

# 電波伝搬的視点からのデジタル伝送特性解析

～二重選択性フェージングにおける  
BERフロア特性と最適シンボル長設計法～

唐沢 好男

物事には「原因」と「結果」がある。原因と結果が直接的に結び付けられることであれば、同じ原因は同じ結果を生む。無線通信では、電波伝搬の諸現象が原因となって伝送特性の劣化と言う結果に至る。筆者等は、広帯域信号の伝送特性解析に、電波伝搬の特徴を定めるいくつかのキーパラメータに着目し、そのキーパラメータを組み入れた伝送特性解析モデルを示し、等価伝送路モデル(Equivalent Transmission-Path model: ETPモデル)と呼んでいる。この等価伝送路モデルは、バースト誤りを引き起こす受信機の再生クロックのサイクルスリップの解析[1],[2]や符号干渉誤りの解析[3]-[5]に力を発揮している。(このモデルの思想や特徴を整理して[6],[7]に詳しくまとめている)。

さらに、筆者等は、近年、OFDMに代表されるようなマルチパス遅延に耐性を有するマルチキャリア伝送においても、その通信での通信性能の限界をもたらす周波数選択性(遅延量のばらつきによる)と時間選択性(ドップラーシフトのばらつきによる)が共に存在する二重選択性フェージング環境での伝送解析を行ってきた[8],[9]。

この、二重選択性フェージング環境では、遅延スプレッド( $\sigma_\tau$ )とドップラースプレッド( $\sigma_\nu$ )の積で表される「スプレッドファクタ(spread factor):  $\sigma_\nu\sigma_\tau$ 」がキーパラメータになる。スプレッドファクタそのものは、1960年代より、いろいろの分野で多くの人がそれを取り上げてきた[10]~[13]という意味では「古く」、その問題が今日の広帯域通信の伝送特性の根幹に横たわり、性能限界を定量的に把握するための鍵になっているという意味で「新しい」と捉えることができる[14]。図1(スライド4)はこの環境を示している。

本稿は、これらのことを背景として、スプレッドファクタが支配的な二重選択性フェージング環境でのデジタル伝送特性、具体的にはビット誤り率(BER)のフロア値に着目し、フロア値を最小化する信号設計法とそのときのフロア値を示す。そして、その限界値がスプレッドファクタに支配されている様を明らかにする。

# 本発表の位置づけ

出発点：マルチパス環境における情報伝送限界問題に関する議論

1) Karasawa, Radio Science, Sept., 2016.

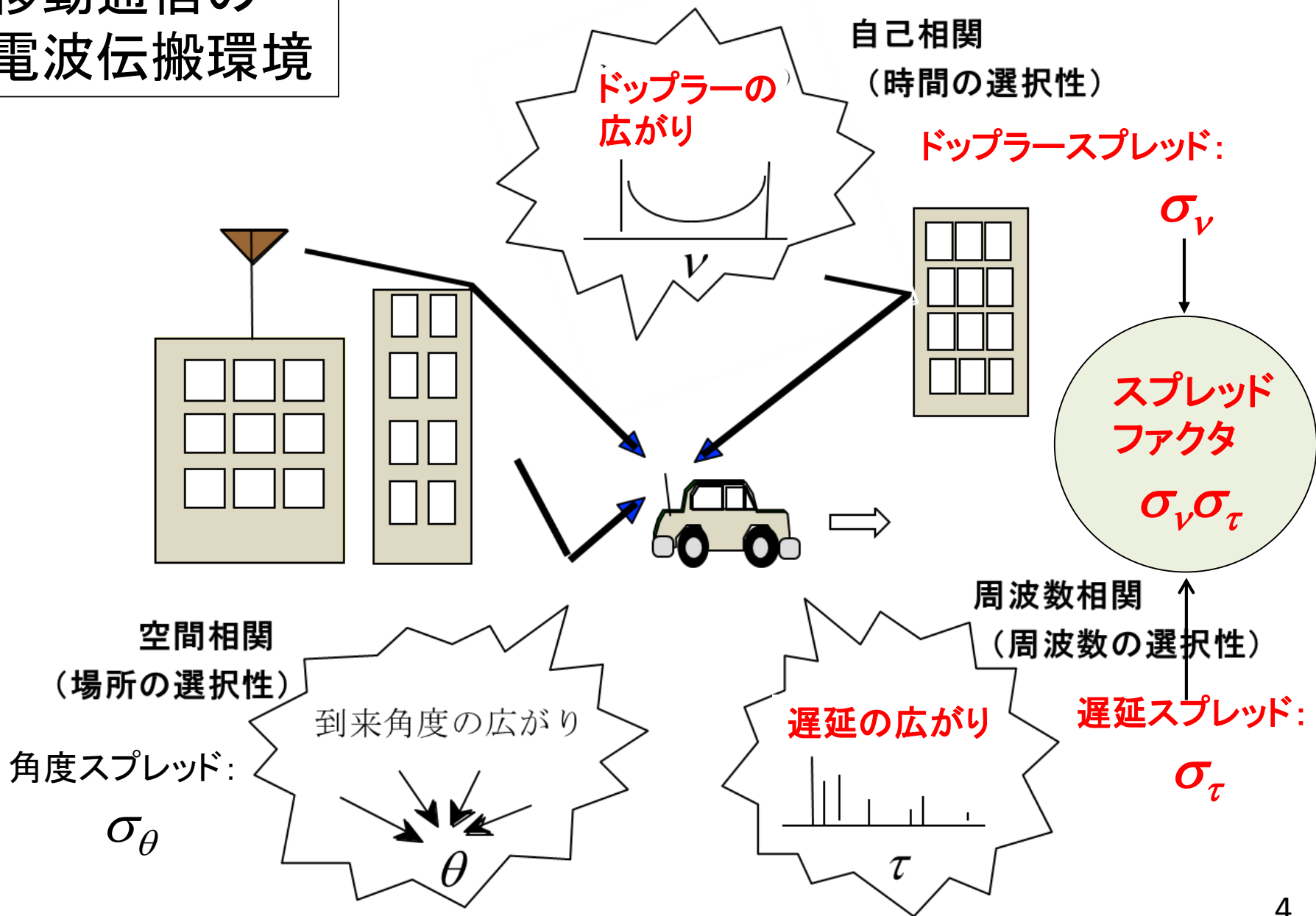
伝搬環境でのデジタル伝送特性に関する定量的な捉え方と  
基本関係式の導出

2) 二重選択性フェーディング環境での通信路容量  
Karasawa, IEICE Trans. Comm., 2018.05 (in press).

