

計算のとらえどころのなさを どのようにとらえるか

三好博之

日本科学哲学会第 37 回大会ワークショップ予稿

1 はじめに

本発表では、計算について形式的なアプローチでとらえきれないところまで含めた哲学的考察を行おうとするときに現れる問題点とそれに対して提題者が採った方針や戦略について報告してみたい（計算の哲学は内容の確立した分野ではないので、現段階で総説的なものを述べるよりも、一つの立場を批判的に検討して頂く方が有効ではないかと考えている．以前の発表を聞かれた方にはある程度の重複をお許し願いたい）．

2 計算とは何か

現在既に（例えば 15 年以上前から）計算についての研究であるという評価が確立している研究分野としては以下のようなものが挙げられる：

- （狭い意味での）計算の理論
 - － 計算可能性，計算量の理論
帰納的関数論，チューリング計算可能性，オートマトン理論，抽象的計算量理論，等．
 - － プログラムの理論
表示の意味論，操作的意味論，公理の意味論，書き換え系，形式的仕様記述，等．
 - － アルゴリズムの設計と解析
数値計算，シミュレーション，オペレーションズリサーチ，線型計画法，コンピュータグラフィックス，等．
 - － 情報理論
情報量，符号理論，暗号理論，等（計算とどのように関わるかは要考察．物理学と同じような位置づけ？）

－（狭い意味での）計算の実現

半導体デバイス，入出力デバイス，アーキテクチャ，オペレーティングシステム，データベース，ネットワーク技術，通信技術，等．
（どこまでを計算と考えるかは要考察．送電技術まで計算か？）

これらを考察の対象とすることについてはおそらく異存がないであろう．しかし，現代においては計算らしきものが関わる領域はもっと広い．

- パーソナルコンピュータ，家電製品，ユビキタスコンピューティング，ヒューマンインタフェース（工学，人文，社会）
- 金融システム，制御システム，情報ネットワーク，システム管理，セキュリティ技術（工学，社会）
- 視覚化，データマイニング，バイオインフォマティクス，コンビナトリアルケミストリ（工学，理学，社会）
- 情報倫理，メディア論（人文，社会，工学）
- アート，パフォーマンス（人文，社会，工学）
- 知能ロボティクス，人工臓器，脳科学（人文，社会，理学，工学）
- 量子コンピューティング，分子コンピューティング（理学，工学）

このような計算らしきものが関わる領域すべてにうまく接続するような「計算」という概念は可能か．可能でないならどのように可能でないのか．

コンピュータ科学からの接近：本当の「計算」の理論があるとしたらどのようなものであるか．

研究指針としてとりあえず次のような基準をおく．

1. 実際に起こっている計算を扱う（現象としての計算）。「なぜ計算は進むのか」を問う（志向性，因果，物理学，情報）．
2. 自然科学あるいは形式的記述が可能なものに限定しない．計算に関わる人文社会科学の問題に向けて開かれていなければならない．形式的記述を使うということがどういうことかを改めて考える必要がある．
3. 人間と人間以外のものの区別を前提としない．心が計算であるための計算概念（反コネクショニズムとは限らない）（知性，意識）や，人工知能，人工生命，人工臓器，ロボティクス（脳科学，生命科学）といった分野との結びつきを視野に入れる．

すなわち我々がここで扱うものは「野生の計算(computation in the wild)」[10]である．

3 素朴な例

最も素朴な例から始めてみよう。我々が（狭い意味での）計算という言葉を使う場面には、例えば次のようなもの挙げられる：

1. 個数を数える，九九を唱える，暗算をする．
2. 筆算をする，そろばんや計算尺で計算する．
3. 電卓で計算する，コンピュータでプログラムを動かす．
4. 人に頼んで計算してもらう．

1 では計算するのは人である．2 では計算するのは人であるが道具である鉛筆，紙，そろばん，計算尺との協調作業である．それでは3では計算しているのは人か，電卓やコンピュータか，それとも両方か．さらに4では計算しているのは頼んだ人か，頼まれた人か．1と2，2と3，3と4との違いはそれぞれどこにあるか．

