

単相交直両用アーク溶接機(日立アークペア)の諸特性

Characteristics of Single-phase AC/DC Arc Welder

秋 山 修* 藤 原 博 之*
Osamu Akiyama Hiroyuki Fujiwara

要 旨

単相全波整流回路の直流側にリアクトルを接続すると、交流電流波形が台形波状になる。このような波形の電源を使用してアーク溶接を行なうと、正弦波交流の場合に比べて、位相反転部でのアークの状態が改善され、スパッタの少ない良好な溶接が行なえるようになり、アーク特性が向上する。また、交流 TIG 溶接では直流分が減少し、アルミニウム溶接の場合に、クリーニング作用のきいたきれいなビードが置ける。さらに、本回路方式では直流アーク溶接機としても使用でき、クロモリブデン系の特殊溶接棒に向くすぐれたアーク特性を示す。

1. 緒 言

交流アーク溶接におけるアーク電流は、半周期ごとに交番するから、一周ごとに2度ずつ零になる瞬間があり、アークが瞬間的に遮断される。したがって、アークを持続するためには、この点で再びアークを発生する必要がある。この現象は再点弧現象と呼ばれ、交流アーク溶接では重要な問題である。

現在広く普及している交流アーク溶接機の電流波形は正弦波形であり、電流の瞬時値は常に変化している。特に、再点弧時の電流値が零になる前後では瞬時値が小さいので、アーク柱内の電力が小さく、また短時間にアーク電力が増加することも、電流波形から不可能である。このようなことがアーク特性に影響し、スパッタ発生などの原因にもなることが考えられる。

このような点から、電流波形を正弦波ではなく台形波状とし、位相反転部での電流変化を急峻にし、しかも波高値はほぼ一定で平坦な波形にすることで、アーク柱での電力の変動を小さくし、アーク特性を向上させることを試みた。

台形波状の大電流を得る回路方式としては二、三考えられるが、簡単で信頼性のある方法として、整流回路の直流側にリアクトルを接続し、リアクトルがエネルギーを吸収、放出する過渡現象を利用する方法を採用した。本方式によれば、交流波形の改善ができるばかりでなく、簡単な切換えで直流溶接機としても使用できる利点がある。

以上のような観点から「アークペア」なる商品名で開発した交直両用アーク溶接機について、その原理、特性などについて述べる。

2. 単相全波整流回路の交流電流波形

一般に整流回路を問題にする場合のように、整流器の特性は正方向の電圧降下がなく、逆電流が零である理想的なものと仮定する。このような整流器を使用した単相全波整流回路で、交流回路にインピーダンス素子のある場合の波形について検討する。

2.1 交流回路にのみリアクトルのある場合

図1(a)に示すように、交流回路にはリアクタンスがあり、直流回路には抵抗のみである単相全波整流回路では、交流電流は図1(b)のように正弦波形で、2次電圧に対し交流回路・直流回路の全抵抗とリアクタンスによって決まる力率角の遅れを示す。

2.2 直流回路にのみリアクトルのある場合

図2(a)に示すように、交流回路のリアクタンスは零で、直流回路のインダクタンスが無限大である場合について考えると、交流電流・直流電流の波形は異なり図2(b)のようになる。 $L_d = \infty$ であ

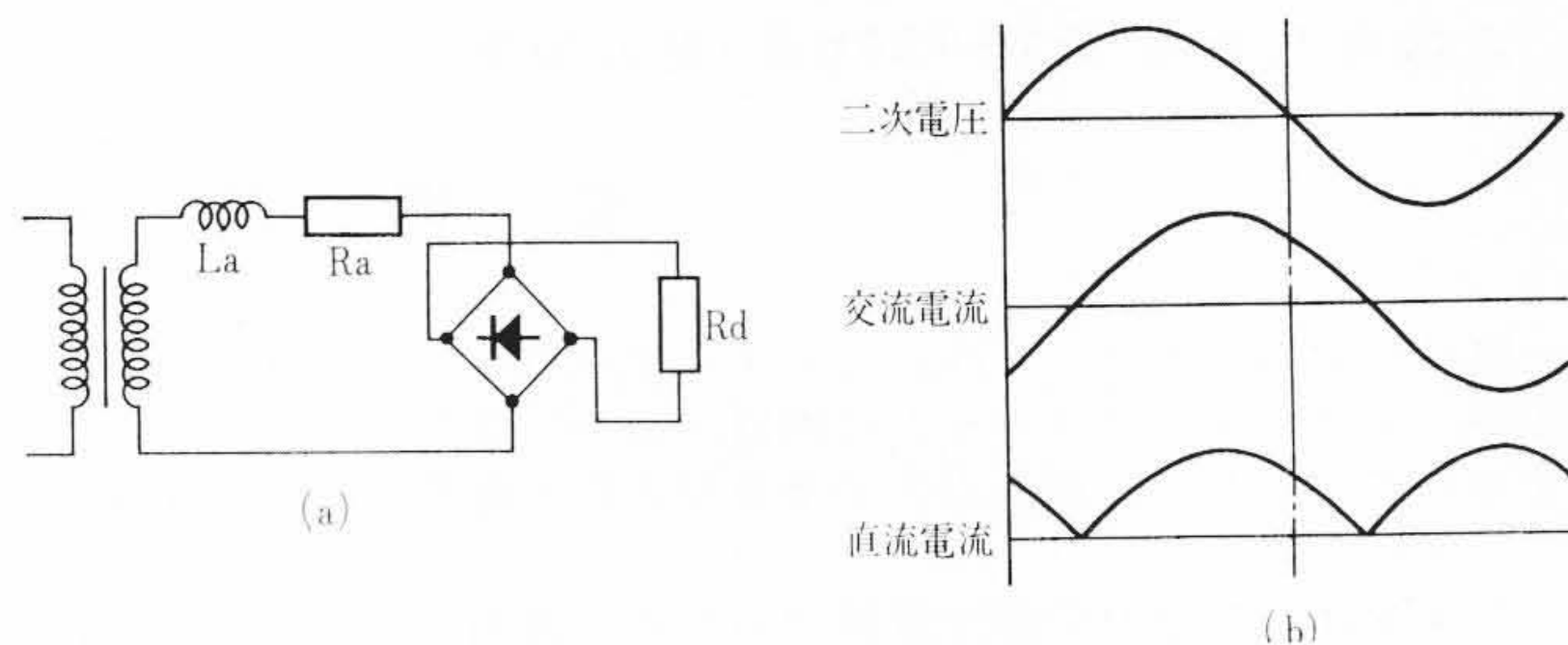


図1 交流回路にのみリアクトルのある場合

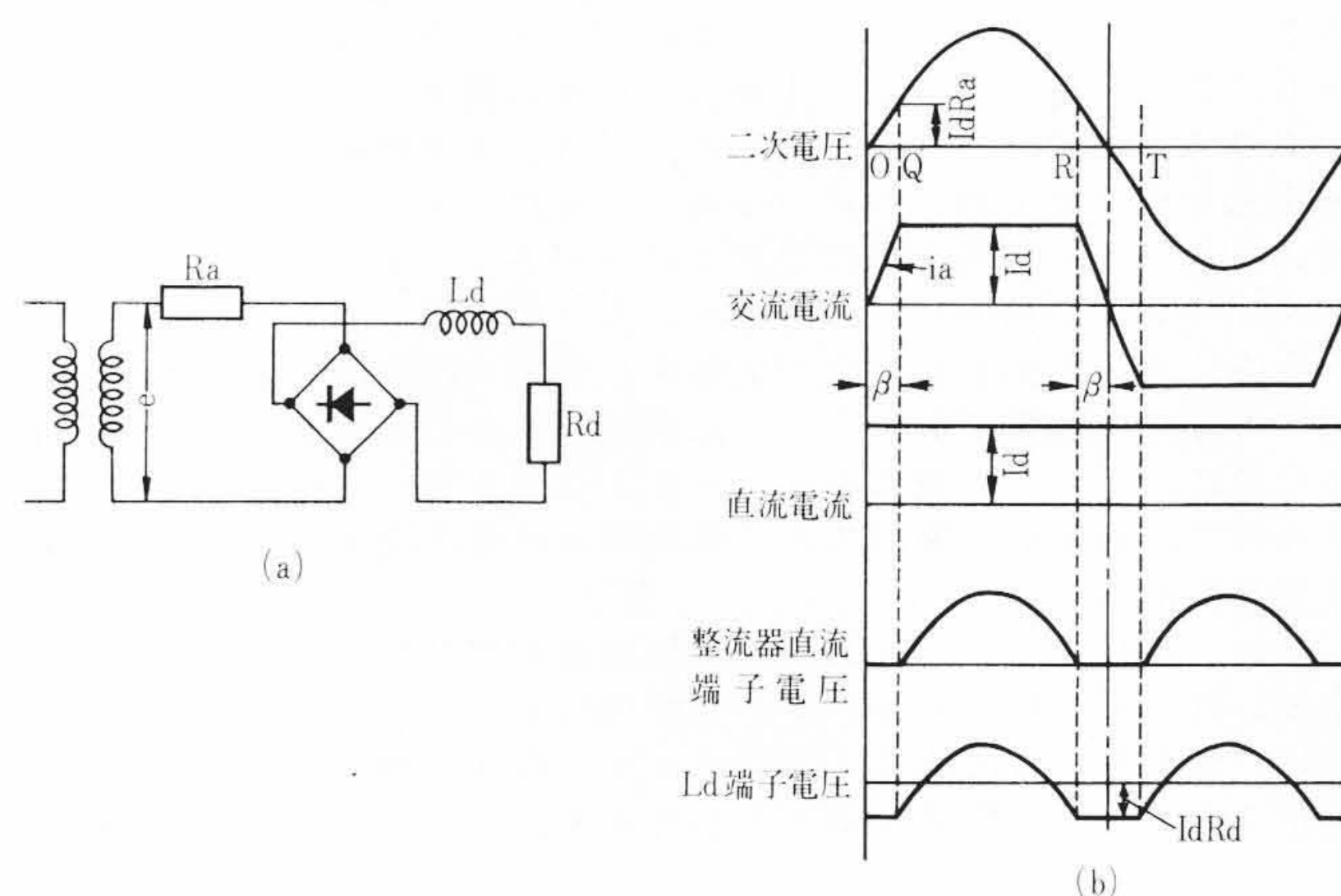


図2 直流回路にのみリアクトルのある場合

るから、交流回路・直流回路を連続して流れる QR の区間では電流は常に一定である。また、交流回路の電流が直流回路の電流より小さくなる RT 区間では、直流リアクトルが QR 区間で吸収したエネルギーを放出するため、整流器は短絡状態となり、交流回路・直流回路に独立した電流が流れることになる。

