

# ワイヤレスメディアの車載受信性能に関する 評価手法の研究

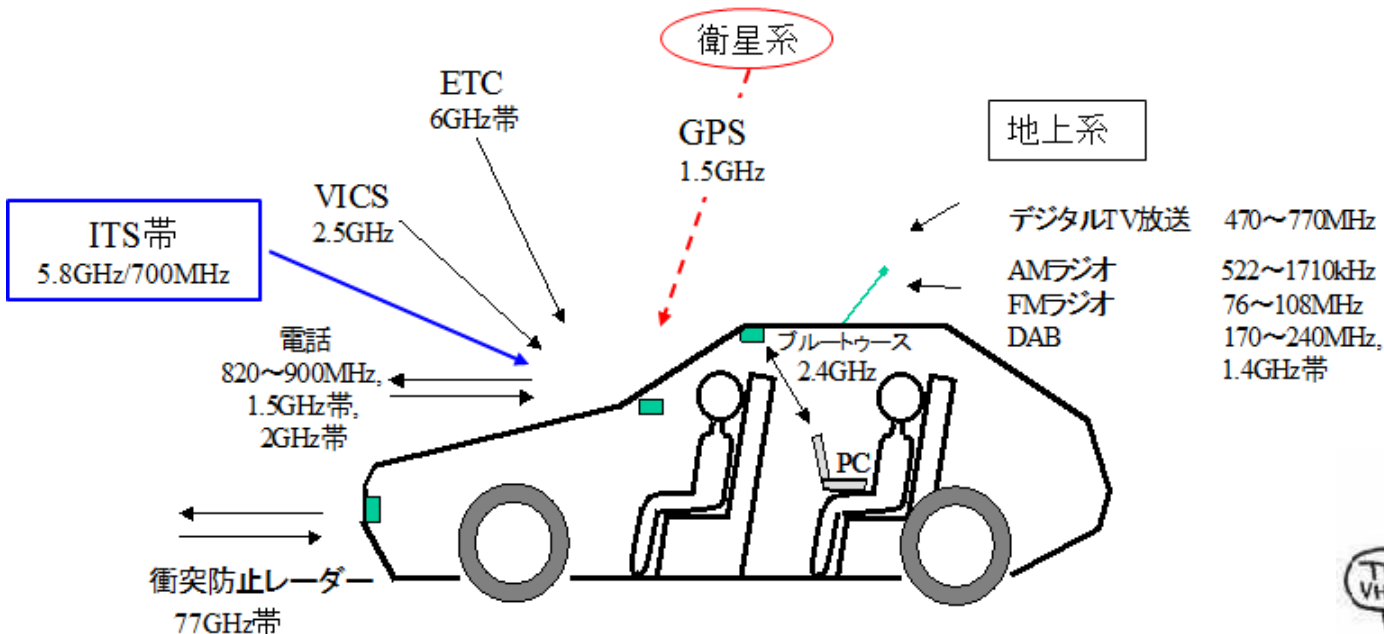
応用環境システム学専攻  
小松 覚

# 査読論文リスト

- [1] 小松覚, 芹澤幸宏, 長尾朗, 今井卓, 田口健治, 柏達也, "FM放送波の多重波到来方向と伝搬遅延時間のMUSIC推定に関する実験的検討," 自動車技術会論文集, vol. 46, no. 2, pp. 565-570, Mar. 2015.
- [2] S. Komatsu, S. Imai, K. Taguchi, T. Kashiwa, "Development of Tool for Evaluation of Automotive Conformity of FM Receiver Using Two-Stage Method," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 8(1):170-179, 2015 doi:10.4271/2015-01-0225
- [3] 小松覚, 唐沢好男, "Two-Stage法フェーディングエミュレータを用いた車載FM受信機のマルチパスひずみ率の測定法" 自動車技術会論文集, vol. 47, no. 1, pp. 215-220, Jan. 2016.
- [4] S. Komatsu, S. Imai, K. Taguchi, and T. Kashiwa, "Incoming Wave Estimation Characteristics by MUSIC Method Using a Virtual Array Antenna in Urban Reception Conditions," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 9(1):123-133, 2016, doi:10.4271/2016-01-0077
- [5] S. Komatsu, Y. Karasawa, S. Imai, K. Taguchi, and T. Kashiwa, "Development and Application of FM Multipath Distortion Rate Measurement System Using a Fading Emulator Based on Two-Stage Method," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 9(1):160-170, 2016, doi:10.4271/2016-01-0082
- [6] S. Komatsu, A. Nagao, T. Suzuki, and N. Kubo, "Positioning Simulation Using a 3D Map and Verification of Positional Estimation Accuracy in Urban Areas Using Actual Measurement," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.* 9(1):171-179, 2016, doi:10.4271/2016-01-0083

# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
　　<地デジ, GPSの開発例と技術課題>
3. 目的と目標
4. ワイヤレスメディアに関する評価手法
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
　　MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ



ITS: Intelligent Transport Systems (高度道路交通システム)  
GPS: Global Positioning System (全地球測位システム)  
ETC: Electronic Toll Collection System (ノンストップ自動料金収受システム)  
VICS: Vehicle Information and Communication System (道路交通情報通信システム)  
DAB: Digital Audio Broadcast (デジタルラジオ)

Fig. 1 車におけるワイヤレスMediaの現状



Fig.2 最適化前の車載アンテナの様子

(課題) 車載アンテナの最適設計(性能&レイアウト)には,  
Mediaごとの実証実験が必要

# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
3. 目的と目標
4. ワイヤレスメディアに関する評価手法
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ

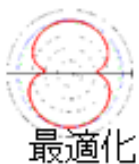
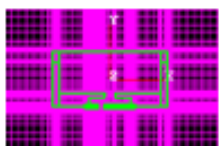
# 2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要

## 地デジの開発例と技術課題

### <車載地デジ受信システムの開発プロセス例>

#### ①アンテナ設計

(手法)電磁界シミュレーションを使った最適設計  
パターン設計

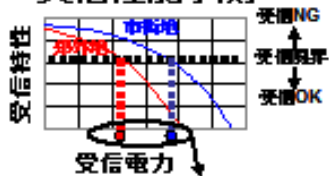


最適化



静特性測定

受信性能予測



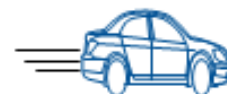
#### ②受信性能評価

(手法)定量的受信率による映像評価

受信機	受信率	モニター	映像
	0~50%		NG
受信機	受信率	モニター	映像
	50~90%		NG
受信機	受信率	モニター	映像
	90~100%		OK

