

解説

Review

現場加工を支援するアーク溶接データベースの開発

小林秀雄*, 川嶋 巖*, 大谷成子*

Development of Arc Welding Database Supporting Works at the Shop Floor

Hideo Kobayashi, Iwao Kawashima, and Shigeko Ohtani

Synopsis

Digital Manufacturing Research Center of the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology is developing a manufacturing database which has been made public on the Internet. It covers fifteen manufacturing methods including arc welding, which are especially principal among small and medium-sized manufacturers.

This report describes arc welding database, the background of the development, structure of the database system of the operation standards and the cases of various metals.

1. はじめに

我が国の中小製造業は、優れた作業者の技能と高度な新技術を生み出すことによって高いものづくり力を維持してきた。しかしながら近年、一般の機械加工分野では熟練技術者の高齢化とその後継者難による技術の空洞化が進行している。このような背景のもと、我が国の「ものづくり基盤技術計画」が平成12年秋に制定され、高度技能者のものづくり技術をデジタル情報として記録して普及・伝承する「デジタルマイスター」の研究プロジェクトが産総研ものづくり先端技術研究センター（略称は DMRC）で開始された。ここでは中小製造業の業務の中で重要な地位を占める、加工技術15分野の高度技術情報を WWW(World Wide Web) で公開することを目標に研究開発を行った。これまでの成果を基にして平成18年度からは、デジタルものづくり研究センター（略称は DMRC）という新たな組織へ研究が引き継がれた。ここでは、熟練技能者の持つ高度だが未解明の知識を明らかにする技術と、原理が理解されていない知識を活用する技術の双方を研究している。そして、それらを製造現場で使える形で提供することで、作業者を支援し、高度な製造技術の維持・発展を可能とする

ことを目標に研究開発を進めている。

本稿では、DMRC 加工データベースの一つであるアーク溶接データベースについて、開発の背景、データベースの構成、各種材料の作業標準、施工例などを紹介する。

なお、本データベースの利用手続きなどについては、デジタルものづくり研究センターのホームページに記載している。

URL ; <http://unit.aist.go.jp/dmrc/>

2. アーク溶接データベース

2.1 背景と WWW メニュー項目

製造業の重要な基盤技術の一つである溶接分野でも 1) 溶接技術・技能者の高齢化と後継者不足が著しく、溶接技術・技能の伝承が急がれている。2) 技術的には高付加価値な耐熱・耐食鋼の効率的な溶接技術の情報提供と、新施工法の開発の要望が高い。そこで、技術力の向上を支援する情報として溶接の難しいとされるステンレス鋼、高合金材の溶接作業標準を作成し、技術の伝承と技術力の向上を図ることとした。

アーク溶接の WWW メニュー画面を Fig.1 に示す。この各メニューのうち溶接作業標準と加工事例検索は、実用性

2007 年 1 月 15 日受付

* 独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター (Digital Manufacturing Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)



Fig.1. Menu page of the arc welding database.

の高い情報である。一方、推奨条件計算システムと溶接連携システムは研究要素が高い。特に溶接作業標準は、技術力強化の中心として位置付けデータの拡充作業を進めている。

2.2 溶接作業標準

作業標準の作成では、実際にものづくりに携わっている経験豊富で多くのベテラン技術者の協力を得て作成している。

この作業標準では、中小企業ユーザが初めて施工する鋼種、溶接方法に対処するための施工要点が記述してある。

またユーザへの利便性を高めるため本文中から鋼材メーカ、溶接材料メーカ、検査協会などのホームページおよび関連 JIS にリンクしている。本作業標準に用いられる溶接方法の区分、母材の区分 (P 番号) は、溶接施工方法の確認試験方法 (JIS Z3040) の区分を適用した。

以下に、作業標準全体に共通する項目と記述要旨を記す。

1) 作業標準のタイトル；母材および溶接法の名称

1.1) 適用；作業標準の適用範囲

1.2) 溶接材料；代表的鋼種に対する適用溶接材料（溶接

棒および溶接ワイヤ) など

- 1.3) 開先形状；母材の物理的性質と代表的な開先形状、開先加工法など
- 1.4) 溶接姿勢；推奨する溶接姿勢
- 1.5) 溶接準備；開先面の清掃など
- 1.6) 溶接電流と極性；溶接棒では棒径と電流値など
溶接電源、極性およびシールドガス；電源特性とシールドガス組成など
- 1.7) 予熱およびパス間温度；予熱の有無とパス間温度、解説など
- 1.8) 溶接上の注意；変形、運棒、割れの注意点
- 1.9) 清掃；溶接直後の清掃要領
- 1.10) 溶接欠陥の補修；補修の要点
- 1.11) 溶接後熱処理；熱処理の目的と方法
- 1.12) 溶接部の検査；欠陥の検査方法
- 1.13) 実施例；施工実施例（ビード外観、マクロ・ミクロ、機械試験など）
- 2) 溶接技能者の資格；溶接技能者資格の種類と資格の取得方法
- 3) 事例集；良好な溶接事例、欠陥事例、WPS（Welding Procedure Specification：溶接施工法確認試験方法書）

PQR（Procedure Qualification Record：溶接施工法確認記録書）

次項では公開中（2007.1）の各作業標準の種類と、それらの概要について述べる。

2. 2. 1 ステンレス鋼

ステンレス鋼の作業標準メニュー画面を Fig.2 に示す。ユーザは該当する鋼種から溶接法を選択してクリックすると、詳細画面が表示される。以下に各種ステンレス鋼溶接作業標準の概要を記す。

