

高温ガス化直接溶融炉による廃棄物溶融処理の数値解析

梁 小平*・埜上 洋*・八木 順一郎*・磯崎 進市*²・松平 恒夫*²

Numerical Simulation on High-temperature Gasification and Melting Furnace for Solid Waste

Xiaoping LIANG, Hiroshi NOGAMI, Jun-ichiro YAGI, Shinichi ISOZAKI and Tsuneo MATSUDAIRA

Synopsis : Currently, a number of waste treatment technologies have been developed. Among them, melting treatment has drawn more and more attentions due to merits such as low environmental pollution, high volume reduction and widespread treatment capacity for various waste materials.

In this study, a two-dimensional mathematical model of high-temperature gasification and melting furnace was developed. This model considers motion; heat transfer and mass transfer of gas, solid and liquid phases in the furnace. Furthermore, this model did take into account the possible chemical reactions and phase transformations. The governing equations include inter-phase exchange of mass, momentum and heat, and consist of strongly coupled set of simultaneous partial differential equations. The model was applied to a gasification-melting furnace having packed bed for gasification and melting of wastes, and freeboard for secondary combustion of pyrolyzed gas. The computational results clearly showed regions of gasification, combustion and melting in the furnace as well as the flow field distributions of temperature, component concentration and other process variables.

Key words : waste treatment; mathematical model; packed bed; free board; smelting furnace.

1. 緒言

地球環境の保全と資源の再利用のためには、適切な方法と条件で廃棄物の処理を行う必要がある。廃棄物処理に関しては、これまで焼却法と埋め立て法が広く採用されてきたが、焼却法には焼却に伴う有害ガスの排出と焼却灰の再処理などの問題があり、埋め立て法には埋立地の占用と土壌や地下水への二次汚染の恐れがある。このため近年は特にダイオキシン発生抑制の観点から、廃棄物溶融処理方式が注目されている。廃棄物の溶融処理は高温溶融による金属系廃棄物の資源化と灰の溶融スラグ化、減容化に加えて、ダイオキシンを始めとする多様な公害物質の発生を抑制できると考えられることから、ゼロエミッションを目指す次世代の廃棄物処理技術の一つとして期待されている^{1,2)}。

高温ガス化直接溶融炉は、製鉄用高炉の超高温溶融・還元技術を利用して開発された充填層式廃棄物処理炉であり、上述の廃棄物溶融処理方式の特徴を併せ持っている。この溶融炉においては、炉頂から装入した廃棄物の可燃分の一部は熱分解および部分燃焼により可燃性ガスとして回収され、灰分は高温雰囲気下で溶融して再利用可能なスラグと溶融金属として連続的に回収される。本文では廃棄物高温ガス化直接溶融炉を対象に、炉内の反応挙動などのプロセス特性に関する理論解析による検討を行うことを最終目標として、炉内の諸現象を数式化して溶融プロセスの数学モデルを作成し、これを用いた数値解析による基礎検討

を行った。

2. 数学的モデル

本研究で対象とした廃棄物高温ガス化溶融炉の構造を Fig. 1 に示す。溶融炉は炉下部のコークス充填層と上部のフリーボードから構成されており、充填層中に二段、フリーボードに一段の計三段のノズルを有している。下部の充填層では廃棄物と共に装入されるコークスを二段の羽口から導入される燃焼用空気で燃焼させ、廃棄物中の不燃分を溶融処理するための熱を発生させると共に、廃棄物を乾燥、熱分解、燃焼させる。上部のフリーボードでは下部充填層で発生した可燃性ガスの一部を三次羽口からの空気により燃焼させる。炉内、特に炉下部の充填層中においては、気体、固体および液体の三相が同時に存在し、それぞれ異なる機構により流動しつつ互いに運動量、熱および物質の交換を行う。また上部のフリーボード部では乱流燃焼が生じている。従って、廃棄物高温ガス化溶融炉の数学モデルを作成する上では、上述の流動・伝熱・物質移動に加えて異相間相互作用や化学反応・相変化をも考慮する必要がある。

2.1 基礎方程式

廃棄物の高温ガス化溶融プロセスの数学モデルを構築するにあたり、炉内の現象が定常状態かつ軸対称に生じているものと仮定した。従って、解析にあたっては炉体の中心

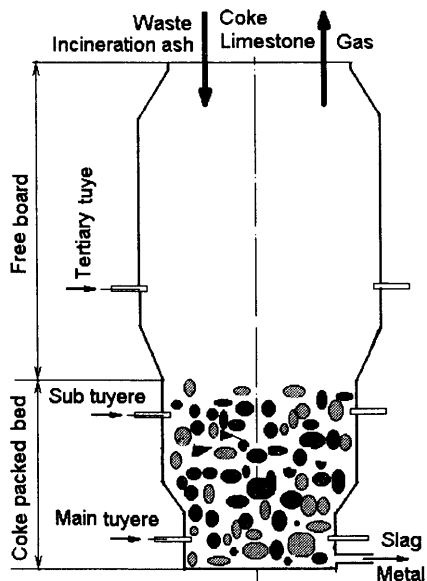


Fig. 1. Schematic diagram of waste gasification and melting furnace.

