

## 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（FS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 領域	[主領域]	タイプIVのため特定なし	公募	ハード分野
		[副領域]	なし	タイプ	
③研究経費（単位：万円）	令和2年度				
※受託額を記入。	949万円				
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		東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授			
藤本博志		東京大学大学院新領域創成科学研究科・准教授			
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			
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>本委託研究は、走行中給電における道路側送電コイルの電気的特性と機械的特性を向上させた上で、アスファルトへの埋込み技術の確立を目的とする。低コストのフェライトレスかつコンデンサレスコイル（以下、「低コストコイル」という。）について、電気的特性（効率・電力など）と機械的特性（耐久性など）を従来コイルと比較し、経年劣化の評価を行い、埋込み深さの最適化、低コストコイル等の可能性を示すものである。</p> <p>令和2年度は、送電コイルの設計を行い、アスファルト舗装下へコイルを埋込み、電気的特性と機械的特性の評価までを行うとともに、電気的特性と機械的特性の両立の可能性を検討する。</p>					

## ⑥ F S 研究の結果

( F S 研究の結果について、これまでの研究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。 )

**<実施内容>** コイルを地面に埋込みコイルの電気的特性と道路の機械的特性を測定。コイル比較と施工方法比較を行う。

**【コイル5種類】** コイルの種類は5つである。全てリッツ線でコイル自体は形成している。コイル1~4は全てフェライトレスかつコンデンサレスコイルのオープン型コイルでケースの素材がPP (ポリプロピレン) , PE (ポリエチレン) , ABS, XPS (スタイロフォーム) である。PPとPEはほぼ同等の特性を持つ。コイル5はフェライトとコンデンサがあるショート型コイルである。

**<オープン型コイル>** コイル1 : PP, コイル2 : PE, コイル3 : ABS, コイル4 : XPS

**<ショート型コイル>** コイル5 : アクリル+PC (ポリカーボネート) +ABS

**【施工4方法】** 施工方法4パターンを行った。コイル1とコイル2はほぼ同等の性質のためコイル1を3個、コイル2を1個使った。

**<施工方法>**

施工1 : RCメッシュ, 施工2 : RCメッシュ+土留め板 (コンクリート), 施工3 : フィルム巻き, 施工4 : セメントグラウト流し込み

**【設計指針】** 設計と選定方針について述べる。本プロジェクト以前の検討では、電気的特性を最優先事項として、電気的には理想状態である空気と等価なXPSをコイルケースとして使用していた。XPSの電気的特性は良いが、十分な強度が得られないと推測されていた。このXPSを一つの比較対象として検討を進めた。今回は機械的特性を考慮して電気的特性をできる限り損なうことなく、かつ低価格な素材、熱に比較的強い素材を選定し、コイルケース選定と設計を行なった。低コストが期待できるオープン型コイルのフェライトレスかつコンデンサレスコイルを中心に設計を行なった。比較対象として、従来型のフェライトとコンデンサを使用したコイルも設計を行なった。

**【主要パラメータ】** 主要パラメータを表 1に示す。地面から受電コイルまでの高さは最低地上高の90mmを目安としている、コイル1のPPの場合、地面表面の70mm下の層に20mmの厚みのコイルを置いているので、地面から送電コイル上面までの距離は50mmとなる。そこから90mm上に受電コイルがあるので、送受電コイル間距離は140mmになる。また、コイルの厚みは各々、コイル1~3は20mm、コイル4は22mm、コイル5は34mmである。

表 1 コイル種類

	ケースサイズ [mm]	素材	重量 [kg]
Coil 1	694 × 1380 × 20	PP (ポリプロピレン)	22.5
Coil 2	694 × 1380 × 20	PE (ポリエチレン)	23.6
Coil 3	694 × 1380 × 20	ABS	24.4
Coil 4	900 × 1600 × 22	XPS (スタイロフォーム)	9.97
Coil 5	776 × 1420 × 34	蓋 : アクリル 巻線層 : PC (ポリカーボネート) フェライト層 : ABS	62.8



