実験と理論

Experiment and Theory

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 教授
唐沢 好男
Yoshio Karasawa

要　旨

以前に「伝搬モデルの作り方」という題で、(社)電子情報通信学会の通信ソサイエティマガジンに解説論文を書きました[8]。ワイヤレス伝送方式の主役になりつつあるOFDMを取りあげ、そのガードインターバルを超える遅延の広がりがある、極めて過酷なマルチパス環境での伝送特性劣化の計算法「OFDM用等価伝送路モデル」を題材にして、そこに若い人に向けた私の研究論を込めました。これを含んで「等価伝送路モデル」の論文や解説記事を多く書いてきましたが、本稿は、これらの記事ではあまり触れていなかった始まりの部分に焦点をあてています。映画の「スター・ウォーズ」のシリーズが、エピソードIVから始まり、一段落ついたところで物語の始まり、エピソードIに戻ったように、これは、私が編み出した「等価伝送路モデル」シリーズの原点:エピソードIです。先人の研究に触発され、コンピュータシミュレーション実験から生まれた一つの理論モデルができあがっていくさまを示し、実験の役割に焦点をあてて述べたいと思います。

One of my articles entitled "How to make a propagation model" has been published as a tutorial paper in the Communication Society Magazine of IEICE[8]. In this paper, I have introduced the "equivalent transmission path (ETP) model" that is based on OFDM (Orthogonal Frequency division multiplexing), which is fast becoming a key technology in wireless transmission systems. This model is a propagation model that can statistically predict the signal degradation in the OFDM transmission scheme in which the delay profile exceeds the guard interval. In the paper, I also have introduced my research policy for encouraging young researchers and engineers to carry out their researches. Although I have written many papers and tutorial articles on the "ETP model," this is the only article in which I have focused on the first stage of my history on the development of the ETP model. I would like to describe the role of an experiment with showing how I was touched by researches of pioneering predecessors and how to be done one theoretical model through computer simulation experiments.

1 実験・理論・実験

2008年のノーベル賞の自然科学部門は日本人の受賞ラッシュになりました。その中に、「素粒子のCP対象性の破れ」を説明する理論を構築した小林　誠・益川　俊英両博士の研究がありました。1964年に素粒子のCP対象性が破れる例が実験で示され、両氏はこれを説明する理論を打ちたて1973に論文を発表しました。この理論が正しければおきるとされていた「B中間子」という素粒子での破れの検証が大変困難で、2001年の大規模実験での検出まで長い年月がかかりました。見事それが実証され、冒頭の栄誉となったのです(ここまでの記述は、私が研究内容を理解して記述したものではなく、報道記事の受け売りになっています)。

この話からもわかるように、実験と理論は相互に啓発し、真理の解明という大木を育てているさまが見えてきます。ともすると、実験は、理論を実証するためのもの、すなわち理論の脇役と考えられがちですが、「最初は実験にあり」と考えると、理論と実験が決して主従の関係ではないと理解できます。哲学者フランシス・ベーコン(1561-1626)は、実験について「実験は理論の種みたいなものを見つけるために行われる」という考え方を示しました[1]。実験は何のためにするのか、と問われたとき、このベーコンの考え方を大事にしたいですね。

皆さんの周りにも、ことの大きい小さいはともかく、実験から生み出された理論、あるいは基本原理が沢山あることと思います。コンピュータシミュレーションもコンピュータの中で行う実験ですから、実験です。私の研究の中から、ベーコンの考えに近い体験例を紹介します。取りあげる現象は「サイクルスリップ」、理論モデルは「等価伝送路モデル」です。

2 サイクルスリップ事始

1990年代初め、私は当時所属していた会社(KDD、現KDDI)で衛星通信の電波伝搬の研究をしていました。対象は降雨による電波の減衰やシンチレーション(電離圏や対流圏で発生する信号強度のふらつき現象)などです。いずれも狭帯域信号対象なので、電波伝搬と通信方式の研究分野はSN比を

