

構造ヘルスマモニタリングにおけるひずみ測定の温度影響の補正に関する研究

Study on compensation of temperature effects on strain measurement in structural health monitoring

町口敦志*, 横山功一**, 原田隆郎***, 高木優任****

Atsushi Machiguchi, Koichi Yokoyama, Takao Harada, Masahide Takagi

*修士(工学) (株)日本海コンサルタント 技術本部 技術第3部(〒921-8042 石川県金沢市泉本町 2-126)

**博士(工学) 茨城大学教授 工学部都市システム工学科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

***博士(工学) 茨城大学講師 工学部都市システム工学科(〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

****博士(工学) 新日本製鐵(株) 鋼構造研究開発センター(〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

There are considerable effects of temperature on strain measurement of civil structures such as highway and railway bridges. This temperature effect poses a great obstacle in damage identification and structural health monitoring (SHM) of these structures. In this paper correlation between temperature distribution and strain at bridge structure has been studied. Temperature effect has been modeled by using Multiple Regression and Neural Networks (NN) analysis based on temperature and strain distribution measured at a bridge model. A new compensation method of temperature effects on strain measurement has been proposed which can reduce the measurement error to about 5% or less.

Key Words : temperature distribution, strain measurement, temperature compensation, multiple regression, Neural Networks

キーワード : 温度分布, ひずみ測定, 温度補正, 重回帰分析, ニューラルネットワーク

1. はじめに

近年, 構造物の老朽化問題が重要視されてきており, 構造ヘルスマモニタリング(Structural Health Monitoring : 以下, SHM とする)技術の実用化の検討が盛んに行われている¹⁾. SHM は長期的・継続的な計測によって構造物の損傷判定を行うため, 環境要因による測定誤差の影響が大きくなる. 特にひずみ測定を行う際においては, 環境要因の中でも温度変化による測定誤差が懸念される. すなわち, 気温変動や日射などによって構造物の温度が変化し, 構造物が変形することでひずみが生じる. また, 日射によって局部的に温度が変化することで構造物内部に温度差が生じ, 伸縮差が生じる. この伸縮差によって構造物内部に不静定力が発生し, 複雑なひずみ分布となる. 他に, 鋼コンクリート合成床版においては, 鋼とコンクリートの熱容量の違いから, 温度影響によるひずみはさらに複雑な挙動を示すことが予測される. しかし, このような長期継続的計測時の温度影響によるひずみのメカニズムは必ずしも明らかとなっていない. これまで, 長期継続的計測における温度変化時の橋梁構造物の変形・挙動に関する研究が小林ら²⁾, 高木ら³⁾, 高木ら⁴⁾などによってなされており, これらの研究は長期継続的計測をする際において温度変化による影響を考慮する必要性を示している. ここで, 温度影響による

ひずみ(以下, 温度ひずみとする)には, 構造物の温度変化に起因するひずみと温度変化によるセンサ出力ひずみがある. これら温度ひずみは, 構造物の損傷によるひずみ出力ではないため, 損傷判定の際に妨げとなることが懸念される. そのため, SHM 時において損傷判定を行う際には, 温度ひずみを簡易に補正する方法が求められる. しかし, 現在までに SHM 時における温度ひずみの補正方法について確立された方法論は提案されていない.

一方, Giraldo ら⁵⁾, Yan ら⁶⁾, 許ら⁷⁾は多変量解析(主成分分析)やニューラルネットワーク(Neural Networks : 以下 NN とする)によって振動や振動に影響する環境誤差の予測について研究している. これらの文献を参考に, 本研究では温度と温度ひずみの関係を多変量解析(重回帰分析)と NN によって学習(モデル化)し, 温度ひずみの予測を行い, 実測ひずみから予測温度ひずみを除くことで, 実測ひずみを簡易に補正する方法を提案する. まず温度と温度ひずみの関係を把握するために, 鋼桁と RC 床版とを一体化した合成桁を屋外に設置し, 合成桁の温度分布, ひずみ分布を測定した. この結果をもとに, 重回帰分析や NN によって温度ひずみを学習・予測することで, 温度ひずみを補正した. そして, 温度ひずみの長期補正の検証を行うために, 今回提案する方法論によって学習(モデル化)と予測の季節が異なるデータの補正ができるか検討を行った.

表-1 試験体の概要

	床版形式	床版厚	底鋼板厚さ	床版幅	配筋	主桁	桁長
G1	RC床版	16cm	—	1.0m	主筋:D13@100mm(上下共) 配力筋:D19@125mm(上下共)	H588× 300×12 ×20	6.5m
G2	I形鋼格子床版		1mm		主筋材:I-105@200mm 配力筋:D19@125mm(上下共)		
G3	鋼板・コンクリート 合成床版		6mm		ズレ止め:I-105@300mm 配力筋:D19@100mm(上側のみ)		

2. 鋼合成桁曝露試験の概要

2.1 試験体の概要

試験体は、高木ら³⁾によって実施された実験と同一の試験体を用いた。すなわち、試験体は合成桁橋梁を模擬した長さ6.5m、幅1.0mの試験体3体であり、主桁は高さ588mmのH形鋼、床版は厚さ16cm、ハンチ高5cmである。床版と桁の合成はフランジ上側に打設したスタッドで行っている。試験体の概要を表-1に示す。G1は一般的な鉄筋コンクリート床版であり、本研究ではG1を検証の対象とした。G2のI型鋼格子床版はRC床版中の主鉄筋の代わりにI形鋼を埋め込んだもので、床版の底面に厚さ1mmの亜鉛鉄版を有している。また、G3の鋼板・コンクリート合成床版は、厚さ6mmの鋼板を床版の底面に有している。この形式についてはズレ止めとして形鋼(I形鋼)を用いたものを使用している。

試験体の設置場所は、千葉県富津市の新日本製鐵(株)総合技術センター内のヤードである。試験体の設置状況を写真-1に示す。試験体周辺には日射、風などを遮るものはない。試験体の設置位置を図-1に示す。試験体は、橋軸方向がちょうど東西になるように配置した。また、側面からの日射の影響を受ける一番南側にはG1を設置した。