#### ③広域の評価性

(手法)限定コース  
(課題)各地域の実施  
は工数的に不可能



現状の定量評価は個別段階まで、車載受信システムの評価は実証実験に依存

# 2. 車のワイレスメディアに関する開発概要

## 地デジの開発例と技術課題

### <実証実験までの準備>

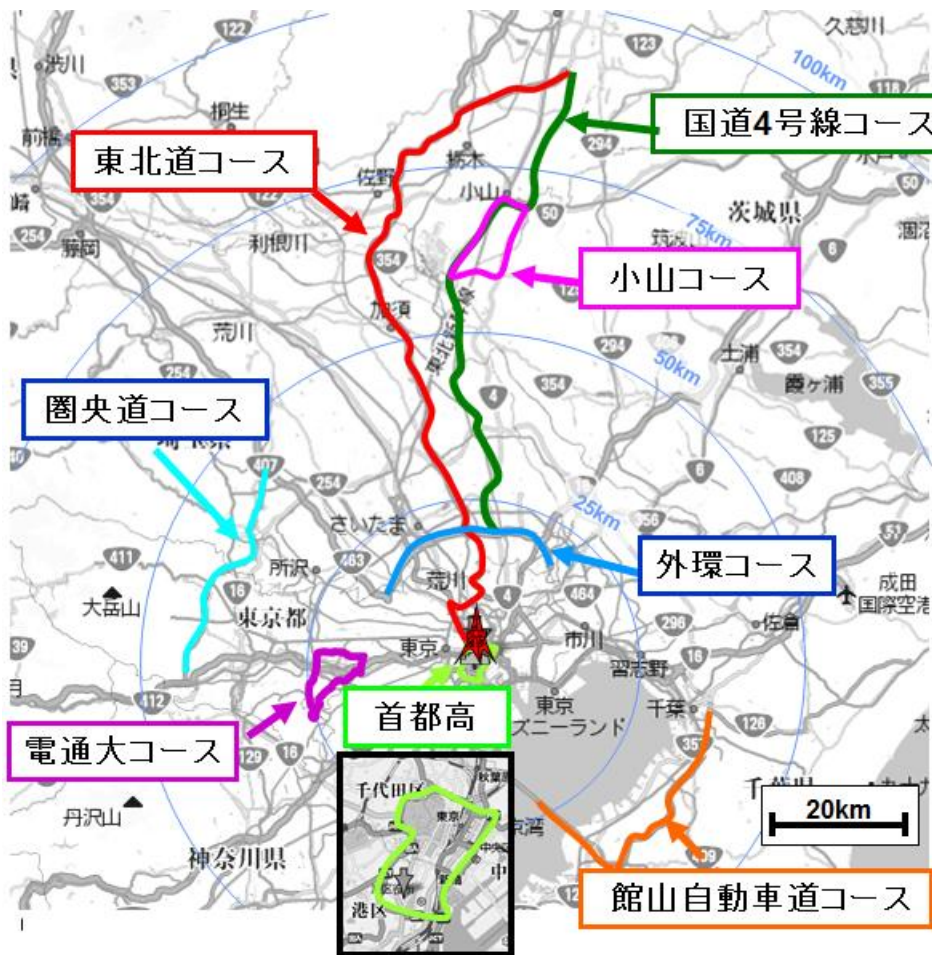


Fig.1 実証実験のテストコース

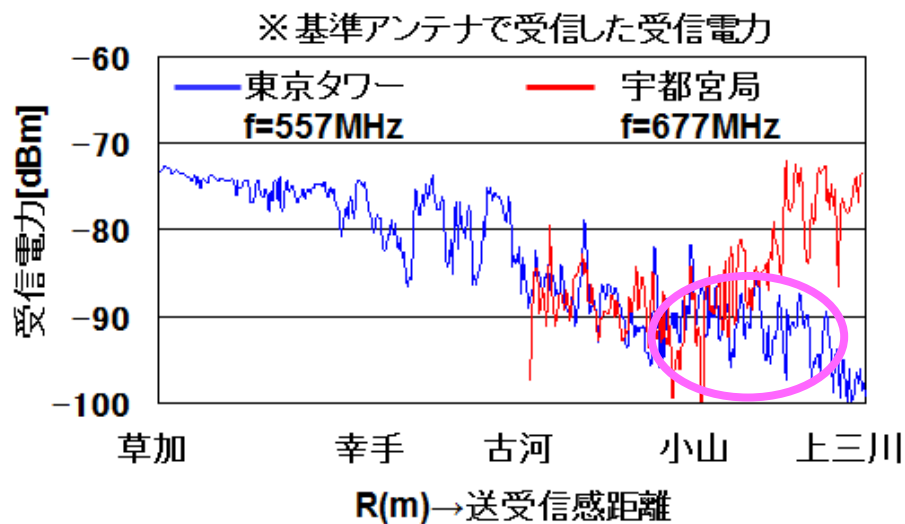
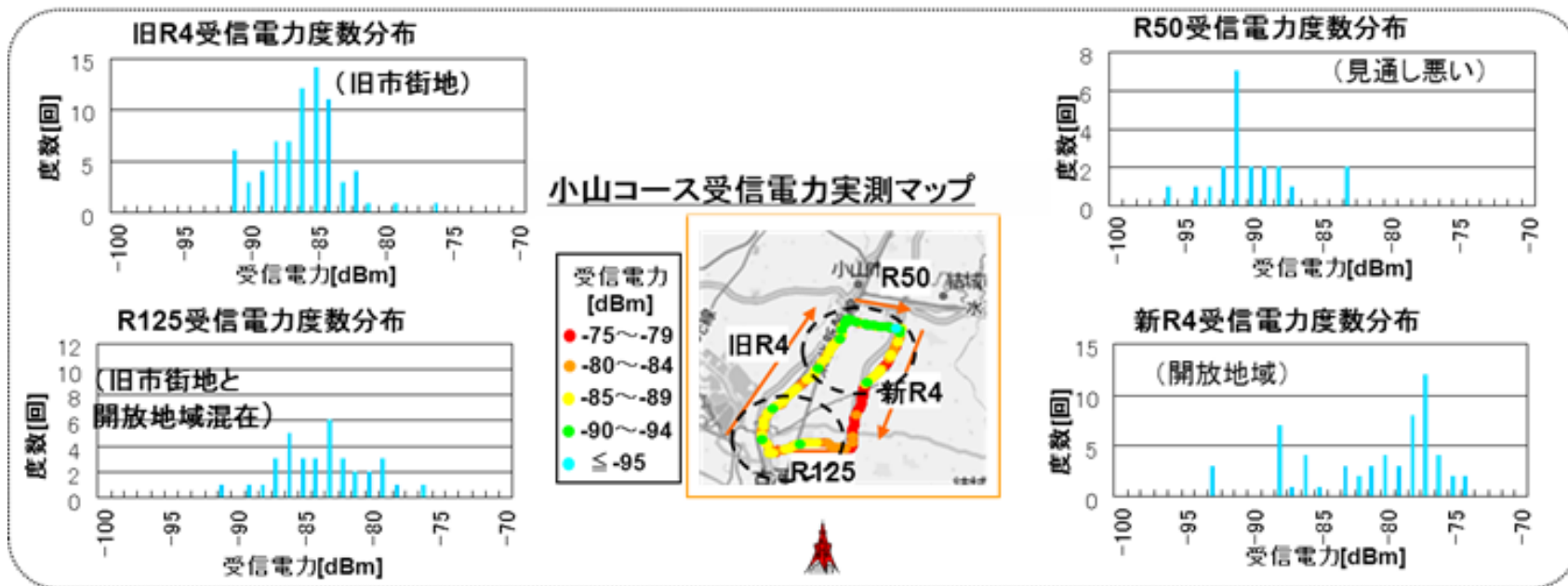


Fig.2 東京タワーと宇都宮局の受信電力特性

実証実験には膨大な準備時間が必要！

# 2. 車のワイレスメディアに関する開発概要

## 地デジの開発例と技術課題



テスト車  
(無指向性アンテナ)

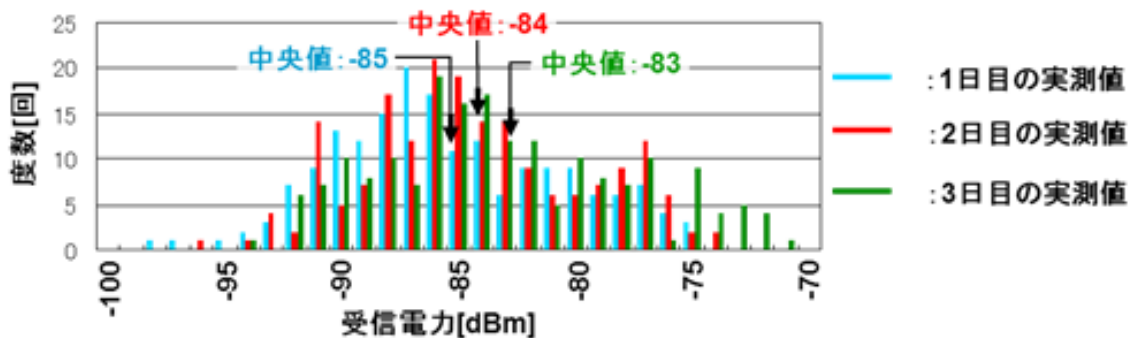
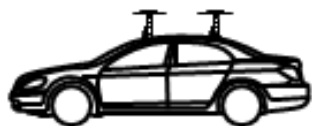


Fig.1 小山コースにおける受信電力の相対度数分布

測定日ごとに受信電力が変動する。 ⇒ 約2(dB)の変動



# 2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要

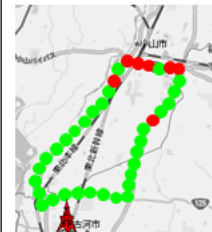
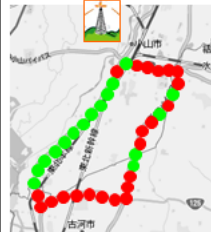
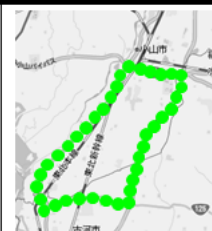


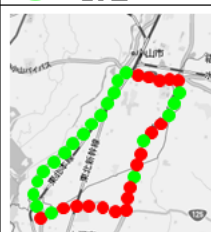
## 地デジの開発例と技術課題

### <実証実験の課題>

Table 1 受信性能に関する評価パラメータと受信率の比較結果

評価パラメータ
(1) アンテナ(利得)
(2) 受信機(最小受信感度)
(3) Diversity(アンテナブランチ数)

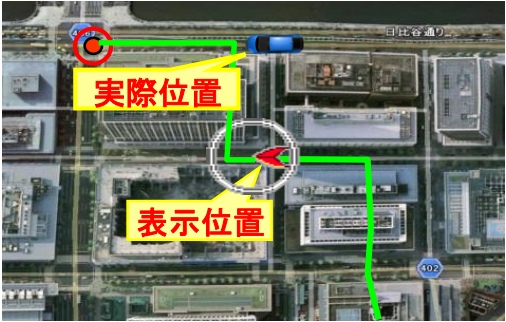



全周囲アンテナ利得差  
 $\Delta\text{Gain} = A - B \approx 2(\text{dB})$

(1)アンテナ	(2)受信機	f=557MHz	f=677MHz
A社	C	 ●の割合82%	 ●の割合42%
	D社	 ●の割合100%	 ●の割合87%
B社	D社	 ●の割合71%	 ●の割合50%

評価パラメータの性能差が受信電力の変動値と同レベルの時、  
 表1の受信率結果に大きな差異が発生する。⇒再現性のある評価手法が必要。

# 2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要

## ナビの商品課題と対策

		現行ナビの商品性の課題	
要因	①センサー精度の劣化	②地図上にない新設道路を走行	
現状ナビ			
対策	現行のGPSを高精度と高感度化して、位置精度アップ化		
解決ナビ			

今後は、積極的にGPS技術を活用して現行ナビの商品性アップする  
 更に、ITS技術と連携し予防安全デバイスのキラーコンテンツとして進化させていく。

# 2. 車のワイレスメディアに関する開発概要

## GPSの開発例と技術課題



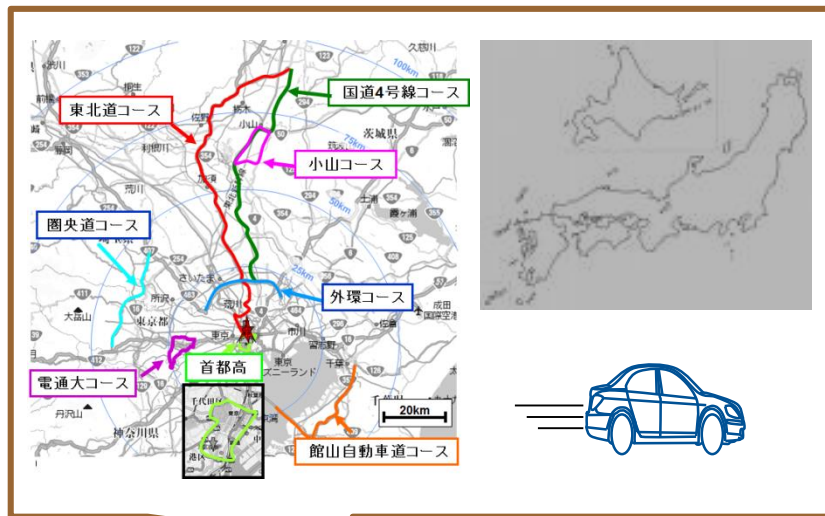
Fig.1 新宿実証実験コース

	A社受信機	B社受信機
コース全体 位置精度 ヒストグラム	<p>中央値: - 3.9m</p>	<p>中央値: - 0.9m</p>
マルチパス 多発地域 位置精度 ヒストグラム	<p>中央値: 7.5m</p>	<p>中央値: - 6.5m</p>

