移動熱源による薄板の温度上昇, 下降の 過渡的变化 (第2報)*

— 温度曲線 —

安藤 弘平** 津 堅 房 弘**

On the Transient Temperature Variation in Thin Plate due to Moving Point Heat Source (Report 2)*

—Temperature Curve—

by Kohei Ando** and Fusahiro Tsugata**

Abstract

Transient temperature rise is calculated by using the newly derived formula

$$n = e^{L/R_{\infty}} F_0(\delta)$$

which is reported in Reference (2). Temperature curves of many points near arc starting and stopping points are drawn and comparison between them and those of quasistationary state is described and discussed.

Fig. 1 and 2 show the calculated temperature curves of points which are illustrated in Fig. 3. The graphic way of drawing of these curves is shown in Fig. 19, 20

In these figures, the temperature rise as well as time elapsed are expressed in dimensionless quantities, temperature rise "n" is defined in equ. (1) and time elapsed $vt=L$ is defined in equ. (3) and is illustrated in Fig. 4.

In Fig. 1 and 2, curves ① show the temperature curves of quasistationary state of the given points and ② show the half values of ①. Curve ② is very convenient for the consideration of the transient temperature. Fig. 10 and 11 illustrate the general characteristics of the transient temperature curves compared with ① and ②.

Fig. 5 and 6 show the maximum temperature, Fig. 7 shows the equithermal lines of maximum temperature and Fig. 18 shows it by experiment.

I. 序 説

溶接アークによる母板の温度上昇の問題の考察は 実用的には母板の変形, 割れの問題の究明 あるいは溶融池内の冶金化学的变化, 冷却母板の結晶の生成, 変化, 変態などの究明を最終目標としている. あいにくと筆者はこれらの問題には素人であるが, いわゆる高温割れはアーク熱による母板の局所的膨張, 収縮に直接関連する現象であると推定され, その究明には「急がば廻れ」のことわざ通り まず母板の過渡的溫度変化の状況をよく知っておくことが必要であろうと考えられる.

本稿は 第1報¹⁾にも述べたように 筆者が母板の過渡的溫度上昇について得た比較的簡明な結果²⁾を利用し

て, アーク起動点, 停止点付近の母板上の固定点の温度変化を計算したものである. ただ上に述べたように 筆者は力学的問題などについて素人であるため 割れ, 変形などの究明にポイントとなるような点をぬかしたマトはずれの所論になっているかも知れない. しかし温度の計算結果は無次元的に取扱っており, 定性的考察も行っている, 各種関連問題の究明に応用して参考となるものと信じている.

計算結果は後掲 Fig. 1~7 の通りであるが, これについて述べるに先だって 計算のための仮定条件, 図に示す使用記号について述べる.

II. 仮定条件, 記号

本稿は アークが一定熱量 q を母板へ与えながら, 一定速度 v で直線的に進む場合のアーク起動点 (または停止点) 付近の母板上の固定点 P_0 (坐標は x_0, y_0) の

* 原稿受付 昭和46年3月30日

** 正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering,
Osaka University

温度変化について計算・考察したものである。標題には「薄板」としているが、厚板でも アークの現在点から板厚の数倍以上距った点については 板の厚さ方向の温度差は無視してよいので、本稿の結果がそのまま適用できることはいうまでもない。

計算は 普通の熱伝導の計算の場合と同様、熱伝導定数は温度に無関係に一定であり、溶融潜熱を無視した理論式に基づいている。また板表面からの熱放散は無視しており、母板は無限板を仮定した場合の計算式を利用している*。

q (cal/sec·cm): 母板へ与えられる熱量。板厚 1 cm 当りの値。

v (cm/sec): アークの移動速度。アークは点(線)熱源として x 軸上を直線的に進む。

K (cal/°C·sec·cm): 熱伝導定数。

$k = K/c\sigma$ (cm²/sec): 熱導達率。

T (°C): 温度上昇

$n = T/(q/4\pi K)$: 温度上昇の無次元表示。……(1)

n_m : n の最大値。与えられた点 (X_0, Y_0) についての最高到達温度。無次元表示。

x_0, y_0 (cm): 考えている点 P_0 の座標。アーク起動点(または停止点)を原点とする。アークの移動方向は $+x$ の方向。

t (sec): アーク起動後(停止後)の経過時間。

$X_0 = vx_0/2k$
 $Y_0 = vy_0/2k$ } x_0, y_0 の無次元表示。……(2)

$X = vt \cdot v/2k$: アークの移動距離(無次元表示)

$\tau: v\tau = L$ (L は次元参照)

$L = (vt - x_0) \cdot v/2k$ ……………(3)

x_0 を基準としたアークの移動距離(無次元表示)

$m = vt/\rho$ ……………(4)

$\delta = v\rho/4k$ ……………(5)

ρ はアークの現在点 O と考えている点 P_0 との距離

A: アーク起動点

O: アークの現在点あるいは停止点

P_0 : 母板上の定点。座標は x_0, y_0

III. 計 算 結 果

(a) アーク起動点(または停止点)付近の母板上の固定点の温度曲線

Fig. 1 はアーク起動点付近、Fig. 2 は停止点付近の固定点についての温度変化曲線を示している(具体的

Fig. 1 Temperature variation near the starting point

計算法は VI(a) 項参照)。ただし Fig. 2 の停止点付近のものは アークが起動して後しばらく時間が経過して準定常状態になったときにアークを停止した場合についてである*。

* 母板寸法が有限な矩形板の場合、表面からの熱放散を考えた場合の温度は 本稿の結果を応用して比較的容易に計算でき、推定もできるので⁵⁾、ここでは触れない。

* アークが起動した後 いまだ準定常状態になっていない状態からアークを停止した場合の温度曲線は Fig. 1, 2 から作図によって容易に求められる。後掲 Fig. 14。

Fig. 2 Temperature variation near the stopping point.

Fig. 1, 2 に計算した固定点 P_0 の位置は Fig. 3 の通りである。Fig. 3 の・印の点、位置は (2) 式のように無次元量で示している。

Fig. 1, 2 の各図に示す曲線群のうち最上方のものの曲線①は $x_0 = +\infty$ (アーク停止の場合は $x_0 = -\infty$) の場合で、いわゆる準定常状態の場合の温度曲線であるが、これは文献 (3) の Fig. 2 の $Y = \text{一定}$ の曲線と同じものである。点線で示した曲線②は ①の 1/2 の

Fig. 3 Fixed points whose temperature is shown in Fig. 1 and 2

高さのもので、後に述べるように各曲線の比較考察に大いに役立つ。

Fig. 1 (a), Fig. 2 (a) は $Y_0 = 0$ の場合すなわち x 軸上の点の場合であるが、この場合には上述の曲線②は $X_0 = 0$ の曲線 (すなわちアーク起動点 (停止点) そのものの温度曲線に一致している。これはすでに第 1 報で力説した所である。なおこの $Y_0 = 0$ の場合の曲線は後に Fig. 19 にさらに詳しく示している。

さて Fig. 1, 2 の縦軸は温度上昇であるが、これを (1) 式の n によつて無次元量として示している*。Fig. 1, 2 の横軸は (3) 式に定義する量

$$L = (vt - x_0) \cdot v / 2k \quad \dots\dots\dots (3)$$

を示している。これは Fig. 4 に図解するように考えている点 P_0 (坐標 x_0, y_0 ; 無次元坐標 X_0, Y_0) から x 軸に下した垂線の交点 S_0 をアークが通過した後の移動距離を上式のように無次元化して示したものである。アーク移動距離は経過時間 t に比例して変化するから、Fig. 1~2 の横軸は経過時間と考えてもよく、図の曲線は温度曲線 (考えている点の温度の時間的変化曲線) を示している。ただし横軸の L として上述のような量を

