

# 優れた高温強度と耐酸化性を兼ね備えたステンレス箔 「JFE20-5HS」

## Stainless Steel Foil with Excellent High-Temperature Strength and Oxidation Resistance “JFE20-5HS”

水谷 映斗 MIZUTANI Akito JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼・鉄粉研究部 主任研究員 (副課長)  
福田 國夫 FUKUDA Kunio JFE テクノリサーチ 機能材料ソリューション本部 環境耐久性・腐食解析センター 主査 (副部長)  
藤澤 光幸 FUJISAWA Mitsuyuki JFE スチール ステンレスセクター部 主任部員 (副部長)・博士 (工学)

### 要旨

従来鋼の 1.5 倍の高温強度と優れた耐酸化性を兼ね備えた高 Al 含有ステンレス箔「JFE20-5HS」を開発した。従来鋼の成分をベースとして高温強度を高めるためには、従来鋼の持つ優れた耐酸化性を低下させないこと、および安定した箔圧延が可能な熱延板靱性を確保することが課題となった。これらの課題を解決するため、まず高 Al 含有鋼の耐酸化性におよぼす固溶強化元素の影響を調査し、耐酸化性の低下がほとんど無い固溶強化元素として Mo を見出した。さらに、Mo 添加量と熱延板靱性の関係を明確化し、安定的に箔圧延できる範囲内で可能な限り高温強度を高める成分設計を実現した。本製品を自動車などのメタル担体に適用することで、触媒コンバーターの耐熱性向上や長寿命化が期待できる。

### Abstract:

Al-containing stainless steel foil “JFE20-5HS”, which has 1.5 times higher high-temperature strength than that of conventional steel and excellent oxidation resistance, has been developed. There were two problems in increasing the high-temperature strength of the conventional steel: 1) to prevent deterioration of oxidation resistance, and 2) to ensure sufficient toughness of hot-rolled sheet for stable cold rolling. In order to solve these problems, the effect of the solid solution strengthening element on the oxidation resistance of the high-Al steel was investigated, and Mo was found as the element with little deterioration of the oxidation resistance. Furthermore, by clarifying the relationship between the amount of Mo addition and the toughness of the hot rolled sheet, the optimum amount of Mo addition was determined. By applying this product to metal honeycomb of automobiles, it is expected to improve heat resistance property of catalytic converters.

## 1. はじめに

自動車には、排出ガスに含まれる有害成分を無害化するために触媒コンバーターが搭載されている。触媒コンバーターは、ステンレス鋼板製シェルの内部にハニカム構造の触媒担体が挿入された構造であり、触媒担体の材料にはセラミックスもしくはステンレス箔が用いられる。図 1<sup>1)</sup> および図 2 に、ステンレス箔製の触媒担体 (メタル担体) の外観およびその構造模式図を示す。メタル担体には、厚さ 30~100 μm 程度のステンレス箔が用いられており、波付加工を施した波箔と、加工を施していない平箔とを重ね合わせ、これらを巻き取ることでハニカム構造としている。表面に貴金属触媒を担持させた触媒担体の内部を排出ガスが流れることで、ガス中の有害成分が浄化される。一般に四輪

車の触媒担体はセラミックス担体が主流であり、メタル担体は高出力低圧損が要求される高性能車両で使用される。一方、二輪車の触媒コンバーターは、構造上四輪車の触媒コンバーターに比べて衝撃や振動を受けやすいため、セラミック担体より耐衝撃性に優れたメタル担体が主に用いられる<sup>2-5)</sup>。

触媒コンバーターの内部は、排出ガス自体の温度に加え、触媒と排出ガスの反応による発熱も生じるため、1000℃を超える高温となる場合がある。従って、メタル担体に用いられるステンレス箔には、極めて優れた耐酸化性が要求される。加えて、エンジン出力の変動に伴う急激な温度変化が生じるため、繰り返しの加熱冷却を受けた際に、ステンレス箔の形状が大きく変化しないことおよび表面酸化皮膜が剥離しないことも必要である。これらの厳しい要求を満たすため、メタル担体には、ステンレス鋼に Al を 3% 以上含有させた SUH21 (18Cr-3Al 鋼) や、20Cr-5Al 鋼に代表される高

