

# 論文 電磁波を用いた鉄筋コンクリート中の塩化物量評価に関する一考察

神谷 武智\*1・須田 久美子\*2・坂田 昇\*3・溝渕 利明\*4

要旨：鉄筋コンクリート中の塩化物量を非破壊で評価する手法として、電磁波による手法を用いて検討を行った。実験は、塩化物量を変化させた供試体を用いて、経時的に電磁波計測を行った。その結果、塩化物量を電磁波で測定する可能性を見出し、塩化物量の推定には比誘電率、振幅値、コンクリート中の水分量及び外気温が大きく影響していることが明らかとなった。

キーワード：非破壊試験，塩化物量，電磁波，比誘電率，振幅値

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物における塩害の評価方法として、構造物からコアを採取することで塩化物量を測定する方法がある。しかしながら、コアを採取することで構造物に局所的な欠陥部を生じさせてしまうとともに、同位置での経時的な計測が難しい。一方、非破壊試験では構造物に損傷を与えることなく、また同位置での経時的測定が可能である。

本研究では、電磁波を用いた非破壊試験を検討する。塩化物量を変化させた供試体を用いて、経時的に電磁波計測を行い、時間経過に伴うコンクリート中の水分量の変化(質量変化率)と電磁波計測で得られた比誘電率、出力波形の減衰等と比較し、電磁波によるコンクリート中の水分量の推定を行った。また、塩化物量の変化と電磁波測定結果を比較し、電磁波による塩化物量の評価について検討を行った。

## 2. 電磁波によるコンクリート中の塩化物量測定

図 - 1 に示すように供試体上面に電磁波測定用アンテナを設置し、電磁波の反射波形を強調するために供試体下面に鉄板を敷いた。鉄筋コ

ンクリート供試体(以下 鉄筋ありと称す)では、鉄筋からの反射波が表面波及び供試体下面の鉄板からの反射波を受けて振幅値が変化するため、鉄筋からの反射波の振幅値を求めるためには、表面波及び鉄板からの反射波を除去する必要がある。そのため、鉄筋あり供試体の測定データから、同じ塩化物量を含むする無筋コンクリート供試体(以下、鉄筋なしと称す)の反射波測定データを差し引いて算出した。振幅値は測定開始時のゲインで出力される出力比の最大値と最小値の差を基準値として 100%と設定し、出力比率を変えて測定した場合もこの基準値に対する比率で求めた。

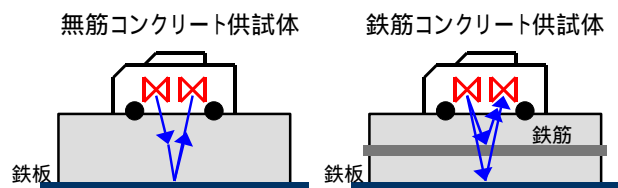


図 - 1 電磁波測定概要

## 3. 実験概要

### 3.1 使用材料及び配合

本実験で使用した材料と、コンクリートの配合条件及び配合を、表 - 1、表 - 2 に示す。

\*1 法政大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部材料・LCEグループ主管研究員 工博 (正会員)

\*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部材料・LCEグループ長 工博 (正会員)

\*4 法政大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

### 3.2 検討ケース

練混ぜ時に塩化物(NaCl)を添加し,表-3に示すように,塩化物量を 0kg/m<sup>3</sup>~6kg/m<sup>3</sup>の範囲で1kg/m<sup>3</sup>ずつ変化させた供試体を用いた。また,供試体に鉄筋を埋め込んだ場合と埋め込まない場合の2種類の供試体を作製した。

### 3.3 供試体の概要

供試体は,図-2に示す100×100×400mmで,供試体内に鉄筋を挿入しない供試体及び100×100mmの断面の中央に異形鉄筋(D16)を挿入した供試体の2種類とした。

### 3.4 実験方法

供試体は,コンクリート打込み後材齢1日で脱型し,その後塩化物を含んだ供試体に水が浸透しないようにビニール袋で密封状態として7日間水中養生を行った。

電磁波測定は表-4に示す仕様の装置を用いて行い,コンクリート供試体下面からの反射波を得るために供試体下面に鉄板を敷いた。電磁波測定時には,供試体の質量測定も行った。また本実験での測定期間終了後,供試体を3日間乾燥炉に入れて絶乾状態とし質量を測定した。本実験では絶乾にした状態を含水率0%とした。