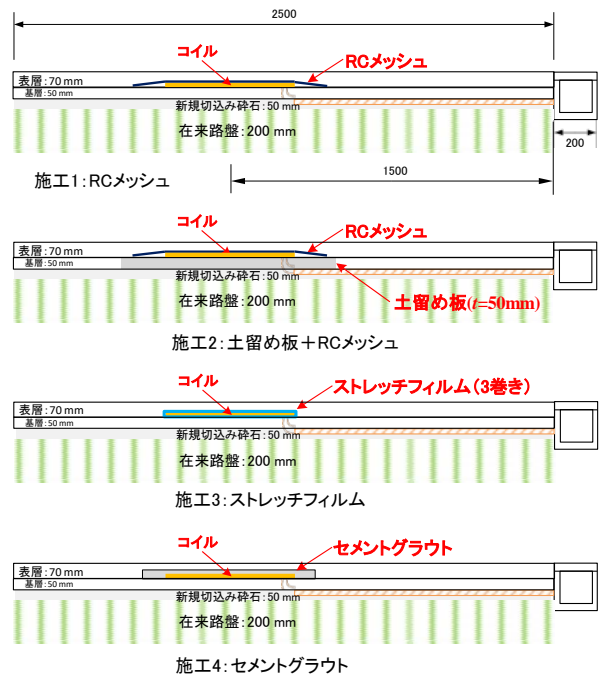
(a) コイル 1, PP (b) コイル 2, PE (c) コイル 3,

ABS



(d) コイル 4, XPS (e) コイル 5, ショート型

図 1 コイル 5 種類



## ⑥ FS 研究の結果 (つづき)

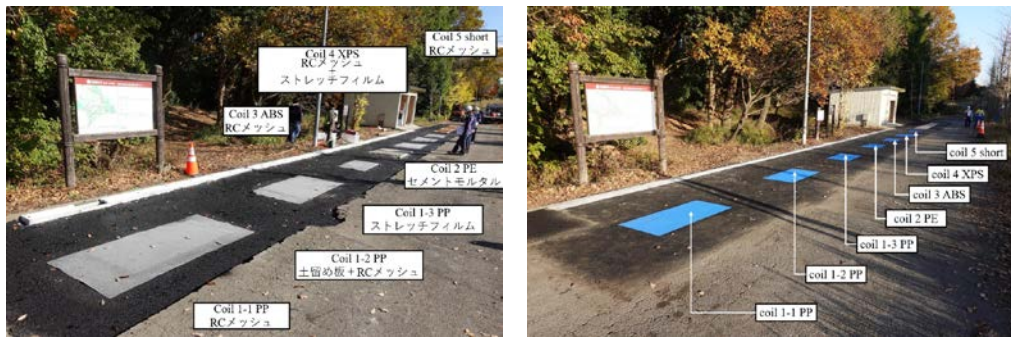


図 3 埋設風景



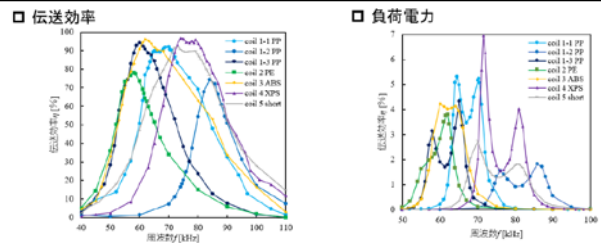
図 4 電氣的測定

### <3つの結果>

コイル埋設によりFSで得られた3つの結果について(1)~(3)で述べる。今回の埋込み深さと送受電コイルでは、結合係数 $k$ は0.2前後であり、 $Q$ 値が100以上あれば $kQ$ 積( $k \times Q$ )が20程度、つまり最大効率90%を超えるので、 $Q$ 値が100以上になるのが一つの目標である。埋込み前は $Q$ 値が500程度のコイルもありその場合、 $kQ$ 積が100程度になり最大効率は98%であった。

