



Title	時空の実在性と現代物理学との関わり～構造はマクロとミクロを繋げるのか？～
Author(s)	藤田, 翔
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/72462
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

時空の実在性と現代物理学との関わり
構造はマクロとミクロを繋げるのか？

大阪大学大学院 人間科学研究科
人間科学専攻 基礎人間科学講座 科学哲学

藤田翔

概 要

時間や空間の実在を巡る哲学的議論は長い歴史を経てきた。ただし現代物理学を土台とした時空の哲学は、その広大な歴史と比べれば比較的新しいと言えるだろう。それは科学哲学や形而上学と密接に関わり合いながら、物理学の今後の方向性やこれまでの蓄積を大いに反映している。今や時間や空間とは何かという問い掛けは、物理学の究極的なテーマである宇宙の始まりにも大きく関与する可能性を持つ。現代物理学はこの100年の間に大きく発展してきたが、量子重力理論は未だに完成することではなく、ミクロな領域の重力や時空の取り扱いには様々な定式化の候補がある。土台となる物理学理論そのものの候補が多過ぎて、それらが様々な世界の描像を与える中で、時空の実在に関して統一的な見解を与えるのは難しい。ただし標準的なビッグバン宇宙論に従えば、我々の宇宙は誕生から今日に至るまでに何らかの統一的な歴史を持つはずである。ミクロな領域で誕生し、現在のマクロな領域で膨張しているというのがビッグバン宇宙論であるが、一方でこの歴史に関しては、例えば真空の中から宇宙に時空間が生まれ、宇宙空間は時間と共に膨張してきたという比較的単純な時空描像がある。少なくとも現在の宇宙に時空があることは日常的には疑いの余地は無いだろう。この日常的にはあると思えるマクロな時空の実在性を哲学的に議論することから始める。そして宇宙の起源まで遡り、量子重力理論の範疇となるミクロな宇宙の始まりにおいて、上述したマクロな時空の実在性と整合性のある時空描像を得たい。一般相対性理論が扱うマクロな領域と量子重力理論が扱うミクロな領域において、ビッグバン宇宙という1つの歴史を通して、時空の実在性という観点で統一的な描像を得ようというのがこの論文における私の取り組みである。一般相対性理論によれば、時空は平坦なユークリッド幾何学ではなく、物質と互いに相互作用を及ぼし合い、曲率という幾何学的性質を備えたリーマン時空であるとされている。重力は幾何学という形で時空の中に取り込まれているが、この曲がった時空の実在に関してまずは従来の議論を整理する。そして一般相対性理論を元にしたマクロな相対論的宇宙論が前提とする宇宙の膨張を、時空構造実在論という立場で考察する。さらに量子重力理論の1候補であるループ量子重力理論が記述する初期宇宙のミクロな描像にも触れて、スピンネットワークと呼ばれる空間の構成物の身分を与える。そして、時空というものを考える際にはその構成物とはある程度独立な議論が可能であることを踏まえた上で、真空から宇宙空間が生まれて膨張して今日の宇宙に至るという明解な「宇宙空間の成長説」に時空の哲学的な解釈を用いて異議を唱えたい。

目次

第 1 章	はじめに	3
第 2 章	時空の哲学の歴史	8
2.1	相対性理論の誕生まで	9
2.2	一般相対性理論における時空観の変遷	12
2.3	一般相対性理論における実体説と関係説	16
2.3.1	一般相対性理論の成立背景	16
2.3.2	宇宙論への拡張と物理場の取り扱い	20
2.3.3	穴の議論と実体説の危機	24
2.3.4	モデルと物理世界との対応 多様体と計量	27
2.3.5	偶然的性質と本質的性質	29
2.3.6	アリストテレスの実体説	32
2.3.7	多様体実体説から計量実体説へ	36
2.3.8	関係説との調停	40
第 3 章	構造実在論における時空の解釈	43
3.1	構造実在論の 2 つのバージョン	43
3.2	時空の実在に応用した構造実在論の登場	45
3.3	実体説と関係説、構造実在論の主張の共通点	48
3.4	構造の多義性と電磁場の描像	50
第 4 章	実体と構造	57
4.1	個体原理と構造 ライプニッツシフトによる違い	57
4.2	物理学理論の今後の展望	62
第 5 章	ビッグバン宇宙論におけるマクロな相対論的宇宙論の解釈	65
5.1	哲学不在の宇宙空間の成長説	66

5.2	構造実在論的解釈と宇宙膨張の関係	69
5.3	マクロな意味での真空に対する取り扱い	73
第 6 章	ミクロな宇宙論との関わり	77
6.1	ループ量子重力理論におけるスピンネットワークと古典的な時空の関係	77
6.1.1	共動座標系との繋がり	79
6.1.2	ニヒリズムと時空の量子化の特異性	81
6.1.3	時空の創発と基礎的な存在者	83
6.2	マクロとミクロの共通性と時空の構造	86
第 7 章	おわりに:まとめ	89
	参考文献	93

第1章 はじめに

今や科学の世界に関する記述は膨大である。しかし「我々の宇宙はどのようにして始まったのか？」という問い掛けには科学は未だに明確な記述を提供出来ていない。現代物理学はこの究極の問いの答えに近付いているのだろうか？そもそも科学がこの問い掛けに答えることは可能なのだろうか？

科学が物理学の理論を用いて「宇宙の歴史」に本格的に言及し始めたのは、恐らくアインシュタインの時代からであろう。相対性理論の提唱によって宇宙論の基盤が出来たと言えるからである。フリードマン・ルメートルの膨張する一様等方宇宙 ([1][2]) に端を発する標準的なビッグバン宇宙論に従えば、もし宇宙時刻 $t=0$ を宇宙の始まりとした場合、時間を遡ってその時刻に近付けば近づくほど現在の我々の住むマクロな宇宙はどんどんミクロなサイズに縮小する。マクロな宇宙は一般相対性理論を宇宙論に応用した相対論的宇宙論で記述される。ただし、所謂プランクスケール以下のミクロな領域の宇宙は量子効果を含めた量子重力理論の範疇となる。量子重力理論とは、物理学の二本柱である一般相対性理論と量子力学を統合しようという試みであり、未だ定式化には至っていない。統合するとは具体的には量子効果の働くミクロな領域において、重力という概念をどのように扱うかということであり、その代表的なものにループ量子重力理論や超弦論等がある。宇宙時刻を時刻 $t=0$ まで遡ると、宇宙は特異点という言葉ば極小の点状態に収束するとされている。この特異点は量子論的には真空状態の揺らぎによって誕生したという説が有力である。ではこの宇宙の源である真空状態とはいかなる状態であるのかという探求が宇宙の起源を探る上で欠かせないであろう。

上記の課題は、直接的には物理学そのもののテーマである。ただしこのビッグバン宇宙論の歴史的な経緯を前提とした上で、時空間の実在性を扱う時空の哲学は宇宙の起源に様々な描像を要求する。極めて直感的な例ならば、敢えて哲学的知識を持ち出すまでもなく、時空に関する2つの対立的選択肢が挙げられる。それは時間や空間は宇宙の始まりにおいて物質と共に誕生したという描像と、宇宙誕生以前から背景として既に存在していたという描像である。もし前者の立場ならば、宇宙という言葉は時空間と物質の両方を指示していることになる。つまり宇宙の起源は時空の起源をも含み、時空間は無や真空状態（空間とは別の概念）から新しく生じたのだ。これに対して後者の立場では、宇宙とは物質のみを指示しており、時空間はその状態や関係を表す物差しの役割を担っている。つまり時空間は宇宙が存在し始める前から既に背景として存在しており、宇宙を生み出し

た真空とは空間そのものであると考えることができる。この立場では宇宙の起源とはあくまで物質の起源であり、時空の起源という発想はナンセンスであろう。これらの描像の違いは時空に何らかの身分を与える哲学的解釈と大いに関係しているのである。

これらの時空間の解釈の違いは、現代物理学が与える時空間の描像とも密接に関わっていることは確かである。ループ量子重力理論では、量子論的に捉えれば空間とは最小単位を持つことを暗示するスピネットワークの集まりとなる¹。この理論では空間を物質のように捉えているために、空間は無から生じたという描像と一見合致している。つまりループ量子重力理論では宇宙の起源とは時空の起源なのである。しかし超弦論では時空はあくまで背景であり、一般的な4次元時空に加えてさらに高次元の合計11次元の背景を必要としている。古典的なマクロ時空との対応において、自由度の多過ぎるループ量子重力理論と比べると、ブレーンによるマルチバース宇宙論の提唱²や自然なインフレーションモデルの構築 [7, 8] といったように、超弦論には幅広い適用性やバリエーションがあるのが現状である。こういった描像の違いは両理論が重力をどのように解釈しているかの違いでもあり、結局はミクロな系に用いる物理学理論の構築の方向性の違いに由来するだろう。すなわち量子重力理論の2つの候補は時空の扱いにおいて互いに対立している理論なのである。

一般に科学哲学では2つの理論が競合する際には、実験や観測結果等との整合性に加えて他にも理論選択の基準が数パターンある [9]。これは半ば形而上学的な観点にはなるが、少なくとも上記の場合においては両者に時空描像の違いがあることは明確である。さらに同じく科学哲学の領域の話になるが、実在という観点では量子重力理論のアイデアは極めて興味深い。ミクロな世界の実在に関しては、例えばファンフラッセンの言うように、世界を経験できるマクロな領域と経験できないミクロな領域に分けた上で、科学理論による説明が経験的に十全であれば、ミクロな領域に登場する存在者の実在には不可知であるという構成的経験主義の立場がある [10]³。この立場では超弦論が予言するような高次元の弦は、マクロミクロに関わらず明らかに観測不可能である。人間が直接経験できない弦はファンフラッセンによれば不可知論であるが、もし超弦論による理論が現象論的に実験結果と結び付いているのであれば、理論に対する経験的な十全性が認められる余地は十分にあるだろう。それはループ量子重力理論が予言するミクロな時空の最小単位に関しても同様である。量子重力理論をテーマとした哲学的議論も今や膨大である⁴。この論文ではその膨大な議論に埋もれている量子世界の哲学的な描像にも触れるが、理論そのものの真偽や妥当性という科学的方

¹この離散的な時空の捉え方は元々はペンローズ [3] に依拠しており、ここから [4] や [5] を経て一般相対性理論の量子化へと進む。

²ワープする余剰次元 [6] の提唱によって、我々の住む3次元空間は高次元の中に組み込まれた膜だという説が宇宙論に本格的に取り入れられるようになったきっかけと言えよう。

³構成的経験主義は現代科学哲学の代表的な反実在論的立場であるが、観測不可能なものと観測可能なものの境界や理論選択の特権性といった議論を巡って実在論を擁護するシロス等 (例えば [11] [12]) と議論を繰り返して来た。

⁴挙げ出すとキリが無いが、例えば [13] は時空の扱いを軸に超弦論やループ量子重力理論の理論構造そのものに言及している。他にも [14] は時間論の観点から、一般相対性理論の量子化に関する問題点を挙げていて、[15] は超弦論が提唱する弦の二元性 (dualism) に関して、ファンフラッセンの後の議論も交えながら新たな哲学的解釈を示している。

法論の話よりは、時空を初めとする電子や光子等の素粒子（弦も含まれるだろうが）といった、理論に登場する理論的存在者 (theoretical entity) の実在に焦点を当てたい。

最初に挙げた宇宙の起源への問い掛けに答えが出せるかどうかは、今後の量子重力理論の定式化次第でもある。この論文では時空の描像に焦点を当てて、こういった哲学的な解釈による観点が今後の物理学そのものの発展において、果たして有意義であるかどうか（例えば理論選択等に何らかの影響を与える余地はあるのかどうか）ということを改めて問いたい。その前進として、例に挙げたような2通りの時空描像も含めた「時空という概念」の中で、果たして妥当な解釈というものは現状存在するのかどうかということを考察したい。もし仮に時空とはモノの背景ではなく、物質的な存在者であるという解釈の方が適切であるならば、ループ量子重力理論は少なくとも時空の扱いにおいて、超弦論よりも優れているということは言えるだろう。しかし、その場合は何を以て時空＝物質という描像が他の描像と比べて適切だと結論付けられるのかということを明らかにする必要性が出てくる。それは物理学的な知見に加えて形而上学的な基準をも必要とする。既存の定式化された物理学の分野の中で、時空を扱う物理学とはマクロな領域を記述する一般相対性理論であるが、まずはこの相対論的な時空の実在性に着目したい。一般相対性理論と量子力学では両理論において時空の扱いが異なっているが、相対論的時空の描像が発展途上のミクロな領域の議論に適用可能なのかということも踏まえた上で、「構造実在論」⁵という科学哲学的なアイデアが宇宙の起源にどのように迫ることが出来るのかということをまとめ上げる予定である。

考察の手順としては、最初に時空の哲学で既に論じられている実在性の議論を検討する。現代の物理学に関連する話に限るために、一般相対性理論の登場以降の哲学的議論に的を絞ることにする。そこから妥当だと帰結される時空描像を一般相対性理論を元にしたマクロな膨張宇宙論に応用する。「現在の宇宙は加速膨張している」という観測事実を受け入れた上で、宇宙膨張と時空間の関係を考察する。これは宇宙論の説明でよく見掛ける「空間の膨張」説を哲学的に捉え直すことでもある。そしてこのマクロな時空描像が、ミクロ時空の描像とどのようにリンクするのかを述べたい。そのために時間（正確には大局的な宇宙時刻を指すパラメータ）を遡りミクロな宇宙について考える。宇宙の起源と時空の関係を量子重力理論を元に考察するが、この論文ではループ量子重力理論を用いることにする。その理由は用いる物理学理論に統一性を持たせるためである。それはループ量子重力理論が、一般相対性理論を土台として計量を直接量子化する手法を用いているからである。一方で超弦論は一般相対性理論とは別の古典的な理論（ある極限で一般相対性理論に近似する）から出発し、重力の量子化を試みている。つまり超弦論においては、標準的な一般相対性理論は制限事例でしかないのである。ということはループ量子重力理論を用いれば、ミクロ宇宙がマクロ宇宙に成長する一連の歴史的過程において、ミクロな初期宇宙もマクロな現代宇宙も共に同じ

⁵現在の議論とは幾分異なっているが、3章で述べるように、上に挙げたファンフラッセン等の反実在論陣営に対抗するために、科学哲学的な文脈で構造実在論を最初に提唱したのはジョンウォラル [16] である。

一般相対性理論を前提としているという点で物理学理論そのものの統一性を保持できるのである。上述したように、一般相対性理論と量子力学ではそもそも時空の役割が異なっており、各々の理論をベースに哲学的な考察を行ったところで異なる時空の実在性が導かれることは明らかである。勿論、古典物理学から量子物理学へと理論が進展するに至って、時空の役割が変化した理由や、逆に変化せずに保存された他の機構などを科学史的に探求すること (例えば [17]⁶等) は、今後の物理学の発展を論じる上で極めて意義のある取り組みであろう。そういった意味では、超弦論に関して考察することも重要であろう。しかし、この論文では現状の物理学から尤もらしい時空の描像を宇宙論的な観点で統一的に論じるために、あくまで一般相対性理論を大前提としたループ量子重力理論において、宇宙の始まりと時空間の関係を検討し、ループ量子重力理論が上述したような無から生まれる時空観を果たして支持しているのかということを考える。従って、マクロな一般相対性理論における時空の哲学的解釈とそれを直接量子化したミクロなループ量子重力理論における物質的な空間という解釈に整合性を持たせる (少なくとも矛盾しない) ことは可能なのかということが論じるべき課題である。

2章において、ニュートン力学以降の時空の哲学の歴史を簡単に振り返り、一般相対性理論を土台とした現代の時空の哲学の議論の現状をまとめる。一般相対性理論が提唱されて、従来までの時空に関する概念が大きくパラダイムシフトしていく中で、現代宇宙論が構成されていく当時のプロセスにもやや着目したい。そして一般相対性理論ではどのように時空を扱うことが妥当であるのかという哲学的トピックに関して、1980年代後半以降の実体説 (substantivalism) と関係説 (relationism) の議論を振り返る⁷。この章はニュートン力学時代から続く伝統的な時空における哲学的アイデアを、一般相対性理論に適用させる際の既存の議論のレビューの役割を担っている。

3章においては、構造実在論という科学哲学における実在論的立場を導入して、それを時空の実在性に取り入れた時空構造実在論 (structural spacetime realism)[23] に着目し、この新たな哲学的立場が主張するであろう時空点の実在性に関する私独自の見解を述べる。その際に個体原理 (haeccecity) に触れながら、一般相対性理論において洗練された実体説と関係説は時空点という観点においては結局は同じ主張を述べている [20] ことも示す。さらに従来の構造実在論が極めて多義的であることも振り返って、電磁場を例に構造とは経験的な領域以上に抽象性を持つ高階の作用に備わっていることを新たに提唱する。そして上記の時空構造実在論をそのように解釈しても矛盾が無いことを確認した上で、6章のミクロな量子重力理論への足掛かりとする。

4章においては、時空の実体説が主張する実体的な時空をもう一度振り返る。2章でも紹介する代表的な2人の実体説論者、ホーファーとモードリンは同じ実体説という名前の立場を取りながら、それぞれ異なった形而上学的な立場であることを確認する。構造実在論が陥っている対象と構

⁶尤もカオの議論や構造主義的な立場は本論文の内容とも大いに関連しているために、主に4章や6章ではこの本の中から複数引用することになる。

⁷[18],[19]を参考に、[20]に基いて主に[21]や[22]に触れる。

造の違いや個体原理に着目して、一般相対性理論の文脈においては、ホーファーの実体説は実体というよりはむしろ構造を実在の基本単位としているという私の見解を示す。さらに後半では今後の物理学の発展においては、実体や構造といった古典的な概念の解釈自体が最早通用しなくなる可能性を述べて、一般相対性理論もあくまで現状における尤もらしい1つの議論に過ぎないと帰結する。そして時空構造実在論は完全な存在論的な主張というよりは、むしろ現状の一般相対性理論を元にした認識的な基盤に十分に依存していることを記述する（藤田 再投稿中）。

5章においてははいよいよビッグバン宇宙論の流れに沿って、まずはマクロな膨張宇宙論、いわゆる相対論的宇宙論における宇宙の膨張を考える。相対性理論を宇宙の大局的な計量に応用することで、一様等方なフリードマンルメートル宇宙をモデルに宇宙が膨張しているという現象を考える。まずは哲学的な解釈は抜きにした上で、宇宙論の教科書 ([24][25]) などで論じられるような「宇宙空間の成長説」を確認する。その上で [26] に基き、宇宙の膨張を改めて時空構造実在論で解釈し直して、膨張する宇宙と時空の関係を新たに論じることとする。その際にマクロな物理学が述べる空間と真空の関係を確認して、一般相対性理論においては真空とは文字通りからっぽの（物質がないという意味での）空間であるということを示し、6章で行う宇宙の始まりの描像への考察の準備とする。

6章ではミクロな宇宙において、一般相対性理論を量子化したループ量子重力理論をモデルを元に時空の実在に関する哲学的な考察を行う。ループ量子重力理論は、大きさを持つ空間が無から誕生するメカニズムと直感的には整合的であるかのように解釈されるが、5章で論じた時空構造実在論の解釈と整合性を保つことは可能なのかということを考える。時空の解釈がマクロな領域とミクロな領域で異なることを、モノがマクロな領域とミクロな領域でその実在性の単位が異なることと対応させて考察する。その際に3章で論じた電磁場の構造にも触れて、物理系の土台である時空を量子化するということは、他の場を量子化することと比べて極めて特異であるということを示す。そして個体原理を持ち出せば、[27] にもあるように、マクロな時空点とミクロな粒子は扱いが似ているが、時空構造実在論はマクロな領域の時点で既に対象（時空点）を挙げられる一方で、ミクロな構造とは別物であるために、スピネットワークというミクロな存在者は空間の構成要素ではあるが、時空間を創発するまでは決して空間そのものでないという論拠を示す。そしてこの解釈こそが時空構造実在論が与える宇宙の起源の描像とそれほど矛盾しないことを確認した上で、宇宙の始まりという現象における時空描像を与える。最後にこの限られた知見の中で当初の問いに私なりの1つの指針を提唱するつもりである。

第2章 時空の哲学の歴史

この章では、時空の哲学の歴史を簡単に振り返る。一般相対性理論を元にした時空の扱いに関しては、主に1980年代後半以降の議論が中心となり、本論文で論じる哲学的立場の大半がこの議論を元に行っている。時間や空間とは何かという問いは、我々の日常感覚に最も親しくそして最も根源的な問いかけである。これらの考察の歴史を紐解くと、多くの哲学者や物理学者が独自の見解で「時空間」を捉えていたことがわかる。物理学が誕生する遙か以前にも、古代ギリシャのエレア派の祖であるパルメニデスやその弟子のゼノンによる分析は有名である¹。自然科学が発達した中世以降では、ニュートンとライプニッツの絶対時空説と関係時空説の議論を皮切りに、主に時空間は中に存在するものとは無関係に独立に存在し得るとする立場と、空間は物体同士の位置関係により、そして時間はそれらの位置の変化としてあくまで後続的に存在するという立場に分かれた²。20世紀に入り特殊相対性理論が登場して、「時間も空間の一種であり、時間の進み方は観測者によって変わってくる」という主張と共に時空の哲学は一変した。さらに一般相対性理論が提唱されると、それまで曖昧だった時空間の性質は、存在する物質の重力によっても影響されるという新たな命題が導入された。この相対性理論の提唱によって、時空の哲学的立場には課題が突き付けられた。例えば仮に時空間というものが実体 (substance) 性を持っているとするのならば、時空間というものは数学的モデルとして表わされている多様体を指すのか、それとも点同士の構造を表わす計量、すなわち重力場に宿るのか、あるいは多様体と計量を合わせたものに相当するのかということを考える必要がある³。特に一般相対性理論を土台とした実体説の主張の変遷を中心に、量子力学が生まれるより前の物理学の範疇に限った時空論の流れを辿り、古典的時空の本質に迫ることを目的とする。

¹ゼノンのパラドックスは、西洋の時間論のみならず、相対性理論とも繋がる現代科学の礎とも言えるだろう [29]。

²具体的には、ニュートンを擁護する親友のクラークとライプニッツの間での書簡のやり取りがこの論争内容である [30]。この対立は古典力学を元にした時空論だが、本論文のテーマとなる実体説 (substantivalism) と関係説 (relationism) の土台はこのニュートン力学に基づいている。ただし実際にニュートンとライプニッツが、それぞれその単純な意味において実体説と関係説の立場を取っているかどうかに関しては様々な主張がある。ニュートンやライプニッツの形而上学は壮大であり、その思想は現在でも広く研究されている。ニュートンの絶対時空は、デカルトが定義した意味での実体 (substance) とも異なっているかもしれない (1.3.5 で後述)。詳しくは [31], [32], [33] 等を参照

³要するに時空とは何を指示しているのかという分析であり [21]、数学的モデルと物理的時空との対応に関する問題でもある ([18] より引用 [34]p.8)。

2.1 相対性理論の誕生まで

この節では、ニュートン重力理論の誕生した17世紀から20世紀初頭に相対性理論の誕生するまでの時空の哲学を簡単に振り返る。ニュートン力学は、現在では一般相対性理論におけるある限られた条件での近似としてしか成立しないことがわかっているために、当時の力学体系を土台とした時空の解釈が現代物理学において直接有用ではないことは予め断っておく。ただし、当時の時空に対する考え方が時空の哲学の根本的な土台を築いていることは事実であり、冒頭に挙げた宇宙の起源と時空の関係も究極的には当時の議論の形を変えた対立的立場⁴の解釈の延長とも考えられる。それゆえに現代物理学の解釈の土台となる部分をこの節で簡潔にまとめることとする。

古代より別々の運動法則に従っているとされていた、天体の星の動きと地上の物体の自由落下の運動が、実は同じ万有引力の法則に還元されることが示された17世紀以来、ニュートンの重力理論はおよそ完全な物理体系として当時の物理学者に広く認知されてきた。ニュートン力学とは、アイザック・ニュートンによって自身の著である「自然哲学の数学的諸原理」(Mathematical Principles of Natural Philosophy)に挙げられた帰納主義(科学理論は、現象から引き出し得た内容のみで構成されるべきという立場)に基づいて構築されたものである⁵。物体の運動は、ニュートンが挙げた3つの法則を軸に、互いに質量を持つ物体は物体間の距離の2乗に反比例する力を受けるという万有引力の法則を加えたもので記述される。この後、18世紀にオイラーらが微分積分学を用いて数学的に定式化し、今日のニュートン力学に至る。この理論はマクロな系において光速に比べれば無視できる程遅い物理現象を論じる際には、実験的にも矛盾無く整合性が取れている。

ニュートンは物体の運動という概念を持ち出すために、モノ(当時は量子力学の知識が無いためにマクロな物体に限定されていたが、この論文においては原子や素粒子等のミクロな意味での物質、そして場合によっては電磁場等のエネルギーも一括りにこのように表現することにする。)は予め存在している空間の中をあらゆる場所で一様に流れる時間の中で運動すると表現し、時空間という大前提を与えた。この空間と時間をそれぞれ絶対空間、絶対時間と定め、あらゆるモノの容れ物(container)という存在的な特権を付した。これによると、空間の各点はあるモノやその状態とは無関係に、それだけで物理的な存在者(entity)であり、時間はモノの状況に限らずにどこでも一様に過ぎて行くもので、空間同様に一刻一刻の時点が別々の個物(individual)であるかのように存在している。この絶対時空という容れ物の中を、物体が力学法則に従って運動しているというのがニュートン自身の哲学である。ニュートンに代表される、この時空説を時空の実体説(substantialism)という。ニュートンは、神がモノを知覚するためには時間と空間が必要で、モノを認識するためには時空間を介さなければいけないという信念を持っていたと考えられている

⁴宇宙の始まりに関する問い掛けは、究極的にはニュートン時代に既に原型は存在していたということである。

⁵ニュートンのこういった信念は、「自然哲学の諸原理」の別名「プリンキピア」の一般の注解の中で表現されている(Newton:The Principia)[35]。

[30]p.15。

これに対してライプニッツは、時間や空間は絶対的な枠組みではなく、空間はそこに存在する物体の位置関係によって相対的に規定されるものであり、時間は物体の位置変化が起こることによって初めて付属的に与えられるものであるという相対時空説を主張した。この時空論では時空はそれだけで存在するものではなく、モノの性質やモノ同士の関係に還元されるべきものであり、時空に関する反実在論の立場を主張していることになる。この時空説を時空の関係説 (relationism) という。ニュートンの「時空は神が物体を知覚するための感覚器官」という考えに対して、ライプニッツは充足理由律⁶を根拠に絶対時空の存在を否定した [30]。彼の立場ではニュートンの絶対時空説に従う限り、もし世界に存在する全てのモノを3フィート（1フィート＝25センチメートル）だけ東に動かすと、神以外には動かす前の世界（これを世界Aと呼ぶ）と認識上は区別できない世界がもう1つ（これを世界Bと呼ぶ）現れる事になる。しかし現実の世界は動かす前の世界Aであり、動かした後の世界Bではない。すなわち神は何らかの理由によって、この世界（ないしは宇宙）をBのように創造せずに、Aのように創造したのである。言い方を変えれば、神が世界Bではなく世界Aを創造したことには必ず何らかの理由が不可欠であるというのがライプニッツの主張であり、その理由がわからない以上は、世界Aと世界Bが別の世界であるという仮定そのものに問題があるとしている。つまり、世界Aと世界Bは我々が認識上区別できないために、同一の世界であり（不可識別者の同一性原理 [38]）、それゆえに絶対時空は存在しないというのがライプニッツの論証となる⁷。こうしてニュートン力学時代の時空論は、実体説と関係説に大別されることになる。

当時の時空論が、現代の意味において本格的な議論に発展したのかどうかはさておき、少なくともこの2つの立場に関しては次のようなことが言えるだろう。一般に物理現象を考える上で、位置変化を論じるためには座標系を設定する必要がある。直感的に考えれば、物体を計測するために座標系を選んである時点で、絶対時空の有無はさておき、何らかの空間と時間を前提にしているようにも感じられる。これは実体説を擁護する発想であるが、逆に次のようにも考えられる。空間座標系を設定する際には必ず何らかの基準となる物体、例えば地表や壁などを原点を選んで計測する。すなわちある物体の位置を3次元空間の原点(0,0,0)に選び、そこから別の物体までの距離を論じるという点においては、座標系の導入は空間そのものというよりは相対時空説を支持しているようにも見える。その3次元の空間座標系に時計で計った時間を含めた合計4次元の時空座標系に、適当な単位を導入すれば座標の各点は4つの次元（パラメータ： t, x, y, z ）を持った各時空点に対応する。この時空点が、そこに存在する物体とは独立に存在論的な意味を与えられるかどうかということが実体説と関係説の争点であり、実体説論者は可能だと言い、関係説論者は不可能だと言う。こ

⁶元は自身の著作「モナドロジー」の32節において提唱した概念である (Leibnitz: Monadology) [37]。

⁷この世界の全てのモノを同じように動かすことを以降の節ではライプニッツシフトと呼び、不可識別者の同一性原理同様に次節以降でも議論する。

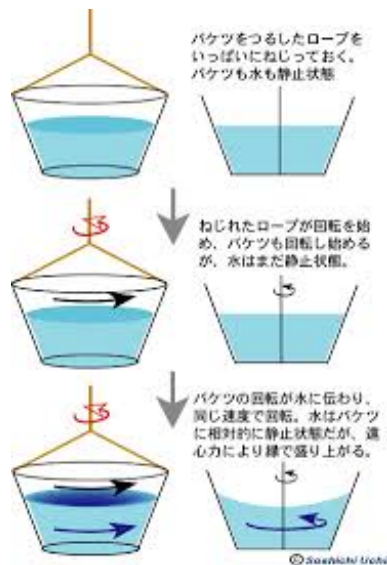


図 2.1: ニュートンのバケツ：ロープとひも、水の入ったバケツだけの世界で、ロープを振ってバケツを回転させる。最初はバケツだけが回転するが、慣性の法則によって、やがてバケツの運動は水にも伝わり、バケツと水は一体となって回転を始める。この時に水には遠心力が生じて、バケツの淵に盛り上がって回転するので、水は絶対空間に対して回転運動をしているという主張である。Copyright:Soshichi Uchii

これは物理学の理論上の課題というよりは、形而上学的な哲学の課題である。

しかし、この哲学的立場の違いが明確に表れる物理現象も存在する。それが所謂「ニュートンのバケツ」である。ニュートンのバケツとは、ニュートンが絶対時空の考えを導入した際に、物体が絶対空間に対して行っている運動のことを指す思考実験の名称である。この絶対運動は、物体が他の物体に対して行う見かけの相対運動と区別するために持ち出されたものである⁸。図 2.1 に示すように、ロープに吊るした水の入ったバケツだけが存在する世界を用意する。ロープを十分に振ってから静かに離すと、ロープの回転がバケツに伝わりバケツが回転を始める。しばらくすると、バケツの回転は水にも伝わりさらに時間が経てばバケツと水は一体となって回転する。ニュートンの言い分としては、最初バケツだけが回転している際には水には何も変化が無いが、水とバケツが共に回転している時は、遠心力によって水がバケツのふちに盛り上がってくる。この遠心力は、水が絶対空間に対して回転している結果働くものであり、相対時空説では説明が付かないとしている。相対時空説によれば、モノの運動は相対的にしか定義できないために、バケツと水だけからなる世界にとっては水とバケツが両方回転する、すなわち世界に存在する全てのモノが同じ運動をするということはナンセンスである。ライプニッツ自身が唱える不可識別者の同一性原理により、この事象は最初の水とバケツが両方静止している事象と全く区別がつけられないのである。よって相対時

⁸ニュートンのバケツでは、本来はバケツに対する水の回転と真空に対する水の回転の2つの回転を扱っているが、ここでは後者の真空に対する水の絶対回転のみを論じるものとする [39]。

空説の立場では、ロープを十分に捻ったところで遠心力などは発生せず水がバケツのふちに盛り上がるということも起こらない。水に遠心力が働くのであれば、それは水とバケツが絶対空間に対して回転している結果としか考えられないという結論である。だがそもそも仮にこのような実験を現実に行ったとしても、ニュートンの予言通りに水が本当に盛り上がるかどうかは定かではない。バケツと水とロープしか存在しない世界を用意することは出来ないために、結局のところ実験自体が不可能である。ゆえにこの思考実験は絶対時空の存在を証明するには不十分である。しかし力の働かない等速運動ならまだしも、遠心力という見かけの力を生じてしまう回転の効果をどのように扱うかということは、関係説論者にとって非常に難しい課題であったことは確かである。

そもそもニュートン力学は、ニュートンの絶対時空説を下敷きに構築されたものであるから、物体の運動を考える際にはまず座標系を張ることを前提としている。既に時空間という枠組み（パラメータ）を設定しているために、時空そのものは存在しないという関係説とは単純に相性の悪い側面がある。時空を前提にしているという理論的な性格は、ニュートン力学だけでなく、電磁気学や量子力学、さらには量子力学と同じ20世紀前半に、アルバート・アインシュタインによって発表された一般相対性理論でさえ同様である。そこでニュートン力学を、座標すなわち時間と空間、さらには質量や力等を前提とせずに物体同士の関係によって構築しようという試みが19世紀後半にエルンスト・マッハによって始められた⁹。これはマッハの「関係説の力学」と呼ばれ、観測できない絶対時空を敢えて措定せずに物体間の相対的な距離のみを用いて物体の運動を論じようとする方針だが、実際に定式化したのは後継者、ひいては後に続くマッハの支持者達であり、バーバーやドベルティらによって現在も受け継がれている¹⁰。時空を仮定しない関係説の力学は非常に斬新で発展性もあるが、この論文では主題となる相対性理論の話へと進みたい。

2.2 一般相対性理論における時空観の変遷

1904年に誕生した特殊相対性理論によって、従来の時空観は大きな飛躍を遂げた。マイケルソン・モーレーの実験結果によって示されたのは、光の空気中の伝搬速度に関する疑問である。そして光の速度は光源の速度に依らず不変であるという光速不変の原理が登場する¹¹。これによれば、時間の進み方は観測する系によって異なるということに加え、2つの事象（時空点）の

⁹マッハの原著は1883年に発表された「力学とその発展—歴史的・批判的叙述 (Mechanik in ihrer Entwicklung; historisch-kritisch dargestellt)」であるが、その10年後に英訳された (McCormick 1993) 後に、現在でも改訂版が続けて出版されている [40]。

¹⁰これらの関係説の力学はマッハ流力学と呼ばれ、時空に替わる「プラトニア」と呼ばれる概念（詳しくは [41] 等参照）を用いて、現在は相対性理論に拡張しようと試みられている。なお、ニュートン力学の再構築に関してはニュートンとライプニッツの論争の核心に迫る興味深い結果も出ているが、現代物理学が時間論に大きな影響を与えた一例 [42] でもある。

¹¹マイケルソン・モーレーの実験は元は地球の自転の方向とそれに垂直な方向のそれぞれの反射光の干渉を利用した光の速度の測定実験だが、決してこの実験から光速不変の原理がすぐに帰結されたわけではなく、科学的にはこの実験結果とアインシュタインの特殊相対性理論の発見の間には、当時空間を占める媒体として措定されていたエーテルと電磁場の存在を絡めた極めて興味深いプロセスがある。例えば [43] や [17]p.42 参照。

時間的順序や同時性は、観測者によって相対的なものであると結論付けられる。さらに互いに等速運動を行う慣性系においては特別な系は存在せずに、あらゆる自然法則は同じように表わされるはずだという相対性原理が加わる¹²。この2つの原理のみに従って、時間成分と3次元の空間成分の合計4次元の座標 (t, x, y, z) で作られたある慣性系 K と、この慣性系 K の空間座標系から見て一定の速度で移動する (t', x', y', z') という別の座標系の張られた慣性系 K' の間に成り立つ関係式を考える。慣性系は全て同等であることから各々の系での光速の値は等しく、それは実験的に $c = 2.99792458 \times 10^8 m/s$ と与えられる。光が微小時間 dt または dt' に進む微小距離 $(dx^2 + dy^2 + dz^2)$ または $(dx'^2 + dy'^2 + dz'^2)$ は両系で等しいことから、光の経路上の限りなく隣接した2つの事象にはそれぞれの座標系において次の等式が成り立つ：

$$c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2 dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2 = 0. \quad (2.1)$$