2021 年 3 月 22 日受付



図1 メタル担体の外観

Fig. 1 Appearance of the metal honeycomb

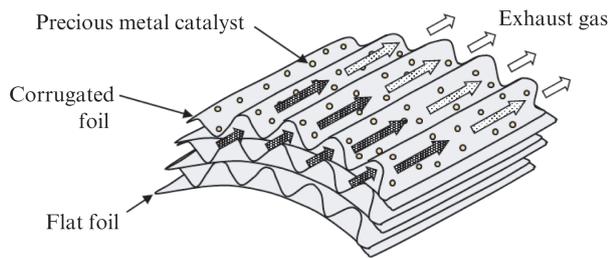


図2 メタル担体の構造模式図

Fig. 2 Schematic of metal honeycomb system

Al含有フェライト系ステンレス鋼が用いられている<sup>5)</sup>。通常のステンレス鋼を高温で酸化させると、表面に $\text{Cr}_2\text{O}_3$ を主体とするCr酸化皮膜が生成するが、触媒コンバーター内部のような過酷な高温環境では、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 皮膜の耐酸化性は十分でない<sup>6)</sup>。一方、ステンレス鋼にAlを3%以上含有させると、Alが優先的に酸化され、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ を主体とする緻密なAl酸化皮膜が生成するようになる<sup>7)</sup>。この $\text{Al}_2\text{O}_3$ 皮膜は、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 皮膜と比べて高温での安定性に優れており、成長速度も遅いため、ステンレス鋼の表面に生成すると極めて優れた保護性を発揮する<sup>8)</sup>。JFEスチールでは、メタル担体用材料として、LaおよびZrを添加することで耐酸化性を飛躍的に高めたAl含有ステンレス箔JFE20-5USR (20Cr-5Al-0.1La-0.03Zr鋼)およびJFE18-3USR (18Cr-3Al-0.1La-0.03Zr鋼)を製造販売しており、これまでに多くの使用実績がある<sup>9-10)</sup>。

近年、環境規制の厳格化に伴って自動車の燃費向上が求められていることから、排出ガスの高温化が進んでいる。排出ガスが高温化するとメタル担体に用いられるステンレス箔の強度が低下するため、走行中の振動や熱応力によって箔材の変形や破断が生じる懸念が高まる。JFE20-5USRおよびJFE18-3USRは極めて優れた耐酸化性を有しているものの、今後増加が見込まれる一部の高温環境では、高温強度が不足する可能性がある。このため、メタル担体に用いられる高Al含有フェライト系ステンレス箔の高温強度向上が求められていた。当社は、JFE20-5USR (従来鋼)の1.5倍の高温強度と、従来鋼と同等の耐酸化性を有する高Al含有フェライト系ステンレス箔「JFE20-5HS」の開発に成功した。本報では、JFE20-5HSの成分設計指針およびその材料特性

について述べる。

## 2. JFE20-5HSの成分設計

本開発では、JFE20-5USR (従来鋼)の成分をベースに、高温強度を高める成分設計を行った。従来鋼の持つ優れた耐酸化性を損なわずに、また安定的に箔材の製造が可能な範囲で、できる限り高温強度を高めることを開発目標とした。

はじめに、従来鋼の化学成分について説明する。メタル担体に用いられるステンレス箔には、優れた耐酸化性を付与するために、3%を超えるAlが添加されている。ここで優れた耐酸化性とは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 皮膜の成長が遅く鋼中のAlが枯渇するまでの寿命が長いこと、繰り返しの加熱冷却によって膨張収縮が生じても箔が変形しないこと、および膨張収縮が生じても $\text{Al}_2\text{O}_3$ 皮膜が剥離しないことを指す。一般に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 皮膜は $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 皮膜に比べて高温での安定性が高いものの、下地合金との密着性に乏しく剥離しやすいという問題がある<sup>11)</sup>。そこで、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 皮膜の耐剥離性向上のため、Y, Zr, La, HfまたはTiなどの酸素活性元素(Reactive Elements: REs)が添加された高Al含有フェライト系ステンレス鋼が、メタル担体用材料として適用されている<sup>12)</sup>。当社では、REsのなかでもLaおよびZrを複合添加することで耐酸化性を飛躍的に高めたAl含有ステンレス箔JFE20-5USR (20Cr-5Al-0.1La-0.03Zr鋼)を製造販売している<sup>13)</sup>。

次に、従来鋼の高温強度を向上させる方法について述べる。鋼の強化機構である固溶強化、転位強化、粒子分散強化、結晶粒微細化強化<sup>14)</sup>のうち、固溶強化が1000°Cを超える温度域でも有効であると考えられる。ステンレス鋼の高温強度を上昇させることができる固溶強化元素として、例えばMo, W, Nb, Taが挙げられる。一方、高Al含有フェライト系ステンレス鋼の耐酸化性に対して、これらの固溶強化元素がどのような影響を及ぼすかについては不明な点が多かった。また、これらの固溶強化元素の添加は、鋼の靱性を低下させる恐れがある。そもそも、高Al含有フェライト系ステンレス鋼は一般的なフェライト系ステンレス鋼に比べて靱性が大幅に劣るため<sup>15)</sup>、固溶強化元素の添加によってさらに靱性が低下した場合、ステンレス箔の製造自体が困難となる可能性がある。このように、従来鋼の高温強度向上にあたっては、耐酸化性および製造性も考慮した緻密な成分設計が求められる。