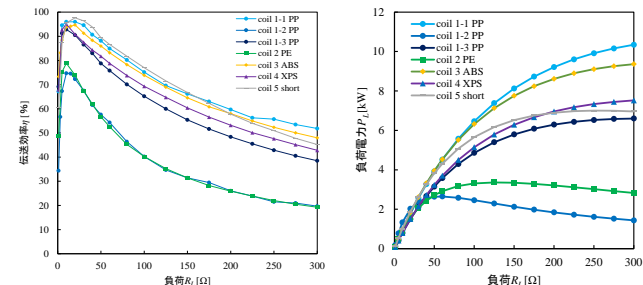
#### (1) 埋設後のコイルの電氣的特性

**【共通事項】** 本プロジェクトで埋設後の電氣的特性を初めて計測し全てのコイルで抵抗値の上昇による効率と電力の悪化を確認した。これにより、アスファルト自体もしくは転圧による影響が確認された。熱による影響の可能性もあるが後述する温度測定結果から主原因はアスファルト自体の影響、転圧、もしくは熱を加えた上での転圧と推測される。これをどの程度押さえ込むことができるかが今後の課題である。セメント系材料使用を除く埋込み方法では、位置ずれがないときは効率95%以上を得られているものがある。但し、オシロスコープ表示値の為より厳密な測定が必要である。また、入力600Vとして効率90%以上とするとコイル1-1のPPでは換算値3kW相当が得られた。DWPTに必要な20~40kWの電力を目指し、大電力化は引き続き課題である。



	Coil 1-1 (PP)	Coil 1-2 (PP)	Coil 1-3 (PP)	Coil 2 (PE)	Coil 3 (ABS)	Coil 4 (XPS)	Coil 5 (short)
最適負荷 $R_{L,opt}$ [ $\Omega$ ]	12	11	11	16	21	11	22
$\eta_{max}$ での周波数 $f_{max}$ [kHz]	68.4	85.8	61.3	58.6	63.1	75.0	73.4
最大伝送効率 $\eta_{max}$ [%]	96.94	73.98	93.06	75.43	95.76	97.24	97.77
最適負荷電力 $P_{L,max}$ [kW]	3.428	1.844	1.681	2.218	4.075	1.771	1.450

図 5 埋設後の周波数特性 (効率と電力)



(a) 効率 (b) 電力 (600V 換算値)

図 6 埋設後の負荷特性 (効率と電力)

### ⑥ F S 研究の結果 (つづき)

【**コイル比較**】埋込み前後のコイルパラメータを表 2 に示す。5 種のコイル比較としては、非常に悪化したセメント系材料を使ったコイルを除くと、オープン型のコイル 1-1、1-3、コイル 3、コイル 4 は概ね同様の傾向が見られ抵抗値が 5Ω 以上に上がっており、Q 値はかろうじて 100 を上回った。コイル 5 のショート型に関しては特性悪化は想定外であり検討課題である。

【**施工比較**】以前のプロジェクトにおいて乾燥した切り出し済のアスファルトで上下側面を囲ったときには特性の悪化は無かった。今回は施工途中にコイルを設置しただけの状態での特性を臨時で PP のみ測定した (表 3)。その結果、設置だけでも特性の悪化が確認された。施工中のアスファルトに水分が多く含まれていたことや、前回は XPS での検証に対して、今回は PP での検証など、複数の要因が考えられ、原因特定には至らなかったため検討課題とする。

また、表 2 より、4 種の施工方法の比較としては、セメント系材料の影響が大きく出ていた。鉄筋コンクリートの鉄筋は渦電流を発生するので当初から構造体候補から除いたが、使用した無筋コンクリートでも影響が確認された。

“施工 2: RCメッシュ+土留め板 (コンクリート)”とコイルを囲うように流し込んだ“施工 4: セメントグラウト流し込み”も悪影響が現れている。各々抵抗値が 33Ω と 25Ω であり、Q 値 23 と 33 となり、100 以下となっている。施工 2 は抵抗値の悪化だけでなくインダクタンスが減少する現象も確認された。いずれにせよ、セメント系材料は誘電損失の影響が予想より強く出ることがわかった。一方で、RCメッシュとストレッチフィルムとの差は若干確認され、RCメッシュの方が良い結果を得られている。

