龍谷大学大学院文学研究科
真宗学専攻

「空」の物理的解析

―― 空の論理による数学的零の成立 ――

浄土真宗本願寺派
信成寺

目次

序論 2

1　零の発見 4
1.1　零の発見の歴史的背景……4
1.1.1　バビロニアにおける零記号……5
1.1.2　マヤにおける零記号……7
1.1.3　インドにおける数学的零の発見……9
1.2　物理学における零の振る舞いについて……14
1.2.1　熱力学における零……14
1.2.2　量子力学における零……18
1.2.3　相対性理論における零……22

2　「空」の解析 27
2.1　『中論』における運動の物理的解析……28
2.2　実体の濃度化による「空」の解析……35
2.2.1　相関関係が示す不安定な系……36
2.2.2　実体の濃度化による二諦説の考察……39

3　空の論理による数学的零の成立 42
3.1　零と無の関係について……42
3.2　相関関係による数学的零の成立……45
3.3　まとめと今後の展望……50

参考文献 53

序論

紀元5世紀頃のインドにおいて最初に発見された零という数字は、現代における数学や物理学の理論的基盤に大きな影響を及ぼしている。一方、零が発見される以前の紀元 2 世紀頃のインドにおいて、大乗仏教の根本思想である空の論理が龍樹によって構築されている。空の論理とは相関関係を用いて実体を否定する論理のことであり、中観や空観あるいは大乗空説ともいう。この空の論理が人類最初の零の発見に影響を及ぼした可能性は大きい。なぜなら、当時のインドにおいて大乗仏教は現在のような一般的な宗教としてではなく、むしろ自然科学のような最先端の学問としての役割を担っていたと考えられるからである。そのような純粋に知的な考察から生まれた空の論理が、人類最初の零の発見に影響を及ぼした可能性は大きい。

確かに、零の発見と空は直接結びつかないという主張もある[1)]。しかし、空思想の最大の円熟期におけるインドではじめて零が使用されている以上、空と零の関係を完全に否定することはできないはずである。その証拠に、現代の学問領域において仏教学と物理学は完全に独立したものであるが、両者の理論的側面には興味深い共通点が見られる。例えば、量子力学における波動関数の確率解釈や、相対性理論における時間と空間の依存性は、大乗仏教における因果論や時間論の考えと通じるものである。さらに量子力学や相対性理論などの物理理論の示す結果は、現実の系に対する観測結果と非常に高い精度で一致している。これは、物理学と共通した論理的基盤を持つ大乗仏教の観察眼がいかに優れているかということの裏付けとなる。このように、大乗仏教と物理学の世の中の振る舞いに対する観察方法には共通性があり、そこから空と零の関係が明らかとなる。というのも、現代物理学の成立に対して零は大きな役割を果たしており、仏教と物理の関係性から、空と零の関係が明らかになると考えられるからである。さらに、空を物理的なアプローチにより定量的に解析することで、仏教の論理的中枢にこれまでとは異なった方向から光があたり、さらなる仏教理解につながる可能性がある。

このような背景のもとに行った本研究では、数字としての役割を完備した数学的な零の本質を、大乗仏教の空思想から見つめ直し、

現代数学の零に空の論理を注入することを試みる。また、空思想を物理学的な方向から定量的かつ定性的に解析することで、大乗仏教の論理にさらなる客観性を持たせ学問的な幅を広げることを試みる。今回の研究の目的は仏教思想と現代物理学の理論的な共通部分を浮き彫りにし、互いに及ぼした影響を明らかにすることである。このとき、仏教学から物理学を見た場合と、物理学から仏教学を見た場合の 2 方向から考察することで研究目的にアプローチする。したがって、研究方法としては仏教学的方法と物理学的方法の 2 つの方法を用いることとなる。仏教学の分野で用いられる文献学的研究方法に、物理学に基づいた定量的かつ定性的な解析を交えつつ考察を行う。

本稿の流れとして、まず第 1 章ではインドにおける零の発見の歴史的背景と、自然科学における零の振る舞いについて述べる。次に第 2 章では空の論理について物理的に検証する。そして第 3 章では空の論理による零の成立について検証することとする。以上の試みは仏教学と自然科学領域の新たな発展を生み出す可能性があり、大乗仏教のさらなる理解と伝播につながると考えられる。

1　零の発見

人類史上最大の偉業は零の発見である。零が無ければ数学の発展はあり得ず。数学の発展がなければ、数学を用いて世の中の振る舞いを記述する物理学の発展もあり得ない。そうなれば、物理学を理論的基盤にしながら発展している化学や生物学においても現在のような進歩は不可能であっただろう。つまり零の発見が無ければ、現代における全ての自然科学領域の存在そのものが脅かされるのである。しかしながら、零がどのように発見されたかは現在においても多くの謎に包まれている。

本章では、まず 1.1 項において零の発見の歴史的背景について検証する。そして、次の 1.2 項においてインドで生まれた数学的な零が、現代の数学や物理学の分野に対してどのような影響を与えたのか考えてみることとする。

1.1　零の発見の歴史的背景

現代の数学において零を厳密に定義することは困難であるが、それは古代においても同様である。古代の文明では様々な零が使用されていた。歴史上、バビロニア・マヤ・インドの 3 つの古代文明において、記号として零が使用されていたことが確認されている[2) 3) 4)]。特にインドでは数学的な零が紀元 5 世紀頃にはすでに発見されており、その時代のインド固有の思想または思索方法が、当時のインドにおける数学や天文学の分野に対して影響を与えた可能性は大きい。つまり、インドにおいて最もはやく数学的な零の発見された背景には、インド固有の思想的影響があったと考えられる。

本項ではバビロニア・マヤ・インドの 3 つの文明に注目し、それぞれの文明において零がどのような意味を持ち、使用されていたのか調べてみる。そこから、インドで使用された零がインド固有のも

のであるということが分かるであろう。

1.1.1　バビロニアにおける零記号

3 つの古代文明の中で最も早く零を使用していたのはバビロニア文明である。バビロニアでは紀元前 3 世紀にはすでに零が使用されていたことが分かっている。バビロニア人は粘土板に葦で描いた楔形文字を考案し、その楔形文字はエジプトからペルシャにいたるまで幅広く使用されていた[5)]。さらに、バビロニアの記数法で注目すべきことは、60 進数法に基づいた位取り記数法が使用されていたということである。エジプトやギリシャ、ローマなどの古代文明では、ある桁もしくは数が大きくなるにしたがい、新たな数を示す記号を用いていた。このように桁ごとに新たな記号を導入した場合と、現在用いられているような位取り記数法とを比較した場合、前者の記数法は表現が非常に複雑になる。バビロニアでは 60 進数法に基づいた位取り記数法が約 4000 年前からすでに使用されており、他の文明に先駆けて高度な記数法を構築していたのである。

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	20	30
40	50	60 又は	60+10	60+20	60+30

表 1.1：バビロニアの 60 進数法による数字の表記法

バビロニアで使用されていた記数法に基づいて、現代の 10 進数法に基づいたアラビア数字を表すと表 1.1 のようになる[3)]。表 1.1 をみると、バビロニア人は 2 種類の楔形記号を用い、その組み合わせに

よってあらゆる数を表現していたことが分かる。例えば、746400（＝$3\times60^3+30\times60^2+6\times60^1+40\times60^0$）をバビロニアの記数法に基づいて示すと次のようになる。

（$=3\times60^3+30\times60^2+6\times60^1+40\times60^0$）

バビロニア人はこのようにあらゆる数を、60 進数法に基づいた位取り記数法によって表記した。しかし、前 2000 年頃のバビロニアの記数法は60進数法に基づいた厳密な位取りという性格を持っているにもかかわらず、ある位の数が欠如しているとき、そのことを示す記号（零記号）を用いることはなかった。例えば 3610（$=1\times60^2+0\times60^1+10\times60^0$）という数はバビロニアでは以下のように示されている。

（$=1\times60^2+0\times60^1+10\times60^0$）

しかし、上の表記は 70（$=1\times60^1+10\times60^0$）を示す記号と混同するおそれがある。このような混乱を避けるため、バビロニア人は 60 のある冪が欠如する位に対して、次のように隙間あけて表記する方法を取った。

（$=1\times60^2+0\times60^1+10\times60^0$）

上記のような欠如した位に対して隙間を空けるような表記法を用いても、本質的な問題は解決しなかったようである。なぜなら、この表記法によると 2 つ以上の位の数がともに欠如した場合、その判別が非常に困難だからである。もし、60^1 の位と 60^2 の位の数がともに欠如していれば、2 つの空白を連続させなければならないが、それを 1 つもしくは 3 つ以上の位が連続して欠如している場合と区別することは非常に難しい。とうぜん、バビロニアでは数の読み間違いによる誤算が生じていた。そこで、バビロニア人は 60 進数法のある

位が欠如していることを示すために、次のような 2 本の楔を斜めに傾けた記号を用いた。

バビロニア人は上のような欠如した位を示す記号を紀元前 300 年頃にはすでに使用していた。これが人類史上、最初に発見された零記号である。しかし、バビロニア人は零記号のみ単独で使用することはしなかった。バビロニア人にとって欠如した位を示す零記号は、60 の最大冪の位以外が欠如したときにのみ用いられるものであり、それのみで「無」を示すものではなかった[6)]。例えば、20 から 20 を引いた結果を「あなたがご存じのように」や「穀物は使いつくされた」というような言葉で表現している[2)]。つまり、数学的な演算の結果が 0 になる場合の解として零記号が使用されることはなかったのである。したがって、バビロニアで発見された零記号は、ある位の数が欠如したときにのみ用いることが許されたものであって、現在使用されている数学的な零と部分的な共通性があるものの、数字として明確に認識されていなかったと考えられる。

1.1.2　マヤにおける零記号

マヤ文明は紀元前 1300 年頃からスペインによって征服されるまでの約 2000 年間、メキシコ南部のユカタン半島で栄えた高度な都市文明である[7)]。マヤ文明は巨大なピラミッドや神殿を中心に、優れた暦法・数学・絵文字・石彫などを特色としている。また、3 世紀から 9 世紀の間に 20 進数法に基づいた位取り記数法と零記号を作り上げ、天文学などの分野において使用していた。

マヤ人は表 1.2 に示すような点と棒を用いた抽象的な記号によってあらゆる数字を表現した。表 1.2 によると 1 個の点が算用数字の 1 を示し、2 個の点が 2 を示す。そして 1 本の棒が 5 を示し、2 本の棒が 10、3 本の棒が 15 を示す。また、1 本の棒の上に点 1 個おけば 6 を示し、2 本の棒の上に点を 2 個置けば 12 を示す。さらに零を示す記号は貝殻に似た記号を基本としながら、いくつかの類似した記号

が用いられた。表 1.2 で示した 0 から 19 までの数を表す記号を 20^0, $20^1, 20^2, 20^3$,・・・のそれぞれの位に配置することによりあらゆる数が表現可能となる。つまり、マヤ人は表 1.2 の数字を基本としながら、あらゆる数を 20 進数法に基づいた位取り記数法によって表記していたのである。

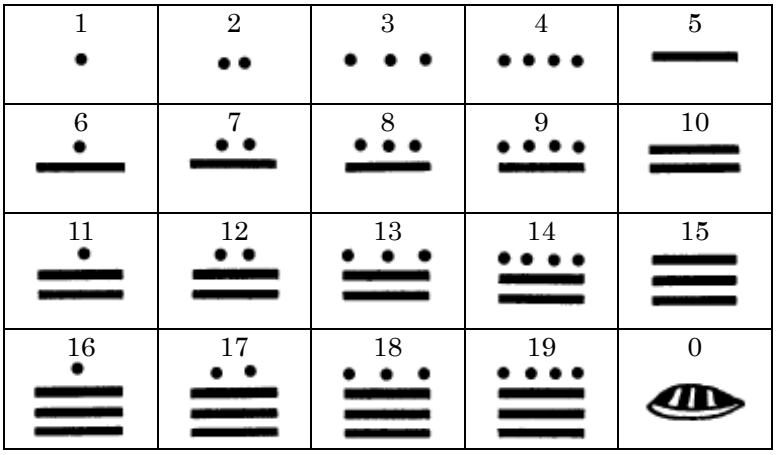


表 1.2：マヤにおける 1 から 19 までの自然数と零の表記法

ただし、マヤにおいてもバビロニアと同様、零記号は演算子として働くことはなかった。というのも、マヤでの記数法は一般的な演算を行うために考案されたものではなく、暦や時間の算出のような特殊な計算のために生み出されたものだからである。しかし注目すべきこともある。それは、マヤでは位取り記数法が考案されるのとほぼ同時期に零を示す記号が使用されていたという点である。バビロニアでは位取り記数法が考案されてから 1000 年以上もの間、零記号を用いることなく演算が続けられていた。零記号なしの長い演算の歴史の中で、表記上の問題から生じた混乱を解決するため、ある種の分離記号としてバビロニア人は零記号を導入する。これに対してマヤでの零は数字の表記以外の場面ですでに使用されていた。例えば、マヤ人は日数を 0 日,1 日,2 日,3 日,・・・というふうに数える。0 日という数え方は一見奇妙に思えるが、これは時間を 0 時,1 時,2 時,・・・というふうに数えるのと同じことである。実際、今日我々が用いている 12 進数法に基づいた時間表記の起源はマヤ文明にある。

