



AP/RCS/URSI-F
(H26.11.13)

ワイヤレス情報伝送の 物理限界を探る ～電波伝搬的視点から～

唐沢 好男

電気通信大学

先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター(AWCC)

宇宙・電磁環境研究センター(SSRE)



講演内容

物理限界とは？

伝送劣化の電波伝搬的要因

OFDMは電波伝搬を克服したか？

蛇足：伝送路の送受信可逆性について

電波伝搬研究とお医者さんの仕事のアナロジー



(インターネット画像より)

診察＝通信障害(伝搬劣化現象)の原因究明

治療＝伝搬劣化対策

予防＝伝搬劣化に強いシステム提案
伝搬劣化推定法

幸せな生活＝医者いらずの生活。しかし現実には・・・
伝搬研究者＝問題が発生すると「出番が来た」と喜ぶ因果な職業



ワイヤレス情報伝送の物理限界

「伝搬はシステムを制す」

「無線システムの進化の歴史は
伝搬問題との戦いの歴史」

「でも、戦える土俵の中での戦いである
では、戦えない土俵とは？」



Shannon の通信路容量定理

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

C (bps): 誤りなく伝送可能なビットレートの上限

W (Hz): 伝送信号の帯域幅

P_S : 信号の平均電力

P_N : 雑音の平均電力



Shannon の通信路容量定理は 情報伝送の物理限界を与えている

この式が満たされるためには

- ・無限の時間が必要
(統計多重効果)

→ 時間的変動がない環境

ワイヤレス通信では時間的変動は常に存在する
実際には物理限界はさらに狭まる
それは、何によって決まるか？



物理限界劇場への3人の登場人物

システム側から

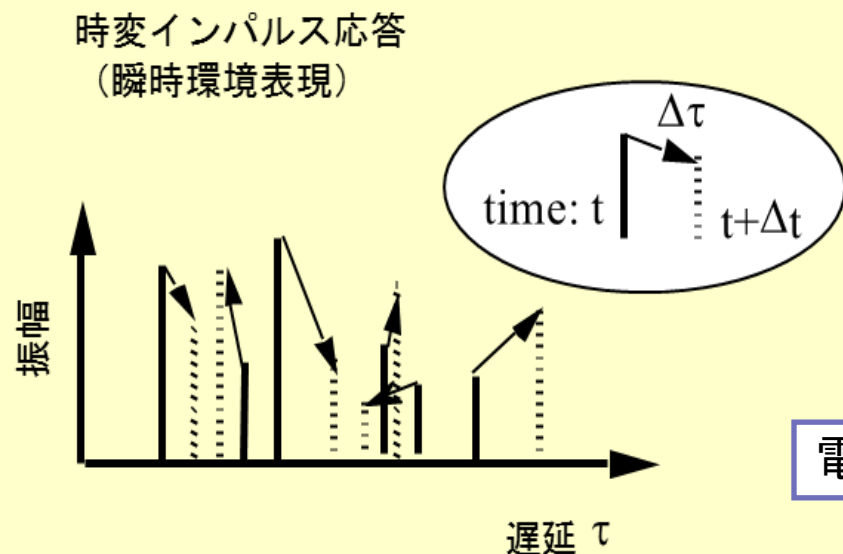
- ・シンボル周期 T_s

電波伝搬側から

- ・最大ドップラー周波数 f_D
- ・遅延スプレッド σ_τ

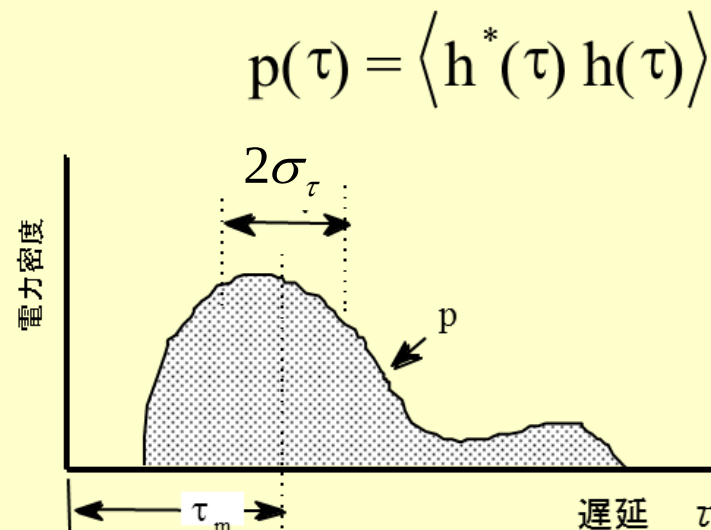
マルチパスによる到来時間のばらつきを表す環境表現

【瞬時環境の表現】 インパルス応答



電力平均

【統計的環境の表現】 遅延プロファイル 遅延スプレッド: σ_τ

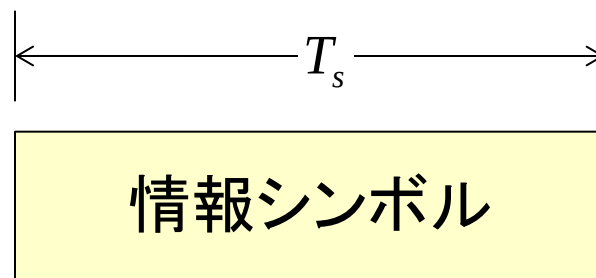


平均遅延
遅延スプレッド:
広がりの標準偏差



情報伝送がうまくゆくための条件： 遅延広がりに対して

送信信号



情報伝送の基本単位

$$B \approx 1/T_s$$

受信信号

先行波

情報シンボル

マルチパス
(先行波
+ 遅延波)

遅延波 +

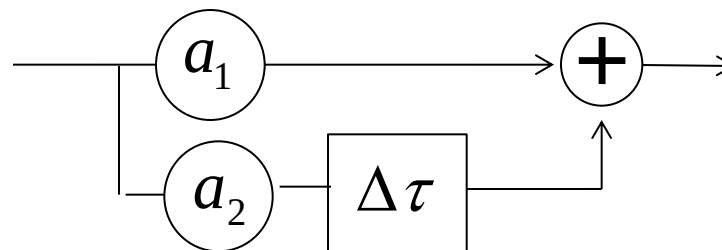
情報シンボル

遅延差 $\Delta\tau$

$\Delta\tau / T_s$
が1/100程度
から、影響が現れ、
0.1以上になると、
そのままでは
通信できない
(符号間干渉誤り)