写真-1 試験体の設置状況

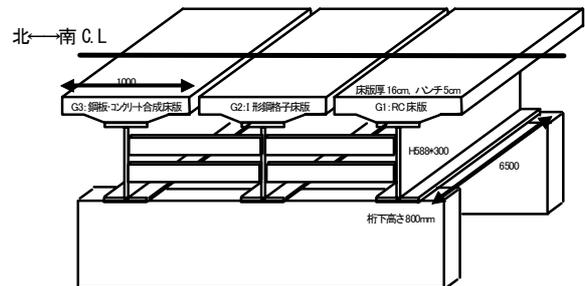


図-1 試験体の設置位置

2.2 測定項目

測定期間は、2005年10月3日から18日までの16日間である。測定ラインと測定位置を図-2に示す。ここで、測定ラインはL1とL2であり、L1は末尾が1桁、L2は末尾が2桁の測定点番号とする。次に、センサの概要を表-2に示す。気温は百葉箱の中に設置した温度計で測定した。また、試験体の温度は熱電対を試験体表面に設置して測定し、試験体のひずみは試験体表面にひずみゲージを設置した。このとき、SHMを考慮し、試験体表面にセンサを配置している。また、ひずみゲージのリード線が温度の影響を受けないように、温度補償型の3線単軸ひずみゲージを使用した。他に、同一測定点においてひずみゲージを2ゲージ並列させて測定(同点計測)を行った。測定結果の確認を行うために、日射のあたらない桁下にダミー材(4-1:コンクリートダミー材、4-2:鋼ダミー材)を置き、温度とひずみを測定した。

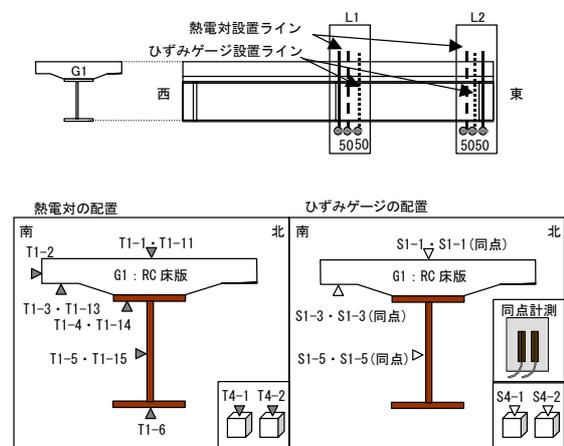
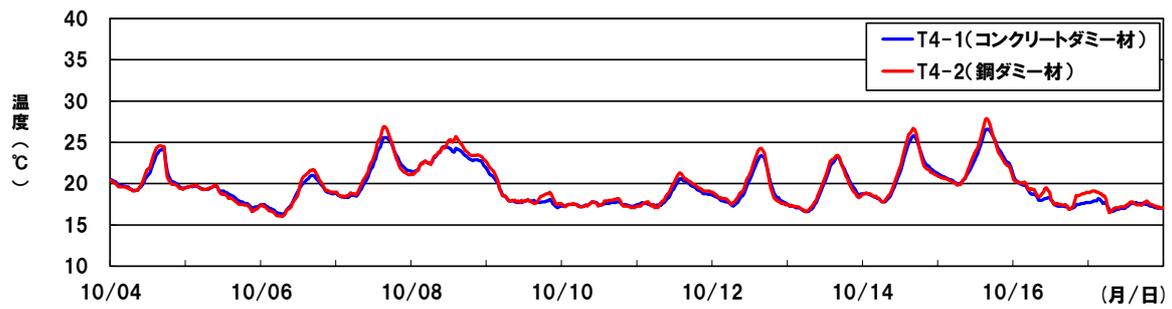
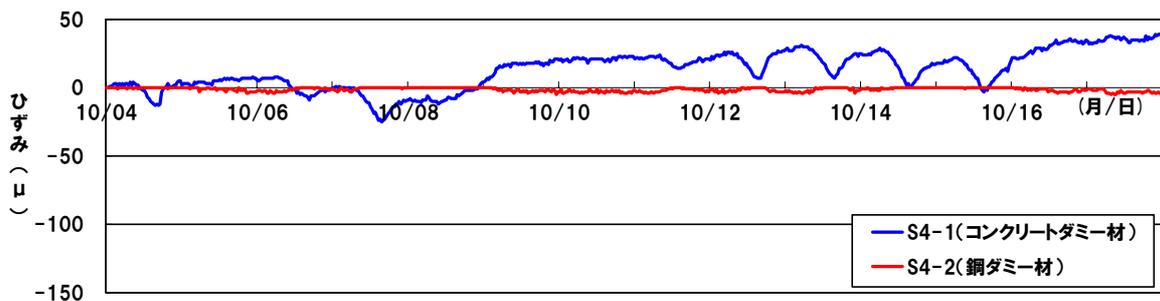


図-2 測定ラインと測定位置



(a) 温度の測定結果



(b) ひずみの測定結果

図-3 温度およびひずみの測定結果 (ダミー材)

表-2 センサの概要

名称	メーカー	型名
ひずみゲージ	(株)東京測器 研究所	PL-60-11-10LT
		FLA-5-11-10LT
熱電対	山里産業(株)	DT651

3. 測定結果

3.1 ダミー材の測定結果

コンクリートダミー材(4-1)・鋼ダミー材(4-2)の温度の測定結果(T4-1・T4-2), およびひずみの測定結果(S4-1・S4-2)を図-3に示す。ダミー材の温度は16°Cから28°Cの変化と安定していた。これは、日射の影響を受けないようにダミー材を桁下に置いたためである。またダミー材のひずみの測定結果より、鋼ダミー材のひずみ出力は小さい値であった。これは、今回用いたひずみゲージが温度補償型ひずみゲージであったためであると考えられる。温度補償型ひずみゲージは、ひずみゲージの線膨張係数と測定材料の線膨張係数を合わせることで温度によるひずみ出力を補正している。例えば、一般的に鋼やコンクリートの線膨張係数は $11(\mu/\text{°C})$ であり、これは 10°C の温度変化によって 110μ の温度変形によるひずみが生じることを示している。ここで、温度補償型ひずみゲージの温度変化による伸縮は測定材料と同様であるため、温度補償型ひずみゲージの出力は、 $0(\mu/\text{°C})$ となる。これより、鋼ダミー材のひずみの出力は小さいものとなった。一方、コンクリートダミー材のひずみ出力は、比較的大きなひずみ出力となっている。一般に、コンクリートは材料の特性上、線膨張係数にばらつきがある。今回の実測でコンクリートダミー材のひずみ出力が比

