

論 文

UDC 622.785.7

数式によるシミュレーションを用いた焼結過程の検討*

浜田 尚夫**・小坂橋寿光**・岡部 俠児**

Investigations of the Sintering Process by Applying of Mathematical Simulation

Takao HAMADA, Toshimitu KOITABASHI, and Kyoji OKABE

Synopsis

In the sintering process of iron ore, various phenomena take place simultaneously, i. e. combustion, heat transfer, decomposition, fusion, and solidification. In order to clarify the relations between each phenomena, a simplified comparison between the results of the experiment by the use of sintering pot and of the calculation by the use of mathematical simulations was carried out, and the following conclusions were deduced.

- (1) The heat-front speed was influenced by mass velocity of gas and heat-transfer coefficient.
- (2) The reaction velocity of coke combustion in sintering layer was lower than that proposed by HOTTEL for carbon sphere.
- (3) From the result of examination of the heat-transfer coefficient calculated and observed, it was concluded that the heat transfer by radiation and combustion should be taken into consideration.
- (4) The fusion and solidification were represented as a mathematical expression in the model. The portion of not-fused ore grain, remained lime stone and pore in sintered ores were measured and these values agreed with the calculated results.

(Received Nov. 16, 1971)

1. 緒 論

高炉原料中焼結鉱の使用割合は多く、高炉操業に大きな影響を与えている。焼結鉱の研究には鉱物学的な物性の研究や、化学工学的な生産の研究がある。後者の研究は、焼結過程は主として伝熱と化学反応よりなるとし、実験により温度経過を知るか、数式により過程を記述することが多い。深川、楯岡ら¹⁾は充填層内のガス-固体間の伝熱の解析により層内温度分布の時間変化を求めている。榎、樋口^{2)~4)}はコークスの燃焼反応速度、乾燥速度を考慮した数式をたて解析を行なっている。さらに、塚本、樋口ら⁵⁾は、石灰石の分解反応速度、鉱石の溶融凝固現象を考慮に入れて数式をたて、操業に影響を与える要因の解析を行なっている。一方実験を主とした研究ではVOICE, WILD^{6)~7)}は溶融や化学反応を起こさないアルミナなど酸化物の小型鍋内での温度挙動を測定し、コークスなど燃料の影響を求めている。三本木、西田ら⁸⁾は各種鉱石を原料にし小型鍋で焼結した際の熱移動について解析している。

これらの研究で用いられる数式や定数値の評価は、数

値解析結果にもとづく焼結温度分布の変化などを実測値と比較することで行なわれている。しかし焼結の過程は複雑であり、最終結果としての温度分布を比較するだけでは不十分であり、ガス-固体の伝熱、コークスの燃焼、鉱石や石灰石の分解、溶融、凝固などについて試験鍋での単純化した過程の実測値と計算値の比較による評価を行なうことが大切と考えられる。

2. 数式によるシミュレーション

数式によるシミュレーションは、焼結中に起こる伝熱量、反応量、溶融量などを表わすことによって焼結過程を表わす方式であり、すでに多くの報告がある^{1)~5)}。今回、伝熱や溶融など各単位ごとに数式や数式中に用いた定数などの妥当性を試験鍋での実測値と比較検討することを目的としたので、試験鍋の挙動を表わす数式をたてた。

数式を導くにあたって次の仮定をおいた。

- * 昭和45年10月本会講演大会にて発表
昭和46年11月16日受付
- ** 川崎製鉄(株)技術研究所

(1) 炉壁からの熱損失はないものとし、半径方向の分布は均一とする。

(2) 伝熱は対流伝熱のみとする。

(3) 粒子内の温度分布は均一とする。

(4) ガス および 粒子の物性定数は 焼結中一定とする。

以上の仮定にもとづき各過程ごとに数式をたてる。まず原料に水分を含んでいる期間中、ガスと固体の含熱量の変化、ガス-固体間の伝熱量と乾燥に必要な熱量などについて次の5式がなりたつ。

$$\left(\begin{array}{l} \text{空隙中のガス含} \\ \text{熱量の時間変化} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{l} \text{ガスの含熱量の} \\ \text{高さ方向の変化} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{ガスから個} \\ \text{体への伝熱} \end{array} \right)$$

$$\epsilon \rho_g C_g \partial T / \partial \theta = -G_g C_g \partial T / \partial z - ha(T-t) \quad \dots (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{固体の含熱量} \\ \text{の時間変化} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{ガスから固} \\ \text{体への伝熱} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{乾燥にとりな} \\ \text{う消費熱量} \end{array} \right)$$

$$\rho_M C_M (1-\epsilon) \partial t / \partial \theta = ha(T-t) - R_w \Delta H_w \quad \dots (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{固体の含水率の変化} \\ \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{l} \text{乾燥速度} \\ \end{array} \right)$$

$$\rho_M (1-\epsilon) \partial w / \partial \theta = -R_w \quad \dots (3)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{空隙中のガス} \\ \text{の湿分変化} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{固体からの} \\ \text{蒸発水分} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{流通ガスの} \\ \text{湿分の変化} \end{array} \right)$$

$$\epsilon \rho_g \partial H / \partial \theta = R_w - G_g \partial H / \partial z \quad \dots (4)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{乾燥速度} \\ \end{array} \right)$$

$$R_w = (ha / \Delta H_w) (T-t) w_a / w_c \quad \dots (5)$$

恒率乾燥期では $w_a = w_c$ 、減率乾燥期では $w_a = w$ とする。乾燥速度は伝熱律速とする。

乾燥終了後のガスと鉱石などの含熱量の変化、ガス-固体間の伝熱量、鉱石などの熔融凝固熱、コークスの燃焼などを考慮して次の8式がなりたつ。

$$\left(\begin{array}{l} \text{空隙中のガス} \\ \text{含熱量の変化} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{l} \text{ガスの含熱} \\ \text{量の変化} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{ガスから鉱石} \\ \text{への伝熱量} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{ガスから石灰} \\ \text{石への伝熱量} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{ガスからコーク} \\ \text{スへの伝熱量} \end{array} \right)$$

$$\epsilon \rho_g C_g \partial T / \partial \theta = -G_g C_g \partial T / \partial z - h_1 a_1 v_1 (T-t_1) - h_L a_L v_L (T-t_L) - h_c a_c v_c (T-t_c) \quad \dots (6)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{鉱石の含熱} \\ \text{量の変化} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{ガスから鉱石} \\ \text{への伝熱量} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{鉱石の溶} \\ \text{融潜熱} \end{array} \right)$$

$$+ \left(\begin{array}{l} \text{鉱石の凝} \\ \text{固潜熱} \end{array} \right)$$

$$\rho_I c_I v_I (1-\epsilon) \partial t_I / \partial \theta = h_1 a_1 v_1 (T-t_1) - R_m \Delta H_m + R_s \Delta H_s \quad \dots (7)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{コークス粒子の} \\ \text{含熱量の変化} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{ガスからコーク} \\ \text{スへの伝熱量} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{コークス} \\ \text{の燃焼熱} \end{array} \right)$$

$$\rho_C C_C v_C (1-\epsilon) \partial t_C / \partial \theta = h_c a_c v_c (T-t_c) + R_c \Delta H_c \quad \dots (8)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{石灰石の含} \\ \text{熱量の変化} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{ガスから石灰} \\ \text{石への伝熱量} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{石灰石の} \\ \text{分解熱} \end{array} \right)$$

$$\rho_L C_L v_L (1-\epsilon) \partial t_L / \partial \theta = h_L a_L v_L (T-t_L) - R_L \Delta H_L \quad \dots (9)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{空隙中の } O_2 \\ \text{量の変化} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{流通ガスの} \\ \text{ } O_2 \text{ 量の変化} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{コークスの} \\ \text{燃焼速度} \end{array} \right)$$

$$\epsilon C_O \partial f / \partial \theta = (G_g C_O / \rho_g) (\partial f / \partial z) - R_c \quad \dots (10)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{コークス粒} \\ \text{子径の変化} \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{l} \text{コークスの} \\ \text{燃焼速度} \end{array} \right)$$

$$4\pi r^2 \partial r / \partial \theta = - (M_c / \rho_c n_c) R_c \quad \dots (11)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{充填層単位体積当たりのコークスの燃焼速度} \\ \end{array} \right)$$

$$R_c = 4\pi r^2 n_c k_s C_O \delta (1-f) \quad \dots (12)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{石灰石の分解反応速度} \\ \end{array} \right)$$

$$R_L = (r_L h_L a_L v_L / \Delta H_L) (T-t_L) \quad \dots (13)$$

3. アルミナ球充填層やアルミナ球とコークスの混合充填層内の伝熱と燃焼

焼結過程を表わす数式によるシミュレーションの中でガス-固体間の伝熱現象とコークスの燃焼を含んだ伝熱現象とに注目し、実験を行なつて数式によるシミュレーションの妥当性を評価した。