### 3.5 コンクリート中の水分量変化

本実験では,電磁波測定時に供試体の質量を測定し,コンクリートの質量変化(水分の逸散量)の算定を行った。コンクリートの質量変化については,次の3つの関係で整理を行い,これらの相違する評価手法に対し,塩化物量推定における有効性及び利便性を検討することとした。

含水率  $m$

含水率は,測定期間終了後に供試体を乾燥炉に入れて絶乾状態にした質量を基準とした測定時のコンクリート中の水分量と絶乾質量との比である。

$$m = \frac{W_n - W_s}{W_s} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$W_n$ : 測定時の供試体の質量  $W_s$ : 絶乾質量

質量減少率  $W_w$

質量減少率は,測定開始時の供試体質量を基

準とした測定開始からの質量減少量と測定開始時の供試体質量との比である。

$$W_w = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

$W_0$ : 測定開始時の供試体質量

水分逸散率  $R_w$

水分逸散率は,測定開始から絶乾状態までの水分量を基準とした測定開始からの水分減少量とコンクリート中の水分量との比である。

$$R_w = \frac{W_0 - W_n}{W_0 - W_s} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

表-1 使用材料

材料	摘要	
セメント	普通ポルトランドセメント,密度3.16g/cm <sup>3</sup>	
細骨材	新潟産川砂,表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> ,粗粒率2.46	
粗骨材	新潟産硬質砂岩,表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup> ,粗粒率6.89	
混和剤	AE減水剤	リゲニスルホン酸化合物,密度1.25g/cm <sup>3</sup>
	AE剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 密度1.04g/cm <sup>3</sup>

表-2 コンクリート配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤	
60	42	155	258	793	1108	0.81	0.388	1.5A

表-3 実験要因及び水準

鉄筋あり	鉄筋なし	塩化物量(kg/m <sup>3</sup> )
RC-1	C-1	0.0
RC-2	C-2	1.0
RC-3	C-3	2.0
RC-4	C-4	3.0
RC-5	C-5	4.0
RC-6	C-6	5.0
RC-7	C-7	6.0

表-4 電磁波測定装置仕様

項目	仕様
アンテナ周波数	1.0GHz
計測モード	距離,時間計測
方式	インパルス方式
発信電圧	17Vp-p(50 負荷時)
水平分解能	80mm

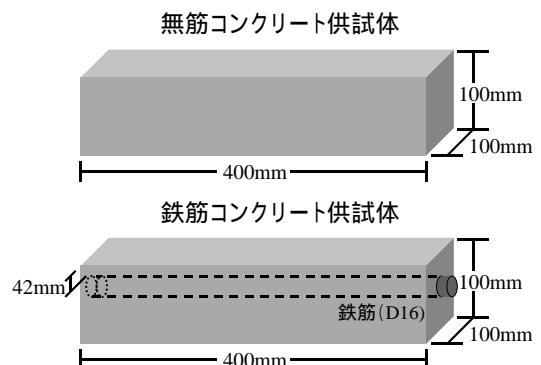


図-2 供試体概要

#### 4 実験結果及び考察

##### 4.1 比誘電率及び出力波形における振幅値の経時変化

既往の研究<sup>1),2)</sup>より、比誘電率はコンクリート中の塩化物量の変化の影響を受けず、水分量の変化に大きく影響を受けること、また振幅値は塩化物量及び水分量の両者の影響を受けると報告されている。

電磁波測定結果より得られた比誘電率及び振幅値の経時変化をそれぞれ図 - 3, 図 - 4 に示す。

図 - 3 より、比誘電率は時間の経過に伴い減少する結果となり、塩化物量の違いによる影響はほとんど見られない。

図 - 4 より、振幅値は時間の経過に伴い増加する傾向を示した。また、振幅値と塩化物量との関係を図 - 5 に示す。塩化物量の増加に伴い振幅値が減少する傾向が見られた。

