

論文 コンクリートの熱特性を活用した塩化物イオン拡散係数推定に関する基礎的研究

小根澤 淳志^{*1}・加藤 佳孝^{*2}・魚本 健人^{*3}

要旨：著者らはこれまで、コンクリート中の拡散という現象に着目し、赤外線法により、既存構造物の塩化物イオン拡散係数を定量的に推測する手法の開発を行ってきた。本研究の範囲内では、(1)既往の研究結果よりも少ない熱量でも塩化物イオン拡散係数が推測可能であること、(2)ポルトランドセメントを使用する場合は、その種類や骨材産地の影響は受けないうこと、(3)細骨材—セメント体積比が 3.7 以下の場合には、塩化物イオン実効拡散係数と熱拡散特性を表す温度パラメーターには $R^2=0.9157$ の高い相関があり、(4)既存構造物の殆どは本研究の配合より単位水量が大きいいため、本手法の適用可能性が高いことがわかった。

キーワード：非破壊検査、赤外線法、塩化物イオン拡散係数

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、そのほとんどが、物質の侵入によって引き起こされる。つまり、コンクリート中の物質移動に対する抵抗性を把握することが、構造物の耐久性を適切に把握するためには必要不可欠となる。これまでコンクリート構造物の非破壊検査は主に、内部欠陥、ひび割れ、鉄筋位置、鉄筋腐食といった構造物の物理的な品質検査を対象として、技術開発がなされてきた。その一方で、コンクリート自体の物質移動抵抗性を評価する検討はほとんど存在しなかった。そのため現状では、コア採取による塩分量の測定結果や電気泳動を利用した拡散係数の算出が主流である。そこで著者らはこれまで、コンクリート中での劣化因子の拡散と熱の拡散が、移動現象のアナロジーにより、数学的に同様に扱えること、また、劣化因子は空隙（液相）を経路として拡散し、熱は固相を拡散することから、コンクリート中の熱の拡散と塩化物イオンの拡散に関連性があると発想し、強制加熱したコンクリートの熱拡散特性と塩化物イオンの拡散現象を実験的に関連づけ、コンクリートの放熱過程における表面温度変化を赤外線サーモグラフィにより収集することで、赤外線法により、既存コンクリート構造物の塩

化物イオン拡散係数を定量的に推測する手法の開発を行ってきた¹⁾。これまでの研究では、限定された範囲内であれば、ある程度の精度で拡散係数を推測することができるが、その精度は必ずしも高くなく、半定量的評価にとどまった。そこで(1)既往の結果に基づいた加熱方法の再検討を行った。(2)さらに適用範囲の検討を行う目的で、普通ポルトランドセメント（以下 OPC）について s/a 、ペースト量を変化させた場合、セメント種類および骨材産地の影響を検討するために早強ポルトランドセメント（以下 HPC）、および産地の異なる骨材を用いた検討を行った。以上のことより熱と塩化物イオンの拡散の関連性の定量評価を検討した。

2. 使用材料と配合および供試体概要

2.1 使用材料とその物性

表-1 に使用した材料とその物性を示す。表中の番号は表-2 に示す配合に対応している。セメントは OPC および HPC を使用した。骨材に関しては、異なるプラントにて製造された生コンを使用することを考慮し、産地の異なる骨材を使用した場合について検討するため、細骨材については富士川産および大井川産、粗骨材については両神産および八王子産のものを使用した。

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 修士（工学）（正会員）

*2 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター講師 博士（工学）（正会員）

*3 東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター教授 工博（正会員）

表-1 使用材料および物性

セメント		細骨材		粗骨材		混和剤		
1	普通ポルトランドセメント	富士川産砂		尚神産碎石		高性能AE減水剤		
	密度(g/cm ³)	3.16	岩種	-	岩種	硬質砂岩	レオビルドSP8SB	
	比表面積(cm ² /g)	3080	表乾密度(g/cm ³)	2.63	表乾密度(g/cm ³)	2.69	助剤	
			吸水率(%)	1.67	吸水率(%)	0.96	マイクロエア303A	
			F.M.	2.81	F.M.	6.70		
2	早強ポルトランドセメント	大井川産砂		八王子産碎石		同上		
	密度(g/cm ³)	3.13	岩種	-	岩種			硬質砂岩
	比表面積(cm ² /g)	4550	表乾密度(g/cm ³)	2.57	表乾密度(g/cm ³)			2.61
			吸水率(%)	2.07	吸水率(%)			0.72
			F.M.	2.59	F.M.	6.67		

