

論文 気象情報と近赤外分光センサーを利用したコンクリートの水分蒸発特性の非破壊測定方法の一検討

高橋 駿人*1・藤田 和哉*2・加藤 佳孝*3・加藤 絵万*4

要旨：実環境下での構造体コンクリート中の蒸発特性の定量的な把握を目的に、気象情報や近赤外分光センサーの活用についての検討を実施した。飽水状態にある供試体を実環境に暴露した実験を行ったところ、高炉スラグで置換した配合の方が、普通ポルトランドセメントを使用した配合よりも蒸発しやすいことが明らかになった。また気象情報から蒸発量を推定できるバルク法を基に算出した蒸発効率の変化と、近赤外分光センサーの吸光度変化の傾向は対応関係があることが明らかになり、近赤外分光センサーの利用は、バルク法を用いた蒸発特性の把握に有効であることが示唆された。

キーワード：乾燥, バルク法, 気象情報, 蒸発効率, 近赤外分光法

1. はじめに

塩害環境下の鉄筋コンクリート構造物の維持管理のためには、塩化物イオンの浸透予測は非常に重要である。既往の研究¹⁾から、大気暴露試験と室内浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数は、異なる傾向にあることが知られている。これは非飽水状態のコンクリートは、濃度拡散のみではなく、乾湿繰返しに伴う液状水の移動が駆動力となり、塩化物イオンが浸透することが原因と考えられる。また、飽水度が低い領域では、移流の影響は大きいことが報告されている²⁾。したがって、塩化物イオンの浸透予測のためには、構造体コンクリート中の乾燥の影響を定量的に把握することは重要である。しかし、構造物が置かれる環境には地域差もあるため、様々な環境条件を考慮して乾燥の程度を定式化するのは困難である。

水門気象学分野で、蒸発量の算定方法として、ライシメータ法³⁾、傾度法⁴⁾、バルク法⁵⁾等が挙げられる。その中でも、バルク法は1地点の気象情報を活用して蒸発量を予測できる手法である。気象情報は、例えば気象庁⁶⁾が、地域毎の過去の気象情報（降水量や日照時間、現地気圧等）を時間単位でオープンデータとして公開しているなど、近年はだれもが利用しやすいようになっている。また地盤分野では、バルク法を用いて気象情報から蒸発量を推定する降雨後の地盤内の水分変動を検討した例もある⁷⁾。以上のような背景から、バルク法を構造体コンクリートの蒸発量の推定に応用することも可能と考えられる。

ただし、バルク法では、物質に固有の蒸発効率というパラメータを求めておく必要がある。文献⁷⁾では、蒸発

効率は体積含水率と関係することが報告されており、含水状態が把握できれば蒸発効率を推定することが可能であると考えられる。ここで、コンクリートの含水状態の把握のために、近赤外分光法センサーの活用が考えられる。菊池ら⁸⁾は、近赤外分光法センサーに基づくセンサーによる水分浸透深さの評価は、現像剤による結果と概ね一致し、また現像剤が明瞭に呈色しない供試体においても、センサーを用いて浸透深さの評価が可能であることを報告している。山川ら⁹⁾は、近赤外線によるセンサーを用いて、散水したモルタル表層の乾燥程度を測定することで、水セメント比の大小による吸水特性の違いを評価している。このように近赤外分光法センサーを用いれば非破壊で簡易に含水状態を推定し、蒸発効率の推定ができると考えられる。

以上より、本研究ではバルク法による実環境下のコンクリートの蒸発量の推定について検討するとともに、近赤外分光センサーの活用による蒸発効率の推定について検討する。

2. バルク法の概要

バルク法では単位面積および単位時間当たりの蒸発量（水蒸気の鉛直輸送量） $E[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$ は式(1)のように表される。

$$E = \rho \cdot g_a \cdot \beta \cdot (q_{\text{sat}} - q_a) \quad (1)$$

ここに、 ρ ：大気密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 g_a ：交換速度 $[\text{m}/\text{s}]$ 、 β ：蒸発効率、 q_{sat} ：飽和比湿 $[\text{kg}/\text{kg}]$ 、 q_a ：比湿 $[\text{kg}/\text{kg}]$ であり、また、 ρ 、 q_{sat} 、 q_a は式(2)～(6)で表される。

$$\rho = 1.293 \left(\frac{P}{1013} \right) \left(\frac{273.15}{273.5 + T_a} \right) \left(1 - 0.378 \frac{e(T_a)}{P} \right) \quad (2)$$

