

二重選択性フェージング環境の通信路容量 [III]

～ 環境適応型ベースバンド無線を想定した ～

唐沢 好男

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.

伝搬環境の通信路容量に関する定量的な捉え方と
基本関係式の導出

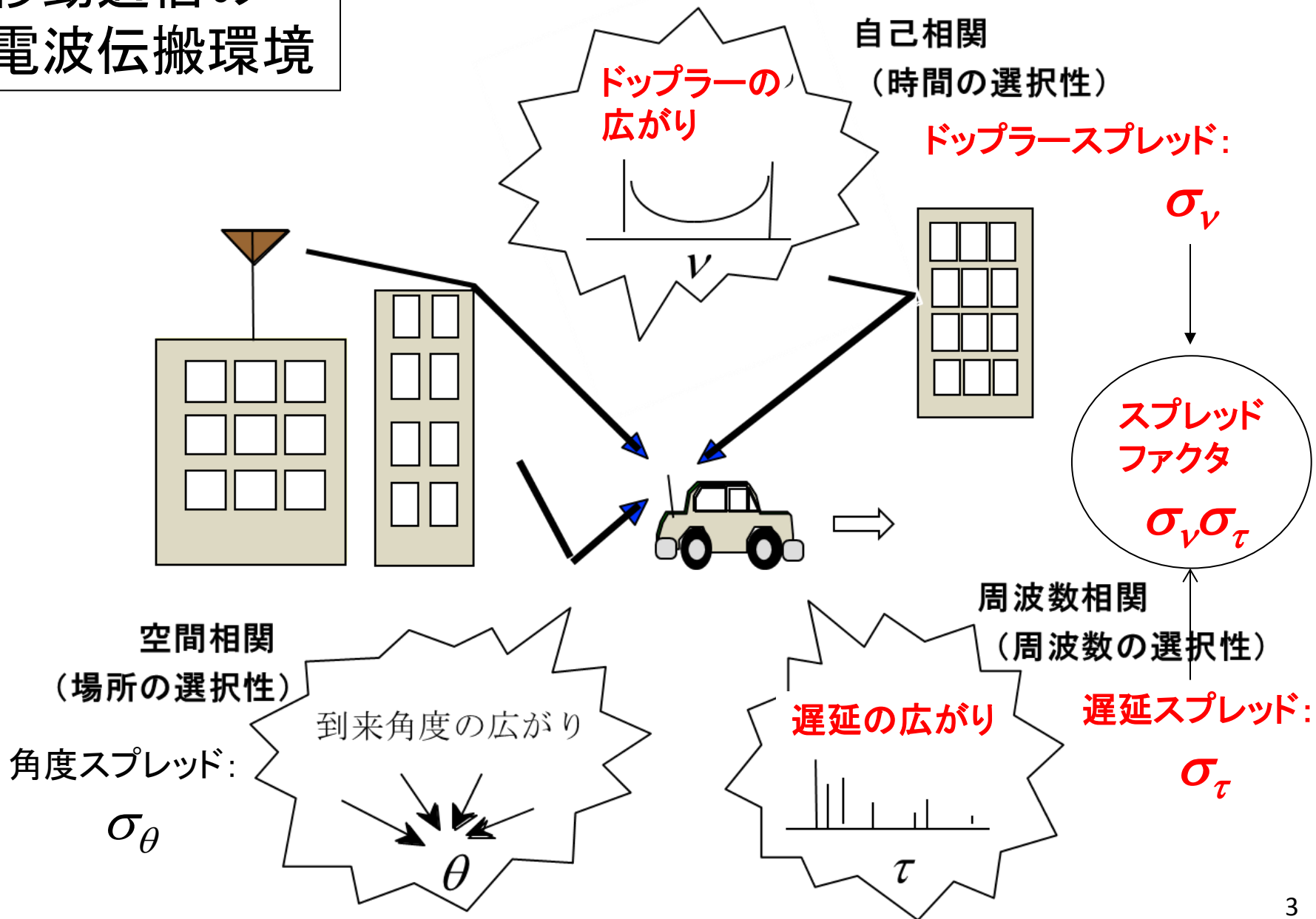
2) 唐沢、“二重選択性フェージング環境の通信路容量,”
信学会AP研、2017.01.

3) 唐沢、“ 同 [II],” 信学会AP研、2017.02

今回発表: ベースバンド無線(=比帯域の広い通信)の場合

4) 唐沢、“ 同 [III],” 信学会RCS研、2017.07

移動通信の 電波伝搬環境



電波伝搬環境の情報伝送能力を数値指標で表したい。
指標として何が良いか？



通信路容量 (Channel capacity) が良い



シャノンの情報理論から生み出された最大相互情報量
システムパラメータ (信号電力や帯域幅) で規定する条件のもと、
最適に設計された信号を無限の時間かけて伝送するときを得られる
誤りなく送ることができる伝送速度の上限 (単位: bps)



メリット: 信号形式 (変復調方式や誤り制御方式) に依存しない
汎用性のある数値

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \max_{p(x)} \frac{1}{T} \iint p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x) p(y)} dx dy \quad \text{【定義式】}$$

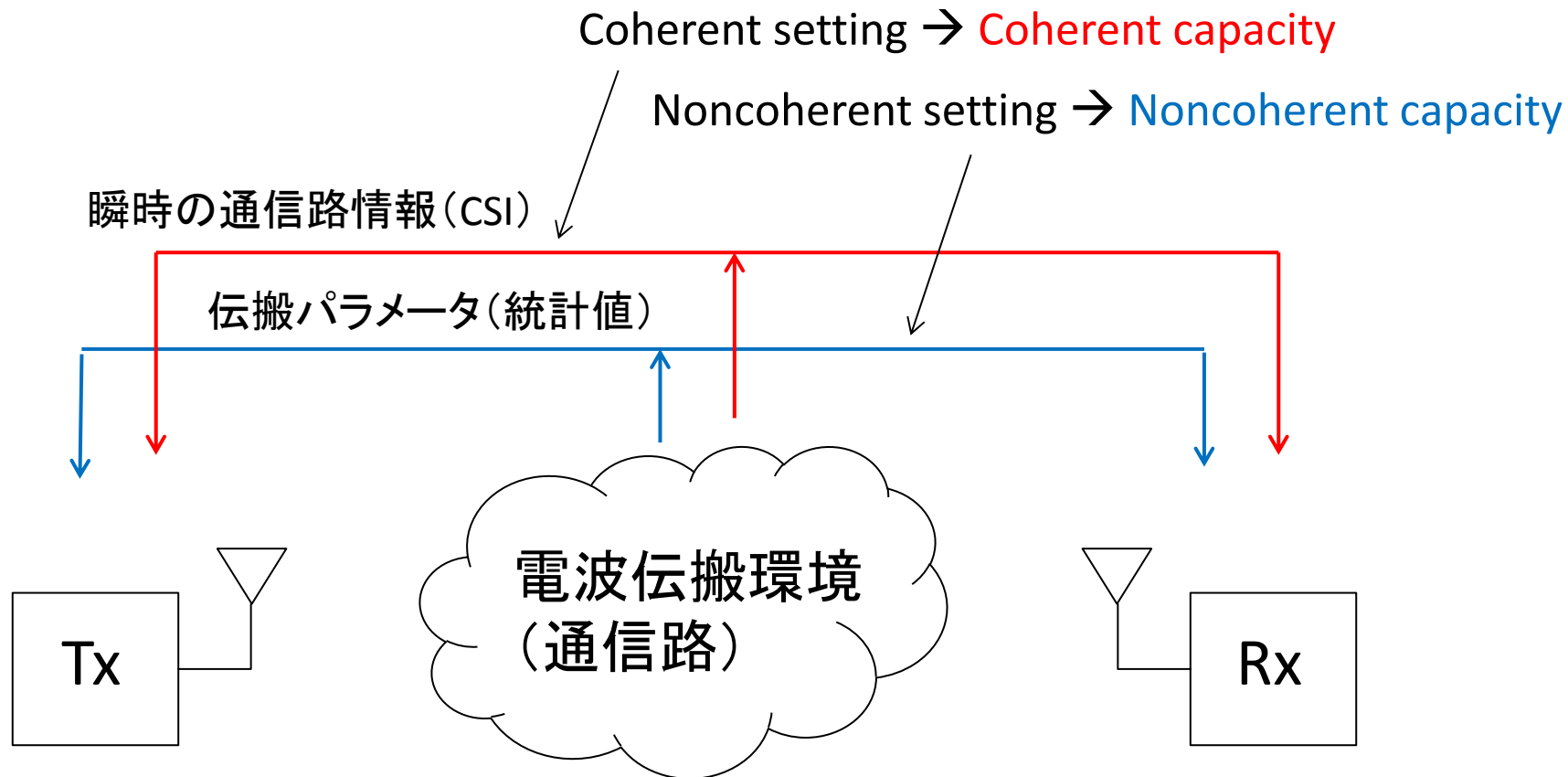
$$= W_s \log_2 (1 + P_s / P_N) \quad \text{【熱雑音下】}$$

= ?

