

## 吊橋主ケーブル断面内温度の応答解析法と形状管理計測への適用

### Thermal Response Analysis of Main Cable in Suspension Bridge for Control Measurement

○前田 研一\* 藤井 堅\*\* 平野 茂\*\*\* 成田 信之\*\*\*\*

Ken-ichi MAEDA, Katashi FUJII, Shigeru HIRANO and Nobuyuki NARITA

**ABSTRACT** The average temperature in the cross section of main cable in suspension bridges should be estimated correctly, in order to predict the configuration for the execution control and for the maintenance. In this paper, a practical method based on the finite element method for unstable thermal response analyses is proposed to evaluate the temperature distribution. Moreover, justification of the proposed method and efficiency of control measurements are verified from results in the application to an actual bridge.

**Keywords** : 吊橋, ケーブル温度応答, 有限要素法, 施工管理 *suspension bridge, thermal response of cable, finite element method, execution control*

#### 1. 緒 言

吊橋主ケーブルの温度変化に伴うサグの変化が全体構造の形状に及ぼす影響は大きく、補剛桁の架設開始から完成までの各架設段階の施工管理、および、完成後の維持管理での各々長時間にわたる形状管理計測では、夜間計測であっても正確な温度変化の把握が不可欠である。しかも、太径の主ケーブル断面平均温度は、他の構造部材と異なって表面温度の平均値とは有意な差異のあることが知られており、断面内の温度分布の経時変化に応じて算定されなければならない。しかしながら、スクイジング後の主ケーブル断面内温度を直接に計測することは実大のダミー供試体を用いない限り困難であり、温度分布の解析とそれによる平均温度の推定を行う適切な計算手法が必要である。

このような観点から、長谷川ら<sup>1) 2)</sup>は非定常熱伝導方程式の解析解を、また、新家ら<sup>3)</sup>はその差分法による解をそれぞれ用い、模型実験結果と対比させることによって、熱拡散率、熱伝達率等の温度物理定数と気温、風速、日射量等の環境条件とを関係付け、主ケーブル断面内温度の応答特性を明らかにしている。さらに、実橋架設現場への適用のために、年間気象実績と形状管理計測の実施前数日間の気象状況を考慮に入れた、実用的な断面内平均温度の簡易推定法を与えている。

一方、著者らは、有限要素法による解<sup>4)</sup>を応用した主ケーブル断面内温度の時系列応答解析法を提案し、解析解および文献1)の模型実験結果と対比させることにより実用上十分な精度を有することを確かめている<sup>5) 6)</sup>。本解析法では、「Neumann型の境界値問題」とせずに「Dirichlet型の境界値問題」として取り扱ったことによって、温度物理定数は熱拡散率のみが、環境条件は主ケーブル表面温度のみが境界条件として対象となり、より実用的かつ汎用性のある断面内平均温度の推定法となる事が予測された。しかし、熱拡散率は断面の空隙率に単に依存するだけでなく含有滞留雨水等の影響を受け、また、境界条件に加えて初期条件が必要であるが、初期温度分布の設定は容易ではないなど、実際問題に適用するには架設現場で対処すべき問題点が残されていた。

- 
- |                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| * 東京都立大学工学部土木工学科    | (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1) |
| ** 広島大学工学部第四類(建設系)  | (〒724 広島県東広島市鏡山1-4-1)   |
| *** 本州四国連絡橋公団企画開発部  | (〒105 東京都港区虎の門5-1-5)    |
| **** 東京都立大学工学部土木工学科 | (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1) |

本論文の一部は日本鋼構造協会第13回大会研究集会マトリックス解析法研究発表会(1979)で発表。

本論文では、まず、著者らが提案した有限要素法による吊橋主ケーブル断面内温度の時系列応答解析法の概要を示し、次に、その妥当性の検証結果を示す。さらに、上述の問題点の解決策、および、計測・解析システムの現場構築案などを提示した後、本州四国連絡橋最初の吊橋である因島大橋を対象にした実橋架設時の施工管理<sup>7)</sup>、および、完成後の維持管理<sup>8)</sup>における形状管理計測への適用結果を示し、主ケーブル断面平均温度推定法としての実用性と有用性について論ずる。

## 2. 主ケーブル断面内温度の応答解析法

### 2.1 2次元非定常熱伝導方程式

主ケーブル断面内での熱移動は、隣接する素線の接触面、空隙を介して行われるが、巨視的に見れば、ある有限区間における等方、等質な断面の2次元非定常熱伝導問題として取り扱われ得ると考えられ、この問題の基礎方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial \theta(x, y, t)}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここに、 $\theta$ は時刻 $t$ における直交座標 $(x, y)$ 位置の点の温度であり、 $D$ は、比熱を $c$ 、密度を $\rho$ および熱伝導率を $k$ として、 $D = k / c \rho$ で与えられる温度伝導率(熱拡散率)である。

