

温度センサ・姿勢感知センサ付きICタグを  
搭載した再生樹脂型枠によるコンクリートの  
品質管理および型枠の運用管理に関する研究

東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻  
准教授 野口 貴文

平成24年11月

1. はじめに.....	4
2. スマートセンサ型枠システム .....	4
2.1 概要 .....	4
2.2 コスト比較 .....	4
3. 静電容量センサによる SS 型枠システムの自動制御に対する実験.....	6
4. 現場適用実験 .....	10
4.1 SS 型枠システムの無線通信距離の検証.....	10
4.2 SS 型枠システムの耐久性検証 .....	10
4.3 コンクリート表面推定強度分布可視化実験 .....	10
5. スマートセンサ用リーダ機器+ソフトウェアのインターフェイス開発.....	16
5.1 はじめに.....	16
5.2 スマートセンサリーダの改良 .....	16
5.3 スマートセンサリーダソフトウェアの改良.....	17
5.4 管理ソフトウェアのインターフェイスの改良.....	18
6. おわりに.....	20
7. 参考文献.....	20

## 研究関係者紹介

のぐち たかふみ

野口 貴文

現職： 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 准教授（工学博士）

## 主な著書・論文

- (1) 松田拓, 野口貴文, 蓮尾孝一, 小出貴夫, 鈴木康範:200N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの強度・自己収縮特性における初期高温履歴の影響メカニズム,1383-1392,第 76 巻 第 666 号,日本建築学会構造系論文集,2011
- (2) Won-Jun Park, Takafumi Noguchi:Genetic algorithm in mix design of recycled aggregate concrete,4206-4222,,The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics,2011
- (3) N. Tsuchiya, M. Kanematsu, T. Noguchi, H. Iikura:Water behaviour around the crack and the rebar in the reinforced concrete,Paper Number 3,31st,Proceeding of 31st Cement and Concrete Science Conference Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials,2011
- (4) 三谷卓摩, 北垣亮馬, 長井宏憲, 野口貴文:実道路ネットワークを考慮した ecoMA の拡張とコンクリートマテリアルフローへの適用,pp.79-83,Vol.7, No.1,日本 LCA 学会論文集,2011
- (5) 藤野郷史, 野口貴文:生コンクリート製造における消費電力量の定量化手法および時間依存特性を利用した省エネルギーポテンシャルの推計,pp.1221-1228,No.665,日本建築学会構造系論文集,2011
- (6) Hideki Yoshioka, Hsin-Chieh Yang, Masamichi Tamura, Masashi Yoshida, Takafumi Noguchi, Manabu Kanematsu, Koji Koura and Yasuji Ozaki:Study of Test Method for Evaluation of Fire Propagation along Façade Wall with Exterior Thermal Insulation,pp.27-44,Vol.30, No.1,International Journal for Fire Science and Technology,2011
- (7) Jeongwon Ko, Dongwoo Ryu and Takafumi Noguchi:The spalling mechanism of high-strength concrete under fire,pp.357-370,Vol.63, Issue 5,Magazine of Concrete Research,2011
- (8) Takafumi Noguchi, Ryoma Kitagaki and Masato Tsujino:Minimizing environmental impact and maximizing performance in concrete recycling,pp.36-46,Vol.12, No.1,Structural Concrete,2011

## 1. はじめに

コンクリートの型枠存置期間中の管理は、工期短縮と長期耐久性能に大きく関わるため、近年、ますます高いレベルの品質管理が要求されている。

本研究は、小型センサやチップ製品市場において成熟した既存製品をうまく組み合わせ、センサ付き小型集積回路を作成した上で、これを樹脂型枠あるいは鋼製型枠に設置することで、作業員に作業負荷をかけることなく、型枠の存置状況、使用回数、コンクリート表面の温度履歴といった情報を収集し、さらに組み込みソフトウェアを使って養生中のコンクリート表面強度推定など品質管理を行うことのできるコンクリート品質管理システム（スマートセンサ（SS）型枠システム）を開発することを目的としたものである。

これまで、コンクリートの品質管理を電子情報で行う手法は RFID を埋め込むなどの事例<sup>1</sup>があるが、本研究は、コンクリートにチップを混入するのではなく、型枠をローコストでデバイス化することで、型枠によって高度な養生・品質管理を効率的に実施することを目的としている。また、この SS 型枠システムに新たに静電容量センサを搭載することで、コンクリートの打込時期、脱型時期を自動探知し、センサシステムをスリープモードからアクティブモードに変えることで、コンクリート工事におけるデータ収集を完全自動化した上で、収集されたデータからコンクリートの脱型判定に必要な表面強度を精度よく推定することをも可能にする。

## 2. スマートセンサ型枠システム

### 2.1 概要

静電容量センサを付与したスマートセンサ型枠システムの分解写真、断面図、型枠への取付状況を、図 1 に示す。コンクリートに接触する内壁側温度センサの周辺に静電容量センサを取付け、コンクリートが接触した場合に静電容量の変化を感知するように設計した。

タッチセンサなど、導電性があるものがコンデンサに触れることで静電容量が変化することを利用した静電容量スイッチがあるが、コンクリートにおいても静電容量が変化することが知られており<sup>2</sup>、これを応用している。この他にも、通気口側の外気測定用センサ、6 軸・回転角を測定する加速度センサ、無線送受信モジュールを搭載した複合的な小型集積回路となっている。

### 2.2 コスト比較

スマートセンサ型枠システムには鋼製型枠と樹脂型枠の 2 バージョンが存在するが、既往の研究<sup>3</sup>をもとに、樹脂型枠バージョンの SS 型枠システムとウレタン塗装コンパネの性能比較試算結果を表 1 に示す。現時点で SS センサ型枠システムは、希望する建設会社によってレンタル契約され、複数の現場で利用されているが、この際のレンタル費用を比較した場合にも、コンパネと同等かそれ以下の平米単価となっている。但し、運用上の自動化がますます求められている。