軸を含む縦断面の半面が対象領域となる。また、本プロセスは上述のように下部の充填層と上部のフリーボードから構成されているが、充填層には気・固・液の3相が共存し、フリーボードではガスの乱流流動のみ存在している。ここではフリーボード内の移動現象に関しては、炉頂から装入した廃棄物がフリーボードを落下する際の加熱現象と充填層から吹き上げられた微細な固相物質の燃焼現象を無視して扱った。炉内の両領域では流動や伝熱の特性が互いに異なっているが、その相違を考慮して炉内の全域を同時に解析できる構成になっている。

気体の流動は連続の式および Navier-Stokes 式で表現され、充填層中では気固および気液間の相互作用ならびに質量の湧き出しを、またフリーボードでは $k-\epsilon$ 2 方程式モデルによる乱流の効果を考慮した。充填層内の固体流れについては Kinematic モデルを用いて表現した。液相については分散相とし、質量および運動量の保存式から運動を推算した。各相の温度分布は、伝導、対流、異相間の熱交換および反応熱を考慮した熱収支式から算出した。各相の化学成分に関しては、反応による物質の生成、消失を考慮した質量保存式で表現した。尚、各反応速度は温度および反応物質の濃度などに対する依存性を考慮して決定した。

炉内の諸現象を表現する保存式は、解くべき変数を ϕ で代表させると、いずれも次式の一般形で表現できる。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_i \rho_i u_i \phi_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \epsilon_i \rho_i v_i \phi_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_\phi \dots (1)$$

式中の添字 i は気体、固体、液体の各相を、 ϵ_i は各相の体積分率を表す。式中に ϕ で代表させた解くべき変数は、

軸方向速度 u 、半径方向速度 v 、乱流エネルギー k 、乱流エネルギーの消散速度 ϵ' 、エンタルピー h および各成分の質量分率 m_j である。尚、 ϕ に 1 を代入すれば各相の連続の式を得る。変数 Γ_ϕ および S_ϕ は各変数に対する有効拡散係数と生成項であり、Table 1 にまとめて示す。尚、各相の体積分率の総和は常に 1 となる。

$$\epsilon_g + \epsilon_s + \epsilon_l = 1 \dots (2)$$

2.2 異相間の運動量交換

気固間の相互作用力は Ergun 修正式³⁾で評価した。

$$\bar{F}_{gs} = \left\{ \frac{150 \mu_g a_s a_{gs}}{36(1-\epsilon_s)} + \frac{1.75 \rho_g a_{gs}}{6} |\bar{v}_g - \bar{v}_s| \right\} (\bar{v}_g - \bar{v}_s) \dots (3)$$

気液間の相互作用力は気液間の接触面積での Fanning 修正式⁴⁾で評価した。

$$\bar{F}_{gl} = \frac{a_{gl}}{a_{gl} + a_{sl}} \cdot \frac{3 C_D \rho_g \epsilon_l}{4 d_l} |\bar{v}_g - \bar{v}_s| (\bar{v}_g - \bar{v}_s) \dots (4)$$

固液間の相互作用力は固液間の接触面積での Kozeny-Carman 修正式⁵⁾で評価した。

$$\bar{F}_{ls} = \frac{180 \mu_l a_s a_{sl}}{36(1-\epsilon_s)} (\bar{v}_l - \bar{v}_s) \dots (5)$$

異相間の接触面積は次式^{6,7)}で評価した。

$$a_{gl} = 0.34 Fr_{ls}^{-1/2} We_{ls}^{2/3} / d_s \dots (6)$$

$$a_{ls} = \frac{6 \epsilon_s}{d_s} \left\{ 0.4 (Re_{ls} / \epsilon_s)^{0.218} We_{ls}^{0.0428} Fr_{ls}^{-0.0238} N_c^{-0.0235} \right\} \dots (7)$$

$$a_{gs} = \frac{6 \epsilon_s}{\psi d_s} - a_{ls} \dots (8)$$

2.3 異相間の熱交換

気固間と気液間の伝熱係数は秋山ら⁸⁾によって修正された Ranz 式で評価した。

$$h_{gj} = (2.0 + 0.39 Re_{gj}^{1/2} Pr_g^{1/3}) \lambda_g / d_j \quad (j=s, l) \dots (9)$$

固液間の伝熱係数は Pohlhausen⁹⁾の強制対流伝熱式で評価した。

$$h_{ls} = (0.664 Re_{ls}^{1/2} Pr_l^{1/3}) \lambda_l / d_s \dots (10)$$

2.4 化学反応および相変化

炉内で生じる化学反応および相変化は、炉内への装入物自身およびその組成によってそれぞれ異なる。本報では、都市ごみおよび焼却灰の熔融プロセスを対象とする。装入物として、処理対象の都市ごみおよび焼却灰の他に、燃料となるコークスおよび融点調整のための石灰石も同時に炉内へ装入される。各装入物の構成成分を Table 2 に示す。ここでは、コークス中の可燃分はすべて炭素からなるもの

