

## 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	
	新藤 竹文 (しんどう たけふみ)	大成建設株式会社	名誉研究員	
②研究 テーマ	名称	走行中の電気自動車に連続的に無線給電を行う道路の実用化システムの開発		
	政策 領域	[主領域]	公募 タイプ	FS (IV)
		道路政策の質の向上に資 する技術研究開発		
[副領域]				
③研究経費 (単位: 万円)	令和 2 年度			
※受託額を記入。	9 4 9 万円 (税込)			
④研究者氏名				
氏名	所属・役職			
大黒 雅之	大成建設株式会社・部長代理			
遠藤 哲夫	大成建設株式会社・次長			
佐藤 大樹	大成建設株式会社・課長			
高橋 要	大成建設株式会社・課長			
加藤 崇	大成建設株式会社・課長			
崎原 孫周	大成建設株式会社・主任			
城本 政一	大成ロテック株式会社・室長			
唐木 健次	大成建設株式会社・課長代理			
大平 孝	豊橋技術科学大学・教授			

塚本 悟司	豊橋技術科学大学・特任教授
阿部 晋士	豊橋技術科学大学・助手
水谷 豊	豊橋技術科学大学・特任助手
渡部 敬史	大成ロテック株式会社・係長

**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。）

本研究は、高効率で汎用性に優れるとともに修復性・更新性にも優れた無線給電道路システムの社会実装を目的とする。より具体的には、電界結合方式を核とする無線給電において、送電電力10kWにおいて、受電電力7kWを実現する舗装材料・構造および施工技術、路車連携による給電制御技術、漏えい電磁界抑制・対策技術などの実用化技術を開発し、無線給電道路システムの体系化技術を確立する。

令和2年度は、FSステージとして、無線給電道路システムの概念設計および実験室レベルでの物性試験等を行なうとともに、無線給電道路システムにおける漏えい電磁界シミュレーション解析に基づく法適合性と漏えい電磁界対策について検討し、本技術の実装可能性を検証する。

## ⑥ F S 研究の結果

### 1. 無線給電道路システムの体系化技術の開発に向けた検討

#### 1.1 無線給電道路システムの基本構造検討

電界結合方式（送電周波数：6.78MHz）を核とする無線給電において、送電電力10kW、受電電力7kWを実現する舗装材料（表層、基層、路盤）の電気定数評価と選定、送電電極・グランド材・無線給電設備を電氣的に接続するための配線設計、道路システムの排水計画を検討し、無線給電道路システムの基本構造検討を行った。

##### （1）効率の基本概念とその定義

図1.1-1に本研究における効率の基本的な考え方を示す。この概念に基づき、ここでは、高周波電源から出力された電力が無線給電道路に入力され、出力されるまでの効率を「道路効率」と定義する。なお、本研究では、道路効率は、電力が無線給電道路内を伝搬する際にどの程度の損失が発生するかを示す指標としても用いることも可能である。

さらに、効率向上のために無線給電道路の入力側に設置した電気回路（以後、整合回路と称する）から、無線給電道路内を伝搬する電力が受電電極を介して、車両内に装着する整合回路から出力されるまでの効率を「伝送効率」と定義する。伝送効率は、道路内を伝搬した電力が車両に到達する際にどの程度の損失が発生するかを示す指標として用いることも可能である。

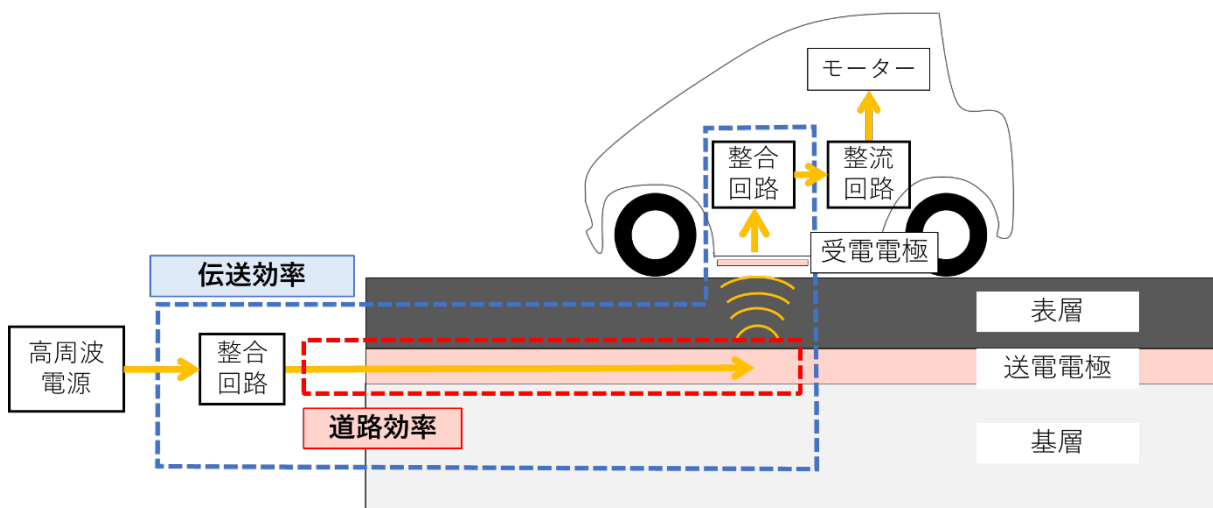


図1.1-1 本報告における「効率」の定義

##### （2）舗装材料の電気特性の検討

電界結合方式による無線給電道路を高効率で実現するためには、道路を構成する材料の電気定数である比誘電率（ $\epsilon_r$ ）が1、誘電正接（ $\tan \delta$ ）が0に近いほど舗装の損失が低減し、道路長の伸長や効率化できることが2013年度から2015年度に行った総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）において確認されている。

SCOPEで検討した道路システムの断面イメージを図1.1-2に示す。舗装表面から表層・基層：特殊アスファルト混合物（セラミック骨材使用）、送電電極、上層路盤：セラミック骨材、下層路盤：建築用断熱材（発砲ポリスチレン）、グラウンド（鉄板）で構成した。セラミック砕石と一般砕石の電気定数を測定した結果を表1.1-1に示す。なお、電気定数は誘電体測定用テストフィクスチャに小試験体設置し、インピーダンスアナライザで測定した。測定の様子を写真1.1-1に、測定に使用した機器を表1.1-2に、測定条件を表1.1-3に示す。

セラミック骨材は一般的なアスファルト混合物に利用する骨材に比べて、誘電正接が低い傾向を示した。また、高密度アスファルト混合物の比誘電率、誘電正接も同様にセラミック骨材を混入した試験体が一般的な骨材を混入した試験体に比べて低い傾向を示した。

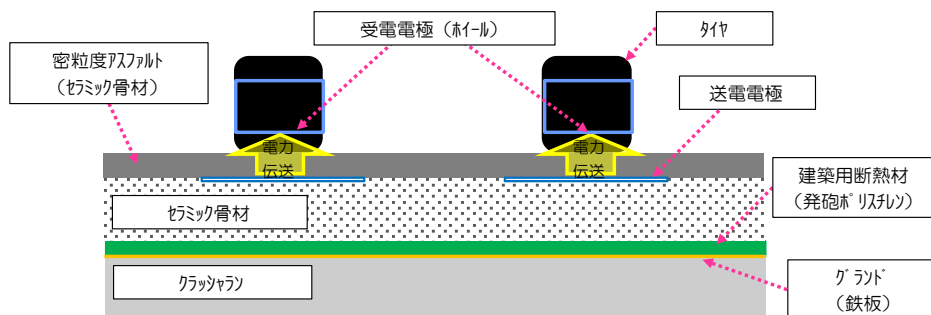


図1.1-2 SCOPEにおいて試作した無線給電道路システムの断面イメージ

表1.1-1 骨材およびアスファルト混合物の比誘電率および誘電正接測定結果

構成要素	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan\delta$
セラミック骨材単体	2.29	0.004
アスファルト混合物 (セラミック骨材)	4.97	0.010
一般的な骨材	2.95	0.127
アスファルト混合物 一般骨材	6.44	0.330



写真1.1-1 道路構成材料測定の様子

そこで、SCOPEでは、図1.1-2の断面構造と舗装材料によって10m長の道路システムを豊橋技術科学大学のキャンパス内に試験施工し（写真1.1-2）、走行中EVへの無線給電（送電電力3kW、受電電力1kW）に成功し、電界結合方式による本道路システムの基本技術を確認した。

しかし、SCOPEで試験施工した道路システムは、一度、降雨や結露によって舗装構造内部に水が滞留すると舗装構造内部の水が排水されず、送受電極やグランド周囲の部材の誘電率や誘電正接が周囲の含水状態の影響によって上昇することで道路効率が低下する要因となっていた。そのため、電界結合方式においては、できるだけ道路の排水性能を高め舗装構造内部の水分を減らすことが重要な課題のひとつである。

表1.1-2 使用機器一覧

名称	メーカー	型番
インピーダンスアナライザ	Keysight Technologies	E4990A
誘電体測定用テストフィクスチャ	Keysight Technologies	16451B

表1.1-3 測定条件

項目	値
周波数範囲	678kHz～40.68MHz
ポイント数	60pts



グランド施工



基層及び送電電極



表層アスファルト施工

写真1.1-2 SCOPEにおいて敷設及び実証実験を行った無線給電道路システム

### （3）無線給電道路システムの断面構造

本研究では、上記SCOPEで得られた成果と基本技術をさらに発展させ、より高効率で汎用性に優れた無線給電道路システムとするために、舗装構造内部の水の滞留をできるだけ抑制できる排水性に優れた舗装の断面構造を考案し、その優位性を検証することとした。

本研究において考案した舗装材料の断面構成のイメージを図1.1-3に示す。舗装表面から表層・基層：特殊アスファルト混合物（セラミック骨材使用）、送電電極、上層路盤：セラミック骨材、下層路盤：雨水浸透材（プラスチック製）、グランド（パンチングメタル）で構成される。

SCOPEにおいて試作した道路システム（以下、従来型無線給電道路と呼称する）では、表層・基層の特殊アスファルト混合物、上層路盤にセラミック骨材を利用することで送電電極と接触するアスファルト混合物と上層路盤の電気定数を低下させるための断面構造としたが、本研究で考案した無線給電道路システム（以下、高機能型無線給電道路と呼称する）は、表層、基層、

上層路盤は従来型無線給電道路と同様の舗装材料とし、下層路盤に雨水浸透材の活用を検討した。雨水浸透材は水を吸収しないプラスチック製であり、空隙率が92%と高いことが特徴である。インピーダンスアナライザで測定した雨水浸透材の電気定数を表1.1-4に示す。雨水浸透材は、比誘電率 ( $\epsilon_r$ ) が1、誘電正接 ( $\tan \delta$ ) が0に近い低損失な材料であり、舗装におけるエネルギー損失の低減が期待できる。さらに、グラウンドとしてパンチングメタルを用いることで、構造内部に侵入した水が道路底部に排出されることが期待でき、従来型無線給電道路で課題となった舗装構造内部に水が滞留した場合の道路効率の低下を解決できる可能性がある。

そこで、本FSでは、本研究で提案した高機能型無線給電道路、SCOPEで検討した従来型無線給電道路、図1.1-4に示す一般的な舗装材料で無線給電道路システムを構築した「一般道路」の3種類の試験体を製作し、降雨を模擬した散水実験による伝送効率の比較実験を実施した。比較実験の結果は1.2節に示す。

また、本研究の無線給電道路システムは、SCOPEで検討したタイヤのホイールを受電電極とする方式を変更し、平板上の受電電極で道路システムからの電界を受電する方式とした。これにより、タイヤの誘電正接の影響によるエネルギー損失が低減および送受電電極の対向面積の増加による効率向上が期待できる。

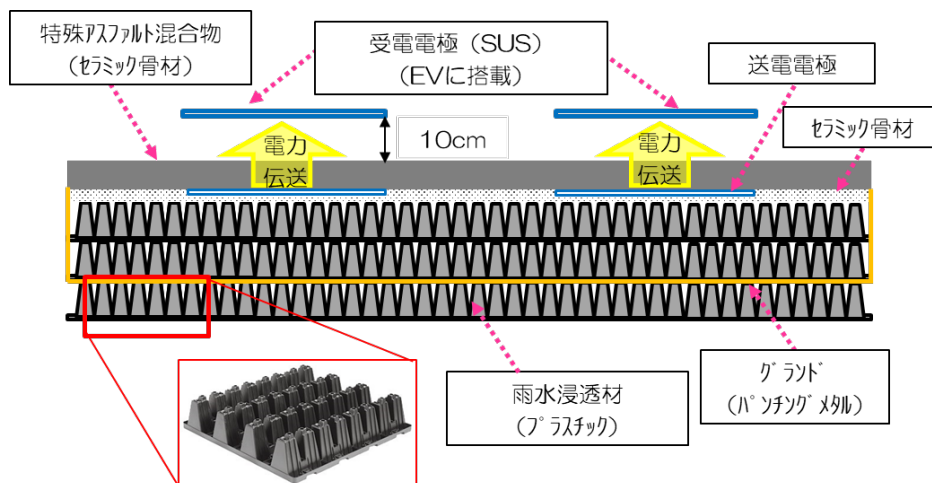


図1.1-3 高機能型無線給電道路の断面イメージ

表1.1-4 道路構成材料の比誘電率および誘電正接測定結果

構成要素	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan \delta$
雨水浸透材（空隙率92%）	1.10	0.0003

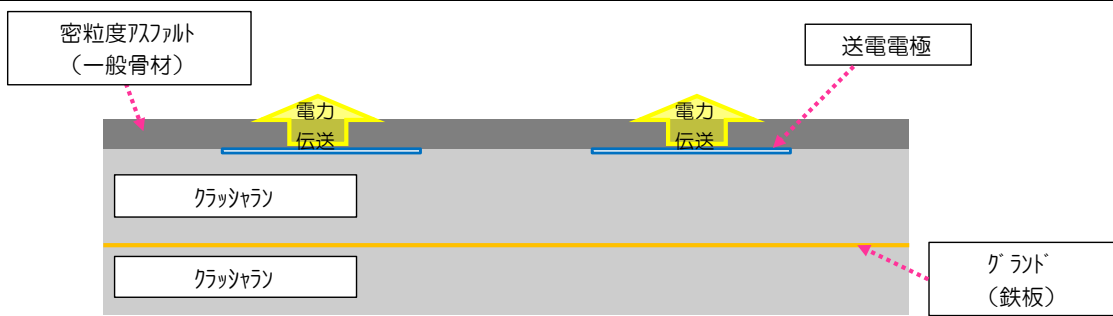


図1.1-4 一般的な舗装材料で構築した無線給電道路システムの断面イメージ

#### (4) 送電電極・グラウンド材・無線給電設備を電気的に接続するための配線検討

無線給電道路システムの無線給電設備（高周波電源～整合回路間の配線、整合回路、整合回路～送電電極間の配線、送電電極と配線を接続するコネクタ）を埋設する方法を検討し、無線給電道路システムの概念設計に反映する。

走行中車両への無線給電において、他方式である磁界結合方式を用いた走行中車両への無線給電は、既往研究として1.5m長の送電コイルを道路内に埋設することから、給電可能区間が短いことが課題である。それと比べ、ここに提案する電界結合方式は、SCOPEにおいて、豊橋技術科学大学のキャンパス内に10m長の道路システムを試験施工し、走行中EVへの無線給電に成功したことから、車両走行方向の定尺を数十mまで長くできる点が大きな特長であり、充電装置（給電装置）の設置を大幅に減ずることが可能である。この特長を活かした長距離の連続給電を想定した場合、無線給電道路システムの電気回路を適切な数、道路に埋設し、地上に設置する高周波電源と接続することになる。そこで、本節では、道路に埋設される電気回路の耐久性の確保の観点から、その保護および防水に着目して、地上に設置する電源システムと道路に埋設する電気回路の配線および埋設方法を検討した。

道路システムにおける配電システムの概念図を図1.1-5に示す。商用の電力（50/60Hz）は変圧器を介して高周波電源によってワイヤレス給電を行う周波数に変換される。高周波に変換された電力は、給電制御部（給電のON/OFFを制御するシステム）を経由して道路システムに埋設したハンドホールに配線される。これらの電源システムは路側に設置する計画である。ここで、電源システムは送電電極2対に対し1台の割合で設置される。後述する電磁界シミュレーションを用いた給電効率の検討において送電電極の長さは20m程度を想定している。したがって、ハンドホールは約40mに1台の間隔で埋設される。

図1.1-6に、道路システムに埋設するハンドホールの断面イメージを示す。路側の電源システムからの配電線（同軸線）は、道路システム内の埋設配管を配線しハンドホール内の電気回路に入力する。電気回路は整合回路、平衡-不平衡変換器（バラン）などインピーダンスの整合を行うことでワイヤレス給電の効率を向上させるための電気回路である。電気回路は金属製の筐体に収納され、金属製筐体に接続した接地線と非接触給電走行路のグラウンドを接続することで、電気回路のグラウンドとワイヤレス給電走行路のグラウンドを共通化（等電位接地）する。また、接地線がハンドホールを貫通する部位には水切りスリーブを取付け、接地線からハンドホール内への水の流入を防止する。電気回路の出力端子に接続した配線は、ハンドホール側面に設置されたインサートに接続する。

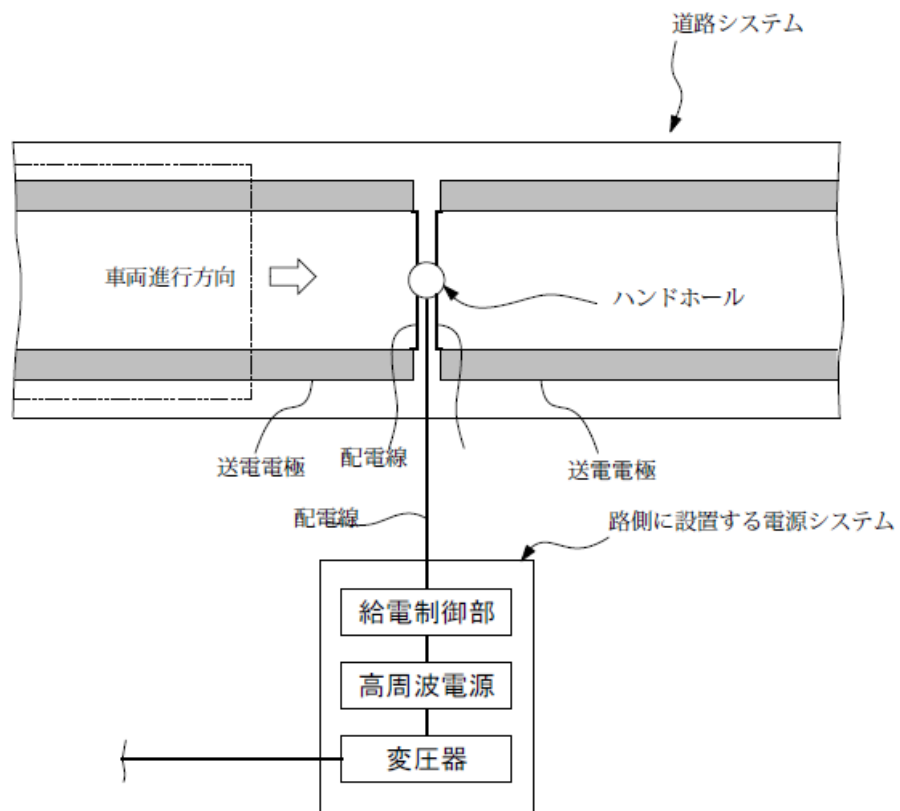


図1.1-5 道路システムにおける配電システムの概念図

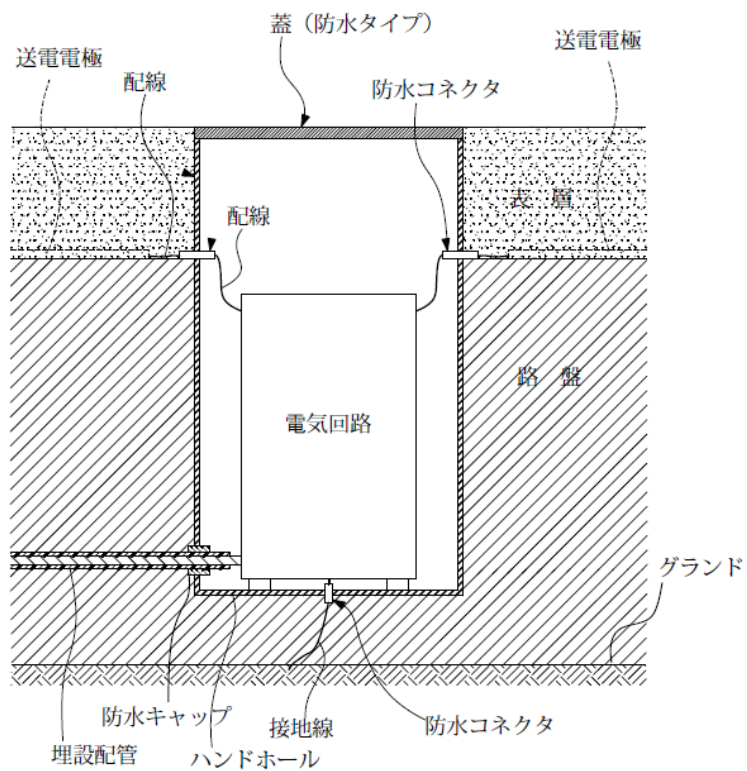


図1.1-6 ハンドホールの断面イメージ



インサートは防水性の高い金属ねじとすることで、送電電極に接続する配線からハンドホール内への水の流入を防止する。また、金属ねじはハンドホールを貫通し、金属ねじを通じてハンドホール内外の配線が導通可能な構造とする。配線は、ハンドホール側面のインサートと送電電極を接続する。ハンドホール側面には、防湿性断熱材を設置し、同底面にセラミックス製砕石など吸水性の少ない断熱材を設置することで結露の発生を抑制する。

以上のような送電電極・グラウンド材・無線給電設備を電気的に接続するための配線構造とすることで、車両の走行に伴う振動、将来的な道路メンテナンス時のアスファルト敷設熱、雨水や融雪、結露による水の侵入などを原因とした故障や漏電を防止できる仕様と言える。また、定期的な点検が必要であり、比較的大きな装置となる変圧器、高周波電源、給電制御装置は定期点検が容易にできるように路側に設置し、比較的安価な部材で構成される電気回路は道路内に埋設することにより、故障時の交換やメンテナンスに対しても容易に対応できると考える。

なお、この本配線構造については、技術の詳細を整理し、今年度中の特許出願を予定している。

## (5) 無線給電道路システムの道路効率実験

### 1) 実験用試験体の舗装構造

実験用試験体として以下の3種類の舗装構造を試作した。図1.1-7から図1.1-12に各試験体の断面構成図と作業手順、表1.1-5から表1.1-7に材料表を示す。また、写真1.1-3-1から1.1-5-4に施工写真を示す。

- ① 一般的な舗装材料で構築した無線給電道路（一般道路）
- ② 舗装材料に配慮し、SCOPEで実証実験を行った無線給電道路（従来型無線給電道路）
- ③ 舗装材料の改良および排水性を高めた無線給電道路（高機能型無線給電道路）

① 一般道路試験体

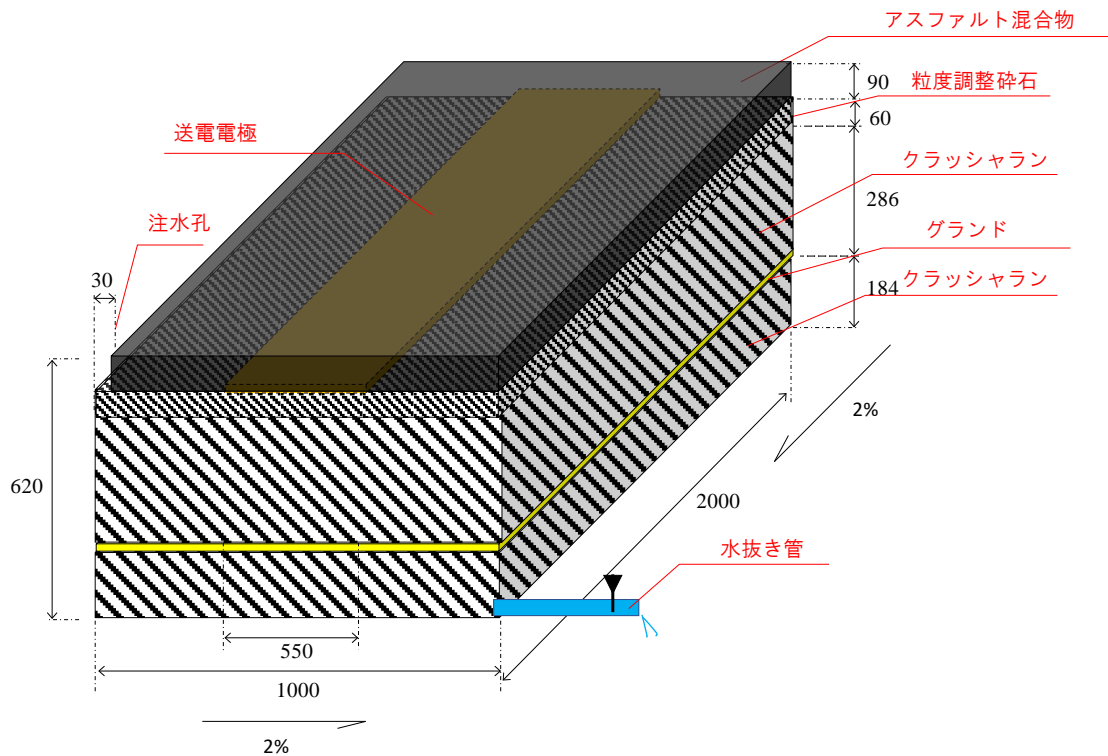


図1.1-7 一般道路試験体の断面構成

表1.1-5 一般道路試験体の材料表

舗装（材料） 区分	種別	規格	備考
表層	アスファルト混合物	舗装施工便覧 平成18年度版 表-6.3.2	密粒度アスファルト混合物 (13)
基層			
電極板	送電電極	-	t=0.5, 550×2000mm
上層路盤	粒度調整碎石	JIS A5001-2008	M-30
グラント	グラント	-	t=1, 1000×1000mm
下層路盤	クラッシュラン	JIS A5001-2008	C-40

1) クラッシュラン施工 (t=183mm)

2) グランド設置 (t=1mm)

3) クラッシュラン施工 (t=286mm)

4) 粒度調整碎石施工 (t=60mm)

5) 送電電極設置

6) アスファルト混合物施工 (t=90mm)

図1.1-8 一般道路試験体の作成手順

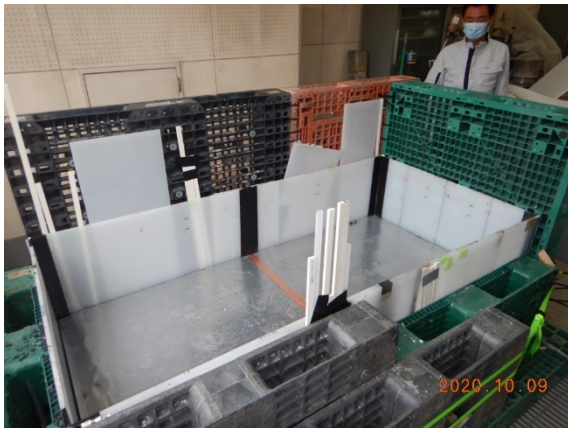


写真1.1-3-1 グランド設置

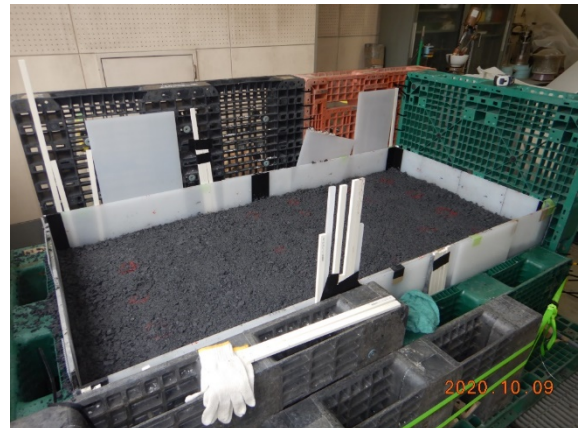


写真1.1-3-2 下層路盤 (クラッシュラン) 施工

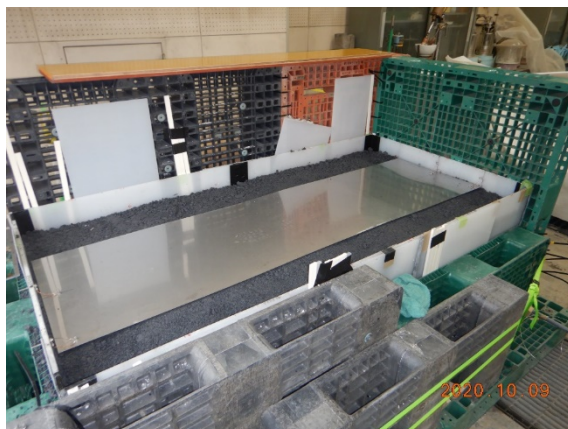


写真1.1-3-3 上層路盤 (粒度調整碎石) 施工  
および送電電極設置



写真1.1-3-4 アスファルト混合物施工

② 従来型無線給電道路試験体

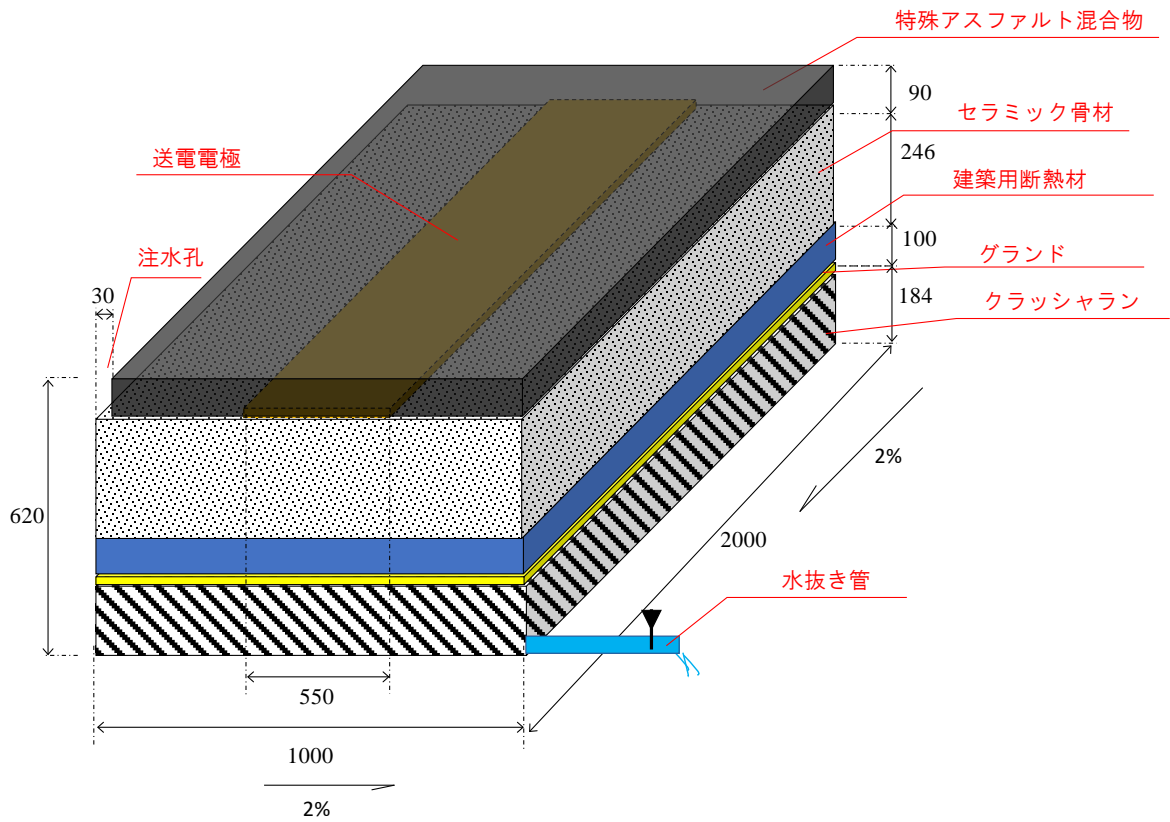


図1.1-9 従来型無線給電道路の断面構成

表1.1-6 従来型無線給電道路試験体の材料表

舗装 (材料) 区分	種別	規格	備考
表層	特殊アスファルト 混合物	舗装施工便覧 平成 18 年度版 表-6.3.2	密粒度アスファルト混合物 (13)
基層			
電極板	送電電極	-	sus304 t=0.5, 550×2000mm
上層路盤	セラミック骨材	JIS A5001-2008 参考	参考粒度：M-25
グラウンド	グラウンド	-	t=1, 1000×1000mm
下層路盤	建築用断熱材	JIS A9521-2017, JIS A 9511-2017	t=100
	クラッシュラン	JIS A5001-2008	C-40

1) クラッシュラン施工 (t=183mm)

2) グランド設置 (t=1mm)

3) 建築用断熱材設置 (t=100mm)

4) セラミック骨材施工 (t=246mm)

5) 送電電極設置

6) 特殊アスファルト混合物施工 (t=90mm)

図1.1-10 従来型無線給電道路試験体の作製手順

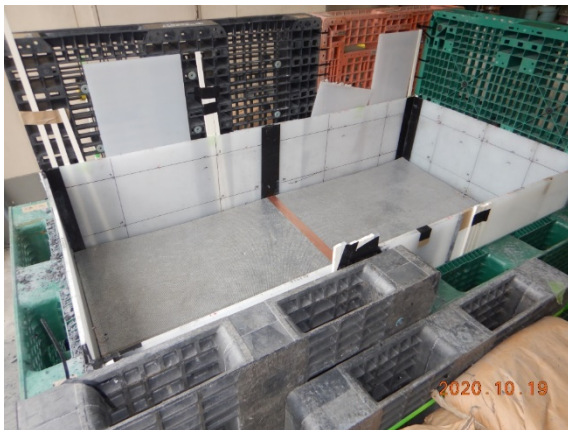


写真1.1-4-1 グランド設置

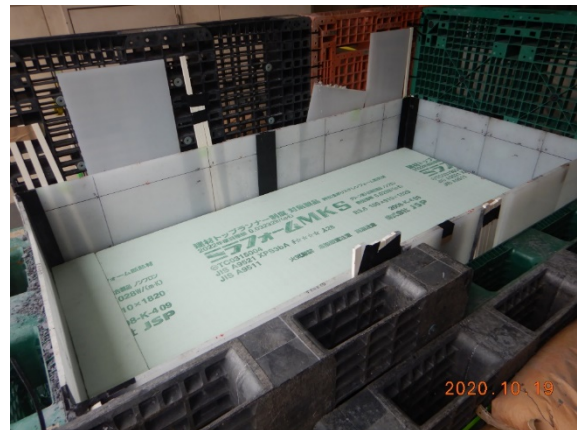


写真1.1-4-2 下層路盤 (建築用断熱材) 施工



写真1.1-4-3 上層路盤 (セラミック骨材) 施工  
および送電電極設置



写真1.1-4-4 特殊アスファルト混合物施工

③ 高機能型無線給電道路試験体

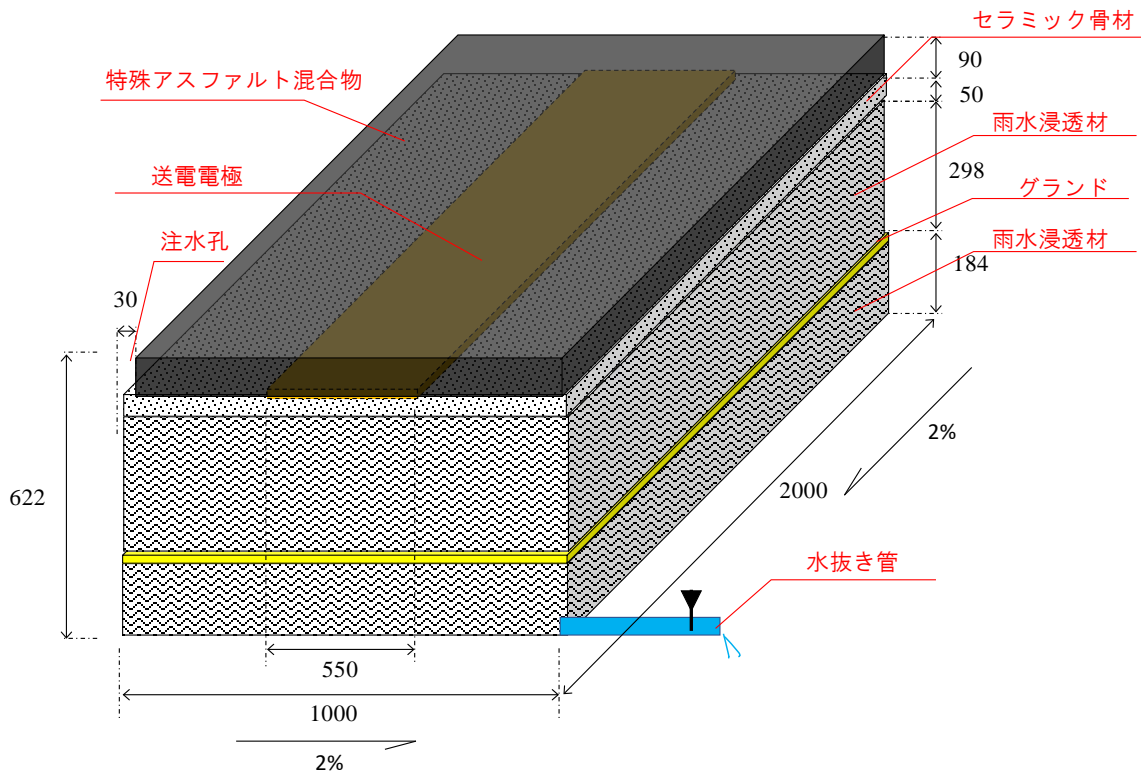


図1.1-11 高機能型無線給電道路の断面構成

表1.1-7 高機能型無線給電道路試験体の材料表

舗装 (材料) 区分	種別	規格	備考
表層	特殊アスファルト 混合物	舗装施工便覧 平成 18 年度版 表-6.3.2	密粒度アスファルト混合 物(13)
基層			
電極板	送電電極	-	sus304 t=0.5, 550×2000mm
上層路盤	セラミック骨材	JIS A5001-2008 参考	参考粒度 : M-25
グラント	グラント	-	t=1, 1000×1000mm
下層路盤	透水シート	-	t=3, 1000×1000mm, φ3mm
	雨水浸透材	-	空隙率 92%

