

# 基礎杭や杭施工法を用いた地中熱，季節間蓄熱の融雪

宮本重信

地下水を使わず省エネでコストも安価な路面融雪を目指し、建物の基礎杭を熱交換杭に兼用した地中熱融雪に始まり、橋梁の密に設置された内径 55 cm の基礎鋼管杭の相互干渉を生かした季節間蓄熱融雪、さらに回転圧入での杭施工法を用いて直径 14 cm の専用熱交換鋼管杭を 1.5 m 間隔に行列に設置しての季節間蓄熱融雪など、16 年間の福井の産学官の開発、実用の足跡と成果を紹介する。合わせて、建設機械と関わるそこでの熱交換杭施工法について述べる。

キーワード：熱交換杭，地中熱，季節間蓄熱，融雪，杭施工法，基礎杭

## 1. プロローグ

1986 年土木事務所から土木材料の試験を業務とする職場に異動となった筆者は、業務を見直し技術開発を行おうとした。そのテーマに、当時の知事が政策に掲げた雪を選んだ。歩道は舗装に埋設された放熱管に 15℃ の地下水を流して融雪し、その使用後の 7℃ の水を車道に散水することを試験施工した。このシステムは、今では北陸の代表的な融雪となった。この技術がマスコミに取り上げられた直後、県の環境保全課で、地下水を利用した融雪を開発するとは何事かと叱られた。それが地中熱融雪への契機となった。

現場で断熱材の上の雪は、地中熱が届かなくて長く溶けないことを見て、深部までの地中熱を使うと凄く溶けるはずで、基礎杭を熱交換杭に兼用すれば安価な地中熱融雪ができると考えた。しかし、事務所に雪対策の看板が掛けられ優秀な方々が来られて実現性の不明なその研究に予算はなかった。土質・基礎で技術士だった私だから思いついた、私が開発しないと実現しないと思いつめて、当時は産学官共同研究は珍しいことであったが、県内のコンクリート杭メーカーの三谷セキサン(株)と(株)ホクコンに、共同研究をお願いした。資金を調達した筆者らは、福井大学機械工学科熱システム研究室の竹内正紀教授を訪ねて産学官の共同研究が始まった。

## 2. 基礎杭兼用利用の地中熱融雪

こうした経緯で、筆者らは建築物や橋梁の基礎杭を

兼用利用し、路面での放熱管を浅くに埋設するなど融抵抗を下げ、図-1 の地中熱融雪の実験を 1990 年に行った。遠心力で製造することで中空となるコンクリート杭の杭底に鉄蓋を付けて、それを地中に基礎杭として設置し、その杭内の空洞に貯水する。その中にポリ管を挿入しておく。融雪時に循環ポンプで、路面埋設の放熱管からの冷水を杭頭からそのポリ管内に流して杭底まで送る。冷水は杭底でポリ管内から外の杭内に出て、広い杭内を杭周囲から地中熱を得ながらゆっくりと杭頭へと流れる。杭頭に達して今や温水となった循環水は、融雪面内の放熱管内に送られ雪を溶かす。放

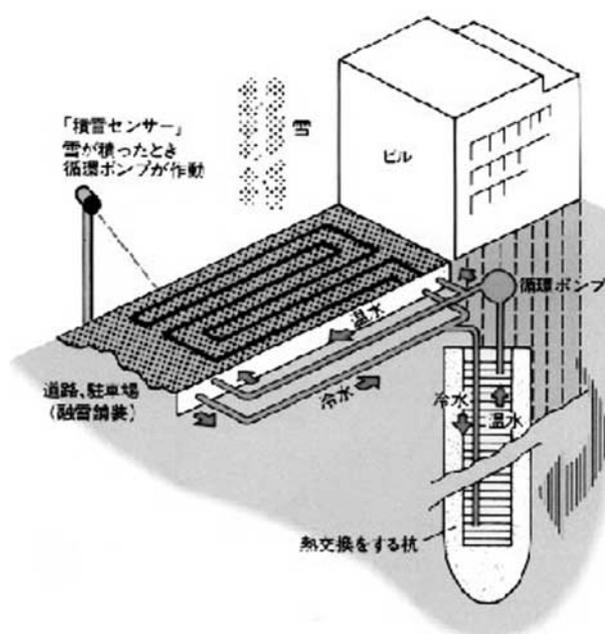


図-1 基礎杭利用地中熱融雪の概念図



写真—1 背景の福井県立音楽堂の基礎杭を利用した地中熱融雪

熱管出口で冷水となった循環水は再び杭へと送られる。良く溶けることを実験で確認し、1992年には福井県立大学の職員住宅駐車場 400m<sup>2</sup> で実用化した。現在福井県内 4箇所 で実用に供されている(写真—1)<sup>1)</sup>。

