

アルミ導体電力ケーブルの溶接法による接続

Welded Joint and Termination for Aluminum Power Cables

浜 田 義 雄* 三 宅 保 彦**
Yoshio Hamada Yasuhiko Miyake

富 田 一 男* 石 下 力*
Kazuo Tomita Tsutomu Ishioroshi

要 旨

アルミ導体の接続は従来圧縮法、アルミろう接などによって行なわれてきたが導体サイズが大きくなると、接続部の寸法上、作業上困難な問題があった。筆者らはこれに代わるものとして MIG 溶接法によるケーブル導体の接続を検討してきたが、良好な結果を得てすでに 2,000 mm² ケーブル端末部そのほかに実用している。本論文はそのアルミ溶接部の構造および溶接法、溶接部について行なわれた各種の試験結果について述べ、さらに、溶接部検査法にも言及する。

1. 緒 言

アルミ導体は架空配電線の分野で従来から広く使用されてきたが、近年における銅需給の国際的窮迫から地下電力ケーブルの分野でも急速に実績を広げつつある⁽¹⁾。このアルミ導体採用の利点としては経済性、軽量化、原料供給の安定性など多々あるが、特に大サイズ導体の場合顕著であり、今後ますます使用されてゆくものと考えられる。アルミ導体採用にあたっての問題点の一つは、その接続法であるが、現在では圧縮接続を主流としつつ、また場合によってははんだ接続など既に多くの実験を重ねて確立した方法が実際に用いられている。

しかしアルミ構造物の接続ではアルゴンガス中で溶接する MIG 法および TIG 法の最近の発展は目ざましく、応用範囲は著しく拡大されており接続部の信頼度も高い。この方法の電力ケーブル導体への応用は早くから関係技術者の念頭にあったが、導体溶接部近傍の軟化の問題などのため敬遠されがちであった。しかし機械的性能がある程度低下する欠点がほかの利点で補いうる場合には、接続部が完全に一体化する溶接法は信頼度も高く、作業は簡便化できるし、また接続部の小形化が可能で性能的にも有利なものとなる。このようなアルミ溶接のケーブル関係への応用例は外国においても散見されるが^{(2)~(4)}、筆者らもアルミ導体の溶接による接続を種々検討してきた。本論文はそのおもな結果をまとめたものである。

2. 溶接の基本条件

2.1 要求される性能

紙またはゴム、プラスチック絶縁電力ケーブルの導体を溶接接続するにあたって接続部および溶接法が満足しなくてはならぬ性能としては次のものがある。

- (1) 溶接部の電気抵抗は導体が軟アルミ、硬アルミいずれの場合でも、これと同等長の導体自身の値より低いこと。また運転時の通電によるヒートサイクルが加わっても異常な温度上昇を示さないことが必要である。
- (2) 溶接部の引張破断荷重は、通電により熱伸縮時発生する導体の内部応力に耐えるものであること。
- (3) ケーブルヘッド導体引出部の場合は端末から導体内部に湿気のはいらぬよう、溶接部は気密性を有すること。
- (4) 溶接時の熱によってケーブル絶縁体に悪影響を与えないこと。

以上、特に問題となるのは(2)の引張破断荷重であるが、ほかの条件は適切な溶接作業を行えばじゅうぶん解決できるものと考えられる。

2.2 溶 接 法

周知のとおり不活性ガスを用いたアルミ溶接法には TIG (Tungsten Inert Gas Arc Welding) と MIG (Metal Inert Gas Arc Welding) の2種がある⁽⁵⁾。両方式の特徴などについては別の書物に譲るが、これらの溶接法のどちらを選ぶかは電線および接続部の構造、工事現場の環境によって決まる。一方、アルミ導体ケーブルの溶接における問題点は次のとおりである。すなわち、

- (1) アルミ電線は細い素線のより合せ体で、個々の素線の熱容量は非常に小さいため、溶接は熱エネルギーの供給むらがあると素線の溶け落ちがある。この点大サイズケーブルになるほど、素線断面積/ケーブル断面積の比が一般に小で、条件が悪くなり、ソリダルケーブルなどでは有利になる。
- (2) ケーブル引出棒などの金具類との溶接では、この付属品がケーブル素線に比べて熱容量が大きく、(1)と同様な結果を招くと同時に、一方では金具のほうが溶け込み不じゅうぶんになりやすい。
- (3) 素線が硬アルミ、半硬質アルミの場合は熱影響部ができるだけ少ないことが望ましい。
- (4) 絶縁油の溶接部への流出を防止する方法。
- (5) 現地工事では場所が狭く作業性がきわめて悪い。

このうち、(1)は常に共通する問題で、大サイズケーブルになるほど、素線断面積/ケーブル断面積の比が一般に小で条件は不利になる。後述の端面予備溶接 (Buttering) などにはそれに対する一方策であるが、比較的細い溶接心線を用いて、(2)の問題も含めて熱効率よく、深い溶け込みが得られる MIG 方式を応用するのが有利と考えられる。また MIG 法は溶接速度も大きく熱影響部が狭く、さらにアークの指向性が良好で、(3)、(5)の問題、特に(5)に対しても有利になる。もちろんケーブルサイズなどによって、電流の大きい MIG から、Sigmet などへの移行も考えなければならない。(4)については空気ジェットによる油の追上げなどの方法⁽²⁾があるが、油のないケーブルでも表面処理は特に入念に行なわれねばならない。

溶接の実施に先だって、以上のことを頭において個々の場合について作業条件を求めなければならない。またアルミの溶接の本質を握し、要求される性能、作業環境を考慮した溶接設計を行なうとともに適切な治具の使用は本接続法の成否を大きく左右することとなる。ケーブルの溶接接続では特に上記(1)、(2)の点で熱流のバランス、しゃ断、さらには(5)を考慮した固定法などに重点を置い

