

信学会AP研究会
(Oct. 19, 2017)

伝搬パラメータ「スプレッドファクタ」について

唐沢 好男

内容(予稿の第一章より)

伝搬パラメータ「スプレッドファクタ(spread factor)」を取り上げ、種々の視点からこれを考察する。本テーマは、「古くて、かつ、新しい」色彩を帯び、筆者の研究者人生における趣味的世界に属する。1960年代より、いろいろの分野で多くの人がそれに着目してきたという意味では「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」と言える。

スプレッドファクタは、遅延の広がりとドップラーの広がりが共に存在するマルチパス伝搬環境におけるそれぞれの量のばらつきの大きさの積で与えられる物理量を指す(2章で述べるように、定義は二つある)。時間領域と周波数領域での二重選択性フェージング環境(WSSUSチャンネル)を表現する伝搬パラメータであり、環境の苛酷さを示す指標でもある。

筆者らは、マルチパス環境での情報伝送限界を探る目的で、このテーマに着目し、その情報伝送能力を数値指標で与えるものとしての通信路容量の解析を行ってきた。その中で、上記スプレッドファクタがキーパラメータとして、情報伝送の限界(通信路容量)に深く関わっていることを明らかにした。

本発表では、この解析結果の整理を行うと共に、より広い視点からスプレッドファクタについて議論を深めたい。

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

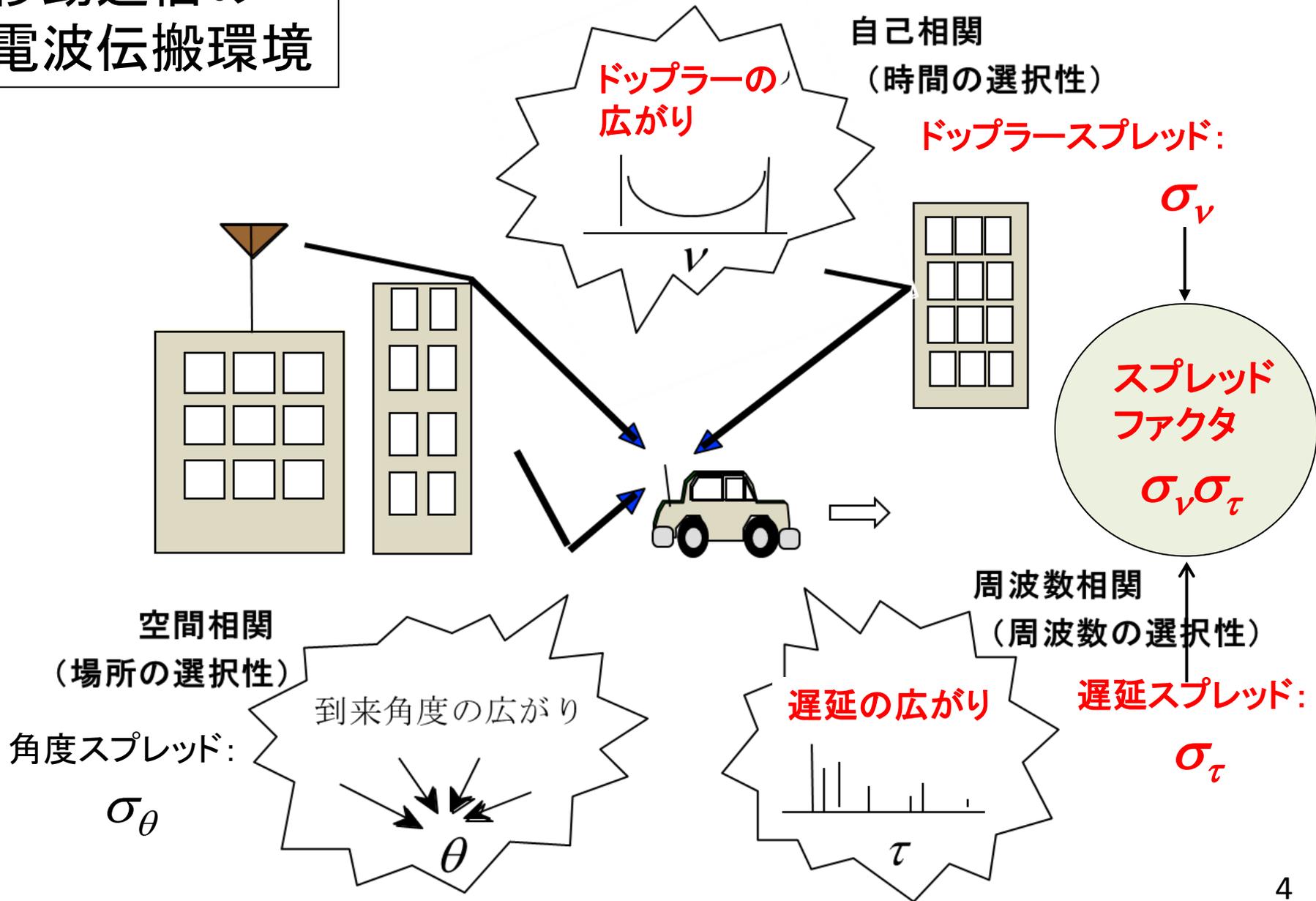
2) 唐沢、“二重選択性フェージング環境の通信路容量,”
信学会AP研、2017.01.

