

Title	溶接アーク音に関する基礎的研究
Author(s)	二俣, 正美
Citation	大阪大学, 1982, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1835
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

乙-2805

溶接アーク音に関する基礎的研究

昭和56年12月

二 俣 正 美

溶接アーク音に関する基礎的研究

昭和56年12月

二 俣 正 美

目 次

第 1 章	総 論	1
第 2 章	溶接アーク音に関する基礎的考察	
2.1	緒 言	3
2.2	溶接アーク音の測定の意義	3
2.3	溶接アーク音に関する予備考察	3
2.3.1	溶接アーク音の音源	3
2.3.2	溶接アーク音の音場の特性	6
2.3.3	暗騒音の影響	9
2.3.4	溶接アーク音の特徴量	11
2.4	結 言	11
第 3 章	実験装置及び実験方法	
3.1	緒 言	13
3.2	無響室の構造及び性能	13
3.3	マイクロホンの特性	17
3.4	溶 接 条 件	17
3.5	溶接アーク音の測定及び解析方法	21
3.6	結 言	23
第 4 章	溶接アーク音の諸特性	
4.1	緒 言	25
4.2	被覆アーク溶接(交流及び直流)	25
4.2.1	音圧レベル	25
4.2.2	周波数スペクトル	30
4.3	CO ₂ アーク溶接(MIG、TIGアーク溶接を含む)	35
4.3.1	音 圧 波 形	35
4.3.2	音圧レベル	40
4.3.2.1	供給電力の影響	40
4.3.2.2	溶接速度の影響	43

	4.3.2.3 シールドガス流量の影響	45
	4.3.2.4 ワイヤ突出し長の影響	48
	4.3.3 周波数スペクトル	50
4.4	パルス化TIGアーク溶接	58
	4.4.1 音圧波形	58
	4.4.2 音圧レベル	60
	4.4.2.1 繰返し周波数の影響	60
	4.4.2.2 電流振幅の影響	61
	4.4.3 周波数スペクトル	64
	4.4.4 アークの挙動	67
	4.4.5 呼吸音の理論に基づく考察	70
4.5	結 言	74
第 5 章	溶接アーク音と溶接振動の関係	
5.1	結 言	77
5.2	溶接振動の検出方法	77
5.3	溶接振動波形	79
5.4	溶接アーク音と溶接振動	80
5.5	溶融池の挙動	82
5.6	溶接振動波形の周波数スペクトル(高周波域)	85
5.7	溶接振動波形の周波数スペクトル(低周波域)	88
5.8	溶融池振動に関する考察	90
5.9	結 言	93
第 6 章	溶接アーク音と作業環境	
6.1	結 言	95
6.2	溶接アーク音と聴覚の機能	95
6.3	溶接アーク音の騒音性	100
6.4	結 言	104

第 7 章	溶接アーク音の利用	
7.1	緒 言	105
7.2	溶接プロセスの検出及び溶接技術教育への応用	105
	7.2.1 溶接プロセスの検出例	105
	7.2.2 溶接技術教育への応用	115
7.3	結 言	116
第 8 章	総 括	117
謝 辞		121
参 考 文 献		122
本論文に関する著者の発表論文		124

第1章 総論

溶接現象に関する情報のイン・プロセス検出は溶接工学上極めて重要な課題である。すなわち、溶接の諸プロファイルに関する情報を得、溶接現象を明らかにし、溶接プロセスを監視制御することによってはじめて信頼度の高い溶接部を得ることが可能となる。

一般に、アーク溶接においては非常な高温はもちろんのこと、アーク・プラズマ光、スパッタ、ヒューム、振動、音、電氣的磁氣的ノイズなどの発生を伴うために、他の分野において適用可能な検出、計測技術の応用が困難となることが多い。このことは、溶接アーク現象の解明さらには溶接の自動制御化を推進する上で障害の一つになっている。

この反面、アーク溶接時に発生するこれらと溶接アーク現象との間には緊密な関係が存在することも予想され、スパッタ、ヒュームの発生状況によるアークの安定性の評価¹⁾、アーク・プラズマ光を利用する溶接線の認識²⁾などに関する研究が行われている。

アーク溶接時に発生する音響（以下、本論文中溶接アーク音と呼ぶ）は、可聴音及び不可聴音（低周波音及び超周波音）を含め、溶接の諸プロファイルに関する有用な情報を提供する可能性がある。このことは、受動的あるいは能動的音響信号が各種の診断や検査の手段として広範に応用されているという事実、訓練された溶接技術者が経験的ではあるが溶接アーク音によってアークの安定性を評価しているという事実、シールド条件の不十分な場合に溶接アーク音が著しく変化するという実験的事実³⁾などからも推測することができる。

従来、溶接アーク音に関する報告としては、溶接アーク現象との関連に着目したもの^{4, 5)}、溶接技術者の視聴覚教育映画に採用したもの⁶⁾、スタッド溶接において品質管理に応用したもの⁷⁾など、いくつかの例が見られる。しかし、溶接アーク音に関する系統的な研究、及びこれを情報源として積極的に応用しようとする研究例はほとんど見られず、溶接アーク音に関する詳細については不明確な部分が多い。なお、溶接アーク音は大電流溶接、パルス溶接などにおいては騒音としての一面をもつため、作業環境の点からも解明されなければならない問題を含んでいる。

本論文は、以上のような観点から従来ほとんど不明確であった溶接アーク音に関し、その諸特性及び溶接アーク現象との関連ならびに応用法などについて実験的かつ理論的検討を加えたものであって、第1章～第8章より構成されている。各章における諸検討事項の概要は次に示すとうりである。

第1章は総論であって、溶接アーク音に関する研究の目的とその方針について明確にしている。

第2章においては、溶接アーク音の測定の意義と溶接アーク音が情報源としての適格性

を有することについて論述している。すなわち、予備的実験から溶接アーク音の放射は無指向性であり、その音源を点音源と見なし得ること、及びS/N比が良好であることを明らかにし、溶接アーク音の変化量がすべて時間と場所の関数であることを述べるとともに、実験を遂行するための基本方針と実験結果を普遍的に表示するための方法を記述している。

第3章においては、本研究に使用した無響室及び溶接アーク音測定装置の性能について概説し、溶接アーク音の測定方法と解析方法について言及している。

第4章においては、各種アーク溶接法を対象とした広範な実験から、溶接アーク音の性質を明らかにするとともに、溶接アーク音を支配する諸因子の抽出を行い、その影響について言及している。また、高速度写真とオシログラムの観察結果に基づく溶接アーク音と溶接アーク現象との関連についての考察を行っている。

第5章においては、アーク溶接時の母材に発生する振動（論文中、溶接振動と呼ぶ）を100mV/G級の圧電型振動加速度計を用いて検出し、その諸特性を明らかにし、溶接アーク現象及び熔融池の流体的挙動との関連について検討を加えるとともに、溶接アーク音との相互関係について実験的、解析的検討を加えている。

第6章においては、聴覚による溶接アーク音の識別評価の調査結果について言及し、識別可能な溶接条件範囲を明らかにしている。さらに、溶接アーク音を騒音として見た場合の特徴点ならびに聴力保護を目的とした許容範囲と怒限度について明らかにしている。すなわち、CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接については許容範囲を図示し、出力電流波形を変化させた場合のTIGアーク溶接については騒音の大きさを予測する上で有効な実験式を提示している。

第7章においては、溶接アーク音が溶接現象のイン・プロセス検出において有効かつ良質な情報源となり得ることを前章までの解析結果を基に述べるとともに、その適用例について述べている。また、本章においては、溶接アーク音を溶接技術者用教育映画に導入し、その教育効果を調査した結果について述べている。

第8章は総括であり、本研究によって得られた成果の溶接工学上における意義を明らかにしている。

第2章 溶接アーク音に関する基礎的考察

2.1 緒言

本章では、溶接アーク音に関する基礎的問題を提示し、その測定の意義について述べている。また、予備的実験において溶接アーク音の指向性、音場の特性、S/N比などについての考察を行い、溶接アーク音が情報源としてすぐれた諸性質を有していることを述べている。さらに、実験を遂行する上での基本方針と実験結果を普遍的に表示するための方法について示している。

2.2 溶接アーク音の測定の意義

溶接アーク音の発生を結果的に見ると、大気圧を平衡中心とするアーク近傍になんらかの原因で圧力変化が生じたことを意味する。しかし、溶接アーク現象が複雑なため溶接アーク音の発生原因、その機構などについては論議せず、まず、アークの発生部分（音源に相当する）をブラック・ボックスと考える。次に、溶接アーク音の媒質を理想気体と見なす。すなわち、空気中を伝播する音は空気の粘性、熱伝導などによって厳密にはエネルギーを失うが、可聴周波数帯域の音の場合にはこれらの影響は小さく無視することができる。ここには摩擦によるひずみなどは発生せず、ブラック・ボックス内部の運動によって生ずる応力は圧力のみとなる。したがって、応力の変動は圧力の変化、すなわち溶接アーク音として観察されることになる。

以上の事実は、溶接アーク音が溶接アーク現象に関する様々な情報、少なくともブラック・ボックスが気体と接する部分の現象についてはすべての情報を含むことを示すものであり、溶接アーク音の測定が溶接アーク現象を解明する上で意義あることを示すものである。

2.3 溶接アーク音に関する予備考察

2.3.1 溶接アーク音の音源

前項においては、アーク発生部を溶接アーク音の音源と見なし、これをブラック・ボックスとして取り扱うことを述べた。そこで本項では、音源形状について若干の予備的検討を行うことにする。

溶接アーク音の音源形状は、アークの形状と完全に一致するか否かは別にしても、それに近いものと見なしでもあまり無理はないと考えられる。したがって、広幅帯状電極を用いる肉盛溶接などの場合を除くと、音源寸法は大きく見積っても電極径の数倍程度のもの

と考えられる。このため、音源から音波観測点までの距離を比較的大きくすれば、音源を点音源と見なすことができる。なお、広幅帯状電極の場合については近距離では線音源に近いものと考えられるが、遠距離では点音源と見なしてもさしつかえがない。

自由空間に存在する点音源からの音波は指向性をもたず、球面波として伝播する。いま、音響出力 W [watt] の点音源を中心とする半径 r [m] の球面を考えると、球面の全面積 $4\pi r^2$ [m²] を通過する音響エネルギーの総和は1秒間当り W であるから、単位面積を1秒間に通過するエネルギー、すなわち、音の強さ I_r [watt/m²] は次式で表わされる。

$$I_r = W / 4\pi r^2 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

また、その点の音圧の実効値を P_e ($=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T P^2(t)dt}$) [Pa] とすると

$$I_r = P_e^2 / \rho c \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

であるから

$$P_e = (1/r) \sqrt{\rho c W / (4\pi)} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

となる。ここで、 ρ は媒質の密度 [kg/m³]、 c は音速 [m/s] である。

音圧 P_e は、一般に基準実効音圧を $P_{e0} = 2 \times 10^{-5}$ [Pa] ($=0.0002 \mu\text{bar}$) とする次式で定義される音圧レベル SPL (Sound Pressure Level) で表示される。

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} P_e / P_{e0} \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

したがって、(2.3) 式は

$$\begin{aligned} \text{SPL} &= 20 \log_{10} P_e / (2 \times 10^{-5}) \\ &\doteq 10 \log_{10} (W / 10^{-12}) - 20 \log_{10} r - 11 \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

となる。

(ただし、媒質を 0°C、1 気圧 (1 atm = 101325 N/m²) の空気とし、固有音響抵抗 $Z = \rho c = 415 \text{ N/m}^3$ とした場合)

右辺第1項は、音源の出力レベル PWL (Power Level) ($=10 \log_{10} W / 10^{-12}$) に一致するので

$$\text{SPL} = \text{PWL} - 20 \log_{10} r - 11 \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

となる。(2.6) 式は、距離が2倍になると音圧レベルが6 dB減衰することを示している。

なお、音源が指向性を有する場合には受音点の方向に対する指向係数を Q とすれば音圧レベルは次式で表わされる。

$$\text{SPL} = \text{PWL} - 20 \log_{10} r - 11 + 10 \log_{10} Q \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、 Q は次式で定義される。

$$Q = P_e^2 4 \pi r^2 / (\rho c W) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

溶接アーク音の指向性の実測結果をFig.2-1に示す。

図は、矩形波電流を用いたTIGアークを水冷銅板上に発生させた場合のものであるが、他のアーク溶接法の場合についても同様な結果が得られている。このことは、溶接アーク音の強さが音源から

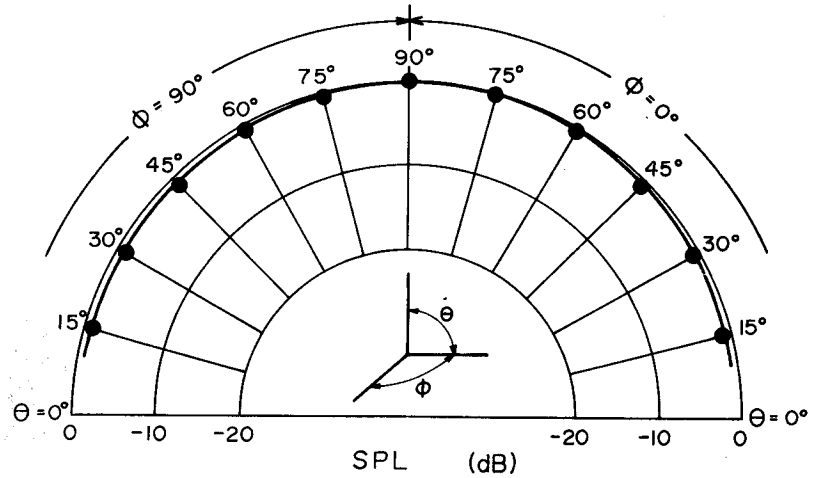


Fig. 2-1 Directional response of welding arc sound.

の距離が一定であれば（本実験では $r=12\text{cm}$ 一定）、測定角 θ 、 ϕ によってほとんど変化せず、溶接アーク音が無指向性であることを示している。

Fig.2-2に、溶接アーク音の距離による減衰効果を示す。音圧レベルは距離が2倍になるごとにほぼ6dBずつ減衰している。

なお、図の横軸は音源からの距離 r を $r_0 (=12\text{cm})$ で無次元化した値 r/r_0 を用いて表示している。

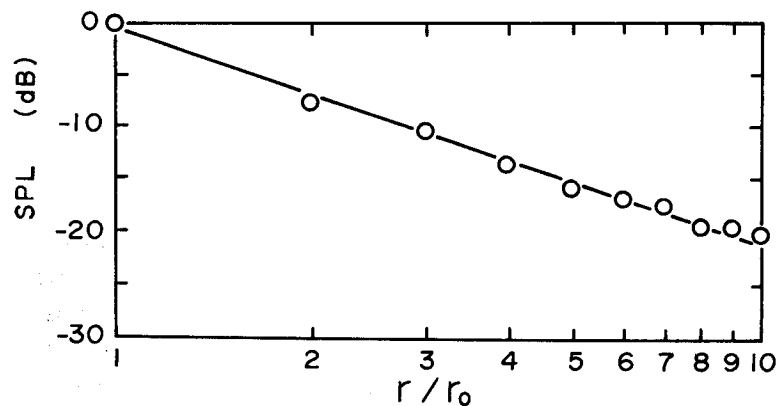


Fig. 2-2 Relation between r/r_0 and SPL.

Fig.2-1及びFig.2-2の実測結果は、溶接アーク音が無指向性であり、同時にその音源が点音源と見なし得ることを示している。

2. 3. 2 溶接アーク音の音場の特性

音波が到達するとその部分の媒質は振動状態となる。その振動は場所によって決まるので、音の測定に際しては音波の存在する場所、すなわち音場の特性をあらかじめ把握しておくことが必要となる。

シールドガスの流れの状態をオイル・スモーク法によって可視化した例を Fig.2-3 に、シールドガス流の濃度をヘンペル式ガス分析器を用いて測定した例⁸⁾を Fig.2-4 に示す。図はいずれもシールドガスとして CO₂ ガスを用いた場合のものであり、噴出レイノズル数 $Re=2200$ ($Re=(d-d_0)u_j/\nu$ 、 d はノズル直径、 d_0 はコンタクト・チップ直径、 u_j はガス噴出平均速度、 ν はガスの動粘性係数)、 $H/d=1.25$ (H はノズルと母材間の距離) の条件である。

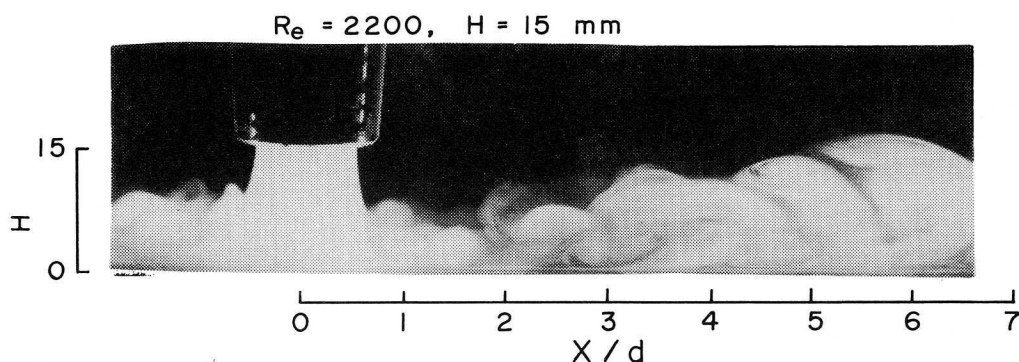


Fig. 2-3 Shielding gas flow pattern.

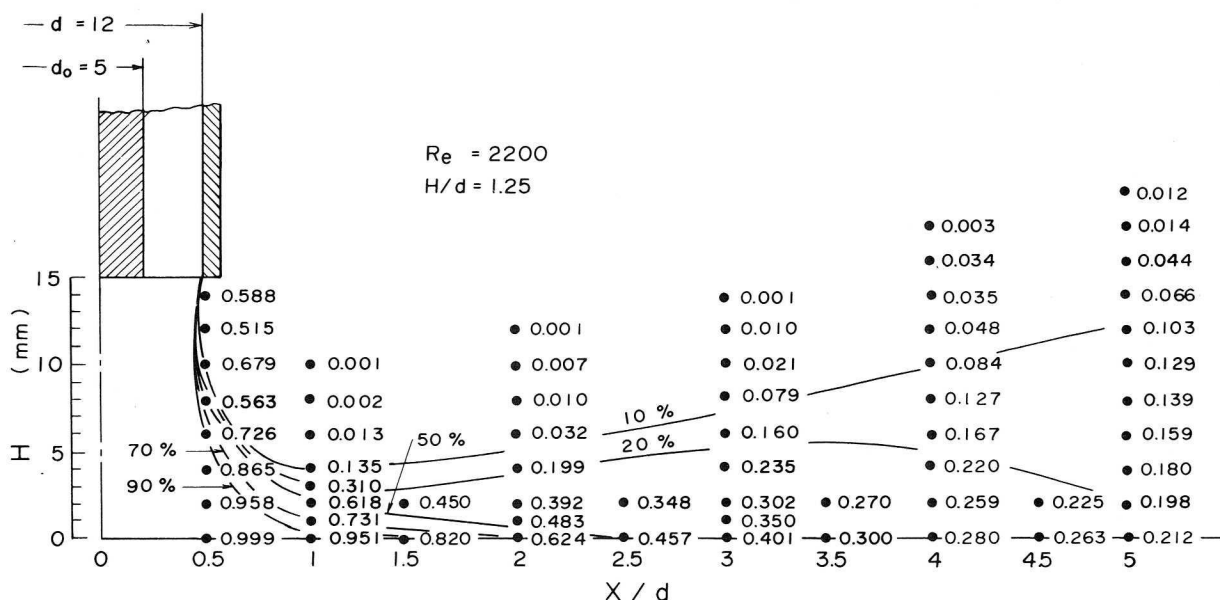


Fig. 2-4 CO₂ gas concentration in the shielding gas at various positions.

Fig.2-3及びFig.2-4 から、溶接アーク音の媒質は、大局的には音源近傍においてはCO₂ガスやArガスなどのシールドガスであり、音源から比較的離れた場所においては大気（空気）と見なすことができる。

音波は異媒質が存在するとその境界面で反射し、損失を生ずる。異媒質が存在することによって生ずるいわゆる透過損失TL(=10log₁₀1/τ, τは透過率)はFig.2-5に示すように、媒質の固有音響抵抗Z(=ρc)によって決まる。

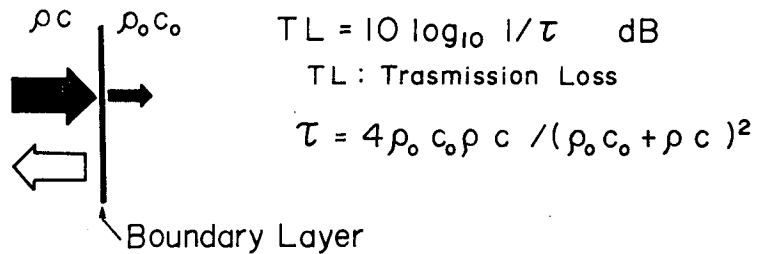


Fig. 2-5 Transmission loss .

Table2-1に、本論文で採用した各媒質についての固有音響抵抗を示す。空気、CO₂ガス及びArガス三者の間には著しい差異がない。例えば、空気とCO₂ガスとの境界面で生ずる透過損失をTable2-1の値を用いて計算すると、TL≒0.034 dBと極めて小さく、その影響は無視することができる。したがって、溶接アーク音の媒質は空気そのものと見なしてさしつかえがないことになる。このことは溶接アーク音の指向性及び距離減衰効果についての実験結果 (Fig.2-1、Fig.2-2) とも良く一致する。

Table 2-1 Specific acoustic resistance.

(0 °C, P=1.013 x 10⁵ N/m²)

	ρ (Kg/m ³)	c (m/s)	Z=ρc
Air	1.29	331.5	428
CO ₂	1.98	258 (L.F)	511
		268.6 (H.F)	532
Ar	1.78	319	568
Steel	7700	6100	470 x 10 ⁵

L.F : Low Frequency
H.F : High Frequency

次に、実際の溶接を室内で行うものとし、音源が室内にある場合の音圧分布について考える。このような場合の音は直接音と室壁によって反射してきた音、すなわち拡散音との合成されたものであり、音響出力Wの音源から r の距離における室内の音圧レベルは次式で表わされる。

$$SPL = PWL + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、R は室定数であり、室の平均吸音率を $\bar{\alpha}$ 、室の表面積をS とすると $R = \bar{\alpha}S / (1 - \bar{\alpha})$ で定義される。

Fig.2-6 は、(2.9) 式で $PWL = 0$ 、 $Q = 1$ とし、 R をパラメータにとり SPL と r の関係を求めて図示したものである。

図から室内の音圧は音源の近くではほとんど直接音によって定まり、音源から離れるに従い拡散音の影響が大きくなるのが分かる。したがって、 R が極端に小さな場合（一般に室容積の小さな場合に相当すると考えて良い）を除くと、直接音のみを比較的容易に検出することができる。

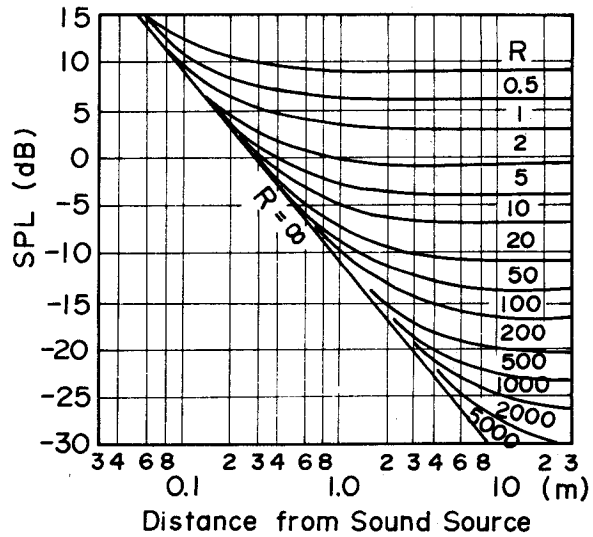


Fig. 2-6 Relation between SPL and r .

本研究において、溶接アーク音の測定

はこのために特に設計、製作した無響室を使用しているが、一部には通常の実験室を使用している。Fig.2-7に、この実験室内における音の距離減衰効果を示す。この場合の音は、小型スピーカから発生させた白色音であり、スピーカは溶接台上に設置されている。音圧レベルは距離が2倍になるとほぼ6dB減衰し、SPLと r の間にはいわゆる逆二乗則が成立している。このことは、音場が自由音場であることを意味する。

なお、この実験室の空間部の容積 V_s は約 190m^3 、表面積 S は約 350m^2 、ピストル音を用いてW.C.Sabineの残響時間 ($T_s = 0.161 V_s / \bar{\alpha} S$)から求めた平均吸音率 $\bar{\alpha}$ は0.35であり、室定数 R は188であった。

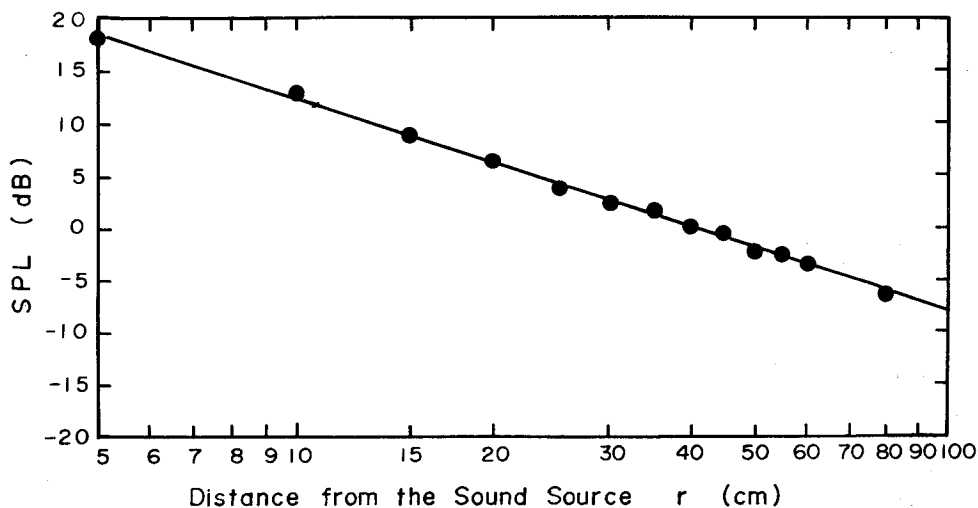


Fig. 2-7 Relation between SPL and r on the laboratory.

溶接アーク音の指向性が無指向性であることについては既に述べたが、ビード・オン・プレート溶接のように音源が平板上に存在する場合には音波は無指向性の1/2球面波として伝播し、このようなき指向係数 Q は2となる。また、隅肉溶接のように音源が平板と平板との直角に交った角に存在する場合には $Q = 4$ となる (Fig.2-8参照)。

指向係数は (2. 8) 式で定義されるように、音源から r の距離における音の強さを同じ音響エネルギーを放射する点音源の r の距離における強さで割ったものであるから、他の場合についても、音源の存在場所が決まると実験的に求めることができる。

本研究において実験は、ビード・オン・プレート溶接を対象として行っているので $Q = 2$ となり、被溶接材を完全反射体すなわち剛体壁と見なすと、音圧は、音源が自由空間に存在する場合の2倍になる。

なお、(2.9) 式において $Q = 2$ 、 $R \rightarrow \infty$ とすると、SPLとPWLとは音源から約40cm離れた点で数値が等しくなる。

2. 3. 3 暗騒音の影響

溶接アーク音の測定に際し、測定対象外の音すなわち暗騒音として問題となるものは、溶接装置に関連するものとして溶接電源から発生する音、ワイヤ送給装置から発生する音、トーチ移動装置から発生する音及びノズルからのシールドガスの噴出音などである。

本実験では、溶接電源及びワイヤ送給装置については防音処理を行い、前者は室外に設置しているので、暗騒音として考慮しなければならないものはトーチ移動装置から発生する音とシールドガスの噴出音である。この両者について実際に近い条件で音圧レベルの測定と周波数スペクトル分析を行った結果をFig.2-9及びFig.2-10に示す (音圧レベルSPLはオーバ・オール値O・A)。

トーチ移動装置から発生する音の強さはSPL=55dB程度 (トーチ移動速度40cm/min の場合) であり、その周波数スペクトルは3500Hzまでの帯域に存在している。また、シールドガスの噴出音の強さは、CO₂アーク溶接用トーチの場合SPL=61dB (ガス流量: 20 l/min)、TIGアーク溶接用トーチの場合SPL=54 dB (ガス流量: 15 l/min) 程度であり、

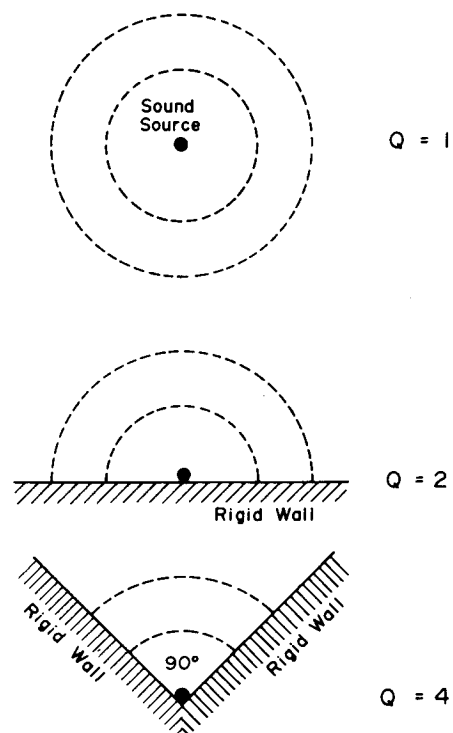


Fig. 2-8 Directivity factor.

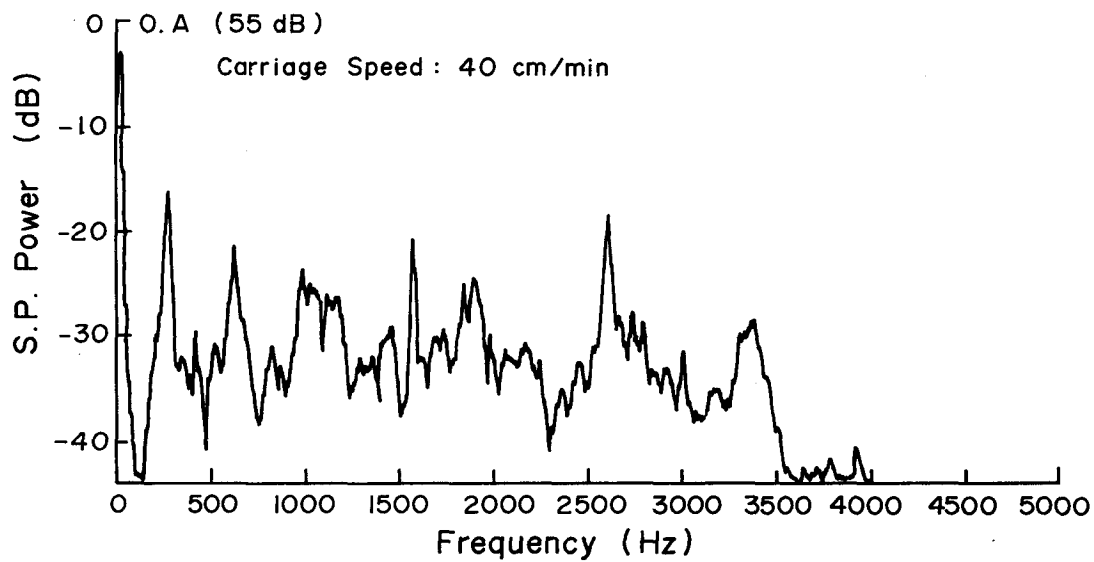


Fig. 2—9 Back ground noise from carriage of welding torch.

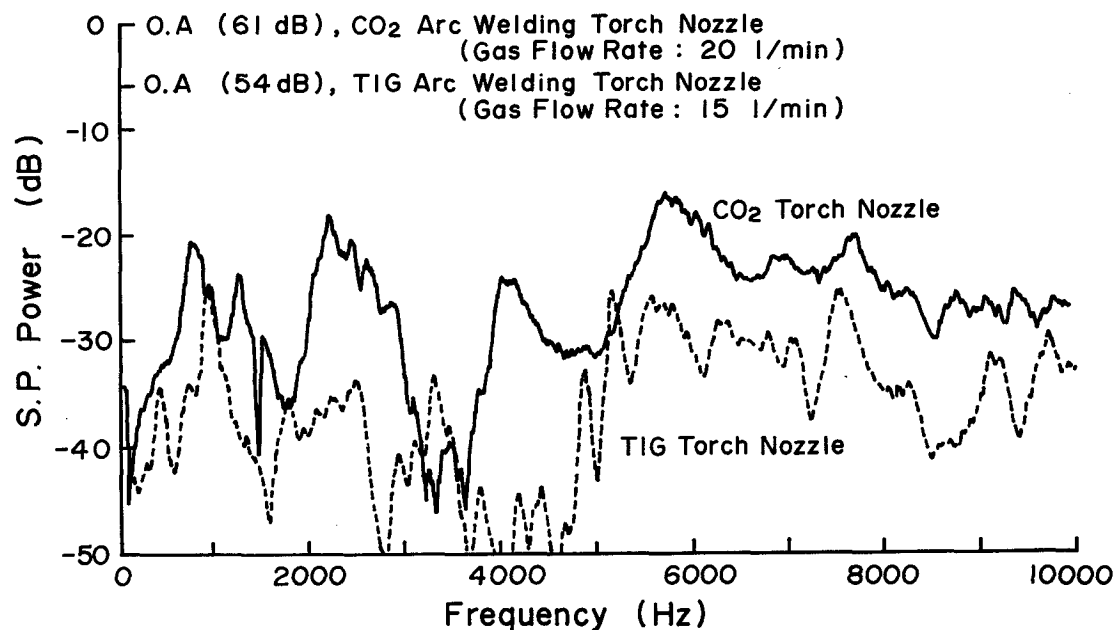


Fig. 2—10 Back ground noise from shield gas flow.

その周波数スペクトルは広帯域に渡って存在している。

溶接アーク音の音圧レベルは溶接法及び溶接条件によって著しく異なるが、たいていの場合SPL=80dB以上となるので、最も大きなシールドガス噴出音と比較してもその間には約20dBの差がある。測定対象音と暗騒音との間に20dBの差があるとき、暗騒音が測定対象音の音圧レベルに与える影響は0.043dBと極めて小さい（一般に、暗騒音との間に10dB以上の差がある場合その影響は無視される）。

このように、溶接アーク音はS N 比の非常に良好な点からも良質な情報源と考えられる。なお、外来の大きな騒音があって、しかもその遮音が困難なような場合については、単一指向型のマイクロホンを使用することによってS N 比の改善をはかることができる。

2. 3. 4 溶接アーク音の特徴量

2.3.1 項において述べたように、溶接アーク音の音源は点音源と見なすことができる。点音源から放射される音波は球面波であり、球面波の変化量はすべて時間と位置のみの関数として表示される。したがって、ある場所で音波を観察することは、例えば音圧を時間の関数としてみることに相当する。このような場合、音の特徴量としては次のようなものが挙げられる。

- (a) 波形
- (b) パワ (全帯域、任意帯域、周波数荷重 など)
- (c) 周波数スペクトル (全帯域、任意帯域など)
- (d) 自己相関関数及び相互相関関数
- (e) 周期性の有無とその周期

本研究では、溶接アーク音の特徴量として(a)~(e)について検討を行った。溶接アーク音の強さを普遍的に表示するためには(2.4)式で定義される音圧レベルを主に用いた。

音圧レベルSPLはパワレベルPWLとの間に(2.6)式及び(2.7)式のような関係があるので、音圧レベルからパワレベルを、パワレベルから音圧レベルを求めるのは容易である。なお、本研究における実験は主にビード・オン・プレート溶接を対象としているので、指向係数を $Q = 2$ とすると音圧レベルとパワレベルとは2.3.2項で述べたように、音源から約40cmの距離で等しくなる。

2. 4 結 言

本章は、溶接アーク音の測定の意義について明確にするとともに、予備的実験から次のような結論を与えている。

- (1) 溶接アーク音は無指向性であり、その音源は点音源と見なすことができる。
- (2) 溶接アーク音の媒質は、音源近傍ではシールドガスであるが、やや離れた場所では大気そのものである。シールドガスと大気との固有音響抵抗には大差がなく、異媒質境界面における透過損失は小さいことから、媒質を大気として取り扱うことができる。
- (3) 溶接アーク音の測定を自由音場内で行うことは比較的容易である。
- (4) 球面波として放射される溶接アーク音の変化量は、すべて時間と位置の関数として表

わされ、また溶接アーク音はS N 比の良好な点からも情報源としての適格性がある。

第3章 実験装置及び実験方法

3. 1 緒 言

本研究を遂行するための実験装置、測定装置の概要について述べるとともに、前章の考察に基づき、実験方法と溶接アーク音の測定及び解析方法について言及している。

3. 2 無響室の構造及び性能

溶接アーク音の測定は主に無響室内で行っている。この無響室は本研究を行う目的で設計、製作した内寸法が縦3800mm、横3300mm、高さ2300mmのものであって、その壁構造及び床構造はFig.3-1、Fig.3-2に示すとうりである。すなわち、壁は30mmの発泡断熱材及び100mmの空気層を介して、厚さ100mmのかさ比重の異なるグラスウールを二層に張ったもので、その表面にクランプ・ネット（直径2mm、ピッチ25mmの正方形目の金網）を張った構造である。また、床は溶接台及びトーチ移動装置などの重量物を置く必要上、直径9mmの丸鋼によるピッチ50mmの格子床構造としている（格子床は900mm×1000mmのユニット製で、脱着が可能）。

床構造は音波に対して透明であることが理想であるが、本研究においてアークは有効半径350mmの比較的広い面積を有する溶接台に固定した被溶接材（ただし、パルス化電流波形を用いたTIGアークについては半径110mmの水冷銅板）に発生させているので、被溶接材を完全反射面体と見なし、床以外の壁を完全吸音体と見なせば、半無響室ともいべき音場となる。このような音場は、自由空間を剛体壁によって仕切った半無限空間に相当する。

したがって、格子床によって生ずると考えられる散乱波（反射波や回折波）の影響については本実験の場合考慮する必要がない。

本無響室は以上のような構造を有するいわゆる簡易型のものであり、その性能はFig.3-3に示すとうりである。Fig.3-3を得た性能試験は、周波数範囲20Hzから10kHzの純音を床上90cmの位置に設置したスピーカから発生させ、音源とマイクロホン間距離を20cmから1.4mの範囲で20cmごとに変化させ、音圧レベルの距離減衰効果を調べるという手法によっている。

図に見られるように、実測値は音源とマイクロホンの距離40cm以内ではほぼ全周波数において、1.4mでは200Hz以上の全周波数において約±2dBの誤差で逆二乗則に基づく計算値に近似している。なお、この試験結果は無響室の中央から横（短辺）方向の最も厳しい条件の場合について測定した例であって、縦（長辺）方向及び対角線方向については実測値は計算値にさらに近似する。

3. 5項に述べるように、溶接アーク音の測定は音源から距離40cm（または12cm）の点で

行っている。このため、溶接アーク音は広帯域な周波数スペクトル成分を有するが、本無響室の使用によりほぼ全周波数帯域について精度良く測定することが可能である。

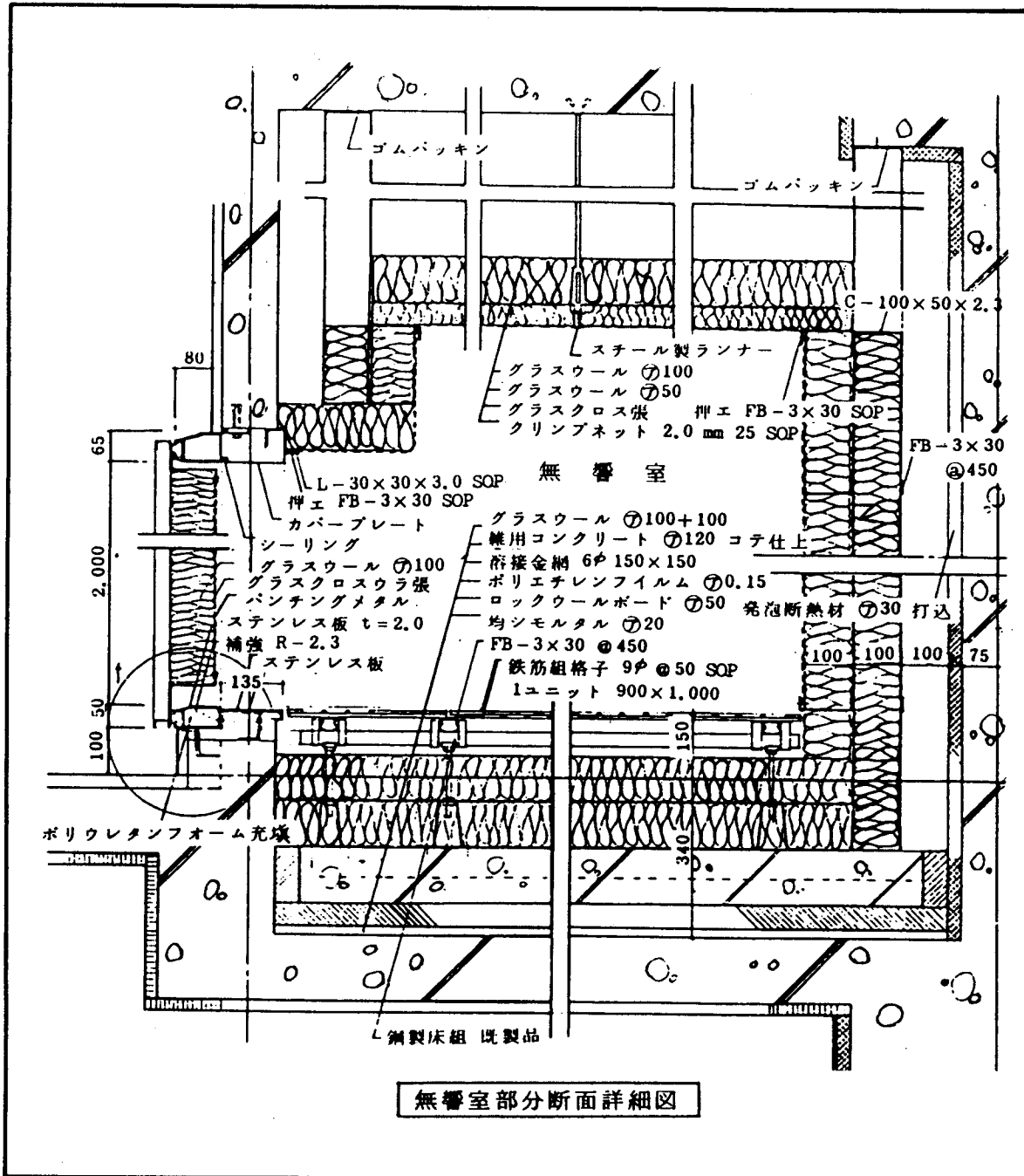


Fig. 3-1 Construction of anechoic room.

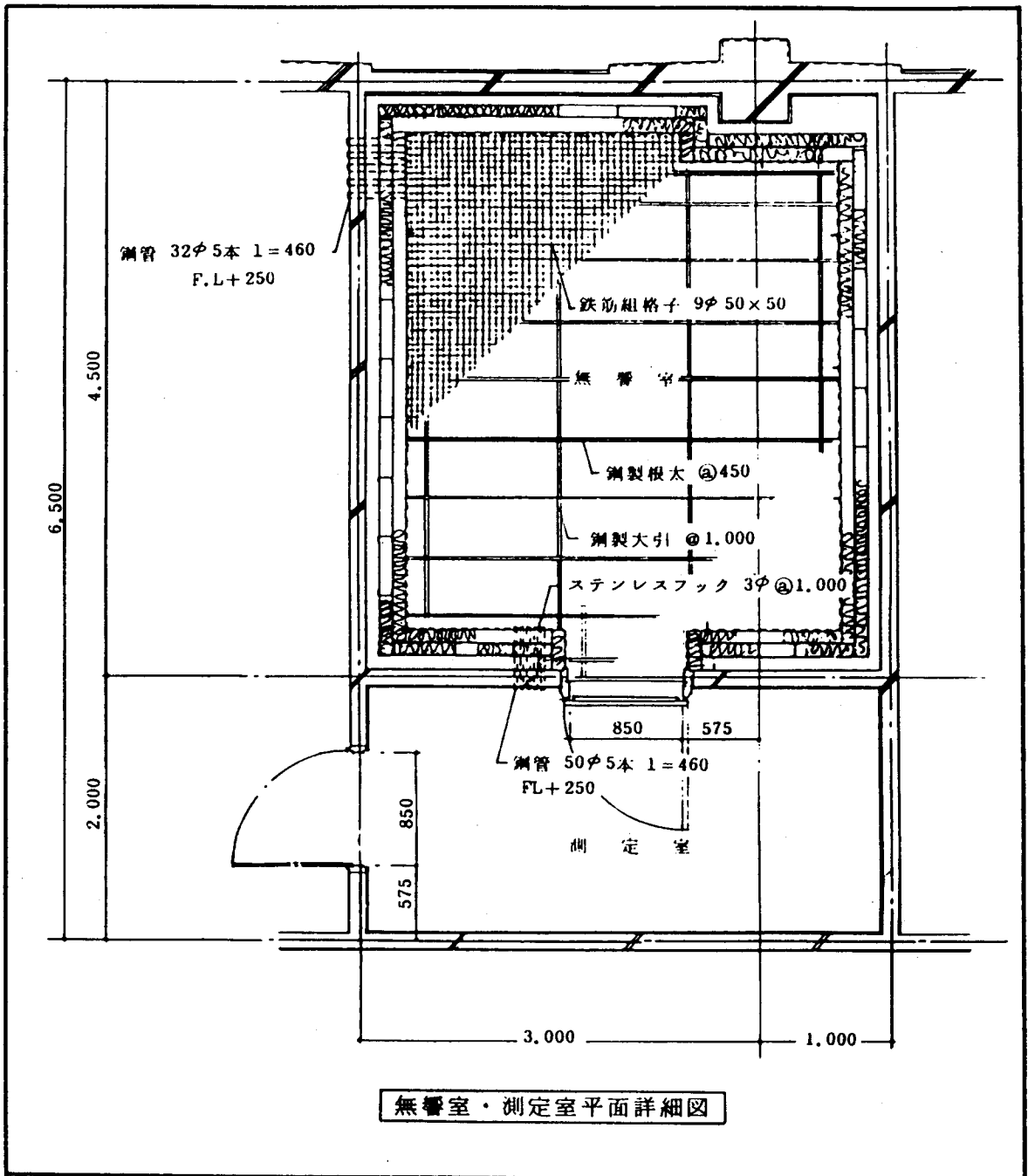


Fig. 3—2 Construction of anechoic room.

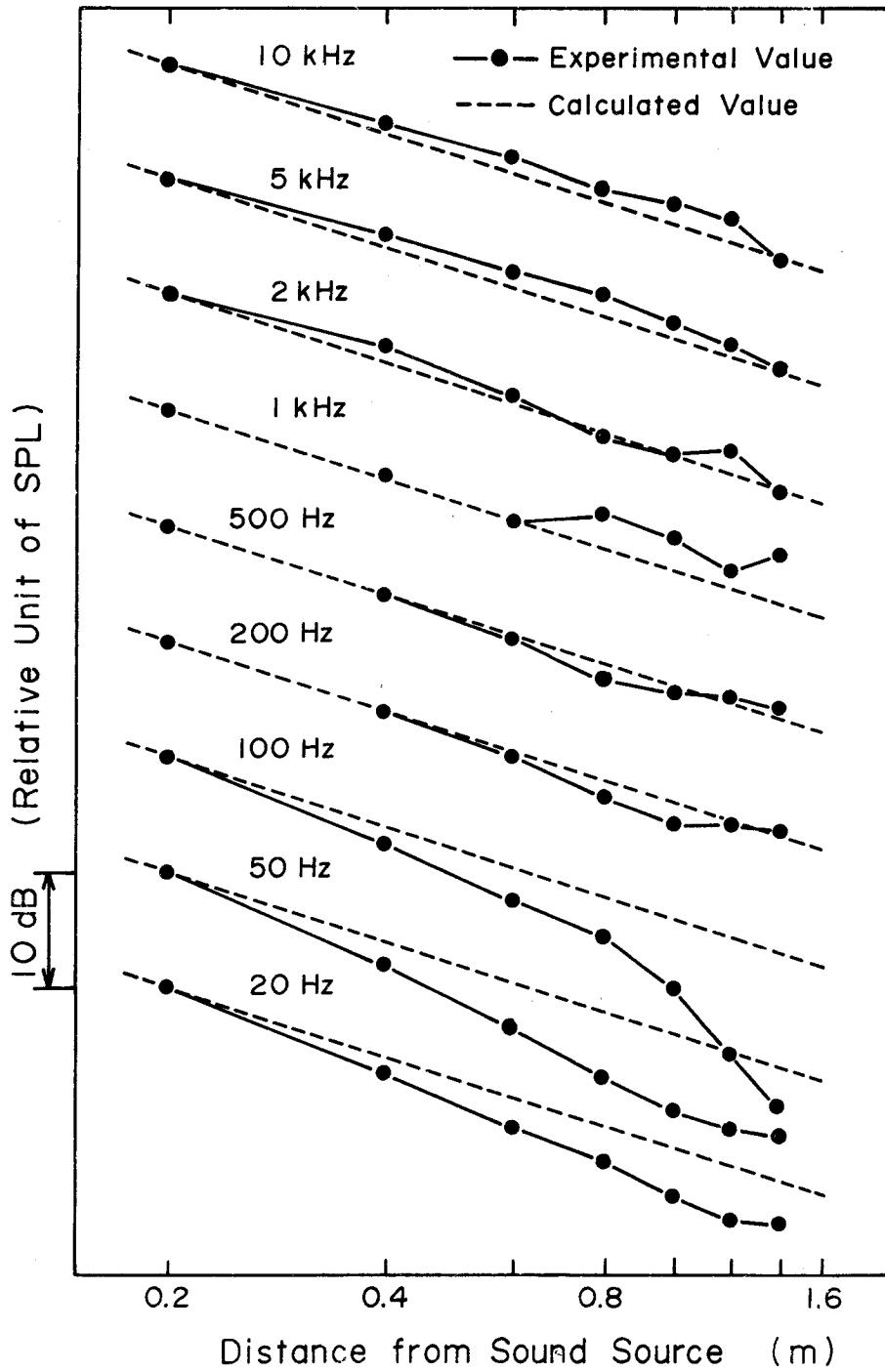


Fig. 3—3 Property of anechoic room.

