HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 人間温熱環境評価のための境界要素法計算モジュールの検討 |
| Author(s) | 横山, 真太郎; 角田, 直人; 山田, 大祐; 富樫, 貴子; 濱田, 靖弘; 中村, 真人; 落藤, 澄 |
| Citation | 衛生工学シンポジウム論文集, 5, 72-75 |
| Issue Date | 1997-11-01 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/7707 |
| Type | bulletin (article) |
| Note | 第5回衛生工学シンポジウム（平成9年11月6日（木）-7日（金） 北海道大学学術交流会館）. 2 評価・モデル. P2-4 |
| File Information | 5-2-4_p72-75.pdf |

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

第5回衛生工学シンポジウム
1997.11 北海道大学学術交流会館

## 2－4

# 人間温熱環境評価のための境界要素法計算モジュールの検討

横山真太郎・角田直人・山田大祐・○富樫貴子・濱田靖弘・中村真人・
落藤 澄 （北海道大学大学院 工学研究科 人間環境計画学）

## 1．はじめに

人間とその温熱環境における熱現象は熱発生、熱伝導、対流熱伝達、放射熱伝達、蓄熱などのいくつかのプロセスの組み合わせからなるといってよい。その際、室内の温熱環境の評価の推定精度をそこなわずにかつオンライン制御の可能性をもたらすアルゴリズムとして境界要素法が考えられる。境界要素法は、**Brebbia (1978)** 以来、徐々に知られるようになった数値解法の一つである。差分法や有限要素法のような領域型解法と比較し、境界要素法では１次元が点問題に、３次元問題であれば領域を囲む曲面上の要素すなわち２次元というように、一般に計算の対象空間の次元が１次元下がることに大きな特徴がある。非定常計算では、対象領域そのものの積分計算の必要性が出てくることがあるが、その場合でも細分化された境界要素のサイズと関係なく計算が行えるので、利点は大きい。

本研究の目的は、生体内熱移動解析から建物の熱負荷解析にいたる人間－温熱環境系の定量評価全体に、境界要素法の適用を検討することにある。そのことによって、温熱環境のオンライン評価・制御の達成のためにも、また環境工学分野で現在取り組まれつつある対流、放射、熱伝導のいわゆる連成解析問題に対しても、精度を保持した高効率計算にいささかでも寄与できればと考えている。

## 2．境界要素法の離散定式化のプロセス

これから境界要素法による熱伝導、放射熱伝達、気流解析、生体内熱移動問題を扱うが、課題によっては研究者レベルで周知な事柄と基本解導出という最初のステップから始めなければならない事柄がある。いずれにしろ、本研究全体に共通した境界要素法の離散定式化のプロセスは、以下のようになる。