3) 唐沢、“ 同 [III],” 信学会AP研、2017.02

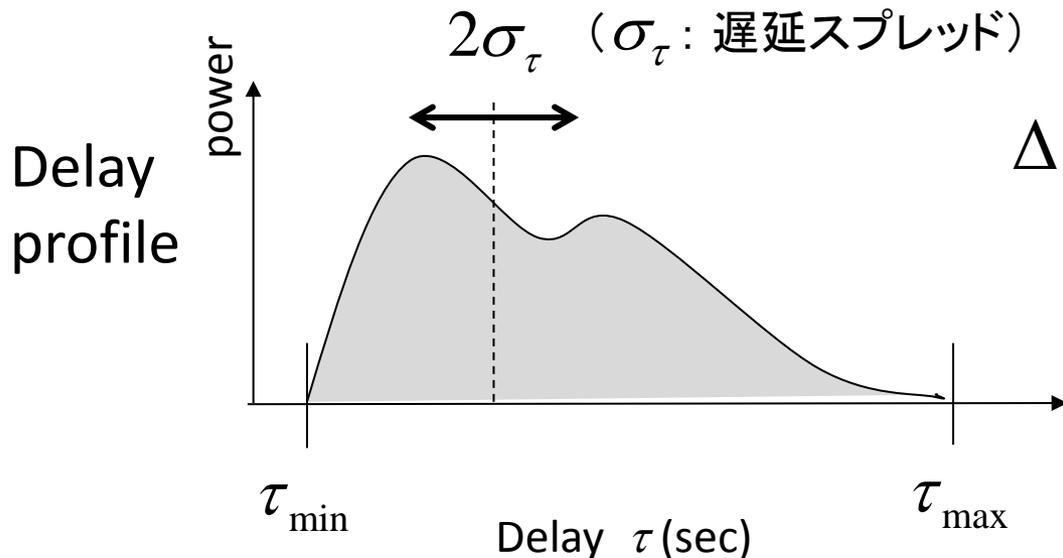
4) 唐沢、“ 同 [III],” 信学会RCS研、2017.07

5) 唐沢、伝搬パラメータ「スプレッドファクタ」について
(スプレッドファクタが現れる様々な場面)