この基礎杭兼用の地中熱熱交換杭とヒートポンプを用いて、福井県立図書館などでは空調にも展開した。地中は気温に比べて冬温かく夏冷たいことから、高い省エネ性が実現された。

### 3. 橋梁基礎杭による地中保存夏の熱の融雪<sup>2)</sup>

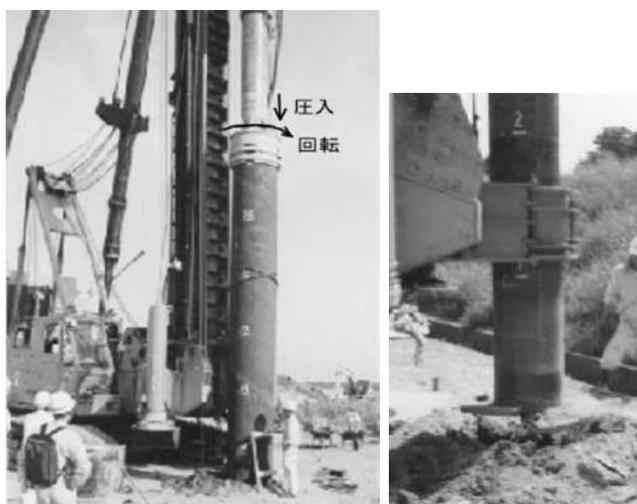
竹内正紀教授らは、気象データから地表面に出入りする熱移動を境界条件として取り込み、融雪部、杭部とそれをつなぐ送水管に起こる熱移動を非定常計算する汎用シミュレーションソフトの開発を行った。融雪面では、舗装断面内の円筒放熱管の温度場を3次元格子で計算され、その舗装表面では日射、熱放射、対流、降雨(雪)と蒸発・結露による水蒸気移動に伴う顕熱と潜熱が気象データから見積もられる。放熱管からの水は送水管に流れ、更に杭へと流れる。杭内では、水が杭底から杭頭へと周囲の地盤と熱移動を行いながら流れる計算を行う。

橋面は凍結しやすく雪が圧雪になりやすいため、前後の坂を含めて融雪需要が高い。そこで、橋台の基礎杭を熱交換に利用し車道を含めて融雪しようとするソフトを用いてシミュレーションしたところ、夏になっても杭内の水温は冬の融雪で低温になったまま温度が回復しない結果を得た。その失望が歓喜に変わるのに数分も要しなかった。冬の熱が夏まで保存されるな

ら、夏の熱も冬までされる。橋梁の基礎杭は杭の設置間隔が2m～2.5mと密接していることでの杭の相互干渉等と鋼管杭で内径が大きいことから、熱が長時間拡散しない。小さな雪だるまはすぐ溶けるが、巨大な雪塊は永く残る。これまで熱の季節間蓄熱ができなかったのは、地中熱を得ようと杭を離して設置したからで、杭みんなが手をつなぐことで事態は一変したのである。

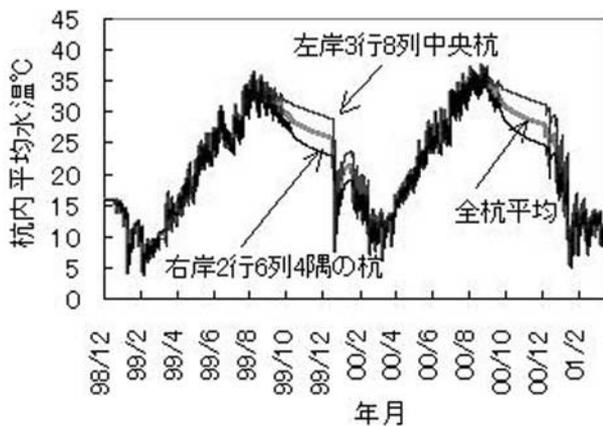
本システムを適用しようとした福井県坂井市の新清永橋の橋台の基礎は、当初、鋼管杭(杭径800mm)の中掘工法で設計されていた。鋼管杭を建てて中を掘削しながら沈下させ、最後に杭底の土砂をセメントミルクで固める中掘工法では、杭内面に残る土を洗浄排出し、杭底をコンクリートで詰めなければならない。京都府舞鶴市の横断歩道橋でのこの工法の施工では、杭底から漏水が生じた。そこでは、筆者はラジエーターの水漏れ防止剤で、どうにか使用出来るようにしたが、大変なトラブルであった。

