報告　コンクリート中の含水率および湿度の測定値と乾燥収縮率の関係

片平　博*1・古賀裕久*2・渡辺博志*3

要旨：コンクリート中の水分状態は，コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす。コンクリート中の水分状態を表現する指標としては主に「含水率」と「相対湿度」という指標があげられる。本研究では，含水率を測定するセラミックセンサや湿度計をコンクリートブロック中に配置して，暴露環境における長期測定を行った。また，JIS A 1129 に準拠したコンクリートの長さ変化試験を実施し，乾燥収縮率と質量変化率を測定した。これらの測定結果から，乾燥収縮は含水率の変化に概ね対応して生じること，乾燥収縮率がある程度進行した状態でないと湿度の低下が認められないこと，を確認した。

キーワード：暴露試験，含水率，湿度，乾燥収縮

1. はじめに

コンクリート中の水分状態は，コンクリートの乾燥収縮に深く関与している。このため，コンクリートに発生する乾燥収縮ひずみ分布をできるだけ厳密に推定するためには，コンクリート中の水分移動との連成解析によるアプローチが試みられている。例えば，３次元有限要素法を用いて構造物の乾燥収縮挙動をシミュレーションする手法も提案されている。この解析手法においては、コンクリート中の水分状態を湿度等のパラメータで表現して，この湿度変化をシミュレーションして，その値から乾燥収縮率を求める手法が検討されている[1)]。

一方で，コンクリート中の水分量をどういった指標で表現し，測定するかについては，定まった方法が確立していないと思われる。例えば，コンクリート中の水分量を表す指標としては含水率や湿度が挙げられ，測定方法としては，コンクリート中にセンサを埋め込んでコンクリート中の含水率を推定する方法や，コンクリート中に小さな空間を設け，その中に湿度計を埋め込んで相対湿度（以下，湿度と略す）を測定する方法が行われている。測定データの相互比較や解析結果の解釈を確実なものにするためには，コンクリート中の水分の指標について，統一した見解を持つことが望ましい。

そこで，当研究所でこれまでに実施した２とおりのコンクリートブロックの暴露試験のデータをもとに，コンクリート中の含水率と湿度との関係を整理した。２とおりの暴露実験のうち，実験Ａではコンクリート中の含水率を，実験Ｂでは湿度を測定した[2)]。暴露年度は異なるものの，各暴露期間の気象条件が類似していることを確認したうえで，含水率と湿度との関係を整理した。

また，類似のコンクリート配合によって JIS A 1129 に準拠したコンクリートの長さ変化試験を実施し，乾燥収縮率と質量変化率を測定した。

これらの測定結果から，含水率および湿度の測定値と乾燥収縮率との関連性について検討した。この結果，乾燥収縮に関わるコンクリート中の水分量の指標としては湿度よりも含水率のほうが適していることを確認した。

2. 実験方法

2.1 暴露ブロックによる実験Ａ

(1) 暴露ブロックの作製

表－１に示す配合によって，**図－１**に示すような 300×300×500mm のコンクリートブロックを作製した。

まず，木製型枠を作製し，暴露するコンクリート表面からの深さが，１，３，５，10，20cm となる位置にセラミックセンサ[3)]を３個ずつ配置した。

暴露ブロックは木製型枠内にコンクリートを打ち込むことで作製し，暴露面は，コンクリートの打設時に型枠側面であった面とした。暴露面以外の木製型枠は取り外さず，打ち込み時の上面は塗装を行って簡易防水した後に木製型枠で覆った。