Table 1. Summary of variables, effective diffusivity and source terms.

| (a) | i | ϕ_i | Region | Γ_{ϕ_i} | S_{ϕ_i} |
|-----|-----------------|-----------------------------|--|------------------------|--------------|
| g | 1 | Both | 0 | 0 | S_{sg} |
| | | | | | u_g |
| | Freeboard | $\mu_e = \mu_g + \mu_{g,t}$ | S_{ug}^F | | |
| | v_g | Packed bed | $\mu_e = \mu_g^e$ | S_{vg}^P | |
| | | Freeboard | $\mu_e = \mu_g + \mu_{g,t}$ | S_{vg}^F | |
| | k_g | Freeboard | $\mu_e = \mu_g + \mu_{g,t} / \sigma_k$ | S_{kg}^F | |
| | ε_g | Freeboard | $\mu_e = \mu_g + \mu_{g,t} / \sigma_\varepsilon$ | $S_{\varepsilon g}^F$ | |
| | h_g | Packed bed | λ_g^e / C_{pg} | S_{hg}^P | |
| | | Freeboard | $\lambda_g / C_{pg} + \mu_{g,t} / \sigma_T$ | S_{hg}^F | |
| | m_{ng} | Packed bed | $\rho_g D_g^e$ | S_{mng}^P | |
| | | Freeboard | $\rho_g D_g + \mu_{g,t} / \sigma_c$ | S_{mng}^F | |
| | s | 1 | Packed bed | 0 | S_{ss} |
| | | h_s | | λ_s^e / C_{ps} | S_{hs} |
| | | m_{ns} | | 0 | S_{mns} |
| l | 1 | Packed bed | 0 | S_{ls} | |
| | u_l | | μ_l^e | S_{ul} | |
| | v_l | | μ_l^e | S_{vl} | |
| | h_l | | λ_l^e / C_{pl} | S_{hl} | |

| (b) | i | ϕ_i | S_{ϕ_i} | |
|-----|-----------------|-----------------------|---|--|
| g | 1 | S_{sg} | $\sum_{n,k} v_{ng,k} R_k$ | |
| | u_g | S_{ug}^P | $-\varepsilon_g \frac{\partial p_g}{\partial x} - F_{x,gs} - F_{x,gl}$ | |
| | | S_{ug}^F | $-\frac{\partial p_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_e \frac{\partial u_g}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_e \frac{\partial v_g}{\partial x})$ | |
| | v_g | S_{vg}^P | $-\varepsilon_g \frac{\partial p_g}{\partial r} - F_{r,gs} - F_{r,gl} - \varepsilon_g \mu_e \frac{v_g}{r^2}$ | |
| | | S_{vg}^F | $-\frac{\partial p_g}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_e \frac{\partial u_g}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_e \frac{\partial v_g}{\partial r}) - \frac{2\mu_e v_g}{r^2}$ | |
| | k_g | S_{kg}^F | $S_{kg}^F = G - \rho \varepsilon_g', G = \mu_{g,t} \{ 2 [(\frac{\partial u_g}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v_g}{\partial r})^2 + (\frac{v_g}{r})^2] + (\frac{\partial u_g}{\partial r} + \frac{\partial v_g}{\partial x})^2 \}$ | |
| | ε_g | $S_{\varepsilon g}^F$ | $S_{\varepsilon g}^F = \frac{\varepsilon_g}{k} (c_1 G - c_2 \rho \varepsilon_g'), \mu_{g,t} = c_{\mu} \rho k_g^2 / \varepsilon_g'$ | |
| | h_g | S_{hg}^P | $\sum_{j \neq g} a_{gj} h_{gj} (T_g - T_j) + \sum_k \eta_{gk} (-\Delta H_k) R_k + \Delta H_{sg}^c$ | |
| | | S_{hg}^F | $\sum_k \eta_{gk} (-\Delta H_k) R_k$ | |
| | m_{ng} | S_{mng}^P | $\sum_k v_{ng,k} R_k$ | |
| | | S_{mng}^F | $\sum_k v_{ng,k} R_k$ | |
| | s | 1 | S_{ss} | $\sum_{n,k} v_{ns,k} R_k$ |
| | | h_s | S_{hs} | $\sum_{j \neq s} a_{sj} h_{sj} (T_s - T_j) + \sum_k \eta_{sk} (-\Delta H_k) R_k - \Delta H_{sg}^c - \Delta H_{sl}^c$ |
| | | m_{ns} | S_{mns} | $\sum_k v_{ns,k} R_k$ |
| l | 1 | S_{ls} | $\sum_{n,k} v_{nl,k} R_k$ | |
| | u_l | S_{ul} | $-\varepsilon_l \rho_l G + F_{x,gl} - F_{x,ls}$ | |
| | v_l | S_{vl} | $F_{r,gl} - F_{r,ls} - \varepsilon_l \mu_l \frac{v_l}{r^2}$ | |
| | h_l | S_{hl} | $\sum_{j \neq l} a_{lj} h_{lj} (T_l - T_j) + \Delta H_{sl}^c$ | |

