

雪氷路面に適した自動運行補助施設の 埋設深さと埋設個数の検討

(国研)寒地土木研究所 寒地交通チーム ○倉田 和幸
(国研)寒地土木研究所 寒地交通チーム 四辻 裕文
(国研)寒地土木研究所 寒地交通チーム 中村 浩

除雪機械の自動運行補助のため路面下に埋設する磁気マーカについて、磁気特性の観点とライフサイクルコストの観点からみて雪氷路面での自車位置特性補助に適した埋設深さと埋設個数の組合せパターンを苫小牧寒地試験道路での実証実験で比較検討した。今回の実験に限れば、路面から深さ70mmに2個埋設するパターンが磁気特性の観点からみて特段の支障がなく、ライフサイクルコストの観点からみて最も経済的となった。

キーワード：自動運転、磁気マーカ、ライフサイクルコスト、除雪機械

1. はじめに

令和2年度の道路法改正に伴い道路附属物に新しく自動運行補助施設が加わった。これは道路運送車両法が定める自動運行装置を備えた自動車（以下、自動運行車と呼ぶ。）の自車位置特定等を補助する施設のことであり、磁気マーカや電磁誘導線等として道路構造令第31条等に規定された¹⁾。磁気マーカには道路の路面下に埋設する埋設型と路面上に接する表面設置型があり、本稿では埋設型の磁気マーカに着目し、以下これを磁気マーカと呼ぶことにする。

磁気マーカは、直径30mm、厚さ20mmのフェライト磁石、並びに、磁束変化に伴う誘導電流により電源不要かつ非接触で通信可能なRFID（Radio Frequency Identificationの略。）チップから構成されており（図-1）、自動運行車の車底に設置される磁気センサによって自車の位置が特定される（図-2）。

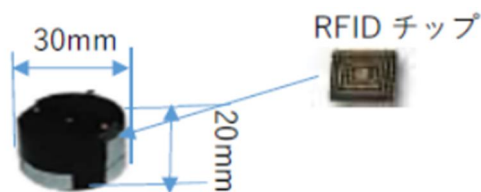


図-1 磁気マーカ（埋設型）

磁気マーカが雪氷路面下に埋設される場合どれだけの深さや個数にするとよいかについてはこれまで不明な点が多かった。寒地交通チームでは苫小牧寒地試験道路の雪氷路面下に埋設深さと埋設個数の組合せが異なるパタ

ーンで磁気マーカを埋設したうえで、車底の磁気センサで検知可能かを検証する実験（以下、実験と呼ぶ。）を実施した。

本稿では実験結果を基に、磁気特性の観点とライフサイクルコストの観点からみて雪氷路面での自車位置特定補助に適した磁気マーカの埋設深さと埋設個数の組合せ（以下、埋設パターンと呼ぶ。）を検討した結果について報告する。



図-2 除雪トラックへの磁気センサの設置状況
(参考文献2から転載)

2. 磁気マーカの埋設パターン

車底の磁気センサが検知する路面下の磁気マーカの磁気特性として磁束密度に着目する。磁気センサを設置する車底までの高さ（車高）は車種により異なるが、図-2に示すように除雪トラックを想定した場合は250mm程度であり、磁気センサの厚さを考慮すると磁気センサまでの地上高は200mm程度になる²⁾。そこで実験では雪氷路面上の高さ200mmの位置で磁気マーカの磁束密度を計測

することにした。全国の自動運行車実証実験で使われたゴルフカートや小型バスを想定した場合、車高は各々110mmや160mm程度になり除雪トラックの車高とは大きく乖離するが、磁気マーカの磁束密度の検知可能性という点では安全側なので、実験では上記の高さ200mmを採用した。