表-2 配合表

記号	粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A	助剤 AE	
1	20	C30sa35	5	30	2.2	35	121	402	646	1232	4.83	0.048
		C40sa35	6	40	5.8		138	346			3.46	0.035
		C45sa35	5	45	4.0		146	324			2.59	0.026
		C50sa35	15.5	50	5.5		152	304			1.37	0.018
		C55sa35	8	55	4.5		157	286			0.63	0.011
		C60sa35	10	60	3.5		162	271			0.01	0.030
		C70sa35	11	70	4.0	171	244	0.00	0.022			
		C30sa45	11.5	30	6.0	45	121	402	831	1042	4.02	0.040
		C40sa45	6.5	40	5.8		138	346			2.77	0.028
		C45sa45	6	45	5.5		146	324			1.94	0.019
		C50sa45	14.5	50	6.7		152	304			1.22	0.012
		C55sa45	8	55	6.0		157	286			0.57	0.009
		C60sa45	8	60	5.5		162	271			0.03	0.005
		C70sa45	6	70	5.8	171	244	0.12	0.002			
		C40sa50	5	40	5.5	50	138	346	874	898	2.77	0.014
		C45sa50	6	45	4.5		146	324			3.24	0.013
		C50sa50	10	50	4.7		152	304			3.04	0.015
		C55sa50	10	55	4.5		157	286			4.29	0.014
		C60sa50	15	60	6.0		162	271			1.35	0.014
		C70sa55	7	70	5.5		171	244			0.49	0.022
		C40sa55Vp30	8	40	4.5	55	159	398	853	1015	3.18	0.020
		C50sa55Vp30	16	50	5.0		175	349			4.19	0.017
		C60sa55Vp30	12	60	4.0		187	311			4.66	0.003
		TRI C40sa45	11	40	4.0		133	332			3.98	0.017
		TRI C50sa45	11	50	3.5		146	291			3.20	0.015
		TRI C60sa45	16	60	5.0		156	260			2.08	0.013

2.2 配合

OPC に関しては、ペースト量を体積割合で 25%一定 (以下 $V_p=25\%$) とし、W/C を 30, 40, 45, 50, 55, 60, 70% の 7 水準 ($s/a=50\%$ は 40~60%), s/a を 35, 45, 50, 55% の 4 水準の計 26 配合と、 $V_p=30\%$ とし、W/C を 40, 50, 60%, s/a を 45% の 3 配合の計 29 配合とした。HPC に関しては、表-1 の 2 に示す骨材を使用し、 $V_p=25\%$ とし、W/C を 40, 50, 60%, s/a を 45% の 3 配合とした。記号に

関しては、たとえば C40sa45V_p30 は、C40 : W/C=40% のコンクリート、sa45 : $s/a=45\%$ 、V_p30 : $V_p=30\%$ を意味する。

2.3 供試体概要および養生方法

供試体は、施工による品質のばらつきを防ぐために 560W×150D×200H(mm) の角柱無筋コンクリートを作製し、2 週間の湿布養生後コアを 2 本採取し、電気泳動用供試体とした。残りの部分をコンクリートカッターで切断し、熱拡散特

性評価用供試体とした（図-1）。その後2週間気中養生を行った。

3. 加熱方法の再検討

3.1 供試体と機材、加熱方法

供試体は、sa35, sa45, sa55 シリーズの 21 供試体を使用した。加熱・放熱面以外の 5 面を厚さ 100mm の断熱材で断熱を施した。加熱機材は、温度コントロールのできるホットプレート（以下プレート）を使用した。供試体表面の凹凸による加熱ムラを防ぐために非接触とした。熱伝導解析により、供試体表面とプレート表面の空気層の温度が 60℃となるようにプレートは供試体表面から 30mm に配置し、プレートの温度は 250℃として室温約 20℃の実験室で1時間加熱した（写真-1）。

3.2 実験結果

放熱開始直後の赤外線画像の一例を図-2 に示す。これによると供試体表面温度よりも断熱材の温度の方が高くなっている。図-3 は同一供試体の放熱開始 30 分後の表示感度 0.5℃の赤外線画像であるが、温度ムラの大きい結果となっている。このような表面温度のばらつきは、断熱材からの熱伝導の影響であると考えられる。

