

蓄熱槽の数値解析

正会員 奥山博康*

1. はじめに 蓄熱槽内の水の流れ方は流れ込む水の温度，すなわち主に密度によっても大きく左右され，この場合大別して押し出し流れと混合流れに分けられる。本報告においてはコントロールボリュームⁱ⁾(以下 C.V.) 法と呼ばれる空間離散化法と回路網によるコンピューターモデリングの定式化法を用い，これらの流れをより合理的にシミュレーションすることをねらったものであり，解析例として槽内の速度ベクトル分布，温度分布と入口水温に対する出口水温の単位応答等を載せた。また出口水温の単位応答については別に熱回路網によるマクロなシミュレーションも行ない結果を比較した。

2-1 流体力学数値解析 最小計算単位である立方体の C.V. において回路網により完全システムの運動方程式をたてれば次式となる。

$$m_j \dot{\phi}_j = - \sum_{i=1}^{n+n_0} S_{ij} (\alpha_{ij} \rho_i v_i + \beta_{ij} \rho_j v_j) (\alpha'_{ij} \phi_i + \beta'_{ij} \phi_j) + \sum_{i=1}^{n+n_0} S_{ij} r_{ij} (\alpha_{ij} \eta_{ei} + \beta_{ij} \eta_{ej}) (\phi_i - \phi_j) - \sum_{i=1}^{n+n_0} S_{ij} \phi_e (\alpha_{ij} P_i + \beta_{ij} P_j) + m_j \phi_e g \quad (j = 1, \dots, n + n_0) \quad (1)$$

- m_j : j -C.V. の質量 (kg)
- ϕ_j : j -C.V. の質量平均の各速度スカラー U_j, V_j, W_j (m/s)
- S_{ij} : j からの i, j -C.V. の面する面積ベクトル (m²)
- v_j : j -C.V. の質量平均の速度ベクトル $^t(U_j, V_j, W_j)_j$ (m/s)
- ρ_i : 密度 (kg/m³)
- η_{ej} : 有効粘性係数ⁱⁱ⁾ (N·S/m²)
- r_{ij} : j からの i, j 間の距離の逆数方向ベクトル (1/m)
- ϕ_e : 各速度方向の単位ベクトル (無次元)
- P_i : 圧力 (N/m²)
- g : 重力の加速度ベクトル (m/s²)
- $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$: 節点間の状態変数直線補間係数, $\alpha + \beta = 1, \alpha, \beta \geq 0$, FTCSⁱ⁾では各々 1/2

n, n_0 : 速度従属の C.V. 個数, 速度独立の C.V. 個数

後記する(4)式で表わされるシステムの状態推移安定性を調べたところ，移流に関し流れ方向によって α', β' を 1 または 0 とする方法 (第 2 次風上差分法ⁱ⁾ と呼ぶ) をとるとき，安定の証明が可能であったため，ナビエ Stokes の PDE に対し適合性を欠くことになるが，実際にはこの空間離散化法による計算を行なった。

さらに質量保存則により次式を得る。

$$\sum_{i=1}^{n+n_0} (\alpha_{ij} \rho_i v_i + \beta_{ij} \rho_j v_j) S_{ij} = 0 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

エネルギー方程式は次式となる。

$$m_j C_{pj} \dot{T}_j = - \sum_{i=1}^{n+n_0} S_{ij} (\alpha_{ij} \rho_i C_{pi} v_i + \beta_{ij} \rho_j C_{pj} v_j) (\alpha'_{ij} T_i + \beta'_{ij} T_j) + \sum_{i=1}^{n+n_0} S_{ij} r_{ij} (\alpha_{ij} \lambda_{ei} + \beta_{ij} \lambda_{ej}) \cdot (T_i - T_j) + H G_j \quad (j = 1, \dots, n) \quad (3)$$

C_{pj} : 定圧比熱 (kcal/kg°C) T_j : j -C.V. の温度 (°C) λ_{ej} : 有効熱伝導率 (kcal/m·S·°C) $H G_j$: 直接入力熱量 (kcal/s)

全体システムで運動方程式を記述すれば次式となる。

$$M \dot{U} = D_u U + P_u P + G_u, \quad M \dot{V} = D_v V + P_v P + G_v, \quad M \dot{W} = D_w W + P_w P + G_w \quad (n) \quad (4)$$

質量保存則は

$$F_u U + F_v V + F_w W + R = 0 \quad (n) \quad (5)$$

エネルギー方程式は iii) での一般論同様次式となる。

$$M C_p \dot{T} = C T + H \quad (n) \quad (6)$$

- U, V, W : 速度状態ベクトル
- P : 圧力の状態ベクトル
- G_u, v, w : 入力ベクトル
- M : 質量マトリクス
- R : 質量入力ベクトル
- T : 温度の状態ベクトル
- C_p : 比熱マトリクス
- H : 熱入力ベクトル
- D_u, v, w : 速度コンダクタンスマトリクス
- C : 熱コンダクタンスマトリクス

コンピューターコアサイズの制限から(4), (6)の時間積分は単段型の陽解法時間差分とする。従って(4), (6)はそのような時間推移の漸化式に変形されるが，(4)は P を未知数として含むため，これを(5)式を満たすように決定し