Table 2. Composition of charged materials.

| Material | Composition |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Coke | Moisture, Carbon, Ash |
| Limestone | Moisture, CaCO ₃ , Ash |
| Municipal solid waste | Moisture, Combustible, Ash |
| Incineration ash | Moisture, Combustible, Ash |

とし、これ以外の装入物の可燃分は炭素、水素、酸素および窒素から構成されるものとした。固体装入物に関する反応および相変化については Table 3 に示すように、可燃分の燃焼、石灰石の熱分解および水分の蒸発、灰分の溶融を考慮した。

2.5 化学反応速度

Table 3 に示した反応 1~4 の反応速度に関しては、化学反応と境膜拡散の複合律速を考慮した鞭らによる総括速度式¹⁰⁾を適用した。都市ごみと焼却灰に含まれる可燃分の燃

Table 3. Chemical reactions and phase transformations.

| | Reaction | No. | i | Region |
|-----------------------------|--|-----|----------------|--------|
| Combustion and gasification | $C(i) + 1/2 O_2 = CO$ | 1 | CK | PB |
| | $C(i) + O_2 = CO_2$ | 2 | | |
| | $C(i) + CO_2 = 2 CO$ | 3 | CK | |
| | $C(i) + H_2O = CO + H_2$ | 4 | | |
| Combustion | $C_2H_6O_2N_d(i) + e O_2 = f CO + g H_2 + h N_2$ | 5 | WA, IA | |
| Thermal decomposition | $CaCO_3(i) = CaO(i) + CO_2$ | 6 | LS | |
| Melting | $CaO(i) = Slag(l)$ | 7 | LS | |
| | $Ash(i) = Slag(l)$ | 8 | CK, WA, LS, IA | |
| Evaporation | $H_2O(i) = H_2O(g)$ | 9 | CK, WA, LS, IA | |
| Gaseous | $CO(g) + 1/2 O_2(g) = CO_2(g)$ | 10 | PB, FB | |
| | $CO(g) + H_2O(g) = CO_2(g) + H_2(g)$ | 11 | | |
| | $H_2(g) + 1/2 O_2(g) = H_2O(g)$ | 12 | | |

CK: Coke, WA: Municipal solid waste, LS: Limestone, IA: Incineration ash,

PB: Packed bed, FB: Freeboard

焼反応速度（反応5）はコークスの燃焼反応と同じ方法で推算する。石灰石の熱分解速度（反応6）は鞭らの提案した総括速度式¹¹⁾で求めた。灰分の熔融および水分の蒸発速度（反応7, 8）は、固体温度がそれぞれの生起温度（灰分熔融：1573K、水分蒸発：373K）を超えた領域で生じるものとし、生起温度に対する熱交換速度によって決定した。気相反応の速度（反応10~13）はHowardの式¹²⁾を適用した。

2.6 解析方法

偏微分方程式として与えられる各保存式(1)は有限体積(Control Volume)法¹³⁾により差分・離散化して代数方程式群とし、これらを連立して解くことで解を得た。代数方程式の解法はTDMA法を用いた。また気相の圧力と運動量の連成については、PatankarとSpaldingによるSIMPLE法¹³⁾と呼ばれる方法を用いて気相の連続の式を圧力補正式に転換した。

3. 結果および考察

3.1 解析条件

3.1.1 原燃料性状および操業条件

充填層の通気性を保つために、装入する廃棄物である都市ごみと焼却灰には予備処理の必要がある。都市ごみは一定の大きさまで粉碎して、焼却灰は造粒してから炉内に装入する。予備処理した固体装入物の平均性状はTable 4に示す。固体の装入条件および送風条件については実操業条件に基づいてTable 5および6に示した条件を与えた。

3.1.2 解析格子の構成

数値計算で対象とした廃棄物高温ガス化溶融炉内の解析領域と解析格子の構成をFig. 2に示す。ガス化溶融炉の外形は外径が高さ方向で変化するもののそれぞれの部位では円筒あるいは円錐台の形状となっており、炉内の現象が軸対称に生じているとの仮定から、解析領域はガス化溶融炉の中心軸を含む縦断面の半面を採用している。高さ方向の分割については、プロセス変数の変化・勾配が大きくなると考えられる羽口近傍を細かく分割した。実際のガス化溶融炉では羽口からガスが導入されるが、モデル解析では、羽口と同断面の水平なスリットからガスが流入するものとした。下部の充填層部と上部のフリーボードの格子分割数はそれぞれ31×108および21×67である。

3.2 数値解析結果

3.2.1 炉内気固液3相の温度分布

気体、固体および液体の温度分布をFig. 3に示す。充填層内の羽口から導入された気体は、コークスの燃焼熱によって急激に温度が上昇し、上方に流動するに従い、固体との熱交換により徐々に温度が低下している。フリーボード部においては、三次羽口から吹き込まれたガスにより気相中の一酸化炭素が燃焼し、羽口前から上方に向けて高温

