

# アクティブ伝搬制御に向けた室内伝搬特性の解析

## Analysis of Indoor Propagation Characteristics for Active Propagation Control

蒲原健一郎                      岩井誠人                      笹岡秀一  
Kenichiro Kamohara              Hisato Iwai                      Hideichi Sasaoka

同志社大学大学院理工学研究科 〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3  
Graduate School of Science and Engineering, Doshisa University  
1-3, Tatara Miyako-dani, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321 Japan  
E-mail: duo0325@mail4.doshisha.ac.jp

### 1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット PC 等に代表される高機能端末の急速な普及により、無線通信の利用がますます増加している。これらの無線通信の利用の拡大は、無線機器の発達や無線通信の伝送特性の改善による高速、大容量、高効率な無線通信システムによって実現されている。また、これによる利便性の向上に伴い、ユーザの利用する情報量は年々増加傾向にあり、無線通信の伝送特性のさらなる高速化、大容量化、高効率化が必要とされている。

このような高速、大容量、高効率な無線通信システムを実現するために、送信機と受信機の双方で複数のアンテナを用いることにより、チャンネル容量を向上させる MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 伝送や、複数の直交する搬送波を用いることで、周波数帯域を有効に利用することが可能である OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式が用いられている。これらの無線伝送方式では、与えられた伝搬路に適した伝送を行うことにより、より良い通信を実現することを目指したものであると言える。しかしながら、無線通信ではマルチパスフェージングに代表される伝搬路の要因により、受信信号強度が極めて小さくなる点が局所的に存在する。このような場所では、伝搬路の状態は劣悪なものとなる。このような伝搬路に対して最大限良好な通信を実現したとしても、高速・大容量な通信は一般に期待できない。さらに極端な例としては、受信アンテナ位置に送信された電波がほとんど到来しない環境では、上記の無線伝送方式の特徴も発揮できない。

このような状況における伝送特性を改善する 1 つの方法として、受信機の受信特性がより良くなるように、伝搬路特性そのものを変化させることが考えられる。受信特性を改善するために、伝搬路特性そのものを変化させる方法はいくつか提案されている。たとえば、文献[1]では、移動通信システムの基地局アンテナ近傍に設置した反射板による高層階の不感地エリア対策が提案されており、文献[2]では不感地エリアに対して、所望周波数のみを散乱する方向制御反射板が実現されている。また、文献[3]では MIMO 可変パッシブリピータを用いた中継により、電波伝搬環境を制御し、MIMO 伝送のチャンネル容量を改善できることを室内の実験により実証している。本稿では、能動的な伝搬路特性の制御をアクティブ伝搬制御 (APC: Active Propagation Control) [4]と呼ぶ。本稿では、初期的な試みとして、回転可能な金属板を用いて伝搬路特性を変化させることを想定する。

本稿では、APC の実用性に関する基本評価として、室内のような閉空間において、回転可能な金属板により APC を行う場合の特性を評価する。評価指標としては、SISO (Single-Input Single-Output) チャンネルの伝搬損失特性及び、 $2 \times 2$  MIMO チャンネルの通信容量特性を用いる。これらを、2次元 FDTD (Finite Difference Time Domain) [5]を用いた伝搬解析を行うことにより定量的に明らかにする。

## 2. アクティブ伝搬制御

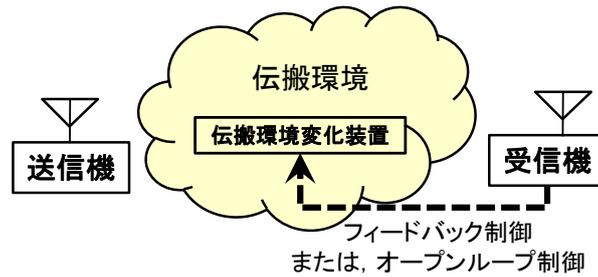


図1 アクティブ伝搬制御の基本構成

図1はAPCの概要を模式的に示している。APCでは同図のように、伝搬環境を変化させる何らかの装置(伝搬環境変化装置)を用いて、受信機の受信特性がより良くなるように伝搬路特性を最適化する。これに類似する技術として、アダプティブアンテナやエスパンアンテナが挙げられる。APCとこれらのアンテナの違いは伝搬路の制御範囲である。これらのアンテナの制御範囲は1つまたは複数の素子を含めた1セットのアンテナのみを対象としている。これに対して、APCではより規模の大きい範囲で伝搬路特性を変化させる。