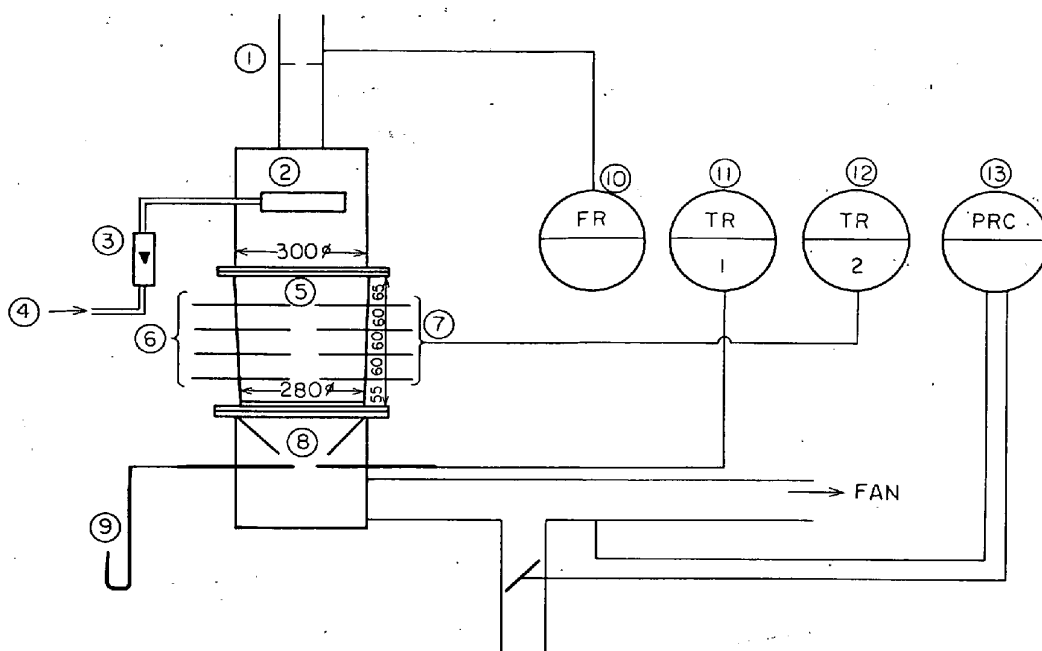
まず、形状が一定で溶融しにくいアルミナ球を試験鍋に充填し、一定流量の高温ガス流下でガスとアルミナ球温度の変化を測定した。つぎに、アルミナ球とコークスを混合して充填し、一定流量の空気を送つて燃焼させ同様の測定を行なつた。アルミナ球内の温度がほぼ均一であることは球内温度分布を求める非定常伝熱の計算によって確かめた。

3.1 実験装置と実験結果

Fig. 1 に実験に用いた試験鍋と測温位置を示す。測温はガスとアルミナ球について行なつた。試験鍋にアルミナ球 (粒径 10 mm) を 39 kg 充填し、上層にコークス 1 kg を入れ、燃焼させて高温ガスの源とした (実験 A)。空気流量は一定とし、4 水準 (2.5, 3.5, 4.5, 8.0 Nm³/min) とした。次にコークスを 3% 混合して充填し燃焼をとらぬ伝熱について調べた (実験 B)。実験 A の測温結果の一例を Fig. 2 に、実験 B を Fig. 3 に示す。

3.2 数式によるシミュレーションとの対比

アルミナ球やアルミナ球とコークスの混合物の充填層の伝熱と燃焼をあらわす数式は上記 (1)~(13) 式のうち、鉱石をアルミナ球と同一種の固体とし、乾燥、分解、熔融、凝固の現象がおこらないので、(2) 式の $R_w \Delta H_w = 0$ 、(3)~(5) 式含まず、(6) 式の $h_1 a_1 v_1 = 0$ 、(7) 式の $R_m = 0$ 、 $R_s = 0$ 、(9)、(13) 式含まずとした式である。さらに充填層のガス-固体の対流伝熱係数 h は



- ① Orifice
- ② Ignition furnace
- ③ Gas flow meter
- ④ Coke-oven gas
- ⑤ Sintering pot
- ⑥ Temperature measuring for alumina ball
- ⑦ Gas temperature measuring
- ⑧ Wind box
- ⑨ Manometer
- ⑩ Measure recorder for inlet air flow
- ⑪ Waste gas temperature
- ⑫ Measure recorder for sintering zone temperature
- ⑬ Suction pressure control

Fig. 1. Apparatus for sintering experiments.

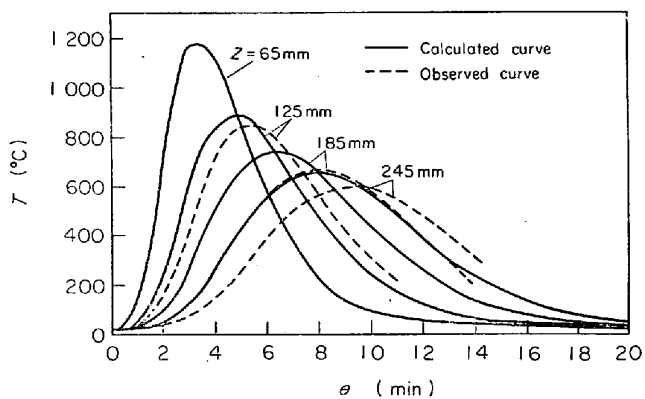


Fig. 2. Calculated and observed temperature curve on experiment A.

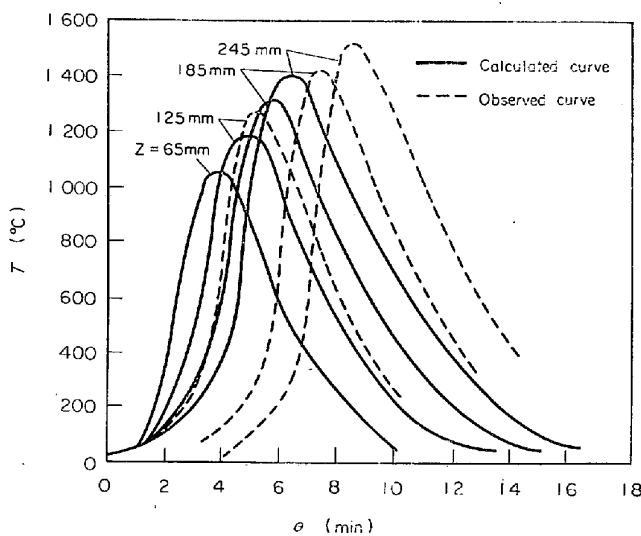


Fig. 3. Calculated and observed temperature curve on experiment B.

$$h = (\bar{k}/D_p \epsilon) (2 + 0.75 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \dots\dots\dots (14)^9$$

となり、これを(6)式に代入すると(6)式の左辺の空隙中ガスの含熱量の時間経過にもなう変化は他の項の 10^{-3} ないし 10^{-5} のオーダーで小さく無視できる。すなわち

$$-G_g C_g \partial T / \partial z - h a (T - t) = 0 \dots\dots\dots (6)'$$

これら方程式は独立変数を高さ z (上から下方向を正) 時間 θ とした連立一次偏微分方程式であり、アナログ計算機 (ALS-505) を用いて解いた。解法上高さ z について 3cm ごとに全層を 10 層にわけ、各層内の挙動は同一とし、層ごとに計算した。(N-1) 層のガス温度変化

を N 層に入るガス温度変化として与え N 層を計算する。今回の計算では最上層のガス温度変化を初期条件として与え、順次各層の計算を行なった。方程式は時間 θ の常微分方程式となり時間 θ の前進差分法により演算回路を組んだ。

実験 A と実験 B に対応するガス温度の計算結果を Fig. 2, Fig. 3 にそれぞれ測定結果とともに示す。

実験 A をあらかず (6)' 式と (7) 式からガス-固体

の伝熱の項を消去すると

$$\partial t_s / \partial \theta = - (G_g C_g / C_s \rho_b) (\partial T / \partial z) \dots\dots\dots (15)$$

となる。いま、ガスの伝熱係数 h が大きくなり、ガスと固体の温度 T , t_s が等しくなると (15) 式から

$$\left(\frac{\Delta z}{\Delta \theta} \right)_{h \rightarrow \infty, T = t_s = \text{一定}} = - \left(\frac{G_g C_g}{C_s \rho_b} \right) \dots\dots\dots (16)$$

したがって左辺 ($\Delta z / \Delta \theta$) はガス温度の移動速度をあら

わし heat front speed (H·F·S) という。ガス温度の移動速度は一定のガス温度すなわち 100°C ⁶⁾ または最高温度⁸⁾ の移動速度を表わす場合がある。実験 A, B についての最高温度の H·F·S の実測値と計算値を Fig. 4 に示す。H·F·S は伝熱係数 h と空気流量によつて変化する。H·F·S と h の関係から (Fig. 5) h は約 $200 \text{ kcal/m}^2\text{hr deg}$ 以上では (16) 式がなりたつことがわ

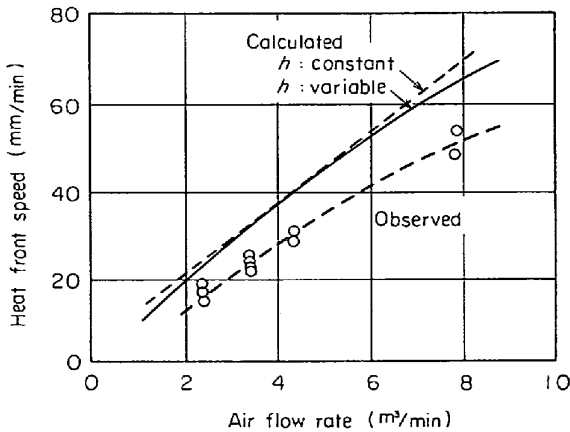


Fig. 4. Calculated and observed results on the relation between heat front speed and air flow rate.

