr濃縮と合金中Cr含有量の関係⁶⁾

生成しやすい元素に分類し、その作用を当量化してステンレス鋼の組織を整理したものが図4に示すシェフラーの組織図である^{7,8)}。この組織図は溶接時の溶着金属について調べたものであるが、圧延焼鈍材の組織についても大体当てはめることができるため大変有用である。各種ステンレス鋼の化学成分からCr当量とNi当量を計算して図上にプロットすると、その鋼種の組織が分かる。基本的には全てのステンレス鋼は、この組織図のどこかの一点で示すことができる。

ステンレス鋼のJIS鋼種 (SUS) は図5に示すように現在84鋼種あり、耐熱鋼規格 (SUH) も含むと現在104鋼種がCrを10.5%以上含有する耐食性を向上させた鋼種である⁹⁾。これ以外にも特殊用途向け鋼種が規定されているが、ここでは省略した。鋼種記号はSUS番号に規定されており、オーステナイト系は300番台、フェライト系とマルテンサイト系は400番台、二相系は320番台、析出硬化系は630番台、高Mnオーステナイト系は200番台など大枠では決められているが、それ

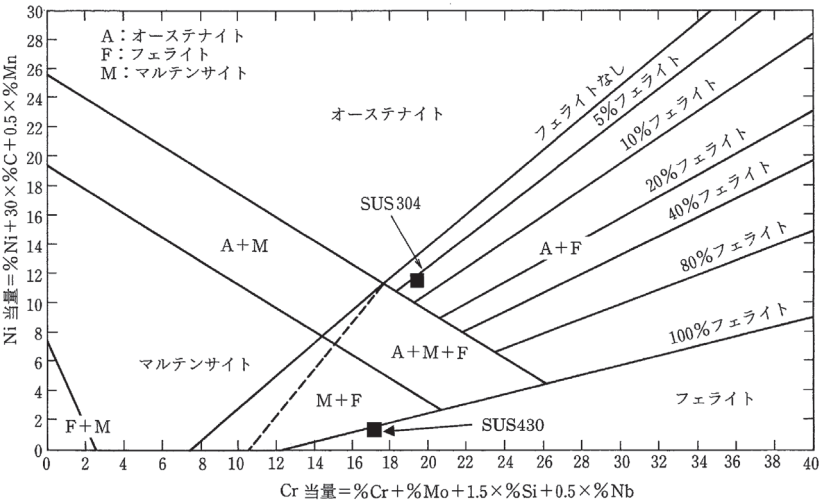


図4 シェフラーの組織図^{7,8)}

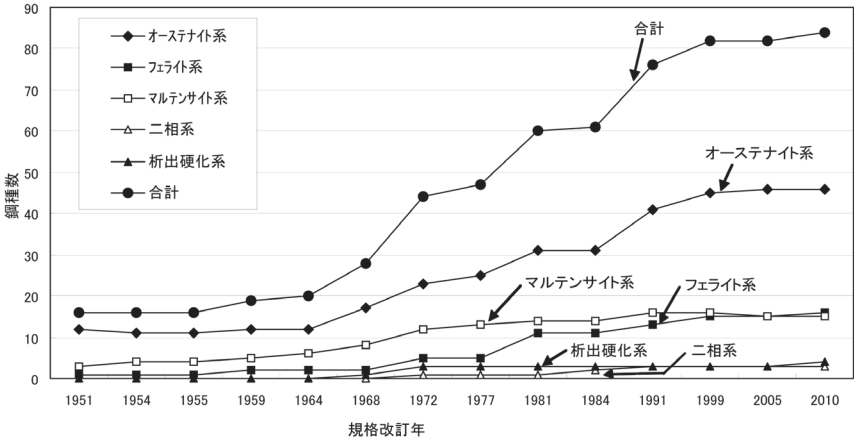


図5 JIS ステンレス鋼種数の推移⁹⁾

以外にも鋼種ナンバーはある。また、耐熱鋼に分類されるステンレス鋼（Crを10%程度以上含有する鋼種）もあり、鋼種記号はSUH番号となる。耐熱鋼も組織的にはオーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系に分類される。JISナンバーによる代表的鋼種の概略の分類と特徴を表1に示す。各JISナンバーの鋼種と化学成分、機械的性質等はそれぞれのJISを参照されたい¹⁰⁾。

3 ステンレス鋼の組織と特性

既に述べたようにステンレス鋼には、オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、二相系、析出硬化系があり、それらの組織により鋼種の特性は大きく異なってくるため、その点を解説する。各鋼種の代表的ミクロ組織を図6に示す^{5,11)}。

