

# 錆に負けない鋼 ステンレス鋼 (下)

添加元素の使い分けと製造プロセスでのつくり分けによって、高い耐食性をはじめ、多彩な機能・特性を発揮するステンレス鋼。その種類は「フェライト系」「オーステナイト系」「マルテンサイト系」の3つに大別される。2回シリーズの後半では、それらの特性を結晶構造の違いなどから解き明かし、代表的品種および新技術を具体的に紹介するとともに、今後、環境の時代を背景に、ステンレス鋼に求められる新たな機能を展望する。

## 結晶構造で異なるステンレスの種類

鉄の代表的な金属組織（結晶の集合体）は、「フェライト」「オーステナイト」「マルテンサイト」の3つだ。

「フェライト」は炭素をほとんど含まない軟らかく変形しやすい組織を持つ。「オーステナイト」は、純鉄の場合では、通常、高温状態（約1,000℃）で現れ、常温では存在しない組織で、最大2%まで炭素を含むことができる。「マルテンサイト」は、オーステナイトを急激に冷やした場合に生じる組織で、炭素を過剰に含んでいて硬くてろい。

ステンレス鋼は、常温でこれらの組織をそれぞれ安定させることが可能だ。ステンレス鋼も「フェライト系（17%クロムなど）」「オーステナイト系（18%クロム・8%ニッケルなど）」および「マルテンサイト系（12%クロムなど）」の3つに大別される（表1）。それぞれ独自に開発され、1912年頃ほぼ同時に誕生した。

これらの違いを鉄の状態図で説明しよう（図1）

炭素濃度0%の純鉄は、1,390℃と910℃で金属組織が変わる。高温の溶けた状態から温度を下げていくと凝固し始めるが、まず初めにフェライト（純鉄の場合 鉄と呼ぶ）、次に約1,390℃でオーステナイト（純鉄の場合 鉄と呼ぶ）が出てくる。さらに約910℃までゆっくり温度を下げるとオーステナイトが再びフェライトに変わる。一般的に鋼は、常温ではフェライトになっており、その結晶構造は鉄特有の「体心立方格子」だ。しかし高温状態で現れるオーステナイトは、「面心立方格子」の結晶構造を持っている（図2）。

ステンレス鋼の分類

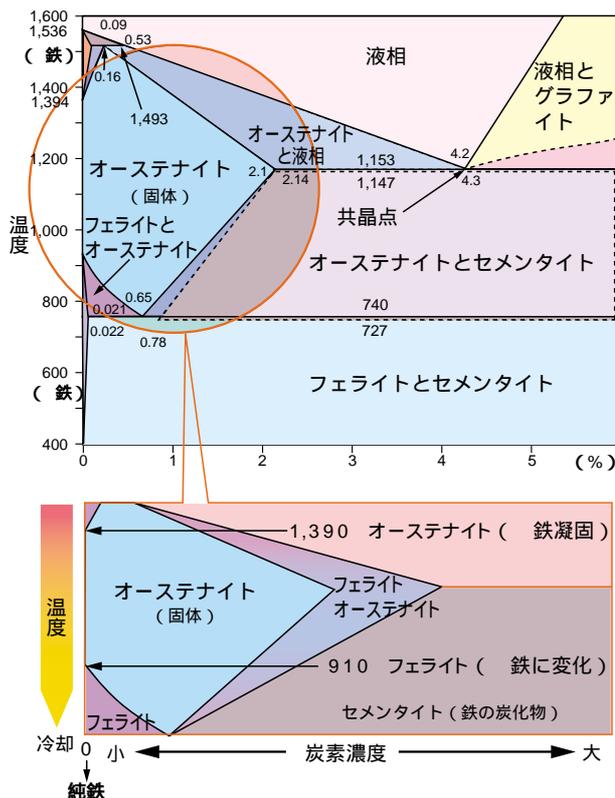
表1

分類	クロム系ステンレス鋼		クロムニッケル系ステンレス鋼
成分	13%クロム	17%クロム	18%クロム8%ニッケル
金属組織	マルテンサイト	フェライト	オーステナイト
硬化性	焼入れ硬化性	非焼入れ硬化性	冷間加工硬化性

