

日立バイメタルの諸特性

Various Characteristics of Hitachi Thermostatic Bimetals

山路賢吉* 寿 憲 夫**
 Kenkichi Yamaji Norio Kotobuki
 吉田善一** 角川清夫***
 Yoshikazu Yoshida Kiyoo Tsunokawa

内 容 梗 概

通常バイメタルの製造法としてはろう接法、拡散法、鍛接法、熱間圧延法などが用いられているが、いずれも作業中の接着面の酸化防止が技術上の大きな問題となっている。

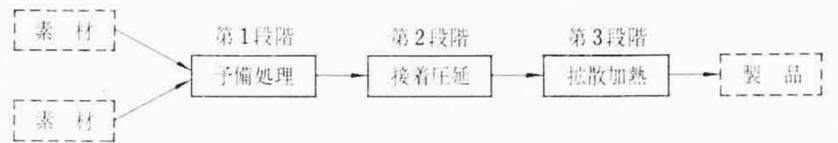
日立電線株式会社では、さきに確立した線材の常温圧接の技術を板材の接着に応用するため、東北大学金属材料研究所、田中研究室のご指導のもとに研究を続けた結果、常温クラッド方式による金属複合板の製造に成功した。本方式では接着前または接着時に加熱を要しないため、接着面における酸化、ガス発生の問題がない。それゆえこの方法により製造したバイメタルは、従来の市販バイメタルに比べ接着性がきわめて良好であり、したがって性能もまた均一なものである。さらに従来の市販バイメタルがその製造法のゆえにすべて短尺品であるのに対し、本方式では性能の均一な長尺コイルの製造が可能である。

1. 緒 言

バイメタルは熱膨張係数の異なる2種類の金属または合金をはり合わせて板状にしたものであり、温度が変化するに従い、その構成金属の熱膨張差により湾曲する特性を有するので、温度を検出する装置あるいは変形によるエネルギーを利用する各種の調整装置に広く用いられている。

バイメタルの製造方法に関しては、従来より数多くの考案がなされているが、いずれの場合でも接着を確実にするため、特に接着面の酸化防止に多大の努力がなされている。たとえばバイメタルの製造法としてもっとも広く行なわれているろう接法では、高膨張側および低膨張側の両金属を重ね合わせ、その間にろうをはさんで加压加熱を行なうが、接着面の酸化を防ぐために加熱を真空中または還元性ガス中で行なうか、あるいは脱酸剤を添加した特殊なろう材を用いて接着するのが普通である。また、一方の金属の側面に他方の金属を鋳込んで複合ビレットとする鋳造法では、鋳込む前に接着面にホウ砂を塗布した後適当な温度に予熱しておいたり、鋳造後さらに鋳込んだ金属を再溶解するなどの方法がとられている。拡散法、鍛接法、熱間圧延法などにおいても、両金属を重ね合わせた後、周囲を溶接し接着面を真空引きしたり、接着面にあらかじめメッキを施したりするのが普通である。いずれにしてもこれらの方法では、作業中いかにして接着面の酸化を防止するかということが、接着技術上の大きな問題となっている。

しかしながら近年金属の溶接に関する研究は著しい進展を見せ、異種金属どうしを加熱しないで接着する、いわゆる固相接合 (Solid phase bonding) に関しても数多くの研究、報告が見られるようになった^{(1)~(4)}。日立電線株式会社においても、電線用非鉄金属線材の常温圧接に関し数年来研究を重ね^{(5)~(7)}、一応技術的な完成を見たが、さらにこの技術を板材の接着に応用するため、東北大学金属材料研究所、田中研究室のご指導により種々の研究を試み、その結果常温クラッド方式によるバイメタル製造の工業化に成功するに至った次第である。



