

# 建築構造用 11%Cr ステンレス鋼 JFE410DH の耐久性

## The Durability of 11% Cr Stainless Steel “JFE410DH” for Building Structure

岡田 修二 OKADA Shuji JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(副課長)  
石井 和秀 ISHII Kazuhide JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(副部長)・工博  
宇城 工 UJIRO Takumi JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部長・工博

### 要旨

建築構造用 11% Cr ステンレス鋼 JFE410DH について、鉄骨造住宅の構造材への適用を目的に、暴露試験、および促進試験により耐久性の評価を行った。腐食形態が局部腐食(孔食)であるため、最大孔食深さが鋼材厚さの 10% となった状態を限界状態とする基準を採用した。調査の結果、JFE410DH は十分な耐久性を有するため、めっきや塗装などの表面処理を施すことなしに、住宅環境での推定耐久寿命は 100 年以上と算出された。切断端面・溶接部の補修処理や使用中の再補修は不要である。この結果を基に、長寿命 100 年住宅の構造躯体などに適合すると国土交通大臣認定を取得した。今後、長寿命住宅用途への適用が期待される。

### Abstract:

The durability of 11% Cr stainless steel “JFE410DH” has been investigated by exposure tests and accelerated tests for structural materials of steel structural houses. As the type of corrosion about stainless steel is localized corrosion (pitting), the end of lifetime is defined as the point when the maximum pit depth reaches 10% of the thickness. Because the base steel has good anti-corrosion property, the lifetime of JFE410DH (2.3 mm $t$ ) is estimated at more than 100 years without coating or painting in the indoor environment. The cut edge or the weld is free from repair and maintenance. JFE410DH is approved as structural materials for long life dwelling houses by the Minister of Land, Infrastructure and Transport, therefore JFE410DH is expected to be used for long life dwelling houses.

### 1. はじめに

1993 年以前は、ステンレス鋼は建築基準法で認定されていなかったため、建築用材料としての用途は内外装、パネル、屋根材が主であり、構造材として用いられた例は少なかった。1994 年 9 月 30 日付で「ステンレス建築構造物」が建築基準法第 38 条の基準に基づく一般認定を取得、その後、2000 年 6 月に建築基準法・同施行令が改正され、ステンレス鋼が構造材料として施行令に導入された<sup>1)</sup>。JIS G 4321 (2000)「建築構造用ステンレス鋼材」では、オーステナイト系の 4 鋼種 (SUS304A, SUS304N2A, SUS 316A, SCS13AA-CF) が規定されている。

JFE スチールは、Cr 系ステンレス鋼の構造用材料開発に取り組んでおり、JFE410DH (旧称 R410DH, 11%Cr 鋼)<sup>2)</sup> について、2002 年 1 月に建築基準法第 37 条認定 (構造材認定) を取得している。機械的性質を一般的な建築構造用

圧延鋼材 SN400 系と同程度にしており、鉄骨造建築物に従来使用されている一般的な鋼材と同様の構造設計が可能である。

2000 年に、住宅の品質確保の促進、および住宅購入者などの利益の保護を目的に、「住宅の品質確保の促進等に関する法律 (品確法)」が施行され、「住宅性能表示制度」が創設された。住宅性能表示制度・日本住宅性能表示基準<sup>3)</sup> では、材料の劣化を軽減するための対策についての評価「劣化対策等級 (構造躯体)」がある。最高ランクの等級 3 は、長寿命 100 年住宅への適合を意味し、住宅が限界状態に至るまでの期間が 3 世代 (75~90 年) である。従来、鉄骨造住宅の等級 3 の基準では、鋼材の厚さごとに、必要な基準の塗装仕様、およびめっき処理を組み合わせた防錆措置が必要であった。溶接部、および切断端面に対しては、補修処理が必要である。

著者らは、JFE410DH を長寿命 100 年住宅の構造材料として用いれば、素材自体が十分な耐食性を有するので、塗装などの防錆措置を省略できると考えた。本論文では、JFE410DH の耐久性について、暴露試験、および促進試験

2008 年 1 月 15 日受付

により調査し、さらに住宅環境における耐久寿命予測を行い、100年住宅の構造材料としての適性判断を行った結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 暴露試験

