

不可秤量流体概念の形成

奥村 大介

あの光はどのようなものだったのか。物体的なものであったのか、霊的なものであったのか。

——ペトルス・ロンバルドゥス『命題集』(須藤和夫訳)

はじめに

他の物体が触れていないにもかかわらず物が動くとき、われわれは驚異の念にとられる。奇術師が手を触れずに動かす硬貨に驚き、何か仕掛けがあるはずだと考える。子供は、磁石が鉄を引きつけ他の磁石と牽引・反発の動きをみるとき、磁石が他の物体に接していないのに力が及ぶことに目を見張る。物理学者アインシュタイン (Albert Einstein, 1879-1955) が、四、五歳の頃、父に貰った小さな羅針盤の針が、触れずとも一定の方向を向くことに驚異した逸話はよく知られている。羽のような器官をもたない生物や、プロペラや翼のような構造が備わっていない人工物が空中に浮かぶことは、われわれに神秘の思いを抱かせもする。宗教的伝承のなかにときに見られる〈人体浮揚〉の現象は、

厳しい修行がなせる奇跡の技とも、悪霊の憑依した人間の見える兇事とも言い伝えられるが、いずれにせよ神秘的な現象と捉えられることには違いない。二十世紀以降の世界各地の空に、鳥でも流星でも飛行機でもない何かが飛翔しているという現代の神話もまた、その物体が浮揚する原因が不明であるために神秘的なのである。⁽¹⁾

ことほどさように、離れて存在する物体の間に、何らかの引力や斥力が働いているようにみえるとき、われわれはその原因を知ろうとし、原因が不明であれば、神秘であると驚く。このような力を〈見かけ上の遠隔力〉と呼ぶことにしよう。本稿は、この〈見かけ上の遠隔力〉を解明するために、西欧の思想史上導入された〈不可秤量流体〉(imponderable fluid) ⁽²⁾ ないしは〈不可秤量物〉(imponderable) という概念の歴史を素描するものである。⁽³⁾

一 概観的整理

あらかじめ概観しておくならば、古代世界において、磁石の力や静電気が軽い物体を引きつける作用など、見かけ上の遠隔力はすでに知られていたが、それは概念的に認められてはいなかった。この状況には中世から初期近代にいたるまで大きな変化はなく、見かけ上、離れている物体の間に何らかの作用があるときには、それらを媒介する何かが存在していると考えられた。初期近代にいたると、自然学の対象として、磁力・重力が概念化されるが、そのときにも、これらの見かけ上の遠隔力を媒介する物質が仮想された。それが、知覚することも秤量することもできない微細な物質、いわゆる不可秤量流体である。磁力現象を説明する磁気流体、電気現象を説明する電気流体、そして遠隔的に伝達する重力と光を説明するエーテル概念などがそれぞれある。同時期には、熱現象を担う熱素、燃焼現象に関与するフロギストンなども、不可視にして不可秤量の精妙な流体ととらえられた。これらの流体概念は十八世紀まで命脈を保つが、この世紀の後半に燃焼現象の本質が酸素という元素との結合であることが解明され（酸化反応）、十九世紀には熱がエネルギーとして捉えられ（熱力学）、電気と磁気が電磁場の概念によつて記述されるようになる（電磁気学）、それぞれその現象を説明していた不可秤量流体の概念は、自然科学上の説明原理としては、姿を消してゆく。最後まで残ったのは光と重力の伝達機序の解明であるが、そのために要請されていたエーテル概念は、世紀転換期に、光の説明原理として不要であることが明らかになる。重力が遠隔的に伝達する仕組みの解明は、二十世紀以降に持ち越され、

エーテル概念は否定されたとも出自の異なる類似概念に交代されたとも評しうる、微妙な帰趨をたどることになる。

二 古代思想における遠隔と近接の現象論

端的に述べるならば、十七世紀の科学革命期以前、つまり古代から初期近代において、遠隔作用は存在しないものとされてきた。

古代世界で、見かけ上の遠隔力の典型は磁石の力であった。古代の自然思想において、磁石の働きは、見かけ上、離れた物体の間に作用しているようだが、実はそれは或る媒介物によつて仲介された近接作用であるとする立場と、機序の委細は明らかでないとしても実際に遠隔作用が存在することを受け入れる立場があった。前者を〈近接作用論〉と呼ぶならば、そこにはデモクリトス (Democrite d'Abdère, v. 460-370 av. J.-C.)、エピクロス (Epicure, 341-270 av. J.-C.)、ルクレティウス (Lucrece, v. 99-55 av. J.-C.) などの原子論と、エンペドクレス (Empédocle, v.490-v.430 av. J.-C.)、ディオゲネス (Diogène d'Apollonie, v. 460 av. J.-C.)、後期プラトン (Platon, 427-347 av. J.-C.)、プルタルコス (Plutarque, 46-v.119) などのシクロ機械論が属する。後者、それ以上説明は不可能だが実際に遠隔的に働いている力が存在することを受け入れる立場を〈遠隔作用論〉と呼ぶなら、磁力を神的・霊的な能力とみるタレス (Thales, v.624-v.546 av. J.-C.)、初期プラトン、そして磁力を生命的・生理的なものとして捉えるガレンス (Galen, v.129-v.200)、アレクサンドロス (Alexandre d'Aphrodise, v.150-v.210) などが属する。⁽³⁾

三 アリストテレスに見る磁力の不在と エーテル概念

ここで、中世以降の西欧科学思想への決定的な影響力を有したアリストテレス (Aristote, 384-322 av. J.C.) についで、やや詳しく確認しておきたい。

アリストテレスは「場所的に物體的運動を引き起こすものは、動かされるものに接触しているか連続しているかのどちらかでなければならぬ」と述べ(『自然学』⁴)、彼の運動理論に遠隔作用の存在する余地はない。落体の運動は、固体物質が〈土〉元素 (la terre) から成るため、その固有の場所である大地 (la terre) を目指すために生じるものとされ、地球と落体の間に重力が働いているという考えはとらない。アリストテレスの自然観では、すべての無生物的な物体は直接的な接触作用によって動き、その運動連鎖の最初の一撃たる動因として「自ら動かずに他を動かすもの」が想定されている。他方で、生物については、その動因が靈魂であるとされる(『靈魂論』)。だが、磁石の持つ見かけ上の遠隔力は、『自然学』の近接作用論と明らかに齟齬し、『靈魂論』の生物論との親和性を見せるが、経験的には磁石は明らかに無生物であり、実際にアリストテレスには磁石が生物であるとか靈魂を有するといった記述はない。このような理由でアリストテレスの自然思想体系のなかに磁石の力が——むろんそれを彼が知らなかったとは考えられないわけであるが——とるべき位置は存在しない。