以上の結果は、既往の研究<sup>1),2)</sup>と同傾向である。また、比誘電率及び振幅値の測定結果において、鉄筋の有無による違いは特に見られなかった。

##### 4.2 重回帰分析によるコンクリート中の水分量の推定

コンクリート中の水分量の変化について、含水率、質量減少率及び水分逸散率の 3 つの関係より検討し、それぞれに対して比誘電率及び振幅値との関係より回帰式を求め整理した。その結果、水分量の変化に対して比誘電率及び振幅値が大きく変化する結果となった。

そこで、比誘電率及び振幅値を説明変数とし、含水率、質量減少率及び水分逸散率のそれぞれを目的変数として重回帰分析を行った(式(4))。各目的変数での予測式における偏回帰係数、定数項及び重相関係数を表 - 5 に示す。

$$\text{目的変数} = a \times \text{比誘電率} + b \times \text{振幅値} + c \quad (4)$$

a, b : 偏回帰係数      c : 定数項

比誘電率と振幅値を用いた含水率の推定では、重相関係数が鉄筋なしの場合で 0.25、鉄筋ありの場合で 0.53 となり、含水率を比誘電率と振幅値で推定することは難しいと考えられる。

質量減少率の場合では、表 - 5 より鉄筋なしの

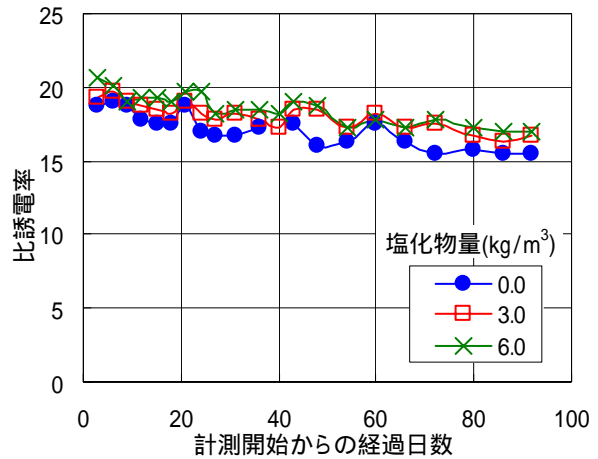


図 - 3 比誘電率の経時変化(鉄筋なし)

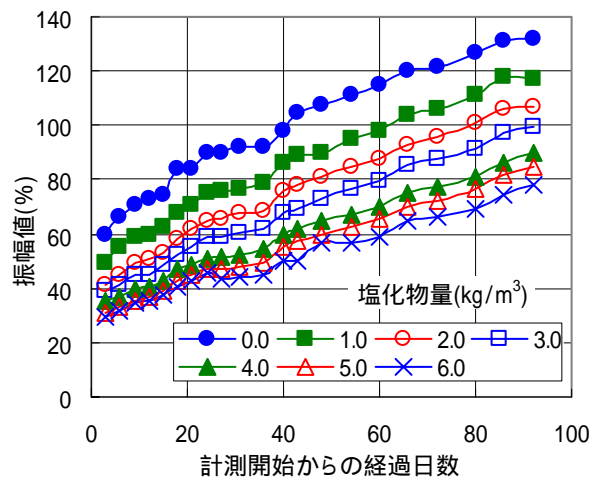


図 - 4 振幅値の経時変化(鉄筋なし)

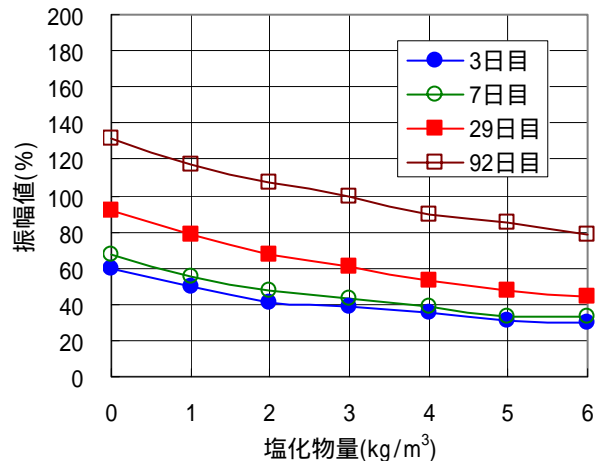


図 - 5 塩化物量と振幅値との関係(鉄筋なし)