・セメント系材料を使用しないで、RCメッシュ使用が現時点で一番良い施工工法である。

【**水の影響確認実験**】雨天時の測定が難しかったので、水をまいて測定した結果を図 7 に示す。電界成分が強くコイルの周辺に存在すると水の影響で効率と電力の悪化だけでなく、短絡事故に繋がるため検証した。結果として効率の低下は 1% だったので大幅な効率の悪化は生じず、コイル周辺の電界成分は比較的小さいと見積られる。但し、若干ではあるが影響は確認されたので、改善は必要である。

### 【**コイルの電气的特性まとめ**】

全てのコイルに共通のこととして、電气的特性の悪化が確認され抵抗値の上昇と効率と電力の低下がみられる。また、断線などの大きな破損は生じなかった。セメント系材料は大幅に

表 2 埋込み前と直後のコイルパラメータ一覧

コイル (樹脂)	埋設	$f_0$ [kHz]	$R$ [Ω]	$Q$ ( $=\omega L/R$ )	$L$ [mH]	$C$ [nF]
Coil 1-1 (PP) 施工 1	前	76.2	2.71	391	2.21	19.7
	後	64.6	5.27	191	2.49	2.44
Coil 1-2 (PP) 施工 2	前	69.8	2.43	411	2.27	2.29
	後	69.8	30.9	25.7	1.81	2.87
Coil 1-3 (PP) 施工 3	前	84.8	2.61	438	2.15	1.64
	後	60.8	6.97	132	2.41	2.84
Coil 2 (PE) 施工 4	前	78.6	2.33	432	2.04	2.23
	後	60.4	14.6	59.1	2.27	3.05
Coil 3 (ABS)	前	77.2	3.28	318	2.15	1.98
	後	59.5	6.49	124	2.15	3.33
Coil 4 (XPS)	前	85.7	1.57	761	2.21	1.56
	後	76.7	5.92	166	2.04	2.11
Coil 5 (short)	前	78.5	1.95	649	1.94	2.13
	後	76.2	12.8	84.9	2.27	1.92

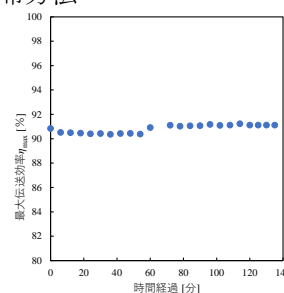
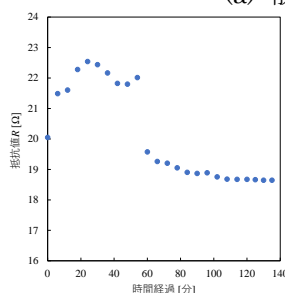
※コイル 5 のみ埋設 3 週間後

表 3 埋込み前と設置中と後のコイルパラメータ

施工	Coil 1-1, PP, 施工 1			Coil 1-2, PP, 施工 2			Coil 1-3, PP, 施工 3		
	RCメッシュ	土留め板	フィルム	室内	設置中	後	室内	設置中	後
埋設	室内	設置中	後	室内	設置中	後	室内	設置中	後
$f_0$ [kHz]	76.2	87.4	64.6	69.8	87.1	69.8	84.8	94.4	60.8
$R$ [Ω]	2.71	4.74	5.27	2.43	33.9	30.9	2.61	7.69	6.97
$Q$	391	264	191	411	31.3	25.7	438	139	132
$L$ [mH]	2.21	2.27	2.49	2.27	1.94	1.81	2.15	1.81	2.41
$C$ [nF]	1.97	1.46	2.44	2.29	1.72	2.44	1.64	1.57	2.84



(a) 散布方法



(b) 抵抗値 (c) 効率

図 7 水の影響

⑥ F S 研究の結果 (つづき)

特性悪化となるため検討対象から一時外す事にする。以上の結果から、電気的特性を悪化させたのはアスファルトそのものと、転圧である可能性が高い。当然、熱を加えた上での転圧であることにも留意しつつ原因の切り分け作業を行う。今後はコイル自体へのダメージの特定を行い、これに耐えられる設計を行う。アスファルトの誘電損失を回避する方法としては例えばコイルの厚みを増やしアスファルトとの離隔距離を保つなどの方法が考えられる。電気的特性に関わる事柄として、屋外での低温下では安定した測定が困難であり、測定環境や測定精度の改善も今後の課題である。