#### 2.1.1 供試材

JFE410DH, および比較鋼 SUH409L を供試材とした。化学成分を表 1 に示す。試験片の形状、寸法、試験期間、個数は以下のとおりである。

- (1) 平板, 50 mm × 150 mm, 3 年および 4 年, 1 試験片
- (2) 平板, 50 mm × 100 mm, 1 年, 1 試験片

#### 2.1.2 暴露条件

環境の異なる以下の 2 ヶ所で暴露試験を行った。

暴露場 A: 千葉県千葉市中央区川崎町 (離岸距離 1 km),

飛来海塩粒子量  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$

暴露場 B: 千葉県千葉市中央区新浜町 (離岸距離 10 m),

飛来海塩粒子量  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$

試験期間 3 年および 4 年のものは 2000 年 5 月, 1 年のものは 2001 年 10 月から, 南向きに水平面から  $30^\circ$  傾けて暴露を開始した。

#### 2.1.3 評価項目

暴露後, 試験片を  $70^\circ\text{C}$  の 10~20% クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬, 水洗 (ブラッシング) を行って腐食生成物を除去した後, 最大孔食深さ (最大侵食深さ) の測定を行った。試験期間 4 年の試験片については, 図 1 に示すように, 試験片の中央部を  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ cm}^2$ ) の区画で 30 個,  $20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  ( $5 \text{ cm}^2$ ) の区画で 10 個の 2 通りで区切り, 各区画ごとに最大孔食深さをレーザー顕微鏡 (レーザーテック (株) 製, 共焦点走査型レーザー顕微鏡 1LM21W) により測定した。各区画の最大孔食深さを Gumbel 分布<sup>4)</sup> で整理し, 1 区画が  $1 \text{ cm}^2$  の場合には再帰期間を 150, 1 区画が  $5 \text{ cm}^2$  の場合には再帰期間を 30 とし  $150 \text{ cm}^2$  の試験片に発生する可能性のある最大孔食深さを推定し, この値を最大孔食深さとした。計算には, (社) 腐食防食協会監修の極値統計解析ソフト (EVAN-II) を用いた。試験期間 3 年の試験片については,  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  の区画を 15~18 個区切り, 同様の測定, 整理を行い,  $150 \text{ cm}^2$  の試験片に発生する可能性のある最大孔食深さを求めた。試験期間 1 年の試験片については, 試験片の中央

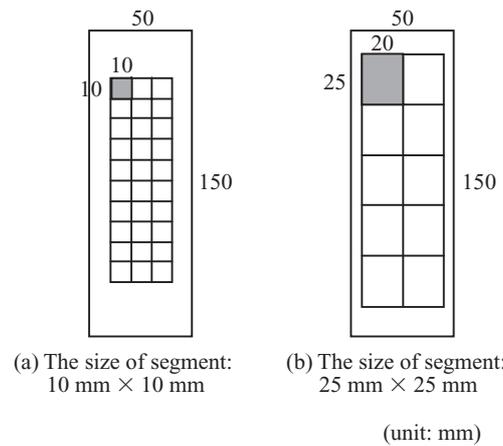


図 1 孔食深さ測定のための試験片の区画割り (単位区画: (a)  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , (b)  $20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ )

Fig. 1 Schematic diagrams of specimens and segmentations for measuring pit depth

部を  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  の区画で 28 個に区切り, 同様の測定, データ整理を行い,  $150 \text{ cm}^2$  の試験片に発生する可能性のある最大孔食深さを求めた。

## 2.2 切断端面の耐初期錆性評価

### 2.2.1 供試材

供試材として, 板厚  $2.3 \text{ mm}$  の JFE410DH, および溶融亜鉛めっき鋼板 (Z27), 炭素鋼板 (SS400) を用いた。下方にバリが形成するように, 試験片を  $60 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  に剪断した。

### 2.2.2 暴露条件

暴露場 C (千葉県千葉市中央区川崎町, 離岸距離 1 km) の屋外と屋内 (住宅環境を模擬) において暴露試験を行った。飛来海塩粒子量は, 屋外で  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ , 屋内で  $0.003 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  であった。

