

■遠赤加熱の理論(3)遠赤外炉の理論的考察

従来遠赤外炉の熱設計においては、対流損失・熱貫流損失・被加熱物顕熱に着目した定常的なエネルギー収支計算に基づくものが主体であった。昨今、コンピュータ性能の飛躍的向上により、さらに複雑かつ非定常性を考慮した数値解析が容易になっている。

ふく射に関する数値解析の手法としては概ね下記のような系統に大別され、それぞれ多数の研究者および技術者の努力により実用化され、実設計にも適用されている。

- (1) Maxwell 方程式を解く方法
- (2) ふく射のエネルギー流束を追う方法
- (3) 面/面間のエネルギー交換に近似する方法

これらについては、文献等も数多く刊行されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。もとよりふく射は空間を電磁波が伝播する現象であるため、(1)を用いることが厳密であるが、波長が短い場合や解析空間のサイズが大きい場合などでは計算コストが肥大化する。数値解析上の手法としては RCWA 法や FDTD 法などが知られている。(2)に関する基礎方程式はふく射輸送方程式と呼ばれ、ガスふく射の解析等に特に有効である。数値解析上の手法としてはモンテカルロ法やふく射要素法などが用いられる。(3)はそれらに比較すると近似的な手法であるが、加熱炉のような大空間（雰囲気が大気のようにふく射吸収性が低い場合）の解析には有効性を示す場合が多い。任意の放射面間の熱交換量は、Stefan-Boltzmann の法則および「形態係数⁽⁴⁾」により定式化可能である。(3)に関する具体的な解析手法である「空間分割法」は(1.3 項で詳しく解説するが)、それらに加え「射度」の概念を用いることにより、閉空間内のふく射エネルギー収支を解析するものである⁽⁵⁾。本章ではそうした状況を鑑み、空間分割法をベースとしつつ、実際の加熱炉の設計に適用しうるふく射数値解析の一端について述べる。

1.1 閉空間内におけるエネルギー収支

開放状態における 2 面間のふく射エネルギー交換に関しては計算が容易である。しかしながら、加熱炉内部のような閉空間系のエネルギー収支を取り扱う場合には、ふく射の反射・吸収・再放射を全内壁面において考慮する必要があるため、一挙に計算が困難になる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そのことを、ロールツーロール式乾燥炉内の塗布膜乾燥プロセスを例にとって説明する。図 1 の上段はヒータから放射されたふく射が、基板面や炉内壁面で多重反射・吸収する様子を示す。さらに炉壁内面で吸収されたふく射エネルギーは、炉壁から伝導で外壁面より系外へ放散される。これらの結果、定常時(連続運転時)における炉の消費エネ

ルギー(電力)および炉内の温度場が決定される。またその傾向は、炉の用途や構造によって多様性を示す。したがって各種加熱炉の抜本的なランニングコストの机上比較についても、依然として統一的な指針が確立されていないのが現状である。

また被加熱物(塗布膜)内部でのふく射吸収の過程も単純ではない。図1の下段は塗布膜に入射したふく射が、膜内部でも多重反射をしながら吸収される様子を示している。ここで、基板と塗布膜界面におけるふく射エネルギー収支の定式化が、解析精度に大きく反映する。