(1) オーステナイト系ステンレス鋼；母材の区分 8A（オーステナイト系ステンレス鋼）と 8A をアーク溶接法により施工する時に適用する。代表的なステンレス鋼として 18-8 ステンレス鋼であり、各ステンレス鋼種のうちでは最も使用量が多い。このステンレス鋼の溶接法の被覆アーク溶接（溶接方法の区分：A）、ティグ溶接（溶接方法の区分：T）、マグ溶接・ミグ溶接（溶接方法の区分：M）の作業標準を作成した。被覆アーク溶接は、一般的に多用されている。薄板または高い継手品質を必要とする場合は、ティグ溶接が採用される。フラックス入りワイヤを用いたマグ溶接は、作業性が良好で高能率が達成できるため急速に溶接材使用量が増している。ミグ溶接は、高能率であるが、多層

ステンレス鋼の作業標準(完成)	
オーステナイト系ステンレス鋼 8A-8A-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
	フラックスコールドワイヤ溶接 (マグ溶接)
	ソリッドワイヤ溶接 (ミグ溶接)
フェライト系ステンレス鋼 7-7-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
マルテンサイト系ステンレス鋼 6-6-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼 (二相系ステンレス鋼) 8B-8B-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
析出硬化系ステンレス鋼 6'-6'-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接

Fig.2. Menu page of the arc welding operation standards of stainless steel.

溶接の際、ビード表面の酸化膜を除去する手間がかかるなどを記述してある。各種ステンレス鋼に共通する問題とし

て、Fig.3 に示すような塗料と溶接割れの事例を溶接準備の項に載せてある。

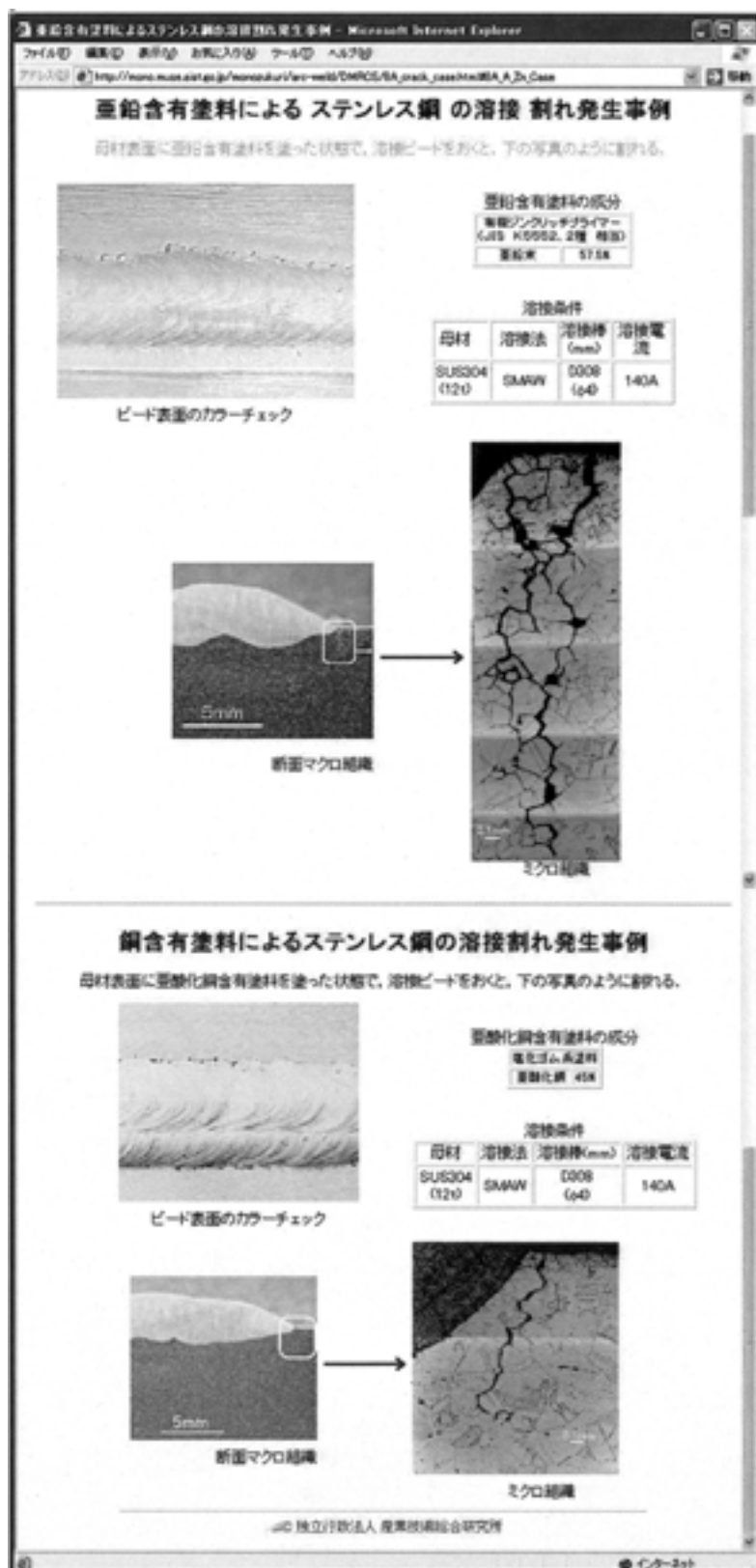


Fig.3. An example case of welding crack caused by coating material.