符号間干渉時の アイパターンと サンプルタイミング



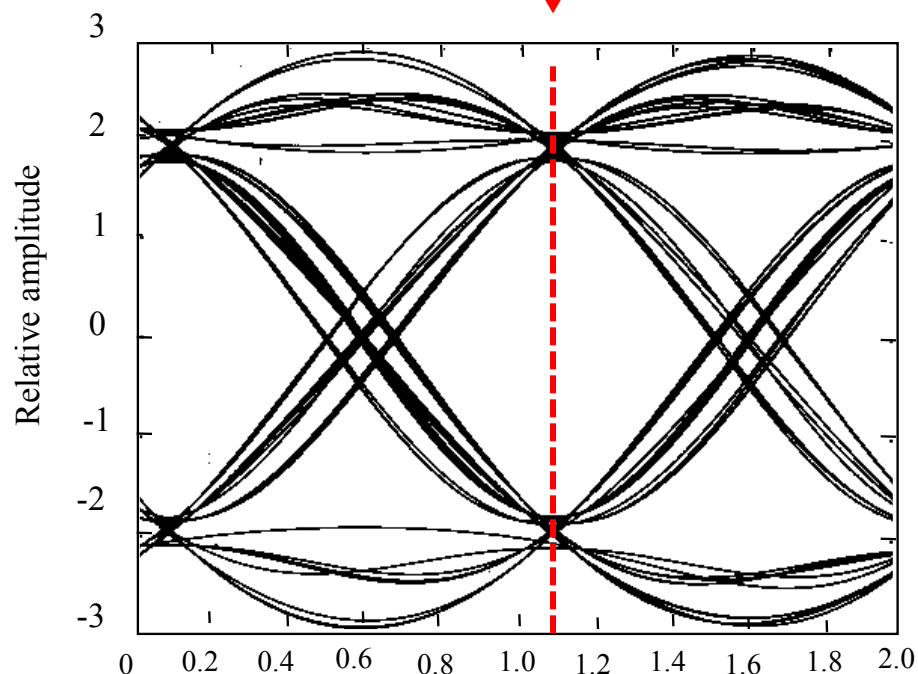
パラメータ値設定

$$|a_1| = |a_2| = 1$$

$$\Delta\tau = 0.2T_s$$

$$\Delta\phi = 0$$

サンプルタイ
ミングが情報の
中心と一致

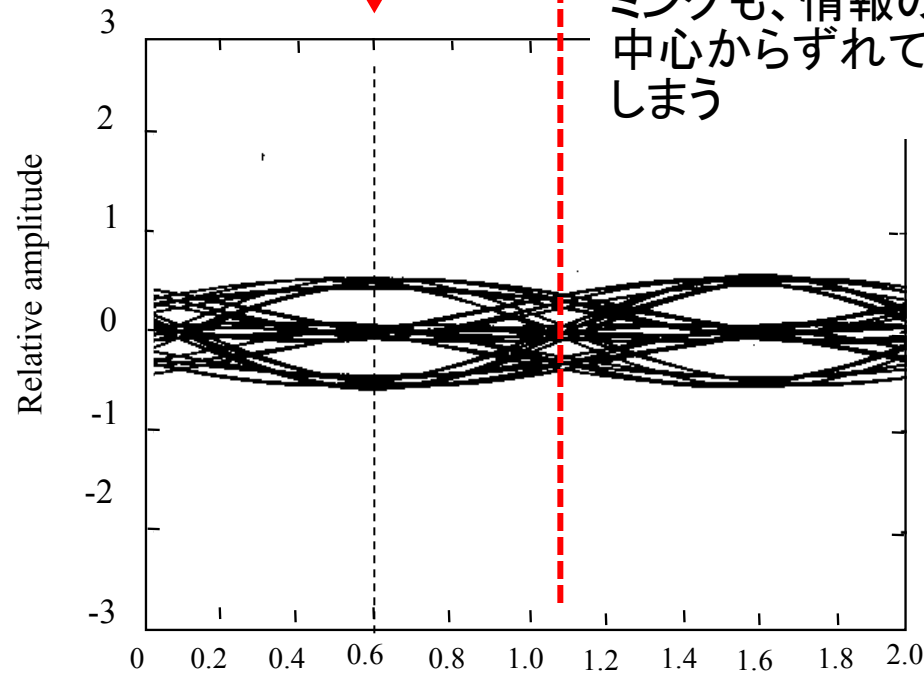


Time scale normalized by symbol period



$$\Delta\phi = \pi$$

信号の形が崩れ
サンプルタイ
ミングも、情報の
中心からずれて
しまう



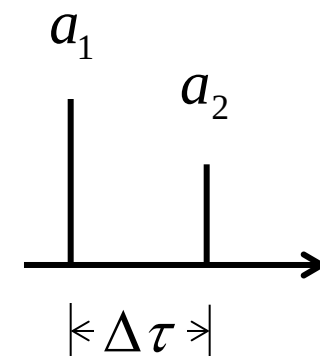
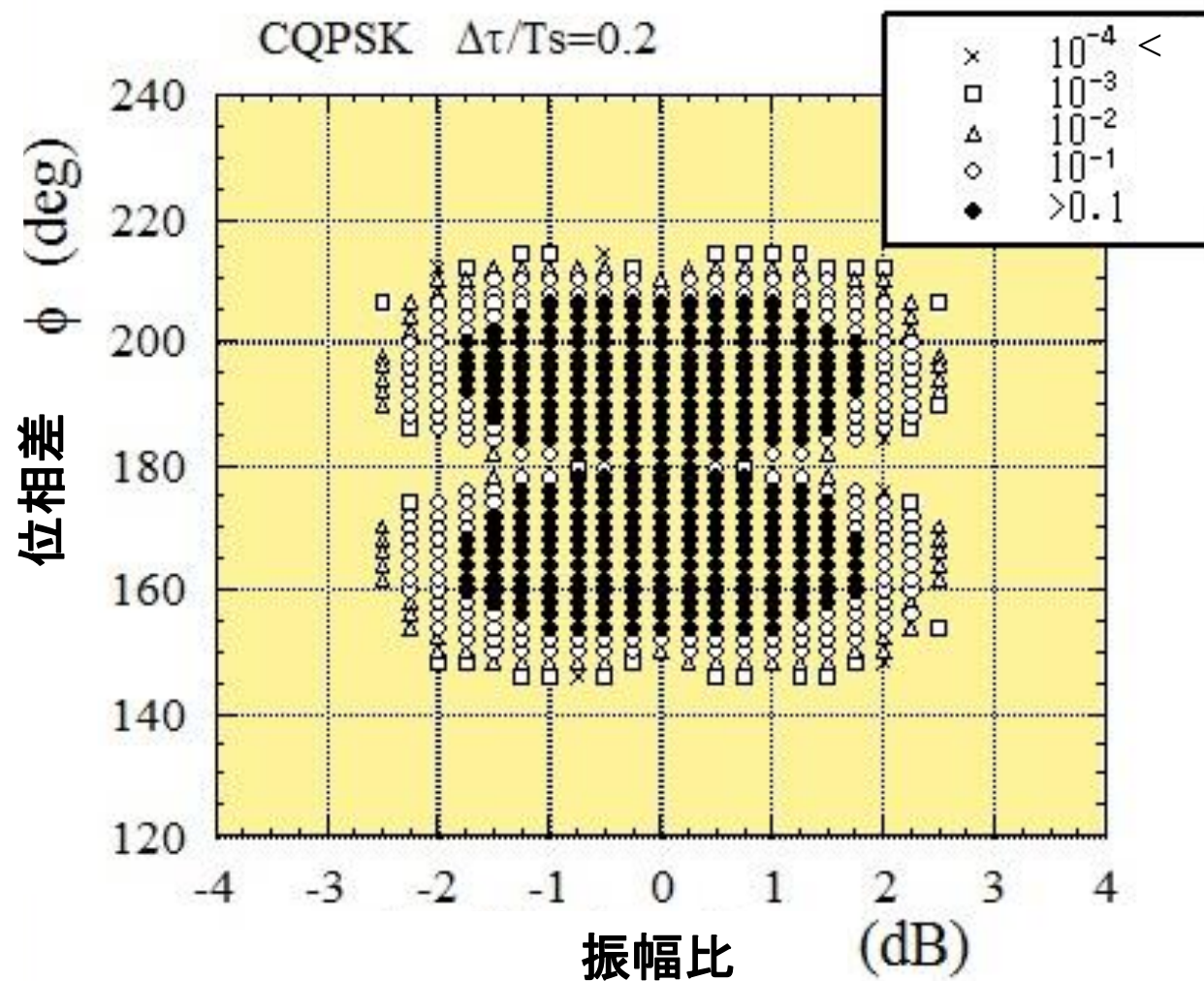
Time scale normalized by symbol period

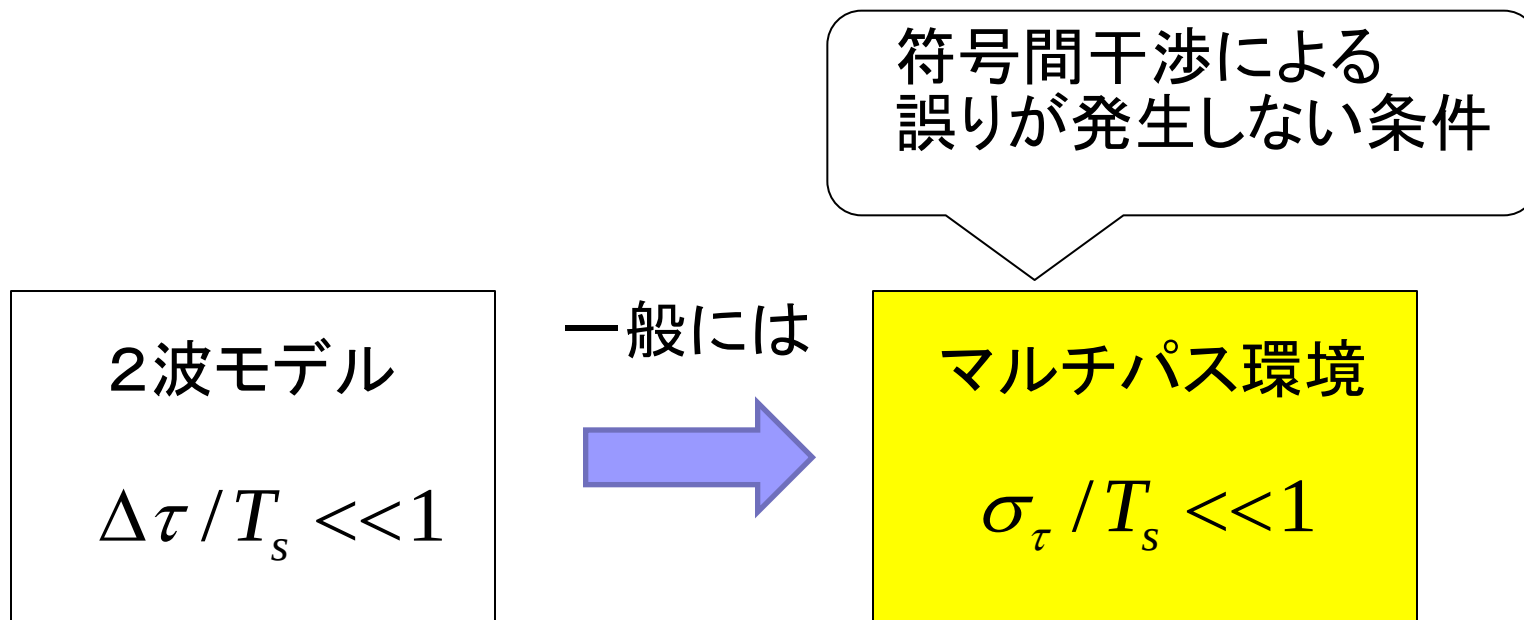




2波モデルの BERフロア特性

CQPSK $\Delta\tau = 0.2 T_s$





これは、究極の物理限界か？ **No**

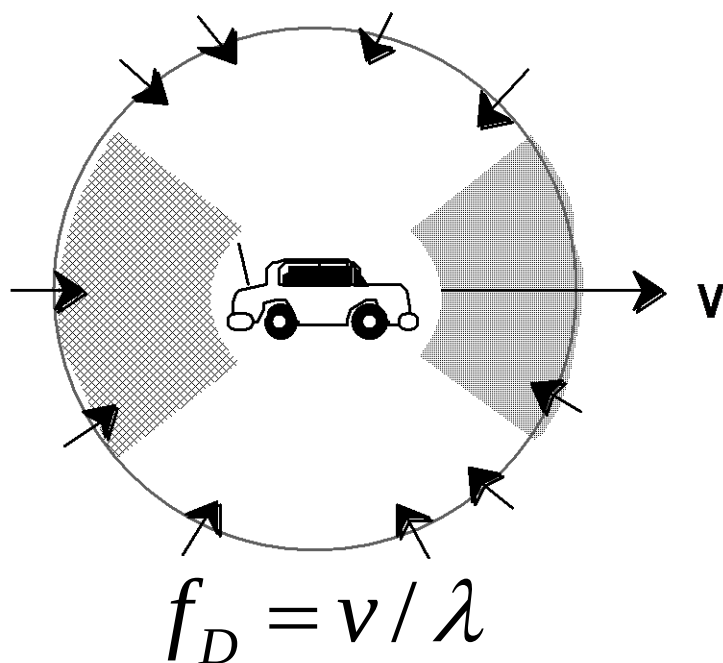
遅延広がりより、十分長い時間をかけた処理によって克服できる

- ・等化器 Equalizer (受信側で、信号処理時間を十分長くする仕組み)
- ・OFDM (送信側で、シンボル長を実効的に長くする仕組み)

