

加熱過程における鋼塊内部の温度分布について*

(鋼塊の熱応力亀裂に関する研究—I)

原 隆 啓

On the Interior Temperature Distribution of Ingots during Heating Process.

(Study of thermal stress cracks in steel ingots—I)

Takahiro HARA

Synopsis:

When high-carbon steel or high-carbon-chromium steel ingots of comparatively large size are heated in a reheating furnace, cracks are often observed in their inside.

Author has studied experimentally and theoretically the conditions under which these ingots develop cracks under thermal stress during the heating process. This report describes the method of calculating the interior temperature distribution in the ingots to calculate their internal thermal stress.

With steels, generally thermal properties (thermal conductivity, specific heat and total heat) will change with temperature, so it is not easy to calculate heat transmission briefly.

Thus considering these thermal properties he devised a finite-difference equation by which we can calculate the heat transmission with comparative ease. And he recognized that the calculated value thus obtained accords perfectly with the observed value in a reheating furnace.

The following facts have been discovered through this theoretical calculation;

(1) During the heating process of an ingot the temperature difference between surface and core (i. e. surface-center temperature difference) reaches a maximum when the ingot undergoes a transformation, because of the heat absorption for the transformation.

With low-carbon steels the surface-center temperature difference becomes greatest, long before the core of the ingot completes the transformation. But with high-carbon steels (especially with hypereutectoid steels) the surface-center temperature difference becomes greatest just before the time of completion of transformation.

(2) The maximum surface-center temperature difference at which the core of a high-carbon chromium steel ingot completes the transformation is determined only by the mean surface temperature elevating rate within the transformation range. To control this temperature difference the surface temperature elevating rate has only to be controlled in this transformation range.

(Received 13 Oct. 1962)

I. 緒 言

高炭素鋼および高炭素クローム軸受鋼の比較的大型の鋼塊を連続式加熱炉において加熱する場合に、しばしば鋼塊内部に亀裂が発生することがある。この亀裂の実際作業における状況は、鋼塊が圧延される初期において、鋼塊表面に大きな亀裂が現われることで発見される。しかしまれに、加熱炉から取出したとき、すでに亀裂を発見することもある。またこの亀裂は、鋼塊の中腹部数カ所に軸方向に直角、いわゆる横方向に発生し、鋼塊の中心部を貫く大きな亀裂であり、明らかに中心部にすでに発生していた亀裂が圧延されたために表面まで進行した

ものと思われる。そしてまた、この亀裂の程度が小さい場合には、表面に現われることなく成品中に残り中心部が空洞となつていることも多い。

このような鋼塊内部に亀裂が発生する原因としては、その鋼塊の製錬、造塊、熱処理および内部欠陥などによるものも考えられるが、著者はこれら製造工程の条件を一定と考え、圧延温度まで加熱する場合の加熱条件のみを取り上げ、鋼塊が加熱される過程において、熱応力により亀裂が発生する条件について、実験ならびに理論的

* 昭和37年10月本会講演大会にて発表
昭和37年10月13日受付

** 山陽特殊製鋼株式会社

考察の両方から行なつた研究結果を順次報告する。

この報告では、鋼塊の加熱過程における内部熱応力を計算するためには、その内部の温度分布を求めることが先決であるから、鋼塊内部の熱伝導を理論的に計算する方法について研究を行なつた。

実際作業上、加熱過程における鋼塊の表面温度は何らかの方法により測定し得るが、内部温度を測定することは容易でない。そこでこの温度を計算によつて求めるためには、従来から数多くの計算方法¹⁾²⁾があるが、これらは実際によく利用されているものの正確なる計算は余りなされていない。この理由は、鋼の熱的性質（熱伝導率、この熱または含熱量）が成分はもちろん、温度によつて大巾に変化するものであり、かつまた、一般の鋼には磁気変態およびオーステナイト変態があり、この変態を通過するときには多量の熱収支があるが、これらの変化を忠実に計算に入れられていなかったためである。この研究では、いろいろな鋼の熱的性質について、できるだけ正確な資料を調査し、これらの変化をすべて考慮に入れた熱伝導方程式を R. J. SARJANT¹⁾²⁾の方法を参考にして、理論式を導き出した。そして実際に温度測定の実験を行ない計算値との比較を行なつた。なおこの理論式を用いているいろいろな鋼種による熱伝導の違いを探索した。

II. 鋼塊および鋼材の温度測定実験

鋼塊および鋼材が加熱される場合の内部温度を実際に測定し、なおその条件における計算値を比較するために次の2つの方法で実験を行なつた。

(1) 小型試験炉における加熱実験

鋼材の熱伝導を測定するため小型試験炉の略図を Fig. 1 (a) に示す。この炉は上部に2本の軽油バーナーがあり、燃焼焰は鋼材の周囲を渦巻き状に廻りながら降りるようにし、鋼材表面が均一に加熱されるようにした。また二次元の熱伝導となるように鋼材の上部に断熱煉瓦を置き、なお上部と下部の温度差が $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 以内になるよう焰の長さを調節して実験した。