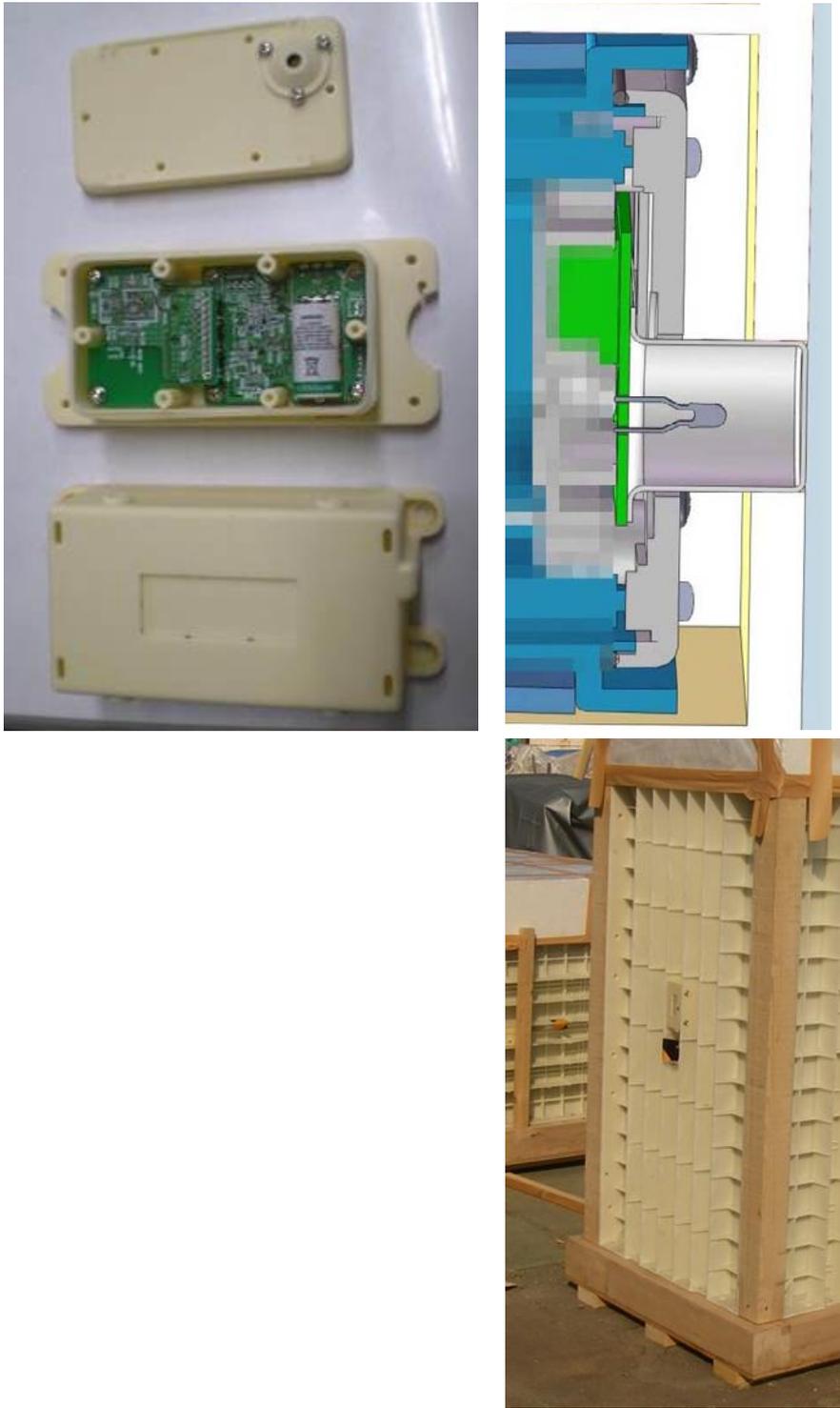


図 1 スマートセンサ型枠システムの概要

表 1 スマートセンサ型枠とコンパネの比較

項目	スマートセンサ型枠	コンパネ
重量 (サブロウ板)	10kg	12kg
光透過性	○ (作業空間明るい)	なし
製造 CO2 (kg/サブロウ板)	9.62	12.62
使用回数	50-100 回	5 回
建築物あたり CO2	小さい	大きい
品質管理システム	センサからのデータを利用した管理ソフト	なし
リサイクル性	再度樹脂型枠にリサイクル	燃料利用

### 3. 静電容量センサによる SS 型枠システムの自動制御に対する実験

SS センサ型枠システムを用いて、構造体コンクリートへの適用可能性を検証した。具体的には、①静電容量センサによるコンクリート打込開始の探知に基づいた自動温度計測開始、②脱型探知に基づいた温度計測自動終了、③ ①②によって収集されたデータに基づき有効材齢にて、コンクリート表面強度を推定したソフトウェアの精度検証をするため、樹脂型枠バージョンの SS センサ型枠を使った柱状の柱状型枠と、表面にボタン型温度センサを貼り付けたサミットモールド (Φ100mm) を用意し、これらに同じコンクリートを打込み、図 2 に示すように、キャッピングしたサミットモールドを SS 型枠内壁に接するように手早く埋込んだ試験体を複数個作成した。その後、表 2 のような水準で大型試験体内部からサミットモールドを取出し、養生期間が同じ現場養生の供試体と同時に圧縮強度試験を行った。SS 型枠システムによって収集された打込み後 7 日目までの収集データを図 3 に、それに基づき有効材齢によって推定されたコンクリート表面圧縮強度、埋込み供試体、現場養生供試体の圧縮強度試験結果をあわせて図 4 に示す。また、有効材齢に基づく圧縮強度推定については次に示す式とパラメータを利用した。

静電容量センサは、打込み、脱型を正確に自動探知すると同時に、正確に養生期間中の温度データが記録された。また、温度履歴データからコンクリート表面強度を有効材齢法に基づき推定した結果は、現場養生供試体の結果が最も小さく、ついで SS センサの圧縮強度推定結果、表面からの深さ 20mm に設置されたボタン温度センサによる圧縮強度推定結果、70mm のボタン温度センサ、120mm のボタン温度センサ、と続いて、埋込み試験体の圧縮強度が最も大きくなり、結果として、SS センサによる推定強度が構造体コンクリートの表面強度の下位推定になった。

$$f_c(t_e) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{(t_e - s_f)/T_0} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{c28}$$