この RT の間で交流回路について次式が成立する。

$$e = i_a \cdot R_a \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $e = \sqrt{2} E \sin \theta$: 二 次 電 圧

i_a : 交流回路を流れる電流

R_a : 交流回路の抵抗

また、 Q において交流回路の電流と直流回路の電流が等しくなると、電流は交流回路・直流回路を連続して流れることになる。

$$\therefore \sqrt{2} E \sin \beta = I_d R_a \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 I_d : 交流回路・直流回路を連続して流れる電流

さらに、直流リアクトルの端子電圧を考えると、一周期については電圧の吸収と放出があり、その平均電圧は零になる。したがって、整流器の直流端子の平均電圧は、直流回路の抵抗にかかる電圧に等

* 日立製作所亀戸工場

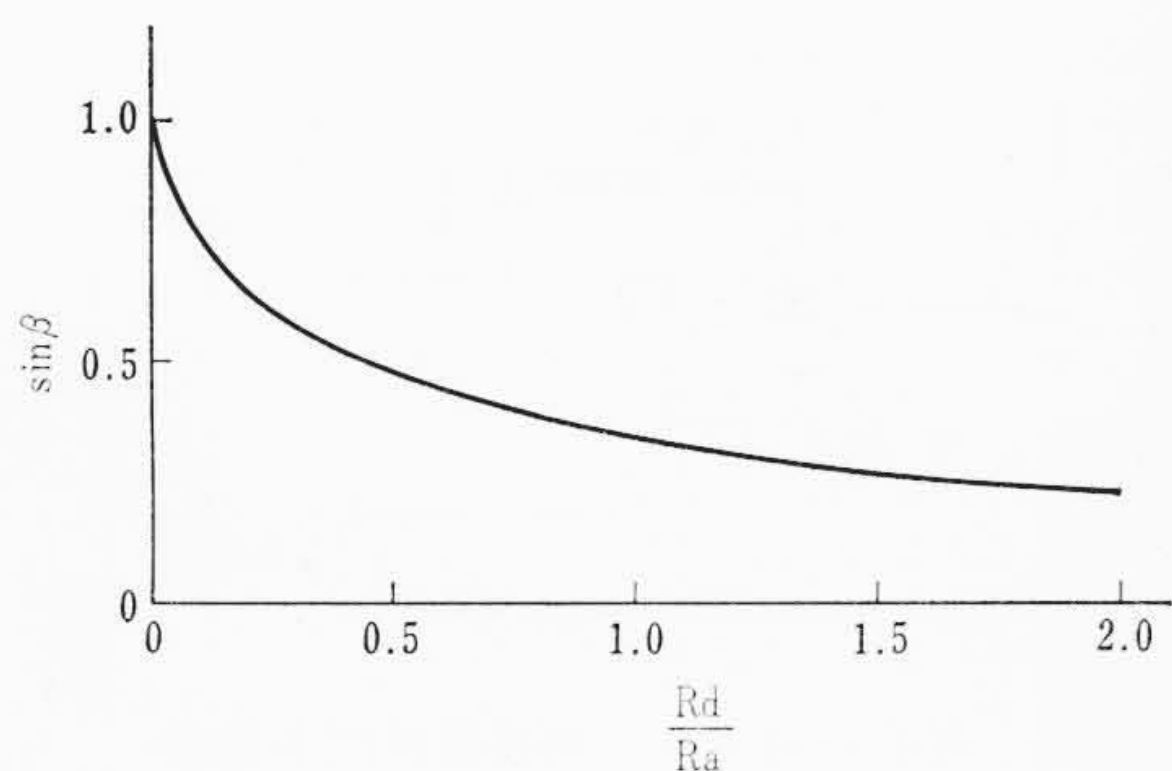


図3 R_d/R_a と $\sin \beta$ の関係 ($L_a=0$, $L_d=\infty$ のとき)

しくなければならない。直流端子に電圧が生ずるのは、電源電圧が交流回路の抵抗にかかる電圧より大きくなる Q からであり、次式が成立する。

$$\int_{\beta}^{\pi-\beta} [\sqrt{2} E \sin \theta d\theta - I_d R_d d\theta] = \int_0^{\pi} I_d R_d d\theta \dots \dots \dots (3)$$

ここに R_d : 直流回路の抵抗

$$\therefore 2\sqrt{2} E \cos \beta = \pi I_d R_d + \pi I_d R_a - 2\beta I_d R_a \dots \dots \dots (4)$$

(2)(4)式より

$$\cot \beta = \frac{1}{2} \left\{ \pi \left(1 + \frac{R_d}{R_a} \right) - 2\beta \right\} \dots \dots \dots (5)$$

(5)式より β を求め、 R_d/R_a と $\sin \beta$ の関係を図3に示す。

このように、直流回路に抵抗と無限大のインダクタンスが接続された場合には、交流回路の電流波形は台形波となり、 R_a が小さく、かつ R_d/R_a が大きいほど電流波形は方形波に近づく。しかし、アーク溶接用の電源として考える時、電流の零点は電圧の零点に一致するから、電流が零になりアークが切れた時に再点弧電圧が得られないので良好な形とは言えない。

2.3 交流回路・直流回路にリアクトルのある場合

交流回路・直流回路にリアクトルを接続した図4(a)の整流回路で、 $L_d=\infty$ とした場合の交流電流・直流電流の波形は図4(b)のようになる。交流電流・直流電流の波形は、前節と同様に同一電流で一定値の部分 QR と、整流器が短絡状態になり独立した電流が流れる RT 間に二分され、 RT 間では交流回路について次式が成立する。

$$e = L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + R_a \cdot i_a \dots \dots \dots (6)$$

ここに L_a : 交流回路のインダクタンス

$\omega t = \theta$ とおき (6)式を解けば

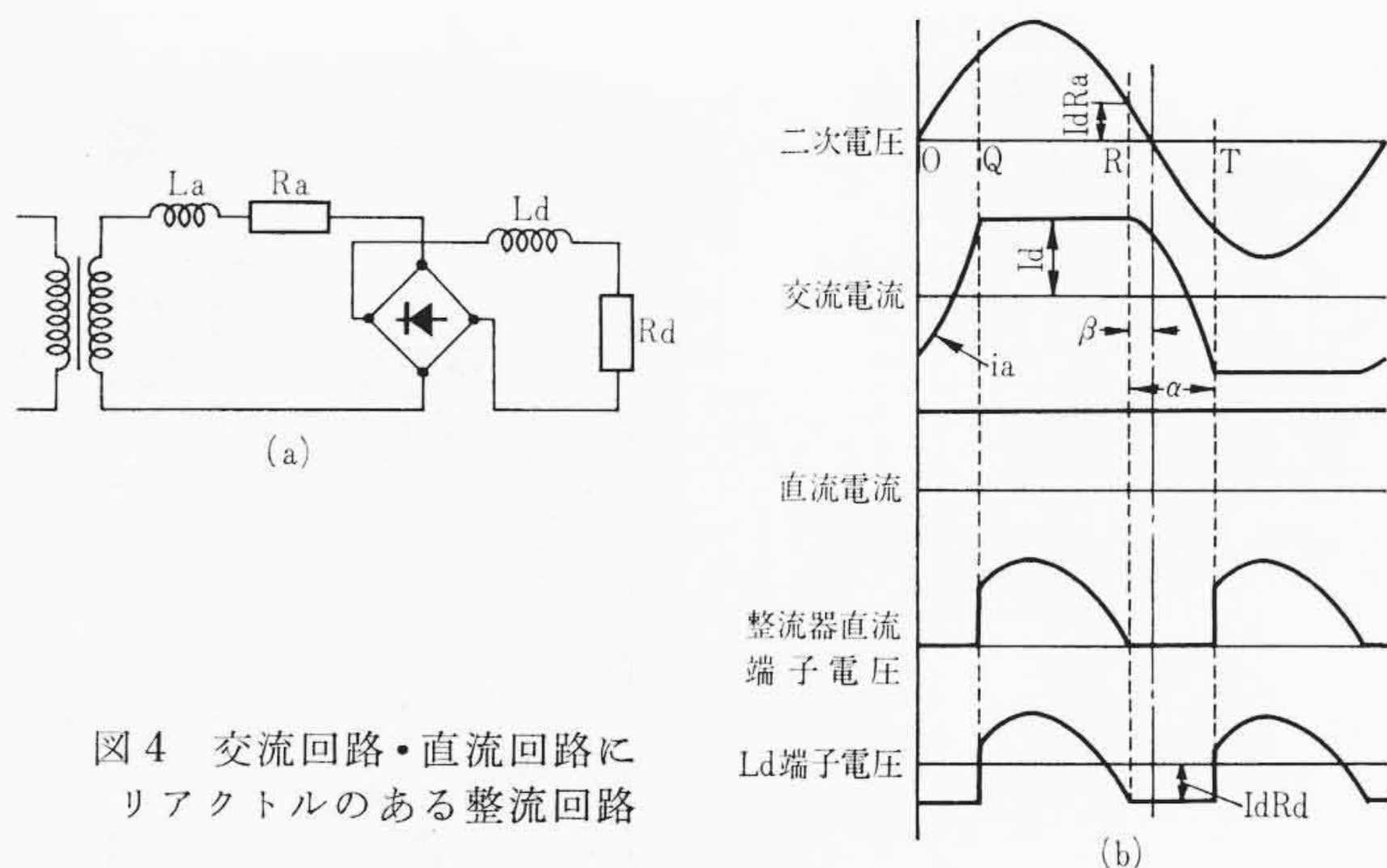


図4 交流回路・直流回路にリアクトルのある整流回路

$\pi - \beta \leq \theta \leq \pi + \alpha - \beta$ のとき

$$i_a = \frac{\sqrt{2} E}{Z_a} \sin (\theta - \phi) + A e^{-k(\theta - \pi + \beta)} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $Z_a = \sqrt{R_a^2 + X_a^2}$

$$\tan \phi = \frac{X_a}{R_a}$$

$$k = \frac{R_a}{X_a}$$

この波形の境界条件より

$\theta = \pi - \beta$ のとき $i_a = I_d$ であるから

$$\frac{\sqrt{2} E}{Z_a} \sin (\pi - \beta - \phi) + A = I_d \dots \dots \dots (8)$$