この無限小の事象間を、時間も含めた距離概念すなわち世界間隔として新しく定める。光の経路の場合は式 2.1 が示すように世界間隔がゼロとなるが、慣性系には特別な方向や基準が無いために、一般に2つの事象の世界間隔は（仮にゼロで無かったとしても）慣性系同士の間の座標変換の前後で値が等しい。そこで座標系 (t, x, y, z) において、無限小の世界間隔 ds を

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (2.2)$$

と改めて定める。時間を含め拡張された距離概念、この2次形式により記述される4次元の幾何学は、平坦なユークリッド幾何学の計量を持つミンコフスキー時空で表現される。あらゆる信号の中で光が最も速く伝わることから、逆にある時間内では光が到達できない領域も存在する。すなわちミンコフスキー座標の中で図 2.2 に示されるように、因果関係にある時空領域 ($ds > 0$) とそうでない領域 ($ds < 0$) が存在することになる。これも光は瞬時に伝わるとされるニュートン力学にはない概念である。この ds は座標変換に対して不変量であることから、もし慣性系 K' が K から見て x 軸の正の方向に一定の速度 v で遠ざかっているとすれば、K の座標系 (t, x, y, z) と K' の座標系 (t', x', y', z') の間には、世界間隔 ds を等しくするという条件から、

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.3)$$

$$y' = y \quad (2.4)$$

$$z' = z \quad (2.5)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.6)$$

¹² この辺りの理論構築も歴史的には大変複雑であるが、この節では天下りの現在の相対性理論を前提とした上で、科学的な議論には触れずにその根幹だけを述べるに留める。

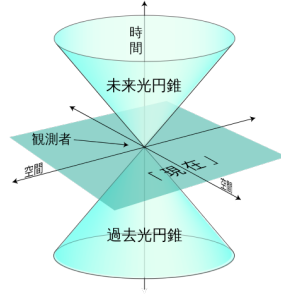


図 2.2: ミンコフスキー座標：縦軸が時間、横軸（この図では 2 次元）を空間で表わした特殊相対性原理が成り立つ慣性系での時空座標。現在の時刻 $t = 0$ を基準にして、光円錐（各々の時刻で秒速 c の光が到達できる最大距離を結んだ図形）の内部を過去と未来において因果関係を持てる領域と定めている。Copyright:Stib and K.Aainsqatsi

で表されるローレンツ変換が成り立つ¹³。時間の流れる速さは各基準系によっても様々であるということから、あらゆる場所で一様に流れる絶対時間の存在が否定された。そして時間も空間の一種であり、時空間の形式が様々であることから同様に絶対空間も否定された。

さらに 10 年以上の歳月を経て、ようやく定式化された一般相対性理論によってマクロな領域における相対性理論は完成する。特殊相対性原理が成り立つ慣性系では、複雑な外力は働かないとしているために一様でない重力場は存在できない。アインシュタインは加速度を持つ非慣性系での物理法則は、慣性系にとって、その系を基準としたときに重力が生じているとした場合と同じになるという、重力＝加速度の等価原理に着目した。そして特殊相対性理論の核であった、微小線素 ds を一定に保つという条件のみから、慣性系に限らずにあらゆる座標系で成立する一般共変な物理法則の構築を行った。その結果、微分幾何学を元にその数学的应用から、今までは座標を基準に定めていた物理量ではなく、座標不変なスカラー、あるいは座標変換によって一定の規則で変化していくベクトルやテンソルが、重力場を扱う上で主流になった。そして時空の構造は通常の物質と呼ばれるモノ（電磁場も含む）のエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ 、時空の幾何構造を表わすリッチ

¹³光速一定の法則が発見されるまでは、ニュートン力学を下敷きにしたガリレイ変換がこの座標変換に対応していた。すなわち、時間の流れる速さは 2 つの座標系で等しいために、ガリレイ変換では以下の簡単な変換式が成り立つ：

$$x' = x - vt \quad (2.7)$$

$$y' = y \quad (2.8)$$

$$z' = z \quad (2.9)$$

$$t' = t \quad (2.10)$$

スカラー R 、リッチテンソル $R_{\mu\nu}$ を用いて最小作用の原理により、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu} \quad (2.11)$$

と表わされることが示された。ここで G は重力定数である。また計量テンソルは 2.2 式の世界間隔 ds を

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu \quad (2.12)$$

のように一般化した際に表される変数である。このアインシュタイン方程式を解くことで、各々定めた座標系において時空の計量テンソル $g_{\mu\nu}$ が計算される¹⁴。時空は、一般には特殊相対性理論のミンコフスキー時空のような平坦なものではなく、いかなる座標系を選んでも不変な曲率 R を持ち、その構造はモノによって相互作用を受ける重力場에만依存して決まることを意味している。既に特殊相対性理論によって絶対時空説の考えは退けられた中で、続いて一般相対性理論によって時空計量（幾何的構造）が、存在する重力場として定まるというメカニズムが決定的に示されたことになる。そして一般相対性理論によって予言される、光の湾曲や水星の近日点移動は実際の観測結果と非常に精度良く一致していることが確かめられると、この新たな理論がニュートン力学に替わるマクロな物理学理論となった。ニュートン力学は、重力場が弱くて速度が光と比べて遅い系を論じる場合の近似理論として相対性理論に組み込まれたのである。

これにより時空の哲学は一変する。ニュートン力学の枠組みでは、時間や空間の計量はそこに存在するモノの状態や分布には全く依存せずに議論出来た。カントは時空がユークリッド幾何学であることは、物理学を論じる上で経験に先立つアприオリな規約だと考えていたとされているが¹⁵、その 1 世紀以上後には科学理論のパラダイム変換が起こり、「存在するモノによって変化する非ユークリッド幾何的時空」が登場したのだ。時空そのものが 2.12 式で示されるある種の幾何構造を伴って議論されることになった。

以上が一般相対性理論の大まかな枠組みであるが、この理論をベースに単純に解釈すれば、時空は幾何的性質という具体的な構造を備えた上で存在している。しかしその構造は我々が直接目で観測できる類のものではなくて、あくまで理論的存在者である。その理論的存在者を巡って、時空が実在するという実体説 (substantialism) と、反実在論の関係説 (relationism) の対立が現代の時空の哲学である。次節では相対性理論の形成当時の物理学者の時空観に簡単に触れた後で、1980 年代後半以降に進展した現代の時空の哲学に関する議論に焦点を当てる。時空の実在性を巡っては様々な議論が展開されているが、一般相対性理論が意味する時空の本質はどこに宿るのかといった

¹⁴ここで μ や ν の添え字は 0 から 3 までの数字を意味しており、それぞれの座標軸の単位 ct, x, y, z に対応している。また $g_{\mu\nu}$ は対称テンソルであるために ($g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$)、方程式を完全に解くためには合計 10 個の $g_{\mu\nu}$ を求める必要がある。

¹⁵カントは純粋理性批判 (Kant: Critique of pure reason)[44] の冒頭で、時間や空間とは対象を現象として認識する上での基盤であり、人間が生まれながら（経験を介さず）に持っている概念だとして、現象の外にある独立した実在としての絶対時空を否定している。

問題点を中心に、まずは一般相対性理論的な時空では、実体説や関係説のそれぞれが意味する「時空の定義」を明らかにする必要があるだろう。

2.3 一般相対性理論における実体説と関係説

一般相対性理論が提唱されてからも、物理学にはさらなるパラダイム変換が続く。量子力学とその後続く量子場理論の登場によって、古典物理学から現代物理学へと移行する20世紀の物理学が形成されていく。時を同じくして哲学の分野では論理実証主義の台頭があり、哲学的な知識やテーゼは科学的な実験による検証を伴うものだけを認めようとする動きが盛んになった。これは1939年に論理実証主義の主流であったウィーン学団が解散してからも、行き過ぎた科学主義への批判という形で新科学哲学へと受け継がれ、20世紀後半の現代の科学哲学へと続いていく。科学哲学では主に量子力学が対象とするミクロな領域での電子等の理論的対象の實在に関する議論において、實在論と反實在論の対立が盛んになるが、時空の哲学では例えばホワード・ステインの見解[45]等がある。時空の實在に関する問題は、理論的存在の實在を問う科学哲学のテーマとして大別されていくが、アインシュタインの相対性理論提唱時期の当時の時空観と現代の哲学的議論には深い関わりがある。この節では、後の章にも関連する相対論的宇宙論の話も踏まえて、アインシュタインの相対性理論における時空や宇宙の描像を簡単にまとめ上げる。その後で現代の時空の哲学の議論、すなわち一般相対性理論における実体説と関係説の立場へと話を続ける。

2.3.1 一般相対性理論の成立背景

前節では相対性理論に関して、それが登場する科学史的な側面には触れずに理論の導入だけを端的に行った。この節では相対性理論の提唱者であるアインシュタインや当時の物理学者達がどのように時空を捉えていたかということに関して簡単にまとめたい。ニュートンの絶対時空の考え方は前節でも述べたように、カントやマッハなどの批判者を伴い後世にも大きな影響を与えていたが、相対性理論の歴史はこの絶対時空そのものや、物体がそれに対して行う絶対運動の否定から始まったとも言えるだろう。数学者のポアンカレは物理学理論とは経験的事実を記述するための言語によって相対的である（経験的仮説は何らかの理論の規約的な枠組みの中でのみ検証される）というカントの規約主義的な立場を引き継ぐも、時空がユークリッド幾何学であるというような絶対的なアприオリな存在論は拒否した¹⁶。アインシュタインは数学者としてのこのポアンカレの立場に刺激され、さらにはマッハの実証主義的な影響も大いに受けて[47]、時空を独立した存在とは仮定

¹⁶ポアンカレは物理学による存在論的仮説には無関心であったが（例えば空間中のエーテルの存在や非存在などはあくまで言語上のメタファーに過ぎないとしている）[17]pp.51-52)、理論が修正される際に、物理的世界の構造を反映した数学的構造は引き継がれるというのが彼の立場であった（[46]）。この構造こそがポアンカレにとっての實在であるが、本論文で取り上げる構造實在論の源流とも呼べる立場であり、次章以降でも取り上げる。

せずに自身の理論を構築したようである。それゆえに絶対時空の存在しない物理学、つまり特殊相対性理論に登場する光速度を基準に定められる平坦な時空や、一般相対性理論に登場する重力場による曲がった時空というアイデアに行き着いたと言えるだろう。しかし、1904年の特殊相対性理論の提唱から1915年の一般相対性理論の発表に行き着くまでは10年以上の歳月を要しており、決して「モノ」と相互作用する重力場による時空の幾何構造を容易く定式化出来たわけではない。

そもそも数学的にテンソルという形で与えられる抽象的な重力場と、時空の幾何学的構造を示す具体的な計量が同じ概念であるというのは極めて大胆な主張である。大胆というのは、当時の時空に関する常識的な観念に対してという意味に加えて、科学哲学的には観測不可能な（非経験的な）領域にコミットしていることに対してである。ミクロという意味ではないが、計量による時空の幾何学的構造は少なくともこの4次元空間に生息している人類が直接観測できる類のものではない。文字通り視覚的にこの世界の時空の曲がり具合を観測するためには、5次元以上の高次元のユークリッド座標系を導入しなければならない。平坦な5次元を観測できる仮想的な観測者によってのみ、そこに埋め込まれた4次元時空の幾何的構造を視覚的に観測出来るのである。この幾何学的構造を高次元を持ち出さずに4次元時空のままで記述するのが2.12式で表される計量である。これは時空に張った座標系の曲がり具合を記述しているが、空間に貼った適当な座標系を仮に目視出来たところで、それは単なる座標系の曲がり具合であって、時空間そのものの曲がり具合を見て取れるわけではない。計量そのものを直接観測することは難しい。例えば地球上で水平に投げたボールが直線運動ではなく、放物運動をして地面に落ちていく様子を目にしたところで、その現象を地球という重力源による時空の曲がりだと一意に認識できるわけではない。一般相対性理論に従えば、この現象はボールが曲がった時空の中をその4元速度 $u^i = \frac{dx^i}{ds} = (\frac{cdt}{ds}, \frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}, \frac{dz}{ds})$ で表されるベクトルを一定に保ったままで平行移動している（曲がった時空の中を測地線方程式に従って等速運動している）という解釈になるだろうが、これはリーマン幾何学を前提とした理論負荷性による解釈である。ニュートン力学のように、地球の重力によって加速度を受けるために3元速度が変化する（平坦な空間の中を運動方程式に従って加速度運動している）という記述の方が遥かにシンプルな解釈であり、少なくともこの現象に関して観測によって時空の幾何構造を検出することは不可能なのである。この要素のみを取り上げるならば、図2.3にも示したように、ニュートン力学の方が非ユークリッド幾何学という理論的存在者を敢えて必要とする一般相対性理論と比べて、単純性の面では優れているだろう [9]。

つまり、計量で表される重力場の存在から一般的な非ユークリッドな時空幾何に結び付けるには大きな隔たりがある。例えば特殊相対性理論の慣性系に限られた理論から、等価原理を前提とする加速度（重力計）系を経て任意の座標系でも成立する物理法則を構築するに至る展開において、アインシュタインは地球の自転による遠心力から重力場の存在を説明したり [48]、ガウスによる二

時空の幾何学の考察

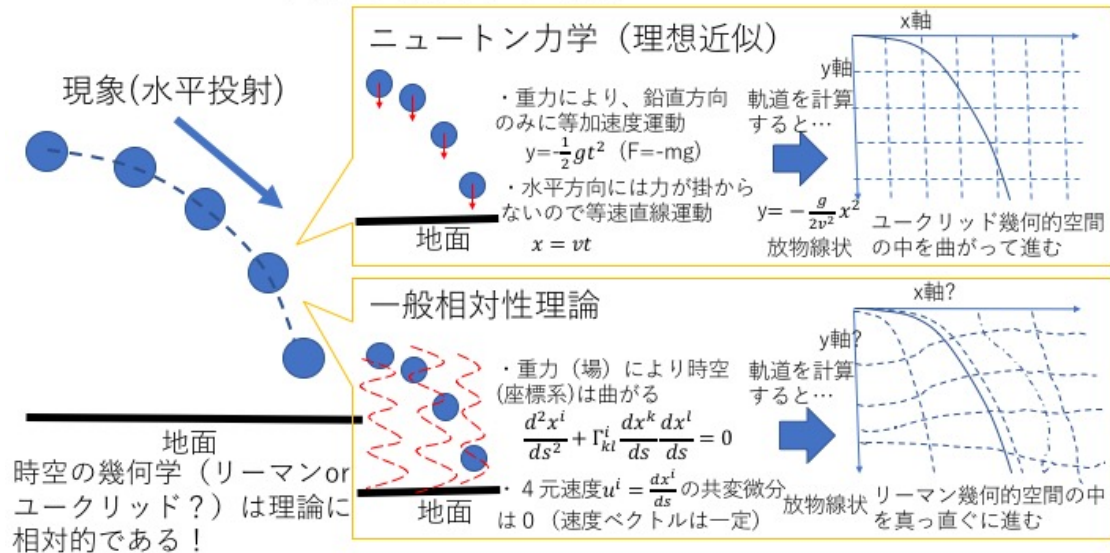


図 2.3: 時空の幾何学の考察: ボールを地面に平行に水平投射するとボールは放物運動を行うのが観測される。これをニュートン力学で解釈するならば空気抵抗などの影響が無視できる場合に限り、鉛直方向には万有引力による重力加速度運動を、水平方向には等速直線運動を行うことが運動方程式から帰結される。一方でアインシュタインの一般相対性理論で解釈するならば、地球の重力場によって時空が曲がっているために4元速度ベクトルは、測地線方程式に沿って平行移動(曲がった座標系においては等速運動)していく。これらは物理的には全く異なる記述を与えるが、この程度のスケールの現象に限って言えば、観測から2つの理論の真偽を比較することは出来ない。ポアンカレの立場で言えば、物体はニュートン力学という言葉の中ではユークリッド幾何的な空間の中を鉛直方向のみに加速度運動をしている一方で、一般相対性理論という言葉の中ではリーマン幾何学的な時空の中を等速運動しているのである。

次元曲面に関する幾何学的な性質と一般相対性理論の間に計量という数学的な類似性を見出した[48][49]。しかしその時点ではまだリーマン等の一般的な非ユークリッド幾何学を扱った数学的な定式化を知らず、マーセル・グロスマンの協力を得てリーマン多様体とテンソル解析による重力場の数学的記述を完成させることになる[49]¹⁷。その定式化において、一般相対性理論の根幹となる一般共変性が大きな役割を果たしている。一般共変性とは、一般相対性理論はどのような座標系(観測者)を用いても物理法則は正しく記述できるという普遍的な要請を要求しているが、アインシュタインはその最終形態であり、動的な場の方程式である2.11式を導出するまでの過程において¹⁸穴の議論(hole argument)に陥っている[51]。これは物理的な時空点が動的な計量2.12式とは

¹⁷この一連の流れはカオによっても紹介されているが([17]pp.66-69)、物理学理論が微分幾何学を伴った数学的な定式化へと向かう際のプロセスや背景に関する詳細は私の次の課題でもある。

¹⁸1915年に発表された4つの論文のうち、最後に発表された[50]のが時空の状態を表す計量テンソルとモノ(matter)

独立に定義出来るという、基準系そのものの実在を仮定した見解でもあり（内容の詳細は次項で取り上げる）、一般共変性の意味を解釈することにより解決された問題でもある。

一般相対性理論の時空を数学的に定式化する上では、連続体を表す多様体が前提となる。これが時空を考える上での数学的な土台である。そして多様体の各点を表現するために座標系を貼るということは、上記のように物理的に何らかの基準系を設定するという限りにおいては同時に何らかの計量をも与えるということも意味する。その意味で座標系と計量は切り離せない関係であり、計量とは独立に座標系の目盛り、すなわち多様体の各点に予め物理的な時空点を対応させることはできない。これは動的な計量場が無くても容器物 (container) として時空の状態（距離や同時性）を有意義に与えることができるニュートンの絶対時空説や特殊相対性理論の慣性系とは違って、一般相対性理論における座標系は計量場の中で記述される現象の中で、初めて時空点（世界線同士の交点や各事象の割り当て）が構成されるからである。穴の議論による問題は、一般相対性理論が果たして従来の古典物理学に共通の決定論的な枠組みの理論であるのか、それとも以降に登場する量子力学のような非決定論的な理論のいずれかであるのかという極めて大きなテーマにも関わるが（同じく内容の詳細は次項で取り上げる）、この観点はアインシュタイン自身が時空点の実在を計量と独立に暗に仮定してしまっていたための混乱であるとされている¹⁹。計量無しに物理的な時空を記述することは出来ないという結論の元で問題自体は解決するが、時空の実在性を哲学的に考える上でも穴の議論は大きな役割を提供している。次項でも論じるように、穴の議論は一般相対性理論を元にした現代の実体説のあり方というテーマにおいて、多様体という数学的な存在者と時空（時空点）という物理的な存在者の間の、つまりはモデルと実在の議論に深く関わっている [18]。ここで得られる「時空は重力場と独立に物理的な実在を備えていない」という帰結は、当時のアインシュタインがモノの容器物としての時空という考えを否定しているという意味で関係説的な立場を取っていることがわかる [17]p.74。また一般共変性は、任意の慣性系で物理法則は同じ形式で成立するという特殊相対性原理を任意の一般座標系に拡張させた要請であり、相対性原理を出発点としていることには疑いの余地は無い。しかし、一般共変性が果たして拡張された相対性原理の数学的な定式化そのものであるのかということに対しては当時の学者達の中でも反論があり、一般共変性は単なる数学的な操作に過ぎず、物理的には空虚な内容しか含んでいないというクレッチマンの指摘 [54] もあった。

さらにアインシュタインの相対性理論の構築にはマッハの関係説的な思想も深く関わっている。マッハ原理に従えば時空の状態は全て物質の分布に依存するが、これはさらに正確に述べれば、2.11 式の左辺が右辺のみに依存しているということである。すなわち時空の関係説のテーゼに従うことで、時空とモノ（電磁場を含む）のうち、モノの時空に対する存在論的な優先性を主張している。

を表すエネルギー運動量テンソルの関係式についての論文であり、そこで一般相対性理論における場の基本方程式である 2.11 式が登場している。

¹⁹ これらの明解な解説書としては、例えば内井参照 [52][53]。

絶対時空という受動的な存在者が退けられた一方で、一般相対性理論は多様体や動的な計量による重力場を元になっている以上、時空は存在しないと述べるライプニッツの主張が何に対応するのかということは自明ではない²⁰。特殊相対性理論ではミンコフスキー時空構造を前提にしているものの、一般相対性理論が時空の構造を計量を用いて一般化している以上はまずはモノの状態が時空を考えるための指標となる。少なくとも言えることは、マッハの路線では等価原理による慣性質量（あるいは慣性そのもの）や物体の運動が、全宇宙に存在する他の物体の質量や運動に対して相対的に決まるということである。ニュートンがニュートンのバケツにおいて、モノの運動を観測不可能な絶対空間に対する絶対運動と定めたのに対して、マッハはモノの運動をある物理的な基準系から見た場合の相対的な運動と定めている [40]。すなわちマッハにとってはバケツの水が回転するのは、質量を持つ地球や他の天体に対する相対的な回転運動によって遠心力が生じる結果であり、バケツと水のみしか存在しない世界においては相対的な運動は生まれず遠心力は生じない。マッハの考えを相対性理論に適応させるためには、例えば質量を持つ物体同士の相互作用が重力場の因果作用だと解釈することで、慣性質量（加速度系における物体の動きにくさ）と重力質量（重力場の中で物体が受ける力）が等しいという等価原理を説明することができる。さらにマッハ原理は相対性原理とも緊密な関係がある。マッハ原理も相対性原理もどちらも絶対的な指標を拒み基準系による相対的な運動や関係を論じている点において共通していることは事実である。相対性原理がどの基準系も同等に扱っていることと、マッハ原理が述べる宇宙全体の物質分布に基づく実証的な立場がどのように結び付くのかは興味深いが、先に挙げたクレッチマンの指摘に対抗するようにアインシュタインはマッハ原理を敢えて相対性原理と区別して、一般共変性の形式における相対性原理（物理的な内容を含む）を保持しながら慣性という概念と全宇宙に含まれる物質との関係を模索した。その試みは次項で説明するように、相対性理論を用いて宇宙論を構築する際のアインシュタインの時空に対する仮説とも大いに関わっている。

2.3.2 宇宙論への拡張と物理場の取り扱い

アインシュタインは一般相対性理論の提唱後、2.11 式の解を元に宇宙論を論じている [55]。初めての相対論的宇宙論の論文が発表される 1917 年の時点では、5 章で論じるような宇宙には始まりがあり、初期のインフレーションを伴って現在も加速膨張を続けているという現代宇宙論の面影はない。当時はビッグバン宇宙論を支持するような天文学分野の観測事実による証拠も足りない中で、アインシュタインはまず最初に静的宇宙のモデルを考案している。この背景にもマッハ原理の影響が強く根ざしている。アインシュタインは有限かつ空間的には閉じた宇宙が最適であると考えたが、この発想は境界条件に対する打開策でもある。というのも解くべき 2.11 式が微分方程式である以上、時間に関して例えば $t=0$ の初期条件を方程式とは独立に外から積分定数として与えて

²⁰ 前節でも挙げたライプニッツの同一性に関しては、微分同相写像という別の形で次項で取り上げることにする。

やらない限りは完全には値が定まらない一方で、空間に関しても何らかの境界条件が必要であるからである。任意の座標変換で一般共変性を満たすようにうまく境界条件を選ぶことは容易ではなく、そもそも観測領域の限られる宇宙空間に境界を与えること自体が哲学的に問題であった。その一例がシュワルツシルト計量が示唆する無限遠点の取り扱いである。

$$ds^2 = (1 - \frac{2GM}{c^2 r})c^2 dt^2 - (1 - \frac{2GM}{c^2 r})^{-1} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (2.13)$$

ここで、用いている座標系 (r, θ, ϕ) は 3 次元の極座標表示であり、 M は中心に存在する質点の質量である。これは 1916 年にカール・シュワルツシルトによって、アインシュタイン方程式の静的な球対称な解として初めて与えられた厳密解である [56]。この計量は今日ではシュヴァルツシルト半径と呼ばれる $r = \frac{2GM}{c^2}$ を事象の地平面とする、角運動量も電荷も持たない最も簡単なブラックホールの解として馴染み深い計量であるが、当時は質量 M を持つ一般的な質点（星などの重力源が重力崩壊した姿）によって生じる重力場の真空（質点の占める位置（ $r=0$ ）以外ではエネルギー運動量テンソルの値はゼロでモノが存在しないという意味での真空）解の発見であった²¹。ここで重要なのは無限遠点での、すなわち $r \rightarrow \infty$ における境界条件の設定である。 $\frac{2GM}{c^2 r}$ はゼロに収束するために、無限遠点の計量はミンコフスキー時空計量 2.2 式に漸近する。すなわち、重力源である原点の質点から十分に遠ざかった領域では、計量は平坦なミンコフスキー時空になるという境界条件が課せられているのである。率直に考えてこの描像はマッハ原理と矛盾している。なぜならば、モノの存在しない領域であるにも関わらず時空そのものを考えることはナンセンスであるからだ²²。もし仮に無限遠点までテスト粒子を飛ばしたとすれば、それは慣性系で存在していることになり、物体とは独立した慣性を前提としてしまうことになるのである。この境界条件に関してアインシュタインは、その無限遠点の慣性さえも、観測を越えた領域に存在している「無限遠の物体」が及ぼしている現象としてマッハ原理を擁護した。この普遍的なミンコフスキー時空的境界条件は、 $T_{\mu\nu} = 0$ を満たす 2.11 式の解としては全く問題無いが、外的な境界条件を方程式とは独立に設定しているために一般共変性そのものは満たしてはいないのである。さらに無限遠の物体の指定は、観測を越えた領域の理論的対象を意味しており、マッハ原理を徹底するには代償が生じる。この代償は、無限遠点で時空がどのような状態になるのかという考察に基くものであるために、アインシュタインは結局境界条件を設定しなくて済むような有限宇宙の考えに辿り着くのである。閉じた有限宇宙では観測が及ばない無限遠点を考える必要は無いが、そのために??式を多少修正することになる。アインシュタイン方程式を積分定数を残した状態で書き換えると、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \quad (2.14)$$

²¹シュヴァルツシルト自身は、 $r > \frac{2GM}{c^2}$ の質点から見てシュヴァルツシルト半径より外側の領域のみを新しく R に座標変換して、動径座標 r ではなく、新しく定義された R を用いて扱っている； $R = (r^3 + (\frac{2GM}{c^2})^3)^{\frac{1}{3}}$ [56]。つまり、座標系 (R, θ, ϕ) によって特異点を含む事象の地平面内部の物理を醸す部分には触れずに議論している。

²²アインシュタイン自身はこの無限遠点においては、影響を及ぼす重力源（質量を持った物体）が何も無い場合、物体の慣性質量はゼロになると考えていたようである [55]。

となり、2.11 式と比べて $\Lambda g_{\mu\nu}$ という項が加わっている。この項の物理的な意味を考えることは後のダークエネルギーの研究にも繋がるテーマであり、宇宙項に関しては真空とは何かというテーマに関して 5.3 でも再び取り上げることにする。取り敢えず今はこの新たな存在を何らかの力と解釈するならば、少なくとも宇宙の全物質が収縮する向きに働く重力を打ち消す向きに作用する力と言えるだろう²³。アインシュタインはこの修正されたアインシュタイン方程式を通じて宇宙を安定に、そして静的に保つ定常宇宙モデルを当時考案したのである [55]。このモデルを用いれば、例えば宇宙に存在するモノが通常のダスト物質（圧力を無視できるほど速度が遅い通常の物質）のみの場合、宇宙項を介して宇宙の曲率 K ($g_{\mu\nu}$ によって計算される値) と物質の密度 $T_{00} = \rho$ との関係が次のように与えられる：

$$\Lambda = K = \frac{4\pi G\rho}{c^4} \quad (2.15)$$

これは無限遠の状態を仮定せずとも、宇宙に存在するモノと宇宙全体の幾何的曲率の間に成り立つ関係式である。モノの物質的密度が大きくなればそれだけ宇宙の曲率も大きくなることを示している。宇宙の曲率の符号が正である以上は閉じた有限宇宙を表現することが可能であり、つまりは時空計量に関して何らかの無限遠点に関する境界条件を持ち出さずとも宇宙を論じることが可能となる。しかしこの解は極めて微細な条件の元で成立する条件であり、少しでも物質密度に揺らぎが生じれば、すぐさま宇宙は加速膨張ないしは加速収縮に転じるという極めて不安定な解でもある。さらにアインシュタインによる宇宙項の導入は、再びマッハ原理を危機に晒す帰結を生み出すことになる。それは宇宙項が閉じた有限な宇宙モデルに加えて静的というより強い過剰な制限まで与えてしまうだけに留まらず、次のようにモノの存在しない時空計量の解まで可能にしてしまうのである²⁴：

$$ds^2 = (1 - \frac{\Lambda r^2}{3})dt^2 - (1 - \frac{\Lambda r^2}{3})^{-1}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (2.16)$$

これは宇宙項が正負の場合も含めて成り立つが、正の場合には $K = \frac{\Lambda}{3}$ を満たすドジッター空間と呼ばれる $\rho = 0$ の通常の物質が存在しない状態における時空計量である。ドジッターによって提唱された ([57, 58, 59]) この新たな静的宇宙の解は一般に真空の解とも呼ばれるが、宇宙項を導入することによって、モノが無くても計量 $g_{\mu\nu}$ が存在することはマッハ原理にとっては大きな弊害であった。通常の物質とは宇宙に存在する星や銀河、あるいは宇宙線といった類のモノであろうが、2.16 式ではこれらの物質は存在しないという前提で 2.14 式から出発している。にも関わらず計量が存在するということは、やはり世界物質 (world matter) と呼ぶべきモノの中には、通常の物体や物質以上のものが含まれているのではないかという発想が続くマッハ原理支持者の逃げどころになるだろう。少なくともアインシュタインの不安定な静的宇宙を実現するには、平衡状態からのず

²³同じく 5.3 でも再び述べるが、宇宙項は後になって実験で明らかにされる宇宙の加速膨張を担うための必要な役割を担っている。

²⁴閉じた有限なモデルだけで良いならば、元々の 2.11 式からも導くことが可能である。また修正された 2.14 式においても 2.16 式のような解が可能となる以上、結局は宇宙項の導入はマッハ原理にとって必要でも十分でも無い [17]p.84。

れをすぐに補えるように、点在している星などの物質とは異なった、宇宙の密度や圧力を一定に保つための宇宙を一様に満たす何らかの流体成分が必要である [17]p.85。もしこの未知の流体を我々が通常の物質として観測することは出来ない世界的物質だと認めるのならば、物質はまさにエーテルの如く宇宙において計量が存在するところに必ず存在することになり、最早時空とモノの境界そのものが曖昧になる。アインシュタイン自身はドジッターとのやり取りにて、自分のモデルにおいて宇宙を一様に漂う流体を認めなかったが、ドジッター時空は完全にからっぽの時空ではなく、計量を成立させている物質が背景に存在すると主張した [60][61]。それは $T_{\mu\nu}$ によって与えられる一般的なモノではなく、上記で述べたような「無限遠の物体」のようなさらに抽象的な意味での物体である。2.16 式において、 $r^2 = \frac{3}{\Lambda}$ を満たす r は天文学的地平面 (cosmological horizon) と呼ばれる領域である。そこでは $g_{00} = 0$ が成立し、なおかつ空間計量に特異点（値が発散してうまく定義できない点）が生じる。物理的にはどれだけ時間を掛けても到達できない領域であり、さらに時間計量 g_{00} をゼロにするためにはそこに存在する物体の質量は無限大でないといけない。こういった特殊な領域に存在する特殊な物体が物理的に存在することを検証するのは不可能であり、結局それはモノ（存在者）というよりはある意味時空計量を説明するための道具でしかないかもしれない。

宇宙が静的であるという主張は擁護が難しく、結局はアインシュタインの静的宇宙もドジッターの真空解も宇宙を表す数多くの数学的モデルの制限された事例に過ぎないことが 1922 年にフリードマンによって示され [1]、一般的にはマッハ原理には従わないような膨張や収縮を行う多くの宇宙の解が論じられるようになる。1927 年にはドジッターモデルを研究していたルメートルも同様に他の銀河から届く光の波長が通常の光の波長と比べて長くなる赤方偏移という現象に着目して、それを宇宙膨張による現象だと解釈した [2]²⁵。そして 1929 年に遠くの銀河はより顕著な赤方偏移を示すというハッブルの法則が観測的に発見されると [62]、最早膨張宇宙論こそが標準的な相対論的宇宙論となる。そして数十年を経てさらなる観測事実、さらなる議論を伴って現代のビッグバン宇宙論が構築されることになる。このビッグバン宇宙論に関しては 5 章と 6 章で取り上げる。

計量とは重力場であり物理場である。電磁場を筆頭とする物理場は電荷や質量といったモノの性質に起因するというのは 19 世紀の電磁場の発見当時であれば恐らく自然な発想であっただろうから、仮にマッハでなくても重力場を及ぼす原因がモノであるという発想はある程度は当時の共通認識であったかもしれない。結局アインシュタインは 1920 年代半ばからマッハ原理ではなく、統一場の理論 (UFT) の支持者となる ([17]p.101&[63])。計量はモノによって決まるというよりは、時空から切り取られたモノの存在論的な優位性の主張は不可能であり、存在するのは総合的な場という物理的存在者だけであり、そこから我々がモノと呼んだり時空と呼んだりするものが、エネル

²⁵ ドジッターの時空モデルが静的な宇宙モデルではなく、実は膨張宇宙を表す動的モデルであるという事実は 5 章の膨張宇宙論と座標系の選び方の考察とも大いに関係している。

ギー運動量テンソルや幾何的な計量を用いて表現されるというのである。この考え方は時空の幾何的プログラムという形で次項のモードリンの話でも少し触れることにしたい。一般相対性理論に従えば、時空はニュートンが考えたようなモノと互いに影響を及ぼさない受動的な容れ物ではなくて、モノと能動的に相互作用する動的な理論的存在者なのである。その構造は様々な座標で記述することが出来るために様々な形式を持つが、重力場という1つの存在者の質的現れ [17] である。どのような座標系を選んでも物理法則は等しく記述できるという一般相対性理論は、数学的な側面も物理学的な側面も含めて存在論的にも認識論的にも個々の観測者の経験を越えた普遍的な物理学の理論なのである。この普遍性は従来の物理学の基本方程式とは明らかに異なる階層に位置しており、その構造の特異性に関しては3章で取り上げることにする。次項からはいよいよ穴の議論を始めとした現代の時空の哲学における議論に入る。

2.3.3 穴の議論と実体説の危機

時空が存在するというテーゼには、一般相対性理論を土台にした何らかの定式化が必要である。それらの定式化が本格的に行われたのは1980年代後半から1990年代であり、主にティム・モードリン (Tim Maudlin)[18][19] やカール・ホーファー (Carl Hoefer)[21] によってであった。歴史的には彼らが一般相対性理論における時空の実体説の先駆者に当たる。その流れを振り返りながら、時空の実体説がどういった意味で時空の実体性を主張しているのかを明らかにしたい。1987年のジョン・アーマン (John Earman) とジョン・ノートン (John Norton) の論文 [64] において、実体説論者 (substantivalist) は物理理論が非決定論的であると認めるか、実体説を棄却するかのいずれかであると述べている。すなわち2人の論証によれば、実体説は一般相対性理論が決定的であることを否定しているということになる。これは、前項で述べたアインシュタインの穴の議論 (hole argument) であるが、彼らは次のような論証を展開している。