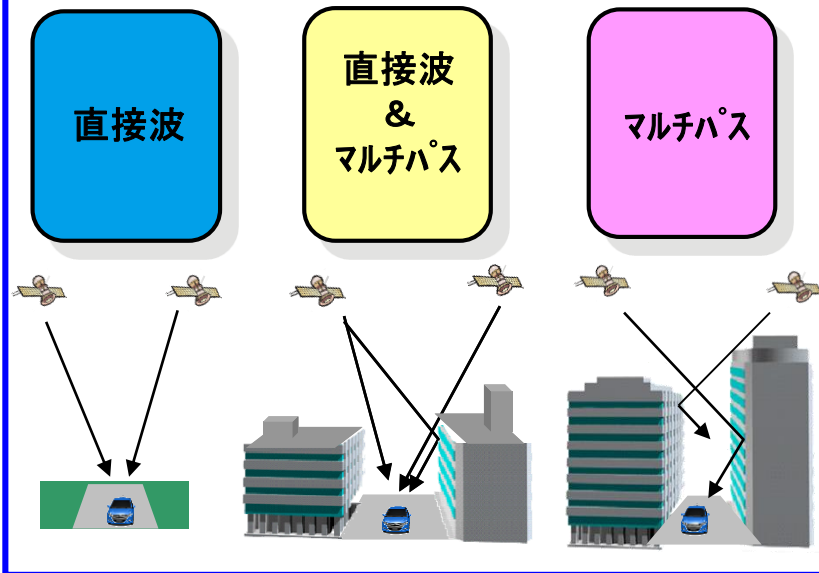
高精度な自車位置算出には、高精度な基準座標系と到来波の場合分けが必要

## <車を取り巻くワイヤレスメディアに関する評価手法の方向性>

再現性・定量的・効率的・・・いち早く車載受信特性を評価したい



シミュレーションを用いて  
時刻変化による到来波の状態を知り  
位置精度を解析したい

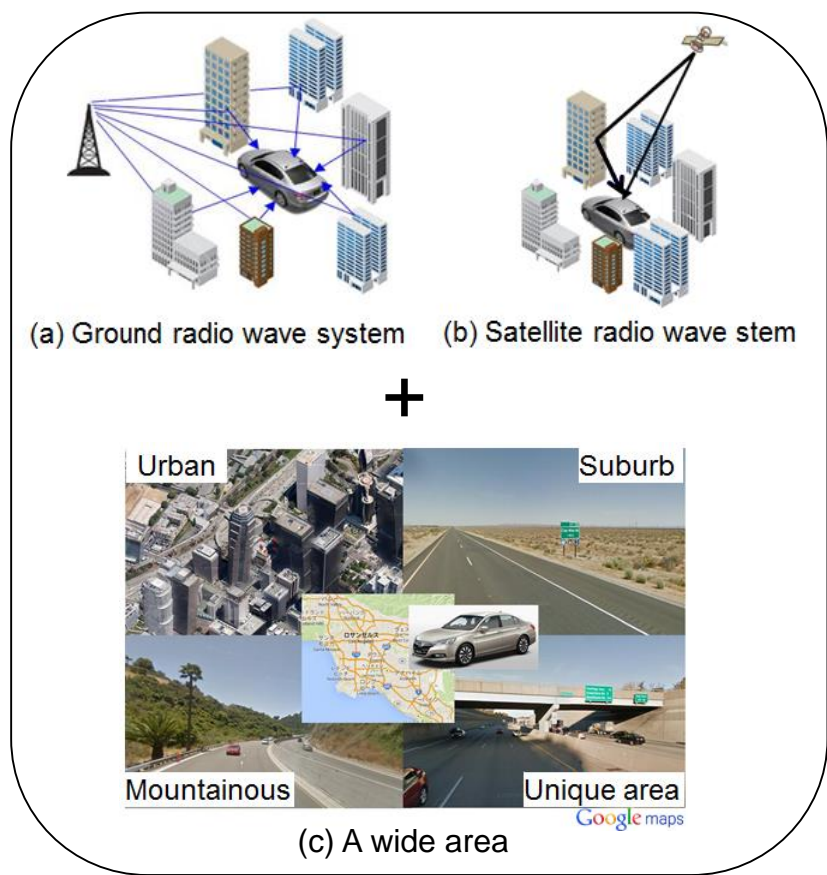


実証実験に代わって、PC上に仮想電波環境特性を作り、  
その中で車を走らせながら、メディア毎の車載受信機特性を評価したい

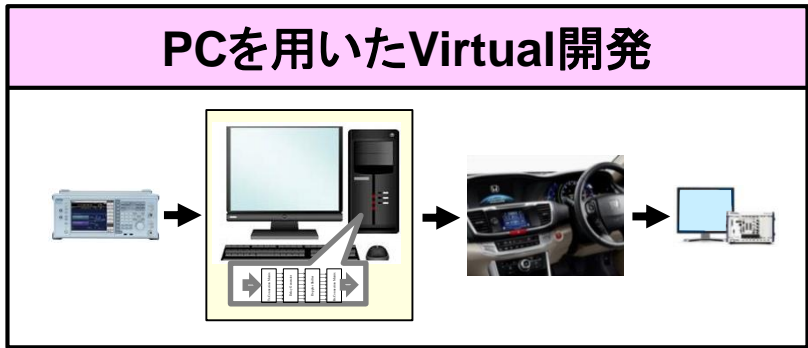
# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
- 3. 目的と目標**
4. ワイヤレスメディアに関する評価手法
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ

<目的> 実証実験に代わる, ワイヤレスメディアの車載受信性能に関する評価手法を実現する.



再現性, 定量的, 効率的な評価手法が必要



技術課題

1. 仮想電波環境の実現
2. メディア毎の到来波特性の推定
3. メディア毎の評価指標の確立

Fig.1 車載要件作りの実証実験

## 実現したい評価手法

<目標> 地上系と衛星系のワイヤレスメディアを統合した評価手法の実現

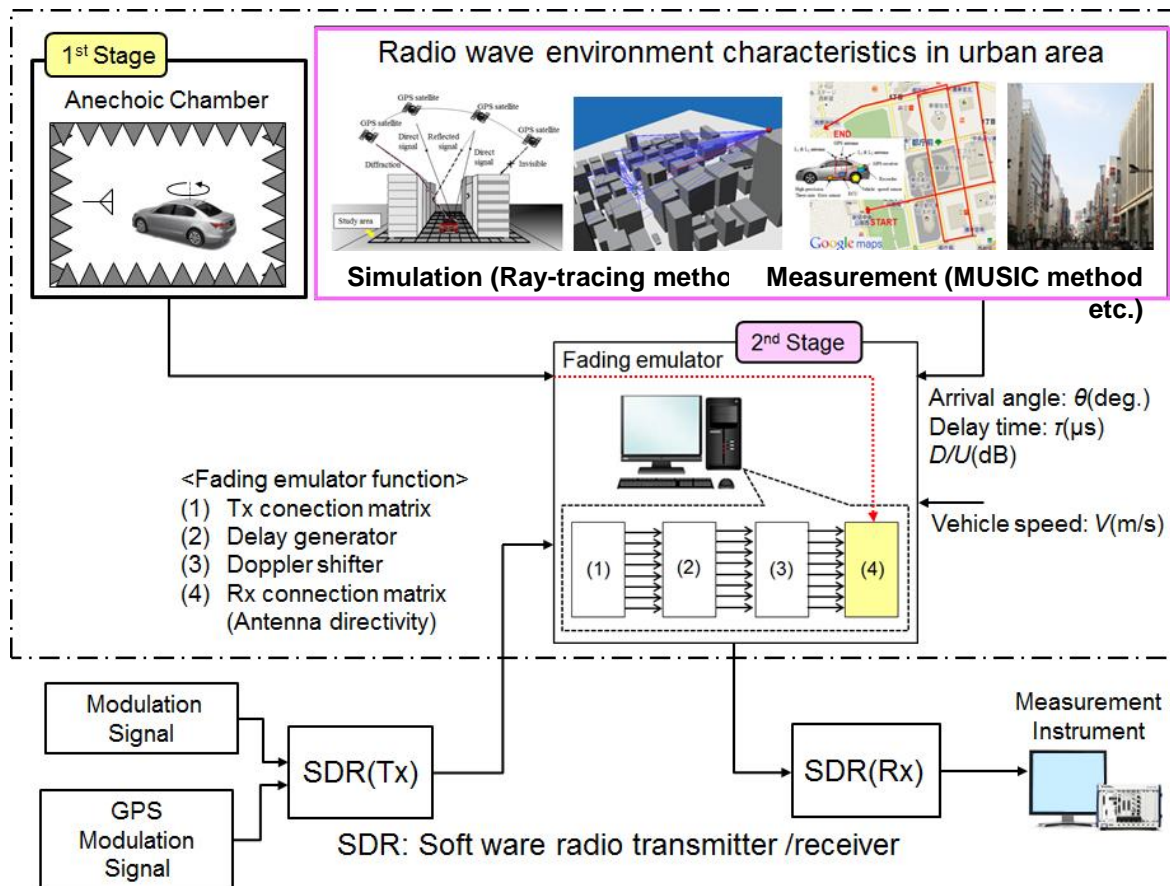


Fig.1 Block diagram of Two-Stage Method on-board Reception Performance of the Wireless Media

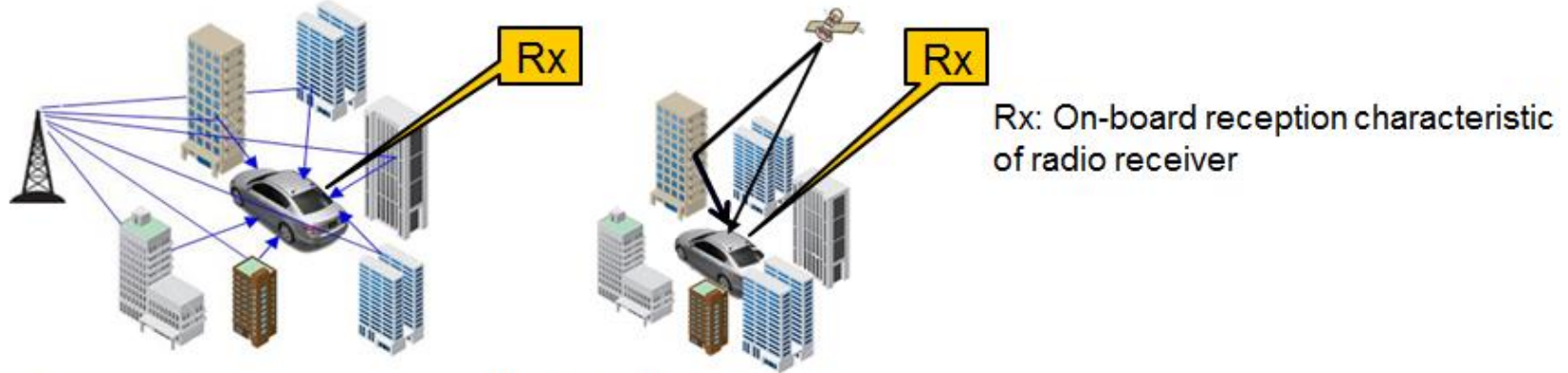
実証実験に代わって、PC上でワイヤレスメディアの  
 車載受信性能に関する評価手法を実現

# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
3. 目的と目標
4. **ワイヤレスメディアに関する評価手法**
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ



## <受信電波環境モデル(チャンネルモデル)の構成>



(a) Ground radio wave system (b) Satellite radio wave stem

Fig. 1 Radio wave environment in urban area

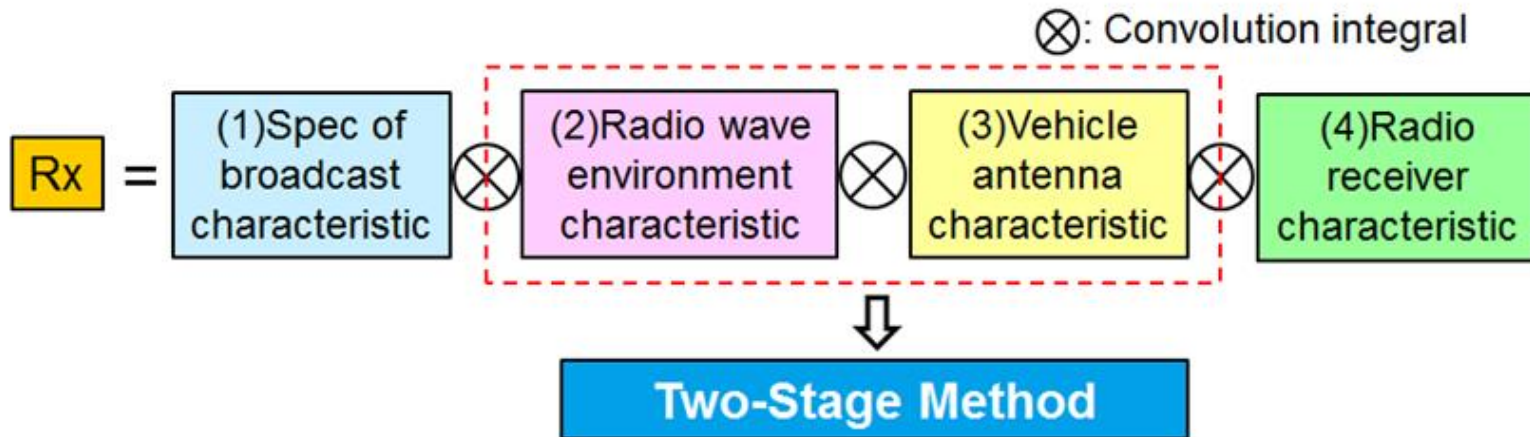


Fig. 2 Block diagram of Fading Emulator based on Two-Stage Method

PC上に(2), (3)の機能を構成し再現性, 定量的, 効率的な評価手法の実現

# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
3. 目的と目標
4. **ワイヤレスメディアに関する評価手法**
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ

## 4-1 地上系の評価手法

### <Fading emulator方式を用いたTwo-Stage法の構成>

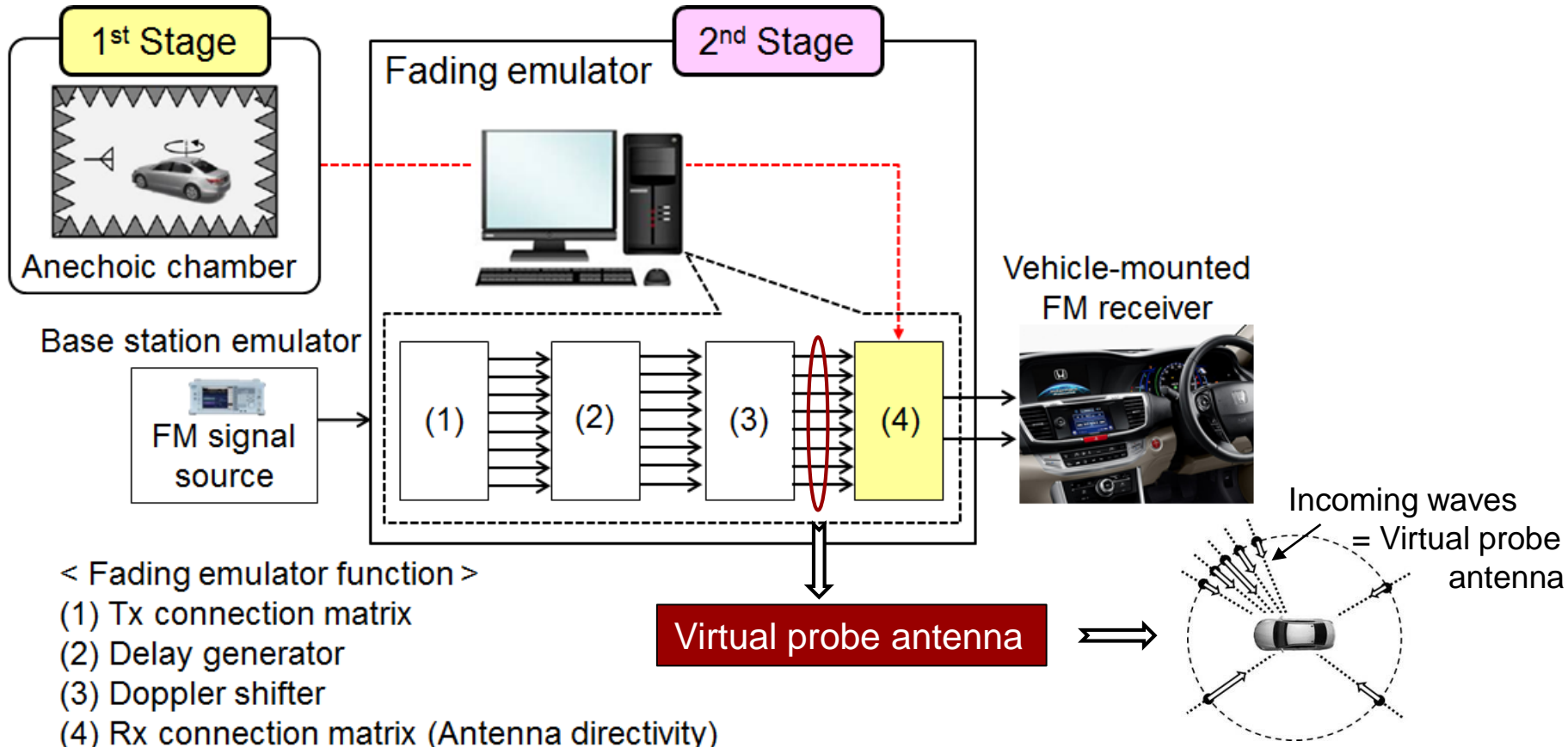


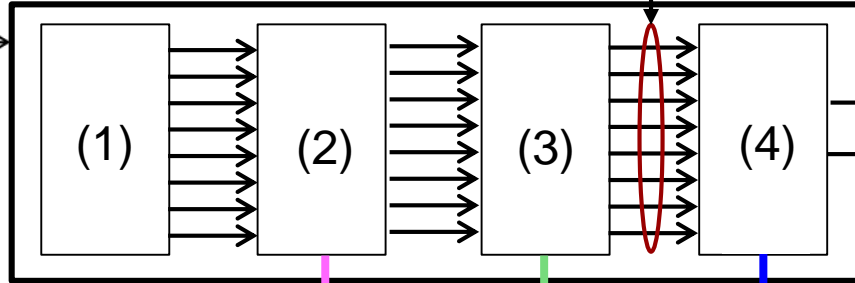
Fig. 1 Block diagram of Fading Emulator based on Two-Stage Method

Fig. 2 The model of incoming waves using the Two-Stage Method

Two-Stage法は各(1)-(4)の機能により構成

## 4-1 地上系の評価手法

### <Fading emulatorの特性>



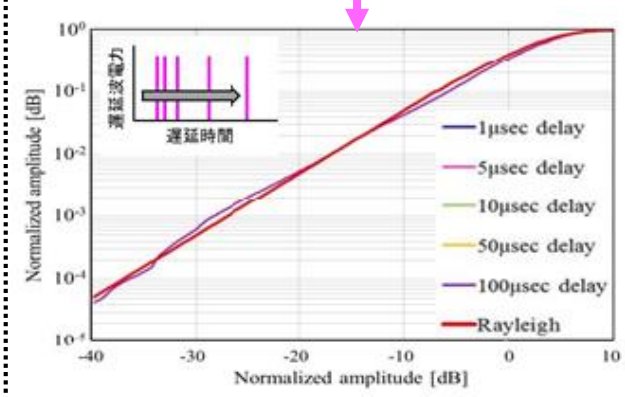
Virtual probe antenna



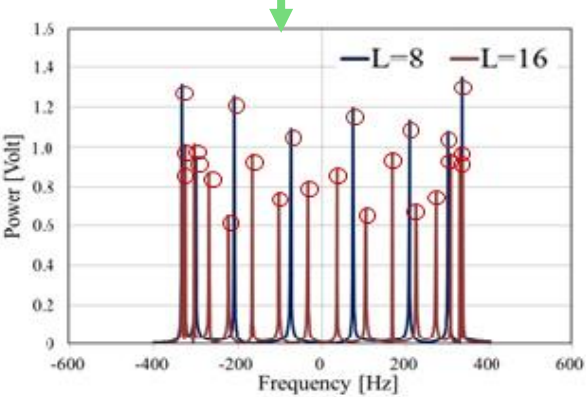
Vehicle-Mounted FM Terminal

#### < Fading emulator function >

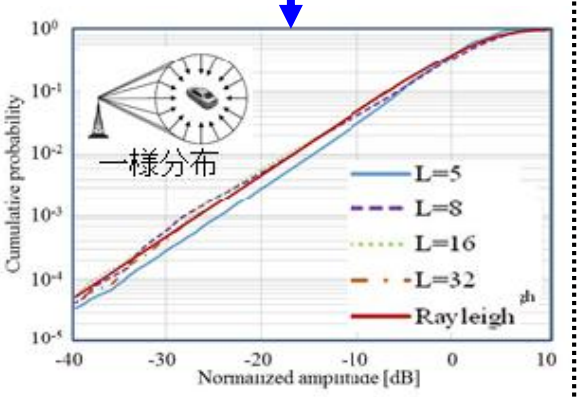
- (1) Tx connection matrix
- (2) Delay generator
- (3) Doppler shifter
- (4) Rx connection matrix



(a) Cumulative distribution of the amplitude of each delayed  
 遅延時間変化に対し  
 振幅累積分布  
 がレイリー分布に一致



(b) Frequency spectrum of the Doppler shift  
 プローブアンテナ数と  
 スペクトラムの本数が一致



(c) Cumulative probability distribution of the amplitude  
 プローブ数が8本以上で  
 レイリー分布にほぼ一致