3. 3 マイクロホンの特性

溶接アーク音の検出には、正面入射角が 0° の場合、20Hzから12kHzまでほぼフラットな周波数応答特性を有する1インチ形コンデンサマイクロホン（リオン社製、UC-11A、感度： -45dB ($0\text{dB}=1\text{V}/\mu\text{bar}$)、容量： 60PF)を主に用い、他に20Hzから100kHzまでの周波数応答特性を有する1/4インチ形コンデンサマイクロホン（国洋電機社製、FAM-7016、感度： -67.9dB ($0\text{dB}=1\text{V}/\mu\text{bar}$)、容量： 6.2PF)を用いた。

Fig.3-4に、1インチ形マイクロホンの周波数応答特性を示す。

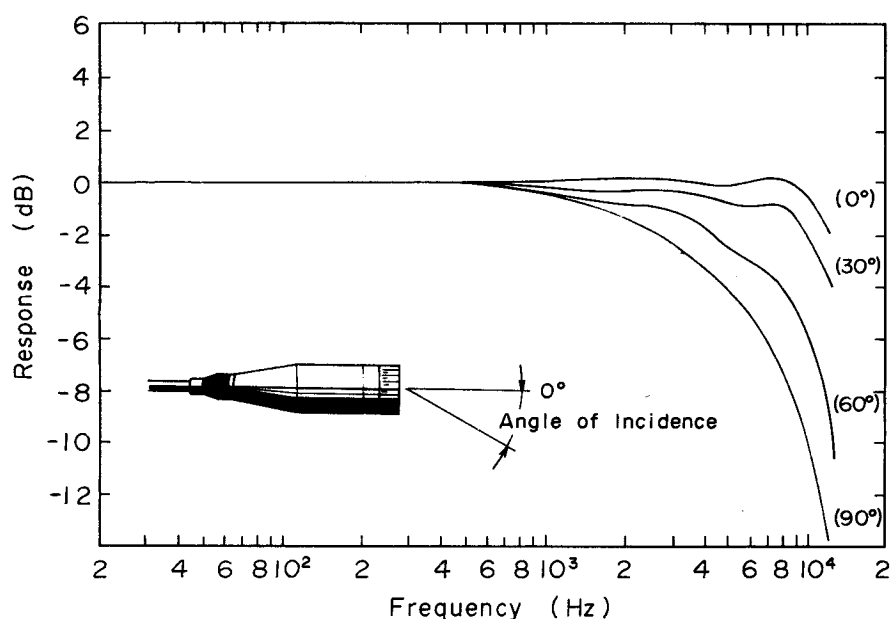


Fig. 3-4 Frequency response curve of 1" condenser microphone (UC-11A).

3. 4 溶接条件

本研究で対象とした溶接法は、被覆アーク溶接（交流及び直流）、 CO_2 アーク溶接、MIGアーク溶接及びTIGアーク溶接（パルス化TIGアーク溶接を含む）である。各溶接法につ

いての主要な溶接条件を

Table3-1、Table3-2 及

びTable3-3 に示す。
被溶接材は、水冷銅板にアークを発生させたTIG溶接の場合を除き、表面酸化物をグラインダによって除去した後、ア

Table 3-1 Working conditions at covered arc welding.

Covered Electrode JIS D4303	
Welding Current AC, DC (A)	100 ~ 225
Arc Length (mm)	4, 8
Electrode Diam. (mm)	4
Welding Speed (cm/min)	10 ~ 15
Polarity	R.P, S.P
Electrode Angle (deg.)	70

セトンで脱脂したS M-41B 鋼板であり、主にビード・オン・プレート溶接を行った。

CO₂ アーク溶接及びMIGアーク溶接では1.6 mmφ (一部1.2mmφ) の軟鋼用ソリッドワイヤを使用した。

CO₂ アーク溶接の場合、溶接電流 I に対するアーク電圧 V の適正範囲は、溶滴の移行形態が短絡移行領域 (I < 250A) では $V = 0.032 \cdot I + 16 \pm 1.5$ 粒滴移行領域 (250A < I < 450A) では $V = 0.06 \cdot I \pm 9 \pm 2$ を一応の基準とした。また、溶接アーク音に影響を与えると考えられる因子については、これらを広範囲に変化させた。なお、特にことわらない場合、ワイヤ突出し長は20mm、ガス流量は20 l/min (TIGアーク溶接では15 l/min) 一定である。

被覆アーク溶接に用いた電源は垂下特性を有する交直両用のもの (日立製作所製、AD-SB) であり、CO₂アーク溶接及

Table 3-2 Working conditions at CO₂ arc, MIG arc and TIG arc welding

Condition \ Method	CO ₂ Welding	MIG Welding	TIG Welding
Welding Current (A)	150 ~ 450	150 ~ 450	150 ~ 250
Arc Voltage (V)	Variable (1)	Variable	19
Welding Speed (cm/min)	20, 40, 60	20, 40, 60	0 ⁽²⁾ , 20
Gas Flow Rate (l/min)	20, (0~25)	20, (0~25)	15
Wire Extension (mm) Arc Length (mm)	20, (10~60)	20	5, (Variable)
Torch Angle (deg.)	90	90	90
Polarity	R.P	R.P	R.P

- (1) $V = 0.032 \cdot I + 16 \pm 1.5$ (I < 300)
 $V = 0.060 \cdot I + 9 \pm 2.0$ (300 ≤ I ≤ 450)
(I : Welding Current, V : Arc Voltage)
(2) Water cooled copper plate

Table 3-3 Working condition at pulsive arc welding.

Current Waveform	Rectangular	Sawtooth	Triangular	Sine
$d = \Delta / T$	0.5	0	0.25	
Current (A)	$\begin{cases} I_{av} = 100 & (17 \text{ V}) \\ I_p = 150 & (20 \text{ V}) \\ I_b = 50 & (14 \text{ V}) \end{cases}$ $\tau_p = I_p - I_b = 100$		$\begin{cases} I_{av} = 100 & (17 \text{ V}) \\ I_p = \text{Var} & (20 \text{ V}) \\ I_b = \text{Var} & (14 \text{ V}) \end{cases}$ $\tau_p = I_p - I_b = 40 \sim 160$	
Repetition Frequency (Hz)	10, 30, 50, 100, 200, 360, 500, 1000, 2000, 3000			
Arc Length (mm)	5, (Variable)			
Gas Flow Rate (l/min)	15 (Ar gas)			
Electrode Diam. (mm)	4, (Variable)			

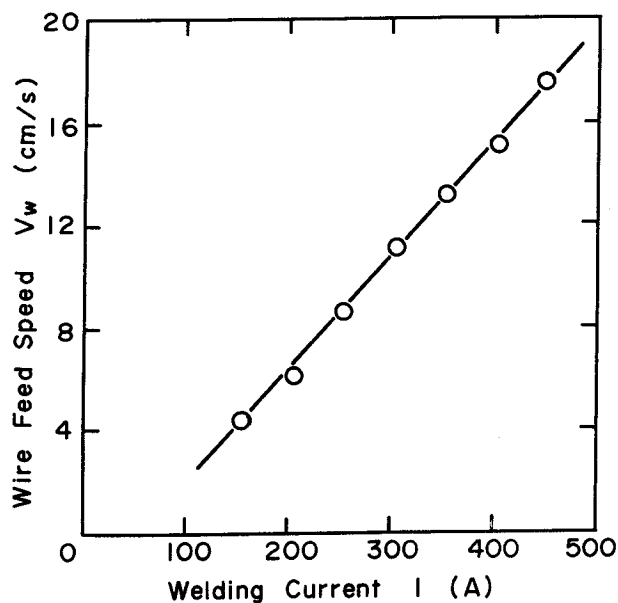


Fig. 3-5 Relation between welding current and wire feed speed.

びMIGアーク溶接に用いた電源は直流定電圧特性を有するもの（日立製作所製、TS-500、及び松下電器社製、YD-500 SC-3）であり、各電流値に対するワイヤの送給速度は、Fig.3-5に示すとうりである。

TIGアーク溶接（Table3-2）に用いた電源は直流垂下特性を有するもの（新明和社製、SPJ-1）である。また、Table3-3に示す溶接条件は溶接アーク音におよぼす電流波形のパルス化の影響を明らかにするための実験において採用したものである。対象とした電流波形は、立上り時間と立下り時間の短い矩形波（ $d=\Delta/T=0.5$ ）及び立上り時間の短い鋸歯状波（ $d=0$ ）、立上り時間と立下り時間の比較的長い三角波（ $d=0.25$ ）及び正弦波の種類である。この場合、水冷銅板（有効半径110mm）にアークを発生させているので、溶融池の生成を伴わず、また電極（トリヤ入りタングステン電極を主に使用）の消耗もあまり大きくはないので、溶接アーク音の諸特性はすべて出力波形にのみ依存すると見なすことができる。ここで用いた電源はトランジスタ制御型の直流電源である（大阪大学溶接工学科の設計、製作のもの、及び大阪変圧器社製、TR-800、TR-500）。一般の整流型直流溶接電源は出力電流にリップル成分（50Hzまたは60Hzの電源周波数に起因する）を含み、しかも内部インダクタンス、可飽和リアクトルなどの時定数が大きいために過渡応答に限界があり、電流制御の即応性に難点がある。トランジスタ制御型電源は出力電流にリップル成分を含まず、従来型電源に比較して安定性と応答性に非常にすぐれている。本電源においては電流

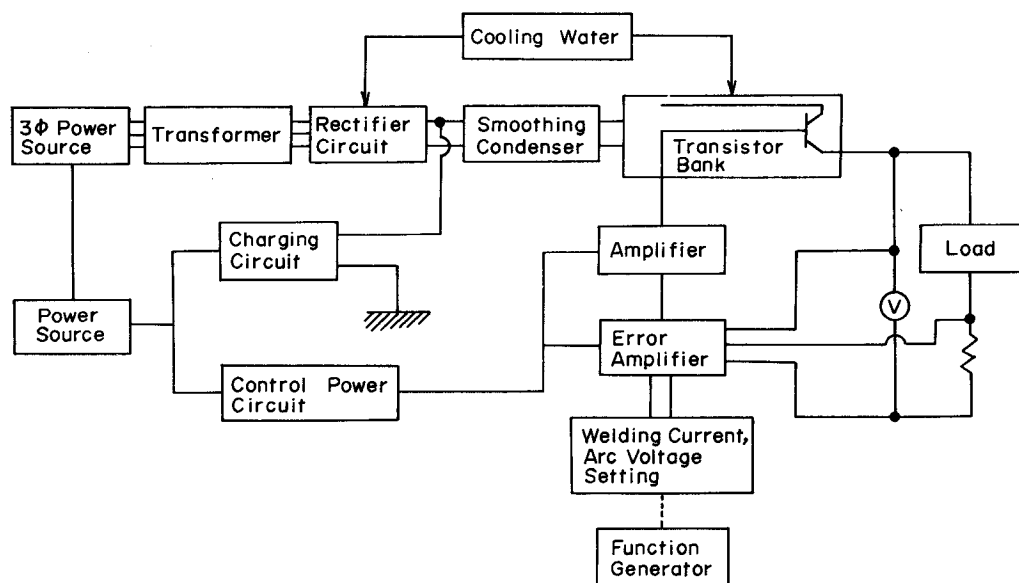
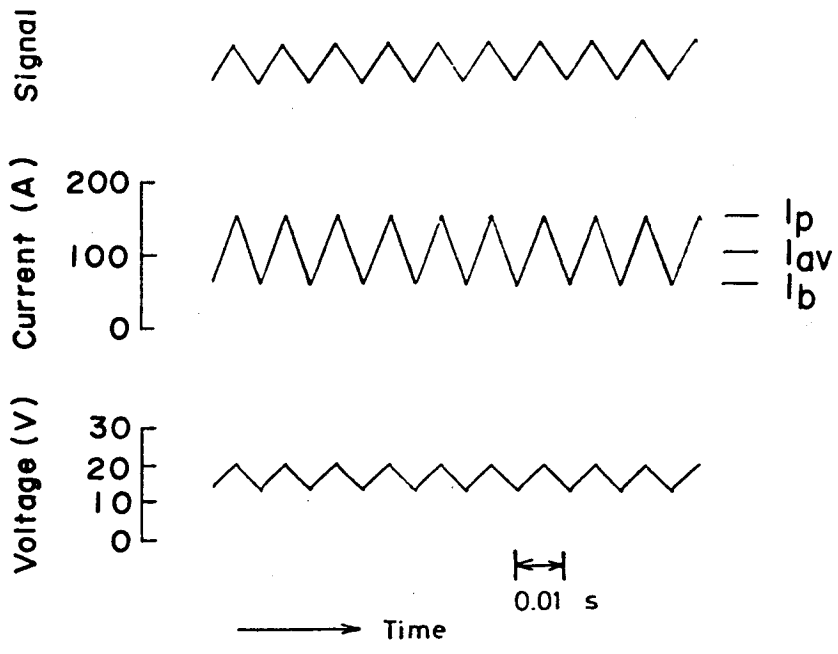
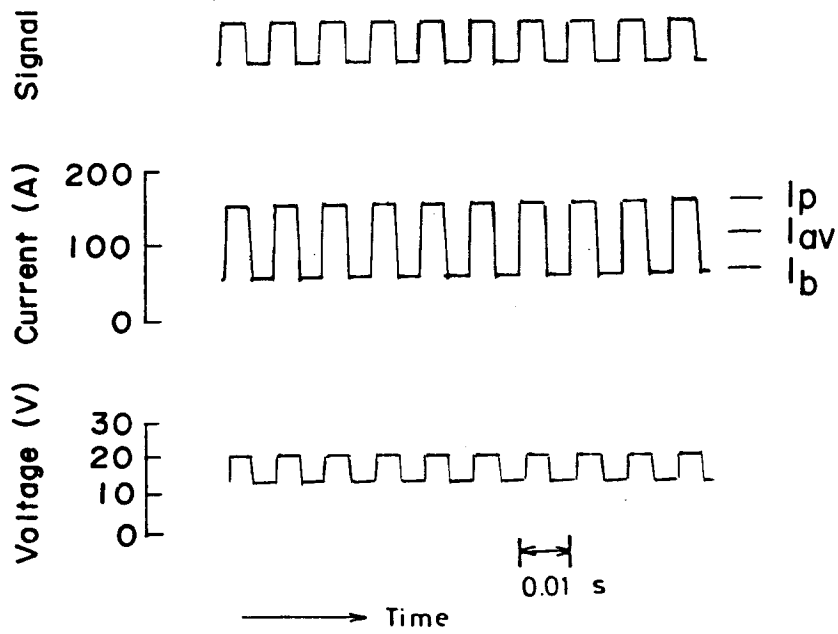


Fig.3-6 Block diagram of welding power source system of transistor control type.



(a)



(b)

Fig. 3-7 Examples of oscillogram of welding current and arc voltage in transistor controlled power source.

及び電圧制御は基準値と出力値との差を検出し、フィード・バック制御により行われるので、完全な直流出力の得られることはもちろん、関数発生器を用いて基準波形の設定を行えば、任意の出力波形を得ることが可能である。また、応答周波数特性が良好で、10kHz程度まで確保されている。

Fig.3-6に、大阪大学溶接工学科において製作された電源の構成を示す。また、Fig.3-7に、本電源を用いて得られた溶接電流とアーク電圧波形の例を、基準信号波形を三角波(a)、矩形波(b)とした場合について示す。

3. 5 溶接アーク音の測定及び解析方法

前章において述べたように、溶接アーク音は無指向性であり、その強さは音源からの距離が一定であれば測定角には依存しない。そこで、溶接アーク音の測定はマイクロホンを保持角 45° とし、アーク発生点からの距離40cmの位置に設置して行った(ただし、水冷銅板にアークを発生させたTIGアーク溶接についてはアーク発生点からの距離12cmの位置)。

この距離は、無響室内及び前章で検討を行った実験室内で自由音場の形成される領域であるとともに、音波が1/2球面波として放射される場合には音圧レベルとパワレベルとがほぼ相等しくなる距離である。

マイクロホンの出力は、増幅器を介して一旦データ・レコーダ(ティアック社製、RM-220、R-80)により磁気テープにDRモードで記録し、解析に際しては適宜再生したデータを供したが、データ・レコーダの周波数応答範囲を超えるデータについては直接、オン

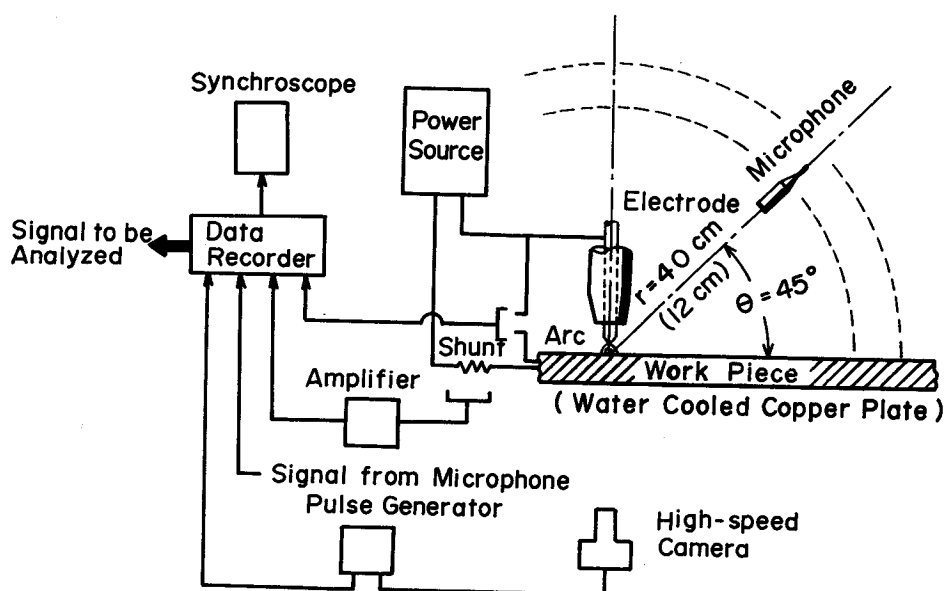


Fig. 3-8 Schematic diagram of experimental apparatus and measuring system.

・ラインで検出したデータを用いた。また、溶接アーク音の記録と同時に、溶接電流及びアーク電圧の出力をFMモードで記録するとともに、アーク発生状況を観察するために高速写真撮影（1000～4000 frames/s）をこれらの記録と同期させて行った。

Fig.3-8に溶接アーク音の測定系の概略を、Fig.3-9に解析系の概略を示す。

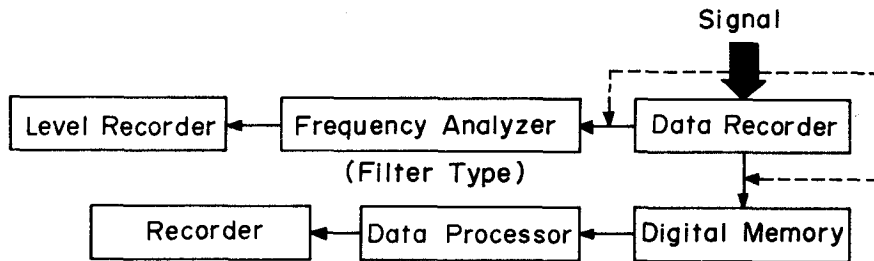


Fig. 3-9 Flowchart of analyzing system for welding arc sound.

溶接アーク音の周波数スペクトル分析は、高速フーリエ変換（FFT）の理論に基づく周波数スペクトル・アナライザ（岩崎通信社製、相関器SM-1310とフーリエ変換器SM-1320のシステム^(注)、及び、小野測器社製、CF-400）を主に用い、一部にはフィルタ形の分析器（電子測器社製、精密周波数分析器 3301 型）を用いて行っている。なお、前者のデジタル・スペクトル・アナライザによる分析に際しては、エリアジングの発生を防止するために、サンプリング・タイム τ に対応するナイキスト周波数 $f_N (=1/2\Delta\tau)$ 以上の周波数についてはこれをフィルタにより遮断している。また、SN比を改善し、分析結果の再現性を得るために $2^{13} \sim 2^{16}$ 回の平均化処理を行っている。さらに、任意周波数帯域についての分析の際には遮断特性の良いバンド・パス・フィルタを利用して所望の帯域のみを分析している。

（注）岩崎通信社製のスペクトル・アナライジング・システムは相関器SM-1310により、まず定常不規則信号 $P(t)$ の相関関数 $\phi_{pp}(\tau)$ を求め、SM-1320でフーリエ変換して周波数スペクトルを求めている。演算は機器内部で入力（アナログ量）をデジタル変換した後に行われ、リアルタイムで処理される。出力はアナログ量となる。すなわち、自己相関関数 $\phi_{pp}(\tau)$ はある時刻のデータの値 $P(t)$ の他の時刻の値 $P(t+\tau)$ への一般的依存性を表わし、次式のように定義される。

$$\phi_{pp}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cdot P(t+\tau) dt$$

自己相関関数はパワ・スペクトル $\Phi_{pp}(f)$ の逆フーリエ変換であるから

$$\phi_{pp}(\tau) = \int_0^T \Phi_{pp}(f) \exp(j2\pi f\tau) df$$

となり、次式のパワ・スペクトルが求められる。

$$\Phi_{pp}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{pp}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau$$

3. 6 結 言

本章は、研究を遂行するための実験装置及び実験方法について述べたものであって、次のような結論を与えている。

- (1) 溶接アーク音を測定するために設計、製作を行った簡易型無響室の構造及び性能を明らかにした。
- (2) 溶接電源及び溶接条件を明確にするとともに、溶接アーク音におよぼす出力波形の影響を調べるための方法を明らかにした。
- (3) 溶接アーク音の測定方法及び解析方法を明らかにした。

第4章 溶接アーク音の諸特性

4. 1 緒 言

各種アーク溶接法を対象として、溶接アーク音の諸特性を明確にするとともに、溶接アーク音を支配する諸因子の抽出を行い、その影響について述べている。

4. 2 被覆アーク溶接（交流及び直流）

溶接アーク音を支配する因子は多種多様と考えられるが、その発生を結果的に見ればアーク及びアーク近傍に圧力変動が生じたことを意味する。この圧力変動は電流、電圧の変化あるいは他の事象の変化に伴うアークの挙動に主に依拠すると考えられる。

被覆アーク溶接におけるアークの挙動は、

- (a) 電流の大きさと種類（交流、直流、極性）
- (b) 溶接棒の種類

に依存する。なお、(a)及び(b)は溶接棒の溶融速度を決定する主要な因子でもある⁹⁾。

ここでは、JIS D4303に該当する被覆剤が鉄粉ライムチタニヤ系の溶接棒（心線直径4mm）を用いて、溶接アーク音におよぼす(a)の影響について調べた。

実験はTable3-1に示すような条件で手動溶接によって行っているが、アーク長を極力一定に保つよう配慮した。すなわち、アーク長に相当する高さにピアノ線（直径0.32mmのもので、音波に対してはほとんど透明である）を被溶接材上に張り、運棒の際におけるアーク長の目安とした。なお、ここでいうアーク長とは被覆筒先端から被溶接材までの垂直距離であって見掛け上の距離である。

吉田ら¹⁰⁾によれば、JIS D4303に該当する溶接棒は溶滴の移行形態が主にSpray型であり、溶滴の棒端からの離脱はMIGアーク溶接のようにピンチ効果では生ぜず、被覆剤の化学物理的作用によって生じ、プラズマの高温気流によって移行する。また、被覆剤が鉄粉系の場合には溶滴が直径0.05～0.2mmと非常に微細化し、かつ安定に移行する溶接棒である。

4. 2. 1 音圧レベル

Fig.4-1に、交流で電流を100Aから225Aの範囲で変化させ、アーク長を4mm及び8mmとした場合についての音圧レベルの変化を示す。なお、使用溶接棒の適正電流範囲は、説明書によれば交流及び直流（S.P、R.P）の場合ともに下向き溶接で140Aから180Aである。

また、アーク長は一般に3mmから5mm程度が適正とされているので、本実験条件のアーク長4mmは適正範囲に、8mmは過大範囲に属している。

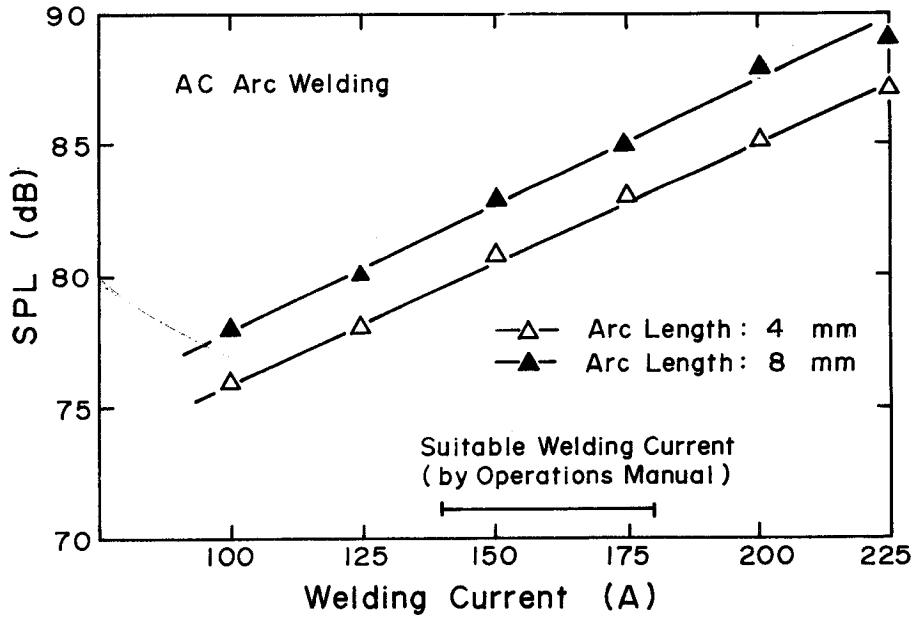


Fig. 4—1 Effects of arc length on sound pressure level in AC arc welding.

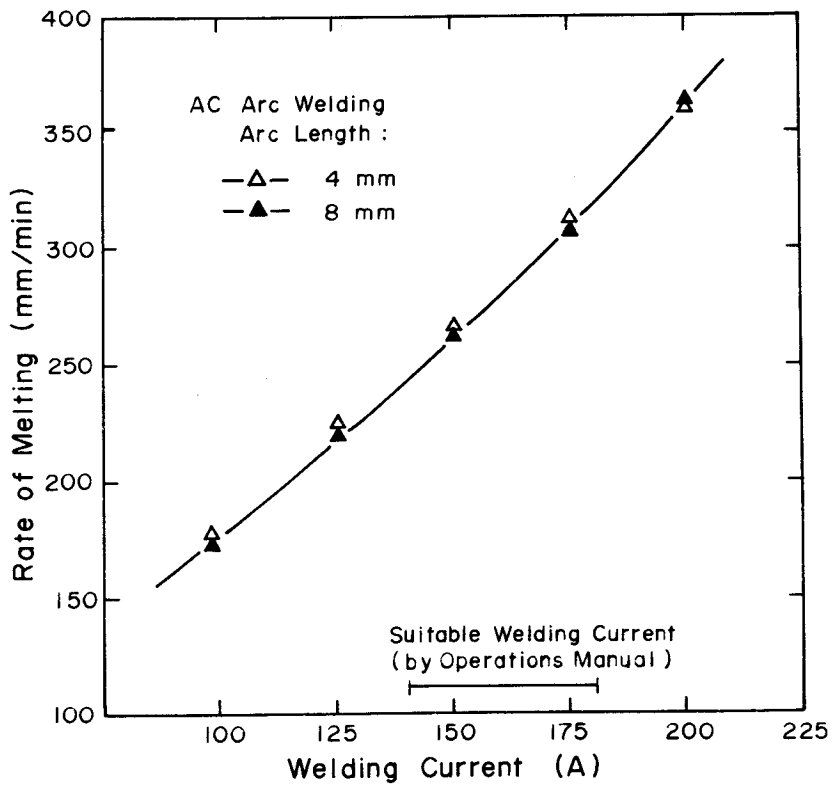


Fig. 4—2 Effects of arc length on rate of melting in AC arc welding.

図に見られるように、音圧レベルは電流の増加に伴って上昇し、両者の間には適正電流範囲内及び範囲外を含む広い範囲において直線関係が成立する。また、アーク長が長くなると上昇する傾向を示し、アーク長4 mmと8 mmの場合について音圧レベルを比較すると、後者は約2 dB大きな値を示している。

さきに述べたように、溶接アーク音はアークの挙動に依拠し、アークの挙動は溶接棒の溶融速度の影響を受けると予想される。すなわち、溶融速度が増大すると単位時間当りの溶滴の離脱、移行回数が相対的に多くなり、アークには微小な脈動が数多く生ずる。アークの脈動数が増大すれば、例えばその振幅が小さくとも音圧レベルは上昇するはずである（この理由については4.4.3項に詳述）。そこで、Fig.4-1のデータを得た実験から溶融速度と電流の関係を求めたところ、Fig.4-2に示すような結果が得られた。図に見られるように、溶融速度は広い範囲にわたって電流にほぼ比例して増大するが、アーク長（アーク電圧に相当）にはほとんど影響を受けない。なお、これらの結果は他の研究者の実験結果とも一致している。⁹⁾

Fig.4-1及びFig.4-2が示す実験的事実は、アーク長を長くした場合に溶融速度がほとんど変化しないにもかかわらず音圧レベルが約2 dBも上昇することに見られるように、溶接アーク音が溶融速度に必ずしも全面的には依存しないことを示すものである。

そこで、アーク長を長くした場合に音圧レベルが上昇する原因をアークの拡がりの増加と考え、アークの吹付面積を次のような方法で調べた。すなわち、水性塗料を薄く塗付した被溶接材にアークを発生させ、溶接棒を比較的速い速度で移動するとアークの吹付けによる熱的痕跡が生ずる。被溶接材上でのアークの拡がりをこの痕跡幅を直径とする円形と見なし、その面積を求めた。アークの拡がりを円形と見なすことは、溶接棒を固定してアークを発生させるとほぼ円形の痕跡が形成されることからあまり無理ではない。

Fig.4-3に、このような方法で求めたアーク長が4 mmの場合の吹付面積 $S_{(S)}$ と8 mmの場合の吹付面積 $S_{(L)}$ の変化を示す。吹付面積はアーク長の長い場合に大きくなり、また、電流の増加に伴って大きくなる傾向を示している。しかし、 $S_{(L)}$ と $S_{(S)}$ の比 $S_{(L)}/S_{(S)}$ を求めてみると、その値は図中に黒丸印で示すように1.5から1.6とほぼ一定である。

$S_{(L)}/S_{(S)}$ がほぼ一定であることは、アーク長が8 mmと4 mmの場合の音圧レベルの差がFig.4-1に示すように約2 dBとほぼ一定であることに関連があると考えられる。

音響理論では、同一の音圧レベル L_0 のエネルギーを放射する音源が n 個存在するとき、音圧レベルの和は、

$$L_n = L_0 + 10 \log_{10} n \quad \text{dB}$$

となり、 $10 \log_{10} n$ だけ音が大きくなる。

いま、非常に大胆な仮定ではあるが $S_{(l)} / S_{(s)}$ を音源の個数の比と仮定すると、 $S_{(l)} / S_{(s)} = 1.5 \sim 1.6$ は $1.8 \sim 2.0 \text{ dB}$ に相当し、この値はアーク長が 8 mm と 4 mm についての音圧レベルの差 2 dB にほぼ一致する。しかしこの仮定が妥当か否か、すなわち $S_{(l)} / S_{(s)}$ を音源の個数の比と見なし得るか否かについてはアーク現象との関連において必ずしも明確ではない。ただし、アーク長したがってアーク電圧の増大に伴ってアークへ供給される電力（溶接電流 I とアーク電圧 V の積に相当）は増大するから、アークへの供給電力の一部が音のエネルギーに変換すると考えるならばアーク長、吹付面積、溶接アーク音圧の三者間には一連の関係があるとの推論は成立する。

溶接アーク音の音圧が、アーク長の増加に伴って変化するという結果はパルス化電流波形を用いたTIGアーク溶接の場合についても同様に認められるが、このことについては4.4項において述べている。

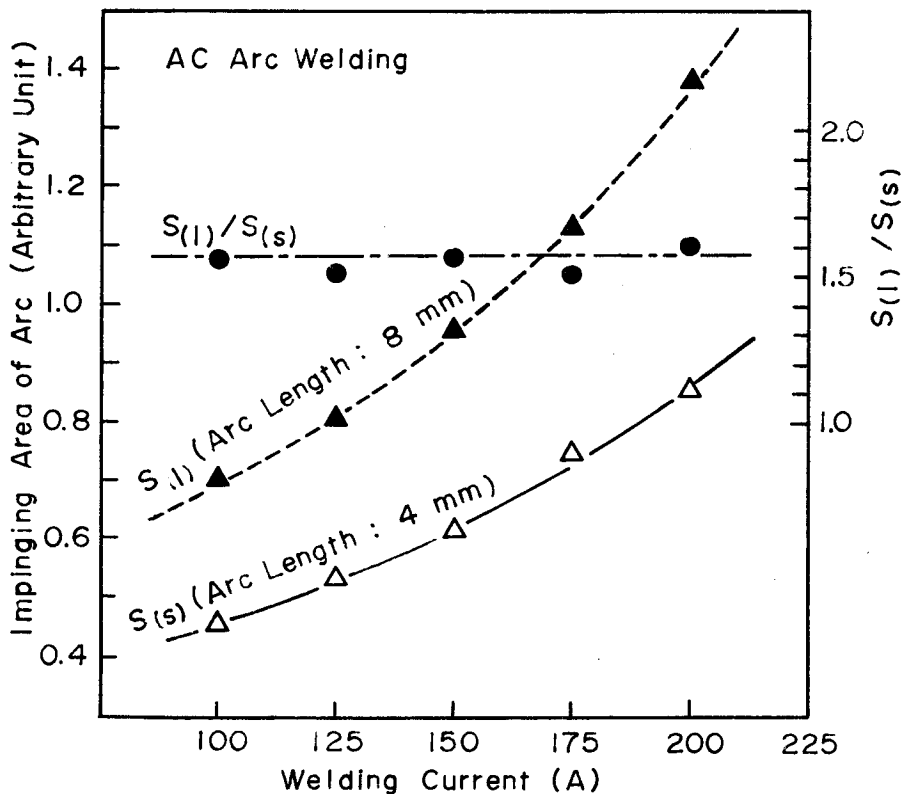


Fig. 4-3 Relation between impinging area of arc and welding current at the arc length of 4 mm and 8 mm.

Fig.4-4は、直流アークの場合についてアーク長を 4 mm 一定とし、音圧レベルにおよぼす極性の影響を調べた結果について示している。

音圧レベルは交流アークの場合と同様、電流の増加に伴って直線的に上昇する傾向を示

しているが、極性の違いにより特に高電流域において変化が生じている。すなわち、音圧レベルは図に見られるように直流逆極性（R.P）の場合の方が直流正極性（S.P）の場合に比較して大きくなる傾向がある。

このように、音圧レベルが逆極性の場合に大きくなるという結果は、溶接棒の溶融速度が正極性の場合にむしろ大きくなるというFig.4-5に示す実験結果とはちょうど逆である（Fig.4-5に示す溶融速度はFig.4-4のデータを得た実験において得られた）。この事実は、溶接アーク音の音圧レベルが溶融速度に必ずしも全面的には依存しないという交流アークの場合からの結論をさらに良く裏付けるものである。

したがって、逆極性の場合の音圧レベルが正極性の場合に比較して大きくなるという現象を溶融速度からは説明することはできない。しかし次のように、逆極性の場合にはアーク柱が陽極への電子の流入によって拮げられること⁹⁾、また、本実験で使用した溶接棒の被覆剤が、酸化チタン約30%、石灰などの塩基性物質約20%を含む柴田らの分類⁹⁾によれば第1種被覆剤であって、アーク長が一定であってもアーク電圧が逆極性の場合に高くなる溶接棒であることを考えれば、アークの挙動が極性によって変化するのは当然であり、逆極性の場合の音圧レベルが大きくなることをかなり良く説明することができる。

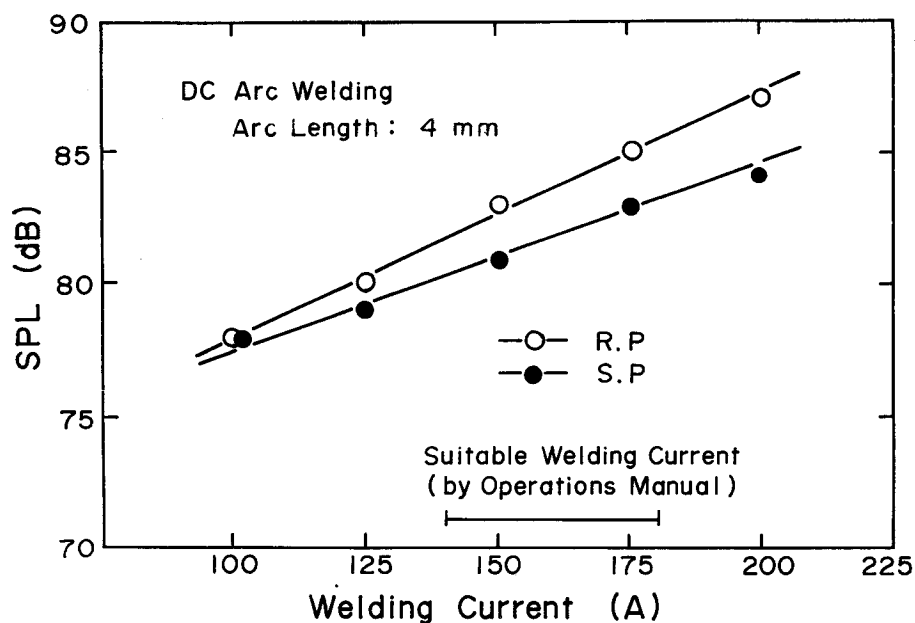


Fig. 4-4 Effects of polarity on sound pressure level in DC arc welding.

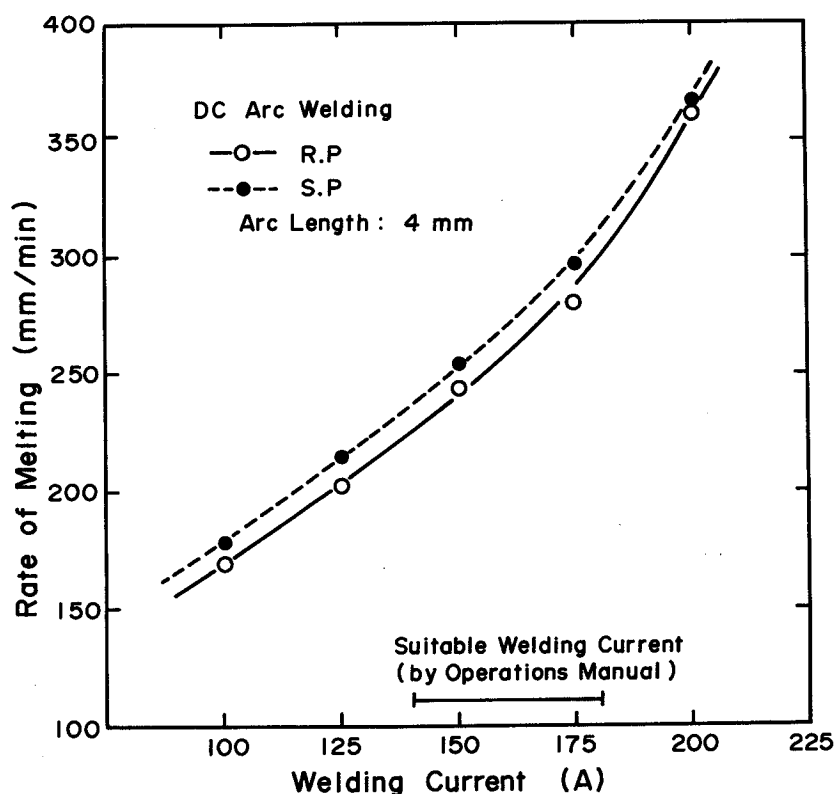


Fig. 4-5 Effects of polarity on rate of melting in DC arc welding.

4. 2. 2 周波数スペクトル

Fig.4-6に、交流で電流を150A、アーク長を4mmとし、10kHzまでの帯域を対象とした溶接アーク音の周波数スペクトル分析結果を示す。

溶接アーク音は非常に広帯域な周波数スペクトル成分を有し、巨視的には白色音的な性質を示しているが、低周波数帯域には一部に線スペクトル成分が認められる。そこで、500Hzまでの帯域を対象とした同一溶接条件における分析結果をFig.4-7に示す。図からこれらの線スペクトルは50、100、200、300及び400Hzの振動数を有するものであり、50Hzを除くとこれらは100Hzを基本とした2倍、3倍、4倍の倍振動であることが分かる。

溶接アーク音中にこのような線スペクトル成分が存在することは電流波形に起因すると考えるのが妥当である。そこで500HzまでのFig.4-7と同一の帯域について電流波形の周波数分析を行ったところ、Fig.4-8に示すような結果が得られた。なお、図中には電流波形の一部も示している。図に見られるように、溶接電流の主要な周波数成分は50Hzとその倍振動成分である150、250及び350Hzであって、Fig.4-7の溶接アーク音の線スペクトル

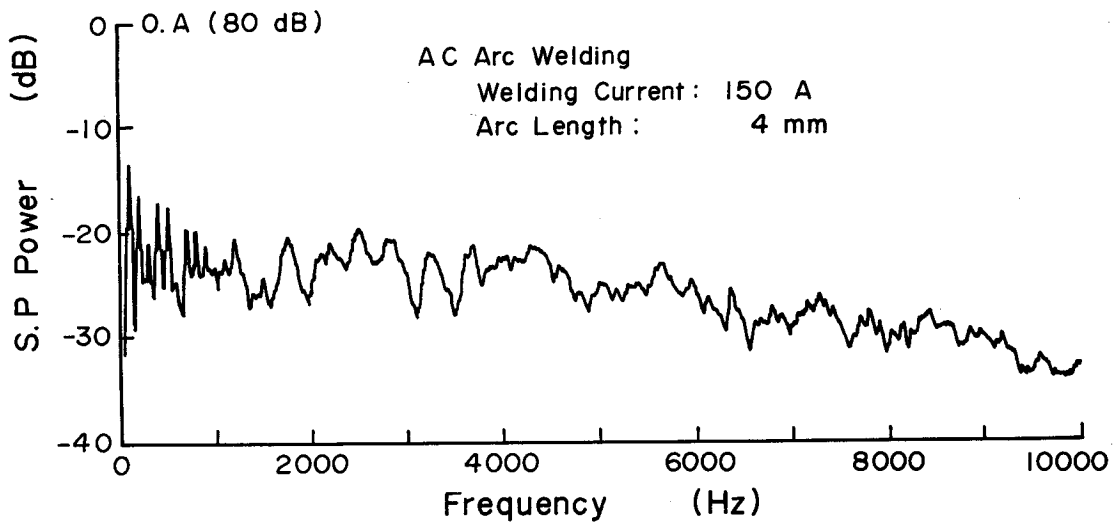


Fig. 4—6 Frequency spectrum of welding arc sound in AC arc welding with covered electrode.

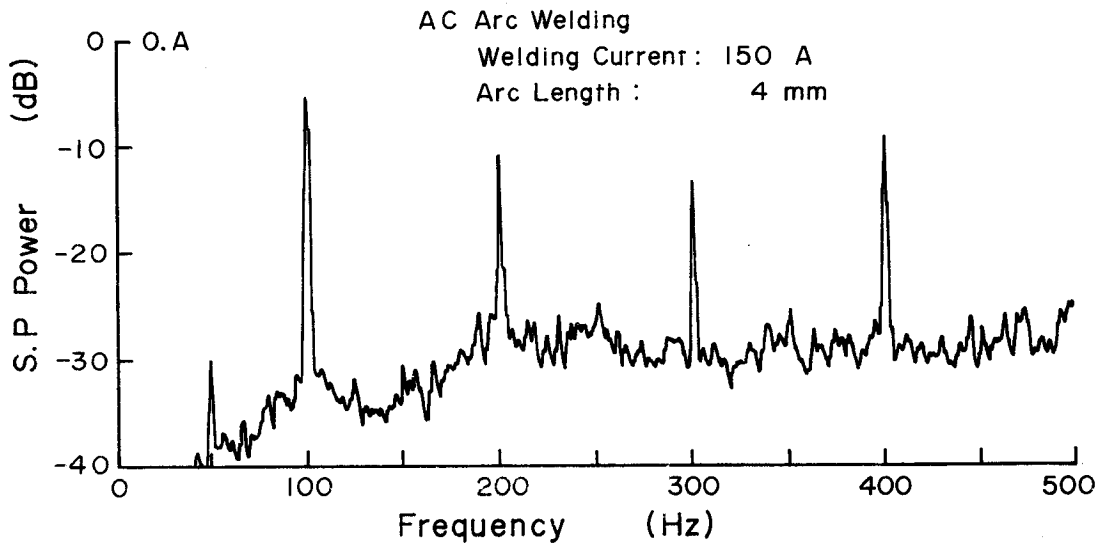


Fig. 4—7 Frequency spectrum of welding arc sound in AC arc welding with covered electrode.

ル成分とは異っている。(ただし、Fig.4-8において、50Hzの倍振動成分はアークの再点孤を容易にするため、電流波形にやや矩形波的な波形を採用した使用電源の特徴によるものである。)

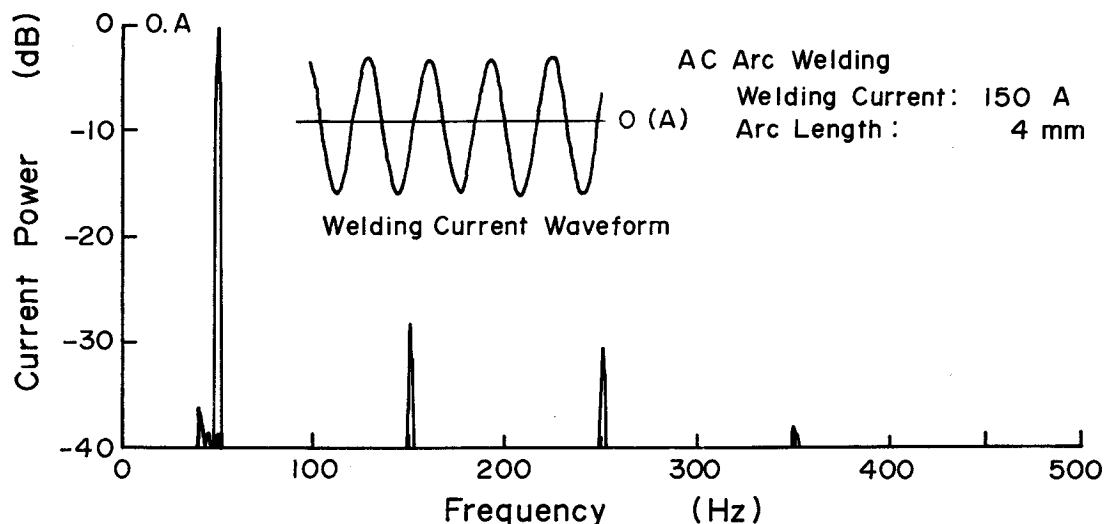


Fig. 4-8 Frequency spectrum of welding current in AC arc welding.

Fig.4-7及びFig.4-8において主要スペクトル成分の周波数が異なる理由は次のようであって、この相違は溶接アーク音中の線スペクトル成分（100Hz及びその倍振動成分）が電流波形に起因するアークの挙動に依存するという考えを否定するものではない。

すなわち、交流アークでは電流の半波ごとに電流の流れる方向が変転し、そのたびごとにアークは消滅して逆方向に再点孤しなければならない。つまり、アークは電流波形の一周中に2回消滅することになり（または2回点孤する）、電流波形の周期の2倍で脈動することになる（Fig.4-8附図参照、電流のゼロとなる点で消孤）。溶接アーク音の発生原因の一つはアークの脈動と考えられるから、交流アークの場合、電流波形の2倍の周波数を有する成分が溶接アーク音中に存在するのは当然である。

次に、直流逆極性（R.P）で電流を150A、アーク長を4mmとした場合の溶接アーク音の周波数スペクトル分析結果をFig.4-9（周波数帯域：10kHz）、Fig.4-10（周波数帯域：500Hz）に示す。

Fig.4-9に見られるように、直流アークの場合の周波数スペクトルは白色音的な連続スペクトルであり、交流アークの場合と類似している。しかし、そのプロファイルは交流アークの場合とは若干異なり、さらに白色音的である。

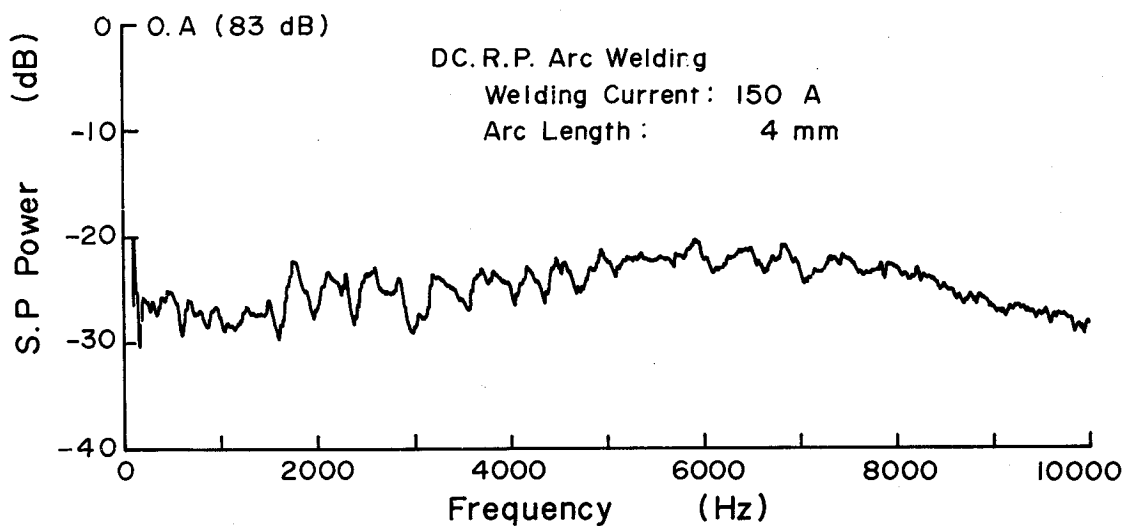


Fig. 4—9 Frequency spectrum of welding arc sound in DC (R.P) arc welding with covered electrode.