【マルチパス環境下では？】

通信路容量 (Channel Capacity)

Coherent Capacity と Noncoherent Capacity



以降では、Noncoherent capacity を対象とする

こういう研究はどの分野で行われているか？ → 情報理論 (IEEE Trans. IT)

遅延広がり現象

$p(\tau)$ 遅延プロファイル

σ_τ 遅延スプレッド(遅延広がり標準偏差)

ドップラー周波数広がり現象

$S(\nu)$ 電力スペクトル密度

σ_ν ドップラスプレッド(ドップラー広がり標準偏差)

通信路容量評価のキーパラメータ

$\sigma_\nu \sigma_\tau$ スプレッドファクタ

$\sigma_\nu \sigma_\tau \ll 1$ Highly underspread

現実に存在する電波伝搬環境は

$\sigma_\nu \sigma_\tau \leq 0.001$ (← それでも結構過酷な環境)

フェージング環境の通信路容量解析

情報理論的アプローチと統計モデル的アプローチ

通信路容量 解析

情報理論的アプローチ(従来手法)

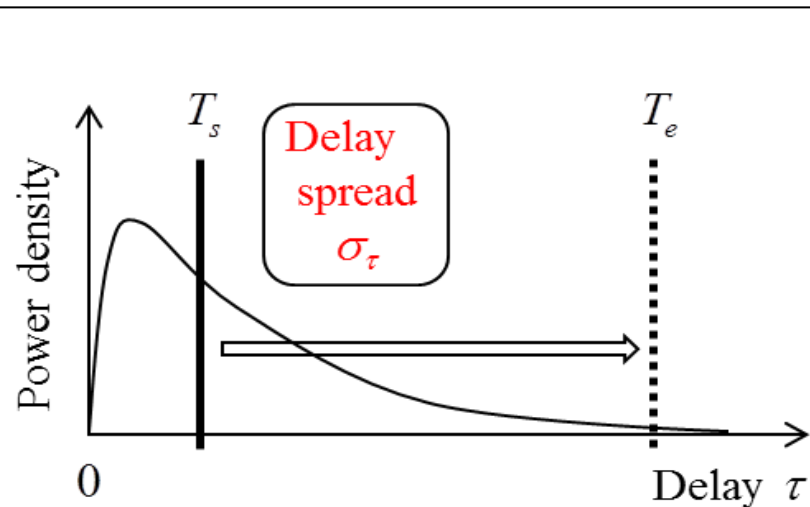
- 連続時変の入出力信号をWeyl-Heisenberg (WH) 直交系で離散化(グリッドパラメータ: T and F) [Durisi et al. 2010]
- 離散化を最適化し、相互情報量を求めてゆく緻密な手法
- 使いやすい、伝搬パラメータとの関係が見える閉形式の表現はまだ得られていない

統計モデル的アプローチ(提案手法)

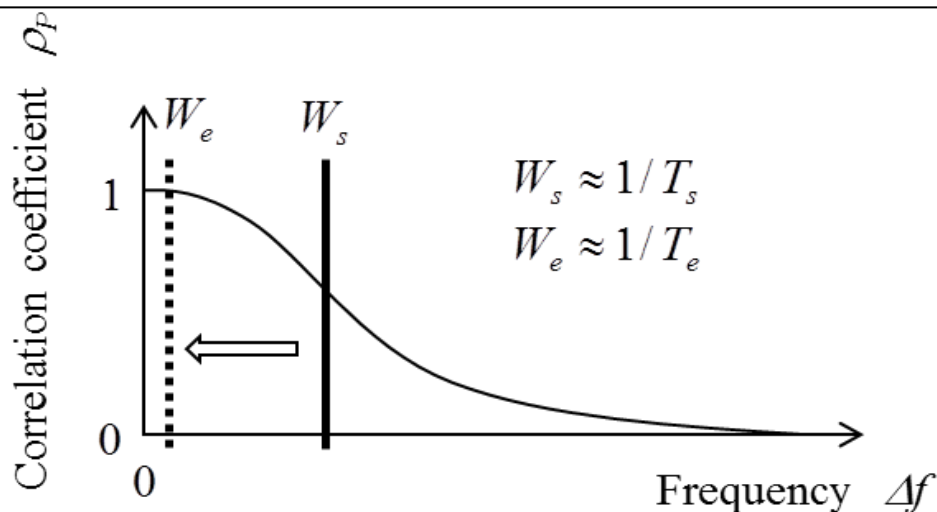
- 直観的方法なので、厳密性を欠く
- 伝搬パラメータとの関係がきれいに見える閉形式の簡易な表現式が得られる

提案法の基本的考え方

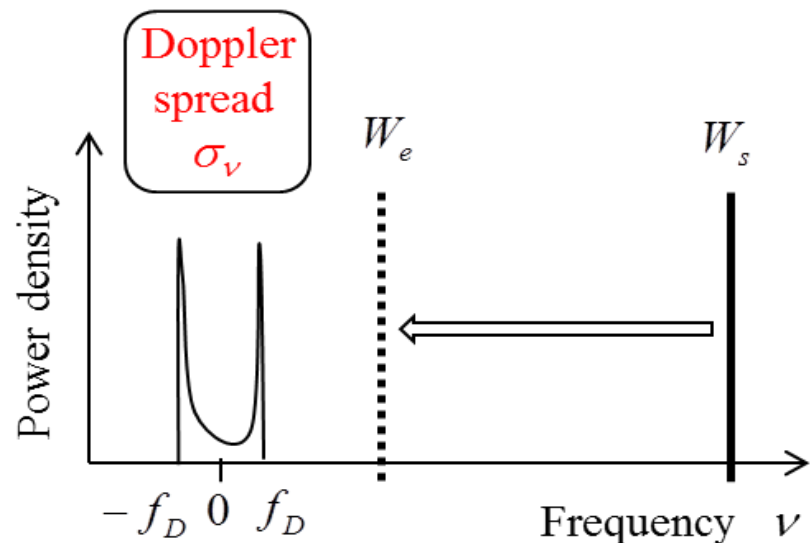
二重選択性フェージング環境の時間領域と周波数領域での統計的關係



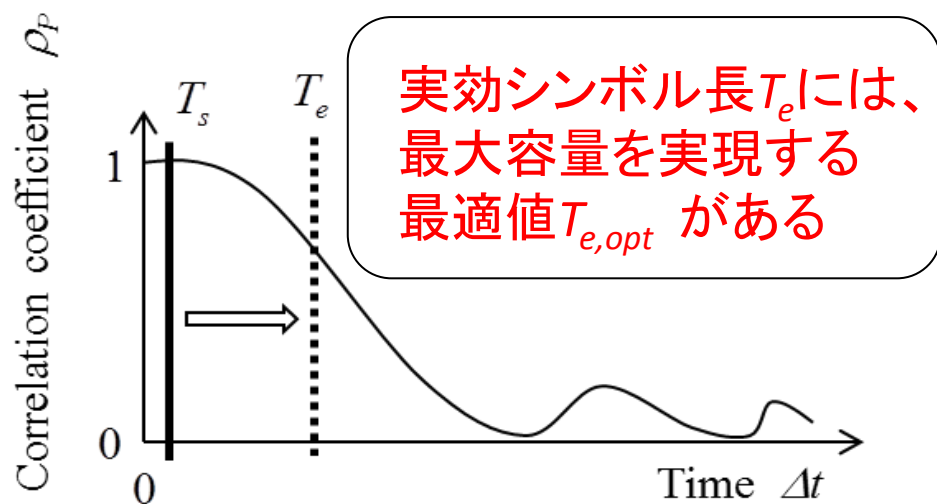
(a) 遅延プロファイル $p(\tau)$ 【遅延現象】



(b) 周波数相関 $\rho_P^{(\text{delay})}$



(c) ドップラースペクトル $S(\nu)$ 【ドップラー現象】



(d) 自己相関 $\rho_P^{(\text{Doppler})}$

通信路容量の算定(近似的な)

