

# コンクリートの充填・締固めを検知する超薄型シート状センサの開発

## DEVELOPMENT OF SHEET SENSOR TO DETECT THE FILLING AND COMPACTION OF FRESH CONCRETE OF FRESH CONCRETE

山田 勉<sup>\*1</sup>, 二宮伸二<sup>\*2</sup>, 海野雄士<sup>\*3</sup>, 桑田拓弥<sup>\*4</sup>  
 Tsutomu YAMADA, Shinji NINOMIYA, Yuji UMINO and Takuya KUWATA

The purpose of this study is to develop a sensor to detect the filling and compaction of fresh concrete along the entire length of the crown area in the tunnel lining.

Firstly, a sensor based on the innovative concept was designed. Secondly, a feasibility study using several prototype sensors was repeatedly carried out in the laboratory. Then, we chose the best of the prototype sensors and strove to enhance its performance and reduce costs. Finally, an in-situ test using the improved sensor was carried out and its performance was confirmed with an automatic detection system.

The results from experimental studies revealed that the sensor could identify the difference between fresh concrete and bleeding water as well as detect vibration.

The developed sensor will make possible a high quality of concrete lining because it monitors fresh concrete along the entire length of the tunnel crown. It will be possible to apply this sensor not only to tunnel concrete but also to concrete of architectural structures.

**Keywords :** Sheet Sensor, Filling, Compaction, Crown Area, Tunnel Lining, Juutenmieruka  
 シート状センサ, 充填, 締固め, 天端部, 覆工コンクリート, ジュウテンミエルカ

### 1. はじめに

山岳トンネルの覆工コンクリートは、セントル（移動式型枠）の検査窓を利用して側壁部から打設を開始し、順次下方の検査窓を閉じて肩部、天端部の打設に移行する。最終打設となる天端部は、全ての検査窓とつま型枠を閉じて吹上げ方式により打設するため、充填・締固め状況の目視確認が困難となる。このような条件において、充填完了は、打設数量の予定と実施の比較、天端のつま型枠の隙間からのブリーディング水やモルタル分の流出程度等をもとに判断している。また、内部振動機や外部振動機を用いた締固めは、作業員の経験に基づき締固め時間等

を判断している。しかしながら、これらの判断には不確実性が伴い、覆工コンクリート天端部背面の空洞や締固め不足等の品質上の問題が発生していた。

このような背景から、コンクリートの充填・締固め状況を監視する様々なセンサが開発されてきた。例えば、充填の監視については、電圧印加式<sup>1)</sup>、静電容量式<sup>2)</sup>、光学式<sup>3)</sup>等があり、充填・締固め双方の監視については、振動を利用する方法<sup>4)</sup>がある。これらのセンサは何れも特定点を監視するものであり、覆工コンクリートにおいて打設スパン全長（例えば、10.5m）にわたって監視するには、天端の防水シートに多数のセンサを線状または面状に設置する

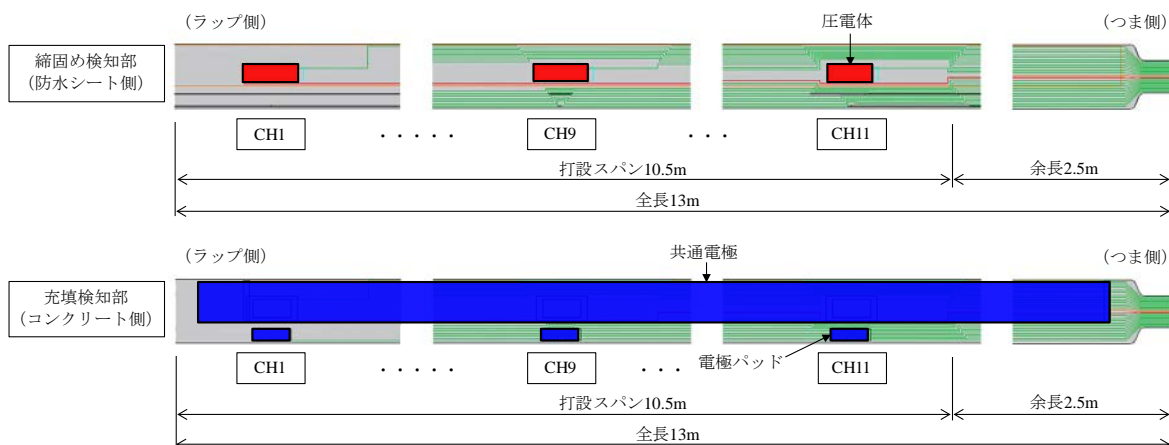


図-1 センサ平面図

\*1 戸田建設(株)土木技術営業部

\*2 戸田建設(株)土木技術営業部 修士(工学)