3.3 加熱方法の改良

3.2 の結果より、断熱材からの熱伝導を受けているため、正確に熱拡散特性を評価できていないことがわかった。実構造物へ適用するためには正確な熱拡散特性の評価が必要である。そこで、断熱材からの熱伝導を避けるため、図-4 の様に断熱材先端が供試体表面から 60mm の高さになるように設定した。また、供試体表面—プレート間の距離は 160mm とした。放熱開始 30 分後の表示感度 0.5℃の赤外線画像を図-5 に示す。平均表面温度 (μ) は 29.11℃、標準偏差 (σ) は 0.12 であり、加熱ムラが解消されていることがわかる。なお、実験は室温約 20℃の実験室にて行った。

3.4 加熱方法の再現性の確認

加熱方法の再現性を検証するために、W/C=30, 40, 45, 50, 55, 60, 70%, s/a=45%の供試体を用いて、同様の条件で加熱・放熱を行い、時間パラメーター（式(1)）が 0.5 の時の温度パラメーター（式(2)）を比較した。記号は図-6 に示すとおりであ

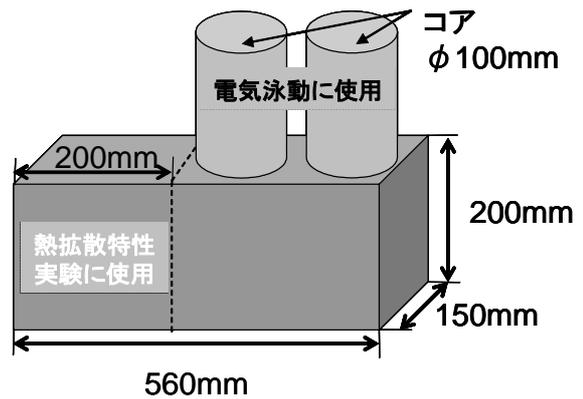


図-1 供試体概要図

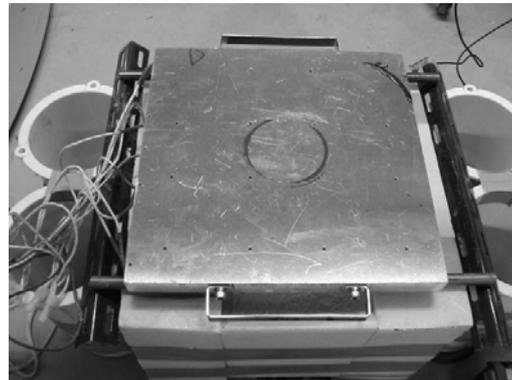


写真-1 加熱状況

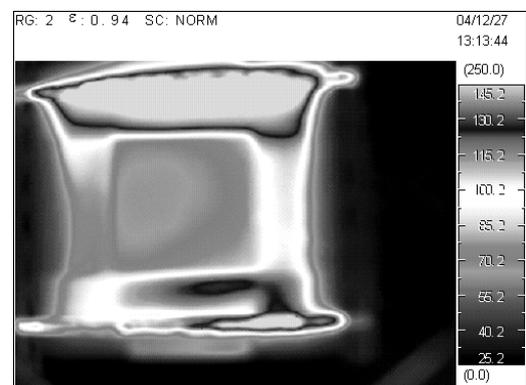


図-2 放熱開始直後の赤外線画像

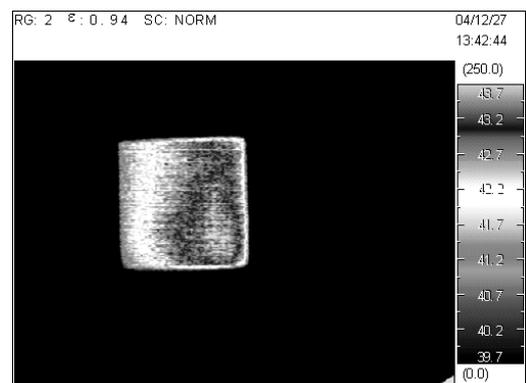


図-3 放熱開始30分後の赤外線画像

る。なお、実験は室温約 24°Cの実験室にて行った。

$$\text{時間パラメーター} = \frac{b}{a} \quad (1)$$

$$\text{温度パラメーター} = \frac{B}{A} \quad (2)$$

