

気象現象がコンクリート躯体温度に及ぼす影響

The Influence of Meteorological Phenomenon on Concrete Body Temperature

西田 徳行* 土橋 吉輝*
Noriyuki Nishida Yoshiteru Dobashi

潮田 和司* 椎名 貴快*
Katsushi Ushioda Takayoshi Shiina

要 約

コンクリート構造物の耐久性を検討する上で、それを取り囲む環境条件は極めて重要である。自然環境下では、気温・湿度、日射および赤外放射などの気象要因が周期的に変化し、構造物表面の性状や躯体内温度等に影響を与えている。しかしながら、気象現象を取入れた構造物の性能評価は、依然として確立されていない。

本研究では、著者らが提案した輻射熱を考慮した境界モデルを検証するため、屋外にて実大モデル試験体の躯体温度と気象現象の計測を行った。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験概要
- § 3. 実験結果および考察
- § 4. 結論

§ 1. はじめに

野外に打設されたコンクリート表面では日射、放射熱、水分蒸発による気化熱等が躯体温度の変動に影響することが知られている¹⁾²⁾。しかし、コンクリートの温度解析では、一般にコンクリート表面と大気との境界条件を対流熱伝達のみとしている。例えば、躯体内の非線形な温度勾配により発生する内部拘束応力が卓越するスラブ状コンクリート構造物では輻射熱の影響によって、この温度勾配が大きくなり、表面ひび割れの発生、成長を助長する可能性があると考えられる。また、硬化コンクリートにおいても塩害や凍害等の劣化過程で、気象因子から受ける温度変化を考慮することは、今後、重要であると考える。

本研究では、提案した境界モデル³⁾を検証するため、

実大モデルの試験体を作成し、打込み時から7種類の気象因子、コンクリート躯体温度および表面熱収支を計測した⁴⁾⁵⁾。なお、所要の品質を確保するため、通常は打設翌日から、霜、日光の直射、風および大雨などの気象作用に対してコンクリートの露出面を保護する湿潤養生等が行われる。しかし、湿潤養生時等の水分供給量や養生方法(湛水、散水、マット等)の評価が困難であるため、本実験では湿潤養生等を行わないこととした。

§ 2. 実験概要

2-1 コンクリート配合および試験体

本論文は、1997年11月7日から弊社屋外実験場(東京都町田市)で行った実験に関するものである。使用したコンクリートは、呼び強度30N/mm²、打設温度21.4℃である。表-1に配合を示す。自然環境下では物体に作用する日射、放射、対流熱伝達量に対する風の影響等、外的因子の1つ或いは全てを完全に取除くことは不可能であるが、個々の影響の軽減は可能である。本実験では、これに基づいて気象因子が、コンクリート表面部に及ぼす影響を検討した。試験体は6種類であり、境界条件を表-2、図-1に示す。試験体の形状は後の解析を簡素化するため、図-2に示すように上面を除く周囲を断熱

*技術研究所土木技術課

表-1 コンクリート配合

呼び強度 (N/mm ²)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位数 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
30	20	12	4.5±1.5	50	45.9	164	328	819	983	1.230

普通ポルトランドセメント：比重 3.16, 比表面積 3350cm²/g, 混和剤：AE減水剤標準形(I種), 断熱温度上昇試験結果： $Q(t) = 51.56(1 - e^{-0.914t})$
 細骨材 S1：細砂, 比重 2.54, 吸水率 3.65%, 実績率 57.9%, FM=1.83
 S2：砕砂, 比重 2.62, 吸水率 1.12%, 実績率 62.1%, FM=3.20
 混合砂(S1:S2=20:80)：比重 2.62, 吸水率 1.12%, 実績率 61.3%, FM=2.93
 粗骨材：碎石, 比重 2.65, 吸水率 1.07%, 実績率 57.1%, FM=6.65

表-2 試験体の境界条件

試験体 タイプ	影響項目			コンクリート表面モデル			
	日射	風	水分 逸散	q_{con}	q_{sol}	q_{sky}	q_{exp}
A, AA	○	○	○	○	○	○	○
B	×	○	○	○	×	○	○
C	×	×	○	○	×	○	○
D	○	○	×	○	○	○	×
E	×	×	×	×	×	×	×