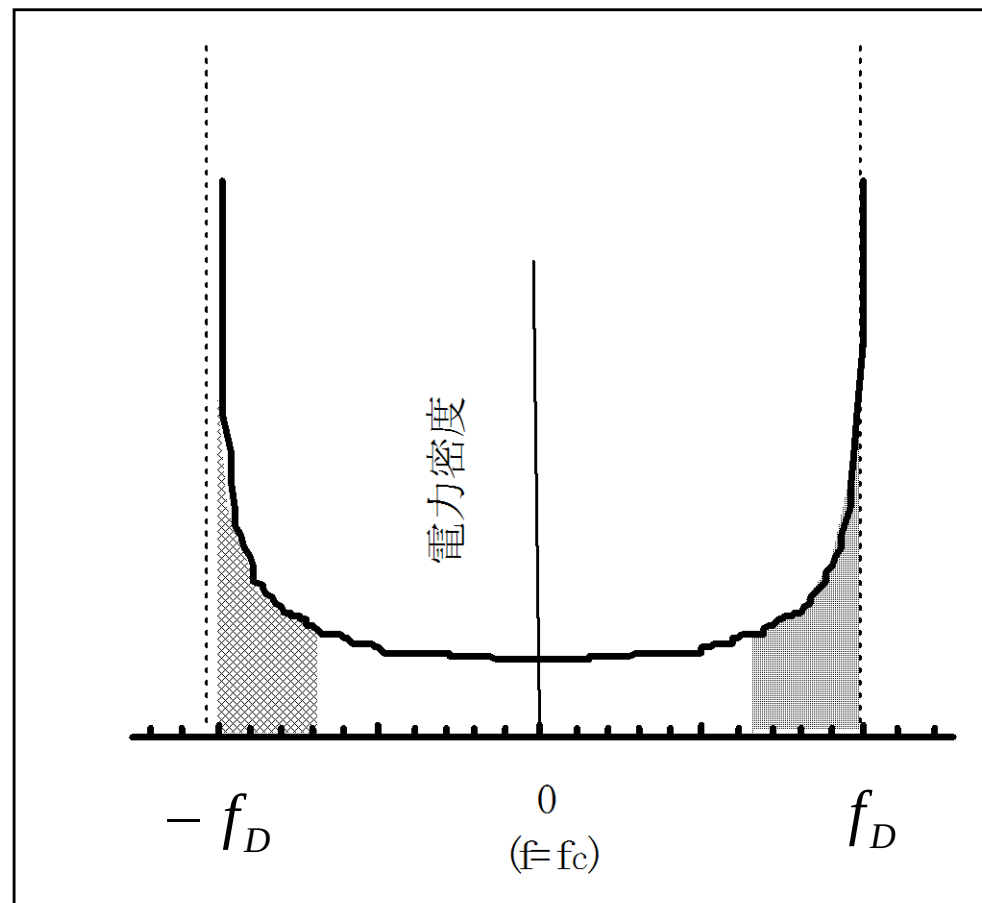
伝搬環境の時間的变化 (フェージング)

【電波の到来角度特性】

【時間変動のパワースペクトル】



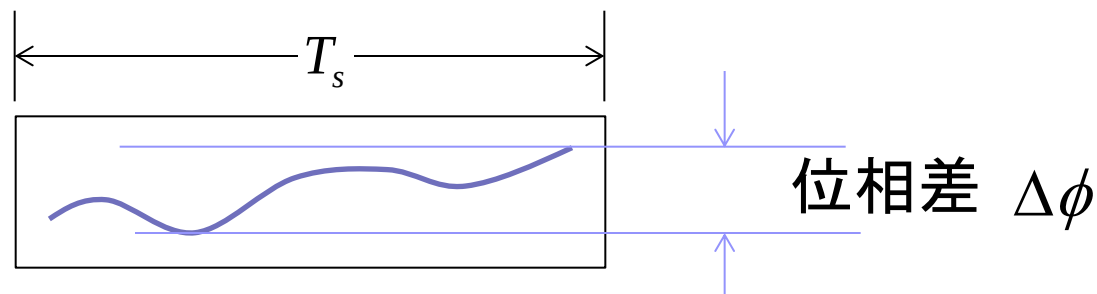
最大ドップラー周波数: f_D





情報伝送がうまくゆくための条件： ドップラー広がりに対して

時間変動
(特に位相の)

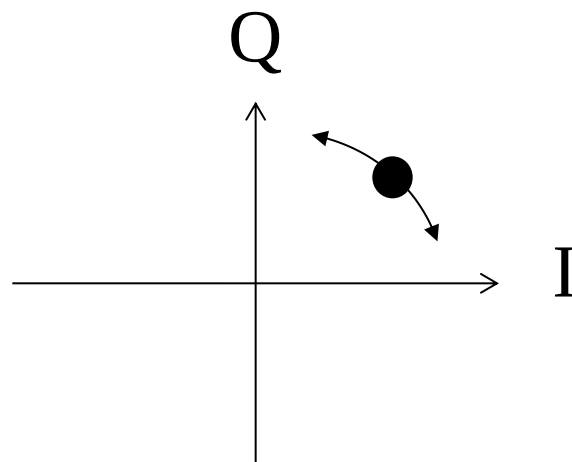


$$\Delta\phi \ll 2\pi$$



$$f_D T_s \ll 1$$

位相変動による誤りが
発生しないための条件



シンボル周期
 T_s の間は、
時間的に安定で
あってほしい

これは、究極の物理限界か？

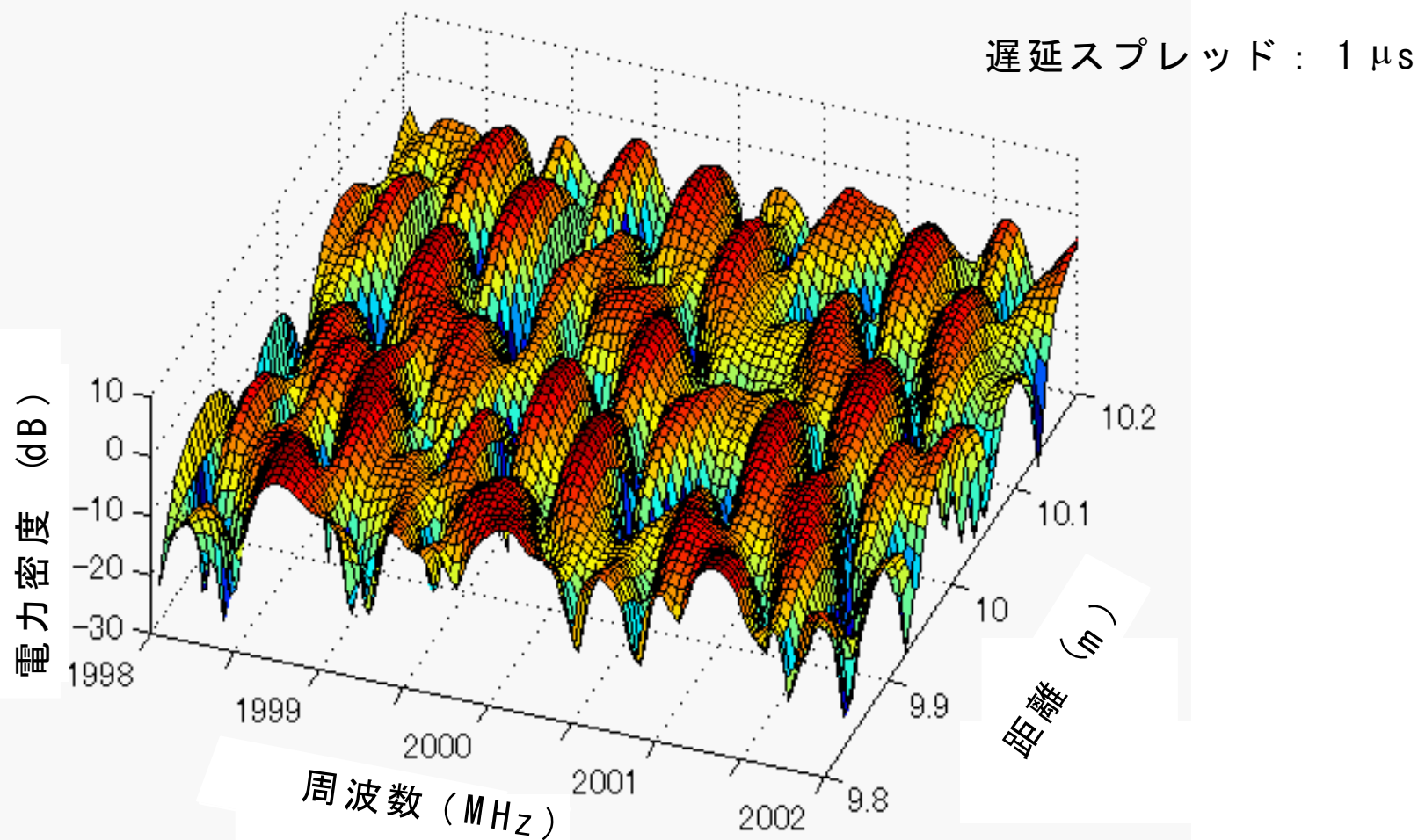
No



では、位相変動に対する誤り対策は？

例えば、シンボル周期を短くして伝送する
(広帯域化、スペクトル拡散など)

