

ワイヤレス情報伝送の物理限界を探る

～ 二重選択性フェージング環境において
シャノン限界にどこまで近づけるか ～

唐沢 好男

概要

電波伝搬と情報理論の交差点部分に焦点を当て、情報伝送の物理限界(未来の通信においてどのように通信方式を工夫しても伝送を不可能にしてしまう伝搬条件)を探り、その上で、それを超えるにはどうしたら良いか、について考える。

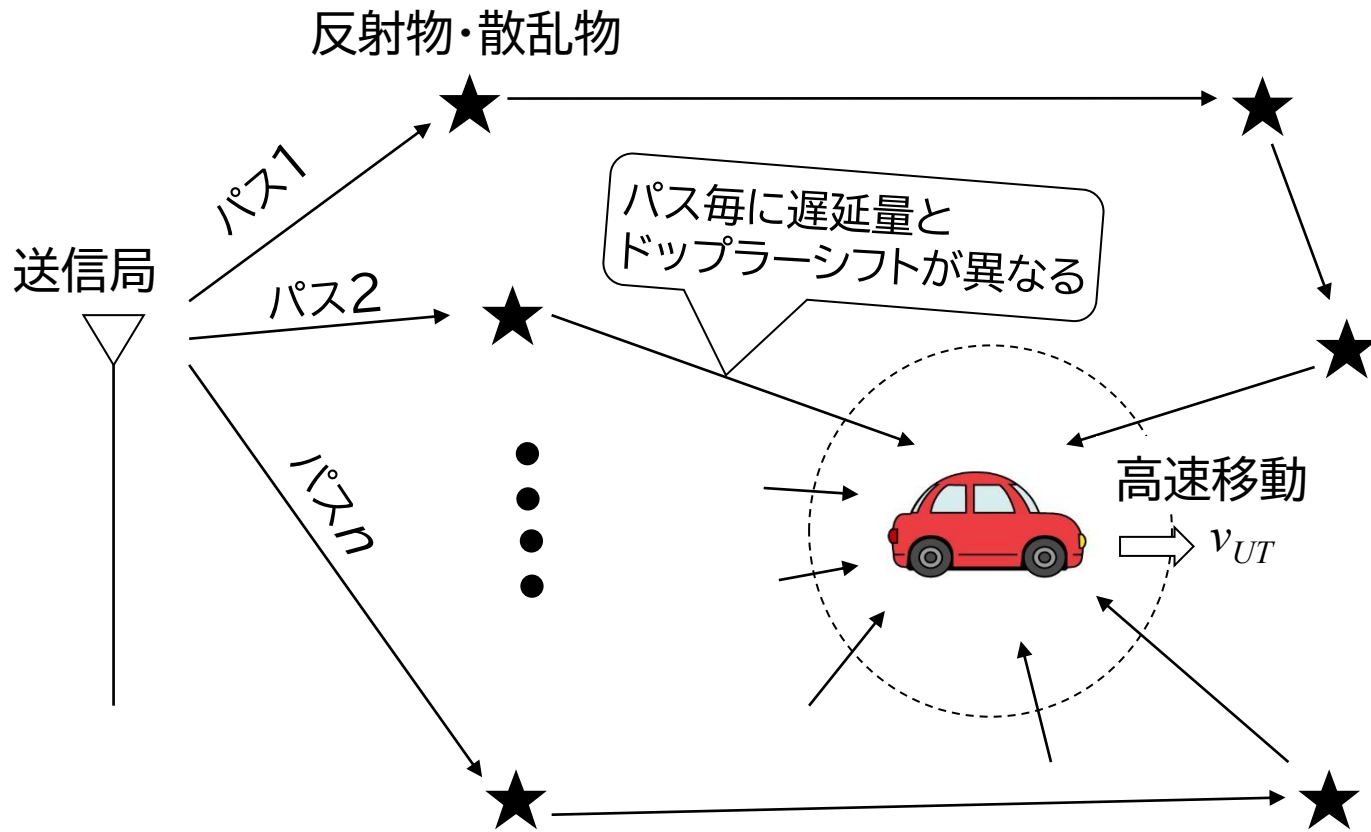
高い周波数が用いられる未来の移動通信、あるいは、エリア拡大への期待がある水中音響通信などでは、遅延時間広がりとドップラー周波数広がりとともに大きい二重選択性フェージング環境になる。筆者はこの環境において情報伝送能力の上限を与える通信路容量が簡易に算定できる理論式を導いている。スプレッドファクタの値に応じて通信路容量の低下が起きるが、信号電力一定の下、帯域幅を拡大することによって、フェージングの無いシャノン限界にまで通信路容量を高めることができる。

本発表では、二重選択性フェージング環境における、通信路容量と帯域幅拡大の関係を定量的に明らかにする。(本内容の詳細レポートは[こちら](#))