計算という現象が起こっている状況をどのように規定するかは容易ではない．

ここでいう規定とは適切な意味での記述によるものとする．これは学という営みであることによる前提である．以後しばらく記述を含めいくつかの語を定義せずに用いる（これについては6節で述べる）．

4 計算はどのように規定できないか

- 計算のトークンの記述不可能性
 - － いま起こっている「まさにこの」計算の実行（トークン）を完全に記述できるか．
 - － コンピュータが熱暴走するかもしれない．宇宙線でメモリ内容が狂うかもしれない．
 - － （計算を担うものとしての）コンピュータとは何を指しているのか．電源やネットワークの接続はどこで区切るべきか．人とコンピュータは切り離せるか．
 - － 対象にしる過程にしる，記述が理解されるものである以上，実行されている計算の完全な記述はありえない．
 - － 計算における「自己」の扱いを考えたときによりあらわになる．フレーム問題．
- 計算のタイプの記述不可能性

- 例えば、抽象的なチューリングマシンはその定義もその実行も何らかの（広義の）記号列により記述され、その記号列には必ず意味論が付随している（タイプ）。しかしその意味論の記述は再び記号列であり意味論を必要とする。形式的な意味論は本質的にすべてこのような無限後退に陥るが、通常は自明と思えるところでこれを打ち切っている。

プログラムの実行においてはこの両方が同時に問題となる。

形式的記述であるプログラムは何らかのメカニズム（CPU やメモリなどのハードウェア、あるいはインタプリタ（プログラムを読み取って実行するプログラム）、等）により実行されている。この場合、そのプログラムの意味論はそのメカニズムにより与えられる。しかし、

- そのメカニズムを完全に記述することはできない（言い換えれば、理解されるメカニズムはその存在そのものではなく、再び何らかの記述でしかあり得ない）。⇒ 記述から外れる部分の必然性。
- その（記述された）メカニズムもまた別のメカニズムで実装されている（計算の場合は等質な階層が考えやすいので、物理的な機器の動作に比べてこの側面が陽に現れる）。⇒ 無限の階層構造¹を扱う必要性。
- プログラム自身もまた別のメカニズムで実装されている（例えば半導体メモリ上、あるいはより高次なメカニズム上にある）。⇒ 動的であることを前提とする方が自然。
- 計算の進行がそのメカニズムそのものに変化を及ぼすことがあり得る。（リフレクション、自分の電源を切る、ロボットアームで自分を壊す、激しい書き換えでハードディスクを故障させる、等）。⇒ 階層構造は局所的であり動的に変化する。むしろそのつど局所的な境界を陽に扱うべき。

といった形で両方の不可能性が影響を及ぼす。もちろん通常の理工学では、適切なところで物理的あるいは論理的な記述の自明性に委ねられるため問題とはされない。しかし「なぜ計算が進むのか」といった問題を考えるときこれらは無視できない。

以下の 5, 6 節ではこのような状況に対応するために提題者が採ったアプローチを簡単に紹介する [7, 8]。そのポイントは、これらの不可能性を議論するときに暗黙においている仮定、つまり（記述された意味論を通じた理解によってもたらされるとされる）記述の普遍的な理解可能性という仮定を少し緩めるという点である。記述の理解の一部を治療的理解と呼ぶ別の形式の理解