### 2.2.3 評価項目

表面, および切断端面の発錆について目視評価を行った。

## 2.3 溶接部の耐久性評価

### 2.3.1 供試材

半自動マグ溶接により, サイズ  $60 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  の突合せ溶接継手を 2 片作製した。ワイヤには Y309L ( $0.03 \text{ mass}\% \text{C} - 23 \text{ mass}\% \text{Cr} - 14 \text{ mass}\% \text{Ni}$ ), シールドガスには  $\text{CO}_2$  を用いた。1 片は溶接まま, 1 片は溶接部に付着したスパッタおよびテンパーカラーをワイヤブラシにて除去した後, 促進試験に供した。

### 2.3.2 促進試験条件

(1) 噴霧 (人工海水,  $35^\circ\text{C}$ , 4 h), (2) 乾燥 ( $60^\circ\text{C}$ , 2 h), (3) 湿潤 ( $50^\circ\text{C}$ , 95%RH (相対湿度), 2 h) を 1 サイクルとした複合サイクル腐食試験を 20 サイクル行った。試験槽内での試験片保持は, 溶接ビードが垂直になるようにして, さらに試験片全体が鉛直に対し  $20^\circ$  となるように

表 1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical compositions of the specimens

Type	(mass%)					
	C	Si	Mn	Cr	N	Others
JFE410DH	0.01	0.2	1.5	10.9	0.01	Cu: 0.3
SUH409L	0.01	0.2	0.3	10.9	0.01	Ti: 0.2

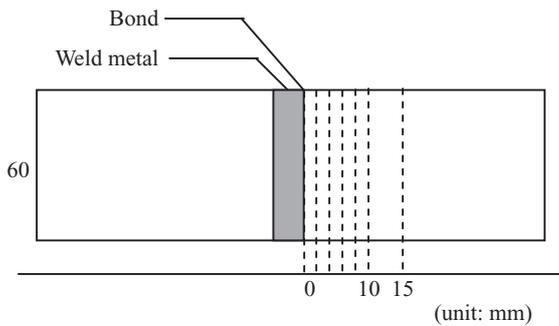


図2 孔食深さ測定のための溶接試験片の区画割り  
Fig.2 Schematic diagrams of welded specimens and unit segmentations for measuring pit depth

設置した。

### 2.3.3 評価項目

促進試験後、腐食生成物を除去した試験片について、図2に示すように区画を区切り、区画ごとに、最大孔食深さの測定を行った。

## 3. 結果

### 3.1 母材の耐久性

JFE410DH についての暴露3年後の断面を写真1に示す。孔食が認められ、腐食形態は局部腐食であることが分かる。暴露後の最大孔食深さを表2に示す。JFE410DH の暴露

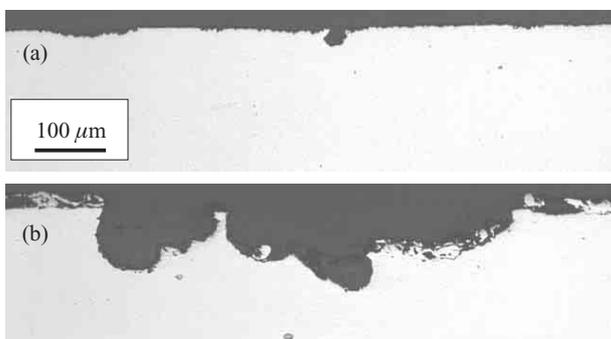


写真1 JFE410DH の断面 暴露3年後 ((a) 暴露場 A, (b) 暴露場 B)

Photo 1 Cross section of JFE410DH after exposure for 3 years at (a) location A, (b) location B

表2 各暴露期間での最大孔食深さ

Table 2 Maximum pit depth after the exposure test

Location	Specimen	Test duration (year)			
		1*	3*	4*	4**
A	JFE410DH	44.2	52.5	53.6	45.0
	SUH409L	—	55.9	72.9	71.8
B	JFE410DH	150.6	175.5	220.9	224.7
	SUH409L	—	165.7	163.8	162.6

