

論文 マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの精度向上に関する研究

中村 秀明*1・中村 明彦*2・河村 圭*3

要旨: 温度ひび割れの発生が予想されるコンクリート構造物については、機能性および耐久性の確保から事前に温度ひび割れに対する検討が行われる。温度ひび割れの検討では、2次元や3次元の温度応力解析が実施されるが、この温度応力解析の最初のステップは、温度解析により温度分布を精度良く求めることである。温度解析では、外気温の設定が必要であり、著者らは全国各地の外気温を簡便に求めることのできるモデルを構築しているが、既存のものはデータも古く、解析に用いた観測点の数も少ない。そこで、本研究では、最新の気象データを用いて、全国各地の外気温を的確に表すモデルの再構築を行い、精度の向上を試みた。

キーワード: マスコンクリート, 温度ひび割れ, 温度応力解析, 外気温, 最適化, Particle Swarm Optimization

1. はじめに

温度ひび割れの発生が予想されるコンクリート構造物については、機能性および耐久性の確保から事前に温度ひび割れに対する検討が行われる。温度応力推定の最初のステップは、温度分布を精度良く求めることである。温度解析では2次元や3次元の有限要素法が広く用いられている。しかしながらコンクリートの温度解析に有限要素法などの高度な手法を用いても、これらの解析結果は入力される熱特性値や環境条件（外気温）によって大きく影響されるものであり、入力値が正確に求まっていなければ精度の良い解析結果は得られない。温度解析に必要な環境条件として外気温があり、著者らは全国各地の外気温を緯度と標高から簡便に求めることのできるモデルを構築している。しかしながら、既存モデルは、モデル構築の際に用いたデータが現在では古くなっており、観測点数も154地点と少なく、精度も決して高いとは言えない。地域、季節によっては、気温の変動がひび割れ発生を左右する場合も多く、特に熱伝達面の多い壁状構造物などでは外気温の影響は大きいと思われる。

そこで、本研究では、25年分の最新の気象データを用いて、実測データの分析や、煩わしい計算を行わなくても、緯度や経度、標高を入力することによって全国各地の外気温の平年値を的確に表すモデルの構築を行い、外気温モデルの高精度化を試みた。

2. モデル構築に用いた気象データ

2.1 アメダス気象データ

本研究で使用した気象データは、アメダスで観測された気象データである²⁾。アメダス (AMeDAS) とは、日本国内に約 1,300 箇所設置されている気象庁の無人観測

施設（地域気象観測システム）の通称である。観測している気象要素は、降水量、気温、日照時間、風向・風速の4要素である地点が多く、寒冷地においては積雪の深さも観測している。観測で得られたデータは通信回線などで気象庁内の地域気象観測センター（通称アメダスセンター）へ10分ごとに送信され、データの品質チェックを経たのち全国に配信されている。

2.2 解析データの作成

外気温モデル作成のためには、アメダス観測地点の年間の気象データ（気温）がある年数分必要である。今回の解析では気温の統計量を求めるため、1986年から2010年までの25年分のデータを解析するが、降水量だけで気温が観測されていない観測所や、25年の間に廃止されたり、移設されたり、新たに設置された観測所がある。25年分のデータを分析するためには、これらのうち上に示すような観測所を取り除く必要がある。そこで年ごとの観測所諸元データの比較を行い、25年以上のデータが揃っている観測所のみをピックアップし解析を行った。なお、今回の解析では、設置期間が25年に満たない観測所についても、20年以上のデータがあれば、解析対象に含めている。また、観測所のうち、本州をはじめとする主要4島（北海道、本州、四国、九州）から遠く離れた島（直線距離で30km以上）については、海洋の影響で、気象データの傾向が他の観測所と異なることが予想される。このような値を含めて解析を行うと全体の傾向を把握しづらくなることが予想されるため、島（沖縄県を含む）に設置された観測所は解析対象から除外した。解析対象となった観測点数を表-1に示す。アメダス観測所は全国に1311カ所あるが、本研究で最終的に解析の対象としたのは、717の観測所である。

*1 山口大学大学院 理工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 株式会社テムロ 代表取締役 (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 解析の対象となる観測所

