

日射熱による大型コンクリート構造物の温度および変形解析

THERMAL AND DEFORMATIONAL ANALYSIS OF LARGE SCALE CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO SOLAR RADIATION HEAT

吉田 弥智*・田辺 忠顕**・二羽 淳一郎***・粥川 幸司****

By Hiroto YOSHIDA, Tada-aki TANABE, Junichiro NIWA and Koji KAYUKAWA

The thermal analysis of a large scale concrete structure subjected to solar radiation heat was carried out. The heat input caused by the solar energy has been formulated considering the shading effect of surrounding obstacles. In the thermal analysis, the newly developed shape function has been incorporated. FEM analysis using this shape function can predict measured temperatures of a large scale concrete structure fairly well regardless of considerably rough discretization. Finally the deformation of the structure due to temperatures was calculated and compared with measured deformation.

Keywords: FEM analysis, shape function, temperature, deformation

1. 序 論

近年、既存コンクリート構造物の適切な維持管理を目的として、構造物の耐久性評価に関する研究が精力的に進められてきている。著者らも日射熱によるコンクリート構造物の変形挙動を明らかにすることにより、既存構造物の健全性を評価することを目指して研究を行ってきた^{1)~3)}。すなわち、外力として日射熱が作用したときのコンクリート構造物の熱変形量が、構造物各部の剛性に依存して変化することから、これをレーザー光線を用いて測定しておき、一方、構造物各部の剛性を变化させた熱変形解析を実施して、熱変形量を一致させることにより、構造物各部の剛性を同定しようとするものである。この際に要求される測定値は、構造物の熱変形量のみであり、本手法によれば、コンクリート構造物になんら損傷を与えることなく、構造物各部の剛性の変化が推定でき、構造物の健全性評価に有用な資料を得ることが

できるのである。

構造物に作用する日射熱は、当該構造物の位置する場所、時刻、太陽光線の透過率、構造物周辺の障害物すなわち周囲の山々や他の構造物による影等により、大きく変化する。したがって、外力としての日射熱を適切に評価するためには、これら種々の要因の影響を定量的に評価しなければならない。また、熱変形量を正確に予測するためには、日射熱により構造物に生ずる温度を正しく評価することが前提となるのであるが、本研究では大型コンクリート構造物を対象として、これをかなり粗い要素分割により有限要素温度解析するための手法を提案した。そして、得られた温度解析結果を入力データとして、熱変形解析を行い、大型コンクリート構造物の1日の変形挙動を予測し、実測結果と比較検討した。

2. 日射量の算定

(1) 日射量算定理論⁴⁾

日射量を算定する場合、まず任意地点、任意時刻における太陽方向ベクトルが必要となる。地球の公転軌道を完全円と仮定し、図-1のように地球上の絶対座標系を $\{K^*\}$ 、観測地点における直交座標系を $\{N^*\}$ とすると以下の関係が成り立つ⁴⁾。

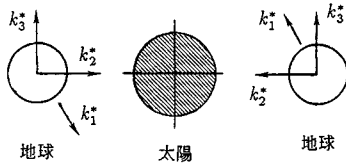
$$\{K^*\} = [k_1^* \quad k_2^* \quad k_3^*]^T = [\gamma] \{N^*\} \dots \dots \dots (1)$$

* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

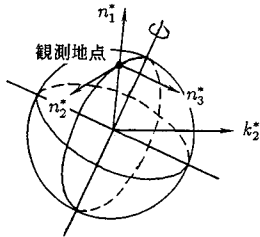
** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

**** 学生会員 名古屋大学大学院 工学部土木工学科 (同上)

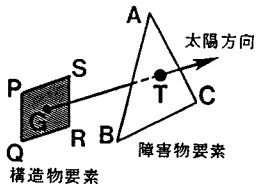


(a) 地球上の絶対座標系 {K*}

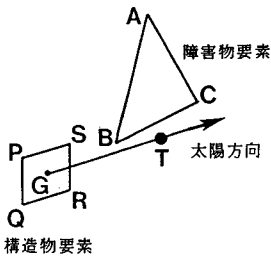


(b) 観測地点の直交座標系 {N*}

図-1 {K*}, {N*} の定義



(a) 日射を遮る場合



(b) 日射を遮らない場合

図-2 構造物要素と障害物要素の関係

ここで、座標変換マトリックス $[\eta]$ については、文献4) に示されたものを使用した。

これにより太陽方向ベクトル $\{k_i^*\}$ を定める。

続いて、構造物が直接日射を受けるか、周囲の障害物により日射を遮られるかを検討する。図-2に示すように、対象構造物表面に四角形要素 PQRS、障害物面として三角形 ABC を考える。式 (1) より求められる太陽方向ベクトル $\{k_i^*\}$ を用いて、 $\square PQRS$ と $\triangle ABC$ の位置関係を式 (2) より求める。なお、式中の \times は、ベクトルの外積を表わす。

$$\left. \begin{aligned} (AB \times AT) / |AB \times AT| &= e_1 \\ (BC \times BT) / |BC \times BT| &= e_2 \\ (CA \times CT) / |CA \times CT| &= e_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) において、正規化されたベクトル e_1, e_2, e_3

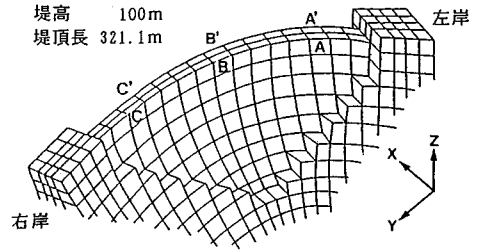


図-3 アーチダム概略図

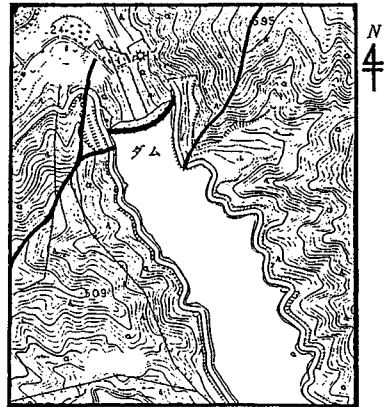


図-4 ダム周辺地形

が同一ベクトルとなり、点 T が $\triangle ABC$ の内部に存在するならば、 $\square PQRS$ は $\triangle ABC$ によって影になっていると評価する。