その頃、日本鋼管(株)の中川栄作氏が、鋼管杭で、そのねじりに強い特性を生かした先端閉塞の回転圧入工法“つばさ杭”を持ち込んできた。当時、橋梁基礎杭では認められていなかったが、杭底が閉塞となる直径1,015mmの切り込み鋼板プレート“翼”を設けて回転圧入する杭(つばさ杭)を採用した(写真—2)。この鋼管杭では、曲げモーメントの大きな杭頭部から7.5m下までを800mm、その下部の長さ31mを508mmとする拡頭杭とした。下杭の直径を508mmと小さくしたのは、当時の回転圧入の施工実績を配慮したことによる。写真—3は、この橋台の鋼管基礎杭の底までに循環水を送るポリエチレン管の施工状況で安価に施工できる。

写真—2 先端閉塞回転圧入杭の施工  
(左：全景、右：先端の地盤貫入直前の状況)



写真—3 ポリエチレン管の杭への挿入



図—2 橋台の各位置での杭内の平均水温



写真—4 連続鉄筋コンクリート舗装で乾燥収縮目地をなくし、曲げなしの直線放熱管の施工

写真—4 は、このシステムでの放熱管の配管で、ここでは、耐久性を確保しながら浅くに放熱管を埋設し、舗装の連続鉄筋コンクリート舗装化で乾燥収縮目地を無くすことで鋼管放熱管は 35 m 曲げなしで施工できるようにしてコストを縮減した。

この現場では、橋とその前後の坂道 1810 m<sup>2</sup> を、右岸と左岸の橋台の合計 36 本の基礎杭に水を貯めて、その水を循環させて融雪と路面の凍結抑制を行う。

図—2 は、周囲の杭に囲まれて最も長期に熱が保存される左岸 3 行 8 列の中央杭と最も拡散しやすい右岸 2 行 6 列の四隅杭の内部の平均水温と、36 本の杭全部の平均水温の変化を示したものである。計算期間は 1998 年 11 月 15 日からなので舗装温度が低く蓄熱条件を満たすことなく 1998 年 12 月の冬を迎えている。雪が路面に積もると融雪が始まり、杭内水温は初期温度の 15.8℃ から低下する。融雪面の積雪が消え

るとポンプの運転を停止し、杭内水温は周囲の地中温度を得て回復に向かう。しかし全杭の杭内平均水温は元には戻らず、初春になると路面温度が杭頭水温より 12℃ 以上高くなり蓄熱運転が始まる。この蓄熱運転はその後継続され、杭内水温は徐々に上昇し 8 月 8 日には最高温度 36.4℃ に達する。秋には周囲への拡散で杭内水温は下がるが、12 月 18 日の降雪直前でも 25.7℃ を保持している。この時、中心部の杭内平均水温は、周囲の杭の干渉で拡散しにくいことから、四隅の杭より 6.0℃ 高い。

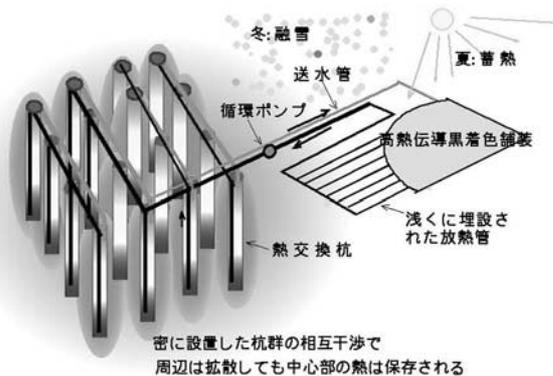
計算では、蓄熱なしで迎えた 1999 年 1 月の降雪では電気融雪に比べて本システムが残雪量が多かったが、蓄熱後の翌年には本システムが電気融雪の残雪量の約 1/3 になった。これは杭内水温が夏の蓄熱で 1999 年 12 月には 25.7℃ と前年より約 10℃ も高いことによる。ちなみに、循環ポンプの運転に要する電気は、融雪での 250W/m<sup>2</sup> に比べて非常に小さい 4W/m<sup>2</sup> であることから、夏に蓄熱のための運転がされても大幅な省エネとなる。この工事は 2006 年 12 月に完成し、夏の蓄熱なしで今冬の融雪を迎える。

