開発物語

THP（Tomlinson-Harashima Precoding）はどのようにして生まれたのか?

東京大学　原島　博　Hiroshi Harashima

1. はじめに

Tomlinson-Harashima Precoding，略してTHPという名称の通信手法がある．THPのHがHarashimaなので，時々質問される．どのような御関係なのですか，50年近く前の文献なので，もしかしてお父様ですか，あるいは御親戚ですか，と．

実は本人であるけれども，今では顔の研究者として紹介されることが多い原島と，THPのHarashimaは余りにも分野が違うので，すぐには結び付かないらしい．無理もない．

元々（もちろん今でも）筆者はコミュニケーションが専門である．若いとき，数学的な情報理論の立場から通信の基礎を研究してきた．THPは，その頃の筆者のいわば研究者としてのルーツとなる研究である．電子通信学会（当時）の論文誌に研究速報（「技術談話室」）[1]として初めて発表したのは1969年，筆者が大学院修士課程の学生のときであった．これは1970年3月に提出された筆者の修士論文[2]になった．

方式名がTomlinsonと連名になっているのには経緯がある．筆者の英文論文がIEEEの論文誌[3]に掲載されたのは1972年であるが，その査読期間中の1971年にTomlinsonがElectronics Letters[4]に同じアイデアを発表した．発表も含めれば明らかに筆者の方が先であるが，欧文ではTomlinsonが先になり，結果として（いつ命名されたのかは不明であるが）連名の方式名になった．

このように筆者にとっては思い出深い研究であったが，何せ50年近く前なので，再びこの方式が話題になることはないと思っていた．筆者の関心も通信の数学的な基礎の探求から，人そのもののコミュニケーションを支えることに移っていった．顔にも，人のコミュニケーションメディアとして関心を持った．

そのようなとき，2006年に，THPなる方式がニュースになっていると，ある方が教えてくれた．調べてみると，それは「より対線で10Gbit/sのイーサネット仕様，IEEE規格に」というニュース[5]で，その基幹技術としてTHPが採用されたという内容であった．いわばTHPがインターネットの物理層の世界標準になったのである．自分も少しは役に立つ研究をしたのかと内心うれしかったが，もちろん正式の連絡は何もなかった．

そして今回，本誌でTHPの歴史を記す機会が与えられた．聞くところによると，第5世代携帯電話の大規模MIMO（multiple-input and multiple-output）における非線形プリコーディングの一つとして，THPが検討されているらしい．元々，筆者は大学院時代にMIMOにも関心を持ち，（もちろん初歩的なレベルであるけれども）そこにTHPを適用したときの理論検討を行っていたから，それはうなずけるものであった．

このような最近の動向を筆者はほとんど把握していない．しかし，THPがそもそもどのようにして発想されたのか，背景も含めてそれを紹介することが少しはお役に立つかもしれないと思うようになった．今回，その執筆の機会が与えられたことに感謝したい．

2. THPとはどのような方式か

THP（Tomlinson-Harashima Precoding）は一言で説明すれば，伝送路に時間的あるいは空間的に干渉があるときに，その干渉を送信端で補償する手法である．それを線形的に行うと，送信レベルの増大など様々な不都合が起こる．そこに簡単な非線形操作を入れて，不都合がないようにした方式がTHPである．

元々，筆者は帯域が制限された伝送路で，高能率にディジタルデータのパルス列をいかに送るかを考えていた．データを無理に送ろうとすると，送信端から単一のパルスを送っても，受信端ではそのパルスがなまって，後続するタイムスロットに影響を及ぼしてしまう．これを符号間干渉（intersymbol interference）という．当然ながら符号間干渉はない方がいいが，強引になくそうとするとどうしても

©電子情報通信学会 2018

無理が生じてしまう．

THP では，次に述べる操作を行う．ここでは図１のような受信端の単一パルス応答を考えよう．

このサンプル値のみに注目すれば，これは１タイムスロットの遅延演算子Dを用いて，

$$R(D) = 1 + r_1 D + r_2 D^2 + \cdots\cdots + r_N D^N$$

と記すことができる．ここに後続するタイムスロットのみに符号間干渉があるものとして，$r_i = 0 \ i < 0$，主応答を $r_0 = 1$ としている．このとき干渉分だけの応答は

$$F(D) = R(D) - 1$$
$$= r_1 D + r_2 D^2 + \cdots\cdots + r_N D^N$$

で与えられる．

この符号間干渉をなくすには，送信端で干渉 F(D) をあらかじめ差し引いておけばよい．これは図２(a) の送信端の回路で実現できる．しかしこれでは，送信出力のピーク値は大きくなって，発散してしまうこともある．これを避けるには，図２(b) のように送信出力が元々の信号の振幅（±M）の範囲に収まるようにも信号値のシフトを行えばよい．このシフト演算はモジュロ演算と呼ばれ，図３の入出力特性を持つ．これが THP である．

