

有相関フェージング環境下での Massive MIMO の情報伝送能力について

Channel Capacity of Massive MIMO in Correlated Fading Environments

唐沢好男

送受信局の双方でアレーアンテナを用いる無線通信は MIMO と呼ばれ、大容量・高品質情報伝送を実現している。最近、第五世代移動通信への導入を目指して、アンテナ素子数が 100~1000 にも及ぶマッシブ MIMO の研究が進んでいる。これまで検討されているマッシブ MIMO の大部分は、基地局側のアレーを大規模にして、比較的小規模のアレーで構成される複数のユーザ局に対して、マルチユーザ通信を実現するものである。このタイプのマッシブ MIMO では、基地局側のアレーアンテナの自由度を生かして、それぞれのユーザに指向性を与えるビームフォーミング伝送が主流になっている。この方式により、ユーザ分離度の良い高信頼な安定回線を実現できることを特徴にしている。

これとは別に、図 1 に示すような無線局の双方に大規模のアレーアンテナを採用する伝送方式も考えられる。当面の応用においては、基地局間無線エントランス回線や基地局とリレー局間の通信、非常災害時の臨時アクセス回線、広帯域汎用無線機のように、きわめて大容量の通信に向いているが、将来の無線システムの一つの形として検討しておく価値がある。本発表では、この構成でのマッシブ MIMO 伝送を取り上げる。具体的には、多数の素子対向によって得られる直交ストリームのうち、相対的に利得の高いいくつかを選んでそこに情報を並列伝送する選択型固有モード伝送（マルチストリーム伝送）である。

無線伝送路では、電波は不規則な反射や散乱を受けるので、MIMO チャネルを表現する通信路行列はランダム行列に分類される。送受信の双方に多数のアンテナ素子を持つマッシブ MIMO の場合には、行列サイズが大きくなり、そこには、大きいことに起因する固有の性質（漸近固有値分布）が現れてくる。このような大規模ランダム行列を扱う理論は数理統計学に基礎を置き、高度な数学で体系化されている。この理論により、行列要素が平均値 0 の i.i.d. であるランダム行列 \mathbf{A}_0 で構成されるウシャート行列 $\mathbf{A}_0\mathbf{A}_0^H$ または $\mathbf{A}_0^H\mathbf{A}_0$ （上付き文字 H は複素共役転置を表す）の漸近固有値分布は、マルチェンコ・パスツール則 (Marčenko-Pastur law ; MP 則) に従うことが導かれている。このように i.i.d. に従うランダム行列であれば、マッシブ MIMO の情報伝送能力はマルチェンコ・パスツール則に従う漸近固有値分布の理論を適用して解析することが期待できる。

一方、マルチパス波の角度広がり比較的狭く、かつ、アレー素子間隔が十分広くできない場合には、素子間に空間相関の影響が現れてくる。送受信局の一方のみがアレーアンテナで構成されるスペースダイバーシチであれば、空間相関の影響はダイバーシチ効果を低減

する方向に働くので、隣接素子間でフェージング変動が無相関になるように十分広い間隔をとることが求められる。では、マッシブ MIMO 伝送においては、この空間相関の影響はどのように働くであろうか？本発表では、計算機シミュレーション及びその考察により、この問題に答えを与えたい。マルチパスフェージング環境として見通し外(NLOS)を代表するレイリーフェージング環境と見通し内(LOS)を代表する仲上・ライスフェージング環境（ライスフェージングとも呼ばれる）を検討の対象とする。

なお、情報理論の分野では、MIMO の有相関通信路での固有値分布や通信路容量について理論解析も試みられている。しかし、これらの扱いは比較的小さい規模の MIMO を対称にしている、かつ、その解析手法も高度に数学的であり、本レポートが対象とする大規模ランダム行列の漸近固有値分布への適用には困難（＝筆者には手が届かない高い壁）がある。そこで、有相関通信路の解析には、計算機シミュレーションを主体とする。