*1 東京理科大学 理工学部 土木工学科 助教 博士（工）（正会員）

*2 東京理科大学 理工学研究科 土木工学専攻（学生会員）

*3 東京理科大学 理工学部 土木工学科 教授 博士（工）（正会員）

*4 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 構造研究グループ長 博士（工）（正会員）

$$q_{sat} = 0.622e_{sat}(T_s)/(P - 0.378e_{sat}(T_s)) \quad (3)$$

$$q_a = 0.622e_{sat}(T_a)/(P - 0.378e_{sat}(T_a)) \quad (4)$$

$$e_{sat}(T) = 6.108 \times 10^{\left(\frac{7.5T}{237.5+T}\right)} \quad (5)$$

$$e(T) = \frac{RH}{100} e_{sat}(T) \quad (6)$$

ここに、 P ：大気圧[hPa]、 T_s ：表面温度[°C]、 T_a ：気温[°C]、 $e_{sat}(T)$ ： T [°C]のときの飽和水蒸気圧[hPa]、 $e(T)$ ： T [°C]のときの水蒸気圧[hPa]、 RH ：相対湿度[%]

のように、バルク法では、用いられるパラメータのほとんどは、1 地点の気象観測情報と表面温度から得ることができる。しかし、交換速度 g_a と蒸発効率 β は事前に検討する必要がある。そこで本検討では、 g_a は近藤¹⁰⁾の裸地面の式(式(7))から求められると仮定し、 β を実験から検討することとした。

$$g_a = 0.0027 + 0.0031U_{1m} \quad (7)$$

ここに、 U_{1m} ：高度 1m の風速[m/s]

3. 蒸発効率 β の算出に関する実験

3.1 供試体概要

使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント(C、密度：3.15g/cm³)、混和材は高炉スラグ微粉末(BS、密度：2.92g/cm³、比表面積：4370cm²/g)を使用した。細骨材は富士川産川砂(S、表乾密度：2.62g/cm³、F.M.:2.89)、粗骨材は秩父産コンクリート用砕石(G、表乾密度：2.73g/cm³、F.M.:6.58)を使用した。練混ぜ水は上水道(W)を使用し、化学混和剤は、アルキルエーテル系の AE 剤とリグニンスルホン酸化合物—ポリオール複合体の AE 減水剤を使用した。作製したコンクリートの配合を表-1 に示す。W/B=50%とし、混和材の有無の影響を比較した。練混ぜ後、100×100×400mm の型枠に打設後、脱型は 24 時間以内に行い、20°C の恒温水槽に約 2 年間水中養生した。供試体を長手方向に 100mm 厚さに切断し、切断面 1 面を除く全ての面にエポキシ樹脂を塗布し、さらに太陽光からの熱吸収を避けるため白色ペンキを塗布した。開放面から 10mm、20mm 高さの任意位置に、深さ 50mm、直径 5mm の温湿度測定センサー挿入用の孔を設けた。供試体の概要図を図-1 に示す。

3.2 測定項目

作製した供試体を蒸留水で飽水させた状態から、日照時間のうち約 5 時間程度、開放面を上面にして後述する気象計の設置地点付近で暴露した。暴露は 2021 年 8 月

26 日、9 月 30 日、11 月 8 日に実施し、暴露中に次の項目を測定した。

(1) 気象情報

気象情報の取得には、超高密度気象観測・情報提供サービス「POTEKA」を利用した。設置した気象計からは気温、気圧、相対湿度、風向、風速、日射量、感雨、雨量の 8 要素を常時実測、収集することができる。本実験では、気象計を周囲の建物等の影響を受けない場所に設置して測定を行った。

