

平成30年6月27日現在

機関番号：30108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06214

研究課題名(和文) 道路舗装の長寿命化を目指した凍上対策工法の高度設計手法の開発

研究課題名(英文) Development of new design method for countermeasure against frost heave aimed at life extension of pavement

研究代表者

川端 伸一郎 (Kawabata, Shinichiro)

北海道科学大学・工学部・教授

研究者番号：10224833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、凍上被害の実態を取りまとめ、設計に加味すべき条件および新たな評価手法について検討した。総延長800kmの道路において路面状態を調査し、土工区分(切土か盛土か)と凍結指数が凍上被害に関係することを明らかにした。凍上被害箇所から採取した51種類の路床土の特徴を示した。全国323地点の凍結指数を調べ、その地域特性を明らかにした。また、100年以上の気温データから凍結指数の長期変動特性を示した。舗装の目視点検の方法の違いが、その評価精度に与える影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we compile data on frost heave and associated damage to roadways, consider additional parameters for roadway design, and examine new methods of assessment. Specifically, we investigate pavement surface conditions over a total of 800 km of roadway and use the data to find the relation among type of earthwork (cut or fill), freezing index, and damage from frost heave damage. Additionally, we examined 51 types of subgrade soil sampled at heaved locations. The results elucidate the regional characteristics of the freezing index at 323 points throughout Japan. For comparison, we reviewed more than 100 years of weather data, using it to reveal long-term fluctuations in the freezing index. Finally, we show that differences in how pavement is visually inspected affects the accuracy of the resulting assessments.

研究分野：地盤工学

キーワード：凍上対策工法 凍結指数 凍上被害 舗装点検

### 1. 研究開始当初の背景

内閣府の社会資本ストック推計によれば、部門別資本ストック(17部門)のうちで最大の割合は道路である。道路は経済や社会活動の基盤となる中枢的なインフラであり、経済競争力の低下や安全・安心が脅かされる事態が生じないよう適切な維持管理が必至であると同時に、全体に占める負担割合から維持管理費や更新費の低減が常に求められる対象である。

インフラの老朽化対策や長寿命化計画は我が国における喫緊の課題であり、このような課題には多くの研究事例が存在する。

しかし、寒冷気象下で生じる現象と関連付けた研究は非常に少ないのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究は舗装の長寿命化を目指し、特に寒冷地で生じる凍上現象への対策工法について取り扱うものである。現行の凍上対策工法は、すでに半世紀近くの歴史を経ており、これまでに気象データの蓄積や被害事例も増えてきたことで、技術的な検証が可能な時期に差し掛かっている。本研究では、凍上被害の実態を取りまとめ、設計に加味すべき条件および新たな評価手法などについて検討することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) 凍上被害の実態を把握するため、北海道内 8 路線(総延長 800km)において 20m 間隔で撮影した路面写真から舗装のひび割れ調査を実施した。この調査結果を基に被害箇所を選定し、路床土の土質工学的特徴を調べた。

(2) 凍上対策工法の設計で必要となる凍結指数について、全国 323 地点の気温データを用い 6 種類の確率分布モデルで最適適合分布の特徴をまとめた。また、100 年規模の気温データから凍結指数の長期変動特性について検討した。

(3) 舗装の目視点検として、路面性状 3 要素(ひび割れ、わだち掘れ、縦断凹凸)を歩きながら点検する方法と、短時間で長距離の点検を目的とした道路パトロール車等の走行車両から点検する方法の 2 通りについて、その精度について検討した。

### 4. 研究成果

(1) 図-1 は、凍結指数と横断クラックの関係である。なお、横断クラックは、20m 範囲のクラック本数で表現している。同図から両者には一義的な関係がみられ、凍結指数が大きな箇所ほど横断クラックが多く発生することが明らかである。