発表の内容

1. 二重選択性フェージングとスペッドファクタ
2. 通信路容量:情報理論的アプローチ(背景説明)
3. 通信路容量:伝搬モデル的アプローチ(概要説明)
4. 二重選択性フェージング下での通信路容量
5. シャノン限界に近づけるには？

二重選択性フェージング



遅延量のばらつき



周波数選択性フェージング

ドップラー周波数のばらつき



時間選択性フェージング

その両方が存在



二重選択性フェージング

伝搬キーパラメータ {

- ドップラースプレッド: σ_v (あるいは最大ドップラー周波数 f_D) [Hz]
- 遅延スプレッド: σ_τ [sec]
- スプレッドファクタ: $\alpha (= \sigma_v \sigma_\tau)$ [無次元]

伝搬キーパラメータ: スプレッドファクタ

情報理論分野など(IEEE論文誌上の大部分)

最大ドップラー周波数差 × 最大遅延時間差

$$\Delta \equiv (v_{\max} - v_{\min}) \times (\tau_{\max} - \tau_{\min}) \quad \Delta > 1$$

オーバースプレッド
(情報伝送が成り立たない)

$$\Delta < 1$$

アンダースプレッド
(通常の伝搬環境はこの範囲)

我々のモデルでは

ドップラーズプレッド × 遅延ズプレッド

$$\alpha \equiv \sigma_v \sigma_\tau$$

例 移動通信(市街地)

遅延ズプレッド 1 μ s(市街地)

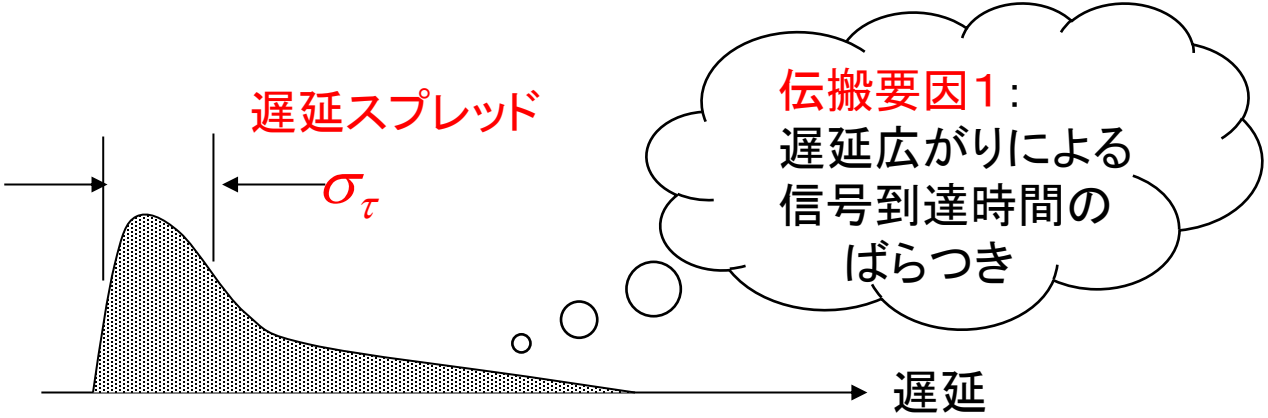
周波数 30GHz

移動体速度 100km/h

$$\alpha \approx 0.002$$

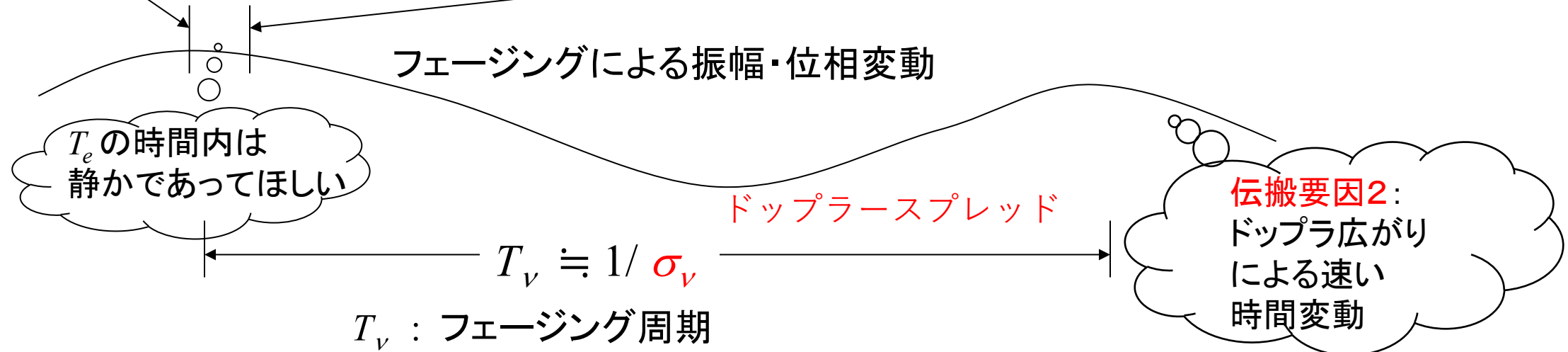
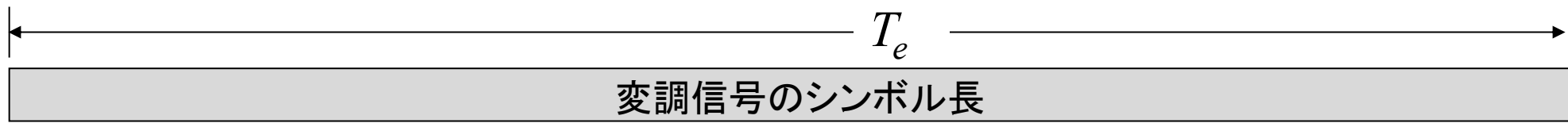
水中音響通信 Δ が最大で数%