遅延スプレッドとドップラースプレッド(ダブルスプレッド)





遅延のばらつきによる符号間干渉誤りが発生しない条件

$$\sigma_{\tau} / T_s \ll 1$$

ドップラーシフトの値のばらつき(位相変化のばらつき)による誤りが発生しない条件

$$f_D T_s \ll 1$$

これらは何も対策をしないということになる、という意味で、まだ、限界ではない。二つを一つの式で結ぶと、

$$\sigma_{\tau} \ll T_s \ll \frac{1}{f_D}$$

真の物理限界は、**電波伝搬環境のみで決まり**
左右の式をつないで得られる

$$f_D \sigma_{\tau} \ll 1$$



情報伝送の電波伝搬特性依存性

$$\sigma_{\tau} / T_s \ll 1$$

満足

不満足

$$f_D T_s \ll 1$$

満足

未対策で
情報伝送可

周波数選択性フェージング
符号間干渉誤り発生
対策: 等化器、OFDM
(信号の狭帯域化)

不満足

ファーストフェージング
位相変動誤り発生
対策: スペクトル拡散等
(信号の広帯域化?)

$$f_D \sigma_{\tau} \ll 1 \quad \text{不満足領域}$$

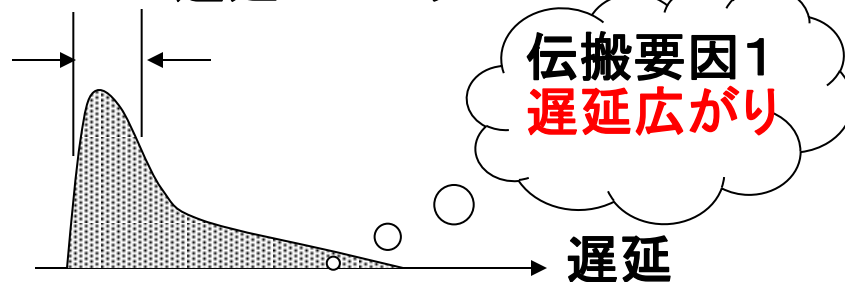
(良好な通信不能?
対策: お手上げ?
空間信号処理(MIMO)
など、別次元からの
アプローチ??)



OFDMは電波伝搬を克服したか？

OFDM信号と電波伝搬パラメータとの関係

遅延スプレッド



OFDMの信号設計条件

$$\sigma_{\tau} \ll T_{GI} < T_{OFDM} \ll \frac{1}{f_D}$$



フェージング
(振幅・位相変動)

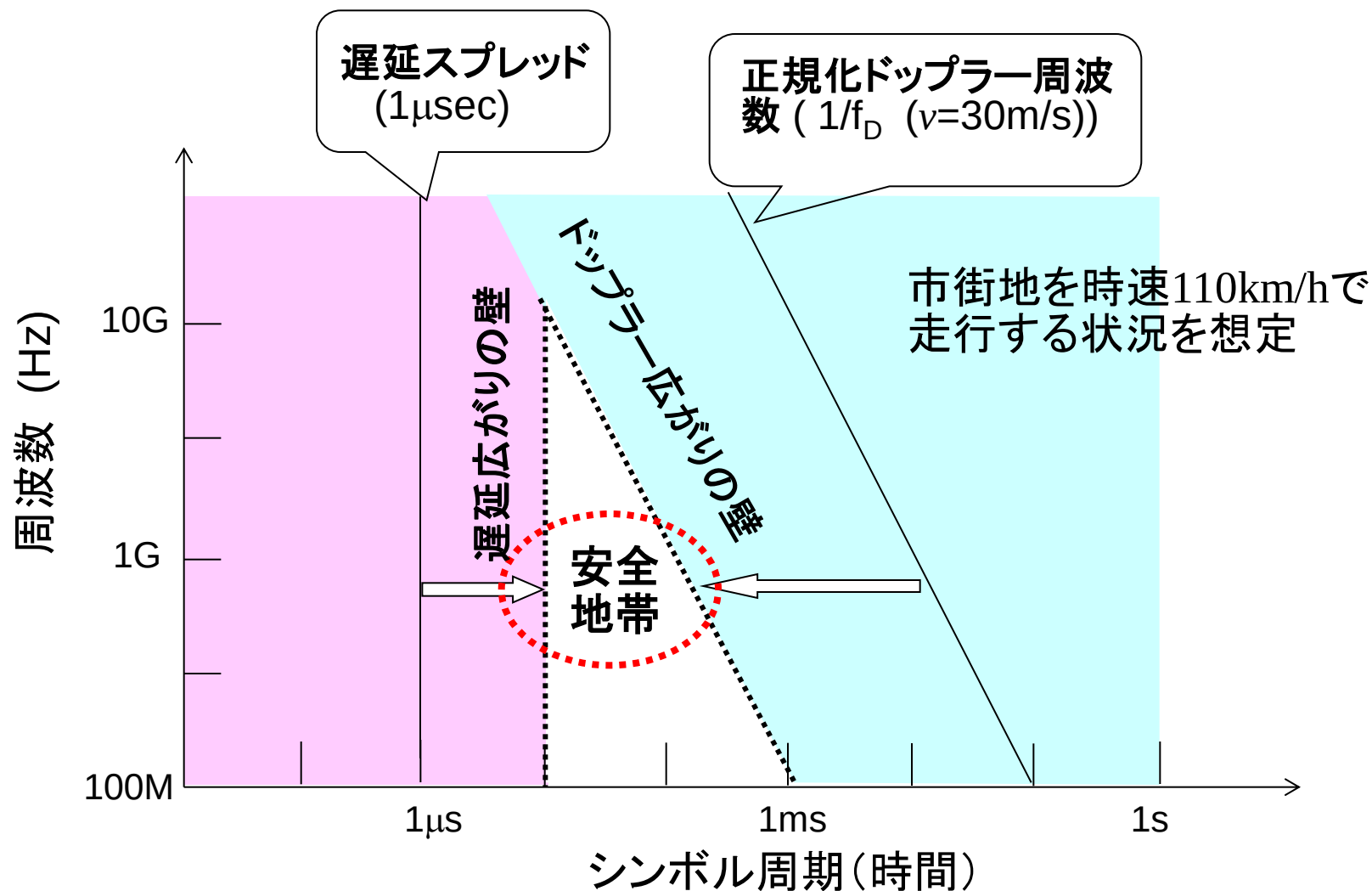
$(1/100)T_f$ 以下が望ましい

$$T_f (\approx 1/f_D)$$

伝搬要因2
ドップラ
広がり



OFDM伝送における伝搬制約条件 (遅延広がりの壁とドップラー広がりの壁の狭間)





OFDM恐るべし

$$\sigma_{\tau} \ll \underbrace{T_{\text{OFDM}}}_{\downarrow} \ll \frac{1}{f_D}$$

この条件が
満たされれば
(安全地帯の
中であれば)

$$NT_0$$

$$B \approx 1/T_0$$

$$N/B$$

$$\underbrace{B\sigma_{\tau} \ll N}_{\downarrow} \ll \frac{B}{f_D}$$

サブキャリア数Nを調
整することで
帯域の制限なく、大容
量の伝送ができる

$$N \propto B$$



OFDMは電波伝搬(マルチパスフェージング)を克服したか？

Yes $f_D \sigma_\tau \ll 1$ の条件のもとで、
いくらでも広帯域な情報伝送ができる

No $f_D \sigma_\tau \ll 1$
の物理限界を超えることはできていない

超過酷マルチパス環境の例

$$f_D \sigma_\tau = 0.001$$

例えば、

$$f_D = 1\text{kHz}$$

×

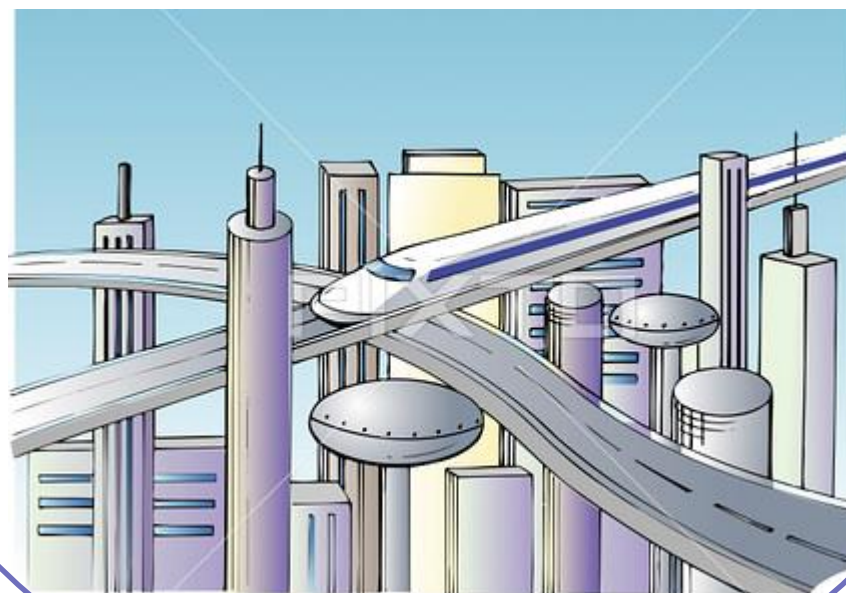
$$\sigma_\tau = 1\mu\text{s}$$



$f = 10\text{ GHz}$, 時速 100km

$f = 5\text{GHz}$, 時速 100km の車車間

$f = 2\text{ GHz}$, 時速 500km



pixta.jp - 7816386

(インターネット画像より)

