

アンテナ・電波伝搬

～その根底にある不思議を探る～



唐沢 好男
(元)電気通信大学

本日の講義のスライドPDFは唐沢研究室ホームページ:

<http://www.radio3.ee.uec.ac.jp> の

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/KEC_Karasawa_Lecture.pdf

からダウンロードできます

自己紹介

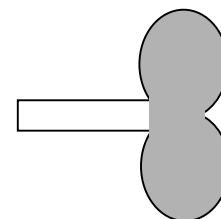
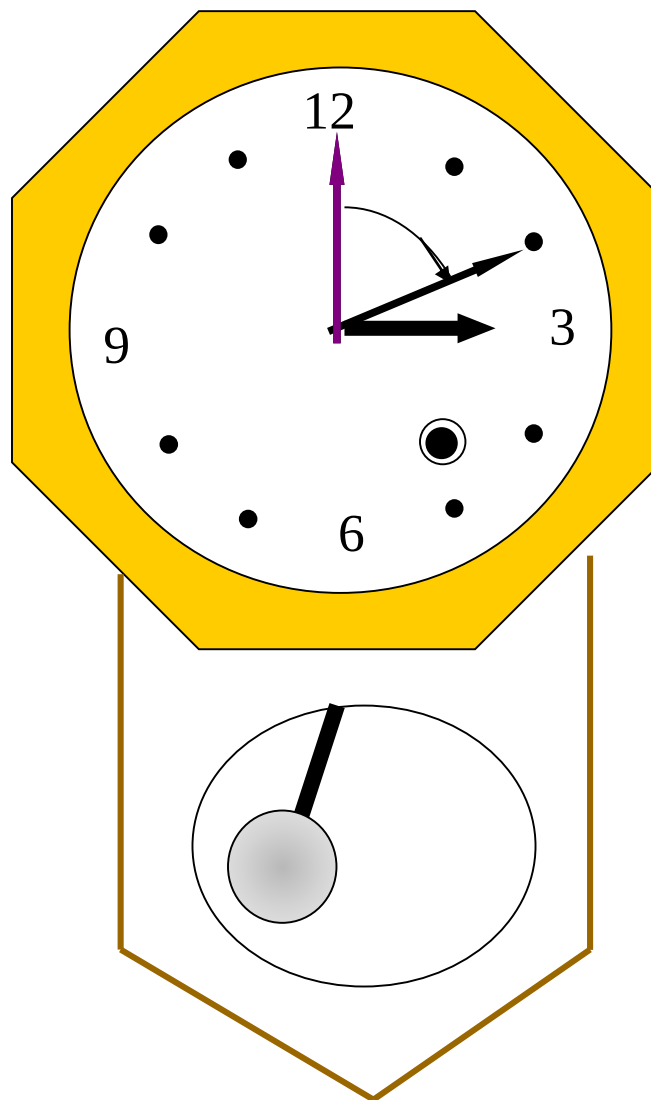
1950年(長野県)生まれ。学部の卒研テーマは結晶成長、就職した会社の部署は半導体課。量子力学を本格的に学びたく大学院受験。合格するも希望の研究室は満杯。このとき、シュレーディンガーを神様とする世界からマックスウェルを神様とする世界に宗旨替え(24歳)。偶然が導いてくれた電波の道であったが、40年以上を歩き続けてみると面白いことがいっぱい。研究者(KDD(現KDDI))、研究マネージャー(ATR)、研究教育者(大学)を経てフリーに。今は、次世代を担う若者に向け、培った電波技術の継承を願って技術レポートをせっせと書いている。唐沢研究室HPより公開中(下記リンク: 唐沢研究室,技術レポートの公開)。

好きな言葉は「セレンディピティ」。周りの人(主に学生)にやたらそれを説くので「セレンディピティ馬鹿」と呼ばれていた。偶然の出会いを重ねながら今日ここまで歩み来た人生そのものに、それを強く感じている(下記リンク: セレンディピティ)。

- [唐沢研究室](#)
- [技術レポートの公開](#) (現時点で57報まで)
- [セレンディピティ](#)

電波伝搬研究者の使命とは...

昔振り子
今クォーツ



講義内容 3点

Part 1 電波の基礎

- ・ 電磁気学から無線へ
- ・ 電磁気学のからくり
- ・ フリスの伝達公式

Part 2 電波伝搬

- ・ 伝搬理解に重要な確率分布: 正規分布とその仲間たち
- ・ ランダムウォークで巡る確率分布

Part 3 アレーアンテナの働き

- ・ スペースダイバーシチ
- ・ MIMO

Part 1 電波の基礎

- (1) 電磁気学から無線へ
- (2) 電磁気学のからくり
- (3) フリスの伝達公式

(1) 電磁気学から無線へ(18世紀～)

キャベンディッシュ

クーロン

アンペア

ファラデー

マクスウェル

ヘルツ

マルコーニ

テスラ

短距離無線通信

長距離無線通信(電離層反射)

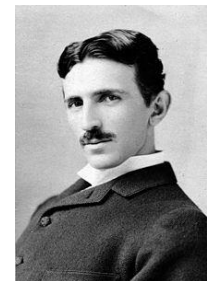
対流圏散乱通信

無線電力伝送

このうち、下線の偉人を、教科書「[電波システム工学](#)」
(信学会/コロナ社)のコラムで紹介

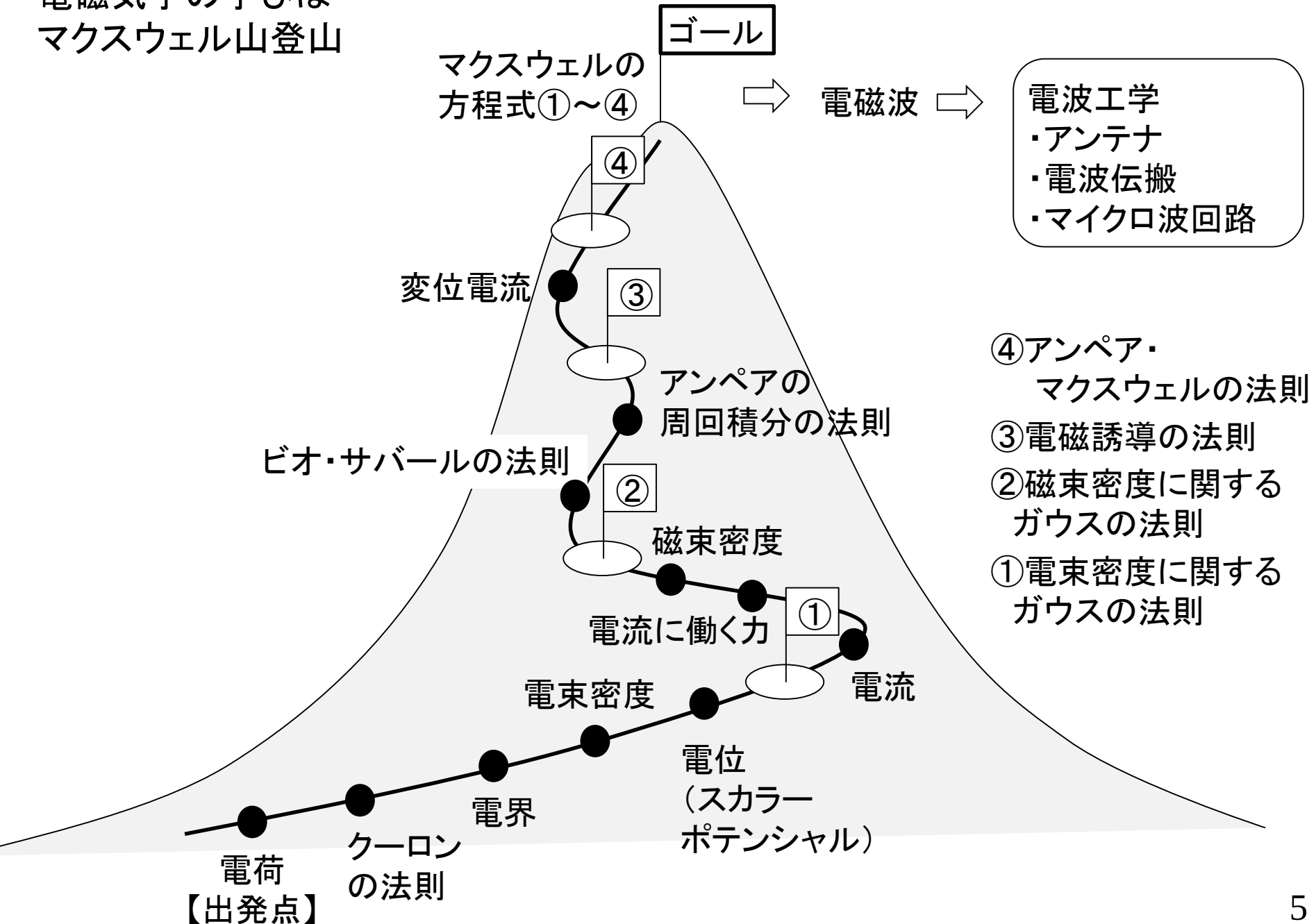


(マルコーニ: 1874-1937)



(テスラ: 1856-1943)

電磁気学の学びは マクスウェル山登山



電磁気学： マクスウェルの方程式

4つの法則よりなる連立方程式ががっちりスクラムを組んで、
電磁現象の全ての仕組みを説明する(WhyではなくHowの意味で)

- ① $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ 電束密度に関するガウスの法則
(電束(電気力線)の出発点は電荷)
- ② $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 磁束密度に関するガウスの法則
(磁束(磁力線)の出発点はない、ループになっている)
- ③ $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ (ファラデーの)電磁誘導の法則
(磁力線の密度が変化するとき、その周りに
電界の渦ができる)
- ④ $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ アンペア・マクスウェルの法則
(電流があると、あるいは、電束密度の時間変化が
あると、その周りに磁界の渦ができる)

法則は経験則である。これまで、反証が無く正しいと信じられている。
我々は、黙って受け入れるしかない。法則の正しさを証明できる人は誰もいない。 6

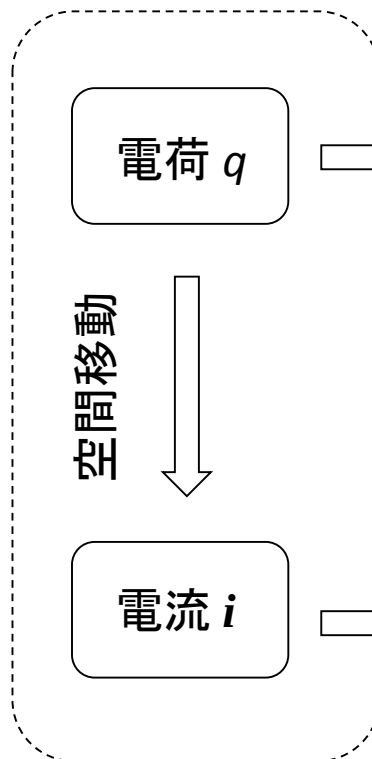
電磁気学 マクスウェルの方程式

4つの法則

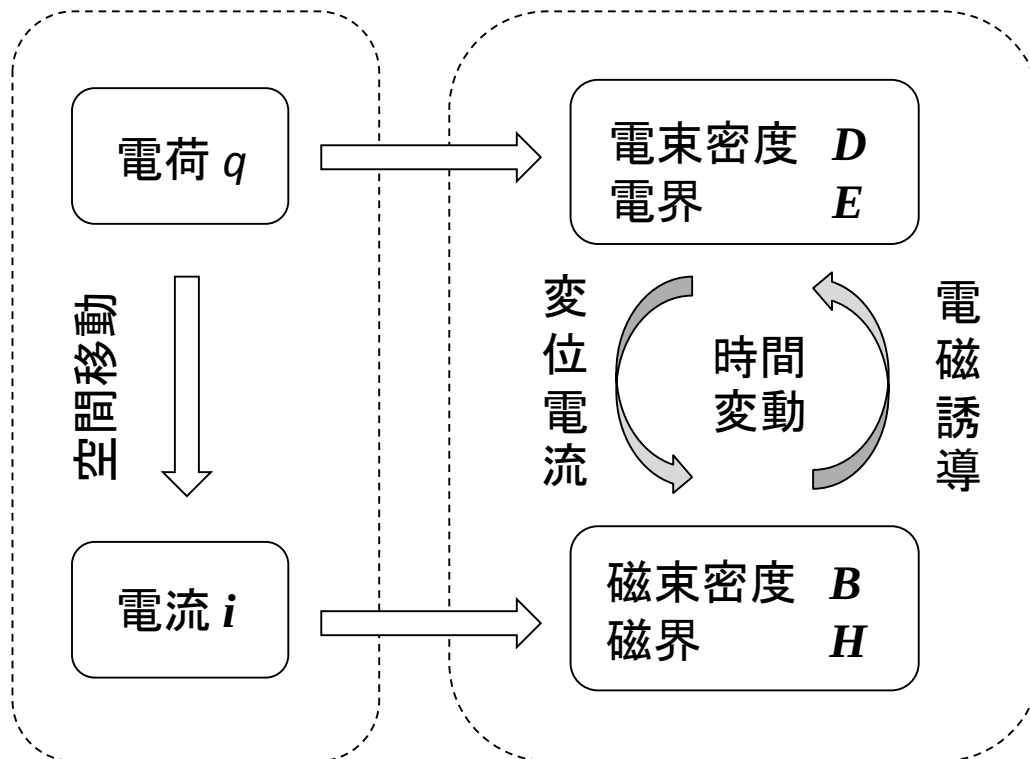
- ・電束密度に関する
ガウスの法則
- ・磁束密度に関する
ガウスの法則
- ・ファラデーの
電磁誘導の法則
- ・アンペール-
マックスウェルの法則

電界と磁界
の振る舞い
に関する力
学の理論

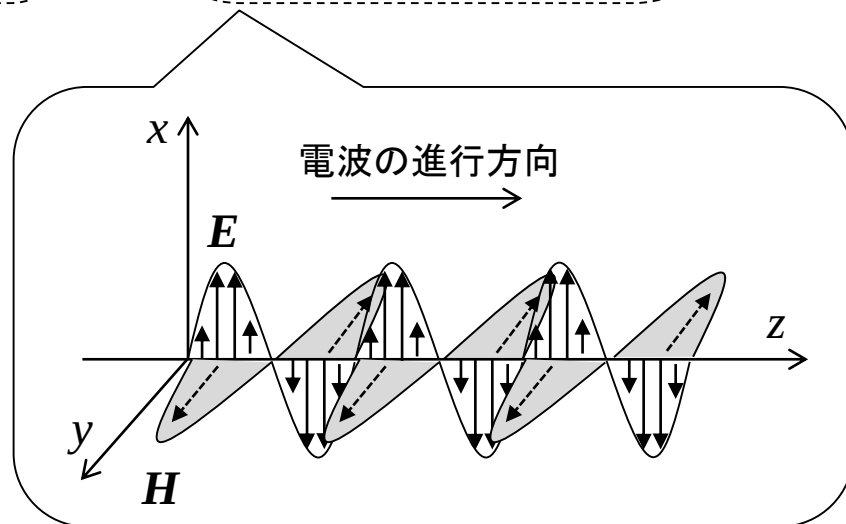
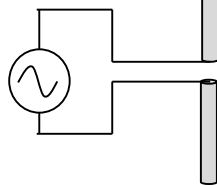
電波の発生



電波の伝搬



アンテナ



(2) 電磁気学のからくり

式の導出を含めた詳細な説明は

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-026_EM-4.pdf

電磁気学は19世紀の後半に完成した理論

20世紀に吹き荒れた力学の革命(相対性理論)を無傷で乗り越え、現代に生きる綻びのない理論

なぜ乗り越えることができたか、それは、マクスウェルの方程式が、相対性理論が規範とした座標変換:ローレンツ変換に対して不変であったから(マクスウェルがそれを意識して組み入れたわけではない。式を作ったらそうになっていたということ)

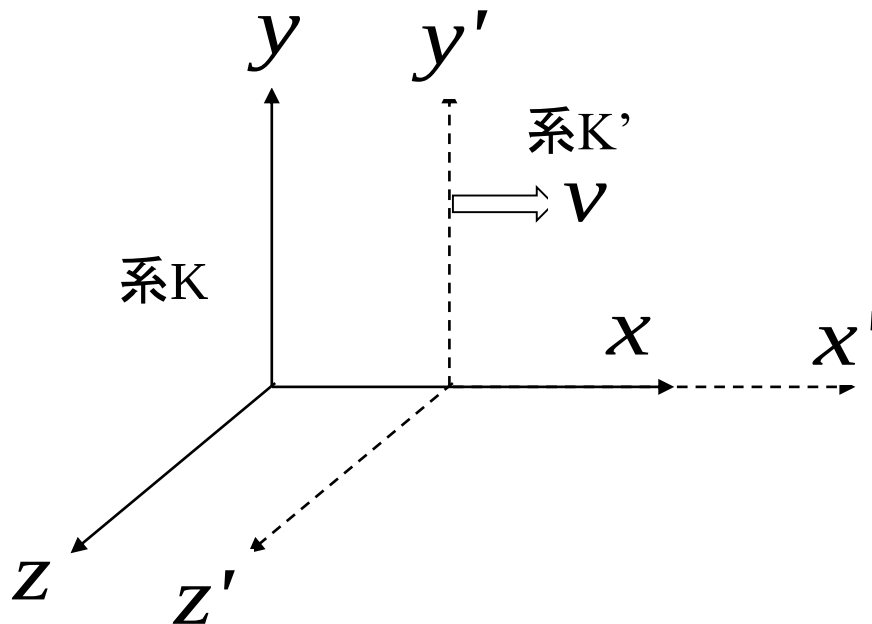
当時の力学:ニュートン力学:その根拠とする座標変換はガリレイ変換

ガリレイ変換の例

速度 v で走る電車の中で、進行方向に向かって速度 v_0 でボールを投げるとき、外から見る人には、ボールの速度は $v + v_0$

マクスウェルの方程式は、ガリレイ変換による不変性が厳密には成り立たない → 厳密性に欠ける理論(近似理論)と見られていた

物理学における慣性系に対する法則の不変性とは



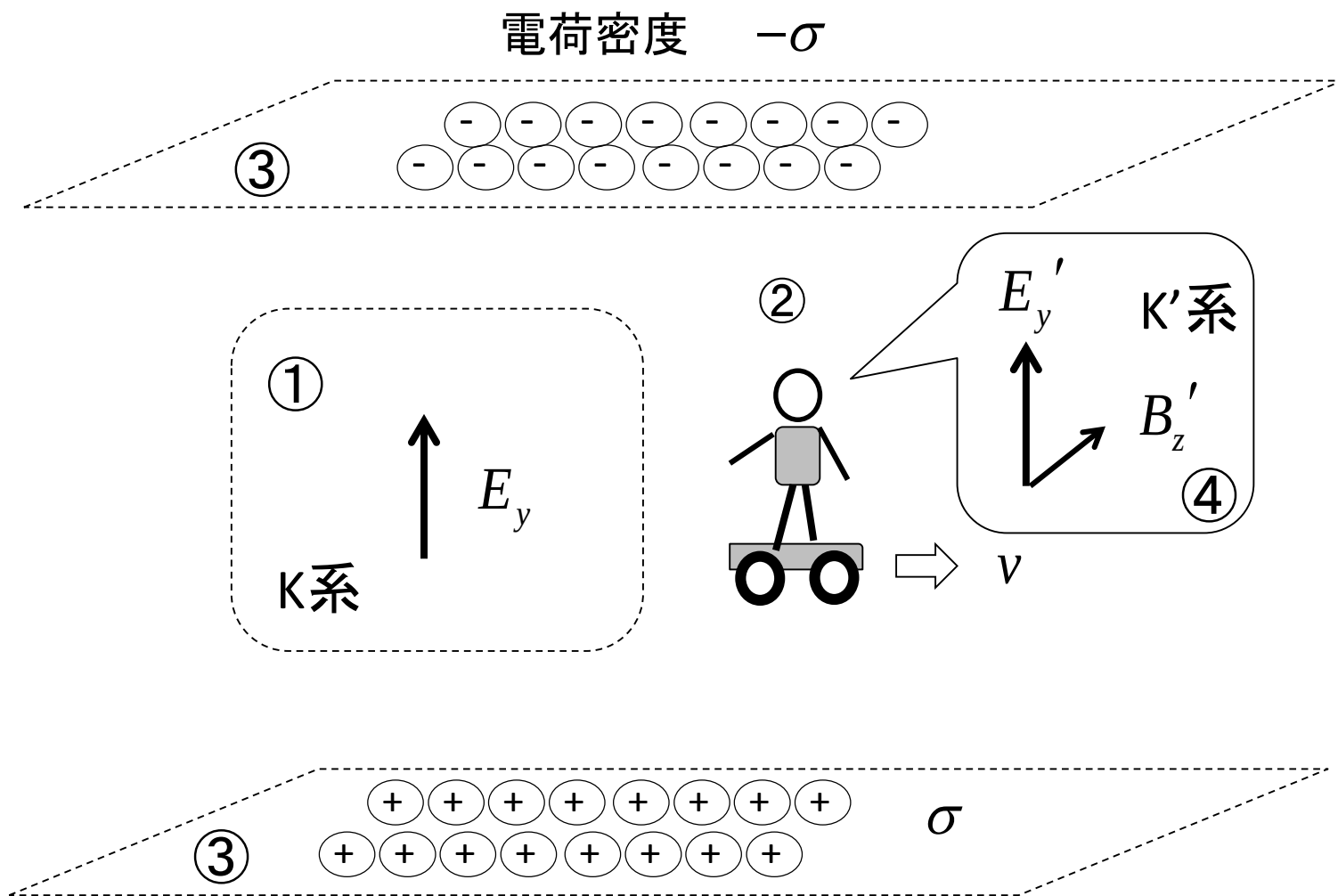
慣性系：
等速直線運動する系
KとK'

どの慣性系でも、物理法則は同じ式で表される
例えば、電磁誘導の法則では

$$\text{K系: } \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \leftrightarrow \quad \text{K'系: } \nabla \times \mathbf{E}' = -\frac{\partial \mathbf{B}'}{\partial t'}$$

でも、ガリレイ変換で座標変換してもこの関係が成り立たない

止まっている系(K)に静電界 E が有る空間に対して、
動いている人はどう感じるか？



動いている人には、電荷が左に動いているように見える。電荷が動くと電流ができる。
電流の向きは上下反対方向。この電流によって、動いている人は磁界を感じる。

ローレンツ変換

- 1) 相対性原理 (全ての慣性系は同等である)
- 2) 光速不変の原理 (光の速度は光源や観測者の運動とは無関係に決まる)

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 &= 0 \\ x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -\gamma v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\gamma v / c^2 & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}$$

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \geq 1 \quad (\text{ローレンツ因子})$$

マクスウェルの方程式をローレンツ変換すると

$$\boxed{\nabla' \times \mathbf{E}' + \frac{\partial \mathbf{B}'}{\partial t'}} = \gamma \left(\boxed{\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}} \right) + \gamma v \left(\boxed{\nabla \cdot \mathbf{B}} \right) \mathbf{i}' = 0$$

$$\boxed{\nabla' \cdot \mathbf{B}'} = \gamma \boxed{\nabla \cdot \mathbf{B}} + \frac{\gamma v}{c^2} \left(\boxed{\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}} \right) \cdot \mathbf{i}' = 0$$

(一つの方程式をK'系に変換すると、K系の二つの方程式が現われて不変性を保つように働いている。
他の2式も同じように成立する)

アインシュタインはこのことに気付いていた

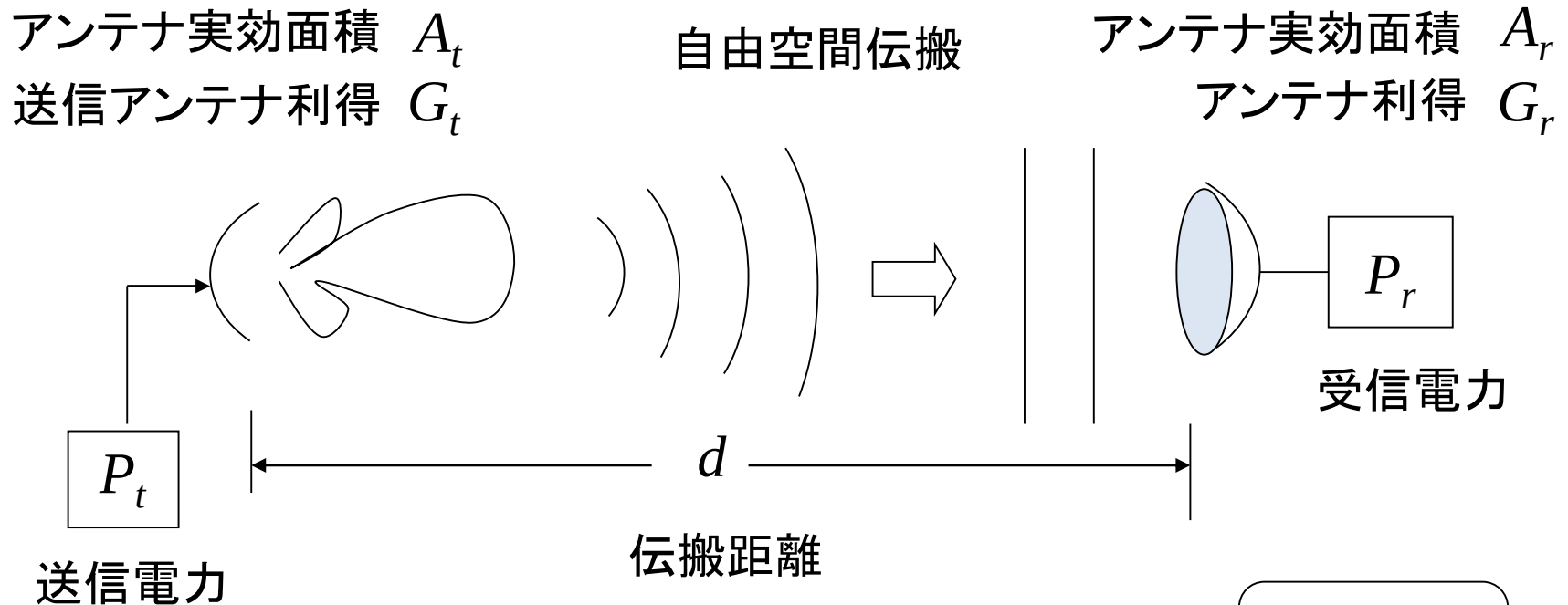
ニュートン力学と電磁気学の矛盾に対して、軍配を電磁気学に上げた

→ 電磁気学は相対性理論誕生の架け橋となった

(3) フリスの伝達公式

無線伝送のイロハのイ

フリスの伝達公式: その出発点

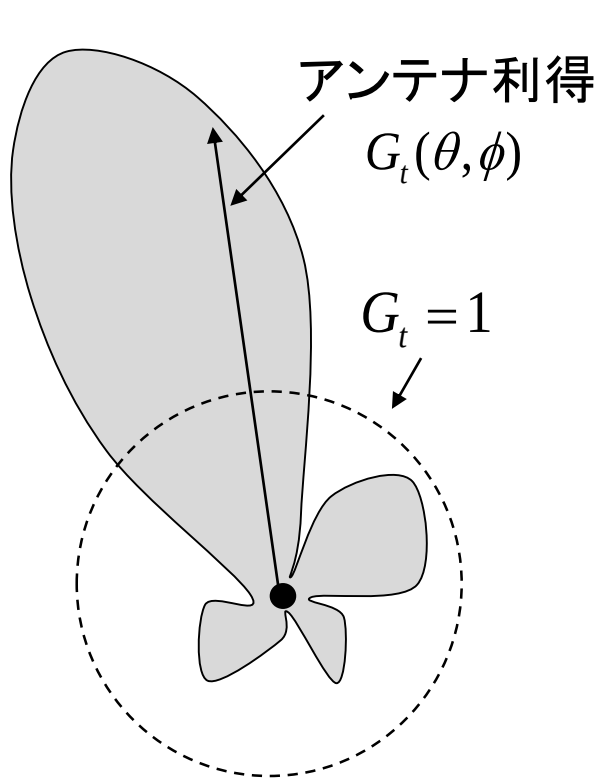


$$P_r = P_t \times G_t \times \frac{1}{4\pi d^2} \times A_r$$

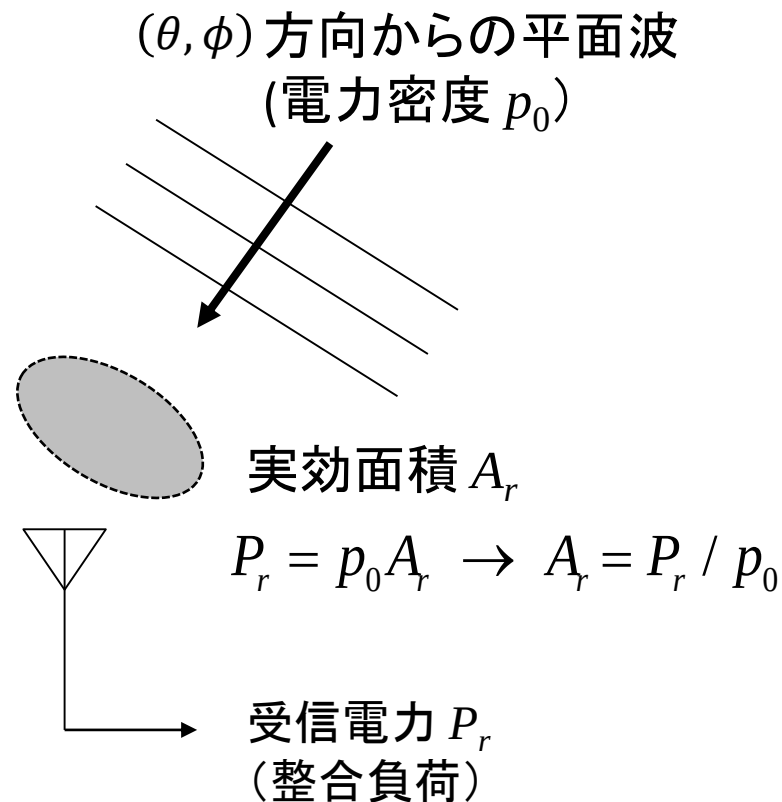
[W] : [W] [1/m²] [m²]

これをどう
定めるか

アンテナ利得と実効面積



アンテナ利得
(送信アンテナの概念)