¹例えば言えば抽象的ホムンクルス（人体の働きを担う微小人体群）の無限回入れ子構造のようなものである。

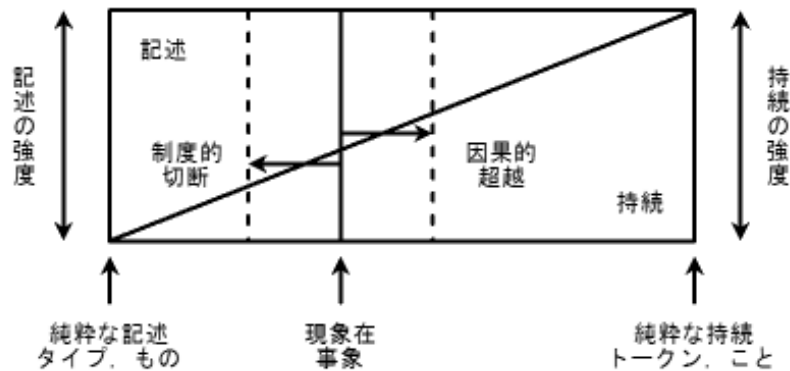


図 1: Hume-Bergson 形式における現象在 (HBF-1)

に置き換えることで、その代わりにいわゆる明証的理解をシステムティックに取り込むことを試みている。従ってこのような「計算の理論」は必然的に形而上学の領域に踏み込むことになる。

5 記述と持続

ここまでの考察から、何かが動作するためには記述のみでは閉じず動性をもたらす記述を超えた何かを必要とし（因果的超越）、その一方で何かが動作していることが認識されるためには少なくとも何らかの記述を必要とする（制度的切断）というとならえ方をするのはそれほど不自然ではない（cf. [3]）。

それに、このような動性を陽に扱うという発想は素朴ではあるが、計算システムの記述においてプロセスへの CPU の割り当てやスレッドといった形で比喩的にしる動性を対象化して導入する説明が行われているため直観的には受け入れやすい。

そこで、計算の動性をもたらす超越的概念を明示的に導入し、形式的記述でとらえきれない部分をそこに担わせるという戦略が考えられる。ここでは持続という概念を導入し²これに伴って記述と持続の両面を備えた存在様態（現象在）を考えることにする。このような枠組みで因果的超越と制度的切断を記述する図式が HBF-1 である（図 1）。

この枠組みにおいては例えば、インタプリタがプログラムを実行するという動作は（前述したようにプログラムもまた何らかの動作により存在していると考えれば）二つの現象在のインタラクションとしてとらえることになるが、このようなときに起こる因果的超越と制度的切断をより見やすい形で表した図式が HBF-2 である（図 2, 3）³。

²これは Bergson からの借用であるが、同じ概念という訳ではない。特に Bergson の純粹持続は我々の立場からは純粹とは言えない。

³因果的超越と制度的切断の遷移は記述された時間経過に対応するものではない。時間の計測は一つの制度的切断としてこの枠組みに組み込まれるはずのものだからである。

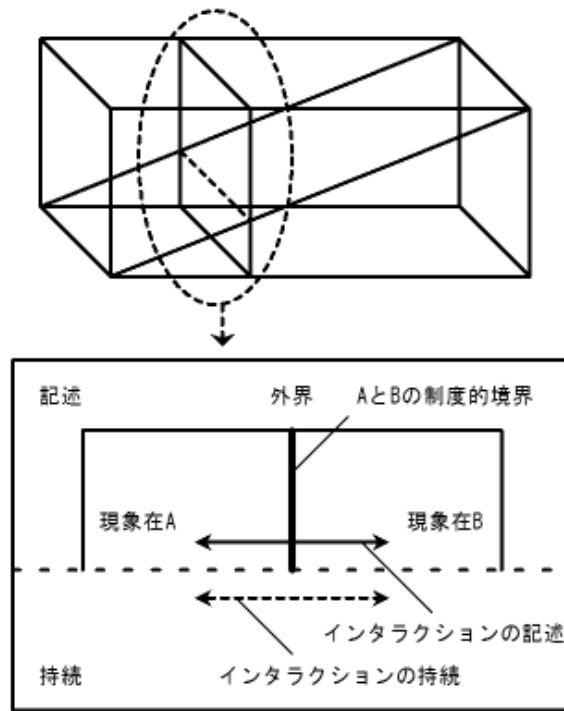


図 2: Hume-Bergson 形式におけるインタラクション (HBF-2)