\*Size of segment: 10 mm × 10 mm

\*\*Size of segment: 20 mm × 25 mm

4年での最大孔食深さは、暴露場 A で 53.6 μm、暴露場 B で 220.9 μm であった。同じ 11%Cr 鋼である SUH409L の最大孔食深さは、JFE410DH と同程度であった。JFE410DH について、最大孔食深さ  $D$  (μm) と試験期間  $t$  (年) との関係は  $D = A \cdot t^n$  (ここで、 $A$  は定数、 $n = 0.6$ ) で近似し、図3に示す(詳細は、4章で述べる)。

### 3.2 切断端面の耐初期錆性

暴露後の切断端面の外観写真を写真2に示す。屋外暴露1週間では、JFE410DH には表面、切断端面とも発錆はほとんど認められなかった。Z27 には切断端面の一部に、SS400 には表面と切断端面に赤錆が認められた。屋内暴露1ヶ月では、JFE410DH には表面、切断端面とも発錆は認められなかった。Z27 には切断端面に、SS400 には表面と切断端面に赤錆が認められた。屋外暴露1週間と屋内暴露1ヶ月で、SS400 の切断端面における発錆は同レベルであるが、Z27 は屋内暴露での発錆が著しい。屋内では、降雨の影響が小さく、濡れ時間が短いので、亜鉛の犠牲防食能が端面にまで機能しなかったからと考えられる。

以上から、JFE410DH の切断端面の耐初期錆性は、亜鉛めっき鋼よりも優れることが分かった。

### 3.3 溶接部の耐久性

溶接試験片についての促進試験後の最大孔食深さを図4に示す。ワイヤーブラシによる手入れ(スパッタとテンパーカラー除去)の有無にかかわらず、溶接部近傍における腐食の促進は認められなかった。以上から、JFE410DH の溶接部の耐久性は、母材部と同等であると考えられる。

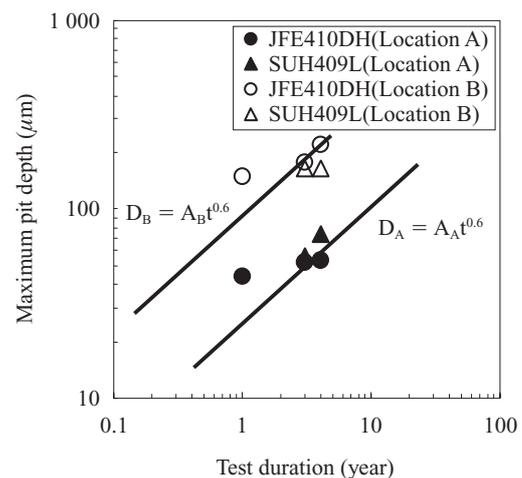
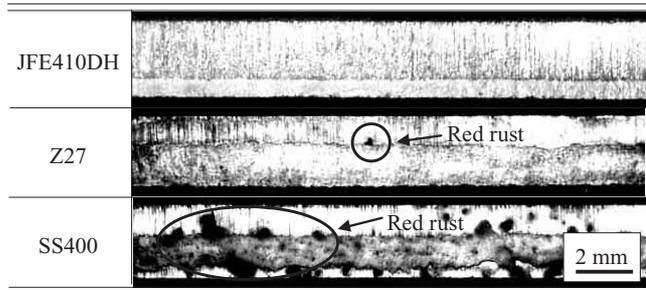
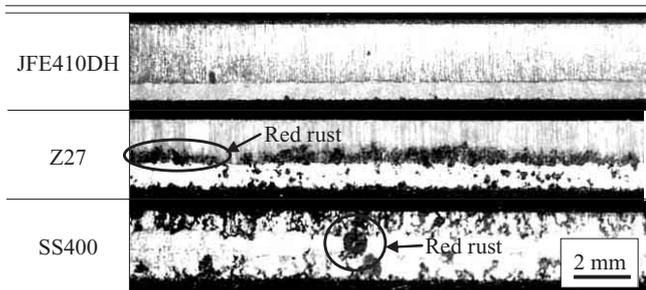