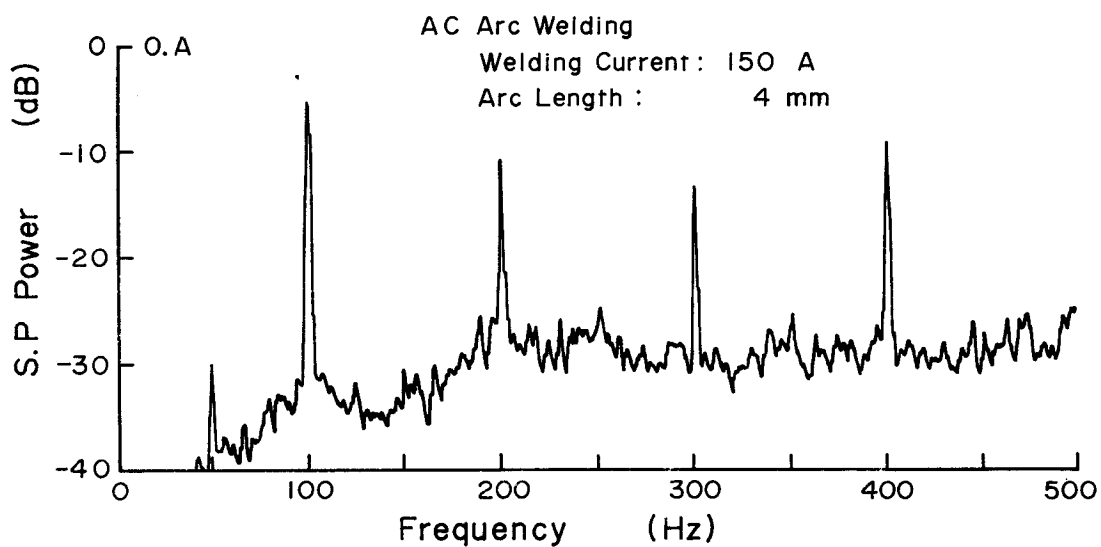


Fig. 4—10 Frequency spectrum of welding arc sound in DC (R.P) arc welding with covered electrode.

直流アークと交流アークの場合の相違は低周波数帯域を対象とした分析結果を比較すると、さらに明らかとなる。すなわち、Fig.4-10において50、100、200、300、400Hzなどの線スペクトルが交流アークの場合と同様に認められるが（Fig.4-7参照）、その成分の強さに差異があり、特に100Hzの倍振動成分の強さが交流アークの場合に比較して弱いのが特徴的である。

Fig.4-11に電流波形の周波数分析結果を示す。なお、図中には溶接電流波形の一部も示している。使用溶接電源は単相、シリコン整流形の一般市販のものであり、図に見られるように出力電流には電源周波数（50Hz）に起因するリップル成分（100Hz及びその高調波）を含んでいる。なお、本電源のリップル率（＝脈動分の実効値/直流分）は約34%である。

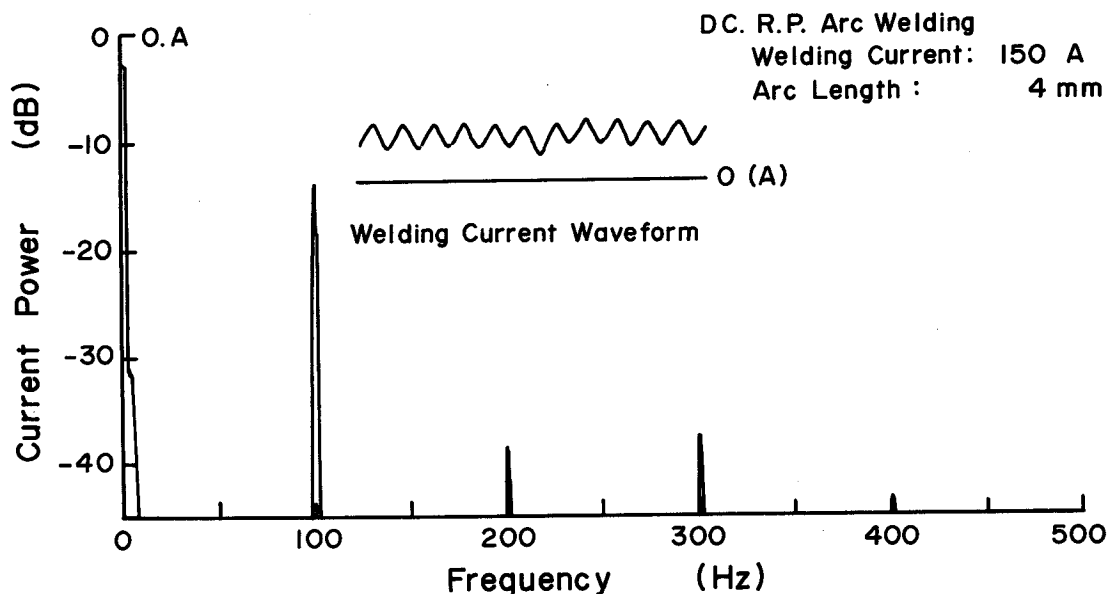


Fig. 4-11 Frequency spectrum of welding current in DC (R.P) arc welding.

Fig.4-10とFig.4-11を比較すると明らかなように、溶接アーク音中の線スペクトル成分はリップル成分と周波数が一致するものであり、溶接アーク音は電流波形に顕著な影響を受けることが分かる。なお、電流波形の影響については4.4項に詳述している。また、図は割愛するが溶接アーク音のスペクトル・プロファイルは、直流正極性の場合には逆極性の場合に類似している。

Fig.4-12は、溶接アーク音の周波数スペクトル中、交流アークの場合にも直流アークの場合にも最大ピークを有する100Hzのスペクトル成分のみについてこれを音圧比に換算し、溶接電流値との関係を示したものである。

図に見られるように、この成分の音圧比は電流の増加に伴って上昇し、また、アーク長、極性によって変化する。

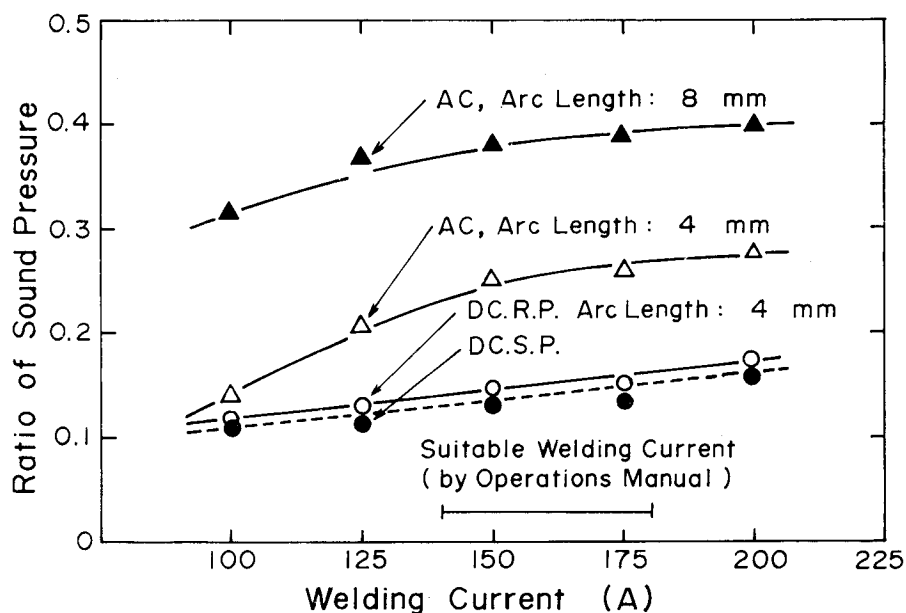


Fig. 4-12 Relation between ratio of sound pressure (component of 100Hz) and welding current.

アークを長く取ると、ポーというような音が強調されて聴えることは實際上良く経験するところであり、図はその事実を良く証明している。

4. 3 CO₂アーク溶接 (MIG、TIGアーク溶接を含む)

主に、CO₂アーク溶接を対象に (一部にMIG、TIGアーク溶接を含む)、溶接アーク音におよぼす諸因子の抽出を行い、その影響について明確にしている。

4. 3. 1 音圧波形

Fig.4-13に、溶接電流波形、アーク電圧波形及び溶接アーク音圧波形の代表的例を示す。(1)は溶滴の移行形態がDip型で、アークも安定な状態にあるCO₂アーク溶接の場合である。再点弧の際に大振幅な音波の発生が見られ、また、この波形は強い高調波成分を含んでいることが分かる。(2)は溶滴の移行が完全なスプレーの状態にあるMIGアーク溶接の場合であり、(3)はTIGアーク溶接の場合である (溶接電源は通常型のもの、新明和社製、SPJ-1)。(2)及び(3)の音圧波形には、溶接電源の出力に含まれるリップル周波数に対応する成分が非常に顕著に現れている。したがって、巨視的に見れば、(1)は広帯域なランダム信号、(2)はランダム信号と正弦波信号の和、(3)はほぼ単一の正弦波信号であるが、実際には4.3.3項に述べる周波数スペクトル分析結果から明らかになるように、(1)の波形にも電源のリップル周波数成分に対応する成分が含まれている。

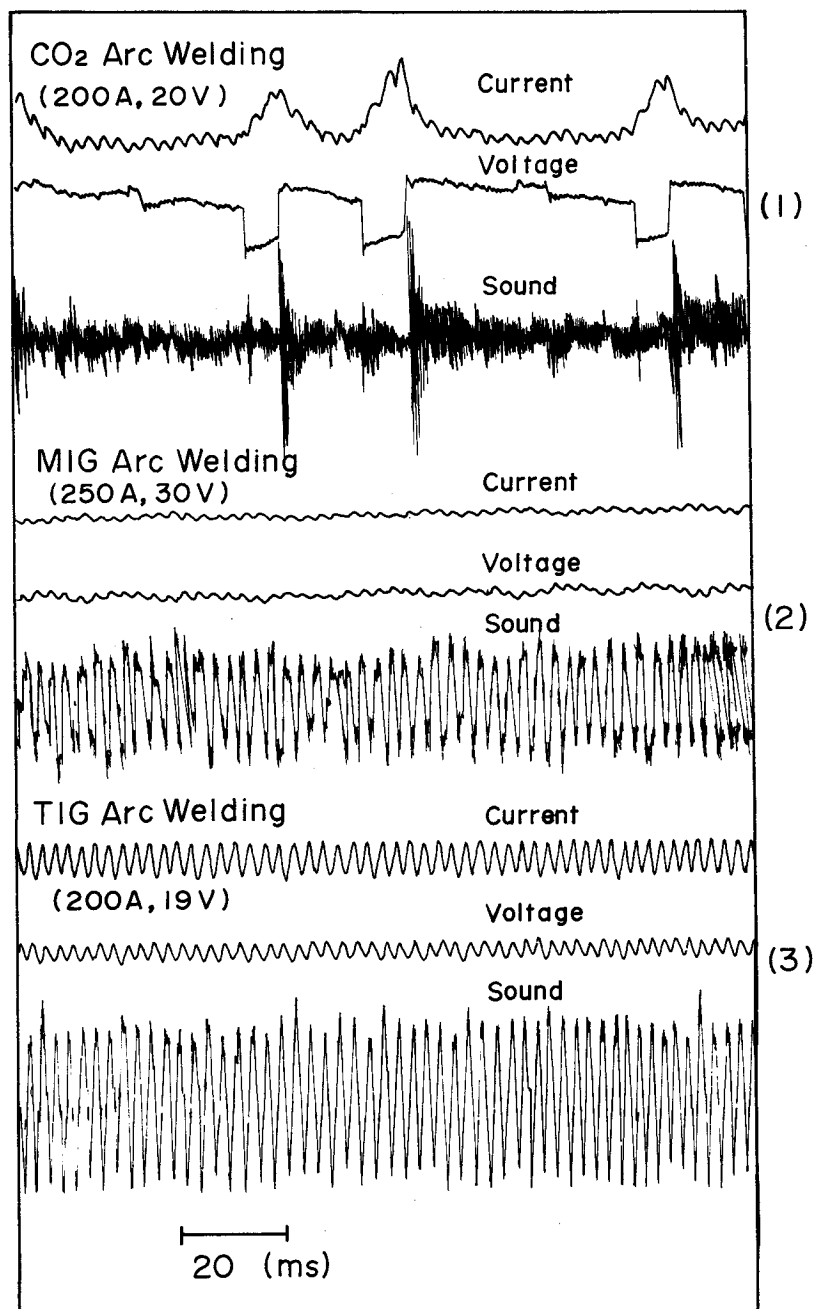


Fig. 4-13 Typical pattern of output signal of welding current, arc voltage and welding arc sound.
 (1) : CO₂ arc welding
 (2) : MIG arc welding
 (3) : TIG arc welding

Fig.4-14は、Fig.4-13(1)に示す短絡から再点弧に至る過程をより詳細に観察するために、時間軸を拡大したものであって、Dip型移行条件のもとにおける代表的音圧波形の例である。消弧時(a)及び再点弧時(b)に対応して発生する大振幅な瞬時音圧波形(A)及び(B)が観察される。このオシログラムの記録に同期させて消弧—再点弧の過程を高速度撮影した写真をFig.4-15に示す。Fig.4-14及びFig.4-15において、オシログラム上の信号と写真駒番号とは時

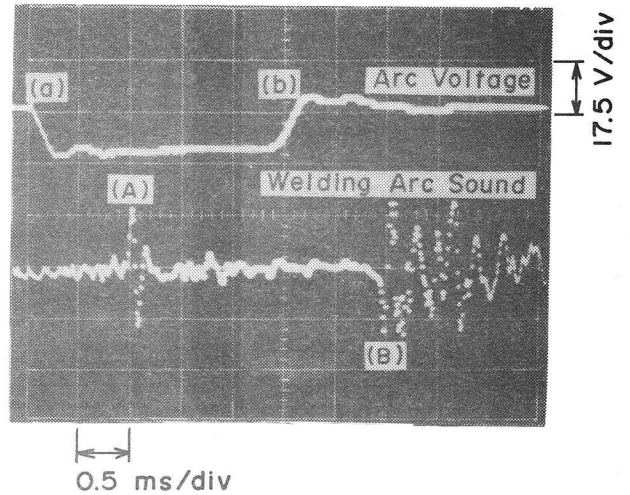


Fig. 4-14 Typical oscillogram of arc voltage and welding arc sound under short circuiting transfer in CO₂ arc welding.
 (a)-(A): Extinction
 (b)-(B): Reignition

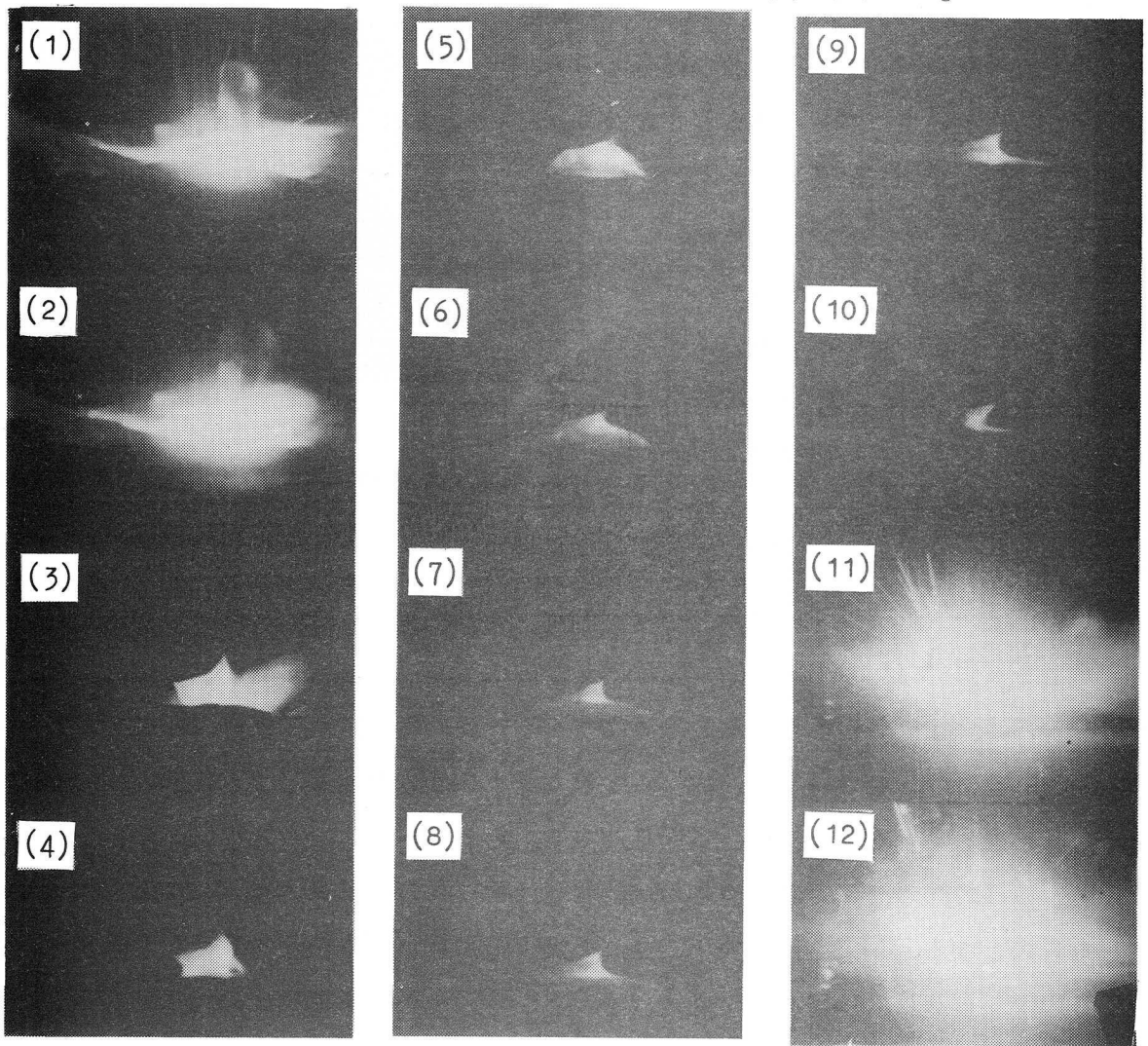


Fig. 4-15 High-speed motion photograph (1000 frames/s) under short circuiting transfer in CO₂ arc welding.
 (3): Extinction
 (11): Reignition

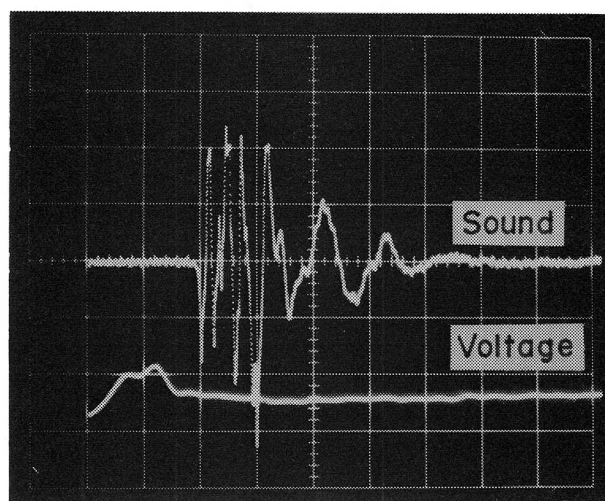
間軸上で対応し、(a)―(A)―(3)が消弧に、(b)―(B)―(11)が再点弧に相当する。

オシログラムと写真観察から、消弧時及び再点弧時における瞬時音圧波形(A)、(B)の発生原因は次のように考えられる。

まず一つは、ワイヤ端に生成した溶滴が溶融池に接触する瞬間の両者の微小部分(消弧の場合)、またはワイヤ端から溶滴が完全に離脱し、溶融池へ移行する直前の両者の微小部分(再点弧の場合)に大電流密度の電流が流れ、その微小部分が瞬時に溶断するいわゆるフューズ・アクションを原因とするものである(原因I)。

他の一つは、消弧及び点弧に伴うアーク近傍の媒質の膨張と圧縮とによるものであって、アーク自身の挙動を原因とするものである(原因II)。

原因Iのフューズ・アクションが大きな圧力の発生を伴うことは、溶接時におけるスパッタの飛散状況から見て理解できるところであり、また、衝撃的大電流により細線金属が溶断する場合などに金属粒子流の発生とともに、パチという衝撃音の聴えることから理解できる。参考に供するためFig.4-16に0.18mmφの銅細線を爆発的に溶断させた際に発生した音圧波形の例を示す。一方、原因IIについては、矩形波あるいは鋸歯状波などの立上り(または立下り)時間の短い電流波形をTIGアーク溶接などに用いた際に発生する音と同様であり、この場合に発生する溶接アーク音の音圧波形については、



0.625 ms/div

Fig. 4-16 Sound pressure waveform at explosion of wire.

4. 4項のFig.4-38を参考にされたい。

瞬時音圧波形(A)及び(B)の発生原因が上述の原因Iに相当するのか、原因IIに相当するのか、あるいは両者の複合したものに相当するのか、その区別はあまり単純ではない。

しかし、波形(A)については、他の多くのオシログラムを観察してもFig.4-14とほぼ類似の形状を呈していることから、原因IIが主であると見られる。もし原因Iが主であるとすると、消弧の際の溶滴と溶融池との接触状態は常に一定とは考え難いので波形は当然変化したものとなる。一方、波形(B)については、その形状が単純な減衰変化を示さず、また多くのオシログラムに固有差が見られることから、その発生原因は原因Iと原因IIの複合したものと考えられる。

Fig.4-14に示したオシログラムは、溶接電流200A、アーク電圧20Vの条件のもとで得

られたものであり、このときの溶接アーク音は音圧レベルで約 88 dB(実効音圧で約 0.5 Pa に相当)である。しかし、再点孤時に発生する瞬時音圧は非常に大きく、そのピーク値をオシログラムから求めると約 6 Pa 程度になる。

音圧が大きく、粒子速度などを微小量として取り扱うことのできない音波(これを微小振幅音波に対して有限振幅音波ということがある)はその伝播過程において波形がひずみ、音波の前面の傾きが急峻化し、ついには衝撃波面を生じて N 型波化して減衰する¹¹⁾。

再点孤時に発生する音波が N 型波に近い衝撃波と見られること、また、大気中でパルス放電、細線爆発を行うと衝撃波が発生することが知られている¹²⁾などの理由から、次に伝播速度について検討を行った。

Fig.4-17 は、音源(アーク発生点)・測音点間距離 r を 20 cm ~ 60 cm の範囲で変化させ、各点における音波の到達時間 T_i を測定し、 r と T_i の関係を示したものである。ここで、 T_i は Fig.4-17 の附図に示すように、オシログラム上においては再点孤点から大振幅の波

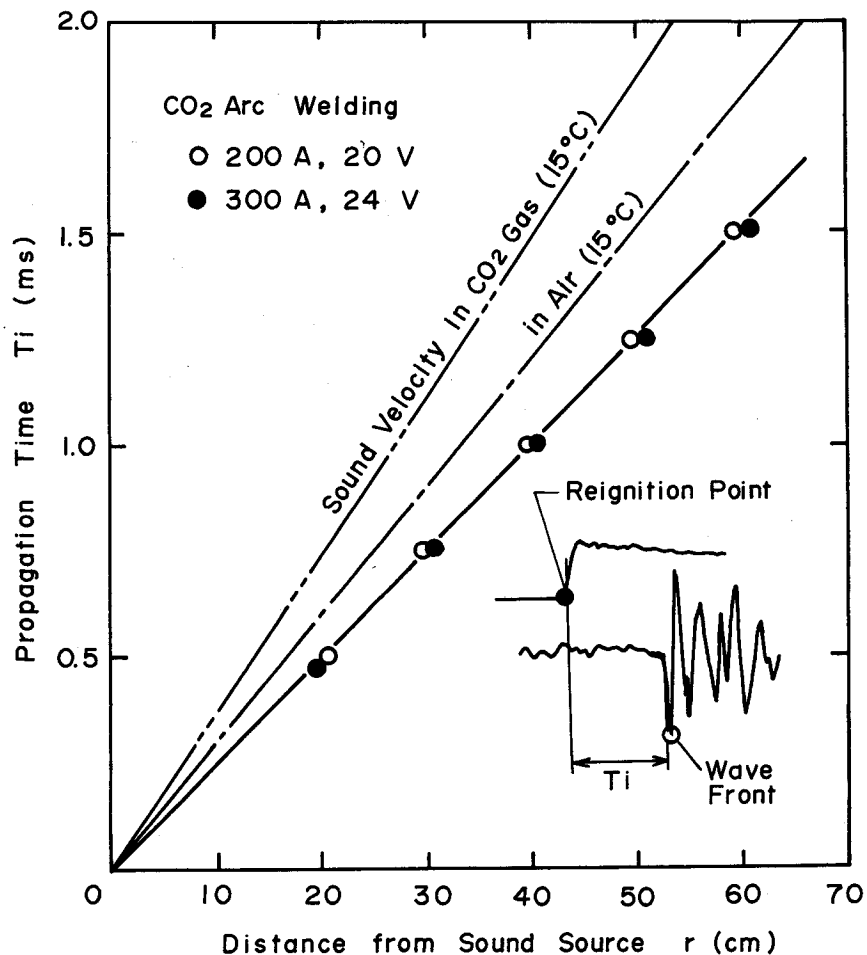


Fig. 4-17 Relation between distance from sound source (r) and propagation time (T_i).

形の最初の波面までの時間である。図の直線部の傾き ($\Delta r/\Delta T_i$) からその速度を求めると400m/sであり、約1.2マッハ(M)であることが示される。この値は衝撃波の伝播速度に相当する。また、Fig.4-16に示した細線爆発の場合について伝播速度を同様にして求めると約1.2Mである。なお、Fig.4-16は直径0.18mm、長さ10mmの銅細線をコンデンサ・エネルギー ($= (1/2)C \cdot V_c^2$ 、 C : コンデンサ容量、 V_c : コンデンサ放電開始電圧) 61 Jouleで爆発させた場合のものであり、細線から音波観測点までの距離は50cmである。また、ここでは放電開始電圧をトリガとしているので、音波到達時間は放電開始点から大振幅の音波の最初の波面が現れるまでの時間である。

再点弧時におけるこのような衝撃波の発生は、溶滴がワイヤ端から離脱し、溶融池へ移行する直前の微小部分にこれを溶断するのに必要な最小のエネルギーよりも過剰なエネルギーの供給されたことが原因と考えられる。

4. 3. 2 音圧レベル

4. 3. 2. 1 供給電力の影響

溶接アーク音の強さは、被覆アーク溶接の場合、前項で述べたように溶接電流及びアーク電圧の顕著な影響を受ける。他の溶接法の場合についても両者の影響を受けることが予想されるが、CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接においては溶滴の移行形態が電流、電圧条件によって変化するので、その影響はより複雑なものと考えられる。

アーク溶接における溶滴の移行形態は一般にDip型、Globular型及びSpray型の三つの型式に分類できる¹³⁾。

Dip型は、溶滴の移行が溶融池との接触によってのみなされるものであり、これが周期的に繰り返されることによって安定な溶滴移行の行われる型式である。

Globular型は、移行粒子が大粒となってワイヤ先端部から比較的遅い速度で溶融池へ移行する型式である。

Spray型は、移行粒子が細粒となってワイヤ先端部から高速で溶融池へ移行する型式である。Ar、Heなどの単原子不活性ガス雰囲気中で大電流を用いた場合に起り、CO₂ガス雰囲気中では起らない。

溶滴の移行形態は電流及び電圧条件によって決まり、CO₂アーク溶接ではDip型かGlobular型のいずれか、MIGアーク溶接ではDip型かGlobular型かSpray型のいずれかとなる。なお、被覆アーク溶接ではGlobular型かSpray型のいずれかとなる。

Fig.4-18及びFig.4-19は、溶滴の移行形態と電流・電圧条件の関係をCO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接についてそれぞれ図示したものである(溶接電源：日立製作所製、TS-

500、ワイヤ径：1.6mmφ)。なお、
 図中に示す斜線部は、アーク電圧
 が溶接電流値に対し過小、過大と
 なり、スタッピング現象やバーン
 ・バック現象を引きおこし、溶接
 が不可能となる境界域であることを
 意味する。

図に見られるように、溶滴の移
 行形態は溶接電流の増加に伴い、
 CO₂アーク溶接では Dip 型から
 Globular 型へ、MIGアーク溶接
 では Dip 型から Globular 型へ、さ
 らに Spray 型へと変化するが、こ
 の変化に対しアーク電圧のおよぼ
 す影響は大きい。

Fig.4-20は、CO₂アーク溶接及
 びMIGアーク溶接の場合について
 溶接電流を各々200A、300A、400
 A一定とし、アーク電圧のみをほ
 ぼ溶接可能範囲で種々変化させ、
 これをアークへの供給電力 $I \cdot V$
 で整理して溶接アーク音の音圧レ
 ベルとの関係を示したものである。

図に見られるように、CO₂アーク
 溶接及びMIGアーク溶接の場合
 ともに音圧レベルは供給電力の増
 加に伴って全体的に上昇する傾向
 を示す。しかし、電流一定の場合
 について見ると、音圧レベルは電
 流値に対しアーク電圧の過小範囲
 では上昇、適正範囲では減少、過
 大範囲では上昇の変化傾向を示す。
 このような変化は溶滴の移行形

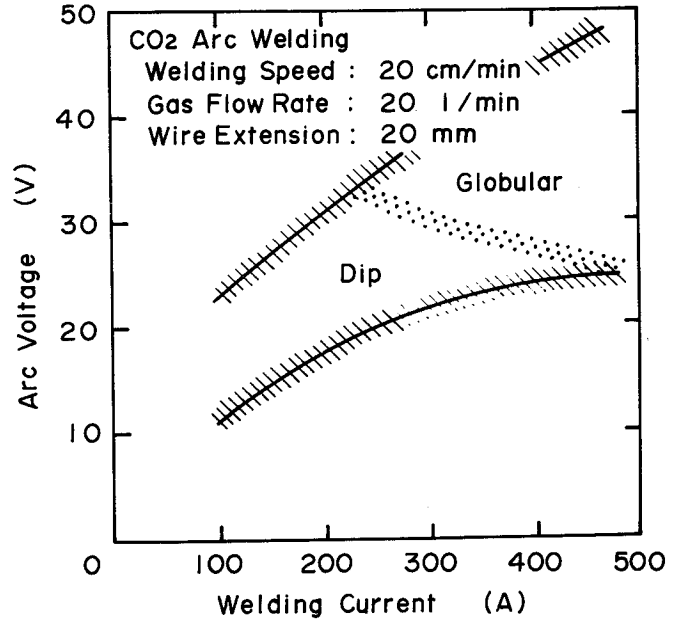


Fig. 4-18 Effects of welding current and arc voltage on droplet transfer in CO₂ arc welding.

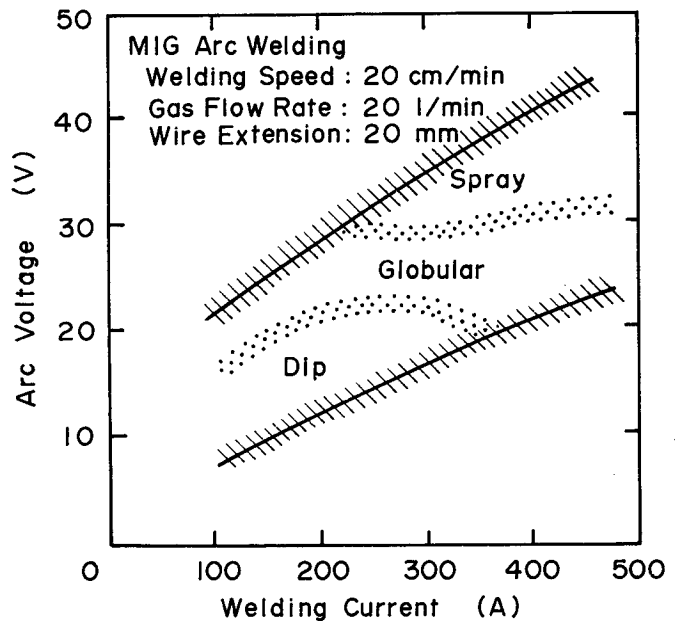


Fig. 4-19 Effects of welding current and arc voltage on droplet transfer in MIG arc welding.

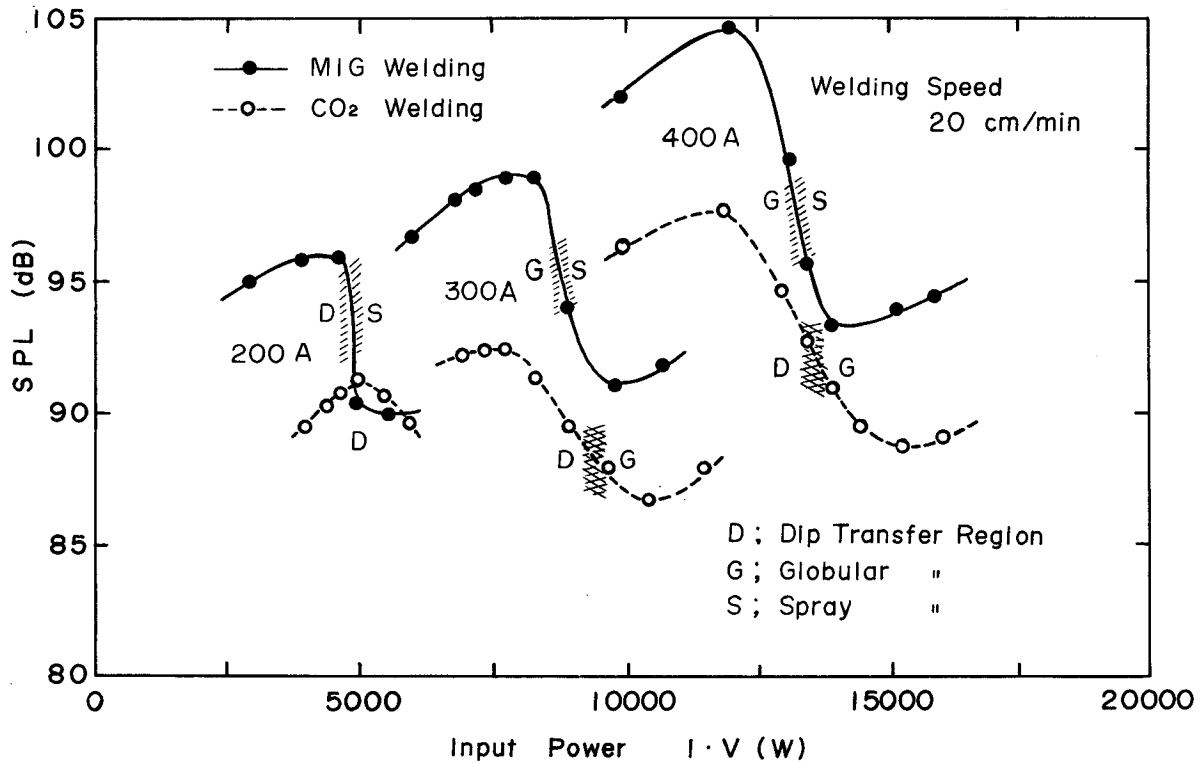


Fig. 4-20 Effects of input power (I·V) on sound pressure level in CO₂ and MIG arc welding.

態と強い関係があるようであり、溶滴がDip型からGlobular型へ、Globular型からSpray型へ変化するその遷移領域で特に著しい。

文献6)によれば、ワイヤ供給速度とアーク電圧とを調整することにより、音の判別で仕事に適した溶滴の移行状態を見出すことが可能であり、たいていの場合、最適ではないにしてもかなり良い状態は、溶滴の移行形態のvariety付近に存在し、CO₂ガス雰囲気中ではDip型からGlobular型へ移る付近にあると述べている。このことはFig.4-20に示す実験結果とも一致する。

溶接アーク音はアーク電圧の変化に対し極めて敏感なことから、次に溶接電流に対しアーク電圧を適正範囲内で変化させた場合についての音圧レベルの変化をFig.4-21に示す。

この場合の適正電圧範囲は、CO₂アーク溶接については3.4項に述べた基準に従い、MIGアーク溶接についても同じ基準に従っている。

図から、音圧レベルはアーク電圧の適正範囲内における変化(250A以下では3V、300A以上では4Vの変化)に対しても数dB変化することが認められる。この変化は聴覚によって識別することができるが、溶接アーク音と聴覚の関係については第6章に詳述する。

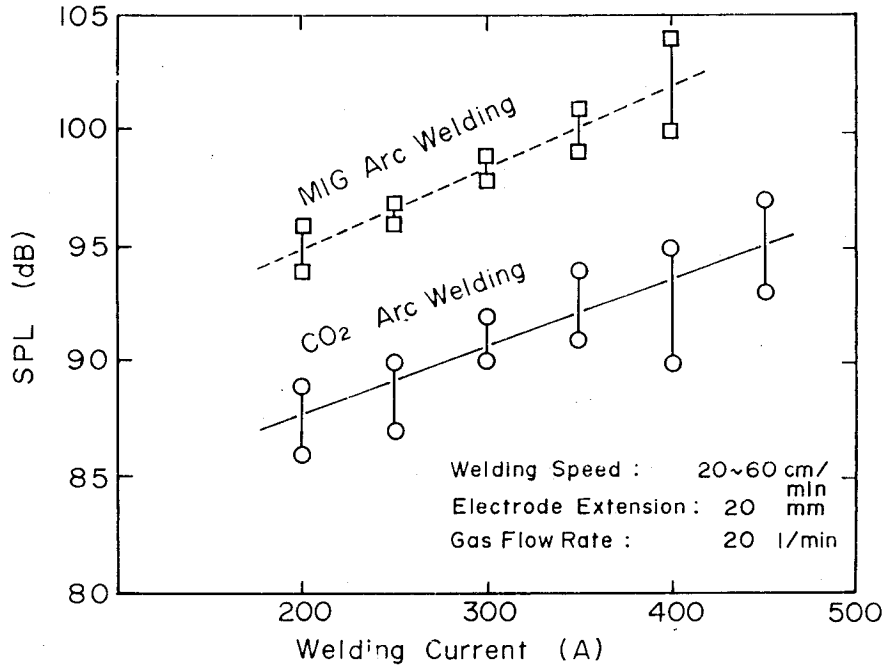


Fig. 4-21 Relation between sound pressure level and welding current at the range of suitable arc voltage.

4.3.2.2 溶接速度の影響

Fig.4-22は、溶接速度をパラメータとして音圧レベルと供給電力の関係をCO₂アーク溶接の場合について示している。音圧レベルは低電流域においては溶接速度の影響をあまり大きくは受けないが、高電流になるに従いその影響を受けるようになり、速度の小さ

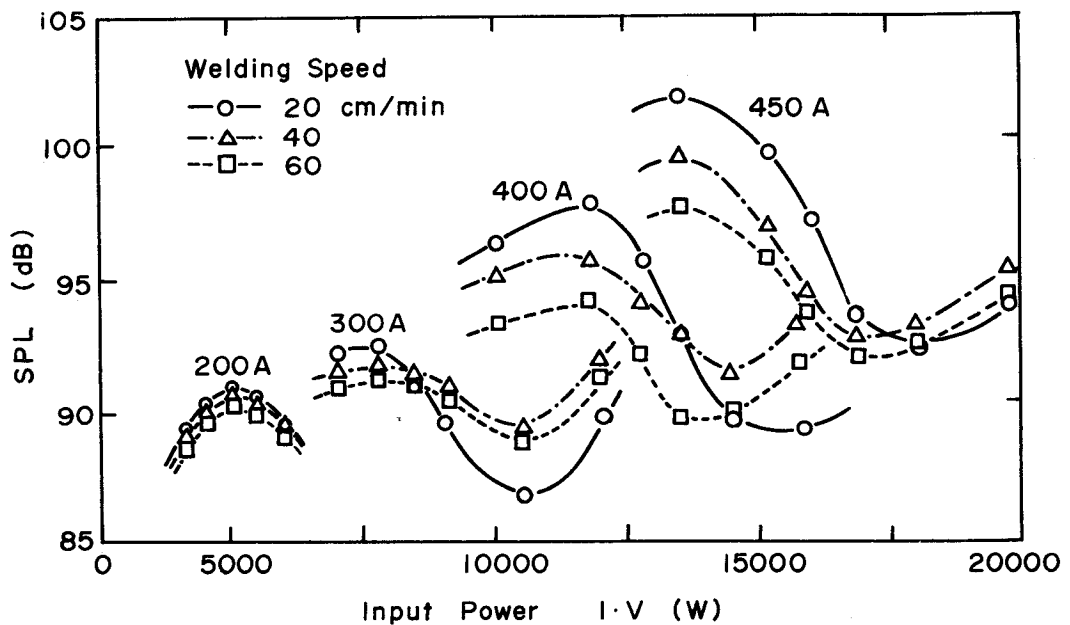


Fig. 4-22 Effects of welding speed on sound pressure level in CO₂ arc welding.

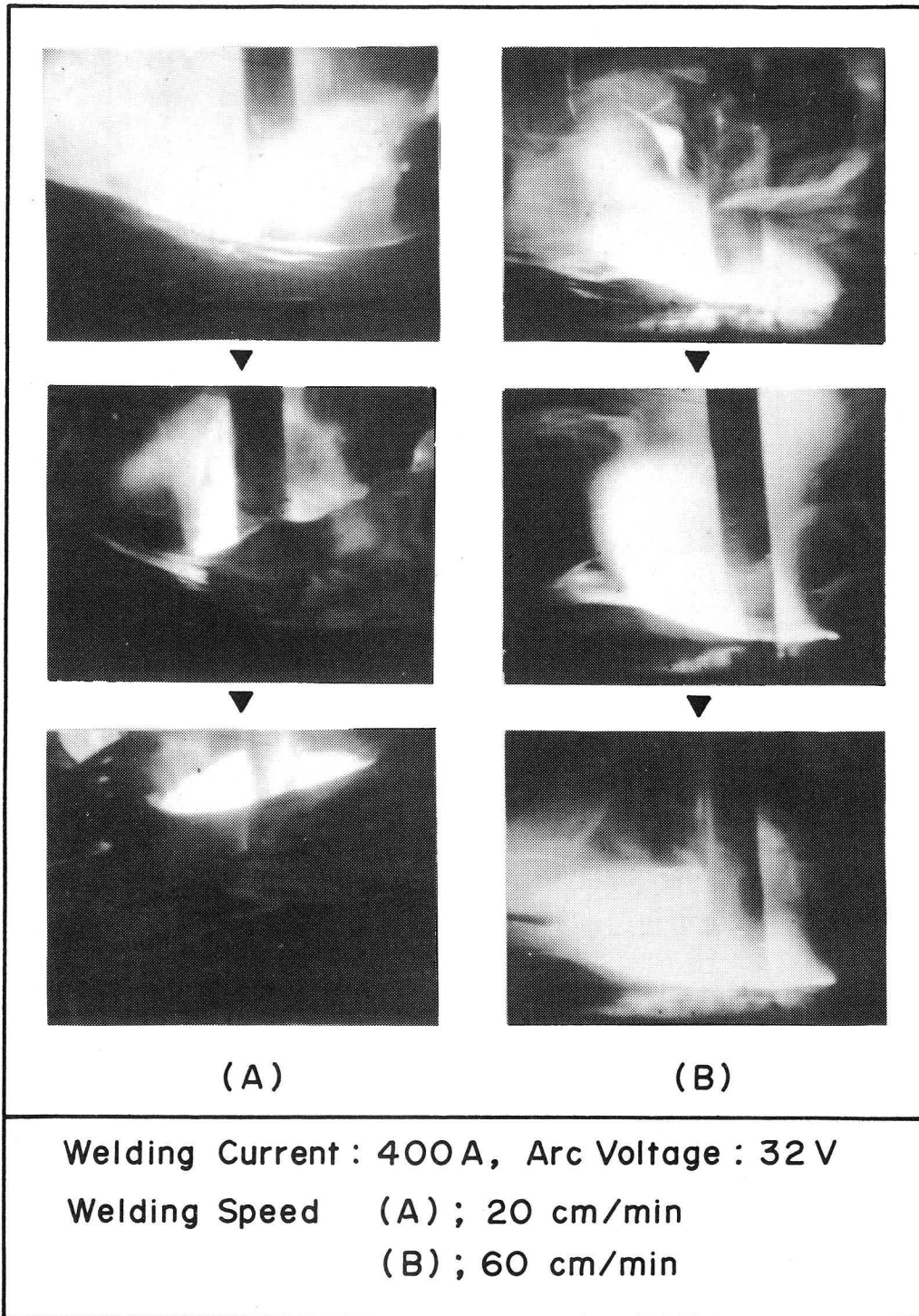


Fig. 4-23 Effects of welding speed on the behavior of arc and molten pool.

い場合に上昇する傾向を示す。この傾向は供給電力の値がある範囲以上になると一部に逆転を生ずるが、このことは溶接速度が大きくなると、アーク電圧の適正範囲が一般に狭くなるといわれていることと関連があると考えられる。

溶接速度による音圧レベルのこのような変化は、**Fig.4-23**に示す写真観察からアーク形状と溶融池形状の差異が主要な原因と考えられる。

Fig. 4-23に示す写真は400 A、32 Vの埋れアークの条件で、溶接速度のみを20cm/min (A)、60cm/min(B)とした場合について、毎秒3000 駒で撮影した高速度写真からその一部を取り出したものであるが、溶接速度の相違によるアークと溶融池の挙動の特徴点をそれぞれ良く示している。すなわち、アークの発生と溶滴の移行が、溶接速度の小さい(A)の場合には溶融池中央付近の深く窪んだ部分で行われ、溶接速度の大きい(B)の場合には溶融池前方端部で行われる。したがって、溶接アーク音の発生機構及びその放射形態が変化し、同時に音圧レベルも変化すると考えられる。

なお、(A)と同一条件のもとにおけるアークと溶融池の挙動に関する写真観察を5.5項で行っている。

4.3.2.3 シールドガス流量の影響

シールド効果の不良な場合、溶接アーク音に顕著な変化が生じ、その変化は聴覚によっても容易に識別できるものであることについてはすでに指摘した³⁾。**Fig.4-24**は音圧レベルにおよぼすガス流量 Q の影響について示したものである。 $Q=0$ 、すなわちシールドガスをまったく供給せずにアークを発生させた場合には CO_2 アーク溶接、MIGアーク溶接の場合ともに音圧レベルは溶接電流値の大小にかかわらずほぼ一定であるが、ガス流量の増加(シールド効果の改善)とともに順次上昇し(ただし、 CO_2 アーク溶接の場合には200A、20Vの条件ではやや減少)、 $Q=10\sim 15\text{ l/min}$ 付近からほぼ定常となる。なお、溶接アーク音の音圧レベルはシールドガスのノズルからの噴出音を含んだ値として測定されるが、2.3.3項で述べたようにガス噴出音の音圧レベルは $Q=20\text{ l/min}$ で約61dBであり、両者の間には最小の場合(CO_2 アーク溶接で200A、20V)でも27dBの差があるから、ガス噴出音の影響は無視できる(暗騒音が信号音におよぼす影響は、その差が10dBの場合に0.4dB、20dBの場合に0.04dBと極めて僅少なことから、一般には10dB以上の差があれば無視できるとされている)。

Fig.4-24においてガス供給量の影響が最も顕著なMIGアーク溶接(400A、32V)についてのアーク形状の観察例を**Fig.4-25**に示す。

図に見られるように、20 l/minのArガスを供給した条件(a)とガスをまったく供給しない条件(b)とではアークの形状に極めて特徴的な相違のあることが分かる。

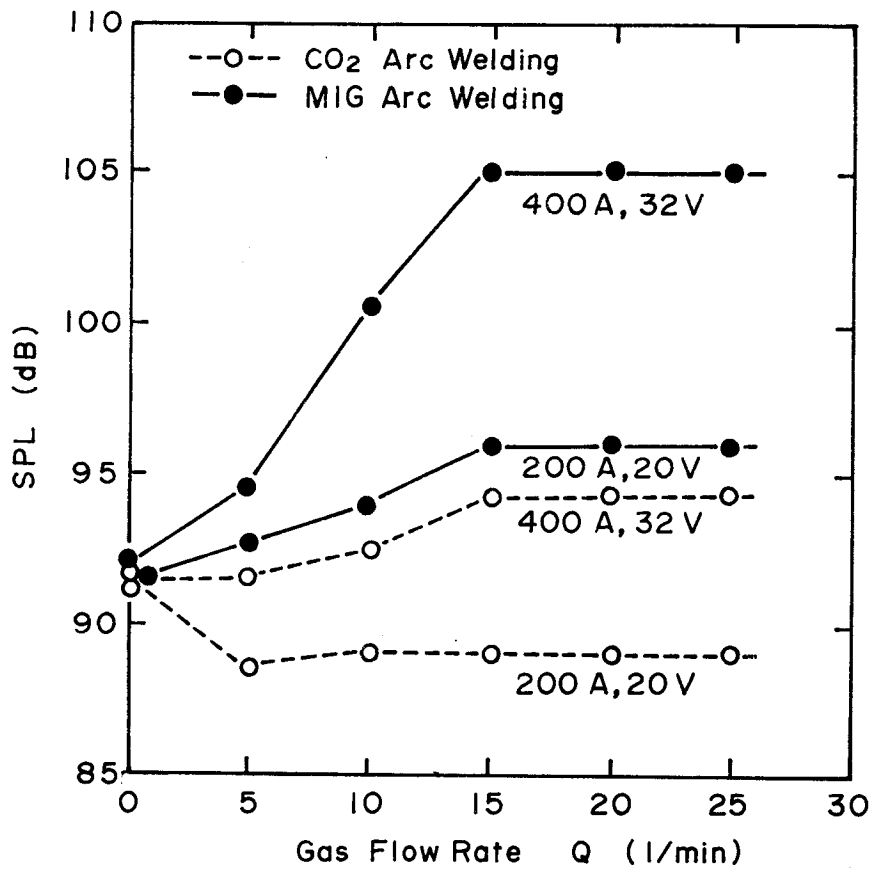


Fig. 4—24 Effects of gas flow rate on sound pressure level in CO₂ arc welding and MIG arc welding.