現実には、この辺りに

限界があるのではないだろうか？



伝送の物理限界は
指向性アンテナの利用や
アレーアンテナの利用
によって緩和できる

例えば、

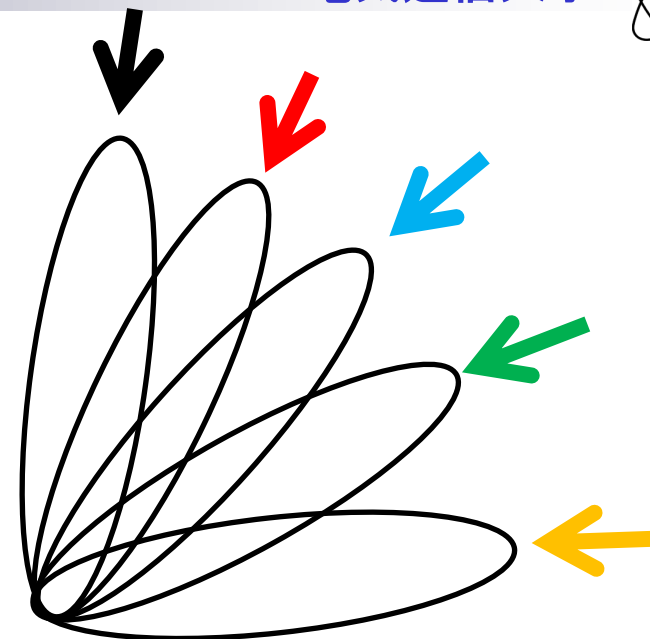
マルチビームにより
ドップラー広がりの
小さい信号に分割
される



伝搬制約条件が
緩和される

$$f_D \Rightarrow f_D / N$$

移動



アレーアンテナ

マルチビーム形成





指向性アンテナやアレーアンテナは、
その物理限界を緩和することができる



しかし、そこにもいずれ限界が来る



ドップラー・遅延・角度のトリプルスプレッド

VS

時間・周波数・空間の3領域での融合信号処理



この3領域に亘る限界条件は？



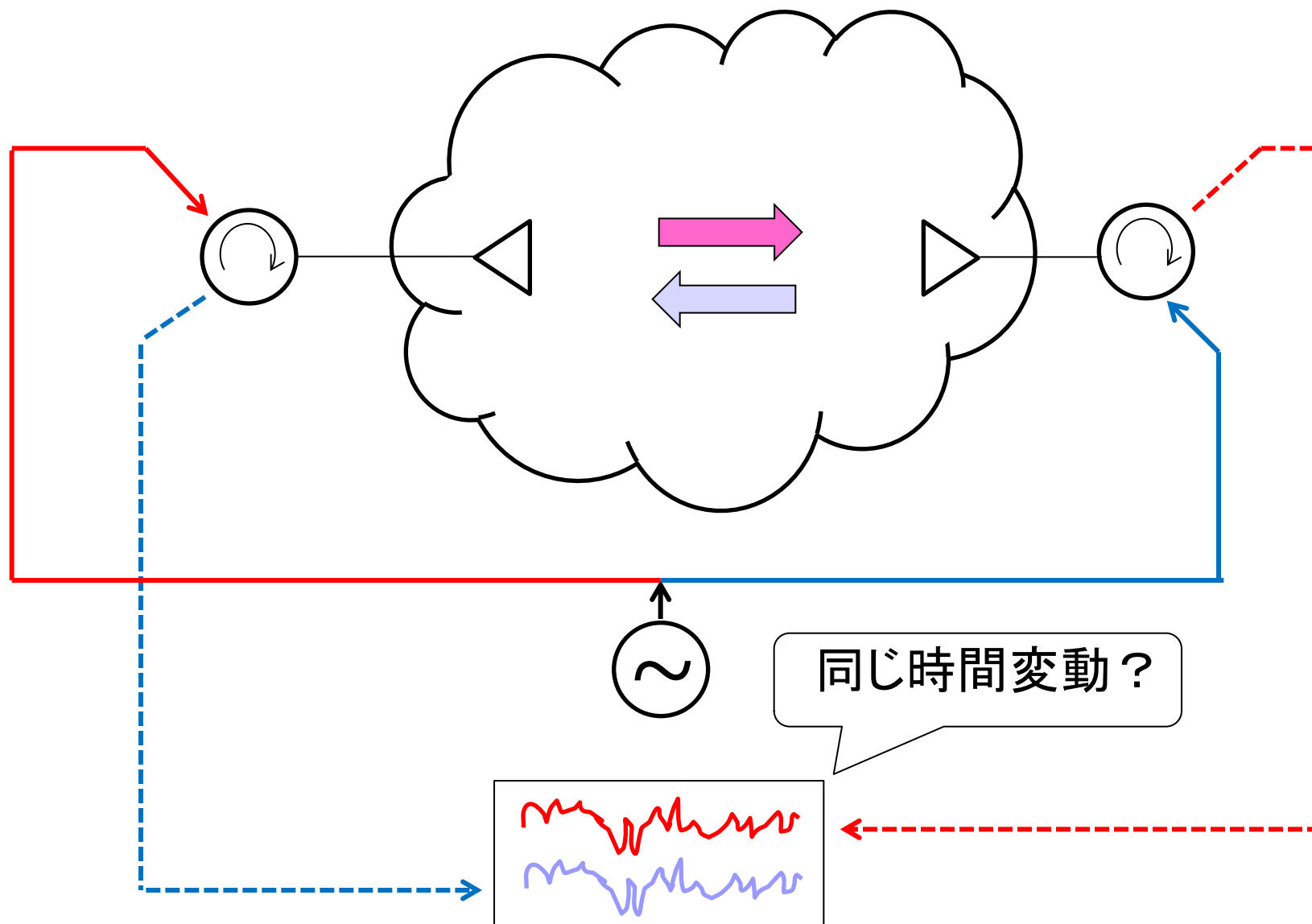
(脇道に逸れるが・・・)