任意の構造物要素について、障害物要素すべてに対して上記の作業を行えば、その構造物要素が影であるか否かを判断できる。最終的に、構造物全体が受ける日射量は式 (3) より算定できる。式 (3) の直達日射量 P と拡散日射量 Q の和をとって理論日射量 R とした。

$$\left. \begin{aligned} P &= I_0 \cdot p^{(1/\sin H)} \cdot |N| \cdot \{k_i^*\} \cdot S \\ Q &= I_{SH} \\ R &= P + Q \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $I_0 = 1164.0$ (kcal/m²·h) : 太陽輻射強度

$$I_{SH} = \frac{1}{2} I_0 \cdot \sin H \cdot (1 - p^{(1/\sin H)}) / (1 - 1.4 \log_e p)$$

: 拡散日射量

p : 大気透過率

|N| : 構造物要素外向き法線ベクトル

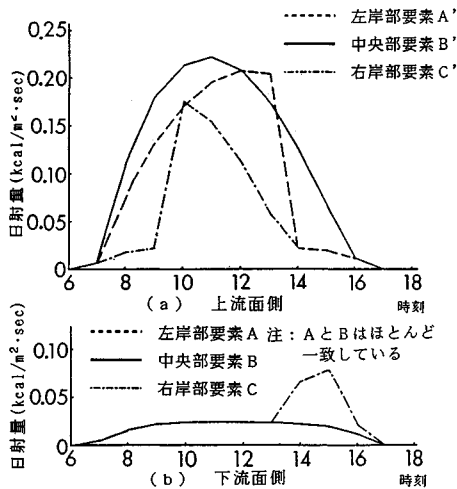
H : 太陽高度 (地表面と太陽とを結んだ直線が地表水平面となす角度)

$\{k_i^*\}$: 観測地点における太陽方向ベクトル

S : 構造物表面積

(2) 数値解析モデルと日射量計算結果

今回対象とした大型コンクリート構造物は、図-3に示すコンクリートアーチダム (堤高 100 m, 堤頂長 321.1 m) である。このダムは図-4に示すように上流



図—5 構造物要素に入る日射量分布

面側がほぼ南を向いており、周囲を山々に囲まれている。そこで、図—2の四角形要素と三角形要素に対応させて、ダム表面を四角形分割して構造物要素を設定し、また図—4の太線で示した周辺の山々の尾根線を一辺とする鉛直面を考え、この面上に障害物の三角形要素を設定した。

図—5に、上流面側（南側）、下流面側（北側）のダム要素に入る日射量計算結果を示す。上流面側では、朝方、右岸部の山々がダムに影を落とすので、右岸部要素C'に入る日射量は中央部要素B'、左岸部要素A'と比較して少なく、拡散日射のみとなる。また、日中から午後にかけて日射量低下がみられるのは、右岸部がダム本体の陰になるためである。左岸部要素A'では午前中は中央部要素B'と同様の日射量増加がみられるが、午後2時頃からは左岸部の山々の影になるので日射量が低下する。一方、下流面側は、ほぼ全面にわたり1日中直達日射はみられず拡散日射のみとなるが、午後3時頃左岸部の山越しに直達日射を受けるので、右岸部要素Cにおいて日射量増加がみられる。このようにして得られた日射量の計算結果を用いて、温度解析を実施することとした。

なお、今回の構造物に関しては、日射量の実測値が得られていないので、日射量の計算値の妥当性を直接評価するには至っていない。しかしながら、本計算結果は、観測された状況と定性的には一致している。また後述するように、本計算結果を入力として用いた構造物の温度解析は温度の実測値と良好な一致をみせていることを考えあわせれば、日射量の計算結果自体もおおむね妥当なものであるとみなしてよいと思われる。

3. 有限要素温度解析

(1) 概 要

一般に、コンクリート構造物の三次元温度解析では、8節点アイソパラメトリック6面体要素が用いられることが多い。当初はこの要素を用いて、ダム全体を厚さ方向(x方向)に3層に分割し、節点数4、厚さ方向の要素数3としてダム全体の有限要素温度解析を行った。しかしこの場合、ダム表面温度の上昇、下降に対して、内部節点温度が逆に下降、上昇するという傾向が認められた。

これは今回対象としたダムの厚さ方向(x方向)が、ダム長手方向(y方向)、鉛直方向(z方向)に比べて相対的に短く、入力される熱の絶対量はダム面内方向よりもダム面外方向の方がかなり大きくなっていること、さらにダムは堤頂部でも約5mの厚さをもっており、等厚の3要素分割ではその厚さが1要素当たり約1.7mとなるが、これらの要素に対して内部温度を線形内挿したのでは前述の多大な入力熱に対して、実際のダム厚さ方向の温度分布を精度よく近似できないことによるものと思われる。

そこで、厚さ方向(x方向)についてその温度分布を表現するために、通常の線形内挿関数の代わりとして、式(4)に示す一次元熱伝導方程式の厳密解を形状関数として選ぶこととした。そして、厚さ方向に直交する面内では通常の線形内挿形状関数を用いて有限要素温度解析を行うこととした。以下にその手法の概要を示すとともに、差分法である一次元Schmidt法による厚さ方向の温度分布解析結果との比較、検証結果を述べる。

(2) 一次元熱伝導方程式の厳密解⁵⁾とその適用

一次元熱伝導方程式を式(4)に示す。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = x^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (x^2 = \frac{K_x}{\rho C} : \text{熱拡散率}) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{初期条件 } \phi(x, 0) = g(x) \quad (0 \leq x \leq L) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{境界条件 } \left. \begin{aligned} \phi(0, t) &= \phi_1 & (t \geq 0) \\ \phi(L, t) &= \phi_2 & (t \geq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ϕ : 温度、 K_x : 熱伝導率、 L : 対象物の全長、 ρ : 密度、 C : 比熱

