

CADおよびCAEにおける データ入力の低減化について

Minimization of Number of Input Data for CAD and CAE

落合 芳博*

Yoshihiro Ochiai

(1993年10月29日受理)

This paper describes several methods for minimization of number of input data in CAD and CAE system. A method for CAD is proposed that makes it possible to generate the free-form surface by the boundary integral equation using the poly-harmonic function. This method requires the boundary geometry of the free surface and the lines on the free surface, e.g., contour lines. This method can be applied for preparing a large amount of data depending on the position for FEM. Usual CAE system is not suitable for the inverse analysis. This paper shows that some inverse analyses of the thermoelastic problems can easily be achieved using the boundary element method.

1. はじめに

中小企業におけるCADおよびCAE（コンピュータ援用工学）の普及は目ざましいものがある。しかし、2次元CADの導入に成功している中小企業は多いが、3次元CADおよびCAEは、操作方法をマスターすることに数カ月も要するとか、データ入力に時間がかかると言う悩みをよく聞く。そこで、3次元CADおよびCAEにおけるデータ入力を簡便にし、データ入力を最小にすることを目的として行った研究の中でデータ入力の低減化に寄与するいくつかの中間成果を報告する。

まず、CADにおける自由曲面の新しい作成方法を提案し、その理論を用いて、自由曲面を作成する。次に、その考えを拡張することにより、CAEなどにおいて分布するデータを入力することが容易になることを示す。また、順解析用のCAEプログラムでは繰り返し計算が必要になる問題が、境界要素法による逆解析プログラムにより容易に解くことができる場合があることを示す。

2. CADにおける自由曲面

3次元CADにおける自由曲面の生成においても、Bézier

やNURBSによりかなり操作が容易になり、大きいパッチ面により面の数を少なくすることが可能になった。また、FEATURE理論により3次元形状の入力のための操作が容易になってきている。本研究では、更にデータ入力を容易にすることを目的として、積分方程式の理論を用いた自由曲面の入力法を提案する^{1,2)}。

一般に f 重調和関数 T_f およびその法線方向微分係数は次式で与えられる。

$$T_f = \frac{r^{2(f-1)}}{2\pi[(2f-2)!!]^2} \times \left[\ln\left(\frac{1}{r}\right) + \operatorname{sgn}(f-1) \sum_{e=1}^{f-1} \frac{1}{e} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial n} = \frac{r^{2f-3}}{2\pi[(2f-2)!!]^2} \left[2(f-1) \ln\left(\frac{1}{r}\right) + 2(f-1) \sum_{e=1}^{f-1} \frac{1}{e} - 1 \right] \frac{\partial r}{\partial n} \quad (2)$$

ただし、 $(2f)!! = (2f)(2f-2)\cdots 4 \cdot 2$ であり、 $\operatorname{sgn}(\)$ を符号関数とし、平面 $x-y$ 上に投影した二点 (P, Q) 間の距離を r とする。曲面上の任意点 P の高さ z_1 が次の二次元のポアソン方程式を近似的に満足していると仮定する。

$$\nabla^2 z_1 = -(z_{S2} + z_{P2} + z_{L2} + z_{D2}) \quad (3)$$

* システム技術部 情報システム研究室

ただし、 z_{P2} は点上でしか値を持たないものとし、同様に線上でしか値を持たないものを z_{L2} 、面状のものを z_{S2} に分ける。なお、線状のものの中で二重層である $\partial T_f / \partial n$ に関するものを z_{D2} とする。式(3)を一般化すると次式が得られる。

$$\nabla^2 z_{Sf} = -(z_{Sf-1} + z_{Pf+1} + z_{Lf+1} + z_{Df-1}) \quad (4)$$

また、 $f = F$ の場合、次式が成立するものとする。

$$\nabla^2 z_{SF} = -(z_{PF+1} + z_{LF+1} + z_{DF+1}) \quad (5)$$

式(4)、(5)は次式のように表現することもできる。

$$\begin{aligned} \nabla^{2f} z_{S1} &= (-1)^f [z_{LF} + z_{DF} + z_{PF}] + \text{sgn}(F-1) \\ &\times \sum_{f=1}^{F-1} (-1)^{F+f} \nabla^{2f} [z_{LF-f+1} + z_{DF-f+1} + z_{PF-f+1}] \end{aligned} \quad (6)$$