暴露ブロック作製後，約５ヶ月間，水中養生を行った。

(2) 含水率の測定方法

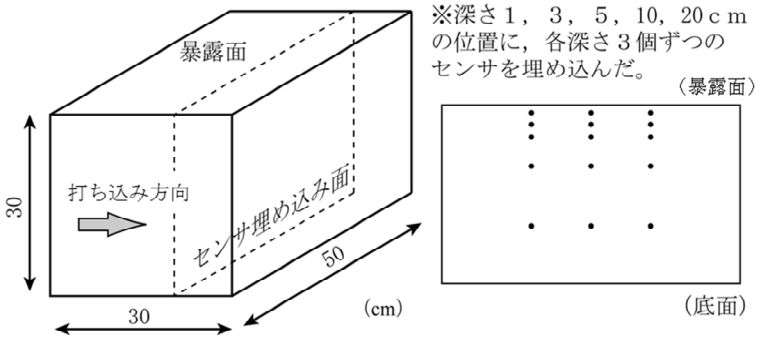
湯浅らが開発した含水率測定方法で，コンクリート中に埋め込んだセラミックセンサ（**図－２**）の電気抵抗が

表－１　コンクリート配合表（実験Ａ）

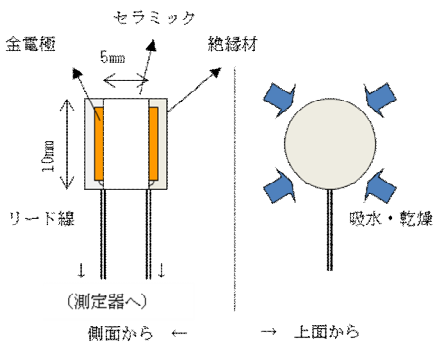
W/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
50	4.5	160	320	784	1,023

使用材料 水：水道水
セメント：普通ポルトランドセメント
細骨材：川砂（密度2.56g/cm^3,吸水率1.58%）
粗骨材：硬質砂岩（密度2.65g/cm^3,吸水率0.5%）
混和剤：AE減水剤（リグニンスルホン酸）,AE剤

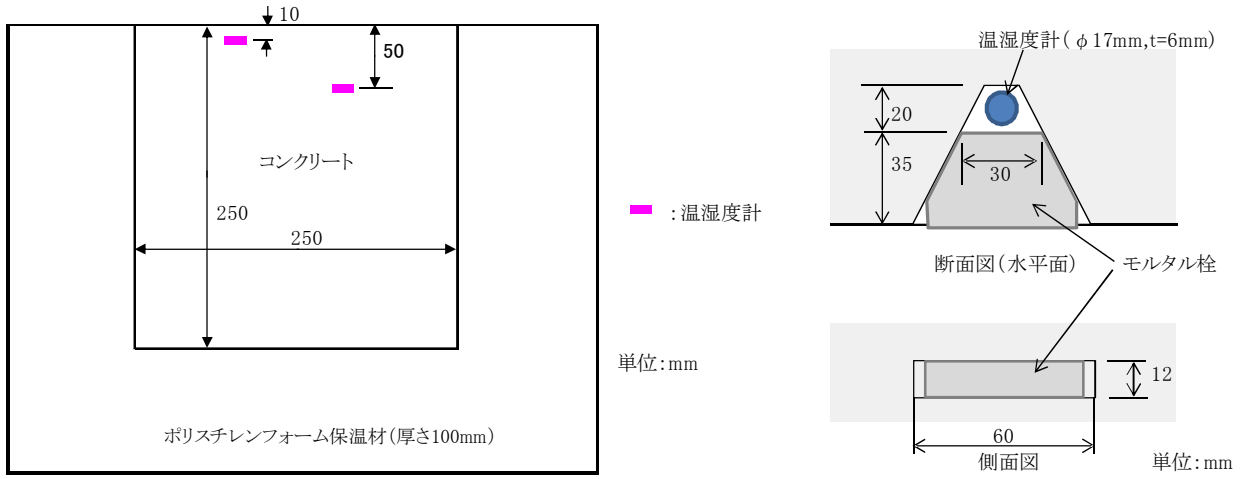
*1　国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター　材料資源研究グループ　主任研究員（正会員）
*2　国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター　材料資源研究グループ　上席研究員（正会員）
*2　国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター　材料資源研究グループ　グループ長（正会員）