橋渡しに明確に分離されていました。学会の発表で伝搬現象によるレベル変動の話をビット誤り率（BER）に結びつけて話すのは、何か本質を外しているという雰囲気でした。衛星通信の研究が一段落してきたので、新天地である地上系の移動通信の研究をしようと思いました（会社も移動通信のサービス展開を始めようとしていました）。この分野は、我々にとっては目新しいものばかりですが、研究や技術開発では、国内外ですでに高いレベルに達しつつありました。

そこで、まず、広帯域信号のマルチパス遅延による影響を知りたいと思い、当時、卒業研究の指導をしていた学生（黒田知紀君：現JAXA）と、**図1**のような、遅延差のある2波で発生する符号間干渉誤りを調べるというところからはじめました。

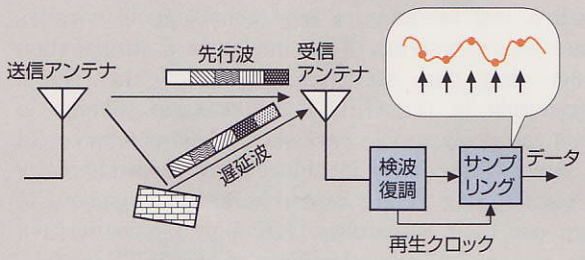


図1　遅延差のある2波が入射した場合の受信機の反応は？

シミュレーションのプログラミング段階で、学生から、「復調後のデータサンプリングをどこに入れればよいか」、と質問を受けました。そういう誰でもやっている原理的なことは、過去の論文を調べればすぐわかると思い、そう指示しました。しかし論文をいくら調べても、「サンプリングは最適位置で行った」、のような表現しか出てきません。大部分の論文では、先行波と遅延波の中間位置で行っているようでした。計算機シミュレーションでは、送信信号のカンニングができるので、たぶんそうしているのだと思いました。でも、実際の受信機はそういうことがわからないのに、どうしてそこが定まるのだろうと疑問を持ちました。そうして調べているうちに、京都大学の池上文夫先生（現京都大学　名誉教授）の研究室で、この現象に着目し、再生クロックのタイミング位置とフェージングの関係を調べる研究を行っていることがわかりました[2][3]。そのタイミング位置がデータシンボルを超えて急速に動く現象が見出され、これを「サイクルスリップ」と名づけていました。本来、符号間干渉には強いはずのBPSK変調方式でも、実測データには、予想以上に誤りの発生が多かった原因を解明しようとしての先駆的な研究でした。私は、当時、まだ現象理解にとどまっていたこの現象に興味を持ち、ここに踏み込んでみようと思いました。研究テーマを暗中模索していた後入りの我々グループ（といっても私と岩井 誠人氏（現同志社大学）の二人だけでしたが）にとってはまさに「曙光が見えた」の気持ちでした。

以下雑談ですが、後入りの研究分野に飛び込んで、いち早くその道のプロになるには、「その分野で一番活躍している研究者を一人定め、その人の論文を徹底的に読む、そうすることによってその分野の研究最先端とそのアプローチの方法が見えてくる」、と何かの本で読んだことがありました。私は、これを、池上先生の研究室の論文に定め、岩井氏と大会・研究会レベルから誌上論文に至るまで、あらゆるものを徹底的に読み、議論しました。そのおかげで、私にこの分野での研究のスタイル（池上先生流？）ができあがりました。［閑話休題］

3　理論のタネ

この現象では、帯域制限フィルタで整形された遅延の広がりのあるマルチパス信号が合成されるので、最適サンプリングポイントが見つけにくくなっているわけです。もっと正確にいうと、（当時の）受信機は最適ポイントを見つけてサンプリングしようとするのではなく、遅延の広がりが問題ない信号（すなわち狭帯域信号）に対して、最適にサンプリングが入るようなクロック再生方式が組み込まれていて、そこに、遅延の広がりのある信号（波形歪を受けた広帯域信号）が入った場合に、どう反応するかという問題になります。