(2) 内部温湿度測定

3.1 で説明した供試体の孔に、±1.5%の精度で低温、結露環境下でも測定可能な静電容量式センサーを挿入した。センサーを挿入後、孔をシリコンで被覆した。湿度センサーはデータロガーと接続して、センサー埋込み位置の温湿度を測定した。なお、9 月 30 日と 11 月 8 日に関しては、データロガーの不調により、データの取得はできなかった。

(3) 質量測定

暴露開始から 1 時間後までは約 5 分間隔で、その後は約 30 分間隔で、質量を 0.1g 単位で測定した。

(4) 近赤外分光法

近赤外線とは、赤外線領域内で 780nm から 3μm の領域の光である。近赤外線はほとんどの物質に対して吸収されず物体を透過するが、水は 1450nm、1940nm 付近の波長で大きな吸収を持つため、蒸発の特性を把握できると考えられる。本研究では、センサーと光源が一体化している Spectral Engines 社製の NIRONE S2.2 タイプ(波長範囲：1750~2150nm)を用いて、供試体の開放面のモルタル部分に設置して、反射光の強さを測定し、吸光度を算出した。吸光度の算出は、1940nm でのリファレンスの白色板の反射光の強さ I_0 と試料の反射光の強さ I を測定

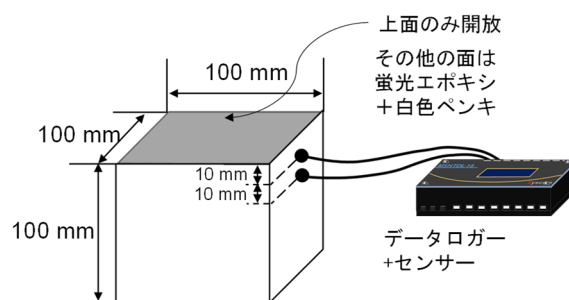


図-1 供試体の概要図

表-1 コンクリートの配合表

配合名	Gmax [mm]	W/B (%)	s/a (%)	単位量[kg/m ³]					AE [B×%]	AE 減 [B×%]	SL [cm]	Air [%]	f'c (28d) [N/mm ²]
				W	C	BS	S	G					
N	20	50	45	165	330	0	817	1033	0.005	0.28	13.0	5.5	34.7
B50					165	165	812	1026	0.01	0.20		5.0	31.0