試料鋼材の寸法は $200\text{mm } \phi$ (また $200\text{mm } \phi$) $\times 600\text{mm}$ であり実際の鋼塊の約 $1/2$ とし、圧延材から採取した。温度は熱電対で表面および中心を測定した。

(2) バッチ炉における加熱実験

実際には連続加熱炉の鋼塊について行なうべきであるが、鋼塊が移動するため測定に困難があるので、バッチ式加熱炉を使用した。この炉では鋼塊が炉床に横に置くため、主に上面からの加熱であり上下面の温度差が大きいので、炉床に高い台を敷き、できるだけ偏熱の少ないようにした。Fig. 1 (b) にその略図を示す。

試料鋼塊は 1.4t 丸型鋼塊 (平均断面 $400\text{mm } \phi \times 1,500\text{mm}$) ならび 1.7t 角型鋼塊 ($400\text{mm } \phi \times 1,500\text{mm}$) の2種類を使用した。温度は熱電対で表面および中心を測定した。なおこの実験に使用した鋼材および鋼塊は軸受鋼 (SUJ2) で、その化学成分を Table 1 に示す。

III. 理論的計算による近似方程式

加熱過程における鋼塊内部の熱伝導は、実際には三次元的なものであるが、鋼塊は細長い形状であるから、端部を除く中腹部はその影響が少なく、二次元と仮定して

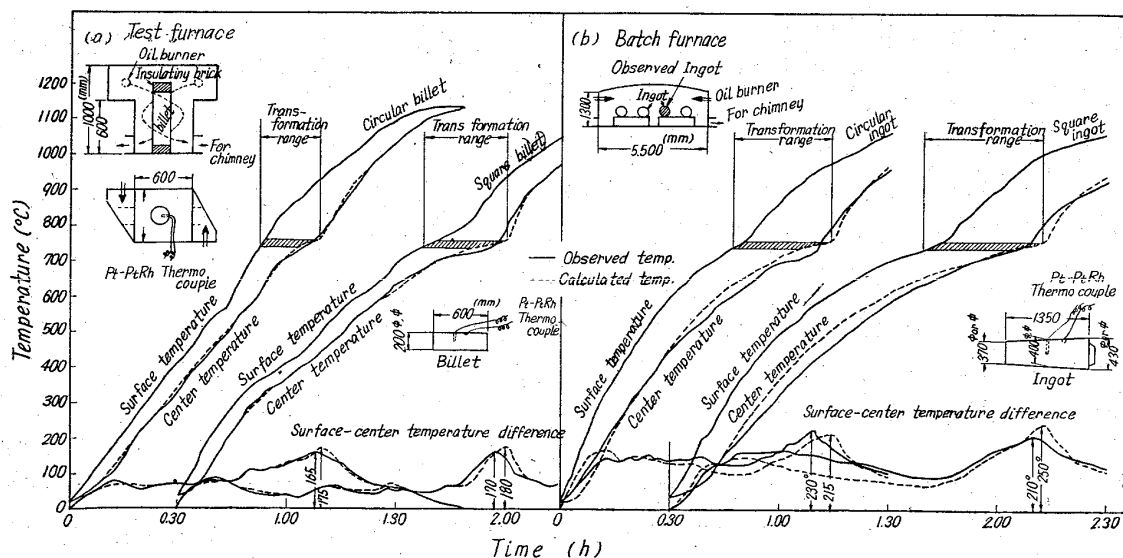


Fig. 1. Schematic diagram of the furnace, and the results of surface and center temperature measurements of billets and ingots in heating process, and its theoretically calculated values.

Table 1. Chemical composition of steels tested.

Specification	Section	Chemical composition (wt%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Billet	Circular Square	1.02	0.25	0.42	0.009	0.014	0.06	1.30	0.01	0.12
		1.04	0.33	0.40	0.009	0.010	0.07	1.42	0.01	0.12
Ingot	Circular Square	1.05	0.30	0.40	0.009	0.010	0.06	1.35	0.01	0.12
		1.07	0.26	0.42	0.010	0.009	0.06	1.36	0.01	0.13

も余り大きな差異はないと考えられるので、丸型、角型鋼塊をそれぞれ無限円柱，角柱として計算する。

(1) 丸型鋼塊の熱伝導

i) 熱伝導の基礎方程式

温度変化に対し物体の熱的性質の変化を伴う場合の非定常熱伝導方程式は次に示される。

$$c \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{K}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \dots \dots \dots (1)$$

熱伝導率，比熱を変数として取扱い，変換すると，

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K d}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \dots \dots \dots (2)$$