次に、APCによる伝搬路特性の最適化の方法について述べる。APCの制御範囲の伝搬特性を計算などにより完全に把握することが可能であり、かつ、伝搬環境変化装置及びAPCの対象である受信機の位置を正確に把握することが可能であれば、受信機からの受信状況のフィードバックなしで、伝搬路特性を的確に最適化可能であると考えられる。たとえば、その環境内にある物体を小物体までを含めて完全にモデル化し、3次元FDTD計算を行うことなどによってそれは可能であると考えられる。しかしながら、現時点では、特に環境の完全なモデル化という観点で、このような計算による正確な伝搬特性の把握は困難である。これに対して本稿ではフィードバック制御を用いた最適化を前提とする。また、フィードバック制御は何らかの方法で理想的に行われ、最適化についても何らかの方法で最適解が得られるものと仮定し、APCの上限となる性能の評価を行う。また、APCを用いた他の受信特性の改善方法として、最適化は行わずに、単に伝搬路特性を変化させ続けるオープンループ制御と適応変調等を組み合わせることが考えられる。伝搬路特性を常に変化させ続けることで、マルチパスフェージングにより伝搬路特性が著しく劣化するような点を時变的に分散させることが可能である。それを適応変調などの適切な伝送方式と組み合わせることにより、マルチパスフェージングによる伝送特性の劣化を緩和することが可能であると考えられる。本稿では、オープンループ制御に基づくAPCについても評価を行う。

## 3. アクティブ伝搬制御を用いた受信特性改善効果の基本評価

### 3.1 評価環境と評価指標

本稿では、APCの実用性に関する基本評価として室内環境においてAPCを用いる場合を想定する。伝搬環境変化装置として金属板を用いて、その中心を固定し回転させることで伝搬路特性を変化させる。そのため、金属板を回転させる場合の伝搬路特性の変化を評価する。

図2は評価を行う環境を模式的に示している。同図のような2次元環境において、2次元FDTDを用いて伝搬路特性を計算する。座標は同図のように部屋の1つの角を原点とする。部屋の大きさは横( $x$ 軸方向)10.0m×縦( $y$ 軸方向)8.0mであり、什器等の物体はないものとする。FDTDの計算では部屋の外側に厚さ1.0m相当のコンクリート壁を設定し、さらに外側にMurの1次吸収境界を設ける。送信点は(1.0, 1.0)に固定し、送信信号の偏波はこの2次元平面に対して垂直な方向である。金属板は中心を(7.0, 4.0)に固定し0°~180°まで1°ずつ回転させる。回転角は図2のように、 $x$ 軸に平行な場合を0°とし反時計回りを正とする。金属板の厚さは0.05mで固定し、金属板の長さ $W$ は1.5mを基本に伝搬損失の計算の場合にのみ0.5~5.0mの範囲で変化させる。キャリア周波数は2.4GHzとする。FDTDのセルサイズは1辺0.01mの正方形であり、これは1/12.5波長に相当する。受信点はこのセ

ルサイズで計算される室内の全ての点である。MIMO 伝送では、送信素子 2 本、受信素子 2 本の 2×2MIMO を想定する。素子間隔を約 1 波長の 0.12m とし、送信側と受信側のそれぞれで 2 つの素子を x 軸に平行に並べる。2 つの素子の中心点が、図 2 の送信点または受信点となるように素子を配置する。2 つの受信素子が室内に配置可能である全ての受信点を考える。

評価指標は SISO チャンネルの伝搬損失及び MIMO チャンネルの通信容量とする。FDTD の計算における励振信号と各受信点で計算される受信信号の比により各受信点での受信チャンネル特性を計算する。なお、この値は SISO チャンネルの場合は 1 つの値で、MIMO チャンネルの場合は 2×2 の行列(チャンネル行列)で表される。これより伝搬損失及びチャンネル容量を計算する。MIMO のチャンネル容量  $C$  [bps/Hz]は以下の式により求める[6]。

$$C = \log_2 \det \left( \frac{\mathbf{H}\mathbf{H}^H}{2\sigma^2} + \mathbf{I}_2 \right) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{H}$  はチャンネル行列、 $\mathbf{I}_2$  は 2×2 の単位行列、 $2\sigma^2$  は 1 素子あたりの雑音の分散である。なお、上式を計算するためには、SN 比を定める必要がある。本稿では、2 次元自由空間伝搬において 1 つの送信アンテナから 1m の位置での受信 SN 比により SN 比を表すものとし、環境内の全ての点で等しい電力の雑音を仮定する。