\*3 ムネカタインダストリアルマシナリー(株) 修士(工学)

\*4 ムネカタインダストリアルマシナリー(株)

Civil Engineering and Technology Sales Dept., TODA CORPORATION

Civil Engineering and Technology Sales Dept., TODA CORPORATION, M.Eng.

Strategy Planning Office, Munekata Industrial Machinery, M.Eng.

Strategy Planning Office, Munekata Industrial Machinery

とともに、ケーブルを並列多重に配線する必要がある。しかしながら、センサ設置・配線作業の煩雑さや費用増加等の問題があった。そこで、戸田建設株式会社とムネカタインダストリアルマシナリー株式会社は、天端部全長の充填・締固め状況を可視化するセンサ「ジュウテンミエルカ®」（以下、本センサという。）を開発した。本稿では、本センサの概要および現場適用例について報告する。

## 2. 本センサの概要

本センサに求める基本的機能は、コンクリートの充填および締固め双方を監視することである。充填および締固めの検知原理は、後述する別々の原理を用いている。厚さ 0.1mm 程度のシート状基材の両面を利用し、コンクリートと接する側に充填検知部、防水シートに接着する側に締固め検知部がそれぞれ配置されている。なお、用途に応じて充填検知部のみ配置して使用することも可能である。

各検知部および配線は、シート状基材上に厚さ 0.01mm オーダーの薄膜技術により形成されている。配線は、シート状基材の防水シート側へ全て集約し、接着層兼絶縁層（厚さ 0.4mm）で被覆している（図-2、図-3 参照）。これにより、配線一体型のコンパクトな形態（厚さ 1mm 未満、幅 50mm 程度、写真-1 参照）となり、従来のセンサに比べて、センサ設置作業が容易になっている。

さらに、本センサには、広範囲をまとめて監視できる機能を付加している。この機能は、図-1に示すように打設スパンを最大11区間に分割してそれぞれに充填および締固め検知部を配置することで実現している。各検知部からの信号は、1本のケーブルを介して写真-2のデータレコーダに取得され、充填・締固め状況が自動判定される。判定結果はUSBフラッシュ・ドライブ（いわゆるUSBメモリ）にデータ移動することが可能である。

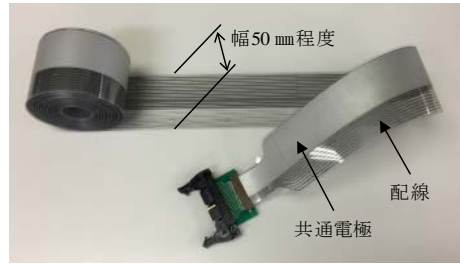


写真-1 センサ形態（接着層なし）



写真-2 データレコーダ

## 3. 充填検知機能

### 3.1 充填検知の原理

フレッシュコンクリートの液相には、セメントから溶出した $Ca^{2+}$ 、 $Na^{+}$ 、 $K^{+}$ 等の陽イオンと $OH^{-}$ 等の陰イオンが存在する。フレッシュコンクリートに電圧を印加すると、これらのイオンがキャリアとなり電気伝導性を示すと考えられている。そして、練混ぜから凝結の始発前後までは、電気伝導率が経時的に増大することが報告されている<sup>5)</sup>。また、打設後に生じるブリーディング水は、同様のイオンを含む電解質溶液である。したがって、フレッシュコンクリートおよびブリーディング水の電気特性を測定することで、覆工コンクリート天端部の充填状況を把握できると考えた。

