

# コンクリート構造物の長期含水状態に関する一般化高詳細予測システム

コンクリート研究室 女屋賢人  
指導教員 下村 匠

## 1. はじめに

塩害，凍害，乾燥収縮といったコンクリート構造物の劣化現象の多くは，コンクリート中の水分または水分を媒介とする物質の移動が関係している．そのため，コンクリート構造物の耐久性・長期供用性を適切に評価するには，供用環境下における含水状態の経時変化を予測することが重要である．

これまでの研究により，条件が制御された実験室内におけるコンクリート中の水分移動はかなり精度よく再現可能となっている．一方，実構造物においては，温度，湿度，降雨，日射など自然界からの種々の作用を受け，かつこれらの環境作用が時空間的に変化する．したがって実構造物の含水状態の予測には，複雑で多岐にわたる環境作用の影響をどのように評価するかが課題となる．また，実構造物の含水状態予測に関しての利用可能なデータとして，構造物近隣の気象観測所などのデータがあるが，生起頻度と程度が異なる観測データから，長期解析用の環境作用入力データを生成する方法を明らかにする必要がある．

本研究では，実環境下におかれたコンクリート構造物中の含水状態の経時変化を数値解析により再現することを目的とし，構造物への環境作用を定量的に評価するための屋外暴露実験と再現解析と気象観測所の観測データから長期予測用の環境作用入力データを生成する数値実験を行った．

## 2. 屋外暴露実験の概要と再現解析

### 2.1 屋外暴露実験

#### (1) 供試体の概要

暴露実験に用いた供試体の概要を図-1に示す．実験には水セメント比 50%の普通コンクリートを用い， $\phi 100 \times 300\text{mm}$ の型枠に打設し，水分の逸散を防ぐために封緘養生を施した．型枠は内径 100mm の塩ビ管と発泡スチロールを組み合わせたものであり，表面からの深さ方向のみの一次元的な熱の移動を再現するために，発泡スチロールの周囲をさらに断熱材で覆い，熱の流出入の抑制を図った．

外気温度，相対湿度，全天日射量は供試体近辺に設置したウェザーステーションにより測定した．コンクリート表面近傍の温度は，表面温度計にて 1 時間毎に自動計測し，コンクリート内部の温度は熱電対で定期的に計測した．コンクリート供試体中の水分量の経時変化は，供試体重量を電子天秤で定期的に計測し，初期重量との差から算出した．

供試体を暴露する環境は，表-1に示す 2 種類とした．いずれも新潟県長岡市にある本学構内である．

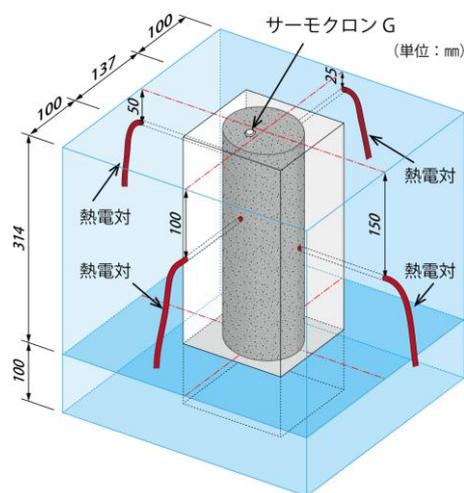


図-1 供試体概要

表-1 暴露供試体の環境条件

Case	試験環境	概要
A	屋外屋根有	温度・湿度変動
B	屋外屋根無	温度・湿度変動, 降雨, 日射



Case A(屋外屋根有) Case B(屋外屋根無)

図-2 供試体暴露環境

Case A : 屋外に設けた百葉箱状の箱内に設置する。日射, 降雨の影響を受けず, 外気温度, 相対湿度の変動のみの影響を受ける環境条件である。

Case B : 屋外一般環境下に設置する。一般的な屋外構造物が経験する外気温度, 相対湿度の変動, 降雨, 日射等の影響を受ける環境条件である。

(2) 実構造物の概要

対象構造物は新潟県柏崎市に建設されたボックスカルバートである。計測位置は図-3 に示す3か所であり, 供試体に使用したのと同じ表面温度計をそれぞれの壁面に設置した。各計測位置は表-2のような特徴がある。

