

古典的な観測に徹すること

南 政 次

CMO/ISMO #407 (25 February 2013)

英文はこちら <http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/~cmo/cmomn4/CMO407.pdf>

前々号、前号のこの欄に於いてビル・シーハン氏が行った暗示は、量子力学の擡頭によって、古典力学が葬り去られたとして、その廿世紀初頭の變轉を前提に、その類推として、火星の古典的観測は火星周回のオービターや火星地上のローヴァー等の現代的観測手段によって意味をなさなくなったという逆展望であった。既に古典的な火星観測に於いて、何か珍しい新発見はあり得ないというポスト・フロンティアの時代にわれわれは入っていると感じるべきだという暗示とともに、われわれの多くは既にそれぞれ一匹狼に過ぎず、しかもわれわれの知っていた世界は既に足の下からどこかへ引っ越してしまったことに氣附くべき時代に入ったのだというわけである。つまり既にわれわれ古典的観測者は何かしら「素敵だけど無益な」ことをやっているに過ぎないということになる。

しかし、実際にそうであろうか。例えば、古典的物理学は量子力学の擡頭によって、死んだのであろうか。地球から火星を観測するという古典的方法も同じように死んだのであろうか。

だが、普通の現代的な物理学者は誰も古典物理学が死んだとは思っていないと思う。古典力学はニュートンの力学を根幹に内蔵していて、ただニュートン力学、或いは古典力学には「適用限界」があるということ知るに至ったというに過ぎない。つまり逆に言えば、古典力学或いはニュートン力学はマクロの世界では現代に至っても大いに有用であるし、正確なのである。宇宙船を飛ばすに当たって、誰も量子力学など使わない。相対性理論を援用する場面があるかもしれないが、ここに使われる相対性理論は古典論なのである。

もちろん、エルヴィン・シュレーディンガー(1887-1961)も彼の方程式(シュレーディンガー方程式、1926年)

$$i\hbar\partial\psi(q)/\partial t=H\psi(q) \quad (1)$$

(ここで $\hbar$ はプランクの常數 h を 2π で割ったもの、 H はエネルギーを表すハミルトニアンというエルミート演算子、 t は時間、ハミルトニアンはハミルトン William Rowan HAMILTON、1805-1865に因む。ハミルトン力学の創始者。彼は四元數などの発見でも知られている)を充たす波動函数 $\psi(q)$ が古典的「實在波」を示すと唱えて、當初間違いを冒したという意味で彼は凄く新しい波動力学の発見をしたにも拘わらず、甚だ古典的であったのである。

古典的實在波であるためには三次元空間に現實に存在しなければならないが、實際には量子力学の空間はもっと數學的で、高次元假想空間で好く、シュレーデ

インガーの波動関数は實在波でなく、「確率波」を示すものであることがマックス・ボルン(1882-1970)やヴェルナー・ハイゼンベルク(1901-1976)、ポール・ディラック(1902-1984)など行列力學に關わる人達によって1920年代に明白にされた。

行列力學では物理量(=observableなオペレーター) $A(q, t)$ はハイゼンベルク式の行列表示では

$$dA(q)/dt=(1/i\hbar)[A(q), H]+\partial A(q)/\partial t \quad (2)$$

を充たす。ここで $[a, b]=ab-ba$ なる交換關係。方程式(2)がシュレーディンガーの表示と數學的に同等だというのは簡単に示される。(最後の項は A が t に陽に(explicitに)依存しなければ無くなる。)

行列力學では、一般化された正準座標 q_i と正準運動量 p_i (兩者とも演算子ないし演算子)は交換關係

$$[q_i, p_j]=i\hbar\delta_{ij}E \quad (3)$$

を充たす。ここで δ_{ij} はクロネッカーのデルタ($i=j$ のとき $\delta_{ij}=1$ 、そうでなければゼロ)。 E は単位演算子。 p_i と q_i など行列や演算子は特有の非可換を示すが、非可換のとき、 p_i と q_i の間に「不確定性原理」が絡まってくる。

ハイゼンベルクは言わずと知れた行列力學や不確定性原理の創始者の一人、ボルンは彼の先生。ハイゼンベルクの扱っている成分が「行列」の要素である、従って行列力學が成り立つと最初に見抜いたのはセンスの好かったボルンであると思う。ボルンの孫にオリヴィア・ニュートン＝ジョンがいる。