本発表の主張点を以下にまとめる。

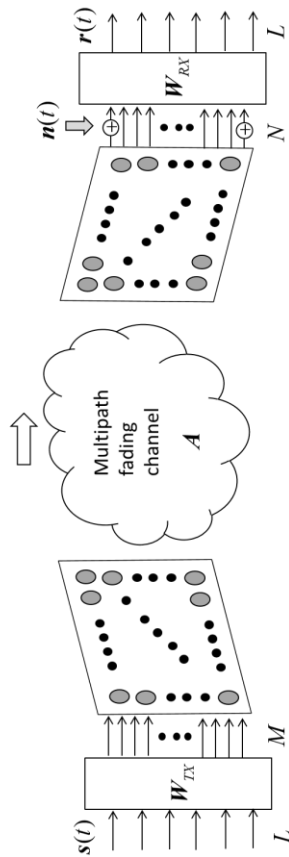
- 1) 比較的大規模な MIMO (8×8 程度以上) では、通信路行列要素間の相関（空間相関）の有無に関わらず、その固有値の確率分布は漸近特性を示す。無相関なレイリーフェージング環境 (i.i.d.) では、漸近特性は、マルチェンコ・パスツール則 (MP 則) に従う。
- 2) 無相関通信路では、NLOS 環境を代表するレイリーフェージングであっても、LOS を代表する仲上・ライスフェージングであっても、通信路容量 C_0 は MP 則を利用して簡易な計算式で求められる。
- 3) 送受信のアンテナ素子数 (M, N) が共に多い MIMO において、ストリーム数 L の並列伝送を行うとき、 L が $\min\{M, N\}$ の 20% 程度以下であれば（例えば、 $N=M=100, L=10$ ）、通信路容量 C は有相関環境の方が大きい。すなわち、 C_0 は C の下限値を与える。
- 4) LOS 環境では、ライスファクタ K の増加と共に、シングルストリーム伝送特性に漸近するが、LOS 環境の代表的な値である $K=10$ 程度では、マルチストリーム伝送の効果が維持されている。
- 5) マルチパス環境において、相関はアンテナの素子間隔が狭くなるほど大きくなる。相関が大きいほど通信路容量が大きくなる伝送方式では、アレーアンテナサイズの小型化を実現できる。

なお、この本文については、[唐沢研究室ホームページの技術レポートページ](#)に [YK-016-rev\[1\]](#)として公開している。

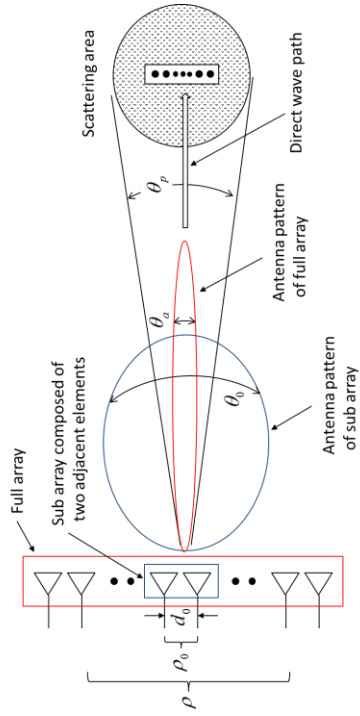
参考文献

- [1] 唐沢好男, “Massive MIMO の情報伝送能力について[修正版],” Tech. Rep. YK-016-rev (私報), 2019.04, http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/ronbun/Massive_MIMO_TR-YK-016_rev.pdf

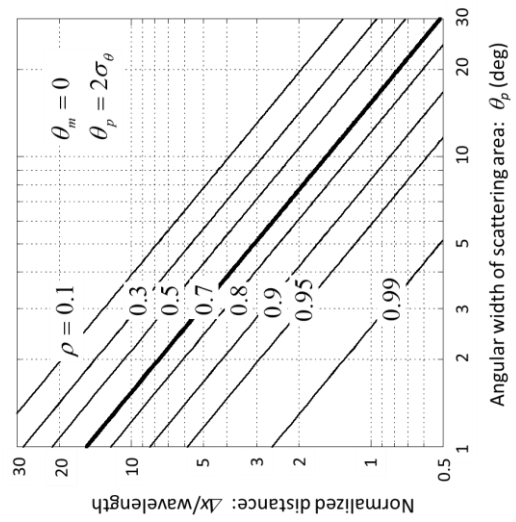
送受信の双方に大規模アレーを有するMassive MIMO (図1)