表 - 5 重回帰分析における各係数及び各項目

鉄筋の有無	目的変数	偏回帰係数		定数項	重相関係数
		比誘電率	振幅値		
鉄筋なし	含水率	-0.156	$1.72 \times 10^{-3}$	0.105	0.25
	質量減少率	0.107	$-7.47 \times 10^{-3}$	-2.69	0.89
	水分逸散率	3.16	$9.74 \times 10^{-2}$	81.0	0.73
鉄筋あり	含水率	$-9.22 \times 10^{-2}$	$1.57 \times 10^{-2}$	6.22	0.53
	質量減少率	$-2.73 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-2}$	-5.26	0.83
	水分逸散率	0.467	0.266	0.03	0.79

場合は偏回帰係数から質量減少率が比誘電率によって定まっていると考えられる。鉄筋ありの場合、偏回帰係数を比較すると振幅値の方が若干ではあるが影響は大きいと考えられる。重相関係数は、鉄筋なしの場合で 0.89，鉄筋ありの場合で 0.83 となり比較的高い相関関係にあるといえる。

水分逸散率においては表 - 5 から鉄筋なしの場合、比誘電率と水分逸散率の相関が高いと考えられる。鉄筋ありの場合においては、比誘電率と振幅値の両方の影響を受けていると考えられる。重相関係数は、鉄筋なしの場合で 0.73 となっており、鉄筋ありの場合で 0.79 となり両者とも比較的高い相関関係にあるといえる。

以上の結果から、鉄筋なしの場合、電磁波測定で得られる比誘電率及び振幅値からコンクリート中の水分量の変化を推定することは、質量減少率を用いればかなり高い精度で行えると考えられる。今回の重回帰分析の結果、コンクリート中の水分量に関しては、既往の研究結果<sup>1),2)</sup>と同様に比誘電率が大きく影響しており、振幅値はそれほど影響していないといえる。

#### 4.3 重回帰分析によるコンクリート中の塩化物量の推定について

本研究では、含水率，質量減少率，水分逸散率のそれぞれの場合について検証したが，その結果，水分逸散率が最も有効であったので，塩化物量の推定では水分逸散率を用いて検討を行うこととした。

重回帰分析による塩化物量の推定において比誘電率及び振幅値のみを考慮した場合(式(5))と，さらに説明変数として水分逸散率を加えた場合(式(6))についての推定結果をそれぞれ図 - 6，図 - 7 に，各ケースにおける推定値の変動幅，平均値を，図 - 8，図 - 9 に示す。

$$\text{塩化物量} = -0.804 \times \text{比誘電率} - 0.0887 \times \text{振幅値} + 23.6 \quad (5)$$

$$\text{塩化物量} = 0.208 \times \mu - 0.147 \times \text{比誘電率} - 0.109 \times \text{振幅値} + 6.77 \quad (6)$$