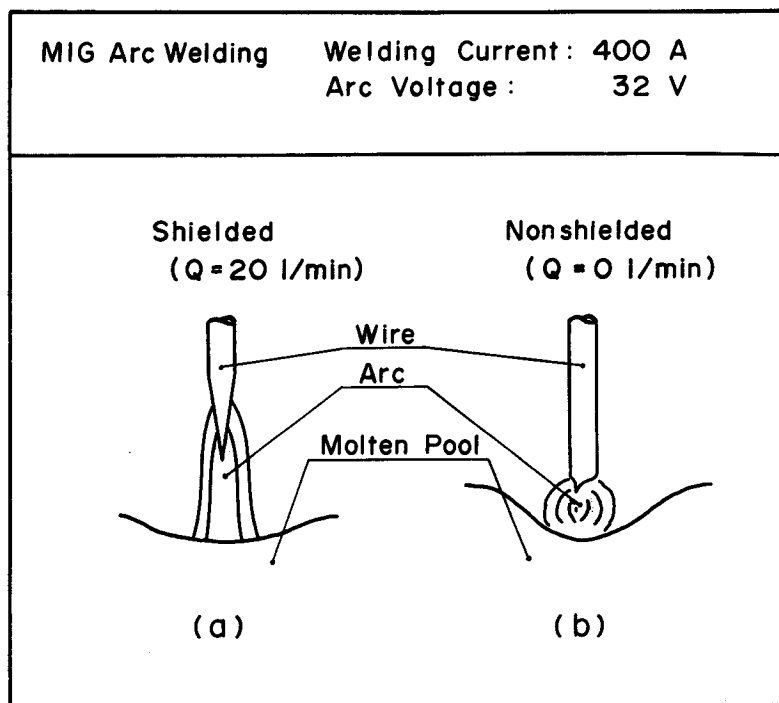


Fig. 4—25 Difference of arc shape of MIG arc welding at different shielding condition.

(a)では、アーク長の比較的長いアークがいわゆる釣鐘状の形状を呈して発生し、溶滴は完全なSpray移行である。また、この場合にはワイヤ先端が鋭くとがった円錐状の形状を呈している。これに対し(b)では、アーク長の短いアークが全体的に丸味を帯びて発生し、溶滴は一部に短い短絡を含むが、Globular移行である。

音圧レベルが(a)の場合に大きくなる理由は、アーク長が長いためにアークの吹付面積が広がること、及び溶滴の微細化のためにアークの脈動数が増大することが主要なものであると考えられる。すなわち、音圧は4.4.3項に述べるように音圧振幅と角振動数の2乗とに比例するから、アークの吹付面積が広がり、脈動数が増大すれば音圧レベルは大きくなるはずである。なお、聴覚によれば、(a)の条件ではシーというような高周波音が強調されて聴え、(b)の条件ではポーというような低周波音が強調されて聴える。

Fig.4-26に、Fig.4-24のCO₂アーク溶接と同一条件の溶接部のX線写真を示す。X線

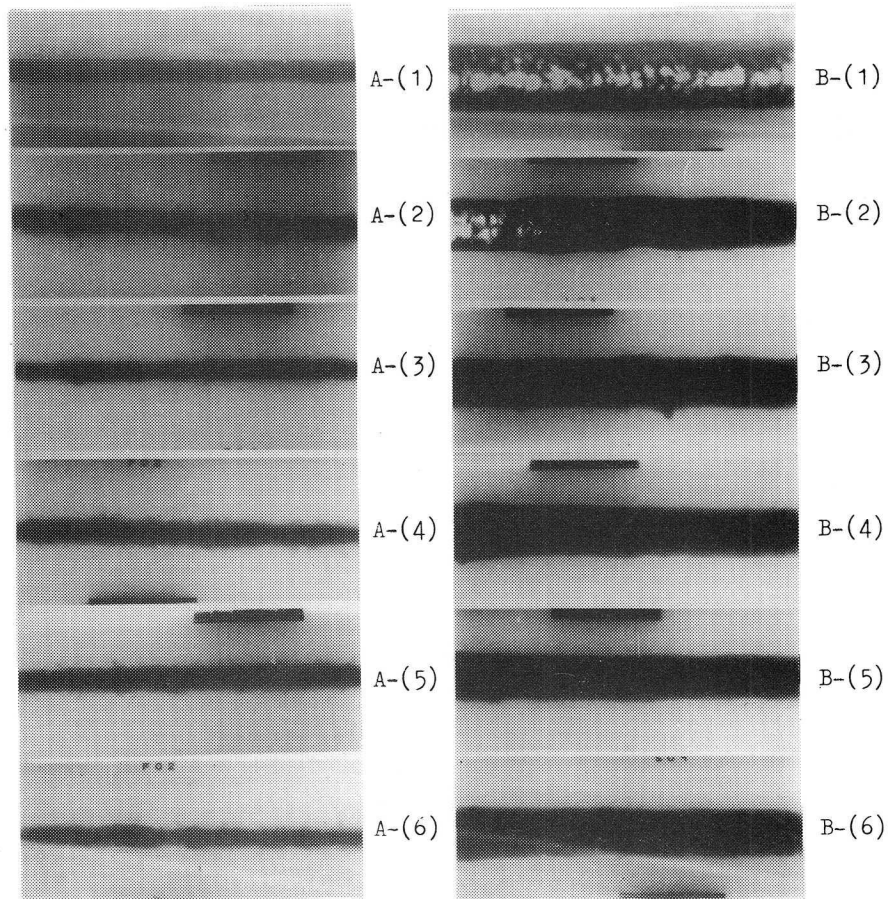


Fig. 4-26 Welding results by means of gas flow rate.

(CO₂ arc welding; A:200A, 20V, B:400A, 32V)

X-ray photo. (1) Q = 0 l/min

(2) Q = 5 l/min

(3) Q = 10 l/min

(4) Q = 15 l/min

(5) Q = 20 l/min

(6) Q = 25 l/min

写真からはA(200A、20V)及びB(400A、32V)の場合ともにシールド効果が $Q=10\sim 15\text{ l/min}$ 付近から良好であると判断される。このガス流量の値はFig.4-24において音圧レベルが定常となる流量にほぼ一致する。したがって、溶接進行中にシールドガスの供給が停止したような場合には音圧レベルの変化からその事態を察知することができる。このことについては第7章でさらに詳しく述べる。

4.3.2.4 ワイヤ突出し長の影響

音圧レベルにおよぼすワイヤ突出し長 H の影響をFig.4-27に示す。ワイヤ突出し長を長くすることは抵抗熱によるワイヤの予熱効果を助長し、溶滴のワイヤからの離脱を容易にする作用がある。しかし、音圧レベルはワイヤ突出し長の増加に伴って上昇する傾向を示し、過大な条件では変動幅が大きく、不規則となる。このような条件ではアークは揺動し、ビードは蛇行し、またブロー・ホールが発生する。これらの現象はワイヤの突出し長の増加に伴ってワイヤ端部の自由度が大きくなり、また、シールド効果が不良となるためである。通常の場合、ワイヤ突出し長は $15\sim 20\text{ mm}$ 程度に設定されるが、この範囲での音圧レベルの変動幅は小さい。

アークの揺動、ビードの蛇行及びブロー・ホールは大電流条件において発生しやすい傾向を示すが、これらはFig.4-28に示すように200A程度の電流条件でも発生する。

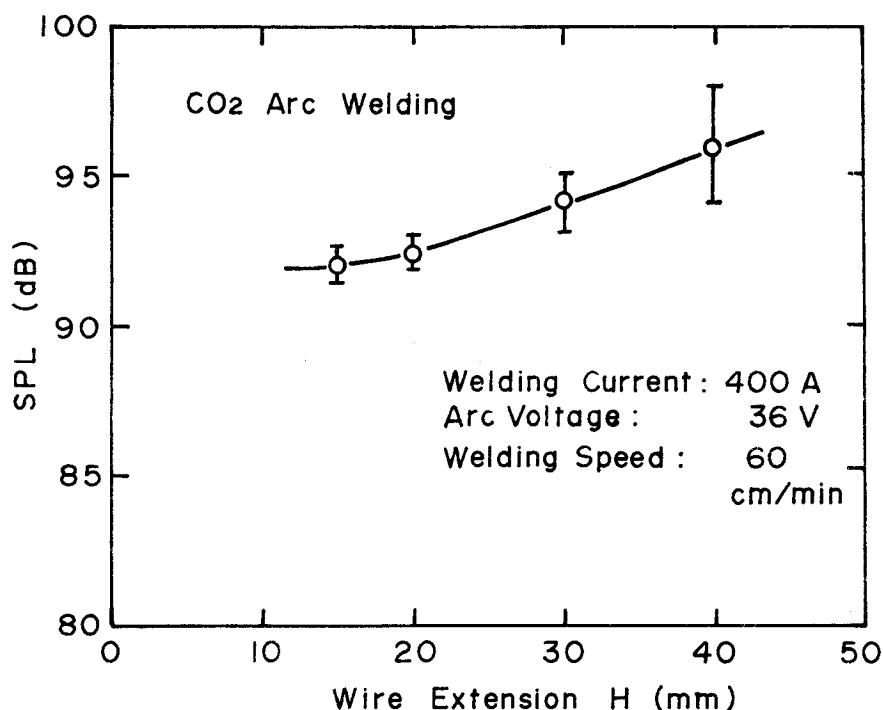


Fig. 4-27 Effects of wire extension on sound pressure level in CO₂ arc welding.

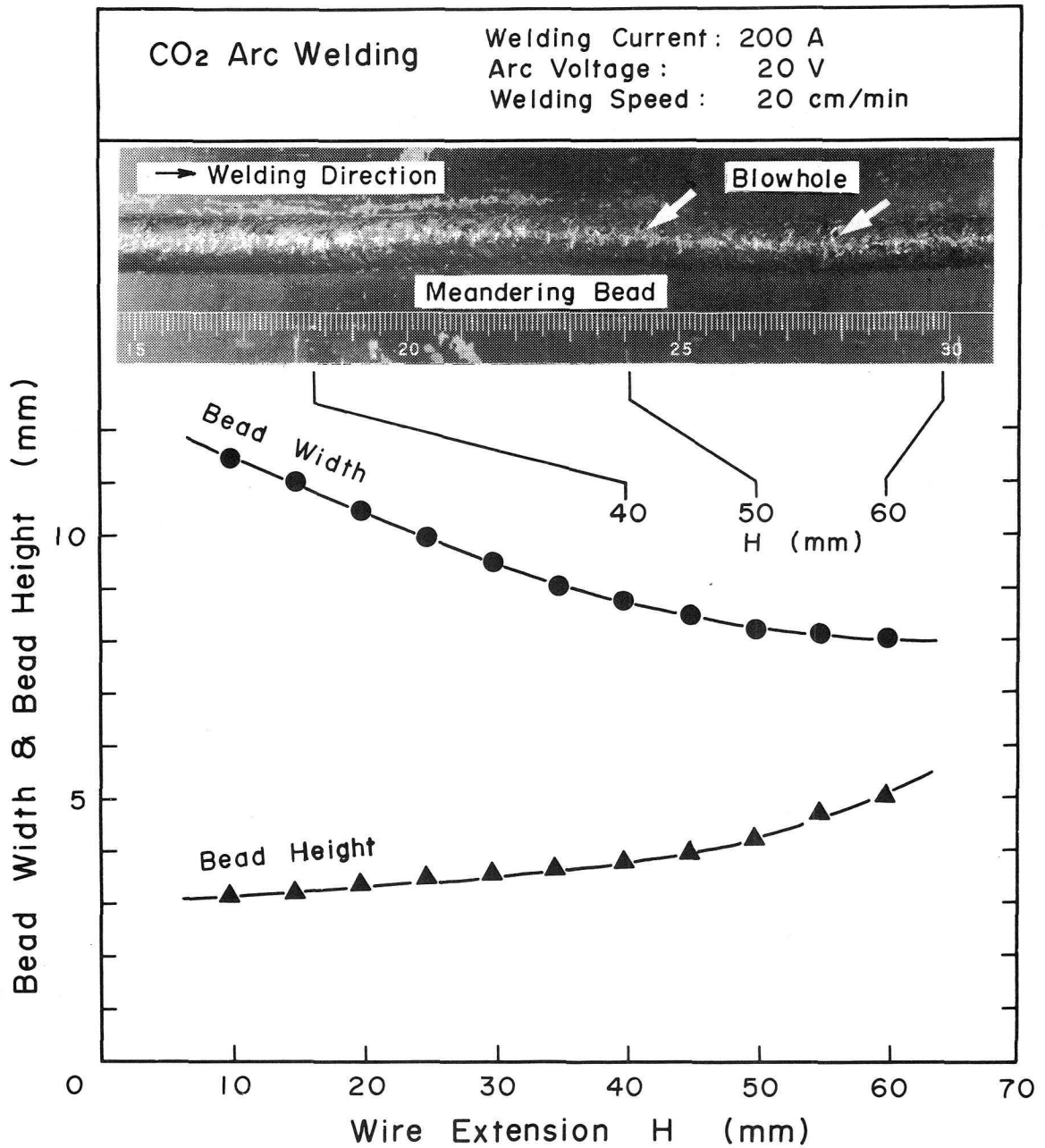


Fig. 4-28 Influences of the wire extension on the weld bead.

図は、溶接の進行に伴ってワイヤ突出し長が徐々に長くなるように被溶接材を傾斜させたいわゆる斜面溶接法 (Slope Welding) で得られたビードについて、ビード外観写真 (H = 35 ~ 60 mm の範囲に相当) と、ビード幅及び余盛り高さの測定結果を示した例である。この例では、H = 40 mm 付近からビードの蛇行が見られ、H = 50 mm 付近からブロー・ホールの発生が見られる。また、ワイヤ突出し長の増加に伴ってビードは幅が狭く、余盛り高さが高くなり、丸味を帯びた形状となることがビード幅と余盛り高さの測定結果から分かる。

4. 3. 3 周波数スペクトル

溶接アーク音の周波数スペクトル分析結果の例をFig.4-29(CO₂アーク溶接)、Fig.4-30(MIGアーク溶接)及びFig.4-31(TIGアーク溶接、ただし通常型の電源(新明和社製、SPJ-1)使用)に示す。

各図に見られるように、溶接アーク音の周波数スペクトルのプロファイルは、溶接法はもとより、溶接条件の相違により変化するが、巨視的に見れば、CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接の場合には被覆アーク溶接の場合と同様に白色音的な連続スペクトルであり、TIGアーク溶接の場合には純音に近い線スペクトルである。図中に f_R と記すスペクトル成分は電源周波数(50/60Hz)に起因するリップル成分に対応するものであり、その周波数は3相全波整流の直流溶接電源においては300Hz(電源周波数50Hzの場合)または360Hz(電源周波数60Hzの場合)である。

各周波数のバンド・レベルを L_1 、 L_2 …… L_n とすると、周波数分析の結果をもとに計算で求められる音圧のトータル・レベル L_T (オーバ・オール値にほぼ相当)は、

$$L_T = 10 \log_{10} (\log_{10}^{-1} L_1 / 10 + \log_{10}^{-1} L_2 / 10 + \dots + \log_{10}^{-1} L_n / 10) \quad \text{dB}$$

のように与えられる。

したがって、溶接アーク音の音圧レベルは、TIGアーク溶接では f_R 成分そのものによってほぼ決定されることになり、CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接では f_R 成分の他に高周波領域成分の影響を受けることになる。この f_R 成分はFig.4-12に示した被覆アーク溶接の場合と同様、溶接電流とアーク電圧の増加に伴って増大する傾向を示し、また、CO₂ガスにArガスを添加したような場合にはArガスの増加に伴って増大する傾向を示す。

なお、比較的狭い周波数帯域を対象に分析を行うと、 f_R の高次高調波成分($2f_R$ 、 $3f_R$ ……)の存在が明らかになるが、これらについては次項(TIGアーク溶接の場合)及び第5章(CO₂アーク溶接の場合)に述べている。

溶接アーク音は一般に広帯域な周波数スペクトル成分を有するため、周波数領域における特徴抽出を行う際にいかなる帯域に着目するかは非常に重要な問題になる。

そこで、200Hzまでの帯域及び1kHzから5kHzまでの帯域を対象に行った2、3の分析例を次に示す。なお、前者の帯域はDip型移行条件の場合には1秒間当りの短絡回数を、Globular型移行条件の場合にはワイヤからの溶滴の離脱回数を含むことから設定されたものであり(短絡及び溶滴の離脱回数は約20~80Hzの範囲である¹³⁾)、後者の帯域は第6章で詳述するように、人間の聴覚敏感帯域(1kHz~4kHz)を含むことから設定されたものである。

Fig.4-32は、Dip型とGlobular型移行条件のCO₂アーク溶接について200Hzまでの帯

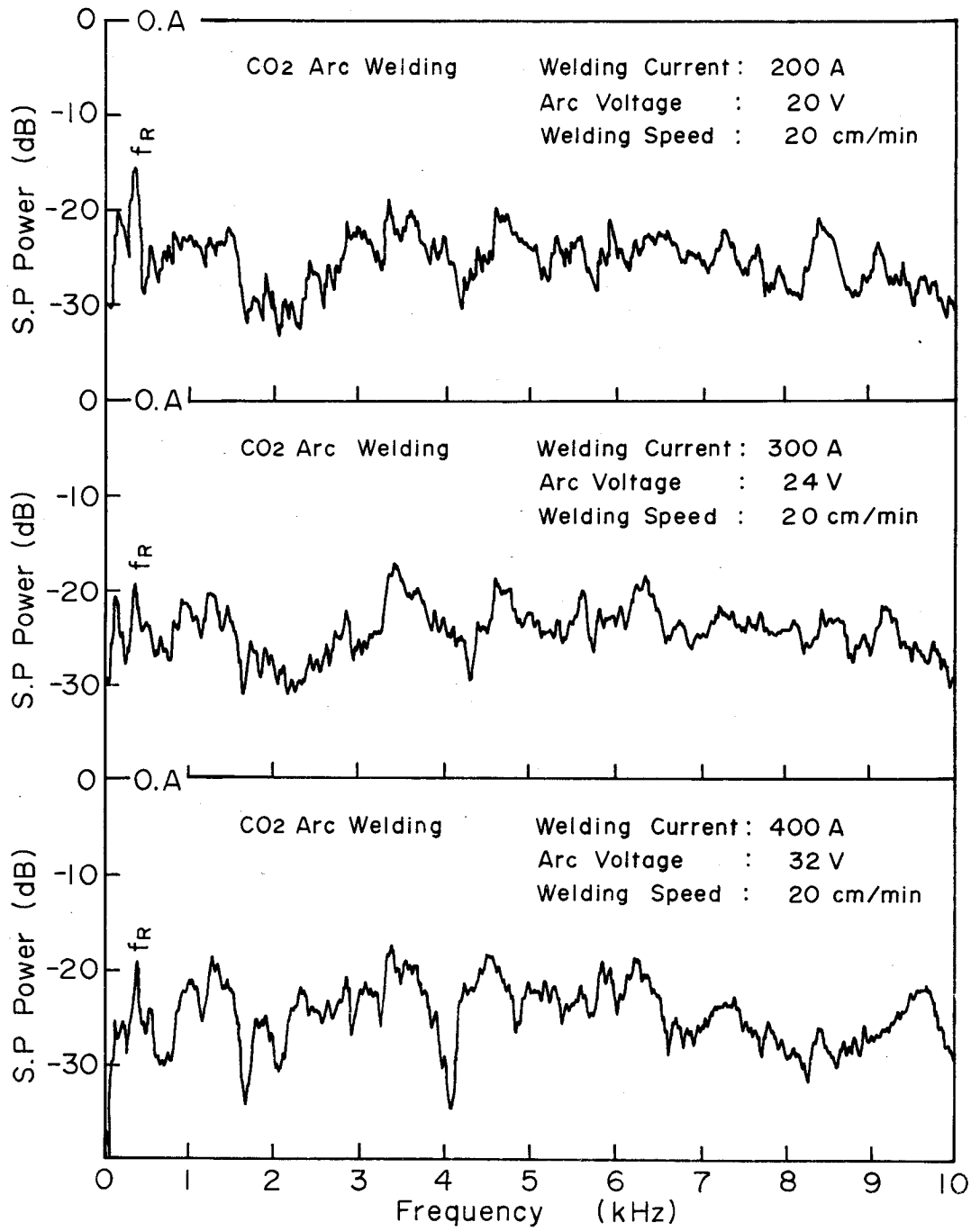


Fig. 4-29 Examples of frequency spectrum of welding arc sound in CO₂ arc welding.

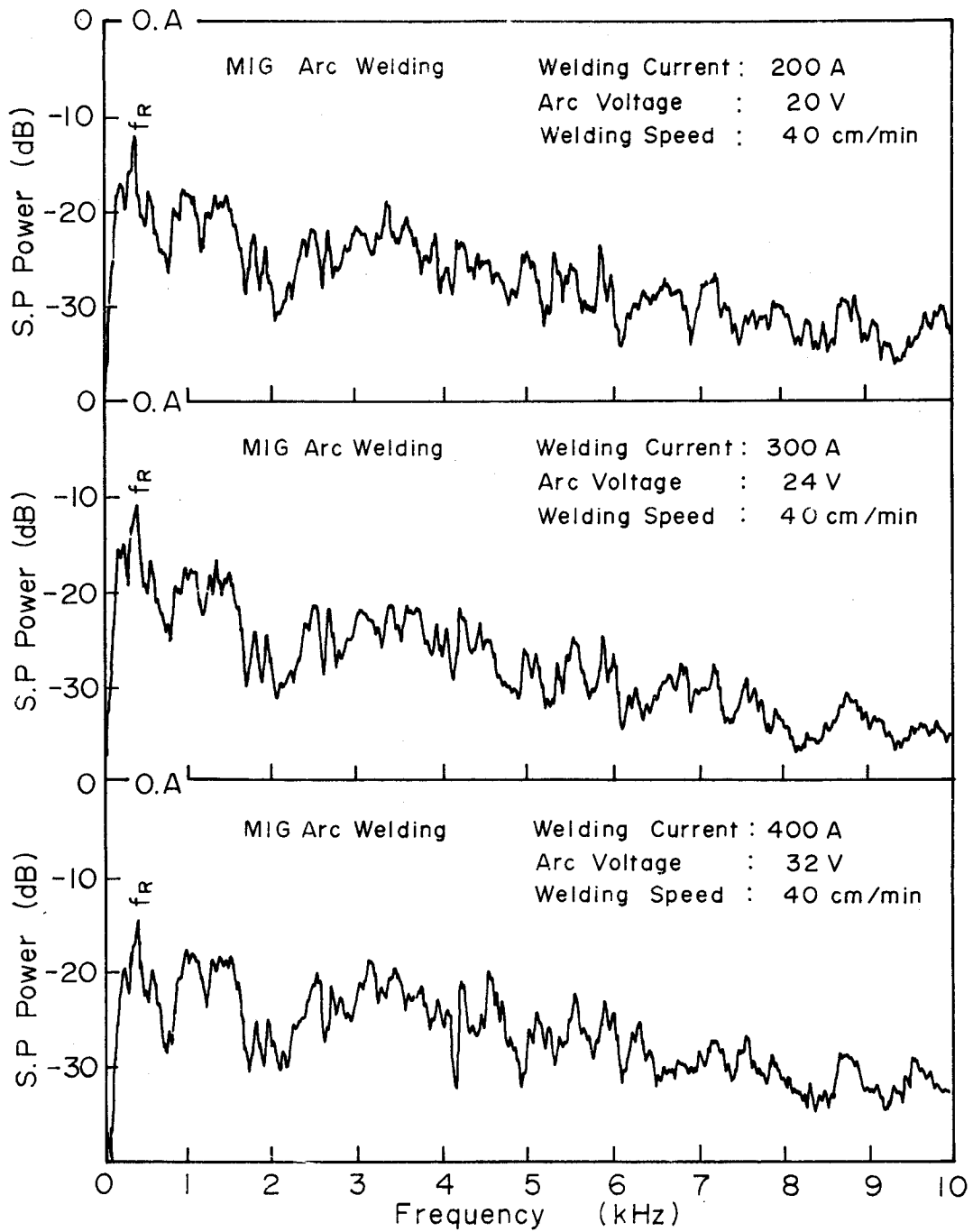


Fig. 4—30 Examples of frequency spectrum of welding arc sound in MIG arc welding.

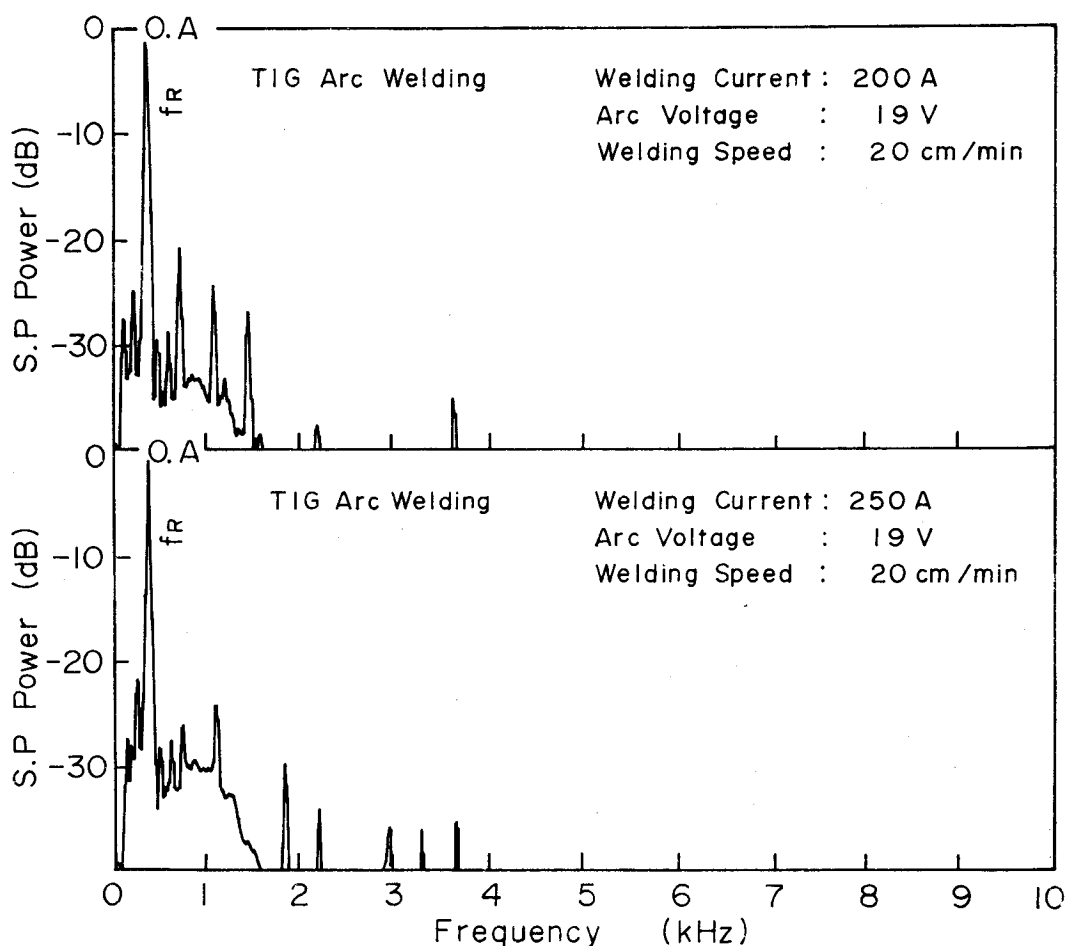


Fig. 4-31 Examples of frequency spectrum of welding arc sound in TIG arc welding.

域を対象とした溶接アーク音の分析例である。オシログラム及び高速度写真観察から判断される短絡回数に相当する周波数スペクトル f_D 、溶滴の離脱回数にほぼ相当するスペクトル f_G が認められる。

Fig. 4-33に、溶接電流を450 A一定とし、アーク電圧のみを変化させたCO₂アーク溶接について1 kHzから5 kHzの帯域を対象とした分析結果を示す。また、この分析結果を同帯域のパワの変化で表示しFig. 4-34に示す(図は適正アーク電圧範囲内の35 Vの場合のパワを基準とし、これを0 dBとしている)。Fig. 4-33に見られるように、スペクトル・プロファイルは各条件の場合ともに類似したものであり、顕著な相違は認められない。

しかし、Fig. 4-34に示すパワからはその相違を明確に見ることができる。すなわち、溶接電流450 Aに対するアーク電圧の適正範囲は34 Vから38 Vであるが (Table 3-2 参照、ただし、溶接電源の使用取扱い書などによれば、一般にこの範囲より若干広い)、適正条件

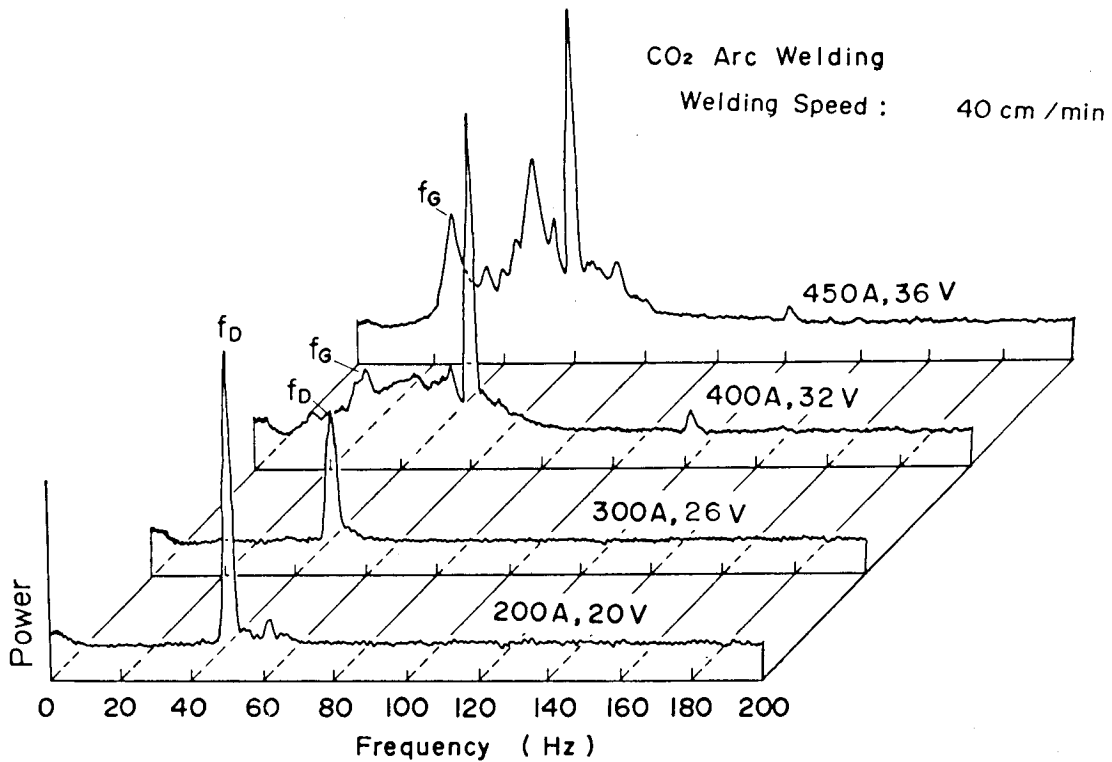


Fig. 4-32 Frequency spectrum of welding arc sound at the low range.

と過小、過大な条件との間にはパワに数dBの相違が認められる。

同様な方法で、ガス流量の影響について調べた結果をFig.4-35及びFig.4-36に示す。スペクトル・プロファイルには顕著な相違は認められないが、パワにはシールド効果の良否による影響が200 A、20 V及び400 A、32 Vの場合ともに認められる。すなわち、シールド効果は $Q = 10 \sim 15 \text{ l/min}$ 以上で良好になると推測されるが、良好な場合と不良な場合とを比較すると帯域パワに数dBの変化が認められる。

以上、二つの帯域に着目した例を示したが、溶接アーク音の特徴量としては2.3.4項に述べたように種々のものがあり、そのうちのなにを対象とするか、また、どの帯域に着目するかは単純な問題ではない。

溶接アーク音の音圧波形、周波数スペクトルについての検討結果から、音場空間において観察される溶接アーク音は定常不規則過程に従うランダム信号と見なすことができる。このような信号についての自己相関関数 ϕ_{pp} は、3.5項で述べたようにある時刻のデータの値 $P(t)$ の他の時刻のデータの値 $P(t+\tau)$ への一般的依存性を表わし、時刻列にお

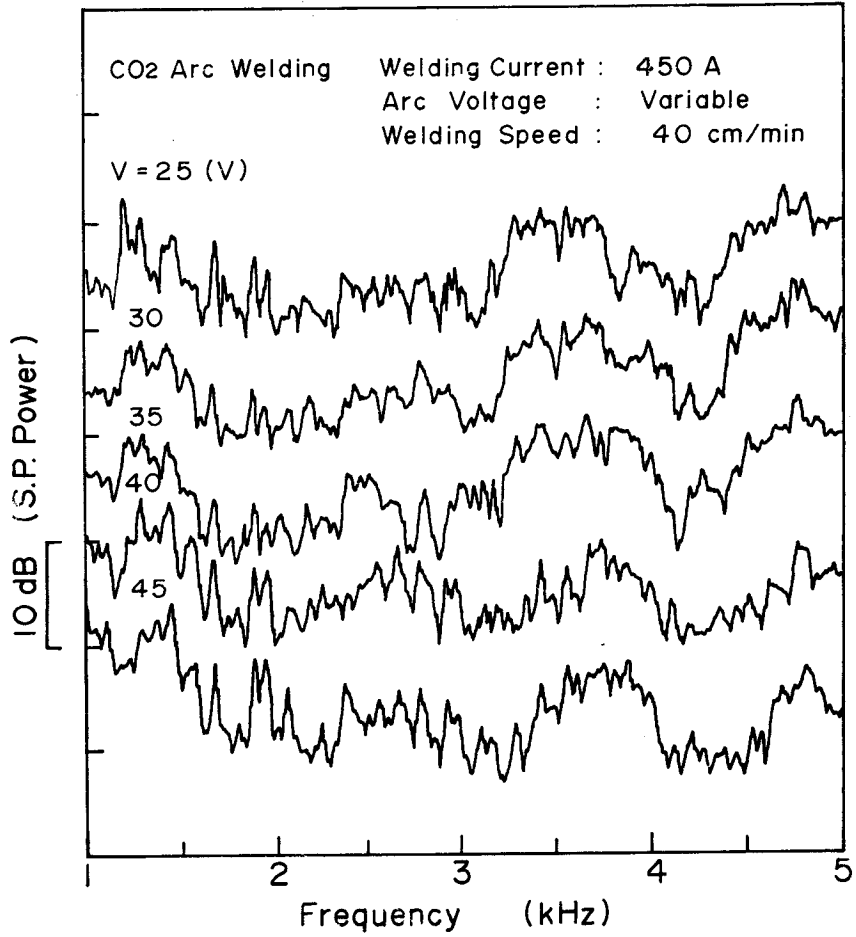


Fig. 4—33 Frequency spectrum of the welding arc sound at the bandwidth of 1 kHz-5 kHz with various arc voltage.

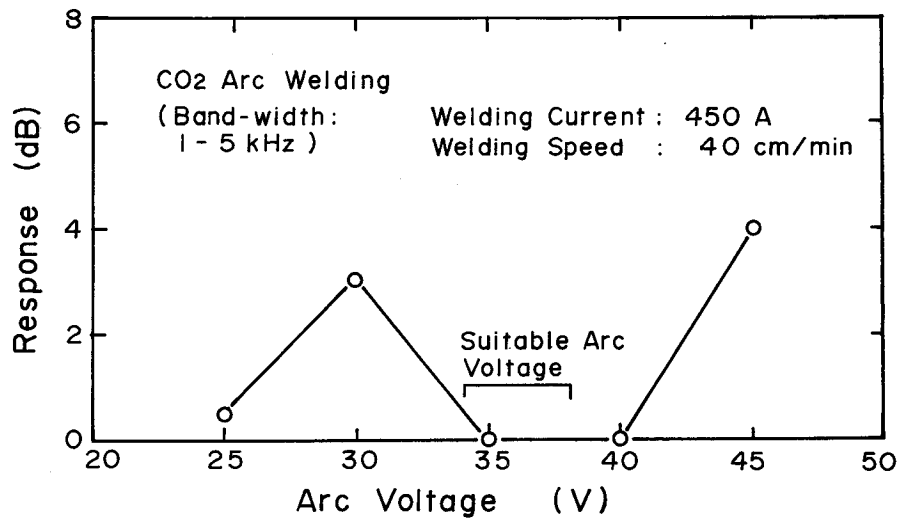


Fig. 4—34 Effects of arc voltage on the power at the bandwidth of 1 kHz-5 kHz with various arc voltage.

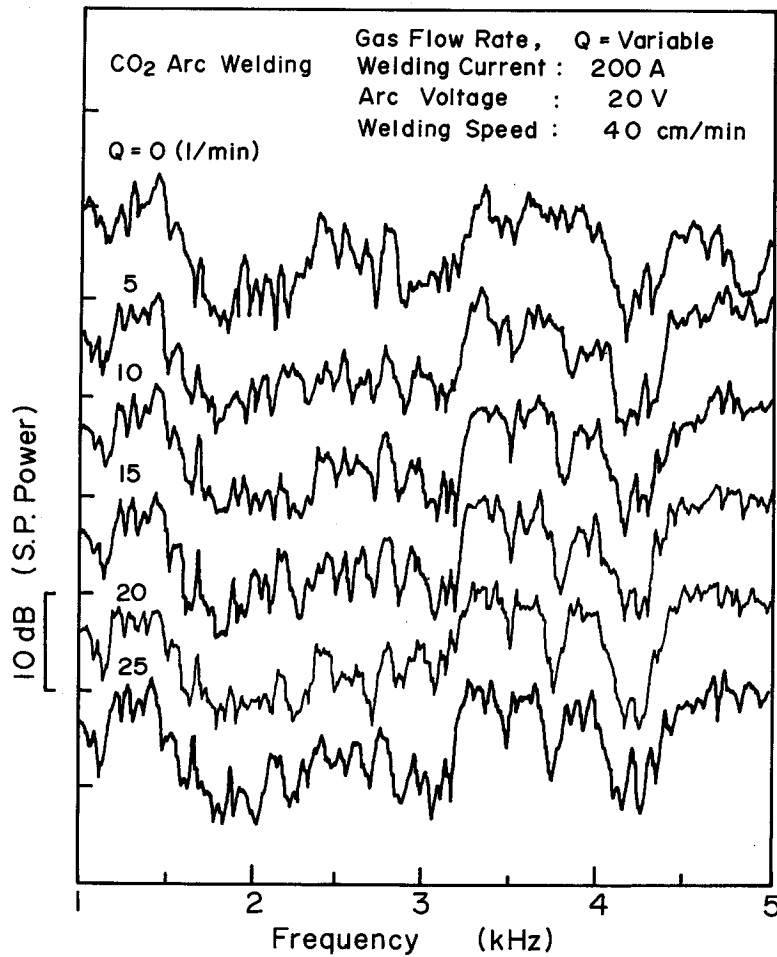


Fig. 4-35 Frequency spectrum of the welding arc sound at the bandwidth of 1 kHz-5 kHz with various shielding gas flow rate.

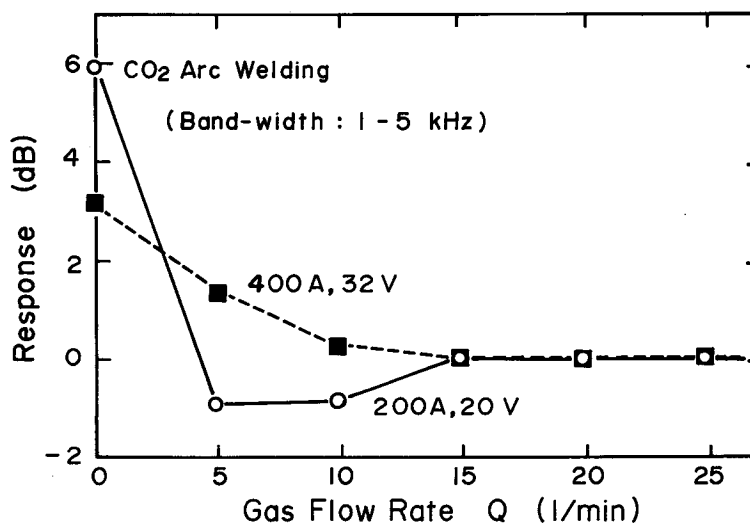


Fig. 4-36 Effects of shielding gas flow rate on the power at the bandwidth of 1 kHz-5 kHz with various gas flow rate.

ける二次統計量を記述する。

Fig.4-37に、CO₂アーク溶接(a)、MIGアーク溶接(b)、TIGアーク溶接(c)についての音圧波形の一部と、自己相関関数とを対応させて示す。

自己相関関数は、その定義から占有帯域の異なるランダム成分の分解を意味し、また、 $\tau=0$ の値は全スペクトル成分に含まれる全パワを意味し、 τ の十分大きな領域では信号の周期成分を示す。したがって、(a)については広帯域なランダム信号、(b)についてはランダム信号と正弦波信号の和、(c)についてはほぼ単一の正弦波信号と見なすことができる。なお、この正弦波信号は溶接電源のリップル成分と対応する。

このように溶接アーク音についての自己相関関数を求めることにより、時間領域と周波数領域における特性を同時に知ることができる。このため、特徴量の一つとしての自己相関関数は溶接プロセスの監視などに際してすぐれた情報を提供することになる。

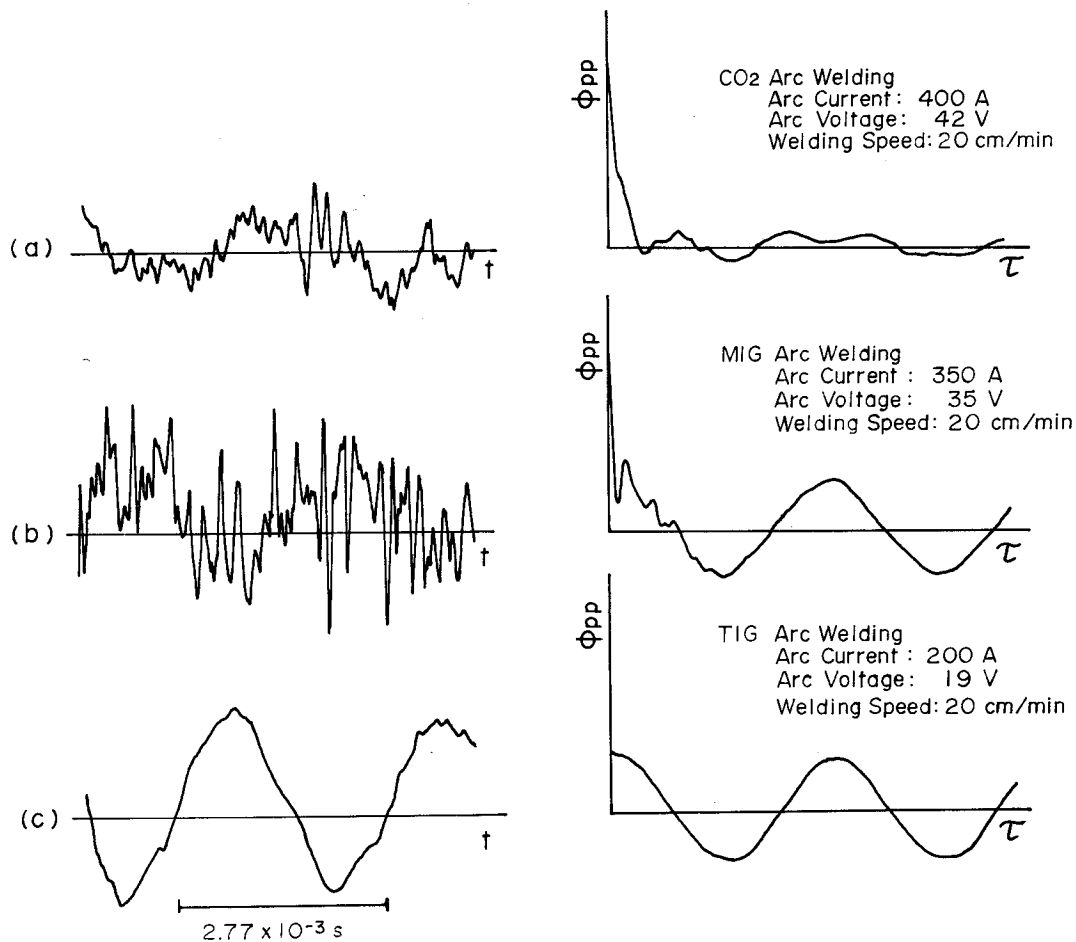


Fig. 4—37 Examples of waveform and autocorrelogram of welding arc sound in CO₂, MIG and TIG arc welding.

4. 4 パルス化TIGアーク溶接

パルス化電流を用い、アークに振動を付加することによって溶融池を加振し、溶接部の凝固形態を改善しようとする、いわゆるパルス溶接が各種溶接法を対象として研究されている¹⁴⁻²¹⁾。この方法は、パルス化によって生ずるアーク圧力の変化を直接利用するものであることから、例えば、磁気攪拌法のように特別な装置を被溶接材側（またはトーチ側）に設ける必要がないこと、広範な供給電力の制御が可能のために薄板材及び異種金属間の溶接ができるなど、種々の特長を有する。反面、本溶接法では一般に立上りと立下りの急峻な波形を用いるために大きな騒音の発生を伴うことは避けられない（パルスTIGアーク溶接においては通常矩形波電流が用いられるが、今後は他の波形についても検討されるものと考えられる）。

すべに述べたように、溶接アーク音の諸特性は電流波形に依拠する部分が多く、例えば、電源周波数（50/60Hz）に起因する出力電流の有するリップル成分は溶接アーク音の強さ及び周波数スペクトルの分布形態を左右する。そこで音の発生条件を明確にするためここでは、電極の消耗をほとんど伴わず、また溶融池の生成を伴わないことから、溶接アーク音の諸特性がすべて出力電流に依存するアークの挙動のみによって決まると考えられる水冷銅板上に発生させた静止TIGアークを用い、溶接アーク音におよぼす電流波形の影響について実験的、解析的検討を行っている。なお、対象とした電流波形は、立上り時間（または立下り時間）の非常に短いものとして矩形波（ $d=\Delta/T=0.5$ ）及び鋸歯状波（ $d=0$ ）、比較的長いものとして三角波（ $d=0.25$ ）及び正弦波の合計4種類である。

4. 4. 1 音圧波形

Fig.4-38に、ベース電流 $I_b=50\text{ A}$ 、ピーク電流 $I_p=150\text{ A}$ （電流振幅 $\tau_p=100\text{ A}$ ）、繰返し周波数 $f_p=500\text{ Hz}$ の条件のもとで得られた代表的音圧波形の例を、模型的に表示した電流波形（破線）とともに示す。

図に見られるように、音圧波形は電流波形に依存してそれぞれ特有な形状を呈し、繰返し周波数と対応した周期で変化する。矩形波電流(a)及び鋸歯状波電流(b)では、電流が I_b から I_p へ、または、 I_p から I_b へ変化する過程において大振幅を有する瞬時音圧波形が観察される。

この瞬時音圧波形は、 CO_2 アーク溶接において再点弧時に発生する音圧波形に類似したものであり（Fig.4-14参照）、周波数スペクトル分析から明らかとなるように、強い高調波成分を有している。一方、三角波電流(c)及び正弦波電流(d)の場合の音圧波形は(a)、(b)の場合に比較すると高調波成分は弱く、特に(d)の場合については正弦波そのものに近

い形状を呈している。

以上のように、パルス化電流波形を用いた場合に発生する溶接アーク音の音圧波形は電流波形に対しそれぞれ特有である。

しかし、この波形は電極形状の異状変化によってアーク発生中にひずみを生ずることがある。

Fig.4-39 (b)にひずんだ波形の例を、正常な波形(a)と対比して示す。これらの波形は $I_b = 50A$ 、 $I_p = 150A$ 、 $f_p = 1000$ Hzの正弦波電流の場合に得られたものである。音圧波形のひずみは発生数秒後に自然に回復する場合と電極を再加工しなければ回復しない場合とがある。

波形にひずみを生ずると音圧レベルは若干上昇し、この変化は聴覚によって容易に知ることができる。波形にひずみを

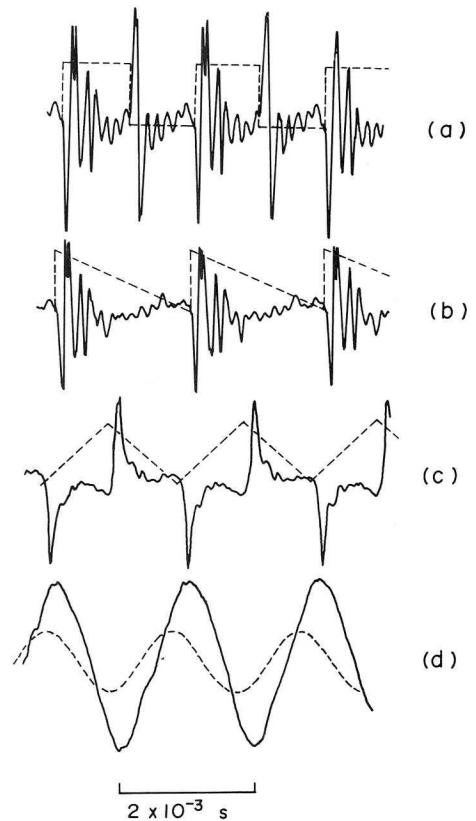


Fig. 4—38 Typical sound waveform in various current waveform.
 (a) : Rectangular
 (b) : Sawtooth
 (c) : Triangular
 (d) : Sine

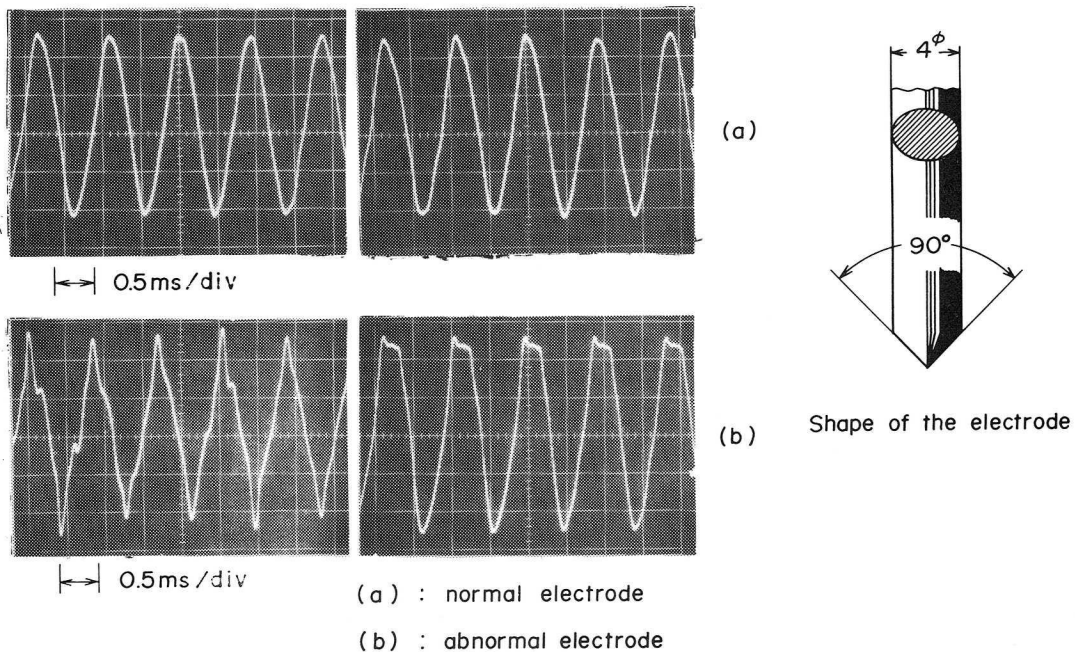


Fig. 4—39 Variation of sound waveform with change of electrode shape.
 (a) : Normal waveform
 (b) : Deformed waveform

生じたような場合に音圧レベルが上昇する原因は高調波成分の影響によるものであるが、このことについては4.4.3項に述べる。

4.4.2 音圧レベル

4.4.2.1 繰返し周波数の影響

溶接アーク音の音圧レベルにおよぼす繰返し周波数 f_p の影響を各電流波形の場合についてFig.4-40に示す。

図から音圧レベルSPLは f_p の対数にほぼ比例して上昇すること、その上昇傾向は電流波形によって異なり、音圧レベルが最も大きいのは4種類の波形の中で矩形波の場合であり、次いで鋸歯状波、三角波、正弦波の順となることが分かる。さらに、音圧レベルの上昇傾向は矩形波と鋸歯状波電流の場合、及び三角波と正弦波電流の場合には類似し、前者の緩やかな上昇に対し後者では急激であることが分かる。すなわち、音圧レベルは f_p が2倍

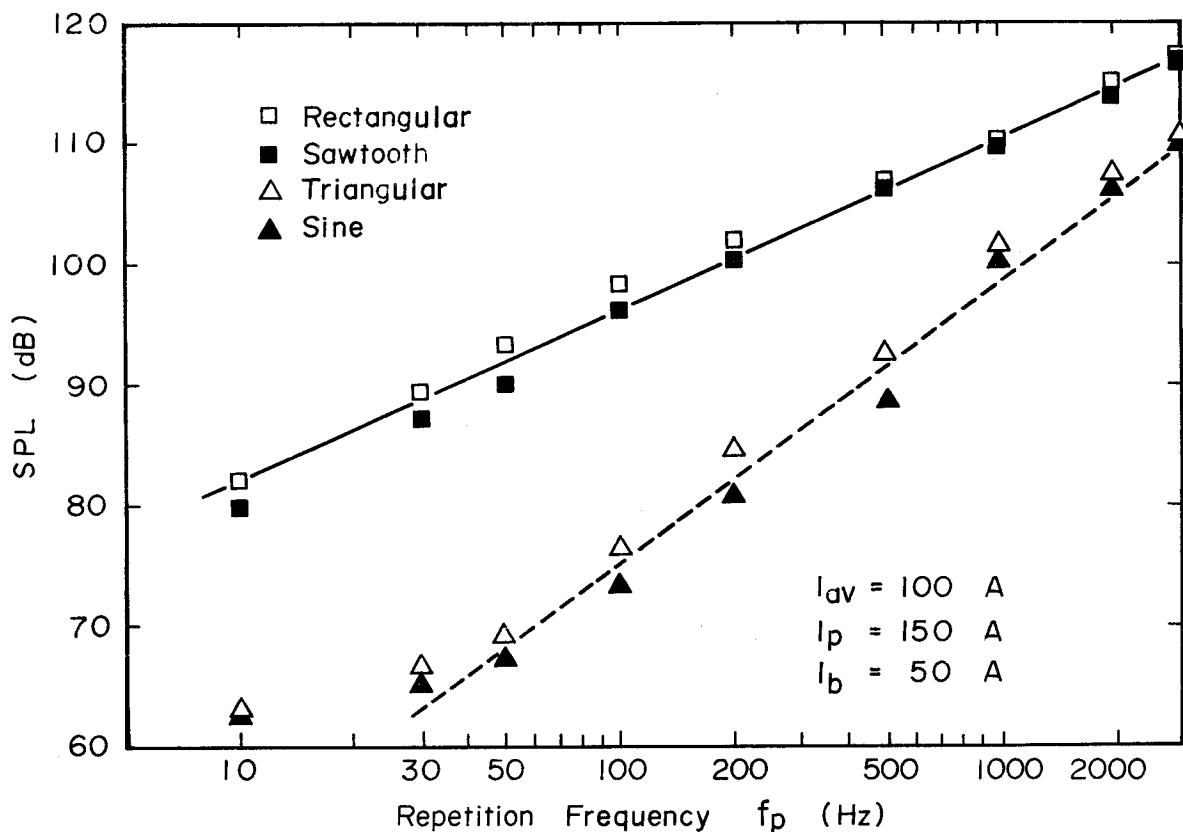


Fig. 4-40 Effects of repetition frequency on sound pressure level at various current waveform.