* 日立電線株式会社日高工場

** 日立電線株式会社研究所

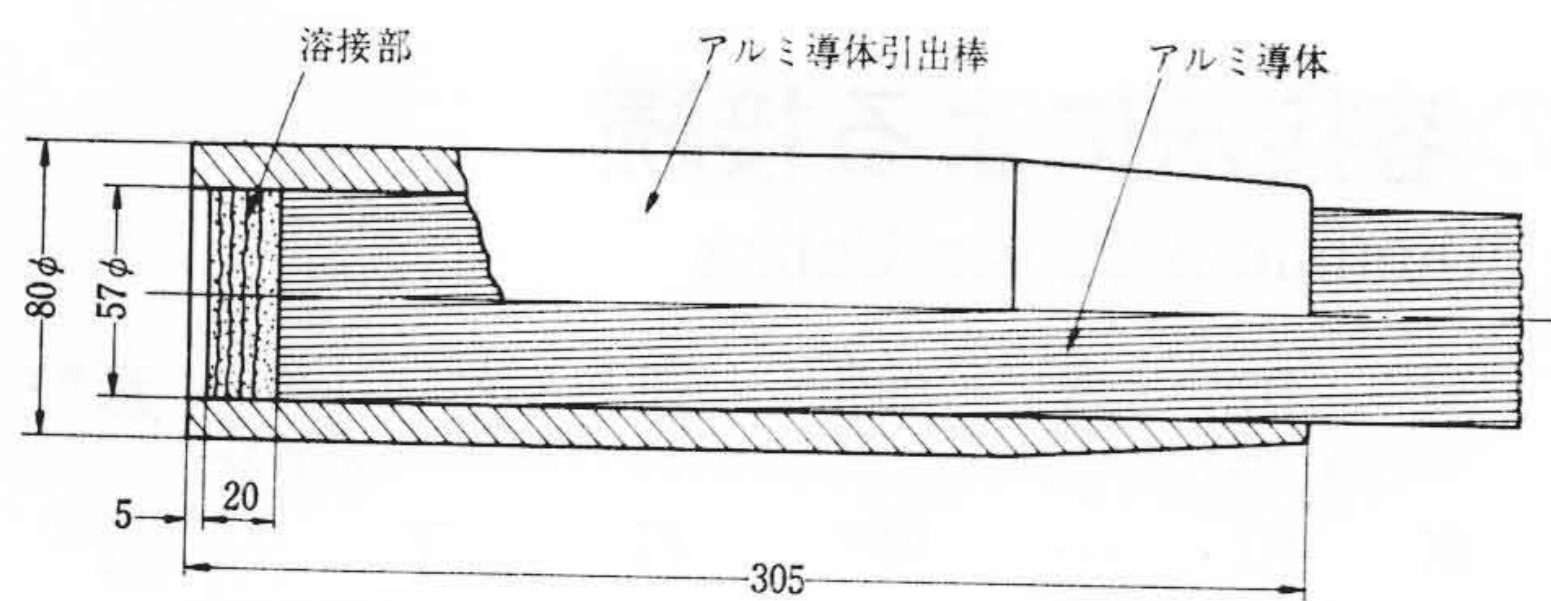


図1 ケーブルヘッド導体引出部の溶接構造

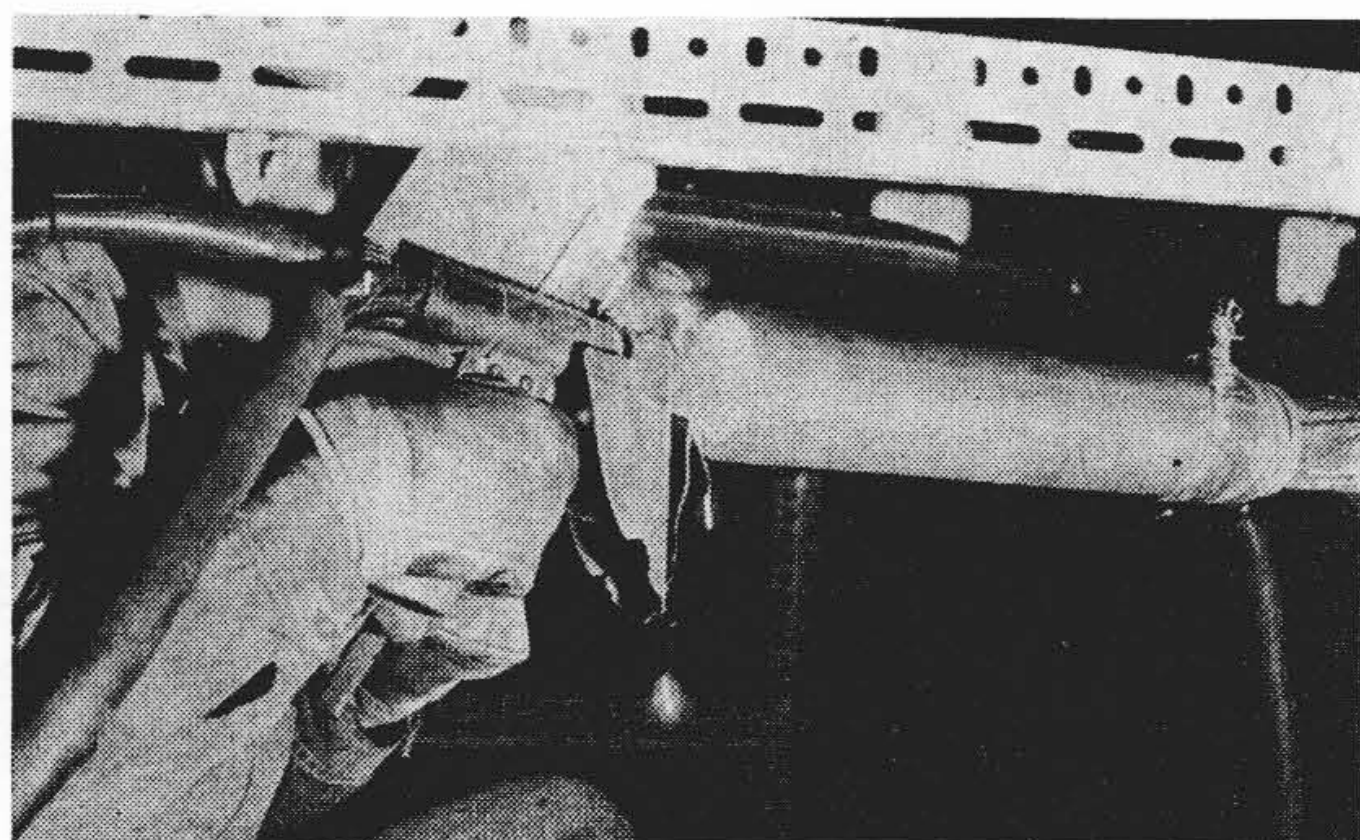


図2 ケーブルヘッド導体引出棒の溶接

て設計すべきである。

3. 溶接部の種類

ケーブル導体の接続を必要とする箇所は第1にケーブル末端部のケーブルヘッド導体引出部と第2にケーブル中間部の直線接続部の2箇所である。これら両者の溶接は基本的には同一であるが、接続部の構造の差により実際の作業法はそれぞれに適したものとするよう検討が行なわれた。

3.1 ケーブルヘッド導体引出部の溶接

3.1.1 溶接方法の検討

供試電線としては、現時点での最大製造記録品の $2,000\text{ mm}^2$ 軟アルミ導体ケーブル⁽⁶⁾⁽⁷⁾を用いて検討が行なわれた。図1はケーブルヘッド導体引出部の溶接構造を示したものである。溶接作業に対してはケーブルヘッドの場合接続作業現場での作業条件が異なることを考慮し、導体引出棒が縦配置、水平配置の2種について検討した。引出棒が縦配置の場合は溶接は下向きとなり比較的容易である。溶接は導体端面と引出棒の内周面をまずすみ肉溶接により一周溶接し、次いで渦巻き状に中心部に向かう。第1層の溶接が済んだらさらにその上に第2層の溶接を同様にして行ない、所要の厚さになるまで続ける。一方、引出棒が水平配置の場合はその内周面の最下部から始め、溶接は導体端面部を水平に左右に移動し、順次上部に向かう。第1層が終わったら、その前面に第2層の溶接を行なうが、この場合、溶接アルミがたれて落ちないように注意を払わなくてはならない。いずれの場合も最後に溶接表面を加熱しながら薄く溶かすことによりほぼ平滑な表面に仕上げることができる。引出棒水平配置の場合の溶接状況は図2に示すとおりである。

また、この溶接作業時各部の温度分布を測定したが、溶接の終了した5分後が最も高く、引出棒中央点で 305°C に達したが、導体露出部は 90°C 、絶縁体端部は 50°C であり、絶縁体に悪影響を与えることは無いことが確認された。