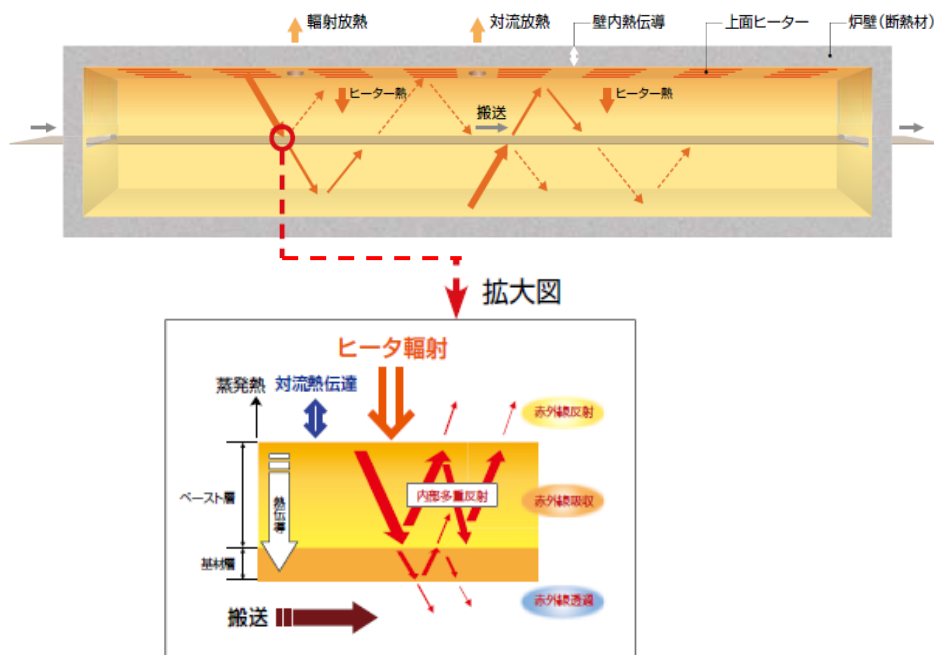


図1 赤外線（ふく射）の吸収・反射・透過モデル

1.2 加熱炉の数値モデル化

本項では、実際の加熱炉を想定したふく射伝熱モデルの例について記載する。特に太陽電池および各種ディスプレイ用ガラス基板や二次電池用フィルム基板を対象とした、ふく射加熱炉を想定した。特に、炉内壁の材質(放射率)と加熱効果との相関、熱風加熱と赤外加熱との比較等の検証に有効なものである。図2および図3に2種類の基本的なモデル化の例を示した。

- (1) 無限平行面モデル (図2 Infinite parallel plates model)
- (2) 直方体多分割面モデル (図3 Finite multi-fractionated rectangular model)