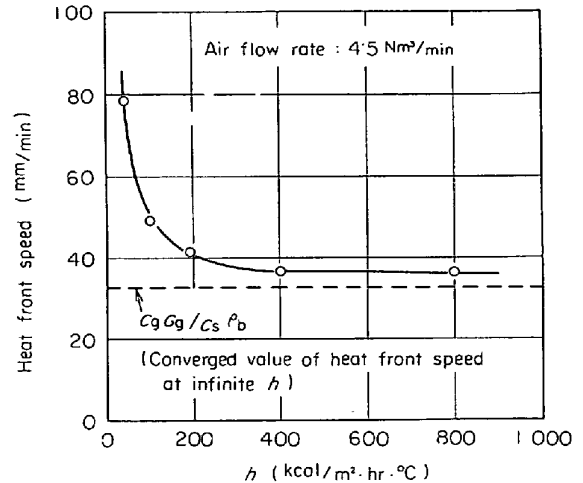


Fig. 5. Comparison of heat front speed and heat transfer coefficient.

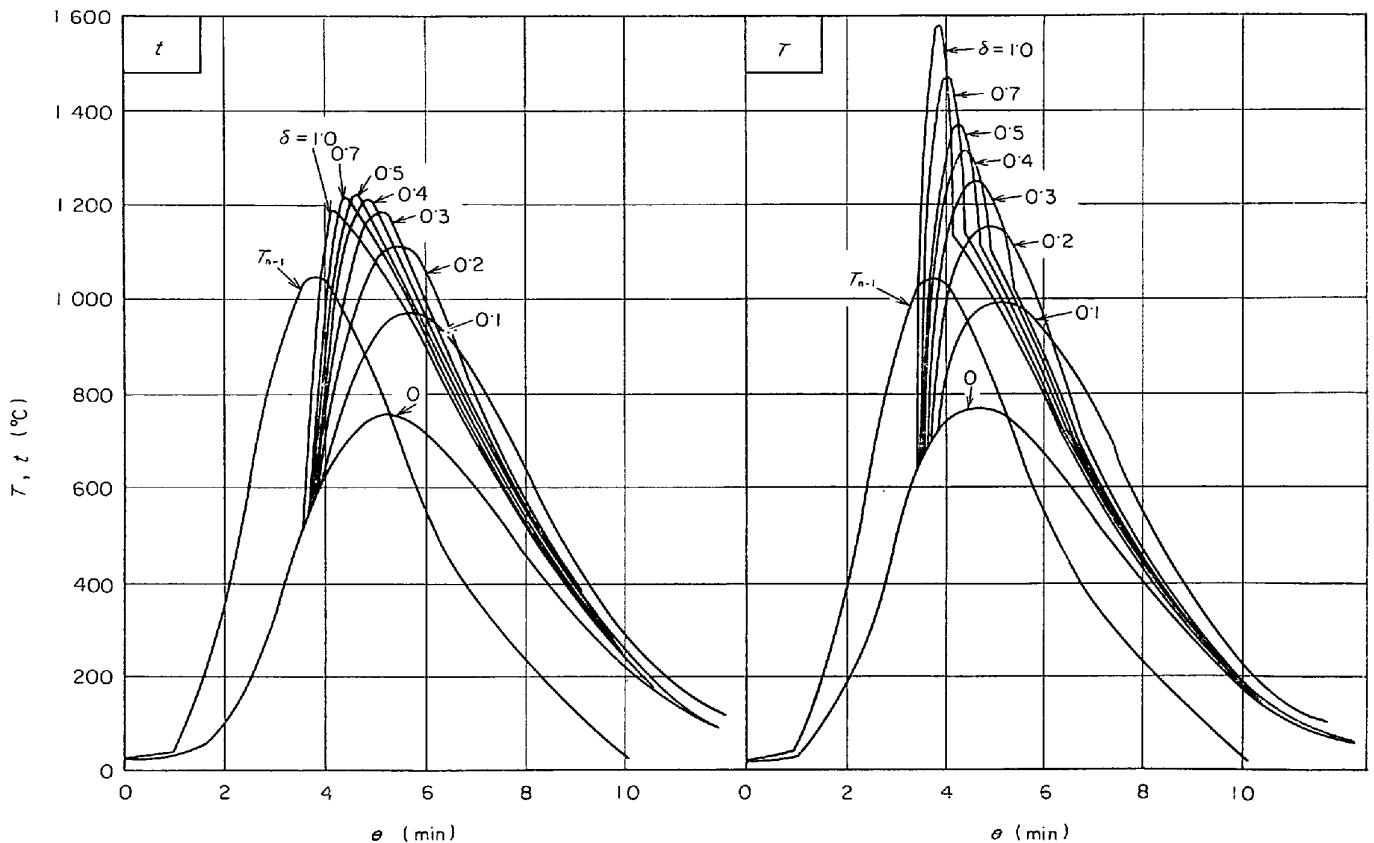


Fig. 6. Effects of the alternation of δ on the gas and solid temperature.

かる。H・F・S と空気流量の関係 (Fig. 4) は実測値とかなりよく一致していることから (14) 式の妥当性が確かめられる。

実験 B に含まれるコークスの燃焼速度をあらわす (12) 式中の燃焼速度定数 k_s を化学反応速度定数 k_c とガス境膜内物質移動係数 k_D の和として

$$k_s = 1 / \left(\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_D} \right) \dots\dots\dots (17)$$

となる。化学反応速度定数 k_c として PARKER, HOTTEL¹⁰⁾ の炭素球の燃焼実験の結果を用いる。

$$k_c = \left(\frac{6.42 \times 10^{11}}{\sqrt{t_c + 273}} \right) \exp \left(- \frac{44000}{R(t_c + 273)} \right) \dots (18)$$

ガス境膜内物質移動係数⁹⁾ は

$$Sh_c = 2.0 + 0.75 Re^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (19)$$

から求められる。 k_c を求めた実験は単一球の炭素を対象にしており、充填層中コークスの燃焼にそのまま適用できないと考え (12) 式中補正係数 δ を導入した。 δ を 1.0 から順次小さくするとガスと固体の温度は Fig. 6 のように変化し、H・F・S は遅くなる。この温度曲線が実測値に近くなるように検討した結果、 $\delta = 0.2$ を選

んだ。

4. 数式によるシミュレーションと実測値との比較

焼結過程のうちコークスの燃焼、ガス-固体の伝熱、鉱石の熔融反応などをあらわした (1)~(13) 式のうち鉱石の熔融と凝固を除いた式からガス、コークス、鉱石石灰石の最高温度、ガスの昇温速度、冷却速度に対する各種要因の影響について計算した (Fig. 7)。この計算に対応すべく Fig. 1 の試験鍋で同一粒径の鉱石を装入し、焼結してガス温度の測定を行ない計算値と比較した。 Fig. 8 にガス温度の時間経過を示す。ガスの最高温度、焼結時間、昇温・冷却速度に対する各要因の影響を Fig. 9 に示す。コークス配合率を増加すると最高温度の計算値と測定値がいずれも上昇する。また、空気流量が大きいほど最高温度は低い。コークス配合率を増加すると昇温速度が増加し焼結時間が低下するようすは計算値が測定値と一致する。実測結果では水分添加割合を増加し 5% を越えると最高温度、昇温速度が減少し、したがって焼結時間が延長するが計算によつては確かめられな