式(1)の初期条件としては、時刻 $t = 0$ での初期温度分布である次のような条件式が考えられる。

$$\theta(x, y, t) = \theta_0(x, y) \quad \text{at } t = 0 \quad (2)$$

また、境界条件としては、次のような2種の条件式が考えられる。

(i) 「Neumann型の境界値問題」 — 境界線の領域 $S_1$ での熱量の出入

$$q(x, y, t) = k \frac{\partial \theta}{\partial n} = \alpha_b(t) \{ \theta_b(t) - \theta(x, y, t) \} + q_b(x, y, t) \quad \text{on } S_1 \quad (3)$$

(ii) 「Dirichlet型の境界値問題」 — 境界線の領域 $S_2$ 上の温度分布

$$\theta(x, y, t) = \hat{\theta}(x, y, t) \quad \text{on } S_2 \quad (4)$$

ここに、 $\alpha_b$ 、 $\theta_b$ はそれぞれ熱伝達率および境界線と接触する外気の温度であり、 $q_b$ は日照などによる熱量に対応するものである。なお、 $n$ は境界線に対する法線方向を意味している。

### 2.2 解析解と無次元パラメータ

「Neumann型の境界値問題」において、 $\alpha_b$ が一定で、 $q_b$ の出入がなく、円形断面とした主ケーブル断面内の温度 $\theta$ が外気温 $\theta_b$ の変動のみによって支配される場合には、式(1)、(3)は極座標表示で、

$$\frac{\partial \theta(r, t)}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (5)$$

$$k \frac{\partial \theta}{\partial r} = \alpha_b \{ \theta_b(t) - \theta(r, t) \} \quad \text{on } r = d/2 \quad (6)$$

のようにそれぞれ書き直されて、ベッセル関数型の微分方程式となり、

$$\theta(r, t) = \theta_0 + \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{\frac{\alpha_b d}{k}}{\alpha_i^2 + \left( \frac{\alpha_b d}{2k} \right)^2} \cdot \frac{J_0 \left( \frac{2\alpha_i r}{d} \right)}{J_0(\alpha_i)} \cdot \frac{4\alpha_i^3}{d^2} \cdot D e^{-\frac{4\alpha_i^2}{d^2} D t} \cdot \int_0^t \{ \theta_b(\tau) - \theta_0 \} e^{-\frac{4\alpha_i^2}{d^2} D \tau} d\tau, \quad (7)$$

$$\alpha_i J_1(\alpha_i) - \frac{\alpha_b d}{2k} J_0(\alpha_i) = 0$$

なる非定常温度応答の解析解を得ることができる。ここに、 $d$ は直径、 $J_j(x)$ は $j$ 階第1種ベッセル関数である。また、式(2)の初期条件 $\theta_0$ は、断面内で一様であるとしている。

したがって、特に、外気温 $\theta_b$ が跳躍関数で与えられる場合には、

$$B_i = \frac{\alpha_b d}{k}, \quad F_i = \frac{D t}{d^2} \quad (8), (9)$$

の無次元パラメータを用いて、ステップ温度応答の解析解が、

$$\theta(r, t) = \theta_b - (\theta_b - \theta_0) \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{B_i}{\alpha_i^2 + \frac{4}{d}} \cdot \frac{J_0\left(\frac{2\alpha_i \cdot r}{d}\right)}{J_0(\alpha_i)} e^{-\alpha_i^2 F r}, \quad \alpha_i J_1(\alpha_i) - \frac{B_i}{2} J_0(\alpha_i) = 0 \quad (10)$$

と表されることになる。

### 2.3 有限要素法による解と数値積分

式(1)の非定常熱伝導方程式にGalerkin法を適用し、両辺に仮想温度 $\delta\theta$ を乗じて、要素にわたっての積分を実行すれば、

$$\iint \frac{\partial\theta}{\partial t} \delta\theta dx dy = \iint D \left( \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \right) \delta\theta dx dy \quad (11)$$

なる式が得られる。さらに、右辺にGaussの発散定理を用いて、

$$\iint D \left( \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} \right) \delta\theta dx dy = - \iint \left\{ \frac{\partial\theta}{\partial x} D \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial x} + \frac{\partial\theta}{\partial y} D \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial y} \right\} dx dy + \int D \frac{\partial\theta}{\partial n} \delta\theta ds \quad (12)$$

とすれば、結局、次のような式が与えられることになる。

$$\iint \frac{\partial\theta}{\partial t} \delta\theta dx dy + \iint \left\{ \frac{\partial\theta}{\partial x} D \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial x} + \frac{\partial\theta}{\partial y} D \frac{\partial(\delta\theta)}{\partial y} \right\} dx dy = \frac{1}{c\rho} \delta q \quad (13)$$

