

AE法によるスポット溶接部の良否判別についての一考察

東北職業能力開発大学校
 附属青森職業能力開発短期大学校
 日本パルスモーター(株)

工藤 裕之
 中村 嘉男
 宇野 尚司
 石山 裕志

An Examination on Quality Evaluation of Spot Welds by Acoustic Emission (AE) Testing

Hiroyuki KUDOU, Yosio NAKAMURA, Naoji UNO, Yuuji ISIYAMA

要約 スポット溶接はほとんど確立された技術ではあるが、メッキむら等により不良品が出る場合がある。不良品がユーザー側で発見されたときは全品返還となり、企業にとっては大問題となっている。このようなことを防ぐために、品質を評価する方法の開発が要望されている。しかし、亜鉛メッキ鋼板については、中小企業に導入できる実用的な方法は開発されていないのが実状である。

本研究は、不良品が机から床に落ちて一瞬に分離することにより発見されるということから、溶接部にき裂が潜在するものと考え、き裂の検知に最も優れていると考えられるアコースティックエミッション(AE)法を用いて、寸法の異なる二種類の試験片について品質評価を行うとともにその適切な方法を検討した。その結果、寸法が大きな試験片では、引張負荷試験での累積AEエネルギーが急増する荷重、すなわちAE開始点を比較することにより溶接部の良否判別を基本的に行えることを確かめた。一方、小さな試験片については、判別が困難であった。せん断負荷試験も試みたが、鋼の塑性変形開始荷重付近に至るまで明瞭なAE事象があまり発生しなかったこと等から、AE法による非破壊試験に適用できないと判断された。

I はじめに

スポット溶接は、薄い鋼板の接合方法として広く用いられているが、溶接条件や材料の化学成分及び表面状態等により影響を大きく受け¹⁾、目的のナゲットが形成されない場合がある。特に、亜鉛メッキ鋼板ではメッキむら等により溶接不良が発生する危険性が高く、また、それによる不良品が納入先で1個でも発見されると、全品返却となり、企業にとっては大きな問題となっている。

このようなことから、溶接状況を監視するためのモニタリング技術の実用化が要望されている。検出因子

として、電極移動量、電極間電圧や抵抗、超音波、アコースティックエミッション(AE)等を利用する各種の方法が報告されている²⁾。しかし、亜鉛メッキ鋼板に対する実用的な方法は開発されていない³⁾。

今回、問題となっている製品は亜鉛メッキ鋼板をスポット溶接したもので、不良品は通常の高さの机から床に落ちたときに瞬時に分離することにより発見される。このため、溶接部の潜在微小き裂が破壊の主たる原因と考えられる。

潜在き裂の非破壊試験法としては、超音波探傷法とAE法が挙げられる。超音波探傷法は比較的大きなき裂に適用されるものであり、直径1～数mmの溶接部

に潜在する微小き裂への適応は難しい。また、1回の検査範囲が狭く、多数の溶接部を有する製品の検査には適当ではない。一方、AE法は、き裂から放出される弾性波を検出するだけであり、一度に多数の溶接部の検査を行うのに適している。

それゆえ、本研究では、溶接品質モニタへの将来的な応用も考慮し、非破壊試験法としてAE法を採用し、溶接部の断面試験による微小き裂の観察や負荷試験における荷重とAE信号との関係を調べるとともに、AE法による適切な品質評価方法の検討を行った。

II AE信号による良否判別の原理

AEとは、固体が変形あるいは破壊する際に、それまでに貯えられていたひずみエネルギーを弾性波として開放する現象であり、そのAE信号を検出することで極めて小さなき裂の挙動も測定可能である⁽⁴⁾。

図1は、平板に引張荷重(W)を作用させた場合における切欠きの有無と応力分布の関係の概略である。

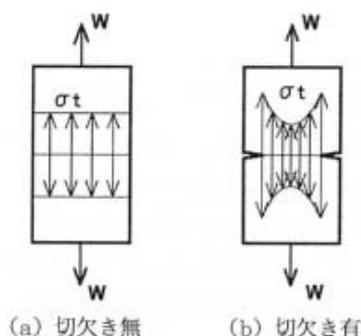


図1 切欠きの有無と応力分布の関係

図のように、(a)の切欠き無の場合は、引張応力(σ_t)は一様な分布を示すが、(b)の切欠き有の場合は、切欠き先端に大きな応力集中が生じる。そのため、溶接部に微小き裂が存在する場合は、品質に悪い影響を及ぼさない程度の荷重条件下でもき裂先端の応力集中による塑性変形が生じ、容易にAE信号を検出できると考えられる。一方、破壊靱性試験の分野では、累積AEエネルギーと荷重をそれぞれ対数目盛で整理した図で求められる累積AEエネルギーが急増する荷重は、き裂が成長し始める荷重とほぼ一致することが報告されている⁽⁵⁾。