バビロニアの零記号とマヤの零記号との決定的な相違は、バビロ

ニアの零記号が単独で使用されなかったのに対し、マヤの零記号は単独で用いられたという点である。しかし、バビロニアと同様にマヤの零記号も数学的な演算には対応できなかった。日時などの数え方からも分かるように、マヤ人の用いた零記号には無だけではなく、充足的な意味も含まれていたようである。そこにはマヤで発展した宗教思想の影響があったと考えられるが、そのことがかえって数学的な零の発展の妨げになったのではないだろうか。しかしながら、文明の歴史を顧みたとき宗教と天文学が科学の道を切り開いてきたことは疑いようのない事実である。このことは次節で述べる、インドにおける数学的零の発見に対してもいえることである。

1.1.3　インドにおける数学的零の発見

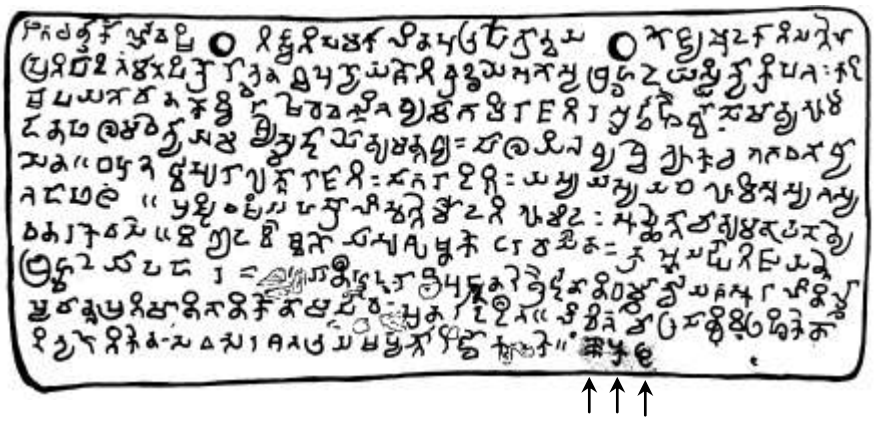


図 1.1：6 世紀頃インドのボラチで発見された位取り記数法を示す銅板。
最後の行の終わりの 3 文字は数字の 346 を示している。

図 1.1 は紀元 595 年、インドのボラチで発見された 10 進数法に基づいた位取り記数法を示す銅板である。これがインドでの位取り記数法を示す最も古い考古学的資料である。考古学的資料によると、インドで位取り記数法が発見されるのはバビロニアに比べてはるかに遅く、紀元 6 世紀頃までしか遡ることができない。また、考古学的な資料に基づけばインドでの零の発見も遅く、紀元 876 年のグワーリヤルで発見された、零記号が記された銅板が最初となる。

インドで発見された零はバビロニアやマヤで使用された限定的な零記号ではなく、演算可能な人類最初の数学的な零でありながら、考古学的資料に基づけば零の存在は 9 世紀頃までしか遡れない。しかし、文献学的資料によって、インド人がすくなくとも 5 世紀頃までに零という数字の存在に気付いていたことが推察される。

インドでは数を示す象徴的な言葉（以下、数言葉と略す）を用いる習慣があり、1 は月（indu,candra）や大地（dhārā）、2 は目（nayana,netra）や手（kara）、3 は火（agni,dahana）や世界（loka）などによって示された。このような数言葉としてインドではじめて零が登場するのである。零を示す数言葉としては、そら（abhra, ākāśa,kha）、点（bindu）、雲（jalada,megha）、空虚（śūnya）などがあり、その数は 10 種類にも及ぶ。中でも「śūnya」は仏教において最も重要な述語、概念、思想である「空」の語にあたる[8)]。この「空」を意味する「śūnya」という語が後にアラビアへ伝わり零の語源となったと考えられている。

ジャイナ教の宇宙論の文献である『ロカヴィバーガ』では数言葉による数表記が紀元 5 世紀にはすでに行われていた。『ロカヴィバーガ』では 13107200000 という数を次の文章によって表している[2)]。

00000		2	
pañcabhyaḥ khalu sunyebhyaḥ	−	paraṃ dve	−
五つの空虚		次に　二	

7	0	1	3	1
sapta	− cāmbaram	− ckam	− trīni ca	rūpaṃṃ
七	大気	一	三	形

= 13107200000

当時のジャイナ教には、空思想を吸収するなど、仏教思想の影響を受けている部分もあることから、「空」という論理的なバックグラウンドが零の使用を推進した可能性も考えられる。

また、ヴァラーハミヒラによる 7 世紀の天文学書である『パンチャシッダーンティカー』（紀元 550 年頃）では 64800 と 1040953 という数が、さらに完全な形の数言葉に基づいて、次のように表されている。

0	0	8	4	6	
bindu－	ambara－	aṣṭa－	lavaṇoda－	ṣaṭka	= 64800
空虚	そら	八	海	六	

3	5	9	0	4	10	
tri－	viṣaya－	aṅka－	kha－	kṛta－	āśā	= 1040953
三	対象	数字	そら	ｸﾘﾀ	方角	

上に示した『パンチャシッダーンティカー』の数の表記は、現在の位の並びとは順序が逆である。これは、当時のインドにおいて数が下の小さな位から読まれていたためである。この順序は 6 世紀頃になって逆転し、現在と同じように上の大きな位から読まれるように変わっている。

さて、数言葉による数の表記法は紀元 550 年頃の『パンチャシッダーンティカー』ではすでに十分発達している。さらに、数言葉による表記法は他の天文学書や数学書にも頻繁に現れ、その出現は 3 世紀頃まで遡ることができる。以上のことから、5 世紀頃のインドでは数言葉による表記法が十分発達しており、零が記号としてのみならず、数字として存在していたことが伺える。ここで、零を示す数言葉の 1 つである点を意味する「bindu」に注目してみよう。インドでは欠如した位を表す記号として「bindu」という言葉を使用している。文学書の中でこのような比喩が成立するということは、当時のインドにおいて零を示す点記号「・」が、一般の人々の間にも広く普及していたことを意味する。

バスカラの『アールバティーヤ注解』（紀元 629 年）では太陽の回転数を示す天文常数が数言葉による記数法で表されている。その中に零記号を意味する「bindu」が現れる。

0	0	0	0	2	3	4	
gagana－	jalada－	bindu－	megha－	yama－	hutāśa－	kṛta	= 4320000
そら	雲	点	雲	双子	火	ｸﾘﾀ	

また、ヴァラーハミヒラの『パンチャシッダーンティカー』（紀元 550 年頃）の中にも、次のように零記号を意味する「bindu」が用いられている。

$$\left.\begin{array}{lllll} 6 & 5 & + & 0 & \div 3^2 \\ \text{ṣaṭ}- & \text{pañca}- & \text{yutaś ca} & \text{bindus}- & \text{trikṛtibhaktaḥ} \\ \text{六と} & \text{五を} & \text{加えた} & \text{点が} & \text{三の平方で割られる} \end{array}\right\} = 560 \div 3^2$$

以上のことから、紀元 6 世紀頃までにインドでは零を意味する記号として点記号「・」が使用されていたことが伺える。さらに、7 世紀までに現代とほぼ同様の数学的な零の概念がインドで確立されていたことが、ブラフマグプタの『ブラーフマ・シッダーンタ』（紀元 628 年）中の記述から明らかとなる。『ブラーフマ・シッダーンタ』には「どんな数に零をかけても結果は零である」と示され、さらに「どんな数に零を加えたり引いたりしても結果は変わらない」と示されている。ここに示された零に関する演算は、現代の数学において定義されるものと同じである。つまり、7 世紀までに、インドでは現代の数学的零とほぼ同様の性質を有する、数学的な零が定義されていたのである。ただし、『ブラーフマ・シッダーンタ』の中には「零を零で割っても零である」という記述もある。しかしこれは間違いである。現代の数学では零を零で割ることは不定形とされ、行ってならない禁止事項とされている。

インドにおいて、数言葉としての零と考古学的資料による零とでは、その発見に 300 年ほどのずれがある。しかし、インド周辺では石碑に刻まれた零記号が 7 世紀の初め頃にすでに出現している。表 1.3 は 7 世紀初めにインド周辺諸国で発見された、石板に刻まれた零記号を示したものである[2)]。表 1.3 をみると、カンボジアでは「シャカ暦 605 年」と書かれた石板が見つかっており、スマトラでも「シャカ暦 605 年」「シャカ暦 606 年」「シャカ暦 608 年」と書かれた 3 枚の石板が発見されていることが分かる。この中で、スマトラの零記号は現代と似た中空の小円であるのに対し、カンボジアの零記号は中黒の点である。インドでは零記号として後に小円が普及するが、それでもあいかわらず零は点「bindu」と呼ばれ続けた。インド人は中黒の点と中空の小円を厳密に区別しなかったようである。零を表現するために点を書くか小円を書くかは伝統や習慣、個人の好みによるとともに、刻まれる対象の材質にも影響を受けていると考えられる[9)]。例えば、柔らかい銅板は中空の小円が比較的刻みやすいが、堅い石板では中黒の点に比べ中空の小円は刻みにくいだろう。しかし、表 1.3 に示したスマトラの例をみれば分かるように、石板にも小円の零記号が刻まれている。したがって、一概に「銅板＝小円」、

「石板＝点」と決めつけることはできないようである。

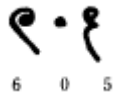
発見場所	西暦［年］	シャカ暦［年］
カンボジア・サンボール州 （トラペアン・プレイの碑文）	683	
スマトラ・パレンパン （ケドゥカン・ブキトの碑文）	683	
スマトラ・パレンパン （タラン・ツウォの碑文）	684	
スマトラ・バンカ島 （コタ・カプールの碑文）	686	

表 1.3：インド周辺で発見された 7 世紀頃の零記号

以上の考察をまとめると、インドにおける零の発見は次のような流れになる。まず、インドにおいて零に対する概念が思想的な深まりとともに次第に固まり、5 世紀頃に数言葉としてはじめて零が成立し、数言葉を用いて様々な数が表現される。そして、6 世紀頃には記号としての零が成立し、点「・」という記号で零は表される。さらに、7 世紀初めには数学的な演算を満たすより完全な零として、様々な書物や石碑などに登場する。インドで数学的な零の概念が定着するとともに、インドの零は周辺諸国に急速に広まったと考えられる。

1.2　物理学における零の振る舞いについて

零が論理学的に注目されるのは、無限大と対比される数だからである。零は数学的に非常に強力な数である。零という概念がなければ、無限大という限りなく大きな数に数学的な振る舞いを見いだすことは不可能である。そうなれば、微積分の核ともいうべき極限の概念さえ定まらず、現代数学そのものの存在が危ぶまれる。つまり、微積分という歴史上もっとも強力な数学上の方法は零に大きく依存しており、現代数学の発展そのものが零によって成立していると言っても過言ではないのである。

では、現代数学を言葉として用いる物理学はどうだろう。例えば、微積分という言葉を物理学が使用できなくなったとしたらどうなるだろうか。それは現代物理学の消失を意味する。物理学の消失は科学の消失を意味する。ゆえに、車、照明、電話などの我々が当然のこととして日々依存している無数の科学技術も、存在するかどうかは零という１つの数次第だったのである。

1.1 項では零の歴史的発展について述べたが、本項ではその後の零が現代科学に対しどのような影響を及ぼし、どのように発展したかについて検証することとする。特に零と物理学との関係に注目し、そこから零と物理学の中に何らかの関係が存在することを見いだしていこうと思う。

1.2.1　熱力学における零

我々人類が火を扱うようになったのはその歴史とともにはるか昔のことである。それ以来、熱や温度に対する人類の関心は特別なものであったにちがいない。しかし、あまりに身近でありすぎたためか、熱に関する学問がはじまったのは大変れて、19 世紀に入ってからである。熱力学はニュートン力学についではじめられた分野である。力学、熱力学についで電磁気学が完成され、19 世紀の終わりにようやく物理学の体系が形成されたのである[15)]。

熱力学は、熱とエネルギーがどう振る舞うかという、熱現象を取り扱う分野である。これは物理学に限らず、化学、生物学、生化学、

医学、あるいは地球物理学などの地球科学、天文学などの宇宙科学、および機械工学、化学工学など種々の工学部門において広く用いられているものである。また、エネルギー、資源、環境などの諸問題に対する意識の高まりから、熱力学はさらなる注目を集めている。