Table 4. Properties of solid materials.

| | Diameter (m) | Density (kg/m ³) | Thermal conductivity (W/m·K) | Specific heat (J/kg·K) |
|-----------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| Coke | 0.035 | 1040 | 11.4 | 1630 |
| Municipal solid waste | 0.005 | 900 | 1.7 | 1270 |
| Incineration ash | 0.010 | 2700 | 1.7 | 1050 |
| Limestone | 0.007 | 2700 | 0.93 | 840 |

Table 5. Charging condition of solid materials.

| | Feed ratio (wt%) | Composition (wt%) | | | | | | Temp. (K) | |
|-----------------------|------------------|-------------------|-------|-------------|------|-------|------|-----------|-------------------|
| | | H ₂ O | Ash | Combustible | | | | | CaCO ₃ |
| | | | | C | H | O | N | | |
| Coke | 17.8 | 0.5 | 11.85 | 87.65 | | | | 298 | |
| Municipal solid waste | 48.1 | 30 | 13.8 | 30.86 | 4.32 | 19.42 | 1.6 | 298 | |
| Incineration ash | 18.6 | 1.6 | 95.2 | 1.8 | 0.3 | 1.1 | | 298 | |
| Limestone | 15.5 | 0.5 | 5.4 | | | | 94.1 | 298 | |

Table 6. Blowing condition.

| | Feed ratio (Vol.%) | Temp. (K) | Pressure (Pa) | Composition (Vol.%) | |
|-----------------|--------------------|-----------|---------------|---------------------|----------------|
| | | | | O ₂ | N ₂ |
| Main tuyere | 47.8 | 383 | 11600 | 32.3 | 67.7 |
| Sub tuyere | 36.1 | 298 | 700 | 21 | 79 |
| Tertiary tuyere | 16.1 | 298 | 700 | 21 | 79 |

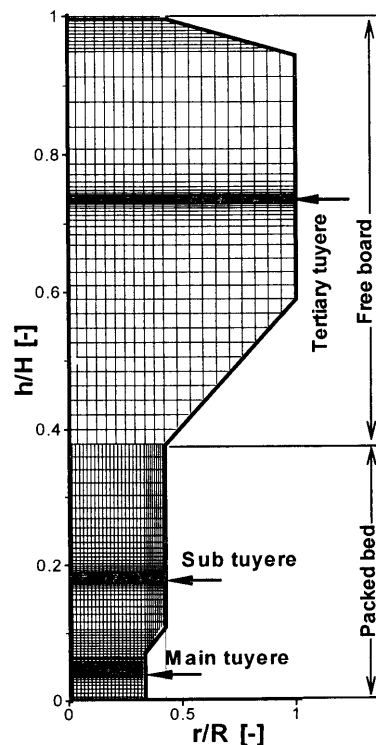


Fig. 2. Calculation domain and grid arrangement.

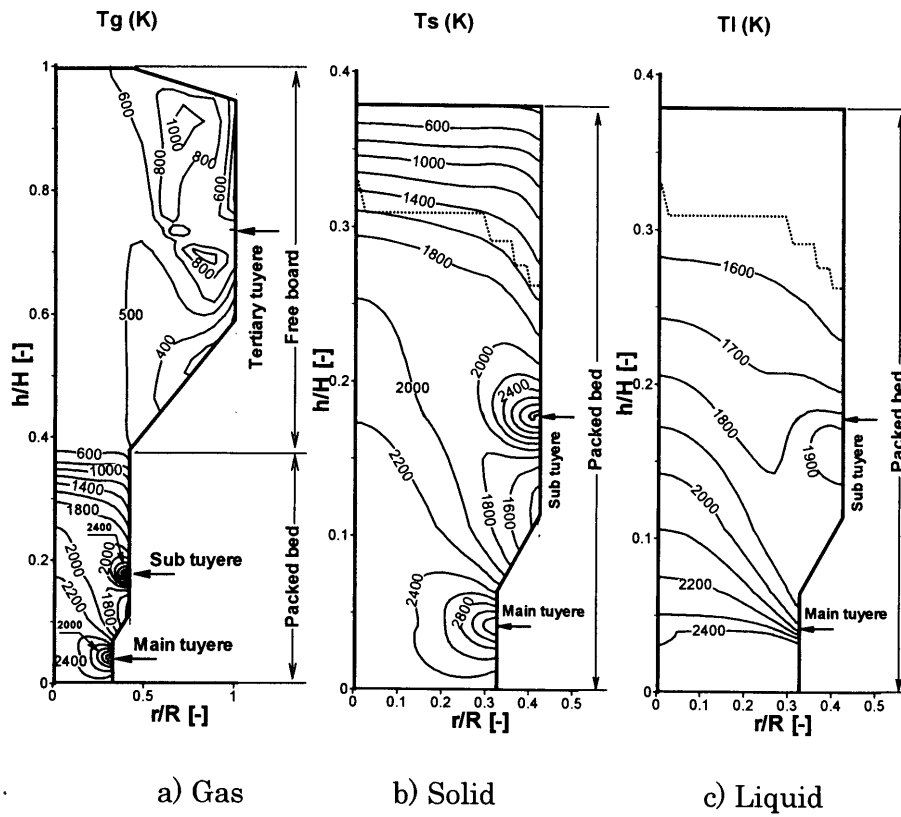


Fig. 3. Temperature distributions of gas, solid and liquid phases.