* たとえばアーク電圧 = 37V, 電流 = 960 A, 溶接速度 $v = 0.7 \text{ cm/sec}$ で板厚 1.2 cm の鋼板をアーク溶接するとき (1) 式の分母は $q / 4\pi K = 5090 (^\circ\text{C})$

となり, (アークの熱効率 90%, $K = 0.1$ と仮定), 温度 $T = 1535^\circ\text{C}$, 700°C に対する n は

$$\left. \begin{aligned} T = 1535^\circ\text{C}: n &= 0.301 \\ T = 700^\circ\text{C}: n &= 0.136 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

となる。また $k = 0.083$ とするとき、図のたとえば $Y_0 = 4, Y_0 = 10$ は

$$\left. \begin{aligned} Y_0 = 4: y_0 &= Y_0 \cdot 2k / v = 0.95 \text{ cm} \\ Y_0 = 10: y_0 &= 2.37 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

に相当する。文献 (3) の計算例参照。

Fig. 4 Definition of "L"

とっているの、考えている点 P の x_0 座標が正の場合には アーク起動の場合 $L=0$ においても温度はすでに正であり、 $x_0 < 0$ の場合には $t=0$ において L はすでに $L=|x_0|$ であり、したがって $x_0 < 0$ の曲線については

$L=|x_0|$ ($t=0$) において温度は零であり、 $L < |x_0|$ については意味がない。後掲 Fig. 14 (a) の Z_1 点参照。

同様にアーク停止の場合には $x_0 < 0$ (たとえば $x_0 = -2$) は アークが Fig. 4 の S_0 点を通して $|x_0|$ だけ右方へ移動したときにアークを停止したのであるから

$L < +|x_0|$ についてはアークは停止されておらずその部分の曲線は準定常状態の場合のそれと一致する。たとえば Fig. 2(b) の $x_0 = -2$ の曲線は 横軸が $L=2$ までは曲線 ① と完全に一致している。後掲 Fig. 14 の (b-2) 図の Z_2 点参照。

なお上に述べるように Fig. 1~2 の図形は 横軸に L をとっているの、同一時刻における異なる x_0 点に対する温度は図の点線で示したような関係になる。(IV. (d) 項参照)。横軸にアーク起動(停止)後の時間(移動距離)をとった場合の図形はたとえば後掲 Fig. 19~20 のようになる。

(b) 最高到達温度 母板上の一定点 $P_0(x_0, y_0)$ の温度は時間に関して Fig. 1~2 のように変化し、ある時刻において最高値に達する。Fig. 5 はこの最高値を無次元量として示したもので、(a) はアーク起動点付近、(b) は停止付近を示している*。図は便宜上 横軸に y_0 をとって x_0 をパラメータとして示しているが、図の最も上側の曲線 ① ($x_0 = \pm\infty$) は準定常状態の値を示しており、曲線 ②' は後の考察の便宜のため ① の $1/2$ の高さのものである。

曲線 ①' すなわち準定常状態の最高到達温度は 理論上

Fig. 5 Maximum temperature along Y_0 -axis

$$n_m = \sqrt{\frac{2\pi}{e}} \cdot \sqrt{\frac{1}{Y_0^2 + \frac{1}{2}}} = \frac{1.52}{\sqrt{Y_0^2 + \frac{1}{2}}} \quad \text{.....(8)}$$

で与えられる。文献(3)の(21)式参照。たとえば

$$Y_0 = 4 \text{ では } n_m = 0.375 \quad \text{.....(9)}$$

図を見ると、(a) 図のアーク起動の場合には $x_0 > 1/2$ では 最高到達温度は曲線 ②' より必ず高く、 $x_0 < 0$ では必ず低い。後述(17)式の記述参照。

Fig. 6 は Fig. 5 を書改めたもので、横軸に x_0 をとり、 y_0 をパラメータとして最高到達温度 n_m を示している。アーク起動点付近。図を見ると、 x 軸から

Fig. 6 Maximum temperature along X_0 -axis (arc starting zone)

* Fig. 5 の曲線は Fig. 1~2 とは別に計算したもので、それぞれの曲線については y_0 の等間隔に約 15 点について計算している。

$Y_0=2$ だけ距った点では $X_0>8$ においてほぼ準定常値になっている。(無次元量 X_0, Y_0, n の具体的な数量 cm, °C への換算については既掲脚洋の(6), (7)式の例参照)。

次に Fig. 7 はアーク起動(停止)点付近についての最高到達温度についての等温度曲線を示している。最高到達温度が

$$n_m=0.5, 0.3, 0.2-0.08$$

となる点を連らねたわけである*。

Fig. 7 において (a), (b) を見較べると、大体においては (b) は (a) を裏返したものに近いが、たとえば $n_m=0.10$ の曲線が X 軸、 Y 軸と交る点は次の通りである。

Fig. 7(a) $X_0=-4.26$ $Y_0=7.13$

Fig. 7(b) $X_0=+4.55$ $Y_0=8.00$

また $X_0=20$ ($X_0=-20$) なる点で $n_m=0.10$ となるのは (a) 図では $Y_0=14.05$ であるが、(b) 図では $Y_0=14.25$ である。つまりアーク起動点、停止点を原点として比較する限りは 同一 $X_0(-X_0)$ の点の最高温度は停止点付近の方が高いのであって、これはたとえば Fig. 1, 2 の $Y_0=2$ の場合について $X_0=+2$ (起動), $X_0=-2$ (停止) の曲線の最高点を比較すればよくうなずける所である。

Fig. 7 Equothermal lines of maximum temperature

IV. 二三の考察

前節に示した温度曲線は 熱伝導理論によって求めたものであるので、Ⅱ節の仮定条件を認める限り これを

* 各点の n_m に到達する時刻はそれぞれ異なっていることはいうまでもない。

そのまま 信用しなければならぬが、母板の割れその他の問題の究明に应用駆使するがためには さらに曲線の定性的特性をよく理解しておくことが望ましい。以下これについて二三の考察を述べる。

(a) 考察に必要な予備知識

(a-1) 準定常状態の場合の最高到達温度とその時期

Fig. 8(a) において P_0 点は x 軸から Y_0 だけ距っているとすると、準定常状態では P_0 点の最高到達温度は (8) 式で与えられ、この最高温度はアーク点が Fig. 8(a) の O_m のような位置 すなわち

$$L=L_m=Y_0^2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

の位置にきたときに実現する。Fig. 8(b) 参照。文献(3)の(20)式参照。たとえば $Y_0=10$ ならば $L_m=100$ において最高値に達する。Fig. 1(d) の $X_0=\infty$ の曲線参照。

Fig. 8

(a-2) 温度が準定常状態の 1/2 となる条件—溶接線 x 軸上に投与された熱量が 考えている点 P_0 の温度上昇に寄与する関係 Fig. 9(a) においてアークの現在点を O とすると、 x 軸上に太く示した部分すなわち

$$\overline{OB}=\overline{OP_0} (= \rho)$$

なる $\overline{OB}$ 部分に投与された熱量による P_0 点の温度は準定常状態 (すなわちアーク起動点 A がはる左方無限の遠方にある場合) の P_0 点の温度の 1/2 となる。文献(2)参照。これをさらに詳言するに Fig. 9(b) において S, S' 点として

$$\overline{OS} \cdot \overline{OS'} = \overline{OP_0}^2 \quad \dots\dots\dots(11)$$

の関係を満足するような相対位置の点を考え、その部分の微小線分 dx, dx' の比を

$$dx : dx' = \overline{OS} : \overline{OS'} \quad \dots\dots\dots(12)$$

のようにとれば、これら dx, dx' に投与されたアーク熱によって P_0 点に形成される温度は アークが O 点にある現時点においては たがいに等しい*。しかるに S, S' の dx, dx' は $\overline{OB}=\overline{OP_0}$ なる B 点を境として溶接線上の左右に対応して存在し、かくして Fig. 9(a) の $\overline{OB}$ 太線部分によって P_0 点に形成される温度は B 点より左