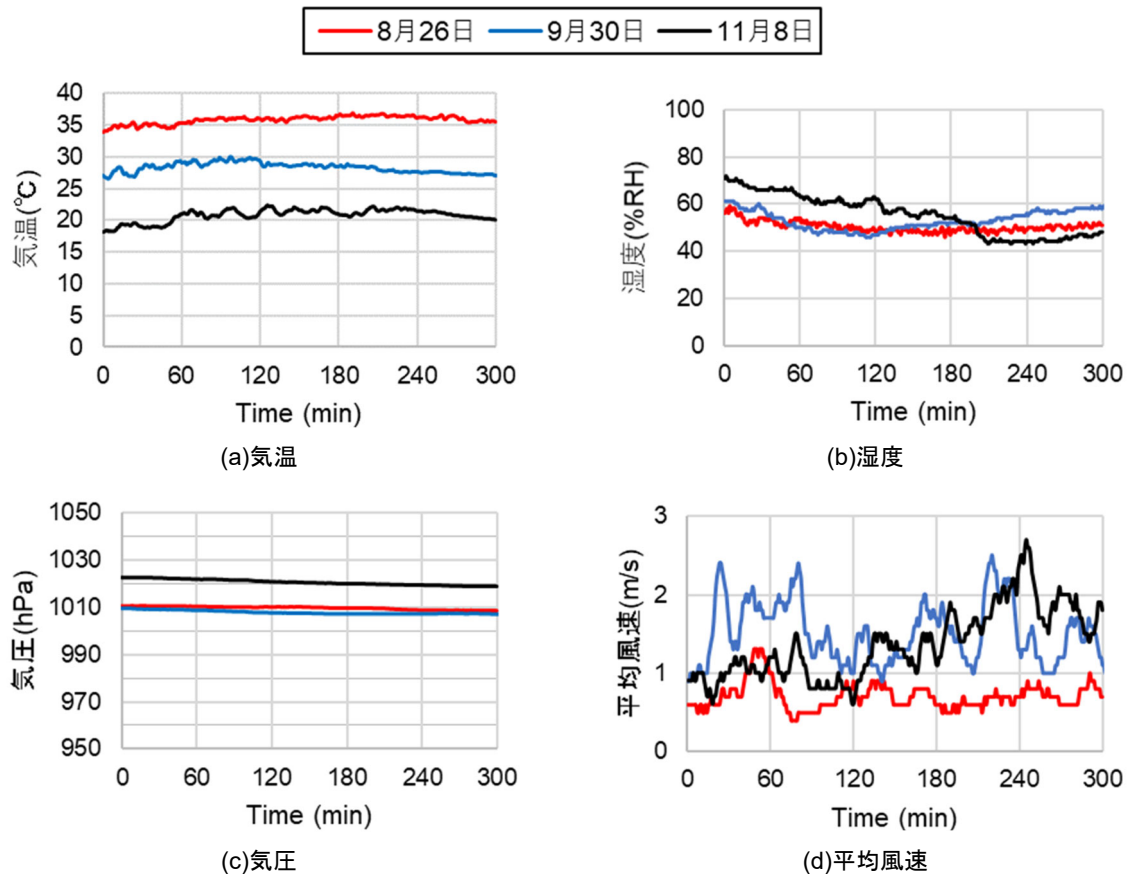


図-2 測定日の気象情報

し、式(8)で吸光度 A を算出した。

$$A = -\log(I/I_0) \quad (8)$$

3.3 実験結果

(1) 気象情報

図-2に、各測定日の暴露中の気温、相対湿度、気圧、平均風速について示す。これによると、気温については暴露中はほぼ安定しており、測定日毎に異なることがわかる。湿度については、暴露期間中に少し変動は見られるが、概ね40~70%RHの範囲に収まっていることがわかる。気圧については、概ね1010~1020hPa程度の範囲に収まっており、暴露期間中で大きな変動は見られない。平均風速については、概ね0.5~3.0m/sの範囲に収まっている。

(2) 内部温湿度測定

図-3に、8月26日の暴露中の気温と内部温度の比較を示す。これによると、供試体内部の温度は気温よりも15°C程度高くなり、10mmと20mm高さで温度はほとんど変わらないことがわかる。また、配合による差はほとんどないことが見て取れる。

図-4に、8月26日の暴露中の内部湿度の変化を示す。これによると、10mm高さでは両配合共に内部湿度は暴露中に100%から低下している傾向が見て取れる。しかし、20mm高さでは、B50は120min経過後に湿度が低下しているのに対して、Nはほとんど低下していない。