第1図 バイメタル製造工程

第1表 日立バイメタルの種類と特性

種類 (JIS規格 該当品)	構成	常用温度範囲 (許容温度範囲) (°C)	彎曲常数 (10 ⁻⁴ /°C)	固有抵抗 (μΩ-cm) (20°C)	弾性係数 (10 ³ kg/ mm ²)	密度 (g/cm ³)	標準熱 処理温度 (°C)
HL-1 (BM141)	Ni-Fe Zn-Cu	-20~150 (-70~160)	14.0	12	11	8.25	200
HL-2 (BM2011)	Ni-Fe Ni-Cu-Mn	-20~150 (-70~200)	19.6	110	13	7.80	250
HM-1 (BM148)	Ni-Fe Ni-Mn-Fe	-20~150 (-70~350)	14.2	80	17	8.10	350
HM-2 (BM158)	Ni-Fe Ni-Mn-Fe	-20~150 (-70~350)	15.2	80	17	8.15	350
HM-3 (BM102)	Ni-Fe Ni	-20~180 (-70~400)	9.6	18	17	8.17	400
HH-1 (BM082)	Ni-Fe Ni	-20~350 (-70~500)	8.0	16	17	8.25	500
HH-2 (BM127)	Ni-Fe Ni-Mn-Fe	-20~350 (-70~500)	11.8	67	17	8.16	500

- (備考) 1. 彎曲常数の許容差は ±5%
 2. 固有抵抗の許容差は ±5%
 3. 熱処理は上記温度で厚さ1mm未満のものについては1時間、厚さ1mm以上のものについては3時間、各1~3回行なう。

2. 常温クラッド方式の接着機構

異種金属どうしを緊密に接着するためには、接触面において異種原子どうしがきわめて近い距離にまで接近し、両金属の原子間に親和力が働くことが必要である。常温クラッド方式は3段階法 (Three-stage method) と呼ばれ、その作業工程を図式的に表わすと第1図のようになるが、第1段階の予備処理工程で接着面を清浄にした後、両金属を重ね合わせて圧縮し、接着面に核結合 (Nucleal bond, Green bond) を形成させる。この圧縮作業は通常圧延によって行なわれているが、原理的には押し引きなどによっても同じである。第3段階において適当な温度に加熱することにより、接着面で原子どうしの拡散浸透が行なわれ、接着ははじめて確実なものとなる。

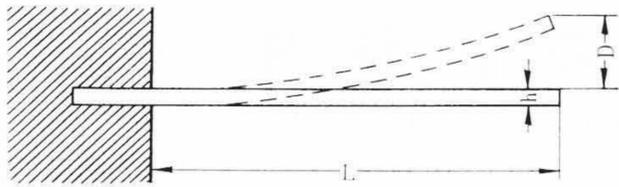
このように、常温クラッド方式では接着前あるいは接着時に加熱操作をまったく必要としないため、この方式により製造したバイメタルは、次のような特長を有している。

- (1) 接着性が良く、はく離のおそれがない。

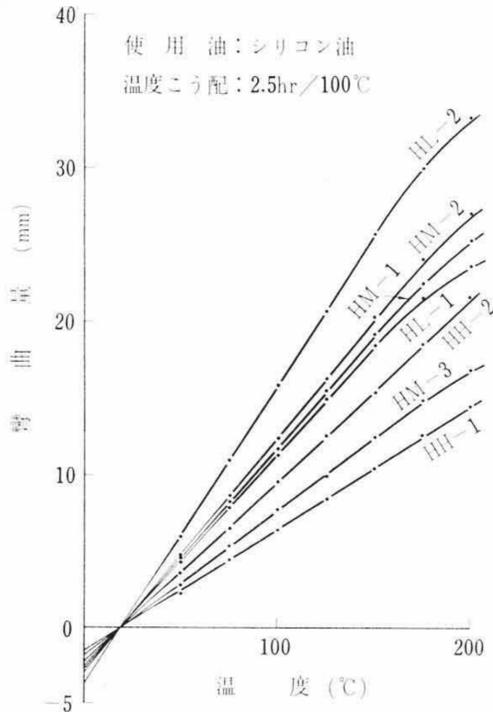
* 日立電線株式会社日立工場 工博

** 日立電線株式会社日高工場

*** 日立電線株式会社電線工場



第2図 片持はりバイメタルの変形



第3図 温度と弯曲量の関係
試片寸法 1.0 t × 10 b × 100 (作動長)