**1)** 解くべき問題の方程式を定式化し、その方程式の随伴方程式の基本解 **T*** を求める。ラプラス方程式などの自己随伴方程式系では、この点の理解は容易である。

**2)** 基本解 **T*** を重み関数として重みつき残差法により、方程式の領域内で積分系を求める。

**3)** グリーンの定理などの境界積分公式を適用し、領域内での任意点での値が境界上の積分によって与えられる積分方程式を求める。

**4)** 積分方程式における任意点を境界上に集約する操作を考え、境界上の積分方程式すなわち境界積分方程式を得る。

**5)** 境界積分方程式を離散化するによって連立１次方程式に帰着させる。ただし、この連立１次方程式の係数を求めるのに要素積分計算が形式的に必要となる。

**6)** 要素積分計算は問題によっては解析的に

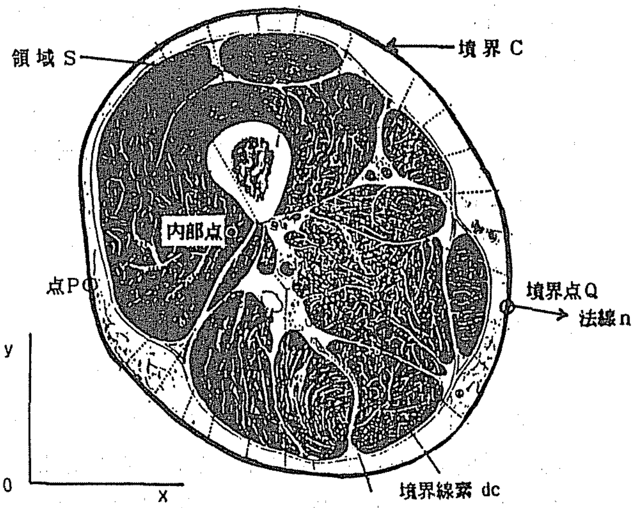


**図１境界要素解析の概念図**

求められる。あるいは数値積分により求める。

7) このようにして得られた連立1次方程式を解くことによって、未知な境界値が求まる。

8) 求めたい内点の値は、5)と6)のステップで離散化した3)の積分方程式に、7)で得られた境界値を代入して求める。

## 3．境界要素法と生体内熱移動解析

上記の境界要素法の離散定式化のプロセスを、例の少ない生体内熱移動解析を題材に、具体的に考えてみる。解析対象の概念図を図1に示す。生体にまつわる熱移動現象には、放射熱伝達、対流熱伝達などによる環境との熱授受と共に生体内の産熱、蓄熱、熱伝導、血液移流、血管壁からの熱伝達を考慮する必要がある。それらを記述する生体内熱移動方程式を表1に示す。

定常状態の生体内熱移動方程式の定式化のプロセスは、空間2次元問題を例にとると、以下のようになる。表1の式(1)と、式(5)と式(6)で表される$\omega$とkを導入すると、式(7)となる。

$$\omega^2=(1/\lambda)\ \{(f c_b/V)+H_{ab}+H_{vb}\} \qquad (5) \qquad k=(1/\lambda)\ \{(f c_b/V+H_{ab})T_{ab}+H_{vb}T_{vb}+M\} \qquad (6)$$

$$(\nabla^2-\omega^2)T+k=0 \qquad (7) \qquad T^*=1/(2\pi)\ K_0(\omega r) \qquad (8)$$

式(7)を満たす式(8)で表される基本解 $T^*$を重み関数として、重みつき残差法による定式化を考える。但し、$K_0$は0次第2種変形ベッセル関数を表わす。また、rはソース点Pと観測点Qの距離を表わす（図1参照）。

$$\iint\{(\nabla^2-\omega^2)T+k\}T^*ds=0 \qquad (9)$$

式(9)に境界積分公式を適用することにより、最終的に境界積分方程式に変換される。

$$T(P)=\int_c\{T^*(P,Q)(\partial T(Q)/\partial n)-T(Q)(\partial T^*(P,Q)/\partial n)\}dc$$
$$+(k(Q)/\omega^2)\int_c\{(\partial T^*(P,Q)/\partial n)\}dc \qquad (10)$$

これを境界上で離散化したものが式(11)である。

$$\gamma T_i=\Sigma\ \{q_j\int_{c_j}K_0(\omega r)dc_j-(T_j-k/\omega^2)\int_{c_j}(\partial K_0(\omega r)/\partial n)dc_j\} \qquad (11)$$

なお、式中の$\gamma$は生体のように滑らか境界では$\pi$となり、生体内部点では2$\pi$となる。

表1 生体内熱移動方程式

・組織 (tissue)

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\nabla^2T+\frac{fc_b}{V}(T_{ab}-T)+H_{ab}(T_{ab}-T)+H_{vb}(T_{vb}-T)+M \qquad (1)$$

・動脈系プール (arterial pool)

$$\rho_b c_b V_{ab}\frac{\partial T_{ab}}{\partial t}=f_{ab}c_b(T_{am}-T_{ab})+\int_V H_{ab}(T-T_{ab})dV+H_{av}(T_{vb}-T_{ab}) \qquad (2)$$

・静脈系プール (venous pool)

$$\rho_b c_b V_{vb}\frac{\partial T_{vb}}{\partial t}=f_{vb}c_b(T_{vn}-T_{vb})+\int_V\left(\frac{f c_b}{V}+H_{vb}\right)(T-T_{vb})dV+H_{av}(T_{ab}-T_{vb}) \qquad (3)$$

・皮膚表面境界条件 (boundary condition at skin surface)

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\varepsilon_S\sigma\left[(T+273.15)^4-(T_{mrt}+273.15)^4\right]+h_c(T-T_a)+H_{eva} \qquad (4)$$