上式の z_2, z_3, \dots, z_{F-1} は z_1 の変化を示す量である。曲面の端をx-y平面に投影した曲線を境界 Γ と考えると式(1)~(6)より任意点の高さ z_1 は、グリーンの定理より、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} cz_1(P) &= - \sum_{f=1}^F (-1)^f \int_{\Gamma} \{T_f(P, Q) \frac{\partial z_{Sf}(Q)}{\partial n} \\ &\quad - \frac{\partial T_f(P, Q)}{\partial n} z_{Sf}(Q)\} d\Gamma(Q) \\ &\quad - \sum_{f=1}^F (-1)^f T_f z_{Pf-1} \\ &\quad - \sum_{f=1}^F \int_{\Gamma_L} (-1)^f T_f z_{Lf-1} d\Gamma_D \\ &\quad - \sum_{f=1}^F \int_{\Gamma_D} (-1)^f \frac{\partial T_f}{\partial n} z_{Df-1} d\Gamma_D \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 Γ_L および Γ_D は線状の z_{Lf} および z_{Df} の形状を示す。滑らかな境界 Γ 上では $c = 0.5$ であり、境界の内部では $c = 1.0$ である。また、同様に f 番目の z_{Sf} に関し、次式を導くことができる。

$$\begin{aligned} cz_{Sf}(P) &= - \sum_{e=f}^F (-1)^{e-f} \int_{\Gamma} \{T_{e-f+1}(P, Q) \frac{\partial z_{Se}(Q)}{\partial n} \\ &\quad - \frac{\partial T_{e-f+1}(P, Q)}{\partial n} z_{Se}(Q)\} d\Gamma(Q) \\ &\quad + \sum_{e=f}^F (-1)^{e-f} T_{e-f+1} z_{Pe-1} \\ &\quad + \sum_{e=f}^F \int_{\Gamma_L} (-1)^{e-f} T_{e-f+1} z_{Le+1} d\Gamma_L \\ &\quad + \sum_{e=f}^F \int_{\Gamma_D} (-1)^{e-f} \frac{\partial T_{e-f+1}}{\partial n} z_{De-1} d\Gamma_D \end{aligned} \quad (8)$$

以上で、基礎式が得られたが、これらの連立境界積分方程式は一般に解析的に解くことはできない。そこで、

離散化した式を用いて自由曲面を求める。

3. 自由曲面の作成事例

図1(a)の斜投影図に示すように自由曲面の境界線の形状および自由曲面上の自由曲線を入力することにより、図1(b)のような自由曲面を作成する。図1(a)

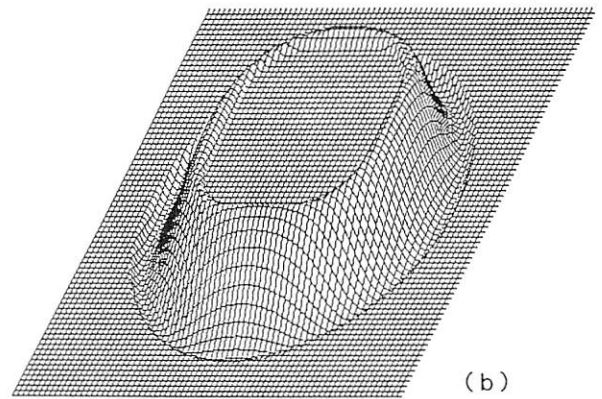
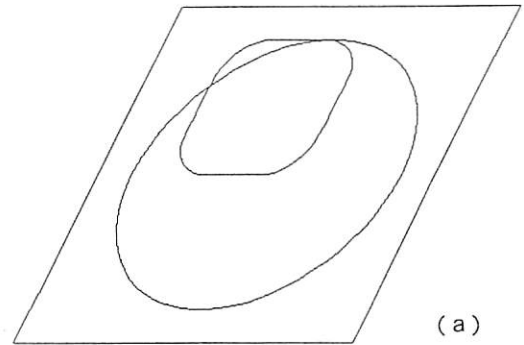