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/t_0} \right]$$

$f_c(t_e)$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$t_e$  : コンクリートの有効材齢 (日)

$T_0$  : 1 日

$f_{c28}$  : コンクリートの 28 日圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$s$  : セメント種類に関わる定数

$s_f$  : 硬化原点のための補正項 (日)

$t_e$  : 有効材齢 (日)

$\Delta t_i$  : 温度 が継続する期間(日)

$T()$  :  $\Delta t_i$  の間継続するコンクリート温度(°C)

$t_0$  : 材齢を無次元化する値で 1 日

セメントの種類	$s$ の値	$s_f$ の値
普通ポルトランドセメント	0.31	0.5
早強ポルトランドセメント	0.21	0
中庸熱ポルトランドセメント	0.60	0
低熱ポルトランドセメント	1.06	0
高炉セメント B 種	0.54	0

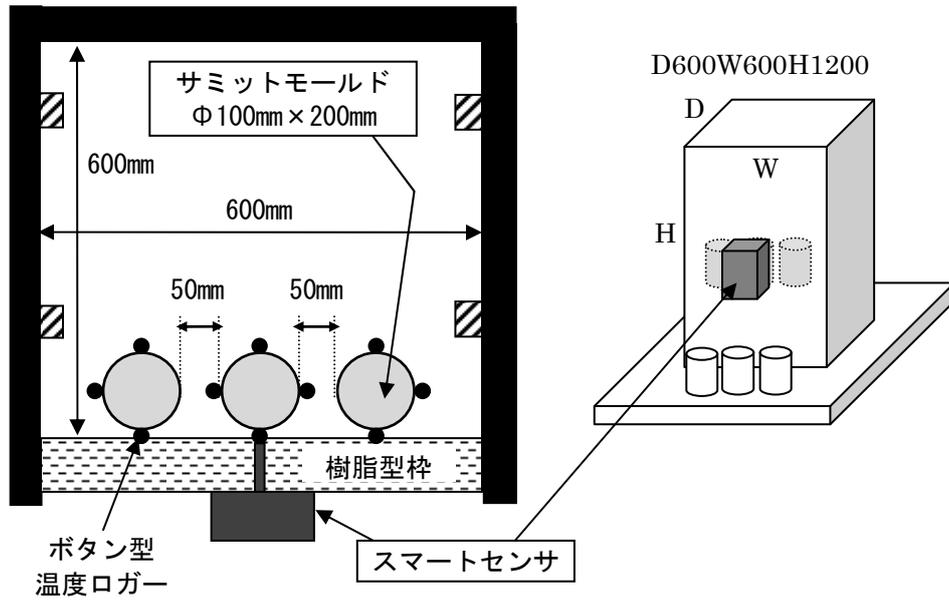


図 2 試験体寸法と作成状況

表 2 試験体水準

試験体	個数	配合	試験日	備考
大型供試体	3 体	27-18-20N 鉄筋なし	1, 3, 7 日 圧縮強度	内部に埋込み供試体を入れる
内部埋込供試体	9 体			大型供試体 1 個につき 3 体
現場養生供試体	9 体			大型供試体 1 個につき 3 体

表 3 コンクリート調合

W/C	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 C×%	空気量 %
		W	C	S	G		
54.5	50.6	170	312	900	900	レオビルド SP8SV 0.9	4.6