$\theta = \pi + \alpha - \beta$ のとき $i_a = -I_d$ であるから

$$\frac{\sqrt{2} E}{Z_a} \sin (\pi + \alpha - \beta - \phi) + A e^{-k\alpha} = -I_d \dots \dots \dots (9)$$

さらに $\theta = \pi - \beta$ では $i_a = I_d$ であるから $\frac{di_a}{dt} = 0$

$$\therefore \sqrt{2} E \sin (\pi - \beta) = I_d R_a \dots \dots \dots (10)$$

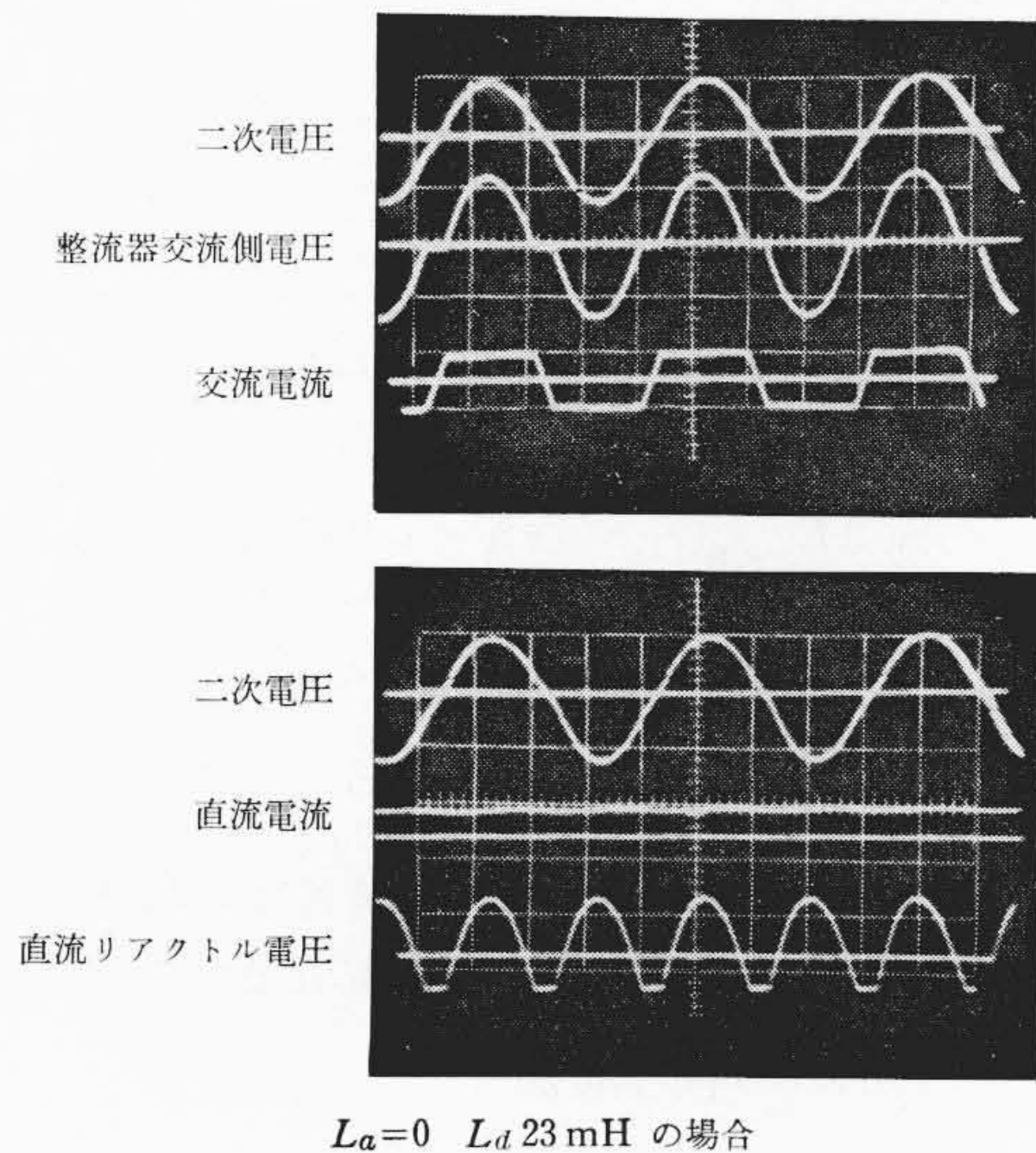
また、整流器の直流端子電圧は直流回路の抵抗の電圧に等しいから

$$\int_{\alpha-\beta}^{\pi-\beta} (\sqrt{2} E \sin \theta - I_d R_a) d\theta = \int_{\alpha-\beta}^{\pi+\alpha-\beta} I_d R_d d\theta \dots \dots \dots (11)$$

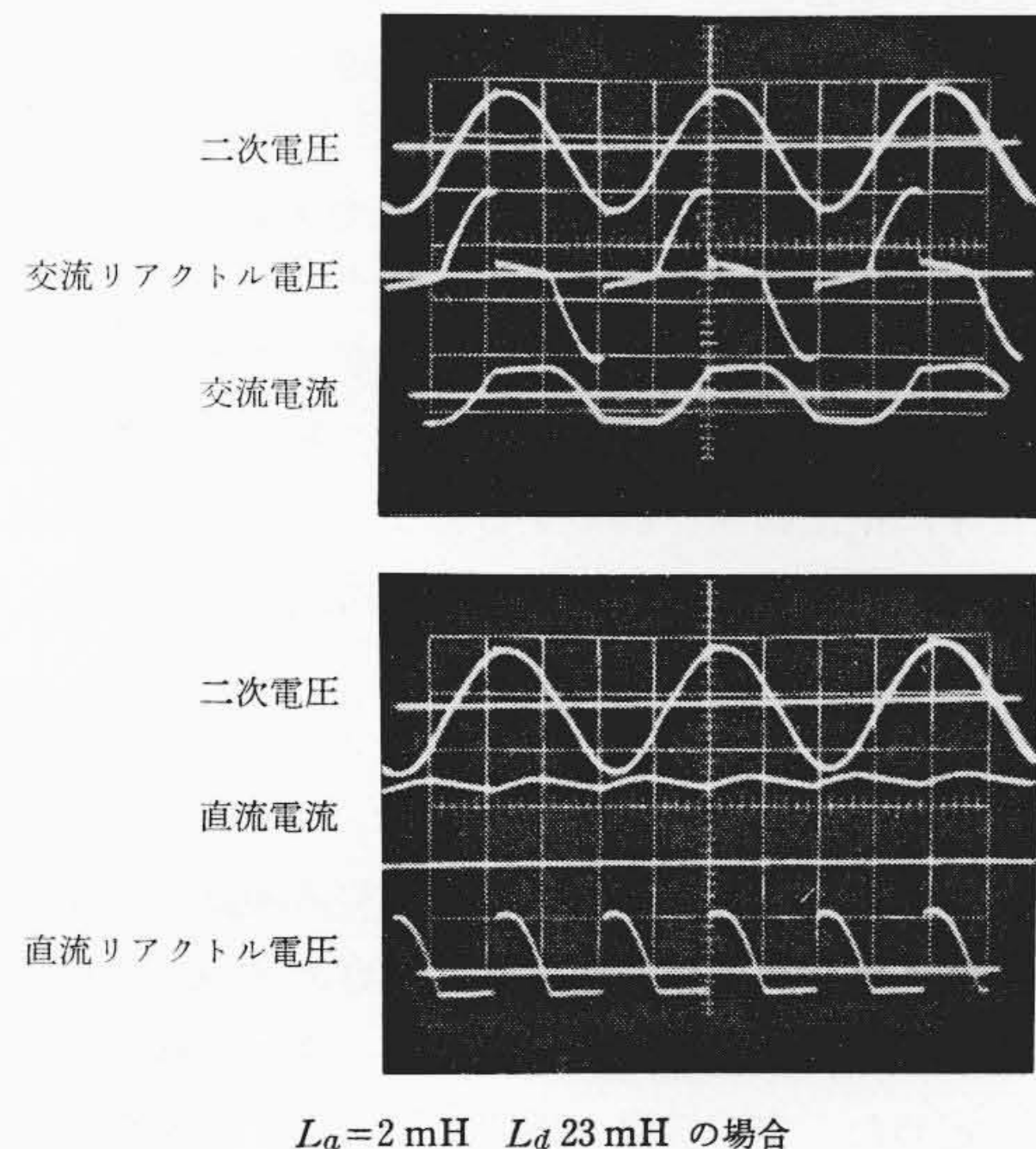
$$\therefore \sqrt{2} E \{ \cos \beta + \cos (\alpha - \beta) \} = I_d (\pi R_d + \pi R_a - \alpha R_a) \dots \dots \dots (12)$$

(8)~(10), (12) 式より、 A, I_d, α, β を求めることになる。

$L_a=0$, $R_a=0.3\Omega$, $L_d=23\text{ mH}$ (内部抵抗 0.176Ω) $R_d=0.44\Omega$ の場合と、 $L_a=2\text{ mH}$ (内部抵抗 0.020Ω), $R_a=0.46\Omega$, $L_d=23\text{ mH}$ (内部抵抗 0.176Ω) $R_d=0.44\Omega$ の場合の各部の波形を図5に示す。