通信路の可逆性

ここにも $f_D \sigma_\tau \ll 1$

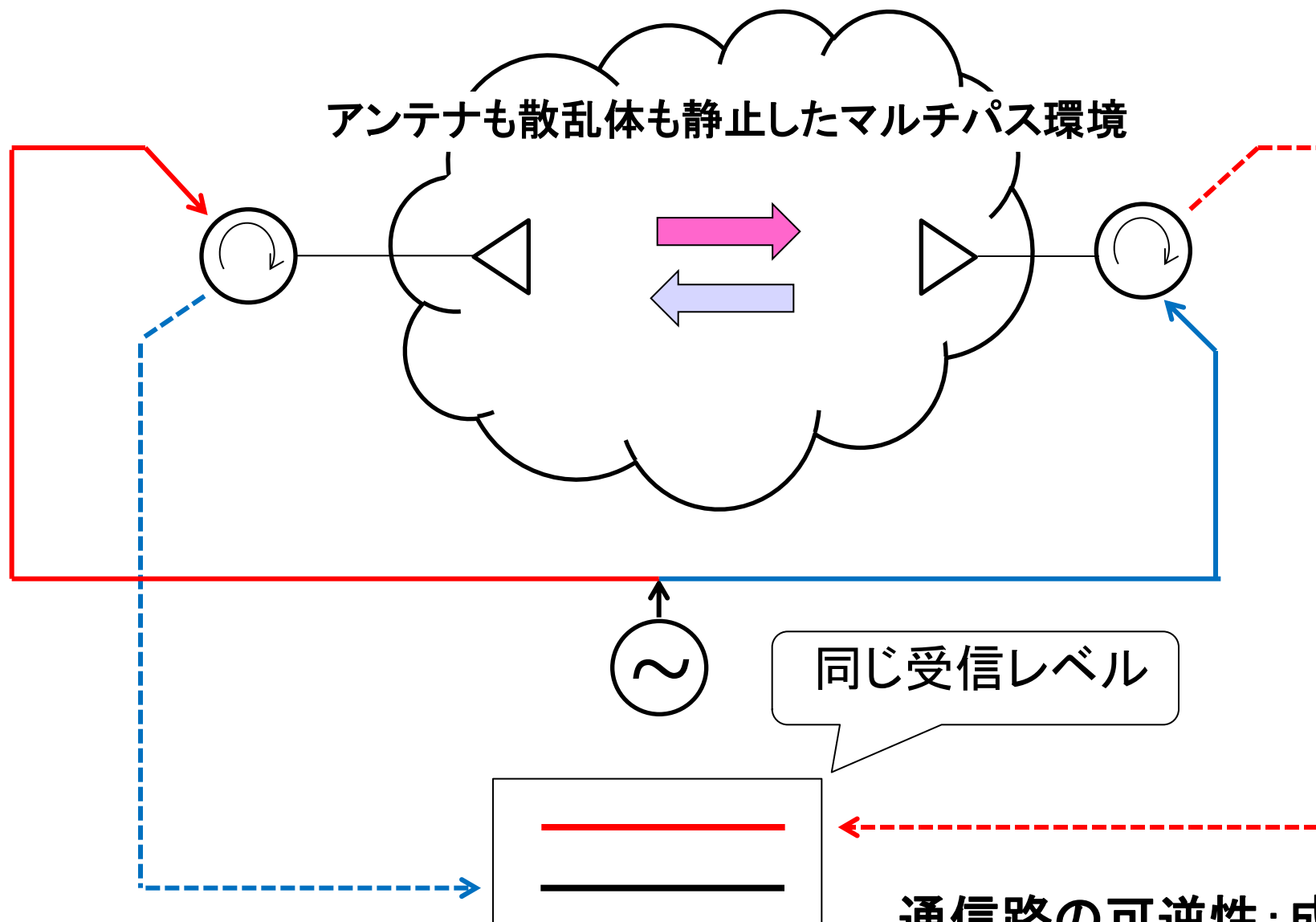


マルチパスフェージング環境



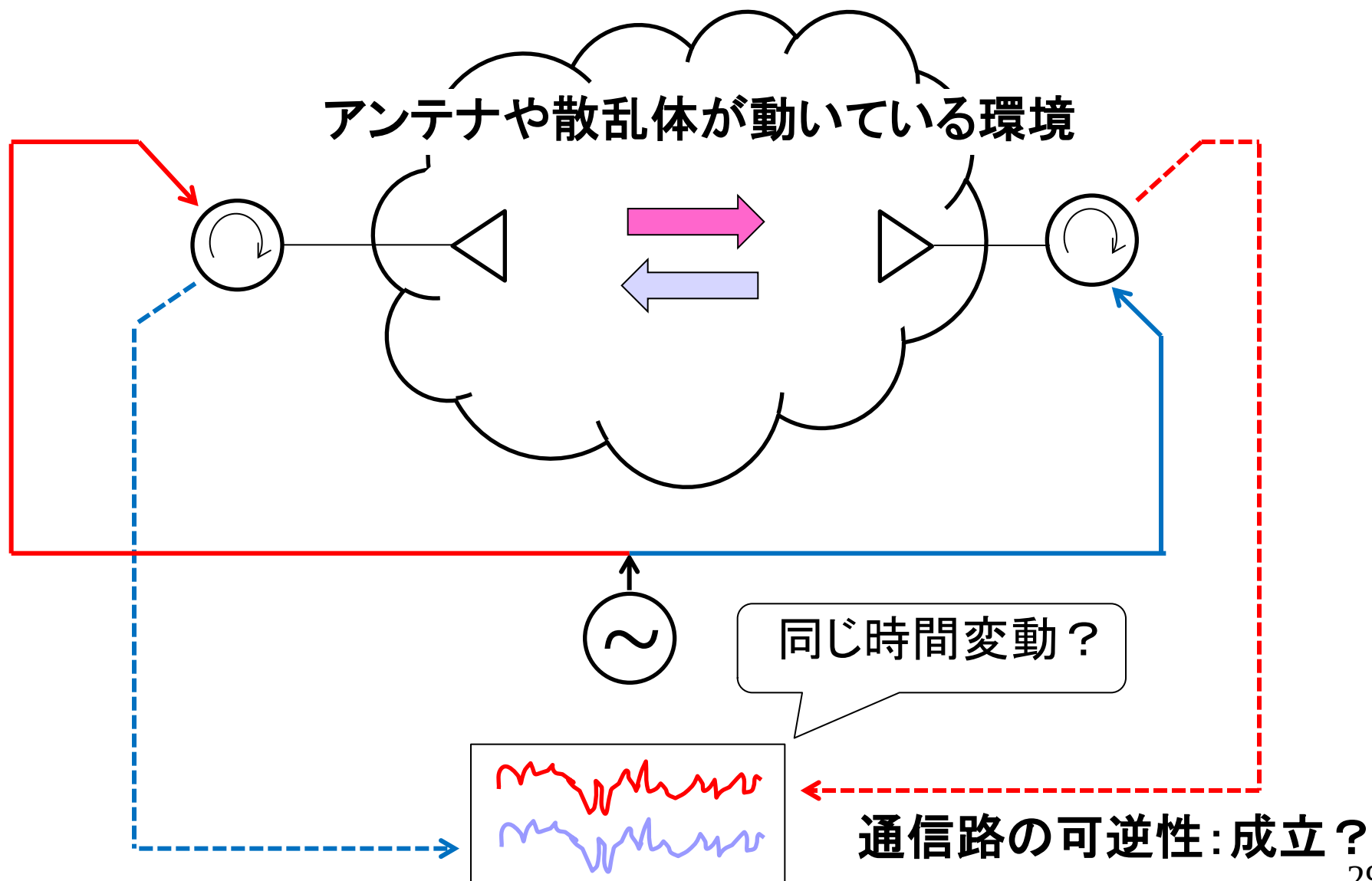


マルチパスフェージング環境

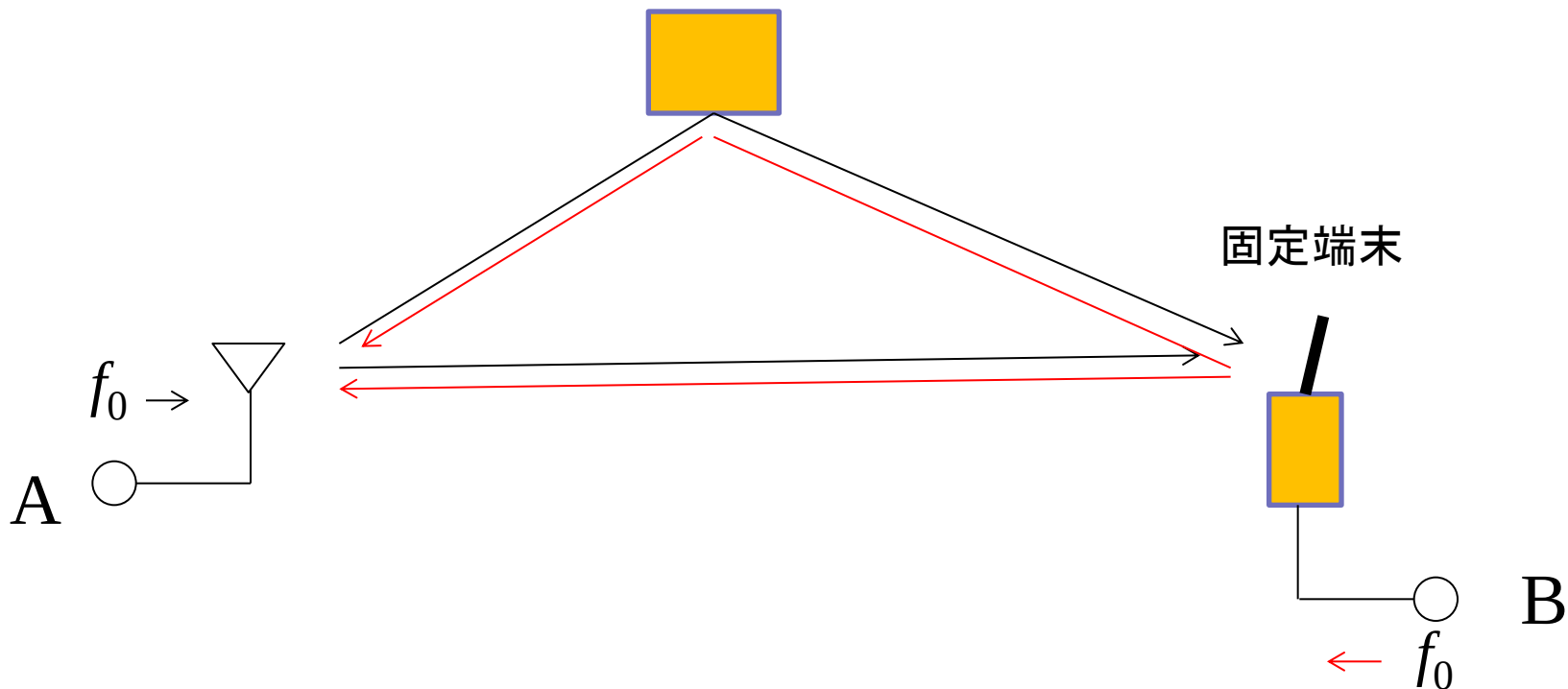




マルチパスフェージング環境