ここで行っているのは単に信号値のシフトだけであるから，受信端ではそのシフトを元に戻すだけで復号できる．非線形的なモジュロ演算が送信端のループの内側に置かれているけれども，受信端ではモジュロ演算だけで一意に復号することができる．このように受信端での操作が簡単であるから，雑音の影響も最小限に抑えることができる．

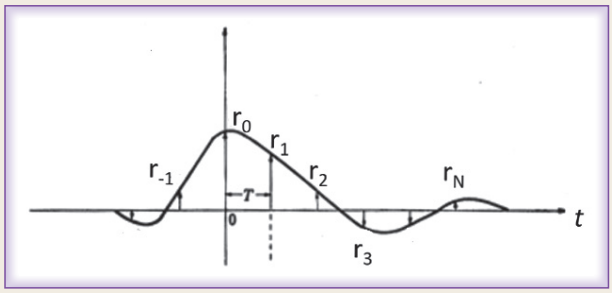


図１　伝送路パルス応答

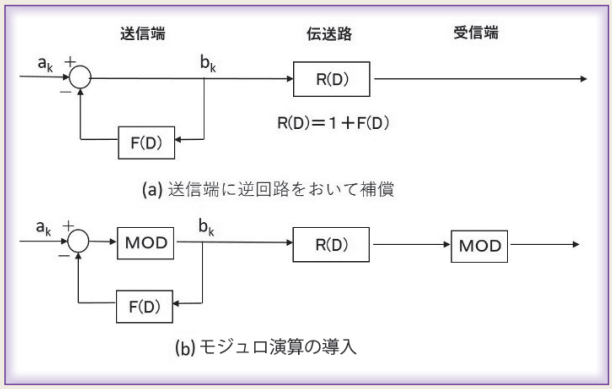


図２　THP の原理

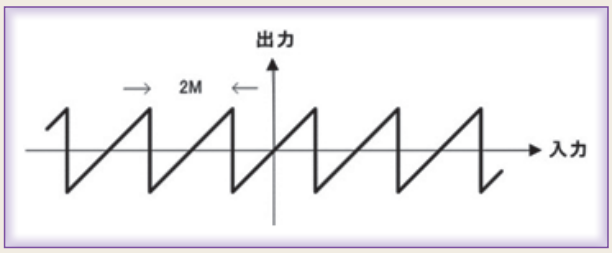


図３　モジュロ演算

3. THPはどのようにして発想されたのか

このような THP はどのようにして発想されたのか．

それを説明するためには，1960 年代という時代背景について触れておく必要がある．今では当り前になっているディジタル通信が実用レベルで花開いたのは，まさに 1960 年代であった．日本では 1966 年に，平衡対ケーブルを用いたディジタル伝送方式として PCM24 通話路方式（1.544Mbit/s）が初めて実用化された．筆者が学部生のときであった．そして筆者が大学院に入ったときは，同軸ケーブルを用いた 400Mbit/s の方式の研究がホットな話題となっていた．

上でも述べたように，帯域が制限された伝送路を用いて高密度にデータを伝送しようとすると符号間干渉が生ずる．この発生原因は伝送路の線形ひずみであり，その最も簡単な補償方法は，送受信端に線形の等化フィルタを挿入することである．しかし，これには幾つかの限界がある．

例えば受信端の等化は雑音の増加を伴うことが多い．これを防ぐために先行するデータの符号を判定して，その情報を用いて後続する符号間干渉を補償する判定帰還方式（decision-feedback system）も提案された．しかし，これは判定誤りがあるとそれが波及するという欠点がある．一方で，送信端で無理に線形等化すると，送信電力が増大してしまう．

(1) 方式の背景：パーシャルレスポンス方式

このため，伝送路の不完全な等化によって発生した符号間干渉の影響を，伝送路の符号構成によって軽減しようとする思想が生まれた．例えば PCM24 方式では，直流遮断の影響を抑えるために，そのスペクトルに直流分のないバイポーラ符号（bipolar code）が使われている．これは，０と１の系列を送りたいときは，１の極性を交互にプラスとマイナスに変換するものである．符号は３値になるけれども，送信系列の直流分がゼロになっている．このような符号は伝送路符号（line code）[6] と呼ばれ，上記の