(2) 埋設後のコイルの機械的特性

コイル内部のひずみ計と熱電対から得られたデータを基に埋設後のコイルの機械的特性について述べる。埋込み施工前後の継続したひずみと温度データを図8と図9に示す。

【コイル比較】

施工時の混合物の圧縮ひずみの変化は、XPS>PP>ABSである。

コイルユニットの樹脂は、XPSが圧縮 ( $-3 \times 10^{-3}$ ) から引張り ( $5 \times 10^{-4}$ ) まで変化し、安定するまで12時間経過している。

XPSのコイル中心温度は55℃であり、他と比べて低温であった。

【施工比較】

セメント系材料を使用した施工方法4であるコイル2 (PE) はひずみが一番小さい。コイル2はコイル中心温度は最大50.8℃程度であり他に比べて低温であった。

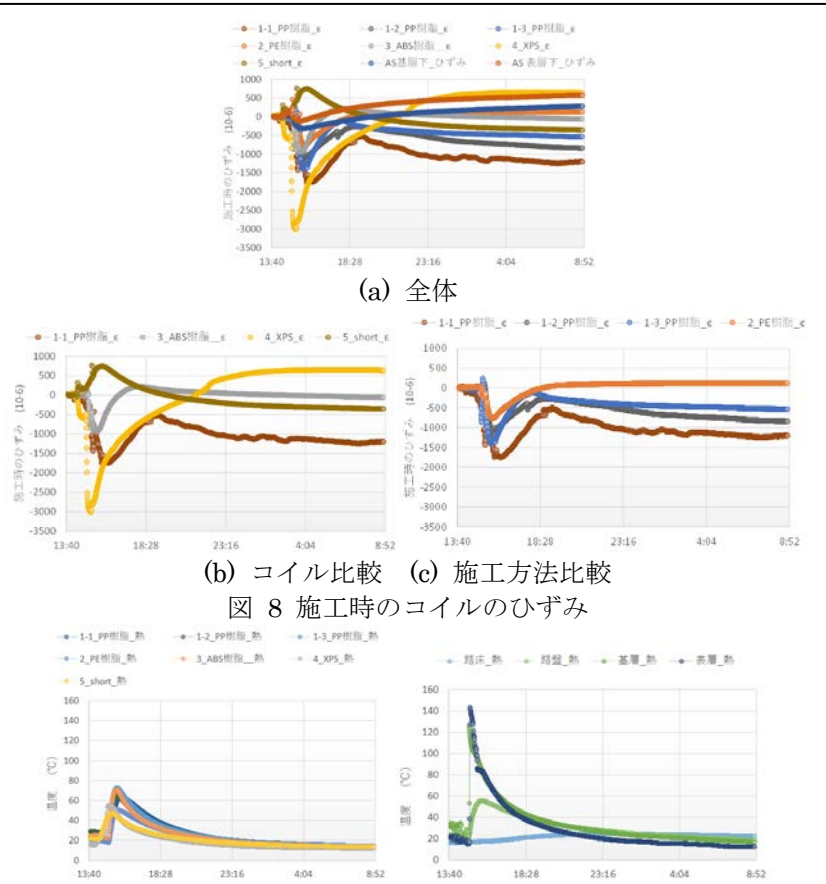


図 8 施工時のコイルのひずみ

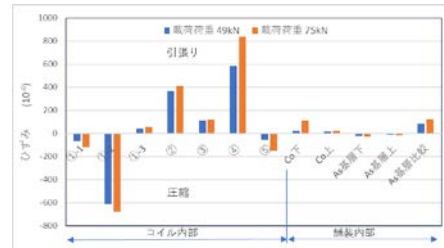


図 9 施工時の温度変化

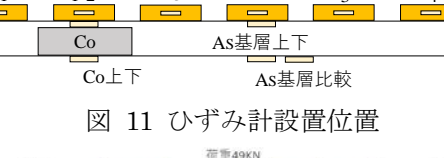


図 10 コイルと舗装のひずみ

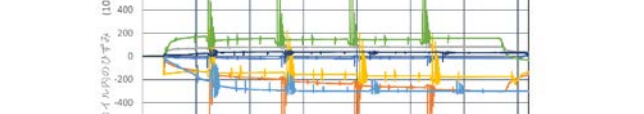


図 11 ひずみ計設置位置



図 12 FWD 試験中のコイルに発生するひずみ

## ⑥ F S 研究の結果 (つづき)

### 【共通事項】

施工時から1時間半で、混合物の温度は60℃まで低下する。樹脂で出来たコイル中心は最大70℃までの上昇である。

コイル1-1など、樹脂素材の温度収縮による圧縮ひずみとその後の温度低下による復元が確認されるが、残留ひずみが大きい。このことからひずみは温度依存が大きいことがわかる。

FWD 載荷試験の発生ひずみの比較の棒グラフを図 10に一括で示す。ひずみ計の位置は図 11に示す。コイル4のXPSは、舗装との剛性の差が大きいため、コイル内部の引張りひずみが大きい。舗装体のひずみに対してコイル内部のひずみは10倍以上ある。一方で、FWD 試験による残留ひずみは少ない(図 12)。