q_{con} ：対流熱伝達量, q_{sol} ：正味全日日射量, q_{sky} ：天空放射量
 q_{exp} ：水分蒸発の気化熱による熱損失量

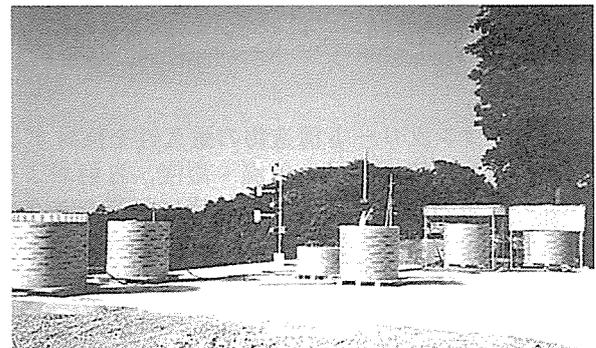


写真-1 コンクリート試験体の配置状況

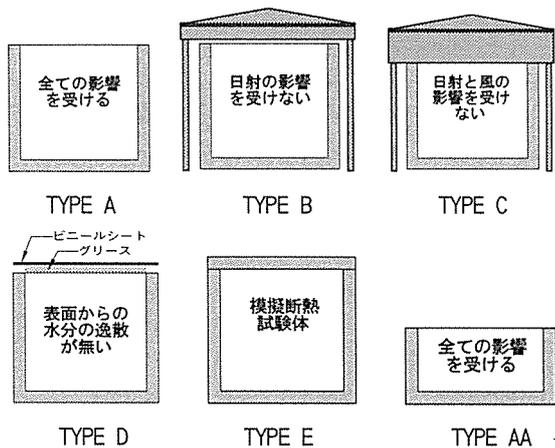


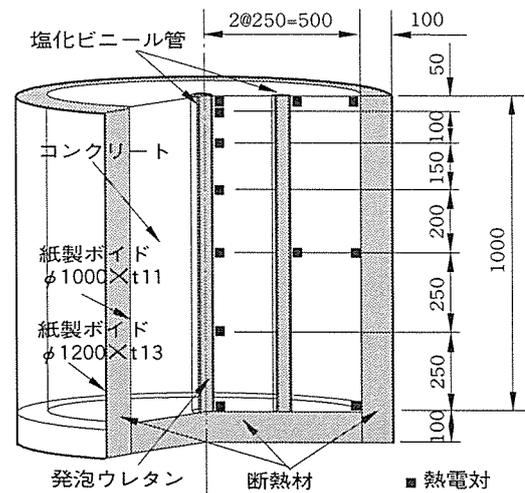
図-1 モデル試験体の種類

材で覆った1次元的な熱拡散となる要素モデルとした。写真-1にコンクリート試験体の配置状況を示す。

2-2 計測項目および計測方法

(1)コンクリート躯体温度

コンクリート躯体温度は、熱電対を用いて30分間隔で測定している。熱電対の配置を図-2に示す。日射や放射が及ぼす影響は、材質、色や温度によって異なるため、コンクリート表面に熱電対を貼付した場合、表面温度を厳密に測定するのは難しい。非接触型の温度計では精度に問題があった。そこで、既往文献⁹⁾を参考に表面から



(a)試験体 TYPE A, B, C, D, E (φ1000×h1000)

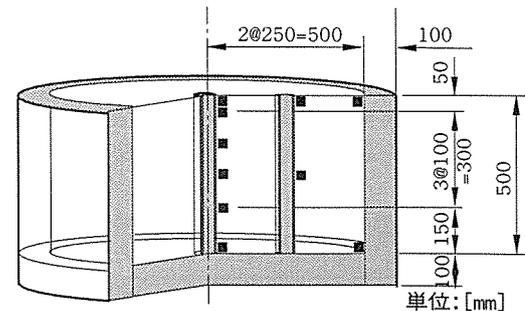


図-2 試験体の熱電対配置図

5mm内側に熱電対を設置し、コンクリートの表面温度とした。また、熱収支 q を直接測定する熱流計を10mm内側に設置した。気象現象を考慮した境界条件は、次式のように仮定した³⁾。

$$q = q_{con} + q_{sol} + q_{sky} + q_{evp} \quad (1)$$

ここに、 q_{con} は対流熱伝達量[W/m²]、 q_{sol} は正味全天日射量[W/m²]、 q_{sky} は天空放射量[W/m²]、 q_{evp} は水分の気化熱による熱損失量[W/m²]である。

(2)気象因子の計測

計測項目、使用計器を表-3に示す。また気象計測概要図と試験体配置図を図-3、4に示す。気象に関する計測データは6秒間隔のスキランを30分間隔で平均したものを測定値として用いた。本実験では、全天日射量はアルベドメータによる計測値から、天空放射は赤外放射計の計測値から、対流熱伝達量は風速と気温およびコンクリート表面温度から定量的に求められる。輻射熱を考慮した温度解析では、測定値に対する計算値の妥当性の確認が必要となる。式(1)右辺の各項は以下に示す式から算出できる。

$$q_{con} = h_c(T_{air} - T_s) \quad (2) \quad q_{sol} = (1 - \alpha)S_0 \quad (3)$$

$$q_{sky} = \epsilon\sigma(T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (4) \quad \alpha = \frac{K \uparrow}{K \downarrow} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{E_m \uparrow - E_m \downarrow}{E_{bc} - E_m \downarrow} \quad (6) \quad E_{bc} = \sigma T_s^4 \quad (7)$$

$$T_{sky} = T_{air} \{0.711 + 0.0056T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013 \cos(\pi t / 12)\}^{1/4} \quad (8)$$

$$q_{evp} = -(42.6 + 37.6v)(p_{cs} - \phi p_{ws}) \times 0.0075 / 4.1868 \times 1.163 \quad (9)$$