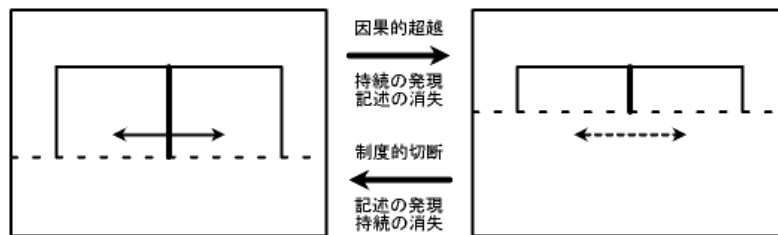


図 3: インタラクションにおける因果的超越と制度的切断

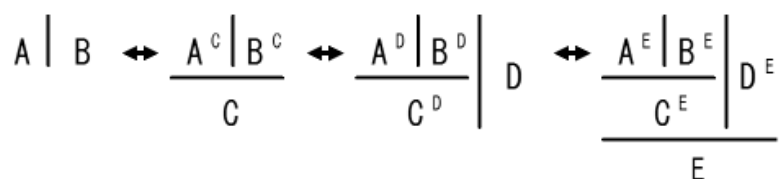


図 4: インタラクションによる記述の発現 (HBF-3)

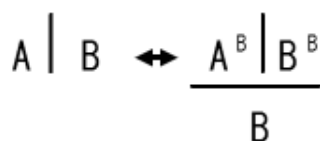


図 5: 自己参照の表現

そのときその実行によってまた一つの計算プロセスが生じてそれもまたインタプリタと同等なものである。すなわちこの枠組みにおいては現象在のインタラクションもまた現象在でなければならない。

また、現象在が記述を含む以上、インタラクトする二つの現象在 A,B はあらかじめ在るものではなく、あくまで A と B のインタラクション（という現象在）を記述する（すなわち何らかの意味でインタラクトする）第三の現象在 C があってはじめて発現することに注意しなければならない⁴。しかしその第三者もまた現象在である以上さらに別の現象在 D により記述されることで初めて存在する。このような状況を記述するため HBF-2 からインタラクションの境界（記述）のみを抽出して組み合わせた図式が HBF-3 である（図 4）。 \Leftrightarrow は HBF-2 としての記述における遷移の並行関係である。

なお、現象在は持続において開いているため、HBF-3 で例えば B が C でもあるという状況も記述可能である。これは自己参照の表現に用いることができる（図 5）。

6 治療的理解

しかし、このような未定義の言葉を含む記述を機能させるためには、直接的に意味を与えるのではなく別の対処が必要である。ここではこのような記述を間接的に理解可能なものとするために次のようなアプローチを採用する。

1. いくつかの未定義な術語を用いた記述の形式を導入する。
2. それらの理解は、我々がその形式の記述を理解しようとしている状況そのものがその形式に当てはまることからもたらされる。

⁴例えば、二つの分子が反応するとき、それらの分子は第三者に記述されることで初めて「現象在として」存在する。

例えば「あなたはこの文を読んでいる」という文が正しいと理解するときの理解の仕方がその一例である．このような理解の仕方をここでは治療的理解と呼ぶことにする．

これは，無限後退を押しとどめるような，いわゆる明証的理解を記述の内部に取り込む一つの方法であり，明証性そのものもこの仕方理解される．

もちろんこのような理解は唯一であることも主張できないし，万人が理解することも期待できない⁵．しかし形式化からはみ出す部分の理解をある程度システムティックに促すためには，このようなアプローチが有効に機能すると考えられる（例えばその理解の仕方自体もこの仕方理解される）．

