

一般論文

品質評価方法の検討による 溶接品質維持向上への取組み

Approach to Welding Quality Maintenance and
Improvement by Studying Analysis Method

宮崎美雪 Miyazaki Miyuki	榎靖弘 Enoki Yasuhiro
原田隆生 Harada Takao	柳本進一 Yanagimoto Shinichi
伊達昌和 Date Masakazu	宿久明日香 Shuku Asuka
野口優弥 Noguchi Yuya	宇都宮里佐 Utsunomiya Risa

概要

当社製品には、特殊工程の一つである溶接が多数用いられている。特殊工程は完成後の状態から品質の良否を判断することが難しい工程のため、品質維持向上には工程の妥当性確認が正しくできる仕組みが必要であり、全社的に取組みを進めている。今回は、溶接技術の品質向上を目的に、溶接品質評価方法の検討と良否「見える化」の試みを行ったので紹介する。

Synopsis

Our products use welding, which is one of the special processes. Since it is difficult to judge the quality of special processes from the appearance of completed products, we need a system that can correctly confirm the validity of processes to maintain and improve quality. This time, for the purpose of improving the quality of welding technology, we studied a welding quality evaluation method and attempted to “visualize” the quality of welding.

1. はじめに

当社製品には、特殊工程である溶接技術が用いられており、その方法や用途は多岐にわたる。特に、高電圧製品においては、構造部の接合に用いられるだけでなく、強度や気密性を確保するために非常に重要な工程となっている。

溶接は特殊工程と呼ばれ、主にその検査方法は、目視による外観検査（官能検査）や自動検査があるが、当社製品は受注生産の一品一様製品が多いことから、溶接検査の自動化適用が難しい。一方、目視による外観検査は、その結果が人的要因に大きく左右される

という課題があることから、当社製品の溶接品質の維持・向上には、溶接スキルと検査技能を向上させ、外観検査の精度向上を図ることが必要不可欠である。

そこで、外観検査の精度向上の一つとして、検査精度のばらつき範囲を低減させることを目的に、製品を模擬した外観不良溶接見本を作り、当該見本に不良状態の測定値を表示した限度見本を作製した。また、外観不良見本の見栄えに対する溶接内部不良の状態や機械強度の相関について検証を行ったので報告する。

2. 外観検査のばらつき低減に向けた取り組み

目視による外観検査は、溶接状態の良否を見極める重要な検査である。しかし、検査基準に基づいた判定を目視で行うことは、一定の知識と経験を要し、さらには検査員の主観に依存するため、検査結果にばらつきが生じやすいという課題があった。

そこで、外観検査のばらつき低減のため、当社でよく用いられる被覆アーク溶接とMAG (Metal Active Gas) 溶接の外観限度見本を作製した。当該見本は、作業後の良否判定において比較対象として見比べることで、検査基準をクリアしているかを定性的に判断するために用いるものである。今回、より判断レベルを分かりやすくするために、溶接外観状態に計測した数値を記載することで不良状態を「見える化」した。また、内部欠陥の確認方法には超音波探傷検査や放射線透過試験が用いられるが、これらは高いスキルと検査時間を要する。よって今回は、外観状態から示唆される内部欠陥状態についても検討した。

2. 1 溶接品質「見える化」へのアプローチ方法

今回、溶接品質の「見える化」に対して用いた分析手法の観察対象と用途を表1に示す。

表1 各分析手法の観察対象と用途

分析手法	観察対象	外観欠陥	内部欠陥	溶け込み
OM	外観	○	×	×
	断面	×	△	○
X線CT	溶接部全体	△	○	×

○：観察可能、△：局所的に観察可能、×：観察不可

今回は、それぞれの用途に対し、デジタルマイクロスコップ (Optical Microscopy (OM)) を使用した外観評価と化学エッチングによる金属組織現出後の溶け込み (内部状態) の評価、およびX線CTによる内部欠陥評価の3つの手法を用いた。