比誘電率      振幅値       $\mu$  : 水分逸散率  
水分を考慮しない場合，重相関係数は鉄筋な

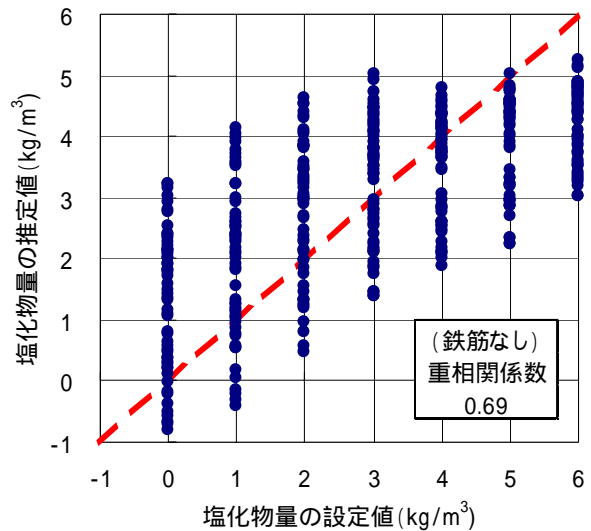


図 - 6 水分考慮なしの場合の塩化物量推定値

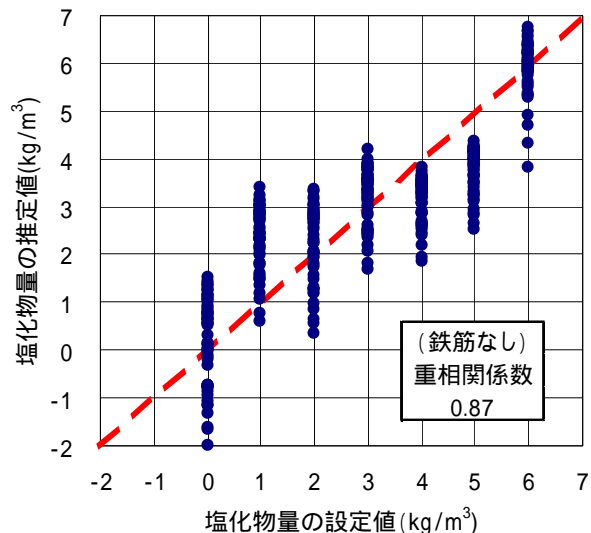


図 - 7 水分逸散率を考慮した場合の塩化物量推定値

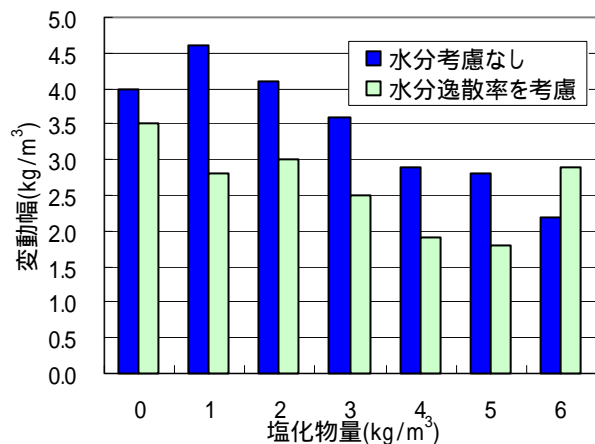


図 - 8 塩化物量推定における変動幅(鉄筋なし)

しの場合で0.69、鉄筋ありの場合で0.62であり、推定精度としてはそれほど高いとはいえない。

一方、説明変数に水分逸散率を加えた場合、推定値のばらつきの幅が小さくなり、重相関係数も鉄筋なしの場合で0.87、鉄筋ありの場合で0.83となり、比較的高い相関関係が得られた。

図-8で推定値の変動幅を比較すると、水分を考慮した場合の方が明らかに変動幅が小さい結果となった。また、図-9に推定値の平均値を示したが、水分を考慮した方が設定値に近い傾向を示した。

#### 4.4 外気温が塩化物量推定に与える影響

測定日ごとのばらつきを評価することを目的として、鉄筋なしの場合を対象に測定日ごとで重回帰分析を行った。重回帰分析の結果を図-10に示す(式(7)による)。

$$\text{塩化物量} = a_1 \times \text{ } - a_2 \times \text{ } + a_3 \quad (7)$$

$a_1 \sim a_3$ : 各測定日での偏回帰係数及び定数項

その結果、重相関係数が0.98となり、高い推定精度を有しているといえる。さらに、測定日ごとの重回帰分析でコンクリート中の水分量の変化を考慮した場合についても別途検討を行った。その結果、水分考慮なしの場合よりも若干ばらつきが小さくなる程度であったので、水分量を考慮しなくても十分な推定精度はあるものと考えられる。ただし、この方法では、常にキャリブレーション用の供試体を用意し、測定日ごとにキャリブレーションを行い、重回帰分析を行ってその日の偏回帰係数を求めなければならなくなるので、実構造物の測定において測定が非常に煩雑になるといえる。