$$C \approx W_s \log_2(1 + SNR_e)$$

$$\downarrow$$

$$SNR_e = \frac{P_S - P_{I_delay} - P_{I_Doppler}}{P_N + P_{I_delay} + P_{I_Doppler}}$$

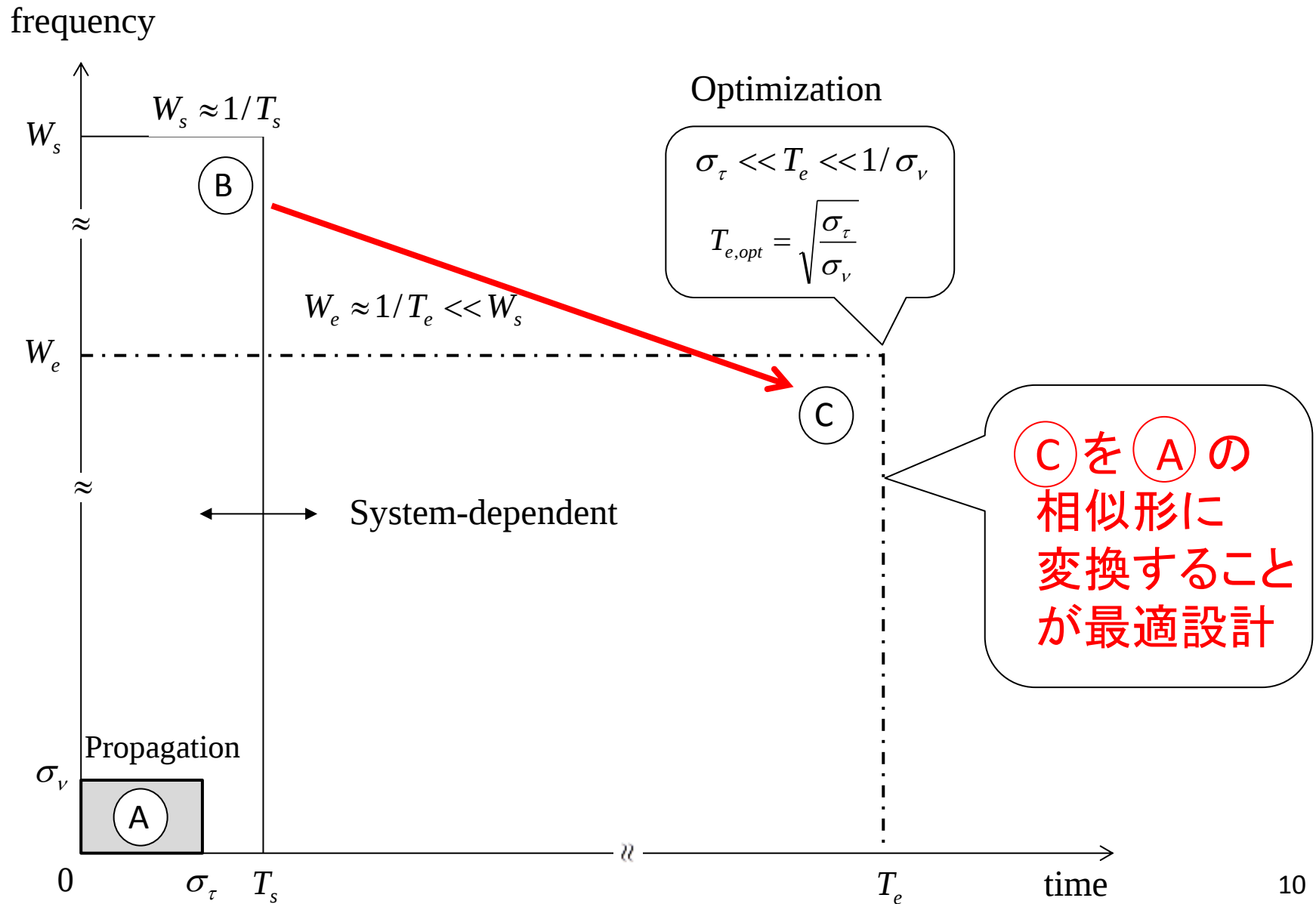
$$\approx \left(\Gamma_0^{-1} + SIR_{delay}^{-1} + SIR_{Doppler}^{-1} \right)^{-1}$$

SIRの最大値は？

$$\frac{\partial SIR}{\partial T_e} \left\{ = \left(\frac{1}{SIR_{delay}} + \frac{1}{SIR_{Doppler}} \right)^{-1} \right\} = 0 \quad \text{より} \quad \left\{ \begin{array}{l} T_{e,opt} = \sqrt{\sigma_\tau / \sigma_\nu} \\ SIR_{max} = \frac{1}{8\pi^2 \sigma_\nu \sigma_\tau} \end{array} \right.$$

スプレッドファクタが
現れる

伝搬パラメータとシステムパラメータとの関連



二重選択性フェージング環境の通信路容量

(Noncoherent Capacity in Highly-Underspread WSSUS Channel)

Case 1 SNR(Γ_0)に着目した評価(信号電力が帯域幅に比例)

$$C \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma_0^{-1} + S I R_{\max}^{-1}} \right)$$

$\sigma_v \sigma_\tau \leq 0.01$
での近似式

Γ_0 : 平均SNR

$$= W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma_0^{-1} + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right) \equiv W_s C_0$$

C_0 : 正規化通信路容量
(bps/Hz)

SNR無限大時の通信路容量のフロア値

$$C_{0, floor} \equiv \lim_{\Gamma_0 \rightarrow \infty} C_0 = \log_2 \left(1 + \frac{1}{8\pi^2 \sigma_f \sigma_\tau} \right)$$

