

1.5 輻射モデル

輻射モデルでは、各ごみモデルのごみ温度、各ガスモデルのガス温度、水蒸気分圧、C O₂分圧及び炉壁温度からの以下の輻射熱を計算している。

- (a) ガスとごみの間の輻射熱
- (b) ガスと炉壁の間の輻射熱
- (c) ごみと炉壁の間の輻射熱

ただし、上記(a)では二次燃焼ガスとごみモデルの間の輻射熱は計算していない。それぞれの輻射熱の計算式を以下に示す。

- (a) ガスとごみの間の輻射熱

$$Q_{rad_gr} = S/3600 \times \sigma \times (3.5 \times (P_{co2} \times 1.3))^{1/3} \\ \times ((Tr/100)^{3.5} - (Tg/100)^{3.5}) \\ + 35 \times (Pv \times 1.3)^{0.8} \times 1.03^{0.6} \times ((Tr/100)^3 - (Tg/100)^3)$$

K：ごみモデル形状係数[-]

σ：輻射補正係数[-]

Tg：ガス温度[K]

Tr：ごみ温度[K]

Pv：水蒸気分圧[atm]

Pco2：CO₂分圧[atm]

- (b) ガスと炉壁の間の輻射熱

$$Q_{rad_gw} = S/3600 \times \sigma \times ((Tg/100)^4 - (Tw/100)^4)$$

- (c) ごみと炉壁の間の輻射熱

$$Q_{rad_rw} = S/3600 \times \sigma \times ((Tr/100)^4 - (Tw/100)^4)$$

2. 予測モデル調整技術及び操作量決定アルゴリズム

2.1 機能概要

図5に予測モデル調整及び操作量決定プログラムの構成図を示す。開発したプログラムの機能は(1)パラメータ最適化モジュール及び(2)感度解析モジュールからなる。各モジュールの機能は以下のとおりである。

(1)パラメータ最適化モジュール

本モジュールはモデルパラメータ調整及び操作量決定の両方に利用する。調整パラメータ、調整対象状態量、評価指標を選択すると、調整パラメータを変化させて評価指標が最適（最大または最小）となるように調整する。調整パラメータの代わりに操作量を入力す

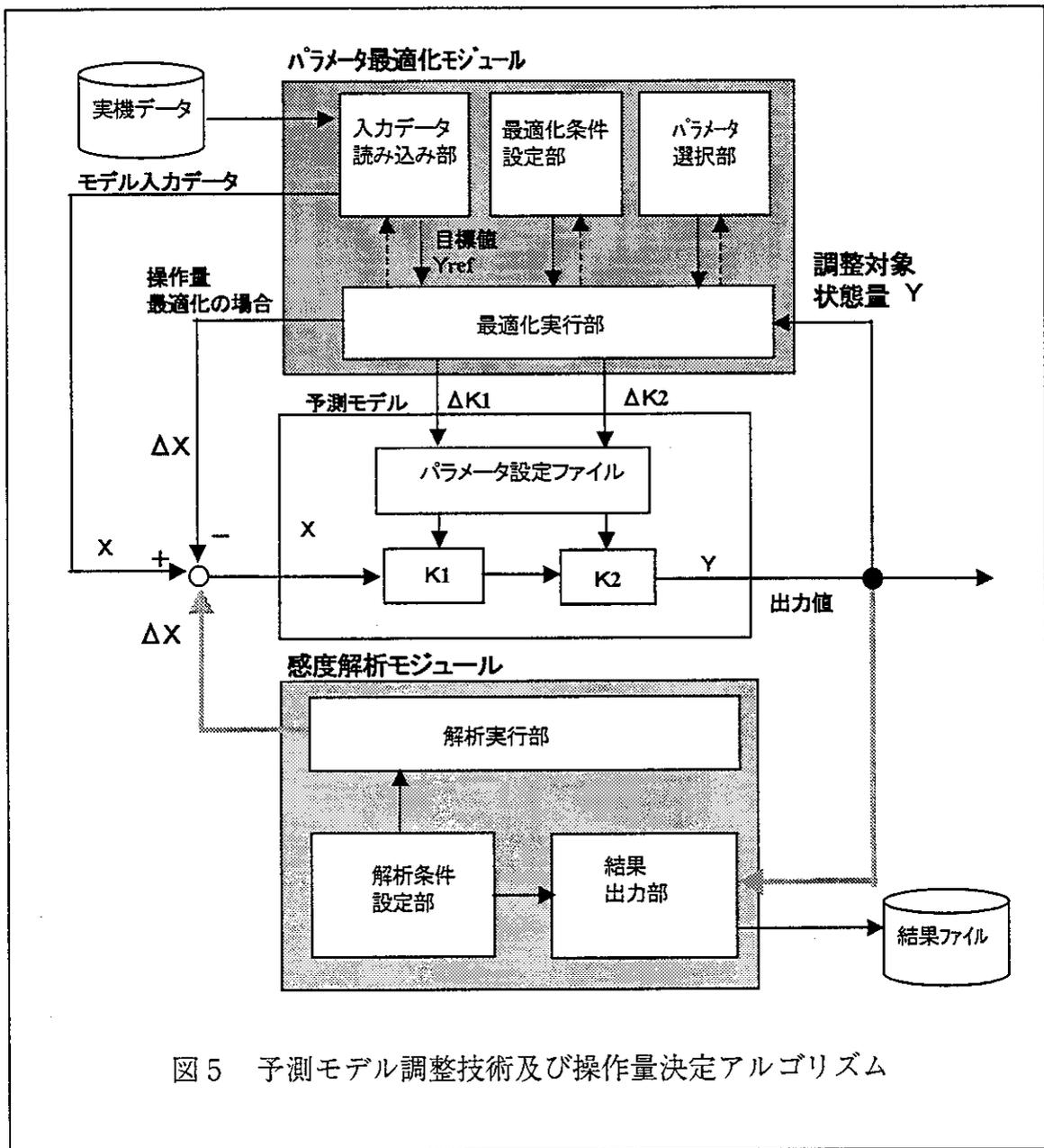


図5 予測モデル調整技術及び操作量決定アルゴリズム

ることで調整対象状態量（例：クロロフェノール濃度）を最小とする操作量を決定することができる。

(2) 感度解析モジュール

モデルパラメータ調整、及び操作量決定の基礎検討用モジュールである。モデル入力であるモデルパラメータまたは操作量を変化させた場合の出力の変化を調べる。自動的に入力値を変化させて入力する機能と、出力結果を整理する機能からなる。

