

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	居村岳広 （いむらたけひろ）		東京理科大学理工学部電気 電子情報工学科		准教授
②研究 テーマ	名称	走行中ワイヤレス給電のコイル埋設についての研究			
	政策	[主テーマ] タイプIVのため特定なし	公募	ハード分野	
	領域	[副テーマ] なし	タイプ		
③研究経費（単位：万円） ※R3は精算額、R4は受託額、R5は計画額を記入。端数切捨。	令和3年度	令和4年度	令和5年度	総合計	
	4,009万円	4,673万円	5,000万円	13,682万円	
④研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏名		所属・役職			
堀洋一		東京理科大学理工学部電気電子情報工学科・教授			
藤本博志		東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授			
清水修		東京大学大学院新領域創成科学研究科・特任講師			
畑勝裕		東京大学大学院生産技術研究所・助教			
阿部長門		東亜道路工業（株）・技術営業部長			
多田悟士		東亜道路工業株式会社技術研究所・第三研究室長			
増戸洋幸		東亜道路工業株式会社技術研究所・第三研究室主任研究員			
⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）					
<p>目的：走行中充電における道路側コイルの電気的特性と機械的強度向上させた上で、アスファルトへの埋込み技術確立を目的とする。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、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。</p> <p>【2022年度】目標：次年度の耐久走行試験時に埋設するコイル選定と施工方法の確立 アスファルト舗装によるコイル特性悪化の原因特定とその対策について検討しコイル設計に反映する。コイルケース方式にとられない幅広い低コストコイルの可能性について検討する。次年度の大型車の耐久走行試験に向けての準備として予備実験を土木研究所で行なう。大電力に耐えるコイル設計、埋設の影響を受けづらいコイル設計を行い最終年度の大電力実験の準備としての電力実験を行う。電気的特性と機械的特性の評価を行い目標値を達成する。</p>					

⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、これまでに得られた研究成果や目標の達成状況とその根拠(データ等)を必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。)

本プロジェクトは走行中ワイヤレス給電(DWPT: Dynamic Wireless Power Transfer)のアスファルト埋設において電気的特性と機械的特性の両立を目指した研究開発である。

本年度の性能目標は下記である。

【性能目標(2022年度) : ①非埋設, ③校内埋設試験, ④実車による耐久走行試験】

効率: ①95%以上、③90%以上

電力(ショート型): ①埋設前 15kW、③埋設後 7.5kW(電力1.5倍) **【目標達成】**

電力(オープン型): ①埋設前 10kW、③埋設後 5kW **【目標達成】**

③道路使用年数(FWD試験): 9年 **【準備中】**

④耐久走行試験: 課題抽出のため数値目標無し

以上から、耐久走行試験に使用するコイル候補を選定し、目標性能全ての基準を満たすコイルを一つ以上見いだす。

※ 但し、実際に入力する電力は10kW以下とする。この電力実験の評価としては絶縁破壊や熱や漏洩磁界の影響を主に評価する。 **【別実験で5kWまで実施。準備中】**

現時点では①非埋設時のデータ取得と②型枠実験(道路の上に仮設の道路を作りコイル特性を検証)のみ終了し、④実車による耐久走行試験(土木研究所での大型車)は現在進行中であるため一部データを取得し、③校内埋設は工事完了したばかりでありデータ整頓中である(FWD試験は路面安定化後の実施予定)。そのため、③、④は速報値として記載している。

■本報告のダイジェスト

現在も実験や測定が進行中のため速報ではあるが、本年度の電気的特性は目標値を大幅に超えて達成した下記2点が主に大きな事柄である。

- ・大電力化設計は大幅達成(50kW)。
- ・埋設時にアスファルトや水の影響を受けにくいコイル設計と埋設方法に成功。

また、今後については以下のように考えている。

- ・土木研究所での耐久性の評価は10万輪後に実施(今年度中)。
- ・N6交通量相当の評価は学内埋設実験で評価を実施予定(今年度中)。
- ・公道実験を見据えて次年度のAdvanced goal(発熱と漏洩磁界)を新たに設定。

■報告全文

以下、研究経過について詳細に述べていくが、先に構成を述べる。構成としては下記の様になっており、前半は電気的特性について述べており、機械的特性に関してはまとめて6.7で述べる構成となっている。

- ・ 6.1 埋設コイルの大電力化
- ・ 6.2 水とアスファルトの影響確認
- ・ 6.3 コイル埋設時の影響低減設計
- ・ 6.4 型枠実験（2022年9月22日、23日、26日）
- ・ 6.5 土木研究所埋設実験（2022年11月07日~16日）
- ・ 6.6 学内埋設実験
- ・ 6.7 機械的特性について

6.1. 埋設コイルの大電力化

6.1.1. リッツ線の改良

2022年度は埋設後でも最大50 kW級の大電力が得られるコイルを作製するためにリッツ線の見直しを行った。2021年度は素線径0.05mmで素線数4000本のリッツ線を使用した。2022年度の土木研究所及び学内埋設実験用コイルは素線径0.05mmで10000本のリッツ線を使用している。これにより、リッツ線の許容電流が96 Aまで対応可能となり、昨年度よりも58 Aも多く電流を流せるようになった。

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について述べる。ショート型コイルの場合、コイル全体にかかる電圧と巻数から耐圧に関する簡単な導出が可能である。導出式を下式に示す。

$$V_L = j\omega LI$$

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。上式に本研究の埋設コイルのインダクタンスである $L=100 \mu\text{H}$ 、周波数を国際規格の85 kHz、電流 I をリッツ線の許容電流である96 Aを代入すると5.1 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2 mm以上離せば耐電圧は確保できることになる。しかがって、本研究の埋設コイルは2 mm以上巻線間隔をあける設計方針である。更に、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、コイルはアスファルト舗装内に埋設されるため施工中の高温や転圧といった過酷な環境に耐えられる仕様でなければならない。本研究で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 °C程の連続使用でも問題ない耐熱性を有している。

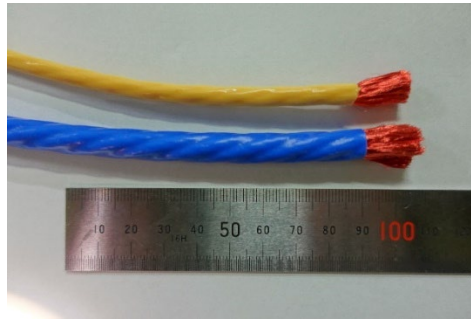


図1. 素線数4000本（黄色）と線数10000本（青色）のリッツ線比較

6.1.2. 2021年度と2022年度の埋設コイルの性能比較

前節で述べた素線数10000本のリッツ線を使用して作製した2022年度の埋設コイルと素線数4000本の2021年度の埋設用コイルの性能を比較する。図2に2021年度及び2022年度の埋設用コイル外観図を示す。表1にそれぞれのコイルの仕様を示す。受電コイルは2021年度はSAEのJ2954に基づいてコイルサイズを決定したが、2022年度は大型車への給電も見据えてコイルサイズをJ2954の規格より大きい600×800 mmとした。

図3に2021年度及び2022年度の埋設用コイルの性能比較結果を示す。ベクトルネットワークアナライザE5061Bによる伝送効率と出力電力による評価の結果、2021年度型は伝送効率96.5%において出力電力は約22 kW得られた。2022年度型は効率97.4%で約56 kWと昨年度よりも高効率と大電力化を達成し、30 kW以上も大電力化に成功したことにより大型車への給電にも対応した。

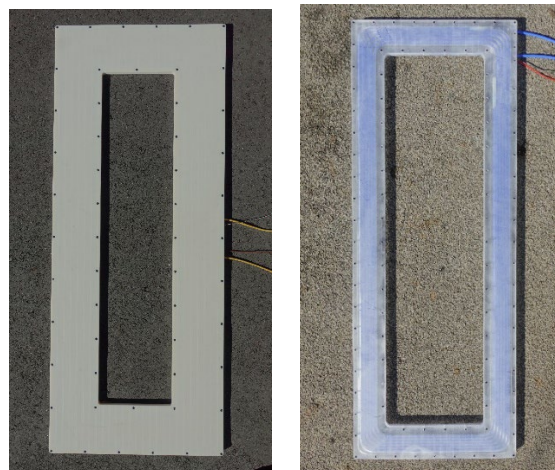


図2. 2021年度及び2022年度の埋設コイル

表1. 学内埋設実験用コイルと受電コイルの仕様

	埋設コイル (2021年度)	埋設コイル (2022年度)	受電コイル (2021年度)	受電コイル (2022年度)
コイルサイズ	600×1600 mm	600×1700 mm	420×420 mm	600×800 mm
ケースサイズ	660×1650×20 mm	660×1760×30 mm	470×470×22 mm	670×870×27 mm
リッツ線	素線数4000本	素線数10000本	素線数4000本	素線数4000本
	素線径0.05 mm	素線径0.05 mm	素線径0.05 mm	素線径0.05 mm
導体外径 d	5.1 mm	7.85 mm	5.1 mm	7.85 mm
巻数 t	15	6	19	7
線間ピッチ p	9 mm	12 mm	8 mm	11 mm
線路長 l	59.4 m	31.5 m	22.6 m	51.2 m
重量	22.6 kg	22.6 kg	9.49 kg	18.3 kg
ケース素材	ABS樹脂	ポリカーボネート樹脂	ポリカーボネート樹脂	ポリカーボネート樹脂

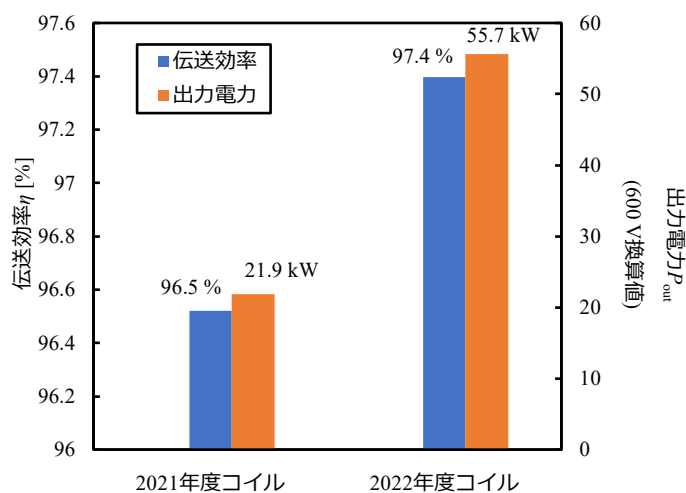


図3. 2021年度と2022年度のコイル性能比較 (非埋設時)

6.2. 水とアスファルトの影響確認

本項では水とアスファルトの影響を確認する目的で簡易的な検証を行っている。初期検討ということでリッツ線ではなくより線を使用している。実際にはリッツ線にするとQ値は高くなるので影響を受けやすい。実際に埋設するのはリッツ線であり、リッツ線に関しては6.3節で検証を行っており、後述する。本節でより線を利用した意図としては安価であるため検証が容易であるという事である。

6.2の結論

本節の結論を先に述べると、

- ・水の影響があり、コイル特性を悪化させる。
- ・アスファルトの影響があり、コイル特性を悪化させる。
- ・水とアスファルトの場合は二つの影響が生ずるのでより悪化する。
- ・水とアスファルトからの離隔距離をとることで回避できる。
- ・コイル設計によって影響を軽減することが出来る。
- ・より線を利用しているのでQ値が低いためリッツ線での検証が必要である。

となる。以下、本節の本文を記載する。

水実験の概要

コイルと水との位置関係を4つの方法で変化させたときのコイルの電気的特性の影響を検証した。コイルは型枠試験のケースありのコイルで測定を行った。水は1000×2000×1 mmの不織布に水を含ませたものである。また、水のみの影響を検証するためにAs（アスファルト）上での測定と空中（スタイロフォーム測定台上）での測定のそれぞれについて4つの方法で測定した。ここで、4つの実験方法について述べる。

1. コイル下面とAsの距離を50 mmに固定し、水の位置をコイルから0 mm～50 mmまで10 mmずつ変化させたときの特性を測定した。
2. コイル下面と水の距離を0 mmに固定し、コイルとAsとの距離を0 mm～50 mmまで10 mmずつ変化させたときの特性を測定した。
3. Asと水との距離を0 mmに固定し、コイルとAsとの距離を0 mm～50 mmまで10 mmずつ変化させたときの特性を測定した。
4. コイル上面と水との距離を0 mm～50 mmまで10 mmずつ変化させたときの特性を測定した。

水実験の写真を以下に示す。

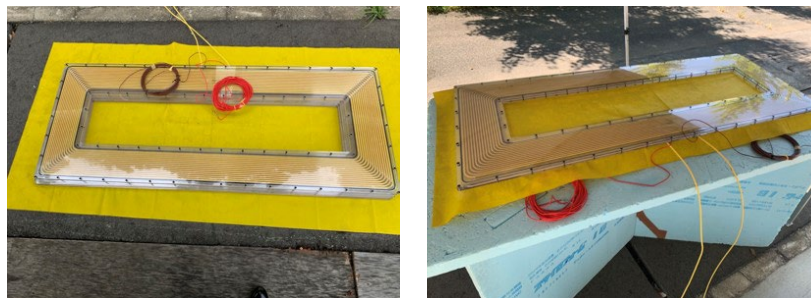


図4. 水の影響の確認実験の写真

実験方法のイメージ図を以下に示す。

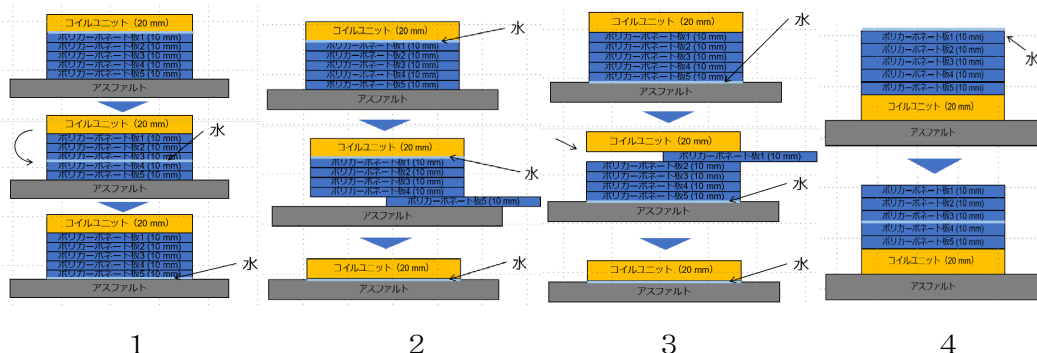


図5. 実験方法のイメージ図 (As上)

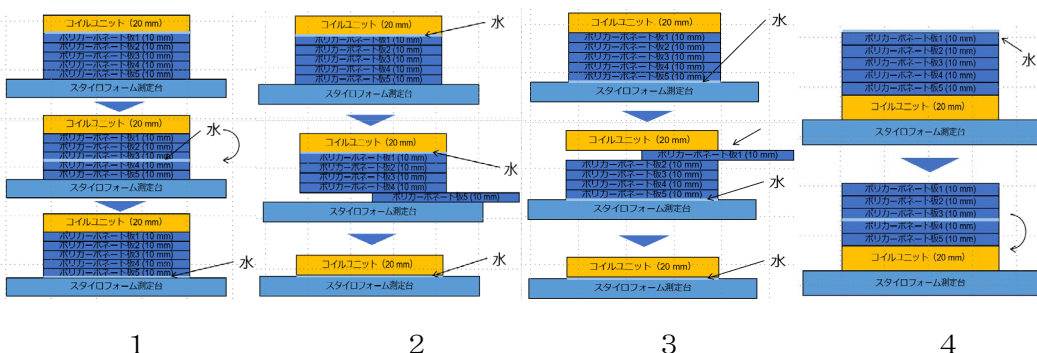


図6. 実験方法のイメージ図 (スタイロフォーム測定台上)

次に、4つの測定結果を以下に示す。

1. コイル下面とAsの距離一定

以下にコイル下面とAsの距離を一定にし、水との距離を変化させたときの測定結果を示す。測定結果より、水との距離が近いほど抵抗値が増加し、0~20 mm離隔したときの抵抗値の変化量が大きくなっている。また、水のみと水+As上のインダクタンスを比較すると水+As上のインダクタンスのほうが高く50 mm離隔しても空中の値に近づかないが、水上では空中の値に近づいているので、水だけではインダクタンスへの影響は小さいと考えられる。Q値を見ると水の場合より水+Asの場合の方がさらに低下していることがわかる。

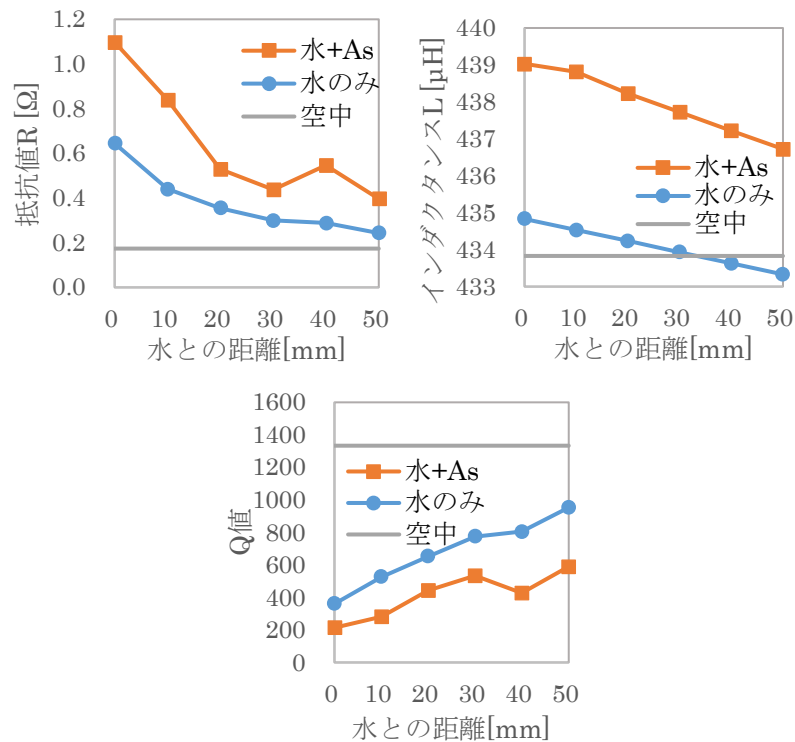


図7. 水との距離に対する特性変化（コイル下面とAsの距離一定）

2. コイル下面と水との距離一定

以下にコイル下面と水との距離を一定にしたときの地面との距離を変化させたときの測定結果を示す。実験1と同様にコイルと水を離隔することでコイルの特性が回復していることがわかる。水の影響の測定の場合、スタイロフォーム測定台に近づいただけなので離隔しても特性はほとんど変化していない。また、水+Asの抵抗値Rを見ると10 mm以上離隔することで水の場合よりも抵抗値が低下しており、変化量が大いので水からの離隔は10 mm以上必要であると考えられる。

