

## 1. 創発

崩壊の力が宇宙に満たされている限り、存在は周縁的な力によって実現する。その力は混沌の中から秩序を創発する。混沌の中に生まれる秩序のメカニズムを追い求めることが学問の伝統的な目的であるが、その一般原理を総括して表すことはできない。しかし、マイケル・ポランニーが指摘したようにヒトの知の形成の中にも、その原理が支配的に働いているとすれば、知のモデルをもっとスマートに描けるのではなからうか。ここではポランニーが提案した周縁制御の原理と物理学でよく用いられる積分方程式とのアナロジーを記述することにより、知の場の理論の構築を試みる。

## 2. 空間の数学的記述

物理学において現象を把握するための最初の定式化として、微分方程式が用いられる。微分方程式は微少な時空間範囲における物理量間の関係を考えることにより物理現象を数学的に記述する方法であり、隣合う空間（あるいは時間）の物理的関係を数学的に記述したものと言ってもよい。しかし、ある空間領域における物理現象あるいは場を形成する原理などを把握するためには、微分方程式を変形していく必要がある。その一つの方法が積分方程式による記述である。積分方程式は、空間においてある領域を想定することにより、その領域を取り囲む境界上の物理量と領域内部の物理量との因果関係を記述するものである。つまり、境界上の物理的挙動が原因となり、領域内の物理量が結果として生じることを数学的に記述することが可能となる。

## 3. 音場

音場は熱力学場と同様に媒質が必要であるという点で重力場、電磁場、量子場と異なる。しかし、空間を支配する秩序が存在し、その記述方法としての数学的表現に関しては同じ概念に基づいている。ここでは音場を例に、微分方程式から積分方程式に至る記述を眺めながら、空間の数学的表現である場の概念について理解を深める。

### 3.1 微分方程式

音響空間の物理は音圧と粒子速度に関する二つの微分方程式によって表される。一つは質量保存則により導かれる連続の方程式

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad [kg/m^3s] \quad (1)$$

もう一つは運動方程式から導かれるオイラーの方程式

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad [N/m^3] \quad (2)$$

である。それぞれの式の各項は物理的な意味がある。まず、式 (1) の単位は時間あたりに変化する単位体積当たりの質量であり、第一項は微小粒子の内部で増加する量、第二項は微小粒子の面から流出する量である。また、式 (2) の単位は単位体積当たりの力であり、第一項は微小粒子の慣性力、第二項は音圧勾配による外力である。これらの式の粒子速度が消えるように、式の操作（連続の方程式の時間微分からオイラーの方程式の発散を減じる）を行うと音圧の項が残り、次のような波動方程式が得られる。

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

### 3.2 積分方程式

まず、式を簡単化するため調和振動を仮定し、時間項を取り去ると式 (3) は

$$(\nabla^2 + k^2) p(\mathbf{r}) = 0 \quad (4)$$

となりヘルムホルツ方程式が得られる。次に図 1 のように閉曲面  $S$  で囲まれた領域  $V$  を想定する。

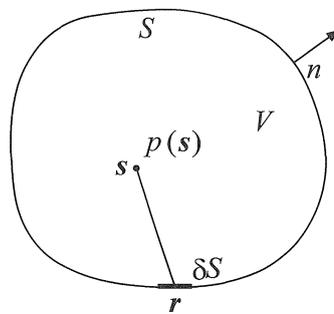


図 1 ある媒質中の境界  $S$  に囲まれた空間

ヘルムホルツ方程式におけるグリーン関数

$$\nabla^2 G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) + k^2 G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{s}) \quad (5)$$

およびグリーンの定理を用いると次のようなキルヒホッフ - ヘルムホルツ積分方程式が得られる。

$$p(\mathbf{s}) = \iint_S G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) \frac{\partial p(\mathbf{r})}{\partial n} - p(\mathbf{r}) \frac{\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})}{\partial n} \delta S \quad (6)$$

ただし、 $\mathbf{s} \in V$ ,  $\mathbf{r} \in S$  すなわち  $\mathbf{s}$  は領域  $V$  内のベクトル、 $\mathbf{r}$  は境界面  $S$  上のベクトルである。

### 3.3 ホイヘンスの原理

ホイヘンスは波の回折を説明するために、波面を点源として表現できると考えた。空間に遮蔽物をおいても波がその遮蔽物を回り込んで折れ曲がって進むことができるのは、波面上に次の波を生成する点源が存在するためだと説明したのである。式 (6) のキルヒホッフ - ヘルムホルツ積分方程式はホイヘンスの原理の数学的表現と考えられているが、その理由について

