

## 薄板におけるフェライト系ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接の検討

居村 篤志\* 仙北 直之\*\* 小竹 真太郎\*\*\* 松本 洋祐\*\*\*\* 藤井 信之\*

### Study of welding of the ferritic stainless steel / mild steel in a thin plate

Atsushi Imura\* Naoyuki Senboku\*\* Odake Shintaro\*\*\* Yosuke Matsumoto\*\*\*\* Nobuyuki Fujii\*

The structure of martensite is generated in the weld metal when stainless steel and mild steel are welded. The reason is that the amounts of nickel and chromium in the weld metal decrease.

Therefore, a stainless steel rod (309 series) is recommended as the filler metal. However, the filler metal of 309 series is expensive. In contrast, the filler metal of mild steel is cheap.

In this study, the dissimilar welding of ferritic stainless steel and mild steel is carried out for the thin plate. The applied welding method is TIG welding. For the filler metals, austenitic stainless steel and mild steel are used. Then, the tensile test, the bending test and the hardness test are carried out to the produced test pieces.

As a result, the clear difference in the used filler metals was not observed.

Keywords: ferritic stainless steel, mild steel, thin plate, TIG welding, dissimilar welding

#### 1. はじめに

ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接では、溶接金属中のNi, Cr量が減少し、マルテンサイト組織(硬く割れやすい組織)が生成される。したがって、溶加材の使用に際しては、Ni, Cr量が多いオーステナイト系ステンレス溶加材(309系)の使用が推奨されている。しかし、309系の溶加材は高価であるという難点がある。それに比べ、軟鋼の溶加

材は安価であるという利点がある<sup>(1)</sup>。

本研究では、薄板におけるフェライト系ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接に309系の溶加材と軟鋼の溶加材を用いたティグアーク溶接法を適用した。そして、作製した試験片に対し引張試験、曲げ試験及び硬さ試験を実施し、機械的特性から軟鋼用溶加材の適用について検討を行った。その結果について報告する。

---

\* 職業能力開発総合大学校

Polytechnic University

\*\* 加古川刑務所

Kakogawa Prison

\*\*\* 八幡職業訓練支援センター

Polytechnic Center Yahata

\*\*\*\* 職業能力開発総合大学校  
機械システム工学科4年

Polytechnic University, Undergraduate  
Course of Mechanical System Engineering

## 2. 背景<sup>(2)</sup>

ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接においては、Ni や Cr の炭素鋼母材への希釈を適切な範囲にコントロールしなければ、溶接時に高温割れや遅れ割れ等の問題が生じることがあり、また、溶接金属が脆化する等の問題が生じることもある。これらの問題は、異材溶接部の溶接金属中のフェライト量と密接に関連している。フェライト量のコントロールは、溶接時の希釈管理すなわち溶接条件の選定によって行われる。母材に溶接ビードを置き余盛を形成させた場合において、溶加材と母材の融合比率を希釈率という。希釈率の定義を図1に示す。

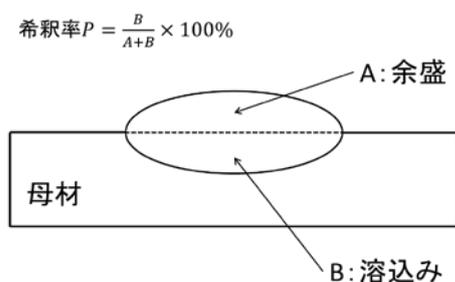


図1 希釈率の定義

フェライト系ステンレス鋼と軟鋼の溶接を行った場合において、母材希釈により溶接金属がど

のような組織に変化するか、図2に示すシェフラーの組織図を用いて推測することができる。溶接に際してフェライト系ステンレス鋼(SUS430)と軟鋼(SS400)が同じ割合で溶込んだとすると、組織図中の両母材の中間点(a点)の組成の母材を溶接することと同じことになる。したがって、309系溶加材によって溶接された溶接金属の組成は、a点と309系溶加材の線上にあり、その位置は希釈率によって変化する。希釈率の小さい段階では、溶接金属の組成はオーステナイト(A)+フェライト(F)の混合領域にあるが、希釈率の増加に伴ってその組成はマルテンサイト(M)の領域へと変化する。溶接時の高温割れを防止するためには、溶接金属の組成をA+Fの領域にすることが重要であり、このことから溶接時の希釈率は図中の安全域(図2の例では40%以下)に入るようにする必要がある。以上の理由からオーステナイト系溶加材(309系)の使用が推奨されている。