領域が形成している。フリーボードの中心軸近傍ではこの燃焼にもかかわらず低温のまま上方に流通しているが、これは主に軸対称の仮定によるものと考えられる。また壁面近傍では熱損失により温度が低下している。

固体温度に関しては充填層に供給されると気相からの熱供給によって徐々に温度が上昇し、副羽口の上(図中の点線で示す)から溶融が始まっている。羽口近傍においてコークスの燃焼により2000Kを超える高温の領域が形成されている。全体的な温度分布の傾向は気相のものに準じている。発生した液体は高温の気体および固体との熱交換により、炉内を流下するに従って温度が上昇している。

3.2.2 ガス組成分布

炉内の O_2 、 CO および CO_2 の濃度分布をFig. 4に示す。充填層中の羽口から供給された空気中の酸素は、炉内に導入されると高温のコークス中の炭素との反応により急速に消費され、消失している。三次羽口から供給された酸素の反応速度は充填層中の反応と比較すると低速で進行しており、フリーボードの中心付近まで酸素が存在している。一酸化炭素の濃度分布に関しては、羽口前での酸素と炭素の反応により約45%まで急激に増加している。羽口前ではコークスの燃焼により二酸化炭素も同時に発生するが、コークス充填層内でソリュションロス反応によって消費され、濃度が低下している。フリーボード部では三次羽口から供給された酸素との反応により一酸化炭素の濃度が低下し、これとは逆に二酸化炭素濃度が上昇している。炉頂

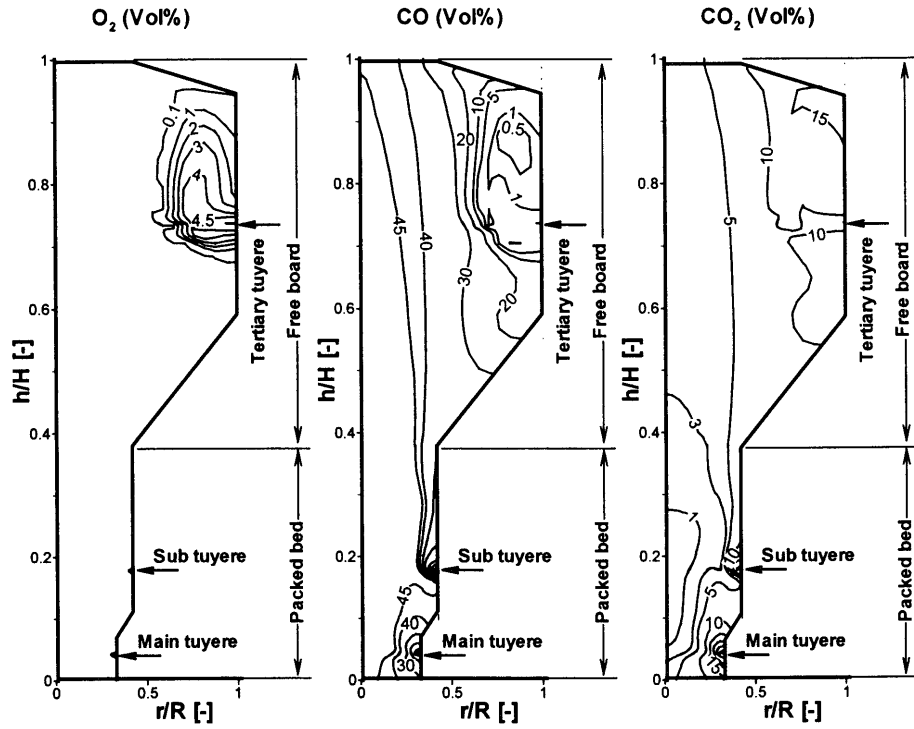
における平均ガス組成は一酸化炭素34.5%、二酸化炭素6.5%、水蒸気1.8%であった。

3.2.3 固体組成分布

固相の組成分布のうち代表的なものとして都市ごみ中の水分および焼却灰中の灰分の固相全体に対する質量率の分布をFig. 5に示す。Fig. 3にも示したように、固体の温度は層頂に供給されると、気体との熱交換により降下と共に温度が上昇し、各種相変化および反応を生じる。固相の湿分として炉内に流入した水分は充填層の上部で急速に蒸発している。焼却灰中の灰分に関してはその溶融温度が水分の蒸発温度より高いため、水分の蒸発位置より低い区域で急激に溶解が進行している。