ここに、 $\delta q$ は、式(3)の「Neumann型の境界値問題」に対応して、

$$\delta q = \int_{S_1} k \frac{\partial\theta}{\partial n} \delta\theta ds = \int_{S_1} [\alpha_b(t) \{\theta_b(t) - \theta(x, y, t)\} + q_b(x, y, t)] \delta\theta ds \quad (14)$$

であり、境界線 $S_1$ の領域内に含まれる要素辺に沿う線積分によって与えられる。

今、図.1に示すような四辺形要素を考え、有限要素法の手法に従って、構成する一つの三角形要素 $ijm$ 内の任意点 $(x, y)$ の温度 $\theta$ が時刻 $t$ において、3節点の温度 $\theta_i, \theta_j, \theta_m$ に対し、

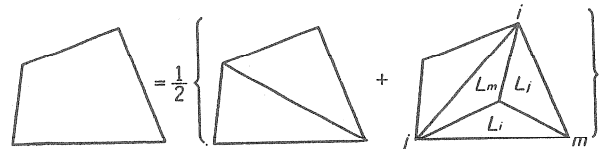
$$\theta(x, y, t) = [N] \{\theta(t)\} = [L_i, L_j, L_m] \begin{Bmatrix} \theta_i(t) \\ \theta_j(t) \\ \theta_m(t) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

であると仮定する。ここに、 $L_i, L_j, L_m$ は面積座標であり、3節点の座標 $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_m, y_m)$ を用いて、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} L_i \\ L_j \\ L_m \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} x_j y_m - x_m y_j & y_j - y_m & x_m - x_j \\ x_m y_i - x_i y_m & y_m - y_i & x_i - x_m \\ x_i y_j - x_j y_i & y_i - y_j & x_j - x_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad (16)$$

ただし、

$$\Delta = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{bmatrix} \quad (17)$$



であり、 $\Delta$ は三角形 $ijm$ の面積を表している。

したがって、式(15)を式(13)に代入すれば、

図.1 四辺形要素

$$[h] \{\dot{\theta}(t)\} + \left[ k + \frac{1}{c\rho} p_{S_1} \right] \{\theta(t)\} = \frac{1}{c\rho} \{q_{S_1}(t)\} \quad (18)$$

なるマトリックス関係式を得る。ここに、各マトリックスは、次式で表される。

$$[h] = \iint [N]^T [N] dx dy, \quad [k] = \iint \{ [N_{,x}]^T D [N_{,x}] + [N_{,y}]^T D [N_{,y}] \} dx dy \quad (19)_1$$

$$[P_{S1}] = \int_{S1} \alpha_b [N]^T [N] ds, \quad \{q_{S1}(t)\} = \int_{S1} \{\alpha_b \theta_b(t) + q_b(x, y, t)\} [N]^T ds \quad (19)_2$$

ただし,

$$[N_{,x}] = \left[ \frac{\partial L_i}{\partial x}, \frac{\partial L_j}{\partial x}, \frac{\partial L_m}{\partial x} \right], \quad [N_{,y}] = \left[ \frac{\partial L_i}{\partial y}, \frac{\partial L_j}{\partial y}, \frac{\partial L_m}{\partial y} \right] \quad (20)$$

である。ゆえに、式(18)を用いて、全断面についての解式が次式のように定められる。

$$[H]\{\dot{\theta}(t)\} + \left[ K + \frac{1}{c\rho} P_{S1} \right] \{\theta(t)\} = \frac{1}{c\rho} \{Q_{S1}(t)\} \quad (21)$$

上式により非定常温度応答解析を実行するためには、時間間隔  $\Delta t$  による数値積分を逐次実行しなければならないことは明らかである。また、式(2)の初期条件および式(4)の「Dirichlet型の境界値問題」に対応する境界条件も導入しなければならない。例えば、数値積分法として最も簡単な後退差分を適用すれば、

$$\{\theta(0)\} = \{\theta_0\} \quad (22)$$

$$\left[ \frac{1}{\Delta t} H + K + \frac{1}{c\rho} P_{S1} \right] \{\theta(t)\} = \left[ \frac{1}{\Delta t} H \right] \{\theta(t-\Delta t)\} + \frac{1}{c\rho} \{Q_{S1}(t)\} \quad (23)$$

$$\{\theta_{S2}(t)\} = \{\hat{\theta}(t)\} \quad (24)$$

なる式によって、各節点の温度  $\{\theta\}$  が任意形状、任意境界について逐次求められることになる。ここに、式(22)が各節点の初期温度  $\{\theta_0\}$  の設定を、および、式(24)が境界線  $S_2$  上の節点での時刻  $t$  における温度の拘束をそれぞれ意味している。