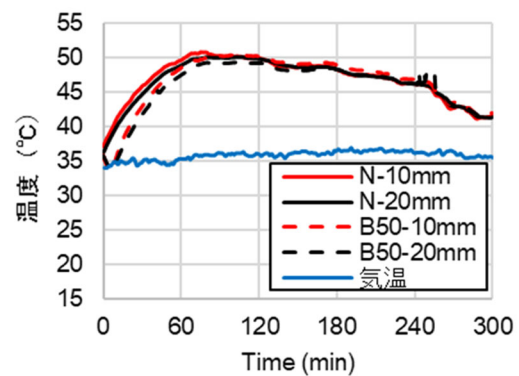


図-3 気温および供試体内部温度（8月26日）

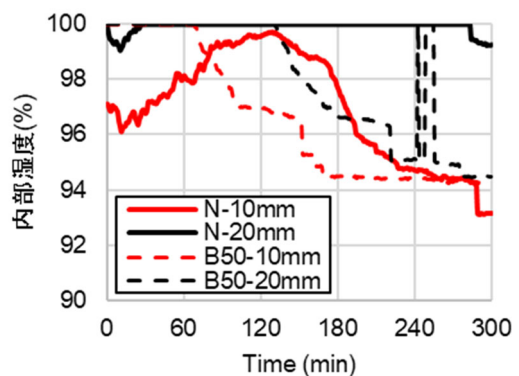


図-4 供試体内部湿度（8月26日）

(3) 質量測定

図-5 に、各測定日の暴露中の質量減少量を示す。これによると、質量減少量は暴露開始後 30min までが特に大きく、その後は緩やかに増加していることが見て取れる。配合について着目すると、各測定日で B50 の方が N よりも質量減少量は大きいことがわかる。以上より、B50 の方が N よりも先に 20mm 高さの内部湿度が低下したことも説明できる。また各測定日について着目すると、8 月 26 日、9 月 30 日では大きな差は見られず、11 月 8 日の質量減少量は小さいことがわかる。これは気象条件の違いや、風速の違いによる交換速度が影響したと考えられるが、この点については後ほど考察する。

(4) 近赤外分光法測定

近赤外分光法の測定ではバラつきがあることが知られている¹¹⁾。そのため、まず測定箇所の違いに関する検討を行った。図-6 に、11 月 8 日に測定した吸光度の、測定箇所の違いによる影響を示す。これによると、値としては ± 0.1 程度の違いはあるが、吸光度の減少および停滞の傾向は一致している。バラつき程度に関しては秋山ら¹²⁾の報告とも一致しており、一定の範囲の吸光度の平均値で評価することが有効であると考えられる。そのため次のデータでは、3 箇所の測定値の平均値で吸光度変化を表している。図-7 に、近赤外分光法による吸光度変化のグラフを示す。これによると、30min 経過までは急激な吸光度の減少が見られ、その後は概ね一定値に収束している傾向が見られる。これは乾燥開始後の急激な蒸発による吸光度の減少と対応していると考えられる。9 月 30 日、11 月 8 日に測定した結果は約 0.35 程度で収束している一方で、8 月 26 日に測定した結果は 0.6 前後と高い値となっている。これは、秋山ら¹²⁾の報告にあるように、環境温度の影響を受けて装置の内部温度が上昇し、反射光強度が低下したためと考えられる。しかし、吸光度の変化の傾向は、水分の蒸発による質量減少量と、対応関係はあると考えられる。

3.4 蒸発効率 β の算定

式(1)の左辺は、単位面積当たりのコンクリートからの水分蒸発量を表す。したがって供試体の質量減少量の時間変化の測定結果と、供試体の蒸発面の温度や湿度のデータがあれば蒸発効率を逆算できる。そこで今回は供試体の 10mm 高さの温度と湿度を蒸発面のデータとして用いて、式(1)を蒸発効率 β について解き、その他の値を代入して、蒸発効率 β の時間変化を算出した。8 月 26 日の場合の蒸発効率の算出結果を図-8 に示す。これによると、蒸発効率は開始 30min までで急激に減少しており、その後はほぼ 0 に近い値に収束している。また B50 の方が蒸発効率は高く、質量減少量の傾向と一致している。このように飽水状態から乾燥させた初期は蒸発効率が高い