歴史上、物理的に意味のある零がはじめて法則として登場するのは熱力学である。この法則は 1787 年にフランスの物理学者である、ジャック・アレクサンドル・シャルルによって発見された。1662 年、ボイルは種々の気体に対する実験から、一定量の気体の温度を一定に保っておけば、その圧力と体積との積は一定になることを発見した。圧力を p 体積を V として表すと次の（1.1）式のようになる。

$$pV = const \tag{1.1}$$

ただし、（1.1）式の右辺の定数は気体の種類と質量および温度によって異なった値をとる。これをボイルの法則という。シャルルは（1.1）式の右辺に現れた定数について、これが温度によってどのように変化するかを実験によって調べた。この実験より、圧力が一定のもとでは、一定量の気体の体積は温度と線形の関係にあり、0℃における体積膨張率は気体の種類によらず、1/273.15 であることを見いだした。これを式で表すと

$$V = V_0\left(1 + \frac{t}{273.15}\right) \tag{1.2}$$

となる。ここで、（1.2）式の V_0 は 0℃のときの気体の体積、V は温度が t ℃ のときの体積である。つまり、一定量の気体の体積は定圧のもとで気体の温度が 1 K 上がるごとに、0℃のときの体積の約 1/273.15 ずつ増加するということになる。これをシャルルの法則という。

いま、水の氷点（0℃）と沸点（100℃）との間を 100 等分した 1 目盛りを温度差 1K とする。このとき、(1.2)式にもとづいて温度 t と一定量の気体の体積 V との関係をグラフに描くと 1.2 図のようになる[16)]。ただし、図 1.2 中の直線の点線部分は物質によって振る舞いが異なり、現実の系では実現不可能である。1.2 図より、描かれた直線は（100 , V_{100}）、（0 , V_0）の 2 点を通ることが分かる。また、直

線の横軸を横切る温度は－273.15℃である。体積は正の量であるから、気体の温度を使う限り、－273.15 ℃より低い温度は現れない。実際、普通の圧力のもとでは－270℃付近の極低温になると最も液化しにくいヘリウム（He）でさえ液体になってしまう。しかし、原理的には圧力を極端に小さくすれば（実際には圧力 0 の場合を考える）－275.15℃は実現可能となる。そこで－273.15℃を 0K とすると、氷点は 273.15 K となる。これがケルビンの絶対温度である。また、－273.15℃（0K）を絶対零度という。絶対零度は現実の系では到達不可能な温度である。つまり、いかなる物体も絶対零度まで冷却されることはないのである。現代物理学ではレーザー冷却により 100 分の数 K という超極低温まで原子を冷却することが可能であるが、それでも絶対零度を実現することは不可能なのである。これが物理学に現れた最初の零である。

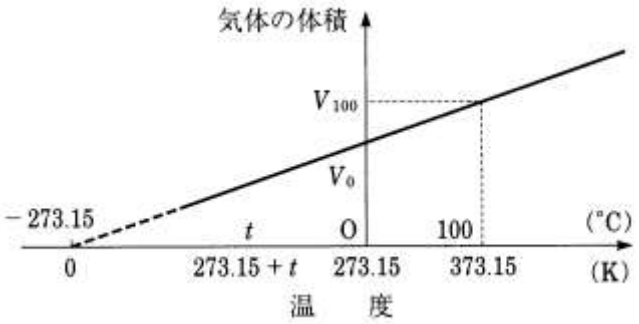


図 1.2：気体の圧力が一定のもとでの温度に対する体積の変化

さらに、熱力学にはもう 1 つの不可能が存在する。それは永久機関の実現である。熱力学第 1 法則の主張するところは、力学で知られている力学的エネルギー保存則が、熱現象においても成り立つエネルギー保存則であるということである。ところで、温度の異なる 2 つの物体を接触させると、高温物体から出た熱量は失われることなく低温の物体に吸収される。ここで、熱力学第 1 法則によると、エネルギーの総量が等しければよいのであるから、低温の物体から高温の物体に熱が失われることなく移ってもよさそうなものである。しかし、実際に自然界においてそのようなことは起こらない。これを不可逆変化という。熱現象の不可逆変化に似た変化は他にもある。

それは拡散という現象である。例えば、コップに入れた水に 1 滴の赤いワインを落としたとき、時間が経過するにつれて、水の中にワインが一様に溶け合ってしまうような現象がそうである。拡散現象は溶液と溶媒とが平衡状態に到達したときに終わる。すでに溶け合ってしまったワインはいくら時間が経過しようとも、ワインだけがひとかたまりになるというように、自発的に分離するという逆の変化は起こらない。つまり、拡散現象は一方向への不可逆な変化を示すのである。

このように拡散という現象は熱の移動と共通の特徴を持っており、また、現象に基づいた変化は一方向にのみ進み、いずれは平衡状態に達する。不可逆変化という自然界に起こる熱現象の変化の方向が、一方向であるということを教えてくれるのが熱力学第 2 法則である。トムソンは熱力学第 2 法則を次のように表現している。

> *1 つの熱源から熱をとり、外部に対して正の仕事をするサイクルを行う熱機関を作ることはできない。*

もしこのような機関の作製が可能であるとすると、どのようなことが起こるだろうか。可能であるとすれば、熱効率が 100%であり、なおかつ周囲の物体から容易に内部エネルギーを吸収し、これを完全に力学的エネルギーに転換させることができる。つまり、周囲の物体から内部エネルギーを吸収して、力学的な仕事をすることになる。例えば、海や地球は無尽蔵のエネルギーを含んだ熱源と考えられるので、これから熱を取り出すことで永久に運転する機関が実現可能となる。

この熱力学第 2 法則を基にして、熱変化の不可逆性の尺度となるエントロピーという物理量がクラジウスによってはじめて導かれる。エントロピーは分かりにくいものの代名詞のように扱われることがある。熱力学的なエントロピーは熱のやり取りのみに注目し、物質の内部変化を考慮せずに論じるため抽象的で分かりにくいかもしれない。これに対し、統計力学では物質内部の分子のようすと関係づけてエントロピーを扱うので、より具体的で分かりやすいだろう。例えば、小さな容器に栓をして閉じこめられていた気体を、真空の大きな容器につないで栓を開ければ、気体は自然に容器全体に広がるのでエントロピーが増大する。気体の分子は小さな容器の中にあるときは動きまわる領域が制限されているが、大きな容器では分子

が無秩序に分布する領域が広く、エントロピーが大きいのである。この意味では、本やノートが机の上にあって、きちんと平行に置かれ制限を受けている状態に比べて、部屋の中に乱雑にある方がエントロピーは大きいということができる。したがって、エントロピーは「乱雑さの度合い」あるいは「無秩序の程度」を表すものであるといえる。一般に統計力学において巨視的状態αにおけるエントロピー$S(\alpha)$は次の（1.3）式によって定義される。

$$S(\alpha) = k_B \log W(\alpha) \tag{1.3}$$

ただし（1.3）式においてk_Bはボルツマン定数（1.380658×10^{-23} [J/K]）であり、$W(\alpha)$はαにおける量子状態の数である。

最後に、クラジウスはエントロピーに対して物理的に意味のはっきりした描像を得たからではなく、熱理論に対する現象論的な考察の結果からエントロピーという物理量を導入したという点に注意しておく。

1.2.2　量子力学における零

20 世紀最初の 4 半世紀の間に、ミクロの世界に対する理解は革命的な変革を遂げる。それは古典物理の適用限界が明らかにされたのみでなく、量子力学というミクロの世界の物理を記述する新たな理論が誕生したからである。19 世紀、マクスウェルやボルツマンによって古典物理学に基づいた原子論の研究は、物質の様々な性質を説明する上でかなりの成功をおさめていた。しかし、ミクロの世界の現象についての理解が正確になるにつれ、古典物理学はいくつかの困難や矛盾にぶつかった。それらを説明するために誕生したまったく新しい物理理論が量子力学である。

古典物理学で説明不可能な量子現象は、19 世紀後半のドイツにおいて起こる。19 世紀後半のドイツは鉄鋼業をはじめとする重工業の発展に力を入れていた。重工業の発展と並行して、それと関連する物理学の研究も奨励されるようになる[18)]。そこで生じた物理学的問題は溶鉱炉の高い温度をいかに精確に計るかということである。なぜなら、溶鉱炉の温度がよく分からないようでは良質な鉄を安定し

て作ることができないからである。そこで、溶鉱炉のミニチュア版ともいえる小型の炉をつくり、小さな窓から漏れ出てくる光のスペクトルを、温度を変化させながら測定するという研究が行われた。いわゆる黒体輻射の問題である。ところが、得られた測定結果はそれまでの古典理論（Rayleigh-Jeans の熱放射式）に基づいた計算結果と比較して振動数の小さい領域しか一致しなかった。つまり、それほど難しいことではないと思われた熱放射現象を、古典物理学の理論では説明できなかったのである。これは当時の物理学者に大きな戸惑いを与えることになった。

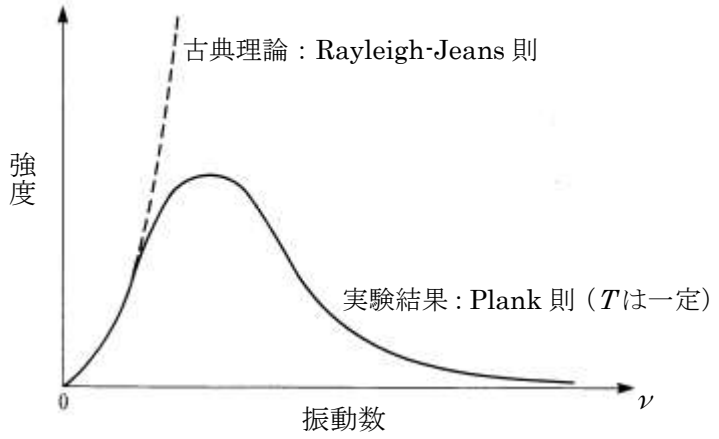


図 1.3：Rayleigh-Jeans 則と Plank 則の比較

1900 年、黒体輻射の問題に対しプランクは次のようなエネルギー量子仮説を提示した。

エネルギーEはいくらでも細かく分けられるような連続量ではなく、$h\nu$ という量の整数倍の値だけしかとることができない。

$$E = nh\nu \quad (n = 0, 1, 2, \cdot\cdot\cdot) \tag{1.4}$$

ただし、(1.4) 式のνは振動数であり、hはプランクが新たに導入した定数でありプランク定数（h=6.626×10^{-27}[erg・sec]）という。プランクは振動数νの光はhのエネルギーのかたまりであるエネルギー量子からできているという仮説に基づいて、振動数の小さな領

域から大きな領域まで実験結果と一致する次のような公式を導き出した。

$$U(\nu,T)=\frac{8\pi h}{c^3}\frac{\nu^3}{e^{h\nu/k_BT}-1} \tag{1.5}$$

これが有名なプランクの公式で、k_Bはボルツマン定数、cは光速、Tは温度である。プランクの公式と古典理論とを比較したものが図1.3である[19)]。図1.3より、古典理論は小さな振動数領域しか実験結果と一致していないのに対し、プランクの理論は全エネルギー領域において実験値と一致していることが分かる。ここに歴史上はじめて量子力学が登場するのである。

プランクの量子仮説は発表当時すぐに一般に受け入れられたわけではない。しかしながら、その後の一連の実験事実のすべてによって確認されることとなる。その重要な第一歩が、1905年にアインシュタインによる光電効果の説明である。アインシュタインはプランクの量子仮説をさらに推し進め、

> *振動数νの光は$h\nu$のエネルギーを持つ粒子（光子）の集団のように振る舞う。*

と考え光電効果の性質を見事に説明した。光が光子という形に量子化されているという考えは、それまでの光に対する考えとはまったく矛盾するものである。しかし、光は波の様に振る舞うこともあれば粒子の様に振る舞うこともあり、波動性と粒子性が重なり合った一見奇妙な性質を有しているのである。

このような粒子の状態は波動関数としてシュレディンガー方程式という線形微分方程式によって記述される。ただし、量子力学では粒子はあくまで粒子と考え、波動関数は粒子の統計的な振る舞いを定めるものと考える。すなわち、量子力学において粒子の空間的な振る舞いに対して答えが与えられても、それは1個の粒子の1回限りの実験の結果として現れるものではなく、1個の粒子による実験を多数回繰り返したときにはじめて認められる。実際の実験では、多数の粒子があとからあとから流れてきて現象を繰り返していくので、事実上はこの種の実験の繰り返しが行われたと考えてよく、波動関数の2乗（確率密度）にしたがって粒子が分布した結果が観測され

ることになる[20)]。

以上の結果からハイゼンベルグによって、次式で示されるハイゼンベルグの不確定性原理が導かれる。

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx h \tag{1.6}$$

ただし x は粒子の位置、p は運動量、h はプランク定数である。(1.6)式より、粒子の位置を正確に知ろうとすれば（$\Delta x \to 0$）するほど、運動量は発散し測定不能となる（$\Delta p \to \infty$）ことが分かる。逆に運動量が確定すると位置はそれだけ不確定になってしまう。つまり位置と運動量の両方を同時に正確に知ることはできないのである。このことは、我々が微視的な対象を観測するとき、どうにもならない測定精度の限界が存在することを意味する。