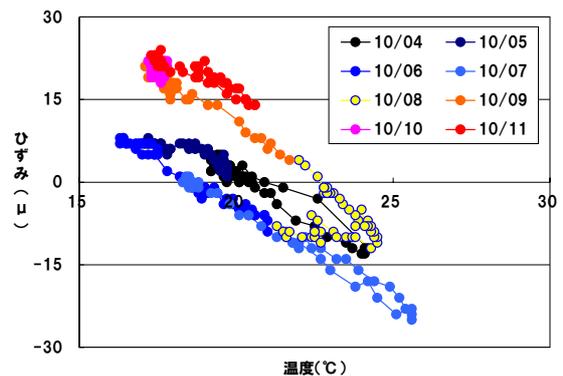
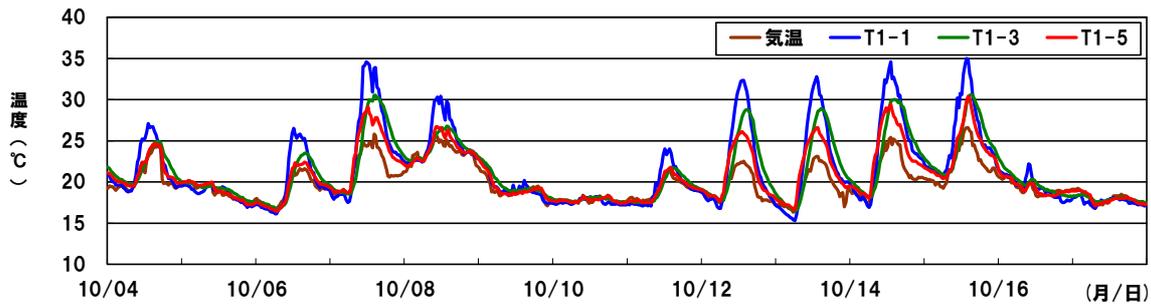
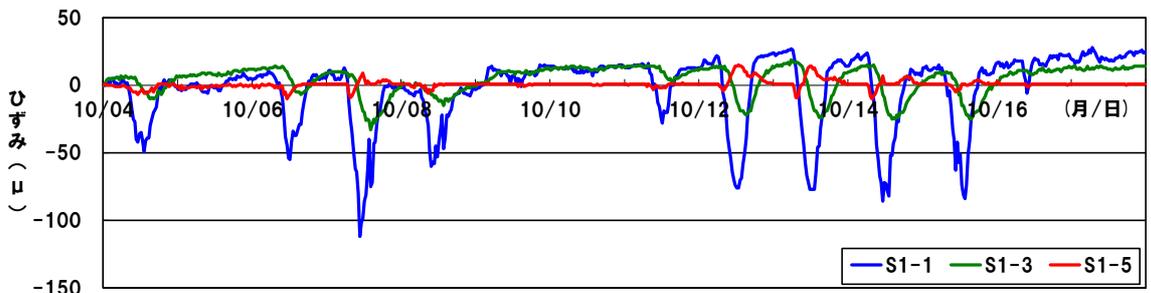


図-4 温度とひずみの関係 (コンクリートダミー材)

較的大きな値となったことは、コンクリートの線膨張係数とセンサの線膨張係数に差が生じたことが原因であると考えられる。また、コンクリートダミー材のひずみは、日が経過するにつれてひずみが増加している。さらにこれを分析するために、コンクリートダミー材の温度とひずみの関係(散布図)を図-4に示す。この散布図は、測定された同時刻の温度を横軸にとり、そのときの測定ひずみを縦軸にプロットしたものである(以下、図-6, 7, 10, 14の温度とひずみの散布図についてもすべて同様の形式である)。なお、図-4については、測定時間の時系列変化を表現するために、プロットした点を線で繋ぐとともに、測定日ごとに色分けして表示した。この図から、温度とひずみの関係には相関性があることが確認できる。また、日が経過すると温度とひずみの関係にズレ(ドリフト)が生じていることがわかる。このドリフトがひずみの増加と関連していると考えられる。このようなひずみゲージのドリフトは、コンクリート材料のクリープ特性とも考えられるが、今回

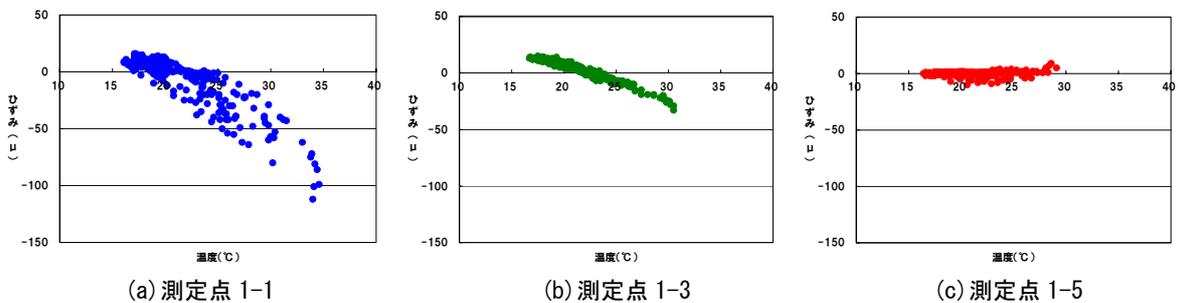


(a) 温度の測定結果



(b) ひずみの測定結果

図-5 温度およびひずみの測定結果 (G1)



(a) 測定点 1-1

(b) 測定点 1-3

(c) 測定点 1-5

図-6 温度とひずみの関係 (G1)