はじめに、OMを用いた外観評価手法を記載する。本手法では、アンダーカットやビード不揃い、蛇行等をはじめとした表面欠陥や見栄えを、OMを用いて測定した。目視判断では難しい計測結果を基準値と比較して外観見本に示すことで、見栄えと実際の測定値との結びつけを行った。

図1に、OMによるアンダーカットの計測結果を示す。溶接外観を三次元的に撮影し、(b)に示される白線部1のプロファイル (c) から、アンダーカットの深さを計測した。目視や定規では計測が難しい箇所も、このように断面のプロファイルから定量化し、欠陥の「見える化」を図った。

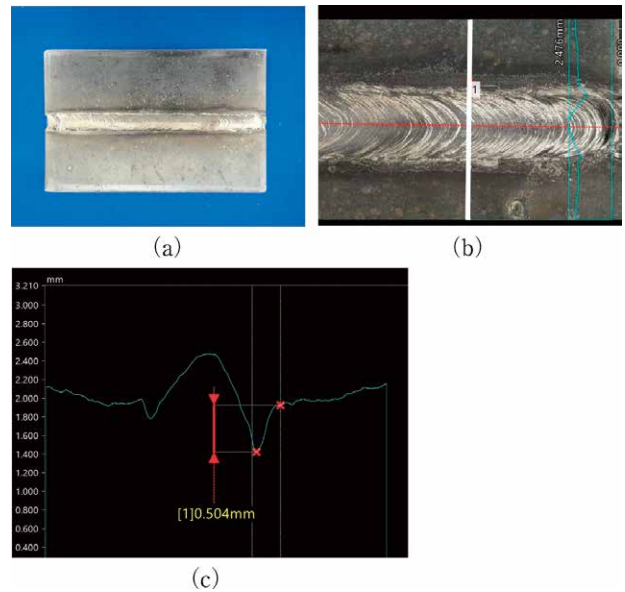


図1 (a) サンプル写真 (被覆アーク溶接突合せ継手)
(b) アンダーカット外観拡大観察画像
(c) (b) 画像白線部1のプロファイル結果

次に、OMを用いた内部状態の評価手法を記載する。本手法は、溶接部を切断し断面を作製した後、化学エッチングを施して金属組織を現出させた断面をOMで観察し、内部状態を評価した。金属組織の現出により、溶接部の溶け込み深さや断面の状態 (亀裂、割れ、ブローホール等) を確認することができる。

図2に平板を重ねた隅肉継手の良品溶接断面を示す。溶接部が両板に対し均等に溶け込み、熱影響部も大きな偏りがないこと、また、亀裂やブローホールなどの欠陥が見られないことが分かる。

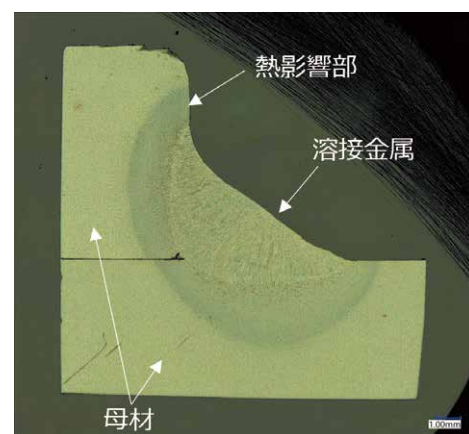


図2 化学エッチング後の溶接断面 (金属組織) 観察画像

最後に、X線CTを用いた内部欠陥（ブローホール、溶け込み不足、融合不良、スラグ巻込み等）の評価手法について記載する。X線CTでは、溶接内部の空隙の大きさや形状、位置を三次元的に観察できるため、溶接の内部欠陥状態を確認できる。

