

# 流動床焼却炉の燃焼条件の最適化

小川彰一、伊藤暢基、鈴木茂

住友重機械工業株式会社 プラント・環境事業本部 環境技術研究所  
神奈川県平塚市夕陽丘63-30

## 概要

一般廃棄物の焼却処理においては、可燃性ガスと燃焼空気を十分に混合し、完全燃焼を図ることが、汚染物質低減及び、効率的な減容化などの点から考えて重要である。ここでは、流動床型焼却炉の2次燃焼室に注目し、燃焼条件のパラメータとして2次空気の吹き込み条件を考え、これらパラメータが炉内の燃焼状態に与える影響を、数値解析的に検討した。さらに、燃焼状態の良否を炉出口におけるCO濃度で評価し、適切な燃焼条件を明らかにした。

## キーワード

都市ごみ、焼却炉、燃焼、計算機シミュレーション

## 1 はじめに

一般廃棄物の埋立地の不足が著しい我が国では、廃棄物を処理する上で、廃棄物の減容化を図る必要がある。減容化法として、焼却は短時間で大量の処理が可能という点から考えて有効な手段であるが、一方で、ごみ焼却施設から発生する排ガス中の微量成分による環境汚染が、社会的な問題になっており、汚染物質の排出量を低減化する、より高度な焼却処理技術が求められている。施設からの汚染物質排出量を抑制するには、焼却炉内における発生量を低減させる方法と、発生した物質を無害化する方法の二つがあるが、前者の方がより根本的な解決につながると言える。従って焼却炉内において可燃性物質と燃焼空気を十分に混合し、完全燃焼を図ることは、大気汚染物質の発生量抑制の手段として非常に重要であると考えられる。

一方、近年では、コンピューター技術の発達は著しく、都市ごみ焼却施設を対象とした解析も行われ、その有効性が示されている<sup>1)2)3)4)</sup>。

ここでは、流動床型都市ごみ焼却炉の2次燃焼室を対象として数値解析的手法を用いて、2次空気の吹き込み速度、ノズル角度、ノズル本数などが炉内における可燃性ガスの流れ、2次空気との混合、化学反応、燃焼などに与える影響を検討した。さらに、排ガス中の微量汚染物質の生成量の指標として一酸化炭素の生成量を採用し、その濃度で燃焼状態の良否を評価し、適切な燃焼条件を明らかにした。

## 2 解析

### 2.1 解析手順

焼却炉内へ投入された一般廃棄物は熱伝達により昇温し、乾燥、熱分解され、 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $N_2$ などの気体と灰分、固定炭素らの固体とに分解される。

これらのうち、 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$  などの可燃性ガスは1次空気及び2次空気中の酸素と反応し、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$  となり、固定炭素は燃焼により  $CO$ 、 $CO_2$  のガスとなる。通常炉内温度は  $850\sim 900^\circ C$  で運転されるため、これらの反応は拡散律速となり、酸素の可燃物に対する均一な分散が完全燃焼を行う上で重要な因子となる。その為、1次空気及び2次空気の炉内への吹き込み条件を種々変更し、炉内における酸素濃度の均一性を調べれば吹き込み条件の良し悪しを評価することができる。ここでは、酸素濃度の均一性に関する定量的な評価法として、酸素濃度偏差を採用した。

さらに、酸素の混合が比較的良好と評価された空気吹き込み条件に対して、化学反応と放射を含む熱流動解析を実施し、炉出口における  $CO$  濃度を直接算出した。前記した炉内温度においては、熱解離による  $CO$  の生成はほぼ無視できると考えられるから、算出された  $CO$  は、炉内における酸素の不均一性に起因する酸素不足下の燃焼によると考えられる。従って、炉出口における  $CO$  濃度を指標として、燃焼条件の最適化を試みた。

## 2. 2 解析条件

解析対象とした焼却炉の形状と座標系を図1に示す。解析は3次元で行い、計算領域は炉の対称性を考慮して実炉の半分とし、流動床表面から炉出口までとした。2次空気吹き込み位置は、ごみが投入される側とその反対側の壁面とし、前者を前段側、後者を後段側と呼ぶこととする。