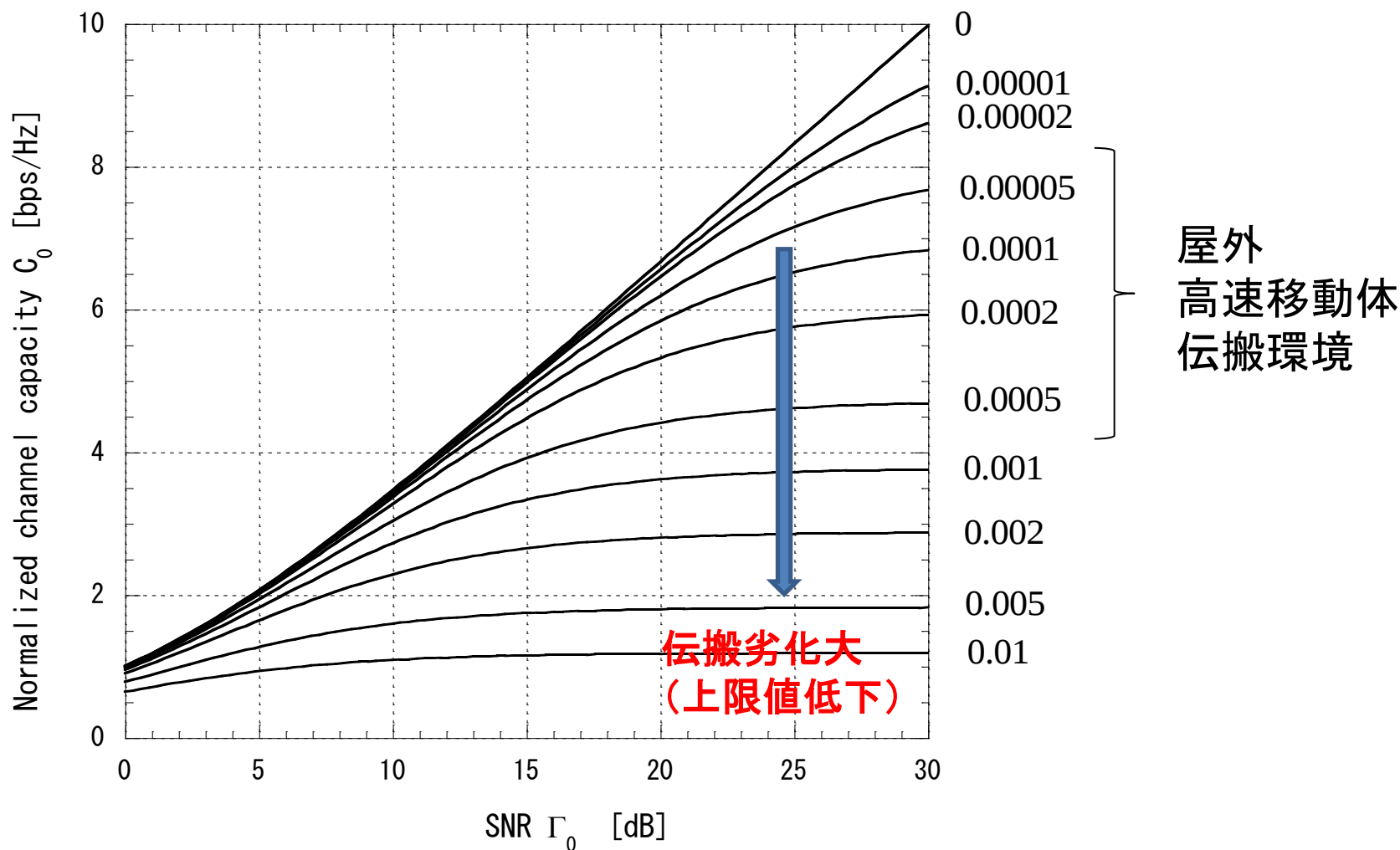
結論

情報伝送の限界を伝搬パラメータを用いて表すことができた。
SNRを一定とした伝送では、スプレッドファクタ $\sigma_v \sigma_\tau$ によって伝送限界が定まる(等価干渉波成分による通信路容量のフロア値が生じる)

正規化通信路容量 C_0 のSNR特性

スプレッドファクタ

$$\sigma_v \sigma_r =$$



伝搬環境の通信路容量: もう一つの見方

Case 2 送信電力を一定にし、帯域幅を広げてゆくと
(スペクトル拡散をしてゆくと)

$$C_2 \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{W_s P_{N0} / P_S + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right)$$

P_{N0} : 雑音電力密度
(1Hz当たりの雑音電力)

$$\lim_{W_s \rightarrow \infty} C_2 \approx \frac{1}{\log_e(2)} \frac{P_S}{P_{N0}} = C_{AWGN}$$

熱雑音のみのときの
通信路容量

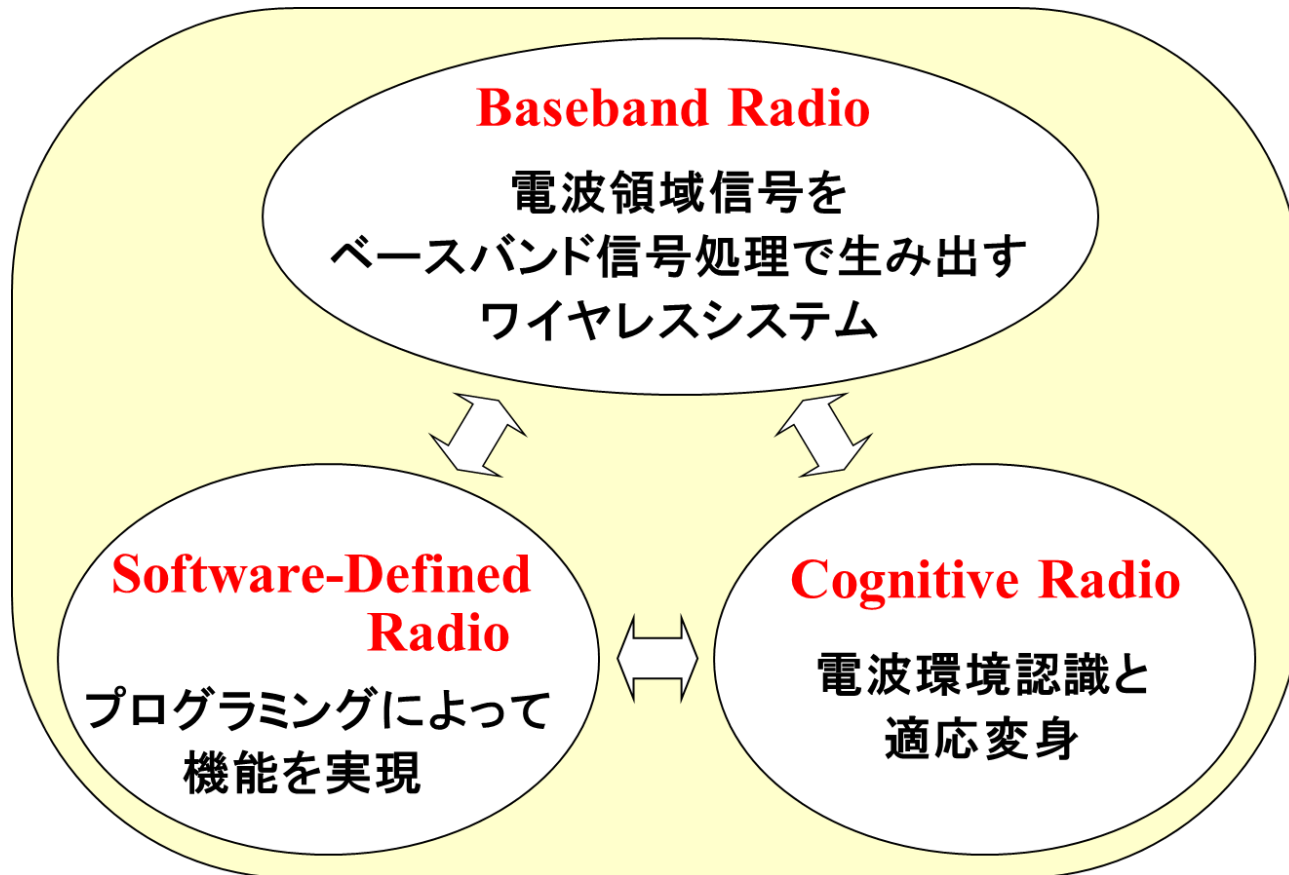
結論 信号電力を一定とした伝送 (Case 2) では、帯域幅を十分大きくとることによって、熱雑音で決まる通信路容量に収束し、伝搬問題が克服できる。