PSK変調信号を考えます。最適サンプリング位置を決める一般的な方法として、帯域制限がかかった信号の包絡線変動からそのシンボルレート（シンボル周期：T_s）に相当する周波数f_S（$=1/T_s$）の成分を狭帯域のバンドパスフィルタで抽出し、そのピーク位置をサンプルタイミングとするというものがあります。**図2**は、先行波（振幅r_1、位相ϕ_1）と遅延波（振幅r_2、位相ϕ_2）の遅延差（$\triangle\tau$）が$0.2T_s$の2波モデルにおいて、振幅が等しい場合の受信信号のアイパターンと上記規範によるサンプルタイミング位置を示しています。電波の位相が逆相の場合（**図2（b）**）には、同じシンボルが重なっている部分が消失し、シンボルとシンボルの入れ替わり部分に電力が残り、そこに信号があると受信機がだまされて、サンプリングがはたらきます。2波モデルの場合、このサンプリングの位置は、次式のように定まります[4]。

$$\tau_S=\frac{\triangle\tau}{2}+\frac{1}{2\pi f_S}\tan^{-1}\left\{\frac{(r^2-1)\sin(\pi f_S\triangle\tau)}{(1+r^2)\cos(\pi f_S\triangle\tau)+2r\cos\phi}\right\}\quad\cdots(1)$$

$$(r\equiv r_2/r_1,\ \phi\equiv\phi_2-\phi_1)$$

遅延差がシンボル周期T_sに比べてわずかにずれている2波があり、それらの振幅が**図3（a）**のように推移するとしましょう。実際には、フェージングの速さは情報の変化速度に比べて十分遅く、かつ、クロックの抽出も狭帯域フィルタで決まる帯域以上の速さには追従しないので、図の例は時間的に誇張があることを知った上で見てほしい。**図3（b）、（c）**は、そのときのサンプルタイミングの変化を、（b）$\phi=0$の場合と（c）$\phi=180°$の場合を概念的に示したものです。2波が同位相の場合には、サンプルタイミングポイントが図のように推移して何事もおきないの

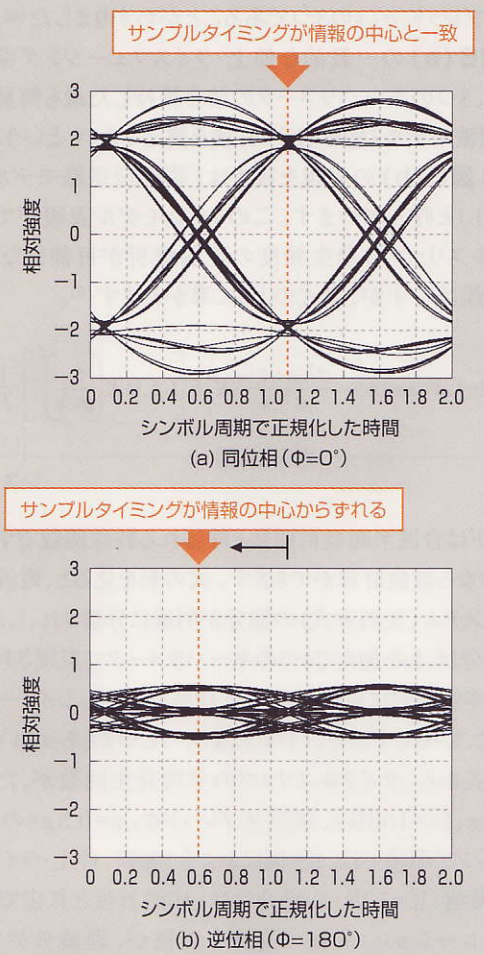


図2　CQPSKのアイパターン(遅延差△τ=0.2Ts、振幅比r=1)