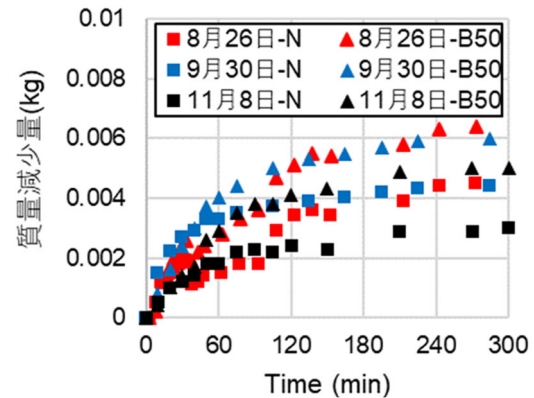


図-5 質量減少量

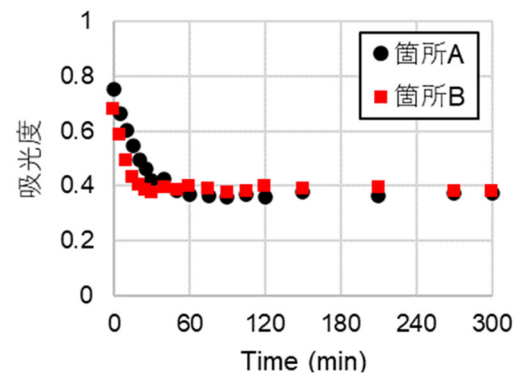


図-6 測定箇所の違いが吸光度に与える影響

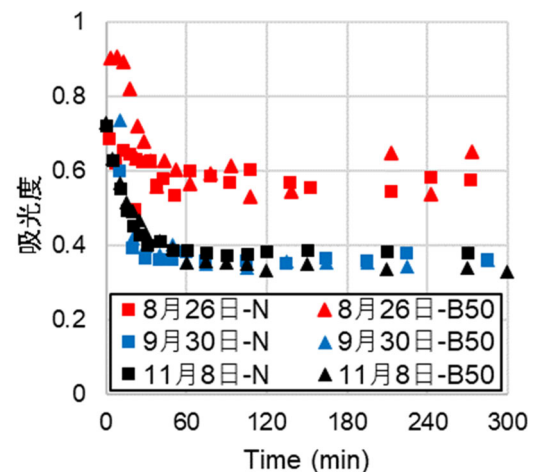


図-7 各測定日の吸光度変化

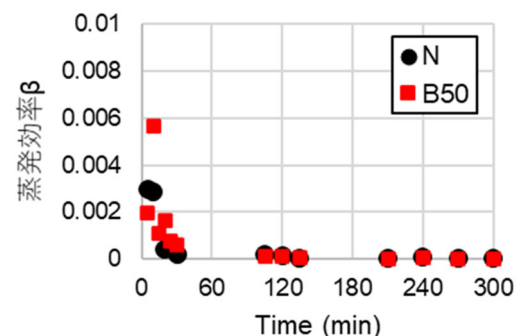


図-8 算定した蒸発効率 β (8 月 26 日)

いことがわかる。以上から、乾燥初期の蒸発効率を正しく把握することで、蒸発量を予測できると考えられる。しかし、取得する気象情報および供試体データの影響度は明らかではないため、次節ではパラメータスタディを行う。

3.5 蒸発効率 β の算定に及ぼす各パラメータの影響

図-8のN配合のデータを基準に、その他のパラメータを固定して、各パラメータが定値で変化した場合の蒸発効率 β に関して検討する。図-9(a)~(e)に各パラメータの影響をまとめる。

(a) 気温

気温が $\pm 5^\circ\text{C}$ 変化した場合、温度の上昇によって蒸発効率は約2倍程度上がる一方で、温度が低下しても、蒸発効率は若干低下する程度であることがわかる。

(b) 内部温度

内部温度が $\pm 5^\circ\text{C}$ 変化した場合、内部温度の上昇によって蒸発効率は若干低下する程度であるが、内部温度が低下すると蒸発効率は暴露開始後5分では2倍以上、10分後も約2倍程度になることがわかる。

(c) 湿度

湿度が $\pm 20\%\text{RH}$ 変化した場合、湿度の上昇により蒸発効率は約2~3倍程度上昇している傾向があり、湿度が低下しても、蒸発効率は若干低下する傾向にある。

(d) 気圧

気圧が $\pm 15\text{hPa}$ 変化した場合でも蒸発効率の算出には影響を大きく与えないことがわかる。

(e) 平均風速

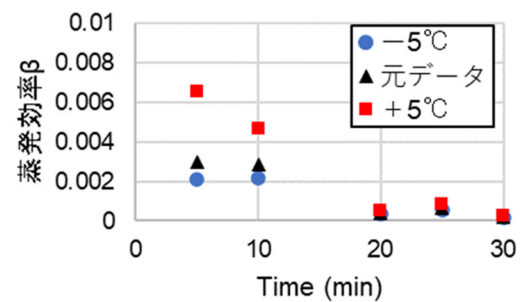
平均風速が $+2\text{m/s}$ 変化した場合、蒸発効率は約半分に低下しているが、 $+2\text{m/s}$ と $+5\text{m/s}$ の場合で比較すると、あまり大きな差は見られないことがわかる。

