【様式５】

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成　果　報　告　レ　ポ　ー　ト
Ｎｏ．2020－7

研究テーマ

走行中ワイヤレス給電のコイル埋設についての研究

研究代表者：東京理科大学准教授　居村　岳広
共同研究者：東京理科大学教授　堀　洋一
東亜道路工業株式会社　阿部　長門
東亜道路工業株式会社　増戸　洋幸
東亜道路工業株式会社　多田　悟士
東京大学教授　藤本　博志
東京大学特任講師　清水　修
東京大学助教授　畑　勝裕

令 和 6 年 5 月

新道路技術会議

【様式 3】

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（令和 3 年度採択）
研 究 概 要

番号	研究課題名	研究代表者
No.2020-7	走行中ワイヤレス給電のコイル埋設についての研究	東京理科大学　准教授 居村　岳広

走行中ワイヤレス充電を実現させるため、道路側に埋設したコイルの電気的特性と機械的強度を向上させた上でアスファルトへの埋込み技術の確立を目的として、電気的特性（効率・電力など）と機械的特性（耐久性など）を各種コイルと比較し、経年劣化の評価を行い、埋込み深さの最適化、サイズ、材質、低コストコイル等の可能性を示す。

１．研究の背景や動機、目的および目標等

近年、電気自動車の需要が高まる中で航続距離が短いことや充電インフラの整備が進んでいないことが電気自動車の普及の妨げになっている。これらの問題点を解決する手法として走行中ワイヤレス給電（DWPT）が注目されている。DWPT において道路側の送電コイル設計と埋め込み技術の確立が非常に重要な要素であるがコイルの埋め込みによってコイルの電気的特性の悪化や舗装の機械的強度の低下が懸念される。そのため、電気的特性及び機械的強度の両立を向上させ、アスファルト舗装内に埋設した状態で大型車の走行に対する長期耐久性を確保できるコイルの設計及び埋め込み技術の確立を目的とする。

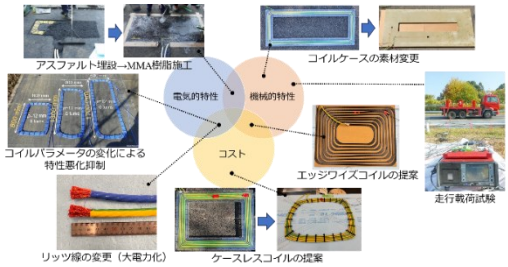
２．研究内容 *（研究の方法・項目等）*

耐電圧、耐電流を考慮したコイルの設計を行い、アスファルト舗装内に埋設した際の電気的特性及び機械的強度を評価し、埋め込み技術について検討する。

アスファルト舗装内にコイルを埋め込み、FWD 試験を行うとともに大型車による走行載荷試験を行い、走行前後における舗装の機械的強度およびコイルの電気的特性を評価する。

３．研究成果 *（図表・写真等を活用し分かりやすく記述）*

コイルサイズを小さくすることでアスファルト埋設によるコイルの特性悪化を抑制し、埋め込みに MMA 樹脂混合物を用いることでさらに電気的特性及び機械的強度の向上を確認できた。コイル設計とリッツ線を見直すことで許容電流値が増加し、VNA 換算値で 50 kW 級の大電力化に成功した。樹脂製のコイルケースを用いないケースレスコイルを提案したことでコイル一つ当たりのコストを大幅に削減することができた。薄型エッジワイズコイルを提案し、コイルの低コスト化と機械的強度の向上が期待でき、コイルの表面積が大きいため放熱特性にも優れていることを確認できた。また、空気中におけるコイルの発熱特性の測定ではエッジワイズコイルで最大 38℃上昇したが、アスファルト舗装内における発熱は最大で 5.2℃であったため埋設時における発熱の影響は小さいと考えられる。土木研究所で実施した走行載荷試験の結果より BWP は 50 万輪までの走行載荷によってもコイルに損傷は見られず、舗装と共に健全であった。大型車の走行載荷位置の IWP で 50 万輪載荷では基層に埋設したコイルは破損しなかったことを確認した。2023 年度設置の IWP ではケースレスや GFRP ケースコイルは破損がなかったことを確認できたため、表層にコイルを埋設した場合でも十分な強度を保つことができると考えられる。



４．主な発表論文 *（研究代表者はゴシック、研究分担者は下線）*

・EVTec2021

Takehiro Imura, Koki Hanawa, Kanta Sasaki and Nagato Abe, "Coil Performance and Evaluation of Pavement Durability of Dynamic Wireless Power Transfer System using Ferrite-less and Capacitor-less Coil for Road Construction Methods," 5th International Electric Vehicle Technology Conference (EVTeC2021), May. 2021.

・WPTCE2023

Koki Hanawa, Takehiro Imura, Yoichi Hori, Hiroyuki Mashito and Nagato Abe, "Proposal of Coil Embedding Method in Asphalt Road Surface for Dynamic Wireless Power Transfer," *2023 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, San Diego, CA, USA, 2023, pp. 1-5

・WPTCE2024

Naoya Sasa, Takahiro Yamahara, Seho Kim, Takehiro Imura, Grant Covic, Yoichi Hori, Hiroyuki Mashito and Hiroki Tanaka, "Thermal Modelling of IPT Coil Embedded in Resin for the Roadway," *2024 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, Kyoto, Japan, 2024.

５．今後の展望 *（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）*

本成果により、ポリカーボネート製の S 型コイルケースや被膜リッツ線コイルの直接埋設で、アスファルト混合物層の基層(中間層)や表層設置の構造が確定し、給電特性も伝送効率 95%以上が確保できている。

今後は公道実証試験で、受電コイルを付けた車両による速度毎の給電能力の確認、漏洩磁界の評価、給電コイルの動作時間に対する舗装体の温度上昇などの確認など、実用化に向けた実証実験が必要である。

給電コイルの埋設位置に関しては、土木研究所内の大型車両の載荷試験により、車輪間（BWP）の走行によるダメージの確認により、車輪通過位置（IWP、OWP）のダメージよりも 10 倍以上小さく、長期運用の可能性を確認しているため、車輪間で大型車の輪荷重の影響の少ない箇所での設置や普及を目指していきたい。

６．道路政策の質の向上への寄与 *（研究成果の実務への反映見込み等）*

本成果により、舗装埋設した給電コイルの伝送効率 95%以上、大型車の直接載荷でも 20 万回以上(車輪間では 700 万回以上)の条件でも破損しない構造が検証できた。

実道での実証実験を通じて、直流電流 400V、電流 20 から 30A(8kW～12kW)程度から、20kW 程度の出力でも運用可能なシステム(高出力化)への検討、実道設置での課題解決を進め、実用化に近づけていくことができる。

薄型のエッジワイズコイルの可能性も見いだせたため、舗装への設置時の改良コストの削減が可能な技術が見えてきた。現在の社会インフラである舗装の切断および設置コストの縮減が普及の鍵になると思われ、今後につなげていきたい。

７．ホームページ等 *（関連ウェブサイト等）*

https://www.rs.tus.ac.jp/imura.lab/

※レポート枚数は最大50ページ程度を目安とする.

目　　次

研究概要（様式３を挿入）..... 1
第１章　はじめに..... 5
１．１　研究背景..... 5
１．２　研究目的..... 5
１．３　走行中ワイヤレス給電における磁界共振結合..... 5
第２章　国内・海外の既存研究状況..... 6
２．１　走行中ワイヤレス給電に関する国内外の研究動向..... 6
２．２　コイル埋設に関する先行研究..... 8
２．３　コンクリートにおけるコイル埋設に関する研究..... 9
２．４　アスファルトにおけるコイル埋設に関する研究開発..... 10
第３章　非接触給電舗装に関する埋設実験..... 13
３．１　コイルの大電力化..... 13
３．１．１　コイルの種類..... 13
３．１．２　コイル設計..... 13
３．２　舗装構造に埋設した給電コイルの影響..... 15
３．２．１　埋設深さと舗装挙動..... 15
３．２．２　走行試験による挙動..... 17
３．２．３　円形走行試験による挙動..... 19
第４章　舗装への給電コイル埋設から得られた所見..... 21
４．１　電気的特性関連..... 21
４．１．１　２０２１年度型枠実験..... 21
４．１．２　２０２１年度学内埋設実験..... 25
４．１．３　コイル埋設におけるコイルのサイズ,巻き数,線間ピッチの関係性..... 31
４．１．４　２０２２年度学内埋設実験..... 32
４．１．５　空気中でのコイルの発熱・放熱特性の評価..... 36
４．１．６　２０２３年度型枠実験..... 38
４．１．７　２０２３年度学内埋設実験..... 42
４．１．８　繰り返し載荷試験によるコイル等を埋設した舗装の耐久性の評価..... 45
４．２　舗装構造と埋設深さについて..... 50
４．２．１　コイルケースの素材と有無の影響..... 50
４．２．２　コイルの埋設深さの影響..... 50
４．２．３　載荷による路面の変形及び破損について..... 50
４．２．４　走行載荷位置と埋設位置の関係..... 51

４．２．５　モデル解析による給電コイルの埋設位置と構造厚 52
第５章　まとめ（今後の道路政策への提案など） 54
５．１　電気的特性のまとめ 54
５．２　供用性を考慮した舗装への給電コイル設置について 54
参考文献 55

第１章　はじめに

1．1 研究背景

日本では2050年にカーボンニュートラルの達成を目指しており，そのためには電気自動車（EV）の普及が必要不可欠である．しかし，日本国内における新車販売台数のうち電気自動車の割合は低く，いまだ普及しているとは言えない．電気自動車の普及を妨げる要因として航続距離の短さ充電速度，ケーブルでの充電といった課題が挙げられる.これらの課題の解決方法として走行中ワイヤレス給電（DWPT：Dynamic Wireless Power Transfer）が注目されている．DWPTは充電の手間をなくし，大容量のバッテリーを積む必要がなくなるため低コスト化や航続距離を改善できる技術であり，各国で盛んに研究が行われている．走行中に電気自動車に給電する技術を実現すればバッテリーの残量を気にすることなく無限に走行することができ，より快適なモビリティ社会の実現が期待できる．

1．2 研究目的

走行中ワイヤレス給電システムのイメージ図を図-1に示す．走行中ワイヤレス給電を実現するためには送電コイルを舗装に埋設する必要があるが，走行中ワイヤレス給電において道路側の仕様（舗装強度や耐久年数）と電気自動車への給電性能を満足したコイルを実現しなければならない．しかし，この2つの観点からアプローチしている研究は少ない．よって，本研究では走行中ワイヤレス給電において道路側コイルの電気的特性及び機械的特性を向上させ，アスファルト舗装内に埋設した状態で大型車の走行に対する長期耐久性を確保できるコイル等の設計及び埋設技術を確立することを目的とする．電気的特性（効率・電力など）と機械的特性（耐久性など）を各種コイルと比較し，伝送特性の評価，コイルサイズの比較検討，経時変化，繰り返し載荷試験による舗装耐久性の評価等を行い，コイル及び施工方法の検討を行った．

1．3　走行中ワイヤレス給電における磁界共振結合

磁界共振結合は電磁誘導の一種であり磁界で結合するという点では同じであるが，共振 を利用するかしないかの違いがある．共振をうまく利用することによって，長い伝送距離においても高効率かつ大電力の電力伝送が可能になる．本研究では，S-S型の図-2路トポロジーを利用した走行中給電向けの磁界共振結合方式について述べる．S-S 型の等価回路は図-2のように表せる．一次側はコイルL_1とコンデンサC_1が直列接続しており，そこに内部抵抗R_1が存在する．二次側はコイルL_2とコンデンサC_2の他に負荷R_Lが直列に接続されている．一次側と二次 側は磁界で結合しているので相互インダクタンスL_mで表すことができる．磁界共振結合は 一次側の共振周波数f_{01}と二次側の共振周波数f_{02}を一致させて動作させることから，共振条件は次式で表される．

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

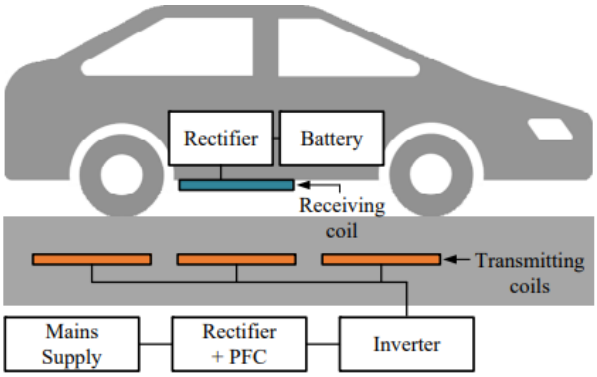


図-1　走行中ワイヤレス給電システム

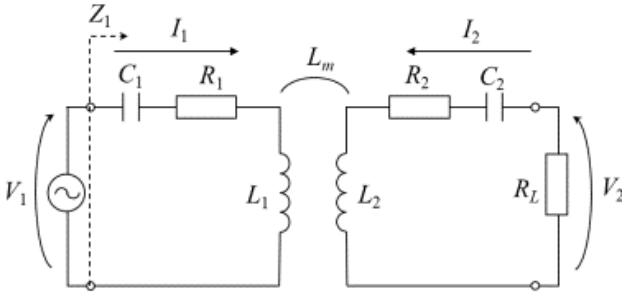


図- 2　磁界共振結合(S-S)の等価回路

第 2 章　国内・海外の既存研究状況

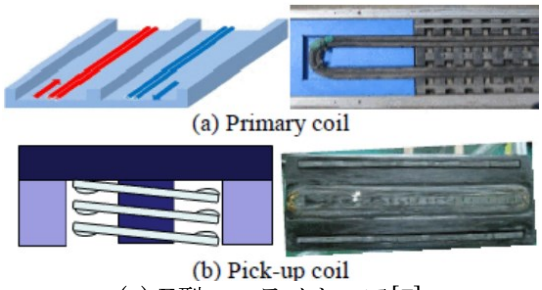
2．1　走行中ワイヤレス給電に関する国内外の研究動向（図，参考文献の調整する）

世界ではいくつかの企業や研究機関が独自の走行中給電システムを提案している．ユタ州立大学で誕生したベンチャー企業である WAVE はバス用の給電コイルを商品化している．最初に提案されたプロトタイプ機はキャンパス内のシャトルバスに実装された（図-3）．このコイルはバス停のコンクリート舗装に埋設され停車中の給電で 200 kW の出力電力を達成した．伝送距離 150~250 mm で最大効率 90 % で出力電力は 25~50 kW を達成した[6]．

2013 年，Bombardier 社は PRIMOVE と呼ばれる EV バス向けの給電システムを発表し，2014 年にドイツのブラウンシュヴァイクで初めて公共交通機関の EV バスに実装された[6]．韓国科学技術院（KAIST）はオンライン電気自動車（OLEV）の開発をしており，2009 年以降，いくつかのタイプの OLEV が提案された．2009 年 2 月 27 日に最初に発表された OLEV は図-4(a)に示すような E 型のフェライトコアを含む幅 200 mm のレールと，レールに自動的に位置制御される機能を備えた OLEV ゴルフカートで，伝送距離 10 mm においてシステム効率 80 %で 3 kW を車両に伝送可能である[7]，[8]．

2009 年 7 月 14 日に発表された 2 番目のタイプは図-5 に示す OLEV バスである．提案されたウルトラスリム U 型構造では伝送距離 170 mm において効率 72 %で 10 個の受電コイルを使用して 52 kW の総出力電力を達成した．OLEV バス用の給電システムは図-5 に示すような大量のフェライトバーを使用した平行 2 線方式の送電コイルであり，伝送距離 100~200 mm において効率 74 %で 27 kW の出力電力を達成した[10]．

図- 1　WAVE の EV バス[13]

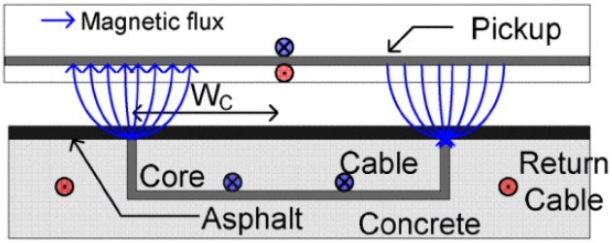


(a) E型フェライトコア[7]

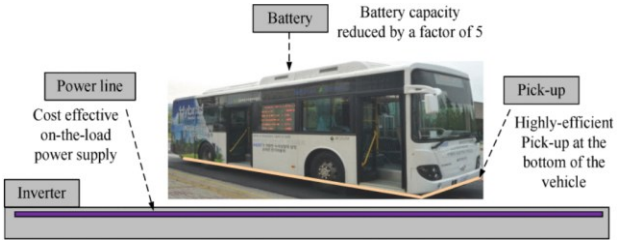
(b) OLEVゴルフカート[8]

図- 4　OLEV（第一世代）

2009 年 8 月 14 日に発表された 3 つめの OLEV は OLEV スポーツユーティリティビークル（SUV）で，伝送距離 170 mm において効率 71%で 15 kW の出力電力を達成した．OLEV バスは 2019 年から韓国のテジョン広域市で商用化され実際に乗客が料金を支払って運行されている[11]．アメリカのモバイル通信技術関連企業である Qualcomm 社は 2011 年にニュージーランド のオークランド大学発の企業である Halo IPT を買収した．同社は普通自動車向けの停車中及び走行中給電システムで送電コイルには 3．3 kW と 6．6 kW に切り替え可能なバイポーラコイルが提案され，受電コイルにはサーキュラコイルやソレノイドコイル，DD コイルなど様々な形状のコイルが提案された（図-7）．これらのコイルは伝送効率 125~175 mm において 3．3 kW，6．6 kW，22 kW を達成した[12]．

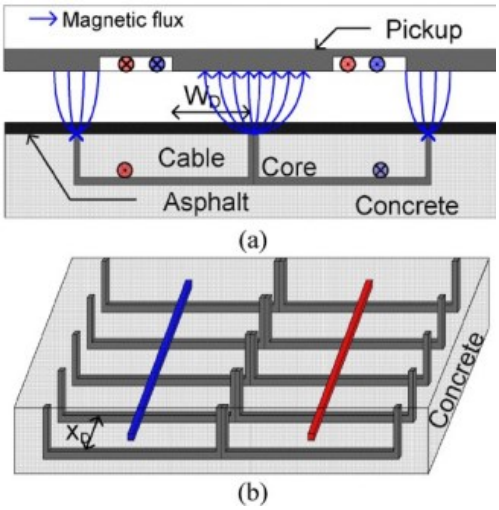


(a) ウルトラスリムU型送電コイルと受電コイル[7]

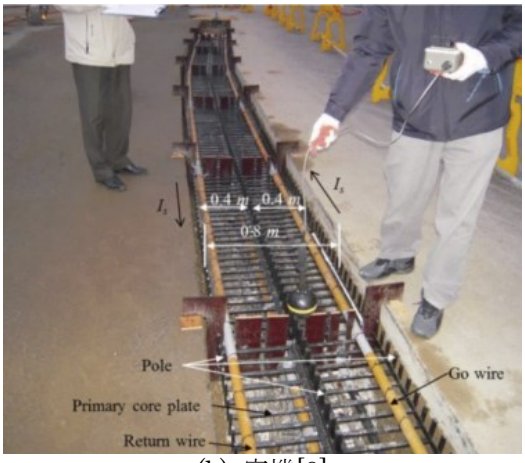


(b) OLEVバス[10]

図-5　OLEV（第二世代）



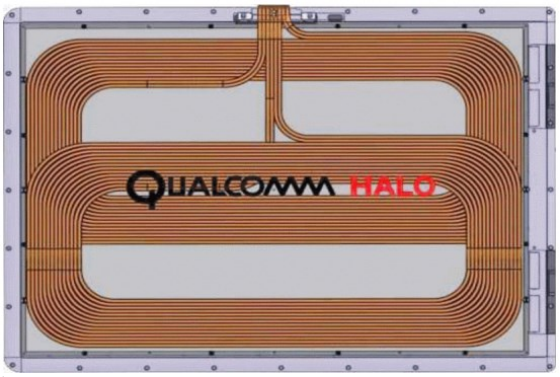
(a) ウルトラスリムW型送電コイルと受電コイル[7]



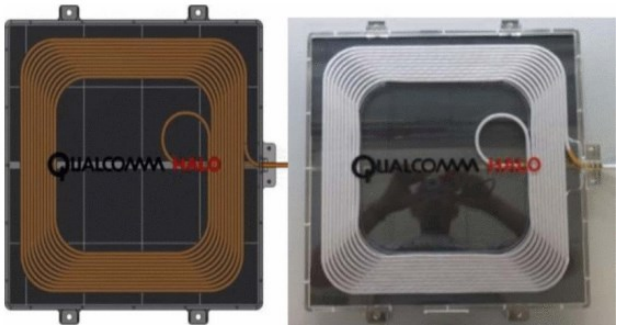
(b) 実機[9]

図-6　OLEV（第三世代）

マサチューセッツ工科大学（MIT）発のベンチャー企業である WiTricity は様々なアプリケーション向けのワイヤレス給電システムを開発しており，2016 年に停車中給電向けに 3．3 kW，7．7 kW，11 kW の給電システムを発表した[14]．同社はトヨタ自動車や IHI，TDK などいくつかの企業とライセンス契約を結び製品化へ向けた製品開発がされた．



(a)3．3kW及び6．6kW級バイポーラ型送電コイル



(b)6．6kWサーキュラ型受電コイル

(c) 6．6kW級DD型受電コイル

図-7　Halo IPTの送電コイル[12]

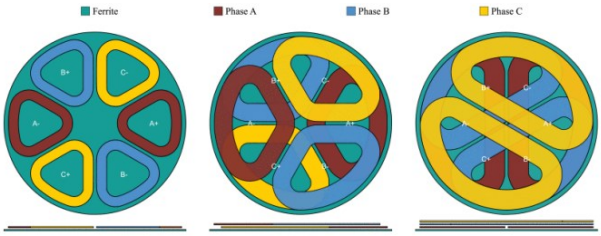
アメリカのオークリッジ国立研究所(ORNL)は停車中及び走行中給電に関する研究を実施しており，コイルの設計や漏洩磁界の最小化，位置ずれの許容度などの様々な検討を行っている[15]，[16]．また，2019 年にはより小さなコイルで高い電力密度を可能にする多相コイルが提案された（図 8(a)）．コイルの層の間で回転する磁場を特徴とする三相のシステムである．プロトタイプ機は伝送距離 150 mm において DC/DC 効率 95 %で 50 kW の電力伝送を達成した[17]．このシステムをスケールアップすることにより 300 kW の電力伝送が期待されている[18]．

国内の開発動向としては東京大学では 2015 年 5 月に世界で初めてワイヤレス電力伝送のインホイールモータを開発し，インホイールモータを搭載した EV の走行に成功した（図 9(a)）．2017 年 3 月には第 2 世代のワイヤレスインホイールモータ（図 9(a)）を開発し，路面コイルからの給電に成功した．2019 年 10 月には EV の駆動装置であるモータ・インバータと走行中給電用の受電コイルをホイール内に収納した第 3 世代のワイヤレスインホイールモータ（図

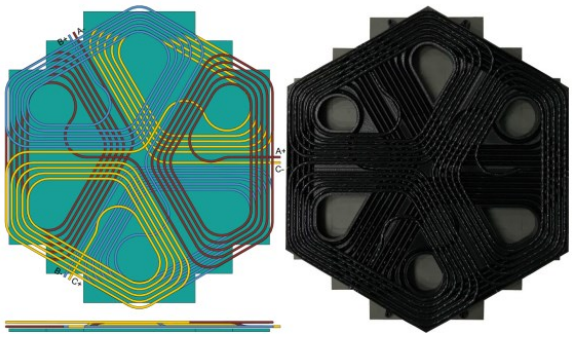
9 (b)）を発表した．また，ギュスターブ・エッフェル大学が投稿した論文では埋設したコイルを出力したときの舗装の温度上昇について言及されている．

舗装表面から 8 cm の位置に給電コイルを埋設し，30 kW の出力をしたときの舗装内の温度について，(図 10(c))に示している．この時の検討は，2024 年にパリ市内に設置要諦の(図 11(a))の埋設コイルでの電力伝送時における検討である．リッツ線コイルの中心は 8cm で，コイル下の磁場抑制のためにフェライトを用いた構造としている．

結果は，コイルによって生成された熱流束が，気候条件だけの影響と比較して，2 日目のアスファルトの温度を大幅に上昇させることを示している．夜間の放熱や稼働時間の短縮が必要である．最高の温度（60 ℃を超える）は，コイルケーブルの周りの限られた範囲であり，車両のわだち通過位置に温度上昇が当てはまらないようにコイルの幅を 600 mm 未満にするなどの工夫が必要である．舗装は多層複合体であり，抵抗力はすべての層材料の完全な結合(連続性）である．



(a)バイポーラ3相コイルシステム[17]



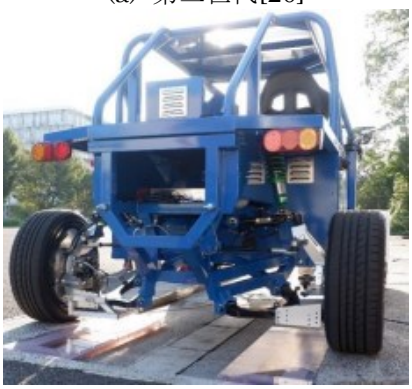
(b)2層カプラ設計　　(c)プロトタイプ機

(d) 多層コイル[18] z

図-8　ORNLのバイポーラ3層コイル

2 つの層の接着性が不十分になるとすぐに力学的抵抗(層間すべり)が大きく変化し，ひび割れの発生につながる．加えて，歩道部から車道部への配線溝（電力線）の埋設用トレンチの設置と埋戻しで，配線溝の材料と形状の選択は，舗装の耐用期間中に力学的な損傷を発生させないように選択する必要がある．

(a) 第二世代[20]

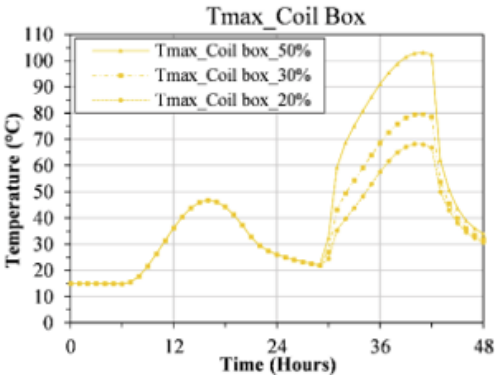


(b) 第三世代[21]

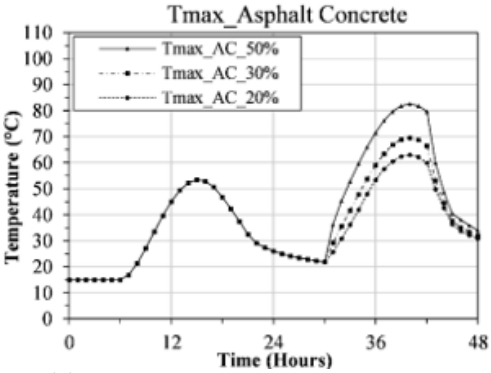
図-9　ワイヤレスインホイールモータ搭載車[21]

2．2　コイル埋設に関する先行研究（参考文献

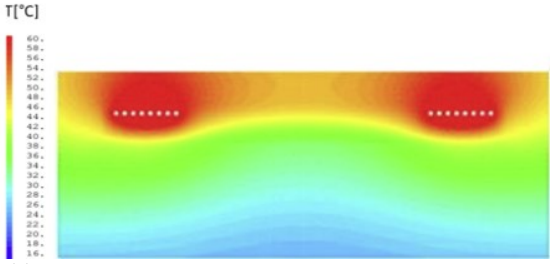
道路はアスファルト舗装とコンクリート舗装に大別される．アスファルト舗装は図 12(a)のような黒色の道路で一般道路や高速道路などでよく見かけることができる．アスファルトとはアスファルト合材のことで砕石・砂・石粉及びアスファルトを所定の割合で配合した混合物であり，アスファルト混合物とも呼ばれる．一方，コンクリート舗装は図 17(b)のような白色の道路でアスファルト舗装に比べて高い耐久性を有するため空港エプロンやトンネル内，大型車両の交通量が多いところに適用される．図 18 に世界各国の高速道路におけるコンクリート舗装とアスファルト舗装の割合を示すが，各国ではアスファルト舗装の方が普及していることがわかる．日本では約 90 %以上がアスファルト舗装となっている．したがって，アスファルト舗装における走行中給電の研究開発を推進することで走行中給電を広く普及できると考える．走行中給電における送電コイルは道路に埋設されて運用されるため，世界ではコンクリート舗装やアスファルト舗装に給電コイルを埋設した研究がいくつか見られる．



(a)給電コイルボックス内温度

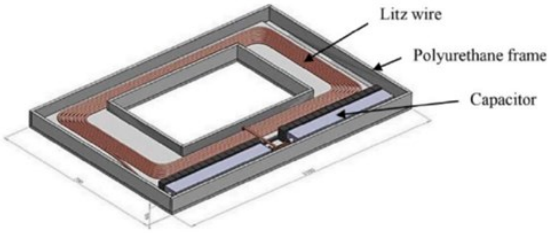


(b)アスファルト混合物の最高温度

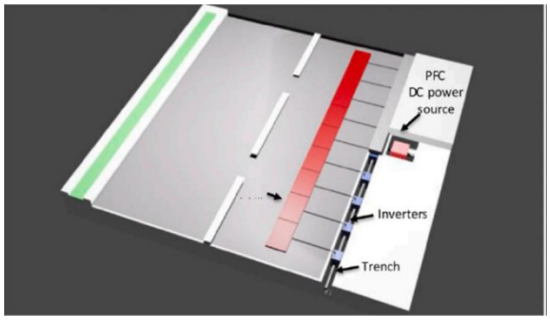


(c)30%稼働した場合の温度上昇のコンター図

図-10　日中12時間の給電コイル動作による舗装の温度上昇



(a)コイル構成



(b)アスファルト舗装上の位置

図-11 INCIT-EV project（パリ市内）におけるコイルの位置

(a) アスファルト道路[]

(b) コンクリート道路[参考文献]

図-12　アスファルト道路とコンクリート道路

2．3　コンクリートにおけるコイル埋設に関する研究

コンクリートへのコイル埋設実験はいくつか確認できたので紹介する．2013 年，日産自 動車は施工中の高温・高圧による送電コイルの損傷を避けるためにセメントアスファルト モルタル（CAM）を使用してコイルが埋設された．提案された 300×1600 mm の送電コイルは直径 400 mm のサーキュラ型受電コイルに効率 90 %以上で 1 kW 以上の電力伝送を達成した[25]．2017 年アメリカのユタ州立大学では円形コイルをコンクリートに埋設したときにおけるコイルの抵抗値とインダクタンスの変化に着目し，特性悪化の原因を実験的に明らかにした（図 20，[26]）．2019 年，イタリアのトリノでは内寸 1250×500 mm の 9 巻のコイルがコンクリートに埋設され抵抗値が悪化する課題が確認された（図 21，[27]）．原因分析のためにコンクリート用のテストフィクスチャが作製されコンクリートの抵抗率や誘電率が測定された．得られた結果より数値モデルを作製し，解析結果より埋設用のコイル設計手法が提案された．オークランド大学では 2020 年に 50kW 級のコンクリート埋め込み型 DD コイルの設計に関する検討が行われた[28]．提案コイルは特殊なコンクリート舗装材を必要とせず，既存のコンクリート埋設方法と柔軟に統合できるようにフェライトバーの間隔などが舗装材と合うように設計されている．コンクリートは鉄筋が使用されることが一般的だが従来のスチール鉄筋に代わるグラスファイバー製の鉄筋を提案し，鉄筋に生じる渦電流損を抑制し鉄筋の発熱を抑えた．また，フェライトの銅損による発熱対策として PCM という材料を提案

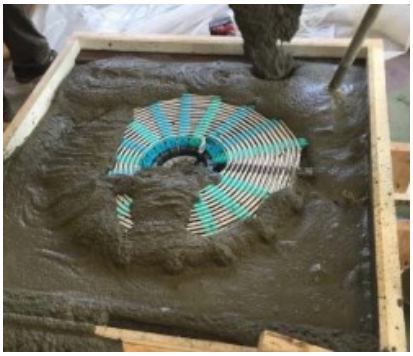
し，フェライトバーを覆うように注入することで熱管理を実現している．
これらの提案手法を適用した埋設用 DD コイルをコンクリートに埋設し，60 時間の経時変化の検証がされた． 2022 年には熱センサとひずみセンサによる提案システムの信頼性と劣化の機械的な評価が行われた[29]．KAIST はオークランド大学と同様に鉄筋コンクリートへのコイル埋設を想定した検討がされている[30]．鉄筋に生じる渦電流損を低減する方法として，鉄筋の切断を提案し渦電流ループを遮断しコイルの損失を抑制した．また，解析により鉄筋を切断しても舗装の耐久性には大きな影響はないと結論付けている．

