

建築物の構造ヘルスマニタリング

白石理人・岡田敬一

近年、構造物に設置したセンサからの情報に基づいてその構造健全性を診断する、構造ヘルスマニタリング技術への関心が高まっている。本報ではこの技術について概説すると共に、これまで筆者らが開発した2種類のシステム—遠隔からの常時監視を可能とした比較的高機能な「オンライン型システム」と、大地震後の健全性診断に目的を絞り低コストかつ簡便な取扱いを実現した「オフライン型システム」—のそれぞれについて、その概要と建築物への適用例を紹介する。さらに次世代型システムの研究開発の取り組みとして、センサネットワークという新しい技術を構造ヘルスマニタリングへ応用した例についても紹介する。

キーワード：構造ヘルスマニタリング、健全性診断、インターネット、最大・累積変位記憶型センサ、非接触計測、センサネットワーク

1. はじめに

ヘルスマニタリングとは、機械・構造物などの対象物にセンサを設置して、音や振動などの物理量を観測（センシング）し、その観測値を様々なデータ処理手法を駆使して分析（信号処理）することによって、対象物に蓄積された損傷の程度を把握し健全性を判定（健全性判定）する技術である¹⁾。この技術を建築・土木構造物に適用したものが構造ヘルスマニタリングであり、近年この技術への関心が高まっている。この理由として、1) 自然災害時、特に我が国では大地震後に構造物の安全性を迅速に判定する技術が求められていること、2) 高度経済成長期に大量に建設・ストックされた構造物を適切にメンテナンスしながら長く使っていく必要があること、の2つをまず挙げることができる。その他に、3) 免震・制振構造などの新しい構造システムが開発され、その構造性能を定量的に評価する技術が必要とされていることも理由の1つといえるだろう。

これまで構造物の健全性診断は、一般的に構造技術者が行う目視点検によって行われてきた。具体的には定期的な建物診断や大地震後の二次的災害防止を目的とした応急危険度判定などがこれに該当する。しかしながら、数が限られた構造技術者によって構造物の一つ一つの詳細に点検するためには時間とコストが必要である。このため、例えば大地震後には建物を短時間

のうちに診断することが求められるが、被災地域に建物が大量にあった場合、その対応が困難となる事態が予想される。また、目視点検では内装材や耐火被覆等に阻まれて、直接構造部材を点検することが難しいケースが多いといった問題も指摘されている。

そこで、建物に予めセンサ等の計測機器を設置しておき、そこからの情報に基づいて構造物の健全性の監視・診断を自動的に行う機能をシステムとして統合した構造ヘルスマニタリングシステムが考えられるようになった（図-1）。昨今のセンサ・情報通信機器の飛躍的な小型・低コスト化によって、構造ヘルスマニタリングシステムはその本格的な普及が可能となりつつあり、様々なタイプのシステムの研究開発が数多くの大学・企業等で精力的に進められている。