2.2 機能詳細

2.2.1 パラメータ最適化モジュール

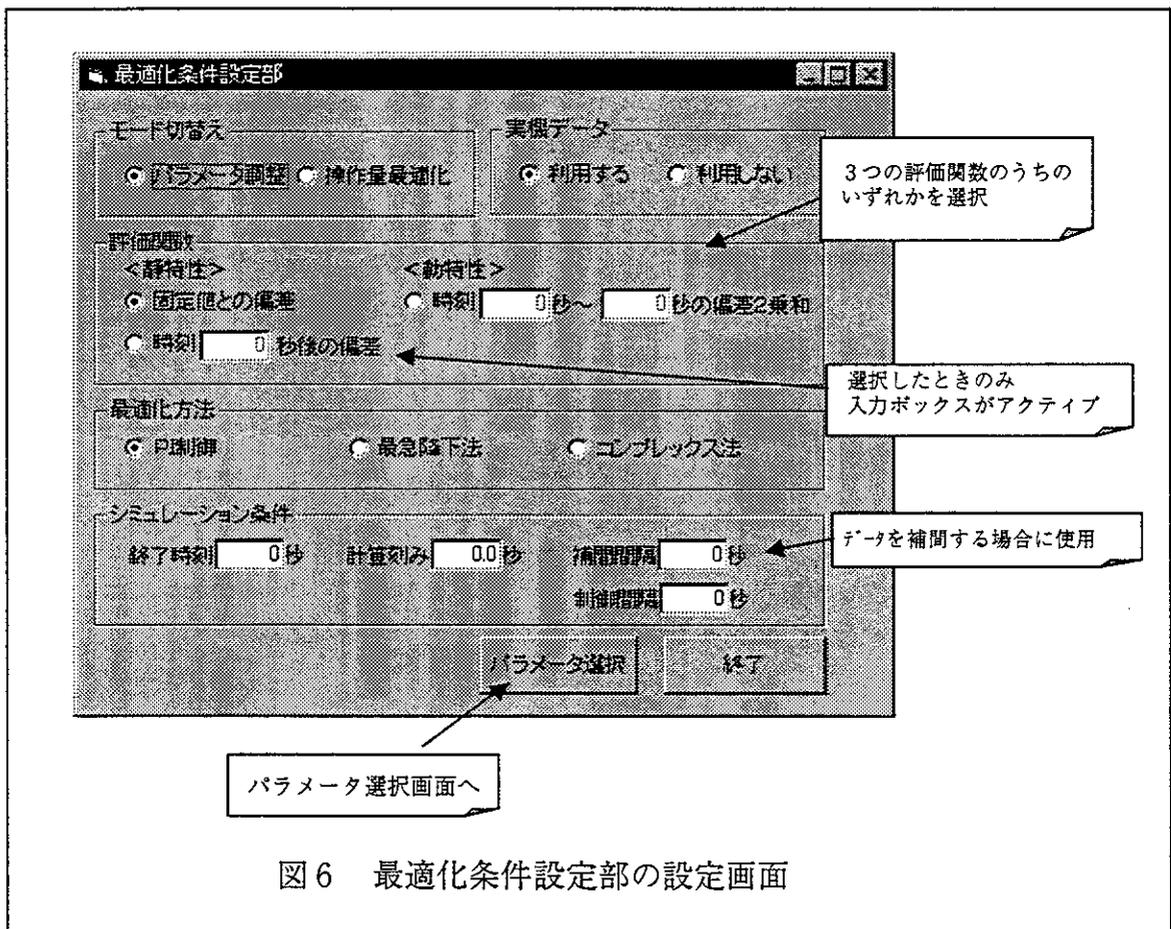


図6 最適化条件設定部の設定画面

(a) 最適化条件設定部

最適化の条件等を図6のメニュー画面に従い設定する。

条件設定後、パラメータ選択ボタンをクリックしてパラメータ選択部に移る。なお、本モジュールを含む条件設定画面は Microsoft(R)社製 VisualBasic で作成した。

(b)パラメータ選択部

図7に設定画面を示す。図7に示したメニューに従い調整パラメータを選択する。モデルパラメータ調整の場合は、ごみ質、反応速度定数等が候補となる。

◇画面1(最適化方法がPI制御の場合)

◇画面2(最適化方法がPI制御以外の場合)

図7 パラメータ選択部の設定画面

操作量最適化の場合は、空気流量、ストーカ速度等が候補となる。

また、同様の手続きで状態量リストから調整対象状態量を選択する。

(c) 入力データ読み込み部

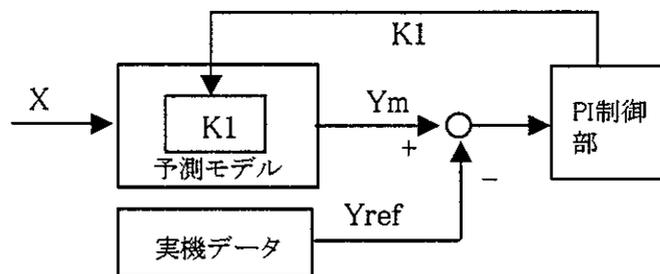
実機データファイルから入力データを読み込む。また、計算刻み幅と実機データのサンプル間隔が異なる場合、データを加工する。(データを補間または間引きする。)

(d) 最適化実行部

上記画面で選択した条件で最適化を実行する。最適化のアルゴリズムは(イ)PI制御、(ロ)最急降下法(ハ)コンプレックス法の3種類から選択できるものとする。各々のアルゴリズムを以下に示す。

(イ) PI制御

モデルパラメータK1を逐次更新していき、モデル出力値Ymと目標値が一致するようなK1を求める。



K1の更新方法:

$$K1(n+1) = K1(n) + \Delta K1(n)$$

$$\Delta K1(n) = Kp * \Delta Y(n) + Ki * \Sigma(\Delta Y(m))$$

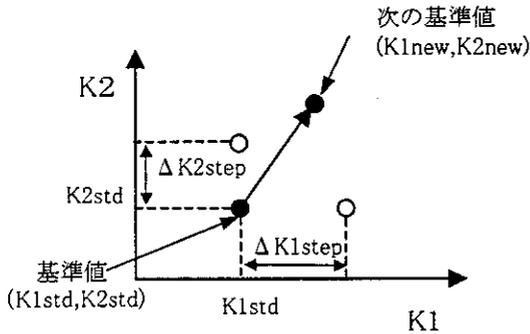
$$\Delta Y(n) = Ym(n) - Yref$$

Ym(n): nステップ目のモデル出力値

Yref : 目標値

Kp, Ki: 制御パラメータ

(ロ) 最急降下法



基準値(K1std, K2std)から次の基準値(K1new, K2new)を以下の手順で求める。

$$J(0) = J(K1std, K2std)$$

$$J(1) = J(K1std + \Delta K1step, K2std)$$

$$J(2) = J(K1std, K2std + \Delta K2step)$$

$$\Delta J(1) = J(1) - J(0)$$

$$\Delta J(2) = J(2) - J(0)$$

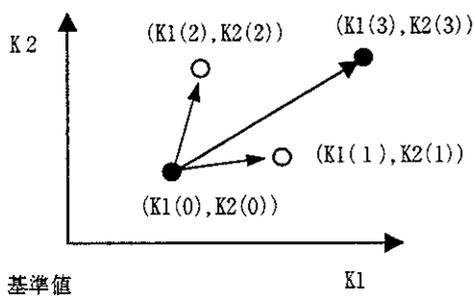
$$\Delta K1 = Kp * \Delta J(1) * \Delta K1step / (\Delta J(1) + \Delta J(2))$$

$$\Delta K2 = Kp * \Delta J(2) * \Delta K2step / (\Delta J(1) + \Delta J(2))$$

$$K1new = K1std + \Delta K1$$

$$K2new = K2std + \Delta K2$$

(ハ) コンプレックス法



(K1(0), K2(0)) ~ (K1(2), K2(2))の3点から次の点(K1(4), K2(4))を以下の手順で求める。
ただし、3点のうち最も評価値(J)が悪いものを基準点(K1(0), K2(0))とし、評価値J(0)とする。

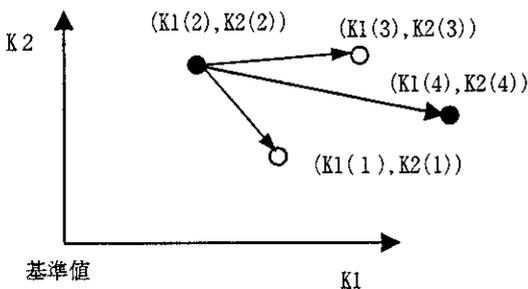
$$\Delta K1 = Kp * (\Delta J(1) * (K1(1) - K1(0)) + \Delta J(2) * (K1(2) - K1(0))) / (\Delta J(1) + \Delta J(2))$$

$$\Delta K2 = Kp * (\Delta J(1) * (K2(1) - K2(0)) + \Delta J(2) * (K2(2) - K2(0))) / (\Delta J(1) + \Delta J(2))$$

