技術報告

ステンレス鋼と純アルミニウムとの摩擦圧接による異種金属接合継手の品質評価方法(1)
—丸棒同士の継手の場合—

Method of Quality Evaluations for Friction Welded Joints on Dissimilar Metal SUS and Al (1)
—in Case of Round Bar to Round Bar Joints—

笹部　誠二*，木村　真晃**，中島　和之***，
川上　巧****，梅田　真一*****，榎本　正敏******，
菅　泰雄*******，中田　一博********
Seiji Sasabe*, Masaaki Kimura**, Kazuyuki Nakajima***,
Takumi Kawakami****, Shinichi Umeda*****, Masatoshi Enomoto******,
Yasuo Suga******* and Kazuhiro Nakata********

1. はじめに

異種金属接合体の継手品質の評価方法には種々のものがある．ここでは，その一つである（一社）軽金属溶接協会が原案作成団体として開発制定したJIS Z 3175:2016「摩擦圧接による異種金属接合継手の試験方法及び継手品質評価の分類」の紹介かたがた，その基にした原案作成委員会にて実施したラウンドロビン試験における結果を，改めて取りまとめたので報告することとした．

固相接合の一種である摩擦圧接による異種金属接合体は，自動車部品，電力部品などの一部に実用化されており，その要求品質に対して，種々の評価方法にて保証されている．しかし，異種金属接合体の品質評価の方法には統一されたものがないことから，過度な品質評価要求があったり，逆に中には低い品質のものが出回ってしまう等の懸念点があることから，それらへの対応ニーズに応えようとしたものである．

* 元(一社)軽金属溶接協会　former Japan Light Metal Welding Association
** 兵庫県立大学大学院　University of Hyogo Graduate School of Engineering
*** 精密工業㈱　Seimitsu Industrial Co., Ltd.
**** ㈲川上製作所　Kawakami Factory. Ltd.
***** 三協立山㈱三協マテリアル社　Sankyo Tateyama, Inc. SankyoMaterial-Company
****** ㈱WISE企画　WISE PLANNING CORPORATION
******* 慶應義塾大学名誉教授　Professor Emeritus, Keio University
******** 大阪大学名誉教授　Professor Emeritus, Osaka University
原稿受付：2020年4月13日

2. 異種金属接合の品質評価に対する考え方

今回対象とするオーステナイト系ステンレス鋼と純アルミニウムとの組み合わせにおいては，主としてFe, Al系の金属間化合物（以下IMC）層が生じ[1]，その脆弱な特性により薄いほど良いといわれる一方，薄すぎると両材料が十分に反応していない未接合部が生じるようになり，却ってその継手特性の低下を来すこととなり，結局，継手特性の最大値をえる実用上最適なIMC層厚さが存在すると言われている[2),3)]．

しかし，いずれにしてもこの継手特性の基本となるIMC層厚さの観察は，断面の接合界面を高倍率にて丹念に観察することが必要であることから，他の簡単な機械的試験で代用できるならば，工業上，非常に有用であると考えられる．よって，ここでは，IMC層厚さとの相関性のある代用特性を見出せるか否かがポイントであると考え，その観点からデータを解析するものとした．

3. 供試体

供試体は，オーステナイト系ステンレス鋼SUS304と純アルミニウムA1070との組み合わせにおける摩擦圧接による異種金属接合体である．なお，その作製時の接合条件は不詳である．それは，本試験の目的が接合条件の最適化にあるのではなく，継手評価の最適化にあるためであり，いわゆるラウンドロビンテストとして各種継手品質を有する接合体を評価できる方法の開発に取り組んだものである．その供試体作製に当たっては，（一社）摩擦接合技術協会の会員である5社（A, B, C, D, E）の協力を得た．

なお，この供試体は，25 mmφの中実丸棒材同士を突合せ，回転摩擦圧接後，バリ研削された異種金属接合体であり，各社固有の接合条件にて引張試験用に２本，曲げ試験用に２本，断面調査用に１本の合計各社５本づつ作製された．

4. 試験方法及び試験結果

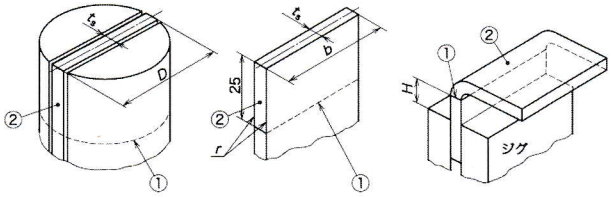
1) 接合界面の断面観察

接合界面各位置におけるIMC層厚さの調査は以下のように実施した．後記する曲げ試験の結果と対応させるために，図１に示す矩形状の曲げ試験片の外周部近傍，回転中心部及びこれら両位置の中間部の３か所を，光学顕微鏡にて1000倍の倍率で観察した．

その結果を，写真１及び図２に示す．これによると各社の供試体は，IMC層の厚さとして0.5 μm前後，1.0 μm前後および2.5 μm前後の３グループに大きく区分されることが分かる．

2) 継手の引張試験

JIS Z 3121に基づき継手の引張試験を実施した．図３に示す荷重―変位線図における引張強さ，破断時全伸び，



①:圧接面 ②:曲げ試験片 b:試験片幅(=D:継手供試材外径) ts:試験片厚さ(=b/4)

図１ 丸棒供試体からの曲げ試験片の削り出しと曲げ試験要領

No.	回転外側	中央	回転中心	平均厚さ
A	0.58 μm	0.46 μm	0.33 μm	0.46 μm
B	0.54 μm	1.58 μm	1.54 μm	1.22 μm
C	0.54 μm	0.58 μm	0.37 μm	0.50 μm
D	0.37 μm	0.67 μm	0.37 μm	0.47 μm
E	1.79 μm	3.33 μm	2.70 μm	2.61 μm

