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？

藤 田 翔*

An Interpretation on Structural Realism to Spacetime Used in Big-Bang Cosmology

Is Space Really Expanding?

Sho FUJITA*

Abstract

This paper discusses a philosophical answer about the question “in relativistic cosmology, is space really expanding?” In general cosmology which is called a big-bang theory, cosmological space is said to have been expanding like a balloon gradually pumped up since a big-bang, which is shown by a co-moving coordinate of which the scale gets bigger as a proper time of observers in the earth passes. In this paper, I would like to interpret this phenomenon from a structural spacetime realism’s viewpoint in which spacetime is real as different whole structures for different coordinates you arbitrarily choose depending only on a metric/gravitational field. Through my remark, I get a new conclusion of what spacetime really means, thus the role of spacetime in contemporary physics.

1. はじめに

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 100 年近い歳月が流れている。一般相対性理論を元に構築された、現代の標準理論とされている相対論的宇宙論、すなわちビッグバン宇宙論（膨張宇宙論）では次の現象を認めている：

- 宇宙空間は膨張している。

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スケール因子の加速増加のことに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。空間の膨張の速度とは、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元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、物体とは別にある種の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？ 哲学的な観点で空間は実体を持っているのだろうか？ この論文では時空間の本質をテーマとして、現代の時空論の哲学的解釈を物理現象と対応させて論じることを目的としている。

近年の時空の哲学では相対性理論を元に、時空は存在する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

* 大阪大学大学院人間科学研究科
E-mail:fujita@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

という関係説 (relationism) を発展させた時空構造実在論 (structural spacetime realism) が提唱された¹⁾。一般相対性理論は、計量によって関係性が示される「時空構造」と、モノや場が持つエネルギーとの相互作用を記述している。こういった時空構造は我々が直接観測できる類の対象ではなく、光の彎曲や水星の近日点移動といった、物体の観測を通して間接的に証明されている理論の対象である。時空構造実在論とは、計量によるそれらの時空構造自体は重力場として実在しているという立場であり、時空に関して計量が本質的な意味を持つ一般相対性理論にとっては妥当な哲学のように思える。

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う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な対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。この新たな視点とは、時空とは何かという哲学的な問いかけの中で、物理学において既に理論の基礎が固まっている古典的な相対性理論と現在研究中の量子重力理論との掛け橋になると私は考えている。

この論文ではまず2章で構造実在論を、時空に用いた時空構造実在論の主張と共に簡単にまとめ、宇宙論へ応用するための足掛かりとする。3章では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。今日の物理学ではあたかもその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実在論の枠組みで捉え直すとうどん詰まりの問題に当たるかということ考察したい。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。4章では、量子力学や量子重力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て、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ことを最後に示す。

2. 時空に関する構造実在論

この章では古典的な一般相対性理論が構築する時空の実在性について、既に議論されている既存の立場に基づいて私自身が支持する解釈を示す。時空は実在するのかどうかというトピックに関しては、実体説 (substantivalism) と関係説 (relationism) の対立があったが、時空は「物質性と従来の時空的性質」の二面性を備えているという新たな観点に基づいた構造実在論の考え方に倣いたい¹⁾。この章では、まず科学理論における構造実在論という考え方を簡単に振り返り、続いて時空に関する構造実在論の考え方を整理しておく。

2.1 構造実在論とは何か？ 時空の実在性の議論への流れ

構造実在論とは、

- 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。

¹⁾ 時空の哲学の流れとしては、実体説も関係説も議論の先に1つの方向性として、お互い似たような結論には至っているが^{2,3)}、その立場が改めて定式化されたのは時空構造実在論¹⁾としてである。以上の時空論の変遷に関しては、詳しくは私が自身でまとめた紀要論文⁴⁾を参照頂きたい。

と考える立場である²。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実在論的態度を取ろうとするのに対して、構造実在論は前者を放棄する立場でもある。この実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いて示された際のことである。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、アンリ・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(Worral (1989) p. 120)⁴。これらは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・レディマンとステイーブン・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、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、「構造を原初的に存在論的に固有のものとして見なす」(Ladyman (1998)⁹ 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(French and Ladyman¹²) p. 46)。

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、直接は目で捉えることが出来ない素粒子といった理論の対象とも互換性を持つ。例えば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」¹⁶)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」¹⁷)がある。こういった背景の中で、一般的な場というものの

² 戸田山和久 (2015)⁵) p. 194 より抜粋

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... Poincaré (1905) pp. 160–260.