- (2) 板厚, 板厚比の均一な長尺コイルにできる。
- (3) 材質, 弯曲度が均一である。

3. 日立バイメタルの特性

日立バイメタルは, それぞれ JIS 規格相当の性能を有する 7 品種を代表的製品とし, 第1表にその種類と特性を示す。

以下にこれらの製品に対して行なった性能試験の結果を述べる。

3.1 弯曲試験

バイメタルは温度変化によって弯曲するが, 両端自由のバイメタル板を均一に加熱したときに生ずる曲率の変化 $1/\rho$ (ρ : 曲率半径) は次式で示される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6(1+m)^2(\alpha_2 - \alpha_1)}{3(1+m)^2 + (1+mn)\left(m^2 + \frac{1}{mn}\right)} \cdot \frac{\Delta T}{h} \dots\dots(1)$$

- $(\alpha_2 - \alpha_1)$: 両金属の熱膨張係数の差
- m : 両金属の板厚比 (h_1/h_2)
- n : 両金属の弾性係数の比 (E_1/E_2)
- h : バイメタルの厚さ ($=h_1+h_2$)
- ΔT : 温度変化

もし, $m=1, n=1$ ならば(1)式は

$$\frac{1}{\rho} = \frac{3}{2} \cdot \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T}{h} \dots\dots(2)$$

となる。膨張係数ならびに弾性係数は, 広い温度範囲にわたって均一ではないが, 一般には

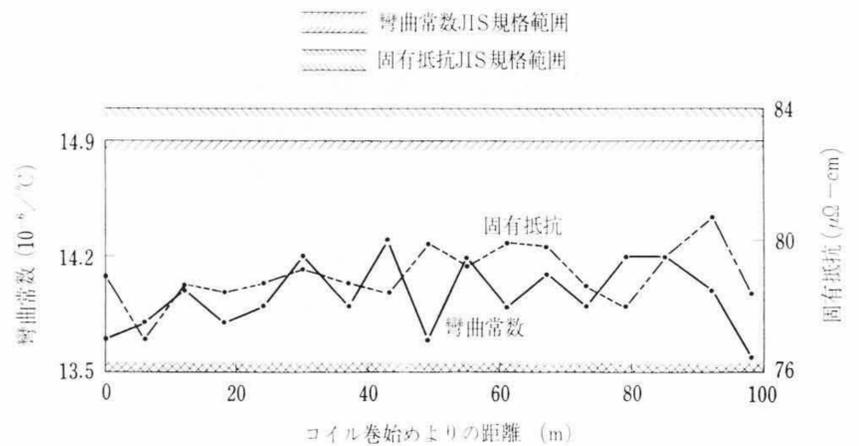
$$\frac{1}{\rho} = 2K \frac{\Delta T}{h} \dots\dots(3)$$

で表わし得るバイメタルの温度範囲は存在すると考えてよい。通常この K を弯曲常数とよび, バイメタルの温度特性を表わす値として広く用いられている。

第2図に示すような片持はりに支持したストリップでは, 曲率変

第2表 弯曲常数測定結果

種類	JIS 規格値 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	測定値 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
		平均値	最大値	最小値	標準偏差
HL-1	14.0±5%	13.9	14.1	13.8	0.1
HL-2	19.6±5%	20.0	21.1	18.9	0.6
HM-1	14.2±5%	14.2	14.8	13.8	0.3
HM-2	15.2±5%	15.2	15.5	14.9	0.2
HM-3	9.6±5%	9.6	9.3	9.9	0.2
HH-1	8.0±5%	7.9	8.2	7.5	0.2
HH-2	11.8±5%	11.8	12.1	11.6	0.2



第4図 コイル内の特性値の変化例
(HM-1, 板厚 0.5 mm)