これに対し、軟鋼用溶加材の組成はSS400とほぼ同じであるため、軟鋼用溶加材によって溶接された溶接金属の組成は、希釈率を問わずマルテンサイト組織となることから軟鋼用溶加材は不適とされている。

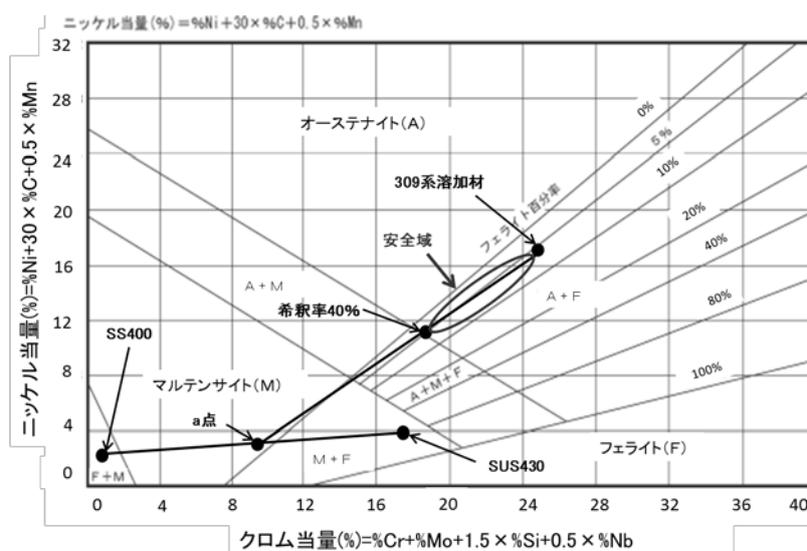


図2 シェフラーの組織図

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験方法

本研究では、同一の条件下で溶接を行うために、治具で固定したトーチを移動台車に装着し一定速度で走行させた。さらに、拘束治具を使用することで溶接による歪みを抑えた。移動台車及び拘束治具を図3に示す。拘束治具の温度を一定に保つために、冷却水パイプに水を流した。さらに、アルゴン供給パイプから試験片裏面にアルゴンを供給することで裏ビードを形成させるとともに、酸化を防いだ。

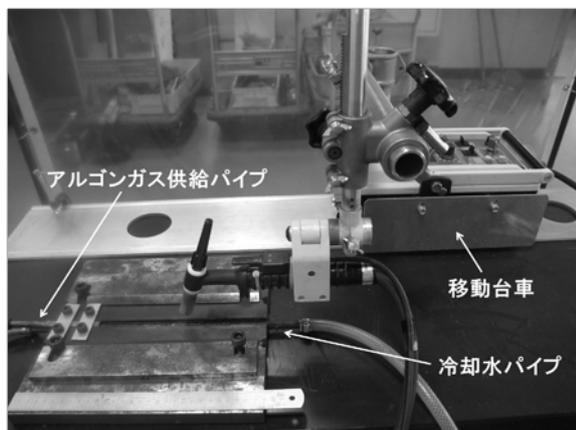


図3 移動台車及び拘束治具

#### 3.2 実験手順及び内容

##### 3.2.1 実験手順

(1)初めに、板厚 1.5mm, 3.0mm を用いて突合せ接合試験片を作製し、曲げ試験及び引張試験を行った。板厚 1.5mm の溶接においては、板厚 1.5mm の SUS430 及び板厚 1.6mm の SS400 を接合した。板厚 3.0mm においては、板厚 3.0mm の SUS430 及び板厚 3.2mm の SS400 を接合した。

(2)次に、さらに入熱量を抑えた板厚 3.0mm の SUS430 及び板厚 3.2mm の SS400 の溶接を行った。その試験片に対し曲げ試験、硬さ試験及び組織試験を行った。使用した溶接条件を表1～4に示す。

##### 3.2.2 実験条件

溶接機にはダイヘン製 DA300P を使用し、パルス無し直流で溶接を行った。シールドガスにはアルゴンガスを使用した。また溶接については二人で行い、一人は移動台車の操作、もう一人が溶加材を挿入した。溶加材の挿入については職業訓練指導員免許(溶接科)を有する技能者が行った。