硬化性：熱処理、冷間加工による硬化

鉄と炭素の状態図

図1

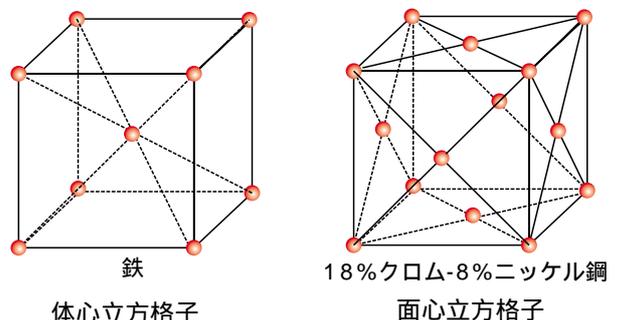


## フェライト系ステンレス鋼

図3に示すように、オーステナイトは多量の炭素を溶かす（結晶内に取り込む）ことができるが、フェライトはごくわずかしか炭素を溶かすことができない。このため冷却過程でオーステナイトからフェライトに変化（変態）するときに溶かすことができない余分な炭素は追い出され、セメンタイト（鉄の炭化物）として析出する。このような現象は窒素の場合でも同じだ。

ステンレス鋼も鉄と同じで、ゆっくり冷却するとフェライトとクロムの炭化物や窒化物になる。これが「フェライト系ステンレス鋼」である。フェライト系ステンレス鋼の汎用鋼種は、オーステナイト系ほどの耐食性は発揮しないため、業務用厨房、建築内装、家具な

## 体心立方と面心立方の結晶構造の比較 図2



鉄の結晶はサイコロのような立方体で、それぞれの角8カ所と、高温状態で現れるオーステナイトは、角以外に面の中心部6カ所に原子がある。

注）鉄、クロム、ニッケルの原子位置に規則性はない。

ど、それほど腐食環境が厳しくない用途に適している。

## マルテンサイト系ステンレス鋼

一方、オーステナイトを急冷することでできる「マルテンサイト系ステンレス鋼」は、急激に冷やされ炭素、窒素が逃げられず過飽和に溶けた体心立方格子になるため、格子が歪んだ状態となり硬くなる。刃物やシャフトなど、硬さが求められる用途に適しているのはそのためだ。(図3)

## オーステナイト系ステンレス鋼

18%クロム鋼にニッケルを8%以上加えた「オーステナイト系ステンレス鋼」は、温度が下がって常温になっても純鉄のようにオーステナイトがフェライトに変化することがなく、結晶構造も面心立方格子を維持する。ニッケル以外にマンガン、銅、窒素などでも面心立方格子を維持する効果があり、部分的にニッケルの代わりに使用される場合がある。

一般的にオーステナイト系ステンレス鋼は、耐食性に優れる。その用途は家庭用品、建築内外装、液化天然ガス(LNG)タンク、原子力設備と幅広い。

## 材料特性の違いは結晶構造の違い

結晶構造の違いは、材料特性の違いにも現れる。金属は転位と呼ばれる線状の欠陥が移動することにより、欠陥のない結晶よりはるかに小さい力で変形する。これをすべり変形という。転位は、特定の方向を向いた面の上を移動する。体心立方格子(フェライト系およびマルテンサイト系)では、動きやすいすべり系(すべり面と方向の組み合わせ)が多いため、一つの面に障害物があっても他の面の上を動かすることができる。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼に見られる面心立方格子では、すべり系が少なく、その面に障害物があると転位が動きにくくなってしまいうため、硬くなる。加えてオーステナイト系ステンレス鋼は、加工によってオーステナイトの一部が硬いマルテンサイトに変態する。これらのため、オーステナイト系ステンレス鋼はステンレス鋼の中でも非常に大きな加工硬化を生じることから、より大きな力を用いることを前提に、高い伸びを示す(\*1)。

面心立方格子は、極低温でも靱性(粘り強さ)が低下せずもろ

くならない。体心立方格子は極低温ではもろくなる。そのため、極低温環境の液化天然ガスタンクや超伝導設備などには、面心立方格子のオーステナイト系ステンレス鋼が使われている。またオーステナイト系ステンレス鋼は高温での強度も高く、熱交換機や自動車のフレキ管など高温環境でも使用される。