表 1 シミュレーションパラメータ

キャリア周波数	2.4GHz
評価環境	10m×8m の 2 次元空間
FDTD セルサイズ	0.01m(1/12.5 波長)
金属板	長さ $W$ : 1.5m (MIMO) 0.5 ~ 5.0m (伝搬損失) 厚さ: 0.05m
壁	厚さ 1m のコンクリート壁 +Mur の 1 次吸収境界
コンクリートの材質定数	比誘電率: 6.76 導電率: 0.0023S/m
SN 比	2 次元自由空間環境において 送信点から 1m の位置で規定
MIMO 素子	素子数: 2×2 間隔: 0.12m (約 1 波長) 配置: x 軸に平行

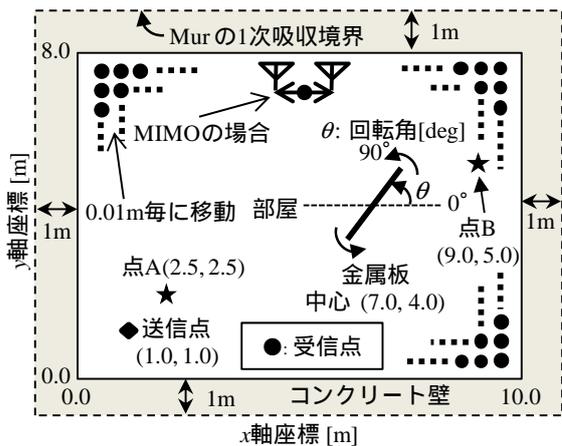


図 1 環境モデル

### 3.2 金属板による伝搬路特性の変化

図 3 は図 2 の室内の伝搬損失の空間分布を示している。同図(a)は金属板を配置しない場合である。同図(b)~(c)は金属板を配置した場合である。金属板は、同図(b)で長さ 2.0m、中心座標(7.0, 4.0)、回転角 90°、同図(c)で長さ 0.12m、中心座標(7.0, 4.0)、回転角 90°、同図(d)で長さ 1.5m、中心座標(2.0, 2.0)、回転角 135°である。同図(a)より伝搬特性には壁からの反射などに伴う干渉縞が現れており、室内はマルチパス環境であることがわかる。また同図(b)~(d)より金属板による電波の反射や遮蔽により空間分布が変化していることがわかる。また、金属板の長さが長いほど、金属板の設置位置が送信点に近いほど、室内の伝搬損失の空間分布を大きく変化させることがわかる。