1) 雨水浸透材設置 (t=183mm)

2) グランド設置 (t=1mm)

3) 雨水浸透材設置 (t=295mm)

4) 透水シート設置 (t=3mm)

5) セラミック骨材施工 (t=50mm)

6) 送電電極設置

7) 特殊アスファルト混合物施工 (t=90mm)

図1.1-12 高機能型無線給電道路試験体の作製手順

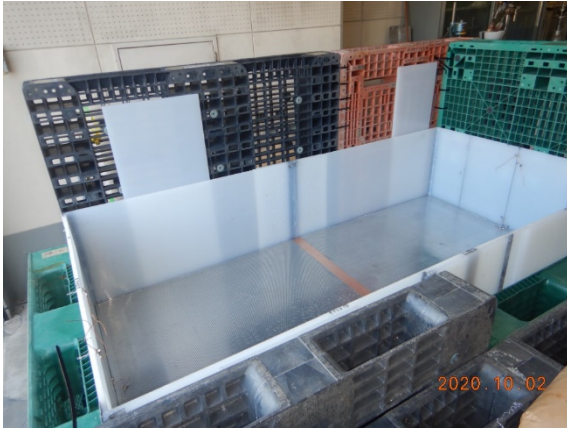


写真1.1-5-1 グランド施工



写真1.1-5-2 上層路盤（雨水浸透材）設置



写真1.1-5-3 上層路盤（セラミック骨材）施工  
および送電電極設置



写真1.1-5-4 特殊アスファルト混合物施工

## 2) 実験方法

図1.1-7、図1.1-9、図1.1-11の実験用試験体を用いて、実験用試験体作製時における道路効率（乾燥状態）と、試験体内に満水まで散水し排水した後（定常状態）の道路効率の評価実験を実施し、3種類の無線給電道路の道路効率が排水前後でどの程度変化するかを確認した。道路効率は、最大有能電力効率（ $\eta_{max}$ ）を指標として評価した。最大有能電力効率（ $\eta_{max}$ ）とは、測定した2ポート系の回路における入力端から出力端までを高周波電力が伝搬する際における理論上の最大効率である。

$\eta_{max}$ の定義を式(1.1-1)に示す。なお、式内の $Z_{11}$ および $Y_{11}$ はベクトルネットワークアナライザ（VNA）で測定したSパラメータより変換したZパラメータおよびYパラメータである。

図1.1-13に道路効率の測定系イメージ図を示す。VNAから配線された同軸ケーブルは型枠に取り付けたコネクタに接続され、コネクタの芯線とグラウンドはそれぞれ試験体の送電電極とグラウンドに接続される。

なお、実験用試験体では内部に滞留する水分量や含水状態を測定することが難しいことから、実験用試験体と同じ断面構造、同じ製作手順にて図1.1-14から図1.1-16に示すダミー試験体を作製し、実験用試験体と同様満水まで散水し排水後の各試験体の体積含水比を測定した。表1.1-8に使用機器一覧を、表1.1-9に測定条件を示す。

$$\eta_{max} = 1 - \frac{2}{1 + \sqrt{1 + kQ^2}} \quad (1.1-1)$$

ただし、

$$kQ = \frac{\text{mag}(Z_{21})}{\sqrt{\text{Re}(Z_{11}) * \text{Re}(Z_{22}) - \text{Re}(Z_{12}) * \text{Re}(Z_{21})}}$$

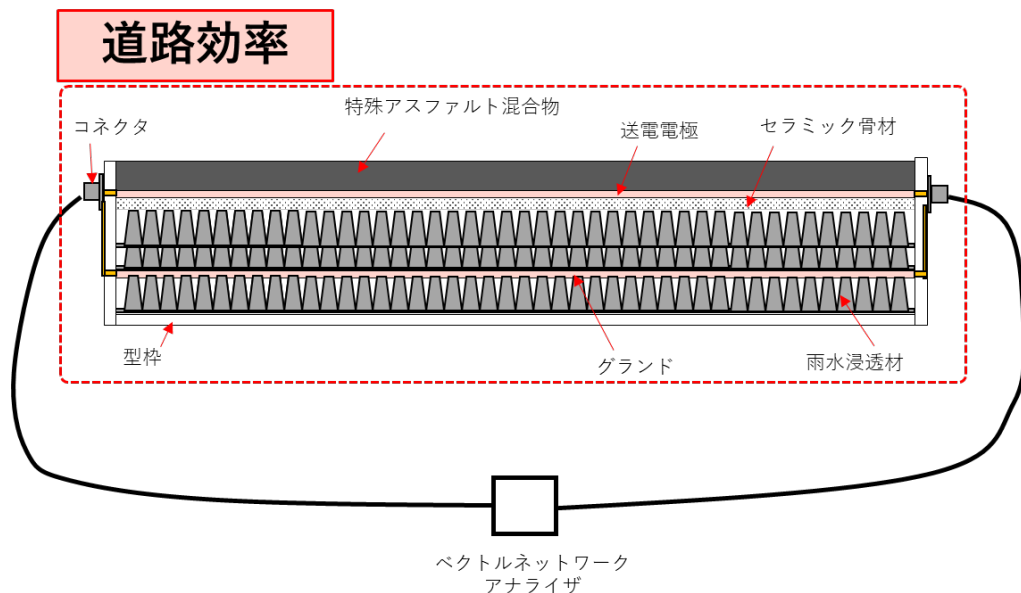
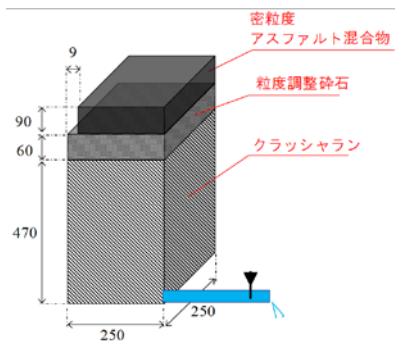


図 1.1-13 各試験体の道路効率の測定系



①一般道路



粒度調整砕石



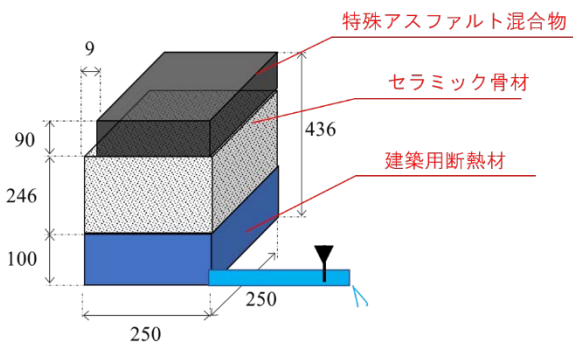
ダミー試験体解体



体積含水比測定用試料採取

図 1.1-14 一般道路のダミー試験体

②従来型無線給電道路



建築用断熱材



セラミック骨材



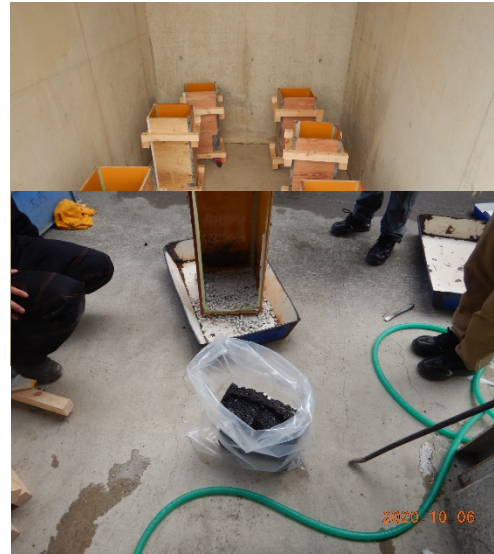
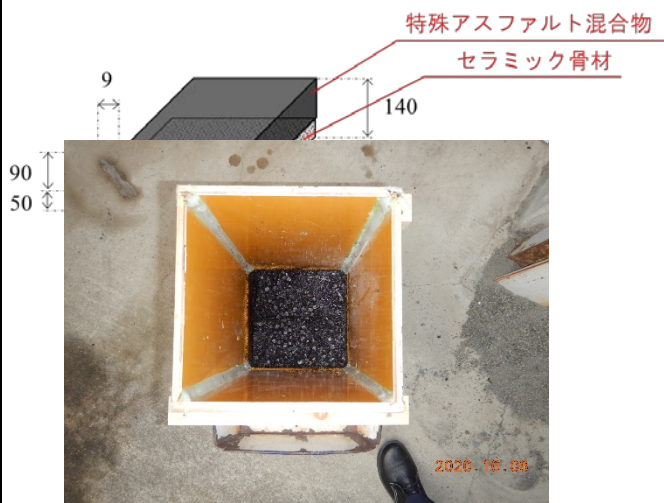
特殊アスファルト混合物



ダミー試験体解体

図 1.1-15 従来型無線給電道路のダミー試験体

③ 高機能型無線給電道路



ダ  
ミ  
ー  
試  
験  
体

体積含水比測定用試料採取

図 1.1-16 高機能型無線給電道路のダミー試験体

表 1.1-8 使用機器一覧

名称	メーカー	型番
ベクトルネットワークアナライザ (VNA)	Agilent Technologies	E5062A

表 1.1-9 測定条件

項目	値
周波数範囲	678kHz～67.8MHz
ポイント数	100pt
キャリブレーション面	Open, Short, Thru, Match : 同軸ケーブル出力側

写真1.1-6に実験状況を、写真1.1-7および写真1.1-8にVNAから配線される同軸ケーブルと試験体を接続するコネクタを示す。

図1.1-17に試験体とコネクタの接続イメージ図を示す。コネクタは、写真1.1-7に示すように厚さ1mmのアルミ板にN型レセプタクルを取り付け、試験体の送電電極とグランドとを接続したものである。試験体内の送電電極およびグランドから金属ビスで固定された単線を型枠まで配線し金属ボルトにより固定する。金属ボルトを型枠外に貫通させるために型枠に設けた開口はシール座金を用いて水漏れを防ぐ構造としている。型枠外に貫通した金属ボルトとコネクタを接続しテスターによる導通チェック後実験を開始した。



写真1.1-6 測定風景

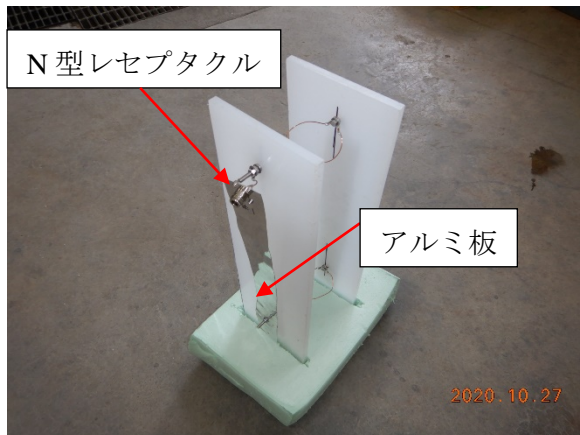


写真1.1-7 測定用コネクタ



写真1.1-8 試験体への接続コネクタ取付状態

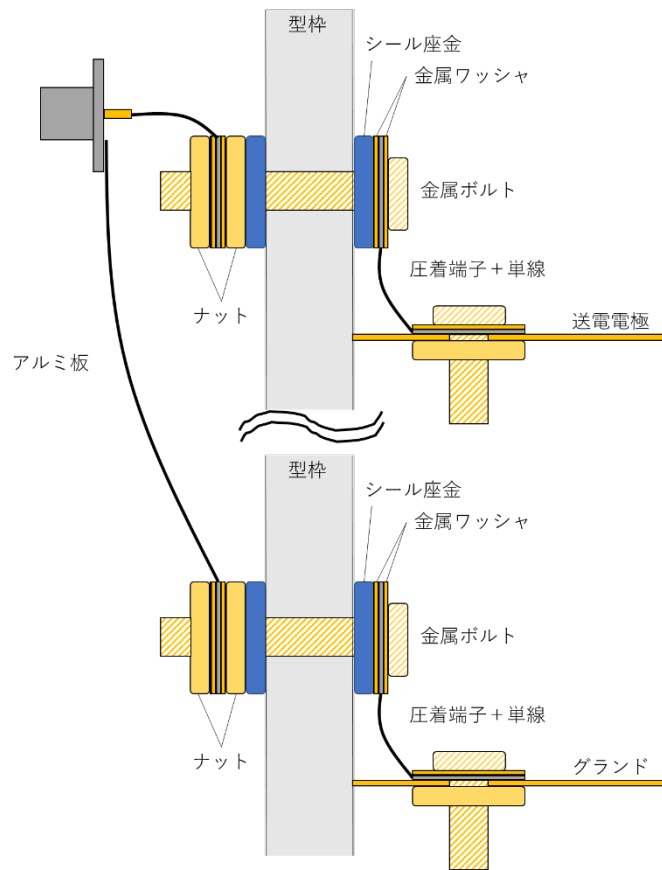


図1.1-17 送電電極およびグラウンドへの配線イメージ図

### 3) 実験結果

実験結果を表1.1-10に示す。一般道路における試験体作製後の $\eta_{\max}$ は36.3%と低い値となった。これは一般道路内に含まれるクラッシュランや粒度調整砕石に水分や鉱物、準鉱物が含まれるためだと考えられる。一方、従来型無線給電道路および高機能型無線給電道路はそれぞれ試験体作製後の値は98.6%、98.4%となった。これは、従来型無線給電道路については建築用断熱材およびセラミック骨材が、また高機能型無線給電道路については雨水浸透材およびセラミック骨材がそれぞれ水分を滞留させないためだと考えられる。

なお、表1.1-10に示したばく露試験の体積含水比は各供試体の上層、下層路盤の値を示している。また、従来型の無線給電道路のグラウンドの上部に設置している建築用断熱材は体積含水比が増加することが予測されたため、各ばく露試験を3日含水させ、その後、内部の水を排水させた。3週後測定を行った結果、各ばく露試験の上層、下層路盤の体積含水比は定常状態と同程度であったが、懸念されていた建設用断熱材は0.4%から1.1%と体積含水比は増加した。建設用断熱材の体積含水比は供用期間が長くなると大きくなり、道路効率が悪くなることが予測されることから、従来型無線給電道路は、長期供用性に問題があることが確認でき、今回提案した高機能型無線給電道路は長期供用性には問題ないと考えられる。

表1.1-10 排水前後における $\eta_{\max}$  @6.78MHzおよび上層、下層路盤の体積含水比測定結果

	一般道路		従来型 無線給電道路		高機能型 無線給電道路	
	体積含水比 [%]	$\eta_{\max}$ [%]	体積含水比 [%]	$\eta_{\max}$ [%]	体積含水比 [%]	$\eta_{\max}$ [%]
試験体作製後 (乾燥状態)	-	36.3	-	98.6	-	98.4
排水24時間後 (定常状態)	1.3	37.2	2.1	95.4	2.3	96.9
ばく露試験(3週間)	0.8		2.1		2.8	

#### 4) 定常状態（滞留水がある場合）の道路材料の比誘電率および誘電正接

滞留水の影響を評価するため、降雨を模擬した散水実験において定常状態（水を含水し、排水した後の安定した状態。排水実験における24時間後に測定した含水比の状態）の道路構成材料の体積含水比を測定し、道路構成材料が含水したときの比誘電率および誘電正接を理論計算により算出した。

定常状態における道路材料の比誘電率および誘電正接を理論計算により算出する際、表1.1-1に示した舗装材料の比誘電率および誘電正接の他に、水の比誘電率および誘電正接が必要となる。そこで、インピーダンスアナライザを用いて水の比誘電率および誘電正接を測定した。測定に使用した測定状況を写真1.1-9に、測定機器を表1.1-11に示す。なお、測定条件は表1.1-3と同様である。測定結果を表1.1-12に示す。ここで、被測定物である水は散水実験で実際に使用したものであり、実際に道路内に滞留する水と同等の性質を有すると考えられることから、この測定結果を用いて含水した材料の比誘電率を算出した。

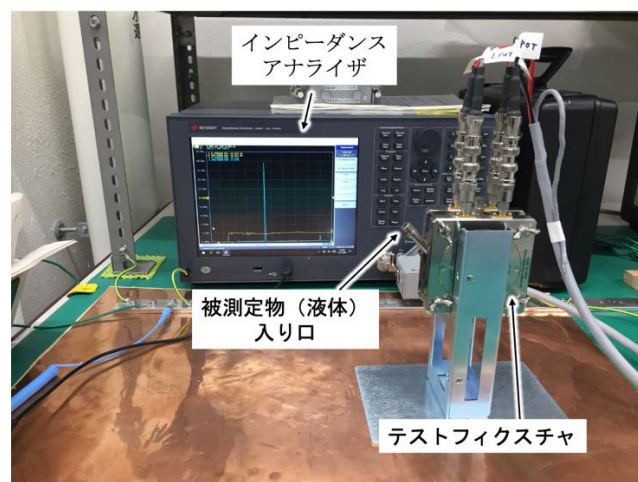


写真1.1-9 水の誘電率および誘電正接測定の様子

定常状態の道路材料の電気定数を式(1.1-2)のMaxwell-Garnettの式より算出する。Maxwell-Garnettの式において、滞留水は球体の水滴が道路材料の中に一様に分布するものとして扱われる。算出結果を表1.1-13に示す。滞留水の影響で表1.2-3の乾燥状態の誘電正接より値が大きくなっており、すなわち損失が増加していることがわかる。

$$\epsilon_{rc} = \epsilon_{r1} + \frac{3a\epsilon_{r1}(\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1})}{2\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2} - a(\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1})} \quad (1.1-2)$$

$$\epsilon_r = \text{Re}\{\epsilon_{rc}\}$$

$$\tan\delta = \left| \frac{\text{Re}\{\epsilon_{rc}\}}{\text{Im}\{\epsilon_{rc}\}} \right|$$

$\epsilon_{rc}$ : 定常状態の道路材料の複素誘電率

$\epsilon_{r1}$ : 乾燥状態の道路材料の複素誘電率

$\epsilon_{r2}$ : 水の複素誘電率

$a$ : 含水率

$\epsilon_r$ : 定常状態における道路材料の比誘電率

$\tan\delta$ : 定常状態における道路材料の誘電正接

表1.1-11 使用機器一覧

名称	メーカー	型番
インピーダンスアナライザ	Keysight Technologies	E4990A
液体測定用テストフィクスチャ	Keysight Technologies	16452A

表1.1-12 排水の比誘電率および誘電正接測定結果

構成要素	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan\delta$
水	78.7	0.776

表1.1-13 定常状態の道路材料の誘電率および誘電正接

構成要素	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan\delta$	体積含水比[%]
特殊アスファルト混合物	5.45	0.0179	3.5
セラミック骨材	3.09	0.0159	11.0

## 1. 2 無線給電道路システムの道路効率

### (1) 無線給電道路システムのシミュレーションモデル

無線給電道路システムのシミュレーションモデルを図1.2-1から1.2-4に示す。図1.2-1は概観図である。道路システムは、幅3.5m、長さ可変長L mとしたシミュレーションモデルを構築し、道路近端の送電電極に電力の入力ポートを設置した。車体は道路構造令で定められている小型自動車の寸法に基づきモデリングし、遠端に配置した。

図1.2-2に車体に装着した受電電極の位置を道路遠端とした際の側面図を示す。車体には受電電極として金属板を装着し受電を行う。受電電極と道路のエアギャップは自動車の最低地上高90mmを満たすよう100mmとした。なお、SCOPEではタイヤのホイールを受電電極としたが、

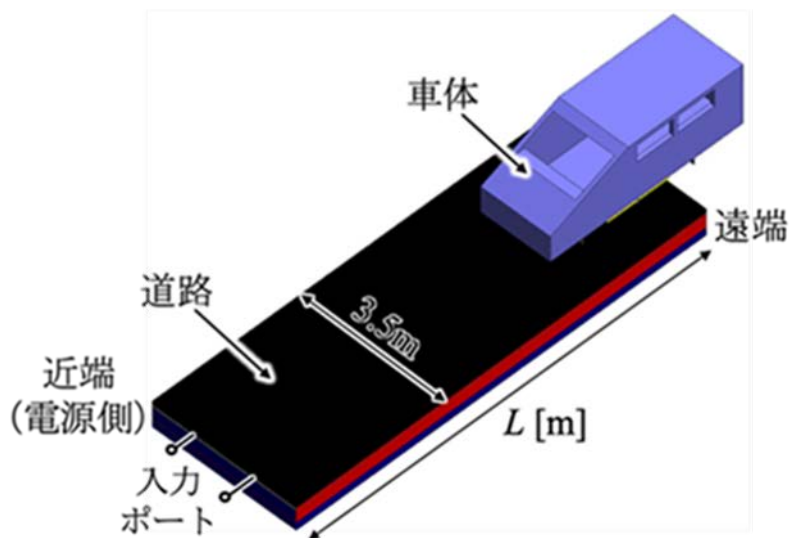


図1.2-1 概観図

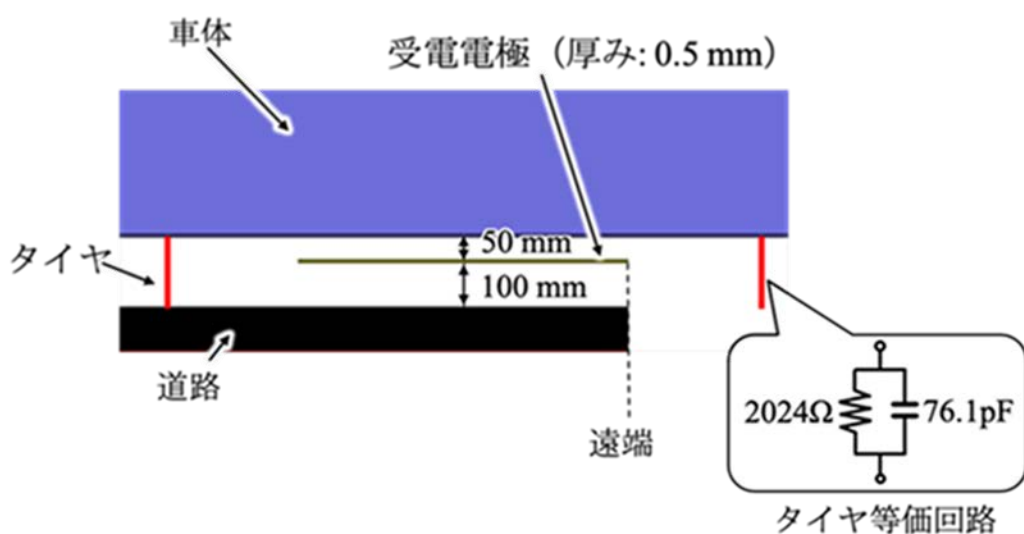


図1.2-2 車体配置位置（道路遠端）の側面図

本研究ではタイヤホイールを介した受電は行わない。しかし、車両のタイヤは送電電極が埋設された舗装上を走行するため、タイヤによる電力損失を含めた伝送効率をシミュレーションにより評価する。なお、タイヤの電気特性は、ベクトルネットワークアナライザにより測定した実測値を等価回路としてモデリングし、シミュレーションモデルに反映させた。

図1.2-3に送電電極と受電電極の位置関係を示す。受電電極は車体の前輪と後輪の間に配置し、送電電極と対向するように配置している。また、受電電力から車載回路に電力を送る出力ポートは、2枚の受電電極中央とした。

図1.2-4は道路システムの短辺方向を切り取った断面モデルである。シミュレーションに用いる舗装材料の材料特性を表1.2-1、表1.2-2に示す。表1.2-1は本道路システムに使用される金属物の導電率および比透磁率、表1.2-2は乾燥状態および定常状態における舗装材料の比誘電率および誘電正接である。なお、透水シートおよび瀝青材の比誘電率および誘電正接は、1.1節で示したインピーダンスアナライザおよび誘電体測定用テストフィクスチャによって測定した結果である。

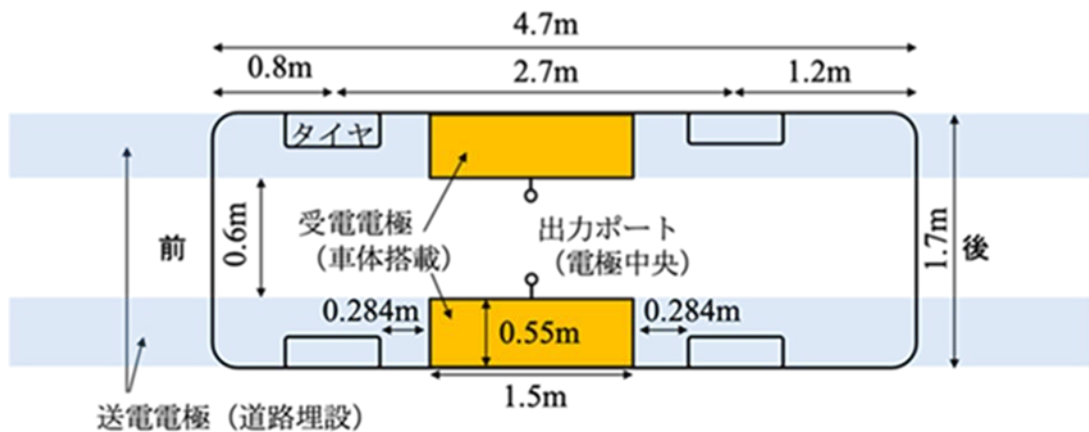


図1.2-3 送電電極と車載受電電極の配置

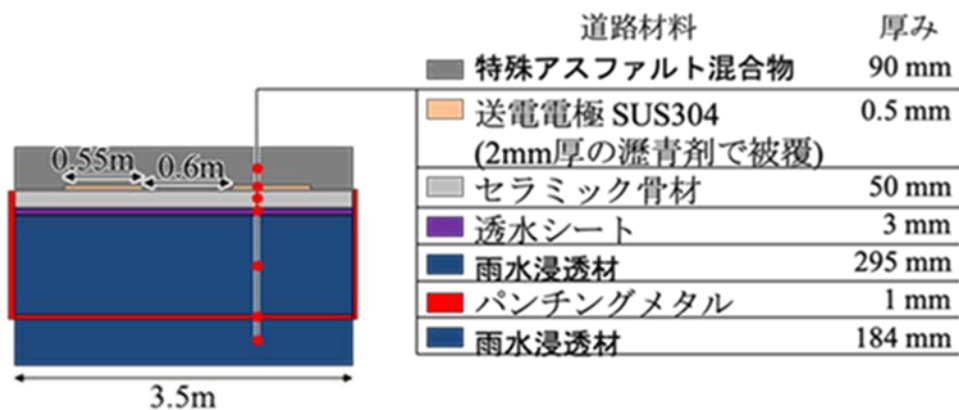


図1.2-4 無線給電道路の断面構造



表1.2-1 システムの中で使用される金属物の材料特性

構成要素	材料	導電率： $\sigma$	比透磁率： $\mu_r$
車体	鉄	$1.03 \times 10^7$	5000
送電および受電電極	SUS304	$1.39 \times 10^6$	1
パンチングメタル	アルミ	$3.56 \times 10^7$	1

表1.2-2 乾燥状態と定常状態の道路構成材料の特性

構成要素	乾燥状態		定常状態	
	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan\delta$	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan\delta$
特殊アスファルト 混合物	4.97	0.01	5.45	0.0179
セラミック骨材	2.29	0.004	3.09	0.0159
雨水浸透材 (空隙率92%)	1.10	0.0003	1.10	0.0003
透水シート	2.34	0.017	2.34	0.017
瀝青剤	1.99	0.011	1.99	0.011

## (2) 車体位置変化による伝送効率特性

道路上の車体位置における伝送効率の変化をシミュレーションにより推定する。伝送効率は図1.2-5で示す青枠の範囲であり、道路、送受電電極による結合器、インピーダンス整合回路を考慮した理論効率である。図1.2-6に効率に関する式をまとめる。道路と結合器（送電電極から受電電極）の効率は2ポートZパラメータから $\eta_{cmax}$ で計算される。整合回路の効率 $\eta_{smax}$ および $\eta_{emax}$ は、2ポートZパラメータからポアンカレ長を計算し、整合回路のQファクタを与えることで算出できる。整合回路のQファクタは十分実現できる値として200とおいた。電磁界解析で2ポートZパラメータを取得し、上記の効率計算方法を用いることで伝送効率を算出する。

図1.2-7のように車体が10m道路上を走行した場合を想定したシミュレーションを実施し、伝送効率を推定した。シミュレーション条件を表1.2-3に示す。入力ポートを道路近端に設置し、出力ポートを受電電極に設置し、50Ω電力源とした。入出力ポートから1Wの電力をシステムに入射し、2ポートZパラメータを取得した。Zパラメータから伝送効率を計算した結果を図1.2-8に示す。赤線が道路乾燥状態、青線が定常状態の伝送効率である。図1.2-8に示すとおり車体が道路に入り始めから道路上を走行している時は定常状態においても高効率を維持しており、本システムは道路上を連続走行することに十分に適応できるものと考えられる。

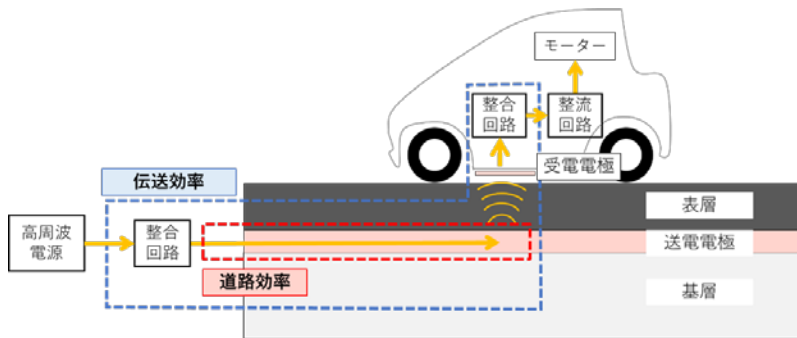
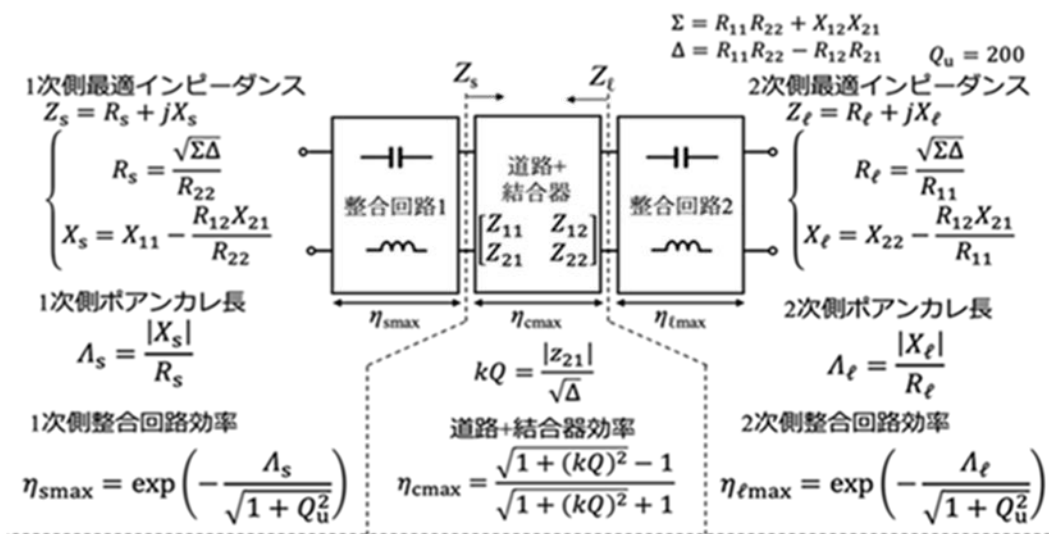


図1.2-5 本報告における「効率」の定義 (図1.1-5を再掲)



伝送効率  $\eta_{tmax} = \eta_{smax} \times \eta_{cmax} \times \eta_{tmax}$

図1.2-6 効率に関する式のまとめ

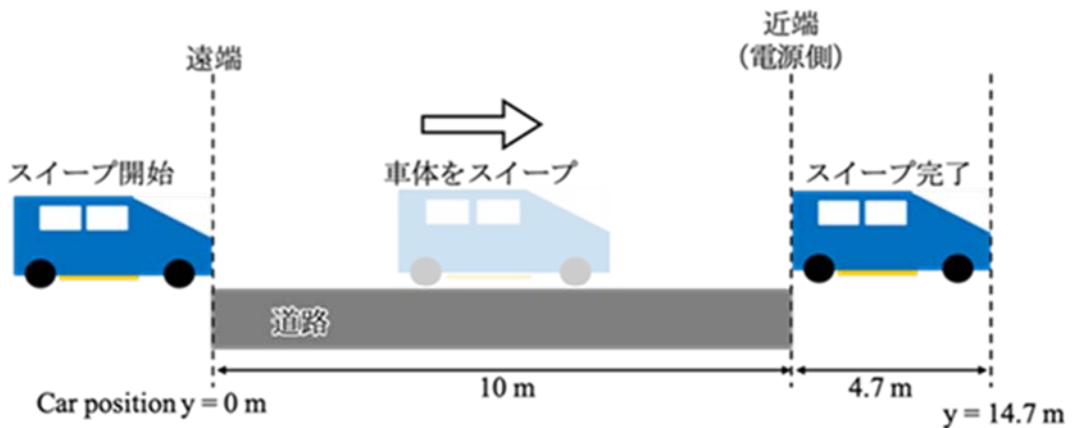


図1.2-7 10m道路上走行

表1.2-3 車体位置変化によるシミュレーション条件

項目	値
周波数	6.78MHz
解析空間の大きさ	120m×120m×120m
外部境界条件	吸収境界
入力ポート	50Ω 電力源
出力ポート	50Ω 電力源
入出力ポートの入射電力	1 W

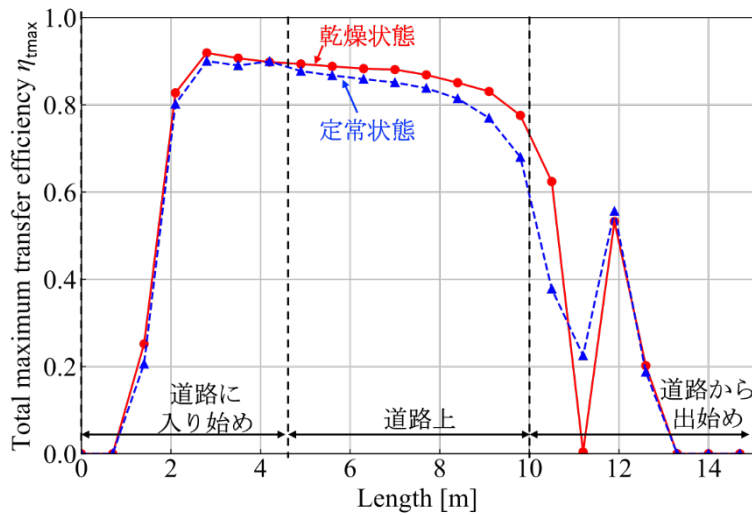


図1.2-8 車体位置による伝送効率特性

### (3) 表層アスファルトの厚み変化による伝送効率

電界結合方式を適用する場合には、この表層アスファルト厚の増減は、送電電極と受電電極のエアギャップの増減に影響し、特に厚さが大きいと伝送効率の低下に繋がる可能性がある。そのため、実際の無線給電道路の施工を想定した場合、一般的道路でのアスファルト舗装と同等あるいはそれ以上に表層アスファルト厚の施工管理に留意することが重要である。そこで、アスファルト厚みの違いが伝送効率に及ぼす影響について、シミュレーションにより推定した。図1.2-1から図1.2-3に示すシミュレーションモデルを使用し、道路長 $L=10\text{m}$ 、道路の表層アスファルトの厚みを図1.2-8に示す $90\text{mm}$ （本研究における設計厚さ）に対して $\pm 20\text{mm}$ の範囲で変化させたシミュレーションを実施した。シミュレーション条件を表1.2-4に示す。

伝送効率のシミュレーション結果を図1.2-9に示す。アスファルトの厚みが設計値より減少した場合、わずかに伝送効率が向上する。それに対して、厚みが増加した場合、伝送効率が低下する傾向が認められる。ただし、表層アスファルトの厚みの差から生じる伝送効率は、乾燥状

態および定常状態のいずれも 90%以上であり、その変動幅も 2 ポイント以内と小さく、表層アスファルトの厚みが $\pm 20\text{mm}$  の範囲であれば、給電性能への影響はわずかであることが明らかになった。

一般的な道路舗装における従来の施工管理では、NEXCO による仕上がり厚の規格（新設）のアスファルト厚みの変動幅は $+10\% \sim -5\%$ （今回の舗装厚  $90\text{mm}$  の場合 $+9\text{mm} \sim -4\text{mm}$ ）と規定されているが、上記のとおり、本道路システムの実際の道路施工においても、従来の施工管理の範囲でも十分に安定した給電性能を確保できる高い実装性を有するものと言える。

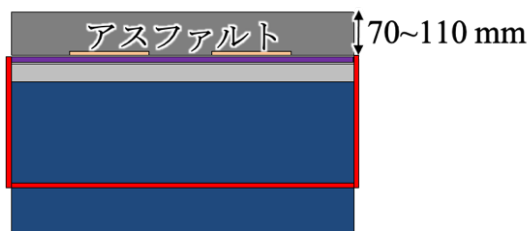


図1.2-8 アスファルト厚みの変化

表1.2-4 アスファルト厚み変化による伝送効率シミュレーション条件

項目	値
周波数	6.78MHz
解析空間の大きさ	120m×120m×120m
外部境界条件	吸収境界
入力ポート	50Ω 電力源
出力ポート	50Ω 電力源
入射電力	1 W

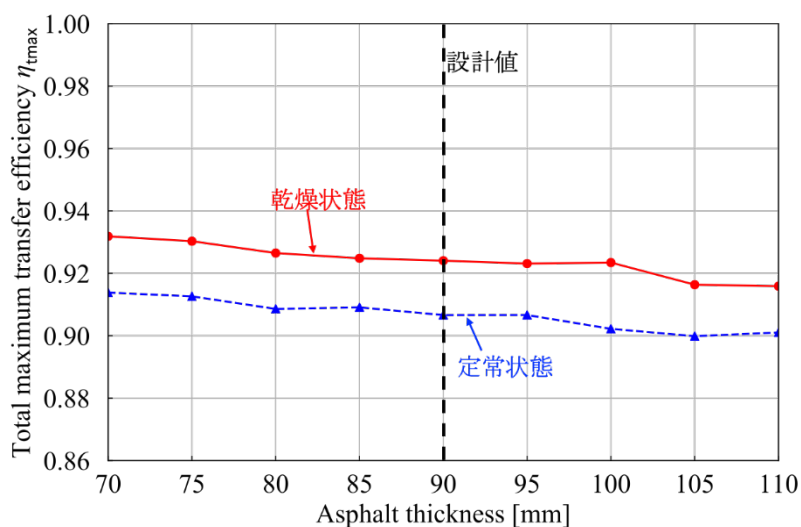


図1.2-9 アスファルト厚み変化に対する伝送効率特性

#### (4) 道路長変化による伝送効率

ここに提案する電界結合方式の特長を活かして、無線給電道路の定尺を長くすることで、1台の高周波電源で給電可能な範囲の延伸が期待できる。そこで道路長を10～100mまで変化させた場合についてシミュレーション解析し、その伝送効率を検討した。図1.2-10のように道路長 $L$ を10～100mまで変化させた。シミュレーション条件を表1.2-5に示す。