新しい点 (K1(4), K2(4))を求める

$$K1(4) = K1(0) + \Delta K1$$

$$K2(4) = K2(0) + \Delta K2$$



(K1(1), K2(1)) ~ (K1(4), K2(4))を新たな3点とし、最も評価値が低いものを基準点として、上記と同様の処理を繰り返す。

C. モデル検証のためのシミュレーション方法

1. 静特性調整

一定の操作条件を入力条件としてシミュレーションした。与えた入力条件を表1に示す。これらの入力条件のうち、No1～No4に示したダンパ開度、及びNo9に示した一次空気温度は実際の焼却炉の運転条件である。

表1 入力条件

No	項目	単位	設定値
1	乾燥段ダンパ開度	[%]	10
2	燃焼段ダンパ開度	[%]	100
3	後燃焼段ダンパ開度	[%]	45
4	二次燃焼ダンパ開度	[%]	100
5	ごみ水分割合	[%]	42
6	ごみ揮発割合	[%]	38
7	ごみチャー割合	[%]	9.5
8	ごみ灰分割合	[%]	8.5
9	一次空気温度[°C]	[°C]	200

次に、目標となる状態量を表2に示す。表2に示した状態量のうち、No1～No3の状態量は表1の運転条件で得られた実測データである。No4のダイオキシン濃度は対象とした焼却炉の一般的な値である0,5[ng-TEQ/Nm³]から推定した値である。

表2 目標状態量

No	項目	単位	設定値
1	クロロフェノール濃度	[μg/Nm ³]	1.8
2	CO濃度	[ppm]	15
3	炉内温度	[°C]	970
4	ダイオキシン濃度(総量)	[ng/Nm ³]	50

これらの目標状態量に調整するための、調整パラメータを表3に示す。調整パラメータのうち、No1～No3のパラメータはごみモデルのパラメータであり、ごみ温度、ごみ滞留量を調整するためのパラメータである。ただし、ごみ温度、ごみ滞留量については目標となる状態量がハッキリとしていない。そこで、ごみ温度、及び揮発分、チャーの燃焼量から、ごみが燃焼開始する位置及び燃焼が完了する位置を推測し、その位置が妥当な位置となるように調整した。また、No4～No9のパラメータは燃焼ガス温度及び燃焼ガスの組成を調整するためのパラメータである。

表3 調整パラメータ

No	項目	元の値
1	水分蒸発速度係数1	0.000017
2	揮発分蒸発速度係数1	0.9
3	チャー燃焼速度係数1	0.0129
4	CO反応頻度因子	12000
5	CO活性化エネルギー	-100000
6	PCPの燃焼反応頻度因子	430.6
7	PCPの燃焼活性化エネルギー	-46650
8	DXNの燃焼反応頻度因子	430.6
9	DXNの燃焼活性化エネルギー	-46650

2. 入力条件変更シミュレーション

2.1 ごみ質変更シミュレーション

前節で調整したモデルパラメータを使って、水分量と揮発分の割合を変化させた場合の挙動について解析した。水分の割合を増加させたシミュレーション及び減少させたシミュレーションを実施した。それぞれの条件を表4、表5に示す。

表4 ごみ質変更シミュレーション (水分増加)

条件	時間[秒]	ごみ水分	ごみ揮発分
条件1	0~300	42.0%	38.0%
条件2	300~3600	43.5%	36.5%

表5 ごみ質変更シミュレーション (水分減少)

条件	時間[秒]	ごみ水分	ごみ揮発分
条件1	0~300	42.0%	38.0%
条件2	300~3600	40.5%	39.5%

2.2 二次空気ダンパ開度変更シミュレーション

二次空気ダンパ開度を変化させた場合の挙動を解析した。シミュレーション条件は表6

表6 二次空気ダンパ開度変更シミュレーション

条件	時間[秒]	ダンパ開度
条件1	0~1800	100%
条件2	1800~3600	60%
条件3	3600~5400	40%
条件4	5400~7200	30%
条件5	7200~9000	20%

に示したとおりである。

D. シミュレーション結果及び考察

1. 静特性調整結果

パラメータ調整後のごみモデル、ガスモデルの特性について以下に示す。

1.1 ごみモデルの特性

ごみ温度及びごみを通過した後の一次空気の温度（一次空気出口温度）の特性を図9に示す。ごみ温度は乾燥段から徐々に上昇し、燃焼段中央付近で約1000℃に達した。その後、若干温度が低下するものの、後燃焼段出口で約900℃となっている。また、一次空気出口温度も乾燥段から徐々に上昇するが、燃焼段中央で約600℃になったのち、温度は徐々に低下し、後燃焼段出口では約250℃となった。

このときの各ごみ成分の滞留量、及び反応量について図10に示す。ただし、ここで反応量とは、水分の蒸発量、揮発分の揮発量、チャーの燃焼量のことである。図10より、ごみ中の水分は乾燥段の最初から蒸発を開始し、燃焼段の中央を過ぎるとほとんどなくなっている。また、揮発分は乾燥段の最後尾から揮発し始め、燃焼段の前半で揮発量はピークを示す。また、チャーが本格的に燃焼を開始するのは燃焼段後半からであり、後燃焼段でも燃焼が継続している。このような特性は定性的には妥当と思われる。なお、後燃焼段のごみ温度が約900℃と高い温度を示すのはチャーの燃焼によりごみが加熱されると仮定したからである。後燃焼段において、約900℃のごみを通過した一次空気の温度が300℃以下に低下するのは、ごみの滞留量が少なくなり、一次空気とごみが熱交換する接触面積が減ったためであると思われる。なお、本シミュレーションではごみ温度を調整しなかったため、若干高い温度となったが、例えば、一次空気とごみとの熱交換量を決定する伝熱係数を調整パラメータとすることで、ごみ温度の調整は可能である。

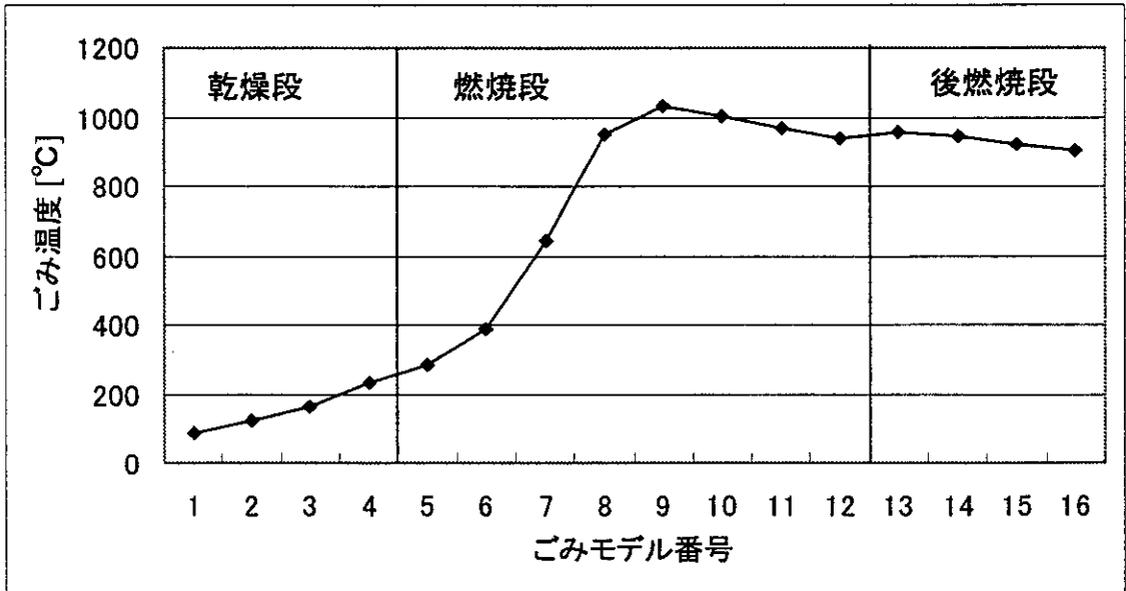
1.2 ガスモデルの特性

ガスモデルの特性について以下に示す。ただし、ガスモデルは10個のモデルからなっており、それぞれのモデル毎に温度、ガス組成を計算している。以下では乾燥ガスモデルから二次燃焼ガスモデルのそれぞれにおいて、中央のモデル（5番目）と最後のモデル（10番目）の特性を示す。

