

石川島播磨重工業(株) 技術 〇利園清雄、難賀基規

1. 緒言

鋳造品の焼入変形は、特に透炭部品のこのような場合、製造者にとってやっかいな問題である。この変形は、焼入れの際の製品内部における温度変化と組織変化によって生ずるものであるが、理論的にこの現象を解析することは、従来、困難であった。最近になって、有限要素法にもとづく弾塑性解析の方法が進歩するにおよんで、熱応力解析は比較的容易になった。著者はこの方法を焼入変形の解析に適用することを考え、その第一歩として中実および中空円筒の焼入変形を解析した。ここでは、解析方法の概要と数例の結果を述べる。

2. 解析方法の概要

焼入れの際、鋼の物性値とともに温度とともに変化し、また物体内部の弾塑性状態も変化する。焼入れの過程を多くのスチップごとに温度変化の計算と変位と応力の計算を行い、得た結果を累積する。温度変化の計算には、M. Marchal¹⁾による差分法を用い、変位と応力の計算には有限要素法を用いた。いずれの計算の場合も、物体は、メッシュまたは節点で結合された要素の集合体であるものと近似する(図1参照)。

2.1 温度変化の計算

体積 V 、境界面積 S を持つ要素の熱平衡は(1)式で与えられる

$$\int_V (\rho - C \frac{dT}{dt}) dV + \int_S \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dS = 0 \quad \text{----- (1)}$$

ここで; T : 温度($^{\circ}\text{C}$)、 ρ : 発熱量(cal/g)、 C : 比熱(cal/g)、 λ : 熱伝導率($\text{cal/cm/sec/}^{\circ}\text{C}$)

t : 時間(sec)、 V : 体積(cm^3)、 S : 面積(cm^2)、 n : 距離(cm)

時間が短い場合は、メッシュを通じて要素 i と流れ込む熱の平衡は(1)式から直接導くことができない(2)式で近似することができ、

$$\rho_i - C_i \cdot \frac{dT}{dt} = \sum_j D_j \cdot (T_i - T_e) \quad \text{----- (2)}$$

ここで; C_i : 要素 i の熱容量(cal) $C_i = c_i \times P \times V$, P : 密度(g/cm^3)

D_j : (3)式で与えられる熱伝達率($\text{cal/sec/}^{\circ}\text{C}$)

J : メッシュ番号, T_e : 要素 i のメッシュ J に隣接する要素の温度($^{\circ}\text{C}$)

$$D_J = \frac{S_J}{\frac{1}{\lambda_i} \cdot \frac{V_i}{S_J + S_J'} + \frac{1}{\lambda_e} \cdot \frac{V_e}{S_J + S_J'} + \frac{1}{\alpha_J}} \quad \text{----- (3)}$$

ここで; J' : 要素 i の J の向いのメッシュ番号, J'' : 要素 l の J の向いのメッシュ番号

l : メッシュ J とはさんで要素 i に隣接する要素の番号

α_J : 熱伝達率($\text{cal/cm}^2/\text{sec/}^{\circ}\text{C}$)、ただし要素 l が同物質の場合は $\alpha_J = 0$ とする。

時間が Δt 経過したときの要素 i の温度変化 ΔT_i は(4)式で与えられる。

$$\Delta T_i = \left\{ \rho_i - \sum_j D_j (T_i - T_e) \right\} \Delta t / C_i \quad \text{----- (4)}$$

Δt は次の安定条件にあることが必要である。

$$\Delta t \leq \text{Min}(C_i/W_i) \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$W_i = \sum_j D_j$$

m : 要素の数

(3) と (4) 式の計算を繰返し行うことにより、焼入中の物ばの温度変化を求めることができる。

2.2 変位と応力の計算

有限要素法については多くの文献があるので説明を省略する。熱応力解析における応力-歪関係は藤田・野本²⁾による式を用いた。すなわち;

弾性状態での応力-歪関係

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} = & \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E \dot{\epsilon}_{\mu\mu} \delta_{ij} + \frac{1}{1+\nu} E \dot{\epsilon}_{ij} \\ & + \left\{ \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E \dot{\epsilon}_{\mu\mu} \delta_{ij} + \frac{1}{1+\nu} E \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{1-2\nu} \dot{\epsilon}_0 \right\} \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで; $\dot{\sigma}_{ij}$: 応力増分, $\dot{\epsilon}_{ij}$: 歪増分, δ_{ij} : クロネッカーのデルタ, $\dot{\epsilon}_0$: 初期歪増分

$$E_{\mu\mu} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}, \quad \dot{\epsilon}: \text{ヤング率の増分}$$