3.1 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加工性、溶接性、耐食性のいずれにも優れているため、世界のステンレス鋼消費の約60%を占めている。オーステナイト系ステンレス鋼の代表鋼種はSUS304（18Cr-8Ni-0.05C）である。SUS304は最も汎用されているステンレス鋼であり、いわゆる磁石に付かないステンレス鋼である。結晶構造がFCCであり、加工誘起マルテンサイトが生成するため、伸び特性は60%程度もある。耐食性は日常生活環境では十分であるが、さらに向上させるためにはMoを添加する場合が多い。耐食性上の大きな欠点は応

力腐食割れを生じることである。Ni量等の加減により加工誘起マルテンサイトの生成をコントロールすることができ、SUS301（17Cr-7Ni）などの高強度と高靱性を両立した鋼種もある。溶接部の粒界腐食を抑制するためにC量を0.02%程度にまで低減した、SUS304LやSUS316LなどのLタイプの鋼種が開発されている。また、近年ではNi原料価格の高騰が経済上の難点となっており、NiをMnで置き換えた200系のSUS201（17Cr-4.5Ni-6.5Mn-0.2N）の利用や高耐食性フェライト系SUSなどの省資源型ステンレス鋼の開発^{12,13)}が進められている。

3.2 フェライト系ステンレス鋼

代表的なフェライト系ステンレス鋼は、SUS430（16Cr-0.05C）であるが、耐食性や加工性、溶接性を向上させるために多くの鋼種が開発されている。基本的にNiを含有しないため比較的安価であり汎用ステンレス鋼として広く用いられている。工業的にはCr量が11～30%まで生産されている。SUS430は熱延プロセスにおける高温域では α 相と γ 相の二相組織となるため、冷延焼鈍プロセスにおいて α 単相領域での熱処理を行いフェライト単相の組織としている。高Cr化や低Cにより高温での γ 相はなくなり、全温度域で α 単相組織となる。結晶構造はBCCであり伸び特性は30%程度であるが、深絞りには重要な r 値は高い。加工性を更に向上させる手段として低C、N化（高純度化）やTi、Nbの添加（安定化）が行われる。Ti、Nbの添加は同時に溶接性向上にも有効であ

表1 JISナンバーによるステンレス鋼の分類と特徴

JISナンバー			
組織	番台	代表的鋼種記号と化学成分(mass%)	特徴
高Mnオーステナイト系	200番台	SUS201 (17Cr-4.5Ni-6.5Mn-0.2N) SUS202 (18Cr-5Ni-8Mn-0.2N)	低コスト化のため、NiをMn、Nで代替したオーステナイト系鋼種。伸びは50%程度あり、強度も高いが、一般に耐食性はSUS304より劣る。
オーステナイト系	300番台	SUS304 (18Cr-8Ni-0.05C) SUS316L (17Cr-13Ni-2Mo-0.02C) SUS310S (25Cr-20Ni) SUS312L (20Cr-18Ni-6Mo-0.7Cu-0.2N) SUS836L (22Cr-25Ni-6Mo-0.2N) SUS301 (17Cr-7Ni)	SUS304は加工性、溶接性、耐食性に優れた最も汎用されているステンレス鋼である。磁石に付かない。耐食性を向上させるためにはMo、Nを添加する。また、溶接部の粒界腐食を改善するためCを低下したLタイプがある。応力腐食割れを生じることが欠点。耐酸化性を向上させた鋼種は高CrのSUS310Sが代表的である。耐食性を極めて向上させた耐海水ステンレス鋼としてはSUS312L、836Lなどがある。オーステナイト安定度を低下させて加工硬化を大きくした鋼種としてSUS301などがある。
二相系	320番台	SUS329J1 (25Cr-4.5Ni-2Mo) SUS329J4L (25Cr-6.5Ni-3Mo-0.15N)	オーステナイト相とフェライト相をほぼ50%:50%含む二相組織であり、強度も高い。オーステナイト系SUSの欠点である耐応力腐食割れ性が改善されている。高合金となるため耐食性もよい。溶接部の耐食性を向上させるためにはNを添加する。
フェライト系	400番台	SUS430 (16Cr-0.05C) SUS430LX (16Cr-0.01C-0.2Ti, Nb) SUS436L (18Cr-1Mo-0.01C-0.2Ti) SUS444 (19Cr-2Mn-0.01C-0.2Nb) SUS443J1 (21Cr-0.4Cu-0.01C-0.2Ti) SUS447J1 (30Cr-2Mo-0.005C-0.2Nb)	SUS430はフェライト系の代表鋼種である。磁石に付くステンレス鋼。加工性、溶接性を向上させるためには低C、Nとして、更にTiやNbを添加する。耐食性の向上には高Cr化やMo添加を行う。通常の使用環境では応力腐食割れは生じない。高価なNi、Moを含まずSUS304並の耐食性を持たせた鋼種としてSUS443J1が開発されている。
マルテンサイト系	400番台	SUS410S (13Cr-0.08C) SUS420J2 (13Cr-0.3C) SUS420F (13Cr-0.3C-0.2S) SUS440A (17Cr-0.7C)	マルテンサイト系であるため強度、硬度が高い。靱性を改善するため、焼き入れ-焼き戻しで用いられる場合が多い。C量と共に硬度が上がる。快削性を良くするためにはS、Pbを添加する。
析出硬化系	630番台	SUS630 (17Cr-4Ni-4Cu-0.3Nb) SUS631 (17Cr-7Ni-1Al)	CuやAlなどの析出硬化により強度を高めた鋼種。Ni量が少ないSUS630はマルテンサイト組織から時効処理、Ni量が多いSUS631は準安定オーステナイト組織からサブゼロ処理後時効。