また、実験では、雪氷路面上の高さ 200mm の位置で磁気センサが検知可能な磁束密度の基準値（ベンチマーク）として、 $30\mu\text{T}$ （マイクロテスラ）、すなわち 0.03mT （ミリテスラ）を採用した³⁾。日本の積雪寒冷地域における地磁気は概ね $0.025\sim 0.030\text{mT}$ であり⁴⁾、地磁気を計測する市販の磁気センサを利用しても計測可能な値であるため³⁾、実験では上記の 0.03mT を基準値として採用した。

したがって、実験では「雪氷路面上の高さ 200mm の位置で磁気マーカの磁束密度が基準値 0.03mT 以上であるか」を埋設パターン毎に検証することにした。

磁気マーカの埋設パターンについては、苫小牧寒地試験道路の第1車線、第2車線、付加車線、及び冠水実験

路車線の舗装（表層、基層、上層路盤）に図-3に示す5つの埋設パターンで道路縦断方向に磁気マーカを複数個埋設した。図-2の磁気センサの代わりにテスラメーターを使用することとし、路面状態が乾燥時、積雪時（積雪深 5cm 又は 10cm）、融雪時（冠水高 0cm、5cm、又は 10cm）の磁束密度をテスラメーターで計測した。なお、融雪時（冠水高 0cm）の路面状態とは湿潤路面を意味する。道路縦断方向の磁気マーカ設置間隔についてはゴルフカートや小型バスの車底に設置される磁気センサ2個の間隔が 2m なので、路面下の磁気マーカの設置間隔も直線区間では 2m とすることが合理的といえる⁵⁾。しかしながら道路縦断方向の磁気マーカ設置間隔は長いほうが個数も減って経済的であるという点、並びに、自動運行車として図-2に示した全長 12m 程度の除雪トラックの車底に磁気センサを設置するという点を勘案し、実験では道路縦断方向の磁気マーカ設置間隔は直線区間では 10m とした²⁾。写真-1には実験での計測の様子を示す。

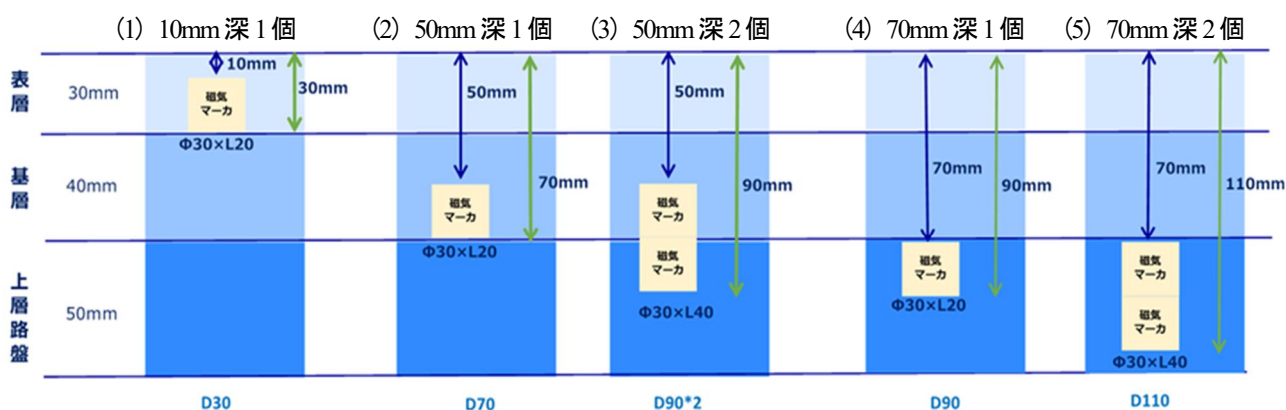


図-3 磁気マーカの埋設深さと埋設個数の組合せパターン（埋設パターン）



写真-1 計測実験の様子（左：乾燥時、中央：積雪時、右：融雪時）

3. 磁気特性からみた埋設パターン比較

図-4に乾燥時の路面から高さ 200mm の位置で5つの埋設パターン(1)～(5)の磁束密度を計測した結果を示す。

磁束密度の平均値（図-4の図中の折れ線）は5つの埋設パターン全てにおいて基準値 0.03mT 以上であった。

また、図-5～図-9に埋設パターン(1)～(5)の各々について路面状態が乾燥時、積雪時（積雪深 5cm 又は 10cm）、融雪時（冠水高 0cm、5cm、又は 10cm）の磁束