福井県内の県道インターチェンジ橋では、中間の砂レキ層が硬くて、先端閉塞回転圧入工法では施工できず、鋼管の全旋回オールケーシング工法とコンクリート杭のプレボーリング工法との比較となり、後者で設計され、施工を待っている。

#### 4. ヒートパイル専用熱交換杭の群杭効果による季節間蓄熱融雪<sup>3)</sup>

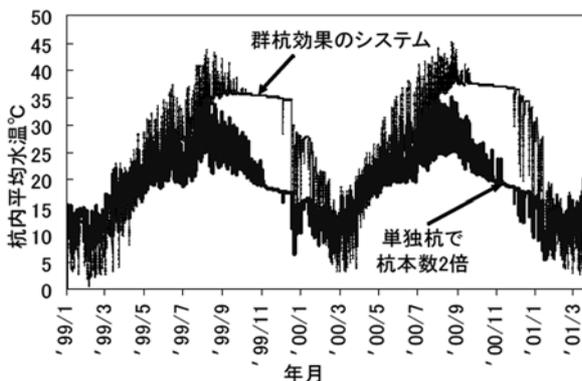
福井市中心部の幸橋では、既存の鉄筋コンクリート基礎を掘削しながら新しい基礎杭を設置する条件での中空の杭は困難なことから、専用の熱交換杭の使用を検討した。戸建て住宅用鋼管杭の回転圧入工法を用い

れば、従来のボーリングによる空洞への樹脂製熱交換杭設置法に比べて建設費は約1/3に縮減できる。その工法ではウルム氷期のレキ層の上面までしか施工できないことから、福井市内では約20mの短い杭になる。したがって、短い杭を従来に比べて多数設置することになる。多数の杭を近接して設置することは杭相互の干渉で、地中熱の集熱には不利である。しかし、前述の橋梁基礎杭のように、杭が相互に干渉する群杭効果は逆に熱の長期保存には適する（図—3）。



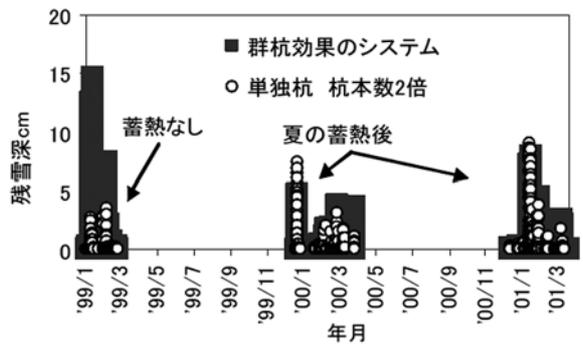
図—3 専用の熱交換杭の季節間蓄熱システム

長さ24m直径14cmの多数の鋼管杭を1.5m間隔に設置して、杭内水温より路面温度が5℃高いと運転開始し、放熱管出入口水温の差が3℃以下になると運転を停止する条件で蓄熱を行い、路面の融雪と凍結しない運転を実施するとして、それを福井の気象データを読み込んで、熱収支に基づき1999年1月1日から2001年3月20日までシミュレーションした。その結果を杭の融雪面積当たりの長さを2倍の4m/m<sup>2</sup>として、周囲の杭とは干渉しないように50m離れた杭と比較した。それぞれの杭内平均水温を図—4に示す。離れた単独の杭では、夏に温めても融雪直前には17.5℃と自然状態より1.7℃高い状態に戻ってしま