同じく図-2 は、凍結指数と縦断クラックの関係である。なお、縦断クラックは、被害を 4 段階で数値化し、延長から被害レベルの平

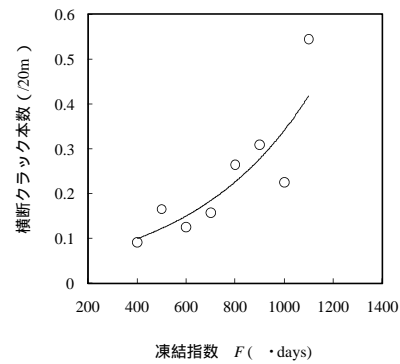


図-1 凍結指数と横断クラックの関係

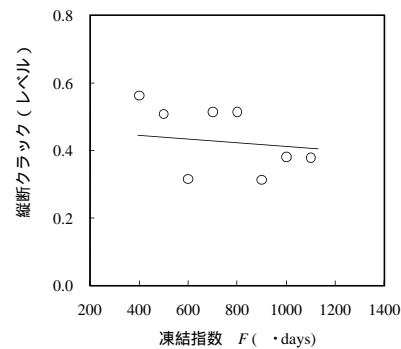


図-2 凍結指数と縦断クラックの関係

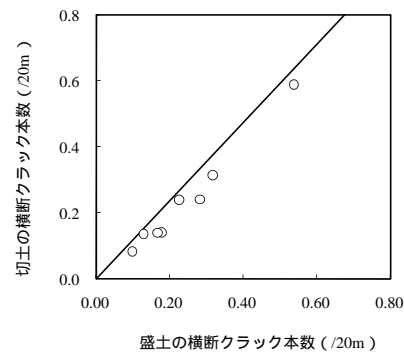


図-3 横断クラックの土工区分比較

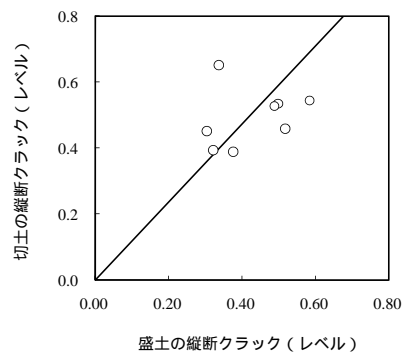


図-4 縦断クラックの土工区分比較

均値を求めている。同図から、縦断クラックについては、図-1 に示した横断クラックのような凍結指数との関係はみられない。

図-3 は、凍結指数ごとに盛土と切土の横断

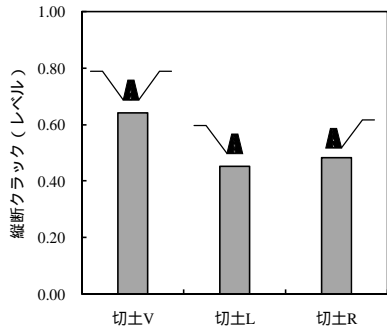


図-5 切土の種類と縦断クラックの関係

クラックを比較したものである。同じく図-4は、縦断クラックの関係である。両図の関係から明らかなように、横断クラックは、盛土と切土で有意な差は無く土工区分とは無関係である。これに対して、縦断クラック（凍上性クラック）は、切土部の値が総じて大きく被害が現れやすい傾向がみられる。

切土部に凍上被害が集中しやすいのは、凍上に必要な水分が集まりやすいことや、日射が遮られ凍結深さが深部に達することが理由として挙げられる。路面の日射条件は、路線方位や切土形状などに支配されるものと考えられるが、このような条件と凍上被害の関係を調べた事例は少ない。

図-5は、縦断クラックを3分類した切土で比較したものである。同図から両切土（切土V）が最も被害レベルが高く、2種類の片切土（切土L・R）は同程度であることが分かる。両切土の被害レベルが高いことは、片切土に比べて日射量が少なくなるためと考えられる。

つぎに、図-6は凍上被害箇所（路床）から採取した51試料の粒径加積曲線である。同図には既往の文献<sup>1)</sup>を参考に凍上性を示す土の粒度範囲も示した。特に細粒分含有率（0.075mm以下）が卓越した試料が2つあるが、概ね粒度分布はある幅に収まっている。細粒分含有率は平均で26%であり、傾向としては15~30%のものが多い。

図-7は、加熱温度の違いによる強熱減量の分布である。800のピークは8%程度であり、400は4%程度に分布が集中している。既往の研究<sup>2)</sup>では、400の強熱減量と凍上性に相