7 計算の哲学のあり方と時間論

このようなアプローチを採る目的の一つは，自然科学的アプローチと人文科学的アプローチ，あるいは哲学における形式的アプローチと非形式的アプローチ，を結びつけることにある．冒頭に述べたように，計算について哲学的考察を行う際には，その影響の及ぶ範囲の広範さから，両方の立場を結びつけることが，数学の哲学，物理学の哲学，生物学の哲学といった自然科学の哲学よりも強く要求される⁶．

上で述べた枠組みは，一方で通常自然科学的態度を取ることによって容易に科学的議論と接続することも可能であり，他方で，HBFによる形而上学的枠組みを通じて様々な人文科学的議論と接続することも可能である⁷．

そのような例の一つとしては上で述べた枠組みと時間論との結びつきが挙げられる．「なぜ計算が進むのか」という問いを取り上げることからも分かるように，野生の計算のあり方はそれに伴う「時間」の進行（あるいは時計の進行）と切り離すことは出来ない．それについて議論する際には我々の立場から時間という概念を分析し直すことも当然必要となる．

哲学において議論されている時間論は，大まかにはソフトな時間論とハードな時間論に分けることが出来るように思われる．ソフトな時間論とは形而上学的な議論を中心に展開するものであり，ハードな時間論とは物理学的な基礎に強く依拠した議論を展開するものである．報告者は今年の第36回大会の発表において，ソフトな時間論に属すると思われる入不二による時間論 [4] とここで展開した計算の哲学とのつながりについて報告をおこなった [6] ので，その内容を簡単に記しておく．

時間の記述を考える素朴な見方としては，所与の時間があり，それに対して不変な記憶が可能であり，それが記述を生み出す，という考え方がある．す

⁵しかし数学や論理学も万人が理解できるわけではない．

⁶生物学と生命論を併せて論ずる状況と似ているかもしれない．

⁷[7]で触れたように，ここで展開した枠組みは Hume, Bergson, Spinoza, Nietzsche, Wittgenstein の思考と様々な点で比較することが出来る．

なわちこれは次のような関係となる．

時間 \implies (その時間において) 不変な記憶の可能性 \implies 記述

このときの記憶とはその時間に対して不変な何らかの存在である．しかし、我々の立場からは記述される時間を一次的な対象としてではなく現象在の理論から生み出される二次的な対象として扱いたい．よってここではこの関係を逆転させてみる．つまり、記述される時間は記述が可能であることからの必然的な要請として浮かび上がってくるものとする．すなわち時間は次のような関係の産物であるということになる．

記述 \implies (因果的超越において) 不変な記憶の必然性 \implies 時間

ここでは不変性を持つ記述を伴う現象在を記憶と呼んでいる．このときこの関係は、自分がこのような記述を理解できているということから記述される時間という概念の必然性を理解する、という治療的理解により理解可能なものとなる．

そして入不二の形而上学との対応としては、「とりあえず性」は制度的切断から因果的超越への転換、「そのつど性」は因果的超越から制度的切断へ転換と見なされる．すなわち「とりあえず性・そのつど性」は(因果的超越と制度的切断の)相互連鎖としての記述(顕在化)が可能であることをもたしている性質、と考えることが出来る(関係としての時間)

それではハードな時間論についてはどうだろうか．我々の立場から見れば、時計による時間の計測もインタラクションであり、時間の実在性の半分は非形式的な持続が担っている⁸(いわゆる流れる時間)．その意味ではハードな時間論といえども持続なしで議論することは出来ない．しかし、明証性を求める位置を色々変えてみるにより、形式的な方向からアプローチしてゆくことは可能であるし、その場合に我々の立場と整合性の高い物理理論を求めてゆくことは重要である．そこで以下では現象としての計算が関わる物理をいくつか取り上げて、我々の立場に整合性があると思われるものについて触れることにしよう．

8 物理学とのつながり

古典情報概念と計算

- 古典(Shannon)情報理論と統計力学は同様な数学的形式を持つ．
- 計算の物理的限界を追求する動き．

⁸実在性を担うのは持続であるが記述なしでは実在性の認識はあり得ない．

- ビット情報の獲得とエネルギーの消費を結びつけた (Leo Szilard 1929, von Neumann)
- 情報の獲得ではなく情報を消去するのにエネルギーが必要 (Landauer 1961) .
- 可逆な万能チューリングマシンの存在 (Bennet 1973) . エネルギーを消費しない計算が可能 .