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⁷。

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⁸)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 Ladyman (1998)⁹), French (1998)¹⁰), (1999)¹¹), French and Ladyman (2003)¹²)等

⁷ French and Ladyman (2003)¹²) p. 36

⁸ モデル(意味論的扱い)と世界の対応関係(Florida 2007¹³)や、因果性の観点からの批判(Chakravartty 2003¹⁴), Psillos 2006¹⁵)など

実在性を構造実在論の立場で考えるのは興味深いが、この論文では一般的な物質（重力源）は取り敢えずモノ（matter）と一旦は認めた上で、その量子的な構造には触れないで置く。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・ドラート氏の構造実在論の概念を用いて論じる⁹。

2.2 一般相対性理論における構造実在論

マウロ・ドラート氏の時空に応用した構造実在論の考え方を述べる。一般相対性理論によれば、時空は4次元座標¹⁰の中でモノと相互作用する。それを表すアインシュタイン方程式が重力定数 G を含めて以下のよう

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

ここで言うモノとは、1式の右辺で表わされる重力源すなわちエネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ のことを指している。そして左辺に表わされているのが時空であり、表記されているリッチテンソル $R_{\mu\nu}$ とリッチスカラー R は次式で表わされる

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

が示す計量（metric field）：時空構造より与えられるものである¹¹。時空構造実在論とは、時空は単なるモノ（matter）の背景や容れ物ではなく重力場のエネルギー媒体として物質的に存在し、その重力場を決める構造すなわち計量こそがその正体であるとする立場である。計量が定まれば重力場が表わされるので、時空構造実在論においては時空は計量であり重力場そのものだと解釈される。時空構造において、その構成要素（対象）となる各時空点を他の点と異ならせている、あるいは区別するためのアイデンティティー（identity）はあるだろうか？ この場合、そもそも各時空点は対象としては実在しないという関係說的、あるいは存在的構造実

在論的主張もあり得るが¹²、ドラートの時空構造実在論では、各時空点は計量によって与えられる周りの構造の中でのみ初めてアイデンティティーが与えられるとしている（Dorato 2000¹³ p.1610）。すなわち、時空点はそれだけで独立に存在しているというわけではなく、あくまで全体の時空構造の中のどこかの位置として実在している。それらの時空構造を直接観測することは出来ないが、単なる数学的な表現形式に留まらずに、物体の運動の測地線として間接的に物理的な世界の中に表わされるという意味において、「真に実在している」（Dorato¹⁴ p.1615）。これは、時空（時空点の集まり）が一種の実体（substance）としてモノとは独立に存在しているという実体説（substantialism）と、時空はモノ同士の関係を表す性質に過ぎないとし、時空構造を道具主義的に解釈する関係説（relationism）を半ば調停するアイデアとしても受け入れることができる。計量によって与えられるのは、微分方程式で与えられる局所的な幾何構造であるが、それらを繋いでいくことで全体の構造（一意に決まる場合は位相空間）を特定することもできる。時空点のアイデンティティーが全体の構造によって定まるということは、逆を言えばその構造を及ぼしているもの、すなわち重力場が無ければその時空点のアイデンティティーは存在し得ないことになる¹⁵。相対性理論では観測者の選ぶ座標系によって計量は異なっている。つまり時空構造の各形式は座標系に依存している。時空構造を表わす各形式が示す数学的モデルは無限に存在することになる¹⁴。これは時空点は時空構造を伴って初めて意味をなすということで、数学的には座標変換（diffeomorphism）すれば多様体上では点は別の点へと変わるが、その時

⁹ 結論から言えば、私の支持するドラート氏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

¹⁰ 4次元に限った話ではなく、4次元から高次元に拡張する場合もあり得る。

¹¹ μ, ν は 0 から 3 の数字で、デカルト座標系なら $x^0 = t, x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z$ となる。例えば重力場の全く効かないミンコフスキー時空なら、 $g_{00} = 1, g_{11} = g_{22} = g_{33} = -1$, それ以外は $g_{ij} = 0$ となる。