そこで、本開発では、初めに20Cr-5Al鋼の高温強度および高温酸化挙動におよぼす固溶強化元素の影響を調査した。その結果、本開発に好適な固溶強化元素としてMoを見出した。次に、20Cr-5Al鋼の熱延板靱性におよぼすMo添加の影響を調査し、安定的な箔材の製造が可能な範囲で高温強度を高めることができる最適なMo添加量を決定した。ここでは、これら検討の過程で得られた結果を示す。

表 1 高温強度および耐酸化性評価に用いた供試材の成分

Table 1 Chemical composition of test materials for evaluation of high temperature strength and oxidation resistance

(mass%)

Steel	C	Si	Mn	Al	Cr	Mo	Nb	Ta	W	La	Zr	Remarks
Base	0.005	0.17	0.15	5.3	19.9	—	—	—	—	0.12	0.03	Conventional steel
3Mo	0.005	0.15	0.15	5.3	20.1	3.1	—	—	—	0.14	0.03	
5Mo	0.005	0.18	0.16	5.8	20.3	4.9	—	—	—	0.10	0.03	
0.2Nb	0.008	0.16	0.13	5.5	20.0	—	0.2	—	—	0.05	0.03	
0.3Nb	0.009	0.16	0.13	5.4	19.9	—	0.35	—	—	0.03	0.02	
0.5Nb	0.009	0.16	0.14	5.5	19.8	—	0.5	—	—	0.06	0.03	
2Ta	0.007	0.14	0.15	5.7	20.0	—	—	2.1	—	0.10	0.03	
3Ta	0.008	0.13	0.15	5.6	20.0	—	—	3.3	—	0.08	0.03	
5Ta	0.008	0.11	0.15	5.7	20.0	—	—	5.5	—	0.13	0.03	
2W	0.006	0.16	0.15	5.6	20.2	—	—	—	2.1	0.07	0.03	
5W	0.006	0.14	0.15	5.7	20.2	—	—	—	5.2	0.06	0.03	

## 2.1 高温強度および耐酸化性に及ぼす 固溶強化元素の影響

### 2.1.1 実験方法

表 1 に示す成分の鋼塊を真空溶解によって溶製し、熱間圧延および冷間圧延により厚さ 1 mm の冷延板とした。次に、この冷延板に対して 1 000℃で 1 分間保持する熱処理を行い冷延焼鈍板を作製した。さらに、この冷延焼鈍板を冷間圧延し、厚さ 50 μm の箔材を得た。これらの冷延焼鈍板および箔材を用いて、高温強度および耐酸化性を評価した。

高温強度は、冷延焼鈍版の高温引張試験によって評価した。今回は、900℃における引張強さ (TS) を高温強度の指標とした。板厚 1 mm、平行部幅 10 mm、評点間距離 50 mm の引張試験片を用いて、JIS G 0567 に規定される方法に準拠し 900℃で高温引張試験を行った。クロスヘッドスピードは 5 mm/min とした。

耐酸化性は、メタル担体を模擬した小型の試験片を作製し、これを高温に保持した際の酸化増量および形状変化量を測定することで評価した。図 3 および図 4 に、耐酸化性評価用試験片の作製方法および形状変化量の測定方法をそれぞれ示す。まず、厚さ 50 μm の箔材から幅 75 mm 長さ 300 mm の試験片を 2 枚採取し、このうち 1 枚に対して 2 つのギヤの間を通過させる波付加工を行った。波付け加工した箔と未加工の箔とを重ね合わせて巻き取った後に端部を溶接し、さらにろう付け工程を模擬するために 1 150℃真空中で 30 分間保持する熱処理を行い、酸化試験評価用試験片を作製した。酸化試験は 1 100℃大気中で行い、5~50 時間保持ごとに炉から取り出して酸化増量および形状変化量を測定した。

### 2.1.2 実験結果・考察

20Cr-5Al 鋼の高温強度に及ぼす添加元素の影響を図 5 に示す。今回調査対象としたいずれの元素を添加した場合も、20Cr-5Al 鋼の高温強度が上昇した。添加量あたり的高温強度上昇量を比較すると、Nb が最も高く 0.35% の添加で 74% の上昇が得られた。Nb に次いで Mo 添加による上昇量が高