表1 共通溶接条件

シールドガス流量	8ℓ/min
電極の種類	YWTh-2
電極先端角度	30°
溶接速度 (V)	150mm/min
溶接姿勢	下向き
トーチ角度	110°

表2 溶接条件①

板厚	1.5mm
溶接電流 (I)	70A
電極突出し長さ	3mm
アーク長	3mm

表3 溶接条件②

板厚	3.0mm
溶接電流 (I)	140A
電極突出し長さ	3mm
アーク長	3mm

表4 溶接条件③

板厚	3.0mm
溶接電流 (I)	100A
電極突出し長さ	5mm
アーク長	4mm

フェライト量のコントロール、すなわち希釈

率を低く抑えることは、入熱量を少なくすることにつながる。そのため、溶接条件①、②における溶接電流については I 形突合せで裏波が形成される最低電流値とした。溶接条件③については、V 形突合せとしたことで、溶接条件②より低い電流で裏波を形成させた。溶接条件①、②を用いた場合の開先の形状を図 4 に、溶接条件③を用いた場合の開先の形状を図 5 に示す。

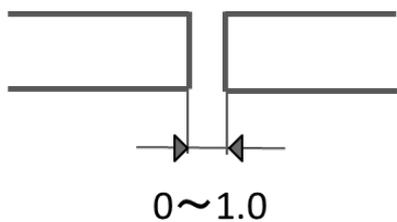


図 4 溶接条件①、②における開先形状

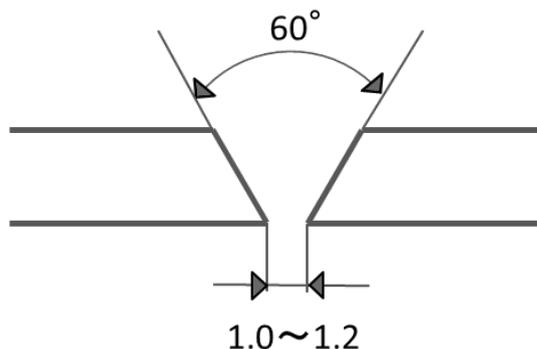


図 5 溶接条件③における開先形状

入熱量  $J(J/cm)$  はアーク電圧  $E(V)$ 、溶接電流  $I(A)$ 、溶接速度  $V(cm/min)$ 、アーク熱効率  $\eta$  により、以下の式であらわされる。本研究では溶接方法として、ティグ溶接を用いているため、アーク熱効率  $\eta$  は 0.6 とした<sup>(3)</sup>。アーク電圧はすべての溶接条件で 20V である。

$$J = \frac{60 \times E \times I}{V} \times \eta$$

溶接条件①、②及び③における入熱量は各々 3360J/cm、6270J/cm 及び 4800J/cm である。

### 3.2.3 曲げ試験

3.2.2 で示した溶接条件①、②を用いて溶接を行った試験片に対し、JIS Z 3122 に基づき試験片を採取した<sup>(4)</sup>。7.0mm、9.5mm、12.5mm、18.0mm の 4 つの曲率半径を用いて曲げ試験を行った。

溶接条件③を用いた溶接試験片から、曲げ試験片を 4 枚採取した。採取位置を図 6 に示す。採取した試験片に対し、JIS Z 3122 に準じて①、③については表曲げ試験、②、④については裏曲げ試験を行った<sup>(4)</sup>。曲率半径は 7mm である。

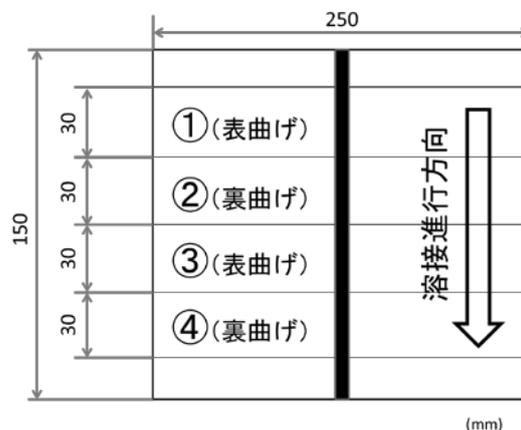


図 6 試験片採取位置

### 3.2.4 引張試験

各溶加材ごとに、3.2.2 で示した溶接条件①、②を用いて溶接を行った試験片から、引張試験片を 3 試験片(計 12 試験片)作製し、JIS Z 3121 に準じて引張試験を行った<sup>(5)</sup>。引張試験片寸法を図 7 に示す。