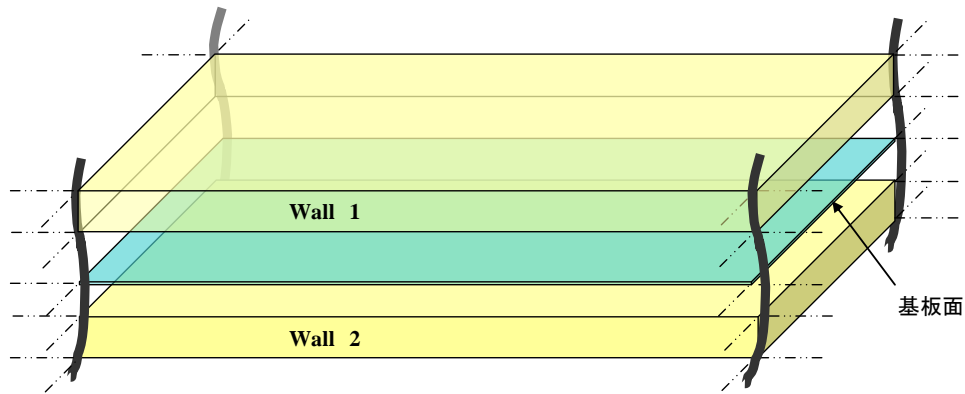


図 2 無限平行面モデル

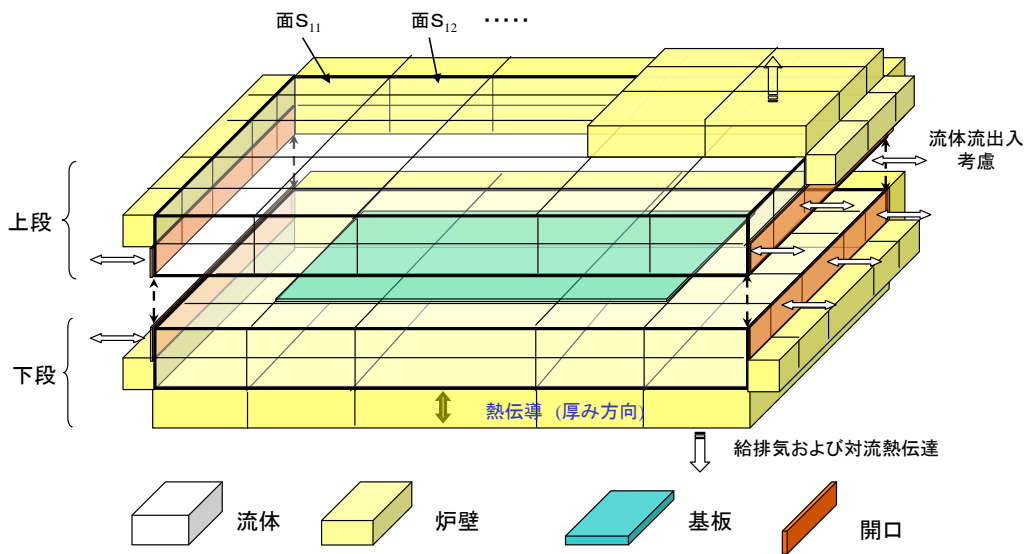


図 3 直方体多分割面モデル

上記 (2) は閉空間を直方体形状に近似し、その内壁面を矩形面に分割して、空間分割法により解析するものである。加熱炉は基本的に直方体の形状をしている場合が多いため、近似手法として合理的である。また内壁面の矩形分割はそれらの間の形態係数を厳密式で表現できる。このことは非定常解析において、その計算所要時間に比してエネルギー保存則上の誤差が小さいという利点をもたらす。したがって複数の加熱炉間の省エネルギー性能等を比較する際に有用である。式体系は後述するが、射度に関する代数方程式と炉壁部分および内部基板の厚み方向に考慮する熱伝導方程式との組み合わせとなる。

また、(1) はその最も単純化された特別な場合で、複数の無限平行面の組み合わせで加熱炉を近似する。本節冒頭に記載した用途の加熱炉内は、広い加熱面と基板面が平行に相對している場合が多いため、(1)のような簡潔なモデルでも良好に近似できる場合がある。

いずれも伝統的な微分方程式により定式化可能であるが、基板の有無に対応するメッシュの識別や基板におけるふく射透過の定式化等については、相応の工夫を要する。

なお 1.1 項で述べた ペーストを塗布された基板を対象とした乾燥炉内における伝熱モデルに関しては、炉の縦断面内を計算領域とした図 4 のようなものが考えられる。乾燥プロセス等、相変化を伴う系は、塗布膜内での物質移動が加わるため、系全体を対象とした総括的な解析を当初から目標とするよりも、まず図 4 のようなモデルを試験検証に耐えうる水準にフィッティングすることがエンジニアリング上有効である。