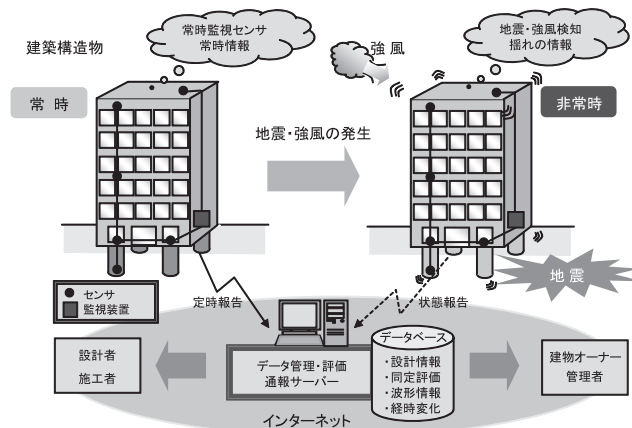


図-1 構造モニタリングシステム

2. 構造ヘルスマニタリングシステムの概要

構造ヘルスマニタリングはその形式から、構造物全体としての大まかな損傷・劣化の有無・程度に注目するグローバルモニタリングと、建物内で予め損傷が予測される位置を想定し、その位置を対象に行われるローカルモニタリングの2種類に大別される。このうちグローバルモニタリングでは主に振動データを計測・解析することによって、対象構造物の全体的な挙動を表現する数学モデルのパラメータ（例えばモード特性）を同定し、その変化を捉えることで構造物の状態を評価する。一方、ローカルモニタリングでは特定の構造部材や構造物の一部分を対象に、例えばその歪みや変形を測定することによって直接的に構造物の状態を判断する。

システムとして実装する際の機能面では、構造物の長期間の状態変化を常時連続監視し遠隔管理可能とする高機能なものから、大地震後の現地での健全性診断に機能を絞って開発されたものまで様々なレベルのものがあり、必要なコストもそれぞれ異なる。

筆者らはこれまでに建物の遠隔からの常時監視を可能とした比較的高機能なグローバルタイプの「オンライン型システム²⁾」と、大地震後の健全性診断に目的を絞り低コストかつ簡便な取扱いを実現したローカルタイプの「オフライン型システム³⁾」を開発・実用化した（表—1）。いずれのシステムもその目的は構造健全性の一次診断を行うことであり、そこで構造物に異常が検出された場合、構造技術者が現地で詳細な二次診断を行うことを前提に、既に数多くの建物に導入した。実際の建物に適用する際には、目的に応じてこの2種類のシステムを組み合わせた形で導入することも多いが、本稿では次節以降でこれらを個別に紹介することにする。また最後に、センサネットワークという新しい技術を応用した次世代型の構造ヘルスマニタリングシステムの研究開発⁴⁾についても紹介したい。

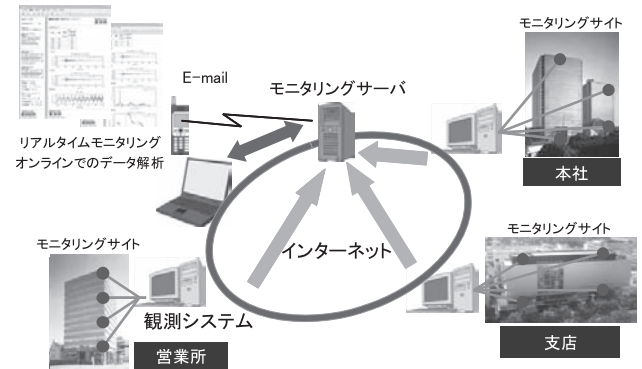
表—1 構造モニタリングシステムのタイプ

	目的	形式	コスト
オンライン型システム	継続的な長期監視 地震後の健全性診断	グローバルタイプ 中心	中—高
オフライン型システム	地震後の健全性診断	ローカルタイプ	低

3. オンライン型構造ヘルスマニタリングシステム

このシステムは構造物の健全性診断や構造性能の検

証をリアルタイムで行い、結果を建物管理者に迅速に伝達することを目的として開発された。インターネットを利用して、対象建物（複数）に置くPCベースの観測システムと中央のモニタリングサーバ、そしてユーザーの利用環境をネットワーク化していることからオンライン型システムと呼んでいる。図—2にシステムの概念図を示す。



図—2 オンライン型システム

建物内に加速度計を中心としたセンサを多数配置し、計測装置で建物の振動をはじめとした各種データを収録する。データ収録のタイミングは、定常状態（観測値の統計情報）、定常波形（定時の微動データ）、非定常波形（地震、強風時の振動データ）の3種類である。これらのデータはインターネット上のモニタリングサーバに自動的にアップロードされデータベース登録される。非定常波形がアップロードされた場合は、即座にサーバ上でデータの解析が行われ、その速報がE-mail、携帯電話、建物内の情報表示装置へ配信されると共に、建物管理者はオンラインでその結果を確認可能である。また、単一の建物の管理だけでなく、分散した複数の建物を一括して群管理する機能も備えている。このような一般のユーザーを対象とした機能に加え、Webブラウザ上でデータベース上のデータを詳細解析する構造技術者・研究者向けの機能も実装した。なお、ヘルスマニタリングの形式は構造物全体の特性変化を捉えるグローバルタイプを基本とするが、ローカルタイプの手法を合わせて組み込むこともできる。