余裕をもって信号設計が可能な伝搬条件



余裕をもって信号設計が可能な伝搬条件

$$\sigma_\tau \ll T_e \ll 1/\sigma_\nu \rightarrow \sigma_\nu \sigma_\tau \ll 1$$



シャノンの通信路容量 (Channel capacity)
(誤りなく伝送可能な伝送レートの上限)

雑音 (AWGN) が存在する通信路の通信路容量

$$C_{AWGN} = W_s \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_N} \right) \quad (\text{bps})$$

フラットフェージング環境に対する平均通信路容量

$$\begin{aligned} \langle C_e(W_s, \Gamma_0) \rangle &= W_s \int_0^\infty p_{SNR}(\gamma; \Gamma_0) \log_2(1 + \gamma) d\gamma \\ &\leq W_s \log_2(1 + \Gamma_0) \quad (\Gamma_0 : \text{平均SN比}) \Rightarrow C_{AWGN} \text{ にほぼ等しい} \end{aligned}$$

周波数選択性フェージング環境に対する通信路容量

OFDMのような狭帯域分割のマルチキャリア伝送が可能 \Rightarrow 同上

伝搬問題はOFDMによって克服されたか? No !! (二重選択性フェージング)

二重選択性フェージング環境における通信路容量解析へのアプローチ

情報理論的アプローチ

主にIEEE Trans. Info. Theory誌上で

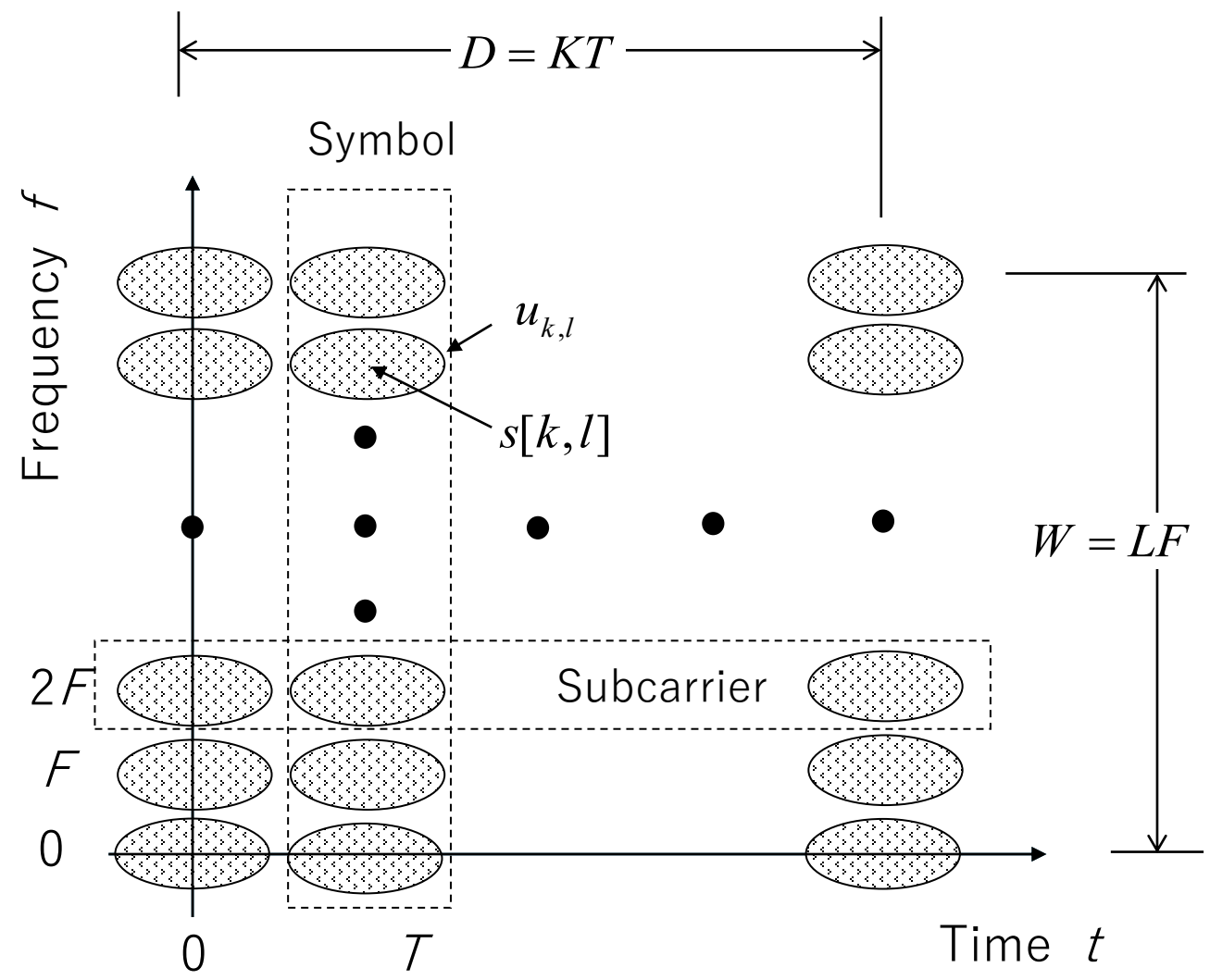
モデル化：手探りの時代

Biglieri等のレビュー論文
(IEEE Trans. IT, 1998 :
74 頁、引用論文数 549)

見通しの良いシナリオ構築

Durisi等 (IEEE Trans. IT, 2010)

それでも、まだ、
使いやすい式の導出にまでは至っていない



Weyl-Heisenbergグリッドマッチング則 (Durisi, 2011)

基本式 $C_{AWGN+fading} \approx W_s \log_2(1 + SINR)$

$$SINR = \left\langle \frac{P_S}{P_N + P_{I_delay} + P_{I_Doppler}} \right\rangle \approx \left(\Gamma_0^{-1} + SIR_{delay}^{-1} + SIR_{Doppler}^{-1} \right)^{-1}$$

実効シンボル長 T_e を導入

$$\left. \begin{aligned} SIR_{delay} &\approx \frac{1 - (2\pi\sigma_\tau / T_e)^2}{(2\pi\sigma_\tau / T_e)^2} \approx \frac{T_e^2}{(2\pi\sigma_\tau)^2} \\ SIR_{Doppler} &\approx \frac{1 - (2\pi\sigma_\nu T_e)^2}{(2\pi\sigma_\nu T_e)^2} \approx \frac{1}{(2\pi\sigma_\nu T_e)^2} \end{aligned} \right\} \frac{1}{SIR} = \frac{1}{SIR_{delay}} + \frac{1}{SIR_{Doppler}} \approx 4\pi^2 \left(\frac{\sigma_\tau^2}{T_e^2} + \sigma_\nu^2 T_e^2 \right)$$