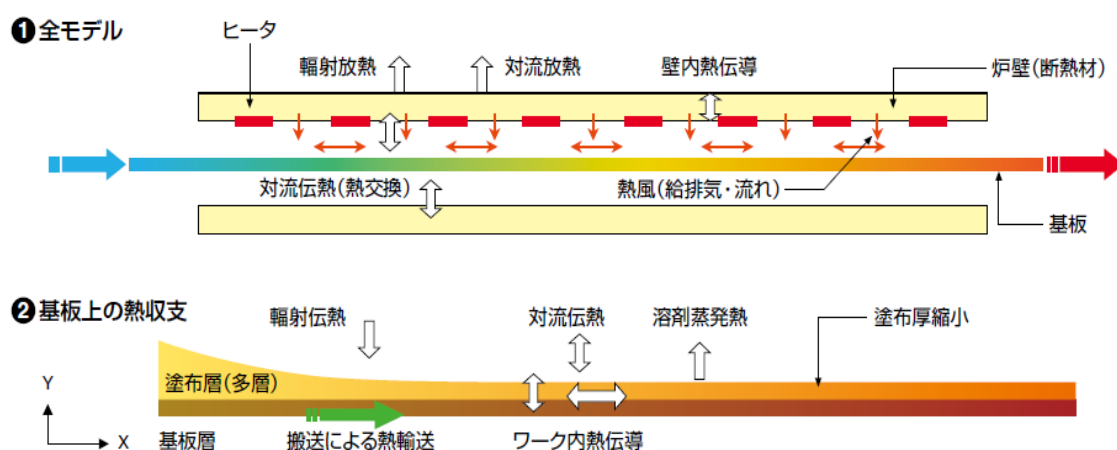


図 4 ペースト乾燥炉内の伝熱モデル例

1.3 定式化例

無限平行面モデルに関する支配方程式の定式化例を以下に示す(図 5 も参照) (8)。なお記号は下記のとおりである。

$c_{p,l}$: 炉壁定圧比熱	[kJ/(kg·K)]
$c_{p,f}$: 基板定圧比熱	[kJ/(kg·K)]
$c_{p,a}, c_{p,a_i}$: 空気定圧比熱	[kJ/(kg·K)]
h	: 内壁面熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
h_{out}	: 外壁面熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
k	: 炉壁熱伝導率	[W/(m·K)]
q	: 発熱面の単位面積当たりの熱発生量	[W/m ²]
q_{ij}	: 壁面間の輻射熱流束	[W/m ²]
q_{if}	: 壁面－基板間の輻射熱流束	[W/m ²]

q_{ia}, q_{ia_i}	: 壁面－空気層間の対流熱流束	[W/m ²]
q_{af}, q_{a_f}	: 空気層－基板間の対流熱流束	[W/m ²]
$q_{out\ i}$: 壁裏面への放熱熱流束	[W/m ²]
t	: 時間	[s]
T_0	: 炉外温度 (基準温度)	[°C]
T_i	: 壁面 (i) 温度	[°C]
T_f	: 基板温度	[°C]
T_{a_i}	: 壁面 i 側の空気層温度	[°C]
x	: 炉壁厚み方向座標	[m]
δ	: 炉壁厚み	[m]
δ_f	: 基板厚み	[μ m]
δ_{a_i}	: 空気層厚み	[m]
σ	: Stefan-Boltzmann 定数	[W/(m ² ·K ⁴)]
ε_i	: 壁面放射率	[—]
ε_f	: 基板放射率	[—]
ρ_i	: 炉壁密度	[kg/m ³]
ρ_f	: 基板密度	[kg/m ³]
ρ_{a_i}	: 空気密度	[kg/m ³]

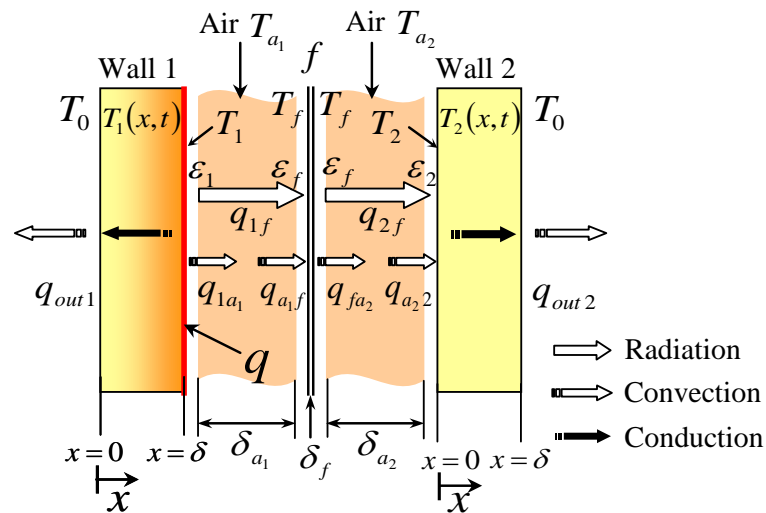


図 5 無限平行面モデルに基づく定式化

Wall i , 空気層 i および基板 f に関する熱収支式は下記の(1)～ (4)式により記述される。

$$\rho_i c_{p,i} \frac{\partial T_i(x,t)}{\partial t} = k_i \frac{\partial^2 T_i(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\rho_{a_1} c_{p,a_1} \delta_{a_1} \frac{dT_{a_1}(t)}{dt} = q_{1a_1}(t) - q_{a_1f}(t) \quad (2)$$

$$\rho_{a_2} c_{p,a_2} \delta_{a_2} \frac{dT_{a_2}(t)}{dt} = q_{fa_2}(t) - q_{a_2,2}(t) \quad (3)$$

$$\rho_f c_{p,f} \delta_f \frac{dT_f(t)}{dt} = q_{1f}(t) - q_{f2}(t) + q_{a_1f}(t) - q_{fa_2}(t) \quad (4)$$