となる。この式は直接に解を求めることができないので，実際の計算にはテーラーの級数展開を用いて差分近

似方程式（または階差）に転換する。

ii) 差分方程式による近似式

伝熱される任意な断面で，ある任意の適当な同心円に分割された半径上の点を Fig. 2 (a) に示すごとく考え，この点における任意時間経過したときの熱量の増減量を次の差分方程式によつて求め得る。

a. 中心でない場合

$$H_{m \cdot t+1} = H_{m \cdot t} + \frac{2K_d \Delta t}{\rho (\Delta r_1) (\Delta r_2) [(\Delta r_1) + (\Delta r_2)]} \{ (\Delta r_2) \phi_{m+1 \cdot t} + (\Delta r_1) \phi_{m-1 \cdot t} - [(\Delta r_1) + (\Delta r_2)] \phi_{m \cdot t} \} + \frac{K_d \Delta t}{\rho r_0 [(\Delta r_1) + (\Delta r_2)]} \{ \phi_{m+1 \cdot t} - \phi_{m-1 \cdot t} \} \dots (3)$$

b. 中心の場合

$$H_{m \cdot t+1} = H_{m \cdot t} + \frac{4K_d \Delta t}{\rho (\Delta r_1)^2} \{ \phi_{m+1 \cdot t} - \phi_{m \cdot t} \} \dots (4)$$

(2) 角型鋼塊の熱伝導

角柱の熱伝導については，R. J. SARJANT¹⁾らの報告にあるから，主な式だけ略記する。

i) 熱的性質が変化する場合の熱伝導方程式

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K_d}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \dots \dots \dots (5)$$

ii) 差分方程式による近似式

計算の分割点を Fig. 2 (b) に示す。

$$H_{m \cdot n \cdot t+1} = H_{m \cdot n \cdot t} + \frac{2K_d \Delta t}{\rho (\Delta x_1) (\Delta x_2) [(\Delta x_1) + (\Delta x_2)]} \{ (\Delta x_1) \phi_{m+1 \cdot n \cdot t} + (\Delta x_2) \phi_{m-1 \cdot n \cdot t} - [(\Delta x_1) + (\Delta x_2)] \phi_{m \cdot n \cdot t} \} + \frac{2K_d \Delta t}{\rho (\Delta y_1) (\Delta y_2) [(\Delta y_1) + (\Delta y_2)]} \{ (\Delta y_1) \phi_{m \cdot n-1 \cdot t} + (\Delta y_2) \phi_{m \cdot n+1 \cdot t} - [(\Delta y_1) + (\Delta y_2)] \phi_{m \cdot n \cdot t} \} \dots \dots \dots (6)$$

以上の差分近似方程により時間の推移による温度の変化を計算によつて求めることができる。

計算にあたり，時間 Δt の取り方が問題となる。分割点を多くとることは，計算に相当な時間を要するから，分割距離を幾分大きくし，そして実用上支障のない誤差範囲となる適当な時間を求めて計算する。この時間の決定は P. H. PRICE²⁾らによつて誘導された式を参考にし

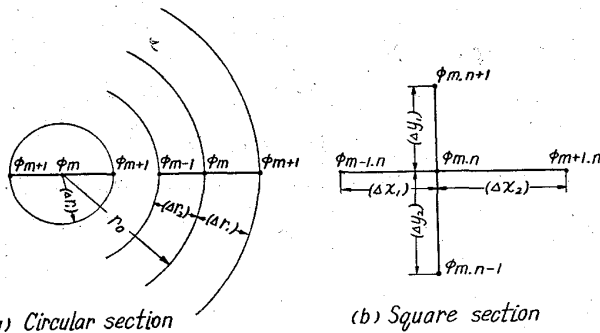


Fig. 2. The finite-difference mesh points on the section of circular and square body.

計算式に使用した記号の説明

- a: 半径, r: 任意点の半径
- K: 熱伝導率, K_d : 任意の基準温度 θ_d の熱伝導率,
- c: 比熱, $c = \partial H / \partial \theta$, ρ : 密度
- H: 含熱量 t: 時間
- θ_a : 表面温度, θ_0 : 中心温度, θ : 任意点の温度
- $\theta_{1/2}$: 中間点(a/2)の温度, なお温度差はそれぞれ $t_1 = \theta_a - \theta_0$, $t = \theta - \theta_0$, $t_{1/2} = \theta_{1/2} - \theta_0$, とする。

$$\phi = \int_{\theta_d}^{\theta} \frac{K}{K_d} d\theta, D = K / \rho c,$$

$m-1, m, m+1, n-1, n, n+1; r, x$ および y 座標の分割点を示す。

$t, t+1$: 時間次元で時間 Δt 経過を示す。

L: 正方形角柱の一辺の長さ

J_0, J_1 : 第一種ベッセル函数

$$h = -1/\theta \cdot \partial \theta / \partial r,$$

た. 次にその一例を示す.