図3に隅肉継手の不良サンプル（オーバーラップ）をX線CTで観察した結果を示す。溶接が盛り上がった凸形状になっており、内部には複数のブローホールが確認された。

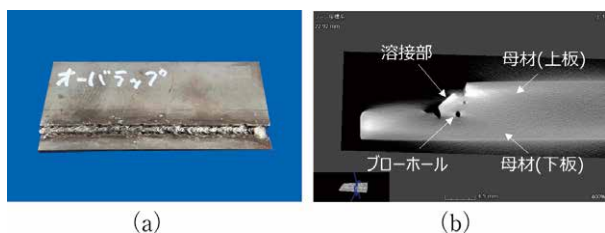


図3 (a) サンプル写真（被覆アーク溶接隅肉継手）
(b) X線CTによる溶接部断面画像

今回、これらの手法を目的に応じて使い分けて被覆アーク溶接とMAG溶接をそれぞれ評価することで、溶接品質の「見える化」に取り組んだ。次節以降でその詳細を説明する。

2. 2 被覆アーク溶接の評価

当社製品においては、被覆アーク溶接は油密や気密に用いられることが多い。よって溶接品質には、外観欠陥がないことだけでなく、リークパスとなり得る欠陥が内部にないことが求められる。外観検査で内部も含めた溶接状態を推定できれば、より不良流出防止につながることから、内部状態の推定も含めて溶接品質を「見える化」できるように取り組んだ。

そのために、当社製品で用いられる構造を模擬した溶接外観限度見本の良品と不良品を作製した。見本はアンダーカットやオーバーラップ（不良レベル）などの欠陥を数値化し、どの様な見栄えが「基準を超える不良」であるかを明示した。さらに、外観不良品の内部を評価し、外観不良と内部状態の関連を確かめたので、その一部を紹介する。

図4に外観限度見本の外観一例を示す。

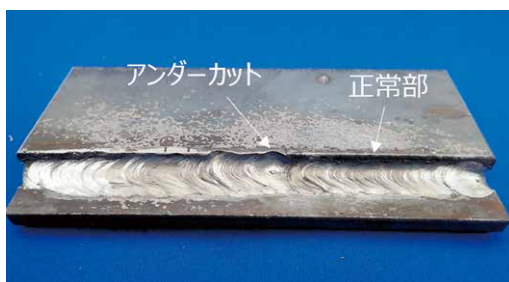


図4 隅肉継手溶接のアンダーカット外観見本

図4に示すサンプルは板厚6mmの平板を重ねた隅肉継手溶接であり、図5に図4の形状の良品と不良品（アンダーカット）の化学エッチング後断面観察結果を示す。

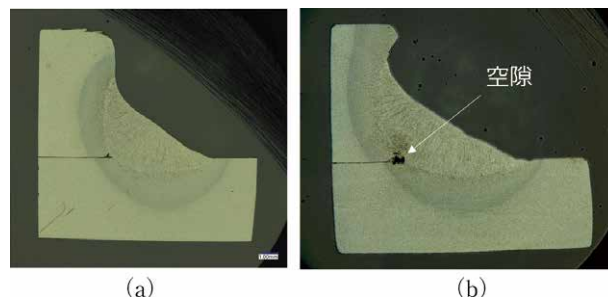


図5 隅肉継手溶接の化学エッチング後断面観察結果
(a) 良品、(b) アンダーカット

図5のうち、良品は両板に対して均等に熱がかかり、溶け込んでいたのに対し、不良品は熱影響部に大きな偏りが見られた。また、良品は板の角が直交する深さまで溶接部が均等に溶けこんでいたが、不良品の溶け込みには偏りが見られ、内部には空隙が確認された。この結果から、アンダーカットは良品に比べて溶け込みが不十分であると考えられ、外観の不良だけでなく内部にも欠陥が生じる可能性が示唆された。