になると前者で約4 dB、後者で約7 dB上昇する。

パルスTIGアーク溶接において f_p の範囲は一般に数Hzから数100Hzであるが¹⁴⁻²¹⁾、Fig. 4-40において矩形波と正弦波電流の場合を比較すると、 $f_p=50\text{Hz}$ で約25dB、 $f_p=200\text{Hz}$ で約20dBの差を音圧レベルに生ずる。

いま、実効音圧を P_e 、基準実効音圧を P_{e0} ($= 2 \times 10^{-4} \mu\text{bar} = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$) とすると、 $\text{SPL} = 20 \log_{10} P_e / P_{e0}$ であるから((2.4)式)、 P_e と f_p の関係はFig.4-40に示す実験データをもとにして次のように表わすことができる。

矩形波及び鋸歯状波電流の場合

$$P_e \propto f_p^{0.7} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

三角波及び正弦波電流の場合

$$P_e \propto f_p^{1.2} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

4.4.2.2 電流振幅の影響

Fig.4-41は、音圧レベルにおよぼす電流振幅 τ_p の影響を $f_p=360\text{Hz}$ 一定、 $\tau_p=40\sim 160\text{A}$ の範囲で変化させた場合について示している。(a)は平均電流 $I_{av}=100\text{A}$ 、(b)は $I_{av}=150\text{A}$ の場合である。図から、音圧レベルは τ_p の対数にほぼ比例して上昇し、また、その上昇傾向は電流波形の相違により前項に述べたと同様の影響を受けていることが分かる。

しかし、音圧レベルは、(a)、(b)を比較すると明らかなように、平均電流の相違にかかわらず τ_p が一定であれば変化しない。この事実は、溶接アーク音の強さが電流の交流分のみ依拠することを示すものであり、完全直流の場合には音がほとんど発生しないという実験結果にも一致する。

(a)及び(b)から、 P_e と τ_p の関係は次のように表わすことができる。

矩形波及び鋸歯状波電流の場合

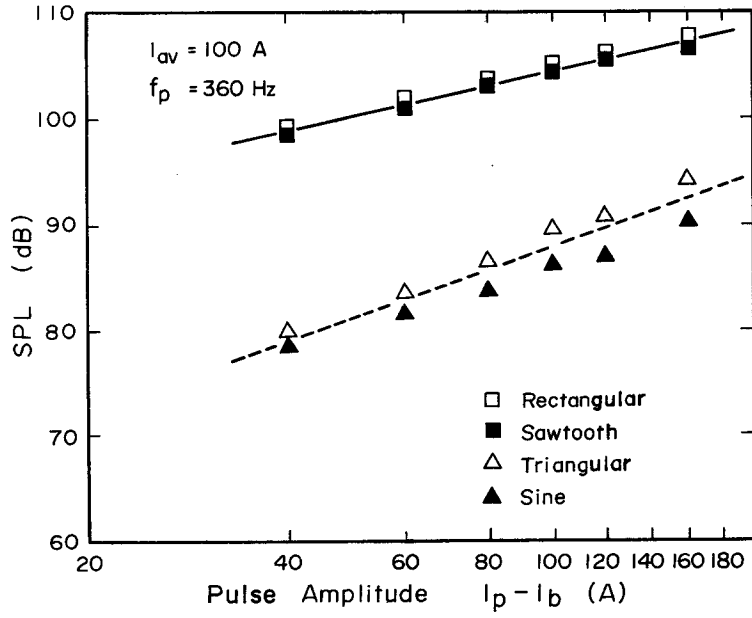
$$P_e \propto \tau_p^{0.7} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

三角波及び正弦波電流の場合

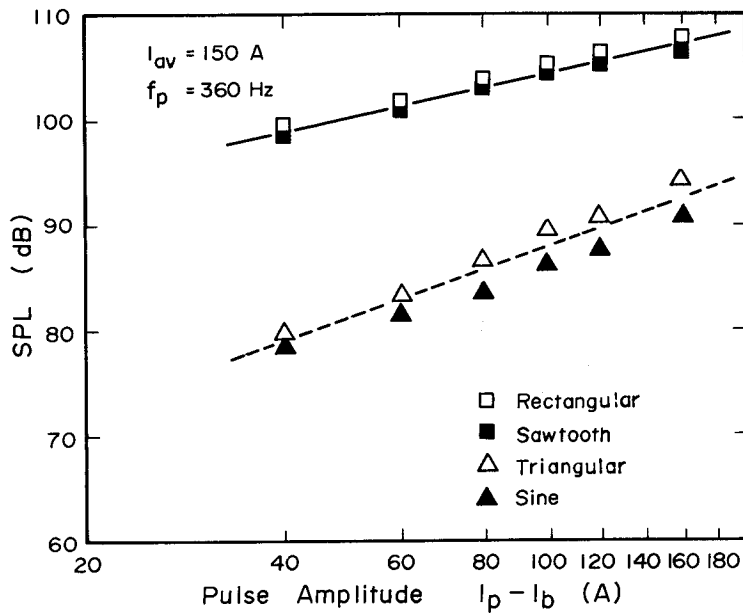
$$P_e \propto \tau_p^{1.2} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

前項及び本項の実験結果から P_e 、 f_p 、 τ_p の関係は次式のように表現することができる。

$$P_e \propto f_p^m \cdot \tau_p^n \quad \dots\dots\dots (4.5)$$



(a)



(b)

Fig. 4-41 Effects of pulse amplitude on sound pressure level at various current waveform.

(a) : Average current $I_{av} = 100$ A

(b) : $I_{av} = 150$ A

ここで、 m 、 n は電流波形によって決まる定数である。

また、Fig.4-40、Fig.4-41に示すデータを用い、(4.5)式の関係をも音圧レベルで表示すると次のようになる。

矩形波及び鋸歯状波電流の場合

$$\text{SPL} = 14 \log_{10}(f_p \cdot \tau_p) + 40 \pm 2 \text{ dB} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

三角波及び正弦波電流の場合

$$\text{SPL} = 24 \log_{10}(f_p \cdot \tau_p) - 20 \pm 3 \text{ dB} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

(4.6)式及び(4.7)式は、パルス化電流波形を用いるTIGアーク溶接において溶接アーク音の騒音性を予測する上で実用上有効である。なお、聴覚によれば音の強さとは別に、溶接アーク音に対する全体的印象は電流波形によって異なったものになるが、これらについては第6章に詳述する。

Fig.4-42は、音圧レベルにおよぼすアーク長の影響を矩形波及び正弦波電流の場合について示している。音圧レベルはアーク長の増加とともに上昇する傾向を示すが、その上昇傾向は電流波形にかかわらず類似したものであり、また、 f_p が変化しても大きな差異が認

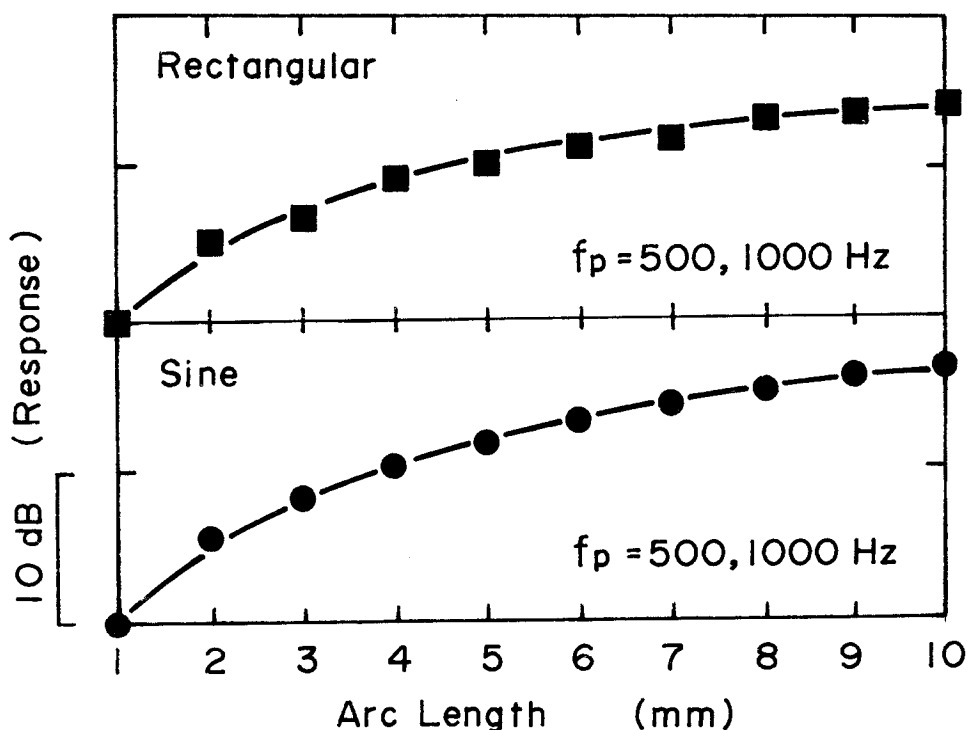


Fig. 4-42 Effects of arc length on welding arc sound.

められない。したがって、(4.6)式、(4.7)式にアーク長による音圧レベルの変動分を考慮すれば、種々の条件のもとにおいて騒音性の予測が可能となる。

4. 4. 3 周波数スペクトル

溶接アーク音の周波数スペクトル分析結果の例をFig.4-43に示す(使用分析器は定比帯域型(電子測器社製、Type3301)のものである)。

図に見られるように、パルス化電流を用いた場合に発生する溶接アーク音の主要なスペクトル成分は、いずれの電流波形の場合にも f_p を基本周波数スペクトルとした f_p 、 $2f_p$ 、 $3f_p$ ……であり、正弦波電流の場合を除くと $10f_p$ 以上の高次高調波成分も明瞭に認められる。したがって、 f_p なる関数波形を出力電流に重畳した場合に発生する溶接アーク音は、いずれの電流波形の場合にも f_p を基本音とした倍音により構成されることが分かる。

Fig.4-44は、参考に供するために関数発生器からの出力信号を同様な方法により分析した例であり、これらの結果は電流波形あるいは電圧波形を分析したと同等に見なすことができる(分析した波形は $f_p=500\text{Hz}$ 一定の矩形波($d=0.5$)、鋸歯状波($d=0$)、三角波($d=0.25$)であり、正弦波については単一スペクトルとなることから割愛)。図から明らかのように、矩形波及び三角波は f_p を基本スペクトルとする f_p 、 $3f_p$ 、 $5f_p$ ……なる f_p の奇数倍のスペクトル成分を有し、鋸歯状波は f_p 、 $2f_p$ 、 $3f_p$ ……なる整数倍のスペクトル成分を有する。なお、周波数分析結果が連続スペクトルのように表示されているのは、フィルタ型分析器を使用したことによる影響であって、これは理論的には線スペクトルとして表示されるべき性質のものである。

いま、最大のピークを有するスペクトルを卓越周波数スペクトル f_{EX} と定義し、 f_{EX} と f_p の関係を調べると、Fig.4-44においてはいずれの波形の場合にも f_{EX} は f_p に一致し、その包絡線は単純な減衰曲線になる。これに対し溶接アーク音の場合にはFig.4-45に示すように三角波と正弦波電流の場合には一致するが、矩形波と鋸歯状波電流の場合には一致しない。

音圧のトータル・レベル L_T (オーバ・オール値にほぼ相当)は各バンド・レベルを L_1 、 L_2 、…… L_n とすると次式で表わされる。

$$L_T = 10 \log_{10}(\log_{10}^{-1} L_1/10 + \log_{10}^{-1} L_2/10 + \dots + \log_{10}^{-1} L_n/10) \dots (4.8)$$

したがって、 f_{EX} と f_p とが一致する三角波及び正弦波電流の場合には、音圧レベルは f_p そのものの影響を強く受けることになり、 f_{EX} が倍音へ移動する矩形波及び鋸歯状波電流の場合には音圧レベルは倍音成分の影響をむしろ強く受けることになる。

一般に、音圧 P は近似的には $ka < 1$ (k は波長定数、 a は音源半径)なる比較的low周波数

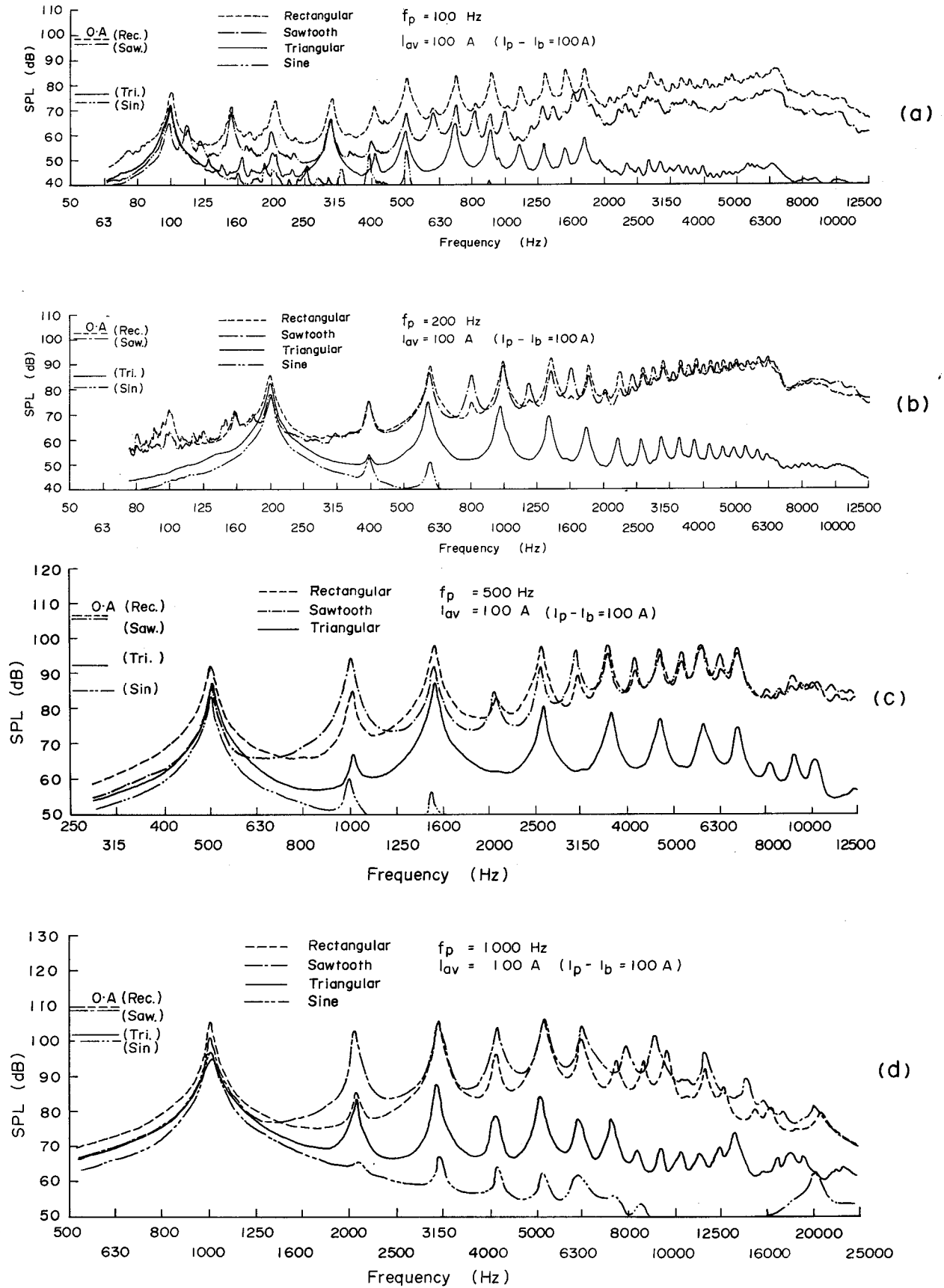


Fig. 4-43 Examples of frequency spectrum of welding arc sound at various current waveform.

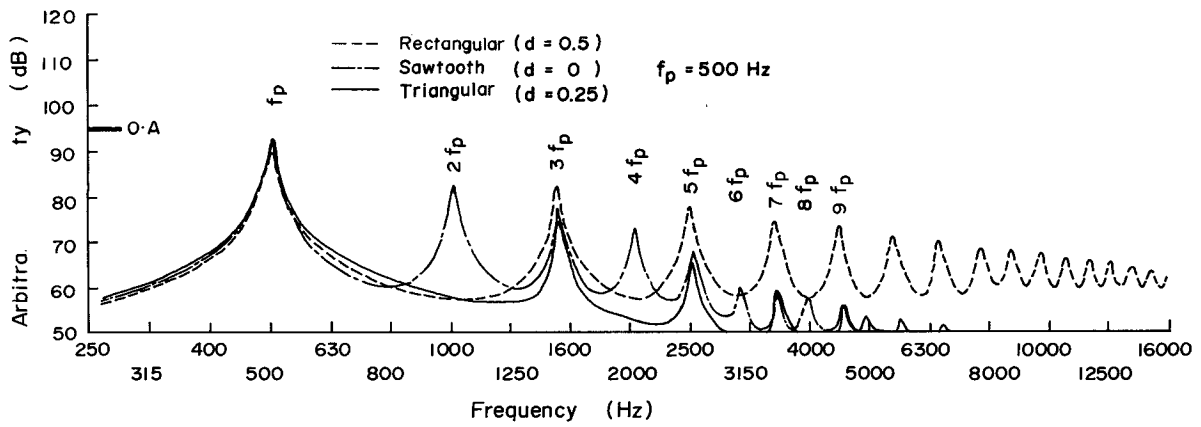


Fig. 4-44 Examples of frequency spectrum of output signal from function generator.

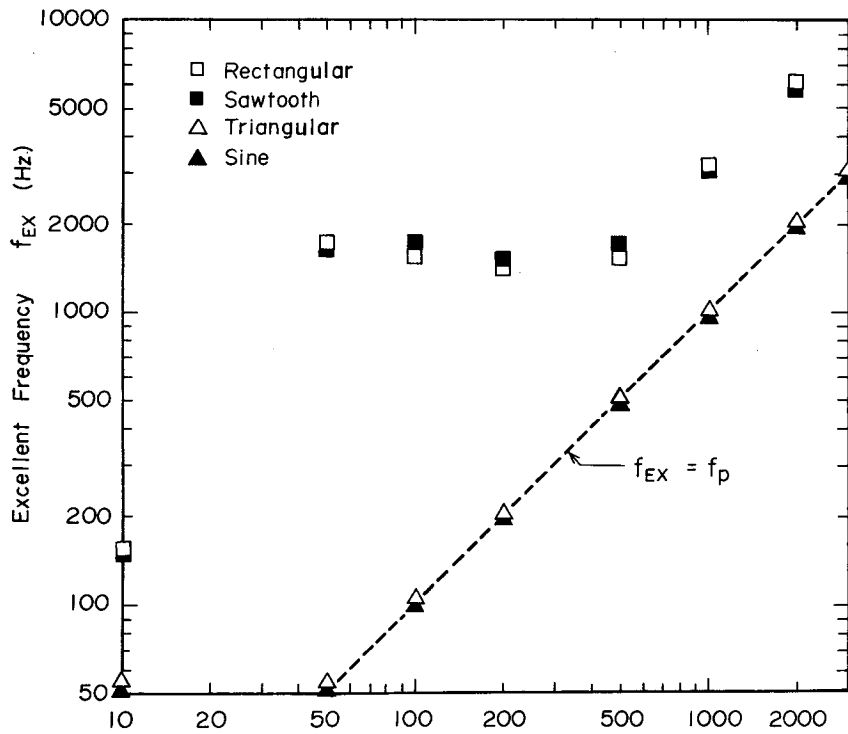


Fig. 4-45 Relation between repetition frequency and excellent frequency.

$$I_{av} = 100A \quad (I_p - I_b = 100A)$$

領域においては、音圧振幅 A と角振動数 ω との間に $P \propto A \omega^2$ なる関係がある²²⁾。このことは、同一のエネルギーでも振幅は周波数の2乗に逆比例して高周波域では小さくなることを意味し、また、高い周波数では振幅が小さくてもエネルギーとしては無視できないことを示している。

したがって、矩形波及び鋸歯状波電流を用いた場合の音圧が三角波及び正弦波電流を用いた場合のそれに比較して大きな値を示す原因は高調波成分の影響に負うところが大きい。

また、4.4.1項において述べたように、音圧波形にひずみを生じたような場合に音圧レベルが上昇傾向を示すのも高調波成分の影響によるものである。

4.4.4 アークの挙動

時刻列上におけるアークの挙動についての観察例をFig.4-46に、溶接電流及び溶接アーク音圧波形についての観察例をFig.4-47に示す。

ここで、アークの発生条件は $I_b = 50\text{ A}$ 、 $I_p = 150\text{ A}$ 、 $f_p = 100\text{ Hz}$ の矩形波電流であり、他の条件については第3章Table3-3に示したとおりである。なお、両図においてイベント・マークの番号は時刻列上でそれぞれが対応する。

Fig.4-46及びFig.4-47から外観上、アークは I_b で電極軸方向に最も収縮した形状を呈し、 I_p で最も膨張した形状を呈している。このようなアーク形状の変化は位相的にも周波数的にも電流波形の変化に一致している。

一方、溶接アーク音は電流が I_b から I_p へ、 I_p から I_b へ変化する点で最大瞬時音圧を示し、連続音にパルスが重畳しているような挙動を示している。本条件において、音圧レベル

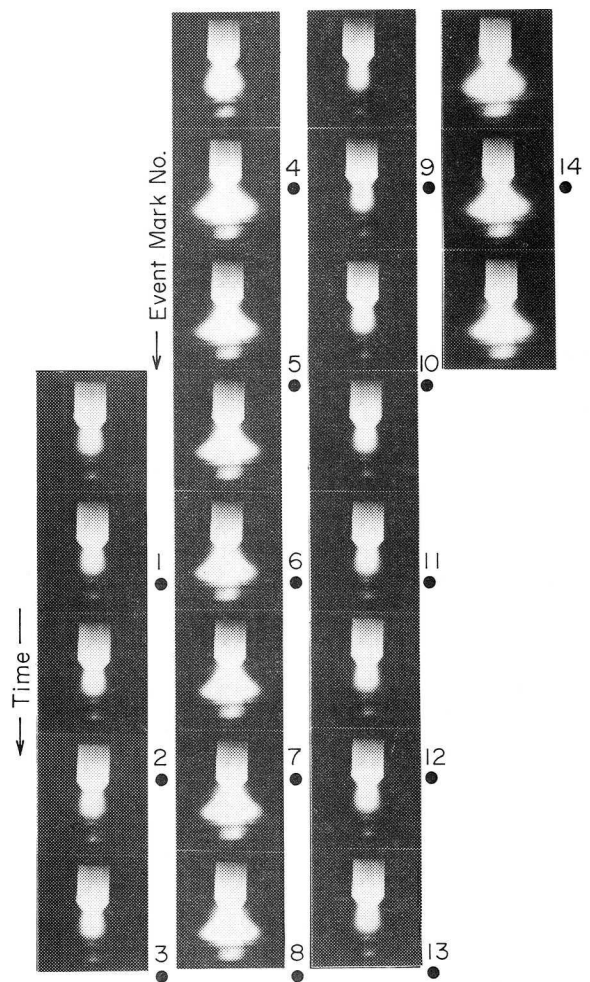


Fig. 4-46 Pictures of welding images using rectangular wave current.
($I_p = 150\text{ A}$, $I_b = 50\text{ A}$, $f_p = 100\text{ Hz}$)

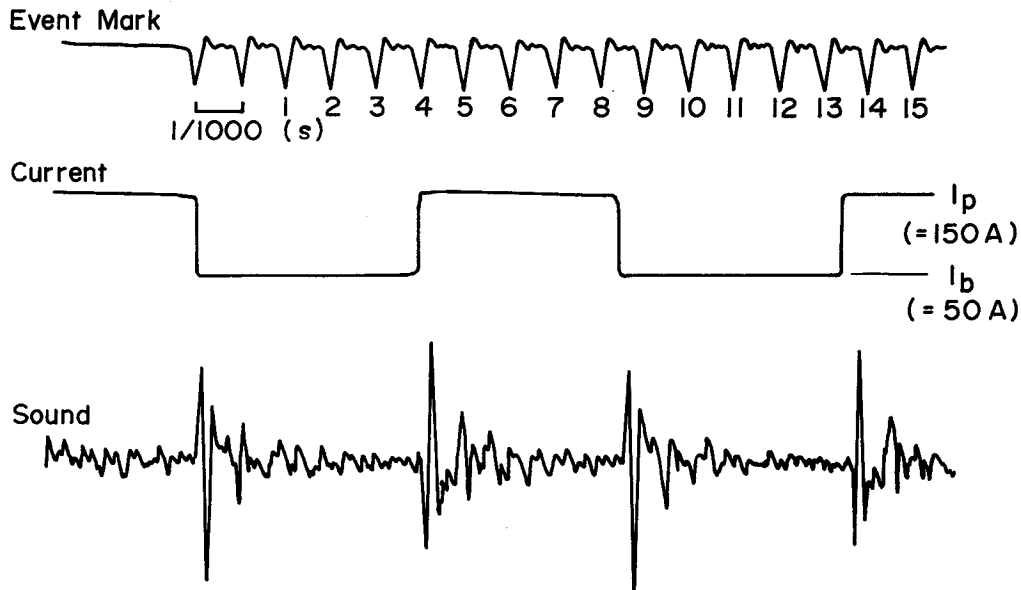


Fig. 4-47 Example of oscillogram on welding arc current and sound.
 $I_p=150A$, $I_b=50A$, $f_p=100Hz$

の実効値は約98dBであるが（実効音圧で約1.6Paに相当）、 I_b から I_p へ、 I_p から I_b へ変化する点での瞬時音圧はおよそ6.3Paにも達する。したがって、これらの点では衝撃的な加振力を溶融池に加えていることになる。

最近、パルス化電流を用い溶接部の凝固形態を改善しようとする試みがなされているが、この方法はこの衝撃的な加振力による溶融金属の攪拌効果を利用するものである。

14-21)

Fig.4-48に、時刻列上のアーク挙動をアークの画像面積の変化で評価した例を示す。この方法は概略次のようである。すなわち、16mmフィルム上のアーク画像を光学系を通してすりガラス板上に拡大投影し、これを適当な格子間隔に分割し、各分割点における画像の透過濃度（D値）をすりガラス裏面に設置した光電濃度計（測定精度 $\pm 0.05D$ ）により測定する。次に、等濃度曲線を描くとFig.4-49のようになるが（Fig.4-49は、Fig.4-46のイベント・マーク番号6の画像についての測定例であり、破線は横格子線上の各点における透過濃度の実測値（黒丸印）を結んだものである）、この等濃度曲線によって囲まれた面積 S を、同様にして得られる時刻列上の最大面積 S_{max} で無次元化する。Fig.4-48は、このような方法でアーク画像を処理したものであり、0.2D値の等濃度曲線によって囲まれた面積を対象として、 S/S_{max} を縦軸、時刻列を横軸として表示している。

なお、0.2D値を採用したのは、その等濃度曲線がFig.4-46に見られるアーク画像の輪郭線にほぼ相当するからであって特別な意味はない。また、フィルム上の画像からはア

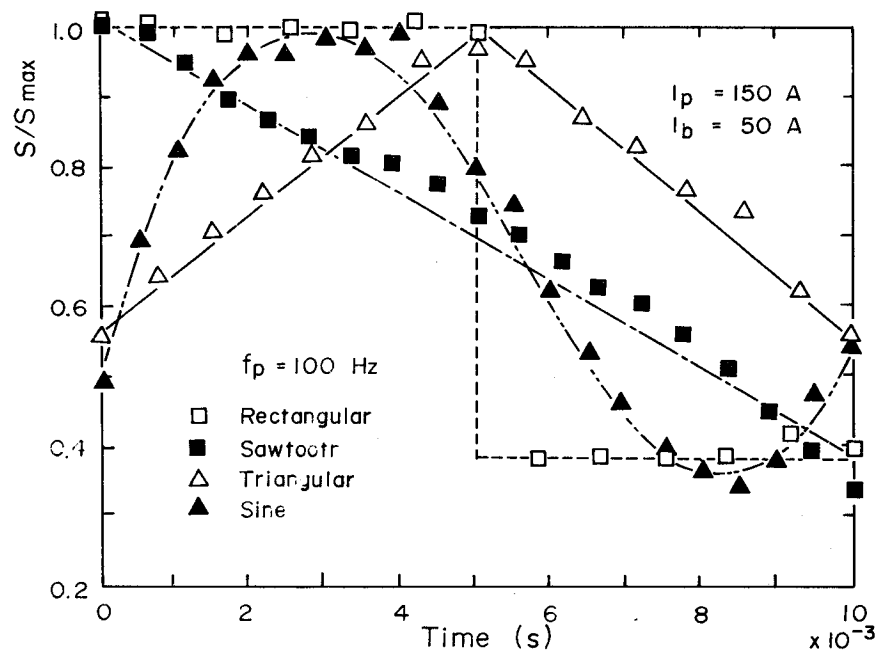


Fig. 4-48 Variation of S/S_{max} on time.

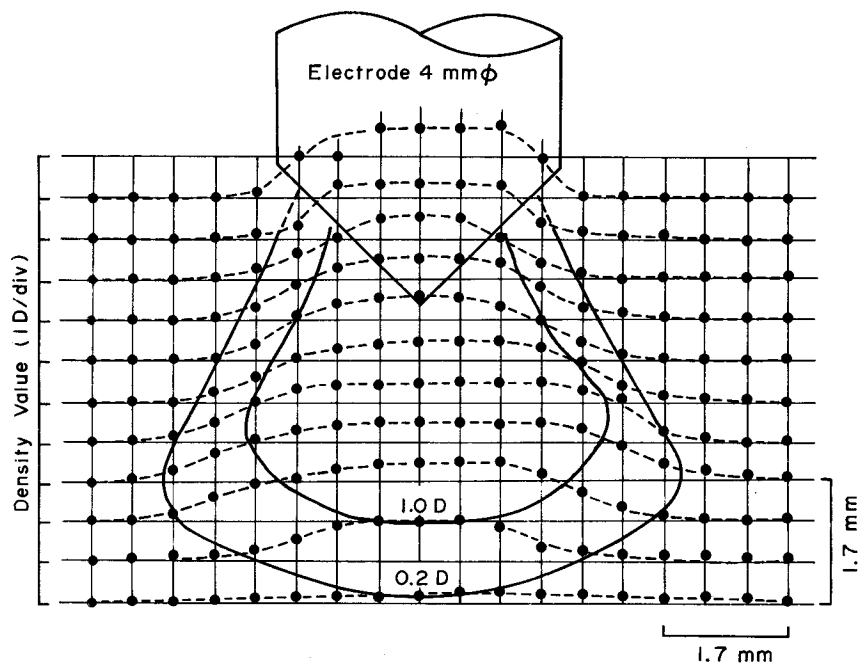


Fig. 4-49 Example of measuring transmission density of arc form.

ークを傘状に覆う、カラー写真の観察によれば、薄青色の陰極炎の発生が認められるが、この面積は測定の対象外としている（Fig.4-46においては陰極炎は写真プリントの関係上あまり明瞭には現れていない）。

Fig.4-48から、 S/S_{max} の変化は4種類のいずれの場合にも電流波形の変化に良く類似していることが分かる。したがって、電流波形を変化させた場合の外観上のアークの挙動は巨視的にはおよそ電流波形に類似したものであると見なすことができる。

4.4.5 呼吸音の理論に基づく考察

前項の観察から、パルス化電流波形を用いた場合の溶接アーク音は、パルス化によって生じたアークの収縮膨張振動が大気圧を平衡中心とするアーク近傍に圧力変化を誘発した結果発生すると見なすことができる。したがって、アークの収縮膨張振動の周波数が低く、振動体の寸法が音波長に比べて小さな場合、すなわち、 f_p が数kHz程度までの正弦波電流を用いた場合に発生する溶接アーク音の音源については理論上、これを呼吸球（pulsating sphere）と見なして取り扱うことができる。

いま、アークの形状すなわち音源の形状を半径 a の球形と仮定し、その表面が $ue^{j\omega t}$ で表わされるような一様な振動速度で半径方向に収縮膨張振動をする音源が剛体壁上に存在する Fig.4-50 に示すようなモデルについて、音源から距離 r の点における実効音圧 P_e を求める。ここで、 $\omega (= 2\pi f)$ は角振動数、 t は時間、 $j = \sqrt{-1}$ である。音源を球形と仮定することは、 a が写真観察から I_b で約 2 mm、 I_p で約 4 mm と音源・測音点間距離（ $r = 120$ mm）に比べて十分小さいことからあまり無理ではない。

まず、Fig.4-50 に示すモデルにおいて剛体壁のない場合を考える。音源が自由空間に

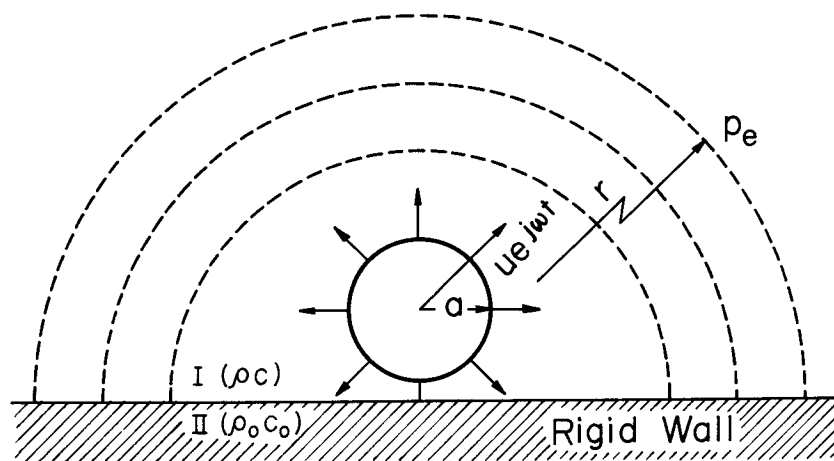


Fig. 4-50 Model of welding arc sound source.

存在するとき距離 r における音圧 $P(r,t)$ 、粒子速度（音波に起因する媒質の微小部分の運動速度成分） $u(r,t)$ は各々次式のように表わされる²³⁾。

$$P(r,t) = (1/r)P_i e^{j(\omega t - kr)} \dots\dots\dots (4.9)$$

$$u(r,t) = (P_i / \rho c r) (1 + 1/jkr) e^{j(\omega t - kr)} \dots\dots\dots (4.10)$$

ここに、 ρ は媒質密度、 c は媒質中の音速、 $k (= \omega/c = 2\pi f/c)$ は波長定数、 P_i は音圧振幅である。

音源半径 a が波長に比べて小さな条件のとき ($ka \ll 1$)

$$u(a,t) = (P_i / \rho c a) (1/jka) e^{j(\omega t - ka)} \dots\dots\dots (4.10)'$$

($a = 4 \text{ mm}$ とすると、 $f = f_p = 10 \text{ kHz}$ の場合であっても $ka = 0.74 \text{ rad}$ であり、本実験条件の $f_p = 3 \text{ kHz}$ の範囲では十分 $ka \ll 1$ が成立する)

a における実効粒子速度を U_a とし、その垂直成分を積分したところの体積速度 $U_0 (= 4\pi a^2 U_a)$ を導入すると、

$$\left. \begin{aligned} U_a &= P_i / (\sqrt{2} \rho c k a^2) = P_i / (2 \sqrt{2} \pi f a^2 \rho) \\ P_i &= (U_0 \rho c k) / (2 \sqrt{2} \pi) = U_0 \rho f / \sqrt{2} \\ P(r,t) &= (1/r) (U_0 \rho f / \sqrt{2}) e^{j(\omega t - kr)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.11)$$

$r \gg a$ のとき、距離 r における実効音圧 P_e は

$$P_e = (1/2r) U_0 f \rho \dots\dots\dots (4.12)$$

次に、音源が広い剛体壁上に存在する場合を考える。この場合、音は1/2球面波となって半空間に放射されることになり、音圧は理論上、剛体壁のない場合の2倍となる。

本実験では、アークを比較的広い面積を有する水冷銅板（有効半径110mm）に発生させること、媒質I（空気）と媒質II（銅板）の音響特性インピーダンスが $\rho c \ll \rho_0 c_0$ ($\rho c \doteq 408$ 、 $\rho_0 c_0 \doteq 327 \times 10^5$) であることから上述の理論が適用できると思われる。そこで、溶接アーク音についての指向性と音圧レベルにおよぼす水冷銅板の影響を調べたところ、音の強さはFig.4-51に示すように方向に関係せず無指向性であることが明らかとなり、また、音圧レベルはFig.4-52に示すように水冷銅板のない場合には約6dB減少することが確認できた。

なお、この場合、アークは直径4mmのタングステン棒端面に水冷銅板の場合と同じくアーク長5mmで発生させている。

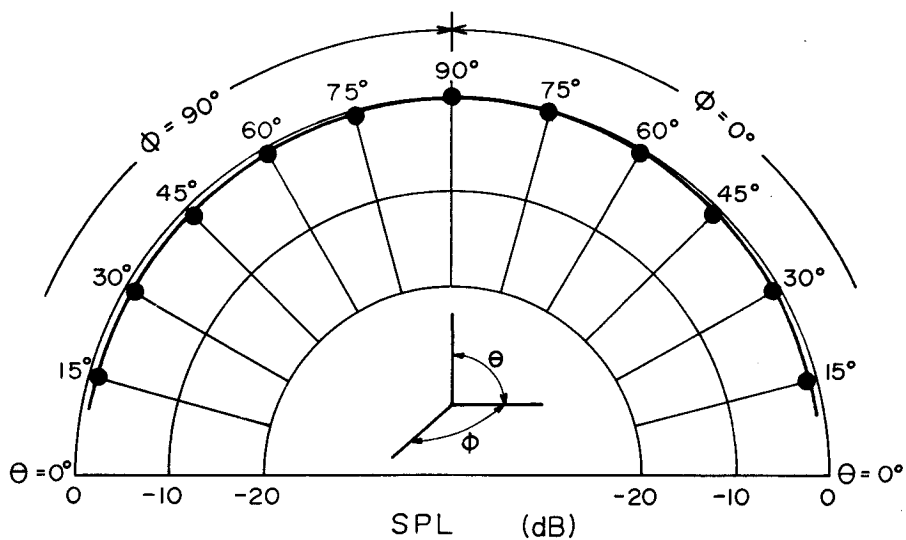


Fig. 4-51 Response of welding arc sound emission.

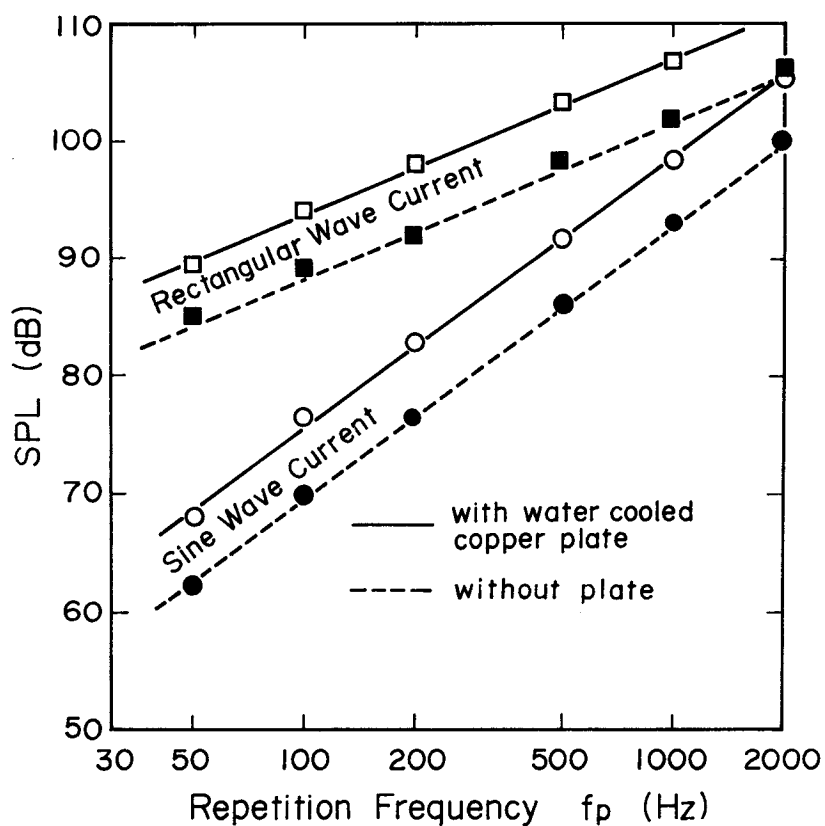


Fig. 4-52 Effects of water cooled copper plate on sound pressure level.

以上の実験結果から、水冷銅板の存在は剛体壁の場合とほぼ同等の効果を溶接アーク音に与えることが示された。したがって、水冷銅板のある場合の音圧は次式で与えられる。

$$P_e = (1/r) U_0 f \rho \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

(4.13) 式において、 r と ρ とは定数であるから、 P_e は U_0 と f とによって決定されることになる。 U_0 は u_a に比例し、 u_a は P_i に比例し、 f に反比例する。また、 P_i は電流振幅 τ_p に比例することが Fig.4-41 に示すように実験的に確認されている。 f は正弦波電流の場合、 f_p に等価である。したがって、実験的に求められた P_e 、 f_p 、 τ_p に関する (4.5) 式は理論的に求められた (4.13) 式と定性的に対応することになる。

(4.13) 式を音圧レベルで表わすと次のようになる。

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} U_0 + 20 \log_{10} f + 114 \quad \text{dB} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

ただし、 $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 、 $r = 0.12 \text{ m}$ とした場合。

なお、(4.14) 式は、音源寸法が波長より十分小さな条件においては、体積速度が同じならば音源の形状及び大きさにかかわらず、音圧レベルは変化しないことを意味している。

Fig.4-53 に、(4.14) 式を用いて計算から求めた音圧レベルと実測値との比較した例を

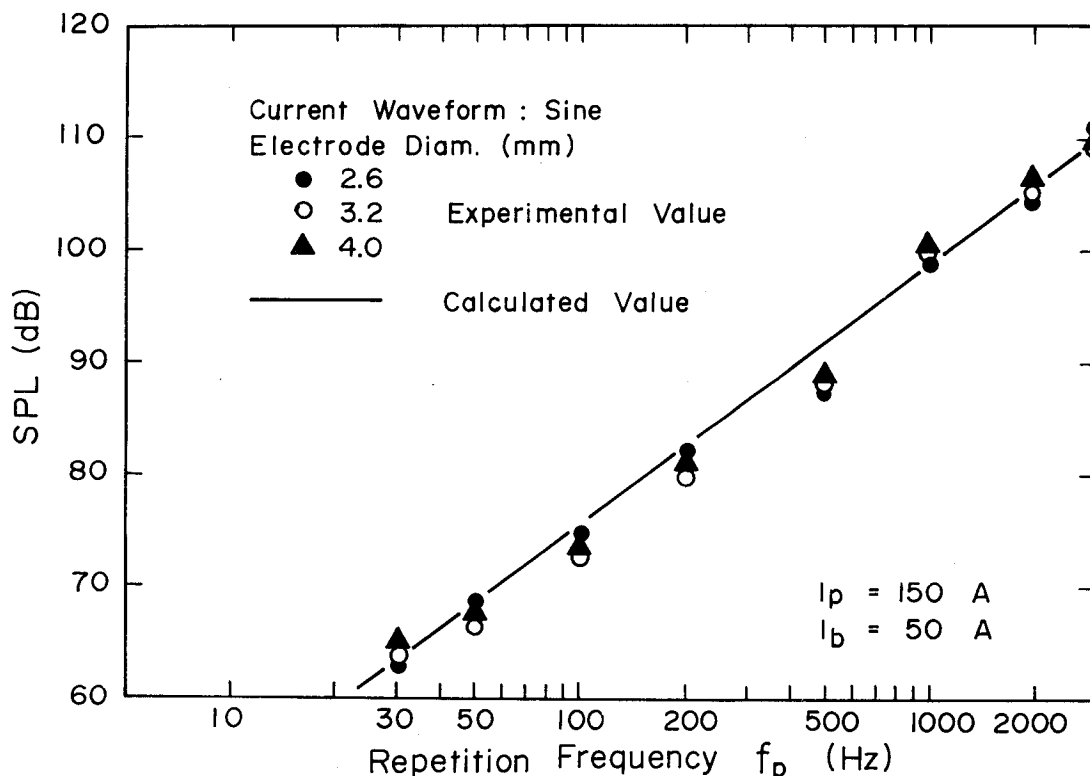


Fig. 4-53 Comparison of the experimental results with calculated results.