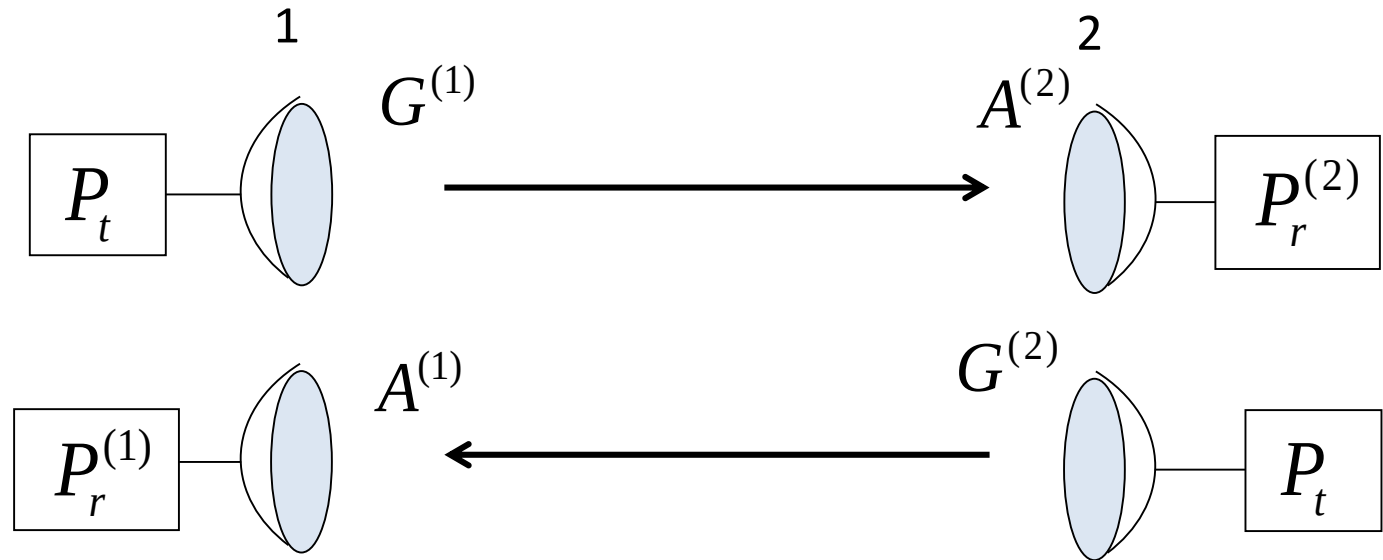


アンテナ実効面積
(受信アンテナの概念)

アンテナの理論: $G_r = G_t, A_t = A_r$

アンテナ利得と実効面積の関係 : 2段階で両者の関係を求める

第一段階(両方向回線の相反定理)



$$\left. \begin{aligned} P_r^{(2)} &= A^{(2)} \frac{1}{4\pi d^2} G^{(1)} P_t \\ P_r^{(1)} &= A^{(1)} \frac{1}{4\pi d^2} G^{(2)} P_t \end{aligned} \right\} \xrightarrow{P_r^{(1)} = P_r^{(2)}} \frac{A^{(1)}}{G^{(1)}} = \frac{A^{(2)}}{G^{(2)}} = \text{アンテナによらず一定}$$

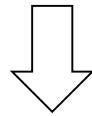
第一段階(両方向回線の相反定理) → A/G は一定

第二段階

(何か一つアンテナを選んで、あるいはどこか1方向について、
 G と A の関係が理論的に求められればよい)

正攻法: マクスウェルの方程式を使って解ける微小ダイポール
アンテナより(虫明: アンテナ・電波伝搬、信学会)

その他: 大口径アンテナの正面方向の利得と開口面積の関係より



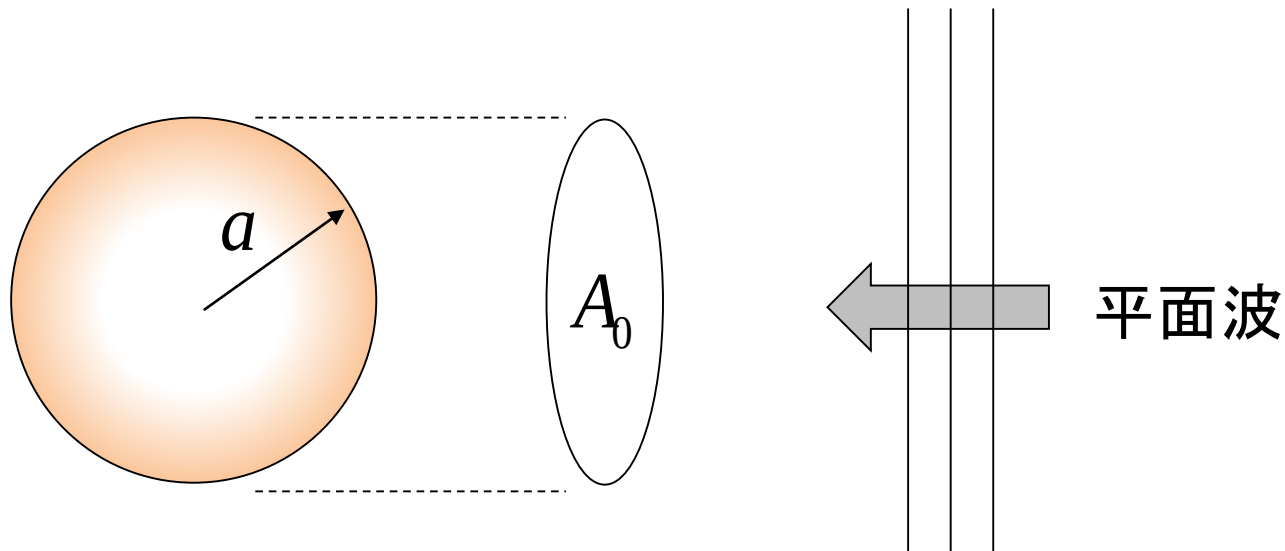
受信アンテナ利得 G と実効面積 A の関係

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

導出はどの方法でもそれなりに骨が折れて、
自明に出てくる式ではない

無指向性アンテナ ($G=1$) の実効面積

$$A_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$



受信球
($ka = 1$ の球)

(k : 電波の波数、 $k=2\pi/\text{波長}$)

実効面積
(円周1波長の円)

例えば

$f=1\text{GHz}$, $\lambda=30\text{ cm}$

→ 直径10cmの円

無線伝送の基本式： フリスの伝達公式

送受信の関係式

$$P_r = P_t \times G_t \times \frac{1}{4\pi d^2} \times A_r$$

受信アンテナ利得 G_r と実効面積 A_r の関係

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

frisの伝達公式

$$P_r = P_t G_t \frac{1}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

$$= \frac{1}{L_p} G_r G_t P_t$$

自由空間伝搬損失: L_p

$$L_p = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

無線伝送の基本式： フリスの伝達公式

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r$$

ここから言えること

アンテナの特性(利得)が周波数に依存しないとき、
周波数が高くなるほど、受信強度は弱くなる

Friisの原著論文

fairly accurate calculation of the output wave shapes produced.

A comparison of typical laboratory wave shapes with similar field records of lightning surges is given in Fig. 12. By reconnecting the capacitors of the generator in

its position for making a comprehensive study of lightning hazards in relation to aircraft¹⁴ and studies on means of protection to minimize such hazards.

¹⁴ J. M. Bryant and M. Newman, "Lightning discharge investigation—I," University of Minnesota Eng. Exp. Sta., Technical Paper No. 38; April, 1942.

A Note on a Simple Transmission Formula*

HARALD T. FRIIS†, FELLOW, I.R.E.

Summary—A simple transmission formula for a radio circuit is derived. The utility of the formula is emphasized and its limitations are discussed.

INTRODUCTION

THIS NOTE emphasizes the utility of the following simple transmission formula for a radio circuit made up of a transmitting antenna and a receiving antenna in free space:

$$P_r/P_t = A_r A_t / d^2 \lambda^2 \quad (1)$$

where

* Decimal classification: R120. Original manuscript received by the Institute, December 6, 1945.

† Bell Telephone Laboratories, Holmdel, N. J.

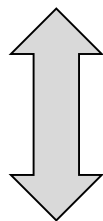
P_t = power fed into the transmitting antenna at its input terminals.	} Same units of power
P_r = power available at the output terminals of the receiving antenna.	
A_r = effective area of the receiving antenna.	} Same units of length
A_t = effective area of the transmitting antenna.	
d = distance between antennas.	
λ = wavelength.	

The effective areas appearing in (1) are discussed in the next section and this is followed by a derivation of the formula and a discussion of its limitations.

フリスの論文の式

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{A_r A_t}{(d\lambda)^2}$$

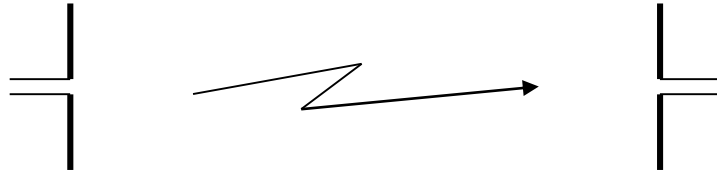
$$\begin{pmatrix} A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \\ A_t = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_t \end{pmatrix}$$



同じ式
でも、見える景色が違う？

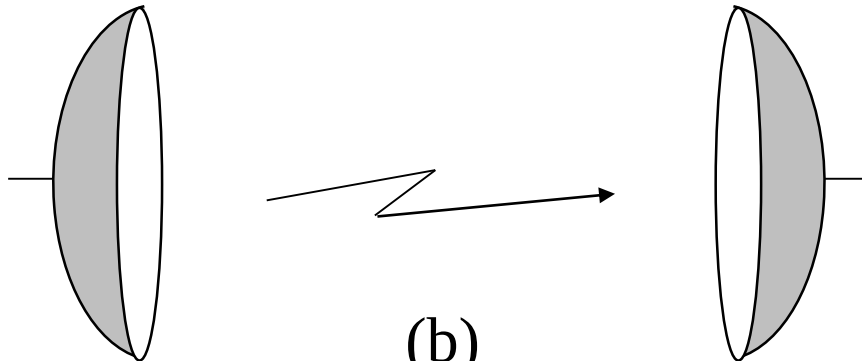
$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r$$

アンテナ特性が周波数によらないとき、受信強度周波数の関係は？



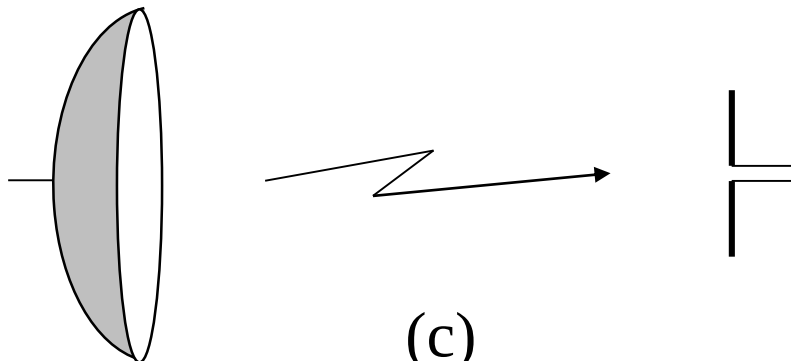
(a)

[アンテナ利得一定]
周波数が高くなると
受信強度は弱くなる



(b)

[アンテナ面積一定]
周波数が高くなると
受信強度は強くなる

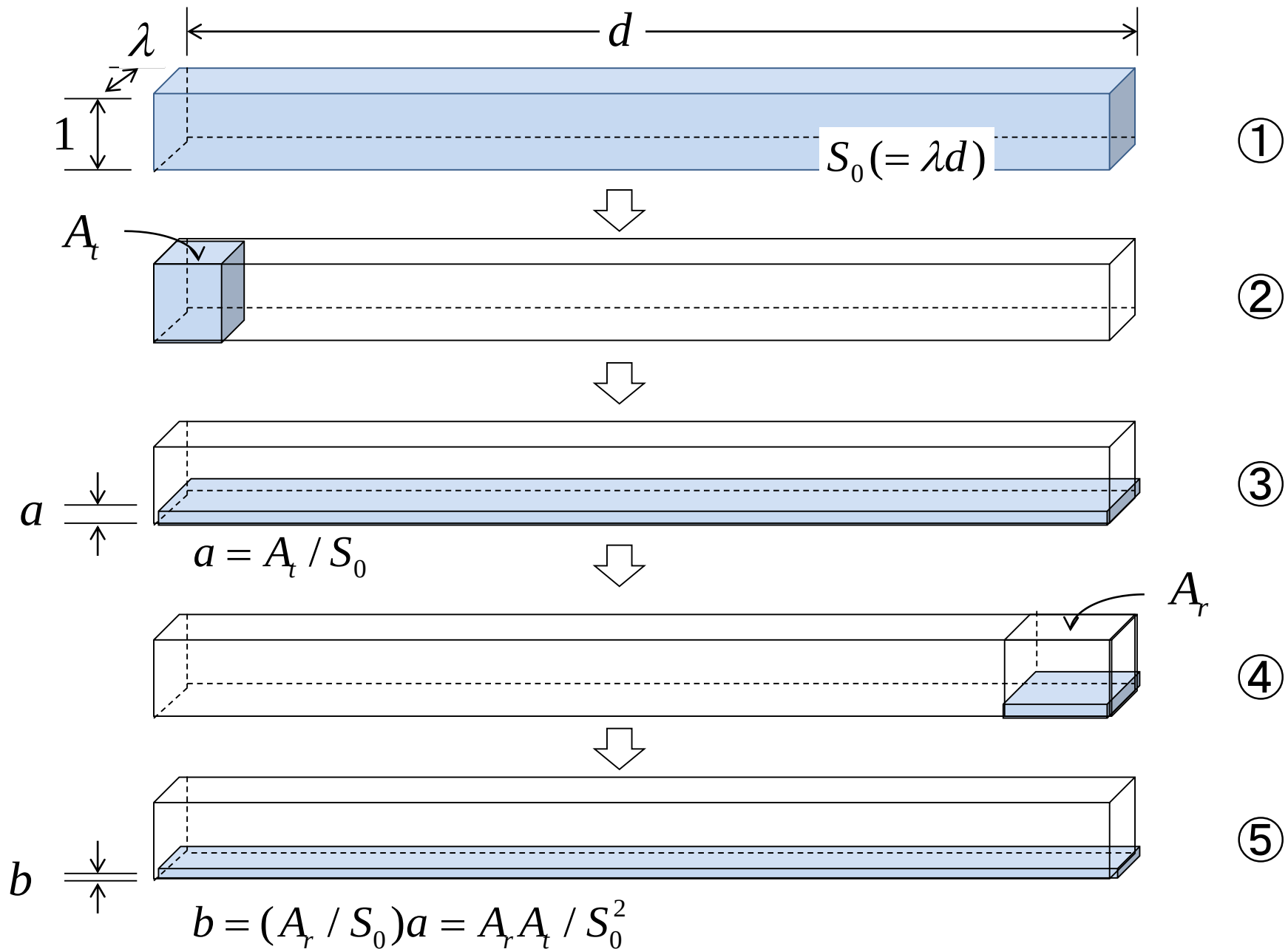


(c)

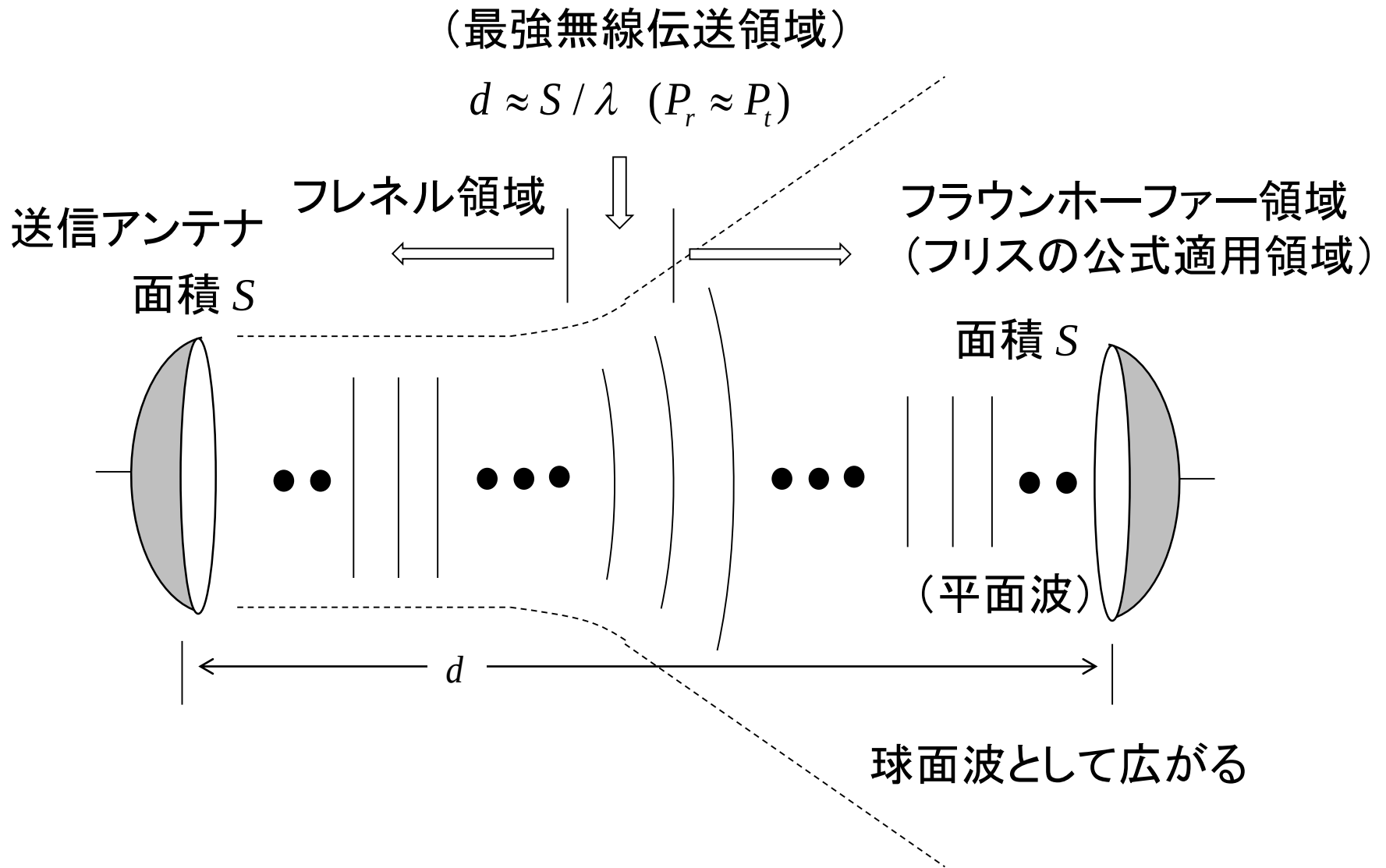
受信強度は変わらない

質問自体が正しくない

フリスの公式を忘れたとき



フリスの公式の適用範囲と最強の無線伝送



Part 2: 電波伝搬

- 各種伝搬モード(脚注)
- 伝搬理解に重要な確率分布:

正規分布とその仲間たち

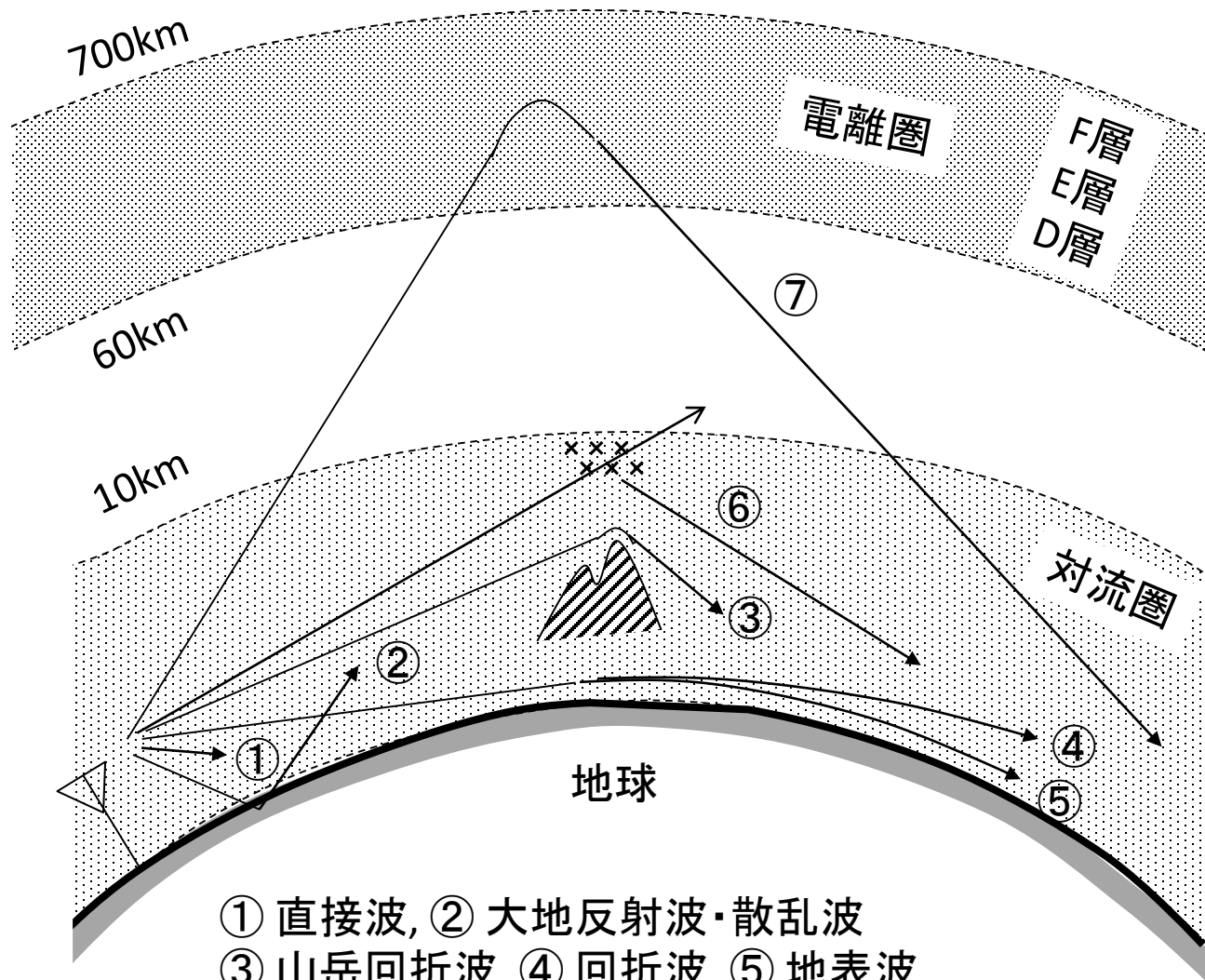
- ランダムウォークで巡る確率分布

入門書: 唐沢, 藤井: [電波システム工学](#), コロナ社, 2020

専門書: 進士昌明(編): [無線通信の電波伝搬](#), 電子情報通信学会, 1992

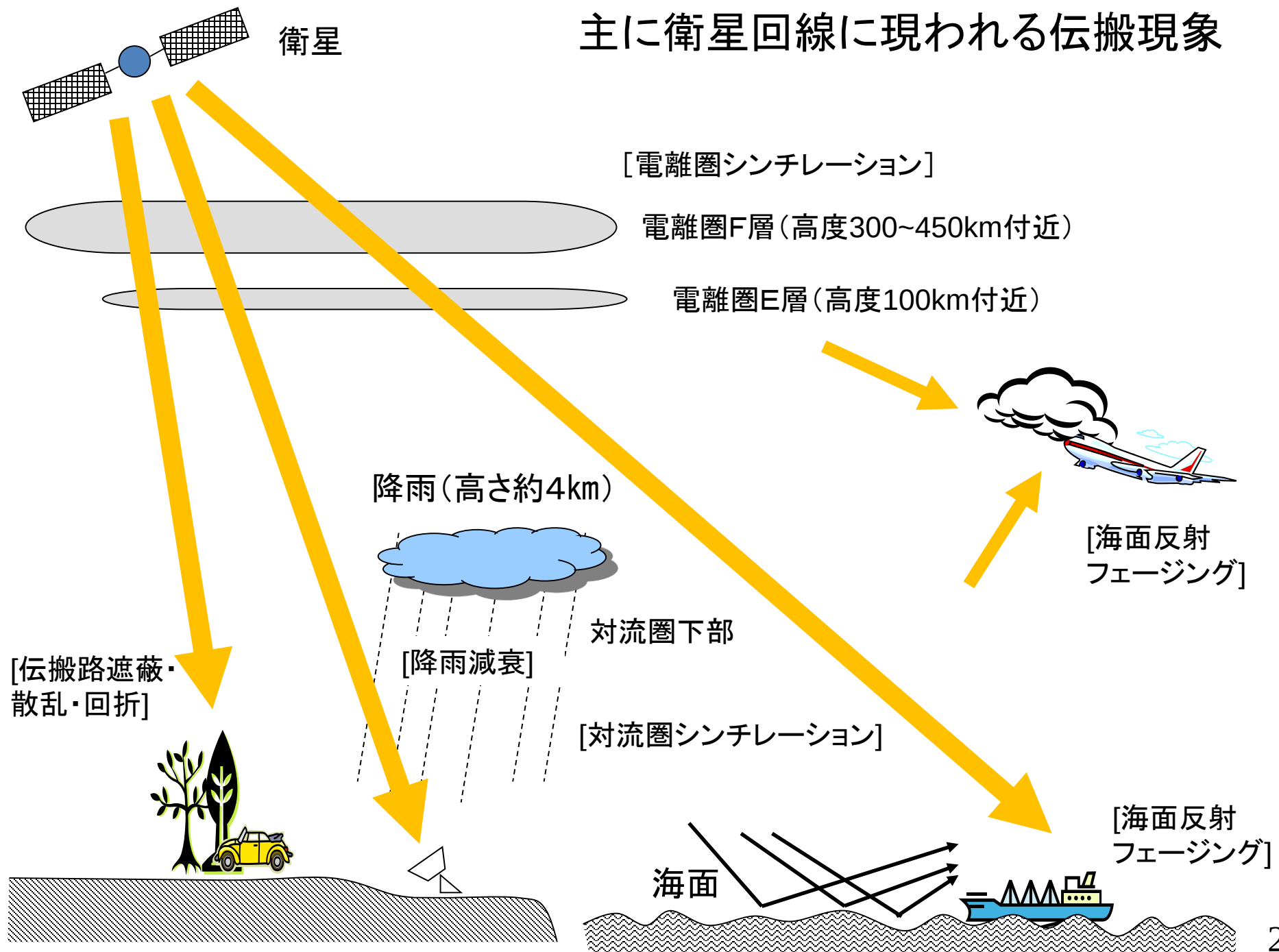
移動伝搬: 唐沢: [改訂 デジタル移動通信の電波伝搬基礎](#), コロナ社, 2016

地上系無線回線に現われる伝搬現象



- ① 直接波, ② 大地反射波・散乱波
③ 山岳回折波, ④ 回折波, ⑤ 地表波
⑥ 対流圏散乱波, ⑦ 電離層(F, E, D層)反射波

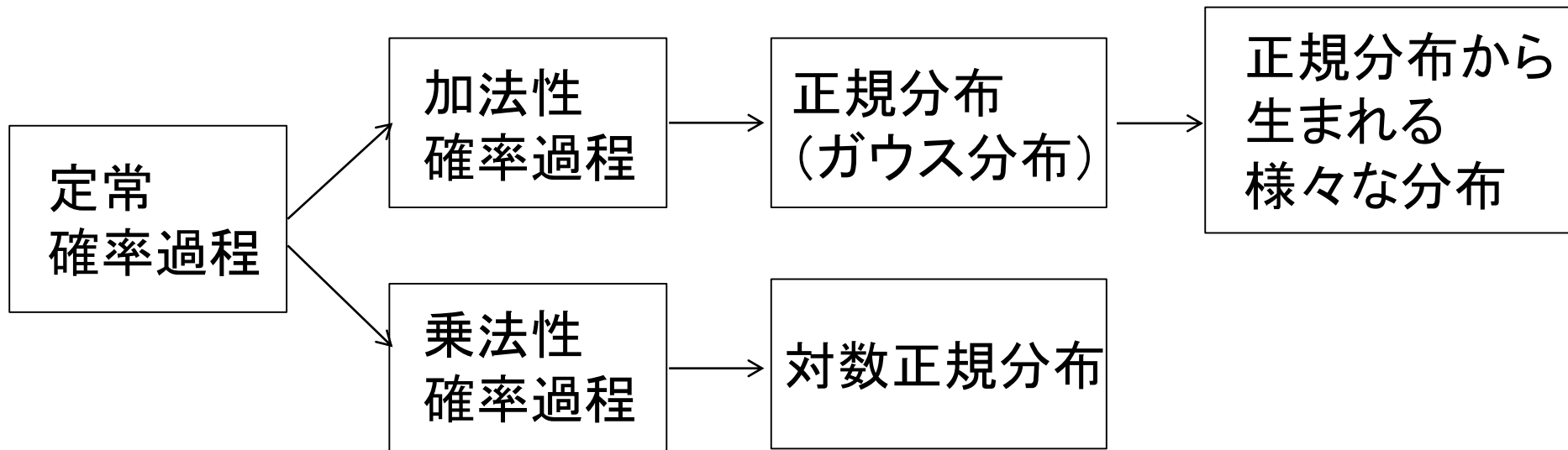
主に衛星回線に現われる伝搬現象



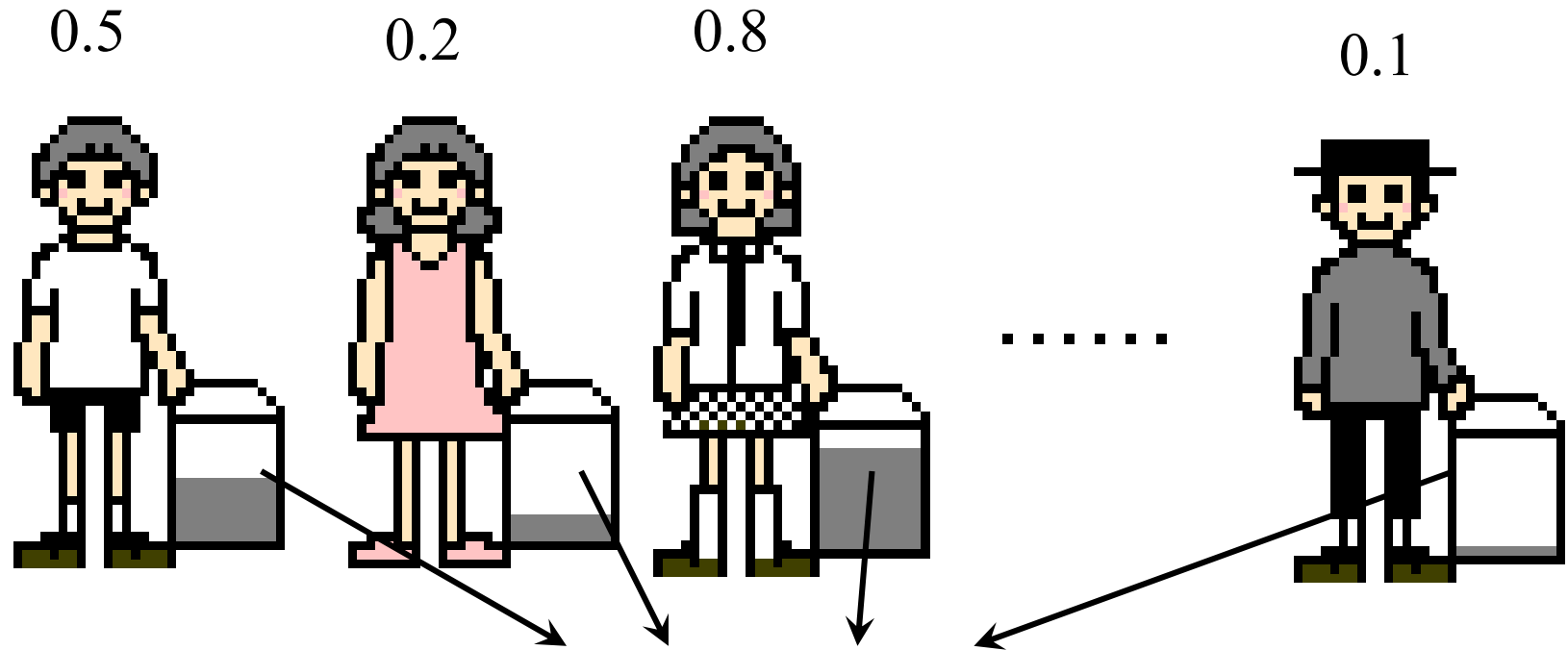
電波伝搬と確率過程

電波伝搬： 電波と自然現象との関わりを扱う分野

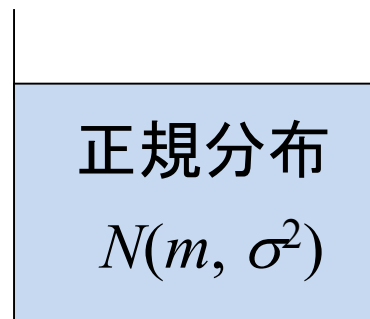
不規則媒質中の電波伝搬 → 確率過程



正規分布(Normal distribution): 加法性確率過程 (Additive Stochastic Process)