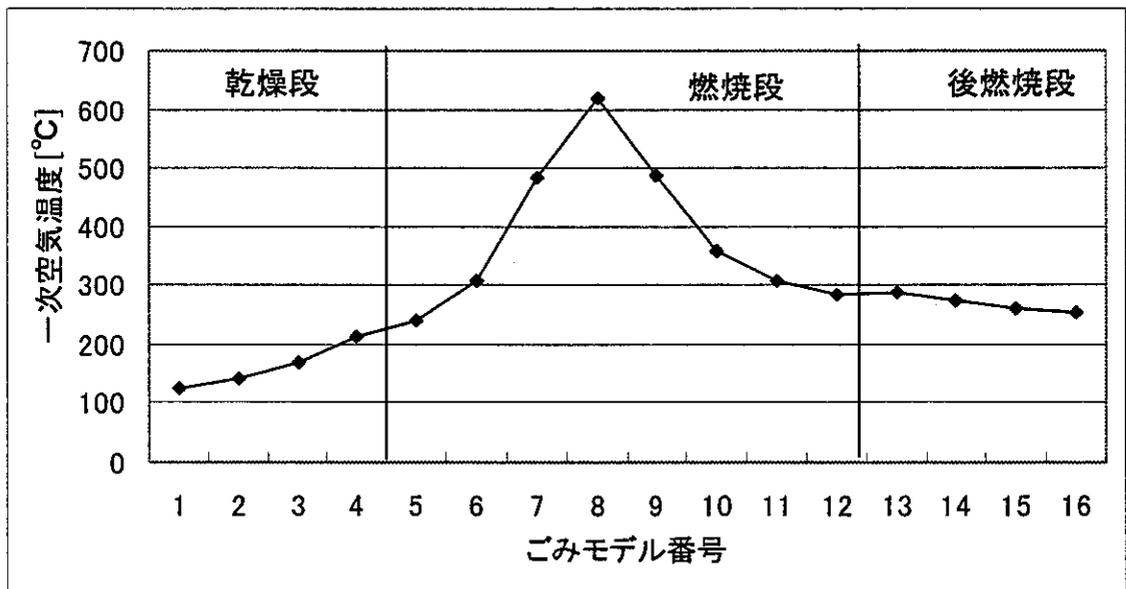
(a) ガス温度

ガス温度の特性について図11に示す。図11より、乾燥ガスモデルから後燃焼ガスモデルの出口温度は約800℃となっている。出口温度が比較的均一になっている理由は、隣接するガス同士が一部混ざり合うモデルになっているためと思われる。

また、二次燃焼ガスモデルの中央部の温度は1016℃、出口温度は979℃となった。実機の炉上部温度が970℃であることを考えると、ほぼ妥当な温度特性であると思われる。

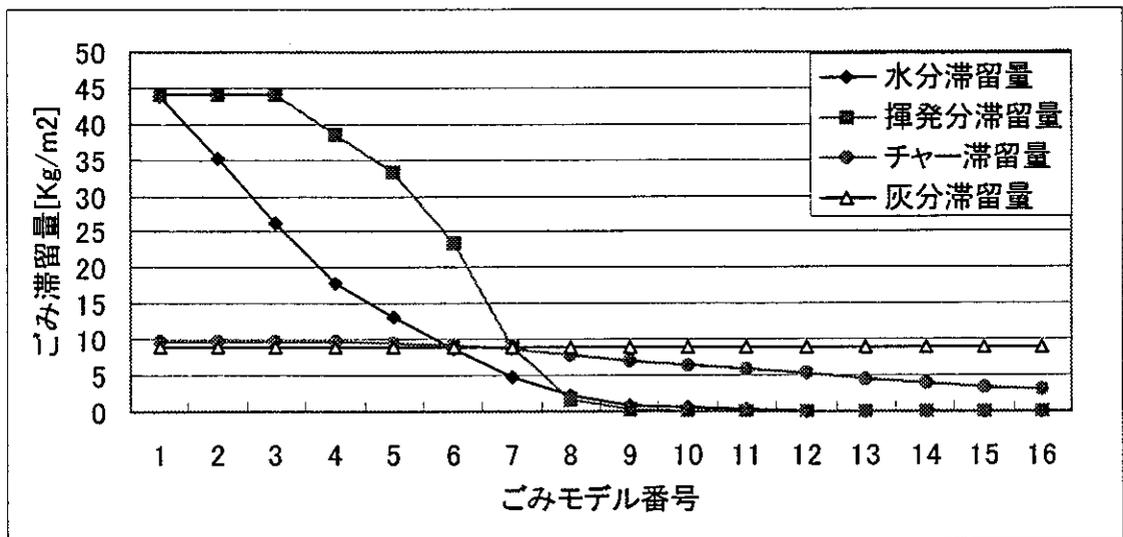


(a)ごみ温度

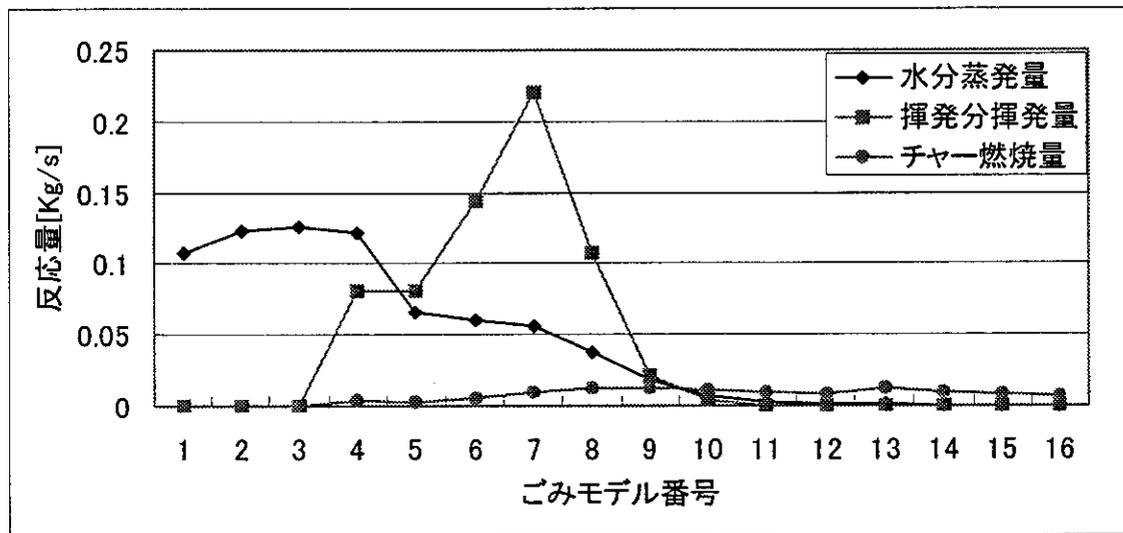


(b)一次空気温度

図9 ごみモデルの特性1



(a)ごみ滞留量



(b)反応量

図10 ごみモデル特性2

(b) O₂濃度

図12に各ガスモデルのO₂濃度の特性を示す。5番目のO₂濃度の値は、乾燥ガスから燃焼ガス2までのO₂濃度が0%となっている。これは、揮発分、及びチャーから発生したCOが燃焼したことにより酸素が消費されたからである。また、10番目のモデルでは燃焼2ガスモデルのO₂濃度は0.3%程度であるが、これは隣接する後燃焼ガスモデルからO₂濃度が0%でないガスが流入したためと思われる。