示す。なお、計算に際し U_0 は、音圧レベルの実測値から P_e を求め、これを(4.12)式に代入して得られる各周波数についての値を使用している。

両者は f_p の広い範囲で、2.6、3.2、4.0mm ϕ のいずれの電極径を用いた場合にも良い一致を示している。

なお、他の電流波形、特に矩形波及び鋸歯状波電流の場合には、溶接アーク音の周波数スペクトル成分が単一でなく、また卓越周波数が f_p に一致しないことなどから(4.14)式をそのまま適用することはできない。しかし、これらの波形の場合についても波形の立上り速度の効果^{24,25)}をエネルギー的に考慮すれば、正弦波電流の場合と同様に呼吸音に準じて扱うことが可能と考えられる。

4.5 結 言

本章は、溶接アーク音の諸特性を明らかにする立場から、被覆アーク溶接、CO₂アーク溶接、MIGアーク溶接、TIGアーク溶接及びパルス化TIGアーク溶接など各種溶接法を対象として、溶接アーク音に関する広範なデータの収集を行い、実験的、解析的検討を加えたものであって次のような結論を与えている。

被覆アーク溶接に関して：

- (1) 溶接アーク音の音圧レベルは、交流アーク及び直流アーク(S.P、R.P)の場合ともに溶接電流の増加に伴って上昇し、音圧レベルと溶接電流の間には溶接棒に対する適正、過小及び過大電流を含む広い範囲で直線関係が成立する。また音圧レベルは、アーク長(アーク電圧)及び極性の影響を受け、アーク長が長く、R.Pの条件で数dB上昇する。
- (2) 溶接アーク音は、広帯域な周波数スペクトル成分を有し、巨視的には白色音的な性質を示す。しかし、周波数スペクトル・プロファイルは交流アークと直流アークとでは若干異なり、直流アークの場合にはさらに白色音的である。一方、低周波領域に着目すると、出力電流特性に依存する線スペクトルが存在する。この線スペクトルは、交流アークでは、アークが電流の半波ごとに消滅、発生を繰り返すために生じたものであり、したがって電源周波数(50/60Hz)の2倍を基本振動とする倍振動成分である。また、直流アークでは出力電流のリップル周波数成分とその高次高調波成分に対応するものである。なお、この基本スペクトル成分は溶接電流、アーク長の増加に伴って強くなる。

主に、CO₂アーク溶接に関して：

- (3) Dip型移行条件の場合、再点孤時に発生する音波は衝撃波の伝播特性を有し、その速度が1.2Mになることを明らかにするとともに、その発生機構について検討を加えた。

- (4) 溶接アーク音の音圧レベルにおよぼす供給電力、溶接速度、ガス流量、ワイヤ突出し長などの影響を明らかにし、その特徴点を明確にした。
- (5) 溶接アーク音の周波数領域における諸特性について明確にするとともに、溶接アーク音から溶滴の離脱、移行に関する情報の抽出が可能なことを示した。

パルス化TIGアーク溶接に関して：

- (6) 溶接アーク音の音圧 P_e を支配する主要な因子が電流波形の繰返し周波数 f_p 、電流振幅 τ_p であることを明らかにし、これらの間には $P_e \propto f_p^m \cdot \tau_p^n$ なる関数関係の存在することを示し、さらに、溶接アーク音の騒音性を予測する上で実用上有効な実験式を提示した。
- (7) 溶接アーク音の周波数領域における諸特性を各種電流波形の場合について明確にした。すなわち、溶接アーク音は f_p を基本音とする倍音構成であることを明らかにするとともに、その卓越周波数 f_{EX} が三角波及び正弦波電流では f_p と一致し、矩形波及び鋸歯状波電流では f_p の高次成分へ移動することを明らかにした。
- (8) 電流波形をパルス化した際のアークの挙動について明確にした。すなわち、外観上、アークはベース電流で最も収縮し、ピーク電流で最も膨張した形状を呈し、この形状変化が位相的にも周波数的にも電流波形の変化に一致することを明らかにした。さらに、時刻列上のアークの挙動をアーク画像の面積で評価することによって、アークの挙動がおよそ電流波形的であることを明らかにした。
- (9) 溶接アーク音がアークの収縮膨張振動によって生ずる呼吸音と見なせることを示し、呼吸音の理論に基づく考察を加えた。

第5章 溶接アーク音と溶接振動の関係

5.1 緒言

溶接アーク現象を解明し、溶接進行状況を監視、制御する上で、溶接アーク音が有効な情報源となり得る可能性については前章までに述べた。しかし、例えば高速度写真から観察される熔融池の振動のような低周波域の信号をマイクロホンによって検出することは、一般にその低域特性からして困難であり、このような信号に対しては直接、被溶接材から固体振動として検出するのがむしろ効果的と考えられる。

一方、アーク溶接時に被溶接材に発生する振動（以下、論文中これを溶接振動と呼ぶ）はビード波の形成に影響をおよぼすといわれ²⁶⁻²⁸⁾、熔融池の流体的挙動及びその凝固過程を研究する上に興味ある問題を提供すると思われる。しかしながら、溶接振動に関する系統的研究は少なく、その性質については不明確な部分が多い。

本章は、100mV/G級の高感度圧電型振動加速度計を用いて溶接振動を検出し、その諸性質を明らかにするとともに、熔融池の挙動との関係及び溶接アーク音との関係などについて実験的、解析的検討を行っている。

5.2 溶接振動の検出方法

溶接振動の検出はFig.5-1に示すような方法で溶接台に設置した圧電型振動加速度計（BN社製、Model 507、感度：97.4mV/G、応答周波数：2～12000Hz、横感度：5%）を用いて行った。

溶接振動の検出に際しては、あらかじめ溶接台を含む被溶接材の振動姿態と固有振動数 f_0 を把握しておくことが必要である。このためには、溶接台の形状は単純なものであることが望ましい。そこで、溶接台の形状を有効半径が350mmの周辺固定を施した円盤状とした（材質：SS41、板厚：25mm）。

この結果、溶接台自身の固有振動数は実測（ハンマーによる打撃試験）では525Hz、計算^(注)では507Hzとなり、両者は比較的良い一致を示した。

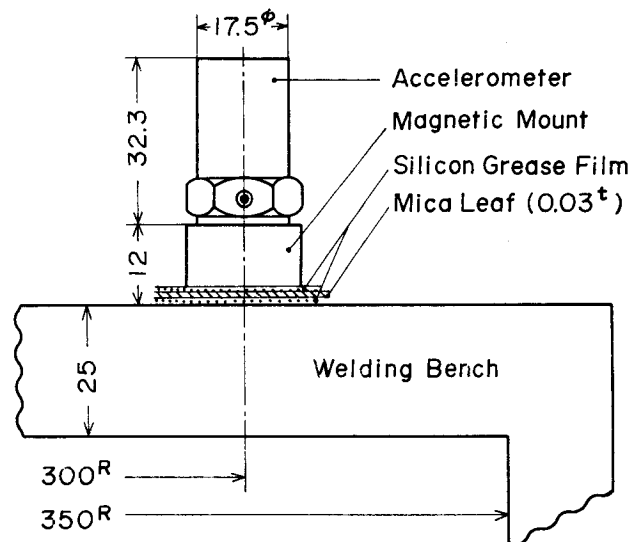


Fig. 5-1 Schematic arrangement of apparatus for measuring welding vibration.

固有振動数は溶接台への被溶接材の固定方法、被溶接材の形状寸法などによって変化するので、これらが一定になるように配慮し、溶接台への被溶接材の固定は専用取付具を用いて行い、また、被溶接材の寸法は50×12-500mm（材質：SM-41B）一定のものを使用した。打撃試験によれば、被溶接材を固定した場合の一次固有振動数 f_0 は253Hzであり、振動姿態は比較的単純なものであった。

なお、溶接台はトーチ部の移動の際に発生するノイズを遮断するために、トーチ部とは完全な分離構造としている。

溶接振動は溶融池の挙動から推測して多自由度の振動系と考えられるが、ここでは上下一方向のみの振動を対象としている。溶接振動の周波数スペクトル分析は、ハードウェアに影響を与える振動数が一般に2000Hz程度の範囲のものであることから、3000Hzまでの帯域を対象として溶接アーク音の分析手法に準じた。なお、溶接法はCO₂アーク溶接によるビード・オン・プレート溶接であり、溶接条件はTable 5-1に示すとうりである。

Table 5-1 Working condition for measuring welding vibration.

Welding Current (A)	200~400
Arc Voltage (V)	Variable
Welding Speed (cm/min)	20 (~100)
Gas Flow Rate (l/min)	20
Wire Extension (mm)	20
Wire Diameter (mm)	1.6 (1.2)
Torch Angle (deg.)	90
Polarity	D.C.R.P

(注) 平板の振動の基礎式は次式で与えられる²⁹⁾。

$$\gamma \frac{\partial^2 w}{\partial T^2} + \frac{Et^2}{12(1-\sigma^2)} \nabla^4 w = 0 \quad \dots\dots\dots (I)$$

ここで、 w は変位、 E は板のヤング係数、 γ は板の密度、 t は板の厚さ、 σ はポアソン比、 T は時間である。

円板の固有振動数をこれより導くと、固有振動数 f_{nm} は周辺固定の場合には次式のようなになる。

$$f_{nm} = \frac{\lambda^2 t}{4 \pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3 \gamma (1-\sigma^2)}} \quad \dots\dots\dots (II) \quad \text{Table I Value of } \lambda \text{ at circular plate.}$$

ここで、 a は円板の振動面の有効半径であり、 λ の値は節直径数 n 、節円数 m に対し Table I のような値である。

溶接台円板のモードは一次モードと考えられるから、 $n=m=0$ のときの $\lambda=3.20$ を(II)式に代入

m \ n	0	1	2
0	3.20	4.61	5.91
1	6.31	7.80	9.20
2	9.44	11.00	12.40

することにより固有振動数 f_0 ($n=m=0$ のとき $f_{nm}=f_0$) が求まる。なお、計算においては各々次のような値を用いている。

$a=35\text{cm}$ 、 $\lambda=3.2$ 、 $\sigma=0.32$ 、 $E=2.1\times 10^6\text{kg/cm}^2$ 、 $t=2.5\text{cm}$ 、 $\gamma(=\text{比重 } \rho/\text{重力の加速度 } g=0.0078/980)=7.96\times 10^{-6}\text{kg s}^2/\text{cm}^4$

5. 3 溶接振動波形

Fig.5-2に、溶接振動波形（加速度波形）の例を溶接電流波形に対比して示す。(a)及び(b)は溶滴の移行形態がDip型の条件であり、(c)はGlobular型で埋れアーク、(d)はGlobular型でアーク長のやや長めの条件である。

溶接振動波形は図に見られるように、溶滴の移行形態及びアーク長の相違によりかなり特徴的な変化を示している。各オシログラムに見られる正弦波状の波形は、後に示すように出力電流に含まれるリップル周波数 ($f_R=300\text{Hz}$) に対応する成分と、溶接台を含む被溶接材の固有振動数 ($f_0=253\text{Hz}$) に対応する成分とから成る複合波形であって、この波形の振幅は溶接アーク音圧の波形と同様、電流が大きく、またアーク長が長い条件の場合に大きくなる傾向を示す。

一方、衝撃状波形について見ると、(a)及び(b)では振幅と持続時間の類似したものが、再点弧に同期して発生している。これに対し(c)では持続時間のやや長いものがやや不規則に発生し、(d)では持続時間の短いものが発生している。ただし、(c)及び(d)についても長時間のデータを観察すると、これら衝撃状波形も比較的周期的に発生しており、その周期はワイヤからの溶滴の離脱周期にほぼ対応するようである。

(a)、(b)、(c)に見られる衝撃状波形についてさらに詳細に観察すると、これらの波形は単純な減衰過程を示さず、あたかも複数の衝撃力を受けて発生したと思われる状態のものが多。なお、衝撃状波形は溶接速度によっても変化し、埋れアークの条件の場合であっても、溶接速度が大きな条件では持続時間の短いものが発生する傾向にある。

以上の観察結果から、衝撃状波形の発生機構は次のように説明することができる。すな

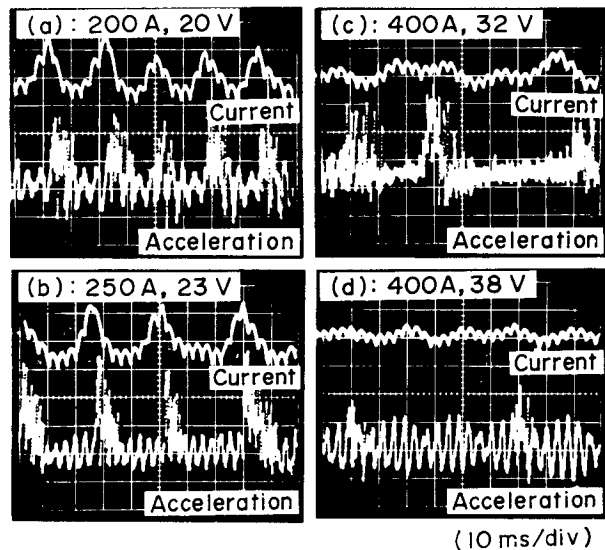


Fig. 5-2 Examples of acceleration waveforms of welding vibration and welding current waveforms.

わち、衝撃状波形は、Dip型移行条件では再点弧時の、Globular型移行条件では溶滴離脱時の爆発的なフェーズ・アクションによる衝撃力が溶融池を加振し、次に、再点弧時または溶滴離脱直後のアーク力が溶融池に作用することにより発生する。再点弧時及び溶滴離脱時のフェーズ・アクションが大きな圧力の発生を伴うことは、スパッタの発生状況及び溶接アーク音の音圧波形の観察（前章Fig.4-14参照）から明らかである。また、アーク力が溶融池形状の複雑な埋れアークのような場合には、局部的に、しかも直接的に作用しやすいことは、アークが幾何学的最短距離を有する部分へ選択的に発生する特性をもつことからして十分理解することができる。このように考えると衝撃状波形の様態の相違を良く説明することができる。

5. 4 溶接アーク音と溶接振動

溶接アーク音の強さは溶接法や溶接条件によって異なるが、音圧レベルSPL = 100 dB以上にも達することがある。100dBは音圧で2 Pa、強さで 10^{-2}W/m^2 に相当するので、溶接アーク音が溶接振動の加振源の一つになり、両者に相関性の存在することが予想される。

そこで、まず溶接台の上方400 mmの位置に設置したスピーカから白色音を発生させて、溶接台に生ずる振動の大きさを測定した結果、音圧レベルSPL (s)と振動加速度レベルVAL (s)の関係はFig.5-3に示すようになった。両者は直線関係にあり、この関係は理論的にも妥当である。すなわち、半径aの球音源があって半径方向に一樣な実効振動速度 u_e で収縮膨張振動を考えると、このとき単位面積当り放射される音響出力Wは次式で与えられる³⁰⁾。

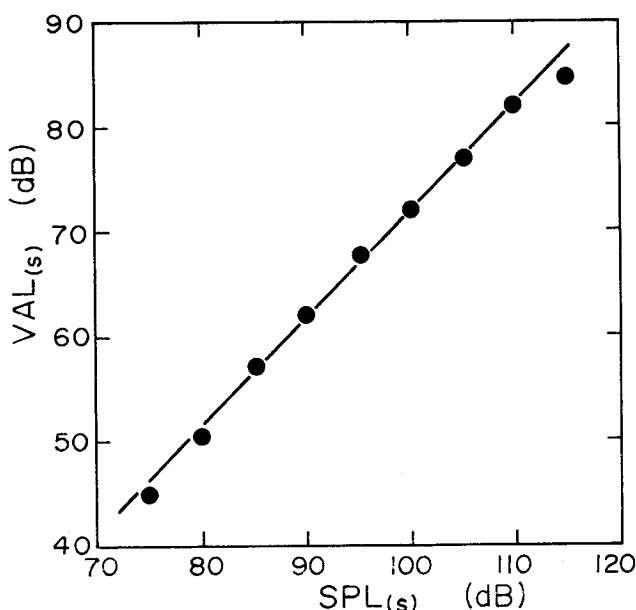


Fig. 5-3 Relation between sound pressure level and vibration acceleration level at white noise.

$$W = (1/2) \rho c u_e^2 K \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

ここに、 ρ は媒質密度、 c は媒質中の音速、 $K(=k^2 a^2 / (1 + k^2 a^2))$ は修正項である（ただし、 $k(=\omega/c = 2\pi f/c)$: 波定数、 ω : 角速度、 f : 周波数）。

いま、音響出力のパワレベルを次式で定義し、

$$PWL = 10 \log_{10} W / 10^{-12} \dots\dots\dots (5.2)$$

振動加速度レベルを次式で定義する。

$$VAL = 20 \log_{10} \alpha_e / 10^{-5} \dots\dots\dots (5.3)$$

(5.3)式において、 α_e は実効振動加速度であり、 $\alpha_e = u_e \omega$ なる関係がある。また、 10^{-5}m/s^2 の値はISO/TC43の draft を参考とした基準の実効振動加速度である。

(5.1)式を(5.2)式及び(5.3)式を用いて対数表示すると次式のようなになる。

$$PWL = VAL - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} K + 27 \dots\dots\dots (5.4)$$

(ただし、媒質を空気とし $\rho = 1.2 \text{kg/m}^3$ 、 $c = 340 \text{m/s}$ を用いた場合)

音源が剛体壁上にあって音波が1/2空間に放射されるとき、パワレベルPWL と音圧レベルSPLの間には(2.7)式から次式のような関係が成立する。

$$PWL = SPL + 20 \log_{10} r + 8 \dots\dots\dots (5.5)$$

(5.5)式を(5.4)式に代入すると、

$$SPL = VAL - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} K - 20 \log_{10} r + 19 \dots\dots\dots (5.6)$$

したがって、音圧レベルと振動加速度レベルとはKを介して理論的に対応する。

次に、溶接電流を200A及び400A一定として、アーク電圧のみを変化させた実際のCO₂アーク溶接について音圧レベルと振動加速度レベルの関係を調べた結果、両者の関係はFig.5-4のようになった。

図に見られるように、振動加速度レベルは適正アーク電圧範囲(溶接機使用取扱い書による)を含むかなり広い範囲で音圧レベルと比較的類似の変化傾向を示し比例関係が成立するが、過大アーク電圧範囲では音圧レベルが上昇するにもかかわらず、振動加速度レベルは逆に減少するという傾向がある。さらに特徴的な点は、音圧レベルが同じであっても振動加速度レベルは電流及び電圧条件によって異なる場合があり、両者はFig.5-3のようにならぬ直線関係にはならないことである。

以上のような事実を溶接アーク現象と関連づけて考察すると、アーク電圧が大きな条件(アーク長の長い条件)で振動加速度レベルが減少傾向を示す一つの原因は、アーク直下部の溶融金属層の厚さがアーク長の短い条件の場合に比べて厚く、振動の伝播過程における減衰損失が大きくなるためと推測される。この推測は、振動加速度波形を周波数分析す

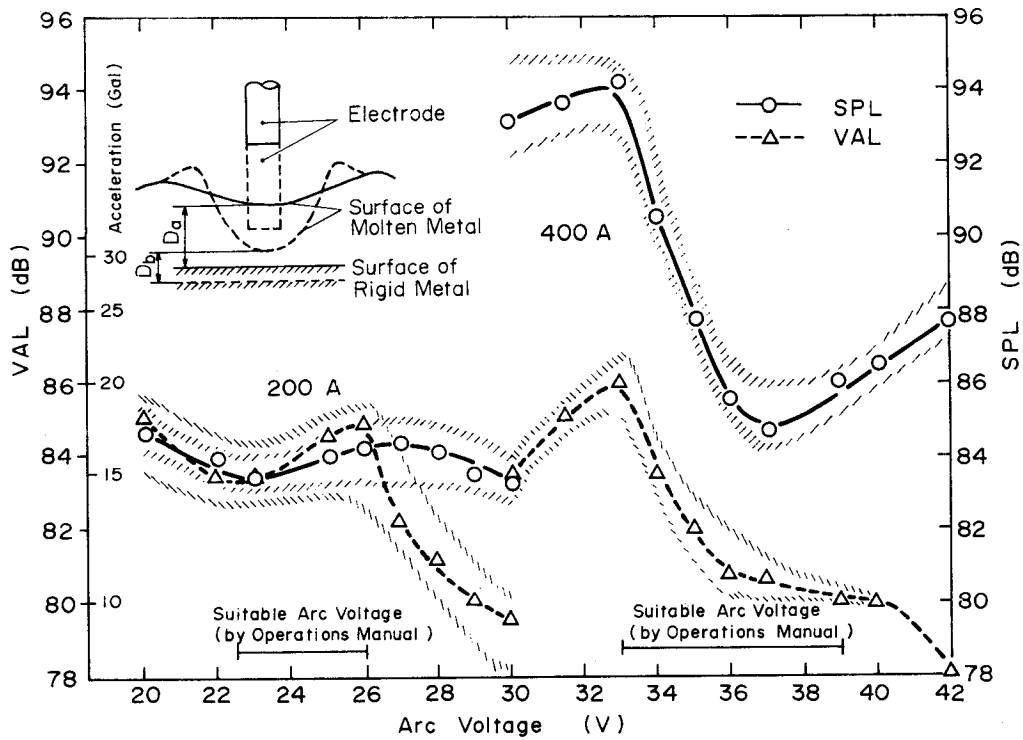


Fig. 5-4 Variations of vibration acceleration level with sound pressure level in CO₂ arc welding.

ると、アーク長の長い条件の場合に高周波数帯域でのスペクトル成分が小さく現れるという事実からも裏づけられる。

なお、Fig.5-4の附図は、アーク長が長い条件 (D_a) と短い条件 (D_b) の場合の熔融金属層厚さを模型的に示している。同じ音圧レベルに対する振動加速度レベルをFig.5-3とFig.5-4について比較すると、Fig.5-4 (実際の溶接) の方が振動加速度レベルははるかに大きな値を示している。このことは、溶接振動が溶接アーク音のみならず他の影響、例えば、熔融金属の上下動などの影響を受けていることを示唆するものである。

5. 5 熔融池の挙動

高速度写真による熔融池の挙動の観察例をFig.5-5(a)、(b)に示す (撮影方向は溶接線とほぼ直角、水平であり、撮影速度は(a)が4000frames/s、(b)が2000.frames/sである)。溶滴の移行形態がGlobular型で、かつ埋れアークの条件である(a)から、熔融金属がさざ波状の微細な表面波をもち、アーク直下部で深く窪んだ形状を保ちつつ、全体が周期的な上下方向に大きなうねり運動をする様子が観察される (写真の駒No.1~32でほぼ1周期に相当。また、No.14とNo.24の見掛け上の波高差は約4mm)。このうねりは、溶滴の離脱直後にワイヤの前方に急激に発生する三角状の波 (No.2及びNo.32、このとき熔融池は荒れた状態を

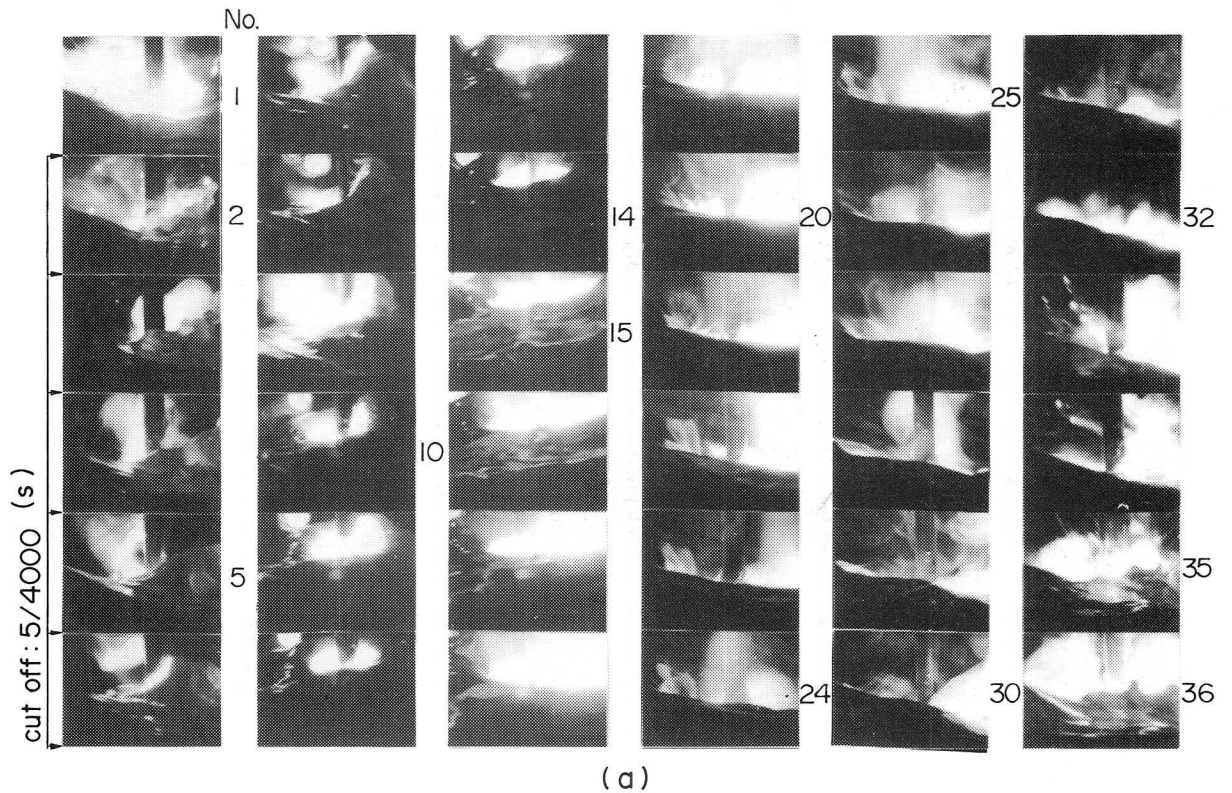


Fig. 5-5 (a) High-speed motion photographs of molten metal.
Welding current: 400A, Arc voltage: 32V, (4000 frames/s)

呈する) と、ワイヤの後方に比較的徐々に成長する波頭に丸味を帯びた波とが結合してできた変位の腹 (No.14) が周辺部に徐々に拡がることによって1周期を形成するようである。

Globular型移行で、アーク長の長めの条件である(b)の場合、溶融金属は、アーク直下部の窪みが浅く、溶滴のワイヤからの離脱時にスパッタの発生が多く見られるものの (No. 31)、全体的になめらかで、かつ単調なうねり運動をしている。このような溶融金属の波の挙動は海の「風波」と「うねり」の関係に類似したものであり、(a)は両者の強い場合に相当する。

以上の観察結果は、5. 3項の溶接振動波形についての説明を良く裏付けるとともに、アーク長の長い条件の場合に振動加速度レベルは減少し、その変動幅が小さくなるという Fig.5-4からの事実にも一致する。

次に、Fig.5-5(a)、(b)を得たフィルム上の画像を光学系を用いてすりガラス板上に拡大、投影し、溶融金属の上下方向の動きを、スリットを介してすりガラス板に取り付けた光電素子 (NEC社製、PO32H) によって電気量に変換した例を Fig.5-6に (出力は平滑化

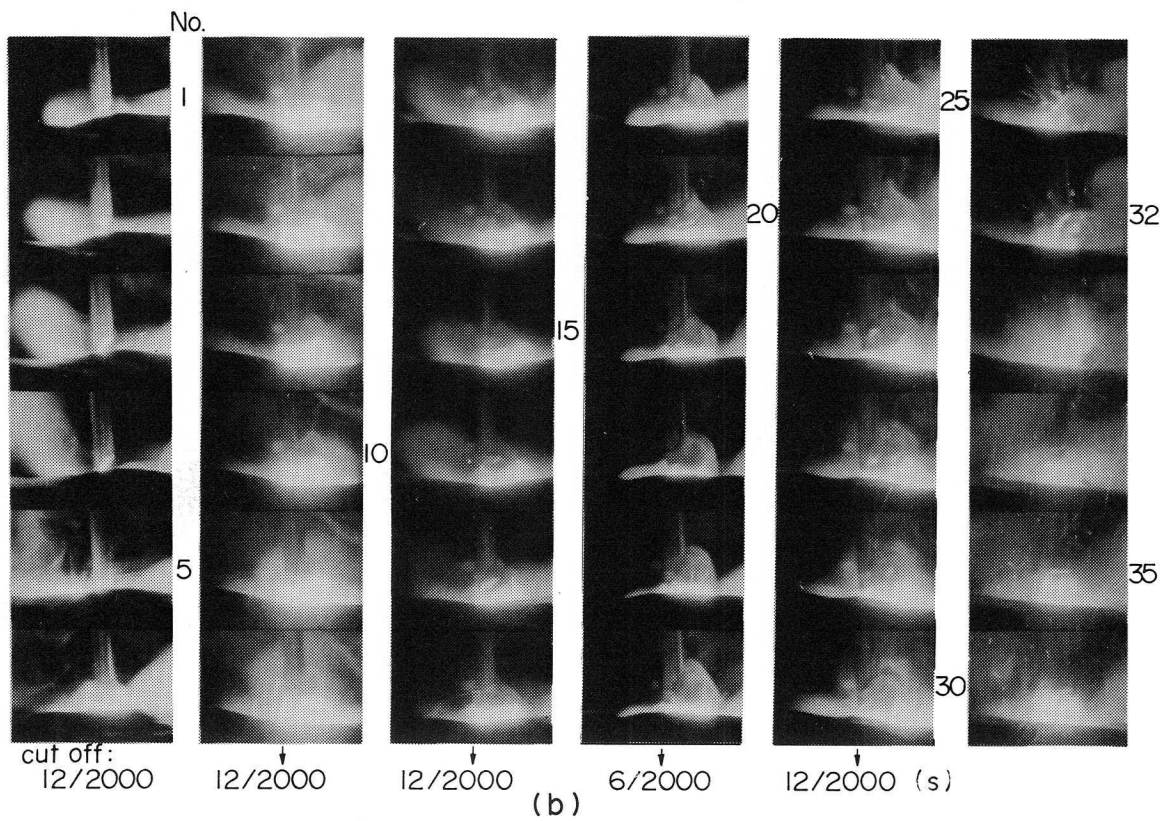


Fig. 5—5 (b) High-speed motion photographs of molten metal.
 Welding current : 400A, Arc voltage : 38V, (2000 frames/s)

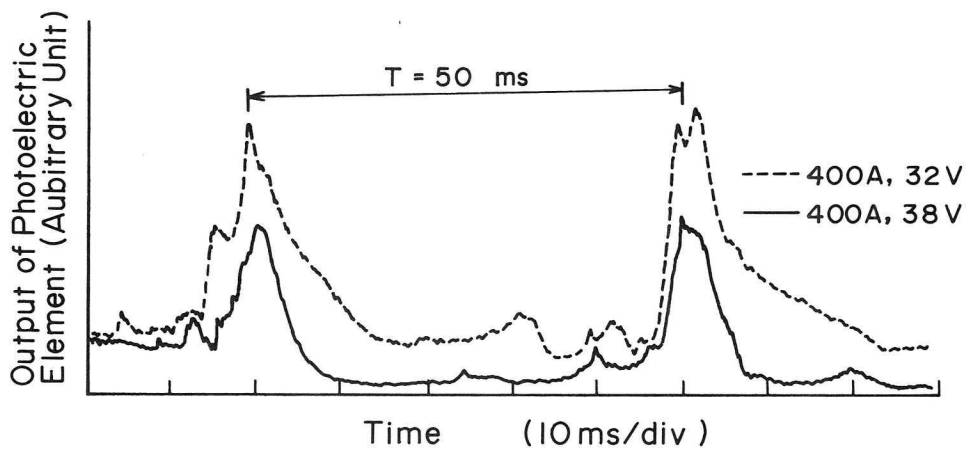


Fig. 5—6 Examples of output signal from photoelectric element.

処理)、その回路をFig.5-7 に示す。

Fig.5-6に見られるように、うねりの周期は400 A、32 V及び400 A、38 Vの場合ともに50ms程度であり、この周期は、溶接振動波形の低周波域を対象とした周波数スペクトルの分析結果 (Fig.5-12参照) と良く対応し、また、単位時間当りのワイヤ送給量 (V_w) と、溶滴を半径 a_d の球と仮定することによ

り算出されるワイヤからの溶滴の離脱周波数 $f_G (= 3 V_w / (4\pi a_d^3))$ にほぼ対応する。

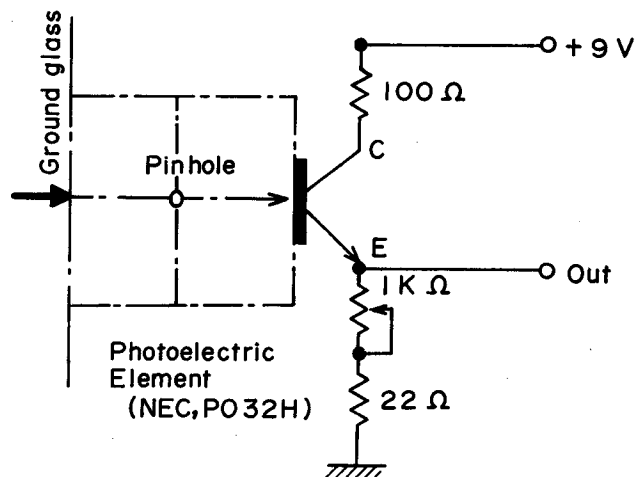


Fig. 5-7 Photoelectric circuit.

5. 6 溶接振動波形の周波数スペクトル (高周波域)

Fig.5-8(a)及びFig.5-9(a)に、溶滴の移行形態がDip型及びGlobular型の場合の溶接振動波形の周波数スペクトル分析結果を示す。また、参考に供するためFig.5-8(b)及びFig.5-9(b)には同一条件のもとでの溶接アーク音圧波形の分析結果を示している。

溶接振動の周波数スペクトル中に、短絡周波数 f_D (Fig.5-8(a))、溶滴の離脱周波数 f_G (Fig.5-9(a))、出力電流のリプル周波数 f_R とその高調波 $m f_R$ 、及び、溶接台を含む被溶接材の固有振動数 f_0 とその高調波 $m f_0$ などに対応する成分が認められる ($m=2, 3, \dots$)。

Fig.5-8(a)、Fig.5-9(a)に示す溶接振動の分析結果から、最も特徴的なスペクトル成分と見られる f_D (Dip型移行の場合) または f_G (Globular型移行の場合)、 f_R 、 f_0 の三者が全周波数成分の強さに占める割合 (パワ比) を求めた結果を Fig.5-10に示す。各成分の割合は溶接条件により異なっているが、Dip型移行条件では f_D 成分、Globular型移行条件では f_0 成分の占める割合が最も大きい。また、三者で全パワのおよそ50%から70%を占めることから、これらはビード波の形成に関してもなんらかの影響をおよぼすと考えられる (ただし、 f_0 成分は溶接本来の現象に起因するものではない)。

Garlandら²⁶⁾、Koteckiら²⁷⁾、及び中根ら²⁸⁾は、TIGアーク溶接におけるビード波形成機構について検討を行い、ビード波の中に f_R と周期的に一致する波が存在することを確認している。しかしながら、 f_0 に対応するビード波の存在についてはまったく言及していない。彼らの実験においては供試材としていずれも薄板 (板厚: 1.067~3.175mm、形状及び

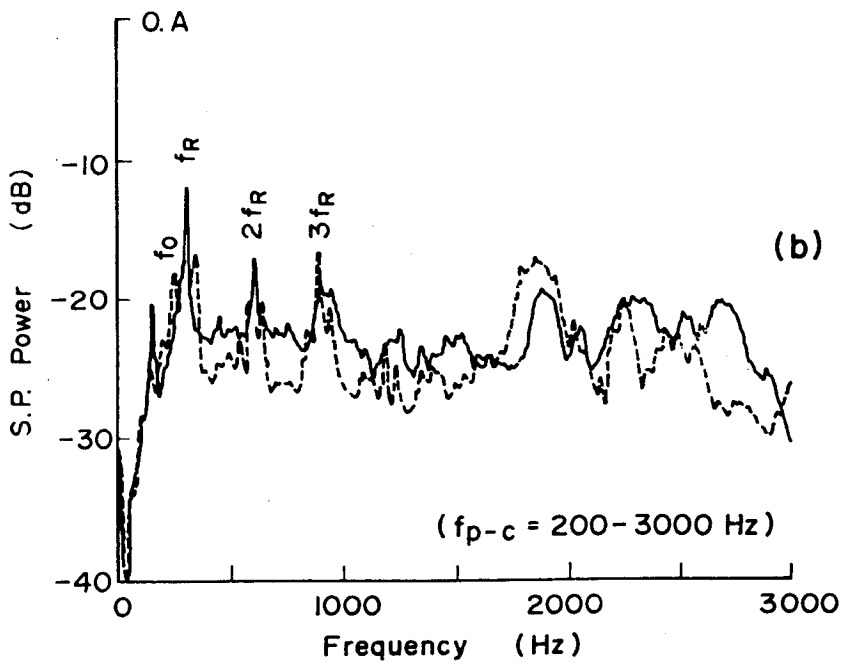
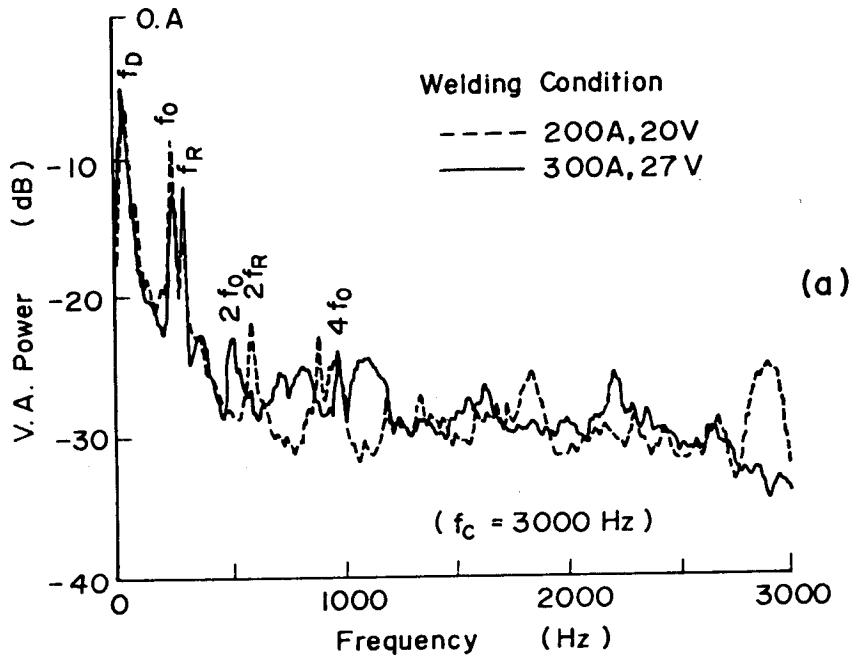


Fig. 5-8 Power spectrum of acceleration of welding vibration (a) and welding arc sound (b) on dip transfer arc at high frequency region.

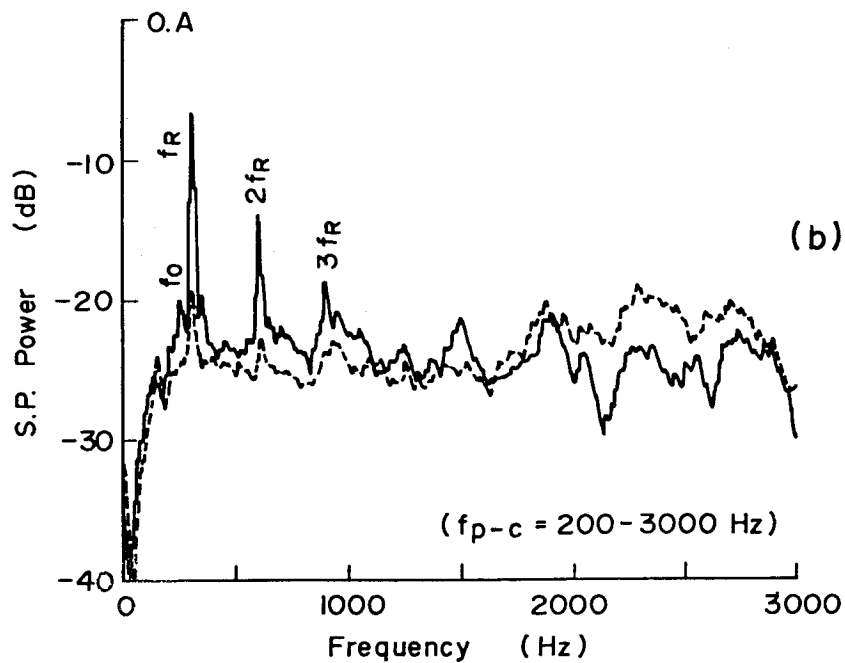
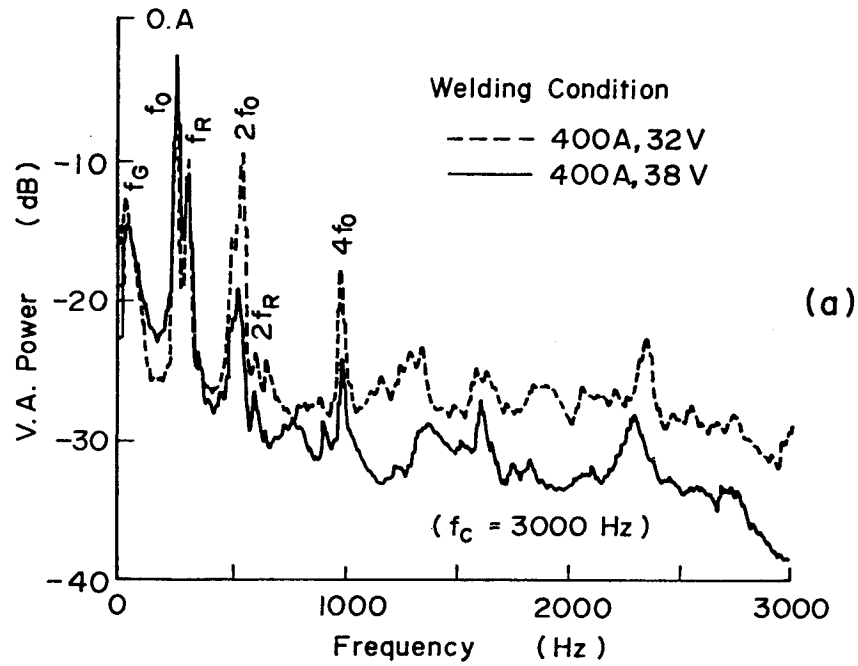


Fig. 5—9 Power spectrum of acceleration of welding vibration (a) and welding arc sound (b) on globular transfer arc at high frequency region.

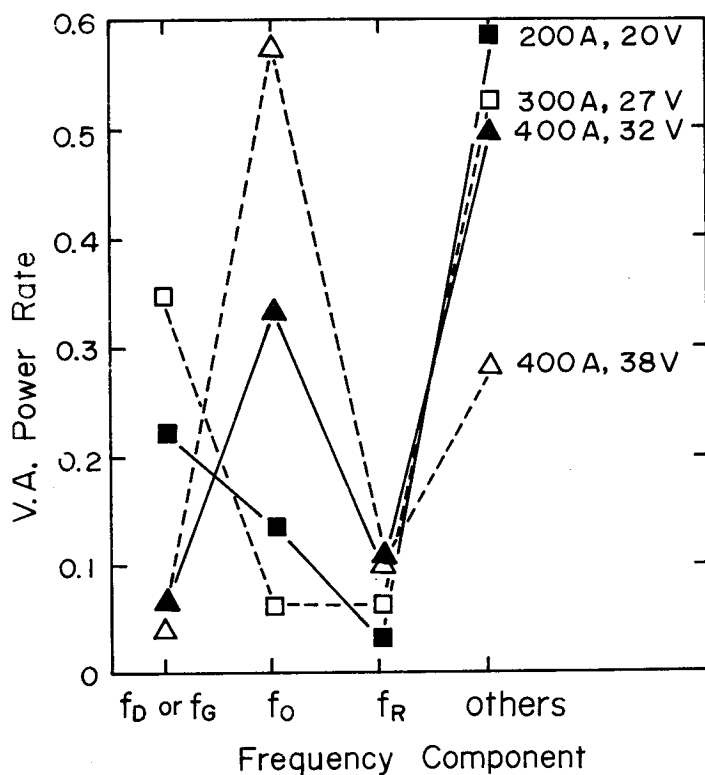


Fig. 5-10 Relation between f_D (or f_G), f_R , f_0 components and V.A power rate.

支持方法については不明)を用いているから、被溶接材の固有振動数がリップル周波数に比較してはるかに高く、したがって、 f_0 に対応するビード波が現れなかったとも考えられるが、その詳細については論文中明らかではない。

溶接アーク音の周波数スペクトル分析の結果については前章に述べたので詳細は割愛するが、Fig.5-8(b)及びFig.5-9(b)において明らかなように、 f_R 、 mf_R 、及び f_0 に対応するスペクトル成分が認められ、大局的には溶接振動に類似したスペクトル・プロファイルを示している (f_D 、 f_G 成分についてはフィルタリングの関係上現れていない)。ただし、溶接振動の場合には高周波域成分の伝播過程における減衰損失が溶接アーク音の場合に比べて大きいため、そのスペクトル・プロファイルは高周波域で一般に減少傾向を示す。

5. 7 溶接振動波形の周波数スペクトル (低周波域)

50Hzまでの低周波域を対象とした溶接振動波形の周波数スペクトル分析結果をFig. 5-11 (Dip型移行条件) 及びFig.5-12 (Globular型移行条件) に示す。図中には、溶接アーク音との相関が強いことから溶接振動に対しても影響を与えると類推される溶接電流波形の分析結果も同時に示している。

Fig.5-11(a)、(b)に見られる35Hz及び20Hz 近傍の卓越したスペクトルは、溶接電流波形の分析結果からも明らかなように、短絡周波数 f_D に相当する成分である。また、Fig.5-12(a)、(b)に見られる20Hz近傍のスペクトルは、5.5項において述べたように、溶融池の上下動の周期に対応するものであり、同時に、ワイヤからの溶滴の離脱周波数 f_G にほぼ対応するものである。

なお、Fig.5-12 (b) (Globular型移行でアーク長のやや長い条件)には明瞭なピークを有するスペクトルが認められないが、この分析結果は溶接振動波形の観察結果 (Fig.5-2) 及び溶融池の写真観察結果 (Fig.5-5)と一致する。

また、Fig.5-11及びFig.5-12に見られるように、溶接振動と溶接電流波形の

周波数スペクトルのプロファイルは良く類似したものであり、低周波域での両者には強い相関性がある。この結果は、低周波域でのアーク・プラズマ光の変動 (アーク・プラズマ光の変動は、Dip型移行条件では短絡、再点弧に、Globular型移行条件では溶滴の離脱、移行に依存する) が、溶接電流の変動と周波数的に対応するという井上³¹⁾の実験結果と一致する。

しかし、広帯域でかつ微細な溶接振動に関する情報を溶接電流から抽出することは、電

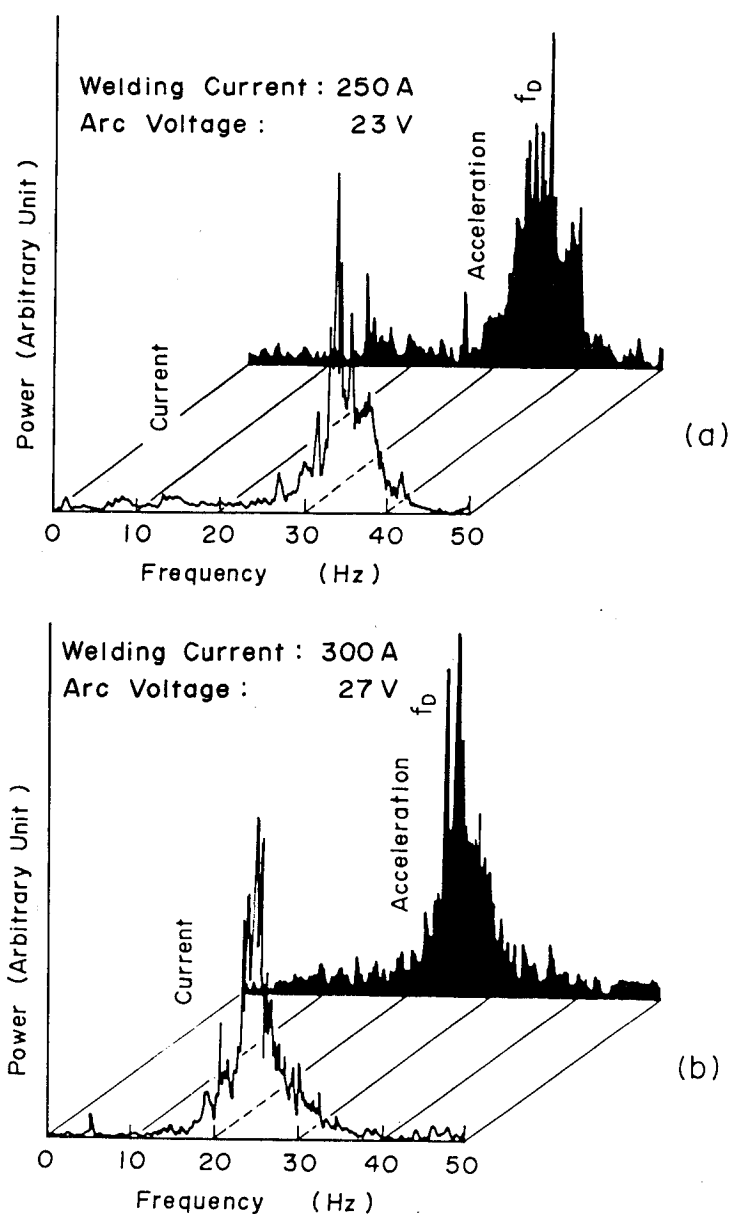


Fig. 5-11 Power spectrum of acceleration of welding vibration and welding current on dip transfer arc at low frequency region.