(a) セメントアスファルトモルタル(CAM)の流し込み

(b) 試験車両と試験舗装路

図-13　日産自動車のコイル埋設実験[25]

図-14　豊橋技術科学大学の電界結合方式による走行中給電[35]



(a) セメント系材料の流し込み

(b) 埋め込み後

図-15　ユタ州立大学のコンクリート埋設実験[53]

(a) コンクリート埋設過程

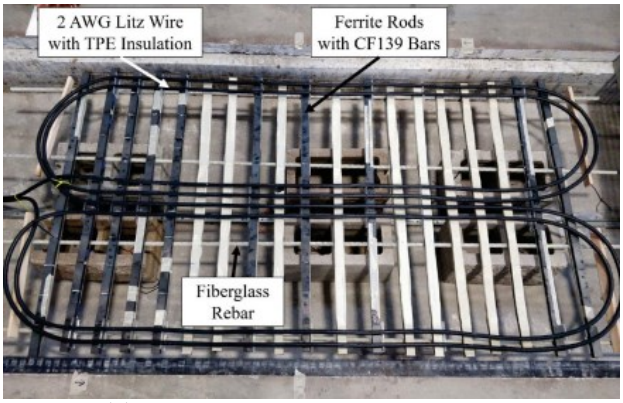
(b) コンクリート測定用テストフィクスチャの作成過程

図-16　コンクリート埋設実験（イタリア、トリノ）[27]

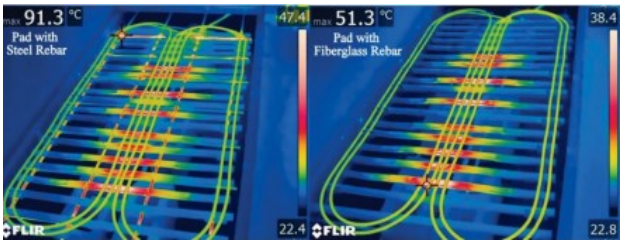
2．4　アスファルトにおけるコイル埋設に関する研究開発

アスファルト道路へのコイル埋設に関する研究はコンクリート埋設に比べて非常に少な い．日本では豊橋技術科学大学が 2013~2015 年にかけて総務省戦略的情報通信研究開発推 進事業（SCOPE）により電界結合方式による走行中給電の実証実験を実施した[31]-[41]．電界結合方式は磁界結合方式によく使われるような巻線状のコイルではなく送受電側

に極板が用いられる．送電側極板と受電側極板を対面させることでコンデンサを形成し，高周波電流を流すと電力伝送が可能となる．



(a) コンクリート埋め込み型コイル



(b) スチール鉄筋とグラスファイバー鉄筋の発熱

(c) コンクリート埋め込み実験

図-17　オークランド大学のコンクリート埋設実験 [28], [29]

図-18　KAISTの鉄筋コンクリート埋設

豊橋技術科学大学は 10 m の電化道路を試験施工し， 13．56 MHz で 3 kW の電力を小型 EV に送電をした（図 24， [35]）．その後，降雨や結露により舗装内部が含水したことにより誘電損失が増加したことで伝送効率が低下する現象が確認された [36]．イスラエルのベンチャー企業である Electoreon 社は 2019 年 11 月にスウェーデンのゴットランド島で世界で初めてトラック・バス用のワイヤレス給電路 50 m を完成させた（図 25(a)）．翌年 2020 年には給電路を 1．6 km に延長してコイルのアップグレードがされた（図 25(b)）．2020 年 8 月にはイスラエル第 2 の都市テルアビブでテルアビブ大学と主要鉄道駅を結ぶ 2 km の区間にコイルが埋設された（図 26）．2021 年にはイタリアの A35 Brebemi 高速道路沿いのテストコースで「Arena del Futuro」というプロジェクトとして多数の企業や研究機関と協力して実証実験を開始している．

(a) ワイヤレス給電路50m[37]

(b) ワイヤレス給電路1.6km[38]

図-19　Smartroad Gotlandプロジェクト（スウェーデン）

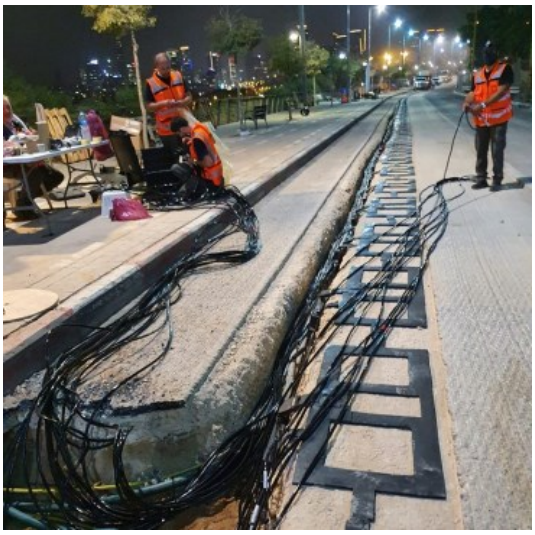


図-20　イスラエル，テルアビブでの実証実験

(a) テストコース

(b) コイル配置

(c) コイル施工の様子

図-21　イタリアでの実証実験

第 3 章　非接触給電舗装に関する挙動調査実験

3．1　コイルの大電力化

本研究は磁界共振結合を用いたワイヤレス給電を想定しており，道路舗装に埋め込む送電コイルはショート型コイル，オープン型コイル，DD型コイルなど様々な種類があり，走行中給電に適したコイルを選定する必要がある．そのために使用する銅線，コイルのサイズ，巻き数，ピッチ，コストを考慮したコイル設計を行い，コイル特性や伝送特性などの電気的特性やコイルの発熱特性，漏洩磁界の評価を行った．

3．1．1　コイルの種類

磁界共振結合用のコイルには大きく分けてショート型コイルとDD型コイルとオープン型コイルの3つがある．ショート型コイルとDD型コイルは巻き線が途中で切れていない一般的なコイルであり外付けの共振コンデンサが必須になるが，オープン型コイルの場合は巻き線途中が開放されており，導線間の浮遊容量によって自己共振が可能である．ショート型，DD型コイルは巻き線が途中で切れていない一般的なコイルであるが，オープン型コイルは巻き線途中が開放されており，導線間の浮遊容量によって自己共振が可能である．一般的にオープン型コイルはMHz帯で動作せることが多く，kHzのような低い周波数で動作させたい場合にはショート型コイルが適している．走行中給電は85kHz帯が規格であることから本研究では主にショート型コイルを使用する．

3．1．2　コイル設計

走行中ワイヤレス給電の規格であるSAEj2954では乗用車の普通充電（公共）には7．7 kW，急速充電には22 kWの電力が必要であると定められている．

(a)ショート型　　(b)DD型　　(c)オープン型

図-22　コイルの種類

そのため，2021年度は20 kW以上の電力伝送を目標とした．

a）大電力に耐えられる耐電圧性，耐電流性

2021年度は埋設後において20kW級の大電力が得られるコイルを作成するためにリッツ線の見直しを行った．2021年度は素線径0．05 mm，素線数4，000本のリッツ線を使用することでリッツ線の許容電流が38 Aまで対応可能になった．また，耐電圧特性についてはショート型コイルの絶縁破壊の設計法から算出する．ショート型コイルの場合，コイル全体にかかる電圧と巻き数から耐圧に関する簡単な導出が可能である．導出式を以下に示す．

$$V_L = j\omega LI$$

V_Lはコイルにかかる電圧，ωは角周波数，Lはコイルのインダクタンス，電流Iはコイルに流れる電流である．上式に2021年度に設計したコイルのインダクタンス$L = 435\mu H$，周波数を85 kHz，許容電流である38 Aを代入すると8．8 kVと求められる．空気の絶縁耐圧は3 kV/ mmであるので巻き線間は3 mm以上離せば耐電圧性は確保できることになる．したがって，本研究の埋設コイルは3 mm以上巻線間隔を開けて設計した．

また，2022年度はコイル一つあたりの電力供給量を大きくすることで埋設するコイルの数を減らすことができ，コイル埋設にかかる費用を削減できると考え50kW級のコイル設計を行った．使用したリッツ線は素線径0．05 mm，素線数10，000本のリッツ線であり許容電流が96 Aまで対応可能になった．耐電圧についても同様に空気中の絶縁破壊を考慮して計算すると5．1 kVと求めることができるためピッチを2 mm以上離すようにコイルを設計した．2021年度，2022年度に使用したリッツ線を図-23に示す，

2023年度は2022年度と同特性以上に保ちつつ低コスト化できるリッツ線を採用した．図-24に2023年度に使用したリッツ線を示す．リッツ線は素線径0．1 mm，素線数2，500本のリッツ線を使用しており，2022年度のリッツ線と比較して素線径が2倍になり素線数が0．25倍になることでコイル一つ当たりのコストを約6万円低減することに成功した．これはコイルの敷設率50%，コイルサイズ1700 mmと仮定すると1 kmあたり約1760万円のコスト低減である．さらには，素線径が2倍になることで素線自体の強度の向上も期待できる．電気的特性，コイルの強

度，コストの3点を考慮したコイル設計を行えた．ここで，各年度に作成したコイルを図-25，ベクトルネットワークアナライザ(VNA)で測定した伝送効率，出力電力の換算値のグラフを図-26に示す．図-26より伝送特性が向上していることが確認できるため電気的特性，コストを考慮したコイル設計を行えたと考えられる．
また，リッツ線外側の皮膜の素材はポリオレフィンで，厚みが 0．5 mm，絶縁耐圧が 20 kV/mm以上なので，十分な絶縁耐圧を得られる設計となっている． また，施工中の高温や転圧といった過酷な環境に耐えられるリッツ線でなければならない．アスファルト舗装内への埋設による影響への対策のため，学内道路での埋設実験においては全てのコイルにポリオレフィンの絶縁被覆を施し防水性を向上させた．ポリオレフィンは 150～200 ℃程の連続使用でも耐えうる耐熱性を有してしるため大電力の伝送特性による発熱にも耐えうる特性である．

b)ケースレスコイルの提案
　走行中給電に使用されるコイルは耐久性や耐水性，コイルの形状維持，フェライトの保持などを目的として樹脂製のコイルケースが用いられる．しかし，コイルケースの切削や材料費がかかるためコイルのコストを大幅に増加させてしまい，コイルが分厚くなってしまうためコイル埋設した際に舗装強度を低下させてしまう．そこで，コイルケースを使用しないケースレスコイルを提案した．リッツ線はポリオレフィン被覆加工を施すことで道路舗装内における耐久性及び耐水性を確保し，形状維持には耐候性の結束バンドを用いることでケースレスコイルの作成に成功した．図-27にケースレスコイルを示す．ケースレスコイルは舗装埋設時の舗装内体積が小さいため，舗装強度を向上させることができ，より埋設深

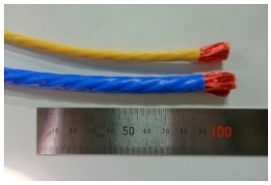


図-23 2021年度(黄)，2022年度(青)に使用したリッツ線

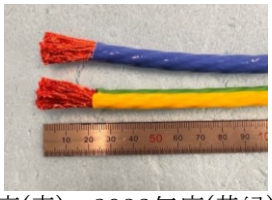
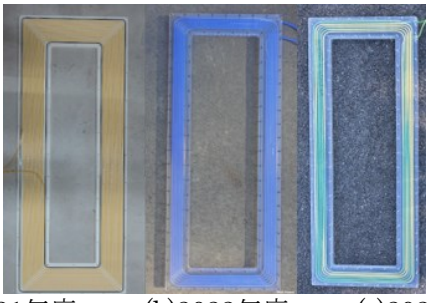


図-24 2022年度(青)，2023年度(黄緑)に使用したリッツ線

さを浅くできることによって受電コイルとの伝送距離を近づけ伝送効率を向上させることができる．

c)エッジワイズコイルの提案
　ここでは新たなコイルタイプであるエッジワイズコイルについて説明する．走行中給電は一般的に 85


(a)2021年度　(b)2022年度　(c)2023年度
図-25 各年度に作成したコイル

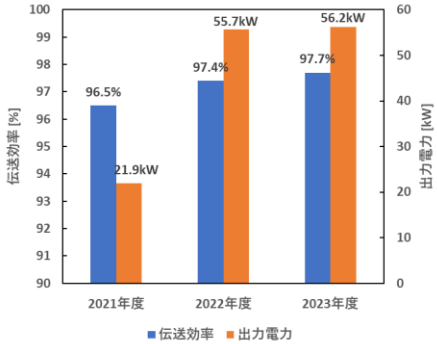
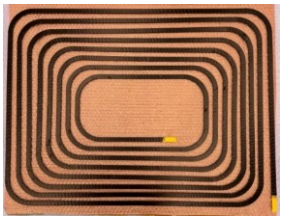
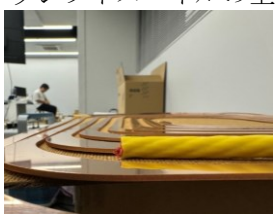


図-26 各年度に作成したコイルの伝送特性

kHz で動作させるため表皮効果により電流が流れる表面積が減少してしまうため表皮深さ以下の素線を撚り合わせたリッツ線を用いるが，製造に時間と手間がかかることや加工コストが課題である．そこで，銅板の切削加工のみでコイル状に形成可能であるエッジワイズコイルを提案する．図-28 にエッジワイズコイルの外観図を示す．エッジワイズコイルは薄いため道路舗装に埋設した際，舗装構造としての強度を向上できると推察でき，より浅く埋設することが可能であるため伝送効率の向上も期待できる．また，エッジワイズコイルは表面積が大きいためリッツ線よりも放熱性において優位性があると考えれる．

図-27 ケースレスコイル


(a)エッジワイズコイルの全体像


(b)コイルの厚み比較
図-28 エッジワイズコイル

3．2　舗装構造に埋設した給電コイルの影響

走行中ワイヤレス給電の送電に使用するコイル（コイルケースを含む）の舗装埋設した状態の電気的特性と機械的特性を向上させ，大型車が走行するアスファルト舗装内に埋設して長期耐久性を確保できるコイルの設計及び埋設技術を確立することが目的である．ここでは，給電用埋設コイルの種類と舗装への埋設深さや固定方法の影響を検討した．

舗装に埋設した給電コイルの機械的特性（埋設工事や自動車による荷重に対する強度），コイルを埋設したアスファルト舗装の機械的特性(舗装の強度・耐久性等）の評価を行った．

3．2．1　埋設深さと舗装挙動

本検討で使用した埋設コイルのコイルケース素材である樹脂板の線膨張係数がアスファルト混合物と大きく異なる場合, 路面との接着界面での剥がれや, 路面のひび割れが生じる懸念がある．

そこで本研究では，曲げ強度がアスファルト混合物以上かつ，線膨張係数がアスファルト混合物と近い値である 10^{-5}/℃の樹脂板を選定した．これまでに使用した樹脂板の物性一覧を**エラー! 参照元が見つかりません。**に示す．GFRP の曲げ強度，引張強度および圧縮強度は，これまでに使用した樹脂板よりも高い強度を有する．また，層の平行方向の線膨張係数は，上述したアスファルト混合物と同程度であることがわかる．

表- 1 埋設コイルで使用したコイルケースの樹脂板

項目	ポリプロピレン(PP)	ABS	ポリカーボネート(PC)	ガラスエポキシ積層板(GRRP)
曲げ強度 (MPa)	41.2～54.9	66	93	400～500 (長手方向)
				350～450 (幅方向)
引張強度 (MPa)	29	42	60	350～450 (長手方向)
				250～350 (幅方向)
圧縮強度 (MPa)	38.2～54.9	45.1～52	68.6～86.3	400～500 (垂直方向)
				300～400 (平行方向)
線膨張係数 ($\times 10^{-5}$/℃)	6.0～8.5	9.0	6.5～6.6	5.7 (垂直方向)
				1.5 (平行方向)

東京理科大学構内の試験埋設における舗装構造は, 大型車交通量が国道レベルの交通量区分 N6 である. 2021 年度は中間層への埋設が主で，2022 年からは表層埋設における検討を含め，コイルケースの種類やコイルケースの有無を含めて比較検討を行った．

厚さ 30 mm のケースコイルは，コイルケース底面に MMA 樹脂混合物 20 mm 施工後に接着し，コイルケースと基層のアスファルト混合物との離隔距離を確保している．ケースコイルの上面は，路面とフラットになるため滑り止め樹脂を 3 mm 施工している．厚さ 10 mm のケース無しコイルは，MMA 樹脂混合物 30 mm 施工後に設置し，樹脂混合物で固定した．その後，路面までの 10 mm を MMA 樹脂混合物で施工した．ケース無しコイルは，路面からリッツ線上面までが約 10 mm であり，ケースコイルは路面からリッツ線上面までが約 5 mm である．コイルケースとアスファルト混合物間は MMA 樹脂系接着材を用いて設置して，舗装とコイルケースを一体化させる．中間層及び表層に埋設する埋設コイルは埋設コイルの深さが異なるが，施工方法は同様である．

図-29　車載式FWD装置によるコイル埋設区間の調査状況

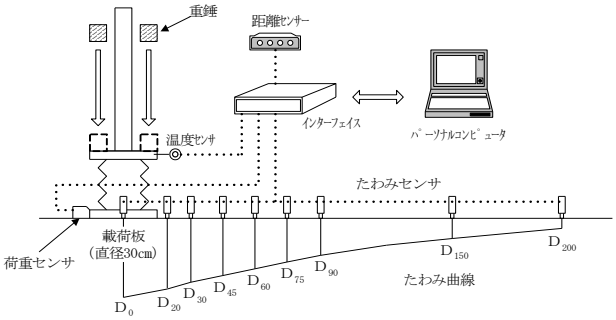


図-30　FWD装置の測定原理図

非破壊で構造調査を行う FWD 調査は, 当該箇所の舗装厚等を考慮して道路用の基準荷重の 49kN を用いる．道路用の FWD には 147 kN まで荷重を載荷できる装置を使用する（図-29）．道路用 FWD の測定原理は図-30 に示す構造であり，載荷板直径はφ300 mm，測定及び評価を 49 kN 荷重で行った．調査は，載荷点に直径 300mm の載荷板を設置し，落下重錘 120 kg を落下高さ 150 mm で自由落下させ，路面に衝撃荷重 49 kN を載荷し，この時に発生する路面のたわみを計測し，舗装の構造評価を行った．

図-31 に示した舗装改修前の FWD 調査結果より路床支持力が低いことを確認されたため，路床上部の改良を含めた打換え工法で舗装改良を行い，アスファルト混合物層内に給電コイルの埋設試験を行った．舗装改修後のたわみ曲線形状は，載荷点周辺である D0 から D300 付近が小さくなり, 舗装構造の改善効果が窺える．

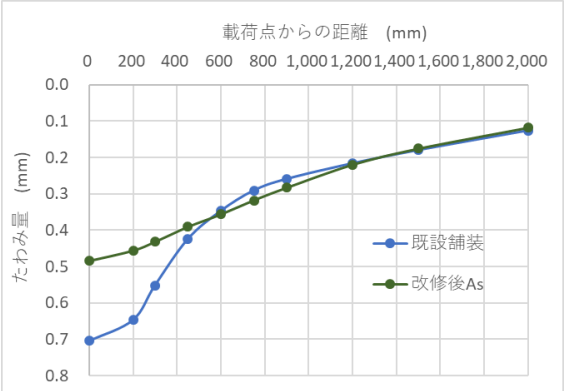
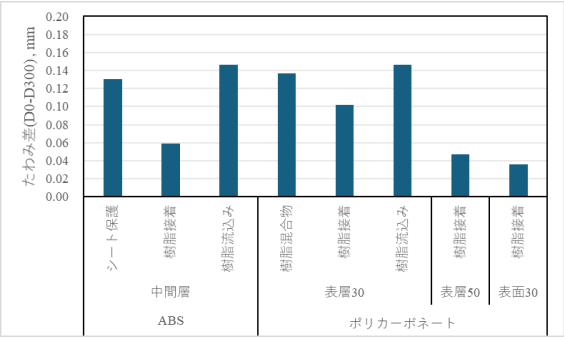


図-31　学内舗装の改修前後のたわみの比較

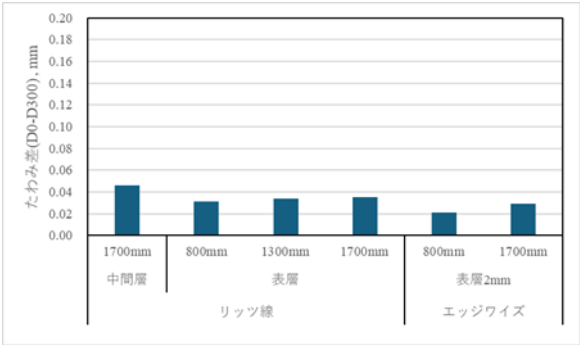
表- 2　埋設したコイルケースの種類と埋設位置及び条件とたわみ差 D0-D300 たわみの比較

コイルケース有り			D0-D300
ABS	中間層	シート保護	0.130
		樹脂接着	0.059
		樹脂流込み	0.146
ポリカーボネート	表層30	樹脂混合物	0.137
		樹脂接着	0.102
		樹脂流込み	0.146
	表層50	樹脂接着	0.047
	表面30	樹脂接着	0.036
コイルケース無し			D0-D300
リッツ線	中間層	1700mm	0.046
	表層	800mm	0.031
		1300mm	0.034
		1700mm	0.035
エッジワイズ	表層2mm	800mm	0.021
		1700mm	0.029



(a)コイルケース有り

埋設したコイルケースの種類及びケースの有無と埋設深さの条件と表層から基層までの構造体の影響を表すと考えられるたわみ差 D0-D300 を表 2 に示す．コイルケース有りの場合とコイルケース無しの場合のたわみ差 D0-D300 の比較を図-32 に示す．



(b)コイルケース無し

図-32 学内舗装のコイル埋設後のたわみ差

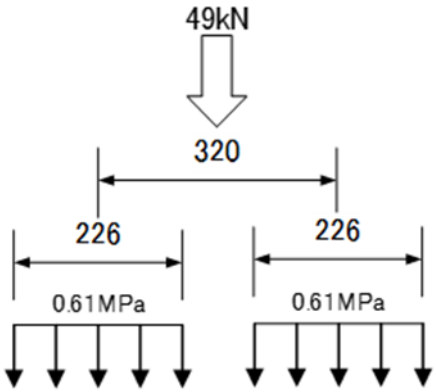


図-33　設計輪荷重の荷重載荷条件

コイルケース有りの ABS 樹脂やポリカーボネートは，D0-D300 のたわみ差が大きく，舗装とコイルケースの一体性に欠ける．また，コイルケース上面と下面を接着剤でアスファルト混合物と固定した場合に関しては，D0-D300 のたわみ差が ABS 樹脂の中間層で 0.059 mm，ポリカーボネートの表層 50 mm や表面設置 30 mm は 0.05 mm 以下で，舗装との一体効果が見られる．

コイルケース無しの被膜リッツ線のコイルやエッジワイズコイルは，いずれも舗装内部に樹脂系接着剤で周辺を固化させたため，剛性やアスファルト混合物との接着性が確保され，D0-D300 のたわみ差が 0.05 mm 以下になっていると想定される．

測定たわみと舗装構成から，多層弾性計算逆解析プログラムの BALM を用いて，舗装各層の弾性係数の逆解析を行った．得られた弾性係数を使用し，多層弾性計算プログラム GAMES を用いて舗装内に生じる応力とひずみの算定を行った．設計荷重(大型貨物車両)の設計載荷条件を図-33 に示す．これらはそれぞれ後輪の複輪荷重で，円形等分布荷重である．

それぞれの埋設コイルにおけるアスファルト混合物＋埋設コイルの弾性係数と基層下面の引張りひずみ ε_t と許容載荷輪数 N_{49t} に関して表 3 に示す．アスファルト混合物＋埋設コイルの弾性係数と許容載荷 ABS 樹脂のコイルケースでは，中間層の MMA 樹脂接着の場合には弾性係数が高く許容載荷輪数も N6 交通の許容載荷輪数 700 万回を満足するが，RC シートによる補強や樹脂の流し込みでは安定していない．

ポリカーボネート（PC）のコイルケース(30 mm)は，MMA 樹脂による接着剤有りの舗装と一体化し許容載荷輪数も N6 交通を満足する．しかし，樹脂混合物上に設置などの条件ではコイルケース＋樹脂混紡物の弾性係数の評価が小さい場合があるものの，基層以下への荷重分散が高く，許容載荷輪数は大きくなっている．舗装全体としての構造強度が大きく影響している．

1) アスファルト混合物の疲労破壊に対する破壊基準式

$$N_{fA} = S_A \left\{ 18.4(C)\left(6.167\times10^{-5}\varepsilon_t^{-3.291}E^{-0.854}\right)\right\} \quad (1)$$

ここに，

N_{fA}：アスファルト混合物の許容 49kN 輪数

S_A ：性能値として設定したひびわれ率による定数(ひび割れ率 20%を基準とし，1 を適用)

C：C = 10 M，M = 4.84(Vb/(Vb+Vv)-0.69)

V_b：アスファルト混合物最下層のアスファルト容積率 (%)

V_v：アスファルト混合物最下層の空隙率 (%)

ε_t：アスファルト混合物下面の引張りひずみ

E：アスファルト混合物の弾性係数 (MPa)

C に関しては，粗粒度混合物 1.38，密粒度混合物 2.75 を適用した．

$$V_b = \frac{\text{密度}\times\text{アスファルト量(重量\%)}}{\text{アスファルトの比重}} \quad (2)$$

2) 路床の永久変形に対する破壊基準式

$$N_{fS} = S_s \left\{ 1.365\times10^{-9}\times\varepsilon_c^{-4.477} \right\} \quad (3)$$

ここに，

NfS：路床の許容 49kN 輪数

εc ：路床上面の圧縮ひずみ

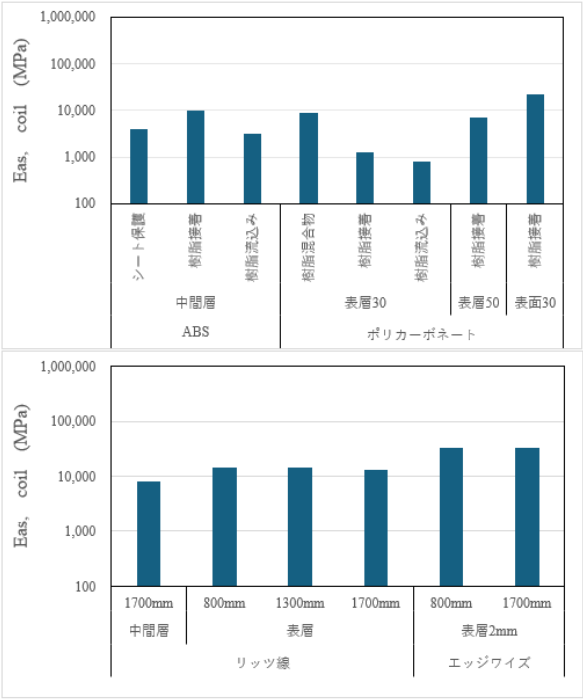
S_S ：性能値として設定した路床の永久変形に起因する定数(路床の圧密沈下を 15mm 基準とし，1 を適用)

表-3 弾性係数と引張りひずみと許容載荷輪数の比較

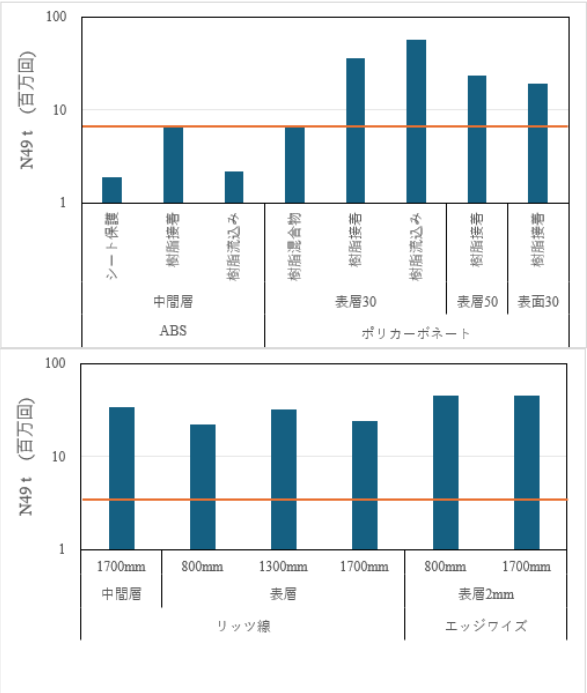
コイルケース有り			Eas,coil (MPa)	εr(10^{-6})	N49t(百万回)
ABS	中間層	シート保護	4,080	183	1.89
		樹脂接着	9,810	106	6.50
		樹脂流込み	3,110	180	2.20
ポリカーボネート	表層30	樹脂混合物	8,650	117	6.89
		樹脂接着	1,236	86	36.41
		樹脂流込み	810	62	57.48
	表層50	樹脂接着	7,015	74	23.32
	表面30	樹脂接着	21,710	62	19.38
コイルケース無し			Eas,coil (MPa)	εr(10^{-6})	N49t(百万回)
リッツ線	中間層	1700mm	8,127	64	34.47
	表層	800mm	14,630	68	21.96
		1300mm	14,190	61	32.21
		1700mm	13,060	68	24.07
エッジワイズ	表層2mm	800mm	33,310	43	45.19
		1700mm	32,560	43	45.90

これに対し，コイルケース無しのリッツ線(10 mm)やエッジワイズコイル(2 mm)は，アスファルト混合物との離隔距離を確保するために周辺を MMA 樹脂で囲まれ剛性の確保がなされている．これにより，アスファルト混合物との接着性が高く，弾性係数が高くなり許容載荷輪数が大きくなる．コイルケースよりも埋設コイルと舗装との接着性の良い MMA 樹脂での施工により有効な結果が得られた．

3．2．2 走行試験による挙動



(a) As 混合物＋Coil の弾性係数 $E_{AS+Coil}$



(b) 許容載荷輪数 N_{49t}

図-34 As 弾性係数 E_{AS} と許容載荷輪数 N_{49t}

舗装及び埋設コイルの強度特性の調査のために，中型のダンプトラックを用いて，埋設コイルの静的載荷及び走行試験を実施した．試験に使用したダンプトラックの諸元を表-4 に示す．ダンプトラックの寸法と輪配置を図-35 に示す．

荷台の積載物には，アスファルト合材工場でストックしている 6 号砕石を積み込み，総重量 12,000 kg とした．この時の前輪荷重は 1 輪当たり 1,800 kg，後輪(複輪)で 4,200 kg である．路面に接するタイヤはブリジストン G540；265/70R19.5 を使用し，輪あたりにかかる 2,100 kg の荷重より接地圧は 680 kPa と算定される．大型車両の条件に近い条件で走行試験を行った．ABS 樹脂ケースでは，コイル上の静止試験ではコイル下面に圧縮ひずみとなっているが，走行試験では引張りひずみに転換している．これに対し PC コイルケースやリッツ線やエッジワイズコイルの樹脂被膜による埋設では，静止試験と走行試験のひずみが共に圧縮であり，舗装とコイルの挙動が一致している．このため，コイルケースの樹脂の種類によっては，舗装との接着性が低く一体化されていない．

ABS 樹脂ケースでは，コイル上の静止試験ではコイル下面に圧縮ひずみとなっているが，走行試験では引張りひずみに転換している．これに対し PC コイルケースやリッツ線やエッジワイズコイルの樹脂被膜による埋設では，静止試験と走行試験のひずみが共に圧縮であり，舗装とコイルの挙動が一致している．このため，コイルケースの種類によっては，舗装との接着性が低く一体化されていない可能性が確認された．以上より，コイルケースの樹脂板はポリカーボネートで MMA 樹脂および樹脂接着剤を用いることが良いと判断される．