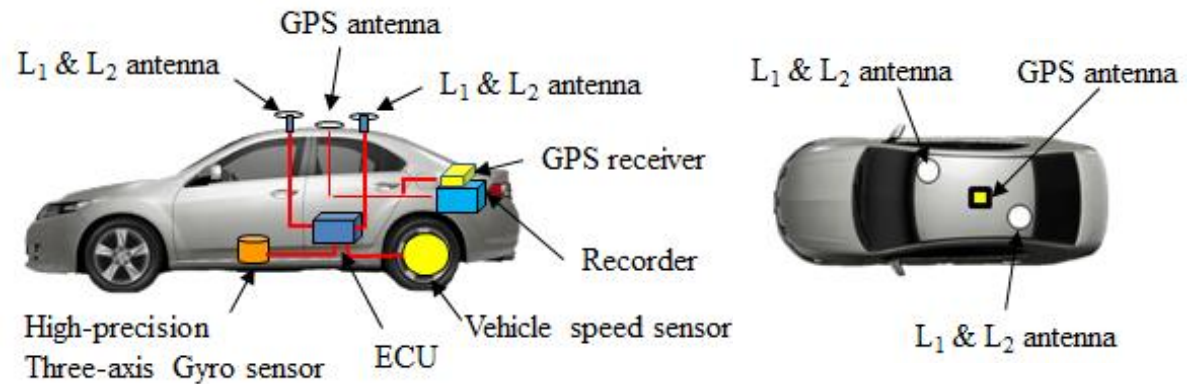
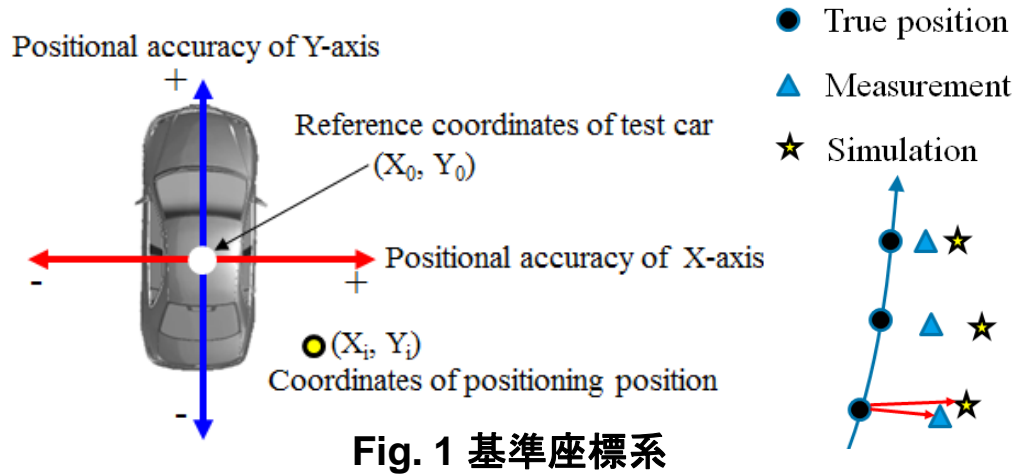
所定の機能・性能を達成, Fading emulator方式のTwo-Stage法を完成

# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
3. 目的と目標
4. **ワイヤレスメディアに関する評価手法**
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 **衛星系の評価手法**
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ

## 4-2 衛星系の評価手法

### <高精度位置計測システムと基準座標系>



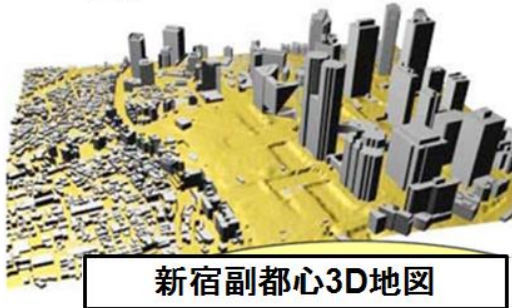
**Fig. 2 高精度位置計測システム**

提案手法: 車両のルーフ中心を原点とする基準座標系の構築

## 4-2 衛星系の評価手法

### <3D地図とレイトレーシング法を用いた自車位置の推定>

DiaMap仕様  
IKONOS衛星画像: 1m解像度  
DEM(digital elevation): 30cm解像度



新宿副都心3D地図  
Fig. 1 三次元地図

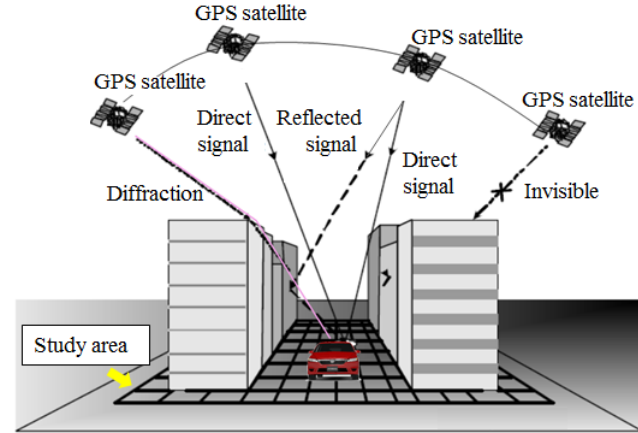


Fig. 2 市街地における伝搬経路モデルの原理モデル

### <反射波と回折波の判別>

- (1) 反射波は鏡面反射
- (2) 回折波はナイフエッジ効果

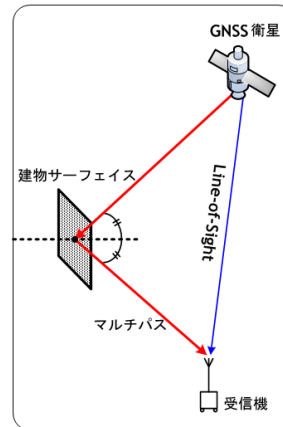


Fig. 3 マルチパスの鏡面反射

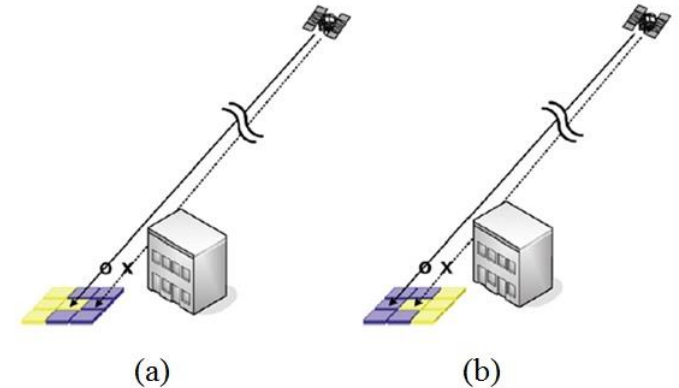
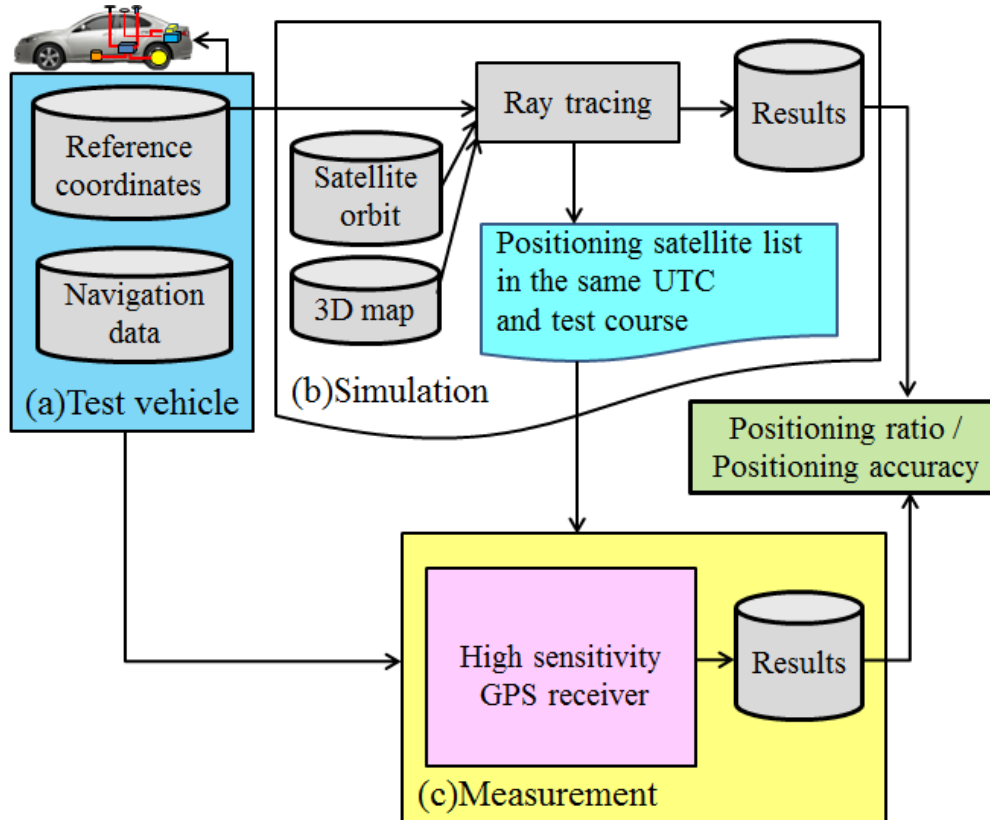


Fig.4 LOS Shift を利用した回折波の判別

3D地図とレイトレーシング法を用いた自車位置の推定を実現

## 4-2 衛星系の評価手法

### <提案手法を用いた位置精度の推定>



#### <従来手法の課題>

高精度位置計測システムがなく、基準位置が不正確。シミュレーションと実験の一致条件はUTCのみ、測位衛星が一致するか？



#### <提案手法>

1. 高精度位置計測システムを用い自車の基準位置を確立。
2. シミュレーションで,
  - ①各UTCにおける衛星番号リスト作成
  - ②受信点での到来波状態リストを作成

実験の受信機は、シミュレーションと同じ衛星番号を抽出し測位演算。

★測位衛星が一致

★実測の到来波の識別が可能。

提案手法より、シミュレーションと実験による基準座標と測位衛星を一致



# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
3. 目的と目標
4. ワイヤレスメディアに関する評価手法
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ

# 5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果

## 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法の原理

### <仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法>

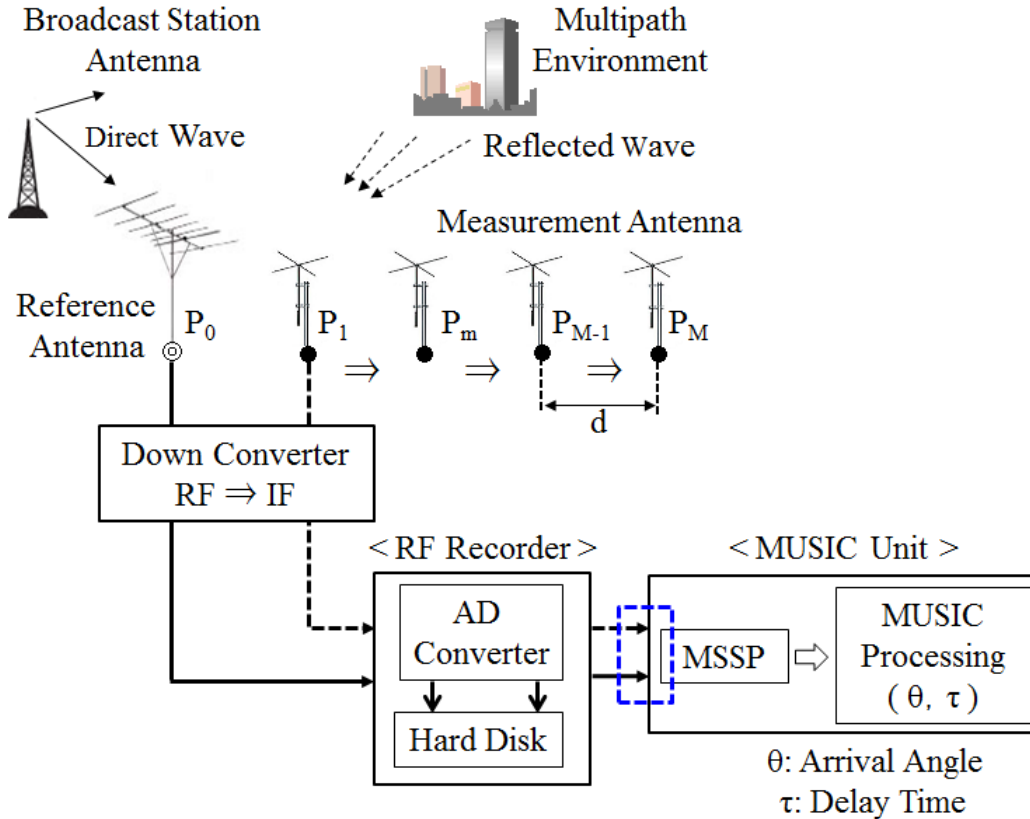


Fig. 1 Principle of the MUSIC method using virtual array antenna

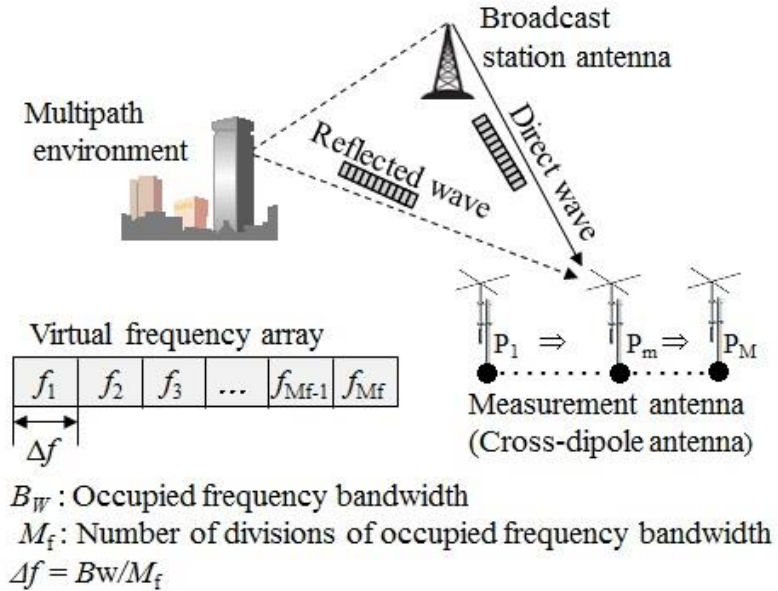


Fig. 2 Principle of delay time estimation of arrival wave

FM波の到来波推定は仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法が最適

# 5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果

## 市街地伝搬における相関抑圧法

### <相関抑圧法>

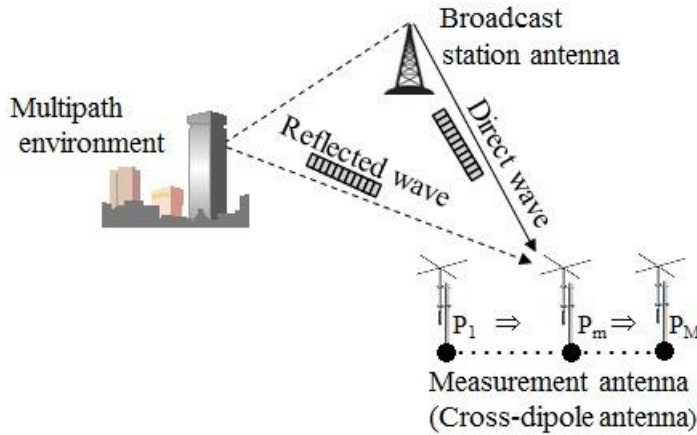


Fig.1 Radio wave environment characteristics in the urban area

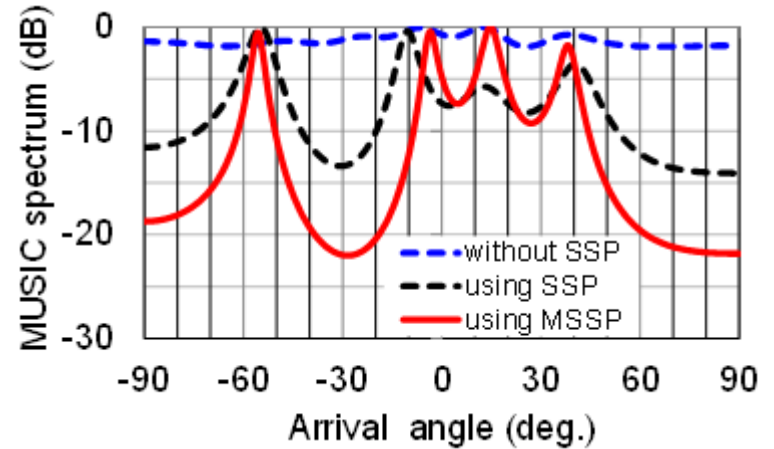


Fig. 2 Comparison result of SSP and MSSP regarding DOA estimation ( $M=15, K=10$ )

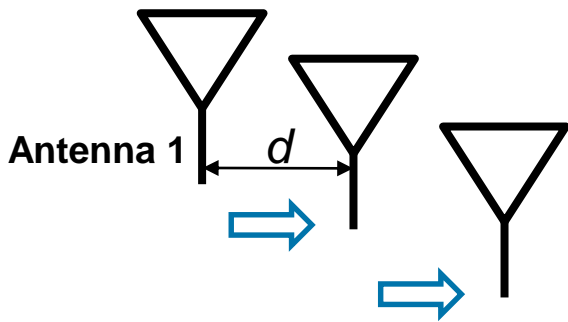


Fig. 3 Correlation suppression method of the incoming wave

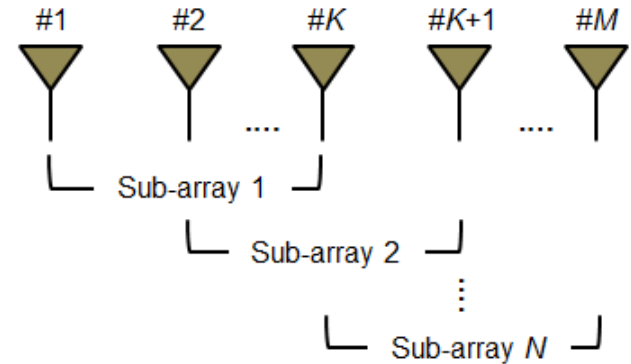


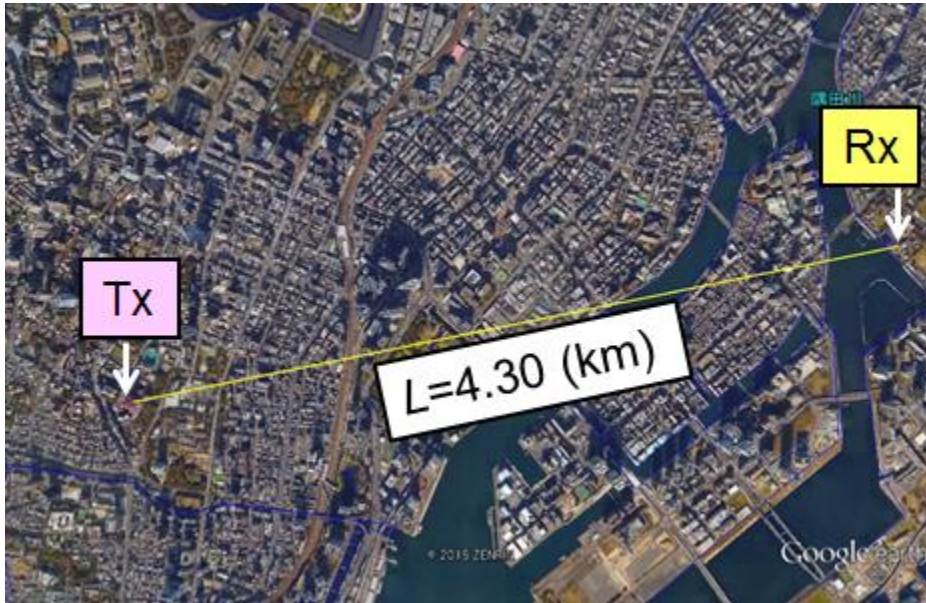
Fig. 4 Relationship of  $K$  subarray element in  $M$  element linear array

市街地におけるマルチパス波の推定は空間平均法により実現できる

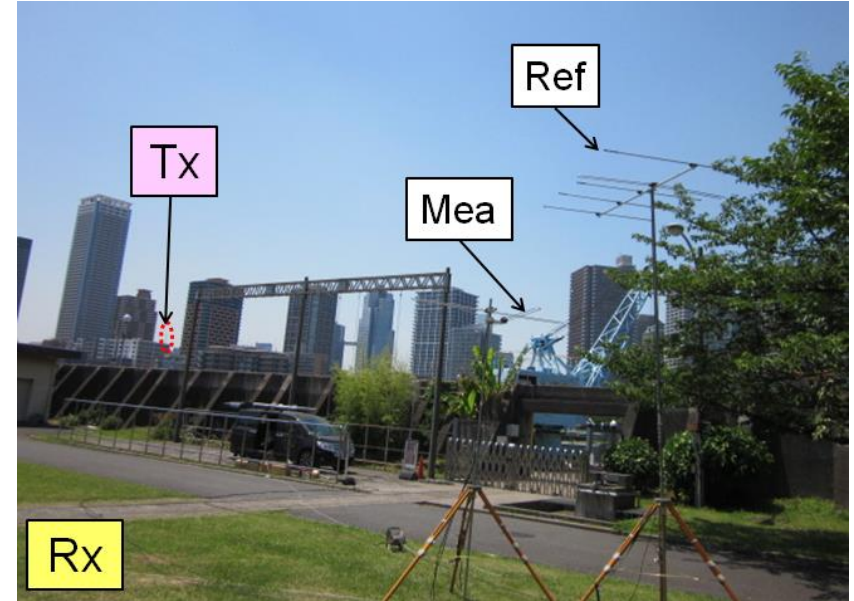
# 5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果