次に、全データを対象とした場合と測定日ごと

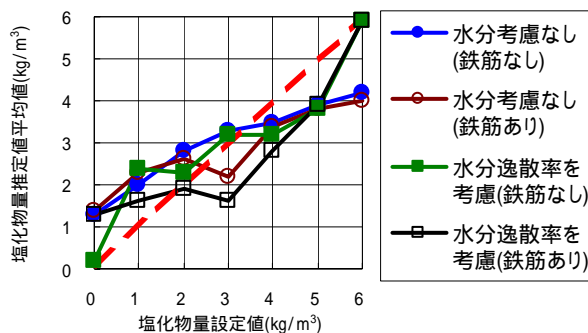


図-9 塩化物量推定値の平均値

で整理した場合の違いについて検討を行った。

全データを対象とした場合の推定結果を図-11に示し、また測定時の実験室内での温度及び湿度の経時変化を図-12に示す。図-11での推定値は全体的に右下がりとなっているのが分かる。また、本実験の測定期間は8月中旬～11月中旬であり図-12の温度は全体的に右下がり

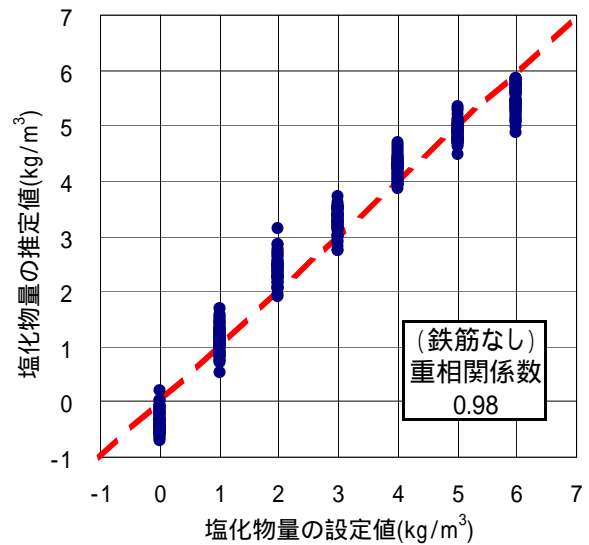


図-10 測定日ごとで重回帰分析を行った場合の塩化物量推定値

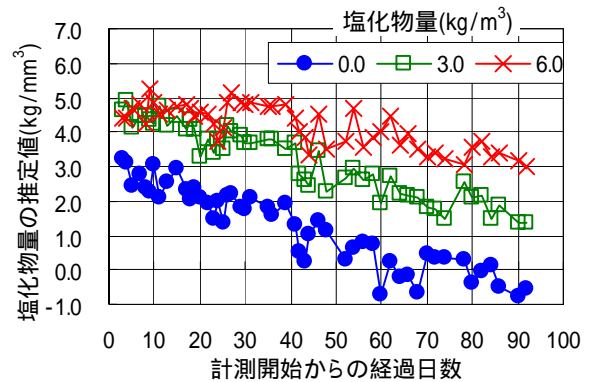


図-11 全データを対象とした場合の塩化物量推定値(鉄筋なし、水分考慮なし)

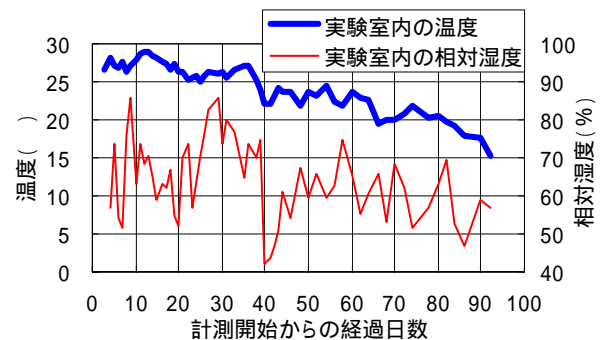


図-12 実験室内の温度及び湿度の経時変化



なっており、この温度の経時変化と図 - 11 の推定結果の経時変化は類似した挙動を示しているのが分かる。これを踏まえて塩化物量の推定に対する説明変数に外気温を加えて重回帰分析を行った。その結果、水分を考慮せずに温度を考慮した場合の重相関係数が 0.90 となり、さらに式(8)の様に水分逸散率を説明変数に加えることで、図 - 13 に示す様に重相関係数が 0.94 となり、電磁波測定で塩化物量の推定をある程度の精度で行うことの可能性を見出すことができた。

$$\begin{aligned} \text{塩化物量} = & -0.374 \times T + 0.120 \times \mu - 0.114 \times \\ & -0.123 \times \quad + 18.9 \quad (8) \\ T: & \text{外気温} \quad \mu : \text{水分逸散率} \end{aligned}$$

