

コンクリート構造物表面における熱収支境界モデルに関する基礎的研究

東京電機大学大学院 学生会員 ○近藤 吉一 東京電機大学 フェロー会員 松井 邦人
西松建設(株)技術研究所 正会員 椎名 貴快

1. はじめに

従来、コンクリート構造物の温度解析は、表面における境界条件を対流熱伝達のみ用いてきた。しかし自然環境下に暴露されたコンクリート構造物は、気温・湿度・日射・赤外放射などの気象因子が影響を与え、表面温度の変動は大きく、深さ方向の温度勾配も大きいことが知られている。そのため温度解析においては、これらの気象因子による流入熱量を定量化し、表面境界に組み込んだ境界モデルを構築する必要がある。

そこで本研究では、モデル実験で計測したデータを用いて境界モデルのパラメータであるアルベド、天空温度について整理する。アルベドは天候・季節・太陽高度などの要因による影響について検討し、天空温度は既存の提案式を検証することでその妥当性を確認する。

2. 熱収支境界モデルと気象因子

構造物表面での輻射熱による流入熱量は、式(1)で表される。

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

ここで、 q_{con} ：対流熱伝達量、 q_{sol} ：正味全天日射量、 q_{sky} ：正味天空放射量、 q_{evp} ：気化熱を示す。

また、各パラメータは式(2)～(8)で表される。

$$q_{con} = h_c(T_{air} - T_s) \quad (2)$$

$$q_{sol} = S^\downarrow - S^\uparrow = (1 - \alpha)S_0 \quad (3)$$

$$q_{sky} = E_m^\downarrow - E_m^\uparrow = \varepsilon\sigma(T_{sky}^4 - T_s^4) \quad (4)$$

$$h_c = 3.1v + 2.1 \quad (5) \quad \alpha = \frac{S^\uparrow}{S^\downarrow} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{E_m^\uparrow - E_m^\downarrow}{E_{bc} - E_m^\downarrow} \quad (7) \quad E_{bc} = \sigma T_s^4 \quad (8)$$

ここで h_c ：熱伝達係数、 T_{air} ：気温、 T_s ：コンクリート表面温度、 $S^\downarrow$ ：下向きの全天日射量、 $S^\uparrow$ ：上向きの全天日射量、 S_0 ：単位面積当たりに入射する全天日射量、 σ ：Stefan-Boltzmann 定数、 v ：風速、 α ：アルベド、 ε ：赤外放射の射出率、 T_{sky} ：天空温度、上向きの赤外放射量、 $E_m^\downarrow$ ：下向きの赤外放射量、 E_{bc} ：理想固体表面(黒体)における赤外放射量である。

3. 天空温度式の提案

3.1 天空温度のモデル

正味天空放射量を求める際に必要となる天空温度 T_{sky} はさまざまな提案式が存在する。天空温度の代表的な提案式を表-1に示す。これ等の式は海外で計測されたデータに基づき提案されたものであり、必ずしも日

本の気候風土に適用しているとは言い難いと思われる。また Martin&Berdahl においては晴天時のみの使用となっているが、Swinbank と Bliss の提案式はその使用についての条件明記がなされていない。

そこで本研究では表-1に示した提案式をベースとし

$$T_{sky} = \alpha T_{air}^\beta \quad (9)$$

$$T_{sky} = \left\{ \alpha + (T_{dp} - 273) / \beta \right\}^{0.25} \quad (10)$$

$$T_{sky} = \left\{ \alpha + \beta T_{dp} + \gamma T_{dp}^2 + \delta \cos(\pi/12) \right\}^{0.25} \quad (11)$$

の3式の係数 α 、 β 、 γ 、 δ をモデル実験で計測したデータを用いて、最小二乗法により算出し、晴天時・曇天時・雨天時の各天候における提案式を求める。

3.2 使用データについて

本研究では、西松建設(株)南町田実験場にて1997年11月～1999年2月まで行われた輻射熱実験で計測されたデータ(若材齢時を除いた1998年1月～同年12月)を用いる。気象計測は温度計、湿度計、風向風速計、

表-1 天空温度の提案式

	提案式
Swinbank	$T_{sky} = 0.0552 T_{air}^{1.5}$
Bliss	$T_{sky} = T_{air} \left(0.8 + \frac{T_{dp} - 273}{250} \right)^{0.25}$
Martin&Berdahl	$T_{sky} = T_{air} \left\{ 0.711 + 0.0056 T_{dp} - 0.000073 T_{dp}^2 + 0.013 \cos(\pi/12) \right\}^{0.25}$

