

# コークス炉内の熱移動に及ぼす生成コークスの き裂と発生ガス流れの影響

論文

深井 潤\*・三浦 隆利\*・大谷 茂盛\*

## Effects of Produced Coke Fissures and Volatilized Gas Flow on the Heat Transfer in the Coke Oven

Jun FUKAI, Takatoshi MIURA and Shigemori OHTANI

### Synopsis:

A heat transfer model of the coke oven chamber is proposed considering the radiation within the macro fissures in the coke and the convection of the product gas. Contributions of the radiation and convection to the temperature distribution in the coke oven chamber are numerically observed under the various conditions concerning the fissure width and the direction of the gas flow. As a result, it is found that both of them cannot be neglected in the heat transfer analysis in the coke oven chamber since they have the significant effects on the temperature distribution.

By using a newly proposed thermal property estimation method, the thermal conductivity and the heat capacity of coal are estimated from temperature distribution computed by the model mentioned above. Thermal properties of coal which are estimated from the temperature history in the coke oven chamber are suggested to be much different from the true values and to have no generality.

**Key words:** coal; coke; coke oven; simulation; heat transfer; fissure; gas flow; radiation; thermo-physical property.

### 1. 緒 言

近年のコークス炉内の伝熱解析では、炉の構造、操業条件および装入炭条件と消費熱量との関係、さらに生成したコークスの品質を的確に予測するために、炭化室内のコークス化現象を伝熱モデルに組み込んだ解析が行われている<sup>1)~3)</sup>。そのためには、炭化室内で石炭がコークスに至るまでの物理的・化学的物性の変化を定量的に把握する必要があるが、多くの現象について十分な知見が得られていない。その中で、コークスの品質および副産物を予測・管理する立場から、生成したコークス内に生ずるき裂の生長機構およびガスの流動特性の解明が急がれているが、それらの伝熱への影響はいまだ検討されていない部分が多い。

コークス層内に発生するき裂の中で、コークス組織の境界面間に発生する微小き裂など小さなき裂内の輻射伝熱の寄与については、多孔質体における気孔内の輻射伝熱と同様にして有効熱伝導度に含ませることができる。しかし、これは空隙内面の温度がほぼ等しいと仮定される場合であり、炉幅のほぼ半分の寸法を有する塊コーク

ス間の巨視的き裂内の輻射伝熱量を、微小き裂と同様な方法で表すことは難しい。一方、ガス流れを伴う場合の伝熱機構に関して、温度分布およびガス流れが定常状態にある場合を対象とした報告<sup>4)</sup>は多いが、コークス炉内のように各位置でガスが発生し、熱流が非定常である場合に対する定量的な検討はほとんどなされていない。

一方、実炉における温度分布の経時変化から熱物性値を推算している報告がいくつか見られる<sup>5)~7)</sup>。この場合の熱物性値には上記の輻射伝熱および対流伝熱が含まれるので、それらを考慮せずとも伝熱解析を進めることができるであろう。しかし、熱物性値推定方法も含め、得られた熱物性値の信頼性に関する検討はなされていない。したがって、実炉内の温度分布データから熱物性値を推算できるか否か、もし可能ならばいかなる熱物性値を示すかを明確にする必要がある。

本研究では、以上の現状を踏まえ、巨視的なき裂（以下、単にき裂と記述する）内の輻射伝熱及び熱分解ガス流による対流伝熱を考慮した簡単なモデルを用いて、それらが炉内温度分布に及ぼす影響を検討した。さらに、その際得られた温度分布から熱物性値を推算し、実炉内

昭和 61 年 5 月 22 日受付 (Received May 22, 1986)

\* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aza-Aoba Aramaki Sendai 980)

温度分布から推定される熱物性値について検討を加えた。

## 2. 解析方法

前節で記したように、現状ではき裂の生長過程およびガスの流動方向についての定量的な説明が得られていないので、各現象に対して以下に述べるような比較的簡単なモデルを用いて、解析を行った。

### 2.1 き裂内の輻射伝熱

Fig. 1 にコークス炉内横断面の模式図を示した。本研究では、コークス層内に幅  $2a_f$  のき裂が等間隔 ( $2a_c$ ) に発生し、その先端面はあらかじめ与えた温度に達した瞬間に炭化室中心へ進行すると仮定した。この場合、塊コークスは  $y$  軸方向へ瞬時に収縮するとして、き裂幅の成長過程は無視している。また、き裂内には熱分解ガスが充満しているとする。本研究では、系の対称性を考慮して、点線で囲まれた領域で伝熱解析を行った。その拡大図を Fig. 1 (b) に示す。図中、 $S_{w-c}$  は炉壁レンガと石炭層あるいはコークス層、 $S_{w-f}$  は炉壁とき裂、 $S_{c-f}$  は石炭層あるいはコークス層とき裂との各境界面を示し、 $S_w$  は燃焼室側の炉壁レンガ面、 $S_0$  は断熱境界面である。

以上のモデルに対して、Table 1 (a) に示す 2 次元熱伝導方程式、初期条件及び境界条件を与えた。式中、cc は石炭層あるいはコークス層、g はガス相及び w は炉壁レンガをそれぞれ示す。乾留初期における石炭層内及び炉壁内の温度はおおの均一であり、フリーに接する炉壁の温度  $\theta_w$  は時間によらず一定であるとする。