$L_a=0$ $L_d=23\text{ mH}$ の場合



$L_a=2\text{ mH}$ $L_d=23\text{ mH}$ の場合

図5 各部の波形

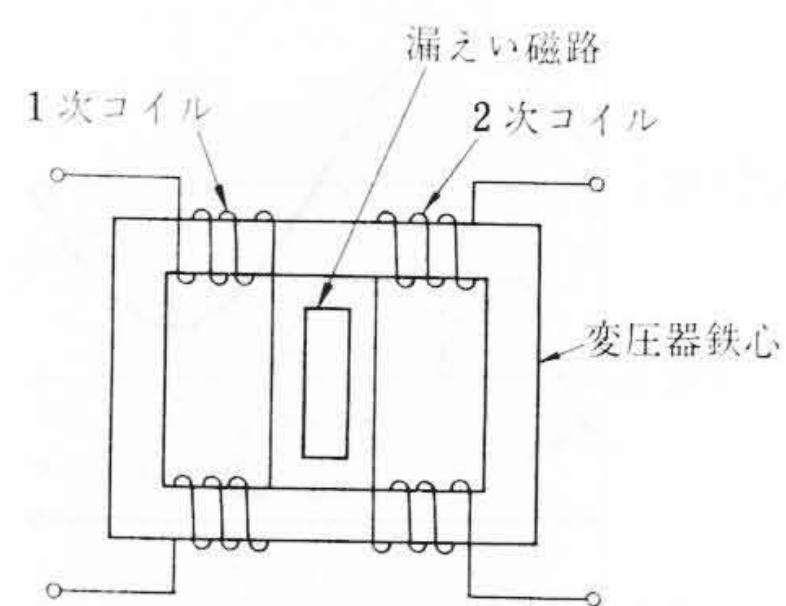


図6 漏えい変圧器の構造

図7 交直両用
アーク溶接機

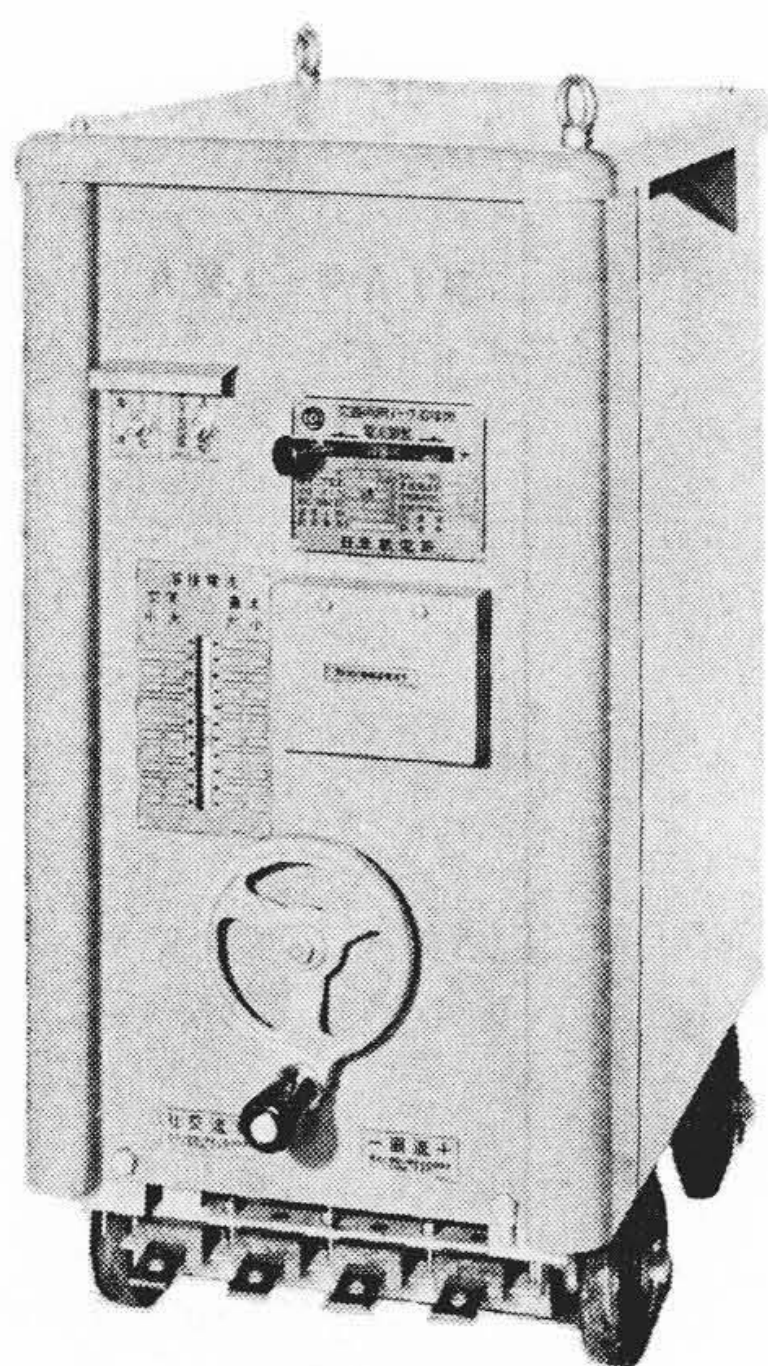


表1 交直両用アーク溶接機仕様

形 式	AD-S		
定格一次電圧	200V 単 相		
定格周波数	50 c/s または 60 c/s		
定格出力電流	150 A	300 A	500 A
定格負荷電圧	27.5 V	35 V	40 V
定格使用率	40%	40%	60%
電流調整範囲	交 流 10～60	交 流 20～140	交 流 45～240
	30～180	70～360	120～550
	直 流 10～55	直 流 15～120	直 流 35～220
	20～155	50～300	100～500

図5から明らかなように、整流回路の直流側にリアクトルを接続した場合には、交流電流の波形は台形波状に変形される。以下、このような電流を流し得る電源を台形波電源と呼び、正弦波電流の電源を正弦波電源と呼び区別する。

3. 台形波電源とその外部特性

台形波電源の場合にも、一般の交流アーク溶接機に用いられていると同様に、交流リアクトルには変圧器とリアクトルを一体に構成する漏えい変圧器を使用する。その構造は図6に示すように、変圧器鉄心に1次コイルと2次コイルを分割して巻き、1次2次コイル間で変圧器鉄心との間に空けきを持つように漏えい磁路を形成する鉄心を置く。無負荷の場合には、漏えい磁路には空けきがあるため磁気抵抗が大きく、1次コイルによって生ずる磁束はほとんど変圧器鉄心中を通り2次コイルと鎖交し、巻数比による電圧を生ずるが、2次側に負荷抵抗を接続した場合には、2次コイルに流れる電流による起磁力により磁束が漏えい磁路に分流するので2次電圧は低下する。変圧器鉄心と漏えい磁路の空けきを変えることにより、交流回路のインダクタンスを連続的に調整することができる。なお無負荷電圧を変えずに電流範囲を広くするように、1次コイル側、2次コイル側にそれぞれ補助コイルを設け、切換えにより直列に接続するようになっている。

直流リアクトルを空けきのある鉄心入りリアクトルとし、整流器にはシリコン整流器を使用している。

このように、交流電流を台形波にする目的で整流回路を使用しているが、端子を切換えて直流側を使用すれば、直流アーク溶接機としても使用できることになるので、交直両用アーク溶接機として仕様を表1のように定めた。本溶接機の外観を図7に、展開接続図を図8に示す。