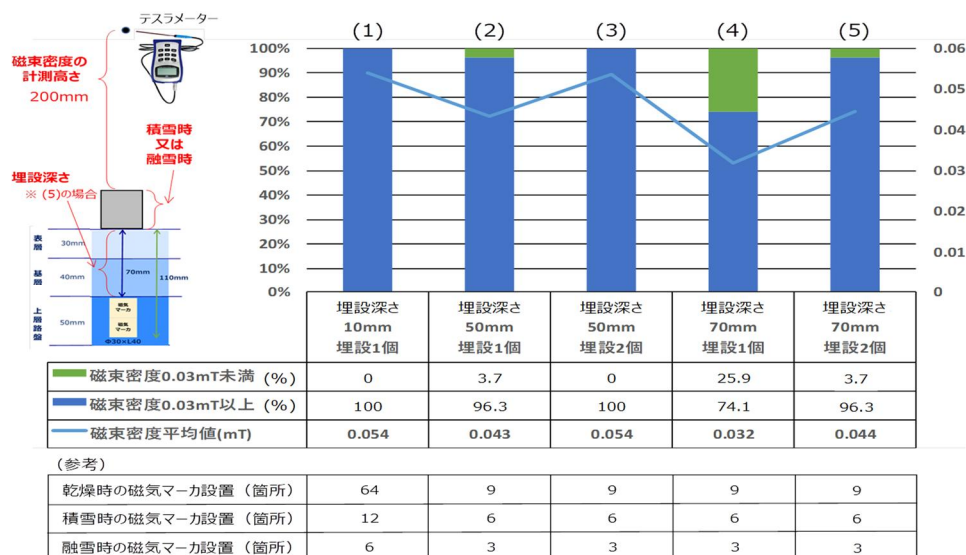


図-4 埋設パターン毎の磁束密度の計測結果 (乾燥時)

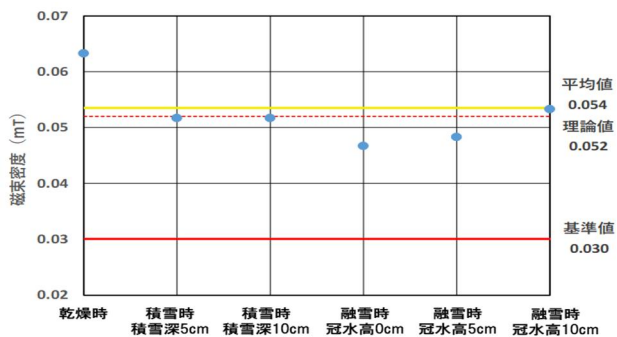


図-5 路面状態別にみた磁束密度の計測結果 (埋設パターン(1))

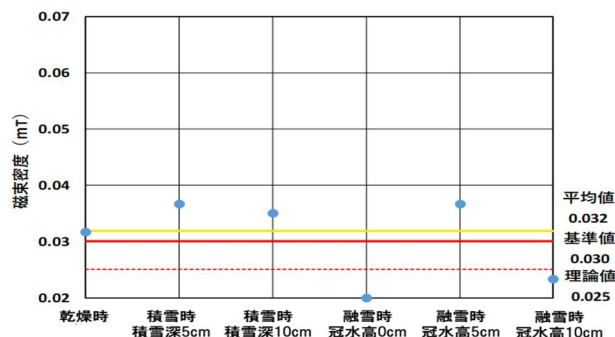


図-8 路面状態別にみた磁束密度の計測結果 (埋設パターン(4))