中心極限定理
Central limit theorem



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

中心極限定理 (Central Limit Theorem)

$$\hat{X} = (X_1 + X_2 + \cdots + X_N) / N$$



x_i : 同一かつ独立な分布 (i.i.d.)
(もう少し条件を緩めることも可能)

N が十分大きいとき、正規分布になる

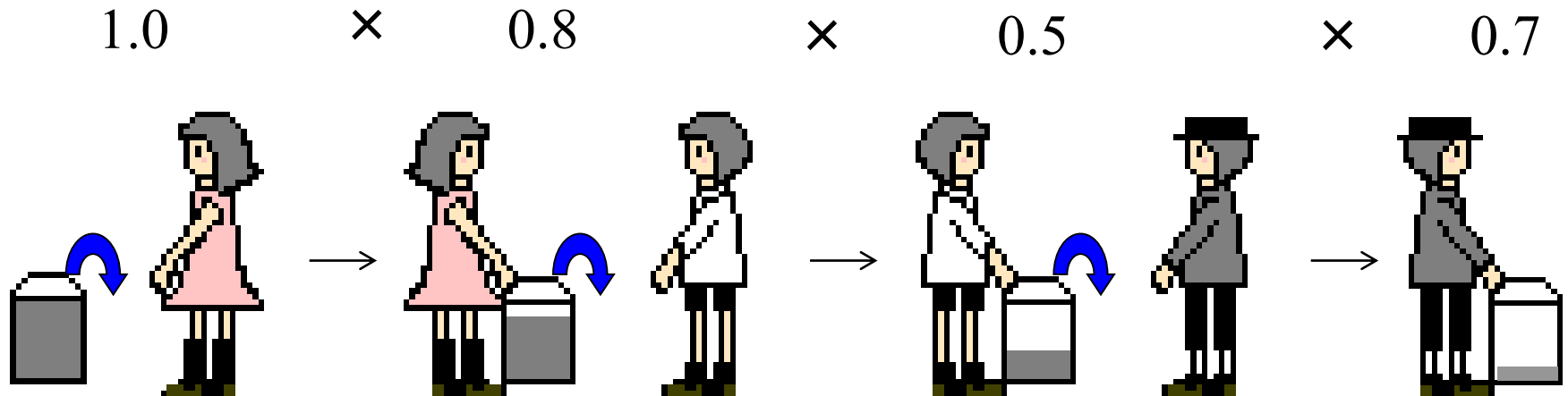
種々の誤差要因が足し算される現象の物理量は
正規分布をする $\Rightarrow$ **正規分布は確率分布の基本分布**

この証明は、どの確率の教科書にも書かれていて、さほど難しくない。
しかし、その証明を理解するためには、確率の和の分布を求める
確率分布の特性関数(あるいは積率母関数)の知識が必要

对数正規分布：積算的確率過程 (Multiplicative Stochastic Process)

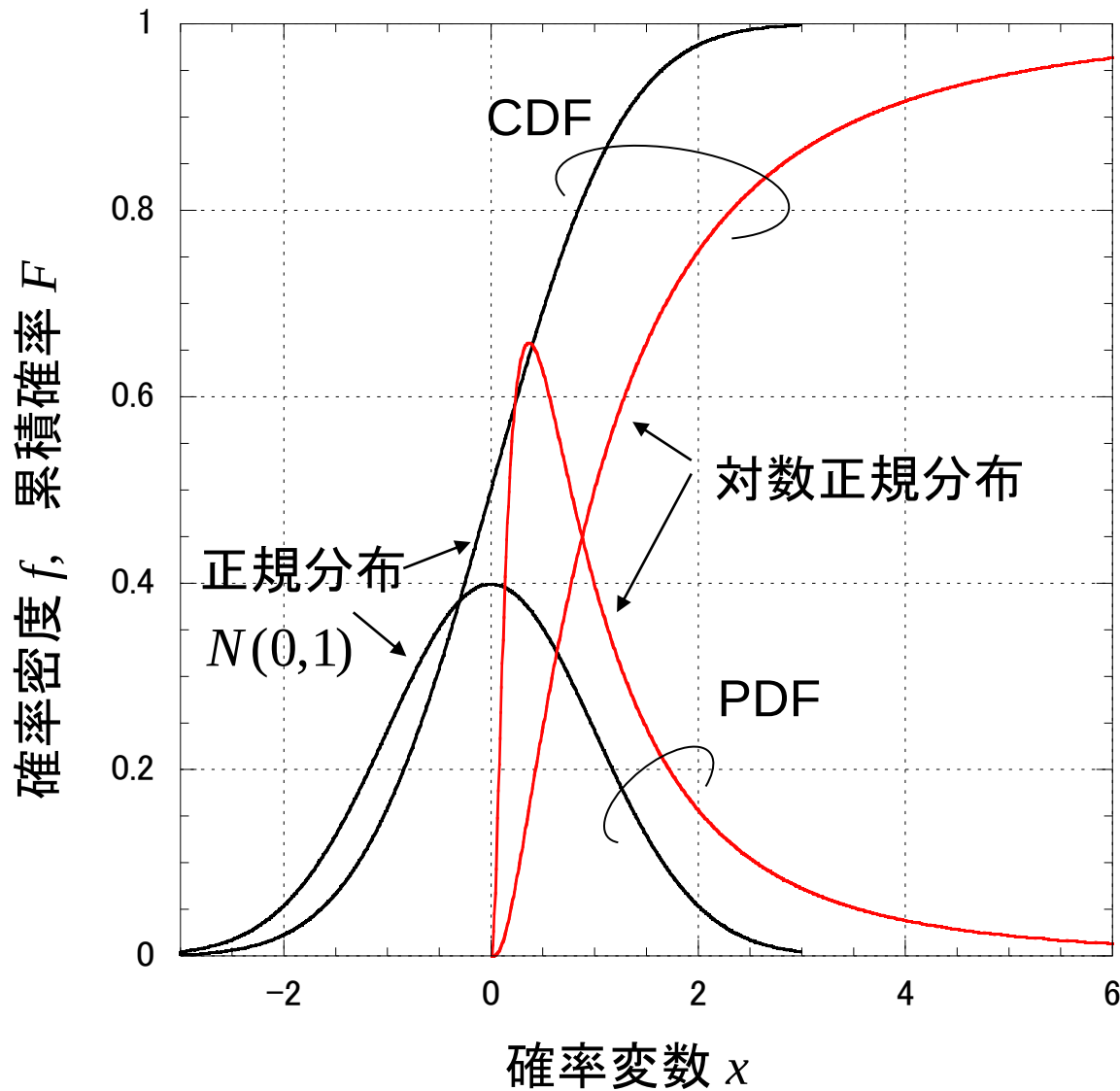
$$X = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_N$$

$$\log x = \log x_1 + \log x_2 + \log x_3 + \cdots + \log x_N$$



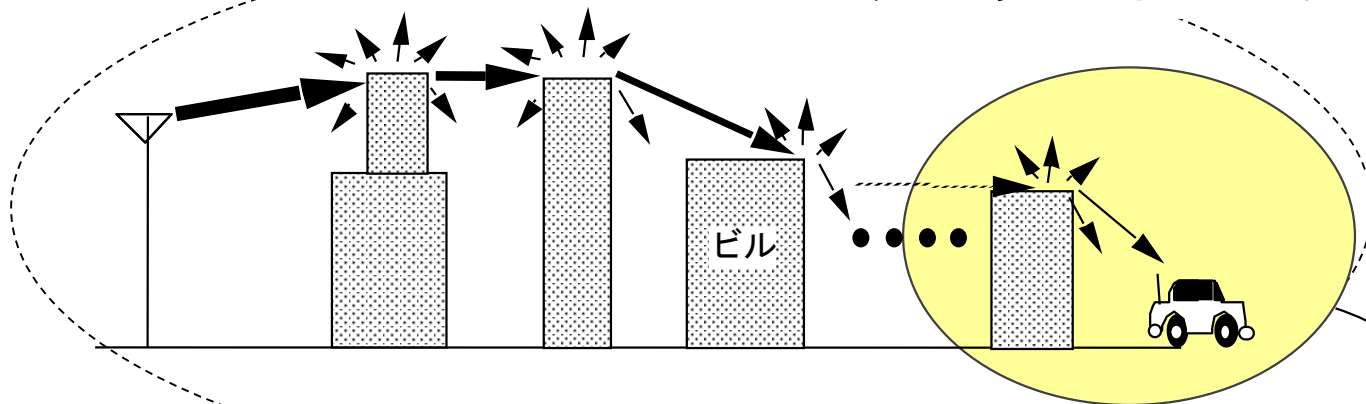
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp \left\{ -\frac{(\log x - m)^2}{2\sigma^2} \right\}$$

正規分布と対数正規分布の 確率密度関数(PDF)と累積分布関数(CDF)



移動伝搬の確率過程

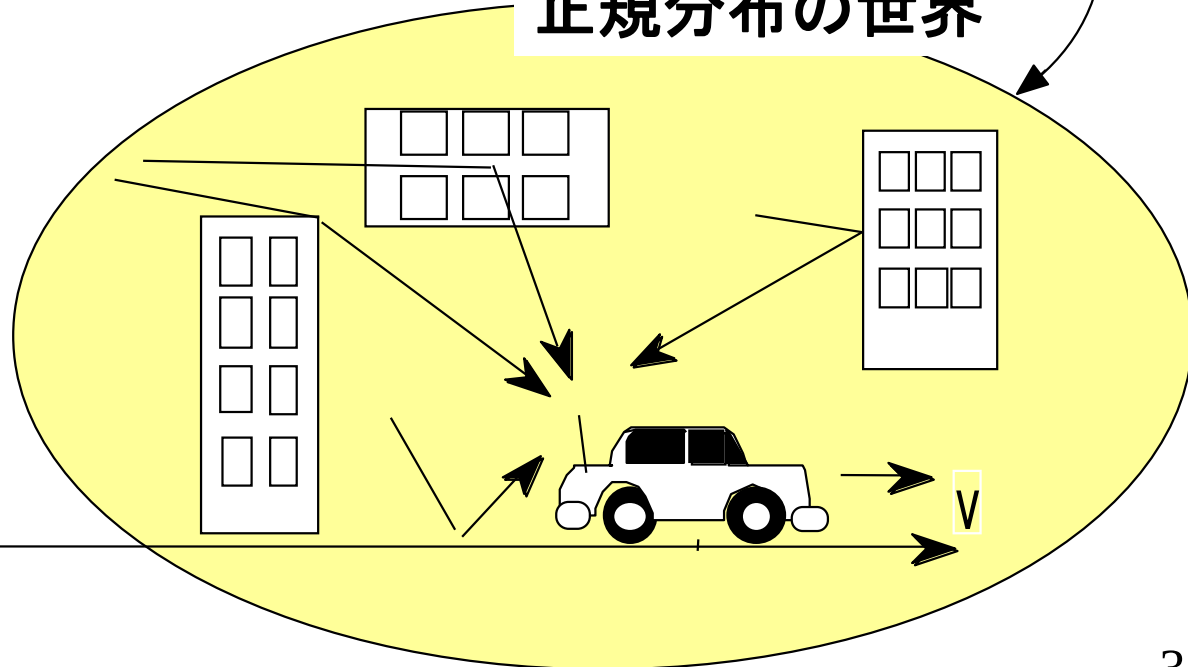
対数正規分布の世界



乗法性確率過程

Multiplicative
Stochastic
Process

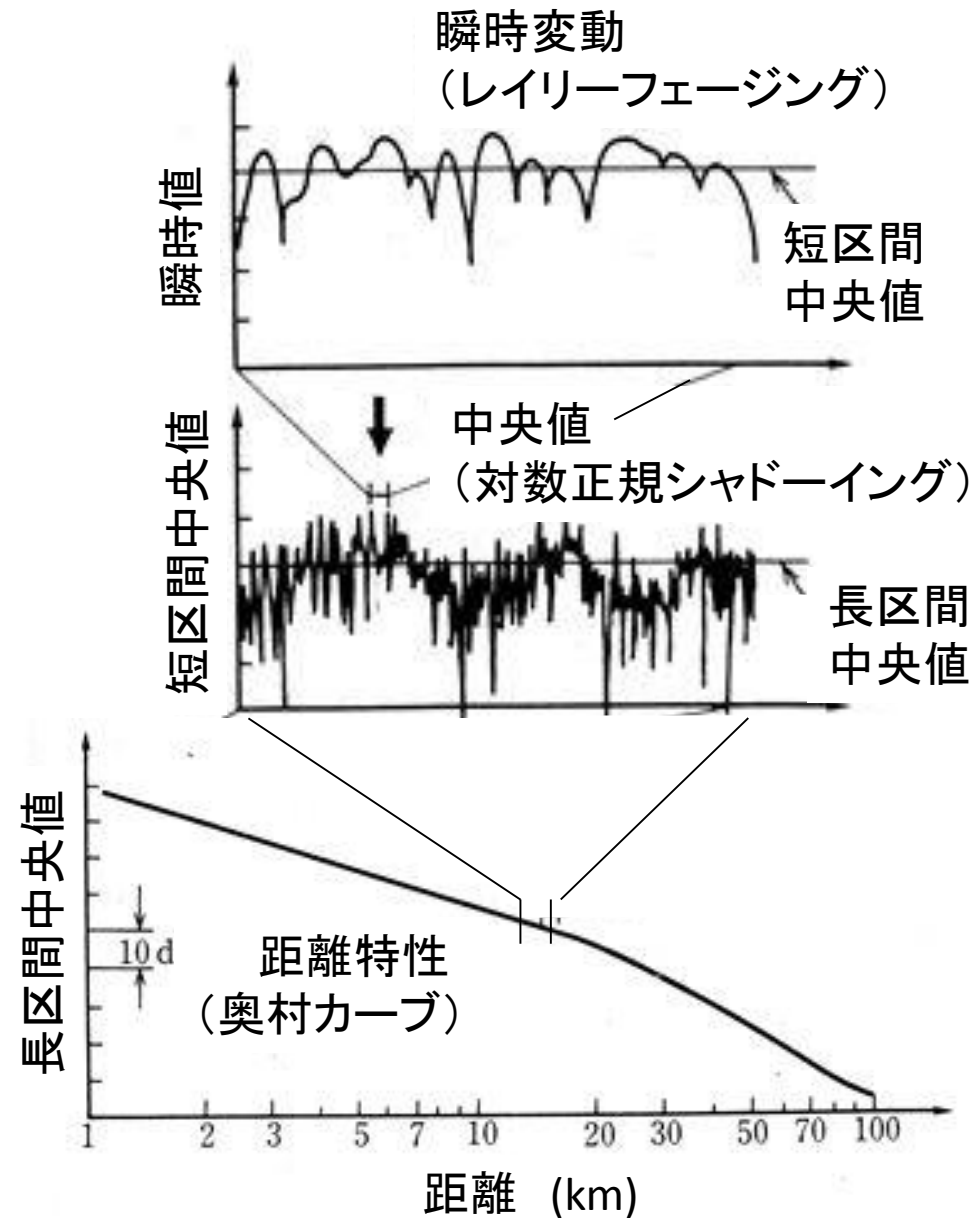
正規分布の世界



加法性確率過程

Additive
Stochastic
Process

移動通信の伝搬モデル(奥村モデル)

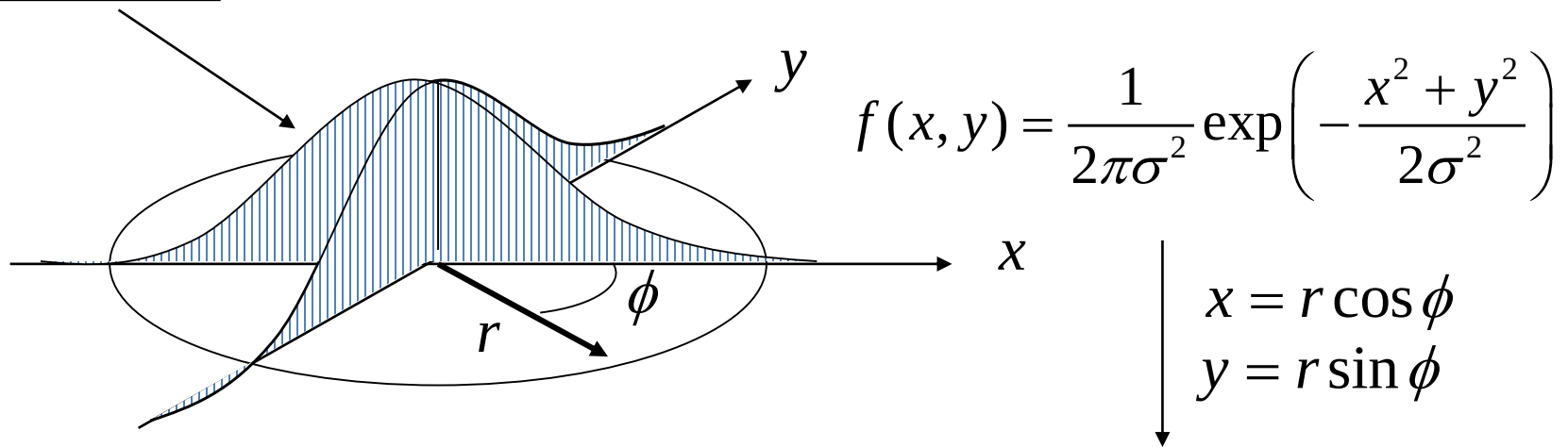


通信モデルと確率分布

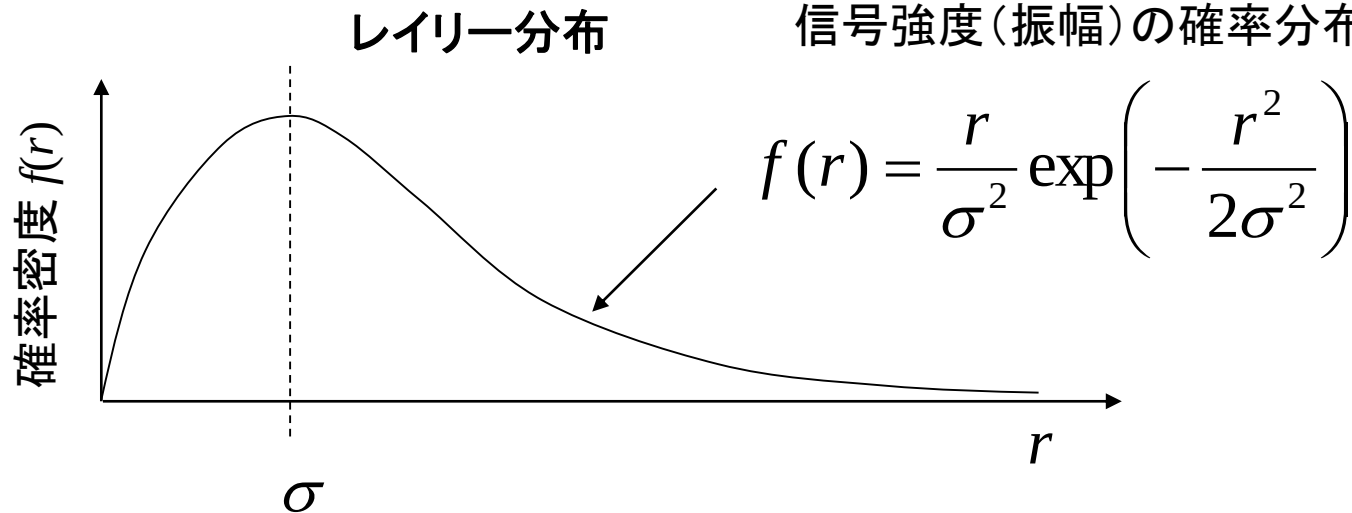
物理量	代表的確率分布
雑音	正規分布
信号強度	仲上・ライス分布、レイリー分布
待ち時間	指数分布
発生回数	ポアソン分布
ダイバーシチ	ガンマ分布(カイ二乗分布)
遮へい減衰	対数正規分布
▪	▪
▪	▪

レイリー分布

2次元正規分布の振幅(=原点からの距離 r)の分布

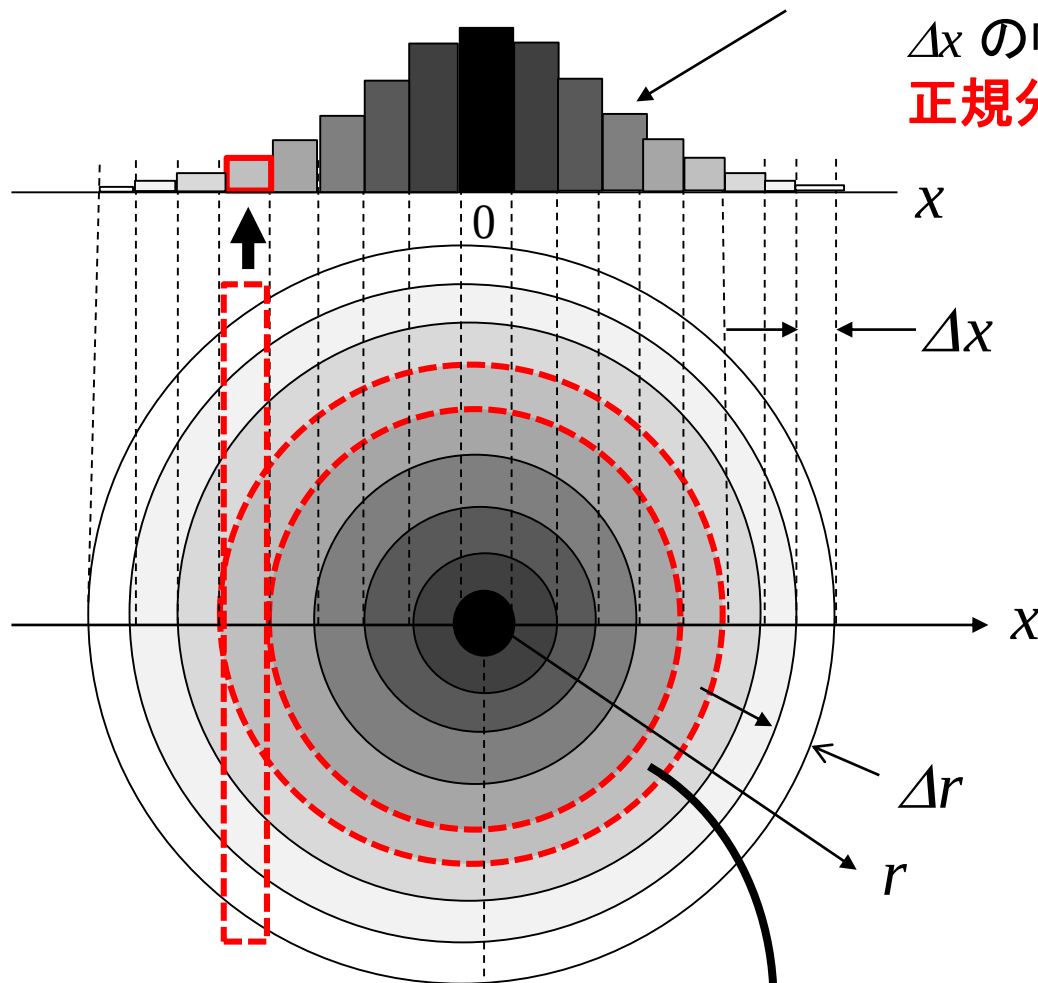


見通し外のマルチパスフェージングの
信号強度(振幅)の確率分布

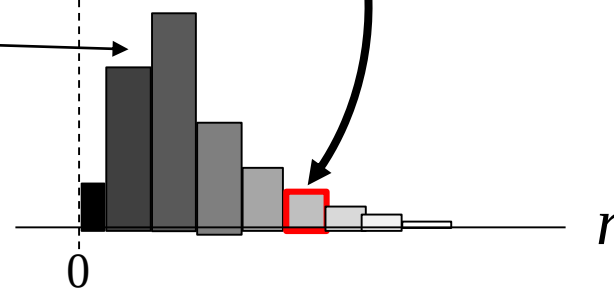


$r=0$ で確率が0である意味

Δx の幅の矩形の中にある確率
 Δx の幅を0に近づけると
正規分布

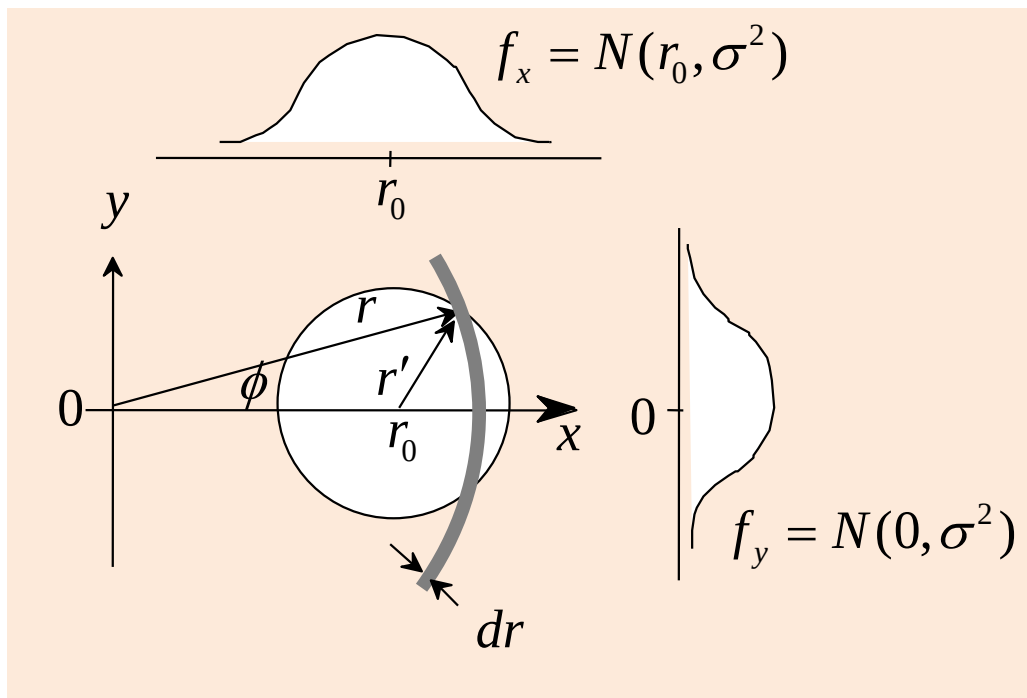


Δr の幅の輪の中にある確率
 Δr の幅を0に近づけると
レイリー分布



仲上・ライス分布

変数 x が $N(r_0, \sigma^2)$, y が $N(0, \sigma^2)$ であるときの $x+jy$ の振幅 r の分布



$$r = |x + jy| (= \sqrt{x^2 + y^2})$$

$$f_{r\phi}(r, \phi) = f_x(x) f_y(y) \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \phi} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \phi} \end{vmatrix}$$

$$= \frac{r}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_0^2 - 2r_0r \cos \phi + r^2}{2\sigma^2}\right)$$

r : 仲上・ライス分布

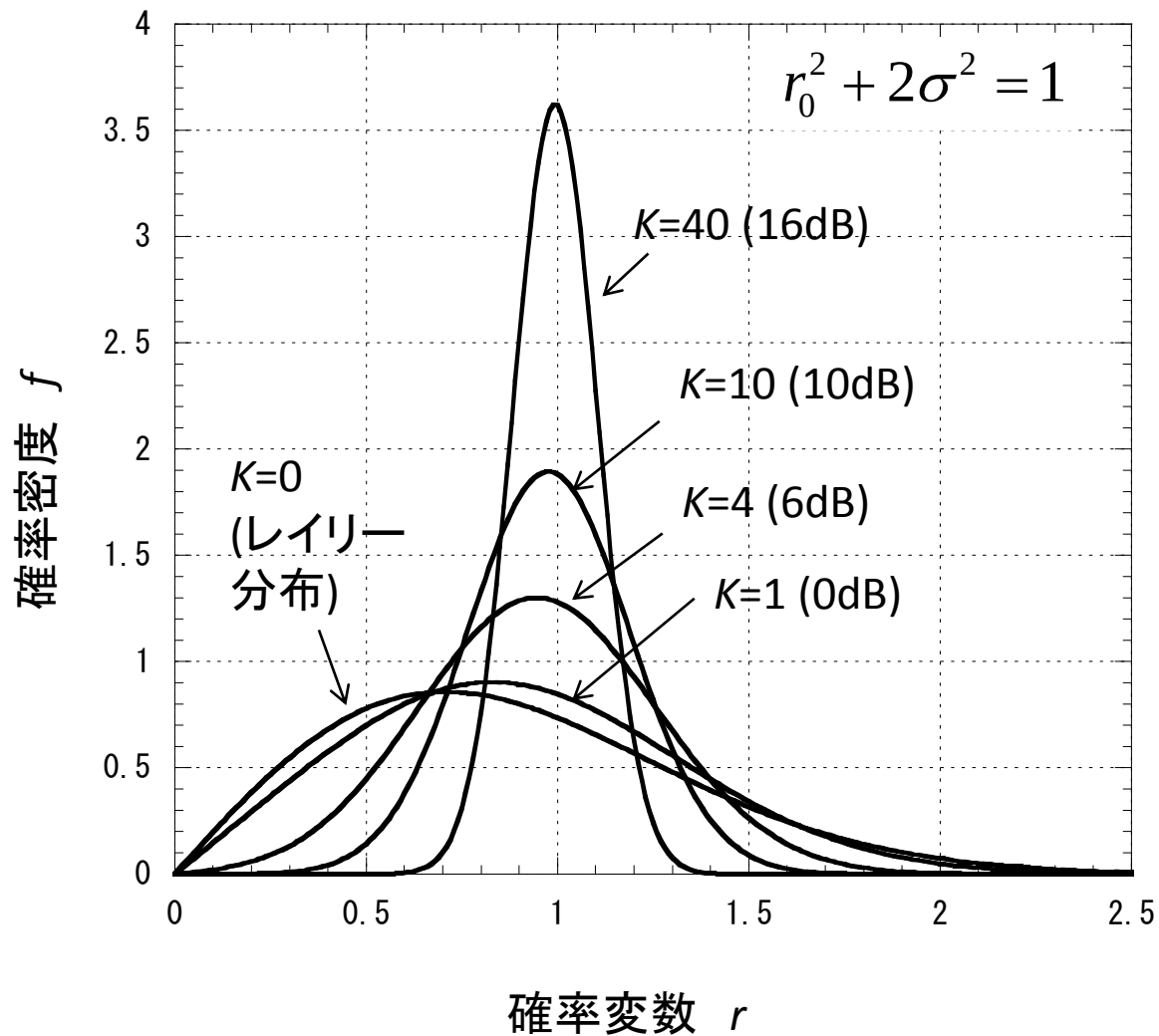
r' : レイリー分布

($r_0=0$ で両者は一致)

$$f_r(r) = \int_0^{2\pi} f_{r\phi}(r, \phi) d\phi$$

$$= \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_0^2 + r^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{r_0r}{\sigma^2}\right)$$