そこで、充填検知部は基材に並列配置した2つの電極で構成することとした（図-4参照）。電極間に交流電圧を印加し、電極間のインピーダンス（交流回路における電気の流れにくさを表す数値、単位： $\Omega$ ）の変化により生じる交流電圧の変化を監視することで、電極間に存在する物質の種別（空気、ブリーディング水、およびコンクリート）を判定する。

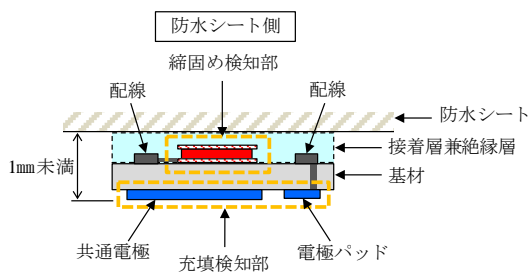


図-2 センサ断面図

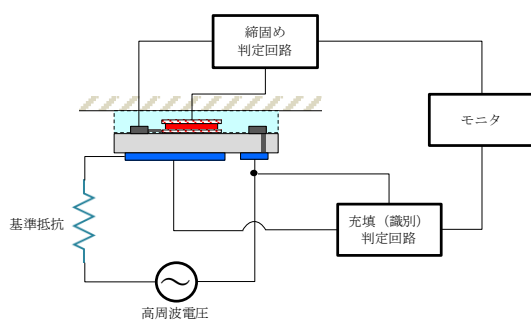


図-3 充填・締固め自動判定システムブロック図

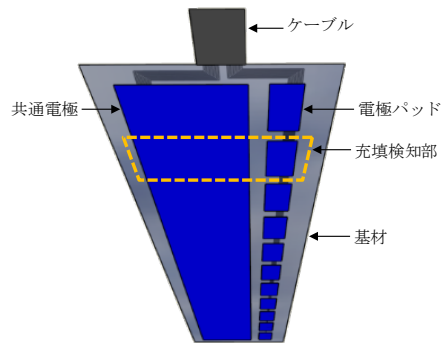


図-4 充填検知部（コンクリート側）

### 3.2 充填検知に関する室内試験結果

コンクリート充填時、本センサに接触した物質がブリーディング水またはコンクリートであることを判定する閾値を設定するために、本センサおよびインピーダンスアナライザ（HIOKI製、IM3570）を用いた室内試験を実施した（写真-3参照）。インピーダンスアナライザは、本センサが出力する電圧データの検証を目的として、インピーダンス測定に用いた。測定対象は、ブリーディング水およびコンクリート（表-1参照）とした。

図-5、図-6に測定結果を示す。本センサが出力した電圧のアナログ信号をデジタル変換したデータ（以下、デジタル値という。）は、各測定対象で段階的に異なり、コンクリートとブリーディング水では3倍程度異なる値となった。なお、同図には示していないが、空気のデジタル値は、コンクリートよりさらに数倍大きい値であった。また、各測定対象のインピーダンスは、本センサのデジタル値と同様の傾向を示した。これらの結果は、空気、ブリーディング水、およびコンクリートを識別するための閾値設定が可能であることを示している。

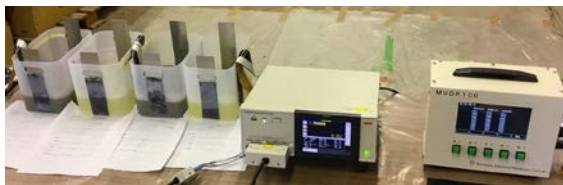


写真-3 充填検知に関する室内試験状況

表-1 コンクリートの配合

種別	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
普通	68.3	48.4	173	253	879	982	2.53
普通	63.8	47.5	173	271	855	990	2.71
普通	58.2	46.4	174	299	824	996	2.99