また、(4)式に関する初期条件および(1)式に関する境界条件は次のように与える。

$$\left. \begin{aligned} t = 0; T_f(t) &= T_0 \\ t > 0, x = 0; -k_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} &= -q_{out1}(t) \\ t > 0, x = \delta; k_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} &= -q_{1f}(t) - q_{1a_1}(t) + q \\ t > 0, x = 0; -k_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} &= q_{f2}(t) + q_{a_2,2}(t) \\ t > 0, x = \delta; k_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} &= -q_{out2}(t) \\ q_{1f}(t) &= \varepsilon_{eff,1f} \sigma \{T_1(\delta,t)^4 - T_f(t)^4\} \\ \varepsilon_{eff,1f} &\equiv \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_f} - 1} \\ q_{f2}(t) &= \varepsilon_{eff,f2} \sigma \{T_f(t)^4 - T_2(0,t)^4\} \\ \varepsilon_{eff,f2} &\equiv \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \\ q_{out1} &= h_{out} \{T_1(0,t) - T_0\} \\ q_{out2} &= h_{out} \{T_2(\delta,t) - T_0\} \\ q_{1a_1} &= h \{T_1(\delta,t) - T_{a_1}(t)\} \\ q_{a_1f} &= h \{T_{a_1}(t) - T_f(t)\} \\ q_{fa_2} &= h \{T_f(t) - T_{a_2}(t)\} \\ q_{a_2,2} &= h \{T_{a_2}(t) - T_2(0,t)\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(1)~(5)式は発熱面を wall 1 側の内面に限定した場合の定式化例である。条件によってはこれ以外にも方法は考えられる。また定常状態において、(1)~(5)式は大きく単純化される。以上の式群は簡潔なものでありながら、定常状態に保たれた加熱炉内に突然挿入された後の基板温度推移、というような工業上非常に重要な現象を、かなり正確に模擬することができる。(1)~(5)式を差分法に基づく数値プログラムで実行すれば、通常のパーソナルコンピュータを用いても1回の計算は数秒以内に完結する。

次に直方体多分割面モデルに関する定式化について、基本的な手法を紹介する。具体的には、「空間分割法」を基本とし、そこに炉壁内熱伝導を付加することになる。

$$G_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) J_i \quad (6)$$

$$J_i = \sum_{m=1}^n F_{i,m} \cdot G_m \quad (7)$$

$$\begin{array}{c} \mathbf{A}_{ij} : \text{形態係数行列} \\ \left(\begin{array}{cccc} \mathbf{1} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{13} & \cdots \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{1} & \mathbf{A}_{23} & \cdots \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \mathbf{A}_{n1} & \mathbf{A}_{n2} & \cdots & \mathbf{1} \end{array} \right) \end{array} \begin{array}{c} \mathbf{G}_j : \text{射度ベクトル} \\ \left(\begin{array}{c} \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{G}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{G}_n \end{array} \right) \end{array} \begin{array}{c} \mathbf{T}_i : \text{温度ベクトル} \\ \left(\begin{array}{c} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{T}_n \end{array} \right) \end{array} = \quad (8)$$

$$A_{ij} = -(1 - \varepsilon_i) F_{ij} \quad (9)$$

$$T_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (10)$$

(6)式は、各分割面上における射度 G の定義である。すなわちある面において「面自身の放射」と「他面から入射するふく射の反射分」の和を射度とよぶ。後者においてある面に入射するふく射の総和を外来照射量 J と定義し、(7)式は射度と外来照射量との関係を示す。 F_{im} は i 面から m 面をみた形態係数である。(6)および(7)式は、行列を用いた形式で記載することができる((8)~(10)式)。(8)式において「射度ベクトル」もしくは「(内壁面)温度ベクトル」のいずれかが判明している場合、(8)~(10)式を解決することにより他方の数値を求めることが可能になる。これを空間分割法といい、通常(12)式の解決にはSOR法等の数値計算手法が用いられる。これらに加え、各分割壁および基板に本項前半で解説した熱伝導方程式を組み込むことにより、「射度ベクトル」と「温度ベクトル」の双方を同時に決定可能である。本定式化により、実際の加熱炉の運転状態におけるエネルギー収支の定量化が実現し、ふく射平衡の条件等、興味深い知見を引き出すことも可能である。