#### 2.4 有限要素法の適用と境界条件

式(23)の有限要素法による解は、式(7)、式(10)の解析解とは異なって、任意境界条件に対する非定常温度応答解析が可能であり、実際問題への汎用性を予測できる。

しかしながら、この境界条件の一つである「Neumann型の境界値問題」に対応した  $[P_{S1}]$ ,  $\{Q_{S1}\}$  の項を架設現場での計測結果から直接に算定することは困難である。なぜなら、熱拡散率  $D$  と異なり、熱伝達率  $\alpha_b$  は周辺の空気の乱れ、風速などによって微妙な影響を受けられるからである。また、日照などによる熱量の出入  $q_b$  は、太陽照射、輻射などの熱量の測定値から、熱吸収率および太陽透過率などの係数を用いて算定されるわけであるが、これらの係数の評価についても未だ不明確な面があると思われるからである。

したがって、従来の研究にもあるように、これらを統計的に究明していくことが今後も研究の一方であることはもちろんであるが、現状においては、次のように考えるのが実用的であると思われる。すなわち、主ケーブル断面の外気との境界線の全域を「Dirichlet型の境界値問題」に対応した境界線  $S_2$  とすることを考えるのである。このようにすれば、式(23)には  $[P_{S1}]$ ,  $\{Q_{S1}\}$  の項がなくなり、しかも、式(24)の境界線  $S_2$  上の節点での時刻  $t$  における温度の拘束  $\{\hat{\theta}\}$  は、架設現場での主ケーブルの表面温度の測定結果から容易に与えられるからである。

### 3. 温度応答解析法の妥当性の検証

#### 3.1 解析解との比較

式(7)および式(10)の解析解は、一種の厳密解であり、その限定された境界条件や初期条件を満足し得る恒温室などでの模型実験結果との対比によって熱拡散率  $D$  等の温度物理値を算定する場合などには有効である。ここでは、式(7)の解析解との比較によって、同一条件における有限要素法による解の精度を検討することとした。

そこで、外気温の日変化を擬したsin波温度応答を考え、 $\theta_0 = 0$ ,  $\theta_b = \sin \pi t / 12$  (周期  $T = 24$  h) として、解析解、および、式(23)の有限要素法による解を用いた非定常温度応答解析の結果を示せば、図.2が得られる。ここに、式(7)の級数解の項数  $N$  に関する解の収束状況は図.3の様である。さらに、有限要素法による解の解析解に対する相対誤差を、数値積分の時間間隔  $\Delta t$  に関して図示

すれば、図.4が与えられる。これらの図から、 $\Delta t$ を0.25h以下に採れば、応答値の誤差を1.0%以内に収められ、実用上十分な精度を有することが解る。

### 3.2 模型実験結果との比較

次に、外気との境界線の全域を「Dirichlet型の境界値問題」に対応した境界線 $S_2$ とする考え方の妥当性について、日照の影響なども考慮した模型実験結果と比較して検討した。

模型実験結果は文献1)で報告されたものを引用し、本実験における表面温度の実測値(図.5参照)を境界条件として与えた有限要素法による非定常温度応答解析を図.6に示す要素分割および時間間隔 $\Delta t = 0.25$ hで実行し、主ケーブル模型断面内の温度分布の実測値と解析計算値とを比較した一例を図.7である。この図からは、両者の値がよく一致しており、提案した温度応答解析法の妥当性が確かめられたとしてもよいと思われる。

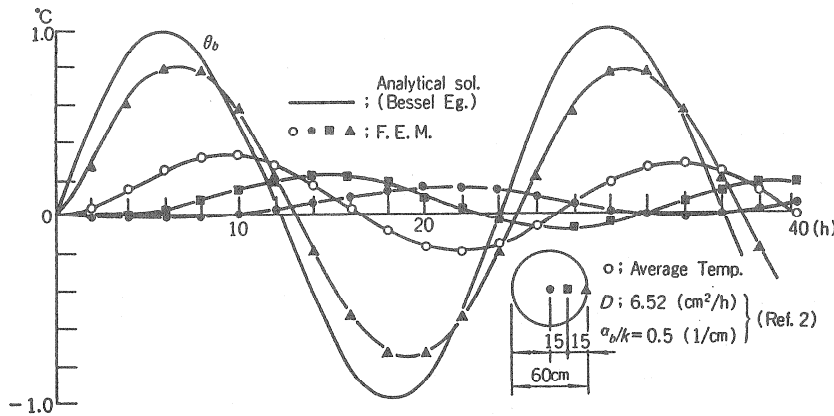


図.2 sin波温度応答

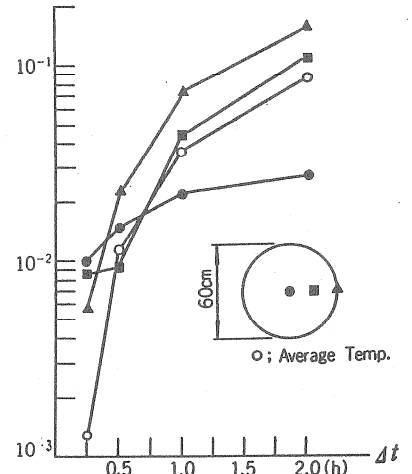


図.4 応答値の相対誤差(20h後)