このシステムを東京都江東区の事務所ビルに導入した例を紹介する。建物は地上6階、軒高26.8m、延床面積9,066m²であり、2Fから上部のS造メガトラスと、それを支える1Fピロティ部の6本のRC造ピア柱の頂部の間に、鉛プラグ入り積層ゴムを設置した免震構造物である。図—3に建物全景と設置したセンサの一覧を示す。図—4に示すのは地震発生時の速報と、



図-3 建物全景と設置センサ

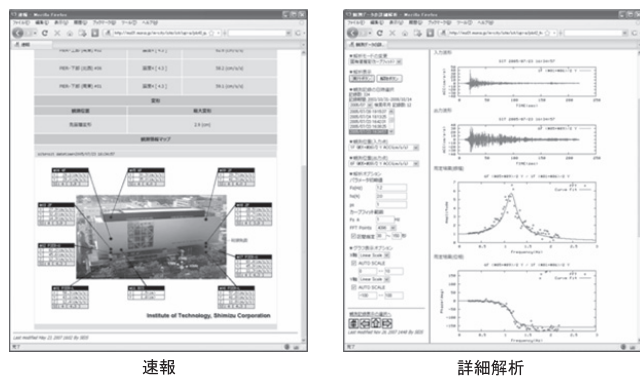


図-4 地震発生時の速報及び詳細解析の Web 表示

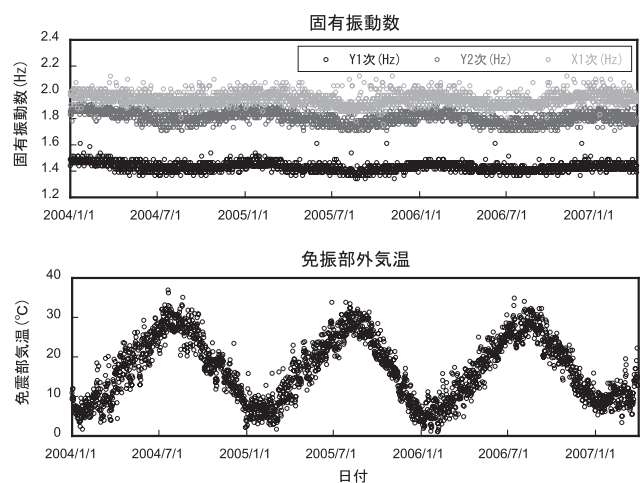


図-5 建物固有振動数の変化

その詳細解析の Web ブラウザ表示の例である (2005年7月23日千葉県北西部を震源とする地震, M6.0)。このオンライン型システムでは地震発生時以外に

も、常時のデータを継続的に取得・解析することによって、構造物の状態変化を把握することが可能である。その一例として2004年1月から約3年間の建物の固有振動数を、定時計測した常時微動波形データから評価した結果を、同時に計測した免震部の外気温と合わせて図-5に示す。年間を通じた気温の変動に対応して、固有振動数も変化していることがグラフから読み取れるが(温度が高くなると固有振動数は低下する)、この気温の影響を取り除いた建物本体の振動特性は現在のところ変化していないことがわかっている。