移动通信の 電波伝搬環境



スプレッドファクタ(ドップラー広がりと遅延広がり)の積): 二つの定義

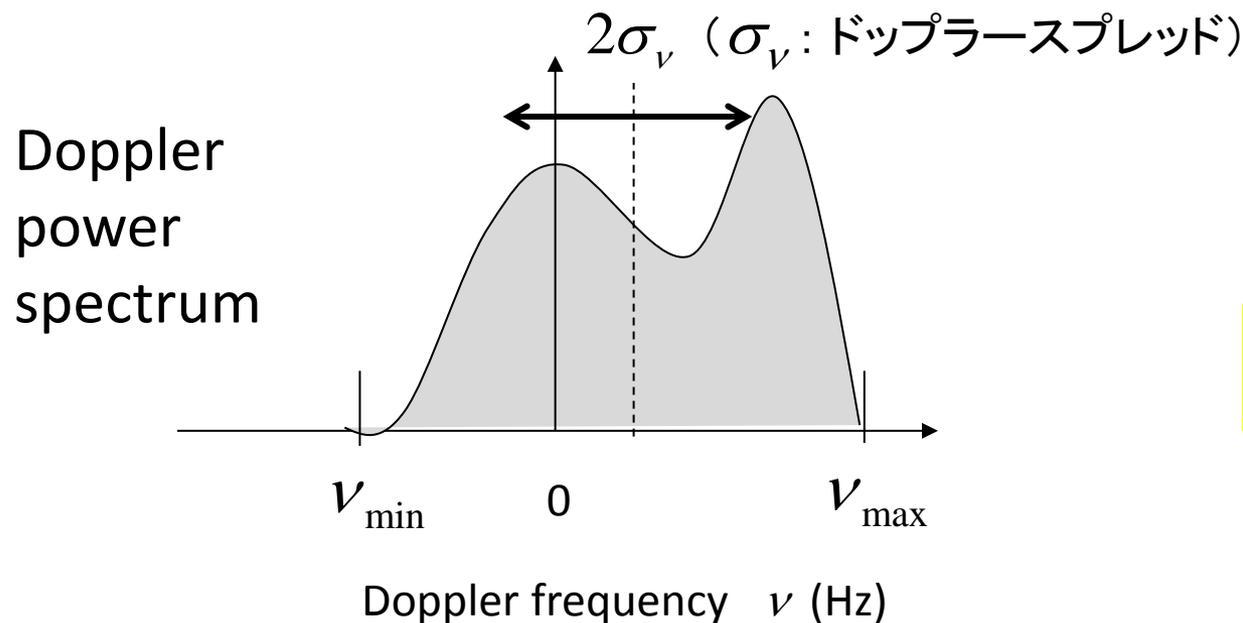


【定義1】

$$\Delta_H \equiv (\tau_{\max} - \tau_{\min})(\nu_{\max} - \nu_{\min})$$

【定義2】

$$\alpha \equiv \sigma_\tau \sigma_\nu$$



Overspread

$$\Delta_H > 1$$

Underspread

$$\Delta_H < 1$$

Highly underspread

$$\Delta_H \ll 1$$

$$\alpha \ll 1$$

スプレッドファクタの歴史

ドップラー・遅延同時測定限界

Kailath, MIT Tech. Rep., (1959)

Bello, IEEE Trans. Inf. Theory, (1969)

定義1

Spread factor と名づけ

定義2 $\sigma_\tau^2 \sigma_\nu^2$ を
Total spread と名づけ

伝搬チャネル表現(技術書)

Kennedy, Fading Dispersive Communication Channels, (1969)

Proakis, Digital Communications, (2001)

通信路容量解析

定義1を使用

Durisi, et al, IEEE Trans. Inf. Theory, (2010)

ワイヤレス伝送の物理限界

定義2を使用

Karasawa, Radio Science, (2016)