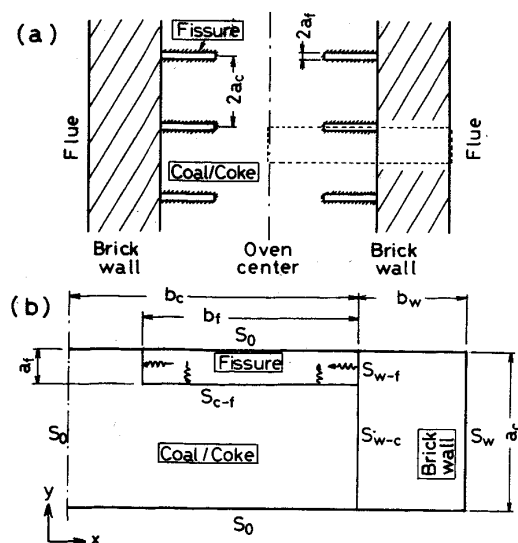


Fig. 1. Two-dimensional heat transfer model with radiation in the fissures.

Table 1. Heat conduction equation.

|                          | (a)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | (b)                                             | (c)                                                                                                   |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Model                    | With fissures                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | With gas flow                                   | Estimation                                                                                            |
| Heat conduction equation | $Ch_k \partial \theta / \partial t = \nabla \cdot (\lambda_k \nabla \theta) + G$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                 |                                                                                                       |
| Dimension                | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1                                               | 1                                                                                                     |
| $k$                      | cc, g or w                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | cc or w                                         | —                                                                                                     |
| $G$                      | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | $C_{pg} \dot{m}_v \partial \theta / \partial x$ | 0                                                                                                     |
| I. C.                    | $0 \leq x < b_c: \theta = \theta_0, b_c \leq x \leq b_c + b_w: \theta = \theta_w$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                 |                                                                                                       |
| B. C.                    | $x=0 \text{ (or } S_0): l_x \partial \theta / \partial x + l_y \partial \theta / \partial y = 0$<br>$x=b_c \text{ (or } S_{w-c}): \lambda_w \partial \theta / \partial x = \lambda_{cc} \partial \theta / \partial x$<br>$x=b_c + b_w \text{ (or } S_w): \theta = \theta_w$<br>$S_{w-f}: \lambda_w \partial \theta / \partial x = \lambda_g \partial \theta / \partial x + q_r$<br>$S_{c-f}: \lambda_{cc} (l_x \partial \theta / \partial x + l_y \partial \theta / \partial y) = \lambda_g (l_x \partial \theta / \partial x + l_y \partial \theta / \partial y) + q_r$ |                                                 |                                                                                                       |
|                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                 | $x=0: \partial \theta / \partial x = 0$<br>$x=b_c: -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = q_w$ |

また、 $S_{w-f}$  および  $S_{c-f}$  の境界条件式の右辺には、輻射伝熱による熱流束  $q_r$  が右辺に加算される。

$q_r$  を見積もる際には、き裂面及び炉壁面の不透過性及び乱反射性、およびき裂内ガスの透過性を仮定し、文献 8) に示される方法を用いた。すなわち、き裂面全体を微小要素面に分割すれば、任意の要素面  $i$  から放出される正味の輻射エネルギーは (1) 式で与えられる。

$$q_{ri} = \{p_i / (1 - p_i)\} (E_{bi} - J_i) \dots \dots \dots (1)$$

式中、 $p_i$  は射出率、 $E_{bi}$  は黒体の輻射熱量および  $J_i$  は射度 ( $i$  面から放出される熱流束) である。ここで、 $i$  面における射度と他の面  $j$  における射度との関係は次式で与えられる。

$$J_i - (1 - p_i) \sum_{j=1}^{N_b} F_{ij} J_j = p_i E_{bi} \dots \dots \dots (2)$$

式中、形態係数  $F_{ij}$  は 2 面間の幾何学的な位置関係から求められる。したがって、すべての要素面に対して (2) 式を与え、 $J$  に関する  $N_b \times N_b$  の連立方程式を解けば、各要素面の射度が得られる。

以上の式を以下の変数を用いて無次元化した後、有限要素法によって温度分布の経時変化を計算した。

$$X = x / b_c \quad Y = y / b_c$$

$$\tau = \kappa_{cc}(\theta_0) \cdot t / b_c^2 \quad u = (\theta - \theta_0) / (\theta_w - \theta_0)$$

$$Q = q_r b_c / \{(\lambda(\theta_0) \cdot (\theta_w - \theta_0))\}$$

$$\Lambda_k = \lambda_k(\theta) / \lambda_{cc}(\theta_0)$$

$$C_k = Ch_k(\theta) / Ch_{cc}(\theta_0) \quad K_k = \kappa_k(\theta) / \kappa_{cc}(\theta_0)$$

Fig. 2 に計算領域の要素分割例を示した。太線は計算過程でき裂と炉壁レンガあるいはコークス層との境界となる面であり、Table 1 (a) 中  $S_{w-f}$  および  $S_{c-f}$  の境界条件を満足させるためにその付近の要素は細かく分割した。

### 2.2 熱分解ガス流れに伴う対流伝熱

炉内で発生したガスは 1 次元的に炉壁方向あるいは炭

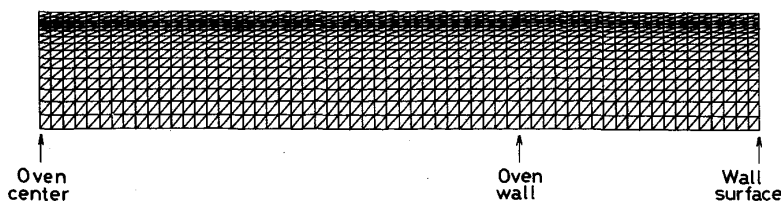


Fig. 2. Triangular elements used to describe the area.