* Fig. 9(b) について上に述べた内容は 文献(2)の Fig. 4 について述べた所を表現を変えて具体的に述べたものである。

Fig. 9 Half-temperature condition

方無限の遠方に至るまでのB点以遠の部分の投与熱量によって形成される温度に等しく、結局 $\overline{OB}$ による P_0 点の温度は準定常値の1/2となるのである。

上述の Fig. 9 の関係は 考えている P_0 点がアーク起動点 (または停止点) 付近にある場合の温度曲線 (Fig. 1, 2) の考察に大いに役立つ。

(b) アーク起動点付近の温度曲線の形

Fig. 10 は Fig. 1 に求めた曲線群の特性をモデル的に図解したものである。図において曲線①は $X_0 = \infty$ すなわち準定常状態の温度曲線で、縦軸の温度は (3) 式によって表示したもの、横軸は Fig. 4 の $L = \overline{S_0 O}$ (無次元量) をとっている。曲線②は①の1/2の高さのもの。

Fig. 10 Typical temperature curves

曲線④は $X_0 > 0$ の場合の曲線で、その最高温度の点 M_A は①の最高温度の点 M_1 より左方にある。④は一般に②より高い。ただアーク起動直後付近の点は異なる。後掲 Fig. 11(c-1) 参照。

曲線⑤は $X_0 < 0$ の場合で、その最高温度の点 M_B は M_1 より右方にある。⑤は②より低い。Fig. 11(d-1) 参照。

実は曲線④の最高温度の点 M_A が M_1 より左方にあることについては 筆者は第1報においては思い違いをして「当然 M_1 より右方にくる」と述べた。(第1報 Fig. 7) その後 Fig. 1(d) の $X_0 = 10$ のような曲線を現実に計算してみて、思い違いに気付いた。思い違いの原因は 移動坐標上の定点と固定坐標上の定点との特性を混同したためで、ここに訂正しておく。

さて Fig. 1(d) の $X_0 = 10, 20$ などの曲線を見ると、最高点付近の曲線の形は はなはだフラットで、最高点の位置がわかりにくい。しかし著者らの計算原簿ではたとえば $Y_0 = 10$ (Fig. 1(d)) の $X_0 = 10$ の場合

$$\delta = v\rho/4k = 40, 45, 50 \quad \dots\dots\dots(13)$$

に対する n は 後に VI(a) 項に述べる方法で計算すると

$$n = 0.1261, 0.1251, 0.1249 \quad \dots\dots\dots(14)$$

となる。上記 δ に対する L は

$$L = \sqrt{4\delta^2 - Y_0^2} = 79.4, 89.4, 99.5 \quad \dots\dots\dots(15)$$

である。Fig. 10 の M_1 の位置は (10) 式によって

$$L = Y_0^2 = 100 \quad \dots\dots\dots(16)$$

であるから、明かに $L = 79.4$ の方が $L = 100$ よりも n が大きく、最高点の位置は M_1 より左方にある。ただし n 値そのものについては 上の例に見るように ほぼ等しく、差は小さい。

さて Fig. 1 に示した温度曲線の大要は Fig. 9(a) に述べた所から次のように理解できる。

Fig. 11(a) の曲線①は準定常状態の温度曲線で、②は①の1/2の高さのものである。図の横軸は (3) 式に述べたように アーク点が Fig. 4 の S_0 を通過した瞬間を起点とした経過時間 (もしくはアーク移動距離) を指している。(a) 図の O_m 点は Fig. 8(a) の O_m と同様 (10) 式を満足するアーク点で、このとき 考えている P_0 点の温度は最高値となる。 O' は O_m より手前の点、 O'' は O_m を越えた点 (時刻) である。

(b) 図はアーク起動点Aと 考えている P_0 点との関係が

$$\overline{O_m P_0} = \overline{O_m A}$$

を満足する場合である。したがってアーク点が O_m にあるとき、すでに投与された $\overline{AO_m}$ 間の熱によって P_0 点に形成される温度は Fig. 9(a) からわかるように準定常値の1/2であり、温度は曲線②の M_2 に一致する。(b-1) 図。

アークが O'' に移動してきた状態では (b-2) 図の x 軸上に太線で示した部分だけ $\overline{AO''}$ は $\overline{P_0 O''}$ より余分となり、したがって温度は②よりそれだけ高い。(b-1) 図のD点。アークが O' にあるときは (b-2) 図の x 軸上の負側の点線で示した部分だけ不足し、温度は②より低くなる。(b-1) 図のC点。

* 著者らの計算原簿では $\delta = 35, 40, 45, 50$ などの中間の δ に対する計算を欠いているので、 n の最大点の位置 (δ) を正確にここに誌すことはできない。
 $Y_0 = 10, X_0 = 20$ の場合には最大点の位置は大体 $L \approx 90$,

Fig. 11 Consideration of temperature curves

次に(c)図においては、アークがO'にあるときちょうど $\overline{OP_0} = \overline{OA}$ となり、温度は②に等しくなる。C点。アークがさらに進んで O_m, O'' にあるときは、図の太線で示した部分が余分となり、温度は②より高い。E; D点。

(d)図は P_0 点のX座標が $X_0 < 0$ の場合で、(d-2)図に見るようにアークが起動点より右方へ進んでOにあるとき、常に $OA < OP_0$ となり、温度は②より低い。

なお以上の考察からわかるように、考えている点 P_0 のX座標が $X_0 = 0$ の場合には、アークが任意の位置Oにあるとき、常に $\overline{OP_0} > \overline{OA}$ であるので、温度は曲線②より低い。Fig. 1(b)~(d)の $X_0 = 0$ の曲線参照。ただ $X_0 = 0, Y_0 = 0$ (アーク起動点) の場合には $\overline{OP_0} = \overline{OA}$ であるので、温度は②に一致する。Fig. 1(a)の $X_0 = 0$ の場合。

$X_0 > 0$ の場合 P_0 とアーク位置Oとの関係が Fig. 11(b)の P_0, O_m の関係 ($P_0 O_m = AO_m$) にあるとき、温度は Fig. 11(b-1)の M_2 となるが、 P_0 の縦座標 Y_0 が1に比べて大きいとき

$$\begin{aligned} \overline{AO_m} &= \overline{P_0 O_m} = \sqrt{Y_0^2 + L_m^2} = \sqrt{Y_0^2 + Y_0^4} \\ &= Y_0^2(1 + 1/(2Y_0^2)) = Y_0^2 + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\therefore X_0 = \overline{AO_m} - L_m = \frac{1}{2} \quad \dots\dots\dots(17)$$

すなわち P_0 点のX座標が $X_0 = \frac{1}{2}$ の程度するとき、温度は Fig. 11(b-1)の程度となり、 M_2 点を通る。

$X_0 \rightarrow 0$ となると、温度曲線は全域を通じて②より低くなる。

以上は温度曲線についての大まかな考察であるが、すでに文献(2)に論証した通り、アーク起動後の過渡的温度上昇の準定常値に対する比率 R は

$$R = m F_0(\delta) / \infty F_0(\delta) \quad \dots\dots\dots(18)$$

で表わせ、 R は(4)、(5)式の m, δ によって一義的に定まる。今

$$\left. \begin{aligned} b &= x_0/y_0 = X_0/Y_0 \\ l &= (vt - x_0)/y_0 = L/Y_0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(19)$$

とおくと、(4~5)式の m, δ は

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{vt}{\rho} = \frac{X_0 + L}{\sqrt{L^2 + Y_0^2}} = \frac{b + l}{\sqrt{l^2 + 1}} \\ \delta &= \frac{v\rho}{4k} = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + Y_0^2} = Y_0 \cdot \sqrt{l^2 + 1/2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