項目	観測所数
アメダス全観測所	1311
上記のうち気温が観測されている観測所	871
上記のうち20年以上のデータがある観測所	761
上記のうち離島(沖縄を含む)を除いた観測所	717

表-2 スミルノフ・グラブス検定の有意点(片側)

データ数	5%有意点(片側)
20	2.557
21	2.580
22	2.603
23	2.624
24	2.644
25	2.663

2.3 日ごとの日平均気温の平均値算出

観測所ごとに、日ごとの日平均気温の平年値(25年間の平均値)を算出する。観測所によっては、データが欠損している場合もあるが、その場合は残りのデータで日平均気温の平均値を算出する。また日平均気温の平均値の算出では、外れ値を除外するため、正規分布を仮定したスミルノフ・グラブス(Smirnov-Grubbs)検定を行った。スミルノフ・グラブス検定では、平均値からの偏差(平均偏差)が一番大きいデータを探し、その平均偏差と不偏標準偏差 σ との比を式(1)により求め、その値が有意点より高いものを外れ値として除外する。除去後は、同じ処理を繰り返し、有意点を上回るデータがなくなるまで繰り返す。今回の解析では有意点として5%を採用した。データ数が20~25の場合の5%有意点を表-2に示す。

$$T_i = \frac{|x_i - \mu|}{\sigma} \quad (1)$$

ここに、 x_i は気温データであり、 μ は気温データの平均値、 σ は気温データの標準偏差である。

2.4 海面更正気温の算出

一般に高度(標高)が高くなるほど気温は低くなるため、算出された日平均気温の平均値を気温減率 $0.65^\circ\text{C}/100\text{m}$ として、海面温度に更正する。観測所ごとに、その観測所の標高がわかっているので、標高(m)に 0.0065 を掛けたものを日平均気温の平均値に加え、海面での気温である海面更正気温(海面での温度に更正し、標高の影響を除いた気温)を求めている。

2.5 算出された日平均気温の平均値

算出された25年平均された日平均気温の一例(東京)を図-1に示す。1月1日から12月31日までの日平均気温が25年間平均されている。なお、観測所によっては、データ欠損等で25年平均でないものもある。これらの日平均気温は、すべて海面更正(標高0mでの値)されており、全国の717観測所について算出されている。

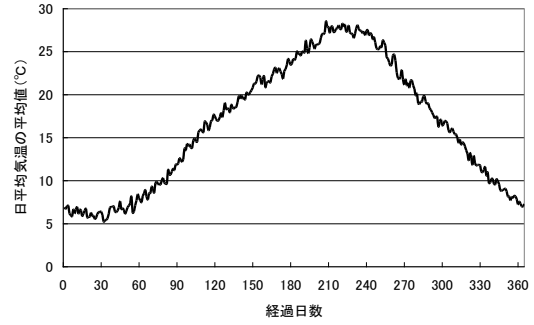


図-1 日平均気温の平均値(東京)

3. 外気温モデルの構築

3.1 外気温モデルの概要

本研究での外気温モデルは、経度あるいは緯度、標高などの位置情報からその地点でのその日ごとの日平均気温の平均値を算出するものである。著者らは過去の研究で緯度と標高からその地点の日平均気温の平均値を算出するモデルを提案している¹⁾。その際に用いたデータは、1983年から1992年までの10年間の気象観測記録²⁾であり、観測地点も全国154カ所とアメダス観測所の数に比べ少ない。そこで本研究では、717カ所のアメダス観測所の1986年から2010年の25年間分の観測データを用いて、従来の外気温モデルを改良し、精度向上を試みた。

3.2 従来の外気温モデル(従来モデル)

著者らが従来構築した外気温モデル¹⁾は、緯度と標高から次の3つの式によって日平均気温を計算するものである。

$$T_d = a_d(N - 35) + P_d - 0.006H \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} a_d &= 0.212k - 1.864 \quad (N \leq 35) \\ a_d &= 0.076k - 1.355 \quad (N \geq 35) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$P_d = 4.354k - 6.007 \quad (4)$$