化室中心方向へ流れる場合を解析した。炉壁あるいは炭化室中心に到達したガスは上部へ流動し炉外に排出されるが、それに伴う熱移動は考慮しない。固相（石炭あるいはコークス）と生成ガスとの温度が等しいと仮定すれば、Table 1 (b) に示した熱伝導方程式及び諸条件が得られる。式中、熱分解ガスの質量流束  $\dot{m}_v$  は、充填時の石炭単位重量当たりのガス  $i$  の生成速度  $dW_i/dt$  との関係より次式で与えられる。

$$\dot{m}_v = \rho_{app} \int_0^x (\sum_i dW_i/dt) dx \dots\dots\dots (3)$$

ここに、各ガスの生成速度  $dW_i/dt$  は既報<sup>9)</sup> の取扱いに従い、Arrhenius 型の反応速度式で与えた。なお、(3) 式はガスが炉壁方向に流れる場合であり、中心方向へ流れるガスに対しては炉壁 ( $x=b_f$ ) から中心 ( $x=0$ ) に向かつて  $x$  まで積分する。

### 3. 解析結果

計算条件および熱物性値をそれぞれを Table 2 および 3 に示した。炉の寸法および乾留条件は操業条件に近い値を与えているが、初期温度については予熱炭の使用も考慮に入れ常温との中間温度を与えた。実炉におけるコークス塊の寸法は  $\phi 50 \sim 100$  mm であり、塊の幅は大きめに与えている。また、き裂幅がコークスの収縮量に等しいとすれば、乾留終了時のき裂幅はコークス塊の 5～15% となる。そこで、き裂幅がそれぞれ 5 mm ( $a_c/a_f = 0.05$ ) 及び 10 mm (0.10) の場合を検討した。き裂先端の温度は、FILONENKO ら<sup>10)</sup> によつて測定されたき裂発生時の表面温度 (920～1 000 K) を参考にしている。石炭の有効熱伝導度及び有効熱拡散率には既報<sup>11)12)</sup> の実験式を用い、ガスの熱物性値は計算の簡単化のため以下のように与えた。

Table 4 に各ガスの発生量を示す。これらの値は既報<sup>9)</sup> の実験式を用いて得られた VM=28% の石炭から発生するガス量である。表より、水素、メタン及び水の発生モル量は他のガス量より比較的大きいことがわかる。そこで、水素、メタン及び水蒸気が 3:1:1 の割合で混合しているガスを想定して、混合ガスの熱伝導度を CHEUNG らの推算式<sup>13)</sup> から、また比熱をモル分率比からそれぞれ求めた。なお、各ガスの熱物性値には、

Table 2. The calculation conditions.

|                                                |         |
|------------------------------------------------|---------|
| Width of the chamber ( $2b_c$ )                | 0.4 m   |
| Width of the wall ( $b_w$ )                    | 0.1 m   |
| Width of the lump coke ( $2a_c$ )              | 0.1 m   |
| Width of the fissures ( $2a_f$ )               | 0.01 m  |
|                                                | 0.005 m |
| Initial temperature ( $\theta_0$ )             | 400 K   |
| Temperature of the wall surface ( $\theta_w$ ) | 1 500 K |
| Temperature of the fissure tip ( $\theta_f$ )  | 900 K   |

Table 3. The thermal properties of the coal/coke, gas  
Coal/Coke

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| $\lambda_{cc} = \begin{cases} 0.180 \exp \{0.0012(\theta - 730)\} & \theta < 730 \text{ K} \\ 0.180 \exp \{0.0041(\theta - 730)\} & \theta \geq 730 \text{ K} \end{cases}$ [W/m·K]                                                                                                                                 | $\theta < 730 \text{ K}$                    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\theta \geq 730 \text{ K}$                 |
| $\kappa_{cc} = \begin{cases} 1 \times 10^{-7} \exp \{-0.00012(\theta - 675)\} & \theta \leq 675 \text{ K} \\ 1 \times 10^{-7} \cdot 2^{(\theta - 675)/110} & 675 \text{ K} < \theta \leq 785 \text{ K} \\ 2 \times 10^{-7} \exp \{0.0045(\theta - 785)\} & \theta > 785 \text{ K} \end{cases}$ [m <sup>2</sup> /s] | $\theta \leq 675 \text{ K}$                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $675 \text{ K} < \theta \leq 785 \text{ K}$ |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | $\theta > 785 \text{ K}$                    |
| $p_{cc} = 0.8$ [—]                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                             |
| Gas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                             |
| $\lambda_g = 0.0121 + 2.36 \times 10^{-4} \theta + 1.62 \times 10^{-8} \theta^2 + 5.44 \times 10^{-13} \theta^3$ [W/m·K]                                                                                                                                                                                           |                                             |
| $C_{pg} = 3.24 \times 10^3 + 1.95 \theta + 2.39 \times 10^{-4} \theta^2 - 2.74 \times 10^{-7} \theta^3$ [J/kg·K]                                                                                                                                                                                                   |                                             |
| $\rho_g = 92.6/\theta$ [kg/m <sup>3</sup> ]                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                             |
| Brick wall <sup>(6)(8)(15)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                             |
| $\lambda_w = 1.5$ [W/m·K] ( $C_{p\rho}$ ) <sub>w</sub> = $2 \times 10^6$ [J/m <sup>3</sup> ·K]                                                                                                                                                                                                                     |                                             |
| $p_w = 0.75$ [—]                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                             |