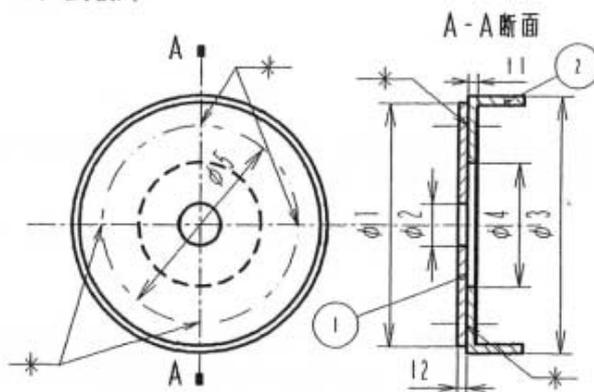
そこで、本研究においても、AE信号の発生時の荷重及びAE信号の最大電圧振幅の計測を行い、累積AEエネルギーと荷重を上述したように整理し、累積AEエネルギーが急増する荷重をAE開始点と定義し、

品質評価のための判断基準として用いた。

なお、累積AEエネルギーは各AE事象の最大電圧振幅の二乗をある時点までに発生した全AE事象について加算した値である。

III 実験方法

1. 試験片



	①			②			φ5
	φ1	φ2	t1	φ3	φ4	t2	
L	52.0	9.0	1.0	55.0	26.6	1.0	42.4
S	23.5	5.0	0.8	25.0	12.5	0.8	20.0

図2 試験片の形状

試験片の形状と溶接条件を、図2と表1に示す。供試材としては、板厚が0.8mmと1.0mmの亜鉛メッキ鋼板を用いた。

試験片は形状の異なる二つの部材(①、②)を、0、3、6、9時の4個所をスポット溶接したものであり、寸法の異なるL、S型の二種類を表1の3条件(G、B、Vb)で溶接して作成した。溶接には、オリジン電気(株)製コンデンサ型スポット溶接機(SA-59)を用いた。

なお、図に示していないが、L型では部材①がたわみ難くするために、穴の周りに外径16mm、内径9mmの輪状の凹みが塑性加工されている。

各溶接条件で製作した製品品質の概略は、以下の通

表1 溶接条件

	条件	加圧力 [N]	充電電圧 [V]	通電時間 [ms]
L	G	3332	320	21.6
	B	3332	250	23.9
	Vb	3332	180	27.7
S	G	2254	250	23.1
	B	2254	195	25.9
	Vb	2254	140	29.3

りである。

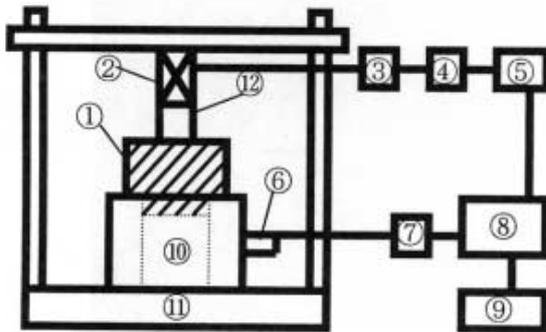
G条件：溶接継手部が母材破断し、製品が良品と評価される条件。

B条件：G条件の約80%の充電電圧で溶接し、基本的に製品として出荷しても問題がない条件。

Vb条件：試験片を机から床に落とすと溶接部が一瞬に破断し、不良品と評価される条件。この条件の製品は、工場外へ絶対に出荷してはならないものである。

2. 実験装置

実験装置の概略を、図3に示す。



- ①試験片、②ロードセル、③ブリッジボックス、④動ひずみ計、⑤増幅器、⑥AEセンサ、⑦プリアンプ、⑧ローカルプロセッサ ((株)NF回路設計ブロック社製9604)、⑨パソコン、⑩台座、⑪油圧式簡易載荷試験器、⑫ポンチ

図3 実験装置の概略図

AEセンサは、共振周波数500kHzと140kHzの二種類のものを、前者はS型試験片、後者はL型試験片に用い、それぞれ台座の一定位置に治具を介して固定した。

特性の異なる二種類のAEセンサを用いたのは、特にS型ではAE信号の電圧が低く、しきい値の電圧を下げて計測する必要があったが、その結果、負荷試験器のノイズが無視できなくなり、それを除去するために周波数によるAE信号の選別を行う必要があったためである。

また、S型とL型にはそれぞれ500kHz～1MHz、100kHz～1MHzのバンドパスフィルターを用いた。

プリアンプ及びメインアンプの増幅は、両者とも40dBに設定した。

ローカルプロセッサには、AE信号と荷重信号を入力し、AE信号の入力時間、最大電圧振幅及び荷重を記録した。

データは、実験終了後、パソコンで解析し、累積AEエネルギーと荷重との関係等の検討を行った。

3. 断面試験

スポット溶接部(ナゲット)の形状やき裂の有無等を、顕微鏡による写真撮影を行い計測した。特に、G、B条件では、荷重を作用させる前後のき裂の状況を詳細に観察した。なお、S型では、試料の採取が困難であったため、L型のみで検討を行った。