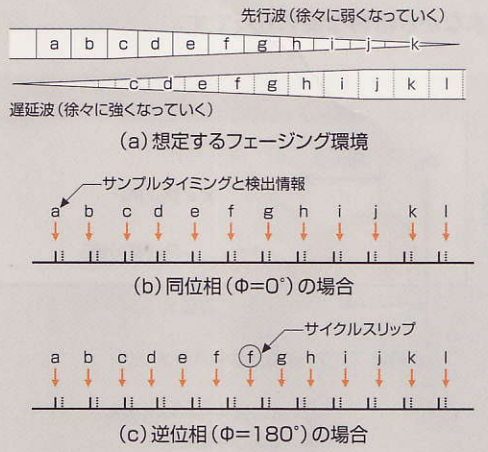


図3　サイクルスリップの発生イメージ

ですが、位相が逆相の場合は、**図3(c)**のような変化となり、始め(シンボル:a)と終わり(シンボル:k)はぴったりと最適位置に入っているのに、サンプリング数がデータの数より一つ多くなっていることがわかります。ミクロにみると、データfとgの切り替わりでfを2回サンプリングし、サイクルスリップがおきていることがわかります。受信機がフェージングにだまされて反応した結果といえるでしょう。(逆に、サンプリングの数の方が少なくなる状況もあります[5])。

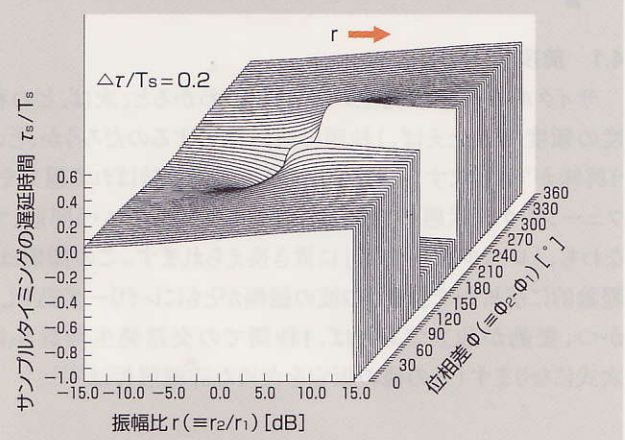


図4　位相差φ一定下での振幅比rの変化に対するサンプルタイミング

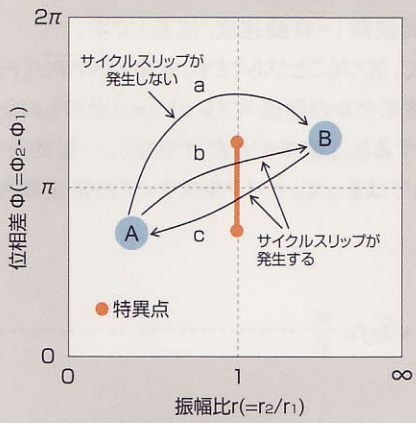


図5　フェージングダイヤグラムとサイクルスリップ発生条件

図4はφ一定下で、rを−15dB(ほとんど先行波だけ)から15dB(ほとんど遅延波だけ)に変化させたときのサンプルタイミングの位置を(1)式により計算して示しています。φ=180°を中心とした一定の角度範囲に谷間が見えます。位相差がこの谷間に相当する値にあるとき、サイクルスリップが発生するようです。**図5**は2波モデルにおいて、フェージングの状態をあらわすダイヤグラムです。図中の●印は2つ存在する特異点で、r=1、φ=π(1±△τ/Ts)にあらわれます[4]。計算機シミュレーション実験を重ねてみると、2つの特異点を両端とする線分上をフェージングの状態が交差して変化するときサイクルスリップがおきることがわかりました。フェージングの状態がAからBに変わる場合、ルートaではサイクルスリップは発生せず、ルートbで発生します。同様にBからAに変わる場合のルートcもサイクルスリップが発生します。このような計算機シミュレーション実験によって発生の詳細メカニズムが見えてきたわけです。一旦サイクルスリップが発生すると、フレーム同期が再確立するまで誤り続けるので、符号間干渉に強いBPSKといえども、この誤りには太刀打ちできません。統計的評価に必要な理論モデル構築のタネを見つけたといえます。