ここに、 h_c は対流熱伝達率[W/m²°C]、 T_{air} は気温[°C]、 T_s はコンクリート表面温度[°C、K]である。 S_0 はコンクリート表面の単位面積に単位時間当りに入射する全天日射量[W/m²]、 α は入射する全天日射量の反射率でアルベドと呼ぶ。 ϵ は入射する赤外放射量の反射率で射出率または放射率と呼ばれている。反射率は、上下方向に各計器の設置により求められる。 $K \downarrow$ 、 $K \uparrow$ は、上からと下からの全天日射量、 $E_m \downarrow$ 、 $E_m \uparrow$ は、上からと下からの赤外放射量である。 σ はステファン・ボルツマン定数(= 5.67×10^{-8} [W/m²K⁴])、 T_{sky} は天空温度[K]、 T_{dp} は露点温度[K]、 v は風速[m/s]、 p_{cs} はコンクリート表面の飽和蒸気圧[mmHg]、 ϕ は相対湿度、 p_{ws} は飽和蒸気圧[mmHg]

表-3 計測項目

計測項目	単位	計測器
コンクリート表面温度	[°C]	熱電対 (5mm 内側)
コンクリート温度	[°C]	熱電対
気温	[°C]	通風式温湿度計
相対湿度	[RH%]	通風式温湿度計
露点温度	[°C]	露点温度計
風向風速	[m/s]	風向風速計 (高さ 1,2,3m)
全天日射量	[W/m ²]	アルベドメータ (Type-A 上)
天空放射量	[W/m ²]	赤外放射計 (Type-AA 上)
コンクリート熱量	[W/m ²]	熱流計 (Type-A,C,D)
降雨量	[mm]	雨量計