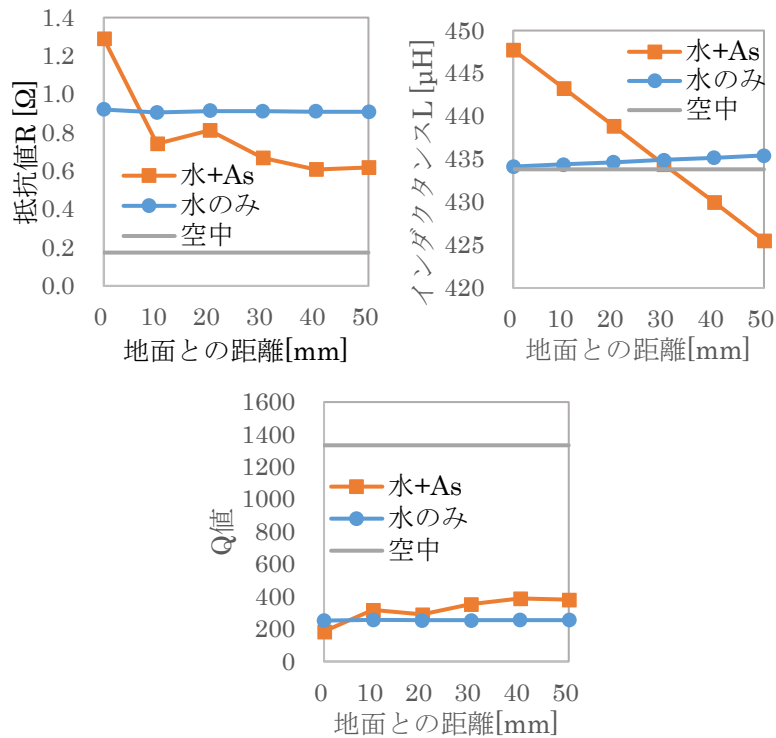


図8. 地面との距離に対する特性変化 (コイル下面と水との距離一定)

3. Asと水の距離一定

以下にAsと水との距離を一定にして地面との距離を変化させたときの測定結果を示す。実験1と実験2と同様にコイルと水とを離隔することでコイルの特性は空中の値に近づいているが、40~50 mm離隔すると抵抗値の変化量が小さいため、変化量が大きい0~20 mm程度離隔するのが良いと考えられる。また、インダクタンスと離隔距離には線径性があることがわかる。

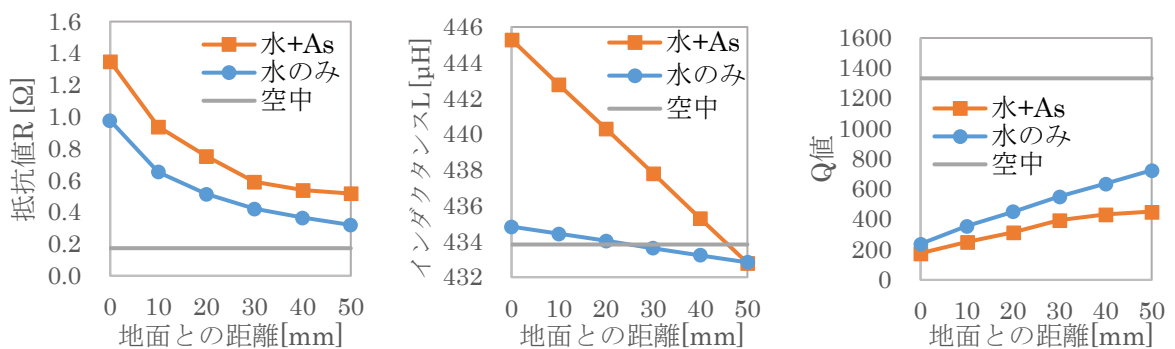


図9. 地面との距離による特性変化 (Asと水の距離一定)

4. コイル上面の水の影響

以下にコイル上面と水の距離を変化させたときの測定結果を示す。コイル上面と水とを離隔することでコイルの特性が空中の値に近づいていることがわかる。また、コイル下面と上面との抵

抗値の増加を比較するとコイル上面に水が近づいているときの方が抵抗値が増加していることがわかる。

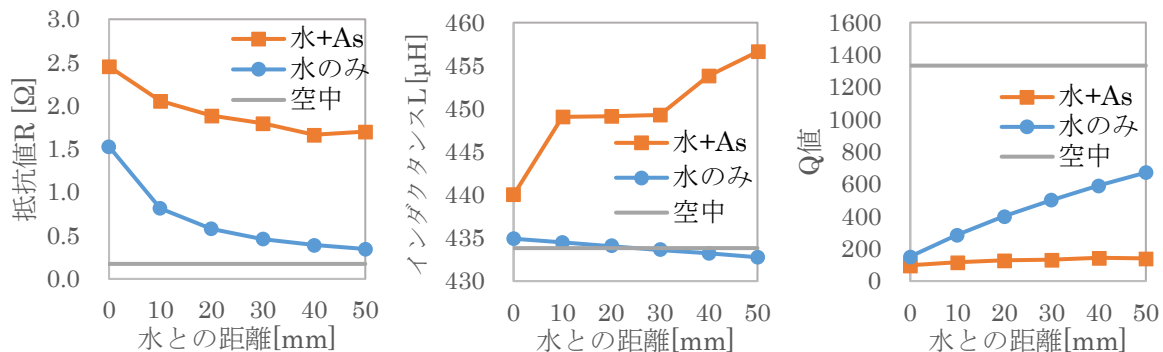


図10. 水との距離に対する特性変化（コイル上面の水の影響）

以上の結果より、コイルと水を離隔することでコイルの特性悪化を低減することが可能である。また、0~20 mmでの抵抗値の変化量が大きいので最適な離隔距離は0~20 mmであると考えられる。さらに、すべての測定において水のみの場合より水+Asの場合の方がさらに特性悪化していることがわかった。

水の影響を低減するコイル設計の検証

コイルの進行方向のサイズ、ピッチ、巻き数を変化させたときの水の影響について検証した。測定項目は空中（スタイロフォーム測定台上）、As上、水上、水+As上の4種で、水は水実験と同様に不織布に水を含ませたものである。

以下に測定条件の写真を示す。

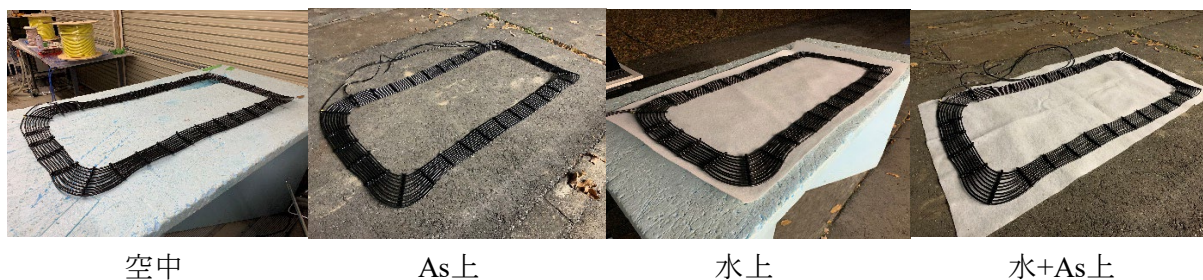


図11. 測定条件

ここで、測定に使用したコイルの寸法について述べる。

1. 進行方向のサイズ変更

コイルの進行方向の長さのみを600 mm, 800 mm, 1200 mm, 1600 mm, 2000 mmに変化させて

測定を行った。また、使用した5つのコイルに共通したパラメータは車幅方向の長さ600 mm、巻き数10巻き、ピッチ9 mmである。以下に測定に使用したコイルの写真を示す。



図12. 進行方向の長さを変えたコイル

2. ピッチ変更

コイルのピッチのみを5 mm, 9 mm, 18 mm, 27 mm, に変化させて測定を行った。また、測定に使用した4つのコイルに共通したパラメータはサイズ600×1200 mm、巻き数7巻きである。以下に測定に使用したコイルの写真を示す。



図13. ピッチを変えたコイル

3. 巻き数変更

コイルの巻き数のみを2, 5, 7, 10, 15, 20 に変化させて測定を行った。また、測定に使用したコイルに共通したパラメータはサイズ600×1200 mm、ピッチ9 mmである。以下に測定に使用したコイルの写真を示す。



図14. 巻き数を変えたコイル

次に測定結果を以下に示す。

1. 進行方向のサイズ変更

進行方向のサイズのみを変更したときの抵抗値R、インダクタンスL、Q値を以下に示す。抵抗値については線形性があり進行方向のサイズが大きいほど水、アスファルトの影響を受けやすく抵抗値の増加がみられる。インダクタンスについては水、アスファルトの影響は大きくないと考えられる。また、Q値を見ると、全体的に最もQ値が低下している水+As上では600×600 mmと600×800 mmのQ値がほとんど変わらず5つのコイルの中でも大きいので、コイルの進行方向のサイズは小さいほうがよく、この測定では進行方向のサイズは600か800 mmがよいと考えられる。

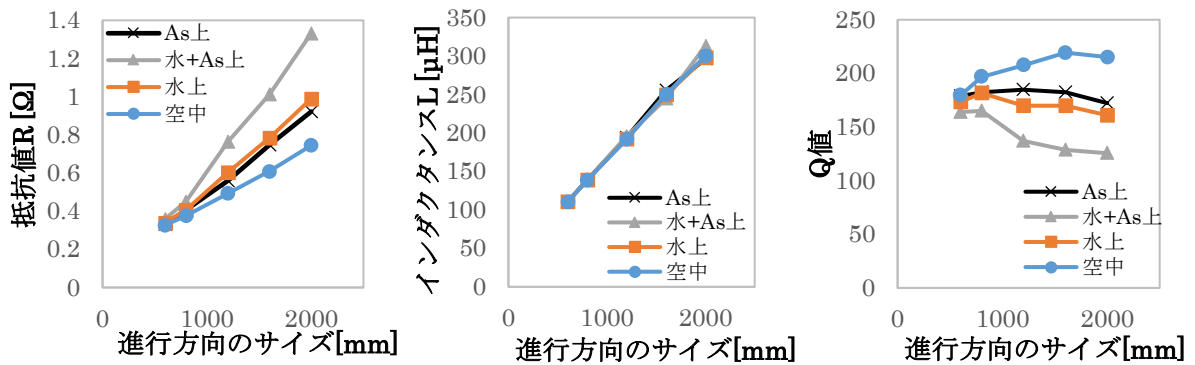


図15. 進行方向のサイズのみを変えたときのR, L, Q

2. ピッチ変更

ピッチのみを変更したときの抵抗値R、インダクタンスL、Q値を以下に示す。抵抗値についてはピッチが狭いほうが水、アスファルトの影響を受けやすく抵抗値の増加がみられる。これは線路長の長さにより水、アスファルトによる影響を受ける部分が増加すること

によるものであると考えられる。インダクタンスについてサイズ変更と同様に水、アスファルトの影響は大きくないと考えられる。また、Q値を見ると、全体的に最もQ値が低下している水+As上を見るとピッチが9 mmと18 mmのときにQ値が大きくなっているため、この測定からコイルのピッチは広すぎても狭すぎてもよいわけではなく9~18 mmの間でQ値のピークがあると考えられる。

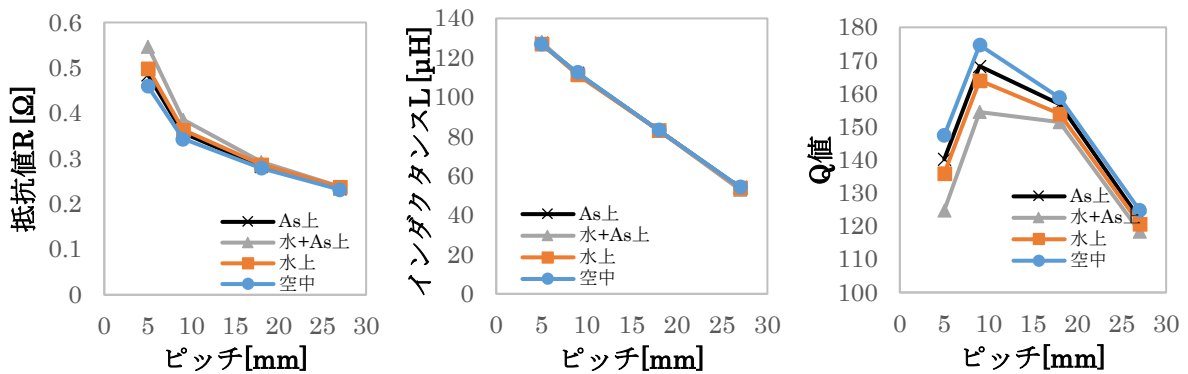


図16. ピッチのみを変えたときのR, L, Q

3. 巻き数変更

巻き数のみを変更したときの抵抗値R、インダクタンスL、Q値を以下に示す。抵抗値については巻き数が多いほうが水、アスファルトの影響を受けやすく抵抗値の増加がみられる。これは線路長の長さにより水、アスファルトによる影響を受ける部分が増加することによるものであると考えられる。インダクタンスについてサイズ変更、ピッチ変更と同様に水、アスファルトの影響は大きくないと考えられる。また、Q値を見ると、全体的に最もQ値が低下している水+As上を見ると巻き数が7巻きのときにQ値が最も大きくなっているため、この測定からコイルの巻き数は多くても少なくてもよいわけではないと考えられる。

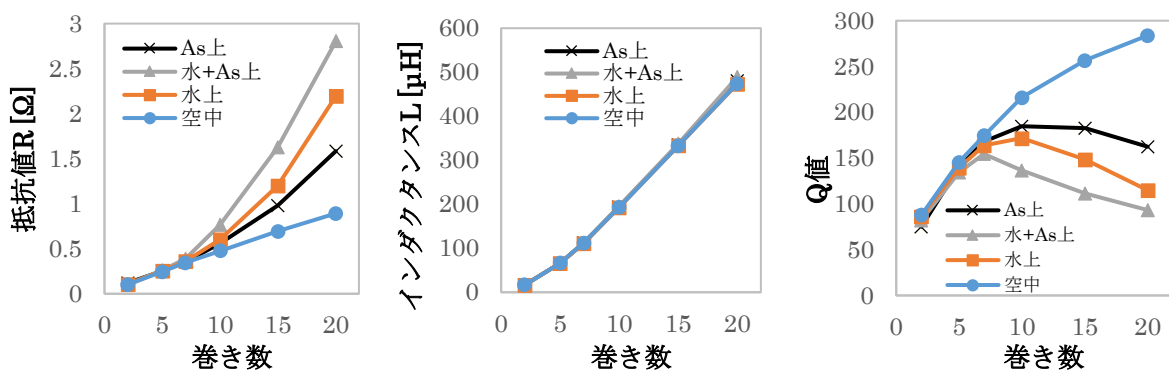


図17. 巻き数のみを変えたときのR, L, Q

以上の結果から、サイズが小さく、ピッチが広く巻き数が小さいほうが水、アスファルトの影響

による抵抗値の増加を低減することができることがわかった。しかし、 Q 値を見ると抵抗値と同じ傾向ではないので、抵抗値の悪化とコイルの形状によるインダクタンスとのバランスがよい点を見つける必要があると考えられる。

6.3. コイル埋設時の影響低減設計

FS時と2021年度の埋設実験ではコイル埋設時にコイルの内部抵抗値が3倍以上悪化することにより、伝送効率と出力電力が低下することが課題となっている。6.2節で一部紹介したが、本節では、コイル構造のみを変化させることでコイルの道路埋設時の影響を低減するコイル設計手法を提案してリッツ線で検証を行う。2021年度は樹脂舗装材やアスファルト混合物との離隔距離を確保することでコイル性能の悪化を低減したが、本設計手法はコイル構造を変化させるだけなので従来のように離隔するための樹脂などの材料が不要となり埋設コイルの低コスト化が期待できる。

水だけの影響に関しては、6.2節で行っているなのでその検証は本節では行わない。

6.3の結論

本節の結論は、6.2節とほぼ同様の結果であるが、やはり実際のリッツ線を使うとその影響が定量的に得られることができた。

- ・アスファルトの影響があり、コイル特性を悪化させる。
- ・水とアスファルトの場合は二つの影響が生ずるのでより悪化する。
- ・水とアスファルトからの離隔距離をとることで回避できる。
- ・コイル設計によって影響を軽減することが出来る。
- ・リッツ線ではより Q 値への影響が大きい。

となる。以下、本節の本文を記載する。

6.3.1. 実機による検証

コイル構造で着目したパラメータはサイズ、巻数、ピッチの3つである。それぞれのパラメータを変化させたときのコイルの内部抵抗値や Q 値の変化を検証する。図18に検証コイルを示す。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、コイルサイズと線間ピッチは一定で、巻数を6, 11, 16, 21, 26と変化させる。また、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。