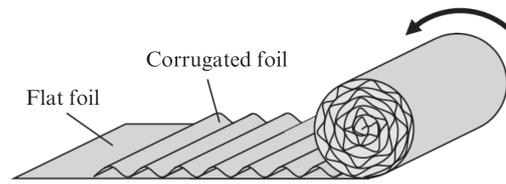


図 3 耐酸化性評価用試験片の作製方法

Fig. 3 Preparation method of test piece for oxidation test

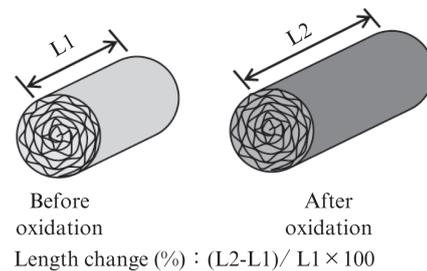


図 4 酸化試験後の形状変化量測定方法

Fig. 4 Evaluation method of length change after oxidation test

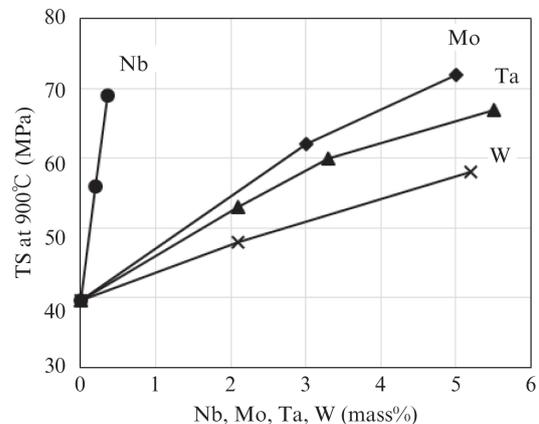


図 5 20Cr-5Al 鋼の高温強度に及ぼす添加元素の影響

Fig. 5 Effect of additive elements on high-temperature strength of 20Cr-5Al Steel

く、Ta、Wの順で上昇量が低下した。Mo、Ta、Wは5%程度の添加で、それぞれ82%、69%、48%の強度上昇が得られた。

次に、これらの元素を添加した鋼の耐酸化性を評価した。図6に、20Cr-5Al鋼の大気中1100℃400時間保持後の酸化増量および形状変化量におよぼす添加元素の影響を示す。いずれの鋼においても、酸化試験中にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>皮膜の剥離は発生しなかった。酸化増量を比較すると、いずれの固溶強化元素を添加した場合でも、未添加のベース鋼より酸化増量が増加することがわかる。増加の程度は元素によって異なり、MoおよびWを添加した鋼はベース鋼と酸化増量の差異が小さかったのに対し、NbおよびTaを添加した鋼では酸化増量がベース鋼より顕著に多かった。特に、Nb添加の影響が大きく、0.5Nb鋼では1100℃400時間保持後に異常酸化が発生した。以上の結果から、Mo、Nb、Ta、Wいずれの添加も酸化増量を増加させるが、MoおよびWは比較的増加の程度が軽微であることが明らかとなった。続いて、酸化

試験後の形状変化量を比較した。形状変化量に及ぼす固溶強化元素の影響も、元素の種類により大きく異なった。NbおよびTaを添加した鋼では、酸化試験中に極めて大きく変形したのに対し、MoおよびWを添加した鋼では変形が軽微であった。表面に生成した酸化皮膜を分析したところ、MoおよびWを添加した鋼の表面には緻密なAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を主とする酸化皮膜のみが生成していたのに対し、NbおよびTaを添加した鋼の表面には、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>に加えてそれぞれFeNbO<sub>4</sub>およびFeTaO<sub>4</sub>といった複合酸化物が生成していた。これらの複合酸化物はポーラスで生成時の体積変化が大きいため、酸化皮膜の成長に伴って大きな応力が発生して変形したものと考えられる。また、これらの酸化物の生成が、NbおよびTa添加鋼における酸化速度の上昇につながった可能性も指摘できる。

メタル担体において異常酸化や形状変化が生じると、表面に担持させた触媒の剥離や担体の目詰まりを発生させる恐れがある。従って、酸化速度および形状変化の著しい増加を招くNbおよびTaは、メタル担体用材料に添加する固溶強化元素として不適と判断した。耐酸化性の顕著な低下を招かないMoおよびWの高温強度上昇量を比較すると、Moの添加量あたりの高温強度上昇量がWより大きかった。以上の調査結果に基づき、本開発では固溶強化元素としてMoを採用することとした。