数値解析に使用している基礎方程式は質量保存則、運動量保存則、エネルギー保存則に基づく各方程式である。乱流モデルは  $k-\epsilon$  モデルを、放射モデルは放射熱線法を使用し、有限体積法に基づいた SIMPLE 法に準ずる解析手法<sup>5)</sup>を使用した。

解析は、最初に流れのみを考慮した流動解析で、炉内の酸素分散をより均一にできる2次空気吹き込み条件の検討を行い、次に燃焼と放射を考慮した熱流動解析で、流動解析で得られた2次空気吹き込み条件の一酸化炭素排出量に対する効果の確認と、2次空気温度の影響を検討した。

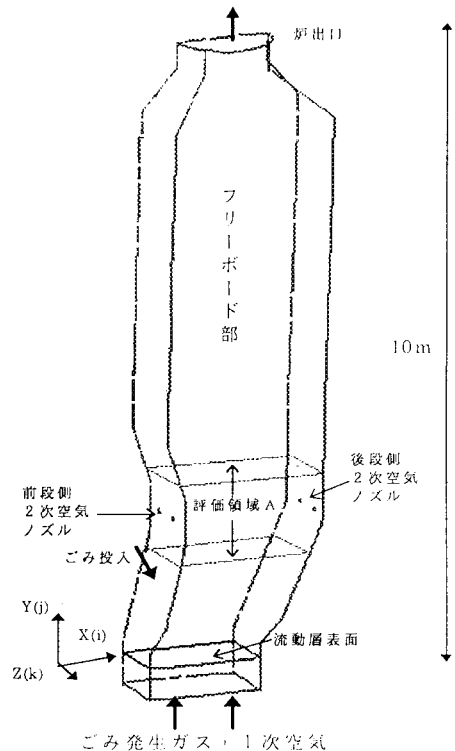
## 2. 3 流動解析

流動解析では流れのみを考慮し、2次空気の吹き込み条件の検討を行った。計算パラメータは吹き込み速度、吹き込み角度、ノズル本数とした。検討範囲を表1に示す。流動床表面からの流れのガス組成は窒素とし、2次空気の組成は空気相当(窒素 79vol%、酸素 21vol%)とした。混合の評価は、炉全体における酸素モル分率の分布と、式(1)で定義した酸素モル分率の偏差  $dev_{O_2}$  で行った。酸素モル分率の偏差による評価は、図1で評価領域Aと示した2次ノズル付近で行った。