a. 丸型鋼塊 $\Delta r_1 = \Delta r_2 = r_0 = a/2 = \Delta r$ の場合

$$\Delta t \leq (\Delta r)^2 / 4D \dots\dots\dots (7-a)$$

b. 角型鋼塊 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta y_1 = \Delta y_2 = L/4 = \Delta x$ の場合

$$\Delta t \leq (\Delta x)^2 / 4D \dots\dots\dots (7-b)$$

(3) 丸型鋼塊内部の温度分布曲線

熱応力を計算するには, 鋼塊の中心から表面までの温度分布を方程式化する必要がある. 前記の差分方程式より, 表面 (a) 中間 (a/2) および中心の3点の温度が比較的正確に求められたものとして, 温度分布曲線を推定する. しかるにこの3点を満足する曲線は無数に存在するが, 実際の温度分布に比較的好く近似し, しかも応力の計算が簡単にできる曲線として, 円柱の熱伝導方程式 (1) 式の熱的性質が一定であるとしたときの特解の中から3点の温度を満足する曲線を選ぶことにする. この場合の式は次に示される.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), 0 \leq r \leq a \dots\dots (8)$$

この式の解として, 最初の温度分布を $\theta = f(r) = \theta_0$ とし, 一定である場合に表面において温度0の媒質中に熱の放散または吸収が行なわれたと考え, ある任意時間 t 後の温度分布は文献⁴⁾により次のごとし,

$$A = \theta_c \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} \exp \left(- \lambda_n^2 \frac{Dt}{a^2} \right)$$

と置けば,

$$\theta = A J_0(\lambda_n r / a) \dots\dots\dots (9)$$

となる. ここで, λ_n は $ha = x J_1(x) / J_0(x)$ の根であり, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ と無数の根を有するが, 実用上第2根以降を入れた値は非常に小さいので省略できるから第1根 λ_1 だけをとる.

熱応力の計算には, その点の相対的な温度差だけが必要であるから, Fig. 3 に示すごとく, 表面, 中間および中心温度が既知である. 温度分布曲線は

$$t_{1/2} / t_i = \{ J_0(\lambda_1 / 2) - 1 \} / \{ J_0(\lambda_1) - 1 \}$$

の関係から, λ_1 が求められる. したがって, 中心から表面までの温度分布の方程式は次のように表わされる.

$$t = [t_i / \{ J_0(\lambda_1) - 1 \}]$$

$$\{ J_0(\lambda_1 r / a) - 1 \} \dots\dots (10)$$

この近似式を使用することに

より, 鋼塊内部に発生する熱応力を比較的簡単に計算することが可能となる.

IV. 鋼の高温度における熱的性質

(1) 熱伝導率

多数の鋼種において, 常温から 1200°C 付近まで詳細に測定された資料は数少ない. この研究ではできるだけ正確な測定値が要求されるので, 文献を調査し, 最新でしかも多数の鋼について測定された中から JIS 規格に類似した鋼を選んで採用した.

R. W. POWELL⁷⁾⁸⁾ は 22 種の鋼について, 0°C から 1200°C までの測定値を報告している. 彼は実測値と理論計算を併用して求めている. この結果を Fig. 4 にまとめた. ここに SUJ 2, 3 の測定値がないので, 計算と他のものとの比較により妥当と思われる数値を推定した.

(2) 比熱と含熱量

比熱は磁気およびオーステナイト変態があれば, 熱量の収支のために見掛の比熱は急激に変化する. また含熱量は比熱を温度で積分したものであるから比熱とともに変化する. この測定資料も数ない. そこで前項鋼種の測

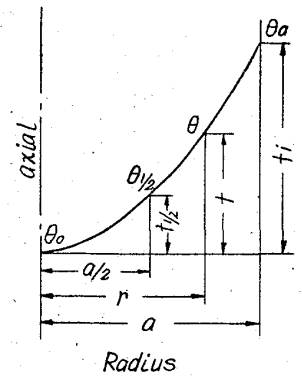


Fig. 3. Radial temperature distribution in a long solid cylinder.