塑性状態における応力-歪関係

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} = & \frac{E}{1+\nu} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dot{\epsilon}_{\mu\mu} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \dot{\epsilon}_{ij}^e + \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dot{\epsilon} E_{\mu\mu} \delta_{ij} \\ & - \frac{1}{1-2\nu} \dot{\epsilon}_0 - \frac{E}{1+\nu} S_{ij} \frac{S_{ke} \dot{\epsilon}_{ke} - \frac{1}{2G} \frac{2}{3} \bar{\sigma} \frac{\partial Y}{\partial T} \dot{T} + \frac{1}{E} \dot{\epsilon} S_{ke} \dot{\epsilon}_{ke}}{S} \dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで; $S = S_{ke} S_{ke} + \frac{1}{2G} \frac{4}{3} \bar{\sigma}^2 H$, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} \{S_{ij} S_{ij}\}^{1/2}$, S_{ij} : 偏差応力

$\dot{\epsilon}_{ij}$: 偏差歪増分, $\dot{\epsilon}_{ij}^e$: 弾性偏差歪増分, H : 加工硬化指数, Y : 降伏強さ

降伏条件としてはミーゼスの条件を用い、塑性から弾性への移行は $\partial f / \partial S_{ij} + \partial f / \partial T \cdot \dot{T} < 0$ によって判定した。ただし、 f : 降伏曲面を表わす関数

2.3 金属組織の変化と物性値の温度依存性

ほとんどすべての物性値は温度依存性を持つが、比熱、熱伝導率、そして降伏強さは、さらに、金属組織にも依存する。変態を生ずると潜熱を発生し、体積変化を生じて温度変化や変位と応力に影響する。金属組織の変化については、2.1 で求める時間と温度の関係に CCT 図を加えて求めた。温度依存性は γ とし投入する折線を内挿で求める方法によった。

3. 数値計算例

要素分割の例を図 1 に示す。温度計算は 4 角形要素を用い、変形の計算は 3 角形要素を用いた。以下の計算例に共通する γ を表 1 と図 2 ~ 図 4 に示す。

以下に示す変形と焼入組織の図は円筒の中心軸から表面までの断面図である。変形については、参

るのため、一定の変形量を表線として示した。なお図中の数値は次の通り。

A: オーステナイト, F+P: フェライト・パーライト, B: バイナイト, M: マルテンサイト。

表1 数値計算のためのデータ
(共通するもののみ)

線膨張係数	
フェライト	$12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
オーステナイト	$16 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
変態潜熱	
フェライト変態	18 cal/g
バイナイト変態	19 cal/g
マルテンサイト変態	20 cal/g
オーステナイト変態膨張	-0.001 cm/cm
ポアソン比	0.3

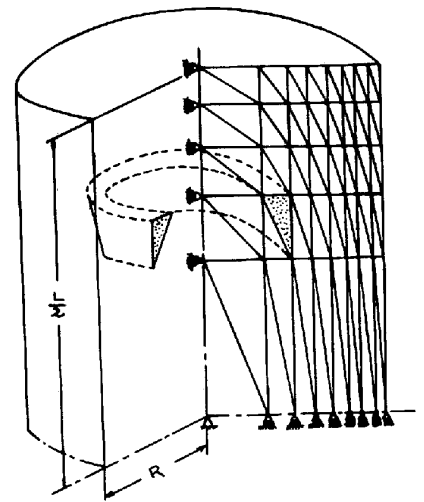


図1 要素分割の例

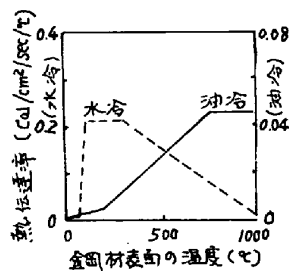


図2 熱伝達率

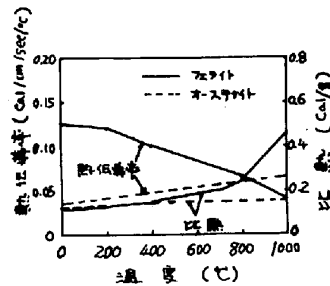


図3 比熱と熱伝導率

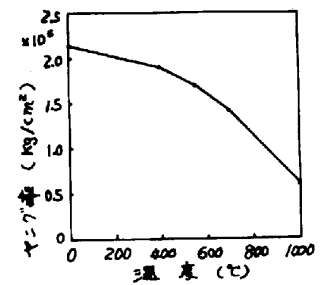


図4 ヤング率

例1. 熱伝力だけが働いた場合の変形

例2. マルテンサイト1相に焼入れたときの变形

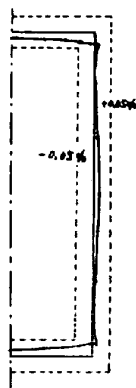


図5

中炭内層を650°Cから水冷した場合

直径 90mm

長さ 200mm

降伏点: 室温 20 kg/mm²

800°C 4 kg/mm²

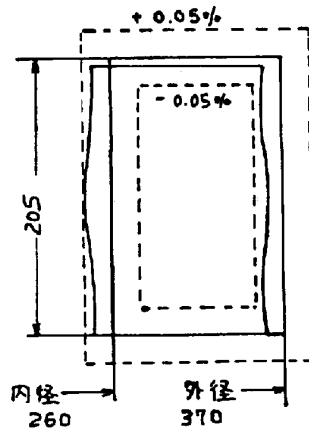


図6

中炭内層を650°Cから水冷した場合

寸法: 図参照

降伏点: 室温 73 kg/mm²

800°C 6 kg/mm²

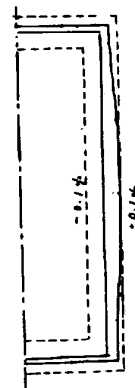


図7

中炭内層を850°Cから油冷した場合

直径: 50mm, 長さ: 100mm

Ms: 250°C, Mf: 100°C

変態膨張量: 4.0×10^{-3}

降伏点 (kg/mm²)