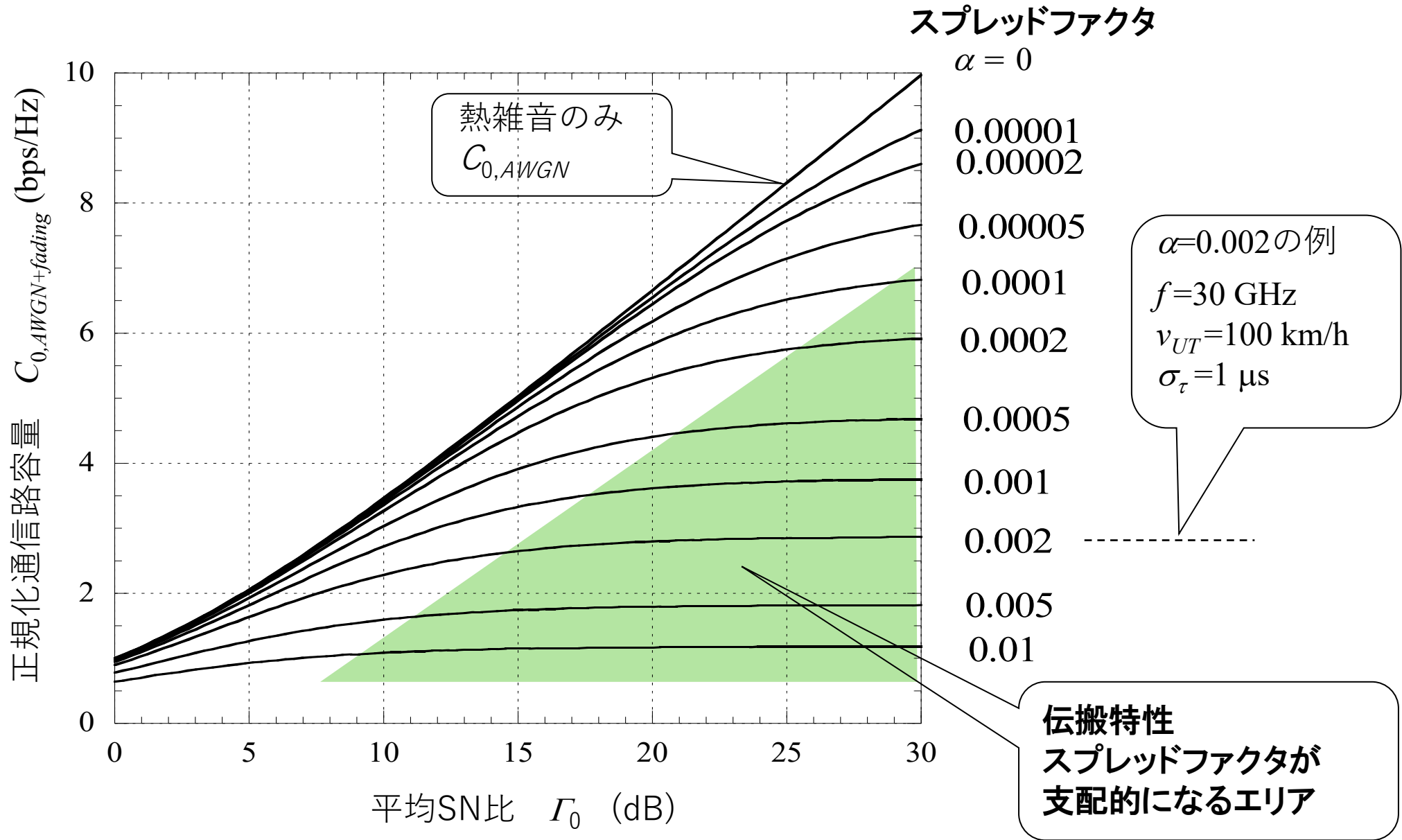
SIR を最大にする T_e を求める

二重選択性フェージング環境における通信路容量

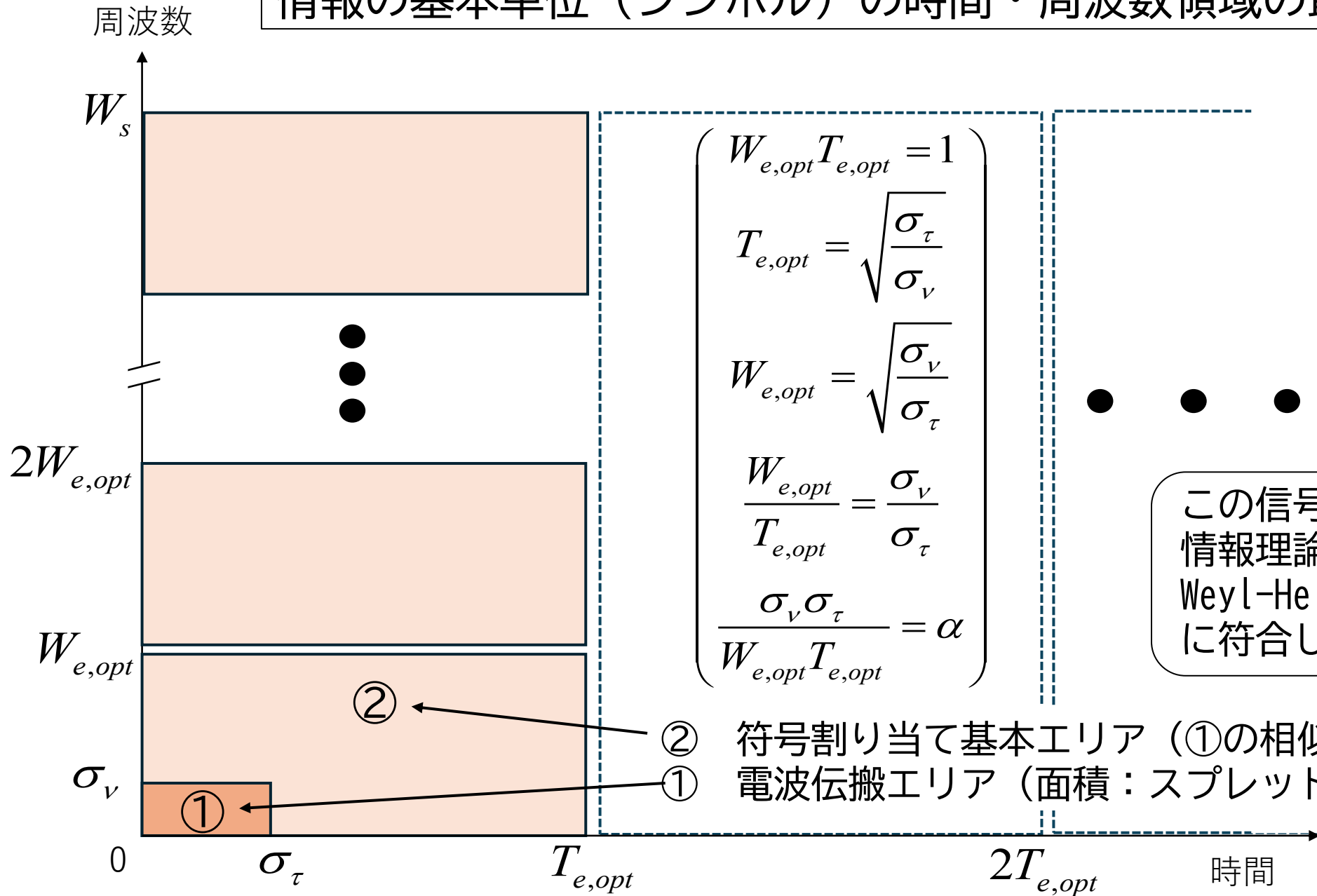
$$C_{AWGN+fading} \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\frac{1}{\Gamma_0} + 8\pi^2 \alpha} \right) \quad (\alpha \equiv \sigma_\nu \sigma_\tau \leq 0.01)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_{e,opt} &= \sqrt{\frac{\sigma_\tau}{\sigma_\nu}} \\ SIR_{max} &= \frac{1}{8\pi^2 \sigma_\nu \sigma_\tau} \end{aligned} \right.$$