なお、ペースト塗布基板を対象とした乾燥炉内における伝熱モデルについての定式化に関しては、ふく射部分については(6)~(10)式に基づく。塗布膜内部における各成分の物質移動に関する解析方法に関しては、過去に詳細な研究内容が報告されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が、式展開等は非常に複雑になるため、ここではその詳細は割愛する。

1.4 数値計算事例

1.4.1 計算対象

本節では、以上で説明した数値モデルにより、実際の加熱炉を想定した数値解析を実施

し赤外線加熱の有効性を検証する。対象とする乾燥炉は、巻取機と巻出機を備えたロールツーロール型の加熱炉で、熱風吹き出しノズルと赤外線ヒータを併設する(図 6)。

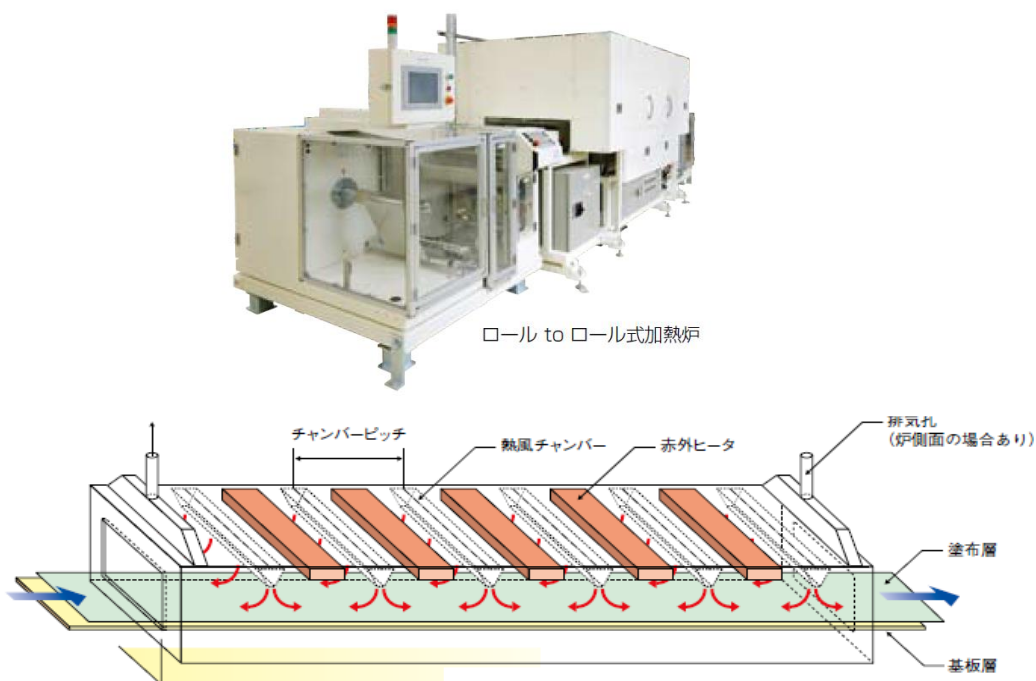


図 6 ロール-ロール型乾燥炉

図 6 の下段の図においては、熱風ノズルと赤外線ヒータは上面のみに設置されているが、下面に設置されることもある。当該乾燥炉を想定し、ペーストを塗布した金属基板を熱処理する過程を数値解析する。ペーストは金属酸化物と有機溶剤および高分子ポリマーの混合物を想定し、1.2 項の図 3 のモデルに基づき計算する。計算上の加熱条件につき、熱風加熱のみの場合と、熱風と赤外線ヒータの複合加熱の場合との比較を、表 7 に示す。なお炉長を 1.5m とし内部は 3 つの制御ゾーンに分割されているものとする。また、搬送速度を 0.5m/min として計算した。