¹² 各時空点を対象として考えるならば、その実在を巡って実体說的な立場は認識的構造実在論的観点へ、そして関係說的な立場は存在的構造実在論的観点を備えていると解釈出来る。詳しくは Dorato (2008)¹⁸⁾

¹³ 相対性理論によれば、重力場が存在しない真空の状態であっても例えば時空は平坦なミンコフスキー時空構造として扱われるが、その場合あらゆる時空点は無限に広がる全体の構造において同じアイデンティティーを持つことになり、各々の時空点は見分けがつかなくなる。他の対称性のある時空構造に関しても同様である。つまり各々の時空点のそれに固有なアイデンティティーは、重力場ひいてはそれを生み出すモノによって半ば生まれているとも言える。

¹⁴ その点における重力場は、エネルギー運動量テンソル $T_{\mu\nu}$ とは異なって、座標系の取り方によってはゼロにすることも値を持たせることもできる疑似テンソル $t_{\mu\nu}$ として表わされる。

空点は新たな時空構造の中で再び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見解で、時空点そのものは単独で存在していない (Dorato (2000) p. 1610¹¹)。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性質を見事に満たしているの、実体説と関係説に代る妥当な時空論だと言える。これが私が時空構造実在論を支持する理由である。

時空構造実在論の立場では、時空点はあくまで全体の構造の一部でありそれ以上の情報によるアイデンティティーを持たないことから、認識的とも存在的とも異なった穏和な (moderate) 構造実在論として解釈できる¹⁵。すなわちこの立場では、時空の本性は構造を抜きにして表現される点の集合体を表す多様体 (manifold) には先行しないことを意味する。このことを表わすわかりやすい例を図 1 に示そう。これは時空の各点が、構造とは別に単独ではその存在は意味を持たないことを暗示している。すなわち各点が自身の中に内在する性質としての個体原理 (primitive identity)¹⁶を欠いており、構造 (structure) による関係 (relation) のみが時空点の唯一のアイデンティティーという意味である。要するに多様体 (座標上) の点としては別々の時空点であっても初期条件を含めた周りの時空構造が仮想的にもし全く同じなら、概念図 1 に示したように無限に離れた部屋 A と部屋 B の 2 点は見分けが付かないという意味で、構造による等しいアイデンティティーが与えられ結果的に同一の時空上の点であると言えるのである。

時空構造実在論から導かれる帰結としてもう 1 つ、今度は後の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ーが異なる点のことである。4 次元計量 2 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¹⁷で、3 次元空間を取り出して見た場

一般相対性理論における時空の概念図

場所の異なる点が、同じアイデンティティー!

図 1 多様体上では異なっても同一のアイデンティティー：世界に同じ大きさの部屋 A と部屋 B だけを、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。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ように配置し、さらに 2 つの部屋の重力場を全く同じように設定する。位置関係が等しい空間上の点同士、例えば矢印を付けた 2 点は空間座標上別々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。

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ーを与えられる。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ーは時刻 t_1 におけるアイデンティティーとは異なっている。時空構造のみで与えられるアイデンティティーが異なっている以上、構造実在論的観点で言えば 2 点は時間と共に同じ空間座標値を持つとは言え、もはや同一の空間上の点とは言えないだろう¹⁸。図 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構造実在論には無い。

320]。

¹⁸ 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ーを持つことになる。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) は区別が付かず同一のアイデンティティーを持つと言える。

¹⁵ これはドラート本人ではなく時空に構造実在論を応用した解釈として、ミカエル・エスフェルドとヴィンセント・ラムによって提唱された見解である¹⁹。

¹⁶ 構造や他の存在に依存しないという意味で、個体原理という言葉を用いている²⁰。

¹⁷ 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²¹ [pp. 319–

一般相対論における時空の概念図2

同じ空間的座標で異なるアイデンティティ！

図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。

以上より時空構造実在論の立場を取れば、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、逆に空間上のある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。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。

2.3 宇宙論への準備

前節までに論じた時空構造実在論の要点を次のようにまとめておく。

1. 時空の本質は点の集合体、すなわち多様体 (manifold) ではなく計量 (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実在はモノの運動等を通して間接的に確かめられる。
3. 各時空点に固有のアイデンティティ (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個体原理 (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を持ち得る。

