

# 3大学合通信系研究室同合同修論発表会

## 磁界共鳴型2次元マルチホップ電力伝送による 複数受電器への公平な電力分配手法

### <目次>

1. 背景
2. 従来研究
3. 提案手法
4. 問題提起と理論的考察
5. 検証実験
6. まとめ

情報通信システム分野  
ワイヤレス通信研究室  
伊藤 有基  
担当教員：上原 秀幸

2013年2月1日

# 背景

## モバイル機器の充電

### 有線

- 複数の同時充電が不可能
- コードにより充電場所が限定



### ワイヤレス

- 複数の同時充電が可能
- ワイヤレスにより充電場所が自由



## 磁界共鳴型ワイヤレス電力伝送

電磁誘導に共振現象を用いており、高効率かつ大電力の伝送が可能

### 磁界共鳴型への要求

- 同時に複数端末へ電力伝送
- 室内(数m)の距離へ電力伝送

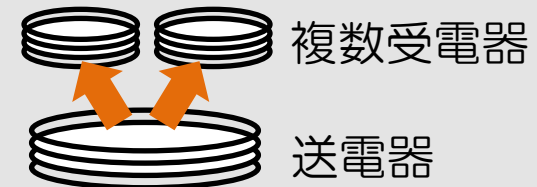
モバイル機器を磁界共鳴型ワイヤレス電力伝送で充電

# 従来研究

## ① 同時に複数端末へ電力伝送

複数受電器への電力伝送を評価<sup>[1]</sup>

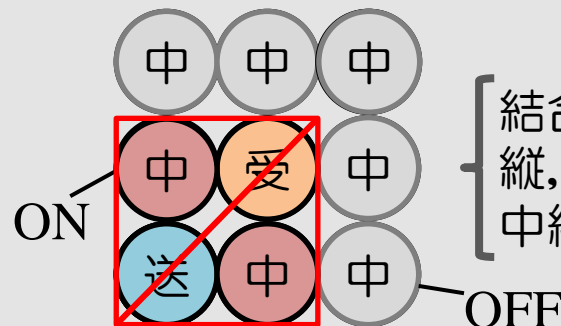
- 複数受電器へ伝送可能



## ② 数mの距離へ電力伝送

中継器(電源なし)を介した2次元マルチホップ電力伝送<sup>[2]</sup>

- 電力伝送距離を拡張
- 2次元平面の電力伝送



結合器を平面上に配置  
縦、横の中継器を介してマルチホップ伝送  
中継器制御 (仮想パス制御) により, 伝送効率を向上<sup>[3]</sup>

[1] Benjamin L. Cannon, et al, "Magnetic Resonant Coupling As A Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 24, No. 7, 2009-7.

[2] 澤上 佳希, 他, "磁界共振結合マルチホップ無線電力伝送方式の解析と評価," DICOMO2010, pp.1844-1850, 2010-7.

[3] 宮坂 拓也, 他, "磁界共振結合による二次元無線電力伝送方式における仮想パス制御方式," 信学会 ソ大, B-20-21, 2010-9.

# 従来研究

## ① 同時に複数端末へ電力伝送

複数受電器への電力伝送を評価<sup>[1]</sup>

– 複数受電器へ伝送可能

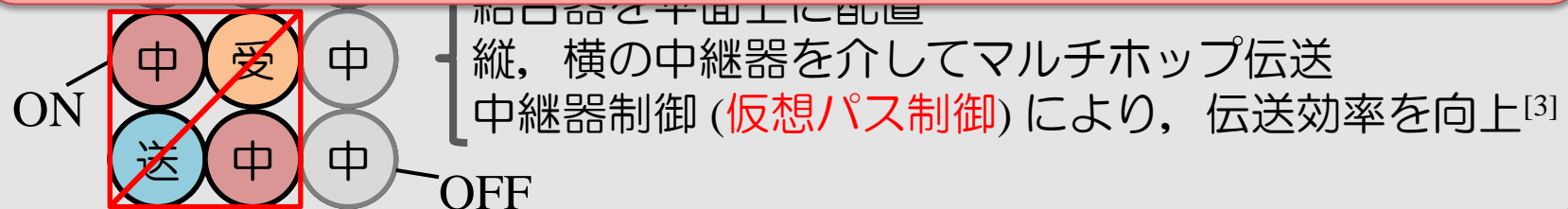


## ② 数mの距離へ電力伝送

中継器(電源なし)を介した2次元マルチホップ電力伝送<sup>[2]</sup>

### 目的

2次元マルチホップ電力伝送において  
中継器制御により複数受電器へ公平な電力分配を実現



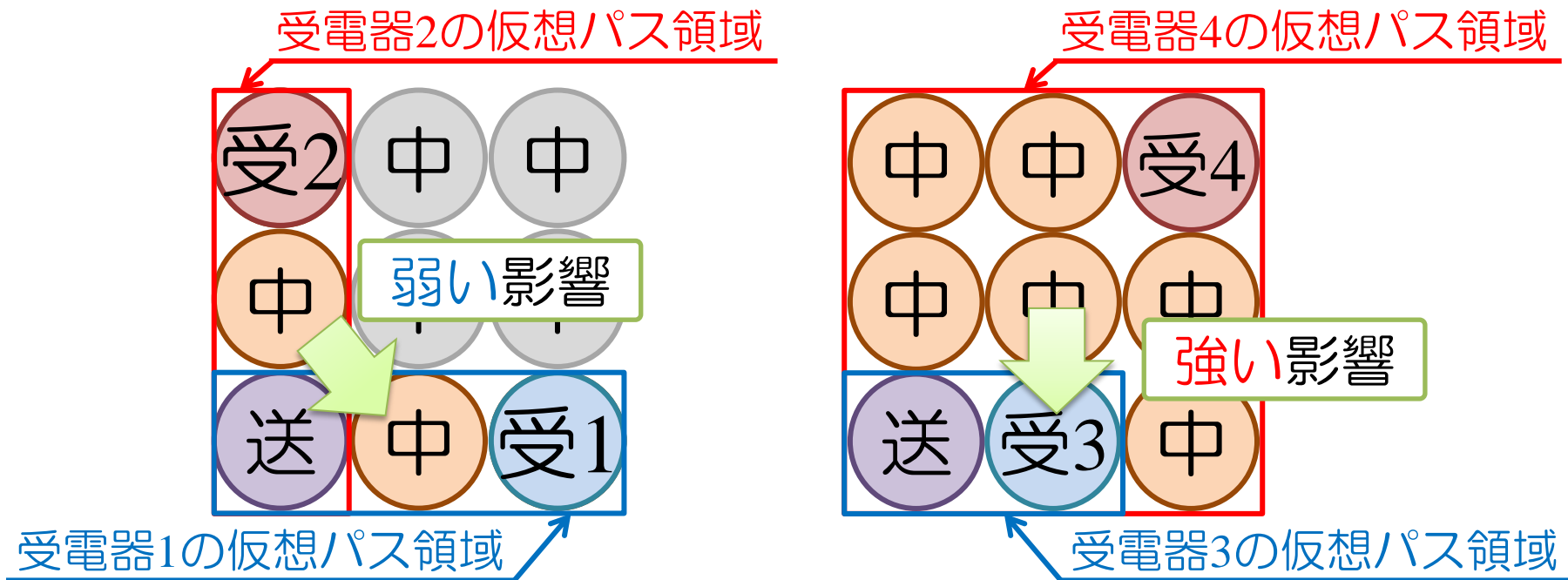
[1] Benjamin L. Cannon, et al, “Magnetic Resonant Coupling As A Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers,” IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 24, No. 7, 2009-7.