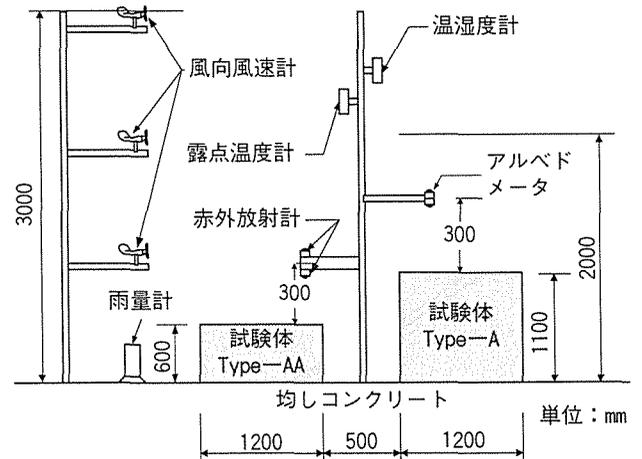


図-3 気象計測概要図

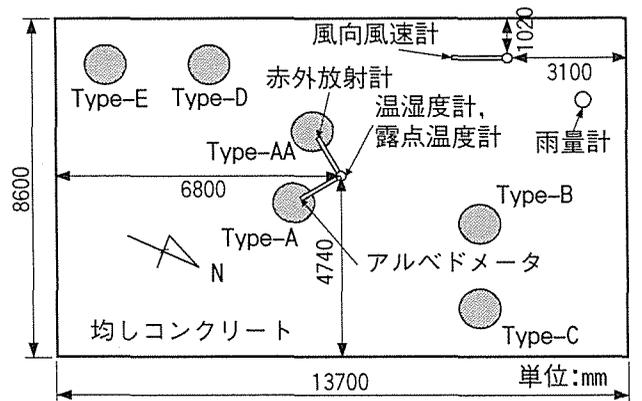


図-4 試験体配置図

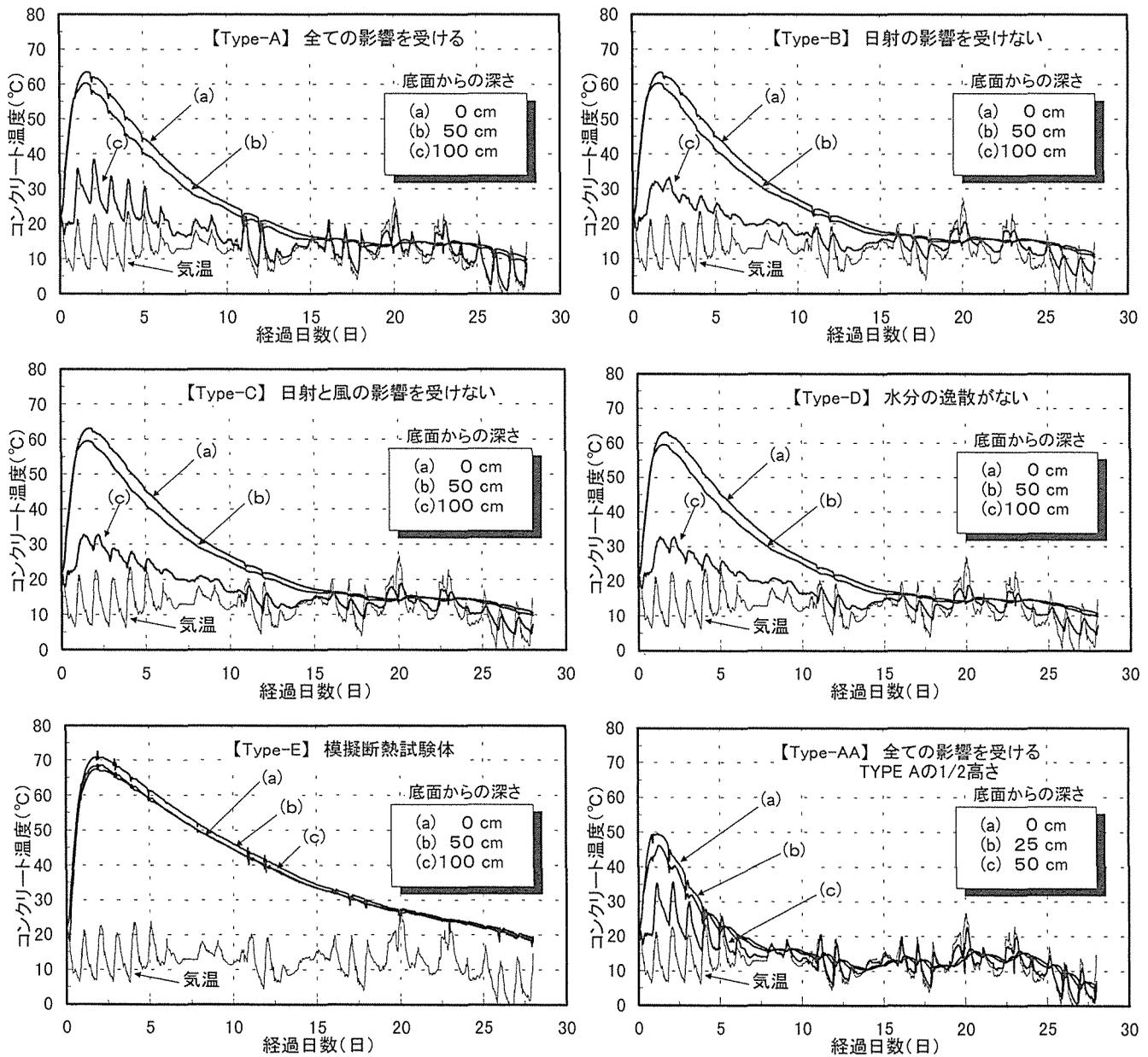


図-5 コンクリート温度測定結果

である。なお、天空温度は雲量により変化することが知られているが、正確に予測する式は無い。ここではASHRAE⁷⁾による晴天時の予測式(8)を用いている。また、式(9)は、湛水養生等でコンクリート上に水の層がある場合の式⁷⁾であるため、本実験での適用は難しい。

§ 3. 実験結果および考察

3-1 コンクリート躯体温度の測定結果

試験体6種類のコンクリート温度の経時変化(中央部)

を図-5に示す。試験体6体の内、Type-E以外は、材齢約1.5日で最高温度が約65°Cであり、15日程度から躯体内温度が外気温に平衡している。日射の影響を受けないType-B,Cは、日射の影響を受けるType-A,Dと比較した場合、コンクリート表面温度の日変化が小さい。Type-BとCの違いは、あまり顕著に現れていない。Type-Dの表面温度は、上面のビニールシートによる温室効果とグリスの茶褐色により、他の試験体に比べて日変化が大きく、全体的に温度が高くなったと考えられる。高さ50cmのType-AAは、材齢1.25日で最高温度が49.5°Cである。躯体