続いて、図6に図5と同形状の良品と不良品（オーバーラップ）のX線CT結果を示す。

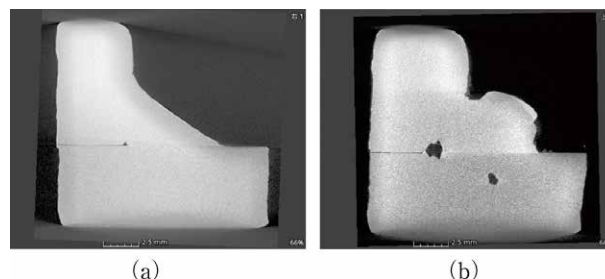


図6 隅肉継手溶接のX線CT観察結果
(a) 良品、(b) オーバーラップ

オーバーラップはビード外観が凸型であることが多い溶接不良であり、今回の不良品では内部にブローホールが多数確認された。この結果から、オーバーラップのような外観欠陥の内部にも欠陥が含まれる可能性があることが分かった。

以上のような評価を複数のサンプルに対して実施した結果、アンダーカットやオーバーラップの外観欠陥は見栄えや形状の不良だけではなく、溶接内部の不良状態との相関がある可能性が示唆された。溶接の外観不良は、材料の適切な前処理がされていない、または電流や速度、トーチ保持角度などの溶接条件が適正でないことが原因で生じやすいため、不

適正な見た目の溶接は、溶接そのものの品質状態も示唆していると推測される。したがって、溶接外観検査技能を向上させることは溶接品質維持向上につながると考える。

2. 3 MAG溶接の評価

当社では、MAG溶接は製品の構造部に用いられることが多く、重量物を接合する重要な役割を担っている。また、溶接の美観が製品外観と直結するため、特に見栄えを含めた品質が求められる。

MAG溶接における溶接品質の「見える化」への取組みとして、二つの事例を紹介する。一つ目の事例として、薄板を直角に突き合わせた隅肉継手溶接の外観不良限度見本を作製し、定量値を表記した。また、それら不良限度見本をX線CTにより観察し、内部の状態を評価することで、外観と内部の相関を確認した。

不良例として、外観の見栄えに影響を与えやすいビードの蛇行、ビードの不揃いおよびクレーター処理（ビード末端の処理）が不十分なサンプルを作製した。

図7にビード蛇行不良例の外観と、X線CT結果を示す。

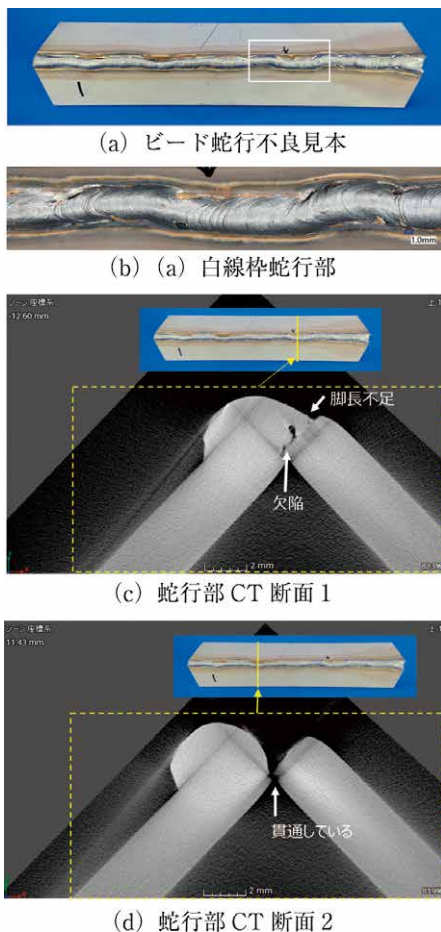


図7 ビード蛇行不良見本外観とX線CT結果

ビード蛇行の内部は欠陥が生じており、脚長が足りない板側へ十分に溶け込んでいないことが分かった(図7(c))。また、大きく蛇行した箇所の外観は、板の側面が明らかに露出しており、断面を見ると裏側へ貫通していることが確認された(図7(d))。