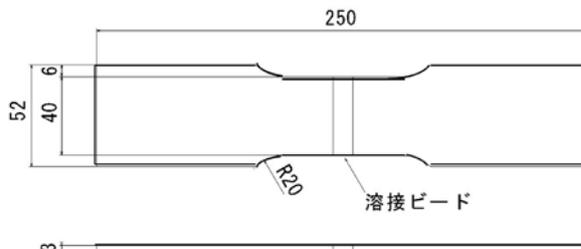


図 7 引張試験片寸法

### 3.2.5 硬さ試験

3.2.2 で示した溶接条件③で溶接を行った試験片から硬さ試験片を採取し、断面のビッカース硬さ試験を行った。試験力(F)は4.9Nである。

### 3.3 実験材料

溶接試験片として、フェライト系ステンレス鋼 SUS430、板厚 1.5mm 及び 3.0mm、125×150mm を使用し、軟鋼には SS400、板厚 1.6mm 及び 3.2mm、125×150mm を使用した。試験片の化学成分を表 5 に示す。ただし、SS400 の JIS 規格値は P、S の上限値及び引張強度の下限値が規定されているだけである。そのため、他の成分に関し参考値として板厚 3.2mm における SS400 のミルシート の値を化学成分として表記している。SUS430 の化学成分は JIS G 4304 で定められた値である<sup>(6)</sup>。

表5 試験片の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P
SS400	0.006	0.002	0.137	0.0015
SUS430	≤0.12	≤0.75	≤1.00	≤0.040

	S	Ni	Cr	Fe
SS400	0.0001	-	-	残
SUS430	≤0.030	-	16.00~ 18.00	残

溶加材の表記については 309 系の溶加材として使用した JIS Z 3321 YS309 を SUS とし<sup>(7)</sup>、軟鋼の溶加材として使用した JIS Z 3316 YGT50 を SS とした<sup>(8)</sup>。ワイヤ径はφ1.2mm 及びφ2.0mm のものを使用した。使用したワイヤ自体の成分は公表されていないため、メーカーが公表しているそれぞれの溶加材を使用した場合における溶着金属の化学成分を表 6 に示す。

表6 溶着金属の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P
SUS	0.05	0.45	2.02	0.026
SS	0.09	0.73	1.35	0.009

	S	Ni	Cr	Fe
SUS	0.003	9.76	19.86	残
SS	0.010	-	-	残

## 4. 実験結果及び考察

### 4.1 曲げ試験結果

3.2.2 で示した溶接条件①、②を用いて溶接を行った試験片の曲げ試験結果を表 7、8 に示す。

表7 板厚 1.5mm の曲げ試験結果

溶加材	曲げ条件	曲率半径 r (mm)			
		7.0	9.5	12.5	18.0
SUS	表曲げ	×	○	○	○
	裏曲げ	×	○	○	○
SS	表曲げ	×	○	○	○
	裏曲げ	×	○	○	○

表8 板厚 3.0mm の曲げ試験結果

溶加材	曲げ条件	曲率半径 r (mm)			
		7.0	9.5	12.5	18.0
SUS	表曲げ	×	×	○	○
	裏曲げ	×	×	×	○
SS	表曲げ	×	×	○	○
	裏曲げ	×	×	○	○

板厚 1.5mm においては、溶加材の種類に関係なく曲率半径 7.0mm ですべて破断した。板厚 3.0mm においては、曲率半径 7.0mm 及び 9.5mm ですべて破断し、12.5mm では溶加棒に SUS を使用した裏曲

げで破断した。破断部はすべて溶接ビード近傍の SUS430 側からであった。原因としては、シグマ相が析出したため、溶接金属が脆化したものと考えられた。そのため、シグマ相脆化に対処するために、3.2.2 で示した溶接条件③を用いて入熱量を抑えて溶接を行った。曲げ試験片及び曲げ試験結果を各々図 8、表 9 に示す。

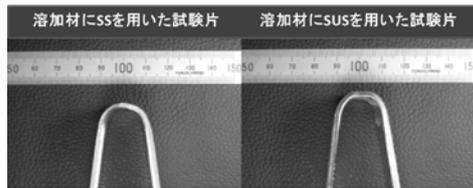


図 8 曲げ試験片

表 9 曲げ試験結果

	① (表曲げ)	② (裏曲げ)	③ (表曲げ)	④ (裏曲げ)
SUS	◎	○	△	×
	◎	◎	○	△
	◎	○	◎	○
SS	×	◎	×	×
	◎	◎	◎	×
	◎	◎	◎	◎