このハイゼンベルグの不確定性原理から零点エネルギーが導かれる。不確定性原理によれば、ある時点において、ある体積の真空の中にどれだけのエネルギーが存在するかということを知ることはできないとされる。つまり微少な体積の真空中のエネルギーは絶えずゆらいでいることになる。この真空中のエネルギーが零点エネルギーである。量子力学により予想された零点エネルギーは物理的に意味のないものとされ無視されてきた。しかし 1948 年、カシミールによって零点エネルギーがいつでも無視できないことが証明されたのである。カシミールは帯電していない平行な 2 枚の金属板をナノレベルまで接近させると、金属板間の空間のゆらぎが減少し、負のエネルギーと負の圧力が生じることを発見した。これをカシミール効果という。カシミール効果で生じる力は金属板の限られた波長でしか存在しないため、限られた仮想粒子しか存在できない。そのために、外側の多数の仮想粒子に押されて圧力が発生すると考えられている。この現象をうまく利用すれば無尽蔵ともいうべき空間のエネルギーを利用できることになるので、非常に魅力的なエネルギー源として注目されている。

以上のように、インドで生まれた零は量子力学の中で零点エネルギーという未知の可能性を示唆するものとして登場し、今後の発展に期待されている。

1.2.3　相対性理論における零

量子力学の零は真空のエネルギーを示唆した。それに対し、現代物理学のもう 1 つの根幹ともいうべき相対性理論において零はパラドクスを生じさせる。相対性理論は 20 世紀初頭にアインシュタインによって構築された物理学である。相対性理論は特殊相対性理論と一般相対性理論とに分けられる。特殊相対性理論は互いに等速度運動をしている慣性系について述べた理論で、1905 年に完成した。それに対し一般相対性理論は重力も考慮した加速度系も含む理論であり、1915 年に完成した。

相対性理論の内容にふれる前に、ニュートン物理学について考察しておこう。ニュートン物理学は相対性理論の場合と同様に時空を用いて記述される。ニュートン物理学は時空の中において、図 1.4 のようなガリレオ変換を満足するような時間座標で表される[21)]。

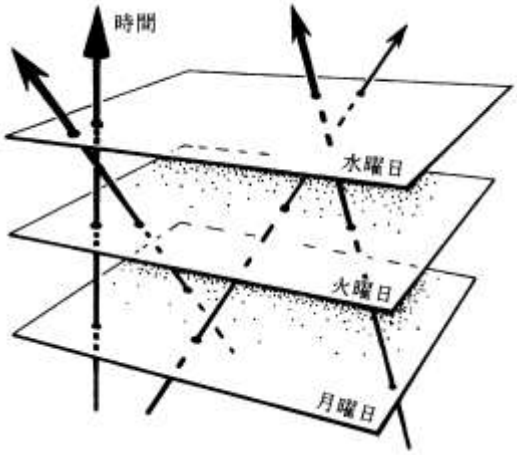


図 1.4：ニュートン物理学におけるガリレオ変換を満たす時空。等速直線運動する質量を持った粒子の運動は平面を貫く直線で描かれている。

図 1.4 では時間が図の下から上へと走り抜け、それぞれの時刻は水平面で表されたユークリッド 3 次元空間の断面として示されている。時間を表す矢印とユークリッド空間を表す平面の関係は、ニュートン物理学で考えられていた時空描像の本質的な特徴を示しており、図を横切るスライスされた平面がそれぞれ同時刻の瞬間瞬間を表している。例えば、月曜日の正午に起こるすべてのイベントは、

時空間を横切る 1 つの水平面上に残ることになる。さらに火曜日の正午に起こるすべてのイベントは、図 1.4 に示された月曜日の次の水平面上に残る。以下同様に、時の経過につれてユークリッド空間が次々と続いていく。つまり、個々の観測者が時空をどのように通過しようと、あるイベントが起こった時刻に対してすべての観測者が同意できる。なぜなら、時間経過を測定するのに、観測者全員が同時刻の平面群を用いているからである。

特殊相対論において、ある物理的イベントの時空描像は光円錐によって表される。いま、ある瞬間にある点でフラッシュがたかれた（フラッシュは時空におけるイベント）とする。このことを時空図として描くと、図 1.5 のような円錐型の時空間座標になる[21)]。図 1.5 において時間は図の下方から上方へと走り、空間座標は水平面の変位で表される。ここでフラッシュは原点によって表され、フラッシュによって生じる光波の進路は水平面（空間）を円形に横切る。円の半径は図の上方へ向かうにつれて光速で広がり、その結果、光波の進路が時空図の中で円錐を形作ることになる。

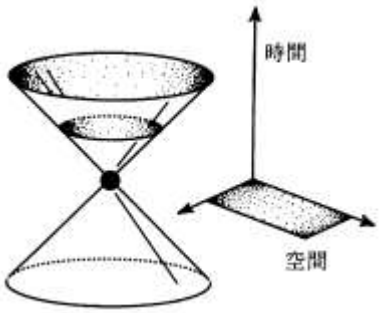


図 1.5：光の伝搬によって形成される円錐型の時空座標

光円錐は時空における最も重要な構造を表しており、特に因果関係が働く限界を示している。図 1.6 は特殊相対論の時空における質量を持つ粒子の運動を表したものである[21)]。時空における粒子の運動は、時空図で上方に向かう 1 本の線で表され、その線は光円錐の内部に存在しなければならない。このことは、質量を持つ粒子が光速より速く移動できないということを表している。つまり、どんな信号も光円錐の内から外へ伝わることはできないのである。光円錐によって因果律に限界が与えられることで、時空における粒子の運

動にも制限が加わることになる。

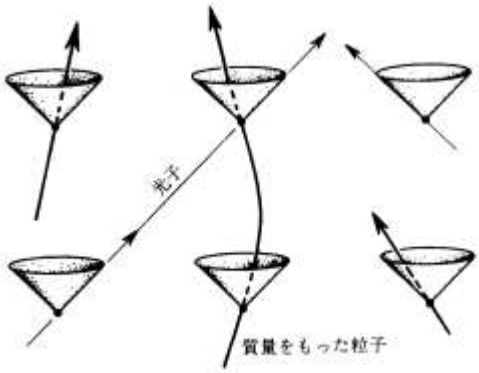


図 1.6：ローレンツ変換を満たす特殊相対論の時空における質量を持つ粒子の運動。時空の様々な点における光円錐は一列に並んでおり、粒子は自身の未来の光円錐の内部でしか移動できない。

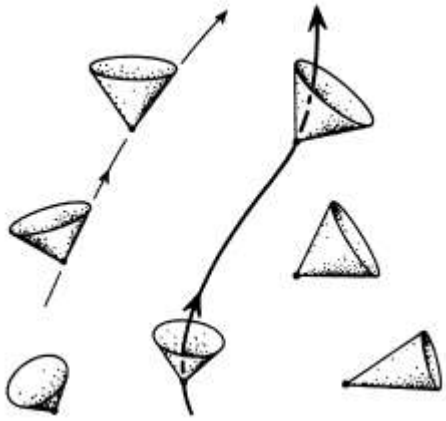


図 1.7：一般相対論における時空。重力の効果により湾曲した時空となる。

一方、重力が存在するときの時空理論である一般相対論において、時空図は図 1.7 で表される[21)]。アインシュタインの理論によると時空の曲率は空間内部の質量で決定される。つまり、物質の密度を適切に定めれば、空間のある点においてどれくらい内側に粒子が加速されるかが分かる。アインシュタインはこのような重力の理論を定量的に示すことに成功したのである。図 1.7 では粒子が運動する時

空が、曲率の大きさに応じてどのようにゆがめられるかを表している。

ある星の周囲の時空は星の重力作用によって湾曲される。さらに質量の大きな中性子星などではさらなる湾曲が起こる。ここで、それらの星より極端に大きな質量（太陽の 30 倍以上の質量）を持つ恒星を仮定する。このような恒星は寿命の末期において自らの質量により収縮をはじめる。恒星はその極端に大きな質量によりパウリの排他原理（2 つの電子は同じ量子状態を共有できない）に打ち勝ち、体積 0 にまで収縮を続け、密度無限大のブラックホールとなる。図 1.8 は質量の大きさにより時空がどの程度湾曲されるか比較したものである。ブラックホールは時空の湾曲というより、むしろ底の無い無限に深い穴である。ブラックホールの密度は極端に大きいため、ある距離より近づいた場合脱出速度は光速をも上回り、光でさえその引力から逃れることはできなくなる[22)]。さらに、ブラックホールという特異点の存在は、なめらかで連続的な時空の基本構造を否定するものであり、ニュートン物理学とはまったく異なる時空概念である。

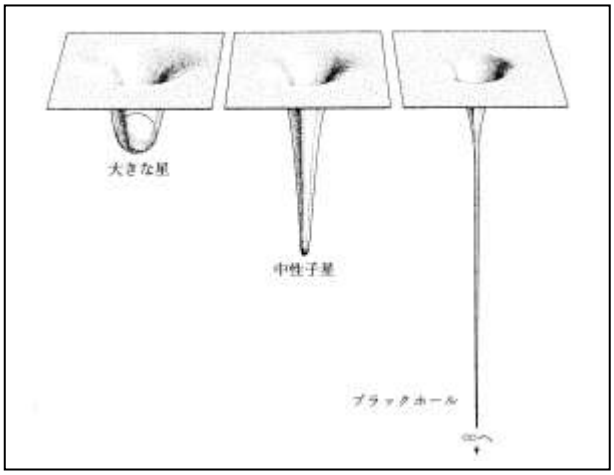


図 1.8：ブラックホールと恒星の比較

ブラックホールのような引き伸ばされた特異点どうしがつながり、さらに、往復可能なものが存在するということが物理的に予想されている。それが往復可能なワームホールである[23)]。図 1.9 は異なる時空をつなぐワームホールの描像を模式図で表したものである。ワ

ームホールを通れば、理論上、瞬時に遙か彼方の異なる時空に移動し、そして戻ってくることが可能である。それは原理的にタイムマシンの可能性を示している。ここから生じる因果律の問題が俗にいう「親殺しのパラドクス」である。父親と出会う前の母親、もしくは母親と出会う前の父親を殺せば、自分自身が存在しなくなりパラドクスが生じるというものである。ホーキングはそのようなことが起こらないように、ワームホールは作られても量子効果によってただちに潰れてしまうという「時間順序保護仮説」を提案している。しかしホーキングの仮説は証明されておらず、今なお未解決の問題である。

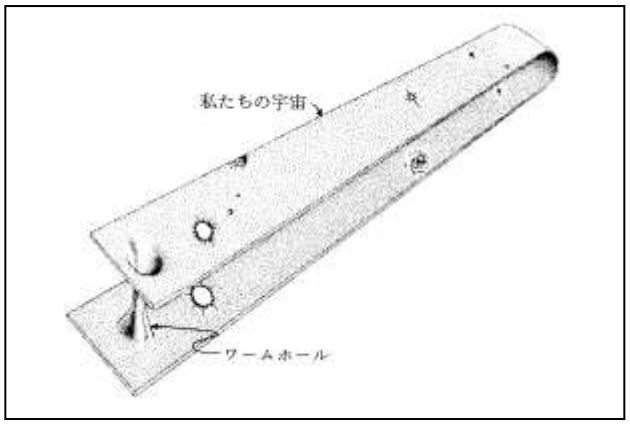


図 1.9：ワームホール

2　「空」の解析

「空」とは言説によってゴータマ・ブッダの縁起思想の妥当性を証明した論理のことである。そして、その目的とするところは「実体」「我」「自性」の否定であり、永遠不変なものを否定し排斥することである。ゆえに、無自性空あるいは空思想、空観思想などと呼ばれる。空思想を構築した龍樹は八宗の祖と呼ばれている。ここでいう「八宗」とは限定された 8 つの宗を意味するのではなく「すべての宗」を意味し、すべての宗派が龍樹を尊んでいることを示している。すなわち、大乗仏教において教理の出発地点はすべて龍樹からであり、大乗と名のつくものはすべて空思想を教理の論理的基盤としていることを意味する[24)]。ゆえに大乗空説という。

大乗空説は大乗仏教の基本要請ともいえるだろう。例えば、量子力学の基本要請として「シュレディンガー方程式の線形性」「重ね合わせの原理」「波動関数の確率解釈」「ハミルトニアンのエルミート性」「基底の規格直交性」などが挙げられる。これらは量子力学を線形代数で表現するための物理的意味づけである。つまり、量子力学の基本要請とは数学と量子力学とをつなぎ合わせる、ブリッジとしての「はたらき」のことである。よって、大乗空説という大乗仏教の基本要請は、大乗仏教徒の信念あるいは願いを言説で表現するための仏教的意味づけといえるだろう。さらに、そこには無自性（自性の否定）という目的へ到達させようとする「はたらき」も付与される。

以上のように「空」は大乗仏教において非常に重要な根本理論であり、概念であり、思想である。本章では、このような大乗空説を物理的な方向から定量的かつ定性的に解析することで、大乗空説の論理的メカニズムの解明に挑む。さらに、大乗仏教の論理を定量的に表すことで仏教哲学にさらなる客観性を持たせ、なおかつ、空の論理と現代科学の理論を融合させることにより、大乗仏教の学問的な幅を広げることを試みる。