2.2 コンクリート中の熱伝導解析法の概要と表面温度の再現解析

(1) 解析手法

供試体の表面温度は, 外気からの熱伝達と, コンクリート内部の熱伝導, さらに屋外一般環境下では, 晴天時の日中に日射を受けるため, 太陽からの熱放射の影響を受ける。また, 暴露実験を行った供試体は, 側面および底面に断熱材を設置し, 熱の流出入の抑制を図っているが, 完全に断熱ではないので, 供試体側面および底面からも熱の流出入が生じると考えられる。

表-2 対象実構造の計測位置の環境条件

記号	試験環境	概要
BRR	ボックス内	温度・湿度変動
UL1R	西向き擁壁	温度・湿度変動, 降雨, 夕日
UL1L	東向き擁壁	温度・湿度変動, 降雨, 朝日



図-3 対象実構造物および計測位置

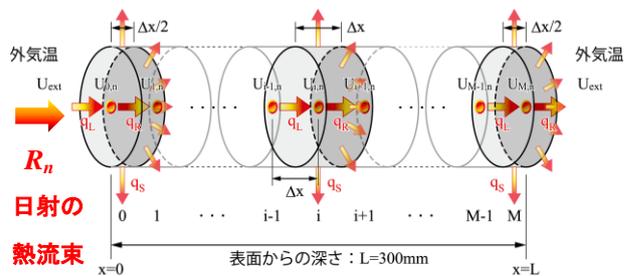


図-4 差分法による熱伝導解析

以上を考慮した熱伝導解析を行った。数値解析法は差分法によった。(図-4)

(2) 供試体の表面温度の再現解析

本学構内で実施した温度変動の暴露実験について, 実験ケース毎に実測値と解析値を比較したグラフを図-5, 図-6 に示す。夏季と冬季の参考として, 左図に2013年6月1日から7日までの温度の変動, 右図に2013年12月1日から7日までの温度変動を示している。また, 解析に使用した外気温度もプロットしている。

図-5 は日射の影響を受けず, 外気温度の変動のみによって温度が変化する環境下 (Case A) の再現解析結果である。夏季, 冬季においても, 表面温度の実測値は外気温度の変動に対し, 少し遅れて変動する傾向を示しており, 解析値においてその変動傾向が正確に再現されていることが分かる。