写真１ 供試材接合界面断面各位置の光学顕微鏡写真及び金属間化合物層の厚さ

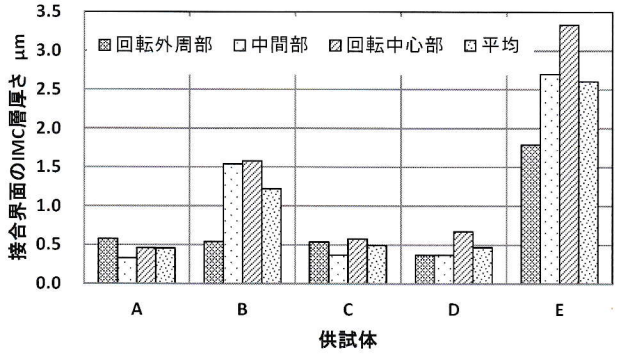


図２　供試体各部位接合界面の IMC 層厚さ

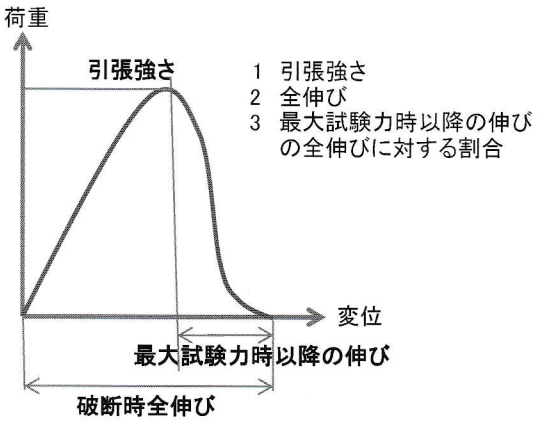


図３　引張試験における採取データ

最大試験力時以降の伸びおよび破断位置を評価の対象とした．

これらの結果を，表１に示すが，破断後の外観を写真２に示す．これから，供試体サンプル B, E の各１本に接合界面での破断が認められたが，他の全ては A1070の母材部で破断した．計測した荷重―変位線図を図４に示すが，接合界面で破断したサンプルはアルミニウム母材で破断した場合に比較して，特に最大試験力時以降の伸びの低下が顕著であった．この特徴をここでは，最大試験力時以降の伸び（表１中の(a)）の全伸びに対する割合（表１中の(b)）にて評価することとした．

断面観察による接合界面の IMC 層厚さと引張試験における引張強さ，全伸び，最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合などとの関係を図５に示す．これから，いずれの特性も IMC 層厚さが増加するにともない低下する傾向が認められるが，引張強さならびに全伸びの低下傾向はそれほど顕著ではない．一方，最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合は一番大きな低下傾向を示す．さらに，接合界面で破断（黒塗りマークにて図示）した場合には，最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合の低下が特に顕著であることがわかった．

3)　継手の曲げ試験

供試体の丸棒直径が25 mmφなので，JIS Z 3175にしたがい回転中心部を含む矩形体試験片（図 1）を作製した．その試験片の厚さは，試験片幅となる外径 25 mm の 1/4 となる6.25 mmとした．この試験片の板厚/板幅サイズ比は，JIS Z 3122の曲げ試験要領に基づいたものである．

表１　供試体の引張試験結果

		引張強さ MPa	全伸び %	a) %	b) 比	破断位置
A	1	106	26	16	0.60	Al 母材部
	2	106	26	16	0.63	Al 母材部
	平均	106	26	16	0.61	
B	1	102	10	1	0.08	接合界面
	2	92	26	16	0.63	Al 母材部
	平均	97	18	8	0.35	
C	1	107	32	20	0.63	Al 母材部
	2	104	28	19	0.66	Al 母材部
	平均	105	30	19	0.64	
D	1	102	35	21	0.60	Al 母材部
	2	103	35	22	0.61	Al 母材部
	平均	103	35	21	0.61	
E	1	92	33	19	0.56	Al 母材部
	2	100	15	1	0.07	接合界面
	平均	96	24	10	0.31	

a) 最大試験力時以降の伸び
b) 最大試験力時以降の伸びの全伸びに占める割合

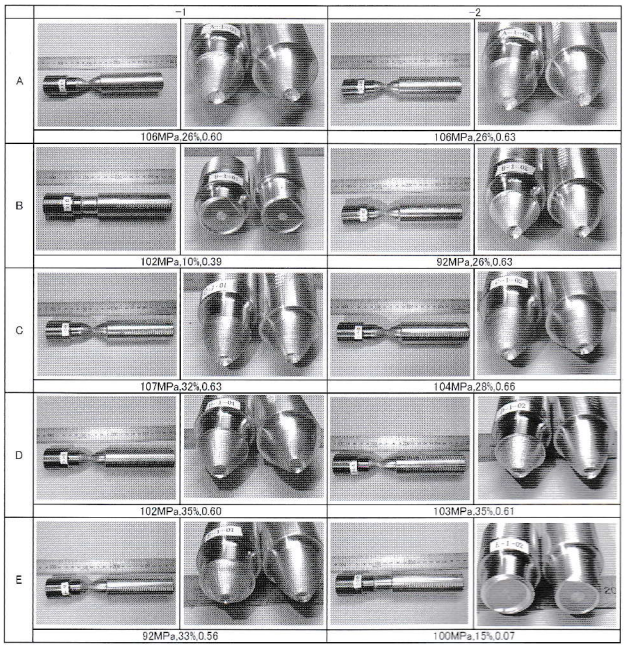


写真２　供試体の引張破断後の試験片外観（左側：SUS，右側：アルミニウム）
（数値は左から，引張強さ，全伸び，最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合）