図4は、断面試験片の作成方法である。溶接部を二等分するように機械切断し、切断面をガラス板上に接する状態で樹脂により固定した。その後、バフ研磨とエッチングを行い試験に供した。

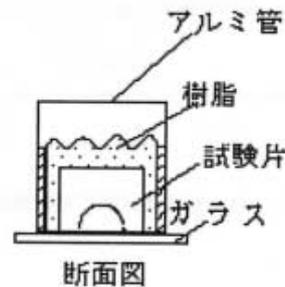


図4 顕微鏡試料の作り方

4. 負荷試験

不良品が、落下時に分離するとき、溶接部には、引張荷重とせん断荷重が作用していると考えられる。

そこで、引張とせん断の二種類の荷重による負荷試験を行った。試験片は、引張負荷試験ではL型とS型の二種類、せん断負荷試験ではL型のみを用いた。

引張負荷試験の方法を、図5に示す。部材②を治具で固定し、部材①にポンチで荷重を負荷して溶接部に引張荷重を作用させた。ポンチには、L型とS型に、直径が20mmと9mmのものをそれぞれ用いた。

実験は、L型を工場のスポット溶接機付近で、S型を当校の研究室内で行ったが、前述した周波数による対策をとることにより、一部のノイズ(IV 3節で詳述する。)を除けば、実験環境のノイズの影響は特に問題にならなかった。

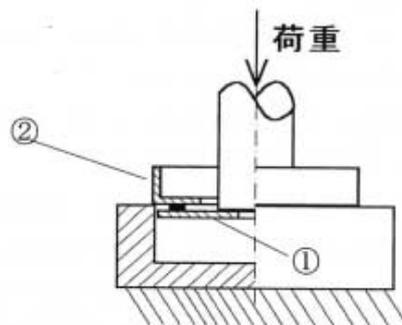


図5 引張負荷試験での載荷の様子

図6は、せん断負荷試験の概略である。

図のように、試作した二つの治具により試験片を固定し、上部の治具に水平方向の荷重を荷重し、溶接部にせん断荷重が作用する機構とした。また、実験は研究室で行った。

なお、本実験の二種類の負荷試験において、引張負荷試験は試験片の形状に左右されるが、せん断負荷試験は形状による制約が比較的少ないという特徴がある。

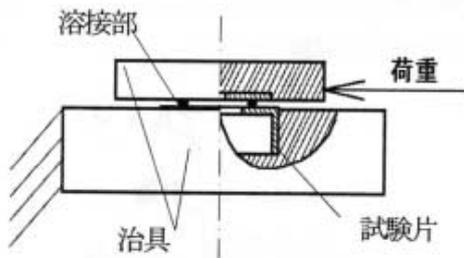


図6 せん断負荷試験での荷重の様子

IV 実験結果及び考察

1. 溶接条件と溶接部の形状

スポット溶接では、ナゲット外縁の形状や内部欠陥が機械的性質に大きく影響することから、それらの状態を顕微鏡により調べた。

図7は、L型試験片の各溶接条件におけるナゲット断面の中央部を負荷試験前に観察した結果である。

図から、G条件では接合面は消失しており、良好な溶接部が形成されていることがわかる。また、B条件では一部に接合面が認められる。一方、Vb条件では大きな不連続面として接合面が残存していることがわかる。

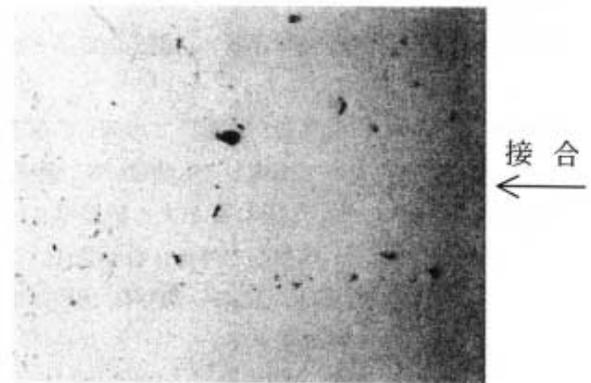
同様に、ナゲット外縁部を観察した結果を、図8に示す。

Vb条件では、ナゲット外縁部が切欠き状の形状となるが、G、B条件ではそのような形状は認められないことがわかる。

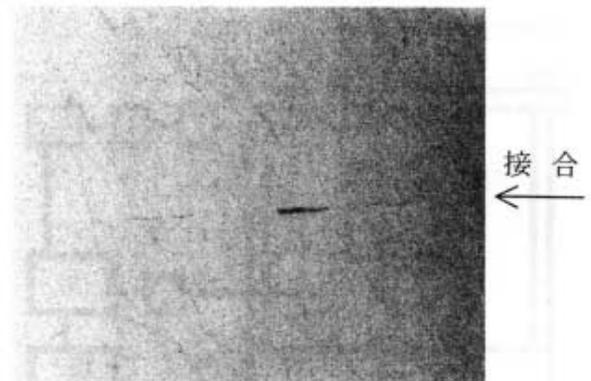
表2は、10数枚の写真を貼り合わせてナゲット径を測定した結果である。充電電圧条件の低下とともに、ナゲット径が小さくなることがわかる。