2.1　『中論』における運動の物理的解析

『中論』第 2 章において展開される運動の否定の論理は『中論』の論法の基礎ともいえるものである。なぜなら運動の否定の論理は『中論』の諸々の章に対して適用されており、第 2 章で証明された結論は自明のものとして他の章でも用いられているからである。

> *まず、すでに去ったもの（已去）は去らない。つぎに、まださらないもの（未去）も去らない。さらに、すでに去ったものと未だ去らないものとを離れた、現に去りつつあるもの（去時）も去らない*[25]。

上の詩は『中論』第 2 章第 1 詩である。この詩の論理は一般常識的な考えからすると矛盾したもののように思える。しかし、『中論』第 2 章第 1 詩の論理は矛盾したものではない。というのも、ここで龍樹が否定の対象としているのは一般常識における「主体」または「もの」ではなく、それ自体として成立する「実有」だからである[26]。「実有」は他の何ものとも関係をもたず、それ自体として成立し永遠不変な存在となりうる。したがって、「実有」は仏教の無我説によって否定される「アートマン」や「実体」と等しいものであることが分かる。「実有」に基づいて『中論』第 2 章第 1 詩を考えてみると非常に分かりやすい。実有的な考えに基づけば、「実有」は他の作用と完全に独立した存在なので、「去った主体」と「去る作用」は完全に独立したものとなり、「去った主体」は永遠に「去った主体」のまま固定化される。同様に、「去らない主体」と「去りつつある主体」も「去る作用」と独立し固定的なものとなる。そして「去った主体」「去らない主体」「去りつつある主体」の 3 つの状態は保存され、永遠に固定化されるので「実有」に基づく運動は不成立となる。以上より龍樹の主張によれば、運動（世の中のあり方）が成立するためには「実有」に基づいて考えてはならない、ということになる。なぜなら「実有」に基づけば運動は成立せず、世の中のあり方もダイナミズムをともなわない固定的な世の中になってしまうからである。

運動の否定の論理を物理的に解析すれば、『中論』の論理構造がさらに詳しく理解される。また、解析から得られた結果より、「去る主体」の時間への依存性が明らかとなる。そして、世の中の現象をあ

りのままに見つめたとき、無自性でなければ運動が成立しないということが明らかとなる。

まず、『中論』第 2 章の表現から次のｉ)からｖ)の 5 つの条件が推察される。

ｉ） 速度は有限である。

ⅱ）「すでに去ったもの」「現に去りつつあるもの」「未だ去らないもの」という表現から$t=0$での初期条件が与えられる。

ⅲ）「すでに去ったもの」「現に去りつつあるもの」「未だ去らないもの」の速度はそれぞれ光速に比べはるかに小さく、ここでの運動において相対論的効果は無視することができる。

ⅳ） 運動のスケールは我々の日常的なスケールが基準となり、プランク長よりはるかに大きく、量子効果は無視することができる。

ｖ） ｉ)からⅳ)よりここでの運動はニュートン力学に基づいて解析できる。また、1 次元の運動として扱っても運動の本質は変わらない。

ｉ)からｖ)の条件より、A :「すでに去ったもの」、B :「現に去りつつあるもの」、C :「まだ去らないもの」とし、時刻をt、位置をx、速度を$\dot{x}$とおけば、A,B,C それぞれの $t=0$ における初期条件は次のように表される。

$$\left.\begin{array}{l} \mathrm{A}:\ x=x_0, \dot{x}=v_0 \\ \mathrm{B}:\ x=0, \dot{x}=v_0 \\ \mathrm{C}:\ x=-x_0, \dot{x}=v_0 \end{array}\right\} \qquad (2.1)$$

ただし、(2.1) 式において$x_0>0, v_0>0$である。(2.1) 式で与えられた初期条件に基づき、$t=0$における A,B,C の状態を模式図で示したものが図 2.1 である。図 2.1 においてx軸上の 0 は観測者の位置を表す。このとき、もし A,B,C のそれぞれが実体（主体）であるとすれば、それぞれの運動はいかなる次元にも依存せず独立していることになるので、もちろん時刻tにも依存しない。その結果、A,B,C それぞれの運動のその後の時間発展はなくなり、それぞれの状態は限定

され固定的なものとなってしまう。そこで、運動を成立させるために、主体と作用との間に相互依存の関係を適用する。A,B,C それぞれに相互依存の関係を適用すれば、それぞれが時刻や位置などの様々な次元と関係性を持つことになるので、実体としての性質は薄れ、無自性となり運動というダイナミズムが生まれる。このことは、まさに現実の世の中の振る舞いと一致する。龍樹の論理の妥当性は世の中の現象のあり方から明らかとなる。というのも、もし実体が存在すれば運動は成立せず、現実の動的な世の中のあり方と矛盾する固定的なものとなってしまうからである。

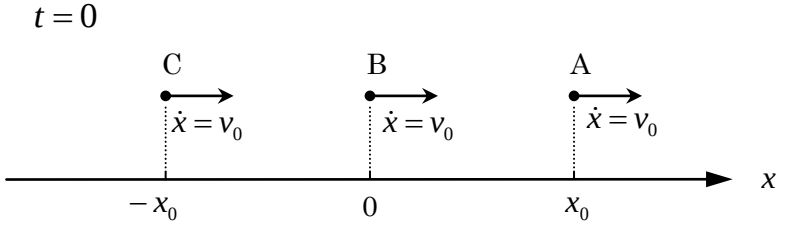


図 2.1：$t=0$ で与えられる初期条件。

上の論証を定量的に示すため、与えられた条件より運動方程式を解くことでさらなる解析を試みる。いま、この系での運動方程式は次のように与えられる。

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=0 \tag{2.2}$$

ただし、(2.2) 式において m は運動する物体の質量である。(2.2) 式を解くと

$$x=C_1t+C_2 \tag{2.3}$$

となる。ただし C_1, C_2 は任意定数である。ここで (2.3) 式に対し初期条件 (2.1) を考慮すると、A,B,C の位置はそれぞれ x_a, x_b, x_c として次の (2.4) 式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned} x_a &= v_0 t + x_0 \\ x_b &= v_0 t \\ x_c &= v_0 t - x_0 \end{aligned}\right\} \tag{2.4}$$

ここで、時間を実体であると仮定して、位置もしくは速度と時間との関係性を無視すれば、x と t との依存性はなくなるので、x_a, x_b, x_c の状態は次の（2.4 - b）式のようになる。

$$\left.\begin{aligned} x_a &= x_0 \\ x_b &= 0 \\ x_c &= -x_0 \end{aligned}\right\} \tag{2.4 - b}$$

このことは A,B,C の状態が常に固定化されることを意味しており、（2.4 - b）式で示される結果は現実の運動の振る舞いとはかけ離れたものとなっている。さらに、$t = t'$（$t' \gg x_0/v_0$）のとき、(2.4 - a) 式の t の 0 次の項は無視できるので、x_a, x_b, x_c の間には

$$x_a \approx x_b \approx x_c \tag{2.5}$$

という関係が成り立つ。つまり、A,B,C においてそれぞれの物理的イベントを限定する作用は薄れ、A,B,C を区別することは不可能となる。考察の対象とした系は実体に基づいていないので、あらゆる事象、もしくは作用と関係性を持つことで形成されている。その結果、時刻・位置・速度は相互に依存し合い、互いに影響を及ぼし合うことになる。そして、ある条件のもとではイベントを限定する要素が取り除かれ、A,B,C というイベントを区別することはできなくなる。このときの x_a, x_b, x_c の状態を図 2.2 に模式図で示しておく。

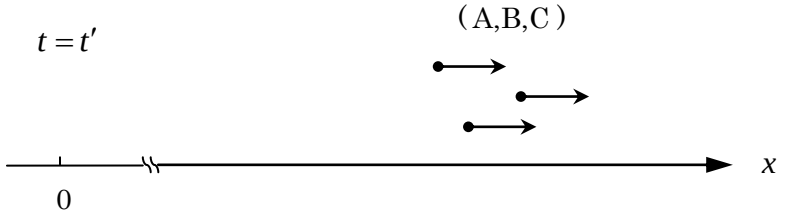


図 2.2：A,B,C の限定は取り除かれ、それぞれの区別は無くなる。

以上の考察結果と、『中論』の帰敬序で龍樹が示す縁起説である「八不」とを比較すると、八不の論理構造が浮き彫りとなる。ここでいう「八不」とは「不生」「不滅」「不断」「不常」「不一」「不異」「不来」「不去」という 8 種の否定のことである。例えば「八不」の 1 つである「不生不滅」において、もし「生」という状態と「滅」という状態が実体に基づいて成立しているとすれば、2 つの状態はいかなる作用とも独立して成立しているので永遠に状態が保存される。つまり、「生」は「生」のまま、「滅」は「滅」のまま永遠に状態を変えずに存在するのである。永遠不変に状態が保持される存在は大乗仏教の基本要請と矛盾したものであり、現実の世の中の現象とは結びつかないものである。実際、八不が成立するためには無自性に基づいていなければならない。ここでの龍樹の主張は「自性をもって生じるものはなく、自性をもって滅するものもない[27) 28)]」ということである。これを言い換えると、「生成消滅が成立するためには無自性でなければならない」ということになる。また、我々の認識や自然科学的な見方からも明らかなように、現実の系において生成消滅は成立している。したがって、世の中のありのままの振る舞いに対する観察から生成消滅という現象が導かれ、世の中のあり方は無自性であることが明らかとなる。ただし、生成消滅は無自性であるための十分条件であることを付け加えておく。

実体としての性質を失った「生」と「滅」はその状態を保持することができず、「生」は「生もしくは滅」の状態をとり、「滅」は「滅もしくは生」の状態をとることになる。ゆえに、両者を判別することは不可能となる。このときの「生」と「滅」の状態を状態ベクトルで表現すると、「生」と「滅」はそれぞれ「生」と「滅」の両方の状態のある種の重ね合わせであると考えられるので、次のようになる。

$$\left.\begin{array}{l} |生\rangle = \alpha\,|生\rangle + \beta\,|滅\rangle \\ |滅\rangle = \xi\,|生\rangle + \eta\,|滅\rangle \end{array}\right\} \qquad (2.6)$$

（2.6）式で使用したカッコはディラックのブラケットといい、量子力学において系の状態を記述するための便法である。ここで｜生〉と｜滅〉は、それぞれ系が「生」という量子状態と「滅」という量子状態にあることを意味する。なお、ここでは複素数のα, β, ξ, ηで重み付けをしておいた。（2.6）式において｜生〉はαとβ、｜滅〉はξとηで重みが付けられた、｜生〉と｜滅〉の状態ベクトルの重ね合わせでそれぞれ表現されている。このとき、「生 」という状態は 1 つの要素のみで構成されているわけではないということに注意しなければならない。つまり、｜生〉と｜滅〉は多数の要素から成り立っているので、1 つの状態に限定することができず、系の固定的な性質が薄れていることになる。もし、｜生〉という状態を観測すると、ある時は｜生〉であり、またある時は｜滅〉となる。同様に、｜滅〉という状態を観測すると、ある時は｜生〉であり、またある時は｜滅〉となる。このような結果が生じるのは、｜生〉と｜滅〉の状態が必然的に決定されるからではなく、観測によって確率的に決定されるからである。実際の状態は 1 つの要素のみで成り立っているわけではなく、複数の要素が重なり合い、影響を及ぼし合い、関係し合うことで成立しており、我々の観測が及ぶのはその系列の一断面でしかない。また、観測という行為自体も作用となり、系を構成する要素となりうる。このとき、観測自体も作用としてはたらくので、逆説的に、観測できるもの（認識できるもの）は実体ではないといえる。現実の系において、（2.6）式の左辺は無限個の項を持つことになる。というのも、現実の世の中では非常に多くの作用（我々の認識に対しては無限個に発散していると考えてよいだろう）が複雑に絡み合うことにより、ある状態を形成するからである。

以上の論理は無自性に基づいて成り立っている。では有自性に基づくときの振る舞いはどうなるか考えてみよう。いま、A,B,C のそれぞれが実体として存在していると仮定する。このとき、A,B,C の状態はいかなる次元にも依存せず独立していることになる。したがって、x_a, x_b, x_cは時刻tに依存しないので、A,B,C それぞれの速度$\dot{x}_a, \dot{x}_b, \dot{x}_c$はそれぞれ 0 となる。このときの運動を図示すると図 2.3

のようになる。図 2.3 に示したように、A,B,C の位置は時刻 t によらず常に一定であり、1 つの場所に常に固定されている。これは（2.4 - b）式で与えられる結果と一致している。つまり A,B,C の運動は時間発展せず運動は不成立となり、（2.1）で与えられる初期条件と矛盾する結果となる。したがって、実体に基づいた運動は、世の中の振る舞いと矛盾していることから否定される。