[2] 澤上 佳希, 他, “磁界共振結合マルチホップ無線電力伝送方式の解析と評価,” DICOMO2010, pp.1844-1850, 2010-7.

[3] 宮坂 拓也, 他, “磁界共振結合による二次元無線電力伝送方式における仮想パス制御方式,” 信学会 ソ大, B-20-21, 2010-9.

# 複数受電器への仮想パス制御の検討

仮想パス制御<sup>[3]</sup>は単一受電器のみ適応  
各受電器の仮想パス領域を重ね合わせ



**問題：** 受電器3は不要な中継器により，**伝送効率が低下**

# 研究の成果

## ＜問題の確認＞

回路シミュレータにより伝送効率を評価

## ＜問題の考察，解決手法の提案＞

回路モデルから数式モデル $S_{21}$ を導出して理論的に考察

## ＜解決手法の検証＞

複数の受電器への電力伝送を回路シミュレータで評価

## ＜実機実験による検証＞

解決手法により，公平な電力分配を確認

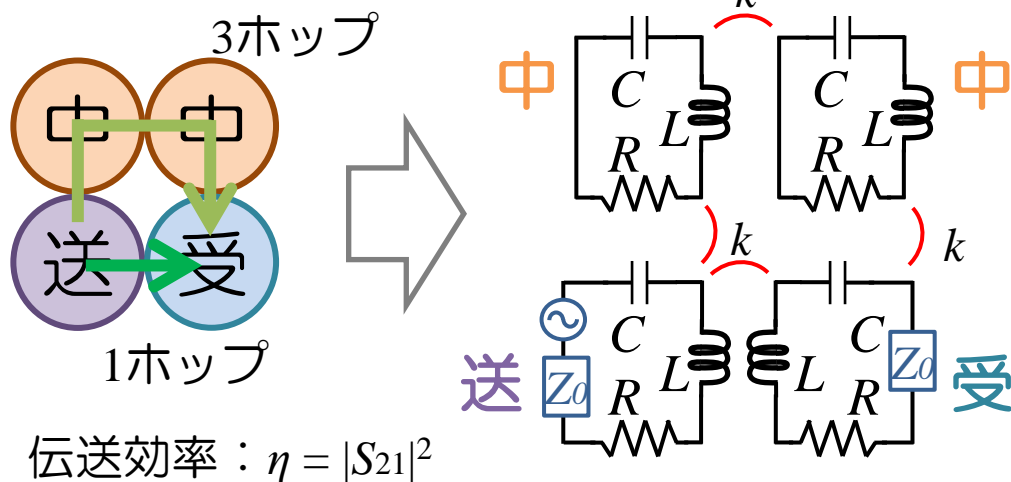
## ＜ $3 \times 5$ ， $5 \times 5$ への拡張実験＞

拡張性を確認

# 問題の確認

磁界共鳴結合器はLC直列共振回路とみなせる<sup>[4]</sup>  
回路シミュレータを用いて回路解析

## 等価回路化



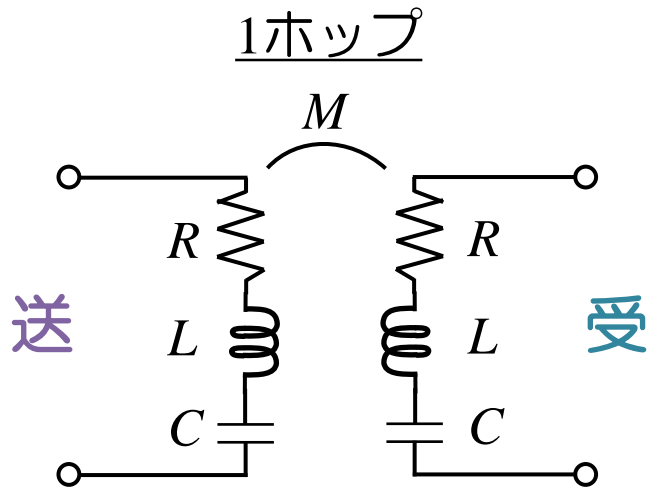
## シミュレーション諸元

インダクタンス L	11.5 $\mu$ H
キャパシタンス C	11.2 pF
負荷抵抗 $Z_0$	50 $\Omega$
損失抵抗 R	1 $\Omega$
結合係数 k	0.05
共振周波数 $f_0$	14 MHz

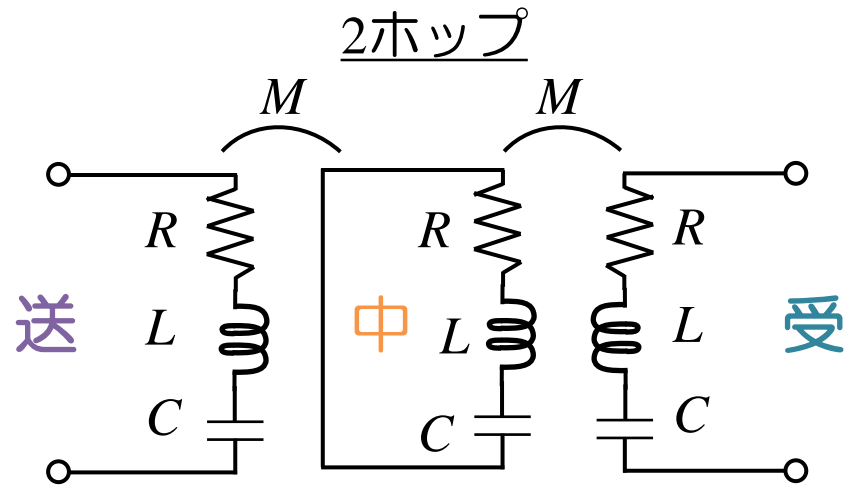
解析結果：受電器への伝送効率は約0%  
複数経路のホップ差による効率低下を数式モデルから考察