曲げ試験結果については4段階の評価を行った。無欠陥のものを「◎」とし、曲がったが割れ等がみられるものを溶接技能者評価試験の判定基準、JIS Z 3801 及び JIS Z 3821 に基づき合格とするものを「○」、不合格とするものを「△」とした<sup>(9), (10)</sup>。破断したものについては「×」とした。

曲げ試験結果からは、入熱量を抑えることで小さい曲率半径でも曲げられることが確認できたが、溶加材の違いによる明確な差異は見られなかった。

#### 4.2 引張試験

3.2.2 で示した溶接条件①、②を用いて溶接を

行った試験片の引張試験結果を図 9 に示す。各試験片数は 2~3 枚である。

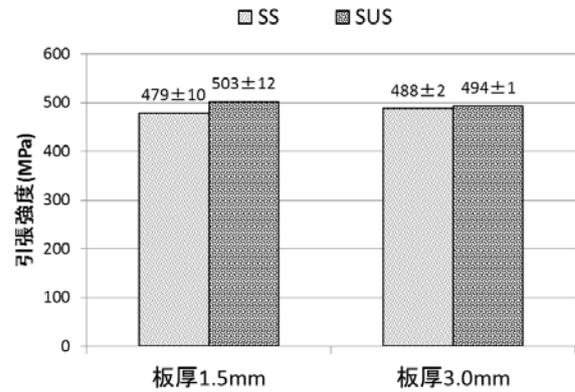


図 9 引張試験結果

引張試験の結果を見ても、強度はほぼ同じで、溶加材の違いによる明確な差異は見られなかった。

#### 4.3 硬さ試験結果

3.2.2 で示した溶接条件③で溶接を行った試験片の硬さ試験結果を図 10 に示す。

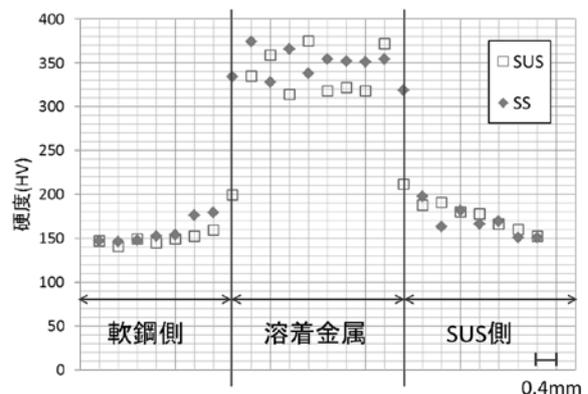


図 10 硬さ試験結果

硬さ試験の結果から、溶着金属の最高硬さはほぼ同じであり、溶加材の違いによる明確な差異は見られなかった。通常のマルテンサイト組織の硬さは約 700HV 以上とされている。この場合、炭素量 0.4% に相当する(図 11)。しかし、今

回測定された軟鋼用溶加材試験片の平均硬さは約 350HV であった。これは、本研究の被溶接材料及び溶加材の炭素量が 0.1%以下と低いため、マルテンサイトの硬さが上昇しなかったためと考えられる。マルテンサイトの硬さは C の量で決まり、図 1 1 に示すように C 量の増加と共に著しく硬化する<sup>(1)</sup>。