表1 流動解析検討範囲

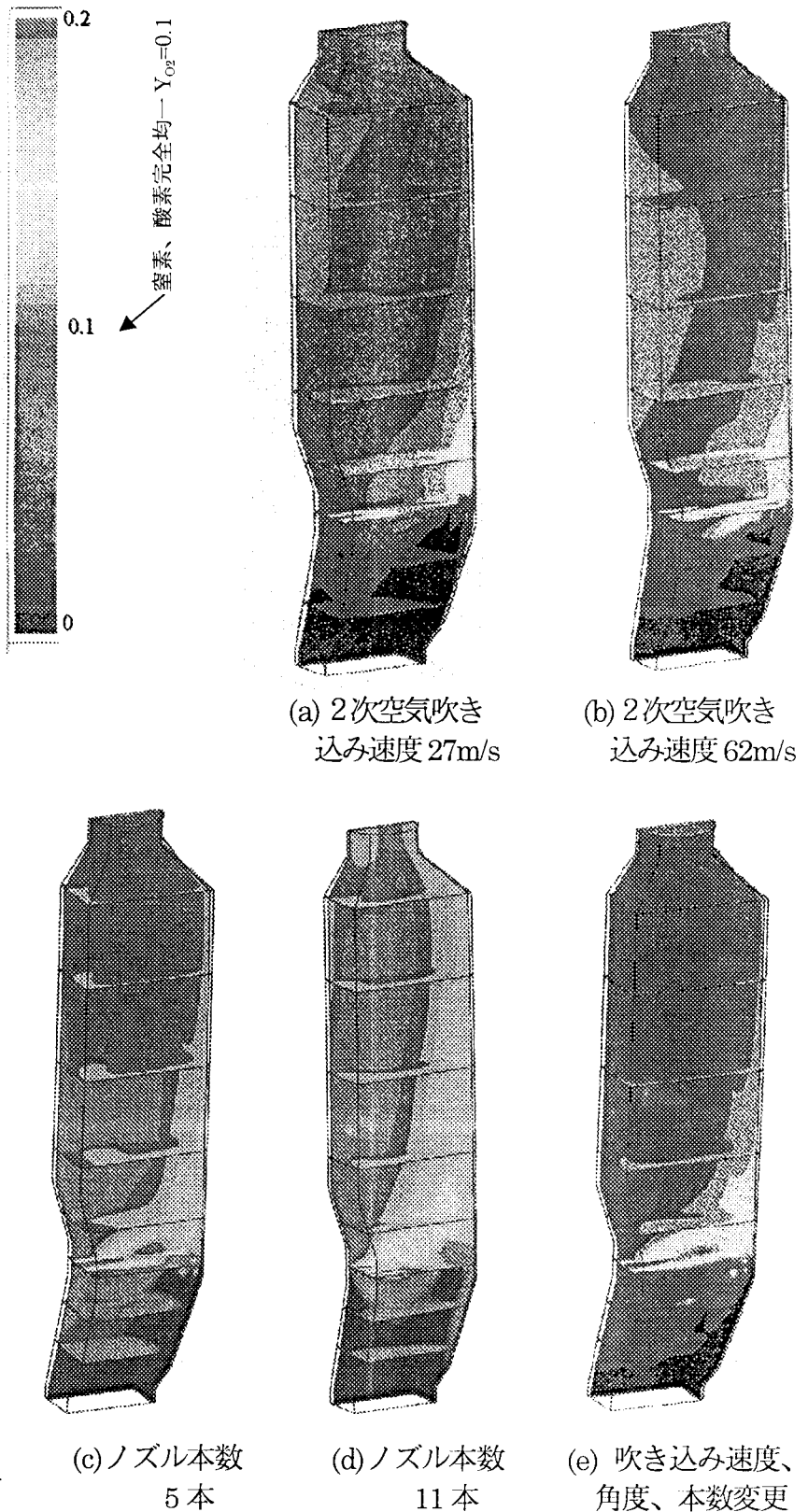
計算パラメータ	前段側 角度(度)	後段側 角度(度)	吹き込み 速度(m/s)	ノズル 本数(本)
変動幅	0 ~ 30	0 ~ 30	16 ~ 62	5 ~ 11

$$dev_{O_2} = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j \sum_k (Y_{O_2,i,j,k} - Y_{O_2,av})^2 V_{i,j,k}}{V_{all}}} \quad (1)$$



ここで、 $Y_{O_2}$ は酸素のモル分率、 $V$ はセルの体積を表す。下添え字の*i,j,k*はセル番号、 $\bar{av}$ は平均値、 $all$ は評価領域A全体をそれぞれ表す。式の形から分かるように、評価領域A内で酸素が均一に分散しているほど  $dev_{O_2}$  は小さな値になり、完全に均一分散した場合は0になる。

最初に、図2-(a)、-(b)に前段側、後段側の2次空気吹き込み角度が0度、下向きに30度、2次空気吹き込み速度が27m/s、2次空気ノズル本数が11本の場合と、吹き込み速度だけを62m/sとした場合の酸素モル分率をそれぞれ示す。流動床表面と2次空気が完全に混合した場合の酸素モル分率は約0.1であり、炉内でこの領域が閉める体積が大きいほど、酸素の分散状態がより良いということになる。図2-(a)に示した通り、速度が27m/sの場合では、流動床表面からの流れが前段側ノズル間を吹き抜けた為、2次燃焼室において酸素混合が不十分な領域が存在する。しかし、速度が62m/sの場合には、吹き込み速度の増加によって、流動床により近い



(a) 2次空気吹き込み速度27m/s

(b) 2次空気吹き込み速度62m/s

(c) ノズル本数5本

(d) ノズル本数11本

(e) 吹き込み速度、角度、本数変更

図2 酸素モル分率

領域まで2次空気が到達すること、垂直断面に形成される渦が強くなるので、ノズル下部での混合が促進し、図2-(a)で観察された、混合が不十分な領域は見られず、酸素がより均一に分散していることがわかる。両ケースの評価領域Aにおける酸素モル分率の偏差は0.028と0.021であった。