3) 二重選択性フェーディング環境でのBERフロア特性 ←今回発表

- 符号間干渉誤り(周波数選択性フェーディング)
- 位相変動誤り(時間選択性フェーディング、高速フェーディング)
- 最適シンボル周期とその伝送特性

# 移動通信の 電波伝搬環境



軽減困難な誤り (irreducible error) の発生  
→ BERのフロア値を与える

遅延の広がり



周波数選択性  
フェージング  
(遅延スプレッド:  $\sigma_\tau$ )



符号間干渉誤り  
( $\sigma_\tau/T_s$  が大きくなるほど  
BERが劣化)



$T_s$  に対するBERの最小値は？  
そのシンボル周期の大きさは？



ドップラー周波数  
の広がり



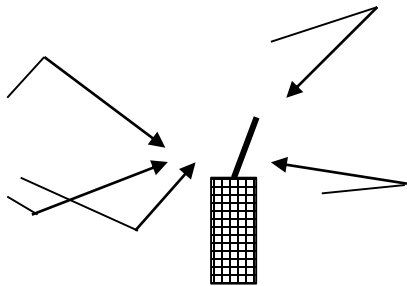
時間選択性  
フェージング  
(ドップラー  
スプレッド:  $\sigma_\nu$ )



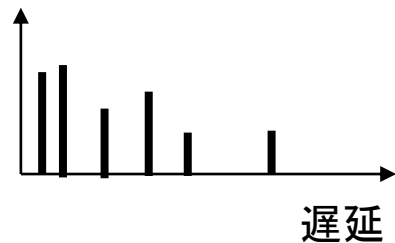
位相変動誤り  
( $\sigma_\nu T_s$  が大きくなるほど  
BERが劣化)

# 電波伝搬的視点からの符号間干渉誤りのBER推定

【マルチパス遅延環境】



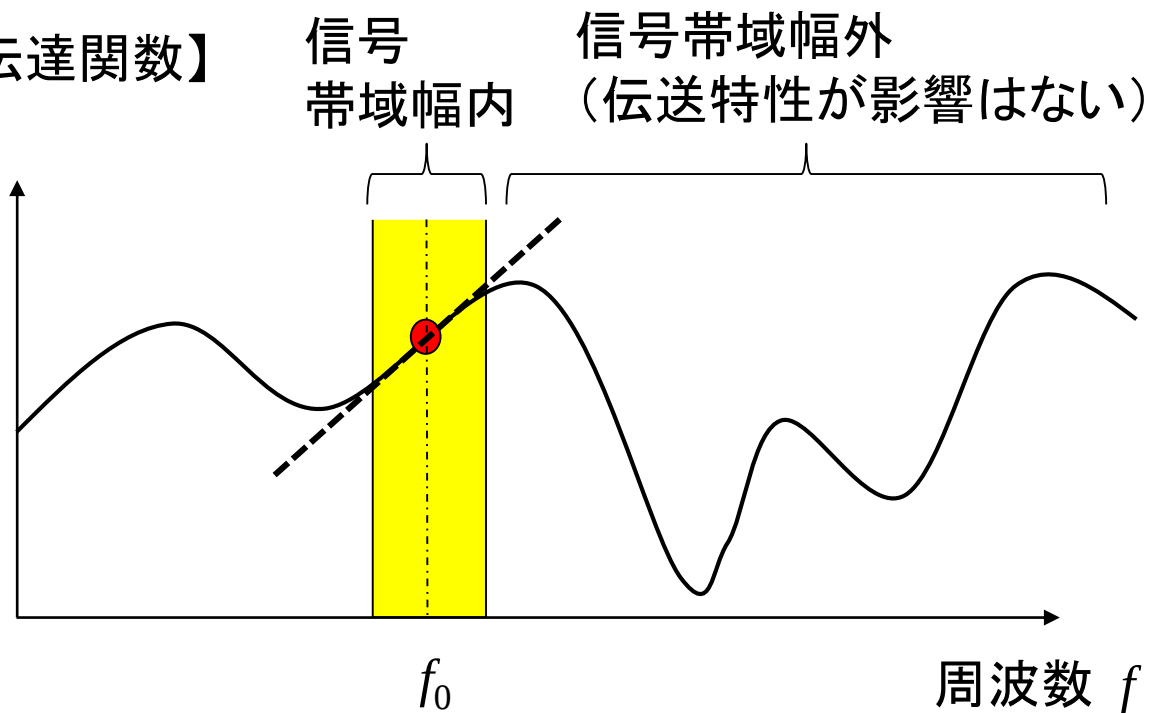
【インパルス応答】



フーリエ  
変換  
→

【伝達関数】

チャンネル利得  $|T(f)|$



帯域内で伝達関数 $T(f)$ が同じ→発生する誤りも同じ

第一次近似: ① 伝達関数の値  $T(f_0)$ が同じ

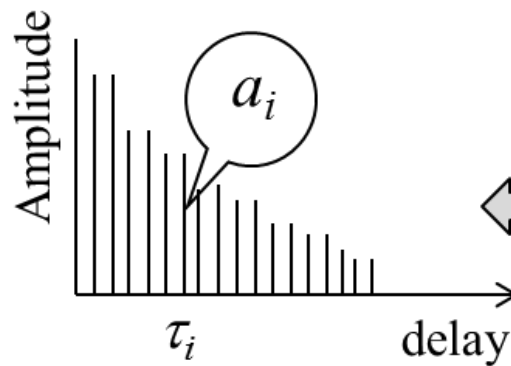
② 伝達関数の微分係数(傾き)  $T'(f_0)$ が同じ

であればよいが、さらに、符号間干渉誤りでは、伝達関数の値そのものにはよらないので

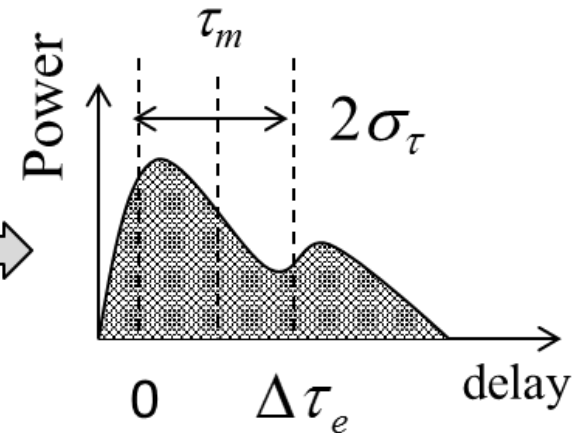
③  $T'(f_0)/T(f_0)$ の値が同じところでは、誤り発生も同じになるはず

# 符号間干渉誤りのBER推定を電波伝搬視点で行う (レイリーフェージング環境の等価2波モデルへの置き換え)

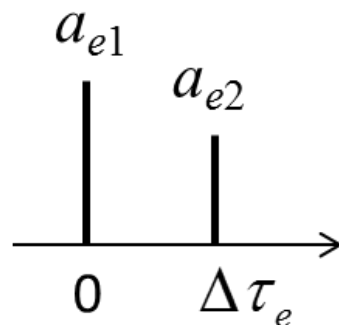
瞬時環境表現  
(インパルス応答)



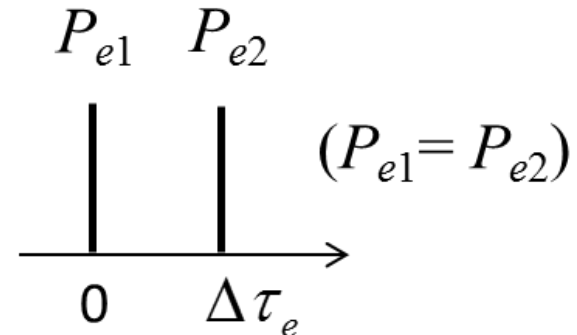
統計的環境表現  
(遅延プロファイル)