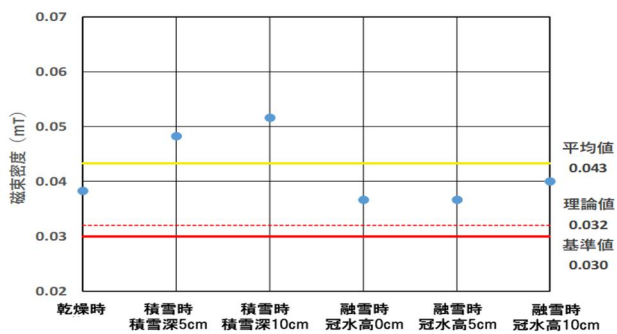


図-6 路面状態別にみた磁束密度の計測結果 (埋設パターン(2))

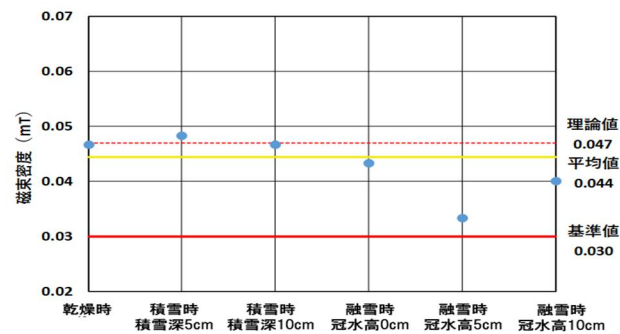


図-9 路面状態別にみた磁束密度の計測結果 (埋設パターン(5))

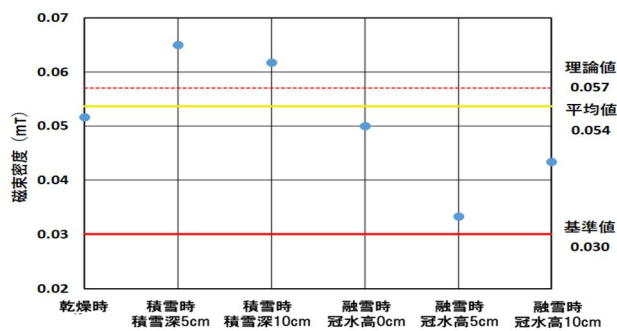


図-7 路面状態別にみた磁束密度の計測結果 (埋設パターン(3))

密度を計測した結果を示す。各図に記載された路面状態毎の計測値 (図中の青色の丸い点) は、該当する路面状態において設置箇所別の計測値を図-4 に掲載した設置箇所数で平均した値であり、図中に「平均値」として記載された値 (図中の黄色の実線) は、6 つの計測値を平均した値である。「理論値」として記載された値 (図中の赤色の点線) は、電磁気学に基づいて磁力体の位置や個数の違いにより異なる磁束密度の値を埋設パターン毎に計算したものであり、基準値 0.03mT とは異なる点に注意が必要である。

結果をみると、図-8において融雪時0cm及び冠水高10cmの計測値が基準値0.03mTを下回ったが、平均値では基準値を上回っており、その他の図-5、6、7、9においては全ての計測値が基準値を上回り平均値も上回っていた。なお、図-5、6、7、9において融雪時5cmの計測値は融雪時10cmの計測値よりも小さいが、図-8においては逆に融雪時5cmの計測値のほうが高くなっている。これは、図-4で示したとおり今回の実験では融雪時の磁気マーカ設置箇所数が3箇所しかなかったことが理由の一つと推察される。

以上より、磁気特性の観点からみて雪氷路面下での磁気マーカの性能は乾燥時、積雪時、融雪時において埋設パターン(4)の一部を除いて基準を満たすことが分かった。したがって、自動運行車の自転車位置特定を補助するため雪氷路面下に磁気マーカを埋設する際、埋設パターン(4)を除いて、性能に特段の支障はないと考えられる。

4. ライフサイクルコストからみた埋設パターン比較

雪氷路面下に磁気マーカを埋設施工した後に、維持管理の段階で、切削オーバーレイによる表層打換え等の舗装補修が必要になることを考慮して、磁気マーカの施工・維持管理に係る経済的で効率的な埋設パターンを検討した。