仲上・ライス分布の計算例



$$K \equiv \frac{r_0^2}{2\sigma^2}$$

仲上 稔 先生の功績

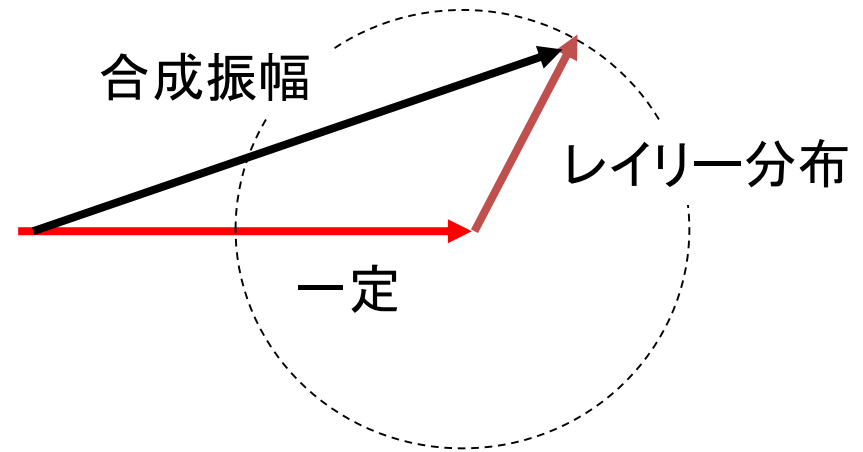
Rice分布



Rice-Nakagami 分布



Nakagami-Rice 分布



S. O. Rice(ベル研究所): 信号と雑音の研究 (BSTJ, 1944)

仲上 稔(国際電気通信株式会社⇒神戸大学):

短波のフェージングの研究 (電気通信学会誌, 1940)

仲上先生の、世界的な名声は、次の仲上m分布 (1943)によって、不動のものとなった。(Nakagami distribution, or, The m distribution)

この経緯を以下にまとめています(唐沢、信学誌、vol. 99, no. 8, 2016)

https://www.journal.ieice.org/bin/pdf_link.php?fname=k99_8_792&lang=J&year=2016

仲上分布、m分布と呼ばれる場合もある。短波の電波伝搬の研究の過程で生まれた分布であるが、移動通信のモデルにも役立つ非常に汎用的な分布である。

$$f(r) = \frac{2m^m}{\Omega^m \Gamma(m)} r^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} r^2\right)$$

$$m \geq 0.5, \quad \Omega = \langle r^2 \rangle$$

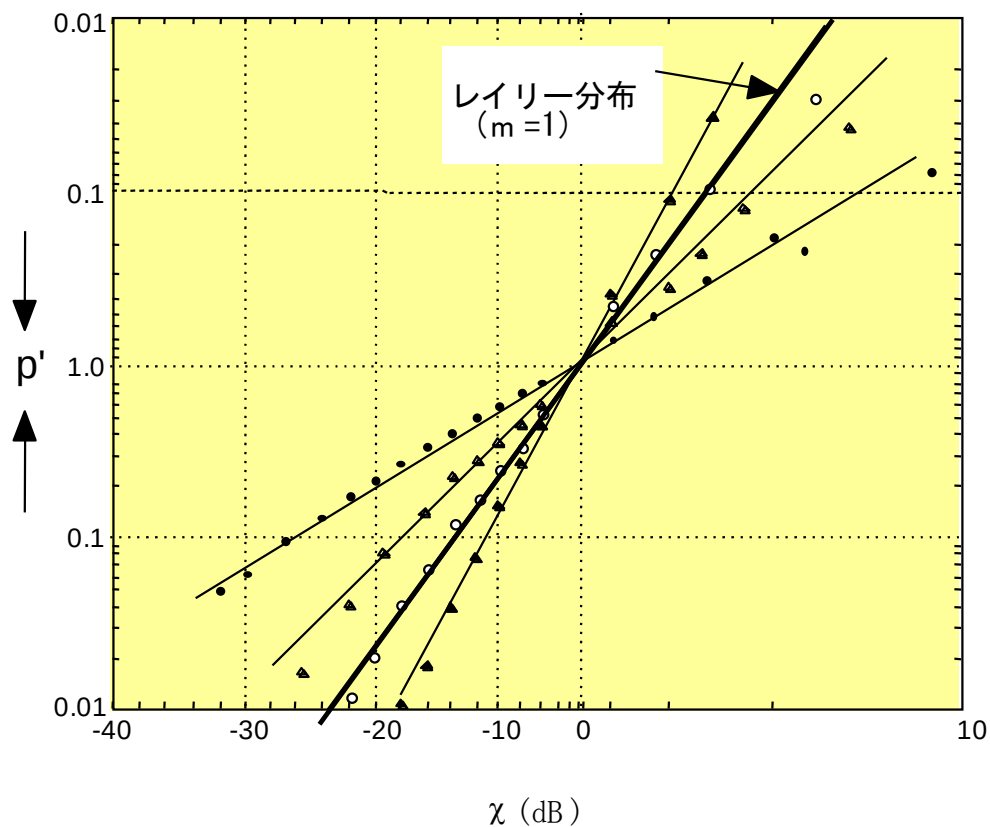


式の形

$$f(r) \propto r^{2m-1} \exp(-\beta r^2)$$

仲上・ライス分布と分布の形が近い(近似関係にある)。
他と組み合わせての利用する場合に、仲上・ライス分布よりは、
解析性に優れている。

仲上m分布：そのルーツ



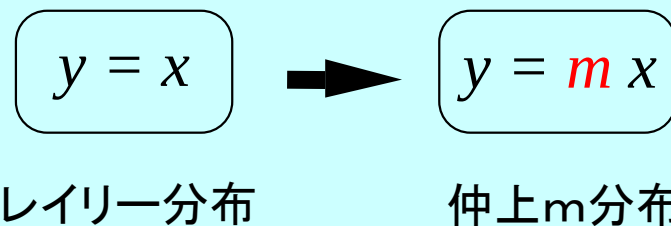
短波通信に見られるフェージングの相対頻度特性

相対頻度特性：確率密度関数の最大値(モード)を1として正規化したもの。この相対頻度を p' 、信号強度のデシベル値を χ とし、最大値1を与える χ を0dBにとる。

$$x = 1 + \frac{2}{M} - \exp(2\chi / M)$$

$$(M = 20 \log_{10} e)$$

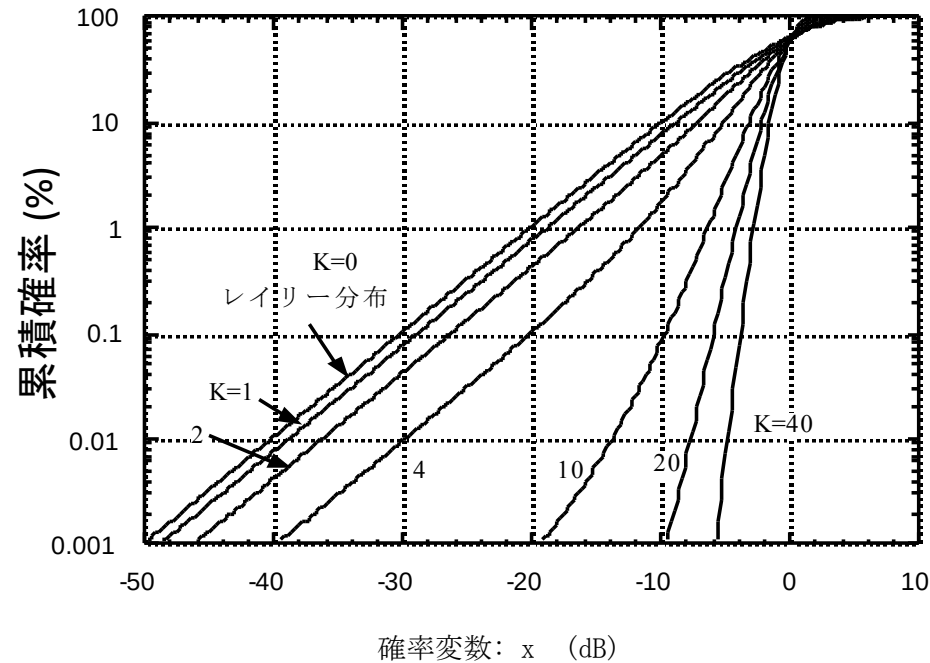
$$y = \begin{cases} \log_e p' & (\text{for } \chi \leq 0) \\ -\log_e p' & (\text{for } \chi > 0) \end{cases}$$



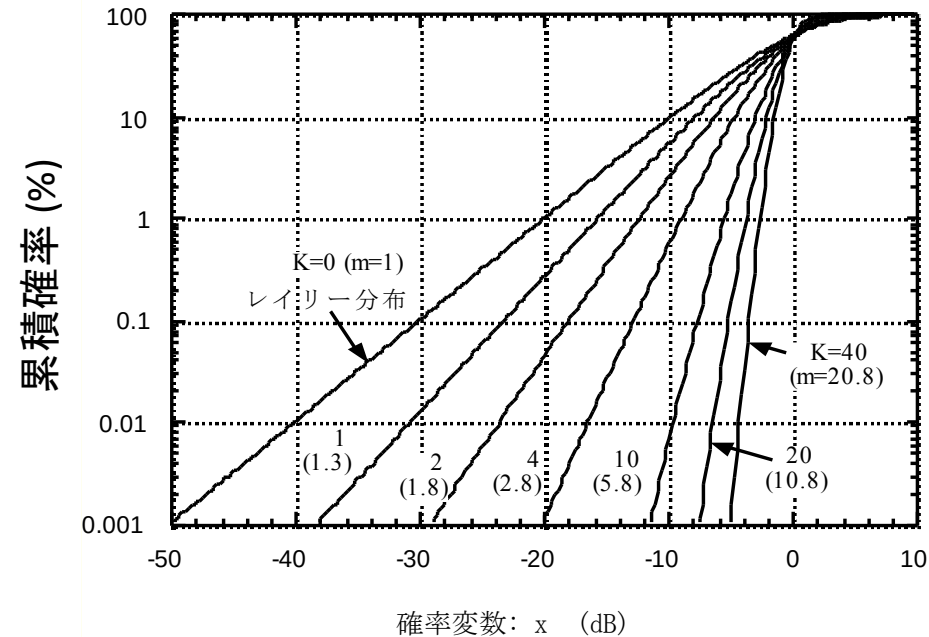
仲上m分布の分布形は発見的な方法で得られた

仲上・ライス分布と仲上m分布: その近似関係は？

[仲上・ライス分布]



[仲上m分布]



パラメータ: m と K の換算

$$m = \frac{(K+1)^2}{2K+1}$$

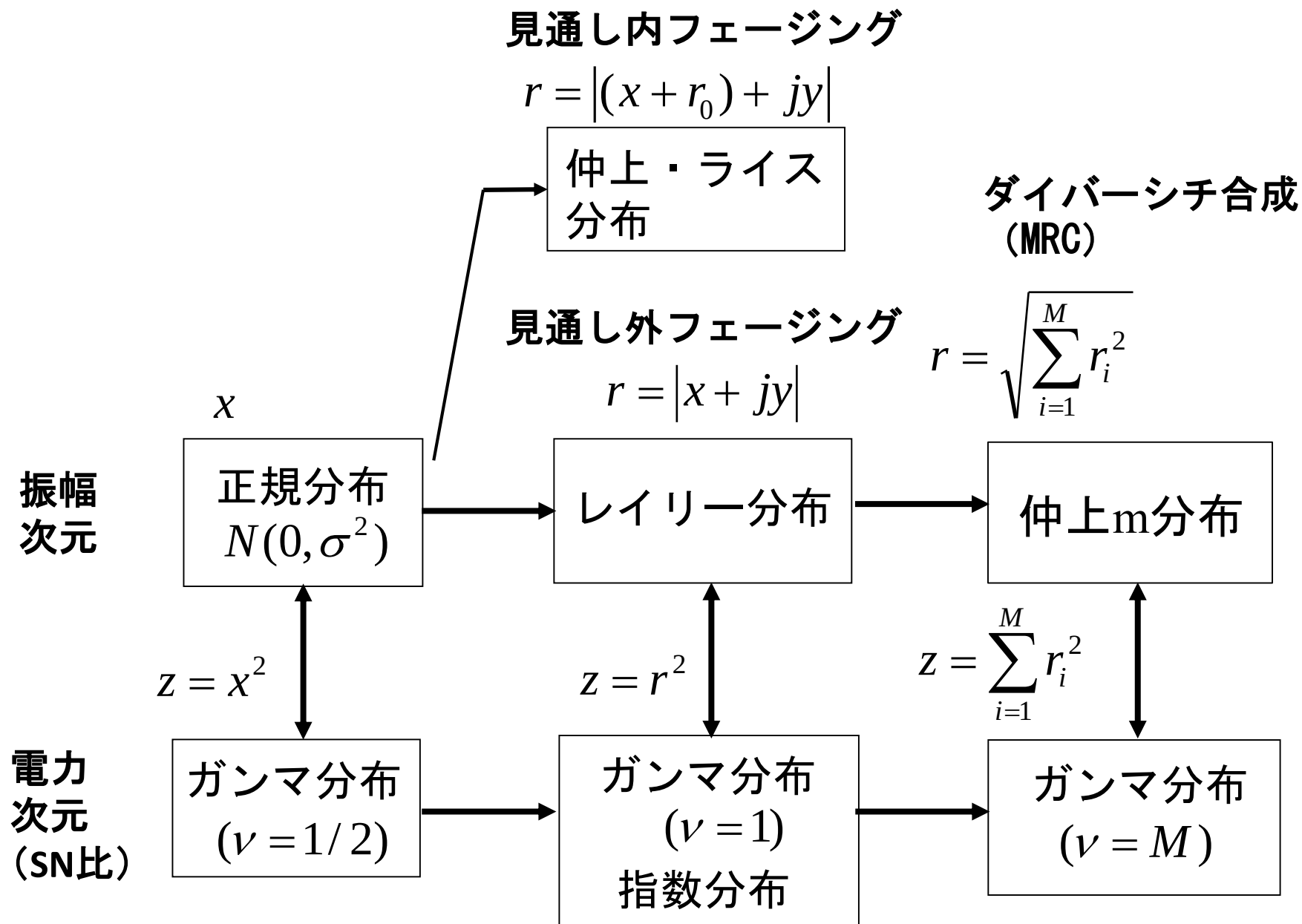
$$K = \sqrt{m^2 - m} + m - 1$$

注意:

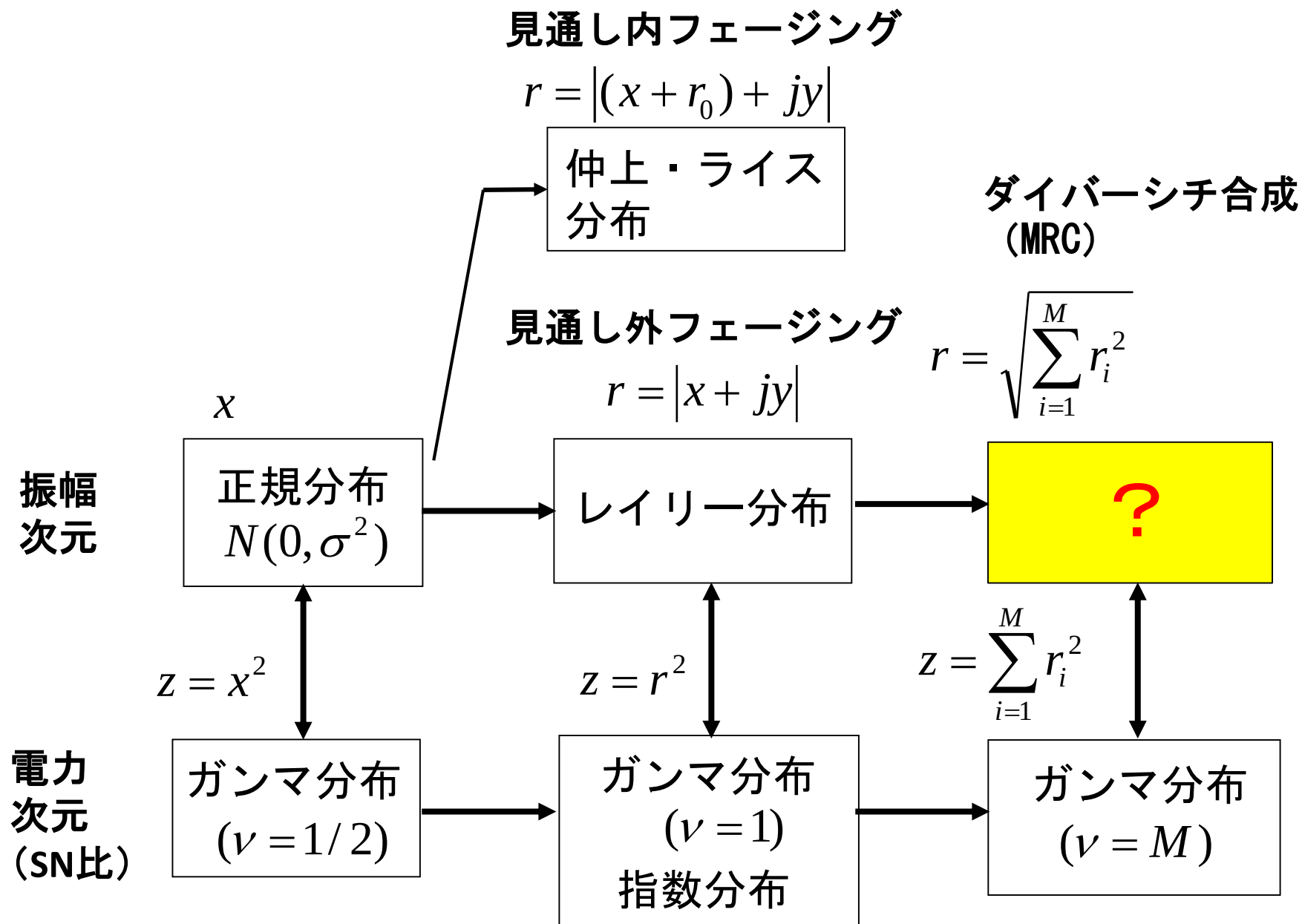
小さい確率の部分では傾向が異なり、
良い近似関係では無い

Channel Capacity: ○ BER: ×

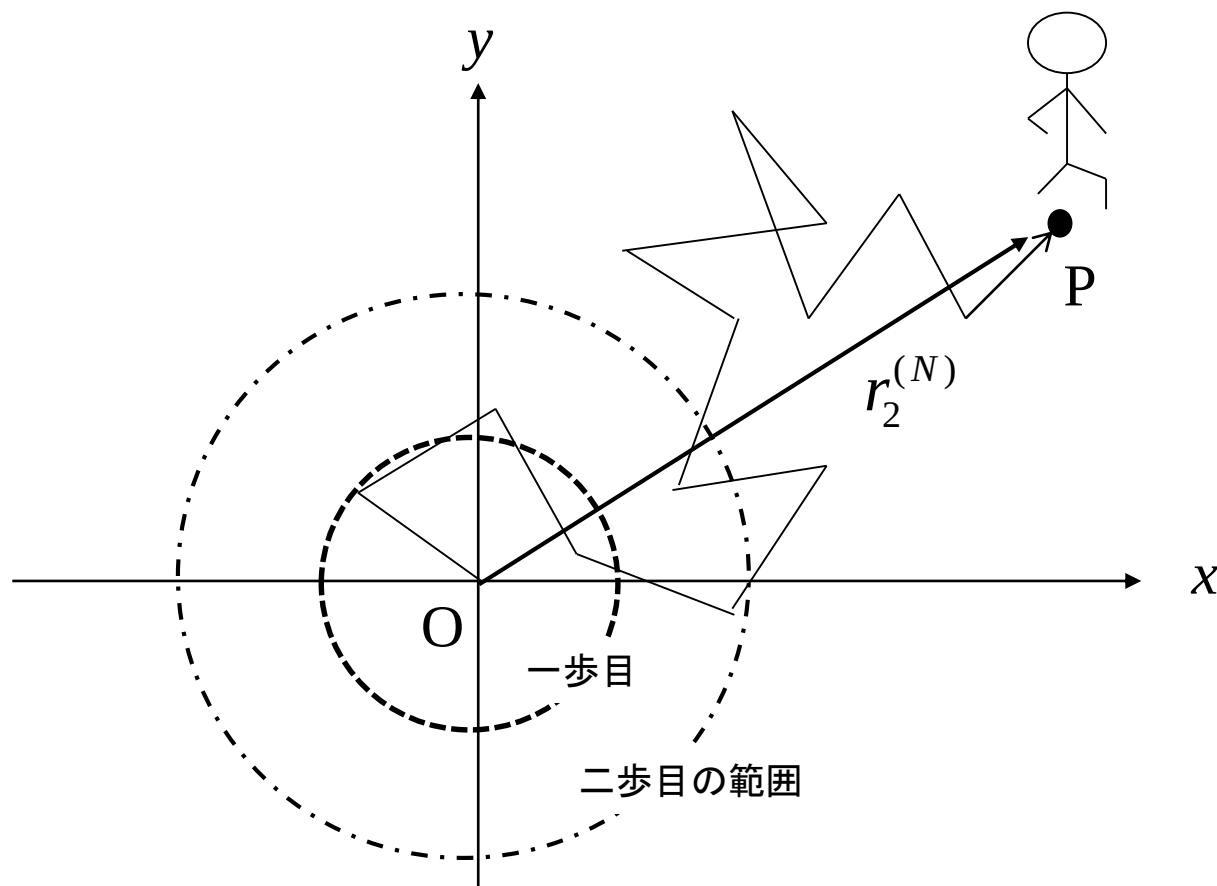
伝搬モデルに現われる正規分布とその仲間たち



伝搬モデルに現われる正規分布とその仲間たち



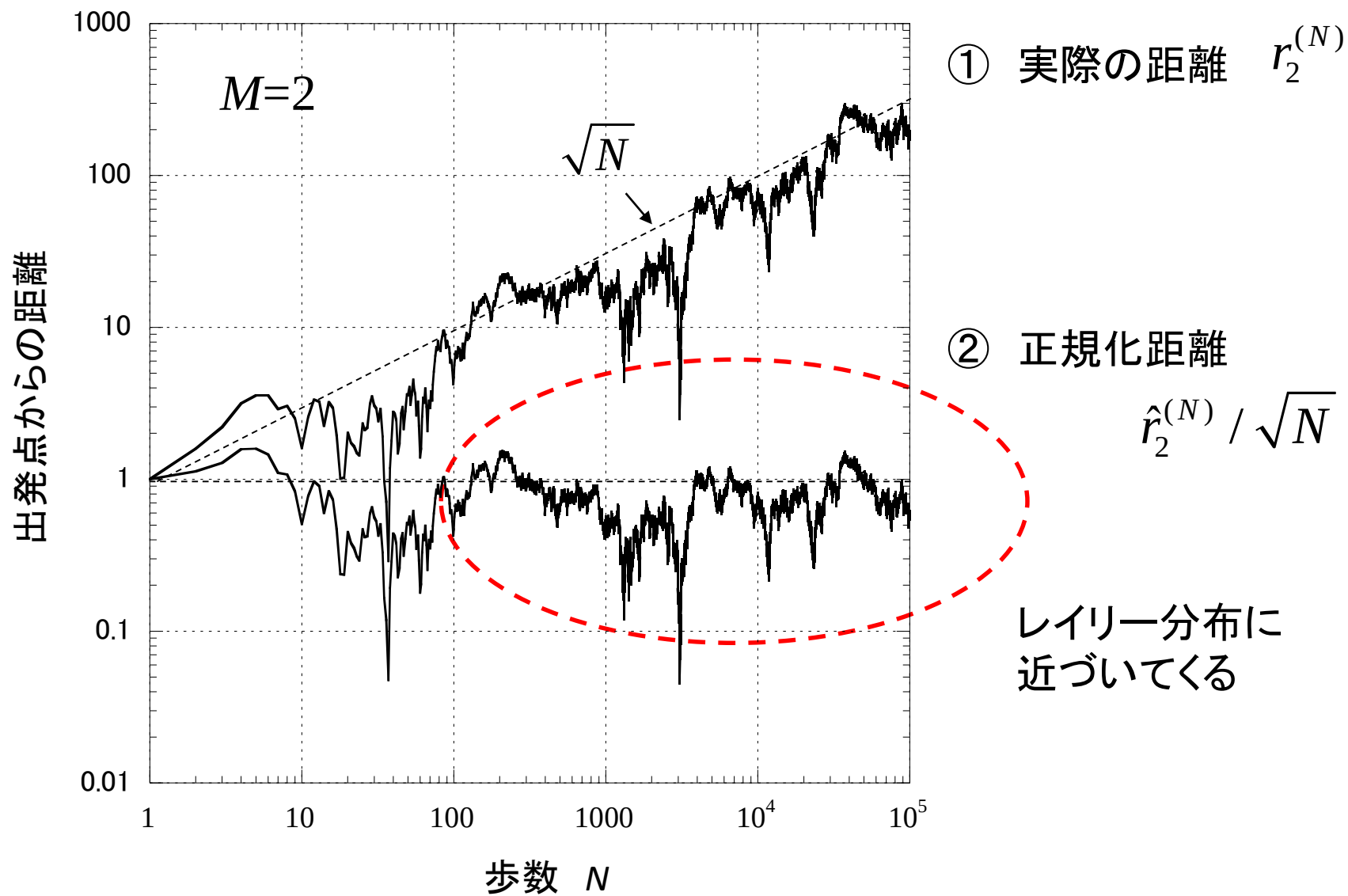
余談： ランダムウォークと確率分布



検討の前提

- 1) 一歩毎のステップ幅：一定（この長さを1）
- 2) 次のステップの方向：完全にランダム（その次元において）

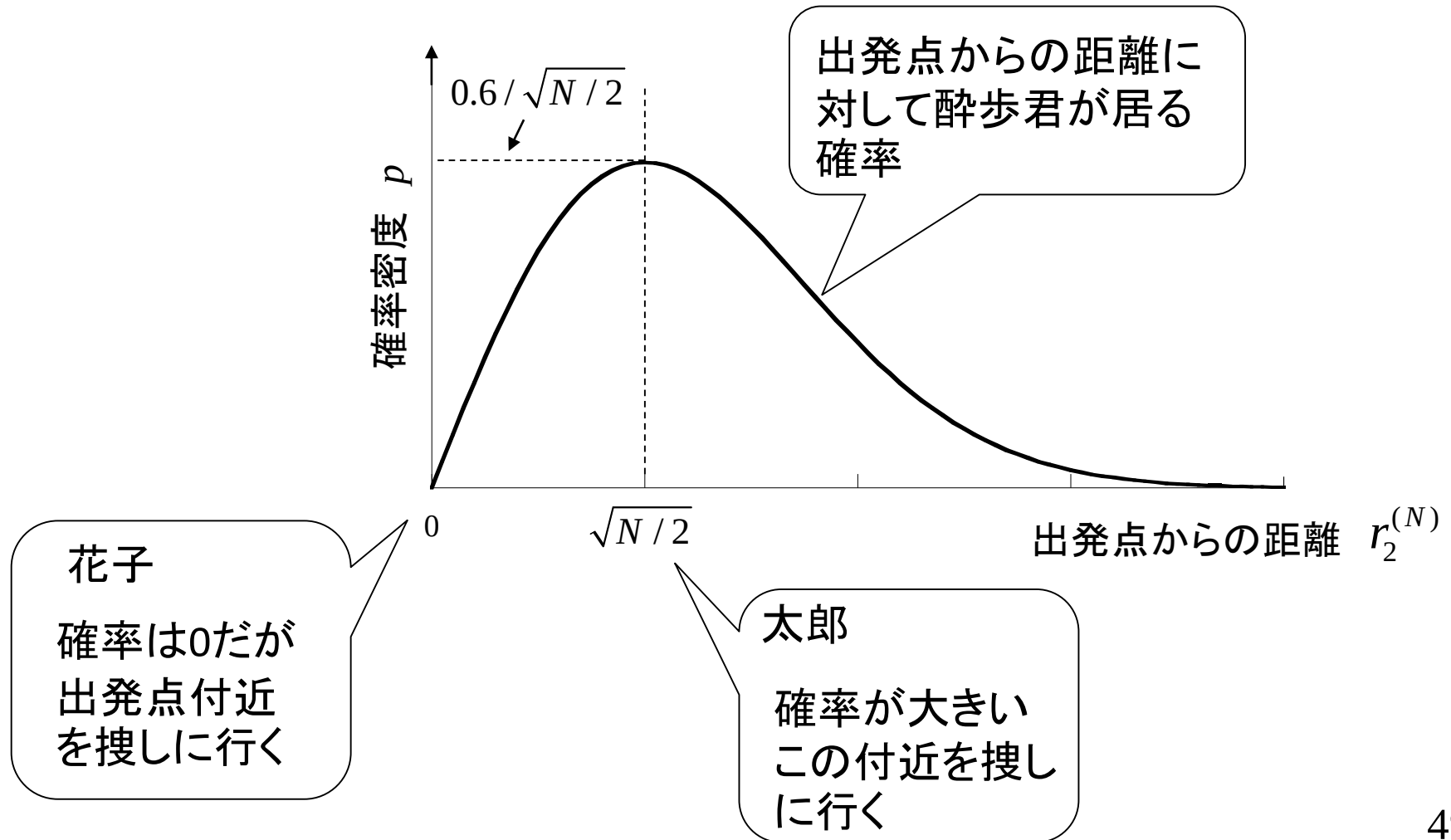
2次元空間のランダムウォークをしてみると



ランダムウォークしている酔歩君を太郎と花子が捜しに行く

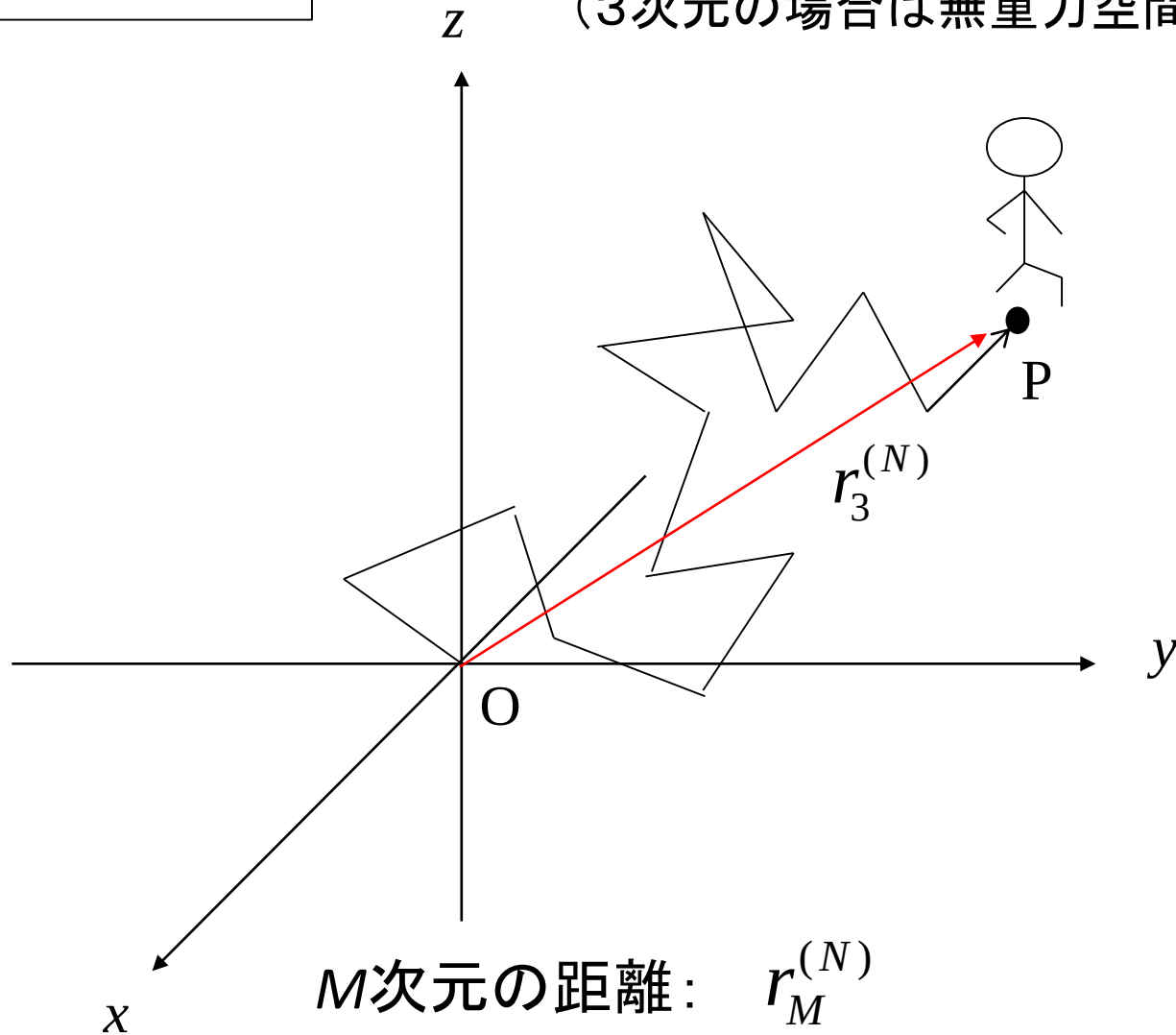
現在、酔歩君は N 歩目。

どちらが先に見つけるか？



多次元空間をさまよう

(3次元の場合は無重力空間)