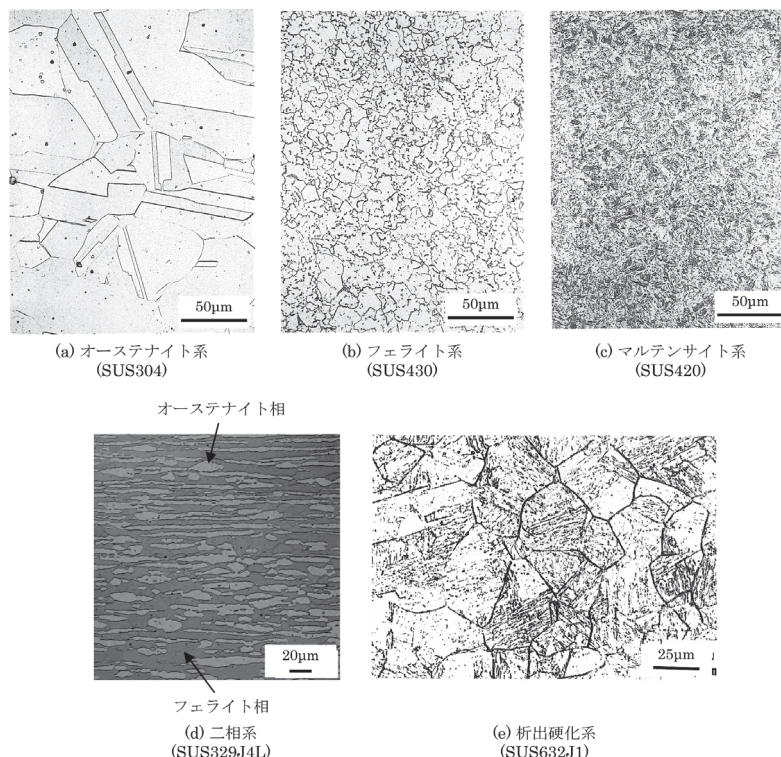


図6 オーステナイト系、フェライト系、マルテンサイト系、二相系、析出硬化系ステンレス鋼のミクロ組織^{5,11)}

る。高純度安定化したJIS鋼種としては、SUS430LX (16Cr-0.01C-0.2Ti,Nb) やSUS436L (18Cr-1Mo-0.01C-0.2Ti) などが代表的である。耐食性の向上のためには高Cr化やMoの添加が行われる。また、フェライト系SUSは通常の使用環境では応力腐食割れは生じない。

3.3 マルテンサイト系ステンレス鋼

代表的なマルテンサイト系ステンレス鋼としては、SUS410S (13Cr-0.08C) やSUS420J2 (13Cr-0.3C) などが挙げられる。マルテンサイト系ステンレス鋼は高温ではオーステナイト組織となっており、急冷によりマルテンサイト組織に変態する。C量に応じて極めて硬く高強度となるため、その特徴を生かした用途に用いられる。焼き入れしたままのマルテンサイト組織は硬く脆いため加工が困難である。そのため通常は焼きなましをして軟質なフェライト相と炭化物の組織とした状態で加工、切削、打ち抜きなどを行い、その後に焼き入れし、さらに靱性を向上させるため焼き戻し処理を行うのが一般的である。快削性を良くするためにはS、Pを添加する。