## 到来推定の測定環境

<仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法による実験>



(a) 送受信間の地図



(b) 受信点(越中島キャンパス)から見た送信局

Fig. 1 測定環境

Tx: Transmission point (Tokyo Tower)

Rx: Reception point (Tokyo University of Marine Science and Technology Etchujima campus)

Ref: Reference antenna, Mea : Measurement antenna

市街地のマルチパス環境として、  
送信点を東京タワー、受信点を越中島キャンパスに設定

# 5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果

## 推定結果と反射源の特定

<推定結果>

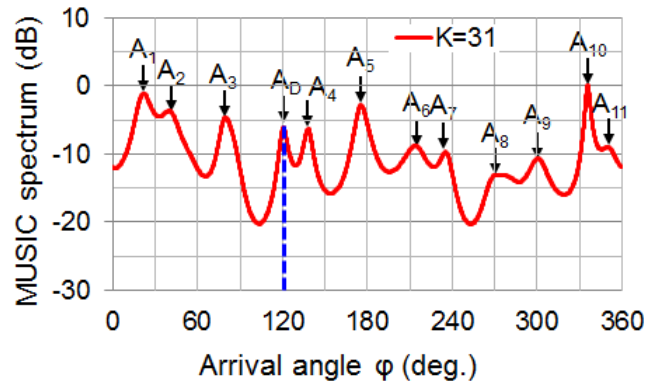


Fig. 1 Characteristics of DOA

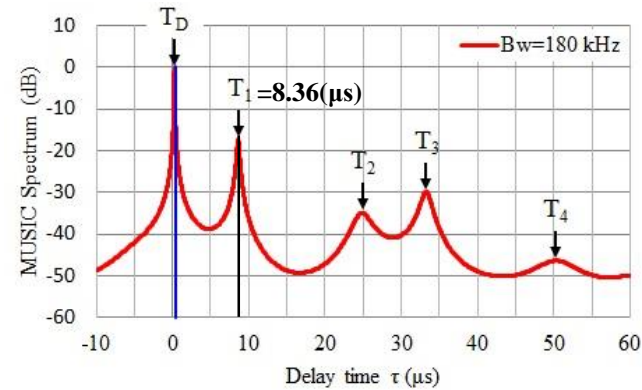


Fig. 2 Characteristics of TOA

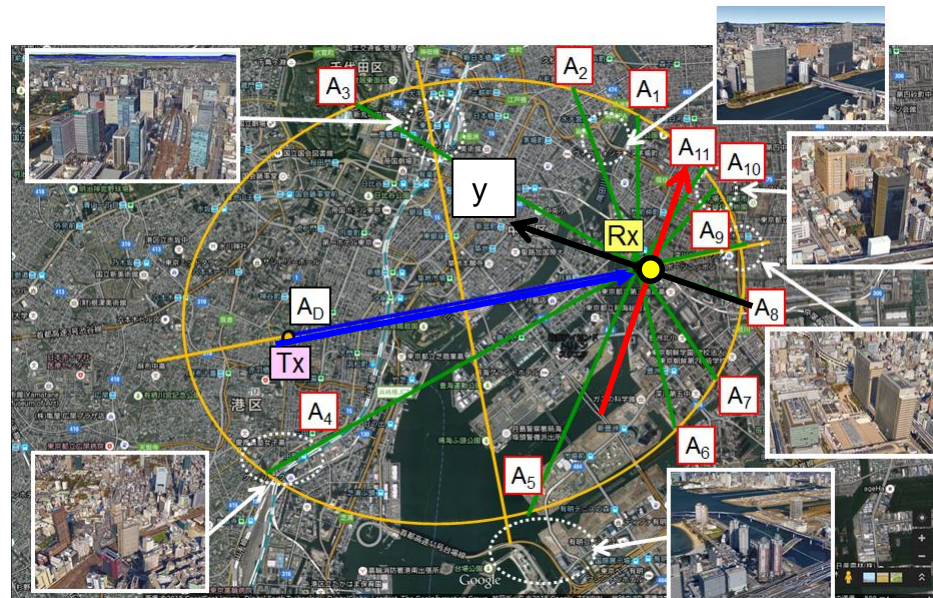
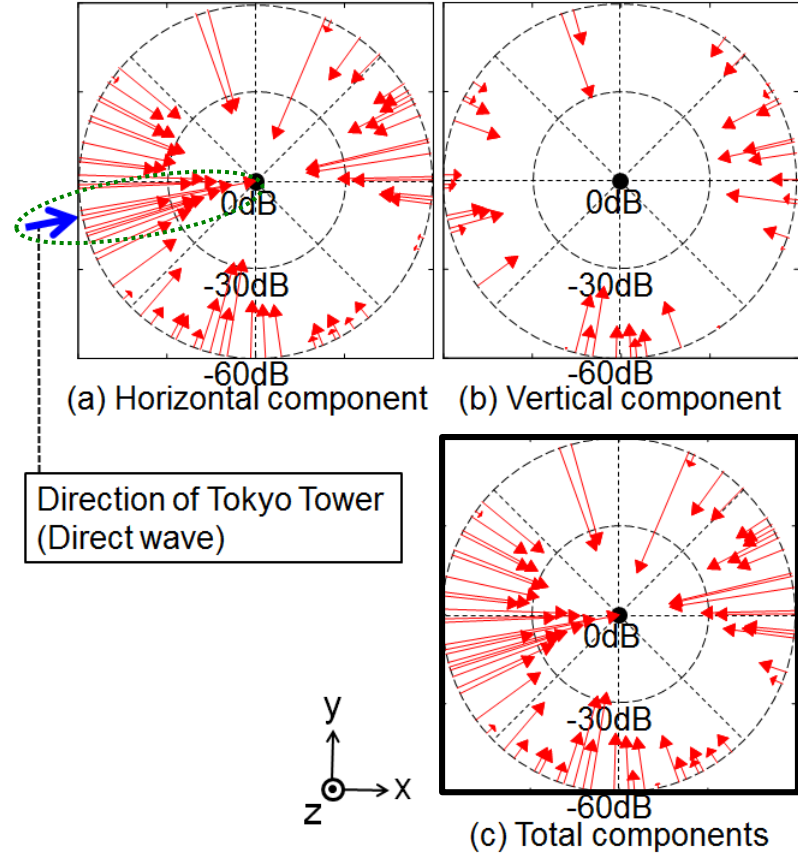
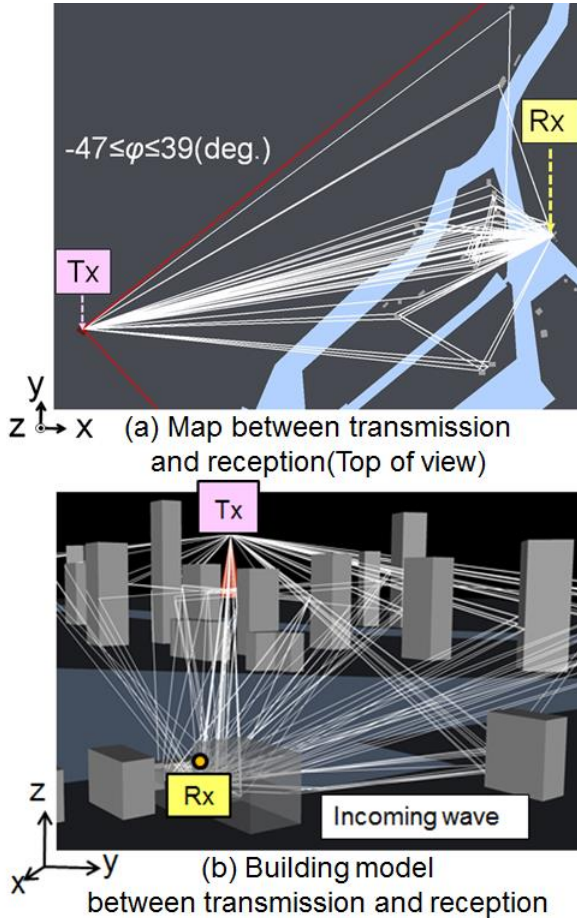


Fig.3 Estimation results of reflection sources  
 $A_D$ : Direct wave       $A_1$ - $A_{11}$ : Reflected wave

# 5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果 レイトレーシング法を用いた到来波推定結果

## <3D地図とレイトレーシング法を用いた到来方向の推定結果>



実験で  
取得可能

Fig. 2 Estimation results of DOA using ray tracing

東京タワー方向から、最大電力が送信されていることが分かる

# 5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果

## MUSIC法とレイトレーシング法の推定結果の比較

<MUSIC法とレイトレーシング法の到来方向に関する比較>

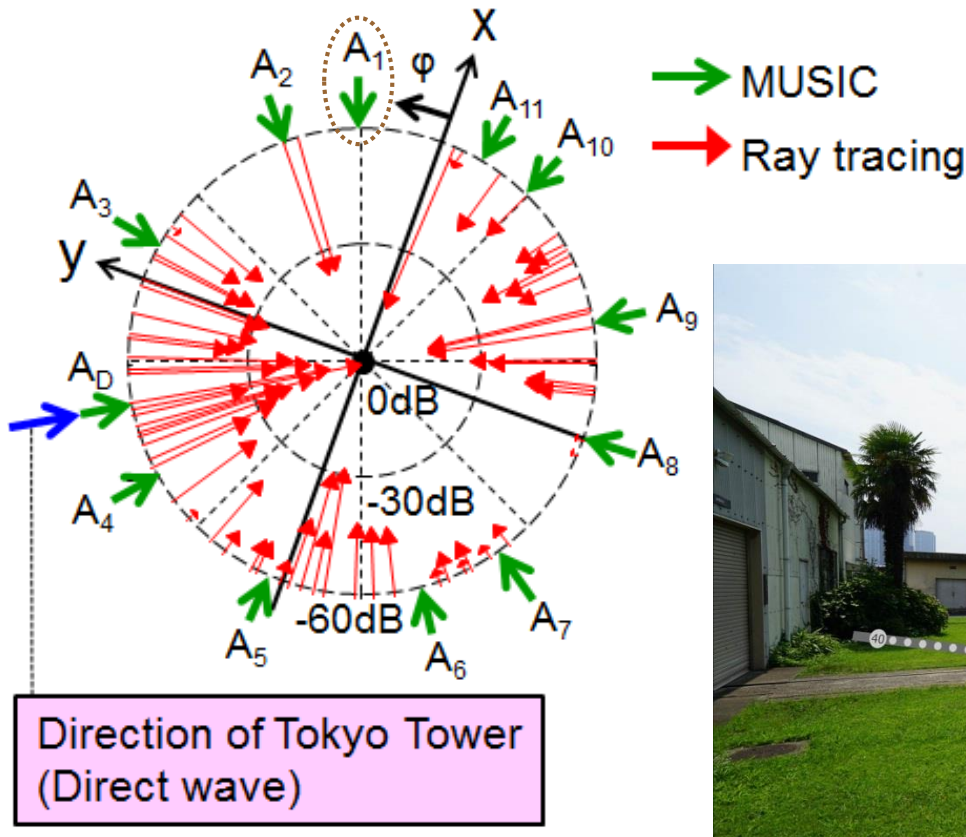


Fig. 1 Comparison of estimation results obtained by MUSIC method and Ray tracing method at reception point