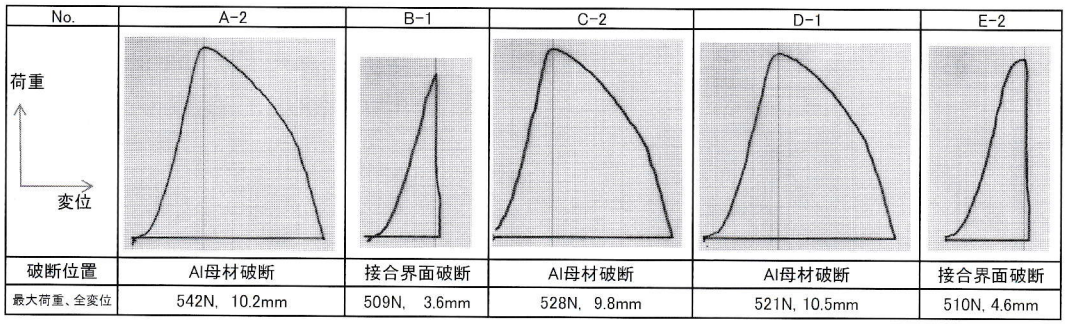


図４　供試体の引張試験時の荷重―変位曲線の例

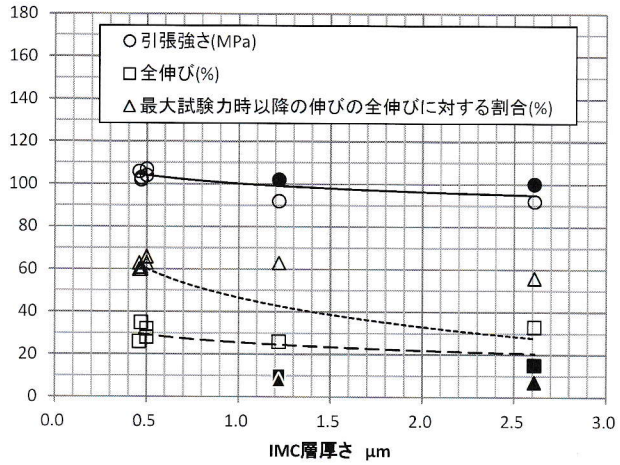


図５　供試体の接合界面の IMC 層厚さと引張特性との関係（黒塗りデータは，接合界面破断の場合を示す）

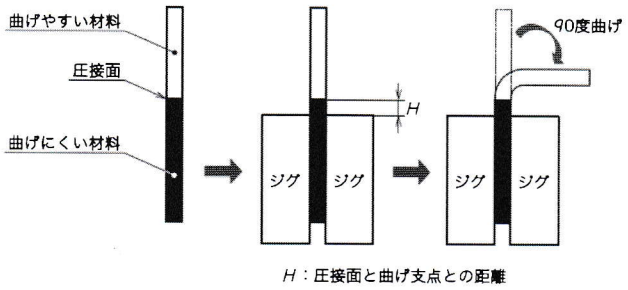


図６　曲げ試験方法の基本要領

曲げに当たっては，異種金属接合体の場合，機械的性質が異なることが一般的であることから一様には曲がらない．そこで，図６に示すように曲がり難い材料を万力などに挟んで固定し，曲げやすい材料を金づちなどによるハンマリングにより90度曲げを行うこととした．この場合，曲げやすい素材部に変形が偏りがちになることはその特性上致し方なく，接合界面での評価が甘くなる場合があるので，ハンマリングの打点位置は，接合界面近傍で曲げ変形を生じさせるべく，できる限り接合界面近傍のアルミニウム材料部位とし，またさらには，曲げ戻しによって曲げやすい材料に加工硬化を付与し，再度，１回目の曲げ方向と同じ方向に90度曲げを行い，接合界面の健全性を評価しようとしたものである．

表２　JIS Z 3175 における品質分類

分類	試験の種類	
	曲げ試験	引張試験
１類	90度曲げを２回実施しても圧接面で破断せず，かつ，圧接面上に基準値[a)]を超える割れがない．	圧接面で破断しない．
２類	90度曲げの２回目で，圧接面で破断する，又は，圧接面上に基準値[a)]を超える割れがある．	
３類	90度曲げの１回目で，圧接面で破断せず，かつ，圧接面上に基準値[a)]を超える割れがない．	
４類	90度曲げの１回目で，圧接面で破断する，又は，圧接面上に基準値[a)]を超える割れがある．	
５類[b)]		引張強さの要求値を超える．
注	a) 3.0 mm を超える割れをいう．また，3.0 mm 以下の割れであっても，その合計長さが7.0 mm を超える場合は割れとする．ただし，試験面全幅に達する割れがある場合は，長さを問わず割れとみなす． b) 引張強さ要求の場合に適用する．	

その継手の曲げ評価として，JIS Z 3175には表２が規定されている．引張試験において接合界面で破断しなかった場合を前提に，接合界面での破断の有無，ならびに接合界面の割れ長さを評価のポイントとして１類から４類まで分類されている．そして，接合界面の割れについては，3.0 mm を超える長さのものを割れありと判定し，また3.0 mm 以下のサイズでも合計7.0 mm を超える場合には，その場合でも割れありと判定されることになっている．ここでは，品質を分類するというよりも品質データの解析を主目的としているので，割れ発生傾向を，図７に示すように観察された個々の割れの長さを合計し，それを試験片幅（25 mm）で除した割れ率なるものを算出し，曲げ回数（X）から割れ率を差し引いた値を曲げ評価点数として活用することとした．