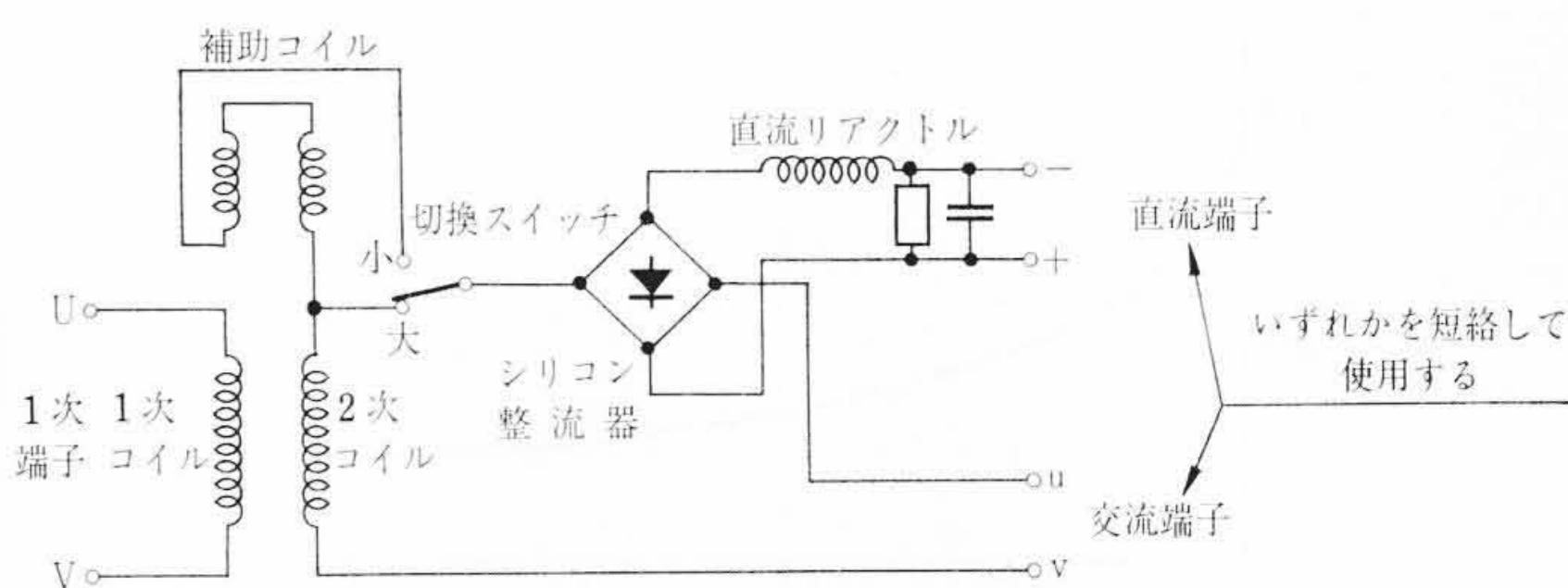


図8 交直両用アーク溶接機展開接続図

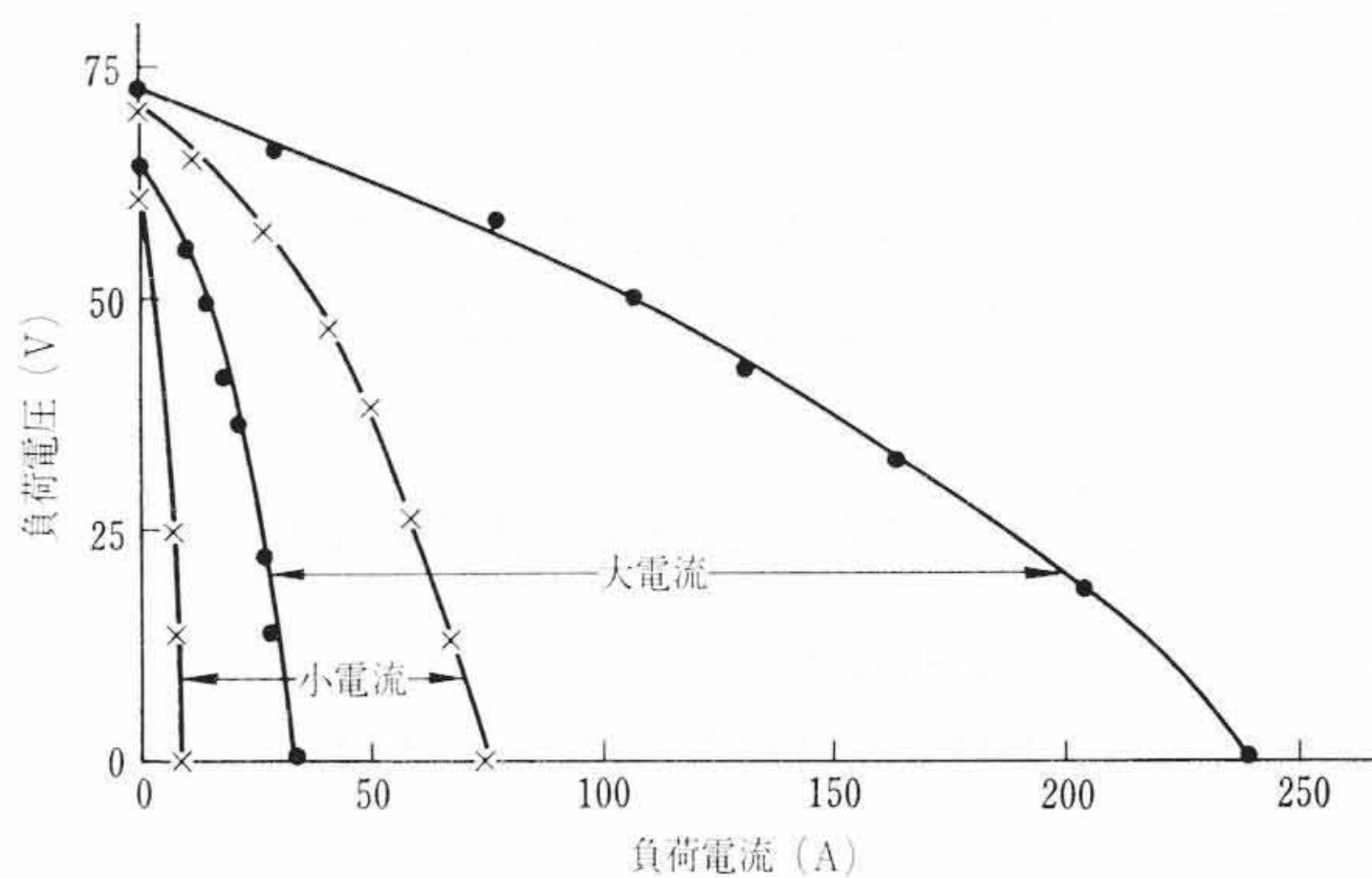


図9 交流端子外部特性

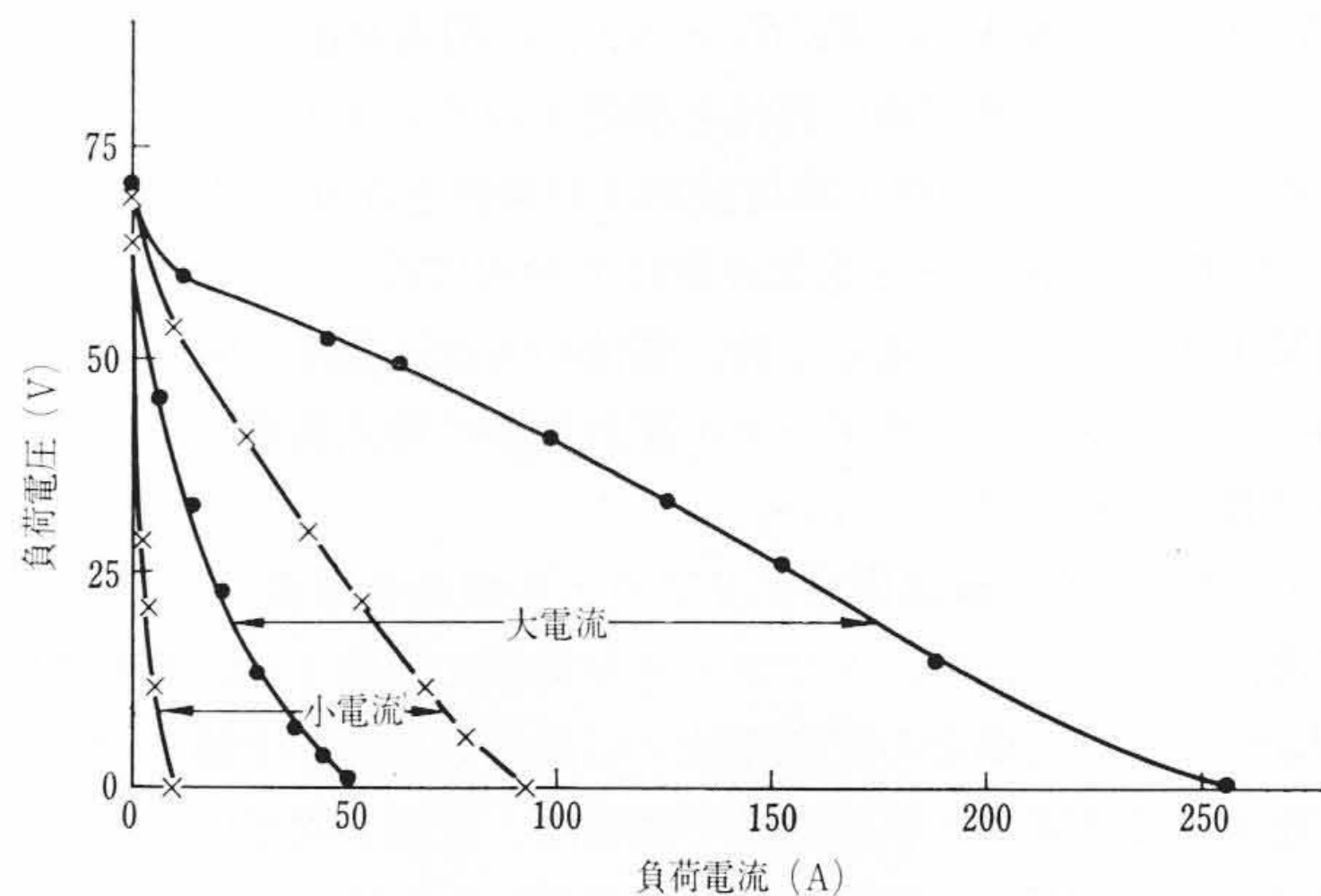


図10 直流端子外部特性

溶接機的外部特性を図9, 10に示す。交流端子の外部特性は垂下特性を示しているが、直流端子の外部特性は直線的である。直流溶接機とした場合には、図4で $R_a=0$ とした場合に相当する。すなわち(7)式にこの条件を入れると

$$Z_a=X_a, \tan \phi=\frac{\pi}{2}, k=0$$

であり (10) 式では

$$\sqrt{2} E \sin (\pi-\beta)=0 \quad \cdots \cdots (13)$$

$$\therefore \beta=0 \quad \cdots \cdots (14)$$

(8), (9)式より

$$\frac{\sqrt{2} E}{X_a} \sin \left(\pi-\frac{\pi}{2}\right)-\frac{\sqrt{2} E}{X_a} \sin \left(\pi+\alpha-\frac{\pi}{2}\right)=2 I_d \quad \cdots \cdots (15)$$

$$\therefore I_d=\frac{\sqrt{2} E}{2 X_a}(1-\cos \alpha) \quad \cdots \cdots (16)$$