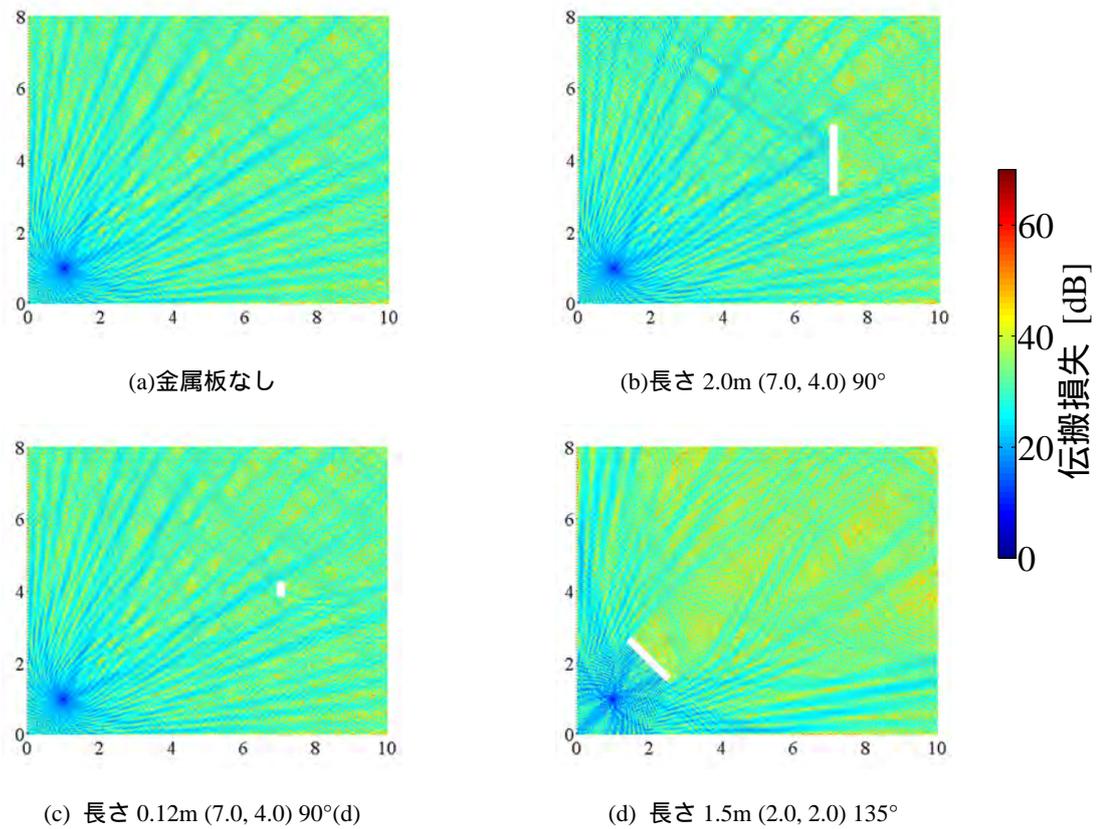


図3 様々な金属板の配置に対する室内の伝搬損失の空間分布

次に、金属板の回転による伝搬損失の変化の例を示すために、図2に示す送信点に比較的近い受信点A(2.5, 2.5)と比較的遠いB(9.0, 5.0)における金属板の回転角に対する伝搬損失の変化を図4に示す。同図では金属板の長さ  $W$  を1.5mとしている。点Aで5dB、点Bで20dBを超える伝搬損失の変化が見られる。なお、2次元FDTDにより電磁界分布を計算しているため、同図の伝搬損失は3次元自由空間伝搬に比べて小さい値となっている。参考までに、3次元自由空間伝搬では周波数2.4GHzの場合で送信アンテナから1mの位置での伝搬損失は約40dBである。

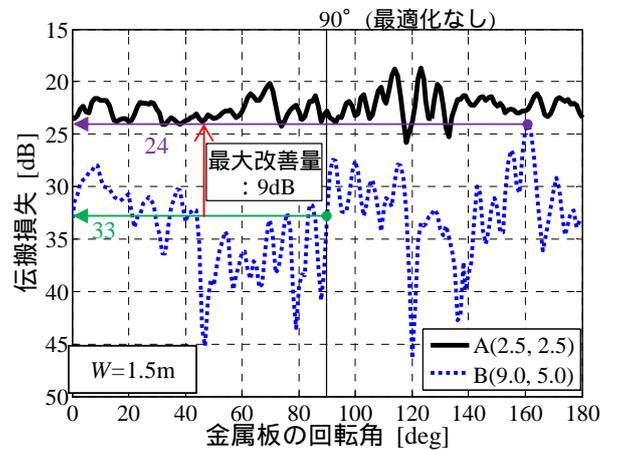


図4 金属板の回転による伝搬損失の変化

### 3.3 フィードバック制御に基づくアクティブ伝搬制御の受信特性改善効果

本節では、フィードバック制御に基づくAPCの受信特性改善効果を示す。評価指標として、SISOチャンネルの伝搬損失及び2x2MIMOチャンネルの通信容量を用いる。金属板の角度が90°固定の場合を「最適化なし」、それぞれの受信点で金属板の回転角に対して受信特性が最も良い値を取り出したものを「APC」とする。また、「最適化なし」と「APC」の差を「最大改善量」と定義する。例えば、図4の点B(青色破線)において伝搬損失の「最適化なし」は33dB、「APC」は回転角160°付近の最小値24dBとなり、「最大改善量」は9dBとなる。

図5は金属板の長さ  $W$  が2.0mの場合のAPCの有無による伝搬損失の比較を示す。同図(a)は最適化なし、(b)はAPCの場合の室内の伝搬損失の空間分布を示す。また、同図(a)と(b)に示されている  $x=9.0$  の線上を、受信点(9.0, 0.0)から(9.0, 8.0)まで直線