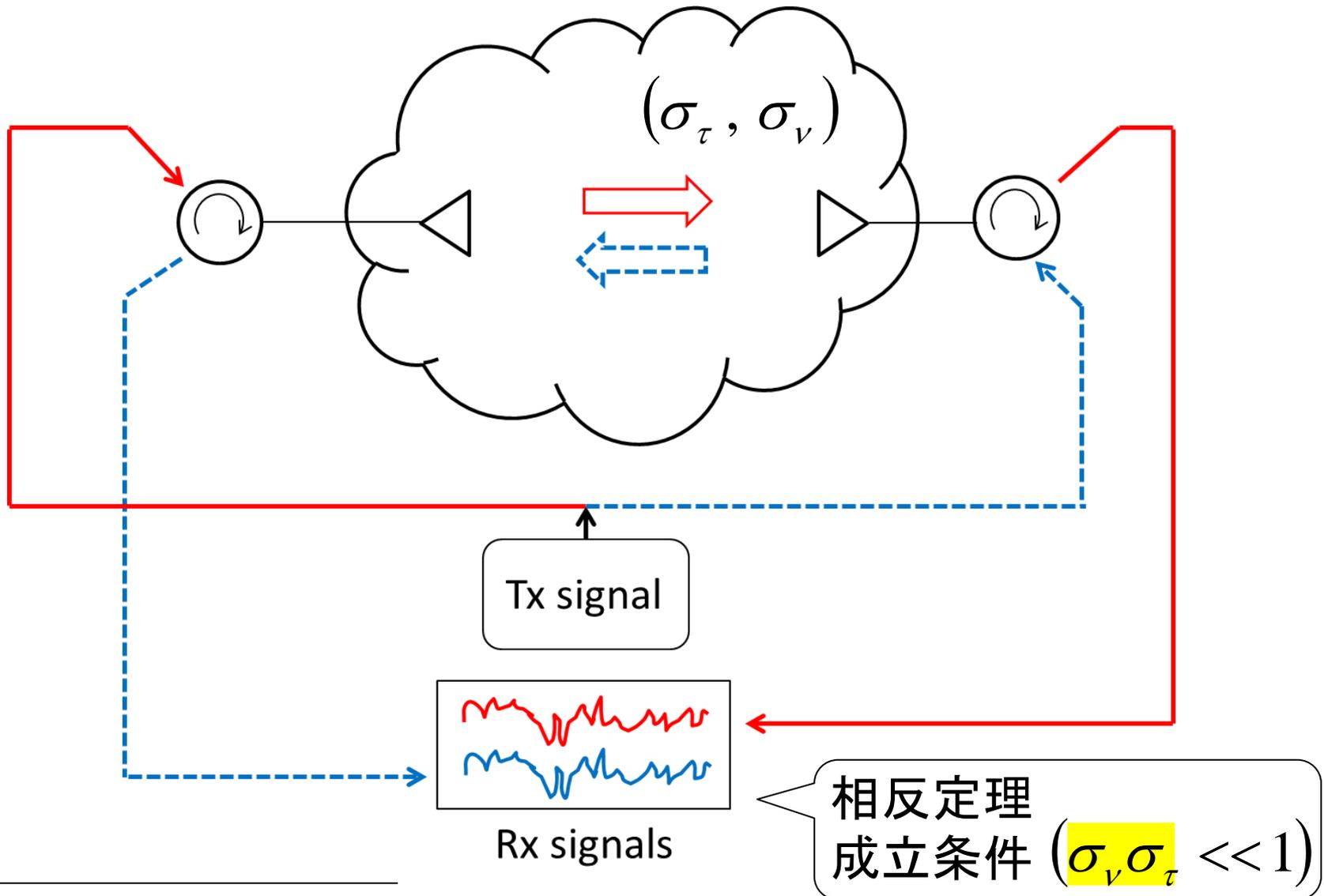
スプレッドファクタが現れてくる現象・特性

遅延広がりとドップラー広がりが共に存在する多重波環境において

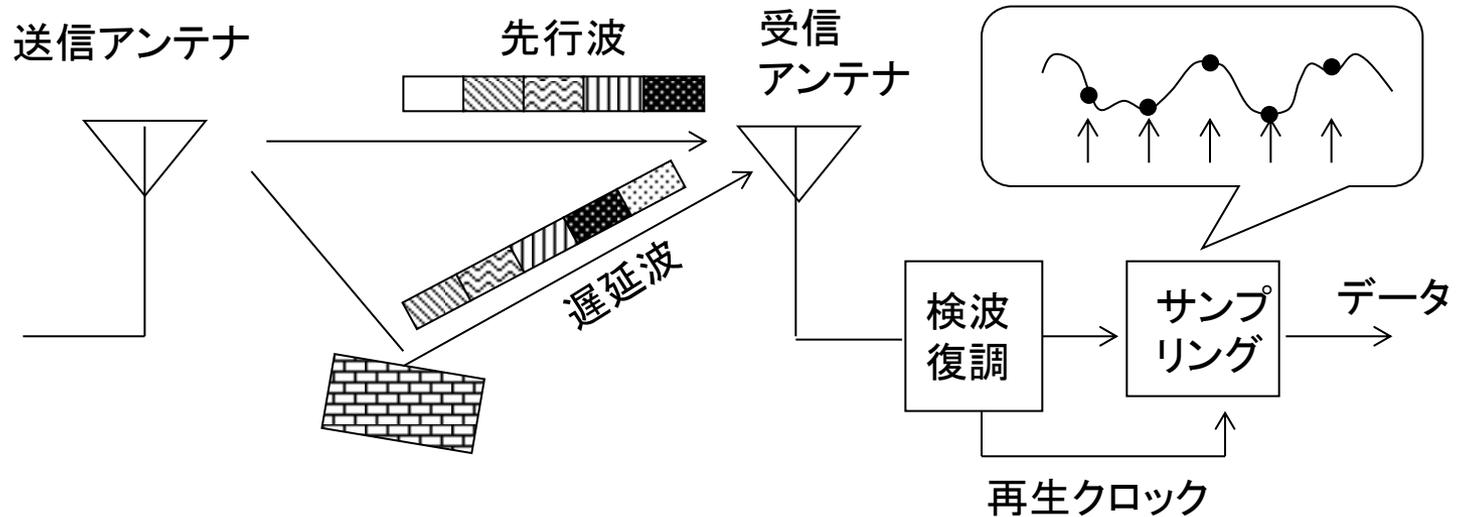
- ① 遅延・ドップラー同時測定限界 ($\Delta_H < 1$; Kailath, Bello)
- ② 無線回線の相反定理(送受信の可逆性)の成立限界
- ③ 受信機での再生クロックのサイクルスリップの発生頻度
- ④ 通信路容量
- ⑤ BERの最小フロア値

② 無線回線の相反定理(送受信の可逆性)の成立限界

Time-varying multipath environment



③ 受信機での再生クロックのサイクルスリップの発生頻度(1)