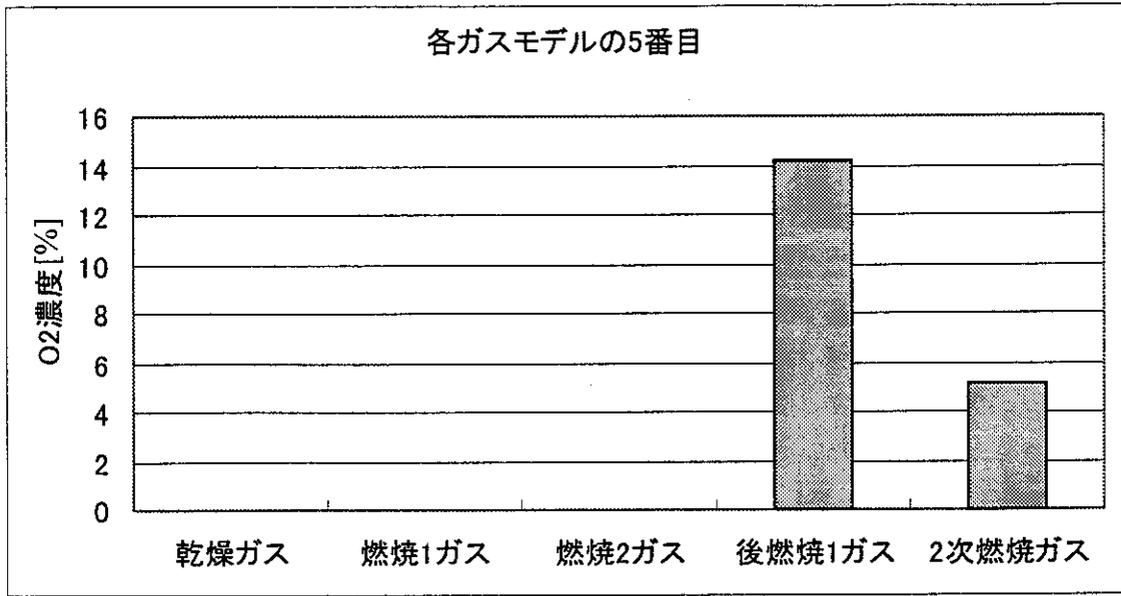
二次燃焼ガス出口のO₂濃度は5%強である。実機で計測されたデータは約11%であり、大きく異なっている。ただし、実機でO₂濃度が計測される場所はEP出口である。実機では炉出口からEP出口までの間には、ガス冷却室、反応塔などがあり、水または消石灰の水スラリーが吹き込まれているが、モデルではそれらの機器を考慮していない。また、焼却プラントでは焼却炉及び排ガス処理系で相当の漏れこみ空気があるといわれている。これらの要因により実際のO₂濃度とモデルで求めた結果が異なると考えられる。

(c) CO濃度

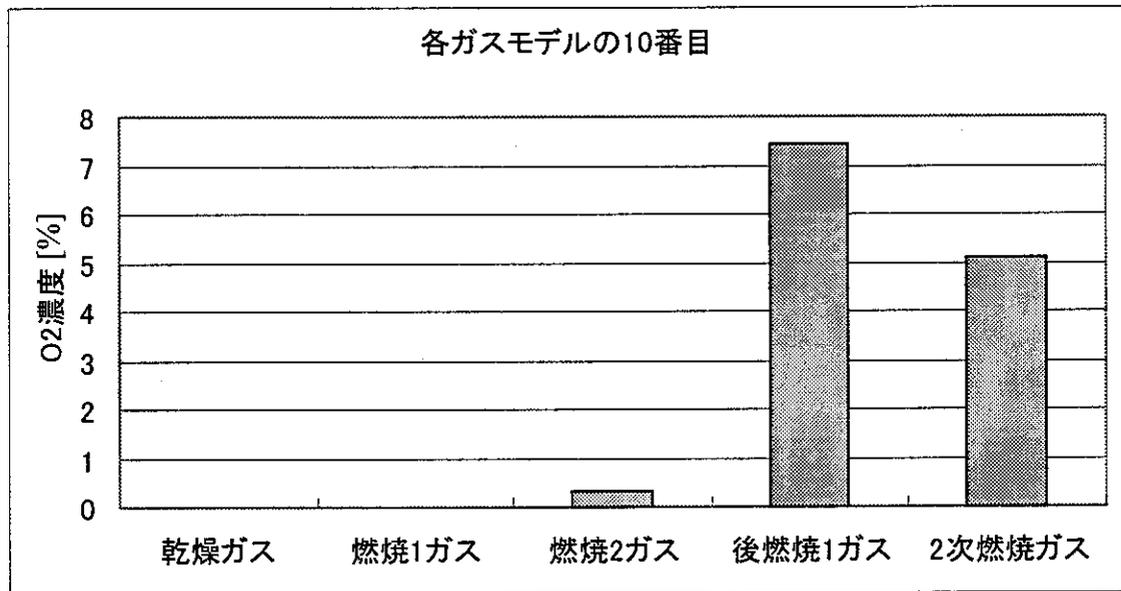
図13にCO濃度の特性を示す。乾燥ガスモデルから後燃焼ガスモデルまでの一次燃焼領域のガスモデルではいずれも高いCO濃度を示している。図11に示したガス温度の特性及び図12に示したO₂濃度の特性から判断すると、乾燥ガスモデルから燃焼ガス2モデルまでのモデルでCO濃度が高くなっているのは、O₂不足によることが分かる。また、後燃焼ガスモデルは、O₂不足ではないがガス温度が低いために反応が促進されず未燃となったと判断できる。これらの一次燃焼領域のガスに二次空気が加わり、二次燃焼ガスモデルの中央のモデル(5番目)及び出口のモデル(10番目)でCO濃度は0 [ppm]となった。ただし、実機のCO濃度は15 [ppm]であり、低い濃度であるが、0 [ppm]ではない。本モデルにおいてCO濃度を15 [ppm]に合せることは可能であると思われる。しかしそのような調整を実施すると、クロロフェノール濃度の推定に影響が出る可能性があったため、本シミュレーションでは調整を実施しなかった。なお、詳細な説明は考察で述べる。

(d) クロロフェノール濃度、ダイオキシン濃度

図14及び図15にクロロフェノール及びダイオキシン濃度の特性を示す。今回は両者の濃度がそれぞれ1.8 [$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$]、50 [ng/Nm^3]となるように調整したため、炉出口の両者の濃度は目標とした値に一致している。また、各ガスモデル出口のクロロフェノールの濃度を比較すると、乾燥段、後燃焼段に比べて燃焼段の濃度は高く、特に燃焼段1のクロロフェノール濃度は乾燥段、後燃焼段の約5倍の濃度となっている。すなわち、クロロフェノールは燃焼段の前半から多く発生することを示しており、定性的に妥当な特性と考えられる。

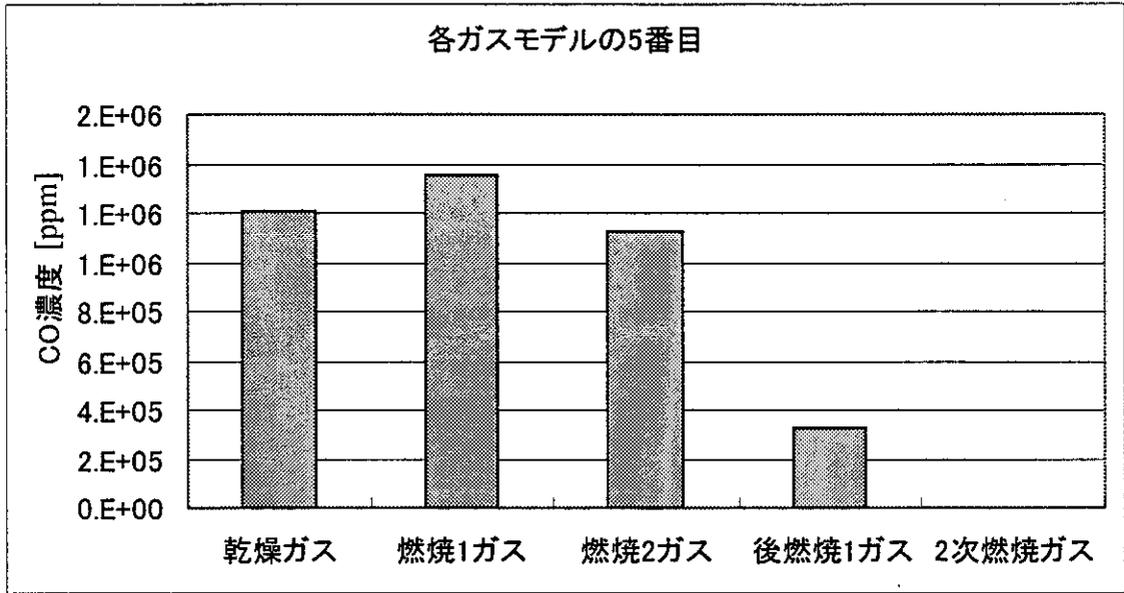


(a)ガスモデル中央(5番目)