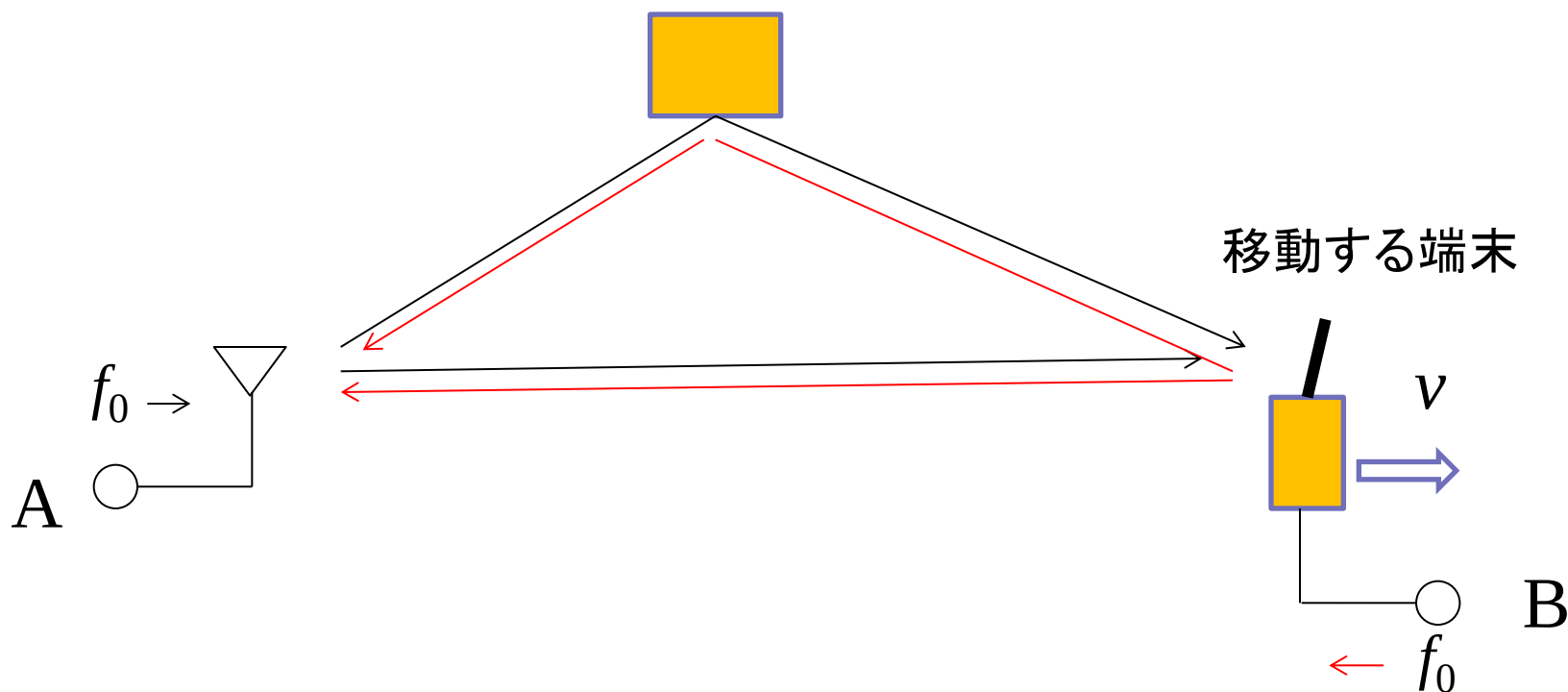
固定端末間の通信路の可逆性



$A \rightarrow B$, $B \rightarrow A$: 同じ? 違う?

これは、可逆であることが証明されている

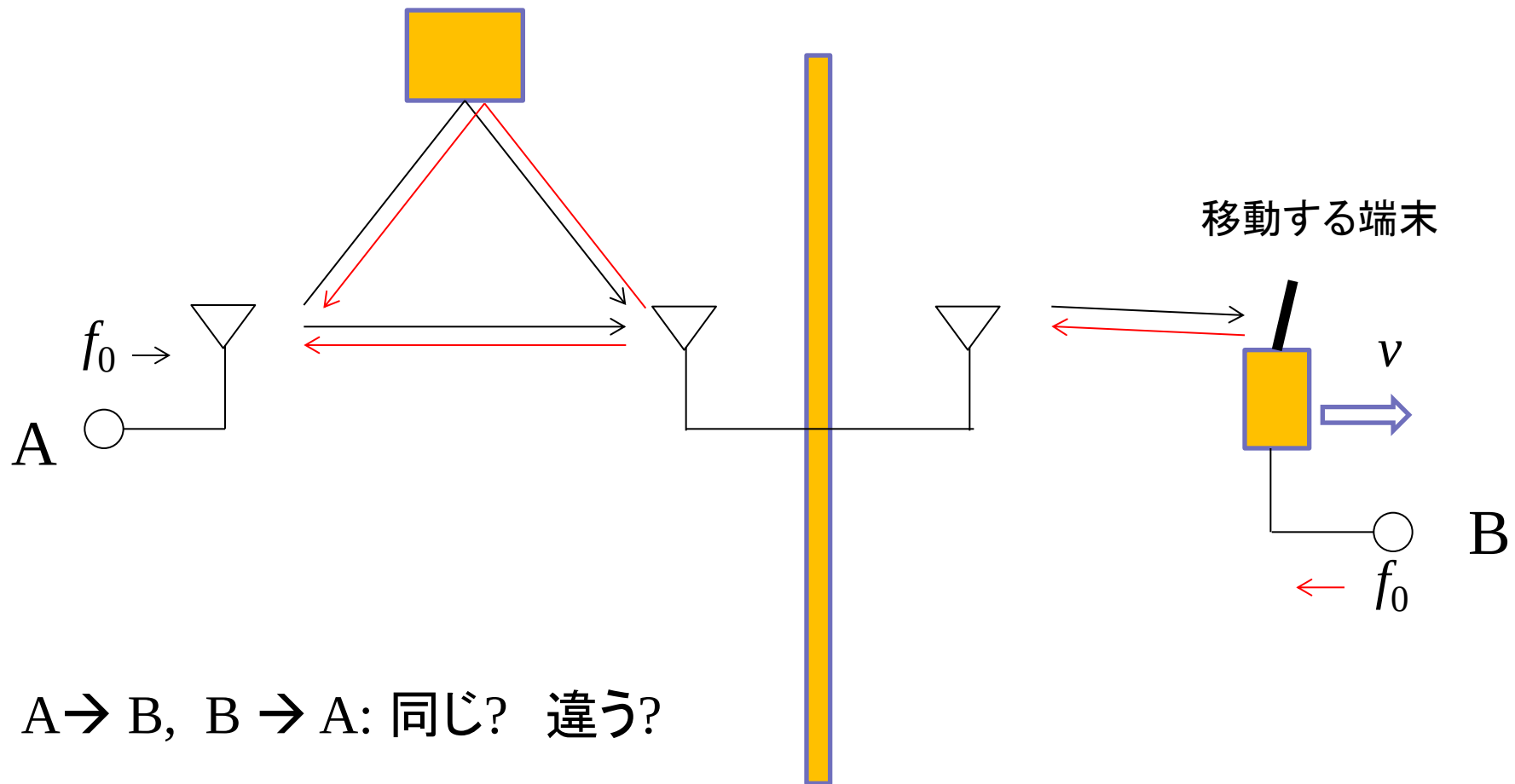
端末が動いている場合の通信路の可逆性は？



$A \rightarrow B$, $B \rightarrow A$: 同じ? 違う?