高密度伝送に関連してバイポーラ符号以外にも，デュオバイナリ符号（duobinary code）など様々なスペクトルを持つ符号形式が提案された．

筆者は1968年4月に修士に入学して，この伝送路符号の発展形としてのパーシャルレスポンス方式（partial response signaling）に興味を持った．これは符号間干渉を妨害要因としてみなすのではなく，むしろ積極的に伝送に利用しようとする方式で，1966年にKretzmerによって提案された[7]．

図4にその構成を示す．この特徴は伝送路が複数タイムスロットにわたって応答を持つように等化することである．ただし，伝送路のパルス応答R(D)の係数r_iは整数値であるという制約を課す．

このR(D)なる応答を持つ伝送路に，L進のデータ系列を入力してみよう．すると受信系列は信号が足し合わされるので，一般にはレベルが増大（二進の場合は多値）して，その復号が複雑になる．そこでパーシャルレスポンス方式では，図4に示すように送信端にプリコーダ（precoder）と呼ばれるL進の論理演算回路を置いて，受信系列が一意に復号できるように工夫している．

具体的には，L進の場合はmodulo Lで定義された伝達関数が，図4にあるように

$$1/R(D) = 1/(1 + F(D)) \qquad \text{modulo } L$$

となるような回路を置けば，受信された多値系列は，その多値レベルのmodulo Lをとるだけで一意に復号できる．

このパーシャルレスポンス符号を適用するには，伝送路のインパルス応答の標本値が整数であることが必要である．しかし，他の標本点への干渉をゼロにする単なる線形等化のみによる方式（これはフルレスポンス方式と呼ばれる）に比べれば，設計の自由度が大幅に増加していることが特徴である．これによって必要に応じて狭帯域での情報伝送，受信信号対雑音比の改善などが可能になる．

図5にKretzmerによって提案された代表的なパーシャルレスポンス方式を示す[7]．先に述べたバイポーラ符号はこの表に含まれていないけれども，$(r_0, r_1) = (1, -1)$に相当して伝送路特性に直流分がなくてよい．またデュオバイナリ符号は$(r_0, r_1) = (1, 1)$に相当する．これは表にあるように高域の$f_0/2$成分が遮断されている伝送路特性で実現される．$(r_0, r_1, r_2) = (1, 0, -1)$はclass-Ⅳ方式と呼ばれ，$(1 - D^2) = (1 + D)(1 - D)$であるので，直流分と$f_0/2$成分がいずれもゼロになっているのが特徴である．

(2) 方式の着想：パーシャルレスポンス方式の拡張

筆者は，このパーシャルレスポンス方式の拡張に興味を持った．すなわち，伝送路のインパルス応答が整数値でなければならないというパーシャルレスポンス方式の制約を何とか外すことができないか．整数値でなく任意の実数値を許すようになれば，その適用範囲は格段に広くなろう．

これに向けて様々な可能性の検討を行ったが，最終的に得られた方式はパーシャルレスポンス方式を自然に拡張したすこぶる簡単なものになった．その考え方は次のとおりである．

図6に示すように，送信端に符号間干渉を補償するための回路を置き，更にその前段に信号変換回路を置く構成を考える．

符号間干渉を補償するための回路は，伝送路の逆特性になるように設計される．問題はこの回路に元々の系列a_kを直接入力すると，多くの場合送信出力b_kのピーク値が増大して，しかもフィードバック回路の安定性が保証されないことである．そこで前段に信号変換器を挿入して，送信系列b_kのピーク値が必ず一定の範囲に入るように信号変換を行うものとする．

これは原系列a_kの振幅が，例えば±Mに限られているときは，振幅範囲2Mの整数倍だけレベルシフトして中間系列c_kとするだけで実現される．すなわち，図の原系列a_kと干渉量予測出力（F(D)