表-4　走行試験に使用したダンプトラックの諸元

車両重量	5,640	kg
最大積載量	7,800	kg
最大重量	13,440	kg
積載量	6,360	kg
総重量	12,000	kg

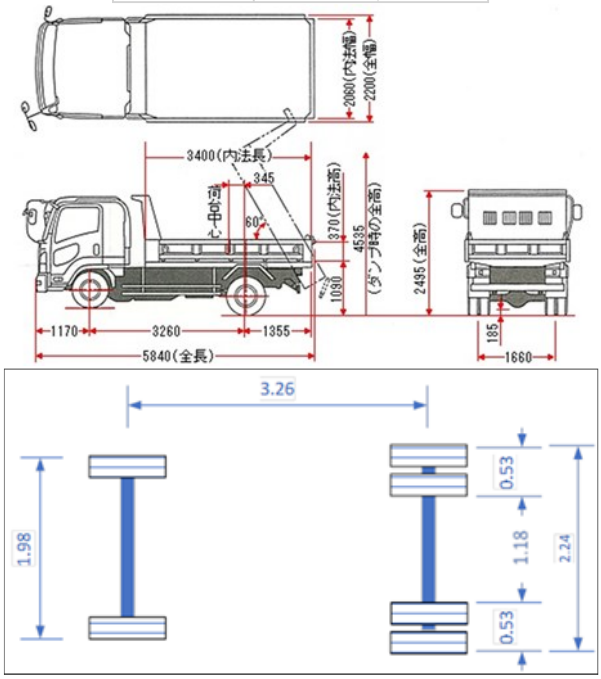
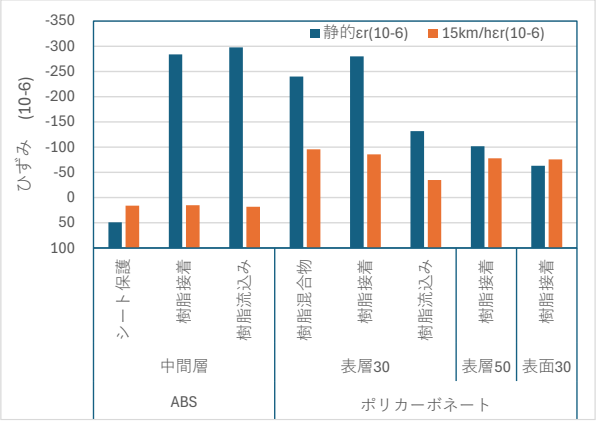


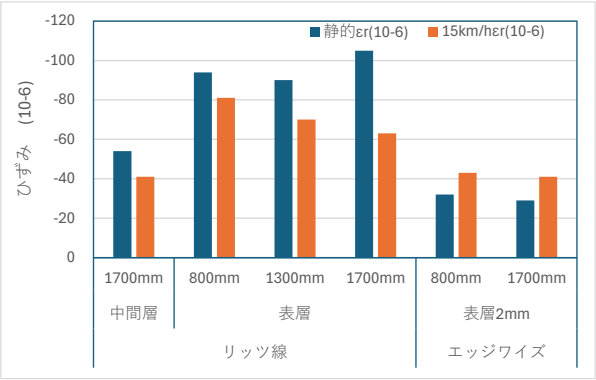
図-35　ダンプトラックの寸法と輪配置

表-5　走行試験に使用したダンプトラックの諸元

コイルケース有り			静的εr(10^{-6})	15km/hεr(10^{-6})
ABS	中間層	シート保護	49	16
		樹脂接着	-284	15
		樹脂流込み	-298	18
ポリカーボネート	表層30	樹脂混合物	-240	-96
		樹脂接着	-280	-86
		樹脂流込み	-132	-35
	表層50	樹脂接着	-102	-78
	表面30	樹脂接着	-63	-76
コイルケース無し			**静的εr(10^{-6})**	**15km/hεr(10^{-6})**
リッツ線	中間層	1700mm	-54	-41
	表層	800mm	-94	-81
		1300mm	-90	-70
		1700mm	-105	-63
エッジワイズ	表層2mm	800mm	-32	-43
		1700mm	-29	-41



(a)　コイルケース有り



(b)　コイルケース無し

図-36　ダンプトラックの寸法と輪配置

3．2．3　円形走行試験による挙動

土木研究所の舗装走行実験施設内円形走路（以下，円形走行路)での繰返し走行試験の目的は，給電用コイルおよび舗装の強度や耐久性の検証，走行試験前後における電気的特性及び機械的特性の変化の検証である．円形走行路において荷重車を走行させた繰返し載荷試験を実施した．舗装走行実験施設における実験箇所を図-37 に示す．

舗装計画交通量を N_5 とした舗装構造にコイルの埋設を行った．コイル埋設直後に電気特性調査，FWD たわみ量調査及び路面形状調査を実施し，走行試験後にも電気特性調査と FWD たわみ量調査を行い，大型車走行による前後の結果から耐久性の検討を行った．

実験箇所の既設舗装構成は，表層 50 mm，基層 50 mm，上層路盤 250 mm，下層路盤 300 mm の構造で，路床の支持力 CBR=6 が標準となっている．コイル埋設時に，既設表・基層を撤去し，基層及び表層の舗設と同時にコイルを埋設した．

土木研究所円形走行路におけるコイル埋設実験条件（2022 年度埋設と 2023 年度埋設）の一覧を示す．図-38 に舗装断面図に図-39 に舗装平面図を示す．2022 年度の埋設コイルは 9 個であり，表層と基層にそれぞれポリカーボネート（PC）ケースコイルとリッツ線コイル（以下，ケースレスコイル)を埋設し，コイルケース有無の違いについて評価した．2023 年度は，改善したケースレスコイル，ガラス繊維強化プラスチック（GFRP）を用いたケースコイル，クロロプレンゴム（CR ゴム）を用いたコイル，コイルサイズを 600×800 mm に縮小したコイルを基層と表層に設置して耐久性の評価を行った．

2022 年度埋設のコイル 1～9 の埋設方法は 2021 年度の成果である電気特性と機械特性の両立を達成した MMA 樹脂混合物によるコイル埋設方法である．コイル 5 のみ基層及び表層全面を MMA 樹脂混合物で施工することにより，基層は MMA 樹脂混合物で表層がアスファルト混合物の舗装構造との比較検討を行った．(図-38(a))より，2022 年度のコイル 1～4 は，試験車両の車輪間の BWP（Between Wheel Path）に埋設し，コイル直上を車輪が通過しない場合のコイル及び舗装耐久性を評価する．コイル 5～9 は車輪走行位置の IWP（Inner Wheel Path)に埋設し，コイル直上を車輪が通過する場合のコイル及び舗装耐久性を評価した．以上より，ケースコイル及びケースレスコイル，基層及び表層埋設，BWP 及び IWP 埋設による合計 9 パターンによる比較検討を行い，電気特性及び機械特性に優れたコイル，埋設深さ，埋設位置の評価を行った．2023 年度は，OWP（Outer Wheel Path）の 5 箇所と IWP の過年度のコイルを撤去した 2 箇所の計 7 箇所にコイルを埋設し耐久性の評価を行った．

FWDたわみ量調査は，当該箇所の舗装厚等を考慮して道路用の基準荷重の49 kNを用いた．測定では，載荷点に直径300 mmの載荷板を設置し，落下重錘120 kgを落下高さ150 mmで自由落下させ，路面に

図-37　舗装走行実験施設の形状とコイル埋設試験の位置

表-6　走行試験に使用したダンプトラックの諸元

（2022年度）

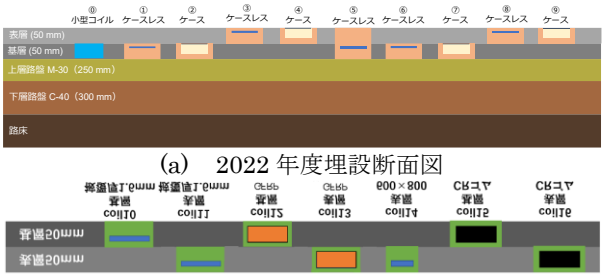
埋設コイル	ケース素材	コイルタイプ	線材	埋設深さ	埋設位置
1	ケースレス	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	基層	BWP
2	PC樹脂	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	基層	BWP
3	ケースレス	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	表層	BWP
4	PC樹脂	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	表層	BWP
5	ケースレス	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	基層	IWP
6	ケースレス	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	基層	IWP
7	PC樹脂	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	基層	IWP
8	ケースレス	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, 糸被覆	表層	IWP
9	PC樹脂	S型	φ8 mm, 0.05mm, 10,000本, FEP被覆	表層	IWP

（2023年度）

埋設コイル	ケース素材	コイルタイプ	線材	埋設深さ	埋設位置
10	ケースレス	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆1.6mm	基層	OWP
11	ケースレス	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆1.6mm	表層	OWP
12	GFRP	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆0.5mm	基層	OWP
13	GFRP	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆0.5mm	表層	OWP
14	ケースレス	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆0.5mm	表層	OWP
15	CRゴム	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆0.5mm	基層	IWP
16	CRゴム	S型	φ8.5mm, 0.1mm, 2,500本, FEP被覆0.5mm	表層	IWP

衝撃荷重49 kNを載荷し，この時に発生する路面のたわみ量を計測し，舗装の構造評価を行った．

2022年と2023年に埋設した表層及び基層にコイルを埋設した舗装のたわみ曲線の比較を図-40に示す．



(a)　2022 年度埋設断面図

(b)　2023 年度埋設断面図

図-38　土木研究所円形走行路における舗装断面図

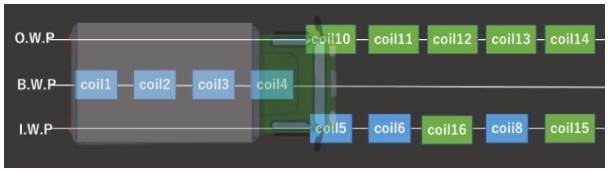
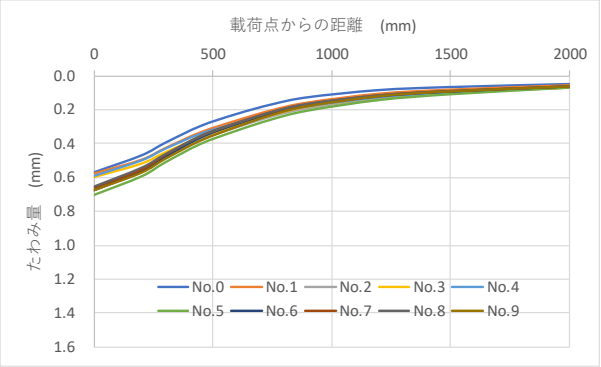
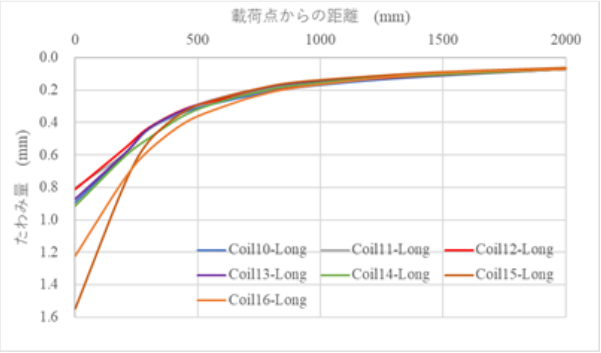


図-39　土木研究所円形走行路における舗装平面図



(a)　2022 年度施工



(b)　2023 年度施工

図-40　BWP,IWP,OWP のたわみ曲線の比較

2022年に埋設したPCケースコイル，ケースレスコイルおよびGFRPケースコイル埋設部は，おおむね同様なたわみ曲線となっているが，CRゴムケースコイル埋設部は載荷点周辺のたわみが1 mmを越え，他のコイルとはたわみ形状が異なる．これは施工7日後の測定結果であり，舗装や舗装接着材は落ち着いていると思われるが，CRゴムコイルケースのたわみ量が大きく，CRゴムの挙動が舗装と異なる影響と考えられる．

走行試験前に各コイル埋設箇所のFWDによるたわみ測定から求めた弾性係数，ひずみ，許容載荷輪数の一覧を表-7に示す．

コイル埋設を含んだ層弾性係数を比較すると，層の位置などの条件によるがリッツ線コイルをアスファルト混合物中に直接埋設し樹脂混合物で保護したタイプの弾性係数が高い結果となった．コイルケース有りのコイルに関しては，埋設時のコイルケースとアスファルト舗装との接着性の影響があると推察される．このため，コイルケース無しの直接埋設の舗装内部の発生ひずみの方が小さく，許容載荷輪数も大きくなる傾向にある．

表-7　各条件の弾性係数，ひずみ，許容載荷輪数の比較

BWP

名称	層厚 (mm)	弾性係数 (MPa)			
		1 基層無し	2 基層Case	3 表層無し	4 表層Case
表層	50	6,050	6,510	3,052	1,710
基層	50	3,375	2,600	2,290	1,354
上層路盤	250	243	178	314	256
下層路盤	300	63	114	68	50
路床		98	80	85	95
基層下面 εt (10^{-6})		278	337	283	383
路床上面 εc (10^{-6})		469	348	454	632
許容載荷輪数	N49t	0.449	0.254	0.675	0.4
N49 (百万回)	N49c	1.092	0.415	1.263	0.287

IWP

名称	層厚 (mm)	弾性係数 (MPa)				
		5 表基樹脂	6 基層無し	7 基層Case	8 表層無し	9 表層Case
表層	50	3,020	1,920	1,631	3,692	1,540
基層	50	3,300	1,527	1,280	4,908	1,381
上層路盤	250	171	165	128	124	206
下層路盤	300	30	66	98	35	26
路床		92	95	105	92	85
基層下面 εt (10^{-6})		360	458	552	333	454
路床上面 εc (10^{-6})		888	587	482	819	1019
許容載荷輪数	N49t	0.264	0.201	0.126	0.263	0.237
N49 (百万回)	N49c	0.063	0.399	0.966	0.09	0.034

名称	層厚 (mm)	弾性係数 (MPa)						
		10 基層 Case無	11 表層 Case無	12 基層 GFRP	13 表層 GFRP	14 表層小 コイル	15 基層 CRゴム	16 表層 CRゴム
表層	50	1,224	6,510	1,628	1,623	1,414	303	610
基層	50	665	2,600	907	907	793	166	238
上層路盤	250	176	178	211	172	194	103	197
下層路盤	300	126	114	106	106	71	81	39
路床		76	80	88	95	88	95	93
基層下面 εt (10^{-6})		538	258	433	480	488	1155	651
路床上面 εc (10^{-6})		417	305	354	353	361	474	349
許容載荷輪数	N49t	0.097	0.28	0.15	0.11	0.115	0.002	0.105
N49 (百万回)	N49c	1.84	7.49	3.84	3.89	3.52	1.04	4.1

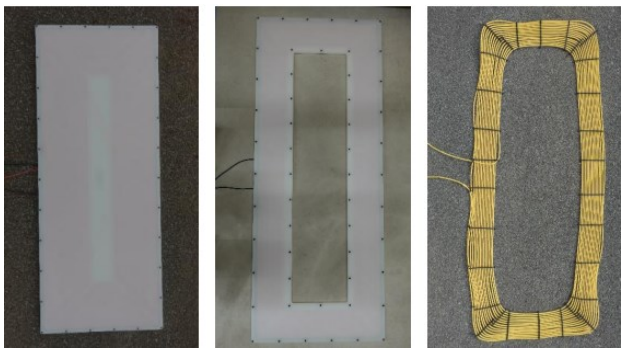
第４章　舗装への給電コイル埋設から得られた所見

4．1　電気的特性関連

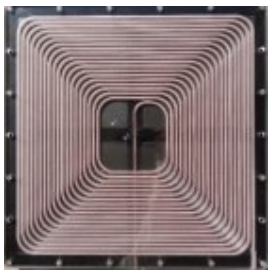
4.1.1　2021年度型枠実験

型枠実験とは木枠にアスファルトを敷設しそこにコイルを埋設し簡易的な道路環境下を模擬した実験である．図-41に型枠設置後の様子を示した．本実験では既設舗装に一切手を加えないため低コストかつ短期間で実験が行えるというメリットがある．型枠実験はオープン型コイルとショート型コイルを用いており，ショート型コイルについては樹脂ケースを使用しないケースレスコイルを作成した．測定に使用したコイルの写真を図-42, コイルパラメータを表-に示す．いずれのコイルもリッツ線は素線径0.05 mm，素線数4,000 本であり許容電流は38 Aである．リッツ線は糸巻きの被覆がされてあり防水性はないが型枠実験は短期間の実験であり雨などの長期的な気候変動に対応した設計である必要はないためコイルケースのOリングのみで止水の対策は施した．コイルの端子部分は高温のアスファルト混合物にさらされるので埋設部分の端子は熱収縮チューブによって保護した．本実験はコイルケースの厚さ及びコイル埋設深さの検討，アスファルト混合物の転圧時の応力アスファルト混合物の温度の影響について検討を目的とした．以下，実施した実験内容について説明する．

図-41　型枠実験



(a)オープン型(b)ショート型(c)ショート型(ケースなし)



(d)受電コイル

図-42　型枠実験に使用したコイル

表-8　型枠実験用コイルと受電コイルの仕様

	オープン型	ショート型	受電コイル
コイルサイズ	600×1600 mm	600×1600 mm	420×420 mm
コイルケースサイズ	660×1650×20 mm	660×1650×20 mm	470×470×22 mm
巻数 t	27	15	19
線間ピッチ p	9 mm	9 mm	8 mm
層間ピッチ g_t	6.1 mm	-	-
導体外径 d	5.1 mm	5.1 mm	5.1 mm
線路長 l	190 m	59.4 m	22.6 m
重量	30.2 kg	16.4 kg	9.49 kg

a)ブロック実験

アスファルト舗装は加熱式アスファルト混合物を転圧することで敷設するため，コイルは過酷な環境下に晒されてしまうため施工時の熱と転圧がコイルに及ぼす影響について検証した．ブロック実験では300×300 mm程のアスファルト混合物のブロックをコイルの周辺に配置していくだけなので転圧及び熱がない時のコイルへの影響を確認できる．図-43にブロック実験における舗装断面図を示した．図-44に実験状況を示した．以下にショート型コイルを使用したブロック実験の結果を示した．ショート型コイルはコイルの内側をくりぬいた構造をしているの

で内側のブロック有り場合と無い場合を検証した．測定結果より，オープン型コイルのブロック実験と同様に基層の上に設置したときが抵抗値が最も増加して約5倍大きくなった．中間層のアスファルトを敷設したときはオープン型コイルと同様に特性の変化がなく，　コイルの内側の中間層の有無も変化がないことがわかった．表層25 mmを敷設したときは約1.2倍悪化した．ショート型コイルの場合は表層アスファルトの重みでもコイルの特性が変わりづらいのでこの特性の悪化は表層25 mmのアスファルトによるものだと考えられる．

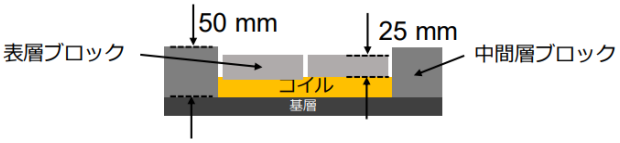
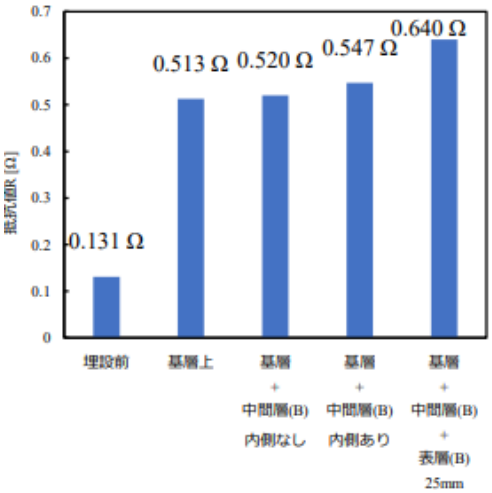
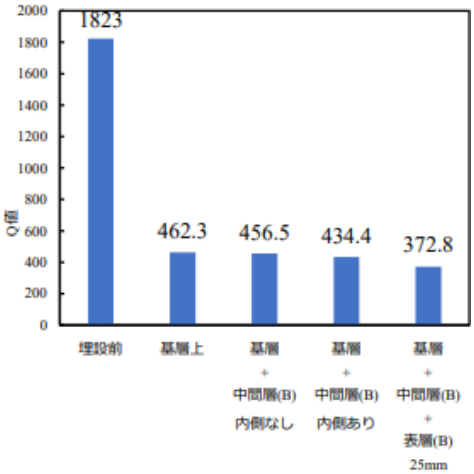


図-43　ブロック実験における舗装断面

図-44　ブロック設置後（転圧・熱なし）



(a)内部抵抗値R



(b)Q値

図-45　ブロック実験におけるコイル特性

b)埋設深さ変化実験

表層を25 mm, 50 mm, 75 mmと厚くしていった時のコイル特性の変化を検証する．本実験では表層厚を変化させるごとに転圧を行う．図-46に埋設深さ変化実験における舗装断面図を示した．図-47に実験状況を示した．以下にショート型コイルを使用した埋設深さを変える実験の結果を示した．オープン型コイルを使用した結果に比べて表層25 mm, 50 mm, 75 mmと変化させたときの特性の変化は顕著に表れた．　中間層から表層25 mmを敷設したときは抵抗値が 1.2倍程度悪化して表層25 mmから表層75 mmまで 25 mmずつ積層させていくと抵抗値が1.1倍大きくなった．したがって，埋設深さを25 mm深くしていくごとに1.1倍～1.2倍程度抵抗値が悪化することがわかった．また，表層厚を25 mm, 50 mm, 75 mmと変化させたときの各工程でVNA（ベクトルネットワークアナライザ）による伝送特性の測定も行ったのでその時の埋設コイルと受電コイルの位置関係を図 49に示した．測定結果を図50に示した．伝送効率は表層厚を25 mm厚くしていくごとに0.5%～1%低下し，電力は約1 kW低下することがわかった．しかし，埋設後でも伝送距離200 mm～300 mmにおいて伝送効率は90%以上を達成し，電力は約10 kW以上得られたので乗用車の走行中給電に適用できる性能であることが確認できた．

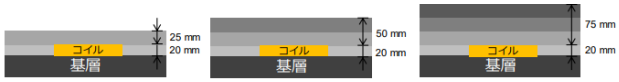
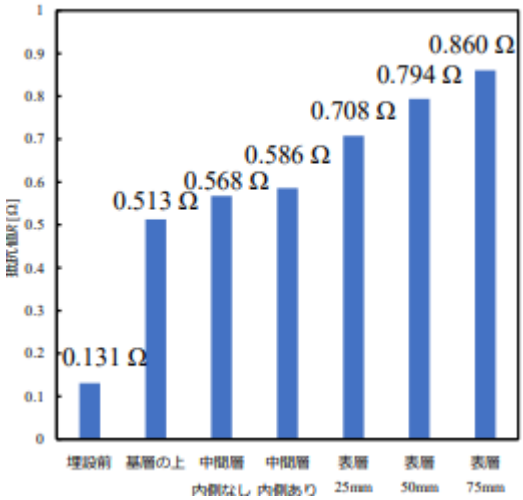
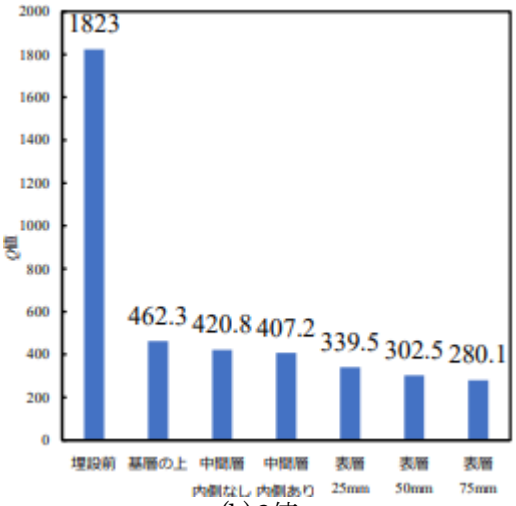


図-46　埋設深さ変化実験における舗装断面図

図-47　埋設深さ変化実験



(a)内部抵抗値R



(b)Q値

図-48　表層厚を変化させたときのコイル特性

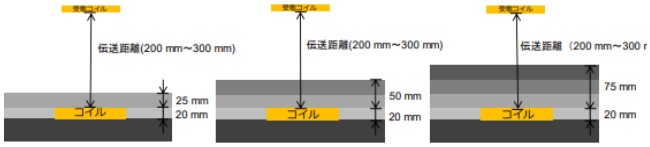
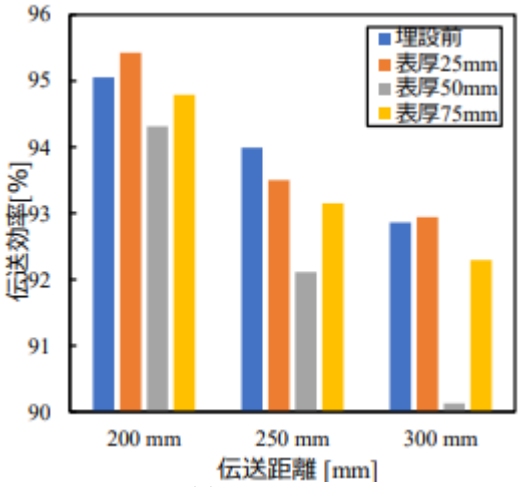
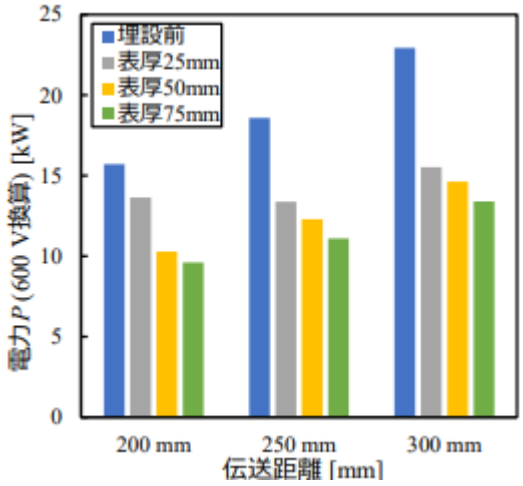


図-49　表層厚変化実験におけるコイルの位置関係



(a)伝送効率η



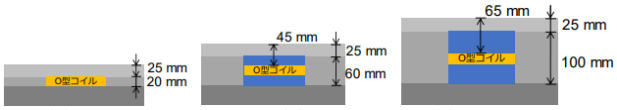
(b)電力P_{out}

図-50　表層厚を変化させたときの伝送特性

c)コイルケース厚変化実験

コイルの上面と底面に XPS を設置してコイルケースの厚さを変化させたときのコイル特性の変化を検証する．コイルとアスファルト舗装との距離を遠ざけていきアスファルト混合物の影響を小さくすることが目的である．XPS は既製品の厚さ20 mm と 40 mmを使用した．910×1820 mmのXPSをコイルケースサイズの660×1650 mmにカットして使用した．コイルケースのサイズに切り出したXPSでコイルをサンドイッチするように挟み込んだ．図-51に舗装断面図を示した．図-52に実験状況を示した．

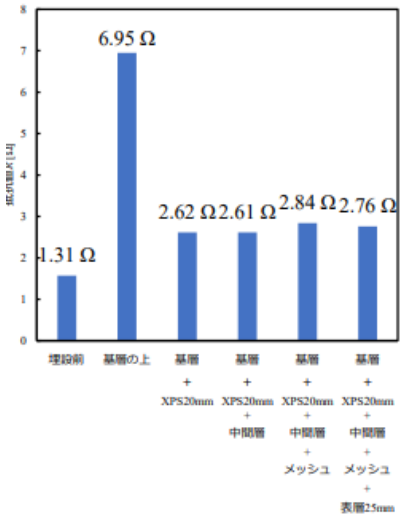
以下にXPS20 mmでアスファルトとコイルを離隔したときのコイルの内部抵抗値の変化とXPS40 mmでアスファルトとコイルを離隔したときのコイルの内部抵抗値の変化を図-53に示す．埋設前と基層の上に置いた状態を比較すると基層の上に置いた時は抵抗値が約5倍大きくなったが，基層とコイルの間にXPS20 mmを設置することで抵抗値の増加を2倍に抑えることができた．同様にXPSで40 mm離隔することで抵抗値の増加を約1.2倍に抑えることができたためコイルとアスファルトを離隔することでコイルの抵抗値の増加を抑制できることを検証することができた．



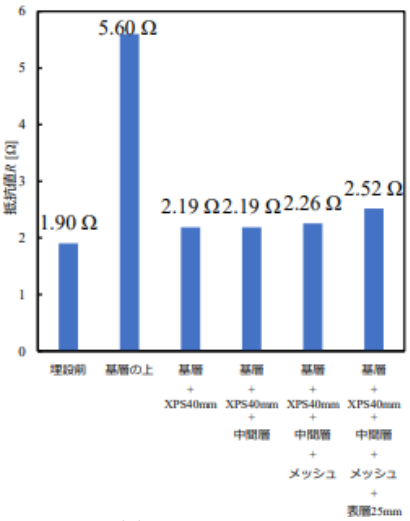
(a)コイルケースのみ (b)XPS20mm (c)XPS40mm

図-51　コイルケース厚変化実験置ける舗装断面図

図-52　コイルケース厚変化実験



(a)XPS20 mm



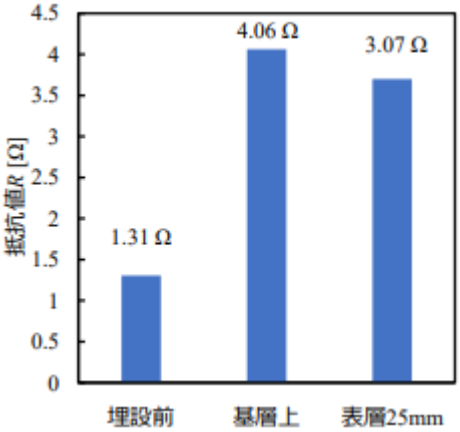
(b) XPS40 mm

図-53　XPS20で離隔したときの内部抵抗値R

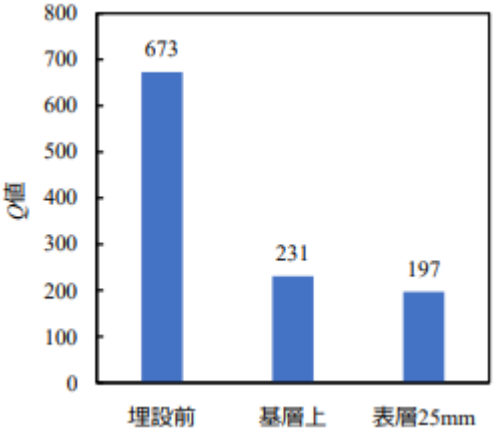
e)熱実験

常温硬化アスファルト混合物を用いて熱を加えない状態で転圧したときのコイル特性を検証した．図-54に実験状況を示した．常温合材を用いてコイルを埋設したときの実験結果を示した．埋設前に比べて基層の上に設置したときは抵抗値が約3倍大きくなった．

図-54　熱実験(常温アスファルト混合物)



(a)内部抵抗値R

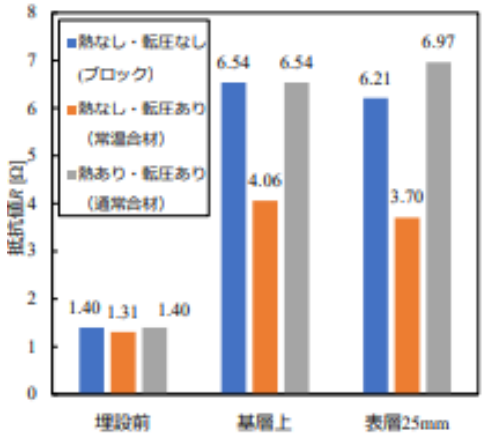


(b)Q値

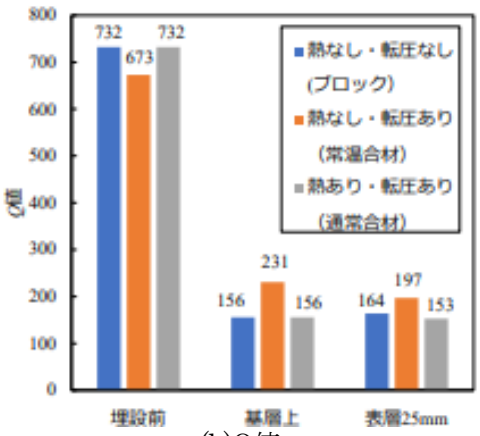
図-55　熱事件におけるコイル特性

e)熱・転圧の影響について

上記のブロック実験，埋設深さ実験，熱実験の結果より施工中の熱や転圧がコイルへ悪影響を及ぼすか比較した結果を図-56に示した．ブロック実験と埋設深さ実験の加熱アスファルト混合物による施工を比較すると抵抗値の変化はほぼ同様の結果となった．ブロック実験では施工中の熱と転圧のいずれもなく，埋設深さ実験では加熱式アスファルトを施工したため熱と転圧がある．つまり，施工中の熱と転圧による影響はないことが明らかになった．熱実験の常温アスファルト混合物による施工が最も抵抗値が小さく，コイルへの悪影響が小さいことが分かった．常温アスファルト混合物（常温合材）は熱を加えないで転圧をする施工であるが，熱と転圧がないアスファルト混合物のブロックよりも抵抗値が低下した．これは材質による違いがあると考えるため次節で誘電体テストフィクスチャを用いた通常アスファルト混合物と常温アスファルト混合物の誘電正接や誘電率，導電率を評価する．