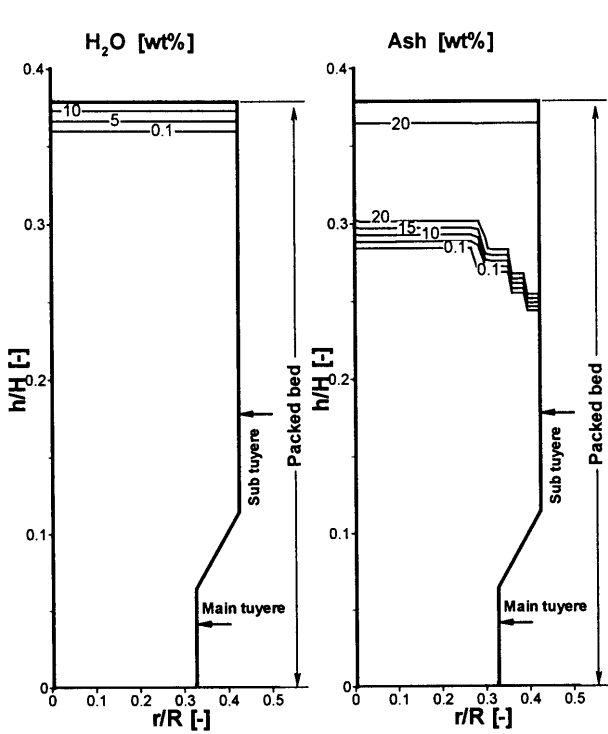
3.2.4 気固の流動特性

Fig. 6に、炉内における気体、固体の流れ模様を示す。充填層中における気体に関しては、充填層内を半径方向に分散して、層頂では半径方向での分布が非常に小さくなっている。フリーボード部では中心軸近傍の流量が大きくなっており、壁面付近ではガスの流速が低くなっている。充填層部でのガスの流速が早く、フリーボード部で遅くなっているのは、充填層中の速度は空隙における実速度であることと、充填層中では温度が高く同じ質量流量でもガスの体積が大きくなっているためである。三次羽口から導入されたガスは、下方から流通してきたガスの流れによって速やかに流れの方向が変化し、炉頂に向かっていく。固体については、層頂では半径方向にほぼ均一な速度で下降



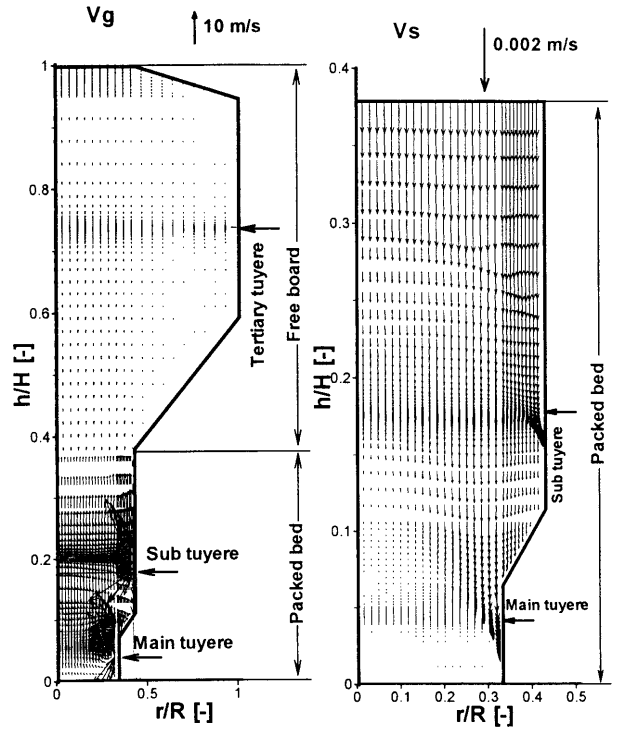
a) Oxygen b) Carbon monoxide c) Carbon dioxide

Fig. 4. Distributions of gaseous species.



a) Moisture of waste b) Ash of incineration ash

Fig. 5. Distributions of solid components.



a) Gas b) Solid

Fig. 6. Flow patterns of gas and solid.

しているが、固体の消費領域である羽口前の領域に向かう流れが形成されている。

4. 結言

本研究では廃棄物高温ガス化直接溶融炉を対象として、

炉内の流動，伝熱および反応挙動など諸現象を速度論的に表現し，種々のプロセス特性に関する理論解析を可能にする数学モデルの作成を行った。数学モデルは炉内に存在する気・固・液3相のそれぞれに対する二次元軸対称・定常条件の連続の式，運動量，熱量および化学物質の保存式および各反応および相変化の速度式から構成される。また，本モデルは複数種類の装入物の同時装入条件にも対応可能なものとした。このモデルに対して，炉体形状，装入物および送風条件を入力すれば，温度，ガス組成，圧力などの各分布および気・固・液三相の流動特性などが結果として得られる。