室温 10

50

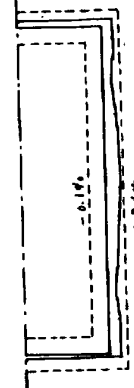


図8

中炭内層を850°Cから水冷した場合

直径: 50mm, 長さ: 100mm

Ms: 300°C, Mf: 150°C

変態膨張量: 3.8×10^{-3}

降伏点 (kg/mm²)

室温 10

50

3

1

例3. 不完全焼入れしたときの变形

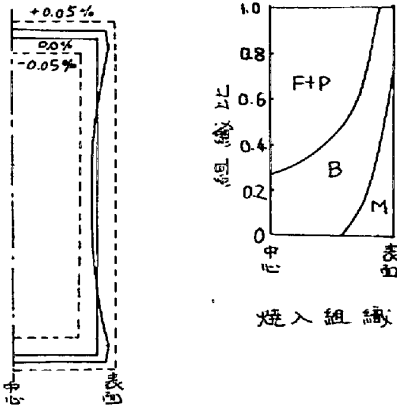


図9
中央円筒を850℃から
水入れした場合

直径: 50mm

長さ: 100mm

変形膨張量

$$A \rightarrow F+P \quad 1.6 \times 10^{-3}$$

$$A \rightarrow B \quad 2.5 \times 10^{-3}$$

$$A \rightarrow M \quad 3.8 \times 10^{-3}$$

降伏点

$$\text{室温} \quad A \quad 10. \text{ kg/mm}^2$$

$$F+P \quad 20. \text{ "}$$

$$B \quad 35. \text{ "}$$

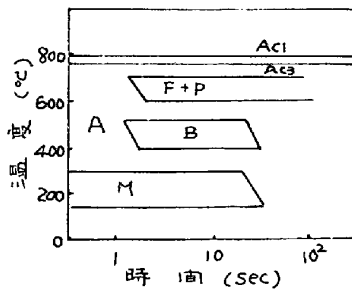
$$M \quad 50. \text{ "}$$

800℃

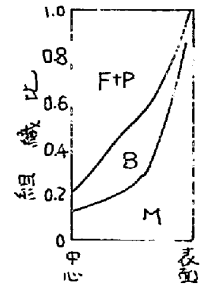
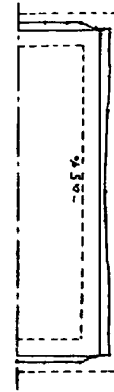
すべての組織: 3 kg/mm^2

1000℃

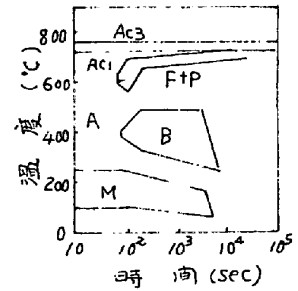
すべての組織: 1 kg/mm^2



計算に用いたC.C.T図



焼入組織



計算に用いたC.C.T図

図10

中央円筒を850℃から水入れ
場合

直径: 400mm

長さ: 600mm

変形膨張量

$$A \rightarrow F+P \quad 1.4 \times 10^{-3}$$

$$A \rightarrow B \quad 2.4 \times 10^{-3}$$

$$A \rightarrow M \quad 4.0 \times 10^{-3}$$

降伏点: 第9図の場合と同じ

4. まとめ

鋼材の焼入変形には、冷却方式と鋼筋の大きさおよび与えられる
焼入中の温度分布、焼入組織の種類とその分布、変形温度、そして
鋼の高温降伏強さなどが大きく影響する。焼入変形を体系的に把握
するためには、これらの影響因子について数多くの数値計算を行う
必要がある。ここに述べた少数の例からも知られるように、焼入れ
の際の変形は、大まかに分けて、中央部が凸になる太鼓形の变形と
中央部が凹になる鞍形の变形に分けられる。前者の变形には熱応力
だけが働いた場合とマルテンサイト1相に焼入れした場合が属し、後
者の变形には不完全焼入れの場合が属する。不完全焼入れでも、焼
入組織がフェライト・パーライトだけのようになると、再び太鼓形
になるものと予想される。

5. 参考文献

- 1) M. Marchal, Computation of heat conduction processes by electronic computers, Sulzer Technical Review, 3 (1964), P155
- 2) O.C. Zienkiewicz, The Finite Element Method in Engineering Science (1971) McGraw-Hill, London
- 3) 藤田, 野本, 熱弾塑性問題に関する研究(第1), 日本造船学会論文集 130(1971)12, P183