自然を記述する際に、そのモデルとして多様体と物理場（重力場を含む）のセットを考え、各々の物理場に成り立つ方程式（微分方程式）を前提とする。電磁場の方程式もアインシュタイン方程式も局所的な方程式であるために、ゲージ自由度が存在する。従って、物理場の解は一意には（全体的には）定まらずに、例えばあるテンソルやベクトル解が認められたとしても、それに対して同じ多様体内で微分同相写像 (diffeomorphism) によって変換される群もまた解になる ($x^m \rightarrow h * x^m$ の座標変換に対して、例えばベクトルは $O_k \rightarrow h * O_k$ の変換をする。)。この微分同相写像は具体的には座標変換に対応しているが、一般相対性理論では一般共変性ゆえにこの変換は受動的な (passive) ものであり、単に視点を変えたのみで物理的な変化を及ぼすものではない。ここでライプニッツの立場を取れば、次のような結論が出てくるだろう。

- ライプニッツの（不可識別者の）同一性：微分同相写像モデルは同じ物理的状態を表す。

一般相対性理論においては、電磁場やモノは除いたとしても、多様体の全ての点において計量が定義されている以上は重力場は存在しているために、ニュートン力学で言うようなからっぽの空間は存在しない。その前提において、実体説は時空の実在として何を根拠にするのかというのが大きな課題である。自然を記述するためには局所的な方程式を出発としている以上、大局的な構造（例えば特定のミンコフスキー空間等）を仮定するわけにはいかず、あらゆる場の容れ物 (container) であり、重力場を定義する土台でもある多様体が時空の候補として挙がる。多様体の実在をどのように定めるかということが難しいが、もし多様体が時空そのものであるならば、我々はモデルに対して厳格な実在論的立場を取ることも可能である。すなわち微分同相写像で変換するそれぞれのモデルは可能な物理的状況を表すというよりは、各モデルが可能な物理的状況そのものであり、そのうちの1つが我々の世界なのである (p.521)。

実体説をどのように再構築しようとも、当時のライブニッツによる厳密な検査は避けては通れない。すなわち世界（宇宙）の全てのものが互いの関係を保ったままで、3フィート東に動いたとすれば、移動の前後で世界は異なっているのか（ライブニッツシフト）という、前々節で挙げた実体説と関係説の議論である。クラークとライブニッツの議論は、一般相対性理論においては上述した微分同相写像の話に置き換えることができる²⁶。実体説は前後の世界は異なっていると結論付ける必要があり、ライブニッツの同一性を否定しなければいけない。ある物体 a が位置 x に存在することを直接観測することは出来ず、例えば x と書かれた物差しの位置に他の存在者を用いて間接的に位置を特定することしか出来ない。つまり時空点そのものは直接観測することが不可能であるため、異なった微分同相写像モデルを観測的に見分けることが出来ないのである。実体説は観測的に見分けが付かないモデルの差異を主張しなければいけないのだ。そしてこのジレンマから一般相対性理論の非決定論性が帰結されるのである。ある局所的な時空論 T において、多様体 M と H (穴) を備えているとする。 H は M の近傍で、 h を H の領域のみで異なり、 M との境界やそれ以外では等しい微分同相写像とする。ゲージ理論により、 h によって変換されたモデルも同じく条件を満たすために、 M の中では同じでも、穴である H のみで異なった微分同相写像モデルが多数存在し、穴の中では無数の計量が考えられることになる。実体説論者はこれらの計量場をそれぞれ互いに異なっていると主張しているのである。この主張は一般相対性理論の非決定論的な側面を掲げる。すなわち過去と現在が定まれば、未来が一意に決まるという決定論的な特徴を否定している²⁷。実体説論者はライブニッツの同一性を諦める、すなわち局所的な時空論の決定論を捨て去る

²⁶ この対応（ニュートン力学における3フィート移動と一般相対性理論における微分同相写像の等価性）の問題は4章でも取り上げるが、ノートンとアーマンは変換の前後でモノや場の関係は変わらないという点で、この置き換えを自明なものとしている。

²⁷ これは穴の外部の全ての情報が決まっても内部を特定できないという意味での非決定論である。そもそも実体説の問題とは無関係に物質の分布が決まれば計量が一意に定まるわけではないという反マッハ的な意味では一般相対性理論は非決定論的である ([19]p.557)。後者の非決定論性は微分方程式である以上、物理学的方程式に特有のものであり、初期条件を与えて初めて計量を一意に決定することができる。

か、それとも自身の立場を捨て去るかの非常に厳しい立場にあるのだ (p.524)。

以上がノートンとアーマンの、前項でアインシュタインも陥ったとされる穴の議論による実体説への批判であるが、ここで重要なのは彼らは時空の実在を位相空間を表す多様体として描いていることである。アインシュタインが多様体に物理的な意味がないことに気付いて、この穴の議論を解決したことは前項で既に述べた通りだが、ノートン等の指摘は、あくまで相対性理論を正しく理解した上で、観測的には2つの穴のモデルが見分けが付かないことを認めた前提での、経験を越えた形而上学的な時空にコミットしていることに注意したい。この立場では計量はあくまで多様体に備わるものであり、他の物質場と同じような身分で考えられているのが特徴的である。微分同相写像によって異なった時空の記述が生まれてしまうことから、実体説を主張する限りにおいては穴の外では全く同じ条件であっても、穴の中での時空は2つのモデルで異なっていると結論付けられている。この主張に対する批判が現代の実体説を作り上げて行くことになる。モードリンは、時空の本質がどこにあるのかということで穴の議論を回避する実体説のあり方を模索した。一般相対性理論の枠組みで時空の実在を主張するということは、端的には時空はモノとは独立に存在しているということだが、先に述べたアーマンやノートンは、このモノの中に計量 (metric) を含めている。計量で表される重力場は、2.12 式にあるように数学的には電磁場などと同じくテンソル場で表されていて、局所的な微分方程式によって与えられ、エネルギーや運動量を伝搬するエネルギー的な媒体である ([64]p.519)。すなわち彼らにとっては時空とは電磁場やエネルギー的物質、そして計量すら取り去った後に残る存在であり、数学的には点の集合による位相空間からなる多様体なのである。つまり彼らにとっては、ある意味ではからっぽの空間（容れ物）はこの多様体のことを指示しているのであろう。計量が無い限りはそれらの点の間に距離的な関係を与えることもできない以上、4次元の多様体には時間も空間も区別なく、それは過去や未来や現在、物理的な因果関係を意味する光円錐も定義出来ない。多様体上の各点は、その点だけを取り出せば言わば裸の基体 (bare substructum) である。当初考えられた一般相対性理論におけるこの実体説を多様体実体説 (manifold substantivalism) という ([21])。問題はこの多様体という数学的モデルを時空間という物理的な対象に当てはめることが果たして適切であろうかということである。モードリンは穴の議論の解決に向けて、ノートンらと同じく実体説の従来の議論の中で主題となったライブニッツシフトを挙げている。3フィートの移動の前後で世界 A と B が異なるとしても、この存在論的に異なる事態を表すことは難しく、文をラムジー化しても2つの世界を区別出来ない²⁸。このことは結局ライブニッツの不可識別者の同一性原理に従えば2つの世界は見分けが付けられず、充足理由律にも相反してしまうために空間そのものは存在せずに、ただモノの位置関係に還元されてしまうと結論付けると関係説的な見解を支持してしまうことになる。時空点は果たして実在するのだろうか。

²⁸ ラムジー化とは、時空点に対する指示を避けて、存在命題のラムジー文に変換することである。例：この時空点は R という曲率を持っている。→ R という曲率を持つ時空点が存在する。

モードリンはここで、数学的な点をそのままの形で物理的な時空点に対応させることには細心の注意を払っている。なぜならば、点はいくまで数学上のモデルであり、数学上の点をそのまま物理的な時空点、ないしは事象に等しいと考えることには飛躍があるからである。そもそも時空の本質は各々の点の集合体からなる多様体なのだろうか？時空と計量との関わりを検討することが新たな実体説の登場を誘うことになる。

2.3.4 モデルと物理世界との対応 多様体と計量

時空をもしラムジー化して記述する場合、ライプニッツシフトにおける2つの世界の違いは見出せないが、逆に穴の議論の問題は解決する。その場合、穴の内部での構造は一意に定まる。つまり存在論的に2つのモデルは同じ時空に対応していて、両者に本質的な違いはない。多様体そのものではなく、計量から作られる時空構造を考えれば穴の議論に陥ることはなく、あくまで実体説の立場でも一般相対性理論の決定論的側面を崩さずに済む。その場合の時空の実体説とは何を意味するのか？穴の議論に対するモードリンの議論[18]を踏まえ、再び実体の在り方に関して考える。穴の議論に陥るのは、多様体実体説のように数学的モデルである多様体に物理的な実在の身分、すなわち実体性を与えることに端を発している。数学的対象とそれが表している物理的な実在との間には総合的な用語の曖昧さが見受けられる²⁹。例えばクワインは時空点の存在を認め、他のどんな物理的な存在者からも独立に存在することができる実体であると考えていた。また、場の方程式の解における数学的な点は、量化された束縛変項として機能することで、事象の位置すなわち物理的な時空点を表すと考え、特定の事象の指示をラムジー化することで解釈していた。すなわちモデルが示すのは特定の時空点に関する命題ではなく、何らかの時空点が存在するということである。この解釈によれば、微分同相写像は数学的な操作であり、座標変換によって各時空点に再び名前（座標値）を与える操作をしているに過ぎず、物理的には同じ内容を表している。これにより2つの微分同相写像によってそれぞれ異なるモデルは1つの物理世界を表していることになり、決定論が復活する。

しかし時空点をラムジー化してしまえば、ライプニッツシフトにおいても移動の前後で2つの世界AとBは物理的に同じ世界になり、存在論的に異なった事態であることが帰結できない。なぜならば、2つの世界は数学的に全く同じ構造を持っているので、ラムジー化したところで両者の物理的な内容に変化が無いのである。そもそもライプニッツシフトにおいては、移動の前後の世界での違いをモノが占めている位置の違い、すなわち対象の存在する時空点の違いに言及している。言い換えれば物理的な事象の位置(event location)を指示するのは、ラムジー文における束縛変項で

²⁹モードリンは「スカラー場」の用法に関して、それが各時空点において1つの自由度（値）を備えていて、写像によって表される何らかの実在そのものを指している(is)のか、それとも何らかの物理的な存在者を表すために適当に構成された、数学的な写像に過ぎないもの(is represented by)なのか、物理的な語法の曖昧な例として挙げている[18]pp.82-83

はなく名前 (naming) である。各世界を2つのモデルとして、数学上の点を物理的な時空点の名前として扱うことで、ライブニッツシフトの問題を解決することは出来るだろう。しかしそれを認めてしまえば微分同相写像の穴の議論の非決定論に逆戻りしてしまう。微分同相写像によって、特定の数学上の点に定義されるテンソル場を変えてしまうからである。穴の議論が一般相対性理論そのものと矛盾しないことがわかっている今や、一般にモデル内の対象に実在の世界の存在者を対応付けることはどの理論にとっても注意が必要である。

仮にモデル内の名前が単なる変項でないと考えるならば、アインシュタインの一般相対性理論だけに留まらず、世の中のあるあらゆる記述が非決定論に陥ってしまう。モードリンは例としてエッフェル塔に関する記述と自分（モードリン）に関する各々の記述において、「エッフェル塔」と「モードリン」の2つの名前を入れ替えた場合を挙げている。元の記述群との違いはただその2つの名前のみであり、宇宙の誕生から今日に至るまでのそれ以外の他の記述や物理法則には全く差が無いとしよう。通常の記述群をモデルC（名前を入れ替えていない場合の記述の集まり）と入れ替えた後の記述群をモデルDとおく。モデルCとモデルDは果たして存在論的に異なっている内容を表しているのかということが考えるべき点である。モデルDでは「1889年にモードリンがセーヌ川沿いに建てられた」や「1988年8月の午後にエッフェル塔がミシシッピ大学で講義をしている」という記述が登場する。もし、文字通りに「エッフェル塔」がエッフェル塔を、「モードリン」がモードリンを指示しているとすれば、モデルDは偽であり、入れ替える前のモデルCが真であるという結論になるだろう。

一般にある理論において、言語的な記述はその理論を構成する1つ1つの文でもあるが、「モードリン」や「エッフェル塔」という名前が単なる束縛変項的な（ラムジー文的発想）名札であるとしよう。すなわち入れ替える前のモデルCで「モードリン」はモードリンを指示し、「エッフェル塔」はエッフェル塔を指示するが、入れ替えた後のモデルDでは指示対象が逆になると受動的 (passive) に解釈すれば良い。結局2つの異なる（名前が入れ替わった）記述は同じ物理的内容を含んでいる。モデルDでは、モデルCにおいて「エッフェル塔」と指示していたものを「モードリン」と、逆に世界Cにおいて「モードリン」と指示していたものを「エッフェル塔」と指示するに過ぎないのだ。重要なのは各モデル内で使われる名前がいかに異なっていようと、それらは微分同相写像と同様に存在論的には同じ1つの世界を表現しているに過ぎない。

しかし、ここで「エッフェル塔」や「モードリン」は一意に世界の実体（本質存在）を指示しているという、能動的な (active) 仮定をする。さらにはエッフェル塔が建てられるまでの宇宙の全ての歴史に関する記述はモデルCとDで一致している。こういった前提の中で、1889年にセーヌ川に桁を構成物とした実体が建てられることにはどちらのモデルも同意しているために、モデル内において、その実体が「エッフェル塔」か「モードリン」のいずれかであるかということに関しては完全に非決定的であるのだ。それは「モードリン」であっても「エッフェル塔」であっても、

あるいは他の名前によって指示される実体であっても、桁を構成物とする実在のエッフェル塔の性質さえ備えていれば何でも良い。これは一種の非決定論を導く。アーマンやノートンが挙げた穴の議論は一般相対性理論の文脈に止まらず、さらに広い形而上学的な描像に根ざしている。こういった問題は、モデルや文における変項が世界における実体を指示するために導入されているということ、そして実体はあらゆる性質を全て偶然的に備えているという仮定のために生じているのである。

2.3.5 偶然的性質と本質的性質

モードリンはさらに続けている。もし世界に存在する実体が、裸の基体として偶然的な性質のみを備えているとすれば、世界は自動的に一種の入れ替え議論に陥るとしている。というのも、もしその世界の中で裸の基体を入れ替えて、各々が持つ偶然的性質を全て交換したとしても、その交換の前後で世界は異なるが、観測的には区別が付かない全く同一の事態となる³⁰。裸の基体の入れ替えによって世界 A と世界 B 同様に、入れ替えの前後で観測的には区別が付かない 2 つの世界（仮にこれを世界 E と世界 F と呼ぼう）が誕生するが、穴の議論同様に、理論は実在の世界が世界 E であるのか世界 F であるのかを決定できなくなり、決定論とは矛盾してしまうのだ。前節の話に戻せば、例えばモデル C では「モードリン」という実体はモードリンが持つ人間としての性質を全て偶然的に備えたものであり、「エッフェル塔」という実体はエッフェル塔が持つ建築物としての性質を全て偶然的に備えている。この偶然的な性質を全て取り去った時に残る裸の基体こそが実体である。モデル D であれば「モードリン」は建物の性質を偶然に備えて、「エッフェル塔」は人間としての性質を偶然備えたのだ。どちらのモデルが適当であるかは理論から決定することは出来ず、結果としてこの形而上学的描像は非決定論的になる。実体とその性質に関しては他の描像もあり得るし、そもそも個物からあらゆる偶然的な性質を取り去れるという見解は、本質主義 (essentialism) とは大きく異なっている。

本質主義は、個物が備える性質は全て偶然的ということではなく、その個物とは切り離せない本質的な性質を有しているという立場である。「モードリン」は確かに実際のモードリンよりは身長がやや低かった可能性も逆にやや高かった可能性もあるが、エッフェル塔のような高さや人間以外の性質はどのモデルにおいても持ち得ないだろう。本質主義を支持する場合、何が個物の本質的な性質であり、どれがそうでないのかという線引きが問題となってくる。個物とは切り離せない本質的な性質があるとすれば、時空（点）にはどんな本質的な性質があるのだろうか？実体論者の先駆者であるニュートンは、時空の本質や本性はその順序にあるとしている。すなわち時間部分も空間

³⁰ 実証主義者ならば、観測的には区別が付かない事態が異なっているということに関して異議を唱えるかもしれないが、現状では彼らの勢力は小さく従ってそれらの形而上学的可能性は自動的に排除されるものではない p.85。

部分もその順序は不変であり、その原始的な位置こそが時空の本質であると述べている³¹。ニュートンにとっては時空の各々の部分は本質的には互いに同一であり、相互的な位置や距離関係によってのみ異なっているべきだとしている。各部分は時空としての計量的な関係を本質的に生み出している。これがニュートンの絶対時空説であるが、この見解を一般相対性理論に変換できないだろうか？一般相対性理論においては時空点の順序や位置、そして距離関係は計量によって与えられる。時空が本質的に計量的な構造であるならば、能動的な解釈をしたところでノートンとアーマンが提唱した穴の議論は問題とならない。なぜなら写像によって粒子や場だけでなく計量自身も動かされるから、点同士に与えられる計量的な関係さえも変わってくるからだ。時空点としての計量が本質的なものと認める以上、本質主義者にとっては微分同相写像による変換の前後で2つの世界が可能だという発想は形而上学的に馬鹿げているのだ。これはラムジー化の解釈による、2つの変項が異なっているという主張とはまた別のものである。数学的な点が物理的な点の名前を与えているという反ラムジー的解釈では、2つのモデルが違いを生み出す以上、どちらのモデルが適しているのかということを個物の本質的な特徴を認めて重要視しなければいけない。ある数学上の点 a が計量 A (リッチスカラーで表される曲率) という性質を備えていたとするならば、微分同相写像によってある数学上の点 b に計量 A が移り変わる。ある時空点 α は本質的に計量 A を備えているために写像前のモデルでは点 a に、写像後のモデルでは点 b に対応するというように考えれば良い。つまり数学上の点が裸の基体としてあらゆる時空の性質を担っているのではなく、 A を備えた点が初めて物理的な時空点に対応するのである。

時空の構造は局所的な計量 (metric) によって与えられるが、それを繋いだ時に表れる全体的な位相空間 (topology) も時空の重要な性質であろう。多様体 (manifold) とは位相空間を表す点の集まりとして解釈することができるが、そういう意味では多様体の情報も結局は時空の性質ということになる。ただし、位相空間の情報だけだと上記の穴の議論に陥ってしまう。もしあらゆる性質が偶然的だとして、時空からそれら全ての性質を取り去れるとすれば、後に残る裸の基体とは文字通り点だけの存在であり、それは最早多様体ですらないだろう。アーマンやノートンは実体論者は多様体上の各時空点、すなわち各事象そのものを時空だと考えることは敢えて要求しなかった。そうではなくて、多様体そのものを時空だと恣意的に考えたのである。多様体を旧来の実体説のように、あらゆる場の容れ物だと考えれば、計量はあくまで contained なモノであり、多様体は container である。その明確な差異がモノと空間を区別する基準だと考える限りは相対性理論の実体説はうまくいかない³²。この区別が明確なのはあくまでニュートン力学の文脈であって、一般相対性理論に

³¹ ニュートンは、時間と空間の部分を入れ替えるという発想は馬鹿げているとしている ([68]p.8)。また、時空点は各々の特徴をその順序のみから得ていて、従って任意の2点の時空点とその互いの位置をもし本当に入れ替えたとするならば、それは同時に特徴そのものも入れ替えることになり、2つの点は数値的に変換される。例えば昨日と今日の時間の位置をもし入れ替えたとしたら、昨日は最早「昨日」ではなくなって、「今日」となるだろう ([67]p.136)

³² 彼自身、その基準では実体説と関係説の議論は、電磁場が登場して以降の現代物理学にとっては最早時代遅れだ (outmoded) と述べている [66]

においては場と空間の区別は非常に曖昧である。特に計量に関しては、計量テンソルによって表される物理場としてのモノの性質と従来の時空間的な性質（他の物理場に時空間的な関係を与える）の2つを備えているとして、計量を他の物理場と区別することができる³³。

モードリンも時空の幾何構造を生み出す計量は他の物理場と違って、それ無くして時空を語ることは出来ないものとして、特別な身分を与えている³⁴。計量によって与えられるアフィン構造や光円錐の因果領域の構造、そして共変微分無くして他の物理場を統制する法則を記述することはできない。計量が時空と切り離せない特別な概念であることは哲学的な考察だけでなく、物理学的な見解そのものからも自明である。ただしこの見解は古典物理学における、一般相対性理論の枠組みのみを前提としたものであって、超弦論や他の高次元時空論における計量や物理場のメカニズム等は考慮されていない。計量と重力場を敢えて区別して、物理的な場は重力場も含めて全て時空の幾何構造に還元される（[[69][86],[71] 等）、あるいは逆に時空は根本的には他の物理場の構造的な量に還元されるといった主張（3.1.2で述べたアインシュタインの統一場の発想）もある。前者は強い幾何プログラム、後者は弱い幾何プログラムと呼ばれており（[17]pp.99-103）、歴史的には物理学は強い幾何プログラムから弱い幾何プログラムへと移り変わっていくが、これはある意味20世紀の物理学における実体説と関係説の形を変えた対立でもある³⁵。一般相対性理論によれば、各時空点の計量テンソルはニュートン的な意味における時間の流れに耐続する静的な存在ではなくむしろ動的であり、各時刻によって各時空点の曲率は変化している。計量テンソルはアインシュタイン方程式を解くことによって求められるが、物質のエネルギー分布を表すエネルギー運動量テンソルに大きく依存する。要は物質の分布状態によって値が変わりうるのが計量なのである。こうなると、計量による構造や曲率は時空にとっては偶発的な性質ではないのかという反論がある。確かに計量そのものは方程式の数だけ異なっているかもしれない。そういう意味ではその時空点は絶対的なものではなく、あくまで偶発的な (contingent) ものである。しかし、ある人の人間性がその人にとって本質的であるが、その人自体の存在は偶発的であるという例を考えると、偶発的なことと本質的なことは、偶然性と本質的のように相反するものではないだろう。時空点における計量の性質は時空点にとっては本質的であるが、それは計量がどんな値であれ時空点にとっては必然 (necessary) であり、計量も時空点も共に絶対的に必然的な存在者というわけではないと示しているに過ぎない。よって計量が時空点にとって本質的であることは十分に擁護できよう。仮に時空の

³³ これは後の計量実体説、時空構造実在論へと繋がる重要な要素である（[23]p.1611）

³⁴ 電磁場や強いゲージ場等はたとえそれが全く存在しなくても、計量（計量テンソル）がある限りは宇宙（時空）を記述する理論は成り立つ。たとえエネルギー運動量テンソルがゼロであっても真空状態は存在し、計量が存在する限りは宇宙を論じることが可能である。ただし逆に電磁場が存在しても計量による構造が無ければ時空を記述する理論は何も無い（p.87）。これが計量を時空として特別視する根拠である。また計量テンソルが他の物理場のエネルギー運動量テンソルとは違って、値がゼロにはならないという点に関して特別であることは、後述するがホーファーも同様に指摘している（[21]p.13）

³⁵ さらに電磁場によって生み出される5番目の次元の時空説など、まだまだ科学理論としての定式化には至らないものの、場と時空の関係の形而上学的な描像は現代物理学の発展（主に量子力学と一般相対性理論の統一への試み）に委ねられる余地を十分に残している。

本質を非動的な特徴に限定するのならば、実体説論者は位相空間を表す多様体ですら認められない。位相空間もこの意味においては動的であり、アインシュタイン方程式に大きく依存するからである。時空から動的な性質を全て取り除いてしまえば単なる裸の点だけが残るだろう。

本質主義は有名な形而上学的教義というわけではなかったが、穴の議論によって最も強力な擁護が得られたということである。名前を与えられた実体を記述する存在論は本質的な性質をそれらの実体に与えなければならず、さもなければラディカルな非決定論に陥るだろう。極論ではあるが、実体を指定する限りは実体にとってはあらゆる単一の性質が本質的だと考えることが1つの方法である³⁶。本質的な性質と偶然的な性質の線引きが明確にできるのであれば望ましいが、それらの区別は根本的に難しいからである。ただし、実体論者が穴の議論を抜け出す方法は本質主義を持ち出す以外にも他にもある。前節で述べたようにラムジークの実体論者なら本質には触れずに穴の議論を解決しているが、時空点には名前を付けること無しに済ませなければいけない。他の立場としてはバターフィールドの代替理論があるが、これもラムジーク的解釈同様に穴の議論は解決できてもライブニッツシフトに関して移動の前後で世界 A と世界 B で異なった存在論を生み出すには至っていない³⁷。一般相対性理論における時空は動的であり、ニュートン力学で論じられるような受動的な容れ物ではない。能動的にモノと相互作用する物質的な側面を備えている。この物質的な要素はむしろ絶対時空以上に一層時空の実体性を主張できるのではないだろうか。物質的要素、すなわち何らかのエネルギー媒体を単純に実体と捉えるのは注意が必要かもしれない。計量を本質的な性質と見なす時空をそもそも実体と呼んで良いのだろうか？続いて時空の実体説のあり方という観点で、従来の実体に纏わる哲学的議論を参考に定式化したい。

2.3.6 アリストテレスの実体説

何か (something) を実体 (substance) と呼ぶための条件を考えたい。時空の哲学以前に実体の定義や議論は極めて多岐に渡っている。近代哲学以降で実体という言葉が登場するのは例えばデカル

³⁶モードリン自身は「テセウスの船」における様相解釈においてこのように論じている pp.88-89

³⁷詳細は pp.89-90 のモードリンが論文の最後に挙げているシカゴでのコメント参照：バターフィールドの代替理論はルイスの可能世界論を持ち出して、微分同相写像で変換した後の多様体が元の多様体とは世界的に断絶された異なる別次元の多様体であると帰結している。数学モデルの各点に物理的な時空点として名前を与えれば、変換の前後の多様体でも「同じ点」に関して別々の事象を当てはめることはできる（先程の例ならば、時空点 α は数学上の点 a だけに対応し、微分同相写像によっても点 b には対応しないという考えである。）。我々の言語は形而上学的に不可能なことにも言及することが出来るので、穴の微分同相写像は本質主義者から見て形而上学的に不可能なことであっても、生み出すことができるのである。このことは別に名前を用いるまでもない。等長 (isometric) 変換でもない限り、微分同相写像における変換後の世界は変換前の時空の異なった可能な事態ではなく、変換前の時空とは完全に異なった別の時空の可能なあり方を表しているに過ぎないと解釈する方法があるからである。つまり同じ数学上の点であっても、2つのモデルとしては物理的には別々の性質を持った時空点に対応するのだから、そもそも名前を与える必要はないのだ。数学的な点は物理的な事象の名前（指示）であるように、しかじかの点がある計量を備えたかもしれないという解釈ではなく、ある計量を備えた事象が存在したかもしれないというラムジーク的発想に沿って解釈すべきである。さらに形而上学的には不可能だがこの時空に起こる反事実的な事態という概念を認めてしまえば、モデル間における代替関係も形而上学的には不可能な先行的出来事も用いることができるだろう。そして計量本質主義ならば、この2つの策略も認められる。

トが挙げられる³⁸。

- when we conceive a substance, we understand nothing else than an entity which is in such a way that it needs no other entity in order to be.(我々が実体を捉えるとき、そうあるために他のいずれの存在者も必要としない方法で存在する1つの存在者のみを理解する。)[72]

似たような意味でのスピノザの引用も挙げておく。

- substantiam intelligo id quod in se est et per se concipitur…(実体によって、私はそれ自身で存在し、それ自身で捉えられ得るものを意味する。)[73]³⁹

この定義に従えば、実体とは他の何者にも依存せずに存在を捉えられる対象であって欲しい。問題を難しくしているのは、その独立した実在を直接観測できないという点である。実在と実体では意味が大きく違う。時空が計量という本質的な性質を持った実体だとすれば、計量を本質的な性質として持つ時空の実在はどのように主張できるだろうか？

そこでデカルトでもスピノザでもなく、モードリンに倣って実体という言葉が古代に定式化したアリストテレスの実体説を参照としたい。これはモードリンが続く論文[19]において時空の実体説を主張するために取り上げたアリストテレスの形而上学のZ3の実体からの引用である(モードリンによる英訳)。For all the other things [than substance] are predicated of substance, and this itself is predicated of matter, so that the nal [subject] in itself is neither something (n) nor so-much nor anything else at all. Nor is it even the negations of these, for they too will belong to it accidentally. It follows for those considering it by these arguments that matter is substance, yet this is impossible. For separability and “thisness” are taken to belong most of all to substance, wherefore the form and the compound of both would seem to be substance rather than matter. (というのは、実体以外の他のあらゆるモノは実体に述語付けられていて、そしてそれ自身も質料に述語付けられている。その結果として最後の主語は本来は何かでも他の何物でもない。さらにそれらでないものでもない。というのも述語達もまた主語に属するのは偶然だろうからである。そう考える人々にとってはこれらの議論から質料は実体であると帰結するが、これは不可能である。なぜなら分離できることや「このもの性」は大部分が実体に属すると考えられているからであり、それゆえに質料というよりは、形相や[質量と形相の]両方の複合体が実体であるように見えるだろう。)(1029a7-30)[74]

アリストテレスは存在の構成要素を質料(matter)と形相(form)に分けて、実体(substance)の候補の中から、他のあらゆるものを述語付けて自身は他の何にも述語付けられない主語というカテ

³⁸この論文で実体の歴史的な議論を振り返るつもりはないが、今節で用いるアリストテレスの議論よりも遙かに現代的な位置付けとして紹介しておく。この定義が正当化出来るのかどうかという議論とは独立に、4章では時空の実体説のあり方という点でこれらの立場を引き合いに出す予定である。

³⁹[79]の英訳を日本語に翻訳済み。

ゴリーに着目した⁴⁰。この引用では、最後の（究極）の主語はあらゆる述語を取り去った後に残る質料であり、全く特徴を持たない不明瞭な不定形の存在となる。この主張がアリストテレス自身のものなのかということにはアリストテレスのこの後の実体に関する主張などを取り上げても様々な議論があるが、少なくともモードリンはそうでないと考えている（[19]p.534）。問題なのは、あらゆるものを述語付ける主語としての実体を質料だと同定することというよりは、その質料が実体の持つ通常の特徴を全く持たずに完全に特徴が無いという点である。そもそも主語と述語を完全に分けて述語のみを取り去っていくというプロセスは可能なのだろうか？仮に可能だとするならば、主語と述語を分けるのには果たしてどんな条件が必要だろうか？

例えばソクラテスという実体、すなわち主語から色という性質、すなわち述語を取り去るとすれば、それはソクラテスが色という性質を全く備えていないからという理由ではなく、あるいは何らかの色をソクラテスから物理的に取り去るということでもない。要するにはソクラテスの人間としての特徴付けに色は必要ないということである。つまり取り去ることのできる述語は、それが述語付けられている主語の条件を定義する部分ではないということである。では主語の条件を定義するのに必要な本質とは何だろうか？主語の本質は述語の持つ本質とは論理的に区別できなければ、述語を全て取り去った後に本質を備えた主語が残ることはない。ただし、もし主語と述語の論理的独立性を仮定すれば、実体が質料であるということは不可能である。なぜならば引用に「実体以外の他のあらゆる何かは実体に述語付けられていて、そしてそれ自身も質料に述語付けられている」とあるように、何かを実体に特徴付けるものは、それが何であっても質料に述語付けられるからであり、質料は非実体的な本質を備えているからである。実体が質料に述語付けられるという前提と、主語と述語は常に論理的に異なった存在であるという前提からは、実体が質料であるという結論は導けない。

主語の存在と述語の存在の区別は非常に疑わしい前提である。例えば机は硬さや長方形のような形や色といった、机の性質を述語付ける主語ではあるが、机がこれらの性質と完全に独立なものと結論するのには躊躇するし、敢えてそう考える理由はない。区別のテーゼによれば、どんなものも究極の主語と断定することはできない。何かを主語だと断定することは、何かを述語付けることになってしまうからである。主語の存在と述語の存在における普遍的な区別を主張するこの前提は、アリストテレスによっては受け入れられていないとモードリンは考えているのである。様々な述語を主語から取り去る過程は、主語の特徴を正しく理解するために必要であるが、それは述語が主語の本質ではなく、偶然であるという時のみ正しい方法である。アリストテレスはZ 3に登場するこのテーゼを後に続く形而上学のガンマ4で否定している。

....But if everything is predicated accidentally, there will not be any ultimate thing of which

⁴⁰ こういった古代哲学の考え方を現代科学の話に端的に結びつけるのは問題あるだろうが、少なくともモードリンはこの実体の定義から時空の実体説を再構築とまではいかなくても、十分に擁護出来る可能性を暗示している。

they are predicated, if the accident always indicates a predicate of some subject. For it [i.e. the identification of new subjects] must go on ad infinitum, but this is impossible. (しかし、もしあらゆるものが偶然的に述語付けられるなら、偶然が常に何らかの主語にとっての述語を示すならば、そのあらゆるものが述語付けられる究極のものなど何もないだろう。というのもそれ[すなわち新しい主語の同定]は無限に続かなければいけないが、これは不可能である。)(1007a20-b1)[74].