### 【コイルの機械的特性まとめ】

- ・コイル中心の温度は最大70℃であり熱による融解は生じていないと推定される。
- ・樹脂素材の温度収縮による残留ひずみが大きい。アスファルト混合物は、300μmの歪みが百万回繰り返されると、疲労ひび割れが発生するので、改善課題である。
- ・流し込み保護材により熱の影響を軽減できる。一方で、電気的特性との両立が課題である。
- ・FWD 試験による残留ひずみは少なく、施工時の温度での残留ひずみの方が大きい。

## (3) 埋設後の道路の機械的特性

### 【コイル比較】

今回は交通量N5を想定しアスファルト混合物2層構造の舗装である。図 13に示す様に、FWD (Falling Weight Deflectometer)にて道路舗装のたわみを測定した。コイル1-1、1-3とコイル5はたわみが1.1mmであり、ほぼ同等の結果を得られた。コイル4 (XPS) はたわみが1.85mmで最も悪い結果であり、電気的特性は良いものの道路構造物としてはこのままでは適さない。コイルのない一般的な舗装のたわみは0.8mmである。

### 【施工比較】

コンクリートの土留め板を使用したコイル1-2(1.85mm)とセメントグラウトで覆ったコイル2(1.36mm)は、コイルがない一般部に比べてたわみ量が多い。アス

ファルト混合物とセメント系材料の接着がないために、コイル内部のひずみが大きくなったと推測される。

### 【道路の機械的特性まとめ】

表 4にコイル1-1、1-3、3、5においては、設計輪荷重49kNで7万回以上、小型道路の設計輪荷重17kNで340万回以上の疲労破壊輪数になっている。コイルのない一般部は設計輪荷重49kNで36.5万回以上の許容が可能であり、コイルの有無による差は約5倍になっている。車輪通過位置が少ない車輪間での運用ならば、車輪がコイル上を通過する確率2.4%を考慮すると、N5交通量相当はコイル4 (XPS) 以外は10年と見込まれる<sup>[1]</sup>。一方で、交通量N6相当で6年以上の供用が可能と判断される。今後の課題として、N6交通量相当で10年以上の耐久年数を目指す。

[1] 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.