再現性の確認実験結果を図-7 に示す。これによると、2回の測定結果から算出した温度パラメーターはほぼ一致しており、加熱方法の再現性が確認できたと考えられる。

3.5 入力した熱流束に関する検討

供試体表面から 1, 5mm の位置に熱電対を 10 点配置し、加熱時の空気層の温度経時変化を測定した。得られた結果から温度勾配を算出し、熱流束を算出した。なお、空気の熱伝導率は 0.0241(W/m・K)を用いた²⁾。この時コンクリートに与えられた熱流束は 2.41×10^{-4} (W/m²)であり、供試体表面—プレート間の空気層の温度は約 30°Cであった。また、加熱終了時の供試体表面温度も同程度であった。このことから、既往の研究結果よりも少ない熱量でも十分コンクリートの品質を評価できると考えられる。また、与える熱流束を大きくすることで、測定時間の短縮も図れると考えられるが、これらは今後の検討課題としたい。

4. 適用範囲の検討

表-2 において OPC については, sa50 シリーズおよびペースト量を増やした V_p30 シリーズ (s/a=45%) を作製した。また、骨材産地およびセメント種類の影響を検討するため、表-1 の材料 2 を使用した TRI シリーズも作製した。全ての配合に対する実験結果を図-8 に示す。なお、実効拡散係数は JSCE-G571-2003 に準拠して算出した。これによると、熱拡散特性を表す温度パラメーターと塩化物イオン拡散特性を表す実効拡散係数にはある程度の相関が見られるが、精度の良い推測は難しいと考えられる。そこで、適用範囲の検討を行った。図-8 中の s/a=55% に着目する。これまで表-3²⁾³⁾⁴⁾に示すように、コ

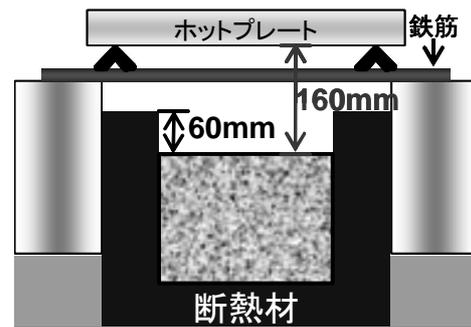


図-4 改良断熱概要図

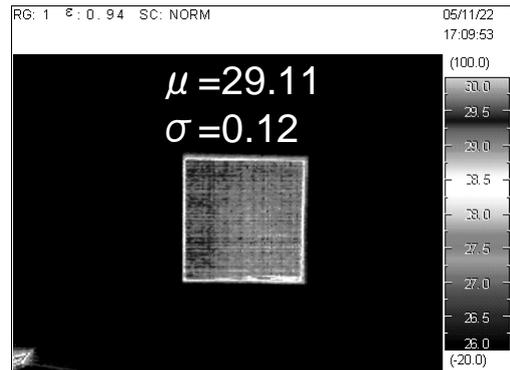


図-5 放熱開始30分後の赤外線画像 (改良後)