次に、図2-(c)、-(d)に前段側、後段側の2次空気吹き込み角度が0度、下向きに30度、2次空気吹き込み速度が27m/s、2次空気ノズル本数が9本の場合と、ノズル本数だけを17本とした場合の酸素モル分率をそれぞれ示す。ノズル本数が11本の場合に相当する図2-(a)とあわせて比較すると、最も酸素の分散状態が良好なのは9本で、逆に17本は前段側ノズル間の吹き抜けが図2-(a)よりも更に顕著になっており、酸素分散は9本、11本の場合よりも悪化していることが分かる。評価領域Aにおける酸素モル分率偏差は9本、17本それぞれに対して0.024と0.031であった。

以上の結果を基に、酸素の混合特性と、2次空気吹き込み条件の関係を表す重回帰式を得た。この式を用いて更に定量的な検討を行い、2次空気吹き込み前段側と後段側の角度がそれぞれ、0度、下向きに30度、吹き込み速度が58m/s、ノズル本数が9本の最適な組み合わせを選定し、この2次空気吹き込み条件に対する流動解析を行った。その結果を図2-(e)に示す。これを図2-(a)~2-(d)と比較すると、いずれの場合よりも2次燃焼室における酸素分散は更に促進しており、酸素モル分率が約0.1である領域は2次ノズル位置より下流側の大部分を占めるに至った。評価領域Aの酸素モル分率の偏差は全ケース中最も分散状態が悪い場合の0.033に対して、全てのケースの中で最小の0.019であった。これらのことから、パラメータの組み合わせによる効果を確認でき、最適な酸素の分散状態が得られる2次空気吹き込み条件を選定することができた。

## 2.2 熱流動解析

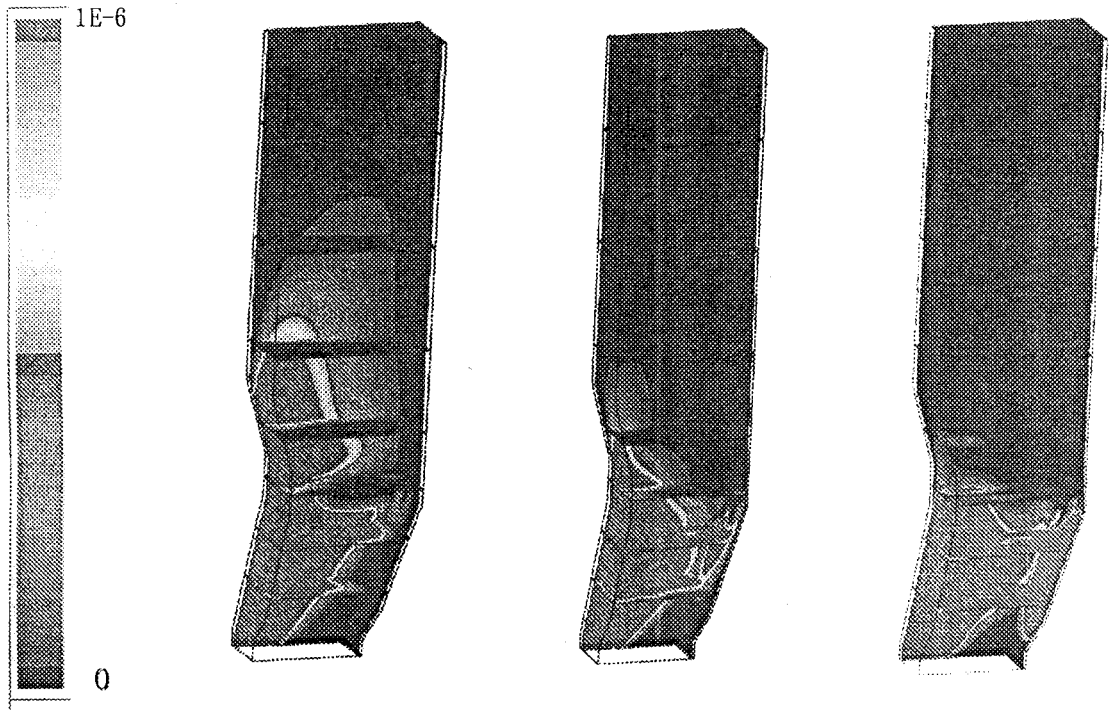
熱流動解析では、流れに加えて燃焼と放射を考慮して燃焼状態の検討を行った。計算は表2に示すように4ケースについて行った。計算パラメータは2次空気吹