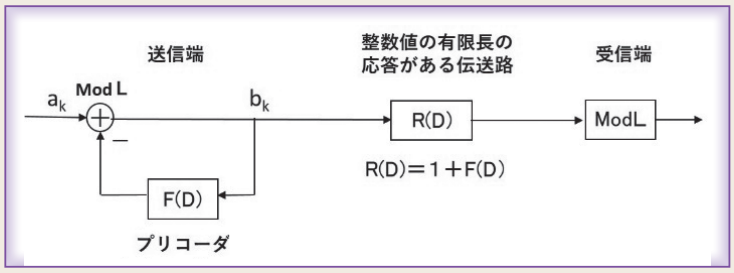
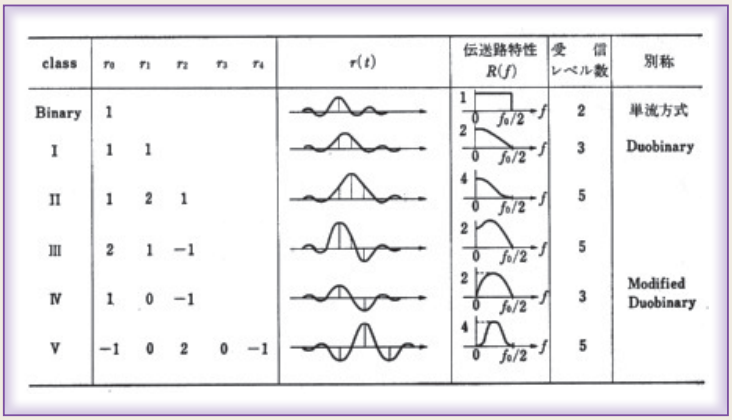


図4　パーシャルレスポンス方式の構成



class	r_0	r_1	r_2	r_3	r_4	$r(t)$	伝送路特性 $R(f)$	受信レベル数	別称
Binary	1							2	単流方式
I	1	1						3	Duobinary
II	1	2	1					5	
III	2	1	−1					5	
IV	1	0	−1					3	Modified Duobinary
V	−1	0	2	0	−1			5	

図5　代表的なパーシャルレスポンス方式

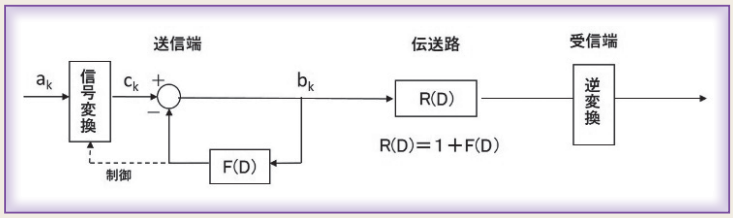


図６　THP の考え方

の出力）の値の差を観測して，そのままだと送信ピーク値が設定値 ±M を超えそうなときは，原系列の値を２M の整数倍だけシフトさせる．これにより，送信ピーク値の増大を防ぐことができる．これが基本的な考え方である．

受信端では，符号間干渉が送信端で補償されているから，（雑音がなければ）送信端で変換された系列 c_k がそのまま受信される．そのときレベルのシフト量が２M の整数倍になっているから，元々振幅が ±M に限られている原系列を一意に復号できる．この操作は図３に示した入出力特性を持ち，（アナログではあるけれども）先にも述べたようにモジュロ演算と呼ばれている．

なお，送信端での信号変換操作は，原系列 a_k と干渉量予測値（F(D)の出力）に基づく信号シフトであるから，この操作はループ内に収めることができる．これが図２に示した構成の THP である．

こうして，パーシャルレスポンスを拡張した新たな方式が導かれた．その特徴は次のとおりである．

①伝送路のパルス応答が整数値でない場合にも適用できる．

②送信出力のピーク値は必ず制限されている．

③受信端ではモジュロ演算で一意に復号できる．

（3）指導教授への報告と学会への発表

筆者がこの方式の着想を得たのは，1969 年の正月休みであった．当時，大学院の修士１年であったが，それは特別な年であった．直後の正月明けに東大安田講堂事件の「攻防戦」があった．その前年，学部の卒業式のときにいわゆる「東大闘争」が始まり，大学院入学直後は筆者にとって波乱と葛藤の日々となった．それに加えて，指導教員であった宮川洋教授の研究室では，修士であっても研究テーマは自分で探すことが要求された．修士論文のテーマもきちんと相談していないまま，上記のアイデアを宮川教授に初めて報告したのは，学内がようやく落ち着きを取り戻した２月になってからであった．

宮川教授からは，学会誌の研究速報にすぐ投稿し，かつ直近の学会の研究会で発表するように勧められた．結果として電子通信学会誌の６月号の「技術談話室」[1] に掲載され，同じ６月に札幌で開かれた通信方式研究会[8] で発表することができた．

この方式は，当時は「整合伝送系（matched transmission system）」と名付けて発表した．それは，この方式によって情報源と通信路の情報理論的な整合を図れることが，すぐ分かったからである（これについては次項で述べる）．