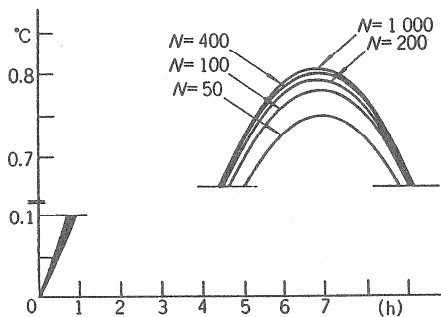


図.3 級数解の収束性(表面温度)

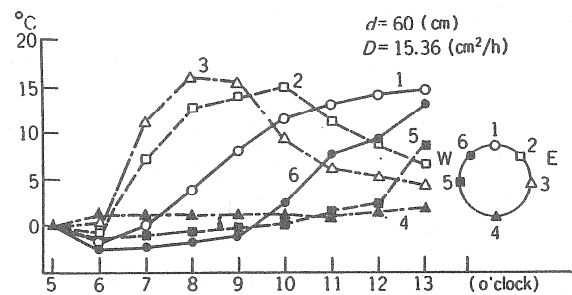


図.5 表面温度の実測値<sup>1)</sup>

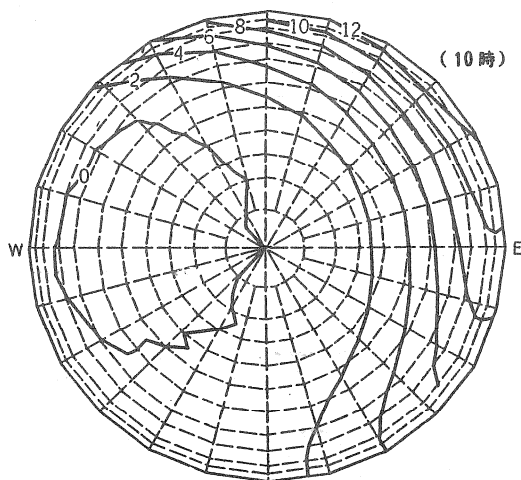


図.6 要素分割と温度分布の計算値

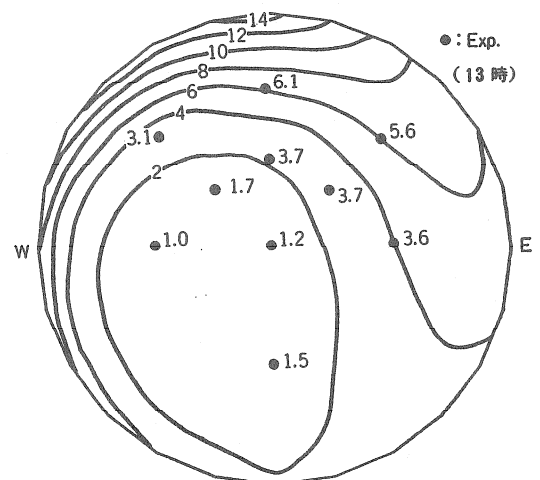


図.7 温度分布の計算値と実測値<sup>1)</sup>の比較

#### 4. 実橋架設現場での適用と管理システム

##### 4.1 問題点とその解決策

提案した有限要素法による主ケーブル温度応答解析法を架設現場での実橋の施工管理、および、維持管理における形状管理計測に適用するには、対処すべき問題点がまだ二つ残されている。

その一つは、熱拡散率 $D$ が、含有滞留雨水等の影響を受け、恒温室での測定結果などから単純に断面の空隙率をパラメータとして算定された値では、信頼性に欠けるという問題である。また、残る一つは、本解析法を実行するためには、式(22)の初期条件を与えなければならないが、初期温度 $\{\theta_0\}$ の設定は容易でなく、仮定値を用いることによる誤差を実用上の許容範囲内に収めなければならないという問題である。これらについて、次のような解決策を考えた。

前者の問題点については、形状管理計測の本測定に先立って、あるいは、並行してキャリブレーション測定を行い、サグ変化の実測値の変動から有限変位解析により算定される主ケーブル温度の相対的な変動値を真値として、表面温度の実測値を用いて温度応答解析により算定される断面平均温度の変動値がこの値にほぼ一致するように熱拡散率 $D$ を決定することで、解決することとした。

