

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K14335

研究課題名（和文）交流インピーダンス法を用いたコンクリートの電気化学的断層スキャンに関する基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental Study on Electrochemical Impedance Tomography for Concrete Structures

研究代表者

福山 智子（FUKUYAMA, Tomoko）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：60587947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリートの電気化学的トモグラフィ取得には、対象の表面電位の測定が必要となる。本研究では、表面電位測定時に印加する電流の周波数決定にはセメント系材料の緩和特性の把握が不可欠であるとし、測定対象を構成する材料の導電・誘電特性、構成材料の形状、測定電極の配置をパラメータとして、インピーダンスの周波数分布に及ぼす影響について実験を行った。その結果、コンクリートの電気化学的なトモグラフィ取得の基礎となる表面電位測定時の最適な測定周波数100Hzを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートの内部は不可視のため、劣化の初期段階での検出が困難である。コンクリート内部の電気化学的なトモグラフィ情報は空洞や鉄筋の分極抵抗などと相関するため、本研究で検討する技術は鉄筋コンクリート構造物の健全性評価や欠陥検出に資すると考えられる。この技術が実現すれば、安価かつ非破壊で構造物の診断を行うことが可能となり、構造物の長寿命化やライフサイクルコストの低減が期待される。

研究成果の概要（英文）：Drawing electrochemical tomography of concrete requires surface potential of target. It is essential to determine frequency of input current for measuring surface potentials. In this study, the experiments about relaxation characteristics of cement-based materials were conducted to grasp effect of material conductivity, dielectricity, shape, and electrodes configuration on the frequency distribution. As a result, the optimum measurement frequency of 100 Hz when measuring the surface potential, which is the basis for obtaining electrochemical tomography of concrete, was clarified.

研究分野：建築材料

キーワード：インピーダンス 緩和 周波数特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

CT スキャンは X 線の物質透過率の差異を利用して断層の情報を得る技術で、人体の内部構造などの観察に広く用いられている。鉄筋コンクリート構造物においても X 線を利用した内部画像が得られているが、形状情報のみしか得られないという難点があった。

一方、福山がこれまで継続的に研究を行っている交流インピーダンス法は、対象に交流信号を印加することでインピーダンスの周波数応答を把握する電気化学的な手法で、材料を抵抗と容量からなる等価回路にモデル化する。このモデル化により、材料の質的情報（誘電率・導電率など）を得ることはできるが、内部の形状情報は少数の素子（抵抗やコンデンサ）に還元されてしまい、微細構造と質的情報とを同時に取得することが難しいという問題があった。

これに対し、電気インピーダンストモグラフィ（EIT）は、対象に多点の電極を設置して表面電位などを測定し（例えば、図 1）導電率や体積抵抗率（インピーダンス）の内部分布推定から断層構造を画像化する電気化学的方法であり、構造と質的情報の双方を安価に非破壊で得られる手法として医学分野やその他さまざまな分野で研究が進められている。

以上の背景に基づき、本研究は、コンクリートの健全性評価や鉄筋腐食診断に資すると考えられるトモグラフィ（構造や質的状态分布の断層イメージ）を取得する手法の開発を目的として、多点電極によるコンクリートのインピーダンス測定・解析に関する検討を開始した。

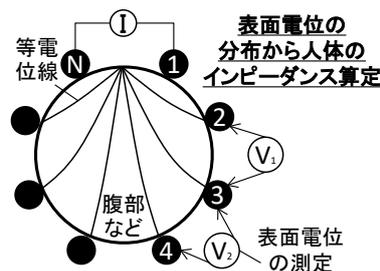


図 1 医学分野における EIT の利用

2. 研究の目的

本研究は、物質の断層構造を導電率などの分布から画像化する EIT をコンクリートにおいても実現することを目的とする。そのために、試験体表面に設置した多点電極を用いた電位測定とインピーダンス分布の解析によりコンクリート断層の幾何学的・電気化学的イメージングデータを取得する手法を構築する。