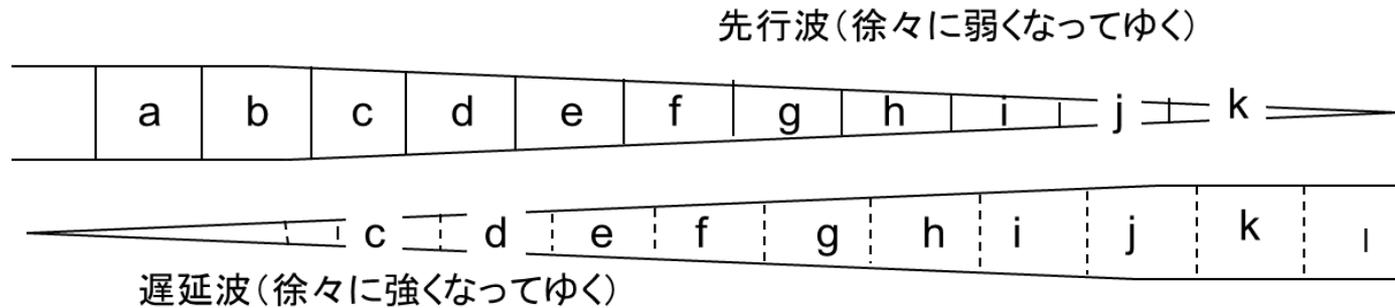


サイクルスリップ:

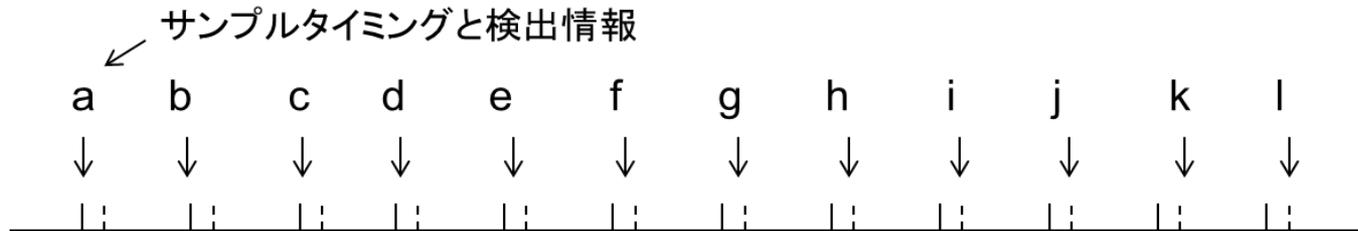
遅延の広がりが1シンボル長の大きさ以内であっても、受信機の再生クロックの位相(タイミング)がフェージングにだまされて、1シンボルを超えて動いてゆく現象

サイクルスリップが発生すると、同期はずれを引き起こし、バースト上の誤りが発生する。

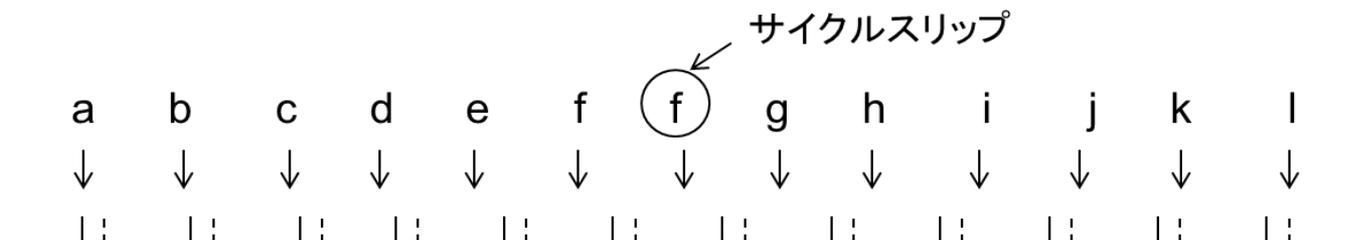
③ 受信機での再生クロックのサイクルスリップの発生頻度(2)



(a) 想定するフェージング環境



(b) 同位相 ($\phi = 0^\circ$) の場合



(c) 逆位相 ($\phi = 180^\circ$) の場合

③ 受信機での再生クロックのサイクルスリップの発生頻度(3)

レイリーフェージング環境でのサイクルスリップ発生頻度
(等価伝送路モデルによる解析)

$$N_s = \sqrt{2\pi} f_D \frac{\sigma_\tau}{T_s} \quad [\text{回}/\text{秒}] \quad \leftarrow \text{水平面到来角度一様のマルチパス環境}$$

$$\sigma_v = f_D / \sqrt{2}$$

$$N_s = 2\pi \sigma_v \sigma_\tau / T_s$$

④ 通信路容量(1)

シャノンの情報理論から生み出された**最大相互情報量**
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に得られる
誤りなく送ることができる伝送速度の上限(単位: bps)