他方、後者については、熱伝導問題特有の無次元パラメータ $B_i$ 、 $F_r$ によって簡便に表された式(10)のステップ温度応答の解析解を用いて、初期温度分布の仮定値を用いることによる誤差を実用上の許容範囲内に低減するまでに要する時間を次のようにして把握し、その所要時間分の表面温度測定と温度応答解析を形状管理計測に先行して実施することで、解決することとした。

すなわち、式(10)において $\theta_0 = 1^\circ\text{C}$ 、 $\theta_b = 0^\circ\text{C}$ として、初期温度分布の仮定誤差の影響が時間の経過とともに低減されて行く状況を無次元パラメータ $B_i$ 、 $F_r$ に関して図示すれば、図.8が得られる。したがって、熱拡散率 $D$ が与えられれば、直径 $d$ は既知であり、この図を適用することによって、許容範囲内の誤差に低減するための所要時間 $t$ を類推することが可能である。例えば、 $\alpha_b/k = 0.5/\text{cm}$ 、 $d = 60\text{cm}$ で $B_i = 30$ の場合、 $F_r = 20 \times 10^{-2}$ で誤差が十分に低減されることが解り、 $D = 20\text{cm}^2/\text{h}$ とすれば、先行して実施すべき温度測定および解析の所要時間は $t = 36\text{h}$ となる。

##### 4.2 計測・解析システム

表面温度の測定は図.9に示すように熱電対をセンサーとするのが一般的となり、自動静歪計、インターフェースを介してコンピュータに測定結果を自動入力し、主ケーブル温度応答解析を実行することによって、断面平均温度の推定値をリアルタイムで得る計測・解析システムを構築することは、現在では比較的容易である。測定の時間間隔は任意に設定できるが、通常は0.25h程度にまで密に測定する必要はなく、適切な補間式を用いて連続的な記録に変換し、数値積分などに適用すればよい。なお、最近では、計測制御機および端末機としてのパソコンの普及とともに、ワークステーションが汎用機に匹敵する能力をもつようになり、架設現場での使用例も既に報告されている。

したがって、各部材の温度変化が全体構造の形状変化に及ぼす影響に関する有限変位解析結果が得られれば、形状測定項目のうち測定結果を自動入力できる項目の場合には、測定データの入力と同時に、その時点での主ケーブル断面平均温度の推定値、および、他部材温度の実測値を適用して設計基準温度に対応する実測値に換算することが可能である。また、長時間にわたる測定結果を手入力する測定項目のような場合でも、各々の測定データの測定時刻を併せて入力することにより、メモリーに記録された平均温度推定値などの時刻歴を用いて、同様の換算を行うことが可能である。

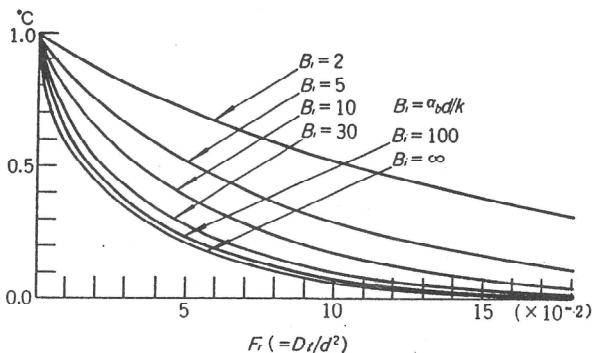


図.8 初期温度仮定誤差の影響(断面平均温度)



図.9 表面温度の測定状況

5. 実橋の形状管理計測への適用例とその考察

対象とした因島大橋は、図. 10にその一般図を示す中央径間長770mの3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋であり、直径61.8cm (空隙率19%)の主ケーブルの諸元は表. 1のようであった。本橋の場合、主ケーブルの単位温度変化に伴うサグの変化量は、有限変位解析の結果、29mm/℃であった。

まず、補剛桁架設途中における適用結果を、図. 11~図. 13に示す。表面温度は、東西両ケーブルの中央断面の周囲各4点で、形状測定開始より約3日前から2時間毎に測定した。解析解に加えて実際の応答解析による照査も行った結果、5℃の初期温度設定誤差があったとしても、60h後にはほとんど影響がなくなることが確かめられた。最初の図. 11は、キャリブレーション測定によって熱拡散率Dを算定した例であり、20時から0時までのサグの変化から算定された値と0時から翌日4時までのものによる値とを平均してD=20cm<sup>2</sup>/hと決定された状況を示すもので、表面温度の平均値では実用上十分な精度で対応できないことも解る。また、図. 12は、0.25hの時間間隔の数値積分により得られた断面内温度分布の解析例を、参考のために要素分割とともに示したものである。

さらに、図. 13は、断面平均温度の推定例として、形状測定開始時におけるこの推定値と表面温度の実測値の平均との差異が約2.5℃と最大であった測定ケースにおける、各種温度の変化状況の一部を示したものである。全部で10回の測定ケースの中で、外気温が日中25℃近くに上昇し最高となった場合 (10月中旬)、および、5℃を超えずに最低であった場合 (2月上旬)も、同様の差異は共に約1℃であったことから、温度変化の履歴挙動など種々の要因が関与しているものと推測された。