他方でアリストテレスの自然思想のなかにみられる〈アイテール〉(エーテル) という概念は、のちの不可秤量流体概念にとって、源泉的

意味をもつ。アリストテレス以前から古代ギリシャ語の世界で、アイテール (αἰθήρ) は、大気上層、月が存在する領域の空気 (アリストテレスであれば「天上界」)、神話においてはゼウスの支配する領分を意味する語であった。アイテールの原意は「光り輝くもの」であり、パルメニデス (Parménide d'Élée, v.520-v.450 av. J.C.) はアイテールを大気上方の火焰として「穏やかかつ希薄で、一面に均一に広がるもの」と述べ、大地の重い物質性と対比している⁵。アリストテレスの自然学においては、月下界と呼ばれる地上世界は四種の元素——土、水、空気、火 (la terre, l'eau, l'air et le feu) ——から成り、他方、天上界は第五の元素から成り立つが、この〈第五元素〉(quintessence) がアイテールと位置づけられる。天上界と月下界の弁別はプトレマイオス (Claude Ptolémée, v.83-v.168) の地球中心の太陽系モデルとともに中世を通じて支持される世界観であるが、ロペルニクス (Nicolaus Copernicus, 1473-1543) からガリレオ (Galileo Galilei, 1564-1642) ケプラー (Johannes Kepler, 1571-1630) ニュートン (Isaac Newton, 1642/43-27) に至る宇宙観の転換を経て、天上界と月下界を区別しない均質な宇宙空間の概念が成立し、世界を構成する物質も四大元素モデルから、より多様な物質概念へと弁別され、それに伴い、エーテルの第五元素としての位置づけも変容してゆくことになる。

近代の初頭に至って、さまざまな物理・化学現象が発見されるようになる。未知の現象が見つかるたびに、それは一種のアイテール——近代語としてはエーテル (ether) ——の作用とされた。この場合もエーテルは〈流体〉として表象される場合が多く、たとえば熱エーテルといえは、熱現象を担う流体、すなわち熱素 (le calorique) と同義であった。さまざまな物理現象がその現象固有の〈流体〉によって

説明されるようになる。磁気現象を説明する〈磁気流体〉、電気現象を説明する〈電気流体〉。エーテルは、これらの不可秤量流体概念の原型であった。エーテルはその後もおお、この名称のままに、〈光の媒質〉として、十九世紀末、あるいは二十世紀初頭まで、概念的命脈を保ち続ける。

四 流体表象の出自

ところで、こうした各種のエーテル様の〈流体〉について、その表象としての性質と出自について一瞥しておこう。

流体 (le fluide) とは、液体や気体のように、流れる性質を有する物質であり、語源的には古代ギリシャ語の動詞 *ῥέω* (流れる) に遡ることができる。すでに述べたとおり、エーテルが一種の精妙な空気であり、「流れる」「気体」の表象であることは、もともとこの語に備わった性質であった。それはアリストテレスの自然学においても踏襲されている。問題は、これが見かけ上の遠隔力とどのように関わるかである。見かけ上の遠隔力に、何らかの流体が関与しているという記述の、確認しうるかぎり初期のものは、エンペドクレスに求められる。アリストテレス注釈者であるアフロディシアスのアレクサンドロスが『問答集』のなかでエンペドクレスに言及しており、それによればエンペドクレスは「磁石からの流出物 (effluences)」が周囲の空気を引きずり、それによって鉄が牽引されると考えたようである。⁶⁾ また、後述するように、ルネサンスから初期近代の科学思想において、さまざまな自然現象の説明原理として用いられる精気 (Leoprit) という概念は、古代ギリシャ語で「息」を意味する *πνεύμα* (pneuma) 概念にも由来する。

五 真空嫌悪の伝統

空間を何らかの媒質 || 流体が満たしているという考えの背景には、遠隔作用の否定とともに、真空の否定という哲学的要請があった。真空の存在については古代ギリシャでは、デモクリトスが世界を原子と真空からなるものとして捉えた一方、アリストテレスは〈自然は真空を嫌う〉として、これを否定した。ペリパトス派のストラトン (Straton de Lampsaque, v.388-v.269 av. J.-C.) には『真空論』 (*Du vide*) の著作があり、アリストテレスに反して真空の存在を認めたが、その後の西欧思想史のなかではアリストテレス以来の〈真空嫌悪〉 (horror vacui) の伝統が根強く、これは初期近代に至るまで続く。したがって、地上を空気が満たしているのと同様に天上界も何らかの物質が満たしていることが要請され、そこに仮想されたのがエーテルであった。

地上の物体の運動に遠隔作用を認めない自然観で問題になるのは、投射体 (projecta) の運動である。手で投げた石は手から離れたのちも運動し続ける。これは一種の遠隔作用ではないか。むしろ、今日の物理学のように、これを慣性運動として説明すれば何ら問題はないが、アリストテレスの運動論において、慣性運動はまったく想定されていない。中世のアリストテレス学派の学者たちは、物体の運動は外部から力が継続的に加えられる場合のみ持続すると考えた。そして、手を離れたあとの石は、媒体——空中であれば空気——の後押し作用で運動を続けるとした。石によって押される空気が後ろに回り込み、石を押すことで運動が持続するというわけである。これが〈アンティペリスタシス〉 (Antiperistasis) 理論であった。⁷⁾

同様に天上界の運動においても、アリストテレス以来、遠隔作用は排された。アリストテレスの自然学を受けてプトレマイオスは、惑星や恒星は、〈天球〉(a sphere celeste)と呼ばれる同心球の上に張り付いており、天球が回転することで、天体が運航することを主張した。プトレマイオスにあって、元来天球は——現代の位置天文学が想定する仮想的球面を天球と呼ぶのと同じく——天体の運行を説明するための純粹に数学的なモデルであったが、のちに天界の構造をあらわす実体的概念として扱われるようになった。つまり——もしその手段があるならば——触知しうるガラスの殻のような物体とみなされるようになったのである。

