621.746.01: 536.421

(49) 凝固速度係数の解析

名古屋大学工学部大学院　○川延保隆
名古屋大学工学部　工博 鞭　巌

1. 緒言　従来凝固の進行に関する解析はほとんどの場合、単一な凝固界面の推移について取扱われていた。しかし、鋼塊凝固ではある温度範囲にわたって凝固が進行するので、ここでは固液共存層を考慮した半無限の1次元非定常熱伝導問題として、凝固速度係数等を導出した。

2 解析　(仮定)　(1)熱的物性定数は温度によらず一定である。(2)表面温度は一定とする。(3)凝固開始、完了は、それぞれ、液相線、固相線温度とする。

(基礎式)

Ⅰ. $\partial t_1/\partial\theta = \alpha_1 \partial^2 t_1/\partial x^2$ ……(1)

Ⅱ. $c\rho\,\partial t_2/\partial\theta = k_2 \partial^2 t_2/\partial x^2 + L\rho\,\partial f_s/\partial\theta$ ……(2)

Ⅲ. $\partial t_3/\partial\theta = \alpha_3 \partial^2 t_3/\partial x^2$ ……(3)

(境界条件)

∘ $x=0$ で、$t_1=t_{10}$ (4)

∘ $x=\varepsilon_1$ で、$t_1=t_2=t_s$ (5)　$k_1\partial t_1/\partial x = k_2 \partial t_2/\partial x + L\rho(1-f_s^*)\,d\varepsilon_1/d\theta$ (6)

∘ $x=\varepsilon_2$ $(=\varepsilon_1+\delta)$ で、$t_2=t_3=t_\ell$ (7)　$k_2\partial t_2/\partial x = k_3 \partial t_3/\partial x$ (8)

∘ $x=\infty$ で、$t_3=t_0$ (9)

液相(Ⅲ)の温度 t_3 が液相温度 t_ℓ に等しい場合：

(解法Ⅰ) 固液共存相内の温度 t_2 を2次式近似して、(2)式をライプニッツの定理を用いて ε_1 ～ $\varepsilon_1+\delta$ まで積分する。(2)式は、$(1/3+L\cdot P/c\Delta t_2)\,d\delta/d\theta + (1+L\cdot f_s^*/c\Delta t_2)\,d\varepsilon_1/d\theta = 2\alpha_2/\delta$　ただし、$P=(1-\sqrt{mC_0/\Delta t_2}\,\mathrm{Arctan}\sqrt{\Delta t_2/mC_0})/(1-k_0)$, $\Delta t_2=t_\ell-t_s$ …(10) となる。ここで $P=f_s^*/2$ の場合は、Tien[1]らが固相率が距離に関して直線分布であると仮定したときの解となる。

(解法Ⅱ) 固相率が温度に関して直線分布をしていると仮定する。(2)式は、$\partial t_2/\partial\theta = \alpha_2 \partial^2 t_2/\partial x^2$ (11) となる。ただし、$\alpha_2 = k_2/(c+f_s^* L/\Delta t_2)$ である。

(解法Ⅲ) 図1のように固相率を温度で近似する。$f_p=0.5$ とすれば平均凝固厚さとなる[2]。(2)式は、$\partial t_i/\partial\theta = \alpha_i \partial^2 t_i/\partial x^2$ $(i=\mathrm{II}1, \mathrm{II}2)$　ただし、$\alpha_{\mathrm{II}1} = k_2/\{c+(f_s^*-f_p)L/(t_p-t_s)\}$, $\alpha_{\mathrm{II}2} = k_2/\{c+f_p L/(t_\ell-t_p)\}$ …(12) となる。

3 結果　解として $\varepsilon_1=\beta_1\sqrt{\theta}$, $\varepsilon_2=\beta_2\sqrt{\theta}$ が得られる。表1に解法Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ の比較($t_0=1000°C$[2])を示した。固相率の分布は距離に関してほぼ直線関係にある。固液共存相内の凝固速度($df_s/d\theta$)は、C 0.15%の8t型鋼塊の場合 $f_s=0.42$ となり、鋼塊表面からの距離によらず最大となる[3]。図2に表面温度の効果を示す。

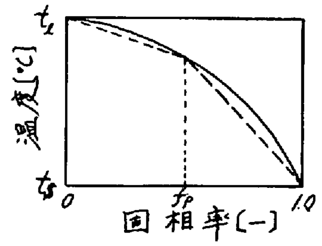

図1 固相率の温度近似

表1 解法の比較

C0.1%	解法Ⅰ	解法Ⅱ	解法Ⅲ
β_1	2.44	2.46	2.45
β_2	2.92	2.96	2.90

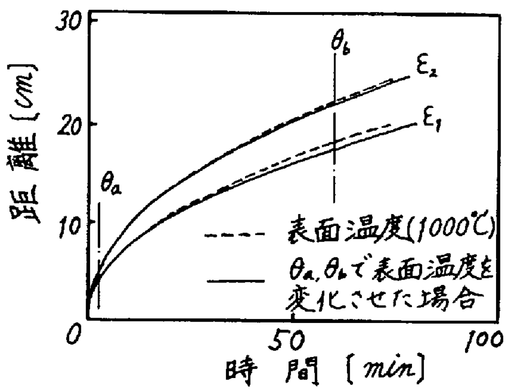

図2 表面温度の効果

(記号) t_0: 注入温度, t_ℓ: 液相線温度, t_s: 固相線温度, t_{10}: 表面温度, ε_1: 凝固完了位置, ε_2: 凝固開始位置, c: 比熱, ρ: 密度, k: 熱伝導度, α: 熱拡散率, L: 潜熱, θ: 時間, f_s: 固相率, m: 液相線の温度勾配, C_0: 初期炭素濃度
Ⅰ: 固相, Ⅱ: 固液共存相, Ⅲ: 液相

(文献) 1) R. H. Tien: Trans. ASME, 89 (1967) 234, 2) 田代ら: 三菱製鋼技報, 4 (1970) 2.11,
3) C. M. Adams: AIME, 239 (1967) 850