4. オフライン型構造ヘルスマモニタリングシステム

次に紹介するオフライン型システムでは、その機能を大地震後の構造健全性診断に絞ることによって、簡便な取扱いと比較的低コストでの導入を実現した。システムは建物の層間変形を計測できるような場所(専用の間柱や制震ダンパー)へ取り付ける最大・累積変位記憶型センサと、そのセンサ内に記憶された値を読み出す計測装置(送信機, 受信機)から構成される。図-6にシステムの概念図を示す。構造健全性の診断(判定)は地震後にセンサ内に保持された層間変形の最大値と階高から求めた層間変形角を、予め定められた基準値(例えば1/100, 1/200等)とシステム内で自動的に比較することによって行う。センサを制震ダンパーへ取り付けた場合はその累積変形を健全性の

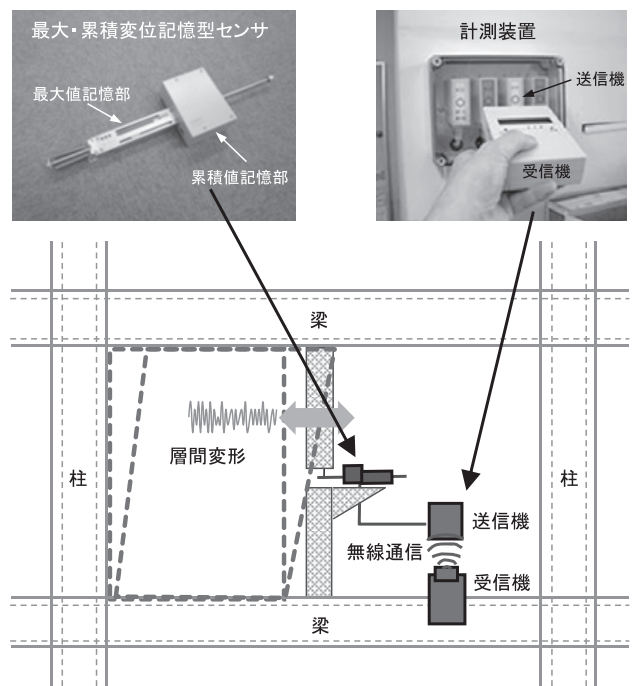


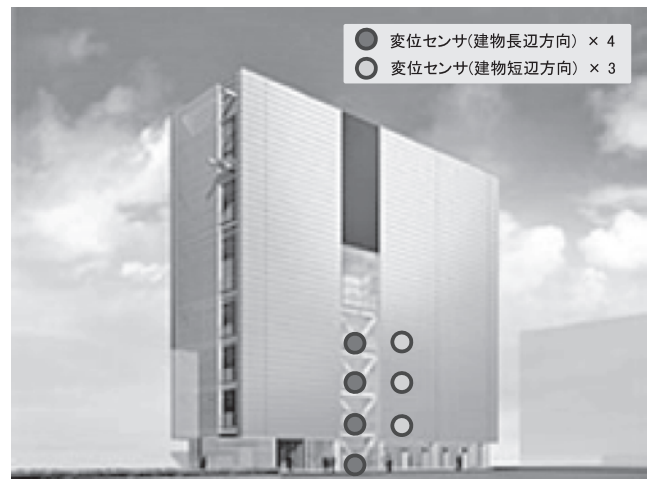
図-6 オフライン型システム

指標とすることもできる。このシステムは設置個所ごとに独立しており、建物管理者が計測装置の受信機を持ってそれぞれの個所で健全性診断を行うことから、前述のオンライン型システムに対してオフライン型システムと呼んでいる。