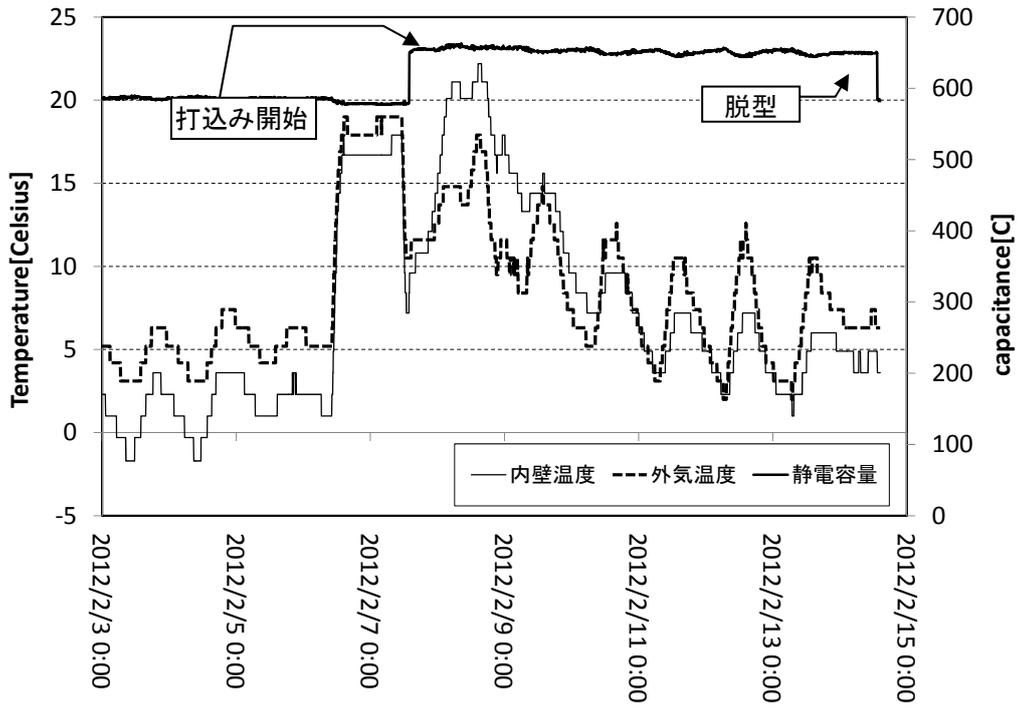


図 3 SS センサのデータ測定状況と打込み・脱型判定

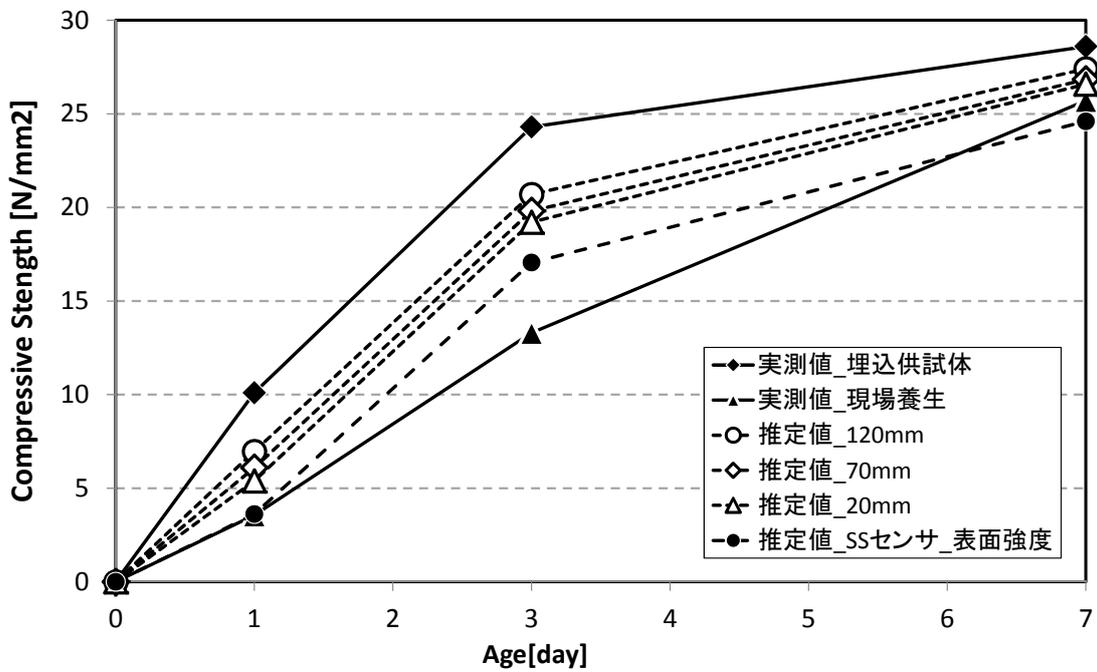


図 4 供試体実測圧縮強度および SS センサ温度履歴,  
埋込み供試体表面温度履歴からの推定圧縮強度

## 4. 現場適用実験

### 4.1 SS 型枠システムの無線通信距離の検証

SS 型枠システムに搭載された無線ネットワーク・システムの仕様と、都市部ガレージにて通信実験を行い得られた結果を表 4、図 5 に示す。SS リーダーと型枠間の最長通信距離は 15～20m 程度あり、山間部の土木コンクリート工事であっても、ほとんどすべての型枠からのデータ回収が、安全な場所から可能であると考えられる。

### 4.2 SS 型枠システムの耐久性検証

次に、茨城県に所在する児玉株式会社・資材倉庫から SS 型枠の電源をオンにしたままで、表 5 に示す 2 現場へトラックにて搬送し、現場ヤードにて屋外保管してもらった後に、型枠工事、コンクリート工事、養生期間を経て脱型後、SS リーダーにてデータを回収しデータ欠落から稼働状況を確認した。なお搬送に関しては時々放り投げるなど SS 型枠に衝撃を与えたほか、樹脂型枠の割付枚数と部材断面寸法の違いによって生まれる端部についてはコンパネをカットして寸法調整を行った。また、現場 B については、豪雪によって現場ヤード内で SS 型枠が雪に埋没し、搭載している各種センサが破損しやすい 0 度前後の温冷乾湿繰返し環境を経験した後、現場に設置された。その結果、現場 A、現場 B 共に 100%の SS 型枠からデータを問題なく回収でき、極めて過酷な冬場の外部環境においても安定稼働することが示された。また無線読取距離についても、金属製の仮設部材の影響もなく減衰なく受信することができた。

### 4.3 コンクリート表面推定強度分布可視化実験

表 5 に示す 2 現場で収集したコンクリート表面の温度履歴データと現場で打込まれたコンクリートの調合をもとに有効材齢法によってコンクリート表面の強度推定を行った。現場 A の型枠割付図と材齢ごとのコンクリート表面推定強度結果を図 6 および図 7 に、現場 B の型枠割付図と材齢ごとのコンクリート推定強度結果を図 9 に示す。その結果、現場 A の擁壁においては土手付近（図中右下部位）と端部が、現場 B においては常時影になる部位と端部の強度発現が遅れる傾向が可視化できた。

表 4 SS 型枠システムの無線ネットワークの規格

規格	IEEE802.15.4 に一部準拠
使用周波数帯域	2.405～2.480GHz
変調方式	DSSS 方式
通信距離	最大 15～20m

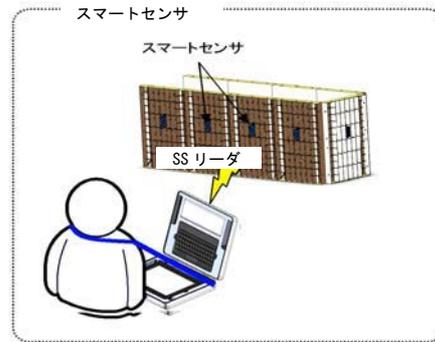


図 5 SS 型枠システムの無線読取状況

表 5 適用現場の概要

現場 A	場 所：東海地方の山間部 適用部位：コンクリート擁壁 66 枚 測定期間：2011 年 11 月末の 1 週間
現場 B	場所：北陸地方南部の山間部 適用部位：コンクリート橋脚 38 枚 測定期間：1 月中旬から 4 週間。 豪雪環境にて屋外保管し雪に埋没