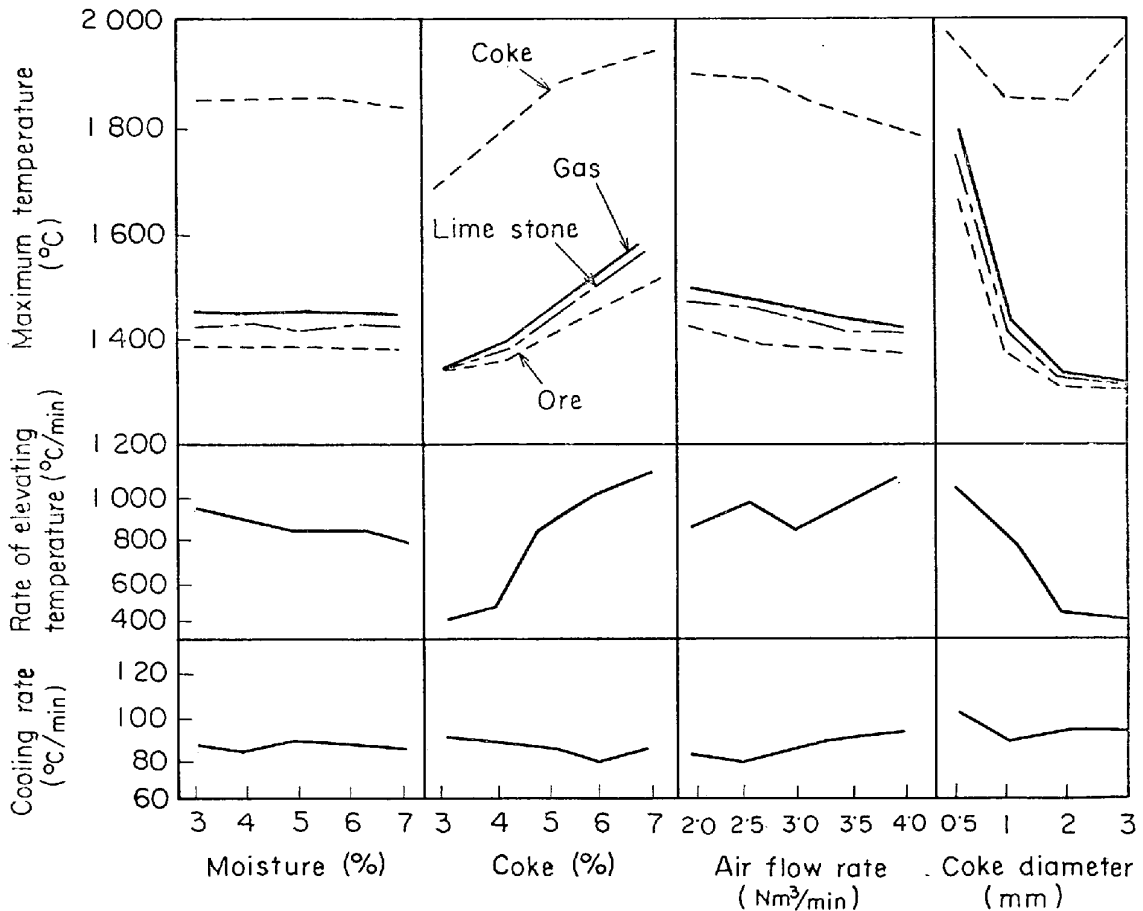


Fig. 7. Effects of the operating conditions on the process variables calculated by mathematical model.

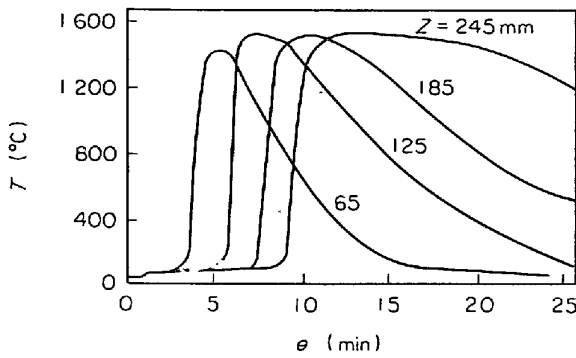


Fig. 8. Example of gas temperature curve at the sinter pot.

い。コークス 粒径を 増加すると、計算によれば 最高温度、昇温速度ともに低下するが実測値には変化はあらわれない。

5. 焼結中の固体の昇温・分解・熔融・凝固

鉱石などへの高温ガスからの対流伝熱量は 3 章のアル

ミナ球充填層中の伝熱により定まる。そこで、実際の原料中での受熱量と対流伝熱量との差異、また石灰石の分解反応と伝熱量の関係を知るために試験鍋中に形の定まった原料を装入し、昇温や分解反応の現象を単純化し、数式によるシミュレーションの計算結果と比較した。さらに昇温後に起こる鉱石や石灰石などの熔融や凝固の現象は焼結鉱の品質や生産に大きな影響を与えるので熔融に付随する現象の数式によるシミュレーションを行ない実測値との比較を行なった。

5.1 鉱石、石灰石、コークスの昇温と分解

Fig. 1 の試験鍋を用い、通常の焼結原料中に 1 辺 10 ~ 30 mm の立方体に整形し熱電対をそう入した鉱石、石灰石、コークスを数個入れ測温した。測定結果を Fig. 10 に示す。昇温期に比して冷却期に測定値のばらつきが大きい。数式によるシミュレーション中、(7)(8)(9)(11)(12) 式の固体の表面積や体積の項に上記整形した立方体の値を代入し以下の式となる。

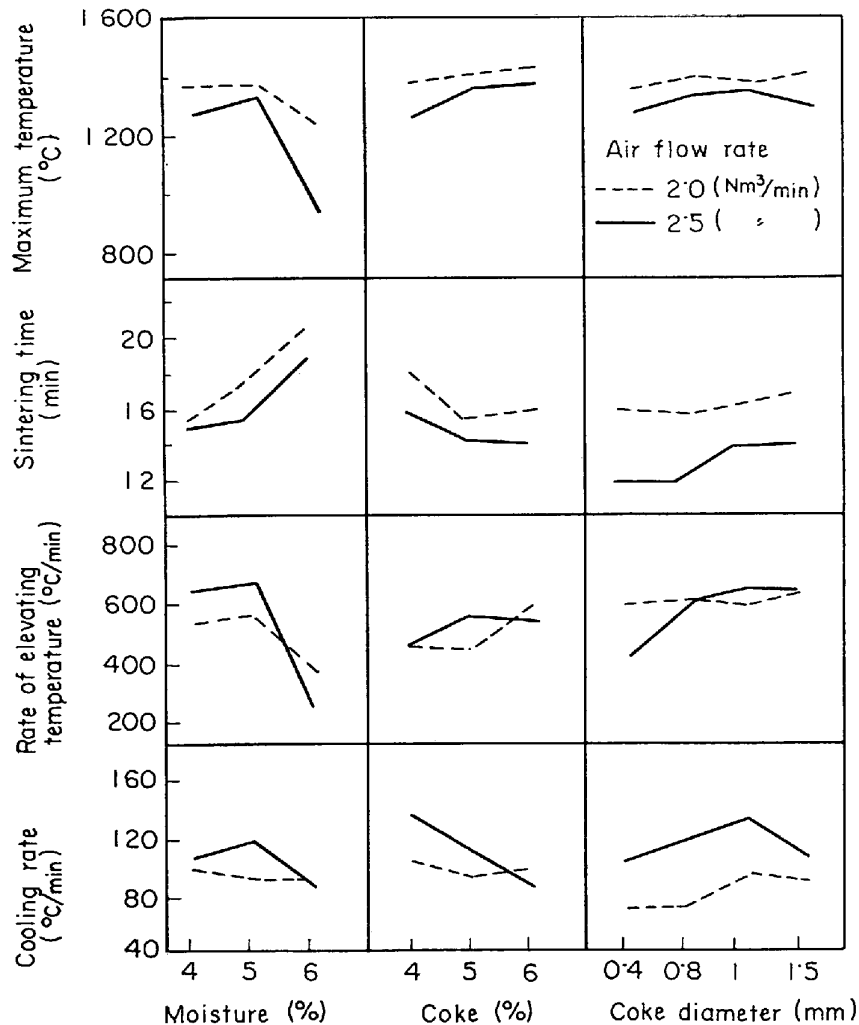


Fig. 9. Effects of the operating conditions on the process variables experimented with sinter pot.