となる。Fig. 12は横軸に(19)式の l をとり、縦軸に次のような内容の曲線 A, B, C をとっている。このうち曲線 A (太線) は

$$\delta/Y_0 = \sqrt{l^2 + 1/2} \quad \dots\dots\dots(21)$$

を示している。曲線群 B (細実線) は(20)式の m を b をパラメータとして示している。曲線群 C (点線) は $Y_0 = 2, 4, 10$ の場合について

$$R = 0.75 \text{ (細点線) または } R = 0.9 \text{ (太点線)} \quad \dots\dots\dots(22)$$

となるような m 値を縦軸にとっている*。

Fig. 12においてB曲線(細実線)の $b=2$ の曲線とC曲線の $R=0.9$ (太点線)のうち $Y_0=4$ の曲線との交点(図の Z_1, Z_2)に注目すると、その横軸は

$$l = L/Y_0 = -0.3, +7$$

である。したがって $X_0=4, X_0=8$ ($b=2$) の場合には $L = l Y_0 = -1.2, 28$

における温度は準定常値の $R=0.9$ 倍になっている。つまり Fig. 1(c) ($Y_0=4$) において $X_0=\infty$ 曲線(準定常)に対する $X_0=8$ 曲線の値の比が $R=0.9$ となるのは上式のような L においてであって、この中間の

* 曲線群Cは次のようにして求めたものである。すなわち(18)式の R は m, δ を与えれば一義的に定まる。したがって逆に R としてたとえば $R=0.75$ をとれば、これを満足する m, δ の組合せはたとえば文献(2)の Fig. 3 から幾組でも求められる。今その1組を m_1, δ_1 とする。しかるに Y_0 としてある値を仮定すれば δ_1/Y_0 は定まる。しかるに曲線 A (太実線) は δ/Y_0 を示しているの、この曲線上に δ_1/Y_0 に相当する点を取り、対応する l を求める。この l (横軸) に対して m_1 を縦軸にプロットする。 m_1, δ_1 として種々なる組合せをとれば $R=0.75$ (または 0.9) を満足する m 曲線が描けるわけで、図には $Y_0=2, 4, 10$ の場合について示している。

Fig. 12 Graphic solution of transient temperature rise

$L(-1.2 \sim 28)$ においては $R > 0.9$ となり, $L > 28$ となると R 値は 0.9 より漸減する. $L \rightarrow \infty$ では $R \rightarrow 1/2$.

なお図に見るように $Y_0=4$ なる太点線は $b=1$ なる細実線と交点がないので、 $Y_0=4$, $X_0=4$ なる P_0 点では準定常値の90%の温度になることは起り得ないことがわかる。

上の例からわかるように Fig. 12 から Fig. 1 に示した温度曲線の準定常曲線①に対する比率について種々なる特性が読みとれるが、詳言は省く。ただし Fig. 10 の M_A , M_B のような最大温度を求めることは困難である。

(c) アーク起動(停止)点付近の点の温度は時間じゅうぶん経過した状態では準定常値の $1/2$ に漸近すること。Fig. 1, 2 の温度曲線を大観すると、温度は考えている点の坐標 X_0, Y_0 によつて異なるが、時間がじゅうぶん経過した後では準定常値に近づくのではなく、その $1/2$ の値に近づいている。つまり Fig. 10 において温度曲線 ④, ⑥ は曲線 ① に近づくのではなく、② に近づく。これは おちついて考えてみると、いわば全く当然のことであるが、逆にこれは起動点(停止点)付近の温度についての基本特性であつて、次のように理解できる。すなわち準定常状態というのは アークが無限の左方遠方から出発して 考えている点の真下の点 (Fig. 4 の S_0) を通過して右方へ移動する場合であるが、アークが S_0 より相当に右方へ遠く移動した時点を考えて、 P_0 点の温度は S_0 より左方の溶接線上の熱と、右方の相当に長い S_0O による熱によって形成され、いわば両手

に花といった形である。これに反して起動点 A に近い P_0 点 (坐標 X_0 が有限) では アーク点 O が S_0 より相当右方にある状態では 右方からの熱によっては温度は高まるが、左方 アーク起動点より左方の熱は少く その恩恵を受けない。時間が相当経過した後では 右方、左方からの熱による温度上昇は大略同等と考えると、起動点付近では左方のものがほぼ零であるので、温度は準定常値の約 $1/2$ となるのである。

1/2 となる件は実は既掲 Fig. 12 において 時間が経過して $l(L)$ が大となると m が 1 に近づいていることに対応しており, 文献 (1), (2) に力説した通り, $m \rightarrow 1$ となると (18) 式の R は 1/2 に近づくのである.

実は上の所論は大まかで、たとえば Fig. 1(c) の $X_0 = -2, 0, 4$ などの曲線を相互に比べると、 $L=100$ のようにアーク点が相当に右方へ移動した時点においてもこれらの点の温度は明らかに差がある。案外(?) に差があるとも考えられるが、この差の存在は次のように理解できる。すなわち Fig. 13 においてアーク起動点を A として P_1 点の温度を考えるに、アークが O にあるとき 図の $\overline{OB_1}$ ($=\overline{OP_1}$) 部分による熱によっては準定常値の $1/2$ の温度が形成され、 $\overline{AB_1}$ の熱がこれに加わる。O が右方へ移動すると B_1 は S_1 に漸近し、 $\overline{AS_1}$ 部分の熱が加わる。 P_2 点については漸近点は S_2 となり、 $1/2$ に加わる熱は P_1 の場合より大となる。このように $1/2$ に加わる熱が P_1, P_2 の位置によって異なるので、アークの現在点 O が S_0 より相当に左方へ移動した後においても P_1, P_2 間には依然として温度差が残存するのである。なお次項の記述参照。

Fig. 13

(d) X 方向への温度傾度 (X 方向への熱の流れ)

Fig. 1, 2 の横軸は (3) 式に定義したような L をとっているので、アークが A 点で起動した後のある一定時刻における各点の温度の考察には注意を要する。Fig. 1, 2 において点線曲線 ①, ②, ③などを示しているが、たとえば Fig. 1(c) の曲線 ④ はアークが A 点を出発して $X=100$ だけ移動した時刻の各点 ($X_0=-2, 0, 4, 8$) の温度を示している。すなわちこの ④ は $X_0=0$ 曲線に対しては $L=100$ の点で交っており、 $X_0=4$ 曲線に対しては $L=100-4=96$ の点を通るように描かれてあ

る。

これらの曲線で見ると、アーク起動後の一定時刻では温度は X_0 によって異なり、 X_0 の大きい点の方が温度は高い。したがって熱は左方に向って流れている。(ただし温度が最高値をすぎた後の時点において。)

実はこの左方へ向う熱流は準定常状態においても生じている。Fig. 1(c) において点線曲線 ⑩ の上方部の $X_0 = \infty$ 曲線上に E_1, E_2 など・印で示している温度は $X_0 = 0, 4, 8$ など たがい 4 だけづつ距る点の準定常状態における一定時刻における温度を示しており、この温度差によって左方に向う熱流が生じている。図からわかるように起動点に近い所では 曲線⑩ のようにこの温度差が大きく、熱流も大きくなるのである。起動点 A より左方では熱が投与されていないので、左方に向う熱流が大きくなるのは云わば当然のことである。

Fig. 2 にはアーク停止点附近の熱流(温度傾度)の関係をやはり点線で示している。当然のことながら熱流は右方に向い、起動点附近とは逆である*。

(e) アーク停止点附近の温度曲線は起動点附近の温度曲線から導来できること Fig. 14 の(a-2)図の曲線 ④ は Fig. 1(b) ($Y_0 = 2$) の $X_0 = -2$ 曲線をそのまま引写したものである。また(b-2)図は Fig. 2(b) ($Y_0 = 2$) の曲線 ① および $X_0 = -2$ 曲線を引写したものである。後者を⑤と名付ける。しからば次に述べるように曲線 ④, ⑤ の間には