以上のように、気圧を除く各パラメータは蒸発効率に影響を及ぼすことがわかり、特に気温の上昇、内部温度の低下、湿度の上昇が蒸発効率の上昇に大きく影響を及ぼす。したがって、実際の予測の際には、これらのパラメータの正確な取得は重要であることがわかる。

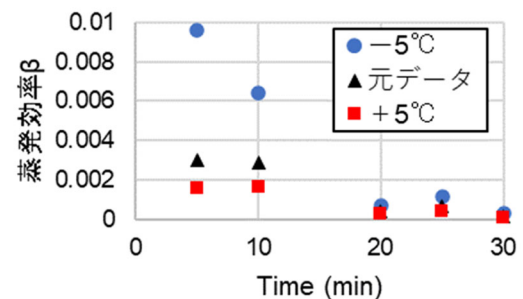
4. 吸光度と蒸発効率 β の関係

前章の検討から、気象情報や蒸発面温度を取得した上で、蒸発効率を推定することができれば、コンクリート構造物の蒸発量も推定できると考えられる。そこで近赤外分光法の吸光度変化に着目して、蒸発効率 β との関係について考察する。

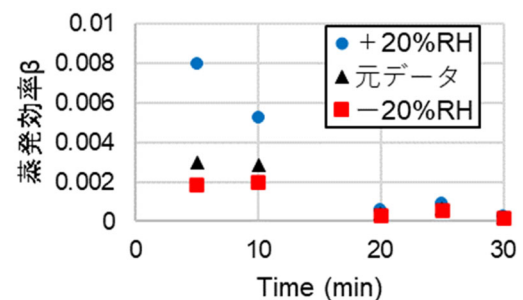
図-10に8月26日に測定した吸光度および算出した蒸発効率の関係を示す。なお、吸光度の測定が蒸発効率の算出と同時刻にできていない場合があったが、その場合は目的時刻の隣接時刻間の吸光度で線形内挿し、目的時刻の吸光度として扱った。図-10によると、吸光度が



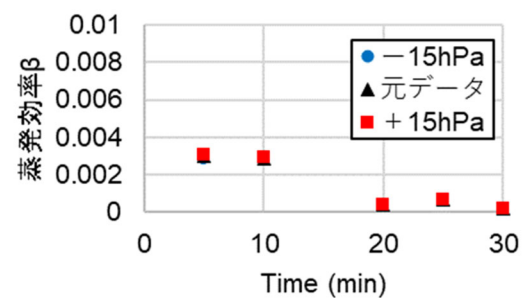
(a) 気温



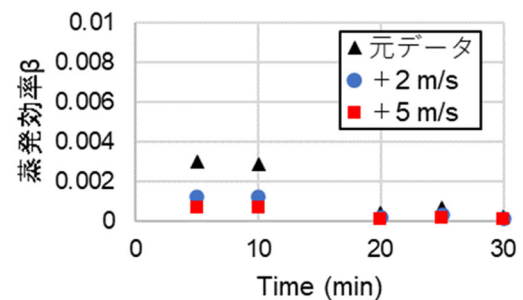
(b) 内部温度



(c) 湿度



(d) 気圧



(e) 平均風速

図-9 各パラメータが蒸発効率の算定に与える影響

0.6 以下では蒸発効率は概ね 0 であるが、0.6 を超えると蒸発効率は大きく上昇することがわかる。また B50 の配合の方が N の配合よりも吸光度および蒸発効率は大きくなっており、質量減少量の結果と対応している。このように近赤外分光センサーで吸光度を測定することで、蒸発効率を推定できる可能性が示唆された。