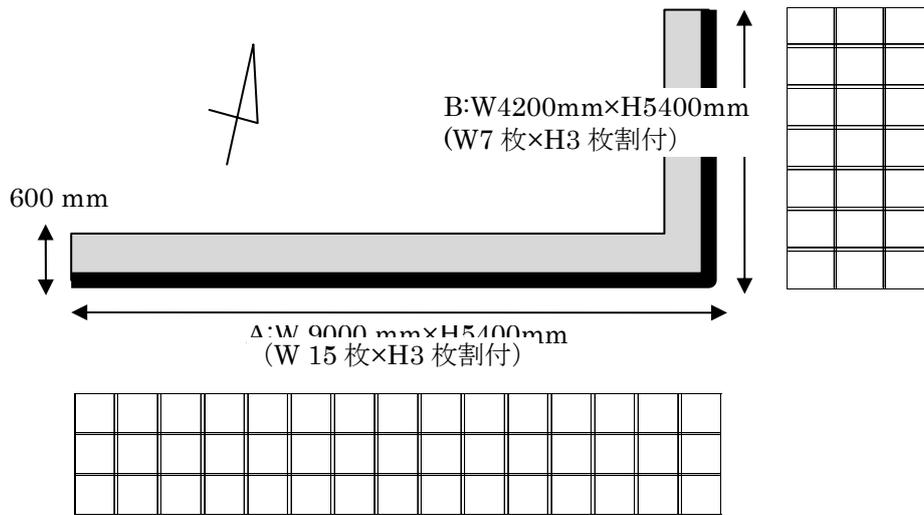


図 6 現場 A のコンクリート擁壁の現場写真（上）と，平面図・型枠割付図（下）

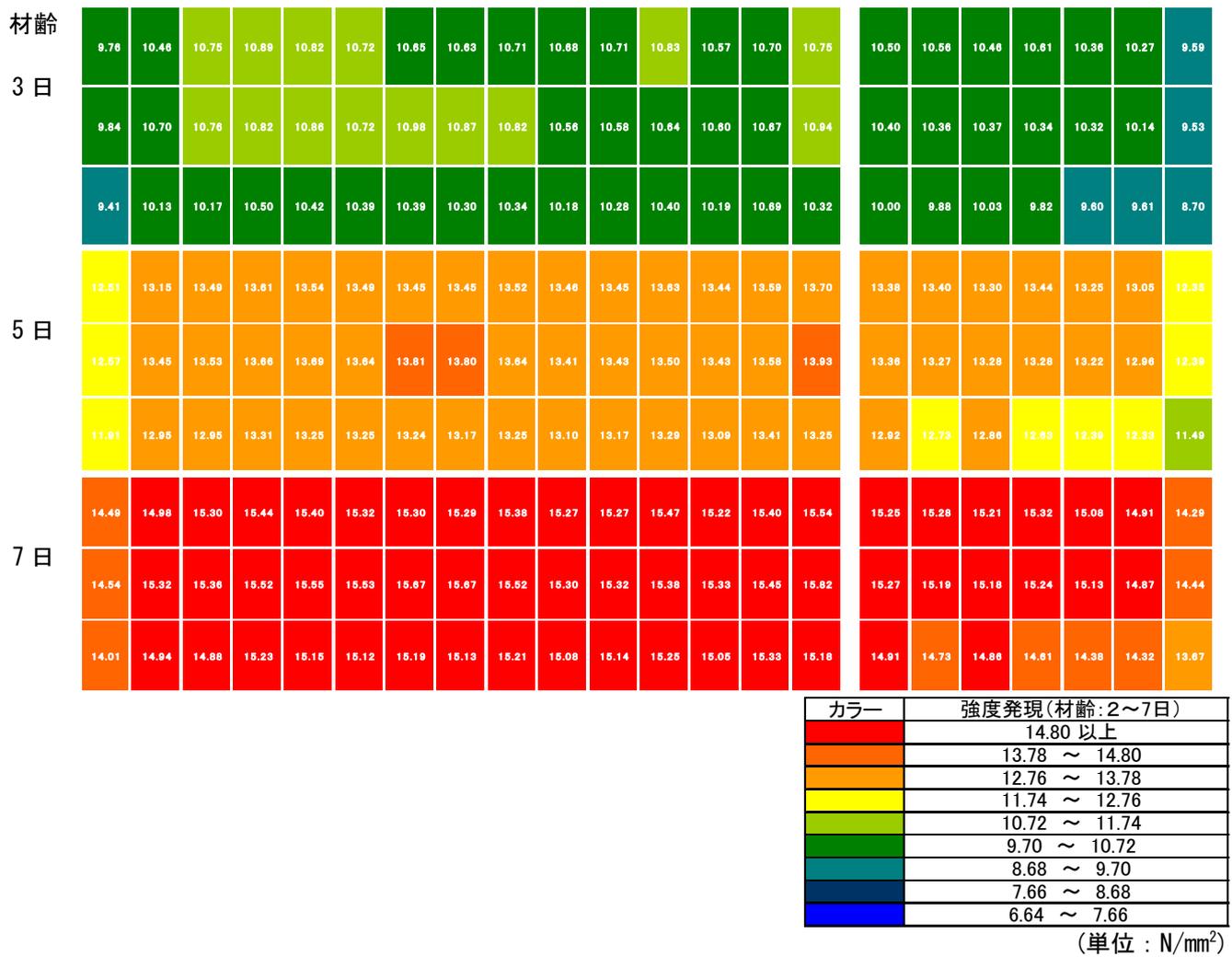


図 7 現場 A のコンクリート表面推定強度分布



図 8 現場 B の型枠設置試験場所

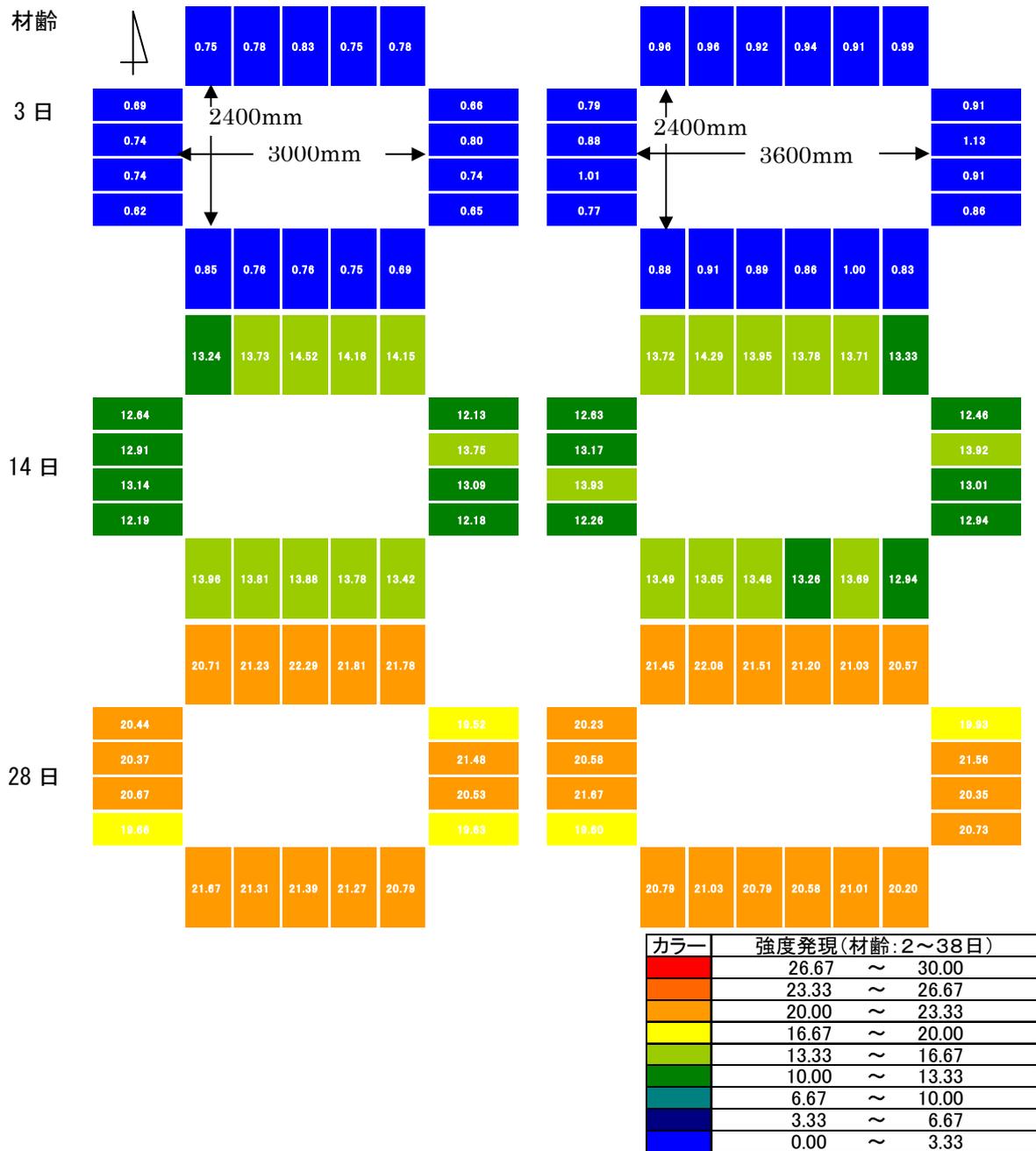


図 9 現場 B のコンクリート表面推定強度分布

## 5. スマートセンサ用リーダ機器+ソフトウェアのインターフェイス開発

### 5.1 はじめに

前節より、スマート型枠センサを用いて、本型枠を利用するだけで、表面強度推定、複数枚の型枠の同時読み取り、可視化機能の開発が実現し、かつ、これを現場で試験利用できたことから、概ね現場利用については問題なく使用できるものと考えられる。

しかし、建設現場においては、知識のほとんどない人が、この管理システムを利用する場合はより多くなることが考えられるため、スマートセンサ用リーダー機器と管理ソフトウェアのよりレベルの高い洗練が求められるものと考えられる。

そこで、最後に、利便性を向上させるための機器およびソフトウェアの改良を行った。

### 5.2 スマートセンサリーダーの改良

スマートセンサ型枠の無線情報を効率的に管理しつつ、現場で PC の使用になれていない作業員でも利用しやすいようにタッチパネル型タブレット PC にソフトウェアを搭載したリーダーへと改良した。下図に概要を示す。



図 10 スマートセンサーリーダー（改良）の概要

### 5.3 スマートセンサリーダーソフトウェアの改良

スマート型枠を大量に利用した場合、どの型枠 ID をもったものが、どこにあるかが判別つきづらい場合がある。このために、型枠の位置特定をリーダーでできるようにソフトウェアを改良した。まず、画像解析技術により、ID の位置を自動的に把握し、型枠の配置構成をリーダー上に構成することができるようになった。図 11 にその概要を示す。