3.4 二相系ステンレス鋼

図4のシェフラーの組織図から分かるように、おおよそCr量が24%以上でNiが6%以上あるとフェライト相とオーステナイト相の二相混合組織となる。代表鋼種としては

SUS329J4L (25Cr-6.5Ni-3Mo-0.15N) が挙げられる。フェライトとオーステナイトの混合組織であるため耐応力腐食割れ性に優れており、高合金であることから耐孔食性もよい。また、二相組織のため強度、靱性も高く、海水用構造材などの耐食性と強度が必要とされる用途に使用されている。溶接部の耐食性を改善するためにNを添加している鋼種が多い。通常は耐食性が最も良くなるフェライト相50%+オーステナイト相50%となるように設計されている。

3.5 析出硬化系ステンレス鋼

この系は合金元素として添加したCuやAlなどの析出硬化(Cu-rich相、Ni₃Al相)を利用したステンレス鋼である。析出硬化系の代表的な鋼種には、Ni量の少ないSUS630 (17Cr-4Ni-4Cu-0.3Nb) と多いSUS631 (17Cr-7Ni-1Al) がある。母相の組織は、SUS630の場合はマルテンサイト相であり、SUS631の場合は準安定オーステナイト組織である。いずれもマルテンサイト組織とした後、時効処理(約400~600℃)を行い高強度化する。

4 ステンレス鋼の耐食性・耐酸化性

4.1 ステンレス鋼の耐食性

ステンレス鋼は耐食性を有しているが故にStain-Lessと

呼ばれる訳であるが、その耐食性の原因は表面に生成する厚さわずか3nm程度の不動態皮膜にあることは既に述べた。ここではステンレス鋼の基本の電気化学特性と耐食性に及ぼす合金元素の影響を主に解説する。

ステンレス鋼の電気化学特性を示す場合にアノード分極曲線がよく用いられる。縦軸は電流密度であり、腐食速度に対応する。横軸は電位であり、金属材料が使用される環境に対応する。図7にFe-Cr合金のアノード分極曲線に及ぼすCr含有量の影響を示す^{14,15)}。電流密度が急激に低下するところが不動態領域であるが、Cr含有量が10%以上において不動態領域が卑な電位域へ広がり、日常生活環境で生じる0V (SCE) 近傍で不動態化することが分かる。この変化は先に述べた、Cr含有量が10%あたりから不動態皮膜中のCrが急激に濃縮する現象に対応するものである。

4.2 ステンレス鋼の耐食性に及ぼす合金元素の影響

ステンレス鋼の耐食性は合金元素の影響を大きく受けることから、影響を及ぼす主たる元素について解説する。

合金元素の影響をステンレス鋼の分極曲線に及ぼす影響として整理したものを図8に示す^{5,16)}。不動態化臨界電流密度 (活性溶解最大電流密度) i_{crit} を抑制する元素として、Ni、Mo、Cu、Cr、N、Nb、Ti、Vなどがある。Cr、Mo、N、W、Si、Ti、Nb、V、Cu、Niなどは、孔食電位 E_{pit} を上昇させるとしている。またCr、Ni、W、Ti、Siは不動態保持電流密度 i_{pass} を低

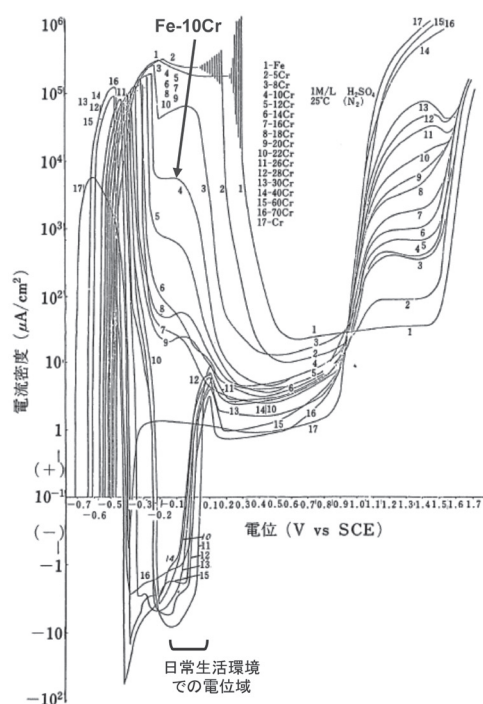


図7 Fe-Cr合金の1M H₂SO₄中でのアノード分極曲線に及ぼすCr含有量の影響^{14,15)}

下させて不動態皮膜の安定性を向上させるとしている。これらの影響は条件にも依存するため、耐食性を向上させるためには個々の用途において検証が必要である。多くの合金元素のなかでも特によく利用される、Mo、Cu、Ni、Nに関して解説する。