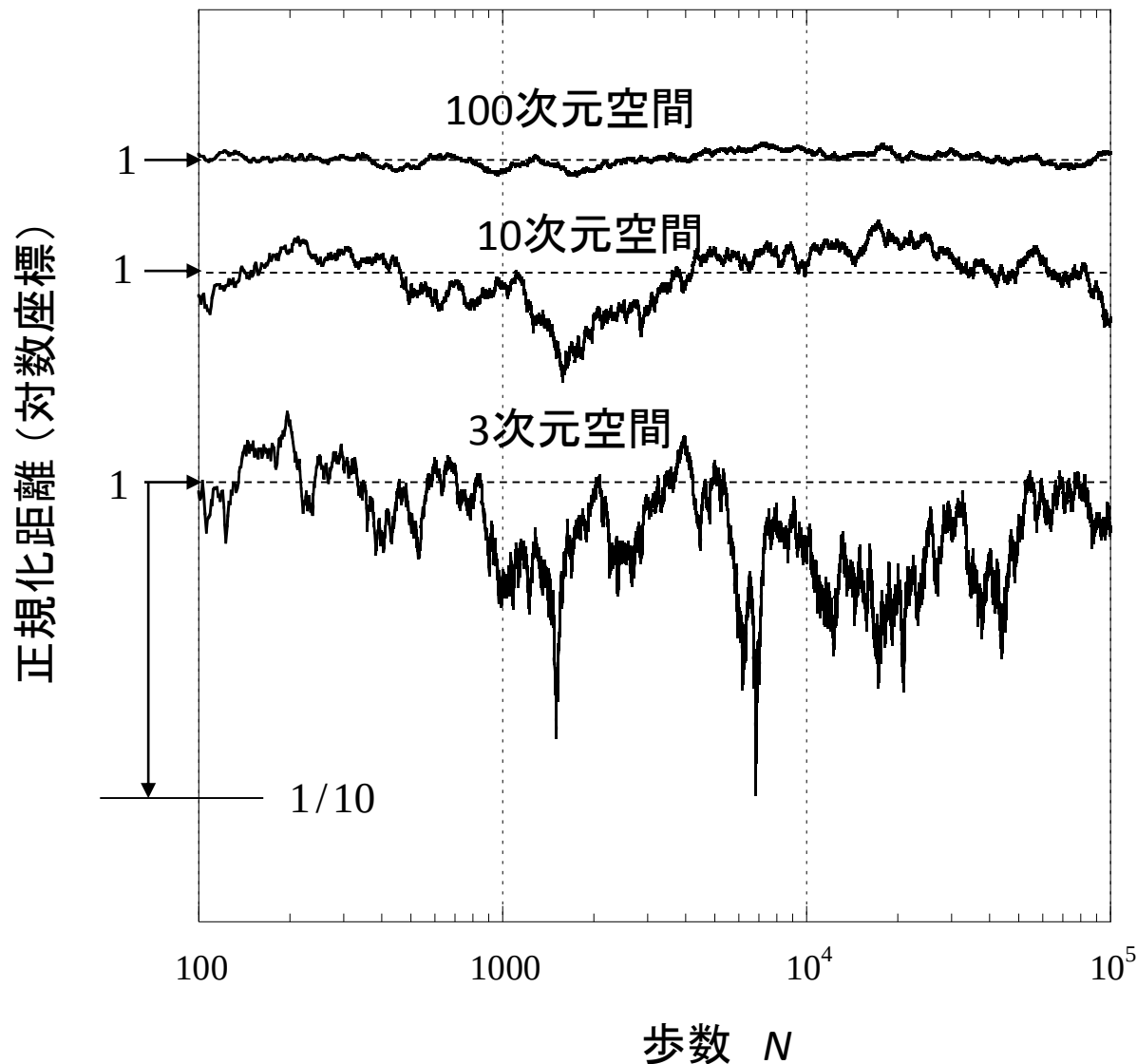


M 次元の距離: $r_M^{(N)}$

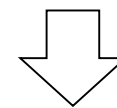
$N \gg 1$ での正規化距離: $\hat{r}_M = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{r_M^{(N)}}{\sqrt{N}}$

正規化距離の確率分布は？

多次元空間ランダムウォークの正規化距離



M次元空間のランダム
ウォークでの出発点からの
距離は $m=M/2$, $\Omega=N$ の仲
上m分布になる

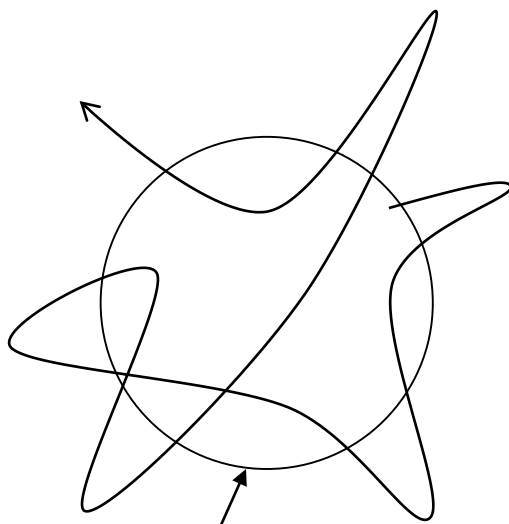


次元が高いほど出発点
に近づかなくなる
(1の値付近に張り付く)

(注: 3つの線が重なって見にくくならないよう縦方向はずらしているが、1/10低下の幅は同じ)

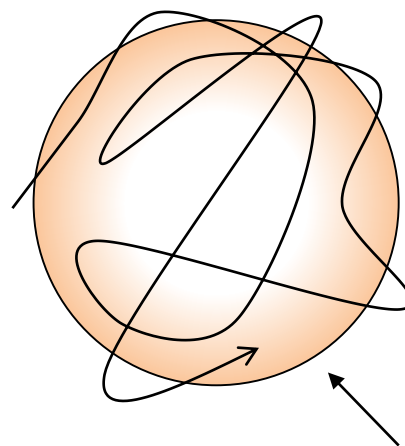
超球面とランダムウォークの軌跡

2次元空間



半径 $\sqrt{N}$ の円

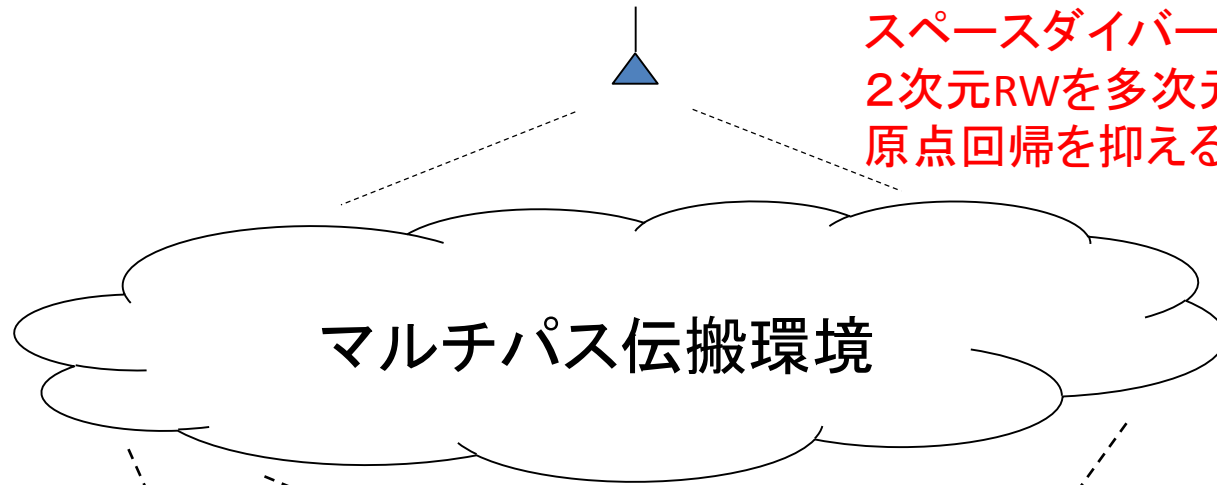
多次元空間
(十分高い次元)



半径 $\sqrt{N}$ の超球面

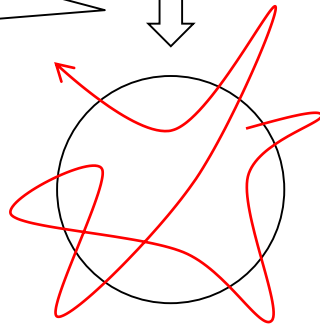
次元が高くなると
超球面に張り付く動きになる

多次元ランダムウォークとスペースダイバーシチ(MRC)

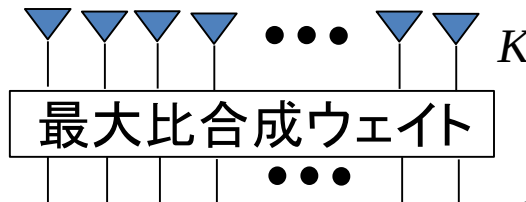


スペースダイバーシチとは
2次元RWを多次元RWに置き替えて
原点回帰を抑える技術

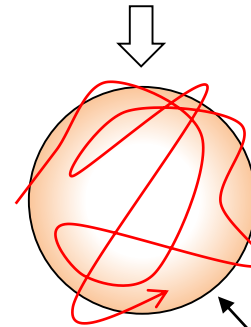
信号振幅は
レイリー分布



正規化半径1の円周を中心に平面
状をダイナミックに動き回る
(受信強度が時々大きく落ち込む)



合成信号振幅は
伸上m分布



正規化半径 $\sqrt{K}$ の超球
面付近を動き回る
(受信強度は常時安定)

多次元空間の超球面

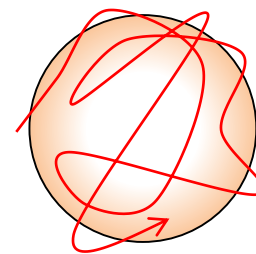
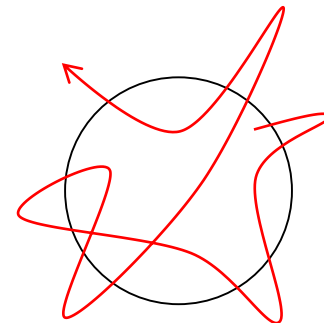
ランダムウォーカーの人生論

ここで議論してきた空間次元は「自由の広さ (DoF)」と読み替えることもできる。

与えられた自由が少ないと、その範囲の中でダイナミックに動き回ることができる。

自由が与えられすぎると、本人はそれを謳歌しているつもりでも、周りから見れば、超球面の表面付近をうろうろしているだけになり、結果的にはお釈迦様の手のひらの上を歩いているだけということになる。

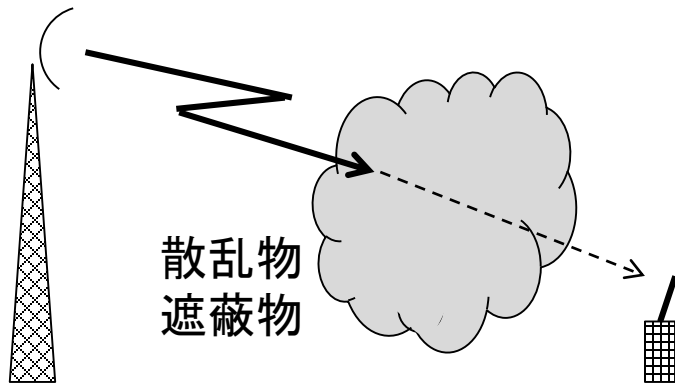
人生、どちらが幸せだろうか。



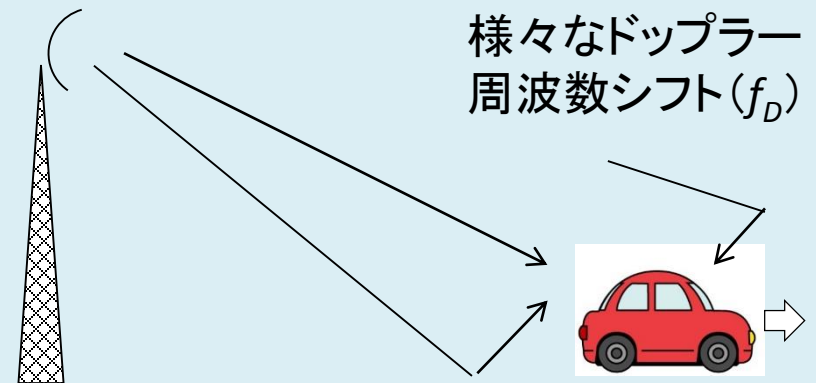
無線通信と電波伝搬(学んだ確率分布が生きる場所)

伝送に誤り(ビットエラー)が起きる原因

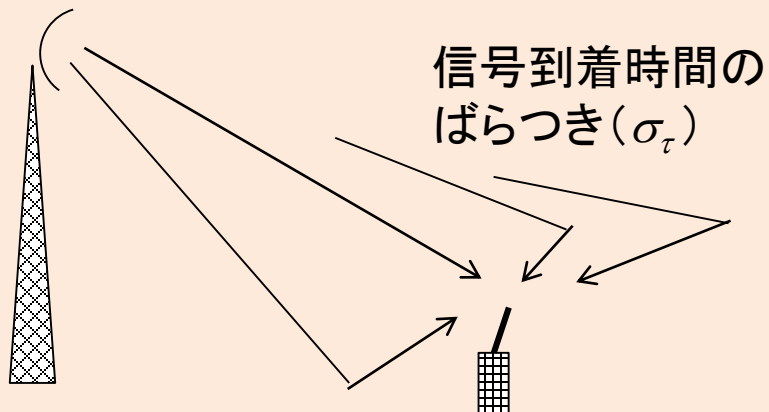
① 電波が弱い(雑音問題)



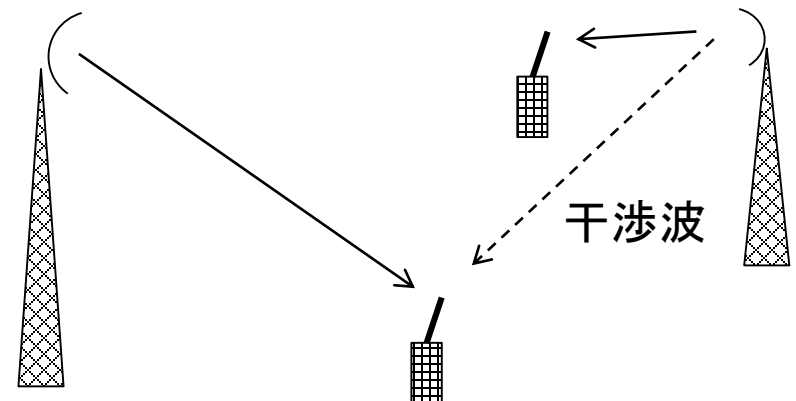
② 信号が動く(ドップラー問題)



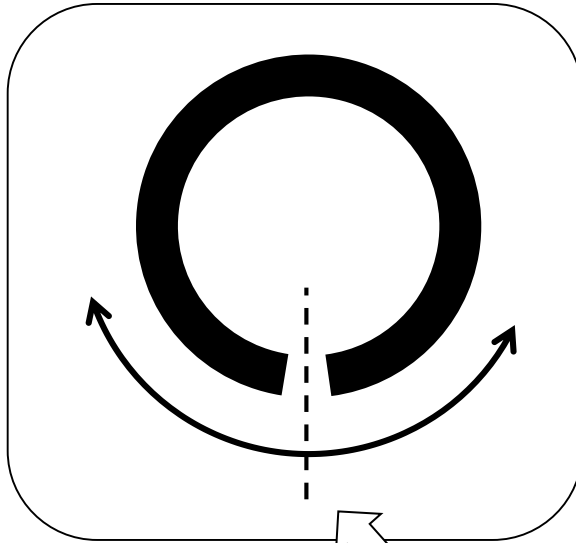
③ 波形が歪む(遅延問題)



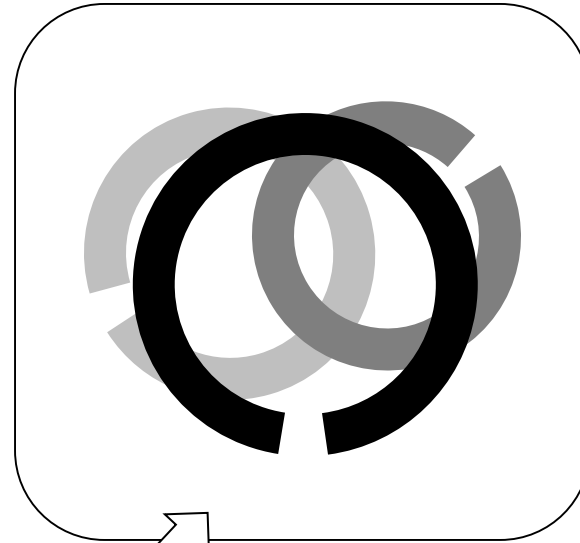
④ 邪魔が入る(干渉問題)



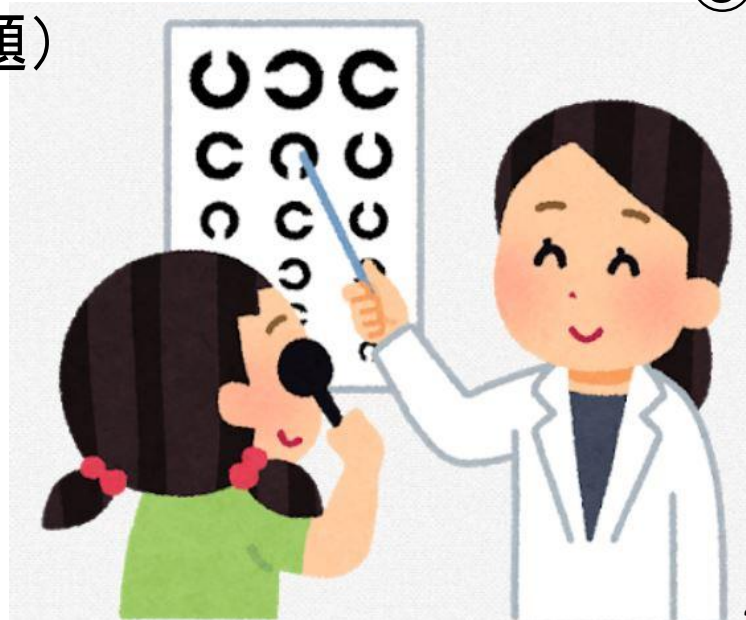
伝送誤りはなぜ発生するか？ → 電波伝搬の理解が大事



②位相変動
(ドップラー問題)



③符号間干渉
(遅延問題)



マルチパスフェーディングとデジタル伝送特性(技術レポート)

1) フラットフェーディング下でのビット誤り率特性(熱雑音による誤り)

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_056_Thermal_Noise_BER.pdf

2) 高速フェーディングでのビット誤り率特性(位相変動による誤り)

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_052_Fast_Fading_BER.pdf

3) 周波数選択性フェーディング下でのビット誤り率特性 (符号間干渉による誤り)

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_054_ETP_Calculation_Formula.pdf

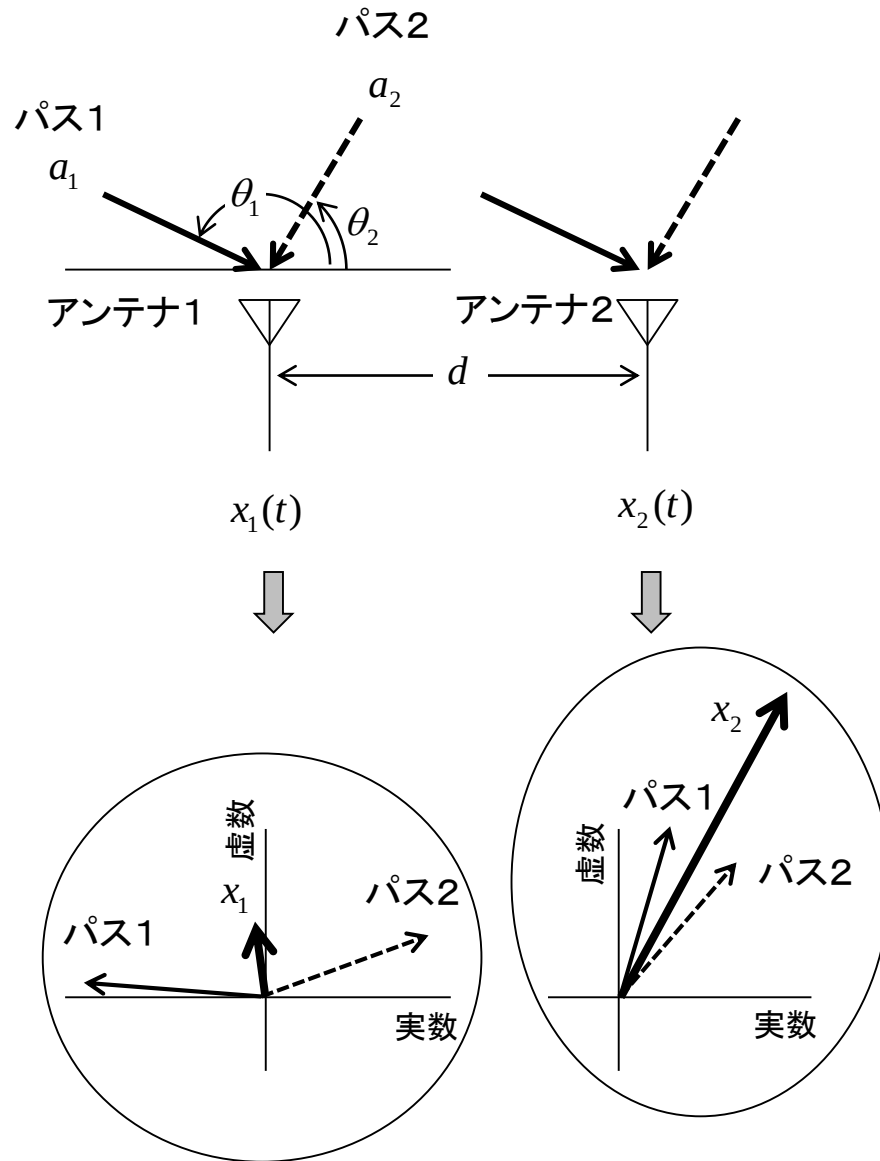
4) OFDM伝送におけるビット誤り率特性 (GI長が不十分な場合の符号間干渉による誤り)

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_055_ETP_OFDM.pdf

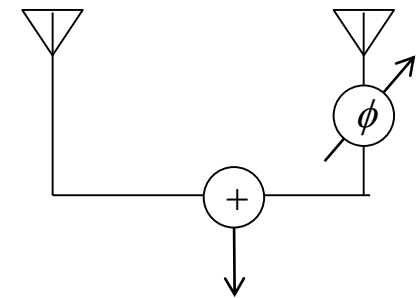
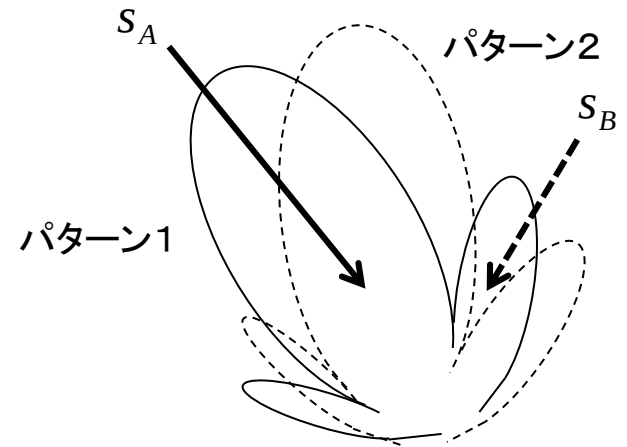
Part 3 アレーアンテナの働き

- スペースダイバーシティ
- MIMO
- Massive MIMO

アレーアンテナの働き

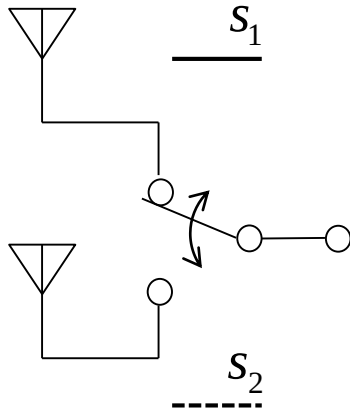


二つのアンテナで受けると

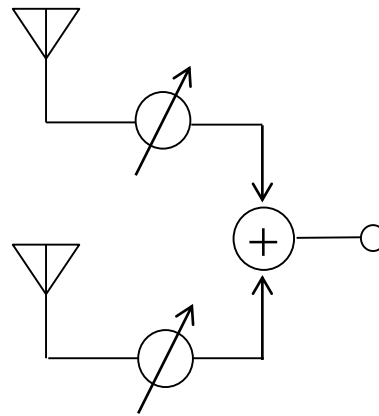


フェーズドアレーアンテナ

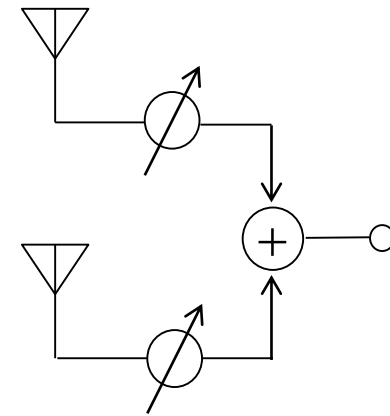
スペースダイバーシチの合成法



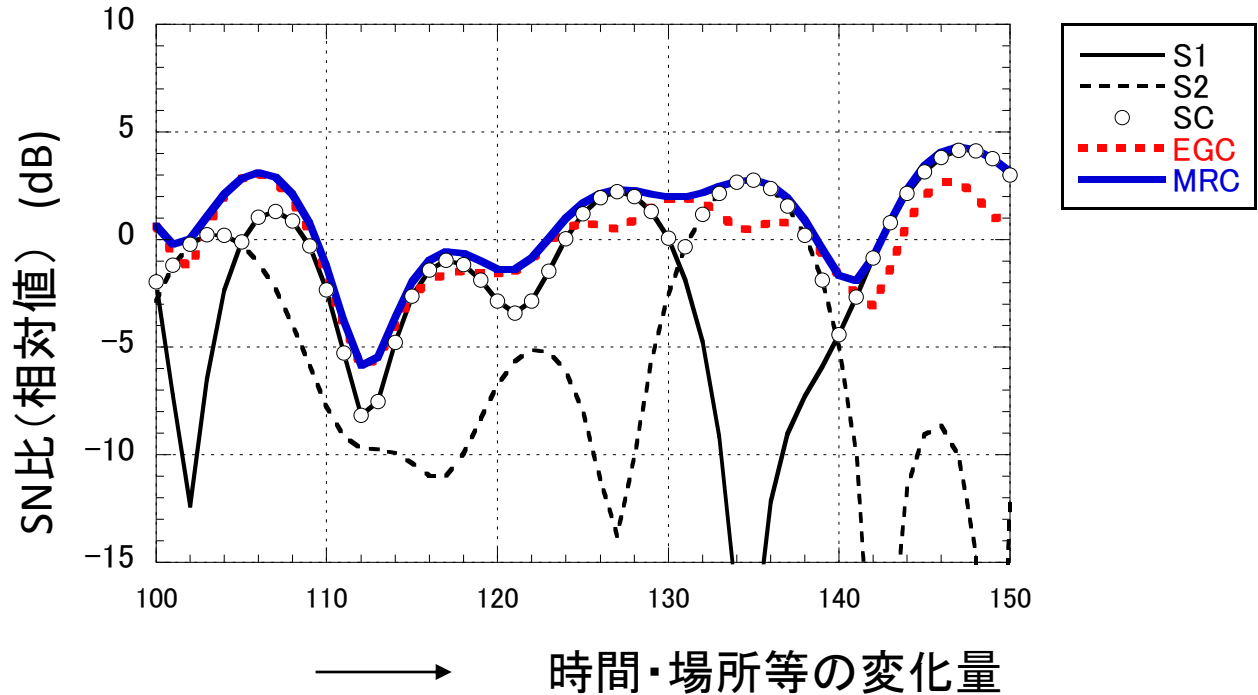
選択合成法(SC)



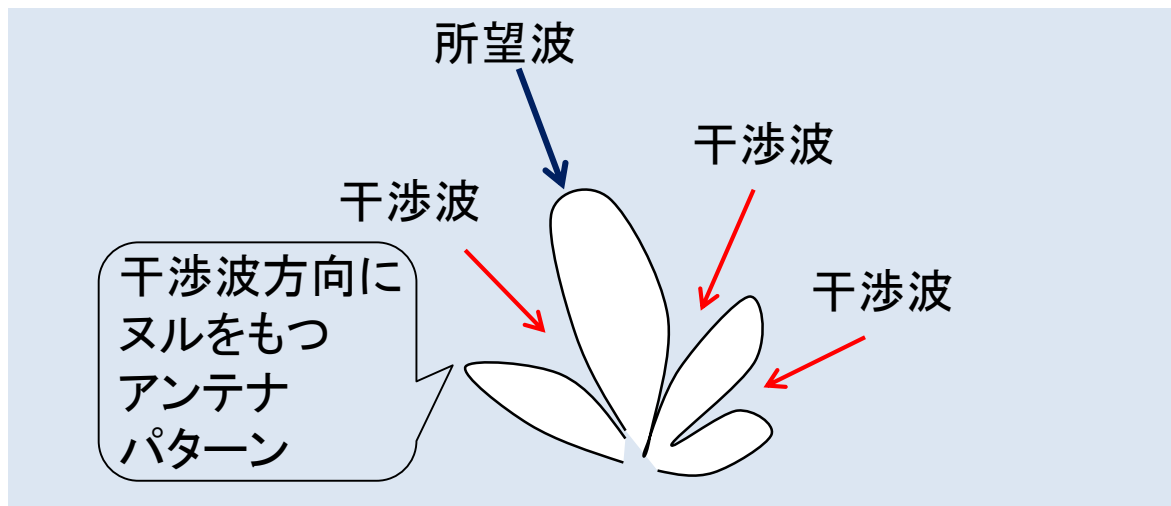
等利得合成法(EGC)