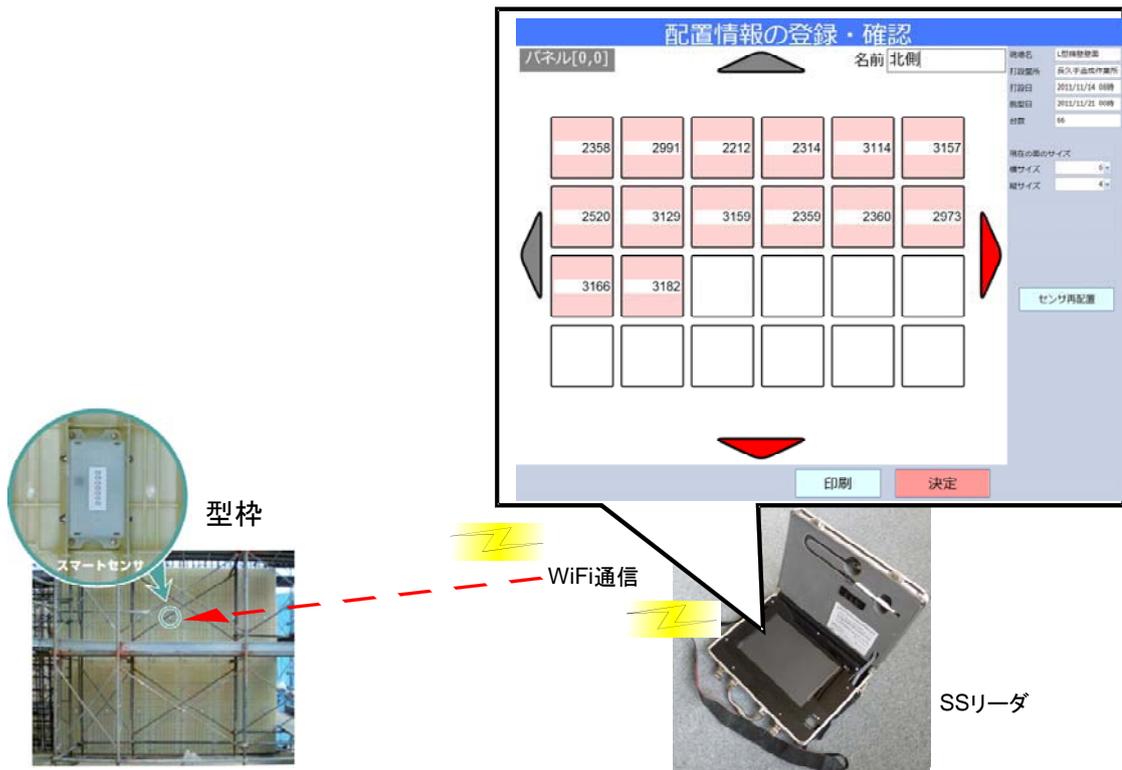


図 11 スマートセンサリーダーの型枠把握機能

## 5.4 管理ソフトウェアのインターフェイスの改良

スマート型枠に搭載されたセンサーから読取られた温度履歴をもとに、有効材齢法にもとづいて強度推定を行う場合、そのデータが可視化できている必要がある。下図のように、単一の型枠の強度推定グラフについては一本の線グラフで、複数の型枠をまとめて判断する場合には最大値、最小値と平均値を組み合わせて管理しやすいようにした。

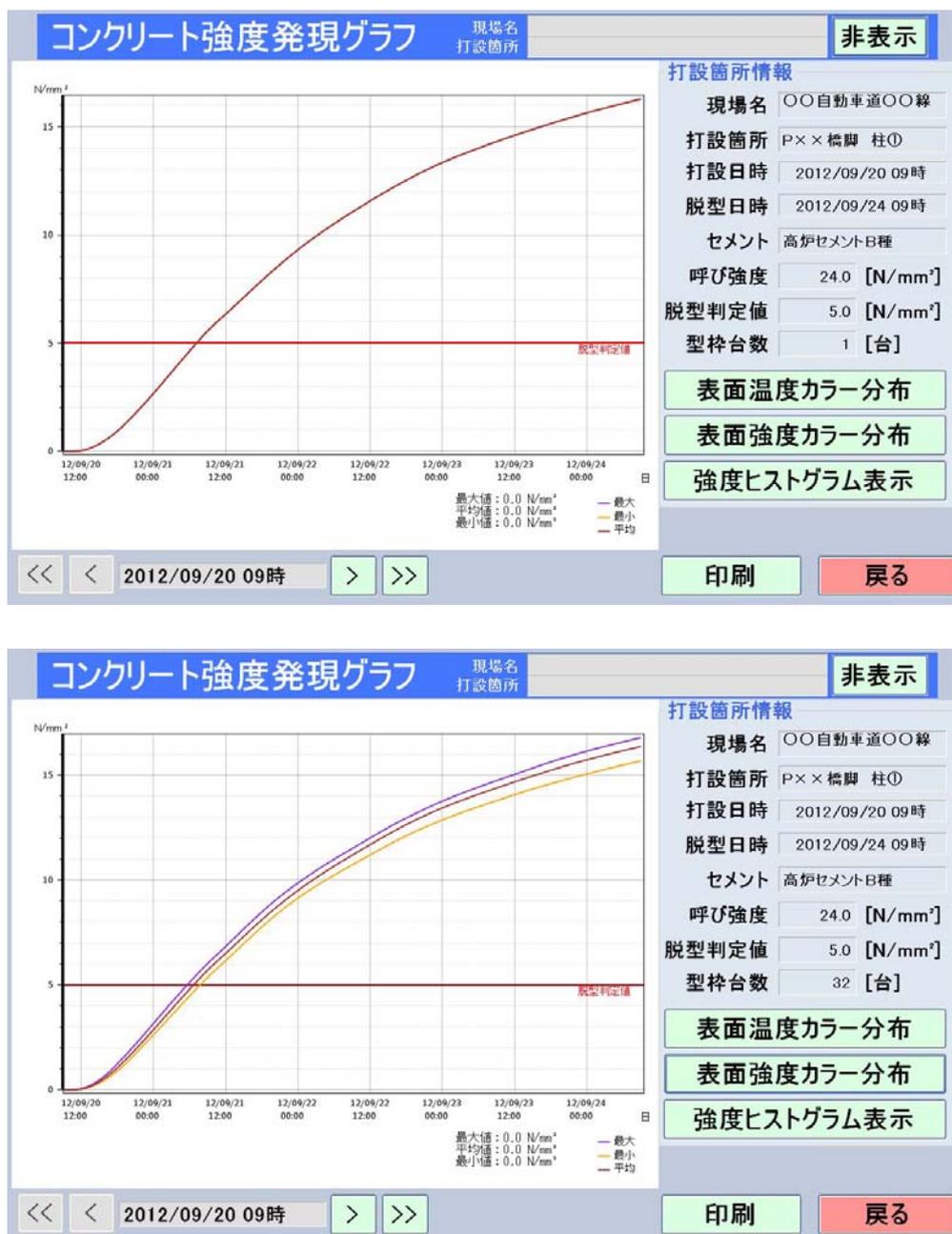


図 12 コンクリート強度発現の可視化

また、タイル状に配置された型枠の推定強度に関しても、次のように、視認性を上げ、管理しやすいようにした。



図 13 タイル配置された樹脂型枠の推定強度マッピング

## 6. おわりに

本研究では、樹脂型枠の利点である繰返し転用回数多さを最大限発揮し、コンクリート工事における、環境性能、コンクリート品質管理機能、施工コストのあらゆる観点における改善をめざし、スマートセンサ型枠システムを開発し、基礎研究を経て、現場に適用し、稼働安定性を検証した。