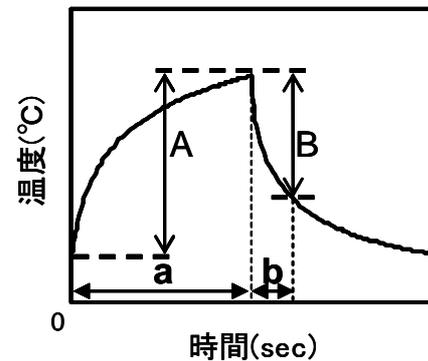


図-6 時間パラメーターと温度パラメーターの概念図

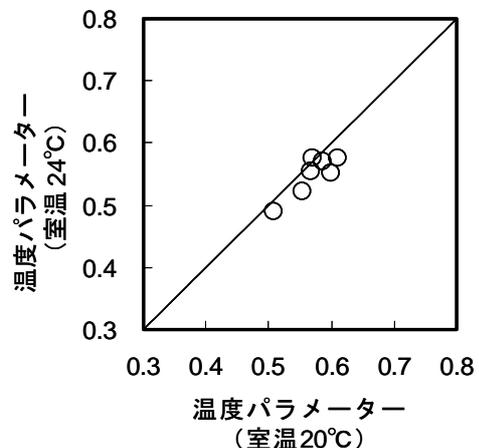


図-7 加熱方法の再現性

表-3 骨材熱物性

		密度(kg/m ³)	比熱(kJ/kg・K)	熱伝導率(W/m・K)	熱拡散率(m ² /h)
細骨材		2630.0	1.152	0.300	9.901E-05
粗骨材	砂岩	2700.0	0.720	1.630	8.385E-04
	石英	2635.0	1.150	5.175	1.708E-03
	花崗岩	4023.9	0.753	2.910	9.604E-04
	安山岩	2500.0	1.212	1.745	5.757E-04
	長岩	2555.0	1.186	2.326	7.677E-04
	玄武岩	2695.0	1.124	1.710	5.642E-04
	大理石	2704.0	1.121	2.326	7.677E-04
石灰岩	2700.0	1.122	2.093	6.909E-04	

ンクリート体積の大部分を占める骨材中で熱拡散率が最も高い粗骨材の量がコンクリートの熱拡散特性の支配要因であると考えきたが、 $V_p=25\%$ シリーズ中で粗骨材量が最も少ない $s/a=55\%$ の温度パラメーターが他の s/a と比較して小さな値を示している。このことは、 $s/a=55\%$ の熱拡散が最も大きいことを示している。つまり、細骨材の量が熱拡散特性の支配要因であると考えられる。また、このことはコンクリート全体の熱物性値は、コンクリートの構成材料の個々の熱物性値を体積比で重み付けして平均化したものに等しい⁴⁾、という事実と反する。そこで、 s/a に着目するのではなく、モルタル中の細骨材—セメント体積比 (V_s/V_c) に着目した (図-9)。図-8中の $s/a=55\%$ の $W/C=45\sim 70\%$ (丸囲い) の部分に着目すると V_s/V_c が 3.7 以上になっていることがわかる。そこで、 V_s/V_c が 3.7 以下の配合について図-10 に塩化物イオン実効拡散係数と温度パラメーターの関係を示す。これによると、最大誤差は $0.26(\text{cm}^2/\text{year})$ であり、両者には $R^2=0.9157$ の良好な相関関係が見られる。

モルタル部分を考えて、通常、細骨材界面には遷移帯が存在し、細骨材量が多くなると遷移帯同士が連結することで、特急経路が形成され、塩化物イオンの拡散速度が増大すると言われている⁵⁾。本研究においても、図-8中の $s/a=55\%$ の $W/C=45\sim 70\%$ (丸囲い部分) において、塩化物イオン実効拡散係数は材料の空間的配置の影響、つまり経路依存性を反映していることがわかる。しかし、熱拡散を考えると、 V_s/V_c が高くなった場合、図-8中の丸囲い部分において、温度パラ

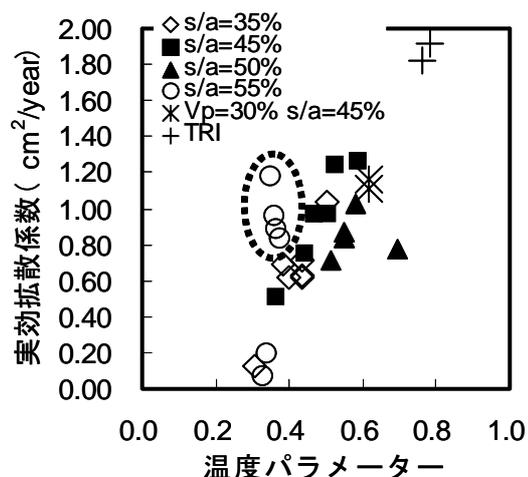


図-8 実験結果

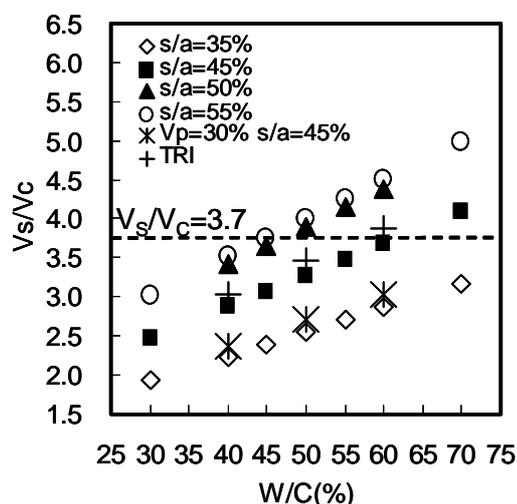


図-9 モルタルの V_s/V_c

メーターはほぼ同一の値を示していることから、材料の空間的配置の違いの影響を捉えられなくなっているものと考えられる。このことから、熱拡散は材料の体積割合の影響が支配的であり、あ