以上の結果から、各溶接条件におけるナゲットの典型的な形状は、図9のように整理される。

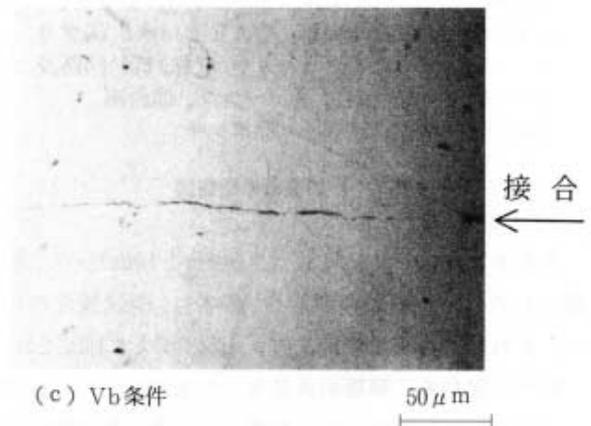
特に、Vb条件ではナゲット径が小さく、不連続面(内部き裂)や切欠き(外部き裂)が顕著であり、荷重が作用した場合はこれらが破壊の起点になると考えられる。さらに、G、B条件の引張負荷試験後の試験片についてもナゲット断面の観察を行ったが、負荷前



(a) G条件



(b) B条件



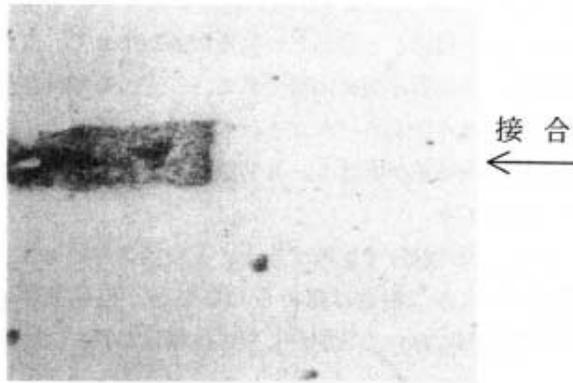
(c) Vb条件

50 μm

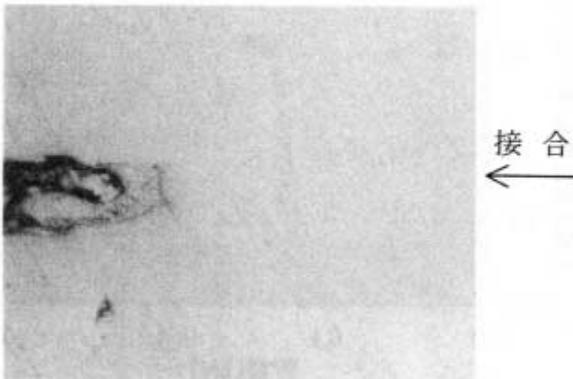
図7 負荷試験前のナゲット中央部分の顕微鏡写真 (×400)

とほぼ同様の結果であった。すなわち、負荷条件は343N(この値については、次節で詳述する。)で行ったが、この程度の荷重を作用させても製品の品質に悪影響を及ぼす痕跡は認められなかった。このように、き裂の発生や進展がなくても応力により材料が塑性域に入り、転位の移動などによってもA/Eが生じる⁽⁴⁾⁽⁵⁾ことから、品質評価の手法としてA/E法が有効であることがわかる。

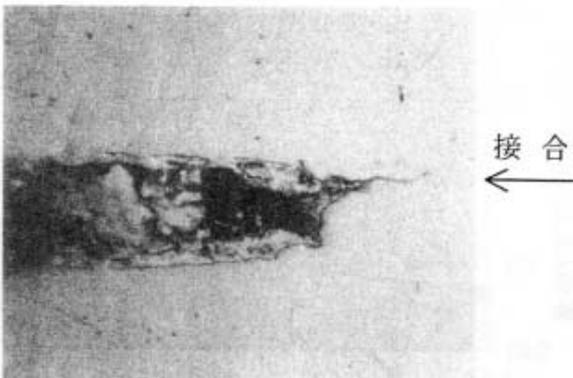
S型の試験片については、今回測定されていないが、後述する負荷試験等の結果から、各条件でL型と同様なナゲットが形成されていると推測される。



(a) G条件



(b) B条件



(c) Vb条件

図8 負荷試験前のナゲット周辺部分の顕微鏡写真 (×400)

表2 ナゲットの直径 [mm]