の実測期間は16日間と短期間であったこと、測定したひずみのうち同点であってもドリフトの有無が存在したこと、既往の実験³⁾で電源をDC電源(バッテリー)とした場合と今回の実験で電源をAC電源(通常の電源)とした場合とで、DC電源の場合に比較的多くのドリフトが確認されたことなどから、ドリフトは計測上の測定誤差であると考え、このような値は解析で利用するデータから除外することとした。

3.2 G1の測定結果

G1(測定点 1-1・1-3・1-5)の温度測定結果とひずみ測定結果を図-5に示す。この期間で、気温は17°C~27°Cの変化が見られ、測定点 1-1・1-3・1-5の温度は15°C~35°C、また測定点 1-1・1-3・1-5のひずみは-115~25μと大きな変化が見られた。このひずみ出力は7(μ/°C)と比較的大きく、SHM時において補正する必要性を確認できる。また、ダミー材の測定結果と同様に、コンクリート部材に比べ鋼部材のひずみ出力が小さいことがわかる。他に、温度とひずみの回帰分析(単回帰)における回帰式の傾き(同測定点の比較)を表-3に示す。同測定点における温度とひずみの

回帰式の傾きが異なっているが、これは構造物の温度変化に起因するひずみの影響ではなく、温度変化によるセンサ出力ひずみの影響であると考えられる。次に、測定点 1-1・1-3・1-5の温度とひずみの関係(G1)を図-6に示す。全測定点において、温度とひずみの関係に相関性があることがわかる。しかし、測定点 1-1の温度とひずみの関係には比較的大きくばらつきが見られ、測定点 1-5にも小さくばらつきが見られる。さらにこれを分析するために、測定点 1-1の10/7の午前と午後に分けた温度ひずみの関係を図-7に示す。この図より、温度とひずみの関係は午前(下側)と午後(上側)で円(ループ)を描いていることがわかる。このループが日によって重なり、ばらつきのもととなっている。また、このループは同温度時においてひずみの値が変わることで生じるが、午前と午後で測定点の温度が同じであっても、構造物内部の温度分布が異なることで構造物の変形量が異なり、ひずみが異なっていると推測できる。

表-3 温度とひずみの回帰分析(単回帰)
における回帰式の傾き(同測定点の比較)

	回帰式の傾き
S1-1	-4.9
S1-1(同点)	-3.3
S1-3	-2.8
S1-3(同点)	-2.4
S1-5	-0.3
S1-5(同点)	1.0

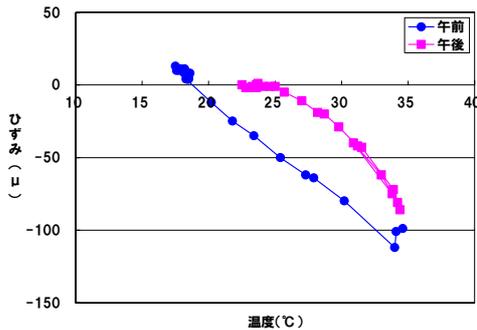


図-7 温度とひずみの関係 (G1, 測定点 1-1, 10/7)

4. 温度ひずみの学習(モデル化)と予測

4.1 温度ひずみの補正方法

鋼合成桁曝露試験の測定結果より、温度分布と温度ひずみに相関性があることがわかった。このことから、本研究では予測解析手法(重回帰分析, NN)によって、温度分布と温度ひずみの相関性を学習(モデル化)し、予測することで予測温度ひずみを求める。そして、実測ひずみから予測温度ひずみを除くことで温度影響のないひずみを求め、温度ひずみを補正する。ここで、本研究では暴露試験による各測定個所の温度分布と任意点の実測ひずみを利用して予測モデルを構築することから、構造物の内部温度差(温度勾配)や、材料とひずみゲージの線膨張係数差などのような温度に起因するすべてのひずみが予測される。よって、このような温度影響によるすべてのひずみを取り除くことを温度ひずみの補正と定義した。

(1)重回帰分析の概要

回帰分析は、変数間の関係式を最小二乗法によりデータから推定することにより、モデル化(1次式化)する統計手法であり、重回帰分析は説明変数が2つ以上の回帰分析

である。本研究では、説明変数(入力)を温度分布、目的変数(出力)を温度ひずみとして学習し、温度ひずみを予測する。

(2)ニューラルネットワーク(NN)の概要

階層型 NN は非線形情報処理手法の一つであり、教師値あり学習の代表的なアルゴリズムである誤差逆伝播法を用いてパターン認識や時系列データの予測などに利用されている⁸⁾。本研究では、温度分布と温度ひずみの相関関係をモデル化する方法として、階層型 NN を利用することとした。図-8 に階層型 NN による予測解析モデルを示す。このモデルは、温度分布と温度ひずみを入出力関係としてシステムを学習させ、温度ひずみの予測値を算出するものである。よって、重回帰分析と同様に、NN の説明変数(入力)を温度分布、目的変数(出力)を温度ひずみとして学習し、温度ひずみを予測する。ここで、図-8 に示す入力 1 は測定された各点の温度分布であり、入力 2 は NN の学習に利用される各点のひずみ測定値(教師値)である。このような NN を用いたモデル化によって、非線形性を含むデータの学習を行えるようにした。