図1.2-11に道路長を10～100mまで変化させたときの伝送効率を示す。乾燥状態は道路内に滞留水が存在しない状態で給電システムにとって最も好ましい状態であるが、道路長100mの場合でも80%以上の効率を維持している。また、定常状態の結果である道路内に水が滞留している条件においても、道路長100mまで伝送効率70%以上を維持している。これらの結果から、ここに提案した道路システムは、道路長100mの長距離においても伝送効率70%以上の高効率の給電を達成できるものと考えられる。

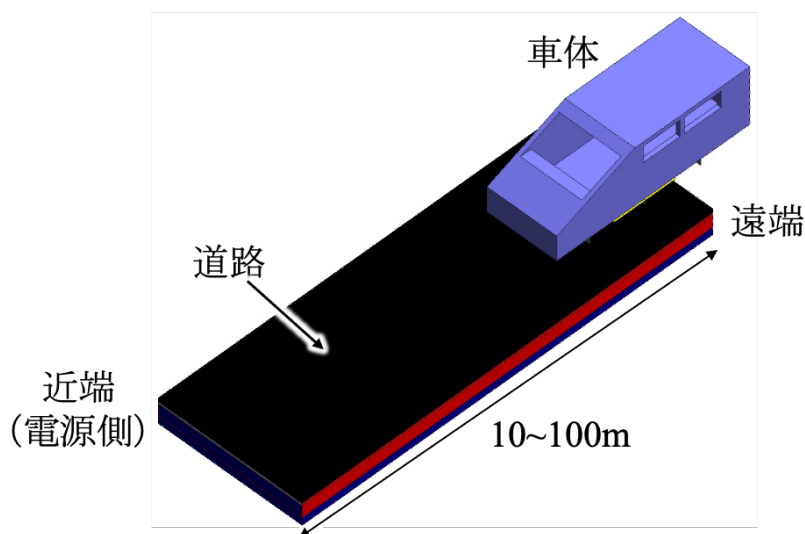


図1.2-10 道路長を10m～100mと変化させた場合のシミュレーションモデル

表1.2-5 道路長変化による伝送効率シミュレーション条件

項目	値
周波数	6.78MHz
解析空間の大きさ	120m×120m×120m
外部境界条件	吸収境界
入力ポート	50Ω 電力源
出力ポート	50Ω 電力源
入射電力	1 W

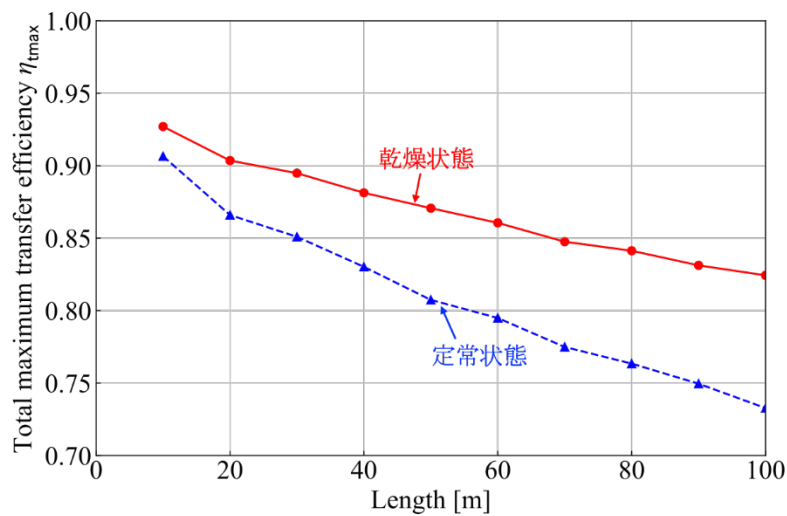


図1.2-11 道路長変化による伝送効率特性

(5) 車体の横方向の位置ずれによる伝送効率の変化

ここに提案する電界結合方式の特長を活かして、無線給電道路の送電電極幅を車体に装着する受電電極幅より大きくすることで、車体の横断方向の位置ずれによる伝送効率の変化が小さくなることが期待できる。そこで、送電電極幅を850mm、受電電極幅を550mmとし、道路長10mの遠端に車体を配置した際における、車体の横ずれによる伝送効率の変化についてシミュレーションにより確認した。シミュレーションモデルを図1.2-12に示す。図1.2-12左図は送電電極と受電電極の中心が一致する条件であり、右図は受電電極中心が150mm右にずれた条件を表している。

図1.2-13に示すシミュレーション結果より、乾燥状態および定常状態の両状態においても、受電電極が横断方向に150mmずれた条件での伝送効率の低下は最大でも1ポイント程度となることが分かった。これらの結果から、ここに提案した道路システムは、車体が道路中心から左右にずれて走行した場合でも送電電極幅を車体に装着する受電電極幅より大きくすることで、伝送効率70%以上の高効率の給電を達成できるものと考えられる。

表1.2-6 シミュレーション条件

項目	値
周波数	6.78MHz
解析空間の大きさ	120m×120m×120m
外部境界条件	吸収境界
入力ポート	50Ω 電力源
出力ポート	50Ω 電力源
入射電力	1 W

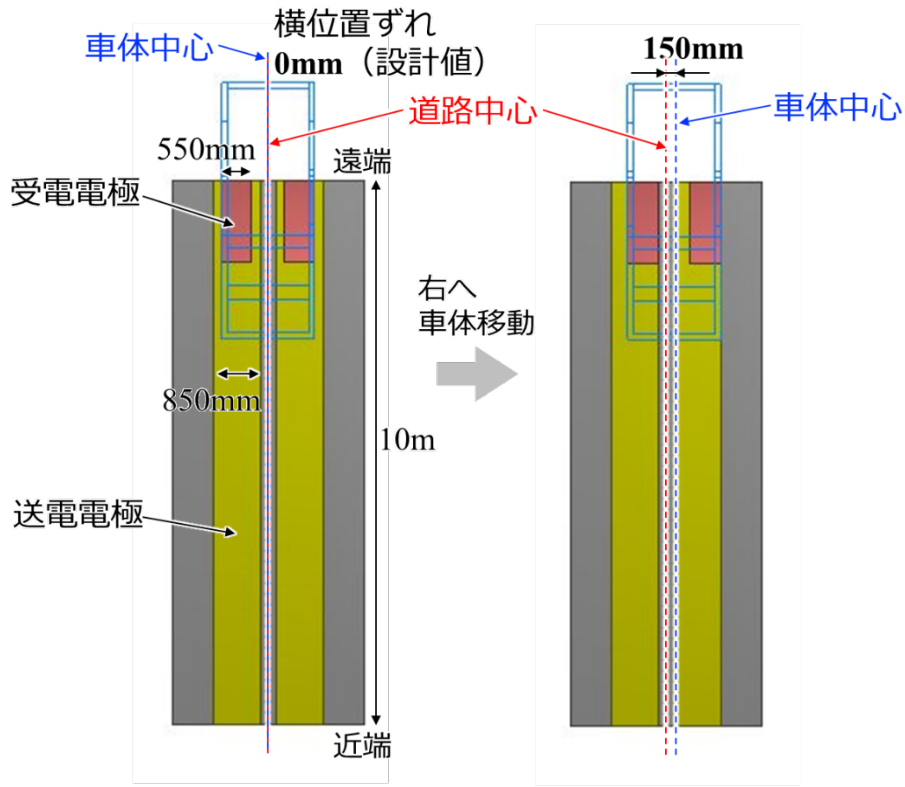


図1.2-12 シミュレーションモデル

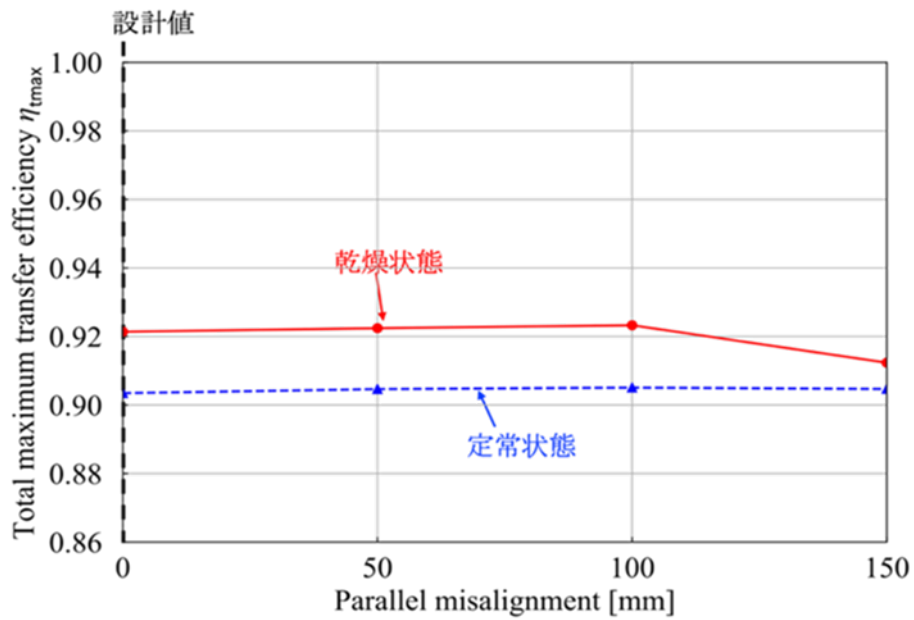


図1.2-13 車両の横方向の位置ずれに対する伝送効率

### 1. 3 無線給電道路システムの概念設計

これまでの検討結果を基に、ここでは無線給電道路の概念設計を行った。

本研究においては、送電電力10kWに対し受電電力7kWを実現することを目標としている。図1.3-1における伝送効率について、先の図1.2-11より、道路内に水が滞留している定常状態においても効率70%以上を達成可能な道路長は100mとなることが分かる。ただし、実際の運用状態においては、高周波電源の損失や、整流回路の損失などが発生することを考慮し、無線給電道路の基本長を20mとすることとした。この時の伝送効率は図1.2-11から定常状態において87%であることが確認でき、本研究において目標とした送電電力10kWに対する受電電力7kWを十分に達成できる結果が得られた。

さらに、車両進行方向に隣り合う送電電極長20mどうしを接続するように給電点を設けることで、全長40mの範囲まで無線給電が伸長できるものと考えられる。

以上の基本設定に基づき、無線給電道路の概念設計の具体的な仕様を図1.3-2～図1.3-6に示す。図1.3-2は特殊アスファルト混合物表層から見た平面図である。無線給電道路の表層には特殊アスファルト混合物とハンドホール用の鉄蓋が配置される。図1.3-3はセラミック骨材および送電電極層から見た平面図である。なお、電気回路を埋設するためのハンドホールによる道路効率の低下が懸念されるため、送電電極とハンドホールを100mm離して配置している。図1.3-4はグラウンド層を断面とした平面図である。図1.3-5および図1.3-6は、それぞれ図1.3-2におけるA断面とB断面を示す。図1.3-5に示すように、無線給電道路の構造は下から、路床、雨水浸透材、グラウンド、雨水浸透材、セラミック骨材、送電電極、特殊アスファルト混合物から構成される。雨水浸透材は無線給電道路内へ侵入した雨水を路床へ排水する。セラミック骨材は道路効率を向上させるために送電電極周囲に敷設する路盤である。また、図1.3-6に示すように無線給電道路の給電部における構造は下から、路床、地盤に埋設された合成樹脂製可とう電線管、ハンドホール、雨水浸透材、グラウンド、雨水浸透材、セラミック骨材、送電電極、特殊アスファルト混合物から構成される。合成樹脂製可とう電線管は、路側に設置される高周波電源からの電力ケーブルを配線するための埋設管である。合成樹脂製可とう電線管内の電力ケーブルは、ハンドホールのインサートを通じ柵内へ配線され、ハンドホール内に配置される電気回路と接続される。電気回路は整合回路、バランで構成され、電気回路の差動出力はハンドホール壁の金属ビスへと接続される。金属ビスはハンドホールを貫通し柵外の送電電極と接続される。

なお、以上の断面仕様における無線給電道路の施工費を現時点で試算すると、セラミック骨材や雨水浸透材などの汎用的な材料を使用しているため、在来工法による一般的な小型道路と比べて8倍程度と見込まれる。そのため本研究では、セラミック骨材や雨水浸透材のより安価な代替品の材料検討や施工方法の改良などの材料費および施工費のコストダウンを図るべく、無線給電道路の実装に向けた全体最適化設計に注力する。

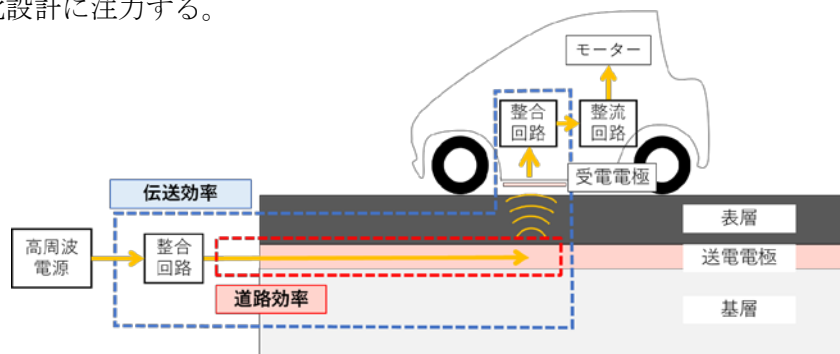


図1.3-1 本報告における「効率」の定義（図1.1-5を再掲）



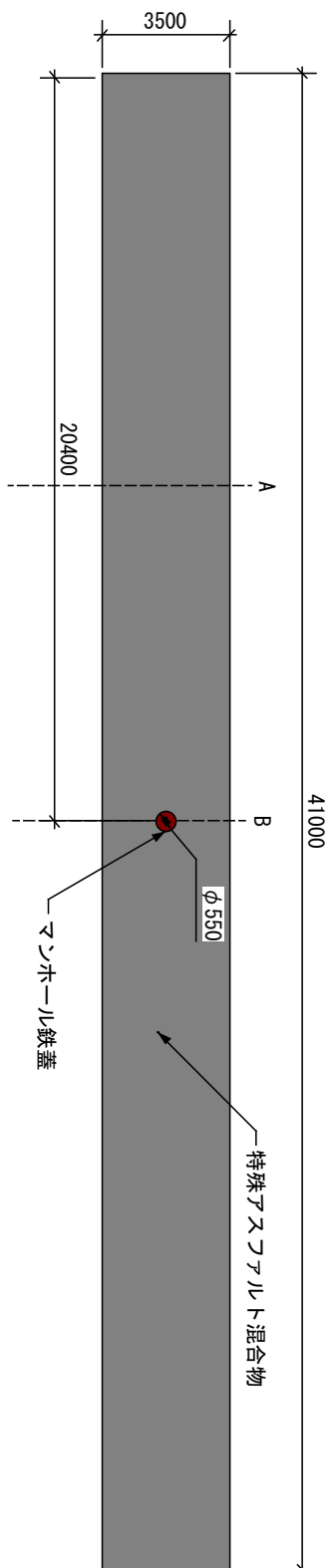


図1.3-2 無線給電道路概念図（特殊アスファルト混合物を断面とした平面図）

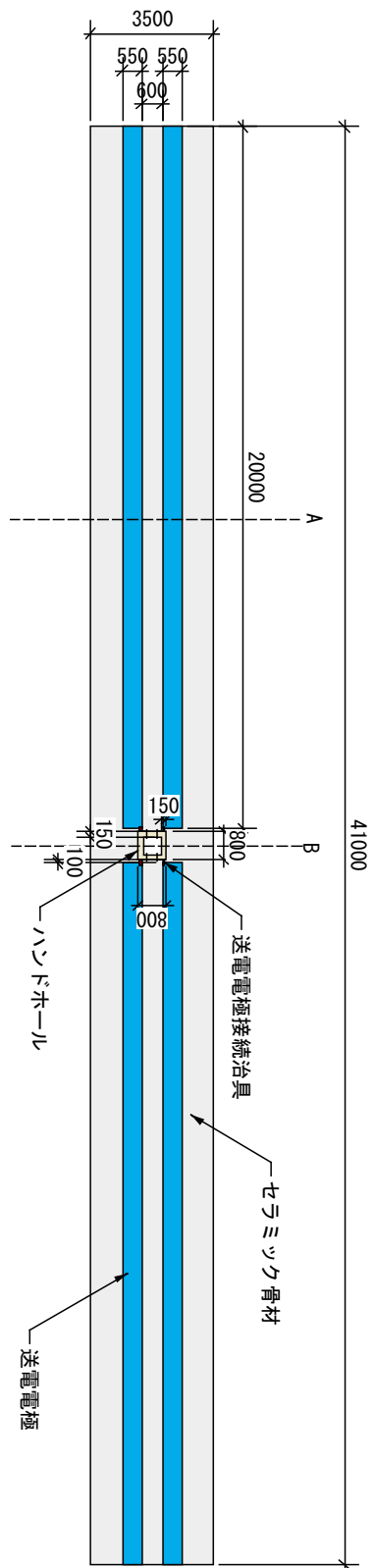


図1.3-3 無線給電道路概念図 (セラミック骨材、送電電極を断面とした平面図)

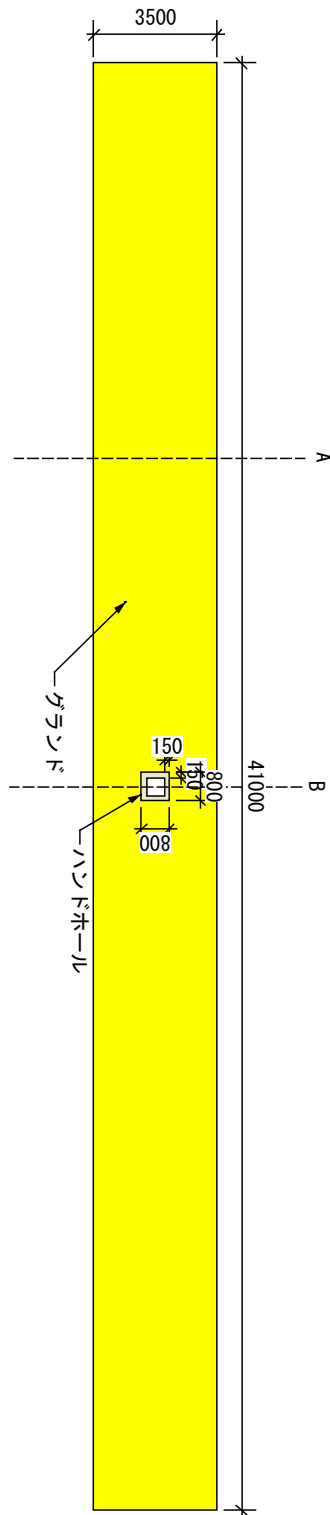


図1.3-4 無線給電道路概念図 (グラウンドを断面とした平面図)

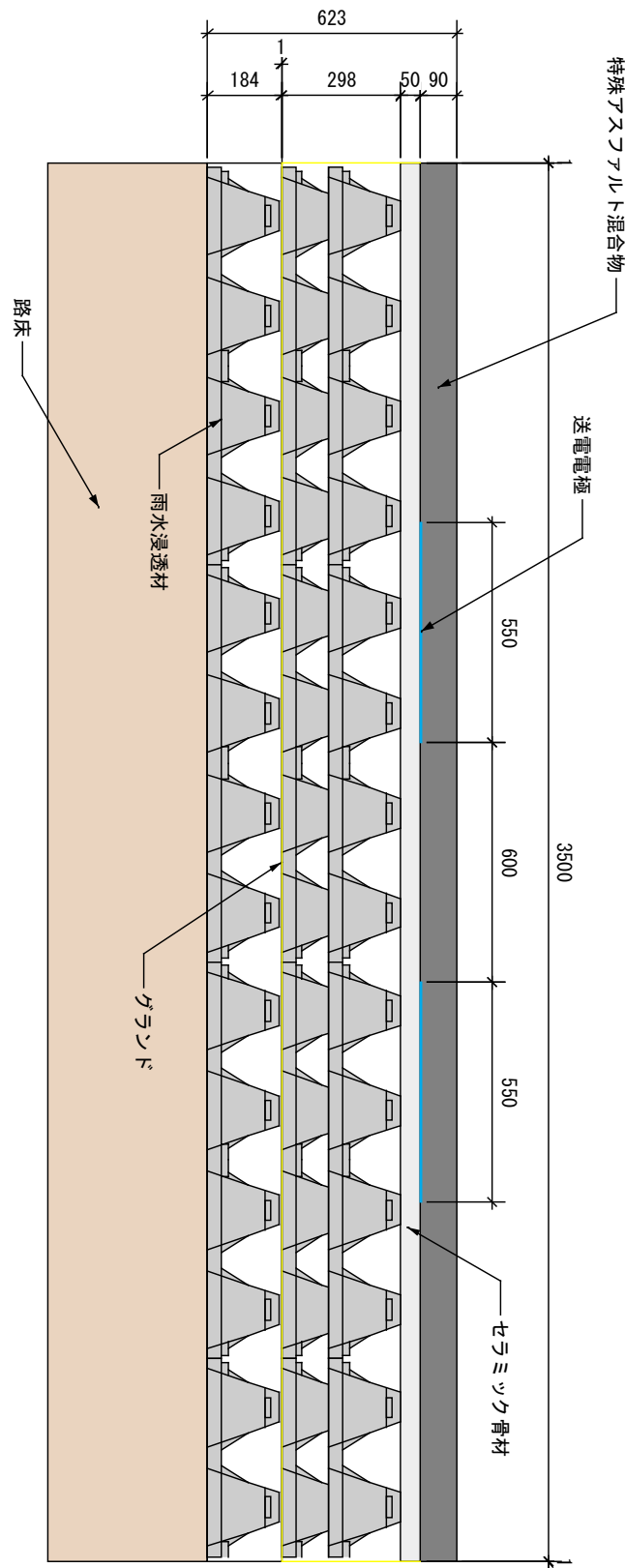


図1.3-5 無線給電道路概念図 (A断面図)

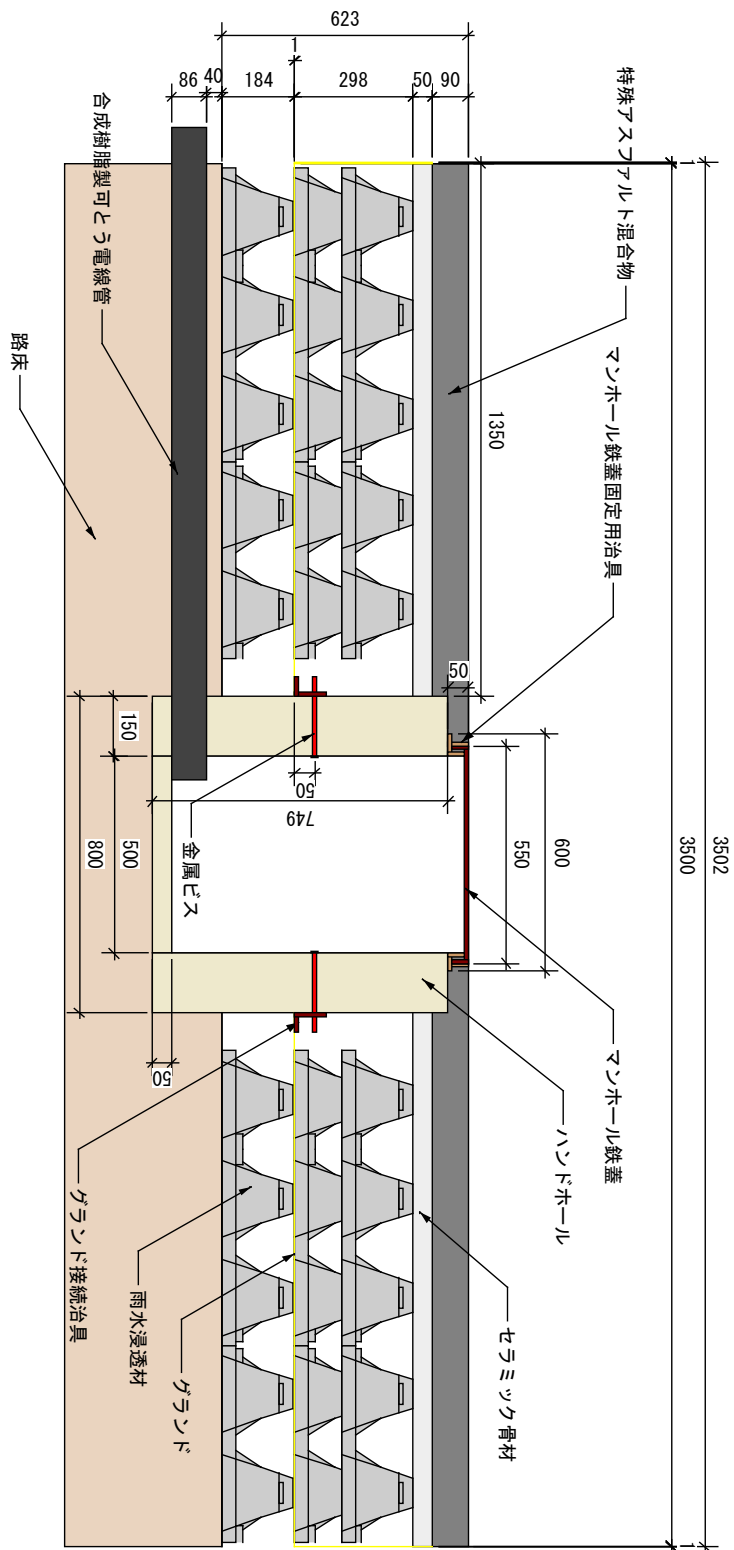


図1.3-6 無線給電道路概念図 (B断面図)

#### 1. 4 本章のまとめ

以上の無線給電道路システムの体系化技術の開発に向けた検討について、本章で得られた知見を以下に示す。

- 1.1節の無線給電道路システムの基本構造検討では、無線給電道路の断面構造について検討した舗装表面から表層・基層：特殊アスファルト混合物（セラミック骨材使用）、送電電極、上層路盤：セラミック骨材、下層路盤：雨水浸透材（プラスチック製）、グランド（パンチングメタル）で構成される構造を提案し、本構造における各材料の電気定数（比誘電率および誘電正接）を評価した。その結果、本構造における材料は、電界結合方式による無線給電において有利な比誘電率、誘電正接に近い結果であり、本構造における材料は良好な値が得られることを確認した。
- 送電電極・グランド材・無線給電設備を電氣的に接続するための配線方法を考案した。具体的には、無線給電道路にハンドホールによる空間を設け、高周波電源からの配線は埋設配管を通じハンドホール内に格納される電気回路と接続される。電気回路からの出力端子はハンドホールを貫通する金属ねじと接続され、金属ねじはハンドホール外で送電電極と接続される構造である。本配線構造は、車両の走行に伴う振動、道路補修時のアスファルト施工に伴う熱、雨水や結露による水などを原因とした故障や漏電から守ることができる実用的な仕様と言える。
- 一般的な舗装材料で構築した無線給電道路（一般道路）、SCOPEで実証した無線給電道路（従来型無線給電道路）、舗装材料および排水構造を改良した無線給電道路（高機能型無線給電道路）の3体の実試験体を製作し、排水前後における道路効率を評価した結果、高機能型無線給電道路の道路効率は2m長さにおいて98.4%と高効率を得られた。従来型無線給電道路も同等の効率が得られたが、3週間の暴露試験の結果、内部の建設用断熱材の体積含水比が0.4%から1.1%と増加したことから、長期間においては含水による道路効率の低下が示唆された。より長期的な効率を維持するためには、従来型無線給電道路の排水性をより高める必要が再確認された。
- 1.2節の無線給電設備の効率検討では、高機能型無線給電道路の乾燥状態と定常状態（道路内に滞留水が残存している状態）の伝送効率をシミュレーションにより検討した。その結果、10m長の無線給電道路上をEVが走行している状況において、定常状態においても高効率を維持しており、本道路システムの連続走行における高い適用性が明らかとなった。
- 電界結合方式を適用する場合には、無線給電道路における表層アスファルト厚の増減は、送電電極と受電電極のエアギャップの増減に影響し、特に厚さが大きいと伝送効率の低下に繋がる可能性がある。そのため、実際の無線給電道路の施工を想定した場合、一般的道路でのアスファルト舗装と同等あるいはそれ以上に表層アスファルト厚の施工管理に留意することが重要である。そこで、アスファルト厚みの違いが伝送効率に及ぼす影響について、シミュレーションにより推定した。その結果、表層アスファルトの厚みの差から生じる伝送効率は乾燥状態および定常状態のいずれも90%以上であり、その変動幅も2ポイント以内と小さく、表層アスファルトの厚みが±20mmの範囲であれば、給電性能への影響は僅かであった。このことから、本道路システムは、従来の道路施工における施工管理の範囲でも、十分に安定した給電性能を確保できる高い実装性を有することが明らかとなった。
- 電界結合方式の優位性の一つに、1台の高周波電源で給電可能な範囲を広げ、無線給電道路の定尺を長くできることが挙げられる。そこで道路長を10～100mまで変化させた場合についてシミュレーション解析し、その伝送効率の変化を検討した。その結果、道路

内に滞留水が存在しない乾燥状態では道路長100mまで80%以上の伝送効率を維持し、さらに、実際に想定される道路内に水が滞留している定常状態条件においても、道路長100mまで伝送効率70%以上を維持しており、本道路システムは道路長100mの長距離においても高い効率で給電できることが明らかとなった。

- 1.3節の無線給電道路の概念設計では、1.1節、1.2節の成果を基に、無線給電道路の概念設計を行った。ここで、送電電極長は20mと設定した。シミュレーションにより得られた知見により、無線給電道路の送電電極長を20mと設定した場合の伝送効率は、道路内に水が滞留している定常状態においても87%と高い効率を維持していることから、その総合効率は74%と試算された。したがって、車両進行方向に隣り合う送電電極どうしを接続するように給電点を設けることで、延長40mの範囲まで、本研究で目標とした総合効率70%以上を実現できる可能性が導かれた。

## 2. 舗装材料・構造の検討および施工技術の開発

本章では、先の1章で提案した高機能型無線給電道路（図2-1）について、各種使用材料（特殊アスファルト混合物、セラミック骨材、雨水浸透材）の品質試験を行ない、それらの基本物性を確認した。

次に、この高機能型無線給電道路の舗装設計における交通条件等の基本条件を整理し、理論設計法に基づく舗装断面の概略設計を行なった。さらに、この設計断面について、小規模ではあるが実施工で使用する小型施工機械による試験施工を行ない、施工手順と施工性を検討するとともに、非破壊試験により施工後の構造特性を確認した。

最後に、高機能型無線給電道路の舗装および送電電極の修復、更新の方法を整理し、長期的に供用するための維持管理方法についても検討した。

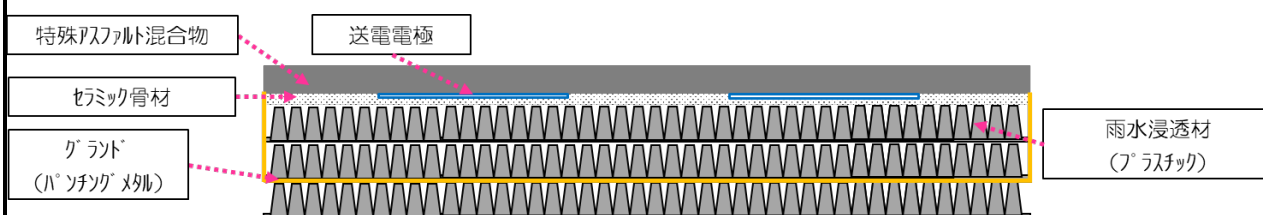


図2-1 高機能型無線給電道路の舗装断面

### 2. 1 無線給電道路システムにおける舗装材料・構造の検討

高機能型無線給電道路に使用する各種材料は表2.1-1に示すとおりである。このうち、特殊アスファルト混合物、セラミック骨材、雨水浸透材における品質試験の結果を以下に示す。

表2.1-1 高機能型無線給電道路の使用材料一覧

舗装区分	種別	品質規格等	備考
表層 基層	特殊アスファルト混合物	密粒度アスファルト混合物 13の合成粒度 相当	ポリマー改質アスファルトII型+セラミック骨材の混合物
送電電極板	ステンレス製	sus304	t=0.5, 550×2000mm
上層路盤	セラミック骨材	JIS A5001-2008 道路用碎石 準用	参考粒度：M-25 相当
グラウンド	グラウンド材	アルミ製パンチングメタル	・t=1, 1000×1000mm ・孔 Φ2 mm, 開孔率 70%
下層路盤	透水シート	プラスチック製有孔シート	・t=3, 1000×1000mm, ・孔 φ3mm
	雨水浸透材	-	空隙率 92%



### (1) [表層・基層] 特殊アスファルト混合物

表層・基層には、特殊アスファルト混合物は、表 2.1-1 に示すとおり、ポリマー改質アスファルトⅡ型と粒度範囲の異なる 6 種類のセラミック骨材との混合物を使用した。

ここで、セラミック骨材の物性は表 2.1-2 に示すとおりであり、吸水率やすりへり減量が一般的な道路用砕石の半分程度と小さい材料である。

電界結合方式においては、できるだけ舗装内部の水分を減らすことが高い給電効率の確保に繋がることから、舗装部の防水性を高める目的でセラミック骨材を積極的に使用することとした。

表 2.1-2 セラミック骨材の品質（商品カタログより）

項目	単位	結果	測定方法
表乾密度	g/cm <sup>3</sup>	2.4	JIS-A1109 JIS-A1110
単位体積重量	kg/L	1.4	JIS-A1104
すりへり残量	%	17.5	JIS-A1121
吸水率	%	1.8	JIS-A1109 JIS-A1110
硬度	-	7~8	モース硬度計(旧)

特殊アスファルト混合物の合成粒度を表 2.1-3、図 2.1-1 に示す。また、これらの図表に一般的な道路舗装に使用する密粒度アスファルト混合物 13 の粒度を併記する。

今回使用する特殊アスファルト混合物の合成粒度は、密粒度アスファルト混合物 13 とほぼ同等の粒度分布になるように混合比率を調整した。

表 2.1-3 特殊アスファルト混合物の合成粒度

種別	ふるい目(mm)	通過質量百分率(%)							
		19.0	13.2	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
特殊アスファルト混合物	合成粒度	100.0	99.8	58.1	39.1	21.6	13.3	7.6	5.9
密粒度アスファルト混合物	13 中央粒度	100.0	97.5	62.5	42.5	24.0	15.5	11.0	6.0

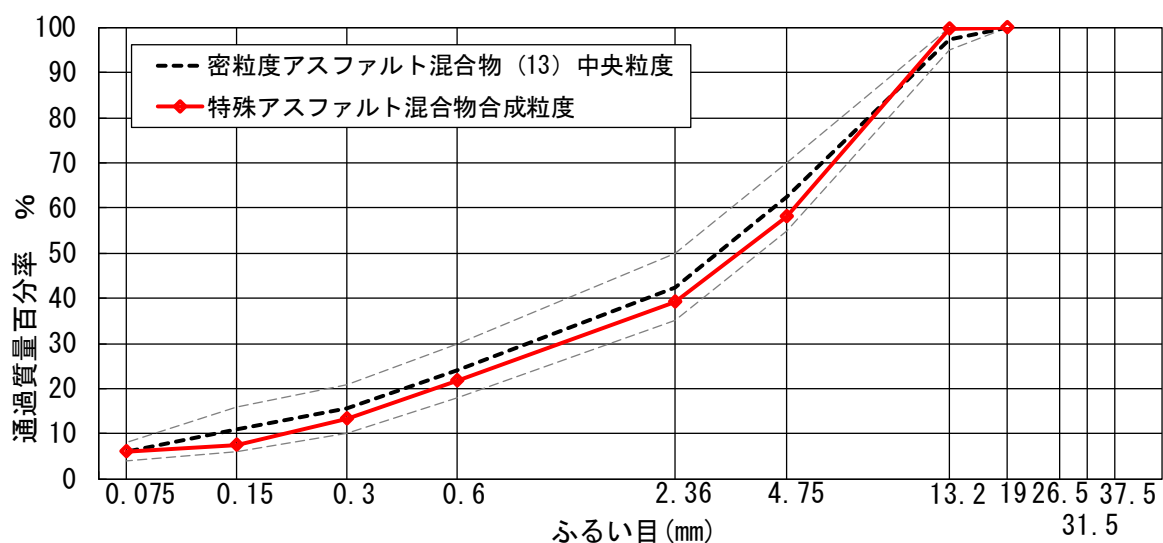


図 2.1-1 特殊アスファルト混合物の粒度曲線

特殊アスファルト混合物における安定度等の品質試験結果を、一般的な密粒度アスファルト混合物 13 の品質規格とともに表 2.1-4 に示す。

高機能型無線給電道路に使用する特殊アスファルト混合物の安定度および動的安定度は、一般的に表層・基層に使用されている密粒度アスファルト混合物 13 の規格値を満足する品質を有する。

表 2.1-4 アスファルト混合物の品質

項目	単位	特殊アスファルト混合物 試験結果	密粒度アスファルト混合物 13 品質規格
アスファルト量	(%)	5.8	-
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	2.151	-
理論密度	(g/cm <sup>3</sup> )	2.251	-
空隙率	(%)	4.4	3～6
飽和度	(%)	73.2	70～85
骨材空隙率	(%)	16.4	-
安定度	(kN)	12.6	4.90 以上
フロー値	(1/100cm)	37	20～40
動的安定度	(回/mm)	5730	500 以上
突固め回数	(回)	75	-
アスファルト加熱温度	(°C)	180	-
骨材加熱温度	(°C)	180	-
骨材突固め温度	(°C)	163	-