【ここまでが、前回までの発表分】

広比帯域通信の例：環境適応型ベースバンド無線

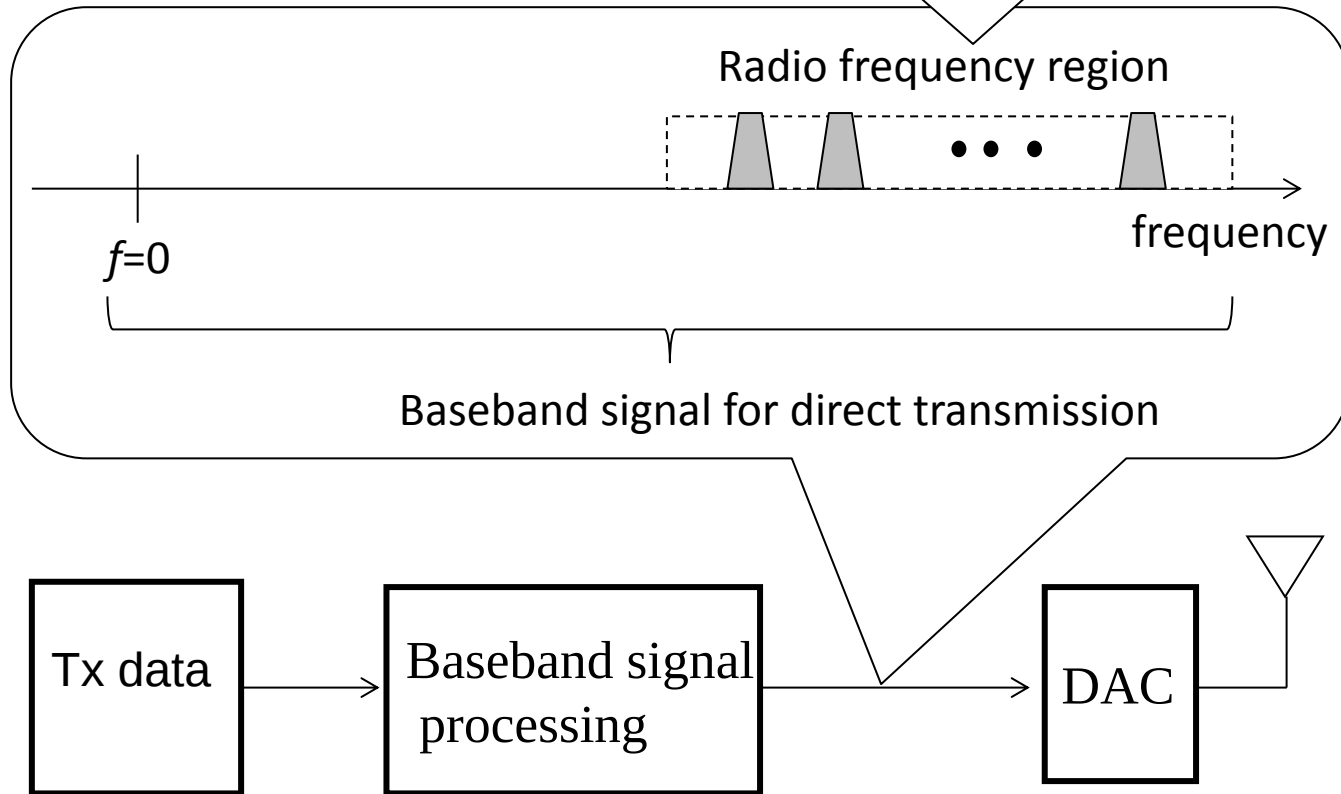
「ベースバンド無線」 一般にはまだ馴染んでないが、唐沢研では研究の柱の一本として力を入れ、代々の学生がその研究を進展させてくれた

三つの無線(3 Radios)を統合した環境適応通信



環境適応型ベースバンド無線：送信系

通信環境・電波環境の変化に応じて
通信信号のスペクトルや信号形式を適応変身

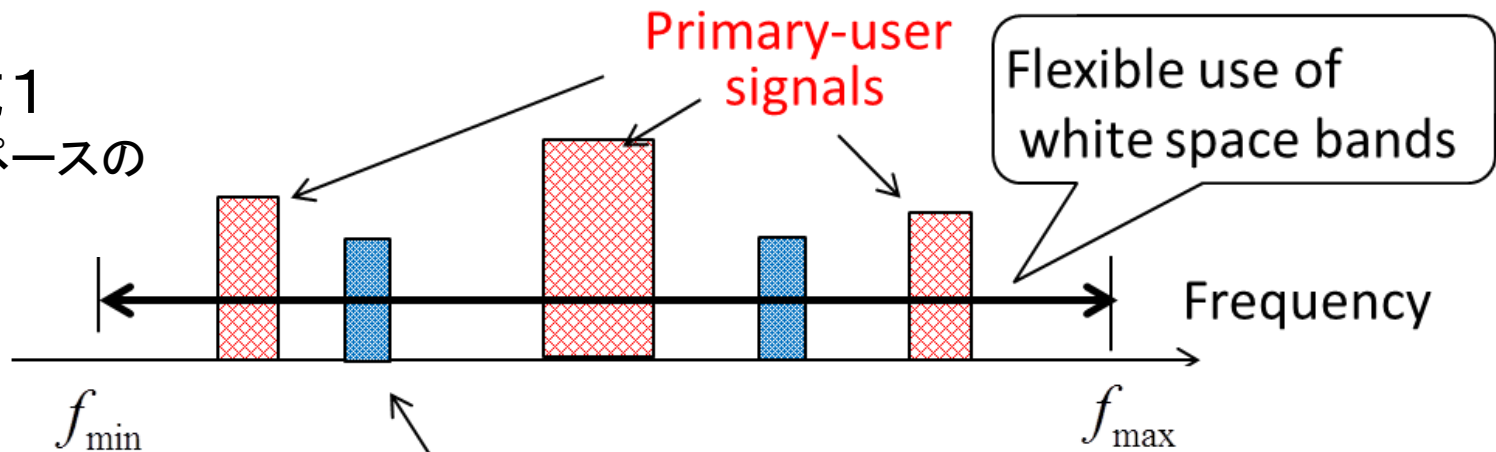


環境適応型ベースバンド無線(→比帯域が非常に大きい通信):
今回想定: ホワイトスペースを利用する二次利用者通信

Frequency-selective fading environment

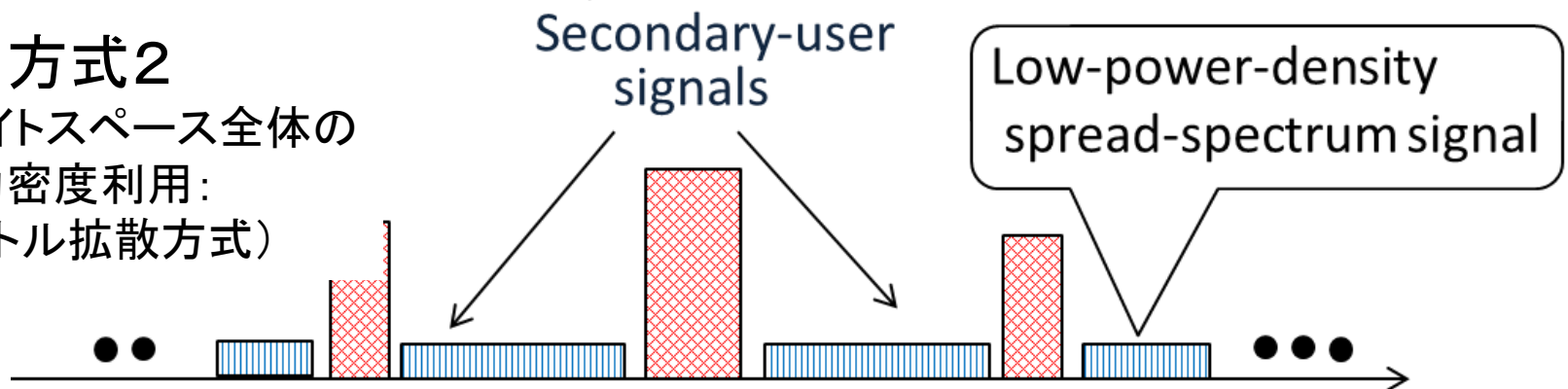
(a) 方式1

(ホワイトスペースの
選択的利用)



(b) 方式2

(ホワイトスペース全体の
低電力密度利用:
スペクトル拡散方式)