Table 4. Amount of the released gases.

| Gas         | H <sub>2</sub> | CO    | CH <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> O | Tar   | CO <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> |
|-------------|----------------|-------|-----------------|------------------|-------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| kg/kg-coal  | 0.018          | 0.028 | 0.053           | 0.054            | 0.104 | 0.009           | 0.008                         | 0.002                         |
| mol/kg-coal | 8.93           | 1.01  | 3.30            | 2.99             | 0.07  | 0.22            | 0.27                          | 0.08                          |

TOUROUKIAN<sup>14)</sup> の値を採用している。また、ガス流れを考慮する場合、Table 4 より CO<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 及び C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> の各発生重量は他のガスに比べて相当少ないことから、それら 3 種類のガスの発生は無視した。

#### 3.1 き裂内輻射伝熱の温度分布に及ぼす影響

Fig. 3 に、き裂幅 10 mm の場合に得られた炉内温度分布の経時変化を示す。破線は炉壁と石炭層との境界を、点線はき裂境界面を示す。いずれの時間においても熱は、炉壁近傍では炉壁あるいはコークス側からき裂へ流れ、炭化室中心側ではき裂からコークスあるいは石炭層へ流れている。これは、輻射伝熱によつて、き裂内の熱移動

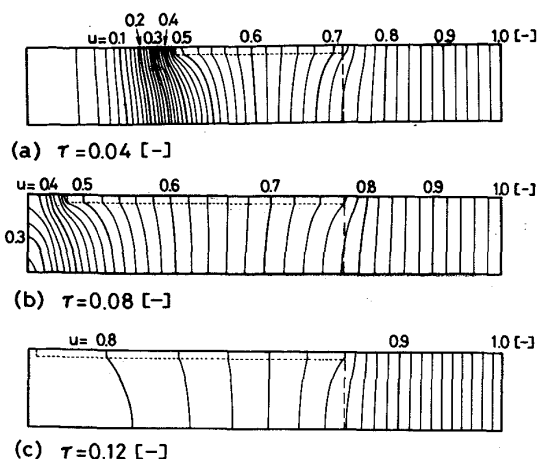


Fig. 3. Temperature distribution at various times (with fissures).

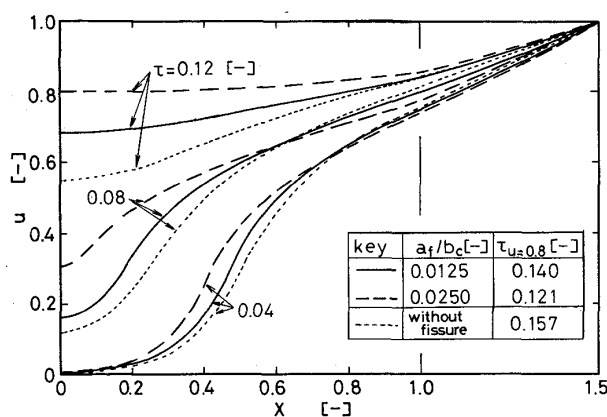


Fig. 4. Effects of the radiation heat transfer on temperature.

量がコークス層内よりも大きいのである。それゆえ、き裂は炉壁近傍では吸熱源として作用し、また炭化室中心側では発熱源として作用する。

次に、Fig. 3 に示したような温度分布を  $y$  軸方向に積分平均して得られた炭化室内温度の経時変化を、Fig. 4 に示した。実線はき裂幅 5 mm、破線は 10 mm の場合の結果および点線はき裂が無い場合の結果である。 $\tau = 0.04$  および  $0.08$  で、き裂幅が大きいほど炉壁付近の温度が低いのは、上述のようにこの付近のき裂が吸熱作用をしているためである。しかし全体的に見れば、き裂幅が大きいほど炉全体の昇温は早い。また図中の  $\tau_u = 0.8$  は炭化室中央部の温度が  $u = 0.8$  ( $\theta \approx 1300\text{K}$ ) に達するまでの無次元時間であり、これを乾留終了時間と定義する。き裂の有無、き裂幅によって乾留終了時間は相当異なっている。

### 3.2 熱分解ガス流れの温度分布に及ぼす影響

熱分解ガスの流れを考慮した場合の温度分布計算例を

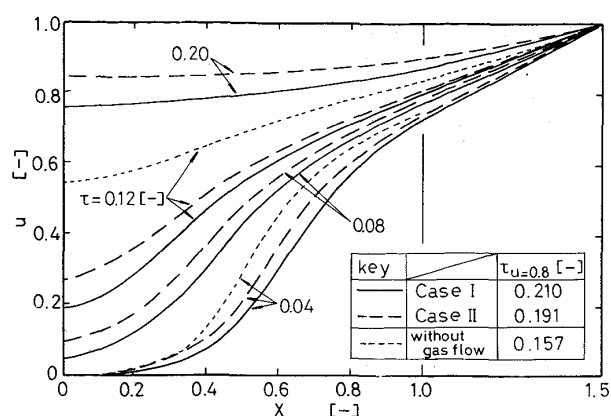


Fig. 5. Effects of the convection heat transfer on temperature.