源の過渡応答特性上、一般には限界がある。

5.8 溶融池振動

に関する考察

溶接振動及び溶接電流の Fig.5-12(a)に見られるような卓越周波数は、溶接電流及びアーク電圧が一定であっても溶接速度の変化に伴って変化する。

Fig.5-13は、400A、32VのGlobular型移行で埋れアークの条件の場合について溶接速度のみを20cm/minから100cm/minの範囲で変化させた際の50Hzまでの帯域での卓越周波数の変化状況をまとめたものである。

図に見られるように、溶接振動と溶接電流の低周波域における卓越周波数は、溶接速度が低速から高速へと変化する過程で減少、上昇のいわゆるV字形の変化傾向を示す。なお、Fig.5-13において溶接速度が20、

40、60cm/minの条件の場合の卓越周波数については、これが溶融池の上下動の周期にほぼ対応することが高速度写真観察によって確認された。

以上のような事実から、溶接振動の卓越周波数の変化の原因を溶接速度の変化に伴う溶融池の形状変化に起因するものと考え、ビード幅及び溶込み深さについての観察を行った。

Fig.5-14は溶接速度を変化させた場合のクレータ部を含むビード外観の写真と、ビード長手方向の切断面のマクロ写真であって、これらの写真観察に基づいてビード幅及び溶込

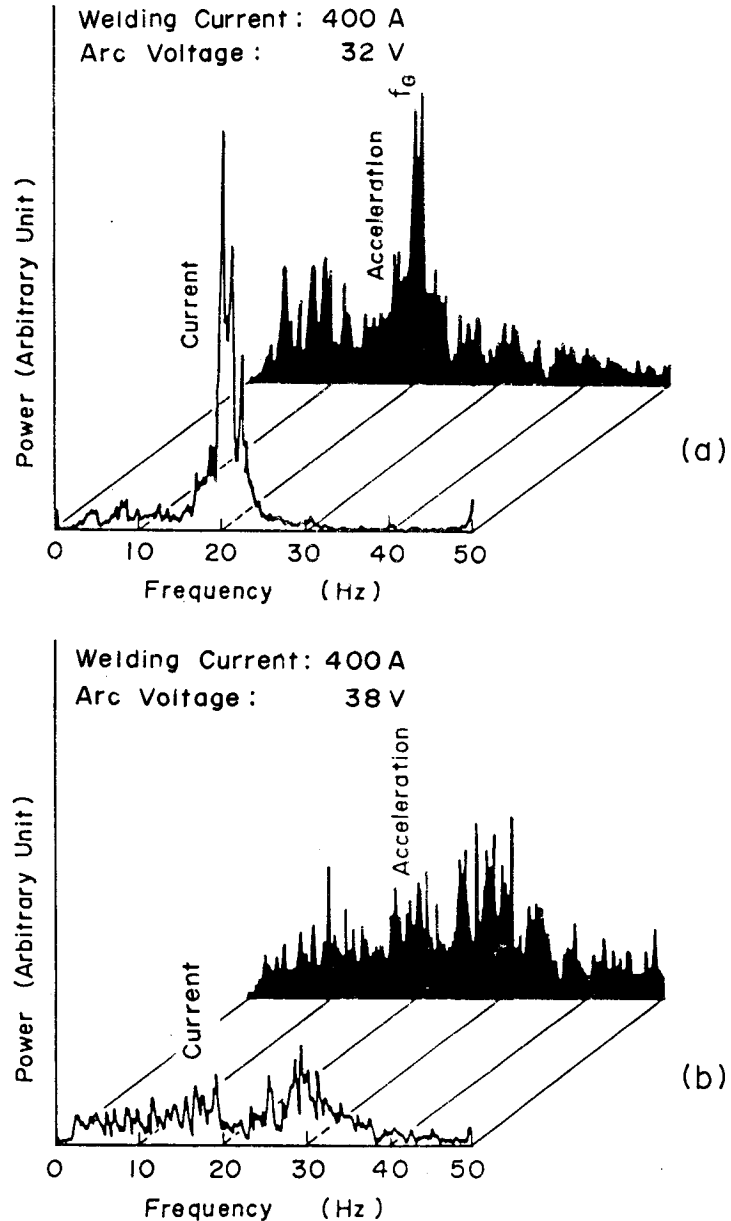


Fig. 5-12 Power spectrum of acceleration of welding vibration and welding current on globular transfer arc at low frequency region.

み深さと溶接速度の関係を整理した結果がFig.5-15である（ビード幅及び溶込み深さの値は測定箇所5個についての算術平均）。Fig.5-14及びFig.5-15から、ビード幅と溶込み深さとはいずれも溶接速度の増大に伴って減少する傾向を示すことが分かる。

山家³²⁾は高速度写真によって観察される比較的大きな振幅を有する溶融池の上下動を溶融池の固有振動と考え、溶融池の振動を円形の薄膜の振動モデルにおきかえて検討を行った結果、TIGアーク溶接における溶融池の上下動の周期は薄膜の振動モデルで得られる固有振動数と周波数的に対応するという興味ある問題を提起している。

溶融池の上下動を薄膜の振動モデルにおきかえること、さらにはアーク発生中の溶融池の半径（薄膜の半径に相当）及び深さ（薄膜の厚さに相当）をアークを遮断した凝固後のビード幅及び溶込み深さと同等と見なすことには若干の無理があるとも考えられるが、同

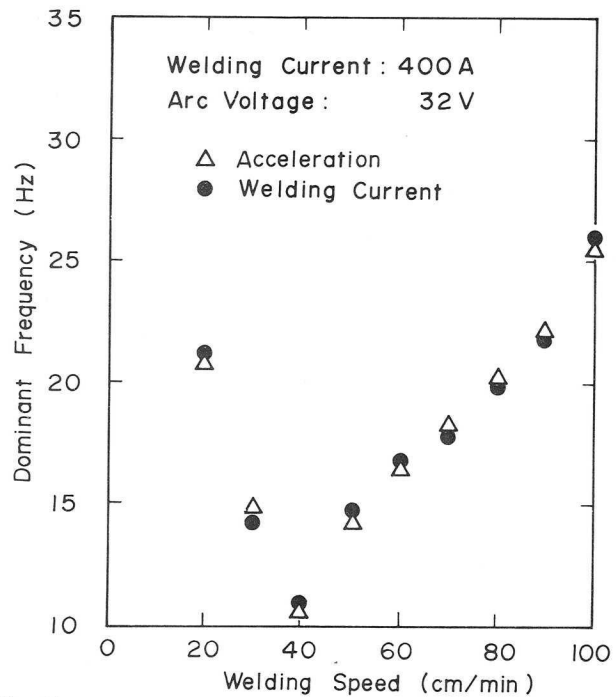


Fig. 5-13 Variation of the dominant frequency of the welding vibration with the various welding speed.

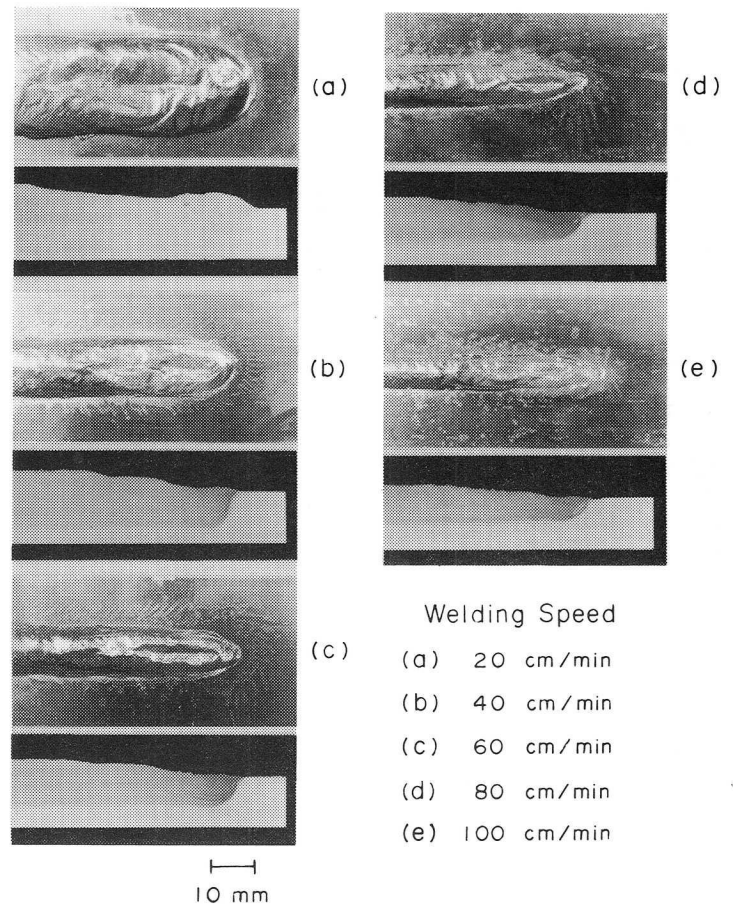


Fig. 5-14 Effects of the welding speed on the bead appearance.

(注)
 様の手法により Fig. 5-15 のデータを用いて固有振動数を計算した結果を Fig. 5-16 に示す。

Fig. 5-13 と Fig. 5-16 を比較すると、溶接速度が 40 cm/min 以上の範囲においてはやや類似した変化傾向が見られるが、40 cm/min 以下の範囲では異なった変化傾向を示している。Fig. 5-13 に示す卓越周波数を溶融池の固有振動数と仮定すると、両者についての以上のような相違は振動モデル自身に問題があること、また、溶接速度の変化に伴う溶融池表面の振動モード (n, m) を考慮していないこと (溶融池表面の振動モードはアーク圧力の作用する場所によって変化することが予想される。アーク圧力は、溶接速度が低速の場合には溶融池の中央部付近に作用し、高速の場合には溶融池の端部付近に作用する。

すなわち、前者の場合の振動モードは $n=2, m=1, 2, 3$ に、後者の場合の振動モードは $n=1, m=1, 2, 3$ になることが予想される)、などが原因と考え

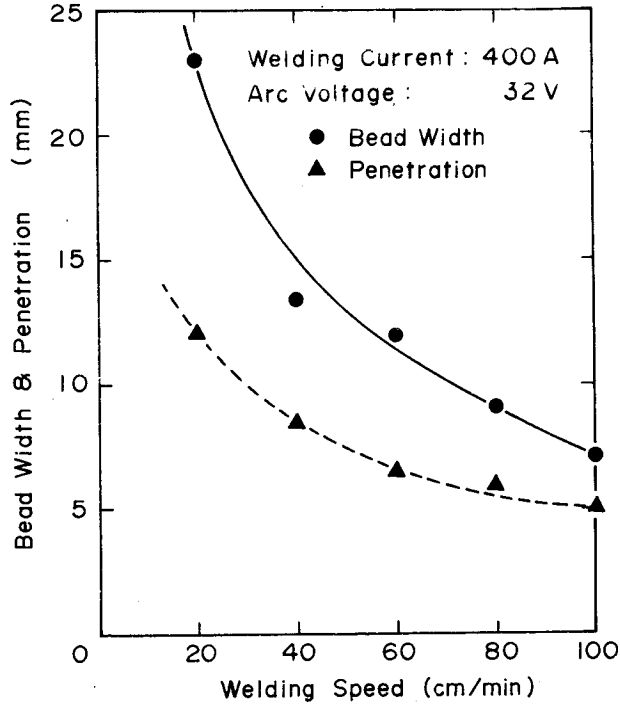


Fig. 5-15 Effect of the welding speed on the bead width and the penetration.

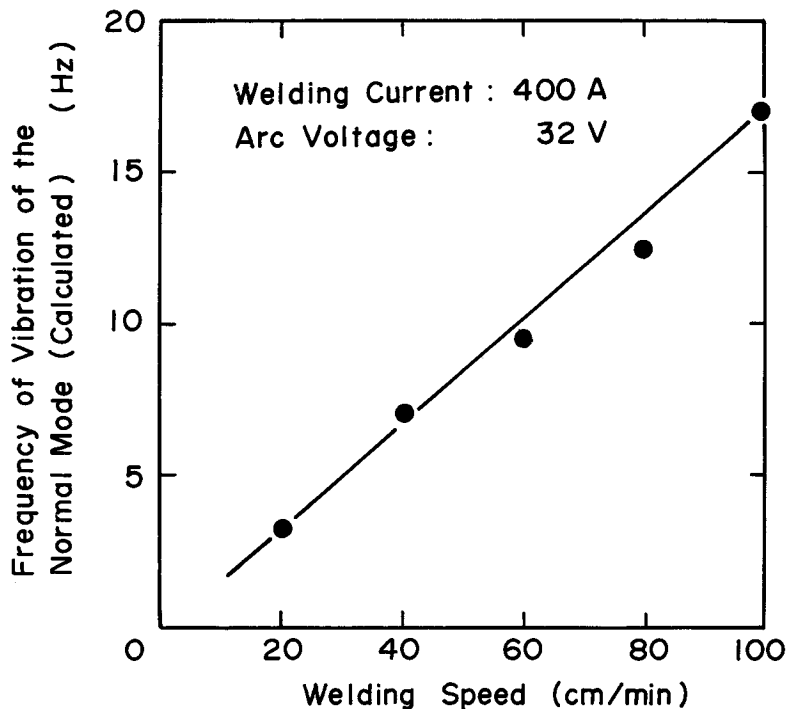


Fig. 5-16 Calculated value of the frequency of vibration of the normal mode at the various welding speed.

られるが、これらについては今後さらに詳細な検討を行うことが必要である。

(注) 円形薄膜の振動の偏微分方程式

$$\frac{\gamma}{\rho_0} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} \right) = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad \dots\dots\dots (I)$$

(I) 式の解 (ただし、最も低い固有振動数)

$$f_0 = \frac{2.4048}{2 \pi a} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_0}} \quad \dots\dots\dots (II)$$

ここで、 a は膜の半径、 γ は表面張力、 ρ_0 は面密度である。

溶融池を半径 a 、厚さ b の薄膜におきかえるとき、

$$\left. \begin{array}{l} S_c = \pi a^2 \\ \rho_0 = \rho d \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (III)$$

(III) 式を用いて、クレータ面積 S_c 、溶込み深さ d に等価な半径 $\sqrt{S_c/\pi}$ 及び面密度 ρd を得る。

したがって、(II) 式は次のようになる。

$$f_0 = \frac{2.4048}{2\pi\sqrt{S_c/\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho d}} \quad \dots\dots\dots (IV)$$

ただし、 $\gamma=950\text{dyne/cm}$ 、 $\rho=7.8\text{g/cm}^3$

5. 9 結 言

本章は、アーク溶接時に被溶接材に発生する振動 (溶接振動) を CO_2 アーク溶接を対象として、感度 100mV/G 級の圧電型振動加速度計を用いて検出し、溶接振動と溶接アーク音及び溶融池現象との相互関係などについて検討を加えたものであって、次のような結論を与えている。

- (1) 感度 100mV/G 級の圧電型振動加速度計を用いることにより、溶接振動の特に低周波域の現象をかなりの確に検出できることが明らかになった。
- (2) 音圧レベルは振動加速度レベルと理論上修正項 K を介して比例関係が成立する。しかし、実際の溶接における両者の関係はアーク電圧によって異なり、適正電圧を含むかなり広い範囲で比例関係が成立するが、過大電圧範囲では比例関係は成立しない。
- (3) 溶接アーク音の場合と同様、溶接振動の周波数スペクトル中には短絡・再点弧周波数

に対応する成分 f_D 、溶滴の離脱・移行周波数に対応する成分 f_G 、出力のリップル周波数に対応する成分 f_R 、及び溶接台を含む被溶接材の固有振動数に対応する成分 f_0 が存在する。 f_D （または f_G ）、 f_R 、 f_0 の三者が全周波数成分の強さに占める割合は50%から70%と大きい。

- (4) 溶接振動の50Hzまでの低周波域における卓越周波数は、Dip型移行条件では短絡・再点弧周波数に対応する成分 f_D であり、Globular型移行条件では溶滴の離脱・移行周波数 f_G 、または熔融池の上下動の周期に対応する成分である。なお、同周波数帯域における溶接振動波形の周波数スペクトル・プロファイルは溶接電流波形のそれに良く類似したものである。

第6章 溶接アーク音と作業環境

6. 1 緒 言

健全な溶接継手を得るためには、適正な溶接条件による安定なアークでの施工が不可欠である。これらの判断は溶接電流、アーク電圧の変化、スパッタ、ヒュームの発生状況あるいはビード形状など、総合的観察のもとに行われる。

溶接条件の設定に関しては、多くの場合に作業標準が作成されているが、アークの安定性に関しては評価方法が必ずしも明確ではない。溶接工の間では、アークの安定性を評価する際の一指標として、経験的に溶接アーク音に注目している事実があり、また、溶接アーク音を溶接技術者用教育映画に導入して効果を上げているという報告もある⁶⁾。しかしながら、聴覚によって溶接アーク音の変化を識別・評価する官能検査のような場合には個体差（聴力、熟練度など）の影響があり、その識別・評価などに関しては不明確な部分が多い。

一方、溶接アーク音は溶接法、溶接条件及び施工法によっては音圧レベルで100dB以上になることがあり、聴力保護の立場からの検討を必要とする場合がある。

本章は、以上のような見地から、まず、聴覚の一般的機能と音を識別・評価する際のプロセスについて述べ、次に、聴覚による溶接アーク音の変化の識別試験の結果について言及するとともに、騒音として見た場合の溶接アーク音の特徴点、ならびに聴力保護を目的とした場合の許容範囲と怒限度について明確にしている。

6. 2 溶接アーク音と聴覚の機能

聴覚によって溶接アーク音を受音し、識別・評価する際の流れはFig.6-1(a)のように表現することができる。これを溶接過程のフィード・バック系と見なし、分析と評価の部分を詳細に記述するとFig.6-1(b)のようになる。

すなわち、作業者の外耳、鼓膜、中耳を経た音波は内耳の蝸牛で分析される（蝸牛の周波数分解能は一般に低いが、神経回路を通して大脳に伝達される間に周波数の違いに敏感となり、特に時間的变化に対して鋭敏になるといわれる）。次に、神経回路で特徴抽出が行われ、感覚中枢を通して個々に記憶されているところの「標準パターン」との照合が行われる。

溶接アーク音を制御量とするフィード・バック系ではこのような過程を経て、例えば、アーク電圧を操作量として溶接プロセスを制御することになる。この場合、センサとしての役割をもつ聴力に差がなくとも、作業者の熟練度は「標準パターン」との照合に際し大きなウェイトを占めることは当然であり、センサから得られた情報の評価を左右する。

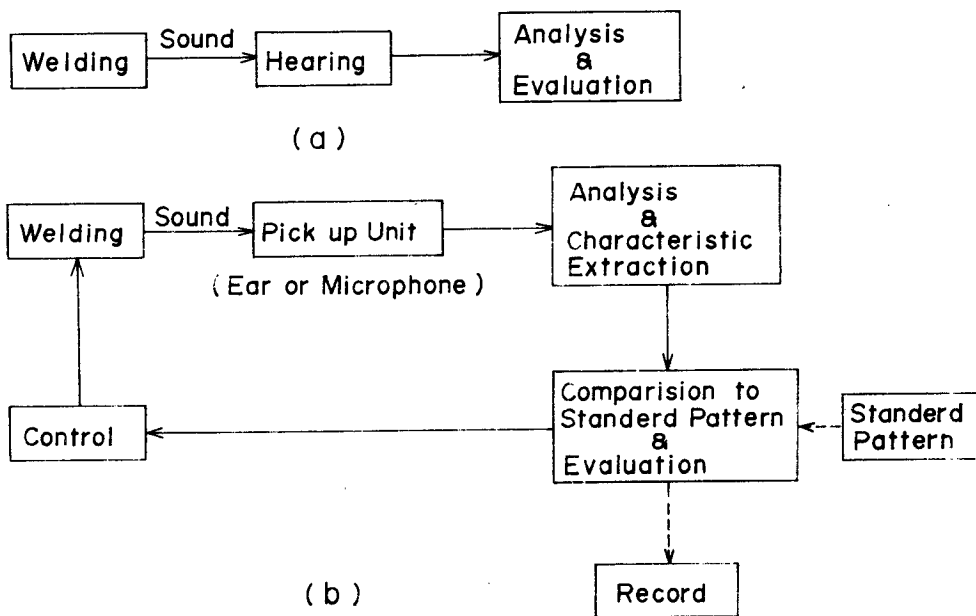


Fig. 6-1 Steps of discrimination and evaluation by hearing acuity of welding sound.
 (a) : Feedforward
 (b) : Feedback

なお、Fig.6-1(b) はマイクロホンを用いて溶接アーク音を受音し、機器分析を行う際の系を記述しているとなすことができる。

人間の聴覚にはWeber-Fechnerの法則が比較的良くあてはまる²²⁾。この法則によれば、弁別し得る最小の感覚変化 ΔL を生ずるに必要な刺激の変化量 ΔI は刺激の全量 I に対して一定の比を有し、次式の関係が成立する。

$$\Delta L = C_1 \Delta I / I \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

両辺を積分すると

$$L = C_2 \log I \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

となり、このことは聴覚は刺激の増大に伴って鈍くなることを意味する。ここで、 C_1 、 C_2 は定数である。

聴覚機能は個体差はもとより、音響的環境条件に支配されるが、純音についての可聴周波数帯域はおよそ20Hzから20kHzである。また、その弁別閾D.L (Difference Limen : 刺激間の強度差を検知できる確率が1/2となる強度差) は、音圧レベルに対して50Hzから10kHzの帯域では音の強さが最小可聴値より50dB程度強ければ1dBであり、周波数に対しては40dB以上の音について60Hzから500Hzの帯域では3Hz、500Hz以上の帯域で

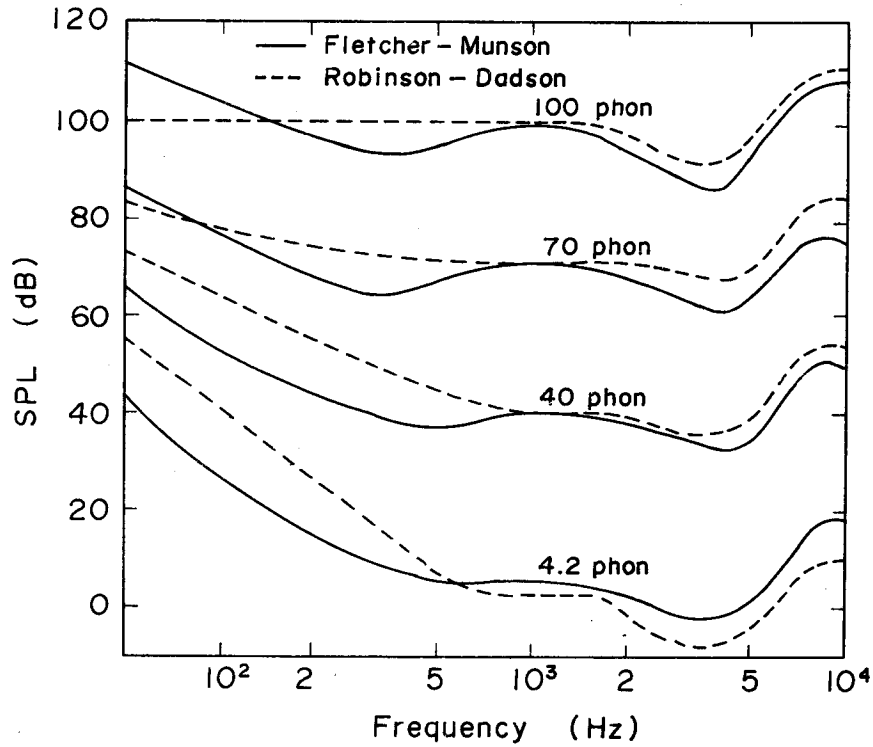


Fig. 6-2 Equal loudness contours of Fletcher-Munson and Robinson-Dadson.

はその周波数に対して0.3%である。

Fig.6-2に、ASAとJISにおいて騒音計の重み曲線として採用されている Fletcher-Munsonの聴感曲線、及びISOにおいて採用されている Robinson-Dadsonの聴感曲線を示す。前者は健全な聴力を有する青年についての統計的な平均値であり、後者は18歳から25歳の正常な聴力保持者が正弦平面進行波の音を放射する音源に正対して両耳で聴いた場合のものである（最小可聴値は年齢によって、また単耳か両耳かによって移動する）。両者には1kHzより低い帯域においてかなりの相違があるが、聴覚機能は1kHzから4kHzの帯域の音に対して最も鋭敏であり、低周波域の音に対しては鈍いことを示している。

聴覚の受感し得る音圧、周波数帯域及びD.Lが分かれば、聴覚が音圧と周波数について分析し得るステップ数の最大はWeber-Fechnerの法則を適用することにより求めることができる。すなわち、1kHzを基準とした場合の音圧についてのD.Lの数 n_p は、

$$n_p = \int_0^{120\text{dB}} 1/\Delta I dI = 280 \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

40dBを基準とした場合の周波数についてのD.Lの数 n_f は、

$$n_f = \int_{31}^{11700\text{Hz}} 1/\Delta f df = 1400 \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

したがって、知覚し得るステップ数 n_t は次のようになる。

$$n = n_p \cdot n_f = 392000 \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

しかし、実際は低レベルほど、また低周波数ほどD.Lは増大するので、全体のステップ数はほぼ30万から40万の範囲と考えられる。

一方、一つの音を弁別するには平均1/5秒から1/4秒の時間を要すること³³⁾、さらにマスキング効果などを考慮すると、聴覚の情報受入れ能力は実効8000bits/s程度と考えられる。ただし、以上に述べたことはすべて純音を対象とした場合であって、広帯域なスペクトル成分を有する溶接アーク音と同一視することはできず、聴覚機能についての一つの目安にすぎない。なお、聴覚によれば、正弦波電流を用いたTIGアーク溶接の場合に発生するような純音に近い音に対しては、主観音の影響を受けて本来存在しないその周波数の整数倍の音が同時に聴えるなどの現象も起きる。

Fig.6-3は、聴覚による溶接アーク音の変化の識別を、アーク電圧のみを適正範囲内で±1.5V及び2.0V変化させた場合について調査した結果である。この場合の被試験者5名はいずれも溶接の実技経験をほとんどもたない21歳と22歳の健康な男子である。試験にはデータ・レコーダを用いて磁気テープに記録した溶接アーク音を客観性を損じないように配慮して編集したものを供した。なお、被試験者は、暗騒音が約45dBの部屋で、スピーカと3mの距離に正対している。

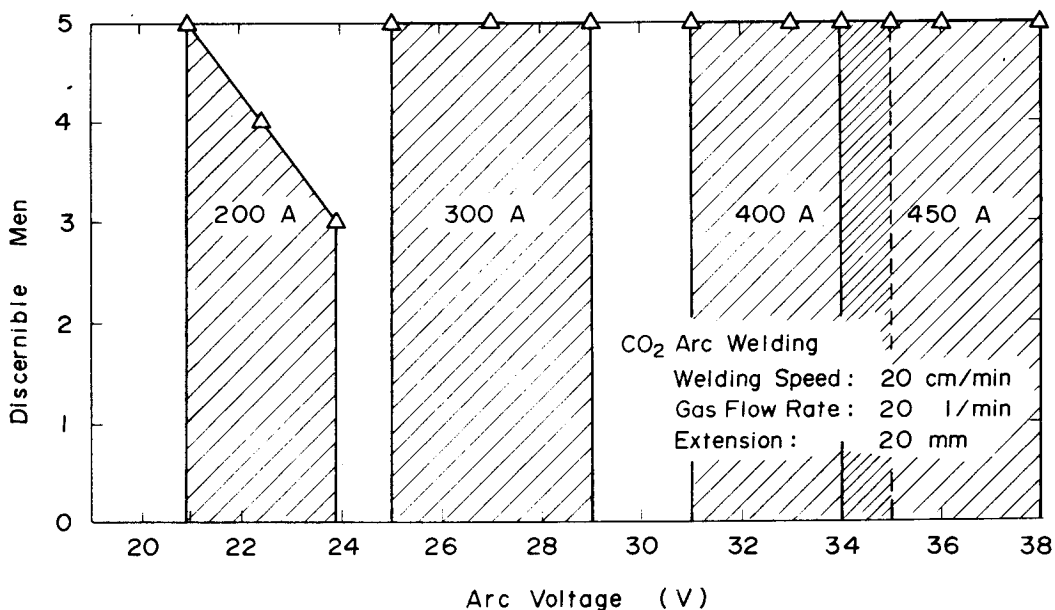


Fig. 6-3 Results on discernibility by the hearing acuity of the welding arc sound.

図に見られるように、溶接電流が200 Aの場合についてはアーク電圧の変化に伴う溶接アーク音の変化を識別できなかった者が若干いるが、300 A、400 A、450 Aの場合については全員が識別可能であった。このように、適正範囲内におけるアーク電圧の変化に対する溶接アーク音の変化をほぼ識別できたことは、次章に述べる溶接アーク音の利用の立場から見て非常に興味深い事実である。なお、溶接アーク音はアーク電圧の本条件における変化に対し、音圧レベルで200 A及び300 Aの場合に2~3dB、400 A及び450 Aの場合に4~5dBの変化である。

また、第4章において述べた1 kHzから5 kHzの聴覚敏感帯域を対象として、アーク電圧、ガスシールド効果及びワイヤ突出し長などの変化に伴う溶接アーク音の変化について同様な方法で識別試験を行ったところ、これらはいずれも良い成績であった。

Fletcher—MunsonまたはRobinson—Dadsonの聴感曲線から明らかのように、聴覚機能は1 kHzから4 kHzの周波数帯域の音に対しては鋭敏であるが、低周波域の音に対しては鈍感である。したがって、聴覚によって判断する音の大きさと物理的な意味での音の強さとは本来異質のものである。そこで、溶接アーク音のオクターブ・バンド・フィルタ分析か

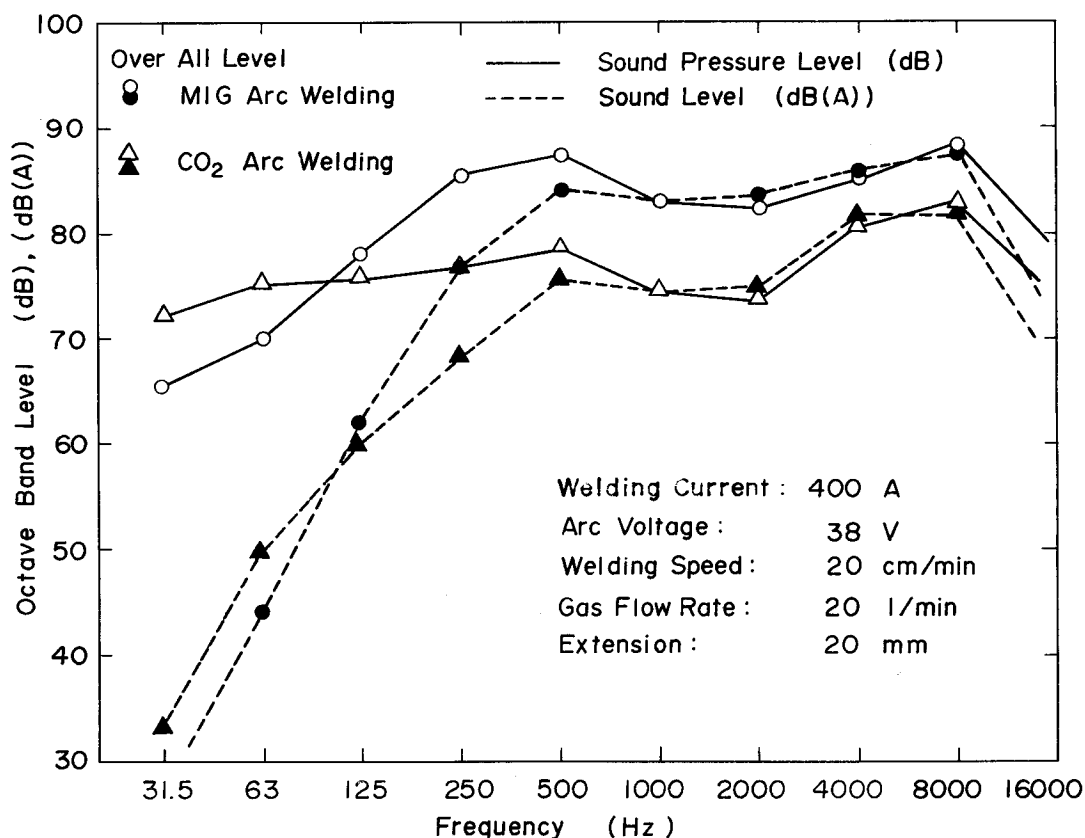


Fig. 6-4 Relation between the sound pressure level and the sound level.

ら得られた各周波数についての音圧レベルと、この分析結果をもとにJISC1502に規定のA特性補正値を用い、聴覚の特性に比較的良く一致する騒音レベル（Sound Level、dB(A)で表示）を計算で求め、両者を比較した例をFig.6-4に示す。すなわち、図は物理的には実線で示される強さの音を、聴覚では点線で示される大きさの音として聴くことを意味する。両者は特に1kHzより低い周波数側で著しい差を生じている。

以上のように、聴覚に物理的な意味での正確さを期待することはできないが、識別に対する機能は非常にすぐれていることから、訓練によってはより細かな情報の抽出を期待することができる。

なお、Fig.6-4において、音圧についてのオーバ・オール・レベルと、近似的に

$$L_T = 10 \log_{10} (\log_{10}^{-1} L_1 / 10 + \log_{10}^{-1} L_2 / 10 + \dots + \log_{10}^{-1} L_n / 10)$$

で計算される騒音のトータル・レベルとの間には大差がないことから、溶接アーク音の強さを支配する主要な成分は高周波数側の成分であることが分かる。

6. 3 溶接アーク音の騒音性

これまでは主に、溶接アーク音に関する諸特性を明らかとし、またその中に埋没している有為情報を抽出するという立場からの検討を行ってきた。この過程において、溶接アーク音は音圧レベルで100dB以上に達することがあり、騒音面からの検討も同時に行う必要のあることが明らかとなった。

すでに述べたように、溶接アーク音の強さは一般に電流値の増加に伴って増大し、またパルス化電流を用いた場合にはその振幅と繰返し周波数の増加に伴って増大する。したがって、大電流溶接及びパルス化電流を用いる各種溶接法に対する期待がますます高まっている今日、溶接アーク音についての騒音面からの検討は重要である。なお、溶接作業に関する環境衛生の立場からの検討は、ヒューム、電撃（電波障害）、アーク光に関するものが主であって、溶接アーク音に関しては皆無である。

さて、大きな音を聴いた直後に正確な音の聞きとりが困難になるという一時的聴力損失をきたすことは日常経験することであるが、露聴時間が長くなると永久的聴力損失の危険を生ずる。騒音による聴力障害は音の周波数スペクトル成分に関係なく、まず3kHzから4kHzの帯域で進行が始まり、ついには会話領域へと進行する。軽症な場合で30dB、重症では60dBも最小可聴値の上昇を生ずる。

騒音の許容基準に関しては、聴力障害、通話障害、うるささなどについて各種の規定が設けられているが、ここでは、聴力保護を目的とする立場から定められたTable6-1に示すACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) の基準に基づき、本研究で対象とした各種溶接アーク音について許容範囲の検討を行う。

なお、溶接アーク音は第4章において述べたように、出力電流に正弦波を用いるTIGアーク溶接などの一部を除くと、いずれも広帯域な周波数スペクトルを有し、しかも高周波域成分の占める割合が大きい。このような場合には騒音レベルと音圧レベルの値はFig.6-4に示されたように近似的に等しくなるので、ここでは便宜上、騒音レベルの代わりに音圧レベルを用いた（概略、500Hz以上の周波数成分の

占める割合が大きな音については、騒音レベルと音圧レベルの値は近似的に等しくなる）。

被覆アーク溶接の場合、第4章、Fig.4-1及びFig.4-4に見られるように、音圧レベルは交流及び直流アーク（R.P、S.P）の場合ともに電流、電圧（アーク長）の適正範囲内では最大で85dBである（ただし、この場合の使用溶接棒は、心線径4mmのJIS D4303に該当するライムチタニヤ系である）。したがって、通常の場合は露聴時間が1日当り連続8時間であっても聴力障害の原因となることはほとんどないと考えられる。ただし、過大な電流、電圧を用い、また心線径のより大きな溶接棒を大電流で使用するような際には聴力保護対策を講ずる必要がある。

CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接の場合について騒音の許容露聴時間をFig.6-5に示す。CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接の場合、溶接アーク音の強さは電流、電圧、溶接速度、ガス流量、ワイヤ突出し長などによって変化するが、Fig.6-5に示す各溶接電流値に対する露聴時間の許容範囲は、いずれも溶接電流に対するアーク電圧がほぼ適正な範囲の場合であって（第3章、Table3-2(1)式参照）、他の条件についても通常用いられる条件に近い場合のものである。

図に見られるように、許容露聴時間は電流の増加とともに短くなり、例えば、溶接電流200Aの場合についてはCO₂アーク溶接で約6時間、MIGアーク溶接で約2時間、400Aの場合についてはCO₂アーク溶接で約3時間、MIGアーク溶接では約0.8時間で限界に達する。したがって、CO₂アーク溶接及びMIGアーク溶接を作業者が手動で長時間連続行う場合には聴力保護対策を必要とする。なお、前述の被覆アーク溶接、及びFig.6-5に示すCO₂アーク溶接とMIGアーク溶接の場合、溶接アーク音の測定はアーク発生点から40cmの

Table 6-1 Permissible limit of value of American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH).

Continuous noise exposure (hours/day)	Permissible value (dB(A))
16	80
8	85
4	90
1	100
1/2	105
1/4	110
1/8	115*

* Noise exposure over 115 dB(A) is prohibited.

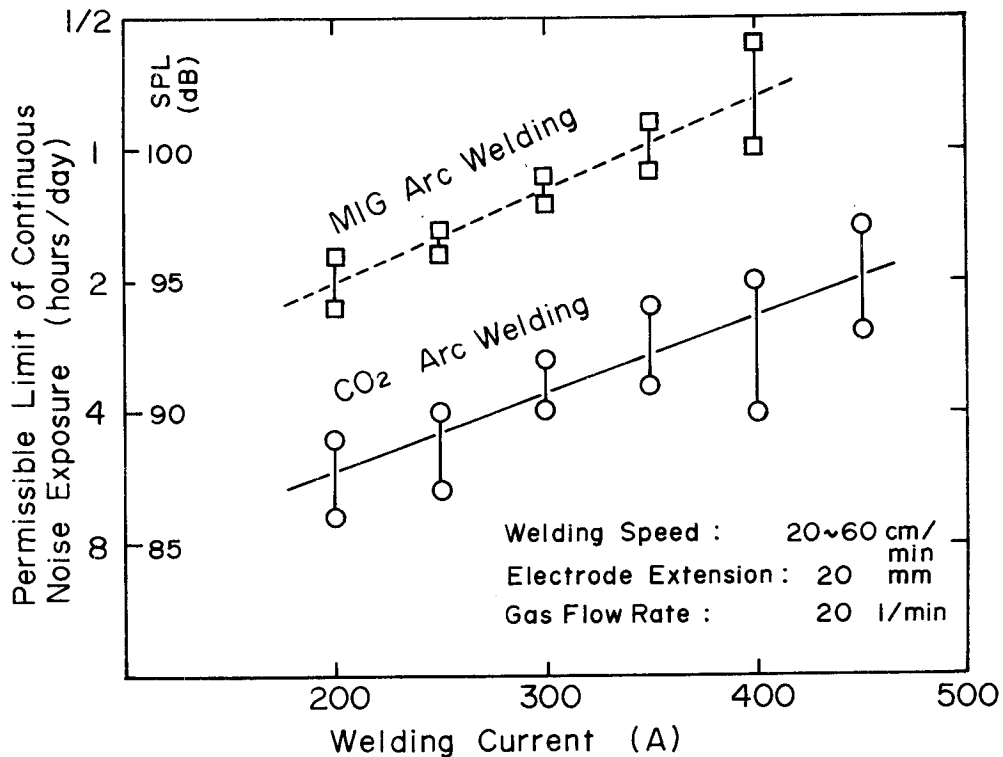


Fig. 6-5 Relation between permissible limit of continuous noise exposure time and welding current in CO₂ and MIG arc welding.

距離で行っている。この距離は通常の姿勢で溶接作業を行う際のアーク発生部と作業者の耳までの距離と大差はない。

一方、パルス化電流波形によるTIGアーク溶接の場合について許容露聴時間と電流波形の繰返し周波数 f_p との関係を図示するとFig.6-6のようになる。図から、例えば矩形波電流を用いた場合の許容露聴時間は、 $f_p = 30\text{Hz}$ で約4時間、 $f_p = 200\text{Hz}$ で約1時間、 $f_p = 2000\text{Hz}$ では怒限度の115dB(A)に達する。ただし、この場合の許容露聴時間はアーク発生点から12cmの距離で計測した溶接アーク音を対象として求めているので、実際にはこれより若干長くなる。

矩形波電流の場合、通常用いられる繰返し周波数は数Hzから数100Hzの範囲のものであるから¹⁴⁻²¹⁾、この範囲では怒限度を越えることはないが、作業環境の立場から溶接アーク音を見ると、矩形波電流または鋸歯状波電流を用いるよりも正弦波電流または三角波電流を用いる方が望ましく、また、この場合には露聴時間を大幅に長くすることが可能である。なお、パルス化電流波形を用いた場合の溶接アーク音の強さは、4.4.2項に述べたように、電流波形及び繰返し周波数の他に電流振幅とアーク長の影響を受ける。このため、図中に記す条件以外の場合については許容露聴時間に補正を行うことが必要となる。この

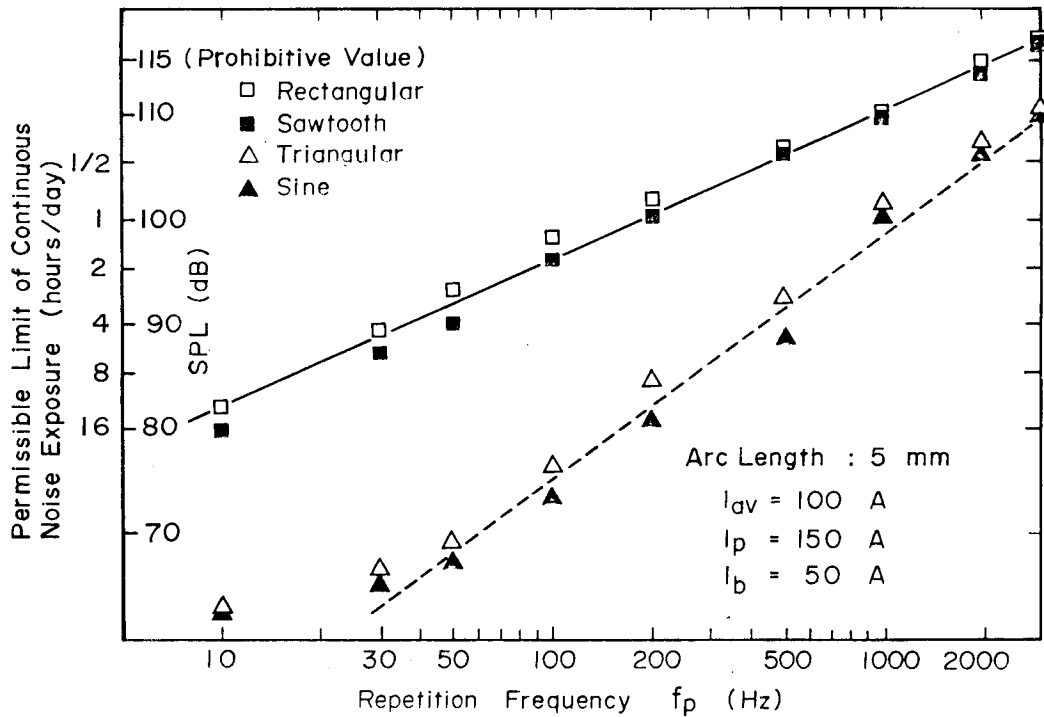


Fig. 6-6 Relation between permissible limit of continuous noise exposure time and repetition frequency f_p in pulsive TIG arc welding.

ような場合、次の各式（第4章、(4.6)式及び(4.7)式）は溶接アーク音の騒音性を予測する上で実用上有効である。

矩形波及び鋸歯状波電流の場合

$$\text{SPL} = 14 \log_{10}(f_p \cdot \tau_p) + 40 \pm 2 \text{ dB}$$

三角波及び正弦波電流の場合

$$\text{SPL} = 24 \log_{10}(f_p \cdot \tau_p) - 20 \pm 3 \text{ dB}$$

他方、聴覚によれば溶接アーク音に対する「うるささ」の感じ方、例えば耳障りであるとか、不快であるとかの全体的印象は、電流波形によって異なったものになり、矩形波及び鋸歯状波など、立上り時間または立下り時間の短い電流波形の場合には刺激性が特に強いようである。

以上に述べた各溶接法についての許容露聴時間は、いずれも半無響室のような場所、すなわち、音波を反射する壁が一面しか存在せず残響音の影響を考慮しなくてもよいような

場所での溶接作業を対象に設定したものである。

残響音が拡散音場を作るものとすれば、その音場の音圧 P_e は、直接音の音圧 P_{ed} と残響として残っている拡散音の音圧 P_{erev} によって決まり、これらの間には $P_e^2 = P_{ed}^2 + P_{erev}^2$ なる関係がある。したがって、例えば船底やタンク内など、反射壁に囲まれたしかも空間容積の小さな場所では、当然のことながら音圧は上昇し、許容露聴時間は著しく短縮することになる。このため、作業環境の観点から溶接アーク音を検討するに際しては、溶接法及び溶接条件はもとより、作業場所についての配慮が重要となる。

6. 4 結 言

本章は、溶接アーク音を利用する立場及び作業環境の立場から見た場合の基礎的資料を得ることを目的としたものであって、まず、聴覚の一般的機能と溶接アーク音を識別・評価する際のプロセスについて検討を加え、次に聴覚による溶接アーク音の変化の識別試験結果について記述している。また、本研究で対象とした各溶接法について、聴力保護の観点から許容露聴時間の検討を行っている。これらの検討に基づき本章は次のような結論を与えている。

- (1) 聴覚は物理的意味での音の強さ、周波数スペクトル成分などを正確に検知することはできないが、その弁別機能はすぐれ、溶接電流に対する適正範囲内でのアーク電圧の変化に伴う溶接アーク音の変化を識別することができる。
- (2) ACGIH の聴力保護基準に基づき、溶接アーク音の許容露聴時間を明確にした。
- (3) 溶接アーク音の強さは、電流、電圧及び電流波形の繰返し周波数の増加に伴って増大する。したがって、強さを低減し、許容露聴時間を長くするためには過大な電流、電圧を用いないこと、繰返し周波数をあまり高くしないことが必要である。また、電流波形については矩形波または鋸歯状波の代りに、正弦波または三角波を用いれば許容露聴時間と「うるささ」の改善を計ることができる。

第7章 溶接アーク音の利用

7.1 緒言

溶接プロセスの監視・制御のための技術として多くの方法が提案されているが、生産システムへ応用されているものは比較的限られている。この理由の一つには、情報自体が溶接に特有な外乱によって影響を受けること、また、情報を検出するセンサが溶接に特有な制約を受け、その機能を十分に発揮できないことが挙げられる。すなわち、溶接時に発生する特有な熱、光、スパッタ、ヒューム、振動、音、電氣的磁氣的ノイズなどの妨害によって情報及びセンサが影響を受け、実験室的には可能な技術が実用面では適用できない場合がある。

前章までの検討結果から明らかなように、溶接アーク音は多くの点で情報源としての適格性を有し、しかも、そのセンサ（マイクロホン）は任意の感度、帯域特性のものを比較的容易に選択することができ、また一般に小型・軽量という特長がある。さらに、音響信号の処理技術がかなり確立された分野であることも好都合である。音響信号の弱点は暗騒音に対してであるが、この点についてはマイクロホンの特性と信号処理方法の選択、その他によって改善することができる。

以上のような点から見て、溶接アーク音の溶接プロセスの監視・制御への応用、その他への応用は実用的にも有用性があると考えられる。

本章では、溶接アーク音を溶接プロセスの検出に適用した例、及び、溶接技術教育における理論と実際の結合手段に適用した例を示し、これらへの適用の有用性を述べている。

7.2 溶接プロセスの検出及び溶接技術教育への応用

7.2.1 溶接プロセスの検出例

溶接時に発生するいくつかの特異な現象については、その検出が溶接アーク音によって可能なことは、すべに示した基礎的データから予測されるものもある。ここでは、溶接施工に際して実際に遭遇することがあるいくつかの状況、あるいはそれに近い状況をあらかじめ設定し、これを溶接アーク音によって検出することを目的とした。検出に際しては最も基本的な特徴量の一つである全帯域の音圧レベルを用いた。

Fig.7-1 及び Fig.7-2 は、溶接線上にあらかじめドリル加工した直径が5 mm、11mmの孔のある試片についてCO₂アーク溶接を行い、音圧レベルの時間的変化をビード形状の位置的变化に対応させて示した例である（なお、Fig.7-1には音圧波形の一部も示している）。

図に見られるように、音圧レベルの時間的変化はビード形状の位置的变化（孔の大きさ

と位置に関係)に強く依存している。すなわち、音圧レベルは孔のやや前方からビードが正常となるFig.7-1の例では孔の後方約10mmの範囲において変化が見られ、Fig.7-2の例では孔の後方約25mmの範囲において変化が見られる。その変動幅は前者で最大8dB、後者で最大16dBにも達し、正常ビードの場合の変動幅1～2dBに比較して著しく大きい。

したがって、例えば正常ビードの際のレベルを基準値に設定すれば、レベルの変動の状態から孔の位置と大きさを検出することが可能となる(ただし、本溶接条件では孔径2.5mm以下のものに対しては検出が困難であった)。

Fig.7-3に、パルスTIGアーク溶接(矩形波電流)で孔径3.5mm、5mm、9mmを対象とした例を示す。音圧レベルの変化は孔径3.5mmに対して約2.5dB、5mmに対して約3.5dB、9mmに対して約5dBである。TIGアーク溶接の場合にはアーク発生中に電極形状の変化、アーク長の変化などが生じなければ音圧レベルはほとんど変化をしないので、これらの値は検出のための信号の大きさとして十分である。なお、本溶接条件では直径が1mm程度までの孔の検出が可能である(孔径1mmの場合に約1dBの変化)。

アークが孔に近づくとアークの脚の一部が孔の周辺部へ移動し(孔から遠ざかる場合にも脚の一部は孔の周辺部にある)、孔の上を通過中には内部へ移動するのが観察される。したがって、結果的にはアーク長の長くなることが音圧レベルを上昇させる原因であるから、レベルの大きさとその時間的变化についてさらに詳細な観察を行えば、孔径の大きさのみならず深さも検出可能となる。

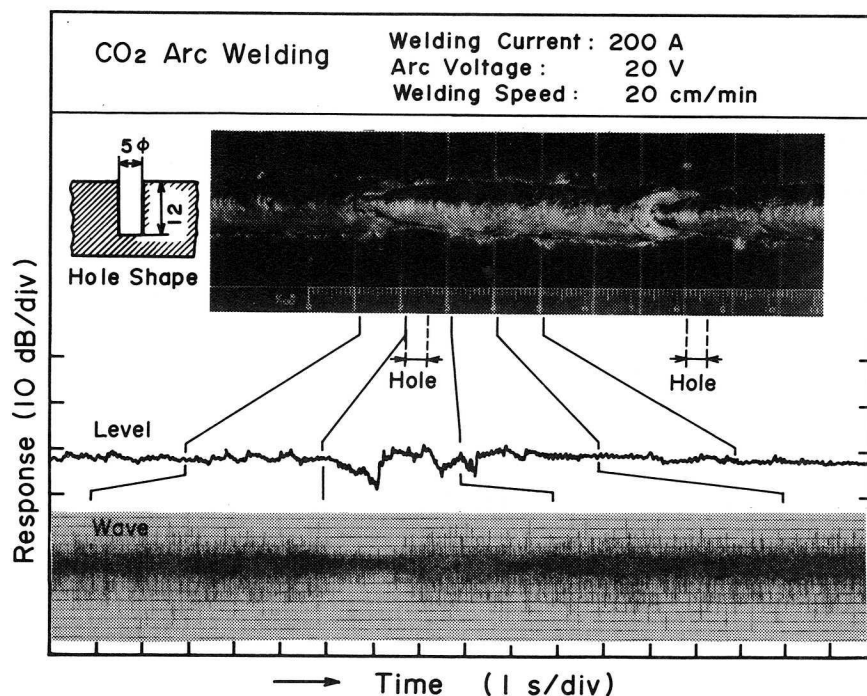


Fig.7-1 Example of hole detected by arc sound in CO₂ arc welding. (hole diameter: 5 mm)

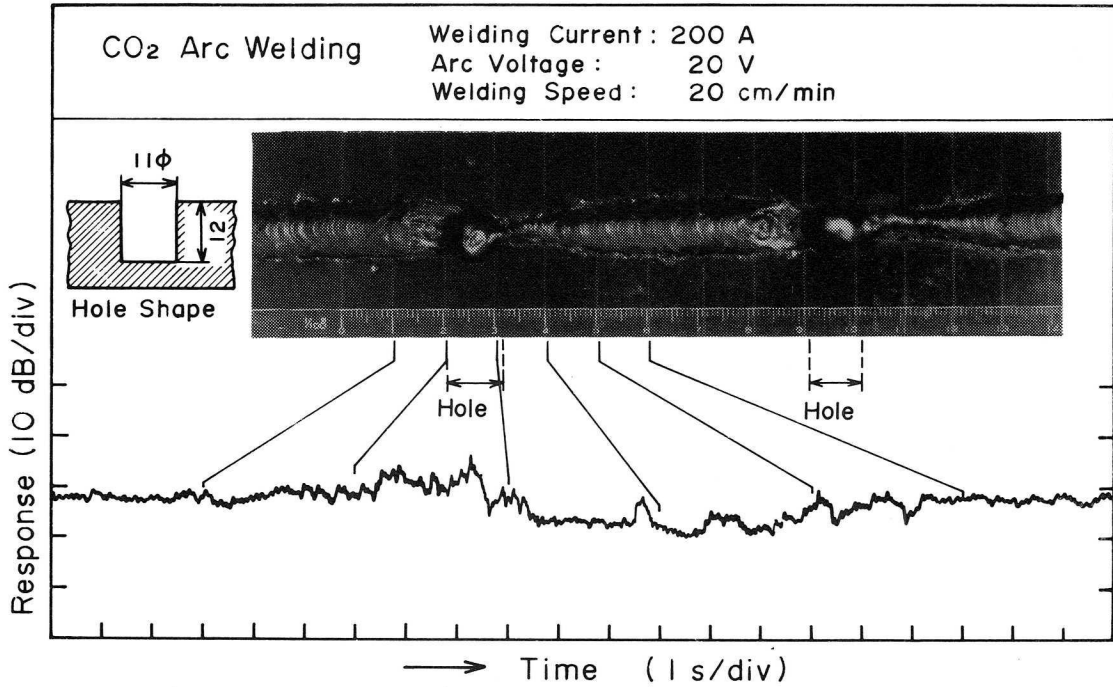


Fig.7-2 Example of hole detected by arc sound in CO₂ arc welding. (hole diameter : 11mm)

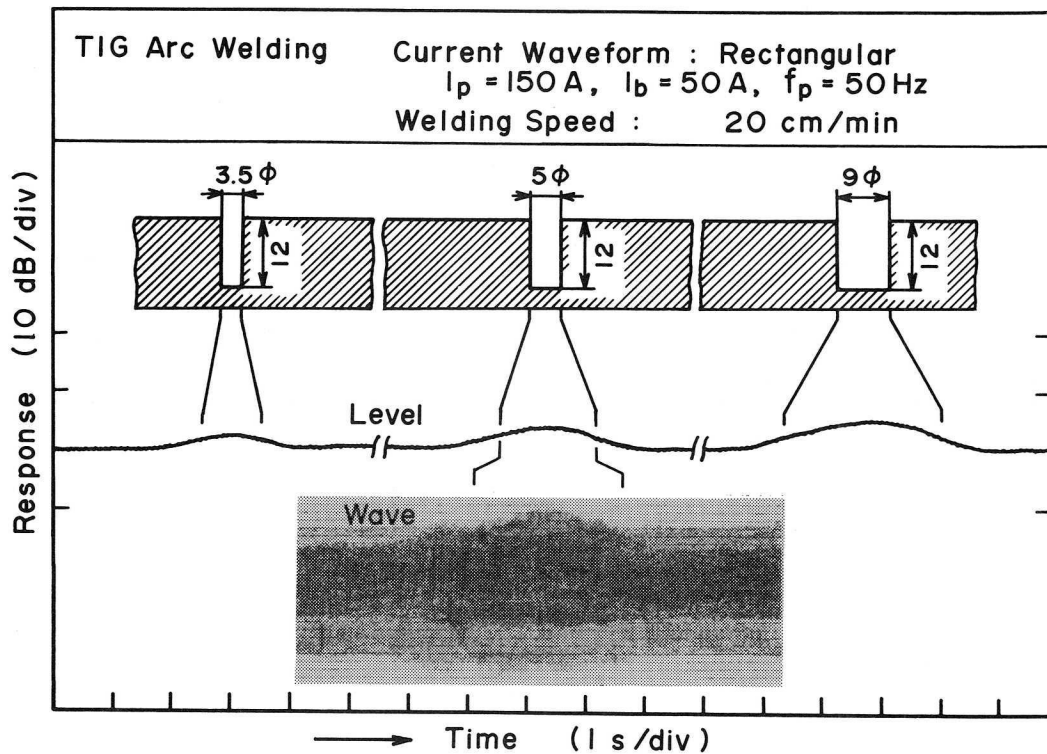


Fig.7-3 Example of hole detected by arc sound in TIG arc welding.