化 $1/\rho$ による自由端の変位 D は, ほぼ $L^2/2\rho$ になると考えてよい。それゆえ(3)式は次のように表わされる。

$$D = \frac{KL^2\Delta T}{h} \dots\dots(4)$$

したがって一般には(4)式を用い, 常温から 100°C までのバイメタル先端の振れを読み弯曲常数を求めている。

第3図は日立バイメタルに対して, この方法で求めた温度と変位量の関係を示す。第2表には各製品ロット間の弯曲常数のバラツキを示す。これは各製品ロットごとに抽出した 10~20 本の試験片につき測定したものであるが, 偏差が小さくバラツキの小さいことを示している。また第4図には, HM-1, 板厚 0.5 mm の製品に対し, 同一ロット内でのストリップ長さ方向の弯曲常数の変化を示すが, バラツキは小さく, 性能が均一であるといえる。

3.2 固有抵抗試験

バイメタルは, これを作動させる熱源のとり方により直熱式, 傍熱式の2通りに分けられるが, バイメタル自体に通電し, それにより発生するジュール熱を利用する直熱式では, その固有抵抗が設計上重要な数値となる。バイメタルの固有抵抗 R は構成金属の固有抵抗および板厚比より決まる。いま高膨張側金属および低膨張側金属の固有抵抗をそれぞれ R_1 および R_2 , 板厚を h_1 および h_2 とし, 全体の板厚を $h(=h_1+h_2)$ とすると大略次式で表わされる。

$$\frac{1}{R} = \left(\frac{h_1}{R_1} + \frac{h_2}{R_2}\right) \frac{1}{h} \dots\dots(5)$$

通常両金属の板厚は等しい ($h_1=h_2=h/2$) ので, (5)式は

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \dots\dots(6)$$

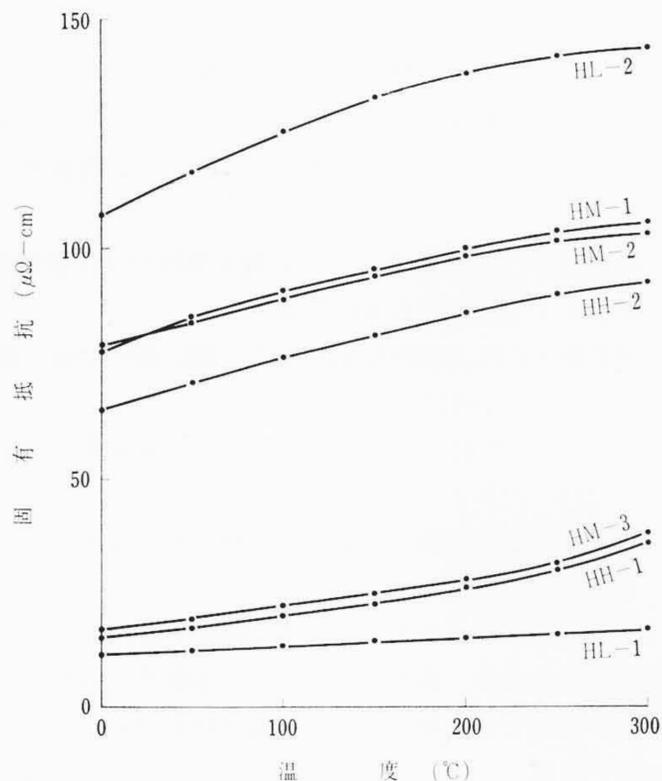
となり, 固有抵抗は構成金属の固有抵抗のみによって決定されることになるが, 日立バイメタルでは第1表に示す構成により, いずれも JIS 規格に適合する固有抵抗値が得られている。

第3表に各製品ロット間の固有抵抗のバラツキを, また第4図には HM-1, 0.5 mm 板厚の製品に対する固有抵抗の変化をもあわせ示しているが, 弯曲常数同様にバラツキが小さく, これらより日立バイメタルは性能が均一で, かつ安定していることがわかる。