## (2) [上層路盤] セラミック骨材

上層路盤には、先の表層・基層と同じ6種類のセラミック骨材を混合して使用した。

セラミック骨材の吸水率やすりへり減量は一般的な道路用砕石の半分程度と小さい材料であり、できるだけ道路の排水性能を高め、舗装構造内部の水分を減らすことを目指して、路盤材としてもセラミック骨材を積極的に使用することとした。

上層路盤材のセラミック骨材の混合割合を表 2.1-5 に示す。また、その粒度分布を表 2.1-6、図 2.1-2 に示す。

ここでは、一般的な道路舗装で使用される粒度調整砕石 (M-25) の平均粒度にできるだけ近くなるように、粒度範囲の異なる6種類のセラミック骨材を混合して、粒度分布を調整した。一部 (ふるい目 13.2mm) の粒度が標準粒度を外れているのは、この粒度範囲のセラミック骨材が入手できなかったことによる。ただし、後述のとおり修正CBR値は75%と良好な結果であり、この粒度分布とすることによる不具合は認められない。

表 2.1-5 上層路盤に使用するセラミック骨材の混合割合

種別	セラサンド 6号	セラサンド A2粒	セラサンド A1粒	セラサンド A粒	セラサンド B粒	セラサンド C粒
混合率 (wt.%)	52.0	9.0	7.0	4.0	4.0	24.0
粒度範囲 (mm)	20~13	5~3.3	3.3~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.15

表 2.1-6 セラミック骨材の合成粒度

ふるい目 (mm)	通過質量百分率 (%)									
	53	37.5	31.5	26.5	19.0	13.2	4.75	2.36	0.425	0.075
セラミック骨材 合成粒度	-	-	100.0	100.0	-	99.8	47.6	35.2	20.1	0.1
粒度調整砕石 M-25 目標粒度	-	-	100.0	97.5	-	70.0	47.5	35.0	20.0	6.0

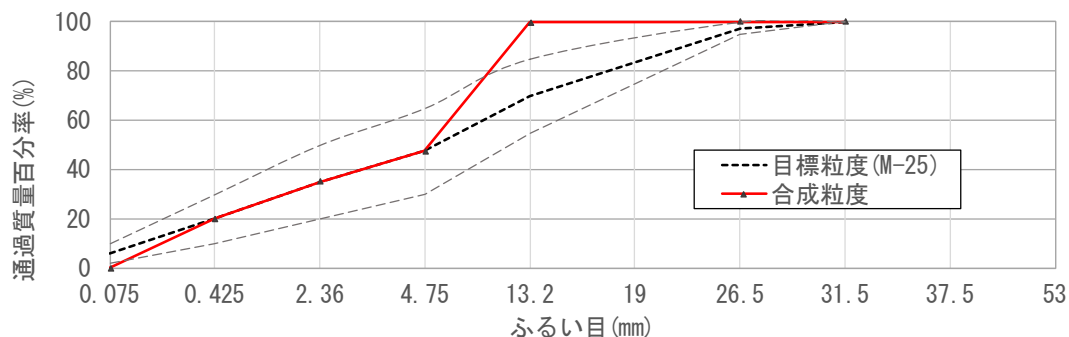


図 2.1-2 セラミック骨材の合成粒度曲線

上記の上層路盤材（セラミック骨材）について、修正CBR試験（写真2.1-1）を実施した。

その結果は表2.1-7に示すとおりであり、修正CBR値は75%と一般的な路盤材（クラッシュラングC-40相当）のJIS規定値（30%以上）を十分に満足することを確認した。

表 2.1-7 セラミック骨材の修正 CBR 試験結果

	セラミック 骨材
最大乾燥密度 (t/m <sup>3</sup> )	1.885
最適含水比 (%)	9.1
修正CBR(%) (締固め度95%)	75.0

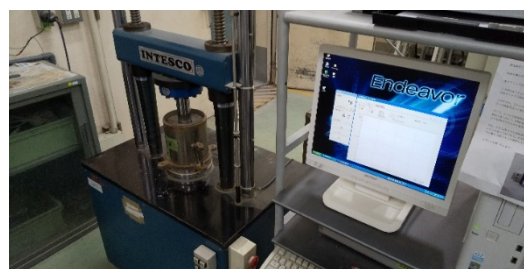


写真2.1-1 修正CBR試験状況

### (3) [下層路盤] 雨水浸透材

本研究では、下層路盤材として雨水浸透材を敷設する方法を提案し、下層路盤の排水性を高める改良を行なった。

大成ロテックでは20年以上前から、雨水浸透材料を用いた雨水貯留浸透施設を兼ねた駐車場等の施工を行っており、数年前より舗装材料として適用する検討を始めている。

SCOPEでは、セラミック骨材を用いた路盤を構築しているが、セラミック骨材が高価なため、比誘電率が空気と同程度で安価な材料を模索していた。

今回、雨水浸透材は容積の90%以上が空洞のため、比誘電率も空気と同程度と考えらえことから雨水浸透材の適用を検討するため、写真2.1-2に示すように、雨水浸透材の一部試験片を万能試験機により直接載荷し、その応力～ひずみ曲線より弾性係数を算出し、後述の舗装設計に反映させた。

試験で得られた応力～ひずみ曲線を図2.1-3に、弾性係数の算定結果を表2.1-8に示す。



写真2.1-2 雨水浸透材の弾性係数測定状況

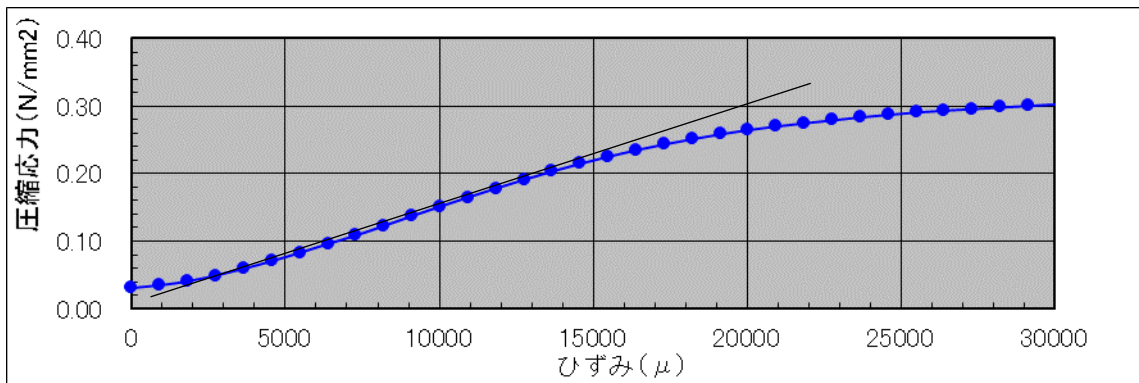


図 2.1-3 雨水浸透材の応力～ひずみの関係

表2.1-8 雨水浸透材の弾性係数 試験結果

	縦ひずみ ( $\mu$ )	応力 ( $\text{N/mm}^2$ )	圧縮静弾性係数 (MPa)
縦ひずみ 50 $\mu$ の点	50	0.0008	11.8
最大荷重の 1/3 の点	8727	0.103	

## 2.2 高機能型無線給電道路システムにおける舗装断面の設計

ここでは、本研究で提案する高機能型無線給電道路の設計における基本的な考え方を示し、理論設計法に基づく舗装断面の概略設計を行なった。

### (1) 理論的設計方法の概要

理論的設計方法のフロー図を図2.2-1に示す。この図は「舗装設計便覧」（平成18年12月版）のP109に記載されている方法である。

理論的設計方法とは、舗装の各層を水平方向に一様な厚さで無限に広がる弾性体と考え、材料特性を弾性係数やポアソン比といった物理定数でとらえ、舗装構造モデルに対し、多層弾性理論を適用した構造解析により、たわみ、応力およびひずみなどを理論的に計算し、その結果が許容値に収まるように舗装構造を決定するものである。

理論的設計方法には、ShellおよびAI（アメリカ・アスファルト協会）などの設計方法があり、ここではAIの設計方法により計算を行なった。

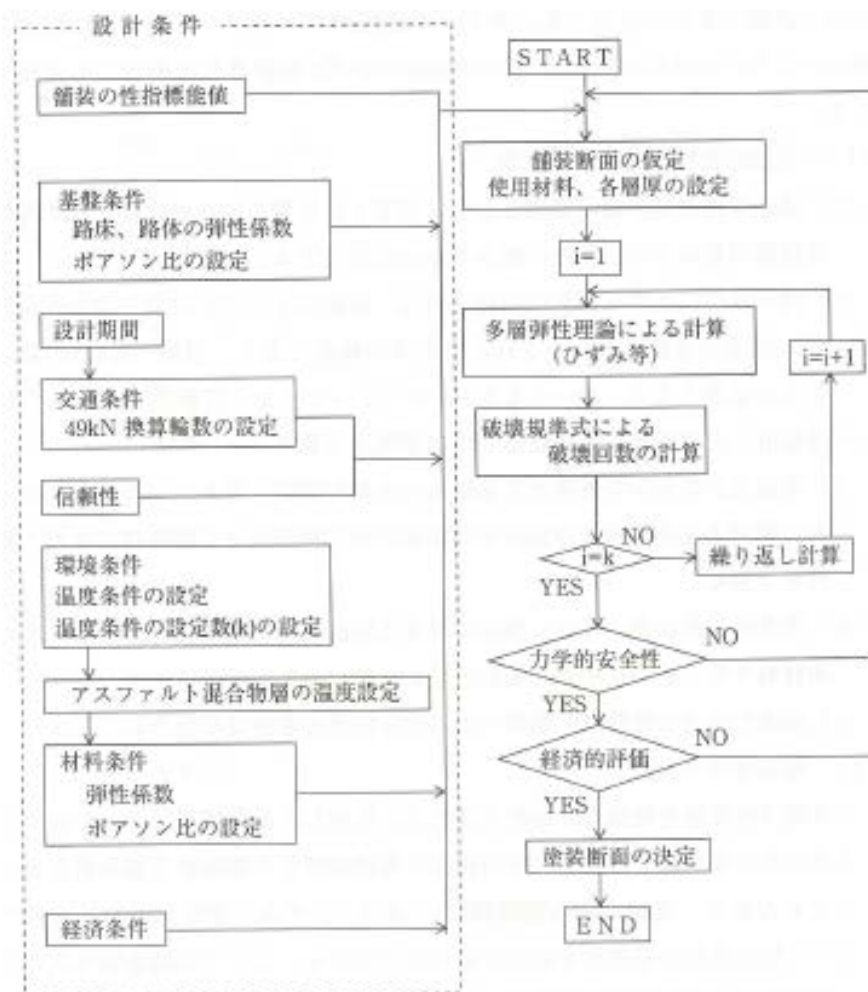
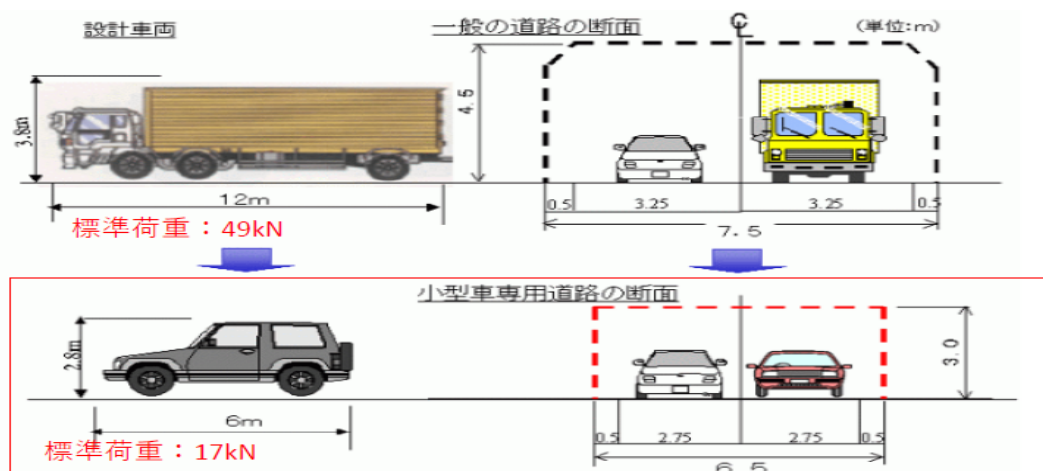


図2.2-1 理論的設計方法のフロー例

## (2) 設計における交通条件

本研究においては、標準荷重17kN相当の車両に送電電力10kW、受電電力7kWを実現する無線給電道路の実装を目標としている。そこで、高機能型無線給電道路の舗装断面の設計における前提条件は、図2.2-2に示す車両標準荷重17kN相当の小型道路を対象とし、表2.2-1に示す交通量区分S2（日交通量300~650台）の10年供用（疲労破壊輪数は1,100,000回/10年）を交通条件とした。今回は、普通自動車への送電を考えているため、舗装構造は小型道路対応とした。

なお、実際の運用では、無線給電機能は持たないが標準荷重17kN相当を超える大型車両が走行する可能性も想定されることから、この種の大型車両の通行に対する舗装設計の考え方についても検討を加えた。



【設計方法】 「舗装設計施工指針」（公益社団法人日本道路協会）準拠

図2.2-2 舗装設計概要

表2.2-1 小型道路の疲労破壊輪数の基準値

交通量区分	舗装計画交通量 (単位：台/日・方向)	疲労破壊輪数 (単位：回/10年)
S4	3,000以上	11,000,000
S3	650以上3,000未満	2,400,000
S2	300以上 650未満	1,100,000
S1	300未満	660,000



### (3) 理論的設計方法による舗装断面の選定

舗装断面を選定するために、前述した理論的設計方法を用いた。具体的には、以下の通りである。

- ① 舗装断面の決定（各層の弾性係数、厚さ、ポアソン比）
- ② 多層弾性理論によるアスファルト下面の引張りひずみ算出
- ③ ひずみより AI の式を用いて疲労破壊回数の算出
- ④ 疲労破壊回数と設計期間の交通量比較
- ⑤ 疲労破壊回数が満足していれば、断面の決定、満足しない場合は①から再計算

アスファルト混合物の疲労破壊に対する破壊基準式は、下記の AI の破壊基準式(式 2.2-1)を用いた。

$$N_{fA} = S_A \{ 18.4(C)(6.167 \times 10^{-5} \epsilon_t^{-3.291} E^{-0.854}) \} \dots \text{式 2.2-1}$$

ここに、 $N_{fA}$ ：アスファルト混合物の許容輪数（本計算では、17kN の疲労破壊回数）

$S_A$ ：舗装の性能値として設定したひびわれ率による定数（1.0）

$C$ ： $C = 10 M$ 、 $M = 4.84(V_b/(V_b+V_v)-0.69)$

$V_b$ ：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(%)

$\epsilon_t$ ：アスファルト混合物下面の引張りひずみ（17kN のひずみ）

$E$ ：アスファルト混合物の弾性係数 (MPa)

(4) 理論的設計方法を用いた設計断面の確認

舗装断面 (図 2.2-3、図 2.2-4) を設計し、2.1 章の物性結果をもとに、110 万回繰り返し荷重がかかった時の特殊アスファルト混合物の下面ひずみを、多層弾性理論による構造解析によって算出した。なお、一般的に表層のひび割れ率が 20%を超えるとアスファルト舗装が構造的に破壊したと判断とされるため、ひび割れ率による定数  $S_A$  は、表 2.2-2 より 1.00 とした。

AI の式より疲労破壊回数と、ひずみの関係を計算した結果を、図 2.2-5 に示す。アスファルト下面に発生する引張りひずみは、 $230\mu$  以下であれば、今回目標としている疲労破壊輪数 110 万回以上を満足する。また、また、雨水浸透材の許容鉛直応力はカタログより  $0.040\text{MPa}$  であることから、雨水浸透材の上面の鉛直応力が  $0.040\text{MPa}$  以下となれば長期供用できる。

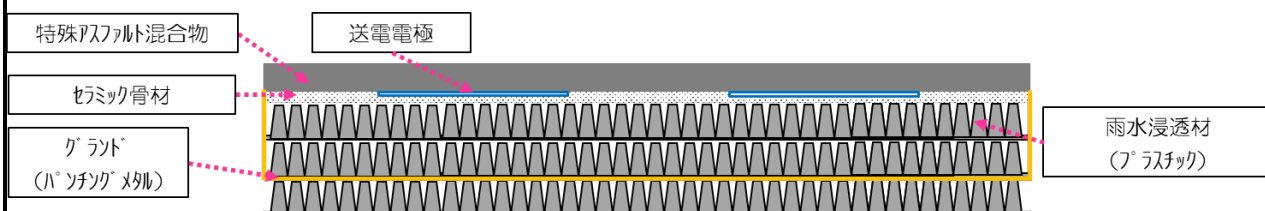


図 2.2-3 想定舗装断面イメージ

表 2.2-2 ひび割れ率による定数

ひび割れ率 (%)	$S_A$
5	0.73
15	0.94
20	1.00
30	1.10



図 2.2-4 設定した各層の層厚

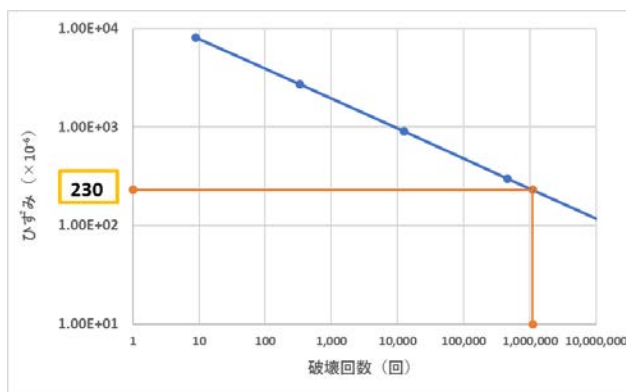


図 2.2-5 舗装断面における着目点

図 2.2-4 に示す本提案断面について、各層の弾性係数、ポアソン比、厚さを表 2.2-3 に示す。この舗装構造のアスファルト下面の引張りひずみおよび雨水浸透材の鉛直応力について多層弾性解析ソフト (GAMES) を用いて計算した。なお、各層の弾性係数については、「舗装工学ライブラリ 3 多層弾性理論による舗装構造解析入門」の計算例で使用している弾性係数を用いた。ただし、雨水浸透材については、実験による値を用いている。また、基層と上層路盤の間に送電電極を設置しているが、①水平方向に一樣な厚さで無限に広がっていない。②剛性が高いことから、計算結果のひずみおよび応力が小さくなることが考えられたことから、この 2 点を考慮し、安全側に設計を行うため、送電電力の材料は除去して計算を行った。

計算結果を表 2.2-4 に示す。表より、規格値を満足していたので、本提案断面で小型道路対応の道路を構築することができることが確認できた。

なお、大型トラック (荷重 49 kN) が載荷した場合の本提案断面でのアスファルト下面の引張りは 647 $\mu$ 、雨水浸透材の鉛直応力 0.058MPa であった。この値は、長期間の許容応力 (規格値) を満足はしていないが、短期であれば許容できる値であった。(アスファルトの疲労破壊回数 28000 回、雨水浸透材の許容応力は 0.11MPa)

表 2.2-3 各層の弾性係数とポアソン比

舗装区分	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	厚さ (mm)	参考材料
表層・基層	5000	0.35	90	密粒度 As
上層路盤	150	0.35	50	クラッシュラン
雨水浸透	11.8	0.20	482	
路床	30.0	0.40	-	

表 2.2-4 着目点における計算結果

着目点	評価項目	規格	計算結果
①	特殊アスファルト混合物の下面引張りひずみ	230 $\mu$ 以下	197 $\mu$
②	雨水浸透材上面の鉛直応力	0.040MPa 以下	0.015MPa

### 2. 3 試験施工による実装に向けた施工方法の検討

ここでは、2. 2節で設定した設計断面について、実際の道路施工を想定して、屋外実験ヤードにて、小規模ではあるが実際に使用する小型資機材を用いた試験施工を行なった。

試験施工を通して、ここに提案した高機能型無線給電道路システムの施工手順と施工性を確認するとともに、非破壊試験により施工後の構造特性を確認した。

#### (1) 試験施工の形状

試験施工を行なった舗装構造を図2.3-1に、その断面を図2.3-2、図2.3-3に示す。

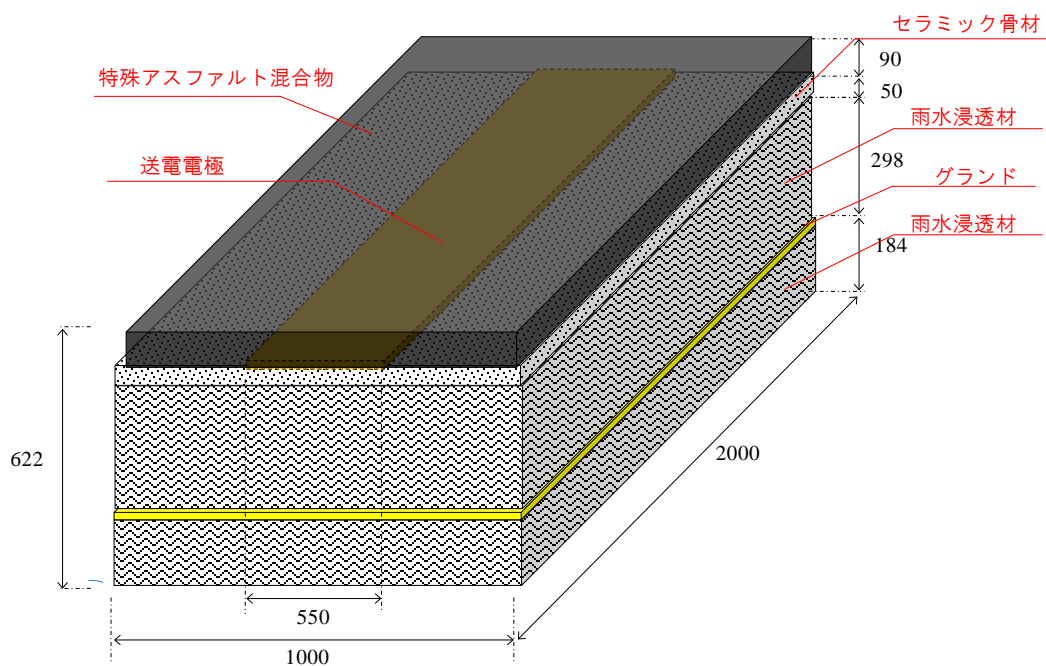


図2.3-1 構造イメージ

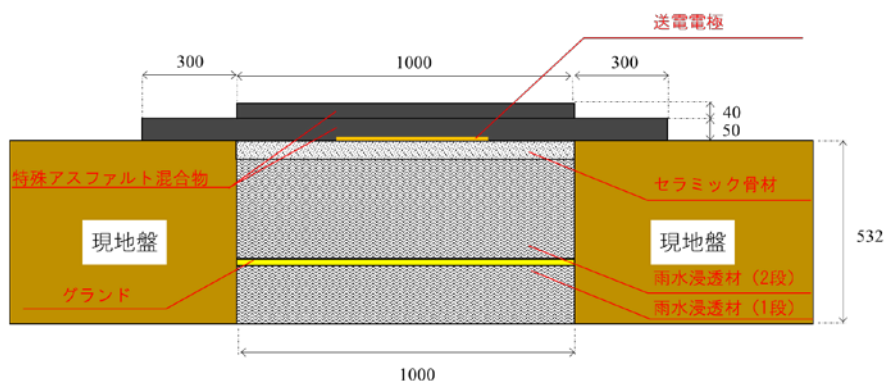


図2.3-2 断面図 (横断面)

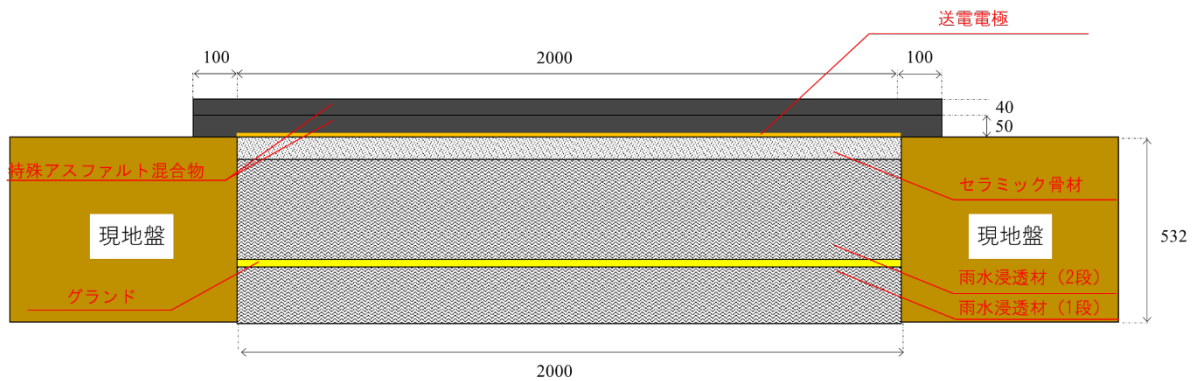


図2.3-3 断面図（縦断面）

## （２） 使用材料および使用機械

試験施工に使用した各種材料は表2.3-1に示すとおりであり、2.2節で詳述したのと同じである。また、表2.3-2に使用した施工機械を示す。

表2.3-1 使用材料

舗装（材料） 区分	種別	規格	備考
表層	特殊アスファルト 混合物	舗装施工便覧	密粒度アスファルト混合物 (13)
基層		平成 18 年度版 表-6.3.2	
電極板	送電電極	-	sus304 t=0.5, 550×2000mm
上層路盤	セラミック骨材	JIS A5001-2008 参考	参考粒度：M-25
グラウンド	グラウンド	-	t=1, 1000×1000mm
下層路盤	透水シート	-	t=3, 1000×1000mm, φ3mm
	雨水浸透材	-	空隙率 92%

表2.3-2 使用機械

機械名	規格
コンバインドローラ	3540kg
ハンドローラー	600kg
プレートコンパクター	40kg

### (3) 施工手順

試験施工における、高機能型無線給電道路の施工手順をフローにして図 2.3-4 に示す。また、給電効率等は考慮せずに仮に在来工法の一般道路を無線給電道路とした場合の施工手順を図 2.3-5 に示す。

ここに提案する高機能型無線給電道路では、雨水浸透材と透水シートの敷設作業が増加する程度であり、作業手順の増加は僅かである。

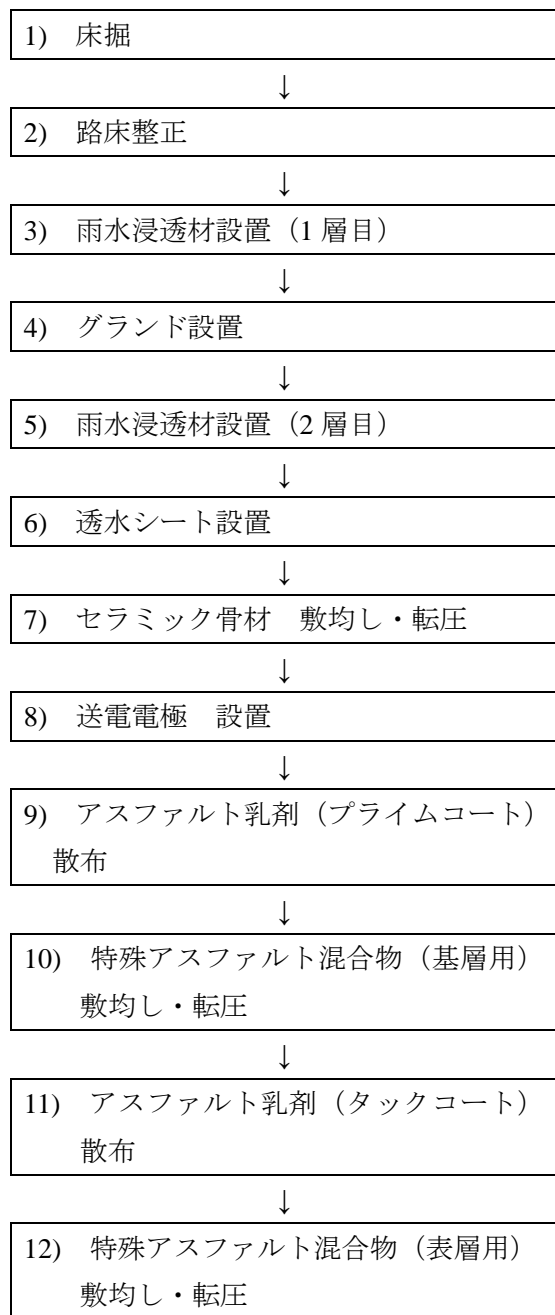


図 2.3-4 高機能型無線給電道路  
施工フロー

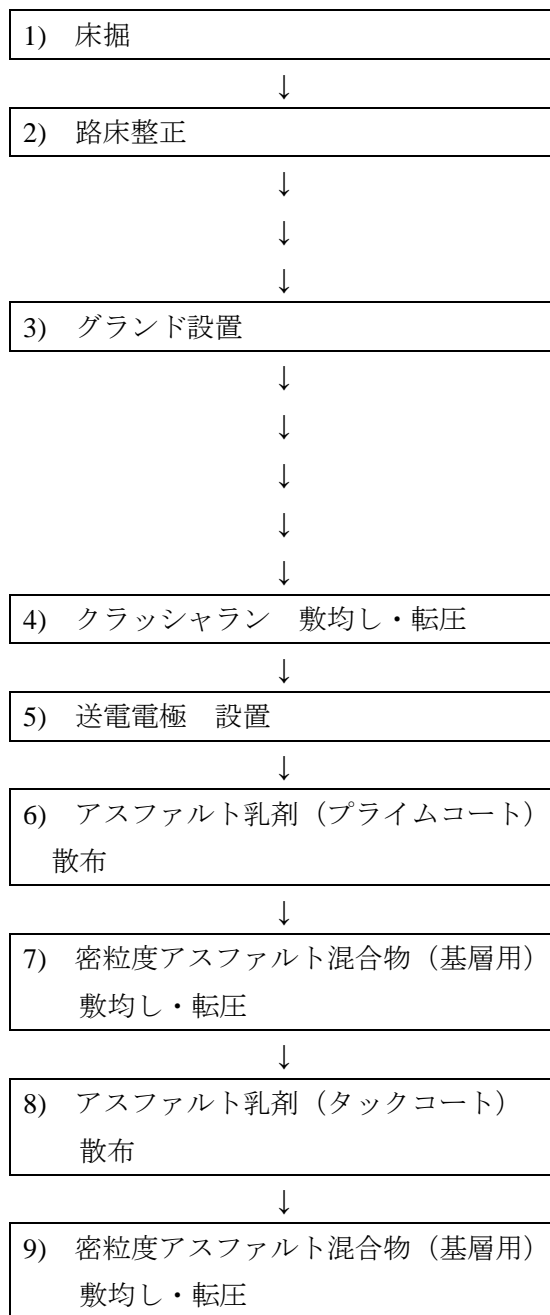


図 2.3-5 一般道路無線給電  
施工フロー

#### (4) 各作業の詳細施工手順の確認と施工性の検討

##### ①床掘 (写真 2.3-1)

各舗装構造の寸法に合わせて路面を人力にて掘削した。

なお、実施工の場合には、バックホウ (バケット容量：0.2m<sup>3</sup>~0.4m<sup>3</sup>) による機械掘削を想定している。



写真 2.3-1 床掘

##### ②基面 (路床) 整正

掘削完了後、人力で不陸整正し、振動コンパクタを用いて転圧を行った。

なお、実施工の場合には、大型の転圧機械による転圧を想定している。

##### ③雨水浸透材 (1層目) の設置 (写真 2.3-2)

雨水浸透材 (994×994×184) は、基面の不陸調整し、基面と雨水浸透材の間に隙間が生じないように設置した。

雨水浸透材の設置後、表面の段差の有無を確認し、段差がある場合には再度基面の不陸を整正した上で、スペーサーを設置した (写真 2.3-3)。



写真 2.3-2 雨水浸透材設置 (1層目)



写真 2.3-3 スペーサー設置

#### ④ グランド材設置 (写真 2.3-4)

排水性を考慮し、グランド材にはアルミ製のパンチングメタル(φ2mm、開口率70%)を設置した。

また、施工面積が広くなりパンチングメタルを複数枚連結する場合は、アルミ溶接または金属製のテープを用いて固定する方法とした。



写真 2.3-4 グランド板設置

#### ⑤ 雨水浸透材 (2層目) の設置 (写真 2.3-5)

グランド材設置後、2層目の雨水浸透材を設置した。

ここで、送電電極とグランドとの所定の空間を確保するため、雨水浸透材は2段重ねとし、1層目と同様にスペーサーを設置した。



写真 2.3-5 雨水浸透材設置 (2層目)

#### ⑥ 透水シート設置

下層路盤に設置した雨水浸透材への上層路盤からの骨材細粒分の侵入を防ぐ目的で透水シートを設置した。

透水シートはプラスチック製の有孔シートであり、水分のみを排出する構造である。

#### ⑦ セラミック骨材の敷均し・転圧 (写真 2.3-6)

上層路盤材は全てセラミック骨材で構成される。なお、締固め度を向上させるために、施工時は最適含水比程度になるよう加水した材料を使用した。なお、この保水分は雨水浸透材を介して下層に排水されることから、路盤内には殆ど滞水しない構造となっている。

路盤の転圧は、振動コンパクト、サイドローラ、コンバインドローラを使用して行った。

なお、実施工では、さらに大型の転圧機械の使用を想定している。



写真 2.3-6 セラミック骨材転圧



### ⑨送電電極設置 (写真 2.3-10)

上層路盤の転圧を終了した後、送電電極 (SUS304) を敷設した。ここで、ステンレスではあるが送電電極のより長期的な耐久性を想定して、送電電極に瀝青材料を被覆したものを使用した (写真 2.3-7～写真 2.3-9)。なお、送電電極の耐久性については、このような被覆の要否も含めて、今後、検討を進める予定である。



写真 2.3-7 送電電極



写真 2.3-8 瀝青材貼付



写真 2.3-9 瀝青材貼付完了



写真 2.3-10 送電電極設置完了

### ⑩アスファルト乳剤 (プライムコート) の散布

舗装内部への水の浸透を抑制し、さらに上層路盤と舗装部 (特殊アスファルト混合物) との一体性を高めるため、通常的一般道路と同様に、標準的な量のアスファルト乳剤を散布した (写真 2.3-11)。

今回の試験施工ではスプレイヤによる手作業の散布としたが、実施工では、ディストリビュータなどによる機械散布を想定している。



写真 2.3-11 アスファルト乳剤散布

#### ⑪特殊アスファルト混合物（基層用）敷均し・転圧（写真 2.3-12、写真 2.3-13）

今回の特徴であるセラミック骨材を使用した特殊アスファルト混合物について、人力にて敷き均し、転圧は振動コンパクト、およびサイドローラ・コンバインドローラを使用して行った。

なお、実施工では、広い施工面積となることから、アスファルトフィニッシャによる敷均し、マカダムローラやタイヤローラなどによる転圧さらには大型ローラによる転圧を想定している。



写真 2.3-12 特殊アスファルト混合物敷均し



写真 2.3-13 特殊アスファルト混合物転圧

#### ⑫アスファルト乳剤散布（タックコート）

基層と表層の活着促進のため、標準的な使用量のアスファルト乳剤を散布した。

なお、ここではスプレイヤによる手作業の散布としたが、実施工では、先の⑩プライムコートの散布と同様にディストリビュータなどを使用した機械散布を想定している。

#### ⑬特殊アスファルト混合物（表層用）敷均し・転圧（写真 2.3-14～写真 2.3-17）

基層で使用したのと同じ特殊アスファルト混合物を敷き均した。基層と同様に、人力により敷き均し、振動コンパクトおよびサイドローラ・コンバインドローラにより転圧し、最終的な仕上げとした（写真 2.3-18）。

なお、実施工では、アスファルトフィニッシャによる敷均し、マカダムローラやタイヤローラ、さらに大型ローラによる転圧を想定している。



写真 2.3-14 特殊アスファルト混合物敷均し



写真 2.3-15 特殊アスファルト混合物転圧  
(振動コンパクタ)



写真 2.3-16 特殊アスファルト混合物転圧  
(サイドローラ)



写真 2.3-17 特殊アスファルト混合物転圧  
(コンバインドローラ)



写真 2.3-18 施工完了

### (5) 層厚の確認

表層・基層の舗装厚さについて、層厚が大きい場合に送電効率の低下に影響する。このことから、表層・基層の施工性では、厚さの管理について、高い施工精度が求められる。そこで、写真 2.3-19 に示すように、G003 粒状路盤の厚さの測定方法（日本道路協会の舗装調査・試験法便覧）を準用し、今回の試験施工における表層・基層および上層路盤の厚さを測定した。

測定結果を表 2.3-3 に示す。ここで、今回の試験施工では、各層の厚みについて、一般的な小型道路における現行基準を準用し、+10%～-5%との範囲で管理した。

小面積の施工範囲ではあるが、一般的な道路における従来の施工管理の範疇で、精度良く管理できることが確認された。

なお、1章のシミュレーション解析において、舗装厚さの変動が設計値に対して $\pm 20$  mmの範囲であれば、給電効率変動への影響は僅かであるとの知見が得られていることから、今回の試験施工における施工誤差であれば所定の給電効率を十分に確保できるものと考えられる。

本件については、今後、より広い面積での検討を行ない、確認する予定である。



写真 2.3-19 層厚の測定状況

表 2.3-3 層厚の測定結果

区分	厚さ(mm)			規格値(国交省) 実測-設計
	実測値	設計値	実測値-設計値	
表層	45	40	5	-2mm 以上
基層	49	50	-1	-3mm 以上
上層路盤	50	50	$\pm 0$	-8mm 以上

(6) 舗装構造に関する確認

①評価項目

試験施工後、表 2.3-4 に示す評価実験を行ない、この舗装構造の力学特性を確認した。

表 2.3-4 舗装構造に関する評価項目

舗装区分	評価項目	試験方法
表層 基層	締固め度	密粒度アスファルト混合物等の密度試験方法 (準拠：舗装調査・試験法便覧 B008-1)
	たわみ量	FWD によるたわみ量測定方法 (参考：舗装調査・試験法便覧 S047)
上層路盤	締固め度	砂置換法による路床の密度の測定方法 (参考：舗装調査・試験法便覧 G021-2)
	たわみ量	FWD によるたわみ量測定方法 (参考：舗装調査・試験法便覧 S047)
下層路盤	たわみ量	FWD によるたわみ量測定方法 (参考：舗装調査・試験法便覧 S047)