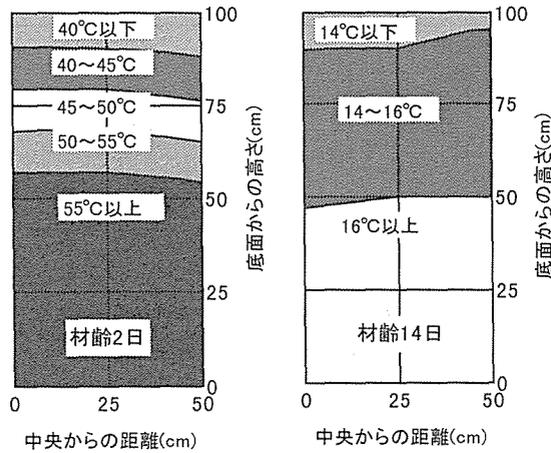


図-6 試験体Type-Aの温度分布図

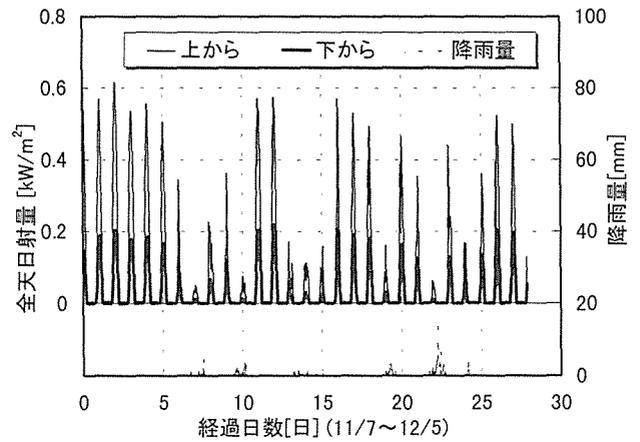


図-7 全天日射量および降雨量の測定結果

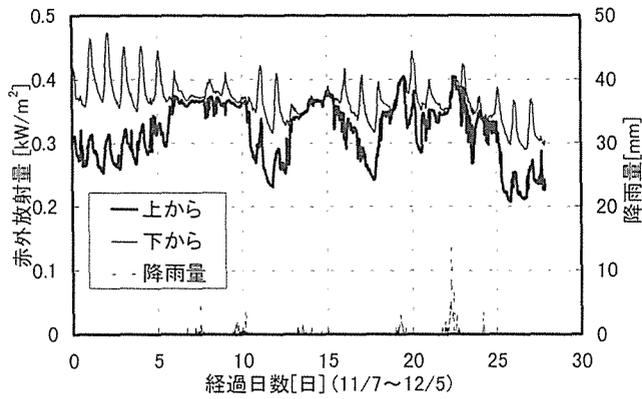


図-8 赤外放射量および降雨量の測定結果

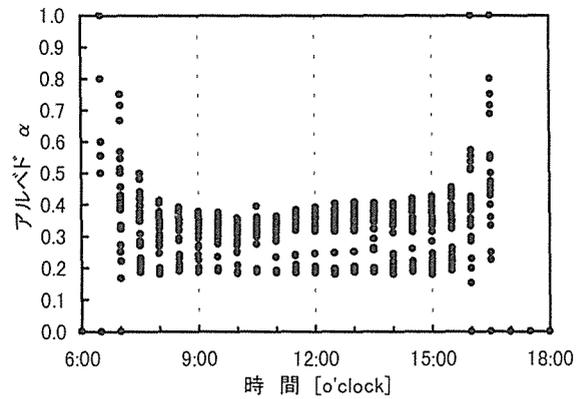


図-9 時刻別アルベド

体内温度は材齢7日程度から外気温に平衡している。以上のように、気象に関する環境条件の違いにより、コンクリート表面および内部温度は異なっている。なお、図-6に示すType-Aの温度分布図から、試験体の熱拡散状態は、ほぼ1次元であることがわかる。

3-2 気象因子の計測結果とその影響

(1) 全天日射量および赤外放射量

図-7に全天日射量、図-8に赤外放射量を降雨量と併記して示す。雨天や曇りと考えられる時は、全天日射量が小さくなっている。また、この時期の赤外放射量は、上からと下からの値の差が小さくなっている。

(2) アルベド

躯体表面における日射量の反射率（アルベド）は、計測値を式(5)に代入して求めることができる。アルベドの時刻別変化を図-9に示す。日の出、日の入りのような太陽高度が極めて小さい時間帯でのアルベドは、計測器の精度上、入射波を正確に計測することが困難であり、

計測しても信頼性の低い値となる。よって、図-9では、アルベドが1以上の値を削除して示している。通常、この時間帯でのアルベドについては考慮しないことが望ましい。コンクリートは若材齢時において、その性状が著しく変化することが知られており、また、雨天時には降雨によって湿り気をおびた表面は、色彩も濃く変わる。このため、アルベドの値も、定義上、その影響によって変化するものと思われる。図-9の結果からも、アルベドの値は必ずしも一定の経時変化をしていないことが分かる。コンクリートの硬化に伴う表面性状の変化による影響をみるため、打設後の材齢1週間毎にアルベドを整理したものを図-10に示す。ただし、期間内での時間帯を8:00~16:00とした。材齢初期の週ほど、アルベドの値は若干小さく算定される傾向がある。これは、打設直後は躯体色が灰系色（セメント系色）のため、日射吸収率が高い（反射率：小）ことが影響したと思われる。ここで、第2週の値が第1週よりも小さいのは、第1週に