ここで、 T_d は日平均気温($^\circ\text{C}$)であり、 N は求めたい地点の緯度($^\circ$)、 H は標高(m)、 a_d は傾き(式(3)により求める)、 P_d は交点の温度(式(4)で求める)である。ただし、 k は日平均気温を求めたい月で、 k の範囲は2~8月となり、8月を中心に左右対称と考え、たとえば10月のときは、 $k=6$ 、1月のときは、 $k=3$ 、9月中旬のときは、 $k=6.5$ となる。場所ごとに N, H の値を設定し、時期ごとに k を設定することで、 T_d として、その日ごとの日平均気温の平均値が求められる。

3.3 新たな外気温モデルの構築(直線近似モデル)

全国の様々な観測所の日平均気温の平均値を観察した結果、日平均気温の平均値は、図-2に示すように a と b の座標値 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ が決まれば大まかに次の式で直線近似できる。

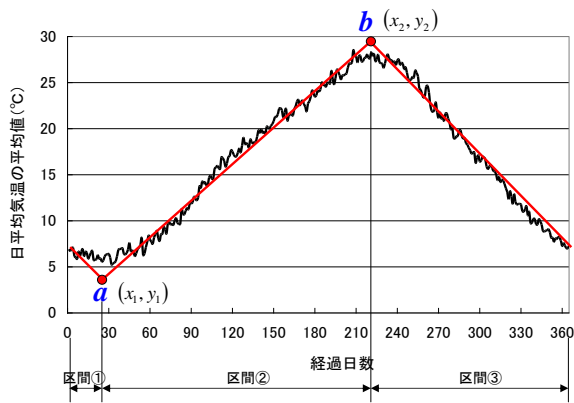


図-2 外気温のモデル化 (直線近似モデル)

区間① ($1 \leq x \leq x_1$)

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2 + 365}(x - x_1) + y_1 \quad (5)$$

区間② ($x_1 \leq x \leq x_2$)

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) + y_1 \quad (6)$$

区間③ ($x_2 \leq x \leq 365$)

$$y = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2 + 365}(x - x_2) + y_2 \quad (7)$$

ここに、 x は経過日数(日)で、 y は経過日数 x における日平均気温(°C)の平均値である。

新たな外気温モデルの構築では、海面更正された全国の717観測所について最適化手法である Particle Swarm Optimization (略して PSO)⁴⁾を用いて日平均気温の平均値と直線近似の誤差が最小となるように a と b の座標値 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ を同定した。PSOは、粒子群最適化とも呼ばれ、鳥の群れや魚の群泳など、群れを成して移動する生物の行動パターンをコンピュータ上でシミュレーションすることにより最適化を行う手法で、連続量の最適化に優れており、評価値が求まるものであればどのような問題にも適用可能である。本研究では、日平均気温の平均値と直線近似の誤差の最小化を行い、誤差が最小となる a と b の座標値 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ を同定している。

図-3 および図-4 に同定された座標値を観測所の緯度との関係で示す。なお、図-5 および図-6 に西日本と東日本で区別した日平均気温と緯度の関係を示す。図-3 に示されるように同定された経過日数、つまり図-2 の a と b に対する経過日数は観測所によらず全国ほぼ同じで x_1 は約20日、 x_2 は約220日となっている。一方、同定された日平均気温、つまり図-2 の a と b に対する日平均気温は、緯度が高くなるほど小さくなる傾向があり、その傾きは西日本と東日本で多少異なるようである。これは、日本列島は細長い形状をしているが関東(東経138.5°, 北緯36°付近)を境としてこの形状が折れ曲が