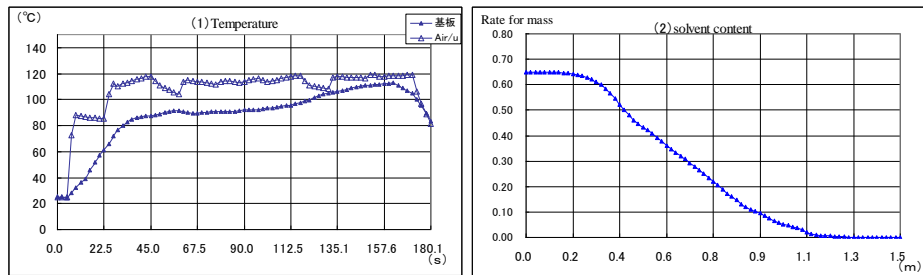
表 7 計算上の乾燥炉設定条件比較

条件1(熱風)	1ゾーン	2ゾーン	3ゾーン	条件2(赤外付加)	1ゾーン	2ゾーン	3ゾーン
上部熱風温度 [°C]	120	120	120	上部熱風温度 [°C]	120	120	120
熱風風速 [m/s]	4	4	4	熱風風速 [m/s]	2	2	2
下部熱風温度 [°C]	120	120	130	下部熱風温度 [°C]	120	120	130
熱風風速 [m/s]	4	4	4	熱風風速 [m/s]	2	2	2
上部赤外 [°C]	-	-	-	上部赤外 [°C]	350	250	200

1.4.2 計算結果と考察

図 8 および図 9 にそれぞれの条件に基づく計算結果を示す。

<条件 1>



<条件 2>

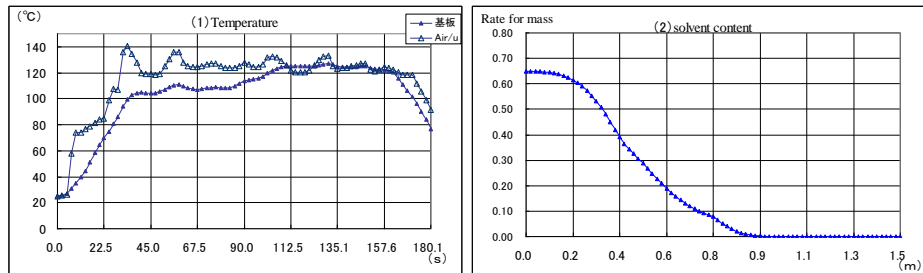
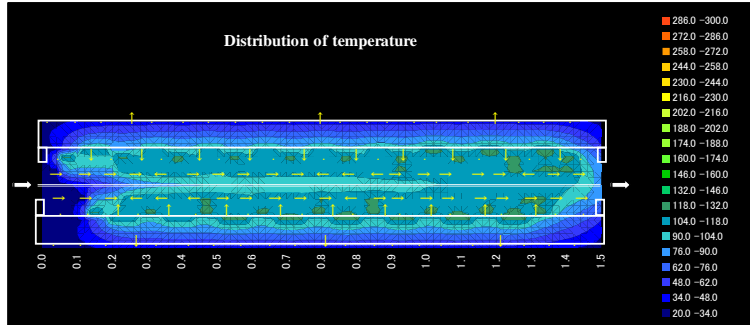


図 8 計算結果 1

<条件 1>



<条件 2>

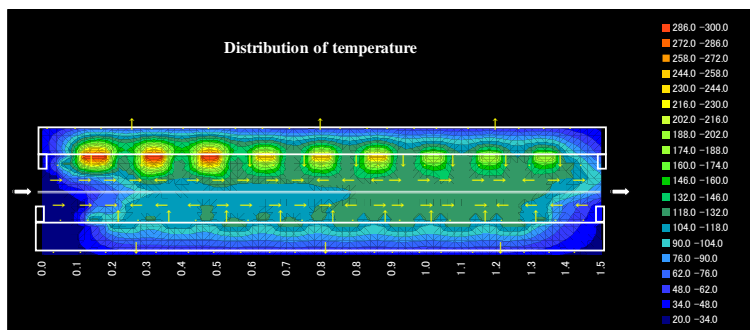


図 9 計算結果 2 (炉断面温度分布)