図1 積分方程式により得られた自由曲面
(a) 入力データ
(b) 自由曲面

Free-form surface obtained by integral equation
(a) Input data
(b) Free-form surface

では自由曲線および自由曲線上での曲面の法線方向の傾き(+2.5および-2.5)が与えられており、作成された金型曲面のパッチの数は3である。本手法で作成される自由曲面は、ほとんどの部分で ∞ 回微分可能な滑らかな曲面である。なお、図1(b)は外形状を一辺400mm正方形とし、中央の面の高さを100mmとして計算した場合の斜投影図である。図2(a)に示すように自由曲線は任意形状であり、図2(b)に示すように任意形状の曲面を作成することができる。当然、接する曲面の曲率を合わせることも容易であり、曲面の勾配分布や曲面で囲まれる体積も線積分により容易に求めることができる。なお、無限に大きい自由曲面や特異点を含む自由曲面、滑らかでない自由曲面なども作成することができる。作成可能な曲面形状には制限があるが、金型のCAD・CAMなどの分野に効果を示すものと思われる。

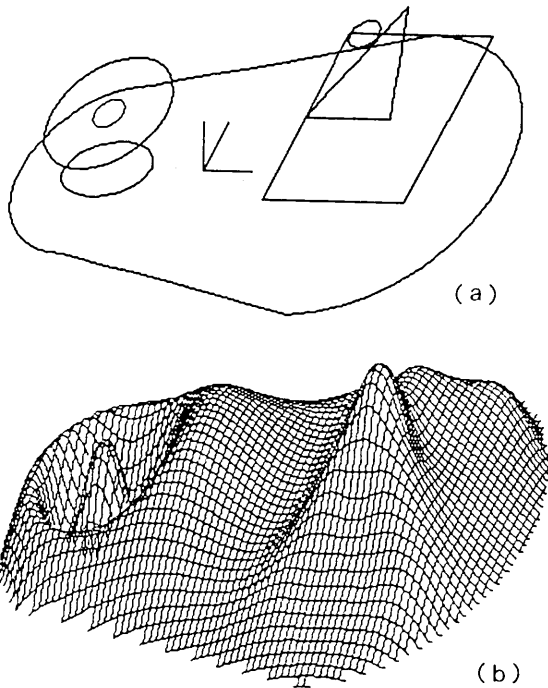


図2 積分方程式により得られた自由曲面
 (a) 入力データ
 (b) 自由曲面

Free-form surface obtained by integral equation
 (a) Input data
 (b) Free-form surface

4. CAEに関する工夫

有限要素法での自動要素生成機能の発達により、3次元物体の解析も容易になりつつある。しかし、複雑な内部熱発生分布がある場合や、複雑な物性値の分布を伴う解析を行うことは困難である。これらの分布が、実験的に得られている場合は、そのデータを使用することができるが、設計段階での解析では、困難を伴う。そこで、3次元解析では等値面を入力し、これらの値から自動分割された要素に自動的に値を与える積分方程式を用いた方法を提案する。本手法は、上記の自由曲面を作成する方法を3次元に拡張したものである。なお、2次元問題では等高線を入力する。CAEにおいて、有限要素法の代わりに境界要素法を用いことにより、データ作成が容易になることが知られているが、内部熱発生分布などがある場合は通常、領域積分のために領域内を有限要素法のように分割しなければならない。そこで、境界形セルの考えや改良された多重相反境界要素法を提案し、形状および熱発生分布の等高線を入力するだけで解析可能であることを示した³⁻⁹⁾。結果から原因を求める逆解析を、市販の順解析のために作成されているCAEソフトウェアで行うには、繰り返し計算が必要であり、しかも解が得られない場合が多い。しかし、境界要素法の基礎式を連立させることにより、容易に逆解析が行える場合がある¹⁰⁾。