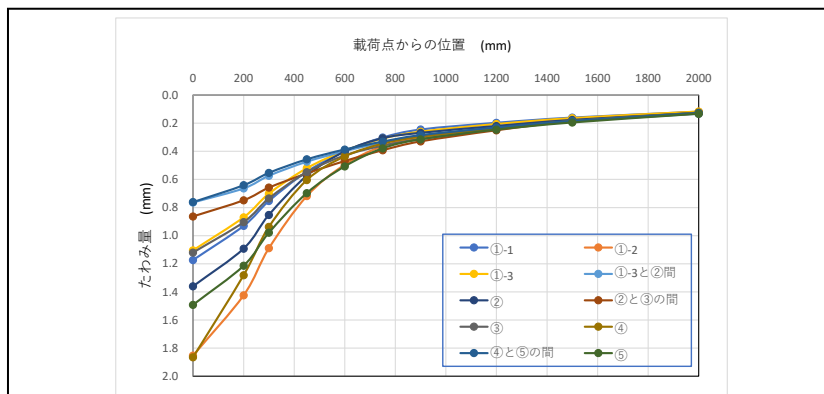


図 13 道路舗装のたわみ

表 4 許容走行年数

	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] (17kN)	3,423,500	698,600	3,925,500	1,668,100	4,642,900	711,500	3,925,500
許容走行回数 [回] (17kN)	140,026,472	28,573,826	160,559,052	68,227,883	189,901,827	29,101,456	160,559,052
許容載荷輪数 [回] (49kN)	77,800	36,900	71,200	46,100	72,300	15,800	30,500
許容走行回数 [回] (49kN)	3,182,141	1,509,267	2,912,191	1,885,562	2,957,182	646,245	1,247,497
許容走行年数 [年] (N5)	34.2	16.2	31.3	20.3	31.8	6.9	13.4
許容走行年数 [年] (N6)	6.8	3.2	6.3	4.1	6.4	1.4	2.7

## ⑥ F S 研究の結果（つづき）

### <課題の抽出>

国内初の本格的なコイル埋込み検証を通して、下記課題が明確化された。

- ・ XPSは強度不足。補強が必要もしくは選定対象外とする。
- ・ PP, PE, ABSなどは概ね良好な結果が得られたが、埋設方法の改良が必要。
- ・ PPとPEはほぼ同等の特性を持つが、厳密な優劣の検証が必要。
- ・ 熱伝達に伴う施工時の温度的検討によるひずみの発生からはセメント系材料で先に囲うのがよいが電気的特性が悪化する。
- ・ ショート型コイルの抵抗値の上昇の原因解明が必要。
- ・ 施工方法はセメント系材料を使わない方法が概ね良好な結果が得られたが改良が必要である。
- ・ 転圧時の温度と応力の影響に関する確認、転圧があっても電気的特性を保持できる強度の強いコイルケース選定や設計が必要。
- ・ 実用化に向けては敷設工事時間の簡素化や短時間施工工法(舗装とコイルの一体化したプレキャスト化)の確立が重要である。
- ・ 長期的な経年劣化の検証。
- ・ コイル1-1、1-3、3、5においては、N6交通量相当において車輪間運用を考慮すると設計年数の6割相当である疲労破壊抵抗性の向上が目標値である。

これ以外に、次年度以降の検証課題として、埋込み深さ、コイルサイズ、大電力実験などがあり、“⑦ 本格研究の見通し”で述べる。

## ⑦本格研究の見通し

(F S 研究の結果を踏まえた本格研究における研究成果の見通し、今後の研究目標の達成見込み、成果の活用方法、手段、今後の展開等を記入。この際、提案書(当初計画)からの変更点があれば、分かるように工夫すること。)

全体としては、3年の本格研究を通して、埋込み可能なコイルと施工方法を確立する見通しが立ったといえる。見通しに関しては、本課題の見通し、実用化までの見通し、他プロジェクトの連携の見通しの3つの見通しについて述べる。

### 【本課題の見通し】

大枠としては、⑥の“課題の抽出”で明確化した課題を基に、引き続き電気的特性と機械的特性の向上が必要であり、室内試験と埋込み試験を行う。追加として10kWを超える大電力実験と大型車走行車両による耐久試験が必要である。