っており、そのため折れ曲がりである北緯36°付近を境として傾向が異なっている。

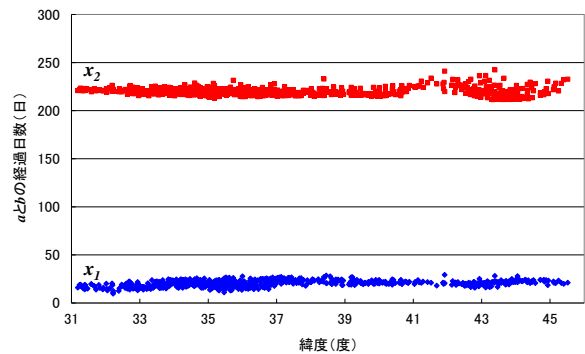


図-3 変曲点 a, b の経過日数 x_1, x_2 と緯度の関係

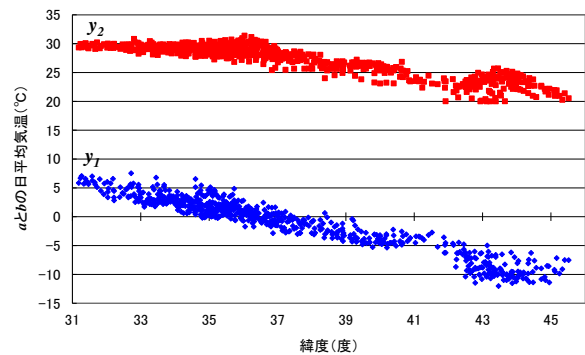


図-4 変曲点 a, b の日平均気温 y_1, y_2 と緯度の関係

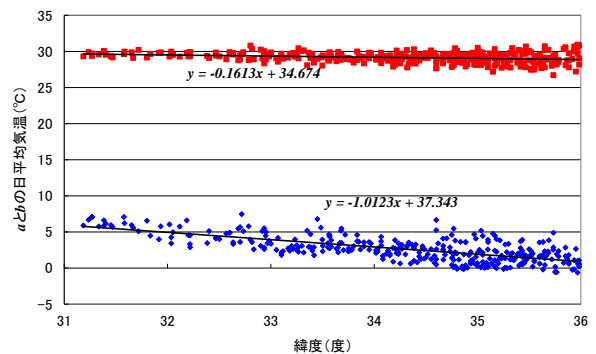


図-5 a, b の日平均気温 y_1, y_2 と緯度の関係 (西日本)

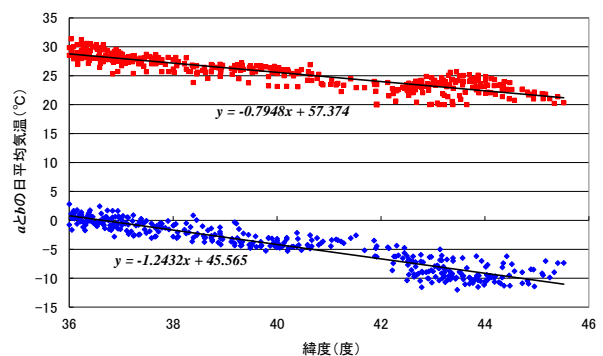


図-6 a, b の日平均気温 y_1, y_2 と緯度の関係 (東日本)

そこで緯度 36° を境に西日本と東日本に分けてモデル式を構築した。西日本の回帰結果（単回帰）を図-5に示し、東日本の回帰結果（単回帰）を図-6に示す。

モデルの構築では、位置情報（経度 E 、緯度 N 、標高 H ）に応じた a と b の座標値 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ が必要となる。 x_1 と x_2 については、図-3 より位置によらず全国ほぼ同一で $x_1=20$, $x_2=220$ となる。 y_1 と y_2 については、西日本と東日本でその傾向が異なっており、緯度 (N) のみで単回帰した結果と経度 (E) 、緯度 (N) 、標高 (H) で重回帰した結果を以下に示す。

・西日本（緯度 36° 以下）

（単回帰モデル）緯度 (N)

$$y_1 = -1.0123N + 37.343 \quad (8)$$

$$y_2 = -0.1613N + 34.674 \quad (9)$$

（重回帰モデル）経度 (E) 、緯度 (N) 、標高 (H)

$$y_1 = 0.3665E - 1.6534N - 0.0016H + 10.3040 \quad (10)$$

$$y_2 = 0.0049E - 0.2262N + 0.0014H + 36.0336 \quad (11)$$

・東日本（緯度 36° 以上）

（単回帰モデル）緯度 (N)

$$y_1 = -1.2432N + 45.565 \quad (12)$$

$$y_2 = -0.7948N + 57.374 \quad (13)$$

（重回帰モデル）経度 (E) 、緯度 (N) 、標高 (H)

$$y_1 = -0.2389E - 1.1642N - 0.0015H + 76.2851 \quad (14)$$

$$y_2 = -0.3791E - 0.5190N + 0.0025H + 99.2381 \quad (15)$$

各地点の日平均気温の平均値は、上の式(8),(9),(12),(13)あるいは式(10),(11),(14),(15)を式(5),(6),(7)に代入することにより求められる。