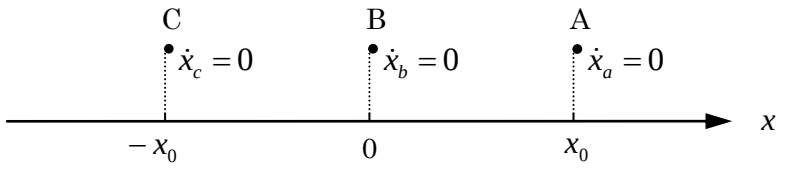


図 2.3：運動が t に依存しないとき、$\dot{x}_a, \dot{x}_b, \dot{x}_c = 0$ となる。

2.2　実体の濃度化による「空」の解析

冒頭にも述べたように、「空」とは言説によってゴータマ・ブッダの縁起思想の妥当性を証明した論理のことである。そして、その目的とするところは実体の否定であり、永遠不変なものを否定し排斥することである。縁起思想とは「縁って起こる」または「縁って起こっている」という考えのことで、その示している内容は実体の否定である。ゴータマ・ブッダが示した縁起思想はそれほど緻密な理論的モデルを形成しているわけではないが、縁起思想が示している内容の本質は龍樹の空思想と等価である。後に、縁起思想から縁起説へのモデル化が行われるが、縁起思想がはじめて論理モデルとして登場するのは、2 つの関係性（因と果など）についての二支縁起としてである。ただし、縁起思想から縁起説へのモデル化を行ったのは、ゴータマ・ブッダではなくサーリプッタであるとされる[29)]。その後、二支縁起は二支から三支、五支、六支、九支と無秩序に支数を増やしていき、最終的に十二支縁起となり、十二支縁起の代用として「これがあるとき、かれがある」の定型句が使用されるようになる。しかし、十二支縁起などの縁起説では各支の実体化が生じてしまい、実体を否定するブッダの縁起思想とは異なるものとなってしまう。龍樹は実体的な考えを強く否定するので、「これ」「かれ」という実体を認めず、「これがあるとき、かれがある」という定型句をきっぱりと否定する[30)]。このとき龍樹が用いる否定の論理こそが空の論理であり、「実体が無い」という意味において「空」である。

空の論理は「相依相持」あるいは「相関関係」という関係性の論理に基づいている。龍樹の論理はあらゆる状態の間に相互依存の関係を見いだすことによって実体を否定するものである。空の論理に基づけば「縁起」とは「縁って起こる」ではなく「関係して生じているあり方」ということになる。さらに空の論理は、目的（自性の否定）へ到達させようとする「はたらき」を発動させるため、二諦説に基づいていなければならない。ただし、ここでのはたらきは主に言説として我々に作用する。図 2.4 に空の二諦と三態の論理構造を模式的に示しておく[31)]。図 2.4 において勝義諦とは世の中のあり方そのものであり、世俗諦とは世の中のあり方を言説で表現したものである。また空の三態では勝義諦を空性（空性の実相）とし、世俗諦を空義（空性の意味）とする。そして、空性と空義は空用（空

性が説かれる目的＝はたらき）によって経由され、ここに空が説かれる目的が明らかとなる[27]。

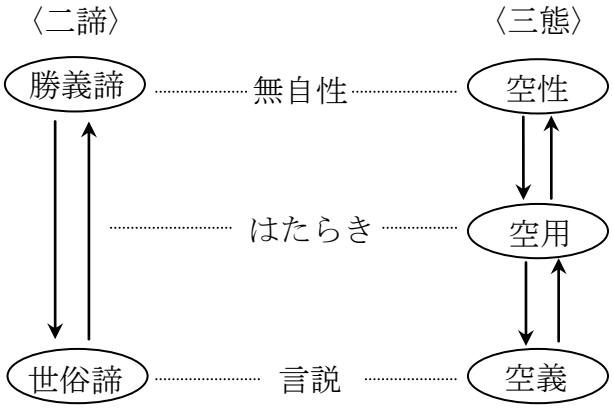


図 2.4 :「空」の二諦と三態の論理構造。

本項では上に示した空の論理構造の解析を試みる。このとき、実体（自性）を濃度化することで定量的に空の論理を解析することが可能となる。実体を濃度として表現することは、現実の系における「空」のはたらきを把握する上で非常に効果的である。なぜなら、実体の濃度化により系の状態数を実体の濃度の逆数として表すことが可能となり、その結果、空の論理に基づいた系の振る舞いが明らかとなるからである。

2.2.1　相関関係が示す不安定な系

2 つのある状態が相互に関係し合い、影響を及ぼし合うことを相関関係という。また、相互に関係し合うある状態は、それぞれ相関関係を示しつつ、同時に変化していく動的な振る舞いを示す。空の論理に基づけば、相関関係を示さないものは存在しないので、世の中のあらゆるものは常に変化する動的な状態にあるといえる。状態が常に変化するということは系が安定しておらず、流動していることを意味する。反対に、状態が常に安定していれば系は秩序を乱すことがない。

1.2.1節で系の乱雑さの度合いを示す物理量であるエントロピーについて述べたが、一般に統計力学では物質内部の分子のようすと関係づけてエントロピーが扱われる。そこでのエントロピーは（1.3）式で記述される。ここで（1.3）式を雛形として、実体に依存した系におけるエントロピーを

$$S(\rho) = k \log W(\rho) \tag{2.7}$$

と定義する。ただし、k は定数、W は状態数であり、ρ は実体の濃度である。また、状態数 W と実体の濃度 ρ との間には次のような関係式が成り立つものとする。

$$W = \frac{1}{\rho} \tag{2.8}$$

（2.7）式は定量的に導かれた式ではなく、統計力学における分子の振る舞いと『中論』の論理とを対比した結果として定性的に導入した式である。さらにその導入の背景には、『中論』と量子論との間の共通した論理構造に着目した、2.1 項の論証結果も反映されている。そもそも、クラジウスはエントロピーに対して物理的に意味のはっきりした描像を得たからではなく、熱理論に対する現象論的な考察の結果からエントロピーという物理量を導入したということにも再度注意しておく。

いま、実体を濃度化して実体の濃度を ρ とした。実体は龍樹の論理によれば完全に否定され排斥されるものであるが、我々の認識の上では概念として存在する。そのような実体を濃度もしくは確率として表現することで 0 から 1 までの連続変数として扱うことが可能となり、状態数 W を（2.8）式のように表すことが可能となる。現実の世の中において相関関係を作り出す関係項の数はアボガドロ数（6.02×10^{23}）をゆうに超えており、状態数 W は 0 から無限大まで発散した連続変数と考えてさしつかえないであろう。なお、W を変数としてエントロピーの振る舞いが明らかとなるが、ここでのエントロピーによって示される巨視的状態は認識上成立している概念としての系である。

以下、実体の濃度に依存した系の振る舞いをエントロピーに注目

し、3 つの場合に分けて検証してみる。

まず、完全に実体が否定され系が無自性であるとき、実体の濃度は 0（ρ=0）となる。このとき（2.8）式より Wは無限大となり、エントロピーは無限大となる（$S=\infty$）。エントロピーが無限大であるということは、系に秩序がまったく存在しないということである。つまり、無自性である系は我々の認識を遙かに超えており、言説によってその振る舞いを表現することは不可能であることを意味する。

次に、実体の濃度が 0 より大きく 1 より小さい（$0<\rho<1$）とき、W は 1 より多きい有限な値をとるので、エントロピーは有限な値（$0<S<\infty$）を示す。このとき、系は乱雑さを示すがエントロピーは発散していない。したがって、系の振る舞いをある程度認識し把握することができると考えられる。

最後に、系が純粋な実体（自性、我、主体）であるとすれば、実体の濃度はもちろん 1（ρ=1）である。このとき、常に安定している微視的状態は秩序を乱すことがないので巨視的状態のエントロピーは 0（$S=0$）である。しかし現実の世の中において、他の何ものからも影響を受けず、また何ものにも影響を与えずに完全に独立した状態が存在するはずはない。もしそのような存在を仮定すれば、世の中の振る舞いをありのままに観察したときの結果と矛盾を生じるであろう。そのことは 2.1 項の考察結果からも明らかである。

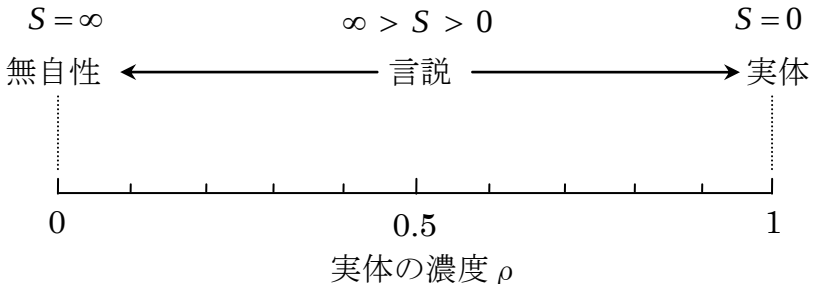


図 2.5：実体を濃度として表したときの無自性、実体、言説の位置づけ。

以上の 3 つの場合を模式的に図に示したものが図 2.5 である。図 2.5 において、実体の濃度が 0 のときエントロピーは無限大となっており、実体の濃度が 1 のときエントロピーは 0 になっている。また同図において、実体の濃度が 0 より大きく 1 より小さいときエントロピーは有限な値となる。このときの巨視的状態を我々に対する言

説のはたらきとした。ただし、言説のはたらきは向きと大きさを持つ１次元のベクトル量であり、その向きは無自性方向と実体方向の 2 方向である。言説のはたらきと実体の濃度との関係は次の 2.2.2 節においてさらなる検証を試みる。

2.2.2　実体の濃度化による二諦説の考察

空の論理は二諦説に基づいて展開される。二諦とは勝義諦と世俗諦のことである。勝義諦とは空の実相（無自性）であり、世俗諦とは実体を否定する言語活動（言説）を意味する[32)]。ただし、両者ははたらきによって経由されるので独立したものではない。

無自性に基づいた世の中の振る舞いを言葉によって表現しようとした場合、言葉を使用した時点で無自性を限定する作用がはたらいてしまう。これは、言葉自体に実体的な要素が混入しているからであり、世の中の振る舞いを記述するために言葉を使用すれば、固定的かつ普遍的な概念が無自性と結びつくこととなる。一見、言葉そのものが実体化しているので、言葉によって無自性に基づいた世の中の振る舞いを知覚することは不可能なように思える。しかし、注目すべきは言葉ではない。なぜなら、世の中のあり方を示すのは、言葉そのものではなく、言葉という道具によって構築された言説という論理モデルだからある。一方、言説という巨視的状態のエントロピーは言葉という微視的状態に依存するので、そのエントロピーは有限な値となり、依存する実体の濃度は 0 より大きく 1 より小さいはずである。また、言説には説く対象と説かれる目的が存在するので向きを持つ。ここでは実体の濃度と言説の振る舞いに注目しているので、向きは無自性方向と実体方向の 2 方向となる。さらに、言説は説く対象に対して、目的に到達させようとするはたらきとして作用する。よって、言説は目的に向かう方向と、はたらきという大きさを持つ１次元のベクトル量によって表すことができる。

大乗仏教の基本要請に基づけば、言説という論理モデルは無自性というありのままの世の中の振る舞いを示す。このときの言説と実体の濃度との関係を模式的に表したものが図 2.6 である。図 2.6 において、言説 a の方が言説 b より実体の濃度が小さく、無自性に近い。つまり、言説 a の方が言説 b より実体を強く否定しており、言説 a

のベクトルの方が言説 b のベクトルより無自性方向を向く可能性が高いことを意味する。しかし、ベクトルの大きさは言説 b の方が言説 a より大きい。言説のベクトルの大きさは目的に到達させようとするはたらきの大きさを意味するので、言説 b の方が言説 a より無自性に向かうはたらきが大きい。ゆえに、言説 b のはたらきの方が説く対象に対してより強力に作用することになる。

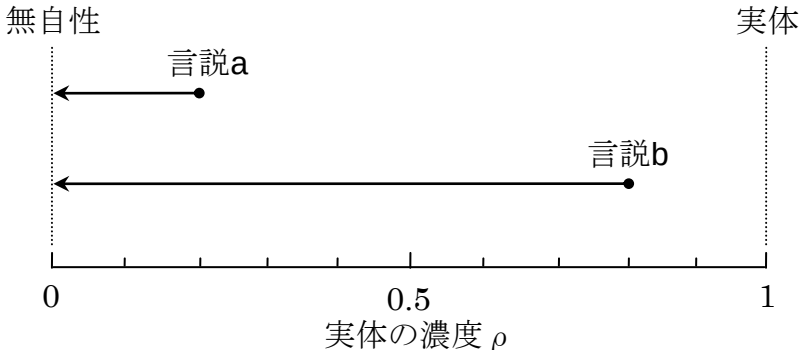


図 2.6：無自性方向への言説のはたらきと実体の濃度との関係。

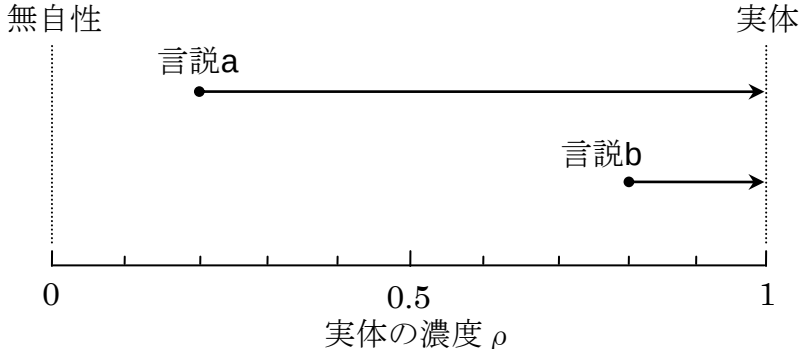


図 2.7：実体方向への言説のはたらきと実体の濃度との関係。

では、言説 A と言説 B が無自性方向へのはたらきではなく、実体方向へのはたらきであると仮定した場合はどうだろうか。このときの言説と実体の濃度との関係は図 2.7 によって示される。この場合、言説 b の方が言説 a より実体の濃度が大きく、より純粋な実体に近い。したがって、言説 b の方が言説 a より実体的な表現をしている