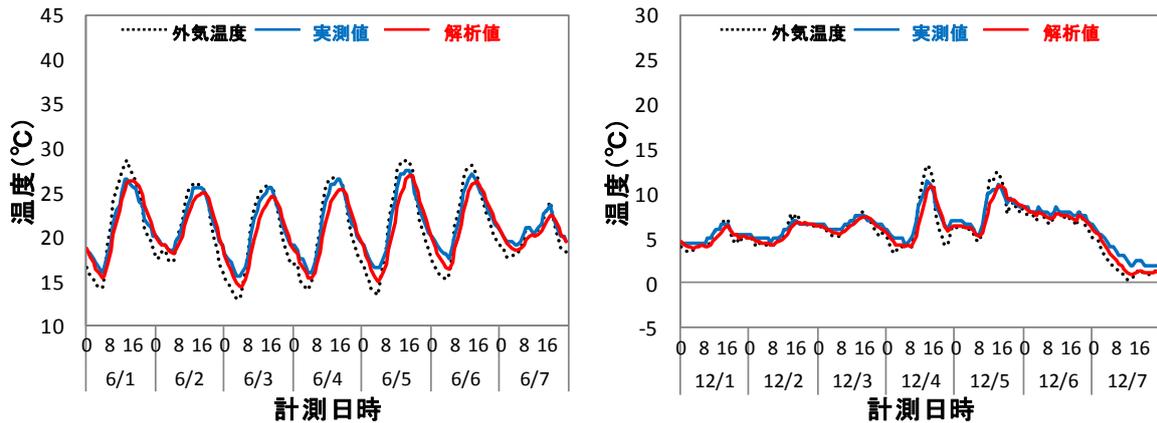


図-5 表面温度 (Case A) 解析結果

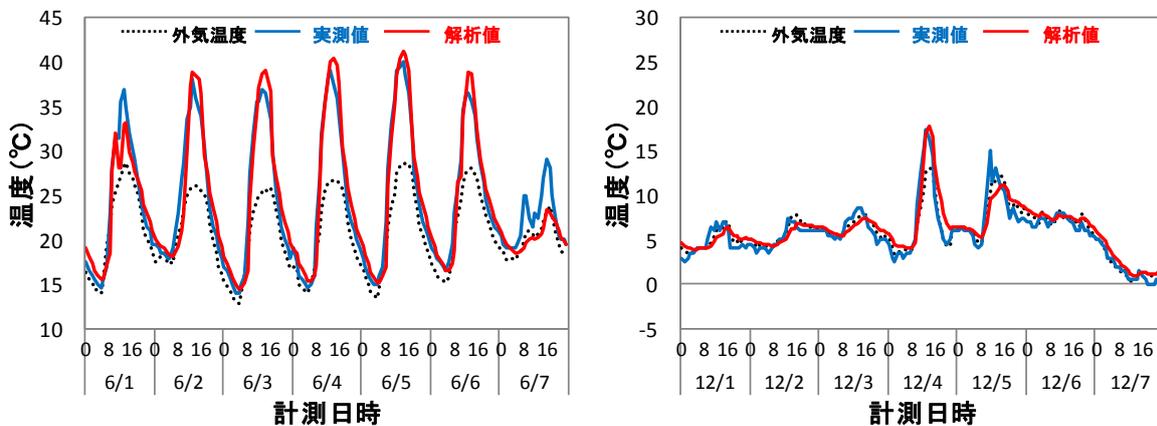


図-6 表面温度 (Case B) 解析結果

図-6 は天候・時間帯により日射の影響を受け、外気温度の変動によって温度が変化する環境下 (Case B) の再現解析結果である。実測値より、日中はコンクリート表面において日射による温度上昇が生じ、表面温度が外気温度を大きく上回っていることが確認できる。解析値においてもこの傾向を再現できている。しかしながら、実測値が外気温度を上回り解析値が外気温度を下回る傾向を示している個所も見受けられる (6月7日, 12月1, 2, 3, 5日)。これは、長岡の四要素観測所で観測された日照時間と、供試体が日射を受けた時間が異なることに起因していると考えられる。

### (3) 実構造物の表面温度の再現解析

新潟県柏崎市の実構造物で計測した表面温度について実験ケース毎に実測値と解析値を比較したグラフを図-7 から図-9 に示す。供試体同様、左図に2013年6月1日から7日までの温度の変動、右図に2013年12月1日から7日までの温度変動を示し、解析に使用した外気温度もプロットしている。

図-7 は BRR の再現解析結果であり、供試体の Case A と同様の環境条件下である。Case A と同様、実測値は外気温度の変動に対し、少し遅れて変動する傾向を示しており、解析値においてもその変動傾向が正確に再現されている。