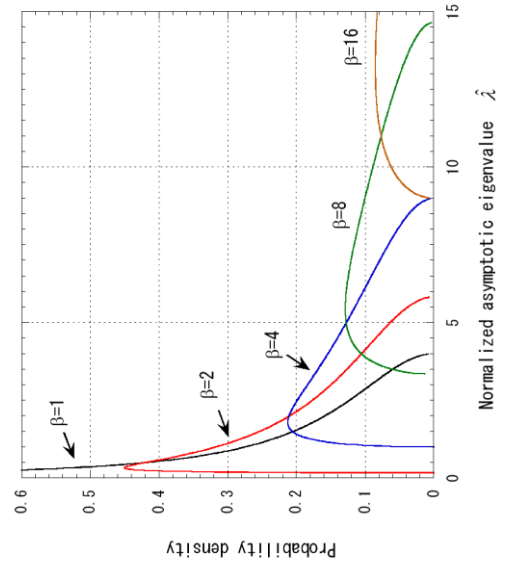
空間相関を有するMassive MIMO伝搬環境 (図2)



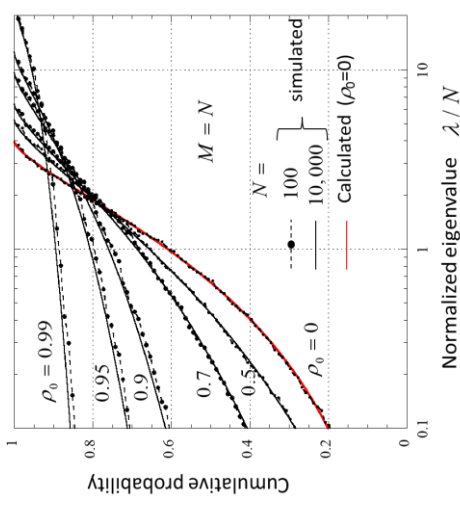
空間相関と到来角広がり antenna間隔との関係 (図3)



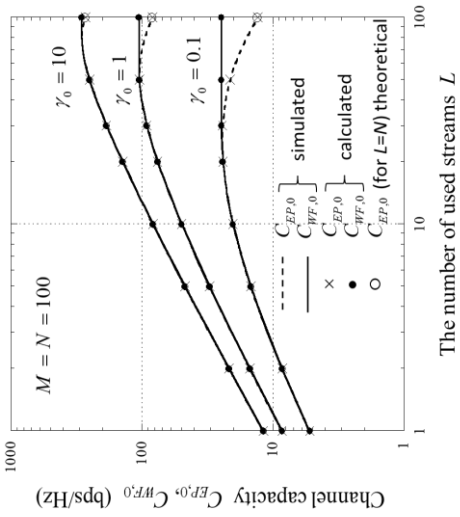
マルチェンコ・パスツール則の漸近固有値分布 (図4)



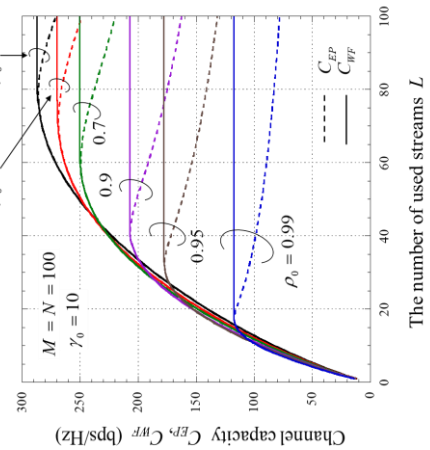
有相関レイリーフェージング環境での漸近固有値分布 (図5)



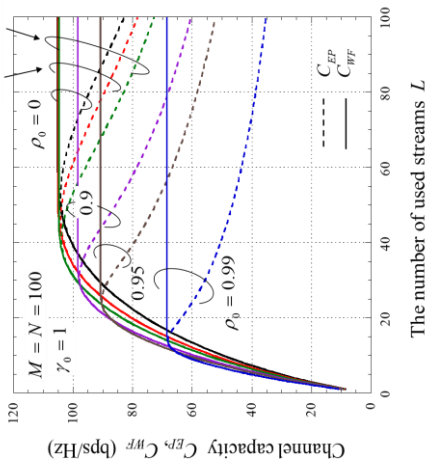
無相関レイリーフェージング環境での通信路容量シミュレーション値と理論値の比較 (図6)