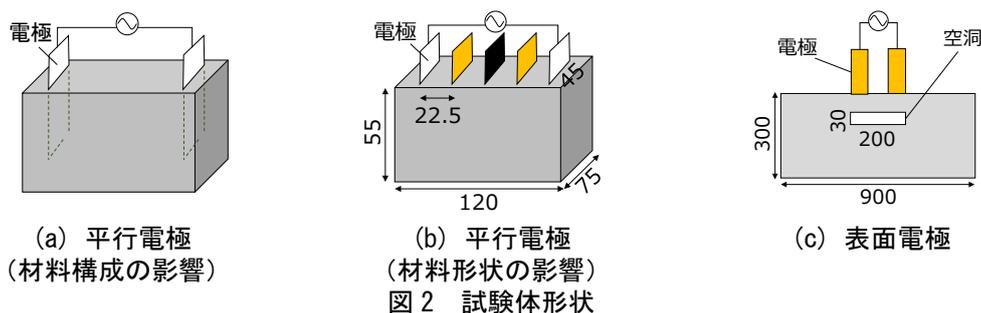
当初は、トモグラフィ取得のために試験体表面に複数の電極を設置した上で対となる電極間の電位を測定し、材料のインピーダンスを解析することを想定していた。しかし、インピーダンスは測定対象の材料構成や電極の分極により周波数依存性をもち緩和現象を示すことから、トモグラフィ構築のための電位測定時には緩和の影響が少ない周波数を選定する必要があると考えられる。通常、コンクリートは、高周波域で抵抗として挙動し、低周波数域で緩和（測定電極の分極も含む）を示す。

しかし、材料構成や電極配置がインピーダンスの周波数特性に影響を及ぼすことが想定されたことから、EIT の検討に先立ち、(1)構成材料がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響、(2)構成材料の形状がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響、(3)電極配置の影響がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響を把握することとした。

3. 研究の方法

- (1)構成材料がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響：コンクリートの微細構造は様々なスケールの抵抗とコンデンサの集積であり、このコンデンサの影響でインピーダンスに緩和が生じる。セメントペーストやモルタル、コンクリートの試験体を図 2(a)に示すように金属板（測定電極）で挟み、この 2 電極間に交流電圧を印加してインピーダンスの周波数応答を測定した。試験体のパラメータは、含水率、W/C、粗骨材の混和有無、高炉スラグ・フライアッシュ・カーボンナノチューブ・鉄粒子といった各種材料の混和量や試験体中含浸する塩化ナトリウム水溶液の濃度とした。
- (2)構成材料の形状がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響：トモグラフィ構築時に重要な情報となる試験体構成材料の厚さの違いがインピーダンスに及ぼす影響を把握することを目的に、モルタル中に測定対象となる板材（鉄、ポリエチレン、ステンレス鋼、溶融亜鉛めっき鋼）を埋設し試験体とした（図 2(b)）。埋設する板材の厚さは 0.5、1.0、2.0、4.0mm とした。また、上記(1)で検討した導電性粉末材料（カーボンナノチューブ）や導電性粒子状材料（鉄粒子）についても比較を行った。
- (3)電極配置の影響がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響：実際のトモグラフィ取得のためには、試験体表面に複数の電極を設置した上で対となる電極間におかれた材料のインピーダンスを測定することになるが、この対となる電極の選定にはいくつかのパターンが考えられる。前述の平行電極配置のほか、隣り合う一対の電極の場合（表面電極配置）も考慮が必

要であり、この場合の測定は電場の印加が直線にはならないことから両者の緩和特性が一致せず、測定周波数の選定に影響することが予想された。コンクリート中に欠陥を模擬した空洞を形成（空洞無・深さ 50mm, 150mm）し、図 2(c)のように表面に銅硫酸銅電極を押し当てることでインピーダンスを測定し、平行電極との周波数特性の違いを検討した。



4. 研究成果

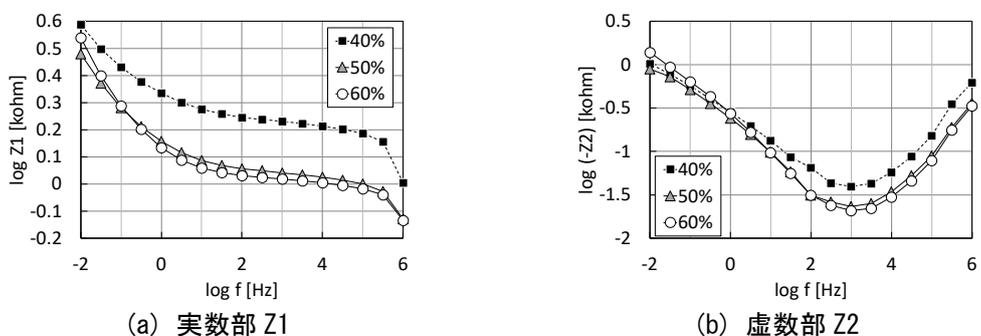
(1) 構成材料や材料形状がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響

本研究ではインピーダンスの緩和現象に着目していることから、材料自体の導電性や材料間の界面挙動に影響する材料の表面積は重要なパラメータとなると考えた。

図 3 は、コンクリートのインピーダンスを示したものである。実数部 Z1 は材料の抵抗、虚数部 Z2 は材料の容量に関する指標となる。EIT においては、材料中の抵抗率の分布が重要となるため、本報告書ではインピーダンスの実数部の結果を主に抜粋して示す。