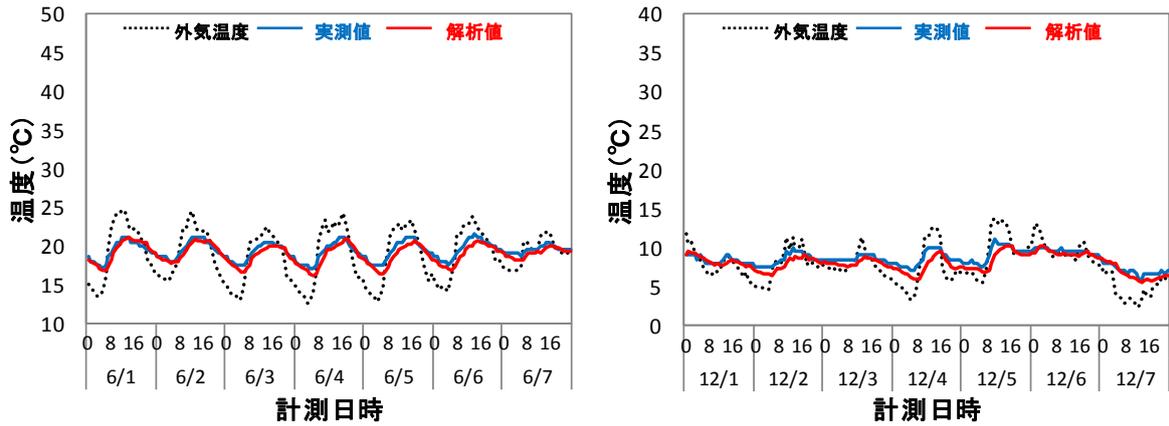


図-7 表面温度 (BRR) 解析結果

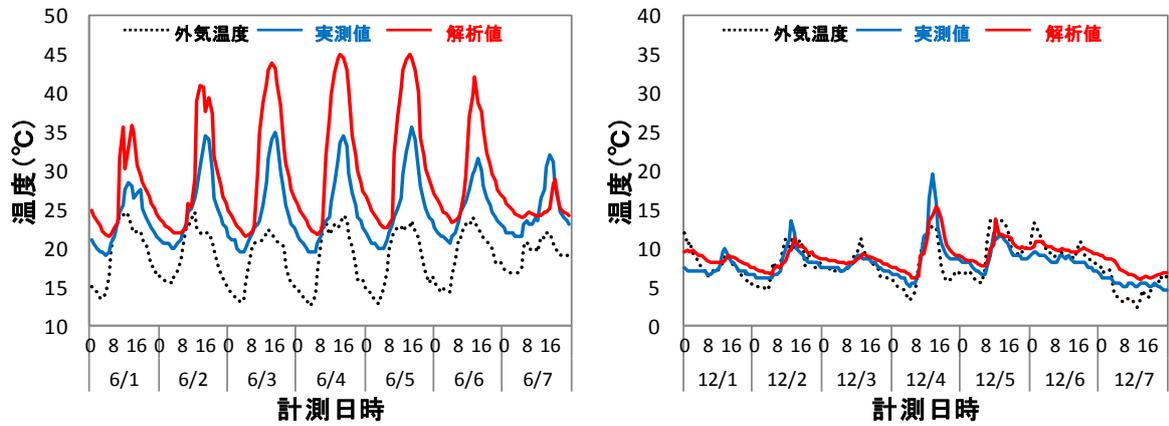


図-8 表面温度 (UL1R) 解析結果

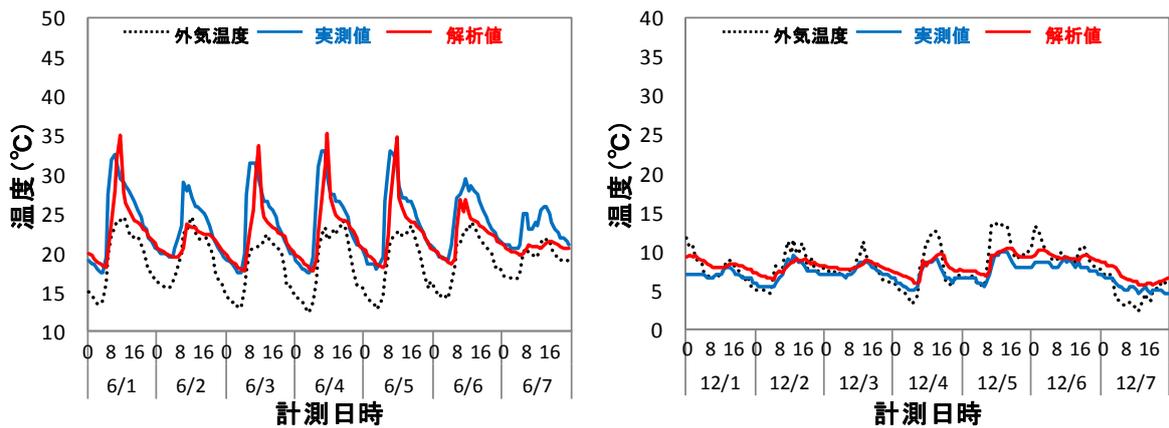


図-9 表面温度 (UL1L) 解析結果

冬季においては若干の乖離が見られるものの、表面温度の変化を定性的に表現できている。

図-8、図-9 は UL1R、UL1L の再現解析結果であり、供試体の Case B に近い環境条件下

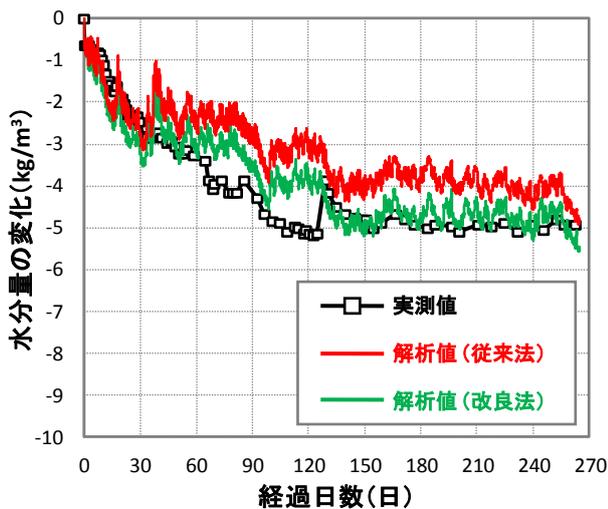


図-10 水分量 (Case A) 解析結果

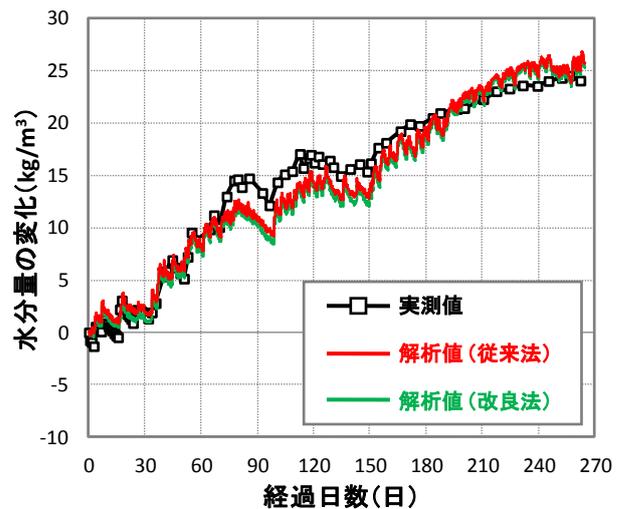


図-11 水分量 (Case B) 解析結果

である。UL1R と UL1L は鉛直の壁面であり、それぞれ向きが異なるため、日照時間を制限することで、解析を試みている。

UL1R の解析結果では、表面温度の解析値が、夏季においては実測値を過大評価し、冬季においては実測値を過小評価している。解析に使用している全天日射量は、水平面に作用するすべての日射量を計測しているものであるが、水平面と鉛直面に作用する日射量は異なる。夏季は太陽高度が高いため、水平面に作用する日射量が大きくなり、逆に太陽高度が低くなる冬季では、鉛直面に作用する日射量が夏季に比べて大きくなると考えられる。日射を受ける構造物の表面温度を正確に計算するためには方向性を考慮した日射量を与えることが必要であり、今後改良の余地があるといえる。