表2 熱流動解析検討範囲

計算ケース	前段角度(度)	後段角度(度)	吹き込み速度(m/s)	ノズル本数(本)	2次空気温度(度)
ケース1	0	-30	27	11	20
ケース2	0	-30	43	11	200
ケース3	0	-30	58	9	20
ケース4	0	-30	58	9	200

き込み速度、ノズル本数、2次空気温度である。流動解析で得られた2次空気吹き込み条件はケース3に相当する。ケース2では2次空気予熱による効果を、ケース4では流動解析で得られた2次空気吹き込み条件に加え、2次空気を予熱したことによる効果を検討した。1次空気、2次空気のガス組成は空気相当とし、流動床表面のごみの燃焼は、ごみから発生する可燃性ガス燃焼とチャー燃焼の両方を取り扱った。可燃性ガスは一酸化炭素、水素、プロパン、エチレン、メタンの5つの化学種を考慮した。結果を炉全体の1酸化炭素のモル分率で整理し、燃焼状態の評価を行った。

ケース1、3、4の1酸化炭素モル分率を図3-(a)、-(b)、-(c)にそれぞれ示す。ケース1(図3-(a))では、流動床表面からの流れが前段側ノズル間を吹き抜けた為、2次燃焼室のほぼ中央の高さまで比較的1酸化炭素が高濃度に存在する領域が観察されるが、ケース3(図3-(b))では2次空気吹き込み条件を最適な条件に変更することにより1酸化炭素と酸素の混合が促進し、これによって1酸化炭素の反応が加速した為、2次燃焼室における1酸化炭素の多い領域は減少した。この結果から、2次空気吹き込み条件の適正な変更によって1酸化炭素排出量を低減化できる事がわかった。ケース4(図3-(c))の、2次空気吹き込み条件の最適化に加えて2次空気を予熱した場合では、ケース3と比較すると、2次燃焼室における1酸化炭素の多



(a) ケース1                      (b) ケース3                      (c) ケース4

図3 炉内一酸化炭素モル分率

い領域は更に減少し、2次ノズル位置より下流側ではほとんど観察されない。これは、2次空気の予熱による炉内温度の上昇によって、一酸化炭素の反応が加速した為であると思われる。また、ケース1、3と比較すると、ケース4の一酸化炭素の低減効果が最も顕著であり、2次空気の予熱も含めた総合的な2次空