この曲げ評価点数と表２の JIS による分類との関係を図

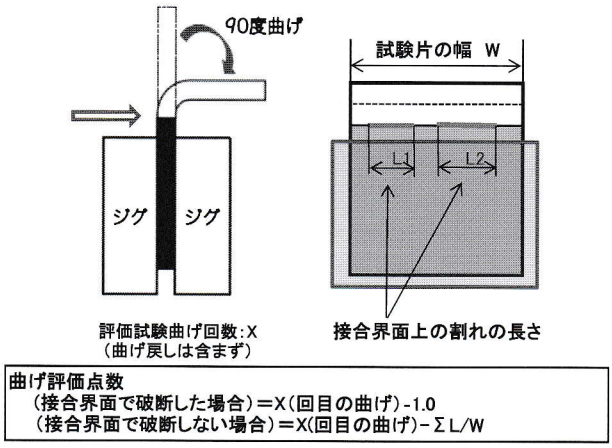


図７　曲げ評価点数

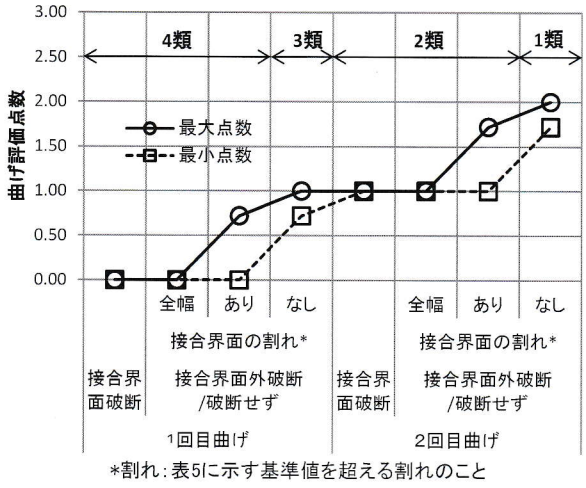


図８　JIS Z 3175の品質分類と曲げ評価点数との関係
（曲げ評価点数は，接合界面の割れ長さの試験片幅（25 mm）に占める割合によって点数に幅が生じる）

示すると図８のようになり，JISによる類別間を曲げ評価点数により評価できているものと思われる．

なお，曲げ評価点数の具体例として，２回目の曲げ試験において，接合界面で破断した場合は2.0－1.0＝1.0，破断しなかったがその接合界面に4.0 mm, 12.0 mm, 2.5 mmの三つの割れがあった場合は２－(4＋12＋2.5)/25＝1.26という具合である．

各供試体（n＝2）の曲げ評価点数は，上記手法にて評価すると表３の通りとなる．この曲げ評価点数と接合界面のIMC層厚さとの関係を示すと，図９のようになり，IMC層厚さが約1.5 μmを超えるようになると，曲げ評価点数は低下していくことがわかった．

さらに，写真３には，曲げ試験時のSUS材側の破断面ならびに曲げ試験では破断しなかったものをさらに曲げを繰り返して強制破断したものを合わせて示す．また，同破

表３　供試体の曲げ試験結果および曲げ評価点数

	１回目の曲げ	２回目の曲げ	曲げ評価点数
	接合界面の割れ長さ	接合界面の割れ長さ	
A–1	○	○	2.00
A–2	○	2.5 mm	1.90
B–1	○	7.5 mm	1.70
B–2	○	3.3, 2.3 mm	1.78
C–1	○	13.5 mm	1.46
C–2	○	14 mm	1.44
D–1	○	○	2.00
D–2	○	8.7 mm	1.65
E–1	○	X 接合界面破断	1.00
E–2	○	X 接合界面破断	1.00

○：破断せず曲がり，且つ接合界面に割れのないことを示す．

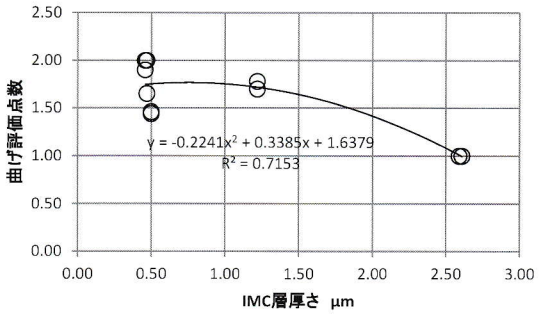
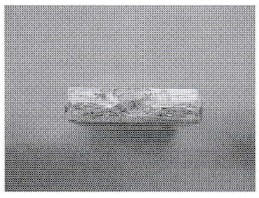
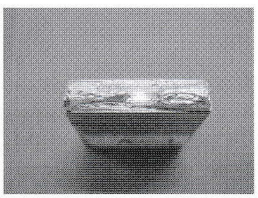
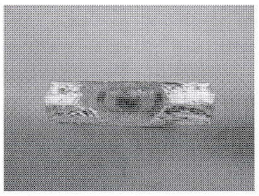
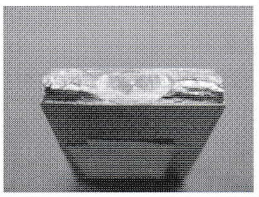
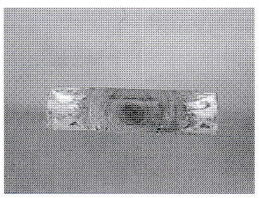
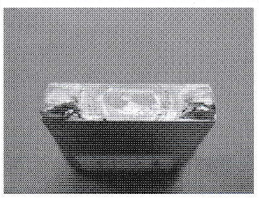
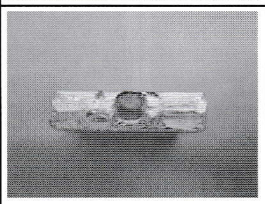
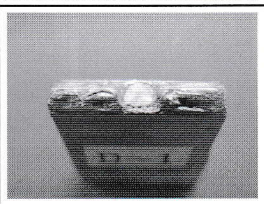
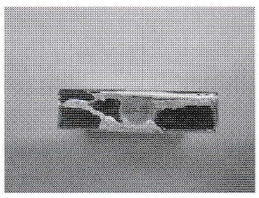
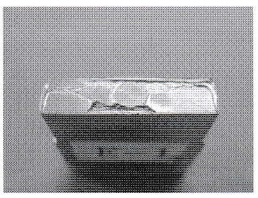