(a) Mo

MoはHClなど非酸化性酸中の耐全面腐食性および耐孔食性を向上させる元素として最もよく利用されている。XPSによる表面分析によると、不動態領域での濃縮が認められ、同時にCrの濃縮を伴うことが示されている。またMoはMoO₄²⁻として溶解しインヒビターとして活性溶解を抑制しているとする考えが支持されている。Moを添加したJIS鋼種としては、SUS316L (17Cr-13Ni-2Mo-0.02C) やSUS444 (19Cr-2Mo-0.01C-0.2Nb)、SUS329J4L (25Cr-6.5Ni-3Mo-0.15N) などが代表的である。

(b) Cu

Cuは耐硫酸性を向上させる合金添加元素としてよく知られている。活性態の電位域において金属状態で表面に選択濃縮し、下地の活性溶解を抑制して耐食性を向上させると考えられている¹⁷⁾。また最近、暴露環境において不動態皮膜中のCr濃縮を促進する作用のあることが報告されている¹²⁾。Cuを添加し耐食性を向上させたJIS鋼種としては、SUS315J2 (18Cr-12Ni-3Si-2Cu-1Mo) やSUS443J1 (21Cr-0.4Cu-0.01C-0.2Ti) などがある。

(c) Ni

NiもCuと同様に活性態で濃縮し、H⁺の還元反応を加速し不動態化を促進すると考えられている。またFeよりも貴の平衡電位であり、交換電流密度も低いことから、浸漬電位を貴にし、溶解速度を低下させる働きをする。

(d) N

Nの役割については、他の合金元素と異なった働きをすることから、その耐食性向上機構解明に多くの研究がなされており、中でも不動態皮膜への作用と孔食発生抑制作用が中心的な考え方である。XPS等の表面分析により不動態皮膜中、

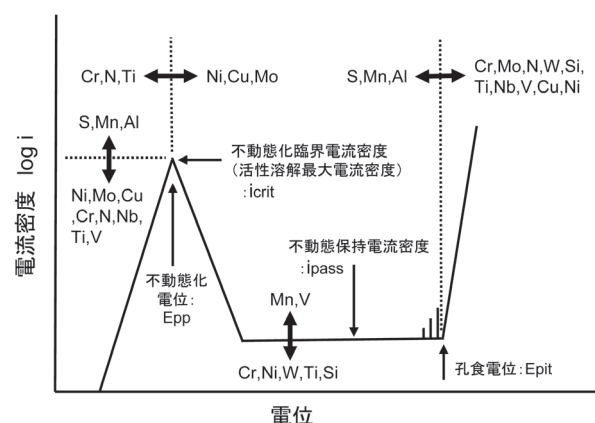


図8 ステンレス鋼の分極曲線に及ぼす合金元素の影響^{5,16)}

特に地鉄との界面にNが濃縮し存在することが報告されている。Nは N^{3-} として存在すると考えられ、 Cl^- イオンによる不動態皮膜の破壊に対する抵抗力を増加させる作用があるとされている¹⁸⁾。また活性溶解を抑制するとともに、不動態皮膜中へのCr濃縮を促進することも認められている。

孔食発生の初期段階において、Nはピット内部で活性態溶解し、その溶解生成物である NH_4^+ がピット内部の酸性化を阻止して不動態皮膜再生に寄与して耐孔食性を向上させる作用のあることが指摘されている。また、貴な電位では溶解したNが酸化されて NO_3^- イオンとなってインヒビターとして働くことも認められている。この考え方では、孔食電位を上昇させる働きは、孔食発生の初期に再不動態化を加速することによって、孔食発生-成長を抑制するとしている。これらの作用は解説にもまとめられているので参考にされたい¹⁹⁾。

多くの合金元素がステンレス鋼の耐局部腐食性に影響するが、非常に大括りな耐食性の指標として下記の式がよく用いられる。

耐孔食性指数： $Cr + 3.3\%Mo + 16N$ （Nはオーステナイト系と二相系にのみ適用）

各合金元素の係数は鋼種や腐食環境、更に孔食かすき間腐食によっても若干異なってくる。また、他の合金元素の影響を加味したものもある¹⁹⁾。オーステナイト系とフェライト系ではずれが生じるが²⁰⁾、大きくランク付けすることは可能である。従って、JIS鋼種の基本成分から耐孔食性指数を計算すれば、各鋼種の耐局部食性の大体の比較をすることができる。

4.3 ステンレス鋼の耐酸化性

ステンレス鋼は耐食性のみならず耐酸化性にも優れた材料である。Crを多量に含有しているため保護性の Cr_2O_3 酸化皮膜が生成して酸化の成長を抑制する。連続した保護性のある Cr_2O_3 酸化皮膜を形成するためには、酸化条件によって決まる臨界Cr濃度以上が必要となる。Fe-Cr合金において形成される酸化皮膜構造はCr含有量、温度、酸素分圧により変化する。1000℃付近の常圧に近い酸素分圧で酸化した時