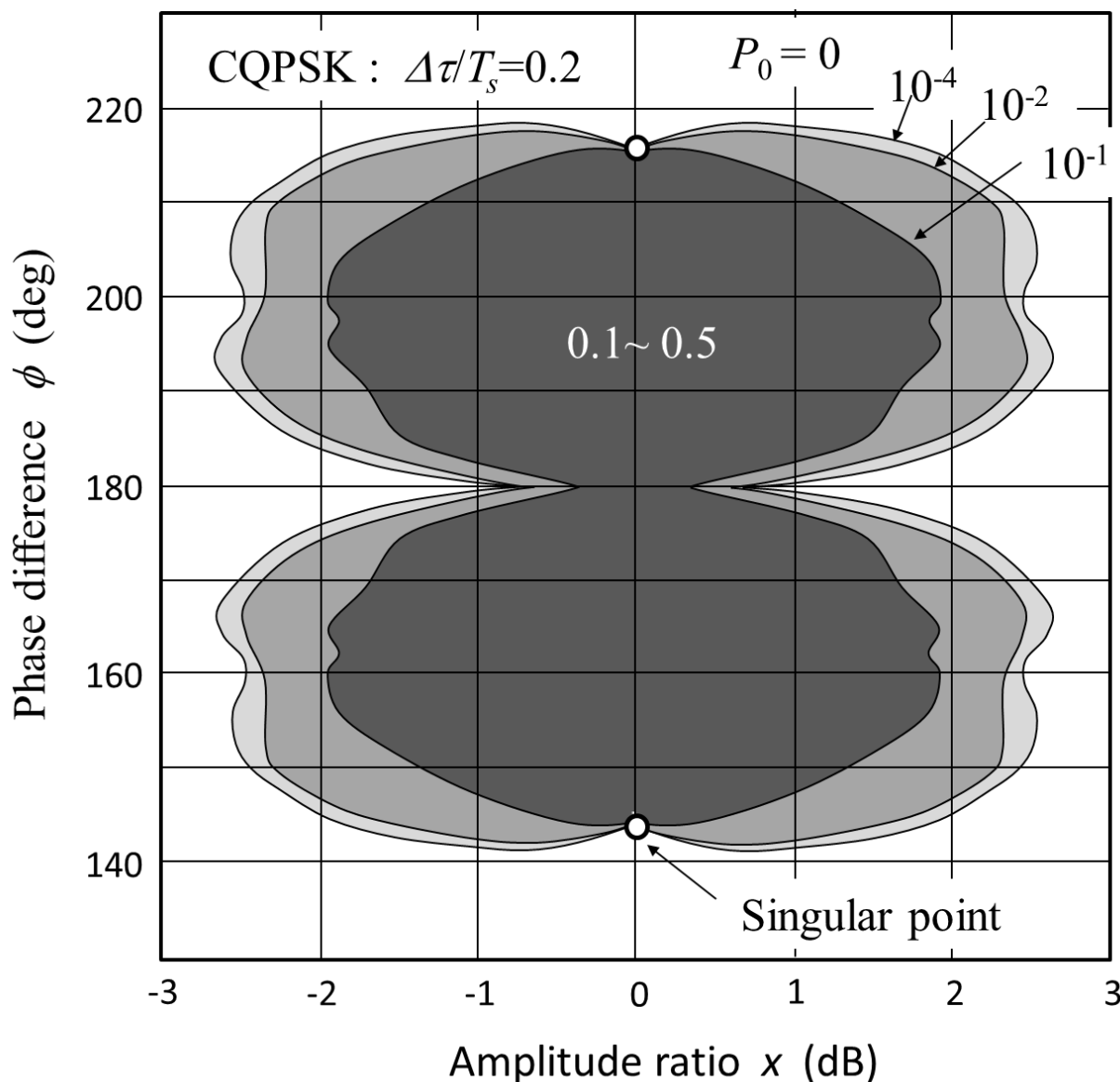
正規化伝達関数傾度  
 $T'(0)/T(0)$ を維持



遅延スプレッド: $\sigma_\tau$   
の値を維持



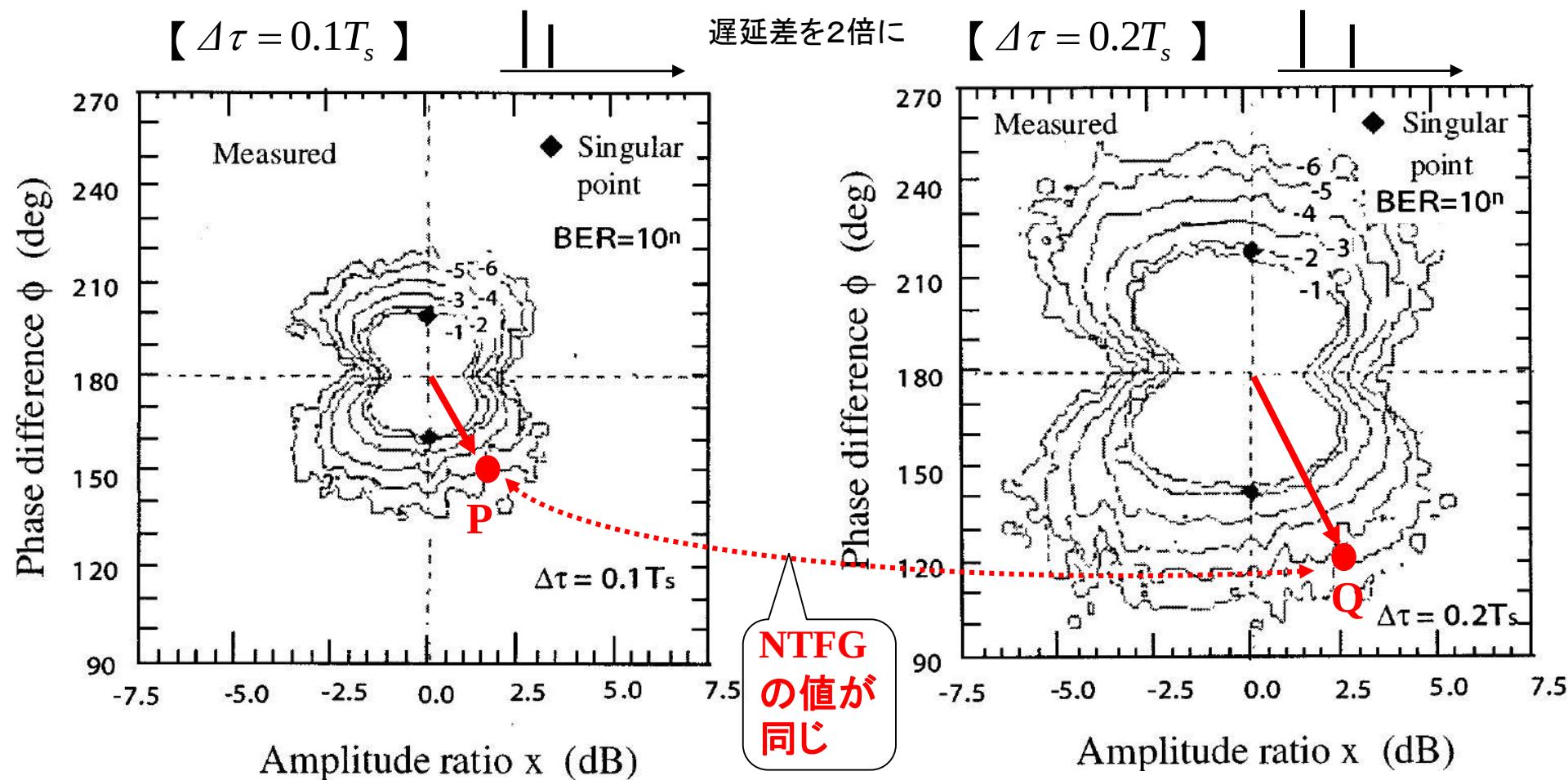
## 2波モデルでの誤りの発生分布(CQPSK: BERマップ)