## 2.2 熱延板韌性に及ぼすMoの影響

### 2.2.1 実験方法

20Cr-5Al鋼にMoを添加すると、高温強度が上昇する一方で熱延板韌性が低下する。安定した箔圧延を行うためには、熱延板韌性も考慮してMo添加量を決定する必要がある。そこで、20Cr-5Al鋼の熱延板韌性におよぼすMo添加量の影響を調査した。今回はシャルピー衝撃試験により熱延板韌性を評価した。表1に示す鋼のうち、Mo含有量を0~5%の間で変化させた鋼(Base, 3Mo, 5Mo)の鋼塊を熱間圧延により板厚30mmのシートバーに加工した。このシートバーを1200℃に再加熱した後、熱間圧延して板厚3mmの熱延鋼板を得た。この熱延板から3mm厚の2mmVノッチシャルピー衝撃試験片(板厚以外はJIS4号試験片に準拠)を採取し、シャルピー衝撃試験(試験機容量:490.3J)に供した。試験片の採取方向は、試験片の長手方向と圧延方向が一致するようにし、圧延方向と垂直に亀裂が進行するよう切欠きを入れた。試験は1温度につき3本ずつ行い、吸収エネルギーおよび脆性破面率を測定して遷移曲線を求めた。脆性-延性遷移温度(DBTT)は、脆性破面率が50%となる温度とした。

### 2.2.2 実験結果・考察

Mo含有量を変化させた20Cr-5Al鋼熱延板のシャルピー衝撃試験結果を図7に示す。Mo含有量の増加に伴い、シャルピー衝撃値および脆性破面率の遷移曲線が高温側にシフ

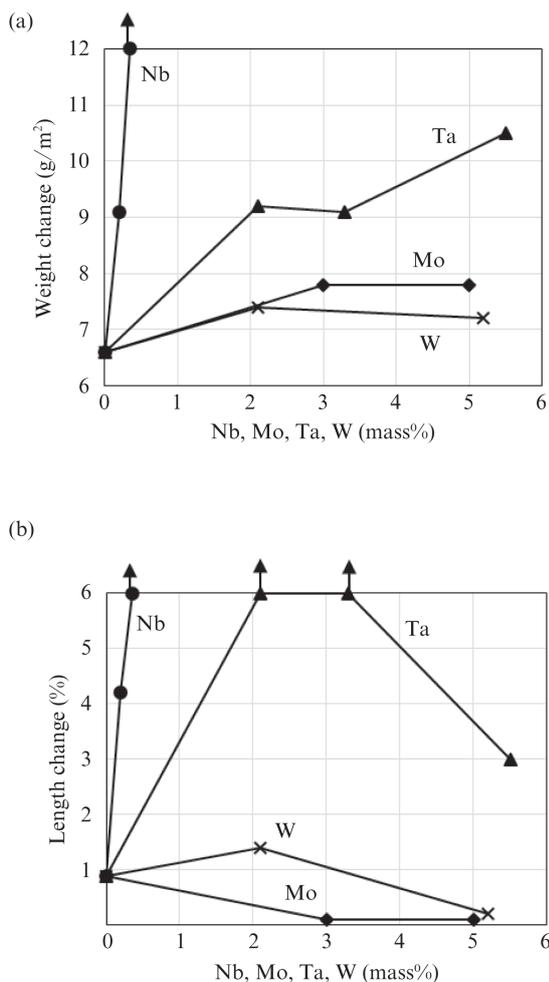


図6 20Cr-5Al鋼の大気中1100℃400h保持後の(a)酸化増量および(b)形状変化量におよぼす添加元素の影響

Fig. 6 Effect of additive elements on (a) weight change and (b) length change of 20Cr-5Al steel after 400 h oxidation at 1100°C

表2 JFE20-5USR および JFE20-5HS の成分  
Table 2 Chemical composition of JFE20-5USR and JFE20-5HS

Steel	C	Si	Mn	Al	Cr	Mo	La	Zr	Remarks
JFE20-5USR	0.06	0.15	0.15	5.5	20	—	0.1	0.03	Conventional steel
JFE20-5HS	0.06	0.15	0.15	5.5	20	3	0.1	0.03	Developed steel