	G	B	Vb
溶接点1	2.83	2.30	1.43
溶接点2	2.48	2.10	1.55
溶接点3	2.93	2.33	—
溶接点4	2.70	2.33	—

2. 引張負荷試験の荷重条件の検討

AE法では、製品に負荷する必要があることから、引張負荷試験における荷重と変位の関係を調べ、品質への影響が比較的小さな荷重条件を検討した。

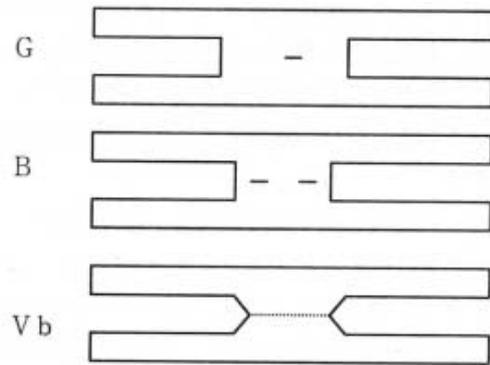


図9 ナゲット断面の模式図 (---:不連続面)

図10は、各溶接条件における荷重と変位の関係をL型試験片で測定した一例である。縦軸に荷重、横軸に負荷試験機のヘッドの変位をそれぞれ示す。また、980 Nの荷重を作用させても試験片が破断しない場合は、試験を終了した。

図から、各溶接条件で破断荷重は異なるが、ほぼ同様な傾向を示し、荷重と変位の関係が3段階で変化することがわかる。すなわち、荷重の小さいところでは、変位の増加とともに荷重が飽和し再びゆるやかに増加するa段階、約150 Nから荷重が急増するb段階、約440 Nから荷重の増加が再びゆるやかとなるc段階と変化する。a段階は、試験片の形状と負荷方法から部材①のたわみ弾性変形と考えられる。一方、b段階では、荷重-変位曲線の傾きは大きく、この段階で各溶接部に引張荷重が作用するものと考えられる。従って、約150 Nから約440 Nの範囲内で、製品の品質への影響が小さい荷重を選定する必要があることがわかる。

そこで、各溶接条件における破断荷重、負荷試験後のナゲット断面の観察等の結果から、最大引張荷重を求めた。破断荷重は、B、Vb条件の平均値がそれぞれ784 Nと392 Nであり、G条件では980 Nを負荷しても破断しなかった。また、上述したように、製品とし

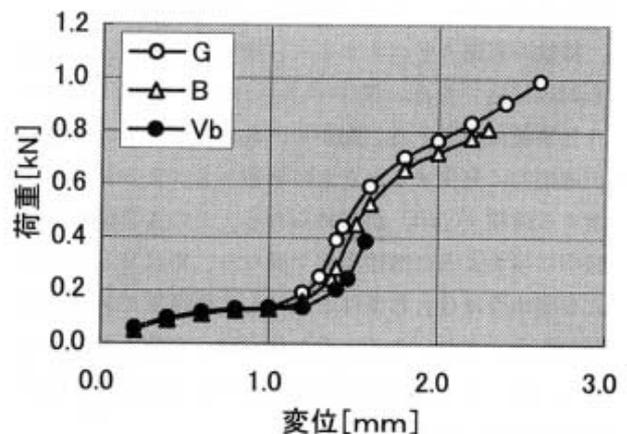


図10 荷重-変位図 (L型試験片)

て出荷されるG、B条件における343N負荷後の断面試験では、品質への影響がほとんど認められなかった。これらのことから、L型の引張荷重を343Nとし、この荷重以下のAE信号を解析することにより品質評価を行った。

図11は、同様にS型試験片の荷重-変位曲線の一例である。L型の結果と若干異なる傾向となるが、詳細に観察するとL型と同じように3段階で荷重と変位の関係が変化する傾向が認められた。S型のb段階が約80Nから約300Nであり、この範囲で最大引張荷重を検討した。

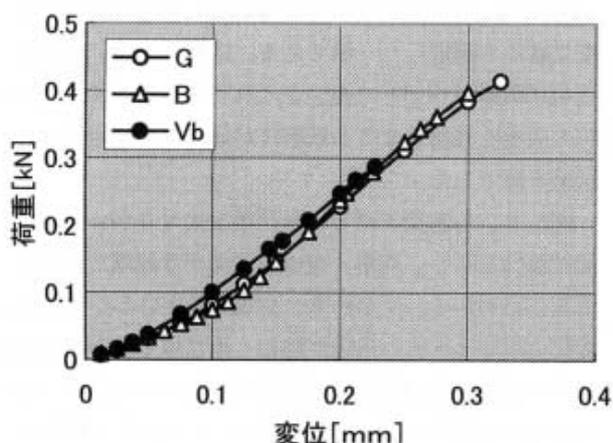


図11 荷重-変位図 (S型試験片)

破断荷重は、V b条件の平均値が274Nであり、G、B条件は392Nを負荷しても破断しなかった。ただ、このS型では断面試験が困難であり、品質への影響を負荷後の塑性変形で評価した。その結果、S型の最大引張荷重を147Nとし、この荷重以下のAE信号を解析して品質の評価を行った。