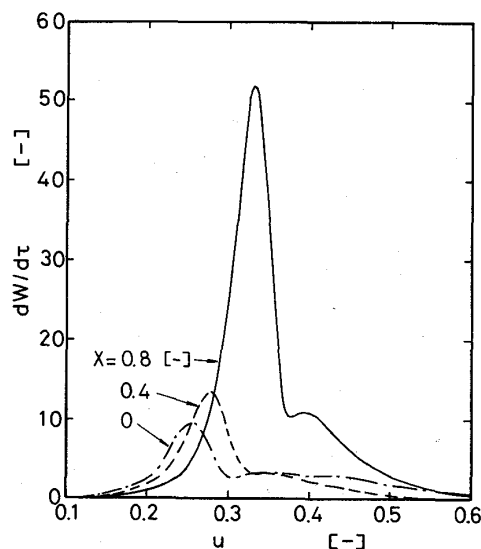


Fig. 6. Variation of gas production rate with temperature.

Fig. 5 に示した。図中、実線で示される Case I は全生成ガスが炉壁へ流れる場合、破線で示される Case II は生成した水（水蒸気）のみが炭化室中央へ流れ、その他のガスは炉壁へ流れる場合である。このように、二つの場合を検討したのは、一部のガスを炭化室中心へ流して、炉内温度分布に及ぼす影響を検討するためである。ここでは熱分解ガスの一例として水に注目しているので、炭化室内での凝縮、再蒸発など他の生成ガスが示さない現象は考慮していない。また、Case I における全ガスの生成速度の温度依存性を Fig. 6 に示した。Case I における熱分解ガスは、Fig. 6 に示すように比較的低温部 ( $u = 0.2 \sim 0.5$  の温度範囲) で多量に発生し、比較的高温のコークス層内を通過する際に加熱される。つまり、ガスは吸熱反応の作用をコークス内の伝熱にもたらすために、Fig. 5 に示されるように炉内全体の昇温は

遅くなる。一方、Case II において発生した水蒸気（全発生ガス重量の約 20%）は、相対的に低温部の炭化室中央へ流れる際に、石炭層を加熱する。それゆえ、Case II は Case I より乾留終了時間が短縮される。いずれにしても、ガス流れは炉内の温度分布に相当な影響を与えていることがわかる。なお、Fig. 6 において、炭化室中央へ近づくにつれ（ $X \rightarrow 0$ ）昇温速度が大きくなるため、ガスの発生開始温度は低下する。さらに、ガス発生速度の最大値も減少するが、滞在時間はその分増すので、乾留過程終了時までの全生成量に変わりはない。

以上の数値実験から、巨視的なき裂およびガス流れに基づく熱移動量は無視できず、炉内の伝熱解析を行う場合にはこれらの伝熱項を考慮しなければならないと考えられる。

#### 4. 炉内温度分布から得られる熱物性値に関する検討

実験室規模の装置で用いられている通常の熱物性値測定法を、実炉のような温度分布が極端に大きな測定系に適用することはできない（4.2 参照）。そこで、そのような測定系に対しても適用できる推算方法を開発し、その方法の信頼性を検討した。さらに、前節で得られた数値実験結果を実炉から得られる温度データと仮想して熱物性値を推算し、き裂およびガス流れの影響を検討した。

##### 4.1 測定原理

著者らが既に円筒座標測定系に対して開発している非線形最小 2 乗推定法<sup>16)</sup>を直交座標系に適用した。炉壁から熱流束  $q_w$  が与えられる測定系に対して、Table 1 (c) に示した熱伝導方程式及び諸条件を与える。式中、 $q_w$  は既知である炉壁の熱物性値および炉壁境界の温度勾配から求められる。ここで、熱伝導度及び熱拡散率を任意の温度区間  $[\theta_i, \theta_{i+1}]$  ごとに次の式で与えた。

$$\lambda(\theta) = \lambda_i \exp \{A_{\lambda_i}(\theta - \theta_i)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\kappa(\theta) = \kappa_i \exp \{A_{\kappa_i}(\theta - \theta_i)\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

温度区間をあらかじめ与えれば、未知のパラメーターは  $(\lambda_i, \kappa_i, A_{\lambda_i} \text{ 及び } A_{\kappa_i})$  である。そこで、Table 1 (c) の熱伝導方程式から求められる計算値と測定値（この場合は前節の数値実験結果）との残差の 2 乗和を最小とするパラメーターを非線形最小 2 乗法で決定した。推算の際には、乾留開始から炉壁の中心温度が  $u=0.9$  となるまでの、炉内 6 か所の各位置（ $X=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ ）における  $\Delta \tau=0.004$  ほどの測定温度を、フィッティング・データとして用いた。