この内容は翌年の 1970 年３月に提出された筆者の修士論文[2] になったが，博士課程に入学してすぐ，理論解析も含めて IEEE の英文誌に投稿することを勧められた．投稿は 1970 年８月 20 日であるが，２年後の 1972 年の８月に IEEE Transactions on Communications[3] に掲載された．その間の 1971 年３月に Tomlinson が同じアイデアを Electronics Letters[4] に投稿して，後に２人連名の方式になったのは先に述べたとおりである．明らかに筆者の研究の方が先ではあるが，当時は和文での発表は外国では無視されることが多かったので，連名であっても名前を入れて頂いたことに感謝すべきなのかもしれない．

（4）THP の情報理論的な位置付け

THP の面白さは，その情報理論的な最適性にある[9]．送信端に THP を置くことを前提として，与えられた伝送路特性，雑音特性の下で送受信端の等化フィルタを最適化すると，情報理論的にほぼ理想的な特性が得られる．

すなわち，例えば送信ピーク電力制限を課して，入力信号として一様分布白色信号（多進の系列はほぼ満足する）を仮定し，かつ無ひずみ条件（雑音がないときはひずみなく受信される）の下で方式を最適化すると，次のような性質が得られる．

①送受信端の等化フィルタを含めた総合的な伝送路特性は最小位相推移になるように設計する．このとき THP で重要な伝送路のパルス応答の初期値 r_0 が最大になる．

②最適な受信フィルタは出力雑音が最終的に白色になるような特性を持ち，出力の雑音電力は雑音のエントロピー電力となる．

また，送信ピーク制限ではなくて平均電力制限を課して，システムの特性を入出力の平均二乗誤差で評価すると，情報理論における注水定理（water filling principal）を実現する通信が可能となる．そのときの送信電力 P と出力誤差 D は変数 λ を導入して，それぞれ次式で与えられる．

$$P=\int_{\Phi}\{\lambda-W_n(f)\}df$$

$$D = \sigma^2 \exp \frac{1}{2W} \int_{\Phi} \log \frac{W_n(f)}{\lambda} df$$

ただし，$\Phi = \{ f \mid W_n(f) < \lambda,\ -w < f < w \}$

ここに，与えられた伝送路の伝達関数をT(f)，受信端で相加される雑音の電力スペクトル密度をN(f)として，$W_n(f) = (N(f))|T(f)|^2$ と置くものとする．σ^2 は情報系列の平均電力である．

上記のPの式は，送信電力の配分を注水定理に基づいて行えばよいことを意味している．一方のDの式は，誤差の値が雑音のエントロピー電力となっていることを意味している．図7に最適系の構造と特性をまとめて示した．この最適系には様々な面白い性質があるが，これを説明するには情報理論の知識を必要とするのでここでは省略する．

実は，かなり後になって筆者にとって大きな驚きがあった．何と指導教員であった宮川洋教授が，1959年という早い時期にこの基礎となる解析を行っていたのである[10]．アナログ情報を対象としたものであったが，THPと類似の方式を解析していた．宮川教授はそのことを一言も口にせず筆者の研究を励まし，学会発表の共著者にもなって頂いた．今思うと，研究者として自らの力で全て解決することを期待されていたのかもしれない．

4. THPのベクトル通信路への展開

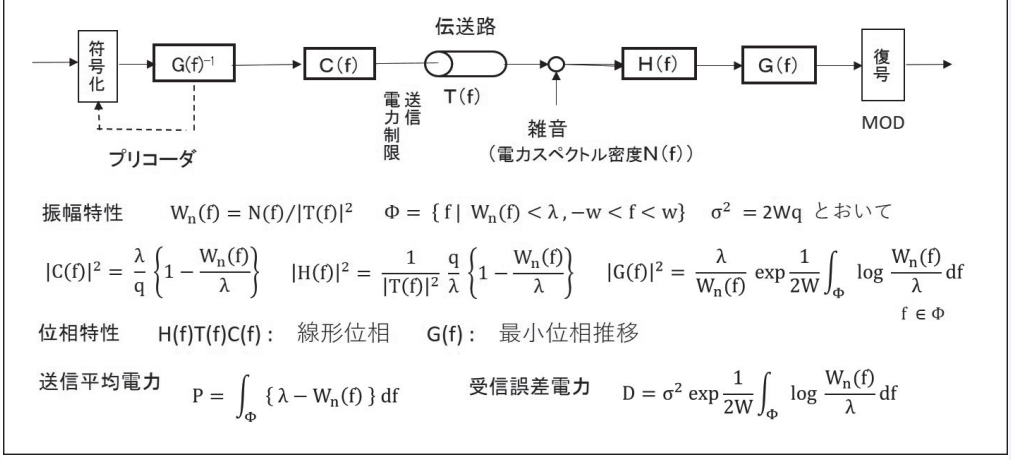
筆者は大学院の博士課程では，より一般的に情報源と通信路の情報整合をいかに図るかに関心を持った．内容的には信号空間の立場から，線形的な整合方式，非線形的な整合方式，受信端から送信端へのフィードバックがある帰還整合方式などを統一的に扱うことを試みた[11]．この非線形整合方式の一部として，THPのベクトル通信路への拡張も行ったので，簡単に紹介しておきたい．今では当り前の議論かもしれないけれども，当時の筆者には新鮮であった．