表-2 天空温度の提案式(天候別)

	提案式	相関指数
提案式①	$T_{sky} = 0.0613 T_{air}^{1.48}$ (晴天時)	0.932
	$T_{sky} = 0.283 T_{air}^{1.22}$ (曇天時)	0.885
	$T_{sky} = 0.834 T_{air}^{1.03}$ (雨天時)	0.907
提案式②	$T_{sky} = T_{air} \left(0.737 + \frac{T_{dp} - 273}{185} \right)^{0.25}$ (晴天時)	0.952
	$T_{sky} = T_{air} \left(0.831 + \frac{T_{dp} - 273}{302} \right)^{0.25}$ (曇天時)	0.905
	$T_{sky} = T_{air} \left(0.914 + \frac{T_{dp} - 273}{817} \right)^{0.25}$ (雨天時)	0.909
提案式③	$T_{sky} = T_{air} \left\{ 0.740 + 0.00614 T_{dp} - 0.0000468 T_{dp}^2 - 0.00682 \cos(\pi/12) \right\}^{0.25}$ (晴天時)	0.952
	$T_{sky} = T_{air} \left\{ 0.829 + 0.00620 T_{dp} - 0.000139 T_{dp}^2 + 0.0748 \cos(\pi/12) \right\}^{0.25}$ (曇天時)	0.911
	$T_{sky} = T_{air} \left\{ 0.862 + 0.0128 T_{dp} - 0.000449 T_{dp}^2 + 0.000323 \cos(\pi/12) \right\}^{0.25}$ (雨天時)	0.928

※ 表-1に示した提案式の相関指数

Swinbank：0.931, Bliss：0.900, Martin&Berdahl：0.938

キーワード：コンクリート構造物、輻射熱実験、熱収支、天空温度、アルベド、太陽高度

連絡先：〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂 TEL:0492(96)5731 内線(2734) FAX:0492(96)6501

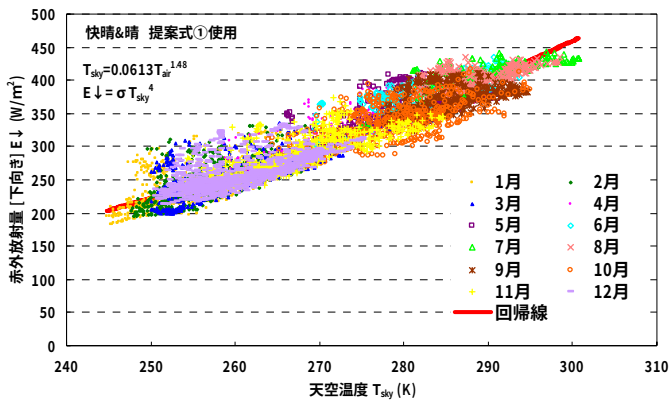


図-1 下向きの赤外放射量と天空温度の関係(提案式①使用)

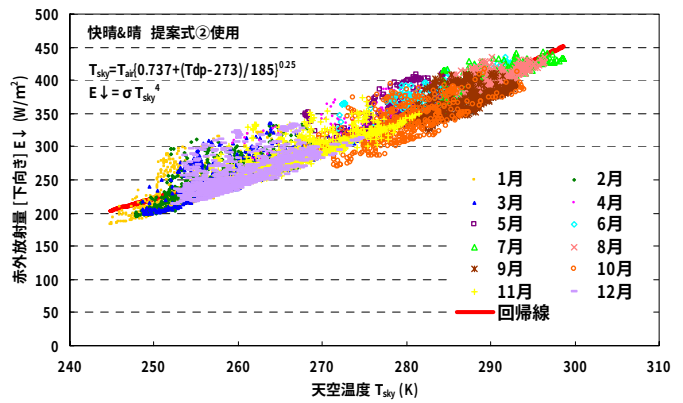


図-2 下向きの赤外放射量と天空温度の関係(提案式②使用)