次に、図8にビード不揃い例を示す。ここでは、ビード幅が細い箇所で溶け込み不良と考えられる欠陥が見られた。

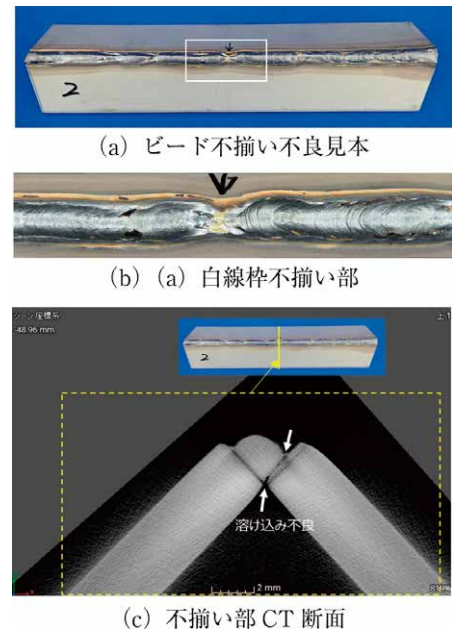


図8 ビード不揃い不良見本外観とX線CT結果

最後に、クレーター処理が不十分な例を図9に示す。

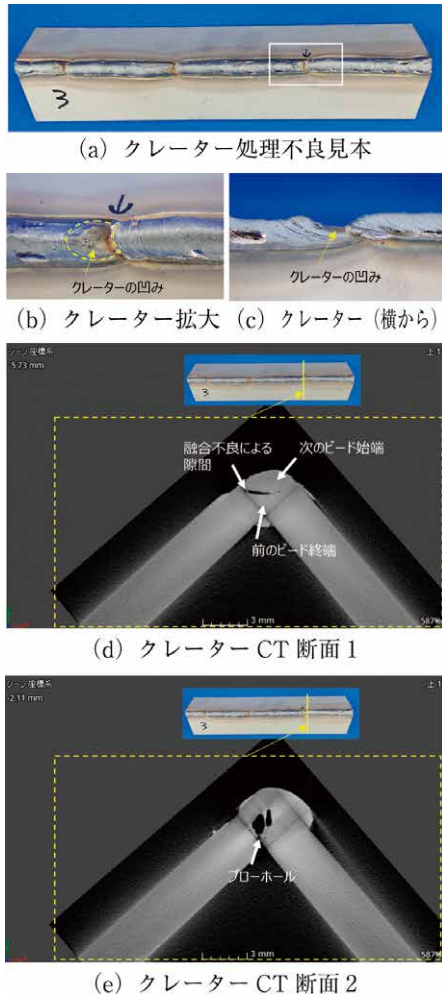


図9 クレーター処理不良見本外観とX線CT結果

外観ではクレーターの凹みが目視でも確認できた。またクレーター処理が不十分で、前の溶接ビード終端と次の溶接ビード始端が溶け込んでおらず、空隙やブローホールが認められた。