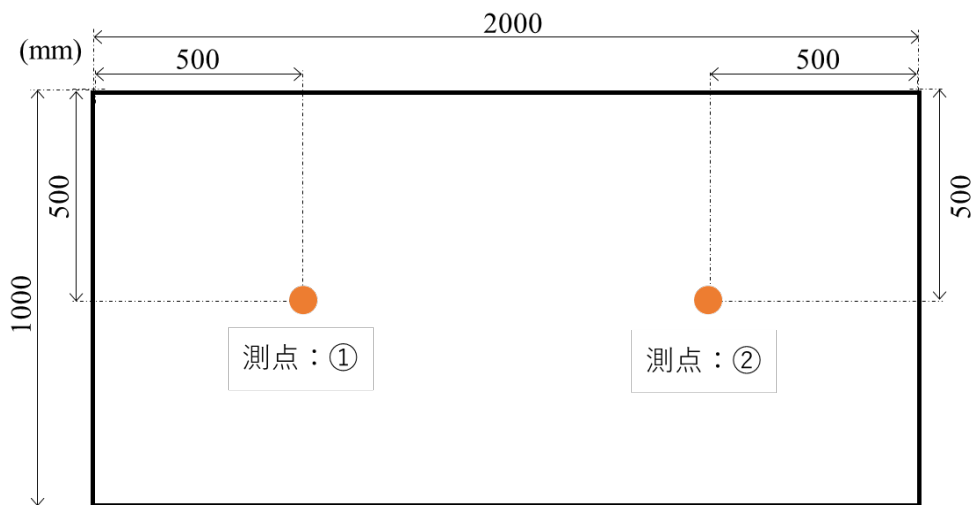


図 2.3-6 たわみ量測定・現場密度試験・コア採取の場所

## ②評価試験結果

締固め度の測定結果を表 2.3-5 に、その測定状況を写真 2.3-19 に示す。また、たわみ量の測定結果を逆解析して得た弾性係数を表 2.3-6 に、その測定状況を写真 2.3-20 に示す。

締固め度において、上層路盤のみ現行規格を満足しない結果となった。また、小型 FWD 試験機によるたわみ量から求めた弾性係数では、舗装設計で設定した弾性係数より小さい結果となった。

この理由としては、硬質プラスチック製の雨水浸透材を組み立てて設置しているため、局所的に衝撃荷重がかかった場合に上下の振動を起こし易いこと、また、雨水浸透材の上部に施工されている上層路盤材の厚さが 50mm と比較的薄いことで雨水浸透材の振動の影響を受け易い状態であったことにより、上層路盤および雨水浸透材の弾性係数が小さい結果となったと考えられる。

また、下部の材料が雨水浸透材のように振動する場合、締固めに用いたローラのエネルギーが締固めへのエネルギーとして作用し難いことで、上層路盤の締固め度が小さくなったものと考えられる。

これらの課題については、雨水浸透材を剛性の高い材料への変更や上層路盤の厚さを大きくするなど、構造断面の改良することで、比較的容易に対応できると考えており、今後、より実工事に近い広い面積での試験施工により改めて検討する予定である。

表 2.3-5 締固め度まとめ

舗装区分	締固め度(%)	規格(国交省)
表層	95.3	94%以上
基層	95.6	94%以上
上層路盤	85.9	93%以上



写真 2.3-19 締固め度測定状況

表 2.3-6 たわみ量の測定結果を逆解析して得た弾性係数

舗装区分	弾性係数(MPa)	設計値(MPa)	厚さ (mm)
表層・基層	6,157	5,000	90
上層路盤	14	150	50
雨水浸透	6	12	482
路床	131	-	-

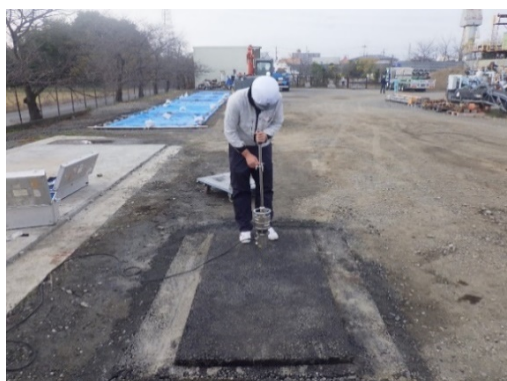


写真 2.3-20 FWD 試験

#### (7) 高機能型無線給電道路の施工性について

先の 2. 3 (3) ～ 2. 3 (6) にて述べたように、ここに提案する高機能型無線給電道路の施工においては、雨水浸透材と透水シートの敷設作業が増加するが、これらの作業は特殊技能を必要としないため、従来の施工方法の範囲で比較的容易に施工でき、また、小面積ではあるが、従来の施工管理方法で層厚や舗装耐力を確保できることが確認された。今回の試験施工では、雨水浸透材と透水シートの敷設は手作業によったが、今後は、機械化施工等のより効率的な施工方法の検討を行なう予定である。

なお、ここに提案する高機能型無線給電道路では、無線給電化に必要な材工費の他、セラミック骨材や雨水浸透材などの在来工法による一般的な小型道路では汎用されない材料を使用しているため、在来の一般的な小型道路の材工費の 8 倍程度と見込まれる。

したがって、より安価なセラミック骨材や雨水浸透材の探索とともに、機械施工への積極的な転換による施工の効率化など、今後、材料・施工面でのコストダウンを図り、無線給電道路の実装に向けた全体最適化設計を進める予定である

## 2. 4 維持管理に関する検討

2. 2節に述べたように、本研究の高機能型無線給電道路システムでは、車両標準荷重 17kN 相当の小型道路について 10 年間供用することを対象としている。ただし、実際の運用において、無線給電機能は持たないが標準荷重 17kN 相当を超える大型車両が走行する可能性も想定されることから、比較的早い期間で舗装面の修復、更新が必要となる可能性もある。

ここでは、高機能型無線給電道路の舗装および送電電極の修復、更新の方法を検討し、長期的に供用するための維持管理方法について検討した。

### (1) 維持管理における補修方法

舗装は、道路利用者に快適に利用してもらうために、路面性状を一定レベル以上で管理するのが基本であり、供用を通じて、損傷に見合った補修や修繕が行われる必要がある。

一般的な道路では、表 2.4-1～表 2.4-3 に示すように、損傷度合いに応じて維持および修繕方法が異なる。以下、現状行なわれている損傷の度合いによる維持・修繕工法とその具体的な方法を示す。

交通条件や設計が適切に行われている場合、区分Ⅲ-2 の損傷は発生しないが、適切に維持・修繕が行われない場合、路盤以下にも損傷が生じ、路盤以下の舗装材料についても修繕が必要となる場合がある。

ここでは、車両標準荷重 17kN 相当の小型道路について 10 年間供用することを対象とし、無線給電道路が適切に維持・補修が行われていることを前提に検討した。

したがって、設計年数 10 年以内は区分Ⅱの維持工法を行なう場合について、10 年毎の区分Ⅲ修繕方法としては供用後数十年度に舗装の打替えを行う場合について、既往の事例を参考にしながら検討を行なった。



表 2.4-1 損傷の診断区分と維持・修繕工法

区分	工法
区分I：健全	-
区分II：表層機能保持段階 (使用目標年数を意識した管理に基づく補修)	(対ひび割れ)シール材注入工法、フオグシール・チップシール等の表面処理工法、パッチング、わだち部オーバーレイ工法(レーンパッチング)、薄層オーバーレイ工法 等 (対わだち掘れ)切削工法、パッチング、わだち部オーバーレイ工法(レーンパッチング) 等
区分III-1：表層等修繕	切削オーバーレイ(表層等) 等
区分III-2：路盤打換等	【詳細調査・修繕設計を実施した上で】 路盤を含めた舗装打換え工法、路盤の強化(セメント安定処理等)、コンクリート舗装やコンポジット舗装への変更 等

表 2.4-2 損傷の診断区分

区分	状態
I 健全	損傷レベル小：管理基準に照らし、劣化の程度が小さく、舗装表面が健全な状態である。
II 表層機能保持段階	損傷レベル中：管理基準に照らし、劣化の程度が中程度である。
III 修繕段階	損傷レベル大：管理基準に照らし、それを超過している又は早期の超過が予見される状態である。
	(III-1 表層等修繕) 表層の併用年数が使用目標年数を超える場合(路盤以下の層が健全であると想定される場合)
	(III-2 路盤打換等) 表層の併用年数が使用目標年数未満である場合(路盤以下の層が損傷していると想定される場合)

表 2.4-3 損傷の診断区分の判定例

診断区分	ひび割れ率	わだち掘れ量
I (健全)	0～20%程度	0～20mm 程度
II (表層機能保持段階)	20～40%程度	20～40mm 程度
III (修繕段階)	40%程度以上	40mm 程度以上

### ①舗装の維持工法の事例

舗装の維持工法は、写真 2.4-1 に示すようなシーラ材注入工法が一般的に適用される。この方法は予備的維持工法であり、比較的幅の広いひび割れに注入目地材等を充填する工法である。



写真 2.4-1 シール材注入工法

### ②舗装の修繕工法の事例

舗装の修繕では、使用目標年数を超えアスファルト舗装に劣化が進行した場合の修繕方法として、写真 2.4-2 に示すような切削オーバーレイ工法が挙げられる。

切削オーバーレイ工法の施工手順は図 2.4-1 に示すように、路面切削機を用いて既設のアスファルト舗装を破砕し、新たにアスファルト混合物を施工する工法である。



写真 2.4-2 路面切削機



図 2.4-1 施工フロー

本研究で提案する高機能型無線給電道路システムにおいて、切削オーバーレイ工法を適用する場合の修繕範囲は表層に限定するのを想定している。

なお、基層まで損傷が進行していることが認められる場合には、写真 2.4-3 および写真 2.4-4 に示すように路面切削を行った後、クラック抑制シートやクラック補修材などを用いた修繕を行なうことになる。



写真 2.4-3 クラック抑制シート



写真 2.4-4 クラック補修材

## (2) 維持管理における課題の抽出

### ①区分Ⅱ（表層機能保持段階）

診断区分が区分Ⅱの場合、クラックの発生に至ることが想定されるが、本研究の舗装構造とすることにより高い排水性が確保されることで、一般的な舗装の場合に問題となるクラックからの浸透水に起因する損傷発展への影響は小さいと考えられる。ただし、クラックをそのまま放置するとポットホール等の発生に繋がることから、この無線給電道路の舗装構造においても、一般的な舗装と同様に、シーリング材等でクラックを補修することを基本とする。

### ②区分Ⅲ-1（表層等修繕）

診断区分がⅢ-1 の場合、表層のアスファルト部分だけの損傷と考えられ、表層部分 5cm 程度を対象にした切削オーバーレイ工法の適用が想定される。

ただし、1 章のシミュレーション解析によれば、舗装厚さ 90 mm において、本研究で目標とした給電効率が確保できると見込まれることから、基層部に埋設した送電電極などを損傷することなく、修繕が可能であると考えられる。

### ③区分Ⅲ-2（路盤打ち替え）

診断区分がⅢ-2 を想定した場合、損傷が路盤まで至っている可能性が高いため、路盤の打ち換えを行う必要がある。このような激しい損傷状態電では内部電極や配線などの再設置が必要となると考えられることから、今後、その撤去方法と撤去後の埋設・配線方法を検討する予定である。

## 2. 5 本章のまとめ

### (1) 高機能型無線給電道路の施工性について

ここに提案する高機能型無線給電道路の施工においては、雨水浸透材と透水シートの工種が増加するが、これらの作業は特殊技能を必要としないため、従来の施工方法の範囲で比較的容易に施工できるとともに、従来の施工管理方法で所定の層厚を確保できることが確認された。

なお、試験施工後に非破壊測定により舗装部の締固め度とたわみ量を確認した結果、たわみ量から逆計算にて計算した弾性係数について設計値よりも小さい結果が得られた。これらについては、雨水浸透材を剛性の高い材料への変更や上層路盤の厚さを大きくするなどの構造断面を検討することで比較的容易に対応できると考えており、今後、より実工事に近い広い面積での試験施工により改めて検討する予定である。

高機能型無線給電道路では、無線給電化に必要な材工費の他、セラミック骨材や雨水浸透材などの在来工法による一般的な小型道路では汎用されない材料を使用しているため、在来の一般的な小型道路の材工費の8倍程度と見込まれる。したがって、より安価なセラミック骨材や雨水浸透材の探索とともに、雨水浸透材や透水シートの機械施工化による施工の効率化など、今後、材料・施工面でのコストダウンを図り、無線給電道路の実装に向けた全体最適化設計を進める予定である

### (2) 舗装断面の設計について

本研究で提案する高機能型無線給電道路について、理論設計法に基づく舗装断面の概略設計を行なった結果、ここで採用した特殊アスファルト混合物や雨水浸透材上面部の鉛直応力について、それぞれ規格値を満足する結果が得られ、設定した舗装断面であれば小型道路として成立できることが確認できた。なお、大型トラック(荷重49kN)を想定した場合のアスファルト下面の引張りひずみは647 $\mu$ m、雨水浸透材の鉛直応力は0.058MPaと試算された。この値は、短期であれば許容できる値であるが、長期間の許容応力を満足するための舗装断面については、使用材料の改良も含めて、今後、検討する予定である。なお、使用材料の検討により、セラミック骨材材料の修正CBRの向上、雨水浸透材の弾性係数の向上が見込まれ、重交通道路として成立すると考える。

### (3) 無線給電道路システムの維持管理について

本研究の高機能型無線給電道路システムでは、車両標準荷重17kN相当の小型道路について10年間供用することを対象としている。ただし、実際の運用において、無線給電機能は持たないが標準荷重17kN相当を超える大型車両が走行する可能性も想定されることから、比較的早い期間で舗装面の修復、更新が必要となる可能性も想定して、高機能型無線給電道路の舗装および送電電極の修復、更新の方法を検討した。その結果、診断区分Ⅲ-1(表層等修繕)を想定した場合、表層部分5cm程度を対象にした切削オーバーレイ工法を適用することで、基層部に埋設した送電電極などを損傷することなく修繕できる可能性が得られた。ただし、損傷が路盤まで至っている可能性の高い診断区分Ⅲ-2(路盤打ち替え)を想定した場合の維持管理については、内部電極や配線などの再設置が必要となると考えられることから、今後、その撤去方法と撤去後の埋設・配線方法を検討する予定である。また、診断区分Ⅲ-1(表層等修繕)の場合に切削オーバーレイ工法により発生するアスファルト混合物の切削廃材の再利用の方法、さらに、診断区分Ⅲ-2(路盤打ち替え)を想定した場合の送電電極等の混入した切削廃材の再利用の可能性については、今後、検討する予定である。

### 3. 路車連携による給電制御技術の開発に向けた検討

無線給電道路システムにおいて EV の位置把握及び給電制御に必要な条件を整理し、センシング装置、路車間通信、給電制御装置に関する概念設計を行う。

#### 3. 1 給電制御に必要なセンサーの検討

無線給電道路システムを走行する車両の給電制御に必要な条件を整理し、センサーを選定する。

##### 3. 1. 1 給電制御の概念

無線給電道路システムは 10m~20m 程度の長さの送電電極に高周波電源を接続した配線となる。図 3.1.1-1 に電極 a1~a6 が連続して敷設される無線給電道路システムの例を示す。ここでは各送電電極の長さを 15m とした例を示す。この場合、高周波電源 c および電極と電源を接続するための接続回路 b を 30m にひとつ設置することで、30m 長の無線給電道路システムとなる。図 3.1.1-2 に給電制御による ON/OFF のイメージを示す。給電制御では、EV が走行する送電電極の電源を ON し、通過後は OFF する機能が求められる。

図 3.1.1-3 に路車連携のイメージを示す。センサーは舗装もしくは側壁に設置される。図 3.1.1-3 は舗装に設置された例である。図 3.1.1-2 に本システムにおける制御に関わる信号の流れを示す。これにより走行中の EV は、道路からワイヤレスで電力を連続して受電することが可能となる。

- ① 路面や路側に設置したセンサーが送電電極上を EV が通過したことを検知し、通過したことを示す信号とセンサー ID を発信する。
- ② 信号を受信した制御システムは、高周波電源の ON/OFF 制御を行い、送電を行う電極を決定する。

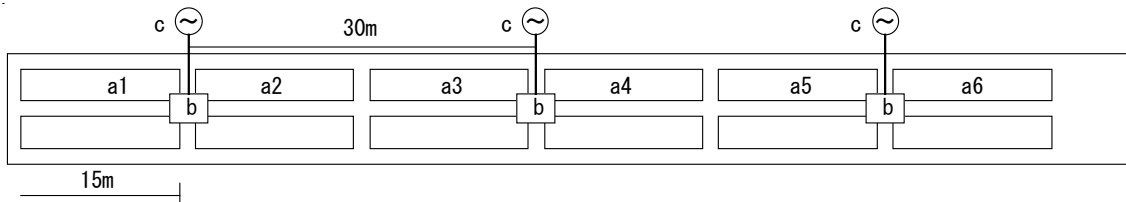


図 3.1.1-1 無線給電道路システムの基本構成

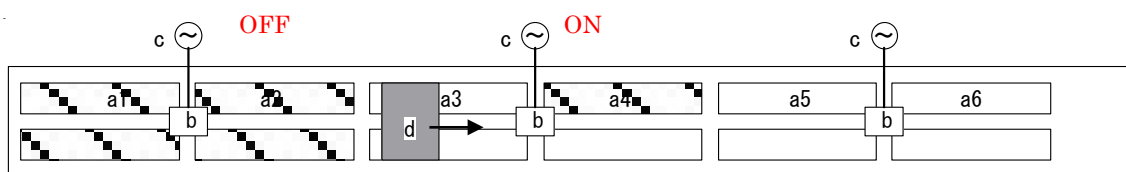


図3.1.1-2 無線給電道路システムの制御イメージ (ユニット通過後はOFF)

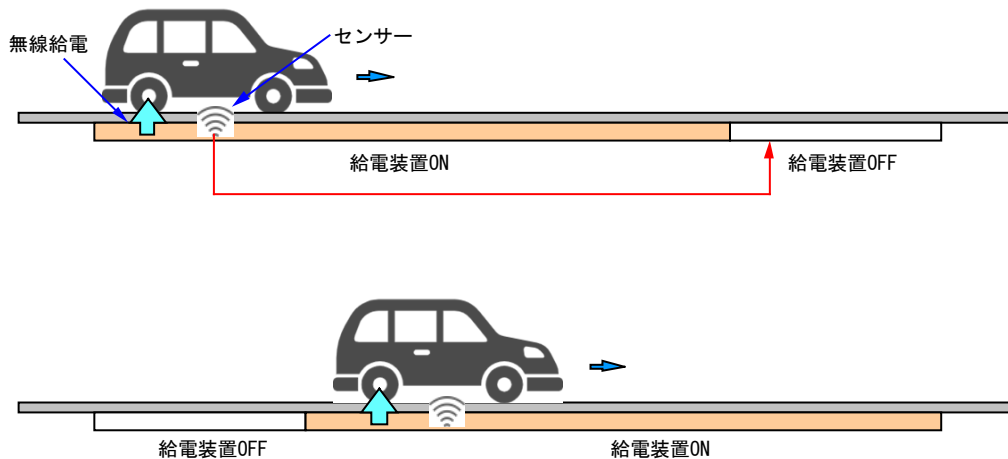


図 3.1.1-3 路車連携のイメージ

### 3. 1. 2 センサーの選定

無線給電道路システムで利用するセンサーは、道路空間で使用するため、現在、土木・建築構造物への設置や実証実験が行われた実績を有する方式の中から選定した。

表 3.1.2-1 実験を行ったセンサー一式

センサーの種類	想定する利用方法	主な使用シーン
ビーコン (電波)	道路側にビーコン電波の発信機(タグ)を設置し、車載のビーコン受信機でRSSI(電波強度)とIDを読み取る。	移動体の位置測位など
イメージセンサー (画像)	標識に2次元コードを設置し、車載カメラで読み込む。	自動運転、インフラ点検など
磁気センサー (磁場)	道路に磁石マーカーを設置し、車載の磁場センサーで検知する。	自動運転
GPSセンサー (電波)	車載に設置したGPSで車両の位置を測位する。	ITS、自動運転、インフラ点検など
レーザーセンサー (レーザー)	路側にレーザーセンサーを設置し、通過した車両を検知する。	交通量調査、インフラ点検など

### (1) ビーコン (電波法式)

ビーコンによる車両の位置検知イメージを図 3.1.2-1 に示す。

道路側に設置されたビーコン発信器 (タグ) から発信した電波を車載の受信機で受信する。受信する情報は、信号強度 RSSI とタグの識別 ID とする。

これにより、車両は道路システムから位置情報が受け取ることが可能であり、車両位置に該当する給電装置を制御することが可能になる。

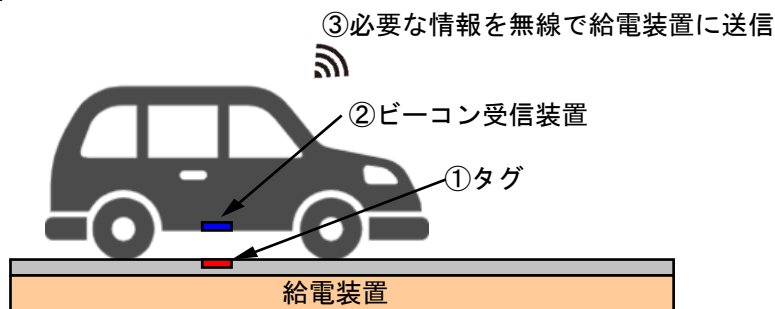


図 3.1.2-1 BLE ビーコン 概念図

#### 1) タグの放射電波の強度分布測定

タグ (送信周波数 2.45GHz 帯、送信頻度 3.3 秒に 1 回) を 3m×3m の床に置き、高さ 0.2m の位置に受信機を設置した場合の受信電界強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) の平面分布を測定した。図 3.1.2-2 に分布測定の測定点を示す。タグを中心に 1m×1m の範囲は 0.1m 間隔、その外側は 0.5m 間隔に受信機を設置した。測定状況を写真 3.1.2-1 から写真 3.1.2-4 に示す。

測定結果を図 3.1.2-3 に示す。タグを中心とした 0.20m の範囲は -50dB 以上の電波強度が円状になっているが、それ以上の範囲では分布形状に“むら”が確認された。送信周波数が 2.45GHz 帯では波長が 0.13m 程度であり電波が周囲で乱反射しながら伝搬を繰り返し受信点に到達するため、干渉によって受信する RSSI に“むら”が生じたと考えられる。

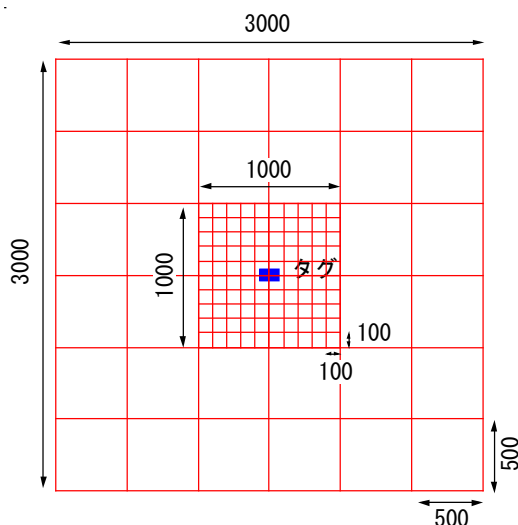


図 3.1.2-2 タグの RSSI 平面分布測定点 (平面図)



写真 3.1.2-1 タグ

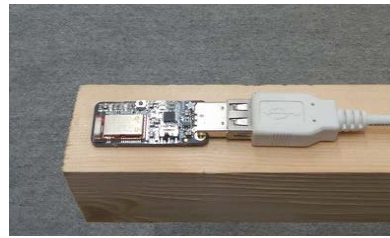


写真 3.1.2-2 ビーコン受信器

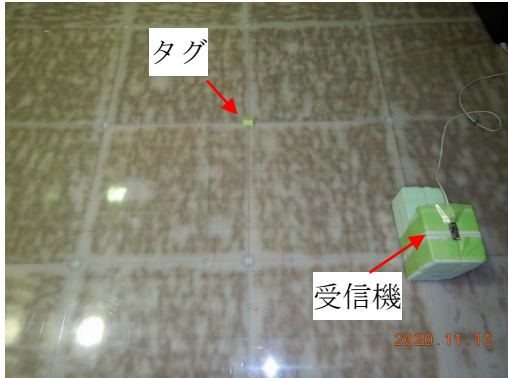


写真 3.1.2-3 測定状況



写真 3.1.2-4 測定状況

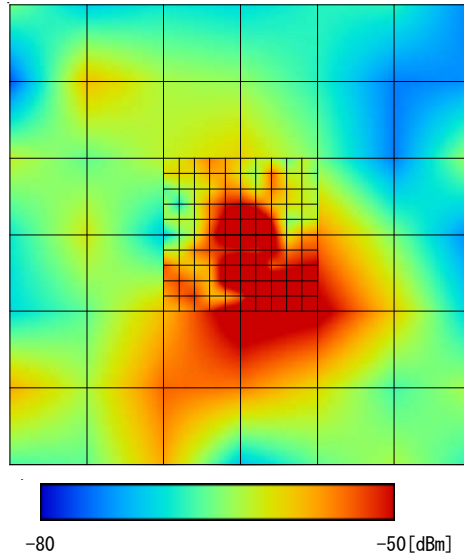


図 3.1.2-3 ビーコンの RSSI 分布測定の結果



## 2) 移動体によるタグの受信強度実験（路面に設置）

2個のタグ（送信周波数 2.45GHz 帯）を路面に 10m 間隔で配置し、路面から高さ 0.2m の位置に受信機を設置した移動体（カート）で移動した場合の受信強度 RSSI を 3 回測定した。移動距離は 15m、移動速度は 1m/s とした。図 3.1.2-4 に電波受信実験のイメージ図を、測定状況を写真 3.1.2-5 から写真 3.1.2-6 に示す。測定結果を図 3.1.2-5 に示す。

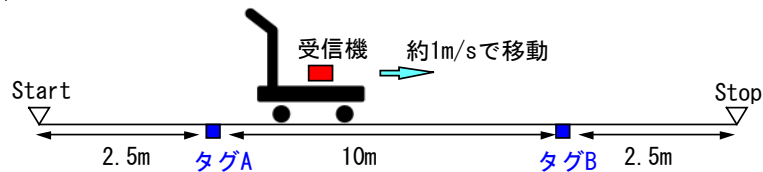


図 3.1.2-4 ビーコン上を移動体が移動した際の電波受信実験（路面設置）

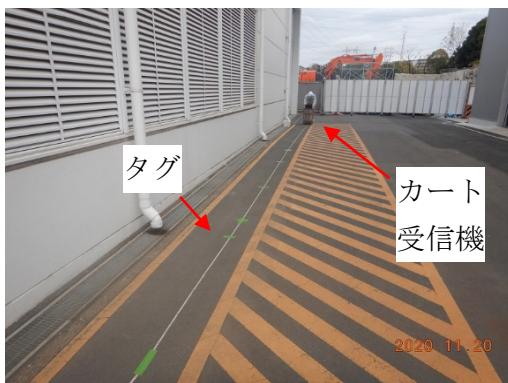


写真 3.1.2-5 測定状況



写真 3.1.2-6 タグ路面設置

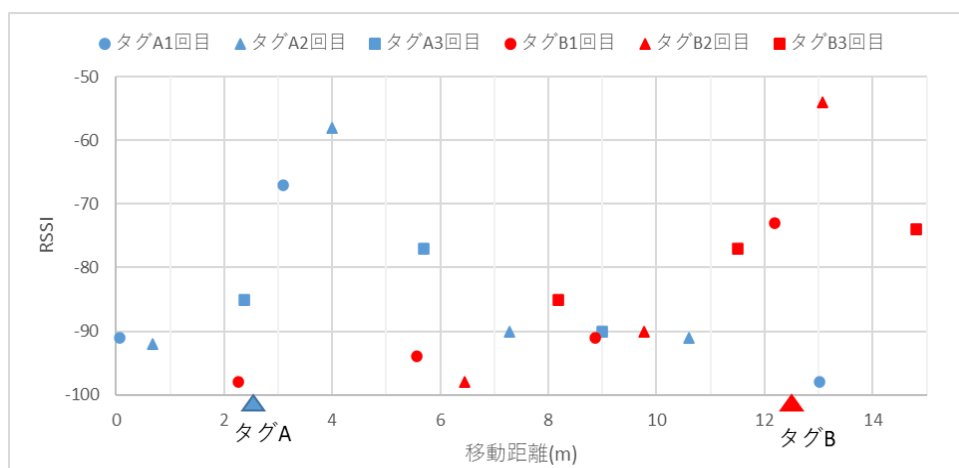


図 3.1.2-5 タグを路面に設置した場合の移動体受信強度実験の結果

### 3) 移動体によるタグの受信強度実験（壁面に設置）

2個のタグ（送信周波数 2.45GHz 帯）を壁面に 1m の高さに 10m 間隔で配置し、路側から高さ 1.0m に受信機を設置した移動体（カート）で移動した場合の受信強度 RSSI を測定した。壁面から受信機の距離は、1.75m と 5.25m の 2 条件とし、移動距離は 15m、移動速度は 1m/s とした。図 3.1.2-6 に電波受信実験のイメージ図を、測定状況を写真 3.1.2-7 から写真 3.1.2-8 に示す。

壁面から距離 1.75m の測定結果を図 3.1.2-7 に、距離 5.25m の測定結果を図 3.1.2-8 にそれぞれ示す。

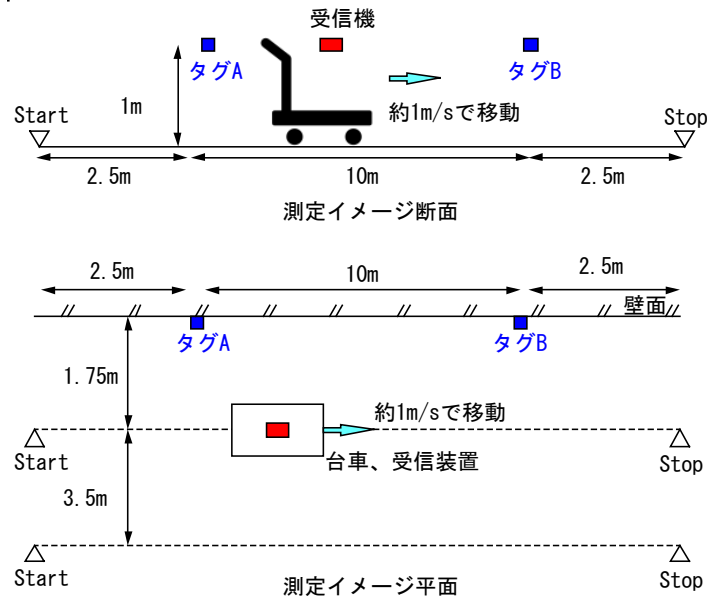


図 3.1.2-6 ビーコン周囲を移動体が移動した際の電波受信実験（壁面設置）

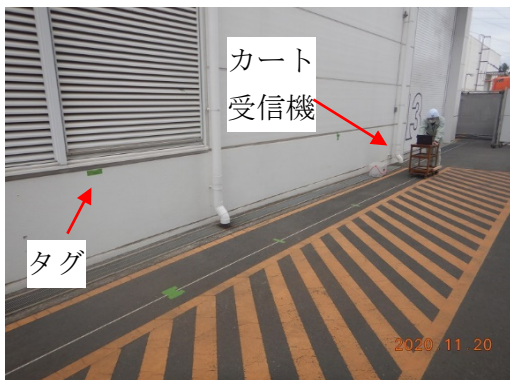


写真 3.1.2-7 測定状況

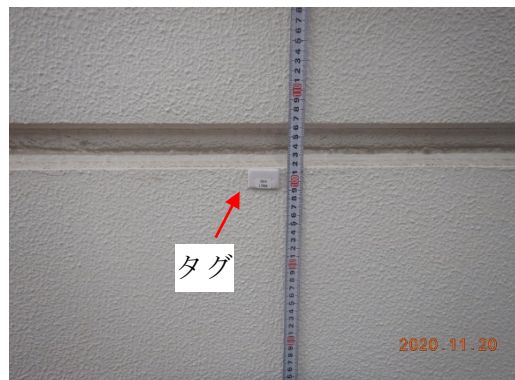


写真 3.1.2-8 タグ壁面設置

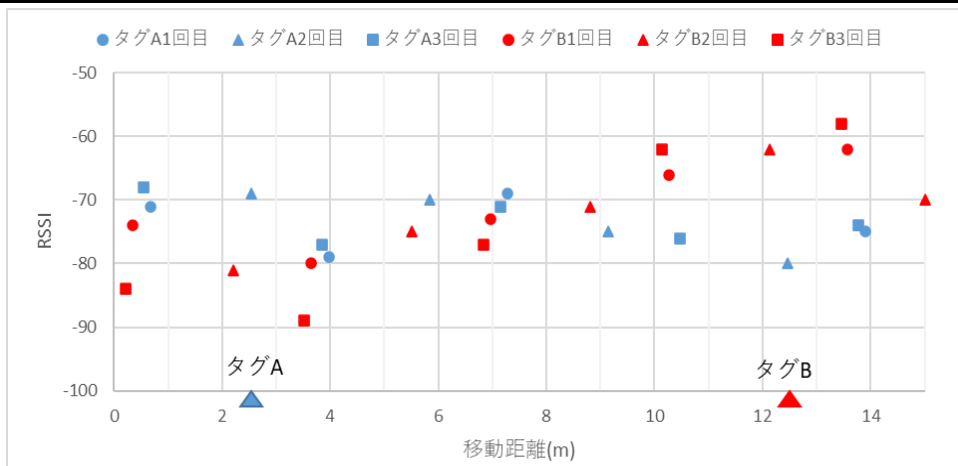


図 3.1.2-7 タグを壁面に設置した場合の移動体受信強度実験の結果(壁面から 1.75m)

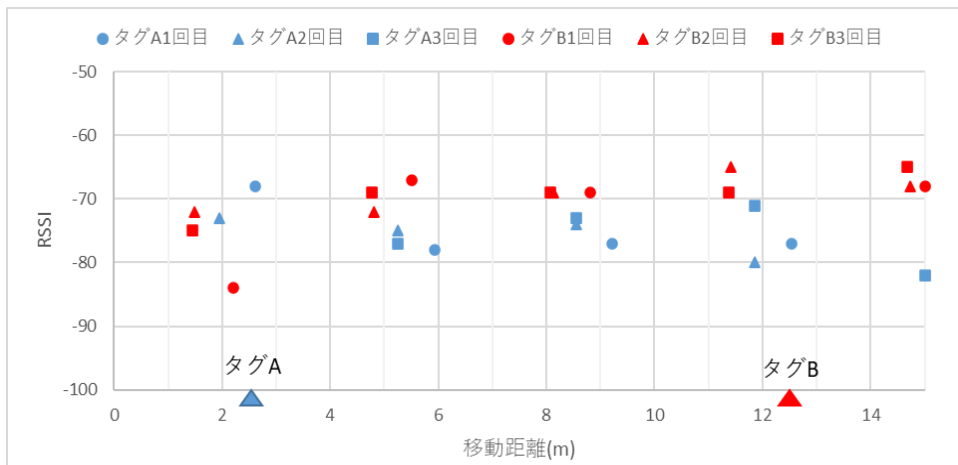


図 3.1.2-8 タグを壁面に設置した場合の移動体受信強度実験の結果(壁面から 5.25m)

## (2) イメージセンサー

イメージセンサーによる車両の位置検知イメージを図 3.1.2-9 に示す。標識に表示された位置情報を含む 2 次元コードを車載カメラ (イメージセンサー) で読み込み自車の位置を特定し、自車情報と合わせて無線で給電装置に情報を送信し、給電を開始する。



図 3.1.2-9 イメージセンサーによる給電制御のイメージ

イメージセンサーの実験は、コンピュータに接続されたカメラ（Raspberry Pi PiNoir Camera Module V2.1）により 2次元コードの読み込みの可否を実験する。測定方法を図 3.1.2-10 に、測定状況を写真 3.1.2-9 から写真 3.1.2-10 に示す。一般的な道路標識の大きさに印刷した 2次元コードを床から 1.8m の高さに設置する。カメラは FL+1.8m の高さに固定し、2次元コードが認識できる距離および角度を測定した。なお、測定の際にカメラの角度は振らずに正面に向けたままとする。また、実験では、カメラを 90度回転し、縦横比 4:3、縦横比 3:4 の 2条件とした。

実験結果を図 3.1.2-11 および図 3.1.2-12 に示す。図中の○は 2次元コードの読み取り可、×は不可を表し、読み取り可能な角度を算出した。その結果、縦横比 4:3 では 30度、縦横比 3:4 では 22度の角度の範囲内では読み取り可能であることが確認された。