以下に、得られた結果と効果を示す。

- スマート型枠センサシステムは、現時点で合板型枠と同等のコストでありながら、有効材齢法に基づくコンクリートの表面強度の品質管理を実現できる
- 大量に型枠を利用する現場に対応し、大規模なコンクリート表面の強度、温度分布の可視化、データ取得が可能である。
- また無線ネットワークシステムを利用して、足場の上まであがらなくても、無線ネットワークの範囲(30メートル程度)において、無線でデータを取得できる。これにより施工現場でより簡便にコンクリートの品質管理が可能である。
- コンクリート表面強度の推定により、これまでたくさんの現場養生テストピースが必要とされていたところを、その個数を減らすことが出来、この部門においてもコスト削減の可能性がある。
- スマート型枠センサシステムは、樹脂型枠に小型の集積回路が設置された製品でありながら、通常の型枠と同等の落とす、放り投げるなどの多少荒々しい運搬をしても故障せず安定的な稼働をする。
- 極めて寒冷かつ雪の影響があった場合でも、センサは正常に稼働する。
- 無線ネットワーク・システムについても問題なく機能しデータ回収が遠隔にて可能である。但し、仮設部材の影響によっては読み取り距離が減衰する。

以上、実現場的にも問題なく、稼働するスマート型枠センサシステムによって、今後は、さらなるユーザビリティの向上、取得したデータから品質管理に必要なソフトの開発を順次進めながら、普及をはかる方針である。

## 7. 参考文献

- 1 杉山ほか：コンクリート中に埋め込んだ各種 IC タグの通信性に関する研究，日本建築学会技術報告集 15(29), 9-14, 2009-02-20
- 2 瀬古ほか：型枠面での高周波静電容量測定によるコンクリート充填状態の判定に関する研究，コンクリート工学年次論文集 29(2), 697-702, 2007
- 3 鈴木誠二：リサイクル可能なプラスチック型枠，建築技術 1999年 11月

# QUALITY CONTROL SYSTEM IN CURING CONCRETE USING SMALL INTEGRATED CIRCUIT FOR MONITORING TEMPERATURE AND ATTITUDE ON FORMWORKS

Noguchi, T.

The University of Tokyo

The forms currently used in concrete work are mostly plywood panels made of lumber in Southeast Asia, which are used only a few times before being discarded, leads to increased industrial waste and deforestation.

Additionally, as the quality performance required of concrete structures increases, quality control for early age concrete becomes an extremely important factor in long-term durability. In reality, however, differences in structures' location environments, their applications, and builders' approaches make thoroughgoing quality control for early age concrete difficult, leaving things highly dependent on on-site assessment of circumstances.

Therefore, quality control system in curing concrete using small integrated circuit for monitoring temperature and attitude on formworks are developed and sophisticated through pilot experiments on construction sites.

The controlling performance is investigated and certificated through using on real construction sites.

*KEYWORDS: quality control system, concrete, monitoring integrated circuits, early age*

## 研究成果の要約

助成番号	助成研究名	研究者・所属
第 2010-16 号	温度センサ・姿勢感知センサ付き IC タグを搭載した再生樹脂型枠によるコンクリートの品質管理および型枠の運用管理に関する研究 報告書	野口 貴文 東京大学

コンクリートの型枠存置期間中の管理は、工期短縮と長期耐久性に大きく関わるため、近年、ますます高いレベルの品質管理が要求されている。著者らは、小型センサやチップ製品市場において成熟した既存製品をうまく組み合わせ、センサ付き小型集積回路を作成した上で、これを樹脂型枠あるいは鋼製型枠に設置することで、作業員に作業負荷をかけることなく、型枠の存置状況、使用回数、コンクリート表面の温度履歴といった情報を収集し、さらに組込みソフトウェアを使って養生中のコンクリート表面強度推定など品質管理を行うことのできるコンクリート品質管理システム（スマートセンサ（SS）型枠システム）を開発した。この SS 型枠システムは、表 1 に示す通り、既存のコンパネ型枠に比較して置換可能性があり、高い経済性と環境性をもつ。

SS 型枠システムのコンクリート表面強度を推定したソフトウェアの精度検証、実現場での稼働検証をするため、樹脂型枠バージョンの SS センサ型枠を使った柱状の柱状型枠と、表面にボタン型温度センサを貼り付けたサミットモールド（Φ100mm）を用意し、これらに同じコンクリートを打込み、キャッピングしたサミットモールドを SS 型枠内壁に接するように手早く埋込んだ試験体を複数個作成した。その後、この大型試験体内部からサミットモールドを取出し、養生期間が同じ現場養生の供試体と同時に圧縮強度試験を行った。SS 型枠システムによって収集された打込み後 7 日目までの収集データに基づき推定されたコンクリート表面圧縮強度、埋込み供試体、現場養生供試体の圧縮強度試験結果をあわせて図 1 に示す。静電容量センサは、打込み、脱型を正確に自動探知すると同時に、正確に養生期間中の温度データが記録された。また、温度履歴データからコンクリート表面強度を有効材齢法に基づき推定した結果

表 1 スマートセンサ型枠とコンパネの比較

項目	スマートセンサ型枠	コンパネ
重量 (サブ板)	10kg	12kg
光透過性	○ (作業空間明るい)	なし
製造 CO2 (kg/サブ板)	9.62	12.62
使用回数	50-100 回	5 回
建築物あたり CO2	小さい	大きい
品質管理システム	センサからのデータを利用した管理ソフト	なし
リサイクル性	再度樹脂型枠にリサイクル	燃料利用

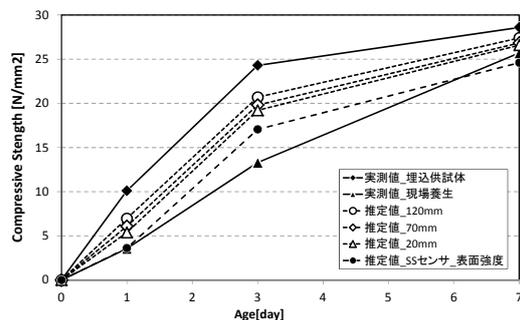


図 1 供試体実測圧縮強度および SS センサ温度履歴、埋込み供試体表面温度履歴からの推定圧縮強度

現場養生供試体の結果が最も小さく、ついで SS センサの圧縮強度推定結果、表面からの深さ 20mm に設置されたボタン温度センサによる圧縮強度推定結果、70mm のボタン温度センサ、120mm のボタン温度センサ、と続いて、埋込み試験体の圧縮強度が最も大きくなり、結果として、SS センサによる推定強度が構造物コンクリートの表面強度の下位推定になった。