3.1.2 溶接結果

(1) 溶接断面、組織

溶接面は外観的には引出棒内に電線を埋め込んだように、きれ

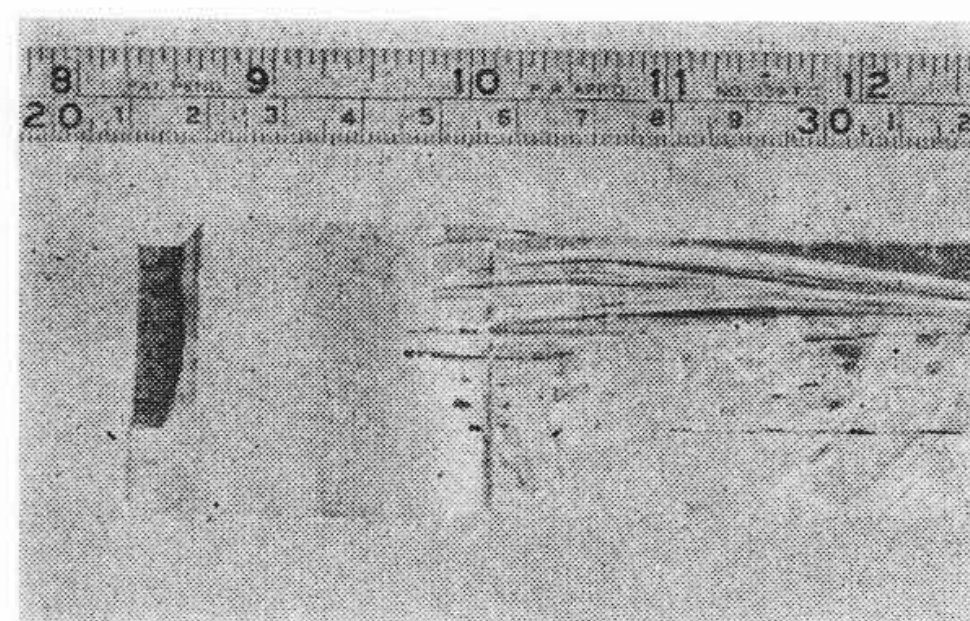


図3 ケーブルヘッド導体引出部の縦4分割断面

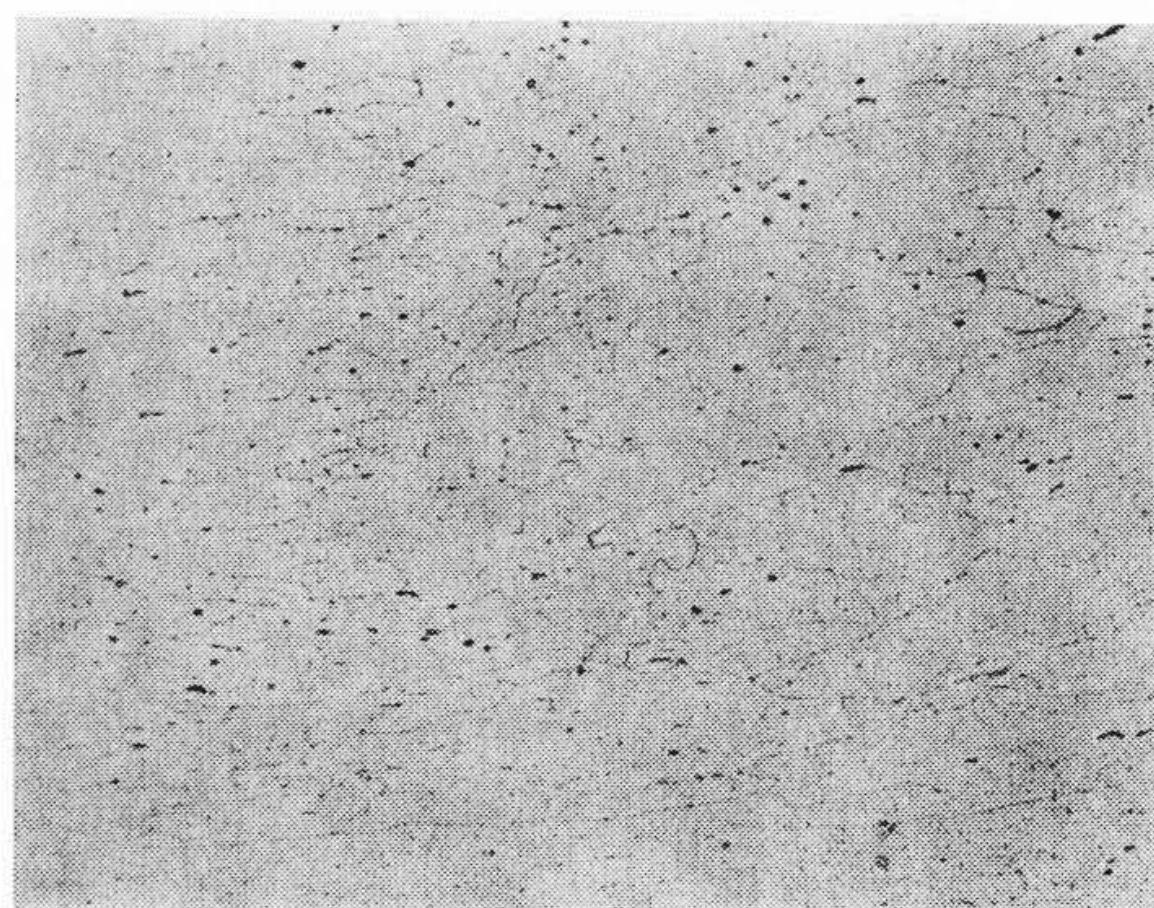
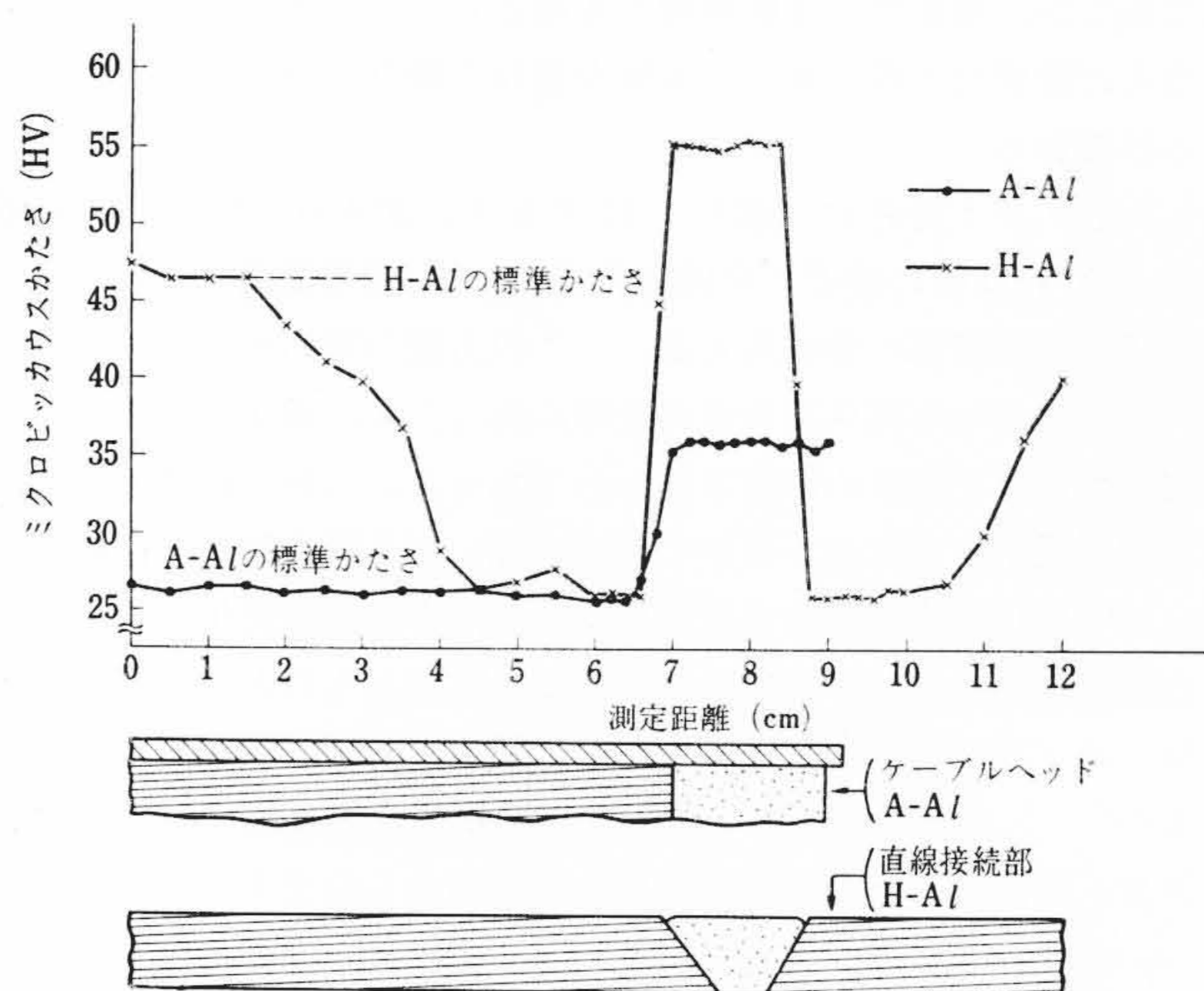
図4 溶接部の金属組織 ($\times 100 \times \frac{1}{2}$)

図5 溶接部のかたさ分布

いに仕上っており断面につきマクロ的な欠陥検査、検鏡など行なった結果、良好な溶接部が得られることがわかった。図3は溶接部を縦に4分割し断面を観察したものであるが、大きな溶接欠陥は見あたらない。図4は二つの溶接部の溶融部—電線の素線の境界部付近の金属組織を示したものである。写真からわかるように異常な介在物、気泡(きほう)などを含まない粒群が認められ、各素線は良く溶融接合し、完全な溶接ができていることを示している。