他方、供用後約2年を経た時期に、温度変化が最も安定する冬期を待って実施された橋体点検のための形状測定における適用結果として、東側、西側の各ケーブル中央断面の周囲各8点で1時間毎に実測された表面温度の平均値の変化状況の一部を、外気温とともに図. 14に示す。

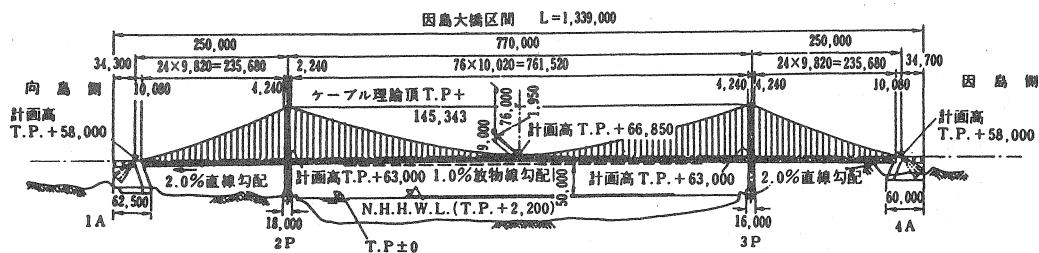


図. 10 一般図 (因島大橋)

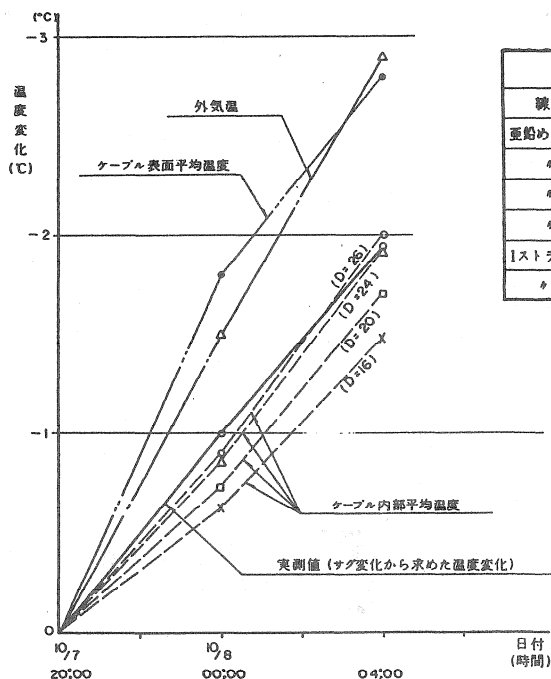


図. 11 熱拡散率Dの算定

表. 1 主ケーブルの諸元

主ケーブル諸元		断面積	2.666 m <sup>2</sup>
鋼材	JIS G 3502 SWRS77B	単位重量	20.873 kg/m
亜鉛めっき素線引強さ	160~180 kg/mm <sup>2</sup>	主ケーブル構成ストランド数	91 本/条
径(めっき含む)	5.17 mm	構成素線数	11,557 本/条
断面積	20.99 mm <sup>2</sup>	一般部直径	618 mm (空隙率 19%)
単位重量	0.164 kg/m	断面積	0.2426 m <sup>2</sup>
1ストランド構成素線数	127 本/ストランド	単位重量	1,899 kg/m
(外線円)直径	67.2 mm	長さ	1,362 m

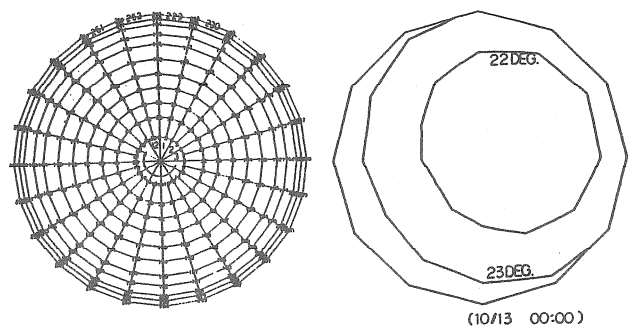


図. 12 温度分布の解析例

比較の対象となった竣工検査時の測定は夏季（8月下旬）に行われ、日中の外気温が40℃を超え、夜間も30℃前後であった。形状測定が実施された22時から翌日4時までの時間帯で、表面温度の実測値の平均とその間に約1.5℃変化した断面平均温度との差異は、最大約2℃であったと報告されている。ここでは、架設途中での測定結果における履歴挙動も参照し、図.14に示した測定結果などから、表面温度の実測値の平均をそのまま断面平均温度としてもよいと判断し、温度応答解析は実施しなかった。ただし、表面温度の測定は形状測定開始より約3日前から行っておき、解析が将来必要となった場合に備えることとした。