5. CAEに関する計算事例

滑らかな分布をもつ内部発熱を伴う物体の温度分布を有限要素法で解析するために必要となる、三次元物体に滑らかな内部熱発生分布を与えるための計算例として、図3に示すような一辺10mmの立方体に滑らかな分布を与えるための計算例を示す。図4に示すように、 $x = 0$ mmの面において内部熱発生量 $W_1 = 10$ 、 $x = 10$ mmの面において $W_1 = 0$ であり、他の面では $\partial W_1 / \partial n = 0$ とする。図4の上の平面図には $W_1 = 3$ の等値面、下の正面図には $W_1 = 7$ の等値面を示す。図5に高さ $z = 2$ mm

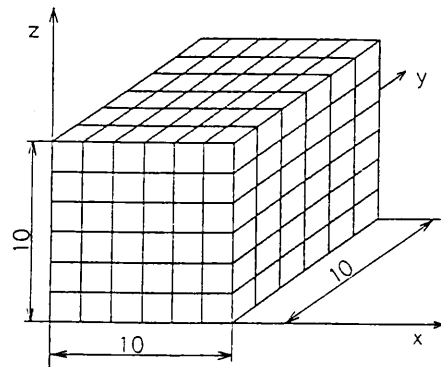


図3 形状と要素
 Shape and elements

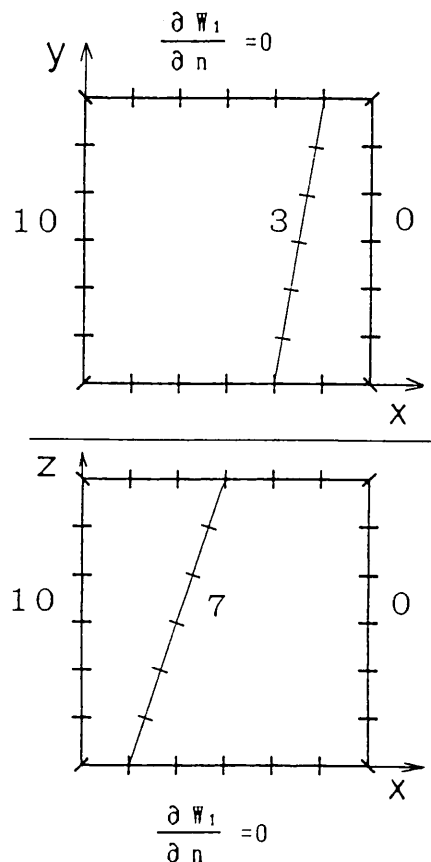


図4 等値面
 Equal value surface

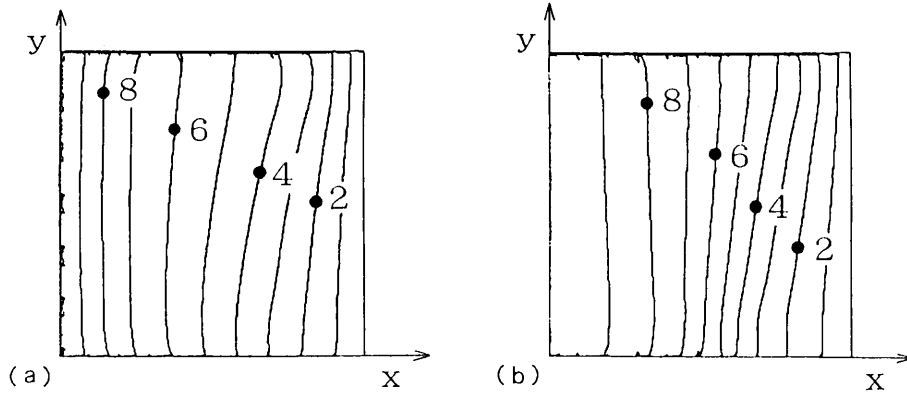


図5 分布
 (a) $z = 2 \text{ mm}$
 (b) $z = 8 \text{ mm}$
 Distribution
 (a) $z = 2 \text{ mm}$
 (b) $z = 8 \text{ mm}$