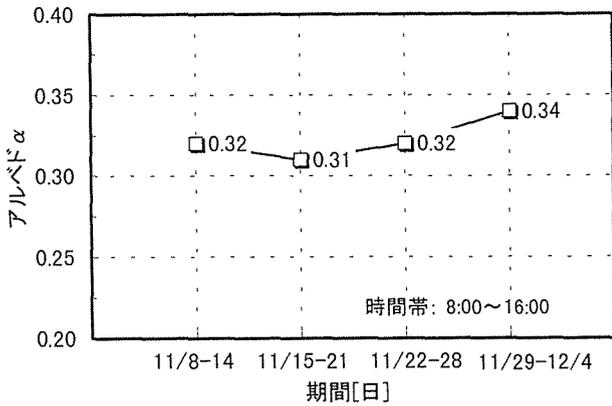


図-10 週平均アルベド

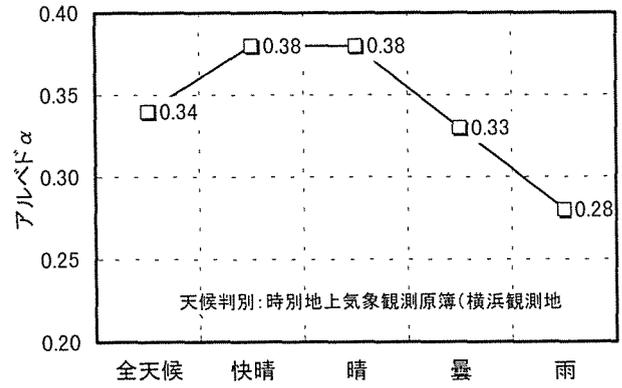


図-11 天候別アルベド

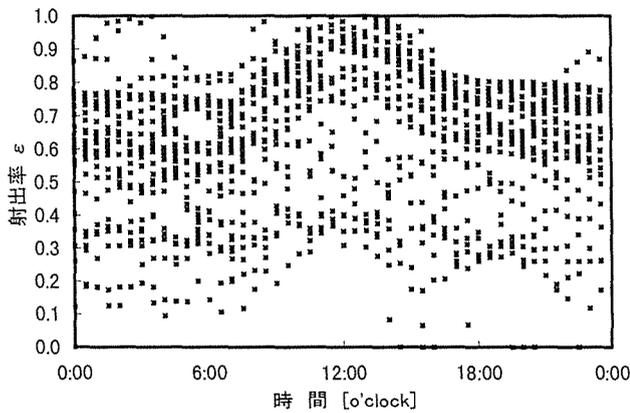


図-12 時刻別射出率

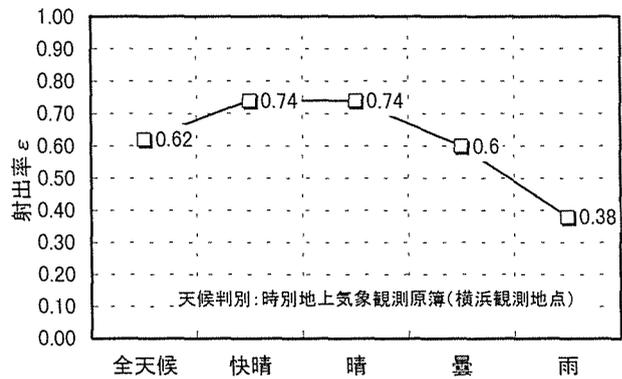


図-13 天候別射出率

比べ、雨天日が多いことが影響したものと推測される。また、硬化の進行とともに躯体色が白系色に変化するため、アルベドは材齢とともに若干大きくなっている。ここでの算定結果に大きな影響を与えている因子として、コンクリート表面の色彩・性状が挙げられる。次に、天候別平均値を図-11に示す。ただし、天候の判別は、特別地上気象観測原簿（横浜観測地点）による6時間毎のものを参考にしてている。図-11については、雨天日の値は快晴・晴天日に比べ、アルベドは小さい。これは、降雨などによる湿った表面の色による影響や、反射波の方向が表面雨水の影響で乱れていることなどが影響しているものと考えられる。

(3) 射出率

射出率の値は、赤外放射計の計測値を式(6)(7)に代入して求めることができる。この射出率の値を時刻別にまとめたものを図-12に示す。この結果より、全体として大きなばらつきを示していることがわかる。そこで、天候別に整理した射出率の平均値を図-13に示す。同

図の結果より、アルベドと同様、曇天・雨天日の値は、快晴・晴天日の値と比較して小さい。これは、大気中の雲や降雨によって、表面温度が低下したことが影響していると思われる。

図-11と図-13に示した全天候時のアルベドと射出率の値を用いて、正味の全天日射量と正味の赤外放射量の値を計算した。図-14に正味全天日射量、図-15に供試体 Type-AAにおける正味赤外放射量(天空放射量)の計算値と測定値との比較結果を示す。ここでいう「正味」とは、「(上からの値)-(下からの値)」を意味する。図-14から正味全天日射量の測定値は、計算値と比較的良く一致していることがわかる。この結果から、全天候時のアルベドの値を用いた場合でも、全天日射によるコンクリート表面からの入熱量は精度良く求めることができるといえる。図-15では、計算値と測定値の変動幅が異なり、正味の全天日射量の推定結果に比べ、大きな差を生じている期間がある。この期間は、曇天・雨天日であった。これだけの差がでた理由として、式(4)中の天空温度を推定