式(5)、(6)に示す条件のもとで、式(4)を解いて次の厳密解を得る。

$$\phi(x, t) = \phi_1 F(x) + \phi_2 G(x) + H(x) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$F(x) = 1 - \frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{2}{n\pi} \right) T_n \cdot \sin \left(\frac{n\pi}{2} x \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$G(x) = \frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{n\pi} \right) (-1)^n T_n \cdot \sin \left(\frac{n\pi}{2} x \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$H(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2g(x)}{n\pi} \right) [1 - (-1)^n] T_n \cdot \sin \left(\frac{n\pi}{2} x \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$T_n = \exp\left(-\frac{\chi^2 n^2 \pi^2}{L^2} t\right) \dots\dots\dots (11)$$

式(7)は境界の温度 ϕ_1, ϕ_2 および初期条件 $g(x)$ が与えられたときの t 時間後における厳密解であるが、これを未知な節点温度 ϕ_1, ϕ_2 をもつ要素内温度分布の内挿関数に適用する。

極端に厚さの薄い板状の要素内での温度 ϕ を求めるために、図-6(a) に示すような自然座標系 (ξ, η, ζ) を用いてダム厚さ方向に相当する ξ 方向に式(7)を適用する。すなわち、節点温度 $\phi_1 \sim \phi_8$ を用いて、 ξ 方向にあたる要素辺上の温度 $\phi_a \sim \phi_d$ は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c \ \phi_d]^T &= \begin{bmatrix} \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 \\ \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} F(\xi) \\ G(\xi) \end{Bmatrix} \\ &+ [H_1(\xi) \ H_2(\xi) \ H_3(\xi) \ H_4(\xi)]^T \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

$$x = \frac{L}{2} (\xi + 1) \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 $F(\xi), G(\xi), H(\xi)$ はそれぞれ式(8)~(10)を式(13)を用いて x から ξ に変換したものであり、 $H_1(\xi) \sim H_4(\xi)$ はそれぞれの辺上の初期条件を考慮したものである。

次に、任意の平面内の温度 ϕ を図-6(b) のように二次元アイソパラメトリック形状関数 $[M]$ を用いて表わすと、最終的に要素内の任意の位置での温度 ϕ が式(14)で得られることになる。

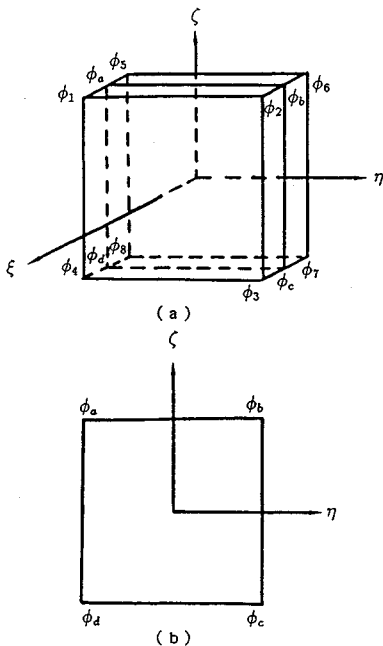


図-6 節点温度、辺上温度の定義

$$\begin{aligned} \phi &= [M][\phi_a \ \phi_b \ \phi_c \ \phi_d]^T \\ &= [M] \begin{bmatrix} \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 \\ \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} F(\xi) \\ G(\xi) \end{Bmatrix} \\ &+ [M][H_1(\xi) \ H_2(\xi) \ H_3(\xi) \ H_4(\xi)]^T \\ &= [N]\{\phi\} + [M]\{H\} \end{aligned} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

$$[M] = [M_1 \ M_2 \ M_3 \ M_4] \dots\dots\dots (15)$$

$$\begin{aligned} M_1 &= (1-\eta)(1+\zeta)/4, \quad M_2 = (1+\eta)(1+\zeta)/4 \\ M_3 &= (1+\eta)(1-\zeta)/4, \quad M_4 = (1-\eta)(1-\zeta)/4 \end{aligned} \dots\dots (16)$$

$$[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6 \ N_7 \ N_8] \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= (1-\eta)(1+\zeta)G(\xi)/4, \quad N_2 = (1+\eta)(1+\zeta)G(\xi)/4 \\ N_3 &= (1+\eta)(1-\zeta)G(\xi)/4, \quad N_4 = (1-\eta)(1-\zeta)G(\xi)/4 \\ N_5 &= (1-\eta)(1+\zeta)F(\xi)/4, \quad N_6 = (1+\eta)(1+\zeta)F(\xi)/4 \\ N_7 &= (1+\eta)(1-\zeta)F(\xi)/4, \quad N_8 = (1-\eta)(1-\zeta)F(\xi)/4 \end{aligned} \dots\dots\dots (18)$$

$$\{H\} = [H_1(\xi) \ H_2(\xi) \ H_3(\xi) \ H_4(\xi)]^T \dots\dots\dots (19)$$

(3) 有限要素温度解析の定式化

三次元非定常熱伝導問題の汎関数 χ は、次式で表わされる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \chi &= \int_V \left[\frac{1}{2} \left\{ K_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. + \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} \phi \right] dV + \int_S q \phi dS + \frac{1}{2} \int_S \alpha (\phi - \phi_0)^2 dS \end{aligned} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 ϕ : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

K_x, K_y, K_z : x, y, z 方向の熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)

C : 比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

ρ : 密度 (kg/m^3)

q : 日射量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)

α : 対流境界面における対流と放射を考慮した熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$)

ϕ_0 : 外気温 ($^{\circ}\text{C}$)

t : 時間 (s)