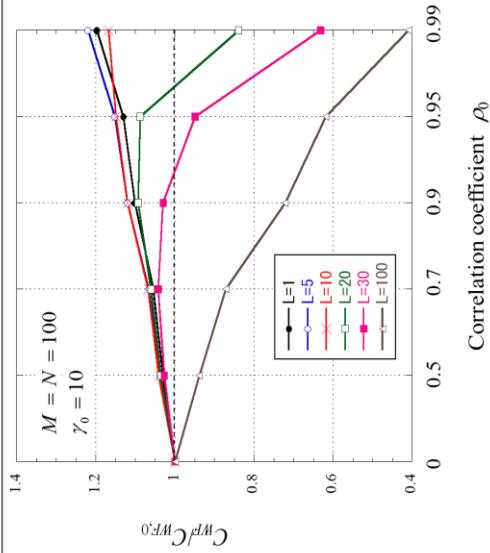
有相関レイリーフェージングでの通信路容量 (SN比=10の場合) (図7(a))



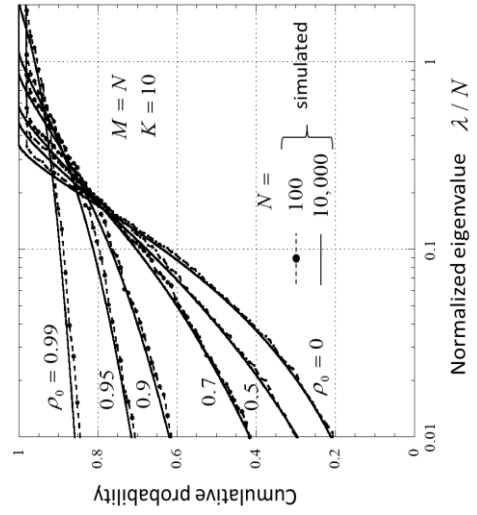
有相関レイリーフェージングでの通信路容量 (SN比=1の場合) (図7(b))



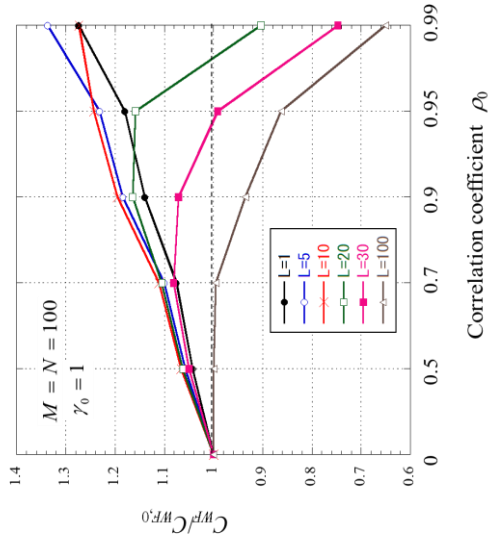
レイリーフェージングでの通信路容量比
(有相関/無相関; SN比=10の場合) (図8(a))



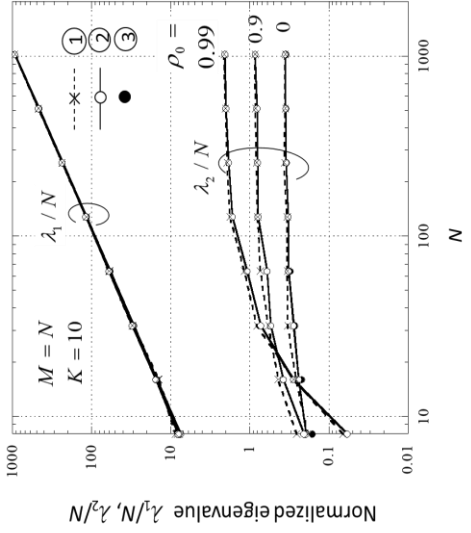
有相関レイリーフェージング環境での漸近固有値分布
($M=N=100$ & $10,000$, $K=10$ の場合) (図9(a))