図－１　暴露ブロック（実験A）



図－２　セラミックセンサ



（1）ブロック全体図　　（2）温湿度計埋設箇所詳細

図－３　暴露ブロック（実験B）

コンクリートの含水率の変化に追随して変化することを利用したものである[3)]。なお，ここでは，含水率はコンクリート中の水分質量を，そのコンクリートの絶乾質量で除した値とした。

事前にセンサの電気抵抗と測定対象のコンクリートの含水率との関係を把握する必要がある。このため，**表－１**のコンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタル配合による予備試験を行った。

40mm立方のモルタル試験体内にセラミックセンサを埋め込んだ試験体(a)と埋め込まない試験体(b)を作製し，十分に吸水させた後，除々に乾燥させ，その間の電気抵抗の変化を試験体(a)より，質量の変化を試験体(b)より測定した。また，試験体(b)は105℃の乾燥炉内で乾燥させ，絶乾質量を測定した。これらの測定値から含水率と電気抵抗値との関係を把握したものである。

なお，暴露試験中の測定においては，電気抵抗は温度によっても変化する。このため，コンクリートブロックの深さ150mmの位置における温度を測定し，文献[3)]で提案されている補正式を用いることで20℃の場合の測定値となるよう補正した。

(3)　暴露試験

暴露ブロックは茨城県つくば市の土木研究所の屋外に暴露した。暴露箇所の日射の状況は，朝夕は周囲の建物や樹木によって日陰となる時間帯もあったが，日中の大部分は日の当たる状態であった。暴露期間は第１期が2000年６月～12月，第２期が2001年７月～2002年９月であった。暴露ブロックの暴露面の方向は，第１期では上面となるように配置し，第２期ではブロックを横倒しして，北面となるように配置した。

暴露期間中のセラミックセンサによる測定は１日１回，16:00ごろに実施した。

2.2 暴露ブロックによる実験Ｂ

(1)　暴露ブロックの作製

コンクリートの配合を**表－２**に示す。**表－１**に近い配合としたが，細骨材の品質が変わったことから単位水量

表－２　コンクリート配合表（実験B）

W/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
50	4.5	172	344	779	988
使用材料	セメント：早強ポルトランドセメント 細骨材：川砂（密度2.56g/cm^3,吸水率2.23％） その他の材料は**表－１**と同じ				

写真－１　温湿度計の埋設状況

がやや多くなった。また，養生期間を短縮する目的から早強ポルトランドセメントを使用した。

コンクリートブロックは**図－３**に示すような 250mm 立方体として，木材で型枠を作製した後，深さ１cm と５cm の位置に温湿度計を埋設するためのくさび状の窪みを作製した。

コンクリート打ち込みの翌日に脱枠し，７日間の水中養生を実施，その後，気乾状態で７日養生し，くさび状の窪みに温湿度計を挿入し，コンクリートから粗骨材を除いた配合で作製したモルタルで栓をした（**写真－１**）。このとき，溝と栓の間に隙間が生じないように粘土を挟み込み，さらに表面をシリコンシーラントで覆うことで，隙間を完全に密閉した。その後，コンクリートブロックは，暴露面（**図－３**の上面）を残して５面をシリコンシーラントで完全に覆うことで防水し，更に周囲を厚さ 100mm の発泡材（ポリスチレンフォーム）で覆うことで断熱した。このブロックは３体作製した。

(2) 湿度の測定方法

市販の温湿度計（**写真－１**）を使用した。この温湿度計は直径 17mm 高さ 6mm のボタン電池型で，内部に電子式高分子湿度センサが内蔵されている。また，内部に IC 回路を有し，定めた時間間隔で自動計測できる。温度の測定範囲は-20～70℃，測定精度は±1.0℃以内，相対湿度の測定範囲は 0～95%RH，測定精度は±５%以内である。

今回の実験では，この温湿度計を，**図－３**，**写真－１**に示すようにコンクリートブロック中のくさび状の窪みに挿入し，入口をモルタル片で塞いだ。すなわち，コンクリート中に空間を設け，この空間の空気中の湿度を測定していることになる。この測定値を本論文中では「コンクリート空間中の湿度」という。