図９　供試体の接合界面のIMC層厚さと曲げ評価点数との関係

断面の接合回転中心部ならびに回転外周部におけるSEM像とAlの面分析結果を写真４に示す．これらから，曲げ試験において接合界面で破断したものと，強制破断した場合とを比較すると，接合回転外周部におけるAl成分の検出量の差異の傾向と関連性がありそうであることがわかる．一方，回転中心部でのAl検出傾向は，必ずしも曲げ評価点数あるいは接合界面層のIMC層厚さとの関連性は認められ難い．これは，曲げ試験で評価の対象となる外面側に，回転中心部がさらされ難いからではないかと思われる．今回の曲げ試験片は，内部まで評価できるように矩形状断面としているが，試験片の肉厚の関係上，回転中心部そのものまでは評価できないのが実態である．今回の曲げ試験片形状は，b(幅＝外径)/t(板厚)≧4の規定により４としたので，外径の1/4に当たる中心部は曲げ試験片の内部に隠れてしまい，直接の評価はできていない．さらに中心部まで曲げ評価をするならば，b/tの値を大きくする，つまり薄い試験片サイズとすればよいと考えられる．

No.	SUS側破断面直上視	SUS側破断面斜上視	曲げ試験状況	曲げ評価点数
A-1			2回曲げ試験後、割れ観察されず。その後強制破断	2-0.0=2.0
B-1			2回曲げ試験後、接合界面に7.5mmの割れ観察。その後強制破断	2-(7.5/25)=1.70
C-1			2回曲げ試験後、接合界面に13.5mmの割れ観察。その後強制破断	2-(13.5/25)＝1.46
D-1			2回曲げ試験後、割れ観察されず。その後強制破断	2-0.0=2.0
E-1			2回曲げ時に接合界面で破断	2-1.0=1.0

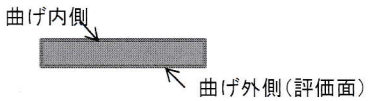


写真３　供試体の曲げ試験片破断面（一部強制破断）外観と曲げ評価点数の例

5.　結果の検討

1)　接合界面の IMC 層厚さと評価因子との相関性

継手の品質評価として，今回は，接合断面の IMC 層厚さ，引張試験における引張強さ・全伸び・最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合・破断位置（接合界面であるか否か）及び曲げ試験における曲げ評価点数を取り上げた．

IMC 層こそが，工業的な種々の特性に影響を与える根源であると考え，ここではその IMC 層厚さに着目し，それを引張試験ならびに曲げ試験での各代用特性にてどのように表現できるのかという観点に立ち，先ずは IMC 層厚さとこれら各特性との相関性を求めた．なお，引張試験における破断位置のデータ化については，接合界面破断の場合を 0，アルミ母材破断の場合を 1 とした．その結果を表４に示す．

相関性有無の判定簡便法から，相関ありと判断される相関係数(r)＞0.57735となる評価特性は，曲げ評価点数（−0.804379），引張強さ（−0.694706），最大試験力時以降の全伸びに対する割合(b)（−0.577851）の３特性が，負の相関性ありとの結果である．一方，引張試験における破断位置（−0.5195041）ならびに全伸び（−0.3628045）は，相関係数が低く相関性は認められないとの判定結果となった．

2)　IMC 層厚さの代用特性による推定式

相関性を参考にして IMC 層厚さを推定することとするが，引張試験における最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合(b)のデータ採取は，施工現場では困難で不向きではないかと考える反面，引張試験における破断位置は比較的容易ではないかなどを考慮して，IMC 層厚さを予