なお第5図に温度と固有抵抗の関係を示す。

第3表 固有抵抗測定結果

種類	JIS規格値 ($\mu\Omega\text{-cm}$)(20°C)	測定値 ($\mu\Omega\text{-cm}$) (20°C)			
		平均値	最大値	最小値	標準偏差
HL-1	12±5%	12.2	12.5	12.0	0.2
HL-2	110±5%	108.0	109.6	106.4	0.9
HM-1	80±5%	78.4	79.7	77.1	0.7
HM-2	80±5%	81.0	82.0	80.1	0.6
HM-3	18±5%	17.8	18.0	17.6	0.1
HH-1	16±5%	16.1	16.3	15.8	0.2
HH-2	67±5%	65.7	66.3	65.1	0.4



第5図 温度と固有抵抗の関係

3.3 ねじり, 繰返し曲げ, 曲げ試験

複合(合わせ)金属板の接着性を調べる試験法については従来あまり研究されておらず、筆者らは上記の常温クラッド方式によってはり合わせ接着したバイメタルについて、巻付け巻戻し試験(試料を3.2mmφの鋼線に巻付け巻戻してはがれを見る)、ねん回試験(試料をねじり試験機に取りつけてねん回しはがれを見る)、引きはがし試験(口出し部をペンチでつかみ引きはがす)、内部摩擦測定などを行ない接着度の判定を試みたが、いずれもいったん接着した試料についてははく離は不可能であり、接着性を定量的に判定することはできなかった。それゆえここではJISの規定に基づいて行なったねじり試験、繰返し曲げ試験および曲げ試験の結果を示す。

JISには接着性および加工性を判定する基準として、次の各試験項目が規定されている。

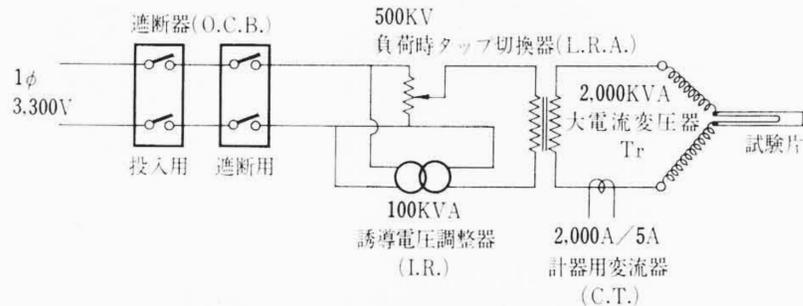
- (1) ねじり試験………圧延方向と直角に幅2mmの試験片をとり、両端をつかんで厚さ1mm未満のものはつかみ間隔を15mmで割った回数、厚さ1mm以上のものは30mmで割った回数だけ試験片をねじり、再びねじり回数だけ戻してサケ、キズ、ワレが生じていないこと。
- (2) 繰返し曲げ試験………圧延方向に幅5mmの試験片をとり、板厚の2倍のRのついたチャックではさみ、90度ずつ交互に曲げるとき、ワレ、ハガレが生ずるまでの曲げ回数が3回以上であること(ワレ、ハガレが生じた場合の最終回は数えない)。
- (3) 曲げ試験………圧延方向に幅2mmの試験片をとり、板厚と同じRのついたチャックではさみ、一方に90度曲げ、さらに10mm以上離れた箇所で反対方向に90度曲げたとき、曲げた部分にワレ、ハガレ、キレツが生じていないこと。

第4表 接着性, 加工性試験結果

種類	板厚(mm)	ねじり試験	繰返し曲げ試験(回)	曲げ試験
HL-1	1.0	ワレ, ハガレなし	8~9	ハガレ, キレツなし
	0.5	ワレ, ハガレなし	8~10	ハガレ, キレツなし
	0.25	ワレ, ハガレなし	9~12	ハガレ, キレツなし
HL-2	1.0	ワレ, ハガレなし	7~8	ハガレ, キレツなし
	0.5	ワレ, ハガレなし	8~10	ハガレ, キレツなし
	0.25	ワレ, ハガレなし	8~10	ハガレ, キレツなし
HM-1	1.0	ワレ, ハガレなし	6~10	ハガレ, キレツなし
	0.5	ワレ, ハガレなし	6~8	ハガレ, キレツなし
	0.25	ワレ, ハガレなし	8~12	ハガレ, キレツなし