(a)内部抵抗値



(b)Q値

図-56　熱・転圧の影響を比較したときのコイル特性

4．1．2　2021年度学内埋設実験

学内埋設実験では合計11個のコイルを埋設した．学内埋設実験に使用したコイルを図-57，コイルのパラメータを表-9，舗装断面図を図-58に示す．オープン型コイル４つ，ショート型コイル7つ，ショート型のDDコイルが1つである．素材は耐熱性と強度，舗装用接着剤との接着性を考慮して主にABS樹脂を採用した．路面表面に埋設するコイルは接着性と曲げ強度を重視してポリカーボネート樹脂を採用した．また，樹脂コイルケースを使用しないリッツ線のみで形成されたコイルも埋設する．樹脂ケースの有無による埋設時における電気的特性と機械的特性を検証する目的である．

図-57 2021年度埋設コイル

表-9 2021年度埋設実験用コイルと受電コイルの仕様

コイル種別	オープン型	ショート型	ショート型 DD	受電側
コイルサイズ　[mm]	600×1600	600×1600	600×1600	420×420
ケースサイズ [mm]	660×1650×20	660×1650×20	660×1650×20	470×470
層数	2	1	1	1
巻数	42 (21+21)	15	13	19
層間ピッチ　[mm]	6.1 mm	-	-	-
線間ピッチ　[mm]	9	9	9	8
線間距離　[mm]	3.9	3.9	3.9	2.9
線路長 l　[m]	148	60	60	23
リッツ線重量　[kg]	6.0	6.0	6.0	1.8
総重量　[kg]	30.9 (PC 樹脂;33 kg)	18.9 (PC 樹脂;20 kg)	20	9.5

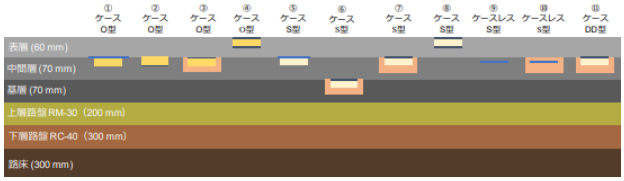


図-58 2021年度学内埋設実験の舗装断面図

a)アスファルト舗装の改築

以下にコイル埋設試験のために舗装の改築を行った内容についてまとめる．

【撤去工，路床改良工】

撤去工，路床改良工の施工手順を図-59に示す．既設の舗装にカッターを入れて，既設の舗装版を撤去した．既設アスファルト混合物は撤去し，中間処理場への搬出を行い，既設路盤に関しては，仮置きを行い，改築後の下層路盤への転用を実施した．所定の深さまでの掘削残土には，ガラが含まれていたため，ガラと残土を分別し，残土を外部にて廃棄処分を行った．　路床上面で仮整形を行い，m^2あたり 50 kgの高炉セメントB種で路床改良30 cmの実行を行った．　整形後の転圧には4 tコンバインドローラを使用し，改良深さの品質確認などを実施した．

図-59　撤去前，路床改良工

【下層路盤工，上層路盤工】

下層路盤工の施工手順を図-60，上層路盤工の施工手順を図-61に示す．路床改良後の地盤上に，下層路盤材を敷き均し，4t コンバインドローラ，10tタイヤローラによって締固めを行った．高さ検測を実施した．上層路盤工も下層路盤工と同様に上層路盤材を敷き均し，4tコンバインドローラ，10 tタイヤローラによって締固めを行った．高さ検測を実施した．基層工の前に上層路盤上面保護を兼ねてプライムコートを散布及び養生した．

図-60 下層路盤工

図-61 上層路盤工

【基層工】

基層工では，Coil6のコイルパネル設置予定箇所に箱抜き型枠を設置し，粗粒度混合物をアスファルトフィニッシャで敷き均し，4tコンバインドローラ，10tタイヤローラによって締固めを行った．高さ検測を実施した．コイル埋設箇所では，温度低下後に箱抜き型枠を撤去し，6号砕石を敷き均し，MMA樹脂を流し込み25mm厚のMMA樹脂層を構築した．30分養生後に固化状態を確認し，接着剤を塗布しS型コイルを固定し，コイル上部のMMA樹脂層を構築した．

図-62 基層工

【中間層工】

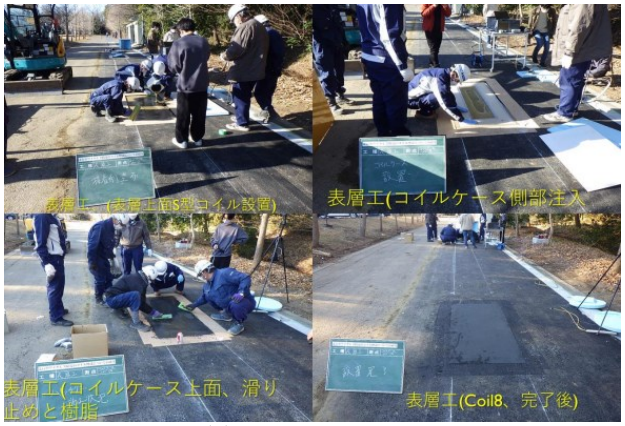
中間層では，Coil1，2，3，5，7，9，10，11のコイルパネル設置予定箇所に設置深さに応じて箱抜き型枠やベニア板を用いて凹形状の空間を作成した．密粒度混合物(13)PMAⅡ型をアスファルトフィニッシャで敷き均し，4tコンバインドローラ，10tタイヤローラによって締固めを行った．高さ検測を実施した．コイル埋設箇所では温度低下後にCoil3，7，10，11では箱抜き型枠を撤去し，6号砕石を敷き均し，MMA樹脂を流し込み25mm厚のMMA樹脂層を構築した．養生30分後に樹脂層の固化状態を確認し，接着剤を塗布しS型コイルを固定し，コイル上部のMMA樹脂層を構築した．他のCoil2，9ではベニア板で型抜きを行った．

図-63 中間層工

【表層工】

表層工ではCoil4，8のコイルパネル設置予定箇所に24mm厚のベニア板を用いて凹形状の空間を作成した．表層工では密粒度混合物(13)PMAⅡ型をアスファルトフィニッシャで敷き均し，4tコンバインドローラ，10tタイヤローラによって締固めを行った．その後，高さ検測を実施した．温度低下後にCoil4，8では箱抜き用のベニア板を撤去し，MMA樹脂を流し込みコイルを接着した．養生30分後に固化状態を確認し，側方に単粒砕石6号を敷き詰め，MMA樹脂流し込み，側方安定化を実施した．コイル上面に防水及滑り止め効果の高いパッチグー(変成 MMA 樹脂＋砂)を塗布し，機能の確保を行った．

(a)表層アスファルト敷設



(b)表層コイル設置

図-64 表層工

b)MMA樹脂舗装材とアスファルト舗装の比較検討

ここでは埋設方法の違いによってコイル特性に変化が生じるかについて着目する．走行中ワイヤレス給電は送電コイルを道路舗装に埋設するため送受電コイル間に道路舗装が存在する．この舗装材は誘電体であるため，誘電体損失が発生する．ここで誘電体損失について説明する．図-65にtanδの等価回路図と原理図を示す．図-65より層間材料のインピーダンスZ_{cf}は次式で表すことができる．

$$Z_{cf} = R_{dielec} + \frac{1}{j\omega C_f}$$

上式より誘電体損失R_{dielec}は次式と求めることができる．

$$R_{dielec} = \frac{tan\delta}{\omega C_f}$$

これより誘電体損失R_{dielec}は$tan\delta$（誘電正接）に依存することがわかる．よって，$tan\delta$の小さい材料を選定することで誘電体損失を低減することが可能である．また，浮遊容量C_fが大きいほど誘電体損失を小さくすることができる．ここでコイル埋設に使用する候補の舗装材である加熱アスファルト，常温アスファルト，MMA樹脂ブロックに砕石を混ぜたもの，MMA樹脂に硅砂を混ぜたものの計4種の電気的特性を測定した．測定に使用した舗装ブロックを図-66，測定方法を図-67に示す．MMA樹脂に硅砂を混ぜた試料は誘電体テストフィクスチャの測定可能サイズ以内の大きさで作成することができたので既製品のテストフィクスチャ1645Bで測定した．それ以外の試料は厚さ10 mm以下で50×50 mmのサイズで作成することは困難であったため300×300×3 mmの銅板を用いて測定した．測定結果を表-に示す．表-10よりMMA樹脂に硅砂を混ぜた舗装材が最もコイルへの影響が小さいことがわかったため，実際に測定した舗装材料を用いてコイル埋設を行う．

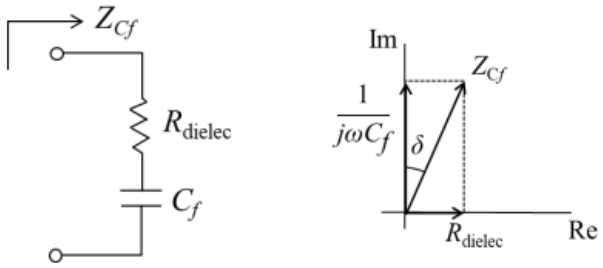
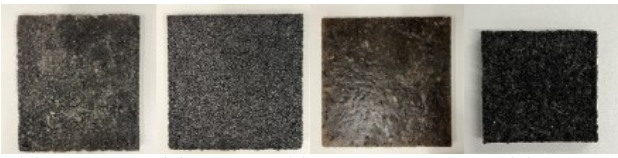


図-65 $tan\delta$の等価直列回路



(a)加熱As (b)常温As (c)MMA樹脂+砕石(d)MMA樹脂+硅砂

図-66 舗装材試料

図-67 誘電体テストフィクスチャ(左)と極版(右)による試料の測定状況

表-10 舗装材の測定結果

試料	加熱 As 混合物	常温 As 混合物	MMA 樹脂+砕石	MMA 樹脂+珪砂
測定法	極板	極板	極板	テストフィクスチャ
試料サイズ	302×270 mm	300×300 mm	300×300 mm	50×50 mm
資料厚 t	22 mm	22 mm	20 mm	10 mm
静電容量 C	161 pF	168 pF	145 pF	2.98 pF
ジーメンス G	5.54×10^{-6} S	7.13×10^{-6} S	2.63×10^{-6} S	3.12×10^{-6} S
導電率 σ	1.49×10^{-6} s/m	1.74×10^{-6} s/m	5.85×10^{-6} s/m	1.25×10^{-6} s/m
抵抗率 ρ	0.670 MΩm	0.573 MΩm	1.71 MΩm	80.2 MΩm
tanδ	0.0644	0.0797	0.0340	0.00196

コイルの埋設方法はMMA樹脂の流し込み，直接埋設の2つの方法を比較する．MMA樹脂の流し込みはコイル周辺にモルタル状のMMA樹脂を20 mm流し込むことによってアスファルト混合物とコイルとの距離を遠ざけて影響を小さくする目的がある．また，施工中の高温や転圧による過酷な環境からコイルを保護する目的があり，舗装との一体化もすることで電気的と機械強度の両立を目的とした施工である．本研究では低コスト化のために MMA 樹脂に砕石を混ぜて樹脂の使用量を半分に減らしている．直接埋設の施工手順を図-68，MMA樹脂の流し込みの施工手順を図-69に示す．

測定にはインピーダンスアナライザとVNAを用いており，インピーダンスアナライザを用いた測定状況を図-70，VNAを用いた測定状況を図-71に示す．また，図-72にMMA樹脂流し込み材とアスファルト舗装における抵抗値RとQ値の比較結果を示した．先行研究の施工法であるRCメッシュシートとコイル

をMMA樹脂の流し込み材によって保護したコイル7を比較すると，MMA 樹脂舗装材の方が先行研究のアスファルト舗装に埋設する方法に比べて抵抗値の悪化を 43%低減することができ，Q値は1.8倍向上した．また，樹脂コイルケースを使用していないコイル9とコイル10の結果を見ると，MMA樹脂舗装材の方がアスファルト舗装に比べて抵抗値の悪化を30%抑制することができた．図-73(a)のVNAによる伝送特性の比較結果より，MMA樹脂舗装材の方がアスファルト舗装に比べて最大効率は約1%向上した．樹脂ケースを使用しないコイル9とコイル10を比較すると MMA樹脂舗装材の方が最大効率は約3%向上し，電力は600 V換算値で4 kW以上得られることが示さ れた．また，負荷が最適負荷に設定した時はコイル埋設後において効率95%以上を達成し，電力は 10 kW以上得られた．図-73(b)の負荷を最大電力負荷に設定した時の伝送特性の比較結果を見ると，MMA 舗装材の方が高効率かつ大電力を達成でき埋設後においても効率94%で21 kW以上得られることがわかった．

(a)コイル設置　(b)加熱アスファルト混合物敷設

(c)転圧　(d)中間層埋設後

図-68 直接埋設コイルの施工

(a)砕石敷設　(b)MMA樹脂の流し込み

(c)MMA樹脂乾燥後にコイル設置 (d)砕石+MMA樹脂

(e)MMA樹脂+硅砂　(f)中間層埋設後

図-69ケースレスコイルのMMA樹脂舗装材による施工

図-70 コイル埋設前後におけるインピーダンスアナライザによる測定状況

図-71 コイル埋設前後におけるVNAによる電力伝送評価

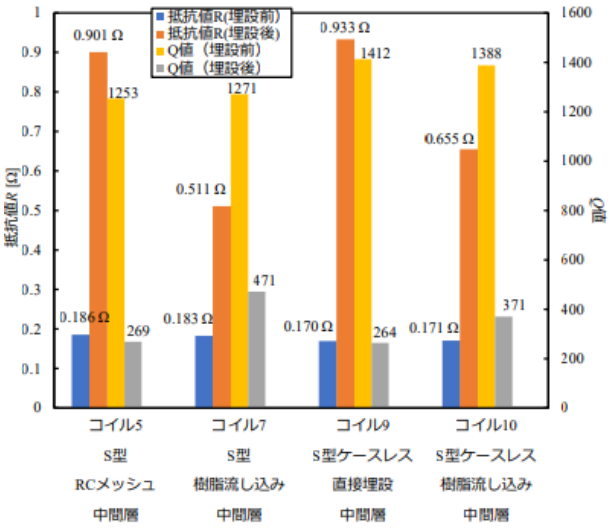
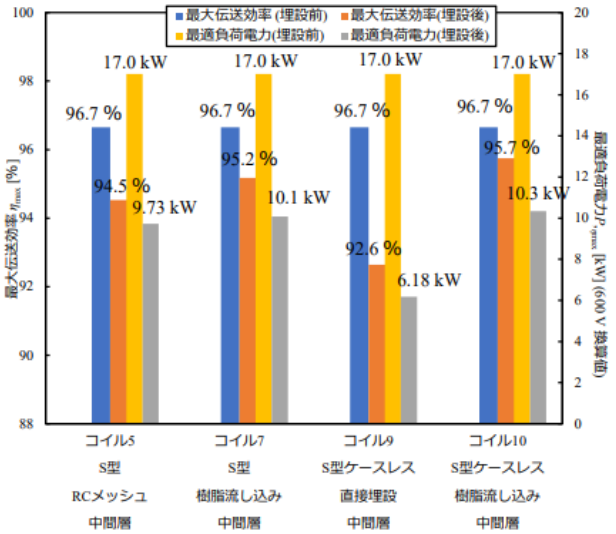
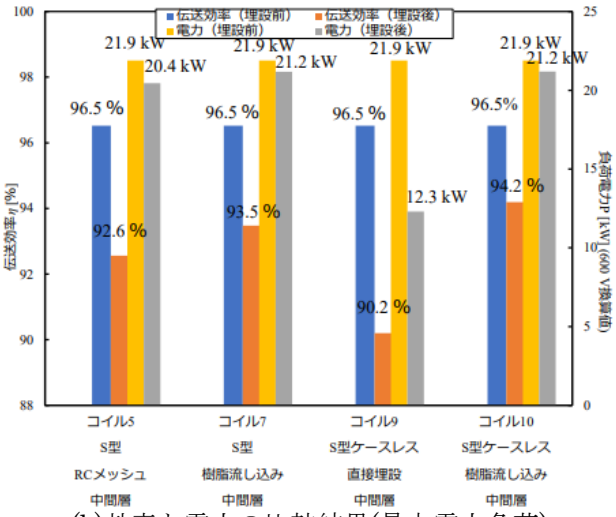


図-72 MMA樹脂流し込み材とアスファルト舗装における抵抗値とQ値の比較検討結果



(a)最大効率と最適負荷電力の比較結果(最適負荷)



(b)効率と電力の比較結果(最大電力負荷)

図-73　伝送特性の測定結果(VNA換算値)

c)埋設深さの比較検討結果

ここでは基層，中間層，表層にコイルを埋設したときの特性を比較した．図-74に基層，中間層，表層に埋設したコイルの抵抗値RとQ値の比較結果を示した．基層，中間層，表層の結果を比較すると表層に埋設したコイルが埋設前に比べて約4.7倍抵抗値が増加し，最も抵抗値が大きくなった．基層及び中間層に埋設したコイルはいずれのコイルも埋設後は抵抗値がほぼ同じになり，埋設前に比べて約2.8倍増加した．表層コイルのみ抵抗値が大幅に悪化した原因は施工方法の違いによるものだと考える．基層及び中間層のコイルはMMA樹脂によってコイルはアスファルト混合物から20 mm離隔されている．表層コイル底面は2～3 mmの接着剤によってアスファルト舗装と接着したため離隔距離は2～3 mmである．

次に，埋設深さに対する伝送特性について言及する．図-76に受電コイルを路面からの距離が一定になるように設置したとき埋設コイルと受電コイルの位置関係を示した．路面からの距離が一定条件では深く埋設するほど伝送距離が長くなるので電力伝送では不利になる．それぞれの伝送距離は基層のコイルが270 mm，中間層のコイルは200 mm，表層コイルは約120 mmとなっている．図-73に路面からの距離が一定条件のときのVNAによる伝送特性の結果を示した．伝送距離が短いほど高効率だが電力は小さくなり効率と電力が反比例した結果となった．これは本研究で採用している回路方式がS-S（series-series）方式であることに関係する．伝送距離を大きくすると結合係数kが小さくなるがS-S方式では結合係数が小さいほど効率は小さくなるが大電力が得られることがわかっている．今回の結果はそのような傾向が表れている．また，基層のコイルは受電側に流れる電流がVNAの600 V換算値では52 A流れることがわかった．本研究で使用している素線数4000 本のリッツ線は許容電流が38 Aであるため基層のコイルは許容電流を超えているため実際に600 V を印加すると故障すると考えられる．そのため，コイルを深く埋設する場合は回路方式の検討や制御側の工夫が必要である．

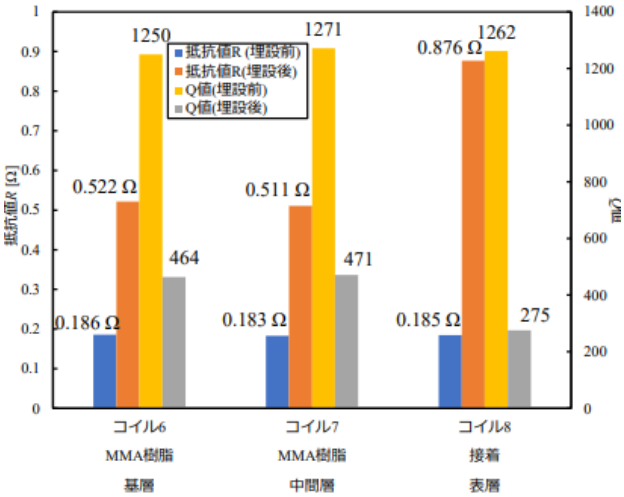


図-74　埋設深さの違いにおける抵抗値RとQ値

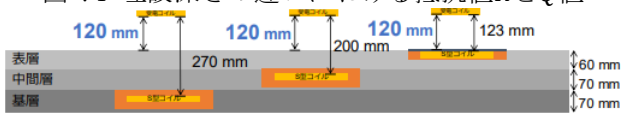


図-75　埋設コイルと受電コイルの位置関係(伝送距離一定)

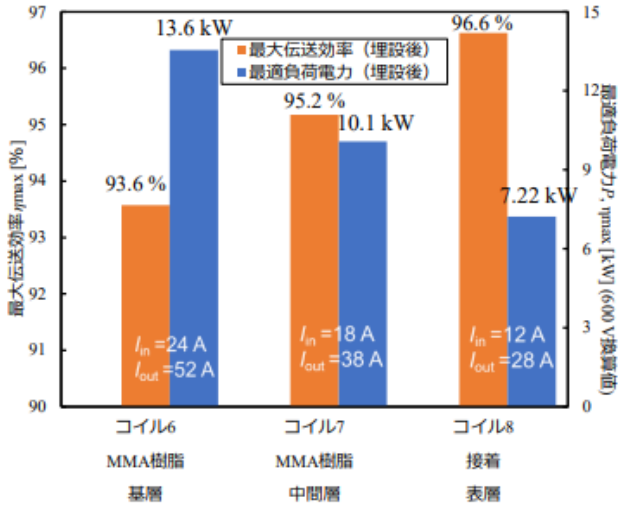


図-76　路面からの距離が一定のときの伝送特性

d)コイルタイプの比較検討

コイル３のオープン型，コイル７のショート型，コイル11のショート型DDコイルの3タイプのコイルを比較した．コイルサイズはすべて同様であり，リッツ線も同様の仕様である．施工方法はいずれもMMA樹脂の流し込みであり，埋設深さは80 mmである．図-77にオープン型，ショート 型，ショート型 DD コイルの埋設前後における抵抗値RとQ値の比較結果を示した．埋設前後においてDDコイルが最も抵抗値が小さくQ値が高い結果となった．オープン型コイルは巻き数が多く，素材の誘電正接(tanδ)の影響を受けやすいためショート型コイルよりも抵抗値が6～7 倍程大きい結果となった．

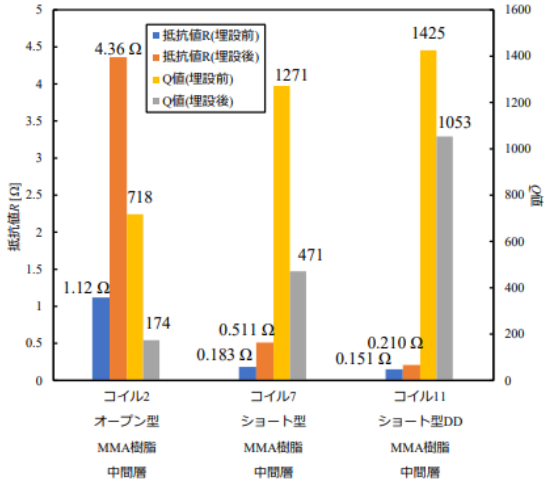
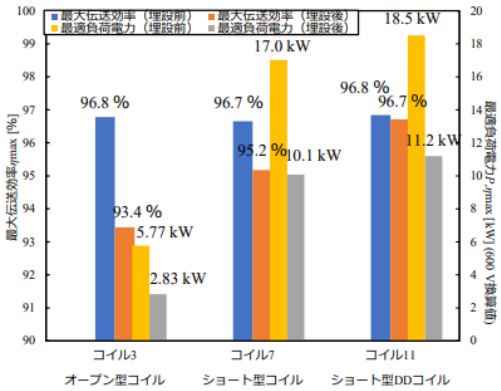
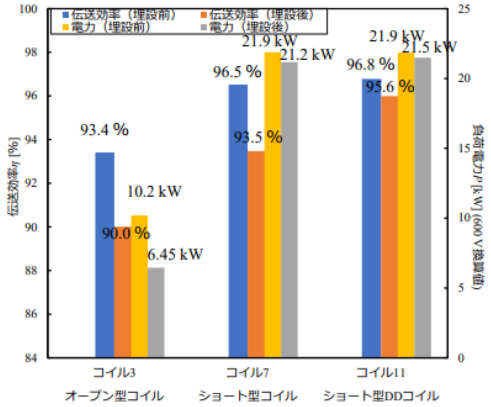


図-77コイルタイプの違いにおける抵抗値RとQ値

図-79にオープン型，ショート型，ショート型DDコイルの最大伝送効率と最適負荷電力を示した．埋設前はいずれのコイルも最大効率は換算値で96%以上でほぼ同様の値となった．埋設後はショート型DDコイルが埋設前に比べてわずか0.1%の低下であり換算値で効率96.7%と高効率となった．電力は埋設前後ともにDDコイルが換算値で11 kWと最も得られた．(b)の負荷を電力が最もとれる負荷に設定するとDDコイルは効率95%以上で電力は換算値で21 kW以上でサーキュラ状のショート型コイルやオープン型コイルよりも高効率かつ大電力であることがわかった．よって，伝送特性は入力電圧600 V 一定条件ではDDコイルが最も優れていることが明らかになった．



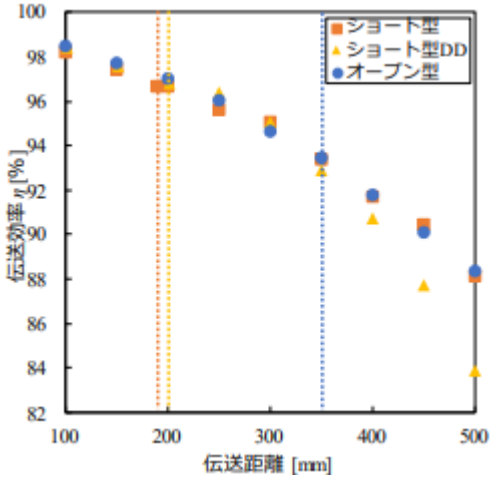
(a)コイルタイプにおける伝送特性(最適負荷)



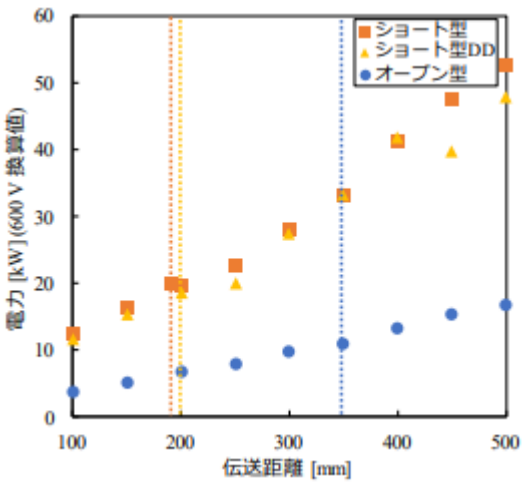
(b) コイルタイプにおける伝送特性(最大電力負荷)

図-78　伝送特性の測定結果

図-78に埋設前において伝送距離を100～500 mmに変化させたときの伝送効率と電力を示した．入力電圧は600 V換算値で負荷は最適負荷の条件で評価した．グラフ上の点線はリッツ線の許容電流の38 Aの境界線でありこれを超えるとリッツ線の定格を超える電流が流れることになる．オープン型コイルは伝送距離350 mmを超えるとリッツ線の許容電流を超える電流が流れる．DDコイルは200 mmまで伝送距離を広げられ，サーキュラ状のショート型コイルは190 mmまで対応できる．これはコイルの巻き数を増やしたりリッツ線をより太い外形のものに変更したりすることでリッツ線の許容電流の上限があがり，より伝送距離を広げられると考えられる．埋設時を考えると普通自動車の場合には伝送距離200～300 mmを確保する必要がある．トラックやバスへの給電を想定すると500 mm程度は必要になる．



(a) 伝送効率η



(b)出力電力P_{out}
図-79伝送距離に対する伝送特性の変化

e)まとめ

2021年度学内埋設実験ではコイルを埋設する際の舗装材の特性比較，埋設深さの比較検討，コイルタイプの比較検討を行った．舗装材についてはアスファルトを用いて埋設するとコイルの内部抵抗値が大幅に増加してしまうが，MMA樹脂混合物を用いることで内部抵抗値の増加を43 %抑制することができることを検証できた．埋設深さの比較検討では表層に埋設することで伝送距離を短くし効率を向上させることが分かった．コイルタイプの比較検討では伝送特性についてはDDコイルが最も良い結果となった．

4．1．3　コイル埋設におけるコイルのサイズ，巻き数，線間ピッチの関係性

2021年度の埋設実験では，コイル埋設用の舗装材を電気的特性の良いMMA樹脂混合物に変えたことで道路環境下においても高効率かつ大電力を達成した．しかし，MMA樹脂混合物はアスファルトよりもコストが高く，樹脂の硬化時間がかかることによる施工時間の増加といった課題があげられる．そこで，コイルのサイズ，巻数，線間ピッチに着目しコイルパラメータを変化させるだけで アスファルト道路からの影響を低減できるコイル設計手法を提案した．本研究で提案するコイルパラメータ変化のみでアスファルトからの影響を低減可能であれば高コストな舗装材が不要になり低コスト化が期待できる．着目したコイルパラメータはサイズ，巻数，ピッチの3つである．コイル埋設にはコストがかかってしまうため事前検証としてそれぞれのパラメータを変化させたときの環境の影響を受けない空気中とアスファルト上に置いた時，湿ったアスファルト上に置いた時の3パターンにおける内部抵抗値RとQ値を測定し比較した．図-80に事前検証コイル，表-11~表13にコイルサイズ，巻きす，線間ピッチそれぞれを変化させたときのコイルの仕様を示す．リッツ線は素線径0.05 mmで素線数4000本の糸巻き線である．検証するパラメータは線間ピッチと巻数は一定でコイルサイズのみを800mm, 1100 mm, 1400 mm, 1700 mm, 2000 mmと変化させたときと，コイルサイズと線間ピッチは一定で，巻数を6, 11, 16, 21, 26と変化させたときと，コイルサイズと巻き数は一定で，線間ピッチを 5mm, 9 mm, 18 mm, 27 mmと変化させたときのコイル特性の変化を検証する．

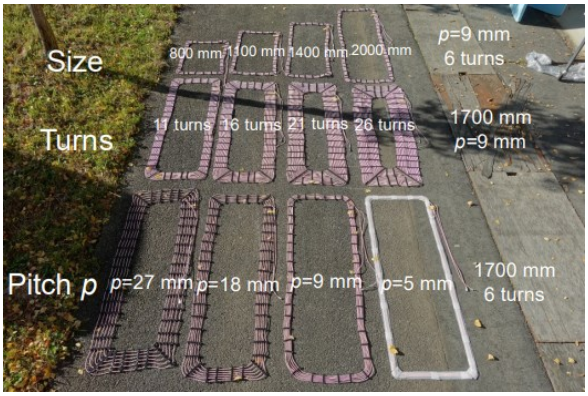


図-80　事前検証用コイル

表-11 サイズのみを変化させたときのコイルの仕様

コイルサイズ	巻数	線間ピッチ	線路長
600×800 mm	6	9 mm	15.4 m
600×1100 mm	6	9 mm	19.0 m
600×1400 mm	6	9 mm	22.6 m
600×1700 mm	6	9 mm	26.2 m
600×2000 mm	6	9 mm	29.8 m

表-12 巻き数のみ変化させたときのコイルの仕様

コイルサイズ	巻数	線間ピッチ	線路長
600×1700 mm	6	9 mm	26.2 m
600×1700 mm	11	9 mm	46.9 m
600×1700 mm	16	9 mm	66.1 m
600×1700 mm	21	9 mm	83.8 m
600×1700 mm	26	9 mm	100 m

表-13 ピッチのみ変化させたときのコイルの仕様

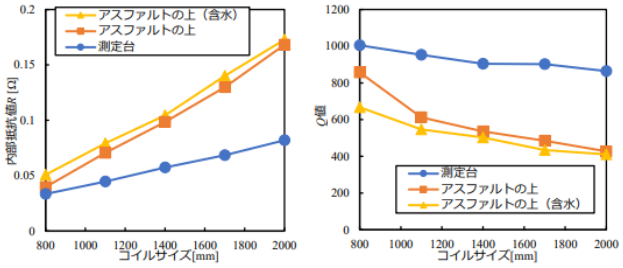
コイルサイズ	巻数	線間ピッチ	線路長
600×1700 mm	6	5 mm	26.5 m
600×1700 mm	6	9 mm	26.2 m
600×1700 mm	6	18 mm	25.5 m
600×1700 mm	6	27 mm	24.8 m

図-81に測定状況を示した．測定にはkeysight technologies社のインピーダンスアナライザE4990Aを使用した．測定周波数は走行中給電の国際規格である85 kHzである．測定はコイルをスタイロフォーム製の測定台に設置してアスファルト道路からの影響を受けないときの状態と，道路に設置したときの状態，雨が降って路面表面が濡れている時の状態である．図の路面表面が濡れているときはリッツ線が濡れないようにコイル下に厚さ0.01 mm以下のポリ袋を敷いた．図-82~図-84にコイルサイズ，巻数，線間ピッチをそれぞれ変化させたときの特性変化を示した．図-82(a)のコイルサイズのみを変化させたときの内部抵抗値 R の結果より，測定台とアスファルト道路の上における測定を比較すると，コイルサイズ800 mmのとき1.19倍，2000 mmの時は2.05倍の増加となり，コイルサイズが小さい方がコイルをアスファルト道路の上に設置したときの抵