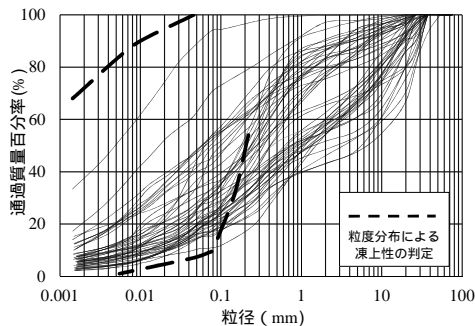


図-6 凍上被害箇所（路床）の粒度特性

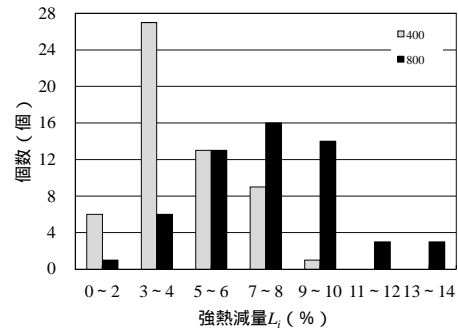


図-7 加熱温度の違いによる強熱減量

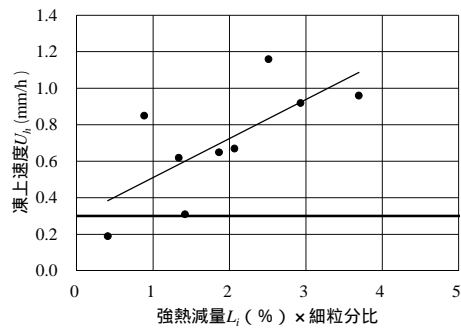


図-8 凍上影響値と凍上速度の関係

関があることが示されており、凍上性が現れる境界は、強熱減量4%程度であるとされている。凍上被害箇所から採取した試料の多くが凍上性の境界である400の強熱減量4%以上であることは非常に興味深い。

図-8は、800の強熱減量（質的なリスク）と細粒分の含有比（量的なリスク）を掛けた凍上影響値と凍上速度の関係である。ばらつきはみられるが、両者には一義的な関係があり、凍上性を間接的な指標から判定する新たな手法として期待できる。

(2) 凍上対策工法の設計で用いられる凍結指数は、「 $n$ 年に1度起り得る」と考える確率凍結指数である。通常この値を求めるためには、当該気象要素に適した確率分布モデルを選択する必要がある。

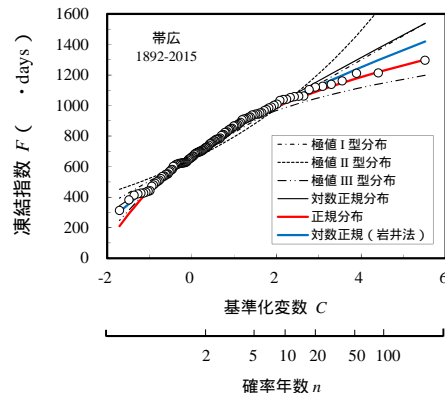


図-9 各確率分布モデルの適合度判定

表-1 指針法と最適適合の凍結指数比較

再現期間 ( $n$ 年)	対数正規分布 (指針等) $F(\cdot \text{days})$	正規分布 (最適適合) $F(\cdot \text{days})$
10	1045	1020
20	1158	1094
30	1221	1133
40	1265	1159
50	1299	1179
100	1403	1235

図-9は、各確率分布モデルの適合度判定の一例である。同図は、6種類の確率分布モデルと実測値の関係を示したものであり、SLSC(適合性の指標)によって、正規分布が最適適合分布に選ばれた例である。現行の指針等<sup>3)</sup>では、凍結指数の確率分布を対数正規分布に限定している。図-9で用いた確率分布モデルは、一般的なものであるが、その中でも対数正規分布は極値II型分布(Frechet分布)を除くと最大である。なお、本例について対数正規分布(指針法)と正規分布(最適適合モデル)で得られる $n$ 年確率凍結指数を比較すると表-1になり、再現期間が延長されるとその差が大きくなっていくことが分かる。

つぎに、図-9のような解析を全国323地点で行い最適適合分布の選出割合を求めた(図-10)。同図から極値I型分布と対数正規分布(岩井法)の選出割合が高く、指針等が定める対数正規分布(2母数)の選出割合が極めて低いことが分かる。

また、極値I型分布は本州エリアに限定された選出であり、逆に対数正規分布(岩井法)は北海道エリアが大部分を占めている。すなわち、凍結指数の発生確率は地域によって特性が異なるものである。さらに、極値II型が選ばれるケースは、ほぼ無いことから、指針等の対数正規分布で得た $n$ 年確率凍結指数の大部分は、最適適合モデルで推定した値よりも過大な推定値である。

北海道には22地点の気象台観測点があり、このうち8地点については、100年以上の気温データが蓄積されている。最近の報告<sup>4)</sup>によると、北海道は100年あたりで、年平均気