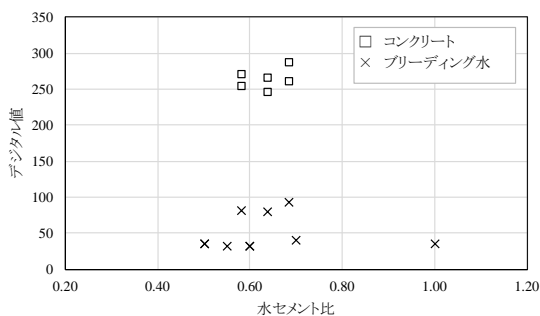


図-5 本センサによる測定結果

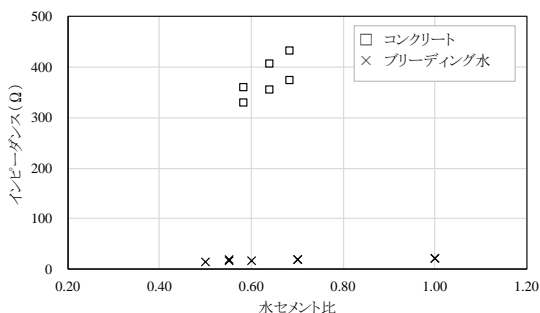


図-6 インピーダンスアナライザによる測定結果

### 4. 締固め検知機能

#### 4.1 締固め検知の原理

締固め検知部は、外力（ひずみ）を与えることで電気が発生するという圧電体の機能を利用している。従来の圧電体は形状や材質等が限られていたが、ムネカタインダストリアルマシナリー株式会社の独自技術であるスプレーコーティング<sup>®</sup>またはペースト塗布等の技術により、薄膜かつ任意形状の圧電体の形成が可能になった（図-7、8参照）。これにより、内部振動機（棒状パイプレータ）または外部振動機（型枠パイプレータ）の稼働時の振動を捉えて電気信号を発生させ、その変化を検知することで、締固め程度を判定する。

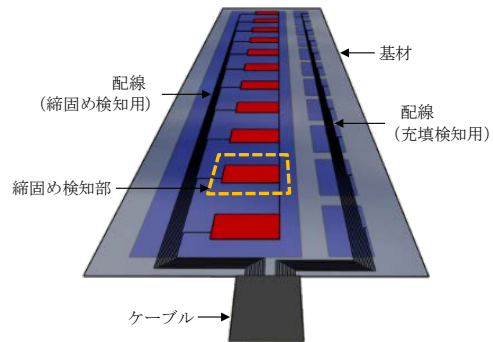


図-7 締固め検知部（防水シート側）

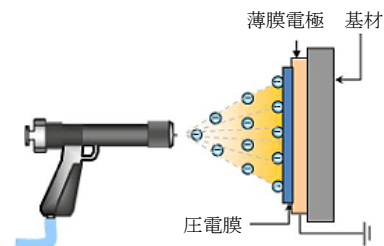


図-8 圧電材料のスプレーコーティング

#### 4.2 締固め検知に関する室内試験結果

木製型枠（幅300×300mm、高さ500mm）に表-1のコンクリートまたはモルタル（表-2参照）を投入後、内部振動機（φ50mm、振動周波数200Hzに設定）を挿入し、一定時間稼働させて伝播する振動の周波数、出力される電圧、および電磁ノイズの有無等を測定した（写真-4参照）。

図-9に電圧測定結果の一例を示す。検知部の大きさ、配線の位置、電極形状等を変えた複数のタイプを用いて試験を行った結果、以下の事象を確認し、締固め検知部の仕様を決定した。

- あらかじめ設定した内部振動機の周波数である約200Hz（ $=5.0\text{ms}^{-1}$ ）の振動を検知したことから、内部振動機の振動による電圧応答を正確に捉えられている。
- 一概に検知部面積を大きくすれば検知感度が上がるわけではなく、最適な検知部面積が存在する。
- 検知部および配線を包含するような（シールド）電極を配置することで、高周波振動モータ内蔵の内部振動機等に起因する電磁ノイズ低減に一定の効果がある。

表-2 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	S
60.0	2.52	321	535	1,350