Fig. 14 Derivation of temperature of stopping point from that of starting point

* Fig. 2 (b) には $X = -\infty$ 曲線上に E_1, E_2, E_3 を示している。これによる熱流の関係は Fig. 1(c) のそれと同様で、左方に向っている。これは一見 停止点附近では右方に向うのと むじゅんするかのように見えるが、 E_1, E_2, E_3 は冷却時期での熱流で、温度上昇時期では逆となる。なお準定常での左方に向う熱流(温度傾斜)が起動点附近のそれに比べて小さいのは、準定常では熱は主として Y 方向に向って流れているからである。

$$\textcircled{A} + \textcircled{B} = \textcircled{1} \quad \dots\dots\dots (23)$$

なる関係があり、(b-2) 図のハッチの高さが (a-2) 図の ④ の高さに等しい*。

すなわちアークを (b-1) 図の O 点で停止させることは 温度に関しては

- (イ) O 点で停止させずに そのまま継続し、一方
- (ロ) O 点で負のアークを起動させ、

この(イ)、(ロ)を合成したのと等価である。(イ)によっては温度曲線は ① になるはずで、(ロ)によっては (a-2) 図の ④ の符号を変じたものとなる。したがって (23) 式が成立するわけである。

上の考察からわかるように準定常状態に達した後 アークを停止した場合の温度曲線 (Fig. 2) は Fig. 1 の曲線群から作図によって求められるわけである。

(f) アークの起動点、停止点附近の温度の相対関係

Fig. 15 の曲線 A, B は Fig. 1(b), Fig. 2(b) の

④ : Fig. 1(b) $Y_0 = 2, X_0 = 2$ (実線)

⑤ : Fig. 2(b) $Y_0 = 2, X_0 = -2$ (点線)

の曲線を引写したものであり、曲線 A', B' は

④' : Fig. 1(b) $Y_0 = 2, X_0 = 0$ (実線)

⑤' : Fig. 2(b) $Y_0 = 2, X_0 = 0$ (点線)

の曲線を引写したものである。図に見るように任意の時刻において B は A より高く、B' も A' より高く、差は初めに大きく 時間が経過すると微小となる。

これらの曲線は Fig. 16 において $P_A, P_B, P_{A'}, P_{B'}$ 点の温度を示しており、一般に起動点 A, 停止点 O に対して対称な関係にある点 P_A, P_B の温度を比較すると、

Fig. 15 Comparison of temperature between arc-start and arc-stop

* (a) 図においてアーク起動点 A と P_0 との関係は (a-1) に示す通りで、(a-2) 図の・印 Z_1 点でアークが起動されている。 Z_1 点より左方では温度は完全に零。

(b) 図においてアーク停止点 O と P_0 との関係位置は (b-1) に示されており、(b-2) 図の・印 Z_2 点まではアークが点ぜられており、温度曲線は準定常の場合に等しい。

Fig. 15 の例に見るように停止点の方が高温であることが次のように論証できる。(これらの曲線において時間の基準のとおり方については Fig. 4 参照)

Fig. 16 において P_A , P_B を起動点 A, 停止点 O に対して対称な点であるとするとき, もしアークの移動速度が無限大で, 溶接線 A O に沿って瞬間的に熱が投与された場合を考えると, P_A , P_B の温度は同一変化をたどるはずで, したがって Fig. 15 に見るように差が生ずるのは 溶接速度が有限であることに原因があると考えなければならない。

今 簡単な場合として 移動アークの現在点が P_A については S_A に, P_B については S_B にある時点について考えるに, P_A に対しては AS_A 区間の熱のみが温度に寄与するに反し, P_B に対しては S_B より左方 無限の遠方までの熱が寄与するので, P_B の温度が P_A より高くなることは容易にうなずける。

上述の関係はアークが O 点で停止されるまでの任意の時点についても成立する。O 点で停止された以後の時点の温度の比較は少々ややこしいが, 次のように理解できる。

Fig. 16

まず P_A , P_B の代りに $P_{A'}$, $P_{B'}$ ($X_0=0$) の温度の比較を考えるに, 計算結果は Fig. 15 の曲線 A', B' に見るように $P_{B'}$ の方が少し高い。これは (17) 式について述べたように $X_0=1/2$ のような点の温度は準定常の $1/2$ となるので, 起動点側において $X_0=0$ の点は $1/2$ より必ず低い。(ただし $Y_0=0$ の場合に限って $1/2$ に一致) (Fig. 1 において $X_0=0$ の曲線と曲線②と比較) 停止点側では (e) 項に述べた負のアークについて同様の関係が成立するので, 準定常値からこれを差引いた値は $1/2$ より大となる。かくして $P_{A'}$, $P_{B'}$ の関係が Fig. 15 に見るように常に必ず $P_{B'}$ の方が高温であることが論断される。(考えている点が x 軸上にあるとき, A, O ならば同一。)

次に P_A , P_B の温度の比較についてであるが, すでに述べたようにアーク点が S_A , S_B にくるまでは P_B の方が高温であることが既知であるので, 以下 それ以後

の時期について検討する。Fig. 16 (b) にその考え方を示している。すなわちこのような時期において起動点附近に与えられた熱は (b) 図のように ①, ② の和として考える。 P_B については点線を負の熱源として, ①, ②', ②'' の和として考える。①', ②' の和は S_B 点でアークを停止したのと同等であるから, 今

P_B に対しては ①, P_B に対しては ①'+②' による温度を考えると, これは $P_{A'}$, $P_{B'}$ に対する温度と同等となり, Fig. 15 の曲線 A', B' となる。 P_A , P_B の正しい温度はこれら A', B' 曲線に対して

P_A に対しては ②, P_B に対しては ②' による温度を加算すればよいことになる。②, ②' による P_A , P_B の温度は もし移動速度が無限大ならば相等しくなるが, 移動速度が有限の場合には P_B の方が早期に高温となることは容易に論証できる。時間が経過すると両者の差は減少し, 結局 初めの時期においては P_B の方が高温となるのである。

(g) アーク起動後 いまだ準定常状態に達していない状態からアークを停止した場合の温度曲線

Fig. 17 の曲線③は Fig. 1(b) ($Y_0=2$) の $X_0=4$ の場合の曲線を引写したもので, ①は準定常の場合。ここでは $X_0=4$ とした場合の温度を考えており, アーク起動点 A と P_0 との関係位置は (b) に示す通りである。

Fig. 17 Derivation of temperature curve for short time arcing

今アークが $L=10$ まで移動してきたときにアークを停止したとして考えてみる。しからばこのアーク停止は前項に述べたように (イ), (ロ) を重ねたものとして考えると, この $L=10$ の位置で (ロ) 負のアークを起動したことになる。この起動点を (b) 図で A' として示すと, P_0 は A' に対しては $X_0=-10$ の位置にある。あいにくと Fig. 2(b) では $X_0=-10$ の場合の曲線は示されていないが, Fig. 2(b) の $X_0=-2$ の場合よりもはるかに低い温度となるはずである。図の曲線③はこれ ($X_0=-10$, $Y_0=2$) を示すもので, 図示の範囲内では ③は ②に比べてはるかに小さく, アーク停止の影は現れない。

もし考えている点が $X_0=4$, $Y_0=2$ で, アークを $X=6$ なる移動距離の期間だけ点じ, アーク点が Fig. 4

の S_0 より右方へ $6-4=2$ だけきたときに停止したとすれば、「負のアーキ」の起動点に対する P_0 の位置は $X_0=-2$ となる。したがって Fig. 15 の曲線 ⑩ の代りに Fig. 1(b) の $X_0=-2$ 曲線をとればよく、 P_0 点の温度は Fig. 1(b) の $X_0=4$ 曲線と $X_0=-2$ 曲線との差として与えられる。もしアーキ発生期間を $X=6$ ではなく $X=4$ とすれば「負のアーキ」としては曲線 $X_0=-2$ の代りに曲線 $X_0=0$ をとる。Fig. 1(b) を見ると P_0 点の温度は「負のアーキ」が $X_0=0$ の場合と $X_0=-2$ の場合とでは相当に異なり、その程度はアーキ持続時間の比 $6:4$ 以上の差となる。