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



電波伝搬環境の情報伝送能力を表す

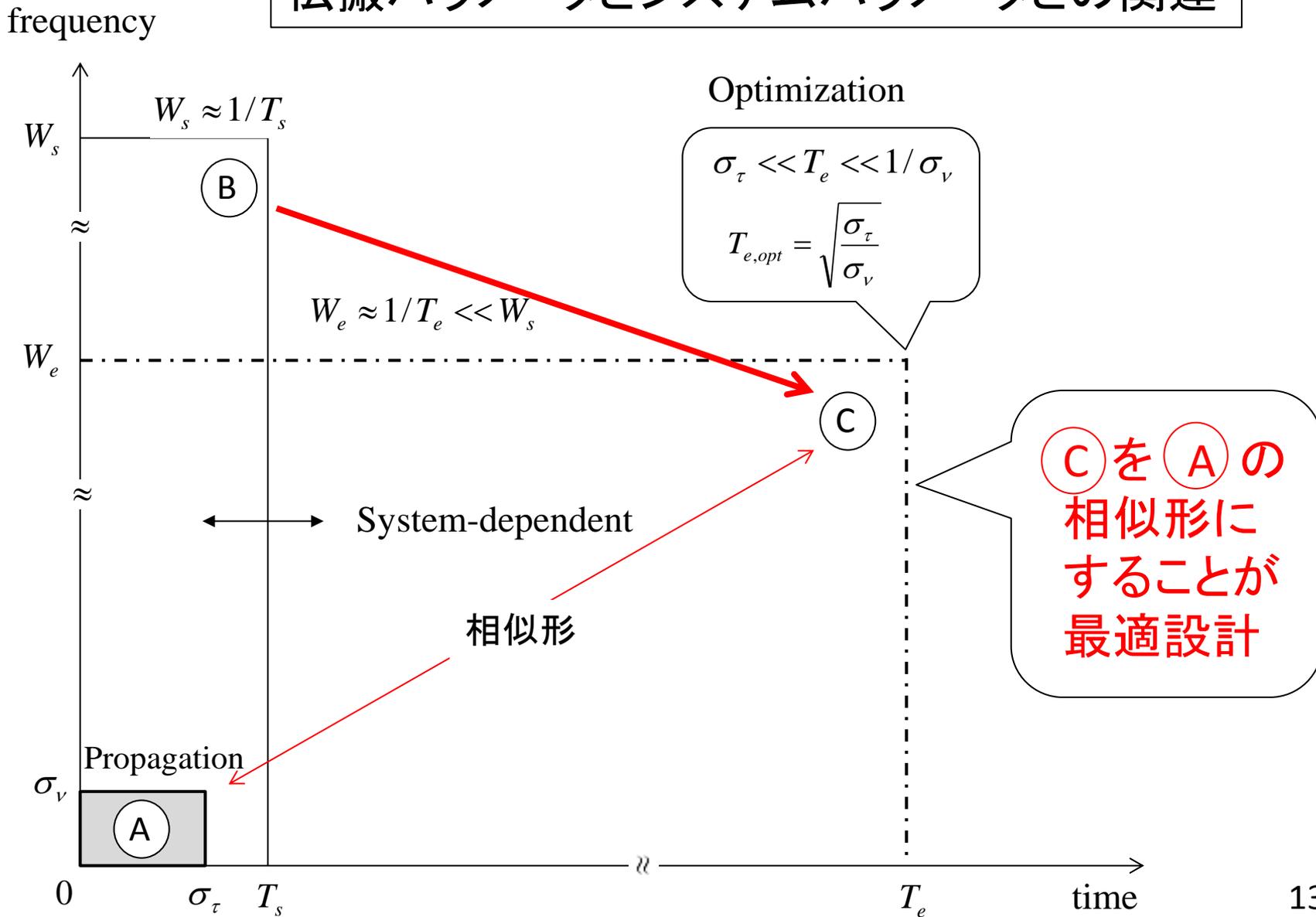
$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \max_{p(x)} \frac{1}{T} \iint p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x) p(y)} dx dy \quad \text{【定義式】}$$

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

$$= ? \quad \text{【マルチパス環境下では?】}$$

④ 通信路容量(2)

伝搬パラメータとシステムパラメータとの関連



④ 通信路容量(3)

$$C \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma_{SNR}^{-1} + \Gamma_{SIR, \max}^{-1}} \right)$$
$$= W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{W_s P_{N0} / P_S + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right)$$

$$C_1 \equiv \lim_{P_S \rightarrow \infty} C \approx -W_s \log_2 (8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau) \quad (\sigma_v \sigma_\tau \leq 0.001)$$