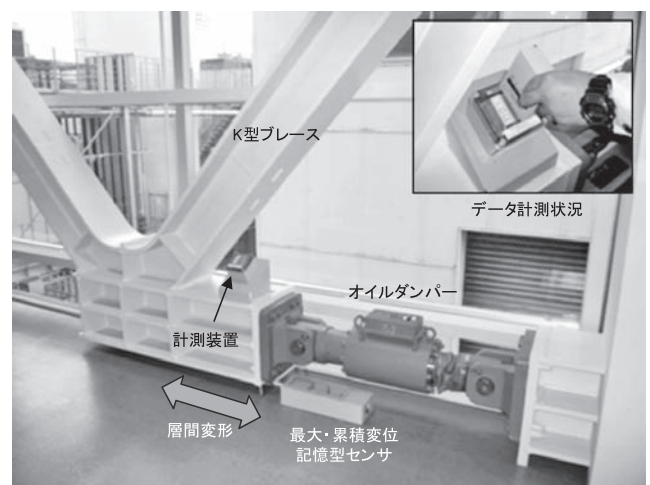
最大・累積変位記憶型センサはワンウェイクラッチを用いた機械的な機構によって実現されている。具体的にはそれぞれ直線・回転型の抵抗部材（ポテンシオメータ）が変形量に応じて一方向のみに移動することにより、最大・累積変形がそれぞれ電気抵抗変化としてホールドされる。計測時に計測装置の送信機はセンサの電気抵抗を計測すると共に、予めセンサ ID と対応して内部にメモリーされた較正值・基準値を参照し、電気抵抗値の物理量変換値と、基準値との比較判定結果を無線で送信する。受信機は送られてきた情報を液晶パネル（変形量）と LED（判定結果：青黄赤の3色）で表示する。送信機の動作電力は受信機（単三型電池×2本で動作）から電磁誘導方式により送られるため、センサ及び送信機側には電源を必要としない。

以上のように、建物側に設置するセンサと送信機はシンプルな機構で電源不要であること、計測はハンディ型の機器と装置の間の非接触通信により行うため電気接点の劣化による接触不良等の不具合が発生しないこと、センサと建物中央のサーバ間の長距離の配線工事が不要といったことから、安価かつ設置が容易でメンテナンスフリーなシステムであると共に、システム内部に健全性判断機能を持っているため、構造技術者以外でも容易に取扱いが可能なシステムであることが特徴である。

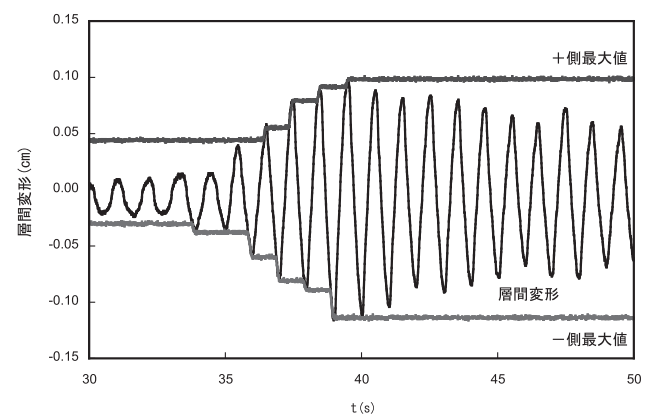
このシステムを東京都江東区の研究施設に導入した事例を示す。建物は地上6階、軒高34.5m、延床面積1,560m²であり、制震用オイルダンパーを層間に設置したS造の構造物である。建物全景を図一7に示す。オフライン型の構造ヘルスマonitoringシステムはオイルダンパー部に計7基が設置されており、上階から下がっているK型ブレースと床の間の層間変形を計測することにより構造健全性を診断する（図一8）。この建物にはシステムの作動検証用として前述のオンライン型システムも合わせて設置しており、これを用いて地震発生時の最大値記憶型センサの作動状況等を確認することができる。図一9は地震発生時のセンサの作動状況である（2007年7月16日 新潟県中越沖地震、M6.8）。層間変形の最大値がセンサ内に記憶される様子がわかる。なお、この地震による最大層間変形は層間変形角に直すと1/1000以下の微小なものであり、構造体の健全性に影響を与えるような変形で