表層に磁気マーカを埋設する場合、打ち換えるたびに磁気マーカの再設置が必要となりその際に舗装補修費用（以下、メンテナンスコストと呼ぶ。）が掛かる一方、基層若しくは上層路盤に埋設する場合、埋設個数を増やして磁力を高めたり路面下の深い位置まで削孔したりする必要が生じて、磁気マーカの埋設施工費用（以下、イニシャルコストと呼ぶ。）が掛かる。したがって経済的で効率的な磁気マーカの埋設パターンはメンテナンスコ

ストとイニシャルコストを合計したライフサイクルコストで優位性を比較するほうが望ましい。

本稿では、図-3と図-4に示した埋設パターン(1)、(3)、(5)に着目し、表-1に示す条件設定に基づき磁気マーカ施工後の経過年数30年間のライフサイクルコストを試算することにした。なお、磁気マーカ単体の耐用年数は30年以上あるとされる³⁾。図-10に試算結果を示す。同図より、イニシャルコストは比較的安い定期的に補修費が掛かる埋設パターン(1)に比べて、概して安いメンテナンスコストをもつ埋設パターン(3)及び(5)のほうが、経過年数30年時点の累積費としてのライフサイクルコストは安くなることが分かった。特に表-1で設定した条件に限れば埋設パターン(5)が最も経済的になると考えられる。

5. おわりに

本稿では磁気特性の観点とライフサイクルコストの観点からみて雪氷路面での自転車位置特定補助に適した磁気マーカの埋設深さと埋設個数に関して、図-3の5つの埋設パターンを比較した。

磁気特性の観点からすると、埋設パターン(4)を除いて自転車位置特定補助の性能に特段の支障はないことが分かった。

ライフサイクルコストの観点からすると、表-1で設定した条件に限れば埋設パターン(5)が最も経済的になることが分かった。

表-1 埋設パターン別にみた磁気マーカのライフサイクルコスト試算のために設定した条件

	パターン(1)	パターン(3)	パターン(5)
磁気マーカ取替の仮定	■ 表層劣化により毎年10%取替	■ 表層・基層劣化により毎年1%取替	■ 上層路盤劣化に起因する取替は生じない
	■ 10年ごとに切削オーバーレイにより100%取替	■ 切削オーバーレイに起因する取替は生じない	■ 切削オーバーレイに起因する取替は生じない
パターン共通の主な条件	■ 延長1kmの第1車線、第2車線、付加車線に、2m間隔で配置（合計1,503個） ■ 磁気マーカは1個あたり500円と設定 ■ 配置作業の人員は準備に測量主任1名、作業に測量技師1名、測量助手1名を設定 ■ 配置作業の時間は表層の場合4分、基層の場合5分、上層路盤の場合5分30秒。		