# 複数経路環境が電力伝送に与える影響

## - ホップ毎の $S_{21}$ -



$$S_{21}(\omega) = \frac{j2Z_0\omega}{(a + Z_0)^2 + (\omega M)^2}$$



$$S_{21}(\omega) = \frac{\frac{2Z_0\omega^2 M^2}{a}}{(a + Z_0 + \frac{\omega^2 M^2}{a})^2 + (\frac{\omega^2 M^2}{a})^2}$$

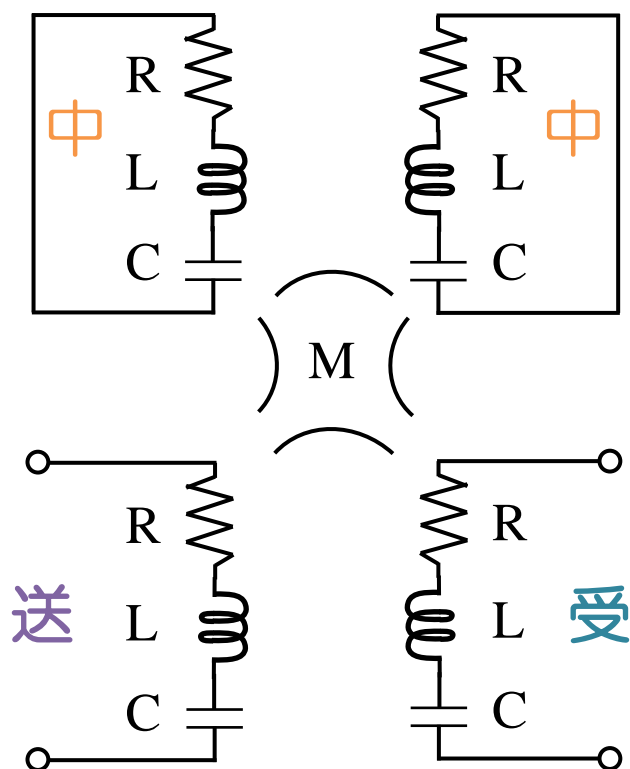
$$a = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}, \text{ 共振時: } a = R$$

共振周波数( $\omega=\omega_0$ )のとき

1ホップ毎に $S_{21}$ の角度が90度遅れることを確認



# 複数経路環境が電力伝送に与える影響



$$S_{21}(\omega) = \frac{\overset{\text{1ホップ}}{2jZ_0\omega M} - \overset{\text{3ホップ}}{\frac{2jZ_0\omega^3 M^3}{a^2 + \omega^2 M^2}}}{\left(a + Z_0 + \frac{\omega^2 M^2}{a + \frac{\omega^2 M^2}{a}}\right)^2 + \omega^2 M^2 \left(1 - \frac{\omega^2 M^2}{a^2 + \omega^2 M^2}\right)^2}$$

$$a = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}, \text{ 共振時 : } a = R$$

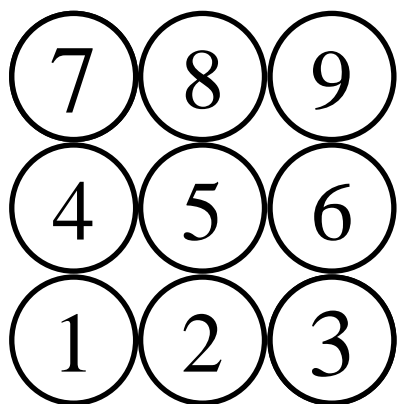
共振時 ( $\omega = \omega_0$ ),  $R = 0$

$$S_{21}(\omega) = \frac{2jZ_0\omega_0 M - 2jZ_0\omega_0 M}{Z_0^2} = 0$$

共振周波数( $\omega = \omega_0$ )のとき,

1ホップと3ホップの $S_{21}$ がお互いに打ち消し合い, 効率が低下  
提案: 中継器をON/OFF制御し, 全ての伝送経路を単一経路へ

# 3×3格子配置の全配置における回路解析



1:送電器

2-9:受電器を2つ選択

※ 対称や入れ替えを除く

受1, 2ともに40%以上の  
伝送効率

単一経路制御が公平かつ  
高効率な電力伝送を実現

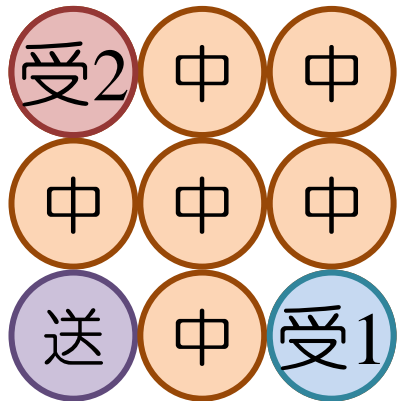
中継器が全てON	仮想パス制御	単一経路制御
(2, 3)	(2, 3)	(2, 3)
(2, 4)	(2, 4)	(2, 4)
(2, 5)	(2, 5)	(2, 5)
(2, 6)	(2, 6)	(2, 6)
(2, 7)	(2, 7)	(2, 7)
(2, 8)	(2, 8)	(2, 8)
(2, 9)	(2, 9)	(2, 9)
(3, 5)	(3, 5)	(3, 5)
(3, 6)	(3, 6)	(3, 6)
(3, 7)	(3, 7)	(3, 7)
(3, 8)	(3, 8)	(3, 8)
(3, 9)	(3, 9)	(3, 9)
(6, 5)	(6, 5)	(6, 5)
(6, 8)	(6, 8)	(6, 8)
(6, 9)	(6, 9)	(6, 9)
(9, 5)	(9, 5)	(9, 5)

実機実験により評価

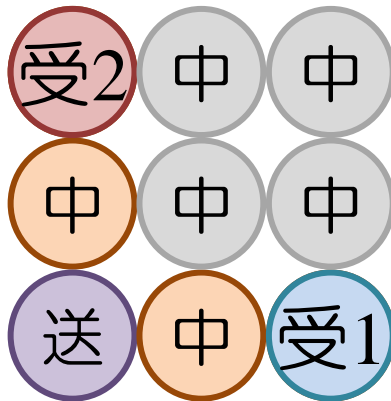
# 実機実験による検証 - 実験配置 -

## 受電器を等しい距離に配置

中継器が全てON

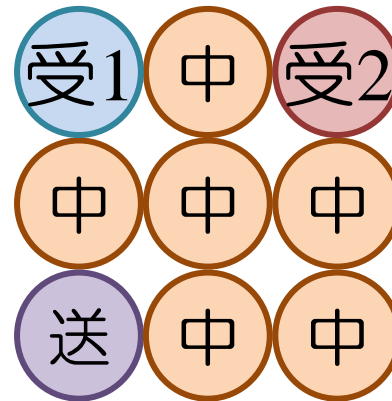


仮想パス制御  
(単一経路制御)