たのち時間積分を行なう。線型代数的には(4)の漸化式 J から速度状態ベクトルを(5)に代入し P に関する方程式を得て解くことになるが、行列演算は出来ないから、緩和法により解く。その時同時に仮想境界 C.V.においては(1)が成立するとして速度を与え圧力を求める。この計算は圧力の情報が瞬間に全計算対象領域に伝わることを意味するが、これは非圧縮性の仮定により合理化できる。温度による物性値の変化は時間積分間隔の遅れをおく。

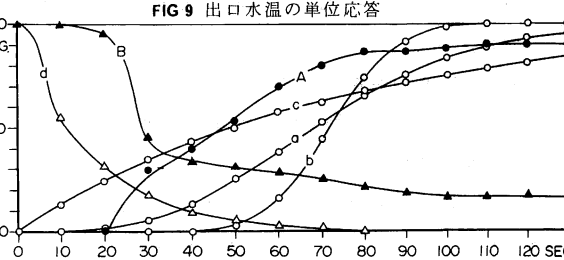
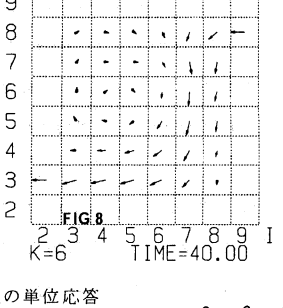
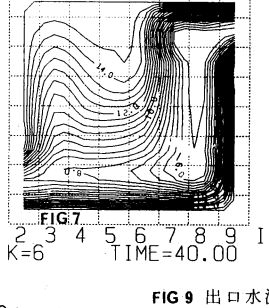
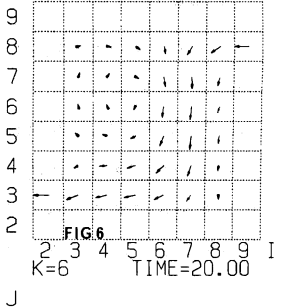
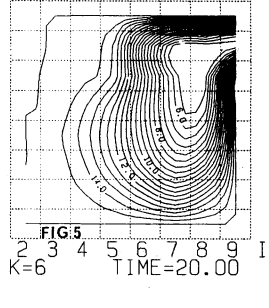
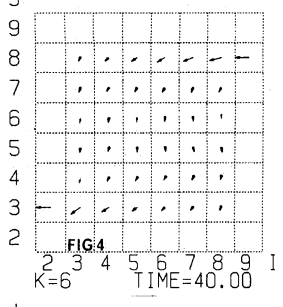
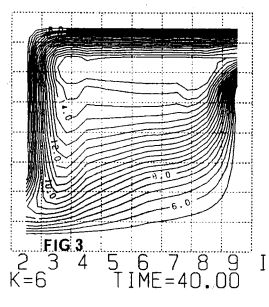
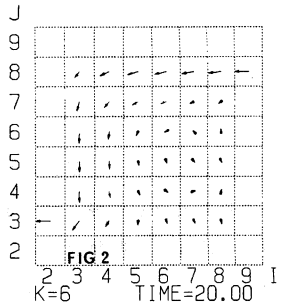
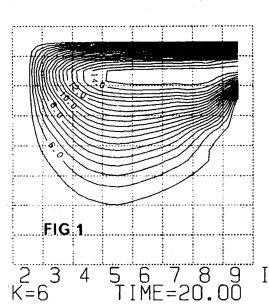
2-2 熱回路網によるマクロな数値解析 この一般記述と時間積分法についてはiii)において述べてある。この場合とったモデリングは槽の鉛直方向をいくつかの層に分割し、隣接する i 層から j 層へ槽流量 V で流れているとすれば熱コンダクタンスは $C_{ij} = C_p \cdot V$, $C_{ji} = 0$ のようにした。また回路網の連結構造の決定アルゴリズムはiv)によった。

3. シミュレーション結果 蓄熱水槽は一辺が 0.7 m の立方体であり、水の出入口は 0.6×0.1 のスリットで上下に付いている。C.V.の一辺は 0.1 の立方体である。流入速度は押し出し (Fig 1~4), 混合 (Fig 5~8) 流れともに 0.05 m/s とした。初期槽内水温は前者が 5° , 後者は 15° , 流入水温は前者が 15° , 後者は 5° である。図の左側は等温線をあらわし、経過時間の単位は秒である。Fig 9 は出口水温の応答をえがいたものである。大文字の曲線が 2-1 の方法、小文字は 2-2 の方法によるものであるが層の数は a, d が 6, b は 60, c は 1 層、つまり完全混合流れである。

4. 結語 全体的な流れの傾向は 2-1 の方法によってよく計算されていると思われる。しかし実用上必要となる出口水温の結果には計算だけでも明らかに不十分と思われる点がいくつか見られる。それに対し

2-2 の方法は計算経済性から見ても実用的であり、もしその回路網の構造が 2-1 のような演繹的、あるいは実験による経験則的な方法により正しく決めることができるのであれば実際の空調システムシミュレーションに用いるには有用であろう。そのためにも 2-1 の方法の今後の進展をはかり、同時に特に有効粘性係数について実験との対応をとっていきたい。

5. 文献 i) コンピューターによる流体力学(上,下), パトリック・J・ローチェ



iii) 建築物の熱回路系における推移行列と射影分解による時間数値積分公式, 奥山博康, 木村建一 建築学会論文報告集 Vol. 269 S53.7
iv) Modeling of Solar Heating and Air Conditioning, Solar Ene. Lab. Univ. of Wisconsin Madison, 31 Jan '73 (清水建設機研所)*