

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 22 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京都市大学

氏 名 : 佐藤幸恵

研究課題名 : 誘電測定による火災後のコンクリートの残存性能および強度回復性の評価

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

誘電測定による火災後のコンクリートの残存性能および強度回復性の評価

Evaluation of residual performance and strength recovery of concrete after fire by in-situ dielectric spectroscopy

東京都市大学 准教授 佐藤幸恵

（研究計画ないし研究手法の概略）

・研究の背景と目的

本研究は、火災が生じた際に高温下に暴露されたコンクリートの水和物の状態変化をより簡易に非破壊的に評価する方法を開発し、火災後の補修改修工事や再利用のための品質保証に活用することを目的とするものである。

鉄筋コンクリート造集合住宅などの建築ストックの有効活用は建築分野において重要な課題であり、維持保全技術の発展とともに高経年化した建築物の活用例は増加している。一方、火害を受けた場合、RC造建物においては、木造建築と違い局所的な被害となることが多く被害部分の補修を行い継続して利用されることが多い。この場合は、火災被害を受けた部位の品質を確認した上で補修等が行われる。品質の確認にはコア採取などの破壊検査が行われるのが一般的であるが、コア採取を基本とした方法は採取部位や範囲の選定、コア採取に係る人的・時間的コストなどの負担やコア採取によって欠損した部位の補修が新たに加わることになる。火災などの高温加熱を受けたコンクリートの品質変化は、500℃前後での水酸化カルシウムの分解や中性化などがある。

申請者らは、これまで、水分子の状態変化をとらえることができる誘電スペクトル測定をモルタル供試体に適用し、誘電緩和の時間変化量から初期強度発現を推定できる可能性を確認した¹⁾。その成果により、誘電測定によりセメント水和物として結合する水の運動の時間スケールを表す緩和時間や緩和時間の変化率などの関係により初期水和進行の状態を評価できることを見いだした。また、乾燥したコンクリート供試体を湿潤養生した際の再水和による強度増進の可能性（水和ポテンシャル）を誘電測定によって評価出来ることを発見した。

それらの知見を基に、本課題では火害を受けた場合の水和物分解や中性化による水分状態の変化を非破壊的に評価する。この評価方法は現場において押し当て式の電極によって非破壊で評価するものであり、現場適用性の高い評価手法を提案することで躯体の再利用コストの大幅削減に寄与できる。

以上より、本研究では、広帯域誘電分光測定による高温加熱を受けたコンクリート中の水和物の状態変化を推定することを試み、高温加熱したコンクリート品質の非破壊評価の可能性を検討した。

・実験概要

誘電測定では、物質に電場を印加したときに起こる分極の程度を表す誘電率(ϵ')と、熱エネルギーとして失われる程度を表す誘電損失(ϵ'')を評価する。これらはまとめて複素誘電率($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)と表記し、この周波数依存性（誘電スペクトル）を観測する。このスペクトルのピークは電気双極子（本研究では水分子）の運動の時間スケールを反映するので、その解析から電気双極子の状態が評価できる。本研究ではインピーダンスアナライザを用いて周波数

ごとの複素誘電率を測定し，コンクリートの状態との関係进行评估する．実験時には，インピーダンスアナライザに接続した電極を高温加熱したコンクリートおよびモルタル供試体に接触させ，誘電スペクトルを観測した．

表 1 に加熱実験の要因と水準を示す．供試体の加熱は文献^{2) 3)}を参考に計画加熱温度を設定した⁴⁾．その後供試体表面に電極を接して誘電測定を行うとともに，表面部の試料を採取し水和物の分析を行った．供試体の加熱にはマッフル炉を用いた．昇温速度は既往文献⁴⁾を参考に，計画加熱温度に達するまで 100°C/hr の速度で昇温し，計画加熱温度に到達後，供試体内部温度を均一にするため 1 時間保持した．その後，炉内で自然降温冷却させ，室温到達後に供試体を取り出して各種試験に供した．コンクリートの使用材料を表 2 に，調合を表 3 に示す．供試体は表 3 の調合で作製したコンクリートをウェットスクリーニングして 40×40×160mm の型枠に打込み，約 3 か月封かん養生した後，中央部に曲げ荷重を与えて得られる折片（長さ約 80mm）を用いた．測定状況を写真 1 に示す．水和物の分析には XRD/リートベルト解析および TG-DSC で水和物を分析した．XRD 用の試料は加熱後に微粉碎し，75 μ m のふるいに全通した粉末を用いた．また，標準物質として α -Al₂O₃ を 10wt% 混合して試料とした．X 線回折は BlukerAXS 社製 D8Advance を使用し，走査範囲を $2\theta = 5\text{--}65^\circ$ に，ステップ幅を 0.023 とした．スキャンスピードは各試料で 0.1°/min で仮測定を行い，ピーク時の強度が 10000 になるように調整した．得られた XRD の結果をもとに定性分析を行い，含有する鉱物および水和物を同定し，リートベルト解析（TOPAS ver4.2）により水和物の定量を行った．TG-DSC は，メトラー・トレド社製 TGA/DSC1 を使用し，アルゴン雰囲気下で常温から 105°C までを 5°C/min で昇温し，105°C 到達後 3 時間保持した後，10°C/min で 1100°C まで昇温させ，その間の示差熱変化（DTG）と質量変化（TG）を求めた．