実体的概念として天球は、ヨハネス・ケプラーが『新天文学』(Astronomia Nova, 1609)において、火星ならびに他の惑星の運行軌道が楕円であることを明らかにしたとき、その存在に疑念が生じる。複数の惑星の公転軌道が同心を描きつつ軌道が相互に並行であれば、楕円軌道であっても天球は同心球として存在することができる。だがプトレマイオスにおいてもそうであったように、ケプラーにおいても、諸惑星の公転軌道は互いに偏向する。このとき実体的な天球を想定すると、天球どうしが干渉・嵌入することになってしまう。また、ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe, 1546-1601)が行なった彗星の観測は、実体的天球の存在を決定的に脅かした。複数の惑星軌道を貫いて移動する彗星は、天球を突き破って進むことになるわけである。かくて十七世紀に至り、天球概念は崩壊する。

天球を失った宇宙で、惑星は何らの支えもない空間に浮揚していることになる。この疑義に対する答えを与えたのがエーテルであった。エーテルは天球の間を満たす存在であり、もし天球が惑星や恒星を自

らの表面に張り付けて回転しているのでないならば、天体を支え、その運動を媒介しているのはエーテルそのものであるということになる。ここにエーテル概念の変容が見出される。⁸⁾エーテルは単に空間の充滿体(plenum)であるのみならず、運動の、実体的媒介物とみなされるようになった。この状況はデカルト(René Descartes, 1596-1650)の運動論のなかに顕著にあらわれている。すなわち彼は、エーテルの粒子が絶えず運動していると仮定する。だが、運動している粒子が動いてゆく先に空虚な空間というものは存在しないので、或るエーテル粒子は、それ自身運動している別のエーテル粒子が空けた場所をとることで運動する。そして一個のエーテル粒子の運動は閉鎖環状に連なったエーテル粒子全体が二巡する運動、いわゆる渦動(vortex)を引き起こすという。⁹⁾デカルトの『哲学の原理』(Principia philosophiae, 1644)を引こう。「かくして、これらの有溝粒子(particulae striatae)は、たえず、星の中央を通過し、かつまた、まわりに広がるエーテルを通過することによって、そこにある種の渦のようなものをつくるのである」。¹⁰⁾

デカルトの機械論哲学では——まさに機械仕掛けの中を動力が齒車どうしの接触によって伝達されてゆくように——力は近接作用としてのみ説明される。

六 精気という概念

ルネサンス期の自然思想は、古代ギリシャの思想、つまりギリシャ語原典によるアリストテレス、プラトン哲学、そしてネオプラトニスムの伝統の再生により、自然に対して単に観想的・観察的な関与のみ

ならず、大宇宙たる自然世界と小宇宙たる人間とが結びつき、天上来と地上世界とが結びつく万物照応の觀念、あるいは両世界の共感によって特徴づけられる。この世界観においては、大宇宙の天体の運行は小宇宙たる人間の運命——具体的には健康や病理——に影響を及ぼすものであり（占星術）、小宇宙たる人間は大宇宙なる神的存在者へと到達することができ（神秘主義）、物質を扱う人間の精神はその物質と相互作用することになる（錬金術）。このとき、大宇宙と地上の存在とを結びつけるものとして、かの第五元素は、〈精妙な流体〉の表象として立ち現れる。これは、精神と身体との媒介物でもあり、天と地の紐帯でもある。具体的には〈精気〉(spiritus)と、いうものが典型であり、〈油性〉(燃性)の土(terra pinguis)、『発散気』(effluvia)など、さまざまな呼称が用いられた。それらは、自然魔術——その物質科学の側面を見ればキミア(錬金術)化学ということになる——の実践なかで、人間が自然に対して介入する際の、自然と人為との仲立ちとなる触媒のような性質をもつ玄妙な物質で、物質でありながらそれ自体は認識を拒み、不可視にして不可秤量という性質をもつ。この性質は、隠れた質(proprietas occulta)——あるいは隠れた力(virtus occulta)、『隠れた作用』(opus occultus)——と呼ばれ、それを探求する自然魔術の実践は隠密哲学(philosophia occulta)とも呼ばれた。¹¹⁾

そしてこの精気概念は、実質的に第五元素、アイテールとも重なり、万物照応という世界観における天と地との紐帯という抽象的なものから、個々の魔術的实践によって生じる——あるいは生じることが期待される——諸種の物理・化学現象を説明する原理として、徐々に分節化され、現象ごとの精気⇨流体⇨アイテールが想定されるようになる。

七 磁力と重力

先述のとおり、アリストテレス以来、十七世紀にいたるまで、西欧精神史のなかで、「虚空を媒介なしに力が伝達すること」、つまり遠隔作用概念が明確に認められた例はほとんどなく、多くは何らかの媒質⇨流体の仲介による近接作用として説明するものであった。だが、そこに唯一の例外がある。磁石の力である。

磁石の作用は古代ギリシャ以来、その自然科学的説明において、釈然としないものがついてまわる。アリストテレスの自然学では、物体はすべて近接作用によって運動するとされることはすでに述べた。しかし磁石の作用は当時すでに知られていて、見かけ上、明らかに遠隔的に作用する。アリストテレスの哲学体系のなかで磁石の作用を整合的に説明することは難しかったことは先に簡単に触れておいた。彼の膨大な著作群のなかで磁石について言及しているのは『自然学』における次の箇所のみである。¹²⁾「磁石のように、最初の動かすものは、それが動かしたところのものを、今度はそれ自身が他のものを動かすものを動かすことができるようなものにする」(二六七a二)。しかもこの箇所は、彼の運動理論——いわゆる〈不動の動者〉を発端とする運動の連鎖——を説明する比喩として磁石が引き合いに出されているのである。磁力そのものの仕組みについては、一切説明されていない。

プラトンにおいても、初期著作『イオン』のなかで、「マグネシアの石」の作用を神的・霊的な無媒介の力とみる記述があるが、それは、芸術の女神ムーサのもつ影響力が人を詩人たらしめ、詩人はまた同様の感化力によって他の人に芸術の靈気を吹き込むことの比喩として、磁石