### 2.3 水分移動解析の概要と水分量変動の再現解析結果

#### (1) 解析の概要

コンクリート中の水分移動解析は既往の水分移動モデルに、表面温度と外気温度が異なることに起因した表面の仮想相対湿度を解析に使用した。飽和水蒸気圧は温度に依存するので、水蒸気分圧がコンクリート表面からの距離によらず一定と仮定した場合、表面における仮想

相対湿度は以下の式(1)で与えられる。

$$RH_s = RH \times \frac{P_{vo}}{P_{svo}} = \frac{P_v}{P_{svo}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $RH_s$  : 表面の仮想相対湿度[%RH],  $RH$  : 外気の相対湿度[%RH],  $P_{vo}$  : 外気温度に対応する飽和水蒸気圧[Pa],  $P_{svo}$  : 表面温度に対応する飽和水蒸気圧[Pa],  $P_v$  : 外気の水蒸気分圧[Pa]である。

#### (2) 供試体の水分移動の再現解析

本学構内で実施した暴露実験における水分量の変化について、実験ケース毎に実測値と解析値を比較したグラフを図-10、図-11に示す。図中の赤の実線は、実測された外気温度・相対湿度を境界条件にそのまま使用した従来法による解析結果であり、図中の緑の実線は改良法による解析結果であって、温度解析によって計算された表面温度と周囲環境の気温、相対湿度から計算される表面の仮想相対湿度を使用している。

図-10は、降雨・日射を受けず、外気温度と相対湿度の変動によって水分量が増加する環境条件である。改良法による解析値は、従来法による解析値に比べ、より実測値に近い挙動を示していることが確認できる。実験開始から70～120日経過した期間において、実測結果と解