的に移動させた場合の伝搬損失の変化を、図6に示している。同図(a)と(b)の比較より APC を用いることで室内全体の伝搬損失が小さくなっていることがわかる。また図6より、全ての受信点で APC により伝搬損失の改善が得られており、マルチパスフェージングによる伝搬路特性の劣化が改善されていることがわかる。

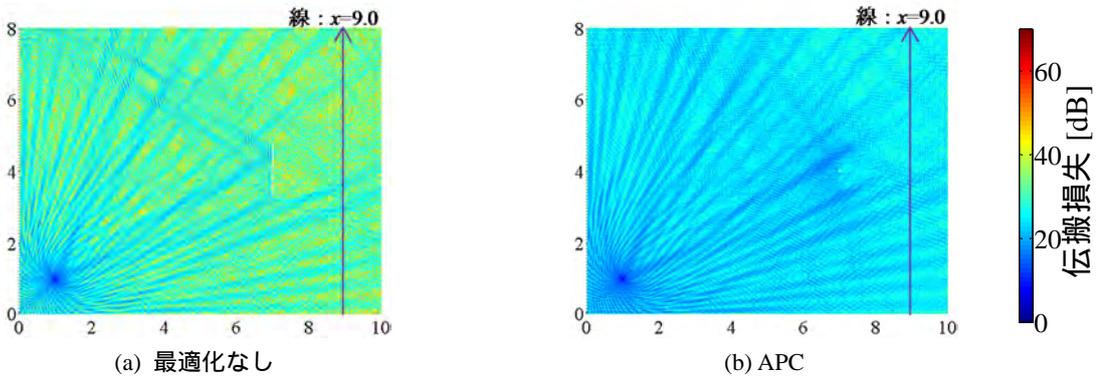


図5 金属板の長さ  $W$  が 2.0m の場合のフィードバック APC の有無による伝搬損失の空間分布の比較

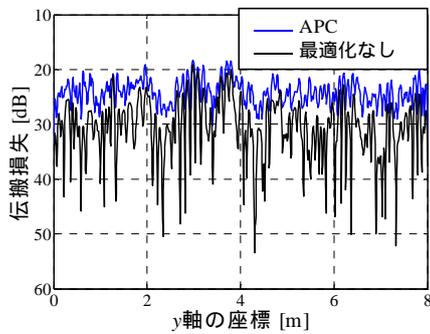


図6  $x=9.0$  上の伝搬損失の比較

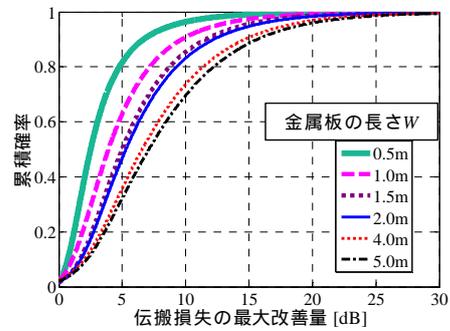
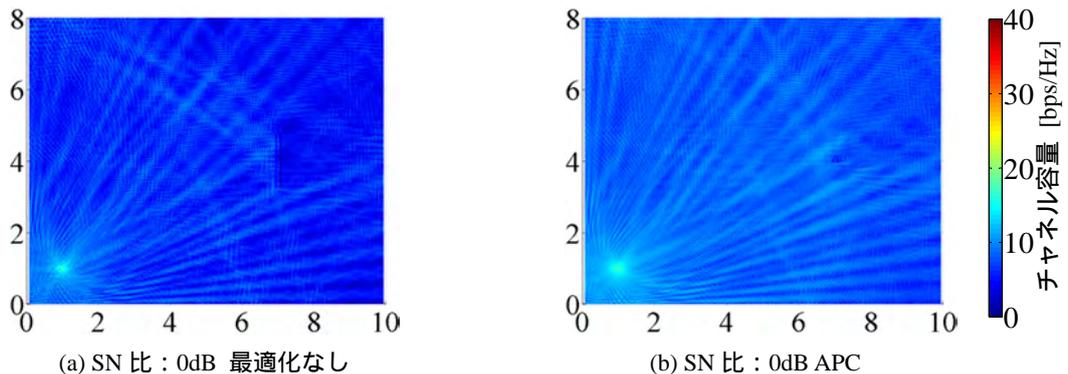