表 1 実験の要因と水準

要因	水準
計画加熱温度(°C) ^{2) 3)}	20, 100, 300, 500, 700
昇温速度(°C/hr)	100
温度保持時間(hr)	1
供試体寸法(mm)	40×40×約 80

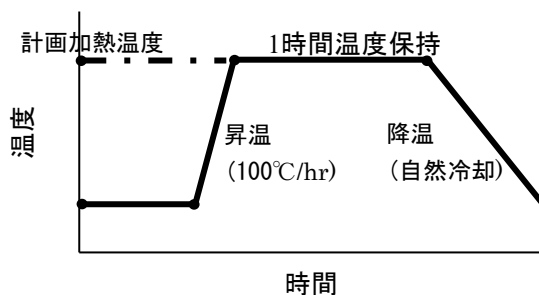


図 1 加熱温度履歴⁴⁾

表 2 使用材料の品質

材料	品質
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
骨材	細骨材:鬼怒川産川砂 (表乾 2.62g/cm ³ , F.M. 2.51)
	粗骨材:碎石 (表乾 2.67g/cm ³ , Gmax20mm)
混和剤	AE 減水剤高機能型(ボゾリス 15S)
	AE 剤(マイクロエア 202)

表 3 コンクリートの計画調合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)				AE 減水剤 (C×wt%)
	W	C	S	G	
50	174	316	785	1005	0.8



写真 1 誘電測定の状態

(実験調査によって得られた新しい知見)

図 2 に X 線回折によって得られた各加熱温度における回折ピークを示す。水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の回折ピークは 300℃までは確認できるが、500℃以降では消失し、それと同時に CaO のピークが増加している。この結果から、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は 450~500℃で分解し、 CaO を生成すると考えた。この特徴は、セメントペーストで報告されている $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の分解の特徴と一致している。また、既往の研究では、炭酸カルシウム(CaCO_3)は 750~900℃で分解することが報告されている。本研究では、計画加熱温度 700℃までの加熱を実施したため、 CaCO_3 の分解による回折ピークの消失は確認されなかった。