抗値の悪化が小さいことがわかった．また，道路表面が濡れている状態は乾燥している状態よりもコイル特性が悪化して，コイルサイズが小さい方が特性の悪化が小さいことが分かった．Q値の結果を見ると抵抗値Rの結果と同様にコイルサイズが小さい方が特性の悪化が小さいことがわかった．図-83(a)の巻数のみを変化させたときの抵抗値Rの結果より，測定台とアスファルト道路の上における測定を比較すると，6巻きのとき 1.61倍，26巻きの時は30倍の増加となり巻数が少ない方がコイルをアスファルト道路の上に設置したときの抵抗値の悪化が小さいことがわかった．また，図83(b)のQ値の結果より，巻数が少ない方がQ値の悪化が小さいことがわかった．図-84(a)の線間ピッチのみを変化させたときの抵抗値Rの結果より，測定台とアスファルト道路の上における測定を比較すると線間ピッチ5 mmのとき1.66倍，線間ピッチ27 mmの時は1.42倍の増加となり，線間ピッチを広げた方がコイルをアスファルト道路の上に設置したときの抵抗値の悪化が小さいことがわかった．図-84(b)のQ値の結果より，線間ピッチを広げた方がQ値の悪化が小さいことがわかった．以上の結果より，コイルサイズが小さく，巻数が少なく，線間ピッチを広げたコイルの方 がアスファルト道路からの影響が小さいことがわかった．これは特性悪化率はコイルの線路長に依存していると考えられる．本節ではアスファルト道路上で測定を行ったが，次節ではアスファルト道路内に埋設したときの影響について言及する．

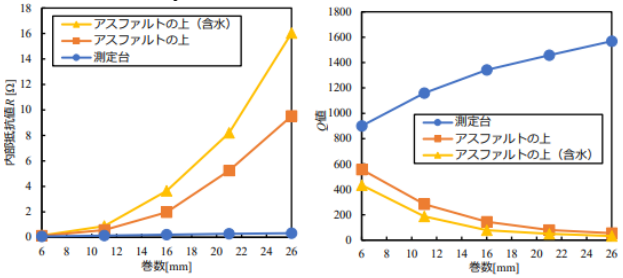
(a)測定台の上 (b)As道路上 (c)As道路上(含水)

図-81 測定状況



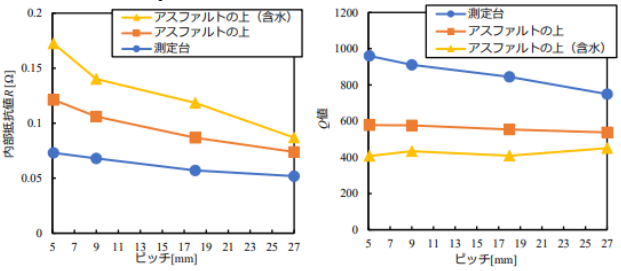
(a)内部抵抗値R (b)Q値

図-82 コイルサイズのみ変化させたときの内部抵抗値とQ値の変化(巻き数，ピッチ固定)



(a)内部抵抗値 (b)Q値

図-83 巻き数のみ変化させたときの内部抵抗値とQ値の変化(サイズ，ピッチ固定)



(a)内部抵抗値 (b)Q値

図-84 ピッチのみ変化させたときの内部抵抗値とQ値の変化(サイズ，巻き数固定)

4．1．4 2022年度学内埋設実験

a)実験概要

2021 年度の学内埋設実験では MMA 樹脂混合物による埋設方法により，電気的特性と機械的特性の両立を達成できた．埋設深さは中間層を中心に検討し表層埋設は初期の検討とした．中間層はアスファルト舗装の路面から舗装構造にもよるが 50 ~60 mm 下の層になるため，中間層にコイルが埋設されていると道路の再舗装時にメンテナンス性が悪くなる．また，車体底面に搭載される受電コイルまでの距離が遠くなり，伝送距離が増大してしまうといったデメリットがある．そこで，本実験では再舗装時のメンテナンス性の向上と伝送距離を短くすることを目的として表層埋設をメインに検討する．

表 7 より，コイル 1～3 はアスファルト混合物の影響低減設計コイルの検証が目的である．型枠実験では既設舗装路上の模擬道路でコイルパラメータ変化のみでアスファルト混合物からの影響を低減させることに成功したが，本実験では実際のアスファルト舗装環境下で検証を行うことが目的である．予算の都合により，コイルサイズを 800 mm, 1300 mm, 1700 mm と変化させたときのアスファルト混合物からの影響低減手法を実際の道路環境下で検証を行う．

コイル 5 はコイルケースが分厚いコイルを提案しており，従来からコイルケース下面を MMA 樹脂混合物で施工してアスファルト混合物から離隔していたが，本提案コイルはコイルケース下面を分厚くして離隔距離を確保する手法を提案する．提案するケースの厚みは舗装厚と同様の厚さであり，離隔用の MMA 樹脂混合物なしでコイルケースの厚さで離隔することが目的である．2022 年度の型枠実験でも厚さ 10 mm のポリカーボネート板を 4 枚ケースコイル底面に設置して簡易的にコイルケースを分厚くする手法をとったが，本実験では離隔部分のケースは一枚板で作製した．また，型枠実験では未実施だった強度試験も行い，MMA 樹脂混合物とコイルケースを分厚くして離隔距離を取る手法でどちらが埋設に適しているのかを検証する．

コイル 7 及び 8 はコイルケースに CR（クロロプレンゴム）のエラストマー系素材を採用して従来のポ

リカーボネート素材の硬質プラスチック系材料との比較検討を行う．CR ゴムコイルは今年度の学内埋設実験における電気的特性及び機械的特性の結果次第では 2023 年度の土木研究所での走行荷重試験で耐久性の検証を行う．
コイル 10 は外付けの共振コンデンサを必要としない自己共振により動作するオープン型（O 型）コイルである．
検証内容は，
①アスファルト混合物の影響低減設計コイルの検証
②コイルケース厚の検証
③硬質プラスチック製コイルケースと軟質ゴム製コイルケースの検証
④表層埋設と中間層埋設
である．

b)埋設コイルについて

図-85 に学内埋設実験用コイルを示す．表 8 にコイルの仕様を示す．埋設コイルは 10 個でケースレスコイルが 4 つ，ケースコイル（30 mm 厚）が 2 つ，ケースコイル（50 mm 厚）が 1 つ，CR ゴムコイルが 2 つ，オープン型コイルが 1 つである．コイルケース表面を研磨して，舗装材との接着性を良くする工夫を施している．リッツ線は素線数 10,000 本，0.01 mm の仕様である．被覆は厚さ 0.5 mm の青色の FEP 被覆が施されている．

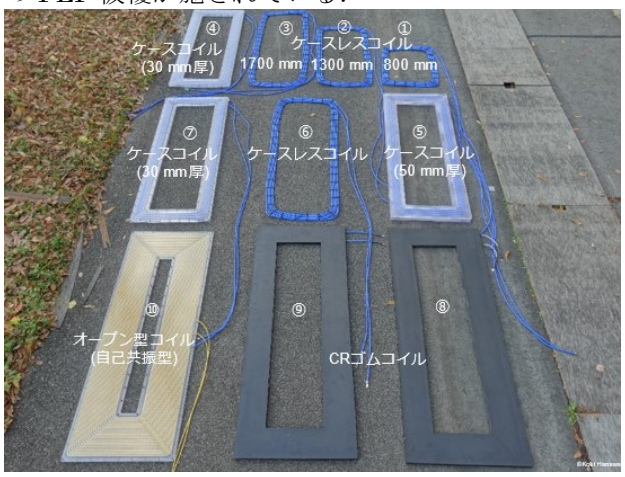


図-85 2022年度学内埋設実験用コイル

表-14 学内埋設実験用コイルと受電コイルの仕様

	S 型ケースコイル	S 型ケースレスコイル	O 型ケースコイル	受電コイル
コイルサイズ	600×1700 mm	600×1700 mm	600×1700 mm	600×800 mm
コイルケースサイズ	660×1760×30 mm	-	660×1760×20 mm	670×870×27 mm
巻数 n	6	6	20	7
線間ピッチ p	12 mm	12 mm	9 mm	11 mm
導体外径 d	7.85 mm	7.85 mm	5.1 mm	7.85 mm
線路長 L	31.5 m	31.5 m	165 m	51.2 m
重量	22.6 kg	7.27 kg	31.8 kg	18.3 kg

図-86 に学内埋設実験における舗装断面図を示す．舗装構造は，大型車交通量が国道レベルの設計交通量 N6 クラスである．2021 年度は中間層への埋設がメインで，表層埋設は初期検討であり十分な検討ができていないので，今年度は表層埋設を中心に中間層埋設との比較検討を行った．
図-87 に舗装断面図詳細を示す．すべてのコイルは 2021 年度の実績のある MMA 樹脂混合物による埋設方法である．ケースコイルは，舗装厚 50 mm に対してコイルケース厚が 30 mm なのでコイルケース底面に MMA 樹脂混合物 20 mm で施工することでコイルとアスファルト混合物との離隔距離を確保している．ケースコイルの上面はコイルケースが路面と面一になるため滑り止め処理のための MMA 樹脂混合物 3 mm で施工する．ケースレスコイルはリッツ線の導線と被覆を含めた厚さが約 10 mm なので舗装厚 50 mm に対してケースコイル底面を MMA 樹脂混合物 30 mm が離隔距離である．ケースレスコイルは路面からリッツ線上面までが約 10 mm であり，ケースコイルは路面からリッツ線までは約 5 mm である．コイル 5（コイルケース厚が舗装厚と同様のコイル）のみコイルケースの厚さで離隔距離を確保してあるため，コイルケース底面は MMA 樹脂接着材 2 mm のみの施工である．コイルと舗装との隙間は MMA 樹脂接着材を用いて埋設し，舗装とコイルケースを一体化させる．中間層及び表層に埋設するコイルは埋設深さが異なるだけで施工方法は同様である．図-にコイル埋設の施工手順を示す．

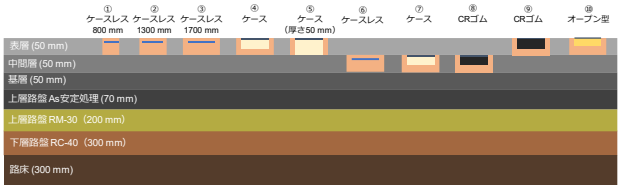
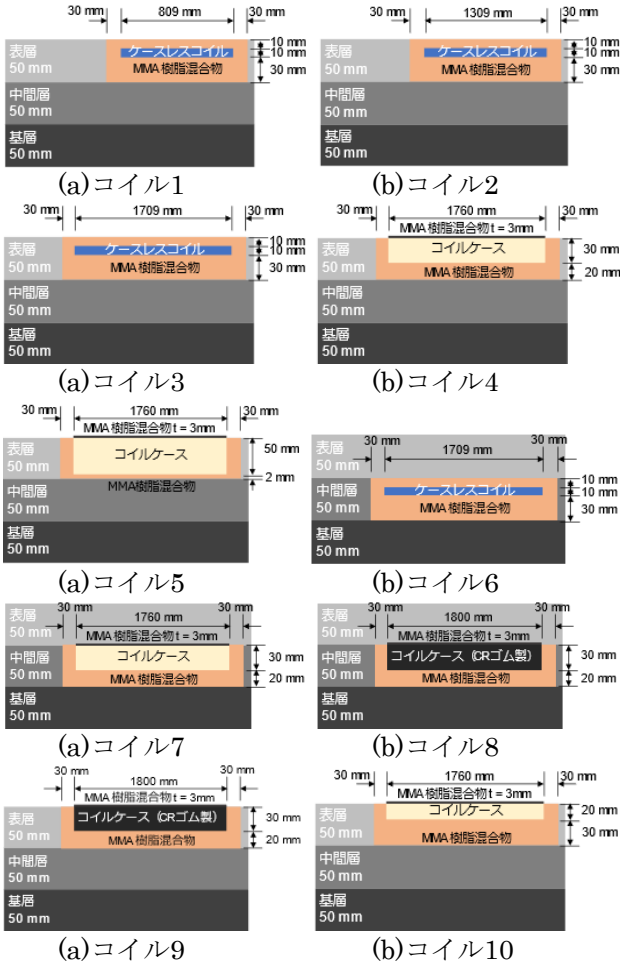


図-86 202年度学内埋設実験における舗装断面図



(a)コイル下面樹脂混合物敷き均し (b)コイル設置

(c)コイル上面樹脂混合物敷き均し (d)埋設後

図-87 コイル埋設手順

c)各コイルの伝送特性の測定結果

・伝送距離200 mmにおける伝送特性

図-88 に伝送距離 200 mm における埋設コイルと受電コイルの位置関係を示した．伝送距離とは送電コイルと受電コイルまでの距離のことである．図-89 に VNA による測定状況を示した．

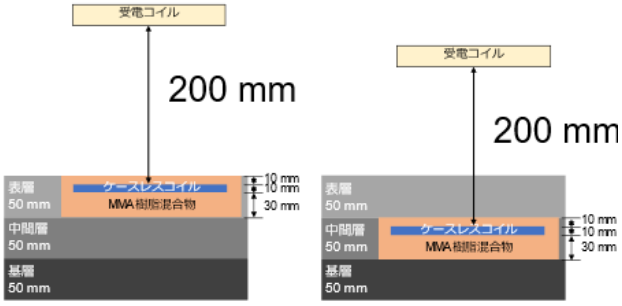
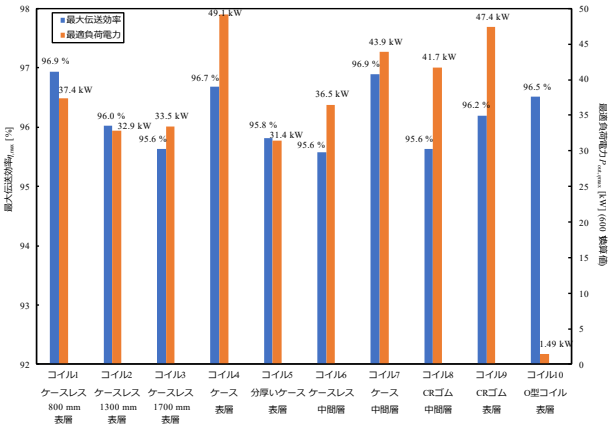


図-88 伝送距離200 mmにおける断面図

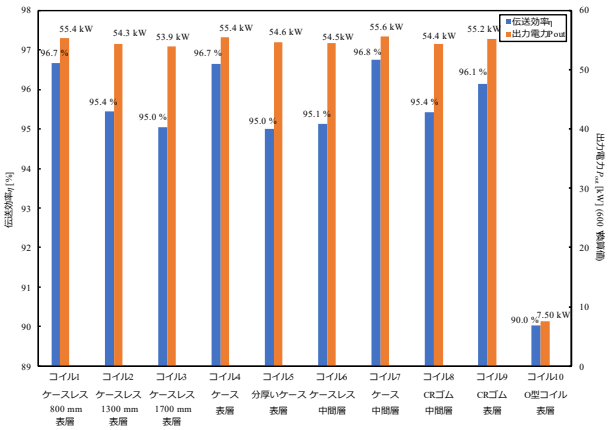
図-89 VNAによる測定状況

図 90 に伝送距離 200 mm における伝送効率 η と出力電力 P_{out} を示した．入力電圧は 600 V（VNA 換算値）である．最適負荷（効率が最も大きくなるように設定した負荷）の結果より，コイル 10 以外は伝送効率 95 %以上で電力は 30 kW 以上を達成した．コイル 4 及びコイル 7 のケースコイルは伝送効率 97 %近く達成し，電力も 43 kW 得られて他のコイルよりも最も高効率で大電力を達成した．

最大負荷（電力が取れるように設定した負荷）の結果より，コイル 10 以外は伝送効率 95 %以上で電力は 53 kW 以上を達成した．全体的な傾向としては表層埋設コイルの方が高効率で大電力である．これは，中間層のコイルは表層と基層のアスファルト舗装からの影響を受けるためと考えられる．また，オープン型コイルは 10 kW 未満であるのでコイルの再設計が必要であると考える．



(a)最適負荷



(b)最大電力負荷

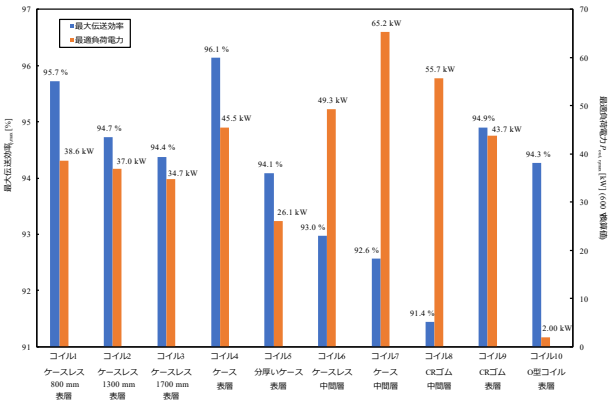
図-90 伝送距離200 mmにおける伝送特性

・路面から受電コイルまでの距離を一定にしたときの伝送特性

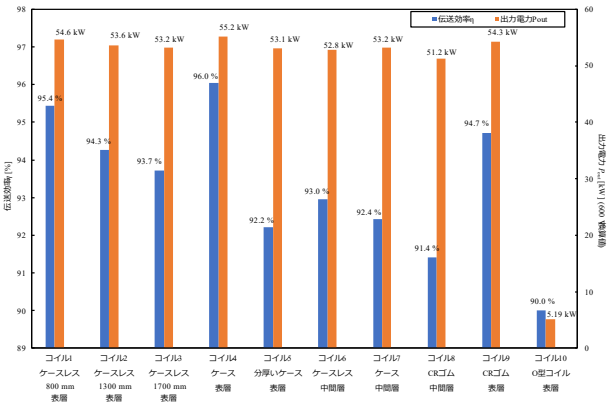
次に路面から受電コイルまでの距離が一定のときの伝送特性を評価した．この評価により走行中給電に適した埋設深さを評価する．表 9 に測定日を示した．図-88 に路面から受電コイルまでの距離が一定のときにおける舗装断面図を示した．図-91 に路面から受電コイルまでの距離が 200 mm 一定のときにおける伝送効率 η と電力 P_{out} の測定結果を示した．最適負荷の結果より，中間層に埋設したコイル 7, 8 における電力は 55~65 kW 程度が得られたが，入力電流が 100 A 以上もの大電流が流れてしまったため走行中給電は安全上難しくなる．本研究の埋設コイルは伝送距離 200 mm 付近で設計されており，中間層のコイルは伝送距離が 250 mm となるため設計値以上の大電流が流れてしまった．

最大負荷の結果より，コイル 10 以外は 51 kW 以上の大電力を達成したが中間層のコイルは表層のコイルに比べて伝送効率が 1~2 %程小さい．これは中間層のコイルは表層のコイルに比べて伝送距離が 50 mm 程長くなり結合係数 k が小さいからである．また，いずれのコイルも電流値はクリアしている．

以上の結果より，表層埋設コイルの方が中間層のコイルに比べて伝送距離を短くすることができ，伝送特性が有利である．



(a)最適負荷



(b)最大電力負荷

図-91 路面から受電コイルまでの距離 200 mm 一定のときの伝送特性

d)コイルサイズを変化させたケースレスコイルのアスファルト道路埋設

本節ではコイルサイズが800 mm, 1300 mm, 1700 mmのコイルをアスファルト道路に埋設してコイルサイズのみを変化させたときの特性悪化の低減が可能かどうかを検証する．図-92に埋設及び検証用コイルを示す．いずれのコイルも線間ピッチは12 mmで巻数は6巻きと固定させ，リッツ線は素線径0.05 mmで素線数 10000本の厚さ0.5 mmのFEP被覆付きである．コイルは道路表面の表層 50 mm に埋設した.埋設方法は先行研究で提案されたMMA樹脂混合物をコイル周辺に流し込む手法を採用した．樹脂系舗装材はアスファルト舗装よりも高コストであるが，本研究ではコイルと舗装と一体化させ舗装強度の向上を目的として樹脂系舗装材を採用した．図-93に学内道路におけるコイル埋設実験の様子を示した．施工手順としては基層より下の層を舗装してから基層50 mm，中間層50 mm，表層50 mmの順にアスファルト層を施工した．その後，図-94のようにコイルをMMA樹脂混合物で施工するための空間を確保するためにコイルサイズ程の表層50 mmを撤去した．撤去後, MMA樹脂混合物を30 mm敷設してその上にコイルを設置して，コイル上10 mmをMMA樹脂混合物で埋設した．内部抵抗値R及びQ値の測定結果を図-95，伝送効率ηと出力電力P_{out}の測定結果を図-96に示す．測定結果よりコイルのアスファルト道路埋設前後を比較するとコイルサイズ800 mmのときコイルの内部抵抗値Rは1.69倍増加した．サイズ1300 mmのときは2.16倍増加してサイズ1700 mmの時は2.78 倍の増加となった.図95(b)より，コイルのアスファルト道路埋設前後を比較するとコイルサイズ800 mmのときコイルのQ値は 39%減少した.サイズ1300 mmのときは54%減少してサイズ1700 mmのときは64%減少した．よって，コイルサイズが小さいほどコイルの特性悪化が小さく，アスファルト道路環境下においても本研究で提案したコイルパラメータ変化のみで特性悪化の低減に成功した．

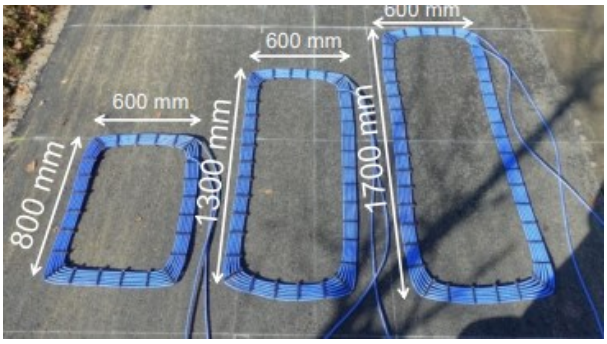


図-92 検証用コイル

(a)MMA樹脂混合物によるコイル埋設 (b)埋設後

図-93 コイル埋設状況

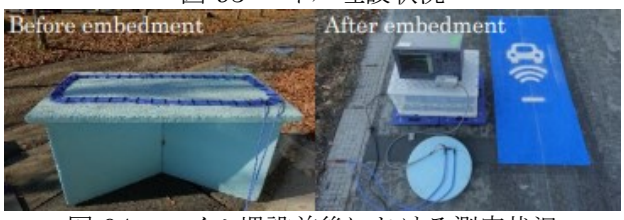
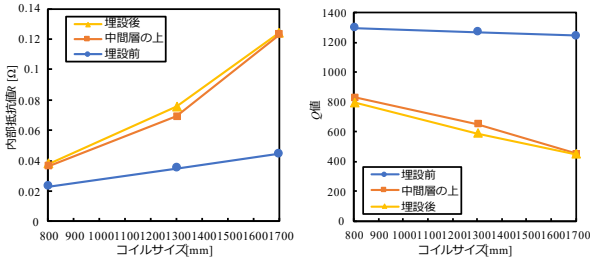


図-94 コイル埋設前後における測定状況



(a)内部抵抗値R (b)Q値

図-95 アスファルト埋設後における抵抗値とQ値

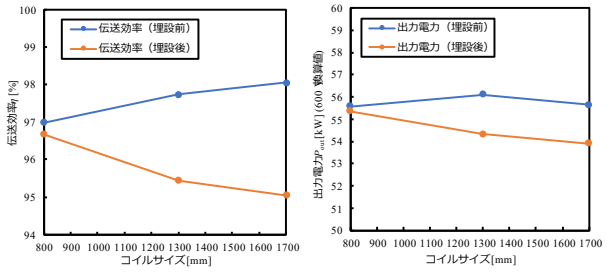


図-96 アスファルト埋設後における伝送特性

e)まとめ

電気的特性は主に効率と電力（600V 換算値）の特性で評価を行なう．2022 年度の成果を簡単に述べると，2021 年度は効率 96.5%，電力 22kW であった．2022 年度は 96.8%，55.6kW まで向上した．また，アスファルトと水の影響を受けにくいコイル設計に成功した．

4．1．5　空気中でのコイルの発熱・放熱特性の評価

走行中給電は交流による電磁誘導を利用した方式であるが，十分な発熱・放熱特性を検証するためには大電流を流す必要がある．しかし，交流で大電力を流すと外部に漏れだす磁界が大きくなり電波法で示された規制値以上になることが想定される．また，温度計測に使用した熱電対は金属導体で構成されたセンサであり，交流磁場により熱電対自体が発熱し精確な温度計測ができないことが懸念されるため，本測定では直流電流による発熱特性・放熱特性を検証した．

本測定では伝送距離200 mm，受電側を最適効率負荷に設定したときの負荷電力が10 kWのとき，送電コイルの内部抵抗で消費された損失を回路シミュレーションで計算し，その計算結果をもとに検証した．ここで，シミュレーションに用いた回路を図-97に示す．送電コイル・受電コイルの内部抵抗値及びインダクタンスは実測結果を用いており，負荷電力が10 kWのとき送電コイルで消費される電力は120 Wであった．そのため，送電コイルで120W消費するように直流電流を流したときの空気中での発熱特性・放熱特性を検証した．

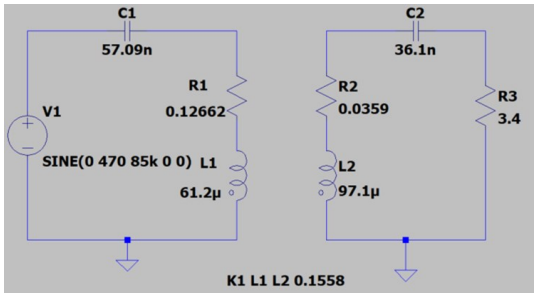
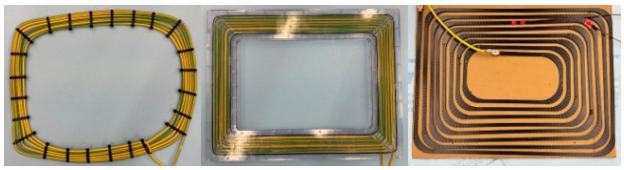


図-97.　シミュレーション回路

a)熱測定に使用したコイル

熱測定に使用したコイルと熱電対の位置を図-98に示す．また，各コイルのパラメータを表-15 に示す．測定にはリッツ線で作成したケースレスコイルとケースコイル，銅で形成されたエッジワイズコイルを使用した．熱電対はコイル直線部とコイルの角部分の熱分布を比較するために 2 箇所に熱電対を配置した．また，ケースコイルについてはケース上面，ケース内，ケース下面における直線部分と角に熱電対を配置した．また，エッジワイズコイルについてはさらに表面積を大きくするためにコイル四方の角に穴をあけ杭を打ち込み放熱特性を検証した．杭を打ち込んだエッジワイズコイルを図-99 に示す．これらのコイルは型枠実験で使用し，埋設後の発熱及び放熱特性と比較するために空気中での計測を実施した．



(a)ケースレスコイル(b)ケースコイル(c)エッジワイズコイル

図-98 熱測定に使用したコイル

表-15 熱測定用コイルのパラメータ

	ケースレスコイル	ケースコイル	エッジワイズコイル
コイルサイズ	600×800 mm	600×800 mm	600×800 mm
ケースサイズ	-	660×860×30 mm	-
リッツ線	素線数 2,500 本 素線径 0.1 mm	素線数 2,500 本 素線径 0.1 mm	単線
導体外径 d	7.85 mm	7.85 mm	横幅：13 mm, 厚み：2 mm
巻数 n	6	6	8
線間ピッチ p	12 mm	12 mm	28 mm

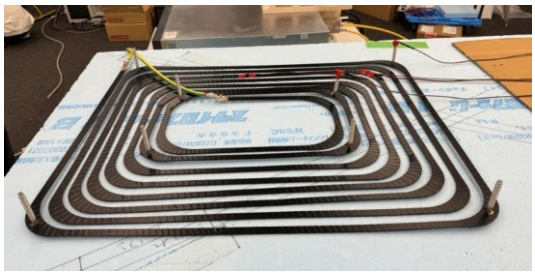


図-99 杭を打ち込んだエッジワイズコイル

b)空気中での熱特性の測定結果

測定風景を図100に示す．直流電流を流したときの温度について東京測期株式会社のデータロガー（TDS-540）を用いて1分毎に自動記録した．

図-100.　測定風景（空気中の熱測定）

・ケースレスコイル

ケースレスコイルの測定結果を図-101 に示す．測定前のコイル表面の温度は 22℃であり，コイルでの消費電力を 120 W にするために直流電流を 80 A 流し，定常状態になるまで測定を行った．結果として，直線部分では最大で 51.5℃，角部分では最大で 46.8℃まで上昇した．これは直線部分の方が線間距離が小さく，熱が集中したことが要因だと考えられる．また，完全に放熱するまで約 50 分経過していることが確認できた．

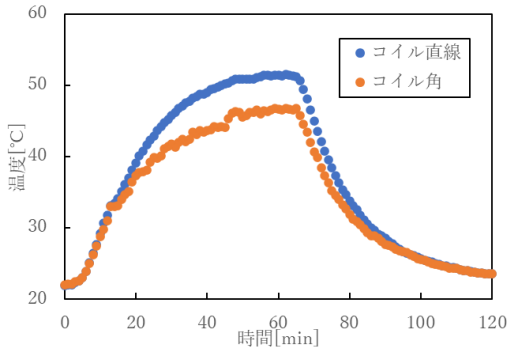


図-101 ケースレスコイルの発熱・放熱特性(空気中)

・ケースコイル

ケースコイルの測定結果を図-102に示す．測定前のコイル表面の温度は22.7~22.9℃であり，コイルでの消費電力を120 Wにするために直流電流を82.6 A流し，定常状態になるまで測定を行った．結果として，ケース上面直線部分では最大で57.8℃，ケース上面角部分では最大で57.3℃，ケース内直線部分では最大で74.2℃，ケース上面角部分では最大で74.3℃，ケース下面直線部分では最大で67.9℃，ケース下面角部分では最大で67.7℃まで上昇した．ケースレスコイルと比較して温度の上昇値が大きいことが確認できた．これはケース内が密閉空間となっており，放熱しにくいことから温度上昇したと考えられる．また，ケース上面より下面の方が温度が高くなった要因としては図100からもわかるようにスタイロフォーム上で計測したため放熱しにくかったことと考えられる．放熱特性についてはケースレスコイルよりも悪く，完全に放熱するまでに約230分を要している．

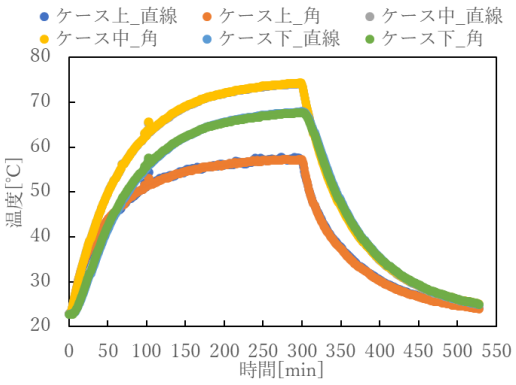


図-102 ケースコイルの発熱・放熱特性(空気中)

・エッジワイズコイル

エッジワイズコイルの測定結果を図-103 に示す．測定前のコイル表面の温度は 22.3~22.5℃であり，コイルでの消費電力を 120 W にするために直流電流を 91.2 A 流し，定常状態になるまで測定を行った．結果として，直線部分では最大で 38 ℃，角の外側部分では最大で 33.7 ℃，4 巻き目の角部分では最大で 34.9 ℃，角の内側部分では最大で 35.7 ℃まで上昇した．リッツ線を用いて作成したコイルと比較して，上昇温度が小さいことが確認できた．また，約 50 分程度で完全に放熱しきっているため放熱特性も優れていることが確認できた．

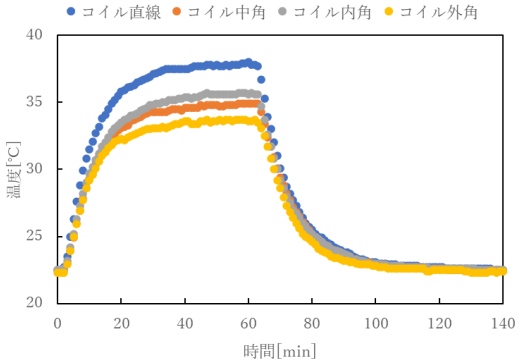


図-103 エッジワイズコイルの発熱・放熱特性(空気中)