表－３　コンクリート配合表（長さ変化試験）

W/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m^3)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
55	4.5	165	300	822	1,001
使用材料　表－1と同じ					

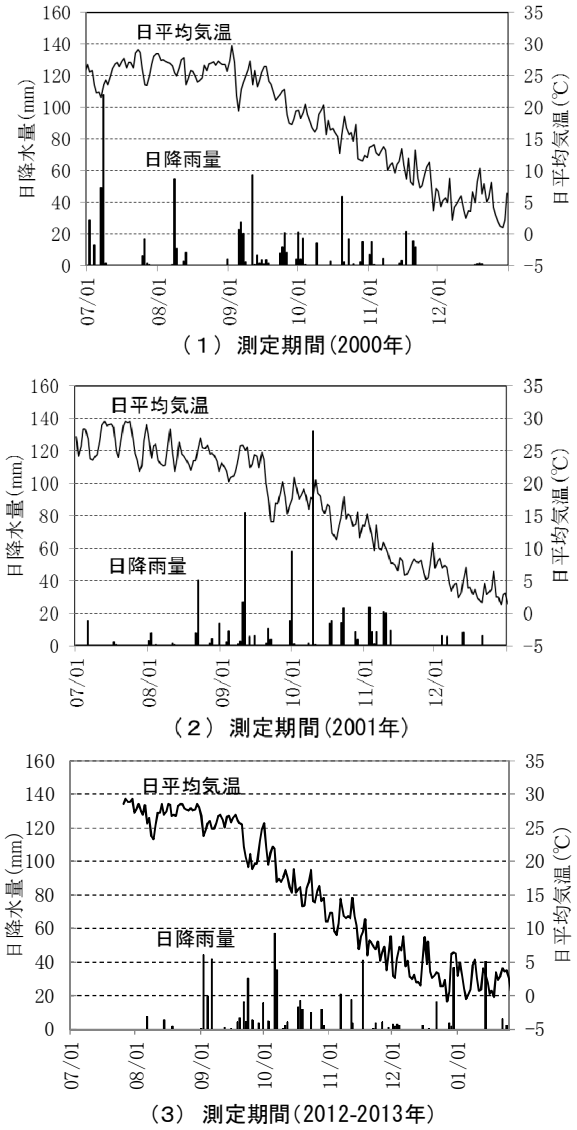
(3) 暴露試験

暴露ブロックを茨城県つくば市の土木研究所のＲＣ構造建屋の屋上に暴露した。朝から夕刻まで日照が良く当たる場所である。暴露ブロックは３体あり，暴露面をそれぞれ上面，北面，南面として暴露した（本検討ではこのうち，上面と北面の結果を実験Ａと比較する）。

暴露測定期間は 2012 年７月から 2013 年９月までとした。コンクリート空間中の温湿度計の測定間隔は，暴露開始から約３ヶ月間は６時間間隔とし，その後は２時間間隔とした。

2.3 長さ変化試験

表－３に示すコンクリート配合に対して，JIS A 1129 に準拠したコンクリートの長さ変化試験を実施した。**表－１**，**２**の配合に比較して W/C が５%大きいが，類似した配合であり，配合の違いが長さ変化試験結果に与える



（１）測定期間(2000年)

（２）測定期間(2001年)

（３）測定期間(2012-2013年)

図－４　日降水量と日平均気温

影響は小さいと考えた。供試体の寸法は 100×100×400mm の角柱とした。7 日間の水中養生後の長さを基長として，20℃，60%RH の環境下でダイヤルゲージ法によって長さ変化を約 5 ヶ月間測定した。なお，質量の変化も測定した。