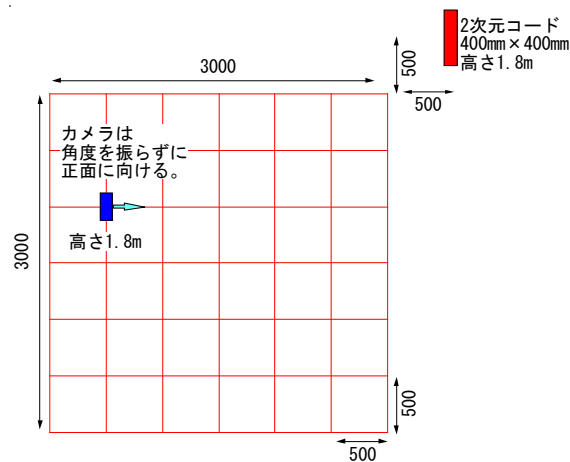


図 3.1.2-10 測定方法

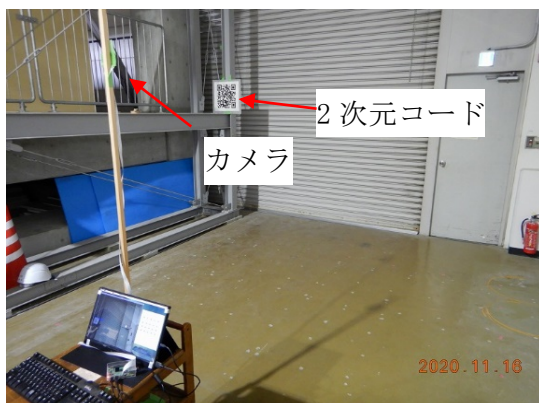


写真 3.1.2-9 測定状況

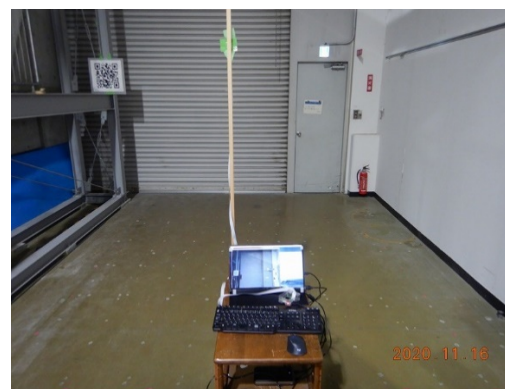


写真 3.1.2-10 測定状況

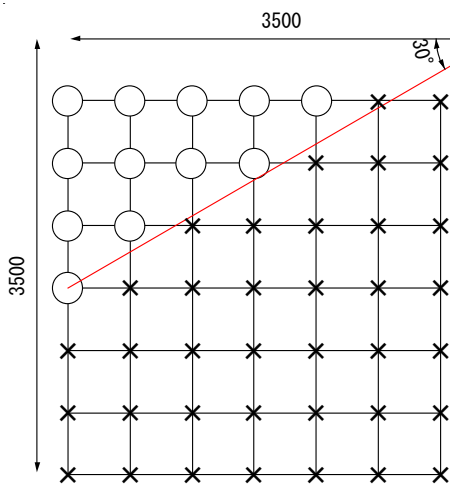


図 3.1.2-11 縦横比 4 : 3 の実験結果

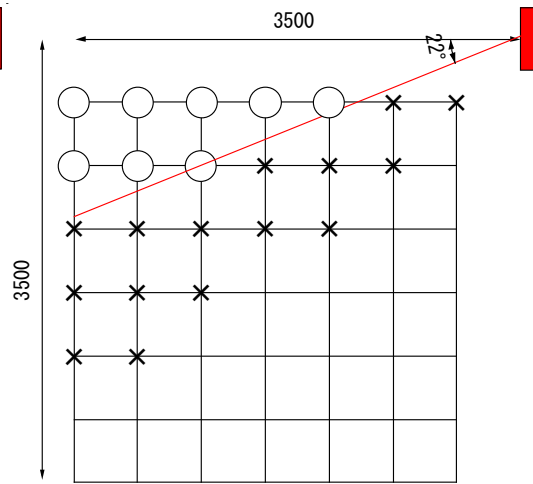


図 3.1.2-12 縦横比 3 : 4 の実験結果

次に、2次元コードの識別距離の限界を実験により検討した。測定方法を図 3.1.2-13 に示す。2次元コードを路面から 1.8m の高さに設置する。カメラは FL+1.8m の高さに固定し、カメラの縦横比は 4 : 3 とし、2次元コードとカメラの距離を 0.5m から 0.5m ピッチで離していき、2次元コードの識別距離を測定する。実験結果を図 3.1.2-14 に示す。その結果、距離 6m まで識別できることを確認した。

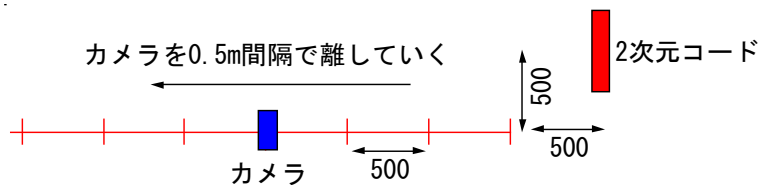


図 3.1.2-13 2次元コード識別距離測定方法

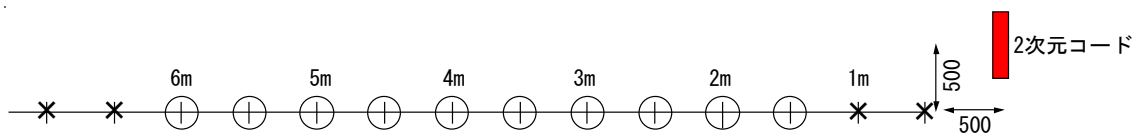


図 3.1.2-14 2次元コード識別距離測定結果

本実験結果より、2車線道路で1車線のみ充電レーンとした場合には、画角を 30 度以下とし 6m の 2次元コードを識別可能なカメラを選定することで自車が充電レーンを走行中であることを識別することは可能であると考えられる。

ただし、イメージセンサーによる 2次元コードの識別は、2次元コードが積雪した場合などへの対応が課題であり、GPS が利用できないトンネル内などの利用に限定される。

### (3) 磁気センサー

磁気センサーによる車両の位置検知イメージを図 3.1.2-15 に示す。路面側に設置された永久磁石から発生する直流磁場を車載の磁気センサーで検知する。ただし、本方法は充電レーンを走行中であることを自車が識別することが目的であり、制御する電源を特定するための位置情報は別の方法で取得する必要がある。本実験では、磁石の上を移動体が通過する場合の検知の可否を評価する。磁気センサーは Xsens 社製 MTi-680G を使用する。図 3.1.2-16 に示すように床に置いたフェライト製永久磁石(直径 80mm、厚さ 10mm、TRUSCO 製 TF80RA) の磁場強度の分布を測定する。磁石を 3m×3m の床に置き、高さ 0.2m の位置に磁気センサーを設置した場合の磁場強度 (ガウス) の平面分布を測定した。

#### 1) 磁場の強度分布測定

図 3.1.2-16-1 に磁石 1 個を設置した条件での分布測定の測定点を示す。磁石を中心に 1m×1m の範囲は 0.1m 間隔、その外側は 0.5m 間隔に受信機を設置した。図 3.1.2-16-2 に磁石 3 個を設置した条件での分布測定の測定点を示す。また、測定状況を写真 3.1.2-11 から写真 3.1.2-13 に示す。

図 3.1.2-17-1 に磁石 1 個を設置した場合の磁場強度分布の結果を示す。磁石を中心に 0.2m の範囲では 1.5G 以上の磁場が確認された。図 3.1.2-17-2 に 0.6m 間隔に磁石 3 個を設置した場合の磁場強度分布の結果を示す。磁場強度は磁石を中心に急峻に減衰するため、各磁石の磁場強度は干渉せず、磁石中心から 0.2m の範囲では 1.5G 以上磁場分布が確認された。

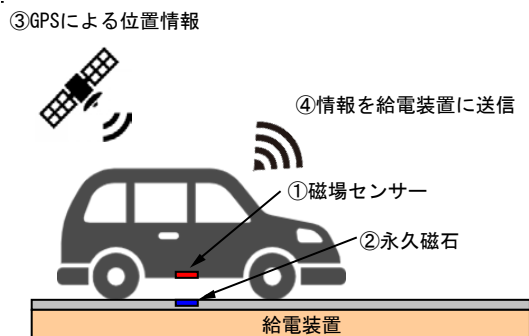


図 3.1.2-15 磁場センサー 概念図

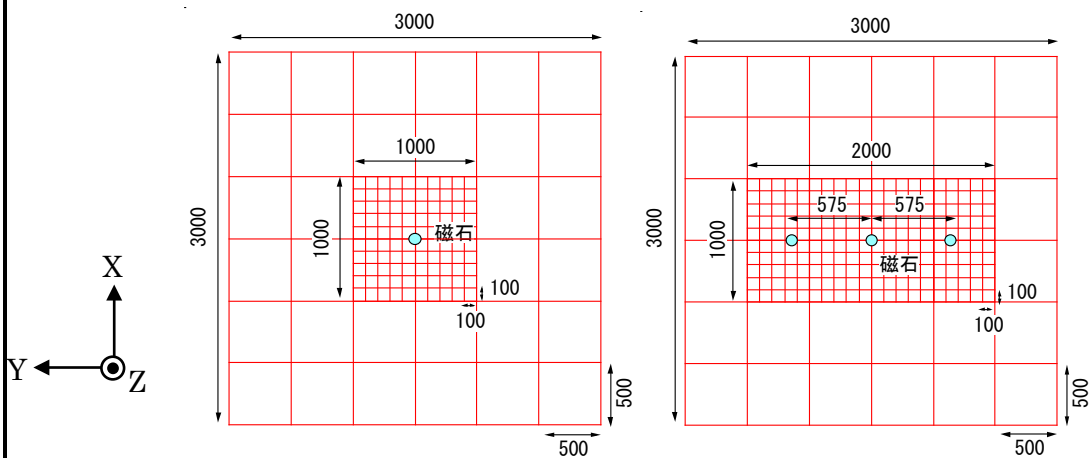


図 3.1.2-16-1 磁石 1 個

図 3.1.2-16-2 磁石 3 個

図 3.1.2-16 測定位置および磁石の配置

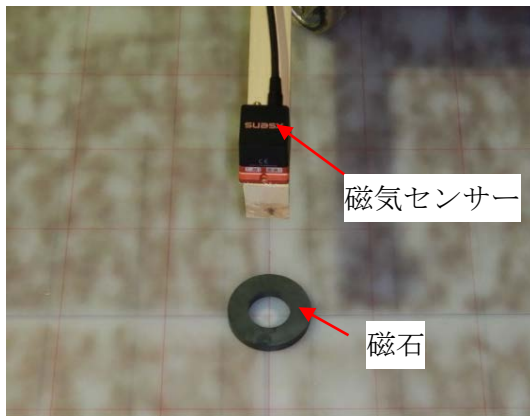


写真 3.1.2-11 磁石と磁気センサー

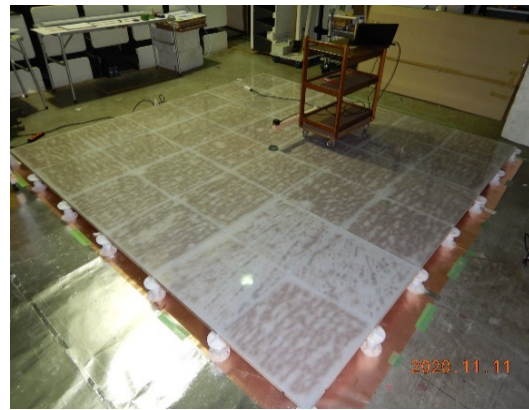


写真 3.1.2-12 磁石 1 個測定状況



写真 3.1.2-13 磁石 3 個測定状況

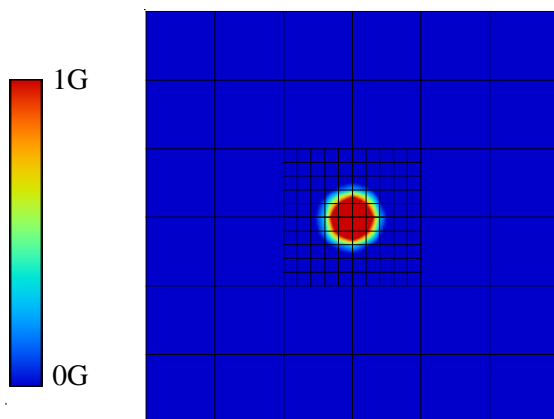


図 3.1.2-17-1 磁石 1 個

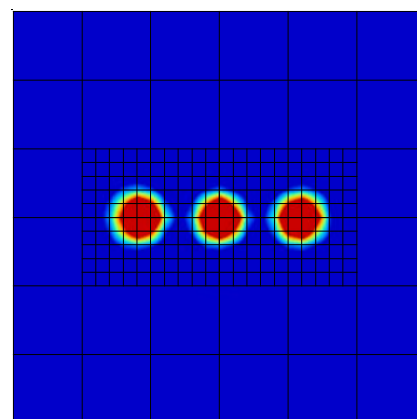


図 3.1.2-17-2 磁石 3 個

図 3.1.2-17 磁場強度の分布測定の結果 (Z 軸方向成分)

## 2) 移動体による磁場強度のセンシング実験

磁石を路面に 0.5m 間隔で置き、路面から高さ 0.2m に受信機を設置した移動体 (カート) で移動した場合の磁場強度を測定した。移動距離は 5m、移動速度は 1m/s とした。図 3.1.2-18 に電波受信実験のイメージ図を、実験状況を写真 3.1.2-14 に示す。

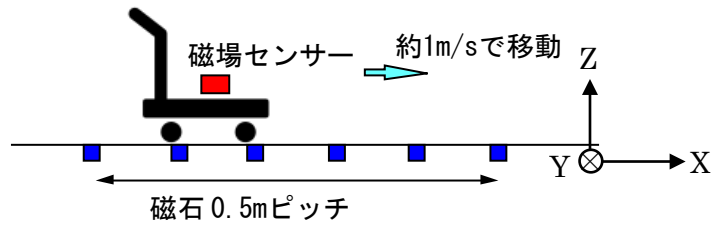


図 3.1.2-18 移動体による磁場強度のセンシング実験のイメージ



写真 3.1.2-14 実験状況

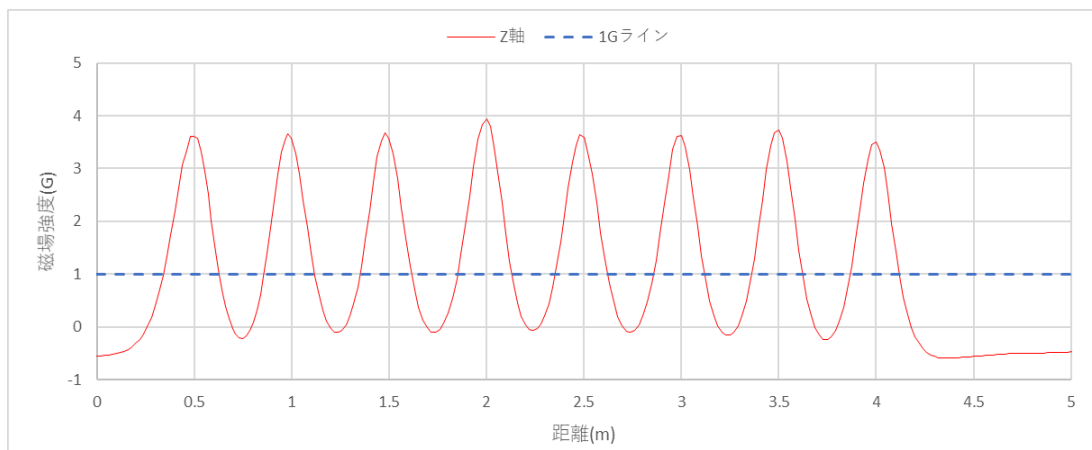


図 3.1.2-19 移動体による磁場強度のセンシング実験の結果

本実験結果より、2車線道路で1車線のみ充電レーンとした場合では、磁石を埋設することで自車が充電レーンを走行中であることを識別することは可能であると考えられる。

ただし、磁場センサーで得られる情報は磁場強度のみであり位置情報を持たないため、ビーコンやイメージセンサーのように制御したい電源の特定は困難である



#### (4) GPS センサー

GPS センサーは数 m の測定誤差があることが過去の文献等で示されていることから、路車連携による給電制御に利用することは難しいことが予想される。しかし、磁場センサーなど位置情報が得られないセンサーとの組み合わせによる給電制御を想定し、位置精度を検証した。

GPS センサーは Xsens 社製 MTi-680G を使用する。

##### 1) 位置精度の分布検討

4m×4m の範囲を 2m メッシュで区切り各交点に GPS センサーを静止した場合に測定した緯度経度を記録する。測定は 3 回行い、それぞれの測定の原点の場所を真とし、各測定点とのズレから位置精度を検証した。測定は、大成建設技術センター本館の屋上で以下の日時に行った。

1 回目 2020 年 11 月 17 日 10:50～11:15

2 回目 2020 年 11 月 17 日 15:40～16:05

3 回目 2020 年 11 月 18 日 10:50～11:15

図 3.1.2-20 に静止時の位置精度実験のイメージを、測定状況を写真 3.1.2-15 から写真 3.1.2-16 に示す。図 3.1.2-21 に実験結果を示す。最大 1.18m の誤差が確認された。

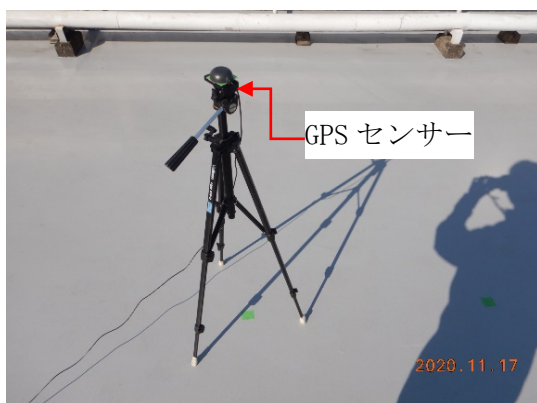


写真 3.1.2-15 GPS センサー



写真 3.1.2-16 測定状況

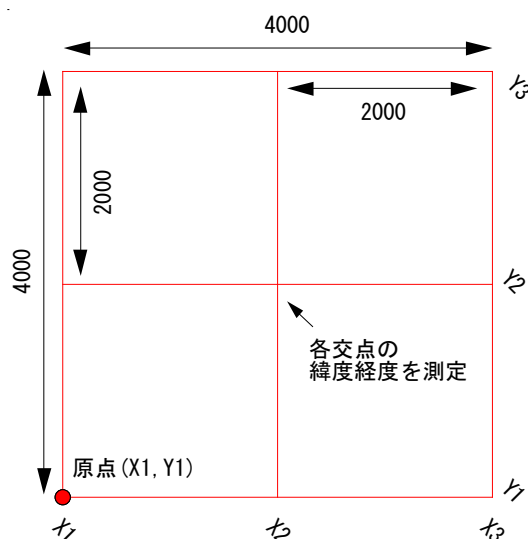


図 3.1.2-20 静止時の GPS の位置精度実験のイメージ

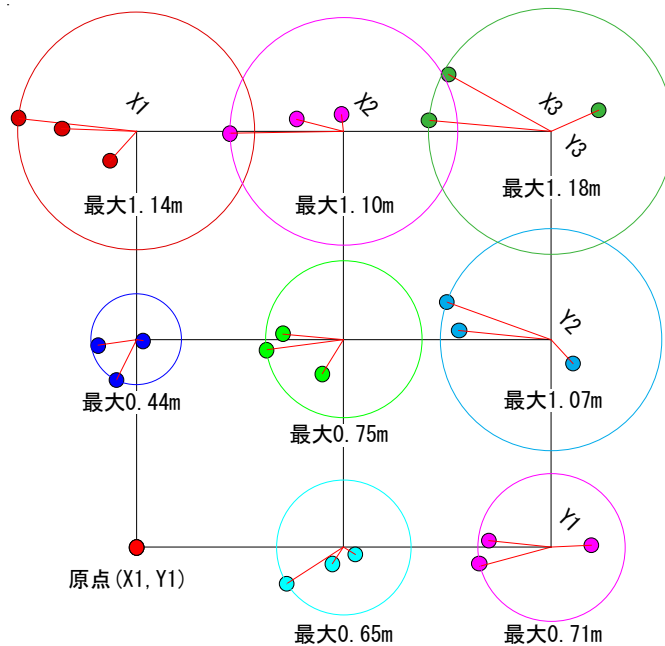


図 3.1.2-21 静止時の GPS の位置精度実験の結果

## 2) GPS 移動時の位置精度検討

移動時の GPS の精度を把握するために、10m の距離を 1m/s で移動し GPS の時間データを 3 度測定する。測定は 3 回とも同じ場所を移動し、1 回目の測定のスタート地点を原点とし、2 回目、3 回目の相対的なズレから位置精度を検証する。図 3.1.2-22 に移動時の位置精度実験のイメージを示す。実験は大成建設技術センターA 棟屋上で 2020 年 11 月 19 日 9:30~9:35 に実施した。

図 3.1.2-23 に実験結果を示す。測定結果から 2 回目 3 回目ともに 1 回目と同じ場所を移動しているにもかかわらず、最大 1.5m の誤差が確認された。一方、移動の軌跡は 3 回とも直線的にほぼ 10m 移動しており、誤差の要因はスタート地点計測時の位置ズレが原因と考えられる。

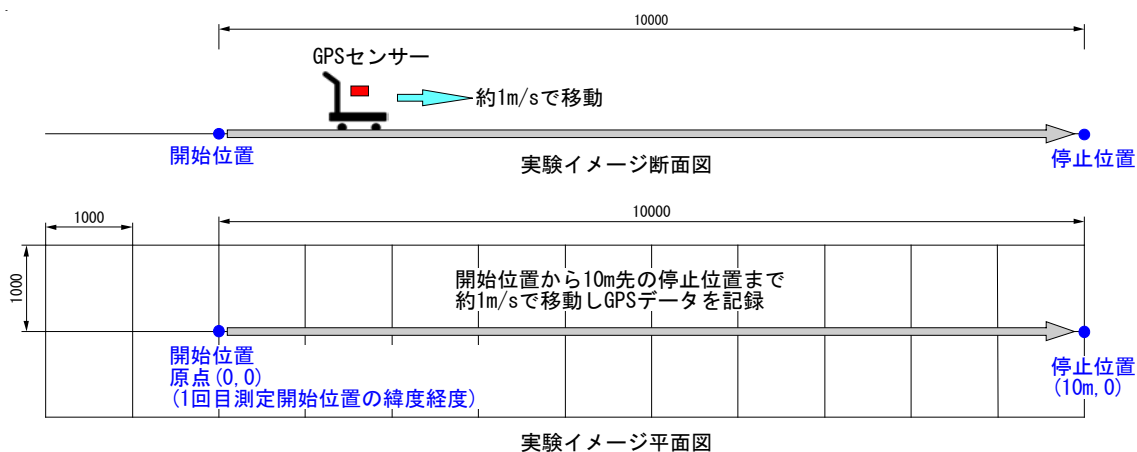


図 3.1.2-22 移動時の GPS 実験のイメージ

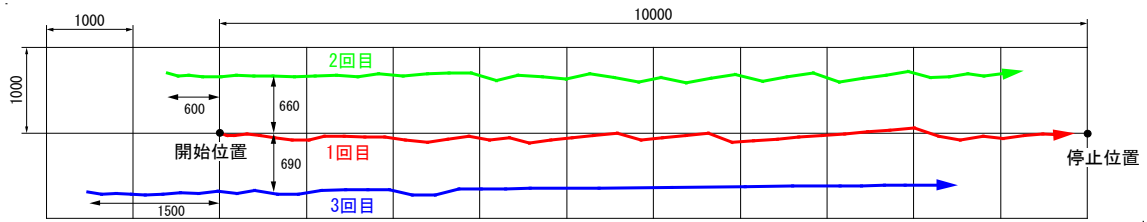


図 3.1.2-23 移動時の GPS 測定結果

### (5) レーザーセンサー

レーザーセンサーによる車両の位置検知概念を図 3.1.2-24 に示す。レーザーセンサーにより車両の通過を検知後、通過した車両の種類に関係なく給電を開始する。この方式では、一般車両が通過した際に起こる給電装置の全反射に対応した仕組みが別途必要となる。

図 3.1.2-25 にレーザーセンサーの実験イメージを、写真 3.1.2-17 から写真 3.1.2-19 に測定状況を示す。壁面に反射板を取り付け、壁面から 7m の位置にレーザーセンサーを設置する。センサーと反射板の間を、壁面から 1m の間隔で通過しレーザーセンサーが反応することを確認する。

測定結果を図 3.1.2-26 に示す。図中の○はセンサーが反応したことを示している。測定結果から全ての通過位置でレーザーセンサーが反応することを確認した。



図 3.1.2-24 イメージセンサー概念図

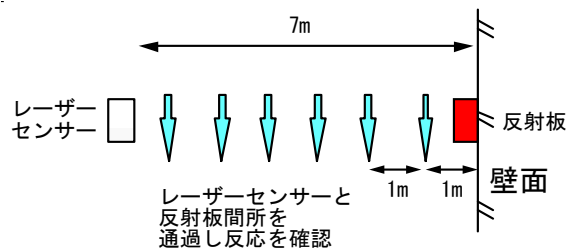


図 3.1.2-25 実験方法



写真 3.1.2-17 レーザーセンサー



写真 3.1.2-18 反射板



写真 3.1.2-19 測定状況

レーザーセンサー

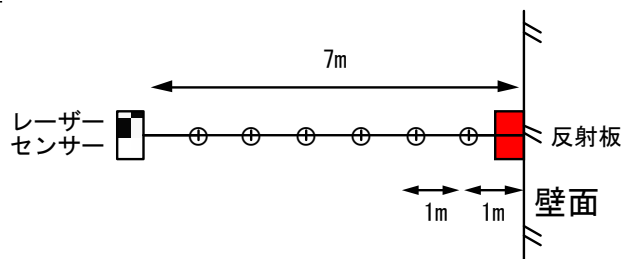


図 3.1.2-26 レーザーセンサー測定結果

## 3. 2 路車連携システムの概念設計

### 3. 2. 1 基本動作

3.1 節の実験結果を踏まえ、路車連携システムの概念設計を行った。概念設計イメージ図を図 3.2.1-1 に示す。1つの無線給電道路システム全長はおよそ 40m とし、1つの無線給電道路システム内において、車両進行方向上の3点に磁石が埋設される構造とした。また図 3.2.1-2 に示すように磁石埋設箇所毎に道路の短辺方向に 20cm 間隔で磁石を5つ埋設することで、車両の横方向の位置ずれにも対応する。路側には1つの無線給電道路システムあたり高周波電源装置が1台配置され、各高周波電源装置は EV と無線通信するための通信機器を内蔵している。この通信機器は通信範囲を半径 20m 程度の装置とすることで、遠く離れた車両からの信号を受信し誤動作する確率を低減する。また、各高周波電源装置は相互に情報を共有するための有線または無線通信システムを内蔵する。

路車連携システムの基本動作を以下に示す。また基本動作フローチャートを図 3.2.1-3 に示す。

- ①無線給電道路システム上を走行する EV は、路面に埋設された磁石による磁場を検知する。
- ②EV は路側に設置された高周波電源装置へ車両 ID、GPS 情報、自身の走行速度の情報を送信する。
- ③情報を受け取った高周波電源装置(n 番目)は、以下の処理を行う。
  - ・車両 ID、GPS 情報、走行速度を自身のテーブルに記録
  - ・車両速度からセクション通過時間 TL を計算
  - ・車両 GPS による位置情報が自身の無線給電道路システムセクション内であり、かつ GPS 情報より推定される車両位置が、
    - A)磁石 1 の場合：TL 秒間送電を開始。④EV が電力を受け取る  
：⑤車両進行方向の高周波電源装置( n+1 番目)に 2\*TL 秒間送電命令
    - B)磁石 2 の場合：0.5\*TL 秒間送電を開始。④EV が電力を受け取る  
：⑤車両進行方向の高周波電源装置( n+1 番目)に 1.5\*TL 秒間送電命令
    - C)磁石 3 の場合：⑤車両進行方向の高周波電源装置( n+1 番目)に TL 秒間送電命令

### 3. 2. 2 基本動作以外の想定シナリオ

以下に示す基本動作以外のシナリオについて、路車連携システムの動作を検討した。

#### (1) 無線給電道路システム上を走行する車両が一般道路へ車線変更する場合

無線給電道路から一般道路への車線変更後は高周波電源装置へ通信する機会がない（埋設磁石上を走行しない）ため、高周波電源装置は最後の通信タイミングで設定された時間分送電後に送電を停止する。そのため無線給電道路が常に送電 ON の状態になることはないと考えられる。またさらなる安全対策として、高周波電源装置に記録した車両 ID からの情報が一定時間更新されない場合、自動的に送電を OFF とする処理を追加することが考えられる。

#### (2) 一般道路上を走行する車両が無線給電道路システムへ車線変更する場合

一般道路から無線給電道路への車線変更後は、無線給電道路システム内のいずれかの磁石に反応し高周波電源装置に車両情報を送信する。その後高周波電源装置は基本動作と同様の処理を行うため、基本動作以外の特異な処理は必要ないと考えられる。

#### (3) 複数の車両が1つの無線給電道路システム内に存在する場合

1つの無線給電道路システム内に複数の車両が存在する場合、1つの車両当たりが受け取れる受電量は低下するが、複数台への給電は行える可能性がある。また、高周波電源装置は逐次受け取った信号を基に送電を開始するため、通信帯域の圧迫や信号の混信等の問題を除けば基本動作以外の特異な処理は必要ないと考えられる。

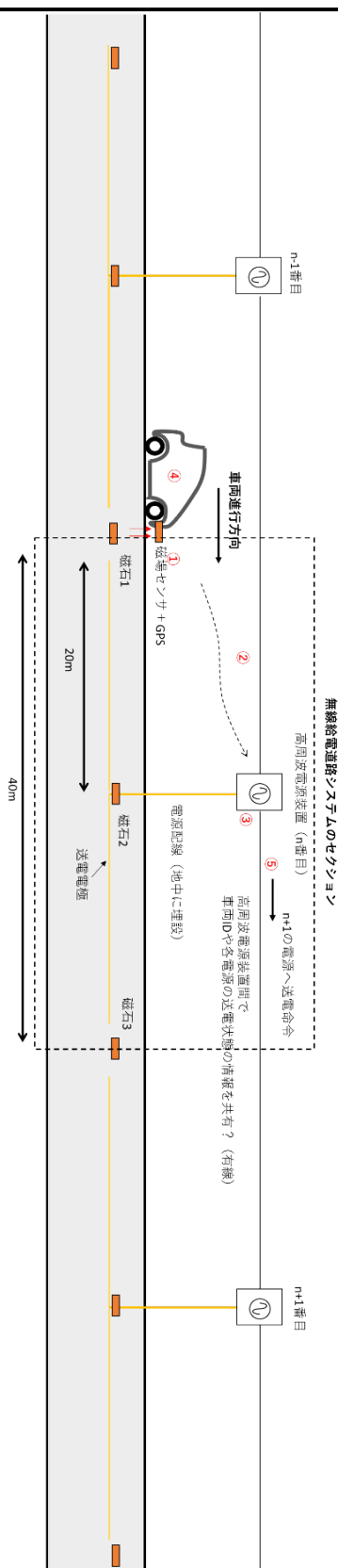


図 3.2.1-1 路車連携システムの概念図

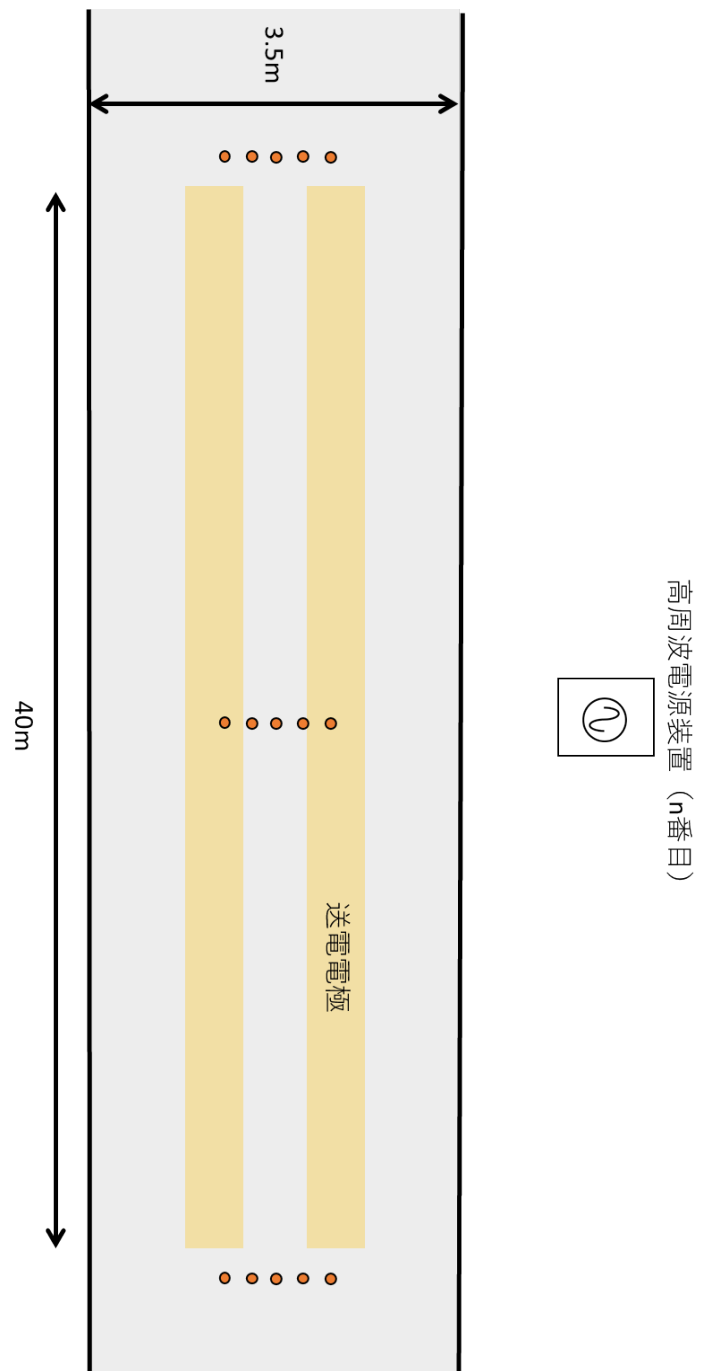


図 3.2.1-2 路車連携システム概念図 (平面図)



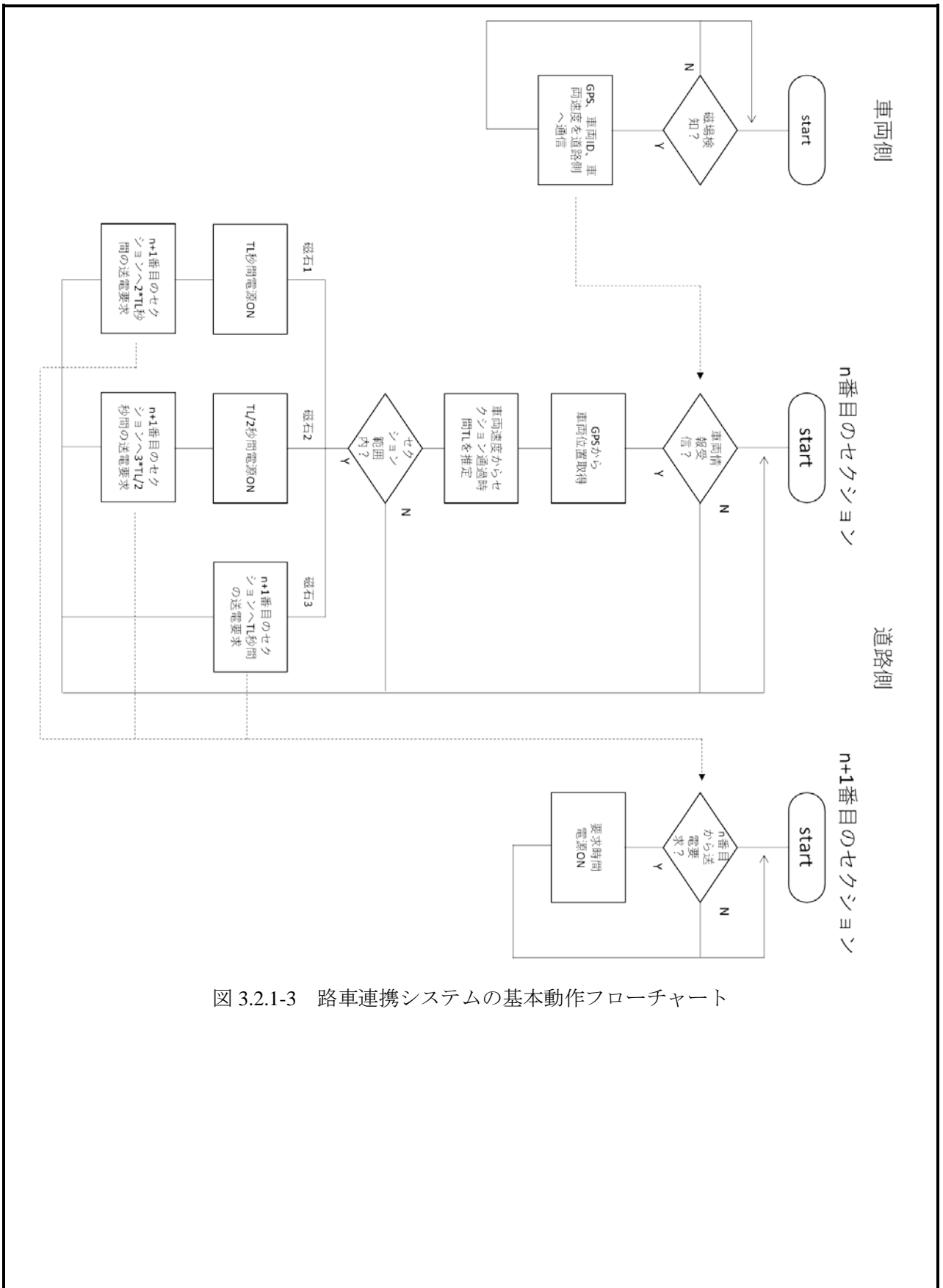


図 3.2.1-3 路車連携システムの基本動作フローチャート

### 3. 3 磁石の埋設実験

3.1.2 節で評価した磁気センサーによる磁場の測定実験において、磁石の位置は路面上としていた。しかし実際の運用時において磁石は道路に埋設されるため磁場の強度が変化し、十分な強度が得られなくなることが懸念される。本節では磁石を無線給電道路内に埋設した際における磁場の検知実験を行った結果について報告する。

図 3.3-1 に無線給電道路内の磁石埋設位置を示す。無線給電道路は  $2\text{m} \times 1\text{m}$  の寸法で構築した。送電電極から  $72.5\text{mm}$  離れの位置、セラミック骨材部内に磁石を埋設した。また、図 3.3-2 断面図における右側の磁石はアスファルト施工前に埋設し、対して左側の磁石はアスファルト施工後にコア抜きを行い埋設した。これは、アスファルト施工時に磁石が破壊され磁場の変化が発生するかを確認するためである。写真 3.3-1 に屋外ヤードに試験施工した無線給電道路を示す。磁場センサーは道路上層路盤から高さ  $100\text{mm}$  の位置に固定し図 3.3-3 に示すように  $100\text{mm}$  刻みで磁石毎に 9 点測定を行った。使用機器を表 3.3-1 に、表 3.3-2 に測定結果を示す。なお、本値は磁場測定装置により測定した値の Z 軸絶対値である。測定結果より、無線給電道路内に磁石を埋設しても埋設した磁石付近であれば十分な磁界強度を観測できることが示された。実験後コア抜きにより埋設磁石の破損を確認したが、どちらの磁石も埋設による破損は確認できなかった。そのため磁場の最大強度が  $1\text{G}$  程度異なる原因として、埋設した磁石の位置ずれが考えられる。