の状況を図9に示すが⁵⁾、安定した Cr_2O_3 層が形成されるのは、18%Cr鋼以上となる。代表的な耐酸化性ステンレス鋼はSUS310S (25Cr-20Ni) である。

5 ステンレス鋼の機械的性質

既に述べたようにステンレス鋼はマルテンサイト系、フェライト系、オーステナイト系、二相系、析出硬化系など多種の組織を有しており、結晶構造もBCCとFCCがあるなど多様性に富んでいる。最新の参考書「ステンレス鋼の科学と最新技術」⁵⁾の機械的性質の章では、結晶構造やすべり系の違いなど基本的なところからこれらのステンレス鋼の機械的性質の違いを分かりやすく詳述している。大変興味深い内容であるので、是非参考にして頂きたい。ここでは、一般的に認識されている各種ステンレス鋼の機械的性質の違いを概説する。

5.1 ステンレス鋼の加工硬化特性

表2に各種JISステンレス鋼の代表的機械的性質を示す。SUS430などのフェライト系の伸びが約30%であるのに対して、SUS304などの準安定オーステナイト系は約60%あり、これが加工性の大きな違いとなっている。従って張り出し加工のような場合にはオーステナイト系が適している。一

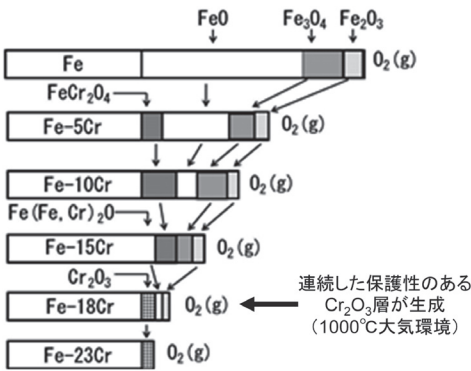


図9 酸化皮膜構造のCr量による変化⁵⁾

表2 各種ステンレス鋼の代表的機械的性質

種類	鋼種(JIS記号)	耐力(N/mm ²)	引張り強さ(N/mm ²)	伸び(%)	硬さ(Hv)	n値	r値
マルテンサイト系(焼なまし)	SUS410	270	480	20~35	135~160		
マルテンサイト系(焼入れ)	SUS410	1030	1380	10~15	380~420		
マルテンサイト系(650℃焼戻し)	SUS410	590	760	23	225		
フェライト系	SUS430	330	490	30	160	0.20	1.0
高純度フェライト系	SUS430LX	280	450	34	145	0.23	1.7
準安定オーステナイト系	SUS304	280	620	60	170	0.34	1.0
安定オーステナイト系	SUS310S	310	660	45	170		
二相系	SUS329J1	590	810	30	250		
析出硬化系(510℃時効)	SUS631	1300	1380	6	450		

方、絞り加工のような場合は r 値を大きくすることが必要であり、この点では高純度フェライト系ステンレス鋼が優れている。図10にフェライト系のSUS430とオーステナイト系のSUS304の応力-歪み曲線を示す²¹⁾。オーステナイト系が伸びに優れている理由として、FCC構造であるためStacking Fault Energy (SFE) が小さく堆積する転位の回復が抑制されることやTaylor因子の違いにより、均一伸びや加工硬化率が大きくなるのが基本的にある。更に大きな影響因子として、SUS304のような準安定オーステナイト系ステンレス鋼は変形中の加工誘起マルテンサイトが生じることによって加工硬化が大きくなることが挙げられる。オーステナイト系ステンレス鋼のSFEに影響を及ぼす合金元素として、Cu、Ni、CなどはSFEを高め加工硬化を小さくするが、Cr、Si、NはSFEを低くして加工硬化を大きくする効果がある。加工誘起マルテンサイトの生成のし易さの指標としては $Md30$ (°C) が一般によく用いられる。

$$Md30\ (^{\circ}C) = 551 - 462 (\%C + \%N) - 9.2 (\%Si) - 8.1 (\%Mn) \\ - 13.7 (\%Cr) - 29 (\%Ni + \%Cu) \\ - 18.5 (\%Mo) - 68 (\%Nb) - 1.42 (\psi - 8.0) \\ \psi : \text{ASTM 結晶粒度番号}$$