スプレッドファクタと平均SN比に対する正規化通信路容量



情報の基本単位（シンボル）の時間・周波数領域の最適割り振り



シャノンの通信路容量の宿命 (シャノン限界に近づけるには)

宿命：高SN比環境での通信路容量の増加は対数的

$$C_{AWGN} = W_s \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_N} \right)$$

熱雑音は帯域幅に比例 (P_{N0} : 雑音電力密度 (1Hz当たりの雑音電力))

$$P_N = W_s P_{N0} \rightarrow C_{AWGN}(W_s, P_s, P_{N0}) = W_s \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{W_s P_{N0}} \right) \quad \text{SN}_0 \text{比}$$

信号電力 P_s を一定に保ったまま、帯域幅のみを拡げてゆくと、徐々に増加し、やがて飽和

$$C_{AWGN, \max} \equiv \lim_{W_s \rightarrow \infty} C_{AWGN} = \frac{1}{\log_e 2} \frac{P_s}{P_{N0}} \quad (\text{シャノン限界 : 通信路容量は信号電力に比例する})$$

どこまで帯域幅を広げればよいか

$$W_{\text{spread}} \geq 10 \frac{P_s}{P_{N0}} \quad (\text{熱雑音条件 : SN}_0 \text{比の約10倍})$$

二重選択性フェージング環境においてシャノン限界に近づけるには

通信路容量の基本式

$$C_{AWGN+fading} \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\frac{1}{\Gamma_0} + 8\pi^2 \alpha} \right) = W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\frac{W_s P_{N0}}{\langle P_S \rangle} + 8\pi^2 \alpha} \right)$$

平均信号電力 $\langle P_S \rangle$ を一定に保ったまま、帯域幅のみを拡げてゆくと

$$C_{AWGN+fading, \max} \equiv \lim_{W_s \rightarrow \infty} C_{AWGN+fading} = \frac{1}{\log_e 2} \frac{\langle P_S \rangle}{P_{N0}} \approx C_{AWGN, \max}$$

(通信路容量は熱雑音伝送路の通信路容量 (シャノン限界) に近づく)