## 磁石につくステンレス鋼 磁石につかないステンレス鋼

鉄、コバルト、ニッケルは磁石に付くことが知られている。これらの金属は、小磁石の集団でできている。通常おのおのが打ち消しあって全体としては磁石になっていないが、磁石を近づけると小磁石の方向がそろい磁石にくっつく。同様に、体心立方格子のフェライト系ステンレス鋼やマルテンサイト系ステンレス鋼は磁石に付く。しかし、面心立方格子のオーステナイト系ステンレス鋼は小磁石を持っておらず磁石に付かない。

長年、オーステナイト系ステンレス鋼の性能が優れるというイメージから、磁石に付くステンレス鋼よりも、磁石に付かないステンレス鋼の方が高級品と言われてきたが、新日鉄(現新日鉄住金ステンレス)は、磁石に付くフェライト系ステンレス鋼の品質を高め、オーステナイト系ステンレス鋼に匹敵する性能のステンレスを創り出してきた。これらは、「高純フェライト系ステンレス鋼」と呼ばれる。

## オールマイティな「オーステナイト系ステンレス鋼(SUS 304)」

オーステナイト系ステンレス鋼は、優れた耐食性を発揮するための成分バランスが取れており、加工すると適当にマルテンサイトが生じて著しく「伸び」が向上する。

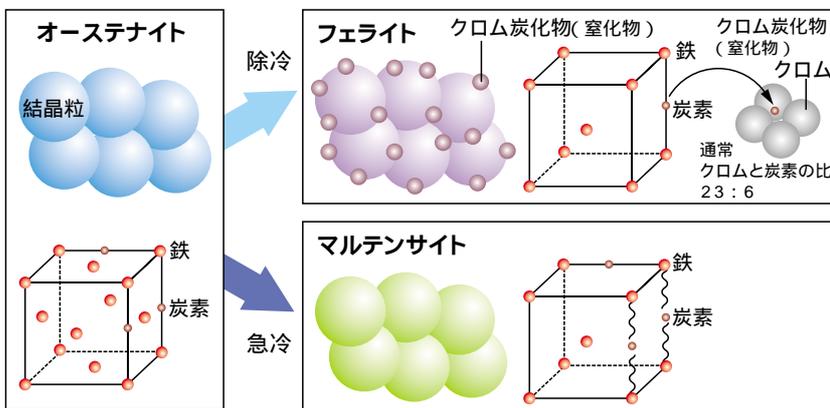
現在、世界で使われているステンレス鋼の約7割が、「オーステナイト系ステンレス鋼」だ。例えば、スプーンなどに18-8と刻印されたものをよく見かけるだろう。クロムが18%入っているため錆びにくく、8%ニッケルによって例え錆びても孔が開きにくい(写真1)。

代表鋼種「SUS 304」(18%クロム、8%ニッケル)の特長は、優れた耐食性(耐錆性、耐孔開き性) 耐熱性(高温強度、耐酸化

## オーステナイトからマルテンサイトとフェライトへの結晶変化の比較

図3

## SUS 304の 写真1 採用例



オーステナイトは多量の炭素を溶かすことができるが、フェライトはごくわずかしか炭素(窒素)を溶かすことができない。多くの炭素は追い出され、クロムの炭化物(窒化物)として析出する。一方、マルテンサイトは急冷することで炭素、窒素が逃げられず過飽和状態になるため、結晶格子が歪み硬くなる。



\*1/ 鋼材を引っ張る場合を考えてみよう。まず最初に伸びた部分は他の部分より細くなる。細くなった部分は他より断面積が小さいためより小さな力で伸びやすい。従って、その部分ばかり伸びやすくやがて破断してしまう。ところが、オーステナイト系は変形すると著しく硬くなるため、変形を受けた部分はそれ以上伸びず他の部分が伸び始める。このようにしてオーステナイト系は局所的な変形が起こらず鋼材全体が均一に伸ばされるため、より大きな力を用いることを前提に、高い伸びを示す。