### BERマップの性質

- 1) 変復調方式毎に形が異なる
- 2)  $\Delta\tau/T_s \leq 0.5$ では、 $\Delta\tau$ の変化に対して、形状相似性がある  
(理論や実験で確認済み)
- 3) 上記形状相似性により変復調方式に対してBERマップは1枚用意しておけばよい

# BER マップの形状相似性 (CQPSK 64kbpsモデムによる実測)



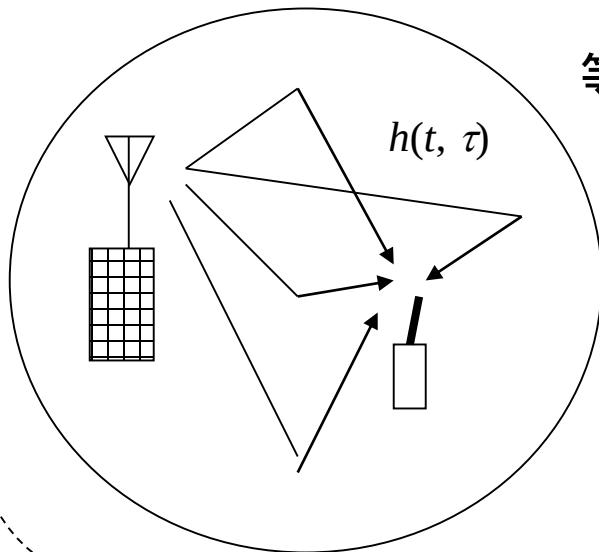
この結果は「**同じ伝搬特性から、同じ伝送特性が生まれる**」を示している。  
点PでのNTFG(正規化伝達関数傾度)の値は、ベクトルを2倍にした点Qでの値と同じ(理論的根拠は、本文に)

# 電波伝搬視点からの符号間干渉誤り推定

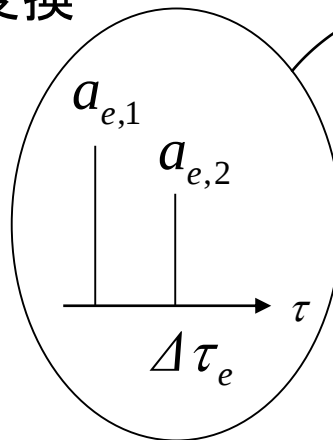
## 【電波伝搬モデリング】

電波伝搬環境

- ・レイリーフェージング
- ・仲上-ライスフェージング



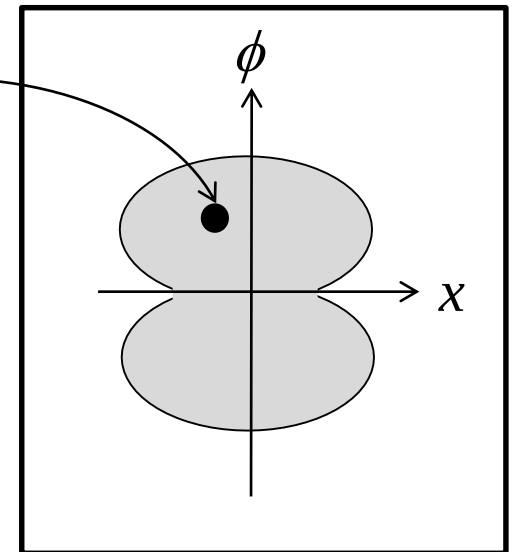
等価変換



$$r = |a_{e2}/a_{e1}|$$
$$x = 20 \log_{10}(r)$$
$$\phi = \arg(a_{e2}/a_{e1})$$

BER map  
 $P_0(x, \phi: \Delta \tau_e)$

$(x, \phi)$



モデル化のポイント:

$(x, \phi)$ で表される伝搬環境の確率分布 $f_p(x, \phi)$ を求めること

# 符号間干渉誤り推定の基本式

$$P_e (= \langle P_0 \rangle) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \underbrace{f_p(r, \phi; \Delta\tau)}_{\text{電波伝搬}} \underbrace{P_0(r, \phi; \Delta\tau / T_s)}_{\text{システム (BER map)}} d\phi dr$$