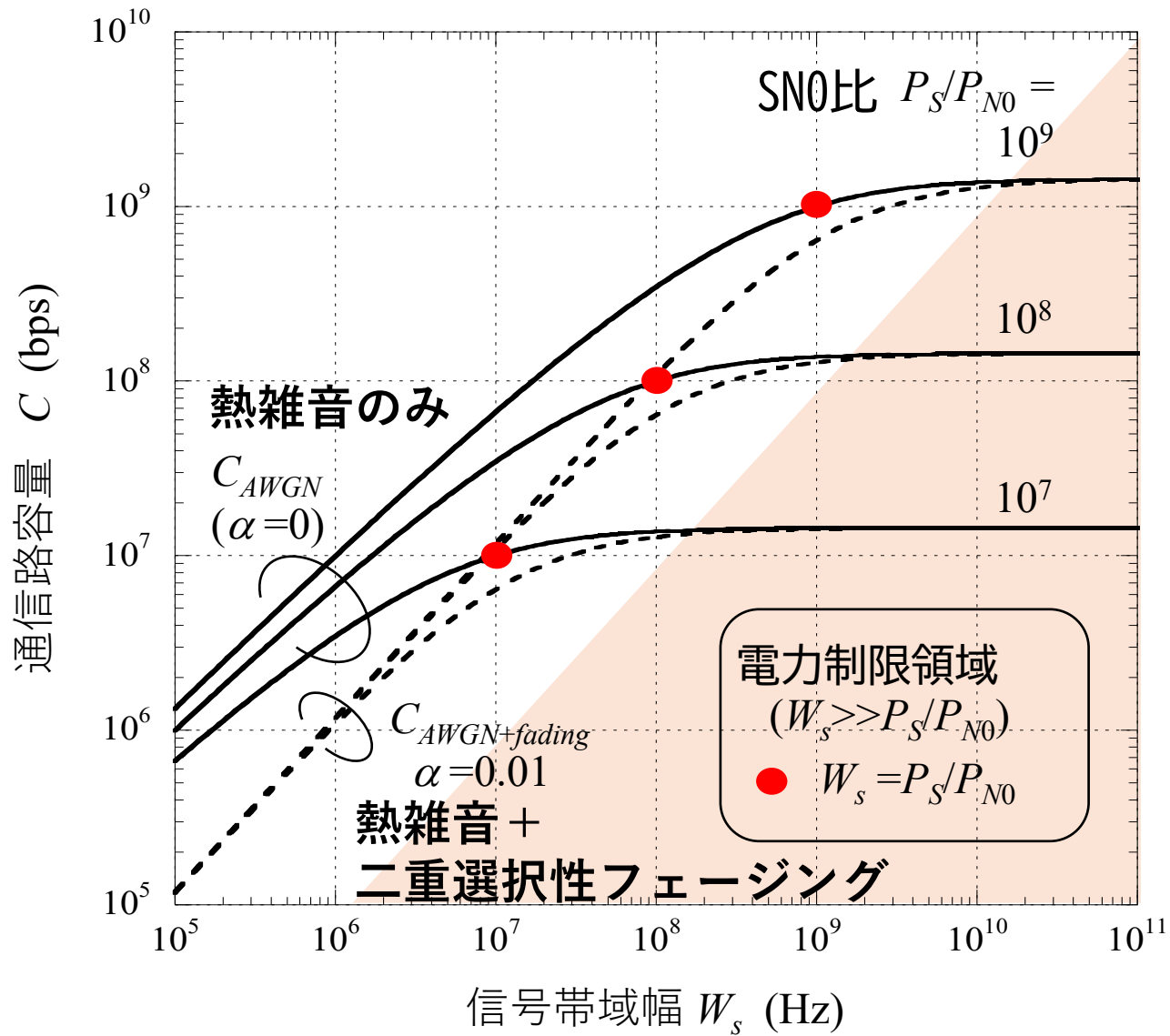
どこまで帯域幅を広げればよいか

$$W_{spread} \geq 10 \langle P_S \rangle / P_{N0} \quad \text{条件 1 熱雑音条件}$$

$$W_s P_{N0} \gg 8\pi^2 \alpha \langle P_S \rangle \rightarrow W_{spread} \gg 8\pi^2 \alpha \langle P_S \rangle / P_{N0} \quad \text{条件 2 熱雑音電力} \gg \text{干渉成分電力}$$