が鉄を引きつけ、引きつけられた鉄が磁力を帯びる現象——今日でいえば磁気誘導——のことが述べられるのみであって、自然科学的記載に主眼があるわけではない。他方、後期の自然科学的著作『ティマイオス』では、微視的機械論の形をとる近接作用によって磁石の力が説明される。だが、それは呼吸の仕組みにおける空気の流れを論じた箇所であって、「息」は空虚に流れ込むのではなく周囲の空気を押しつけてゆき、もともとその息があった場所は、周囲の空気が循環して埋めるので空虚な空間は存在しないことを述べているくだけたものであつて（これは後のアントニペリスタシス理論を思わせる）、同様に、磁石や琥珀の牽引作用も、空虚な空間に作用する「引力」(ἀκτι)が存在するわけでは決していないことを述べ(79B80C)、はっきりとは語らないものの、何らかの近接作用の存在が仄めかされるにとどまる。

初期近代にいたつて、ギルバート (William Gilbert of Gylberte, 1544-1603) が『磁石論』(De magnet. 1600) のなかで、磁石とその働きについて、まとまった考察を行なう。ここでギルバートは基本的に、アリストテレス以来の遠隔作用否定の立場をとるが、磁石の力は例外事象とし、それが仲介物を要さない遠隔作用であることを主張する。ギルバートは述べる。「磁石は単に距離を隔てて磁性体を刺激する」¹³⁾。磁力の遠隔作用説は、それ自身としてはもとより、万有引力概念の祖形となつた点で画期的であつた。

ギルバートの磁気概念に着想を得たニュートンの万有引力概念は、伝達媒質を想定しない遠隔作用である。ただし、厳密に言えば、ニュートンは媒介物質としてのエーテルの存在を否定してはいない。一六七五年の論攷「光の諸属性を説明する仮説」のなかでは、エーテル (aether) あるとはエーテル的媒質 (aethereal mediums) によつて

重力 (force of gravity) を説明しようとしている¹⁴⁾。しかし引力という現象を数学的に記述することに徹するという文脈では、引力の原因が判然としない以上、それに不用意な仮説を導入しないという立場を、少なくとも『プリンキピア』(Philosophie Naturalis Principia Mathematica, 1687) と『光学』(Opticks, 1704) においては貫徹している。ニュートンの重力概念は伝統的に否定されてきた遠隔作用概念であることから、当然ながらアリストテレス主義者たちから批判を受ける。同時に、デカルトやライプニッツ (Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646-1716) らとも対立することになる。天体間に働く引力という考えは、ネサンスの自然魔術的・占星術的思考には馴染みよいものであつたが、当時の〈新科学〉のリーダーにも〈旧科学〉の擁護者たちに承認しがたいものであつたのであつた¹⁵⁾。

こうしたわけで、十七世紀後半にあつて西欧では、ニュートンの遠隔作用論たる万有引力説とデカルトの近接作用論たる渦動説が併存することになる。この状況を十八世紀初頭にヴォルテール (Voltaire, 1694-1778) は『哲学書簡』(Lettres philosophiques, 1734) のなかで、「ロンドンに到着するフランス人は、他の諸事万端と同様、哲学においても勝手が大大違つていることに気づく。かれは充実した世界 (le monde plein) を去つて、いまやそれが空虚 (vide) であることを見出す。パリでは微細な物質の渦動 (tourbillons de matiere subtile) から成る宇宙が見られるが、ロンドンではさういふものは何も見られない」と書きとめている¹⁶⁾。

八 さまざまな不可秤量流体概念

十八世紀以降の概念変遷は、やや錯綜している。ニュートン自身のなかで重力理論（遠隔作用）とエーテル理論（近接作用）が併存している状況はそのまま十八世紀の言説空間へと投影される。一方で数理的な概念としての重力、他方でエーテル様の流体（「微細な流体」とか「不可秤量流体」と呼ばれる一連の概念、この両系統が併存するようになる。論理的にみるならば、流体の存在を認める実体論的立場と重力の数理的自然科学は相互に排他的ではない。

同時に、十八世紀以降の西欧科学は、磁力や重力のほかにもさまざま自然現象を陸続と発見していく。そのなかには「見かけ上の遠隔力」に属する現象も含まれ、それらの現象それぞれに対応する固有の流体を想定する物質論的な考え方が現れる。これらの物質はきわめて微細(subtle)であるために重量を測定できない(imponderable)ので、「不可秤量体」とされた。そして、きわめて微細であるために、いかなる穿孔にも浸透して流動しうる流体 (le fluid) とみなされたのである。¹⁷⁾ このような概念で説明された現象の筆頭は電気現象であろう。電気現象についての説明が本格的に始まるのは十七世紀後半から十八世紀にかけての大陸ヨーロッパにおいてである。電気が一種の流体の働きとして捉えられた背景にはデカルト流のエーテル説があったことは明らかであるが、同時に、実験科学の流行という社会的条件があった。¹⁸⁾

A 電気流体

電気実験の前提として、電気を発生させる装置の発明が不可欠で

ある。すでに一六六〇年にドイツのゲーリケ (Otto von Guericke, 1602-86) が硫黄の球体を回転させ、それを摩擦することによって静電気を生じさせる起電機を製作している (一七〇五年頃、英国のホークスビー [Francis Hauksbee or Hawksbee, 1660-1713] がこれを改良した効率的な摩擦起電機をつくる)。さらにドイツのクライスト (Ewald Georg von Kleist, 1700-48) とオランダのミュッセンブルク (Pieter van Musschenbroek, 1692-1761) がほぼ同時期に——前者は一七四五年、後者はその翌年——それぞれ独立に蓄電器 (コンデンサー) を開発する。いずれもガラス瓶の内外に金属箔を貼ったもので、のちにそれはライデン瓶と呼ばれるようになる。蓄電器の発明により実験用の電源を安定的に利用することができるようになり、電気学の実験研究は格段に進む。同時に、電気をめぐる理論的認識もこの時期に進展する。