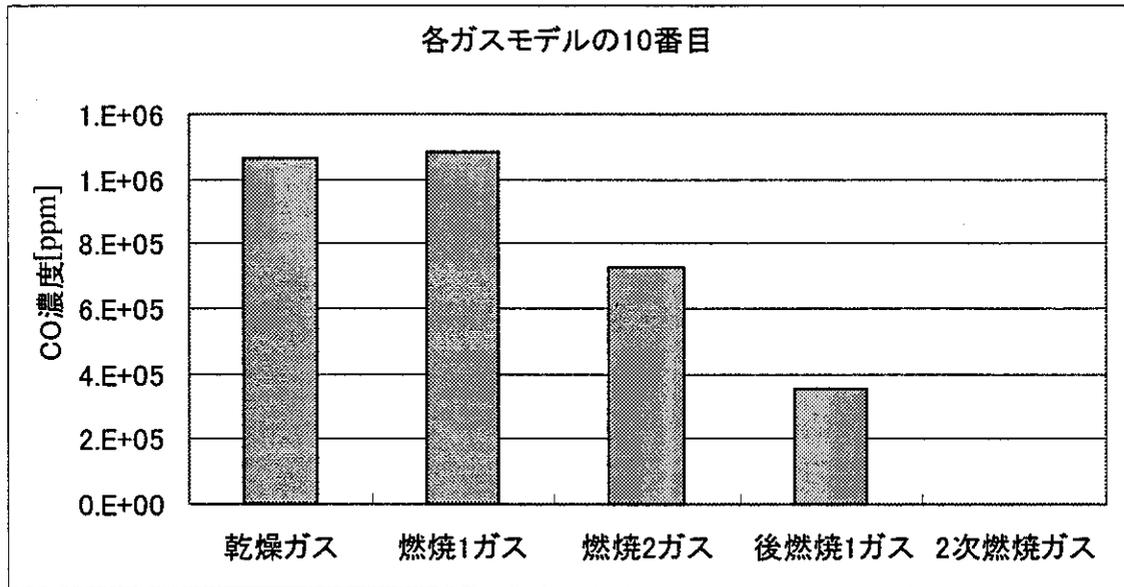


(b)ガスモデル出口(10番目)

図12 ガスモデル特性2(O₂濃度)

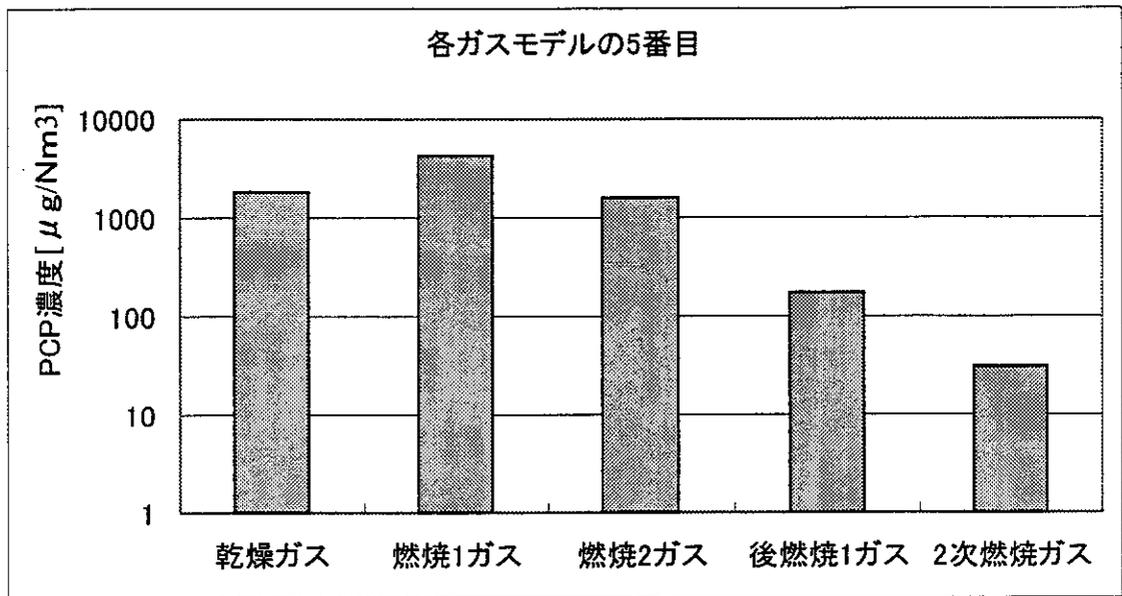


(a)ガスモデル中央(5番目)

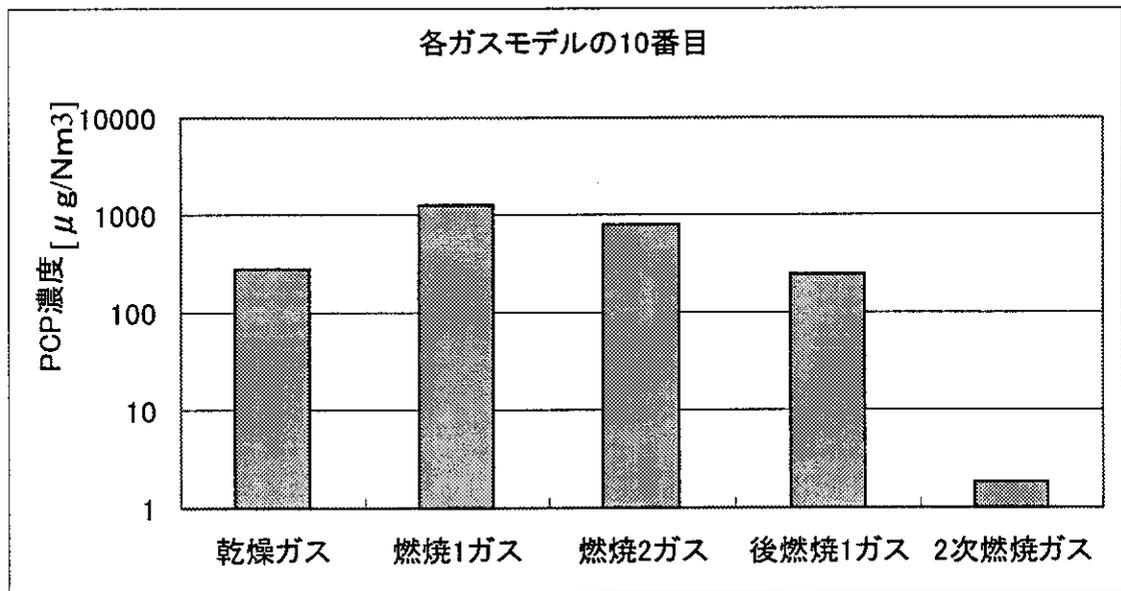


(b)ガスモデル出口(10番目)