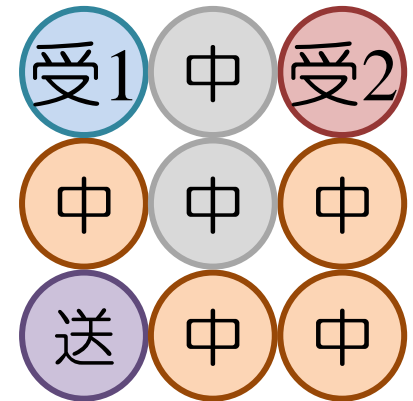


## 受電器を異なる距離に配置

中継器が全てON  
(仮想パス制御)



単一経路制御



# 実機実験による検証 - 実験諸元 -

## ヘリカルアンテナのパラメータ

アンテナ直径	30 cm
巻数	6
コイルピッチ	0.5 cm
銅線直径	0.1 cm
自己共振周波数	14 MHz

## 使用器具・使用機器

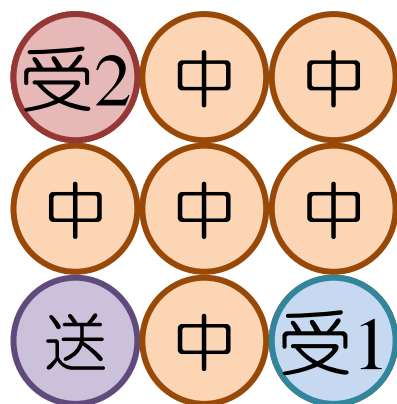
ヘリカルアンテナ	9 個
Vector Network Analyzer	1 台
バラン	2 個
負荷 ( $R_0 = 50\Omega$ )	1 個



# 実機実験による検証 - 伝送効率 -

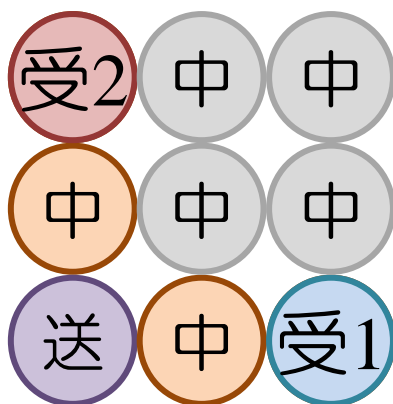
## 受電器を等しい距離に配置

### 中継器が全てON



受電器1	14.78 %
受電器2	14.93 %
総合	29.71 %

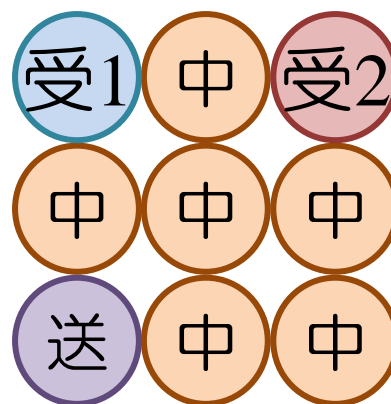
### 仮想パス制御 (単一経路制御)