3．実験結果

3.1 暴露期間中の気象データ

気象庁のデータより暴露期間中の日平均気温と日降水量を整理した。

今回の暴露試験の期間は 3 つの期間に分かれており，それぞれの暴露時期における暴露開始から 6 ヶ月間の気象データを**図－4 (1)～(3)** に示す。

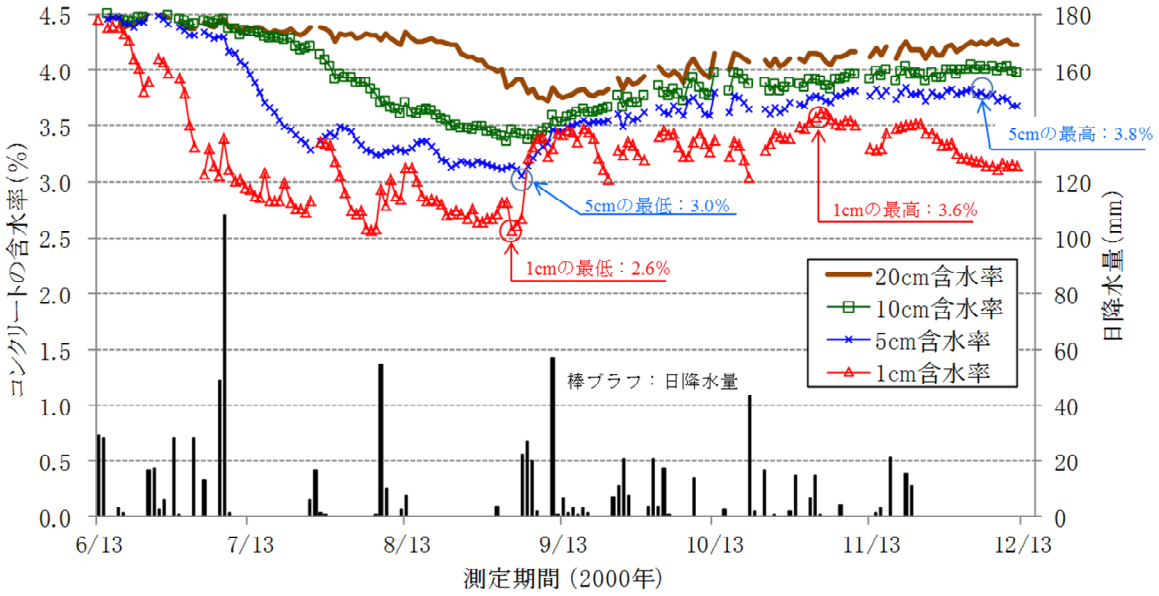
暴露時期が 3 つの期間に分かれてはいるものの，気象条件には以下のような共通の特徴があった。

- 7～8 月は日平均気温が 25℃程度と高温で，降水が無い期間が比較的長く認められる。
- 9 月～11 月に日値平均気温は低下していき，頻繁に降水が認められる。
- 12 月以降は日平均気温が 5℃程度と低く，降水日は少ない。

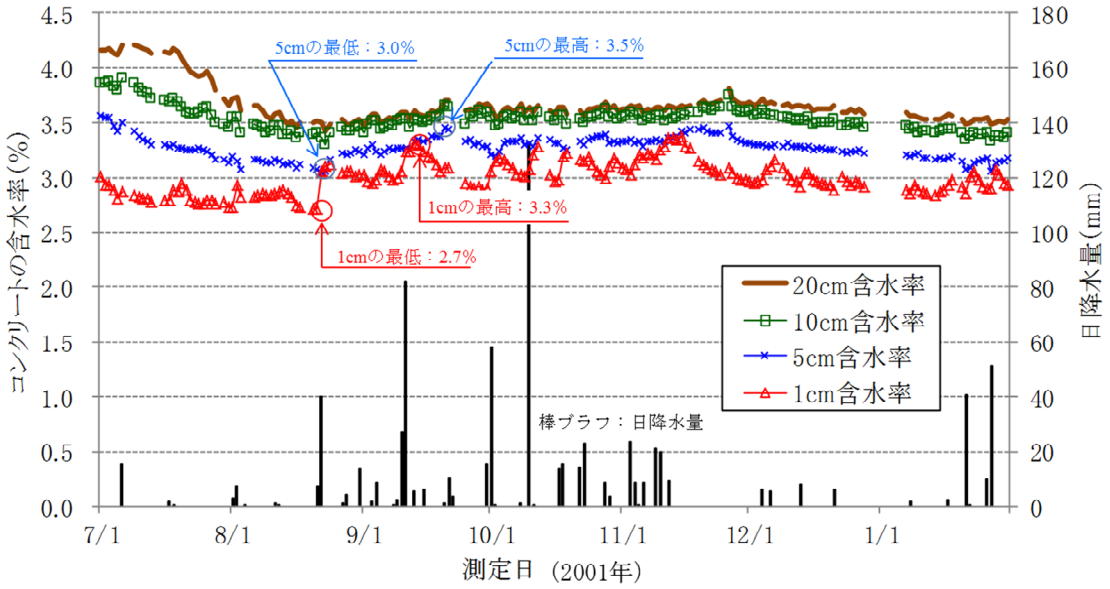
そこで，**図－4** に示した各 6 ヶ月間を対象に，含水率とコンクリート空間中の湿度の測定データを比較することで，その関係を調べることとした。