出力端子を短絡し、 $R_d=0$ の時の直流電流を I_{ds} とすれば、この電流は交流回路内の電流の最大値で平滑になるので

$$\frac{I_d}{I_{ds}}=\frac{1}{2}(1-\cos \alpha) \quad \cdots \cdots (17)$$

直流回路の抵抗にかかる電圧は (11) 式より

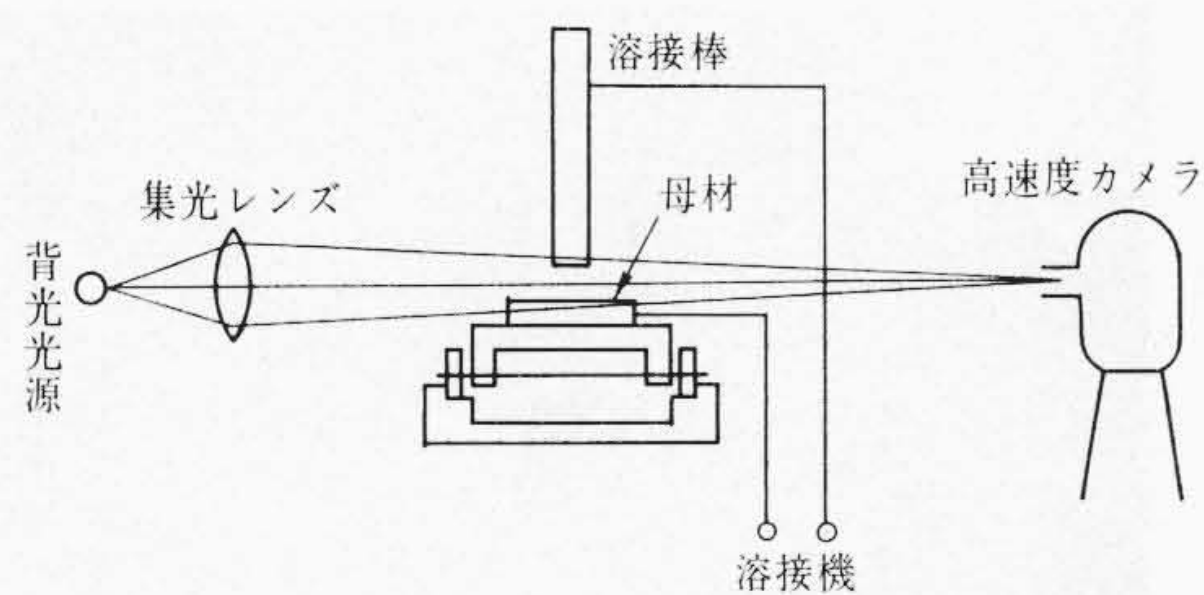
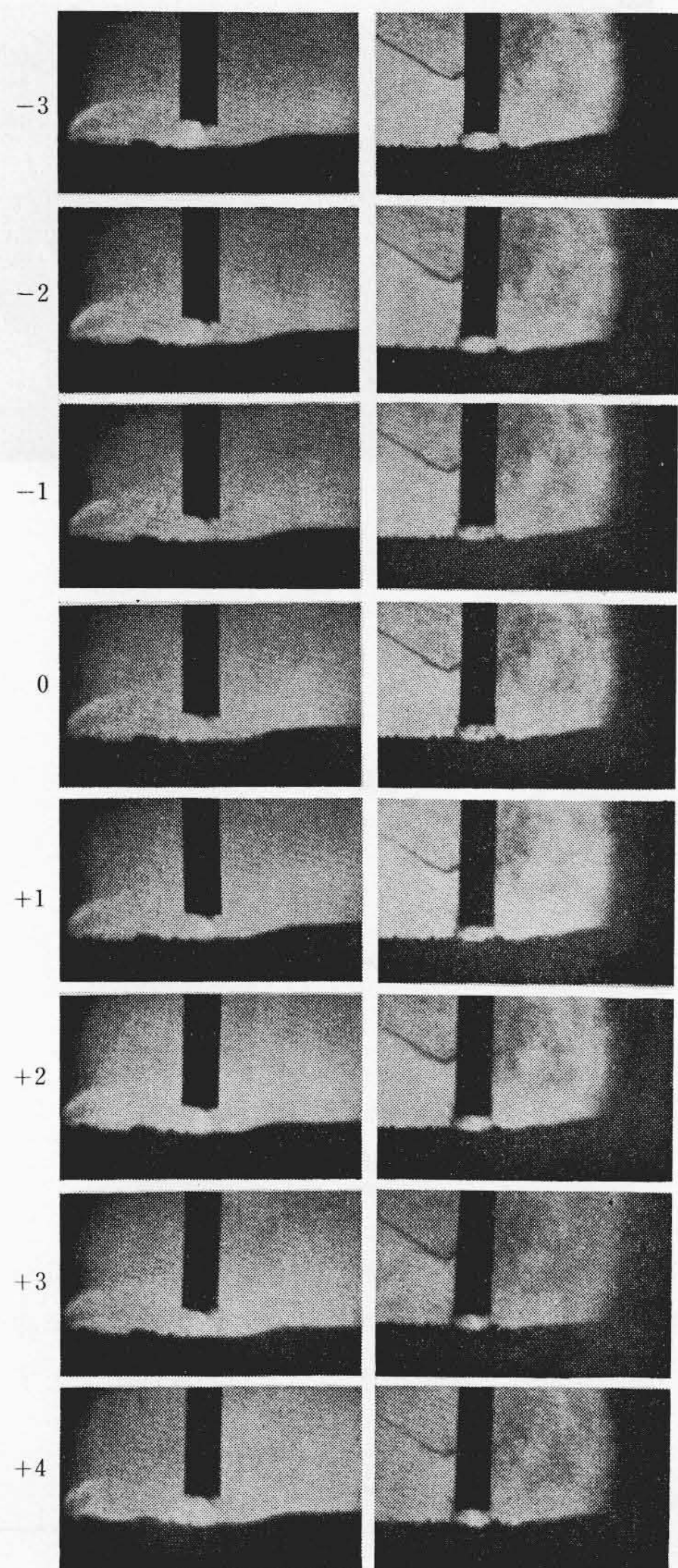


図11 撮影装置配置図



(a) 台形波電源 (b) 正弦波電源

図12 溶接アーク高速度写真

$$V_D = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} E \sin \theta d\theta = \frac{\sqrt{2} E}{\pi} (1 - \cos \alpha) \dots\dots (18)$$

無負荷電圧 V_{D0} は

$$V_{D0} = \frac{2 \sqrt{2} E}{\pi} \dots\dots\dots (19)$$

であるから

$$\frac{V_D}{V_{D0}} = \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha) \dots\dots\dots (20)$$

(17) (20) 式より

$$\frac{V_D}{V_{D0}} + \frac{I_D}{I_{Ds}} = 1 \dots\dots\dots (21)$$

したがって、直流リアクトルが無限大で交流回路の抵抗が零であれば、電圧比と電流比の関係は直線であり、外部特性は直線性をもつ

表2 アークの認められない時間測定結果

溶接棒	電 源	極 性	全 区 間 (ms)	位相反転前 (ms)	位相反転後 (ms)
B-14 3.2φ	正 弦 波	正 極 性	0.75	0.26	0.49
		逆 極 性	0.72	0.25	0.47
	台 形 波	正 極 性	0.30	0.10	0.19
		逆 極 性	0.26	0.16	0.11
B-14 4.0φ	正 弦 波	正 極 性	0.62	0.24	0.38
		逆 極 性	0.62	0.22	0.40
	台 形 波	正 極 性	0.41	0.15	0.26
		逆 極 性	0.35	0.12	0.23

てくる。直流端子の外部特性は、(21)式により求まる特性曲線より、負荷電流に比例する直流リアクトルの抵抗分による電圧降下を差引いたものとなる。

4. 正弦波交流アークと台形波交流アークの比較

4.1 高速度カメラによるアークの比較

高速度カメラと溶接アークと背光光源を図11に示すように配置し、溶接棒を下方へ、母材を横方向に自動的に送り、アーク長を一定に保つようにしてアークを発生させ、溶接アークとアーク電圧波形を高速度カメラに同時撮影し、電流値が零となる近傍でアークが認められない時間をコマ数から測定した。溶接棒には JIS D 4301 相当の B-14 3.2φ, 4.0φ の2種を用いた。

撮影結果の一例を図12に示す。各写真の溶接棒の一方の側にあられる白線はアーク電圧を示すが、撮影位置の関係から、実際の現象との間に4コマのずれがある。また、左に記した数値はアーク電圧から判断し、位相の反転する部分に相当するコマを0とし、これより先の部分を負、後の部分を正にとった場合のコマ数である。この位相反転部でアークの存在の認められないコマ数を数え、10個のデータを平均したものが表2である。もちろんこのコマ数は、アークが認められないからといって、完全にアークが消滅していることを意味するものではなく、溶接アークの輝度が弱くなり、背光のためにアークが認められないものも含んでいるので「アークの認められない時間」と呼んだ。また、高速度カメラであるために、現象の記録が完全に連続されたものではなく、露光時間による1コマ単位であるための誤差も当然入ってくる。しかし、同一背光を用い、同一撮影速度を用いれば、2機種間の相対的な特性の比較は十分に行なえるものと考えられる。

表2の結果より、正極性の場合でも逆極性の場合でも、また電流の減少区間増加区間を問わず、いかなる場合でも台形波電源の方が良好であることがわかる。特に、電流の増加する区間においてその差が著しいことから、台形波電源の方がアークの弱い時間が短くアークの持続が容易であると同時に、この結果としてアーク空間の冷却期間も当然短くなって、溶接棒の溶融作用にも良い影響を与えることが期待される。

4.2 光電管によるアークの比較

交流アークでは、電流の瞬時値が変化するため、この影響を受けてアーク中の温度が変化するといわれている。このときの時間的变化は、アーク電圧波形が方形波状とみなされるから、アーク電流波形によって定まると考えられる。アーク柱の温度の時間的变化の記録は簡単ではなく、ここでは二種の電源の優劣の比較が主であるところから、アークの光を光電管で電流に変換しその波形を記録した。その結果を図13に示す。

位相反転時における光電流波形の変化状態を見ると、台形波電源の方が急激な変化を示していること以外に、正弦波電源でも台形波電源でも光電流の最小点位相とアーク電圧の反転位相との間に約5~10度の位相差が認められる。これは、アーク柱温度の遅れに起