4 等価伝送路モデルの誕生

4.1 前夜

サイクルスリップの発生メカニズムがわかると、次は、どの程度の頻度で、たとえば、1秒間に何回発生するのだろうか、という興味がでてきます。これは、2つの特異点で結ばれる線分を、フェージングの状態が1秒間に何回交差するかという問題、すなわち、「レベル交差問題」に置き換えられます。この問題は、理論的に解析ができ、2つの波の振幅がともにレイリー変動をし、かつ、変動が独立であれば、1秒間での交差発生回数N_sは次式になります（その他の仮定を含めた詳細解析は[4]）。

$$N_s=\sqrt{2}\pi f_D\frac{\sqrt{P_1P_2}}{P_1+P_2}\frac{\triangle\tau}{T_s}\quad\left(\frac{\triangle\tau}{T_s}<1\right)\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで、P_1、P_2は先行波と遅延波のそれぞれの平均電力、f_Dは最大ドップラ周波数（＝移動速度/波長）です。

式(2)をみて、気づくことがあります。式中の$\left\{\sqrt{P_1P_2}/(P_1+P_2)\right\}\triangle\tau$の部分は、2波モデルの遅延スプレッド（$\sigma_\tau$）そのものなのです。これはもしかすると、2波モデルだけでなく、一般的なマルチパス環境でもあてはまって、サイクルスリップの発生頻度は、どんな場合でも

$$N_s=\sqrt{2}\pi f_D\frac{\sigma_\tau}{T_s}\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

で与えられるのではないかと予感されます。これは、推測ベースの理論式です。

遅延スプレッド（σ_τ）の値を同じにして、さまざまな遅延プロファイルを与えて、計算機シミュレーションを行ってみると、$\sigma_\tau/T_s\leq0.3$程度では、波の数や遅延プロファイルの形状によらず、電波伝搬のパラメータとしては(3)式で表現されるσ_τとf_Dのみであることが実証できました[4]。これは、推測ベースの理論式を実験（計算機シミュレーション）により、確固なものにした、という位置づけになります。

4.2 そしてそのとき

このレイリーフェージングで得た理論式(3)を、仲上・ライスフェージングの理論に発展させてみたいと思いました。仲上・ライスフェージングは、直接波に加えてマルチパスが存在する環境で、屋内通信や衛星通信でよく現われる伝搬環境です。直接波の信号強度を0にすれば、レイリーフェージング環境になるので、レイリーフェージングを含んだより一般的なマルチパス環境表現といえます。

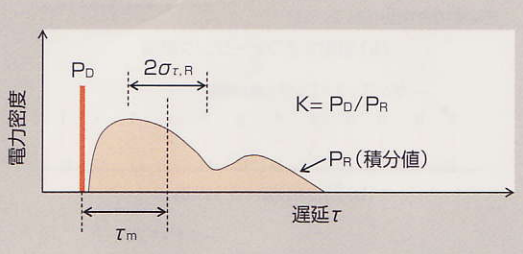
このときも、コンピュータシミュレーション実験から先に入りました。**図6（a）**の仲上・ライスフェージング環境を表現する遅延プロファイルから、本質的なパラメータ（いわゆるキーパラメータ）を探っていくと、直接波電力（P_D）と反射波電力（P_R）の比：K（$=P_D/P_R$）、反射波部分の平均遅延：τ_m、反射部分の遅延スプレッド：$\sigma_{\tau,R}$の3つであることがわかりました[6]。そうすると、**図6（a）**の一般的な仲上・ライスフェージング環境での解析を、3つのキーパラメータの値を維持した最も簡易な表現である2波モデル（**図6（b）**）に置き換えてよい、ということがいえます。**図6（b）**の表現を我々は「等価伝送路モデル（ETP model）」と呼んでいます。このようなモデル表現ができると、サイクルスリップの発生頻度の理論解析が可能になり、導出は多少煩雑ですが、次式のように導かれます[6]。

$$N_s=\sqrt{2}\pi f_d\sigma_{\tau,R}\exp\left(-\frac{\sigma^2_{\tau,R}+\tau^2_m}{\sigma^2_{\tau,R}}K\right)F\left[1.5,1;K\left(\frac{\tau_m}{\sigma_{\tau,R}}\right)^2\right]\frac{1}{T_s}\cdots(4)$$