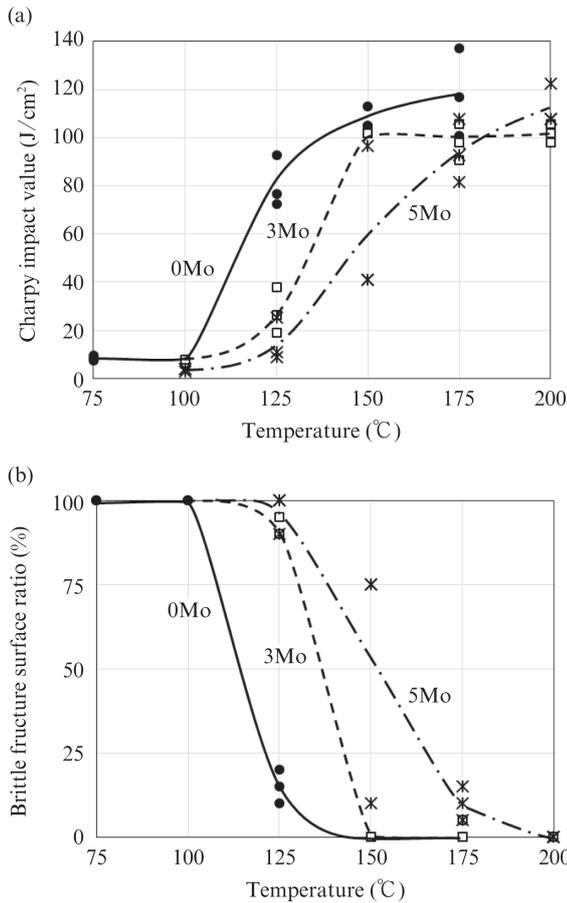


図7 20Cr-5Al-(0~5) Mo 鋼のシャルピー衝撃試験結果  
(a) シャルピー衝撃値 (b) 脆性破面率

Fig. 7 Charpy impact test results of 20Cr-5Al-(0~5) Mo steel  
(a) Charpy impact value (b) Brittle fracture surface ratio

トした。一方、Mo 含有量を変化させても上部棚エネルギーはほとんど変化しなかった。図8に、図7(b)から読み取ったDBTTとMo含有量の関係を示す。Mo含有量の増加に伴ってDBTTが上昇したことがわかる。

次に、安定した箔圧延が可能な熱延板靱性を確保する観点から、最適なMo添加量を検討した。別途、熱延板のDBTTと冷間圧延時の破断発生確率との関係を調査したところ、DBTTが140℃以下であれば破断発生率が大幅に低下し、安定的に冷間圧延できることがわかった。一方、図8に示した結果から、Mo含有量が3%以下であればDBTTが140℃を下回ることがわかる。以上の検討結果に基づき、開発鋼のMo含有量を3%に決定した。

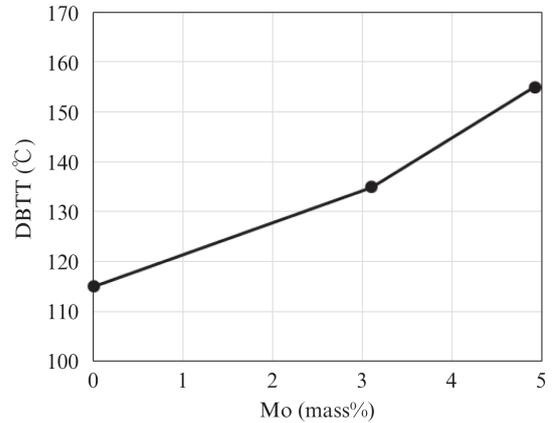


図8 20Cr-5Al 鋼熱延板の脆性-延性遷移温度に及ぼす Mo 含有量の影響

Fig. 8 Effect of Mo on ductile-brittle transition temperature of hot rolled 20Cr-5Al steel

### 3. JFE20-5HS の特性

ここまでに述べた成分設計指針に基づき、開発鋼の成分を決定した。表2に、従来鋼および開発鋼の化学成分を示す。開発鋼は、従来鋼に対してMoを3%添加することで高温強度を高めた材料である。ここでは、開発鋼の高温強度および高温酸化特性を、従来鋼との比較によって示す。

#### 3.1 高温強度

東日本製鉄所で製造された従来鋼および開発鋼の熱延板を採取し、実験室の冷間圧延機で厚さ1mmの冷延板とした。この冷延板に対し1000℃で1分間保持した後に空冷する熱処理を行った材料を用いて、2.1.1と同様の条件で高温引張試験を行って高温強度を調査した。結果を図9に示す。従来鋼の900℃におけるTSが35MPaであったのに対し、開発鋼のTSは52MPaであり、おおよそ1.5倍高温強度が上昇していることがわかる。

#### 3.2 高温酸化特性

東日本製鉄所で製造された従来鋼および開発鋼の40μm厚の箔材を採取し、2.1.1と同様の条件で酸化試験を行った。今回は、圧延まま材(HARD材)および光輝焼鈍材(BA材)の2種類の最終仕上げの箔材について調査した。これら2種類の最終仕上げは、加工の程度や適用部材によって使い分けられるものである。HARD材およびBA材の酸化試験