(2) 7-7: フェライト系ステンレス鋼; 母材の区分 7 (フェライト系ステンレス鋼) と 7 をアーク溶接法により溶接施工する時に適用する。JIS G4304 (熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯) には、フェライト系ステンレス鋼として 13Cr 系 (SUS405, SUS410L), 17Cr 系 (SUS430, SUS434), 19Cr 系 (SUS436L, SUS444), 22Cr 系 (SUS445 系), 30Cr 系 (447J1) などの 14 種類が規定されている。溶接法は、被覆アーク溶接 (A), ティグ溶接 (T) について作成した。この鋼種では、特に予熱・パス間温度および溶接後熱処理が継手品質に影響するので注意事項を記述した。

(3) 6-6: マルテンサイト系ステンレス鋼; 母材の区分 6 (マルテンサイト系ステンレス鋼) と 6 をアーク溶接法により施工する時に適用する。JIS G4304 (熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯) には、マルテンサイト系ステンレス鋼として SUS403, SUS410, SUS410S, SUS420J1, SUS420J2, SUS429J1, SUS440A の 7 種類が規定されている。この中で溶接可能な材料は先の 3 種類 (炭素量 0.15 mass% 以下) で、炭素量の高い SUS420J1 以降の材料は溶接割れ発生の問題があり、この作業標準の適用外とする。この系の 13 クロムステンレス鋼は、焼き入れによって硬化、機械的性質に優れている。ただし、耐食性はフェライト系より劣る。作業標準は、被覆アーク溶接 (A) とティグ溶接 (T) について作成した。

この系のステンレス鋼も予熱・パス間温度、および溶接後熱処理が継手品質に影響するので注意するよう記述した。

(4) 8B-8B: 二相系ステンレス鋼; 母材の区分 8B (二相系ステンレス鋼) と 8B をアーク溶接法により施工する時に適用する。オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼を、以下二相系ステンレス鋼と記す。JIS G4304-1999 (熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯) には、二相系として SUS329J1, SUS329J3L, SUS329J4L の 3 種類が規定されている。二相系ステンレス鋼は、オーステナイト系ステンレス鋼とフェライト系ステンレス鋼の特徴を併せ持つ材料であり、一般的には微細な二相 (γ 50: α 50) 混合組織で、耐応力腐食割れ性や耐孔食性に優れ、強度、じん性とも優れているため厚肉材への適用も多い。ただし、高温 (400 ~ 1000 °C) での組織は不安定であるため、高温で使用する機器への適用は問題が多い。さらに、溶接や熱処理においても金属間化合物の析出および相バランスの変化などによる脆化が原因のトラブルの報告が多いので、事前の十分な溶接施工条件および熱処理条件の検討の必要性があることを記述した。作業標準は、被覆アーク溶接 (A), ティグ溶接 (T) について作成した。

(5) 6'-6': 析出硬化系ステンレス鋼; 母材の区分 6 (析出硬化系ステンレス鋼) と 6 をアーク溶接法より溶接施工する時に適用する。P ナンバーがマルテンサイト系ステンレス鋼と同じであるが、暫定的に析出硬化系ステンレス鋼を 6' とした。溶接法は、被覆アーク溶接 (A), ティグ溶接 (T) について作成した。

JIS G4304 (熱間圧延ステンレス鋼板および鋼帯) には、析出硬化系ステンレス鋼として SUS630 (17Cr-4Ni 系) と SUS631 (17Cr-7Ni 系) の 2 種類が規定されている。

析出硬化系ステンレス鋼は、固溶化熱処理後に、各種の条件で析出硬化熱処理して強度を調整した材料である。SUS630 は、固溶化熱処理後、析出熱処理 (H900, H1025, H1075, H1150) を行う単一熱処理型であり、析出熱処理温度が低い程、強度は高い。SUS631 は、固溶化熱処理後、二重熱処理型の析出硬化材料である。この種の材料は、1000 N/mm² 以上と強度が強く、伸びも少ないので、この材料同士の突合せ溶接による溶接構造物として使用されることはまれである。高強度、高硬度、耐食性を生かし耐摩耗用材料としてレールや戸当り、バルブシート面などに活用されている。これらの場合、炭素鋼と熱処理済みの析出硬化系ステンレス鋼との異材溶接になることが多いことを記した。

2. 2. 2 炭素鋼とステンレス鋼 (異材) の溶接

異材溶接の溶接手法はユーザから要望が多く寄せられた。炭素鋼とステンレス鋼の溶接作業標準メニュー画面を、Fig.4 に示す。ここでは適用項目と、異材溶接の勘所の解説例について紹介する。

(1) 炭素鋼とステンレス鋼; 母材の区分 1, 3, 4, 5 (炭素鋼および低合金鋼) と 6, 7, 8A, 8B (ステンレス鋼) の異材継手を被覆アーク溶接 (A), ティグ溶接 (T) により突合せ溶接する時に適用する。

この異材溶接の勘所として、Fig.5 に示す炭素の移行現象を説明している。

(2) 肉盛り溶接; 母材の区分 1, 3, 4, 5 (炭素鋼と低合金鋼) へオーステナイト系ステンレス鋼の溶接材料を用いて、被覆アーク溶接 (A) およびマグ溶接 (M) により肉盛溶接する時に適用する。

(3) ステンレスクラッド鋼の溶接; 母材の区分 1 (炭素鋼) を 8A (オーステナイト系ステンレス鋼) で被覆したステンレスクラッド鋼を被覆アーク溶接 (A) およびフラックス入りワイヤのマグ溶接法 (M) により突合せ溶接する時に適用する。解説例として、作業手順図などを掲載している。

2. 2. 3 高合金材料の溶接

高合金材料メニュー画面を Fig.6 に示す。ここでは公開

炭素鋼とステンレス鋼の溶接(完成)	
炭素鋼とステンレス鋼の異材継手 1-8A-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
炭素鋼へのステンレス鋼の肉盛 1-8A-	被覆アーク溶接(手溶接)
	フラックスコールドワイヤ溶接 (マグ溶接)
ステンレスクラッド鋼の溶接 1-8A-	被覆アーク溶接(手溶接)
	フラックスコールドワイヤ溶接 (マグ溶接)

Fig.4. Menu page of the arc welding operation standards of dissimilar metal welding.