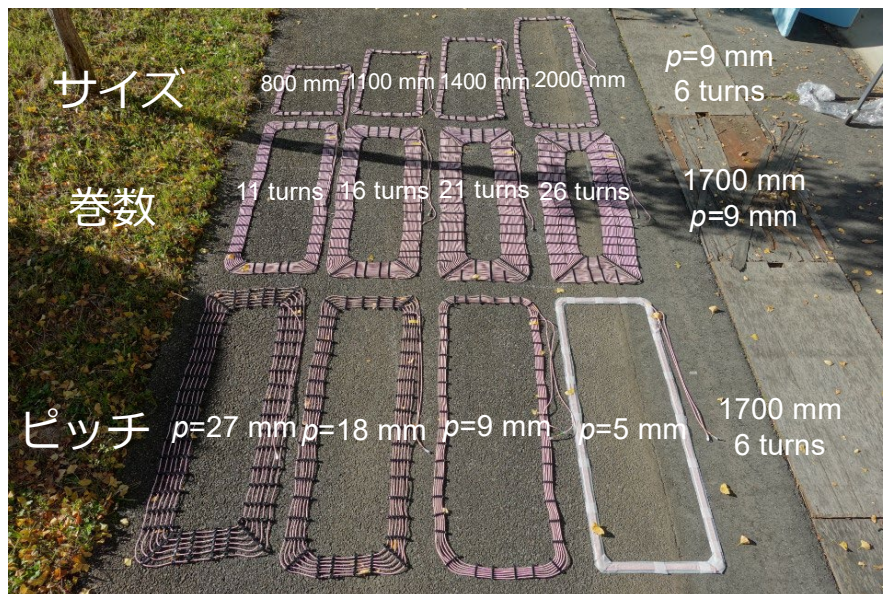


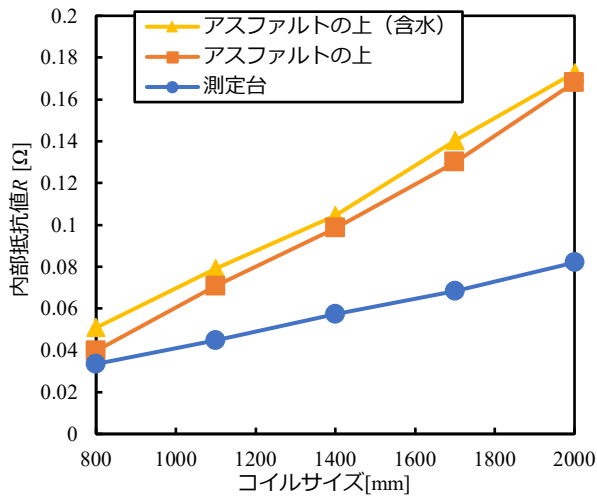
図18. 検証コイル

6.3.2. 実験結果

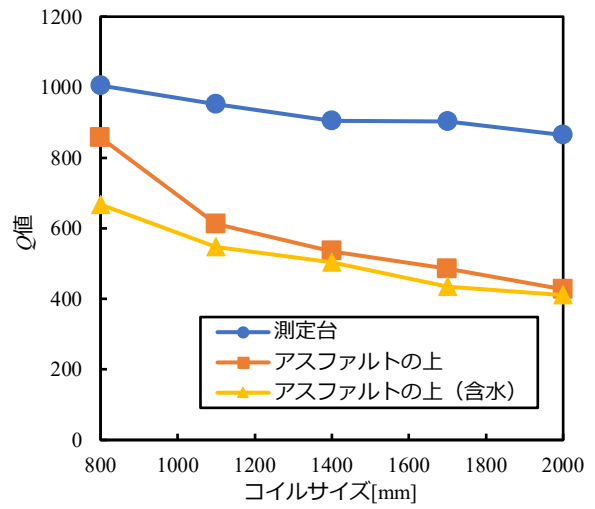
図19に測定状況を示す。測定はコイルをスタイロフォーム製の測定台に設置して地面からの影響を受けないときの状態、アスファルト混合物の道路に設置したときの状態、アスファルト混合物の道路に雨が降って路面表面が濡れている時の状態である。



図19. 測定状況

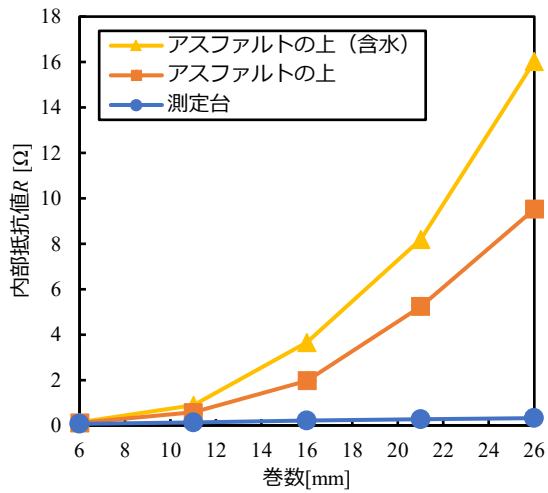


(a)抵抗値 R

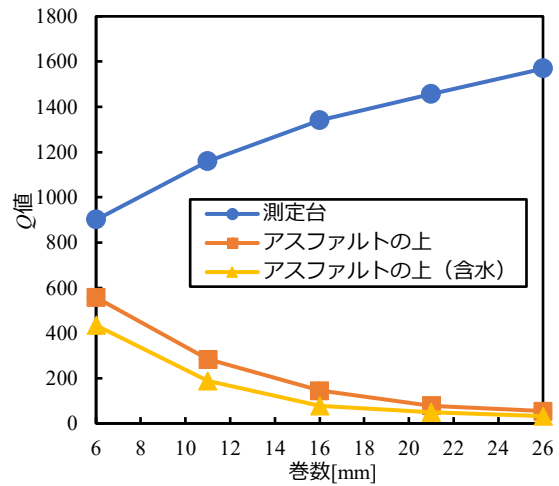


(b) Q 値

図20. コイルサイズのみ変化させたときの内部抵抗値 R と Q 値の変化(巻数、ピッチ固定)

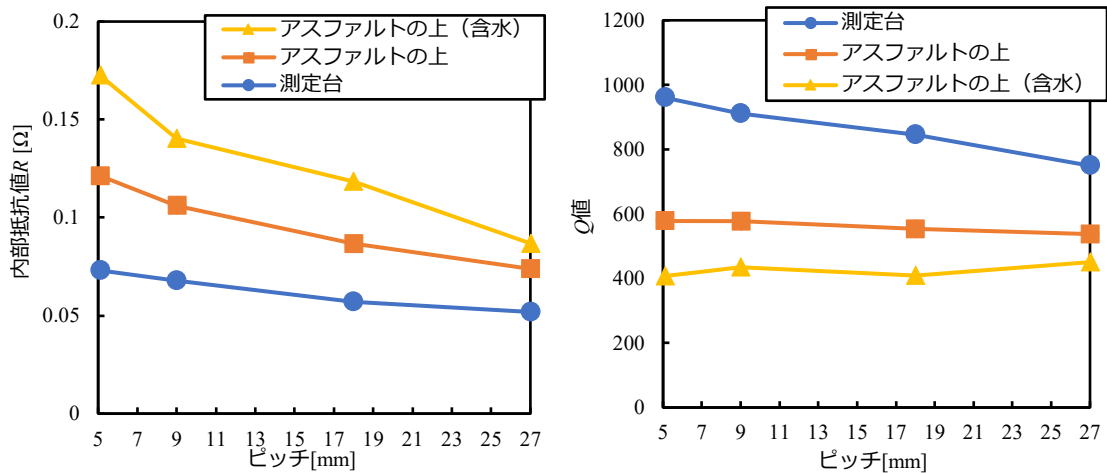


(a)抵抗値 R



(b) Q 値

図21. 巻数のみ変化させたときの内部抵抗値 R と Q 値の変化(サイズ、ピッチ固定)



(a)抵抗値 R

(b) Q 値

図22. 線間ピッチのみ変化させたときの内部抵抗値 R と Q 値の変化(サイズ、巻数固定)

図20～図22にコイルサイズ、巻数、線間ピッチを変化させたときの内部抵抗値 R と Q 値の変化を示す。図20(a)の内部抵抗値 R の結果より、測定台とアスファルト混合物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混合物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、アスファルト混合物が含水し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21(a)の抵抗値 R の結果より、測定台とアスファルト混合物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混合物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21(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22(a)の抵抗値 R の結果より、測定台とアスファルト混合物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混合物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22(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、コイル埋設時においては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がコイル特性の悪化が小さいことがわかった。本設計手法を反映させたコイルは後述する型枠実験と学内埋設実験で埋設する。

6.4. 型枠実験（2022年9月22日、23日、26日）

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23に型枠設置後の様子を示す。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。2022年度の型枠実験では土木研究所と学内における埋設実験に向けた課題抽出と事前検証を目的として行った。



図23. 型枠実験

6.4の結論

本節の主要な結論を先に述べると、

- ・埋設の影響を受けにくいコイルの実証成功（型枠実験3）。
- ・しかもケースレスにおいて成功した。
- ・コスト低減の大きな可能性を得られた。

となる。以下、本節の本文を記載する。

6.4.1. 型枠試験の検証項目

2021年度の型枠実験ではXPS（スタイロフォーム）でコイル上面と下面を挟んでアスファルト混合物から20 mmと40 mm離隔距離を確保したことでコイルの内部抵抗の悪化を低減することに成功した。その結果より、2021年度の学内道路におけるコイル埋設実験では

MMA樹脂（混合物）舗装材によりコイルの電気的特性と舗装強度を確保することに成功した。しかし、樹脂舗装材の厚さはコイル下面の20 mmのみであり、樹脂厚によるコイル特性の検証がされていたかったので2022年度の型枠実験で検証することにした。

検討内容は、

- ①アスファルト混合物とコイルとの離隔用素材の検証
- ②MMA樹脂（混合物）舗装材の厚さの検証
- ③アスファルト混合物の影響低減設計コイルの検証
- ④コイル掘り起こし後の雨水による含水状態の検証

である。

表 2. 型枠実験におけるコイル条件一覧

コイル No.	型枠 No.	ケース 素材	線材	埋設 深さ	埋設 方法	型枠 実験No.	検証目的
1	1	PC樹脂	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	樹脂40 mm (コイル下面)	1	離隔用素材
2	2	PC樹脂	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	PC板40 mm (コイル下面)	1	離隔用素材
3	3	PC樹脂	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	直接埋設	1	離隔用素材
4	4	ケース レス	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	樹脂20 mm (コイル下面)	2	樹脂の離隔距離
5	5	ケース レス	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	樹脂40 mm (コイル下面)	2	樹脂の離隔距離
6	6	ケース レス	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	直接埋設	2	樹脂の離隔距離
7	7	ケース レス	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	直接埋設	2, 3	アスファルトの影響 低減設計コイル
8	8	ケース レス	φ 5 mm 0.05 mm, 4000本 FEP被覆	中間層	樹脂20 mm (コイル下面)	2, 4	経時変化

6.4.2. 型枠実験用コイル

表 3に型枠実験用コイルと受電コイルの仕様を示す。埋設コイルは全て2021年度の仕様と同様であるが、受電コイルは2022年度からの新設計コイルである。送電コイルはフェライトは使用していないが、受電コイルはフェライトを使用している。2021年度は従来の樹脂製のコイルケースを使用しないケースレスのコイルを提案したが、2022年度も樹脂製ケースとケースレスコイルを採用している。コイルケースはポリカーボネート樹脂で作製されている。いずれもコイルサイズや巻数、ピッチなどの仕様は同様であり、ケースの有無の違いだけである。リッツ線は素線径0.05 mmで素線数は4000本であり、許容電流値は38 Aである。被覆は厚さ0.5 mmのFEP素材であり、連続使用温度は200 °Cである。

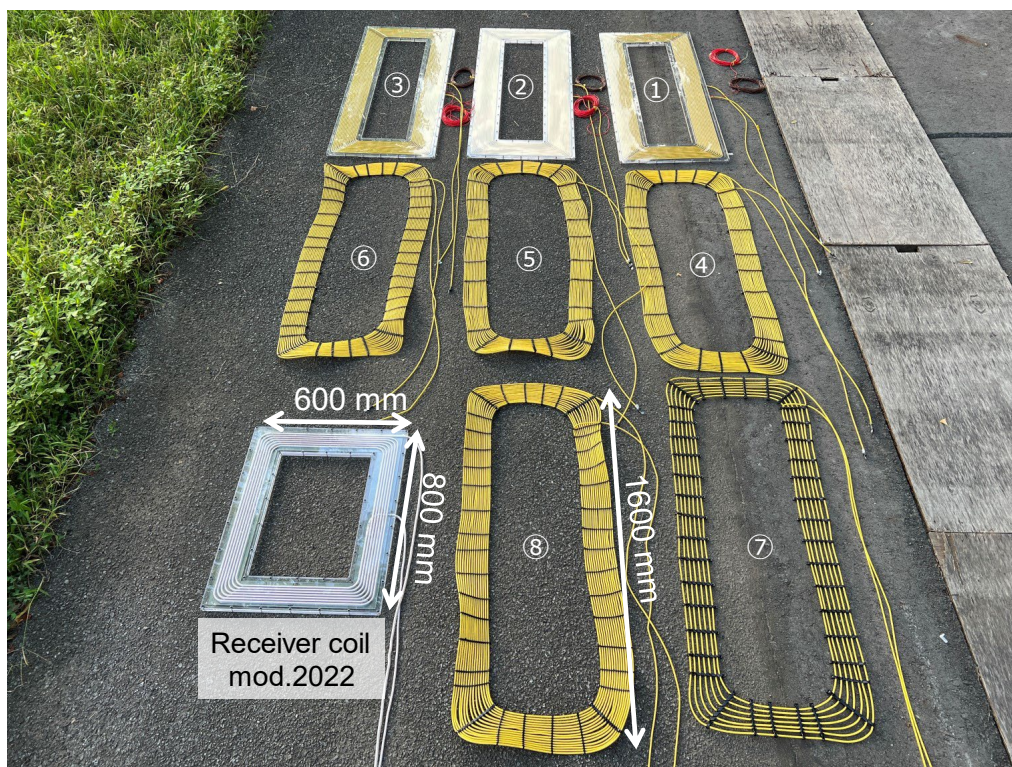


図 24. 型枠実験用コイルと受電コイル

表 3. 型枠実験用コイルと受電コイルの仕様

コイル	樹脂ケースコイル (コイル1, 2, 3)	ケースレスコイル (コイル4, 5, 6, 8)	ケースレスコイル (コイル7)	受電コイル
コイルサイズ	600×1600 mm	600×1600 mm	600×1600 mm	600×800 mm
コイルケースサイズ	660×1650×20 mm	-	-	670×870×27 mm
巻数 t	15	15	7	7
線間ピッチ p	9 mm	9 mm	18 mm	11 mm
導体外径 d	5.1 mm	5.1 mm	5.1 mm	7.85 mm
線路長 l	59.4 m	59.4 m	28.6 m	51.2 m
重量	22.6 kg	7.27 kg	2.82 kg	18.3 kg

6.4.3. 型枠実験項目

6.4.3.1. 型枠実験1（隔離用素材の検証）

2021年度における型枠実験ではスタイロフォーム20 mmと40 mmでコイルの上面と下面を挟みアスファルト舗装からの隔離距離を確保したところコイル特性の悪化の低減に成功した。しかし、隔離を確保するための素材はスタイロフォームのみの検証であり、他の素材の検証はされていなかったため今年度はMMA樹脂40 mmとポリカーボネート板40 mmで比較検討を行った。また、コイルを直接埋設したときと隔離したときとの特性の差も比較した。

図 25に隔離用素材の検証実験における舗装断面図を示す。図 26に実験状況を示す。

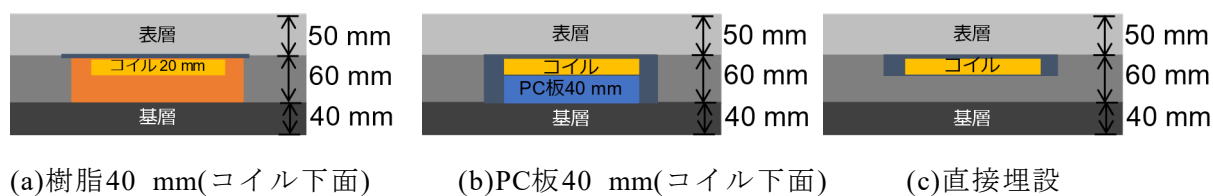
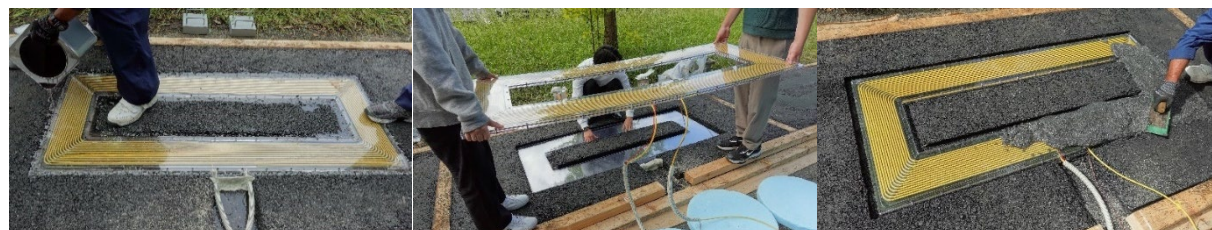


図 25. 隔離用素材の検証実験における舗装断面図



(a)樹脂40 mm（型枠1） (b)ポリカーボネート板（型枠2） (c)直接埋設（型枠3）

図 26. 隔離用素材の検証実験

6.4.3.2. 型枠実験2（樹脂舗装材の厚さの検証）

2021年度における学内埋設実験ではコイル下面のMMA樹脂の厚さを20 mmとして施工した。しかし、樹脂厚による検証がされていなかったため、2022年度の型枠実験ではコイル下面の樹脂厚を20 mm、40 mmと変化させたときのコイルの特性変化を検証した。また、コイルをアスファルト舗装に直接埋設して樹脂の有無の比較も行った。本実験のコイルは樹脂ケースを使用していないリッツ線のみで形成されたコイルである。図 27に樹脂舗装厚変化実験における舗装断面図を示す。図 28に実験状況を示す。

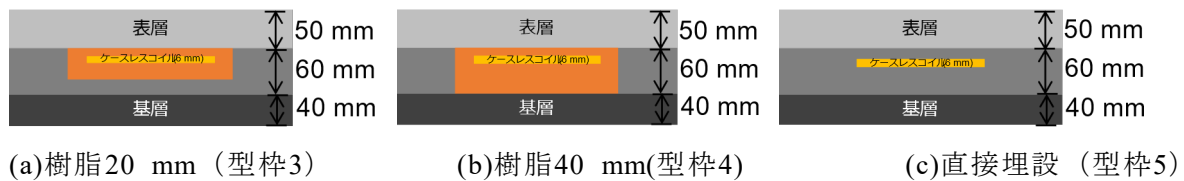


図 27. 樹脂舗装材の厚さの検証実験における舗装断面図



(a)樹脂20 mm (b)樹脂40 mm (c)直接埋設

図 28. 樹脂舗装材の厚さの検証実験

6.4.3.3. 型枠実験3（アスファルト混合物の影響低減設計コイルの検証）

6.3節で提案したコイルのサイズや巻数、線間ピッチのコイル構造を変化させるだけでアスファルト混合物の影響を低減できるコイルの検証を型枠7（コイル7）で行う。コイル7は他のコイルに比べてコイルサイズは同様であるが、巻き数を1/2以下に減らして、線間ピッチも2倍の18 mmとして提案した設計手法を反映させた。従来設計のコイル6（型枠6）の直接埋設コイルと特性を比較して提案手法の実機による埋設環境下での検証を行う。コイル埋設方法はコイル6とコイル7は同様で埋設環境は同一条件であり、異なるのはコイルの巻き数と線間ピッチのみである。