この汎関数 χ に式(14)の温度 ϕ を代入し χ の変分をとる。変分をとるにあたって、まず式(14)より $|g|$ を求める。

$$|g| = \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \ \frac{\partial \phi}{\partial y} \ \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]^T = [B]\{\phi\} + [DM]\{H\} + [DH]^T [M]^T \dots\dots\dots (21)$$

ここで、

$$[B] = \left[\frac{\partial N_j}{\partial x} \ \frac{\partial N_j}{\partial y} \ \frac{\partial N_j}{\partial z} \right]^T \quad (j=1\sim 8) \dots\dots\dots (22)$$

$$[DM] = \left[\frac{\partial M_j}{\partial x} \ \frac{\partial M_j}{\partial y} \ \frac{\partial M_j}{\partial z} \right]^T \quad (j=1\sim 4) \dots\dots\dots (23)$$

$$[DH]^T = \left[\frac{\partial H_j}{\partial x} \ \frac{\partial H_j}{\partial y} \ \frac{\partial H_j}{\partial z} \right]^T \quad (j=1\sim 4) \dots\dots\dots (24)$$

式(21)を用いて式(20)を次式のように書き換える。

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} |g|^T [D] |g| dV + \int_V \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} \phi dV$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_S q \phi dS + \int_S \frac{1}{2} \alpha (\phi - \phi_0)^2 dS \\
 = & \int_V \frac{1}{2} \{ \phi \}^T [B]^T + \{ H \}^T [DM]^T + [M] \{ DH \} \cdot [D] \\
 & \cdot \{ [B] \} \phi + [DM] \{ H \} + [DH]^T [M]^T \} dV \\
 & + \int_V \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} [N] \{ \phi \} dV + \int_V \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} [M] \{ H \} dV \\
 & + \int_S q [N] \{ \phi \} dS + \int_S q [M] \{ H \} dS \\
 & + \int_S \frac{1}{2} \alpha [N] \{ \phi \} + [M] \{ H \} \}^2 dS \\
 & - \int_S \alpha \phi_0 [N] \{ \phi \} + [M] \{ H \} \} dS + \int_S \frac{1}{2} \alpha \phi_0^2 dS \dots\dots\dots(25)
 \end{aligned}$$

ここで、

$$[D] = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(26)$$

式 (25) を各要素ごとに微分して、任意の節点温度に関して次式を得る。

$$\frac{\partial \chi}{\partial \phi} = [\tilde{P}]^e \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} + [\tilde{H}]^e \{ \phi \} + \{ \tilde{F} \}^e = 0 \dots\dots\dots(27)$$

ここで、

$$[\tilde{P}]^e = \int_V \rho C [N]^T [N] dV : \text{熱容量マトリックス} \dots\dots\dots(28)$$

$$[\tilde{H}]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_S \alpha [N]^T [N] dS \dots\dots\dots(29)$$

: 熱伝導マトリックス

$$\begin{aligned}
 \{ \tilde{F} \}^e = & \int_S q [N]^T dS - \int_S \alpha \phi_0 [N]^T dS \\
 & + \int_V [B]^T [D] [DH]^T [M]^T dV \\
 & + \int_V [B]^T [D] [DM] \{ H \} dV \\
 & + \int_S \alpha [N]^T [M] \{ H \} dS : \text{荷重ベクトル} \dots\dots\dots(30)
 \end{aligned}$$

式 (27) を系全体に重ね合わせることによって、最終的に系全体としての有限要素方程式が得られる。

通常のアインパラメトリック要素の線形内挿形状関数を用いた場合、熱容量マトリックス、熱伝導マトリックスは式 (28)、(29) と同じ形態になるが、荷重ベクトルについては式 (30) の第 1 項、および第 2 項だけとなる⁶⁾。これに対して、ダム厚さ方向 (ξ 方向) について一次元熱伝導方程式の厳密解を導入したことによって、式 (10) 中の初期条件 $g(x)$ に関する項が必要となり、最終的に式 (30) の第 3 項～第 5 項が必要となる。すなわち、式 (30) の第 1 項、第 2 項は、それぞれ日射量、外気温による等価節点荷重ベクトルであり、第 3 項～第 5 項が初期条件による等価節点荷重ベクトルとなっている。

式 (27) を解くにあたっては、Wilson と Clough によ

て提案された時間差分法を用いた。また、実際の計算に際しては、時間増分値を 1 時間とし、日射量および外気温を時間ステップごとの増分値で与え、荷重ベクトルを更新した。初期条件については、第 1 ステップのみ仮定値を $g(x)$ として与え、以降のステップでは前ステップで計算された要素内温度分布をそのステップでの初期条件 $g(x)$ として用いることとした。第 1 ステップで与える初期条件は、各要素辺上に関してあらかじめ設定したその両端の節点温度のうち、ダム全体の中心部にある節点の節点温度を用いて、これを初期条件 $g(x)$ に一定値として与えることとした。

(4) 3要素モデルによる温度解析結果

図-7 に示すような要素数 3 のモデルについて、一次元熱伝導方程式の厳密解を形状関数として用いた有限要素温度解析と一次元 Schmidt 法⁷⁾との比較を行った。このモデルは 2.(2) で示した数値解析モデルであるコンクリートアーチダムのダム中央堤頂部の要素を想定したもので、要素の大きさはダム厚さが約 5 m であることから x 方向を 5 m とし、 y, z 方向をそれぞれ 30 m、20 m とした。また、熱入力方向は x 軸に垂直な面のみで、 $x=5$ m 面を上流側、 $x=0$ m 面を下流側とし、 y, z 軸に垂直な面は断熱とした。このように想定することで三次元解析ではあるが基本的には一次元解析となる。Schmidt 法では、全長 5 m、節点数 62 のコンクリート棒材として解析を行った。熱荷重については、2.(2) で示した日射熱と外気温を用い、初期温度は端部節点で 1°C、内部節点で 8°C とした。