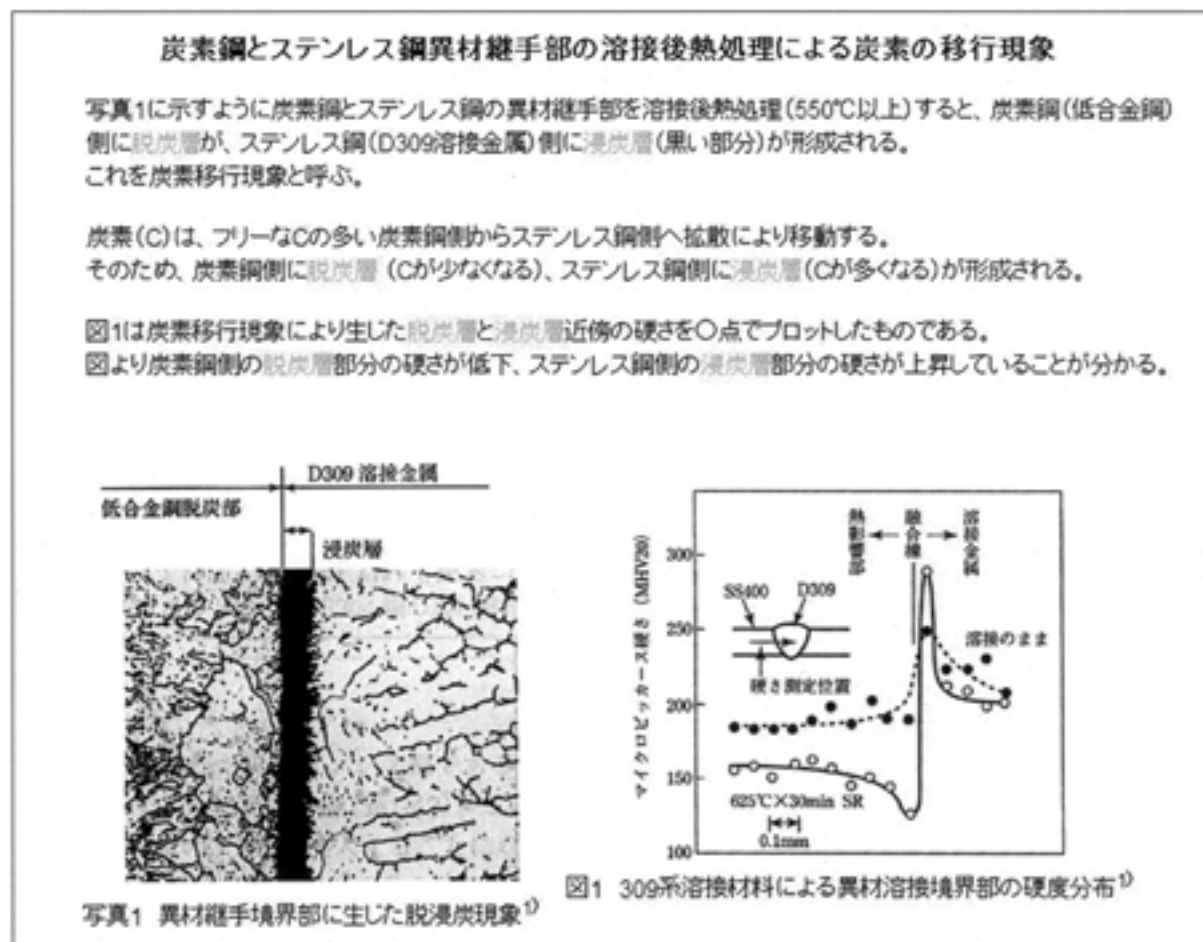


Fig.5. Carbon migration of dissimilar metal welding between stainless steel and carbon steel.

中の作業標準に記述されている適用項目と主な用途または特徴について述べる。なお、一部の種類は未構築である。

(1) インコロイ合金；母材の区分 45（鉄 - ニッケル - クロム合金）を被覆アーク溶接 (A)，ティグ溶接 (T) により溶

高合金材料の溶接(作成作業中)	
インコロイ合金 45-45-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
インコネル合金 43-43-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
ハステロイ合金 43-43-	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
チタン 51-51-T	ティグ溶接
モネル (Ni-Cu)	被覆アーク溶接(手溶接)
	ティグ溶接
キュプロニッケル (Cu-Ni)	ティグ溶接
純銅	ティグ溶接

Fig.6. Menu page of the arc welding operation standards of high alloy.

接する時に適用する。インコロイ合金 (INCOLOY®) の呼称は、Special Metals Corporation の登録商標からきている。現在は、JIS (日本工業規格)、ASTM (アメリカ材料試験規格)、ASME (アメリカ機械学会規格) などに制定され、規格の材料記号も普及しているが、この商標の方がわかりやすい場合が多いので、作業標準では商標と規格を併記した。インコロイ合金として、Special Metals Corporation の技術資料¹⁾には 17 種類ほどあるが、溶接作業標準の対象材料としては、使用量の多いインコロイ 800、800H、800HT および 825 の 4 種類とした。インコロイ合金は、1950 年代初期に INCO 社 (International Nickel Company) で開発され、最初に紹介されたのがインコロイ 800 である。現在も INCO 社の流れをくむ Special Metals Corporation がその技術を引き継いでいる。インコロイ 800 シリーズの材料は、石油化学工業や原子力発電プラントの高温装置部材への使用例が多い。800 の含有 C 量や Al+Ti 量および結晶粒度を調整して高温の特性を向上させたのが 800H、800HT である。ASME には、インコロイ 800 は 593℃以下、800H、800HT は 593℃以上との記述があるので、使用される温度により適正な材料を選定する必要がある。最も高い温度で使用されているのが 800HT で、900℃前後で使用されている例もある。インコロイ 825 は、800 シリーズの材料に Ni、Mo、Cu を添加して耐食性を向上さ