計算と情報はきちんと区別して用いなければならない .

- 物理的記述に還元すればよいという立場なら計算を可逆過程 + 情報の変化として考えることも出来る . しかし「計算がなぜ進むのか」という問いは扱えない . 情報理論と意味論は本質的に異なる .
- 情報理論における情報は記述の枠組みがあって初めて議論できる . そのためにこれに基づく限り計算の動性を一次的に議論することは出来ない .

量子計算と量子情報処理

- 量子計算とは、ヒルベルト空間における可逆なユニタリ作用素による時間発展を計算プロセスに見立てたものである [2, 9] . 重ね合わせされた状態の時間発展が並行して起こることにより計算の効率が上がる . ただし計算可能な関数のクラスが変わるわけではない . 結果を求める際には観測の時点で起こるデコヒーレンス (重ね合わせの破壊) を利用している .
- すなわちこのような量子計算は時間に依存した定式化である . このような何らかの形の (記述された) 時間を前提とした定式化では「なぜ計算が進むのか」に答えることは出来ない .
- 量子計算では多世界解釈が採られることも多い . 多世界解釈では世界の分節と個体化が先になければ議論できない . 我々の立場ではこれを直接採ることは出来ない .
- 参照フレームに依存した量子情報処理では相対論も含めて議論される . 日常的なスケールでも例えばカーナビなどに用いられる GPS では特殊および一般相対論による補正がなされるので , 我々の立場からは一般相対論も無視することは出来ない .
- 我々のアプローチと親和性の高い理論が望まれる . 実際そのような理論を探究する動きもある (次節参照) .

物理における非時間的記述を哲学としてどのように考えるか

- 素粒子論における時間の逆行，虚数時間（H. Price, L. S. Schulman, S. Hawking）
- 正準形式による量子論および相対論の非時間的定式化，ループ量子重力，背景時空の排除（J. Butterfield, C. Isham, L. Smolin, C. Rovelli）
- 量子宇宙論における時間の扱い，観測の不在（J. B. Hartle, M. Gell-Mann）
- 我々の立場ではこれらの理論を理解するときに現れる日常的な時間の流れの直観との整合不整合は理論に内的なものではなく，理論の理解することそのものにおいて引き起こされるものであり，この立場からは例えば虚数時間を認めることになんら不都合はない．これは我々の立場を取る一つのメリットである．

9 HBF との結びつきが示唆される物理

以下は，まだ開始したばかりの研究であり speculative であるが，HBF の背景にある見方を自然科学と結びつける例を示す意味でここで紹介しておく．

量子テレポーテーション 量子テレポーテーションとは量子エンタングルメントを利用した高速な通信手段である [2, 9]．この通信には EPR 対などの量子エンタングルメント状態による量子的な通信チャンネルと古典的な通信チャンネルが用いられる．このとき量子チャンネルの通信だけ見ると一見，超光速通信が行われているように見えるのだが，これは相対性理論を破っているわけではない．これを考察するためには「情報が光速より速く伝わることはない」ということの意味するところを詳しく検討しなければならない．

すなわち外部の視点から見ると，量子チャンネルでは通信元の観測によるデコヒーレンスで通信元と通信先が相関した状態に「同時に」収束するのであるが，その事実はいくまで外部の視点からのものであって，量子チャンネルだけではそれが送信先に伝わることはない．第三者の視点からのその事実の記述が別の古典チャンネルを通じて伝わって初めて「情報」が伝わることになる．すなわち，記述の枠組みがなければ情報という概念が成り立たないことが分かる．この点において，情報によって物理学を基礎付ける試みや量子情報科学についての哲学的な考察では HBF-3 のような視点を持つことが有効であることが示唆されている．