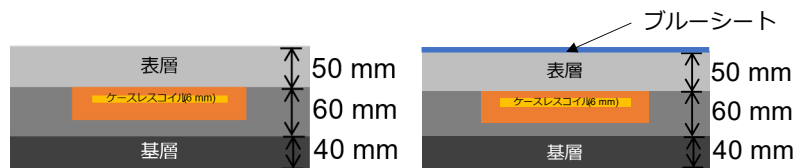
図 29. 直接埋設（型枠7）



(a)アスファルト敷設 (b)アスファルト敷均し
 図 30. アスファルト混合物への直接埋設状況 (型枠7)

6.4.3.4. 型枠実験4 (経時変化の検証)

FSや2021年度におけるコイル埋設後の経時変化の測定では全てのコイルの特性が悪化した。考えられる原因としては雨による影響だが、舗装内部の含水状態を確認していないため確証はない。本実験では、樹脂20 mmによる施工において雨水にさらされる型枠とブルーシートで型枠を覆い雨水の侵入を防いだ型枠で比較を行い、経時変化の検証やコイル掘り起こし後のコイル内部や舗装内部の含水状態を確認した。



(a)樹脂20 mm (型枠4) (b)樹脂20 mm、ブルーシート (型枠8)

図 31. 経時変化の検証実験における舗装断面図



図 32. 経時変化の検証実験

6.4.4. 実験結果

6.4.4.1. 型枠実験 1（離隔距離用素材の検証）の結果

図 33~図 35に離隔距離用素材の検証実験における測定したタイミングを示す。測定した各工程は埋設前(スタイロフォーム上計測架台)、基層上、中間層埋設後、表層施工後の状況である。埋設前とはスタイロフォームの測定台の上にコイルを乗せてアスファルト舗装の影響を受けない状態での測定のことである。基層上とは既設舗装の上に敷設した40 mmのアスファルト舗装の上にコイルを設置して測定した状況のことである。中間層埋設後とは基層40 mmの上に敷設した60 mmのアスファルト混合物の層にコイルを埋設した後の測定である。表層施工後とは中間層の上に50 mmのアスファルト舗装を敷設した後の測定のことである。

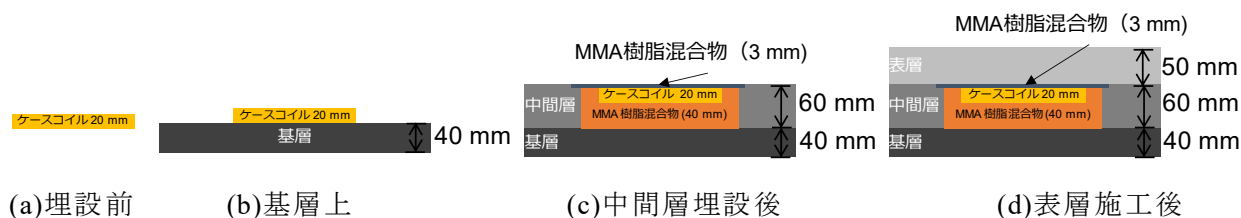


図 33. 型枠1の測定タイミング（離隔距離用素材の検証実験）

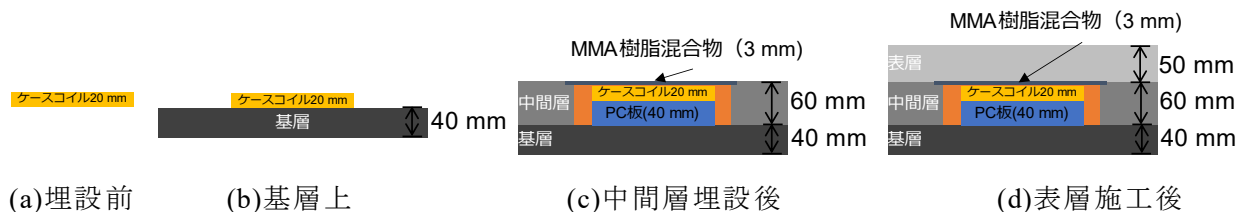


図 34. 型枠2の測定タイミング（離隔距離用素材の検証実験）

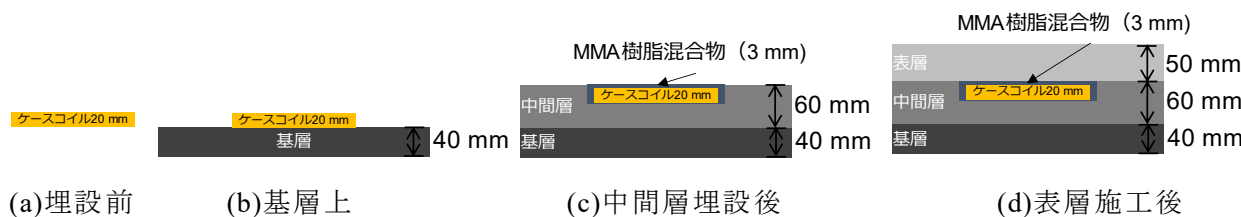


図 35. 型枠3の測定タイミング（離隔距離用素材の検証実験）

図 36に各施工工程における埋設コイルの抵抗値 R 及び Q 値の測定結果を示す。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。抵抗値 R の結果を見ると、コイル下面をMMA樹脂混合物40 mmで離隔したコイル1（型枠1）が最も抵抗値 R が大きく、ポリカーボネート板40 mmで離隔したコイル2（型枠2）が埋設後の特性悪化を最も低減できた。樹脂40 mmと直接埋設を比較するとアスファルト混合物にコイルを直接埋設した方が抵抗値の悪化が小さい結果となった。よって、MMA樹脂混合物よりもポリカ

一ボネート板でコイルケースを分厚くし、アスファルト混合物から隔離した方がコイル埋設後の抵抗値 R の悪化を低減できることがわかった。

2021年度の学内埋設実験ではコイルをアスファルト混合物に直接埋設するよりもMMA樹脂混合物でアスファルト混合物から隔離距離を確保した方が良い特性となったが、それに反する結果となった。型枠実験は道路環境を模擬したものであり、実際の道路環境下での実験ではないので厳密に環境を再現できない部分による影響なのか不明であるが、この原因の究明については次年度以降の課題とする。ポリカーボネート板40 mmでコイル下面のケースを分厚くしたコイル2については本検証実験で最も良い特性となったため、学内埋設実験で舗装強度試験も含めて実際の道路環境下での評価を行う。

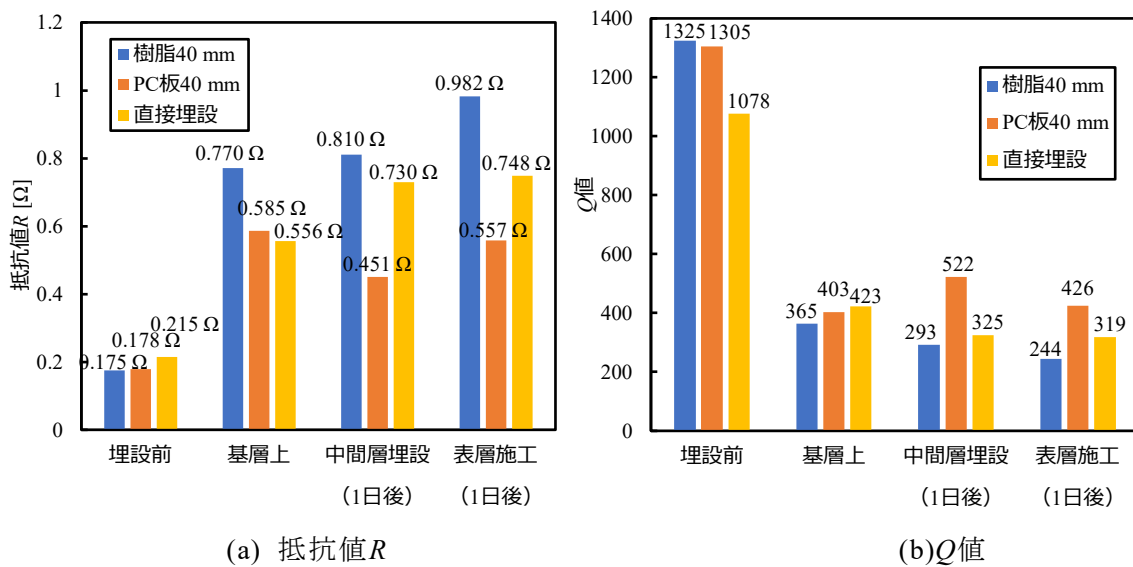


図 36 隔離距離用素材の検証実験におけるコイル埋設過程の特性変化

図 37に型枠実験におけるコイル埋設前後のベクトルネットワークアナライザ (VNA) による測定状況を示す。図 38に隔離距離用素材の検証実験における送受電コイルの位置関係を示す。コイル埋設前後における伝送効率と出力電力の伝送特性評価を行った。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た。VNAは実際に高電圧を印加する機能はなく微弱な信号が入力され結果は換算値として表示される。測定に使用した機器はKeysight Technologies社のENAシリーズネットワークアナライザE5061Bである。

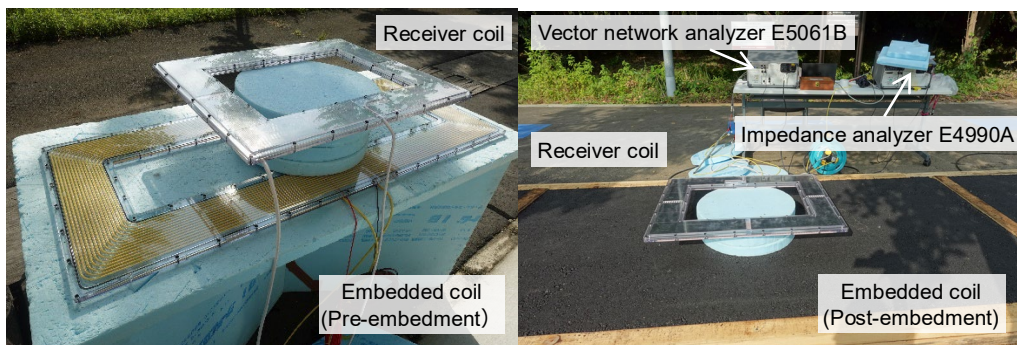
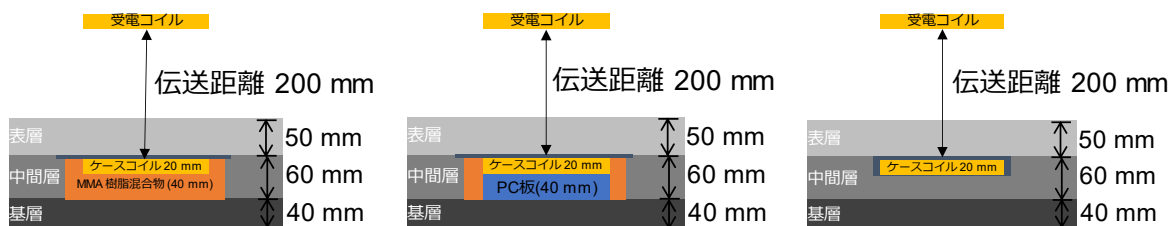


図 37. 型枠実験におけるコイル埋設前後のVNAによる測定状況



(a)樹脂40 mm (b)ポリカーボネート板40 mm (c)直接埋設

図 38. 離隔距離用素材の検証実験における送受電コイルの位置関係

図 39に離隔距離用素材の検証実験におけるVNAによる伝送効率 η と出力電力 P_{out} の測定結果を示す。伝送効率 η を見ると、コイル下面をポリカーボネート板40 mmで分厚くしたコイル2が最も高効率を達成し、埋設前に比べて効率 η は2%低下した。コイル下面を樹脂40 mmで離隔したコイル1は最も伝送特性が悪く、埋設前に比べて効率 η は5%以上も低下した。出力電力 P_{out} を見ると、いずれのコイルも埋設後でも20 kW以上は達成した。コイル2 (型枠2) は埋設後でも出力電力 P_{out} は0.3 kWの低下に抑えられた。よって、**MMA樹脂混合物よりもポリカーボネート板でコイルケースを分厚くし、アスファルト混合物から離隔した方がコイル埋設後の伝送効率 η と出力電力 P_{out} への悪影響を低減できることがわかった。**

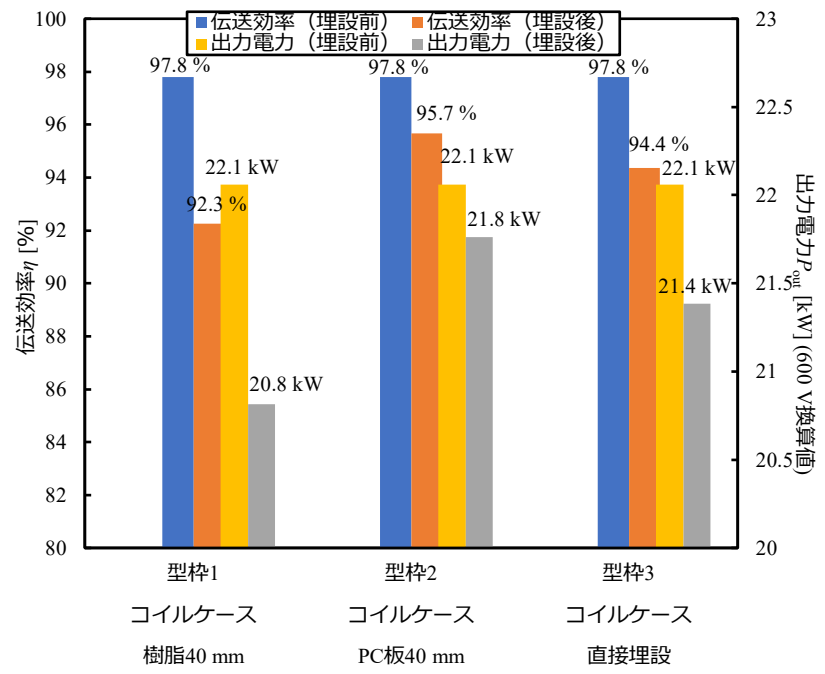


図 39. 離隔距離用素材の検証実験における伝送効率と出力電力

6.4.4.2. 型枠実験2（樹脂舗装材の厚さの検証）の結果

図 40~図 42に樹脂舗装材の厚さの検証実験における測定したタイミングを示す。測定した各工程は埋設前(スタイロフォーム上計測架台)、基層上、中間層埋設後、表層施工後の状況である。

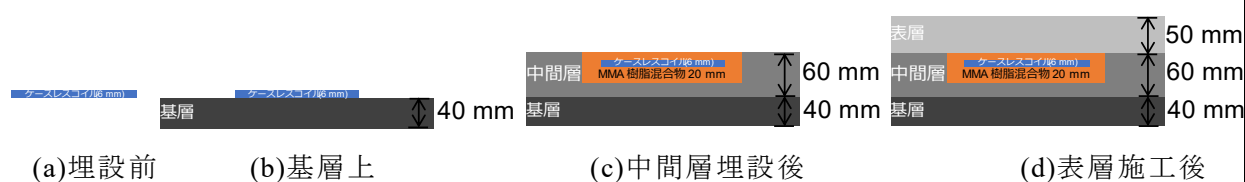


図 40. 型枠4の測定タイミング（樹脂舗装材の厚さの検証実験）

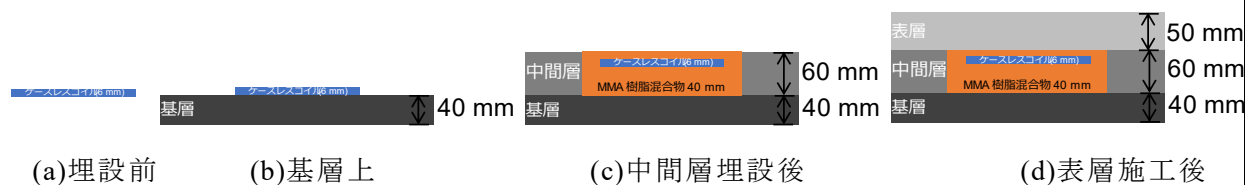


図 41. 型枠5の測定タイミング（樹脂舗装材の厚さの検証実験）

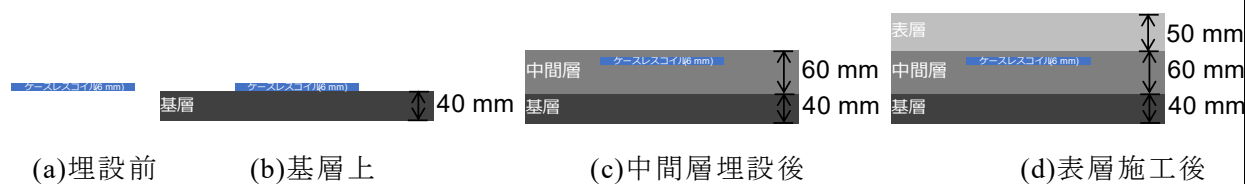
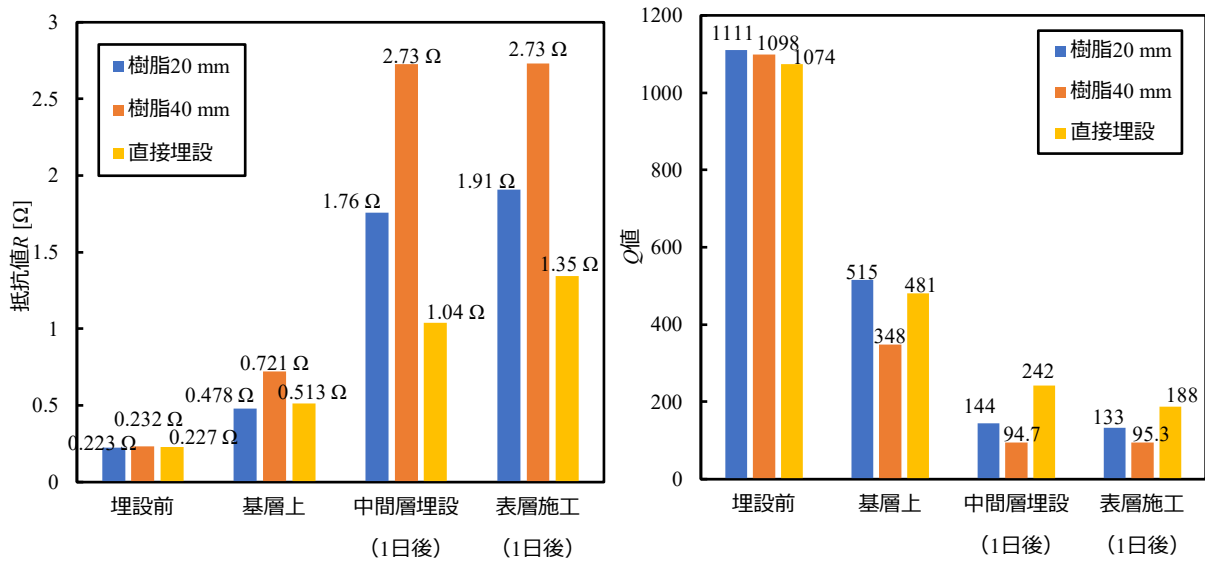