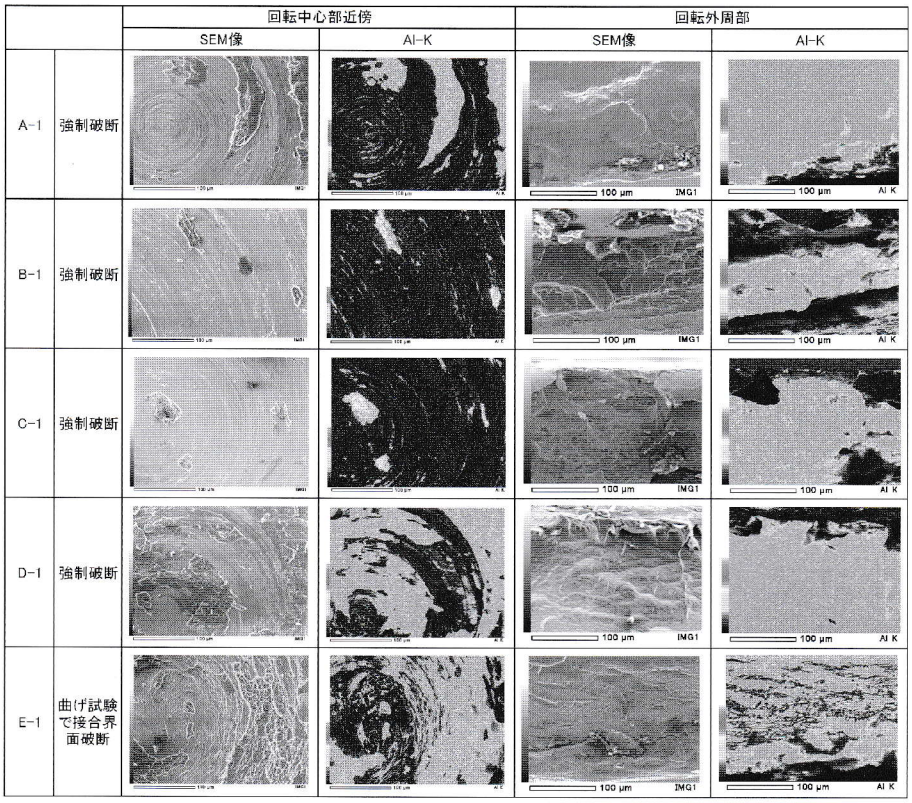


写真4　破断面 SUS 材側の SEM 像および Al の面分析

表4　供試体における継手特性の相関性

	引張強さ	全伸び	b)	破断位置	曲げ評価点数	IMC 層厚さ
引張強さ	1					
全伸び	−0.0034587	1				
b)	0.08995856	0.86241205	1			
破断位置	0.03904344	0.89219065	0.99336859	1		
曲げ評価点数	0.4018053	0.1352383	0.37477086	0.3479091	1	
IMC 層厚さ	−0.6947064	−0.3628045	−0.5778506	−0.5195041	−0.8043792	1

b)：最大試験力以降の伸びの全伸びに対する割合
破断位置：0 接合界面，1 Al 母材
＊ 相関性の判定
$r^2 > 4/(データ数+2) = 4/12 = 0.3333$
∴ $r > 0.57735$で相関性あり

測する重回帰式を数種類検討した．

その結果は表5に示す通りで，全ての評価因子を説明変数として組み入れることで，その回帰式の最適さ（Ru）は最高になる．これは，相関性が認められないと判定された評価特性においてもある程度の関係性があるため，より最適さ（Ru）の度合いが上がったのではないかと推定される．ここで，最適さ（Ru）が最高と判定された表5中の式(1)，最適さは低いが参考までに曲げ評価試験及び引張試験時の破断部位を因子とした式(2)及び評価の容易性などを考慮した適用が現実的な式(3)の3式を選択し，各式により算出したIMC層厚さの計算値と，IMC層厚さの実測値との対応性を求めた．その結果を図10に示す．

この結果，現場での評価の容易性，相関性を考慮した下記の式（表5中の式(3)）は，施工現場での適用に十分に耐えるのではないかと考えられる．

[IMC 層厚さ (μm)] = −1.18072×[曲げ評価点数]
−0.07822×[引張強さ (MPa)]
−0.68099×[破断位置（0：接合界面破断/1：母材破断)]
+11.40968

表5　各説明変数（特性値）を用いたIMC層厚さを表す重回帰式の最適さ

	引張試験				曲げ評価点数	IMC層厚さ	Ru	回帰式番号
	引張強さ	全伸び	(b)	破断位置				
相関係数	−0.694706	−0.3628	−0.577851	−0.5195	−0.804379	1		
重回帰式	○	○	○	○	○	○	0.884735	式(1)
	○		○	○	○	○	0.861072	
	○		○		○	○	0.811348	
	○				○	○	0.650137	式(2)
	○			○	○	○	0.777972	式(3)

b：最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合
破断位置：0 接合界面，1 アルミ母材
Ru：説明変数選択規準（正の数で大きな数値ほど最適な回帰式となる）
式(1) [IMC層厚さ（μm）]＝−1.28659×[曲げ評価点数]−0.05397×[引張強さ（MPa）]−10.9072×[最大試験力以降の伸びの全伸びに対する割合（比率）]＋5.909568×[破断位置（0：接合界面破断/1：母材破断）]−0.03862×[全伸び（%）]＋10.40398
式(2) [IMC層厚さ（μm）]＝−1.48974×[曲げ評価点数]−0.07184×[引張強さ（MPa）]＋10.70932
式(3) [IMC層厚さ（μm）]＝−1.18072×[曲げ評価点数]−0.07822×[引張強さ（MPa）]−0.68099×[破断位置（0：接合界面破断/1：母材破断）]＋11.40968

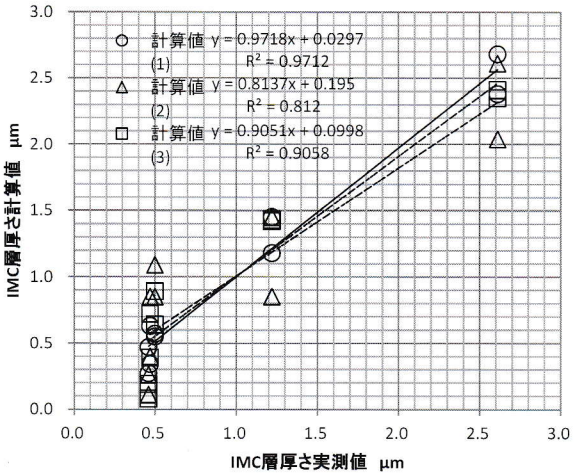
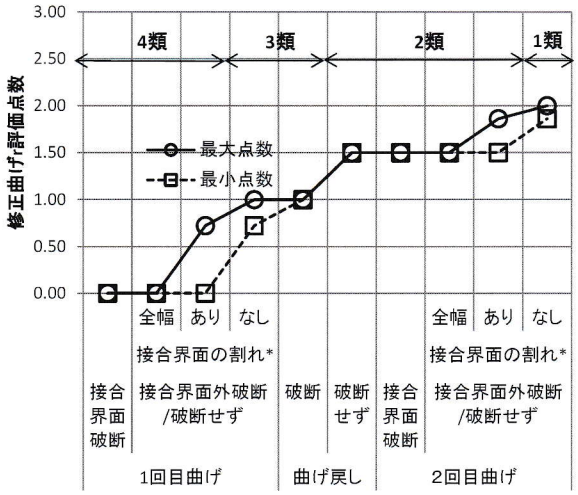