(1) ベクトル通信路におけるTHPの構成

ベクトル通信路は，多入力・多出力の通信路で，入力と出力がスカラでなくベクトルで表現されるので，その名がある．今で言うところのMIMOである．例えばダイバーシチのある多重通信路では，空間的に相互に干渉があり，この干渉をいかに補償するかが課題となる．修士論文では，無限長の時系列を扱ったが，これを有限の次元で厳密に扱うことが筆者の関心事であった．

図8にベクトル通信路におけるTHPの基本構成を示す．Tは通信路行列と呼ばれる線形変換行列であって，対角以外の要素は多重通信路における成分間の干渉の程度を表している．もしこの通信路行列がたまたま対角要素が全て1の下三角行列（これをGと置こう）である場合は，時系列に対するTHPの考え方をそのまま適用できる．すなわち，有限長のベクトルの成分があたかも時系列として並んでいると考えて，第一成分から順に変換していけばよい．もし通信路行列Tが下三角行列でない場合は，図7に示すように行列Lをかけて全体として下三角行列Gになるようにする（すなわちG＝LTとする）．

例として最も単純な二次元の場合を考えよう．このとき原データがそれぞれの次元でピーク値制限されているとすれば，信号値は図9の正方領域に含まれているはずである．これをそのまま送信するのではなくて，ベクトルの第2成分の値は，第1成分の値に応じて±2M（あるいはその整数倍）だけシフトされる．その結果信号変換されたベクトルの領域は，図9に示すように平行四辺形となる．



T(f)：伝送路伝達関数、N(f)：受信端雑音電力スペクトル密度、Wn(f)：送信端換算雑音電力スペクトル密度、σ2：情報系列平均電力、2W：送信帯域幅、λ：送信電力の注水定理によって定まる定数

図7　最適系の構造と特性（平均電力制限，平均二乗誤差評価の場合）

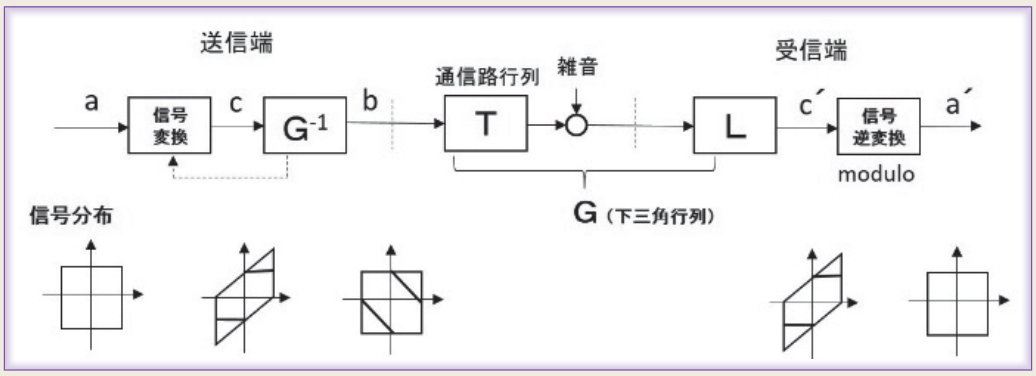


図８　ベクトル通信路における THP の基本構成

この平行四辺形は，送信端における G^{-1} を通過すると，図８の信号分布に示したように再びピーク値が制限された正方領域に戻る．一方受信端では（雑音がなければ）平行四辺形の領域を持つ信号変換後のベクトル信号が受信されるから，モジュロ演算による信号シフトを行うだけで，元のデータが復元できる．