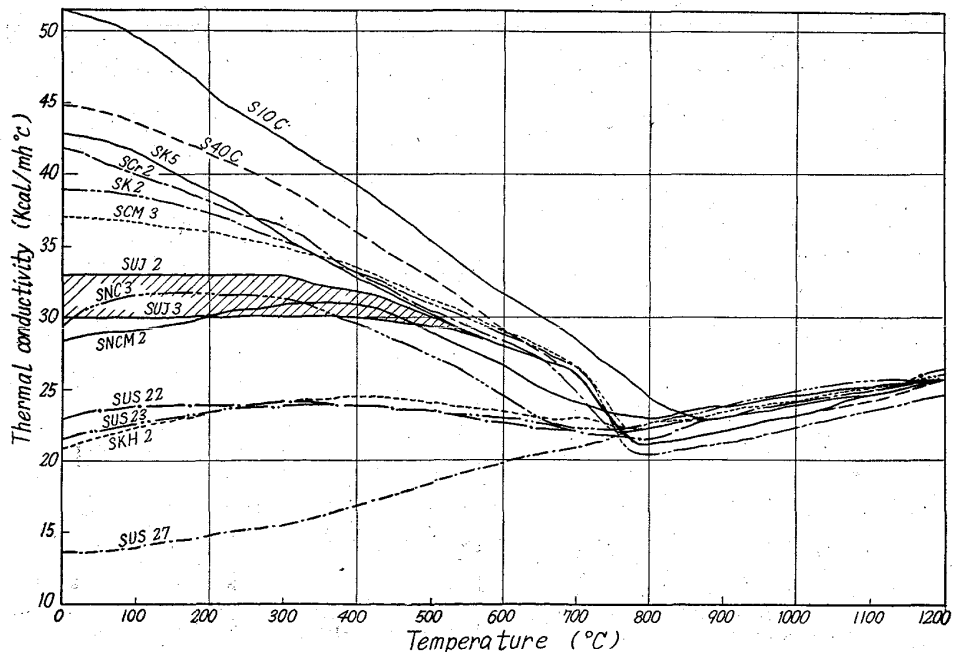


Fig. 4. Variation of thermal conductivity with temperature in various steels. (R. W. POWELL)

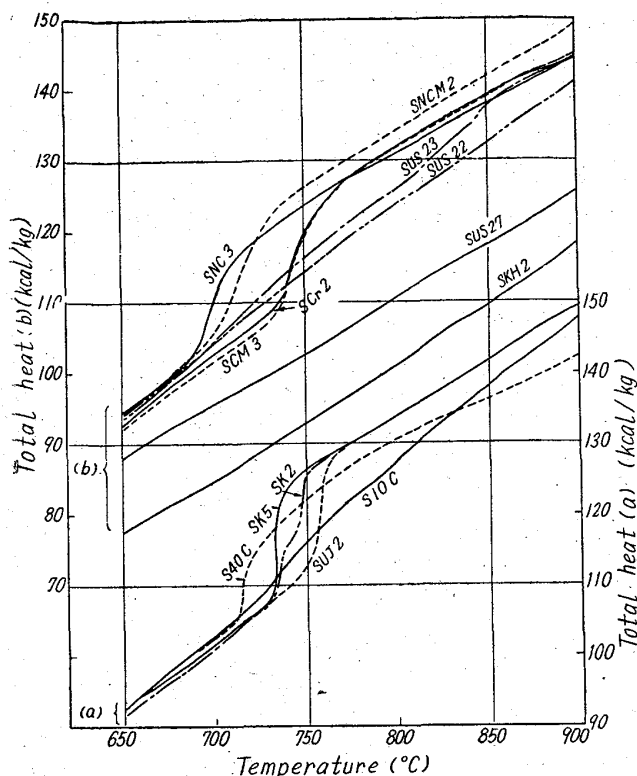


Fig. 5. Variation of total heat with temperature in the neighbourhood of transformation point in various steels. (P. R. PALLISTER, J. H. AWBERY)

定結果を使用する。測定者は J. H. AWBERY, P. R. PALLISTER⁷⁾⁸⁾で、この結果の変態点付近の状況を Fig. 5 に示す。ここでも SUJ 2, 3 の実測値がないので、炭素含有量がほぼ近似した SK 2, 5 の変態に要する熱量(潜熱)が約 14 kcal/kg であることから、これと同一と仮定し、変態範囲内でこれだけの熱量が消費されるものとして推定した。

以上の実測値を熱伝導の計算に利用する。

V. 加熱実験結果と考察

小型試験炉およびバッチ炉における測度実測値および計算値の一例を Fig. 1 に示す。

(1) 小型試験炉での実験

丸型および角型試料の表面および中心温度の測定値と計算は、両者ともによく一致している。あえていえば、中心が変態完了する所で、やや差が認められるが、これは変態が進行するとき温度分布がやや偏心したために、中心が最低温度でなく、ややずれた処に最低温度があったと考えられるから、最大温度差としては計算値の方に接近していると思われる。したがって、実測と計算値は原則的には一致しているとみなされる。また SUJ 2 では、中心が変態を完了するとき、表面中心温度差が最大