ことになり、言説 b のベクトルの方が言説 a のベクトルより実体方向を向く可能性が高いことになる。しかし、このときのベクトルの大きさは言説 a の方が言説 b より大きくなるので、言説 a の方が言説 b より実体に向かうはたらきが大きくなる。したがって、言説 a のはたらきの方が説く対象に対してより強力に作用することになる。

以上の考察はある種のジレンマを生む。例えば実体を否定するような論理を構築したとする。その論理が無自性という世の中の振る舞いに近づけば近づくほど、実体の濃度は小さくなるが、その分はたらきも小さくなる。逆に、その論理が実体的な論理に近づけば近づくほど、実体の濃度は大きくなるがその代わりにはたらきも大きくなる。つまり、実体の濃度が小さければ、リスクが小さい分はたらきも小さくなる。それに対し、実体の濃度が大きければ、リスクも大きいが、その分はたらきもより強力に作用することになるのである。

大乗仏教の教化方法は教化対象の精神的素質や傾向に大きく依存している。したがって、実体論的な教化方法が大きな成功を収める場合もある。しかし同時に大乗仏教が堕落する可能性もここに含まれている[26)]。実体的な論理には強力なはたらきとともに大きなリスクもつきまとう。空の論理はリスクが小さい代わりにはたらきも小さい。リスクかはたらきか、どちらを優先するかは作用する対象の資質が関わってくるので非常に難しい問題である。しかし、大乗仏教において最も重視しなければならないのは、はたらきの大きさより、むしろはたらきの方向だといえるだろう。このことは大乗仏教の基本要請からも明らかである。よって、いかなる論理モデルにおいても大乗仏教である限り、はたらきの向きが無自性方向であることを明確に示す必要がある。また、はたらきの方向は大乗仏教であるかそうでないかを判別する重要な要素となりうる。

3　空の論理による数学的零の成立

第 1 章での考察より、インドで数学的な零が歴史上はじめて発見されたことと、零が物理学の発展において非常に重要な数であることが分かった。また第 2 章において、空の論理を物理的に解析することにより、その論理構造をより明確に把握することができた。以上をふまえた上で、本章では空の論理によって数学的零が成立したということを証明してみようと思う。

まず、第 1 章で明らかとなった零の性質をもう一度見つめ直すことにより、「零」と「無」の関係について考えてみる。次に、第 2 章で詳しく検証した関係性の論理を「零」と「有」の関係に適用することで数学的な零が生まれることを示し、空の論理によって数学的零が成立したことを導く。

3.1　零と無の関係について

バビロニアの零記号はある位の数が欠如したときにのみ使用されるものであった。つまり、バビロニアの零記号は欠如という「無」を意味する。しかし、マヤの零記号は欠如した位を表すとともに、1,2,3,・・・という 1 以上の自然数と同様に、それのみ単独で使用されることもあった。バビロニアの零記号とマヤの零記号にはいくつかの相違点があるが、両者ともに数学的演算には対応できなかったようである。これに対しインドの零記号は欠如した位を表し、もちろん単独でも使用され、なおかつ数学的演算も満足するものであった。それではなぜバビロニアとマヤの零記号は数学的な零にまで発展しなかったのか、ということを考えてみるとそれぞれ以下の理由が考えられる。

バビロニでは零記号が使用される以前は欠如した位を空白で表していた。空白によって欠如した位を表すと、1 つの位が欠如した場合

と隣り合う 2 つの位が欠如した場合との判別が難しくなり、演算する上で混乱をまねいてしまう。そのような混乱をなくすために、2 本の楔形を傾けた零記号が考案されたと考えられる。バビロニアの零記号は欠如した位を表す空白と同様の意味を持っている。つまり、バビロニアの零記号は純粋な「無」を意味するのである。バビロニア人が欠如した位を空白によって表現したのは、欠如した位がいかなるものも存在しない「無」を意味するからである。しかし、空白は演算上の混乱を生むため、それを解決するため「無」を意味する空白を楔形の記号によって表した。これがバビロニアの零記号である。バビロニアにおいて「無」を記号に置き換え「零」としたことは、数の歴史において非常に大きな功績である。しかし、バビロニア人は零のみ単独で使用することができなかった。つまり、「無」をそれのみ単独で使用することができなかったのである。零以外の数を表すときにのみ零記号が登場するということは、とうぜん数学的に不完全であり、零に対する認識に何らかの誤りがあるか、もしくは足りないものがあるかのどちらかである。だがバビロニア人は「無」と「零」を等価なものとして扱っており、零に対する認識に誤りはないようである。つまり、数学的な零を構築するために足りない何かがあったと考えられる。では足りないものとはいったい何であろうか。そこで、第 1 章と第 2 章の検証結果より、足りないものは関係性の論理（相関関係）であると考えられる。関係性の論理がなければ「無（零）」を「有（自然数）」と結びつけることができず、「無」と「有」を等価なものとして扱うことができない。それに対し、「無」と「有」に関係性の論理を適用すれば両者の間に相関関係が生じ、「無」と「有」を等価なものとして扱うことができるであろう。

バビロニアでは位取り記数法が考案されてから 1000 年以上もの間、零記号を用いることなく演算を続けていたのに対し、マヤでは位取り記数法が考案されるのとほぼ同時期に零記号が使用されている。さらに、マヤの零記号はバビロニアの零記号と違い、単独で使用されることもあった。一見すると、マヤの零記号はバビロニアの零記号より論理的に進展しているように思える。しかし、マヤ人の零に対する認識には大きな誤りがある。実際、マヤの零記号は数学的には不完全なものであり、単独の演算に対しては無力であった。マヤの零記号が不完全である理由は、零に「有」の意味が込められている点にある。「有」として零を扱うことにより、零記号を単独で

使用することができ、さらに、位取り記数法が考案された早い段階から零記号を導入することができたのである。マヤの零は「有」を示す自然数とほぼ同様の意味であり、「有」という集合の中において相関関係が適用され数字として成立していたのではないだろうか。もちろん、マヤでは「無」ではなく「有」に注目しているので、「無」と「有」の間に関係性の論理が適用されることはない。

以上の理由により、バビロニアとマヤの零記号は数学的な零にまで発展しなかったと考えられる。バビロニア人が零を「無」としてとらえたのに対し、マヤ人は零を「有」としてとらえた。また、バビロニア人は「無」と「有」との間にはたらく相関関係まで思索が及ばなかった。その結果、バビロニアの零は単なる空白を表す代替記号でしかなかった。一方、マヤ人は零を「有」としてとらえることにより単独での使用を可能とした。しかし、マヤの零も数学的な零にはほど遠く、自然数（1,2,3,...）の領域から脱していないものであった。

確かに、バビロニアとマヤの零はともに数学的に不完全なものである。しかし、バビロニアとマヤの零に対する認識の誤りは、数学的な零が成立する上で不可欠な要素を示してくれている。数学的な零が成立するために、まず乗り越えなければならない壁は「無」を数として認識することである。「無」を数として認識することにより「無＝零」となり、「無」と等価な意味を持つ零記号が生まれる。そして「無」と「有」の間に関係性の論理を適用することにより、零と自然数の間に関係性が生じて数学的な零が成立すると考えられる。

3.2　相関関係による数学的零の成立

零記号はバビロニアでは楔形の文字で表され、マヤでは貝殻などの絵文字で表されたのに対し、インドでは点や小円などの極めて単純な記号で表されている。また、インドの零記号は単独でも使用されており、零と他の数に関する足し算・引き算・かけ算・割り算の四則演算も定義されている。7 世紀の天文学書である『ブラーフマ・シッダーンタ』には$a \pm 0 = 0$, $0 \pm 0 = 0$, $a + (-a) = 0$, $a \times 0 = 0 \times a = 0$, $0 \times 0 = 0$, $0^2 = 0$, $\sqrt{0} = 0$, $0 \div a = 0$などの零に関する計算が記されている[33]。ただし零での割り算においては、$0 \div 0 = 0$として誤った結果を導いていたり、$a \div 0$を「零を分母に持つもの」とだけ表現してその意味にふれなかったりしている。現代数学では零の割り算はやってはいけない禁止事項となっている。零での割り算は当時のインドの数学者達を大変悩ませたようである。例えば、$a \div 0 = 0$としたり、$a \div 0 = a$や$(a \div 0) \times 0 = a$とした者もいた。ただしこれらは現代数学ではすべて間違いである。また、バスカラは$a \div 0$を「無限量」と表現して数のように扱い、「これに数を足したり引いたりしても変わらない（$\infty \pm a = \infty$）」としている。現代数学的では、これは正しい記述の仕方ではない。しかし、バスカラの考えは$a \div x$においてxを限りなく 0 に近づけていくと無限大になるという「極限」の概念の先駆けともいえる。いずれにせよ、古代のインドで使用されていた零は現代数学で用いられている零とほぼ同様の意味を持っていたと考えてよいだろう。

インドの零はマヤの零のように単独でも使用されていたが、そこに「有」の意味が込められていたとは考えにくい。インドにおいて零を示す言葉は「空虚」「雲」「点」などのように否定的な意味合いの強いものが多いことから、零記号は「無」を示していたと考えられる。このことに対しジョセフ・ニーダムは、インドにおける零の発見はインドと中国の文化的な交流の結果が生み出した思想的産物ではないかと指摘している。つまり、ニーダムはインドと中国の文化的な交流により、インドの「空」の概念と中国の「無」の概念が思想的に結びつくことで「零」の発見に至ったとしている[34]。ニーダムの主張の真偽は分からないが、少なくとも彼の主張より零の発見において「無」に対する「空」のはたらきがあったことが伺える。

「無」に対する「空」のはたらきを認めれば、インドでの零の成立に対して決定的な影響を及ぼしたと考えられるのは、龍樹によって構築された空思想に基づく関係性の論理（相関関係）である。3.1項で述べたように、バビロニアとマヤの零は相関関係に対する認識の欠如、あるいは不足により数学的に不完全なものとなった。ただし、零を生み出すための前提として「無」を数として認識する必要がある。「無」を数として認識することにより、「無」を意味するシンボリックな記号としての零が誕生する。さらに、零が単なる記号以上の数学的な数として効力を発揮するためには、零に対して関係性の論理を適用する必要がある。「無」を意味する零と「有」を意味する自然数の間に関係性の論理を適用することにより、「零」と「自然数」は相互に依存し合うことによって成立していることが明らかとなる。つまり、両者は互いに相依って成立しており、どちらかが独立して成立しながら存在しているわけではないので、「有」の存在は同時に「無」の存在を前提としていることになる[8）35)]。したがって、「有」に基づいた自然数が成立すれば、「無」に基づいた零という数が同時に成立することになる。相関関係によって成立した零は、バビロニアの零のように空白に代わる単なる代替記号ではなく、自然数の振る舞いに準拠し、なおかつ数学的に新たな意味を有した数となる。

ここで、相関関係による零の成立をさらに詳しく検証してみよう。例えば、「無」と「有」が独立したものではなく、両者の間に何らかの関係性が認められる（実際、「無」と「有」の両者は互いに相依って成立しており、どちらかが独立して成立しているわけではないから、以下の論証は恒等的に成立する）とする。このとき、「α」という状態と「β」という状態の間に生じる相関関係によるはたらき（作用）を

$$J_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\beta} \tag{3.1}$$

と定義する。いま、「無」と「有」との間に相関関係に基づくはたらきが生じているので、「無」を示す0と「有」を示す1以上の自然数との間にも同時に相関関係が成立しはたらきが生じる。したがって、「無」と「有」との間に相関関係を考慮した場合の0と1以上の自然数との関係を模式的に表すと図3.1のようになる。図3.1において、「無」と「有」を結ぶ横線「—」は両者の間に相関関係が成立して