##### 4.2 推算方法の検討

き裂及びガス流れがない場合の温度分布を用いて推算した無次元熱拡散率を Fig. 7 に示した。実線は上記の方法による推算結果、点線は炭化室内温度分布を推算する際に用いた熱拡散率であり、推算値が点線に近いほど測定誤差の少ない測定法である。また、破線および一点鎖線は既に著者らが検討を加えている定速昇温法および連続加熱法<sup>17)</sup>を用いて得られた結果である。なお、既報の測定原理は円筒座標系を用いているが、ここでは直交座標系に対する温度分布の解析解<sup>18)</sup>から同様な方法で有効熱拡散率を推定している。定速昇温法による推定結果は  $u=0.6$  で極小値を示した後急激に増加し始め、連続昇温法による推算結果も、ほぼ同様な傾向を示している。このように既報の方法は、今回のように温度分布が大きく、かつ熱物性値に大きな温度依存性を有する物質の熱拡散率測定には、不適当であることが分かる。一方、非線形最小 2 乗推定法による方法によれば、推算結果は 0.1% 以内の誤差内で本来の熱拡散率に一致している。また、非線形最小 2 乗推定法によれば、熱伝導度についても良好な推算結果が得られている。

次に、与えた熱物性値が本来の熱物性値の関数形と異なっている場合を検討した。ここでは、Table 3 に示した石炭層の熱物性値の関数を変更する替わりに、推算する熱物性値を次式に示すような温度の一次式で与えて、各パラメーターを推算した。

$$\lambda(\theta) = \lambda_i \{1 + A_{\lambda_i}(\theta - \theta_i)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\kappa(\theta) = \kappa_i \{1 + A_{\kappa_i}(\theta - \theta_i)\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$u=0 \sim 0.9$  の温度範囲を 3 及び 5 区間に分割して推算

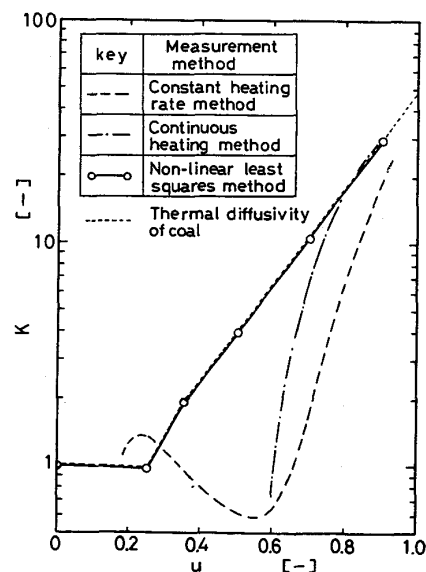


Fig. 7. Comparison between measurement methods.

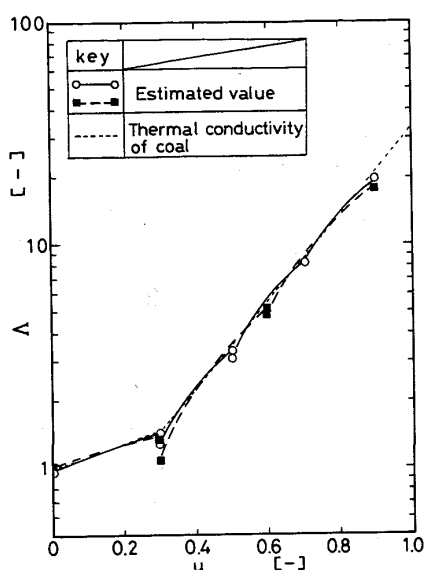


Fig. 8. Temperature dependencies of the estimated properties..

した熱伝導度を Fig. 8 に示した。各温度区間の境で推算値の不連続性が確認されるが、この場合も良好な推算結果が得られている。すなわち、本方法によれば与えた熱物性値の温度依存性が本来の関数形と異なっても、いくつかの温度区間ごとに熱物性値を与えることによって真の熱物性値を近似的に表すことが可能となる。それゆえ、5 区間に分割した場合 (○印) の方が 3 区間の場合 (■印) より良い推算結果が得られている。

以上非線形最小 2 乗推定法の有効性が確認されたので、前節で得られたき裂あるいは炉内ガスがある場合の温度分布からこの方法を用いて熱物性値を推算した。

#### 4.3 き裂内輻射伝熱を伴う場合の推算結果

推算結果の一例として、き裂幅が 10 mm の場合を Fig. 9 に示した。無次元熱容量  $C$  は推算された熱伝導度と熱拡散率から得られる。点線は石炭の熱物性値、一点鎖線はき裂の進行を考慮しているがき裂内の輻射伝熱を無視した温度分布から推算した結果、および実線はき裂内の輻射伝熱を考慮した場合の推算結果である。すなわち、実線と一点鎖線との差が輻射伝熱の寄与となる。Fig. 9 (a) に示した熱伝導度の推算結果は  $u=0.4$  から急激に増加し、高温における輻射伝熱の寄与は全体の 50% にも達している。き裂幅が 5 mm の場合の輻射伝熱量は全体の約 30% に達した。Fig. 9 (b) に示した無次元熱容量には多少のばらつきが見られるが、き裂の先端付近が発熱源として作用するために総括熱容量は小さくなっている。 $u=0.2\sim0.5$  の範囲の総括熱容量に大きな不連続性が見られるのは、き裂の生長によって熱物