これらの外観限度見本は、不良例として外観検査の教育に使用され、内部の観察結果は外観不良から推測される内部の危険性を示す資料として活用されている。

二つ目の事例として、JIS Z 3841に準拠した試験片（突合せ継手中板、V字開先60度）を用いて外観と曲げ試験、および内部状態の評価を実施したので紹介する。

図10にCO₂溶接の代表的な良品外観と内部状態を示す。

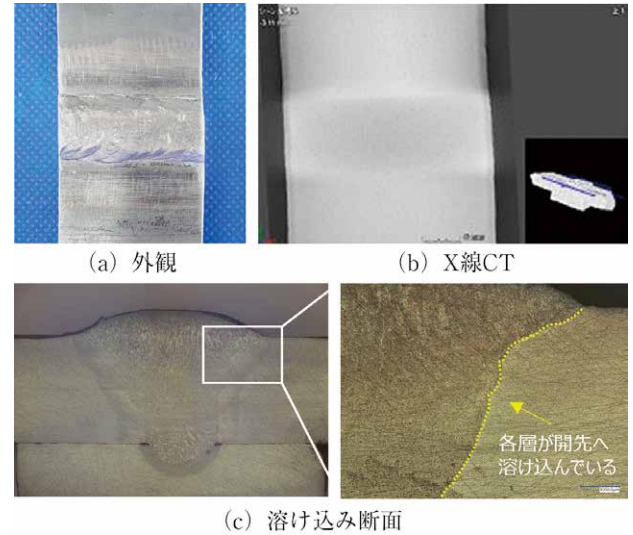


図10 CO₂溶接試験片良品結果

良品はビード形状や幅、余盛高さなどの外観や、曲げ試験において欠陥は見られなかった。また、内部状態を観察した結果、空隙はほとんどなく、各層が開先（母材）に対して十分溶け込んでいる様子が確認できた。

次に、不良例として図11に不良品1の外観と曲げ試験、およびX線CT観察結果を示す。

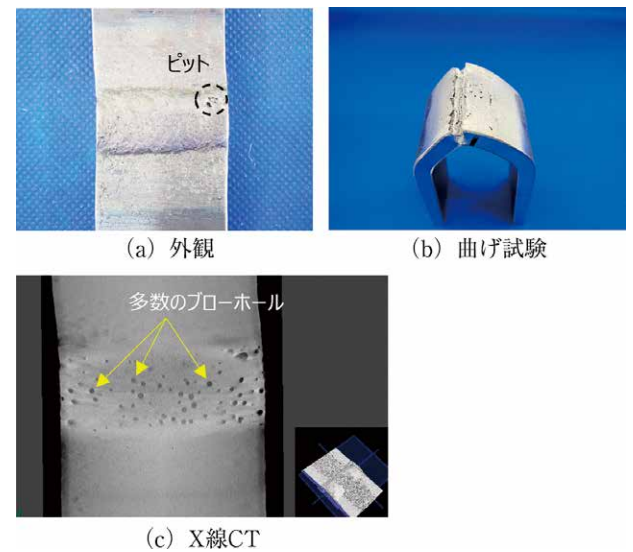


図11 CO₂溶接試験片不良品1結果

不良品1は外観表面にピットが見られており（図11 (a)）、その内部をX線CTで観察すると、多数のブローホールが確認された（図11 (c)）。また曲げ試験を行った結果、全長にわたり深い亀裂が生じた（図11 (b)）。このような不良発生要因としては、シールドガス不足やノズルにスパッタが詰まっているなど、溶接条件が適正でなかった可能性

が考えられる。

続いて、図12に不良品2の外観と曲げ試験、および溶け込み断面観察の結果を示す。

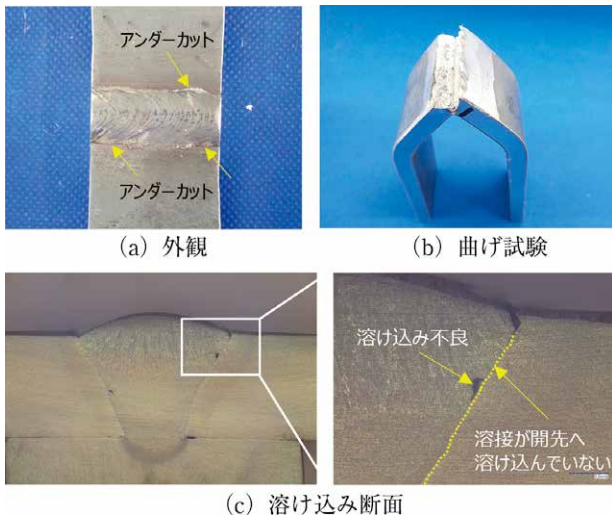


図12 CO₂溶接試験片不良品2結果

不良品2の外観にはアンダーカットが確認された(図12(a))ほか、曲げ試験では全長にわたる割れが確認され(図12(b))、溶接不良であることが確認された。また、断面における溶け込み状態を観察し、良品の結果(図10)と比較すると、不良品2は良品に比べて溶け込みが不十分であり、開先が残存し、溶接部と開先の界面に欠陥が見られた(図12(c))。このような欠陥ができた要因として溶接の狙い位置が適切でない可能性が考えられる。