第5表 連続加熱試験後の永久変位量
試片寸法 1.0 t × 10 b × 100

種類	保持条件 (°C × h)	変位量 (最大値/最小値) (mm)	標準偏差 (mm)
HL-1	160 × 6	0.18 (0.25/0.15)	0.04
HL-2	200 × 6	0.16 (0.25/0.10)	0.06
HM-1	350 × 6	0.22 (0.30/0.15)	0.05
HM-3	400 × 6	0.19 (0.35/0.05)	0.12
HH-1	500 × 6	0.26 (0.35/0.15)	0.07



第6図 瞬時高温加熱試験回路

HL-1, HL-2 および HM-1 に対してこれらの試験を行なった結果は第4表に示すとおりであるが、すべてJIS規格を上回り、接着性および加工性の良好なことがわかる。

3.4 連続加熱試験

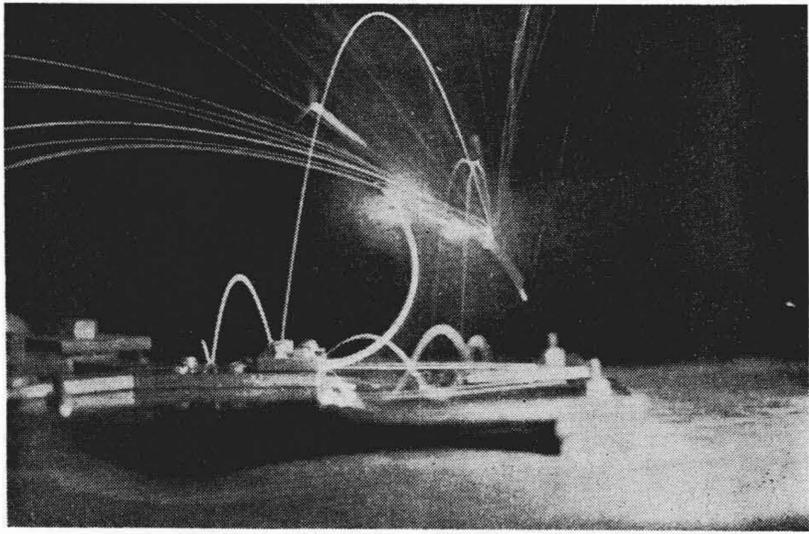
バイメタルを実際に使用する場合に、繰返し加熱と長時間連続加熱による履歴現象が大きな問題となるが、JISに規定されている連続加熱試験では、弯曲常数試験と同一の試験片を治具に取り付け、これを恒温槽中で板の最高許容温度に6時間保持した後徐冷し、このとき加熱による自由端の永久変位量が0.5mm以下のものを合格としている。