図3 最大孔食深さの経時変化

Fig.3 Maximum pit depth after the exposure test



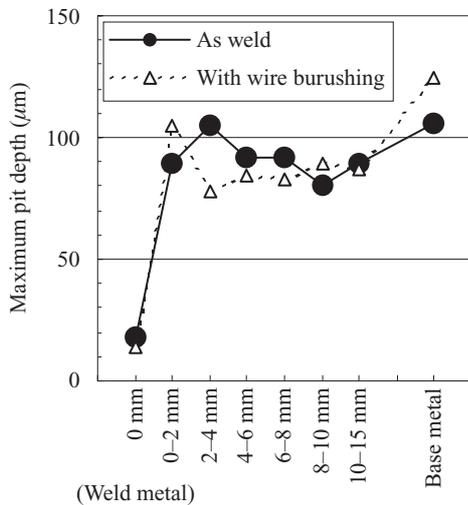
(a) Out door for a week



(b) In door for a week

JFE410DH: 11%Cr stainless steel  
 Z27: Hot-dip zinc-coated steel sheet  
 SS400: Carbon steel sheet

写真2 暴露後の切断端面 ((a) 屋外1週間, (b) 屋内1ヶ月)  
 Photo 2 Surface appearance of the cut edges after exposure



Positions of the specimen (0 mm: bond)  
 図4 促進試験での溶接部の最大孔食深さ  
 Fig.4 Maximum pit depth of the weld specimens after the accelerated test

#### 4. 考察

##### 4.1 寿命予測式

吉井ら<sup>5)</sup>は、ステンレス鋼 (SUS316, SUS304, SUS434, SUS430, SUS410) の10年暴露結果から、ステンレス鋼の腐食 (食孔深さ, 腐食量) は次式に示すような暴露期間の  $m$  乗根に比例して推移すると報告している。

$$h = a \cdot t^{1/m} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $h$  は腐食の程度 (食孔深さ, 腐食量),  $t$  は経過年数,  $m$  と  $a$  は定数である。

武藤ら<sup>6)</sup>も同様に、大気環境におけるステンレス鋼 (Type409, Type430, Type304 など) の孔食進展挙動に関して、最大孔食深さ  $D$  ( $\mu\text{m}$ ) と試験期間  $t$  (y) との間に以下の関係が成り立つことを報告している。

$$D = A \cdot t^n \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $D$  は最大孔食深さ ( $\mu\text{m}$ ),  $t$  は試験期間 (y),  $A$  は定数 ( $\mu\text{m}$ ) で化学成分と環境に依存,  $n$  は定数で環境に依存する。

本報告では、(2) 式を JFE410DH の寿命予測式として適用する。

##### 4.2 住宅環境における JFE410DH の寿命予測

###### 4.2.1 $n$ 値と $A$ 値

JFE410DH (板厚 2.3 mm) の住宅内環境における耐久寿命の算出を行う。

一般鋼材の限界状態は、鋼材厚さの10%が腐食した状態であるとされている<sup>3)</sup>。局部腐食 (孔食) となるステンレス鋼の場合においては、限界状態を最大孔食深さが鋼材厚さの10%となった状態としている。すなわち、板厚 2.3 mm の部材 (開断面形) の限界状態は、最大孔食深さが  $115 \mu\text{m}$  に達した状態である。(2) 式で、 $A$  値と  $n$  値がわかれば、最大孔食深さが  $115 \mu\text{m}$  に達するまでの期間  $t$  (y) (耐久寿命) が求められる。 $A$  値を暴露期間  $T$  (y) の暴露データ (最大孔食深さ) から求まる  $T$  の関数  $A(T)$  と考えれば、(2) 式より、

$$A(T) = D/T^n \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $D$  は暴露期間  $T$  での最大孔食深さ,  $n$  は定数である。11%Cr 鋼の  $n$  値として、武藤ら<sup>6)</sup>による 0.57 (厳しい海洋地域) および 0.21 (工業地域), Schmittら<sup>7)</sup>の重量減平均侵食深さデータから算出された 0.51 (厳しい海洋地域)<sup>8)</sup>などが報告されている。本報告では、海浜地域から田園地域までの広い環境への適合の可能性が示されている値、0.6<sup>8)</sup>を用いることにする。

表2に示した暴露場 A と暴露場 B における各試験期間  $T$  の最大孔食深さから求めた  $A(T)$  を表3に示す (たとえば、暴露場 A における試験期間 4 年のデータから得られる  $A(T)$  は、 $53.6/4^{0.6} = 23.3$  である)。