以上の二つの事例より、外観不良を有する溶接は、その内部にも溶け込み不良やブローホールなどの欠陥が潜んでいることが分かった。MAG溶接においても、被覆アーク溶接と同様に、外観不良が現れるような不適正な溶接条件が、内部の状態に影響していると推定される。

3. 溶接不良と機械強度の相関

溶接は金属を接合する手法であり、一般的に溶接部の強度は設計においても重要なパラメータである。しかし、外観不良が強度などの機能面に与える影響について評価した事例は少なく、経験の浅い溶接従事者および検査員では、外観不良を単なる見栄えとしての不良と捉えてしまう危険性がある。そこで、溶接技能と検査技能向上への意識を高めることを目的に、外観欠陥をはじめとする溶接欠陥が強度に与える影響を、「見える化」することを試みたので、本章にて説明する。

サンプルとして、MAG溶接の良品および外観欠陥(アンダーカット品、ビード蛇行品)および内部欠陥(ブローホール品)を意図的に作製した。試験には、あらかじめ内部状態をX線CTにて確認し、内部に欠陥があることを確認したサンプルを供試した。開先は板厚の半分の厚みでC面取りし、開先部が溶け込むように溶接した(完全溶け込みでない)。

図13に溶接品の引張強度試験結果を示す。横軸は断面に対する欠陥面積の割合をとった欠陥面積率とした。欠陥面積率は、事前にX線CTを用いて確認した内部状態を基に、実際の破断面に準じた面、具体的には図14に示す良品とブローホール品はビートの中央断面、アンダーカット品とビード蛇行品は、開先表面に含まれる欠陥面積の割合を算出したものである。

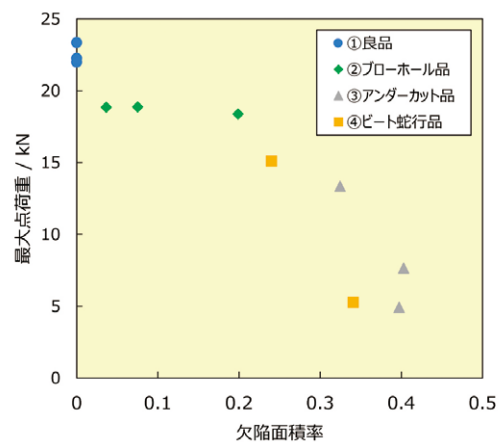


図13 溶接欠陥品における引張強度試験結果

引張強度試験の結果、欠陥を有する溶接品は良品に比べて強度が低下し、欠陥面積率が大きくなるほど引張強度は低下する傾向が確認された。この結果から、欠陥を有する箇所は機械強度が低下する可能性があると考えられる。また、試験前後のサンプル外観一例を図14に示す。