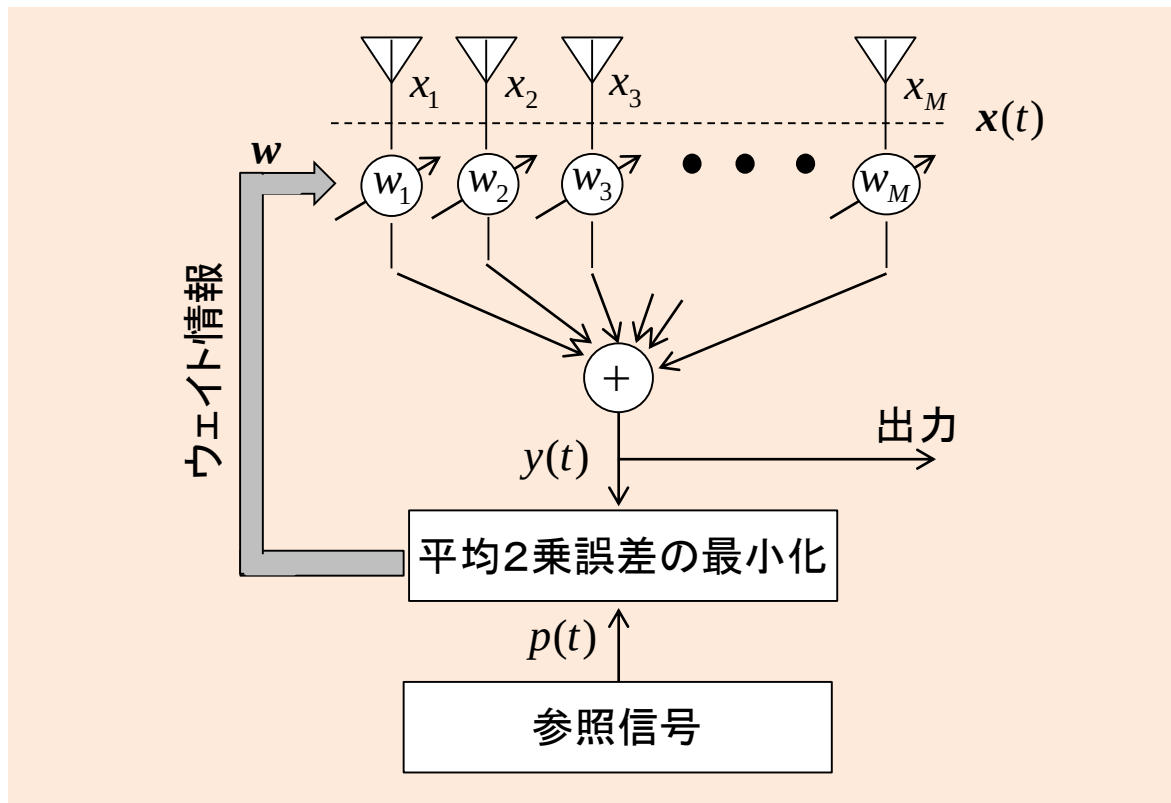
最大比合成法(MRC)



アダプティブアレーアンテナ(劣悪な電波環境に強い)



私が大学院生だったころ
アダプティブアレー研究の
牽引者だった鷹尾和昭先
生の授業を受けて、これは
将来性のあるすばらしい技
術と思ったが、それ以降も
実利用の声が、なかなか聞
こえてこなかった。



スペースダイバーシチの技術

アレー受信

アレーアンテナ受信側において、通信路の特性が取得できれば、その情報に基づく受信信号処理により、ダイバーシチ効果を得ることができる

アレー送信

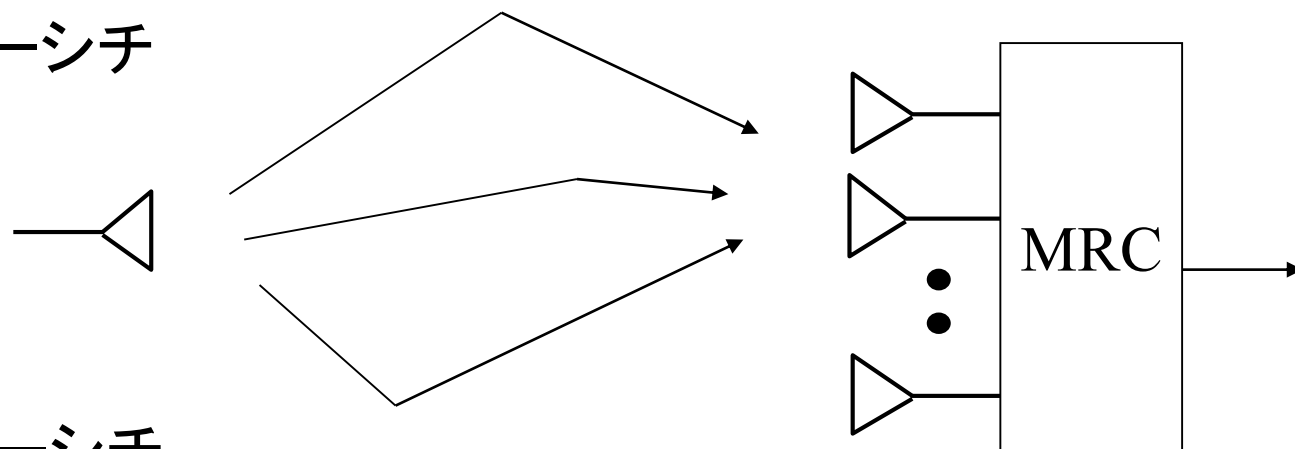
送信側にチャネル情報(CSI)あり

何らかの手段によって、通信路の情報を入手できれば、受信アレーと同様にダイバーシチ効果を得ることができる

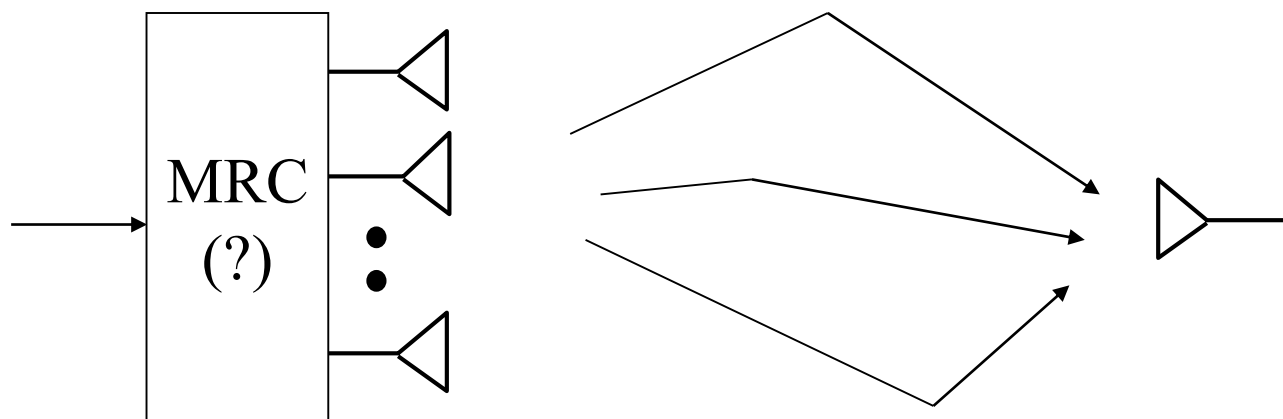
送信側にチャネル情報(CSI)なし

通信路の情報が手に入らないとき、どういうルールで送信すればよいか
(暗闇の中でボールを投げるときの基本的な考え方は)

受信ダイバーシチ

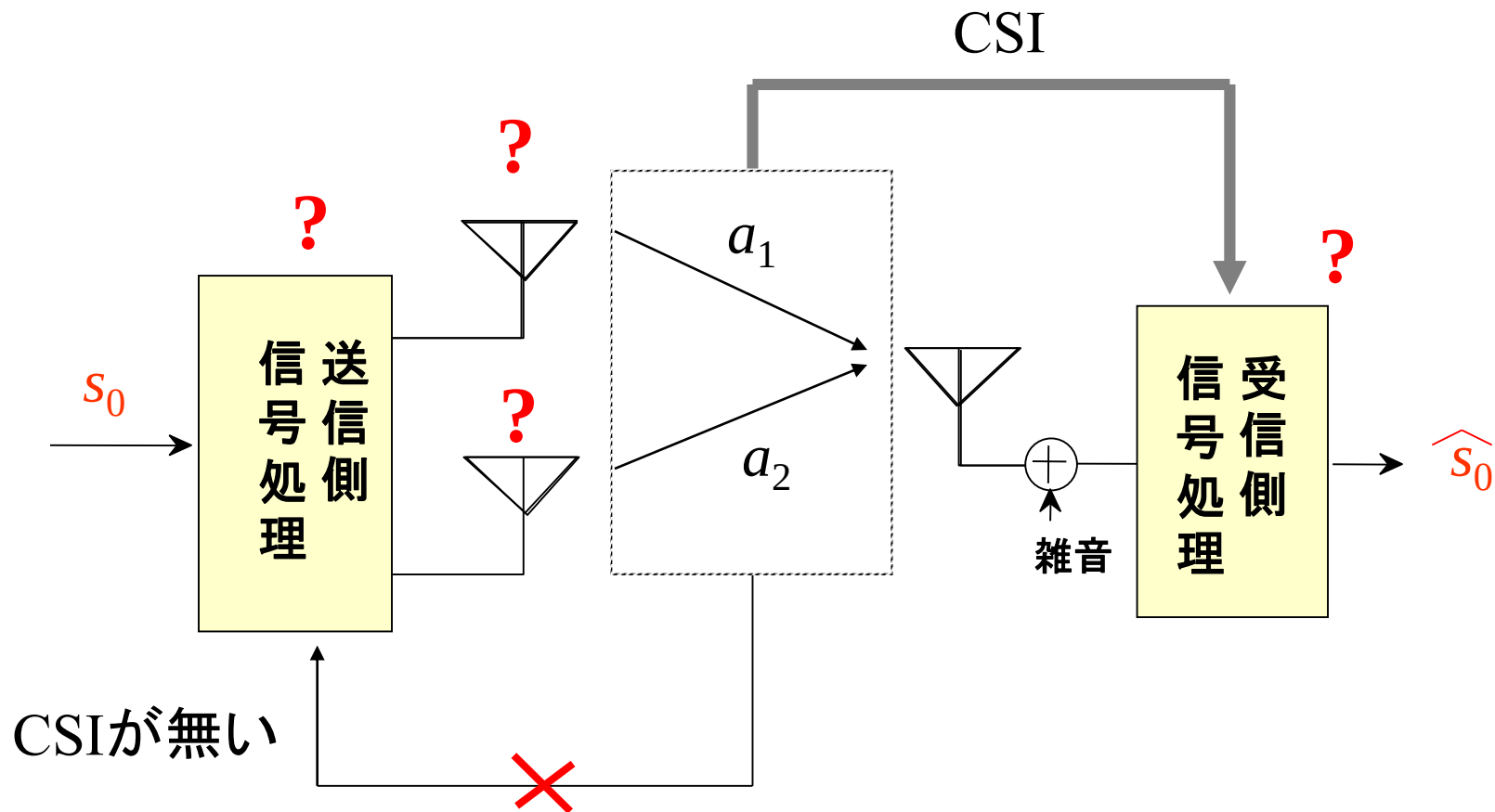


送信ダイバーシチ

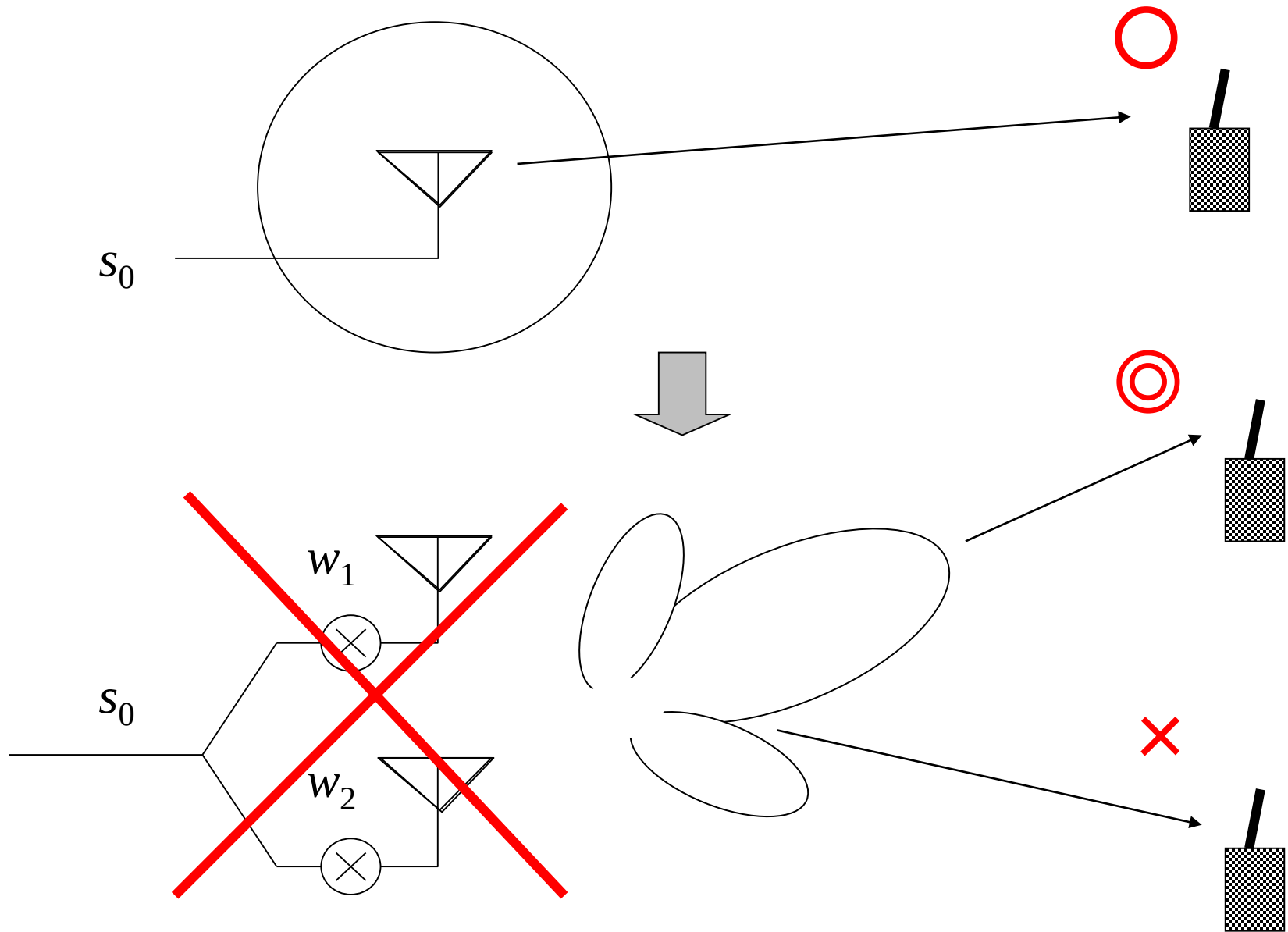


受信側のダイバーシチは比較的容易に実現できる（なぜ？）
送信側のダイバーシチは、受信ほど簡単では無い（なぜ？）

送信ダイバーシティ: 伝送路の特性を知らないときは？



濃い霧の中で
ボールを投げるようなもの



2本のアンテナの効果が良いことにも、悪いことにもなっている

送信ダイバーシティ(CSI無し)

その方法は

STBC (Space-Time Block Coding)

時空間ブロック符号化

発明した人はS. M. Alamouti (1998, IEEE JSAC)

THE BEST *of* THE BEST

**Fifty Years of Communications and
Networking Research**

Edited by

WILLIAM H. TRANTER

DESMOND P. TAYLOR

RODGER E. ZIEMER

NICHOLAS F. MAXEMCHUK

JON W. MARK

 **IEEE
COMMUNICATIONS
SOCIETY**

通信システムやネットワーク分野で
時代を切り開いたIEEE Com Soc論文
(1953～2001年半世紀での57編)を
集めている

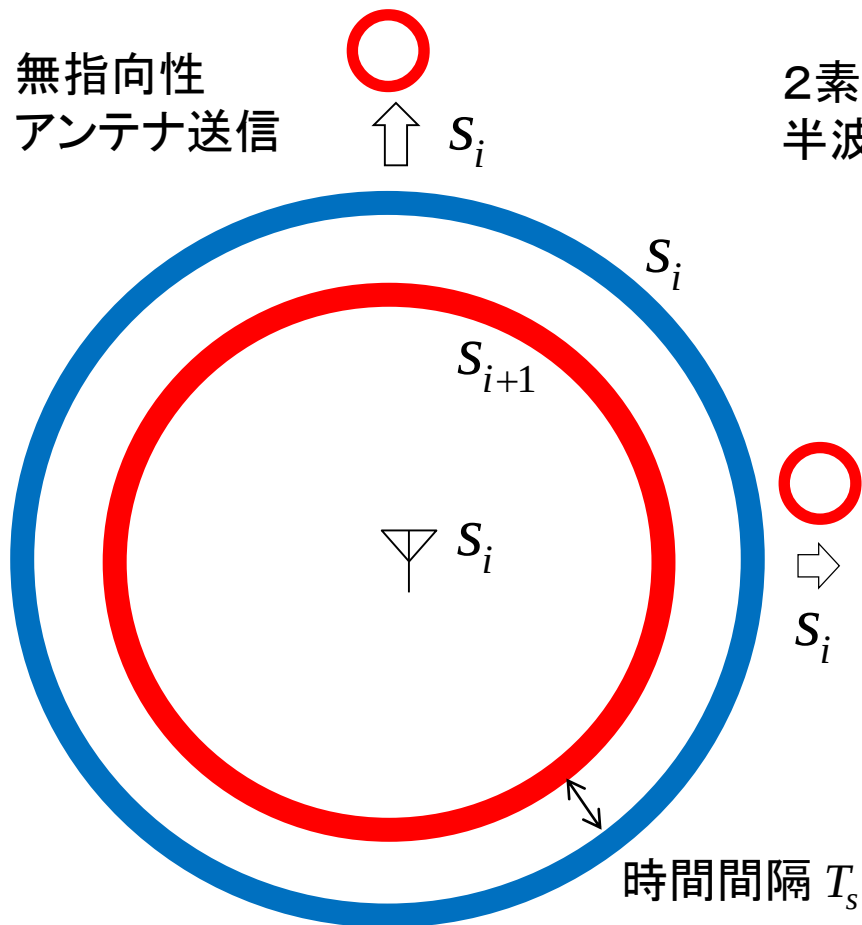
Alamouti 論文もその一つ

S. M. Alamouti, “A simple transmit
diversity technique for wireless
communications,”

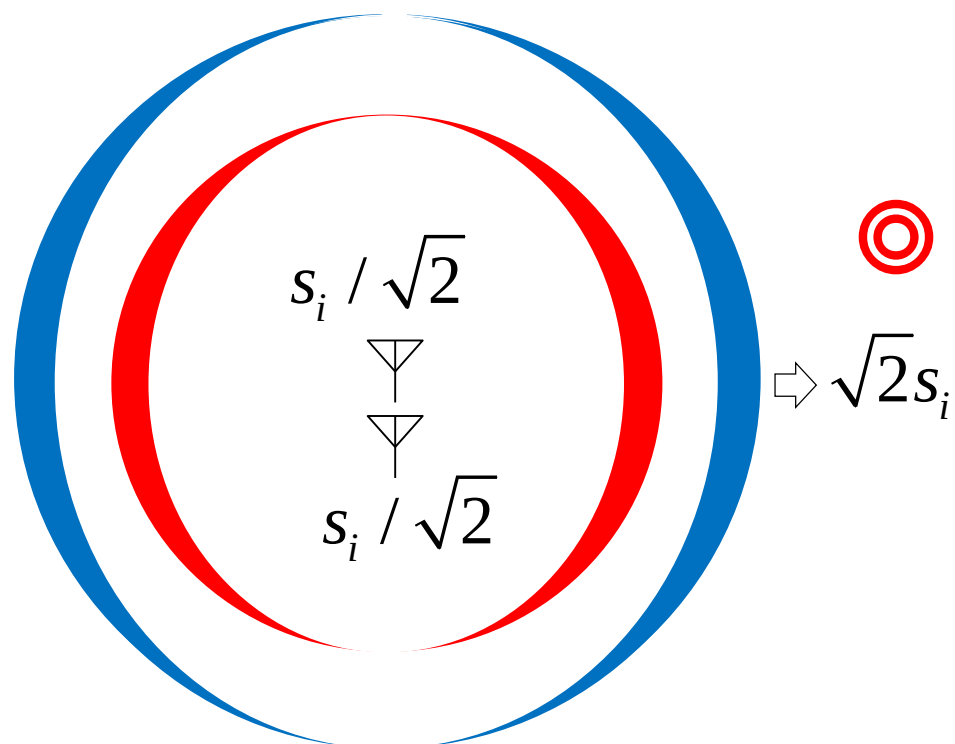
IEEE Jour. Selected Areas Communs.,
vol. 16, no. 8, 1998.

先人が紡ぎ出した理論を読みといて、
それを味わうのも結構楽しい

実数信号の自由空間伝送 (Alamouti 以前)



2素子アレーアンテナ
半波長同相合成送信



受信強度

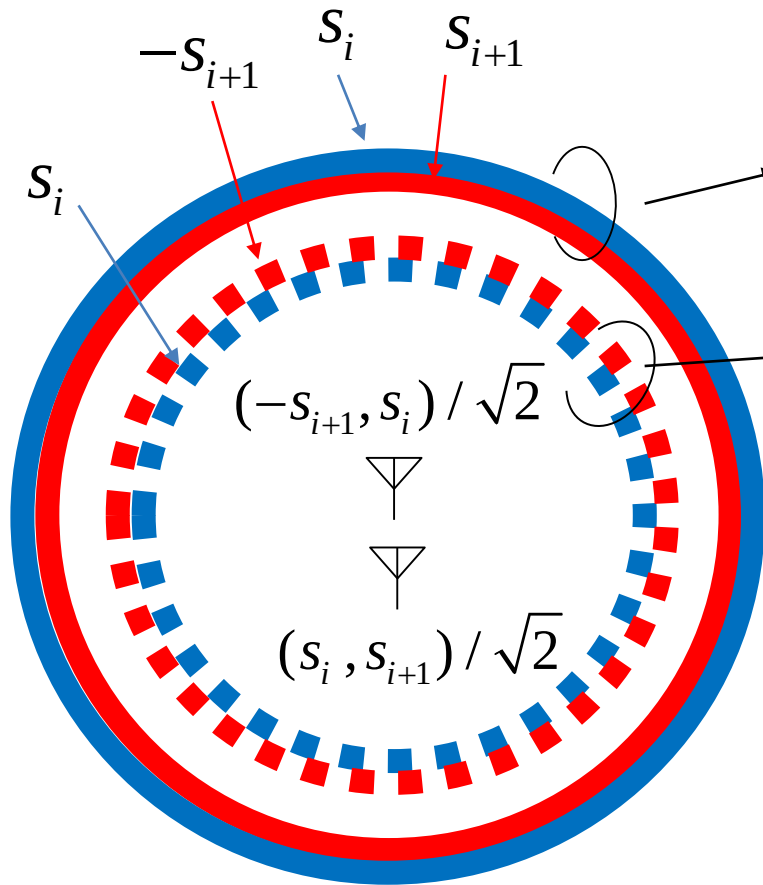


ダイバーシチ機能

(一本のアンテナが不具合)



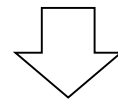
実数信号の自由空間伝送 (Alamouti 前夜: STBC送信の原型)



$$r_i = \frac{1}{\sqrt{2}} (s_i + s_{i+1})$$

$$r_{i+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (-s_{i+1} + s_i)$$

2シンボルを
ペアで受信



$$r_i + r_{i+1} = \sqrt{2} s_i$$

$$r_i - r_{i+1} = \sqrt{2} s_{i+1}$$

アレーアンテナ送信なのに、
方向依存性がなくなっている

受信強度



◎でないのは、合成時の雑音電力増加分により、
SN比的には単一アンテナの場合と変わらない

ダイバーシチ機能

(一本のアンテナが不具合)

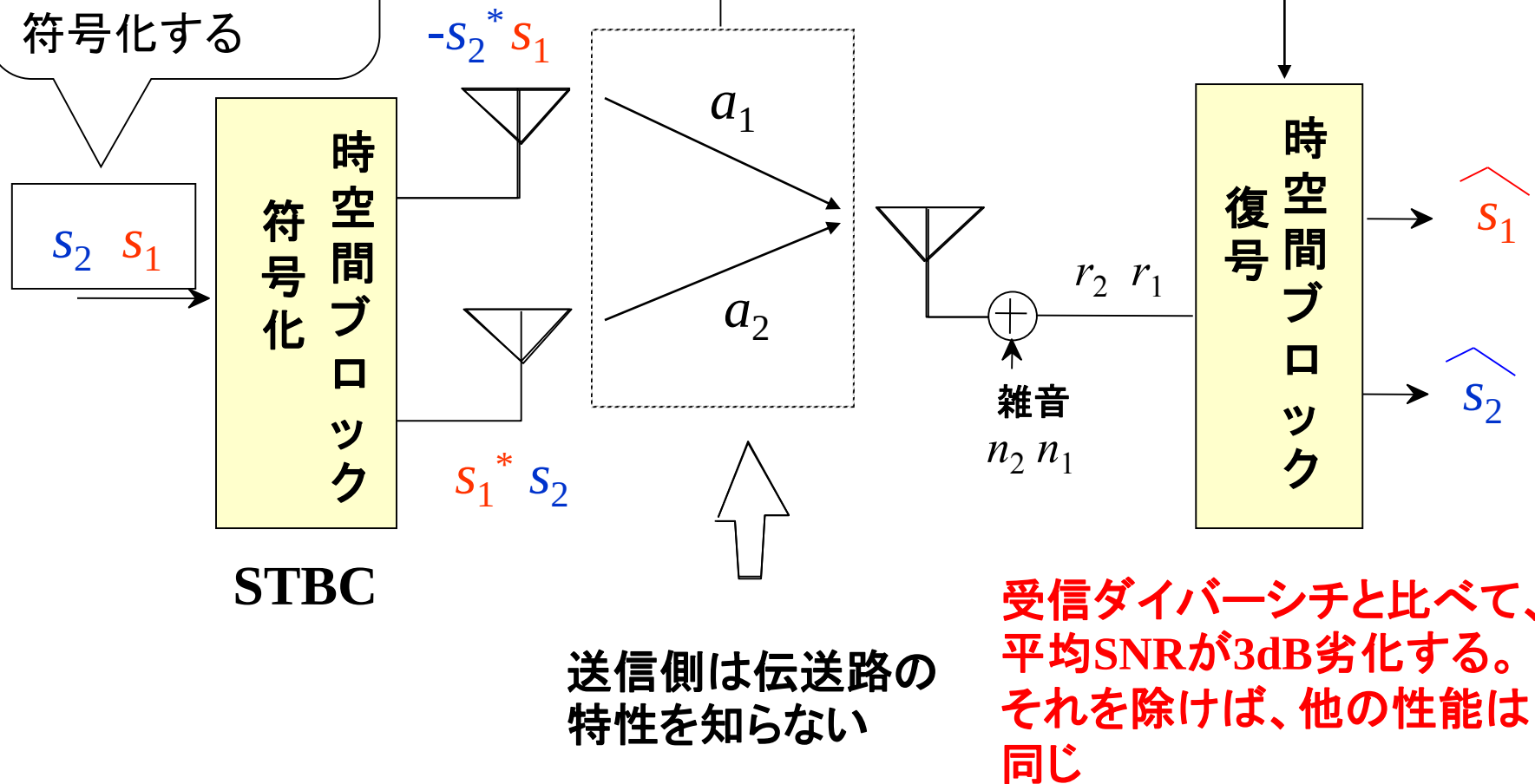


時空間ブロック符号化伝送 (Alamoutiの方法)

前スライドの予備的検討との違い

- ① 送信信号が複素数
- ② 通信チャネルが複素数

2の時間をかけて
2つの信号を
時間・空間領域で
符号化する



受信信号の表現

$$r_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 s_1 + a_2 s_2) + n_1$$

$$r_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (-a_1 s_2^* + a_2 s_1^*) + n_2$$

($1/\sqrt{2}$ は平均送信電力を1とするため)

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}$$

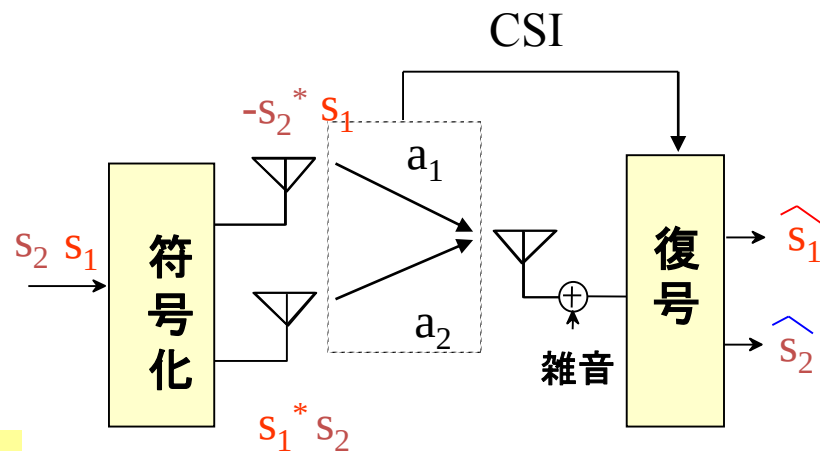
$$r_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 s_1 + a_2 s_2) + n_1$$

書き換え

$$r_2^* = \frac{1}{\sqrt{2}} (-a_1^* s_2 + a_2^* s_1) + n_2^*$$

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2^* \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2^* & -a_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{r} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathbf{A}_e \mathbf{s} + \mathbf{n}$$



STBC

時空間符号化

$$S = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}$$

空間(アンテナ) → 時間

実効チャネル表現

$$\mathbf{A}_e = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2^* & -a_1^* \end{pmatrix}$$

受信信号の表現(続)

受信信号 $\mathbf{r} = \frac{1}{\sqrt{2}} A_e \mathbf{s} + \mathbf{n}$

ウェイト: $W = A_e$

ウェイトを掛けて受信信号処理(復号)

$$\boxed{W^H \mathbf{r}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \boxed{A_e^H A_e} \mathbf{s} + A_e^H \mathbf{n} \Rightarrow \hat{\mathbf{s}}$$

受信側での演算
(復号)

$$\left(|a_1|^2 + |a_2|^2 \right) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- ・信号分離(直交化)
- ・MRC合成(フルダイバーシチ)