図-8 に $x=0$ m および $x=5$ m 面で温度がピークとなるときの x 方向の温度分布を、実線：一次元熱伝導方程式の厳密解を用いた有限要素温度解析、破線：一次元 Schmidt 法、一点鎖線：通常の線形内挿関数を用いた有限要素温度解析として示した。

通常の線形内挿関数を用いた有限要素温度解析では、表面温度が上昇するにつれて内部節点温度が下降しており、破線の Schmidt 法にみられるような表面付近での急激な温度変化を正確に表現できないことがわかる。しかし、一次元熱伝導方程式の厳密解を用いた有限要素温

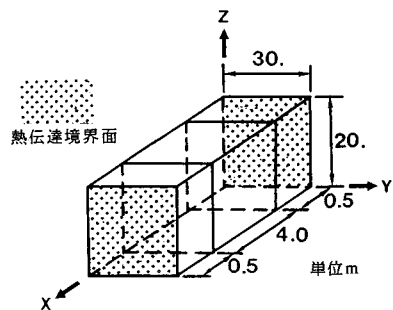
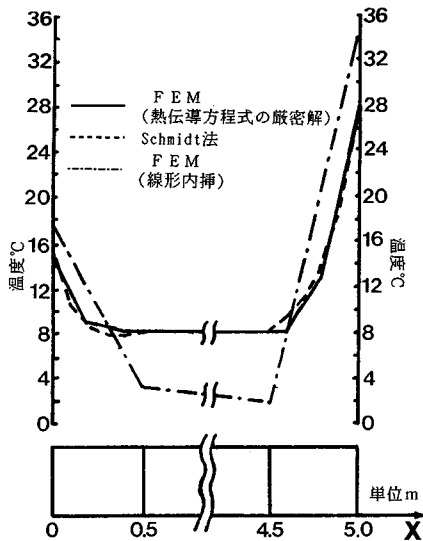


図-7 3要素モデル



図—8 一次元熱伝導方程式厳密解 FEM と Schmidt 法の比較

度解析では、非常に粗い要素分割にもかかわらず、コンクリート表面部における急激な温度変化を適切に表わしており、また Schmidt 法ともよく一致している。表層の要素厚はこの解析例では 50 cm であるが、1 m 程度まで拡大しても同様な解析結果が得られることが確認された。なお、Schmidt 法および今回行った有限要素温度解析の結果、日射熱および外気温変化によるコンクリート内部の温度変化は、表層部 50 cm 程度にとどまり、それより内部では温度変化がほとんどないことが認められたので、表層の要素厚を極端に大きくする必要はないものと考えられる。

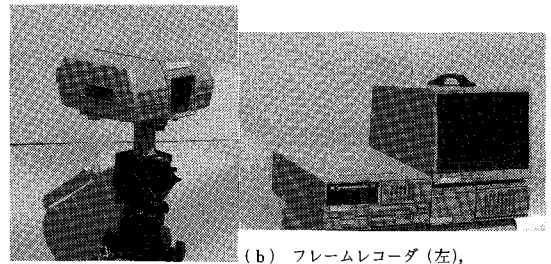
今回実施した温度解析は、支配的な入力熱方向について新たな形状関数を導入したものであるが、以上の結果からみて、ダム厚さ方向の温度分布を精度よく予測できると判断されたので、これを用いてダムの温度解析を実施することとした。

4. 赤外線映像装置による構造物の表面温度測定

(1) システムの概要

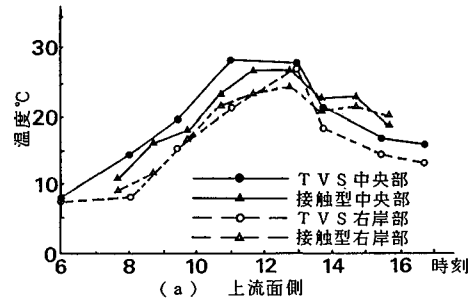
日射熱および外気温によるコンクリート構造物の温度解析結果を検証するために、赤外線映像装置 (Thermal Video System, 以下 TVS と記す) により表面温度測定を行った。TVS は物体の発している輻射エネルギー、すなわち赤外線を検知し、その強さに比例した電気信号に変換、増幅後、デジタル信号化してカラー熱画像としてモニタに表示、フロッピーディスクに記録するものである。

写真—1 は TVS の基本構成機器である。対象物表面

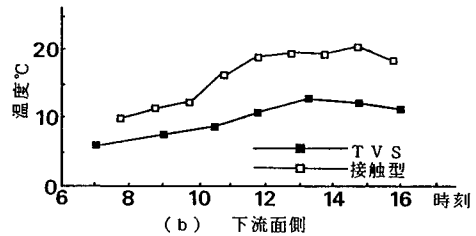


(a) カメラヘッド (b) フレームレコーダ (左)、プロセッサ (右下)、モニタ (右上)

写真—1 TVS 基本構成機器



(a) 上流面側



(b) 下流面側

図—9 ダム表面温度測定結果

から射出される赤外線を検知し電気信号に変換するカメラヘッド部、カメラヘッドからの電気信号をデジタル信号に変換する本体プロセッサ部、デジタル信号を処理して熱画像をリアルタイムにモニタリングするモニタテレビ部、パソコンを用いて測定温度データを処理するためにフロッピーディスクにデータを記録するフレームレコーダより構成される。TVS は、毎秒 20 画面の速度で、リアルタイムに表面温度をモニタリングできるので、風や雲などの気象条件に対する瞬間的な影響も的確にとらえることができる。また、通常の接触型温度計と異なり数 m から数十 m 角の構造物表面温度を一度に表示でき、場所による表面温度の変化が把握しやすい。なお、測定温度の最小単位は 0.1°C である。

(2) コンクリートアーチダムの表面温度測定結果および考察

図—9 に、コンクリートアーチダムの上流面側、下流面側の TVS および接触型温度計による表面温度の測定結果を示す。測定日は昭和 63 年 11 月 9 日で午前中は快晴、無風であったが午後は時折雲がでるという天候で