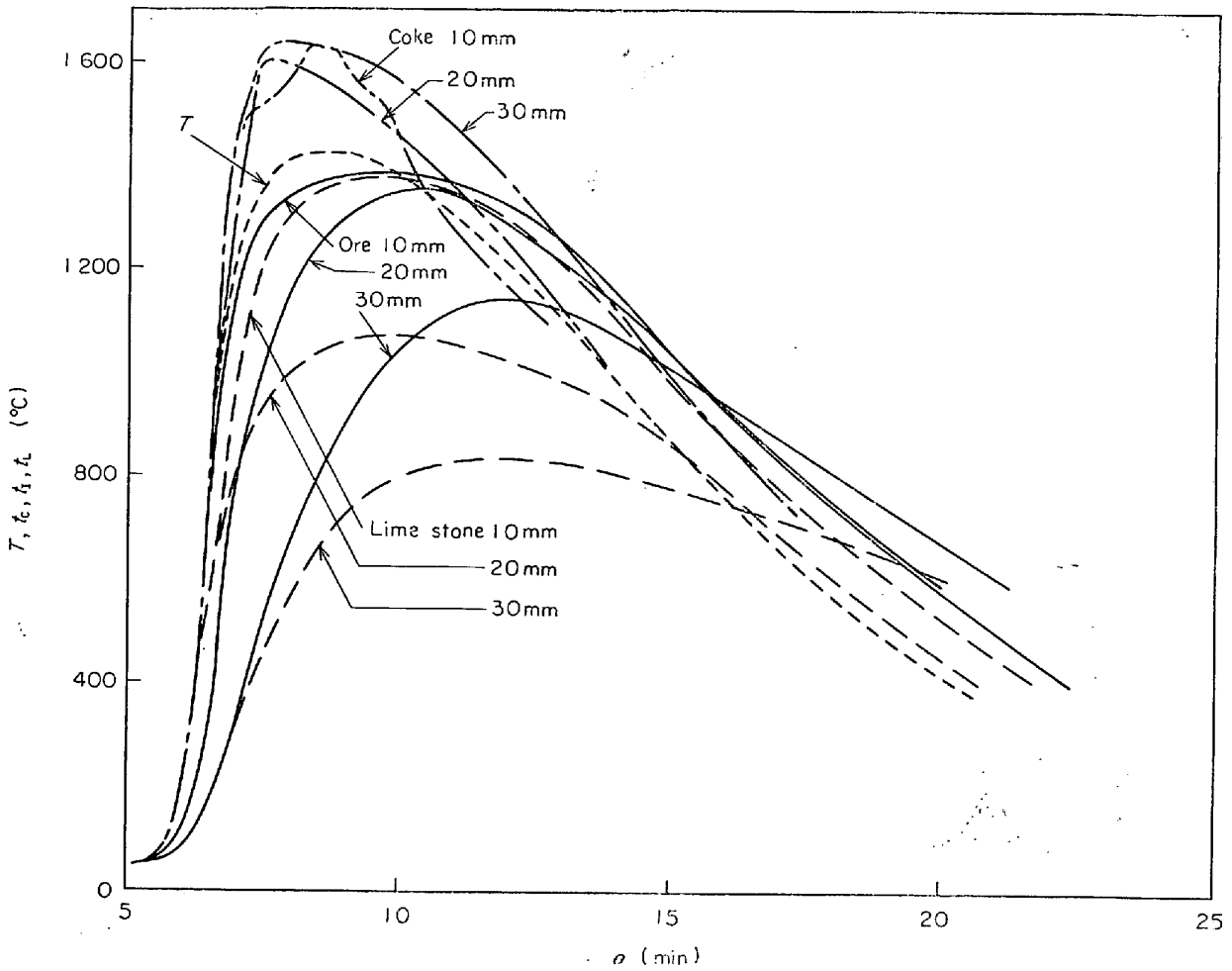


Fig. 10. Measured temperature variations of coke, ore and lime stone in the sinter pot.

(鉱石の含熱量の変化) = (ガスから鉱石への伝熱量) - (鉱石の溶融潜熱) + (鉱石の凝固潜熱)

$$L^3 C_I \rho_I dt_I / d\theta = 6L^2 h_I (T - t_I) - R_m \cdot \Delta H_m + R_s \cdot \Delta H_s \dots (7)'$$

(コークス粒子の含熱量の変化) = (ガスからコークスへの伝熱量) + (コークスの燃焼熱)

$$L^3 C_C \rho_C dt_C / d\theta = 6L^2 h_C (T - t_C) + R_{CL} \cdot \Delta H_C \dots (8)'$$

(石灰石の含熱量の変化) = (ガスから石灰石への伝熱量) - (石灰石の分解熱)

$$L^3 C_L \rho_L dt_L / d\theta = 6L^2 h_L (T - t_L) - R_L \cdot \Delta H_L \dots (9)'$$

(コークス粒子の半径の変化) = - (コークスの燃焼速度)

$$3L^2 dL / d\theta = - (M_C / \rho_C) R_{CL} \dots (11)'$$

(コークスの燃焼速度)

$$R_{CL} = 6L^2 k_s C_O \delta (1 - f) \dots (12)'$$

鉱石の溶融量は少なく、したがって昇温速度から伝熱係数が求まる。鉱石 10 mm の場合を Fig. 11 に示す。このようにして求めた伝熱係数を理論式と比較し Fig.

12 に示す。3章のアルミナ球充填層の場合と異なり理論式の約2倍の値を示した。これは対流伝熱以外に輻射や伝導の伝熱の影響を無視できないことを示唆している。

石灰石の伝熱機構や分解機構には不明な点が多い¹¹⁾。測定した石灰石の温度変化は粒径に依存することを示している。粒内の温度と反応が均一であるとした(9)'式に代わって分解反応が伝熱により律速されるとして次式をたてた。石灰石を球とし、非定常伝熱の式から

(伝熱量) = (昇温に必要な熱量) + (分解反応に必要な熱量)

$$k_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial r_L^2} + \frac{2}{r_L} \frac{\partial t_L}{\partial r_L} \right) = \rho_L C_L \frac{\partial t_L}{\partial \theta} + R_L \cdot \Delta H_L \dots (20)$$

伝熱量のうち分解反応に必要な熱量の割合を γ_L とし分解反応温度以下では $\gamma_L = 0$ だが、以上では $\gamma_L \geq 0$ とする。

$$(1 - \gamma_L) k_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial r_L^2} + \frac{2}{r_L} \frac{\partial t_L}{\partial r_L} \right) = \rho_L C_L \frac{\partial t_L}{\partial \theta} \dots (21)$$

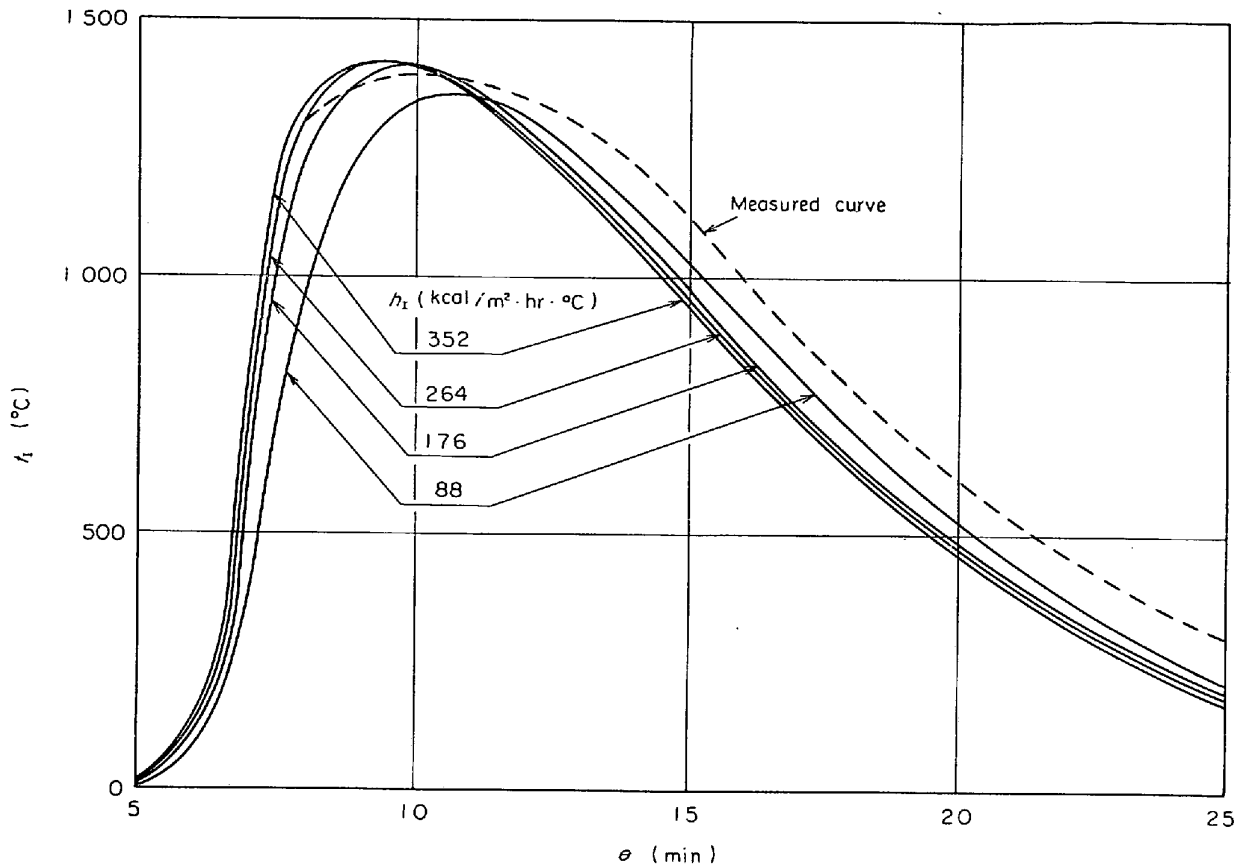


Fig. 11. Measured curve of ore temperature compared with calculated one for each heat transfer coefficient (ore diameter 10 mm).