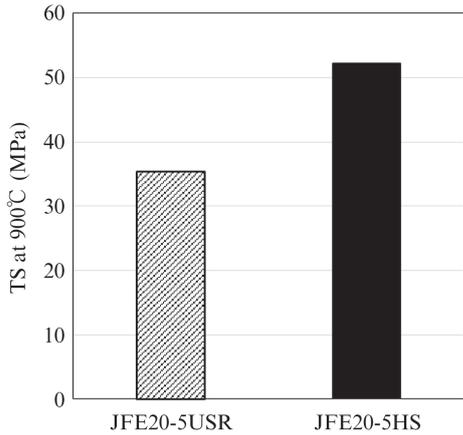


図9 従来鋼および開発鋼の高温強度

Fig. 9 High-temperature strength of conventional steel and developed steel

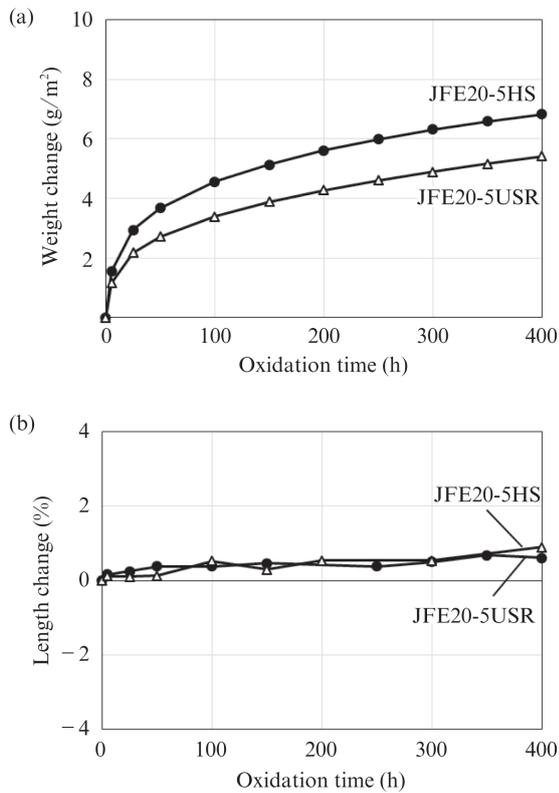


図10 従来鋼および開発鋼の1100°C大気中における高温酸化挙動 [40μm厚, HARD仕上] (a) 酸化増量 (b) 形状変化

Fig. 10 Oxidation behavior of conventional steel and developed steel at 1100°C (40 μm thickness, HARD) (a) Weight change (b) Length change

結果を、それぞれ図10および図11に示す。いずれの材料においても、酸化試験後に異常酸化やAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>皮膜の剥離が発生せず、健全な外観が保たれていた。開発鋼の酸化増量が従来鋼より若干多かったものの、その差異はわずかであり、開発鋼は従来鋼とほとんど同等の酸化寿命を有すると判断

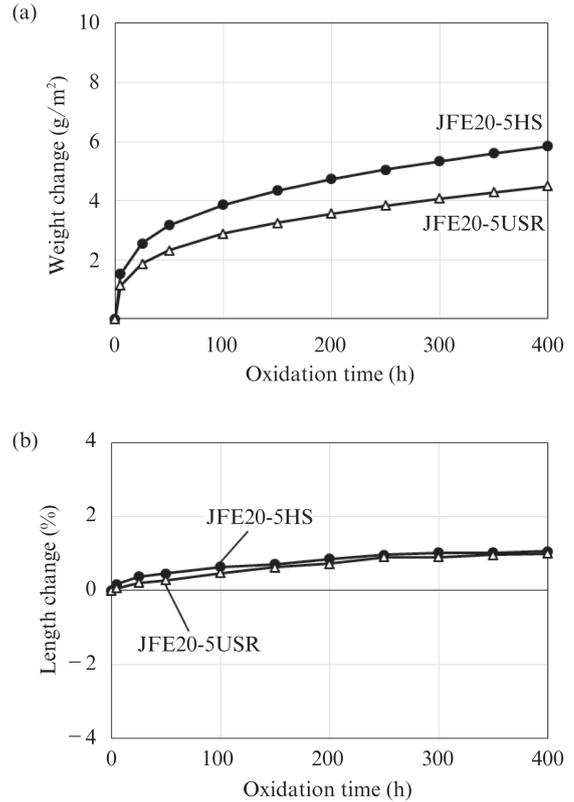


図11 従来鋼および開発鋼の1100°C大気中における高温酸化挙動 [40μm厚, BA仕上] (a) 酸化増量 (b) 形状変化

Fig. 11 Oxidation behavior of conventional steel and developed steel at 1100°C (40 μm thickness, BA) (a) Weight change (b) Length change

できる。さらに、開発鋼の酸化試験後の形状変化量は±1%未満と非常に小さく、従来鋼とほとんど同等であった。以上の結果から、開発鋼は従来鋼と同等の極めて優れた耐酸化性を有することがわかる。

なお、HARD材とBA材の酸化増量を比較すると、従来鋼および開発鋼ともに、BA材の酸化増量がわずかに低かった。光輝焼鈍によって生成した表面皮膜がその後の大気中酸化で生成する酸化皮膜の特性を変化させたため、酸化皮膜の成長速度が低下したものと考えられる<sup>16)</sup>。