受信信号のSNR

シンボル s_1 に対して

$$SNR_{s_1} = \frac{\left(|a_1|^2 + |a_2|^2 \right)^2 \langle |s_1|^2 \rangle}{2 \langle |a_1^* n_1 + a_2^* n_2|^2 \rangle} = \frac{\left(|a_1|^2 + |a_2|^2 \right)^2 \langle |s_1|^2 \rangle}{2 \left(|a_1|^2 + |a_2|^2 \right) \langle |n_1|^2 \rangle} = \frac{1}{2} \left(|a_1|^2 + |a_2|^2 \right) SNR_0$$

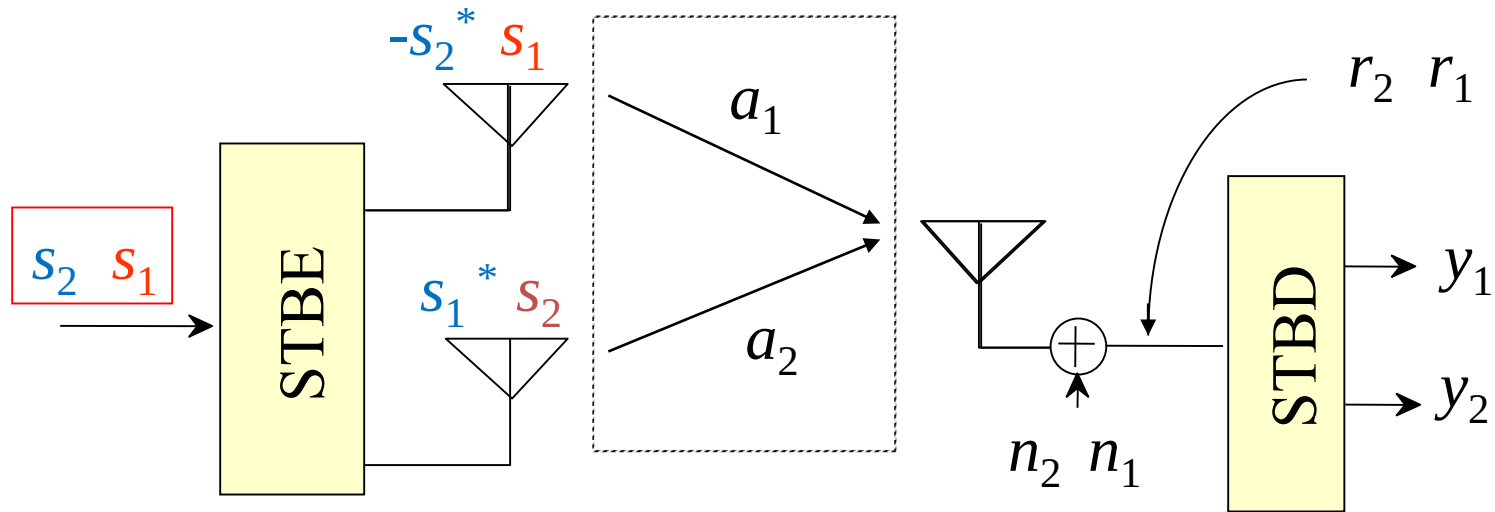
CSIを持たないことの
代償(ペナルティ)
(スライド2との唯一の違い)

シンボル s_2 に対しても同様(上式に同じ)

$$\langle |n_1|^2 \rangle = \langle |n_2|^2 \rangle, \langle n_1 n_2^* \rangle = 0 \text{ より}$$

フルダイバーシチ

送信ダイバーシチ: Alamoutiの方法がなぜうまくいったか？



$$\begin{aligned}
 a_1^* r_1 &= |a_1|^2 s_1 + a_1^* a_2 s_2 + a_1^* n_1 \\
 +) \quad a_2 r_2^* &= |a_2|^2 s_1 - a_1^* a_2 s_2 + a_2 n_2^*
 \end{aligned}$$

$$y_1 = \left(|a_1|^2 + |a_2|^2 \right) s_1 + 0 s_2 + \text{noise}$$

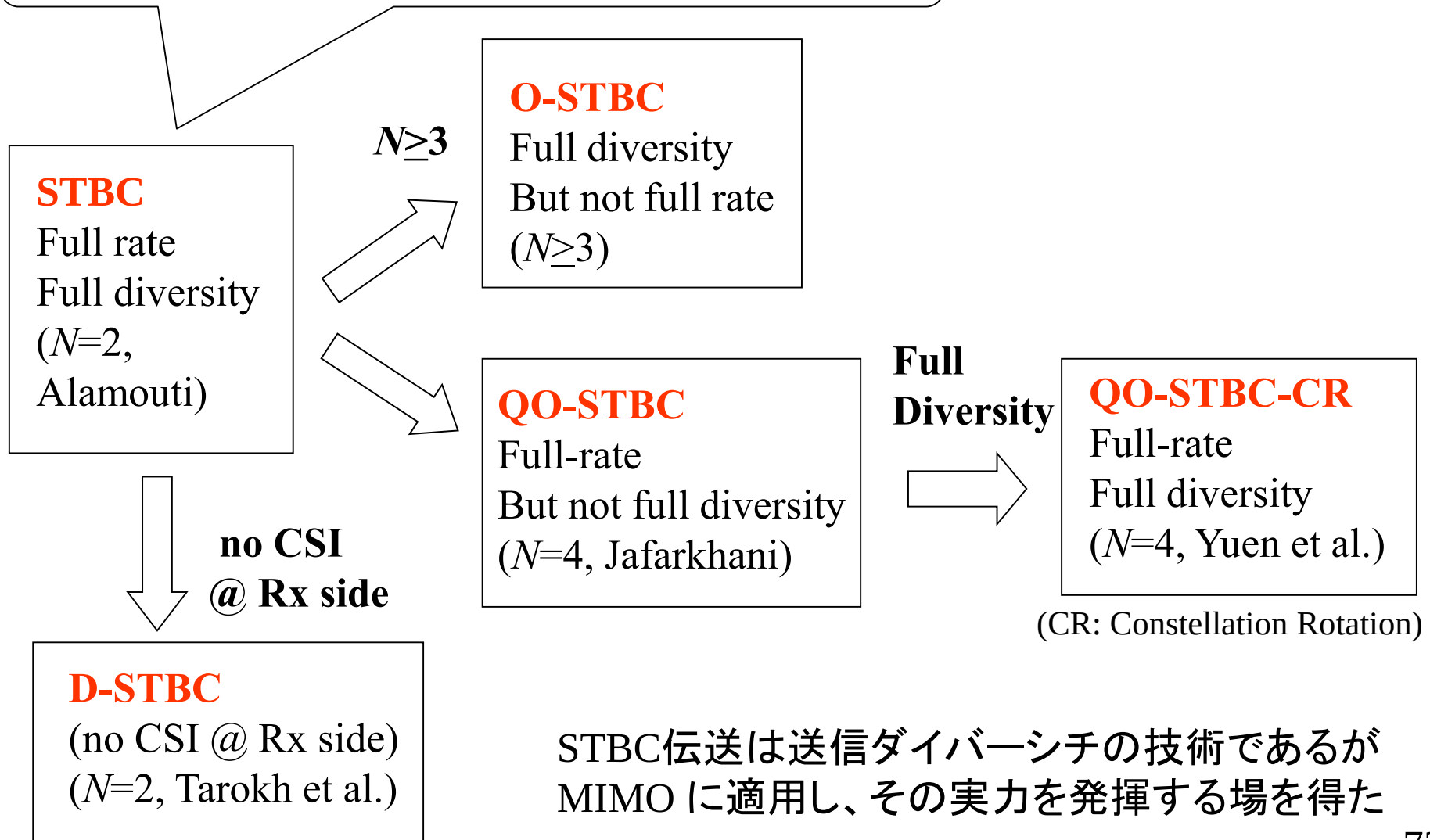
[伝送信号を直交化:

s_1 を最大比合成で

受信する演算= s_2 を打ち消して0にする演算]

STBC進化の系譜(弱点を補う形での)

レートを落とすことなく完全ダイバーシチを実現できるのは送信アレー素子数が2 ($N=2$) の場合のみ



空間多重(マルチストリーム伝送)

通信路容量(スループット)を上げる技術

MIMOに最も期待される働き

シャノンの通信路容量

通信路容量：誤り無く伝送することのできる伝送速度の
最大値

周波数帯域幅： W (Hz)

信号の平均電力： S

雑音の平均電力： N

報酬

努力

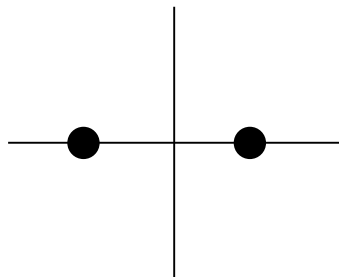
$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit / s})$$

$$\approx W \log_2 \left(\frac{S}{N} \right) \quad (1 \ll S / N)$$

この式は、電力が有り余っても、容量増加に
有効に活かされない構造になっている

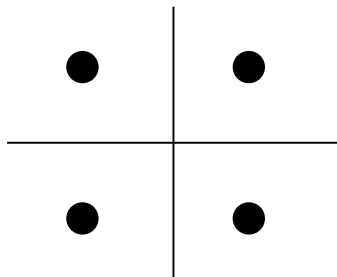
→ 電力を倍にしても、1ビット増えるだけ

対数的増加の非効率性の例 Example of ineffectiveness for logarithmic increase



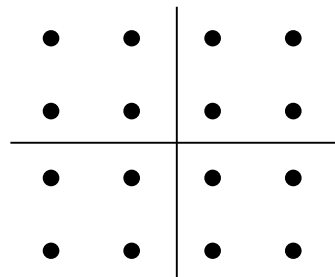
BPSK (1bit/symbol)

SNR →



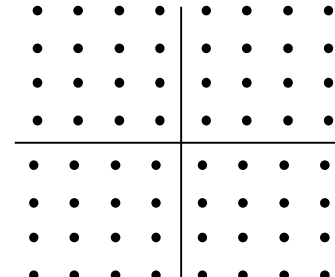
QPSK (2)

+3dB →



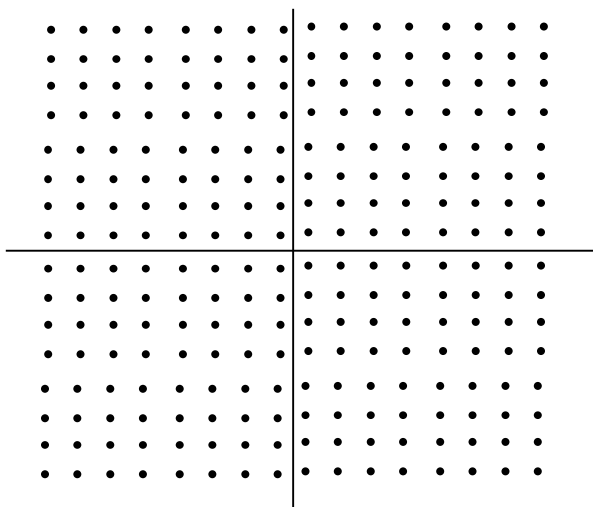
16-QAM (4)

+6dB



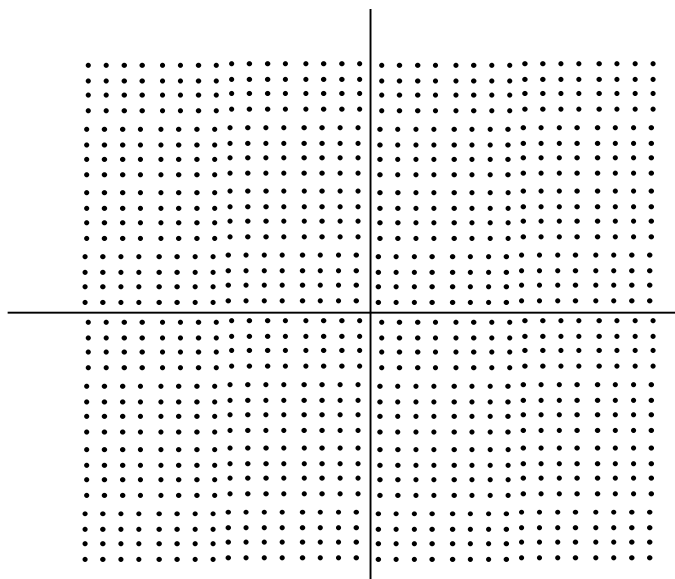
64-QAM (6)

→ +6dB



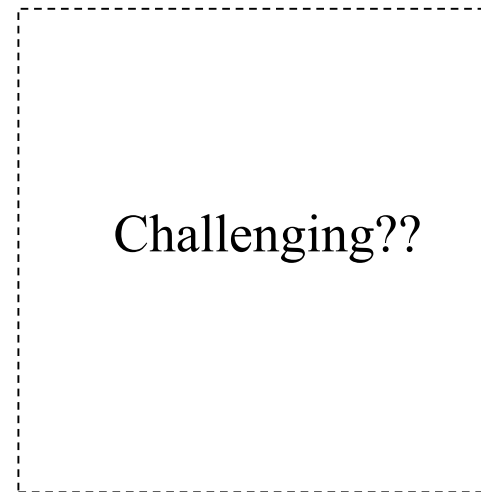
256-QAM (8)

→ +6dB



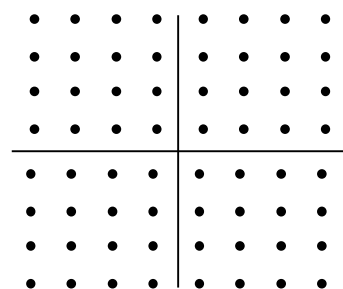
1024-QAM (10)

→ +6dB



4096-QAM (12)

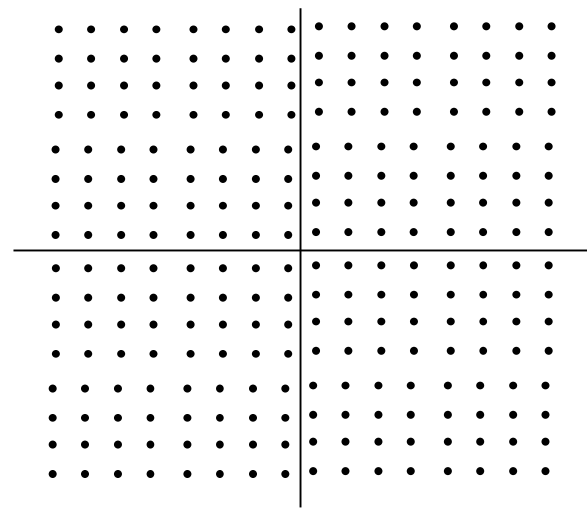
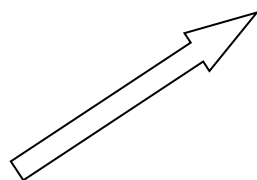
SNRが4倍大きくなったら？



64-QAM

6 bit/symbol

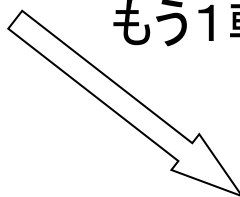
2直交軸のまま



256-QAM

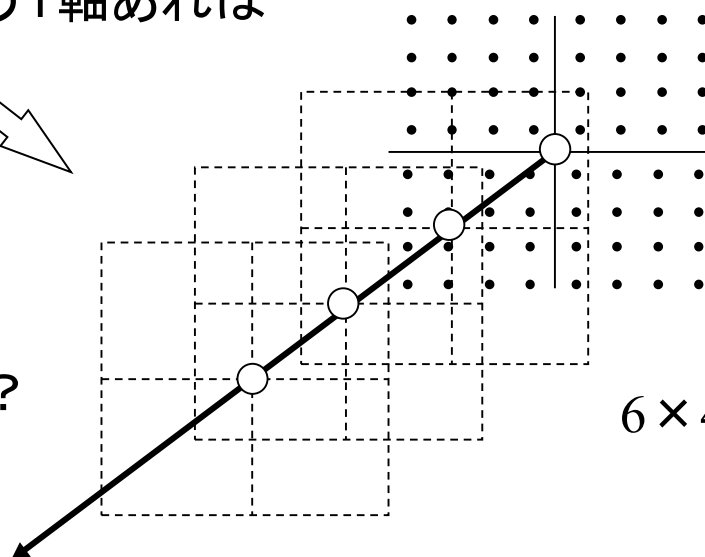
8 bit/symbol

もう1軸あれば



この直交軸は？

それが空間軸



$6 \times 4 = \mathbf{24}$ bit/symbol

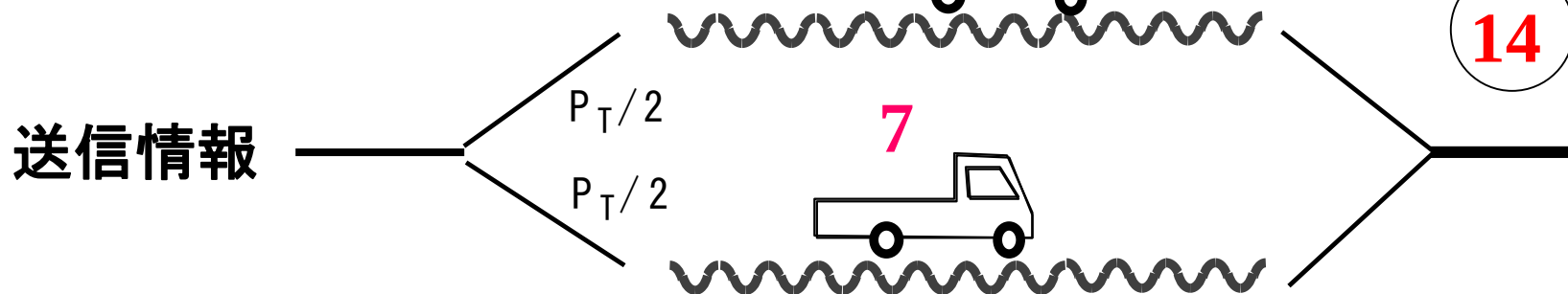
高SNRのケースでは

例: 8bit/symbol/シングルストリーム

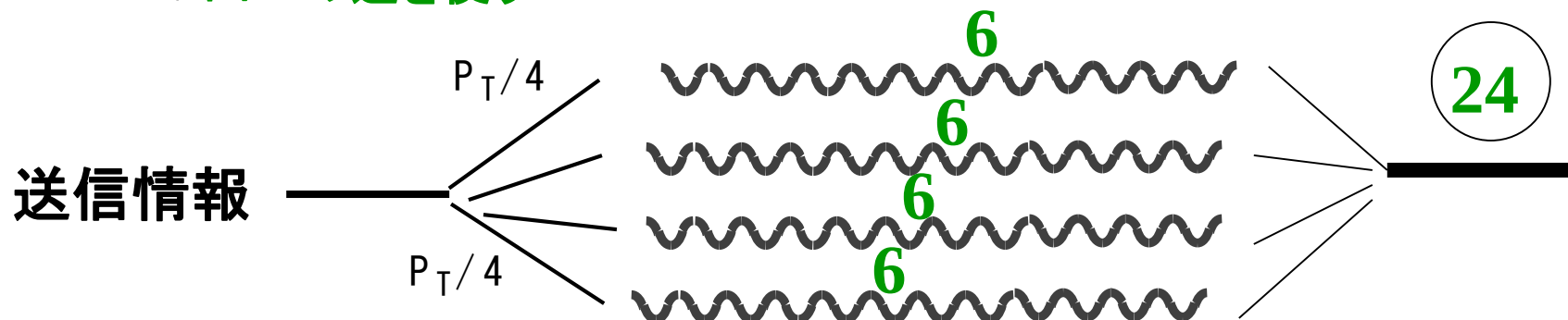
Case 1: ひとつの道だけを使う



Case 2: 二つの道を使う



Case 3: 四つの道を使う



(千手観音同士のキャッチボール)

MIMO理解に重要な 行列の固有値と固有ベクトル

正方行列

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{pmatrix}$$

行列の固有値と固有ベクトルを求める方程式

$$A\mathbf{e} = \lambda\mathbf{e}$$

λ 固有値（ N 個ある）

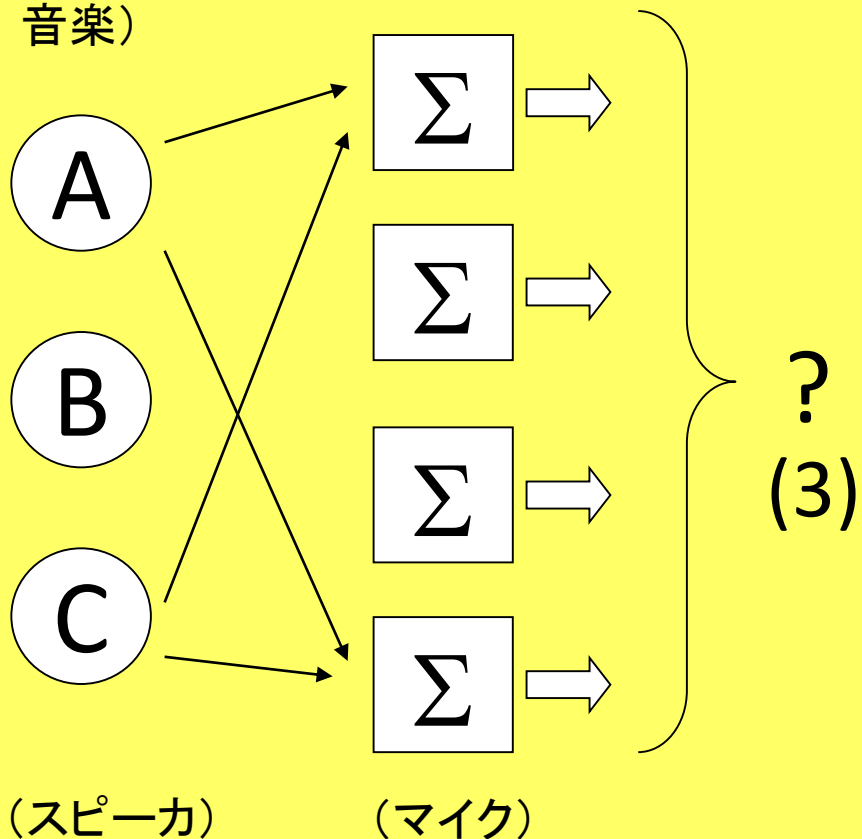
$\mathbf{e}$ 固有ベクトル（固有値に対応して N 個ある）

固有値の数 = 独立な情報の数？

(case 1)

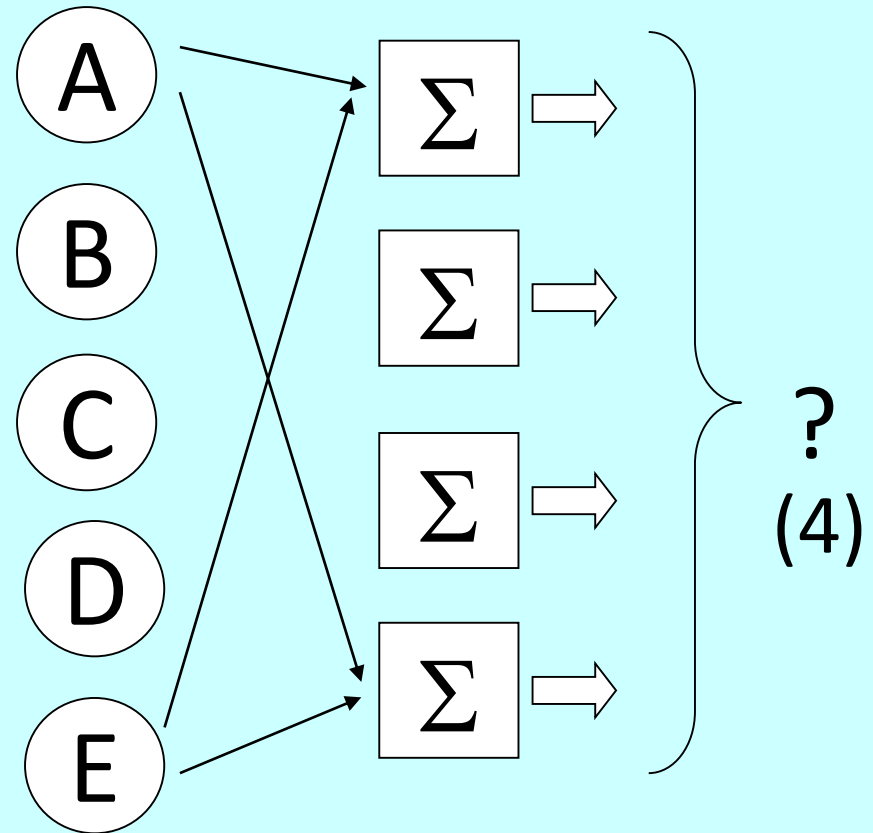
情報

(例えば、
音楽)



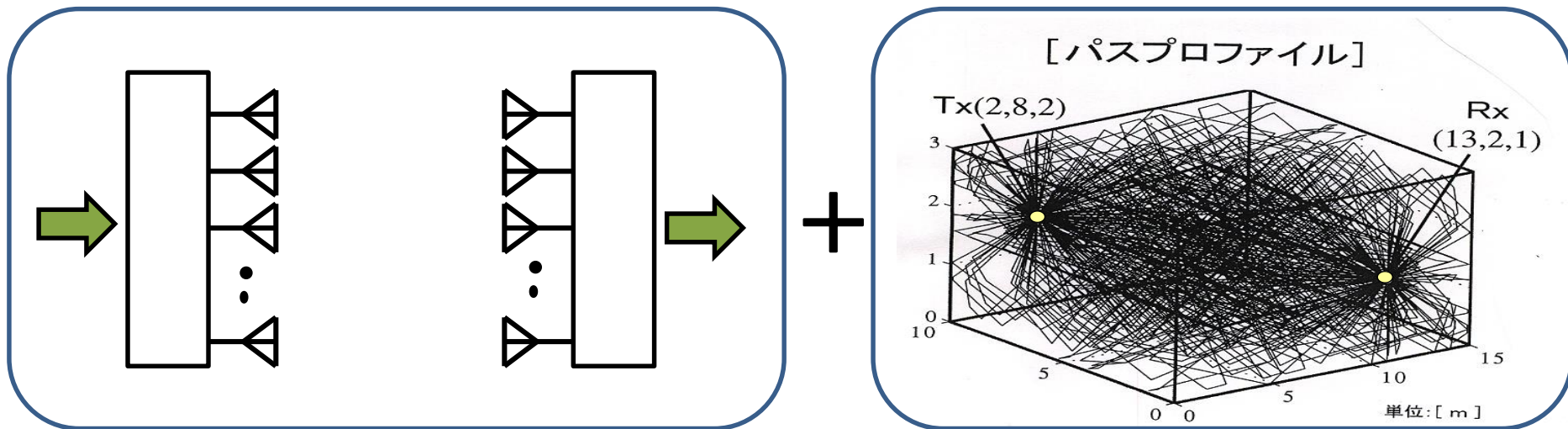
(case 2)

情報



相手に情報を送りたい場合、複数の伝送路を利用して、
並列に情報を送ることができれば、たくさんの情報を送ることが
できそう → マルチストリーム伝送

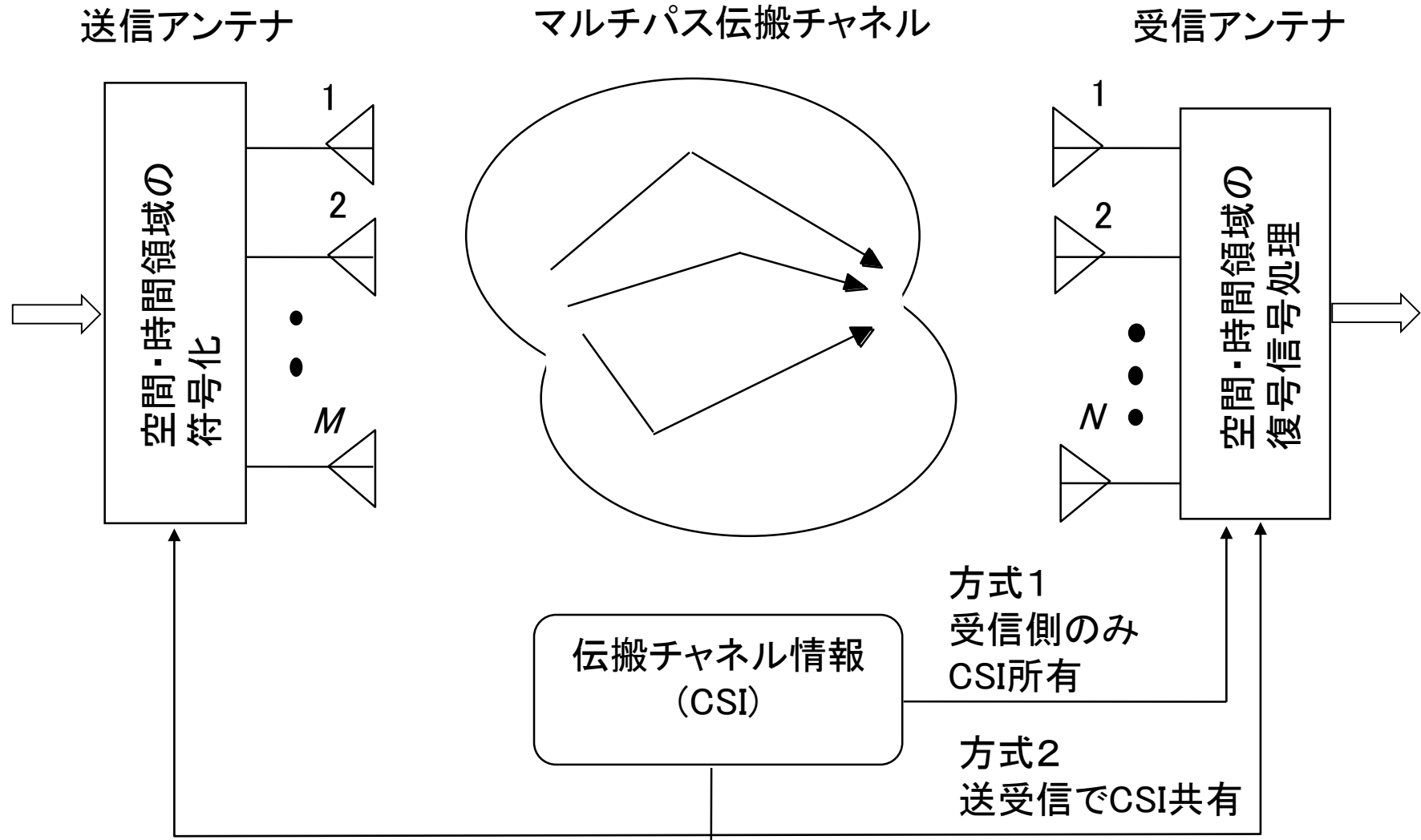
では、その複数の伝送路を、どのようにして手に入れるか？



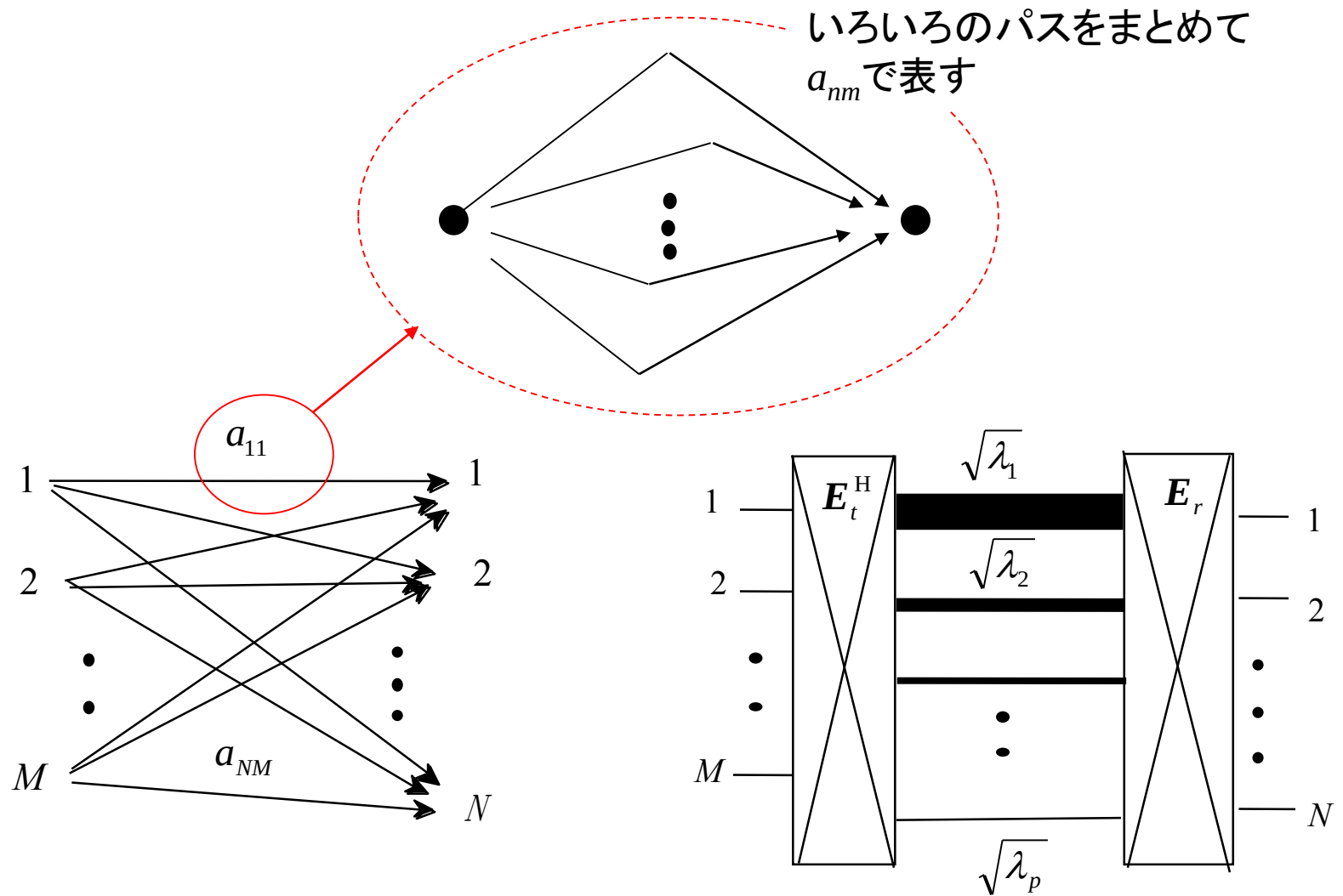
送受信にアレーアンテナを使おう

マルチパス環境を
積極的に利用しよう
(逆転の発想)