本格研究においては、コイルケースの改善、施工方法の改善、舗装へのコイル埋設試験を各々3回計画しており、具体的項目としては、下記となる。

- ・コイル設計(厚み、形状、コイルサイズ)、埋設深さによる検証。
- ・コイル埋設の流し込み式保護材の検討(転圧回数の低減と施工時の温度の影響低減が目的)
- ・換算値で行っていた電力に関しては、10kWを超える大電力実験を行う。
- ・大型走行車両による耐久性評価試験に関しては(国立研究開発法人)土木研究所所有の円形走行実験路で実施予定。発展的な検討課題としては以下も想定している。
- ・コイル隣接設置による設置区間短縮なども埋込み技術中心に行う。
- ・コイルと一体となったプレキャスト舗装(厚さ200-300mm)の検討(省力化と急速施工の目的)

### 【実用化までの見通し】

・低コスト化の道筋が必要である。金型と大量生産を考えると材料費近くまでケース代は落ちるので、そこから先の低コスト化技術開発が必要であり、フェライトレスコンデンサレスコイルなどが必要になる。研究領域かつ各社の競争領域である。

・コイル寿命延長の道筋。ゴムや樹脂などのフレキシブル素材などによるコイルケース開発による埋め込み用コイル技術開発。研究領域かつ各社の競争領域である。

・敷設工事技術開発の道筋(短時間施工方法(コイルと舗装のプレキャスト化)確立・各社の競争領域)。

などが挙げられる。但し、研究領域かつ各社の競争領域と記述したものに関しても実際の埋込みを行っての検証は、本プロジェクトの様な埋込み技術開発に適したプロジェクトでの実施が適している。

### 【走行中給電実用化までの他連携含めた見通し】

走行中ワイヤレス給電は、本プロジェクトで主に扱うA)埋込み技術以外に、B)給電方式の国際標準、C)経済成立性を踏まえたコスト比較、D)100kW級への大電力化、E)漏洩磁界抑制、F)再生可能エネルギーとの連携、などが課題として残される。課題が明確化すれば、解決するだけなので、一つ一つに適したプロジェクトで解決を図る。B)はJARIを中心としJAMAやJSAEがリエゾンとなり動いており、C)はSIPで検証しており、C)とD)はSIP後継プロジェクトで更なる検証予定である。B)に関してはJSAE経由で連携している。また、C)～F)は主要メンバーとしてプロジェクトの一員である。これら他プロジェクトと連携、連動しながら進める事で、本プロジェクトは埋込み技術に注力して進めることができる。

### 今後の達成見込み

- ・コイルの電気的特性として効率90%以上と電力10kW以上を埋込み時に達成させ、実用化に向けた埋込み可能なコイルを作る。
- ・コイルと施工方法の改善を行い、道路の機械的特性の向上を行うことで、49kN載荷時のたわみ量0.6mm以下を実現させる。
- ・N6交通量相当において耐久年数10年以上の埋設コイルとその埋込み技術の開発を行う。

### 成果の活用方法、手段、今後の展開

今後の展開としては、デモンストレーション的要素が強いため後回しとしている実車でのDWPT実験を計画している。特に道路側の電源制御と車体側の電力制御など、埋込み技術以外の技術要素が強いため、他のプロジェクトで行う事を計画している。また、再生可能エネルギーとの連携が重要なので、エネルギーマネージメント技術の研究開発も重要である。走行中ワイヤレス給電は再生可能エネルギーとの連携によって更なる相乗効果が見込まれ、運輸部門のCO<sub>2</sub>削減だけでなく、電力部門のCO<sub>2</sub>削減も行えるため、そちらとの連携も行う予定である。

## ⑧特記事項

(本F S 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。)

2030年以降における世界的なEV化に向けて、走行中ワイヤレス給電の研究は世界的にも注目されており、沢山行われはじめた。しかしながら、電気設備の整備や用地確保などの問題からハードルが高くコイルを実際に埋込んだの研究は国内では数件程度であり、十分な検証が行われていない。この様な状況において、実際にコイルを埋込み、7種類の電気的特性と機械的特性の検証が行えたことは本プロジェクトの第一歩としての達成度としては十分と評価できる。本格研究における課題抽出や今後の見通しの明確化に関しても本プロジェクトだけでなく、他プロジェクトの連携含めて示すことができた。今後はこれら見通しに沿って実施することで、ロードマップに示されているより早い段階での実用化を目指す。