この主張は Z 3 と非常に似通っている。主語の存在と述語の存在が常に区別出来るためには述語は常に偶然的に主語に述語付けられていて、主語の本質の一部にはなれない。しかし、そうすると主語そのものの存在はさらに他の主語に述語付けられなければならない、これは無限に繰り返されることになる。Z 3 の議論においては、本質を全く持たない究極の主語を措定することでこの後退を止めている。本質的に主語に述語づけられるものが何も無い以上、Z 3 の議論は実体と本質を崩壊させてしまうと結論付けているために、もしアリストテレスがあらゆる述語が偶然性であるという考えを拒否すれば、彼が Z 3 の究極の主語という存在を受け入れていると考えることは難しい。

結局アリストテレスの主張はどこにあるのか? Z 3 の議論がアリストテレス自身の声明ではなく、そしてさらに受け入れ難い前提が、主語の存在と述語の存在が常に論理的に区別出来るというテーゼであるならば、実体的な形相と質料の間の関係における新たな説明が可能となる。体で例えるならば、指が指であるのは血や骨と同様にそれが全体として機能している動物の体の一部である時のみに成り立つことであり、全体と切り離して部分のみが先行して定義されることは論理的にない。魂が吹き込まれた体の一部であるからこそその指なのであり、生命の無い手は、石像の手と同様に単に名前においてのみ「手」と表現されるだけである。つまりは魂が述語付けられるべき有機的な体全体が魂に先行することは論理的に決してない。なぜならば魂無くして体は成り立たないからである。魂を形相、体を質料だと考えるならば、質料の定義は魂とその機能に十分言及しなければいけない。この主語の述語への依存性はアリストテレスが Z 3 のアポリアを逃れる新たな方向性を示している。結局質料（主語）の存在と形相（述語）の存在は不可分であり、両者の表裏一体の相互依存性によって、述語の取り去り過程は認められない。よってこの不可分性により Z 3 の、実体は質料と形相を統合したものであるという結論とは矛盾しなくなる。アリストテレス自身、この統合がどのように可能であるのかということについては同じ形而上学 Z、H、プサイの多くで論じている。

質料と形相の、あるいは主語と述語の統合は哲学的考察の斬新な切り口を与える。具体的な個物の個性はどこにあるのかという問題に対して、実体の形相や述語が示す普遍性ではなく、質料や主語が示す特殊性にあると考えられる。しかし、個体から普遍性である述語を取り去って行くと後に残るのは特殊性ではなく、何の特徴も持たず、定義も認知もされ得ない、ただ名付けられるだけの対象となる。すなわち裸の基体あるいは「このもの性」である。それらは特定が可能などんな性質も持たない。結局これは、主語を述語と完全に切り離せるという誤った仮定に基づく問題であり、形而上学的に両者を切り離してはいけない。実体において、何らかの性質はそれに本質的でなければ

ばいけないのである。

以上がモードリンがアリストテレスの形而上学を元に考察した実体のあり方であり、以降ではこの本質的な性質、すなわち計量を備えた実体としての時空の実在を示している。実体は、それとは切り離せない本質的な性質を備えている主語であるというアリストテレスの実体によれば、時空の実体説が定式化出来る余地があることは少なくとも言えるだろう。計量を時空の本質的な性質として見れば、時空は計量という述語とは切り離せず計量とは完全に独立ではない。多様体を本質とする時空の実体説は穴の議論のような非決定論的な驚くべき帰結を迎えてしまう。しかし逆を言えば、物理的性質を担う計量こそが本質であるという主張は時空の実体説を擁護する上でも、さらにそのラディカルな帰結を防ぐ上でも非常に有意義であろう。次節ではこの計量こそがまさに時空そのものであるという、モードリンの路線とはまた異なったホーファーの計量実体説の定式化を紹介したい。

2.3.7 多様体実体説から計量実体説へ

続いていよいよ一般相対性理論における実体説の定式化を行ったカール・ホーファー (Carl Hoefer) の実体説に焦点を当てたい。時空を実体 (substance) だと見なす実体説論者 (substantivalism) は時空がモノとは独立に存在しているという点に着目するならば、その主張は、

時空は自然法則と矛盾せずに、物体とは独立に存在し得る⁴¹。

というものにある⁴²。ニュートン力学の提唱者であるニュートンにとっては、その正体は物体を全て取り去った場合に残る空の容れ物であり、絶対時空という枠組みであったが、一般相対性理論において、物体と独立に時空間の存在を考えることはどういう意味を持つのかということを改めて考察したい。

ホーファーの議論の前に 2.3.1 や 2.3.2 でも軽く触れたように、時空が物体の容れ物という観点と一般相対性理論で記述される非ユークリッド時空の仕組みを少し話しておきたい。ニュートン同様に、仮にモノを全て取り去った場合に時空は存在するのかという問いに関してはマッハ原理を完全に無視すれば理論的には答えが出せる。すなわち答えはイエスである。前節でも述べたように、座標系の構築を前提とする相対性理論には、最初からある種の時空が前提とされているからである。一般相対性理論により特殊相対性原理が成り立っていた慣性系とは、重力を及ぼす物質が全く存在しない（あるいは重力の影響が無視できる）特別な時空のことを指し、ミンコフスキー時空計量は確かに 2.11 式が示すアインシュタイン方程式の解を満たしていることが自明である⁴³。つまり、モノが全く存在しない時空はミンコフスキー時空になるという前提で相対論は構築されたも

⁴¹[21]p.5

⁴²特に言及は無いが、この実体説の定義は前節の冒頭で挙げたデカルトやスピノザにも通じるものがある。

⁴³重力場の無い平坦な時空では $T_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} = 0$

のである。2.3.1のマッハの関係説的な主張とは別に、ニュートンのバケツに関して相対性理論を持ち出すと、バケツと水しか存在しない空間は、全体の質量は小さくて近似的に重力場は0だと見なすことが出来るので、慣性系すなわちミンコフスキー時空を用いても問題ないと考えられる。バケツを回転させるとは、慣性系に関して水とバケツを円運動で座標変換させることを意味し、回転しているバケツと水の座標系で見れば、等価原理により外向きに重力を生じているように見える。よって遠心力が発生し、水は淵の方向に盛り上がりニュートンの思考実験は、一般相対性理論の文脈において結局のところ正しかったことになる。ただし、ニュートンにとってはバケツと水が回転しているのは絶対空間に対してであったが、相対性理論ではバケツと水は慣性系に対して回転していることになる。これはニュートンが持ち出した絶対空間の仮説が、一般相対性理論では慣性系に置き換わったと捉えるとも可能で、この新たな前提はアインシュタイン方程式の球対称な真空解の理論の中でも表れている⁴⁴。

相対性理論では、一般相対性理論が特殊相対性理論を土台にしている限り、ミンコフスキー時空がある種の絶対時空的な枠組みを持っている。重力場が弱くて近似的にその影響を無視できる系、例えば量子場の理論等においては特殊相対性原理が成立していて、平らなミンコフスキー時空構造のモデルで説明が可能である。つまり現代の物理学において、重力場が存在しないと見なせる空間はミンコフスキー時空構造になるという前提を当然としている⁴⁵。

これより、モノを全て取り除いたからっぽの時空というものがミンコフスキー時空に相当するという前提に従う限りは、物体とは独立に時空は存在している⁴⁶。しかし、このミンコフスキー時空が実体説の主張する時空の正体だと帰結されるわけではない。ミンコフスキー時空とは、平坦な時空に存在する構造であるが、重力源が存在する系においてもその背後に存在しているわけではない。なぜならば、物体が存在する系では物体の持つ重力場によって時空は曲率を持つからである。曲率を持つ時空に対して、ミンコフスキー時空のような平坦な座標系を構築することは不可能だからである。これは2.11式が示すように、物体の持つエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ によって、時空計量 $g_{\mu\nu}$ が変化するという意味であるが、そもそも計量を与えるということは、前提として何らかの座標系を考えるということを意図している。そしてその座標上に定義された点同士が、どのような関係にあるかを示す役割として、無限小離れた2点間の微小変位量、局所的な計量 ds が与えられている。つまり物体が存在しない状況では、各計量テンソルが、 $g_{00} = 1; g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$

⁴⁴同じく2.3.2でも挙げたようなシュヴァルツシルト計量2.13式やさらに複雑な回転するブラックホールを扱うカー計量の導出等がその最たる例である。

⁴⁵アインシュタイン方程式の解を満たすという意味では、例えば、

$$ds^2 = -cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (2.17)$$

に収束する時空構造も理論上はあり得る。この計量の物理的な意味を考えるのは難しいが、こういった解が認められていないのは、やはり重力場がゼロの時空はミンコフスキー時空構造以外にはあり得ないという、相対性理論の暗黙の了解だと考えられる。

⁴⁶この時空の前提を完全に覆して、マッハのような古典的な関係説に徹するためには、1節で述べたように時空をモノの位置関係のみから再構築する関係説の力学を、一般相対性理論へと拡張させるしかないように思える。

で与えられ（それ以外は0）、2.2式のようにミンコフスキー時空構造になることを要請している。では一般に物体が存在し、重力の影響で各計量テンソルが他の値を示す場合は、任意の座標系に応じて計量を導出し時空構造を考えることになる。⁴⁷。

ここでホーファーの議論に戻ろう。前節までで述べたように、多様体は点の集合体である位相空間 (topology) を表現しており、計量はその局所的構造を表現している。前節のモードリンの議論において、時空は計量をその本質的な性質と定めたところであるが、多様体の性質も含んでいるだろう。ここで計量実体説を正当化するために、もう一度多様体に目を向けたい。時空は独立に実在しているという実体説の立場を貫くなら、実体説の立場としては、

1. 時空とは多様体上の点であり、曲率を与える計量すなわち重力場は時空とは別のものである。
2. 時空とは多様体に計量を含めたものであり、座標点と重力場を合わせたものである。
3. 時空とは重力場自身であり、計量こそが時空に対応している。

という3つの立場がそれぞれ考えられる。1を多様体実体説 (manifold substantivalism)、2を多様体+計量実体説 (manifold plus metric field substantivalism)、3を計量実体説 (metric field substantivalism) と呼ぶ⁴⁸。多様体実体説とは、前節までで述べたように、ノートンとアーマンによる穴の議論に陥るきっかけとなったニュートン時代の実体説の名残りである。この立場は時空は物理的な対象（場や物質）を収納するための容れ物であるという言い分に倣ったもので、光や物質といった物理場、すなわちエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ 、そして重力場をも全て除いた多様体こそが実体 (substance) であるという主張である。先程、重力場の存在しない時空はミンコフスキー時空になると述べたが、ミンコフスキー時空にも2.2式で与えられる計量は存在しているので、物体が及ぼす重力場がゼロの時空にも点同士の関係は存在している。この計量そのものまで物理的な場の一部と考えるなら、完全に文字通り空の容れ物とは時空構造から計量を差し引いた多様体のことを指していることになる。

しかし計量という構造を持たない多様体には、距離や因果関係と言った物理的性質を与えることは一切不可能で、純粋な数学的記述に過ぎない多様体を物理的時空と一致させることは出来ないという指摘があることは、先程のモードリンの議論で述べたばかりである [18]。これは物理を論じる上では、あらゆる物体を取り除いた空の容れ物という概念において、重力場を完全に時空と切り離して論じられるかという問題であり、計量と時空の関係をどのように捉えるかということは、時空の哲学では非常に深刻な問題なのである。計量を時空の一部とみると、時空そのものが計量の変化量、言い換えれば重力波として伝わるエネルギーや運動量といった、直感的には物質だと考えられ

⁴⁷一般相対性理論において時空を記述する上で、数学的にこの座標系と計量が必要であることは、時空間の構造を考える必要の無いニュートン力学において時空点を定義する上では、数学的に座標だけで十分だったことと対応している。

⁴⁸この呼び名は、ホーファーが、自身の論文 ([21]) で順に定式化したものである。

るものまで含んでいることになる⁴⁹。しかし上述したように、計量を物理的な場と考えて、残った多様体を時空と考えるなら、物体の動きや位置関係等は時空ではなく、それを与える計量という物理場の間の関係に還元されてしまうことになる。これでは時空の役割は存在せず、時空の存在を必要としない一種の関係説の考えに相当してしまう ([21]p.13)⁵⁰。

では実体説を主張するためには、やはり計量も含めて時空なのだろうか。続いて多様体に計量を与えたものが時空だという、2の多様体+計量実体説に移る。座標は計量を伴って初めて現実の物理的な時空点に対応させることができるので、計量と多様体をセットで考えた座標上の時空点が時空そのものであるという主張を指している。ではその時空点の実体はどのように与えられるのだろうか。ここで改めてデカルトの「それだけで存在するという実体」の定義を認めた上で、時空点の実体性を考える。この実体の定義より時空点を実体だと認めるためには、その時空点が他の存在に依拠せずに単独で存在しなければいけない⁵¹。時空点は座標上の点として座標値という数値で与えられるが、この数値は座標系において任意に定められる原点、あるいは他の時空点に対する位置関係を示しているに過ぎない。すなわち座標変換すれば変化するものであり、その点にとって普遍なアイデンティティーではない。ではその時空点を時空点たらしめる実体的な要因はどこにあるのだろうか。そこで実体説において、ノートン、アーマン、モードリン、バターフィールド等は、時空点は原初的同一性 (primitive identity)、すなわち個体原理 (haeccecity) (前節のモードリンの議論でこのもの性と呼んだものである。) を持つと考えていた (Hofer(1996)p14[21])。これは個々の時空点には、座標や計量における互いの位置関係とは別に与えられる性質で、点同士を互いに異なる実体として区別する上で必要な普遍的同一性のことを指す⁵²。先に挙げた通り、ノートンらはアインシュタイン自身も長い間陥っていた「穴の議論」に則って実体説を批判した。その際に時空点は多様体上の点という前提で話が進められたが、後のモードリンの考察によれば時空の本質は計量であるために、多様体上の点としての独立した同一性へのコミットは避けられた。時空点が個体原理を備えていることは、計量の情報どころか多様体の情報さえ無くても点同士を互いに区別出来ることになってしまう。これは座標と計量を与えて初めて物理的な時空点に一意に定まる仕組みとは異なっていて、点そのものを時空と同一視していることになり⁵³、一般相対性理論の決定論的な因

⁴⁹ただしホーファーは、計量が伝搬するエネルギーや運動量は、数学的には疑似テンソル $t_{\mu\nu}$ と呼ばれるものであり、 $T_{\mu\nu}$ で表される物理量ではないために、各物体のエネルギー運動量テンソルとは性質の上でも根本的に異なっているから問題は無いとしている。また先程も脚注で挙げたように計量は仮に物質が存在しない場所 ($T_{\mu\nu} = 0$) でさえ値を持つ ($g_{\mu\nu} \neq 0$) ために、他の物質場とは性質上異なっていると述べている [21]。

⁵⁰ここで使われている関係説の意味は、続いて関係説の立場を述べる際にも後述する。

⁵¹デカルトやスピノザの実体を持ち出すのはホーファーの議論ではなく、後に登場するマウロ・ドラートの論文 (Dorato 2008) であるが、これは現代の物理学で指示される時空を現代哲学的な意味の実体として捉えることは難しいということを示している。

⁵²原初的同一性 (primitive identity) は別名原初的このもの性 (primitive thisness) とも呼ばれていて、元々は各々の個物は個体原理 (haeccecity) を備えているという考え (Adams(1979)[75]) に倣ったものである。ゆえにこの論文では以降は個体原理という呼び名でこの同一性を指示することにする。

⁵³個体原理を考える限りは、多様体実体説も多様体+計量実体説も穴の議論での問題に陥るだろう。

果性を崩してしまうからである。そもそも計量さえ与えられれば、その座標系は特定されるわけだから、座標値は計量によって決められるものであり、個体原理を備えた独立した値などでは決していない。さらに、わざわざ個体原理を持ち出さなくても多様体上の点という性質は以下で説明するように、結局は計量の性質に先行されるという意味で、計量の性質と独立した多様体の性質等は持ち得ないために多様体+計量実体説は棄却されるだろう。

ホーファーは実体説において、この個体原理が宿る時空点という考え方を棄却して⁵⁴、計量すなわち重力場そのものが時空に等しいとした。つまり3の計量実体説こそが実体説の妥当な在り方だと述べている⁵⁵。この立場では、多様体は時空点の連続性や全体的な位相を与える情報であり、局所的な計量を繋いで結果的に生まれる概念なのである。決してそれらに先行する概念ではない。時空は連続性と位相、そして計量による構造を備えていて、傾向性 (disposition) (曲率や構造) を持つ存在物であるとホーファーは結論している (Hofer (1996)p26[21])。重要なのは、計量によって生まれる時空構造が時空の本質であり、周りの構造を伴って初めて実体となる⁵⁶。この解釈によればモノはあくまで重力源 $T_{\mu\nu}$ のみで、そこから発生する重力場は時空として、ある意味「物質的に」位置づけられるのである。以上がホーファーの論文を元にした、一般相対性理論における現代の実体説の変遷と解釈である。

2.3.8 関係説との調停

時空の実体性を擁護する実体説論者に対して、関係説論者 (relationist) の主張としては、

物理理論は時空点に言及せずに、存在している対象と対象の性質のみに依存して書き直すことができる⁵⁷

といったものである。これも源流はライプニッツに遡るだろうがニュートン力学と違って、時空が曲率という構造を持つ一般相対性理論では、前提として計量や2.11式の右辺は、時空に関する(具体的に時空を何と定めるかという上述の問題はさておき)記述である。書き直すということは、時間と空間を仮定しない物理理論そのものを新しく構築するという、マッハ流力学のような試みだ

⁵⁴ホーファーは、実体説に関して個体原理を最初に捨て去ったのはアンナ・メイデンズだと紹介している (Hofer (1996)p14[21])。

⁵⁵ホーファーは時空の実体説の段階として、まず多様体実体説を挙げて、続いて計量の伴った多様体という概念で多様体+計量実体説を紹介している。最後に、問題となった時空点に宿る個体原理という考え方から脱却する実体説の在り方として、計量実体説を提唱し、「全体の位相 (topology)」を表わす多様体の情報が無くても、局所的な点同士の関係を表わす計量がわかっていれば、時空を記述することが可能だとしている。また一般相対性理論において、時空の主要な役割は計量が担っているという点も計量実体説を動機付ける上で重要である (Hofer(1996)pp24-25[21])。

⁵⁶ホーファーは、近年もなお研究が続いている量子重力の分野でも、実体説と関係説の議論は重要な役割を担っていると述べている [76]。計量実体説の主張は、アーマン、ノートンによって旧来の実体説の立場で考えれば、計量を物理的対象の容れ物だと見なすことは出来ないと既に指摘されているが [64]、計量というものは多様体があるからこそ存在し得るもので、計量を包括している独立した実体 (時空) があるはずだという反論になるだろう。しかし、それはあくまで実体説は時空を容れ物のように捉えるべきだというニュートン力学の呪縛のようなものであろう。

⁵⁷[77]p.101

けを指すわけではなく、あくまで時空点そのものに言及せずに、一般相対性理論に現れる時空の数式や法則を道具主義的に理解すべきという、時空に関して反実在論の立場を取ることもある([23]p.1615)。すなわち、もし時空点や計量といった物理量が、存在する物体や物体の性質に還元されれば関係説の要望を満たすことになる。既に特殊相対性原理が成り立つ時空として、物体の存在しない領域でもミンコフスキー時空が存在することを述べたが、関係説論者にとっては、この時空は物理的に存在するものではなく、数学的な解としての存在でしかないとも考えられる⁵⁸。また多様体実体説の問題としても述べたように、計量を時空と切り離して物理的な場と定めるなら、物体や他の物理場の位置や距離関係は時空幾何を与える計量の性質に還元されるため、一種の関係説の立場と考えることもできる⁵⁹。これはたとえ多様体実体説を棄却して、計量実体説で計量を時空に定めた場合でも実は同様である。計量を物理場（重力場）だと捉える限りは、時空を表わしているものは数学的記述に過ぎない多様体ではなく、計量という物理場であるので結局時空は物理場の性質として還元されてしまう。つまり時空の独立した実在などは無く、実在する重力場の性質に還元されるという見方もできる（[79]pp.27-28⁶⁰）。すなわち時空の本質を計量だと考えることは、ホーファーが唱えたような、時空自身が計量であるという計量実体説という解釈にも、時空は計量という重力場の性質だとする関係説という解釈にも、どちらとも取ることが出来るということを示している⁶¹。

そこで再び計量実体説の主張に立ち戻りたい。ホーファーの主張では、重力場の持つ傾向性(disposition)は、そこに存在する時空（モノの占めていない領域）に宿るものとして時空を実体だとしている⁶²。しかし関係説論者であるパウル・テラーは、時空点ではなく計量が時空を表わしているという、ホーファーとほぼ同じような結論に辿り着いていながらも、この計量（場）の傾向性を、実体である時空の傾向性ではなく、その領域に物体を置いた場合にどのように動くかを示した傾向性と定め⁶³、時空そのものの実在を意図していない⁶⁴。計量が時空の本質であるという主張は、肝心の時空の実在に関しては曖昧なままなのである。すなわち、

時空の本質を計量だと定めることは、実体説とも関係説ともどちらでも解釈できる⁶⁵。

⁵⁸ 関係説論者にとって、ミンコフスキー時空を前提とする相対論的量子力学を扱う際にも、時空を表わすパラメータを場の性質に還元することは難しい問題である [78]。

⁵⁹ この場合は単に計量が物理場であり、時空そのものではないという意味で、時空の数式や座標値等は全て場のパラメータだという主張である。

⁶⁰ 相対性理論の性格ゆえに時空と物質、すなわち重力場と他の物理場の線引きが曖昧なために、重力場を新たに物質的なモノと解釈すれば、このような見解も一つの方向性を持つ。これは前々節で挙げた弱い幾何プログラム的な考え方に近い。

⁶¹ これは一般相対性理論や場の理論の枠組みにおいては、実体説と関係説の対立は本質的なものではなく、仮に同じ主張であってもどちらの解釈を選ぶかという言葉上のものである（[66]）という前節でも挙げた言明を支持している。

⁶² この実体は前節でも述べたように、各時空点ではなく計量によって定まる局所的な時空構造を含めて指している。

⁶³ 物体の位置関係において、実際のモノの関係だけを表した狭義の関係説 (narrow relationism) ではなく、あらゆる可能性を含んだ世界を表した寛大な関係説 (liberalized relationism)こそが本質だとテラーは説いている。

⁶⁴ [21]p25, [22]p396 参照のこと。テラーにとっては時空の本質は質量 (mass) と同じく、絶対的に値を持つ身分ではなく二者以上の関係 (relation) においてのみ与えられるという結論に達している。

⁶⁵ これはホーファーの計量実体説とテラーの関係説に関する見解であり、実体説と関係説の議論の中で発展した1つの道筋である。

近代の時空の哲学を紐解けば、結局ニュートン時代の実体説と関係説の議論は一般相対性理論を土台とした際には、多角的な観点を必要とし、計量に着目する限りにおいて曖昧な帰結を要求する。実体という言葉1つを取ってもこれは哲学上の言葉であり、個体原理を取り去った計量実体説が果たして実体性を完全に主張出来るのかということに関しては4章で詳しく議論したい。次章ではこの曖昧な描像をさらに別の科学哲学的な観点から論じた、構造実在論の時空の哲学への導入と、21世紀の新たな時空観への独自の見解を示すことにする。新たな時空観とは、構造実在論を時空に応用した際の時空点の身分に関する考察であり、ホーファーの計量実体説とテラーの関係説との共通の見解に関する私独自の観点である。

第3章 構造实在論における時空の解釈

近年の時空の哲学では、相対性理論を元に時空は物体とは独立に存在するという実体説 (substantivalism) と、存在する物体同士の関係に還元されるという関係説 (relationism) を発展させた、時空構造实在論 (structural spacetime realism) が提唱された ([23, 79])。これは時空はあくまで時空構造としてモノの位置や距離関係を与えているが、時空構造自体は重力場としてモノとは独立に実在しているという、実体説と関係説を半ば調停する中間的な立場でもある。時空に関して計量という情報を与えられている一般相対性理論にとっては、一見妥当な哲学のように思われる。本章ではその構造实在論というアイデアの原点やその変遷を簡単に辿って、時空構造实在論が与えた科学哲学的な意義や、時空に関する従来までの実体説や関係説には無い新たな描像を述べる。その上で、ホーファーの計量実体説とテラーの関係説、そして新しく登場するドラートの時空構造实在論のそれぞれの立場で時空点にアイデンティティーを与える（同一視する）ための条件を考察し、3つの立場における共通点を私自身の見解としてまとめる。

3.1 構造实在論の2つのバージョン

構造实在論とは、

- 科学理論はそもそも世界の構造について語るものであり、その構造についての正しい記述を目的とする。そしてそれに程度の差はあれ成功している。

と考える立場である¹。この立場では、科学は世界の構造について明らかにしようとするものであり、その構造を構成している対象に関しては重要とされていない。つまり世界に存在する対象の本性と、それらの間の関係（構造）について科学理論が述べることからの両方に対して实在論的態度を取ろうとするのに対して、構造实在論は前者を放棄する立場でもある。この实在論の根拠としては科学史的な例で言えば、光の正体がエーテルではなく電磁場の振動であったことが物理学にお

¹[82]p.194 より抜粋

いて示された際のことである²。旧理論であるフレネルの法則もそれに新しく成り変わったマクスウェルの電磁場の理論も、扱っている対象はエーテルと電磁場で違うもののその対象を記述する数式や構造に関しては連続的であったことが挙げられている。ジョン・ウォラルは、2.3.1でも軽く触れたように、基本的にはカントの立場を踏襲したポアンカレの主張³を元に、我々が知り得るのは対象間に存在する関係（高階の性質）に限られており、対象そのものの本性について正しく記述しえないのは、旧理論（フレネル）も新理論（マクスウェル）も同様だとしている（[16]p.120）⁴。これは後に認識的構造実在論として分類される。すなわち認識的構造実在論とは、

- 対象が持つ本性に関しては不可知論であり、対象同士の関係を記述した構造のみが我々の知ることが出来る唯一の概念であり、科学は対象そのものではなくこの構造をより深く解明すべきである

という立場である。ただし、ウォラルの見解では構造と本性の区別が曖昧であるという問題点もあり⁵、これより後にジェームズ・レディマンとスティーブン・フレンチによって、存在的構造実在論が新しく提唱される⁶。レディマンの主張では例えば同じ物理学を例に取れば、量子的対象（場や粒子）は究極的に個物（individual）と言えるのかどうかという議論を持ち出して⁷、存在するのは粒子なのか場なのかという二者択一に迫るのではなく、各々の観点においては粒子としても場としても振る舞えることを認めた。すなわち構造実在論はこの世界にあるものは構造だけで、それ以外には何もないという立場を取るべきであるとしている。これは本性を備えた対象の存在を否定するものであり、「構造を原初的で存在論的に固有のものとなす」（[85]p.420）という考え方である。この考えはまず対象が先行して存在し、その間に関係や構造が備わって、我々はその構造のみを知ることが出来るという認識的な言及とは正反対で、

- 世界には対象は無く、ただ構造のみが存在する

という形而上学的な立場である。存在的構造実在論は、構造は観測不可能な対象（unobservable object）やそれらの間の外的関係の性質に随伴する（supervenient）ものではなく、逆に我々が対象と考えているものはあくまで構造に還元される概念だとしている（[88]p.46）。

²ただし、電磁場の登場がすぐにエーテルの消去に繋がったわけではないことは、2.2の脚注でも述べた通りである。例えばローレンツは電荷を持つ粒子（イオン）がローレンツ力を受ける際に、静的エーテルを表す電磁場との相互作用に関してニュートン力学の第3法則を破るような電気力学理論を考案している（[17]pp.42-43,[83]）。

³原文：these are merely names of the images we substituted for the real objects which Nature will hide for ever from our eyes. The true relations between these real objects are the only reality we can attain. . . [46]pp.160-162

⁴このエーテル理論の例は、ポアンカレを引用したウォラルによって持ち出されたものである。ウォラルは自身の論文において構造実在論の特色を、奇跡論法による実在論的立場と悲観的帰納法による反実在論的立場の良いところ取り（the best of both worlds）と述べている。

⁵他にもウォラルの構造実在論に対する批判は様々で、構造主義的な面では遥か以前に議論されたニューマン問題等 [84] も関係している。後の存在的構造実在論の誕生にはこういった批判への反省や改善も含まれている。

⁶[85],[86],[87],[88] 等

⁷[88]p.36

果たして構造を対象と切り離して論じることができるのか？対象そのものが存在しないという、一見ラディカルな存在的構造実在論もまた様々な批判にさらされている現状で⁸はあるが、対象と構造のうちどちらが先かという問題はさておき、少なくとも物理理論において示される数学的構造が意味するものが何であるのかということを考えることは大変意義深い。特に存在的構造実在論の例でも挙げた通り、量子場というものは日常的な意味でのモノ (matter) でも実体 (substance) でもなく (詳細は6章で議論)、直接は目で捉えることが出来ない素粒子といった理論的对象とも互換性を持つ。前章で重力場の時空としての役割を述べたが、重力場に限らずに一般の場に関しても時空との関わりで様々な議論があった。例えば端的に場が空間上に値を持っているという現象を、場という対象が空間上に分布するのか、それとも空間そのものだけが存在し、場としての役割を担っているのかという場と時空の関係の哲学的議論は予てから存在している。「時空一元論」[93]は後者の立場で場や物質は時空の性質に還元されるという主張で、対立する立場としては逆に時空が物質に還元されるという「物質一元論」[94]がある。こういった背景の中で、一般的な場というものの実在性を構造実在論の立場で考えるのは興味深いが、前章の計量実体説でも挙げたように一般的な物質 (重力源) は取り敢えずモノ (matter) と一旦は認めた上で、この章ではその量子的な構造には触れないでおく。ここではモノではなく、時空そのものを場として扱う重力場の実在性を中心に、時空が果たして物質 (重力源) 同様に、単独で実在し得るのかということをマウロ・ドラート (Mauro Dorato) の構造実在論の概念を用いて論じる⁹。

3.2 時空の実在に応用した構造実在論の登場

時空の実在性を、別の形でさらに定式化したのがマウロ・ドラートである。ドラートはホーファーが行き着いたように、2000年の論文で多様体ではなく計量こそが時空を表わしていて、時空点は計量という構造を伴って初めてアイデンティティー (identity) が与えられることに注目した。そしてエネルギーや運動量を伝搬する重力場は、他の物質場と同様に互いに影響し合いながらも、なおかつ時空として各点や物体の位置として、4次元座標を定義する性質を担っているという意味で、旧来では相反するものとされていた、物質性と時空性の二元性を備えていると表現している ([23]pp.1611-1612)。計量は構築する座標に依存するものであって、座標系によって様々な表現形式 (form) を持つが、ドラートは座標変換によって変換する一連の計量群のことを時空と定めた [23]。ここでドラートは、時空の実在性を表わすためには新たな哲学的観点が必要ということで、従来の意味でのからっぽの時空 (substantivalism) も、時空の反実在論 (relativism) をも両方否定する形で、時空を構造実在論に応用した第3の時空構造実在論 (structural spacetime realism) を

⁸モデル (意味論的扱い) と世界の対応関係 ([89]) や、因果性の観点からの批判 ([90],[91]) など

⁹結論から言えば、私の支持するドラートの立場は物質と時空の二元論であり、より正確に言えば物質と計量の二元論である

本格的に提唱した¹⁰。これはニュートン時代の実体説と関係説の旧来の在り方を捨てると同時に、物質と時空の2つの性質を帯びた計量という概念に関して両立場をある意味共有する主張でもあり、一般相対性理論における新たな時空説である。すなわち時空構造実在論とは、計量によって生じる時空構造、言い換えるなら時空の点同士に関係を示す (relational な) 特性を与えつつ、なおかつ時空の幾何構造そのものが物理世界によって例化されているという立場となる¹¹。これは計量によって表わされる時空構造が、物体とは独立に実在しているということである。この定式化に関して以下に詳しく分析する。

時空構造実在論とは、文字通り時空構造は真に実在しているということだが、「真に実在する」という言葉には、哲学的に考えると次の3つの意味に分けることができる¹²：

1. 時空構造は精神とは独立に (mind-independently) 存在する。
2. 時空構造は物理系を記述するための数学的構造として存在する (platonic realism)。
3. 時空構造は自然法則を生み出し、他の物理的事態等には完全には随伴しない (non supervenient) 構造を与える。

この3つの中で、時空に関する構造実在論に当てはまるのは1と3である。一般相対性理論は、時空の構造を述べたものであるが、その時空の幾何構造は、例えば星の動きや光の湾曲等を通して間接的に確かめることはできる。それゆえに現実の物理世界とは独立に、数学的構造だけが普遍的に存在しているわけではないので2は当てはまらない。多様体のような数学的構造のモデルとしてではなく、物理世界の中に構造として精神に独立に例化されている。そしてその構造は、粒子の測地線方程式といった自然法則を生み出している。時空構造から得られる関係 (relation) とは、そこに存在する関係項 (事象等) の個体原理に付随して決まるものではなく、逆に関係のみが先行して関係項にアイデンティティーを与えているのである。時空は何らかの形式 (Form) (計量によって生じる時空点同士の関係) を構成しており、その形式は物理世界とは切り離して独立に普遍的に存在するものではなく、物理現象、例えば物体やテスト粒子の運動等を介在して物理世界に確認できるという意味において、テラーが結論したように関係説のように聞こえるかもしれない。しかし関係説論者が主張するように、時空は決して道具主義的なものではなくて、時空構造としては確かに存在しているとする。以上より時空構造実在論における時空の実在を次のようにまとめることができる：

¹⁰ ドラートは自身の2つの論文で、第3の時空論を掲げるきっかけを作ったのは、時空の実体説と関係説の対立はかつての科学実在論と反実在論の対立に似て、蛇足で範疇を超えている (supererogatory) と述べているという主張 ([45]p.193) に倣ったものだとしている ([23]p.1613, [79]pp.28-32)

¹¹ ここで言う「関係を示す (relational な)」とは、従来の関係説 (relationism) の意味における物体同士の関係ではなく、時空点同士の関係を示す (relational な) 構造のことを指していることに注意したい。

¹² ドラートはこの実在の意味を定式化したことで、一般相対性理論では時空を実体説か関係説のいずれかに分類することは実質不可能だと留めた、30年以上も前のステインの見解を発展させたのである。

時空が実在することの意味は、物理世界が時空構造を例化あるいは例示していて、なおかつその時空構造が数学的に記述されることである¹³。

時空は、物理系の構造の一部として確かに存在している。その存在はモノとは独立に、時空構造全体が独立して構造を持っており、時空点は全体の中での関係 (relation) においてのみアイデンティティーを与えられている。これは重力場によって生じる時空構造（計量群によって表わされる構造は、座標の選び方により様々である）は、全体で実在しているということである。そしてこの時空構造を生み出す重力場により、質量を持つ物体は運動の軌道を曲げられるが、これは時空という観測不可能な理論的存在者 (theoretical entity) が、他の物体に及ぼす（運動の軌道を変える）因果的性質 (causal property) を備えているのではなく、他の物理的な存在物によっても生じる時空の関係を示す (relational な) 幾何的性質によって物体の運動が引き起こされるのである。性質は形而上学的には存在者 (entities) の持つ因果的な力とされているので、そういった意味においては、時空構造実在論は実体説と関係説を統合したものである ([23]p.1617)。重力場は物理的な場であるが、一般相対性理論では計量を時空と考える限り、計量の存在しない「からっぽの時空 (empty)」を考えることは出来ないので、重力場と時空を分けることは不可能である¹⁴。時空構造は重力場を表現したものであり、時空構造と重力場（計量）は等価である。例えば強い重力場の下では時間が遅く進むという現象に関しても、時間という実体があるのではなく、強重力場の影響の中で、物体の動きを時計に見立てて間接的に計った時間という性質が存在しているのである。その性質が重力場の性質、すなわち重力の強さとして確かに実在している。時空間という概念、ひいてはその関係を生み出しているのは重力場なのである¹⁵。

時間と重力、あるいは計量（時空の幾何構造）と重力場が同じものであるならば、もし重力場が実体として存在しているとすれば、それと等価な計量、すなわち時空も実体として存在していることになるのではないかという反論があるかもしれない。しかし場というものは4次元空間では、物理的变化によって絶えず変わっていくものであり、例えば黄色から赤色に性質を変えても、自身の存在を変わずに保ち続ける交通信号のような実体とは明らかに違っている¹⁶。重力場はモデルの中で計量という形で表わされるが、座標系によって計量は異なるので時空構造は座標系に依存している¹⁷。すなわち観測者の選ぶ基準系によって時空構造の実在の在り方は変わってくる。時空構造を表わす数学的モデルは無限に存在することになる。これは時空点は時空構造を伴って初めて意

¹³ 以上の時空の実在に関する定式化は、[23]pp.1614-1615 を引用したものである。

¹⁴ 前節でも述べたように、この空の時空とは多様体のことを指し、重力場と時空を完全に分けることは多様体実体説の考えに戻ってしまう。

¹⁵ かつて性質を持つものは実体だとされていたが、ひも理論における高次元上のひもや素粒子といった、明らかに観測不可能なものである理論的存在を扱う上で多くの可能性が検討されるようになった [80]。

¹⁶ これは、2000年の論文でドラートが最後に述べた見解であるが [23]p.1626、そもそも実体を伴うモノとは何であり、時間の変化と共に同一なものなのかということは、根本的形而上学的に深く議論する必要がある [81]。

¹⁷ 前章で述べたように、これは座標系に応じて決まるというよりは計量によって座標系が定まるのであり、決して座標系に独立した実在があるという多様体+計量実体説の考え方ではない。

味をなすということで、座標変換すれば点は別の点へと変わるが、その時空点は時空構造の中で初めてアイデンティティーを与えられ、変換の前後で物理的には同じものであるということが示される。つまり時空点を表わす数学的な座標の値そのものには、決して本質的な意味は無いという意味で時空点そのものは単独で存在していない ([23]p.1610)。時空構造実在論はこの一般相対性理論の物理的、そして共変性という数学的モデルの性質を見事に満たしているので、実体説と関係説に代る妥当な時空論だと言えるだろう。

以上より重力場によって定義される時空の実在に関して、ホーファーは各点ではなく時空は構造の情報を含んだ状態で実体だと述べ、テラーは実在するものではなく、そこに物体があると仮定した場合の性質だと考えた。時空構造実在論はこの主張をまとめて、時空点は全体の構造の中での関係を示す要素においてのみ実在しており、その構造は物理的世界によって例示、あるいは例化されるものであるとしている。ただし時空構造実在論では、ホーファーが言うように時空を完全に独立した存在者 (entity) とは認めず、テラーが言うように物体のみに依存しているわけでもなく、この点に関しては丁度中間的な主張となる。2008年にエスフェルドとラムによって、時空に関する構造実在論は時空点のアイデンティティーは、時空構造とセットで与えられるという意味で穏和な構造実在論 (moderate structural realism) として分類された¹⁸。これは構造実在論の提唱者のウォラルが初めに定式化した、構造の中の各要素のアイデンティティーは構造の中にありながら決して我々の認識出来ない固有の性質を備えているとする認識的構造実在論 (epistemological structural realism)[16] や、レディマンやフレンチ等が唱えた、存在するのは構造だけでその中の各要素の存在等認めないとするラディカルな存在的構造実在論 (ontological structural realism)[88] と対比されている¹⁹。