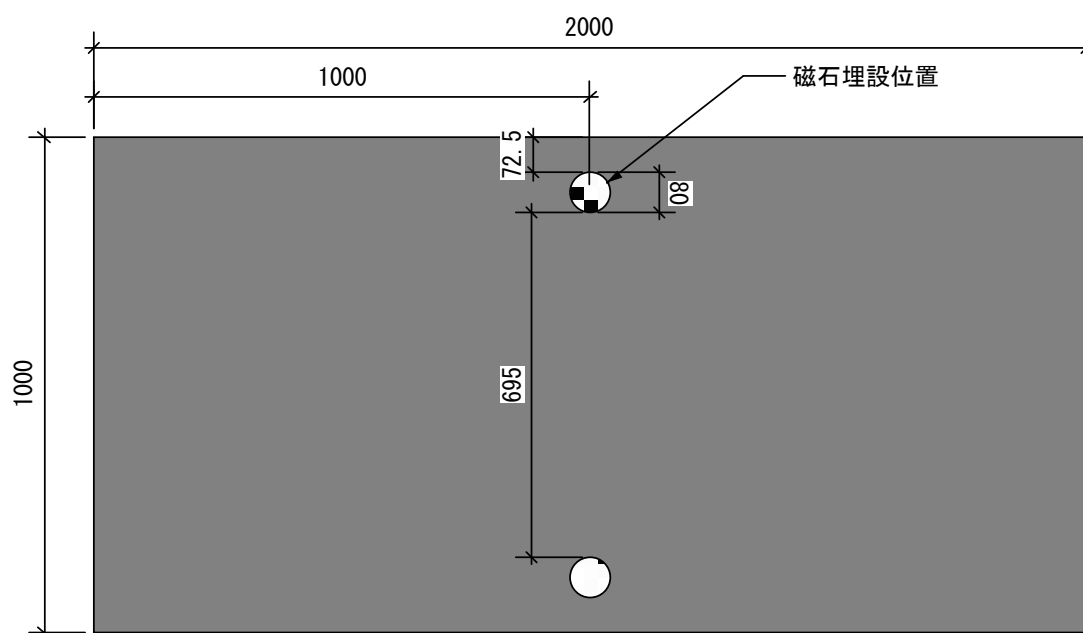


図 3.3-1 磁石埋設位置 (平面図)

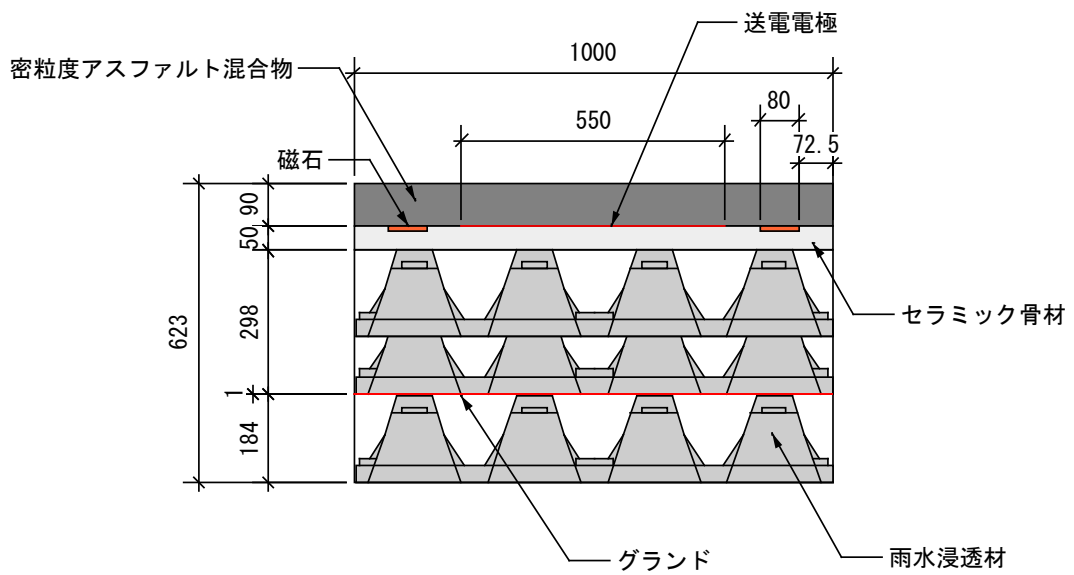


図 3.3-2 磁石埋設位置 (断面図)

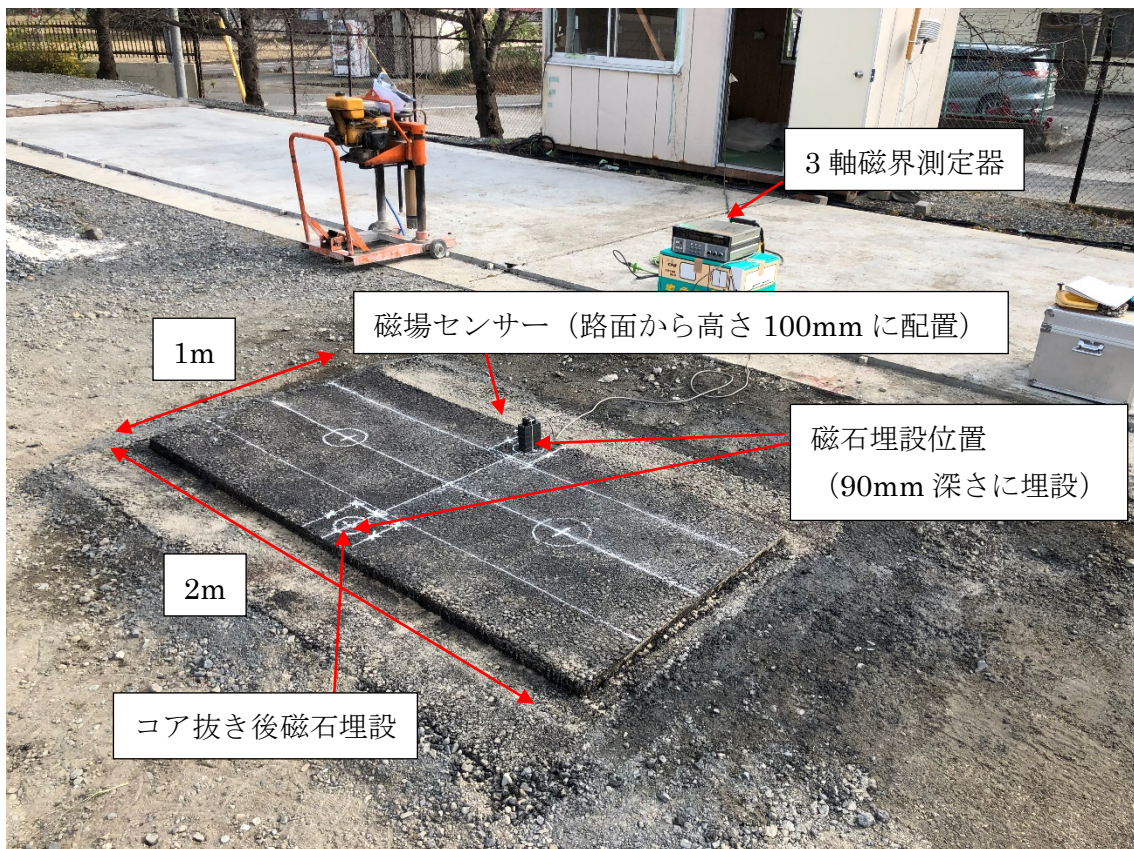


写真 3.3-1 測定風景

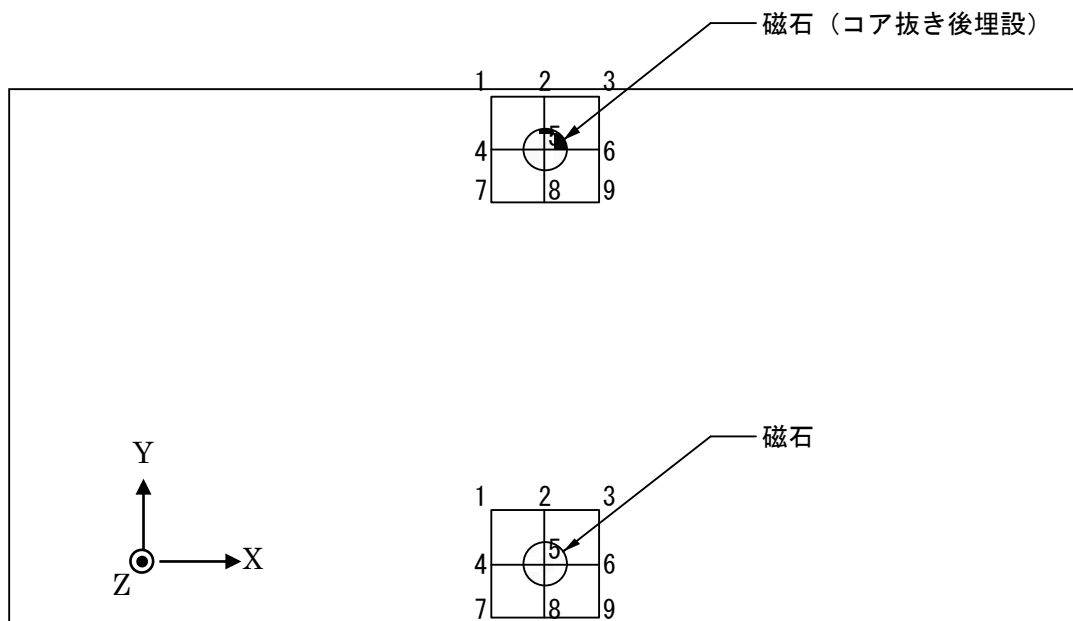


図 3.3-3 測定位置

表 3.3-1 使用機器

名称	メーカー	型番
3 軸磁界測定器	MTI	MM-340

表 3.3-2 測定結果 (単位はガウス[G])

(a)コア抜き後埋設

1	2	3
0.008	0.350	0.143
4	5	6
0.467	1.438	0.788
7	8	9
0.472	1.139	0.631

(b)通常埋設

1	2	3
0.803	1.417	1.104
4	5	6
1.246	2.359	1.602
7	8	9
0.909	1.338	0.985

### 3. 4 本章のまとめ

本章では路車連携による給電制御技術の開発に向けた検討について報告し、以下に示す知見を得た。

3.1 節の給電制御に必要なセンサーの検討では、ビーコン、イメージセンサー、磁気センサー、GPS センサー、レーザーセンサーの評価実験を行った。結果、すべてのセンサにおいて、道路上を走行する EV の検知が行える可能性を見出した。しかし、単体のセンサのみでは高周波電源の給電制御を行うために必要十分な情報を送信することが難しいため、道路内に磁石を埋設し、EV 側に磁場センサーと GPS センサーを搭載することで、磁石をトリガーとした給電制御を行うこととした。

3.2 節の路車連携システムの概念設計では、道路内に磁石を埋設し、EV 側に磁場センサーと GPS センサーを搭載した路車連携システムの動作フローについて検討した。道路に埋設した磁石による磁場を EV に搭載した磁場センサーが検知したとき、EV は路側に設置された高周波電源装置へ車両 ID、GPS 情報、自身の走行速度の情報を送信する。高周波電源装置は受け取った速度情報を基に EV が当該無線給電道路を通過する時間を計算し、その時間分高周波電源から電力を送電する。このようなシステムとすることで無線給電道路と EV が連携した給電制御システムを実現する。

3.3 節の磁石の埋設実験では、道路の表層アスファルト 90mm 下に埋設される磁石からの磁場を磁場センサにより検知可能か実験により検証した。磁場センサーは道路上層路盤から高さ 100mm の位置に固定し 100mm 刻みで磁石毎に 9 点測定を行った。測定結果より、無線給電道路内に磁石を埋設しても埋設した磁石付近であれば十分な磁界強度を観測できることが示された。

#### 4. 漏えい電磁界抑制・対策技術開発に向けた検討

6.78MHzを利用した無線給電システムの漏えい電磁界に関する検討は、総務省情報通信審議会情報通信技術分科会電波利用環境委員会において、平成26年度に実施されている。本研究では、電波利用環境委員会における審議への適合性を評価する。

##### 4. 1 電磁界強度に関する規制値

###### (1) 人体防護に関する規制値<sup>1)</sup>

電磁界が人体に与える影響については、様々な研究がなされており、国際的な合意を得ている項目が数多くある。我が国では、これらの研究結果に基づき、電波のエネルギーが人体に好ましくない影響を及ぼさないよう、指針となる電波のエネルギー量等に関して、電波防護のための指針（電気通信技術審議会答申「電波利用における人体の防護指針」（平成2年6月）及び「電波利用における人体防護の在り方」（平成9年4月）並びに情報通信審議会答申「局所吸収指針の在り方」（平成23年5月））を策定している。これらに基づき、無線給電道路システムの運用形態に応じて、以下の電波防護のための指針（以下「防護指針」という。）に適合する必要がある。

- ① 電気通信技術審議会答申 諮問第38号  
「電波利用における人体の防護指針」（平成2年6月）
- ② 電気通信技術審議会答申 諮問第89号  
「電波利用における人体防護の在り方」（平成9年4月24日）
- ③ 情報通信審議会 諮問第2030号  
「局所吸収指針の在り方」に関する答申（平成23年5月17日）

なお、防護指針の値は、十分な安全率を考慮した人体防護を前提としたものであることから、防護指針値を超えたからといってそれだけで人体に影響があるものではないことに注意が必要である。また、防護指針は、現時点において専門家が共通の認識に達している事項に基づいて記述されており、暫定的な性格も有している。したがって、今後、この分野における調査研究が進展し、科学的に裏付けされた根拠や新しい考え方が示された場合には、電波利用の状況や諸外国の状況等に応じて、防護指針の内容が改定される可能性があることにも留意する必要がある<sup>1)</sup>。

また、上記の指針において、無線給電システムを高周波利用設備のうち50Wを超える電力を使用するシステムとして評価の対象としているが、電気自動車用無線給電システムで充電中の車内の人体における電磁界へのばく露に対する防護指針への適合性評価は対象としていない。そこで、本研究では、道路システムから漏えいする電磁界の周囲環境に対する適合性を評価し、車内の人体に対しては、上記の基準を参考値としてする取り扱うこととする。

無線給電システムに適用すべき指針値は、当該装置から発生する電波の特性、設置状態・使用条件等によって異なる。6.78MHz帯を利用する無線給電システムについて適用すべき指針値の基本的な考えを下記に示す。

- ・ 熱作用に基づく指針値（平均時間6分間）を適用する。
- ・ 人体が電波放射源及び金属体から20cm以上離れている場合には、不均一又は局所的なばく露に関する補助指針を適用できる。
- ・ 人体が電波放射源及び金属体から20cm未満に近づく場合には、電磁界強度指針を入射電磁界強度の最大値に適用する、又は局所吸収指針を適用する。なお、電波放射源から20cm未満の領域で、電磁界強度指針を入射電磁界強度の最大値に適用するためには、電波

放射源から20cm未満の領域の入射電磁界を電磁界プローブで適切に測定できることが必要である。

- ・ 適用すべき指針値の平均時間にわたり電界強度又は磁界強度が変動する場合には、平均時間内で実効値の自乗平均平方根した値を指針値と比較する。
- ・ 非接地条件が満たされない場合には、電磁界強度指針の非接地条件が満たされない場合についての注意事項（注2）を適用する、又は誘導電流に関する補助指針を適用する。
- ・ 電磁界強度指針は、最悪のばく露条件を想定しているため、当該指針を超過していても直ちに防護指針に適合していないとはならない。そのため、電磁界強度指針を満足していても、防護指針の根拠となる基礎指針により即している局所吸収指針を適用することで、防護指針への適合性を直接確認することができる。
- ・ 100kHz以上の電波を利用する電気自動車用 無線給電 システムに関しては、熱作用に基づく指針値のみを適用し、刺激作用に基づく指針値は適用しない。ただし、当該WPTシステムに関しては、局所SARに基づく指針値が満足される場合でも、必ずしも全身平均SARに関する指針値を満足するとはいえないため、適用すべき指針値は全身平均SAR及び局所SARに関する指針値と接触ハザードが防止されていない場合の接触電流に関する指針値になる。

以上の条件において、道路システムの人体防護に関する規制値は、表4.1-1（参考文献<sup>1)</sup>の表3(a) 条件G（一般環境）の磁界強度および電界強度に関する指針値への適合性を確認する。

表4.1-1 電波防護指針（一般環境）における電磁界強度（6分間平均値）の指針値<sup>1)</sup>

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]	電力密度 S[mW/cm <sup>2</sup> ]
10kHz - 30kHz	275	72.8	
30kHz - 3MHz	275	2.18f(MHz)-1 (72.8 - 0.728)	
3MHz - 30MHz	824f(MHz)-1 (275 - 27.5)	2.18f(MHz)-1 (0.728 - 0.0728)	
30MHz - 300MHz	27.5	0.0728	0.2
300MHz - 1.5GHz	1.585f(MHz)1/2 (27.5 - 61.4)	f(MHz)1/2/237.8 (0.0728 - 0.163)	f(MHz)/1500 (0.2 - 1)
1.5GHz - 300GHz	61.4	0.163	1

表4.1-2 電波防護指針（一般環境）、低周波領域における電磁界強度（平均時間<1秒）の指針値

周波数 f	電界強度の実効値 E[V/m]	磁界強度の実効値 H[A/m]
10kHz - 100kHz	894	72.8

注1：接触ハザードが防止されていない場合の電界強度の実効値は、15MHz以下周波数では61.4V/m以下(平均時間<1秒)でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表3(a)及び表3(b)の指針値を下回る時は、参考文献<sup>1)</sup>の3.2.2(2)を適用することができる。

注2：人体の非接地条件を満たさない場合の電界強度の実効値(平均時間6分間)は、3MHzから30MHzまでの周波数では $1,430f(\text{MHz})-3/2\text{V/m}$ (すなわち275V/m~9V/m)、30MHzから100MHzまでの周波数では9V/m、100MHzから300MHzまでの周波数では $0.09f(\text{MHz})\text{V/m}$ (すなわち9V/m~27V/m)以下でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表3(a)の指針値を下回る時は、参考文献<sup>1)</sup>の3.2.2(3)を適用することができる。

注3：表3(a)に示した平均時間内において、電界強度及び磁界強度が変化する場合は平均時間内で実効値の自乗平均平方根した値を用い、電力密度が変化する場合は平均時間内での平均値を用いる。

注4：電磁界が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、電界強度及び磁界強度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、電力密度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の和を求める。これらの総和が1を超えてはならない。

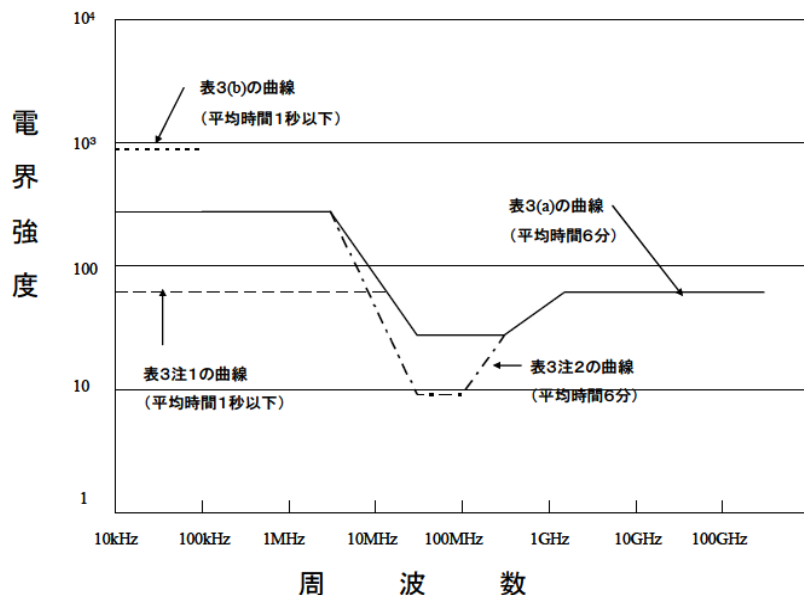


図4.1-1 電波防護指針(一般環境)における電界強度(6分間平均値)の指針値<sup>1)</sup>  
(※図内における表3(a)は本報告書における表4.1-1を、表3(b)は表4.1-2を示す)



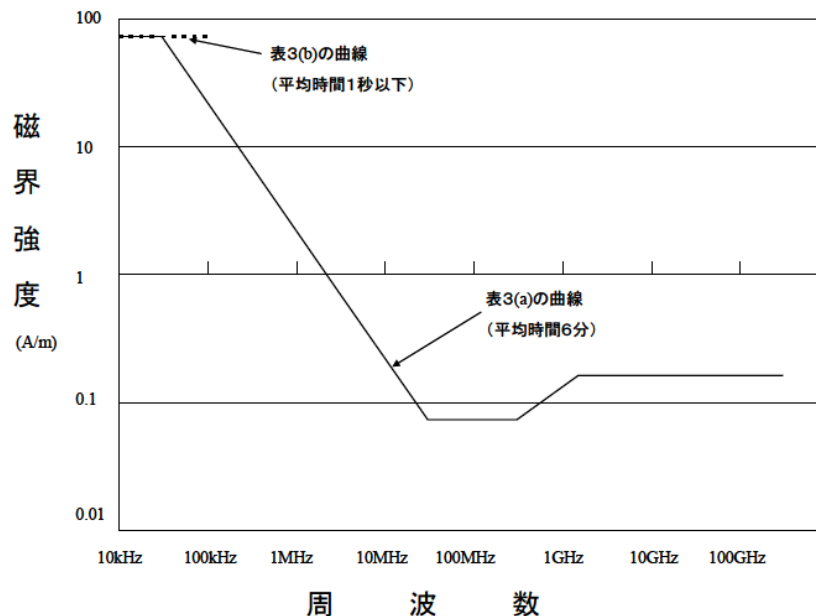


図4.1-2 電波防護指針（一般環境）における磁界強度（6分間平均値）の指針値<sup>1)</sup>  
 （※図内における表3(a)は本報告書における表4.1-1を、表3(b)は表4.1-2を示す）

以上において、道路システムに利用する6.78MHzでの指針値を求めると、以下の数値となる。

- ・電界強度指針値：121V/m
- ・磁界強度指針値：0.3A/m

本研究では上記の指針値への適合性をシミュレーションの結果から評価する。

## （2）放射妨害波に関する規制値<sup>2)</sup>

無線給電システムが無線システムに与える影響については、総務省が主催する情報通信審議会 情報通信技術分科会において検討されている。本道路システムは、6.78MHz帯を利用した無線給電システムであり、今後、実用化に向けた標準化検討を行う段階では、参考文献2) に示された「家電機器用WPTシステム①モバイル機器、産業用IT機器への充電・給電システム」と同様の規制値で評価されるものと考えられる。

### A 放射妨害波の電界強度

(a) 利用周波数において：100 mV/m@30 m (100 dB $\mu$ V/m@30 m)

### B 放射妨害波の磁界強度

(a) 利用周波数において：265.3  $\mu$ A/m@30 m (48.5 dB $\mu$ A/m@30 m)

## 参考（引用）文献

- 1) 電波防護指針、諮問第38号「電波利用における人体の防護指針」、平成2年6月
- 2) 情報通信審議会 情報通信技術分科会、電波利用環境委員会報告（案）、平成26年11月5日

#### 4.2 電磁界漏えいシミュレーション

車体に搭載した負荷に電力を10kW供給した際の電磁界漏えい量をシミュレーションにより見積もる。シミュレーションモデルの外観を図4.2-1に表す。道路近端の送電電極に入力ポートを設置した。遠端に車両を配置した。図4.2-2のように受電電極に整合回路を接続し、負荷へ電力供給した。道路の状態は実際の運用を考え、道路内に滞留水がある定常状態とした。表4.2-1および表4.2-2にシミュレーションで用いた材料定数を示す。

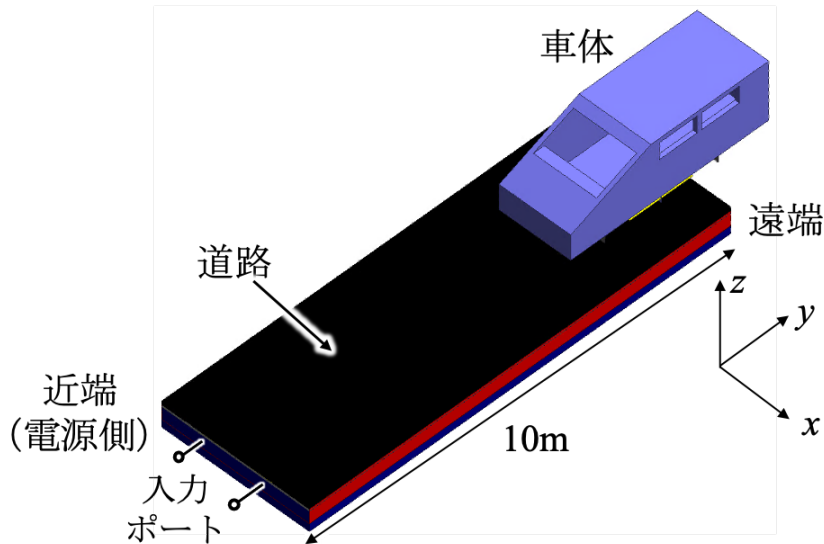


図4.2-1 電磁界漏えいシミュレーションの外観

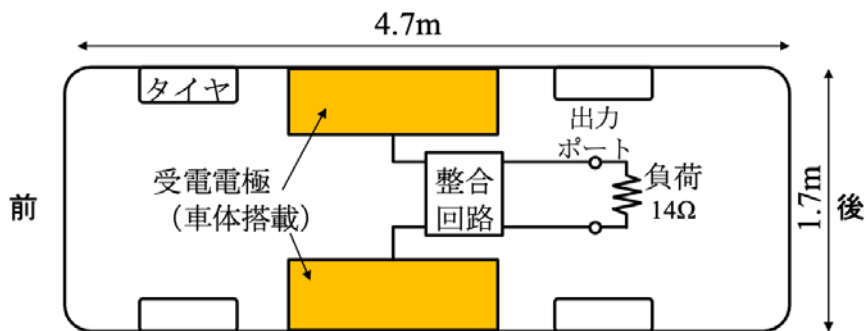


図4.2-2 受電側回路と負荷

表4.2-1 システムの中で使用される金属物の材料特性 (表1.2-8再掲)

構成要素	材料	導電率： $\sigma$	比透磁率： $\mu_r$
車体	鉄	$1.03 \times 10^7$	5000
送電および受電電極	SUS304	$1.39 \times 10^6$	1
パンチングメタル	アルミ	$3.56 \times 10^7$	1

表4.2-2 定常状態の道路構成材料の特性（表1.2-9の定常状態を再掲）

構成要素	定常状態	
	比誘電率： $\epsilon_r$	誘電正接： $\tan\delta$
特殊アスファルト 混合物	5.45	0.0179
セラミック骨材	3.09	0.0159
雨水浸透材 (空隙率92%)	1.10	0.0003
透水シート	2.34	0.017
瀝青剤	1.99	0.011

### （1）人体防護指針に対する電磁界漏えいシミュレーション

道路システムから漏えいする電磁界量が人体防護指針の規制値を満足するかシミュレーションにより見積もる。シミュレーション条件を表4.2-3に示す。入力ポートに電圧源を接続し、1750Vの電圧を与えた。このとき、負荷抵抗の電圧値が529Vとなった。取得した負荷抵抗の電圧値529Vと抵抗値14Ωにより負荷への供給電力を計算し、10kW出力を確認した。10kW出力した状態で、電磁界が集中する受電電極中央点を中心に図4.2-3のような3つの断面の電界分布および磁界分布をシミュレーションで確認した。

図4.2-4から図4.2-6に電界分布結果を示す。それぞれの図で赤色部分が人体防護指針の規制値を下回る部分になる。図4.2-4より道路の側面から0.4m離れた位置および道路近端から1m離れた位置、遠端から0.7m離れた位置における電界強度は人体防護指針を満たすことがわかる。図4.2-5より道路上においては近端より0.5m進んだ位置のz方向の電界が大きくなり、道路表面から1.5mの高さで人体防護指針を満たす。図4.2-6より車体の側面から0.7m離れた位置で人体防護指針を満たす。図4.2-5および図4.2-6より車内には電界が侵入していないことがわかる。これは車体が鉄製かつ、受電電極を車体下に設置したことにより窓からの電界のまわり込みも少なくなるためである。この結果より、車内の搭乗者に対しての安全が期待できる。

図4.2-7から図4.2-9に磁界分布結果を示す。車外の磁界については、図4.2-7より道路の側面から0.5m離れた位置および道路近端から0.8m、遠端から0.2m離れた位置で人体防護指針を満たすことがわかる。図4.2-8より道路近端から0.8m離れた位置で人体防護指針を満たす。道路上においては近端より0.5m進んだ位置のz方向の磁界が大きくなり、道路表面から1.6m離れた高さで人体防護指針を満たす。図4.2-9より車体側面から0.2m離れた位置で人体防護指針を満たす。図4.2-8および図4.2-9より車内の磁界強度が小さいため、車内の搭乗者に対しての安全が期待できる。

図4.2-5および図4.2-8より道路近端から0.5m地点でz方向の電磁界強度が特に強いことがわかった。そこで図4.2-10に示すような道路近端から0.5m地点においてzx断面の電磁界強度をシミュレーションで確認した。図4.2-11に電界強度、図4.2-12に磁界強度の結果を示す。電界および磁界強度はどちらも道路の側面から0.5m離れた位置で人体防護指針を満たす。

本項の結果をまとめると、道路側面方向に0.5m、道路近端から離れる方向に1m、遠端から離れる方向に0.7m、道路表面から1.5m高さの位置で人体防護指針を満たす。加えて、車内においても人体防護指針を満たし、搭乗者に対しても安全が期待できる。

表4.2-3 人体防護指針に対する電磁界漏えいシミュレーション条件

項目	値
周波数	6.78MHz
解析空間の大きさ	50m×50m×50m
外部境界条件	吸収境界
入力ポート	電圧源
出力ポート	負荷抵抗 14 Ω
入力ポート電圧	1750 V (波高値)

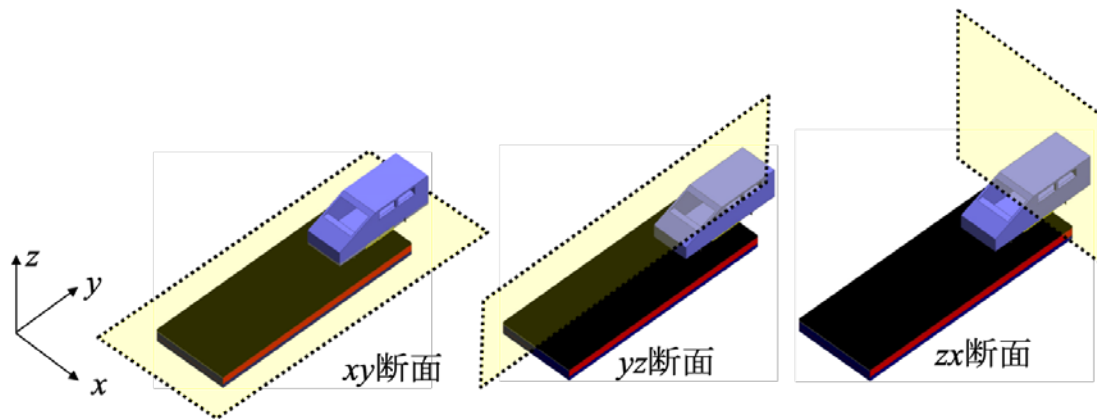


図4.2-3 受電電極中央点を中心にとったときの3断面

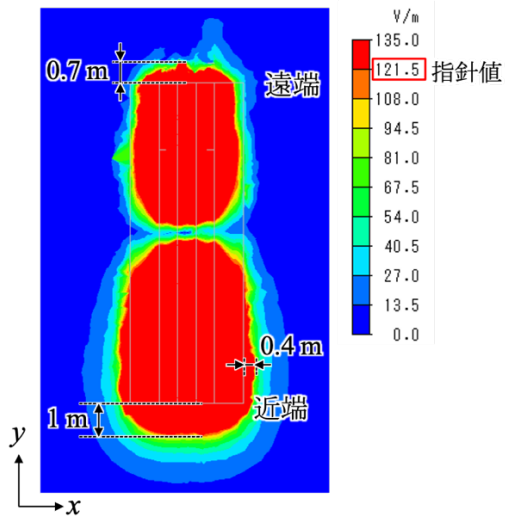


图4.2-4 受電電極中央xy断面電界分布

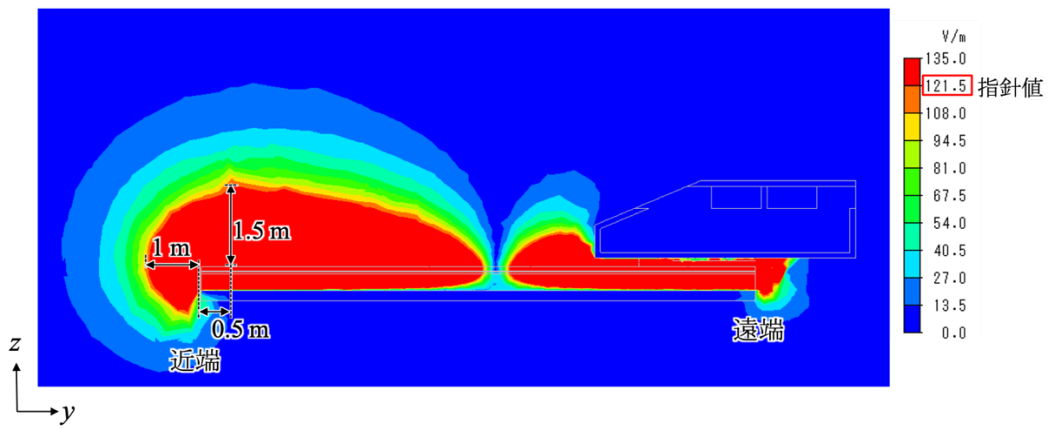


图4.2-5 受電電極中央yz断面電界分布

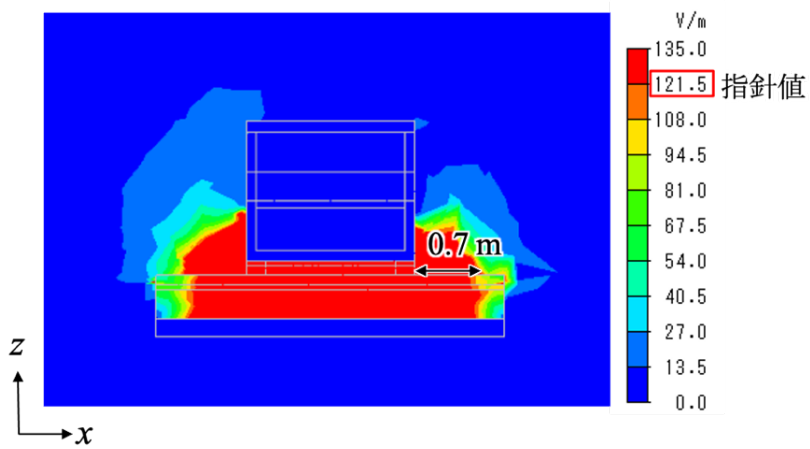


图4.2-6 受電電極中央xz断面電界分布

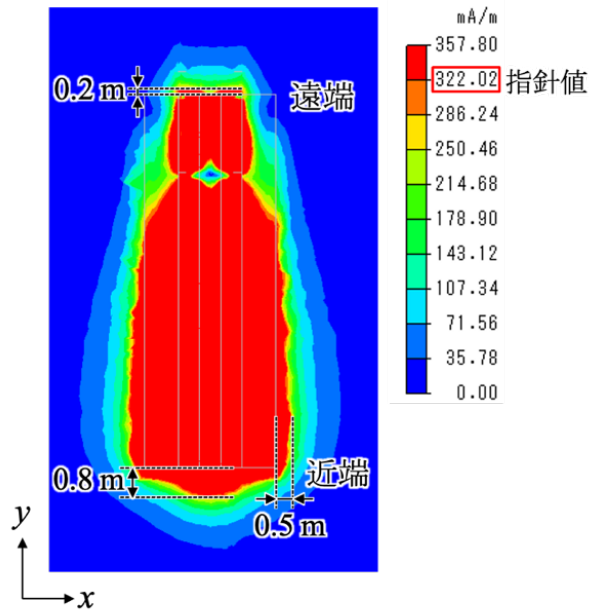


图4.2-7 受電電極中央xy断面磁界分布

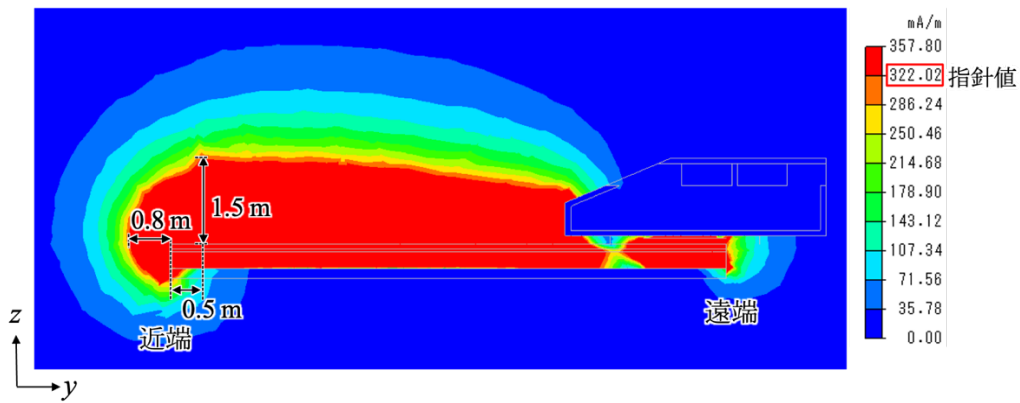


图4.2-8 受電電極中央yz断面磁界分布

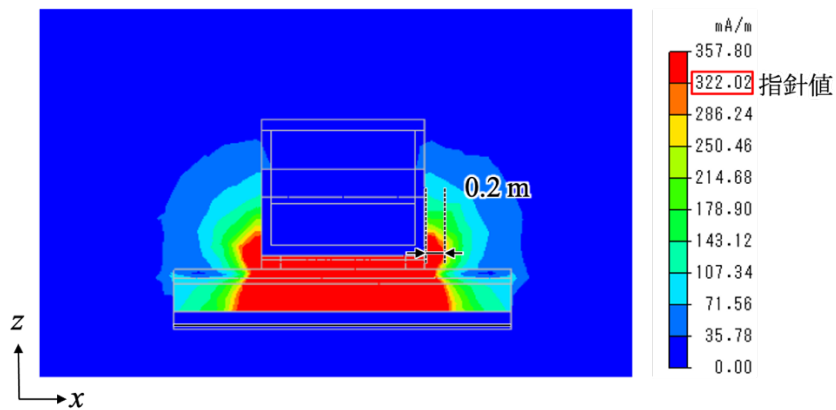


图4.2-9 受電電極中央xz断面磁界分布

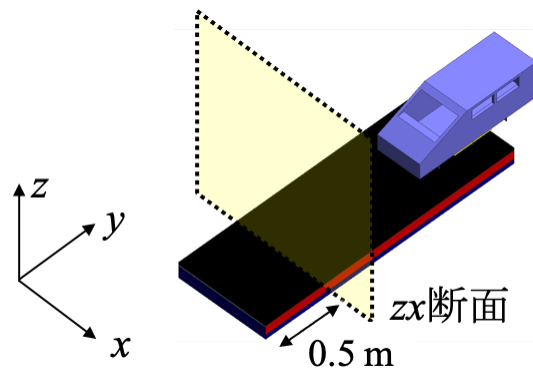


図4.2-10 道路近端から0.5m地点のzx断面

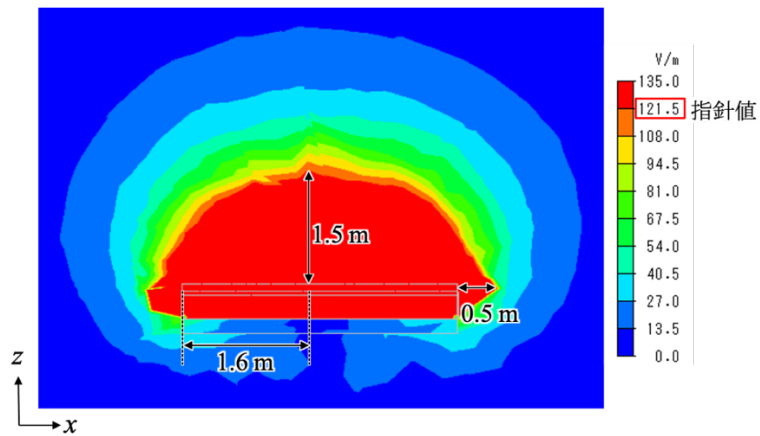


図4.2-11 道路近端から0.5m地点のzx断面電界分布

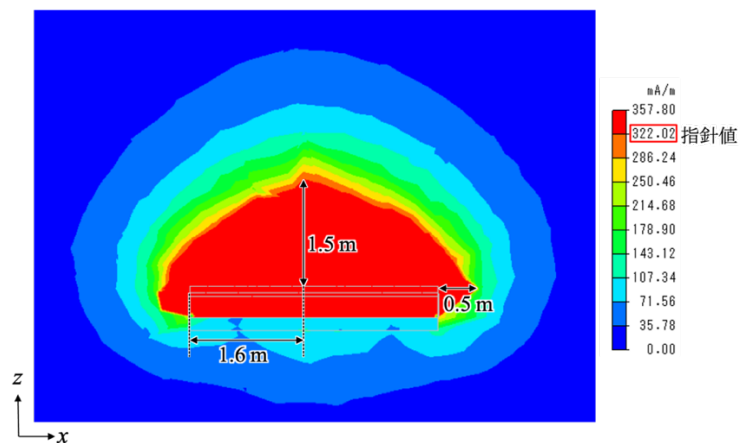


図4.2-12 道路近端から0.5m地点のzx断面磁界分布

## (2) 放射妨害波に対する電磁界漏えいシミュレーション

放射妨害波に対する遠方電磁界漏えいをシミュレーションで見積もる。表4.2-4にシミュレーション条件を示す。遠方界の電磁界強度を確認するため解析空間を前項の範囲から広げ、100m×100m×100mとした。負荷抵抗に10kW電力供給した状態で、電磁界強度を確認する。電磁界が集中する受電電極中央点を中心に図4.2-11のような3つの断面の電界分布および磁界分布をシミュレーションで確認した。前項より道路近端から0.5m地点でz方向の電磁界強度が特に強いことがわかったため、図4.2-11のような3つの断面に加え、図4.2-12のような道路近端から0.5m地点におけるzx断面の電磁界強度を確認した。