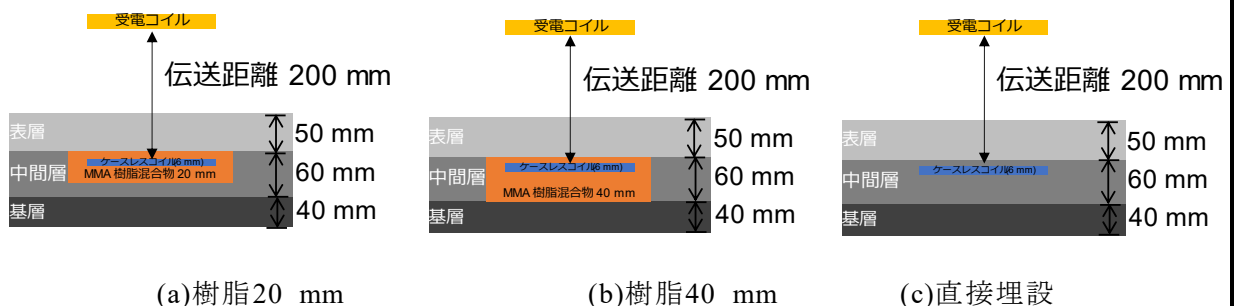
図 42. 型枠6の測定タイミング（樹脂舗装材の厚さの検証実験）

図 43にMMA樹脂混合物20 mmと40 mmでアスファルトとコイルとの離隔距離を変化させたときのコイルの内部抵抗値 R と Q 値の測定結果を示す。抵抗値 R の結果を見るとコイルケース下面を樹脂40 mmで離隔したコイルが最も抵抗値 R が増加し、アスファルト混合物に直接埋設したコイルに比べて2倍以上の抵抗値 R が悪化した。樹脂と直接埋設を比較すると直接埋設コイルの方が最もコイル埋設後の特性悪化を低減できたが、前節で述べたように2021年度の学内埋設実験の結果と異なる傾向となった。この原因の解明についても次年度以降の課題とする。



(a) 抵抗値 R (b) Q 値
 図 43. 樹脂舗装材の厚さの検証実験における抵抗値 R と Q 値の変化

図 44に樹脂舗装材の厚さの検証実験における送受電コイルの位置関係を示す。図 45に伝送効率 η と出力電力 P_{out} の測定結果を示す。図 43の抵抗値 R と Q 値の傾向と同様に、コイル下面をMMA樹脂混合物で施工したコイル4 (型枠4) とコイル5 (型枠5) が伝送効率 η と出力電力 P_{out} が悪く、アスファルト混合物にコイルを直接埋設したコイル6 (型枠6) よりも伝送特性が悪い結果となった。樹脂20 mmと樹脂40 mmを比較すると樹脂40 mmの方が効率 η が樹脂20 mmよりも3%低い結果となった。よって、2021年度の型枠実験におけるスタイロフォーム20 mmと40 mmでアスファルト舗装から離隔距離を確保した方が伝送特性の悪化を低減できたが、本実験ではそれに反する結果となった。2021年度と2022年度の離隔距離の検証実験では離隔用の素材が異なるので傾向が一致しなかったと考えられるが、詳細な原因の究明は次年度以降の課題とする。



(a) 樹脂20 mm (b) 樹脂40 mm (c) 直接埋設
 図 44. 樹脂舗装材の厚さの検証実験における送受電コイルの位置関係

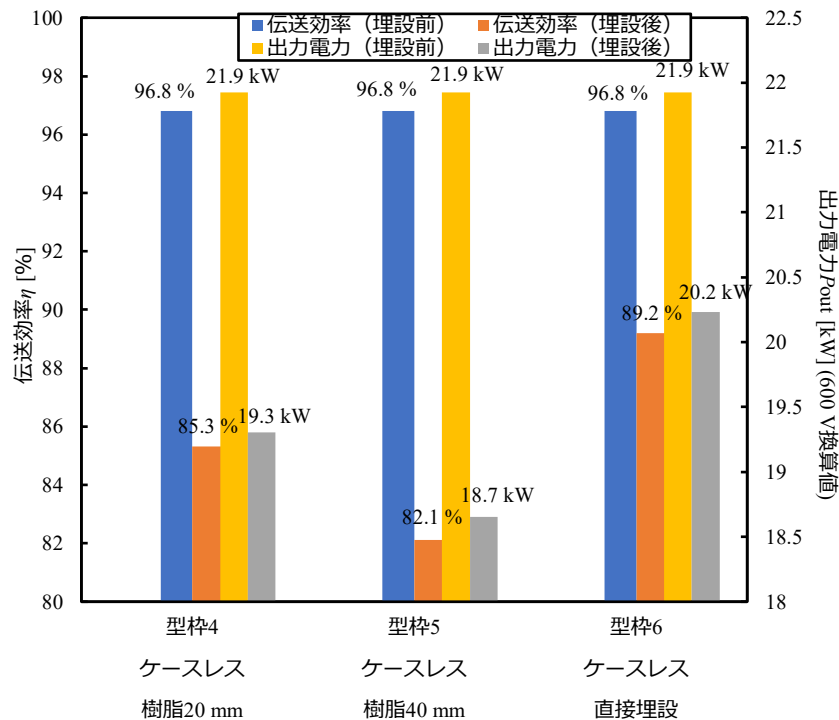


図 45. 樹脂舗装材厚の検証実験における伝送効率と出力電力

6.4.4.3. 型枠実験3（アスファルト混合物の影響低減設計の検証実験）の結果

型枠実験 3：従来設計のコイル 6（型枠 6）の直接埋設コイルと特性を比較して提案手法の実機による埋設環境下での検証を行う。コイル埋設方法はコイル 6 とコイル 7 は同様に埋設環境は同一条件であり、異なるのはコイルの巻き数と線間ピッチのみである。



図 29 直接埋設（型枠6・型枠7）【再掲】

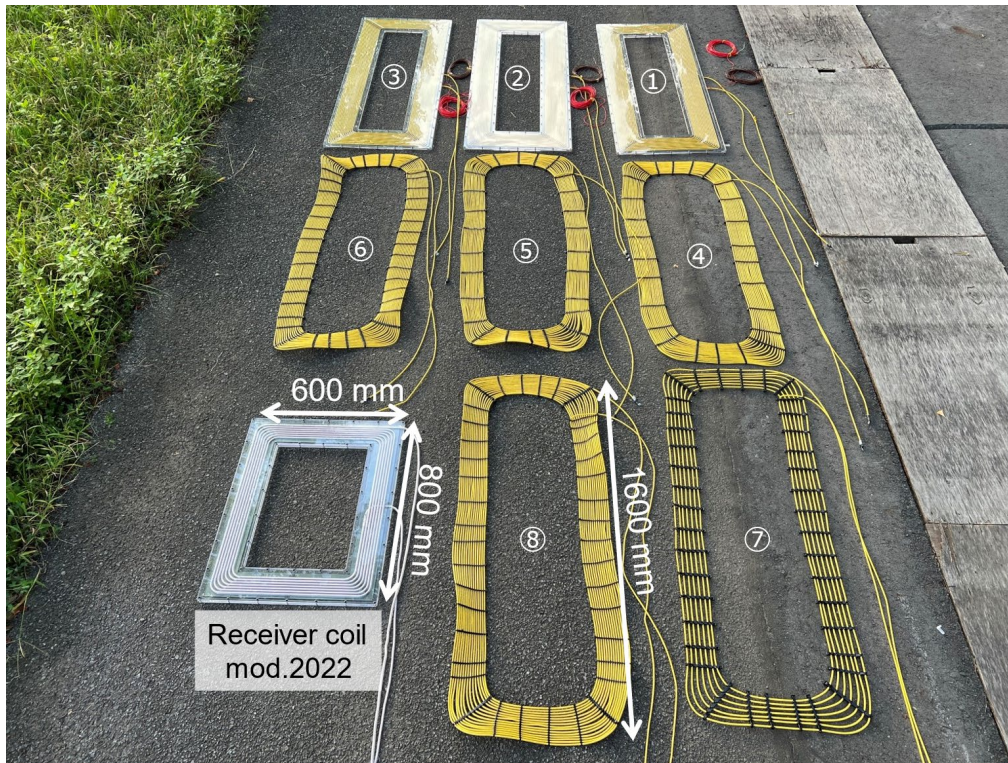


図 24 型枠実験用コイルと受電コイル【再掲】

表 3 型枠実験用コイルと受電コイルの仕様【再掲】

コイル	樹脂ケースコイル (コイル1, 2, 3)	ケースレスコイル (コイル4, 5, 6, 8)	ケースレスコイル (コイル7)	受電コイル
コイルサイズ	600×1600 mm	600×1600 mm	600×1600 mm	600×800 mm
コイルケースサイズ	660×1650×20 mm	-	-	670×870×27 mm
巻数 t	15	15	7	7
線間ピッチ p	9 mm	9 mm	18 mm	11 mm
導体外径 d	5.1 mm	5.1 mm	5.1 mm	7.85 mm
線路長 l	59.4 m	59.4 m	28.6 m	51.2 m
重量	22.6 kg	7.27 kg	2.82 kg	18.3 kg

図 46に従来設計のコイルとアスファルト混合物の影響低減設計手法を適用したコイルの抵抗値 R と Q 値の結果を示す。図 46(a)の抵抗値 R の結果より、従来設計のコイル6は表層施工後の抵抗値 R は 1.35Ω と埋設前に比べて約6倍も抵抗値 R が増加したが、新設計のコイル7は埋設前に比べて表層施工後は約2.5倍となり、特性悪化の低減に成功した。図 46(b)の Q 値の結果より、埋設前は従来設計のコイル6の方が Q 値が1000以上で新設計のコイル7よりも高 Q 値であったが、埋設後はコイル7の方が抵抗値 R の悪化を低減できたことにより Q 値が

大きくなった。

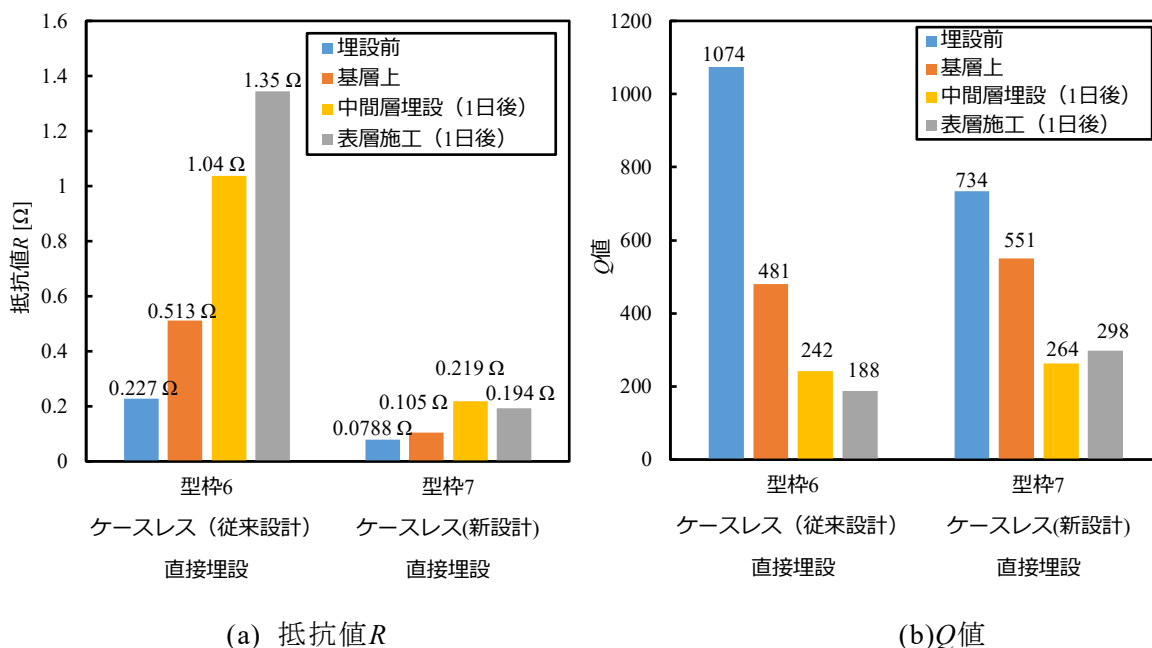


図 46. アスファルトの影響低減設計コイルの検証実験における抵抗値 R と Q 値の変化

図 47に従来設計コイルと新設計のコイルのVNAによる伝送効率 η と出力電力 P_{out} の測定結果を示す。従来設計コイルは埋設前に比べて効率 η が7.6 %低下したが、新設計コイルは僅か1.4 %の低下に抑えることに成功した。出力電力 P_{out} を見ると、従来設計コイルの埋設後は埋設前に比べて1.7 kWの小さくなったが、新設計コイルは0.2 kWの低下に抑えることに成功した。よって、従来設計コイルよりも、埋設の影響を受けにくく設計した新設計コイルの方がコイル埋設後において高効率かつ大電力を達成し、本研究の提案設計手法が実機による検証でアスファルト混合物からの影響を低減可能であることが確認できた。

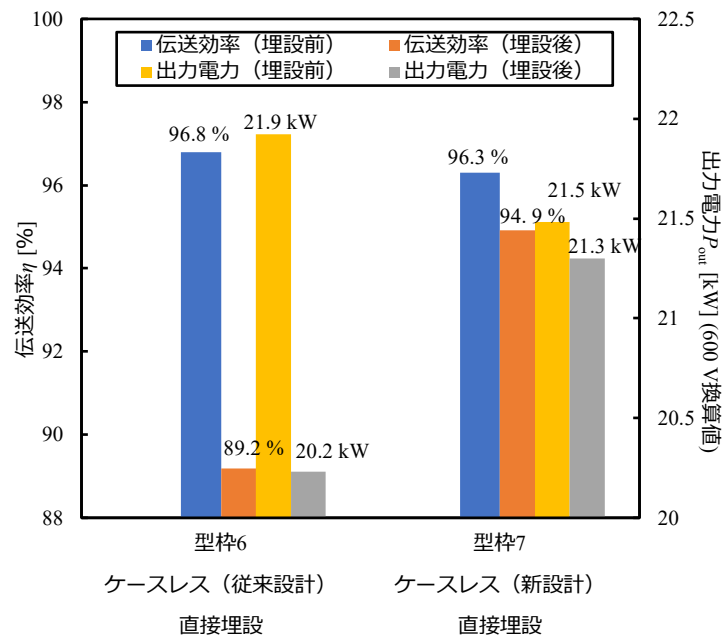


図 47. アスファルトの影響低減設計コイルの検証実験における抵抗値 R と Q 値の変化

6.4.4.4. 型枠実験4 (経時変化の検証実験) の結果

図 48に型枠4と型枠8における抵抗値 R と Q 値の測定結果を示す。経過日数は表層施工時を0日として、29日目に型枠撤去日であったのでそこまでの経時変化を示す。雨は表層施工日から9, 10, 17, 21日目に降っている。ブルーシートなしの型枠4とブルーシートで覆った型枠8を比較すると型枠8の方が雨による影響を受けていないためか値の変化が小さいことが分かる。型枠4は9日目の雨が降った後の測定では抵抗値が前日より約1.5倍増加したがその2日後の雨が降っていないときは抵抗値が表層施工直後の状態まで回復していることがわかる。よって、雨による影響で特性が悪化するが、降雨がやんで路面が乾けば元の特性近くまで回復することが確認できた。

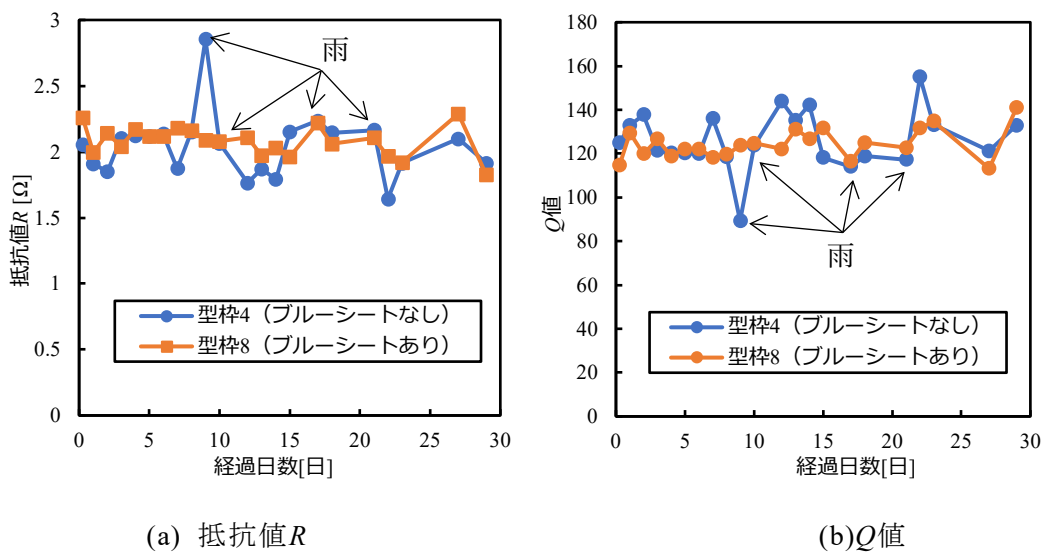


図 48. 抵抗値 R と Q 値の経時変化

6.5. 土木研究所埋設実験 (2022年11月07日~16日)

本実験は土木研究所において実施したコイル埋設実験及び継続中の走行荷重試験である(図49)。コイル埋設後に大型車による10万輪の載荷試験を行い、コイルおよび舗装耐久性の検証が目的である。評価としては10万輪後の測定で評価することになるが、現時点で分かっている事柄について記載する。機械特性については6.7で述べる。