3.3 実体説と関係説、構造実在論の主張の共通点

構造実在論の定式化には様々な問題を孕むが、ここでホーファーの計量実体説、テラーの関係説、そしてドラートの構造実在論が時空とは関係 (relation)、すなわち構造 (structure) の中で、そしてそれのみによって構成されていることを暗示しているという点で、3人の立場が名前は違えども等しい時空論を展開していることを改めて認識したい。そのことを示すために仮想的に物質的配置を全く同じように与え、さらに時空構造さえも完全に等しくするために、初期条件なども全く同じように与えた2つの部屋を考える。この2つの部屋のみが同じ宇宙の中に存在し、お互いの重力場は無視できるほど離れているとしよう。この時空の概念図 3.1 において、2つの部屋 A と部屋 B の矢印で示した2点の時空 (空間) 点は、上の3つの立場ではいずれも計量のみでアイデンティティー

¹⁸ 次章でも記述。ただしエスフェルド等は、時空構造実在論は分類上は根本的には実体説に基づくものとしているために、ドラートの見解とは異なっている ([92]pp.42-43)。

¹⁹ ドラート自身が時空構造実在論に関して、この存在的構造実在論を完全に否定しているのかどうかは不明である [79]。

が与えられる。この時空が独立して実在しているのかということに関しては、ホーファーとテラーで意見が分かれるかもしれないが、その空間の点に与えられるアイデンティティは等しく、従って3者はこの2点は実質的に同一のものであると述べていると解釈できるだろう。2点は多様体上では別々の点であるが、計量としては同一の点なのである。これこそが3つの立場における、時空の正体を多様体ではなく計量に置くことの共通した観点である。そしてこの重力場の存在をどのようにして定式化するかということで、3つの立場はそれぞれ分かれたのでありと考えられる。

3つの立場の共通点としてもう1つ、今度は5章の宇宙論の話でも用いる逆の例を出しておく。逆とはすなわち多様体上では同じであってもアイデンティティが異なる点のことである。4次元計量 2.12 式において、時間が同期化できる（全ての空間上の点において同時性を定義出来て時計を合わせることができる）条件²⁰で、3次元空間座標を取り出して見た場合、ある時刻 t_1 における時空構造の中である空間座標点 (x, y, z) （適当に原点を定める）は全体の空間幾何構造におけるアイデンティティを与えられる。一般に時空構造は時間発展し刻一刻と変化するので、時刻 t_2 における3次元座標上の点 (x, y, z) の空間幾何構造におけるアイデンティティは時刻 t_1 におけるアイデンティティとは異なっている。時空構造のみで与えられるアイデンティティが異なっている以上、2点は時間と共に同じ空間座標値 (x, y, z) を持つとは言え、もはや3者は各々の時間におけるそれらの空間点を同一視することはないだろう²¹。図 3.2 において、 t_1 における点 C (x, y, z) と t_2 における点 D (x, y, z) が同じ空間上の点であると言える根拠は、少なくとも計量のみを時空の正体だと見なす立場には無い。

以上より3者の立場を取れば、時空上の別々の点が同一のアイデンティティを持ち得る一方で、逆に空間上の同じ点が時間と共に別のアイデンティティを持つ点となり得る。空間の同一性や変化、存続の問題は少なくとも一般共変性を満たす相対性理論では議論出来そうにない。以上が時空に関する構造実在論の提唱者であるマウロ・ドラート氏の定式化を元に、私自身が解釈した古典的一般相対性理論における「時空の実在性」である。ホーファーの実体説、テラーの関係説、そしてドラートの時空構造実在論の要旨をまとめると、一般相対性理論を理解する上では、時空間の本質は計量が与える時空構造にあると言える。3人の主張は、時空点の性質が各点単独ではなく全体の構造の中で与えられるということに着目した点で一致していて、特に計量実体説や時空構造実在論は個体原理を取り払った「モノの存在論」にコミットしている。物理学において時空の正体が何であるかという哲学的考察は、実体や理論的存在の新たなカテゴリーを生み出すきっかけとなる可能

²⁰ 具体的には $g_{0\alpha} = 0$ (α は 1 から 3 までの数) が時間を同期化する条件で、任意の 4 次元計量においてこのような時間座標を構築することが可能である [108][pp.319-320]。

²¹ もし仮に時刻 t_1 における空間構造と時刻 t_2 における空間構造が全く同じならば、空間幾何構造においては両時刻における (x, y, z) は同一のアイデンティティを持つことになる。しかしそれはあくまで空間幾何構造においてであって、3次元空間に限った話である。4次元時空に拡張すれば時間座標が異なっている以上、 (t_1, x, y, z) という時空点と (t_2, x, y, z) という時空点はそもそも別々の多様体（座標）上の点であり、3次元空間構造ではなく4次元時空構造で考える必要がある。本当に例外なのは、重力場が時間座標に全く依存しない静止重力場である場合で、この場合のみ時間方向における対称性から (t_1, x, y, z) と (t_2, x, y, z) は区別がつかず同一のアイデンティティを持つと言える。

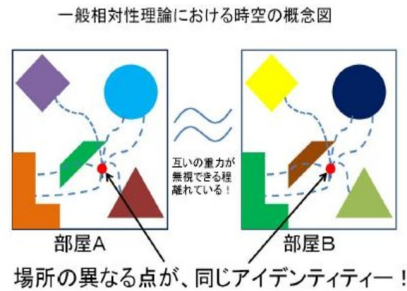


図 3.1: 時空間のアイデンティティー: 大きさの同じ部屋Aと部屋Bを、お互いの重力場が無視出来るぐらい、十分遠くに離れた場所に用意する。部屋の周りには、お互いに重力を及ぼすものは何も無いとする。この2つの部屋の中に、質量(重力)と形の全く等しい物体を、全く同じ配置で並べるとする。この時、2部屋の中の空間(物体が占めていない点)を考える。もし初期条件等が等しければ、部屋の壁からの位置関係が等しい点同士、例えば矢印を付けた2点は、部屋の中の物体の重力場によって、全く同じ空間構造を持っていることになる。一般相対性理論の枠組みでは、この2点を、時空構造以上の情報で見分けることはできないので、この2点は、空間上、別々の場所の点ではあるが、同じアイデンティティーを持っているということになる。

性を含んでいると私は考えている。そしてこの時空における構造実在論という解釈が、現代物理学の最先端である量子重力理論や宇宙論の分野でどのように応用あるいは解釈できるかが今後の課題である。最後に考えた、空間上の点は時間と共に等しい同一性を維持できる根拠が無いことは、5章のマクロなビッグバン宇宙論における膨張空間の議論に応用するために必要な主張なのである。

3.4 構造の多義性と電磁場の描像

2.3.1で述べたように我々が時空の曲率を直接目視出来ないという意味においては、時空幾何はマクロではあるが理論的存在者である。前々節で述べたが、これは物理的世界が数学的に表現される時空構造を例示あるいは例化している描像であり、元々 $g_{\mu\nu}$ として数学的に表現される場が、物理的な時空幾何を記述しているという前提で解釈している。この時空幾何は単なる数学的なモデルではなく、電子のように物理的な世界に存在すると科学理論が記述していることは間違いない²²。時空構造実在論は2.3.5で挙げた強い幾何プログラム(実体説的発想)と弱い幾何プログラム(関係説的発想)において、時空幾何と重力場を存在論的に同等に扱っているという点で両者を併合した立場と解釈することもできるだろう。現在の一般相対性理論の文脈においては重力場が計量と同等であることは疑いの余地がないが、アインシュタインを始めとする弱いプログラムの提

²² 2.3.1の図2.3で示したようなボールの運動ではまず不可能だが、例えば宇宙空間に巨大な三角形を描き内角の和を計算したり、あるいは5章でモデル化するような一様等宇宙において、地球(を含む銀河)を中心とした巨大な球体を作り、その表面積と半径の長さの比などを計算することで、我々の3次元空間がユークリッド幾何学であるのかを確認することは理論上可能かもしれない。逆に言えば、こういった実験を行わない限りは計量が与える時空の幾何的な特徴を直接的に見ることは不可能だろう。

一般相対論における時空の概念図2

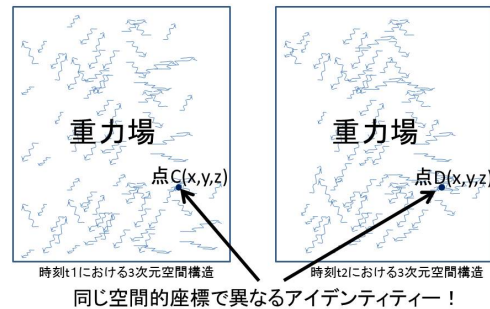


図 3.2: 多様体上では同一であっても異なるアイデンティティ：適当な時空座標系を選び、時刻 t_1 と時刻 t_2 において同一の座標点 (x, y, z) で表される空間の点 C、D を考える。C と D は 3 次元空間上の座標値が時間と共に等しいという意味では同一の点である。しかし周りの（時）空間構造は異なっているために、この 2 点に全体の（時）空間構造の情報のみでアイデンティティを与えるならば、この 2 点は異なるアイデンティティを持っているということになる。

唱者達は物理学理論を場という形で統一することを目指していたのである。アインシュタイン自身は重力場と電磁場の統一を遂になし得なかったが、現在の量子場理論で目指されている場の統一理論等はまさにこの取り組みの延長であろう。そういった意味で場を存在の本質とする弱い幾何プログラムは今後、重力との統一を目論むミクロな量子場理論に大きく左右される可能性を持つだろう。重力場はもちろん場自身は時空と切り分けて考えることが不可能であり、仮に統一場が完成したとすれば、時空は重力場を表す構造的な量に還元されるため、場が持ち得る構造は、上記で述べた時空幾何以上に極めて抽象的なものとなるだろう。その際に構造実在論は、この抽象的な構造がどこに実在していると言えるだろうか？時空の幾何構造のように物理世界によって例示あるいは例化されていると主張できるのだろうか²³？時空構造実在論は電磁場や他の物理場の実在性に関しては言及出来ていないが、ここで私は構造実在論が主張すべき構造に関してある尺度を設けたい。それは重力場と時空幾何を同一視する時空構造実在論の立場と整合的であり、なおかつ電磁場の構造も示唆できるような一般的な構造の基準である。そのために物理学理論の階層に関する話を少し交えたい。

一般相対性理論は一般共変性を前提としており、基本方程式はアインシュタイン方程式である 2.11 式である。この式はまさに時空とモノの関係を表現しており、粒子の測地線方程式（ニュートンの運動方程式の相対論的修正）や電磁場に成り立つマクスウェル方程式と同じ物理学の基本方程式である。これらの基本方程式の発見の歴史的な流れはここでは触れないが、現代物理学ではこれらの基本方程式は最小作用の原理から導くことができる。これは物理学における自然法則は、各々の場から計算される座標不変なあるスカラー量（どの座標系で見ても値が同じ物理量）をラグラン

²³ この問い掛けは 6 章のミクロな時空の議論で再び取り上げたい

ジュアン密度として時空間パラメータで積分した作用と呼ばれる新たな物理量が、場の関数として最小値を取る条件として導かれるという原理である。つまりは作用という高階の構造より基本方程式が決まると言える。これは量子場理論でも必ず成り立つ原理であり、重力場の場合は宇宙項を無視すれば計量テンソル $g_{\mu\nu}$ から計算されるリッチスカラー R がこのラグランジュアン密度の役割を果たしている。従って、時空はアインシュタインヒルベルト作用を用いて以下のように表される：

$$S_{E.H} = \frac{1}{16\pi G} \int R \sqrt{|detg..|} d^4x \quad (3.1)$$

計量テンソルは観測基準系によって変化するが、リッチスカラー R は1つの時空に対して普遍的に定まる量であり、このアインシュタインヒルベルト作用を重力場の構造だと定めることは時空構造実在論の主張と整合的であろう。実際にこの時空の作用に対して計量を僅かながら変化させて(変分 $g_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu}$ を用いる)、作用 3.1 式が極値を取る条件を与えると真空の ($T_{\mu\nu} = 0$ と置いた場合の) アインシュタイン方程式 2.11 式が導かれる。そして6章で考察するループ量子重力理論はこの高階のアインシュタインヒルベルト作用を直接量子化する試みである。

では他の物理場に関してはいかがだろうか。例えば電磁気学の場合、この作用は電磁場 E 、 B の積分形式であるベクトルポテンシャル A_i や E 、 B を表す電磁場テンソル F_{ik} を用いて表される。電磁場の構造に関してはこの論文で一切触れていないが、後の時空(重力場)の量子化の話に対応させるために、ここで電磁場を光子という粒子の集まりと記述する電磁場の量子化の手順を見てみたい。

まず、古典的な電磁場に関わる作用は次のように与えられる；

$$\begin{aligned} S_{E.B} = & - \frac{1}{16\pi c} \int F_{ik} F^{ik} \sqrt{|detg..|} d^4x \\ & - \frac{1}{c^2} \int A_i j^i \sqrt{|detg..|} d^4x \end{aligned} \quad (3.2)$$

第1項は、自己相互作用項(電磁場自身の運動エネルギー)で、第2項はモノとの相互作用項である。これが時空の 3.1 式に対応する電磁場の出発式であり、この式に変分原理を用いることによってマクスウェルの4つの方程式が得られる。さて、もし真空中の場合(重力場がゼロと見なせるという意味での真空)にこの電磁場の方程式を解くと、ベクトルポテンシャルと電場、磁場は波動方程式の解の重ね合わせで次のように表すことが出来る。これは真空中を横波として伝搬する電磁波の式である。

$$\begin{aligned} A(\vec{r}, t) &= \sqrt{\frac{1}{V}} \sum_k \sum_{\gamma=1}^2 \vec{a}_{k\gamma} \{q_{k\gamma}(t) e^{ik \cdot r} + q_{k\gamma}^*(t) e^{-ik \cdot r}\} \\ E(\vec{r}, t) &= \sqrt{\frac{1}{V}} \sum_k \sum_{\gamma=1}^2 \vec{a}_{k\gamma} i\omega_k \{q_{k\gamma}(t) e^{ik \cdot r} - q_{k\gamma}^*(t) e^{-ik \cdot r}\} \\ B(\vec{r}, t) &= \sqrt{\frac{1}{V}} \sum_k \sum_{\gamma=1}^2 [\vec{k} \times \vec{a}_{k\gamma}] i \{q_{k\gamma}(t) e^{ik \cdot r} - q_{k\gamma}^*(t) e^{-ik \cdot r}\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

そして量子化する際には、まずは電磁場のエネルギー密度を表す式に変形し、いわゆるハミルトニアンを求める。

$$U(\vec{r}, t) = \frac{1}{2}(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2) \quad (3.4)$$

これを体積区間 V 内で積分することで、ハミルトニアン H は各波動の振幅 q_k とその時間微分を用いて次のように書き表される：

$$H = \sum_{k, \gamma} \frac{\epsilon_0}{2} (\dot{Q}_{k\gamma}^2 + \omega_{k\gamma}^2 Q_{k\gamma}^2) \quad (3.5)$$

こうして電磁場は各 k に対応した無限調和振動子（様々な周期を持つ、バネに結び付けられた粒子の単振動）の重ね合わせという形と式状は一致する。ただし、

$$Q_{k\gamma}(t) = q_{k\gamma}(t) + q_{k\gamma}^*(t) \quad (3.6)$$

と変換し、 $\dot{Q}_{k\gamma}$ は $Q_{k\gamma}$ の時間微分とする。そしてここで量子化を行うことで、各 k は初めて1つの粒子に対応することが出来て、光子の集まりという量子的な解釈が生まれるのである。各光子は各 k の値に応じて異なる振動数（エネルギー）を備えていて、1つの k の値に対して複数の光子が存在出来るために、量子論的にはボソン粒子として存在している。ハミルトニアンは各エネルギー固有値に存在する光子数の和として与えられる：

$$E_{[n]} = \sum_{k, \gamma} (n_{k\gamma} + \frac{1}{2}) \hbar \omega_k \quad (3.7)$$

ここで改めて電磁場とは何かという問いに対してその構造を考える。古典的な電磁場と量子化された光子のうちどちらがより根本的な存在者であるかという議論は無意味であり、いずれの解釈（場も粒子）も同じ構造を元にした単なる形式の違いであるというのが一般的な存在的構造実在論的解釈であろう²⁴。そしてその構造とはマクロミクロ両方で成立するマクスウェルの方程式とも解釈出来るし、それを導くための出発点である作用とも考えられるだろう。これは時空（重力場）の場合にはアインシュタイン方程式とアインシュタインヒルベルト作用に対応している。電磁場のケースを量子化も含めた構造実在論的な解釈例として挙げるのならば、先程の時空構造実在論の話も含めて、この作用を物理学の構造と見なすことは合理的である。作用自体は抽象的な構造ではあるが、電磁場の場合も重力場の場合もより具体的な基本法則を導く共通の枠組みなのである²⁵。

しかし、電磁気学の構造に関しては例えば次のような指摘がある [98]。

この事例では構造レベルでの非連続性も示されている。つまり、同じ光という現象を扱うにしても、古典的に扱うか、量子的に扱うかという観点の違いによって、異なるハミルトニアンが

²⁴ 粒子と場は同じ構造の異なる対象レベル表象である [82]。また各々の光子に個体原理がない事は時空点や他の量子的粒子と同様である。

²⁵ 予め断っておくがこの構造の考え方は、従来の構造実在論が悲観的帰納法 [96] を回避するための解決策として、抽象的な構造から具体的な構造へと向かう半実在論 [97] で展開している方法論とは正反対の取り組みである。

与えられること、すなわち異なる方程式の形式が与えられているのである。OSRにとって存在論的にコミットすべき世界の物理的構造の手がかりは、科学理論の構造を見るしかない。しかしながら理論によって式の形式が移り変わってしまえば、コミットすべき構造が変わってしまうことになる。

これは、量子化の際に構造が変化しているという構造実在論そのものに対する批判になるが、表式における形式の違いから構造における違いにまで言及していることになる。この点に関しては、私は結局は構造実在論における抽象的な高階の構造が曖昧なために、表面的な式上の違いが構造の違いだと解釈されてしまっていると考えている。というのもレディマンの場合は構造が連続的であるという事例を、古典的な運動方程式と量子的な運動方程式の構造の類似（保存）として指摘しているからである ([85]p.415)。

例えば、（エーレンフェストの定理として知られている）方程式 $F(\langle r \rangle) = m \frac{d^2 \langle r \rangle}{dt^2}$ は古典論と量子力学の間の連続性を示している。これは確かに方程式 $F = ma$ への類似した形式を備えている。

エーレンフェストの定理とは、量子力学の物理量からでも古典的な運動方程式と同じような関係は導けるということである。ニュートン力学には位置や加速度なる概念が決定論的に存在するが、量子論はそれらが与えられるのは波動関数とその時間の2回微分ということで、確率論的にしか与えられない。そこで期待値（平均値） $\langle r \rangle$ という概念を用いれば、古典論で言うところの運動方程式の量子力学バージョンが出来上がるのである。運動方程式は、古典力学の根幹とも言える物体が受ける力と加速度の関係を表した構造であり、力も加速度も具体的なモノが備えているという前提に立てば、それらは一階の性質同士の間接的な関係を表している。これは古典力学と量子力学が、実は具体的な現象においても共通した構造があるという例で、元を辿れば作用という抽象的構造を共通に持つという古典電磁場と量子化された光子以上に基礎方程式そのものが類似する明確な具体的な構造の主張とも捉えられるだろう。そして具体的な構造しか認めないという立場ならば、確かに光における古典的な取り扱いと量子的な取り扱いには、ハミルトニアンという表記において共通した構造など無いだろう。物理量が演算子に置き換わっただけという程度ならまだしも、光の表式は電場と磁場の和という3.4式から、登場する各々の光子のエネルギーの和という別の3.7式に置き換わっているのである。

私はここで言う具体的な構造と抽象的構造の間にはそもそも重要な差があるのかという話をした上で、寧ろ抽象的な構造の方が物理学の本質であるという発想を提示したい。そして、電磁気学における構造はやはり連続的であるとしてこの章を締め括りたい。先に述べたように力も加速度も具体的なモノが備えているという前提で考えたが、私はまずこの前提から疑い、結局具体的と抽象的にはそれほど本質的な差がないことを主張する。運動方程式はモノの基本的な法則であり、加速度

や位置が測定可能という意味では経験的なレベルの法則である²⁶。マクロかミクロかどうかの議論も重要だが、エーレンフェストの定理も期待値を取れるという意味では測定可能で十分経験的だと言えるだろう。ただし力とはモノの性質なのか、それとも独立した実在なのかという議論はニュートン力学時代からあり、バネの伸びなどを通して間接的に測定しているとも言える。力そのものは目では直接観測出来ないために、抽象的な観測不可能な力という概念を間接的に経験的な領域で検出しているに過ぎないという解釈も出来るのである。電磁場の場合は運動方程式に相当する基本的な法則はマクスウェルの方程式であろう。これも確かに間接的には測定可能ではあろうが、モノの運動と場の運動に関しては古くからの議論があり [17]、場はマクロな領域に限ったとしてもその実在自体が哲学的な論争になっている。かつての論理実証主義者のように理論語と観察語の歴史的議論を繰り返すつもりは無いが²⁷、一口に具体的と言っても全てが直接観測できる（一階の）性質と言えるかどうかは曖昧なのである。エネルギーやポテンシャルともなれば尚更で、さらにミクロな領域も考慮に入ればどこまでが経験的で、あるいは直接測定に掛かる具体的な物理量であるかという線引きをすることは不可能であろう。勿論距離や質量と比べれば、そこから計算されるハミルトニアン（エネルギーと同じ表記）や作用等の方がより高階の性質であることは否定できないが、構造を定義する基準を考える際に線引きをするのは難しそうである。そしてマクロな時空に関する議論では、物理的な幾何学における観測とは本質的に理論負荷であるが [99]、同時性などの観測においても時空構造は経験的な領域に部分的に属していると認めない限りは、どんな経験的な理論も生まれることは出来ないとしている ([23]pp.1620-1621)。これも結局は観測可能と不可能の、すなわち経験的と非経験的（理論的）の間の違いは単純には区別できないことを含意している。構造において階層はあれど、具体的構造も結局は何らかの抽象性を孕んでいるということである。

さらにマクスウェルの方程式と運動方程式をそれぞれモノと場に対する別々の法則と認めたところで、少なくともそれぞれの方程式だけでは物理学はそれ以上は進展しない。最小作用の原理からラグランジアンを変分することによって重力場の方程式もマクスウェルの方程式も物体の測地線（運動）方程式も全て導出できることから、物理学は作用という抽象的な概念において共通点を持っている。さらに統一理論とは全ての物理現象を統一的に解釈するために研究されている分野であり、そこではラグランジアンやベクトルポテンシャルの数学的な構造（ゲージ不変性）こそが重要である。そういう意味では物理学は経験的な領域よりもさらに上の高階の抽象的な性質で深く繋がっており、そこから発展してさらに上の構造にコミットしている。その歴史を見ても作用という構造は運動方程式やマクスウェル方程式以上に普遍的で本質的な構造である。よってハミルトニアンの形式が違ったところで、それは構造ではなくあくまで形式上の違いであり、根幹的な構造は共通して

²⁶厳密に言えば、速度や加速度も位置の極小の時間変化を計算したものであり、位置をモノの一階の性質とすれば、その性質の関係である速度はモノの2階の性質、加速度はさらに速度の時間変化なので、3階のモノの性質と考えることもできる。ここでは1階か2階かということにはあまり触れずに、単に測定可能かどうかという点で捉えることにする。

²⁷経験的な領域と実在の関係は科学実在論の根底であるが、経験的な領域という括り自体がそもそも曖昧であるという主張 [11] を踏襲したい。

いると解釈する方が理に適っていると言えるのではないだろうか？そして時空構造実在論も、アインシュタインヒルベルト作用を新たな構造と定めることに特に矛盾は無いのである。

第4章 実体と構造

2章では、実体説と関係説の起源を振り返り、現代の時空の哲学の議論の手引きとした。3章では新しい第3の時空の哲学的解釈である時空構造実在論を導入した。ホーファーの計量実体説の主張する実在性は、ドラートの時空構造実在論という形で実在の身分が引き継がれているように考えることもできるが、そもそもここで言われている実体と構造の根本的な違いは何であるのかということはこの章では考えたい。すなわち形而上学的な意味で、実体と構造という言葉の哲学的な解釈の違いはどのように存在するのかということである。そのために2章で導入したモードリンの実体に関する議論から計量実体説、時空構造実在論の立場の変遷をより詳しく考察したい。

4.1 個体原理と構造 ライプニッツシフトによる違い

今までの議論では時空点が個体原理 (haecceitism) を持ち得るかということが論点であった。これは時空点が計量によって与えられる外的な周りの関係的 relational な時空構造以上に、さらにそれとは別の内在的な性質も除いた上でそれ自身で何らかのアイデンティティーを持ち得るのかということの問題にしている¹。2章のモードリンによるアリストテレスの議論でも挙げたが、個体原理とは本質的な性質も含めて実体を持つあらゆる性質を取り除いた後に残る無定形の「このものの性」のことでもある。結局ホーファーはこの時空点における個体原理の主張をやめて、位相空間のみを表す点の集合としての多様体ではなく、その点同士に関係を与える計量こそが時空そのものを指示する先行的な概念として計量実体説 (metric field substantivalism) に行き着いている ([21]pp.24-25)。時空から個体原理を棄却したホーファーの実体説がここに誕生する。

単に時空を計量と定めるだけでは時空を実体と呼ぶにはまだ不十分ではないだろう。時空構造は直接目に見えるものではないが故にミクロとマクロの問題とは別に電子や原子、ひいては素粒子といったような理論的対象の範疇となる。ドラートは時空の本質を計量と認めた上で、各時空点のアイデンティティーは計量のみによって与えられることに着目し、計量実体説の「時空点からの個体

¹一般相対性理論においては外的な時空構造以外に時空点の性質を表す概念 (例えば色や大きさ) は論じられないので、内在的な性質と原初的アイデンティティーの区別は相対性理論の文脈では曖昧である。なお私の論文 ([20]、[26]) では原初的アイデンティティーのことをそのまま個体原理と訳している。特に後者では内在的な性質も含めたニュアンスで個体原理という表現をしているが、厳密には個体原理とは内在的な性質よりもさらに外側の高階の概念であろう。

原理の取り去り」を引き継ぎながらもまた別の時空構造実在論 (structural spacetime realism) を提唱している。これは個体原理を持たないある意味曖昧な実体説を、構造を持ち出すことで改めて別の単位として定式化したものとして解釈することも可能である。計量として時空の実在の存在的身分は多義的である。3章で挙げたようにホーファーの計量実体説とテラーの関係説、そしてドラートの構造実在論は同じ「時空は計量である。」という共通の見解を抱えている。こういった哲学的解釈が自由度を持つ現状で、ホーファーの計量実体説とドラートの時空構造実在論との関係を敢えてそれより以前のモードリンの結論を元にしながら改めて検討したい。計量実体説は時空を実体としてその対象の実在を暗示しているのに対して、構造実在論は時空の実在を対象としてではなく関係によって作られる構造として解釈している。対象と構造は実在論の立場では本来は対照的な概念であるが、そもそも時空における対象と構造とはそれぞれ何を意味しているのだろうか？

構造とは構造実在論の文脈では対象の間に成り立つ数式的な関係を表している。構造実在論のあり方を背景に時空構造実在論をカテゴライズしたい。構造実在論に関して対象と構造の明確な区別が可能なのかという問題もあるが、そもそも実在の有無はともかくとして、時空構造実在論に関して対象とは何を指すだろうか？構造が計量で 2.12 式や 3.1 式のように数学的に表される時空構造であるならば、時空における対象とは何であろうか？対象とは構造を構成する任意の関係 (relation) を生み出す関係項 (relata) である²。時空構造実在論では、関係項は関係の束で (bundles of relation) のみで作られる概念であり、どんな個体原理もない ([23]p.1615 derived from [100] または [17])。ただしドラート自身も議論しているように、対象と構造の区別に加え、関係項の固有の性質 (intrinsic property) と純然たる関係の区別も曖昧であるために、もし存在者がその束だけの場合は存在的構造実在論でさえ対象実在論 (entity realism) に陥ってしまう可能性も挙げている³。一先ずこの対象を時空点と捉えれば、この時空点には計量によって与えられる全体の構造以外にはどんな内在的なものも、さらには高階の原初的アイデンティティーも存在しない計量実体説の描像と確かに合致する。原初的アイデンティティーを持たない時空点という曖昧な対象が構造のみから関係的な性質を得る描像は、同じく前章でも挙げたようにエスフェルドとラムによって、認識的ともラディカルな意味での存在論的とも異なった穏和な構造実在論 (moderate structural realism) だと区分されている。時空点がそれに随伴 (supervene) する構造を生み出すのではなく、構造の中で初めて与えられる時空点が時空における対象であるならば、この時空点は2章で挙げたデカルトの実体の定義もスピノザの定義も満たさない。なぜならばデカルトもスピノザも実体はそれだけの単位で、他の何物にも依存せずに捉えられるとしているが、時空点をその存在単位として考える以上、周りの構造以外にその点を捉えるアイデンティティーがどこにも無いからである。ホーファーの実体説

²前章で挙げた存在的構造実在論では、この関係項は単なるノードでしかないと帰結されるのである。

³原文: "if the only existing entities were bundles of relations, ontic structural realism would trivially degenerate into entity realism and would be trivially compatible with it." (Dorato 2008[79]1-1 参照) 一方で認識的構造実在論で解釈するならば、その場合は束において何を認識できるかということが問題となる。

は時空が独立して存在するという意味で実体説を主張しているが、時空点という概念を持ち出した場合には従来の意味における実体の定義は当てはまらない。ただし同じく2章でも述べたように、これはあくまでデカルトやスピノザの実体の定義を基準にすればという前提であり、現代物理学における実体はあくまでこの時空のようなものだと考えれば、現代の実体（存在的基盤）の方を修正し、その正体は（例えばカオの用いる substance[17] のように）全体の構造だと解釈することも可能であろう。現に量子力学の解釈問題においても議論されるように、「実体」や「粒子」は元々あくまで古典的概念（相対性理論登場以前）であり（その文脈においてさえ多義的ではあるが）、それらの概念を用いるのはミクロな世界像を考える上で果たして適切なものか（通訳不可能性）という問いさえある（次節で詳しく述べる。）。そう考えるならば、仮にマクロな理論であっても、当時の哲学的概念を一新した一般相対性理論における時空の存在は、実体という旧用語の意味を発展させるよりは構造として新しく解釈される方が適切であるかもしれない。

ではモードリンの実体説はどうであろうか。彼はホーファーのような順を追った定式化は行っていないことに加え、計量そのものを時空と見なすホーファーの議論とは少し異なっているように見える。というのも彼にとっては計量は時空の切り離せない本質的性質であり、形相なのである⁴。彼は自身の論文で時空とは計量空間 (metric space) を指しているとしている ([19]p.553-554)。つまり時空とは計量空間という実体であり、計量は計量空間に宿る性質であると考ええる立場なのである。前章の考察に従えば、質料と形相は切り離せない関係であり、同じく切り離せない主語と述語の関係として対応をなしているが、時空に関して言えば、主語である時空は計量という述語とセットで実体を構成しているのである。この立場ではホーファーとは少し異なった実体説の主張が可能である。モードリンの論文でも触れられてはいるが、ライブニッツシフト（2.3以降で述べた微分同相写像のことではなくて、あくまで空間に対してモノを3フィート動かすという本来の意味でのライブニッツシフトのことを指す）において、そのシフトさせるものの中に果たして時空の幾何構造を含めるかどうかという問題がある⁵。

一般相対性理論では、全てのモノを移動するという表現自体が曖昧である。もし計量も含めて全て移動させるというのなら、そもそも全体の移動距離を定義することさえ難しい。ということは計量実体説にせよ計量空間説にせよ、実体説を主張する限りは計量はそのままモノだけをその中で移動させるというプロセスになるだろう。これもまた一般相対性理論的には難しい要求である。というのもモノの分布によって時空構造が変化を受ける以上、計量だけを固定して全てのモノを等距離移動するなど一般的には不可能である。可能なのは、土台となる時空構造がある種の対称性

⁴If one thinks of metric and manifold as form and matter, this is the ultimate case of the essential form making the matter what it is. (もし計量と多様体をそれぞれ形相と質料だと考えるならば、これは質料をあるべき姿にしている本質的な形相の究極的な事例である。) [19]p.554 ここでモードリンは計量が時空の本質であることに対しての、考えられ得る最後 (7 番目) の反論として位相空間と計量のどちらが先行するかということをホーファー同様に述べている。

⁵この問題に関しては上述の反論の直前、すなわち 6 番目の反論に対するモードリンの見解として挙げられている。p.551-553

(並進対称性等) や一様性を備えている場合であり、移動させた後にも時空構造を変えることなくアインシュタイン方程式を成立させられる場合である。そしてこの場合、移動の前後で2つの世界は変わっているとするのがモードリンの実体説である。

- If the metric were sufficiently isotropic and homogeneous, a global transformation similar to moving everything 3 feet East might be definable and even lead to a new solution to the field equations. But accepting such global transformations as resulting in distinct physical states raises no spectre of indeterminism, for in such a case the Cauchy surface must be changed too.⁶

モードリンの実体説では、計量空間が実体としての時空であり、点が異なればそれは別々の時空の点ということになる。点は本質的にその点における計量を与えられているが、例え同じ様な（対称な）計量であっても任意の2つの時空は区別されるとしている。この時点で既にドラートやホーファールの立場とは異なっている。というのも構造実在論や計量実体説では様な（対称な）計量上における任意の2点は、同じ構造を持つためにそもそも区別ができないからである。ではモードリンにおいて2つの時空点の違いを生み出しているのは何であろうか？モードリンの議論には個体原理（このものの性）をどのように扱うかということは明確ではないが、デカルトやスピノザが言う実体のように、少なくとも他のいかなる存在者にも頼らずにそれ自体で存在しているという意味では各点は独立に実在している。そういう意味では各点は計量という構造における本質的な性質だけではなく、そこに存在するだけで生じている個体原理のようなものによって区別されていると考えることが可能である。それゆえに例え構造が全く同じ2つの時空点であっても、別々の存在者であると言えるのだろう。

この実体説は構造実在論とは異なっている。構造実在論は何よりもまず全体の構造が先行して実在し、構造によって各時空点（対象）は初めてアイデンティティーを与えられるわけである。つまり上記の条件でモノだけを移動させたとしても、移動の前後で別々の世界だと述べることは出来ないだろう。というより、構造自体が何も変わることもなしの移動などナンセンスだろう。ホーファールのような計量実体説論者が実際にどのような主張をするかは定かではないが、やはり個体原理も認めない以上は移動の前後の世界を区別することは不可能である。計量実体説と構造実在論は結局時空が計量であるという意味においては共通である。各点が構造から与えられるアイデンティティーのみを持つという見解においても一致しているだろう。時空構造実在論はこの点が構造のみで決定されるゆえに、時空を構造と呼び、計量実体説は時空点の存在論には言及しないゆえに時空構造そのものを実体と定義している。世界の存在者という側面で考えれば、古典的なマクロな物理学（電磁場やエーテルは除いて）においては各物体はデカルトやスピノザの実体で説明できるかもしれない。

⁶Maudlin 1990 p.553[19] より。モードリン自身は、ライプニッツシフトによる移動の前後の世界は異なっていると強調しているわけでは無いが、少なくともコーシー曲面も変化するために非決定論の問題は生じないとしている。