3.2 暴露ブロックによる含水率の測定結果（実験Ａ）

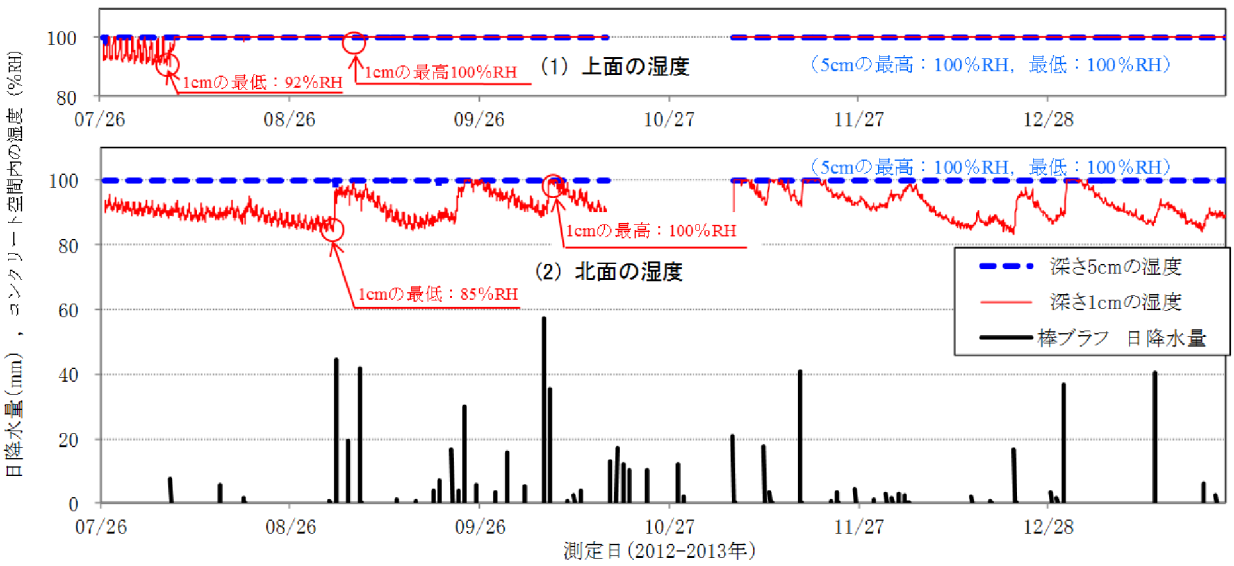
上面を暴露面とした場合の深さ 1， 5， 10， 20cm の含



図－5 コンクリート中の含水率の測定結果（実験A、暴露面上向き）



図－6 コンクリート中の含水率の測定結果（実験A、暴露面北向き）



図－７　コンクリート空間中の湿度の測定結果

水率の測定結果（３センサの平均値）を**図－５**に示す。なお，降水量の棒グラフも合わせて示す。水中養生の状態から暴露を開始したため，初期の含水率は深さに関係無く4.5%と高く，日数を経るにつれて，含水率が除々に低下する傾向が認められた。