(2) 溶接部のかたさ分布

図5は溶融部を中心に素線の中央をたどってかたさ分布を測定した結果である。アルミ素線が軟アルミの場合、溶接前のかたさはビッカース硬度26~27程度であり、溶接部近辺でも特にかたさの低下は認められずむしろ溶融部は素線自身よりいくらかかたいことを示しているが、引張試験でも溶融部で切れることはなかった。このように導体の素線が軟アルミの場合は溶接時の熱の影響

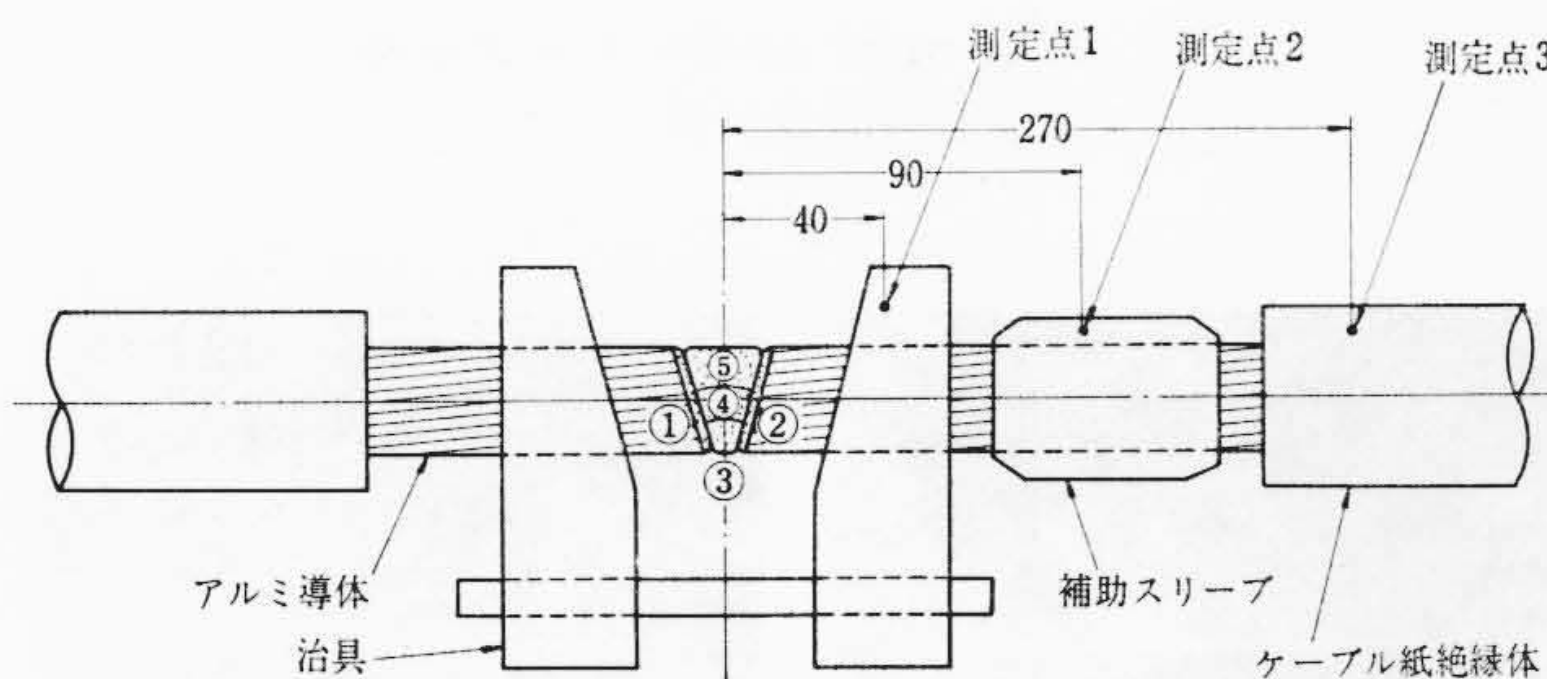
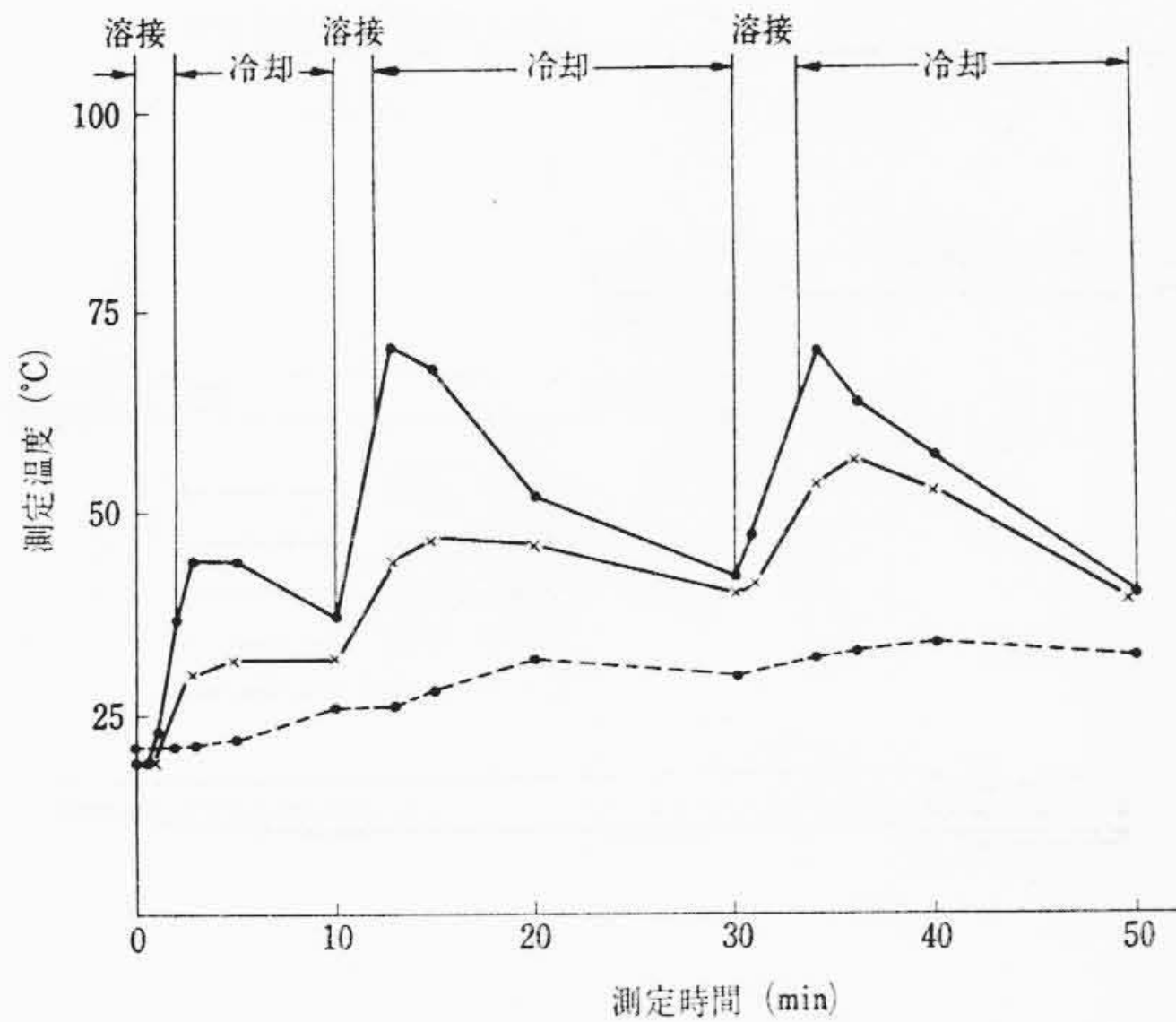


図6 直線接続溶接部の構造および温度特性

は比較的少なく、直線接続部の場合でもスリーブなど特別な補強は必要ないと考えられる。

3.2 直線接続部導体どうしの溶接

3.2.1 溶接法の検討

供試材には 510 mm^2 硬アルミ導体を使用し、溶接時の熱による各部の温度上昇、硬アルミ素線の硬度および引張強さの変化する度合い、導体部の油の影響などを検討した。