今後は、既往の研究¹³⁾にあるように、近赤外分光法のスペクトル処理用の多変量解析(例えば、PLS 回帰分析)等を用いて、定量的な評価手法を検討すると共に、降雨などの変動を受けた場合の予測の可能性を検討していくことが必要であると考えられる。また交換速度についても、今回は文献 10)の裸地面の式を参考にしたが、文献 4)で提案されているような室内実験により、コンクリートとしての特性値を求めることが必要であると考えられる。

5. まとめ

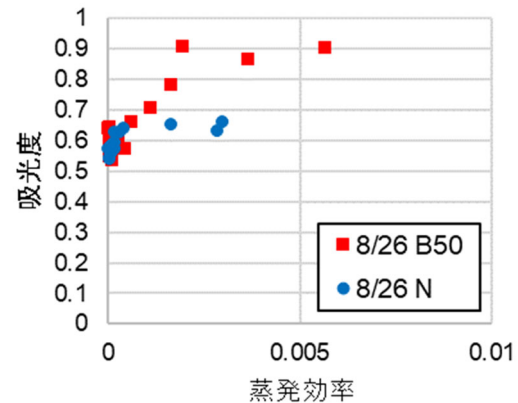
本研究で得られた知見を次にまとめる。

- 1) 高炉スラグで置換した配合の方が、普通ポルトランドセメントの配合よりも乾燥により蒸発がしやすい。
- 2) 実験結果から算定した蒸発効率 β のパラメータスタディから、蒸発効率の把握と共に、気象情報や表面温度が取得できれば、バルク法で蒸発量を推定可能である。
- 3) 近赤外分光センサーによる吸光度測定は、蒸発効率を推定できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号 19H02218）の助成を受けて実施した。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー155 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針（案），2019.
- 2) 加藤佳孝，池田伊輝，大野浩嗣，江口康平：干満部を想定したモルタルへの塩化物イオンの浸透性状の実験的検討，セメントコンクリート論文集，Vol.71，pp.146-153，2017.
- 3) 東博紀，岡太郎：ウェイングラシメータにおけるトウモロコシの蒸発散—植物の成長と水文素過程に関する基礎研究—，土木学会論文集，No.768，II-68，pp.13-22，2004.
- 4) Monji et al.: CO₂ and Water Vapor Flux Evaluations by Modified Gradient Methods over a Mangrove Forest, Journal of Agricultural Meteorology, Vol.58, No.2, pp.63-



図ー10 蒸発効率と吸光度の関係

- 69, 2002.
- 5) Kondo, J., Saigusa, N., and Sato: A parameterization of evaporation from bares soil surfaces, Journal of Applied Meteorology, Vol.29, pp.385-389, 1990.
- 6) 気象庁，過去の気象データ・ダウンロード：
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>（閲覧日：2022 年 1 月 7 日）
- 7) 里見知昭，酒匂一成，吉留花江，深川良一：最表層土の水分変動を考慮したバルク法による蒸発量推定手法の改良，応用力学論文集，Vol.13，pp.525-534，2010.
- 8) 菊池晃平，酒井雄也：近赤外分光法センサーによるモルタルの水分浸透深さの評価に関する基礎的検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第 21 巻，pp.143-148，2021
- 9) 山川和樹，上田隆雄，郡政人，七澤章：近赤外分光法によるモルタル表層物性の評価に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，pp.1801-1806，2013.
- 10) 近藤純正：地表面に近い大気科学 理解と応用，東京大学出版会，p.143，2000.
- 11) 角田直人，近藤克哉，有本英伸，山田幸生：水の近赤外吸収特性を利用した非接触温度イメージング，システム/制御/情報，Vol.57, No.12, pp.493-498, 2013.
- 12) 秋山大地，城所健，佐藤大輔：近赤外分光法による水分量測定に関する基礎的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1025-1026，2021.
- 13) 松野玄：近赤外分光分析法のプロセスモニタリングへの応用(2)—検量線の作成とアプリケーション例，THE CHEMICAL TIMES，No.200，pp.10-14，2005.