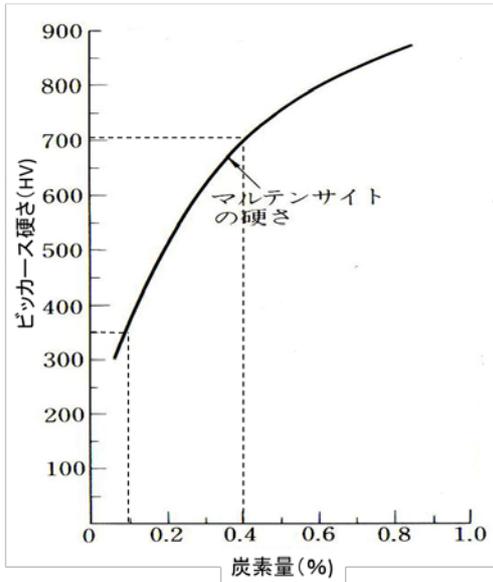


図 1 1 マルテンサイトの最高硬さに及ぼす C 量の影響

#### 4.4 組織試験

溶接部断面の溶着金属および母材部の組織を確認した。SUS 及び SS を使用した試験片の組織写真を各々図 1 2、1 3 に示す。

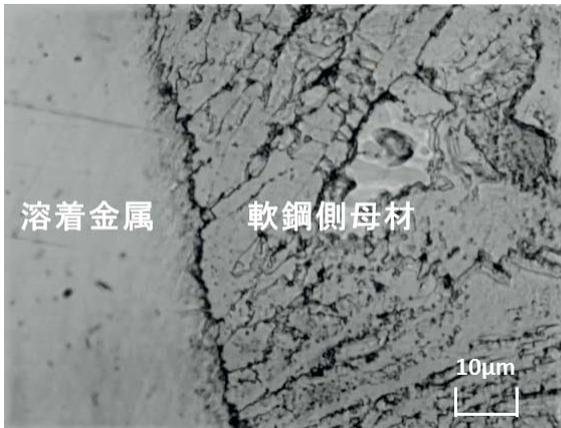


図 1 2 SUS を使用した試験片の組織写真

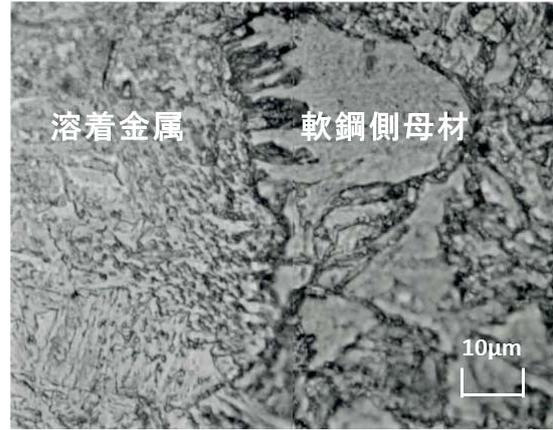


図 1 3 SS を使用した試験片の組織写真

軟鋼用溶加材(SS)を用いた場合、母材結晶粒サイズの変化が大きいことが分かる。また、マルテンサイト組織の生成が予想されたが、試験片の組織からは、マルテンサイト組織は確認されなかった。

#### 4. まとめ

- (1) 曲げ試験結果、引張試験結果及び硬さ試験結果に関しては、溶加材の違いによる明確な差異は見られなかった。
- (2) 軟鋼用溶加材を用いた試験片においても、マルテンサイト組織の生成は確認されなかった。
- (3) 薄板のフェライト系ステンレス鋼と軟鋼の異材溶接においては、軟鋼用溶加材を用いても機械的特性に差異がなく実用上問題はないことが分かった。

#### 参考文献

- (1) 仙北直之：“薄板におけるフェライト系ステンレス鋼/軟鋼異材溶接の検討”，職業能力開発総合大学校，平成 22 年度卒業論文。
- (2) 接合・溶接技術 Q&A1000 編集委員会：“接合・溶接技術 Q&A1000”，株式会社産業技術サービスセンター，pp. 506，(1999)。
- (3) 溶接学会編：“溶接・接合便覧”，丸善株式会社，pp. 8，(2003)。

- (4) 日本規格協会：“JIS Z 3122 突合せ溶接継手の曲げ試験方法”，（1990）.
- (5) 日本規格協会：“JIS Z 3121 突合せ溶接継手の引張試験方法”，（1993）.
- (6) 日本規格協会：“JIS G 4304 熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯”，（2005）.
- (7) 日本規格協会：“JIS Z 3321 溶接用ステンレス鋼溶加棒，ソリッドワイヤ及び鋼帯”，（2010）.
- (8) 日本規格協会：“JIS Z 3316 軟鋼，高張力鋼及び低温用鋼用ティグ溶接溶加棒及びソリッドワイヤ”，（2011）.
- (9) 日本規格協会：“JIS Z 3801 手溶接技術検定における試験方法及び判定基準”，（2001）.
- (10) 日本規格協会：“JIS Z 3821 ステンレス鋼溶接技術検定における試験方法及び判定基準”，（2001）.
- (11) アグーン ウィスヌグロホ：“薄板における軟鋼とステンレス鋼の異材溶接の検討”，職業能力開発総合大学校，平成 18 年度修士論文.