深さ１cm での含水率は８月に 2.6%程度まで低下しているが，９月のまとまった降水によって 3.5%まで上昇し，その後は 3.0～3.6%の範囲で推移している。深さ５cm での含水率は除々に低下し，９月の上旬に 3.0%程度となるが，降雨の影響でその後は除々に増加して，最大は 3.8%となった。深さ 10cm，20mm と深くなるほど，含水率の変化は緩慢なものとなり，含水率は深い位置ほど高くなる傾向を示した。

北面を暴露面とした場合の含水率の測定結果を**図－６**に示す。深さ１cm の含水率は降水の少ない７月～８月中旬では 2.7%程度と低く，その後８月下旬の降水によって３%程度まで上昇し，その後は 2.8～3.3%の範囲で推移している。深さ５cm の含水率は８月下旬に３%まで低下し，その後の降水で上昇し，その後は３～3.5%の範囲で推移している。深さ 10cm，20cm の含水率は８月下旬まで漸減し，それ以降は概ね 3.5%程度の値で推移している。

3.3 暴露ブロックによるコンクリート空間中の湿度の測定結果（実験Ｂ）

暴露開始から６ヶ月間の測定結果を**図－７**に示す。

上面を暴露面とした場合の深さ 1cm のコンクリート空間中の湿度は，暴露開始当初は 92～100%RH の範囲で推移していたが，８月上旬の８mm 程度の降水以降は 100%RH となった。深さ５cm のコンクリート空間中の湿度は暴露開始から一貫して 100%RH であった。

北面を暴露面とした場合の深さ１cm のコンクリート空間中の湿度は，85～100%RH の範囲で推移しており，概ね 20mm 程度の日降水量があると 100%RH に達し，降雨が無ければ徐々に低下するという挙動を繰り返し示している。深さ５cm のコンクリート空間中の湿度は暴露開始から一貫して 100%RH であった。

3.4 含水率とコンクリート空間中の湿度の関係

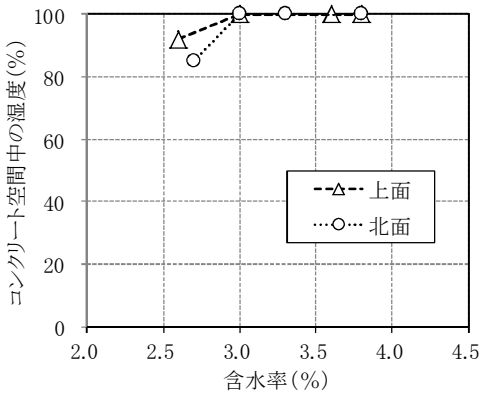
3.1 で述べたように，それぞれの暴露開始から６ヶ月間の気象条件が類似していることから，この間の含水率とコンクリート空間中の湿度を比較した。その方法としては，**図－５～７**に示すように深さ１cm と深さ５cm のデータについて，最大値と最小値に着目して，その値を整理した。その結果を**表－４**に示す。ただし，**図－５**の暴露開始から２ヶ月間の範囲は水中養生の影響が含まれると考え，対象から除外した。

表－４の値について，上面と北面に分けて含水率とコンクリート空間中の湿度の関係をグラフ化すると**図－８**のようになる。すなわち，含水率が３%以上のコンクリート空間中の湿度は 100%RH と測定され，３%未満になる程度まで含水率が低下した状態ではじめてコンクリート空間中の湿度も低下傾向を示すという関係が見られた。