なお，信号変換を行わずに原データを直接 G^{-1} の入力とすると，送信ベクトルの領域が平行四辺形となって，それぞれの成分のピーク値が制限されなくなってしまう．THP では，あらかじめ信号をシフトさせることによって，送信ピーク制限を実現しているのである．

（2）信号空間の分割と分解合同

この例から分かるように，ベクトル通信路における THP の基礎概念は「信号空間の分割と再配置」である．

すなわち，信号空間において信号点がある領域に含まれているとき，その領域を幾つかのサブ領域に分割して再配置を行う．これによって，信号値が含まれている領域の形を変えることができる．

例えば，図 10 では，この分割と再配置によって正六角形が正方形に変換されている．

THP は，変換が限定されているけれども，この再配置を行うアルゴリズムであると言える．問題はこのような再配置が任意の次元で可能かということである．

筆者は大学院時代に，このような信号空間の分割と再配置で，非線形操作を伴う通信方式（変調方式）を統一的に記述することに興味を持っていた．やや数学的に過ぎるかもしれないが，筆者としては面白い話題であったので，ここで少し触れておきたい[12]．

信号領域は多くの場合多角形（多次元の場合は多面体，以下図形と呼ぶ）となるので，この問題は次のようになる．すなわち

「二つの図形が与えられたときに，その一方を分解して並べ替えることによって他方の図形を作ることができるだろうか？」

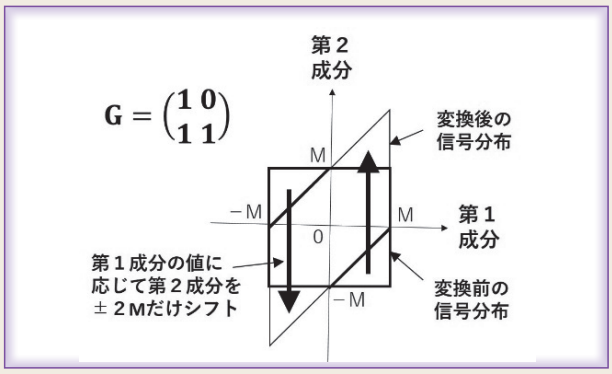


図９　二次元の場合の信号変換操作
（三角形の部分を± 2M だけシフトする）

数学的にはこれは分解合同（decomposite congruent）の問題として知られている．二つの分解合同な図形は面積（体積）が等しい．単純な図形に変換できれば面積計算が簡単になる．この分解合同の概念はユークリッドの時代から図形の面積計算の基礎理論として研究された．

幾つかの定理を示しておこう．まずボヤイ＝ゲルヴィンの定理によれば「等積な二つの多角形は分解合同である」．これが三次元以上でも成り立つかは，有名な 1900 年のヒルベルトの 13 問題の一つとして提出され，同年デーンによって否定的に解決された．

しかし特殊な多面体に限ればこれは成立する．例えばハドヴィゲールは「凸多面体が立方体と平行移動のみの再配置で分解合同であるための必要十分条件は，その面がそれぞれ点対称多角形になっていることである」を証明している．任意の平行多面体はこの条件を満たす．これによって送信ピーク値が制限された通信路へ THP を適用することが多次元でも原理的に可能であることが，数学的にも証明された．

（3）情報理論的な最適性

上で述べたように信号空間の分割と再配置を行えば，全体としての信号領域の形，すなわち信号のマクロな分布を変えることができる．一方で，分割さ

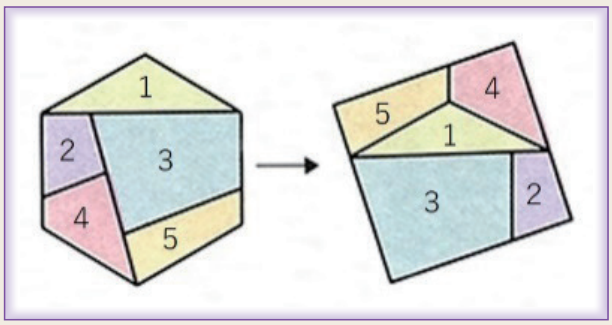


図 10　分割と再配置

れたそれぞれのサブ空間内部のミクロな距離構造（これは雑音特性によって決まる）は，サブ空間を平行移動させても変化しない．このようにミクロな距離構造（雑音特性）は変えずにマクロな信号分布を変える．ここに THP の本質があったのである．