3. 引張負荷試験による品質評価

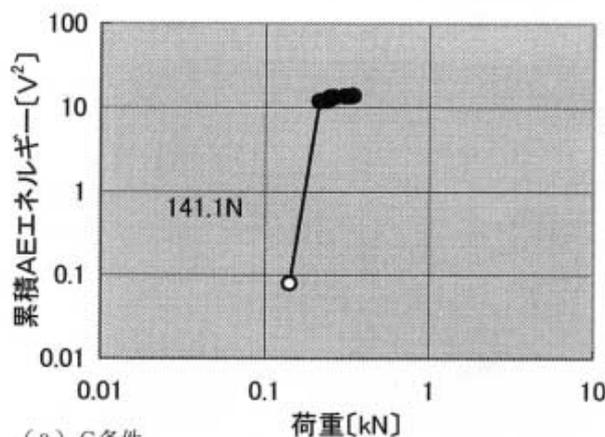
G、B及びV b条件で溶接したL型の典型的な累積AEエネルギーと荷重の関係を、図12に示す。

縦軸が累積AEエネルギー、横軸が荷重で、両軸とも対数目盛である。図中の各点は、それぞれ1個のAE事象に相当する。図から、各溶接条件でAE事象が連続的に発生するとともに累積AEエネルギーが急増する荷重(○印)が認められる。そのAE開始点は図中に示すように溶接条件で異なり、特にV b条件のAE開始点はG、B条件と比較して低荷重であることがわかる。また、このような傾向は、S型でも認められた。従って、AE開始点を求めることで品質評価が可能であると考えられる。

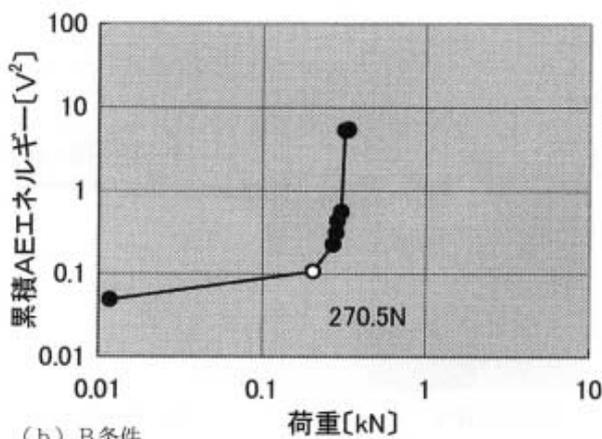
図13は、S及びL型のAE開始点を整理した結果で

ある。S型では各溶接条件で試験片によるバラツキは少ないが、良品と不良品との荷重の差が小さく、AE開始点での品質評価は困難である。一方、L型は良品条件で試験片によるバラツキは大きい、良品と不良品との荷重の差が大きく、AE開始点による品質評価が可能である。

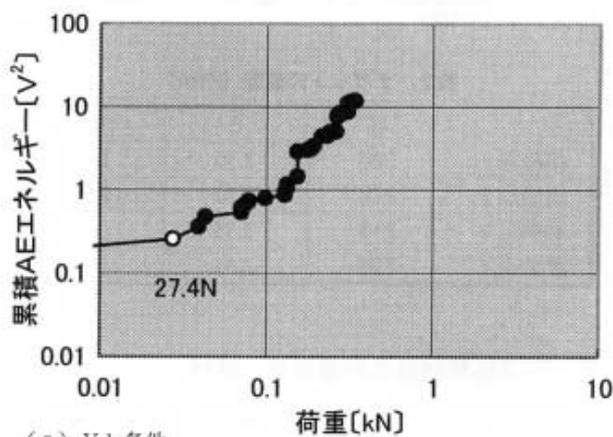
また、両試験片を比較すると、不良品条件ではAE開始点に大きな相違は認められないが、良品条件のAE開始点においてS型がL型に比較して小さくなる。



(a) G条件



(b) B条件



(c) V b条件

図12 累積AEエネルギー-荷重図 (L型試験片)

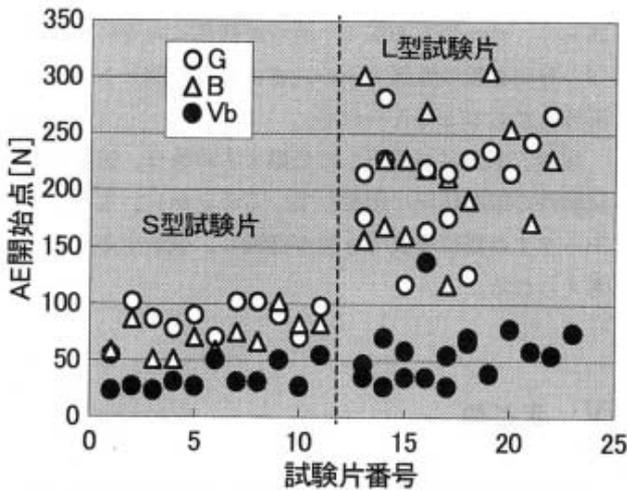


図13 AE開始点による判別結果

このように、AE開始点で品質評価を行う場合、試験片の寸法がその可否に影響する傾向が認められる。

図14は、S型とL型における荷重条件と部材①の変形状態の概略である。S型の部材①はL型と比較して板厚が薄く、図の(b)のように荷重が作用すると容易に変形する。その結果、溶接部の内側に大きな応力集中が生じ、良品条件でもAE開始点が小さくなったものと考えられる。