6.5の結論

本節の主要な結論を先に述べると、

- ・埋設後の特性として50kW級のコイルに成功した。

となる。以下、本節の本文を記載する。



図 49 土木研究所での実施の様子

表 4に土木研究所における埋設実験条件の一覧を示す。また、図 50に舗装断面図、図 51に舗装断面図詳細、図 52に舗装平面図を示す。埋設コイルは9個であり、表層と基層にそれぞれケースコイルとケースレスコイルを埋設してコイルケース有無の違いによる舗装耐久性を検証する。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的特性と機械的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う。図 52より、コイル1~4は試験車両の車輪間のB.W.P (Between Wheel Path) に埋設し、車輪に踏まれていないとき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I.W.P (Inner Wheel Path) に埋設し、車輪に100%踏まれ続けた時のコイル及び舗装耐久性を評価する。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、B.W.P及びI.W.P埋設による合計9パターンによる比較検討を行い、電気的特性及び機械的特性の優れたコイル、埋設深さ、埋設位置の評価を行う。

表 4. 土木研究所におけるコイル埋設条件の一覧

埋設 コイルNo.	ケース 素材	コイル タイプ	線材	埋設 深さ	埋設 位置	土研・学内 共通コイル
1	ケース レス	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	基層	B.W.P	○
2	PC樹脂	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	基層	B.W.P	○
3	ケース レス	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	表層	B.W.P	○
4	PC樹脂	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	表層	B.W.P	○
5	ケース レス	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	基層	I.W.P	
6	ケース レス	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	基層	I.W.P	○
7	PC樹脂	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	基層	I.W.P	○
8	ケース レス	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 糸巻線	表層	I.W.P	○
9	PC樹脂	S型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000本 FEP被覆	表層	I.W.P	○

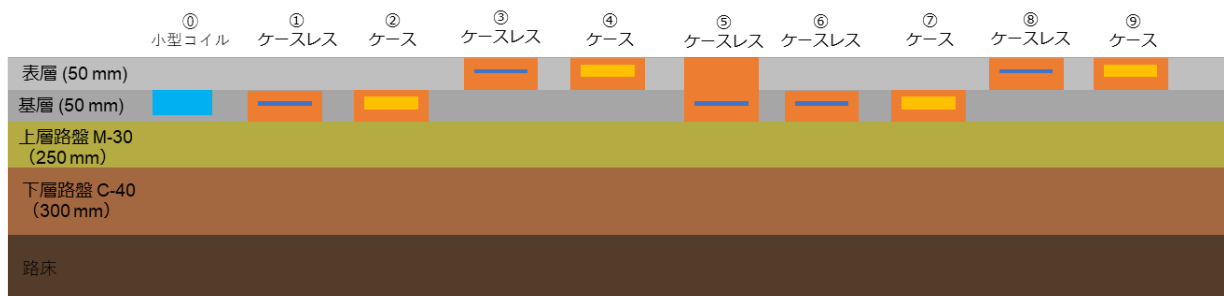
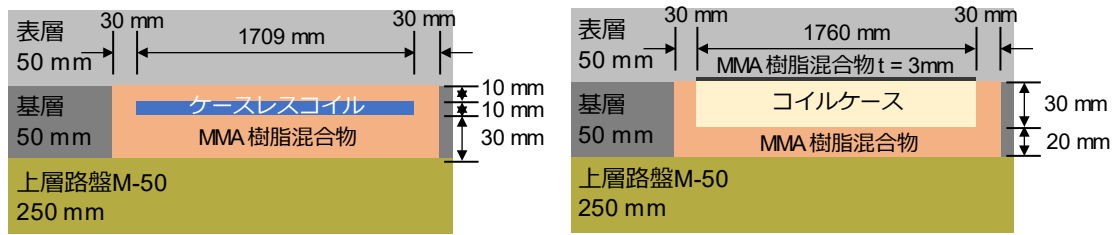
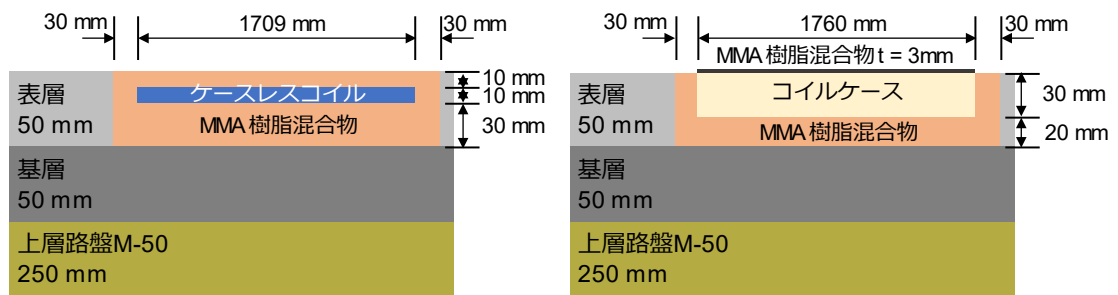


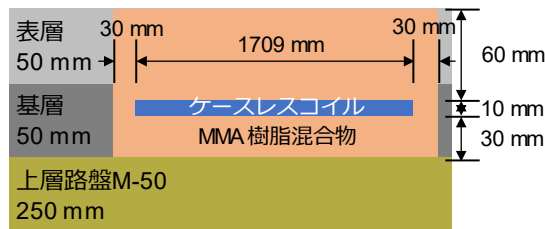
図 50. 土木研究所でのコイル埋設実験における舗装断面図



(a)ケースレスコイルの中間層埋設(コイル1, 6) (b)ケースコイルの中間層埋設(コイル2, 7)



(c)ケースレスコイルの中間層埋設(コイル3, 8) (d)ケースコイルの中間層埋設(コイル4, 9)



(e)ケースレスコイルの樹脂全面施工 (コイル5)

図 51. 土木研究所におけるコイル埋設実験の舗装断面図詳細

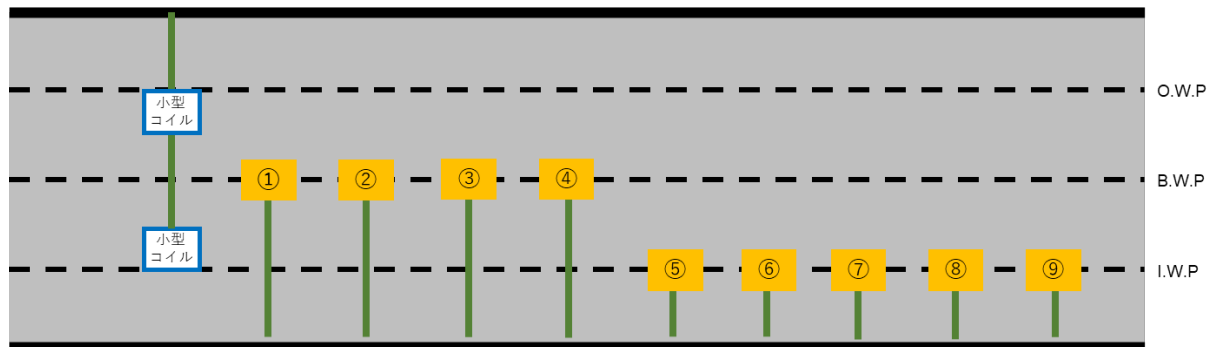


図 52. 土木研究所でのコイル埋設実験における舗装平面図

図 53に土木研究所における埋設実験用コイルを示す。土木研究所用のコイルは型枠実験用コイルとはことなり、素線数が10000本のリッツ線を使用しており、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FEP素材である。土木研究所の送受電コイルの仕様は学内埋設実験と同様である。



図 53. 土木研究所埋設実験用コイル

表 5. 土木研究所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	受電コイル
コイルサイズ	600×1700 mm	600×1700 mm	600×800 mm
コイルケースサイズ	660×1760×30 mm	-	670×870×27 mm
巻数 t	6	15	7
線間ピッチ p	12 mm	12 mm	11 mm
導体外径 d	7.85 mm	7.85 mm	7.85 mm
線路長 l	31.5 m	31.5 m	51.2 m
重量	22.6 kg	7.27 kg	18.3 kg

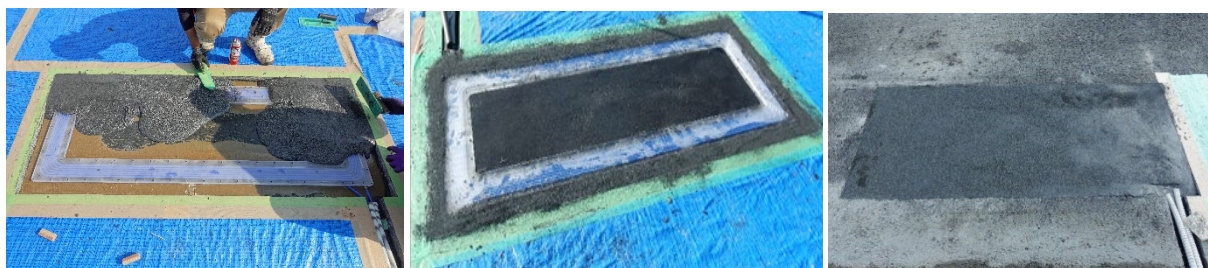
図 54にMMA樹脂混合物によるケースコイルの施工状況を示す。施工方法は基層及び表層の50 mmに対して、コイル下面の20 mmをMMA樹脂混合物で施工した。樹脂硬化後、その上に2 mm程度接着剤を流し込み、すぐに厚さ30 mmのケースコイルを設置後、約120kgの錘をのせて数十分圧着した。最後に、コイル上面の3 mmをMMA樹脂混合物で表面処理をした。

図 55にMMA樹脂混合物によるケースレスコイルの施工状況を示す。施工方法は基層及び表層の50 mmに対して、コイル下面の30 mmをMMA樹脂混合物で施工した。樹脂硬化後、厚さ約10 mmのケースレスのコイルを設置してコイル上面の10 mmをMMA樹脂混合物で

埋設した。

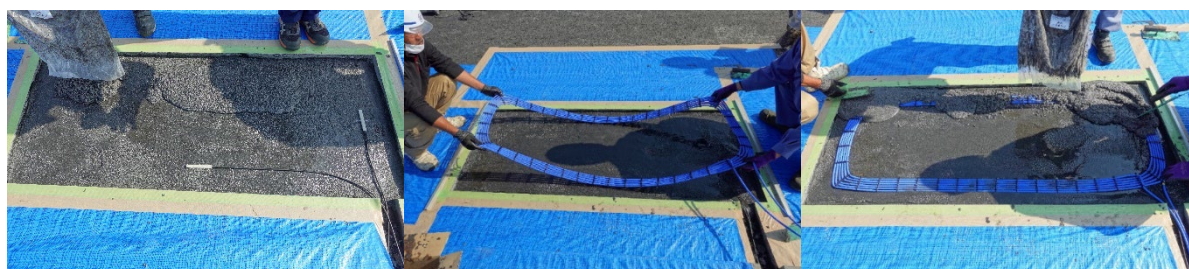


(a)コイル下面樹脂20mm舗設 (b)コイル下面接着剤2mm (c)ケースコイル設置



(d)コイルと接着剤の接着 (e)樹脂によるコイル固定後 (f)中間層埋設後

図 54. MMA樹脂混合物によるケースコイルの施工状況



(a)コイル下面樹脂施工 (b)コイル設置 (c)コイル上面樹脂施工

図 55. MMA樹脂混合物によるケースレスコイルの施工状況

図 56に埋設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、コイルの元々のリード線3 mだと短く走行試験中の測定ができないため、図 57のように7 mのリッツ線に圧着端子を付けてボルトで接続して合計10 mに延長した。図 58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、図 59にリード線が40 mのときの測定結果を示す。全体的な傾向としては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 が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、舗装材から隔離されているため影響を低減できているからだと考えられる。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かケースコイルと同程度の抵抗値 R となった。図 59のリード線10 mの結果を見ると、リード線3 mに比べて抵抗値 R が1.5 倍以上増加した。これは、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。

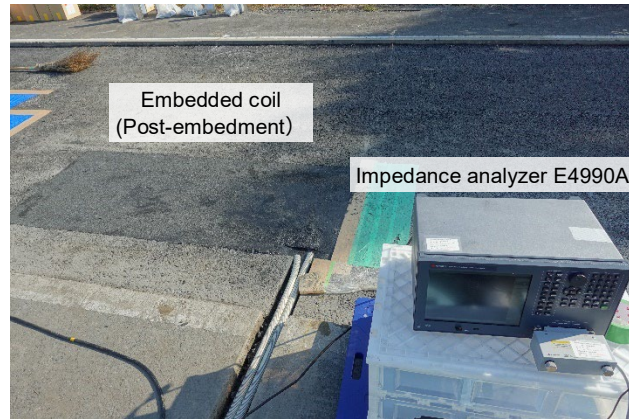


図 56. インピーダンスアナライザによる測定状況



図 57. リード線の延長

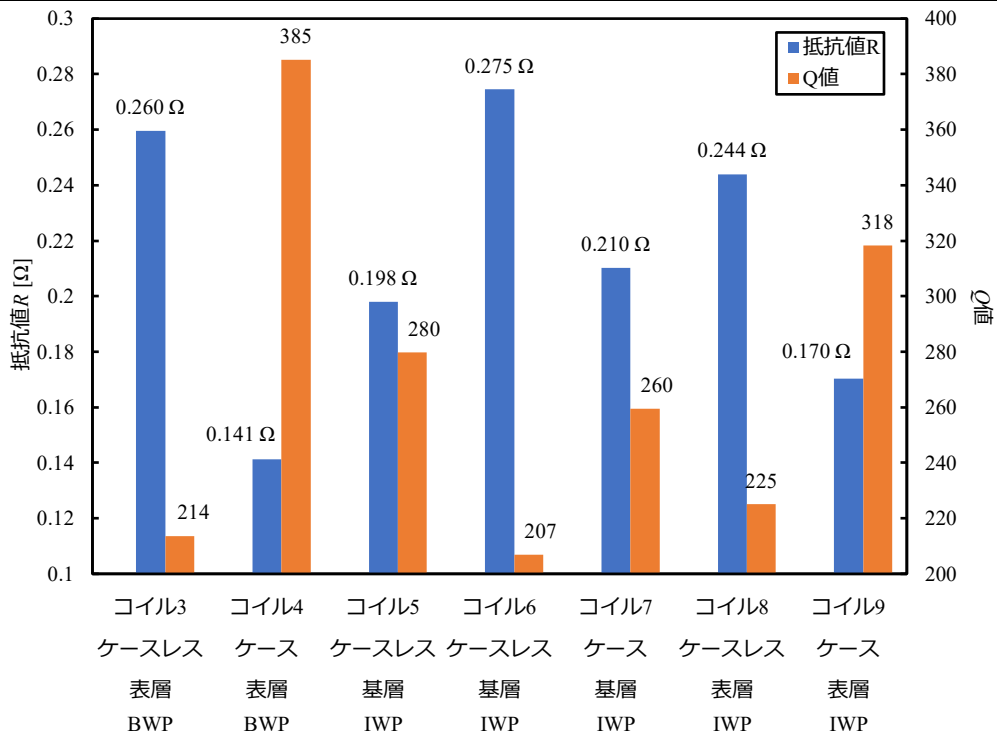


図 58. コイル埋設後における抵抗値RとQ値（リード線3 m）

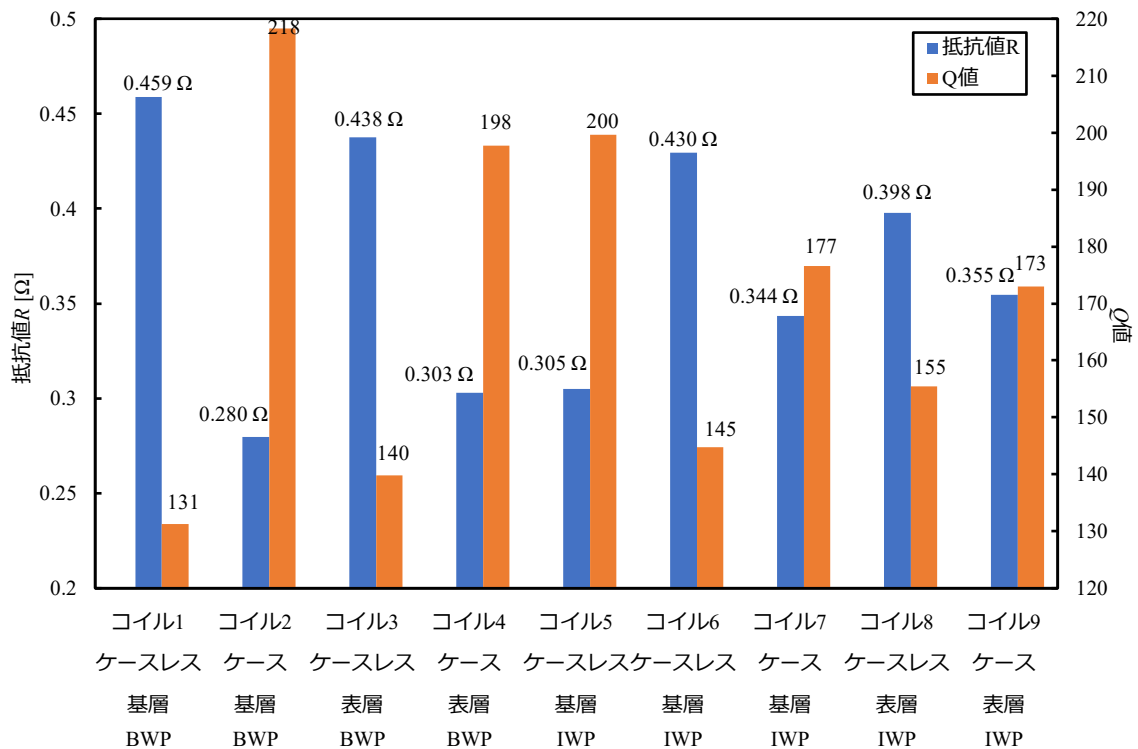


図 59. コイル埋設後における抵抗値RとQ値（リード線10 m）

図 60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。

図 61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。リード線3 mのときの結果はコイル5~9までであるが、図 61(b)より、**いずれのコイルも埋設後は効率91%以上で出力電力は50 kW以上の大電力を達成した。一番良いコイルは効率95%かつ54 kWである。**