い。しかし、その実体の最小単位としてミクロな描像を考えるとそもそもどこまでを実体の単位として見なせるのかという問いが生じる。一般相対性理論における時空に関しては、実体を時空点と捉える限り、計量実体説においても構造実在論においてもデカルトらの実体説は当てはまらない。両立場は構成要素ではなく構造を1つの単位とする存在論を掲げているからである。もし時空点ではなくその全体構造を改めて実体と呼べば、計量実体説と構造実在論は用いている言葉は違えど両立は出来るだろう。ただしモードリンの実体説によれば、仮に時空点の単位で考えたところでそれはデカルト等の実体の定義と矛盾せずに、本質的な性質に加えて原初的アイデンティティーをも暗示しているかのように見える。つまり時空の実体説という立場においては、逆に言葉は同じであってもその実体としての単位には、モードリンとホーファーで別々の解釈、すなわち時空点と時空構造が考えられるのだ。

要はアーマンやノートの穴の議論を躲すために、一般相対性理論における時空の実体説論者は計量が担う時空の役割を考慮したが、時空に質料を残したままのモードリンの実体説では多様体としての裸の基体が残る一方で、個体原理どころか多様体を捨て去ったホーファーの計量実体説では時空点の問題を消去できる。本質的な形相と切り離せない質料は、そもそも質料（主語）である時点で、既に形相以外の何か (something) なのである。このモードリンの解釈は、ホーファーの言うところの多様体＋計量実体説に幾分近いのではないだろうか。ただし、穴の議論を回避出来る点においてはモードリンの実体説の方が幾分優れているのではないかと思う。モードリンの実体説では、等しい計量を持つ点が対称的に並んでいる場合に質料の違いという観点が初めて出てくるのである。そもそもモードリンは2.3.4で述べた通り、ニュートンの絶対時空説で言う順序的な意味での計量も用いている。一般相対性理論の時空のモデルで順序と言え、局所的な計量というよりは全体的な多様体の役割である。私が3.2で挙げたような計量実体説や構造実在論の共通した「多様体上の異なる点であっても等しいアイデンティティー」という見解は、局所的な構造に加え全体の順序によって本質性を得るという計量空間の概念には当てはまらないかもしれない。結局時空が計量の役割を備えたと考えたところで、やはり多様体としての役割も物理的世界に未だ根強く残っていたのである。順序という多様体の性質は個体原理そのものではないが、ホーファーが旧来の解釈を改め個体原理を捨て去り計量実体説へと辿り着いたからこそ、ドラートの時空における構造実在論、ひいてはエスフェルドとラムによる穏和な構造実在論が誕生できたのではないだろうか。実体としての解釈と構造としての解釈との違いに関する私の結論は、このモードリンとホーファーの実体説の違いなのである。

4.2 物理学理論の今後の展望

計量実体説や時空構造実在論では、個体原理を一切考えないために時空点のアイデンティティーはあくまで全体の構造のみによって与えられるとしている。すなわち両立場は点ではなく、構造を持つ計量そのものを根本的な存在者と考えている。一方でモードリンの実体説では、同じく計量が時空の本質を担っていることには違いないが、計量を計量空間の性質と置いている。ライブニッツシフトが異なる物理的世界像を与える限りにおいては、それが宿る質料の実体（点）は何らかの原初的アイデンティティー、あるいは多様体上の点としての順序的性質を持っており、この時空点はデカルトやスピノザが考えたような意味での実体だと考えることも可能であろう。よって、モードリンの実体説はホーファーの計量実体説と時空点の扱いにおいて異なっており、計量実体説こそが時空構造実在論へと行き着くと考えられる⁷。その意味において、時空の実在は対象（点）から構造へと移り変わっている。

現代物理学において対象と構造という二分法はそれほど自明ではない。そもそも時空が何を指しているのかということさえ同様である。モードリンは計量としての時空にどこまでの概念（計量と電磁場の場としての違いは自明だが、電磁場や他の場が計量や時空の幾何的性質に全て含まれるという可能性を考慮して）を含めるかということ（実体は宇宙全体？）によっては時空が実体であるというテーゼは自明ではないと認めている⁸。この辺りの事情は究極的には物理学そのものの課題である一般相対性理論と量子力学の統一、すなわちモノと時空の起源に迫る量子重力理論の進展にも大きく左右されるだろう。この論文を通して述べた「実体としての時空点」や「構造としての計量」といった時空の存在論的基盤では、後者が比較的新しい現代物理学の哲学的解釈となり得るだろう。しかし、結局のところ3.2で述べたように、前者を時空における対象と捉えるのは、量子力学や場の量子論において、粒子を対象と捉えるのと同様に単に古典的概念の必要不可欠性という発想に縛られているだけとも言えるかもしれない⁹。既に議論されているように、この粒子は干渉稿の実験において軌道を持たず他の粒子と入れ替え不変であるために個物と見なせるかどうかとも疑わしい（ミクロなモノの粒子性に関しては6章でも議論する。）。時空（計量）とモノ（他の物理的場）との二分法、そして構造と対象といったこれらの区別的解釈が有効なのは、あくまで現時点での物理学がその認識的な側面において、古典的すなわち今までの常識的な回帰を可能にする余地があるからなのではないだろうか？というのも数学的に明確に定義された多様体と計量に基づいた時空という概念を、わざわざ実体や関係や構造といった曖昧なものによって解釈しようとする

⁷モードリン (1988 1990)、ホーファー (1996)、ドラート (2000) とこういった実在的解釈の移り変わりは3者の立場の時系列においても自然である。

⁸こちらは2番目と4番目の反論に対するモードリンの見解となっている。実体とは計量によって宇宙に含まれる全体を時空として指す超実体説 (supersubstantialism[101]p.221) という考え方もあるが、これは今の相対性理論の枠組みでは1つの可能性でしかない ([19]p.548-549)。

⁹ペラーによれば、この必要不可欠性という懐疑的な前提は、ファインマンが示したように ([103])、しばしば科学者側の包括的な「してはいけないこと」と局所的な「しなくても良いこと」の混同による側面も強いとしている [102]。

方法がどこまで通用するのかということである。ボーアの相補性の議論も然り ([104])、量子力学を数学的に明確に定義された自己共役作用素にもとづいた観測可能量から捉えようとする方法は、波動関数や場の実在を極めて難しくしている。観測不可能な波動関数の解釈に関しては、歴史的には particle ontology と field ontology の2通りの解釈があったが、さらに量子場理論、すなわち第二量子化や場の量子化まで話が進めば結局は二者択一を迫るような古典論的な解釈の枠組みではうまくいかない¹⁰。

従って私が強調しておきたいのは、我々が語る物理学の根本的存在論は、その基盤を従来の認識に多分に依存しているということである。相対性理論の時空を記述するのに古典的な実体は通用しなくなり構造へと進化した。ここで示された構造は相対性理論で初めて登場した数式的な表現形態であり、直接目に見えないという意味で極めて抽象的な新しい何かであった。こういった抽象的なものを物理的な存在者として認めるのかどうかということは、科学哲学においてもあるいは形而上学においてもそれだけで大きな議題となるだろう。私は少なくとも現時点では世界を認識するために、その構造を存在者として語ることは有用であるとだけ留めておきたい。裏を返せば、もし量子重力理論が発展していく中で、この構造の認識がさらに抽象的なものになったとしても、あるいは別の概念に吸収されたとしても、必ずそれを存在者だと解釈するための、あるいは非存在者だと解釈するための認識論的な方法が生まれると期待している。ただし、その認識論的な発想は、旧来の実体から個体原理の無い構造へと変化したように、我々が今捉えているような構造的解釈とは大いにかけ離れていくかもしれない。

というのも現代物理学の中では、オーソドックスな一般相対性理論の他にも、例えば修正重力理論においてラグランジュアンに物質場と計量以外にスカラー場の導入を試みた Brans-Dicke 理論 (BD 理論) (1961) [105] も存在する。これは素粒子物理学の予言とは噛み合わない宇宙項 (真空エネルギー) の存在を持ち出さなくても、例えば観測結果である宇宙の加速膨張を説明するモデルも存在するのだ¹¹。その場合、スカラー場をどのように扱うかが重要で、時空=計量=重力場の存在論的解釈は単純に意味を失うだろう。というのもこの理論は、アインシュタインとは違いマッハ原理を忠実に重力理論に取り込んだものであり、先に挙げた関係説の力学と同様に異なった時空描像を与える。後者は完全な関係説的立場であり、相対性理論から時空を排除する理論の構築へと向かう¹²が未だに完全な定式化には至っていないものの、前者に関しては数式的なスカラー場と計量場が重力場の構造を確かに表現している。それはモノ (matter) と計量 (metric) という単純な二元論とは異なっているが、それでも何らかの数式的構造である。それらの構造は一般相対性理論において理解可能な時空とは異なったとしても、量子重力理論に、具体的には弦理論やループ量子重

¹⁰場の理論において、波動関数を確率的なものではなく実在する実体的な場と解釈出来ても (field ontology)、それは従来の意味での実体 (substance) ではない [17]p.17-19。

¹¹勿論このモデル [106] はある観点では役立つが、現時点で一般相対性理論に取って代わる程の説得力を持つ理論ではないものの、スカラーテンソル理論自体は強力な対抗馬である。

¹²例えば2章で挙げた [42] 参照

力理論においても何らかの要素を与えるだろう¹³。マッハ原理を棄却するかそれとも保持するかという選択は、かつての実体説と関係説の構図以上に物理学理論そのものの形成にも深く関わってくるだろう。要するに時空構造実在論は「現時点で定式化されている標準的な一般相対性理論」から帰結される抽象的な世界の存在を記述する上での最も優れた手段であり、例えば量子重力理論の範疇となるような、宇宙が始まる前に時空が存在していたかどうかという究極的な問い掛けに完全に応じるだけの認識的基盤を少なくとも現在は持たないのだ。

これは物理学の各々の分野にも単に役割があるだけで、一般相対性理論そのものはミクロな初期宇宙を取り扱う上では適していないという極当然の帰結を述べているようにも聞こえるかもしれない。しかし、描像という観点でマクロな時空描像とミクロな時空描像が異なっているということと、それらが矛盾しないということは明らかに意味が違ふ。例えば一般相対性理論が今後修正を余儀無くされて、結果的に時空構造実在論の解釈が適切でなかったと結論付けられることはありえるだろう。その際にはまた別の時空の実在性が必要になるだろうが、一般相対性理論が正しい前提で量子重力理論が仮に定式化されたところで、マクロな時空描像とミクロな時空描像が異なっていることは一般相対性理論と量子重力理論が理論として異なる以上当然の帰結である。ただし各々の描像は互いに矛盾してはいけないだろう¹⁴。マクロとミクロを繋げるためには物理学以上にこの哲学的な無矛盾性（互いの描像の不可侵条件）が要求されるだろう。この無矛盾性の論証を念頭に入れた上で、一般相対性理論を大前提として解釈を組み立てて、マクロ時空とミクロ時空の描像の事例をビッグバン宇宙論を元に残りの5章と6章で行う¹⁵。

¹³同様にマッハ原理を再現した Shape Dynamics は、通常の一般相対性理論よりも制限された解を持ち、同じく関係説的な時空描像を与えるが、通常の相対性理論以上にループ量子重力理論の定式化にヒントを提供していることも事実である [107]。

¹⁴6章でも詳しく述べるが、モノの実在性の場合には先に議論したように、例えばマクロに見れば実体であっても、ミクロに分解して見れば構成粒子は実体（個物）とは呼べないかもしれないという描像は一見矛盾しているように見えるが、形而上学的に一貫性を持たせることは可能である（6.1.2参照）。

¹⁵宇宙の始まりに直接言及するのは量子重力理論であり、6章ではループ量子重力理論を考察する一方で、5章では一般相対性理論を用いたマクロな相対論的宇宙に時空構造実在論的解釈を応用する。ただし仮にマクロな宇宙論でも例えば時空構造実在論を用いた際にミクロな宇宙の始まりに何らかの描像を与えることは可能である。そしてその描像がループ量子重力理論の空間の描像と矛盾してしまうのかどうかを考察することが課題である

第5章 ビッグバン宇宙論におけるマクロな相対論的宇宙論の解釈

アインシュタインによって相対性理論が提唱されてから早100年の歳月が流れている。前章まで一般相対性理論における時空の哲学をその既存の議論を元に論じたが、時空構造実在論は少なくとも現時点での一般相対性理論の性質を鑑みる限りにおいては妥当な哲学的立場であるとは言えるだろう。では、冒頭で述べたように相対性理論を基盤とした現代物理学が論じる宇宙形成においていよいよ話を展開したい。宇宙論と言っても様々なバリエーションがあるが、ここでは宇宙は特異点から生まれ今も膨張しているという標準的なビッグバン宇宙論を扱う。そしてこの物理的世界とは、あくまで1つの宇宙のみを指示することにする¹。ただし4.2でも述べたように、時空構造実在論の立場で宇宙誕生の瞬間までを述べる術はない。というのも一般相対性理論で標準宇宙論は全て説明できるわけではなく、ミクロな領域の宇宙になれば量子重力理論を用いなければいけない。冒頭でも述べたようにミクロ宇宙に関しては、一般相対性理論ではなくループ量子重力理論を用いるために、宇宙誕生の描像に関しては次章で行う。この章では一般相対性理論に基付いたマクロな膨張宇宙を扱いたいと思う。すなわち、現代の我々が生きる十分に大きな宇宙において古典的な一般相対性理論の時空構造実在論的解釈を応用したいと思う。ビッグバン宇宙論（膨張宇宙論）では次の現象を認めている：

- 我々の宇宙は膨張している。

これは今日の宇宙論で有力な説として考えられている、初期宇宙のインフレーション理論や、ダークエネルギーによる現在の宇宙の加速膨張のことに関して言及したものである。相対性理論では、ある場所における光の信号が伝わる速度が最も速いもので、通常の物質がその速度を超えることは決してないとされている。宇宙が膨張するすとは、言い換えれば宇宙に存在するモノ同士の距離が大きくなるということである。現象的にはそれ以上でも以下でもないが、この現象を一般相対性理論では宇宙の計量を表すスケール因子の時間パラメータによる増加で説明しているのがマクロな相対論的宇宙論である。この宇宙のモデルを時空という観点で、そして時空構造実在論の立場で考

¹冒頭で述べたマルチバース宇宙論では、宇宙の数は1つではなく複数あるという描像を掲げていて、時空という概念でこの宇宙が他の宇宙とどのように関わっているのかを考察するのは興味深い。しかしここではこの宇宙と時空間の関係にテーマを絞って考察する。

察するのがこの章の目的である。相対性理論はあくまで時空を前提に構築されたものである。特殊相対性理論では重力場のない慣性系であるミンコフスキー時空を背景として、一般相対性理論へと繋げていることからからっぽの時空を暗に仮定している。そしてその一般相対性理論を用いた標準ビッグバン宇宙論では、宇宙膨張という概念を、共動座標系（後述予定）と呼ばれる観測者が感じる時間の増加に伴う空間そのものの膨張として、あたかも空間そのものが存在しているかのように解釈することができる。これは今日の物理学においては時空間座標という数学的なモデル概念と、それによって表わされる時空間という現実の物理的な対象の境界線が曖昧になっていて、それ故にあたかも座標系を空間という一種の実体と捉えてしまった結果だと考えられる。この現象を時空構造実在論で解釈し直すとしたらどのようなことになるだろうかということを中心に考察したい。さらに一般相対性理論と相対論的宇宙論でなされている、空間の定義を今1度整理する。そして1つの方向性として、宇宙論における数学的概念と物理的对象の境界線の曖昧さという観点から、物体と空間の境界線の曖昧さに話を発展させている。宇宙論で使われている空間という言葉がそもそも何を指しているのかということに関して、古典的な相対性理論の範囲内で新たな視点を提唱したい²。

5.1 哲学不在の宇宙空間の成長説

宇宙論で最も有力視されているビッグバン宇宙論における宇宙の膨張として、時間と共にスケールが大きくなっていく共動座標系、いわゆるロバートソンウォーカー計量をモデルとして「宇宙膨張」を時空構造実在論の立場で考察する。まずはその足掛かりとして、具体的にこの宇宙を大局的に表す一様等方計量を導出したい。肝心の哲学的な議論の前に一般的な物理学の知見として、宇宙における時空とはどのように解釈されているのかということを確認することとする。宇宙論の専門書や物理学者の議論においては、しばしば宇宙の膨張の表現を次のように記述している。:

- 我々の宇宙空間そのものが膨張している。

空間の膨張とは、今しがた述べたスケール因子の増加に過ぎないが、この現象を空間を持ち出して説明しているのである。要するに宇宙の規模が拡大する様子を空間そのものの成長と捉えることで解釈する方法である。膨張するという表現を取る以上は膨張速度が定義できる。それは数式的には空間上のある点にとって、そこから有限の距離だけ離れている別の点が元の点に対して遠ざかる速度のことを指している。現代宇宙論では、その遠ざかる速度が場合によっては元の点から発せられた光の速度を超えるという現象、つまりは光が追いつけない領域（事象の地平線）の存在を認めている。これは相対性理論そのものとは決して矛盾しない。というよりむしろ「空間の膨張」という概念を持ち出すことによって、ビッグバン宇宙論の正当性を裏付けてさえいる。これは空間の点そ

²この章はマクロなビッグバン宇宙論に時空構造実在論を応用させた [26] に全面的に基付いている。この新たな視点とはまさに次章で扱うループ量子重力理論の描像とも関わっているが、この章ではあくまで古典論に限った話のみを展開する。

のものが、物体とは別に存在物としての地位を備えているかのようにも解釈できる。ではその膨張していく空間とはどのようなものなのか？

本題となる相対論的宇宙論での大局的な宇宙構造を表わす時空計量の導出に入る前に、先に現代宇宙論構築の歴史に関して大まかに振り返っておきたい。

1. アインシュタインは一般相対性理論の完成直後、自らのアインシュタイン方程式を用いて、大きさが有限で静的な宇宙モデル（定常宇宙論）を考えた（[55]）。
2. アインシュタインは宇宙の重力による収縮を避けるために、引力ではなく斥力を及ぼす宇宙定数なるものをアインシュタイン方程式に導入した [55]。
3. ハッブルによって宇宙の膨張を示す証拠が赤方偏移によって示されると [62]、宇宙には始まりがあると考えられ、現在の元素の組成比を元にガモフらによって初期の宇宙は高密度で高温状態だというビッグバン理論が提唱された（[109]）。
4. 宇宙マイクロ波背景放射の観測によって、ビッグバン理論が预言する元素比が示され理論の正しさが認められた（[110]）。
5. 素粒子宇宙論の発展によって、地平線問題や平坦性問題といったビッグバン宇宙論の抱えている問題点を解決するために、宇宙は初期のミクロな量子状態から急激な加速膨張を経て現在のマクロな宇宙になったというインフレーション理論が標準理論となった（[111]）。

20世紀の科学技術の進歩によってその観測精度も向上し、現在直接的な観測手段の及ばない（光が元素と結合しているために、我々に届かない）時期の初期宇宙に関しても、素粒子物理学の観点から様々な量子宇宙論が展開されている。

肝心の宇宙を表す時空構造だが、宇宙には我々人類が住んでいる地球も含め特別な場所はどこにもないという宇宙原理に基づいて宇宙の時空計量を特定している。宇宙原理とは、「大局的なスケールでは、宇宙は一様かつ等方である。」という仮定であり、この仮定を取り敢えずは受け入れた上で基本観測者の座標系に話を移す³。ロバートソン・ウォーカーモデル（導出は、[24]pp.2-4 参照）に従うと、一様等方宇宙を表す計量は次のように与えられる：

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]. \quad (5.1)$$

なお、座標系に関しては時間座標 t と 3次元空間を極座標パラメータ (r, θ, ϕ) で示した計4次元座標 (t, r, θ, ϕ) 表記で示している。3次元の空間計量に関しては、空間曲率 K （定数）を用いて表わ

³宇宙空間の中には、銀河の密集地域が点在したりダークハロ等の暗闇の領域が広がっており、実際は決して一様ではない。そういった小スケールでの扱いを無視し大局的な宇宙の振る舞いを論じるために、近似的に便宜上一様等方な宇宙モデルを考えている。

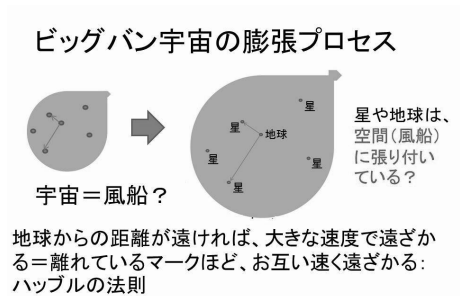


図 5.1: 風船に喩えられた膨張宇宙空間：膨張宇宙のモデルを表す例として宇宙論の教科書等でよく持ち出される概念図でもある。予めマークをいくつか書き込んでおいた風船に徐々に空気を入れていく。このときあるマークから比較的に近いマークよりも、遠い位置にあるマークの方がより大きな速度で遠ざかっていく。

すことが可能となる。ここで観測者の空間座標系は、固有時間 t が増えるに従ってスケール因子 $a(t)$ が変化することによって膨張あるいは伸縮していく「共動座標系」であることに注意したい。また極座標の原点を観測者の位置（天の川銀河の地球）とする⁴。1、2 に挙げたように、当初アインシュタインは静的宇宙を考え、 $a(t)$ が t の増加に対して変化せずに一定の値を持つモデルを与えた。しかし 3 に示したハッブルの観測結果に基づいて、図 5.1 が示す通りあたかも空気を入れた風船が広がっていくように、銀河や銀河団の規模がそのままの形で拡大していく膨張宇宙論が定説となった⁵。すなわちスケール因子 $a(t)$ は、時間と共に増加して共動座標系は大きくなる。これは宇宙は時間を進めればその規模はどんどん縮小し、 $t = 0$ の時その始まり（特異点： $a(0) = 0$ ）に達すると考えられる。

以上が標準のビッグバン宇宙論の大まかな流れであり、宇宙の膨張は数学的には風船に喩えられた、この共動座標系の拡大していく様子のことを指している。では数学的に表わされたこの座標系は、「具体的に」どういった物理的内容に対応しているのかを改めて考察したい。図 5.1 の風船宇宙の現象に、すなわちハッブルの法則に従えば、宇宙の膨張は宇宙の中に存在している銀河同士の距離が広がっていくことを示している。ロバートソン・ウォーカー計量の一様等方モデルでは、系の中にはエネルギー密度の値が場所によらず一定の物質成分、放射成分、ダークエネルギー成分といった各流体で満たされている⁶。その流体の中に観測者は存在し、なんらかの物質、例えば銀河（の星）を観測している。銀河は 5.1 式の重力場においては、スケール因子 $a(t)$ の増加に伴って目盛りの幅が拡大していく共動座標系に張り付きながら観測者から遠ざかっていく [24][p.2]。つま

⁴計量を見てもわかるように、この一様等方時空構造は対称性を備えていて、ある時刻 t における空間点は 3 次元時空間幾何構造においてはどれも等しいアイデンティティを持っている。

⁵実際に銀河が遠ざかる速度を直接観測しているのではなく、その銀河を構成している星からやってくる光の波長がどれだけ赤方偏移しているかという、ドップラー効果として観測している [62]。

⁶これは勿論、一様等方という条件を前提にした上でのモデルであって宇宙空間全体がこれらの流体で一様に満たされているわけでは決していない。宇宙を大局的に見たこの近似に基づいてアインシュタイン方程式からフリードマン方程式が導かれて、スケール因子 $a(t)$ が計算できる [24][pp.34-37]。

り共動座標系は単なる数学的表現ではなく、モノの位置を表す指標として現実の物理に対応している。というより動いている銀河の位置を基準に座標系を構築したとも言える⁷。宇宙に存在する物質の位置そのものが共動座標系の目盛りとなっている。スケール因子 $a(t)$ が増加することが宇宙膨張となるのは、その目盛りの幅が大きくなるために宇宙に存在するモノ同士が離れていくからである。

つまり単純に考えれば、宇宙はその中に存在するモノ同士が遠ざかって全体が拡大していくという意味で風船の如く膨張している。物理現象としてはこれ以上でも以下でもないが、これは相対論的には、5.1 式で表現されている時空計量によって、共動座標系として表わされた宇宙空間が膨張していき、銀河や銀河団はそれに張り付いているために結果として全体が広がっていくと解釈されている。この宇宙空間が急激に膨張するのが初期宇宙のインフレーションであり、計量という概念を持ち出す限りはスケール因子 $a(t)$ の変化は時空の変化だと描くことができる。

この宇宙空間の膨張という説明には哲学とは特に無縁であるが、科学哲学的に捉えても科学的説明としては有用であろう。それは目盛りの大きさの膨張という概念を持ち出すことで、宇宙の一樣等方性とハッブルの法則を同時に説明できるという包摂性を備えている点である。例えばハッブルの法則は、この地球上で観測される銀河や銀河団の赤方偏移は、地球（我々の銀河）とそれらとの距離に比例するというテーゼに結びつく。このテーゼは、単純に考えれば宇宙の一樣性とは相容れない見解でもある。なぜならば、もしこの見解が正しければ、我々の銀河を基準に距離に比例した物理量（銀河の後退速度に相当する）が存在することになり、一見我々の銀河を宇宙の中心に捉えた解釈が可能になるからである。しかし、上記の風船モデルで宇宙を解釈すれば、それらは互いの距離関係においてのみ全て相対的に決まるものであり、一樣等方性をも含意しているからである。そういう意味で、この共動座標系自身を宇宙空間と解釈するモデルは、予め前提とした宇宙原理も、そして実験による観測結果の両方を擁護する上で有用であることは先に断っておきたい。

5.2 構造实在論的解釈と宇宙膨張の関係

今日の物理学ではあたかも共動座標系を現実の宇宙空間として表現しているようであるが、この現象を時空構造を本質と見なす時空構造实在論の枠組みで捉え直すとどういった問題に当たるかということを考察したい。主に 3 章で論じた時空構造实在論の要点を次のようにまとめておく。

1. 時空の本質は計量 (metric) であり、重力場によって表わされる任意の座標系による時空構造にある。
2. 時空構造はモノに完全には依存することなく存在し、その数学的構造が示す实在はモノの運動等を通して間接的に確かめられる。

⁷それゆえに、共動座標系と呼ばれているのである。

3. 各時空点に固有のアイデンティティー (identity) は周りの時空構造の関係 (relation) のみに依存しており、点自身が単独で自身に内在する本性すなわち原初的アイデンティティー (primitive identity) を備えてはいない。

この要点の中で、特に3の帰結として言えることは、

- 時空点は多様体上は別々の点であっても同じアイデンティティーを持ち得るし、3次元空間では時刻と共に同じ座標値で表わされても、時刻が異なれば構造的には別々のアイデンティティーを持ち得る。

ということである。この時空構造実在論の解釈をいよいよビッグバン宇宙論へと応用する。理想的な一様等方宇宙を表すロバートソンウォーカー計量 [24] を具体的に取り上げて、宇宙論で論じられる時空モデル、さらに厳密に言えば時間と共に大きさの変化する「宇宙空間」というモデルを時空構造実在論の立場で議論したい。宇宙を構成する計量に照準を当てて、そこから得られる宇宙の歴史を論じるのは私自身のオリジナルな取り組みである。標準的なビッグバン宇宙論では、便宜的に時間と空間を分けて時間と共に膨張する宇宙空間をモデル化している。ここで切り口としたいのは要点の帰結で述べた、時間を跨いだ場合の空間のアイデンティティーである。宇宙が膨張していることは地球に届く光の波長を観測すること（赤方偏移）等によってテストされているが、この膨張宇宙論が示す「宇宙膨張」の物理的意味を今一度整理し、そこで論じられている時空の役割を考察した上で「空間の時間的变化」に焦点を絞りたいと思う。

時空構造実在論に従う限り、5.1 式で示される時空計量は1、2の通り確かに実在している。共動座標系の時空構造は観測者にとっては単なる物質の広がり還元されることなく、むしろ赤方偏移による銀河のドップラー運動を通して間接的に確かめられるのである。ではこの共動座標系はやはり空間そのものののだろうか？宇宙に存在する物質はその空間に張り付いて移動しているに過ぎないのだろうか？

ここで改めて3の主張を見てみたい。空間の点は全体の構造とは別に単独ではアイデンティティーを持たない。2章の終わりに要点からの帰結に記述した通り、時空構造が時間と共に変化する場合、空間上の点は例え時間と共に同じ座標値であっても同一のアイデンティティーを持つとは言えない。図5.2に示すように、2つの時刻 t_1, t_2 において宇宙空間上の2点 $a(t_1)(r_c, \theta_c, \phi_c)$ 、 $a(t_2)(r_c, \theta_c, \phi_c)$ は、そこに同じ物体が占めているというアイデンティティーで共通しているものの、両時刻における $a(t)$ の値が異なる時点で計量による時空構造は異なる。よって2点は異なったアイデンティティーを持っており、単に3次元座標による位置を表す数学的な座標値が同じ (r_c, θ_c, ϕ_c) であること以外に同一の点と言える根拠は無い。1が示しているように、座標値すなわち多様体の点が同一であることには意味がないのである。試しに座標系を3次元の中でモノと同時に動く共動座

時間と共に動く目盛り

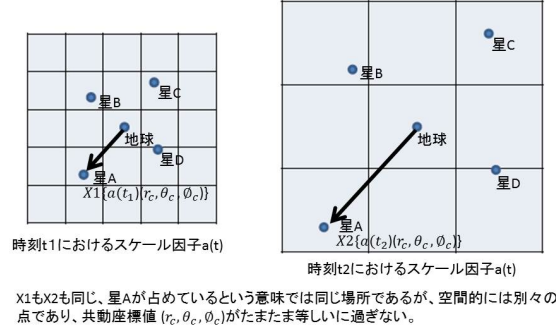


図 5.2: 共動座標系の座標値：時刻 t_1 における空間点 $X_1:a(t_1)(r_c, \theta_c, \phi_c)$ と、時刻 t_2 における空間点 $X_2:a(t_2)(r_c, \theta_c, \phi_c)$ を考える。これらの空間点はたまたま共動座標系において数学的に表記した際に3次元座標値 (r_c, θ_c, ϕ_c) が等しいということに過ぎない。

標系から、観測者に対して静止している「静止座標系」へと変換することも可能である。具体的には、共動極座標パラメータ (r, θ, ϕ) から、 $a(t)r = r'$ と変形して得られる静止極座標パラメータ (r', θ, ϕ) で、5.1 式の時空計量を表すと、

$$ds^2 = (c^2 - H^2(t)r'^2)dt^2 + 2H(t)dt dr' - \frac{dr'^2}{1 - \frac{Kr'^2}{a^2(t)}} - r'^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (5.2)$$

となる。ここで $H(t)$ はハッブル定数と言って、 $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$ ($\dot{a}(t)$ は $a(t)$ の t に関する1階微分である) というように $a(t)$ を用いて表すことができる。この座標系は $dt dr'$ という項があることから $H(t) = 0$ でない限り時間に関して同期化されておらず、空間上の各々の点において時間の進み方は異なっており、同時性を定義することは出来ない⁸。元々共動座標系の固有时间として時間パラメータ t を定義したために、この静止座標系で t を用いることは非常に複雑である。しかし一般相対性理論が一般共変性という性質を備えている以上、理論上はこの5.2式のパラメータを用いて観測者の時間 t で物理を語ることも可能である。静止座標系を用いる場合、座標系の目盛りは時間と共に変化しない。だから銀河や銀河団は座標系に張り付くことなく、静止座標系の間を運動することになる。また空間曲率 K がもしゼロでない値を持つ場合、時間 t の増加と共にスケール因子 $a(t)$ が増加するならば、 $\frac{K}{a(t)}$ の絶対値は減少する。5.2式において、 $\frac{K}{a(t)}$ は物理的には3次元空間 (r', θ, ϕ) の曲率を表している。つまり時間の増加と共に変化するのは空間の曲率である⁹。この静止座標系での時空構造の様子を単純に概念図として表したのが図5.3であるが、静止座標系で考え

⁸詳しくは [108][p264] 参照

⁹3次元の空間構造は $K > 0$ ならば3次元球の閉じたモデルに、 $K < 0$ なら開いたモデルとなる。詳しくは [25][p.45] 参照。空間の曲率の絶対値が0に近づくにつれて空間は平坦になっていく。

時間と共に動かない目盛り

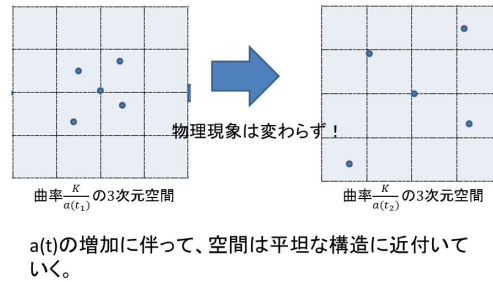


図 5.3: 静止座標系における時空構造：5.2 式による時空構造の概念図。共動座標系と違って、空間座標系の目盛りは変化せずに静止したままである。時刻 t の増加に伴って変化するのは 3 次元空間の曲率であり、スケール因子 $a(t)$ が大きくなればそれだけ 3 次元曲率 $\frac{K}{a(t)}$ の値は、 K の符号に関わらずゼロに近付いていく。

る限り空間が膨張しているという結論には至らない。しかし構造実在論で考える以上、この目盛りは変化しないが曲率は変化するという時空構造も確かに実在していると言えるだろう。なぜならば 1 によると、任意の座標系による時空構造が実在するために、もし観測結果によって共動座標系の時空構造が認められるならば、ただそれを座標変換しただけの静止座標系の時空構造も実在していると言えるからである。ただし共動座標系においては空間の座標値 (r_c, θ_c, ϕ_c) が等しかった図 5.2 の 2 点 X1、X2 は、静止座標系においては最早全く別の 3 次元座標値を持つ点である。

結局構造実在論に従う限りは、1，2 において共動座標系も静止座標系の時空構造も同様に実在している。さらに 3 や前章の要点の帰結を受け入れれば、各々の点が空間を構成する要素として時空構造を越えて存在しているわけではない。つまり空間の点に予め意味を与えない限りは、空間が膨張しているという根拠は何もないことになる。すなわち共動座標系では、確かに動いていく物質の位置が数学的には同じ 3 次元空間の座標値を取り得るが、その値が空間のアイデンティティーであるとは言えない。図 5.2 に示すように、あくまでこの座標系で見れば、空間曲率 K が一定の 3 次元空間が時間と共に膨張しているように理解できるに過ぎないのである。同様に静止座標系で見れば大きさの変化しない空間において、空間曲率 $\frac{K}{a(t)}$ が 0 に近付いていくように理解できる。時空構造実在論では共動座標系で見ると静止座標系で見るとによって、時空構造は異なった形式で実在しているのである。以上よりビッグバン宇宙論の膨張宇宙に関して、時空構造実在論的解釈をまとめる：

- 宇宙は時空構造全体で存在しているため、共動座標系を張ればスケールの変化する宇宙空間を、そして静止座標系を張れば静止している宇宙空間をそれぞれ考えることが出来る。ただし共動座標系を優先する理由はなく、客観的な物理現象としてはやはり物質全体のスケールが広がっているに過ぎない。

これは次章のテーマとも関わるが、時空構造実在論に従う限りは、宇宙の時間パラメータ t を 0 に遡っていても宇宙空間そのものが小さくなることはないのである。ではこの膨張していく共動座標系は、そもそも何のために構築されたものなのか？元々静止座標系ではなく、宇宙中に離れて広がっていく物質に対してそれらと共に動く座標系を構築し、5.1 式の計量を導入したのは理由がある。それはこの宇宙空間が一様等方という宇宙原理から要請される大前提に基づいているからである。ハッブルの法則により、地球から遠い銀河ほど速く遠ざかる¹⁰という観測結果と宇宙原理を整合的に矛盾なく受け入れるために、時間と共に空間のスケールが変化するこの共動座標系を張ったのである。もし静止座標系を張ったならば、前節の最後に述べたように、我々の位置があたかも宇宙の中心であるという特別な視点を与えてしまう。静止座標系の構築は一様性に反してしまうのである。