となることが確認された。

(2) バッチ炉での実験

丸型および角型鋼塊の表面および中心温度の測定値と計算値は、この場合両者とも幾分の相違が認められる。これは始めに述べたごとく、加熱される面が主に上面であるから、上下面の偏熱のために中心温度は余り一致していない。しかし、これらの相違は余り大きな相違でないところから実際には計算で求めた数値を使用できるものと思う。また、連続炉の場合は鋼塊の下部も加熱を受ける訳であるから、このバッチ炉の条件よりもよくなるので、計算値を十分利用できるものと判断する。この実験の場合も SUJ 2 では、中心が変態を完了したときの温度差が最大であることが注目される。

以上に加熱実験の一例のみ挙げて説明したが、その他多くの実験においても、実測と計算値がよく一致することを認めた。したがって、今後の熱伝導の計算に大幅な利用が可能であることを確信した。

VI. 熱伝導の性質

(1) 鋼の種類による熱伝導の比較

鋼の組成により熱伝導率および含熱量の変化に相違があることを述べたが、このために、たとえ同じような加熱を行なつても内部温度の上昇状況にはそれぞれの特徴がある訳である。例えば、低炭素鋼では変態開始から完了まで相当の温度範囲があり、急激な熱量の収支はなく緩慢なる変化であるが、高炭素鋼になるほどこの温度範囲は狭く、急激な熱量の収支がある。このような違いによつて、同じ大きさの鋼塊で同じ条件で加熱した場合に生ずる温度差には違いが起こるものである。この一例として、Fig. 6 に低炭素鋼(S10C)と高炭素鋼(SK2)の温度上昇を計算した。ここで表面温度上昇は同一とした。図によれば、S10Cの表面—中心温度差の最大となる時期は変態の途中にあるが、SK2の方は中心が変態を完了する直前に最大温度差があることが確かめられた。その他の鋼種についても同様な調査を行なつたが、炭素含有量が増加するにしたがって変態完了時期と最大温度差の発生する時期が接近することがわかった。このことは熱応力亀裂の発生に重要な意味をもつものである。

(2) 表面温度の上昇経路と温度差の変化

鋼塊を加熱する過程において、表面温度がいろいろな上昇経路をたどり、ある温度に達する場合に、その経路によつて表面—中心温度差がいろいろ変化する。ここに一例として SUJ 2 の丸型鋼塊(400mm φ)について、

Fig. 7 (a) に示すように、 $0^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ の加熱過程において、表面温度の上昇経路を2つの目標に対してそれぞれ3つの経路によつて温度が上昇した場合の表面と中心の温度差の変化を計算によつて求めた。ここで、表面

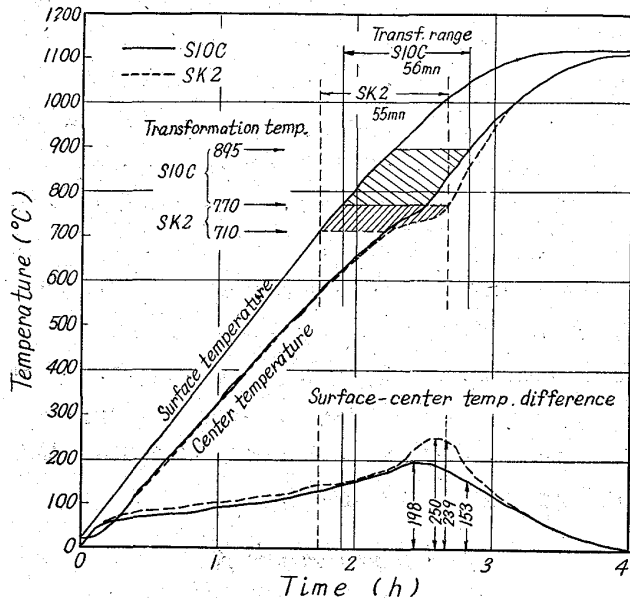


Fig. 6. The calculation examples of change of center temp. in low-carbon and high-carbon steel ingots with sections of both $400\text{mm } \phi$ and the same elevation of surface temp.

が 700°C になつたときの温度差は表面温度の約 600°C から 700°C までの平均温度上昇率 ($\dot{\theta}_1$) によつて比例的にほぼ決まることがわかつた。Fig. 7 (b) にSUJ2のいろいろな断面の鋼塊について、約 600°C 以下の経路は考慮せず約 $600^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ 範囲の平均表面温度上昇率と表面が 700°C になつたときの温度差 (t_{i1}) との関係を示した。ここで、 t_{i1} は $\dot{\theta}_1$ に比例的に変化していることは表面温度の最初からの経路には関係なく、その温度に達する直前のある狭い範囲 (その温度より約 100°C 程度下から) の温度上昇率によつて温度差が決まることを示している。このことは加熱過程を考える場合に重要なことである。