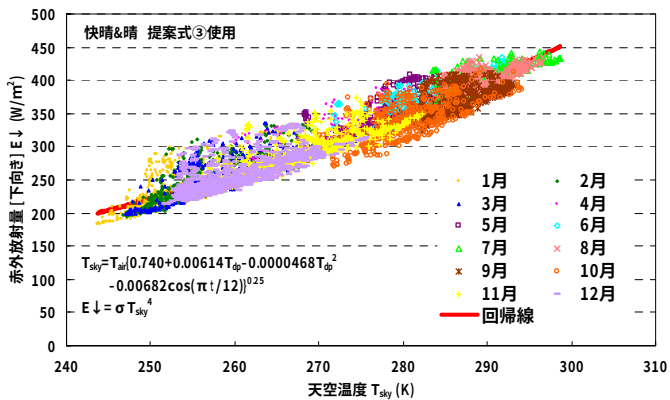


図-3 下向きの赤外放射量と天空温度の関係(提案式③使用)

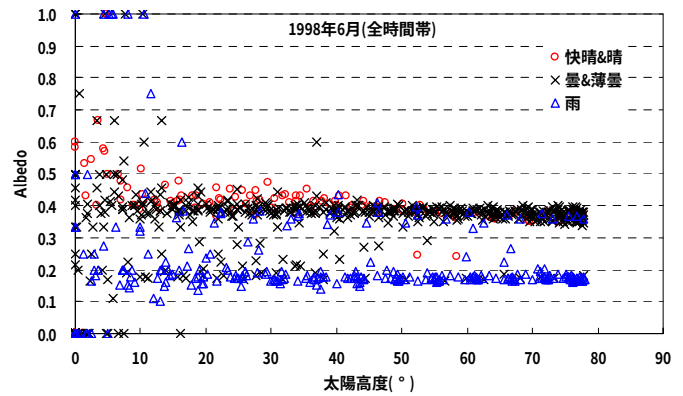


図-4 アルベドと太陽高度の関係(1998年6月)

アルベドメータ、赤外放射計を使用し計測を行なっている。また気象に関する計測は6秒間隔のスキャンを30分平均で出力している。

3.3 解析結果

最小二乗法を用いて算出した結果を表-2に示す。またこれら3式を提案式①, ②, ③とする。これらの式より算出した天空温度と赤外放射量の関係、及び回帰線を図-1~3に示す(全て晴天時)。本研究では、各提案式を評価するのに相関指数を用いている。相関指数は各提案式における回帰式から求めている。相関指数より、本研究で求めた提案式は既存の提案式よりもばらつきが小さいことが確認できた。また気温のみを用いた式と露点温度や時間軸を含んだ式での相関指数はそれほど差がないことが確認できた。

4. アルベドと太陽高度

4.1 太陽高度について

アルベドは全天日射量に対する反射率であり、構造物表面での物性、性状、彩色及び太陽高度によっても異なることが知られている。太陽高度は式(12)より求めることができる。観測点(西松建設(株)南町田実験場)の緯度は北緯35度29分58秒である。視赤緯は太陽時12:00における太陽の緯度である。時角は南中時からの時間を1日360°とした時の角度で表した値である。

$$\varphi = \sin^{-1}(\sin \psi \sin \delta + \cos \psi \cos \alpha \cos \delta) \quad (12)$$

φ : 太陽高度 [rad]

ψ : 観測点の緯度 [rad]

δ : 視赤緯 [rad]

α : 時角 [rad]

4.2 アルベドについて

太陽高度が低い(日の出・日の入り)時では日射の入射角が小さく、表面での反射量を測定しきれていないためばらつきが大きくなってしまふ。6月におけるアルベドと太陽高度の関係を図-4に示す。上部は天候が良い場合、下部は天候が悪い場合にわかれている。また太陽高度が高くなるとアルベドがやや小さくなる傾向がある。

5. まとめ

- 1) 本研究で求めた提案式は既存の提案式よりもばらつきが小さいことが確認できた。
- 2) 天空温度モデルは露点温度を考慮すると改善されるがその影響は比較的小さいと思われる。また時間軸の影響も曇天時、雨天時においてはかなり小さいと思われる。
- 3) 太陽高度が高くなるとアルベドがやや小さくなる傾向がありアルベドは太陽高度の影響を受けることが明らかである。雨天時のアルベドが小さい理由は雨による試験体表面の色の变化ではないかと思われる。

6. 参考文献

- 1) Duffie, J.A and Beckman, W.A: Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition, John Wiley & sons, 1991
- 2) ASHRAE Handbook, HVAC Systems and Applications.