二重選択性フェージング環境での情報伝送の限界を定める キーパラメータ

キーパラメータ: スプレッドファクタ

比帯域が大きい通信では、スプレッドファクタは周波数の関数になる

$$\alpha \equiv \sigma_v \sigma_\tau \rightarrow \alpha(f) \equiv \sigma_v(f) \sigma_\tau(f)$$

- ・ 遅延スプレッドの周波数依存性は小さい → 固定値で与える
- ・ ドップラースプレッドは周波数に比例

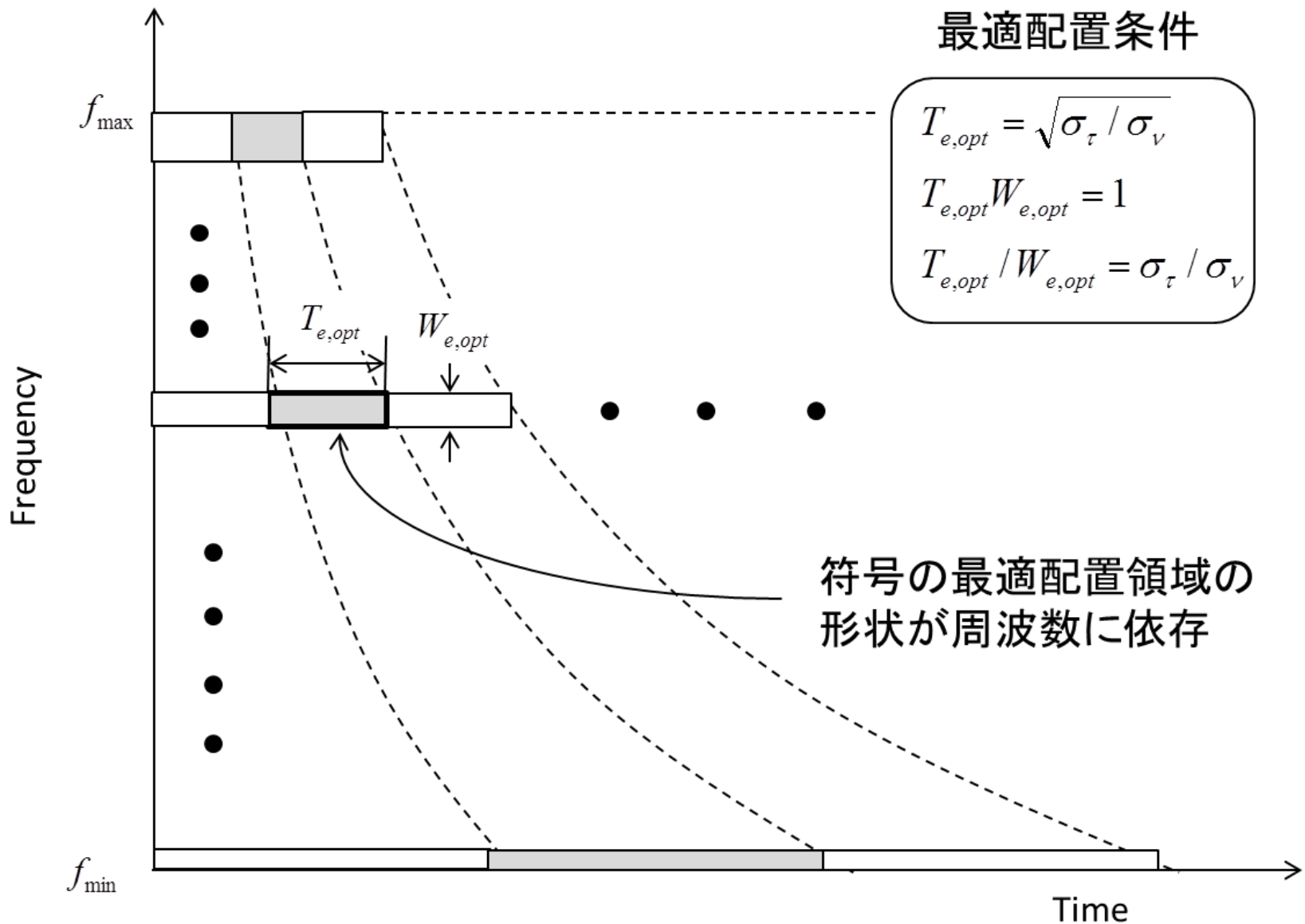
$$\sigma_v(f) \approx \sigma_{v_ref} \frac{f}{f_{ref}}$$

$$f_{ref} = \sqrt{f_{min} f_{max}}$$
$$\sigma_{v_ref} \equiv \sigma_v(f_{ref})$$

スプレッドファクタの周波数特性近似

$$\alpha(f) \equiv \alpha_{ref} \frac{f}{f_{ref}}, \quad \alpha_{ref} \equiv \sigma_{v_ref} \sigma_\tau$$

スプレッドファクタの周波数特性の考慮が必要な 広比帯域通信における符号の時間・周波数領域最適配置



【方式1】 時間・周波数領域での符号最適配置のときの 正規化通信路容量のフロア値

基本式

$$C^{(\text{Case1})}(f) = W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma_0^{-1} + 8\pi^2 \alpha(f)} \right)$$

周波数依存のスプレッドファクタ

$$\begin{aligned} \alpha(f) &(\equiv \sigma_v(f) \sigma_\tau) \\ &= (f / f_{\text{ref}}) \alpha_{\text{ref}} \\ &(\alpha_{\text{ref}} \equiv \sigma_{v_ref} \sigma_\tau) \end{aligned}$$

正規化
通信路容量の
フロア値

$$\begin{aligned} C_{0, \text{floor}}^{(\text{Case1})} &\equiv \lim_{\Gamma_0 \rightarrow \infty} C^{(\text{Case1})} / W_s = \log_2 \left(1 + \frac{f_{\text{ref}}}{8\pi^2 \alpha_{\text{ref}} f} \right) \\ &\approx -\log_2 (8\pi^2 \alpha_{\text{ref}} f / f_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

$$(\alpha_{\text{ref}} \leq 0.001)$$

その平均値
(帯域内の
任意の周波
数が選ばれ
たときの平
均値)

$$\langle C_{0, \text{floor}}^{(\text{Case1})} \rangle = \frac{1}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}} \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} C_{0, \text{floor}}^{(\text{Case1})}(f) df$$

$$\approx -\log_2 (8\pi^2 \alpha_{\text{ref}}) - \frac{f'_{\text{max}} \ln f'_{\text{max}} - f'_{\text{min}} \ln f'_{\text{min}} - f'_{\text{max}} + f'_{\text{min}}}{\ln 2 \cdot (f'_{\text{max}} - f'_{\text{min}})} \quad (\alpha_{\text{ref}} \leq 0.001)$$

$$f'_{\text{min}} \equiv f_{\text{min}} / f_{\text{ref}}, \quad f'_{\text{max}} \equiv f_{\text{max}} / f_{\text{ref}}$$

$$f_{\text{ref}} = \sqrt{f_{\text{min}} f_{\text{max}}}$$

【方式1】 時間・周波数領域での符号配置を周波数 f_{ref} の最適値に固定したときの正規化通信路容量のフロア値

$$SIR \approx \frac{T_e^2}{4\pi^2 \left\{ \sigma_\tau^2 + \sigma_{v_ref}^2 \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^2 T_e^4 \right\}} \quad \text{---} \quad T_e^2 = \sigma_\tau / \sigma_{v_ref}$$