あった。TVS による測定結果は、上下流面の堤体側面の表面温度である。特に下流面側については堤頂からダム高さ約 50 m までの平均的な温度である。一方、接触型温度計での測定値はダム堤頂部近傍の堤体側面の温度である。上流面側では中央部付近での TVS による測定値が接触型温度計による測定値よりも 1~2°C 程度高くなっているものの、これらの測定値はおおむね一致していた。一方、下流面側では、TVS による測定値が接触型温度計による測定値よりもかなり低くなっている。この理由として、ダム下流面側はほとんど 1 日中日射を受けないが、堤高が 100 m と高いので接触型温度計で測定した堤頂部付近は多少日射の影響を受けていることが予想される。つまり、ダム高さによってかなり周囲の大気の状態が異なり、それゆえに下流面側では堤頂部付近は比較的高い温度を示すが、ダム底部では表面温度はあまり高くないと考えられるのである。

以上より、表面温度の実測値には、TVS による測定値を用いることとした。

5. コンクリートアーチダムにおける温度解析結果

(1) コンクリートアーチダムの要素分割

2. に示したコンクリートアーチダムを次のように要素分割した (図-10)。ダム本体を厚さ方向 8 層、長手方向 9 層、鉛直方向 4 層に分割し、かつダム本体周囲の岩盤を一層併せて考えた。このように要素を分割することで、図-11 に示すように 1 つの要素は厚さ方向に 0.5~2.5 m、他の 2 方向に 20~30 m という極端に薄い

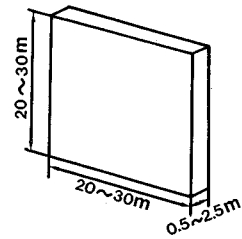


図-11 1要素の大きさ

板状の要素となる。

熱伝達境界については、下流面側はダム本体全面としたが上流面側については変位実測時の水位が 282 m となっていたため最高部要素一層のみとし、水面下は日射量および外気温入力を 0 とし、また水温は 8°C で一定とした。なお、堤頂水平面はもちろん日射を受けるが、その熱入力にダム側面に比較して少ないことを考慮して上流面側の水面下と同様に熱入力を無視した。解析に用いた直交座標系は、ダム湖方向 x 、ダム右岸方向 y 、鉛直上方 z とした。

(2) 温度解析結果および考察

2. で得られた日射量と、実測した外気温を熱荷重として与え、ダム全体に対する温度解析を行った。その結果を図-12 および図-13 に示す。なお、解析に用いたコンクリートおよび岩盤の熱特性値を表-1 に示す。

図-12 は図-3 に対応して、ダム下流面側、上流面側堤頂部のそれぞれ左岸部要素 A、A'、中央部要素 B、B'、右岸部要素 C、C' の表面温度の時間履歴であり、中央部における表面温度実測値、入力した外気温も併せて示

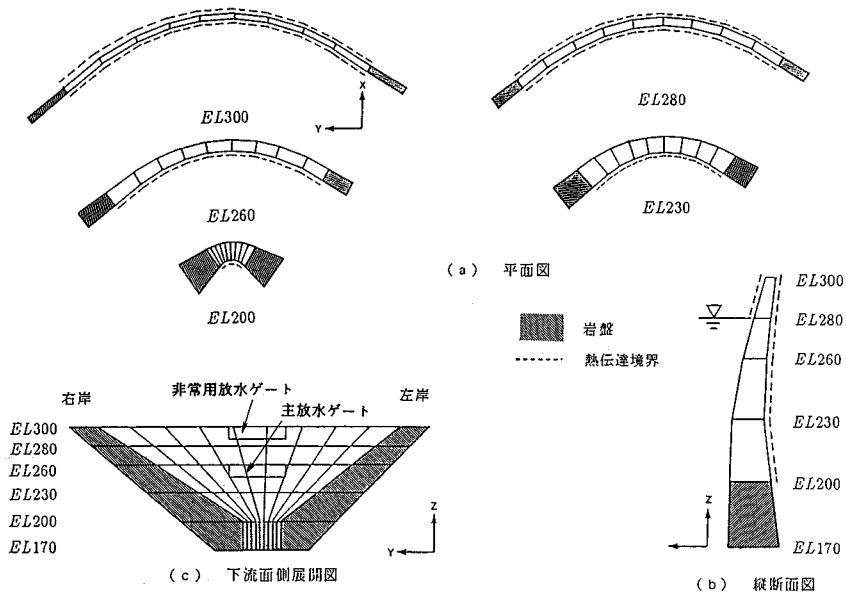
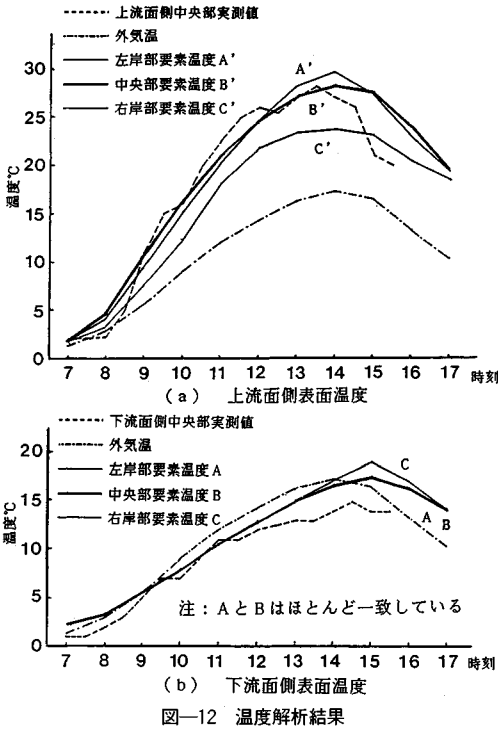
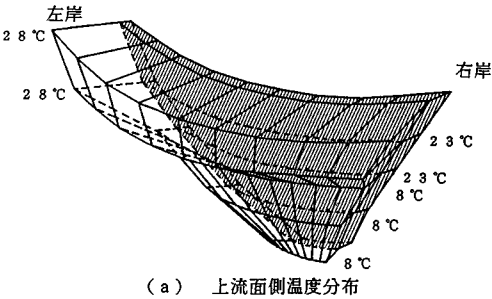