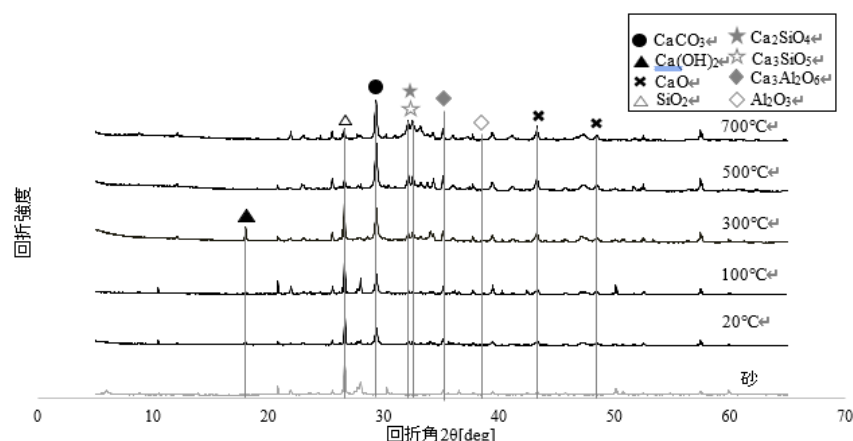


図 2 X線回折結果

なお、二酸化ケイ素(SiO_2)で大きな回折ピークが確認された。砂はケイ素が主成分であるため、モルタル供試体に使用した砂のみで X 線回折を行い比較した。その結果、 SiO_2 の大きな回折ピークが確認されたことから、供試体で観測された SiO_2 の回折ピークは骨材由来と考えられる。図 3 に TG-DSC による DTG 曲線と TG 曲線を示す。各加熱温度によって特に低温領域での C-S-H などが分解する領域で曲線が異なることが確認できる。図 4 に示す誘電測定による誘電損失スペクトルは、全ての加熱温度で 1 つの損失ピークが観測された。図より未加熱 (20°C) の供試体では、この損失ピーク周波数は 30 kHz($\log f=4.5$)となった。加熱温度が高くなると低周波側にシフトするが、700°C加熱では損失ピーク周波数がバラつく結果となった。これは、700°C付近では炭酸カルシウム (CaCO_3) が分解過程にあるため、電極を押し当てた箇所によって異なる状態となったためと考えられる。300°C、500°Cの加熱温度では、この間に水酸化カルシウム (Ca(OH)_2) の分解が生じたと考えられるがピークの変化は大きくなかった。