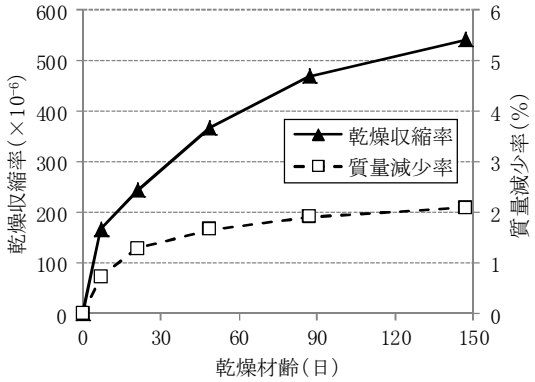
このように，含水率がある程度低下してもコンクリート空間中の湿度には低下が認められない理由としては，コンクリート空間中の気体の飽和水蒸気量に対して，コンクリート中に含まれる水分量は十分に多く，コンクリート中の

表－４　含水率とコンクリート空間中の湿度の関係

		深さ1cm		深さ5cm	
		最小値	最大値	最小値	最大値
上面	含水率(%)	2.6	3.6	3.0	3.8
	湿度　(%)	92	100	100	100
北面	含水率(%)	2.7	3.3	3.0	3.5
	湿度　(%)	85	100	100	100



図－8　含水率とコンクリート空間中の湿度の関係



図－9　長さ変化試験結果

空間が密閉空間に近い状態である場合は，コンクリートからのわずかな水分の蒸発で飽和水蒸気量に達するためと考えられる。場所によって変化するコンクリート中の水分の分布を把握するためには，広い領域での平均的な湿度ではなく，スポット的な湿度情報の測定が望ましいが，湿度の測定空間を小さくすると，わずかな水分の蒸発で湿度が上昇してしまい，微妙な水分状況の変化を捉えることが難しくなるものと考えられる。

3.5 長さ変化試験結果と含水率・コンクリート空間中の湿度との関係

長さ変化試験から得られる乾燥収縮率と質量減少率の測定結果を**図－9**に示す。試験開始直前までは水中養生を行っていることから，試験開始時点のコンクリート供試体は飽水状態と考えられる。この状態から乾燥状態に移した時点から長さ変化試験がスタートするが，乾燥材齢の初期の段階から，水分蒸発による質量減少が生じ，それに伴って乾燥収縮も進行している。質量減少率の値は，コンクリート中の含水率の減少率と対応する値であるから，乾燥初期の僅かな含水率の低下に対応して収縮挙動が生じていると解釈できる。

一方，3.4 で述べたように，含水率の変動に比較してコンクリート空間中の湿度は乾燥開始初期の変化が緩慢であり，コンクリート空間中の測定湿度が 100%RH であったとしても，含水率はある程度の値まで低下している可能性がある。

これらのことから，コンクリート空間中の湿度の測定値から乾燥収縮率を推定しようとする場合には，初期の乾燥に伴う乾燥収縮率を見逃してしまう可能性があるので，この点に注意が必要と考えられる。

４．まとめ

コンクリートの乾燥収縮はコンクリート中の水分量の影響を受ける。コンクリート中の水分量の指標には含水率とコンクリート空間中の湿度が用いられる。この２つの指標について，暴露ブロックの計測データ等を分析した結果，以下の知見を得た。

(1) 暴露ブロック内の含水率の変動は 2.5～3.8%の範囲，コンクリート空間中の湿度は 85～100%の範囲であった。しかし，含水率が３%以上の状態では，コンクリート空間中の湿度はほぼ 100%で一定であり，含水率が３%以上の領域での含水状態を，コンクリート空間中の湿度を指標として表現することは困難である。

(2) 乾燥収縮率はコンクリートの含水率の変化に良く対応することが分かった。

(3) コンクリート空間中の湿度が 100%RH の状態でも乾燥収縮は進行すると考えられ，コンクリート空間中の湿度の情報から乾燥収縮率を推定する場合には，この点に注意が必要と考えられる。

参考文献

1)例えば，河野広隆ほか：コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，pp.126-132，2012.8

2)古賀裕久，渡辺博志：屋外に暴露したコンクリートの含水率モニタリング結果，コンクリート工学年次論文集，Vol.28,No.1,pp.641-646,2006

3)湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第498 号，pp.13-20，1997.8