せた材料である。還元性および酸化性の両雰囲気で優れた耐食性を有しているので、耐熱性と耐食性が要求されるプラントなどに使用されているなどを記してある。

(2) インコネル合金；母材の区分 43 (ニッケル-クロム-鉄合金) を被覆アーク溶接 (A) およびティグ溶接 (T) により溶接する時に適用する。インコネル合金 (INCONEL®) もインコロイ合金と同じく INCO 社で開発されている。インコネル合金 (INCONEL® alloy) として、Special Metals Corporation の技術資料²⁾には 26 種類ほどあるが、この溶接作業標準の対象材料としては、溶接構造物として使用量の多い P-43 (ニッケル-クロム-鉄合金) に該当するインコネル 600、601、625 および 690 の 4 種類とした。インコネル合金は、1930 年代初期から開発されている。インコネル合金の用途は、以下のように記した。

- 1) インコネル合金として最初に開発されたのがインコネル 600 で、現在も耐熱耐食材料として使用されている。
- 2) 601 は、600 より Cr の増加、Al の添加などにより、耐熱 (耐酸化) 性を向上させた材料である。
- 3) 625 は、Mo を多量 (9 mass%) に添加した材料で、耐海水腐食などの耐食性に優れている。
- 4) 690 は、Cr を 30 mass% に増加した材料で、耐熱、耐食性を向上させた材料である。

(3) チタン合金；チタン材は耐食性に優れ、軽くて強く、溶接性、加工性も良いので各方面で幅広く使用されている。代表的な使用用途として、宇宙・航空機産業、発電用施設、海水淡水化装置、化学プラント、建築用材料、医療用（生体）部品、スポーツ用部品、装飾品などがある。

チタン材の溶接作業標準は、母材の区分 51、52 のチタンおよびチタン合金をティグ溶接法（T）により突合せ溶接する時に適用する。

溶接材料は、JIS Z 3331「チタンおよびチタン合金イナ-

トガスアーク溶加棒およびソリッドワイヤ」に 11 種類規定されているので、その品質に合格したものを使用することが必要である。規定の溶加棒の中に、丸棒と角棒の規定があるが、現在入手困難な溶接材料では同種の板材を切り出して角棒として使用することができる。溶接材料用角棒の仕様は JIS の規定にあるので、これに適合したものとする。酸化性の高いチタン合金のティグ溶接では、溶融金属のガスシールド方法と運棒方法が重要である。その要領を作業標準本文中、Fig.7 のように掲載してある。