図一7 建物全景と設置センサ



図一8 システム設置状況



図一9 地震発生時の最大値記憶型センサの作動状況

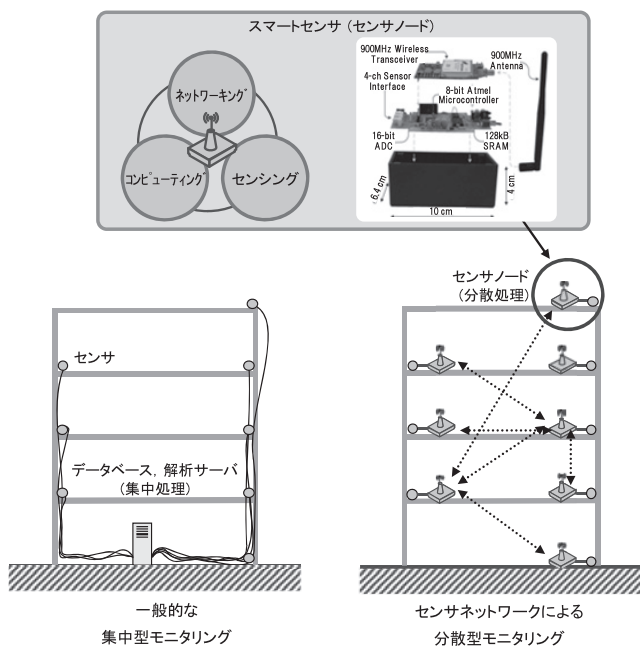
はない。

5. 次世代型システムの研究開発

最後に、これまでに紹介したシステムの、さらにその先を目指した研究開発の取り組みとして、近年幅広

い分野で注目を集めているセンサネットワークという技術を構造ヘルスマニタリングへ応用した例について紹介したい。

センサネットワークとは、1) 用途に応じた各種センサ（センシング）、2) センシングしたデータの処理を行う演算装置（コンピューティング）、3) 処理結果を送受信する通信機能（ネットワーキング）、の3要素を備えたセンサノードと呼ばれる超小型かつ安価な端末（スマートセンサ）を無数にネットワーク化し、空間に配置することで、その状況を認識しようという技術・概念である（図—10）。近い将来この技術は様々な分野への応用が一気に進むと考えられており、その中でも構造ヘルスマニタリングは有望視されている適用先の一つである。センサネットワークの持つセンサノード上での分散処理と、無線・有線ネットワークによるデータ伝送という特徴を活かすことで、これまで以上に高密度かつ大規模な構造物のセンシングが可能になる。ただしこの場合、本報でも紹介した中央のサーバへデータを集約・処理する従来のグローバルタイプの方法では限界があり、各センサノードが分散的にデータを処理する拡張性の高い手法が求められている。