一七二九年、イギリスのステファン・グレイ (Stephen Gray, 1666-1736) によって、電気が物体のなかを伝わること、つまり電気伝導が発見される。¹⁹⁾ 彼は帯電体と導体を接触させることで、電気力 (Electric Vertue [electric virtue]) あるいは牽引力 (attractive Vertue) が伝わるが、これは帯電体と導体を近づけるだけでも遠隔的に伝わることを観察した。そして、この電気の牽引力のことを、電氣的発散気 (Electric Effluvia) とも述べ、一種の流体的表象で捉えている。²⁰⁾ グレイの助手であったフランス出身のデザギュリエ (Jean Theophile Desaguliers, 1683-1744) は、電気力を伝える物質を導体 (conductors) あるいは非電気体 (non-electrics) と呼んだ。「非電気体」という呼称を用いたのは、摩擦によって電気を起こすことができる絶縁体の対概念としてである。²¹⁾ 当時の人々は、帯電した物体が引力を示すのは、その物体が或る特殊な状態になると考えていた。²²⁾ ところが、

ライデン瓶が示したことは、電気現象を引き起こす何かは瓶のなかに蓄積することができるという認識であった。ワイン・ボトルの容積が大きいほど一層多くの葡萄酒を注ぐことができるように、ライデン瓶が大きいほど電気を溜める容積も多くなるという経験的事実も（実際にはライデン瓶の内外に貼られた導電板の表面積の大きさが静電容量を決めているのであって、瓶という形状の容積と静電容量とは無関係なのだが）、電気は目には見えないが液状の物質であるという確信をもたらした。そして、グレイやデザギュリエの解明した電気の伝導性が示したのは、電氣的引力の原因が物体から離れて他の物体へと移ることができるといふ認識であった。かくて、電気は〈状態〉というよりは一種の〈実体〉であるという理解が成立する。そして、この実体には——今日で言えば正と負の——二種類があることが一七三三年にフランスのシャルル・フランソワ・デュ・フェ (Charles François de Cisternay du Fay, 1698-1739) によって主張された。デュ・フェの用語法では正電気はガラス電気 (électricité vitree)、負電気は樹脂電気 (électricité résineuse) である。デュ・フェは、この二種類の電気の同種を帯びた物体の間には斥力が生じ、異種の電気を帯びた物体の間には引力が生じることを明らかにした。デュ・フェ門下のフランスの学者ジャン・アントワヌ・ノレ (Jean-Antoine Nollet, 1700-70) は、電気があらゆる固体・液体・気体に流入・流出する微細物質の効果によって生じることを主張した。他方、英国では、ウィリアム・ワトソン (William Watson, 1715-87) が〈電気の火〉 (Electrical Fire) または電気エーテル (Electrical Aether) という概念によって、電氣的な引力・斥力を説明している。電気エーテルは希薄な場合は不可視な流体であるが、集中すると焰になる。この火という表象は、電気火花

の視覚的イマジネーションでもあるが、古代の四大元素に由来する元素としての火の性格を有しており、後述するプールハーフェからの直接的影響もみられる。このような背景のなかで、一七五〇年、米国のベンジャミン・フランクリン (Benjamin Franklin, 1706/6-90) の〈電気流体〉概念が現れる。フランクリンは、あらゆる物体に重さのない電気流体が含まれており、それが過剰になると正に帯電し、不足になると負に帯電すると主張した。ここに電荷の正負の概念が確立した。デュ・フェがガラス電気・樹脂電気という二種類の電気流体を仮定したのに対し、フランクリンは流体は一種であり、電荷に正負の二状態があると主張したのである。

電気流体の概念で——他の流体概念と比して——重要な点は、これが流体であり媒質として機能するものである以上、近接作用の機序を説明する要素となると同時に、見かけ上の遠隔力を説明する概念でもある点である。それ以前——ギルバート以来——電氣的引力は、帯電した物体が外部に放散する微粒子の〈発散気〉 (effluvia あるいは electric effluvia) によると考えられてきた。フランクリンはガラスを通して電氣的引力が作用することを発見し、これを受けてドイツのエピヌス (Franz Ulrich Theodor Aepinus, 1724-1802) は、電気流体は直接接触せずとも作用を及ぼすと主張した。これは磁力・重力に加えて電気力もまた遠隔作用であるとする考えである (今日でいう静電誘導)。ここに流体をめぐる遠隔作用／近接作用の二分法が単純には成立しない複雑な状況が生じる。数理的説明においても、イギリスのキャヴェンディッシュ (Henry Cavendish, 1731-1810) とフランスのクーロン (Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806) によって、電磁気力は距離の二乗に反比例すること (クーロンの法則) が一七八五年から

一七八九年にかけて発見され、これはニュートンによる重力の〈逆二乗則〉に対応することから、重力・電気力・磁気力の類似が知られるようになる。

B 磁気流体

電気流体説の影響下に、磁石の作用もまた二種の流体が担っているとする磁気流体説が主張されるようになる。一七五九年の著作でエピソードが一種類の流体による磁気流体説を唱えた。ついで、一七七八年にはオランダのブリュフマンズ (Anton Brugmans, 1732-89)、スウェーデンのウィルケ (Johan Carl Wilcke, 1732-96) がそれぞれ独立に、二流体による磁気流体説を主張した⁽³⁴⁾。二種の流体は、北流体 (Boreal) と南流体 (austral) と呼ばれた⁽³⁵⁾。磁気流体説は、純粋な自然学の内部では、電気流体ほどの理論的意味をもつ概念ではなかった。それは磁気流体が基本的に含鉄物質に含まれ、鉄から分離して他に移すことができないため、電気流体のような理論的展開が生じにくかったのである⁽³⁶⁾。だが、磁気流体の概念は十八世紀後半にヴィーン出身でパリで活躍した医師メスメル (Frédéric-Antoine Mesmer, 1734-1815) によって治療術の概念体系のなかに組み入れられ (メスメリズム＝動物磁気治療術)、またロマン主義の時代には哲学や文学における神秘的思想の源泉となった点で、文化史における意味は大きい⁽³⁷⁾。

C 〈火〉と熱流体

近代の不可秤量流体概念としておそらくもっとも重要なものは熱流体 (熱素) である。十七世紀にあつては機械論的自然観のもと、ニュートン、ボイル (Robert Boyle, 1627-91)、ホイヘンス (Christiaan

Huygens, 1629-95)、フック (Robert Hooke, 1635-1703) から主要な学者たちは皆、熱現象を微小粒子の振動と考えていた。十八世紀に熱の流体説が現れた背景には、エンペドクレス以来の元素としての〈火〉、つまり〈火の実体論〉、そして火・光・熱の三者を曖昧に同一視する伝統的な考えがあった。十八世紀にこの三者が概念的に分化してゆくなかで、それぞれが個別の実体によって担われるようになる。火の実体論と光の実体論は十八世紀から十九世紀にかけて徐々に克服されるが、熱の実体論についてはその後もしばらく熱理論の基礎として残り続ける⁽³⁸⁾。