次に、L型の良品条件におけるAE開始点の大きなバラツキであるが、これは、両試験片でAEセンサの共振周波数とバンドパスフィルターの特性が異なり、それが大きく影響したものと考えられる。すなわち、バラツキの原因は、試験片と治具間の摩擦等によるノイズと考えられ、特に良品条件でAE開始点が実際よりも小さく評価された試験片もあり、バラツキが大きくなったものと考えられる。

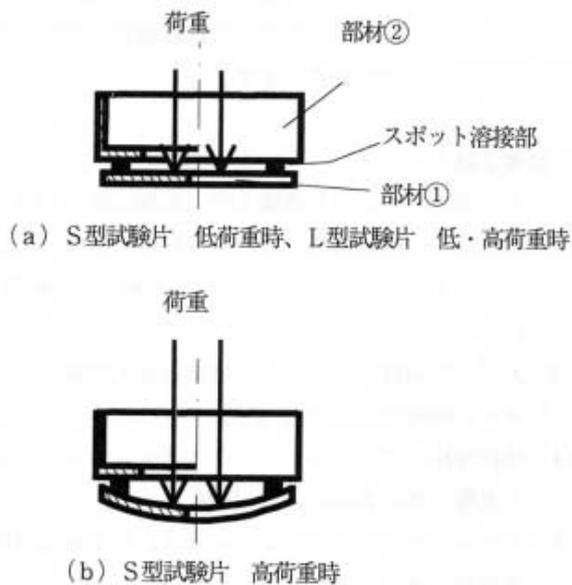


図14 曲げ作用

4. せん断負荷試験による品質評価

せん断負荷試験では、各溶接条件でそれぞれ9個の試験片を用いて実験した。良品のG、B条件では2450 Nまで荷重したが、全ての試験片が破断しなかった。一方、不良品のVb条件では2個の試験片が、塑性変形を伴う約1388 N以上の荷重でゆっくりと破断した。

図15は、典型的な累積AEエネルギーと荷重の関係を測定した結果である。(a)のG条件では明瞭なAE開始点が無く、その判定が困難である。(b)と(c)のB及びVb条件では、AE開始点が、図のように、それぞれ1987 N、1105 Nと求められる。ただ、これらの荷重は約1000 N以上の塑性領域であり、製品に変形が

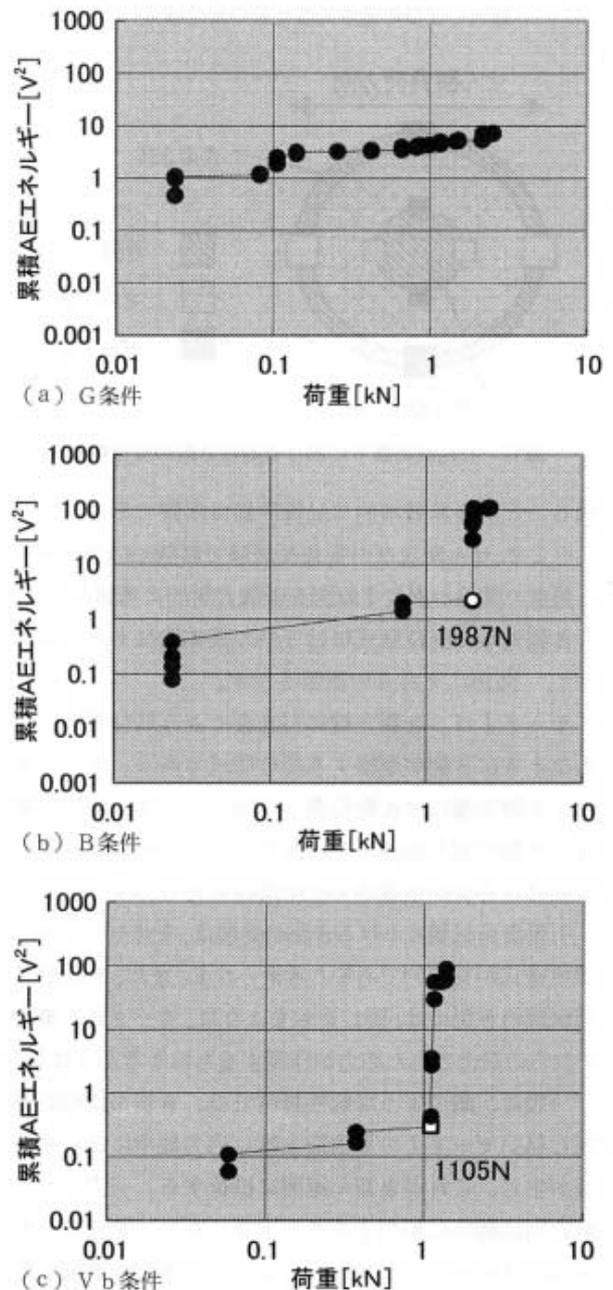


図15 累積AEエネルギー-荷重図 (L型試験片)