図13 ガスモデル特性3(CO濃度)

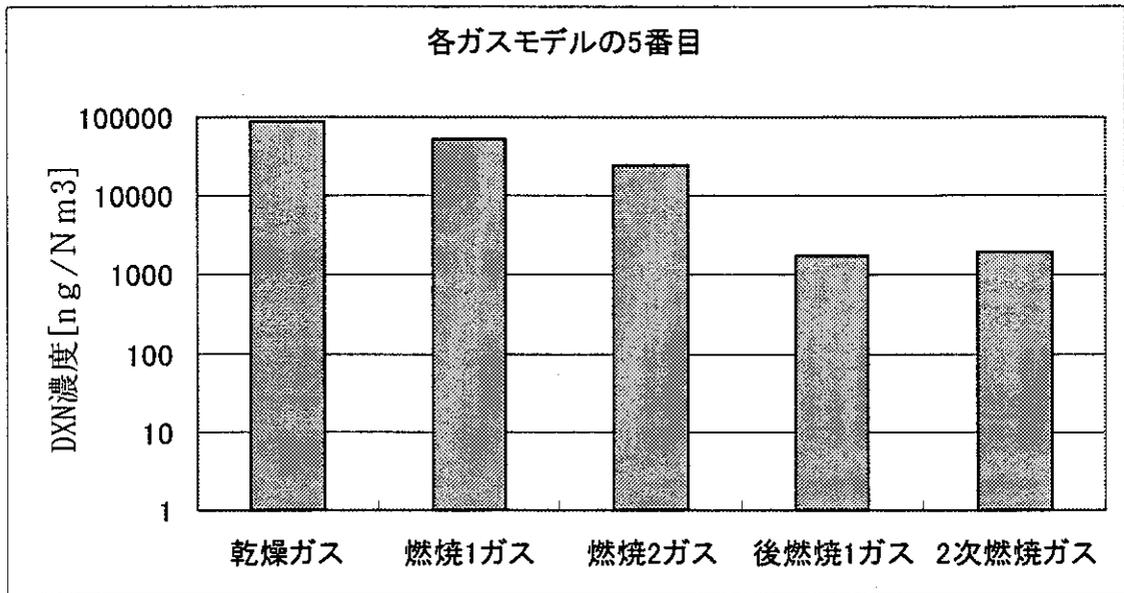


(a)ガスモデル中央(5番目)

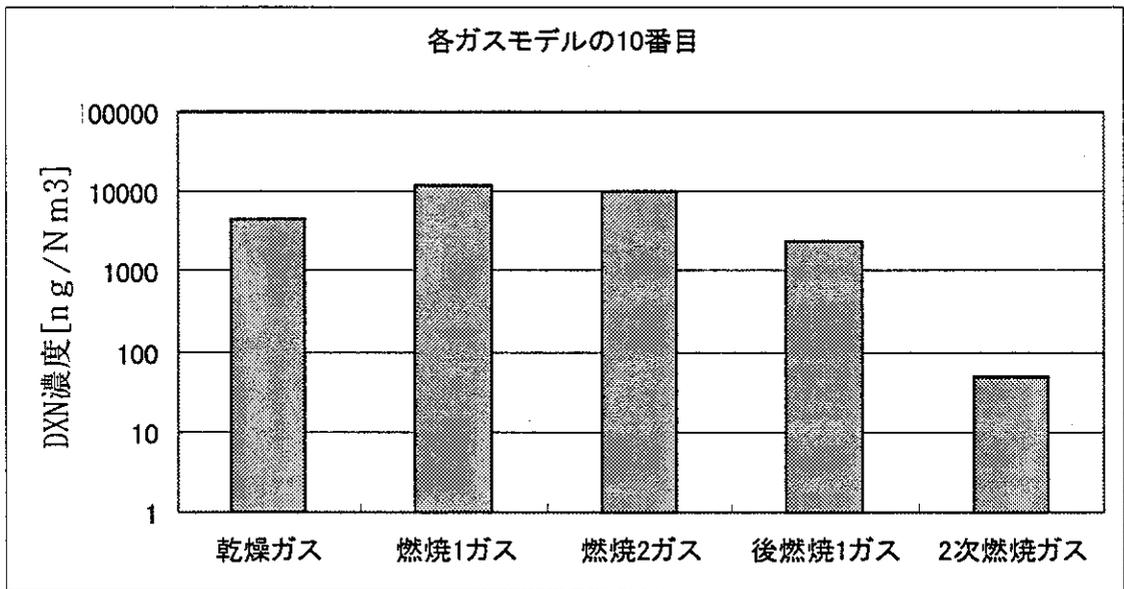


(b)ガスモデル出口(10番目)

図14 ガスモデル特性4(PCP濃度)



(a)ガスモデル中央(5番目)



(b)ガスモデル出口(10番目)

図15 ガスモデル特性5(DXN濃度)

2. 入力条件変更シミュレーション結果

2.1 ごみ質変更シミュレーション結果

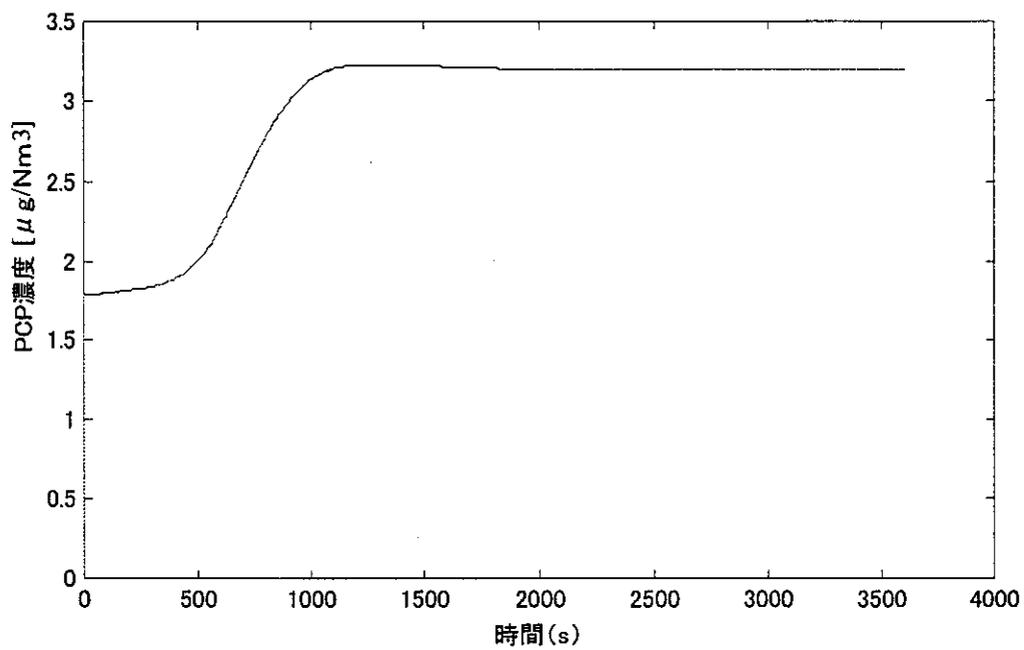
ごみ中の水分を増加させ、揮発分を減少させたシミュレーション結果を図16に示す。水分を増やすことにより、クロロフェノールの濃度は増加した。このときのガス温度の変化を図17に示す。ガス温度の変化をみると、ごみ中の水分を増加させた時間(300秒)からしばらくして、ガス温度が低下している。そのために反応速度が低下し、クロロフェノールの濃度は増加したと考えられる。

逆に、ごみ中の水分を減少させ、揮発分を増加させた場合のシミュレーション結果を図18に示す。このときのガス温度の変化を図19に示す。この場合はごみ中の水分を減少させた時間からしばらくのちに、逆にガス温度が上昇していることがわかる。