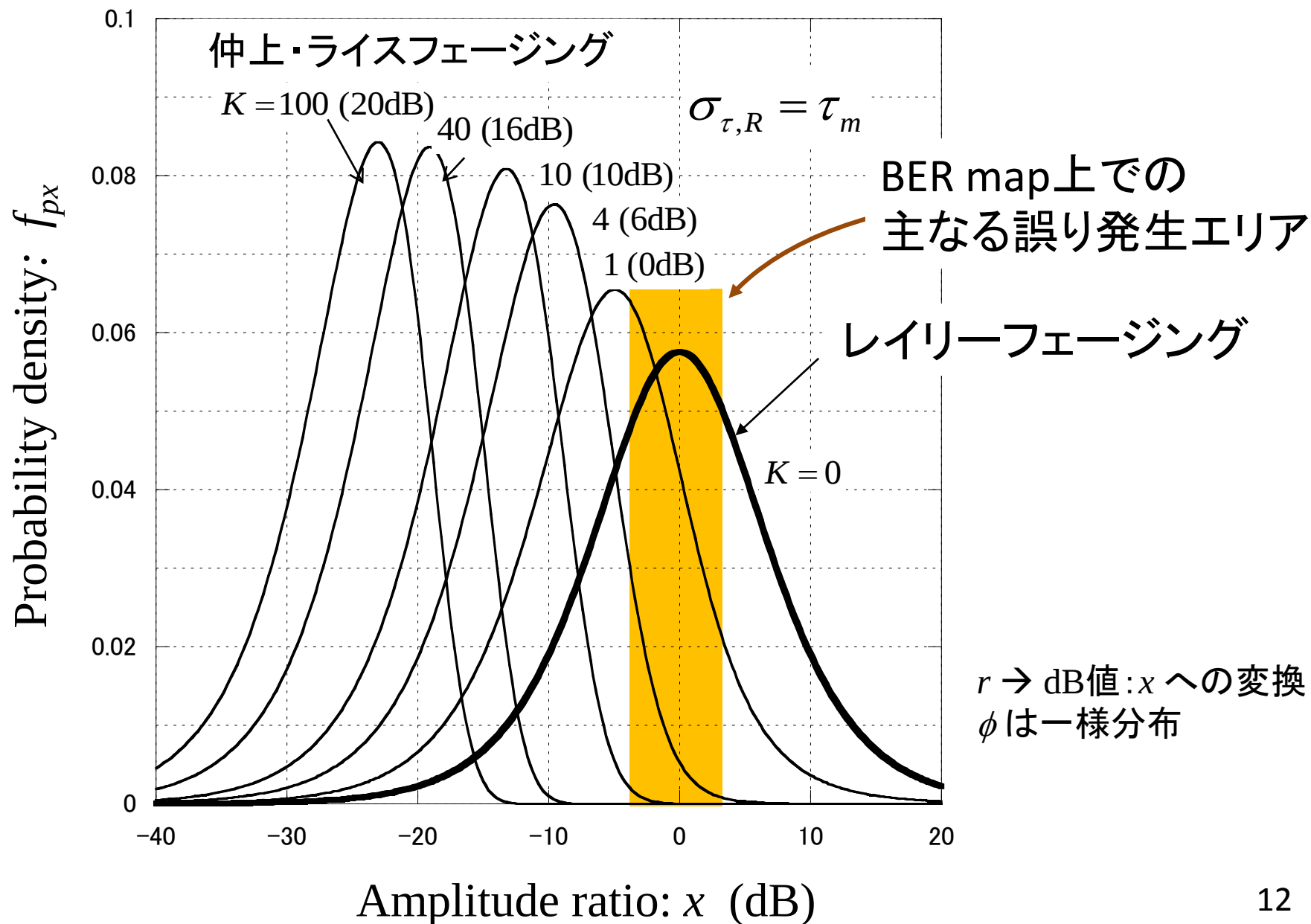
## 仲上・ライスフェージング

$$\begin{aligned} f_p(r, \phi; K, \tau_m, \sigma_{\tau, R}) \\ = \frac{\sigma_{\tau, R}^2 \tau_m^2 r}{\pi (\sigma_{\tau, R}^2 r^2 + \tau_m^2)^2} \left( 1 + \frac{K \tau_m^2 (\tau_m^2 + \sigma_{\tau, R}^2)}{\sigma_{\tau, R}^2 (\sigma_{\tau, R}^2 r^2 + \tau_m^2)} \right) \\ \times \exp \left\{ -\frac{K (\tau_m^2 + \sigma_{\tau, R}^2)}{\sigma_{\tau, R}^2} \left( 1 - \frac{\tau_m^2}{\sigma_{\tau, R}^2 r^2 + \tau_m^2} \right) \right\} \end{aligned}$$

## レイリーフェージング

$$f_p^{(\text{Rayleigh})} = f_p(r, *, 0, \sigma_\tau, \sigma_\tau) = \frac{r}{\pi (r^2 + 1)^2}$$

# 伝搬状態 ( $x$ )の発生確率分布: $f_{px}$



# 符号間干渉誤りと遅延スプレッドとの関係

$$\begin{aligned} P_e^{(\text{Rayleigh})}(\sigma_\tau) &= P_e(0, \sigma_\tau, \sigma_\tau) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ f_{px}(x; 0, \sigma_\tau, \sigma_\tau) \int_0^{2\pi} P_0(10^{x/20}, \phi; \Delta\tau / T_s) d\phi \right\} dx \\ &\approx \frac{1}{2\pi} f_{px}(0; 0, \sigma_\tau, \sigma_\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{2\pi} P_0(10^{x/20}, \phi; \Delta\tau / T_s) d\phi dx \\ &\approx k_\tau (\sigma_\tau / T_s)^2 \quad (\sigma_\tau / T_s \ll 1) \end{aligned}$$

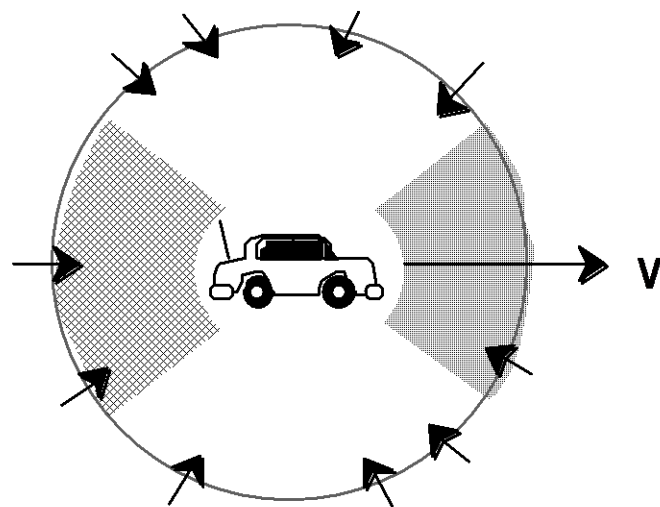
BER mapの相似性より  
この積分は $\Delta\tau (=2\sigma_\tau)$ の  
2乗に比例