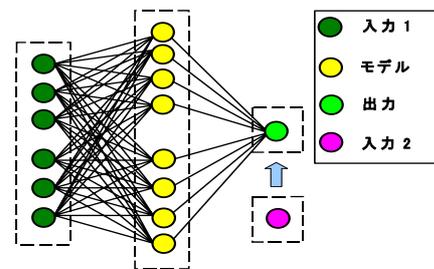


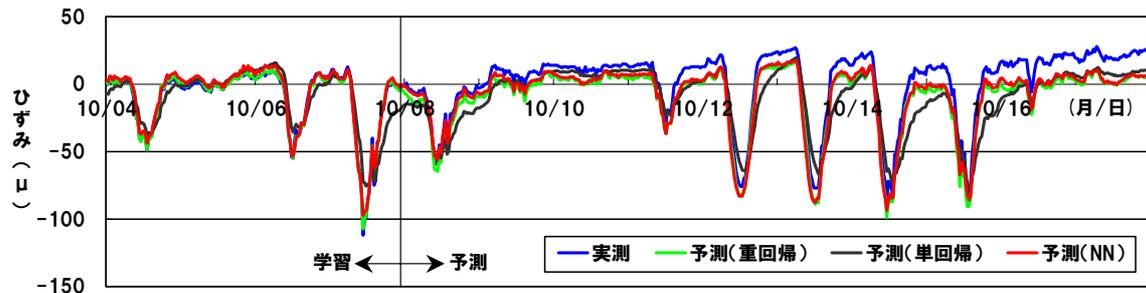
図-8 階層型 NN による予測解析モデル

4.2 学習(モデル化)と予測の項目の選定

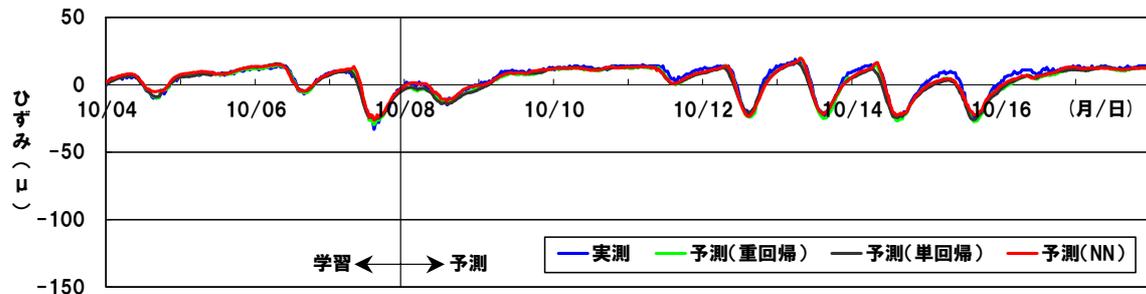
重回帰分析・単回帰分析・NN の精度を比較する。予測解析手法の予測精度を向上させるには最適な説明変数の選定や様々な温度分布パターンを学習するなど学習精度を向上する必要がある。そこで、本研究では説明変数の選定において逐次選択法を利用し、学習精度の最も良い(実測値と学習値の平均誤差が最も小さい)説明変数の組み合わせを選定した。その結果、今回測定した全測定点の温度を入力した場合の実測値と学習値の平均誤差が最も小さくなり、学習精度が最も良い精度となることが分かった。このことから、重回帰分析や NN の説明変数は全測定点の温度(気温・T1-1 ~ T1-6・T1-11 ~ T1-15)とし、単回帰分析の説明変数は、予測するひずみの測定点の温度とした。予測解析手法における目的変数と説明変数を表-4 に示す。ここで、重回帰分析の式を式(1)に示す。x は測定点番号で、S1-x

表-5 重回帰分析による係数の各値

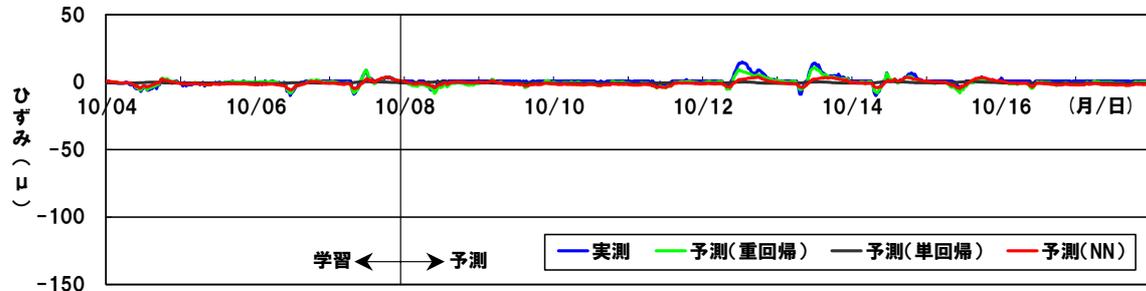
	係数	気温	T1-1	T1-2	T1-3	T1-4	T1-5	T1-6	T1-11	T1-13	T1-14	T1-15
	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉	a ₁₀	a ₁₁
S1-1	55.5	-1.6	-6.2	1.5	0.9	-2.4	8.6	-6.1	-1.8	-0.1	8.4	-4.2
S1-3	64.7	-1.0	0.7	0.5	-6.0	0.7	2.7	-0.5	0.0	-0.8	2.3	-1.4
S1-5	5.7	-0.5	-0.3	0.4	1.1	-1.8	-1.8	2.6	0.2	-0.7	3.9	-3.4



(a) 測定点 1-1



(b) 測定点 1-3



(c) 測定点 1-5

図-9 温度ひずみの学習および予測結果(G1)

は測定点番号 x におけるひずみを表す。 $a_y(a_0 \sim a_{11})$ は、 y を回帰係数番号とする回帰係数である。次に学習日・予測日の選定を行った。ここで、学習後に予測を行うことを考慮して学習日の選定を行った。その結果、10月4～7日の学習精度が良かったため、学習日を10月4～7日とし、予測日を10月8～17日とした。

$$S1-x = a_0 + a_1 \cdot \text{気温} + a_2 \cdot T1-1 + \dots + a_{11} \cdot T1-15 \quad (1)$$

表-4 予測解析手法における目的変数と説明変数

	目的変数	説明変数
重回帰分析 およびNN	S1-1	気温 T1-1～T1-6 T1-11～T1-15
	S1-3	
	S1-5	
単回帰分析	S1-1	T1-1
	S1-3	T1-3
	S1-5	T1-5