ということである。次章ではこの時空構造実在論の解釈を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²²⁾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ために、時空の実在への相対性理論の既存の哲学的解釈を応用するという試みが本論文の主旨であり、以降の取り組みが私のオリジナルな考察となる。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的帰結で述べた、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）等によって実証されているが、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「空間の時間的変化」に焦点を絞りたいと思う。

3. 相対論的宇宙論への応用

この章では、時空構造実在論の立場で標準理論とされるビッグバン宇宙論を前節までの要点を元に私独自の方法で解釈する。ビッグバン宇宙論とは、初期宇宙はインフレーションによってミクロなサイズから急激にマクロなサイズへと膨張し現在も加速膨張を続けているという理論であるが、この「宇宙が膨張している」という現象を時空構造実在論で解釈した際に、果たして宇宙空間そのものが膨張していると言えるのかということを考察する。

3.1 共動座標系とスケール因子

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

(Einstein (1917)²³⁾).

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²³⁾。
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²⁴⁾、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 (Gamov (1948)²⁵⁾。
4. 宇宙マイクロ波背景放射の観測によって、ビッグバン理論が予言する元素比が示され理論の正しさが認められた (Penzias and Wilson (1965)²⁶⁾。
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 (Guth (1981)²⁷⁾。

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、宇宙は一樣かつ等方である。」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¹⁹⁾。ロバートソン・ウォーカーモデル (導出は、Weinberg (1984) pp. 2-4²²⁾ 参照) に従うと、一樣等方宇宙を表す計量は次のように与えられる：

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]. \quad (3)$$

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) を用いて表わすことが可能となる。

¹⁹⁾ 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、実際は決して一樣ではない。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、近似的に便宜上一樣等方な宇宙モデルを考えている。

ビッグバン宇宙の膨張プロセス

地球からの距離が遠ければ、大きな速度で遠ざかる = 離れているマークほど、お互い速く遠ざかる：ハッブルの法則

図 3 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。

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²⁰⁾。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 3 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²¹⁾。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理論の流れであり、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。

²⁰⁾ 計量を見てもわかるように、この一樣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ーを持っている。

²¹⁾ 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²⁴⁾。

3.2 共動座標系は空間？ 物理的対象と数学的対象の境界

図3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²²。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3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²²⁾ [p. 2]。つま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²³。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、3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と描くことができる。

ではこの現象を時空構造実在論の立場で考えた時に、どのように解釈できるかということを考える。前章に述べた時空構造実在論の主張の要点を再度列記しておく：

1. 時空の本質は点の集合体、すなわち多様体 (manifold) ではなく計量 (metric) であり重力場によって

²² 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²²⁾ [pp. 34–37]。

²³ それゆえに、共動座標系と呼ばれているのである。

時間と共に動く目盛り

時刻 t_1 におけるスケール因子 $a(t)$ 時刻 t_2 におけるスケール因子 $a(t)$
 $X1$ も $X2$ も同じ、星Aが占めているという意味では同じ場所であるが、空間的には別々の点であり、共動座標値 (r_c, θ_c, ϕ_c) がたまたま等しいに過ぎない。

図4 共動座標系の座標値：時刻 t_1 における空間点 $X1: a(t_1)(r_c, \theta_c, \phi_c)$ と、時刻 t_2 における空間点 $X2: a(t_2)(r_c, \theta_c, \phi_c)$ 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。

表わされる任意の座標系における時空構造にある。

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実在はモノの運動等を通して間接的に確かめられる。
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個体原理 (primitive identity) を備えてはいない。

時空構造実在論に従う限り、3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4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、3式の時空計量を表すと、

$$ds^2 = (c^2 - H^2(t)r'^2)dt^2 + 2H(t)dt dr' - \frac{dr'^2}{1 - \frac{Kr'^2}{a^2(t)}} - r'^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (4)$$

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²⁴。元々共動座標系の固有時間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4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。4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²⁵。この静止座標系での時空構造の様子を表したのが図5であるが、静止座標系で考え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