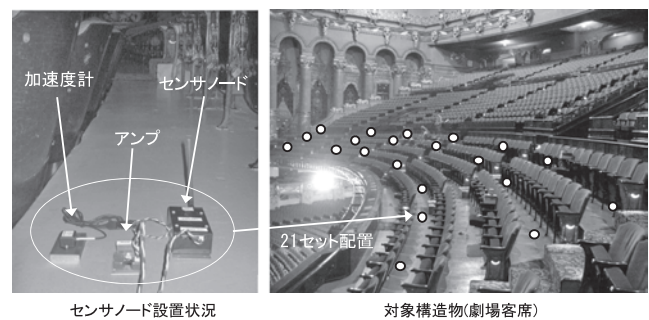


図—10 センサネットワークを利用したモニタリングシステム

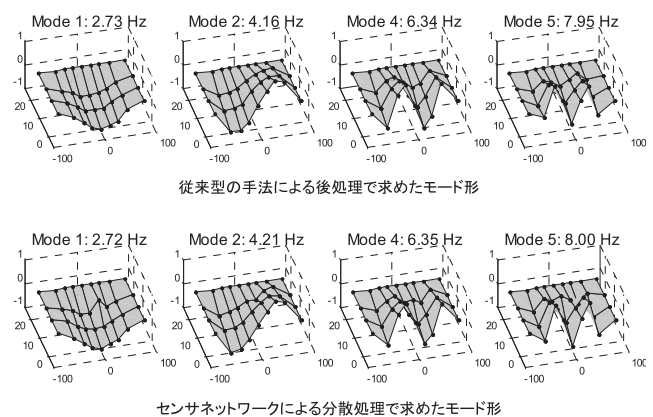
そこで、振動データから構造物の動的特性（モード特性）を同定する手法を分散処理型に拡張し、研究開発用の無線センシングシステムへ実装した。このセンシングシステムは米国のミシガン大学で開発されたものであり、センサノードに接続した外部センサからの信号を各ノード内で処理し、解析されたデータは無線

通信により基地局、及び他のセンサノードへ送信することができる。

このシステムを実際の構造物に設置して実証試験を行った。対象とした構造物は片持ち梁形式の劇場客席（バルコニー）であり、床に21セットのセンサノードを配置して客席のモード特性の同定を行った。試験状況を図—11に、同定されたモード形（構造物の振動数別の変形形状）の例を図—12にそれぞれ示す。高密度のセンサ配置とセンサノード内の分散処理により、構造物のモード形が精度よく同定されており、従来の集中型的手法による同定結果と比較しても同等の結果が得られていることがわかる。



図—11 試験状況



図—12 同定されたモード形

6. まとめ

本報では構造ヘルスマニタリング技術について概説すると共に、比較的高機能なグローバルタイプのシステムである「オンライン型システム」と、大地震後の健全性診断に目的を絞り低コストかつ簡便な取扱いを実現した「オフライン型システム」のそれぞれについてその概要と適用例を紹介した。また次世代型のシステムとして研究開発を進めているセンサネットワークを利用したシステムについても紹介した。本報執筆時点でオンライン型システムは22件、オフライン型シ

ステムは26件の適用実績がある。

安全・安心が強く求められている現代社会において、構造ヘルスマニタリングは建物を利用する人に安心を与えるためのキーとなる技術の一つであり、今後ますますその重要性は増していくものと考えている。

本技術は平成18年度第8回国土技術開発賞（入賞）を受賞した。



《参考文献》

- 1) 山本鎮男：ヘルスマニタリング，共立出版（1999.8）
- 2) 岡田敬一：ヘルスマニタリングの実施例 ー日本女子大学百年館，慶應義塾大学日吉来往舎一，建築防災，No.318，pp.21-25（2004.7）
- 3) 岡田敬一：変位記憶型センサによるモニタリングシステム，計測と制御，第46巻，第8号，pp.628-631（2007.8）
- 4) 白石理人：ワイヤレスセンサネットワークによる分散型のモード特性同定，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.255-256（2008.9）

[筆者紹介]

白石 理人（しらいし みちひと）
清水建設㈱
技術研究所 安全安心技術センター
研究員



岡田 敬一（おかだ けいいち）
清水建設㈱
技術研究所 安全安心技術センター
主任研究員



建設機械ポケットブック

<除雪機械編>

本書では、除雪機械について事故や故障を未然に防止するための主要な点検項目や点検時の留意点などを整理しました。日常点検や定期点検・整備における基礎資料として活用され、点検、整備および修理を的確かつ効率的に実施し、道路の維持除雪工事を安全で適正に施工するための一助となれば幸いです。

監修／国土交通省北海道開発局事業振興部機械課
発行／社団法人 日本建設機械化協会

目次

1. 整備点検のあらまし
2. 除雪トラック

3. 除雪グレーダ
4. 除雪ドーザ
5. ロータリ除雪車
6. 小形除雪車
7. 凍結防止剤散布車
8. 資料編

●パスポートサイズ／87ページ

●平成17年9月発刊

●定 価

1,000円（本体953円）送料250円

※送料は複数冊申込みの場合、又は他の図書と同時申込みの場合、割引となる場合があります。

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>