ここで, t:時間 [s], $\rho$: 比重量 [kg/m3], $c$: 比熱 [J/kg°C], $T$: 温度 [°C], $\lambda$: 熱伝導率 [W/m°C], $f$: 血流量 [kg/s], $V$: 体積 [m$^3$], $M$: 産熱量 [W/m$^3$], $H$: 熱伝達を表わす係数 [W/m$^3$°C], $h_c$: 対流熱伝達率 [W/m$^2$°C], $T_a$ :部位周囲空気温度 [°C], $T_{mrt}$: 平均放射温度 [°C], $H_{eva}$:水分蒸発による放熱量 [W/m$^2$], $\sigma$ :Stefan-Boltzmann 定数=5.67×10$^{-8}$ [W/m$^2$K$^4$], $\varepsilon$ :放射率 [-]. 添字は, $b$: 血液, $ab$: 動脈系, $vb$: 静脈系, $am$: 隣接部位の動脈系, $vn$: 隣接部位の静脈系を表わす.

式(11)をもとに均質な領域に対しては、以下のようなマトリクス表示式が形成される。

$$[H][T] = [G][Q] + [B][K] \qquad (12)$$

ここで、各成分は以下の式(13)一式(16)のようになる。

$$H_{ij} = \int c_j \{\partial K_0(\omega r)/\partial n\} dc_j + \delta\, ij \qquad (13) \qquad G_{ij} = \int c_j \{K_0(\omega r)\} dc_j \qquad (14)$$

$$B_i = -\int c_j \{\partial K_0(\omega r)/\partial n\} dc_j \qquad (15) \qquad K_j = -k_j/\omega^2 \qquad (16)$$

なお、式(11)中の$\delta_{ij}$はクロネッカーの$\delta$規約を表す。また、上記に基づく定常2次元生体内熱移動プログラムが開発され、現在実用段階に入っていることを付記する。

非定常状態の生体内熱移動方程式については、基本解を導き、離散定式化のプロセスが終了している。紙面の都合上、基本解 $T^*(x,y,t;\xi,\eta,\tau)$だけを示すと2次元問題では以下のようになる。ただし、式(18)中の$\kappa$は、$\kappa^2=\{(f\, c_b/V) + H_{ab} + H_{vb}\}/(\rho\, c)$ である。

$$T^*(x, y, t; \xi, \eta, \tau) = 0 \qquad (\tau < t) \qquad (17)$$

$$T^*(x, y, t; \xi, \eta, \tau) = \{1/(4\lambda(\tau - t))\} \exp[-1/(4\lambda(\tau - t))\{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2\} + \kappa^2(\tau - t)] \qquad (\tau > t) \qquad (18)$$

## 4. 境界要素法による熱伝導解析と放射熱伝達解析

人間温熱環境評価において壁体をはじめ熱伝導解析が必要な場面は多い。定常ならびに非定常熱伝導解析に必要な基本解が広く知られ、それに基づく離散定式化の方法が多くの成書に紹介されている。われわれもいくつかのプログラム言語を用いて熱伝導解析モジュールを開発し、十分な実用段階に入っている。

放射熱伝達解析はモンテカルロ法や放射熱線法によるアルゴリズムがよく知られている。境界要素法による放射熱伝達解析について、Bialecki (1992)が詳しく検討している。この方法を用いることによって、ガス吸収の影響が無視できない場合や窓ガラスのような透過現象を伴う場合、衣服に代表されるように対象に多孔質を含む場合の放射熱伝達解析での活用が期待される。現在、これに基づく放射熱伝達解析モジュールを開発中である。

## 5. 流体解析と境界要素法

境界要素法による流体解析は差分法や有限要素法と比較し、圧倒的に少ない。しかし、徐々に国内外において理論および数値計算上での成果が散見されるようになってきた。環境工学分野においても、境界要素法を適用すると壁体表面上での積分方程式を解くことに問題を集約することが可能となることから、適用に値する手法との考えがでてきた。また、他の放射熱伝達や熱伝導解析モジュールとの同時解法すなわち連成問題解法を想定した場合、そのメリットは大きいと考えられる。

流体解析と境界要素法について、パネル法(panel method)、特異点法(singularity method)、離散渦法(discrete vortex method)の名称でこれまで検討がなされてきた歴史がある。定常非圧縮これらの解析例としては、パネル法では航空機の機体まわりの流れ解析、特異点法は2次元ポテンシャル流れ、離散化法では高レイノルズ数の非定常はく離流れの解析があげられる。