###### 4.2.2 劣化環境条件 (海塩付着量)

ステンレス鋼の腐食による劣化は、海塩付着量が多いほ

表 3 暴露試験結果から算出された係数,  $A(T)$

Table 3 Coefficient,  $A(T)$  calculated from exposure test

Location	$F_s$ (mdd)	$W_s$ (g/m <sup>2</sup> )	Test duration (year)		
			1	3	4
A	0.2	0.07	44.2	27.2	23.3
B	0.4	0.2	150.6	90.8	96.2

$F_s$ : The amount of airborne sea salt  
 $W_s$ : The amount of deposited sea salt

ど起こりやすい。今回、劣化環境条件は、飛来海塩粒子量ではなく海塩付着量で定義する。

押川ら<sup>9)</sup>は、栃木県野木町の鉄鋼系工業化住宅屋内における海塩付着量は最大で  $1 \times 10^{-3}$  g/m<sup>2</sup> 程度であったと報告している。また、松本ら<sup>10)</sup>は、東京都八王子市、および熊本県阿蘇郡久木野村のスチールハウス屋内における海塩付着量は最大で  $1 \times 10^{-3}$  g/m<sup>2</sup> 程度であったと報告している。以上の文献データを参考にして安全率を確保するため、住宅内環境における海塩付着量の上限を  $3 \times 10^{-3}$  g/m<sup>2</sup> とし、海塩付着量が  $3 \times 10^{-3}$  g/m<sup>2</sup> 以下となる環境を前提とする。

#### 4.2.3 寿命予測 (耐用年数推定)

暴露データを活用して、寿命予測を行う。

3.1 節で示した暴露試験の環境データは飛来海塩粒子量(海塩飛来量)である。下記に示す篠原<sup>11)</sup>による海塩付着量  $W_s$  (g · m<sup>-2</sup>) と海塩飛来量  $F_s$  (mdd, mg · dm<sup>-2</sup> · day<sup>-1</sup>) の関係式を用いて、飛来海塩量を海塩付着量に換算した値を表 3 中に示す。

$$\log W_s(\text{g/m}^2) = 1.52 \log F_s(\text{mdd}) - 0.104 \quad (F_s \geq 0.2)$$

$$\log W_s(\text{g/m}^2) \cong 0.346 \log F_s(\text{mdd}) - 0.963 \quad (F_s < 0.2)$$

得られた海塩付着量  $W_s$  (g/m<sup>2</sup>) を  $x$  軸に、表 3 に示した係数  $A(T)$  ( $\mu\text{m}$ ) を  $y$  軸に対数表示して図 5 示す。海塩付着量  $W_s$  (g/m<sup>2</sup>) の対数と係数  $A(T)$  ( $\mu\text{m}$ ) の対数の間に直線関係が存在すると仮定し、外挿により住宅内環境(海塩付着量)での係数  $A$  を求め、寿命予測を行う。図 5 で、暴露場 A と B における最大の係数  $A(T)$  である 1 年データの点を結んで得られる直線を外挿して  $W_s = 0.003$  g/m<sup>2</sup> での係数  $A$  を算出すると、 $A = 1.1$  ( $\mu\text{m}$ ) となる。したがって、JFE410DH (板厚 2.3 mm 以上の部材、開断面形) の耐久寿命  $t(y)$  は、以下ようになる。

(2) 式を  $t$  について解くと、

$$t = (D/A)^{1/n}$$

限界状態となる最大孔食深さ  $D = 115$  ( $\mu\text{m}$ )、住宅内環境での係数  $A = 1.1$  ( $\mu\text{m}$ )、定数  $n = 0.6$  を代入して、

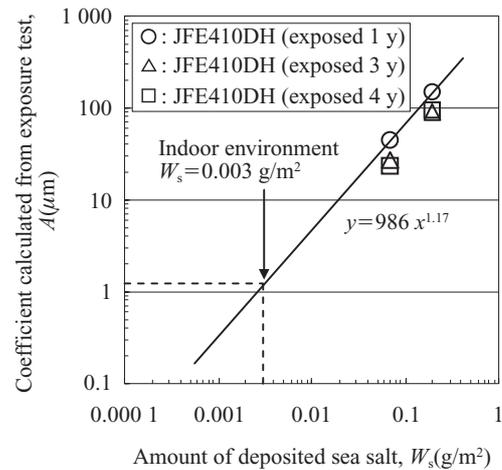


図 5  $W_s$  と  $A(T)$  の関係 (対数表示)