図6は溶接構造を示したものであるが、導体を斜めに切断し、左右の導体を数ミリの間隔を取り突き合わせ、動かぬよう治具で固定する。まず導体断面①②を予備溶接し、次いで下層から③④⑤と盛りあげ、溶接部を導体径と同径に仕上げる。また補助スリーブを使用する場合はあらかじめそう入しておいたスリーブを溶接部に移動し、圧縮する。溶接は途中、温度を監視しながら行なわれたが、その温度測定結果によると最も溶接部に近い治具部分でも 80°C を越えることはなく、ケーブル絶縁体部では $30\sim 40^\circ\text{C}$ とほとんど上昇せず、溶接時の熱による縁絶体の劣化は全く問題とならないことが確認された。

溶接作業上のほかの問題は紙絶縁ケーブルの含浸油の影響である。導体部に油が存在すると溶接部に欠陥が発生しやすいことが考えられる。事実、油含浸の無い導体の溶接の場合は溶接部で完全に溶接され異常は全く認められないものが、一方、油含浸導体の場合は接続部中央、溶接部の底部に不完全な溶接が見られた。図7は油含浸有無試料の導体溶接部断面写真であるが、油含浸試料の溶接中央部にブローホールの異常が認められる。これは油の除去が不完全であったため、溶接中に油がガス状に吹き出したものである。油の除去方法としては単にトリクレンで導体を洗浄するのみならず、 N_2 ガスジェット吹付けにより油分を吹き飛ばす方法が効果的であることが確認された。