性)、低温靱性という材料特性を持ちながら、60%にも及ぶ伸びを持ち、さまざまな形状にも加工できるというところにある。このような優れた性質を活かし、耐錆性を要求される家庭用品、建築内外装品、耐孔開き性を要求される原子力機器、化学プラント設備、耐熱性を要求される自動車のフレキ管、低温靱性を要求される液化天然ガスタンク等あらゆる用途に対応できる。

さらに、加工(冷間圧延)すると加工された部分がマルテンサイトに変化し、非常に硬くなって強度が増す性質がある。クロム、ニッケルなどの成分量が同じでも、圧延時の加工率によりオーステナイトの部分とマルテンサイトに変化した部分の比率を変え、用途に応じて伸びと強度のバランスをコントロールすることができる。これを応用して各種バネや鉄道車両などの高強度材に使用されている。

また「SUS 304」は、熱伝導率が低く熱を逃がさない性質を持つ(\*2)。保温効果があり、持っても手が熱くならないマグカップには最適だ。「SUS 304」で作られた調理器具の鍋は、鍋底に銅を張ることで、効率的に熱が伝わるような工夫がなされているが、一度温めた後は「SUS 304」の性能で熱を逃がさない。

オーステナイト系ステンレス鋼にも欠点がある。一つは引張応力がかかった状態で塩化物イオンを含むような腐食環境にさらされると応力腐食割れを起こしたり、多量のマルテンサイトが発生するような過度な深絞りを行うと引張の残留応力が残り、時間が経つと割れる場合がある。

## 精錬技術と組織制御技術で フェライト系を高品質化

「フェライト系ステンレス鋼」の技術進歩は著しく、着実に用途を拡大している。

例えば、ここ十数年で一大マーケットを確立した、自動車の排気系部品や家電製品で使われるステンレス鋼の大半がフェライト系だ。こうした用途開発には、1967年の真空脱炭法(VOD: Vacuum Oxygen Decarburization)(2004年6月号本企画参照)の開発以降、精錬の技術革新によって炭素や窒素などの不要な成分を100~150ppmという極限まで少なくし、モリブデン、チタン、ニオブなどの有効な元素を添加し、飛躍的に耐食性と加工性を向上させたことが大きく寄与している。

日本で初めて屋根材に「フェライト系ステンレス鋼」を使った

幕張メッセでは、多くの試験を重ね、オーステナイト系より熱膨張しないフェライト系の特長を活かした。

「フェライト系ステンレス鋼」の加工性の向上には、精錬技術だけではなく、「集合組織のコントロール技術」が欠かせない。

ステンレスはさまざまに加工されるが、その一つに深絞り加工がある。長手方向に引っ張ったときに板幅が縮めば良いが、板厚が薄くなると破断することがある。(図4)。それを防ぐために、もともとさまざまな方向を向いている鋼板の結晶方位を、炭素や窒素を極力低減することによってランクフォード値が向上する方向に揃えていく。それが「集合組織のコントロール技術」(「ランクフォード値」の制御)だ。炭素、窒素を下げるだけでなく熱延工程、冷延工程でも工夫をこらしている。

さらに、「フェライト系ステンレス鋼」は常温では普通鋼と同じだが、普通鋼は高温では100%オーステナイトで、常温まで冷える時にフェライトに変化する。しかし、16%以上のクロム鋼(フェライト系ステンレス鋼)では高温でもオーステナイトはごくわずかしかかず、全ての温度域でフェライトのまま。このため鍛造時の結晶組織が壊れずにそのまま残りやすい。

鍛造後、壊れた伸びの良い部分と、壊れない伸びの悪い大きな結晶粒が連なった塊(コロニー)の両方があると、圧延方向と平行に凹凸の縞模様が出る(リジング)。それを防ぐために、鍛造時に結晶組織を微細化し、なおかつその組織を分解し、熱間圧延の圧下力を強めるなどの工夫をしている(図5)。炭素や窒素の含有量を下げて高純度化すればするほど、大きなコロニーができやすいため、この技術は「フェライト系ステンレス鋼」の高純度化のポイントとなる。