受電器1	31.56 %
受電器2	27.77 %
総合	59.33 %

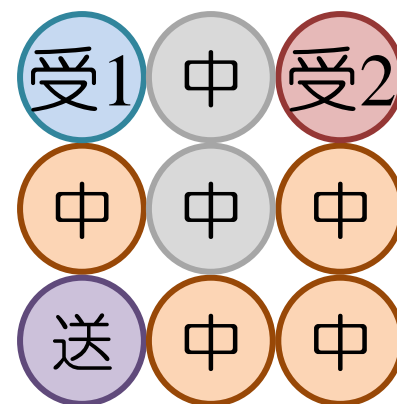
## 受電器を異なる距離に配置

### 中継器が全てON (仮想パス制御)



受電器1	16.21 %
受電器2	39.22 %
総合	55.43 %

### 単一経路制御



受電器1	33.95 %
受電器2	21.48 %
総合	55.43 %

複数経路のホップ差による伝送効率低下を確認  
単一経路による公平な電力分配を確認

# まとめ

## <目的>

複数受電器へ中継器を制御して公平に電力を分配

## <問題提起>

複数経路のホップ差から効率低下の問題を提起

## <数式モデルによる考察>

複数経路が2ホップ差のときに $S_{21}$ が180度ずれて効率低下

## <実機実験による検証>

複数経路のホップ差によって伝送効率が低下  
単一経路制御により、公平な電力分配が可能

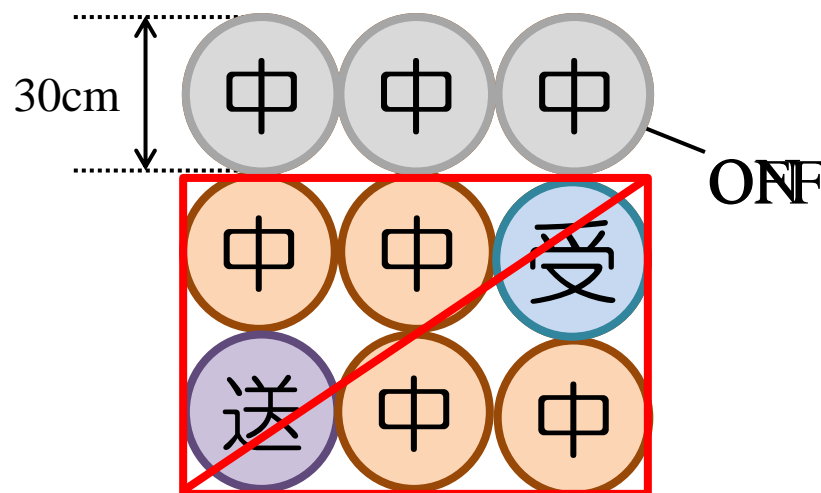
## <3×5, 5×5への拡張実験>

単一経路制御により拡張しても公平な電力分配



# 先行研究

## アンテナを平面に配置した際の仮想パス制御方式<sup>[3]</sup>



中継器が全てON

### 制御手法

- 1.対角線を引く
- 2.長方形を決定
- 3.枠外の中継器をOFF

中継器をON・OFF制御して効率を改善

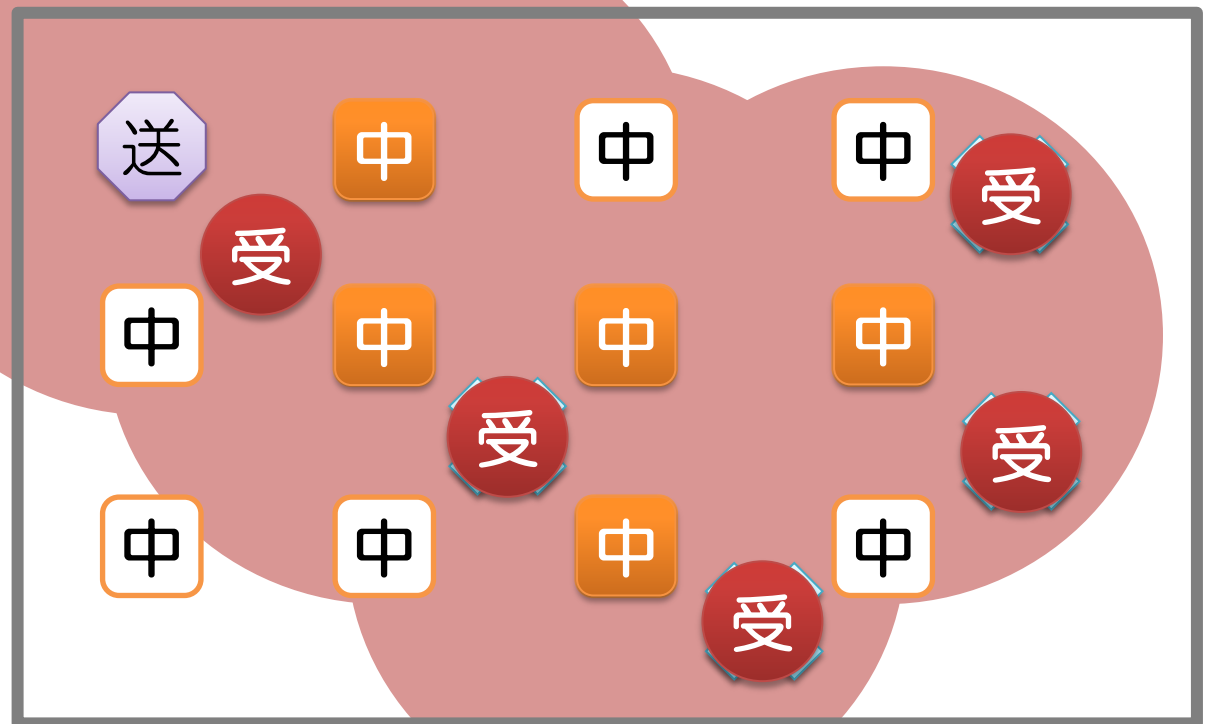
[3]宮坂 拓也 他, 磁界共振結合による二次元無線電力伝送方式における仮想パス制御方式, 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-20-21, 2010-9.



# 複数受電器への2次元マルチホップ電力伝送

高効率な受電範囲が狭い

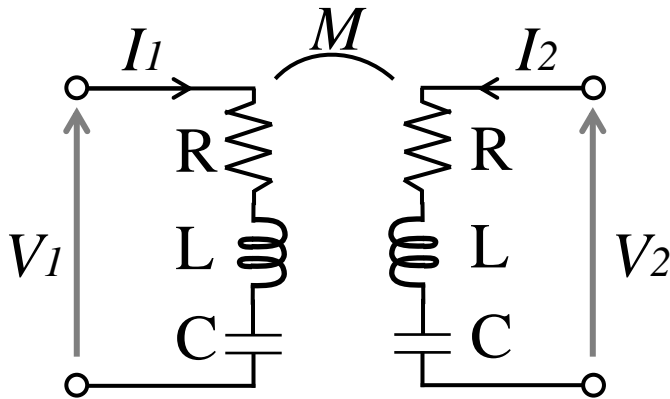
高効率な受電範囲



中継器を配置し、  
受電範囲を拡大

マルチホップにより、複数の受電器へ伝送可能

# ホップ毎に90度遅れる理由



$$V_1 = \left( R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) I_1 + j\omega M I_2$$

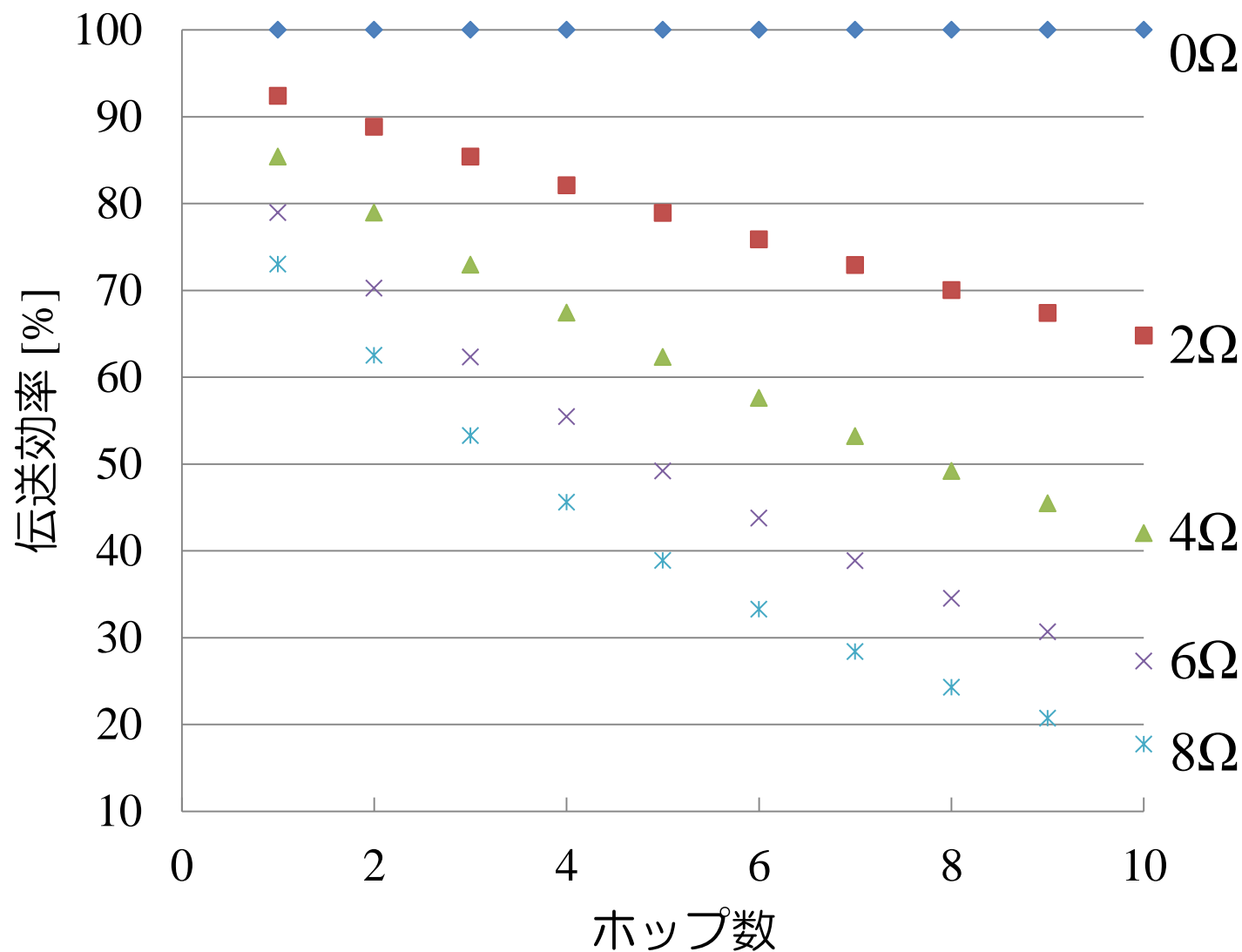
$$a = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, V_1 = 0 \text{ ならば}$$