MUSIC法とレイトレーシング法の推定結果より、同じ方向の到来波が確認できた

# 目次

1. 研究の背景
2. 車のワイヤレスメディアに関する開発概要  
＜地デジ, GPSの開発例と技術課題＞
3. 目的と目標
4. ワイヤレスメディアに関する評価手法
  - 4-1 地上系の評価手法
  - 4-2 衛星系の評価手法
5. 仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法と実験結果  
MUSIC: Multiple Signal Classification
6. 本研究手法を用いた評価結果
7. まとめ



## Two-Stage法を用いたFMマルチパスひずみ率の評価

### <FMマルチパスひずみ率の比較>

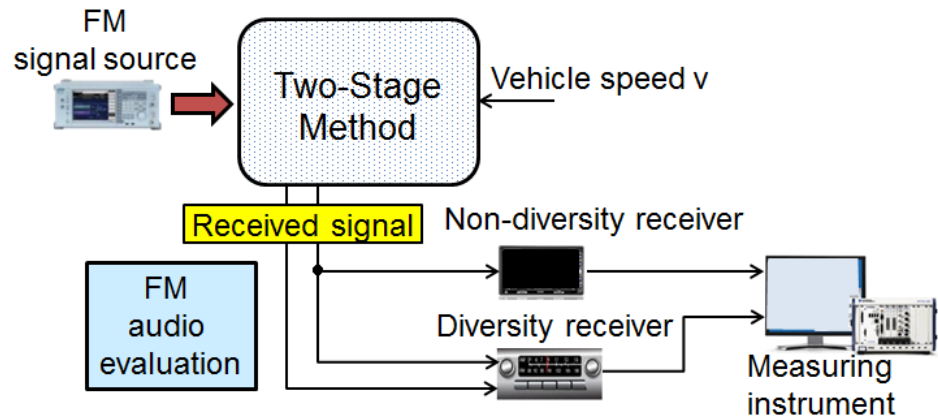




Table 1 Comparison of receiver type and antenna directivity using Two-Stage method

Characteristic parameter of radio wave environment in Hiroyama park	Vehicle speed	Receiver type	Broadcasting signal	Measurement antenna directivity and Multipath distortion rate (%)	
				Omni antenna	Car antenna
1. Direct wave 2. Diffracted wave $\theta_1 = 28(\text{deg.})$ $\theta_2 = -51(\text{deg.})$ $\tau = 3.5(\mu\text{s})$	60(km/h)	Non-diversity receiver	Monophonic	1.8(%)	0(%)
			Stereophonic	44.4(%) 	3(%)
		Diversity receiver	Stereophonic	42.4(%)	0(%) 

Two-Stage法により 同じ電波環境で複数の車載パラメータを同時に評価できる

# 6. 本研究手法を用いた評価結果

## 実測結果に対する受信感度しきい値を使った考察

### <本研究の実証実験環境とシミュレーションと実測結果比較>



Fig. 1 新宿テストコースの3次元地図



Round number		UTC
No.1	Start time	2:55:34
	Finish time	3:05:54
No.2	Start time	3:06:41
	Finish time	3:16:20
No.3	Start time	5:16:28
	Finish time	5:26:40
No.4	Start time	6:18:48
	Finish time	6:29:56
No.5	Start time	6:31:29
	Finish time	6:42:13
No.6	Start time	7:10:01
	Finish time	7:17:42

- <条件>
- (1) 周回コース距離: 3km
  - (2) 周回時間: 10-17(分)
  - (3) 走行の合計時間: 4時間22分
  - (4) 一定速の走行
  - (5) 市販GPS受信機: U-blox 6T

Fig.2 新宿テストコースとUTCテーブル

Table.1 測位率と位置精度の推定結果

	Conditions of reception	Positional ratio (%)	Positional accuracy	
			±X (m)	±Y (m)
Simulation	All GPS satellite reception	99.3	24.6	22.8
Measured	C/N <sub>0</sub> >20 (dB-Hz)	97.4	38.5	34.8
	C/N <sub>0</sub> >25 (dB-Hz)	96.6	38.5	34.7
	C/N <sub>0</sub> >30 (dB-Hz)	92	37.6	31.1
	C/N <sub>0</sub> >35 (dB-Hz)	76.6	28.3	24.4

受信感度のしきい値変化だけでは、シミュレーションの妥当性を検証できない

# 6. 本研究手法を用いた評価結果

## シミュレーションを用いた到来波の解析

### <シミュレーションの活用>

シミュレーションを用い、各UTCにおける上空にある測位衛星からの到来波の受信状態を解析。



- ★実測に対する到来波の識別に利用できる。
- ★実測における伝搬特性のメカニズムが推定可能

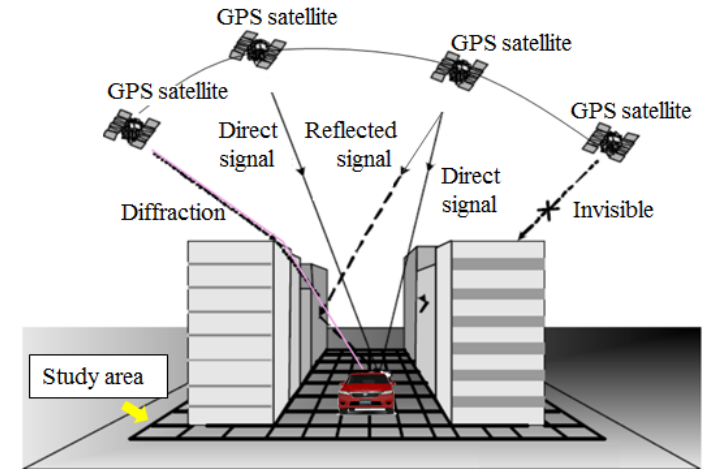


Fig.1 シミュレーションの3Dモデル

Table. 1 到来波の受信状態の解析

UTC	Satellite number								
	5	9	12	15	18	21	26	27	28
6:31:37	(3)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(3)	(1)	(3)
6:31:38	(3)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)	(3)	(1)	(5)
6:31:39	(3)	(1)	(3)	(1)	(1)	(1)	(3)	(1)	(4)

実験だけで取得不可能

Conditions of incoming wave :

- (1)Direct wave, (2)Direct wave+Reflected wave
- (3)Direct wave+Diffractive wave, (4)Reflected wave, (5)Diffractive wave

シミュレーションの解析結果を利用し実測の伝搬特性の推定ができる

# 6. 本研究手法を用いた評価結果

## 3Dシミュレータと実証実験の位置精度の比較

### <提案手法を用いた位置精度の推定結果>

表1. 到来波が直接波と反射波の場合

Conditions of incoming wave		Positional ratio (%)	Positional accuracy	
			±X (m)	±Y (m)
(1), (2)	Simulation	68.5	14.8	11.7
	Measured	61.8	15.3	14.1

Conditions of incoming wave :

(1)Direct wave, (2)Direct wave+Reflected wave

表2. 到来波が直接波, 反射波, 回折波の場合

Conditions of incoming wave		Positional ratio (%)	Positional accuracy	
			±X (m)	±Y (m)
(1), (2), (3), (4), (5)	Simulation	99.3	24.6	22.8
	Measured	91.7	45.3	40.4

Conditions of incoming wave :

(1)Direct wave, (2)Direct wave+Reflected wave

(3)Direct wave+Diffractive wave

(4)Reflected wave, (5)Diffractive wave

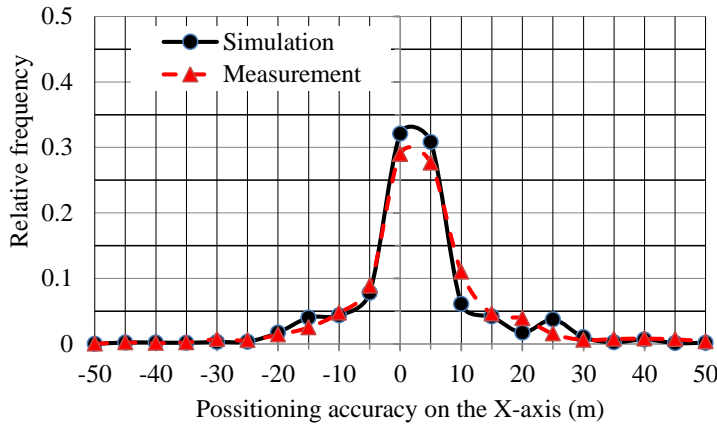


Fig.1 X方向の位置精度

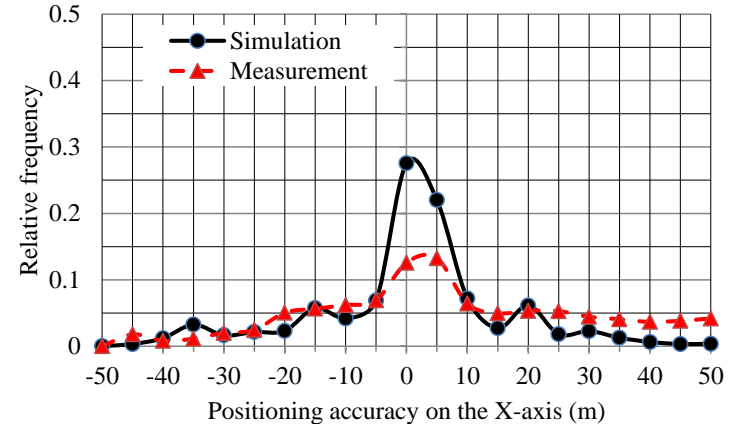


Fig.2 X方向の位置精度

到来波が直接波と反射波の場合, シミュレーションと実測の位置精度がほぼ一致する

1. 地上系のワイヤレスメディアであるFM放送波の電波環境特性を仮想アレーアンテナを用いたMUSIC法により推定し、この特性をPC上に再現してFM受信機のマルチパスひずみ率の評価ができた。

2. 衛星系のワイヤレスメディアであるGPSのマルチパス環境特性をGPSシミュレータを用いて推定し、この特性を使い自車位置を算出して実証実験より検証できた。

今後の課題は、メディア毎において到来波推定を用いた実際の電波環境特性の把握である。

本手法を車々間通信システム、及び高精度GPSシステムの車載性能評価に適用させることにより、実証実験で入手できない特性を素早く取得し、今後のITSシステム構築に有効活用する。

以上