4.3 学習結果と予測結果

4.2 で、重回帰分析・単回帰分析・NN によって学習を行

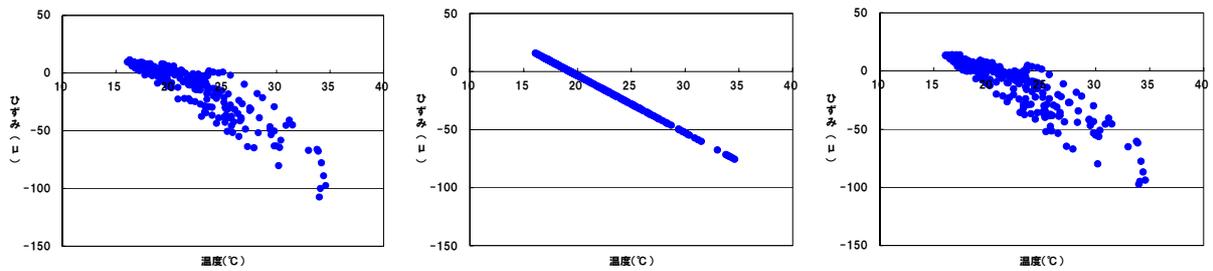
い、モデルを作成した。重回帰分析の係数の各値を表-5 に示す。表-5 より、基本的には各予測ひずみの測定点の温度の係数が高い値であり、このような係数が温度に大きな影響を与えていると考えられる。このようにモデルを作成して予測を行った。

(1) 学習誤差と予測誤差についての考察

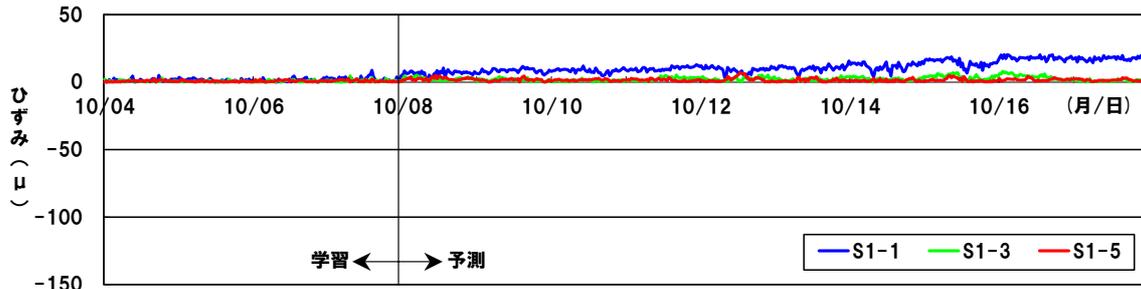
各点の実測ひずみと温度ひずみ(S1-1・S1-3・S1-5)を重回帰分析・単回帰分析・NN によって学習し、予測した結果を図-9 に示す。また、測定点別予測方法別の学習誤差と予測誤差を表-6 に示す。ここで、本研究では各点の温度分布から任意点の温度ひずみを予測するモデルを構築することを目的としているため、式(2)に示すように、ひずみの実測値から予測値を引いた値の絶対値について総和平均をとったものを誤差と定義する。

$$\text{誤差} = \frac{\sum |S1-x - S1-x'|}{N} \quad (2)$$

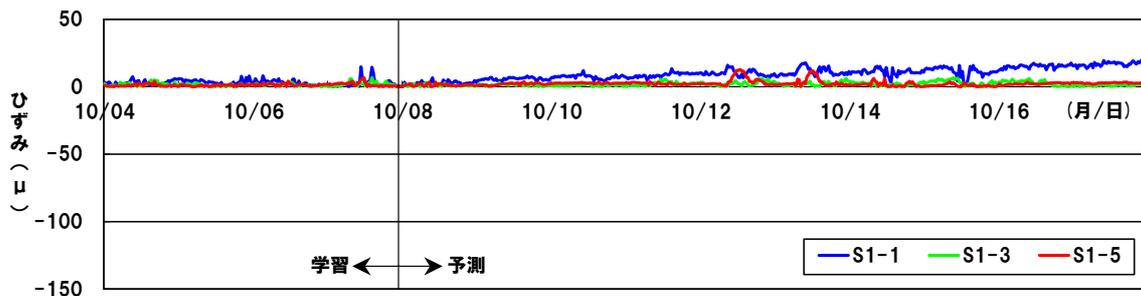
ここで、 $S1-x$ は各実測ひずみ、 $S1-x'$ は各予測ひずみ、 N はデータ数とする。 $S1-1$ の学習誤差・予測誤差は $S1-3$ や $S1-5$ と比べ予測誤差が大きかった。本モデルでは温度



(a)重回帰分析 (b)単回帰分析 (c)ニューラルネットワーク：NN
 図-10 予測解析手法の違いによる温度と予測ひずみの関係 (G1, 測定点 1-1, 2005/10/8-17)



(a)重回帰分析



(b)ニューラルネットワーク：NN

図-11 予測解析手法の違いによる温度ひずみ補正後の出力ひずみ (G1)

分布の時間変化を考慮していないことから、S1-1 の予測誤差が大きくなった原因は、温度変化が最も大きく、また構造的にも温度の影響も大きい箇所であったためと考えられる。一方、重回帰分析による予測誤差と NN による予測誤差に大差はなかった。非線形性を含むデータの予測に優れている NN と重回帰分析の精度が変わらなかった要因として、今回の計測は短期的かつ局部的な温度変化であったことや、今回使用した鋼合成桁の床版の厚さが比較的薄い床版であったことなどによって、温度ひずみに非線形性が少なかったことが考えられる。

(2)ループの予測結果についての考察

測定点 1-1 の温度と重回帰分析、単回帰分析および NN による予測ひずみの関係を図-10 に示す。単回帰分析は原理上ループの予測はできないが、重回帰分析および NN において、構造物の温度分布を説明変数に入れることによってループの予測ができた。このことから、ループは構造物の温度分布に起因するひずみであると推定できる。

(3)部材の違いによる学習誤差・予測誤差

学習誤差・予測誤差をコンクリート部材と鋼部材と比較

するとコンクリート部材の方が大きい誤差であった。この要因として、予測解析手法は変動が大きい場合に誤差が大きくなる傾向があり、コンクリート部材が鋼部材に比べひずみの出力が比較的大きかったことが考えられる。

表-6 各測定点の学習誤差と予測誤差 (G1)