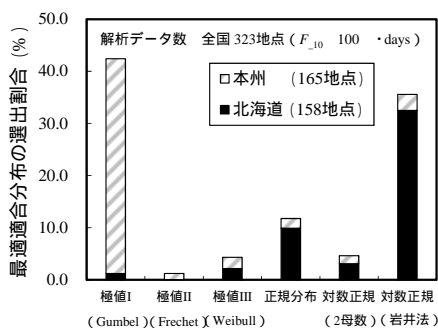


図-10 最適適合分布の選出割合

表-2 凍結指数の変化率順位

変化率 順位	地点名	変化率	平均凍結指数 ( $\cdot \text{days}$ )	データ 年数
1	帯広	-4.10	756	124
2	釧路	-3.64	562	126
3	旭川	-2.98	773	128
4	札幌	-2.73	413	133
5	網走	-1.67	587	127
6	根室	-1.18	406	137
7	寿都	-0.80	227	129
8	函館	-0.14	231	138

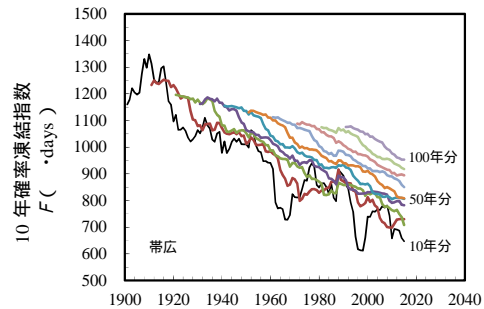


図-11 データ数の違いによる凍結指数の年変動

温が1.59 上昇したとされ、その傾向を季節ごとに分析すると冬期の気温上昇が最も高いことが示されている。

北海道で最も温暖化しているのは帯広であり、4.1  $\cdot \text{days}/\text{年}$ で凍結指数が減少している。帯広では1900年頃1000( $\cdot \text{days}$ )程度であった凍結指数が直近では500( $\cdot \text{days}$ )程度にまで減少している。これは理論最大凍結深さに換算すると、160cmから105cmに減少したことになる。表-2は、全地点の凍結指数の変化をまとめたものである。全地点で変化率がマイナスすなわち温暖化傾向にあることが分かる。

図-11は、帯広を例に1892~2015の凍結指数を用いて、解析データ数を10年単位で変化させ(10年から100年まで)、10年確率凍結指数を求めたものである。10年程度のデータ数では、特異な年度の影響で確率凍結指数の値が大きく変動しており、30年以上のデータ数にならなければ、安定した結果を得ることは難しいようである。ただし、データ数が増加すると過去の寒冷なデータが増えることで、凍結指数も増加していく。本例では、2015年時点で、データ数10年で解析すると $F=647(\cdot \text{days})$ 【理論最大凍結深さ122cm】、100年では $953(\cdot \text{days})$ 【同154cm】との結果を得る。

AME-DASは1977年から本格的に稼働を始めており、大部分の観測点で30年以上のデータが蓄積されてきている。仮に $n$ 年確率凍結指数の算定で30年分以上のデータを要求しても、対応は比較的容易であると考えられる。しかし、過度にデータ期間を長く取り過ぎると、過去の気象状況の影響を強く受けることから適当な範囲に留めるべきである。本来は、

凍結指数の年変動を母集団の変化と捉え、新たな手法を提案すべきであるが、現時点の結論はそこまでには至っていない。したがって、経過的な措置ではあるが、30年以上のデータを用いることで解析結果の安定を図り、構造物のライフサイクルをイメージして最長で50年分のデータ範囲でn年確率凍結指数を求めることを提案する。

(3) 国土交通省による総点検実施要領(案)【舗装編】<sup>5)</sup>では、舗装路面の点検方法として従来の路面性状測定車による方法に加え目視点検が導入されたが、目視点検を採用した事例や研究が乏しいため、ほとんどの自治体ではコストの高い従来の点検方法を採用している。本研究では、目視点検として、歩きながら点検する歩行点検と走行車両から点検する走行点検の2方法を考え、路面性状値が既知の舗装において両点検を実施し、その精度について検討した。図-12のように歩行点検の正解率は対象者全員でひび割れとわだち掘れが約80%、縦断凹凸は約60%であり、点検経験を積むと正解率が向上した。同様に図-13の走行点検ではひび割れとわだち掘れが約60%、縦断凹凸は約70%であり、経験を積むとひび割れでの損傷レベルが大きい箇所では正解率が上昇することが分かった。

<引用文献>

- 1) 電力中央研究所：電力中央研究所報告、地盤の凍結・凍上特性 - 凍上特性と土質常数の相関 - , 1987.