以上述べる所は仮付溶接によるビード附近の温度について参考となるが、上述の関係は P_0 点とアーキ起動、停止の相対位置によって大いに異なることは云うまでもない。

(h) 最大温度の発生時期 Fig. 10 について述べたように筆者は第1報では思い違いをして最大温度の点 M_A は準定常状態の場合の点 M_1 より右方へくると述べた。対象とする点がアーキの移動とともに移動する移動坐標上の定点ならば正にその通りであるが、母板上に固定した定点については $X_0>0$ の場合 Fig. 10 に見るように M_A は M_1 より左方にくる。すなわち移動坐標上の定点ならば時間が経過するにしたがって準定常値に近づくので、最大点は M_1 より遅れて右方にくるが、母板上の固定点については時間がじゅうぶん経過すると(c)項に述べたように準定常値の $1/2$ の曲線 ② に近づくので、最大点 M_A は M_1 より左方にくるのである。

ただ筆者は現在 M_A 点のどの程度に M_1 より左方にくるのかの定量的な詳しいことは明かにしていない。

なお Fig. 6 は横軸に P_0 点の X 坐標 X_0 をとって最大温度 n_m を Y_0 をパラメータとして示している。今固定坐標上の定点ではなく移動坐標上の定点 P を考え、 P とアーキ点 O との関係が Fig. 8(a) の P_0, O_m の関係にあり、 O_m の移動とともに P も移動するとして考えると、 P 点の温度が準定常値に近づく状態は第1報 Fig. 2 のようであり、Fig. 6 の曲線はこれと全く同じ形式のものである。 Y_0 が小さい場合には早く準定常値に近づくことは第1報に述べた通りである。なお図の各曲線上の・印の点は準定常値の $1/2$ の点で、(17) 式に見るように $X_0=1/2$ でおこる。

(i) 最高到達温度 Fig. 5 は横軸に Y_0 をとって X_0 をパラメータとして最高到達温度 n_m を示している。図の曲線 ①' は(8)式で与えられ、②' は①' の $1/2$ の高さ。

Fig. 5 を見ると、アーキ起動の場合((a)図)には $X_0=0$ の条件では n_m は②' より必ず低く、アーキ停止

(b) 図では②' より高い。これはアーキ起動では $X_0=0$ の条件では Fig. 11 に述べたように温度は常に②より低いので、最大値についても低くなるとして理解できる。アーキ停止については(e)項に述べたように温度を(イ)、(ロ)の和として考えるとき、(ロ)の負のアーキの方が上記起動の場合に見るように②より低いので、これを差引いた合成値は②より高くなるのであるとして理解できる。

(j) 最高到達温度の等温線 Fig. 7 に示した起動点、停止点附近の最高到達温度の等温線はたとえば

$$T_m=900^{\circ}\text{C} \text{ とか } T_m=700^{\circ}\text{C}$$

など、鋼についての特定の温度への到達範囲を示している。治金あるいは力学上の考察に特に有用であると察せられる。それ故に Fig. 7 について少し補足的に述べることにし、次の問題について考えてみる。

設問 アーク入力 q (cal/sec) を2倍(一般に f 倍)とし、溶接速度 v (cm/sec) も2倍(f 倍)とした場合すなわちビードの長さ1cm 当りの入熱 (cal/cm) を一定とした場合の温度分布 上記のような仮定条件の場合溶接線から一定距離 y_0 (cm) だけ距った点の最高到達温度は準定常状態においては同一となることはよく知られている所である*。これを(8)式について述べるに与えられた y_0 に対して速度を2倍にすると Y_0 は(2)式に見るように2倍となり、(8)式の n_m は $1/2$ 倍となる。(Y_0 が大きい場合) しかるに q が2倍となっているので、(1)式の T は元のままである。

さてアーキ起動点 A に対する P_0 の位置を cm で示して (x_0, y_0) とするとき、その無次元表示 X_0, Y_0 は移動速度 v を2倍にすると2倍となる。たとえば

$$\left. \begin{array}{l} X_0=2 \\ Y_0=4 \end{array} \right\} \text{ なる点は } \left. \begin{array}{l} X_0=4 \\ Y_0=8 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

となる。Fig. 7 を利用するには上の注意が必要で、たとえば $T_m=900^{\circ}\text{C}$ なる温度が Fig. 7 において $n_m=0.2$ の曲線であるとするれば、その準定常における Y_0 は $Y_0=7.6$ である。 q, v をともに2倍にすると、 $n_m=0.1$ が同じ温度 ($T_m=900^{\circ}\text{C}$) を表わし、準定常においては $Y_0=15.2$ となり、これら $Y_0=7.6, 15.2$ は実質的に同じ y_0 を示している。

さて Fig. 7(a) において P_1 点は $X_0=10$ で $n_m=0.2$ となる点であるが、 $\overline{OP_1}$ 直線上に $X_0=20$ の点を取り、これを P_1' とする。また $X_0=20$ にて $n_m=0.1$ となる点を P_1'' とする。しからば P_1, P_1' は v を $1:2$ に変えたときの母板上の同一点を示しており、図に見るように P_1' は P_1 より上方にある。すなわち q, v を2

* たとえば文献(3)の(23)式、文献(9)の(6・6・1)式。

倍としたとき, P_1 と同一の点 P_1' の n は $n=0.1$ より大となり, 温度は $T_m=900^\circ\text{C}$ より高くなる.

Fig. 7(a) には P_2, P_3, P_4 として $X_0=4, 0, Y_0=0$ において $n_m=0.2$ となる点を取り, 同じ作図を施しているが, いずれも上述の傾向を示し, q, v を2倍とした場合の方が同一 (x_0, y_0) 点の最高到達温度が高くなっている. これは次のように理解できる. すなわち高速度では熱はあまり拡散せずに考えている点 P に集中的に伝導してくるので温度が高くなるのである. ただしこれは定性的の論議で, 定量的には q, v を2倍程度に変えたのでは図に見るように大した差は生じない.

次に Fig. 7(b) にも同様の作図を示している. すなわち P_1 は $X_0=-10$ で $n_m=0.2$ を通る点であり, P_1' は OP_1 の延長上の $X_0=-20$ の点であるが, 図では偶然(?) P_1' は $n_m=0.1$ の点 P_1'' にほぼ一致している. しかし P_3, P_4 については多少異なり, P_4'' 点は明かに P_4' より内側にある. すなわち q, v を2倍としたとき母板上の同一 (x_0, y_0) の最高到達温度は少し低くなり, アーク起動点附近の場合と逆の傾向にある. これは次のように理解できよう. すなわち (h) 項に述べたようにアーク起動点と停止点との対応する点 (X_0, Y_0) と $(-X_0, Y_0)$ とを比べると, 一般に後者の方が温度が高く, これは停止点附近では熱伝導によって予熱されているからである. 溶接速度が大となると熱が伝導してくる暇がなく, 予熱効果が減少する. このため Fig. 7(b)

の P_4', P_4'' のように 高速となると同一点の温度が低くなるのである.

(k) 最高到達温度の等温線についての一実験

Fig. 18 は板厚 3 mm の軟鋼板の表面を磨いて D.C. S.P. の TIG アークを用いて一定速度で母板表面上を直線的にアークを走らせた場合に生じた表面の酸化皮膜による変色模様を示している. このうち (a), (b) は溶接速度は同一で 電流を 1 : 2 に変化された場合 (アーク電圧は 12 V 一定), (c), (d) は (a), (b) に比べて溶接速度を 1/2 とした場合である. つまり (a), (b), (c), (d) はアークの熱効率を一定とする限り, 溶接線の単位長当りの入熱 (cal/cm) を 1 : 2 : 2 : 4 とした場合である.