記号

| | |
|-------------------|--|
| a_i | : 相 i の層中の比表面積 ($\text{m}^2/\text{m}^3\text{-bed}$) |
| a_{ij} | : 層単位体積中の相 i, j の接触面積 ($\text{m}^2/\text{m}^3\text{-bed}$) |
| c_1, c_2, c_μ | : 乱流に関する係数 ($c_1=1.44, c_2=1.92, c_\mu=0.99$) |
| C_D | : 抵抗係数 (-) |
| C_p | : 比熱 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$) |
| D | : 拡散係数 (m^2/s) |
| d | : 直径 (m) |
| F_{ij} | : 相 i, j 間の作用力 ($\text{N}/\text{m}^3\text{-bed}$) |
| Fr_{ij} | : 相 i の相 j に関する Froude 数 ($=a_i G_{mi} / \rho_i^2 g$) |
| G_m | : 質量流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) |
| g | : 重力加速度 (m/s^2) |
| ΔH_{ij}^c | : 物質移動による相 i からの相 j への熱移動速度 ($\text{W}/\text{m}^3\text{-bed}$) |
| ΔH_k | : 反応 k のエンタルピー変化 (J/kg) |
| h | : エンタルピー (J/kg) |
| h_{ij} | : 相 i, j 間の伝熱係数 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) |
| k | : 乱流エネルギー (m^2/s^2) |
| m_{ng} | : ガス中における成分 ng の質量分率 (-) |
| m_{ns} | : 固体中における成分 ns の質量分率 (-) |
| N_c | : 無次元界面張力 (-) |
| P_g | : ガスの圧力 (Pa) |
| Pr | : Prandtl 数 ($=\mu C_p / \lambda$) (-) |
| r | : 円柱座標系における半径方向位置 (m) |
| Re_{ij} | : 相 i の相 j に関する Reynolds 数 ($=G_{mi} d_i / \mu_i$) (-) |
| R_k | : 反応 k の反応速度 ($\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^3\text{-bed}$) |
| S_ϕ | : 生成項 |
| T | : 温度 (K) |
| u | : 軸方向の速度 (m/s) |
| v | : 半径方向の速度 (m/s) |
| We_{ij} | : 相 i の相 j に関する Weber 数 (m/s) |
| x | : 軸方向位置 (m) |
| ε | : 体積占有率 ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{-bed}$) |

| | |
|----------------|---|
| ε' | : 乱流エネルギーの消散速度 (m^2/s^3) |
| ϕ | : 変数 |
| Γ_ϕ | : 有効拡散係数 ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$) |
| η_{ik} | : 反応 k の反応熱の相 i への配分率 (-) |
| λ | : 熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) |
| μ | : 粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) |
| v_{ng} | : 反応 k におけるガス成分の化学量論係数 (-) |
| v_{ns} | : 反応 k における固体成分の化学量論係数 (-) |
| ρ | : 密度 (kg/m^3) |
| σ | : 乱流に関する係数 ($\sigma_k=1.0, \sigma_T=0.9, \sigma_c=1.0$) |
| 下付き | |
| g | : ガス |
| i, j | : 相 g, s, l |
| k | : 反応番号 |
| l | : 液体 |
| ng | : ガスの組成 ($\text{O}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}, \text{H}_2, \text{N}_2$) |
| ns | : 固体の組成 ($\text{C}_{(i)}, \text{H}_2\text{O}_{(i)}, \text{Ash}_{(i)}, \text{CaH}_b\text{O}_c\text{N}_{d(i)}, \text{CaCO}_{3(i)}$) |
| r | : 軸方向 |
| s | : 固体 |
| x | : 軸方向 |
| e | : 層流および乱流状態の有効値 |
| 上付き | |
| e | : 多相体系における有効値 |

文 献

- 1) K.Ishii, J.Yagi, R.Takahashi, N.Kojima, C.Onishi, K.Miyatake, M.Ueno, T.Sugiyama and T.Iida: *J. High Temp. Soc.*, **27** (2001), 81.
- 2) X.Zhang, R.Takahashi, J.Yagi, C.Onishi and S.Kume: *J. High Temp. Soc.*, **27** (2000), 306.
- 3) S.Ergun: *Chem. Eng. Prog.*, **48** (1952), 89.
- 4) 八田四郎次, 前田四郎: 化学工学概論, 共立出版, 東京, (1978), 270.
- 5) 第5版化学工学便覧, 化学工学協会編, 丸善, 東京, (1988), 242.
- 6) J.Mada, H.Shinohara and M.Tsubakihara: *Kagaku Kougaku*, **27** (1963), 978.
- 7) M.Niu, T.Akiyama, R.Takahashi and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 647.
- 8) T.Akiyama, R.Takahashi and J.Yagi: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 848.
- 9) 平岡正勝, 田中幹也: 移動現象論, 朝倉書店, 東京, (1971), 102.
- 10) M.Kuwabara, Y.Xie and I.Muchi: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1918.
- 11) I.Muchi: *ISIJ Int.*, **7** (1967), 223.
- 12) J.B.Howard, G.C.Williams and D.H.Fine: 14th Int. Symp. on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh, (1973), 975.
- 13) S.V.Patankar 著, 水谷幸夫, 香月正司訳: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 東京, (1991), 29, 54, 130.