$\alpha \leq 0.01$ では、1の熱雑音条件が、2を含む

通信路容量 (C_{AWGN} と $C_{AWGN+fading}$) の信号帯域幅依存性



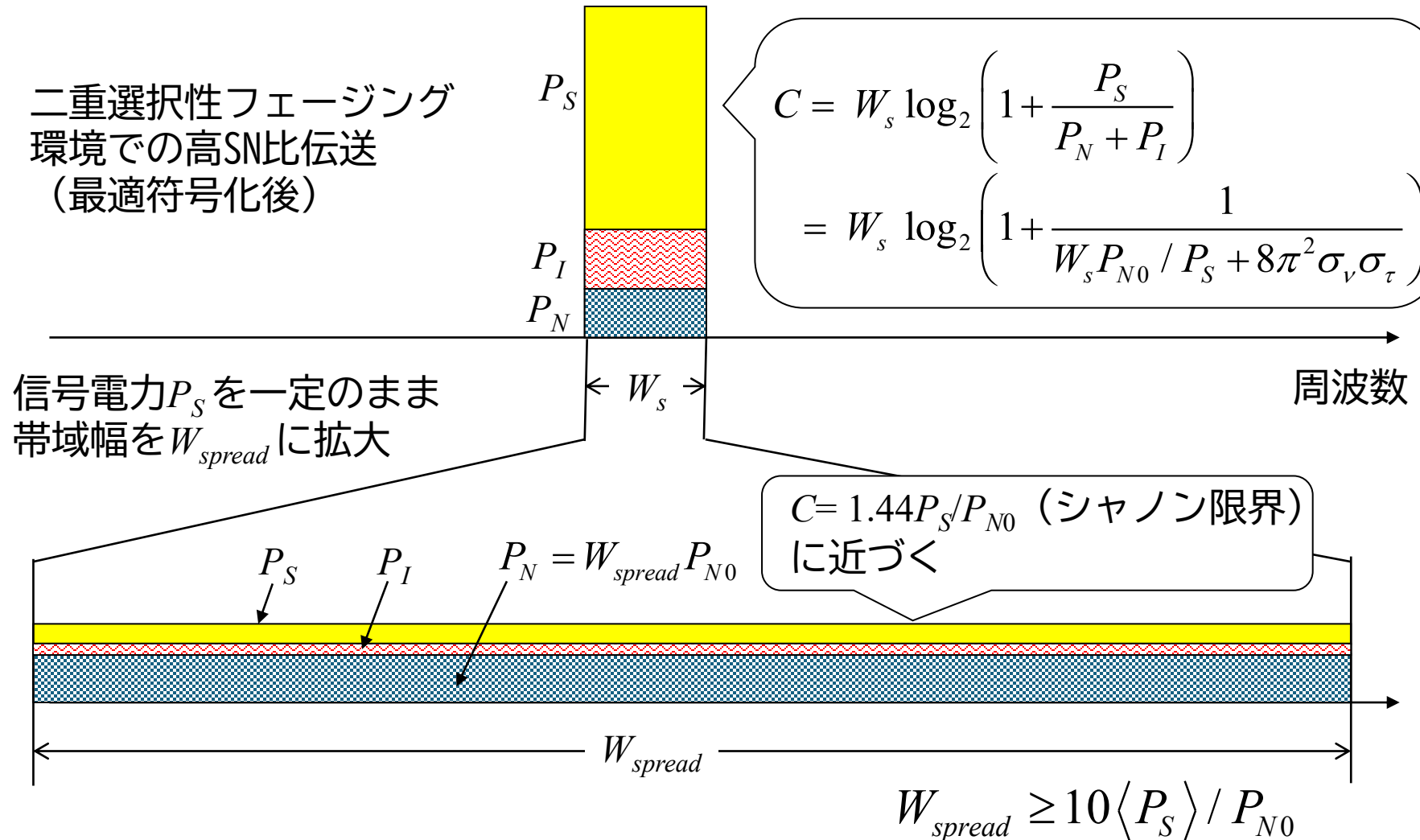
熱雑音のみの場合 (C_{AWGN})

- $W_s \gg P_s/P_{N0}$ (● の左側)
通信路容量が帯域幅に支配される帯域制限領域
- $W_s \gg P_s/P_{N0}$ (● の右側)
通信路容量が信号電力に支配される電力制限領域

二重選択性フェージング ($\alpha < 0.01$) の場合

- $W_s \gg P_s/P_{N0}$ (● の左側)
スプレッドファクタの値に応じて容量低下がある
- $W_s \gg P_s/P_{N0}$ (● の右側)
熱雑音の飽和値に近づく

通信路容量をシャノン限界に近づけるには？



(具体例)

OFDM
(符号の最適設計)

OFDM + 周波数拡散
(低電力密度通信)

→ 電波伝搬問題の克服

まとめ

二重選択性フェージング下での通信路容量を算定する理論式に至る道筋を辿るとともに、その式から見えてきた電波伝搬とシステムの関係性を考察した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) フェージングがあっても、それが、周波数選択性フェージングのみでは通信路容量の劣化は無視できる（＝シャノン式を維持できる）。
- 2) 周波数領域と時間領域の二重選択性フェージング環境では遅延スプレッドとドップラーズプレッドの積で表されるスプレッドファクタに応じた通信路容量低下がある。
- 3) スプレッドファクタ $\alpha < 0.01$ を目安とする二重選択性フェージング下において、信号電力一定の下、周波数帯域幅を一定値まで広げてゆくと、伝搬劣化を受けないシャノン限界に近づく。

上記3)では、シャノン限界に近づけるために、信号電力に応じて、故意に帯域幅を広げるわけであるから、周波数有効利用の観点では、それが弱点になる。しかし、CDMの様な直交拡散符号による多重化に可能性がある。その場合、OFDM, 周波数拡散、周波数領域差動符号化、微弱電力密度信号の検知や同期などがキーワードとなろう。

電波伝搬と情報理論の交差点部分に位置する本研究が、次世代を担う人たちによって、さらに深められてゆくことを願っている。

【本内容を詳しくまとめた技術レポート（TR-YK-003）は [こちら](#)】