$$a I_1 = -j\omega M I_2$$

ここで、共振周波数において  $a$  は実数

$I_2$  は  $I_1$  に比べて、90度遅れている

# ホップ毎の伝送効率低下





# 仮想パス制御と単一経路制御の比較

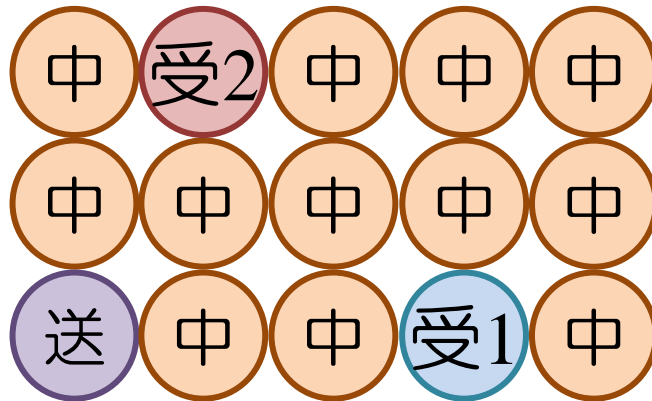
仮想パス制御	受電器1 [%]	受電器2 [%]	単一経路制御	受電器1 [%]	受電器2 [%]
( 2, 3 )	42.96	42.39	( 2, 3 )	42.96	42.39
( 2, 4 )	42.98	42.83	( 2, 4 )	42.98	42.83
( 2, 6 )	40.49	41.71	( 2, 6 )	43.07	41.43
( 2, 7 )	43.08	42.15	( 2, 7 )	43.08	42.15
( 3, 7 )	42.12	42.12	( 3, 7 )	42.12	42.12
( 6, 5 )	41.89	42.48	( 6, 5 )	41.52	41.99
( 6, 8 )	41.95	42.00	( 6, 8 )	41.24	41.24

# 各アンテナのパラメータ

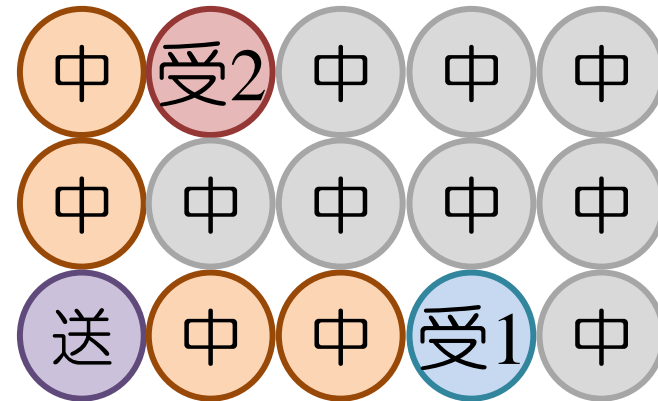
	インダクタンス $L$ [ $\mu\text{H}$ ]	キャパシタンス $C$ [pF]	損失抵抗 $R$ [ $\Omega$ ]
送電器	13.145	9.96	7.66
受電器1	12.378	10.586	7.02
受電器2	12.599	10.406	7.81
中継器1	12.736	10.107	8.72
中継器2	12.137	10.864	6.07
中継器3	12.629	10.370	7.37
中継器4	12.417	10.438	7.55
中継器5	11.670	11.192	7.29
中継器6	12.031	10.771	8.37