#### 4. おわりに

優れた高温強度と耐酸化性を兼ね備えた高Al含有フェライト系ステンレス箔「JFE20-5HS」の成分設計指針および材料特性について述べた。要旨は以下の通りである。

- 20Cr-5Al鋼の持つ優れた耐酸化性を維持しつつ、効果的に高温強度を高めることができる固溶強化元素としてMoを見出した。
- 安定的な箔圧延が可能で熱延板靱性を確保するため、Moの添加量を3%とした。
- JFE20-5HSの900°Cにおける引張強さは従来鋼である

JFE20-5USR の 1.5 倍であり、優れた高温強度を有している。

- JFE20-5HS は従来鋼と同等の優れた耐酸化性を有しており、40 $\mu$ m 厚の箔材を 1 100 $^{\circ}$ C 大気中で 400 時間保持した後も異常酸化が発生しない。また、高温での形状安定性に優れており、高温酸化時の形状変化量が極めて小さい。

本製品は従来鋼より高温域における強度が高いため、排ガス温度が従来より高い車両に対して適用が可能である。また、本製品の適用によりメタル担体の耐熱性向上や長寿命化が期待できる。当社は、本製品の適用拡大により、さらなる自動車の燃費向上および地球環境問題の解決に寄与していく所存である。

#### 参考文献

- 1) JFE スチール (株). “自動車用ステンレス鋼”. <https://www.jfe-steel.co.jp/products/stainless/car.php> (参照 2021-01-29)
- 2) Nonnenmann, M. Metal Supports for Exhaust Gas Catalysts. SAE Transactions. 1985, vol. 94, section 1, p. 814–821.
- 3) Pelters, S.; Kaiser, F. W.; Maus, W. The Development and Application of a Metal Supported Catalyst for Porsche’s 911 Carrera 4. SAE Transactions. 1989, vol. 98, section 4, p. 254–268.
- 4) 三田裕弘. メタル担体について. 電気製鋼. 1990, vol. 61, no. 2, p. 124–135.
- 5) 福田國夫, 石井和秀. 触媒担持用耐熱ステンレス鋼の開発動向. ふえらむ. 2007, vol. 12, no. 9, p. 23–28.
- 6) 富士川尚男. フェライトステンレス鋼の高温酸化. 鉄と鋼. 1984, vol. 70, no. 11, p. 41–50.
- 7) Weisenburger, A.; Jianu, A.; Doyle, S.; Bruns, A.; Fetzer, R.; Heinzl, A.; DelGiaccio, A.; An, W.; Müller, G. Oxide Scales Formed on Fe-Cr-Al based Model Alloys Exposed to Oxygen Containing Molten Lead. Journal of Nuclear Materials. 2013, vol. 437, p. 282–292.
- 8) 斎藤安俊, 阿竹徹, 丸山敏夫. 金属の高温酸化. 内田老鶴圃, 1986, 123p.
- 9) 清水寛, 河野雅昭, 吉岡啓一. 高耐酸化性 20% Cr-5% Al-La-Zr 鋼「R20-5USR」の開発. 川崎製鉄技報. 1993, vol. 25, no. 2, p. 119–123.
- 10) 太田裕樹, 清水寛, 河野雅昭, 福田國夫, 石井和秀. ディーゼル車触媒担体用高耐酸化性ステンレス鋼箔「JFE18-3USR」の開発. 2013, まてりあ. vol. 52, no. 01, p. 29–31.
- 11) 磯部晋. 高 Al フェライト系耐熱鋼フォイルの高温酸化. 電気製鋼. 1987, vol. 58, p. 104–113.
- 12) 斎藤安俊. 耐熱合金の高温酸化における希土類元素の役割. 鉄と鋼. 2004, vol. 65, no. 7, p. 747–771.
- 13) 石井和秀, 河野雅昭, 佐藤進. 20% Cr-5% Al ステンレス鋼箔の耐酸化性におよぼす La および Zr 添加の影響. 川崎製鉄技報. 1998, vol. 30, no. 2, p. 104–108.
- 14) 例えば, 高木節雄. 鉄の強化機構と限界強度. まてりあ. 1997, Vol. 36, no. 7, p. 675–679.
- 15) 河野雅昭, 清水寛, 吉岡啓一. 高温酸化特性および熱延板靱性に優れた La, Zr 添加 Fe-Cr-Al 合金の開発. 材料とプロセス. 1992, vol. 5, p. 1937.
- 16) 河野雅昭, 石井和秀, 白井幸夫, 佐藤進. 水素焼鈍した Fe-20Cr-5Al 合金の高温酸化挙動. 日本金属学会誌. 1997, vol. 61, no. 8, p. 715–720.



水谷 映斗



福田 國夫



藤澤 光幸