説明する。

まず、境界を持たない自由音場におけるグリーン関数として次式が知られている。

$$G(\mathbf{r}|\mathbf{s}) = \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{s}|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{s}|} \quad (7)$$

これは自由音場において位置  $\mathbf{r}$  に点音源（モノポール音源）があるときの位置  $\mathbf{s}$  における音圧の値と考えて良い。また、積分方程式の中に現れるグリーン関数の法線方向微分  $\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})/\partial n$  は位相が反転する二つの点音源（ダイポール音源）が法線方向に近接して置かれていると考えて良い。つまり、式 (6) で表される積分方程式は境界面  $S$  上の位置  $\mathbf{r}$  に大きさ  $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$  のモノポール音源  $G(\mathbf{r}|\mathbf{s})$  と大きさ  $-p(\mathbf{r})$  のダイポール音源  $\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{s})/\partial n$  が設置され、それによって領域  $V$  内の音圧  $p(\mathbf{s})$  が生成されることを数学的に表現していると考えられる。このようにキルヒホッフーヘルムホルツ積分方程式はホイヘンスの原理の説明において課題であった、波面に生じる音源の数学的性質を示したわけである。

### 3.4 境界音場制御の原理

電気音響変換器の一つである電磁型スピーカが発明され、その研究が盛んになった 1930 年代始めにベル研究所で最初のステレオフォニクス（立体音響）実験が行われた [1]。スピーカの数と再生する音場の立体感の関係を調べたところ、前方に音像が定位する音場であれば二つのスピーカで十分実現できることから、二つのスピーカに立体的な音響信号を入力する方法がステレオ再生と呼ばれるようになった。1960 年代後半から音場制御の数学的な解釈が検討され、積分方程式によって音場制御を説明する記述が論文に現れる [2]。つまり、上記のモノポール音源とダイポール音源を境界面上に設置すれば、その境界面で取り囲まれた領域内の音場を制御することが可能となるという説明である。厳密に述べると、原音場において、ある領域を取り囲む境界面  $S$  上のすべての位置における音圧  $p(\mathbf{r})$ 、および音圧勾配（あるいは粒子速度） $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$  を計測し、無響室内で音場に影響を与えないほど小さい（音響的に透明な）モノポール音源とダイポール音源を原音場と同じ境界の形となるように設置し、それらの音源の大きさが計測した音圧勾配と音圧と等しくなるように音源を駆動すれば、原音場が再生音場と等しくなる、すなわち完全な音場再現を実現できるというものである。しかし、音響的に透明な無数の音源を無響室内の境界上に設置することが必要であるため、それが原理的には可能であっても "hopeless idea" だと述べる研究者もおり [3]、多くの音響学者が真のステレオフォニクスは実現不可能と考えてきた。一方、1980 年代後半からデジタル信号処理技術が発展し、音場制御に用いられるようになってきた。特にアクティブ騒音制御技術の研究が盛んになり、多くの実験において成功例が報告された。空調ダクトのような二次元音場では一つの二次音源を用いて十分に実用的な性能が得られたため、アクティブ騒音制御の研究は日常的な空間である三次元音場への実用化が一つの課題となった。しかし、従来の積分方程式の音場制御理論としての理解からわかるように、三次元音場で完全な制御を行うためには、音響的に透明な無数の点音源が必要であるという理論の存在が、三次元音場への実用化もまた hopeless であるという空気を漂わせた。しかし、それでも大規模なアクティブ騒音制御装置を用いた三次元音場における実験が行われた。その結果、限られた範囲ではあるが、二次音源の数を増やすことにより、広い範囲で制御が可能となる実験例も報告された [4]。ここに理論と実験の矛盾が生じた。すなわち、理論的には上記のような点音源を開発しなければ、三次元音場における広範囲の制御ができないはずであるのに、複数のスピーカを用いる制御において、その逆システムを設計することができれば広範囲の音場制御の可能性が見いだされたのである。そのような背景から提案されたのが境界音場制御の原理である [5]。境界音場制御の原理では無響室のような自由音場やモノポール音源、ダイポール音源などを想定する必要はなく、原音場で測定した音圧  $p(\mathbf{r})$  と粒子速度  $\partial p(\mathbf{r})/\partial n$  が再生音場において等しくなるように、逆システムを設計すればよい。つまり、点音源の開発という hopeless な問題から逆システム設計という現実的な問題になったため、音場制御の実現可能性は飛躍的に高まったのである。現在、境界音場制御の原理に基づいたアクティブ騒音制御手法 [6] や音場再現システム（図 2）[7] の研究が活発に進められ、多くのデモンストレーションにおいて高い評価を得ている。