図 60. コイル埋設後におけるVNAによる測定状況

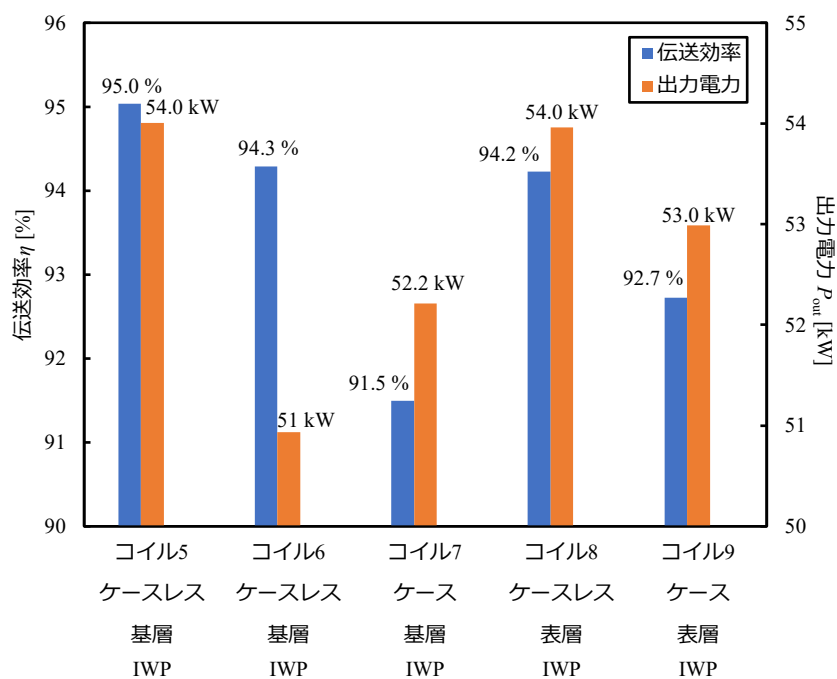


図 61. コイル埋設後におけるVNAによる伝送特性評価の結果（リード線3 m）

6.5.1. 超小型コイル

送電コイルと受電コイルの間の距離を近くすることによって小型化が可能なコイルを設置する際の路面耐久性について述べる。送電コイルと受電コイルの間の距離を近くするためには、路面との干渉のない範囲で受電コイルを路面に近づけることが必要である。車両の懸架装置より上に受電コイルを設置する場合は、懸架装置のばねが段差等を乗り越える際に一時的に縮まったり、乗員や積載物の変化による車体重量の変化によって縮まったりするため、その変位を予期して受電コイルと路面の距離を設定する必要がある。一方で懸架装置より下に受電コイルを設置する場合には受電コイルと路面の距離を変化させる要因は、タイヤの変位のみとなり、送電コイルと受電コイル間の距離の変動が小さくなる。そのため予期しなければならない変位が小さくなり、受電コイルの距離をより縮めることができる。

懸架装置の下に受電コイルを搭載する場合には、アップライトもしくはアームに搭載することとなるため、受電コイルはタイヤ近傍に搭載することになる。すると送電コイルは受電コイルと対向させるために、タイヤ近傍に設置する必要がある。送電コイルがタイヤ近傍に接地されるということは車両の荷重の影響をより受けやすい配置になるため、タイヤ近傍への小型コイルの配置による路面への影響検証を行う。コイルは2種類の形状を用意している（図 62）。



図 62. 超小型コイルの埋設の状況

6.6. 学内埋設実験

学内埋設は工事が終了したばかりであり FWD 試験などはこれからであり、本報告では間に合わないため、学内埋設の成果は最終報告書に記載する事にして、実施事項について述べる。実施意図としては、路床からの改良が必要なため N6 交通量相当の検証は土木研究所ではできないので、コイルの最適化や埋設方法の最適化などに関しては学内埋設が適している。学内埋設の様子を図 63 に示す。



図 63. 学内埋設の様子

以下実施内容の説明である。表 3 に学内埋設実験におけるコイル条件一覧を示す。土木研究所埋設実験では実績のあるコイルや埋設方法しか検討できなかったが、学内埋設実験では新提案のコイルをいくつか検証する。表 3 より、コイル 1～3 ではコイルサイズを 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、今までは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。コイル 7 及び 8 はコイルケースに CR 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。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オープン型（O 型）コイルである。

表 6. 学内埋設実験におけるコイル条件一覧

埋設コイル No.	ケース素材	コイルタイプ	線材	埋設位置	土研・学内共通コイル	備考
1	ケースレス	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	表層		<ul style="list-style-type: none"> ・小型コイルの検証用 ・サイズ 800 mm ・1, 2, 3 で比較
2	ケースレス	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	表層		<ul style="list-style-type: none"> ・小型コイルの検証用 ・サイズ 1,300 mm ・1, 2, 3 で比較
3	ケースレス	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	表層	○	<ul style="list-style-type: none"> ・ケースレスコイルの表層埋設 ・2022 年度より学内埋設初検討 ・1, 2, 3 と 3, 5, 6, 7 で比較
4	PC 樹脂	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	表層	○	<ul style="list-style-type: none"> ・2021 年度の表層施工方法 ・3, 5, 6, 7 で比較
5	PC 樹脂	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	表層		<ul style="list-style-type: none"> ・ケースを厚くしたコイル ・MMA 樹脂かケース厚による離隔の検討
6	ケースレス	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	中間層	○	<ul style="list-style-type: none"> ・2021 年度電気, 機械特性最も良い結果 ・3, 5, 6, 7 で比較
7	PC 樹脂	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	中間層	○	<ul style="list-style-type: none"> ・ケース付きコイルの中間層埋設 ・3, 5, 6, 7 で比較
8	CR ゴム	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 糸巻線	中間層		<ul style="list-style-type: none"> ・エラストマー系素材の検討 ・2023 年度の土研埋設に向けた初期検討 ・FEP 被覆なしの糸巻線
9	CR ゴム	S 型	φ 8 mm 0.05 mm, 10,000 本 FEP 被覆	表層		<ul style="list-style-type: none"> ・エラストマー系素材の検討 ・2023 年度の土研埋設に向けた初期検討 ・FEP 被覆
10	PC 樹脂	O 型	φ 5 mm 0.05 mm, 4,000 本 FEP 被覆	表層		<ul style="list-style-type: none"> ・オープン型 ・2021 年度の再検討

図 64 に学内埋設実験における舗装断面図を示す。舗装構造は国道レベルの N6 設計である。2021 年度は中間層埋設がメインであり表層埋設は厳密には検討しきれていないので今年度は表層埋設を中心に比較検討を行う。

図 65 に舗装断面図詳細を示す。ケースレスコイル及びケースコイルの MMA 樹脂混合物による施工方法は土木研究所での施工方法と同様である。コイル 5 のみコイルケース厚が表層厚と同様の 50 mm であるためコイル下面は 2 mm の接着剤でコイルケースとアスファルト舗装を接着する施工方法である。

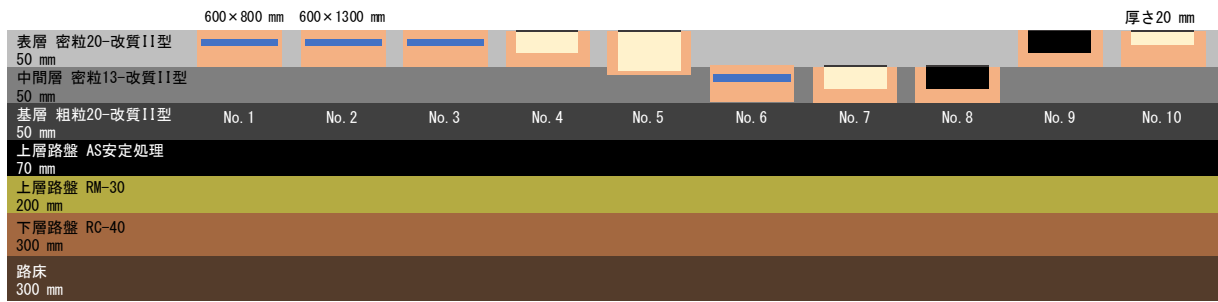
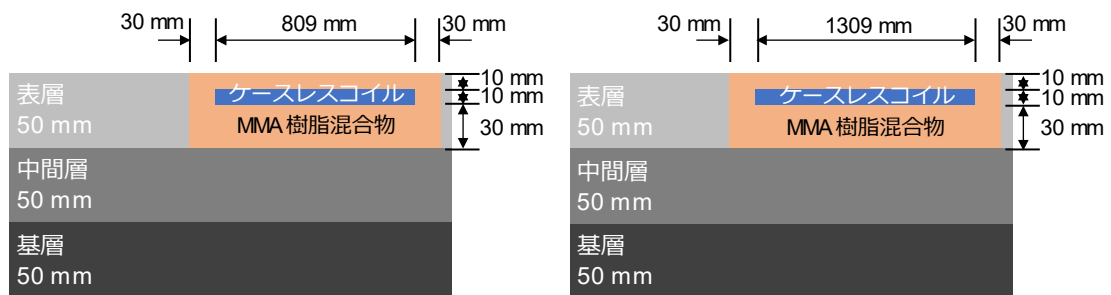
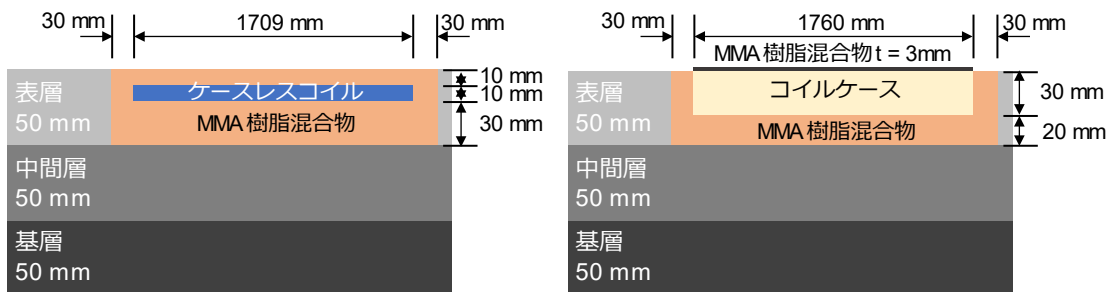


図 64. 学内埋設実験における舗装断面図



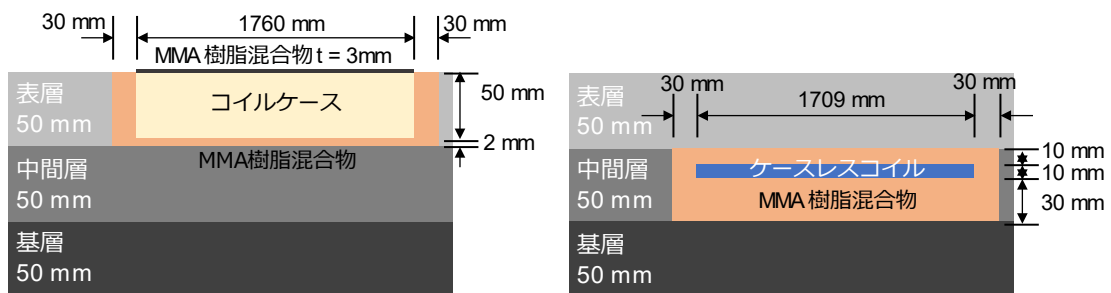
(a)コイル1

(b)コイル2



(c)コイル3

(d)コイル4



(e)コイル5

(f)コイル6

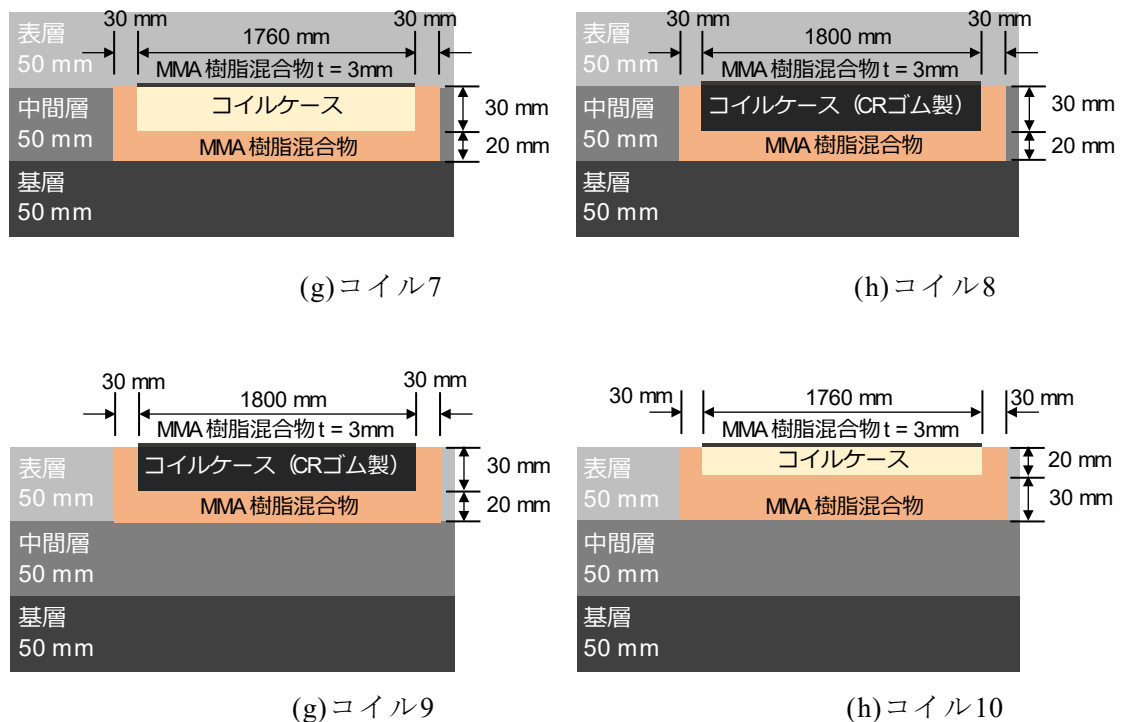


図 65. 学内埋設実験における舗装断面詳細図

6.7. 機械的特性について

6.7.1. 土木研究所円形走行路 埋設試験・走行試験

本年度は改良したコイルケース及びリッツ線コイルの直接埋設を円形走行路内の舗装に埋設(図 66)し、走行載荷試験による耐久性の検討を始めた。

表層及び基層にコイルを埋設した舗装と比較地点のたわみ曲線の比較を図 67に示す。基層に埋設したコイルケース有りとは直接埋設は、比較地点のたわみ曲線と類似しているが、表層のコイルケース有りのコイル埋設はたわみ形状が異なり、載荷点から300mm離れた位置までのたわみ形状が大きい。これは、施工直後二日後の測定結果であり、舗装や舗装接着材の強度が安定していない可能性もある。

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の比較を図 68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はよるがリッツ線コイルをアスファルト混合物中に埋設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、埋設時のケースと舗装の接着材の強度発現などが遅い影響もあるかもしれない。基層下面に発生する引張りひずみと路床上面に発生する圧縮ひずみを図 69に示す。



図 66. 円形走行路 表層コイル設置状況

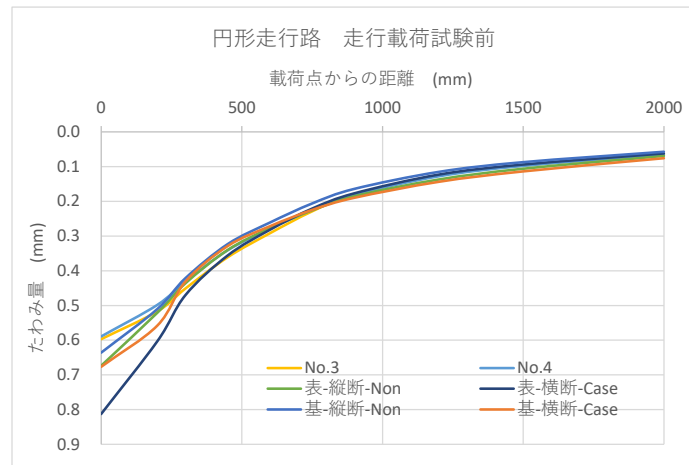


図 67. 表層・基層コイル埋設と比較地点のたわみ比較

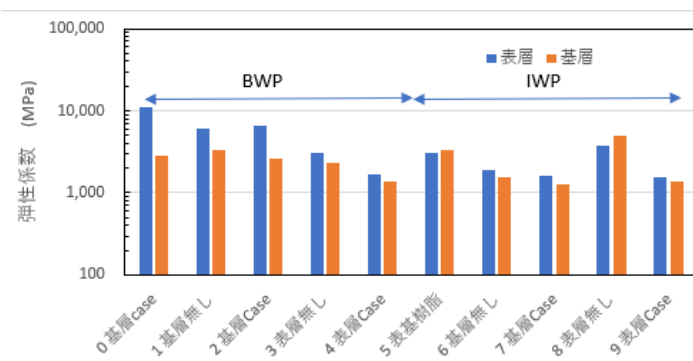


図 68. 表層・基層の弾性係数の比較

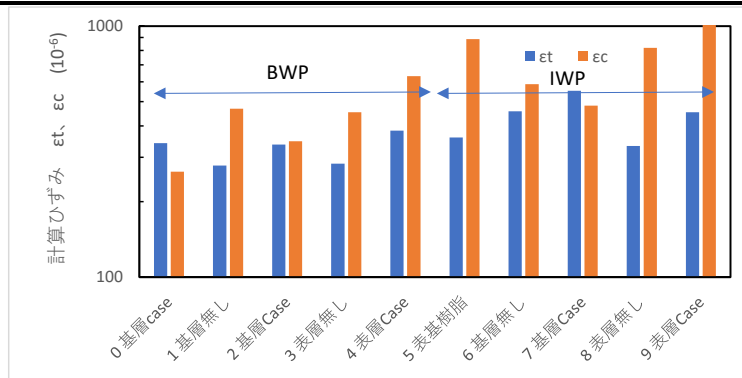


図 69. 弾性係数から求めた計算ひずみの比較

アスファルト混合物の基層下面の引張りひずみはコイルケースのある場合の基層の引張りひずみに比べ、直接埋設コイルの基層の引張りひずみの方が小さい。直接埋設コイルの方が、耐久性が高いと予測される。

円形走行路の直径200mで時速30km/hで4台が走行する試験である。車輛は輪荷重7.5tになるように調整されている(図 70)。1台の車輛は76秒で1周するため、19秒ごとに1台が通過する載荷条件になっている。11月下旬から走行試験が開始され、走行試験時に舗装に埋設したひずみ計測を行った。