いることを意味する。また、互いに影響を及ぼし合う作用は（3.1）式より$\sigma_{無}\cdot\sigma_{有}$となる。同時に、「無」を意味する 0 と「有」を意味する 1 以上の自然数（1,2, 3・・・）との間にも相関関係が成立するので、0 と 1 との間には$\sigma_0\cdot\sigma_1$の作用が生じ、0 と 2 との間には$\sigma_0\cdot\sigma_2$の作用が、0 と 3 との間には$\sigma_0\cdot\sigma_3$の作用が生じることになる。最終的に0はすべての自然数との間に相関関係を形成することになるので、無限個の作用が生じることとなる。もちろん、自然数どうしの間にも相関関係が成立しており、1 と 2 との間には$\sigma_1\cdot\sigma_2$、2 と 3 の間には$\sigma_2\cdot\sigma_3$の作用が生じており、図には示していないが 1 と 3 やそれ以外の数の間にもそれぞれ作用が生じている。「無」と「有」との間に相関関係が成立し作用が生じれば、「無」とういう概念は「有」という概念によって明確に定義される。つまり、「有」に相対して「無」が定義されることにより零が数として認められるのである。歴史上「無」である零が使用される以前からすでに「有」である自然数は明確に定義され使用されていたことは明らかである。ここに相関関係を適用し、「無」と「有」との間に作用を生じさせれば、両者は互いに作用し合うので、「無」も「有」に対する数として明確に定義されることになる。また、両者は互いに依存し合うことにより成立しているので、一方のみが単独で成立するという状況はありえず、必ず両者ともに同時に成立するはずである。その証拠として、バビロニアやマヤの数の体系には限界があり、その後の進展もみられなかったことが挙げられる。したがって、「有」の数と「無」の数がともに成立してはじめて数学的な数の体系が完成され、現代数学に至る数の発展が可能となる。

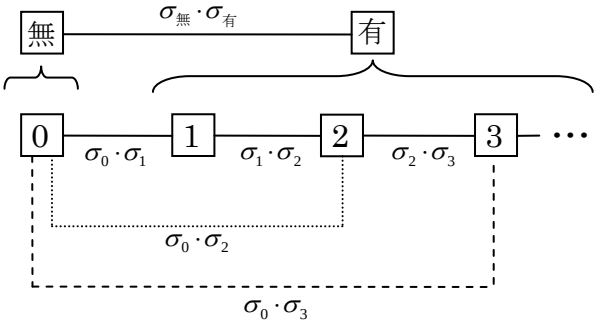


図 3.1 :「無」と「有」との間に相関関係を考慮した場合の 0 と 1 以上の自然数との関係。

では、「無」と「有」の間に相関関係が成立せず両者がそれぞれ独立した存在であるとすれば、作用が生じている場合と比較して数の体系にどのような違いが現れるだろうか。

条件より、「無」と「有」の間に相関関係が成立しておらず、両者はそれぞれ独立してそれのみで成立しているので、「無」と「有」との間に相関関係に基づくはたらきが生じることはない。したがって、「無」を示す 0 と「有」を示す 1 以上の自然数との間にもはたらきが生じることはなく、0 と 1 以上の自然数はそれぞれ独立して存在することとなる。このときの 0 と 1 以上の自然数との関係を模式的に表すと図 3.2 のようになる。図 3.2 において、「無」と「有」との間には相関関係が成立していないので、両者の性質が作用によって経由され影響を及ぼし合うことはない。つまり「無」と「有」の関係は断裂しており、同様に 0 と 1 以上の自然数の関係も断裂している。もしこのような状況のもとで、0 以外の「有」に基づいた数のみ成立しているとすればどうなるであろうか。このとき「無」は「有」と関係性をもたないので、「有」によって明確に定義されることもない。「無」はいつまでたっても「有」と対等な概念として認められることもなく、注目されることもない。そして、「無」に基づく数が生まれることもなく、「有」に基づいた数のみ存在することになる。ゆえに、0 を自然数と対等な数として扱うことができず、数学的な 0 が成立する可能性はなくなる。

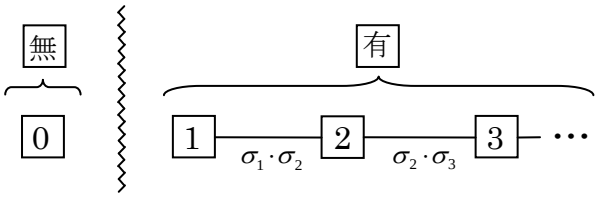


図 3.2 :「無」と「有」が相関関係を形成しない場合の 0 と 1 以上の自然数との関係。

以上の考察より数学的な零が成立するためには、まず関係性の論理が成立していなければならないことが分かる。関係性の論理が成立していれば、それを自然数に適用することによりはたらきが生じて零が生まれる。インドでは龍樹によって「空」という実体を否定する論理として関係性の論理が確立していた。もちろん、それ以前

に零以外の数の体系はできあがっている。零以外の「有」の数に対して「空」がはたらきとして作用することにより、零という「無」の数が生まれるのである。バビロニアやマヤの零は関係性の論理に基づいて生まれたものではないということは明らかである。だからこそ、現代数学の零がインド固有の空の論理をその発端としているとう確証がより一層深まるのである。

3.3　まとめと今後の展望

今回の研究では、インドにおいて発見された最初の数学的零の成立を中心に、零が自然科学に及ぼした影響と空思想の解析を試みたわけであるが、本研究の結果をまとめると以下のようになる。

まず、零はバビロニア・マヤ・インドの 3 つの古代文明において発見されており、中でも最も早く零を使用していたのはバビロニア文明であった。しかし、バビロニアの零記号は演算上の混乱を避けるために導入された単なる代替記号であり、欠如した位を意味していた空白の代わりをするものでしかなかった。マヤの零記号は「有」としての側面もあり、単独で使用されることもあったが、バビロニアとマヤはともに数学的な演算に対応するような零を構築することができなかったようである。それに対しインドでは遅くとも 5 世紀頃までに零の概念が確立していたと考えられる。当時のインドでは数は言葉で表現されており、言葉によって様々な数が表現されるなかで、零もそら（abhra,ākāśa,kha）、点（bindu）、雲（jalada,megha）、空虚（śūnya）などの言葉によって表された。その後、6 世紀頃には記号としての零が成立し、点「・」として零は表される。そして、零は 7 世紀初め頃には数学的な演算を満たす、より完全な数学的零として様々な書物や石碑などに登場する。その後インドで数学的な零の概念が定着するとともに、零は急速に周辺諸国に広まったと考えられる。

インドで誕生した零は現代においても自然科学分野に対して多大な影響を与えている。特に現代物理学において零は様々な姿で登場し、熱力学では絶対零度として、量子力学では零点エネルギーとして、相対性理論ではブラックホールとして現れる。

このように零は現代物理学に大きな影響を与えており、両者の間には何らかの共通項が存在すると考えられる。そこで、零の成立に影響を与えたと考えられる空の論理を物理的に解析することを試みた。その結果、関係性の論理によって実体が否定されたとき、はじめて運動が成立することが明らかとなった。なお、実体を仮定したときは世の中の振る舞いとの間に矛盾が生じて運動が否定されることとなった。また、実体を濃度化することで、ある状態のエントロピーの振る舞いが分かり、そこから実体の濃度と言説の関係が明らかとなった。このように零を媒体として「空」と物理学との間に論

理的なつながりを見いだすことができ、「空」を物理的に解析することに成功した。

さらに、「無」と「有」の関係性に注目したとき、両者の間に相関関係が成立し、その結果作用が生じて影響を及ぼし合うので、「無」とういう概念は「有」という概念によって明確に定義されることが理解できた。したがって、「有」に相対して「無」が定義されることにより零が数として認められ、数学的な零が空の論理によって成立することが明らかとなった。

以上のように、今回の研究では零と自然科学の関係性に注目しながら零の歴史性を見つめなおし、零の成立とその振る舞いを物理的な視点に基づいて考察したわけであるが、今後の展望として次のような問題が考えられる。まず、注目すべきは零と無限大との関係である。分数で表された数の分母を零に極めて近づけたとき無限大となる。この無限大という概念は零という極小の概念がなければ生まれないものであり、現代数学と空思想の接点として注目すべきものである。また、連続と不連続の関係や、時間と空間の無自性性などが今後の課題として考えられる。極限の概念の派生として現れる連続と不連続の関係も零なくしては語れない問題である。時間と空間の性質は、両者の間に関係性の論理を適用することにより無自性であることが推測される。さらに、有理数、無理数も含めた実数や、虚数も含めた複素数の領域まで研究の対象を広げることも、零と空の関係を理解する上で重要であると考えられる。

最後に吉田洋一氏の主張について触れておく。吉田氏は『零の発見―数学の生いたち―』の中で、特にインドにおいて零の概念がなぜ発達したかという問題に対して

> *なかには、これを「空」というようなインドの哲学思想と結びつけて考えようとしている人もないではないが、これは、はたして、いかがなものであろうか。こういう高遠な考え方は、ただ興味だけを中心とした見地からは、捨てがたい味があるにしても、とうてい問題の本質に多くの光を投げえないのではないか、と思われるのである。*

と述べ、零の発見に対する空思想の影響を否定している[1)]。吉田氏は、当時のインドで行われていた砂の上に文字を書いて演算を行うという筆算方法が零の成立に影響を与えたと考えており、そのよう

して成立した欠如した位を示す零記号がなければ位取り記数法は誕生しえないと主張している。しかし、これは明らかに事実に反している。なぜなら、歴史上零が数字として成立する以前よりバビロニアでは位取り記数法が用いられており、中国でも零なしに位取り記数法が用いられていたからである[34)]。また、零という思想的にも非常に高度な概念が、筆算をしていたからといってそう簡単に生まれるものだろうか。確かに、空と零の関係に対する論証には、神秘性を求めた高遠な考えのものも存在する。しかし、それは「空」そのものを誤解しているからであり、「空」とは実体を否定する関係性の論理のことであって、純粋に知的な論理モデルであるということを理解すればそのようなこともなくなるであろう。零と空の論理的な側面に注目し、純粋に知的な立場より両者の関係を考察することは、仏教と科学のつながりを探求する上で非常に効果的である。そして、空による数学的な零の成立は、仏教と科学の理論が共通した土台の上に成立していることを示す確かな証拠となるはずである。

参考文献

1) 吉田洋一『零の発見―数学の生いたち―』岩波新書,1978 年

2) ジョルジュ・イフラー『数字の歴史―人類は数をどのようにかぞえてきたか―』平凡社,1988 年

3) 茂木和行『ゼロの記号論』毎日新聞社,1988 年

4) ドゥニ・ゲージ『数の歴史』創元社,1998 年

5) 杉勇『楔形文字入門』中公新書,1981 年

6) O.イノゲバウアー『古代の精密科学』恒星社厚生閣,1984 年

7) 石田英一郎『マヤ文明』中公新書,1986 年

8) 三枝充悳「龍樹における空の思想」『東洋学術研究』第 11 巻 4 号 1974 年

9) 林隆夫『インドの数学―ゼロの発明―』中公新書,1993 年

10) 矢野道雄『インド天文学・数学集』朝日出版社,1980 年

11) ヴァン・デル・ウァルデン『数学黎明』みすず書房,1984 年

12) チャールズ・サイフェ『異端の数ゼロ―数学・物理学が恐れるもっとも危険な概念―』早川書房,2003 年

13) ブライアン・ロトマン『ゼロの記号論―無が意味するもの―』岩波書店,1991 年

14) 糸川英夫『新解釈“空”の宇宙論』青春出版社,1991 年

15) 戸田盛和『熱・統計力学』岩波書店,1983 年

16) 押田勇雄, 藤代敏幸『熱力学』裳華房,1998 年

17) 長岡洋介『統計力学』岩波書店,1994 年

18) 小山慶太『光で語る現代物理学』講談社,1989 年

19) 猪木慶治, 川合光『量子力学 I 』講談社サイエンティフィク, 1994 年

20) 朝永振一郎『量子力学 I 』みすず書房,1969 年

21) ロジャー・ペンローズ『心は量子で語れるか』講談社,1999 年

22) 内山龍雄『一般相対性理論』裳華房,1978 年

23) 佐藤勝彦『相対性理論』岩波書店,1996 年

24) 三枝充悳「龍樹―生涯と思想―」『東洋学術研究』別冊,1977 年

25) 三枝充悳『中論（上）―縁起・空・中の思想―』レグルス文庫, 1984 年

26) 中村元『ナーガールジュナ』講談社,1980 年

27) 山口益, 横超慧日, 安藤俊雄, 舟橋一哉『仏教学序説』 平楽寺書店,1961 年

28) 小川一乗『大乗仏教の根本思想』法蔵館,1995 年

29) 三枝充悳「縁起思想史におけるサーリプッタとナーガールジュナ」『勝又俊教博士古稀記念論集：大乗仏教から密教へ』春秋社,1981 年

30) 三枝充悳「初期仏教の〈これがあるとき、かれがある〉」『印度学仏教学研究』第 28 巻 1 号 1974 年

31）山口益『空の世界』理想社,1948 年

32）安井廣済『中観思想の研究』法蔵館,1961 年

33）『Newton』ニュートンプレス,2004 年 2 月号

34）ジョセフ・ニーダム『中国の科学と文明』思索社,1975 年

35）上田義文「中論における相関性の論理について―第十章「火と燃料との考察」の研究―」『哲学雑誌』第 66 巻 1 号 1951 年