日立バイメタルについて連続加熱試験を行なった結果を第5表に示す。変位量はいずれも5~10本の試験片の平均値である。

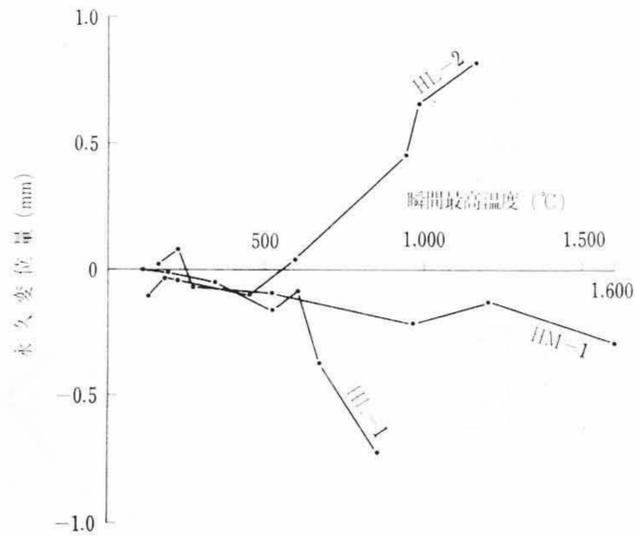
3.5 瞬時高温加熱試験

バイメタルを直熱形として使用する場合、使用回路によっては瞬間的に大電流の流れることも予想されるが、このような場合にもその後の作動に支障をきたさないことが必要である。ここでは日立バイメタルに瞬間的に大電流を流して加熱し、はく離、溶断の状況を調べるとともに、室温に戻った後の永久変位量を測定した。第6図は実験装置の回路図を示したものである。

実験に際して、電流は負荷時タップ切換変圧器、誘導電圧調整器で、時間は二つのO.C.B.を特殊ドラムスイッチで連動させて調整し、電磁オシログラフで記録測定した。またバイメタルの瞬間温度は、通電電流および時間から算出するとともに、写真撮影により弯曲度を記録して換算する方法をとった。永久変位量は試料台にセットした読取顕微鏡で測定した。第7図に写真撮影例を、第8図に測定結果を示す。低温用のHL-1およびHL-2では、500°C以下では



第7図 瞬時高温加熱試験状況



第8図 瞬時高温加熱後の永久変位量
試料寸法 1.0 t × 10 b × 100 (作動長)

永久変位量が 0.1mm 以下であり、約 800°C までは 0.5mm 以下である。また中温用の HM-1 は 1,600°C でもその永久変位量は約 0.3mm と小さく、これより瞬間的な加熱に対してもきわめて安定であることがわかる。

この実験に付随して、材料の軟化温度以下で瞬間加熱を繰り返した場合の永久変位量の変化を測定して、これを第6表に示す。繰返し回数が増すに従い、しだいに安定してくる傾向が認められる。

第6表 繰返し瞬時加熱後の永久変位量
試料: HM-1, 1.0 t × 10 b × 100

回数	通電条件		瞬間最高温度 (°C)	永久変位量 (mm)
	電流 (A)	時間 (ms)		
1	1,920	59	760	-0.153
2	1,960	65	780	-0.031
3	1,920	52	670	-0.004
4	2,000	49	690	-0.002
5	1,920	56	730	-0.002

4. 結 言

以上常温クラッド方式により製造した日立バイメタルの各種性能について述べたが、これらを要約すると次のとおり結論することができる。

- (1) 弯曲常数, 固有抵抗および連続加熱後の永久変位量は JIS 規格を十分満足するものである。
- (2) 接着前または接着時に加熱操作を要しないため, 接着性が良好で, かつ性能も安定である。
- (3) 長尺コイルでは, その各点において弯曲常数, 固有抵抗はほぼ均一である。
- (4) 瞬時高温加熱試験の結果より, 瞬間的な加熱に対してもきわめて安定である。

最後に, クラッド圧延方式についてご指導いただいた東北大学金属材料研究所田中教授, 福田先生ならびに本研究に終始ご指導, ご協力いただいた電工部会第7分科会導電材料委員会委員の諸氏, とくに日立製作所亀戸工場大井田氏に厚くおれい申し上げる。

参 考 文 献

- (1) W. Hofmann, H. Schüller: Z. Metalkunde 49, Hf. 6(1958)
- (2) H. Boessenkool, G. Durst: U. S. Patent No. 2,753,623
- (3) H. Pflumm, F. Rogers: U. S. Patent No. 2,834,102
- (4) H. Boessenkool, G. Durst: U. S. Patent No. 2,860,409
- (5) 斎藤, 山路: 日立評論 別冊-28, 79 (昭 33)
- (6) 斎藤, 山路: 溶接界 11, 137 (昭 34-3)
- (7) 斎藤, 山路: 日立評論 41, 586 (昭 34-4)