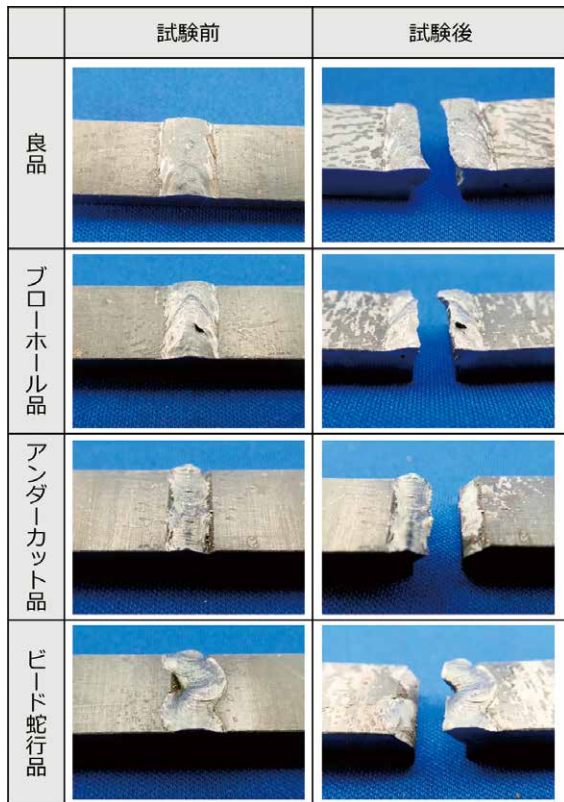


図14 引張試験前後のサンプル外観

ブローホール品は良品と同じようにビード中央部で破断しているが、内部に欠陥があるため、良品と比べて強度が低下する結果となった。ビードの中央で破断するような形態となった要因として、ブローホール品は内部に欠陥を有するものの、ある程度母材に対して溶け込んでおり、結果的に構造上断面積が最も小さくなる中央部にて破断したと考えられる。一方で、アンダーカット品とビード蛇行品については開先表面で破断した。これらは、十分溶接されておらず、開先との接合面積が中央部より小さくなった可能性がある。もしくは、開先への溶け込みが不十分であったため、母材と溶接金属の境界が弱点部となり、そこを起点として破断した可能性も考えられる。

この結果から、このような欠陥品は強度低下に与える影響が大きいと推測されるため、検査での外観良否判定が重要であると言える。

4. 技能教育教材製作の取組み

当社では、安全な作業のもと製品品質を担保する技能向上を目的に溶接技能競技会を毎年開催している。また、溶接業務従事者および製品検査員を対象に、溶接マイスター（高い溶接技術、技能の専門的知識を有すると当社で選任された社員）による溶接の基礎講習を行い、知識強化と技能向上に努めている。

これら溶接技能向上の一環として、溶接技能の一層の習熟と向上を図るため、溶接の良品および不良品の状態を「見える化」し、基本的な作業要領とともに社内資料化することで、技能的な改善点を明確にする資料として活用している。

5. まとめ

本稿では、特殊工程である溶接の品質維持向上に向けた取組みについて紹介した。溶接はその良否を完成後の外観からの官能検査により判断することが多い。よって、外観検査の精度向上の一つであるばらつき低減を目指し、見栄えに対応した実際の定量値を示した外観限度見本を作製した。

また、不具合程度の測定値を内部状態や機械強度を含めて「見える化（可視化）」をすることで、溶接業務従事者の技能向上や製品検査員の検査ばらつき低減にアプローチした。現在も継続して溶接状態の「見える化」に取り組んでおり、今後も、より一層の品質維持向上へ努める所存である。

参考文献

- (1) 日本溶接協会 出版委員会 編『JISZ3801手溶接技能者研修テキスト 新版JIS手溶接受験の手引き』産報出版(1998)
- (2) 大畑充「溶接継手強度の基礎」溶接学会誌、77巻7号(2008)pp.678-684
- (3) 渡辺、蒲地「溶接欠陥と継手強度の関係」溶接学会誌、30巻6号(1961)pp.376-386

✎ 執筆者紹介



宮崎 美雪 Miyazaki Miyuki
研究開発本部
材料技術開発研究所



榎 靖弘 Enoki Yasuhiro
生産技術本部
品質保証統括部 グループ長



原田 隆生 Harada Takao
生産技術本部
生産技術部 主査



柳本 進一 Yanagimoto Shinichi
生産技術本部
生産技術部 工師



伊達 昌和 Date Masakazu
生産技術本部
生産技術部 マイスター



宿久 明日香 Shuku Asuka
研究開発本部
材料技術開発研究所



野口 優弥 Noguchi Yuya
研究開発本部
材料技術開発研究所



宇都宮 里佐 Utsunomiya Risa
研究開発本部
材料技術開発研究所 主幹