結果を図4.2-13から4.2-20に示す。それぞれの図において、青色部分が放射妨害波の指針値を満たす部分になる。どの図においても外部境界において反射が発生し、定在波が生じているように見える。これは外部境界を吸収境界にしても、シミュレーション上では完全に電磁波を吸収できないため生じる計算誤差によるものである。具体的に説明すると、10kW電力を供給したとき発生する最大電磁界強度に対して-60dBオーダーの電磁界強度において微小反射が起こっており、このレベルの電磁波は外部境界で吸収しきれしていない。完全に電磁波が吸収されるとこのような反射は起こり得ず、距離に応じて電磁界強度は減少する。

図4.2-13より道路の側面から43m離れた位置で電界強度指針値100mV/mを満たす。30m位置では指針値を満たさない。しかし、電界強度の距離特性を詳細にみることで実際には30mより短い距離において指針値を満たすことが期待できる。電界強度は放射源から21m程度で一旦小さくなり、さらに距離を離れることで大きくなり、43mの位置で再度小さくなる。これは前述の微小反射による定在波を表している。このため反射の影響を考慮しない場合、21m付近で指針値を満たす可能性が考えられる。道路近端からは19m、遠端からは15m離れることで指針値を満たす。図4.2-14においても道路近端および遠端方向の電界強度の様子をみることができ、図4.2-13と同様の結果を示している。図4.2-15の道路側面方向の電界強度をみると図4.2-13と同様の考察を得ることができ、21m付近で指針値を満たす可能性があると考えられる。図4.2-16より道路側面方向の電界強度を評価すると、図4.2-15と同等の結果を得られる。これらの結果より電界強度については道路側面方向に21m、道路近端から19m、遠端から15m離れることで指針値を満たす可能性がある。

図4.2-17より道路の側面から20m離れた位置で磁界強度指針値 $265.3 \mu\text{A/m}$ を満たす。加えて、道路近端からは20m、遠端からは15m離れることで指針値を満たす。道路近端および遠端からの距離は図4.2-18からも読み取ることができ、前述の図4.2-17と同じ結果を得る。図4.2-18および図4.2-19より道路側面方向の磁界強度を評価すると、20m離れた位置で指針値を満たす。これは図4.2-17と同等の結果である。これらの結果より磁界強度については道路側面方向に20m、道路近端から20m、遠端から15m離れることで指針値を満たす可能性がある。

本項の結果より30m地点における放射妨害波は指針値を満たす可能性を示すことができた。今後、実測により放射妨害波に対する指針値を満たすことが期待できる。



表4.2-4 放射妨害波に対する電磁界漏えいシミュレーション条件

項目	値
周波数	6.78MHz
解析空間の大きさ	100m×100m×100m
外部境界条件	吸収境界
入力ポート	電圧源
出力ポート	負荷抵抗 14Ω
入力ポート電圧	1750V (波高値)

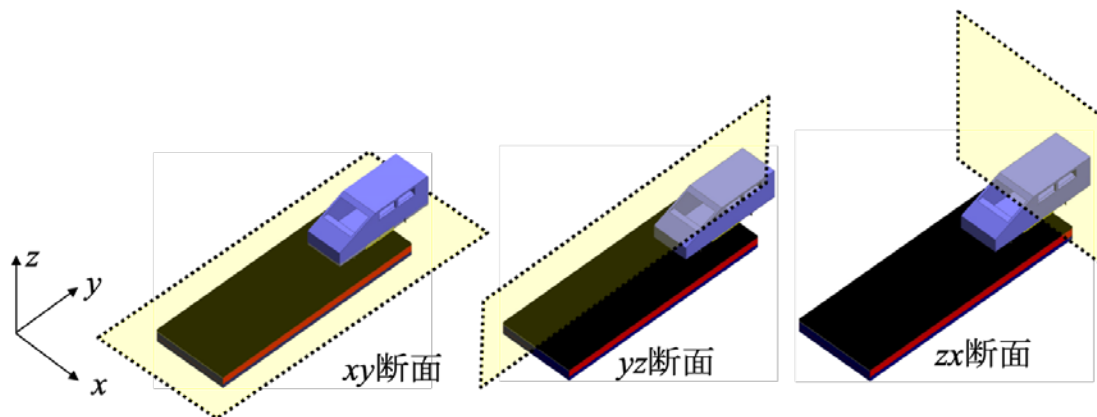


図4.2-11 受電電極中央点を中心にとったときの3断面（図4.2-3を再掲）

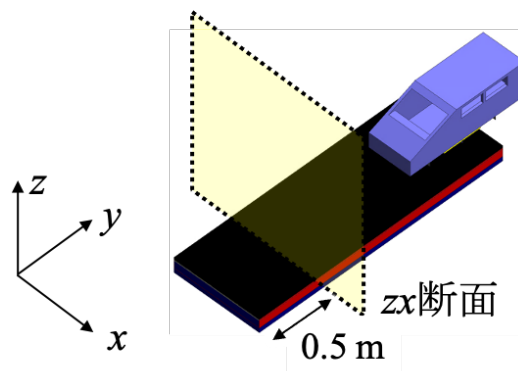


図4.2-12 道路近端から0.5m地点のzx断面（図4.2-10を再掲）

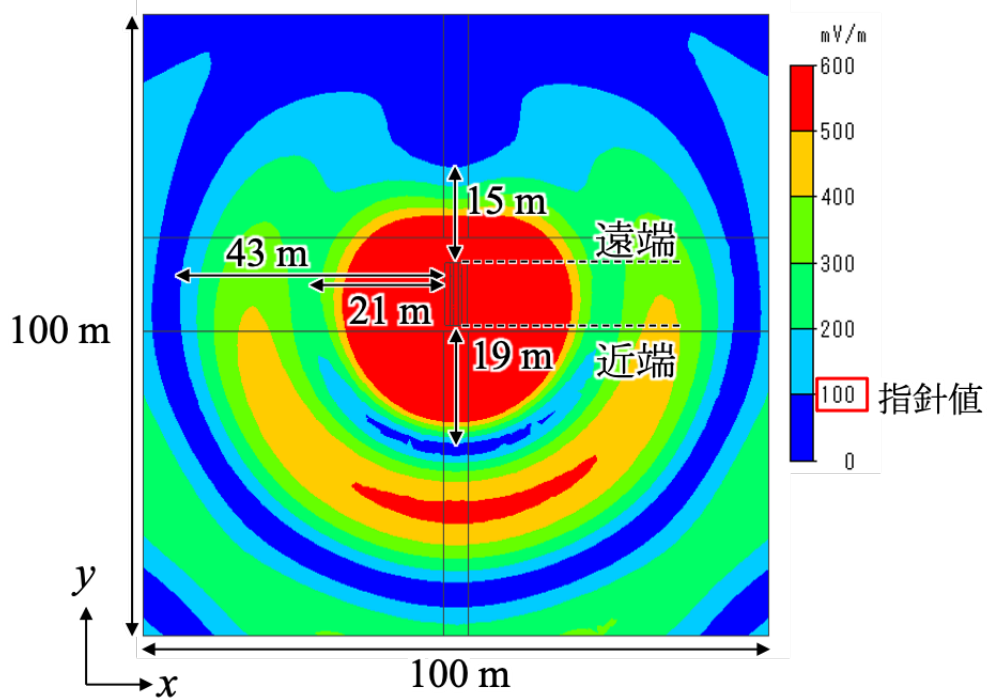


图4.2-13 受電電極中央xy断面遠方電界分布

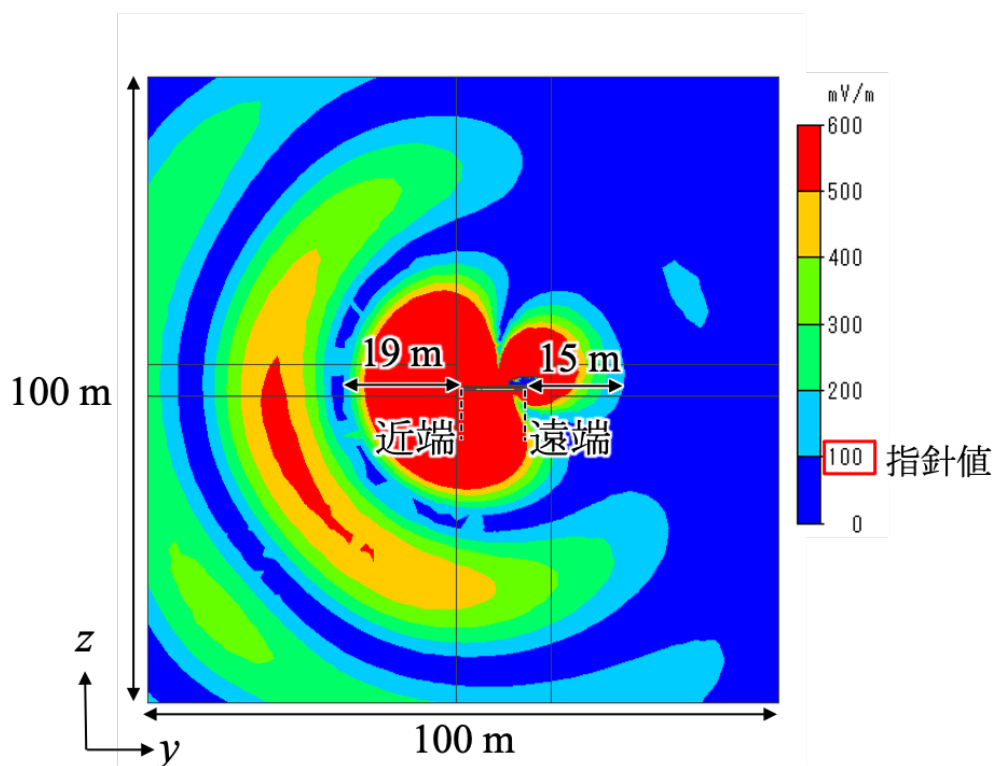


图4.2-14 受電電極中央yz断面遠方電界分布

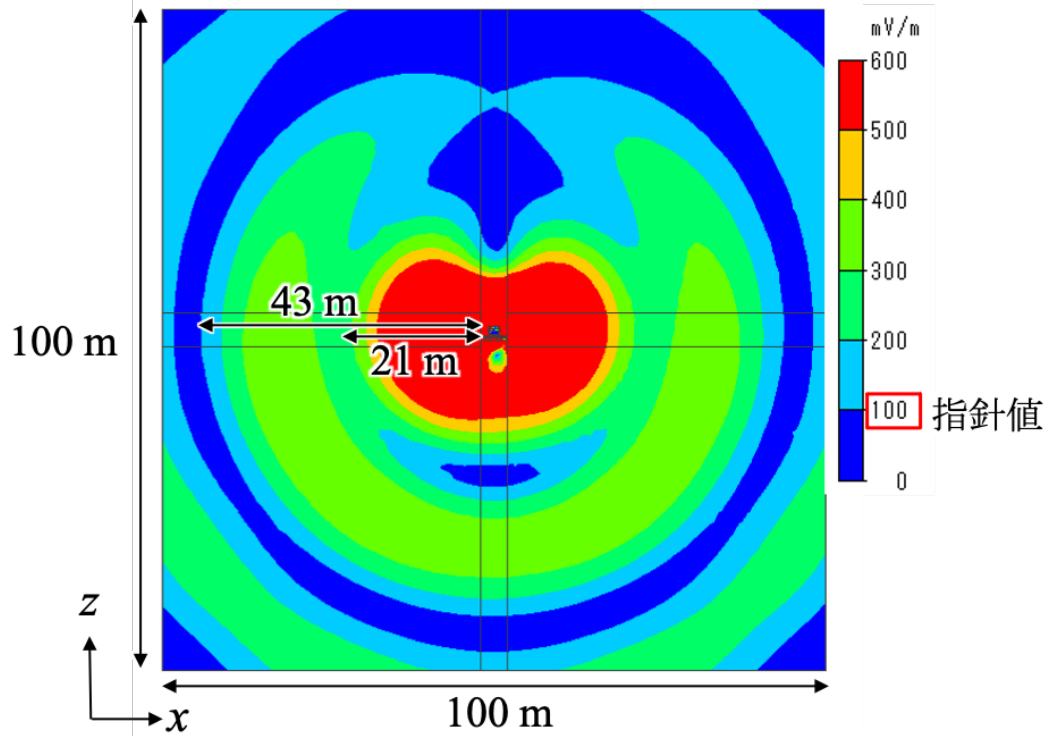


図4.2-15 受電電極中央zx断面遠方電界分布

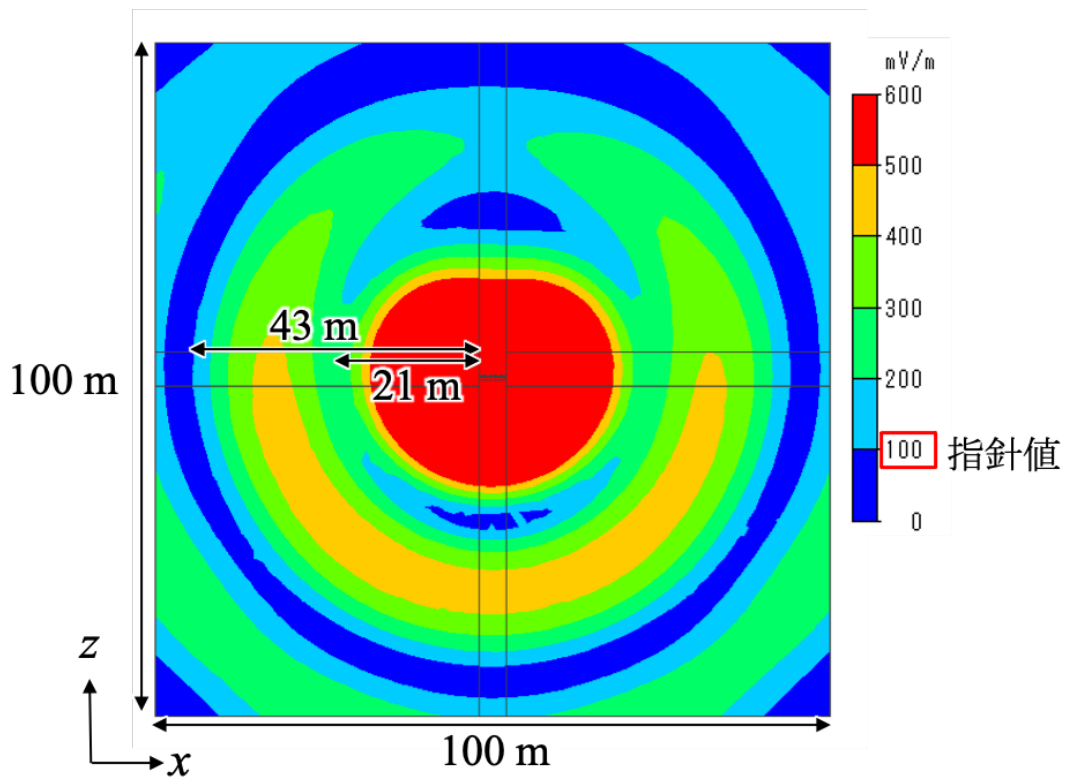


図4.2-16 道路近端から0.5m地点のzx断面遠方電界分布

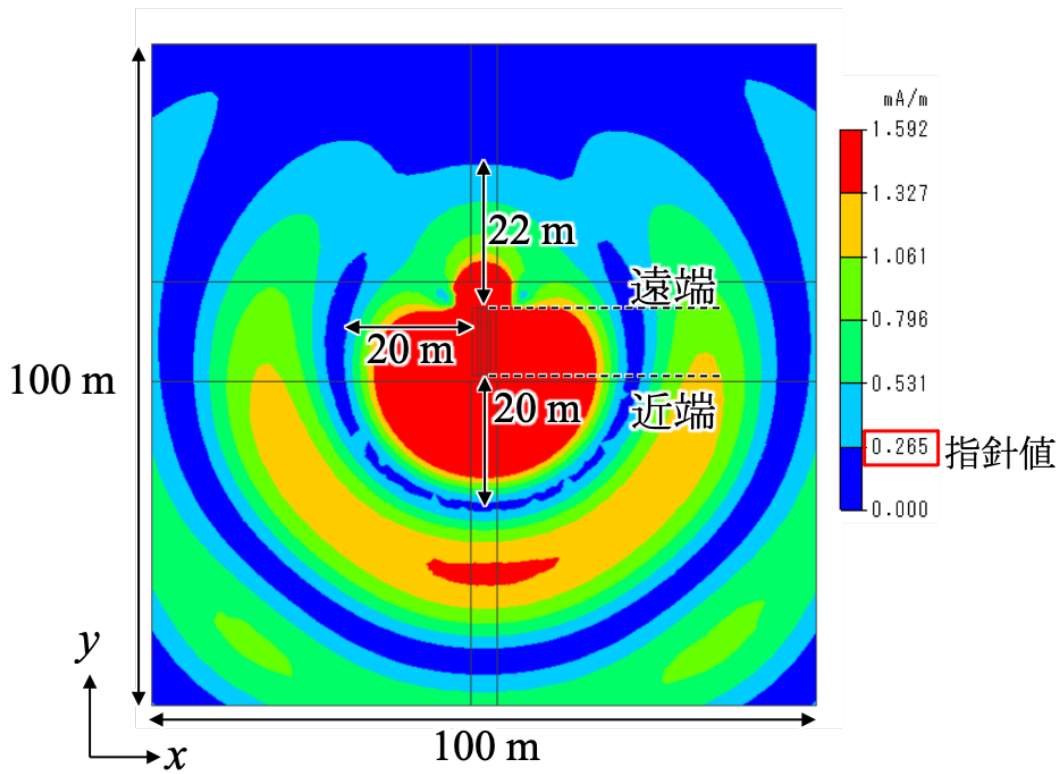


图4.2-17 受電電極中央xy断面遠方磁界分布

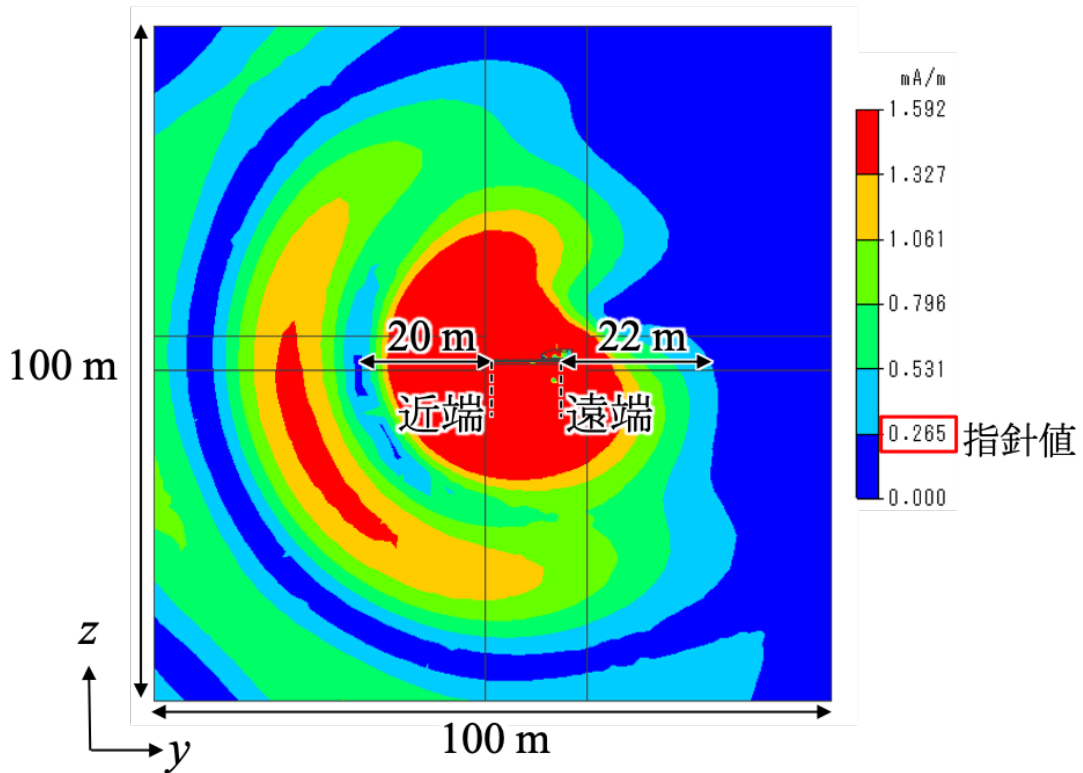


图4.2-18 受電電極中央yz断面遠方磁界分布

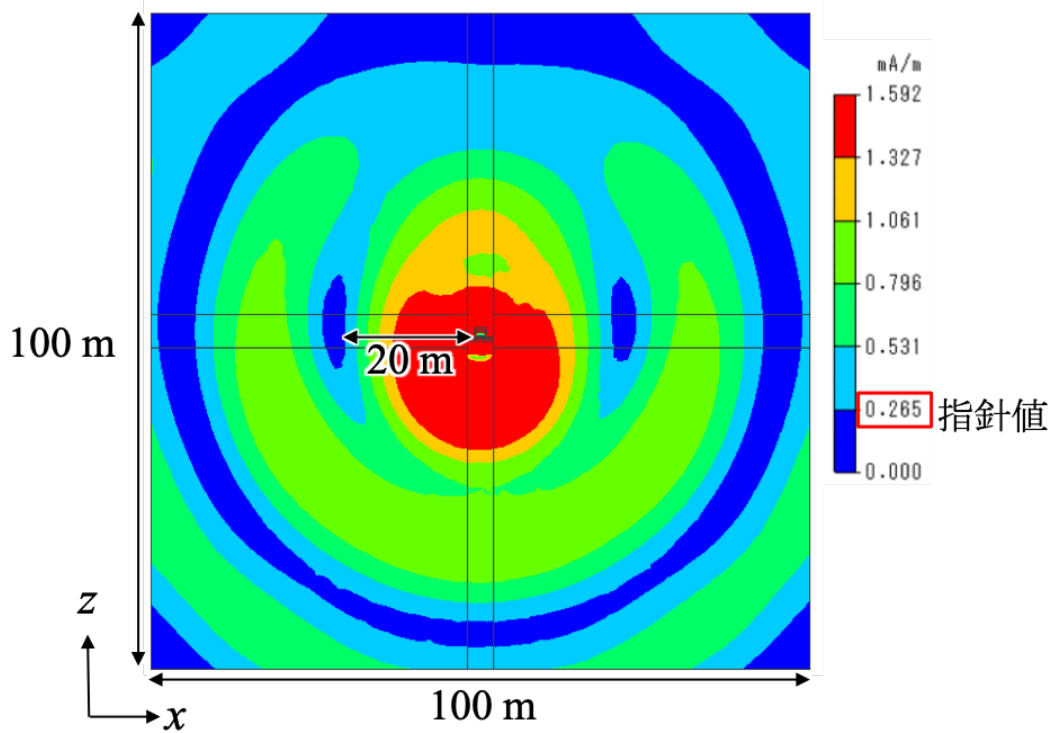


図4.2-19 受電電極中央xz断面遠方磁界分布

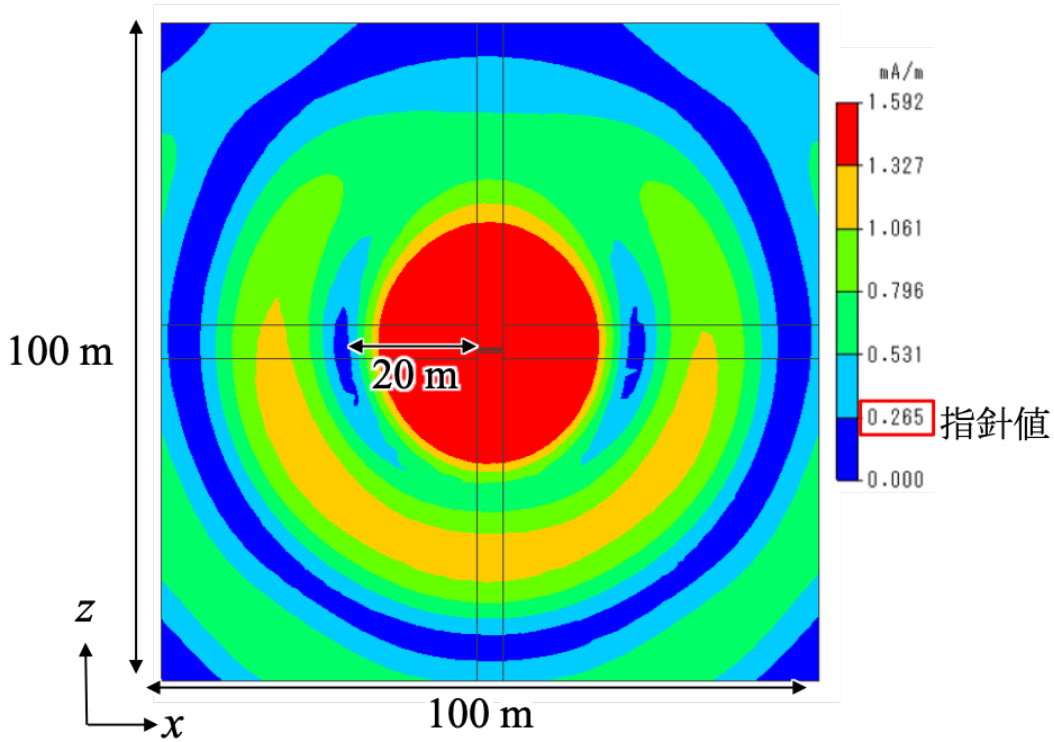


図4.2-20 道路近端から0.5m地点のxz断面遠方磁界分布

#### 4. 3 本章のまとめ

本章では漏えい電磁界抑制・対策技術開発に向けた検討について報告し、以下に示す知見を得た。

4. 1節の電磁界強度に関する規制値では、電波のエネルギーが人体に与える影響について検討し策定された電気通信技術審議会答申「電波利用における人体の防護指針」（平成2年6月）及び「電波利用における人体防護の在り方」（平成9年4月）並びに情報通信審議会答申「局所吸収指針の在り方」（平成23年5月）を基に本道路システムにおける適合性を評価した。結果、本道路システムに利用する6.78MHzにおける指針値は電界強度が121V/m、磁界強度は0.3A/mの指針値となることが示された。また、放射妨害波に関する規制値についても評価を行った。その結果、電界強度の規制値は100mV/m @30m(100dB $\mu$ V/m @30m)、磁界強度の規制値は265.3 $\mu$ A/m @30m(48.5dB $\mu$ A/m @30m)で評価されることが考えられる。

4. 2節の電磁界漏えいシミュレーションでは、道路システムの概念設計図をモデル化し、10kWの電力を電気自動車を受電することを想定したシミュレーションを行った。総務省情報通信審議会情報通信技術分科会電波利用環境委員会において平成26年度に審議された「人体防護に関する規制値」および「放射妨害波に関する規制値」に対する適合性を満足することを達成目標とした。その結果、道路側面方向に0.5m、道路近端から離れる方向に1m、遠端から離れる方向に0.7m、道路表面から1.5m高さの位置で「人体防護に関する規制値」を満足することを見積もることができた。加えて、車内においても人体防護指針を満たし、搭乗者に対しても安全が期待できることがわかった。また、道路側面方向に21m、道路近端から20m、遠端から15m離れることで「放射妨害波に関する規制値」を満たす可能性を示すことができた。これらの結果より、実測により「人体防護に関する規制値」および「放射妨害波に関する規制値」を満たすことが期待できる。

## ⑦本格研究の見通し

### 【研究目標の到達レベル】

本研究では、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE、2013～2015年度）において実証した「電界結合方式による無線給電道路システム（送電電力3kW、受電電力1kW）」の成果を発展させ、より高効率で汎用性に優れた無線給電道路システムを開発する事を目的とする。今年度のFS研究の結果を踏まえた本格研究の成果の見通しを以下に示す。

#### （1）無線給電道路システムの体系化技術の開発

走行中電気自動車への無線給電道路システムの効率は、送電電力10kWにおいて、受電電力7kWを目標とした。令和2年度（FS研究）においては、無線給電道路システム（道路構造、舗装材料、無線給電設備、排水計画、給電制御など）の概念設計および無線給電設備の効率化検討を行った。その結果、長さ20m、幅3.5mの道路システムを想定した場合の伝送効率は87%であることを見積もることができ、次年度以降の研究で予定している、電気自動車の車載回路の検討を進めることで研究目標は達成できる見込みである。また、FS研究では、送電周波数は13.56MHzとして当初計画を進めた。しかし、令和2年10月9日から開始した総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会ワイヤレス電力伝送作業班における、近接結合型ワイヤレス電力伝送システムの「走行中ワイヤレス給電システムの標準化審議」として、電界結合方式は500kHz帯および6.78MHz帯の利用が提案された。そこで、本研究は、送電周波数を6.78MHzに変更する。これにより、6.78MHz帯の高周波電源や車載回路が汎用化し、低価格化が実現できると考えている。

#### （2）舗装材料・構造及び施工技術の開発

本研究で提案する無線給電道路システムでは、舗装の防水性や路盤の排水性を向上させるための改良として、セラミック骨材や雨水浸透材などの在来の道路舗装では汎用されない材料を使用する。そこで、これらの各種舗装材料の材料実験を行ない、その結果に基づいて、理論設計法に基づく舗装断面の概略設計を行なった結果、従来の舗装設計方法によって導いた舗装断面であれば無線給電機能を有する小型道路として成立できることが確認できた。なお、ここでは小型車専用道路路対応（標準荷重：17kN）で、交通量区分S2（日交通量が300～650台）の10年供用を前提条件とした。実際の運用においては、無線給電機能は持たないが標準荷重17kN相当を超える大型車両（荷重49kN等）が走行する可能性も想定されることから、この種の大型車両の通行に対する舗装断面を試算した結果、短期では適用できる資産結果が得られた。長期の適用については、使用材料の改良も含めて、今後の本格研究において検討を進める予定である。

設定した舗装断面について、小面積ではあるが試験施工を実施した結果、新たにセラミック骨材の使用や雨水浸透材の敷設作業が生じるが、これらは在来工法の範疇で合材製造や施工できること、一般的な施工管理で精度良く層厚管理できることが確認された。なお、走行性に影響する路盤の弾性係数について実測値が不十分な結果となった。ただし、これらについては、雨水浸透材や上層路盤等の改良により比較的容易に対応できると考えられ、今後の本格研究において改めて改良、検討を進める予定である。

本研究で提案する無線給電道路では、無線給電に必要な材工費の他、セラミック骨材や雨水浸透材などの在来工法では汎用されていない材料を使用しているため、一般的な小型道路の材工費の8倍程度と見込まれる。機械施工への積極的な転換による施工の効率化など、本格研究では、材料・施工面でのコストダウンを図り、無線給電道路の実装に向けた全体最適化設計を進める予定である。

### **(3) 路車連携による給電制御技術の開発**

令和2年度は、無線給電道路システムにおいて電気自動車の位置把握及び給電制御に必要な条件を整理し、給電制御装置に関する概念設計を行った。次年度以降の研究において、EVの位置検知システムおよびEVから路側の受信機に通信するシステムの試作と基礎実験を行い基本仕様へ反映する予定である。

### **(4) 漏えい電磁界抑制・対策技術の開発**

無線給電道路システムの漏洩電磁界は、総務省情報通信審議会情報通信技術分科会電波利用環境委員会において平成26年度に審議された「人体防護に関する規制値」および「放射妨害波に関する規制値」に対する適合性を満足することを達成目標とした。道路システムの概念設計図をモデル化し、10kWの電力を電気自動車を受電することを想定したシミュレーションを行った。

その結果、車内および車外の道路システムから路側方向に0.5m離隔した位置における電界強度および磁界強度は「人体防護に関する規制値」を満足することを見積もることができた。また、道路システムから30m離れた位置での電界強度および磁界強度は「放射妨害波に関する規制値」を満足することを見積もることができた。

本格採用後は、令和3年度に5m長の道路システムの試作と漏えい電磁界実験を行い、総務省に対して高周波利用設備の設置申請および認可を予定する。令和4年度および令和5年度は、法適合性を有した40m長程度の道路システムの建設を行い、安全に利用するためのガイドラインを作成する。したがって、目標は達成できる見込みである。

#### **【当初計画からの変更点】**

高周波電源装置の送電周波数は13.56MHzとして当初計画を進めた。しかし、令和2年10月9日から開始した総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会ワイヤレス電力伝送作業班における、近接結合型ワイヤレス電力伝送システムの「走行中ワイヤレス給電システムの標準化審議」として、電界結合方式は500kHz帯および6.78MHz帯の利用が提案された。そこで、本研究は、送電周波数を6.78MHzに変更する。これにより、将来的な6.78MHz帯の高周波電源や車載回路が汎用化と、低価格化に即応した実装が円滑に実現できると考えている。



## ⑧特記事項

### 【F S研究から得られた知見】

無線給電道路システムに採用した電界結合方式において、防水性や排水性を高めて舗装内の滞留水の影響を低減することは、伝送効率の向上に極めて有効である。そこで、本F S研究において、表層・基層および上層路盤にセラミック骨材を用いることで防水性を高め、さらに、雨水浸透材を積層した下層路盤により排水性を改良した新たな舗装構成とすることで、高い伝送効率を有する無線給電道路システムの実現が可能であるとの知見を得た。

また、この無線給電道路システムは、設計・施工・維持管理を通じて、従来の設計の考え方や施工方法の範疇で概ね対応が可能であり、比較的容易に実装できる可能性が得られた。

さらに、無線給電道路におけるコストアップの大きな要因となっている高周波電源および付属設備（給電制御装置、整合回路、埋設ケーブルなど）などの設備の設置において、本F S研究において開発した道路システムは、道路効率が高く、約20mに1台の高周波電源および付属設備によって無線給電できる可能性を示すことができた。

この知見は、無線給電道路システムのインフラ整備に必要な設備投資のコストダウンに大いに貢献できるものと考えている。

### 【進捗の達成度】

A：目標とする成果が得られた。

### 【標準化への取組み】

総務省 情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会ワイヤレス電力伝送作業班における、近接結合型ワイヤレス電力伝送システムの「走行中ワイヤレス給電システムの標準化」として、電界結合方式（6.78MHz帯）を提案し、審議が開始された。

標準化によって、工場や物流施設で稼働する多くのビークルやロボットに実装される可能性が高く、汎用化が進むことで電界結合方式の無線給電システムの低コスト化が促進されることが期待される。なお、現在審議中の第一ステップの標準化モデルは、利用環境が屋内に限定され送信電力4kW以下、送電電極5m以下の制限があるが、屋外利用や大容量化へのニーズが高いことから、第二ステップとして屋外利用、送電電力の拡張、送電電極の伸長について、総務省に対する標準化提案の窓口になっているブロードバンドワイヤレスフォーラムへ提案する予定である。この際、本F Sにおいて道路システムからの漏えい電磁界が比較的低い値であることを見積もることができたため、標準化モデルとして提案に至る可能性は高いと考えている。