		重回帰分析	単回帰分析	NN
S1-1	学習誤差	1.6	7.7	2.9
	予測誤差	11.5	13.3	10.0
S1-3	学習誤差	0.8	1.3	1.6
	予測誤差	2.4	2.6	1.9
S1-5	学習誤差	0.8	1.9	1.3
	予測誤差	1.7	2.5	2.3

4.5 温度ひずみ補正結果

実測ひずみから重回帰分析および NN によって予測した温度ひずみを除いて温度ひずみを補正した後の出力ひ

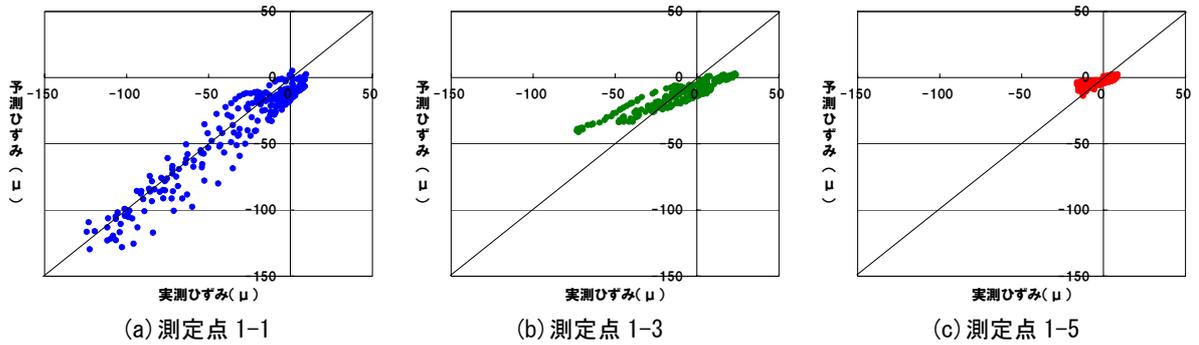


図-12 夏季における実測ひずみと予測ひずみの関係 (G1, 2002/08/22-27)

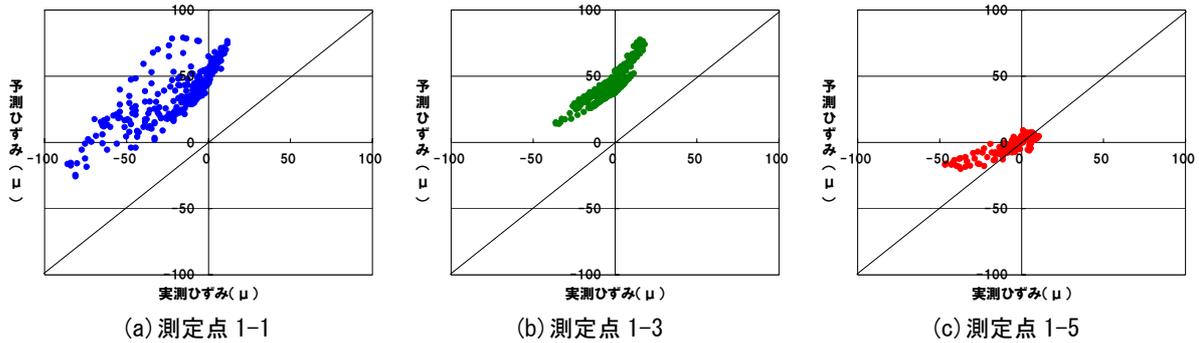


図-13 冬季における実測ひずみと予測ひずみの関係 (G1, 2003/02/05-12)

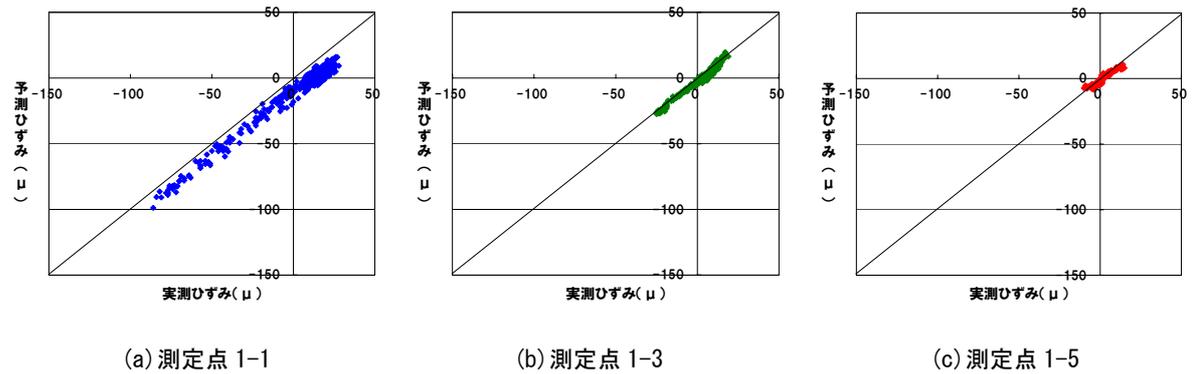


図-14 秋季における実測ひずみと予測ひずみの関係 (G1, 2005/10/08-17)

ずみを図-11に示す。温度ひずみを補正したことによって、温度変化時における最大 $4.9(\mu/\text{°C})$ の実測ひずみを約 $0.15(\mu/\text{°C})$ のひずみに補正することができた。これは、実測ひずみの約5%以内の出力である。

5. 温度ひずみの長期補正に関する検討

5.1 夏季と冬季のデータ

これまでの検討では、秋季(2005年10月)の短い期間に測定されたデータに限られていた。そのため、温度変化の幅には限りがあり、夏季および冬季のように温度条件の異なる場合のひずみの補正を確認する必要がある。本研究で目標としている SHM のための温度影響によるひずみの補正は長期的な視点が必要であり、季節変動による温度変化についても考慮された予測式の開発が望まれる。そこで、同一試験体に対して行われた夏季と冬季の鋼合成桁暴露試験の実測データを用いて、本研究における予測方法が適用できるかを検討した。夏季および冬季のデータは、高木

ら³⁾が行った実験データと同様のものを用いた。このデータの測定項目は、秋季の計測と同様であり、夏季は2002年8月22日から27日の6日間、冬季は2003年2月5日から12日の8日間のデータを用いた。