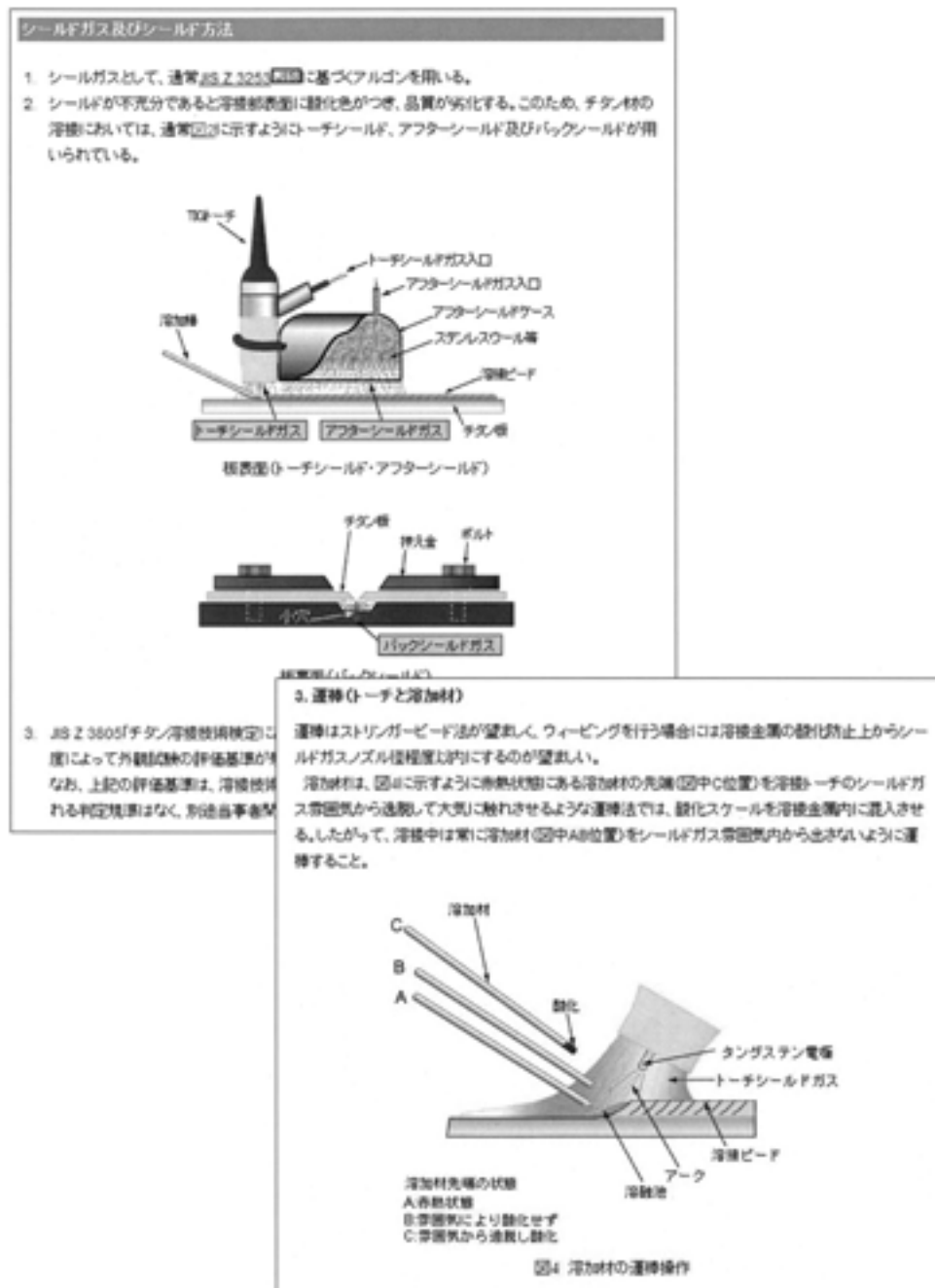


Fig.7. Explanation of Gas shielding process and weaving motion at TIG welding.

2. 3 事例集

2. 3. 1 WPS (溶接施工法確認試験方法書) PQR (溶接施工法確認記録書)

重要な構造物の溶接施工では、WPS、PQR の認証が必要

2. 3 事例集

2. 3. 1 WPS（溶接施工法確認試験方法書）

PQR (溶接施工法確認記録書)

重要な構造物の溶接施工では、WPS.POR の認証が必要

2. 3. 2 实施例

溶接作業標準は、健全な溶接ができるような作業手順の説明文書である。その手順に従って施工すると、各種判定を合格する品質の良い溶接継手が得られるはずである。当所ではそれを実際に溶接実験し、事例数値を示して科学的に実証した。各作業標準に準拠した溶接事例は、PQR の作成方法に倣って各種試験および判定を行った。インコロイ合金のティグ溶接の事例を Fig.9 に示す。

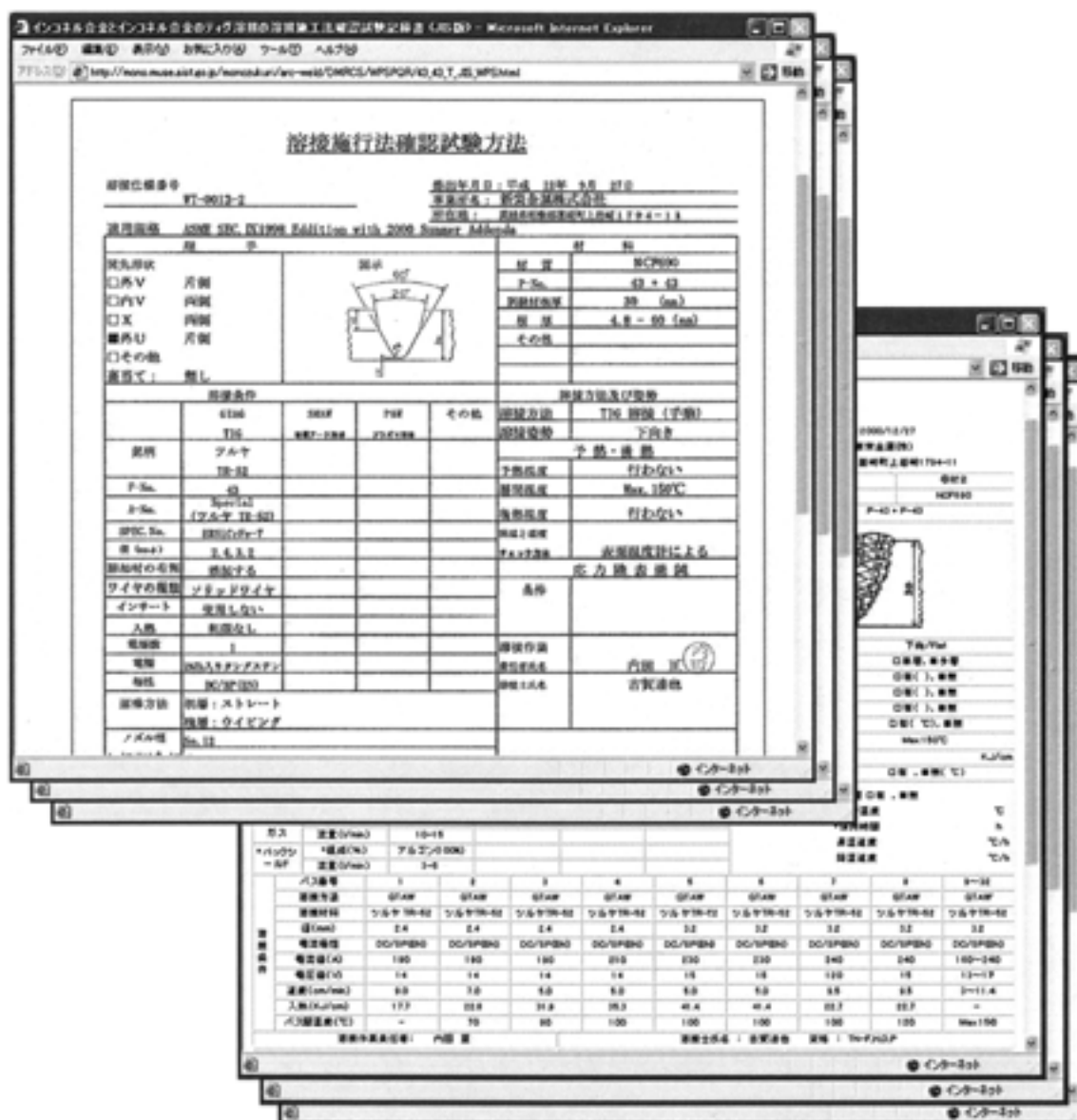


Fig.8. WPS and PQR of 43(INCONEL)-43-T(TIG) .