図10　供試体接合界面のIMC層厚さの実測値と重回帰式よる計算値との関係
計算値(1)：引張強さ，伸び（全伸び，局部伸び割合），破断位置，曲げ評価点数を考慮した式による場合
計算値(2)：引張強さ，曲げ評価点数を考慮した式による場合
計算値(3)：引張強さ，破断位置，曲げ評価点数を考慮した式による場合



*割れ：表5に示す基準値を超える割れのこと

図11　JIS Z 3175の品質分類と曲げ評価点数との関係（曲げ評価点数は，接合界面の割れ長さの試験片幅（25 mm）に占める割合によって点数に幅が生じる）

3)　曲げ評価点数について

IMC層厚さの推定に関する実用に耐える重回帰式を求めることができたとはいえ，図10に示す計算値のばらつきが若干大きいことは否めず，曲げ評価方法について再検討することとした．実際の曲げ試験過程を考えると，1回目の曲げ評価で破断しなかったもののうち，接合界面での割れがないと判定されたものは2回目の曲げに臨む権利が付与されたこととなり，その手順として先ずは曲げ戻しを行うことになる．この曲げ戻し時に破断することもあり得るわけで，曲げ戻しで破断しないことに対する評価点数を付与しないと，2回目の曲げで破断した場合と曲げ戻し時に破断した場合とが同じ評価点数となってしまう不合理が生じる．品質の分類という意味ではJIS規定のように厳しい目の判定で問題はないが，IMC層厚さを代用特性で表現しようとする取り組みにおいては，曲げ評価点数の算出に際し，割れや破断に対するきめ細かい評価が必要ではないかと考え，以下のように修正曲げ評価点数なるものを検討することとした．

その修正曲げ評価点数のイメージは図11に示すように，曲げ戻しの評価を新たに入れようとするもので，破断せずに曲げ戻しできたものに0.5点を一律に付与するものであ

る（但し割れ長さの評価は行わない）．したがって，1回目曲げ評価後からの2回目曲げ評価までの持ち点を1.0とした場合，曲げ戻しでの0.5点分の評価の残分，つまり0.5点分を2回目の曲げによる評価に充てることとした．言い換えれば，たとえば曲げ戻しで破断した場合は1.0点となり，破断しなかった場合には1.5点以上が確保される．そして，2回目の曲げで接合界面における割れが3.5 mm, 1.5 mm, 4.0 mmの三つが観察された場合は，2（曲げ評価回数（曲げ戻しは曲げ回数に数えない））$-0.5\times(3.5+1.5+4.0)/25=1.82$という具合である．

この修正曲げ評価方法にて，修正曲げ評価点数を再評価すると表6のようになり，その値を用いての相関性は表7となる．これから，修正曲げ評価点数のIMC層厚さとの相関性は，修正前の曲げ評価点数を用いた場合に比較して高くなることがわかる．また，修正曲げ評価点数を用いて，IMC層厚さを予測する重回帰式を求めると，修正前の曲げ評価点数を用いた場合に比較して，重回帰式の最適さが表8のように上がることも分かる．表8に示す中から重回帰式3式分を抽出し，IMC層厚さの実測値と3式分による計算値との関係を示すと図12のようになり，重回帰式の最適さが上がっていることが図面からも確認できる．そして，施工現場での適用性を考慮したIMC層厚さの推定可能な重回帰式としては，修正曲げ評価点数を用いた下記の式（表8中の式(3)）が，より有用であると考えられる．

IMC層厚さ（μm）］$=-1.43869\times$［修正曲げ評価点数］
$-0.06158\times$［引張強さ（MPa）］
$-0.5588\times$［破断位置（0：母材破断/1：接合界面破断）］$+10.1852$

表6　供試体の曲げ試験結果および修正曲げ評価点数

	1回目の曲げ	2回目の曲げ	曲げ評価点数	修正曲げ評価点数*
	接合界面の割れ長さ	接合界面の割れ長さ		
A-1	○	○	2.00	2.00
A-2	○	2.5 mm	1.90	1.95
B-1	○	7.5 mm	1.70	1.85
B-2	○	3.3, 2.3 mm	1.78	1.89
C-1	○	13.5 mm	1.46	1.73
C-2	○	14 mm	1.44	1.72
D-1	○	○	2.00	2.00
D-2	○	8.7 mm	1.65	1.83
E-1	○	X：曲げ戻し時破断	1.00	1.00
E-2	○	X：曲げ戻し時破断	1.00	1.00

○：破断せず曲がり，且つ接合界面に割れのないことを示す．
* 修正曲げ評価点数
（曲げ戻し時に破断した場合）$=1.5-0.5=1.0$
（曲げ戻し時に破断しなかった場合）$=1.5$
2回目の曲げに際し，
（接合界面で破断した場合）$=$X（回目の曲げ）-0.5
（接合界面外で破断した場合/破断しない場合）
$=$X（回目の曲げ）$-0.5\times$（割れ総長さ/試験片幅）

6. ま と め

以上の結果をまとめると以下のようになる．

(1) 異種金属接合体の継手特性を左右すると考えられる接合界面におけるIMC層の厚さは，曲げ試験による曲げ評価点数，引張試験による引張強さ・最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合の3因子との間に強い相関性があるとの結果が得られた．

(2) 相関性が最も高かったのは，曲げ評価点数であり，今回取組んだ2回曲げによる評価方法が有効な方法であることが分かった．

(3) 施工現場における評価の容易性などを考慮して，引張試験における引張強さ・破断位置，曲げ試験による曲げ評価点数にて，IMC層の厚さを推定できることが分かった．