3.4 新たな外気温モデルの構築（フーリエ級数モデル）

日平均気温の平均値の形状をより良く表す方法としてフーリエ級数を使う方法がある。フーリエ級数では、図-2 に示す日平均気温の平均値を次のような式で表現する。

$$y = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(x + \phi)\right) + b_1 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(x + \phi)\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi}{365}(x + \phi)\right) + b_2 \sin\left(\frac{4\pi}{365}(x + \phi)\right) \quad (16)$$

ここに、 x は経過日数（日）で、 y は経過日数 x における日平均気温（ $^\circ\text{C}$ ）の平均値である。また、 a_0, a_1, b_1, a_2, b_2 はフーリエ係数であり、 ϕ は位相である。

海面更正された全国の717観測所について PSO を用いて日平均気温の平均値と式(16)で求めた近似曲線との誤差が最小となる $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \phi$ の6つのパラメータを同定した。同定の結果、 ϕ は観測所によらずほぼ160であったため、 $\phi=160$ に固定し、 ϕ を除いた5つのパラメータについて再度同定を行った。

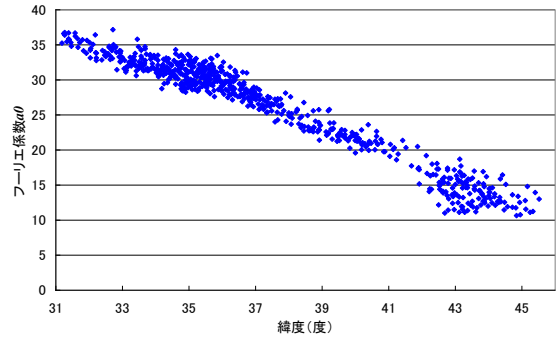


図-7 同定された a_0 と緯度との関係

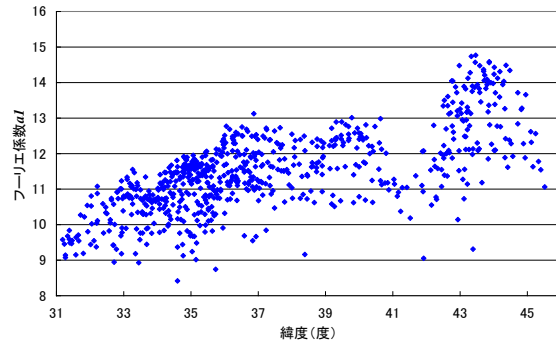


図-8 同定された a_1 と緯度との関係

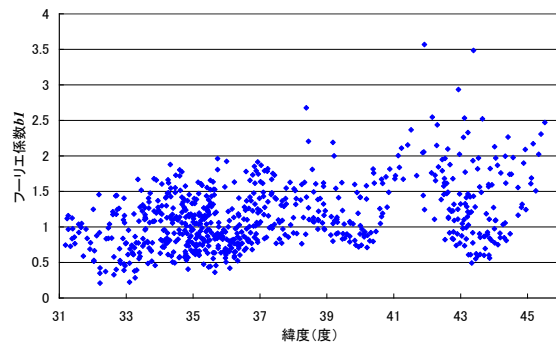


図-9 同定された b_1 と緯度との関係

同定された a_0, a_1, b_1 を観測所の緯度との関係で図-7~9に示す。

フーリエ係数 a_0 は、緯度と良い相関があるが、他の係数は緯度とはあまり相関はなかった。西日本と東日本では傾向が違うため、緯度 36° を境に西日本と東日本に分けてモデル式を構築した。

・西日本

（重回帰モデル）経度 (E) 、緯度 (N) 、標高 (H)

$$a_0 = 0.3728E - 1.8847N - 0.0002H + 46.3362 \quad (17)$$

$$a_1 = -0.1532E + 0.5882N + 0.0013H + 11.0208 \quad (18)$$

$$b_1 = 0.0231E + 0.0363N - 0.0009H - 3.2352 \quad (19)$$

$$a_2 = -0.0663E + 0.1507N + 3.7189 \quad (20)$$

$$b_2 = 0.0279E - 0.0934N + 0.2468 \quad (21)$$

・東日本

（重回帰モデル）経度 (E) 、緯度 (N) 、標高 (H)