写真-4 締固め検知部に関する室内試験状況

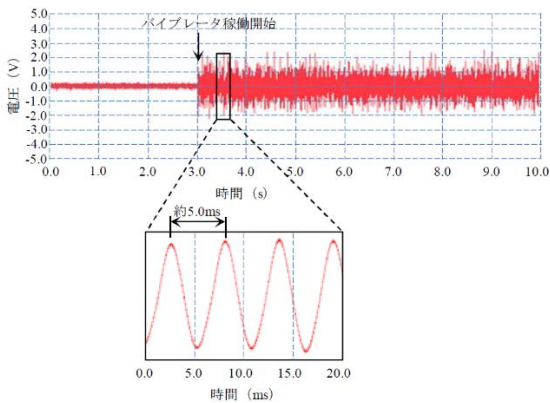


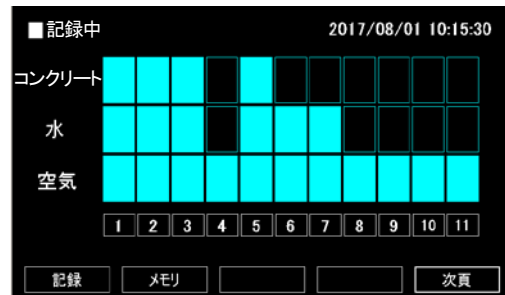
図-9 電圧測定結果（締固め検知部）

## 5. データレコーダ

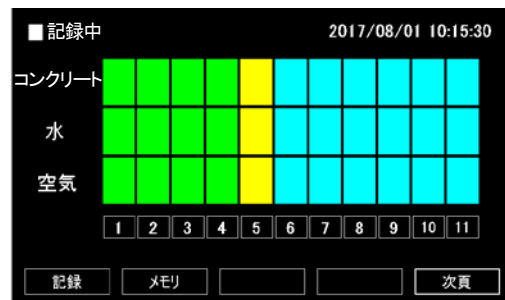
図-10, 11に充填・締固め状況を自動判定するデータレコーダのモニタ表示例を示す。充填・締固めの検知結果は、打設スパンを最大11区間に分割してリアルタイムにモニタリングでき、モニタの横軸に各区間の検知状況が並べて表示される。図-10は、充填中のモニタ表示例で、充填検知部が接触している物質の識別を青色セルの点灯数で表している。モニタの縦軸の点灯数が1つのとき空気、2つのときブリーディング水、3つのときコンクリートであることを示す。図-11は、充填後に締固めを開始した場合のモニタ表示例である。内部振動機または外部振動機の稼働に伴い締固め検知部まで振動が到達し始めた区間のセルは全て黄色に変わり、十分締固め固まった区間は全て緑色に変わる。

将来的には、データレコーダから専用のクラウドサーバへデータを無線送信し、その情報をインターネット上で閲覧することを検討している。これにより、データレコーダが設置されたセントル内だけでなく、何れの場合からでも充填・締固め状況をリアルタイムで把握することができる。さらに、これら

のデータは、トンネル供用後の維持管理の初期データとして活用することも可能になる。



(点灯1:空気, 点灯2:ブリーディング水, 点灯3:コンクリート)  
図-10 充填中のモニタ表示例



(緑色:締固め完了, 黄色:締固め中, 青色:締固め前)  
図-11 締固め中のモニタ表示例

## 6. 現場適用例

### 6.1 施工性の評価

本センサ（充填検知部のみ配置）を山岳トンネルの覆工コンクリート天端部の充填状況の監視に適用した。写真-5に本センサの現場納入時の形態を示す。長さは、防水シートの起伏によるロスを考慮して、打設スパン長（10.5m）に余長2.5mを加え、13.0mとした。現場納入時は、接着層兼絶縁層と剥離紙をあらかじめセットし、貼付け作業がしやすいロール状の形態とした。

写真-6に本センサの貼付け状況を示す。セントルつま側の防水シートに手が届く位置に人員を配置し、セントル移動時に剥離紙を剥がしながら本センサを貼り付ける方法とした。結果として、セントル移動に遅れることなく迅速に貼り付けられることが確認できた。