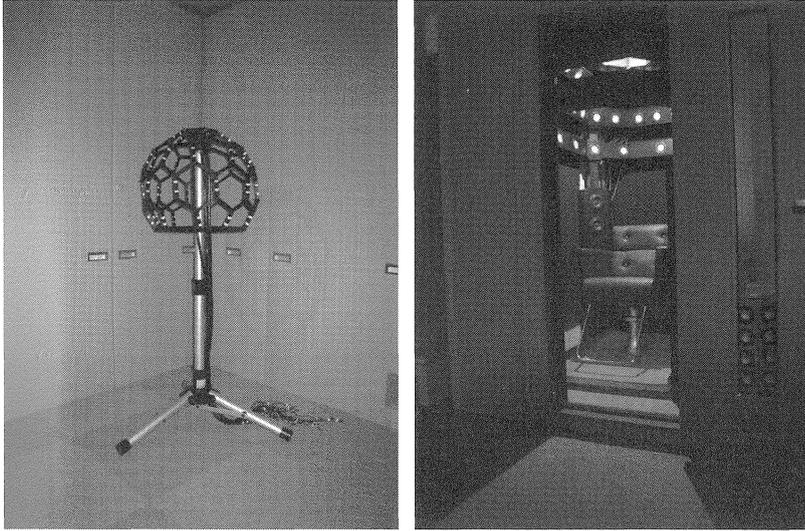


図2 境界音場制御の原理に基づいた  
音場収録システム(左)と再現システム(右)  
Boundary Surface Control System (BoSC System)

## 4. 周縁制御の原理

### 4.1 Shaping

積分方程式は三次元領域の現象がその領域を取り囲む二次元閉曲面上の境界条件によって生じることを数学的に示すものであり、言わば現象の原因を次元の異なる層に帰することができることを示すものである。マイケル・ポランニーは「暗黙知の次元」で暗黙知が生じる場を想定し、周縁上に存在する条件によって意味が生じるという知の生成の一般原理を提案し、それを周縁制御の原理と呼んだ。まずはポランニーの言葉を引用しておこう。

機械の作動原理は、このような人為的なかたどり (Shaping) によって物質内に実現される。そのような作動原理は、非生命システムの境界条件を支配する、ということができよう。境界条件とは、自然の法則によって明白に不確定なままにされている諸条件の集合である。このような境界条件を決定するのが工学である。[8] p.66

機械を構成する物質間で力学的な関係が生じ、それはニュートン力学の範囲で数学的な記述が可能である。しかし、その機械が正常に機能したり、ときに故障したりするのは、機械を構成する物質の「かたどり」すなわち境界条件によるものである。いくら物理学的な知識が深められても物理学の範囲では機械の作動原理を説明することができないのは、境界条件を決定するという工学的な手続きが含まれていないためである。前述において音場の微分方程式 (波動方程式) から積分方程式を導出したが、これは境界条件を決定するための一つの工学的な手続きといえよう。さらにポランニーは続ける。

そしてこのことにより、非生命システムがいかに二つのレベルの二重の制御に服しうるのが説明される。つまり、下位のレベルは、生命をもたぬ存在の法則、つまり物理学と化学の法則にしたがうものとみなされている。一方、上位のレベルの活動は、そのような下位のレベルの境界として人為的に実現される。

我々は、下位のレベルの成分をなす諸細目にたいして、上位のレベルの組織原理が行う制御を、周縁制御の原理 (The Principle of Marginal Control) とよぶことができる。[8] p.66

ポランニーは形態発生、機械の作動原理、言葉を読むこと、技能の獲得など非常に広範囲において周縁制御の原理が働くことを説明しようとするが、それはエントロピーが増大する宇宙の基本原則の中で存在を確定する力およびその力が働く場 (カオスの縁) の存在を示していることにほかならない。このように広い範囲での存在の論理を語ろうとすると、その原理の意味するものがぼやけてしまい、総括的な理解が難しくなることに我々は注意しなければならない。しかし、上記の文章からポランニーが暗黙知 (Tacit knowing) というヒトの心理的な現象と物理や化学に見られる自然現象の中に相同性を見出