図7 APC による伝搬損失の最大改善量の累積分布

次に、金属板の長さ  $W$  を 0.5 ~ 5.0m の範囲で変化させた場合を示す。図7は全ての受信点で伝搬損失の最大改善量を計算し、その累積分布関数 (CDF: Cumulative Distribution Function) を求めたものである。同図より、金属板の長さ  $W$  が 2.0m (図5) の場合では累積確率 50% 値で 5dB、90% 値で 12dB 以上の改善効果が得られることがわかる。また、同図では金属板の長さが長くなるにつれて APC の改善効果は増加傾向にあるが、4.0m と 5.0m の場合の CDF があまり変化しないことから 4.0m 付近でこの増加は飽和していると考えられる。

次に、 $2 \times 2$  MIMO チャンネルの通信容量を評価指標として同様の制御の改善効果を示す。図8は金属板の長さ  $W$  が 1.5m の場合の APC の有無による MIMO チャンネル容量の空間分布を示している。同図(a), (b) は SN 比が 0dB の場合であり、(c), (d) は SN 比が 20dB の場合である。また、同図(a)と(c)は最適化なし、(b)と(d)は APC である。どちらの SN 比でも伝搬損失の場合と同様に、室内全体のチャンネル容量が改善されていることがわかる。



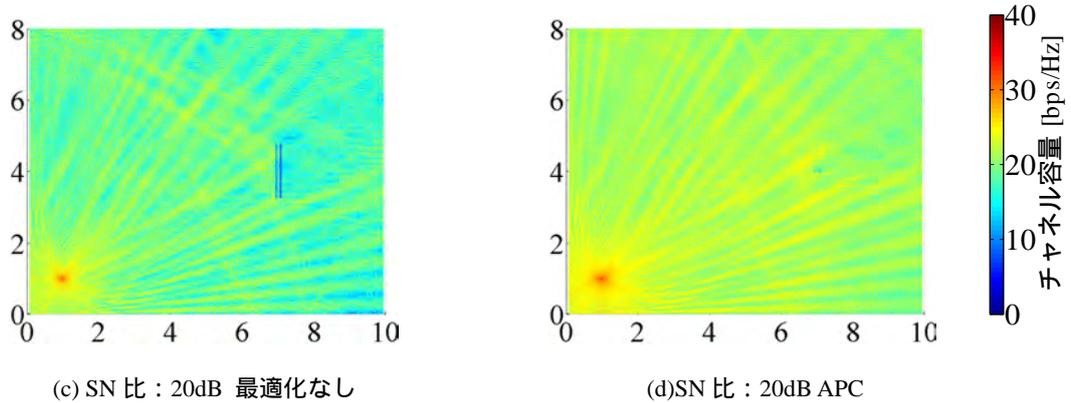


図8 金属板の長さ  $W$  が 1.5m の場合の APC の有無による MIMO チャンネル容量の比較

図9は図8のチャンネル容量の空間分布のCDFを示している．同図では，SN比を0～30dBの範囲で変化させている．同図よりそれぞれのSN比において「最適化なし」の場合にチャンネル容量が小さい状態ほど，APCにより効果的にチャンネル容量が改善されていることがわかる．一般にMIMOチャンネル容量の改善はSN比の増加，またはアンテナ間のチャンネル特性の相関の減少によって得られる．そこで，APCによるチャンネル容量改善のメカニズムを調べるために，MIMOチャンネルの相関行列の固有値を求め，第1固有値 $\lambda_1$ と第2固有値 $\lambda_2$ ( $\lambda_1 > \lambda_2$ )の比により評価する．図10は室内のそれぞれの受信点のチャンネル行列に対してこの比を計算し得られたCDFを示している．同図より，「APC」では $\lambda_2/\lambda_1$ の大部分が-10から0dBの範囲に含まれていることがわかる．したがって，固有モード伝送において第1パスに偏らず，第2パスが有効となるようにAPCが機能することがわかる．この結果より，APCによるMIMOチャンネル容量の増加は，主にアンテナ間のチャンネル特性の相関の減少に起因していると考えられる．