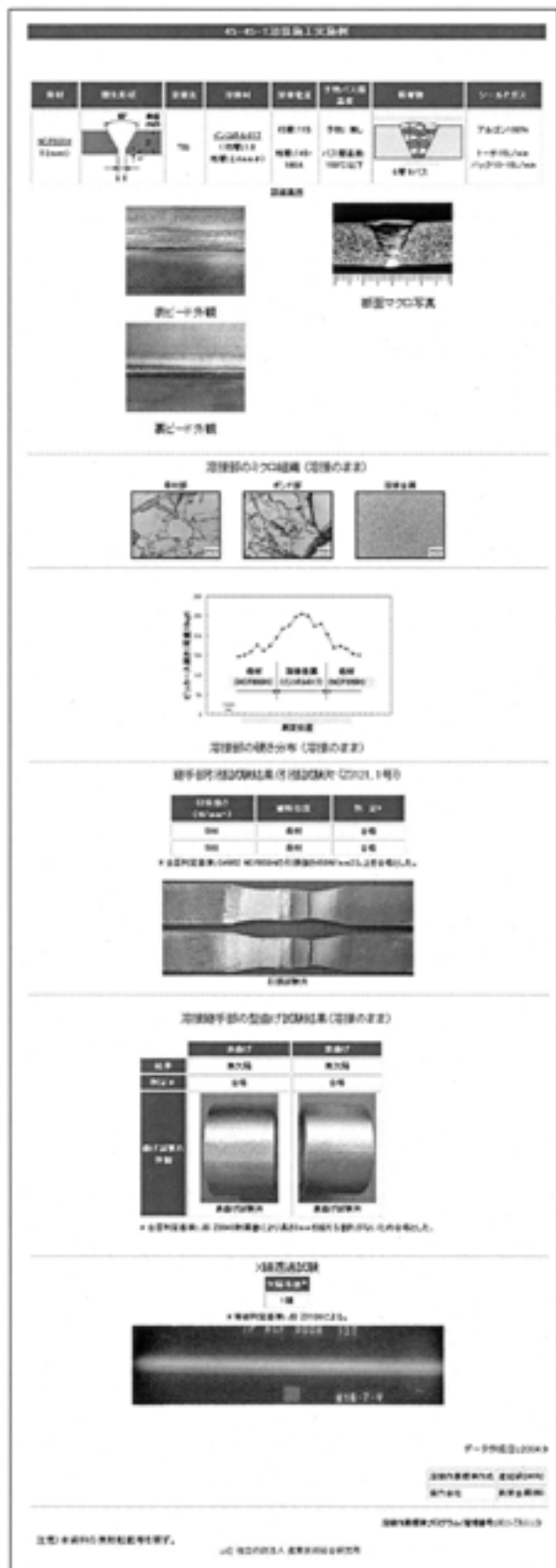


Fig.9. A welding case of TIG welding of Incoloy alloy (P-45).

本来、アーク溶接データベースの基本は実験事例ベースから構成されている。すなわち、これまでさまざまな書式で記録されてきた溶接事例をある決まった書式で記述し蓄積することによって、アーク溶接技術情報を収集し伝承しようとするものである。通常、企業ではアーク溶接条件を記録することはまれであるが、それを業務の中で蓄積できる手法を確立することで、溶接トラブルの解決などの加工支援や、企業の技術資産として役立てることができるはずである。当所では溶接加工が再現できるだけの事例の必須項目を検討し、XML (Extensible Markup Language) による記述方式を開発した^{3),4)}。これらは、XML Schema で要素を定義しており、Fig.10 のような要素のツリー構造を構成している。また、Fig.11 に XML テキストの一部とブラウザの表示例を示す。XML は XSL (Extensible Stylesheet Language) を用いてブラウザで変換し、ユーザに見やすい形で表示される。作成した XML 溶接事例は 1997 年からの 9 年間の実験データで 114 件である。対象とした母材は、軟鋼、クロムモリブデン鋼、ステンレス鋼、チタン合金など Table 1 に示す 7 種類である。事例は各作業標準からのリンクだけではなく、EagleSearch⁵⁾ によって、ユーザが必要とするものを検索提示することが可能である。今後、ユーザ事例も含めた事例間の比較システムを開発予定である。

3. まとめ

中小溶接製造業の技術強化のために、溶接作業標準の提供が有効と判断した。まず、ステンレス鋼作業標準を作成し、WWW 上に初公開したのは 2002 年 10 月である。以来、現在まで、材料の種類を広げ、作業標準を更新し続けている。

高合金材の溶接作業標準の作成には、技術情報が少なく、そのため各材料ごとにその道の達人の技術提供を受けるなど、多くの方と団体の協力を得た。

公開から 4 年が経過し、溶接関係者への普及とともに、さまざまな要望も寄せられている。これらのご意見、ご要望などを参考に、なお一層、溶接データベースの拡充に努める予定である。

以上、紹介させていただいた溶接データベースを、多くの方に御活用いただければ幸いです。

(文 献)

- 1) Special Metals Corporation: Products INCOLOY® alloys 800, 800H and 800HT.