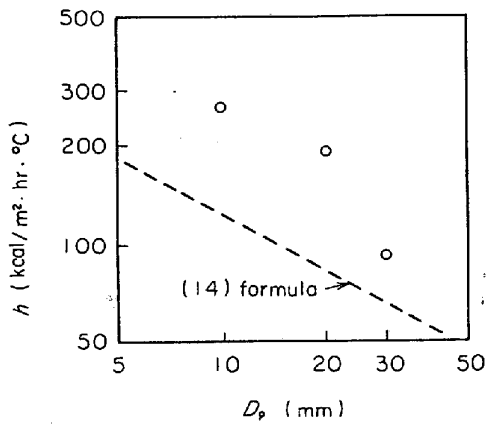


Fig. 12. Comparison of heat transfer coefficients calculated and observed (air flow rate 2Nm³/min).

$$\gamma_L k_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial r_L^2} + \frac{2}{r_L} \frac{\partial t_L}{\partial r_L} \right) = R_L \cdot \Delta H_L \quad \dots \dots \dots (22)$$

単位体積の石灰石の分解反応が θ_1 で開始し θ_2 で終了すると (22) 式中右辺の分解速度が積分され密度と等しくなる。

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \gamma_L k_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial r_L^2} + \frac{2}{r_L} \frac{\partial t_L}{\partial r_L} \right) d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} R_L \cdot \Delta H_L d\theta$$

$$= \rho_L \cdot \Delta H_L \quad \dots \dots \dots (23)$$

$$\text{初期条件: } \theta=0; t_L=t_L^0 \quad \dots \dots \dots (24)$$

境界条件:

$$r_L=R_L; h_L(T-t_L) = -k_L(\partial t_L/\partial r_L) \quad \dots \dots \dots (25)$$

$$r_L=0; (\partial t_L/\partial r_L)=0 \quad \dots \dots \dots (26)$$

表面においてガスから境膜伝熱をうけるとし、粒内を4層に分けて計算し、実測値と比較すると Fig. 13 となり γ_L がかなり小さいことを示唆している。

5.2 鉱石と石灰石の溶融・凝固

鉱石や返鉱は高温では石灰石やコークス灰とともに低溶融点の化合物を作り、溶融した後低温で凝固するが、一部は未溶融のまま溶融相に囲まれる。溶融した割合、組成、未溶融物の状態、凝固の際の気孔の状態は焼結鉱の生産や品質に大きな影響を与える。そこで溶融・凝固の現象を数式によるシミュレーションで表わし、測定結果と対比して妥当性を調べた。

5.2.1 実験装置と実験方法

前述の装置に比して小型の試験鍋 (径 120 mm ϕ , 装入量 8 kg) にて Table 1 に示したように粒径や配合を変えた装入物を焼結し、終了後冷却しつつ上部からエピコ

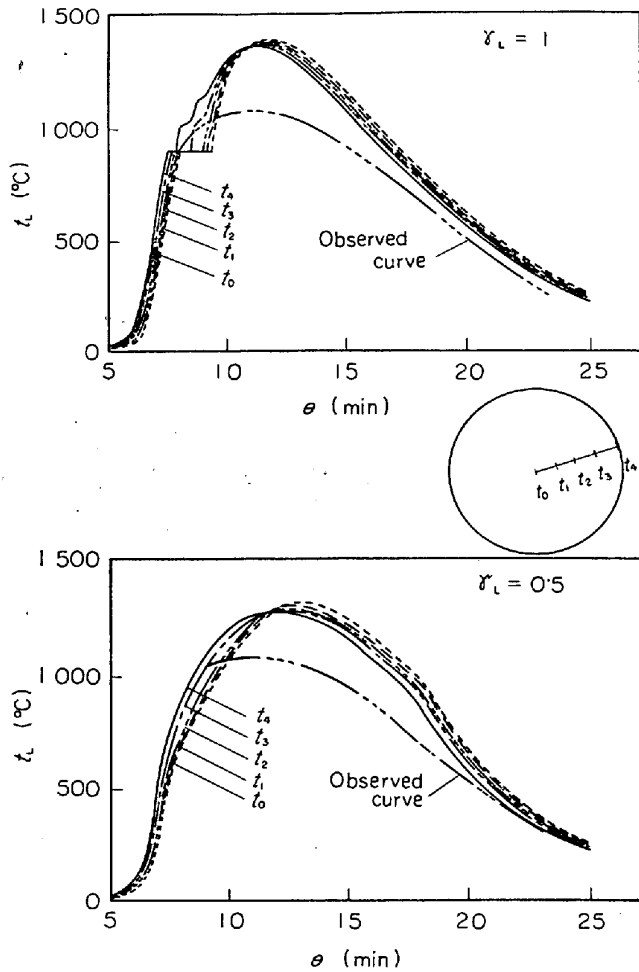


Fig. 13. Temperature curves of lime stone observed and calculated with mathematical model for decomposition (diameter 20 mm).

Table 1. Experimental conditions for measuring fusion ratio.

Supplied material	Chile iron ore			
	T.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Chemical composition of iron ore	61.25	6.05	6.20	1.42
Diameter of iron ore	5~3 mm	3~2	2~1	
Lime stone addition	0%	10	20	
Diameter of lime stone	5~3 mm	3~2	2~1	
Coke addition	3%	4	5	6

ート樹脂を注入し硬化させる。硬化後80 mm間隔に4層に切断し研磨する。研磨面の写真を Q.T.M (Quantiment TV Microscope)¹²⁾ により次の状態量を測定した。

- (a) 未熔融の粒状鉱石の割合 (鉱粒率とする): 未熔融鉱石/(熔融鉱石+未熔融鉱石)
- (b) 未熔融の石灰石の割合 (石灰石率とする); 未熔融石灰石/(熔融石灰石+未熔融石灰石)
- (c) 気孔率; 気孔のしめる面積/全断面面積

(d) 熔融率 (鉱石熔融率; 1-a, 石灰石熔融率; 1-b)

5.2.2 熔融と凝固の数式によるシミュレーション

鉱石の粒子は表面でのガスからの対流伝熱により昇温し、粒内温度が均一だとすると顕熱の増加量は

$$(4/3)\pi R_1^3 \rho_1 C_1 dt_1/d\theta = 4\pi R_1^2 h_1 (T-t_1) \dots (27)$$

となる。一定温度 (熔融点) に到達後、一定熔融熱により θ_1 から θ_2 時間に熔融すると熔融熱は

$$\left(\frac{4}{3}\pi R_1^3\right) \rho_1 \cdot \Delta H_m = \int_{\theta_1}^{\theta_2} 4\pi R_1^2 h_1 (T-t_1) d\theta \dots (28)$$

となる。凝固は降温中一定温度に到達後、一定凝固熱により θ_3 から θ_4 時の間でおこるとし凝固熱は

$$\left(\frac{4}{3}\pi R_1^3\right) \rho_1 \cdot \Delta H_s = \int_{\theta_3}^{\theta_4} 4\pi R_1^2 h_1 (t_1-T) d\theta \dots (29)$$

となる。石灰石の熔融は溶液に固体石灰が溶解する場合を想定し、熔融速度は溶液中の石灰濃度と固体石灰が共存する平衡濃度の差に比例するとした。溶解量は

$$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{4}{3}\pi r_L^3\right) = -4\pi r_L^2 k_S (C^* - C) \dots (30)$$

となり、モル濃度に変換すると

$$dr_L/d\theta = -k_S/\rho^M (n^* - n_I) \dots (31)$$

n^* は石灰の平衡モル濃度であり CaO-FeO-SiO₂ 三元系状態図¹³⁾から求めた。 n_I は熔融石灰のモル濃度を表わし (28) 式によって求めた熔融鉱石量中の熔融石灰石量から次式によって求められる。

$$n_I = \frac{(4/3)\pi \rho^M (r_{L0}^3 - r_L^3)}{(4/3)\pi \rho_I (R_{I0}^3 - R_I^3) + (4/3)\pi \beta (r_{L0}^3 - r_L^3)} \dots (32)$$

(31)(32) 式により石灰石の熔融式が求まる。

5.2.3 鉱粒率, 石灰石率などの実測値と計算値の比較

鉱石の熔融・凝固の状態を示すために (27)~(29) 式を用いて粒径 3 mm ないし 10 mm の鉱石の昇温曲線を計算で求めた (Fig. 14)。粒径が 3 mm と 5 mm では

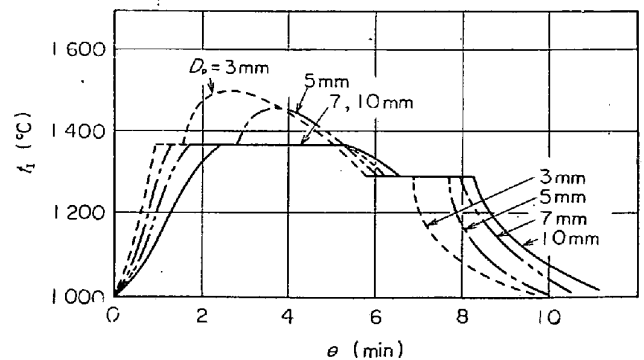


Fig. 14. Calculated temperature curve of ore considering fusion and solidification.