・エッジワイズコイル（杭打ち）

杭を打ち込んだエッジワイズコイルの測定結果を図-104 に示す．測定前のコイル表面の温度は 22.7~22.8℃であり，コイルでの消費電力を 120 W にするために直流電流を 88.6 A 流し，定常状態になるまで測定を行った．結果として，直線部分では最大で 37.9 ℃，角の外側部分では最大で 33.3 ℃，4 巻き目の角部分では最大で 35.0 ℃，角の内側部分では最大で 33.0 ℃まで上昇した．杭を打ち込んだ内側と外側の角部分については杭がない場合に対してそれぞれ 2.7 ℃，0.4 ℃の温度上昇を抑制できていることが確認できたため，杭の有効性が確認できた．さらに熱伝導率が高い杭を打ち込むことで更なる温度上昇の抑制効果が確認できると考える．

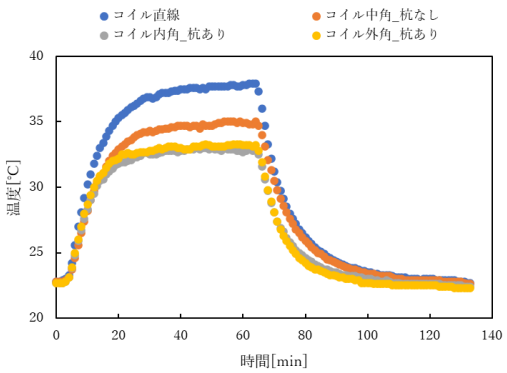


図-104 エッジワイズコイル(杭)の発熱・放熱特性(空気中)

4．1．6　2023年度型枠実験

図-105 に型枠設置後の様子を示した．型枠実験とは木枠にアスファルトを敷設し，そこにコイルを埋設し簡易的な道路環境下を模擬した実験である．2023 年度の型枠実験では今年度提案したエッジワイズコイルの埋設前後での特性比較，埋設後における発熱特性，漏洩磁界の評価を目的として実施した．

型枠実験の検証項目を下記に示す．

① 埋設時の発熱・放熱特性の比較

各コイルのアスファルト舗装埋設時の発熱・放熱特性を計測し，6.1.2 章で示した空気中の発熱・放熱特性と比較する．また．リッツ線コイルについてはケースコイル，ケースレスコイルともに中間層，表層に埋設しているため，中間層と表層での熱特性も比較を行う．

② 埋設時の漏洩磁界の評価

埋設時の漏洩磁界については本プロジェクトでは未検証であるため，ケースレスコイル，ケースコイル，エッジワイズコイルを用いて漏洩磁界を検証し，比較する．また，②と同様に中間層，表層の磁界比較も行う．

③ コイル四方に金属を配置し漏洩磁界抑制を検証

コイルを埋設した舗装表面に溝を作成し，銅，アルミ，鉄を配置することによる漏洩磁界抑制効果について検証する．

．舗装断面図を図-106 に示す．中間層，表層にそれぞれリッツ線で作成したケースレスコイルとケースコイルを埋設し，エッジワイズコイルを 3 つ表層に埋設した．Coil7 についてはエッジワイズコイルの角に金属製の杭を打ち込み放熱性について検証する．また，型枠実験では主に漏洩磁界，熱について検証するが，コイルの埋設深さの影響があるか，リッツ線コイルとエッジワイズコイルの特性の比較をするために図-107 のようなコイル埋設案を提案した．

図-105 2023年度型枠実験

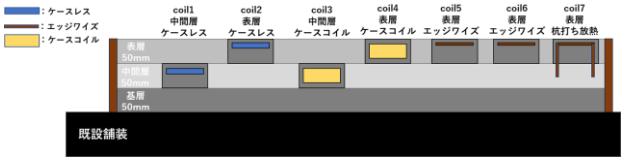


図-106 型枠実験舗装断面図

コイルの施工方法は2022年度のコイル埋設実験の結果よりMMA樹脂混合物を用いることでアスファルト直埋設よりも電気的特性，機械的強度ともに向上できることが確認されたため2023年度も同様の施工方法でコイルを埋設した．コイルの施工方法を図-107に示す．

(a)コイル下面樹脂敷き均し　(b)コイル設置

(c)コイル上面樹脂敷き均し

図-107 2023年型枠実験におけるコイル埋設の施工手順

a)コイル埋設前後の電気的特性の測定結果

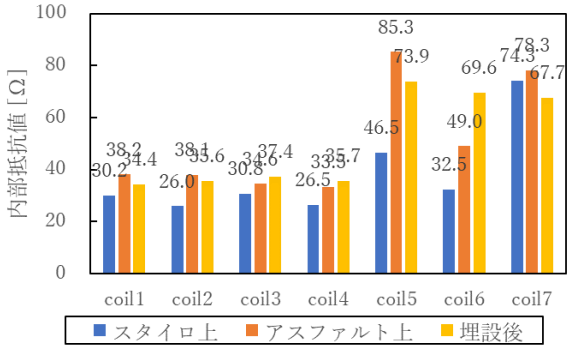
電気的特性の評価はコイル埋設前後のコイル特性及び伝送特性を計測し比較する．コイル特性の測定には keysight 社のインピーダンスアナライザ E4990A を使用し，コイル間の伝送特性は keysight 社のベクトルネットワークアナライザ

(VNA)E5061B を使用した．VNA を用いた伝送特性の測定は実際に電力を伝送しておらず，小信号を換算して伝送効率及び出力電力を計測するものであり，漏洩磁界や発熱特性の影響はないものである．

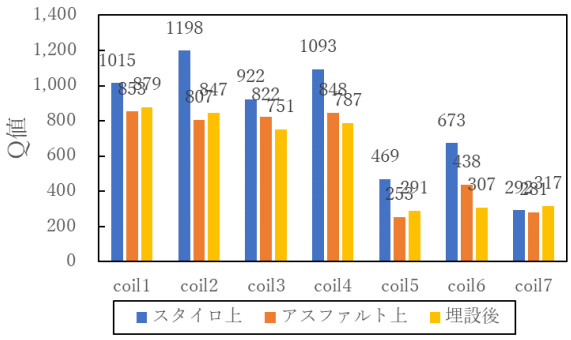
VNA の測定は 3 パターンの伝送距離で測定を行った．また，環境の影響を受けないように体積の 98% 以上が空気であるスタイロフォーム上と埋設後の測定結果を比較する．

測定結果を図108~図114に示す．図109~図114における最大電流負荷とは，入力電流をリッツ線の許容電流値である96 Aになるような負荷に設定したときの伝送効率及び出力電力である．

図108より，エッジワイズコイルの方がリッツ線コイルよりも内部抵抗値が高く，Q値が低いことがわかる．その理由としてエッジワイズコイルはリッツ線の表皮効果による抵抗増大の対策を行っていないためであり，交流抵抗が大きくなることは明確である．図108~図114より，埋設後における最大効率はリッツ線コイルは98.3 %であるのに対しエッジワイズコイルは97.4 %であるため，エッジワイズコイルの方が伝送効率が低下していることが読み取れるが大きな差異がないことがわかる．エッジワイズコイルはリッツ線よりも製作が容易かつ安価であることから社会実装することを考慮すると十分なメリットを得ることができると考える．最大電流負荷においてはどのコイルにおいても出力電力が50 kWを超えていることからどのコイルにおいても大電力でワイヤレス電力伝送が可能なコイルであると推察される．

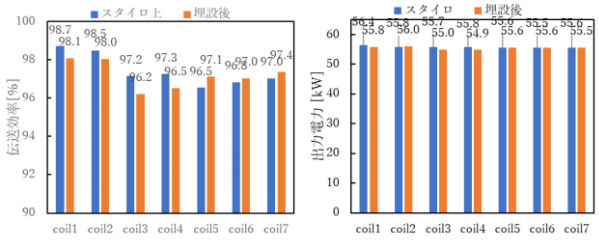


(a)内部抵抗値R



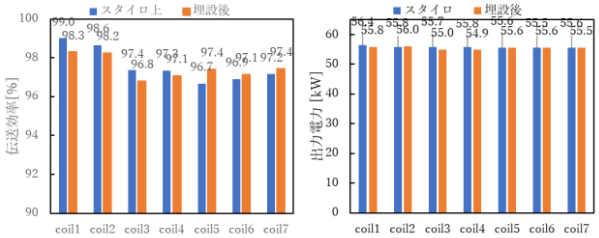
(b)Q値

図-108 コイル特性



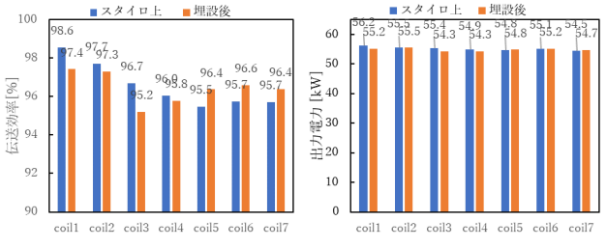
(a)伝送効率η　　(b)出力電力P_{out}

図-109 伝送距離200 mmにおける最大電流負荷



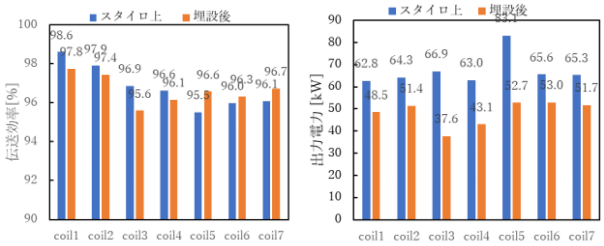
(a)伝送効率η　　(b)出力電力P_{out}

図-110 伝送距離200 mmにおける最大効率負荷



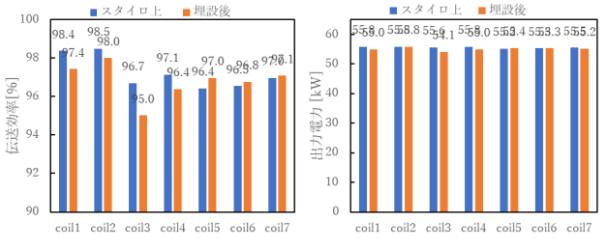
(a)伝送効率η　　(b)出力電力P_{out}

図-111 伝送距離250 mmにおける最大電流負荷



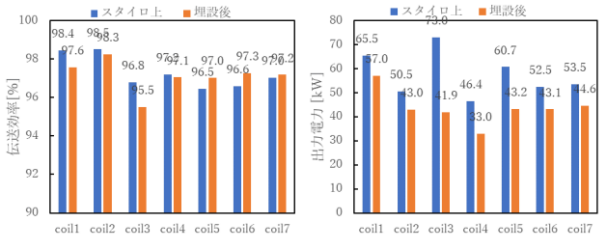
(a)伝送効率η　　(b)出力電力P_{out}

図-112 伝送距離250 mmにおける最大効率負荷



(a)伝送効率η　　(b)出力電力P_{out}

図-113 地表から200 mm一定における最大電流負荷



(a)伝送効率η　　(b)出力電力P_{out}

図-114 地表から200 mm一定における最大効率負荷

b)埋設時の発熱・放熱特性の検証

本節では 4.1.4 節で述べた空気中におけるコイルの発熱特性・放熱特性の検証と同様の検証を，アスファルト中に環境を変えて検証をしたことについて述べる．熱測定には熱電対を使用し，コイルに設置する熱電対位置は 6.1 章で述べたときと同様である．また，アスファルト中にも熱電対を配置していて，その時の概略図を以下の図 115 に示す．

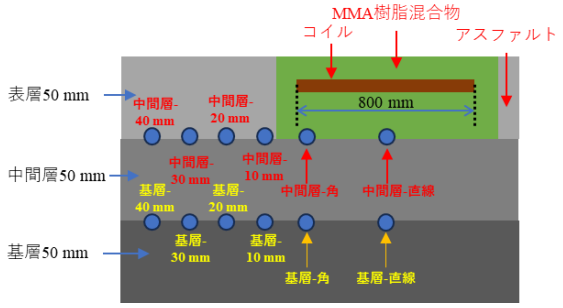


図-115 アスファルト中に設置する熱電対位置の概略図

本測定方法も 4.1.4 章と同様であり，コイルが 120 W の電力を消費するように直流電流を印加し，その時の発熱と放熱を計測した．熱測定したコイルの埋設状況を図 116 に示し，その結果を以下の図-117~図-123 に示す．

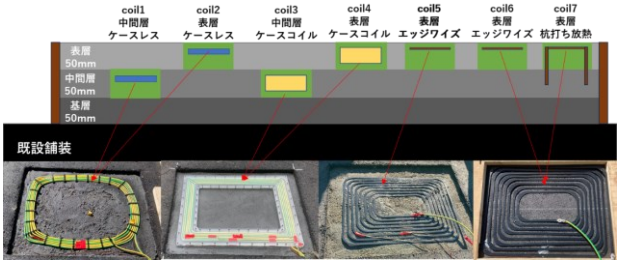


図-116. コイルの埋設状況

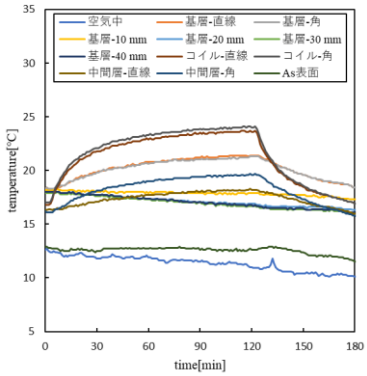


図-117. Coil 1 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

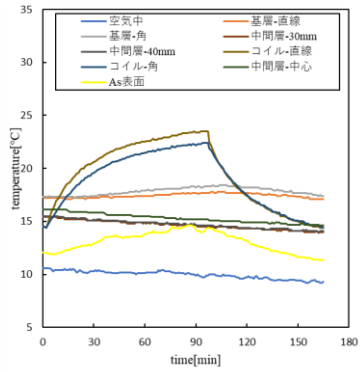


図-118. Coil 2 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

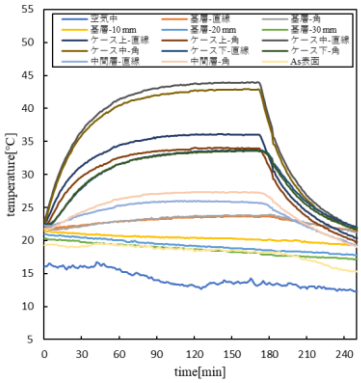


図-119. Coil 3 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

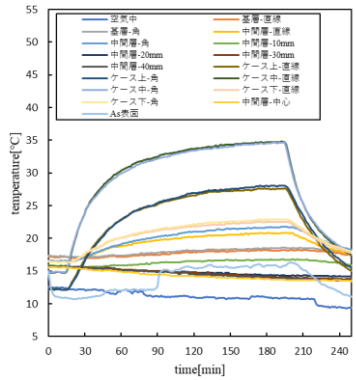


図-120. Coil 4 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

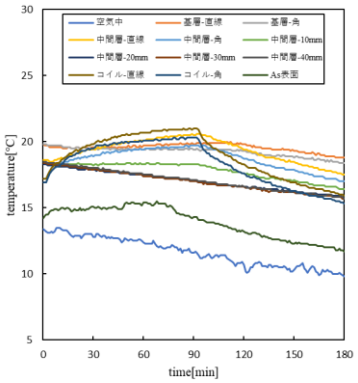


図-121.　Coil 5 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

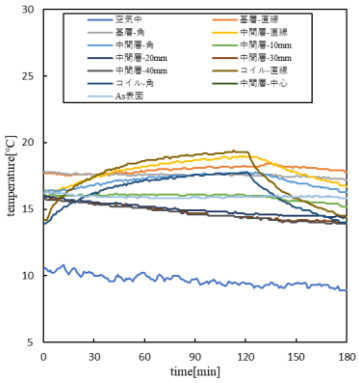


図-122.　Coil 6 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

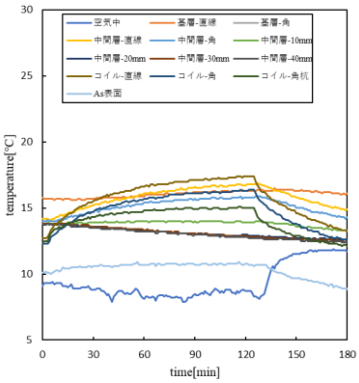


図-123.　Coil 7 のアスファルト中の発熱特性・放熱特性の測定結果

本実験において，施工途中で破損していて熱測定できなかった熱電対があり，Coil 2 の中間層-直線，中間層-角，中間層-10 mm，中間層-20 mm の熱電対および, Coil 7 の基層-角の熱電対で測定できなかった．発熱に関して，表層，中間層，コイル部分の各部分で発熱が大きかった部分を取り上げ, 表 16 に示す．

表-16 アスファルトの各層およびコイル部分の温度上昇値

	基層	中間層	コイル部分
Coil 1	直線 +3.1	角 +3.5	直線 +6.9
Coil 2	角 +1.1	角 +3.5	直線 +9.0
Coil 3	角 +2.2	角 +5.5	ケース中-直線 +20.9
Coil 4	角 +1.2	角 +5.2	ケース中-直線 +20.1
Coil 5	直線 +0.2	直線 +2.0	直線 +3.8
Coil 6	直線 +0.7	直線 +2.6	直線 +5.2
Coil 7	直線 +0.7	直線 +2.7	直線 +4.7

図-117~図-123 および表 16 から読み取れることとして，Coil 3 と Coil 4 のケースコイルはコイル部分で温度上昇値が 20 ℃以上と非常に高く，温度が定常状態になるまでにかかる時間も長いことが分かる．その理由としては，ケースコイルのケース内には空気を多量に含んでいて，空気は断熱性が高いためにコイルから発生する熱が籠ってしまって，温度が上昇しやすいことが推察される．また，ケースレスのリッツ線コイルとエッジワイズコイルを比較すると，エッジワイズコイルの方が温度上昇値は 1.7 ℃～5.2 ℃低いため放熱性に優れていることが分かる．Coil 6 と Coil 7 を比較することで杭による放熱性の違いを見ると，杭がある Coil 7 のコイルの方がコイル-直線部分で温度上昇値が 0.5 ℃低いため, 放熱性の向上は見られたが，今後は杭の素材を熱伝導率の高いものにすることで，放熱性能は今以上に向上すると推察される．以上の結果より，型枠実験の埋設コイル発熱を評価することができた．

c)埋設コイルの漏洩磁界の評価

走行中給電の課題の一つとして漏洩磁界があげられる．そこで，埋設コイルにおける漏洩磁界を評価した．型枠実験では計 7 つのコイルを用いておりケースレスコイル及びケースコイルを用いて中間層と表層での漏洩磁界の比較を行い，またリッツ線で作成したコイルとエッジワイズコイルの漏洩磁界を比較する．

回路は直列共振回路を用いており，負荷は 10 Ω の定抵抗を使用した．また，入力電流が 1 A, 2 A のときの伝送距離 200mm における漏洩磁界を測定した．測定風景を図-124,図 125 に示す．

電力伝送時の出力電力，伝送効率の測定結果と漏洩磁界の測定結果を図 126,図 127 に示す．測定結果よりリッツ線で作製したコイルよりもエッジワイズコイルの方が漏洩磁界が低いことが確認された．また，ケースレスコイルとケースコイルを比較するとケースコイルの方が漏洩磁界が小さいことが分かる. 中間層と表層の比較をするとほとんど差

異はないがわずかに表層の方が漏洩磁界が低いことが分かる．これらの測定結果より，埋設深さは表層が良く，ポリカーボネート製のコイルケースを用いることで漏洩磁界を低減することができ，エッジワイズコイルの方がリッツ線コイルよりも漏洩磁界が低いことが確認できた．

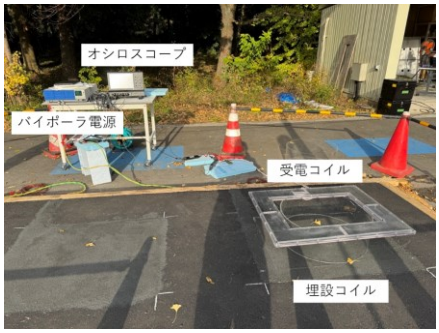
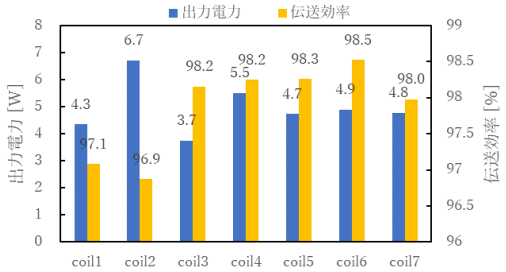
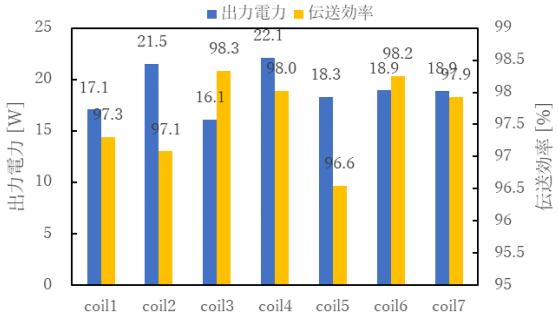


図-124 電力伝送の測定風景

図-125 漏洩磁界の測定風景

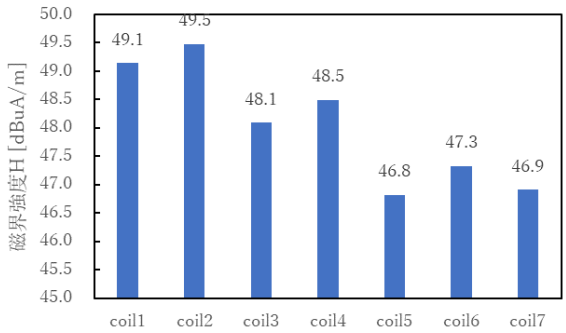


(a) 入力電流 1 A

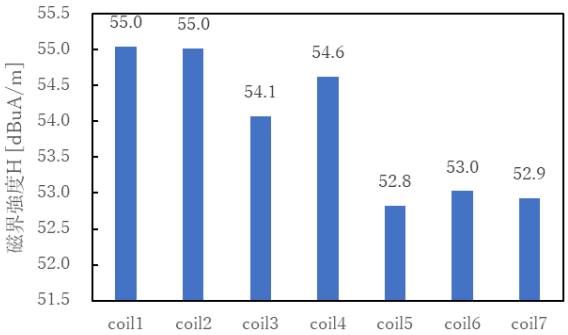


(b) 入力電流 2 A

図-126 伝送距離 200 mm のときの伝送効率η，出力電力P_{out}



(a)入力電力 1 A



(b)入力電力 2 A

図-127 伝送距離 200 mm のときの漏洩磁界

4．1．7　2023年度学内埋設実験

昨年度までの各種実験結果を踏まえ，今年度の埋設実験では下記事項を主たる目的とした．

・型枠実験での結果を踏まえた実施工想定の検証

・コイルの機械的特性評価

本施工と合わせて，2021 年度 FS 研究において埋設したコイルの取出し・観察を実施する．施工位置の詳細位置を図-128 に示す．

表-17 に学内埋設実験におけるコイル条件一覧を示す．2022 年度の結果より表層に埋設することで伝送距離が小さくなり，メンテナンス性もよくなることから 2023 年度はすべてのコイルにおいて表層に埋設した．

検証内容は下記の通りである．

①オープン型コイルの大電力設計(coil1)

②DD 型コイルの埋設(coil2)

③コイル埋設の再現性検証(coil8, coil9, coil10)

④フェライトの直接埋設(coil11, coil13)

⑤ケースコイル面一施工(coil4)

⑥光ファイバセンサ(FBI-Gause)を用いた埋設コイルの熱特性の検証(coil3, coil5, coil13)

⑦エッジワイズコイルの電気的特性と機械的強度の両立(coil5, coil12, coil13)

である．

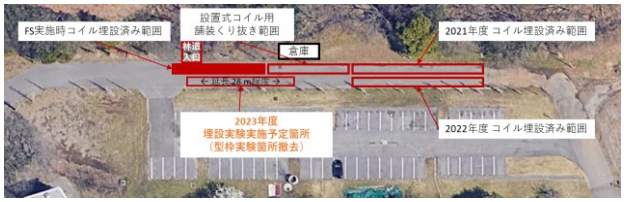


図-128.　施工位置詳細

a)埋設実験用コイル

図-129 に学内埋設実験用コイル，図-130 に舗装断面図を示す．埋設コイルは 13 個でショート型ケースレスコイルが 6 つ，ショート型ケースコイルが 2 つ，オープン型ケースコイルが 1 つ，DD 型ケースコイル，エッジワイズコイルが 3 つである．コイルケース表面を研磨して，舗装材との接着性を良くする工夫を施している．コイル 1 はオープン型コイルの大電力設計である．2022 年度のコイル設計の際と同様に使用するリッツ線をΦ5 mm，素線径 0.05 mm，素線数 4,000 本のリッツ線からΦ8 mm，素線径 0.1 mm，素線数 2,500 本のリッツ線に変更し，再設計することで大電流，大電圧に耐えることが可能になると推測できる．また，コイル 2 は昨年度検証していない DD 型ケースコイルである．DD 型コイルは構造上ショート型よりも漏洩磁界が低くなる傾向にあるため，2023 年度に使用するリッツ線を用いてコイル作成し，コイル特性を比較する．コイル 3 はショート型ケースコイルである．昨年度と同様の設計であるため，昨年度のコイル特性と比較を行う．コイル 4 も同様にショート型ケースコイルであるが，表層面一に埋設しており，コイルケース内の結露などを目視できるようにしている．コイル 5 については 1700×600 mm のエッジワイズコイル埋設しており，コイルの電気的特性と機械的強度の両立について検証する．コイル 6 はショート型のケースレスコイルであり，リード線を巻線の向きと逆向きにコイル 7 を囲うように配線することで漏洩磁界を抑制する手法を検証する．コイル 8, 9, 10 は 800×600 mm のケースレスコイルであり，コイル埋設の再現性を検証する．コイル 11 も同様に 800×600 mm であるがコイル下側にフェライトを直接敷き，フェライトの耐久性及びコイルの電気的特性を検証する．コイル 12 は 800×600 mm のエッジワイズコイルであり，コイル 5 と同様に機械的強度と電気的特性を検証する．コイル 13 はコイル 11 と同様にフェライトをコイル下に直接敷き，フェライトの耐久性及び効果を検証する．

図-129 2023年度学内埋設コイル

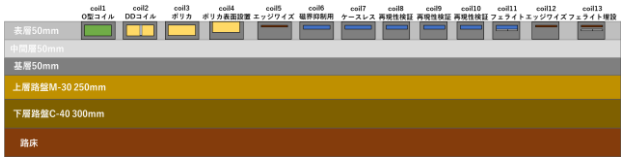


図-130 2023年度学内埋設舗装断面図

表-17 学内埋設実験用コイルと受電コイルの仕様

	DD 型コイル	S 型コイル	エッジワイズコイル	O 型コイル	受電コイル
コイルサイズ	600×1700 mm	600×1700 mm 600×800 mm	600×1700 mm 600×800 mm	600×1700 mm	600×800 mm
巻数 n	8	6	8	15	7
線間ピッチ p	12 mm	12 mm	28 mm	2 mm	11 mm
導体外径 d	8 mm	8 mm	幅: 13 mm、厚み: 2 mm	8 mm	7.85 mm

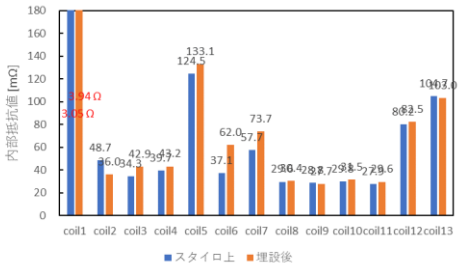
学内埋設実験ではN6交通相当の強度の道路舗装にするため路床から改良を行った。コイル埋設手順を図131に示す。まず、既設舗装を路床まで掘り起こし、路床、路盤を敷きならした上にアスファルトを基層、中間層、表層の3層敷設した。また、コイル埋設箇所をカッターで掘り起こし、MMA樹脂混合物を用いてコイルを埋設して施工完了である。

図-131 アスファルト舗装内コイル埋設手順

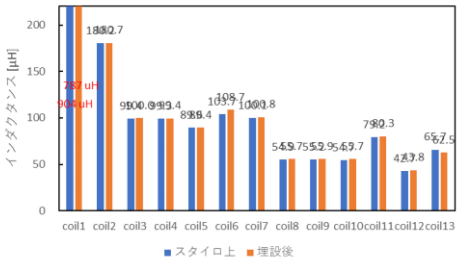
b)電気的特性の評価

埋設コイルにおけるコイル特性及び伝送特性を測定した。コイル特性はインステック社のLCR-6100を用いて測定し、伝送特性はkeysight社のVNAを用いて測定を行った。また、3パターンの伝送距離における伝送特性を測定した。また、コイル特性の測定結果を図-132、伝送距離のイメージ図を図-133に示す。伝送特性を図-134に示す。図-132より、内部抵抗値についてはエッジワイズコイルよりもリッツ線で作成したコイルの方が小さいことが分かる。また、コイル1以外はコイルの線路長が短いことから埋設前後でコイル特性の大きな変化見られなかった。コイル1は埋設することで0.9 Ω内部抵抗値が上昇し、120 uHインダクタンスが低下していることが確認できる。コイル11及びコイル13についてはコイル下側にフェライトを埋設していることからフェライトがないコイルに対してインダクタンスが大きいことが変わる。伝送特性については伝送距離200 mmのとき、コイル1とコイル2以外のコイルにおいて埋設後で伝送効率95 %以上、出力電力53 kW以上であることが確認できる。コイル 1 については最大効率負荷に設定することで最大で94.1 %の効率を達成することができたが、出力電力が2.7 kWと小さい。これは線路長が長いため送電コイルの内部抵抗値による損失が大きいことと入力電流が小さいことによる差であると考えられる。また、エッジワイズコイルに

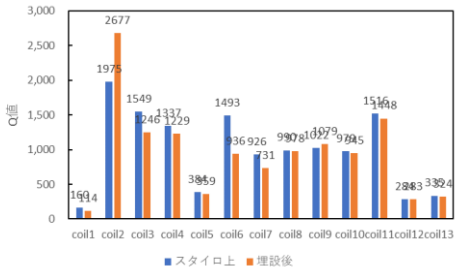
ついてはリッツ線のコイルよりは伝送効率が低くなっているが、出力電力は50 kW以上と急速充電できるコイル性能であるため、コストを考慮した場合、エッジワイズコイルで十分であると考えられる。



(a)内部抵抗値R



(b)インダクタンスL



(c)Q値

図-132 学内埋設コイルのコイル特性

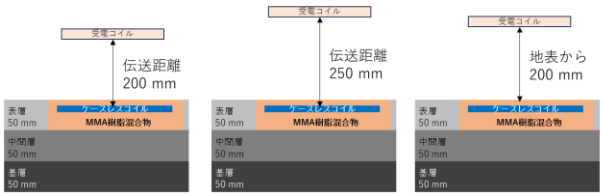
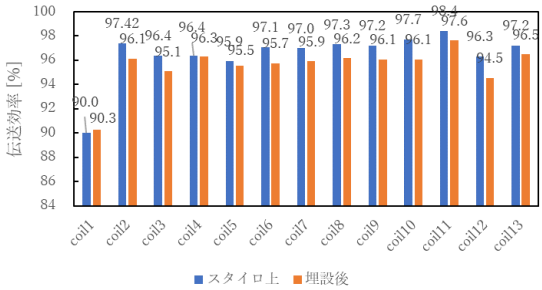
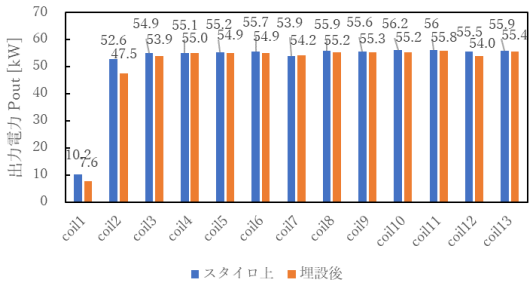