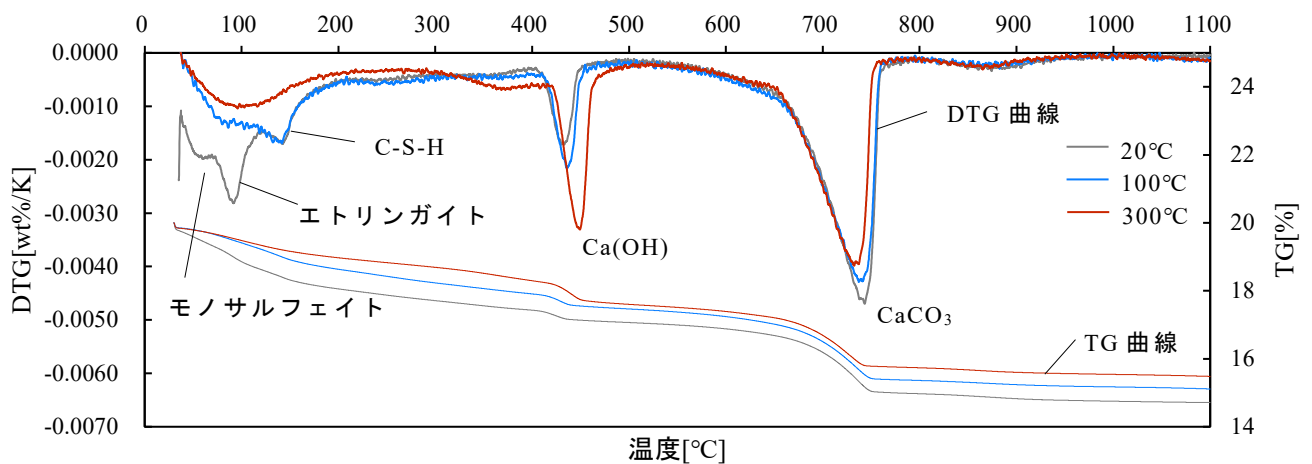


図 3 熱分析による DTG 曲線と TG 曲線

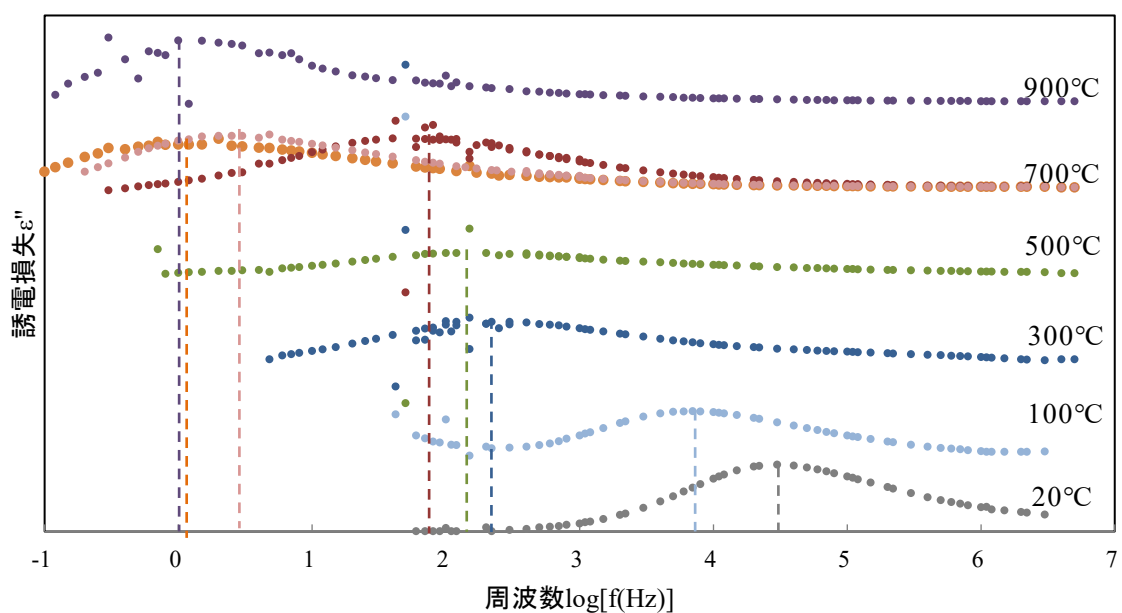


図 4 誘電測定による誘電損失スペクトル

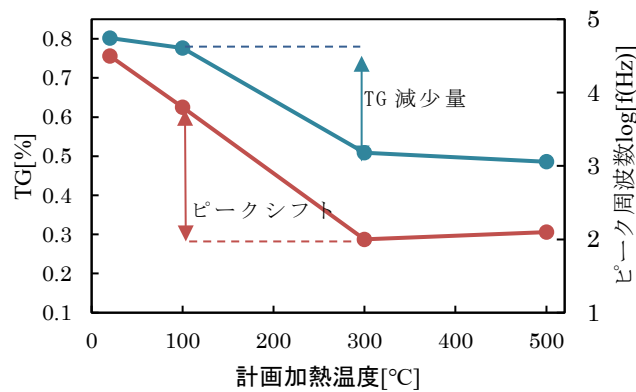


図 5 TG(%) 損失ピーク周波数の関係

このことから、主に 300°C以下の温度域での水和物分解と損失ピーク周波数のシフトの関係について検討した。その結果を図 5 に示す。図 5 には 500°Cまでの TG および損失ピーク周波数の関係を計画加熱温度との関係で示している。図より、100°Cから 300°Cの間の TG 減少量と損失ピーク周波数の変化の傾向が一致する結果となった。既存のコンクリートの誘電測定の結果では、MHz 領域に観測される損失ピークは供試体内の結合水の運動を反映しており、損失ピーク周波数は結合水の閉じ込められた空間構造に関係することが報告されている。本研究で実施した誘電測定の測定結果では、100°Cから 300°Cで加熱することで、損失ピーク周波数が低周波側にシフトすることが確認できた。また、図 4 より、700°Cから 900°Cでも変化が大きいことがわかる。これらより、C-S-H や CaCO_3 の加熱過程におけるセメント硬化体中の毛管細孔やゲル細孔などの空隙構造変化を評価出来る可能性を示していると考えられる。また、温度変化に応じた損失ピーク周波数の変化からコンクリート表面が履歴した受熱温度を推定できる可能性を示唆している。

以上より、20~900°Cまでの温度で加熱したコンクリートの誘電測定を実施し、損失ピーク周波数からコンクリートの受熱温度を推定できる可能性を確認した。

参考文献

- 1) 須藤誠一ほか：広帯域誘電分光測定によるセメント系硬化体中の水の評価，日本建築学会構造系論文集第 90 巻第 832 号，2025.6(掲載予定)
- 2) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説,2024
- 3) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック,2017
- 4) 一瀬賢一,長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究,日本建築学会構造系論文集,第 541 号, pp.23-30, 2001.3

(発 表 論 文)

- 1) 須藤誠一，佐藤幸恵ほか：広帯域誘電分光測定によるセメント系硬化体中の水の評価，日本建築学会構造系論文集第 90 巻第 832 号，2025.6(掲載予定)
- 2) Shintaro Saito, Sachie Sato, Norihiko Kurihara, and Seiichi Sudo, Prediction of Compressive Strength in Structures using Dielectric Measurements, The 4th ICSCEA 2025.7(採用決定)
- 3) 内田朋希、佐藤幸恵，須藤誠一：高温加熱を受けたコンクリートの誘電測定による非破壊品質評価手法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）2025.9（投稿済）