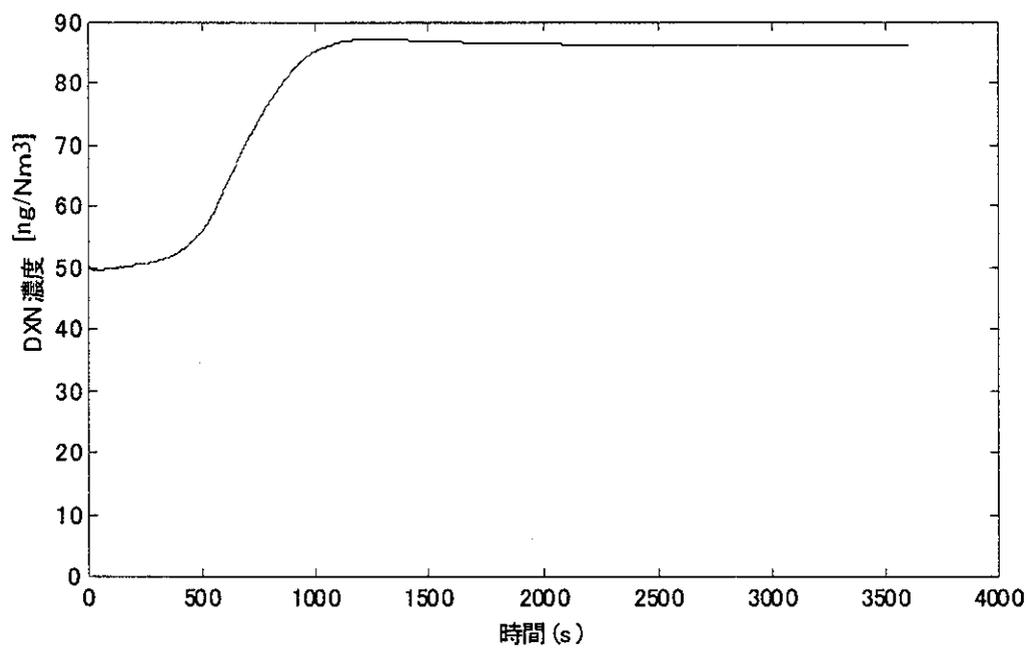
以上より、ごみ中の水分の量による挙動は定性的には妥当と思われる。ただし、水分変化量に対するクロロフェノール濃度の変動幅が大きく、今後は定量的妥当性を検討する必要がある。

2.2 二次空気ダンパ開度変更シミュレーション結果

二次空気ダンパ開度を100%から60%、40%、30%、25%と段階的に減らした場合のシミュレーション結果を図20に示す。100%から60%にするとクロロフェノール濃度は低下したが、さらに空気量を減らすとクロロフェノール濃度は上昇した。少し二次空気量を減らすことで、ガス温度が上昇しクロロフェノール濃度は低下するが、減らしすぎると、酸素濃度が低下し、また攪拌効果が低下するためクロロフェノール濃度は上昇する。この挙動も定性的には妥当と思われる。本シミュレーションではダンパ開度60%の時にクロロフェノールを最も低くできる操作量であった。なお、ダンパ開度切り替え時に一時的にクロロフェノール濃度が上昇した原因は、本モデルで模擬した攪拌効果(見かけ反応速度)はダンパ開度を切り替えた瞬間に変化するが、ダンパ開度を小さくしてからガス温度が上昇するまでにはある程度時間がかかるためであると思われる。

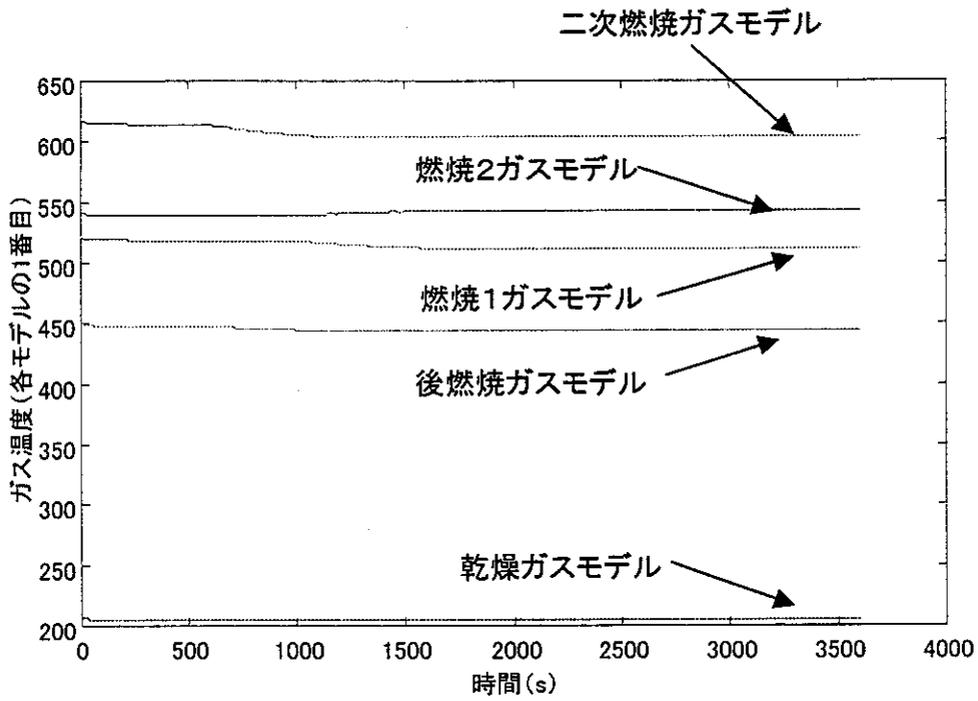


(a)PCP濃度

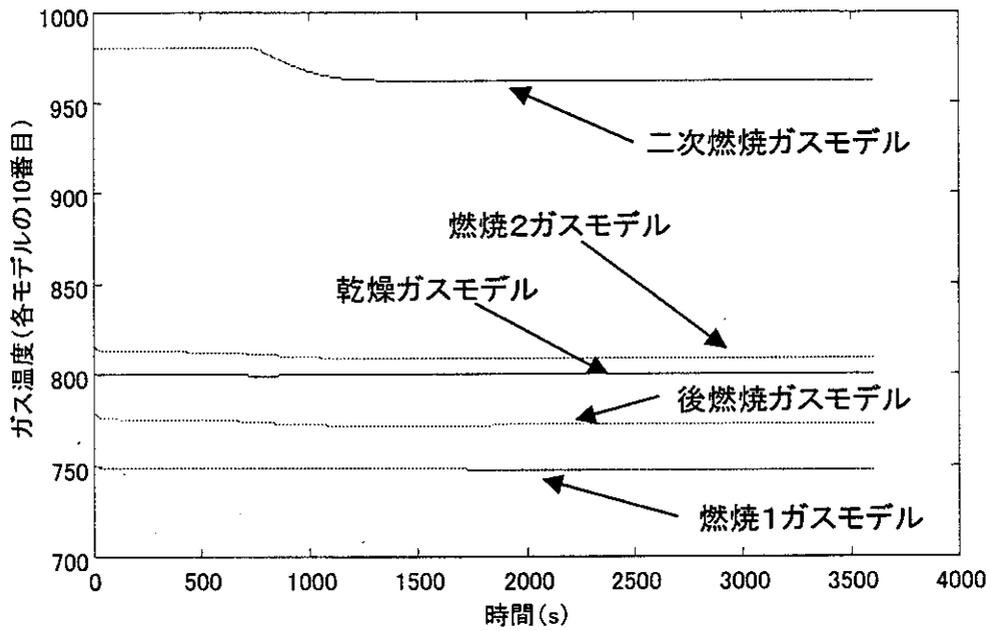


(b)DXN濃度

図16 ごみ中の水分が増加した場合の特性1



(a)ガスモデル入口(1番目)



(b)ガスモデル出口(10番目)

図17 ごみ中の水分が増加した場合の特性2