

情報の物理学と哲学

——大庭健氏の批評に答える——

品川 嘉也

大庭健氏はその論文「環境と人間」⁽¹⁾において、拙著「意識と脳」⁽²⁾を引用して「品川……の問題意識に共感しつつも一定の懸念を抱くのは」「情報理論と物理学の精密な統合が必要」な点だ、という意味のことを述べて居られる³。拙著に「共感」を示して居られるのであるから、筆者が何も申し上げることはないのかも知れないが、「情報理論と物理学の統合が必要」と云われるのは、誤解に基づくことが明らかである。明らかなことは記さなくてもよいとも思われるが、世間には同様の誤解をしている人も見受けられるし、理科系出身者にも居るので、一言申し述べておきたい。

情報理論は一九二九年のシラードの論文⁽⁴⁾に初まると見るべきであるから、明らかに物理学（熱力学、統計力学）から出発している。それが後にシャノン⁽⁵⁾によって通信に應用され、現在では生物学など各方面に應用されている。さらに文学や医学など

に應用が拡がると、情報の意味や情報の価値を定式化したという要求が出て来るし、物理学との関係は薄くなる。他方、物理学の内部でも、非平衡系の熱力学が展開されて来ると、情報理論をその方面に拡張する必要が生じて来る。

このような情報理論の拡張に際しても、従来の物理学的情報理論と矛盾しないことが、当然ながら要求される。哲学の立場としては、情報理論の拡張の方向を示さねばならない。情報理論と物理学の統合ができてしまえば、哲学者が口をはさむ余地は存在しないのである。筆者の「情報構造」⁽²⁾の哲学は、前記の二方向——人間学的方向と非平衡系——への情報理論の拡張を統合的に指し示すために役立てたいと考えて体系化を試みたものである。哲学は、自然科学とは異なる方法論を持つわけであるから、物理学等に対して物申す折には、多少の危険性は避けられないと思うが、「情報理論と物理学の統合」が完成したときには、哲学者の出番はなくなっていると考えるべきではなからうか。

一 物理学と情報理論

情報理論の創始者はシラードであり、彼の論文⁽⁴⁾を見れば、情報理論が物理学から派生したことは明らかである。然るに世間ではシャノン⁽⁵⁾を情報理論の創始者と見て「情報理論は通信工学の理論である、物理学とは何の関係もない」と云う人が居る。シャノン自身の意図がどうであったにせよ、シャノンの理論はシラードの理論の通信工学への應用であったことは歴史的に見

て明らかである。近年、社会科学へのエントロピー概念の応用、あるいは、非平衡系への情報理論の拡張の試みに際して、⁶⁾ シヤノンの情報理論がそのままでは使えない⁷⁾ という声を聞くが、通信工学に應用された理論が、そのまま他の分野にも通用すると考えるのは虫がよすぎると云うものであろう。シラードの情報理論にたち帰って考察すべき問題なのである。

シラードの情報理論をかいつまんで云うと、一つの箱の中に気体分子が一個だけ入っている。この箱に仕切を入れて、分子が仕切の右にいくか左にいくかを知ることが、知識の最小単位であり、その大きさは $kT \ln 2$ であることを示した (k はボルツマン定数、 T は自然対数を示す)。これがシヤノンの情報量の単位 1 bit に対応することは明らかであらう。すなわち

$$1 \text{ bit} = kT \ln 2$$

であり、系のエントロピーは $kT \ln 2$ (または 1 ビット) だけ減少する。たゞし、宇宙全体のエントロピーは、観測者が 1 ビットの情報量を獲得した際に、1 ビット以上増大する。云い換えると、宇宙のエントロピーと情報量の和は常に増大するのである。このように、物理的エントロピーと情報量は、直接に関係しているのである。

大庭氏は $kT \ln 2$ の値が $h \times 10^{-10}$ の乗 (エルグ/度) という「無視しうる大きさにしかならない」ことが物心二元論の根本的問題を衝いている、と云うが、これは物理学に対する完全な誤解に基いている。

ボルツマン定数 k の値が極めて小さいのは、分子一個を単位

としていたためである。人間の日常生活では、分子一個に 1 ビットの情報を書くことはできず、情報を記録するために N 個の分子を必要とし、その N の価はアボガドロ数 N_A に近い。すなわち日常の 1 ビットは $kT \ln 2$ に相当し、分子の世界の N 倍だけ冗長である。これは、心と物の差を表わしているわけではなくて、分子の大きさと人間のサイズの違いを表わしているに過ぎない。