次に、階段状の段部を有する試片についてその段部の検出を行った例をFig.7-4(CO₂アーク溶接)、Fig.7-5(パルスTIGアーク溶接、矩形波電流)に示す。段差はCO₂アーク溶接の場合20mm、パルスTIGアーク溶接の場合8mmであり、溶接方向をそれぞれについて、(a)高部から低部へ(便宜上、下進法と呼ぶ)、(b)低部から高部へ(上進法と呼ぶ)の2通りとした。

CO₂アーク溶接の場合、段部を含むその前後のレベルの変動は下進法で最大12dB、上進法で最大13dB程度である。またレベルの変動が段部の影響によるものと明らかに見られる範囲は上進法の場合の方が広い。この傾向はビード形状の変化についても同様である。特に、ビード形状については、ビード幅が下進法では段部においてもほぼ一定しているのに対し、上進法では狭くなり、この状態は段部通過後も暫時継続する。これらの相違は段部の溶融状態から見て次のように考えられる。すなわち、下進法の場合には、段部の溶融がアークの直接的溶融効果と二次的予熱効果とによってなされるために、垂直面を含む段部の溶融は比較的なめらかに進行し、ワイヤ突出し長の変化もなめらかに進行する。これに対し上進法の場合には二次的予熱効果が小さいために垂直面は十分溶融せず、また突出し長の変化も急激である。したがって、下進法ではアーク及び溶融の状態が上進法の場合に比較して短時間で定常となり、結果的にレベルの変動とビード形状の変化とは比較的短時間で終了することになる。

一方、Fig.7-5に示すパルスTIGアーク溶接の場合、レベルの変動は下進法、上進法の場合ともに約7dBであり、その時間的变化は上昇、下降の様態が逆であるがほぼ類似している。レベルが変動する原因は段部でアーク長が変化するためであり(下進法では長くなり、上進法では短くなる)、その時間的变化が類似の傾向を示すのは、下進法及び上進法のアークの発生状態にあまり差がないためである。

以上、Fig.7-4及びFig.7-5に示した例で明らかのように、レベルの変動状態から部材に存在する段部の検出が容易に可能である。なお、これらの例は開先加工を施した部材の溶接中に溶接線の狙い誤差を生じ、アークが開先内から開先外へ移動した場合に近いものである。したがって、このような場合の検出にも溶接アーク音が適用できることはいうまでもない。

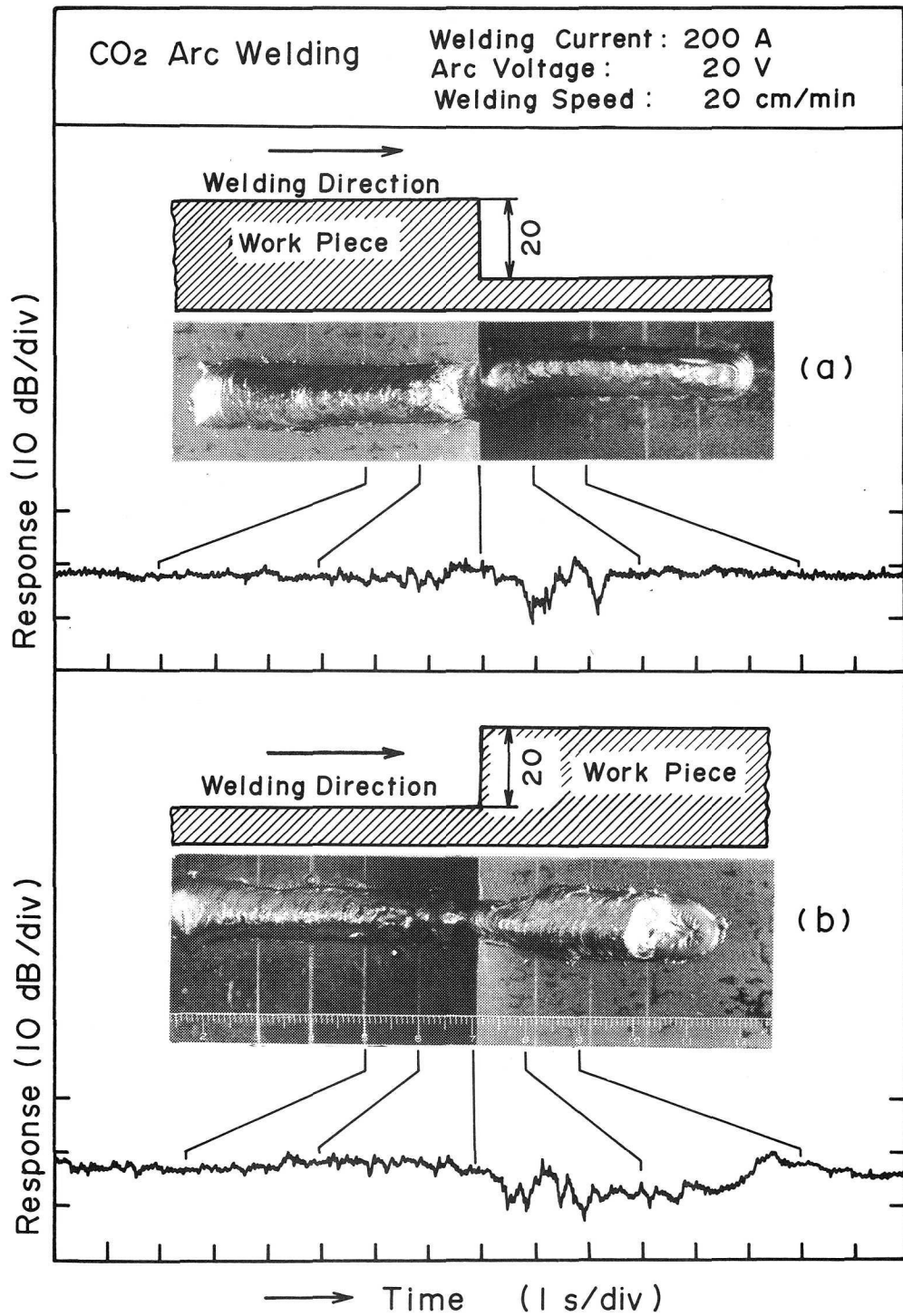


Fig. 7-4 Examples of step detected by arc sound in CO₂ arc welding.
(a) step down
(b) step up

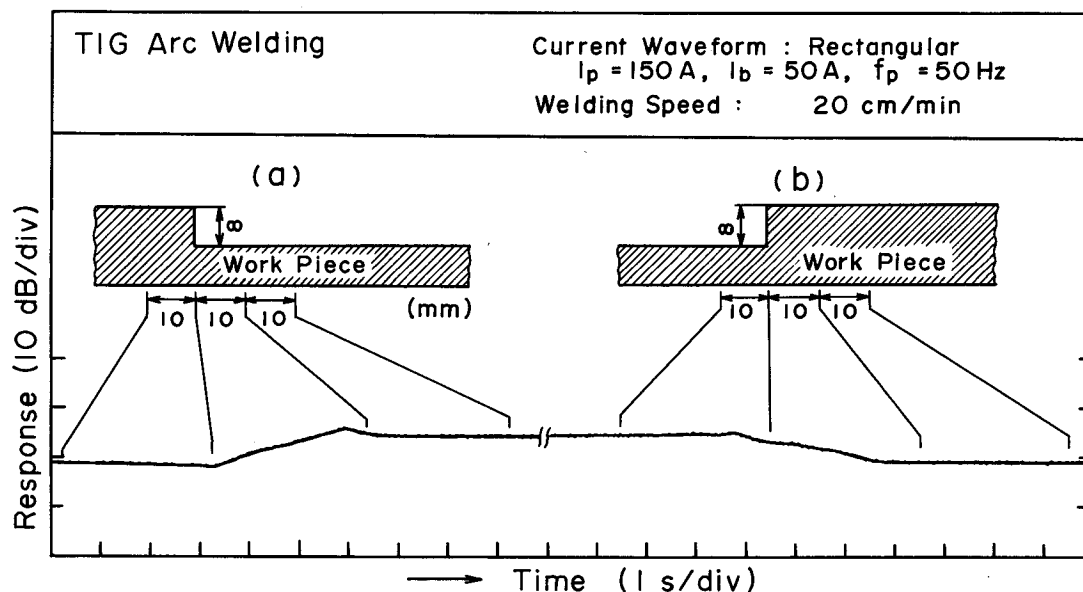


Fig. 7-5 Examples of step detected by arc sound in TIG arc welding.
(a) step down
(b) step up

Fig.7-6 は、溶接の進行に伴ってアーク長が2mmから20mmまで徐々に長くなるように試片を傾斜させた、いわゆる斜面溶接法の場合の音圧レベルの変動を示した例である。アーク長の増加に伴って音圧レベルは上昇し、アーク長2mmと20mmとのレベル差は約14dBである。

Fig.7-7 は、溶接の進行に伴って開先幅が0mmから10mmまで徐々に広がるような形状の試片を対象とした場合の音圧レベルの変動を示した例である。開先幅の増加に伴って音圧レベルは上昇し、開先幅0mmと10mmとのレベル差は約7dBである。

この場合、音圧レベルが上昇するのはアーク長が長くなり、またアークの脚の一部が広がるためである。本溶接法ではさきに述べたように、溶接条件が一定であればレベルの変動はほとんどないから、例えばアーク長あるいは開先幅の1mmの変化に対してもその検出は容易に可能である。ただし、Fig.7-6に見られるように、アーク長の増加に伴うレベルの増分はアーク長の短い範囲で大きく、長い範囲で小さくなる傾向を示すので、同じアーク長1mmの変化でもレベルの変動分は異なったものとなる。

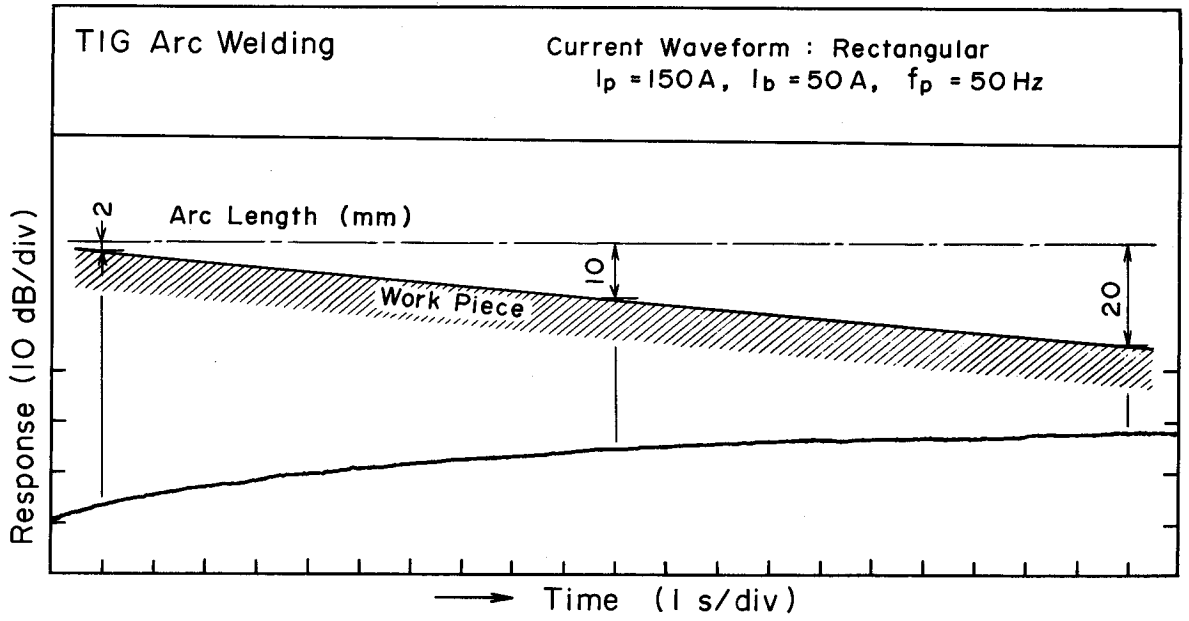


Fig.7-6 Example of change in arc length detected by arc sound in TIG arc welding.

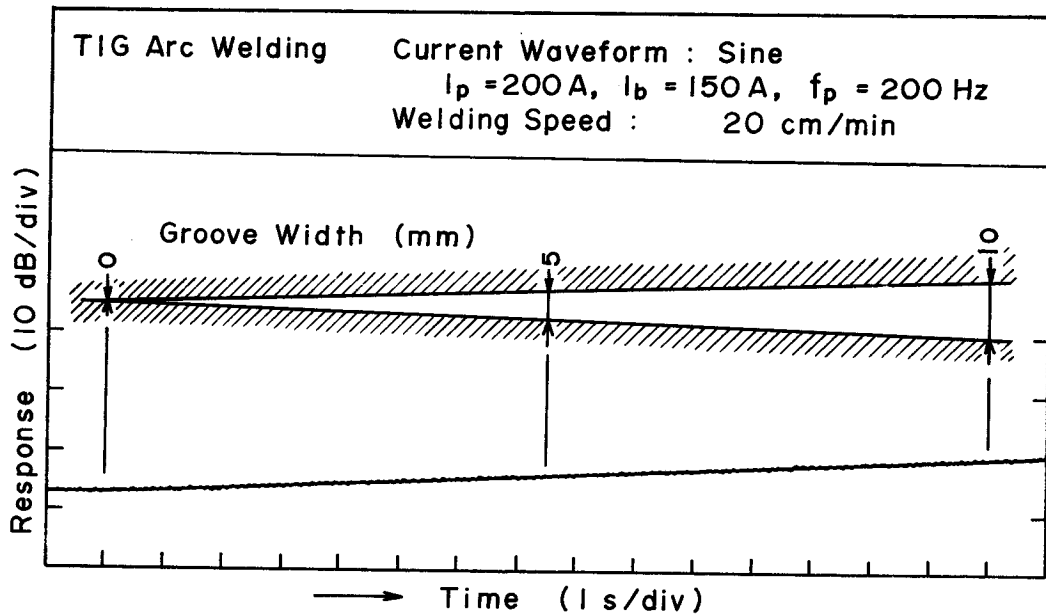


Fig.7-7 Example of change in groove width detected by arc sound in TIG arc welding.

ガスシールド効果の良否が溶接アーク音におよぼす影響については4.3.2.3項に述べた。ここでは溶接中にシールドガスの供給が停止したような場合を想定し、バルブ操作によってその供給を停止することによって音圧レベルの変動状況を調べた。

Fig.7-8はその一例であり、(a)はCO₂アーク溶接 (200A、20V)、(b)はMIGアーク溶接(400A 32V) の場合である。図に見られるように、シールドガスの供給を停止した時点で音圧レベルは(a)で約7dB、(b)で約13dB減少する。(前者では停止の状態が続くとレベルは上昇し、供給されている場合より約2dB大きい値を示すようになる)。これらの値はシールドガスの供給の停止を検出するための信号の大きさとしては十分である。

なお、Fig.7-8において注目されるのはシールドガスの停止状態が続くとレベルは飽和し一定となることであるが、これはFig.4-25に示したようにアークが空気雰囲気中でもそれなりに安定であり、一定の状態を保つためである。

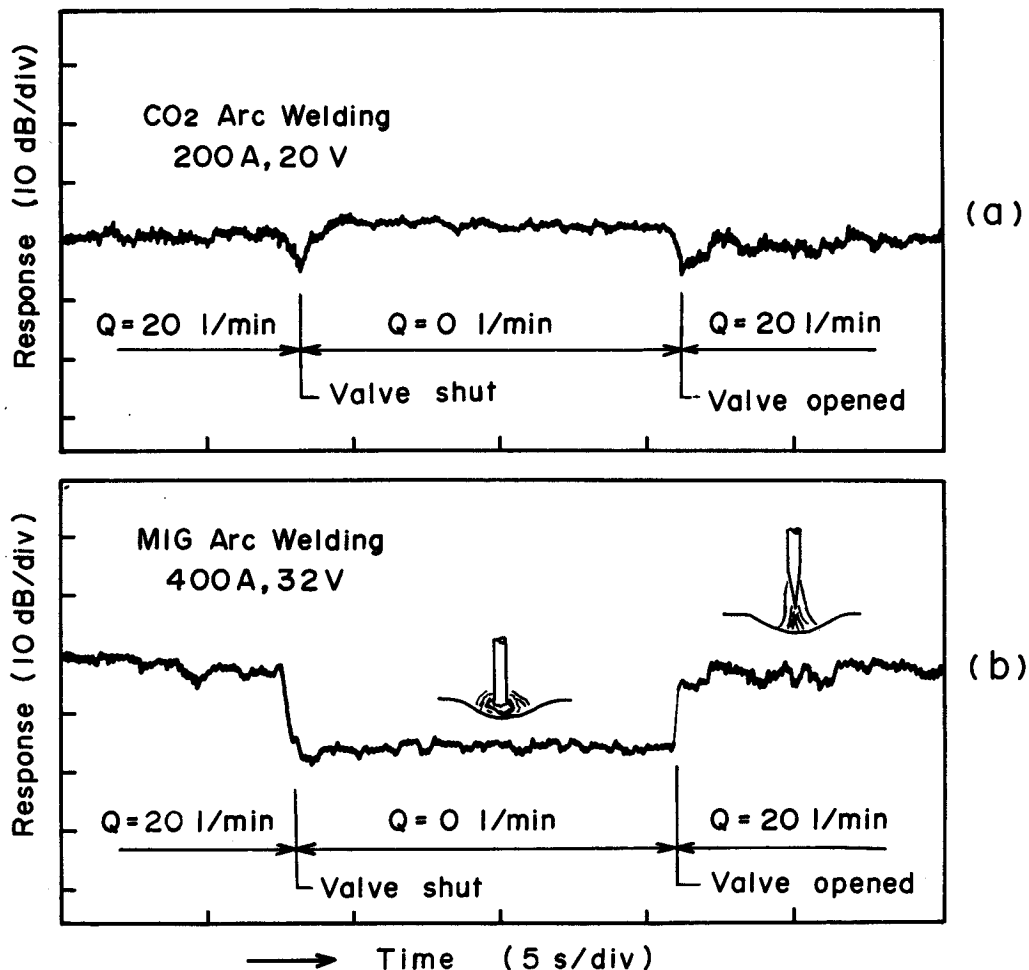


Fig.7-8 Examples of interruption of shielding gas flow detected by arc sound.
 (a) CO₂ arc welding
 (b) MIG arc welding

Fig.7-9は、溶接速度が40cm/minのパルスTIGアーク溶接(正弦波電流)の際に得られたビード形状と音圧レベルの変動の例である。図に見られるように、ビードは凹凸の激しい不連続ビード(ハンピング・ビード)であり、この凹凸はほぼ周期的に発生している。このときのレベルの変動は約1.5dBであり、凹凸の発生に対応して周期的に発生している。

ハンピング・ビードは電流、電圧及び電極先端角などの溶接条件を一定とした場合、溶接速度を大きくすることによって発生するが、その機構は次のように考えられている⁹⁾。

すなわち、高速溶接では元来少ない溶融池内の金属がプラズマ気流によって吹かれ、凝集力のためにすでにアークの後方におかれたビードの方へ吸引される。この結果、アーク直下部には固体金属面が露出し、アークの脚が不規則に移動するために溶融池が前後に揺動して凹凸の激しいビードを形成するのである。

肉眼観察によれば、アーク周辺部の溶融金属がアークの周辺側方を経て後方へ周期的に移動してビードに凸部を形成するという現象、及びアークの脚の一部が溶融金属の移動に伴って後方へ広がるというほぼ上述のような現象が見られる。したがって、凹凸の発生に対応してレベルが変動するのはアークの脚の拡がりに伴うアーク長の変化が原因であると推測される。

なお、ハンピング・ビードの発生に伴う音圧レベルの変動は他の電流波形を用いた場合にも観察されるが、ピーク電流、ベース電流及び繰返し周波数などの条件を一定とし波形のみを変化させた場合には、レベルの変動は正弦波電流の場合と大差がなく1~1.5dB程度である。

次に、溶落ちの検出例を示す。Fig.7-10は、CO₂アーク溶接において溶接電流400A、アーク電圧32Vの埋れアークの条件で、20cm/minの比較的低速溶接を行った際に得られた溶落ちビードの形状と音圧レベルの変動の例である。なお、試片(板厚12mm)には溶落ちを故意に発生させるために、あらかじめ溶接線上にドリル加工を行った直径4mmの貫通孔が1個設けてある。

溶落ちはドリル孔の近傍でまず最初に発生すると、これが引金となって次の溶落ちを発生させるというふうに順次ほぼ周期的に発生するようになる。溶落ちが周期的に発生する傾向は低速溶接ではかなり一般的に見られ、溶落ちが1回で終了することはむしろ少ない。したがって、溶落ちの発生したビードは、図に見られるようにノッチ状の貫通孔が連鎖したあたかも切断されたような形状を呈し、溶着金属をほとんど保有しないことが多い。

さて、溶落ちが発生すると溶接アーク音が急激に変化して聴えるために、その発生を知ることが良く経験することであるが、Fig.7-10に示す音圧レベルの変動はその事実を良く現している。すなわち、音圧レベルの時間的変化をビード形状の変化に対比して観察すると、レベルのピークはノッチ状の貫通孔にほぼ対応して発生している。図において最初

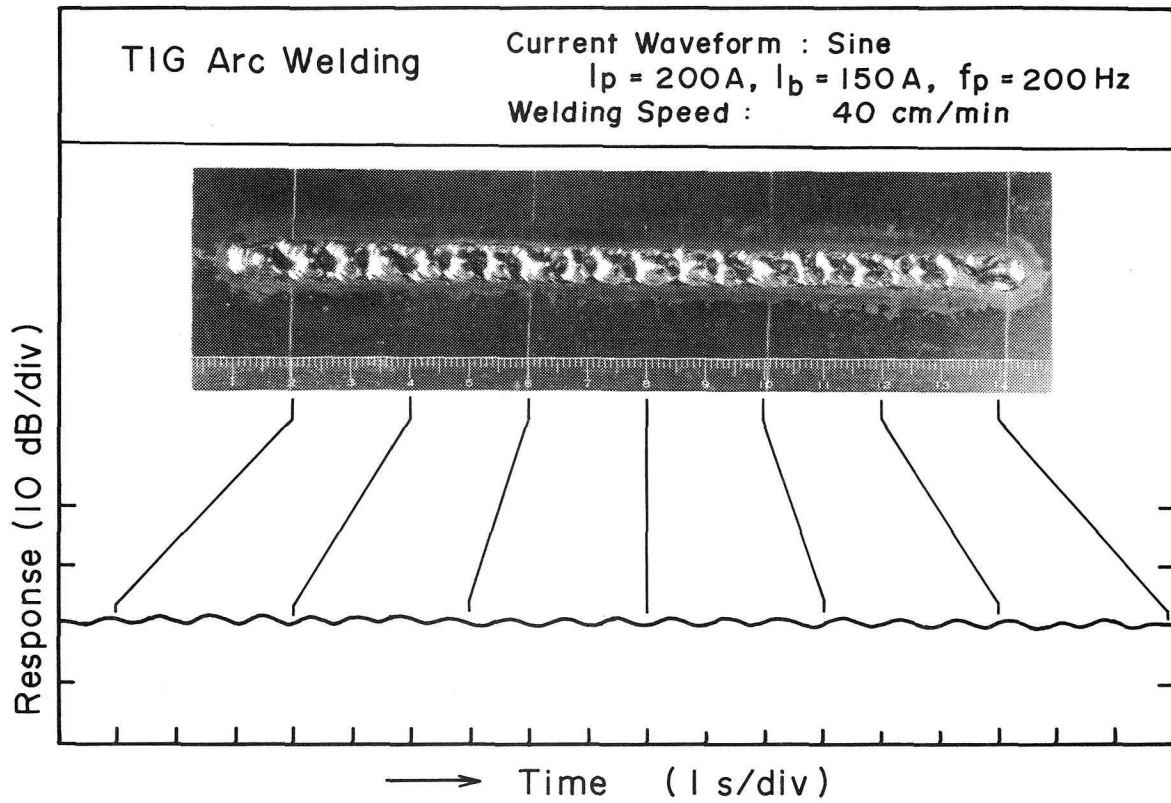


Fig.7-9 Example of humping bead formation detected by arc sound in TIG arc welding.

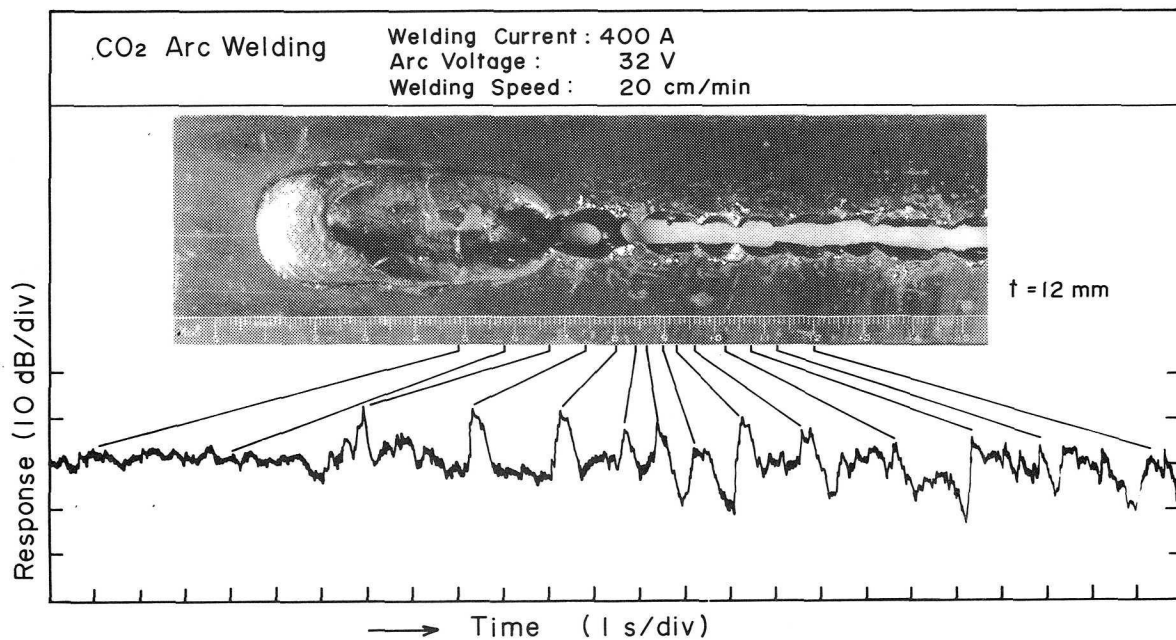


Fig.7-10 Example of burn-through detected by arc sound in CO₂ arc welding.

の溶落ち発生時のレベルの変動幅は約15dB、最大は23dBにも達していることから、溶落ちの発生を溶接アーク音によって検出することは容易に可能である。

なお、ノッチ現象はガス切断、MIGアーク切断など各種切断法においてもしばしば見られる現象であり、その検出は切断面の品質管理の点から重要な課題であるが、このような場合にも音響信号は有力な検出手段として適用できると考えられる。

7. 2. 2 溶接技術教育への応用

溶接技術の質的、量的充実は極めて重要な課題であるが、例えば、溶接技術検定試験における合格率が一般に低いことに見られるように、現状は必ずしも満足できるものではない。この原因の一端は、溶接技術教育が理論と実際との有機的結合を特に必要とする分野であるにもかかわらず、このことに対する効果的手段が確立していないことにあると考えられる。

溶接アーク音はこれまでの検討結果から溶接アーク現象に関する理論と実際についての知識を深める上で有効な手段になり得る可能性がある。また文献6)によれば、溶滴の移行形態を理解する上で溶接アーク音が効果的であると指摘している。

そこで、溶接技術教育に溶接アーク音の導入を試み、聴覚の訓練に力点をおいて製作した映画を用い、その教育効果を調査した。なお、対象とした溶接法は主にCO₂アーク溶接であり、溶接技術検定試験においてはJIS Z3841に該当する。

調査項目及び調査方法は次のようである。

- (a) 溶滴の移行形態とアークの安定性についての理解度、及びこれらと溶接条件との関係についての理解度（面接調査）。
- (b) 溶滴の移行形態がDip型かGlobular型かを溶接アーク音によって判断すること（実技調査）。
- (c) 任意に与えた溶接電流値に対してアーク電圧を適正範囲内に電圧計を用いずに設定すること。また、Globular型移行条件の場合について、埋れアーク及びオープン・アークとなるようにアーク電圧を設定すること（実技調査）。

被試験者は、第6章において述べた溶接アーク音の変化の識別調査の場合と同様、溶接の実技経験をほとんどもたない男子であり、調査は映画を用いて視聴覚教育を行ったグループ（3名）と行わないグループ（3名）とを対象として行った。

調査の結果、視聴覚教育を行ったグループは視聴覚教育を行わないグループに比べ(b)、(c)の実技面で特に良い成績を示すことが明らかになり、溶接技術教育に溶接アーク音を導入し、視聴覚教育を行うことの有効性が実証された。

7.3 結 言

本章は、溶接アーク音が溶接アーク現象のイン・プロセス検出、その他において有用かつ良質な情報源となり得るという前章までの知見に基づき、溶接アーク音の具体的な応用例について述べている。

一つは、溶接施工時に遭遇することが予想されるいくつかの特殊な状況、現象の検出に溶接アーク音を適用した例であり、他の一つは、溶接技術教育における理論と実際の結合手段に溶接アーク音を適用した例である。

これらに関し本章は次のような結論を与えている。

- (1) 溶接線上に存在する孔、段差、及び部材の傾斜、開先幅の変化などを溶接アーク音によって検出することができる。
- (2) シールドガスの供給停止、及びハンピング、溶落ちの発生などを溶接アーク音によって検出することができる。
- (3) 溶接技術教育への溶接アーク音導入の有効性が実証された。

第8章 総 括

本研究は、溶接アーク音が溶接アーク現象に関する有用な情報を提供する可能性を有するという点に着目し、従来ほとんど不明確であった溶接アーク音に関し、その諸特性及び溶接現象との関連、ならびに応用法などについて実験的、解析的検討を加えたものである。

本研究では、まず溶接アーク音の測定の意義を明確にするとともに、情報源としての適格性について言及している。ついで、溶接アーク音の時間領域及び周波数領域における諸特性を明確にし、アークの挙動及び溶融池の挙動との関連について検討を加え、溶接アーク音を情報源として応用する場合の基礎的データを示している。また、騒音面からの検討を行い聴力保護の立場からの露聴許容時間を明示している。さらに、応用面からの検討を行い、溶接アーク音による溶接プロセスの検出例と溶接技術教育効果について言及している。

本研究で得られた諸結果については各章において詳述しているが、これらの結果を総括して記述すると次のとおりである。

第1章では、溶接アーク現象に関する情報のイン・プロセス検出の問題点を指摘し、本研究の目的とその方針を明らかにした。

第2章では、溶接アーク音の測定の意義を明確にするとともに、溶接アーク音の放射形態、音場の特性を明らかにし、溶接アーク音が情報源としての適格性を有することを示した。さらに、溶接アーク音の特徴量と実験結果を普遍的に表示する方法を示した。

第3章では、溶接アーク音の測定を行った簡易型無響室の構造と性能試験の結果を示し、溶接アーク音の測定方法とその解析方法を示した。また、溶接電源特性及び溶接条件を示した。

第4章では、各種アーク溶接法を対象として溶接アーク音の時間領域と周波数領域における諸特性、及び溶接アーク音を支配する因子について検討を加えた。また、アークの挙動との関連について実験的、解析的検討を加え、次の諸点を明らかにした。

被覆アーク溶接に関して：

- (1) 音圧レベルは、交流アーク及び直流アーク（S.P,R.P）の場合ともに溶接電流の増加に伴って上昇し、電流値との間に直線関係がある。また、アーク長及び極性の影響を受ける。
- (2) 周波数スペクトルは広帯域な連続スペクトルであり、巨視的には白色音的な性質を示

すが、比較的low周波域には出力電流波形に依存する線スペクトル成分を含む。この基本スペクトル成分は溶接電流及びアーク長の増加に伴って強くなる傾向を示す。

主に、CO₂ 溶接に関して：

- (3) Dip型移行条件で再点孤時に発生する音波は衝撃波の伝播特性を示し、その速度は約1.2Mである。
- (4) 溶接アーク音の音圧レベルはアークへの供給電力、溶接速度、ガス流量、ワイヤ突出し長など、溶接条件との関連が緊密であり、それぞれ特徴的な変化を示す。
- (5) 周波数スペクトルは被覆アーク溶接の場合と同様広帯域な連続スペクトルであり、低周波域には出力電流特性に依存する線スペクトル成分、及び溶滴の離脱、移行周波数に対応するスペクトル成分を含む。

パルス化TIGアーク溶接に関して：

- (6) 音圧 P_e を支配する主要な因子は電流波形、繰返し周波数 f_p 、電流振幅 τ_p 、であり、これらの間には $P_e \propto f_p^m \cdot \tau_p^n$ なる関係がある(アーク長一定の場合)。 f_p, τ_p を一定とすると、音圧は矩形波電流で最大となり、次いで鋸歯状波、三角波、正弦波の順となる。なお、完全直流では音はほとんど発生しない。
- (7) 溶接アーク音は f_p を基本音とする倍音構成である。卓越周波数 f_{EX} は、三角波及び鋸歯状波電流では f_p と一致し、矩形波及び鋸歯状波電流では高次倍音成分へ移動する。
- (8) 音圧レベル(本溶接法では騒音レベルにほぼ相等しい)を予想する上で実用上有効な次のような実験式を得た。

矩形波及び鋸歯状波電流の場合

$$SPL = 14 \log_{10} (f_p \cdot \tau_p) + 40 \pm 2 \quad \text{dB}$$

三角波及び正弦波電流の場合

$$SPL = 24 \log_{10} (f_p \cdot \tau_p) - 20 \pm 3 \quad \text{dB}$$

- (9) アークは外観上、ベース電流で最も収縮し、ピーク電流で最も膨張した形状を呈す。この形状変化は電流波形の変化と位相的にも周波数的にも一致する。
- (10) $f_p = 3\text{KHz}$ 程度までの正弦波電流の場合に発生する溶接アーク音は呼吸音として扱えることを実験的及び理論的に明確にした。なお、他の電流波形の場合には波形の立上り速度効果をエネルギー的に考慮することにより呼吸音に準じて扱い得ることを示した。

第5章では、CO₂アーク溶接を対象として溶接時に被溶接材に生ずる振動を感度100mV/G級の圧電型振動加速度計を用いて検出し、その諸特性及び溶融池の挙動との関連、なら

びに溶接アーク音との関連について検討を加えた。その結果、次の諸点を明らかにした。

- (1) 振動加速度レベルと音圧レベルとは適正アーク電圧を含む広い範囲で類似の変化傾向を示すが、過大アーク電圧範囲では異なった変化傾向を示す。
- (2) 周波数スペクトル中には溶接アーク音と同様、短絡・再点弧周波数に対応する成分 f_D 、Globular型移行条件の場合にはワイヤからの溶滴離脱周波数に対する成分 f_G 、出力電流のリップル周波数に対応する成分 f_R 、及び溶接台を含む被溶接材の固有振動数に対応する成分 f_0 が存在する。これら f_D (または f_G)、 f_R 、 f_0 が全周波数成分の強さに占める割合は50%から70%程度である。
- (3) 50Hzまでの帯域における溶接振動の卓越周波数スペクトルは、Dip型移行条件では f_D 成分、Globular型移行条件では f_G 成分または溶融池の上下動の周期に対応する成分である。また、同帯域において溶接振動と溶接電流波形についての周波数スペクトルのプロファイルは類似している。

第6章では、聴覚の一般機能と、溶接アーク音を識別評価する際のプロセスについて言及するとともに、聴覚による溶接アーク音の識別調査を行った。また、聴力保護の立場からACGIH基準に基づき許容露聴時間の検討を行った。

その結果、次の諸点を明らかにした。

- (1) 聴覚の弁別機能は非常にすぐれ、例えば、溶接電流に対する適正アーク電圧範囲内での変化 ($\pm 1.5V$ または $2.0V$) に伴う溶接アーク音の変化を識別することができる。
- (2) ACGIHの聴力保護基準に基づき、各溶接法について溶接アーク音の許容露聴時間を明らかにした。また、許容露聴時間を長くするためには、必要以上に過大な溶接電流及びアーク電圧を用いないこと、パルス化電流の場合には繰返し周波数を低くすること、矩形波や鋸歯状波の代りに、立上り時間と立下り時間の長い三角波や正弦波電流を用いることなどが有効である。これによって、「うるささ」の改善を計ることができる。

第7章では、溶接アーク音が溶接アーク現象のイン・プロセス検出、その他において有用かつ良質な情報源になり得るという前章までの知見に基づき、溶接アーク音の具体的応用について検討を行った。一つは、溶接部材上に存在する特殊な状況、適正溶接条件からはずれた際の異状な現象、さらに溶接欠陥の発生などの検出に溶接アーク音を適用した場合であり、他の一つは、溶接技術教育における理論と実際の結合手段として溶接アーク音を適用した場合である。その結果、次の諸点を明らかにした。

- (1) 溶接線上に存在する孔、段差、及び部材の傾斜、開先幅の変化などを溶接アーク音により検出することができる。

- (2) シールドガスの停止、及びハンピング、溶落ちの発生などを溶接アーク音により検出することができる。
- (3) 溶接技術教育への溶接アーク音導入の有効性が実証された。

謝

辞

本研究は、大阪大学溶接工学研究所及び北見工業大学工学部において、大阪大学溶接工学研究所荒田吉明教授、北見工業大学工学部棟徹夫教授の御指導と御教示を賜わって遂行し得たものであります。また、本研究を進めるにあたり大阪大学工学部丸尾大教授、大阪大学溶接工学研究所井上勝敬教授に終始懇切な御指導と御討論をいただきました。

本論文をまとめるにあたり、大阪大学工学部西口公之教授、仲田周次教授より論文の各項につき御指導と御意見をいただきました。

実験の遂行にあたっては、大阪大学溶接工学研究所の諸先生、大阪大学工学部の諸先生及び北見工業大学工学部の諸先生より多大の御助言と御便宜をいただきました。

本論文を終えるにあたり、これらの諸先生に深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小林, 馬來, 大江: アーク溶接過程で発生するヒュームに関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, 第18集 (1976), 374-375
- 2) 荒田, 井上: アーク熱源型の自動制御化溶接に関する基礎的諸問題, 超高温研究, Vol.11 (1974), 1-129
- 3) 二俣, 棟: ガスシールドアーク溶接における耐風効果に関する研究 (第4報), 溶接学会誌, Vol.48, No.8 (1979), 621-626
- 4) 土屋, 岸本, 松永, 中野: プラズマアーク溶接のビード形成に関する二、三の現象について, 第40回溶接法, 第28回アーク物理合同委員会資料, No.72-178 (1972年2月)
- 5) 藤原, 堀江, 福田, 神村: 炭酸ガスアーク溶接におけるアーク光、アーク音、発生煙及び溶着効率の挙動について, 溶接学会全国大会講演概要, 第13集 (1973), 444-445
- 6) フランス国鉄製作: 映画「音と光」(田中重喜紹介), 第66回溶接冶金, 第45回アーク物理合同委員会資料 (1976年11月)
- 7) W.A Baeslack III, G.Fayer IV, S.Ream and C.E.Jackson: Quality Control in Arc Stud Welding, Welding Journal, Vol.54, No.11 (1975), 789-798s
- 8) 二俣, 棟: ガスシールドアーク溶接における耐風効果に関する研究 (第3報), 溶接学会誌, Vol.47, No.9 (1978), 668-673
- 9) 安藤, 長谷川: 溶接アーク現象, 産報 (1967)
- 10) 吉田, 阿部, 尾上: 被覆アーク溶接棒のアーク現象, 溶接学会誌, Vol.30, No.3 (1961), 160
- 11) 田中, 熊本: N型波伝播における減衰, 日本音響学会講演論文集 (1976.5), 385-386
- 12) 土屋, 佐藤: 衝撃大電流による細線金属の爆発現象, 山形大学紀要 (工学), Vol.14 No.1 (1976), 103-116
- 13) 山本: 炭酸ガスアーク溶接現象の研究, 大阪大学工学部学位請求論文 (1962), 5
- 14) H. Maruo and Y. Hirata: Welding Mild Steel Plate with Pulsive Arc, IIW, Doc., IV-225 (1977)
- 15) T.B.Corry: Wave Shape Effect on Alloying and Stability of Alternating current Tungsten-inert-arc Welding, Transaction Paper of AIEE, No.61-546 (1961)
- 16) E.P.Vilkas: New Welding Current Pulsation Method, Welding Journal, Vol.477, No.7 (1968), 549-560s
- 17) 信原, 窪田, 浮田: 方形波パルスによる交流TIG溶接アークの再点孤現象(I), 溶接学

- 会誌, Vol.46, No.4 (1977), 32-37
- 18) 庄司, 一海, 小沼, 石丸: 方形波アーク溶接法によるAl薄板の溶接, 溶接学会誌, Vol.47, No.11 (1978), 25-30
 - 19) Von Hofe : Versuche und Entwicklungen beim Metal - Lichtboycensch wessen mit Stromimpulsen, Maschinenmarkt (DEU), Vol.83, No.78 (1977), 1534-1537 s
 - 20) A.A.Omar and C.D.Lundin : Pulsed Plasma - Pulsed GTA Arc : A Study of the Process Variables, Welding Research Supplement, April (1979), 97-105 s
 - 21) D.W.Baker and C.M.Adams Jr. : The Role of Pulsed GTA Welding Variable in Solidification and Grain Refinement, Welding Research Supplement, May(1979), 143-152 s
 - 22) 例えば, 福田: 騒音対策と消音設計, 共立出版 (1974), 80
 - 23) 五十嵐: 音響と振動, 共立出版 (1968), 26
 - 24) 難波, 桑野, 加藤: 音の立上り時間と大きさについて, 日本音響学会誌, Vol.33, No.3 (1974), 144-150
 - 25) 平松, 高木, 山本: 騒音のうるささにおよぼす立上り速度の効果, 日本音響学会誌, Vol.33, No.1 (1976), 23-28
 - 26) J.G.Garland and G.J.Davies : Surface ripping and growth perturbations during weld pool solidification, Metal Construction and British Welding Journal, Vol. 2, No.5 (1970), 171-175s
 - 27) D.J. Kotecki O.L.Cheever and D.O.Howden : Mechanism of Ripple Formation During Weld Solidification, Welding Journal, Aug. (1972), No.5, 386-391 s
 - 28) 中根, 立石: 直流ティグ溶接におけるビード波生成に関する研究, 溶接学会全国大会講演概要, 第24集 (1979), 150-151
 - 29) M.H.Cyril and E.C.Chares : Shock and Vibration Handbook, Vol.1, No.1(1961), McGraw-Hill
 - 30) 例えば, 坂, 石井, 吉川: 音響工学概論, 日刊工業新聞社 (1974), 140
 - 31) 井上, 荒田: アーク熱源の自動制御化溶接に関する基礎的研究 (第4報), 溶接学会誌 Vol.48, No.11 (1979), 950-954
 - 32) 山家: 電流制御TIG溶接現象に関する研究, 大阪大学工学部卒業研究論文(1980), 40
 - 33) 電子通信学会編: 聴覚と音声, 電子通信学会 (1975), 420

本論文に関する著者の発表論文

- 1) 溶接アーク音に関する研究 (第1報), —— 溶接アーク音におよぼす溶接法, 溶接条件の影響 ——, 溶接学会誌, Vol.47, No.7 (1978)
- 2) ガスシールドアーク溶接における耐風効果に関する研究 (第3報), —— 流れの可視化とガス濃度の分析による解析 ——, 溶接学会誌 Vol.47, No.9 (1978)
- 3) 溶接アーク音に関する研究 (第2報), —— 聴覚による評価と二、三の特性 ——, 溶接学会誌, Vol.48, No.5 (1979)
- 4) ガスシールドアーク溶接における耐風効果に関する研究 (第4報). —— 二、三の溶接アーク現象とガスシールド条件 ——, 溶接学会誌, Vol.48, No.8 (1979)
- 5) Investigation on Welding Arc Sound (Report1), —— Effect of Welding Method and Welding Condition on Welding Arc Sound ——, Transactions of JWRI, Vol. 8, No.1 (1979) IIW, Doc., S. G. 212-451(1979)
- 6) Investigation on Welding Arc Sound (Report 2), —— Evaluation by Hearing Acuity and Some Characteristics of Arc Sound ——, Transactions of JWRI, Vol. 8, No.2 (1979)
- 7) 溶接アーク音に関する研究 (第3報), —— TIG溶接アーク音特性におよぼす電流波形の影響 ——, 溶接学会誌, Vol.49, No.1 (1980)
- 8) 溶接アーク音に関する研究 (第4報), ——アーク溶接時に発生する母材振動の解析 ——, 溶接学会誌, Vol.49, No.12 (1980)
- 9) Investigation on Welding Arc Sound (Report 3), —— Effects of Current Waveforms on TIG Welding Arc Sound ——, Transaction of JWRI, Vol. 9, No.2 (1980)
- 10) Investigation on Welding Arc Sound (Report 4), ——Vibration Analysis of Base Metal during Welding ——, Transactions of JWRI, Vol.10, No.1 (1981)
- 11) 溶接アーク音に関する研究 (第5報), —— TIG溶接アーク音特性におよぼす電流波形の影響(II) ——, 溶接学会誌, Vol.50, No.12 (1981)
- 12) Forschung in Bezug auf das Schweißlichtbogengeräusch (Bericht 5), ——Einfluß der Stromwellenform auf das Schweißlichtbogengeräusch bei Wolframschutzgasschweißen —— Transactions of JWRI (投稿予定)