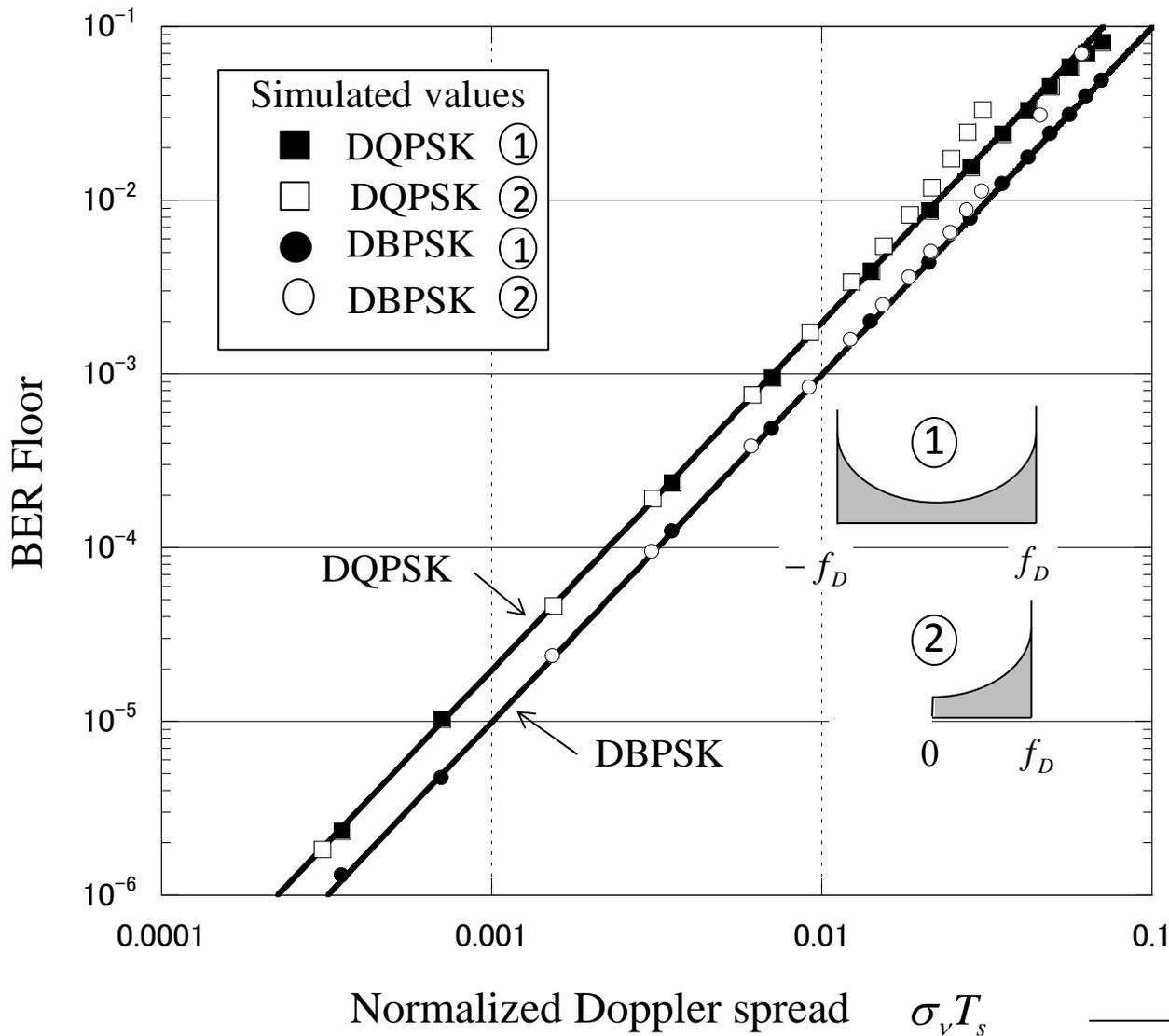
帯域幅一定の下、信号電力を大きくしてゆくと、
通信路容量の上限はスプレッドファクタによって決まる

$$C_2 \equiv \lim_{W_s \rightarrow \infty} C = \frac{1}{\ln 2} \frac{P_S}{P_{N0}} = C_{AWGN}$$

信号電力一定の下、帯域幅を大きくしてゆくと、
通信路容量の上限は熱雑音特性になり、伝搬問題は克服される

⑤ 二重選択性フェージング下でのBER特性(1)