新日鉄(現新日鉄住金ステンレス)では、こうした精錬技術と組織制御技術によって「高純フェライト系ステンレス鋼」を開発した(写真2)。さらに自動車排気系に使用されるステンレスについて普通鋼用のタンデム圧延機やCAPLを活用した生産プロセスを開発し、生産性を飛躍的に向上させ、排気系へのステンレス鋼の適用・普及を加速させた。

現在、これほど「フェライト系ステンレス鋼」が普及しているのは日本だけだ。新日鉄が蓄積してきた合金設計や精錬技術、組織制御技術、および利用加工技術のレベルの高さがあるからこそ可能な商品開発だと言える。

新日鉄(現新日鉄住金ステンレス)が昭和58年頃に自動車のモール用に開発した「NSSC 180(極低炭素、窒素、ニオブ、銅を

## ランクフォード値と熱延での制御のメカニズム

円盤から円筒を絞る例

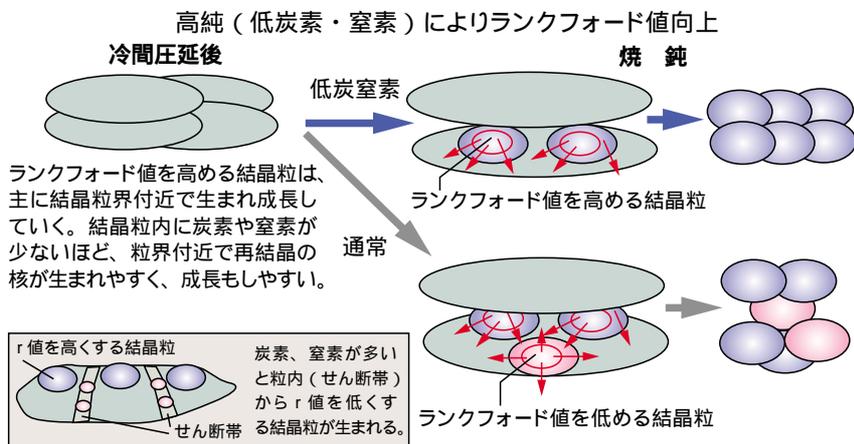
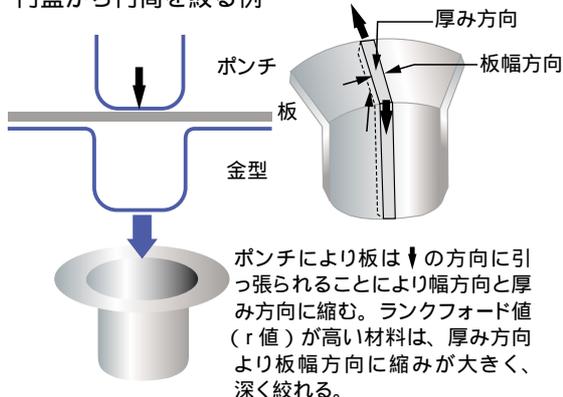


図4

\*2 ステンレス鋼は一般的に、熱や電気を通しにくい。その理由は、結晶を構成する鉄原子の一部がクロムやニッケルの原子に不規則に置き換わり、多種の原子が混在することで、熱や電気の伝導現象である原子の振動や結晶中の電子の動きが乱されることによる。

微量添加した19%クロム鋼)はSUS 304並の耐食性を持ちながら高い加工性があるため、近年では食洗器などの家庭用電気製品、業務用厨房製品や建築内外装品等に幅広く使用されている。特に最近ではニッケル、モリブデンの高騰によりこれらの元素を含まない、ニッケルレス、モリブデンレス鋼として、この「NSSC 180」が注目を集めており、さらに用途が広がろうとしている。

他にも加工性をとことんまで追求した「NSSC PDX (炭素、窒素等の微量元素を極限まで減少させ、それにチタン添加した17%クロム鋼)」は、今までは軟らかく普通鋼と同じ金型で加工できるという特徴を活かし冷蔵庫の扉に使用されてきたが、高い加工性を活かしオーステナイト系でなければ加工できなかったような複雑な形状の製品に使用され始めている。