図 4 は粉体材料をセメントペーストに混和した場合の Z1 を示したものである。導電性を有する粉体であるカーボンナノチューブを混和した試験体と導電性を持たないフライアッシュを混和した試験体とでは、緩和を開始する周波数が異なっており、カーボンナノチューブの方がより低周波数での緩和開始となっている。フライアッシュと高炉スラグは同様の傾向を示し、どちらも 10^2Hz までは一定のプラトーを示すが、それより下の周波数で緩和を開始していることから、混和材料の導電性の有無が緩和周波数に影響すると推察される。

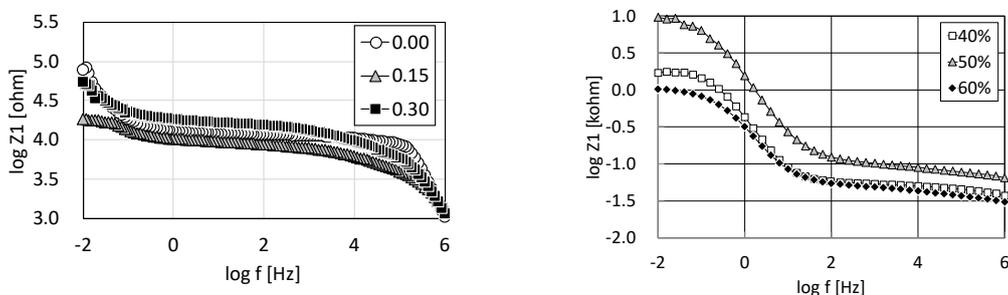
図 5, 図 6 は粒子状材料と板状材料をモルタルに混和した場合の Z1 を示したものである。インピーダンスの分布は類似した形状を示し、微分特性から 10^2Hz より下の周波数で緩和を開始していることが確認できた。また、材料厚さの影響については本測定の範囲では明確ではなかった。



(a) 実数部 Z1

(b) 虚数部 Z2

図 3 W/C がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響



(a) 導電性有（カーボンナノチューブ）

(b) 導電性無（フライアッシュ）

図 4 粉状材料

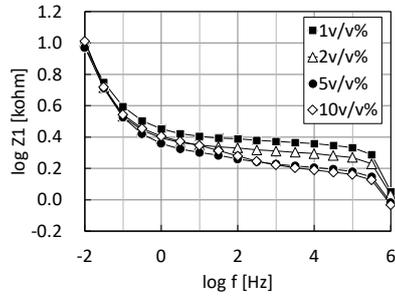


図5 粒子状材料（鉄粒子）

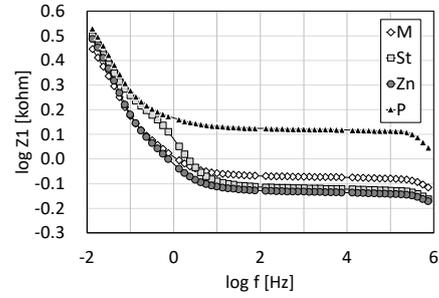
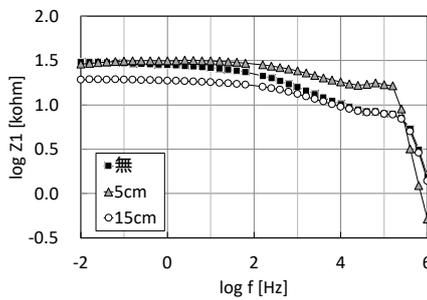


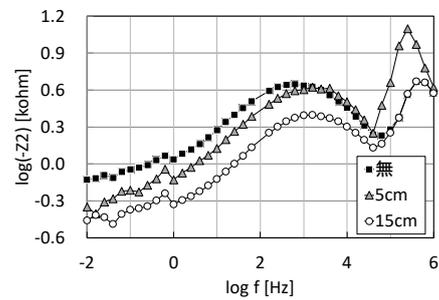
図6 板状材料

(2)電極配置の影響がインピーダンスの周波数特性に及ぼす影響

電極配置がセメント系材料のインピーダンスに及ぼす影響に関して平行電極配置，表面電極配置による測定結果の比較を行った。図3と図7の比較から，各電極配置を用いたインピーダンスの周波数分布の差異は明らかである。これは電場の印加方向に依存して材料内の導電電荷や感応電荷の移動方向が異なるために，同一試験体であっても各周波数における抵抗やコンデンサとしての振る舞いに差異が生じることを意味する。ただし，Z1に関してはほかのシリーズと同様に 10^2Hz 近傍のインピーダンスは一定のプラトーを示す結果が得られた。