図-133 伝送距離（表層埋設）

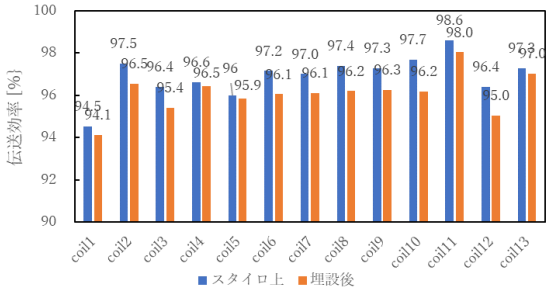


(ⅰ)伝送効率η

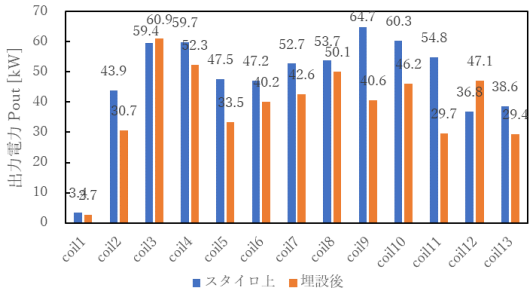


(ⅱ)出力電力P_{out}

(a)最大電流負荷



(ⅰ)伝送効率η



(ⅱ)出力電力P_{out}

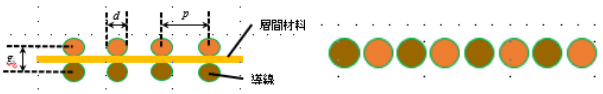
(b)最大効率負荷

図-134 学内埋設コイルの伝送特性(200 mm)

c)1層オープン型コイルの提案

埋設した2層オープン型コイルは効率90%のとき、最大電力7.9 kWとショート型コイルと比較して得られる電力は小さいことが確認された。2層オープン型コイルは構造上、上下と左右両方に銅線が存在するため近接効果の影響が大きくなり、内部抵抗値が上昇してしまう。また、今年度作製したオープン型コイルはコイルの形状維持と層間材料として絶縁粘土を使用したため、層間材料がない場合に比べて損失が大きくなると考えられる。そこで、層間ギャップに依存しない1層オープン型コイルを提案する。に1層オープン型コイルと2層オープン型コイルの構造を図-135に示す。図-136より1層オープン型コイルは1層目と2層目を交互に巻く構造となっており、層間ギャップに依存しないことから、学内埋設実験でも埋設したショート型ケースレスコイルと同様の方法で1層ケースレスオープン型コイル作製した。図136に作成した1層オープン型コイルを示す。また、表、図137にオープンコイルのコイル特性及び伝送特性を示す。測定にはインピーダンスアナライザとVNAを使用しており、伝送特性は換算値である。測定結果より、スタイロ上では効率90%のとき14.5

kW、アスファルト上に置いた時に12.3 kWを達成していることが確認された。この結果より、1層型オープン型コイルはプロジェクトの目標値である埋設後における効率90 %、出力電力10 kWを達成できることが期待される。



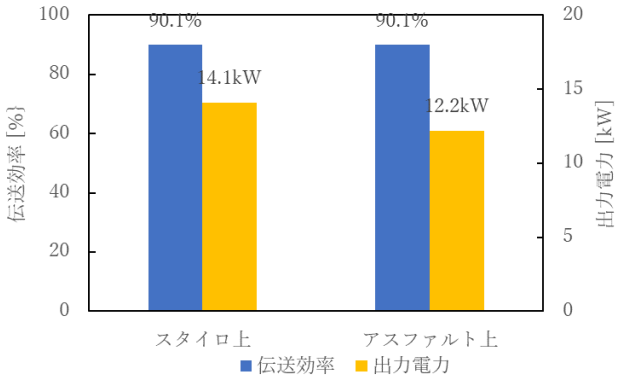
(a) 2 層オープン型コイル (b) 1 層オープン型コイル

図-135. 2 層オープン型コイルと 1 層オープン型コイルの構造

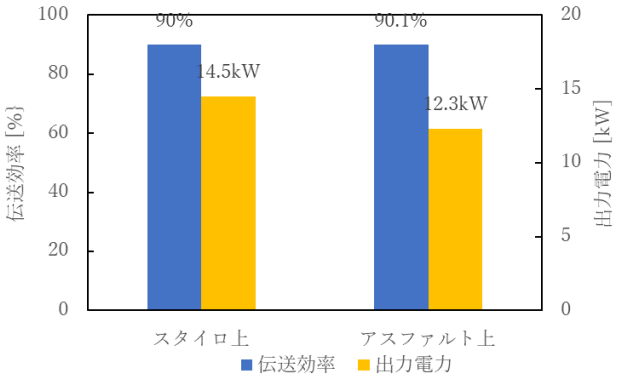
図-136. 作製した 1 層オープン型コイル

表-18. 1 層オープン型コイルのコイル特性

	スタイロ上	アスファルト上
共振周波数 [kHz]	84.97	84.23
内部抵抗値［Ω］	2.03	2.24
インダクタンス [mH]	1.21	1.19
Q 値	318	280



(a) 伝送距離 200 mm



(b) 伝送距離 250 mm

図-137. 1 層オープン型コイルの伝送特性

4. 1. 8 繰り返し載荷試験によるコイル等を埋設した舗装の耐久性の評価

繰り返し載荷試験の目的は、給電用コイルおよび舗装の強度や耐久性の検証、走行試験前後における電気的特性及び機械的特性の変化の検証である。土木研究所の舗装走行実験施設内円形走路（以下、円形走路）において荷重車を走行させて繰り返し載荷試験を実施した。舗装走行実験施設における実験箇所を図-138 に示す。

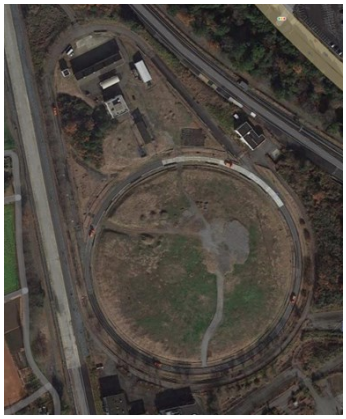
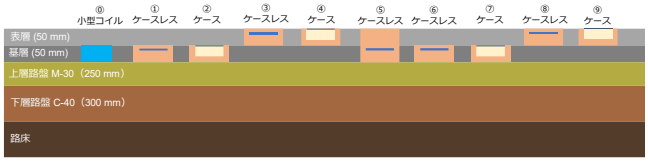


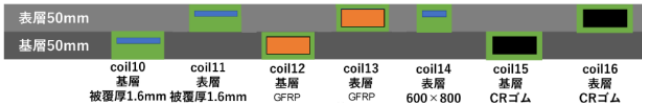
図-138 舗装走行実験施設の形状とコイル埋設試験の位置

コイル 1～9 の埋設方法は 2021 年度の学内埋設実験において電気特性と機械特性の両立を達成した MMA 樹脂混合物によるコイル埋設方法である。コイル 5 のみ基層及び表層全面を MMA 樹脂混合物で施工することにより、基層は MMA 樹脂混合物で表層がアスファルト混合物の舗装構造との比較検討を行った。2023 年度は、改善したケースレスコイル、ガラス繊維強化プラスチック（GFRP）を用いたケースコイル、クロロプレンゴム（CR ゴム）を用いたコイル、コイルサイズを 600×800 mm に縮小したコイルを基層と表層に設置して耐久性の評価を行った。図 139(a)より、2022 年度のコイル 1 ～4 は、試験車両の車輪間の BWP（Between Wheel Path）に埋設し、コイル直上を車輪が通過しない場合のコイル及び舗装耐久性を評価する。コイル 5～9 は車輪走行位置の IWP (Inner Wheel Path)に埋設し、コイル直上を車輪が通過する場合のコイル及び舗装耐久性を

評価した。以上より、ケースコイル及びケースレスコイル、基層及び表層埋設、BWP 及び IWP 埋設による合計 9 パターンによる比較検討を行い、電気特性及び機械特性に優れたコイル、埋設深さ、埋設位置の評価を行った。2023 年度は、OWP の 5 箇所と IWP の過年度のコイルを撤去した 2 箇所の計 7 箇所にコイルを埋設し耐久性の評価を行った。



(a)　2022 年度埋設断面図



(b)　2023 年度埋設断面図

図-139.　土木研究所でのコイル埋設実験における舗装断面図

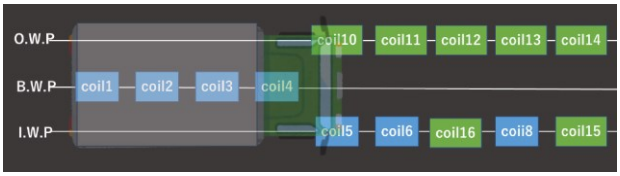


図-140 2023 年度埋設平面図

a)土木研究所舗装走行実験施設に埋設したコイル

図-140 に土木研究所舗装走行実験施設に埋設したコイルを示す。表-15 に土木研究所埋設実験用コイルと受電コイルの仕様を示す。

2022 年度に埋設したコイルは、型枠実験用コイルとは異なり、素線径 0.05 mm,素線数 10,000 本のリッツ線を使用することで、大型車にも対応した 50 kW 級の大電力を達成できる設計である。被覆は厚さ 0.5 mm のフッ素樹脂（FEP）素材である。送受電コイルの仕様は学内埋設実験と同様である。

2023 年度は、伝送効率及び耐久性の検証のため、素線を 0.1 mm, 2,500 本のリッツ線を使用し、ケースレスコイルについては FEP 被覆 1.6 mm と厚くし、舗装材の影響などを確認する目的とした。加えて伝送効率の違いを確認するため、延長方向を小さくした 600×800 mm のケースレスコイル（受電コイルと同サイズ）を埋設した。また、2022 年度はポリカーボネート製のコイルケースを用いたが、アスファルト及び MMA 樹脂混合物と線膨張率が近い GFRP 製のケースコイルと 2022 年度に学内埋設実験で埋設した CR ゴム製ケースコイルを埋設した。

(a)2022年度使用コイル

(b)2023年度使用コイル

図-141　土木研究所埋設実験用コイル

表-15　土木研埋設実験用コイルと受電コイルの仕様

	S 型ケースコイル CR ゴムコイル	S 型ケースレスコイル	GFRP ケースコイル	受電コイル
コイルサイズ	600×1,700 mm	600×1,700 mm 600×800 mm	600×1,700 mm	600×800 mm
コイルケースサイズ	660×1,760×30 mm	-	800×2,000 mm	670×870×27 mm
巻数 n	6	6	6	7
線間ピッチ p	12 mm	12 mm	12 mm	11 mm
導体外径 d	7.85 mm	7.85 mm	7.85 mm	7.85 mm
線路長 l	31.5 m	31.5 m	31.5 m	51.2 m

b)走行載荷試験前のおける2022年度コイルの電気的特性の評価

図-142 に埋設したコイルのインピーダンスアナライザ E4990A による測定状況を示す。また、コイルからのリード線が 3 m と短かったため、図-143 のように 7 m のリッツ線に圧着端子を取り付け、ボルトで接続して合計 10 m に延長した。図-144 にコイルのリード線 3 m のときの抵抗値 R と Q 値の測定結果を示す。また、に図-145 リード線の延長 40 m の測定結果を示す。全体的な傾向としてケースレスコイルとケースコイルを比較すると、ケースコイルの抵抗値 R はケースレスコイルよりも小さい結果となった。これは、ケースコイルはリッツ線がポリカーボネート製のコイルケースによって保護されており、舗装材から離隔されているため影響を低減できているためと考えられる。コイル 5 の基層から表層まで MMA 樹脂混合物で埋設したケースレスコイルは、表層からのアスファルト混合物による影響がないため、ケースコイルと同程度の抵抗値 R となった。図-145 のリード線 10 m の結果より、リード線 3 m

に比較して抵抗値 R が 1.5 倍以上増加した。リード線 7 m の抵抗値 R の測定値が約 20 mΩ であったため、リード線の延長による内部抵抗値の増加よりも、圧着端子同士をボルトで接続したことによる抵抗値の増大が支配的であると考えられる。

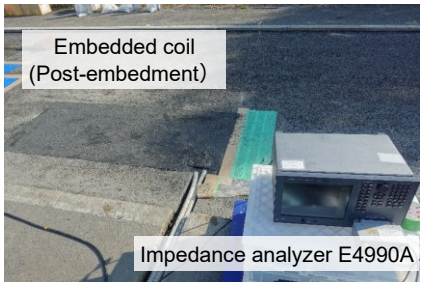


図-142.　インピーダンスアナライザによる測定状況

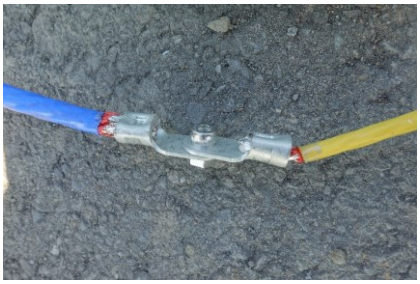


図-143 リード線の延長

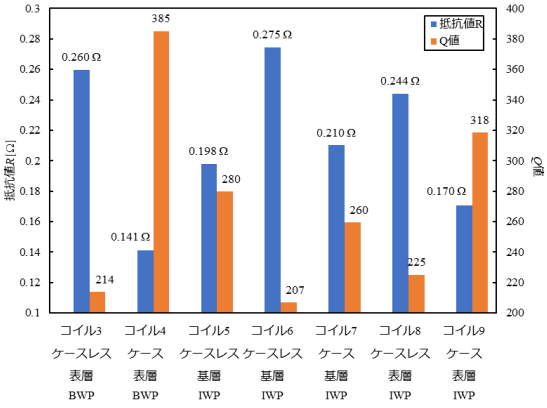


図-144 抵抗値RとQ値(リード線3 m)

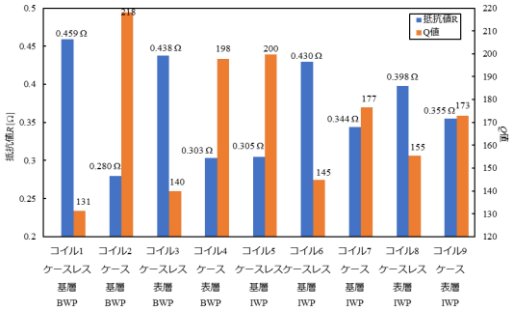


図-145 抵抗値RとQ値(リード線10 m)

図 146 にコイル埋設後における VNA の測定状況を示す。伝送距離は 200 mm で受電コイルは埋設コイルの中央に設置して評価した。入力電圧は 600 V (VNA 換算値）で、負荷は最大負荷である。図 147 にコイル埋設後における伝送効率 η と出力電力 P_{out} の測定結果を示す。測定日は 10 万輪の走行試験前のコイル埋設後から数日以内の測定である。リード線 3 m のときの結果はコイル 5～9 までであるが、いずれのコイルも埋設後は伝送効率 91 %以上で出力電力は 50 kW 以上の大電力を達成した。

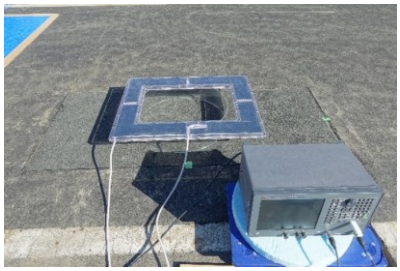


図-146.　コイル埋設後におけるVNAによる測定状況

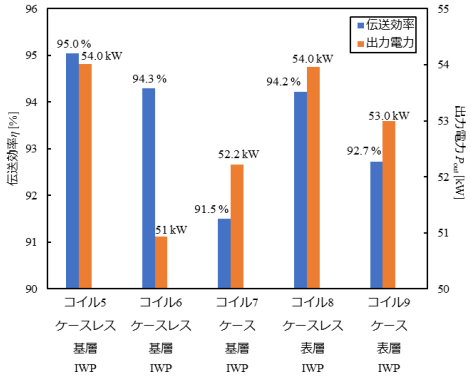
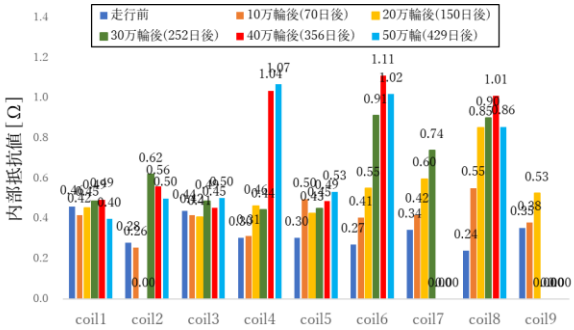


図-147- コイル埋設後におけるVNAによる伝送特性評価の結果（リード線3 m）

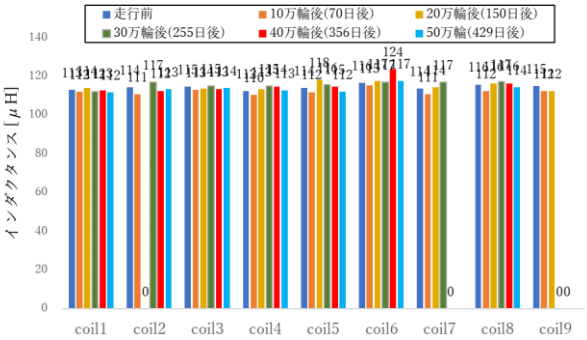
c)2022年度コイルの50万輪走行試験における特性変化

図 148 に 50 万輪走行試験前後におけるコイルの抵抗値 R、インダクタンス L、Q 値の特性変化を示す。走行試験前の測定は 2022 年 11 月 14 日に行い、10 万輪走行試験後の測定は 2023 年 1 月 23 日、20 万輪走行試験後の測定は 2023 年 3 月 14 日、30 万輪走行試験後の測定は 2023 年 7 月 24 日、40 万輪走行試験後の測定は 2023 年 10 月 30 日、50 万輪走行試験後の測定は 2024 年 1 月 11 日に行った。また、伝送特性を図-149 に示す。コイル 2 については測定用のリード線が断線したため 20 万輪走行試験後の測定が行えなかった。また、コイル 9 については 30 万輪、コイル 7 は 40 万輪の走行試験の最中にコイルケースを固定していたボルトが破断し、ケースの上下が分離したため車両が安全に走行できないと判断され撤去した。測定結果より、BWP に埋設したコイルはコイル 4 以外特性悪化していないことが確認できる。コイル 4 についてはケースコイルを舗装面一に埋設しており、コイルの上側には数 mm の樹脂しかないため、樹脂にひび割れが生じ、そのひび割れから水分が入ったことにより特性悪化したと考えられる。IWP に埋設したコイルについてはコイル 5 のみ走行試験による特性悪化がみられなかった。コイル 5 は基層から表層まで樹脂で施工しているため、コストはかかるが長期的にコイル特性を維持するためにはコイル 5 の施工方法が適していると考えられる。コイル 7、9 については車両走行によりボルトが破断し、コイルケースの上蓋と下蓋の隙間が生

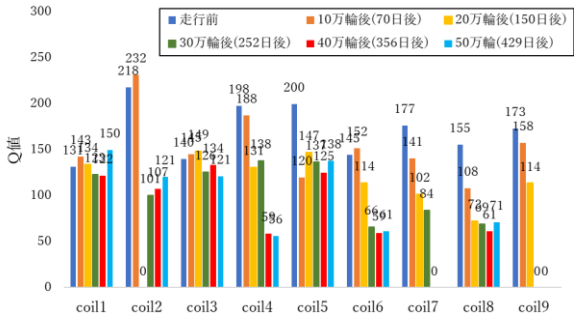
じることでリッツ線周辺に水分や舗装材の粉塵が入り込み特性悪化したと考察できる。コイル 6、8 については 50 万輪の走行により電気的特性は悪化したが、舗装としては安全に走行可能であったため、強度としては十分であると考えられる。また、電気的特性が悪化した要因の一つとして走行によってリッツ線の素線が断線し、コイルの内部抵抗値が上昇したと考えられる。以上より、コイルの埋設深さは少なくとも 10 mm 以上であることが望ましく、課題としてはコイルケースの構造及び固定方法の改善、ケースレスコイルの強度の向上があげられる。



(a)内部抵抗値R

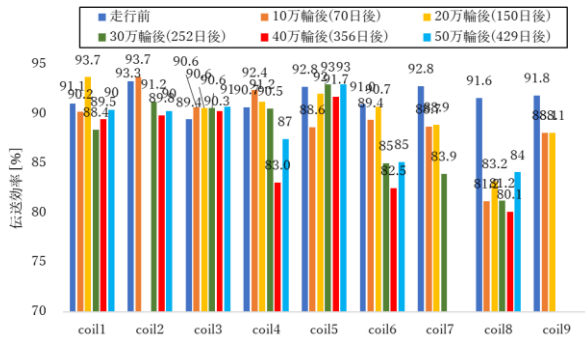


(b)インダクタンスL

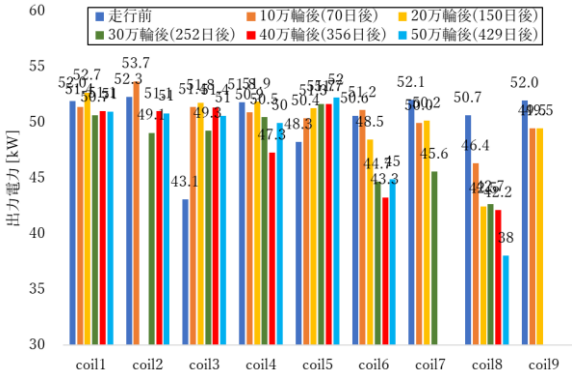


(c)Q値

図-148.　50 万輪走行試験前後におけるコイル特性



(a)伝送効率η

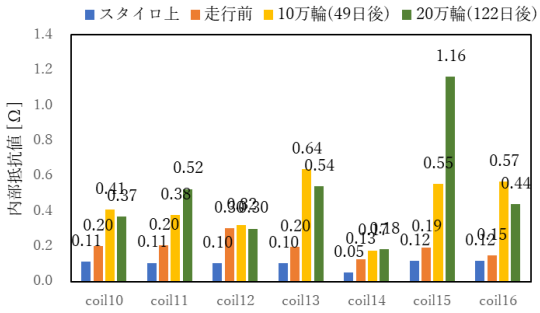


(b)出力電力P_{out}

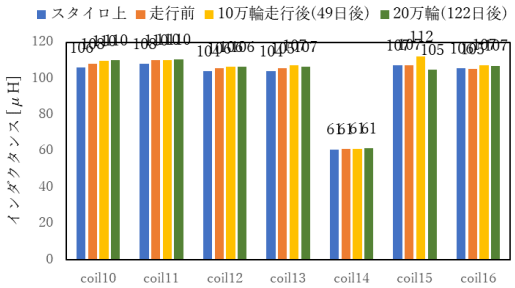
図-149 万輪走行試験前後における効率と電力（最大電流負荷、伝送距離 200mm）

d)2023年度コイルの20万輪走行試験における特性変化

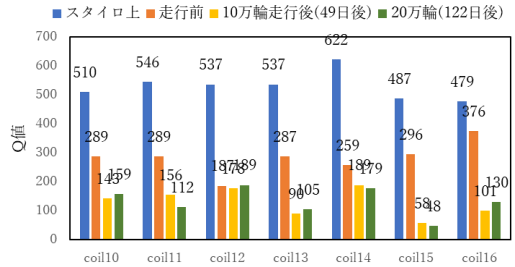
2023 年度に埋設したコイルにおいては 20 万輪の走行載荷試験を実施したためスタイロ上、走行前、10 万輪走行後、20 万輪走行後のコイル特性及び伝送特性を測定し、比較する。コイル特性を図-150、伝送特性を図-151 に示す。測定結果より、コイル 14 はほとんど特性変化しておらず、最も伝送特性が良いことがわかる。これはコイルの体積が小さく、アスファルト舗装内に埋設しても十分な強度を保つことができ、走行の影響を受けなかったと考察できる。コイル 10、11 はリッツ線の被覆を 0.5 mm から 1.6 mm に分厚くしたことにより 2022 年度よりは特性悪化を抑制できているが、10 万輪走行の時点で特性悪化しているため素線の断線によるものかひび割れからの水の侵入によるものかわからないため引き続き検証が必要であると考えられる。コイル 12 についてはコイル特性は大きく変化していないが、伝送特性が低下していることが確認できる。また、コイル 13 は走行により特性が変化しているため線膨張率がアスファルトに近い素材でコイルケースを作成してもコイルへの影響を抑制することは難しいが、舗装としての破損はないため機械的強度的には GFRP が良いと考えられる。コイルケースは素材より構造を重視するほうがよく、2 層のコイルケースではなく、一体成型にすることで舗装と一体化させ、水の侵入を抑制できると考える。



(a)内部抵抗値R

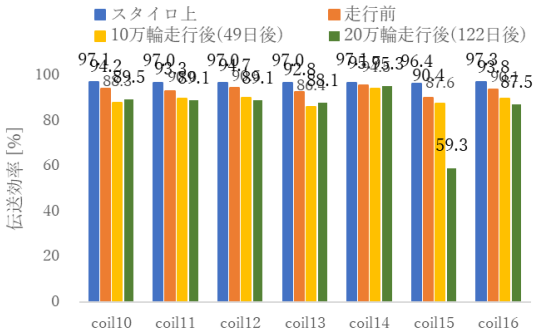


(b)インダクタンスL

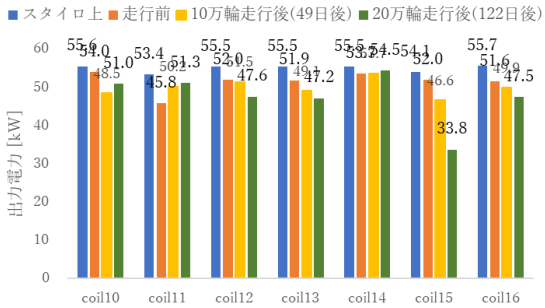


(c)Q値

図-150 2023 年度土木研究所コイルのコイル特性

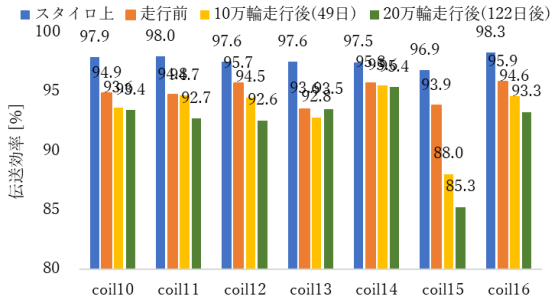


(ⅰ)伝送効率η

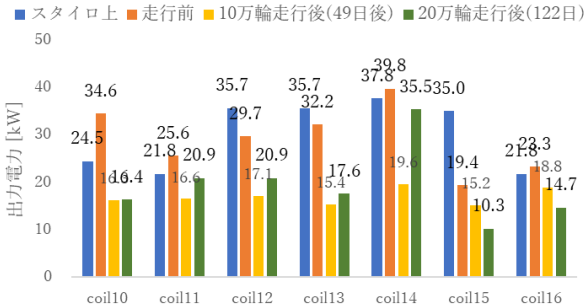


(ⅱ)出力電力P_{out}

(a)最大電流負荷



(ⅰ)伝送効率η



(ⅱ)出力電力P_{out}

(b)最大効率負荷

図-151 2023 年度土木研究所コイルの伝送特性（伝送距離 200 mm）

埋設深さは表層でも問題ない
BWPだと十分な強度を担保できる
コイルケースの構造上，ケース内に雨水が浸入しコイル特性が悪化するため，耐水性とコイルケースの強度が課題である．

e)土木研究所コイル埋設・走行載荷試験委おける電気的特性のまとめ

2022年度に埋設したコイルについては50万輪、2023年に埋設したコイルは20万輪の走行載荷試験を実施し、走行試験及び経時変化に対する電気的特性の評価を行った。道路舗装として最も安全性を高くするためにはコイルの体積を小さくすることが望ましいと考えられるため、ケースコイルよりケースレスコイルの方がコイル埋設に適していると考えられる。また、今年度提案したエッジワイズコイルについてはさらに体積が小さくなるため、更なる舗装強度の向上が期待できる。ケースコイルについては構造の再検討が必要であり、雨水の侵入が課題である。

4．2　舗装構造と埋設深さについて

舗装は下方に対して上方に剛性が高く，車両走行による摩耗やせん断に抵抗出来る材料を表層に使うことが一般的である．

荷重を負荷する車両が静止している場合には，その影響は下方に応力分散の形状となって分散するが，走行の場合には主応力分布が移動に伴い回転することになる．このため，舗装内部の表基層には連続的な応力波形(圧縮から引張りの回転，振動)が発生するため，表基層混合物の疲労抵抗性を検証することになる．

ここでは舗装体に，異なる素材の非接触給電用コイルを埋設するため，以降の条件ごとに検討をまとめる．

4．2．1　コイルケースの素材と有無の影響

コイルケース有無と表層埋設及び基層埋設の影響を比較するため，土木研究所の走行試験路に埋設したコイルケースの有無と車輪間(BWP)と車輪下(IWP)におけるひずみと許容載荷輪数の施工後と10万輪走行試験後の比較を図-152に示す．この結果，PC コイルケースに比べ，リッツ線を直接埋設し樹脂混合物で保護する構造の方が良い結果が得られている．また，基層では走行試験後に走行に応じた10万輪分の通過回数が低減するが，表層の結果では通過回数以上のダメージにより推定する残留載荷回数の低減が大きい．

車輪間のコイルケース有りの条件では表層の載荷による低減が少ないため，表層においてはコイルケース有りの方が給電コイルを保護できる．リッツ線の直接埋設では，表層の応力レベルでの載荷を考慮すると，基層埋設の方が応力やひずみの影響を受けにくく，走行に伴う許容載荷輪数の低減が少ない．以上のことから，コイルケース有りは表層，コイルケース無しは中間層や基層への埋設が良いと考えられる．

4．2．2　コイルの埋設深さの影響

埋設コイルの表面からの深さの影響は，コイルケースの種類や舗装との接着方法に依存すると考えられる．舗装構造体としての一体性を考慮すると，アスファルト混合物とコイルケースの接着性や隅角部の影響を考慮する必要がある．走行試験後のたわみの変化と許容載荷輪数の比較を図-153に示す．

走行載荷試験前と 10 万輪及び 20 万輪走行後のたわみ調査の結果では，車輪下(OWP)の結果より，樹脂接着した GFRP ケースでは走行後のたわみや許容載荷輪数の変化が少なく安定している．コイルケース無しは基層内の樹脂保護が最も良い結果で，表層では延長の短いリッツ線コイル(800x600 mm)の低減が少ない．表層埋設は応力の影響を受けやすいため，小さい形状の方がダメージを受けにくいことが明らかとなった．

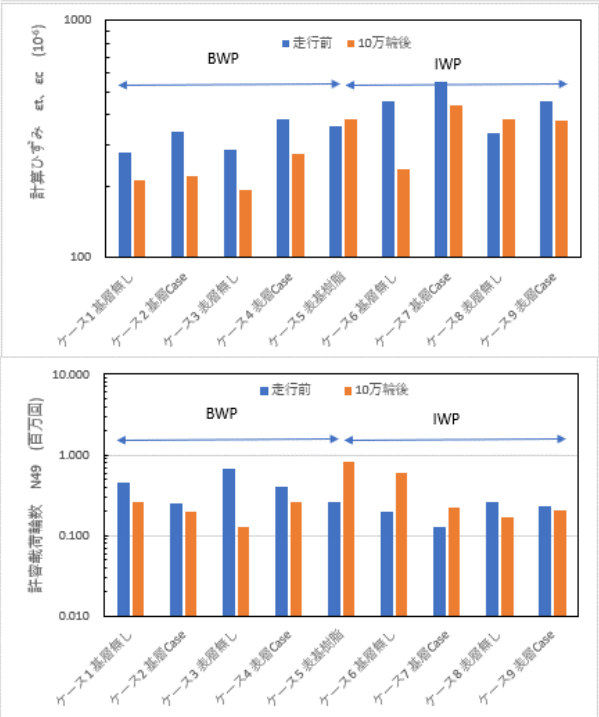


図-152　コイルケースの有無と走行位置によるひずみと許容載荷輪数

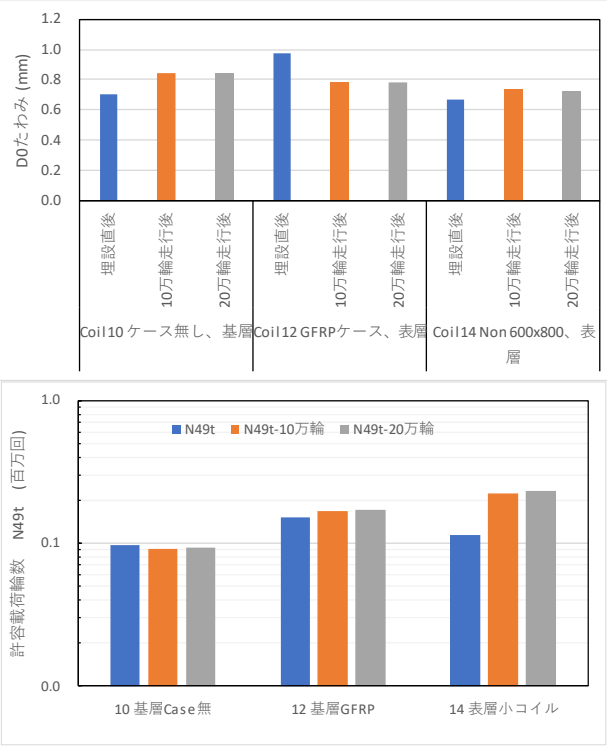


図-153　走行試験前後のたわみと許容載荷輪数の比較

4．2．3　載荷による路面の変形と破損について

大型車両の車両走行試験によって路面のわだち掘れが生じる．ここでは，走行試験実施前後における路面形状変化を評価するため，地上レーザスキャナによりコイル埋設区間の三次元点群を取得し，コイル埋設個所を含む近傍の道路横断形状を比較した．