していることがわかる。その意図は、神経細胞をいくら分析しても心がわからないのと同じように、物理や化学を理解しても自然現象は理解できないという悲観的なものではない。境界条件を決定することが上位レベルの原理であることを認めることにより、現象の詳記不可能性という特徴があることや物理や化学において現象のモデル化が可能であるのと同じように技能の獲得、言語活動、文化の生成など集団的、社会的な心理現象のモデル化が可能だということである。本論ではその後者のモデル化を行うことが一つのねらいである。

## 4.2 中心と周縁

周縁という用語に関して言及する場合、山口昌男の「中心一周縁理論」[9]を避けて通ることはできない。山口昌男が周縁の概念に関してポランニーの影響を間接的にうけている可能性は大きい、しかしその捉え方は大きく異なる。最も大きな違いは山口が記号論を出発点としている部分である。ソシュールの構造言語学を基礎としてレヴィ・ストロースにより用いられた記号論は文化人類学を社会科学として位置づけることに貢献した。社会現象を分析するための方法論として用いられた記号論は客観性を記述する科学という範疇として認められたのである。それはたしかに文化の静的な状態を記述する場合には適しており、記号論という思考モデルは様々な社会現象を記述しうる。一方で、ポランニーが化学者から科学哲学者へ転身したのは、共産主義や実存主義などで「科学」や「自由」という言葉を振りかざしながら、「個人」を圧迫する時代の流れに対抗する理論としての暗黙知を表明したかったからである。記号論に比べて暗黙知が社会科学の中でとりあげにくいのは、科学が正当と位置付けてきた客観的真理へのあからさまな希求が創造をむしろ拒む危険性があることを暗黙知理論が示しているためである。このような立場の違いは記号論と暗黙知というモデルの中でも如実に表れる。例えば記号論ではシニフィエやシニフィアンの母体となるラングを想定するが、それは社会の中にある一定の言語観が存在することを想定している。つまり、社会の中で誰もが共通に捉える事ができるラングを想定することにより、記号論的な諸概念の客観的な記述が可能となるという立場である。しかし、問題は意味生成のメカニズムが従来の記号論ではモデル化しにくいという点である。ジュリア・クリステヴァが記号論的体系における意味生成のメカニズムとしてシニフィアンスという概念を提案したが、社会に存在するラングという抽象的なモデルの中に意味生成のメカニズムを組み入れても、それが実体として何を意味するのか不明瞭であるため、余計に抽象化されわかりにくいものになる。意味生成という現象は個人的なレベルで生じるため、社会的な側面を出発点とする記号論にはなじまないのだ。一方で暗黙知理論では、個人が感知してきた数々の諸細目が包括されることによって意味が生成され、そのときに現れる能動性が個人的な知識を生成するメカニズムとして重要であるという立場をとる。科学的発見をはじめとして一般的な文化の生成の原理の根底には「個人」の知的情熱が存在し、その情熱を駆動する能動性が本質的に重要なのだ。このような視点では暗黙知と記号論は反対のベクトルに向かっていくように見える。したがって、科学的発見や文化の生成の中でポランニーが周縁と考える空間的な範囲は個人的な思考の中に見出すべきであろう。ここで個人という概念も、理解が困難であるが、IndividualではなくPersonal、すなわち人格をもつ主体を意味する。

## 4.3 ミーム場

ミーム論は体系化された理論であるとは言い難く、ミームに関する定義は多様に存在する。なかでも知の生成あるいは知の伝搬のメカニズムを議論するための土台がない状態で語られるミーム論は耐え難い空虚さを含んでいる。ここでは暗黙知理論を土台として、記号論体系をそのまま個人の脳内に想定することにより中心一周縁理論も援用したミーム論を構築し、周縁制御の原理を描いてみたい。まず、ミームの提案者であるリチャード・ドーキンスはミームを次のように説明している。

ミームは明確に決まった構造をもっており、物理的媒体が何であれ、それを使って脳に情報を保存することを可能にしている。脳がシナプスの結合様式として情報を保存しているとすると、ミームは原理的にはシナプス構造の明確に決まった様式（パターン）として顕微鏡下で見ることができはずである。また、脳が情報を「散らばらせた」かたちで保存しているとすると（Pribram, 1974）、ミームは顕微鏡のスライド上には局材しないことになるが、それでもなお、ミームを脳の中に物理的に定住するものとわたしは考えたい。[10]

ミームという概念が抽象的なものではなく、実体として存在することを確信するためには、それが神経細胞の集合体であることを忘れてはならない。また、それが暗黙知を構成する基本要素と考えることにより、心理に現れる周縁制御の原理を