## 6. 結 言

提案した吊橋主ケーブル断面内温度の時系列応答解析法は、妥当かつ実用的であり、実橋架設現場に本解析法を適用した比較的簡便な計測・解析システム

を導入することによって合理的かつ効率的に断面平均温度を推定でき、補剛桁工事の開始から完成までの施工管理、および、供用後の維持管理での形状管理計測において非常に有用であると、本論文では言えた。今後、新設の吊橋の施工管理計測の他、本四架橋を初めとする我が国の既設の吊橋群の維持管理計測への適用が期待される。

最後に、因島大橋の形状測定に関して、本州四国連絡橋公団、および、補剛桁工事に携わった川田工業株式会社・日立造船株式会社・住友重機械工業株式会社・盤東京鐵骨橋梁製作所共同企業体、供用後の橋体点検に携わった盤本州四国連絡橋エンジニアリングの関係者の各位に対し、心より感謝の意を表したい。

### 【参考文献】

- 1) 長谷川鏞一・原田康夫・清田鎌次・押尾祐三・遠藤秀雄：吊橋ケーブルの温度測定実験，橋梁と基礎，1975.10.
- 2) 長谷川鏞一・原田康夫：吊橋ケーブルの温度応答に関する研究，土木学会論文報告集，No.251，1976.
- 3) 新家 徹・頭井 洋・大谷 修・湊 理宙：架設途中における吊橋ケーブルの温度応答に関する研究，土木学会論文報告集，No.302，1980.
- 4) 例えば，Zwienkiewicz, O.C. : Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, 1971.
- 5) 大地羊三・前田研一・藤井 堅：有限要素法による吊橋主ケーブル温度応答解析法，日本鋼構造協会第13回大会研究集会・マトリックス解析法研究発表論文集，1979.
- 6) 三品吉彦・中崎俊三・前田研一・藤井 堅：主ケーブル温度推定誤差による長大吊橋の架設誤差問題と解析法，橋梁と基礎，1979.9.
- 7) 高桑 稔・原 章・枝 典郎・寺井和夫・高田和守・内海 靖：因島大橋補剛桁工事後報告，川田技報Vol.4, 1985.
- 8) 松井 勉・平野 茂・金子正猪：因島大橋の橋体形状測定とケーブルバンドボルト軸力調査，本四技報，Vol.11, No.44, 1987.

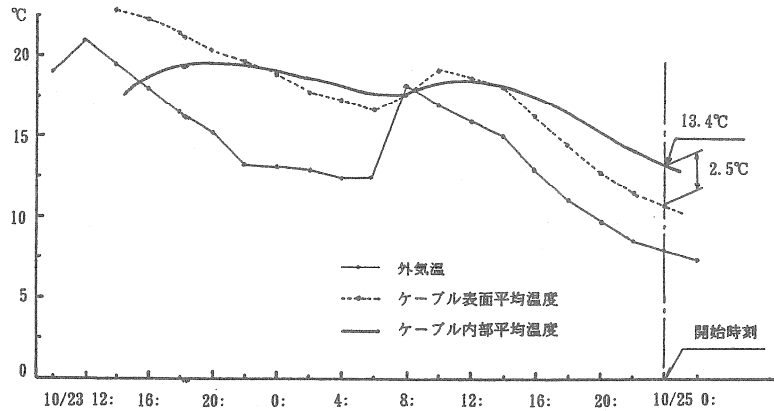


図.13 主ケーブル表面温度の測定結果と断面平均温度の推定値

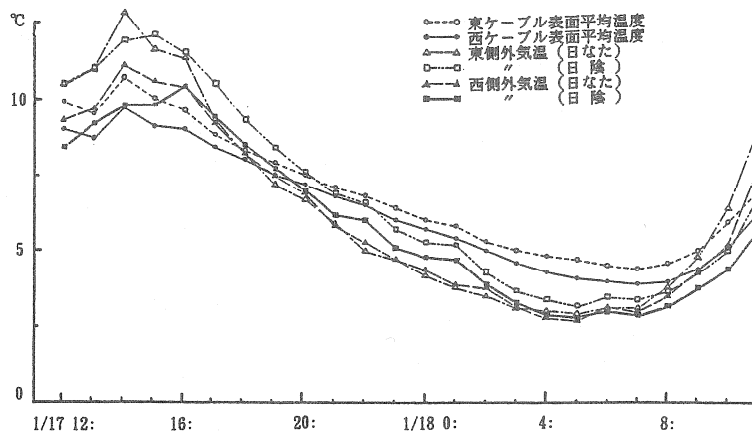


図.14 維持管理計測における東西ケーブル表面温度の測定結果