$$= \frac{1}{4\pi^2 \alpha_{ref} \left\{ 1 + (f / f_{ref})^2 \right\}}$$

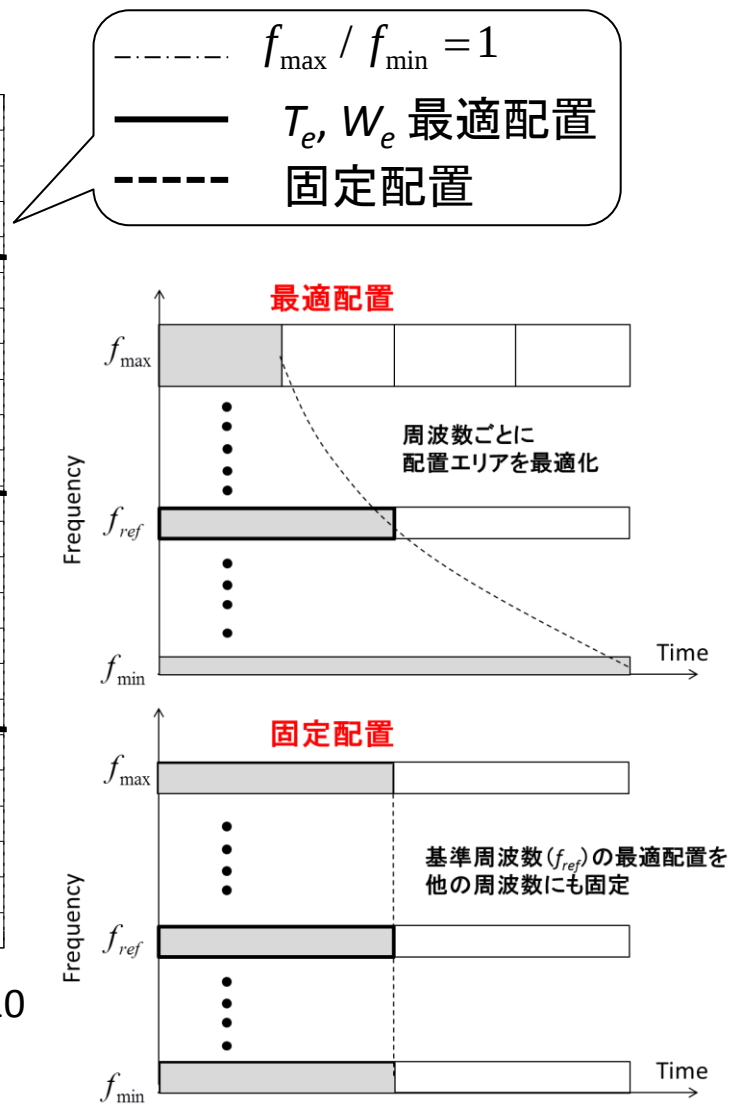
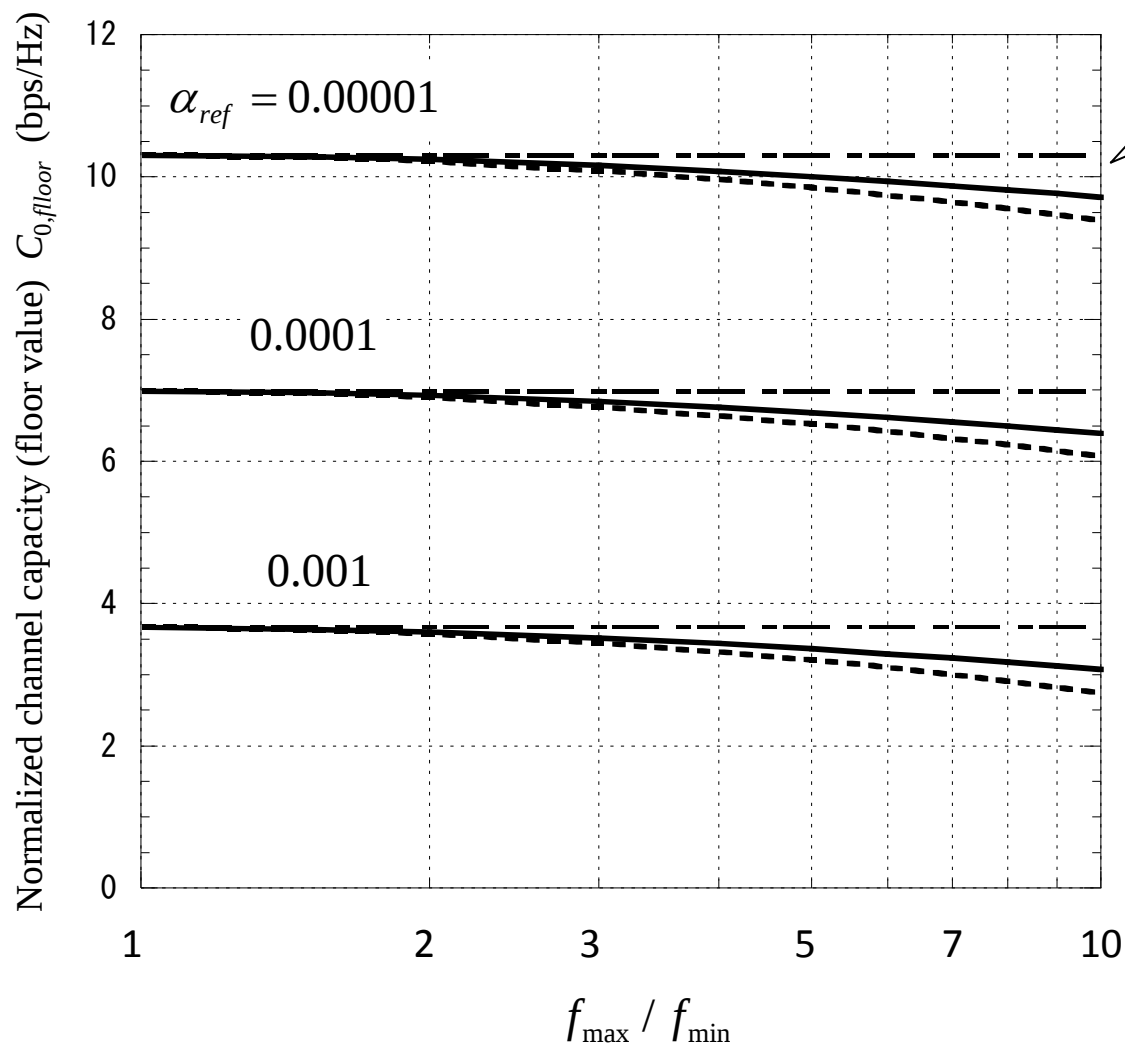
$$C_{0, floor}^{(Case1)} = \log_2 \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 \alpha_{ref} \left\{ 1 + (f / f_{ref})^2 \right\}} \right)$$

$$\left\langle C_{0, floor}^{(Case1)} \right\rangle = \frac{1}{f_{max} - f_{min}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} \log_2 \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 \alpha_{ref} \left\{ 1 + (f / f_{ref})^2 \right\}} \right) df$$