その他、Oseen 近似の基本解を用いた二次元平板周りの二次元平板周りの定常流解析(梶島ら, 1985)、 Stokes 近似の基本解による2次元キャビティ流解析(Tosaka and Kakuda, 1986)などが早い段階で報告されている。最近では、松梨(1991)が閉鎖性三次元拡散問題への境界要素法の適用し、平面水槽と沈殿池の具体的適用例を示している。

また、木須ら(1995)は、非圧縮粘性流体の境界要素法の高精度化に関する研究を行い、その例解として、平行平板間の Couette 流れ解析、二次元滑り軸受の解析モデル、同心二重円筒内

流れ解析、無限領域中の回転円筒の流れ解析を提示し、三次元問題へ容易に拡張できることを示した。これらのことは、これまで一般に多大な計算時間を要した数値流体解析が、ある程度の予測精度を保持しながら短時間に行える可能性を示唆しているものと考えられる。

## 6．おわりに

生体内熱移動解析から建物の熱負荷解析にいたる人間－温熱環境系の定量評価全体に、境界要素法の適用可能性を検討してきた。通常のアルゴリズムと現状の計算機による精度を保持した人間温熱環境系の評価・制御のための計算時間は、記憶容量や計算速度の制限により、膨大なものになる。これに対して、ここで検討した計算モジュールは、オンライン評価・制御の可能性をもたらし、環境工学分野で現在取り組まれつつある対流、放射、熱伝導の連成問題に対しても精度を保持した高効率計算をもたらす可能性がある。現在、生体内熱移動、熱伝導解析モジュールが開発され、十分な実用段階に入っている。その他の温熱環境要素の解析モジュールは現在開発中である。今後はそれぞれの解析モジュールを完成させ、それらを連成する手法について検討を加えていく予定である。

## ＜参考文献＞


1) Brebbia, C. A. (1978): The Boundary Element Method for Engineers. Pentech Press, London.

2) Brebbia, C. A. , J. C. F. Telles and L. C. Wrobel(1984): Boudary Element Techniques. Springer-Verlag, Berlin, Heiderberg, New York and Tokyo.

3)境界要素法研究会(1986)：境界要素法の理論と応用．コロナ社，東京．

4)田中正隆・ 松本敏郎・中村正行(1991)：境界要素法．培風館，東京．

5) 横山真太郎 (1993)：生体内熱移動現象．北海道大学図書刊行会，札幌．

6) 横山・落藤・長野・中村・角田・山本(1995)；部位別特性を考慮した体温調節モデルのアルゴリズムの改良とその応用.空気調和・衛生工学会学術講演論文集、p661~668

7) Greenberg, M. D. (1971) : Application of Green's Functions in Science and Engineering. Prence-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

8)大森敏明(1996)：三次元任意形状の放射伝熱解析法．空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1269-1272.

9) Bialecki, R. A. (1994): Solving Heat Radiation Problems Using the Boundary Element Method. Computational Mechanics Publications, Southampton and Boston.

10) Patankar, S. V. (1978): A Neumerical Method for Conduction in Composite Materials, Flow in Irregular Geometries and Conjugate Heat Transfer. Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Toront, 3, 297.

11)今野雅・鎌田元康・倉渕隆(1996)：固体伝熱・対流・放射連成解析の手法に関する検討．空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，1265-1268.

12)村上周三・加藤信介・近藤靖史・高橋義文・催棟皓(1995)：対流場、放射場の連成シミュレーションによる冷房室内の温熱環境解析．空気調和・衛生工学会論文集，57，105-116.

13)日本機械学会 編(1988)：流れの数値シミュレーション．コロナ社，東京．

14)保原充・大宮司久明(1992)：数値流体力学－基礎と応用．東京大学出版会，東京．

15)数値流体力学編集委員会 編(1995)：非圧縮性流体解析．東京大学出版会，東京．

16)松梨順三郎(1991)：環境流体輸送．日刊工業新聞社、東京．

17) 木須博之・戒圭明・松崎要(1995)：境界要素法の高精度化に関する研究 (第 5 報，非圧縮粘性流体の積分方程式の正則化)．日本機械学会論文集（Ｂ編）, 61, 2062-2068.