# 3×5格子配置への拡張実験

中継器が全てON



シングルパス制御



伝送効率

受電器1	0.45%
受電器2	0.45 %
総合	0.90 %

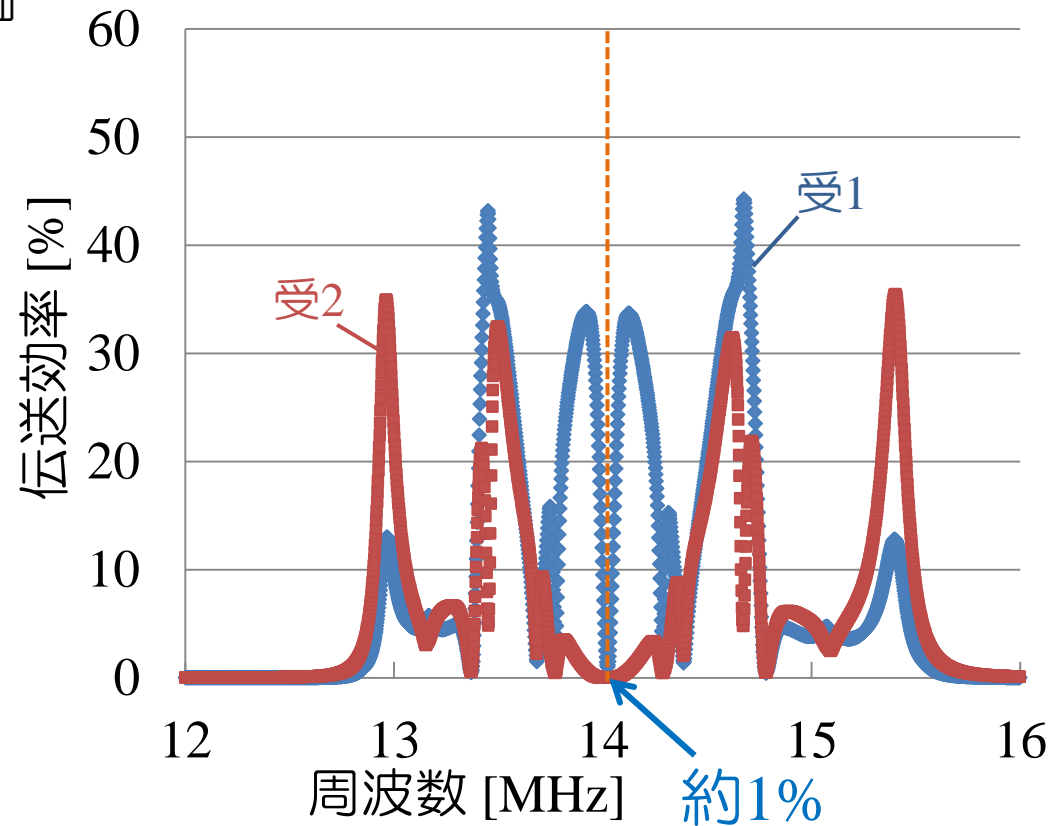
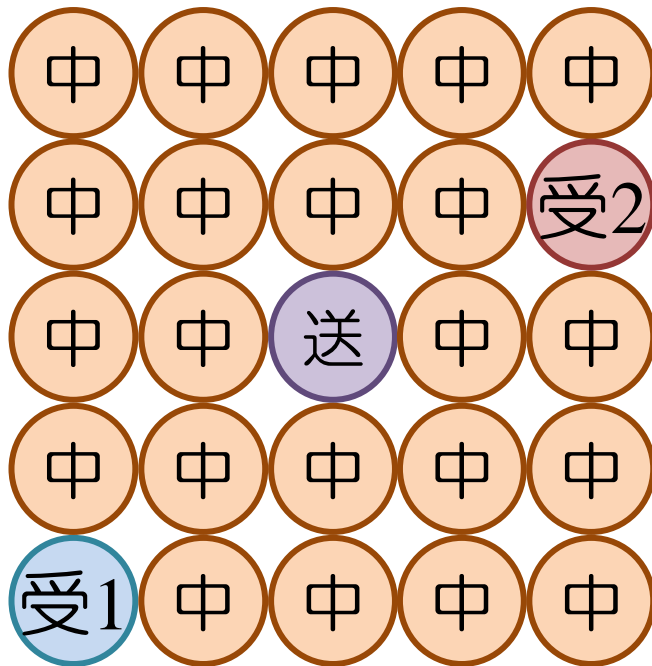
受電器1	41.25 %
受電器2	41.25 %
総合	82.50 %

シングルパスにより公平で高い伝送効率  
広範囲へ拡張が可能

# 5×5格子配置への拡張実験

## － 中継器が全てON －

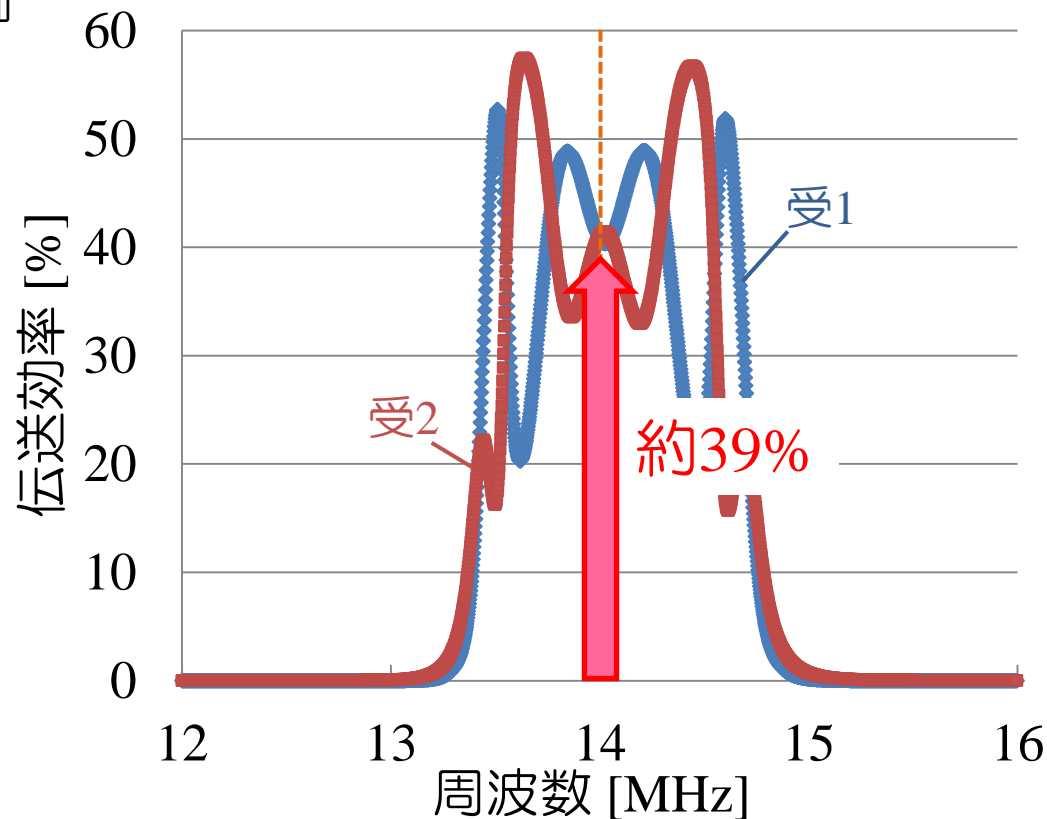
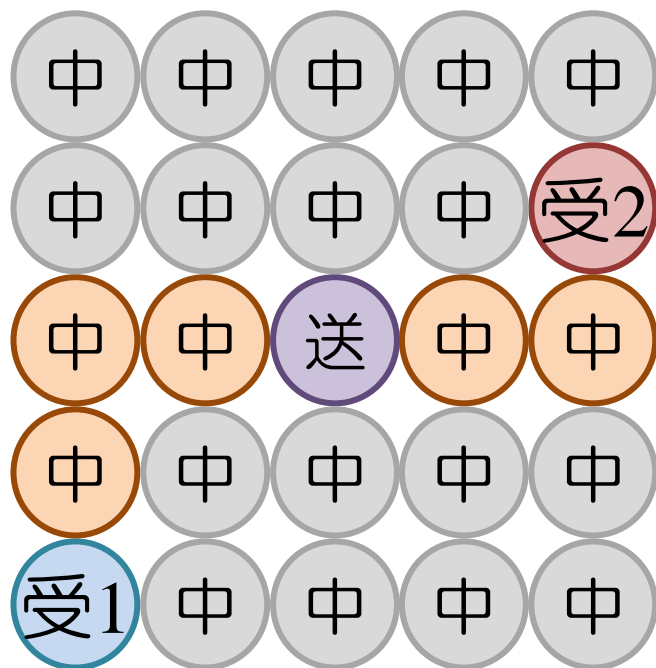
回路シミュレーションにより評価