(3) 変態中における温度差の変化

鋼塊の表面が変態を開始して中心に向つて進行し中心が完了するまでの間における範囲の温度差の変化を調査した。SUJ2の丸型鋼塊 ($400\text{mm } \phi$) において、変態開始時に存在した温度差 t_{i1} が変態完了時の温度差 t_{i2} におよぼす影響を示したのが Fig. 8 である。この図から、同じ平均表面温度上昇率 $\dot{\theta}_2$ であれば t_{i2} は t_{i1} には関係しないことが明らかとなつた。言換えれば t_{i2} を変えるためには $\dot{\theta}_2$ のみを制御すればよいことがわかつた。このことも熱応力亀裂に重要な意味がある。

次に鋼塊のいろいろな形状のものにおいて、 $\dot{\theta}_2$ の変化による t_{i2} と変態時間 Tt の変化を Fig. 9 に示す。

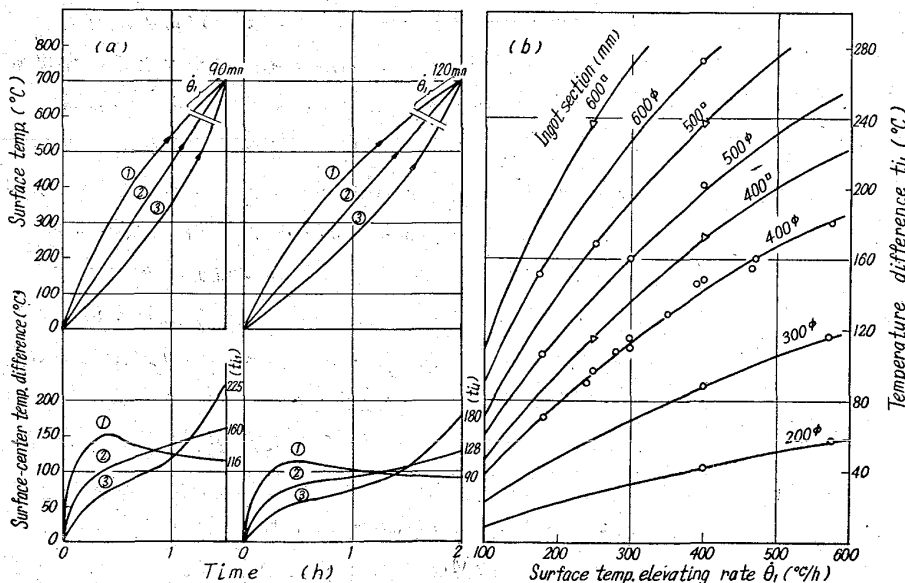


Fig. 7. The relation between the various elevating processes of surface temp. and calculated surface-center temp. diff. in high-carbon-chromium steel ingots of $400\text{mm } \phi$ section (a), and the relation between the mean surface temp. elevating rate ($\dot{\theta}_1$) in various ingot sections during heating process of $600^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ and calculated temp. diff. (t_{i1}) when the surface temp. becomes 700°C (b).

$\dot{\theta}_2$ の t_{i2} との影響は大きい、 Tt との影響は少ない、また、鋼塊の断面により t_{i2} が非常に影響されることがわかつた。この図から例えば $200\text{mm } \phi$ と $400\text{mm } \phi$ 断面と比較すれば、温度差の発生には格段の相違があり熱応力亀裂の危険性も非常な差があることが推定できる。

V. 結 言

(1) 鋼塊が加熱される場合の熱伝導について、鋼が温度により変化する熱的性質 (熱伝導率、比熱および含熱量) を十分加味した階差方程式を求め、実際の加熱によく一致することを確かめた。