図 - 14 に塩化物量 3.0kg/m<sup>3</sup> の場合における推

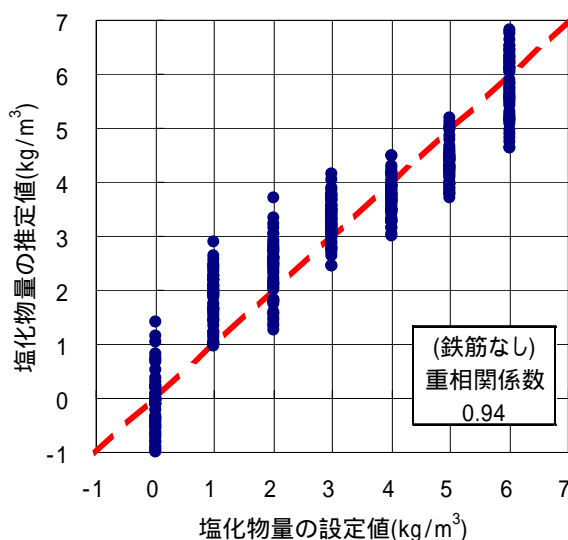


図 - 13 外気温と水分を考慮した場合の塩化物量推定値

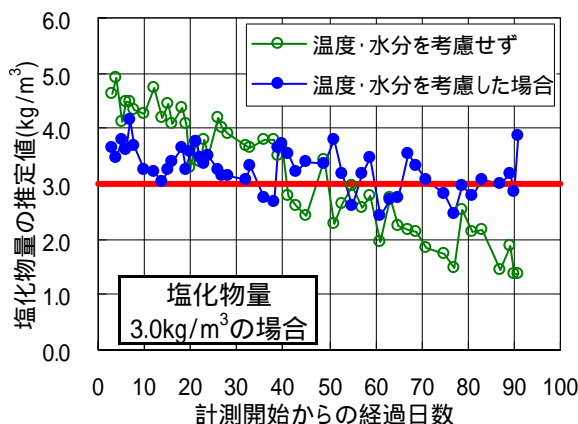


図 - 14 各回帰条件による塩化物量推定値 (鉄筋なし)

定結果を示す。外気温及び水分を考慮しない場合の回帰分析結果は実験室内の温度の測定値と同傾向であり、外気温及び水分を考慮した回帰分析結果ではこの傾向がほぼ解消された。外気温が測定結果に影響を与える可能性があるものは、コンクリート及び測定器であると思われる。測定器のアンテナやケーブルは金属であることから、コンクリートと金属の熱特性の違いから、測定器の方が外気温の影響を大きく受けやすいものと推測される。この点については、今後の検討課題の一つであると思われる。

## 5 まとめ

本研究では、電磁波を用いたコンクリート中の水分量及び塩化物量の推定について検討を行った。本検討で得られた結果を以下に示す。

- 1) 電磁波測定で得られる比誘電率及び振幅値からコンクリート中の水分量の変化を推定することは、質量減少率を用いればある程度の精度で行うことができる。
- 2) 塩化物量を電磁波で測定する可能性はあるものと考えられ、塩化物量の推定には、電磁波で測定した比誘電率、振幅値、コンクリート中の水分量及び外気温が必要である。

今後の課題としては、コンクリートの使用材料及び配合が変化した場合、これらが比誘電率及び振幅値に及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 溝淵利明ほか: 電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No 1, pp. 1509-1514, 2002
- 2) 新井淳一ほか: 非破壊による鉄筋コンクリート中の塩分測定に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No 1, pp. 1515-1520, 2002
- 3) 吉村明彦ほか: コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp. 132-142, 2001