熱流体の概念的起源の一つがエーテルであることは明らかである。もう一つの重要な源泉はプールのハーフェ (Herman Boerhaave, 1668-1738) の〈火〉 (Fau) という概念である⁽³⁹⁾。これは、ものが燃焼するときに見られる通常の焰 (Flamme) とは区別された存在で、熱現象を説明するための仮想的物質である。たとえば摩擦熱であれば、摩擦によって物体中の〈火〉粒子の振動が激しくなり、その物体を構成する通常の物質粒子を運動させることにより熱が生じる、という具合に説明される⁽⁴⁰⁾。伝統的なエーテル概念とプールのハーフェの影響下に、アントワヌ・ラヴォジエ (Antoine-Laurent de Lavoisier, 1743-94) は一七七〇年代に熱理論を構想し、一七八七年にギトン・ドゥ・モルヴォ (Louis-Bernard Guyton de Morveau, 1737-1816) の共著『化学命名法』⁽⁴¹⁾ において、熱素 (le calorique) とする語を用いている。

D フロギストン——負の流体

十八世紀中頃には燃焼現象もまた一種の不可秤量体であるフロギストン (das Phlogiston) の作用として説明された。その由来は、十七

世紀のベツヒヤー (Johann Joachim Becher, 1635-82) の〈油性の土〉、さらに錬金術の象徴物質〈イオウ〉に遡る。ベツヒヤーの影響下にシュタール (Georg Ernst Stahl, 1659-1734) が主張したフロギストン理論 (die Phlogistontheorie) によれば、フロギストンとは物質に可燃性を与える原質である。一般に物質は灰とフロギストンが結合したものであり、たとえば金属を空气中で燃やすと、そのなかに含まれるフロギストンが追い出され灰になる。金属灰は、フロギストンを多く含む木炭とともに加熱してフロギストンを与えてやれば金属に戻るといふ。燃焼を酸化現象ととらえる後世の理論からみれば、フロギストンは〈負の酸素〉ということになる。フロギストン理論は金属の燃焼 (灰化) 現象以外にも広く適用され、物質の色や匂いといった性質——ロック (John Locke, 1632-1704) が二次性質に分類したもの——を説明する上でも、機械論的抽象的理論よりも強力な原理となった。錬金術以来伝統的に知られていたさまざまな化合現象もフロギストンで説明される。ところで、フロギストン理論がラヴォワジエ (Antoine-Laurent de Lavoisier, 1743-94) によって否定されたことは、よく知られた科学史上の出来事である。ラヴォワジエは、燃焼前後の金属の重量を計り、燃焼後のほうが重くなることから、燃焼現象がフロギストンの放出であるとする説を否定したとされる。だが、金属を燃焼させると重量が増える現象はラヴォワジエ以前から知られていた。それにもかかわらずフロギストン理論が支持されたのは、フロギストンが反重力的傾向をもつと考えられたためである。フロギストンは重量を持たない、それどころか上昇傾向をもつ、別の言い方をすれば〈負の重量〉を有すると、この主張がヴェネル (Gabriel François Venel, 1723-75) らによってなされる (シュタール自身はフロギストンの重量は測定できないとし

たり、ごくわずかな重量があるとしたり、著作のなかでも一貫していないところがある)。フランスにおいてシュタール学説の流れを受け継いだルエル (Guillaume François Rouelle, 1703-70) は、フロギストンをブルーハーフェの〈火〉と同一視して、上空へと向かう傾向をみている (これはアリストテレス自然学における〈火〉概念のもつ性質の遠い残響である)。その後、十八世紀の後半になると、フロギストンはいかなる物質よりも軽いとされたり、水素と同一視されたり、あるいはフロギストン、エーテル、電気、火、光はすべて同一のものであるとする見解が出たりと、概念としての同一性が維持できないほどにフロギストン説は混乱を極める。概念の輪郭が自壊寸前となったところに、ラヴォワジエによる批判が最後の一撃を与えたとみるべきであろう。

E 場の理論におけるエーテル

すでに述べたように、電気現象と磁気現象の類似は古くから知られていた。両者はいずれも〈見かけ上の遠隔力〉であり、クーロンの法則が発見されて以降、両者がともに逆二乗法則に従うことが明らかになり、これらの間に強い関連があることが定量的にも確認されていた。

場の概念は一八二〇年にデンマークのエルステッド (Hans Christian Ørsted, 1777-1851) が電流の磁化作用を発見したことを、その成立の端緒とする。彼が観察したのは、磁針と並行になるように導線を張って電流を流すと、磁針が振れる、そして電流の向きを逆にする、磁針は逆方向に振れるという現象である。

遠隔力として認識された〈力〉の概念が、電気や磁気を伝達する〈場〉の概念へと置き換わっていくときに注意すべきは、ここにおいても遠隔力を媒介するエーテルの存在は否定されていないということである。

十九世紀の場の概念と、二十世紀以降のそれは、概念の理論編成が異なる。マックススウェル (James Clerk Maxwell, 1831-79) 時点での場の概念は、エーテルを否定するどころか、電磁現象をエーテルの作用によって理解しようとする探究として始まった。⁴³⁾

マックススウェルが自らの説を初めて「電磁場の理論」と呼んだ一八六五年の論文「電磁場の動力学的理論」では、電磁場が「電気的または磁気的条件にある物体を含み、かつ、それを取り囲む空間の部分」と定義し、この電磁場は通常の物質で占められていても真空でも構わないが、その真空にはエーテルを考える必要があることを主張する。⁴⁴⁾ マックススウェルにあつて電磁場の理論のなかで記述される電磁的作用はあくまでも媒質の力学的状態変化であり、真空状態でもエーテルという媒質を必要とする。マックススウェルの電磁場は、エーテルをも含む何らかの物質⇨実体の状態変化であり、現代の物理学が考えるような、それ自身が独立した実体としての電磁場とは、似て非なるものであることに注意しなければならない。一八八六年から行なわれた、無線通信技術の出発点ともなったヘルツ (Heinrich Rudolf Hertz, 1857-94) の実験——発信機の火花放電が絶縁された離れた場所にある共振器にも生じる——もまた、電磁氣的な力を伝達する媒質としてのエーテルの実在を示すものと当時は理解された。⁴⁵⁾