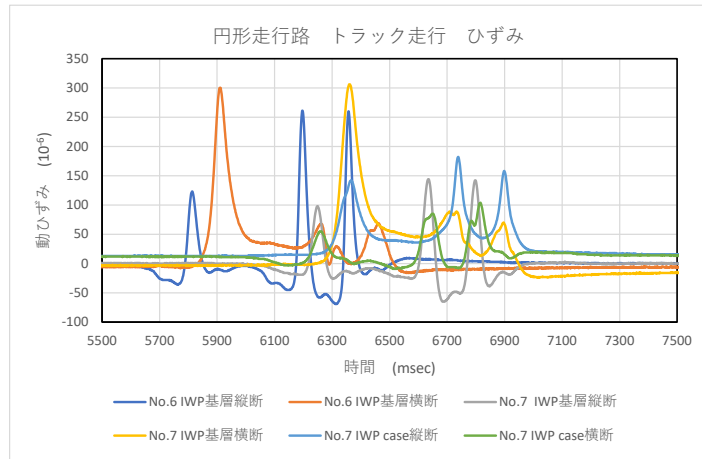
基層に埋設したコイル下の舗装のひずみと表層に埋設したコイル下の舗装のひずみを図 71に示す。基層のコイル下のひずみは中立軸より下方のため引張りひずみが発生し、表層のコイル下は中立軸より上のため圧縮ひずみが発生している。後軸で発生するひずみ量の方が前軸で発生するひずみより大きい。

表層のコイル下のひずみで、走行回数毎に残留するひずみと走行によって復元するひずみ量の比較を図 72に示す。

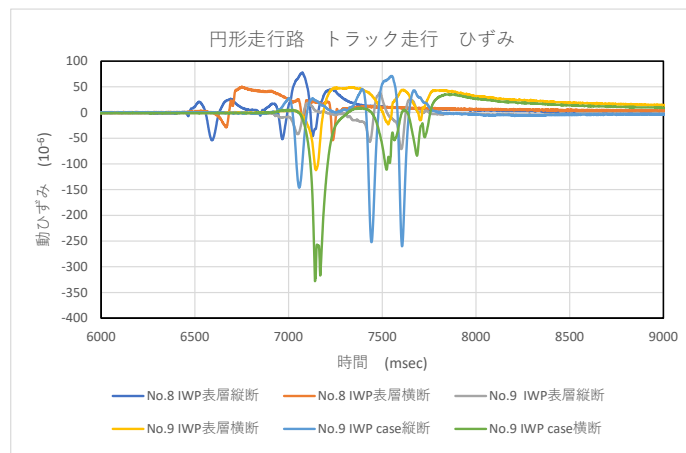
残留ひずみの比較では、直接埋設の方がコイルケースの埋設に比べ、残留ひずみが大きい。これに対し、タイヤに直接踏まれるIWPの走行時のひずみは、車輪間のBWPのひずみに比べて大きい。実測ひずみの傾向は、舗装の埋設位置により疲労抵抗性の傾向と一致しており、車輪間のBWPの位置に埋設するコイルの被害量が少ないことが窺える。



図 70 コイル埋設箇所を走行する大型車輛

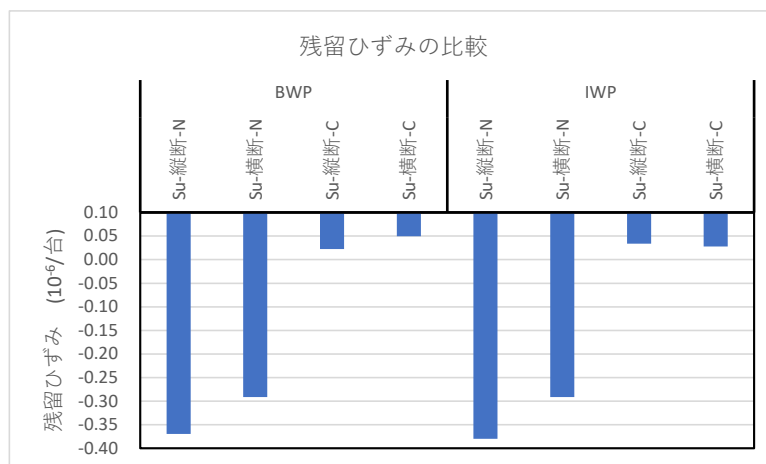


(a) 基層下の動ひずみ

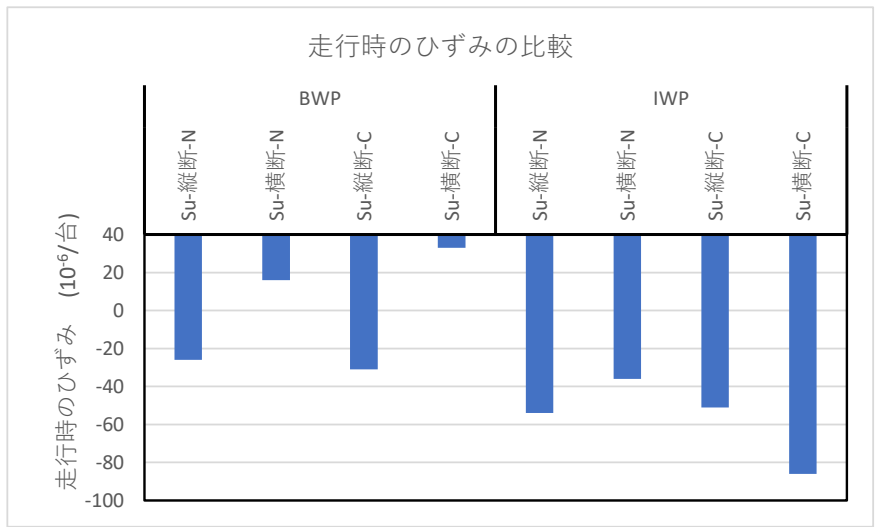


(b) 表層下の動ひずみ

図 71 走行試験時の発生ひずみの事例



(a) 载荷後との残留ひずみの比較



(b) 走行時の動ひずみの比較

図 72 走行試験における動ひずみの比較

6.7.2. FWD 試験と走行可能年数

昨年（本格研究1年目）のFWD試験は学内埋設道路で行った。昨年度（2021年度）の学内埋設道路の舗装構造はN6交通量相当の設計を行っている。一方で、土木研究所の円形走行路の舗装構造はN5交通量相当の設計である。N5交通量相当の設計は2020年度に実施した学内でのFSでの舗装構成（N5交通）と同等の条件となるので参考程度に示す（表 5）。FSの結果は使用しているコイルや埋設方法が古い手法であり、値は良くない。

今回の土木研究所における評価方法としては、非埋設区間の通常道路と、コイルを埋設した所の比較、そして、経年劣化後の比較というのが妥当な評価となる。今回の埋設直後の結果を表 8に示す。今回は非埋設区間の通常道路がOWPで5.6年相当、IWPで5.0年相当、それに対してコイルを埋設した所は1.4～7.3年相当であり、初期実験としては良い値が一部で出ている。しかしながら、今後の10万回載荷試験後の路面調査や構造調査が重要になる。その結果は最終報告書にまとめる。

N6交通量相当の10年設計の道路は学内埋設の方で昨年同様に工事を行っている。FWD試験は今後行うのでその評価も最終報告書にまとめる。

表 7. （参考値）2020年度 FSにおける校内埋設の走行可能年数

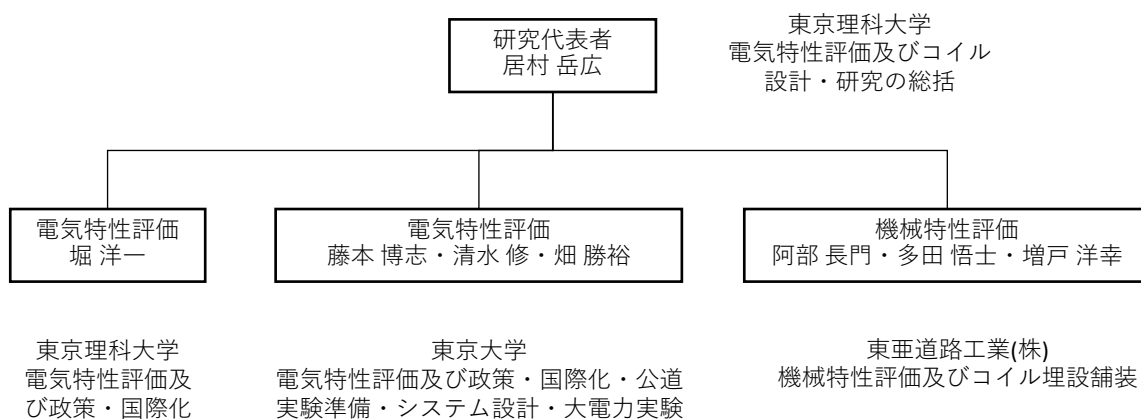
2020年度 FS 校内N5相当	コイル1-1	コイル1-2	コイル1-3	コイル2	コイル3	コイル4	コイル5
許容載荷輪数 [回] (49kN)	77,800	36,900	71,200	46,100	72,300	15,800	30,500
許容走行日数 [年] (N5)	0.8	0.4	0.8	0.5	0.8	0.2	0.3
許容走行日数 [年] (N6)	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1

表 8. 2022年度 土木研究所における走行可能年数

コイル種類	コイル0	コイル1	コイル2	コイル3	コイル4	コイル5
許容走行回数 [回] (49kN)	203,000	449,000	254,000	675,000	400,000	264,000
許容走行日数 [年] (N5)	2.2	4.8	2.7	7.3	4.3	2.8
許容走行日数 [年] (N6)	0.4	1.0	0.5	1.5	0.9	0.6
コイル種類	コイル6	コイル7	コイル8	コイル9	As舗装 OWP	As舗装 IWP
許容走行回数 [回] (49kN)	201,000	126,000	263,000	237,000	519,000	465,000
許容走行日数 [年] (N5)	2.2	1.4	2.8	2.5	5.6	5.0
許容走行日数 [年] (N6)	0.4	0.3	0.6	0.5	1.1	1.0

この様に、現在は初期の測定状況のみであり、10万回載荷試験後の調査を踏まえ、舗装の変形や路面の走行後の状態及びFWD載荷試験についてまとめ、更なる詳細な解析等を行い、コイル埋設方法や位置の違いが舗装構造に与える影響をまとめ、非接触給電舗装の必要となる構造や設計方法の検討に繋げていきたい。

6.8. 体制



⑦研究成果の発表状況

(本研究から得られた研究成果について、学術誌等に発表した論文及び国際会議、学会等における発表等があれば記入。)

・ 埴昂樹，居村岳広，堀洋一，阿部長門 "走行中ワイヤレス給電のコイル埋設における舗装材とコイルとの距離特性," 自動車技術会2022年春季大会

・ K. Hanawa, Takehiro Imura, Yoichi Hori and Nagato Abe, "Proposal of Coil Embedment Method by Pouring Resin Materials for Dynamic Wireless Power Transfer," *2022 Wireless Power Week (WPW)*, 2022, pp. 761-765

・ Koki Hanawa, Takehiro Imura, Yoichi Hori and Nagato Abe, "Comparison of Circular Coil, Double-D Coil, and 85 kHz Self-Resonant Coil in Road Embedment for Dynamic Wireless Power Transfer", *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.1-6, 2022.

⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

■社会実装を目指した研究計画

委員のコメントから「社会実装を目指した研究計画」という非常に見通しの良い方向性を示して頂いたので、このことを参考に本プロジェクトの範囲と他のプロジェクトとの連携などについて整頓させて頂く。

本課題はアスファルト埋設に特化したプロジェクトではあるが、社会実装にはそれだけでは足りない。A)~H)をクリアする必要がある。本プロジェクトでは主に主要な項目のA)~C)を課題に挙げて進めており、昨年はD)についても取り組んだ。

【DWPT の社会実装に必要な項目】

- A) コイルの電気的特性 (効率・電力)
- B) 道路とコイルの機械的特性 (N6 交通量相当での耐久性)
- C) コスト低減 (機器費と埋設手法)
- D) DWPT の全体設計とコスト (高圧受変電設備とインバータとコイル配置)
- E) コイル発熱対策 (コイル側と道路側) 【Advanced goal】
- F) 漏洩磁界 (人体防護とノイズ対策) 【GI : 漏洩磁界対策】 【Advanced goal】
- G) DWPT 制御 【GI】
- H) 法整備など 【GI】

次年度も同様に取り組んで行くが、Advanced goal として E)と F)についても取り組んで行く。E)は埋設と漏洩磁界対策が出来た上で取り組める課題である。熱対策を行うと電気的特性や機械的特性にとってはマイナスに働くので両立を目指す。F)の漏洩磁界対策は GI (グリーンイノベーション基金)でも取り組む課題であるが、GI ではよりアドバンスな手法を想定しており、現在の公道実験を目指している本課題とは手法が大きく異なる。課題 G)は高速走行の車両への充電制御であり、H)は法整備などであるが、これらに関しては GI 側で行う。

■実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等の確保

今後は公道実験に向けての取り組みが必要となる。実績をいくつも重ねる事で信頼性をあげ、かつ国民の関心を集めることが可能になる。世論が走行中ワイヤレス給電 (DWPT: Dynamic Wireless Power Transfer) を必要と思うことが非常に重要である。公道実験は全てが完成しなくても実施可能である。例えば、電力を抑えて実施するとしても実環境でしか得られない科学的

データ、社会的データの蓄積は非常に重要である。実務的には公道実験のための道路管理者含めた調整業務は非常に時間がかかるため、年単位での準備が必要となる。一方で、公道実験に目を奪われると DWPT 機器の進化は止まってしまうため、基礎開発と社会実験の両輪が必要となっていく。【DWPT の社会実装に必要な項目】で述べた A)~C)だけでなく、来年度の Advanced goal に掲げた E)~F)に関しても追求することが必要である。世界的に WPT 研究で有名なオークランド大学でもユタ州立大学でも、目下 E)に関して取り組んでいるところである。

研究期間終了後も本プロジェクトの後継で公道実験が行えることが望ましい。特に公道実証になると国交省との連携や後押しが非常に大切になる。しかし、これは申請者の勝手な要望である。本プロジェクトの後継の見通しが現時点では不明であるのでバックアッププランについても考えている。本プロジェクトの後継がなかった場合は DWPT の研究は他のプロジェクトで行えるようにする。DWPT の重要性は日に日に理解されつつあり、筆者が DWPT の研究に着手した 2007 年頃では全く考えられない程の追い風を受けているのはありがたい限りである。

⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

【研究で得られた知見・成果】

A) 大電力化設計

ここまでの知見においては、大電力化設計の大方針を見だし設計して入力電圧は換算値ながら実証できた事にある。昨年度も類似の事を述べたが、大幅に向上させることができた。

昨年度の間接報告時までに関に合った型枠実験の埋設時の電力は約15kWで最終報告書では約20kWまで達成できる事を示した。一方で、今年度は土木研究所の実験において、定格電流や絶縁破壊を考慮したリッツ線をしっかり用いた上で、50kWの出力が可能となった。この結果はコイルの敷設率を大幅に下げ、DWPTの費用を大幅に減らせる可能性を見いだせたことになる。

B) 埋設時の影響低減設計

埋設時の電気的特性の悪化に関する原因究明は、アカデミック的価値が非常に高く取り組んでいるが、理論化は容易ではないため来年度も引き続いて取り組む。一方で、実験を重ねる中でアスファルトなど道路の影響を受けにくいコイル設計の見通しが立ち、設計に反映させたところ非常に良い結果を得られることが出来た。その成果は「⑥これまでの研究経過」で述べたとおりである。

【研究の見通しや進捗についての自己評価】

大枠の進捗については、大電力化設計に関して計画を大幅に超えるスピードで進めているということで、十分な進捗といえる。2030年代にDWPTを実用化しようという他のプロジェクトより非常に早く進んでいる。

そのため、次のステップである公道実験に向けた課題をAdvanced goalとして目標に掲げることにした。その課題は以前委員から頂いたコメントを参考に、漏洩磁界と給電時のコイルの発熱に関する課題とさせて頂いた。

一方で、忘れてはならないのは、本プロジェクトの本命である、電気的特性と機械的特性の両立が重要であり、本年度末の最終報告書までにはその結果をまとめる。また、アカデミック的価値がある埋設時のコイル特性の悪化の原因究明が見いだせれば、さらなる躍進になるため、そちらにも取り組む。

以前にも記載したが、委員の先生方から頂いた性能目標の明確化や公道実証に向けての課題整理によって、非常に見通しの良い研究設計ができています。詳細は「⑩令和5年度の研究計画・方法」で記述する。総合的には順調に研究を進められており、次年度からは更なる飛躍が出来ると確信している。

【昨年度の本格研究1年目で頂いたコメントに対する回答】

・個別研究相互の関係を明確にした上で、システムとして成果をわかりやすく示すことを考えて継続していただきたい。

⇒コメントありがとうございます。見通しの明確化の重要性をご指摘頂きありがとうございます。

【DWPTの社会実装に必要な項目】課題A)～H)を追記させて頂きました。

・合理的な舗装構造の立案と各種性能の確認を行って、実用に近い形で無線給電道路の施工を実施していただきたい。

⇒コメントありがとうございます。舗装構造の立案や性能確認に関しては、理科大構内の埋設試験や11月から実施中の土木研究所構内の円形走行路(輪荷重75kN載荷 大型トラック)の走行試験を開始し、FWD載荷試験やひずみ計測を実施している最中です。

コイルケースの素材や舗装接着材の改良効果を把握し、舗装厚の設計における増厚の必要性や設計手法の検討を行い、来年度に大型車輛の通過に耐える舗装構造の設計手法を確立し、土木研究所の円形走行試験路での耐久性を確認していく予定です。

・本研究の終了後、供用中の道路において実証試験を行えるよう、必要な性能をどこまで達成できたかを明確にしていきたい。

⇒コメントありがとうございます。現時点では供用中の道路は頂けておりませんが、頂けた場合に必要な性能をどこまで達成できたかと考えて中間報告書の方には記載させて頂きました。「⑥これまでの研究経過」で記載させて頂いたとおりですが、一部繰り返させて頂きますと電気的特性の大電力化に関しては非常に良い結果が得られており、DWPTに十分な性能を得られております。さらな

る大電力化は敷設率低減につながられるので、更に上を目指しております。機械的特性に関しては土木研究所の円形走行試験路の走行載荷試験を通じて、舗装の耐流動性やひび割れ抵抗性などの性能指標についてどの程度まで満足できるか、満足するための設計方法がどうなるかまとめていきたいと思っております。N6交通量の検証に関しては学内埋設試験で実施いたします。