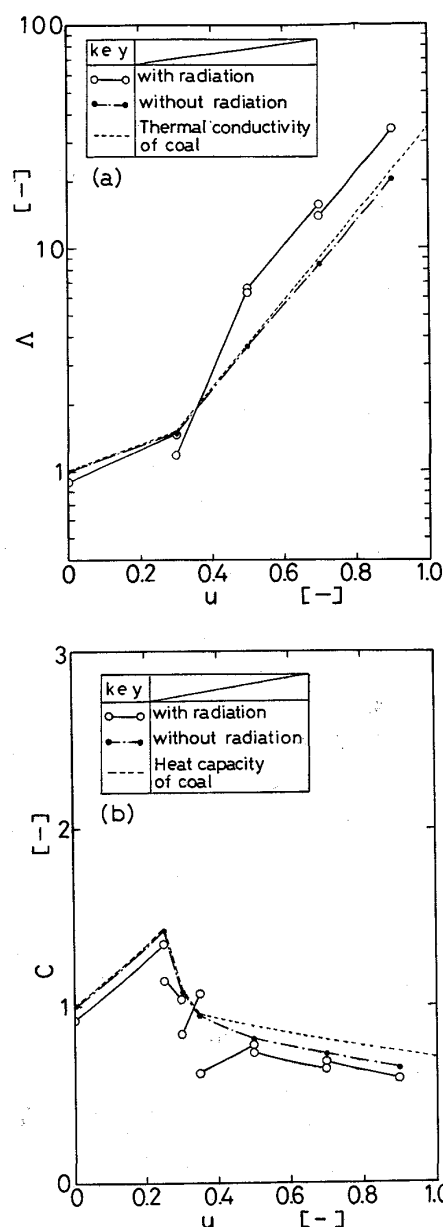


Fig. 9. Temperature dependencies of the estimated properties (with fissures).

性値を温度だけの関数と見なすことに無理があるためである。例えば、Fig. 3 に示した温度分布において温度が  $u=0.7\sim0.8$  のゾーンは、 $\tau=0.04$  で吸熱作用を行う炉壁付近に位置するが、 $\tau=0.12$  では発熱作用を行うき裂先端付近に位置している。このように同じ温度であつても位置あるいは時間によって異なる熱物性値を示すため、今回のように熱物性値を温度のみの関数で与えた場合、最小 2 乗法の収束性が悪化する。

#### 4.4 熱分解ガス流れを伴う場合の推算結果

熱分解ガス流れがある場合の推算結果を Fig. 10 に示した。点線は石炭の各熱物性値であり、実線はガスが炭

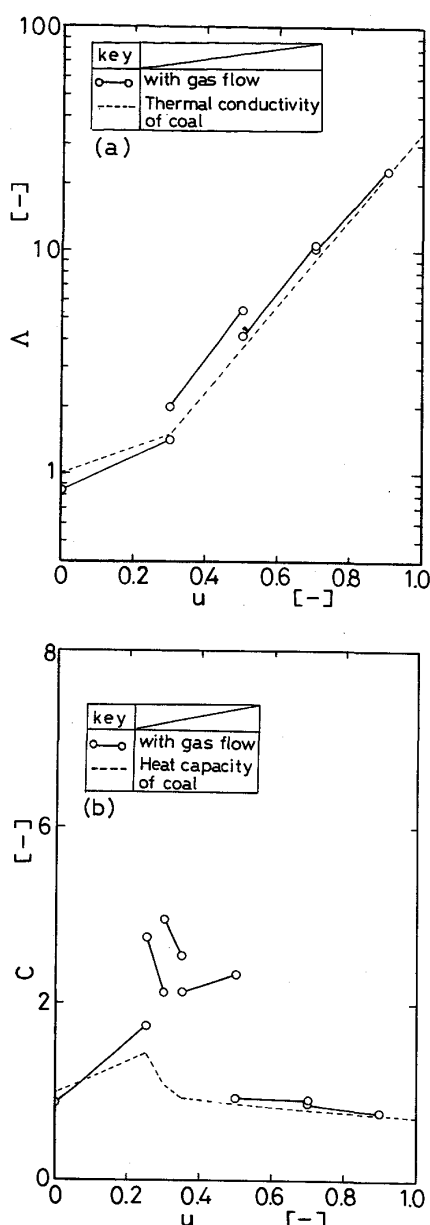


Fig. 10. Temperature dependencies of the estimated properties (with gas flow).

化室壁へすべて流出する場合 (Case I) の各熱物性値である。したがって、実線と点線との差がガス流れの各熱物性値へ与える影響を示す。いずれの熱物性値もガス発生が多い温度区間 ( $u=0.2\sim0.6$ ) で大きい値を示している。総括熱容量が大きいのは、前記のごとく炉壁方向へのガス流れが吸熱源として作用するためである。しかし、炭化室中心付近では、ガス発生がほとんど終了する  $u=0.5$  までしか吸熱源を持たないのに対して、炉壁付近では、炉内全体の熱分解反応が終了する比較的高温 ( $u\approx0.8$ ) まで吸熱源を有することになる。したがって、き裂の場合と同様に、この場合の熱物性値も位置、時間

等に影響される。

## 5. 結 言

き裂及び熱分解ガス流を考慮した伝熱モデルを用いて、炭化室内温度分布を計算した。その結果、き裂内の輻射伝熱及び炉内ガス流れは、炉内温度分布に大きな影響を及ぼすことがわかった。従って、実炉の伝熱解析にはそれらの影響を加味する必要がある、そのためにはまずき裂の生長過程、熱分解ガスの流動挙動を定量化することが望まれる。次に、実炉のように温度分布が大きな測定系に対して有効な熱物性値推定法を開発し、上記の数値実験結果から熱物性値を推算した。その結果を用いて、実炉データより推算される熱物性値には、マクロき裂の生長による輻射伝熱および熱分解ガス流れによる対流伝熱の影響が混入し、さらに、そのような熱物性値は時間、位置等によって異なることを説明した。すなわち、実炉データから推算される熱物性値は、特定の装置及び条件のみに適用できる装置定数であるといえ、それらを普遍的なものとなし伝熱解析で使用することは避けるべきであろう。