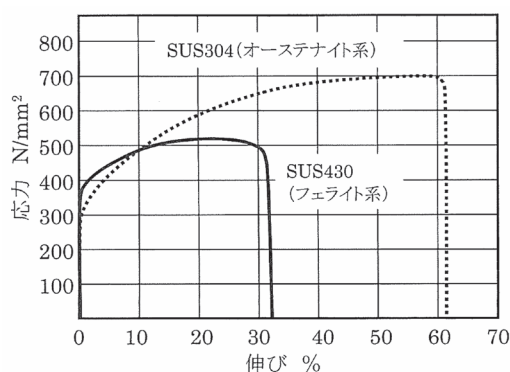


図10 オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) とフェライト系ステンレス鋼 (SUS430) の応力-歪み曲線²¹⁾

準安定オーステナイト系では、加工誘起マルテンサイト変態を利用して高強度のステンレス鋼を得ることが可能である。図11に各種ステンレス鋼の冷間圧延率と引張り強度の関係を示す²¹⁾。SUS304やSUS301などの準安定オーステナイト系ステンレス鋼は安定系のSUS310Sやフェライト系のSUS430に比べて大きな加工硬化特性を有しており、必要強度に応じた冷間圧下率のハード材を用いることにより、強度と加工性、靱性に優れた鉄道車両用高強度材などが製造されている。

5.2 ステンレス鋼の固溶強化とその他の特性

オーステナイト系ステンレスの固溶強化能に関しては、Ni、Co、Mnなどのオーステナイト安定化元素は強化能が小さく、Si、Moなどのフェライト安定化元素は強化能が大きい。また、侵入型のC、Nはさらに大きい効果を持つ。0.2%耐力に及ぼす合金元素の影響を図12に示す^{5,22)}。オーステナイト系ステンレス鋼の場合、NはCと違って耐食性を害することがなく、また固溶度も大きいいため、強度向上にも積極的に利用することができる。図13に固溶強化に及ぼすNの影響を示す^{5,23,24)}。最近では特殊な製造方法により1%程度までNを添加した鋼種が開発されている¹⁹⁾。

フェライト系ステンレス鋼に関しては侵入型元素であるC、N量が大きな影響を持っている。伸びを向上させるだけではなく、集合組織を制御して r 値を向上させるためにも100ppm以下レベルまでC、Nを低減すること、C、Nと結合して安定化させるTi、Nbを添加することが行われている。極低C、N化は靱性改善にも有効である。化学プラントなどのやや厚物の構造材用途において、応力腐食割れのためオーステナイト系ステンレス鋼が使用できない場合には、50ppm程度までC、Nを低減して靱性を向上させた高純度フェライト系ステンレス鋼SUS447J1 (30Cr-2Mo-0.005C-0.2Nb) などが適用されている。