る閾値を越えると熱物性の加算則に従わなくなることがわかる。しかし、その閾値までは、熱拡散と塩化物イオンの拡散は高い相関を示していることがわかる。本研究結果においては、熱が材料の空間的配置の違いの影響を捉えられなくなってくるのは $V_s/V_c=3.7$ 以上の際であると考えられる。このことから、細骨材量が多い配合においては熱拡散特性から塩化物イオン拡散特性を推測することは難しいが、コンクリート標準示方書における単位水量や W/C の変遷について記載された文献⁶⁾によると、既存コンクリート構造物の殆どは、スランプ 10cm 程度で単位水量が 170～195kg/m³ であり、W/C も 45～65%であることを考えると、その殆どは $V_s/V_c < 3.7$ であることが考えられる。

コンクリートの熱拡散特性には、ひび割れ、内部空隙等が影響するため、直ちに実構造物に適用できるとは言い難いが、実験室レベルにおいては本手法のポルトランドセメントを使用したコンクリートへの適用可能性が高いと考えられる。今後は、ひび割れ、内部空隙等を有する供試体を用い、より実構造物に近い条件での実験を検討課題としたい。

5. まとめ

本研究の範囲内では以下の知見が得られた。

- 1) 既往の研究結果よりも少ない熱量（熱流束 $(2.41 \times 10^{-4} \text{ (W/m}^2\text{)})$ 程度）でも塩化物イオン拡散係数の推測が可能である。
- 2) 今後さらなる検討が必要ではあるが、ポルトランドセメントを使用する場合は、その種類や骨材産地の影響は受けない。
- 3) 細骨材—セメント体積比が 3.7 以下の場合には、塩化物イオン実効拡散係数と熱拡散特性を表す温度パラメーターとの間には $R^2=0.9157$ の高い相関がある。
- 4) 既存構造物の殆どは、本研究の配合よりも単位水量が大きいため、 $V_s/V_c < 3.7$ であることが考えられる。そのため、本手法は実験室レベルであれば、ポルトランドセメントを使用した殆どのコンクリートに適用できると考えられる。
- 5) 今後は、ひび割れ、内部空隙等を有する供

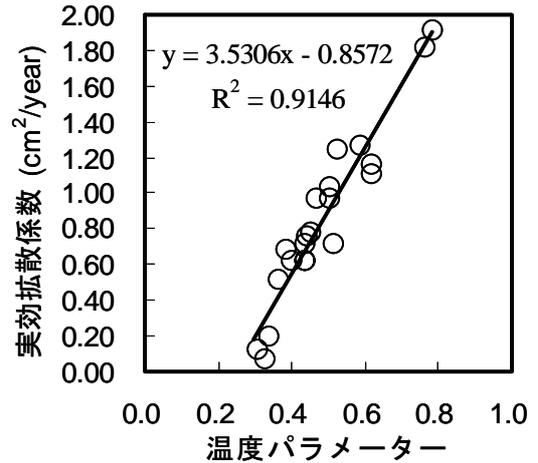


図-10 塩化物イオン拡散係数と温度パラメーターの関係

試体を用い、より実構造物に近い条件での実験を検討課題としたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なご協力を頂いた芝浦工業大学卒論生金橋二功氏および魚本・岸・加藤研究室の皆様へ深謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、小根澤淳志ほか：コンクリートの熱特性を活用した既設構造物の物質拡散性状評価に関する研究：コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1765-1770, 2005
- 2) 国立天文台編：理科年表 第77冊, 丸善, pp.402-404, 2004
- 3) 小原二郎〔ほか〕編集：建築内装技術ハンドブック, 朝倉書店, 1984
- 4) 川口徹, 梶田佳寛：コンクリートの熱伝導率, 熱拡散率, 比熱の測定方法とその応用, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.11-14, 1982
- 5) 加藤佳孝：遷移帯がコンクリートの物質異動現象に及ぼす影響, 東京大学学位論文, 1999
- 6) 魚本健人：コンクリート診断学入門, 朝倉書店, pp.58-61, 2004