図 8 はそれぞれの条件において、左側が温度推移を示し、右側がペースト中の溶剤質量分率の推移を示す。横軸は炉内での加熱時間もしくは炉の入口からの距離を示す。温度推移のグラフの凡例中、黒三角は基板温度を、白三角は基板上面の流体温度をそれぞれ示す。条件 1 と 2 を比較すると、基板温度は赤外線ヒータを付加したことにより高く維持され、それに伴い溶剤の蒸発速度も熱風の場合に比し約 30%短縮されている。また重要な点は、条件 2 においては熱風の使用量が条件 1 に比し半分に抑えられていることである。双方の条件における炉の計算上推定出力は、条件 1 の場合約 25kW(熱風予熱に必要分)に対し条件 2 の場合は約 21kW(熱風予熱 12.5kW,赤外線ヒータ 8.5kW)であり、条件 2 において約 15%削減されている。結論的に条件 2 は、少ない消費電力でかつ迅速な乾燥を実現できていることになり、赤外線加熱の効率性を示している。なお当該傾向は実験においても確認されている。塗布膜中に赤外線が直接吸収され有効な蒸発エネルギー源になっていると解釈されるが、(当該ふく射を放射する水準に)赤外線ヒータを高温に保つことは、熱風温度を上昇させることに比べて通常エネルギー的にはるかに容易である。少しでも熱風を削減しふく射エネルギーに置き換えていくことが、乾燥速度の上昇という意味での加熱プロセス効率化の鍵となっていることは明白である。

1.5 まとめと今後の課題

本章においては、赤外線加熱に代表されるふく射加熱の効率性について検証するために、主として数値解析手法の見地から最近の取り組みの一端を記載した。紙面の関係上、その全容を記載することは困難であるが、1.4 項の数値解析により赤外線加熱の効率性の一端は示されている。1.4 項に例示したようなプロセスは、近未来のエネルギー源として大きな注目を集めるリチウムイオン電池の電極形成プロセス等にも既に用いられている。ただし、加熱プロセスの効率性は単にその乾燥の迅速性のみで評価することはできない。たとえばいくら速く溶剤乾燥が行われたとしても、乾燥後の塗布膜に機械的強度が不足しているなら、それは本末転倒なこととなってしまふ。近年のコンピュータ技術の進歩に伴い、シミュレーション技術もその進歩が著しい。乾燥速度のみならず、被加熱物の品質・性能に影響する因子まで予測可能な解析技術も、少しずつではあるが実現されてきている。引き続き研究開発に努力し、解析技術を通して少しでも遠赤外炉の効率化に尽力できるなら幸甚である。

参考文献

- (1) Modest, M.F., *Radiative Heat Transfer*, 2ndEd., (2003) , Academic Press.
- (2) Siegel, R., Howell, J. R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 4th Ed., (2002), Taylor & Francis.
- (3) Maruyama, S., *Light energy engineering* (in Japanese) , (2004), Yokendo..
- (4) Howell, J.R., *A Catalog of Radiation Configuration Factors*, (1982), Section.
- (5) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Data Book : Heat Transfer 5th Edition*, (2009), p.3, pp.135 -136.
- (6) Kondo, Y., Yamashita, H., Aoki, M., *45th National Heat Transfer Symposium of Japan*, Vol.III (2008-6), pp.805 -806.
- (7) Kondo, Y., *JIRA Report vol.20, No.4* , (2009), pp.7 -10.
- (8) Kondo, Y., Yamashita, H., Niwa, C., Aoki, M., *Theoretical Analysis of Temperature of Substrate Inserted Between Parallel Plates Based on Radiation Heat Transfer Model*, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 76 No.768, pp.1248-1257.
- (9) Miyanaga, T., Nakano, Y., *Analysis of Infrared Radiation Heating (Part3)*, *Komae Research Laboratory Rep. No. T90041*, (1991).
- (10) 白井達郎, *エレクトロニクス分野における精密塗布・乾燥技術 第4章*, (2007), pp.205 -276, 技術情報協会.