写真-7に本センサ貼付け後の状況を示す。防水シートの起伏に追従して貼り付けられている。

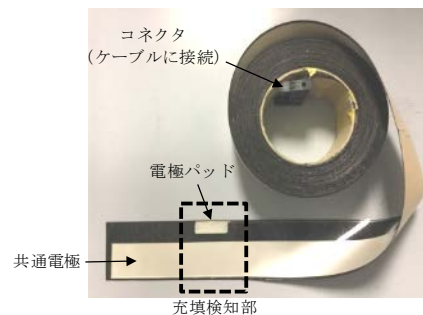


写真-5 センサ形態（接着層あり）

表-3 充填検知結果の出力例

Time	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11
14:11:08	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
14:21:10	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
14:31:10	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
14:41:10	黄	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
14:51:10	黄	赤	赤	赤	黄	黄	赤	赤	赤	赤	赤
15:01:10	黄	黄	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
15:11:12	黄	黄	赤	黄	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
15:21:12	黄	黄	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤
15:31:12	黄	黄	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤	赤

■ 空気, ■ プリーディング水, ■ コンクリート



写真-6 センサ貼付け状況

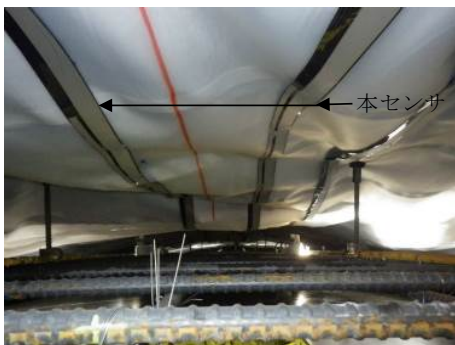


写真-7 センサ貼付け後の状況

### 6.2 検知精度の評価と検知結果の出力

現場で使用したコンクリート(表-4参照)においても室内試験と同様の電圧応答が得られ、空気、プリーディング水、およびコンクリートの識別が可能であった。

データレコーダで表示された検知結果は、測定区間および時刻毎に整理した表で出力可能である。表-3に打設スパン全長(10.5m)を11区間に分割して充填状況を監視したときの出力例を示す。赤色が空気、黄色がプリーディング水、緑色がコンクリートを表している。また、CH1がラップ側、CH11がつま側の検知部である(図-12参照)。ラップ側から順次、空気、プリーディング水、およびコンクリートへ経時的に変化していることが確認できた。

表-4 コンクリートの配合

種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Ad
普通	55.8	48.0	172	309	853	935	3.09

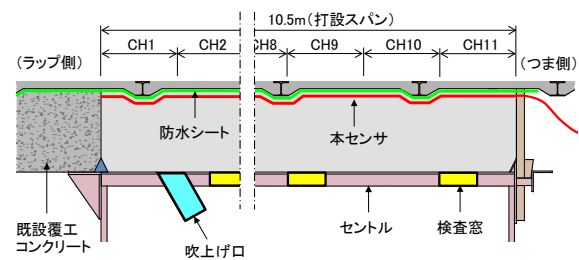


図-12 検知部の配置状況

### 7. おわりに

覆工コンクリート天端部の打設時に本センサを適用することで、打設スパン全長にわたって充填・締固め状況のリアルタイム監視が可能になる。これにより、天端部背面の空洞や締固め不足等の発生を未然に防止し、覆工コンクリートの品質確保に寄与できるものとする。

今後は、締固め検知部も併用し、覆工コンクリートへ適用を重ねて本センサの信頼性を高めていくとともに、明かり構造物のコンクリートにも適用し、コンクリート構造物全般の品質確保に取り組んでいく予定である。

### 参考文献

- 1) 平田隆祥, 十河茂幸「電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究」コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996.
- 2) 藤倉裕介「静電容量の変化によるコンクリートの打込みから硬化過程の水分量評価と施工時の品質管理手法に関する検討」コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012.
- 3) 坂井吾郎, 万木正弘, 坂田昇, 岩城実「品質保証を考慮した高流動コンクリートの施工について」コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, 1995.
- 4) 金子稔, 坂井孝, 安田正雪, 末岡英二「振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験」コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002.
- 5) 阿保寿郎, 松田浩朗, 松元和伸, 平間昭信, 寺澤正人「電気的な特性値を用いたコンクリートの凝結の進行の把握に関する基礎実験」土木学会第 65 回年次学術講演会, VI-508, 2010.
- 6) <https://www.munekata.co.jp/eh/method.htm>