ブリルアン⁽⁷⁾ は 1 ビットの情報を獲得するためには $kT \ln 2$ より大きなエネルギーを費さねばならないことを示した。シラードのモデルで、分子が箱の右半分にいるか左半分にいるかを見るために、光を当てるとすると、その光のエネルギーは kT より大きくなければならない (T は絶対温度)。同じモデルにおいて、右方にいた分子が仕切板の方に向かって飛んで来たときに、素早く仕切板を開き、分子が通過すると仕切板を閉じることにする。こうすると、何も仕事をしないで、新たな情報を獲得することができるように見える。しかし、このときも分子の飛んで来る方向を見分けるための光のエネルギーが kT より大きくなることをブリルアンは示している。以上のような理論の解説は多くの物理学書に見られるが、拙著『医学生物系の物理学』⁽⁸⁾ (培風館) にも易しく解説しておいたので参照されたい。

もう一つ注意しておきたいことは、ブリルアンの最後の例で、仕切板の質量 M は分子の質量 m よりも大きくなければ、飛んで来た分子によって仕切板がはね飛ばされてしまう。また、仕切

板を動かす速さは、分子の速さ v と同程度でなければならぬ。したがって、仕切板を動かす運動のエネルギーは⁽⁸⁾

$$\frac{1}{2} M v^2 > \frac{1}{2} m v^2$$

であり、一方、分子を球形とすると

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} kT$$

の関係がある。これに分子を見るための光のエネルギー (kT より大) が加わるから、全体では $\frac{5}{2} kT$ より大きなエネルギーを必要とすることになる。一ビットの情報量に対応するエネルギーは $kT \ln 2$ であるから、その比は

$$\frac{5}{2} kT / kT \ln 2 \approx 3.61$$

となり、一ビットの情報を獲得するたびに、宇宙のエントロピーはその三・六倍以上増大するのである。

二 分子チップ

私達の日常の世界は、アボガドロ数 N_A の程度の大きさを持っている。私が今、こうして原稿を書いているとき、一文字当り数ビットの情報を記録しているわけであるが、これを書いているボールペンや紙を作るに要したエネルギー、私が文字を書いたために費したエネルギー等々の総和は、一文字当りキロカロリーのていどとなる。一方、一文字を記録している分子の数もアボガドロ数に近い。いま N_A 個の分子が一ビットの情報

を表しているとするときエントロピー単位では $N_A k \ln 2$ となる。 $N_A k \ln 2 \approx R$ (R は気体定数) であるから対応するエネルギーは $R T \ln 2$ である。 $R T$ は熱エネルギーの大きさ(常温では約 0.6 キロカロリー)である。すなわち、シラードの情報理論は「情報を獲得するためのエネルギーは、熱エネルギーと同程度かそれより大きくなければならない」と云う、ごく当り前のことを述べているに過ぎない。⁽⁹⁾ 精神の情報と物質のエネルギーの関係を表わしているわけではない。

脳での情報処理のエネルギーを求めるのは困難であるが、筆者は信号一個当り 10^4 エルグと見積った。これは $L S I$ で一回の演算をするのに必要なエネルギー 4×10^6 エルグと同程度である。これらの値は理論限界の約一億倍である。(分子一億個くらいを使って一つの情報を表現している。)

最近盛んに研究されるようになった分子チップは、分子一個に一ビットの情報を書き込むことを究極の目標としている。これが実現すればシラードの理論限界 $k \ln 2$ に接近することができる。コンピュータの記憶・演算素子として分子を使うことが研究されているわけである。

情報の担体としては、水素原子が常温では最小の素子であることが物理学的に証明される。¹⁰⁾ すなわち、情報担体の大きさは、その粒子自体の大きさと、その粒子の量子力学的不確定性の二者のうち、小さい方の値で決まる。たとえば、光子はそれ自身の大きさは無限に小さいが、光子の位置の不確定性は光の波長のていどであり、光子を情報担体として原子より小さい素子を

作することは不可能である。他方、重原子は、位置の不確定性は無視できるほど小さいが、それ自身の大きさは水素原子の何倍にもなる。その点、水素原子の位置の不確定さは常温で $0 \cdot 2$ オングストロームのていどであるが、水素原子の結晶半径も同程度であり、分子内で占める大きさ（ファンデアワール半径）も $0 \cdot 5$ オングストロームと同程度である。

したがって、水素原子を情報担体とする素子を作れば、最小の大きさで、動作エネルギーも「 π 」のていどの素子を実現できる可能性がある。水素原子を作動させるには、分子内の水素原子を利用するのが最も効率がよいと考えられるので、これが分子チップが研究されている理由である。⁽¹¹⁾