電磁場の概念が(エーテルがその特殊な場合として含まれる)物質から切り離され、電磁場がそれ自体独立の実体であるという認識が成立するには、一八九二年、オランダの物理学者ローレンツ (Hendrik Antoon Lorentz, 1853-1928) によるマックススウェル理論の再定式化がなされるのをまたなければならぬ。⁴⁶⁾ ローレンツにあつて、電磁場はたしかにエーテルによって担われるが、通常の物質とエーテルは相互

に独立であるとされ、よつてこのときエーテルは物質の或る特殊例という意味を事実上失い、電磁場そのものと同一視される。ここに、不可秤量流体としてのエーテルは概念として解体し、独立した実体としての場の概念が確立されたとみてよい。

九 光と重力

さて、このようにして、各種の不可秤量流体概念が、より説得的な別様の説明原理によつて取つて代わられていくなかで、後代まで説明困難な現象として残つたのが光と重力であり、その伝達を担う媒質としてのエーテル概念である。

光は無媒介的に伝わるのか、あるいは、媒質を要求するののか——。この問題は十九世紀末にまで持ち越される。一八八七年に米国の二人の物理学者、マイケルソン (Albert Michelson, 1852-1931) とモーレー (Edward Morley, 1838-1923) によつて行われた実測実験は、エーテルの不在を示した。さらにアインシュタインの特殊相対性理論によつて絶対静止系の存在が否定され、エーテル概念は、少なくとも物理的存在としては否定されることになる。

重力についても重力場概念の導入と、アインシュタインの一般相対性理論(一九一五年)によつて、巨視的現象としては、エーテルの存在は要請されなくなった。しかし、微視的あるいは超高エネルギー状態における重力現象は一般相対性理論だけでは十分に説明し尽くされない。むしろエーテル概念が担つた機能の少なくとも一部は、現代物理学が重力の発生を説明する際に用いる「ヒッグス粒子」の概念が担つているとも考えられる(これは実質的にかつてのエーテル概念とみな

しうる可能性があり、エーテル概念が完全に消滅したとは断言できない。現在、重力の機序は、自然界にある四つの基本的な力（重力、電磁気力、強い相互作用、弱い相互作用）を統一して説明する統一場理論のなかで、完全な記述がなされることが期待されている。

流体概念の消息——結びにかえて

ここまで見てきた流体概念は、さまざまな物理・化学現象を説明する実体的概念であった。それが紆余曲折を経て機能的概念（関数的概念）へと変遷してゆくことは、近代科学へと至る西欧自然思想の思惟構造の歴史的変遷を（実体概念）から（関数的概念）への展開として跡づけたカッシーラーの『実体概念と関数的概念』（二九一〇）の見立てに沿うものである。

大筋ではたしかにそうなのだが、それでは自然科学上の説明装置としての役割を終えた流体概念はどこへいったのか。熱素は熱が冷めるかのように、フロギストンはたしかに負の質量をもつかのように、概念として、ほぼ消失してしまつたように見える。だが、自然思想内部では理論的な展開が限定的であつた（磁気流体）の概念は、ときに電気流体の概念とも混交を見せながら、自然科学の世界から、医学や治療文化、広く哲学思想や芸術の世界に流れ込み、メスマルの治療術で想定された動物磁気流体は、十九世紀の観念論哲学やロマン派芸術のなかに類出する磁気のイマジユとして再生し、そして、それは実体であるにもかかわらず秤量できないという不可思議な性質から、新たな概念的現実を得て、精神分析の創始者フロイト (Sigmund Freud, 1856-1939) のリビドーという仮想的物質概念や、その弟子ライヒ (Wilhelm

Reich, 1897-1957) がオルゴンと呼んだ特異なエネルギー概念へと変容し、むしろこれらの領域で展開を見せている。すでに万物照応の時代と異なる知の大地の上に立ち、自然科学、治療実践、哲学、芸術といった領域がそれぞれに分化した時代である十九世紀から二十世紀にかけて、磁気流体は文化諸領域の歴史を斜交的に下降しつつ、各領域へと流入している。自然認識の世界から流れ出た流体の消息を追跡するところが不可秤量流体の概念形成史の責務であろうが、それを果たすには、また幾つかの別稿を要するのである。

後注

(1) 心理学者ユング (Carl Gustav Jung, 1875-61) は〈空飛ぶ円盤〉(Flying saucer) を冷戦下の人々の無意識的不安が空に投影された〈現代の神話〉であると論じた (C. G. Jung, *Ein Moderner Mythos: Von Dingen, die am Himmel Gesehen wurden*, 1958. 松代洋一訳『空飛ぶ円盤』ちくま学芸文庫、一九九三年)。その他、円盤現象については稲生平太郎『底本』何かが空を飛んでいる』国書刊行会、二〇二二年を参照。

(2) 本稿と同一の対象について、先行する研究文献として、本稿全体のため参考としたものは以下のとおりである。山本義隆『磁力と重力の発見』全三巻、みすず書房、二〇〇三年。島尾永康『物質理論の探求』岩波書店、一九七六年。Jean Starobinski, *La Relation critique: Paul cretun II*, Paris, Gallimard, 1970 (調佳智雄訳『活きた眼II——批評の関係』理想社、一九七三年)。Mary Hesse, *Forces and Fields*, 1961. また、次の論攷は、本稿ではほとんど扱えなかつた生体にかかわる流体概念——典型的には動物精気と動物磁気——について論じた文献として重要である。吉永進『電気的』身体——精妙な流体概念について』『舞鶴工業高等専門学校紀要』第三号、一三二—一三〇頁、一九九六年三月。https://researchmap.jp/multidatbases/multidatbase_contents/download/445188/355ad3d456924468136eb3bc8d7de818/20028?col_no=2&frame_id=924566