3.2.2 溶接結果

適切な作業手順によって接続された溶接部の断面観察、溶融部

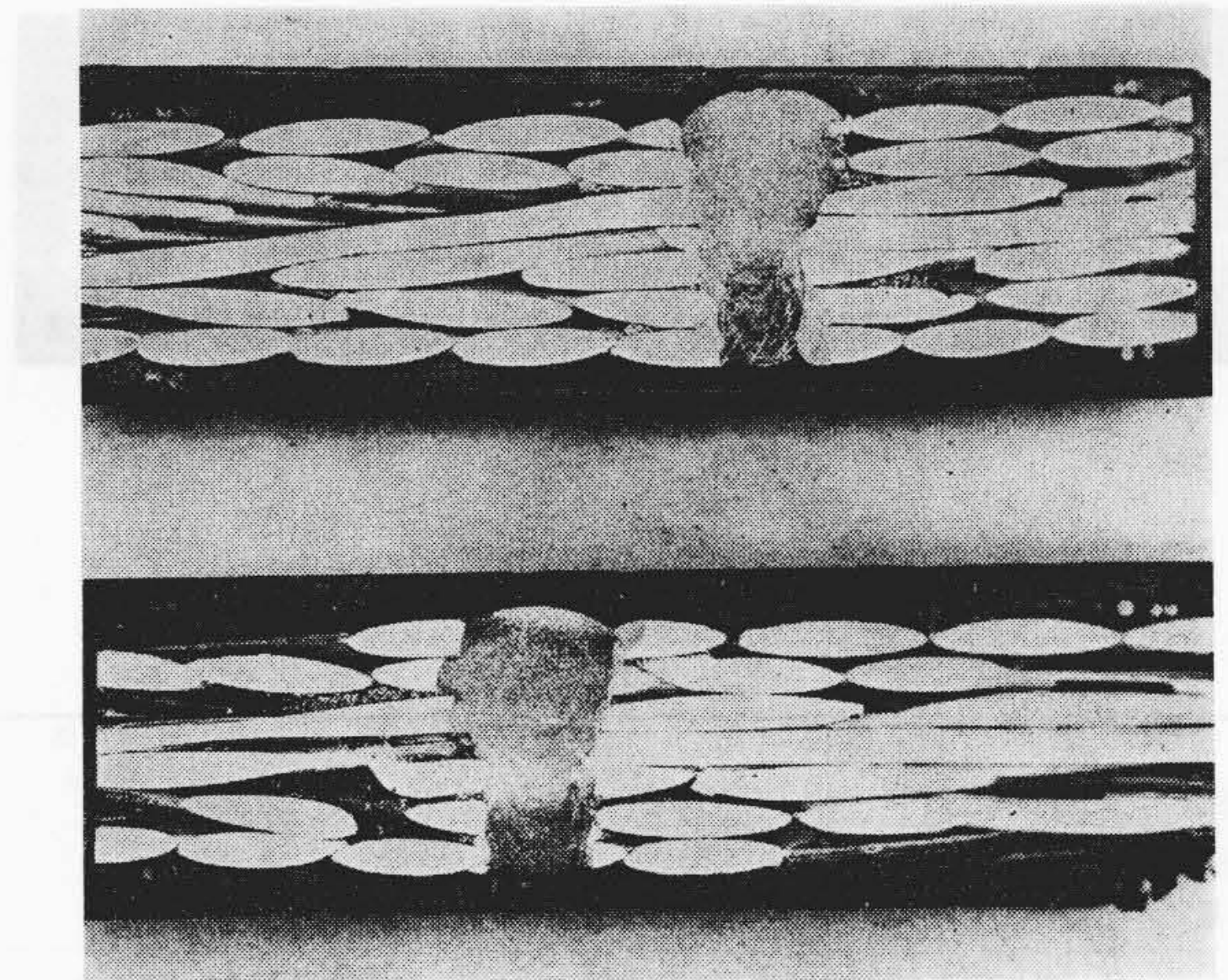


図7(a) 油含浸無試料の溶接部切断図

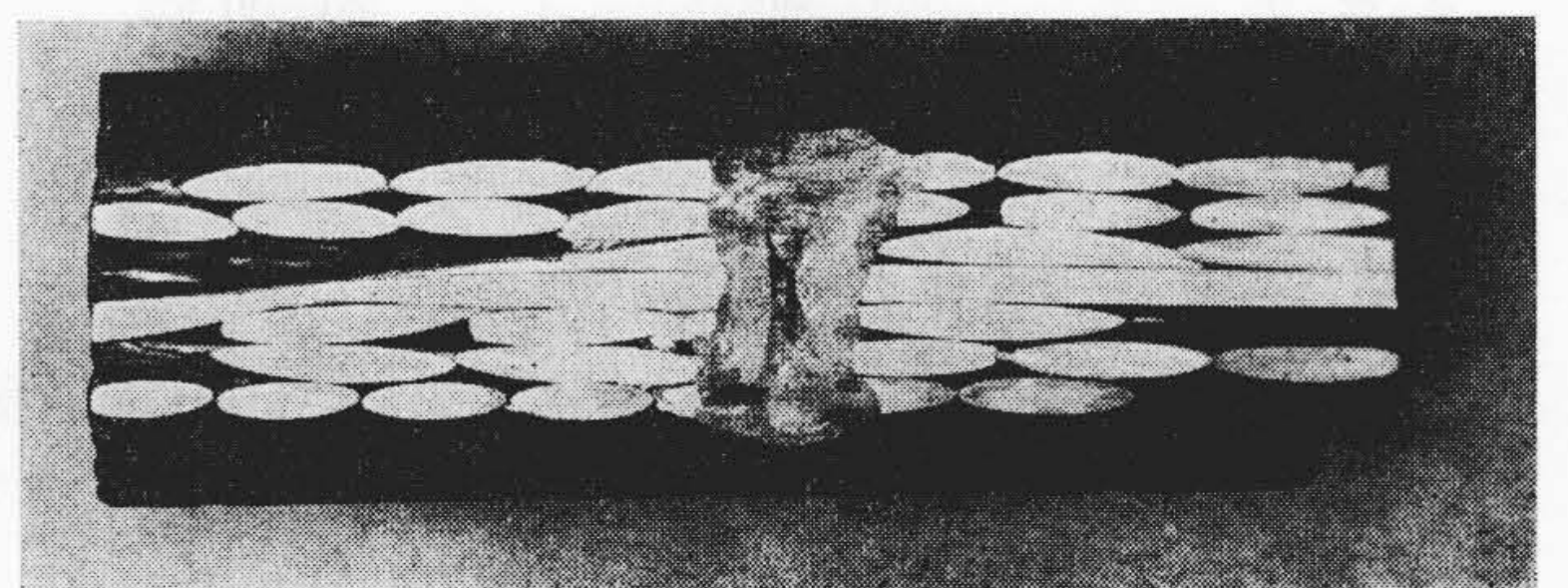


図7(b) 油含浸試料の溶接部切断図

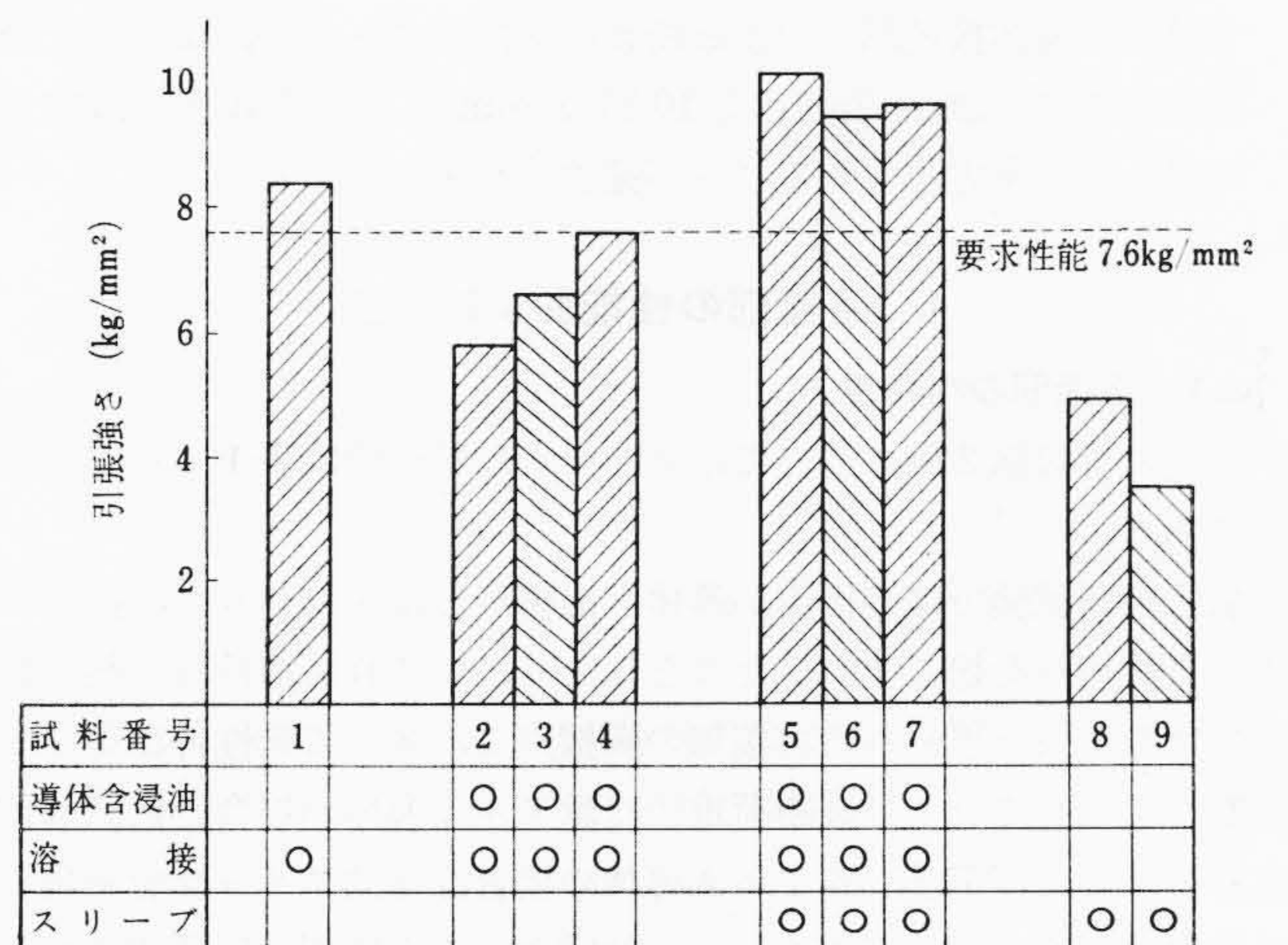


図8 導体直線接続部の引張強さ

の金属組織調査から見て各素線は良く接合し、硬アルミの場合も軟アルミ同様完全な溶接部を期待することができる。一方、溶接部のかたさ分布であるが図5の測定結果から見るとやや熱による素線の軟化傾向を示している。硬アルミ素線の溶接前のかたさはビッカース硬度 $44\sim 50$ 程度で、溶接中心から約 60 mm 程度は軟化しており、溶融部に近づくにつれてやわらかくなり、中心より 30 mm ぐらいまでは完全に焼なまされていることがわかる。溶融部のかたさが高いのは溶接心線として 4043 を用いたためである。このような熱影響部の長さは治具、溶接法の改良によりいくらか小さくなるが、導体の引張強度の補強のためには、溶接部の上にスリーブをかぶせて圧縮する方法が効果的である。

パイプ形ケーブルの接続部のようにオフセット無しで布設される場合、ケーブルの熱伸縮に対し導体内部に生ずる応力に耐えるだけの機械的強度が要求される。特に温度降下した場合の縮みに対し生ずる導体内応力を保証しなくてはならない。図8は溶接部

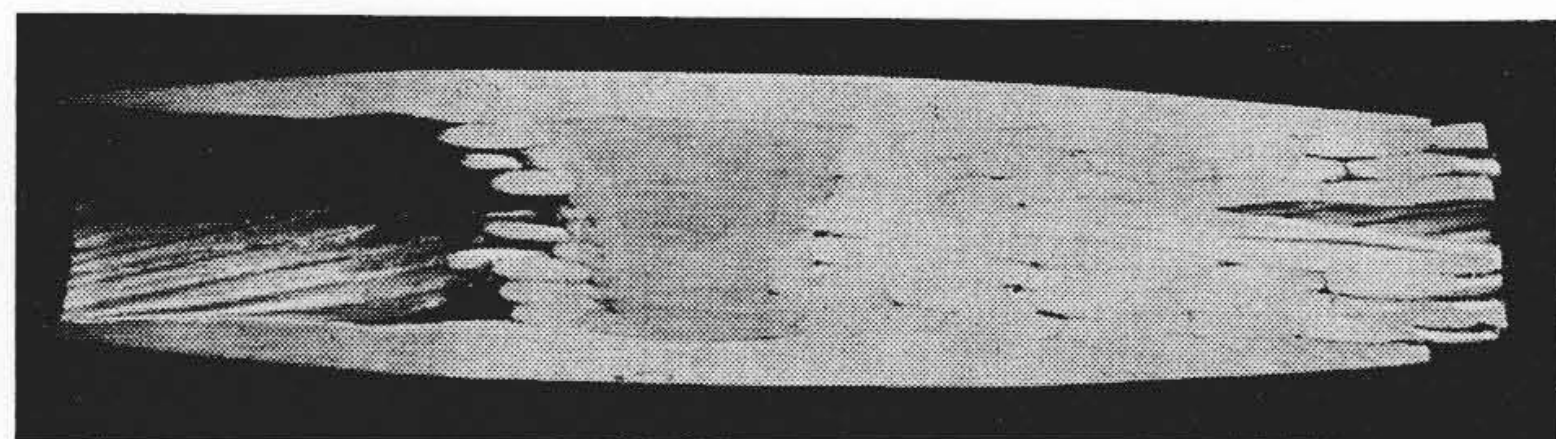


図9 アルミ導体直線接続部、
引張破断試料の切断図

表1 アルミ導体溶接接続部の諸特性

特性項目	軟アルミ導体 2,000 mm ²	硬アルミ導体 (補助スリーブ付き) 510 mm ²
引張破断荷重 (導体比)	10,600 kg (71%)	4,960 kg (59.5%)
電気抵抗 20℃ (導体比)	16.8 μΩ/1.2 m (98.8%)	10.25 μΩ/0.2 m (78.2%)
温度上昇 (導体比)	1,800A 通電 27℃ (99%)	1,100A 通電 55℃ (91.5%)
くり返し通電試験 (1,800A, 100回)	電気抵抗, 温度 上昇値とも変化なし	電気抵抗, 温度 上昇値とも変化なし

の引張試験結果であるが、要求される性能を満たすためには溶接のみでは不じゅうぶんであることが判明し、機械的に小形のスリーブを併用して引張強度を大きくすることが必要となった。一方、スリーブのみの引張強さは、やはり要求値に足らず、溶接と併用することが必要であることを示している。図9は補助スリーブ付き、導体接続部の引張破断後の切断面であるが、破断状況は正常であり、破断引張強さも10.3 kg/mm²に達しじゅうぶん使用に耐える作業方法であることが確立されたと考える。