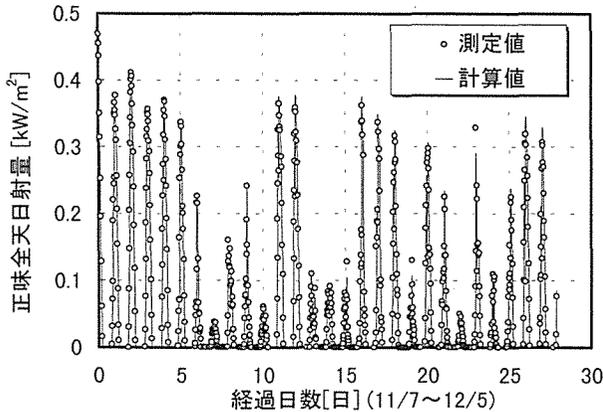


図-14 正味全天日射量の測定値と計算値

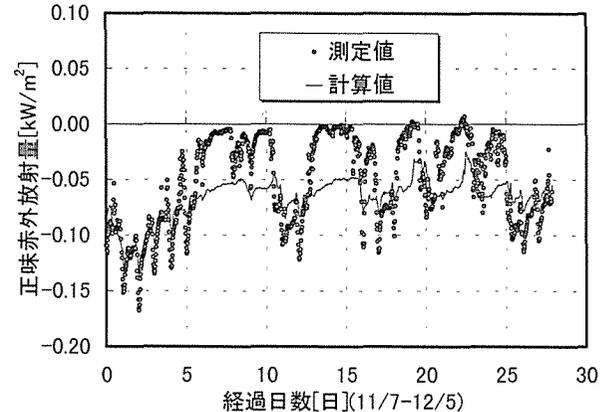


図-15 正味赤外放射量の測定値と計算値

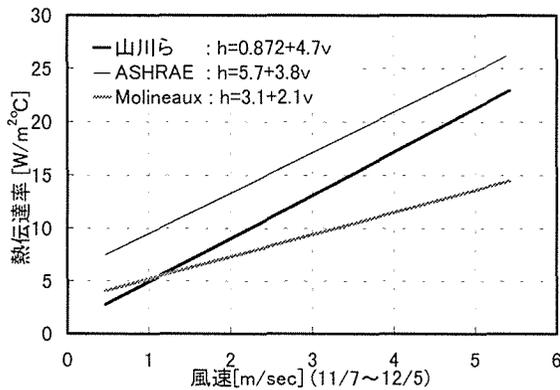


図-16 熱伝達率と風速の関係

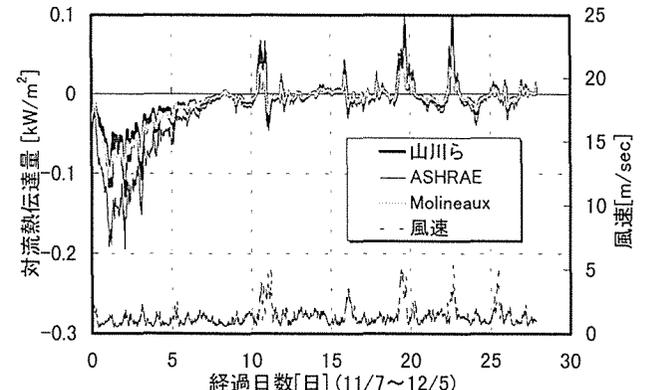


図-17 対流熱伝達量の計算値

する式(8)の値が、晴天時における天空温度を推定する式のため、曇天や雨天時での現象に対応していないからであると思われる。

(3)対流熱伝達量

対流熱伝達量は式(2)により求められ、熱伝達率の設定方法により値が変わる。既往文献の熱伝達率は、対流熱伝達量と気化熱を同時に含むものが多い。図-16に風速 v との関係と式を示す。山川ら⁸⁾は、硬化コンクリートの熱伝達率試験から熱伝達率を求めている。ここでは、3点の実験計測データから回帰式を求めて図-16に示した。また、湛水養生やプールなどの条件下で気化熱の影響を考慮したものでは、ASHRAE⁷⁾式、対流熱伝達量のみではMolineauxら⁹⁾の式がある。図-17に各熱伝達率の値を用いて式(2)から求めた対流熱伝達量を示す。気化熱の影響が小さい山川らの式とMolineauxらの式を用いた値は概ね一致している。

(4)コンクリート表面の熱収支

試験体Type-Aに設置した熱流計による熱収支と式(1)

に基づく計算値の比較を図-18に示す。対流熱伝達量は、計算値1で対流熱伝達量のみを考慮するMolineauxらの式、計算値2で対流熱伝達量と気化熱を考慮するASHRAEの式による熱伝達率を用いて示した。測定値と計算値1は比較的によく一致しているが、計算値2はコンクリート温度のピーク時(材齢2~3日)において、一致が悪い。これから、本実験のような条件下では、気化熱の影響が小さく、これを無視できると考えられる。ただし、コンクリート温度のピーク時は若材齢時であり、表面部は比較的湿っているため、気化熱の影響が予想される。よって、各養生方法の影響も含めて今後の課題と考える。