表-3 日平均気温の平均値と外気温モデルとの適合性 (適合性が良い10観測所)

観測所	経度	緯度	標高	従来モデル	直線近似(単)	直線近似(重)	フーリエ級数	総合					
四日市	136.5689	34.9344	55	1.096	66	0.900	14	0.896	32	0.613	13	3.506	1
佐伯	131.9003	32.9500	2	1.267	187	0.845	2	0.818	1	0.610	12	3.541	2
尾鷲	136.1850	34.0672	15	1.005	6	1.074	167	0.836	2	0.630	18	3.545	3
宿毛	132.6853	32.9172	2	1.065	34	0.995	85	0.869	15	0.653	28	3.582	4
大分	131.6169	33.2336	5	1.224	155	0.842	1	0.868	14	0.648	26	3.582	5
御荘	132.5672	32.9522	12	1.066	35	0.978	70	0.879	20	0.676	46	3.601	6
海老名	139.3839	35.4333	18	1.092	63	0.967	58	0.851	7	0.699	68	3.608	7
宗喰	134.3050	33.5633	4	1.017	8	1.049	142	0.880	23	0.664	35	3.610	8
西条	133.0689	33.9025	4	1.179	112	0.904	17	0.913	38	0.638	23	3.633	9
後免	133.6350	33.5845	12	1.247	175	0.927	29	0.888	27	0.574	4	3.636	10

表-4 日平均気温の平均値と外気温モデルとの適合性 (適合性が悪い10観測所)

観測所	経度	緯度	標高	従来モデル	直線近似(単)	直線近似(重)	フーリエ級数	総合					
えりも岬	143.2350	41.9181	63	3.163	714	3.240	716	3.005	717	2.830	716	12.238	717
納沙布	145.7514	43.3850	12	3.196	715	3.249	717	2.920	716	2.684	715	12.049	716
糠内	143.3186	42.7839	70	3.312	717	2.730	713	2.482	715	2.319	713	10.843	715
大津	143.6356	42.6836	4	3.266	716	2.811	715	2.349	714	2.183	712	10.609	714
榑町	145.1017	43.1172	2	3.044	712	2.792	714	2.136	707	1.859	700	9.831	713
大樹	143.2681	42.5000	87	3.048	713	2.525	710	2.228	712	2.005	706	9.806	712
知方学	144.7336	42.9342	149	2.546	706	2.516	709	2.286	713	2.101	711	9.450	711
陸別	143.7342	43.4670	207	2.881	711	2.291	703	2.089	706	1.838	697	9.100	710
焼尻	141.4175	44.4186	38	2.226	674	2.567	712	2.220	711	2.019	709	9.033	709
宗谷岬	141.9336	45.5172	26	2.119	655	2.423	707	2.219	710	2.043	710	8.804	708

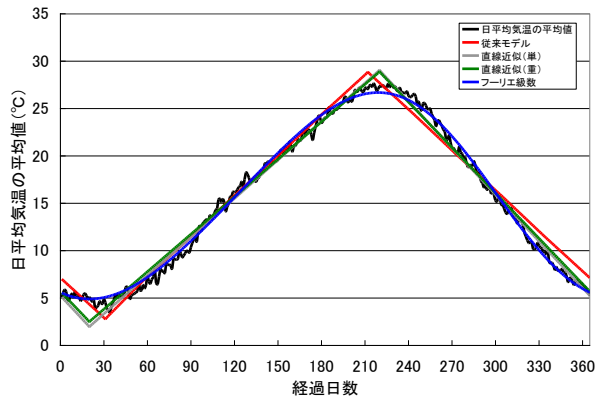


図-10 外気温モデルとの適合性 (1: 四日市)