4. 溶接部の性能および検査

4.1 溶接部の諸特性

前述の溶接部2例について求めたおもな特性値は表1に示すとおりである。

引張破断試験では溶接部が導体引出棒からはずれたり、溶接部の中で素線切れを起こすようなことはなく、いずれも溶接時の熱影響で軟化した所と思われる溶接部の隣接点で、すべて延性伸びを伴う破断を起こしていた。破断荷重値は軟アルミ導体の場合、供試導体自身の値に比べ71%、硬アルミ導体の場合は補助スリーブを使用して約60%で、後者はやや低いが、通常ケーブル接続部に要求される破断荷重値は導体自身の30%以上であること、ケーブルのオフセット無しで使用されるパイプ形ケーブルの接続部などでも45%以上を保証すればじゅうぶんであることから問題なく使用できる。

溶接部の電気抵抗値および通電による温度上昇値は軟アルミ導体、硬アルミ導体いずれの場合も導体自身より低く、使用上安全であることを示している。

一方、実際の運転時の安定性を見るため、くり返し通電を行ない、溶接部の電気抵抗、温度上昇値の推移を見たが、図10に示すように50回後、100回後、いずれも初期値と変わらず満足すべき結果であった。

4.2 溶接部の検査

溶接部の検査方法としては断面観察、顕微鏡による金属組織の検査などがあるが、いずれも破壊検査であり試料試験に対しては適用できるが製品に対しては適用できない。しかし製品の場合も溶接部の性能確認は必要となる場合が多く、非破壊試験としてX線透過法、超音波探傷法について検討した結果をケーブルヘッド導体引出棒部の溶接例で述べる。

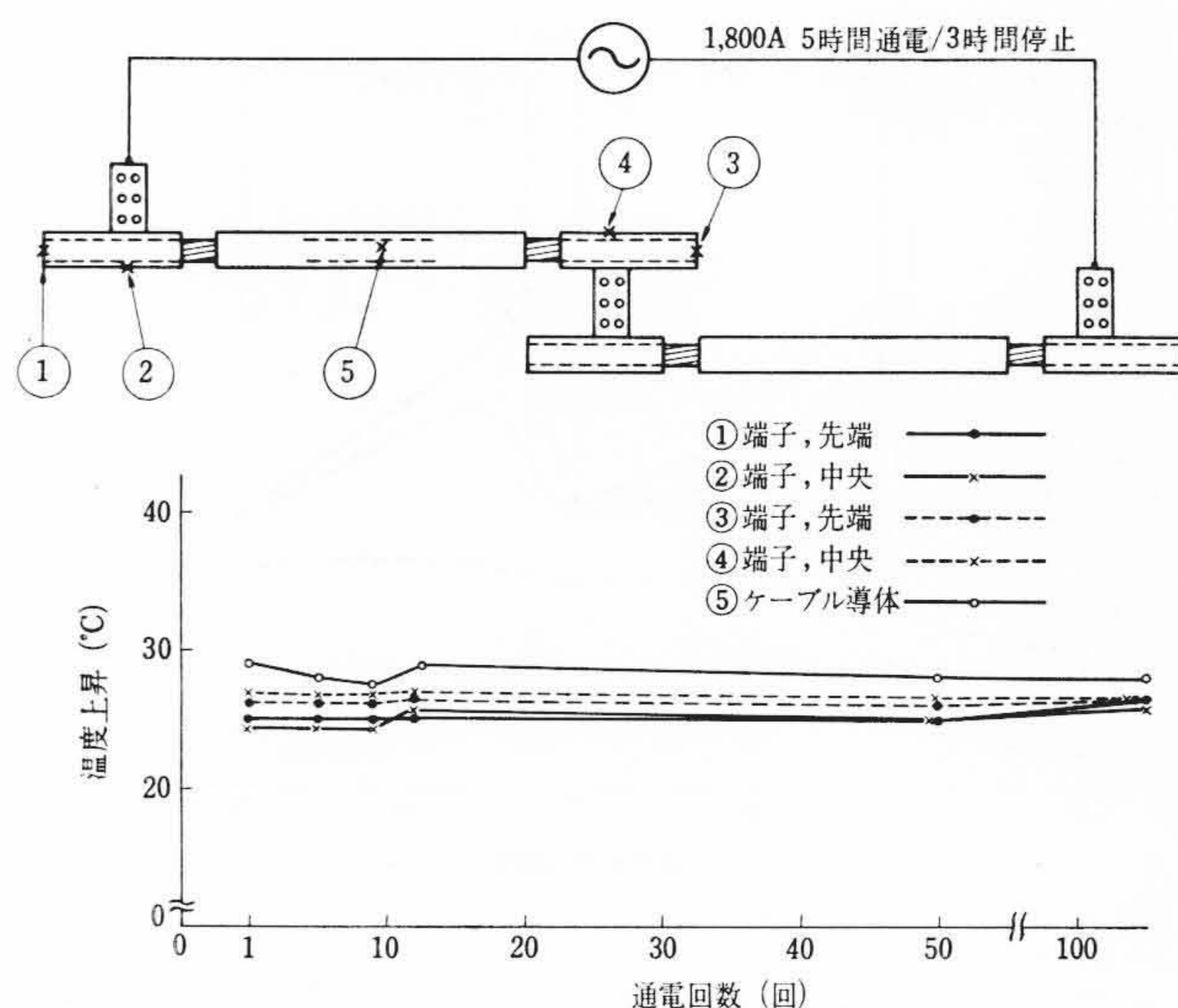


図10 2,000 mm² Al-QV ケーブルの
くり返し通電試験結果

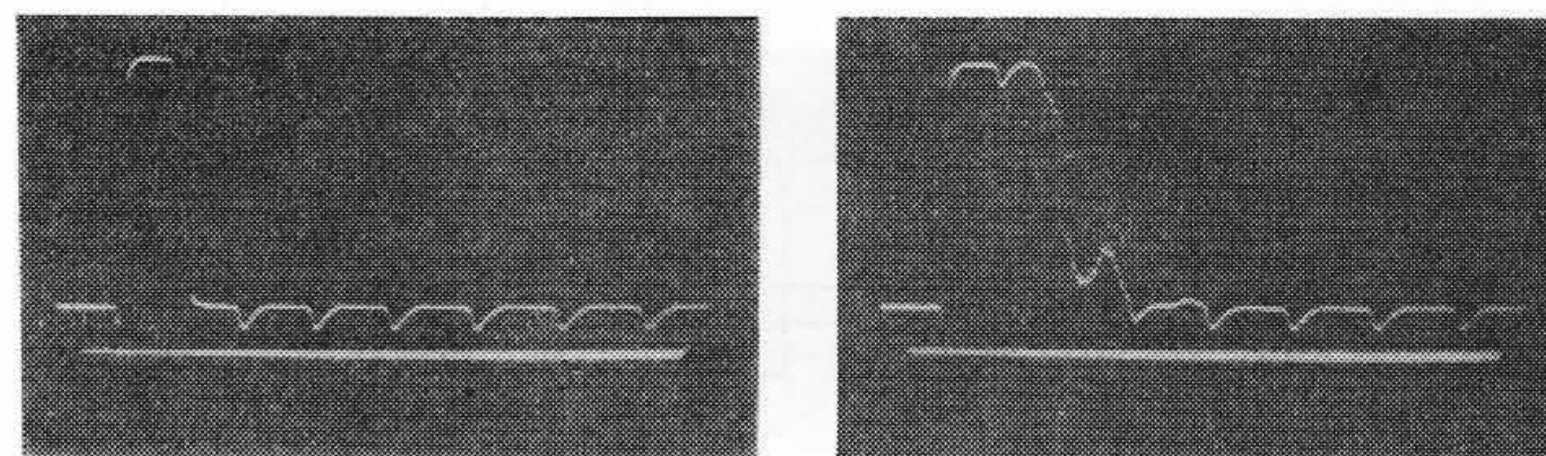


図11 溶接部の超音波探傷写真

4.2.1 X線透過法による検査

X線透過による金属内部の欠陥の検出は最も有効、正確な方法の一つである。ケーブル導体接続部のように円筒状の部分でも、X線透過を数方向から行なうことにより、ほぼ完全に異常を検出することができる。しかし、このX線透過法は撮影機そのものが大形となること、撮影時、放出される放射線に対する防御が必要となること、装置の取扱者が限定されることなどの問題があり、工場における検討には応用可能だが接続作業現場での適用は無理な場合が多いと言わざるを得ない。