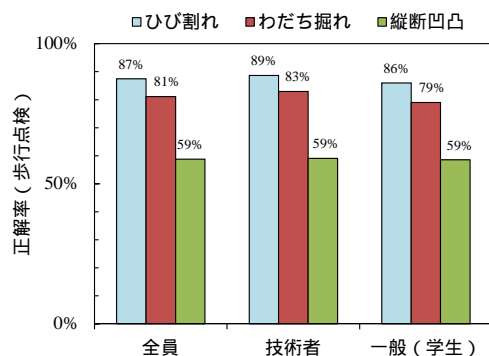


図-12 点検者の正解率(歩行点検)

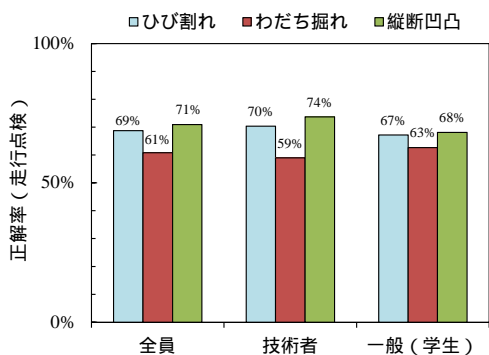


図-13 点検者の正解率(走行点検)

- 2) 小山義道, 高橋毅, 川合優: 火山灰の凍上性について, 土と基礎 Vol. 13, No. 11, pp.29-32, 1965.
- 3) 日本道路協会: 舗装設計施工指針(平成18年度版), pp.171-174, 2006.
- 4) 札幌管区气象台: 北海道の気候変化【第2版】, pp.9-11, 2017.
- 5) 国土交通省道路局: 総点検実施要領(案)【舗装編】, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

Luo, B., Ishikawa, T., Lai, H., Tokoro, T., Frost heave analysis of ballasted track above box culvert and its influence on train vibration, Sciences in Cold and Arid Regions, 査読あり, Vol.9(3), 2017, 229-235

川村和将, 亀山修一, 伊倉雄広, 東名高速道路における舗装マネジメントに関する研究, 土木学会論文集 E1(舗装工学), 査読あり, 73巻, 2017, I\_213-I\_219

DOI: [https://doi.org/10.2208/jscejpe.73.I\\_213](https://doi.org/10.2208/jscejpe.73.I_213)

Hirakawa, S., Kameyama, S., Kishira, R. and Jomoto, M., Bearing Capacity of Cement Concrete Pavement above a Cavity under the Road Surface, Proceedings of the World Conference on Pavement and Asset Management, 査読あり, 2017

A. SATO, S. NISHIMOTO, T. SUZUKI and S. KAWABATA, Factors Causing Deformation in Embankments Constructed in winter, and Control Measures, Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 査読あり, 2017, 2435-2438

S. KAWABATA, T. ISHIKAWA, S. KAMEYAMA, Effects of Freeze-thaw History on Bearing Capacity of Granular Base Course Materials, Advances in Transportation Geotechnics III, 査読あり, Vol.143, 2016, 828-835

T. ISHIKAWA, S. KAWABATA, Influence of Freeze-Thaw on the Mechanical Behavior of the Granular Base and Fatigue Life of Pavement Structures in Japan, ASCE Geotechnical Special Publication (GSP), 査読あり, 2016, 77-85

石川達也, 松谷真吾, 所哲也, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 不飽和鉄道バラストの力学特性に及ぼす細粒分の影響評価, 土木学会論文集 E1(舗装工学), 査読あり, 72巻, 2016, I\_151-I\_158,

DOI: [https://doi.org/10.2208/jscejpe.72.I\\_151](https://doi.org/10.2208/jscejpe.72.I_151)

亀山修一, 金森弘晃, 井上昌幸, 浅田拓海, 川端伸一郎, 舗装路面の目視点検の精度に関する研究, 土木学会論文集 E1, 査読あり, 71巻, 2015, I\_25-I\_30