つまり時空構造実在論が共動座標系を「優先する理由はない」というのは、空間を計る座標系としてという意味であり、一様等方な座標系の構築という観点ではやはり共動座標系が最も適している。宇宙が一様等方に見えるためには共動座標系を選ぶ必要があり、膨張宇宙論（空間ではなく、存在する物質の規模が拡大していくという意味における膨張）を支持するためには、この座標系は特別な意味を持っている。空間自体はいかようにも座標を張ってその構造を定めることができるが、共動座標系として膨張していく空間と捉えることが最も自然な解釈なのである。すなわち、宇宙原理を大前提とするならば共動座標系は特別な意味を持っている。ただ座標系は、あくまで物理的対象を記述するための数学的対象でしかなく物理的対象そのものではない。よって宇宙空間が膨張しているという言い方は、時空構造実在論としては正しくない。しかしその数学的対象に「空間」という物理的な存在を与えることによって、一様等方宇宙論は非常に納得の出来る現象として理解できる。図 5.2 において、共動座標系の空間座標値 (r_c, θ_c, ϕ_c) が 2 点で等しいことも単なる数学的な同一性に留まらず、空間の同一部分を指すある種の必然性とも解釈できる。これは初期宇宙のインフレーションも同様である。物質とは違って、空間の膨張速度がどれだけ急激であったとしても相対性理論としては何の矛盾もない¹¹。ただし空間そのものに実体が認められていない以上は、共動座標系は現象を仲介する媒体（空間という比喻）でしかない。座標系という数学的対象と空間という物理的対象の境界線は、宇宙論においては曖昧になっている。

5.3 マクロな意味での真空に対する取り扱い

今までは時空の実在をモノや物質場と分けて論じてきたが、そもそも時空の存在を論じる際に時空だけを完全にモノと切り離して取り出すことは可能なのだろうか？これは時空構造実在論への

¹⁰実際には、前述したように銀河の速度ではなく、その銀河の星から地球に届く光の赤方偏移を見ている。

¹¹インフレーション理論は、光の速度では通常因果関係を持ちえない程離れている領域同士の相互作用を、空間の膨張を持ち出すことで解決している（地平線問題）[111]

反論といった哲学的な意味というよりは、むしろ相対論的宇宙論から帰結される物理学的な問い掛けである。一般相対性理論では、考えている系から重力源となるモノを全て取り払った場合に残るからっぽの対象、すなわち真空を空間として扱っている。一方で量子力学や量子場理論といったミクロな系を扱う物理学では、真空はエネルギーを持っている。ミクロな時空描像ではそもそも一般相対性理論のようにエネルギーと空間を完全に分けることが出来るのかということを指摘し、最先端の現代物理学においてはそもそも「時空間の定義」を改めて考える必要があることを示唆したい。それによつてはビッグバン宇宙論の膨張していく共動座標系的な空間が、ある種の実体 (substance) として存在している可能性も残っている。

前節までで述べたような宇宙空間とは、モノ（エネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ ）を全て取り除いたときに残る、純粋な真空 (vacuum) のことであつた。古典物理学である以上、従来の実体説も関係説もそして構造実在論もこの真空に関する実在をテーマとして扱っていた。風船宇宙で喩えるならば、風船に張り着いたマークが銀河や銀河団を表わす物体でそれ以外のものは真空である。ロバートソン・ウォーカーモデルでは、一様等方という条件から存在するモノは真空全体に均一に分布する各流体の成分であつた。各流体の成分とは、その圧力の無視できる非相対論的物質（通常の物質成分）と、圧力が密度に比例して与えられる相対論的物質（光やニュートリノ等の放射成分）、そして圧力と密度の比例定数がはっきりしないダークエネルギーに区分されるが、現在の宇宙の成分比は相対論的な放射成分は値が小さく無視出来て、7割がダークエネルギーで残りが物質成分である。またその物質成分の内訳は、大部分が正体不明の暗黒物質で、現在確認されている元素（バリオン）はダークエネルギーを含めた全体の1割にも満たないとされている。これを考えると我々が通常モノと呼んでいるものは極少数派の非相対論的な物質成分である。時空と相互作用するモノというのはこれらのエネルギー（重力源）であるが、現在はその殆どが未だ解明されていない物質なのである。

近年、宇宙の加速膨張が超新星の観測から検証された [112] が、その加速膨張を担うのがダークエネルギーである。その有力な候補の中で、2.3.2や前々節でも大まかに紹介したアインシュタイン方程式の積分定数として式にも出てくる宇宙項、すなわち負の一定の圧力を持つ真空エネルギーがある。真空エネルギーとは、本来はモノが存在しない場所に予め存在するエネルギーであり、量子理論等ではゼロ点エネルギーの基準として、空間の持つ物性だとも考えられている。相対論的宇宙論から導かれる真空エネルギーのパラメータと、量子理論から導かれる真空エネルギーの値には大きなズレがある¹²が、もし仮に真空状態がエネルギーを持つならば、空間の存在は無ではなく何らかの未知の物質的機構である。こういった意味で空間と物質を完全に分けることは難しいのではないだろうか。

古典物理学の範疇ではダークエネルギーに関して、これ以上のことは何も言えない。ただ時空構

¹²詳しくは、[25][pp.168-170] 参照

造実在論に従う限り真空エネルギーが存在するとしても、それらを物質のエネルギーとしてアインシュタイン方程式である 2.11 式の右辺に代入して計算し、左辺の時空構造に対する影響を見れば良い。具体的には次のようになる。2.14 式の左辺において宇宙項 Λ は物理的には時空に付随する未知のエネルギーとしても解釈出来るので、時空がモノとは別に持つ真空エネルギーと考えられるわけである。この項を右辺に移項して 2.14 式を

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G}g_{\mu\nu}) = 8\pi GT_{\mu\nu}^{\sim} \quad (5.3)$$

のように書き換えることで、その余分なエネルギーを時空ではなく物質側に預けることで、時空とモノを分けることができる。このように新たに物質場を $T_{\mu\nu}^{\sim}$ と再定義することで、未知のエネルギーも一括りにモノとして扱うことができる。これが理論的に導かれるダークエネルギーの発端である。モノと時空幾何は便宜的に分けられるのである。すなわち左辺は現時点で考えられる、エネルギー源（になり得るもの）を差し引いたからっぽの時空である。もしダークエネルギーの正体が Λ の値が一定の真空エネルギーならば、からっぽの時空はもはや真空とは呼べず、真空からさらに真空エネルギーを差し引いたものとなろう¹³。従ってダークエネルギーの正体は何であれ、古典的な相対論を題材にする限りでは時空構造実在論が扱う時空はあくまでこの左辺が意味するからっぽの時空を指しているのである。

相対論的宇宙論は時間を遡り、物質の規模が極ミクロなプランクスケールになった時点で破綻する。要はスケール因子 $a(t)$ が 0 に近付けば、それだけ量子効果が効いてくるのである。古典物理学的に解釈した、あらゆる物質を差し引いた時空構造という概念は量子力学へと持ち込んだ時にどのような存在として解釈できるだろうか？古典物理学と量子力学は別々の物理学理論であるがゆえに、前節で述べたように真空の扱いに関しても両者は本質的に異なっているのである。真空の相転移で宇宙が誕生したという説 [114] が有力なもの、量子論的には空間は何かを生み出すための存在であることの証拠である。

では膨張宇宙は真空の中から生まれたのだろうか？真空が無ではないならばそのエネルギー的存在を取り去った後に残るものは、古典的な意味合いでの時空なのだろうか？それともこの論文を通して扱ってきたような、あらゆるエネルギー的存在を取り去った後に残る、重力場による幾何構造を持った「古典的な時空」という存在はナンセンスなものなのだろうか？時空構造実在論をそのまま解釈して得られる結論のように、空間は実体を持たず現象を記述するための構造でしかないのかもしれない。しかし次の章でも示すように宇宙空間の成長説で支持されるような、共動座標系で表現される宇宙空間は、座標点そのものが実体性を持ち得る可能性もある。例えば図 5.4 に示すように、空間は何らかの形で物質と共に生まれ膨張したとしよう。その場合、この古典的な空間は時間と共に大きくなる座標的実体 (substance) として量子論的な背景時空、すなわち真空とは異なった

¹³5.3 式のように、物質場を $T_{\mu\nu}^{\sim}$ と改めて定義するならば、 Λ は値が一定の定数でなくてもよくなり、真空エネルギー以外にも様々な候補が誕生するのである。

真空から生まれる古典的空間

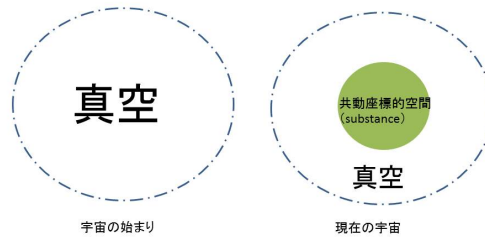


図 5.4: 真空から生まれる実体的空間：モノが生まれる前に存在していた真空から、時空と物質が誕生したという仮説である。宇宙が誕生した際に、我々が通常物質と呼んでいるモノを拡散させる土台として、新たに共動座標系で示される実体的空間が生まれたのである。これは空間は一種の物質的存在であり、最早重力場によってモノと相互作用する時空構造ではないという描像を示す。

存在と結論付けることができるかもしれない。つまり時空の実体説は復活の可能性が残っているということである¹⁴。

¹⁴これは座標的実体説とでも名付けられるだろうか。こういった発想は完全に時空構造実在論と矛盾する描像ではあるが、物理学理論の解釈（世界像）はそれだけ多くの自由度を備えているということである。

第6章 ミクロな宇宙論との関わり

マクロな領域の宇宙論において、時空構造実在論的解釈による「宇宙の膨張」に続いてミクロな領域の、すなわち量子効果の無視出来ない非常に小さいプランクスケールの初期宇宙を扱うことにする。初期宇宙というのは宇宙が誕生してインフレーションを起こすまでの極めて早期の宇宙という意味であるが、ここでの時間は前章の通り、宇宙を大局的に近似した場合の宇宙時刻 t に基付いている。時空構造は多種多様であり、どのように時間座標を定義することも可能であるが、ある特定の時間パラメータを宇宙全体の時刻として論じていることを最初に断っておく。その上で、今回は空間という物理的存在者に対してそのミクロな状態における身分を考察する。

6.1 ループ量子重力理論におけるスピンネットワークと古典的な時空の関係

ここからはミクロな世界の時空論を考える。一般相対性理論は古典的な領域のみでは現状は正しい物理学理論ではあるが、量子効果を考える際には別の物理学理論、すなわち量子重力理論が必要である。一般相対性理論と量子力学が統合されていない中で、未だ十分に定式化された量子重力理論は存在しないが、候補となるアイデアは現代物理学において常に探求されている。本論文ではその中でループ量子重力理論というアイデアを扱う。冒頭でも述べた通り、ループ量子重力理論は、一般相対性理論そのものから出発したアイデアであり、一般相対性理論が記述する時空の計量を直接量子化している。量子化とは、古典的な物理量を不確定性原理に基いて連続量から離散化させることを意味する。すなわち時空に関する何らかの物理量が飛び飛びの値を取るということが予想される。

具体的な手法としては、正準量子化というのが一般的であり、古典的な関係式を適切な物理量（例えば位置と運動量）に従って交換関係あるいは反交換関係を導く。一般相対性理論と量子力学の折り合いが悪いのは、この手法を使うのに困難が伴うためである。当然のことながら、時空の幾何構造を表す計量場の量子化は何度も試みられた。最もメジャーな方法は場の量子論に類似した摂動計算である。すなわち、 $g_{\mu\nu}$ を

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + \delta g_{\mu\nu} \quad (6.1)$$

と分解し、非摂動項 $g_{\mu\nu}^{(0)}$ をバックグラウンドとした摂動項 $\delta g_{\mu\nu}$ の発展として扱う方法である。これにより重力場を自然界における他の力と同様に量子化し、場に対応する粒子（重力の場合は重力子）を考える準備が整う。ただしこの手法では、 $\delta g_{\mu\nu}$ が無限大に発散しうまく処理することができない。この事情により量子重力理論は大きく分けて2つの打開策を掲げている。1つは摂動計算というアプローチそのものは認めた上で、一般相対性理論そのものから出発するのではなく、超弦論のように一般相対性理論よりさらに基礎的な理論を土台として、何らかの極限で一般相対性理論に近似できるようにする方法である。これは現在ではオーソドックスな方法であり、最先端の物理学では標準的な一般相対性理論はある意味不完全な理論としてその体系を留めている。もし一般相対性理論よりもより基礎的な理論が存在するのだとすれば、少なくとも時空構造実在論による時空の描像は、たとえ古典的な領域に限ったところでその意義を失う可能性も大いにあるだろう。哲学的な解釈は物理学理論を前提とした上で議論が成立しているのであり、この論文全体に渡って議論してきた時空の哲学は、究極的には現状の標準的な一般相対性理論に根差したものであるからである。それゆえに超弦論を元にしたミクロな時空論に立ち入る際には、今まで論じたマクロな領域での議論を無効にしてしまう恐れもある。もし今後超弦論がさらに発展し、重力が他の力と統一出来る目処が経つのであれば、時空や宇宙の始まりの描像には一般相対性理論に限った見解とは独立に、今まで以上に明瞭な解釈が生まれる可能性もあるだろう。それらの可能性を現段階で予想することは興味深いが、この論文では議論に統一性を持たせた上で、宇宙の歴史という1つの物語の中で時空の描像を論じたい。よってもう1つの打開策である一般相対性理論そのものを土台とした、非摂動的なアプローチを採用することにする。

さて、正準量子化は非摂動的なアプローチの代表的な手法であるのだが、一般相対性理論において計量の正準量子化を行う上では極めて多大な手続きを要する。既に試みはあるものの、従来の方法では様々な点で行き詰まりを見せている。計量の量子化とは、具体的にはアインシュタイン方程式の原点であり、2.5で触れた時空の曲率を表すアインシュタインヒルベルト作用である3.1式を量子化することが目的である。ただし量子化すると一口に言ってもどのように量子化するのかということが問題である。量子化されるべき正準変数を見つけるためにはまず時間を括り出す必要があり、時間と空間がそもそも同じ扱いになる一般相対性理論では、まず時間軸を再び設定してやる必要がある。そこで計量の形をADM分解という変換により時間を取り出す作業が必要となる。これにより空間と時間は再び分離して、ループ量子重力理論ではこの空間に対して量子化を行うことになる。さらにAshtekar変数、そしてholonomy、fluxという関数を用いて空間の量子化を行う。これらの数学的な手段を借りると、量子化された空間における表面積や体積の演算子や固有値の概念が導出できる。グラフ理論による状態空間の記述を用いると、各頂点とそれを結ぶ曲線におけるスピンネットワーク (spinnetwork) という表記に到達したのである（一連の導出は、文献としては[116][123]、[117][118]、[119]、[120]、[121][122]等参照）。

これらの導出には極めて大きな自由度があり、現時点ではマイクロ領域での空間の状態というのは不明瞭である。変数や量子化自体が極めて抽象的なために、スピネットワークが古典的な時空とどのように対応しているのかということにはすぐには繋がらない。こういった解釈自体に幅のある未完成な量子理論を哲学的に議論することには極めて慎重にならなければいけないことは事実だろう。量子化した以上、このループ量子重力理論から出て来たスピネットワークという存在者を認めた上で、この描像が前章まで議論した構造実在論的解釈と整合的かどうかということに焦点を当てたい。その観点から時空の実在性を、ひいては宇宙の誕生と時空の関係についてマイクロ宇宙からマクロ宇宙へと繋がる1つの歴史の中で、統一的な哲学的描像を得たい。

6.1.1 共動座標系との繋がり

ループ量子重力理論においては、膨張する一様等方的な空間をスピネットワークを用いた何らかの方法で表せないかということが課題となっている。スピネットワークに関して計算出来る物理量は極めて限られており、例えば体積演算子は頂点に作用することによって、各頂点は体積を持ち、これを空間を構成する体積の最小要素と解釈する方法がある。さらにもう1つ、面積演算子は曲線に作用するが、頂点を結ぶ曲線が隣接する頂点（体積要素）の接触面の面積を表していると解釈するならば、空間とは離散的な最小単位が多数連なった結果の連続極限と考えることが可能である。マクロな空間は連続的であるが、プランクスケールで考える限りは離散的であるという見方がある（図6.1参照）。もしこの見方が正しいとすれば、スピネットワークというモデルは物理的な空間の励起状態を表しているという描像になる。そこで、この体積が例えば何らかのパラメータに従って増加することが示されれば、宇宙空間の成長説で述べたような「宇宙空間そのものが膨張している」という時空描像と合致しているように思える。つまりは、共動座標系によって宇宙時間と共に大きさが変化する空間は、宇宙時間を遡っていくとどんどんサイズが小さくなり、やがてマイクロな量子空間になる。そしてそのまま特異点へと、すなわちサイズが0の無へと収束していくという宇宙誕生のシナリオがループ量子重力理論によって想像できるようになる。これは確かにマイクロな時空を扱う上で、時間と空間を再び分離して空間の状態に着目することで得られる自然な発想である¹。5.3の最後に述べたように、古典的な共動座標系が空間そのものであり、もし大きさを持つ物質的な存在者ならば、時空の実在は構造というよりは一種の実体説を仄めかしているとも解釈できる²。前章で述べた通り、宇宙空間の成長説は特に哲学的な議論を伴わない物理学者による明解な宇宙空間の描像であるが、例えばこの描像に空間座標の各点に宿る個体原理というアイデ

¹時空を分離せずに、4次元時空のまま量子化を試みたスピフォームという時空の単位もあるが、この論文では扱わない。

²ここで言う実体説とは、共動座標系の空間座標の各点がそれぞれ空間の各構成要素として時間を通じたアイデンティティを備えているという意味での新たな実体説になるが、これはループ量子重力理論と宇宙空間の成長説を合わせて解釈できる時空描像の1つの明確な例である。

スピネットワークと空間の関係性

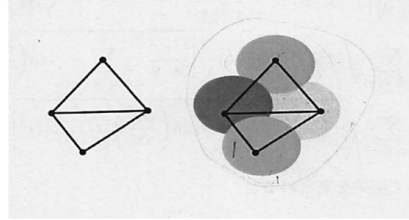


図 6.1: スピネットワークの概念図：左が状態空間 (モデル)、右が実際に物理的に存在する空間の状態を記述している。

アを与えると、各点が時間を通じて変化し膨張していく空間像を描くことが可能となる。そして、それは上述した体積の増加する頂点を持つスピネットワークの解釈と直感的には整合的である。では逆に空間そのものは膨張しないと主張する時空構造実在論とは矛盾するだろうか？前章で時空構造実在論的に解釈した膨張宇宙の時空に関する解釈を再度列記しておく。

- 宇宙は時空構造全体で存在しているため、共動座標系を張ればスケールの変化する宇宙空間を、そして静止座標系を張れば静止している宇宙空間をそれぞれ考えることが出来る。

このテーゼに従えば、時空は特定の大きさや形を持たずにただ共動座標系のような形式でも表されるというだけである。系がある程度ミクロになれば量子効果を考える必要があるために、この章では量子重力理論を考えている。ただし空間自体が大きさを持たない以上は、ミクロになるのはあくまで物質だけである。5.3でも論じたように5.3式のように考えることで宇宙項も物質側に預けておけば、少なくとも古典的な意味での時空構造は共動座標系そのものが収縮したところで消えるわけではない。例えば物質が一点に凝縮しようとも時空まで収縮するわけではないからだ³。宇宙の空間曲率などは、座標系の設定に関わらず空間の無限性や有限性にも関わってくるが、大事なのは物質が一点に凝縮した時にその周りに時空構造は存在するのかということである。この一点に凝縮する様子が宇宙誕生であるとするならば、それは丁度2.3.2のシュヴァルツシルト解の2.13式が示すような一種の重力崩壊のような描像となり、最早質点となった宇宙の外に新たに時空構造を定義できるはずである。構造自体は消えることがないので時空は実在し続けるだろう。5.3でも述べたように、一般相対性理論においては真空とはあくまでからっぽの空間であり、それは一種の構造を持つからである。古典物理学の範疇においては、いかなる現象が起こっても計量が定義できないということはある得ない。すなわち時空構造実在論は、空間が消滅するというループ量子重

³ただし $a(0) = 0$ を満たす場合、5.1式の空間計量が特異点になるだけでなく、5.2式でも空間曲率 $\frac{K}{a(0)}$ が発散して特異点に陥る。

力理論と宇宙空間の成長説から想像されるような描像とは矛盾するのは確かである。

そこで、再びループ量子重力理論の描像に目を向けたい。5.3において、宇宙を生み出す真空と古典的な意味での真空は別々のものであることは既に述べた通りである。宇宙を生み出す真空とは量子論的な意味でのエネルギー的な存在者であるが、ダイナミックなものというよりは論じるべき物理系の土台でもある。ループ量子重力理論では、その時空間という土台そのものが論じるべき媒体なのである。その媒体の背景に何があるのかというのも興味深いテーマではあるが、ここでループ量子重力理論はそもそも量子化した後も時空間を扱っていると言えるのかということを改めて問いたい。それはスピンネットワークという存在者がミクロな空間そのものとして果たして考えられるのかということである。これは時空に量子化という手続きを行うことの特異性に関する問題でもある。

6.1.2 ニヒリズムと時空の量子化の特異性

マクロな視点からミクロな視点へと移行する時には物理学では実在の観点は大きく変わっている。時空に関する議論の前に、モノに関する視点の移行を述べておこう。ここでは構造実在論に加えて、形而上学的な観点も再び導入する。

2章で挙げたデカルトやスピノザの主張を実体の定義の基準とするならば、例えば我々の周りにある椅子や机はそれ自身で他の何者にも依存せずに存在しているという意味で確かに実体であろう。素朴実在論の立場ではこういったマクロな対象は実体として実在していると言えるだろう。ただしそれらをさらにミクロな視点で構成要素としてみていくと、最終的にはクォーク等の素粒子となる。この素粒子に関しては、電子同様に直接目で観測できる対象ではないし、緻密な実験装置を用いて光や他の物質との相互作用を用いながら間接的に位置や運動量を特定することしかできない。こういった環境において素粒子は他のいずれの存在者も必要としない方法で存在すると言えるのだろうか？捉えるというのを、例えば我々が知覚（認識）するというように考えるならば、決してそれ自身でのみ捉えられるような対象ではない。つまりデカルトやスピノザの実体の定義では、少なくとも今の科学技術においては素粒子は実体と呼べるかどうかは疑わしい。実在という面で考えても、ミクロな領域に関する理論的对象には注意が必要であろう。素粒子は量子場理論に従えば、粒子という性質と波動（場）という性質の二重性を備えている。これらの特に場という側面を持つ対象の実在性に関しては構造実在論を介しての面白い見解もある⁴。予め断っておくが、上記

⁴“while structural relations are real in the sense that they are testable, the concept of unobservable entities that are involved in the structural relations always has some conventional element, and the reality of the entities is constituted by, or derived from, more and more relations in which they are involved.”(構造的な関係が検証可能であるという意味において実在している一方で、構造的な関係に関わっている観測不可能な存在者の概念は常に旧来の要素を備えていて、その存在者の実在はそれらが関わっているますます多くの関係によって構成されるかあるいは由来するのである。[17]p.5) 20世紀における理論的对象の実在的身分は、構造という観点で大きな特徴を備えており、これは「時空」という理論的对象に関しても同様である。

の実体の定義において、デカルトは実体というものは空間的に延長する物体だけでなく、精神もその定義を満たすと考えていたし、スピノザにとっての実体は神そのものを指しているようにも見える。私が言いたいのは、あくまで彼らの「実体」をモノに当てはめたとしても、マクロな素朴実在論とは矛盾しないという程度であり、彼らの主張はそもそも現代物理学とは独立な形而上学である。ただし現代物理学を多少は考慮している現代存在論においても、椅子や机といった対象は「中間サイズの物質的対象」であり古来からの伝統として主に第一実体と呼ばれるが、それらの構成要素とされる素粒子の集まりと同じ身分なのかどうかということには立場が分かれる⁵。つまり机を1つの個別の実体だと認めたところで、構成要素の素粒子（の集まり）と同等の存在者であるかということに関しては現代の形而上学でも議論が分かれている。素粒子の性質だけでは、どれだけの数を集めたところで机の木製という性質も色の性質も生み出すことは出来ず、中間サイズの物質的対象は、基礎的な構成物から創発されたと考えることもできる。この考えを時空の量子化に対応付けるのであれば、空間の構成要素とされるスピンネットワークは果たして空間そのものと呼べるのかどうかということである。

時空構造実在論の立場から見ても、ループ量子重力理論が時空そのものの量子化を扱っていることは、アインシュタインヒルベルト作用 3.1 式を直接量子化していることから間違いないだろう。3.4 でも述べたように時空が計量である以上は、基本方程式の元である作用を構造と捉えても差し支えないことは電磁場のケースを例に出して先に議論した通りである。ただし、電磁場を量子化して光子を得た場合と、空間を量子化してスピンネットワークを得るのでは話が大きく異なっている。電磁場の場合は手順が明確で、3.2 式から 3.7 式に至るまでにエネルギー表記したものを k という変数とその時間微分に関して量子系の調和振動子という形式に改めたに過ぎず、各々の光子にとって Q_k という新たな位相空間を定義している。時間座標に関してはそのままであり、電磁場が示すような空間を古典的に伝播する波としての性質から、その振動数で以って位相空間を量子論的に調和振動する粒子としての性質へと見方を変えて表しただけである。現に量子論では、電子のエネルギー状態の遷移として光の放出や吸収を行う現象を、古典的な電磁場中に置かれた電子系のエネルギー状態の式を量子化する（量子演算子に置き換える）ことで記述している。同じ素粒子とは言え、光子は場の媒介粒子（ゲージ粒子）であるために、机を構成する物質粒子や電子以上に仮想的であるが、物理学に基づく限り、電磁場を光子の集まりと同一視することに問題は無いのである。しかし、時空の場合はそうではない。従来の時空の哲学を振り返る際に、2 章でも議論してきたように計量とは宇宙を論じる上で不可欠なものであり、電磁場の量子化で考えたような時間発展的な概念も全て時空を土台とした上で基礎方程式から出発している。では時空そのものを量

⁵現代存在論講義Ⅱの第一講義において、倉田剛は作業台に置かれた犬の像を象った粘土の塊を例にとり、作業台の上に存在するものは何か？という問いに対して、像と塊を同一視する「同一性論者」（1つと答える）と前者と後者を別々のものとする「構成論者」（2つと答える）と共に、両者の存在を否定してそれらを構成する素粒子の存在にのみコミットするニヒリズム（無数と答える）を挙げている [124]。

子化する場合、何を土台として扱っているのだろうか？

スピネットワークは holonomy や flux という数学的な手段によって状態空間を表しているが、この状態空間は正準変数を定義する上での位相空間であり、電磁場の Q_k と同様に抽象的なヒルベルト空間である。そしてその中に頂点とそれらを結ぶ曲線が存在しているのみである。肝心の多様体や計量といった時空の性質はそこには何もない。もし、スピネットワークが空間の構成要素であるならば、それらが多数集まった時に新しく時空の性質を創発するはずである。上述したように、もし頂点が空間の最小単位を表しているとしても、仮に共動座標系に限ったところで、元々の空間には各々の空間点があるだけなので、そこに大きさという概念は存在しない。古典的な時空と対応させるためには、時間が経てば点同士の距離が広がることと、空間の体積要素が増大することの間に明確な対応付けが必要となるのである。つまりはスケール因子の増加という要素も何らかの形で創発されるべき事項である。この辺りの話はループ量子重力理論の自由度が大き過ぎるがゆえに、現段階ではあまり迂闊な議論は出来ない状況ではあるが、最新の論文 [28] でループ量子重力理論による時空の創発を議論しているものがある⁶。

6.1.3 時空の創発と基礎的な存在者

量子重力理論が時空を議論する上で、経験的な領域との一貫性 (coherence) は常に意識すべき問題であり [126]、これは理論的存在者の存在論的な問題に加えて現代物理学における理論自身の哲学的な問題でもある。特にヒルベルト空間や位相空間といった明らかに直接観測出来ない意味での抽象的な領域での議論を、比較的具体的と言えるような経験的な領域に焼き直す際には何らかの相転移 (phase transition[28]p.5) が生じていると考えられる⁷。

例えば温度や圧力といった系の巨視的な性質は、それを実現する多数の微視的な状態（粒子の集まり）の統計性に還元されるが、微視的な系の方が巨視的な系に比べて圧倒的に数が多く非対称性が生じるために、微視的な系が巨視的な系の基礎になっているのは確かである。温度自体は微視的な系に存在する粒子のエネルギーの和という説明や存在論的な還元は出来ても、個々の粒子の性質として、巨視的な温度の全てを表現できるわけではない (非還元性)。これは一般的な創発（と非還元性）の明瞭な一例であるが、マクロなレベルとミクロなレベルではそもそもの土台が違う故にミクロな粒子からマクロな温度が相転移したとも解釈できるだろう⁸。もう少し今回の時空に近い例を挙げるならば、素粒子が炭素原子を構成し、やがて生命を造るプロセスなどが挙げられる。この場合、温度と同じく生命体が素粒子によって構成されていることには間違いはないが、物理学

⁶次項で紹介する創発 (emergence) の話は還元 (reduction) や随伴 (supervene) と両立可能な意味で用いられている。3者のそれぞれの関係や両立性に関しては [125] 参照のこと。

⁷3.4で述べたように抽象的と具体的には境界線が曖昧ではあるが、ここでは時空的な物差しを越えた領域での議論を「明らかに」抽象的であるとしている。

⁸実際の物理学理論において、これを相転移と呼ばないことはさておく。

的には素粒子をいくら集めても生命現象を説明することは難しく、条件的に生命の構成に失敗してしまうケースも十分考えられる。そうなった場合に生命体の性質や状態は創発されることはなく、それらの性質は果たして素粒子に還元できると言えるのかどうかということは物議を醸すだろう。創発には根本的な理論からある程度自律的であることも必要なのである。これは、より基礎的な理論においては空間の構成要素とされるスピネットワークが時空を構成し損なう可能性も挙げており、より基礎的な理論は時空構造とはまた違った独立な構造を含んでいなければいけないだろう。すなわち創発とは単に偶然的に、さらに量子重力理論へのアプローチの詳細に依存する方法で生じているのである。これは創発とは、それぞれ異なるレベル（領域）で用いられる一般相対性理論と量子重力理論において、現象の依存性と非依存性の二元性 [127][28] を表現しているということなのである。

具体的な創発のプロセスの問題として、スピネットワークと時空における局所性が挙げられる。これも [28] に基いているが、スピネットワークと時空の対応関係から、時空がさらに基礎的な非時空的な存在者から創発しているということを主張している⁹。前々項でも述べたように、スピネットワークの考えられ得る解釈として、頂点が空間の体積要素を表しているとしよう。重要なのは、スピネットワークの図はあくまで抽象的な状態空間の概念図であるために、隣合った頂点同士的位置関係は現実の空間における関係性を表しているわけではない。この状態でもし空間の創発が起こった場合に、例えばスピネットワークの中では隣接している2つの領域が、通常は因果性を保てないような時空的なレベルにおける意味での非常に離れた場所に非局所性が起こるのである（図 6.2）。これは基礎的な領域においては、局所的な構造を元に異なる時空構造を生み出す可能性を示唆している。続いて幾何的解釈との対応である。上記の距離関係の話とも一部通じる部分であるが、スピネットワークは量子状態であり、状態の重ね合わせで表現されるべきである。そして決定論的な幾何的な値は持たないが、観測が生じた際にそれらの状態は1つの幾何的な固有状態に収まるのかもしれない。しかし、時空の量子系を扱う文脈での観測問題は通常の量子系以上に極めて複雑な概念であろう。時間に関しても同様で、一般相対性理論はそもそも時空を1つの構造として議論しているものであり、量子重力理論の中で宇宙が満たすべき波動関数である Wheeler-DeWitt 方程式には通常のシュレディンガー方程式と違って系の時間発展という概念はない。ループ量子重力理論によって記述された根本的な構造においては時間に相当するものはないのである。時空そのものを量子化をする際には時間の流れが無いという奇妙な状態である。結局ループ量子重力理論において、基礎的な存在者であるスピネットワークは非時空的な存在者であり、通常の時空を表すためには何らかの相転移が必要なのである。従って体積要素の増加という発想は宇宙空間の成長説に通じるかもしれないが、それは時空を生み出す候補の1つでしかなくて、まし

⁹この論文ではループ量子重力理論の他に、量子重力理論の別の時空への試みである因果集合論でも同様の考察を行っている。

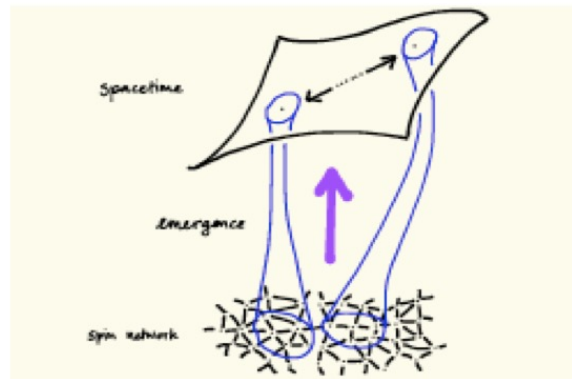


図 6.2: スピンネットワークによる空間の創発：局所的な状態空間としてのスピンネットワーク上の構造が、時空として創発する際に非局所的な関係となる例を示す。図は [28]p.8 より抜粋。

てや計量に含まれるスケール因子との対応などとは大きな隔たりがある。

以上より、ミクロな初期宇宙の領域を扱うループ量子重力理論はスピンネットワークという新たな存在者を議論しているが、これはマクロな時空構造を基礎付けるものには違いない。しかし、スピンネットワークはあくまで非時空的な構造を持つために、創発のメカニズムがある程度明確にならない限りは5章までに論じた時空構造とは独立に考えても問題無いだろう。すなわち、ループ量子重力理論は宇宙の始まりに空間そのものが消えることを暗示しているわけではない。時空構造実在論はあくまで時空の実在に対する立場であり、極端なニヒリズムの立場を取らない限りは初期宇宙の領域におけるスピンネットワークの議論は不要なのである。そもそもこのスピンネットワークのような基礎的な非時空间的な構造は一体何であろうか？ループ量子重力理論では時空とモノのうち、モノには触れず時空を量子化している。しかし、ミクロ宇宙の描像でも述べた通り、そもそも宇宙誕生時には宇宙中の全てのモノが凝縮するという描像が前提であった。そのサイズがプランクスケールになった際に初めて量子重力理論を考える必要があるのだが、そのミクロな領域ではこの非時空间的な構造とモノ（エネルギー媒体）が混在している状況である。その領域において時空（空間）の構成要素であるスピンネットワークという基礎的な存在者と全てのモノの構成要素が高エネルギー状態で存在しているが、例えばモノはこのスピンネットワークから創発したという物理学的なモデルもある¹⁰。時空とモノはミクロな領域で統一される可能性も十分に残しているのである。

¹⁰ただしこちらのモデルでは、スピンネットワークが扱うのは「量子化された幾何学」と表現されており、モノはあくまで各モデルに対応する時空より生まれたという主張である [128]。

6.2 マクロとミクロの共通性と時空の構造

ミクロな領域で時空を量子化すると、それは最早非時空的な存在者である。計量から出発しているとは言え、モノ（電磁場や物質）のように根幹の基本方程式が共通なので構造が連続しているとはとても言えそうにないことがわかった。これは時空自身を量子化することで得られたスピンネットワークが非時空的な構造を備えているために、何らかの相転移を伴うような時空構造の創発を必要とするからである。尤もこの構造も幾分恣意的な設定ではあり、電磁場に関しては量子化における形式的な表現の違いを越えた上で構造を新たに定義した。すなわち作用という抽象性を新たに構造の軸にしたのであり、これはマクロな時空構造実在論とは整合的であった。モノの場合はさらに直接的であり、量子化に伴いエーレンフェストの定理によって保存する基礎方程式の構造がある。そもそも物質に関しては最初から量子化しても粒子性と波動性を合わせ持つ構造として解釈していたが、改めてモノの構成要素である素粒子とは、果たして単独ではどのような存在者なのだろうか？時空の哲学との類推で個体原理を用いた議論が可能である。ここで時空点と対応させるために敢えて粒子性に着目してみる。粒子性というのは4.2で触れたように、個々の粒子は任意の入れ替えに対しても不変であるということである。つまり多粒子系において、個々の粒子は各々の状態（波動関数や軌道といった性質）以外にアイデンティティーを持たないのである。これは量子統計力学の原則であるが、particle ontology に従えば個々の粒子が存在者でありながら区別できないということは、存在的構造実在論の強い根拠となっている¹¹。そしてこれは量子力学的な粒子が個体原理を備えていないことを含意しているだろう。この発想は粒子そのものではなく、粒子間における関係こそが存在の最も根本的な単位だと主張する前節のカオの議論とも通じているが、この粒子と関係（構造）は時空の議論においては、丁度時空点と計量（時空構造）に対応しているのである。この古典的な感覚に基く二分法に意味はあるのかということは4.3でも述べた通りだが、ミクロなモノの観点とマクロな時空の観点に類似性が見られる [27] ことは確かである。