時間と共に動かない目盛り

$a(t)$ の増加に伴って、空間は平坦な構造に近付いていく。

図5 静止座標系における時空構造：4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。

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、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4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4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か静止座標系で見るかによって、時空構造は異なった形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：

²⁴ 詳しくは²¹⁾ [p. 264] 参照

²⁵ 3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²⁸⁾ [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。

- 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。

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、3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²⁶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、地球を含む天の川銀河以外の全ての銀河が外側に向かって遠ざかっていき、天の川銀河から離れればそれだけ速度が大きくなるという現象は、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等方に反してしまうのである。

つまり時空構造实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、時空構造实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4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²⁷。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（空間という比喩）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。

4. 新たな時空論へ

今まではモノや場と分けて時空の实在性を論じてきたが、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？ これは時空構造实在論への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。この章ではこの問い掛けに関して考察し、古典的相対性理論が破綻するミクロな量子世界のスケールでの物理学の新たな現代時空論への架け橋とする。

4.1 空間と物質の境界線

前章までで述べたような空間とは、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、純粹な真空（vacuum）のことであった。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实在論もこの真空に関する实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った。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

²⁶ 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。

²⁷ 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）²⁷⁾

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²⁹⁾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2.1の冒頭で宇宙論の科学史を大まかに紹介した際に、2でも述べたような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（次節で後述）宇宙項と呼ばれている、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²⁸⁾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がある。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。

4.2 宇宙の始まりに迫る物理学と時空

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1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。アインシュタイン方程式を積分定数を残した状態で表記し直すと、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (5)$$

となって、1式と比べて、 $\Lambda g_{\mu\nu}$ という項が加わっている²⁹⁾。これ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5式を

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G}g_{\mu\nu}) = 8\pi G \tilde{T}_{\mu\nu} \quad (6)$$

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 $\tilde{T}_{\mu\nu}$ 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。すなわち左辺はあくまで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³⁰⁾。従ってダークエネルギーの正体が何であれ、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。ミクロな系の宇宙を論じる物理学は量子重力理論であるが、一般相対性理論と量子力学の統合が未だ成されていない現状では定式化には至っていない。ループ量子重力理論、超弦論など、重力を扱ったミクロな系の物理学はいくつか存在するが、時空の在り方や解釈も様々である³¹⁾。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³²⁾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

²⁸⁾ 詳しくは、²⁸⁾ [pp. 168–170] 参照

²⁹⁾ この方程式も1式同様に数学的には許される解であるがゆえに、当初はこの方程式を元にアインシュタインによって定常宇宙モデルが考案されている²³⁾。

³⁰⁾ 6式のように、物質場を $\tilde{T}_{\mu\nu}$ 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。

³¹⁾ ループ量子重力理論では、時空にそれ以上分割出来ない最小単位が存在するとして時空そのものを分析しているが、超弦論では時空と重力を切り離して時空は背景そのものとしている^{30), 31)}

真空から生まれる古典的空間

図6 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描像を示す。

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単なる現象を記述するためだけの道具でしかないのかもしれない。しかしその可能性と同等に、共動座標系で表現される宇宙空間はやはり古典論独特のもので、量子論的な真空及び空間とは切り離れた上で、座標点そのものに固有のアイデンティティーがあり実体を持ち得る可能性もある。例えば図6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の実体 (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。

5. おわりに：まとめ

時空に関する構造実在論の立場¹⁾で、古典的相対性理論の範疇に基づいてビッグバン宇宙論を解釈した。ビッグバン宇宙論を単純に捉えれば、宇宙空間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。しかし相対性理論が示す一般共変性に基づいた時空構造

実在論では、特定の構造を優先する理由はなく観測者にとって自由に座標を張れる。どの座標系で見た時空構造も真に実在しているために、時間と共に大きくなり銀河と共に動いていく共動座標系を空間そのものだと帰結するには至らないことを述べた。

しかし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」という存在だと考えれば、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く。空間という媒体を用いることによって、観測結果も理論も整合的に受け入れることができるのである。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ーを備えている可能性、すなわち新たな実体説 (substantivalism) を誕生させる可能性も残している。

古典的宇宙論ではこれ以上のことは何も言えないが、この共動座標的空間の存在を主張する根拠もある。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すれば、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、宇宙論という分野はそれだけ理論に自由度が多い³²⁾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。