また、熱応力の計算のために鋼塊内部の温度分布方程式を推定した。

(2) 鋼が変態を通過するとき

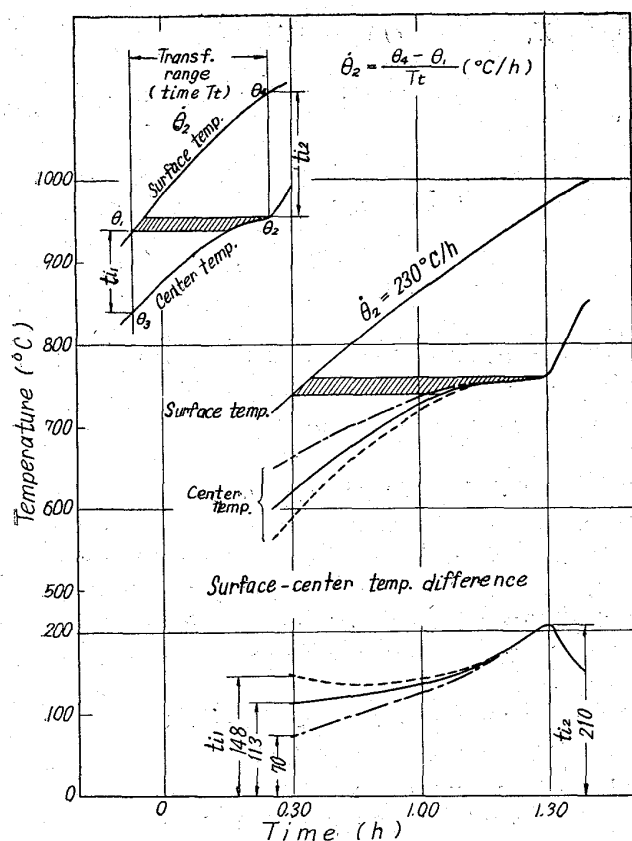


Fig. 8. Calculations in 400 mm ϕ section ingot of high-carbon-chromium steel showing that the surface-center temp. diff. (t_{i1}) which existed at the beginning of transf. has no influence upon the surface-center temp. diff. (t_{i2}) at the time of completion of transf.

熱量の吸収があるため、変態中に最大温度差が発生する。しかし、炭素含有量によつて最大温度差が生ずる時期と中心が変態完了する時期とは異なるが、炭素含有量の増加にしたがつてこの両者が接近し、共析成分以上ではほとんど一致することが明らかとなつた。

(3) 高炭素鋼の一例として、高炭素クロム鋼々塊における加熱過程の熱伝導を検討した結果、表面中心温度差の変化は表面温度上昇率（その温度に達する以前約100°C程度前からの範囲）にのみ影響され、それ以前の加熱経路には無関係であることがわかつた。

次に、変態範囲中の温度差の関係も同じく、変態完了時の最大温度差は変態中の表面温度の上昇率のみに影響されるもので、変態開始時に存在した温度差の大小には無関係であることが明らかとなつた。したがつて、最大温度差を少なくするためには、変態中の表面温度上昇率のみを制御することによつて目的を達することが明らかとなり、加熱作業上の重要な指針を得ることができた。

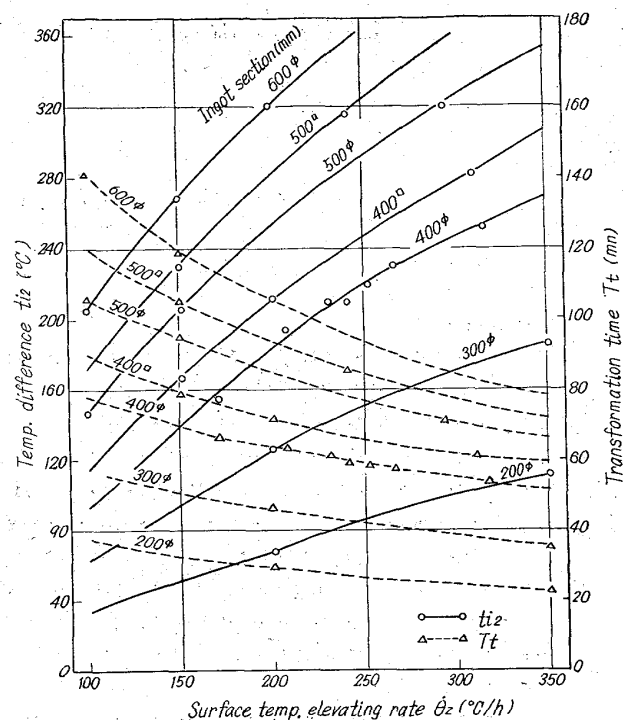


Fig. 9. The relation as calculated with various ingot sections of high-carbon-chromium steel between the mean surface temp. elevating rate ($\dot{\theta}_2$) in transf. range and the surface-center temp. diff. (t_{i2}) at the time of completion of transf. and the time (T_t) necessary for transf.

以上のことから、高炭素鋼が変態完了する時期に最大温度差が発生するために熱応力亀裂が発生する危険性が非常に大きいことも明らかとなつた。

文 献

- 1) R. J. SARJANT, M. R. SLACK: J. Iron & steel Inst.(U.K.), 175 (1954), p. 428~444
- 2) R. W. RUDDLE: "The Solidification of Castings" Menograph, No.7 (1957) London, p. 112
- 3) P. H. PRICE, M. R. SLACK: Brit. J. Appl. Phys., 3 (1952), p. 379~384
- 4) 川下研介: 熱伝導論, 河出書房, (1943), p. 197~336
- 5) 藤本武助, 佐藤 俊: 伝熱学概論, 共立社, (1946), p. 66~69
- 6) W. H. MCADAMS: "Heat Transmission" (1942) New York McGraw-Hill Book Co. Inc., p. 21~25
- 7) J. H. AWBERY, R. W. POWELL et al: Iron & Steel Inst., Spec. Rep. (U.K.), (1939) No.24, p. 215~251
- 8) J. H. AWBERY, P. R. PALLISTER, G. G. SHERRATT, R. W. POWELL, et al: J. Iron Steel Inst. (U.K.), 2 (1946), p. 83~121