MIMOによる情報伝送システム



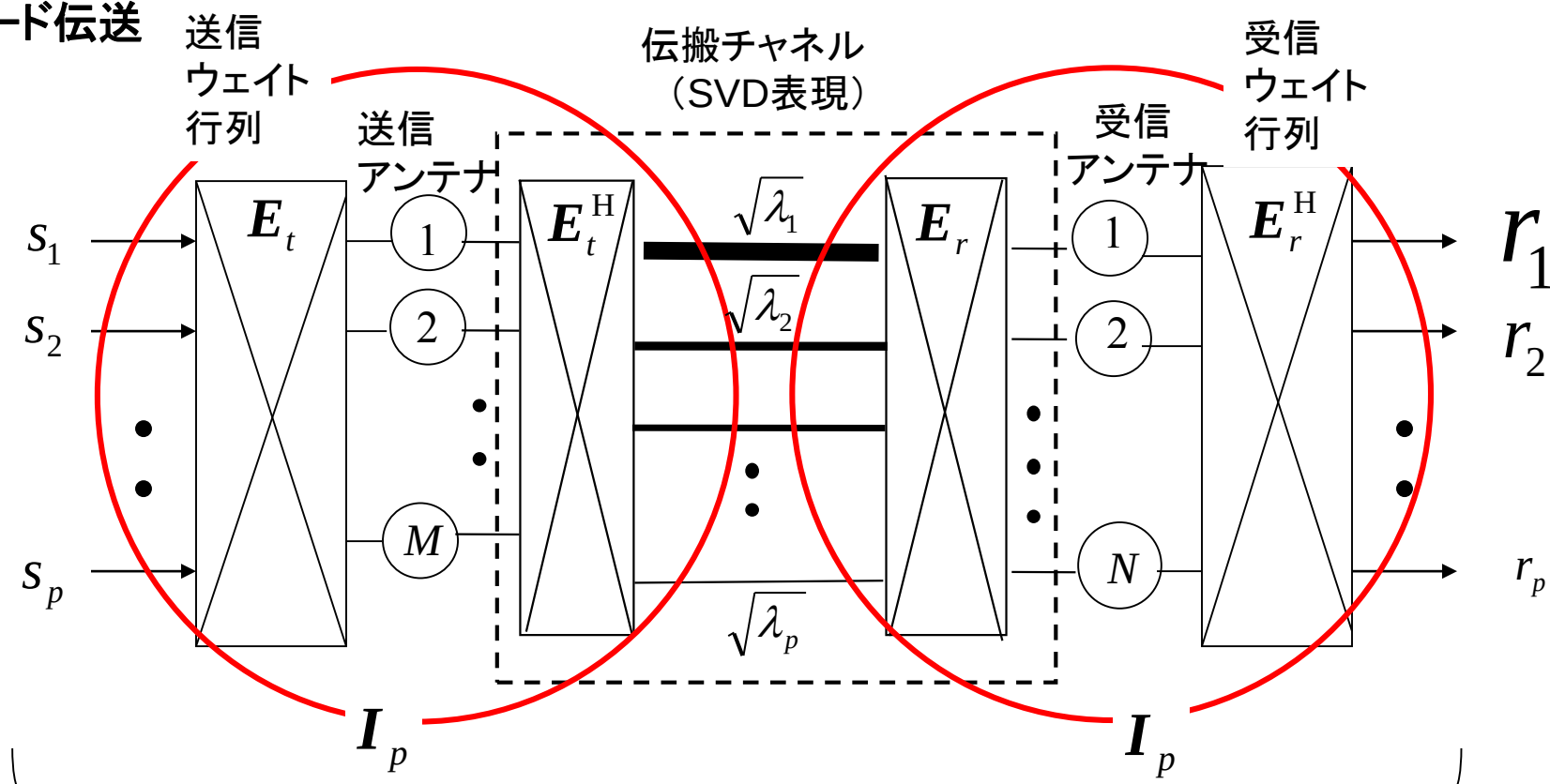
MIMOチャネルの等価回路表現



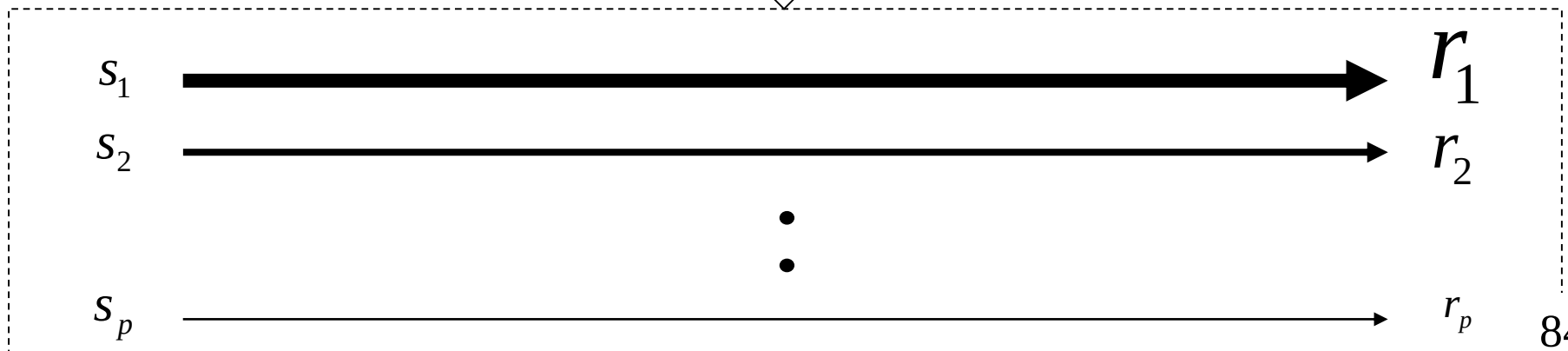
チャネル応答行列の要素

行列の特異値分解(SVD)に基づく等価回路

固有モード伝送

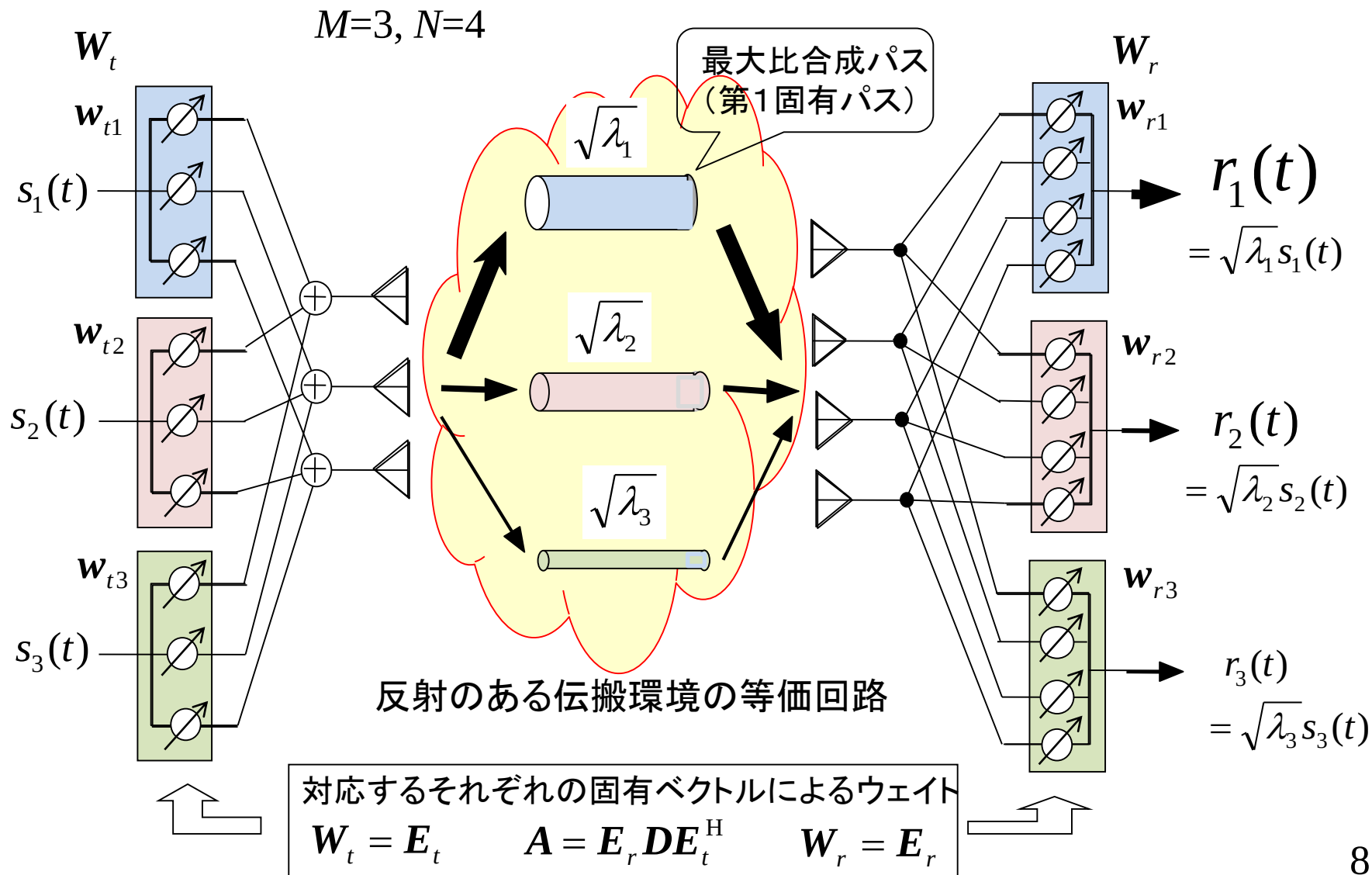


実効通信路

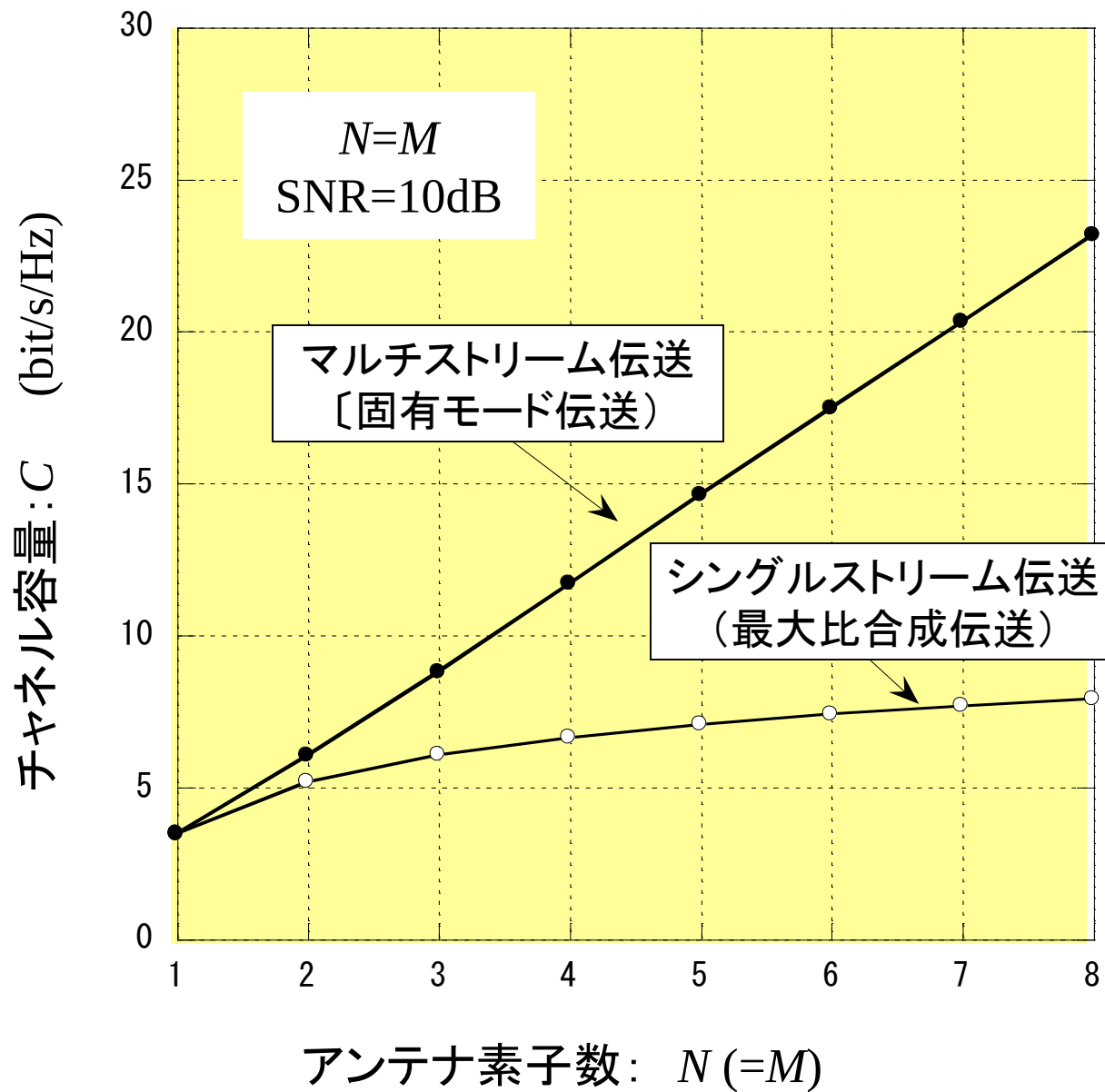


MIMO固有モード伝送の構成例

イメージ: 反射のある環境において
3つの音楽を3つのスピーカーから流し、
それを4つのマイクロホンで拾い、
分離して聞くことができる技術



シングルストリーム伝送 vs マルチストリーム伝送



注意！！

この比較はあくまで、
SN比が高いところで
チャンネル容量を
比較したもの

MS伝送がSS伝送より
優れているということを
一般的に言っている
わけではない

MIMO: その二つの顔

(1) **たくさんの情報を伝送する技術**
(高スループット技術: マルチストリーム伝送)



二者択一(過剰な期待は禁物)

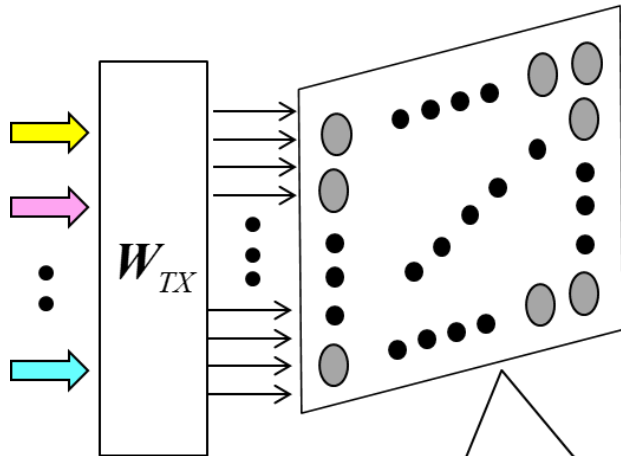
(2) **切れないリンクを実現する技術**
(高信頼性技術: 送受信ダイバーシティ)

移動通信の5G, 6Gに期待される新しい技術: Massive MIMOはこの二つの機能を両立することができる

第5世代移動通信のマッシブMIMO情報伝送システム (高機能マルチユーザシステム)

キーポイント 1
情報の送り方

基地局



素子数が1000程度の
大規模アレー

キーポイント 2
伝搬チャネルの理解

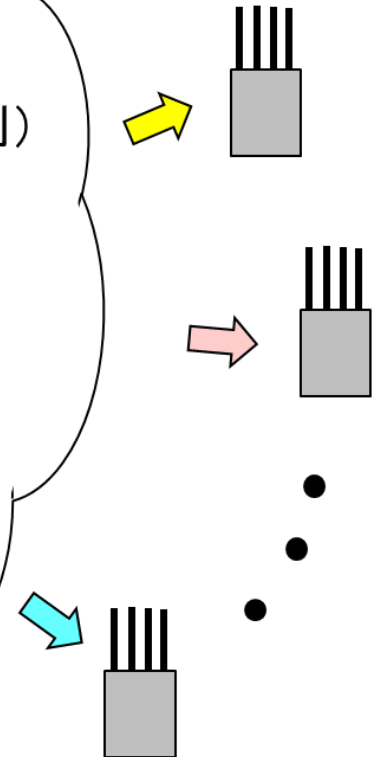
伝搬チャネル
(大規模ランダム行列)

- ・見通し外
- ・見通し内

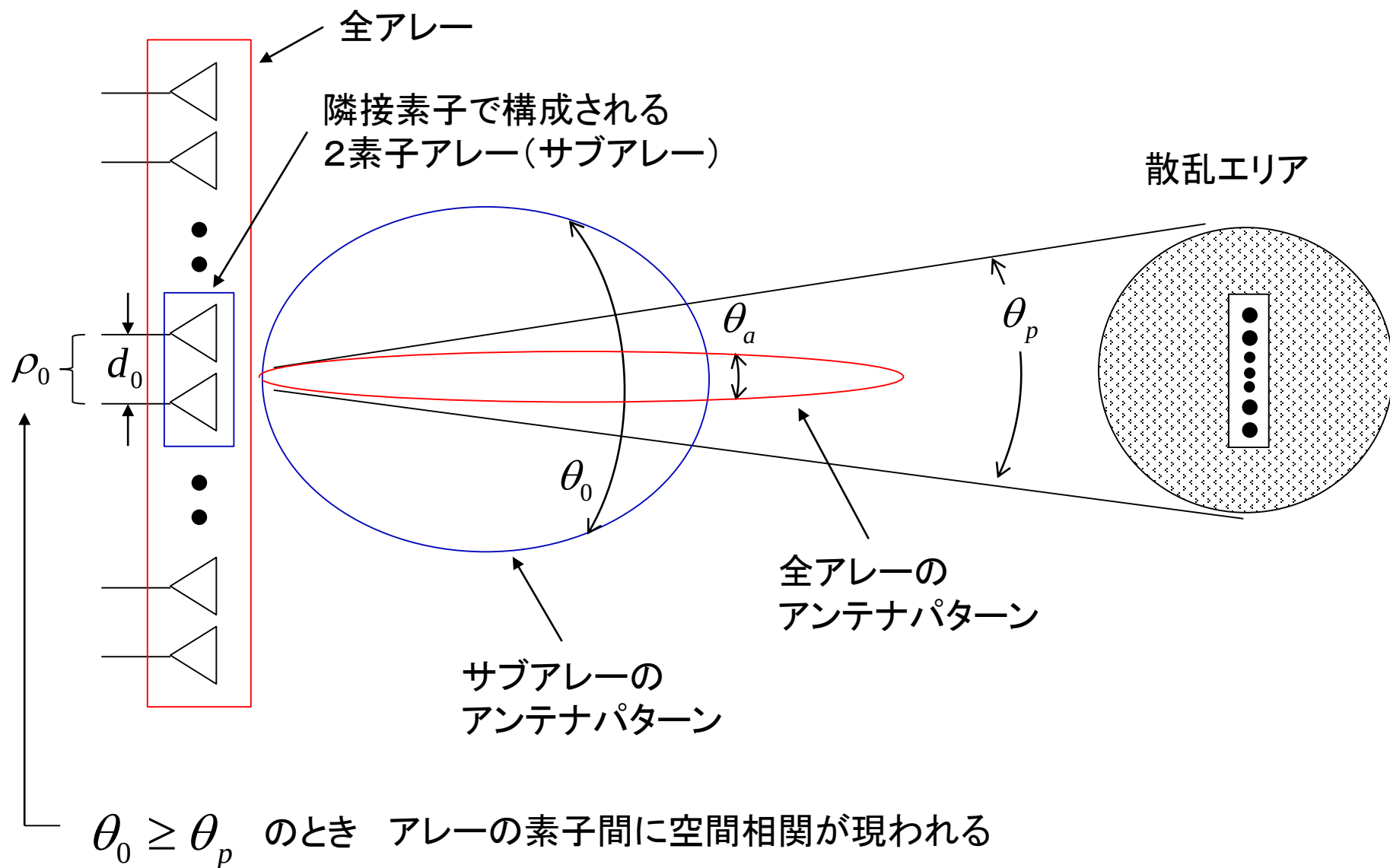
信号の素子間相関

- ・無相関
- ・有相関

多数のユーザ



Massive MIMO伝搬環境



無線通信の高信頼化・高機能化

SISO（単一アンテナの対向）

↓ 信頼性を上げる

SIMO（アレーアンテナ受信：ダイバーシチ）

↓ 通信容量を上げる

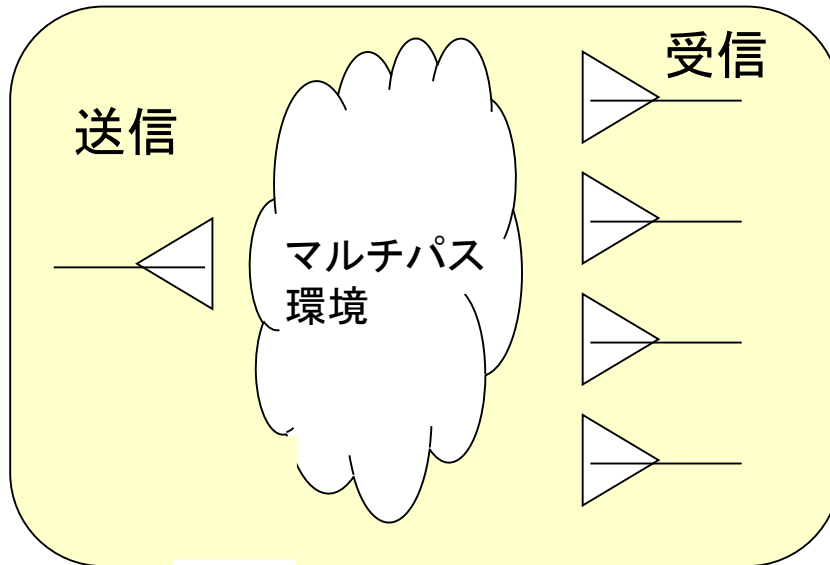
MIMO（送受信共にアレー）

↓ ユーザ数を増やす

Massive MIMO（基地局に大規模アレー）

なぜアダプティブアレーより構成が複雑なMIMOが時代に受け入れられたか

SIMO (1対多)

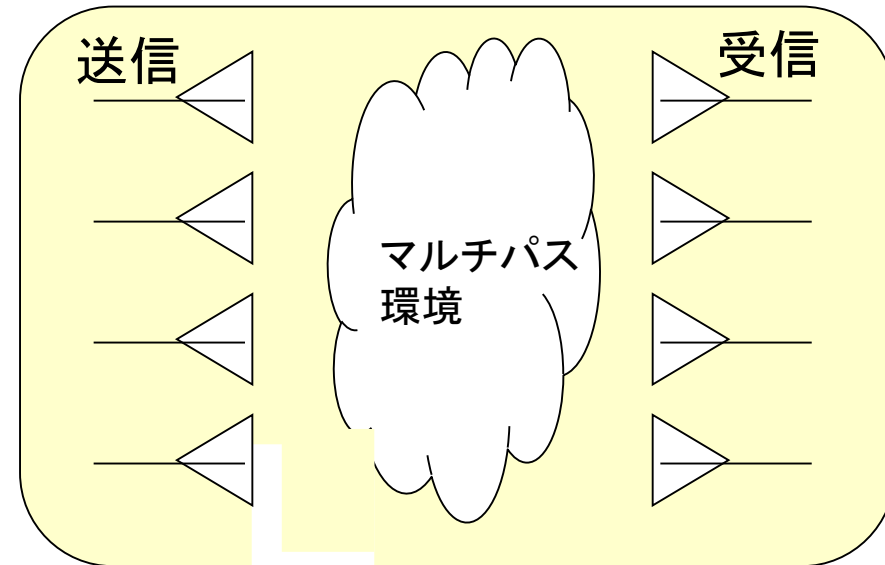


- 4素子ダイバーシチ
- 3つの干渉波除去 (アダプティブアレー)

困ったことを助けてくれる

VS

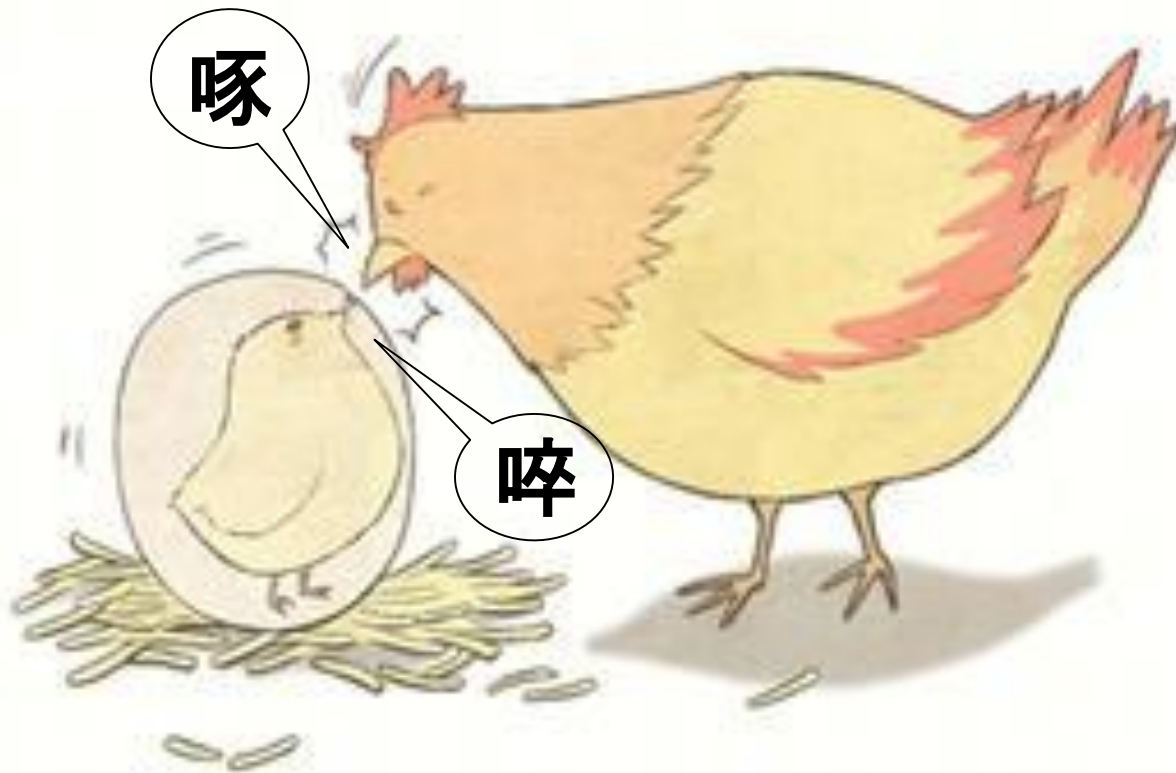
MIMO (多対多)



- 16素子のダイバーシチ
- 3つの干渉波除去
- 4つのデータの並列伝送 (4倍のスループット)

できなかったことができるようになる

MIMOにみる啐啄同時(そったくどうじ)



終わりに

キャベンディッシュの教訓

- ・発明・発見は、いずれ誰かが成し遂げる
新技術は、いずれ誰かが紡ぎだす

大事なことは

- ・記録に残す
- ・発表する

電子情報通信レクチャーシリーズ D-15

電波システム工学

電子情報通信学会  編

唐沢 好男
藤井 威生 【共著】



コロナ社

1. 電波システムとは

【基礎編】

2. 無線伝送の基本モデル

3. マルチパス伝搬

4. アレー信号処理

5. MIMO伝送技術

6. デジタル変復調

7. デジタル変調の誤り率

【応用編】

8. 移動通信システム

9. 自律分散無線ネットワーク

10. 衛星通信システム

11. 衛星航法システム

12. レーダシステム

13. ワイヤレス電力伝送

本日の講義に関連する参考資料情報

唐沢研究室ホームページ <http://www.radio3.ee.uec.ac.jp>

○ 本日の講義スライド (top: 最近の研究紹介記事等より)

○ 無線通信技術に関する技術レポート (全57報)

<http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/report.htm>

○ 無線通信技術の不思議をまとめた解説記事:
「電波研究の玉手箱」

(電波技術協会報 FORN: 全10講中の第4講まで)

第1講 [フリスの伝達公式への温故知新](#) (No. 335, 2020.07)

第2講 [ランダムウォークで巡る電波伝搬基本式](#) (No. 336, 2020.09)

第3講 [統計的にもものを見る目を養おう](#) (No. 337, 2020.11)

第4講 [電磁誘導の法則に見る電磁気学のからくり](#) (No. 338, 2021.01)

第5講 伝送誤りはなぜ起きる? (No. 339, 2021.03)

本講義に関するご質問は E-mail: karasawa@ee.uec.ac.jp