実体として捉えることが可能となる。さらに実体を備えた周縁制御の原理は物理学における積分方程式とのアナロジーが可能となる。図3のように、神経細胞で満された空間にミーム場を想定する。

中心には成熟し固定化されたミームがあり、それらのミームは身体を駆動することによって技能となって身体外部に表出することが可能である。中心におけるミームの構造に変化をもたらすためには、周縁における未成熟で流動的なミームの存在が不可欠となる。すなわち、周縁における未成熟ミームは「わかった！」の快感とともに成熟する可能性をもつ、現時点では未確定のミームである。暗黙知理論の範疇で表すと諸細目が包括的全体へ遷移する可能性をもつ状態である。「わかった！」の快感を動因として、身体は様々な諸細目となる情報を脳内に付加しようとする。

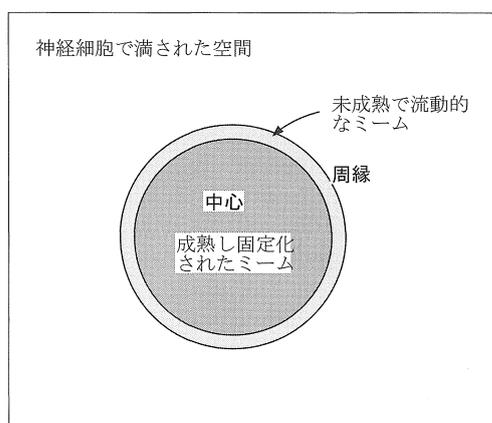


図3 ミーム場

それが能動的に身体を駆動して知が蓄積されるメカニズムである。何かを理解したとき、「わかった！」の快感が生じて未成熟ミームが成熟すると、それは中心の領域へ移動する。それによって中心に固定されていたミームに構造の変化が生じる。多くの周縁領域において成熟ミームが現れれば、中心における構造の変化も大きくなる。これが大きな発見によって大きな快感を得る仕組みである。積分方程式では境界上の音圧と粒子速度が変われば、音場が変化することを述べたが、その構造と全く同じである。つまり、神経細胞に満される空間に現れるミーム場は境界条件としての周縁とその影響によって思考が変化する中心領域が存在する。ホイヘンスの原理で示した境界上の波源に相当するのが周縁であり、その波源によって影響される領域が中心である。空気で満された空間に音場が生成されるのと同じように、神経細胞で満された空間にミーム場が生成される。

## 5. むすび

音場に対応する知の場としてミーム場を想定し、積分方程式によって成立する境界音場制御の原理に対応するものが周縁制御の原理であるという論理構築を試みた。このアナロジーは未完成である。特にミームという言葉を用いる以上、その自己複製の機能がどのように働くのかを描き出す必要がある。しかし、それはヒトからヒトへ技能が伝達する脳内メカニズムにおいて周縁制御の原理を適用しなければならない。その場合には前述の発見の快感だけではなく、伝達の快感による能動性の駆動力も必要となるであろう。

### 参考文献

- [1] 伊藤毅. 音響工学原論, pp.583-592. コロナ社, 東京, 1957.
- [2] G. Malyuzhinets. "An inverse problem in the theory of diffraction". Soviet Physics Doklady, 14, pp.118-119, 1969.
- [3] M. Camras. "Approach to recreating a sound field". J. Acoust. Soc. Am., 43, pp.1425 - 1431, 1968.
- [4] S. Ise, H. Yano, and H. Tachibana. "Basic study on active noise barrier". J. Acoust. Soc. Jpn., 12 (6), pp. 299-306, 1991.
- [5] 伊勢史郎. "キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理". 日本音響学会誌, 53, pp. 706-713, 1997.
- [6] 金慎也, 仲島崇博, 井本桂右, 伊勢史郎. "アクティブノイズリフレクションユニットの性能評価 - ANRU 周辺でのインテンシティ分布の測定 -". 日本音響学会講演論文集, pp.1091-1092, 3 2008.
- [7] 榎本成悟, 池田雄介, 伊勢史郎, 中村哲. "境界音場制御の原理を用いた音場再現システムにおける再現領域の物理的な評価" 日本音響学会講演論文集, pp. 855-856, 3 2008.
- [8] マイケル・ポラニー. "暗黙知の次元". 紀伊國屋書店, 1980.
- [9] 山口昌男. "文化と両義性". 岩波現代文庫, 2000.
- [10] リチャード・ドーキンス. "延長された表現型". 紀伊國屋書店, 2000.