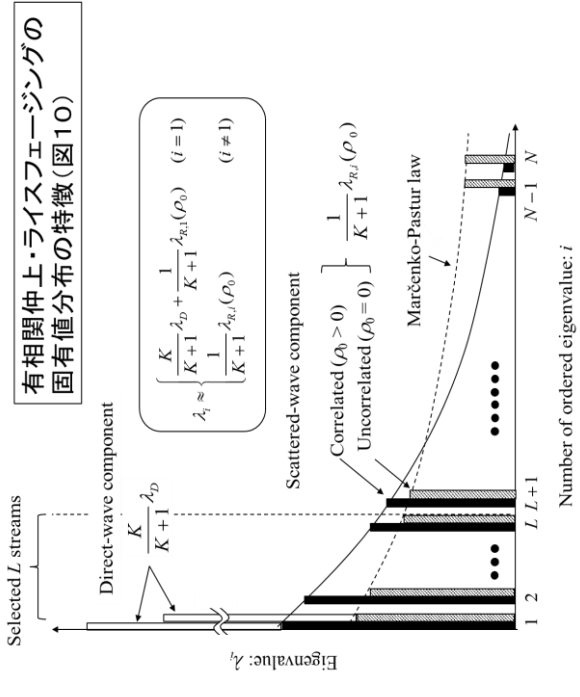


レイリーフェージングでの通信路容量比
(有相関/無相関; SN比=1の場合) (図8(b))

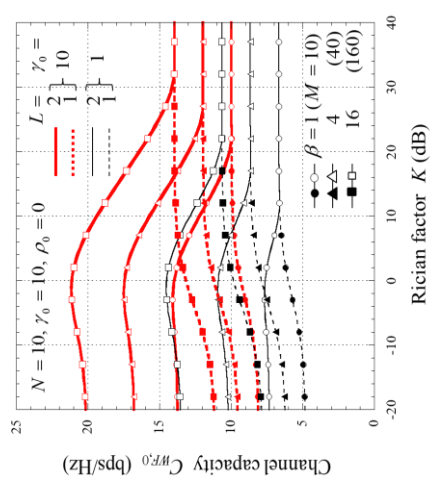


有相関レイリーフェージング環境での第1固有値と
第2固有値に着目 (図9(b))

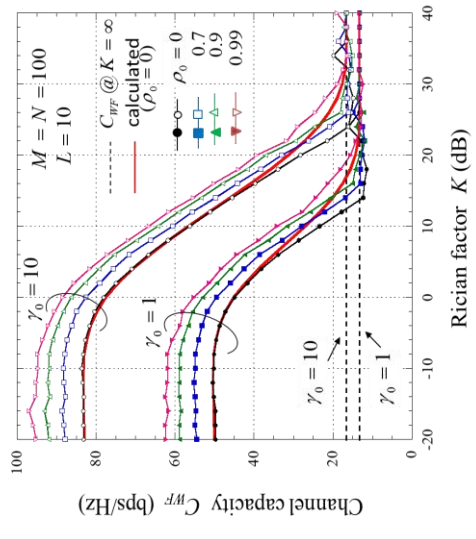




無相関仲上・ライスフェージング環境での通信路容量 (N=10, M=10, 40, 160, L=1, 2 の場合) (図12)



有相関仲上・ライスフェージング環境での通信路容量 (M=N=100, L=10 の場合) (図11)



まとめ

- 1) 全ストリーム数 M に比べて少数 L の直交ストリームを利用するマルチストリーム伝送 (目安として L/N が 20% 程度以下) においては、**空間相関は通信路容量 C を増加させる働きをする。**
 - 2) 空間相関はアンテナ素子間隔が狭くなるときに発生するので、上記 1) により、**アンテナを小型サイズで実現することにメリットが生まれる。**
 - 3) **空間相関が無い場合の通信路容量 C_0 (C_{EPO}, C_{WFO})**は、仲上・ライスフェージングの場合も含めて、マルチエンコンコ・パスツール則に従う漸近固有値分布の性質を取り入れた簡易な計算式から精度よく推定できる。1) より、 $L/N \leq 20\%$ 程度のマルチストリーム伝送において、通信路容量比 C/C_0 は 1 以上の値になるため、 C_0 は**通信路容量の下限値を与える。**
 - 4) **LOS環境**で、ライスファクタ K の値が大きくなると、直接波のみの環境になり、第一固有値のストリームを利用するビームフォーミング伝送 (最大比合成伝送) が唯一のモードになる。しかし、LOS の通常発生する環境である K が 5 ~ 20dB 程度では、第二固有値以下のストリームも利用する**マルチストリーム伝送に十分なメリットが残っている。**
- 有相関時の漸近固有値分布の特性を把握することができたが、その理論推定を可能とするとところまでは至っていない。これが、今後の検討課題である。