図—4 杭内平均水温（群杭 vs 杭2倍単独杭）

う。一方1.5m間隔の群杭は、夏の温度も高く、融雪直前まで保存され34.6℃となっている。それぞれの融雪面での残雪深のシミュレーション結果を図—5に示す。夏の蓄熱なしで融雪をおこなっている最初の冬は、1.5m間隔群杭方式杭は杭長2倍の単独杭の約3倍である。しかし、夏の蓄熱後の冬ではほぼ同じ残雪深を実現している。杭はほぼ1.5mの間隔に多数設置すると従来の地中熱交換杭の長さを半減できる。杭間隔を狭くすると杭内水温とその周辺は高温になるが、熱を蓄えられる地盤全体の大きさは小さくなり、2月には低温になり能力が著しく低下する。最適な杭設置間隔が存在する。こうした季節間蓄熱を福井市と札幌市で夏の熱を保存しての融雪実験で検証した。



図—5 残雪深（群杭 vs 杭2倍単独杭）

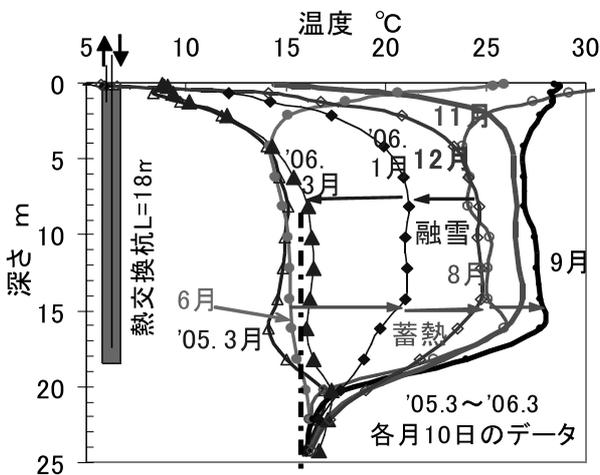
(1) 福井市内と札幌での実験

福井市内に内径127.8mm、外径139.8mm、長さ18mの鋼管杭を1.65mの間隔で5行5列25本の杭を熱交換杭として設置した（写真—5）。循環ポンプで、融雪面からの熱媒体（水）を杭の底までポリ管で送り、底で杭内に出し、杭頭部に周囲から集熱しながら送る。杭頭部からはポリ管で再び融雪面に送る。融雪（集熱）面には面積155.5m<sup>2</sup>の鋼繊維補強着色コンクリート舗装を用いた。蓄熱運転は、かぶり40mmの放熱管と放熱管の中間路面温度が杭頭から深さ60cmの水温より、7～9月は8℃高くなるとポンプの運転を開始し、放熱管出口水温と入口水温の差が5℃以下で運転を停止した。10～11月は、それぞれ開始は5℃、停止は3℃、12～3月で開始3℃、停止1℃とした。凍結抑制は路面温度が0.5℃未満でポンプを運転し、1.5℃以上で停止した。

'04年1月から現在まで運転してきたが、'05年3月から'06年3月までの1年について、その中心地盤（3行3列目と3行4列目の2本の杭の中間点）断面の温度変化を図—6に示す。深さ4～16mでは、同時刻



写真一五 戸建て住宅用杭打設機による熱交換杭の設置



図一六 蓄熱中心点の地温プロファイル (福井市)

でほぼ一様温度で、3月に16.5℃であったものが蓄熱によって9月には27.6℃になり、12月でも24.5℃を保持した。融雪後の3月でも福井の自然地温16℃に止まった。自然積雪深95cmのH18年豪雪でも融雪面上は一時的な数cmの積雪に止まり、十分な融雪であった。

数値シミュレーションソフトを用いて気象データを取り込んで、実験装置の運転を計算させた。杭中心部深さ18.2mの温度の計算値が実測値とよく一致するなど、数値シミュレーションが適切であることが確認された。

札幌市でも、杭を1.5m間隔の6行6列36本に、融雪(集熱)面を147m<sup>2</sup>として、放熱管(鋼管)を10cm間隔にしてほぼ同様の実験を行った。6月から

の蓄熱運転で10月には19℃までになり、12月でも深さ6m～17mでは18.5℃となった。融雪状況は、周囲が1m以上の積雪となる状況では一時的には10cmまでの残雪が生じたが、駐車場機能としては問題がなかった。

## (2) 各地でのフィジビリティ・スタディ

福井市内の2箇所、秋田市内、札幌市隣接の北広島市の5箇所の鋼床版橋・歩道・駐車場について、数値シミュレーションソフトを用いて、各地の気象条件を読み込んで残雪深を求めた。それをその地域での一般的な電気融雪での残雪深とほぼ同じ残雪深となるまで試行した。その条件で電気料金、建設費を見積もった結果、本システムは福井市や秋田市では電気融雪より建設費も安価で、電気の使用は電気融雪の数%となることが分かった。降雪量が多く夏の気温が低い札幌では、建設費が電気融雪を上回るが、そのコスト高はほぼ数年の電気代で取り戻せると試算された。