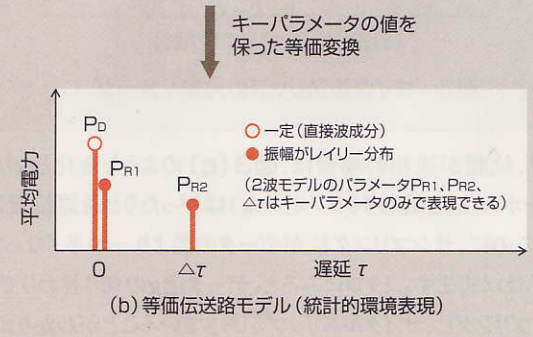
（電波伝搬）　（システム）

ここで、Fは合流形超幾何関数と呼ばれる特殊関数ですが、コンピュータなら数値計算ができます。式の形を見ると、電波伝搬部分と、システム（変調方式）の部分が明確に分離され、しかも電波伝搬部分は、f_Dを加えて4つのキーパラメータで表現されており、現象の本質が式に現われていると理解できます。レイリーフェージングでは、K=0ですので、(3)式になり、つじつまもあっています。

この式から、サイクルスリップの平均発生回数が、たとえば、$T_s=1\mu s$、$f_D=100Hz$、遅延スプレッド$\sigma_{\tau,R}=0.3\mu s$のレイリーフェージング環境では、1秒間におよそ100回、仲上・ライスフェージング環境（K=5dB）の場合には、10回程度と算定できます。（シミュレーション）実験で見出した種が、理論モデルとして実を結んだことになります。この計算式は、種々の仲上・ライスフェージングやレイリーフェージング環境を想定して行ったコンピュータシミュレーション実験の結果を正確にいいあてていて、我田引水ながら結構な優れものです。



(a) 遅延プロファイルとキーパラメータ



(b) 等価伝送路モデル（統計的環境表現）

図6　仲上・ライスフェージング環境をあらわす等価伝送路モデル

4.3 その後

サイクルスリップの研究で作りあげた等価伝送路モデルが、同様に遅延スプレッドが問題になる広帯域信号の伝送誤り、すなわち符号間干渉誤りに適用できるのではないかと考え、その応用へと駒を進めていきました。マルチパス環境下での平均誤り率（平均BER: P_e）は次の基本式で推定できます[5]。

$$P_e=\iiint_{x,y,z,\cdots} f_p(x,y,z,\cdots)\,P_0(x,y,z,\cdots)\,dx\,dy\,dz,\cdots \quad \cdots\cdots\cdots (5)$$

（f_p：電波伝搬、P_0：通信方式）

P_0は伝搬状態を規定する変数x, y, z, ...の関数で与えられるBER、f_pはその伝搬状態（x, y, z, ...）が発生する確率です。このように、伝搬現象ごとにf_pが、また、変復調方式ごとにP_0が求められていれば、平均BERを求めることができます。サイクルスリップのときの（4）式と同じように、「伝搬」と「通信方式」が陽に分離されていることが特徴になります。

このf_pの部分に振幅比と位相差であらわされる2波モデルの状態発生確率を数式で与え、P_0の部分を2波モデルの各状態でのBERを事前に計算してテーブル（我々はこれをBERマップと呼んでいます）で与えて、計算する手法を確立し、符号間干渉誤り推定のための等価伝送路モデルと呼んでいます。我々は、さらにこのモデルをOFDMの伝送において、遅延の広がりがガードインターバルを超える環境における伝送特性の劣化を推定するOFDM用の等価伝送路モデルを作りあげています。シングルキャリア伝送方式での符号間干渉推定用等価伝送路モデルについては文献[5]、[7]で、OFDMの伝送劣化応用では文献[8]にまとめているので、興味があったら見てください。