5.2 予測方法の適用

4. の結果より、重回帰分析と NN の精度はほとんど変わらないため、重回帰分析によって長期補正の可能性について検証を行った。ここで、重回帰分析の目的変数および説明変数は4. と同様とした。また、秋季のモデルを使用するため、学習日を2005年10月4~7日とし、夏季の予測日を2002年8月22~27日、冬季の予測日を2003年2月5~12日として予測を行った。

5.3 夏季と冬季の予測結果と考察

夏季の各測定点の実測ひずみと予測ひずみの関係を図-12に示す。同様に、冬季の場合の関係を図-13に示す。なお、比較のため図-9で示した秋季における実測ひずみ

と予測ひずみ(重回帰分析による予測結果のみ)の関係を図-14に示す。ここで、原点(0,0)を通る 45° のラインは、実測ひずみと予測ひずみが同じ値であるラインである。この 45° ラインと実測ひずみと予測ひずみの値を比較することで、実測ひずみと予測ひずみの傾向を考察する。

夏季および冬季ともに、本研究の提案手法によって求めた予測ひずみは実測ひずみに近い値を出力しているが、測定点1-1において実測ひずみと予測ひずみの関係にばらつきが生じていること、冬季の測定点1-1と1-3(図-13(a)(b))で、ゼロ点のシフトが見られること、また夏季の測定点1-3や冬季の測定点1-5で傾きの違いが見られ、4.で検討した図-14に示す関係ほど高い精度の予測はできていないことがわかる。これらの原因としては、予測式を作成した学習データが秋季のものであり、夏季や冬季のような温度条件が考慮されておらず、これによってばらつきや傾きの違いが生じる原因になったと考えられる。また、ゼロ点がシフトしたことについては、今回用いたデータが長期的・継続的な計測によるものではなかったことから、ひずみ測定開始時(ひずみが 0μ のとき)の構造物の温度分布が秋季と夏季および冬季と異なることでひずみの絶対値が異なり、学習ひずみと予測ひずみにズレが生じたことなどが考えられる。温度影響の長期補正を行うためには、これらを解決することが今後の課題と考える。

6. まとめ

本研究では、構造ヘルスマモニタリングにおいて温度ひずみを補正することを目的とし、床版と鋼桁とを合成した試験桁を用いて温度分布ならびにひずみの測定を行い、温度と温度ひずみの関係を分析した。その結果、温度分布と温度ひずみには相関性があることがわかり、その相関性を用いて温度ひずみの補正方法の検討を行った。本研究において得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 今回の秋季の実測では、温度ひずみによる出力は最大($4.9(\mu/\text{C})$)となり、SHM時における温度ひずみの影響が大きく、補正する必要があることがわかった。そして、重回帰分析やNNによって予測を行い、実測ひずみから予測温度ひずみを除くことで、実測ひずみの約5%(約 $0.15(\mu/\text{C})$)以内のひずみ出力に補正できた。
- 2) 温度とひずみの関係で見られたループは、単回帰分析では予測できなかったが、重回帰分析およびNNの説明変数に構造物の温度分布を入力することによって予測することができた。このことから、ループは構造物の温度分布に起因するひずみであると推定される。
- 3) 重回帰分析とNNの予測精度は変わらなかった。このことから、今回の計測では温度分布と温度ひずみの関係において非線形性が少なかったと考えられる。
- 4) 秋季の学習モデルを使用して夏季・冬季の温度ひずみを予測、補正することの可能性を検証した。その結果、実測ひずみと予測ひずみの大まかな関係を示すこと

ができることを確認できたが、学習条件や測定条件が原因と推測されるズレやばらつきが生じているため、完全な予測はできなかった。温度ひずみの長期補正を行うためには、これらを解決することが今後の課題と考える。

本研究において温度ひずみの簡易な補正方法を提案することができた。今回の実験は模型による実験であったが、本研究を実構造物のヘルスマモニタリングに適用することを視野に入れると、実構造物は構造や環境要因が異なるため、構造物の温度とひずみの関係を学習する必要がある。また、長期的・継続的に対応できる補正方法と成り得るかが本研究の課題となる。今後、構造ヘルスマモニタリングの実用化のためにも温度などの環境条件の変化を計測データから除去することは重要な課題であり、温度によるひずみ変化のメカニズムを詳細に解明することが望まれる。

参考文献

- 1) 例えば、呉 智深, 許 斌, 原田隆郎: 都市インフラに関する構造ヘルスマモニタリングの現状と展望—展望論文—, 土木学会応用力学論文集, Vol.6, pp.1043-1054, 2003.8
- 2) 小林祐介, 三木千壽, 出野麻由子, 斎藤勝昌: 合成桁橋梁の健全度モニタリングを目的とした温度変形挙動の検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.979-985, 2002.3
- 3) 高木優任, 横山功一, 原田隆郎: 鋼合成桁の温度分布に影響を及ぼす環境要因に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.835-846, 2004.3
- 4) 高木伸也, 村越潤, 麓興一郎, 次村英毅: 部材応力の長期計測による鋼橋モニタリングに関する検討, 鋼構造論文集, 第11巻第43号, pp.61-71, 2004.9
- 5) Giraldo, D., and S.J. Dyke: Damage Localization in Benchmark Structure Considering Temperature Effects, 7th International Conference on Motion and Vibration Control, Washington University, St. Louis, MO, 2004.8
- 6) Yan, A.M., Kerschen, G., Boe, P.D., and Golinval, J.C.: Vibration-based Damage Detection under Changing Environmental Conditions, 7th International Conference on Motion and Vibration Control, Washington University, St. Louis, MO, 2004.8
- 7) Xu, B., Wu, Z.S., and Yokoyama, K.: Neural Networks based Identification for the Akinada suspension bridge with earthquake responses, The Seventh International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Tianjin, P. R. China, pp.474-482, 2002.8
- 8) 例えば、矢川元基: 計算力学とCAEシリーズ12—ニューラルネットワーク, 培風館, 1992.5

(2006年9月11日受付)