4章でも述べたように、構造実在論が定義する古典的時空は純粋な意味でのからっぽの真空であるが、量子理論で扱われている真空はエネルギーを持っていることから空間と物質の区別は曖昧なままである。初期宇宙の誕生から現在までの膨張までの歴史は、ミクロな世界の時空がマクロな系の時空へと続いていく連続的なプロセスを確かに含んでいる。量子重力理論と相対論的宇宙論が、物理理論においてどう繋がってい

³²⁾ 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。

くかということは完全に今後の物理学の発展に頼るべき内容である。しかしもし時空とは何を指すのかということに対して、両理論で矛盾の無いように定義し直すことが出来るならば、宇宙の誕生から今までの歴史の統合的な理解に何かきっかけが得られるかもしれないのである。

時間や空間は物質と共に始まったのか？ それとも既に背景として絶対的に存在しているのか？ こういった問いは真空と空間、そして無との違いは何かということを変更して考える時に重要となる。その哲学的探求は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] Mauro Dorato (2000) *Substantivalism, Relationism, and Structural Spacetime Realism*. Foundations of Physics, 30, 1605–1628, Plenum Publishing Corporation.
- [2] Carl Hoefer (1996) *The Metaphysics of Space-Time Substantivalism*. The Journal of Philosophy, Vol.93, No.1, pp.5–27.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 戸田山和久 (2015) 科学的実在論を擁護する。名古屋大学出版社。
- [6] Jules-Henri Poincaré (1905) *Science and Hypothesis*. (Page references to the Dover reprint of the first English translation of 1905).
- [7] John Worral (1989) *Structural realism*. Dialectica, 43, pp.99–124
- [8] Newman, M. H. A. (1928) *Mr. Russell's "Causal Theory of Perception"*. Mind, Vol.37, No.146 (Apr. 1928), pp.137–148
- [9] 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.
- [10] Steven French (1998) *On the withering away of physical objects* Princeton University Press, pp.93–113.
- [11] Steven French (1999) *Models and mathematics in physics: The role of group theory* Cambridge University Press, pp.187–207.
- [12] Steven French and James Ladyman (2003) *Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure*. Synthese, Volume 136, Issue 1, pp.31–56.
- [13] Luciano Floridi (2008) *A defence of informational structural realism* Synthese March 2008, Volume 161, Issue 2, pp.219–253.
- [14] Anjan Chakravartty (2003) *The Structuralist Conception of Objects* Philosophy of Science, 70, pp.867–878.
- [15] Stathis Psillos (2006) *The Structure, the Whole Structure and Nothing But the Structure?* Philosophy of Science, 73, pp.560–570.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Mauro Dorato (2008) *Is Structural Spacetime Realism Relationism in Disguise? The Supererogatory Nature of the Substantivalism/Relationism Debate* Philosophy and Foundations of Physics, Volume 4, 17–37 (2008)
- [19] Michael Esfeld and Vincent Lam (2006) *Moderate structural realism about space-time*. Springer Science+Business Media B.V.
- [20] Robert Adams (1979) *Primitive Thisness and Primitive Identity* The Journal of Philosophy, Vol.76, No.1 (January 1979), pp.5–26.
- [21] 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。
- [22] Steven Weinberg (1984) *COSMOLOGY* OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- [23] Albert Einstein (1917) *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*. Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte, pp.142–152.
- [24] Edwin Hubble (1929) *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae* National Academy of Sciences Vol.15 No.3, pp.168–173.
- [25] George Gamov (1948) *The Origin of Elements and the Separation of Galaxies*. reprinted in Bernstein

- and Feinberg, pp.114–116.
- [26] 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.
- [27] Alan H Guth (1981) *A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems.* reprinted in Bernstein and Feinberg (1986), pp.299–320.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Jeremy Butterfield and Chris Isham (1999) *Space-time 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.
- [31] Daniele Oriti (2009) *Approaches to quantum gravity: Toward a new understanding of space, time, and matter.* Cambridge University Press.
- [32] 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.
- [33] 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—宇宙のはじまり. 日本評論社.
- (2015 年 11 月 2 日投稿、2016 年 2 月 25 日再投稿、2016 年 4 月 15 日掲載決定)