極低温の用途に関しては、やはりFCC構造を持つ低温靱

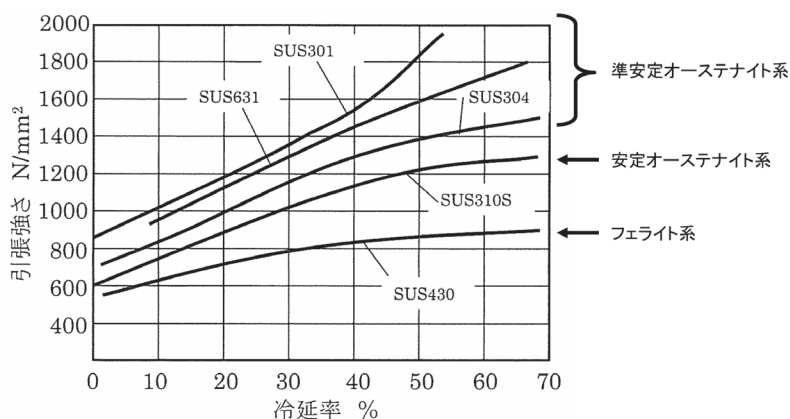


図11 各種ステンレス鋼の冷間圧延率と引張り強度の関係²¹⁾

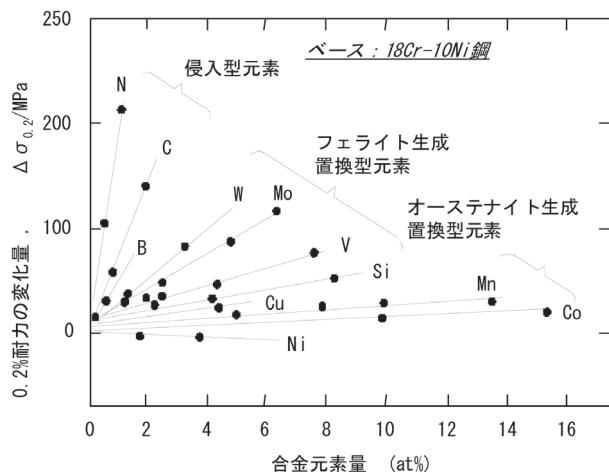


図12 オーステナイト系ステンレス鋼の0.2%耐力に及ぼす合金元素の影響^{5,22)}

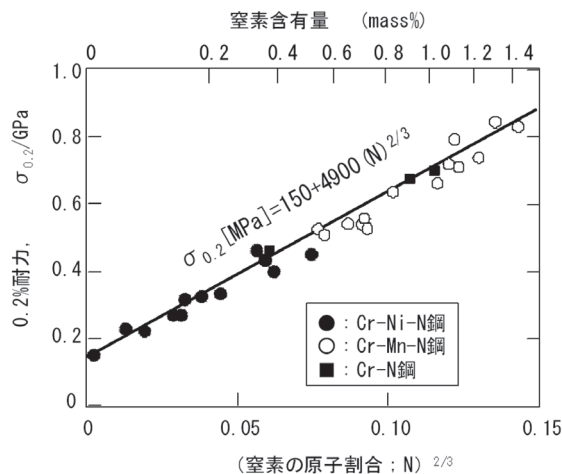


図13 オーステナイト系ステンレス鋼の固溶強化におよぼす窒素の影響^{5,23,24)}

性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼が有効である。SUS304やSUS316などは-200℃でも良好な靱性を示すため、LNGタンクの構造材などに使用されている。

最近の水素社会実現に向けた取り組みとして、水素ステーションや燃料電池車における高圧水素ガス環境においても脆化しない材料としてSUS316L (17Cr-13Ni-2Mo-0.02C) が有望視されている。水素脆化には加工において生成するマルテンサイトが悪影響を及ぼす。SUS316Lは加工誘起マルテンサイトを生成し難い鋼種であるが、このような用途の時には更にオーステナイトの安定度を高める成分の微調整が行われている。

6 おわりに

錆びない鉄鋼材料として発明されたステンレス鋼は、多くの合金元素と組織からなる鋼種であるが故に、多様な優れた特性を示す材料となっている。今後も時代の要請に応じた鋼種が開発され、規格化されていく筈である。本小文がその理解に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴木隆志：ステンレス鋼発明史，アグネ技術センター，(2000)
- 2) JIS G 0203, (2009)
- 3) G.Okamoto and T.Shibata：Passivity of Metals (The Electrochemical Society), (1978), 646.
- 4) 濱田悦男, 山田克美, 名越正泰, 佐藤馨, 石井知洋, 石川伸, 宇城工：CAMP-ISIJ, 22 (2009), 556.
- 5) 細井祐三 監修：ステンレス鋼の科学と最新技術，ステンレス協会編，(2011)
- 6) ステンレス鋼便覧第3版，ステンレス協会編，(1995), 255.

- 7) ステンレス鋼便覧第3版，ステンレス協会編，(1995), 558.
- 8) A.L.Schaeffler：Metal Progress, 56 (1949), 680.
- 9) ステンレス協会資料，(2014)
- 10) JISステンレス鋼ハンドブック，ステンレス協会，(2006) など
- 11) ステンレス鋼便覧第3版，ステンレス協会編，(1995), 136.
- 12) 石井知洋, 宇城工, 濱田悦男, 石川伸, 加藤康：鉄と鋼, 97 (2011), 441.
- 13) NSSCホームページ，FWシリーズステンレス鋼
- 14) ステンレス鋼便覧第3版，ステンレス協会編，(1995), 253.
- 15) 塩原国雄, 沢田可信, 森田進：日本金属学会誌, 27 (1963), 419.
- 16) 田中良平 編集：ステンレス鋼の選び方・使い方，日本規格協会，(2010)
- 17) T.Ujiro, S.Satoh, R.W.Staehle and W.H.Smyrl：Corrosion Science, 43 (2001), 2185.
- 18) 宇城工, 佐藤進：材料と環境, 47 (1998), 577.
- 19) 片田康行, 八代仁：ふえらむ, 14 (2009), 656.
- 20) T.Ujiro, K.Yoshioka and R.W.Staehle：Corrosion, 50 (1994), 953.
- 21) ステンレスの初歩，ステンレス協会編，(2007)
- 22) K.J.Irvine, D.T.Llewellyn and F.B.Pickering：J.Iron Steel Inst., 199 (1961), 356.
- 23) 土山聡宏, 高木節雄：ふえらむ, 7 (2002), 852.
- 24) T.Tsuchiyama, H.Uchida, K.Kataoka and S.Takaki：ISIJ Int., 42 (2002), 1438.

(2014年12月22日受付)