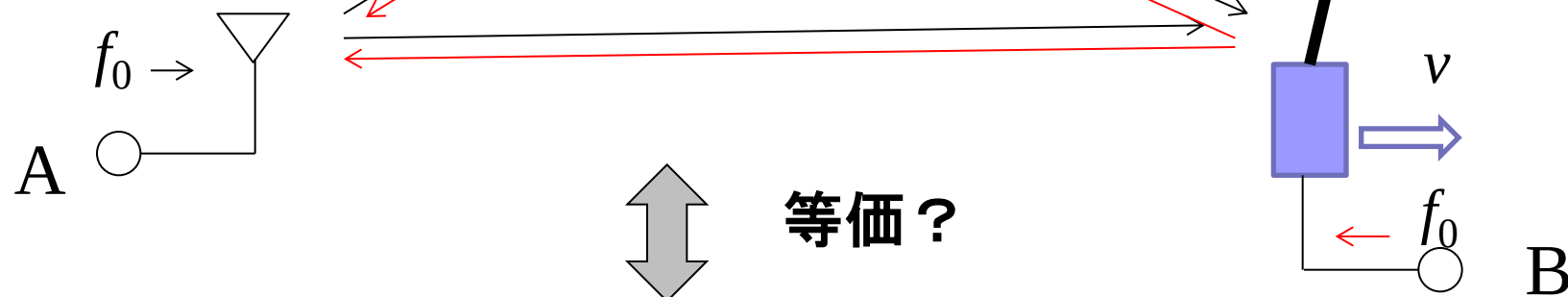
この構成で、通信路の可逆性は？



左側部分で、遅延差が大きいとき、可逆性は明らかに破綻している

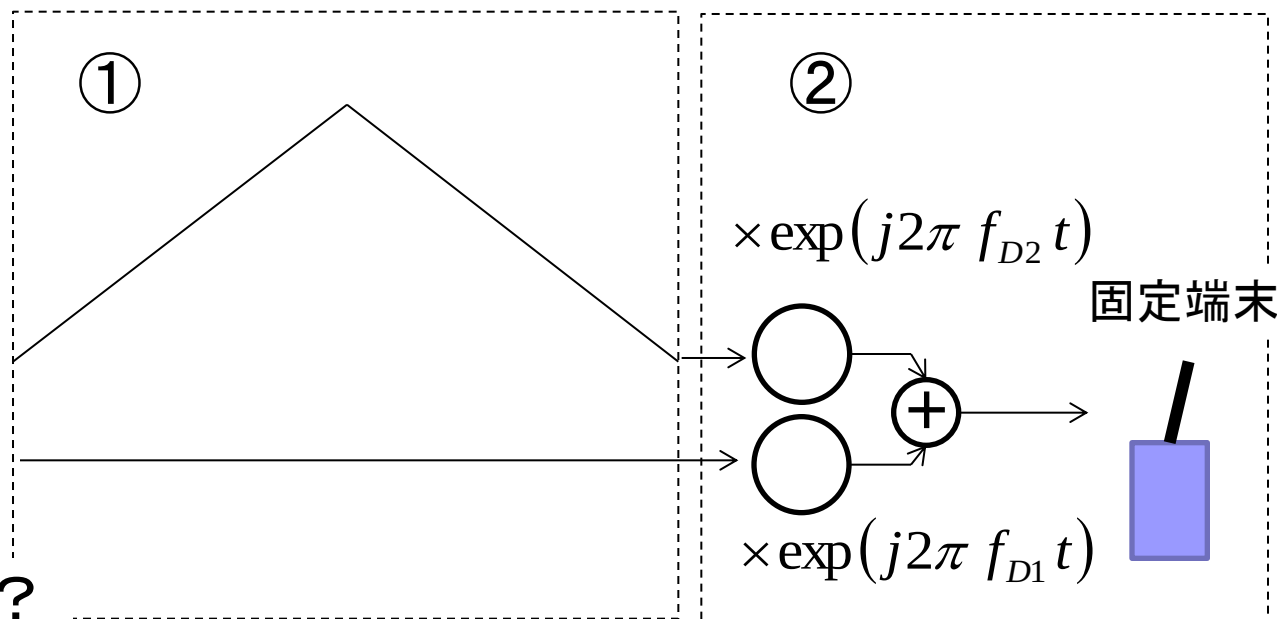


前スライドとの
本質的な違いは
有る?ない?



A→B の
等価回路?

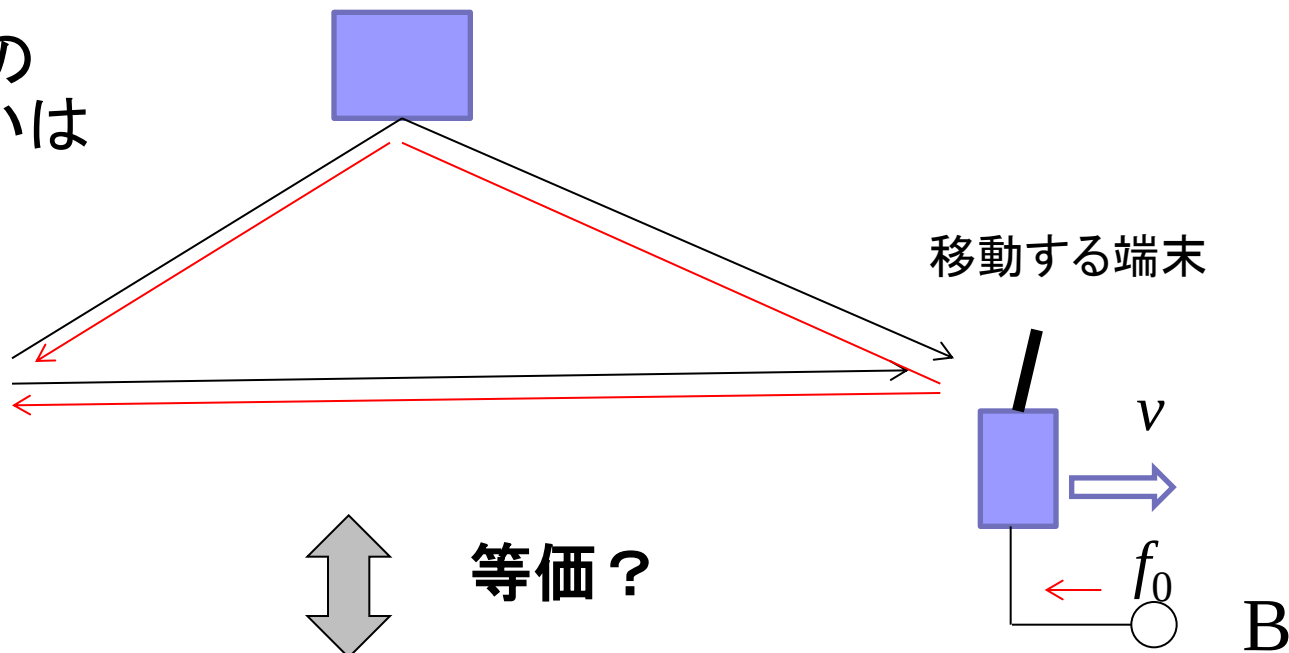
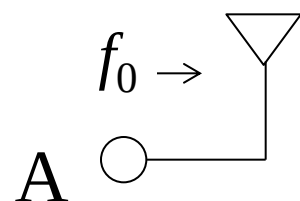
②は可逆
①は非可逆
全体として
可逆性破綻



と言ってよいか?

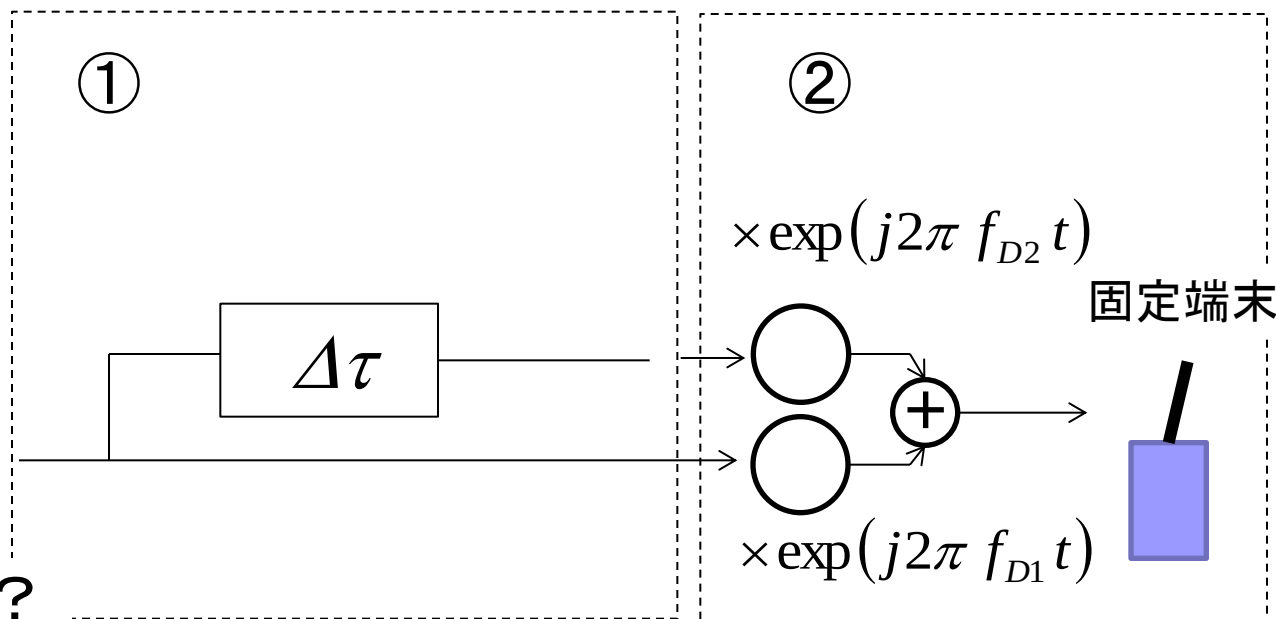


前スライドとの
本質的な違いは
有る?ない?



A→B の
等価回路?

②は可逆
①は非可逆
全体として
可逆性破綻



と言ってよいか?



チャネル表現： 等価低域通過系での表現

$A \rightarrow B$

$$h(\tau, t) \approx a_1 \delta(\tau - \tau_1) \exp(j2\pi f_{D1} t) + a_2 \delta(\tau - \tau_2) \exp(j2\pi f_{D2} t)$$

$A \leftarrow B$

$$h(\tau, t) \approx a_1 \delta(\tau - \tau_1) \exp\{j2\pi f_{D1}(t - \tau_1)\} + a_2 \delta(\tau - \tau_2) \exp\{j2\pi f_{D2}(t - \tau_2)\}$$

両式が近似的に同じと見なせる条件、すなわち通信路の可逆性が満たされる条件は

$$f_D \sigma_\tau \ll 1$$

この式は、情報伝送の物理限界で述べた条件式と奇しくも同じ形



情報伝送の物理限界のまとめ

電波伝搬は
システムを制す

- システムパラメータに依存しない
＝伝搬パラメータのみによって決まる
(無指向性アンテナにおける)その限界条件は

$$f_D \sigma_\tau \ll 1$$

- 指向性アンテナやアレーアンテナの利用により、
この限界は緩和できる

ドップラー・遅延・角度のトリプルस्प्रेッド

VS

時間・周波数・空間の3領域での融合信号処理

アンテナ・伝搬は
システムを制す

この3領域に亘る限界条件は？



伝送路(送受)の可逆性に関する結論

電波伝搬環境において、
可逆性は、動くものと
厳密には成り立たなくなる

近似的に、成り立つと言える条件は

$$f_D \sigma_\tau \ll 1$$

電気通信大学

菅平宇宙電波観測所

星のささやき

宇宙からのメッセージ

Thank you very much for your kind attention