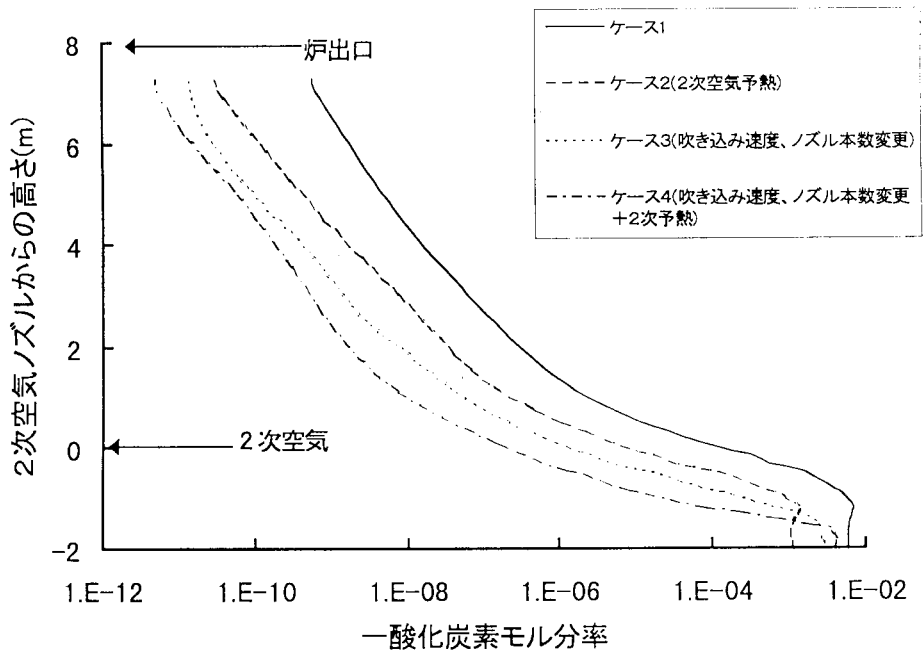


図4 炉内一酸化炭素モル分率分布図

気吹き込み条件の適正化によって、更に一酸化炭素排出量を低減化できることが分かった。

図4に各高さで平均化した炉内一酸化炭素モル分率を示す。いずれのケースにおいても、一酸化炭素は2次ノズルより吹き込まれた2次空気と混合し、燃焼するため2次ノズル位置近傍で減少する。ケース1とケース2を比較すると、炉出口における一酸化炭素排出量はケース2の方が少なく、ケース1の約1/10程度にすることができた。ケース1とケース3を比較すると、炉出口における一酸化炭素排出量はケース3の方が少なく、この図からも2次空気吹き込み条件の適正化による効果を確認できた。また、ケース2、3、4を比較すると、ケース4の排出量の方が少なく、2次空気吹き込み条件に加えて、2次空気の予熱を含めた総合的な適正化による効果分かった。

#### 4、おわりに

流動床式ごみ焼却炉を対象として、2次空気の吹き込み角度、吹き込み速度、ノズル本数を種々に変更し、2次空気吹き込み条件と、炉出口におけるCO濃度との関係を数値解析的手法によって検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 2次空気吹き込み速度、角度、ノズル本数は、炉内の酸素分散に大きな影響を与えることが明らかとなり、最も良い分散を与える条件は、前段側、後段側の角度がそれぞれ0°、下向きに30度、吹き込み速度が58m/s、ノズル本数が9本の組み合わせケースであり、酸素モル分率偏差は0.019であった。最も悪い分散を与える条件の酸素モル分率偏差は0.033であった。
- (2) 酸素モル分率偏差の小さい場合は、炉出口における一酸化炭素排出量も少なくなる傾向を示し、微量汚染物質の低減に有効な燃焼条件と考えられる。
- (3) 比較的炉雰囲気ガス温度が低い領域へ吹き込む2次空気の温度は一酸化炭素排出量に影響を及ぼし、200°Cに予熱すると、20°Cの場合と比較して一酸化炭素出口濃度は約1/10に低減する傾向を示した。従って、2次空気の予熱は一酸化炭素排出量の低減に有効であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 伊藤、小川、住友、山崎：ごみ焼却炉内2次空気混合に関する数値解析、第5回廃棄物学会研究発表会講演論文集、(1994)、pp.55-60
- 2) 伊藤、小川、住友、山崎：クラスタモデルによるごみ焼却炉数値解析、第6回廃棄物学会研究発表会講演論文集、(1995)、pp.312-315
- 3) 鈴木、伊藤、小川、住友、山崎：ごみ焼却炉内ガス流れの整流に関する研究、第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集、vol. II、(1996)、pp.622-624
- 4) 上田、藤原、森嶋：ごみ焼却炉における層上空気吹き込みの最適化、第4回環境工学総合シンポジウム講演論文集、1994、pp81-83
- 5) Patanker, S.V. : コンピューターによる熱移動と流れの数値解析、森北出版、(1980)
- 6) 片桐健一、平岡正勝、水野健一郎：都市固形廃棄物の熱分解反応特性に関する研究、京都大学環境衛生工学研究会、第3回シンポジウム講演論文集、(1981)、pp55-60
- 7) Siegel, R. and Howell, J.R. : Thermal Radiation Heat Transfer, 3<sup>rd</sup> Ed., (1992)