三 非平衡系と複雑な系

以上で情報理論が物理学（熱力学）を出発点とし物理学に立脚していること、情報量とエネルギーの關係が理論的限界を示すのみならず、現実的問題となっていることを御理解いただけたいと思う。分子の世界と日常の世界の大きさの違いが、物心二元論の根本的問題であると云う大庭氏の指摘⁽⁶⁾が見当はずれであることも明らかである。

それでは情報理論があくまで、物理学の一部であるかと云うと、決してそうではない。生物の情報理論は、物理学プラス生物学の知識の上に建設される。言語や社会への応用についても同様である。

はじめに述べたように、哲学の仕事は、科学の拡張と新しい

領域への適用について、その方向性を示すことにあると考える。拙著⁽²⁾に「啓発されて生物のエントロピー収支を定量的に計算している」とおっしゃる物理学者が居られ、脳科学においても「実験を続けて行くと品川さんの理論の通りになるようだ」と云って下さる方がいる⁽¹³⁾。これらの言葉は、おこがましいけれども拙著の考え方が一定の意味を持っていることを示しているとりたい。

たとえば、非平衡系の持っている情報は、その系が平衡に達した時のエントロピー S_{max} を基準として

$$I = S_{max} - S$$

で表わされる。ただし S はその系のその時点でのエントロピーである。（ビット単位に変換するには両辺を $\ln 2$ で割ればよい。）しかしながら、非常に複雑な系に対しては、その系の平衡状態が何であるかを定義するためには、物理学の知識だけでは不十分である。たとえば、社会の平衡状態をどのように定義するのか？ 研究者の立場毎に、異なる定義が存在するのである。それらの立場を統一的に解釈するためには、哲学の指針が必要であると思われる。

そのためには、宇宙的視野が必要である。大庭氏の云う「環境と人間」の環境とは——フラー⁽¹⁴⁾の言葉を借りるなら——「人間を除くすべて」なのであろう。それに対して、宇宙とは、人間を含むすべて、なのである。

結語

どこまでも「物理学との統合」を求めるのは、典型的な還元主義——一名、物理学帝国主義——となる。私達は、個別科学はそれぞれの階層に対応した、それぞれの法則を持つてゐることを知っている。さらに、それぞれの法則には、適用限界があり、宇宙は法則性と偶然性のあざなえる組であることを知っている。

諸法則の決定論的性格と、偶然の自由をいかに統一するかは、常に哲学の課題であった。大庭氏のごとく、物心二元論に逃げるのは、哲学の放棄と云わざるを得ない。「物」の必然性と「心」の自由というのでは俗論的三元論となつてしまふ。

一方、拙論の立場から人間の社会を理論的に構築することは、筆者のように社会科学の知識の乏しい者にとっては容易なことではないし、本稿のような小論のよくなるどころでもないが、拙論が「社会」に対しても適用可能であろうという大庭氏の示唆⁽¹⁵⁾に対しては感謝しなければならない。

この謝辞をもって、小論の一応のしめくりとしたい。

文献

- (1) 大庭健「環境と人間——ホモ・ロクウェンスの(文化の暴力)への一試論——」新岩波講座哲学、第6巻『物質・生命・人間』岩波書店、一九八六年。
- (2) 品川嘉也『意識と脳』紀伊国屋書店、一九八二年。
- (3) 大庭前掲書、二八五頁、三〇二頁。

討議

- (4) L. Szilard: Zeitsch. für Physik, 53, 840' 一九二九年。
- (5) C. E. Shannon and W. Weaver: The Mathematical Theory of Communication (University of Illinois Press) 一九四九年。
- (6) 大庭前掲書、二八七頁。
- (7) L. Brillouin: Science and Information Theory (Academic Press) 一九五六年。
- (8) 品川嘉也『医学生物系の物理学』培風館、一九七六年、第十八章および十五、十六章。
- (9) 品川嘉也『バイオコンピュータ』共立出版、一九八七年。
- (10) Y. Shinagawa and M. Kikuchi: Biophys. J. 51 卷、四四三a頁、一九八七年。
- (11) 品川嘉也「核酸・蛋白質・酵素」、第三二卷四号、四三〇—四三二頁、一九八七年。
- (12) 青木一郎、私信。
- (13) 角田忠信、私信。
- (14) 立花隆『宇宙からの帰還』中央公論社、一九八三年による。
- (15) 大庭前掲書、二九〇頁。
(筆者 しながらわ・よしや 日本医科大学生理学教室 [生理学]教授)