## 記 号

- $A_k, A_l$ : 温度係数  $[1/K]$
- $a_c$ : 塊コークスの幅の半値  $[m]$
- $a_f$ : き裂幅の半値  $[m]$
- $b_c$ : 炭化室幅の半値  $[m]$
- $b_f$ : き裂長さ  $[m]$
- $b_w$ : 炉壁レンガの幅  $[m]$
- $C$ : 無次元熱容量  $(= (Ch(\theta)/Ch_{cc}(\theta_0))) [-]$
- $Ch$ : 熱容量  $(= C_p \rho)$   $[J/KgK]$
- $C_p$ : 比熱  $[J/m^3K]$
- $E_b$ : 黒体の輻射熱量  $[W/m^2]$
- $F$ : 形状関数  $[-]$
- $J$ : 射度  $[W/m^2]$
- $l_x, l_y$ : 境界面に垂直な単位ベクトルの  $x, y$  成分  $[-]$
- $\dot{m}_v$ : ガスの質量流速  $[kg/m^2s]$
- $N_b$ : 境界要素の個数  $[-]$
- $p$ : 射出率  $[-]$
- $Q_r$ : 無次元熱流束  $(= q_r b_c / \{\lambda_{cc}(\theta_0)(\theta_w - \theta_0)\}) [-]$
- $q_r$ : き裂表面からの真の熱流束  $[W/m^2]$
- $q_w$ : レンガからの熱流束  $[W/m^2]$
- $S$ : 境界面  $[-]$
- $u$ : 無次元温度  $(= (\theta - \theta_0)/(\theta_w - \theta_0)) [-]$
- $W$ : 原炭単位重量あたりに生成するガス重量  $[Kg\text{-}gas/Kg\text{-}coal]$
- $X, Y$ : 無次元  $X, Y$  軸 ( $X = x/b_c, Y = y/b_c$ )  $[-]$
- $x, y$ :  $x, y$  軸  $[m]$
- $\theta$ : 温度  $[K]$
- $\theta_0$ : 炭化室内の初期温度  $[K]$
- $\theta_w$ : 炉壁レンガの表面温度  $[K]$
- $K$ : 無次元有効熱拡散率  $(= \kappa(\theta)/\kappa_{cc}(\theta_0)) [-]$
- $\kappa$ : 熱拡散率  $[m^2/s]$

$\Lambda$  : 無次元有効熱伝導度 ( $=\lambda(\theta)/\lambda_{cc}(\theta_0)$ ) [-]

$\lambda$  : 熱伝導度 [W/mK]

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau$  : 無次元時間 ( $=\kappa_{cc}(\theta_0)t/b_c^2$ ) [-]

添字

0 : 初期値

cc : 石炭層あるいはコークス層の値

eff : 有効値

g : ガスの値

w : 炉壁れんがの値

## 文 献

- 1) B. ATKINSON and D. MERRICK: Fuel, **62** (1983), p. 553
- 2) W. KLOSE: Glückauf-Forschungshefte, **45** (1984), p. 35, p. 91
- 3) 西岡邦彦, 吉田周平, 播木道春: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 358
- 4) 例えば, S. YAGI, D. KUNII and N. WAKAO: AIChE J., **6** (1960), p. 543
- 5) J. KASPERCZYK and W. SIMONIS: Glückauf-Forschungshefte, **32** (1971), p. 23
- 6) 山田健彦, 大木 巖, 奥井信之, 田村洋一, 高島啓行, 越後格之: 燃料協会誌, **56** (1977), p. 36
- 7) A. D. MAMROSOV, D. I. KIRYAKOV, I. G. KUPRIENKO and I. M. KHANIN: Solid Fuel Chem. (U. S. S. R), **14** (1980), p. 56
- 8) J. P. HOLMAN: Heat transfer, 4th edit. (1976), p. 273 [MacGraw Hill]
- 9) 三浦隆利, 深井 潤, 松林久雄, 大谷茂盛: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 1872
- 10) Y. Y. FILONENKO, V. I. EREMOV and V. N. SHARIPOV: Coke and Chem. (1975), p. 15
- 11) 三浦隆利, 深井 潤, 大谷茂盛: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 336
- 12) 深井 潤, 三浦隆利, 大谷茂盛: 化学工学論文集, **11** (1985), p. 314
- 13) H. CHEUNG, L. A. BROMELEY and C. R. WILKE: AIChE J., **8** (1961), p. 221
- 14) Y. S. TOULOUKIAN: Thermophysical Properties of matter (1970) [Plenum Press]
- 15) 矢木 栄, 国井大蔵: 工業窯炉 (1956), p. 12 [共立出版]
- 16) 深井 潤, 渡辺 実, 三浦隆利, 大谷茂盛: 化学工学論文集, **11** (1985), p. 84
- 17) 三浦隆利, 杉山和央, 深井 潤, 高島武雄, 飯田嘉宏, 大谷茂盛: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 538
- 18) H. S. CARSLAW and J. C. EAGER: Conduction of Heat in Solids, 2nd edit. (1959), p. 101 [Oxford Press]