5 むすび

縁があってこの記事を執筆する機会をいただきました。巻頭にはふさわしくない個人的な研究事例の紹介になってしまいましたが、ここで紹介したような地味な研究から、ノーベル賞に値する大きな研究まで、実験→理論→実験の一連の流れ、その中でも、最初の実験、すなわち、「理論の種を探すための実験」の大切さを述べました。個人にとって新しい分野へのチャレンジ、しかしその分野自体は歴史も古く、基盤も確固たるように見える、そういった中にも、意外と盲点があり、突破口もあります。取り組む分野が古くても新しくても、若い人にとってはすべてがチャレンジです。

そのチャレンジの成功を祈って、セレンディピティ（Serendipity）という言葉を贈ります。偶然に幸運な予想外の発見をする才能（ability）と訳されています[9]。ノーベル賞を受賞した研究者が、失敗から掴んだ大発見というような体験談で、よく使われています。しかしそれは、セレンディピティの結果であって、本来は、誰の中にもある（でも眠っているかもしれません）才能を意味します。いつかそれが発現するように、その才能を磨きましょう（磨き方は、事例満載の[9]から感じ取ってください）。「幸運はそれを待ち受ける心構えのある人に訪れる」このパスツールの言葉で締めたいと思います。

6 参考文献

[1] 竹内薫, 99.9%は仮説:思い込みで判断しないための考え方, 光文社新書, 2006.

[2] S. Yoshida, S. Onoe, and F. Ikegami, "The effect of sample timing on bit error rate performance in a multipath fading channel", IEEE Trans. Vehicul. Tech., vol. VT-35, no. 4, pp. 168-174, 1986.

[3] S. Yoshida, F. Ikegami, and T. Takeuchi, "Cause of burst errors in multipath fading channel", IEEE Trans. Commun., vol. 36, no. 1, pp. 107-113, 1988.

[4] Y. Karasawa, T. Kuroda, and H. Iwai, "Cycle slip in clock recovery on frequency-selective fading channel", IEEE Trans. Commun., vol. 45, no. 3, pp. 376-383, 1997.

[5] 唐沢好男, "デジタル移動通信の電波伝搬基礎", コロナ社, 2003.

[6] Y. Karasawa, T. Kuroda, and H. Iwai, "Analysis of cycle slip in clock recovery on frequency-selective Nakagami-Rice fading channels based on the equivalent transmission-path model", IEICE Trans. Commun., vol. E79-B, no. 12, pp. 1900-1910, 1996.

[7] 唐沢好男, "広帯域移動通信の多重波伝搬理論とモデリング:等価伝送路モデルによる「伝搬」と「システム」の橋渡し", 信学論（B）, vol. J83-B, no. 12, pp. 1651-1660, 2000.

[8] 唐沢好男, "伝搬モデルの作り方:OFDM伝送特性評価用広帯域伝搬モデルを例として", 信学会通信ソサイエティマガジン, vol. 1, no. 1, pp.67-75, 2007.

[9] R.M.Roberts（安藤喬志訳）、セレンディピティ:思いがけない発見・発明のドラマ、化学同人, 1993.

【執筆者略歴】

唐沢　好男（からさわ　よしお）

1977年	京都大学大学院工学研究科修士課程（電子工学）修了
1977年	国際電信電話（株）（現KDDI）入社、同社研究所に勤務
1993-1997年	国際電気通信基礎技術研究所（ATR）に出向、研究室長
1999年-現在	電気通信大学電気通信学部教授
2005年-現在	同大先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター（AWCC）兼務同センター長（2005.04-2007.03）

博士（工学）、電子情報通信学会（信学会）フェロー、電波功績賞（1998）、ICF優秀研究賞（2006）、信学会論文賞（2件：2006）、信学会通信ソサイエティBest Tutorial Paper Award（2007, 2008）等受賞
ワイヤレス情報伝送技術の研究に従事