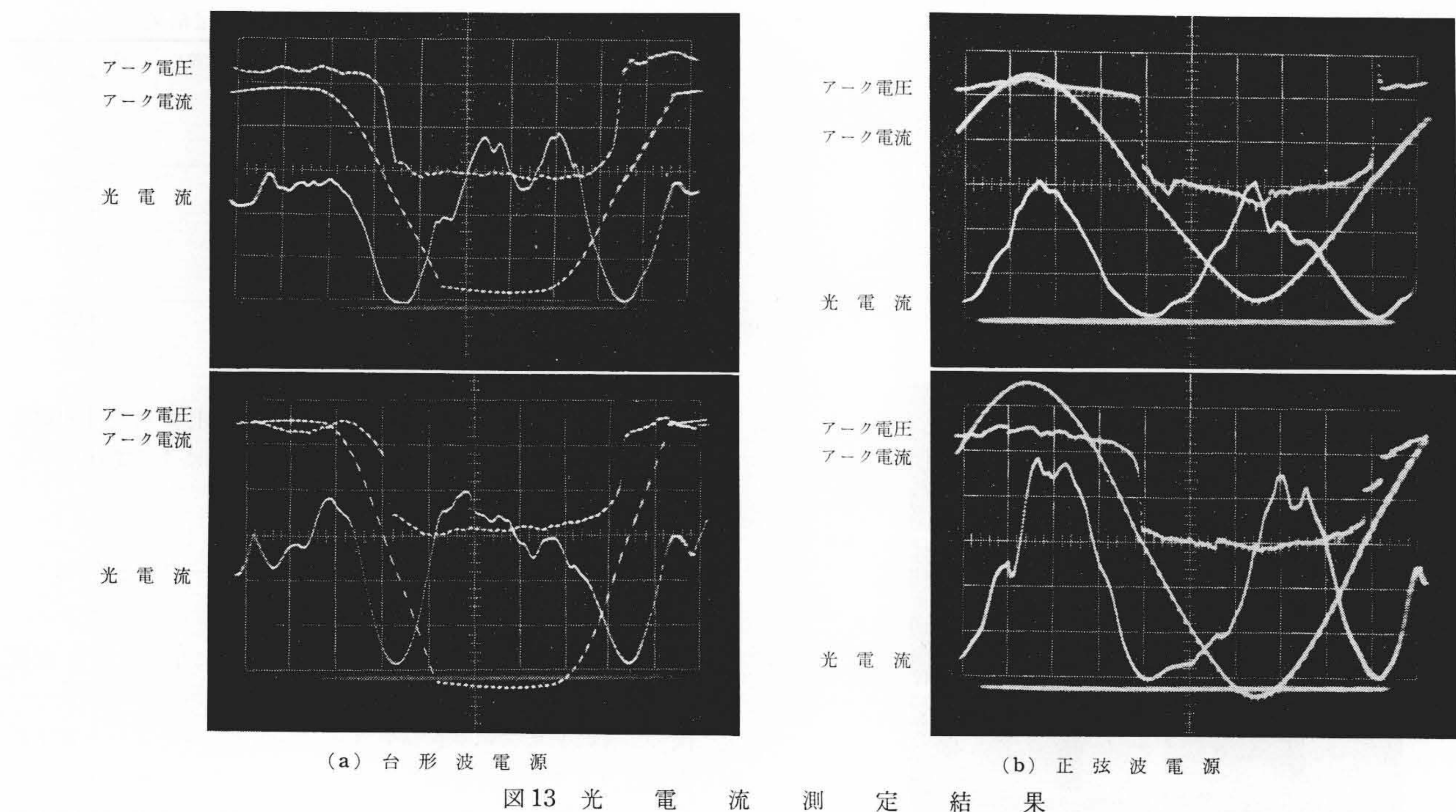


表3 スパッタ率測定結果			
溶接棒銘柄	溶接棒径	電源	スパッタ率(%)
LB-26	3.2φ	正弦波	14.4
		台形波	8.9
	4.0φ	正弦波	8.4
		台形波	4.6

因すると考えられるが、このことから、高速度写真によれば大体位相反転前でアークの弱い時間が短く、反転後で弱い時間が長くなるという表2の結果の理由が説明づけられる。

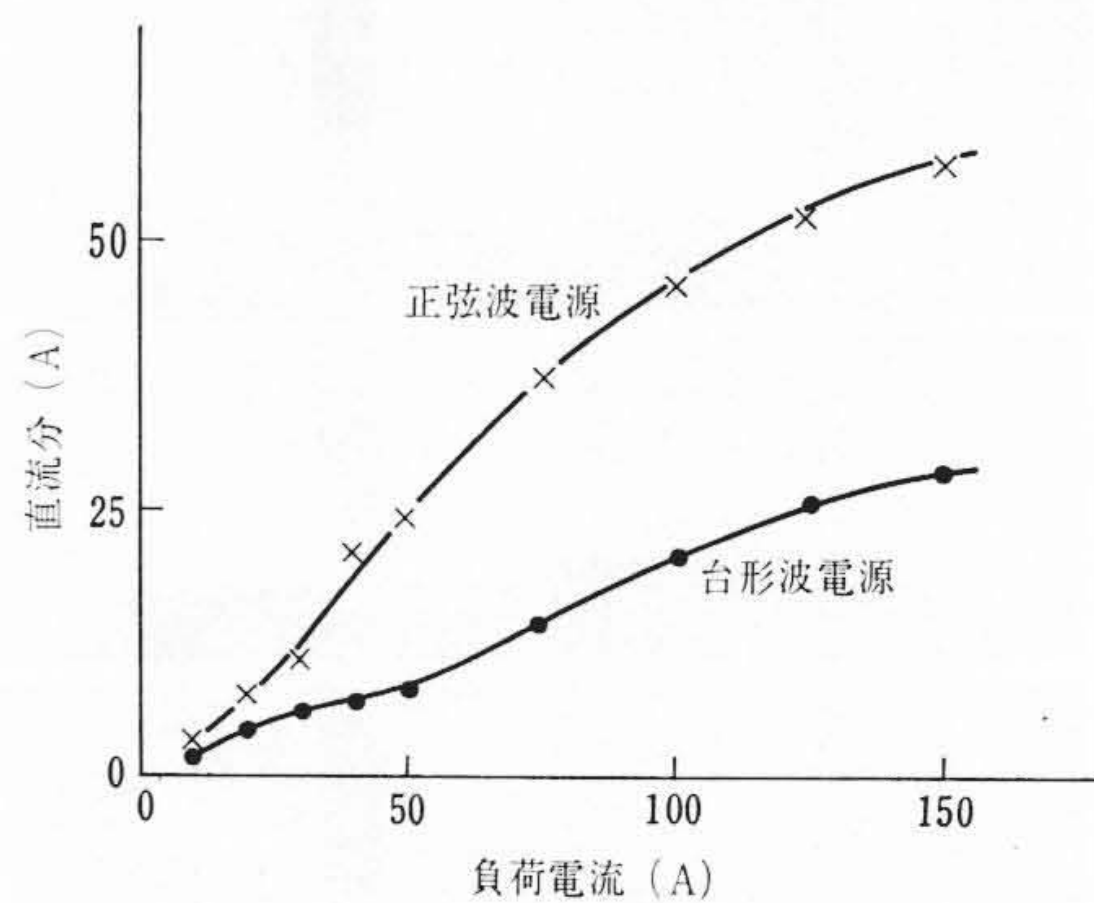
4.3 スパッタ率

溶接棒を使用してビードを置いたとき、周囲に飛散するものをスパッタと呼んでいる。本実験では、スパッタ中の鉄分の回収量と溶接棒心線の消耗量から、溶接棒単位溶融量当たりのスパッタ率を測定した。その結果を表3に示す。いずれの溶接棒によっても、台形波電源の方がすぐれた特性を示している。

スパッタの発生原因としては、溶滴の短絡移行終了時のヒューズ作用、アーク力、電極間ガスの膨張収縮などが考えられるが、いずれも過渡的現象で簡単には解析できない。しかし表3の結果は、台形波電源の方が正弦波電源に比べ、アーク電流の反転位相付近の電流変化が急激であること、波高値が広い範囲にわたり一定値に近いことなどからアーク力の変化、アーク柱内の温度変化なども小さくなることが有効に作用しているものと考えられる。