ホログラフィック原理 上述したように，計算について考察するにあたって，量子論と相対論を共に扱うような理論とのつながりを考慮することが望

ましい。残念ながらそのような統合は数学的厳密さと実験的検証の両面においていまだに十分にはなされていないがいくつかの候補は提案されている。その中には我々の枠組みに比較的親和性が高いと思われる考え方を見出すことが出来る。その一つがホログラフィック原理である [1]。ホログラフィック原理はその名前の通り一つの理論と言うよりは一つの考え方である。

この考え方の元になっているのはブラックホールのエントロピーである。J. D. Bekenstein はブラックホールは表面積に比例したエントロピーを持つと主張し、熱力学の一般化第二法則「ブラックホールの全エントロピーとブラックホール外のエントロピーの総和は決して減少しない」を提唱した。後に R. D. Sorkin によりそのエントロピーが Hawking 輻射を含めて具体的に計算され、それによるとブラックホールのエントロピーはプランク面積（プランク長（約 10^{-33} ）の 2 乗）を単位とした地平面の面積の $1/4$ になる。

ホログラフィック限界はそれを拡張したものであり、L. Susskind, Bekenstein らにより研究が行われた。それによるとある閉じた領域のエントロピーの最大値はその表面積によって決まる。また、その限界値は系の構成やそれが何で出来ているかとは（超ひもであろうと何であろうと）関係なく一般化第二法則だけで決まる。すなわち、ある閉じた領域に記録できる情報量の物理的限界はその体積ではなく表面積により決まるのである。情報と物理に関するこのような方向の研究は、特に離散的な時空構造と関連づける形で様々な研究が行われている。

これを一般化した原理はホログラフィック原理と呼ばれ、G. 't Hooft によって提唱され、L. Susskind によって詳しく研究された。またそれとは独立に L. Crane によっても位相的場の理論の文脈で類似の考え方が提唱された。これは一般的には「ある n 次元時空のある理論が別の $n-1$ 次元時空の別の理論と等価である」という形を取る。その場合、まずこの原理が現実の時空構造での議論に適用できるかどうかを考えなければならないが、今までに AdS/CFT 対応をはじめいくつかの数学的に厳密に成り立つ例が見出されている（例えば、5 次元 AdS 時空のブラックホールが、4 次元の時空境界面における別の物理過程による熱放射に対応することが E. Witten により示されている）。しかし、残念ながら AdS 宇宙は現実の宇宙の幾何学的構造とは異なるらしいことが観測により分かっているので、ホログラフィック原理を適用するより一般的な方法が望まれるが、R. Bousso によってさらに適用範囲の広いホログラフィック限界が考案されたことにより現実に近い時空構造にも適用できる可能性が拓かれた。

もし現実の時空において様々な場面でホログラフィック原理が成り立つのであれば、何らかの記述である境界により現象在が個体として扱われる、という我々の見方を直接的物理的に解釈する可能性が出てくる。しかし、HBF-3 のような境界と観測者との関係はどのように考えればよいだろうか。実は、そのような見方とつながる可能性のあるホログラフィック原理の特別なパー

ジョンが提案されている．それは F. Markopoulou と L. Smolin による弱いホログラフィック原理である [5]．

この提案は，一般相対性理論と量子論を結びつける候補の一つとして A. Ashtekar, L. Smolin, C. Rovelli らを中心に発展してきたループ量子重力理論と呼ばれる離散的な時空構造の理論に基づいている [11]．Markopoulou と Smolin の定式化では時空が局所的な境界（スクリーン）のネットワークとなっており，それに付随するヒルベルト空間は有限次元であって観測に依存して定まる．量子的な時空はスクリーンのネットワーク（スピネットワーク）の局所的な変化からそのつど構成される．ネットワークの離散性から基本的な因果プロセスには有限の情報しか含まれないために，このような変化を記述するヒルベルト空間は有限次元となる．すなわち，ここでは他の宇宙論のような単一の波動関数や単一のヒルベルト空間を仮定していない．