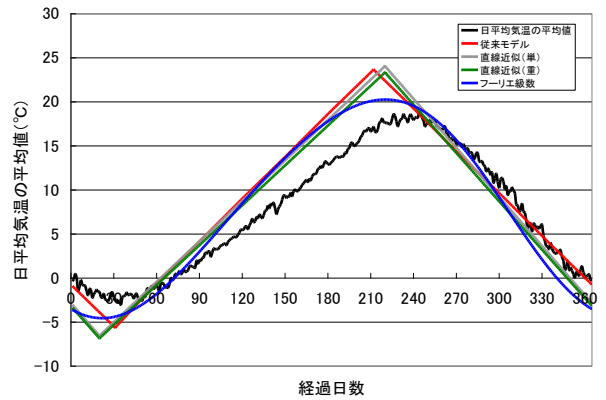


図-11 外気温モデルとの適合性 (717: えりも岬)

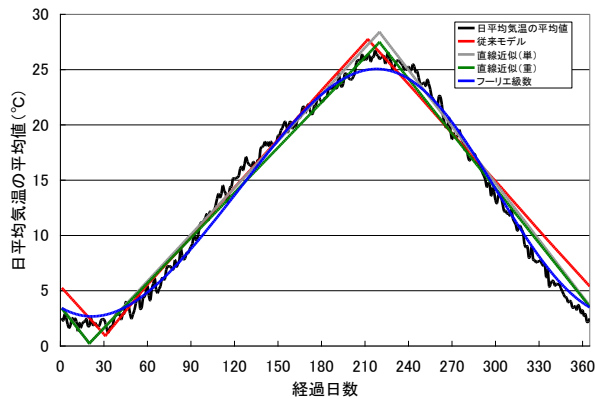


図-12 外気温モデルとの適合性 (250: 真岡)

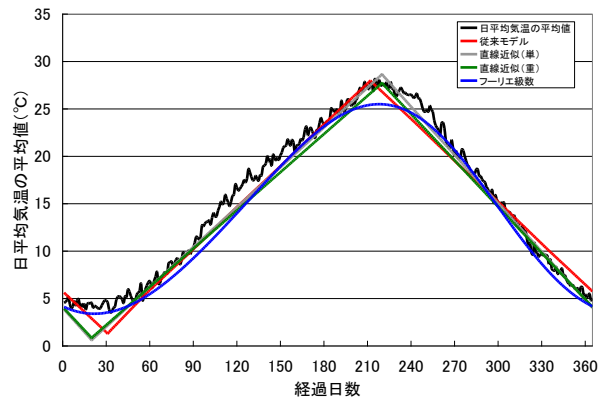


図-13 外気温モデルとの適合性 (500: 熊谷)

$$a_0 = -0.6333E - 1.6765N - 0.0010H + 177.4078 \quad (22)$$

$$a_1 = -0.0771E + 0.2695N + 0.0017H + 11.8500 \quad (23)$$

$$b_1 = -0.0136E + 0.0311N - 0.0006H + 2.0460 \quad (24)$$

$$a_2 = -0.1172E - 0.0179N - 0.0001H + 17.0260 \quad (25)$$

$$b_2 = 0.0288E - 0.0037N - 0.0004H - 3.1767 \quad (26)$$

4. 外気温モデルの検証

構築した外気温モデルの精度の検証を行った。表-3 および表-4 に日平均気温の平均値と外気温モデルとの適合性が総合的に良かった10観測所と悪かった10観測所を示す。表中の薄緑の網掛けの数値は、外れ値を除いた25年間の日ごとの平均気温とモデルから求めた気温との誤差の二乗和を365日間累計したものを365で割り、

表-5 外気温モデルの精度の比較

従来モデル	直線近似(単)	直線近似(重)	フーリエ級数
1.540	1.321	1.256	1.030

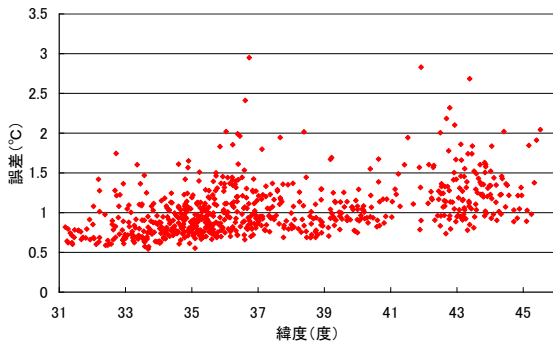


図-14 緯度と誤差との関係（フーリエ級数モデル）

さらにその平方根をとったもので、言い換えれば、モデルの1日あたりの平均的な誤差を表している。また、その右側の黄色い網掛けの数値は、それぞれのモデルにおける場所ごとの適合性の順位である。この順位が高い場所ほどモデルの適合性は良いと云える。また総合欄は4つのモデルの誤差の合計を表しており、この値が小さいほど、目安ではあるがモデルの適合性が良い場所で、この値が大きいほどモデルでは表し難い場所と云える。