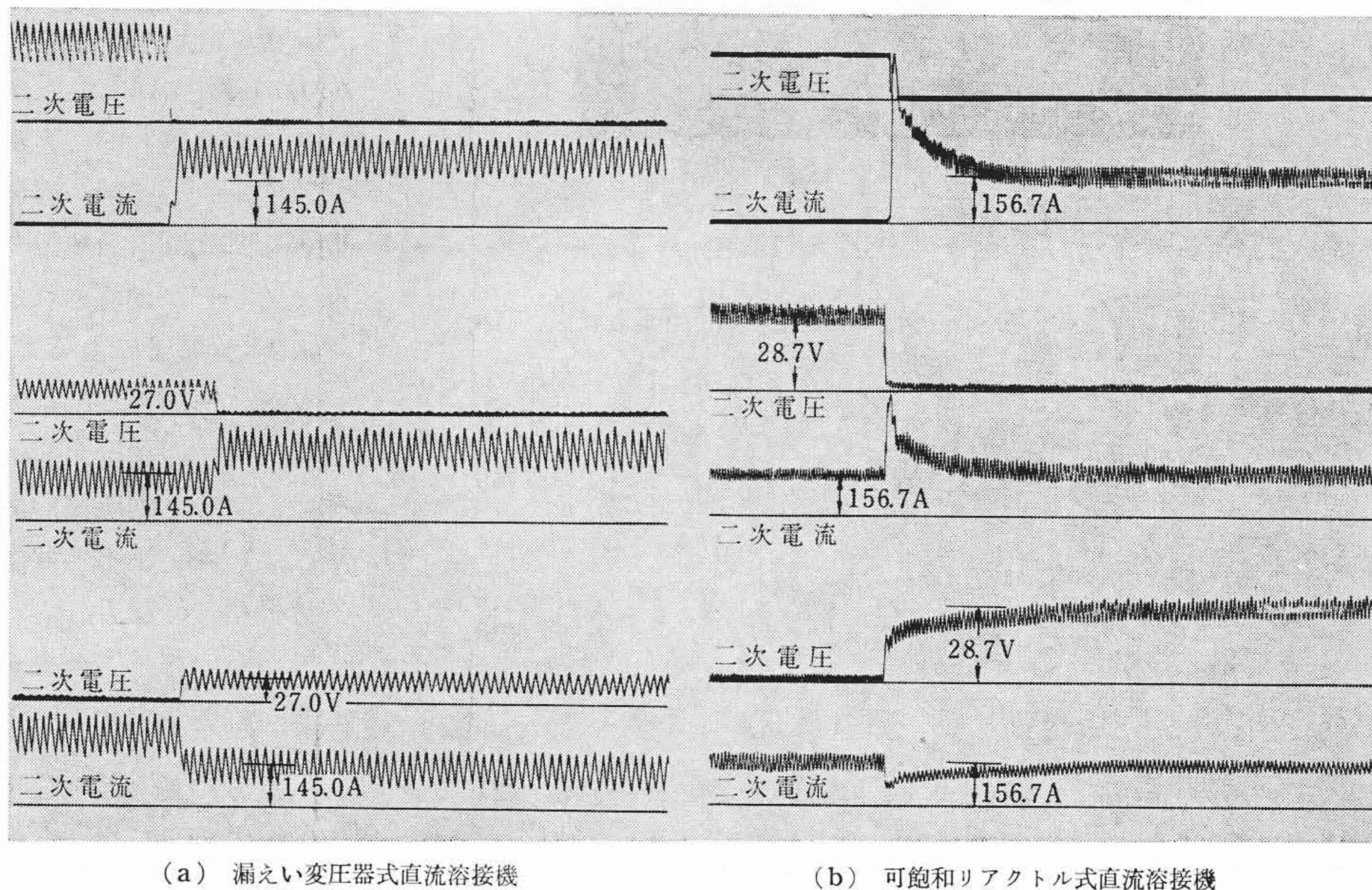
4.4 交流TIG溶接時の直流分

TIG溶接とは、アルゴンガスでアークの周囲を遮へいし、電極に非消耗性のタングステン電極を使用する方法であるが、アルミニウムを溶接する場合には本溶接法で、しかも電源を交流にしなければなら



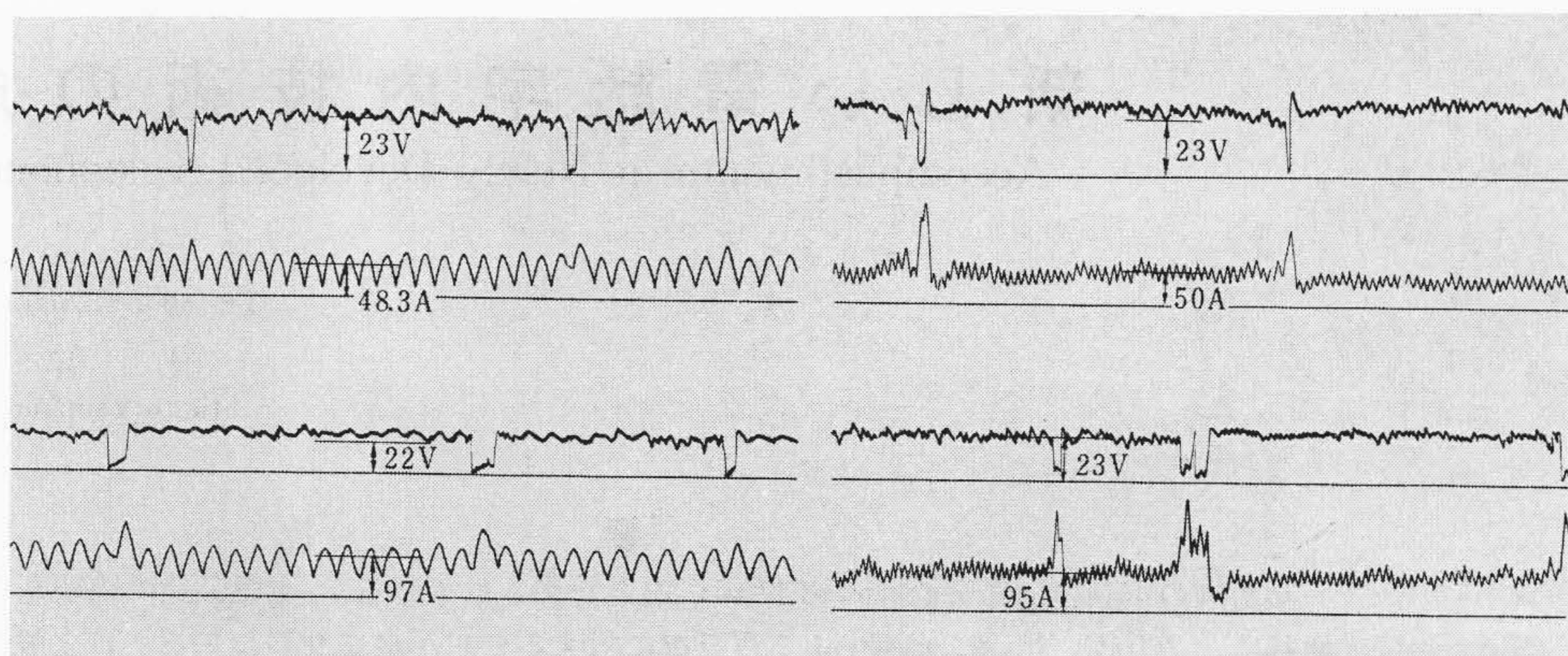
ばならない。

交流のTIG溶接では、被溶接物とタングステン電極の熱電子放射が異なるため、タングステン電極が負になる正極の半波では電流が大きく、逆の半波では電流が小さくなる整流作用を生ずる。この



ため、電源に直流励磁が加わるため溶接機の容量を低減しなければならないばかりでなく、逆の半波が出ないためにアルミニウムの酸化被膜を除去するクリーニング作用が悪くなる。

2種の電源につき、負荷電流の回路に変流器と分流器を直列に接続し、変流器により交流電流実効値を、分流器により直流分を測定した結果を図14に示す。台形波電源では直流分が約 $\frac{1}{2}$ に減少し効果があることがわかる。



(a) 漏えい変圧器式直流溶接機

(b) 可飽和リアクトル式直流溶接機

図16 直流アーク溶接機のアーク電圧・電流波形

5. 直流アーク溶接の比較

現在、一般に用いられている可飽和リアクトル形三相全波整流式直流アーク溶接機と漏えい変圧器形単相全波整流式の本溶接機について、電圧電流の過渡特性とスパッタ量の比較を行なった。

電圧電流の過渡特性としてアーク負荷の代わりに抵抗負荷を用い、無負荷から短絡、負荷から短絡、短絡から負荷の状態へ変えた場合の変化を電磁オシロにより撮影した。その結果は図15に示すとおりである。また低水素系の溶接棒を使用して、アークを発生している時の電圧電流の波形を示したのが図16である。スパッタ量は、直流アーク溶接機でも比較的多いといわれている低水素系、クロームモリブデン系の溶接棒について行なわれた。その結果を表4に示す。表4はスパッタ量を溶接棒単位長当たりの重量で算出しているもので、表3のものと単位が異なっている。

漏えい変圧器形では単相全波整流であるためリップルはやや大きい、負荷抵抗の変化による電圧電流の変化は瞬時に安定した状態に移っている。一方可飽和リアクトル式では電流値の変動は小さいが、安定するまでに若干時間がかかる。また、溶接時の波形では溶接中溶滴の移行のために溶接棒と母材間が一度短絡し、その後短絡が破れアークが発生する過程が記録されている。溶接中このような短絡が生じた場合、漏えい変圧器形では短絡時瞬間電流が大きくなるが、アークの再生と同時に定常電流に戻っている。可飽和リアクトル式では短絡電流が増す以外に、アークが再生した時すぐに定常電流に戻らず、一度小さくなった後定常状態に戻っている。このような短絡現象が生じた時の電流変化が異なっていることがスパッタ量の差に現われるものと考えられるが、漏えい変圧器形のスパッタ量は可飽和リアクトル式の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ になり、アーク特性の良いことがわかる。

6. 結 言

単相全波整流回路の交流回路、直流回路にそれぞれリアクトルを接続する回路では、交流回路の電流波形が台形波状になることを確

表4 直流アーク溶接機のスパッタ比較

溶 接 棒	銘 柄	漏えい変圧器式 直 流 溶 接 機	可飽和リアクトル式 直 流 溶 接 機
LB-26	3.2φ	1.4 (g/m)	2.9 (g/m)
CMB-105	3.2φ	1.0	3.9
CMA-106	3.2φ	2.0	5.3
CMB-76	3.2φ	1.5	3.9
HD-370	3.2φ	1.2	3.8

認した。このような波形のアーク溶接機と、一般に用いられている正弦波形のアーク溶接機とのアーク特性を比較し、次のような結論を得た。

- (1) アークの状態を高速度写真により観測した結果、交流電流の位相反転部でアークの強さが弱くなる時間が台形波電源では短くなり、アーク特性の向上に有効である。
- (2) 台形波状の電流では、アーク柱の状態の変動が小さくなることに起因すると考えられるが、スパッタが少なくなり、ビード外観が向上する。
- (3) 交流 TIG 溶接の場合に生ずる直流分は台形波電源の場合に約 $\frac{1}{2}$ に減少し、クリーニング作用のきいたきれいなビードができる。

以上のほか、簡単な接続変更で直流アーク溶接機としても使用することができる。直流アーク溶接機とした場合には外部特性は直線的になるが、3相可飽和リアクトル式に比べてアーク時の過渡特性が向上し、スパッタ量も減少し、特にクロームモリブデン系の特殊溶接棒を使用する溶接に適することがわかった。

参 考 文 献

- (1) 安藤：交流アーク溶接機 68~72 (昭 33-9 電気書院)
- (2) 安藤，西口：アーク溶接機器 (昭 41-3 産報)
- (3) 安藤：交直両方アーク溶接機資料 No.2, 86~109 (昭 34-5 阪大安藤研究室)
- (4) 安藤，長谷川：溶接アーク現象，(昭 32-7 産業図書)