この横断形状から，横断形状端部の変形が進行していない箇所を基準として横断形状を作成し，車輪

通過位置の最大量をわだち掘れ量とした．車輪通過位置周辺の横断形状とわだち掘れ量の比較(20 万輪走行後)の各工区の比較を図-154 に示す．

横断プロファイルの変化より，20 万輪走行後から 30 万輪走行に至るまでの間で表層アスファルト混合物の部分的な流動が確認された．表層アスファルト混合物が流動した要因としては，埋設コイル上部の樹脂混合物と表層アスファルト混合物との層間で接着不良で流動したと考えられる．

各条件の比較より，車輪間(BWP)はいずれのケースにおいても 2 mm 以下で車両走行試験の影響を受けていない．これに対し，車輪通過位置では，表層にコイル埋設した箇所の境界面より上面の薄層混合物が接着力不足により流動していると推察される．このため，表層にコイルケースを設置する場合は，表面にコイルケースを露出させた設計方法で，コイルケースの剛性で車輪通過に耐えられる構造とする方が良い．

4．2．4　走行載荷位置と埋設位置の関係

走行位置とコイル埋設位置の関係は，図-155 の様に正規分布形状になっている．全車両走行位置分布および大型車走行位置分布とも概ね一致した正規分布を示している [2]．

各ケースにおける疲労破壊輪数を比較することにした．この場合の比較では，既往の研究 [3]より車輪走行位置の標準偏差は 200 mm 程度であることから，車輪がコイル上を通過する確率は 2.4 %となる．

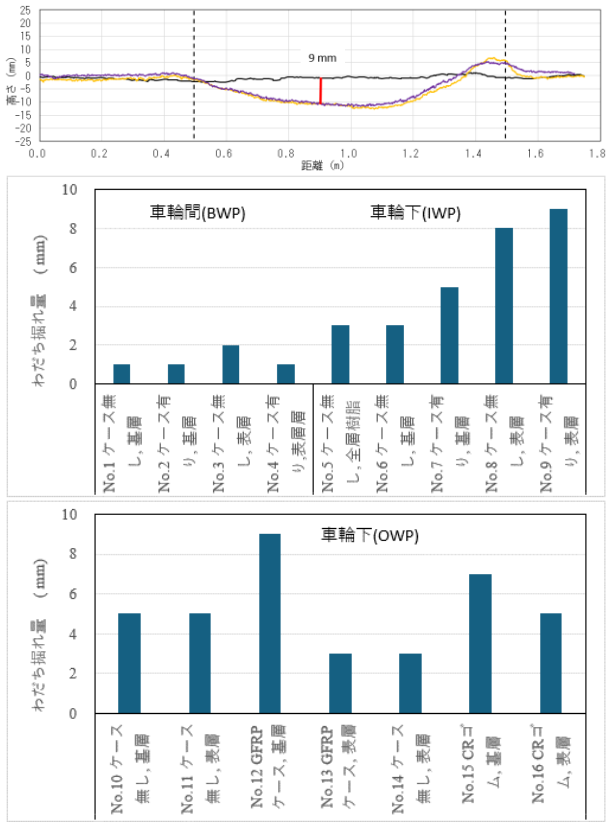


図-154　走行試験前後のたわみと許容載荷輪数の比較

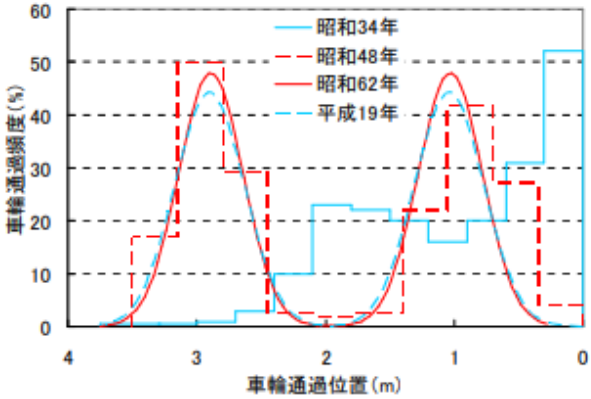


図-155　車輪走行位置分布(年代別)

3 章の方法で求めた許容載荷輪数の比較を図-156 に示す．CR ゴムのケースを用いたコイル 15 とコイル 16 を除くと，許容載荷輪数は車輪通過位置では 3 万輪となるが，車輪間に設置の場合は，通過確率が 2.4%のため，これを考慮すると 100 万回以上に耐えられる．以上より，車輪間の設置の場合は，設計年数 10 年の確保が可能である．いずれのケースにおいても当該舗装は，約 140 万回の大型車の通行させることができるものと考えられる．

走行試験での30万輪通過後の舗装表面に発生したコイルケース横のひび割れを図-157に示し，考えられる原因の概念を図-158に示した．

図のように，コイルケース横の隅角部の応力集中に起因するせん断応力の影響により舗装上面に向かってひび割れが発生すると推察される．設置時に収

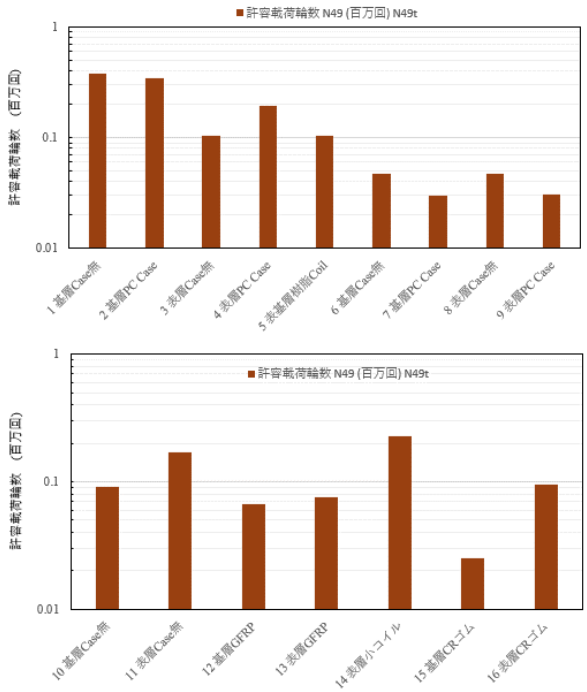


図-156　許容載荷輪数の比較

図-157　ケース有り基層埋設のひび割れ事例

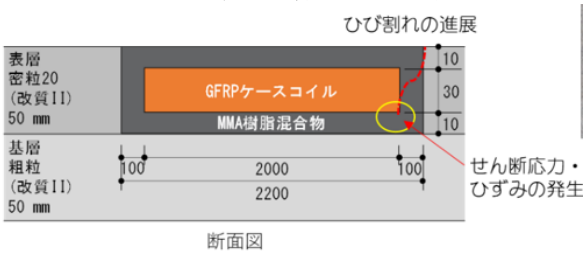


図-158　コイルケース隅角部からのひび割れ想定

縮目地の設置など検討を進める必要がある．

4．2．5　モデル解析による給電コイルの埋設位置と構造厚

非接触給電舗装では，舗装体にリッツ線コイルを保護する樹脂のケースを埋設している．このケースと舗装体を一体化させるために樹脂系接着材を適用しているが，この接着効果は弾性解析モデルでは明らかになっていない．

そこで，有限要素解析モデル(以降FEM解析)を使用し，舗装体に存在するコイルケースの影響を検討することとした．使用した計算プログラムは，西澤らが舗装の解析用に開発したPAV3Dを使用した[4)5)]．

コイル埋設に伴う層の要素分割は，アスファルト舗装とS型コイルケースとDDコイルケース(ポリカーボネート製)で分割して，モデル化した．コイル設置層の要素分割モデルを図-159に示す．この図では，中央載荷とコイルケース上部の載荷のモデルとなる．

コイル埋設に伴う層の要素分割は，アスファルト舗装とS型コイルケースとDDコイルケース(ポリカーボネート製)で分割して，モデル化した．コイル設置層の要素分割モデルを図-160(a)に示す．この図では，コイルケース上部の載荷のモデル例である．

コイルケースはポリカーボネートの板状の部材を加工したため，試験成績表の材料の曲げ剛性を参考とし，2,000 MPa の弾性係数として算定した．MMA系接着剤の弾性係数は材料成績表の曲げ強度を参考に 4,000 MPa として算定した．コイルケースのないOWP の FWD 載荷試験による弾性係数の逆解析を参考に，表層 8,000 MPa，基層 6,000 MPa，上層路盤 200 MPa，下層路盤 70 MPa，路床以下 80 MPa として解析を行った．

基層にコイルケースを設置した場合の載荷縁部のy=15 cmの変形を比較(図-161)すると，ケース厚30 mmの場合は，変形量であるたわみの相違に比べ，水平ひずみの差違の方が大きい．コイルケース厚が20 mmの場合は，異なる材料厚が薄くなるためたわみが小さく，ひずみも少し小さくなる．舗装内に設置するコイルケースの厚さが薄いほど，舗装体内部の異物の影響がなくなり，一体化しやすい．また，層間状態の接着とすべりの比較では，接着に対してすべり状態ではたわみやせん断ひずみが大きくなる傾向にある．

これは接着面（滑り面）の影響を見ているため，載荷中心と縁部の差が大きく表れていると考えられる．DDコイルは中央に梁があり，ねじれに強いため，滑りでも縁部の方がたわみやひずみが小さくなる傾向にある．

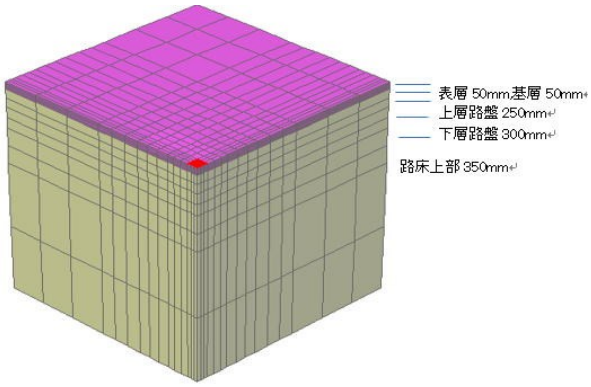
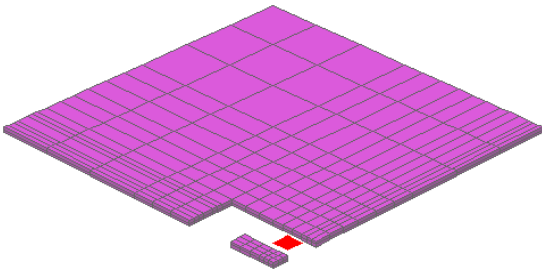
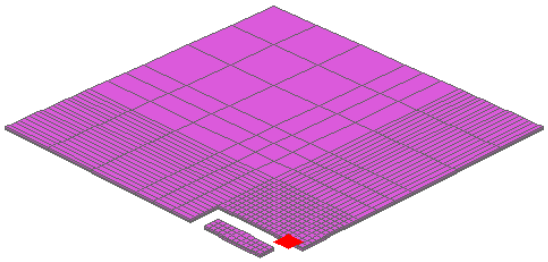


図-159　舗装構造解析のメッシュ図(1/4 モデル)



(a) S 型コイルケース上の載荷



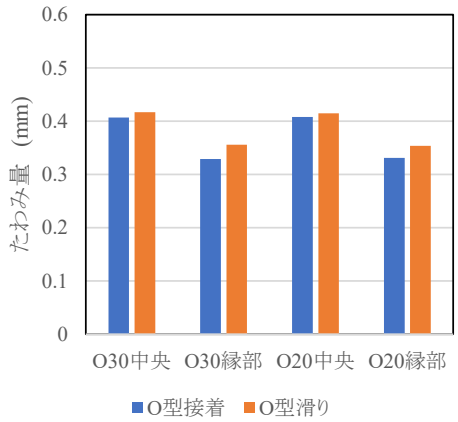
(b) DD コイルケース上の載荷

図-160　2 層目のコイルケースのメッシュ分割例

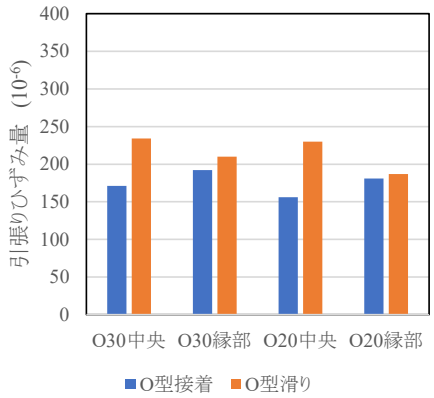
表層にコイルケースを設置した場合のたわみとひずみの比較を表-19に示す．各コイルの縦断方向の表面たわみの比較を図-162に示す．コイルケースとアスファルト舗装が接着されている場合には，コイル

ケース上の載荷に比べ，コイルケース縁部の載荷条件の方がたわみやひずみが大きくなる．これに対し，コイルケース下面の境界要素の場xy平面でのすべりが生じる場合には，コイル縁部の載荷，コイル中央の載荷のいずれのケースにおいても，たわみが1.4倍程度大きくなる．特にDD型コイルに関しては，中央に横断方向の梁構造によるねじれに強い構造のため，コイルケース縁部載荷では載荷点から離れた箇所で変形量やひずみが大きくなる．

また，舗装から 50mm下がりの位置にコイル下面と基層の境界面となるため，水平ひずみは境界面が接着条件では圧縮，滑動条件では引張りとなる．せん断ひずみに関しては，滑動の条件の場合では接着に比べ1.7倍程度のせん断ひずみ(引張り)が発生する．これが表層のコイルケース周辺に発生するひび割れの原因と推察される．路床上面の鉛直圧縮ひずみにも影響が現れ，すべりの場合には1.2～1.3倍程度大きくなる．これより，表層にコイルケース設置の場合は，層境界面がすべりの場合には縦断方向や横断方向の表面変位が大きく，反りの影響も受けやすい．水平方向のひずみはすべりの状態ではハガレに繋がるような300×10^{-6}以上の大きいひずみが発生する．載荷面である表面に近いほど，コイルケース下面の接着による舗装との一体化の影響が大きいことが窺える．

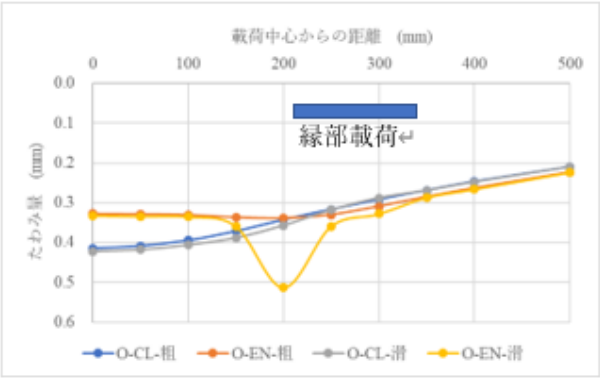


(a) 路面の D0 たわみ

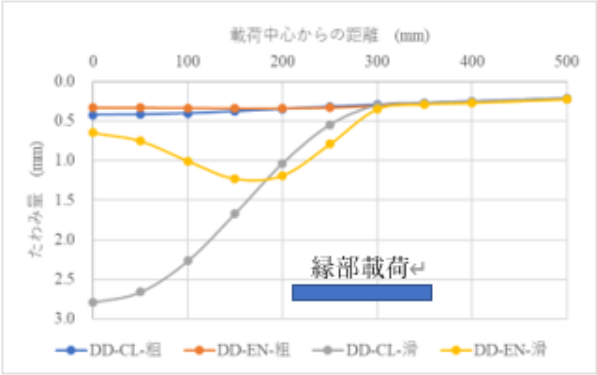


(b) As 下面のひずみ比較

図-161 基層のコイルケース厚さと接着の差異



(a) O 型コイル



(b) DD 型コイル

図-162 各コイル縦断方向の表面たわみの比較

表-19 表層コイルケースの各条件によるたわみやひずみ

着目点		Oコイル中央載荷		Oコイル縁部載荷	
		接着	滑り	接着	滑り
載荷点のたわみ	(mm)	0.415	0.422	0.328	0.332
As引張りひずみ	(10－6)	155	159	104	95
Ba引張りひずみ	(10－6)	221	232	185	192
Sg圧縮ひずみ	(10－6)	448	465	366	375
せん断ひずみ	(10－6)	284	344	211	236

着目点		DDコイル中央載荷		DDコイル縁部載荷	
		接着	滑り	接着	滑り
載荷点のたわみ	(mm)	0.422	2.79	0.33	0.649
As引張りひずみ	(10－6)	156	224	100	142
Ba引張りひずみ	(10－6)	226	224	187	181
Sg圧縮ひずみ	(10－6)	455	455	369	366
せん断ひずみ	(10－6)	290	427	212	292

第５章　まとめ

5．1　電気的特性のまとめ

令和 4 年度の研究成果を踏まえて，アスファルト舗装に埋設するコイル設計し，電気的特性は主に効率と電力（600V 換算値）の特性で評価を行った．2023 年度の成果を簡単に述べると，2022 年度は 800×600 mm のケースレスコイルにおいて効率 96.8%，電力 55.6 kW であったのに対して，2023 年度は大電力に耐えられるコイルの開発を行うため耐電圧及び耐電流を考慮したコイルを埋設し，フェライトを直埋設した 800×600 mm のコイルにおいて 97.6 %，55.8 kW までの向上に成功した．また，リッツ線を変更することで特性を維持したままコイル一つ当たり 60,000 円のコスト低減に成功した．さらに，銅板の切削加工のみで作成可能なエッジワイズコイルを提案し，埋設したエッジワイズコイル及びリッツ線コイルにおいて発熱の評価，漏洩磁界の評価を行った．

電気的特性に関する詳細なまとめについて述べると以下のようになる．

・型枠実験，学内埋設実験，土木研究所埋設実験においてインピーダンスアナライザ，LCR メータによる計測ではコイルの通電を確認できたため電気的な故障はなかった．

・型枠実験では埋設したリッツ線コイルとエッジワイズコイルの電気的特性を測定し，リッツ線コイルは効率 97.4 %，電力 55.2 kW で，エッジワイズコイルは効率 96.6 %，電力 55.2 kW であった．わずかにリッツ線コイルの方が伝送特性は良いが生産性やコストを考慮するとエッジワイズコイルの方が利点があると考えられる．

・型枠実験における発熱・放熱特性の検証を行い，直流電流 90 A 前後を流したがコイルの故障はなく，大電力に耐えられるコイル設計ができていることが確認できた．

・空気中での発熱・放熱特性の検証結果より，ケースコイルの温度上昇が最大で 51.3℃.の上昇であったのに対してエッジワイズコイルは最大で 15.1℃の上昇しか見られなかった．また，放熱特性についてもエッジワイズコイルの方が優れていたことが確認された．

・型枠実験における埋設コイルの発熱・放熱特性についても空気中と同様にエッジワイズコイルの発熱が 3.8℃と最も小さいことが確認できたが，リッツ線で作成したケースレスコイルにおいても 6.9℃の温度上昇で発熱特性に問題がないことが確認できた．これは測定時期が 11 月で舗装の温度が低い影響もあると考えられるので夏における再検証も必要である．

・型枠実験における漏洩磁界の評価を行った結果，リッツ線コイルよりもエッジワイズコイルの方が小さいことが確認された．

・型枠実験で検証した電気的特性，発熱・放熱特性，漏洩磁界の結果を踏まえるとエッジワイズコイルが最もコイル埋設に適していると考えられる．

・2023 年度に土木研究所で埋設したコイルにおいて 20 万輪走行載荷試験を行い，走行試験によるコイルの破損がないことを検証できた．走行の影響によってコイル特性が悪化することが確認されたが，伝送電力については 800×600 mm のコイルにおいて効率 94.7 %，54.3 kW を伝送できるため十分な強度を保ちつつ，大電力を伝送できることが分かった．また，コイルサイズを小さくすることで舗装強度が高くなることが分かった．

・学内埋設実験においてオープン型コイルの大電力設計を行い，1 層オープン型コイルを用いることで埋設後においても効率 90 %以上，電力 10 kW を達成することが期待できる．

・学内埋設実験において 3 つのケースレスコイルを用いてコイル埋設の再現性を検証し，伝送効率が 96.1~96.2 %で電力が 55.2=55.3 kW と誤差がほとんどないため再現性を検証できた．

・学内埋設実験において光ファイバセンサも埋め込み，発熱・放熱特性を検証し，型枠実験の際に熱電対で測定した結果に近しいデータが測定でき，エッジワイズコイルが最もよい特性であった．

5．2　供用性を考慮した舗装への給電コイル設置について

機械的特性に関してまとめると以下のようになる．

(a) 表層上面にコイルケースを設置する場合は，コイルケース下面と表層の接着に樹脂系接着剤を用いることでアスファルト舗装と一体化でき，

たわみ量は小さくなり，走行載荷で発生するひずみは小さくなり，許容載荷輪数は大きくなる．アスファルト舗装との接着性を強化することで，コイルケースの表層設置の可能性が確認された．

(b) 表層上面設置のコイルケースで詳細調査を行った結果，短辺の横断方向に比べ長辺の縦断方向縁部載荷のたわみ量（変形）が大きい傾向にある今後はコイルケースの製作方法や埋設方法の改善を検討する．コイルケースの樹脂流し込みによる一体化整形や板を積層する場合には真空による樹脂注入による密封化などを検討したい．

(c) 樹脂混合物で埋設したケースレスコイルは，樹脂被膜のリッツ線と舗装との接着力が確保され一体化している．

(d) 円形走路のFWD載荷試験時の試験結果より，BWPのコイル埋設箇所の動ひずみは圧縮ひずみであるが，IWPに設置したコイル埋設箇所ではひずみ計の位置が基層の下面に近いほど，引張りひずみになる．この傾向は荷重車の走行試験も同様な結果となった．よって，アスファルト混合物層の上面は圧縮，下面は引張で，コイルと舗装の一体化が明らかである．アスファルト混合物100 mmでは中央の50 mm付近や150 mmの場合には70 mm付近に入れることが良いと考えられる．

(e) 円形行路における荷重車走行試験の結果より，BWPは50万輪までの走行載荷後にコイルに損傷は見られず，舗装と共に健全であった．大型車の走行載荷位置のIWPで50万輪載荷では基層に埋設したコイルは破損しなかったが，表層埋設のコイルケースはひび割れの発生による雨水の浸透の影響によりはがれなどが発生した．2023年度設置のIWPではケースレスやGFRPケースコイルは破損がなかったが，弾性係数の低下やひずみの増加は見られた．

(f) 有限要素解析モデルで，コイルケースと舗装間の境界面(接着面)の影響解析で，接着面の接着力が不足するとアスファルト混合物下層の引張りひずみなどが増加し，路床面の鉛直圧縮ひずみや鉛直変形量も増大する．このため，アスファルト舗装とコイルケースの一体化が舗装の耐久性に対して重要な因子となる．また，コイルケース厚30 mmと20 mmの比較をすると，20 mm層厚の方が舗装と一体化しやすくたわみやひずみが1.5倍程度小さくなり耐久性が高い．このため，コイルケース無しのリッツ線で樹脂による舗装と一体化した埋設方式が最も耐久性向上につながると予測された．

(g) 学内の埋設試験ではケースレスのリッツ線コイルとエッジワイズコイルでは，たわみが小さく，舗装との一体性が確認された．このため，ケースレスコイル埋設の種類の際は大きく現れていない．コイル3～12については，他のコイルに比べ基層下面の引張りひずみに基づく許容載荷輪数Ntが大きく，N_6交通量で設計期間10年を十分満足している．

(h) ダンプ走行試験の3水準の走行速度において，走行位置の3種および走行速度の3種のいずれもコイルケース下面の舗装やコイルケース下面のひずみ計の位置で，全て圧縮ひずみとなっている．舗装とコイルの一体化によって，引張りひずみの発生がなくなったと推察される．

(i) 速度ごとの動ひずみを比較すると，速度の上昇によって圧縮ひずみ量が低減する．走行時間が長い場合には載荷エネルギー量が大きく，載荷時間が短いことは載荷エネルギー量が小さいことと比例しており，粘弾性挙動を示していることが明らかである．

(j) 表面設置のケースレスコイルは，いずれのケースにおいても基層下面の引張りひずみが小さいため，許容載荷輪数NtはN_6交通の700万回を満足する結果になっている．電力伝送効率及び電気特性の有利な表層設置のケースレスコイルが総合的に良い結果となった．表層設置に関しては，施工時や維持管理におけるコイルの交換においても舗装の補修範囲が少なく，維持管理的に有利になる．また，舗装破損時にケースが無いため，舗装の変形にコイルが追従するためコイルケースのように浮き上がりなどがないことも利点である．

(k) ケースレスコイルに関しては，電気的特性や舗装埋設による機械的特性のバランスを取りながら，構造強度が高くかつ耐久性の低下しにくい非接触給電舗装を目指す．エッジワイズコイルは厚さが薄いため，更なる舗装一体化の可能性が高い．今後は，給電に伴う熱特性や漏洩電波対策の検討は必要である。

参考文献

1) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計施工指針平成 18 年版，2006.
2) 久保和幸，井上直.：舗装構造の理論設計の高度化に関する研究，国立研究開発法人土木研究所，図-4，2010.
3) 松野三郎，小林泰介：車両走行位置について，第14 回
日本道路会議論文集, pp.177-178, 1981.
4) 西澤辰男：3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装構造解析パッケージの開発，公益社団法人土木学会，舗装工学論文集，第 5 回，pp.112-121, 2000.
5) 一般社団法人セメント協会：https://www.jcassoc.or.jp/tokusetsu/jcapave3d/
6) Bombardier, “World’s First Electric Bus with Bombardier’s PRIMOVE System Begins Revenue Service”, https://bombardier.com/en/media/news/worlds-first-electric-bus-bombardiers-primove-system-begins-revenue- 2023-02-24 アクセス）
7) S. Lee, J. Huh, C. Park, N. -S. Choi, G. -H. Cho and C. -T. Rim, "On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system," 2010 IEEE

Energy Conversion Congress nd E position, Atlanta, GA, USA, 2010, pp. 1598-1601.
8) The Green Optimistic, “OLEV: The First Wirelessly-Powered EV Made in South Korea”, https://www.greenoptimistic.com/olev-wireless-electric-vehicle- 2023-02-24 アクセス）
9) S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, and C. T. Rim, “Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles,” IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 18–36, Mar. 2015.
10) J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, “Narrowwidth inductive power transfer system for online electrical vehicles,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, Dec. 2011.
11) Ko, Young Kwan, Yonghui Oh, Dae Young Ryu, and Young Dae Ko. 2022. "Optimal Deployment of Wireless Charging Infrastructure for Electric Tram with Dual Operation Policy" Vehicles 4, no. 3: 681-696.
12) G. Ombach, D. Kurschner, S. Mathar, and W. Chlebosz, “Optimum magnetic solution for interoperable system for stationary wireless EV charging,” in Proc. 10th Int. Conf. Eco. Veh. Renew. Energies, Mar. 2015, pp. 1–8.
13) Wave, “Leading the Wireless WAVE”, http://www.waveipt. 2023-02-23 アクセス）
14) WiTricity, “WiTricity Drives EV Interoperability With New 11 kW Wireless Charging System”, https://witricity.com/newsroom/press-releases/witricity-drives-ev-interoperability-new-11-kw-wireless-charging-system/,（2023-02-24 アクセス）
15) J. M. Miller et al., “Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle: The benefit of electrochemical capacitor smoothing,” IEEE Electron. Mag., vol. 1, no. 1, pp. 12–24, Mar. 2014.
16) J. M. Miller, P. T. Jones, J. -M. Li and O. C. Onar, "ORNL Experience and Challenges Facing Dynamic Wireless Power Charging of EV's," in IEEE Circuits nd Syste s M g zine, vol. 15, no. 2, pp. 40-53, Secondquarter 2015.
17) J. Pries, V. P. N. Galigekere, O. C. Onar and G. -J. Su, "A 50-kW Three-Phase Wireless Power Transfer System Using Bipolar Windings and Series Resonant Networks for Rotating Magnetic Fields," in *IEEE Tr ns ctions on Power Electronics*, vol. 35, no. 5, pp. 4500-4517, May 2020.
18) OAK RIDGE National Laboratory, “Hands-free: Wireless charging system advances electric vehicle convenience”, https://www.ornl.gov/news/hands-free-wireless-charging-system-advances-electric-vehicle-convenience,（2024-02-24 アクセス）
19) 東京大学大学院新領域創成科学研究科, “世界初ワイヤレスで電力伝送する『ワイヤレスインホイールモータ』搭載車の走行に成功”, http://www.k.u-tokyo.ac.jp/info/entry/22_entry400/,（参照 2020-1-31）
20) K. Hata, K. Hanajiri, T. Imura, H. Fujimoto, Y. Hori, M. Sato, D. Gunji: “Driving Test Evaluation of Sensorless Vehicle Detection Method for In-motion Wireless Power Transfer, ”in IPEC, pp. 663–668, 2018.
21) 東京大学大学院新領域創成科学研究科, “【記者会見】「第 3 世代走行中ワイヤレス給電インホイールモータ」の開発に成功― 世界初受電から駆動までのすべてをタイヤのなかに―”, http://www.k.u-tokyo.ac.jp/info/entry/22_entry772/,（参照 2020-1-31）
22) 日本アスファルト合材協会, “アスファルト合材とは”, https://www.jam-a.or.jp/asphalt/,（2023-02-24 アクセス）
23) NIPPO, “製品・技術のご案内”, https://www.nippo-c.co.jp/tech_info/general/SG02025_g.html, 2023-02-24 アクセス）
24) 日本道路協会, “コンクリート舗装の普及に向けて”, https://www.road.or.jp/event/pdf/201609151.pdf, 2023-02-24 アクセス）
25) K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse and K. Takeda, "Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles," 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013, pp. 1-10.
26) Gardner, Trevor, "Wireless Power Transfer Roadway Integration", All Graduate Theses and Dissertations. 6866., 2017.
27) Cirimele, V., Torchio, R., Virgillito, A., Freschi, F., and Alotto, P. "Challenges in the Electromagnetic Modeling of Road Embedded Wireless Power Transfer", Energies 2019, 12, 2677.
28) B. J. Varghese, A. Kamineni, N. Roberts, M. Halling, D. J. Thrimawithana and R. A. Zane, "Design Considerations for 50 kW Dynamic Wireless Charging with Concrete-Embedded Coils," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), 2020, pp. 40-44.
29) J. B. Larsen, A. Kamineni, N. Roberts, M. Halling, P. Vaikasi and A. Barnes, "Test Platform to Evaluate Pavement Embedded Wireless Charging Pads," 2022 Wireless Power Week (WPW), 2022, pp. 861-866.
30) S. -H. Lee, M. -Y. Kim, B. -S. Lee and J. Lee, "Impact of Rebar and Concrete on Power Dissipation of Wireless Power Transfer

Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 1, pp. 276-287, Jan. 2020.
31) 遠藤哲夫、崎原孫周、大平孝：電界結合方式を利用した走行中給電技術の開発、電設技術、no. 764、pp. 94-98、2016. 7.
32) T. Ohira : A battery-less electric roadway vehicle runs for the first time in the world (invited) 、 IEEE Int. Conf. Microwave Intelligent Mobility、Nagoya、Japan、pp.75-78、2017.3.
33) 大平孝：電化道路：自動車の電動化に向けた走行中給電インフラ、高速道路と自動車、vol. 61、no.2、pp.5-8、2018. 2.
34) 大平孝：電界結合ワイヤレス電力伝送、MOTOR エレクトロニクス、no.10、pp.93-102、2019.4.
35) 豊橋技術科学大学, “ワイヤレス給電のための創発的高周波半導体回路技術の構築”, http://riti.tut.ac.jp/strategy/emergent04.html,（2023-02-25 アクセス）
36) 望月勇杜、阿部晋士、水谷豊、坂井尚貴、大平孝：電界結合方式走行中ワイヤレス電力伝送のための電化道路の損失要因分析、信学技報、vol. 119、no. 333、WPT2019-47、pp. 17-22、2019.12.
37) https://mobile.twitter.com/SmartroadG/status/1194548389414920192/photo/1
38) https://www.smartroadgotland.com/post/successful-upgrade-of-the-first-50-meters
39) https://www.designboom.com/technology/israeli-startup-electreon-electrify-roads-tel-aviv-06-03-2020/.
40) https://www.recyclind.it/ita/3789/arenadelfuturolaricaricaadinduzionesullautostradaa35brebemi/
41) T. Tohi, Y. Kaneko, and S. Abe, “Maximum Effciency of Contactless Power Transfer Systems using k and ”, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 132, no. 1, pp. 123-124, 2012.