717観測所の中で適合性が悪い上位10観測所は、いずれも北海道にある観測所で、北海道はほぼ全域が亜寒帯湿潤気候に属し、積雪寒冷地帯であるため、他の場所と傾向が異なっているためと考えられる。図-10および図-11に、それぞれ適合性が一番良かった観測所と悪かった観測所の適合性をグラフで示す。さらに適合性が250番目と500番目に良かった観測所の適合性のグラフを図-12および図-13に示す。

適合性が最も良かった「四日市」では、どの外気温モデルにおいても日平均気温の平均値と比較的良く一致している。適合性が最も悪かった「えりも岬」はどの外気温モデルも一致しておらず、特に4月から8月にかけての期間は大きく外れている。また、外気温モデルによる差は比較的小さく、特に、直線近似の単回帰と重回帰の差は小さい。適合性が250番目の「真岡」、500番目の「熊谷」についても比較的良く一致しているが、フーリエ級数で近似したものは最高温度が低くなる傾向がある。

4つの外気温モデルの精度を比較するため、それぞれのモデルについて1日あたりの平均的な誤差を717観測所について平均したものを表-5に示す。表より精度は、「フーリエ級数モデル」、「直線近似モデル（重回帰）」、「直線近似モデル（単回帰）」、「従来モデル」の順に悪くなっており、本研究で構築したモデルは、従来のものよりも精度が良くなっている。

図-14に緯度と誤差との関係をフーリエ級数モデルについて示す。緯度が高くなると若干誤差は大きくなる傾向がある。フーリエ級数モデルでは、一番精度が悪いのは「奥日光」で、「えりも岬」、「納沙布」、「草津」、「糠内」となっている。北海道以外の「奥日光」と「草津」はそれぞれ標高が1292m、1223mと高地であり、高地では高地特有の要因が影響し、傾向が他のものと異なるため、精度が悪くなっており、モデルの適用には注意が必要である。

5. まとめ

本研究では、アメダス気象観測データを統計処理し、マスコンクリートの温度解析の入力項目となる外気温について、全国各地の日平均気温の平年値（25年間の統計量）を比較的簡単に算出するモデルの構築を試みた。構築されたモデルは従来のもよりも精度が良く、温度応力解析の精度向上につながるものと思われる。

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 外気温モデルとして、直線近似モデルとフーリエ級数モデルを新たに提案し、モデルパラメータを位置情報（経度と緯度と標高）から算出する式を構築した。
- (2) 構築された外気温モデルは、従来モデルよりも精度が高く、位置情報（経度と緯度と標高）がわかれば比較的簡単にその場所の日平均気温が計算できる。
- (3) 構築された外気温モデルは北海道での適合性が悪い。これは、北海道はほぼ全域が亜寒帯湿潤気候に属し、積雪寒冷地帯であるため、他の場所と傾向が異なっているためと考えられる。また、標高が高い高地についても、傾向が他と異なるため、適合性が悪くなっている。
- (4) フーリエ級数モデルは、モデルの精度は一番高いが、最高気温を小さく見積もる傾向がある。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 24560567（研究代表者：中村秀明）、24360173（研究代表者：田村隆弘）の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村秀明, 緒方香奈恵, 谷本俊夫, 浜田純夫: マスコンクリートの温度応力解析のための外気温モデルの提案, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.285-290, 1997.5
- 2) 気象業務支援センター: 気象データベース・アメダス (フルセット版), ウェザートイ, 2010
- 3) 日本気象協会: 気象庁年報, 1983-1992, 日本気象協会
- 4) 中村秀明, 王桂萱, 江本久雄, 宮本文穂: Particle Swarm Optimization によるマスコンクリートの熱伝導逆解析, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.107-118, 2006.2