符号間干渉によるBERのフロア値は  
 $(\sigma_\tau / T_s)^2$ に比例

$k_\tau \approx 0.8$  for QPSK系

# もう一つの伝搬問題: 高速フェージング環境

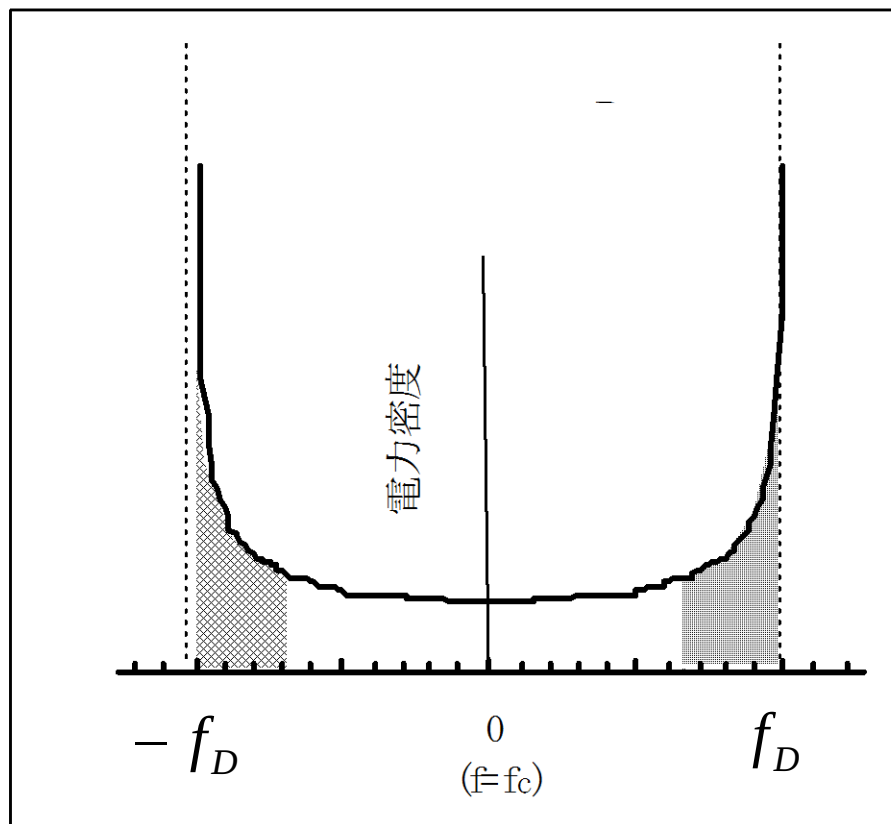
【到来角度プロファイル】



$$f_D = v / \lambda$$

最大ドップラー周波数:  $f_D$

【到来角度一様の場合の  
ドップラースペクトル】

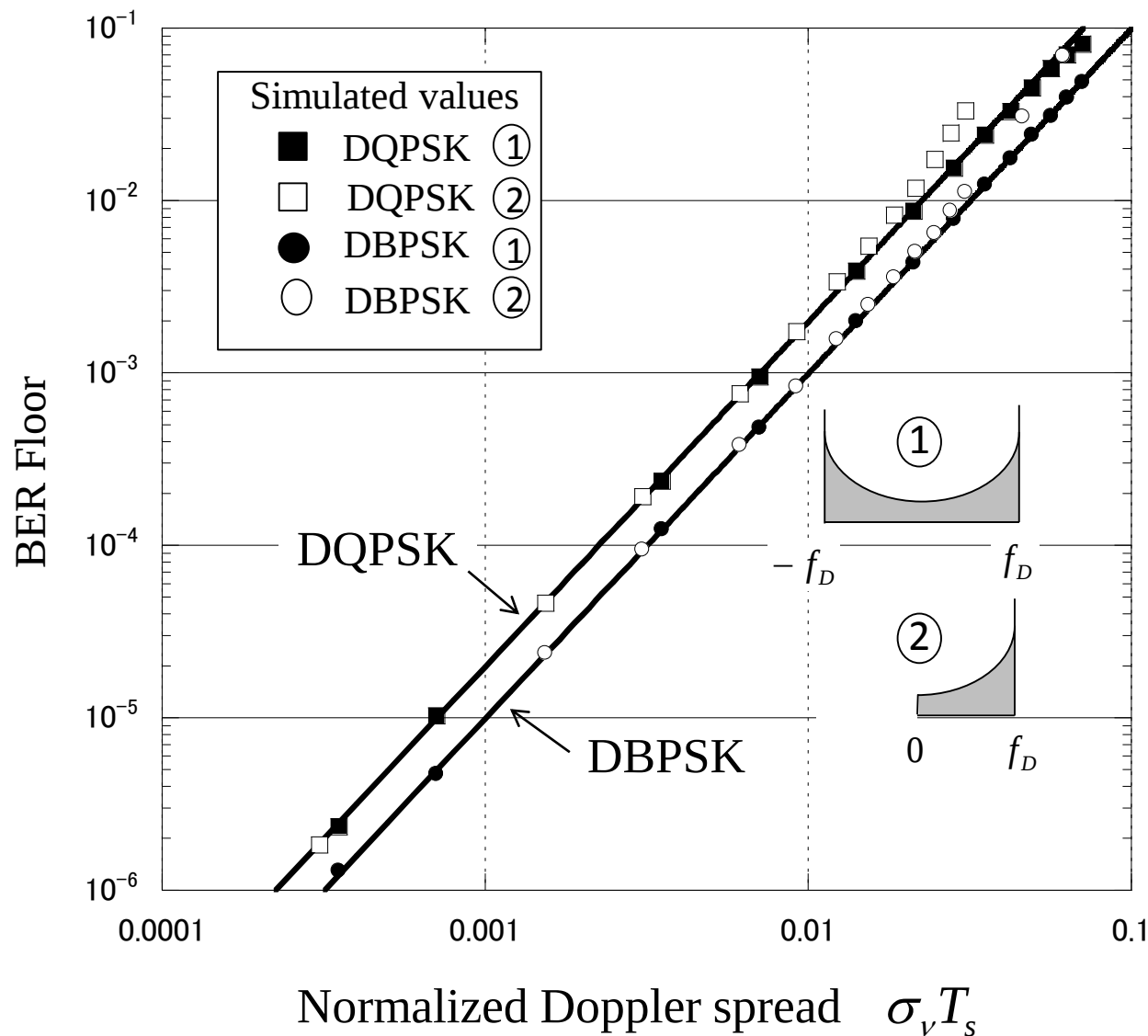


実際には、ドップラースペクトルの形は多様なため  
電波伝搬的視点でのドップラー広がりパラメータは、

その標準偏差を以てする **ドップラースプレッド**

# 時間選択性フェージング(=高速フェージング)下でのBERフロア特性

(ドップラー広がりのみの場合)



$(\sigma_v T_s)^2$ に比例

$$P_{e,Doppler}(\sigma_v; T_s)$$

$$\approx k_v (\sigma_v T_s)^2$$

$$k_v = \begin{cases} \pi^2 & \text{for DBPSK} \\ 2\pi^2 & \text{for DQPSK} \end{cases}$$

# 二重選択性フェージング下でのBERフロア特性

## BERのフロア値

$$P_{e, floor}(\sigma_v, \sigma_\tau, T_s) \approx P_{e, Doppler}(\sigma_v, T_s) + P_{e, delay}(\sigma_\tau, T_s)$$

$$\begin{aligned} P_{e, Doppler}(\sigma_v; T_s) &\approx k_v (\sigma_v T_s)^2 \quad (\text{位相変動: ICI}) \\ P_{e, delay}(\sigma_\tau; T_s) &\approx k_\tau (\sigma_\tau / T_s)^2 \quad (\text{符号間干渉: ISI}) \end{aligned}$$

$$\approx k_v (\sigma_v T_s)^2 + k_\tau (\sigma_\tau / T_s)^2$$

$T_s$ を変化させ、 $P_{e, floor}$ の最小値を求めると  $\frac{\partial P_{e, floor}}{\partial T_s} = 0$  より

$$P_{e, floor, min} \approx 2\sqrt{k_v k_\tau} \sigma_v \sigma_\tau$$

$\sigma_v \sigma_\tau$ : スプレッドファクタ  
電波伝搬環境の苛酷度を  
表すキーパラメータ

$$\text{when } T_s \rightarrow T_e = \left( \frac{k_\tau}{k_v} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{\sigma_\tau}{\sigma_v}}$$

# 伝送シンボル長の環境適応設計の一例

## 環境

周波数: 5GHz

移動速度(自動車): 30m/s (=108km/h)

→  $f_D = 500\text{Hz}$ ,  $\sigma_v = 354\text{Hz}$  (マルチパス水平面一様到来)

遅延スプレッド(市街地):  $\sigma_\tau = 1\mu\text{s}$

スプレッドファクタ:  $\sigma_v\sigma_\tau = 3.5 \times 10^{-4}$

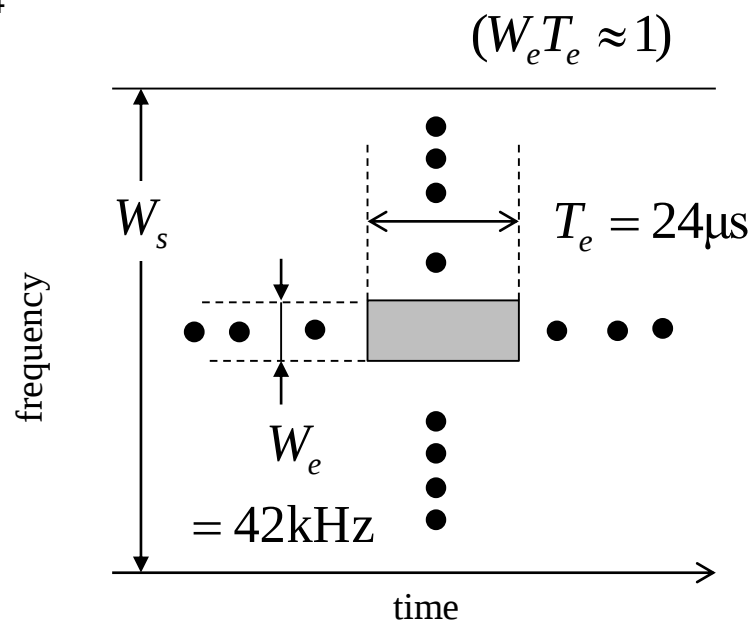


シンボルの環境適応設計  
(OFDM/DQPSK 想定)