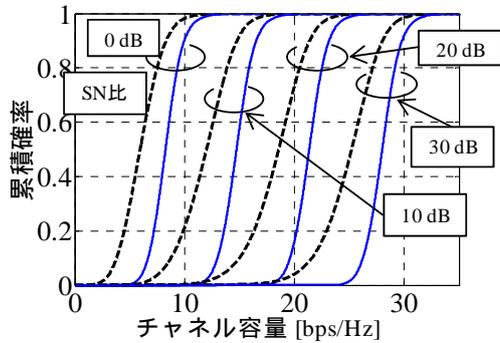


図9 MIMO チャンネル容量の CDF

(黒破線：最適化なし，青実線：APC)

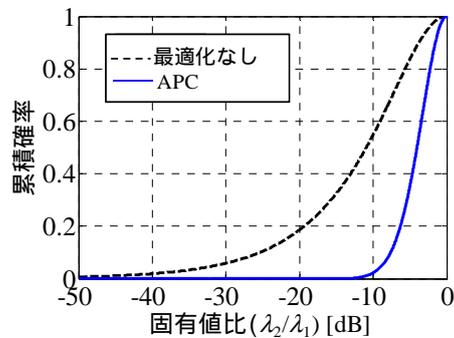


図10 MIMO チャンネルの相関行列

の固有値比の CDF

### 3.4 オープンループ制御に基づくアクティブ伝搬制御の受信特性改善効果

本節では，オープンループ制御に基づく APC の受信特性改善効果を示す．評価指標として， $2 \times 2$  MIMO チャンネルの通信容量を用いる．長さ  $W=1.5$  m の回転可能な金属板を用いて，伝搬路特性を常に変化させることを想定する．なお，金属板の回転速度は，伝搬路特性が準静的変化となる速度を想定する．したがって，金属板のそれぞれの回転角に対して，各受信点で式(1)で定義される理想的な通信容量を得られるものとする．前節同様に，金属板の角度が  $90^\circ$  の場合を「最適化なし」とする．各受信点で金属板のそれぞれの回転角に対して，通信容量を求め，金属板の回転角  $0 \sim 180^\circ$  に対して平均した値を「APC」とし，これら2つの通信容量の対象環境内の分布を比較する．図11はオープンループ APC の場合の室内のチャンネル容量の空間分布を示している．また，図12は図11のチャンネル容量の空間分布に加え，SN比が10dBと30dBの場合のチャンネル容量の空間分布のCDFを示し

ている。ただし、同図では金属板の回転と重なる領域を除いて CDF を求めている。図 11(b)では、図 8(c)の比較的容量が小さい点(濃い青色)が改善されており、マルチパス環境における伝搬路特性の大きな場所依存性が緩和されていることがわかる。図 12 の SN 比が 20dB の場合の CDF を比較する。「最適化なし」では累積確率 0.01% 値で 8.1bps/Hz ,0.1% 値で 9.5bps/Hz である。これに対して「APC」では、累積確率 0.01% 値で 11.4bps/Hz ,0.1% 値で 12.5bps/Hz であり、0.01% 値で 3.3bps/Hz ,0.1% 値で 3.0bps/Hz の改善が得られている。主に劣悪な伝搬路に対して、これらの改善は得られており、室内全体で適切な通信を確保するように APC が機能していることがわかる。一方で、APC の伝送特性の均質化により、チャンネル容量が低下している点が存在する。このような点は、「最適化なし」の場合にチャンネル容量が大きい点である。一般に通信システムの設計ではより劣悪な地点を想定する。したがって、そのような地点の伝送特性を大きく改善する APC は有効な方式であると考えられる。