以上より、本実験のように湿潤養生等を行わない場合、著者らが提案した境界モデルは、気化熱の影響を無視することで、実現象を良く表現できることが確認された。

試験体Type-Aの日中14:00の表面熱収支を成分別に示したものを図-19に示す。図中符号の正は吸熱、負は放熱を意味する。正味全天日射量が小さい部分は曇りある

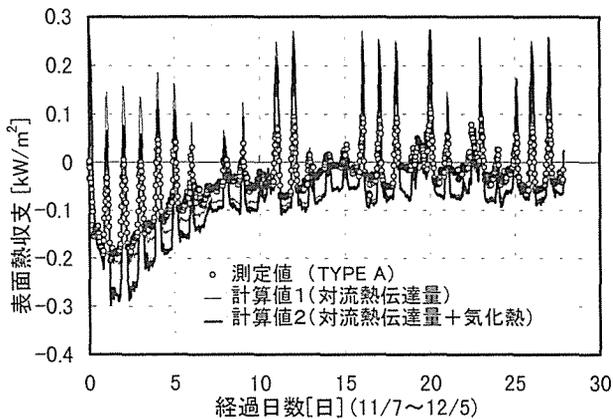


図-18 コンクリート表面の熱収支

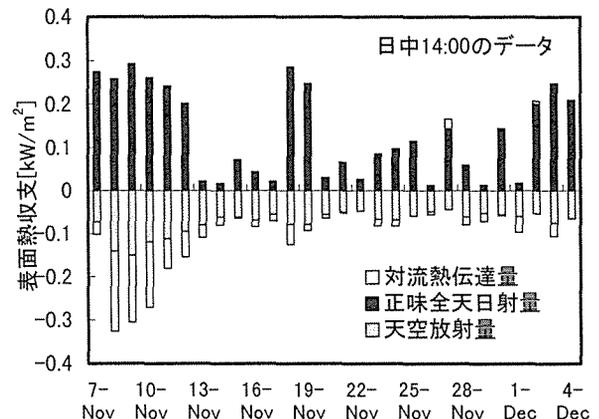


図-19 表面熱収支量の成分 (Type-A)

いは降雨時である。晴天時の日中は、正味全日射量の影響が大きい。若材齢時は発熱により表面温度が高く、対流熱伝達と天空放射の放熱が大きくなっている。

§ 4. 結論

本実験から得た主な知見を以下に示す。

- (1)全天候でのアルベドの平均値は0.34であった。これを用いた正味の全日射量は、測定値と良く一致することを確認した。
- (2)射出率を0.62として天空放射量を算定した結果、曇天・雨天日においては、天空温度推定式が対応していないこともあり、若干差が生じている。この点については、今後さらに天候による分類を行い、より細分化した条件が必要である。
- (3)提案した境界モデルは、本実験のように湿潤養生等を行わない場合、気化熱の影響を無視することで実現象を比較的良く表現できることが、表面熱流量の推移から確認できた。
- (4)晴天時の日中は、正味の全日射量の影響が大きい。また、若材齢時は発熱により表面温度が高くなり、対流熱伝達と天空放射による放熱量が大きくなることが表面熱収支成分図より確認できた。

今後は、季節別の特性、各種養生方法と気化熱の関係、応力等の検討が必要である。

謝辞：本研究は、東京電機大学理工学部 松井邦人教授と米国アイオワ大学工学部 Theodore F. Smith教授との共同研究として行なわれた。実施要領作成や実験結果に対

する検討などにおいて、多大なご協力・ご助言を頂いたことに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造・耐久性設計境界問題研究委員会報告書，1998.7.
- 2) 土木学会：舗装工学研究小委員会報告書，1997.6.
- 3) 松井邦人，T.F.Smith，西田德行，椎名貴快：輻射熱の影響を考慮したマスコンクリートの温度解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1281-1286，1996.6.
- 4) 高橋誠二，ほか：コンクリート躯体温度に及ぼす気象現象の影響評価，土木学会第53回年次学術講演会概要集，第5部門，pp.712-713，1998.10.
- 5) 西田德行，ほか：コンクリート躯体温度に影響を及ぼす気象現象について，土木学会第53回年次学術講演会概要集，第5部門，pp.714-715，1998.10.
- 6) 例えば，丸山暉彦，ほか：アスファルト混合物層の温度推定方法，土木学会第47回年次学術講演会概要集，第5部門，pp.34-35，1992.9.
- 7) ASHRAE，1993 Fundamentals Handbook，American Society of Heating，Refrigerating and Air Conditioning Engineers，Atlanta，Ga. 1993.
- 8) 山川秀次，笠原 清，小林精一：マスコンクリートの熱伝達率試験方法の検討，土木学会第37回年次学術講演会概要集，第5部門，pp.415-416，1982.
- 9) B.Molineaux，B.Lachal，and O.Guisan：Thermal Analysis of Five Outdoor Swimming Pools Heated by Unglazed solar Collectors，Solar Energy，Vol.53，No.1，pp.21-26，1994.