さて準定常状態における最高到達温度は溶接線からの離距 y_0 に反比例することは熱伝論的によく知られている所である. 一方 表面の酸化皮膜は当然この最高到達温度によって左右される. したがって Fig. 18 の (a), (b), (c), (d) においては酸化による変色部の幅はほぼ 1 : 2 : 2 : 4 の比になることが期待されるのが, 実験結果もほぼその通りになっている*, **.

次にアーク起動点, 停止点附近の変色模様に注目するに, 大体 Fig. 7 の最高温度の等温線に似ている.

(1) 冷却速度 冷却速度は本稿に求めた温度曲線傾斜から求められる. この冷却速度は 溶接工学上からは温度曲線よりも重要かつ興味ある問題で, すでに多くの研究者による発表があり, 増淵⁶⁾らはアーク起動点, 停止点附近の冷却速度について論考している. しかしその一部の件については著者らは異見を抱いている. これについては稿を改めて述べる.

Fig. 18 Temper color on steel plate obtained by TIG arc welding (plate thickness—3 mm)

(a)	$v=60$ cm/min	100A	12V
(b)		200A	12V
(c)	$v=30$ cm/min	100A	12V
(d)		200A	12V

* Fig. 18 の準定常部の変色部の幅は大体 8, 18, 16, 36 mm である. 大体 1 : 2 : 2 : 4 の比であるが, 200 A の場合の方が 100 A の場合に比べて 期待値に対して相対的にやや大きい. 大電流によるアークの拡がりの影響がこのように効くとは筆者には考え難いのだが.

** 熱伝論によると, 準定常状態の場合 溶接線から y (cm) だけ距った点の最高到達温度は

$$T_m = \frac{q}{v} \cdot \frac{1}{c\sigma} \cdot \frac{1}{4.13} \cdot \frac{1}{y} \quad \dots\dots\dots(25)$$

で与えられる. 今 Fig. 18(d) の場合を考えるに, TIG アークの熱効率を $\eta=0.5$ とすると, 板厚 1 cm 当りの投与熱量は

$$q = 0.24\eta \cdot V_a \cdot I/b \\ = 0.24 \times 0.5 \times 12 \times 200 / 0.3 = 960 \text{ cal/sec}$$

したがって $c\sigma=1$ とし, 変色幅の実側値 $36 \div 2 = 18$ mm を用いて T_m を計算してみると

$$T_m = \frac{960}{0.5} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{4.13} \cdot \frac{1}{1.8} = 257^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots(26)$$

これは鋼の青熱脆性として知られている温度 250°C にほぼ一致している.

V. 結 言

本稿はアーク起動点、停止附近の過渡的温度変化について論考したもので、次の点を明かした。

1. アークを移動点熱源と仮定し、温度を無次元量として取扱っているが、起動点、停止点附近の数ヶ所の点(X_0, Y_0)の温度変化を具体的に計算した。

2. 母板上に固定した点の温度が最高値に達するのはアーク起動点附近において $X_0 > 0$ の場合には準定常の場合よりも早く起り、 $X_0 < 0$ の点については遅れて起る。(ただし時間の基準は Fig. 4 の S_0 の点)

3. 実際の溶接ビード長は有限であるので、時間がじゅうぶん経過した後は準定常値とはならず、その 1/2 の値を示す。

4. 起動点に対して $X_0 = 1/2$ の点の温度は準定部分の 1/2 の値をとる。

5. 起動点、停止点に対し対称の関係にある点 (Fig. 16 の P_A, P_B) の温度を比較すると、停止点側の温度は常に高い。その差は初めの時期においていちじるしく、その後は漸減する。

VI. 附 録

(a) 温度曲線の計算法

Fig. 1, 2 に示した温度曲線の計算法は第1報¹⁾あるいは文献(2)をみればおのずから明かであるが、具体的には次のようである。すなわち温度の公式は文献(2)の(21)式に見るように

$$n = e^{X \cdot m} F_0(\delta) = e^{X \cdot R \cdot \infty} F_0(\delta)$$

で与えられるが、上式の X は移動坐標に即したもので、本稿に云う L である。すなわち

$$n = e^{L \cdot R \cdot \infty} F_0(\delta) \quad \dots\dots\dots(27)$$

上式の δ は(5)式に示されており

$$\delta = v\rho/4k = \sqrt{L^2 + Y_0^2}/2 \quad \dots\dots\dots(28)$$

であり、また m は(4)式の通りであるので

$$m = \frac{vt}{\rho} = \frac{L + X_0}{2\delta} \quad \dots\dots\dots(29)$$

したがって温度計算は次のように行える。すなわち考えている点 P_0 の坐標 X_0, Y_0 が与えられるとき、適当

な δ を仮定して $\infty F_0(\delta)$ を別表(たとえば文献(2)の表1)から求める。また δ と Y_0 とから

$$L = \sqrt{4\delta^2 - Y_0^2} \quad \dots\dots\dots(30)$$

を計算し、 e^L を計算する。これより準定常の場合の温度

$$n_{\infty} = e^{L \cdot \infty} F_0(\delta) \quad \dots\dots\dots(31)$$

が求められる。次に(29)式の m を計算し、これよりたとえば文献(2)の Fig. 3 から R を求め、(31)式の n を求める。次表は P_0 点として

$$X_0 = 4, \quad Y_0 = 2$$

の場合に二三の δ を仮定した場合の計算を示している。この表の L と n_{∞} (準定常)との関係は Fig. 1(c) の $X_0 = \infty$ の曲線、 L と n との関係は Fig. 1(c) の $X_0 = 4$ の曲線上の値を示している。

(b) 溶接線上の温度曲線

溶接線上の温度曲線は Fig. 1(a), 2(a) に示されている。この溶接線上の温度曲線はすでに仲・増測²⁾によつても示されているが、Fig. 19 にその作図法を示した。

Fig. 19(a) において太線で示した曲線群はアーク起動点Aに対して $X_0 = -5, 0, 10, 20$ などの距離にある溶接線上($Y_0 = 0$)の点の温度曲線を示している。ただしアークがその点を通過した後の温度、横軸は起動の瞬間を原点とした経過時間 t —正しくは移動距離 vt を無次元的に示したものである。すなわち

$$\text{横軸: } X = vt \cdot v/2k \quad \dots\dots\dots(32)$$

図には細線で示した曲線群

$$\delta = 5, 10, 20, 40, 60$$

が示されてあるが、実は太線の温度曲線はこの細線群から後述の方法によつて容易に作図によつて求められるもので、まず細線曲線について述べる。

図の細線曲線は(27)式の温度の公式において

$$L = 2\delta = \text{一定}$$

として、移動坐標上の固定点(ただし $Y_0 = 0$ で、 X 軸上の点)について温度の過渡的变化を示したもので、横軸は経過時間に対応した移動距離(無次元)をとっている。この細曲線はたとえば文献(2)の Fig. 1 の値に $e^{2\delta} = e^L$ を乗じたもので、時間がじゅうぶん経過する

Table 1 Calculation of "n" for a point ($X_0 = 4, Y_0 = 2$)

δ	$\infty F_0(\delta)$	L	e^L	n_{∞}	$X_0 + L$ ($X_0 = 4$)	m $\left(\frac{X_0 + L}{2\delta}\right)$	R	n $R \cdot n_{\infty}$
1	2.2778×10^{-1}	0	1	0.2277	4	2.	.853	.194
2	2.2318×10^{-2}	3.464	3.195	0.713	7.464	1.866	.903	.643
3	2.4488×10^{-3}	5.657	2.863×10^2	0.705	9.657	1.609	.884	.623
10	1.1482×10^{-9}	19.95	4.616×10^8	0.529	23.95	1.139	.721	.382

Fig. 19 How to draw the temperature curve of fixed point from that of moving point