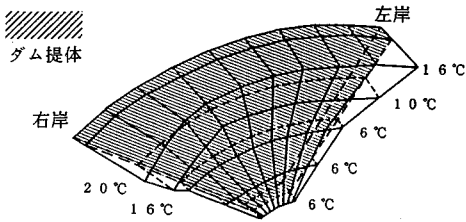
図-10 コンクリートアーチ式ダムの要素分割



図—12 温度解析結果



(a) 上流面側温度分布



(b) 下流面側温度分布

図—13 ダム表面温度分布

した。

上流面側では、日射を受ける中央部要素 B' の解析値が時間的に実測値をよく追従しており、ピーク時の温度も約 28°C とほぼ一致している。また、中央部要素 B'、左岸部要素 A' に比べて、右岸部要素 C' が時間的に遅

表—1 コンクリート、岩盤の熱特性値^{1),9)}

熱特性値	コンクリート	岩盤
熱伝導率 $\times 10^{-3}$ (kcal/m \cdot sec \cdot °C)	0.611	0.538
熱伝達率 $\times 10^{-2}$ (kcal/m 2 \cdot sec \cdot °C)	0.278	0.278
比熱 (kcal/g \cdot °C)	0.28	0.25
密度 (t/m 3)	2.35	2.60
放射吸収率 ⁹⁾	0.46	—

れた温度上昇をみせている。これは 2. で述べたように、朝方は右岸側の山々がダムに影を落とすためである。下流面側については、ほぼ 1 日中日射を受けないので、解析値は外気温に沿った温度上昇をみせている。しかし、右岸部要素 C' については、午後に左岸部の山越しに日射を受けるので他の部分に比べて若干の温度上昇が認められる。

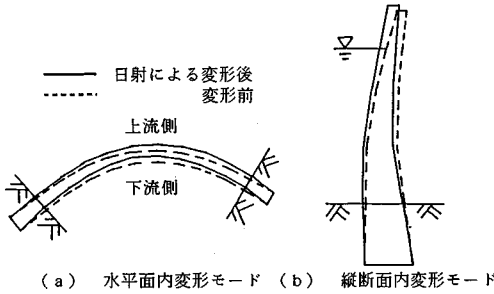
図—13 には、午後 3 時の時点での上流面側および下流面側の温度分布の解析結果を示した。上流面側では、ダム長手方向に関して、概して左岸寄りの部分が右岸側よりも温度が高くなっている。また、下流面側では、前述した理由により右岸部分においてやや高い温度分布が得られた。鉛直方向については、堤頂部付近は比較的高い温度となっているが、標高が下がるにつれて徐々に温度が低くなってきている。これは 4. でも述べたように、堤頂部付近は日射の影響による気温の上昇があるが、標高の低い場所ではそれほど気温が上がらないためであると考えられる。

今回数値解析モデルとして選定したダムは、上流面側ではほぼ全面が日射を受けるが、その地理的条件により、ほとんどの時間帯において右岸側よりも、中央部から左岸側にかけての部分が高くなる温度分布が予想される。日射量計算結果に基づく今回の温度解析結果には、この傾向が正しく現われている。また下流面側においても、時間帯によって堤頂部付近の右岸部分の温度が高くなる傾向が適切に評価されている。以上のように今回行った温度解析は、温度の時間履歴、ダム全体の温度分布に関して、おおむね良好な結果を与えていると考えられる。

しかし、解析では晴天・無風の理想的な状態を想定しており、実際の気象条件の短期的な変動等を考慮していない。表面温度は、日射熱、外気温だけでなく、その他の要因に対しても敏感に反応すると思われるが、より実際に即した温度解析を行うためには、これらの影響についても考慮していくことが必要であると考えられる。

6. コンクリートアーチダムの熱変形解析

5. で得られたダムの 1 日の温度解析結果から温度増分 Δt を求め、これから温度ひずみ $\alpha \Delta t$ を算出し、さらにこれを等価な荷重ベクトルに置き換えることによ



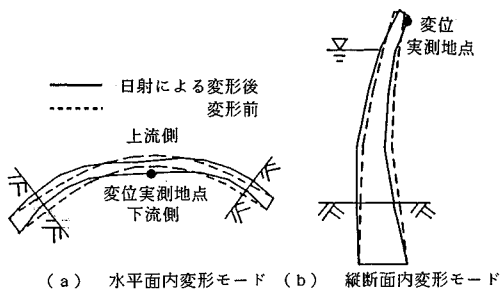
図—14 ダムの変形モード (弾性係数が一樣なとき)

り、ダムの熱変形解析を行った¹⁰⁾。

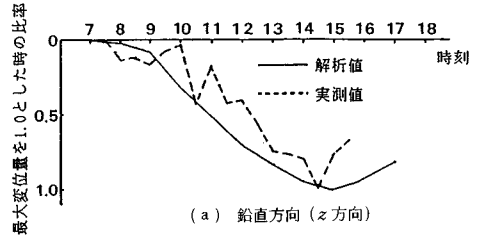
境界条件として、ダムの底面および兩岸の岩盤側面の節点を固定端とした。弾性係数は、当初は部分的な剛性変化を考慮せず、一律に岩盤で $5.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、コンクリートで $2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ と想定して、ダムの熱変形量を求めた。その結果、図—14に示すようにダム全体が上流側にはらみ出すような変形モードが得られた。これはダムの下流側側よりも上流側側の方が日射による温度上昇度が大きいこと熱膨張量が大きくなり、さらにダムの形状がアーチ型であるために生じたと考えられる。しかし、下流側側中央部堤頂地点におけるダムの日変位の実測結果²⁾によれば、ダムは下流側側に約1 cm 変位することが認められている。