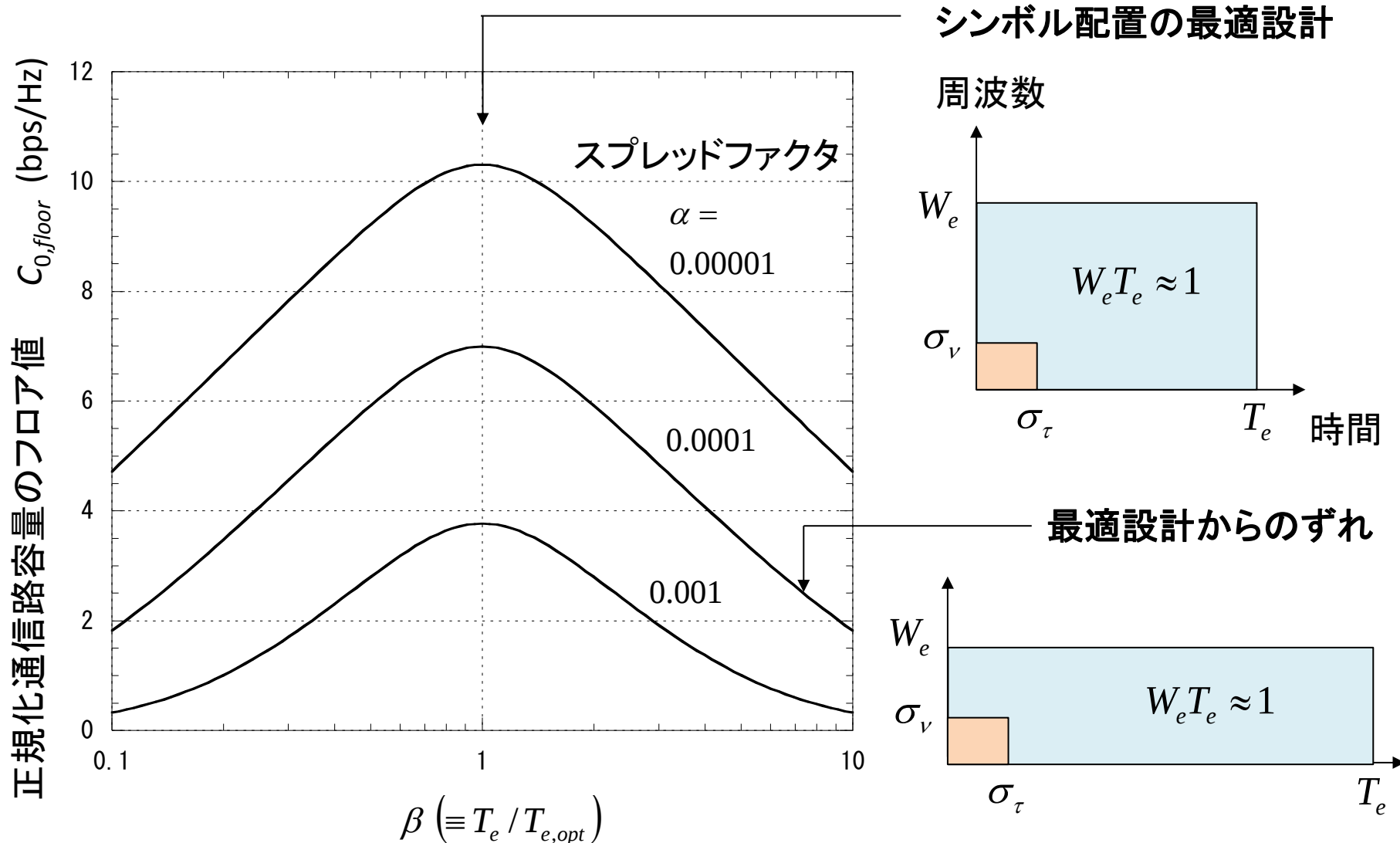
$$\approx -\log_2(8\pi^2 \alpha_{ref}) + 1 - \frac{f'_{max} \ln \left\{ (f'_{max})^2 + 1 \right\} - f'_{min} \ln \left\{ (f'_{min})^2 + 1 \right\} - 2(f'_{max} - f'_{min}) + 2(\tan^{-1} f'_{max} - \tan^{-1} f'_{min})}{\ln 2 \cdot (f'_{max} - f'_{min})}$$

$$(\alpha_{ref} \leq 0.001)$$

【方式1】正規化通信路容量の平均フロア値の比帯域幅依存性

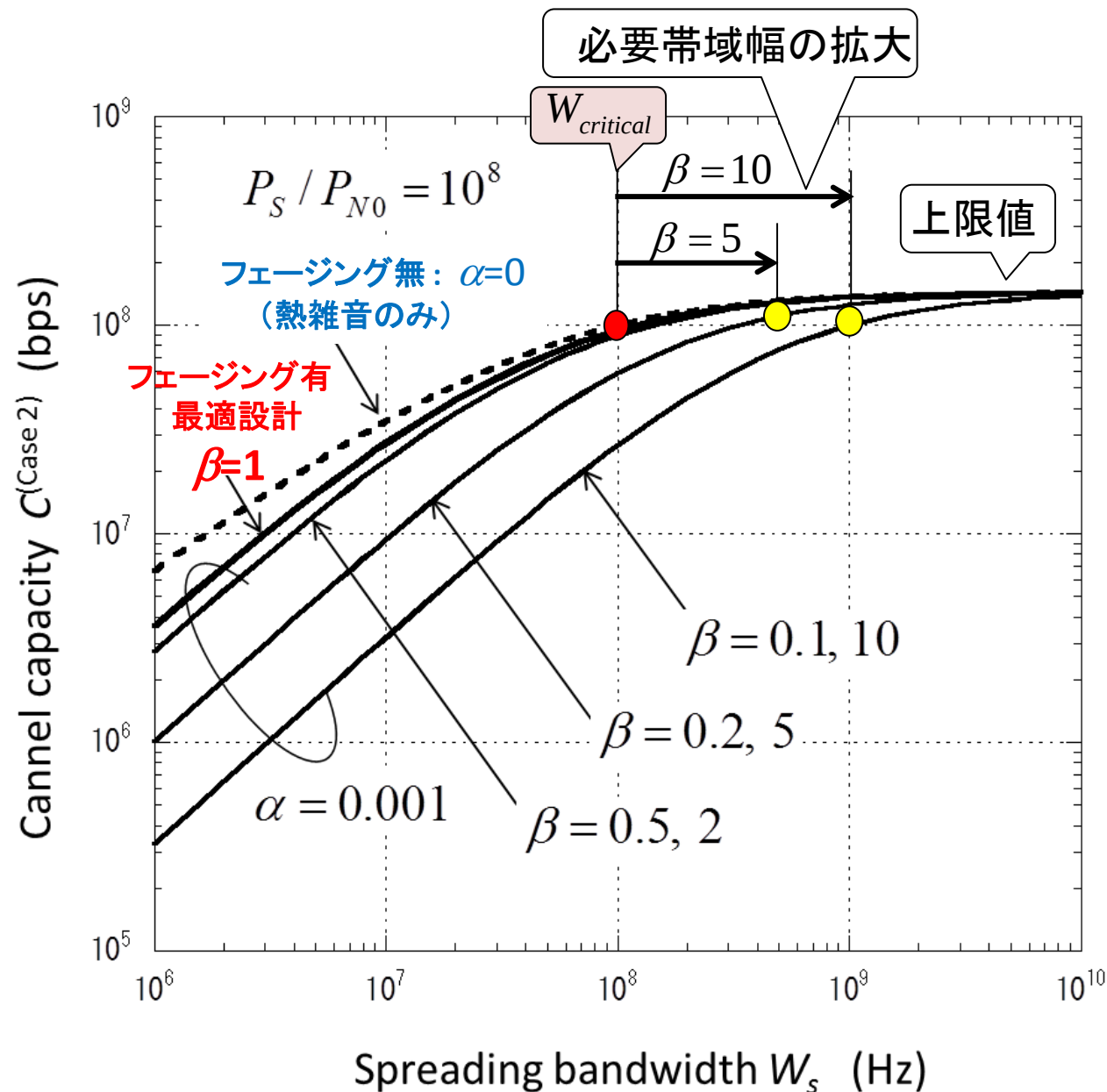


符号の時間・周波数領域配分に関する最適値からのずれがあると



実効シンボル長の最適値($T_{e, opt}$)からのずれのファクタ

【方式2】 実効シンボル長 T_e が最適値($T_{e,opt}$)からずれている場合



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

(最適値からのずれを表すファクタ)

実効シンボル長 T_e が最適値($T_{e,opt}$)からずれている場合、上限値を得る必要帯域幅は、 β の1からのずれに応じて大きくなる

$$W_s \approx \beta W_{critical}$$

$$W_{critical} \approx P_S / P_{N0}$$

(ただし、 $\beta > 1$ のとき。
 $\beta < 1$ では、 $1/\beta$ 倍)



実効シンボル長の最適設計が大事

二重選択性フェージング環境の通信路容量： まとめ

ケース	利用可能な リソース	制限	通信路容量	最適設計からのズレ
1	電力	帯域幅	スプレッドファクタに 依存してフロア値が 発生(伝搬問題顕在)	フロア値の悪化 (スループット劣化)
2	帯域幅	総信号電力	熱雑音時の値 (伝搬問題解消)	必要帯域幅の増加 (リソースの無駄使い)

結論： 符号の時間・周波数領域配分に関する最適設計が重要