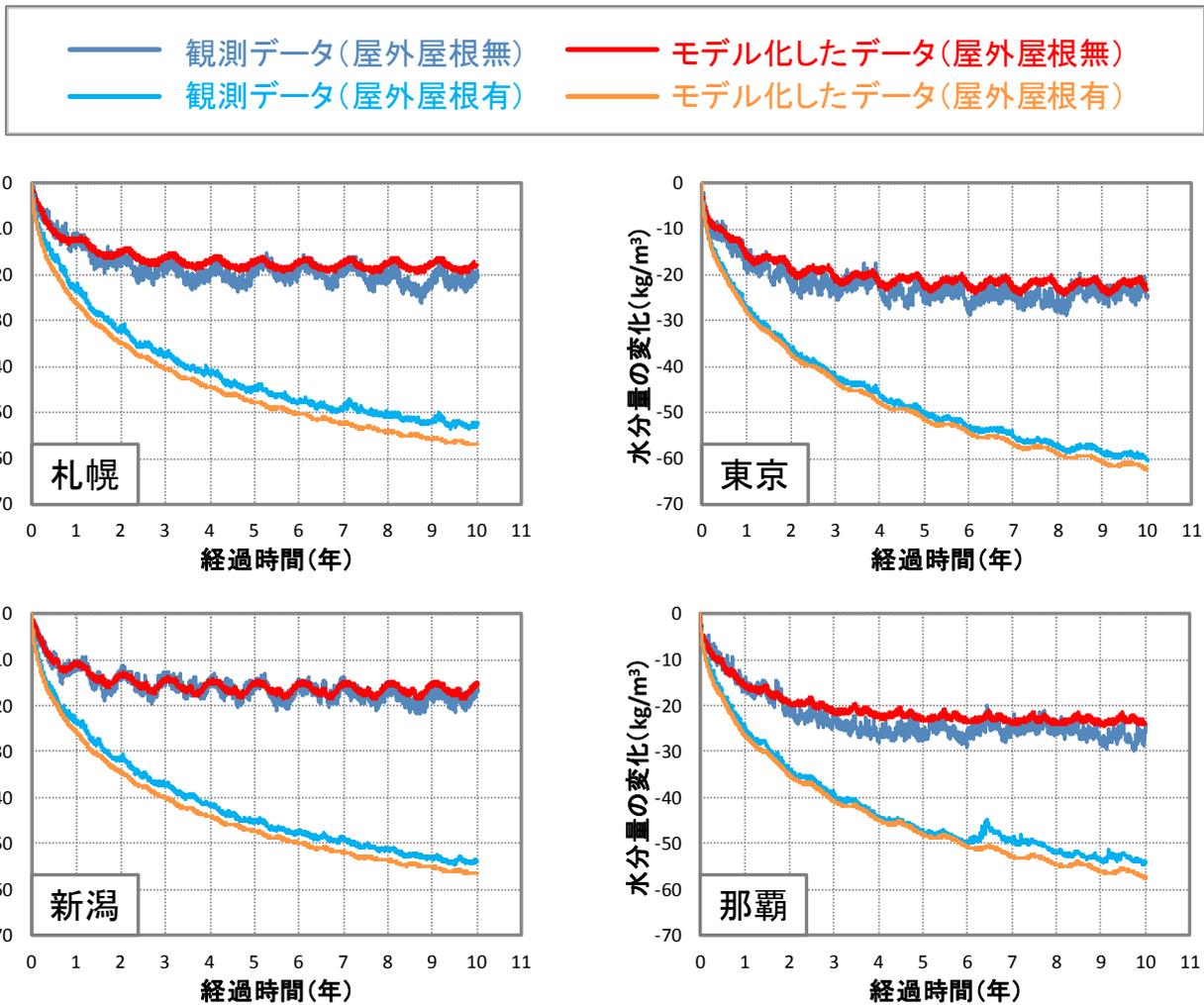


図-12 各都市の水分量解析結果

析結果に少々乖離が見られるが、実験全期間の平均的な含水状態の変化傾向は一致している。

図-11は、外気温度と相対湿度の変動に加え降雨による吸水によって水分量に変化する環境条件である。Case Bの条件下では、降雨による吸水の影響が支配的となるため、従来法による解析結果と改良法による解析結果の違いはごくわずかである。Case Aと同様に、実験の中期において実測結果と解析結果に乖離が見られるが、水分量の変動については良好に再現できている。

### 3. 環境作用入力データを生成する数値実験

外気温度、相対湿度、日照時間、日射量の値は日変動と季節変動を伴う値であるため、同月

内、同時刻において平均化する手法をとった。降雨履歴は季節的変動を伴う値であり、また降雨が継続する時間の影響を評価する必要があったため、月ごとに合計乾燥・降雨時間を求め、降雨が継続する時間を1時間として割り振る方法を採用した。

図-12は各都市の気象台の2000年から2009年までの10年分の観測データから、前述の方法で1年分の環境作用入力データを生成し、水分移動解析を行ったものである。いずれの都市においてもモデル化したデータの解析値は観測データの解析値の挙動を良好に再現しており、本研究で行った作用のモデル化手法は、信頼度の高い手法であることが確認された。