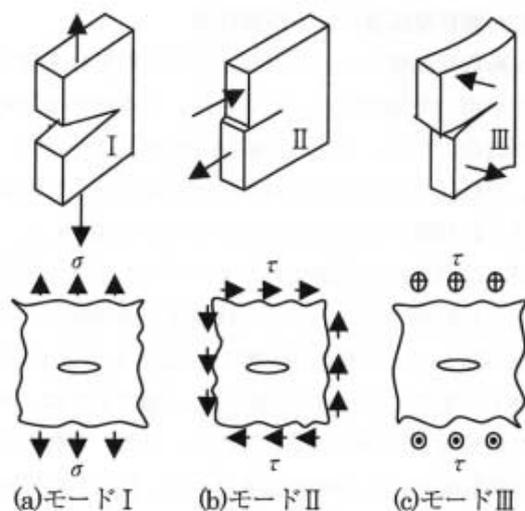


図16 3つの基本的なき裂の変位様式⁶⁾

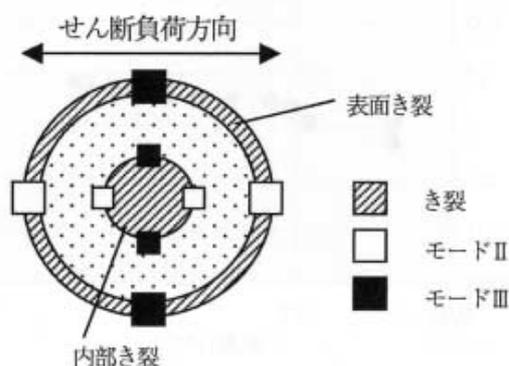


図17 せん断荷重下における潜在なき裂の変位様式

残ることから非破壊的な品質評価は困難である。

そこで、せん断及び引張負荷試験で累積AEエネルギーと荷重の関係が異なる原因を破壊力学的に考察した。

き裂先端の変位様式には3つの基本的なタイプがあり⁶⁾、図16にそれらの概略を示す。

モードIは、き裂先端に引き裂くような荷重が作用したときにき裂が進展する変位様式である。モードIIは、き裂先端にせん断荷重が作用したとき、モードIIIは、き裂先端を面外にせん断するように荷重が作用した場合にき裂が進展する変位様式である。

引張負荷試験におけるき裂の進展は、主にモードIの変位様式が支配的であると考えられる。また、せん断負荷試験のき裂には、図17に示すように、モードII、IIIとそれらの混合された応力が作用するものと考えられる。

一般に、鋼のような延性材料では、き裂が比較的進展し易いモードIでもき裂先端に応力集中による塑性域が生じ、これがき裂の進展に抵抗する。一方、せん断負荷試験時に相当するモードII、モードIII及びそれらの混合モードでは、モードIよりもき裂が進展し難く、応力集中によるき裂の塑性域がいつそう拡大し、全体として塑性変形が顕著になるものと考えられる。

さらに、せん断応力が4ヶ所の溶接部に均等に加わらない等のき裂の有無やその大きさ以外の因子も大きく影響したものと考えられる。

なお、不良品が落下して分離する現象は、引張負荷試験時の破断状況に類似していることから、主としてモードIの変位様式でき裂が進展し、破断するものと考えられる。

V まとめ

本実験の範囲内において、以下のことが明らかとなった。

- 1) 不良品のVb条件では、溶接部の断面に切欠きや大きな接合面の残存が認められた。一方、良品のG条件ではそれらの欠陥は認められず、B条件では接合面に小さな融合不良が認められた。
- 2) 製品の品質に悪い影響を及ぼさない最大引張荷重は、L型試験片では343N、S型試験片では147Nであった。
- 3) 引張負荷試験は、AE開始点により品質評価が可能であった。ただ、AE開始点が試験片の形状の影響を強く受けるため、板厚の薄いS型試験片では良品と不良品とのAE開始点の差が小さく、その判断が困難であった。
- 4) せん断負荷試験は、試験片の形状に左右されないという長所があるが、潜在き裂の有無やその大きさ以外の因子のAE開始点への影響が大きく、品質評価への適用は困難であった。

最後に、御協力をいただいた当短大校の佐竹正敏先生、白坂彰先生、小関英明先生、卒業生の成田稔彦君、天内こずえさん、阿部和正君、岩田直樹君、石岡考次君、盛貴仁君に謝意を表します。

【参考文献】

- (1) 奥田滝夫、スポット溶接入門、産報出版、1994
- (2) 松山欽一、抵抗溶接における品質管理技術の最近の発展とその動向、溶接技術、Vol. 44-3、p74-78、1996
- (3) 天沼、現場技術者のための抵抗溶接入門講座テキスト、溶接学会、p59、1993
- (4) 仲佐博裕、アコースティックエミッションの理論と実際、地人書館、p11、1994
- (5) アコースティック・エミッション、日本非破壊検査協会、p66、1990
- (6) 小林英男、破壊力学、共立出版、p63、1995