溶融完了後再び昇温しているが粒径 7 mm と 10 mm では全量は溶融しないことがわかる。一方コークス添加率 鉱石粒径、層別による鉱粒率の実測値を Fig. 15 に示す。計算結果と実測値をコークス添加率をパラメーターとして Fig. 16 に示す。絶対値には大きな差があるが傾向は示している。

石灰石率の実測値を Fig. 17 に示す。上層より下層が少なく、石灰石粒径が小さいほど少ないことがわかる。(30)~(32) 式を用いて計算による結果を Fig. 18 に示す。石灰石粒径 1 mm ないし 4 mm とし、共に溶融する

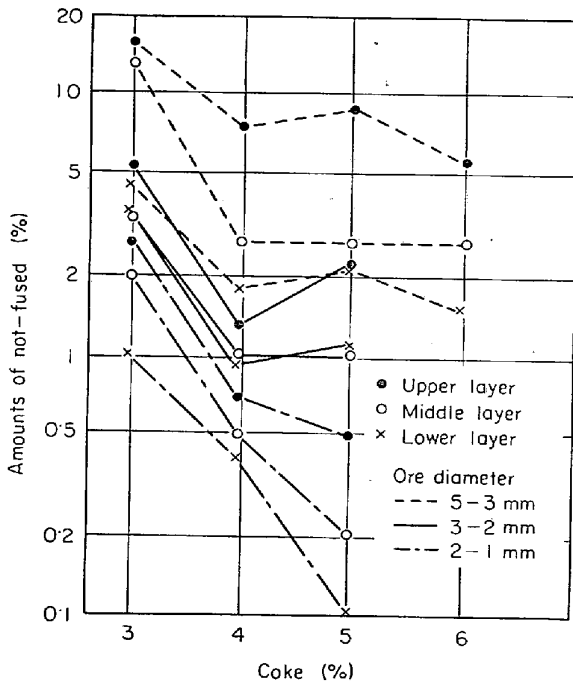


Fig. 15. Relation between amounts of not-fused and coke addition for various ore sizes.

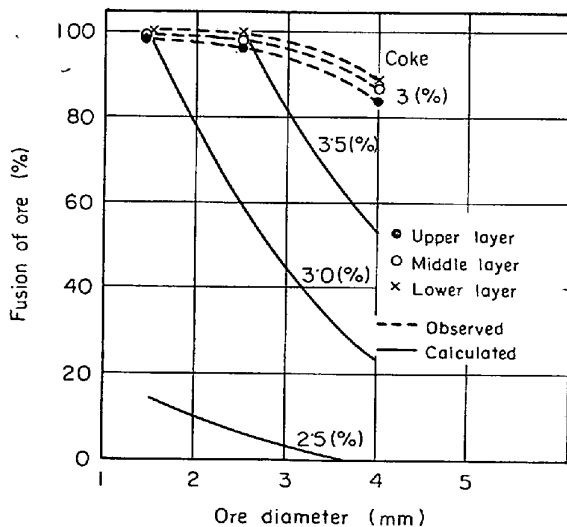


Fig. 16. Comparison of calculated and observed results on fusion ratio of ore.

鉱石径をパラメーターとして示した。石灰石粒径 1.5 mm 以上では全量は溶融しないことは明らかである。実測値と計算値の対応を Fig. 19 に示す。両者の差は大きい石灰石径、石灰石配合割合の影響は明らかである。また計算結果は実測値に比し要因の変化に対して熱量が不足する傾向を示している。

5.2.4 気孔率

焼結鉱の性質は気孔率によつて影響をうける。一般に気孔率が大になると還元速度は大であるが、もろく還元崩壊しやすい。したがつて気孔率に影響を与える要因を知ることは大切である。

そこで焼結前後の鉱石の密度、気孔率などの代数関係

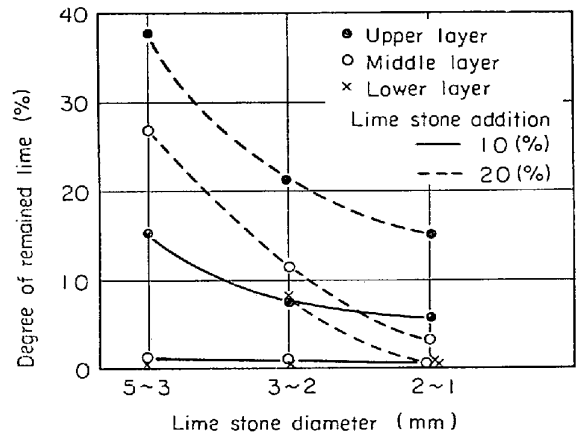


Fig. 17. Relation between degree of remained lime and diameter of lime stone (ore diameter 5~3 mm).

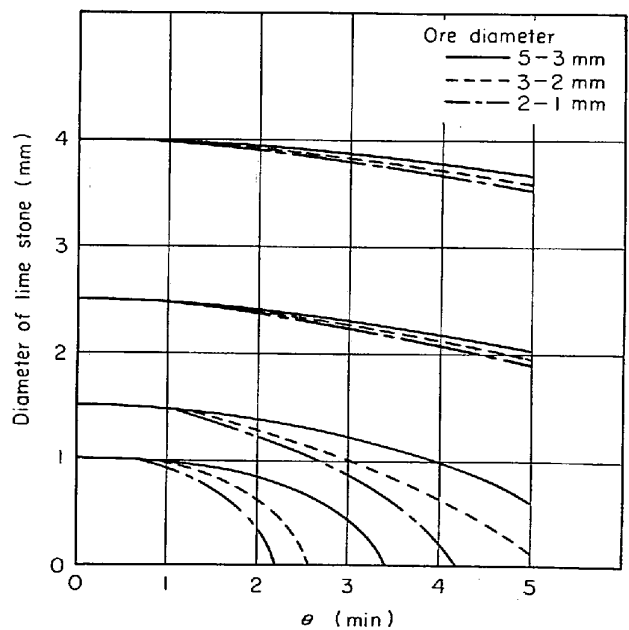


Fig. 18. Calculation of decreasing diameter of lime stone with time for various ore sizes.

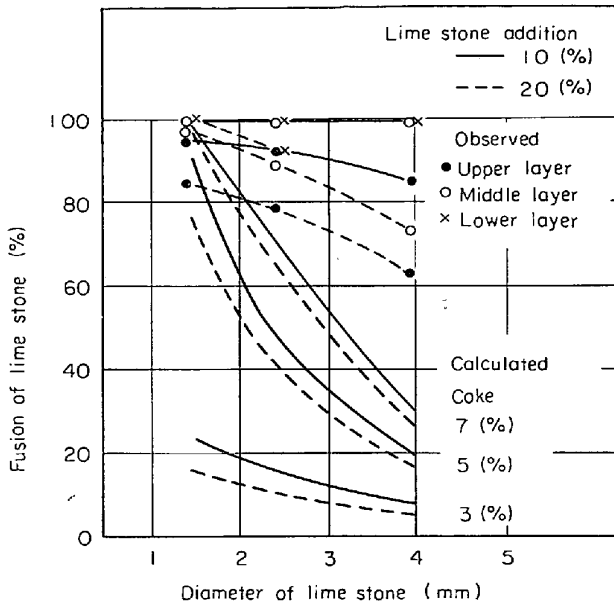


Fig. 19. Comparison of calculated and observed results on fusion ratio of lime stone.