BERフロアの最小値:

$$P_{e,\text{floor},\text{min}} = 2.78 \times 10^{-3}$$



シンボル周期設計が最適値からずれると

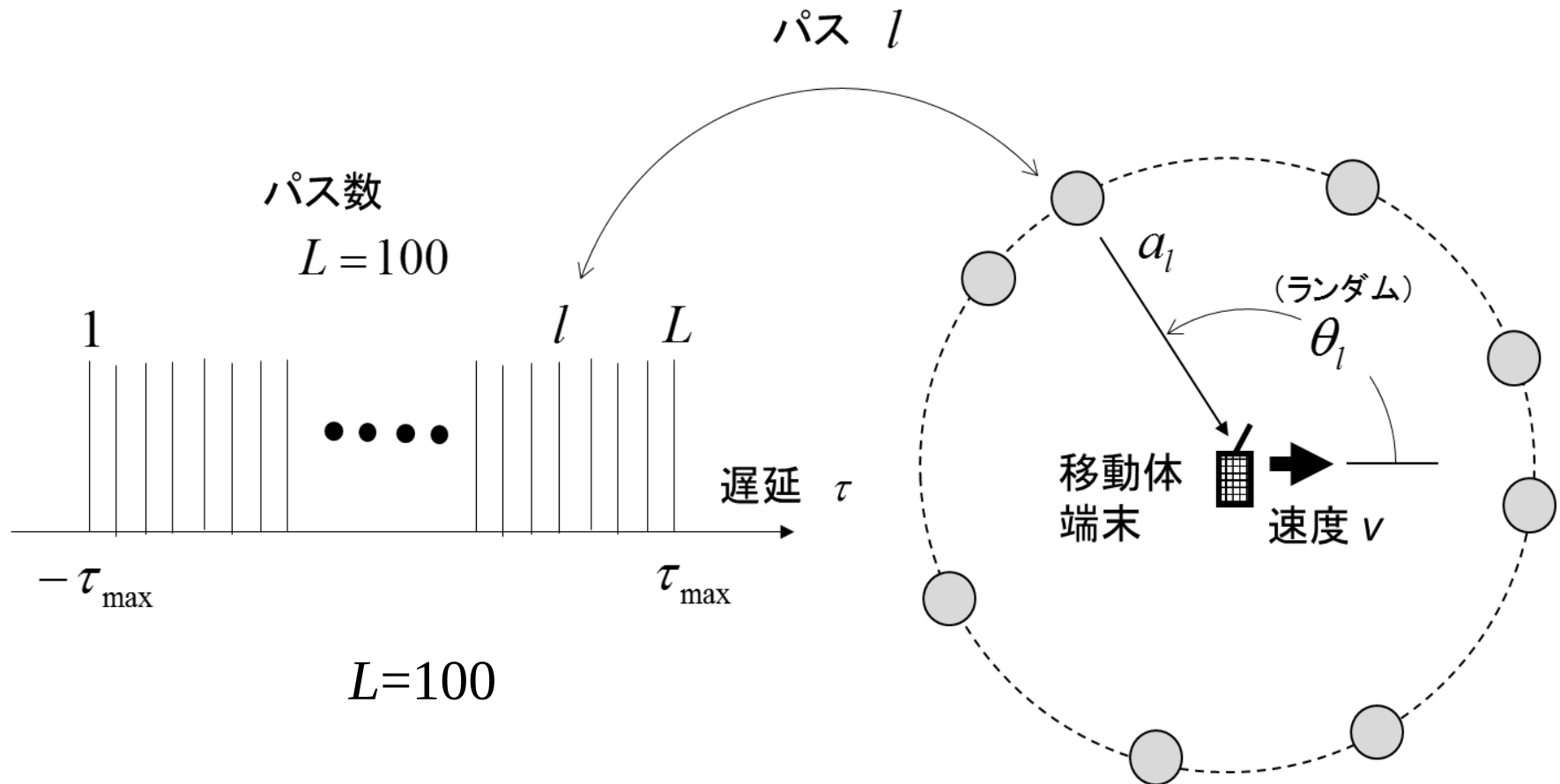
$$P_{e, floor} \approx \xi^2 k_v (\sigma_v T_{e,opt})^2 + \frac{k_\tau}{\xi^2} (\sigma_\tau / T_{e,opt})^2$$

$$= \left( \xi^2 + \frac{1}{\xi^2} \right) \sqrt{k_v k_\tau} \sigma_v \sigma_\tau$$