ここで強調しておきたいのは、時空はマクロな議論においてでさえ、既に対象は個体原理を備えていないことである。上記の時空とモノの量子化における違いが生じた理由の1つには、後者は量子化することで構造を担う（構造によって与えられる）対象（物質粒子や光子）が現れる一方で、時空の場合はマクロな古典的な議論の中で、既に構造（計量幾何）に対応する対象（時空点）が議論できたことではないかと考えている。つまり時空構造実在論はマクロな領域の時点で既に構造と対象が完結していたと言えるのではないだろうか。モノの場合はマクロな実体は、物理学的にはミクロな粒子の集まりに分解されると言えるが、同じことは時空点には当てはまらない。前章で述べたようにマクロな古典的な時空点とミクロな空間の最小単位に直接の繋がりは未だ見出せていない

¹¹これは量子力学的な粒子が個体性を持たないという議論であるが、粒子が個体性を持たないことは理論よりすぐに帰結されるわけではない。より正確には、ある制限された条件の下では粒子が敢えて個体性を持つと考えたところで、個体性の有無に関しては決定不全に陥ることが、粒子という対象を捨てて存在的構造実在論を主張する根拠だとしている。[85]p.419-420

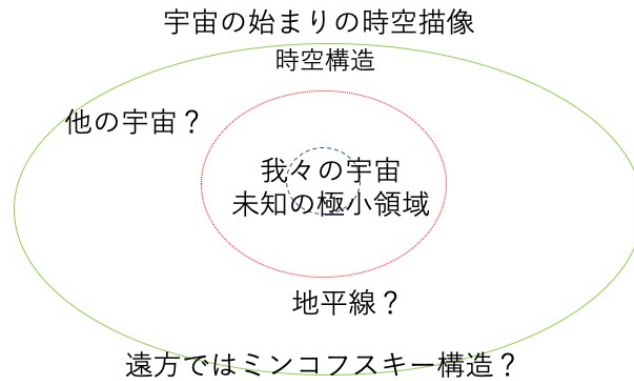


図 6.3: 宇宙の背景の真空状態の時空構造：宇宙の始まりにおいては、真ん中のミクロな領域にはスピネットワークの非時空的な未知なる構造が存在している。その周りには何らかの時空構造が存在していて、これよりさらに宇宙時刻を遡ったとしても時空自体は消えるわけではない。

からである。そもそもマクロな時空点はそれ自体が大きさを持たない点であり、ミクロな単位の集まりには還元できない。マクロな時空は数学的にはあくまで連続的な存在者であり、空間が離散化しているという記述はスピネットワークからの類推に過ぎない。ミクロな体積要素よりマクロな空間がいかにして構成されるのかといった本質的なメカニズムはわからないままである。計量そのものの量子化には複雑な数学的手順をいくつも踏んでいる以上、元の構造とは大いに関係離れた情報を含んでいるのは確かだろう。従って、ループ量子重力理論が描く初期宇宙の時空理論は特にマクロな時空に何か制限を掛けるようなことは無い。ゆえに 5 章で考察した時空描像はループ量子重力理論を伴って例えば次のような宇宙の起源を予言できる。

- 時空構造はモノが無くても計量が存在する限りにおいて、からっぽの真空にでも存在できる。ゆえに極初期の一部のミクロな領域には時空そのものは存在しないが、時間を遡っても周りの時空が消失するメカニズムは考える必要はない（図 6.3）。

尤もこれは計量はモノ $T_{\mu\nu}$ が無くても定義出来るという前提での話であり、2.3.1 や 2.3.2 で挙げたマッハ原理や関係説の力学とは相容れないかもしれない。しかし、かつてはマッハ原理の支持者であったアインシュタインがドジッターの時空モデルに対して考えたような、モノとは別に計量を存在させている世界物質 (world matter) (それらが通常のものと呼べるのかどうかという議論はさておき) の存在を仮定することで、我々の宇宙の外に特定の時空構造があることは十分考えられるべきことではないかと思う。一方でマクロな領域の重力場による幾何構造として、1つの時

空構造を各々の座標系という様々な表現形式で表していたが、アインシュタイン方程式の出発点となる 3.1 式で表されるアインシュタインヒルベルト作用まで辿れば、重力場による幾何構造も 1 つの表現形式に過ぎないということは言えるかもしれない。これは 6 章で考察したような創発という概念を無視して、スピネットワークも計量もアインシュタインヒルベルト作用から出発したという点においては共通しており、マクロミクロな表現は形式の違いに過ぎず、あくまで 1 つの何かを表しているという「広義な構造的」解釈もあるかもしれないことを含意する。ただし、その場合は宇宙の始まりにおいてどんな明確な時空描像も提供してはくれない。結論として、ループ量子重力理論の創発的時空と時空構造実在論を整合的に解釈すれば、大局的に宇宙の始まりと見なせる時刻 $t=0$ において、時空が消滅すると考える必要は何も無いのである。あくまで時空計量が定義できる限りにおいてからっぽの宇宙にも時空は定義可能な一方で、初期宇宙では物質が集中する極ミクロな領域で、非時空的な構造を備えていると解釈できるのである。時空という構造の構成要素である計量とスピネットワークという概念は別々の存在者であり、後者が前者を基礎づけていることは確かだが、時空の本質はあくまで前者なのである。構造をマクロに解釈すれば、エスフェルド等の言う意味において対象は個体原理を持たない時空点となるが、ミクロに見ればそれは離散的な空間格子の集まりなのである。そして「膨張する空間像」はあくまで宇宙そのものを指示するための道具でしかなく、共動座標系は空間そのものではなくやはり数学的な表現に過ぎないのである。結局はマクロな視点においてもミクロな視点においても、一般共変性を満たす相対性理論を土台とする限りは時空を一意に定める座標系は存在しないのである。

第7章 おわりに:まとめ

この論文では時空に関する哲学的な議論を題材に、現状の物理学で宇宙誕生という究極の事象にどの程度まで迫ることが出来るのかということを論じた。こうした研究の背景には、物理学自身の問題として悩ましい大きな決定不全性があった。端的に言えばそれはループ量子重力理論と超弦論であり、その他大勢のアイデアでもある。宇宙マイクロ背景放射（CMB）の観測事実を裏付けるようなインフレーションモデルの数が多いにありふれているように¹、現状の観測事実や実験結果を超えた領域を議論するためにも、それらの探求は物理学が今後どのように発展出来るのかという問い掛けとも関わっている。勿論宇宙全体の歴史ではなくとも何らかの局所的な相互作用（例えばブラックホール）の観測結果において、理論が影響を受ける可能性は大いにある。現に一般相対性理論をベースに拡張した修正重力理論（4.2 で紹介した例）などが徐々に有力視されている経緯からもそれは明確である。

ここではループ量子重力理論を扱ったが、初期宇宙のミクロな高エネルギー状態は実験による再現も難しく、特に超弦論で扱うような高次元の弦などは3次元空間と1次元の時間を感じることしか出来ない我々にとってはまさしく観測不可能である。科学哲学では量子力学が扱うミクロな電子や波動関数は直接観測出来ないがゆえに、それらの実在性が論点であった。超弦論が記述する高次元の現象はそのミクロな事情に加え、我々の経験的な領域をさらに逸脱している。従って弦の実在性を擁護するためには極めて難しい議論が必要となるだろう。そういう意味でも仮に量子重力理論が、ループ量子重力理論あるいは超弦論の単純な二項対立に収まったところで、結局は何らかの形而上学的な観点が理論選択の基準になりうるのかというところである。本論文で何度か引用してきたカオの冒頭 (pp.6-7)[17] にもあるが、物理学の発展には形而上学的な観点が大いに寄与している。形而上学的な視点は世界像を与え、現象の説明は特定の世界像の観点により与えられる。その説明は物理学理論にとっては経験的法則の詳細より遥かに重要であり、カオは例として一般相対性理論とニュートン力学では、経験的な内容（惑星の軌道の計算など）の差は僅かだが、ユークリッ

¹正確には、いずれのモデルも初期宇宙における現象を記述しているが、現存する観測事実の中でインフレーション時期のものは微量な重力波などを除けば直接的には存在しない。これは我々にとって唯一の観測手段である光でさえも、宇宙中を自由に動き回れる状態になるには時間が掛かるからである。極論を言えば宇宙が誕生してから宇宙時刻 $t \simeq 3.8$ 万年時（宇宙の晴れ上がり）の最も古い光による観測結果と矛盾さえなければ初期宇宙に関してはどんなモデルでも通用するのである。

ド幾何学からリーマン幾何学に移る際に物理学は大きな進歩を遂げて、時空に関する世界観そのものが移り変わったことを挙げている。世界の描像が物理学にとって重要な役割を果たしているということは確かである。今回は時空の実在性という側面が宇宙の始まりにどのような描像を与えるかということで、具体的には一般相対性理論を軸にした標準的なビッグバン宇宙論を持ち出した。多岐に渡る重力理論のアイデアの中で現代物理学の持つ世界像も同じく多岐に渡るだろうが、今回私は一般相対性理論とループ量子重力理論を選んだ。これはビッグバン宇宙論が記述する膨張宇宙の歴史において²、ミクロな観点とマクロな観点を繋げるための統一的な解釈を期待しての試みだった。2章、3章で考察した一般相対性理論における時空の哲学を有意味なものにするには、物理学においても一般相対性理論の土台を前提とする必要があり、それゆえに超弦論ではなくループ量子重力理論を選んだのである。時空を背景とした超弦論における実在性の考察は是非とも今後に委ねたい。

4章の後半でも触れたように、一般相対性理論や量子力学が扱う経験を越えた抽象的（数学的）なコミットメントは、果たして物理的世界の何をどのように指示しているのかということに着目し出すと、粒子性や実体といった従来の枠組みを持ち出さざるを得ない。こういった実在の探求は世界がどのようにあるかということ以上に、世界をどのように知ることが出来るのかという認識に多分に依存している。そして構造実在論の立場を取れば、その依存の度合いは構造実在論が提唱する構造をどの階層まで認めるかにもよるだろう。ドラートの時空構造実在論は、構造を数式に置きながらも物理的世界がそれを例化あるいは例示しているという点で現象との関係性を明示している。3章でも考察したが、時空構造が少なくとも普遍者的な意味での実在ではないことは本人も認めている。つまりはレディマンやフレンチの存在的構造実在論以上に具体的なレベルでの実在を主張していることになるだろう。3.4でも述べたように、構造実在論は極めて多義的であって、構造とは何であるかということに関しては定量的な基準がはっきりしていない。モデルとの同型性といったような数式的な道具立てはあるが、6.2でも述べたようにどのレベルでの数式を基準にするかによっての恣意性は避けられない。私は作用という、具体的な経験的世界と比べれば高階の物理量を構造として選んだが、量子化を通じて時空が別の構造を持つ存在者となったことは構造の不連続性を示す上で割と妥当な基準であったのではないかと思う。これは、量子重力理論が扱う世界は、単にミクロなという意味以上に経験的な領域を遥かに逸脱している。ループ量子重力理論が示すような、スピンネットワークの非時空的なメカニズムを新たに存在論と呼ぶのならば、我々の住む具体的な世界のあり方ではなく、抽象性を多分に介した擬似的な存在論であると言わなければならないだろう。これは現代物理学が存在論そのものではなく認識論に傾いている一例に過ぎないが、宇宙の始まりが確実に起こった事象であることには疑いの余地がない。結局のところ時空の起源（図

²ビッグバン宇宙論と一口に言っても実際にはバリエーションがあり、宇宙論という括りで見ればインフレーションすら伴わないモデルも存在しているが、これに関しては今回はあくまで標準的な解釈を採用したと留めておきたい。

6.3の真ん中のマイクロ領域)を具体的なレベルにまで掘り下げて語ることは、現代物理学では極めて難しいというのが結論である。

ビッグバン宇宙論を単純に捉えれば、特異点から生まれた宇宙空間(共動座標系)が膨張することによって宇宙の規模は大きくなっている。この世界観はループ量子重力理論のスピンネットワークのプロセスと一見相性がいいかもしれないが、私がこの論文で行なったことは「宇宙空間の成長説」の徹底的な批判であった。現在ループ量子重力理論が宇宙誕生のメカニズムを完全に記述したわけではない。例えば空間が創発するメカニズムがわかれば、スピンネットワークの新たな構造を議論できるようになり、その制限事例としてマクロな時空構造が得られる可能性もある。マイクロマクロを通じた構造は不連続だが、さらに高階の普遍的な構造が得られるかもしれない。しかしスピンネットワークと時空の関係は物理学的には当然のことながら、哲学的にも大きな課題を残している。逆に創発のメカニズムによっては、共動座標系は単なる数学的表記ではなく「膨張していく空間」という存在者だという身分を得るかもしれない。5.2で述べたように、空間という存在者を介することで、宇宙の一樣等方性もインフレーションも非常にうまく説明が付き、観測結果も理論も整合的に受け入れることができるのは事実である。つまり空間上の点は、銀河の位置以上に空間そのものの何らかのアイデンティティを備えている可能性、すなわち新たな実体説(substantialism)を誕生させる可能性も同等に残している。それはこの宇宙の膨張という現象を数学的な機構だけで説明するとなれば、一樣等方という宇宙原理の要請や観測結果との照合などこれらが全てうまくいくのは奇跡であり、やはり背景に実在している空間があるからこそ説明可能だという、一種の奇跡論法に頼った最善の説明である。ただし宇宙原理も観測結果ではなくあくまで1つの仮定であり、一樣等方モデルは宇宙を大局的に見た場合の近似であって、インフレーション理論等も「こう考えたらうまく行く。」という仮説に過ぎない。強重力場での厳密な一般相対性理論の検証という大きな課題も残る中で、宇宙論という分野はそれだけ理論に自由度が多い³のである。だからこの奇跡論法は一般の奇跡論法と比べて極めて恣意的であり、空間の実在を主張する手段としては説得力に欠けるかもしれない。しかし構造実在論とはまた違った時空の新たな実在を仄めかしているのは事実である。そしてこの場合はどの座標系も平等であるという一般共変性はあくまで一般相対性理論の数学的な要請に過ぎず、現実の宇宙論へ応用する際には時空は1つの形式(共動座標系)に定まっており、時空構造実在論は意味を失うだろう。このような可能性を考え出すと、やはり未だ具体的な世界像にも多くの自由度があり、果たして将来の物理学によってそれらの自由度が制限されることは決して自明ではない。

将来の物理学が世界像にどれだけの影響を与え得るのかということは、科学と科学哲学、そして形而上学との繋がりにおいても極めて重大なテーマである。形而上学は科学を超えた実在の探求を

³宇宙年齢の見積もり、ホライズンの半径等、宇宙論は大局的な議論がメインであるために、基本的にパラメータや定数に制限を掛けると上限と下限の差が極めて大きくなるのが特徴である。

目指す一方で、大いにその影響を受けている。上述したように科学も経験的な法則以上に各々の物理学者による世界像を表現する形で発展してきた。現状の物理学は経験を遥かに越えたところに位置しているために、世界像そのものは抽象化された構造にリンクせざるを得ない。今後はさらに高階の抽象化された普遍的構造が登場し、現在我々の認識が全く及ばない方向へと向かうかもしれない。これが将来の物理学によって世界像の自由度が制限されることが自明ではない理由である。これは、当時はユークリッド幾何学という概念しか無かったニュートン力学がリーマン幾何学を取り込んで一般相対性理論へと発展したように、この世界の認識という側面で将来哲学的なアイデアが科学を先導することも十分にあり得るだろう。その例が、例えば上記の新たな実体説やマクロな時空構造実在論的解釈である。私は時空構造実在論を用いて、個体原理を持たない空間の非物質的な側面を強調したが、これは現時点でのループ量子重力理論の現状も加味した上での1つの指針に過ぎない。ただし、こういった哲学的探求は今後の物理学の発展にも繋がる可能性があることを最後に強調しておきたい。

参考文献

- [1] Alexander A. Friedmann (1922). Über die Krümmung des Raumes, Zeitschrift für Physik Volume 10, Issue 1, pp 377-386
- [2] Georges H. Lemaître (1927). Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, A47, p. 49-59
- [3] Roger Penrose (1971). Angular momentum: an approach to combinatorial space-time. *Quantum Theory and Beyond*, edited by Ted Bastin, Cambridge University Press 1971, pp. 151-180.
- [4] Abhay Ashtekar (1987). New Hamiltonian Formulation of General Relativity. Phys. Rev. D 36, 1587-1602
- [5] Joseph Samuel (1987). A lagrangian basis for ashtekar's reformulation of canonical gravity. Pramana- Journal of Physics, the Indian Academy of Sciences April 1987, Volume 28, Issue 4, pp L429-L432
- [6] Lisa Randall and Raman Sundrum (1999). Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension. Phys. Rev. Lett. 83, 3370
- [7] Clifford P. Burgess, Mahbub Majumdar, Detlef Nolte, Fernando Quevedo, Govindan Rajesh and Ren-Jie Zhang (2001). The inflationary brane-antibrane universe. Journal of High Energy Physics, JHEP07 047
- [8] Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde, Juan Maldacena, Liam McAllister and Sandip P. Trivedi (2003). Towards Inflation in String Theory. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, JCAP 0310, 013
- [9] Thomas. S. Kuhn (1977). Objectivity, value judgment, and theory choice. In Thomas. S. Kuhn (Ed.), *The Essential Tension* (pp.320-339). The University of Chicago Press.

- [10] Bastiaan. C. van Fraassen (1980). *The Scientific Image*, Oxford University Press.
- [11] Stathis Psillos (1996). On Van Fraassen's Critique of Abductive Reasoning. *The Philosophical Quarterly* (1950-), Vol. 46, No. 182 (Jan.,1996), pp.31-47
- [12] Stathis Psillos (1999). How Not to Defend Constructive Empiricism: A Rejoinder. *The Philosophical Quarterly* (1950-), Vol. 47, No. 188 (Jul., 1997), pp. 369-372
- [13] Jeremy Butterfield and Chris Isham (1999). Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity.from *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in quantum gravity* edited by Craig Callender, Nick Huggett (2001). Cambridge University Press.
- [14] Tim Maudlin (2002). "Thoroughly muddled McTaggart: Or, how to abuse gauge freedom to create metaphysical monstrosities," *Philosophers' Imprint*, Vol.2 No. 4, pp. 1-23
- [15] Dean Rickles (2011). A philosopher looks at string dualities. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Volume 42, Issue 1, February 2011, Pages 54-67
- [16] John Worral (1989). *Structural realism*. *Dialectica* 43, pp99-124
- [17] Tian. Y. Cao (1997). *Conceptual Developments of 20th Century Field Theories* (Cambridge, Cambridge University Press) .
- [18] Tim Maudlin (1988). "The essence of space time" . *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* in 1988, Vol.2,A.Fine and J.Leplin, eds.(East Lansing,Michigan.1988), pp.82-91
- [19] Tim Maudlin (1990). Substances and space-time: What Aristotle would have said to Einstein. *Stud. Hist. Phil. Sci.* 21, pp.531- 561 .
- [20] 藤田翔 (2016) 一般相対性理論における時空論の実体説と関係説、そして構造実在論への展開. 大阪大学大学院人間科学研究科 「年報人間科学」 第37巻 pp.123-141
- [21] Carl Hoefer (1996). The Metaphysics of Space-Time Substantivalism. *The Journal of Philosophy*, Vol.93,No.1,pp.5-27.
- [22] Paul Teller (1991). Substance, Relations, and Arguments about the Nature of Space-Time.*The Philosophical Review* Vol. 100, No. 3(July 1991), pp. 363-397

- [23] Mauro Dorato (2000). Substantivalism, Relationism, and Structural Spacetime Realism. *Foundations of Physics*.30,1605-1628 Plenum Publishing Corporation.
- [24] Steven Weinberg (1984). *COSMOLOGY* OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- [25] 松原隆彦 (2010) 現代宇宙論—時空と物質の共進化. 東京大学出版会.
- [26] 藤田翔 (2017) ビッグバン宇宙論における時空の構造実在論的解釈空間は膨張しているのか? 科学基礎論研究 Journal of the Japan Association for PHILOSOPHY OF SCIENCE 2017 年第 44 卷 第 1・2 号 pp.1-14 (2017)
- [27] Sho Fujita (2018). Contemporary Physics and Philosophy Approaching the Beginning of Spacetime philosophy of physics revealing the ultimate question. proceeding of Contributed Paper of 24th World Conference Philosophy
- [28] Christian Wüthrich (2018) The emergence of space and time, Sophie Gibb, Robin Finlay Hendry and Tom Lancaster (eds.), Routledge Handbook of Emergence
- [29] Verelst, Karin (2006). Zeno's paradoxes. A cardinal problem. 1. on Zenonian plurality. In J. Škilters (ed.), *Paradox: Logical, Cognitive and Communicative Aspects. Proceedings of the First International Symposium of Cognition, Logic and Communication*., University of Latvia Press
- [30] Clarke Samuel, Gottfried Wilhelm Leibniz, Freiherr von and Isaac Newton and H G Alexander (1956). *The Leibniz-Clarke Correspondence: Together with Extracts From Newton's Principia and Opticks*. Barnes & Noble.
- [31] Howard Stein (2002). Newton 's metaphysics in *The Cambridge Companion to Newton*, Cambridge University Press.
- [32] Edward Slowik (2009). Newton's Metaphysics of Space: A "Tertium Quid" betwixt Substantivalism and Relationism, or Merely a "God of the (Rational Mechanical) Gaps" ?. *Perspectives on Science* Volume 17, Issue 4, pages 429-456
- [33] John Earman (1979). "Was Leibniz a Relationist?" *Midwest Studies Philosophy* Volume 4, Issue 1, p.263-276
- [34] Robert Geroch (1978). *General Relativity from A to B*. University of Chicago Press.

- [35] Issac Newton (1687). *The Principia : mathematical principles of natural philosophy* a new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, assisted by Julia Budenz. University of California Press (1999)
- [36] 河辺六男訳『世界の名著・ニュートン』中央公論社 (1971)
- [37] Gottfried Wilhelm Leibniz (1714). *The Monadology* Neuro Quantology September 2006 Vol.4 Issue 3 pp.282-290
- [38] Gottfried Wilhelm Leibniz (1686). Discourse on Metaphysics, Philosophical Papers and Letters pp 303-330
- [39] Robert Rynasiewicz (1995). “ By their Properties,Causes,and Effects:Newton’s Scholium on Time,Space,Place,and motion-1.The Text,” Studies in History and Philosophy of Science,26:133-153
- [40] Ernst Mach (1883). *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*, translated by Thomas J. McCormack (1893). Open Court Publishing Company; 6 edition December 19, 1988
- [41] Julian.B.Barbour (1982). “ Relational Concepts of Space and Time,” British Journal for the Philosophy of Science,33:pp.251-274
- [42] Julian.B.Barbour (2001). “ *The End of Time:The Next Revolution in Physics*”, Oxford University Press
- [43] Robert S. Shankland (1964). THE MICHELSON-MORLEY EXPERIMENT. Scientific American Vol. 211, No. 5 (November 1964), pp. 107-115
- [44] Immanuel Kant (1787).modified from original ver (1781) *Critique of pure reason*, translated and edited by Paul Guyer Allen W. Wood (1998). Cambridge University Press
- [45] Howard. Stein (1967) Newtonian spacetime, Texas Quarterly10, pp.174-200.
- [46] Henri Poincaré (1905) original ver (1902) *Science and hypothesis*,translated by William John Greenstreet, Toronto University Press (Page references to the Dover reprint of the first English translation of 1905).
- [47] Albert Einstein (1916). Ernst Mach Physikalische Zeitschrift, vol 17, pp.101-104

- [48] Albert Einstein (1921). A Brief Outline of the Development of the Theory of Relativity, Nature volume 106, pp. 782-784 (17 February 1921)
- [49] Albert Einstein (1922). How I created the theory of relativity, a speech at Kyoto University on 14 December 1922 translated by Yoshimasa A. Ono (1982) Physics Today: Vol 35, No 8
- [50] Albert Einstein (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), pp.844-847
- [51] Albert Einstein (1914). Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), pp.1030-1085
- [52] 内井惣七『アインシュタインの思考をたどる一時空の哲学入門』ミネルヴァ書房 (2004)
- [53] 内井惣七『空間の謎・時間の謎—宇宙の始まりに迫る物理学と哲学』中公新書 (2006)
- [54] Erich Kretschmann (1917). Über den physikalischen Sinn der Relativitätspostulate. A. Einsteins neue und seine ursprüngliche Relativitätstheorie. Annalen der Physik 53: 575-614
- [55] Albert Einstein (1917). *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte pp.142-152.
- [56] Karl Schwarzschild (1916). “ *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie* ”. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* 7:189-196
- [57] Willem de Sitter (1917) *On Einstein's Theory of Gravitation and its Astronomical Consequences. Third Paper, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 78, Issue 1, 9 November 1917, pp.3-28,*
- [58] Willem de Sitter (1918). *On the curvature of space, Huygens Institute- Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences(KNAW), Proceedings, 20 I, Amsterdam, pp. 229-243*
- [59] Willem de Sitter (1918), *Further remarks on the solutions of the field-equations of the Einstein's theory of gravitation, Huygens Institute- Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences(KNAW), Proceedings, 20 II, Amsterdam, pp. 1309-1312*

- [60] Schulmann et al(1998) *The Einstein-De Sitter-Weyl- Klein Debate,*” *The Collected Papers of Albert Einstein*, covering correspondence during period 1914-1918, vol.8 , pp.351-357
- [61] Albert Einstein (1918) “ *Kritisches zu einer von Hrnn. de Sitter gegebenen Lösung der Gravitationsglei- chungen.*” *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften(Berlin).* *Sitzungsberichte:*270-272
- [62] Edwin Hubble (1929). *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, *National Academy of Sciences* vol. 15 no. 3, 168-173
- [63] Albert Einstein (1925). *Unified Field Theory of Gravitation and Electricity*, translation by A. Unzicker and T. Case, *Session Report of the Prussian Academy of Sciences*, pp. 414-419
- [64] John Earman and John Norton, “ *What price substantivalism:The hole story,*” *British Journal for the Philosophy of Science*,38,515-525(1987)
- [65] John Norton (1987) ‘*Einstein, the Hole Argument and the Reality of Space*’, in J. Forge (ed), *Measurement, Realism and Objectivity*. Reidel
- [66] Robert Rynasiewicz (1996). *Absolute versus relational space-time: An outmoded debate?* *J. Phil.* 43(1) pp.279-306
- [67] Issac Newton (1962). *Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton*, A. Rupert Hall and Marie Boas Hall (eds.). Cambridge: Cambridge University Press
- [68] Issac Newton (1966) , *Principia* . Berkeley: University of California Press
- [69] Hermann Weyl (1918). *Raum, Zeit, Materie* (Berlin, Springer,).
- [70] Hermann Weyl (1918) “*Gravitation und Elektrizität,*” *Preußische Akad. Wiss. Sitzungber.*, 465-478.
- [71] Arthur Eddington (1921) “*A generalization of Weyl’s theory of the electromagnetic and the gravitational fields,*” *Proc. Roy. Soc. A* 99, 104-122.
- [72] RenéDescartes (1644), *Principia Philosophiae*, transl. by B. Reynolds, *Principles of Philosophy*, E. Mellen Press, Lewiston, NY (1988).
- [73] Baruch De Spinoza. (1662-1675), *Ethica More Geometrico Demonstrata*, <http://www.filosofico.net/ethi1caspinozaa.htm>
- [74] アリストテレス著 出隆訳 形而上学〈上〉岩波文庫. (1959)

- [75] Robert Adams, “Primitive Thisness and Primitive Identity” (January 1979)p5-26
- [76] Carl Hoefer, “Absolute versus relational space-time:for better or for worse,the debate goes on” *British Journal for the Philosophy of Science*,49(3),451-469(1998)
- [77] Jeremy Buttereld (1984). “Relationism and Possible Worlds1” *British Journal Philosophy Science* (1984) 35 (2):p101-113
- [78] Dennis Dieks, “Space-time relationism in Newtonian and relativistic physics” *International Studies in the Philosophy of Science Volume 15, Issue 1, (2001)p.5-17*
- [79] Mauro Dorato, “Is Structural Spacetime Realism Relationism in Disguise?The Supererogatory Nature of the Substantivalism/Relationism Debate” *Philosophy and Foundations of Physics Volume4,17-37(2008)*
- [80] Merrilee H.Salmon,John Earman and Clark Glymour et al,“Introduction to the Philosophy of Science” *Prentice-Hall(1992)*
- [81] Theodore Sider, “FOUR-DIMENSIONALISM:An Ontology of Persistence and Time” *Oxford University Press (2001)*
- [82] 戸田山和久 (2015) 科学的实在論を擁護する. 名古屋大学出版社.
- [83] Hendrik Lorentz (1895). *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern translation:Attempt at a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies, (Evert Jan) Brill Leiden*
- [84] Newman, M. H. A. (1928) Mr. Russell’s “Causal Theory of Perception” . *Mind Vol. 37, No. 146 (Apr., 1928), pp. 137-148*
- [85] James Ladyman (1998) *What is Structural Realism?. Studies In History and Philosophy of Science Part A, Vol. 29, No. 3. (September 1998), pp. 409-424.*
- [86] Steven French (1998) *On the withering away of physical objects Princeton University Press pp.93-113*
- [87] Steven French (1999) *Models and mathematics in physics: The role of group theory Cambridge University Press pp.187-207*
- [88] Steven French and James Ladyman (2003) *Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure. Synthese Volume 136, Issue 1, pp 31-56*

- [89] Luciano Floridi (2008) *A defence of informational structural realism Synthese* March 2008, Volume 161, Issue 2, pp 219-253
- [90] Anjan Chakravartty (2003) *The Structuralist Conception of Objects Philosophy of Science* 70, pp.867-78
- [91] Stathis Psillos (2006) *The Structure, the Whole Structure and Nothing But the Structure? Philosophy of Science* 73, pp.560-70
- [92] Michael Esfeld and Vincent Lam (2006) *Moderate structural realism about space-time. Springer Science+Business Media B.V.*
- [93] Albert Einstein, Leopold Infeld and Beate Hoffmann (1938) *The Gravitational Equations and the Problem of Motion Annals of Mathematics Second Series*, Vol. 39, No. 1 (Jan., 1938), pp. 65-100
- [94] Andrei Sakharov (1991) *Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation American Institute of Physics · Soviet Physics Uspekhi*, Volume 34, Number 5
- [95] Robert Adams (1979) *Primitive Thisness and Primitive Identity The Journal of Philosophy* Vol. 76, No. 1 (January, 1979), pp. 5-26
- [96] Larry Laudan. (1981) *Confutation of Convergent Realism in Leplin,J(ed.) Scientific Realism, Berkeley and Los Angeles: University of California Press.*218-249
- [97] Chakravartty, A (2007) *A Metaphysics for Scientific Realism: Knowing the Unobservable, Cambridge University Press*
- [98] 野内玲 (2009) 「存在的構造實在論の妥当性」『科学基礎論研究』 37-1, pp.9-18
- [99] Robert DiSalle (1995) *Spacetime theory as physical geometry, Erkenntnis* Vol. 42, No. 3, pp. 317-337
- [100] Armstrong. D, *Universals and Scientific Realism (Cambridge, Cambridge University Press,1989).*
- [101] Sklar. L, *Space, Time. and Spacetime Berkeley: University of California Press. (1977)*
- [102] Beller. M "The Rhetoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit" *Philosophy of Science*, Vol. 63, No. 2 (Jun., 1996), pp. 183-204

- [103] Feynman, R. P., R. B. Leighton, and M. Sands (1969), *The Feynman Lectures on Physics*. Reading, MA: Addison Wesley.
- [104] Howard. D, *Who Invented the “Copenhagen Interpretation” ? A Study in Mythology Philosophy of Science*, Vol. 71, No. 5, (2004)
- [105] Brans, C., Dicke, R.H, *Mach’s Principle and a Relativistic Theory of Gravitation*. *Phys. Rev.* 124, 925 (1961)
- [106] F. P. Silva and K. Koyama, *Self-accelerating universe in Galileon cosmology*. *Phys. Rev. D* 80, 121301 (2009)
- [107] Smolin. L “Linking shape dynamics and loop quantum gravity” *Phys. Rev. D* 90, 044070
Published 29 August 2014
- [108] エリ・デ・ランダウ, イェ・エム・リフシッツ (恒藤敏彦, 広重徹訳) (1978) 場の古典論. 東京図書株式会社.
- [109] George Gamov (1948) *The Origin of Elements and the Separation of Galaxies*. reprinted in Bernstein and Feinberg, pp.114-116.
- [110] Arno A Penzias and Robert W Wilson (1965) *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s*. reprinted in Bernstein and Feinberg (1986), pp.141-143
- [111] Alan H Guth (1981) *A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems*. reprinted in Bernstein and Feinberg (1986), pp.299-320.
- [112] Adam G Riess and Alexei V Filippenko, Peter Challis et al. (1998) *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*. *The Astronomical Journal*, Volume 116, Number 3
- [113] Daniele Oriti (2009) *Approaches to quantum gravity: Toward a new understanding of space, time, and matter*. Cambridge University Press.
- [114] Katsuhiko Sato (1981) *First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe*. *The Royal Astronomical Society*. Provided by the NASA Astrophysics Data System
- [115] 佐藤勝彦・二間瀬敏史. (2007) 現代の天文学シリーズ 2 宇宙論 1 一宇宙のはじまり. 日本評論社.

- [116] Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*, Cambridge University Press.
- [117] Kiefer, C. (2007). *Quantum Gravity second edition*, Oxford University Press.
- [118] Holst, S. (1996). Barbero's Hamiltonian derived from a generalized Hilbert-Palatini action. *Phys.Rev. D* 53, 5966-5969, gr-qc/9511026.
- [119] Barbero, F. (1995). Real Ashtekar variables for Lorentzian signature space time. *Phys.Rev. D* 51 5498-5506, gr-qc/9606089.
- [120] Immirzi, G. (1997). Real and complex connections for canonical Gravity. *Class. Quantum. Grav.* 14 L177-L181, gr-qc/9612030.
- [121] Ashtekar, A and Lewandowski, J. (1997). Quantum theory of geometry I: Area operators. *Class.Quantum.Grav.* 14, A55-82, gr-qc/9602046.
- [122] Ashtekar, A and Lewandowski, J. (1997) Quantum theory of geometry II.: Volume operators. *Adv. Theor. Math. Phys.* 1, 388-429, gr-qc/9711031.
- [123] Thiemann, T. (1998). Closed formula for the matrix elements of the volume operator in canonical quantum gravity. *J. Math. Phys.* 39, 3347-71, gr-qc/9606091.
- [124] 倉田剛 現代存在論講義 II. 新曜社. (2017)
- [125] Jeremy Butterfield. (2011) *Emergence, reduction and supervenience: A varied landscape. Foundations of Physics*, Volume 41, Issue 6, pp.920-959,
- [126] Nick Huggett and Christian Wüthrich. (2013) *Emergent spacetime and empirical (in)coherence. Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, Volume 44, pp.276-285,
- [127] Karen Crowther. (2017) *Inter-theory Relations in Quantum Gravity: Correspondence, Reduction, and Emergence, Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*
- [128] Sundance Bilson-Thompson, Jonathan Hackett, Louis Kauffman, Yidun Wan. (2012) *Emergent Braided Matter of Quantum Geometry, SIGMA* 8 pp.14-43