位を与えて、その温度分布を逆に求める。図6 (a)に断面を示す半径100mmの円柱には、外力が作用していないものとし、図6 (b)に示す法線方向の変位分布 u_n は次式で与えられるものとする。

$$u_n = d[\cos(2\theta) + 1] \quad (9)$$

ただし、 θ は角度であり、 $d = 0.1 \text{ mm}$ とする。ヤング率210GPa、ポアソン比0.3、線熱膨張係数を $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ とし、平面ひずみ問題として計算する。図7 (a)に計算により求められた接線方向の変位成分を考慮した変位分布を示す。図7 (b)には円柱の表面の温度分布を示す。

変位成分を考慮した変位分布を示す。図7 (b)には円柱の表面の温度分布を示す。

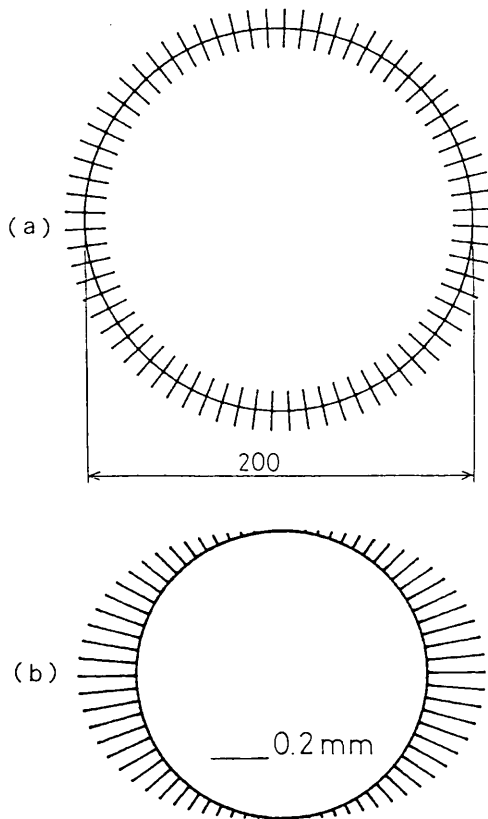


図6 円柱における逆解析(条件)
 (a) 円柱の断面
 (b) 与えられた法線方向の変位分布

Inverse problem on circular column (Given condition)
 (a) Cross section of circular column
 (b) Given normal displacement distribution

および $z = 8 \text{ mm}$ の面における計算により得られた分布図を示す。本手法は、複雑形状であっても任意の三次元分布を少ないデータ入力で与えることができる。