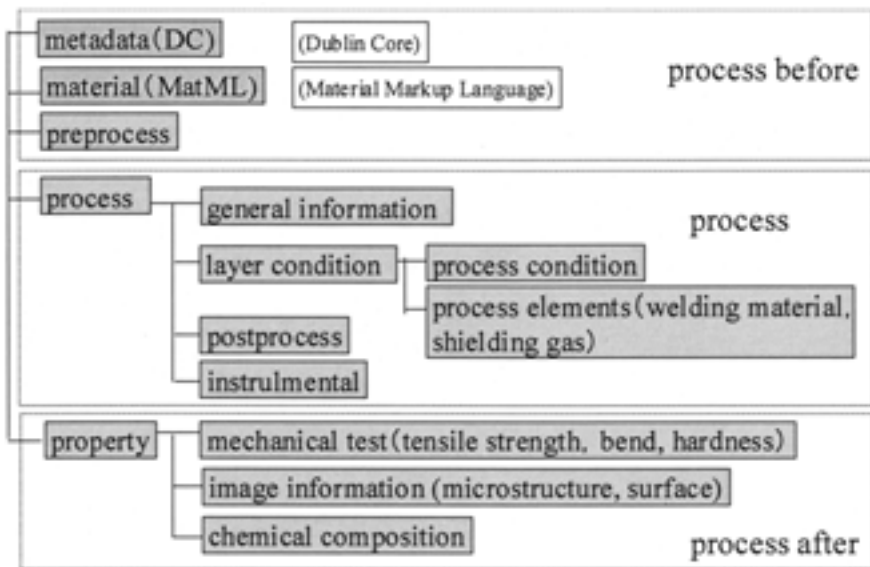


Fig.10. Structure of the arc welding data schema.

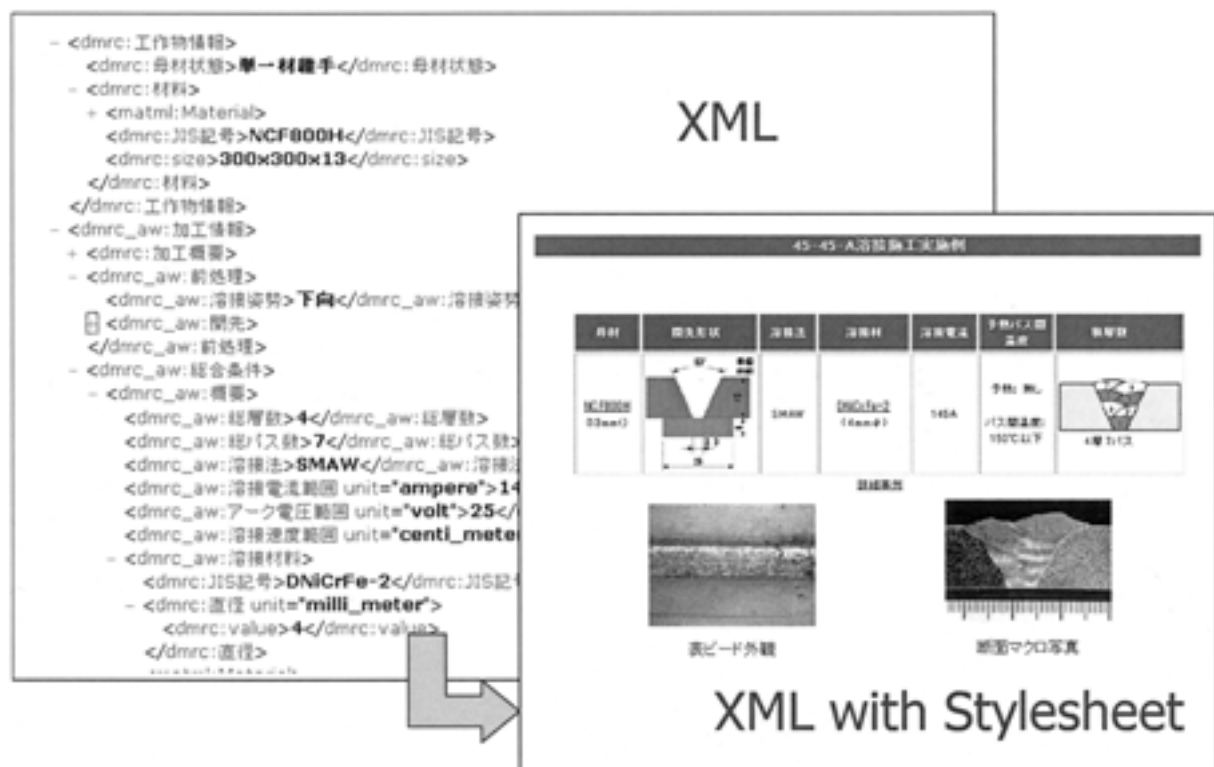


Fig.11. Part of the XML instance and its rendered image with stylesheet.

Table 1. Number of cases per each basemetal.

Basemetal	Carbon steel	Stainless steel	Chrome molybdenum steel	Titanium alloy	Nickel based alloy	Copper alloy	Aluminum alloy
Case numbers	22	34	12	30	12	3	1

- 2) Special Metals Corporation: Products (INCONEL[®] alloy600, INCONEL[®] alloy601, INCONEL[®] alloy625, INCONEL[®] alloy690).
- 3) 大谷成子, 小島俊雄, 大橋隆弘: 精密工学会論文誌, 71 (2005), 5, 613.
- 4) ものづくり先端技術研究センター: 加工事例記述のためのXML定義, 産業技術総合研究所 DMRCレポート, 6 (2005).
- 5) O.Ryabov: 精密工学会秋季大会講演論文集, 107 (2002), 626.