4.2.2 超音波探傷法による検果

ケーブルの接続作業現場で簡易に導体溶接部を検査するためには試験器具が小形軽量であることが必要で、超音波探傷法はこの目的にかなっている。その方法は小形の探傷子を溶接部に当てるだけでよく、適当なリード線で結ぶことにより操作できる。操作、検出器は少し離れた場所に置くことも可能で、狭い場所でも検出作業は容易である。

図11は導体引出棒溶接部の探傷結果の一例を示したものである。無欠陥の溶接部と溶接部に小孔傷を設けた場合の波形の乱れを対比させるとわかるように溶接部のわずかの欠陥も検出可能で実用性のある方法といえよう。

5. 溶接法 of 具体的応用例

アルミ導体は溶接法により小形で信頼性のある接続部を得ることができるが、また同時に、はんだまたは圧縮法に比較して作業時間も大幅に短縮可能であった。この溶接法の応用例をケーブルヘッドと直線接続部について次に示す。

5.1 2,000 mm² ケーブルヘッドへの応用

中部電力株式会社、高根第1発電所の主幹電力路⁽⁷⁾として15 kV 1×2,000 mm² アルミ導体架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル (略

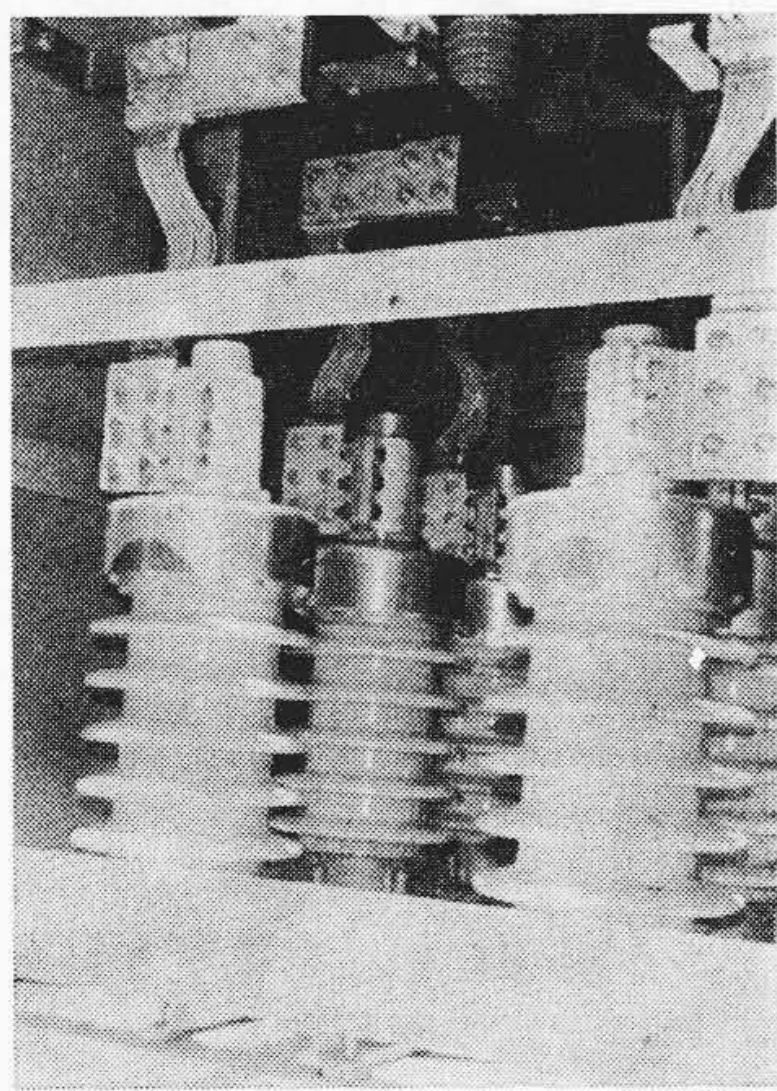


図 12 15 kV, 2,000 mm² Al-QV 用
ケーブルヘッドの完成状況

号 Al-QV) が使用されたが、導体が大サイズのためケーブルヘッドの導体引出部は従来技術のはんだあげ、圧縮接続では性能上または作業性からも困難が予想され、事実、試作結果は満足できるものではなかった。ここで溶接接続法が採用されることになったが、その結果は狭いキュービクル内の作業であったにもかかわらず、作業は容易に行なわれしかも作業時間は圧縮作業などに比べて大幅に短縮された。本布設例ではケーブルヘッドは縦配置、水平配置のもののおの 24 組施工されたが、溶接後の検査の結果、すべて良好なものであることが確認されている。その完成状況は図 12 に示すとおりである。

5.2 950 MCM 直線接続部への応用

カナダ、エドモンド市納入のアルミ導体パイプ形 OF ケーブル⁽³⁾の導体接続に機械的性能の要求から溶接接続法が採用された。本布設にあたっては特に、パイプ形ケーブルの布設はオフセット無しのため熱伸縮により導体内部に発生する応力を保証するだけの機械的強度、溶接時の熱による紙絶縁体の劣化防止の点に対して考慮が払われている。

5.3 溶接接続法の適用範囲

溶接法による接続はすべてのアルミ導体ケーブルに適用できるが、それを最も効果的なものとするのは、超大サイズ導体の接続および同一場所で大量の接続を短時間に施工する必要がある場合である。特に前者の場合は従来技術のはんだあげ、圧縮接続では不可能に近いが、溶接法を採用することによって容易に解決できることになった。比較的サイズの小さい導体の接続の場合はその数量、用途、時間的制約などを考慮して採否を決定することになる。

6. 結 言

以上に MIG 法を用いたアルミ導体電力ケーブルの溶接接続法の検討経過について報告したが、その結果はじゅうぶん満足できるものであった。

アルミ溶接はケーブル導体の前処理を適切に行ない、溶接条件を最適なものとするにより、信頼性のある接続部を短時間に完成することができる。溶接部について組織検査、かたさ分布検査などを行なったがアルミ母材と同等な性能を示し、また溶接接続部全体に対する電気抵抗、引張り、くり返し通電試験の結果はなんらの異常も認められず良好であった。また溶接の検査法としては X 線透過、超音波探傷などが有効であった。

本アルミ溶接法はすでにケーブルヘッド、中間接続部に応用されているが、今後ますます多く使用されてゆくものと考えている。

終わりにあたり、本実験を担当されたかたがたおよび本技術を実工事で運用されたかたがたに厚くお礼を申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 庄司, 吉岡ほか: 日立評論 47, 71 (昭 40-10)
- (2) K. J. Smith: I. E. E. E., Vol. Pas-86, No. 10, 1284 (Oct. 1967)
- (3) C. A. Anderson: I. E. E. E., Vol. Pas-85, 381 (April 1966)
- (4) J. Sticher, R. H. Hiester: A. I. E. E., Vol. 73, 1126 (Oct. 1954)
- (5) 軽金属溶接技術会編: アルミニウムとその合金のイナートガスアーク法溶接作業標準, 同解説
- (6) 日立評論, 45, 1359 (昭 45-11)
- (7) 大堀, 市毛ほか: 昭 42 電気学会連合大会, 639
- (8) 富田, 秋山ほか: 昭 45 電気学会連合大会

Vol. 31

日立造船技報

No. 2

目 次

■ 論 文

- ・高圧用メカニカルシールの研究 (第 5 報)
— 静圧形メカニカルシールの密封特性と密封性能 —
- ・標準ユニット法による船体局部強度解析
- ・中, 小形船の伴流係数推定法

- ・風による円柱の振動に関する二, 三の考察
- ・噴流層の流動化のための最大圧力降下と流動化状態における圧力降下
- ・ポーラスプラグによる溶銑の脱硫と黒鉛球状化処理
- ・塗布量と膜厚との関係 — 表面あらさと膜厚との関係 —

……………本誌に関する照会は下記に願います……………

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60 郵便番号 554