温度分布を持った円柱の熱膨張による法線方向の熱変

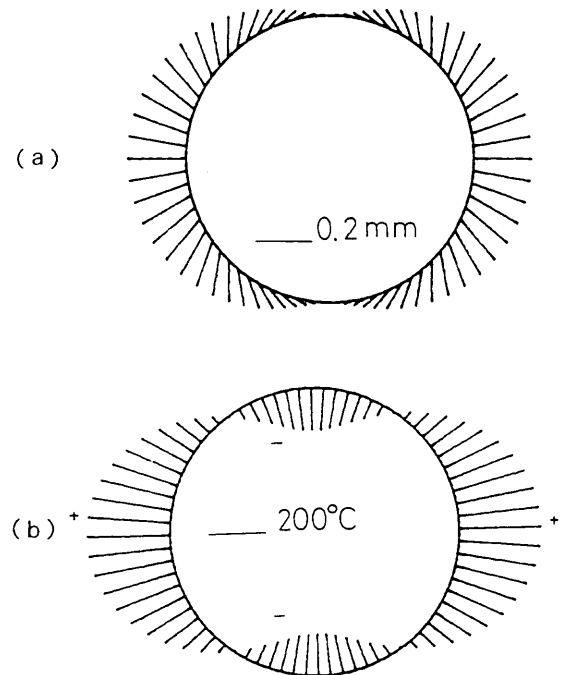


図7 円柱における逆解析(解)

(a) 実際の変位
 (b) 温度分布

Inverse problem on circular column (Solution)
 (a) Actual displacement
 (b) Temperature distribution

次に、図8 (a)に断面を示すような隅角の半径Rを考慮した一辺200mmの正四角柱の逆問題を解く。図8 (b)に示すようにx軸方向に0.2mmの熱変形を与え、y軸方向の変位を0.0mmとするための温度分布を求める。隅角の半径部の法線方向の変位分布 u_n は式(9)を用い

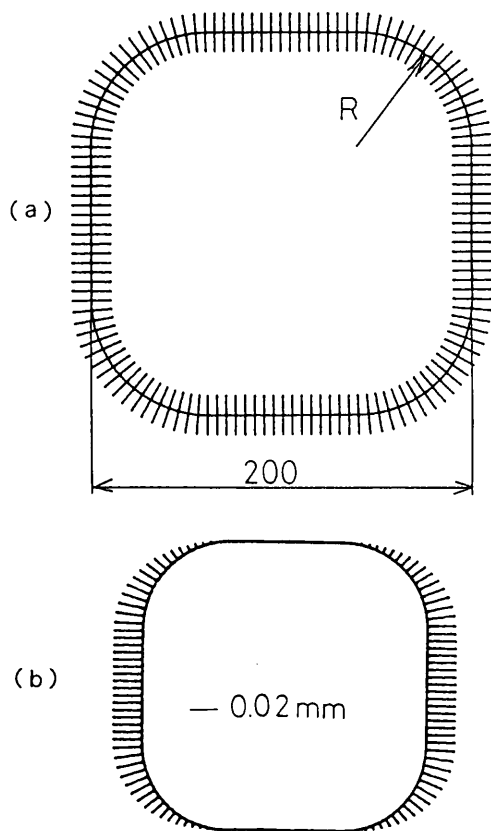


図8 四角柱における逆解析 (条件)
 (a) 四角柱の断面
 (b) 与えられた法線方向の変位分布

Inverse problem on square column (Given Condition)
 (a) Cross section of square column
 (b) Given normal displacement distribution

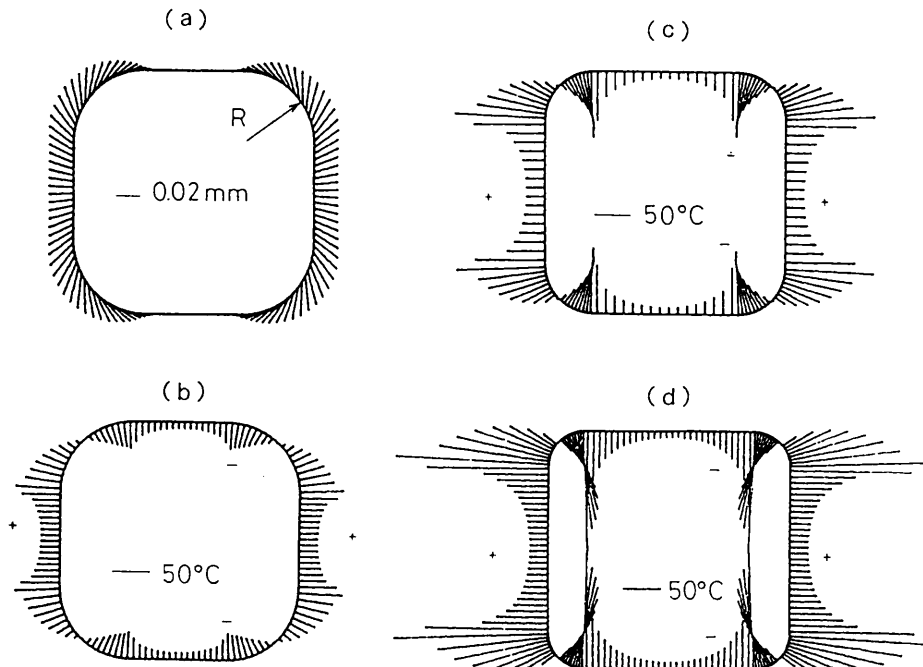
て滑らかに変化させる。図9 (a)に隅角の半径 $R = 60$ mmの場合の接線方向の変位成分を考慮した変位分布を示す。図9 (b), (c), (d)にそれぞれ隅角の半径 $R =$