これにより，ベクトル通信路においても情報理論的に興味深い性質が得られる．すなわち，図 7 を行列形式で表現して，送信行列と受信行列などを最適化すると，ベクトル通信路の注水定理を満たす特性が実現できる．数学的には時系列に対する特性と同じ構造をしており，その伝送路特性及び雑音の電力スペクトルを，通信路行列や雑音の共分散行列などの固有値（あるいは特異値）の議論に置き換えるだけで，ほぼ同じ解析が可能となる．もちろん，それを行うには，送受信端の変換行列の対角化，あるいは対角要素が 1 の下三角行列 G の対角化（逆に言えば対角行列からの G の設計）など，行列特有の扱いが必要になる．

5. おわりに

以上，THP についての筆者の大学院時代の研究を紹介した．今から思えばそれは幸せな時代だった．研究の時間はたっぷりあり，しかもそれに没頭できた．研究室では優秀な先輩，同僚，そして後輩に恵まれた．

大学院の学生は，学位を取得するためには論文を学会に発表して研究業績を上げる必要がある．しかし筆者は研究そのものが好きだった．次から次へと興味深い研究テーマが湧いて，それを展開することそれ自体が楽しかった．

一方で（これは若手研究者には絶対勧められないけれども）学会に数多くの論文を投稿して業績を上げることには，余り関心がなかった．THP のアイデアそのものは指導教員の勧めもあって，電子通信学会（当時）の研究速報及び IEEE の論文誌に投稿したけれども，その理論解析の外部発表はほんの僅かで，詳細はほとんどそのままになっていた．

それから数十年たって，今回その概要だけでも報告する機会が与えられたことを，まずは感謝したい．しかし，大学院時代の筆者の関心は，あくまで情報理論的な検討であって，その実用化はほとんど想定していなかった．その意味では，本稿で述べたことも的外れな議論が多かったかもしれない．

例えば，THP の理論解析は，通信路の性質や雑音特性などが正確に分かっていることを前提として行った．もちろん，実用レベルで THP を適用するときは，これをいかに事前に推定するかが問題となり，アダプティブな構成が必須となろう．更にマルチユーザに適用するときは，特別な検討が必要になろう．

第 5 世代携帯電話などを目的とした研究では，これも含めて検討が進んでいると聞く．今後の発展を期待したい．

文献

(1) 宮川　洋，原島　博，“符号間干渉のある伝送路のための符号変換の一方式，”信学論（A），vol.52-A，no.6，pp.272-273，June 1969.
(2) 原島　博，“通信路に整合した情報伝送方式に関する研究，”東京大学修士論文，March 1970.
(3) H.Harashima and H.Miyakawa，“Mached-transmission technique for channels with intersymbol interference，”IEEE Trans. Commun.，vol.COM-20，no.4，pp.774-780，Aug. 1972.
(4) M.Tomlinson，“New automatic equalizer employing modulo arithmetic，”Electron. Lett.，vol.7，no.5，pp.138-139，March 1971.
(5) http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20060620/118329/?rt=nocnt
(6) 宮川　洋，原島　博，“伝送路符号，”信学誌，vol.53，no.11. Nov.1970.
(7) E.R.Kretzmer，“Generalization of a technique for binary-data transmission，”IEEE Trans. Commun.，vol.COM-14,no.1,pp.67-68,Feb.1966.
(8) 宮川　洋，原島　博，“符号間干渉のある伝送路のための符号変換の一方式―整合伝送方式の提案―，”信学会通信方式研資，CS-69-15，June 1969.
(9) 宮川　洋，原島　博，“整合伝送系の最適化と情報伝送速度，”信学会通信方式研資，CS-70-30，June 1970.
(10) 宮川　洋，“通信路と情報理論的に整合したエンファシス方式，”信学誌，vol.42，no.12，p.1220，Dec.1959.
(11) 原島　博，“連続通信系における情報整合理論の研究，”東京大学博士論文，March 1973.
(12) ボルチェンスキー，図形の等積と分解合同，東京図書，東京，June 1960.

原島　博（名誉員：フェロー）

1945 東京生まれ．2009 東大を定年退職．大学では大学院情報学環と工学部に属し，人と人の間のコミュニケーションを技術的に支援することに関心を持ってきた．その一つとして「顔学」の構築と体系化にも尽力．定年後は，女子美術大（芸術），明治大（数理），立命館大（文学）の客員教授などを務め，2015-12 に東大に戻って，現在特任教授．

（撮影：中村年孝）