(4) JIS Z 3175に規定の異種金属接合体の品質分類方法は，上記の解析結果からも大変有用であることを再確認した．

表7　供試体における継手特性の相関性（修正曲げ評価点数の場合）

	引張強さ	全伸び	b)	破断位置	曲げ評価点数	IMC層厚さ
引張強さ	1.00000					
全伸び	−0.00346	1				
b)	0.08996	0.86241205	1			
破断位置	0.03904	0.89219065	0.99336859	1		
曲げ評価点数	0.48755	0.15827517	0.42718443	0.3773108	1	
IMC層厚さ	−0.69471	−0.3628045	−0.5778506	−0.5195041	−0.9110446	1

b)：最大試験力以降の伸びの全伸びに対する割合
破断位置：0 接合界面，1 Al母材
* 相関性の判定
$r^2>4/$（データー数$+2)=4/12=0.3333$
∴ $r>0.57735$で相関性あり

表８　各説明変数（特性値）を用いたIMC層厚さを表す重回帰式の最適さ（修正曲げ評価点数の場合）

	引張試験				修正曲げ評価点数	IMC層厚さ	Ru	回帰式番号
	引張強さ	全伸び	(b)	破断位置				
相関係数	−0.694706	−0.362804	−0.577851	−0.519504	−0.911045	1		
重回帰式	○	○	○	○	○	○	0.976987	式(1)
	○		○	○	○	○	0.947281	
	○		○		○	○	0.946639	
	○				○	○	0.837200	式(2)
					○	○	0.745003	
	○			○	○	○	0.935722	式(3)

b：最大試験力時以降の伸びの全伸びに対する割合
破断位置：0 接合界面，1 アルミ母材
Ru：説明変数選択規準（正の数で大きな数値ほど最適な回帰式となる）
式(1) [IMC層厚さ（μm）]＝−1.45583×[曲げ評価点数]−0.05041×[引張強さ（MPa）]−5.71053×[最大試験力以降の伸びの全伸びに対する割合（比率）]＋3.006608×[破断位置（0：接合界面破断/1：母材破断）]−0.03069×[全伸び（%）]＋9.892499
式(2) [IMC層厚さ（μm）]＝−1.73015×[曲げ評価点数]−0.05329×[引張強さ（MPa）]＋9.391631
式(3) [IMC層厚さ（μm）]＝−1.43869×[曲げ評価点数]−0.06158×[引張強さ（MPa）]−0.5588×[破断位置（0：接合界面破断/1：母材破断）]＋10.1852

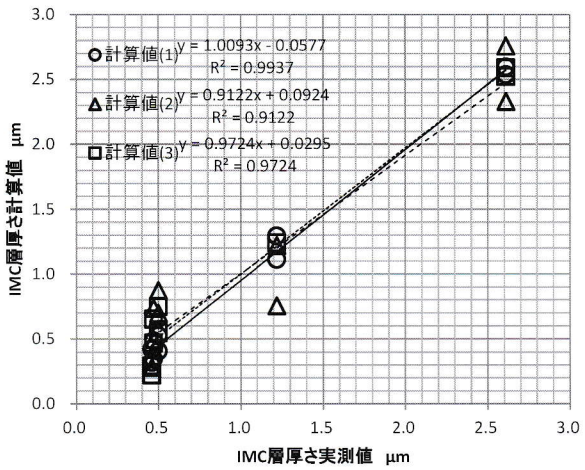


図12　供試体接合界面のIMC層厚さの実測値と重回帰式よる計算値との関係（修正曲げ評価点数を用いた場合）
計算値(1)：引張強さ，伸び，破断位置，修正曲げ評価点数を全て考慮した式による場合
計算値(2)：引張強さ，修正曲げ評価点数を考慮した式による場合
計算値(3)：引張強さ，破断位置，修正曲げ評価点数を考慮した式による場合

(5) IMC層厚さの推定において，たとえば曲げ評価過程における曲げ戻し時の破断の有無を評価に加えた修正曲げ評価点数を用いれば，さらにその精度は上がると分かった．

なお，被接合材料や接合方法などによって，具体的な数値は異なってくることは当然のことであるが，今回開発した２回曲げ試験方法とその評価方法を用いれば，引張試験における評価との抱き合わせで，実用的にかつ十分に品質評価は可能であるというこの基本的事項は，種々の組合せの接合体評価に適用展開できるものと考える．

参考文献

1) 山本尚嗣，高橋　誠，有年雅敏，池内建二：溶接学会論文集，Vol. 23 (2005), No. 4, 622–627.
2) 中田一博：軽金属溶接，Vol. 56 (2018), No. 1, 2–9.
3) 廣瀬明夫：軽金属溶接，Vol. 58 (2020), No. 1, 2–9.

JIS Z 3175 開発原案作成委員会構成表（敬称略）2012～2014年度

	氏　名	所　属（当時）	氏　名	所　属（当時）
委員長	中田一博	大阪大学接合科学研究所		
副委員長	菅　泰雄	慶応義塾大学名誉教授		
委　員	木村真晃	兵庫県立大学大学院	堀　久司	日本軽金属㈱
	冨田正吾	富山県工業技術センター	福田敏彦	㈱UACJ
	森　久史	(公財)鉄道総合技術研究所	土屋和之	㈱IHI
	堤　紳介	(一財)日本規格協会	藤本光生	川崎重工業㈱
	和泉康夫	㈱大阪ケイオス	石川　武	㈱総合車両製作所
	川上　巧	㈲川上製作所	浅井　知	㈱東芝
	梅田真一	㈱三協立山	平野　聡	㈱日立製作所
	中島和之	精密工業㈱	佐山　満	㈱本田技術研究所
オブザーバー	藤田雅成	経済産業省産業技術環境局 (～2014年３月31日)	遠藤修治	経済産業省産業技術環境局 (2014年４月１日～)
事務局	榎本正敏	(一社)軽金属溶接協会	笹部誠二	(一社)軽金属溶接協会