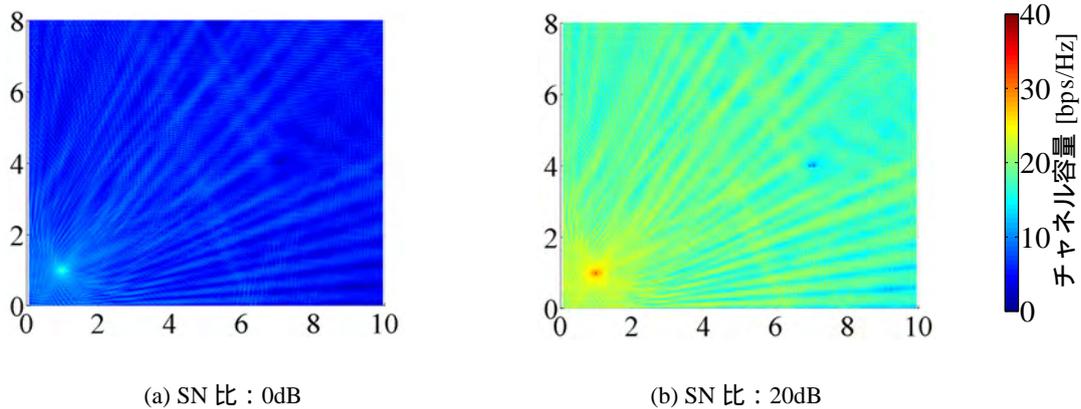


図 11 オープンループ APC による MIMO チャンネル容量の空間分布場合のチャンネル容量の CDF

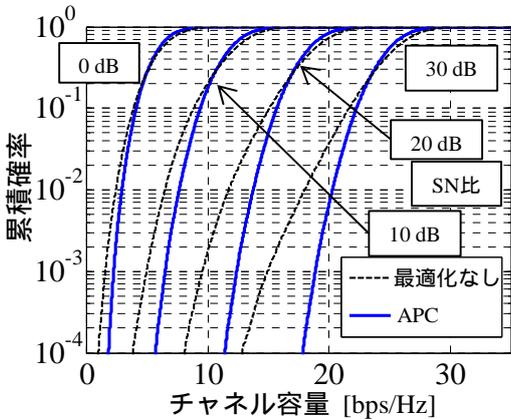


図 12 オープンループ APC の場合のチャンネル容量の累積分布

4. まとめ

本稿では、無線通信の伝送特性の改善方法として、伝送方式や変復調方式による改善ではなく、能動的に伝搬路特性を変化させることでユーザの受信環境を改善するアクティブ伝搬制御について、その実用性に関する基本評価を行った。伝搬路特性を変化させる装置として、回転可能な金属板を用いた。この場合の APC による、SISO チャンネルの伝搬損失特性及び、MIMO チャンネル容量特性を、2次元 FDTD を用いて定量的に評価した。その結果、フィードバック制御に基づく APC により、金属板の長さが 1.5m の場合では、80% 値で約 9dB、90% 値で約 13dB の伝搬損失の改善が得られ、金属板の長さが 4.0m の場合では、70% 値で約 10dB、90% 値で約 17dB の伝搬損失の改善が得られることを示した。また、MIMO チャンネル容量の改善についてチャンネル容量が小さい状態ほど、APC により効果的にチャンネル容量が改善されていることを示した。また、APC による MIMO チャンネル容量の改善メカニズムの 1 つとして、アンテナ間のチャンネル特性の相関を減少させることを示した。さらに、オープンループ制御に基づく APC により、室内全体で適切な通信を確保するように MIMO チャンネル容量を改善可能であることを示した。これらの結

果より，APC を用いて室内の伝搬損失及び，MIMO チャネル容量を改善できることを示し，APC の有効性を明らかにした．

なお，金属板による回転はやや原始的であり，実用の際に人や物との物理的な干渉等不都合が生じることが考えられるため，他の伝搬環境変化装置による APC の実現方法を検討する必要がある．また，今回は 2 次元 FDTD による計算のため 2 次元環境に対する評価であり，さらに現実的な評価をするためには 3 次元環境に対する評価も必要である．

## 5. 参考文献

- [1] 北尾光司郎，今井哲朗，石川一道，“移動通信システムにおける基地局アンテナの近傍に設置した反射板による高層階不感地エリアの形成法，” 信学論，Vol.J96-B, No.9, pp.971-980, 2013 年 9 月.
- [2] 丸山珠美，古野辰男，上林真司，“電波の届かない領域をなくすための方向制御反射板の研究，” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル，Vol.17, No.3, 2008 年.
- [3] 高橋雄太，本間尚樹，“可変トランスミッタレーによる電波伝搬環境改善の実験的評価，” 信学技報，AP2013-55, pp.49-52, 2013 年 7 月.
- [4] 岩井誠人，蒲原健一郎，笹岡秀一，“無線通信におけるアクティブ伝搬制御による受信特性の改善，” 信学技報，AP2013-162, pp.163-168, 2014 年 1 月.
- [5] 宇野亨，“FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析，” コロナ社，1998.
- [6] 大鐘武雄，小川恭孝，“わかりやすい MIMO システム技術，” オーム社，2009.