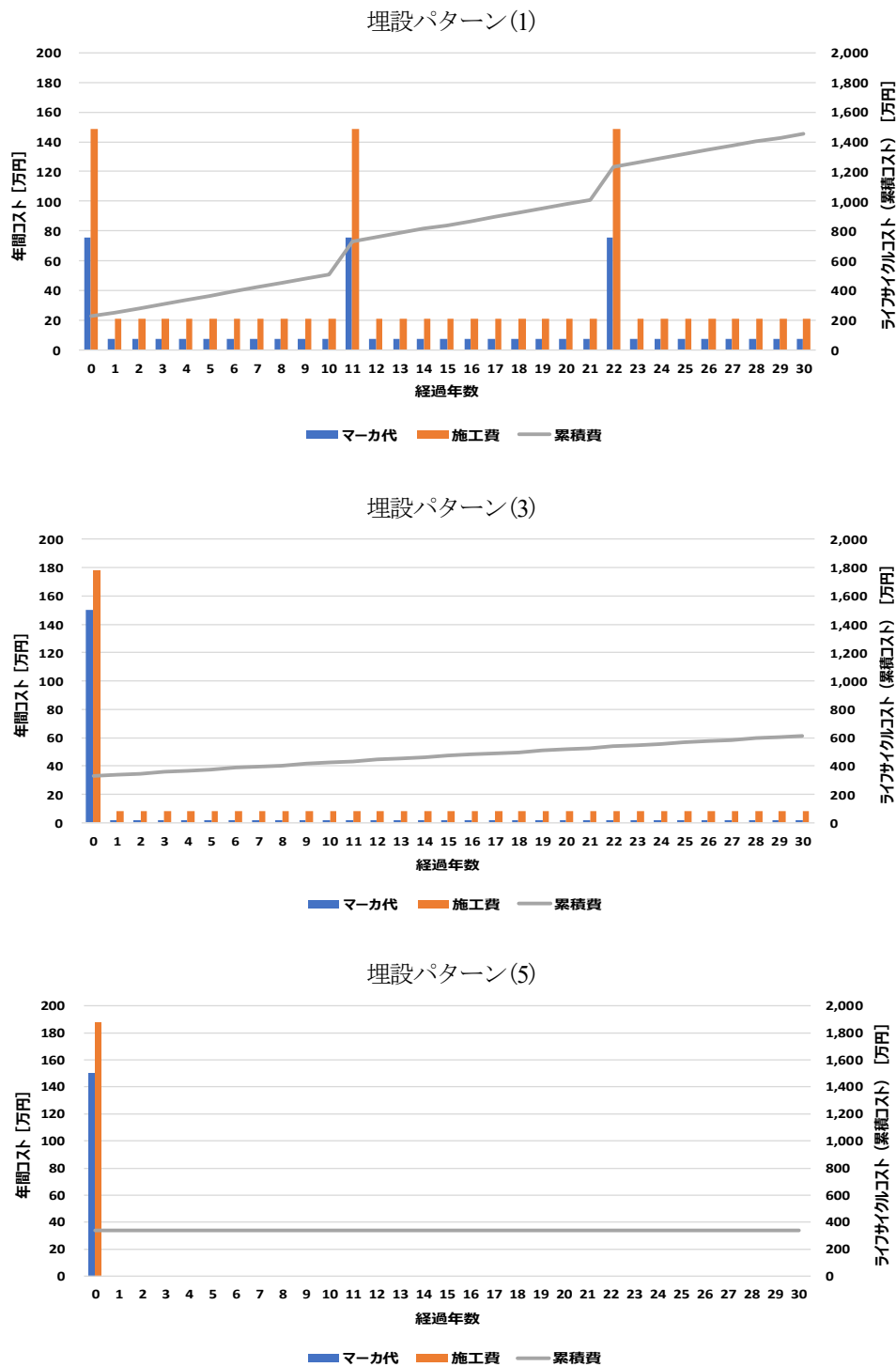


図-10 埋設パターン別にみた磁気マーカのライフサイクルコスト試算結果

参考文献

- 1) 日本道路協会：自動運行補助施設、道路構造令の解説と運用、pp.651-652、令和3年3月
- 2) 新保貴広、山口洋士、久慈直之：磁気マーカシステムを用いた除雪車走行支援に関する基礎実験、第63回北海道開発技術研究発表会発表論文集、pp.606-609、2020。
- 3) 土木研究所寒地土木研究所、愛知製鋼株式会社、株式会社NIPPO、アイシン・ソフトウェア株式会社：自動運転技術の活用による除雪車の運転支援及び道路構造・管理に関する共同研究報告書、第523号、令和3年1月
- 4) 国土交通省国土地理院：磁気図（水平分力）2020年値、国土地理院技術資料
https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/menu03_magnetic_chart.html（令和7年10月7日確認）
- 5) 中川敏正、関谷浩孝、中田諒、藤村亮太：自動運行補助施設（磁気マーカ）の設置間隔に関する分析、交通工学論文集、第8巻、第1号、pp.21-30、2022