(a) 実数部 Z1



(b) 虚数部 Z2

図7 表面電極

以上より，本研究の検討の範囲では，セメント系材料のインピーダンスは混和材料の種類や形状，電極配置にかかわらず， 10^2Hz 前後では緩和を示さないという結果が得られた。今後は，この周波数で測定した試料表面の表面電位分布を有限要素法により内部のインピーダンス分布に変換してコンクリートのトモグラフィを取得する。また，これら蓄積したインピーダンスデータを用いて EIS の解像度に対する検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 福山智子, 金侖美, 山田悠二, 田中章夫	4. 巻 42
2. 論文標題 セメント系材料へのカーボンナノチューブ分散に関する検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 福山智子, 千歩修	4. 巻 82(740)
2. 論文標題 プレストレストコンクリートの劣化診断を指向したセメント系積層材料の電気化学的特性の周波数依存性に関する基礎的検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1537 1546
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aijs.82.1537	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tomoko FUKUYAMA, Yuki OKAMOTO, Takuya HASEGAWA, Osamu SENBU	4. 巻 3(1)
2. 論文標題 Fundamental study on dielectric relaxation characteristics of cementitious materials	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Asian Concrete Federation	6. 最初と最後の頁 20-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.18702/acf.2017.06.3.1.27	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 福山 智子, 岡本 祐輝, 長谷川 拓哉, 千歩 修	4. 巻 70
2. 論文標題 セメントペーストの誘電緩和特性に及ぼす混和材料と細孔容積の影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 セメントコンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 201-208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.14250/cement.70.201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福山 智子, 岡本 祐輝, 長谷川 拓哉, 千歩 修	4. 巻 70
2. 論文標題 誘電緩和特性を用いたコンクリート粗骨材界面のキャパシタ評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 セメントコンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 193-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://doi.org/10.14250/cement.70.193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福山 智子, 岡本 祐輝, 長谷川 拓哉, 千歩 修	4. 巻 38
2. 論文標題 誘電緩和現象を利用したコンクリートの微細構造解析技術に関する 基礎的研究	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1251-1256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 野田貴之, 福山智子, 長谷川 拓哉, 千歩 修	4. 巻 38
2. 論文標題 セメント系材料の性状が交流インピーダンス測定に及ぼす影響	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 675-680
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川 拓哉, 千歩 修	4. 巻 38
2. 論文標題 コンクリートの細孔構造と交流インピーダンスの相関に関する検討	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1245-1250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本祐輝, 福山智子, 千歩 修	4. 巻 40
2. 論文標題 コンクリートの各種性状が交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1665-1670
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 福山智子, 岡本祐輝, 千歩修	4. 巻 40
2. 論文標題 プレストレストコンクリートを構成する材料の電気化学的判別に関する基礎的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本コンクリート工学会年次論文集	6. 最初と最後の頁 1659-1664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川 拓哉, 千歩 修	4. 巻 16
2. 論文標題 含水状態を変えたコンクリートの交流インピーダンス測定に基づく空隙構造の解析	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 213-218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 福山智子, 金侖美, 佐光正和, 牛渡裕二, 川瀬良司
2. 発表標題 プレストレストコンクリートの誘電緩和測定を利用した欠陥の検出に関する電極配置の影響
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 FUKUYAMA Tomoko, SENBU Osamu
2. 発表標題 Nondestructive Electrochemical Testing Method for Prestressed Concrete Structures
3. 学会等名 ICCSEE 2018 : 20th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoko Fukuyama, Yuki Okamoto, Takuya Hasegawa, Osamu Senbu
2. 発表標題 FUNDAMENTAL STUDY ON DIELECTRIC RELAXATION CHARACTERISTICS OF CONCRETE
3. 学会等名 The 7th International Conference of Asian Concrete Federation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福山 智子, 岡本 祐輝, 長谷川 拓哉, 千歩 修
2. 発表標題 誘電緩和測定によるコンクリート粗骨材界面の情報の取得
3. 学会等名 セメント技術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修
2. 発表標題 セメントペーストの誘・導電特性に及ぼす混和材料と細孔構造の影響
3. 学会等名 日本建築学会北海道支部研究報告会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 福山智子, 長谷川拓哉, 千歩修
2. 発表標題 セメントペーストの誘・導電特性に及ぼす混和材の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川 拓哉, 千歩 修
2. 発表標題 各種性状の変化が交流インピーダンスの周波数応答特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会北海道支部研究報告会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本祐輝, 福山智子, 長谷川 拓哉, 千歩 修
2. 発表標題 粗骨材やセメントマトリクスが交流インピーダンスに及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----