$$= \frac{1}{2} \left( \xi^2 + \frac{1}{\xi^2} \right) P_{e, floor, min}$$

$$\xi \equiv T_e / T_{e,opt}$$

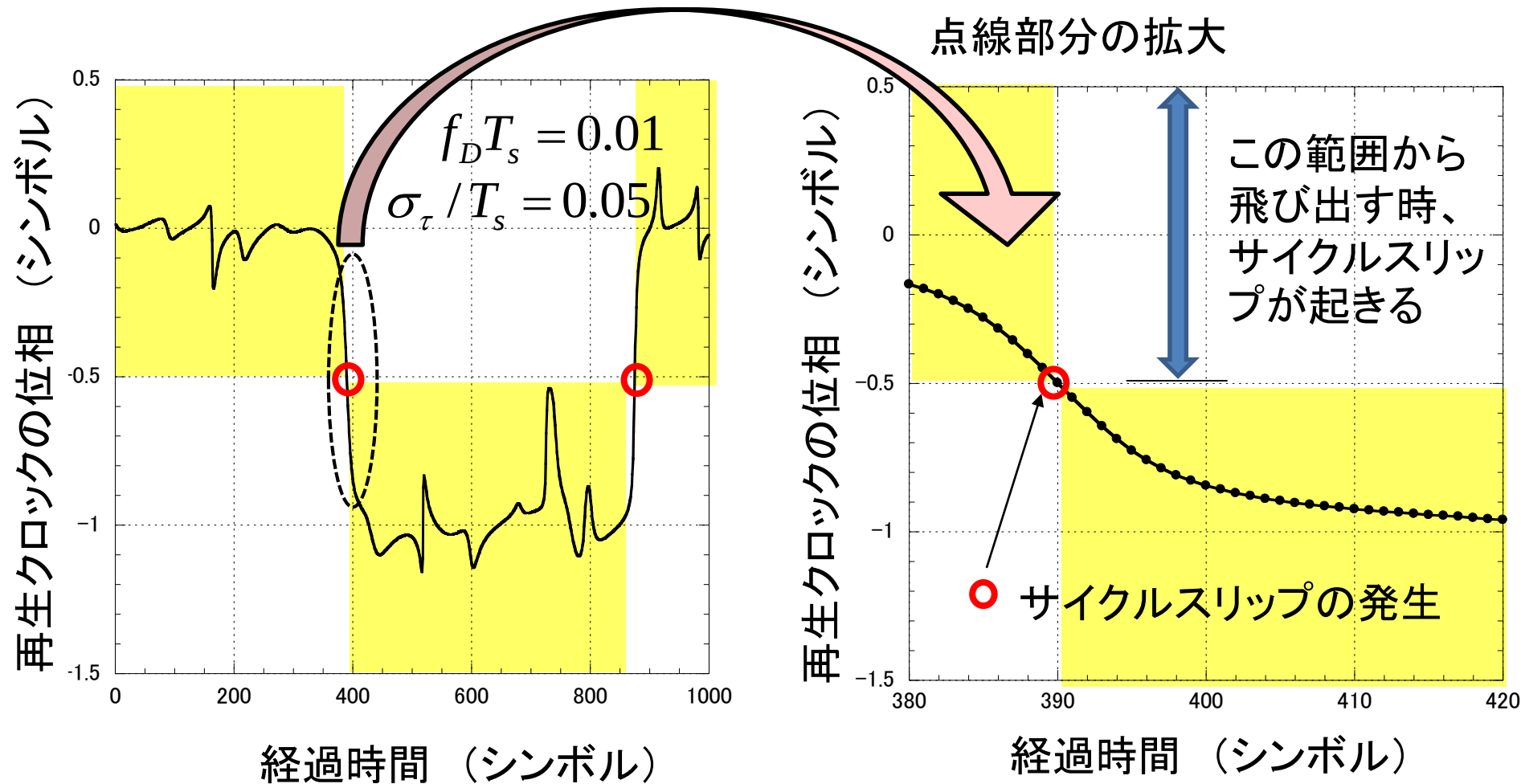
# シミュレーションのためのマルチパス環境生成



遅延スプレッド制御: 最大遅延  $\tau_{\max}$  を変化

ドップラースプレッド制御: 最大ドップラーシフト  $f_D$  を変化

# 二重選択性フェージング環境での再生クロック位相の推移



再生信号クックの位相(タイミング)はフェージングの変化と共に変化

→ ときどきサイクルスリップが起きる(BER評価が困難)

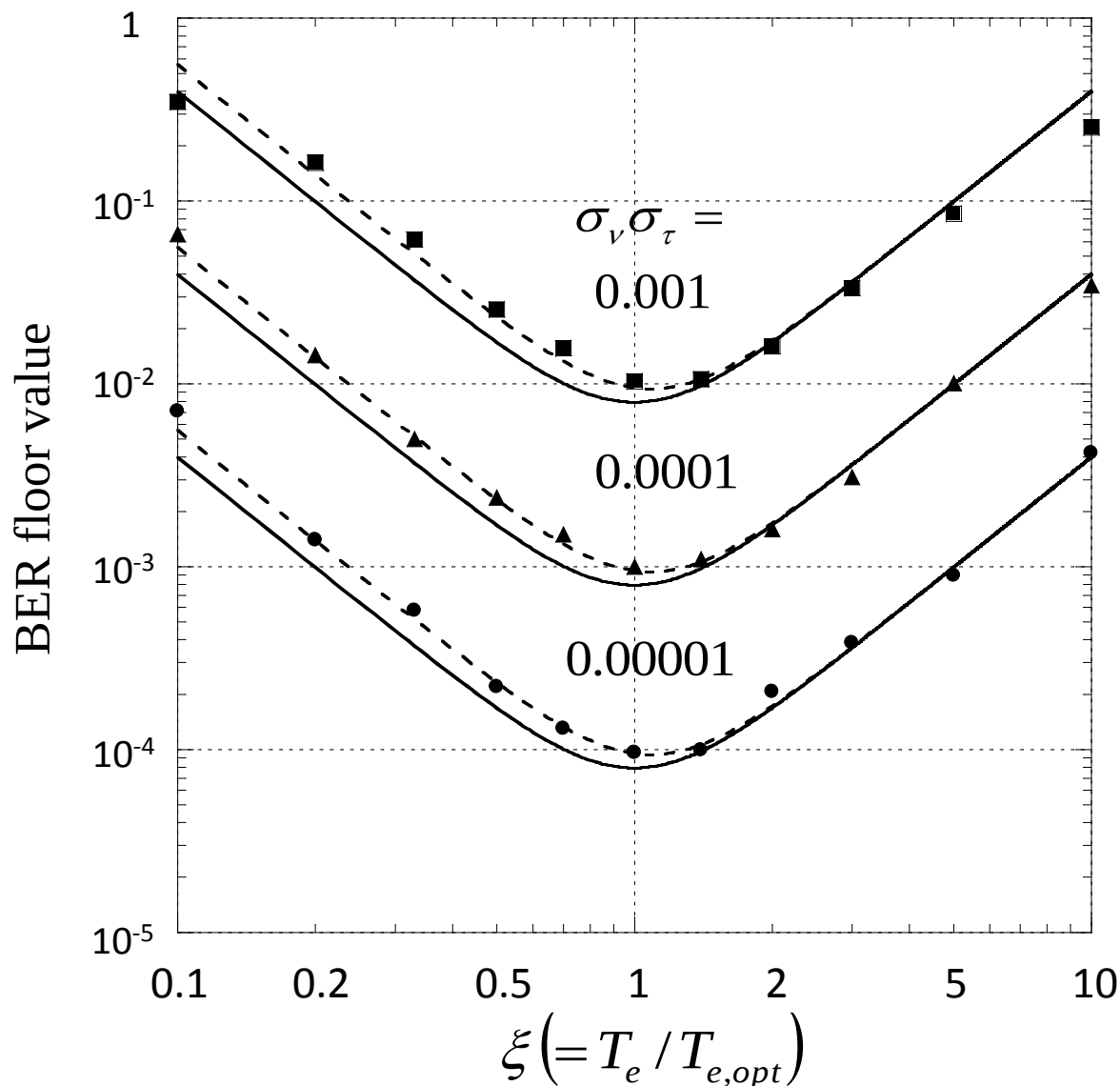
→ サイクルスリップの発生を防ぐためにクロック位相を平均遅延( $\tau_m=0$ )に固定

→ この固定により、約1.4倍、符号間干渉部分のBER特性劣化

周波数選択性フェージング  
(符号間干渉誤り)  
が支配的領域



時間選択性フェージング  
(ファーストフェージング)  
が支配的領域



— 計算値

---- シミュレーション  
予想値(計算値)

●▲■ シミュレーション値

BERフロア値の $T_e$ 最適長  
からのずれ特性

それぞれの谷の位置がBER  
の最小値

$T_e$ の値はこれよりも長くても  
(図の右側)、短くても(図の  
左側)、BER特性劣化

# まとめ： 情報伝送に立ちふさがる電波伝搬の二つの壁

シンボル設計に開かれた窓  
実効シンボル長  $T_e$  に関する  
最適設計エリア

BER フロア最小値も  
通信路容量(最大通信量)も  
スプレッドファクタ  $\sigma_v \sigma_\tau$  の  
関数で与えられる