福井市内では370m<sup>2</sup>の既存の駐車場にこのシステムが導入され、今冬から融雪が開始された。また、福井中心部の橋面3920m<sup>2</sup>は、このシステムで施工中で、2007年12月には供用されるだろう。

## 5. 熱交換杭設置での建設機械関連の課題

この数年、鉄鋼メーカー、ゼネコンと住宅メーカーの一部で、ヒートポンプを併用して空調をターゲットにした地中熱の研究開発の機運が高まっている。そこでの課題として、鋼管杭の腐食と内面断面が大きく、寒冷地では大量の不凍液が必要となること等がある。その解決策として、水を貯めた杭の中にU字のポリ管を挿入する方法が採用されている。それは大口径となるビルや橋梁の兼用杭の巨大空洞の利点を生かさず、空調の立ち上がり向上の効果を奪っている。関連して先端閉塞杭の施工性や設計法の向上が課題と思われる。

一方、口径が14cmほどの専用鋼管杭でその中に水を貯めてU字管を挿入という熱交換杭方式に対しては、以下の代替が考えられる。すなわち、鋼管杭を回転圧入工法などで設置後、Uタイプの樹脂管を鋼管杭内部に挿入し、鋼管杭を引き抜き転用出来れば、ボーリング工法より安価な施工で、樹脂の熱交換杭が設置できる。その際には、継ぎ手を溶接するのではなく、ワンタッチのカップリング化が必要となる。また、Uタイプポリエチレン管を残すには ① U杭先端は切り離して鋼管を引き抜く ② 杭設置後ポリエチレン

管を挿入後、ポリエチレン管に当たらないようにガイド鋼管底が開いて鋼管を引き上げる ③先端開放鋼管(外管)の内面に先端閉塞鋼管(内管)を挿入して設置後、内管を引き抜き、その後にUタイプポリエチレン管を挿入し、外管を引き抜くなどである。筆者らは、この試験施工を実施したが成功していない。

40万台の地中熱空調のアメリカなど欧米に比べて、日本のそれは環境省などの1/3補助にもかかわらず桁違いに普及が進んでいない。その原因は複雑な日本の地盤ではボーリング費が高いことにある。沖積平野の軟弱地盤上に都市が位置する日本の特殊性を逆に、杭施工法の応用で欧米並みの4,000円/mの熱交換杭を期待している。

## 6. おわりに

一連の取り組みは、福井の地域、現場を見つめてのものであった。そのことが地中熱では桁違いに普及されている欧米のボーリング方式ではなくて、日本の地盤などに相応しい技術、内発的な技術となった。それらで建設費は従来の1/3～1/5に、省エネ性も向上した。県の公共事業の発注者に近い公務員技術者ならで

はこの立場を生かし、アイデアと相応しい現場を見つけ、必要となった様々な分野の研究者や現場の方々をつないで実用化を図ってきた。それは都道府県では3箇所しかない建設系の公的研究機関があつてのことである。

最後に建設機械の関係者によって熱交換杭の設置技術が進展することを期待する。 JICMA

### 《参考文献》

- 1) 宮本重信,竹内正紀,木村照夫:基礎杭利用による地熱融雪法の設計施工運転と数値シミュレーション,土木学会論文集,No.609/VI-41,pp.99-110,1998.12
- 2) 宮本重信,中川毅信,竹内正紀,永井二郎,藤井政志:橋梁と基礎橋梁基礎杭を利用した地中への季節間蓄熱融雪,pp.13-21,2006.4
- 3) 福井県,福井大学,大阪工業大学,大阪大学,名古屋工業大学,室蘭工業大学,北海学園大学,石川工業高等専門学校,“エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発事業 技術融合による地中熱融雪システムのコスト縮減と省エネ化の研究開発”NEDO(新エネルギー・総合産業技術開発機構)平成14～16年度成果報告書

### 【筆者紹介】

宮本 重信 (みやもと しげのぶ)  
福井県雪対策・建設技術研究所  
総括研究員



## 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に申込みの場合、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>