と準定常値(移動坐標上の固定点の定常値)に近づく。

さて太線のうちのたとえば $X_0=0$ なる曲線すなわちアーク起動点Aの温度曲線に注目すると、横軸が、
 $X=10, 20, 40$

なる時刻では 細線の

$$2\delta=10, 20, 40 \quad (\delta=5, 10, 20)$$

なる曲線上の値をとっている。これはアークの現在点と考えている点(A)との距離が 2δ に等しいから ($Y_0=0$) である。

太線の $X_0=10$ のものは アーク起動点Aから $X_0=10$ だけ右方の点の温度曲線であるが、アークが $X=10$ の地点にきたとき、その点の温度は無限大となり、 $X=20$ の地点にきたときには 考えている点 ($X_0=10$) とアーク点との距離は $X-X_0=20-10=10$ となる。したがってその時刻では $2\delta=10$ の細線の値となる。

一般にアーク点が X の位置に移動してきたとき、考えている点 X_0 ($Y_0=0$) との距離は $X-X_0$ となり、温度は

$$2\delta=X-X_0$$

を満足する細線の値をとる。かくして細線曲線群から太線の温度曲線が求められる。たとえば $X_0=-5$ の点については アークが $X=15$ の位置にきたとき アークとの距離が $X-X_0=20$ となり、 $2\delta=20$ の曲線上の値をとる。図の最下部の曲線参照。

次に Fig. 19(b) は アークが準定常状態に達したときにアークをO点で停止した場合の温度曲線の作図である。アークの停止は IV (e) 項に述べたように (イ) アークを停止せしめず継続したものと、(ロ) 負のアークをO点で起動したものと和として考えられる。(イ) による温度は Fig. 19(a) の細線の $2\delta=10, 20, \dots$ の水平部分の値(準定常)をとるので、これに(ロ)の負のアークによる温度を加えると、(b) 図の細線となる。この細線曲線群からアーク停止点附近の温度を求める手続きは (a) 図の場合と同じである。

なお (a) 図には×印で $X_0=20$ の温度を δ 曲線上に示している。(×印は $X_0=10$ の・印に対して右方に10の距離にあることは云うまでもない。) 図に見るように×印は δ 曲線上のほぼ水平になった所に位置しており、図示の温度(経過時間)の範囲では ほとんど準定常状態の値に一致している。

また (b) 図では $X_0=-10, -5$ の温度曲線が $X \approx 15$ のあたり Z 点で交叉して一見ややこしいが、図からアーク停止後の任意の時刻における各点の温度ならびに冷却速度(曲線の傾斜)、母板上での熱の流れの方向などの関係を読みとることができる。図の Z 点以前では $X_0=-10$ 点よりも $X_0=-5$ 点の方が高温で、熱は左方に流れているが、Z 点を過ぎると熱の流れが逆転している。これは初めはアーク起動部のそれと同様熱は左方に流れるが、後 アーク停止によって熱は冷たい $X_0>0$ の方へ流れるようになるからであることは云

Fig. 20 How to draw the temperature curve of fixed point out of the welding line

* $X_0=0$ の場合の温度曲線はすでに知る通り準定常状態の温度 (Fig. 1(a) の $X_0=\infty$) 曲線の $1/2$ である。Fig. 19(a) において $X=10$ の時刻における温度は $2\delta=10$ なる細線の水平部分(準定常)の $1/2$ の値である。

うまでもない。

なお Fig. 20 は $Y_0 \neq 0$ の場合の作図を示すもので、 δ を与えた場合 (30) 式の L が異なり、(31) 式の n_∞ が異なる。細線の高さが Fig. 19(a) と異なる。 $\delta = \delta_0$ なる細線に対しては

$$X = X_0 + \sqrt{(2\delta_0)^2 - Y_0^2}$$

なる坐標の点を取り、このような点を連らねて温度曲線が得られる。たとえば $\delta_0 = 40$, $X_0 = 8$, $Y_0 = 4$ とおくと

$X = 8 + 80 = 88$ において細線と太線が交わる。

引用文献

1) 安藤	:	溶接学会誌	39	548	(6月号)
2) 安藤	:	"	"	167	(3月号)
3) 安藤・奥田	:	"	"	94	(2月号)
4) 安藤	:	"	"	9	(1月号)
5) 安藤	:	"	"	1140	(11月号)
6) 仲・増淵	:	"	"	17	9 (昭23年)
7) 木原・増淵	:	"	"	25	588
8) 木原, 鈴木, 金谷	:	"	"	26	442
9) 渡辺・佐藤	:	溶接力学とその応用	朝倉書房		

研究室だより

神戸製鋼所 構造研究所について

神戸製鋼所には鉄鋼、機械、溶接棒、軽合金伸銅の4事業部があり、互いに連繋しあって巨大な複合経営を推進しているが、土木、建築、造船、機械などの分野における各種構造物と深い関連を有している。これら構造物の合理的設計製作および施工に貢献する研究と独自の構造部材の開発をおこなうために、1970年4月に構造研究所が発足した。

当所の具備すべき特色はつぎの通りである。

1. 大規模な試験、研究設備により、各種構造材料から構造部材、さらに実物大構造物にいたるまで一貫した研究をおこなう。
2. 鋼構造物のみならず、コンクリート、軽合金、複合構造物にいたるまでの広範囲な研究と開発をおこなう。
3. 最近の構造工学のすう勢からみて、大形構造物(長大橋、高層建築、巨大船、大形機械など)のための試験、研究設備をそなえる。
4. あらゆる種類の静的、動的試験を総合的にこなう。

構造研究所は浅田基礎研究所(物理)、中央研究所(冶金)、各事業部の開発部(工学)の各部門と協力して、超ミクロから超マクロの世界までのシステムの、総合的な幅広い研究、開発の一端をになっている。

研究員は現在約30名で、2年後には50名になる予定である。研究グループは(1)機械・容器構造(脆性破壊をふくむ)、(2)土木、建築構造、(3)長大橋、軽合金構造の3グループにわかれている。

研究施設の選定にあたっては、これまでの各大学、国立研究所、民間の研究施設を参考にして、独自の施設をつくるように努力した。

主要施設の概要はつぎの通りである。

300 ton テストリグ

立体構造物(長さ3m、幅2m、高さ1.5m)または極厚板(板厚200mm)の脆性破壊発生および停止特性をもとめることができる。ピンで試験片をとりつける方式であるので、1日に2~3枚の大型脆性試験が可能であり、ラムストロークが500mmであるので、板厚100mmのHT80の引張り試験が可能である。試験片のタブへの溶接は消耗電極型エレクトロスラグ法をもちいる。

テストベッド

床は長さ20m、幅13mm、厚さ1.5mm、の鉄筋コンクリート製で1.4mm間隔にアンカーボルト用の孔があげられており、それに載荷フレームや大型の試験体を固定し任意の位置で静的動的試験をおこなう。鉄筋コンクリート製の反力壁(8m×8m×1.5m)により水平荷重をあたえる。地下室口高さがの箱構造で中、小型試験をおこなうことも可能である。

載荷用ジャッキは電気油圧式65ton/100ton 2基動的油圧式50ton 2基(予定)、静荷重用ジャッキ200, 100, 50, 20ton 各2基である。

300 ton 万能試験機

引張り、圧縮試験用クロスベッドの間隔が最大6m、曲げスパン6m、支柱間隔1.5mで、同程度の容量の試験機に比していちじるしく大きい。とくに作業の安全と能率化のために試験機のまわりに4層の作業台が設置されている。

100 ton/60 ton 電気油圧式万能疲れ試験機

同機種が3台ある。油圧サーボ機構の最新型で、周波数範囲が0.6~900cpmと広く、各種波形の疲れ試験が可能である。

20 ton 低サイクル疲れ試験機

油圧サーボ機構で繰返し内圧試験にもちいられる。今後の設置予定としては1,000tonまたは1,500ton 堅形圧縮、曲げ試験機、各種疲れ試験機などがある。

(池田一夫記)