DOI : <https://doi.org/10.2208/jscejpe.71.1.25>  
亀山修一, 斎藤昌之, 長屋弘司, 田中俊輔, 川端伸一郎, 転圧が北海道型 SMA のテクスチャと耐久性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E1, 査読あり, 71 巻, 2015, I\_103-I\_110

DOI : <https://doi.org/10.2208/jscejpe.71.1.103>  
石川達也, 木次谷一平, 所哲也, 応力変形・熱伝導・浸透連成解析による舗装構造の凍上・融解挙動評価, 土木学会論文集 E1, 査読あり, 71 巻, 2015, I\_185-I\_192

DOI : <https://doi.org/10.2208/jscejpe.71.1.185>  
A. SATO, T. YAMANASHI, S. NISHIMOTO, T. SUZUKI and S. KAWABATA, Long-term properties of coal ash embankments, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読あり, 2016, 1-6

DOI : <https://doi.org/10.3208/jgssp.JPN-01>

〔学会発表〕(計 2 件)

佐藤厚子, 山梨高裕, 久慈直之, 川端伸一郎, 路盤の品質管理への衝撃加速度の適用性に関する試験, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 58 巻, 2018, 1-6

青木亮介, 石川達也, 所哲也, 林天舒, 寒冷地における路床土のレジリエントモデュラスの評価手法の検討, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 58 巻, 2018, 23-30

青柳智之, 石川達也, 丸山記美雄, 工藤静瑠, 凍結融解型保水性試験機の性能評価に関する基礎的実験, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 58 巻, 2018, 217-224  
川端伸一郎, 亀山修一, 凍結指数の経年変化が置換え深さに与える影響, 気候変動に伴う積雪寒冷地の地盤災害に関するシンポジウム発表論文集, 2017, 59-64

青木亮介, 石川達也, 所哲也, 凍結時の繰返し載荷履歴が融解後の土のレジリエントモデュラスに及ぼす影響, 第 52 回地盤工学研究発表会講演集, 2017, 1099-1100

瀬戸哲, 石川達也, Dareeju Biyanvilage, Gallage Chaminda, 移動輪荷重作用下の不飽和路床材の繰返し変形特性評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 57 巻, 2017, 201-210

松谷真吾, 石川達也, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 青柳智之, 不飽和鉄道バラストの強度変形特性に及ぼす粒子径の影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 57 巻, 2017, 67-74

石川達也, 桃谷尚嗣, 中村貴久, 早野公敏, 河井勝之, 小関裕二, 高橋茂樹, 廣津栄三郎, 路床・路盤材の材料特性試験方法のイノベーションに向けた研究動向, 第 51 回地盤工学研究発表会講演集, 2016, 983-984

松谷真吾, 石川達也, 福真治, 中村貴久, 桃谷尚嗣, 不飽和鉄道バラストの強度変形特性に及ぼす細粒分の影響評価, 第 51

回地盤工学研究発表会講演集, 2016, 985-986

川端伸一郎, 川尻峻三, 石川達也, 北海道における降雨特性の変化と年代的特徴, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 56 巻, 2016, 301-308

佐藤厚子, 山梨高裕, 鈴木輝之, 川端伸一郎, 植生基盤材によるのり面の断熱効果, 第 50 回地盤工学研究発表会講演集, 2015, 131-132

亀山修一, 斎藤昌之, 長屋弘司, 川端伸一郎, 北海道型 SMA のきめ深さと転圧方法の関係, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, 2015, 753-754

〔図書〕(計 2 件)

川端伸一郎, 亀山修一(分担執筆), 積雪寒冷地の舗装に関する諸問題と対策, 土木学会, 丸善, 2016, 総ページ数 205

川端伸一郎(分担執筆), 舗装標準示方書, 土木学会, 丸善, 2015, 総ページ数 351

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川端 伸一郎 (KAWABATA, Shinichiro)  
北海道科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 1 0 2 2 4 8 3 3

(2) 研究分担者

亀山 修一 (KAMEYAMA, Shuichi)  
北海道科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 3 0 2 9 5 8 9 4

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)  
北海学大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 6 0 3 5 9 4 7 9

佐藤 厚子 (SATO, Atusko)  
国立研究開発法人土木研究所(寒地土木研究所)・主任研究員  
研究者番号: 8 0 4 1 4 1 7 6

高見 雅三 (TAKAMI, Masazo)  
地方独立行政法人北海道立総合研究機構・地質研究所  
研究者番号: 0 0 4 4 6 3 5 3