(3) 山本『磁力と重力の発見』第一巻、九二頁。

- (4) 一四二b五九。出隆・岩崎允胤訳『自然学』、アリストテレス全集、第三巻、岩波書店、一九六八年。以下、同邦訳書からの引用とする。
- (5) 廣川洋一『ソクラテス以前の哲学者』講談社学術文庫、一九九七年、二五八頁。
- (6) R.W. Sharples, *Alexander of Aphrodisias: Questiones 2.16-2.23*. London: Bloomsbury Academic, 2014, p. 83 (2.23).
- (7) これに対してジャン・ユリタン (Jean Buridan, v.1295-1358) ヲノ・ロボノス (Jean Philopon, v.490-v.570) イブン・ヌイーナー (Avicenne, 980-1037) を参照し、物体はそれ自体が有する何らかの量によって運動を続けると主張。ピュリタンはその量をインペトゥス (impetus) と呼んだ。これはデカルトが初めて提唱することになる運動量の概念を先取りするものである。
- (8) これを「エーテルの第一の近代化」と呼んでもよい。それに対して後述するようにエーテルに「場」を担う媒質としての意味が与えられたことは「エーテルの第二の近代化」である。
- (9) ホイッテカー (箱田光一・近藤都登訳)『エーテルと電気の世界』上巻、講談社、一九七六年、一七頁。
- (10) デカルト (井上庄七・水野和久・小林道夫・平松希伊子訳)『哲学原理』第三部「可視の世界について」一〇八節、井上・小林編集『科学の名著 第二期 第七巻 デカルト』朝日出版社、一九八八年、一五九頁。
- (11) その代表的文献は、例えはアグリッパ (Agrrippa von Nettesheim, 1486-1535) の『隠密哲学のこころ』全三部』(De Occulta Philosophia libri III, 1531-33) である。
- (12) 山本『磁力と重力の発見』第一巻、四二一―四三三頁。
- (13) キルバート (三田博雄訳)『磁石論』第二巻、第七章、三田編集『科学の名著 第七巻キルバート』朝日出版社、一九八一年、一一〇頁。
- (14) Isaac Newton, "Hypothesis explaining the properties of light", 1675. 参照した版は Thomas Birch (ed.), *The History of the Royal Society*, vol. 3. London, 1757, pp. 247-305 に収録されたもの電子版 (<https://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00002>)。pp. 250,255.
- (15) 山本『磁力と重力の発見』第一巻、六二―七三頁。
- (16) Voltaire, « Lettres philosophiques », dans *Œuvres complètes de Voltaire*, tome 22, Paris, Garnier, 1879, p. 127. 林達夫訳『哲学書簡』岩波文庫、
- 一九八〇年、強調引用者。
- (17) 島尾『物質理論の探究』、一一〇頁。
- (18) 廣重徹『物理学史』第一巻、培風館、一九六八年、九五―九六頁。
- (19) Stephen Gray, "A letter to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. containing several experiments concerning electricity by Mr. Stephen Gray", printed in *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 37, 1731-32, p. 18. <https://doi.org/10.1098/rstl1731.0005>
- (20) Stephen Gray, *op. cit.*, pp. 30-32.
- (21) 廣重『物理学史』第一巻、九六―九七頁。
- (22) 廣重『物理学史』第一巻、九七頁。
- (23) ハシユラール (金森修訳)『適応合理主義』国文社、一九八八年、一三〇―一三三頁。
- (24) 山本義隆『熱学思想の史的展開——熱とエントロピー』現代数学社、一九八七年、六九―七〇頁。廣重『物理学史』第一巻、九七頁。
- (25) Du Fay, *Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'attraction & répulsion des corps électriques*, p. 457-476, 1733, p. 469. https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Reaumur/Reaumur_pdf/p457_476_vol3530m.pdf
- (26) 島尾『物質理論の探究』一一九―一二〇頁。
- (27) William Watson, *A Sequel to the Experiments and Observations tending to illustrate the Nature and Properties of Electricity*, London, 1746, p. 728. <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl1746.0119>
- (28) *Ibid.*, p. 717.
- (29) *Ibid.*, pp. 745-746.
- (30) Benjamin Franklin, "Opinions and Conjectures concerning the Properties and Effects of the Electrical Matter, arising from Experiments and Observations made in Philadelphia", 1749. (*Experiments and Observations on Electricity*, London, 1751, pp. 51-82) <https://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-04-02-0006>
- (31) Franz Aepinus, *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi*, Saint-Petersbourg, 1759.
- (32) Jed Z. Buchwald, "Electricity and Magnetism to Volta", in Jed Z. Buchwald and Robert Fox (eds), *The Oxford Handbook of the History of Physics*, Oxford, Oxford UP, 2013, p. 439.

- (33) Aepinus, *op. cit.*
- (34) Arturo López Dávalos and Damian Zanette, *Fundamentals of Electromagnetism: Vacuum Electrodynamics, Media, and Relativity*, Berlin, Springer-Verlag, 1999, p. 5.
- (35) 廣重『物理学史』第一巻、九八頁。
- (36) 島尾『物質理論の探求』一二五頁。
- (37) メスメリズムの文化史的展開については、以下の文献を参照。タタール(鈴木晶訳)『魔の眼に魅されて——メスメリズムと文学の研究』国書刊行会、一九九四年。
- (38) 廣重『物理学史』第一巻、九九頁。
- (39) この〈火〉概念については、次の文献を参照。Hélène Metzger, *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique*, Paris, Félix Alcan, 1930. 金森修「火の科学」、『科学的思考の考古学』人文書院、二〇〇四年所収。
- (40) 山本『熱学思想の史的展開』九〇頁。
- (41) Lavoisier, L. B. Guyton de Morveau, C. L. Berthollet et A. F. Fourcroy, *Méthode de nomenclature chimique*, Paris, Cuchet, 1787.
- (42) 島尾『物質理論の探求』一一四頁。
- (43) 廣重『物理学史』第一巻、一四九頁。
- (44) J. C. Maxwell, "A dynamical theory of electromagnetic field", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459-512. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1865.0008>
- (45) 廣重『物理学史』第二巻、三二頁、三六頁。
- (46) H. A. Lorentz, "Electriciteit en Ether", *Verhandelingen van het Nederlandsch Natuur- en Geneeskundig Congres*, 3-40, 1891; *Collected Papers*, vol. 9, pp. 89-101.
- (47) Ernst Cassirer, *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Berlin, B. Cassirer, 1910. カッシーラー(山本義隆訳)『实体概念と関数概念』みすめ書房、一九七九年、第四章V—VIII。