より直観的に言えば次のようになるだろう．空間における面とは量子的な情報が流れるチャンネルである．すべての測定はその面上で起こる．各面にはその面上の測定から得られる可能性のある結果を含むヒルベルト空間が付随している．面の面積とは量子的な情報のチャンネルとしての容量の言い換えであり，各面のヒルベルト空間の次元の対数が面積の定義となる．こうして時空の幾何学は情報の理論に還元される，というのが Smolin らの見方である．

この見方は計算ではなく情報を一次的に扱っていることを除けば，すなわち物理学から踏み出してはいないことを除けば，我々の立場とかなり共通点が多い．しかも Smolin が示唆しているように，位相的場の理論などを経由することで圏論的な定式化への道が開けているため，コンピュータ科学の形式的意味論において発展してきた様々な手法を適用することが可能であると考えられ，一部ではそのような試みも行われている．この意味でも計算とのつながりが期待できる．

10 終わりに

計算の哲学はここで述べたアプローチが標準的なわけでは決していない．むしろこれから様々なアプローチで探究されていくことによりその内容が深まってゆくことが期待されている．既存の哲学においても計算に関して様々な考察が行われているが（数学の哲学，心の哲学，物理学の哲学，現象学，情報倫理，等々）それら個々の分野では十分とらえきれない問題があるのも確かであり，本発表で述べたのはそのような部分を探ってゆく試みの一つである．

- 「計算の哲学」プロジェクト (<http://philcomp.org/>)
- 計算の哲学に関連する学会：International Association for Computing and Philosophy (IACAP) (<http://iacap.org/>)

参考文献

- [1] J. D. Bekenstein, “Information in the Holographic Universe”, *Scientific American*, August 2003. J. D. ベッケンスタイン, 「ホログラフィック宇宙」, 日経サイエンス 2003 年 11 月号, pp.56–65. (ホログラフィック原理の一般向け解説).
- [2] J. Gruska, *Quantum Computing*, McGraw-Hill, 1999. 伊藤他訳『量子コンピューティング』, 森北出版, 2003 年.
- [3] 一ノ瀬正樹『原因と結果の迷宮』, 勁草書房, 2001.
- [4] 入不二基義『時間は実在するか』, 講談社, 2002.
- [5] F. Markopoulou and L. Smolin, “Holography in a quantum spacetime”, 1999. hep-th/9910146.
- [6] 三好博之, 「持続・記述・時間」, 日本科学哲学会第 36 回大会, 2003.
- [7] 三好博之, 「リフレクションからインタラクションへ 計算の哲学への間接的アプローチ」, 京都産業大学論集人文科学系列第 32 号, pp.70–84, 平成 16 年 3 月.
- [8] H. Miyoshi, “From Reflection to Interaction: An Indirect Approach to the Philosophy of Computation”, in: J. Weckert and Y. Al-Saggaf (eds.), *Computers and Philosophy 2003*, Conferences in Research and Practice in Information Technology, Vol.37, Australian Computer Society, pp.33–38, 2004.
- [9] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, 2000.
- [10] B. C. Smith, “The Foundation of Computing”, in: M. Scheutz (ed.), *Computationalism: New Directions*, MIT Press, pp.23–58, 2002.
- [11] L. Smolin, “Atoms of Space and Time”, *Scientific American*, January 2004. L. スモーリン, 「時空の原子を追うループ量子重力理論」, 日経サイエンス 2004 年 4 月号, pp.32–43. (ループ量子重力の一般向け解説).
- [12] J. Preskill, “Quantum information and physics: some future directions”, 1999. quant-ph/9904022. (量子情報科学が物理に与えるインパクトについての短い解説. ホログラフィック原理についても少しだけ触れている).

hep-th/9910146 といった番号のあるものについては <http://jp.arXiv.org/> から取得できる.