をたてて前述のコークスの添加量と溶融しない鉍粒率の関係 (Fig. 15) を代入し、コークスの添加量と気孔率の関係を求めた。(焼結前後の鉍石と焼結鉍の定数の記号を Table 2 に示す)

$$(\text{焼結鉍の気孔率}) = 1 - \left(\frac{\text{焼結鉍中固体の体積}}{\text{焼結鉍の体積}} \right)$$

$$\epsilon' = 1 - (W'/\rho_I')/V_T' \dots\dots\dots (33)$$

原料充填層中コークスが燃焼して消滅し還元などで重量が減少したことなどを考慮して (33) 式を変換する。

焼結鉍の体積 V_T' は焼結鉍生成による体積減少率を β' とすると

$$V_T' = V_T(1 - \beta') \dots\dots\dots (34)$$

原料充填層の体積 V_T は鉍石、コークスの体積と空隙量の和として

$$V_T = W/\rho_I + (\alpha W)/\{(1 - \alpha)\rho_C\} + V_T\epsilon \dots\dots (35)$$

(34)(35) 式を (33) 式に代入して

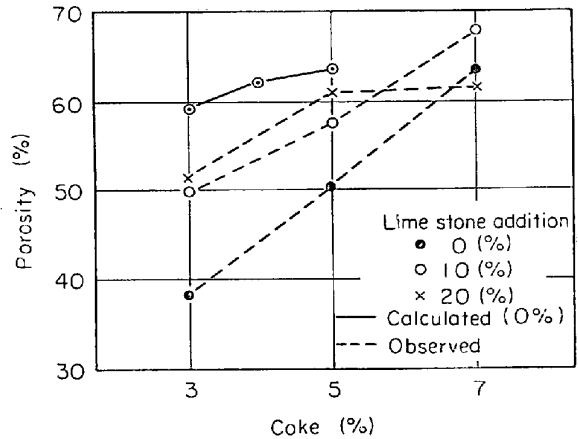


Fig. 20. Effect of coke addition on porosity.

$$\epsilon' = \frac{W'/\rho_I'}{(1 - \beta') \left\{ \frac{W}{\rho_I} + \frac{W\alpha}{\rho_C(1 - \alpha)} \right\}} \dots\dots\dots (36)$$

焼結鉍は鉍粒部分と溶融部分で構成されていると考えられるので (36) 式中 ρ_I' は次のように求まる。

$$(\text{焼結鉍のみ}) = (\text{鉍粒部分の}) + (\text{溶融部分の})$$

$$\text{かけ密度} = \text{みかけ密度} + \text{みかけ密度}$$

$$\rho_I' = \delta\rho_1' + (1 - \delta)\rho_2' \dots\dots\dots (37)$$

気孔率 ϵ' を求める (33)~(37) 式を計算し Fig. 20 に実測値と合わせて示す。コークス配合率の増加によって気孔率が増加する現象を表している。また実測から石灰石配合率の増加によっても気孔率は増加した。

6. 結 言

焼結中における伝熱・燃焼・分解・溶融・凝固などの過程について数式によるシミュレーションを展開し、焼結過程を単純化した実験値と比較して次の点が明らかになった。

- (1) heat front speed は $G_g C_g / \rho_b C_s$ と伝熱係数 h に影響され、 h が小さいほど H・F・S は大きくなり h が大きくなると $G_g C_g / \rho_b C_s$ の値に近づく。
- (2) 焼結層のコークスの燃焼速度は HOTEL らの

Table 2. Symbols used for calculation of sintering pore variation.

Material	Sinter
True density of ore : ρ_P	True density of sinter : ρ_P'
Apparent density of ore : ρ_I	Apparent density of sinter : ρ_I'
Inner porosity of ore : ϵ_I	Inner porosity of sinter : ϵ_I'
Ore weight in packed bed : W	Weight of sinter : W'
Coke weight in packed bed : $(\alpha/1 - \alpha)W$	Porosity of sinter : ϵ'
Porosity of packed bed : ϵ	Volume of sinter : V_T'
Volume of packed bed : V_T	Volume decrease by sintering : β'
Coke addition : α	Not-fused ore ratio : δ
Apparent density of coke : ρ_C	Apparent density of not-fused ore : ρ_1'
	Apparent density of fusion : ρ_2'

$$\rho_I = \rho_P(1 - \epsilon_I), \rho_I' = \rho_P'(1 - \epsilon_I'), V_T' = V_T(1 - \beta')$$

炭素球の総括燃焼速度よりも小さい。

(3) 焼結原料層中の鉱石, コークス, 石灰石などの単一試料の温度変化にもとづいて伝熱・燃焼・分解過程を考慮できる。

(4) 焼結の原料条件 (水分量, コークス量, コークス粒径) と操業条件 (空気流量) の影響を計算し実測値と比較した。コークス量, 空気流量の影響についてはその傾向は一致した。

(5) 焼結鉱中の鉱粒, 残留石灰石, 気孔を Q・T・M で測定し焼結の熔融凝固過程のシミュレーションと関連させて原料粒度, 石灰石量, コークス量の影響について考察しその傾向は一致した。

記 号

a, a_C, a_I, a_L, a_S : 焼結原料, コークス, 鉱石, 石灰石, アルミナ球の充填層単位体積当たりの表面積 (m^2/m^3 bed)

C, C^* : 溶液濃度, 溶液飽和濃度 (wt%)

$C_g, C_M, C_C, C_I, C_L, C_S$: ガス, 焼結原料, コークス, 鉱石, 石灰石, アルミナ球の比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$)

C_O : 焼結層に入るガス中の酸素濃度 ($\text{kg}-\text{mol}/\text{m}^3$)

D_p : 粒子径 (m)

D_v : ガスの拡散係数 (m^2/hr)

f : 酸素の転化率 (-)

G_g : ガスの質量速度 ($\text{kg}/\text{m}^2 \text{hr}$)

H : ガス中の水分含有量 ($\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg dry air}$)

h, h_C, h_I, h_L : ガスと焼結原料, コークス, 鉱石, 石灰石との間の伝熱係数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \text{hr}^\circ\text{C}$)

$\Delta H_C, \Delta H_L, \Delta H_m, \Delta H_S, \Delta H_w$: コークスの燃焼熱, 石灰石分解熱, 鉱石の熔融熱, 鉱石の凝固熱, 水分の蒸発熱 ($\text{kcal}/\text{kg}-\text{mol}, \text{kcal}/\text{kg}$)

k, k_L : ガス, 石灰石の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m hr}^\circ\text{C}$)

k_S : 物質移動係数 (m/hr), コークスの燃焼反応の総括速度定数 (m/hr)

k_C : コークスの燃焼反応速度定数 (m/hr)

k_D : ガス境膜内物質移動係数 (m/hr)

L : 立方体の一辺の長さ (m)

M_C : 炭素のグラム分子量 ($\text{kg}/\text{kg}-\text{mol}$)

n_C : 原料層単位体積中のコークス数 ($1/\text{m}^3$)

n^*, n_I : 溶液中の CaO 飽和モル濃度, モル濃度 ($\text{kg mol}/\text{m}^3$)

Nu : ヌッセルト数 ($h D_p/k$) (-)

Pr : プラントル数 ($\mu C_g/k$) (-)

R : 気体定数 ($\text{kcal}/\text{kg}-\text{mol}^\circ\text{K}$)

R_C, R_L, R_m, R_S, R_w : コークスの燃焼反応, 石灰石の分解反応, 鉱石の熔融, 鉱石の凝固, 水分の蒸発の

速度 ($\text{kg}-\text{mol}/\text{m}^3\text{hr}, \text{kg}/\text{m}^3\text{hr}$)

R_I : 鉱石粒子の半径 (m)

r : コークス粒子の半径 (m)

r_L : 石灰石粒子の半径 (m)

Re : レイノルズ数 ($D_p G_g/\mu$) (-)

Sc : シュミット数 ($\mu/\rho_g D_v$) (-)

Sh : シャーウッド数 ($k_D D_p/D_v$) (-)

T, t, t_C, t_I, t_L, t_S : ガス, 焼結原料, コークス, 鉱石, 石灰石, アルミナの温度 ($^\circ\text{C}$)

v_C, v_I, v_L : 原料中のコークス, 鉱石, 石灰石の体積割合 (-)

w, w_C : 粒子の含水率, 限界含水率 ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg dry stock}$)

z : 焼結層上面からの距離 (m)

β : CaO 粒子の液化体積変化率 (-)

γ_L : ガスから粒子への伝熱量のうち石灰石の分解反応に使われる割合 (-)

δ : コークス燃焼速度の補正係数 (-)

ϵ : 層の空間率 (-)

θ : 時間 (hr)

μ : ガスの粘度 ($\text{kg}/\text{m hr}$)

$\rho_g, \rho_M, \rho_C, \rho_I, \rho_L, \rho_S$: ガス, 焼結原料, コークス, 鉱石, 石灰石, アルミナの密度 (kg/m^3)

ρ_b : アルミナの嵩密度 (kg/m^3)

ρ^M : CaO モル濃度 ($\text{kg}-\text{mol}/\text{m}^3$)

文 献

- 1) 深川, 石川, 野口, 楯岡: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 338~340
- 2) 樋口, 鞭: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 1171~1173
- 3) 鞭, 樋口: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S 19
- 4) 鞭, 樋口: 鉄と鋼, 56 (1970) 3, p. 371~381
- 5) 塚本, 嶋田, 田口, 樋口: 鉄と鋼, 56 (1970) 6, p. 661~670
- 6) E. W. VOICE and R. WILD: Iron Coal Trade Rev., 175 (1957) 10, p. 841~850
- 7) E. W. VOICE and R. WILD: JISI, (1956) 10, p. 841~850
- 8) 三本木, 西田: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, p. 338~340
- 9) 化学工学協会編: 化学工学便覧〔丸善〕(1958), p. 147, p. 394
- 10) A. L. PARKER and H. C. HOTTEL: Indust. Eng. Chem., 28 (1936), p. 1334~1341
- 11) 杉山: ケミカルエンジニアリング (1968) 5, p. 39~44
- 12) P. LECOMTE and R. VIDAL: C. N. R. M, 23 (1970), p. 1~10
- 13) Phase diagram for ceramics: [American Ceramic Society], p. 204