Fig.5 The relationships of  $W_s$  to  $A(T)$  on a log scale

$$t = (115/1.1)^{1/0.6} \\ = 2320 \geq 100$$

以上から、住宅内環境における JFE410DH (板厚 2.3 mm 以上の部材) の耐用年数は、表面処理を施すことなしに 100 年以上であると考えられる。

以上の研究結果を基に、財団法人日本建築センターへ JFE410DH が日本住宅性能表示基準の等級 3 (長寿命 100 年住宅の構造躯体など) に適合するとの特別評価方法認定を申請した。その申請における試験内容は、

- (1) 屋外暴露試験結果および長期寿命予測方法
- (2) 表面仕上げの影響と板厚の影響
- (3) 溶接部の耐食性
- (4) 異種金属接触腐食

であり、いずれにおいても問題がなく、100 年以上の寿命であることが認定され、2005 年 6 月 7 日付で国土交通大臣認定を取得した。

## 5. おわりに

建築構造用 11%Cr ステンレス鋼 JFE410DH について、鉄骨造住宅の構造材への適用を目的に、暴露試験、および促進試験により耐久性の評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) JFE410DH は十分な耐食性を有するため、めっきや塗装などの表面処理を施すことなしに、板厚 2.3 mm 以上の部材の住宅内環境における耐久寿命は 100 年以上である。
- (2) 亜鉛めっき鋼よりも、切断端面の耐初期錆性に優れる。
- (3) 溶接した状態のまま母材と同等の耐久性を有するので、溶接部の補修処理を必要としない。
- (4) 長寿命 100 年住宅の構造躯体等 (日本住宅性能表示基準の等級 3) に適合するとの国土交通大臣認定を取得

した。今後、長寿命住宅用途への適用が期待される。

参考文献

- 1) ステンレス建築構造設計基準作成委員会. ステンレス建築構造設計基準・同解説. 技報堂出版. 2001.
- 2) 宇城工, 塩川隆, 高橋英孝. 耐久性に優れた建築構造用 11%Cr 鋼材「R410DH」. 川崎製鉄技報. 2002, vol. 34, no. 4, p. 59.
- 3) 日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説編集委員会. 日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説 2003. 工学図書. 2003.
- 4) 腐食防食協会. 装置材料の寿命予測入門. 丸善. 1984.
- 5) 吉井紹泰, 西川光昭, 林公爾. 10年間の暴露試験からみたステンレス鋼の耐候性. 日新製鋼技報. 1988, vol. 59, p. 54.
- 6) Muto, I.; Sato, E.; Ito, S.; Kihara, H. Pitting Corrosion Behavior of Stainless Steels in Atmospheric Environments. Proceedings of International Symposium on Plant Aging and Life Predictions of Corrodible Structures. Ed. by T. Shoji, T and Shibata, T. NACE International. 1997, p. 153.
- 7) Schmitt, R. J.; Mullen, C. X. Influence of Chromium on the Atmospheric Corrosion Behavior of Steel. Stainless Steel for Architectural Use. ASTM STP 454. 1969, p. 124.
- 8) 腐食防食協会. 住宅の腐食・防食 Q&A. 丸善. 2004, p. 223.

- 9) 押川渡, 辻川茂男. 亜鉛の大气・室内腐食における速度式  $W = at^n$ . 材料と環境. 2003, vol. 52, p. 249.
- 10) 松本雅充, 野村広正, 鹿毛勇, 山本誠志, 辻川茂男. モニターハウスにおける耐久性試験 スチールハウスの諸性能に関する研究 その 14. 日本建築学会大会学術講演梗概集. 1998, p. 1005.
- 11) 篠原正. 腐食防食ハンドブック—CD-ROM2 版. 丸善. 2004.



岡田 修二



石井 和秀



宇城 工