## ライフサイクルの中で ステンレス鋼本来の性能を活かす

ステンレス鋼の製造では、ステンレス鋼のスクラップ(屑)を大量に使用する。ステンレス鋼は、技術的に100%のリサイクルが可能で、現在生産されているステンレス鋼の約半分がスクラップから再生されたものだ。今後も、ステンレス鋼がさまざまな用途で社会に浸透することで、原料となるスクラップがますます増加していくこととなる。

ステンレス鋼はライフサイクルコストにも優れる。一般的な鉄鋼材料よりインシャルコストは高いが、長寿命化によるメリットを生み出す。例えば、醤油のもろみタンクにスーパーステンレス鋼を使用すれば、ほとんど腐食されないのメンテナンスフリーでかつ寿命は飛躍的に延長される。約10年前に構造材として認定されたステンレス鋼は、美しく清潔感あふれる意匠性や非磁性体であることが注目されてきた。しかし、今後は、材料本来の価値であるライフサイクルコストがさらに認識されていくに違いない。

近年では食品分野の貯蔵タンク、海洋構造物などステンレスの性能の原点である耐食性を活かす市場が拡大している。一方、通常の鉄鋼材料と、11%クロムなど適用しやすいステンレス鋼を適材適所に使い分けることで、一般構造物のさらなる長寿命化も可能だ。また、耐酸化性を活かしセラミックスなど他の材料からの転換も図られる。

さらに、社会的テーマでもある自動車の燃費向上に対して、部

品を薄くできる強度と、高温下での耐酸化性を持つ「フェライト系ステンレス鋼」が、軽量化、高温燃焼による効率化に貢献している。防食用の塗装・めっきが省略できるため、製造時の省エネルギーや環境負荷低減も可能だ。

現在有望視されているのは「高純フェライト系ステンレス鋼」と、海水環境でも錆びないオーステナイト系の「スーパーステンレス鋼」だ(前号)(写真3)。今後は、このような新材料の技術開発をベースに、最終製品の加工方法にまで踏み込んだ利用技術開発を進めていく。

## まだまだ広がるステンレス鋼の用途

鉄は紀元前から使用されてきましたが、ステンレス鋼が発見されたのは20世紀になってからであり、100年の歴史しかありません。その間、用途はどんどん広がり、家庭、街中、工場、海上等あらゆる場所でステンレス鋼を見ることができるようになりました。

しかし現在、世界で使用されているステンレス鋼の約7割はSUS304(18%ニッケル-8%クロム鋼)であり、高価なニッケルを多量に含んでいるため価格が高いというイメージは拭えません。

これを解決するのがニッケルを含まないフェライト系ステンレス鋼です。

今後、私たちが保有している優れた精錬技術やプロセスメタラジ-技術をさらに発展させ、お客様のニーズに合致したフェライト系ステンレス鋼を開発するとともに、お客様の利用加工技術まで含めたソリューションを提供することによって、ステンレス鋼の用途はますます広がっていくものと確信しています。

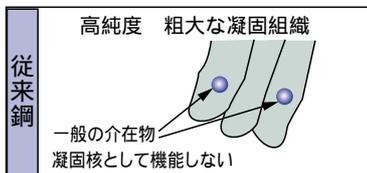


監修 新日鉄住金ステンレス(株)  
研究センター長  
平松 博之 (ひらまつ・ひろし)

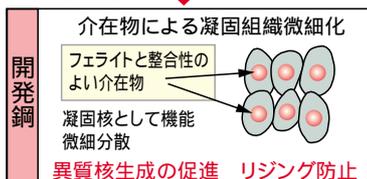
プロフィール  
1953年生まれ、東京都出身  
1977年 新日鉄入社  
主としてステンレス薄板の  
生産・開発等に  
2005年 現職

## リジングとその対処法

酸化物を活用した材料組織制御



### 脱酸制御



高加工性とリジング低減を両立した開発鋼の円筒深絞り後の外観

介在物(酸化物等)を活用した凝固組織微細化技術により、リジング低減を実現

## 高純フェライト系 ステンレス鋼の採用例

写真2



大阪ドーム

## スーパー ステンレス鋼の採用例

写真3