マルチパスのため伝送効率が低下

# 5×5格子配置への拡張実験 - シングルパス制御 -

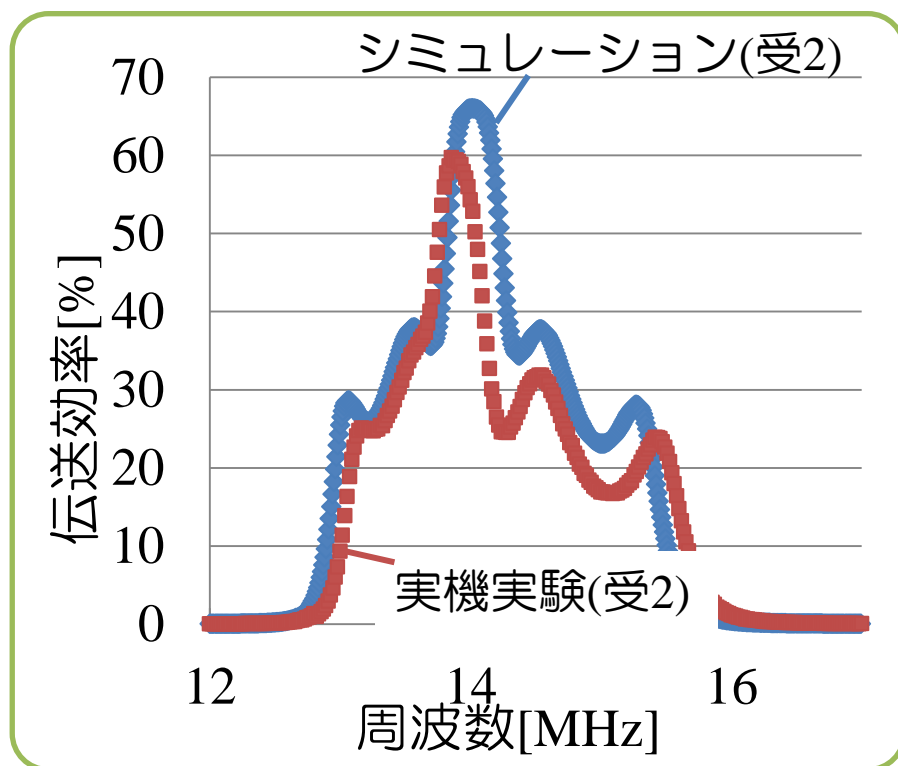
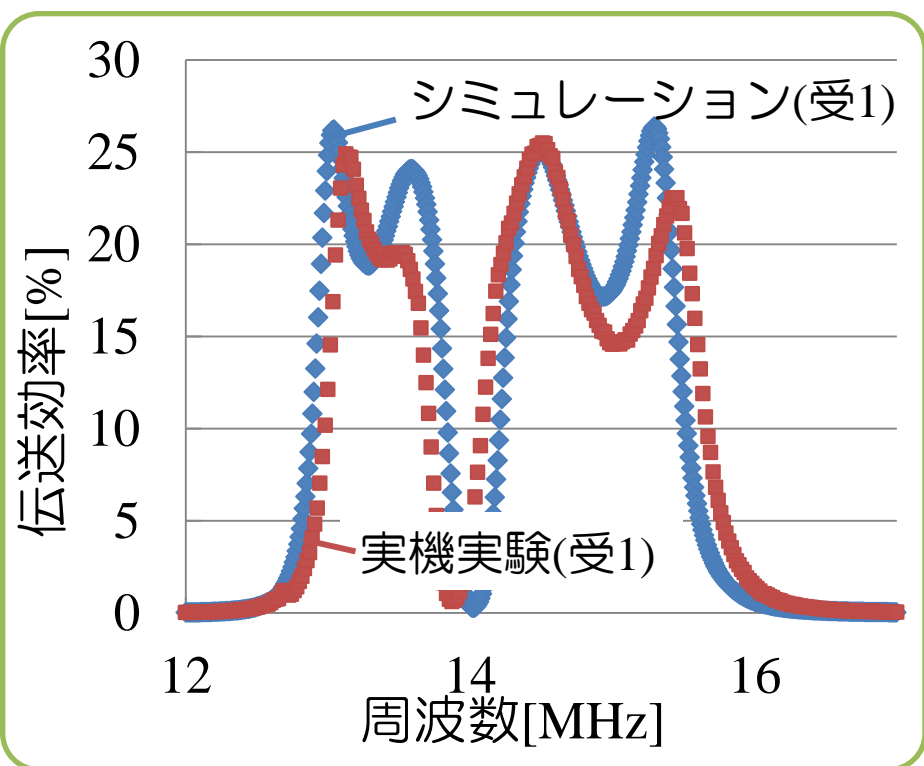
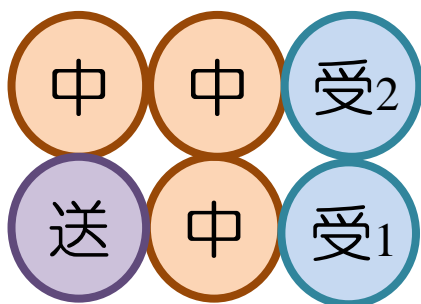
回路シミュレーションにより評価



シングルパスにより公平で高い伝送効率  
広範囲へ拡張が可能



# 実機実験とシミュレーションの比較



実機とシミュレーションの傾向が一致

# 業績リスト

---

## 学会発表

- [1] 電子情報通信学会総合大会 (2012-3)
- [2] IEEE AP-S/MTT-S Nagoya Chapter Midland Student Express 2012 Spring (2012-4)
- [3] 電気関係学会東海支部連合大会 (2012-9)

## 展示会

- [4] Microwave Workshop & Exhibition (2012-11)

## 表彰

- [5] 優秀発表賞, 電子情報通信学会東海支部卒業研究発表会 (2011-3)
- [6] 連合大会奨励賞, 電気関係学会東海支部連合大会 (2013-1)