したがって、部分的な剛性の変化が予想されるのであるが、より実際に近いモデル化を行うという観点から、まずダムの放水設備 (図—10(c) 参照) に着目し、その部分の弾性係数を他のコンクリート部分よりも小さくすることとした。

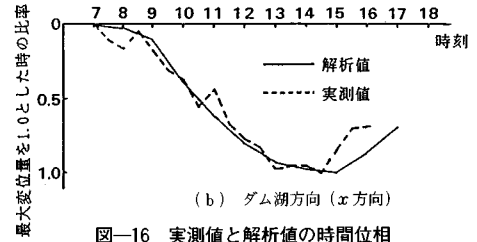
すなわち、今回解析の対象としたダムでは、ダム中ほどに位置する主放水ゲートとダム中央堤頂部に位置する非常用放水ゲートの2か所の放水設備があり、ともにダム長手方向に関してほぼ中央に位置している。そこで、これらのゲートが存在する部分の要素剛性を低くして再度解析を行ってみた。その結果、図—15に示す変形モードが得られた。すなわち、水平面内では、破線で示した変形前のアーチ形状から、ちょうどダム中央部にヒンジ



図—15 ダムの変形モード (弾性係数を変化させたとき)



(a) 鉛直方向 (z方向)



(b) ダム湖方向 (x方向)

図—16 実測値と解析値の時間位相

表—2 コンクリートおよび岩盤の弾性係数、ポアソン比¹⁾

種類	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
岩盤	5.0×10^4	0.17
コンクリート 一般部	2.0×10^5	
放水ゲート	1.0×10^5	

が形成された場合のような形状に変形するのである。その結果、中央部付近では下流側に変位し、左右兩岸付近では逆に上流側に変位することとなる。また、ダム中央部における縦断面内では、水面上の要素群への上流側側からの熱入力によりこれらの要素がダム長手方向を軸として下流側に回転し、これらの要素群の挙動のため、水面下の要素群は逆に上流側へ張り出すような変形状態となるのである。

図—16は、図—15に示した変位実測地点におけるダム湖方向および鉛直方向変位量について、解析値と実測値のおおのこの最大変位量を1.0としたときの各時刻の変位量の比率を表わしたものである。図—16より、ダム変形モードの時間履歴については、解析値と実測値はほぼ一致していることが認められる。なお、解析で用いた弾性係数およびポアソン比は表—2に示すとおりである。

今回行った熱変形解析により、ほぼ妥当であると思われる変形モードの時間履歴を得ることができた。しかしながら、変位量の絶対値に関していえば、ダム湖方向変位が実測で最大約1.0 cm であるのに対して、解析では約2.2 mm とかなり小さな値となった。

この原因として、解析上は、要素分割の問題、すなわち、ダム厚さ方向では8層に分割しているが、ダム長手方向およびダム鉛直方向については、図—11に示したような数10 m 単位の要素を用いていることや、コンク

リート部と周囲の岩盤部の結合に関する境界条件について十分に考慮できなかったことが挙げられる。

その他、今回の解析モデルでは、コンクリート部の周りに岩盤部を一層のみ考えたのであるが、日射を受けるのはダム本体のみに限らず、周囲の山々も当然その表面に日射を受けているのであり、多少なりとも変位を生じていることが予想される。したがって、変位の実測値にもこの影響が含まれることは否定できず、実測値自体の再評価の必要性も認められるのである。

いずれにせよ、現段階では変位の実測値と解析値とを一致させて構造物各部の剛性を同定し、健全性評価に資するという本来の目的達成には至らなかった。ただし、部分的な剛性変化が全体的な変形モードに与える定性的な影響は推測できたわけであり、今後さらに部分的な剛性変化の影響について検討を進めていきたいと考えている。

7. 結 論

大型コンクリート構造物の健全性評価の前提として、構造物に入力される日射量の算定を行い、日射量と外気温を熱荷重として、温度解析を行った。温度解析にあたっては、一次元熱伝導方程式の厳密解を形状関数に用いた。この結果、少ない要素数にもかかわらず表面温度だけでなく構造物内部の温度を含め、構造物全体の温度分布を適切に評価することが可能となった。

熱変形解析の結果、実測されたダムの変形モードと適合する変形状態を得ることができた。ただし、変位量の予測については必ずしも十分ではなく、検討していくべ

き問題も残されている。今後もさらに、各種構造物の変位実測値と解析値との比較を行い、実構造物の健全性評価のための基礎資料を集積していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 吉田弥智ほか：光素子センサーを用いた大型土木構造物の管理システムに関する研究，昭和60年度科学研究費補助金研究成果報告書，No. 58850101，1986。
- 2) 吉田弥智・田辺忠顕・梅原秀哲・上原 匠：光素子センサーを用いた大型土木構造物の三次元変位測定システムの開発に関する研究，土木学会論文集，No. 397/V-9，1988。
- 3) 吉田弥智・田辺忠顕・梅原秀哲・上原 匠：コンクリートアーチダムの日射による日変位挙動に関する研究，土木学会論文集，No. 420/V-13，1990。
- 4) 田辺忠顕・遠藤孝夫・原口 晃・山川秀次：日射を受ける伊方原子力発電所2号炉外部遮蔽壁の熱応力解析，電力中央研究所報告，No. 379039，1982。
- 5) 小平吉男：物理数学第二巻，現代工学社，1933。
- 6) Larry J. Segerlind (川井忠彦監訳)：応用有限要素解析，丸善，1978。
- 7) 日本コンクリート工学協会 マスコンクリートの温度応力研究委員会：マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム，日本コンクリート工学協会，1985。
- 8) J. P. Holman (平田 賢訳)：伝熱工学，ブレイン図書，1982。
- 9) 大河原重昭・近久博志・津崎淳一・桜井春輔：マスコンクリートの熱特性の評価(その1)～(その3)，土木学会第44回年次学術講演会概要集，1989。
- 10) 矢川元基・宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社，1985。

(1990.2.27・受付)