図9 四角柱における逆解析 (解)

- R = 60mm
- (a) 実際の変位
- R = 60mm
- (b) 温度分布
- R = 40mm
- (c) 温度分布
- R = 30mm
- (d) 温度分布

Inverse problem on square column (Solution)

- R = 60mm
- (a) Actual displacement
- R = 60mm
- (b) Temperature distribution
- R = 40mm
- (c) Temperature distribution
- R = 30mm
- (d) Temperature distribution



60, 40, 30mmの場合の表面温度分布を示す。隅角半径を十分小さくすると隅角部での温度変化がきわめて激しくなる。従って、このような場合は現実には生じ得ないものと思われる。なお、以上の計算においては、一定要素を用い、境界積分はすべて解析積分を使用した。本手法は非定常熱応力の逆問題にも適用可能である。

6. 結 論

新しく提案した自由曲面作成理論を用いることにより、容易に自由曲面が作成できることを示した。また、CAEにおいて必要な分布する入力データを容易に作成する方法を示した。また、順解析のためのCAEシステムでは解析が困難な問題も、境界要素法を活用した逆解析手法を用いることにより容易に解析することができる場合があることを示した。以上の方法を用いることにより、限られた分野ではあるがデータ入力の低減化が可能となる。

参 考 文 献

- 1) 落合芳博, 境界積分方程式による曲面の創成法, 日本機械学会設計システム部門講演会論文集, p.255-260 (1993)
- 2) 落合芳博, 金型用CADのための自由曲面創成法, 1993年度精密工学会秋季大会講演論文集, p.433-434 (1993)
- 3) 落合芳博, 石田良平, 関谷壮, 境界要素法による熱発生を伴う二次元定常熱応力解析, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.158, No.552, p.104-108 (1992)
- 4) 落合芳博, 西谷弘信, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.59, No.557, p.219-224 (1993)
- 5) 落合芳博, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.59,

- No.559, p.367-371 (1993)
- 6) 落合芳博. 境界要素法による熱発生を伴う軸対称熱応力解析. 日本機械学会論文集 (A編). Vol.59, No.564, p.1848-1853 (1993)
 - 7) 落合芳博. 境界要素法による任意物体力を伴う応力解析. 日本機械学会論文集 (A編). Vol.59, No.565, p.1691-1696 (1993)
 - 8) 落合芳博. 改良された多重相反法による熱伝導解析. 第71期機械学会全国大会講演会論文集. Vol. A, p.35-37 (1993)
 - 9) 落合芳博, 石田良平. 境界要素法による直交異方性体の二次元非定常熱伝導解析. 日本機械学会論文集 (B編). Vol.59, No.568, p.3906-3912 (1993)
 - 10) 落合芳博. 境界要素法による熱応力問題の逆解析. 日本機械学会計算力学講演会論文集. p.347-348 (1992)