ドップラー広がりのみの場合



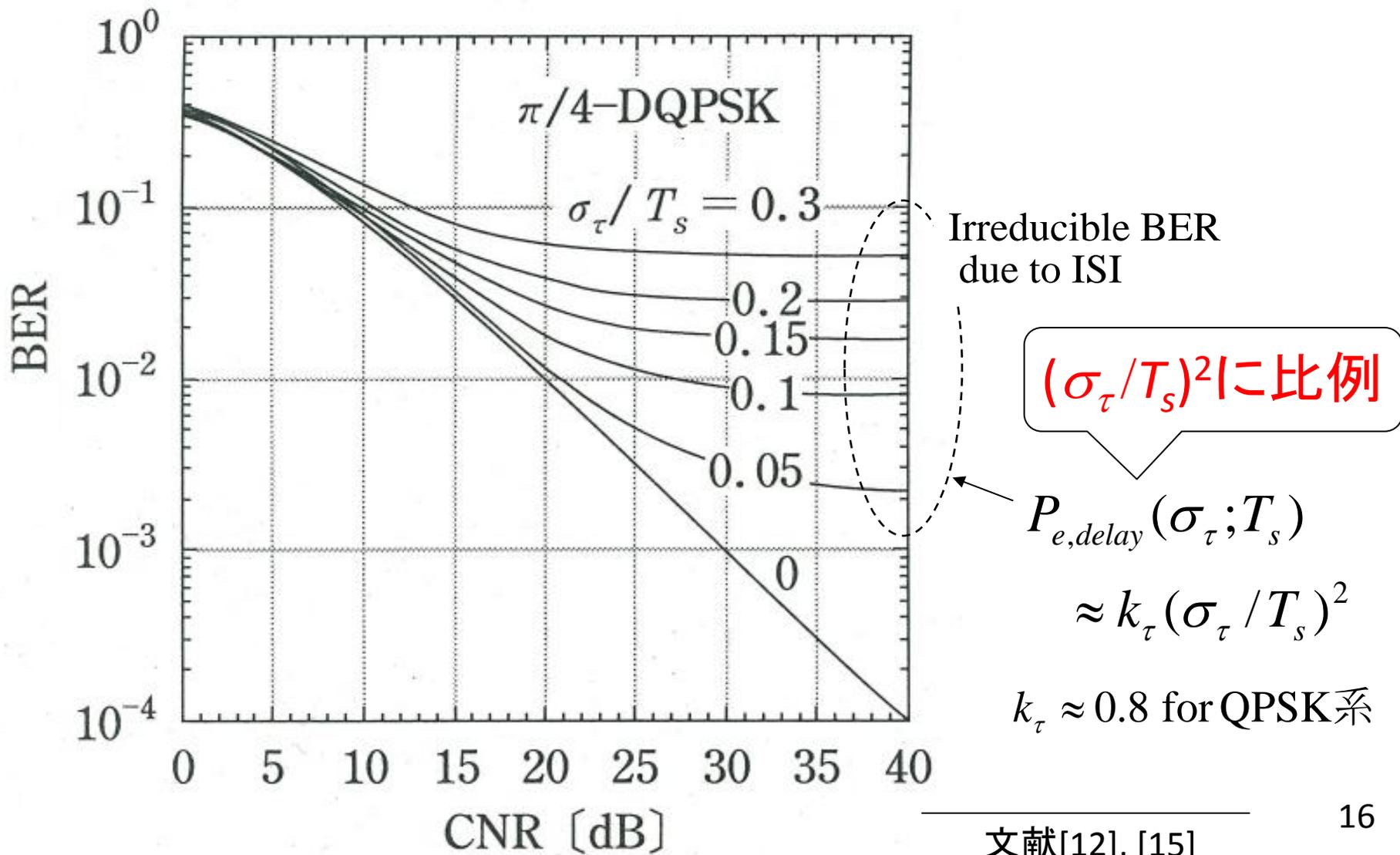
$(\sigma_v T_s)^2$ に比例

$$P_{e,Doppler}(\sigma_v; T_s) \approx k_v (\sigma_v T_s)^2$$

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

⑤ 二重選択性フェージング下でのBER特性(2)

遅延広がり+熱雑音の場合



⑤ 二重選択性フェージング下でのBER特性(3)

BERのフロア値

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



$$P_{e, Doppler}(\sigma_v; T_s) \approx k_v (\sigma_v T_s)^2 \quad (\text{位相変動: ICI})$$

$$P_{e, delay}(\sigma_\tau; T_s) \approx k_\tau (\sigma_\tau / T_s)^2 \quad (\text{符号間干渉: ISI})$$

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

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

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

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

まとめ

遅延広がりとドップラー広がりが共に存在する環境において、伝搬キーパラメータ「スプレッドファクタ」が現れるケースを調べた

- ① 遅延・ドップラー同時測定限界
- ② 無線回線の相反定理(送受信の可逆性)の成立限界
- ③ 受信機での再生クロックのサイクルスリップの発生頻度
- ④ 通信路容量
- ⑤ BERの最小フロア値(誤り訂正無)

ほかにどんなものがあるだろうか？

理論式の中に、スプレッドファクタが現れている