行列力學と波動力學が同等であることは、シュレーディンガー他いろんな人に依って唱えられたが、ポール・ディラックの形式が最も美事である。簡単に言えば、波動関数を行列の要素、もしくはその重ね合わせと見做す。

しかし、ここで注意するのは、古典力學における正準(canonical)形式は、量子力學のそれと「相似」であるということである。正準變數も夫々對應し、古典力學でも n 次元の正準變數が可能なのである。古典論では量子力學の交換子 $[,]$ に對應して以下のようにポアッソンの括弧式が存在する。シメオン・ドニ・ポアッソン(Siméon Denis POISSON、1781-1840)に因む。いま U と V を正準變數 q_i 、 p_i に依存する任意の古典函數として

$$\sum_i ((\partial U/\partial q_i)(\partial V/\partial p_i) - (\partial U/\partial p_i)(\partial V/\partial q_i)) = [U, V]_{\text{Poisson}} \quad (4)$$

とポアッソンの括弧式を定義することが出来る。この $[U, V]_{\text{Poisson}}$ は演算子や行列の交換子と同じ「代數的」性質を持つことが示されるし、いま V として $V=q_i$ 或いは p_i と選んでやれば、

$$[U, q_i]_{\text{Poisson}} = -\partial U/\partial p_i$$

或いは

$$[U, p_i]_{\text{Poisson}} = \partial U/\partial q_i$$

が得られる。特にここで U として q_i を採ると

$$[q_i, q_j]_{\text{Poisson}}=0, \quad [q_i, p_j]_{\text{Poisson}}=\delta_{ij}$$

が導かれる。この二番目の交換關係を先の演算子の交換關係と比べると

$$[q_i, p_j]_{\text{Poisson}} \longleftrightarrow (1/i\hbar)[q_i, p_j]_{\text{Quantum}} \quad (5)$$

の對應關係にあることが分かる。

いま述べた代數關係を基盤に、ハミルトンの古典正準方程式

$$dq_i/dt = \partial H / \partial p_i \quad (6.1)$$

$$dp_i/dt = -\partial H / \partial q_i \quad (6.2)$$

を導入してやれば、体型は力學になる。先のポアッソン括弧式を使うと

$$dq_i/dt = [q_i, H]_{\text{Poisson}}$$

$$dp_i/dt = [p_i, H]_{\text{Poisson}}$$

でもある。

いま一般に A を (q, p, t) の函數とすると

$$dA/dt = \sum_i \{ (\partial A / \partial q_i)(dq_i/dt) - (\partial A / \partial p_i)(dp_i/dt) \} + \partial A / \partial t$$

だから、(6)を使えば

$$dA/dt = [A, H]_{\text{Poisson}} + \partial A / \partial t \quad (7)$$

である。ここまでは古典論である。

ここで先の對應を適用すれば、

$$[q_i, H]_{\text{Poisson}} \longleftrightarrow (1/i\hbar)[q_i, H]_{\text{Quantum}} \quad \text{ないしは}$$

$$[A_i, H]_{\text{Poisson}} \longleftrightarrow (1/i\hbar)[A_i, H]_{\text{Quantum}} \quad (8)$$

となって、上の古典論の式(7)が量子力學のハイゼンベルク型の運動方程式(2)に變化することが分かる。

この様に古典論と量子論の形式に大きな違いはない。

ラグランジアンやハミルトンニアン、ポアッソン括弧を含む古典論の體型は量子論の導入よりも相當以前に用意されていて、急遽新しく作られたものでないことが肝要である。量子論初期の人達は事の進展に驚いていたかもしれないが、それより古典論の吟味をすることの方が肝心だったのである。

不思議なことだが、古典論の精緻な展開をみると逆に物理學からの要求や歴史を知らなくても量子力學の數學的内容を理解することが出来るということである。しかし、古典論も量子論も同じ様な數學的内容を持っているからと言って、數學的構造は物理的内容をあからさまにするわけではないことには注意する。19世紀前半に於いては物理からの内的な量子論的要求はなかったのである。

従って、量子力學の出現は古典の側からそれほど腦ましいものではなかったと言える。ただ、新しい世界は對象を限定すれば、際だったものであるが、胸をかきむしられるほどものではなかったと言ってよい。ボルンやハイゼンベルクの先輩にゾンマーフェルトという古典的な人がいるが(古典力學の教科書を書いている)、彼の門下からはハイゼンベルクも含む澤山の量子論の俊才が出ている。彼自身も後に量子論に寄與している。

扱て、火星観測の世界に戻って、古典的な観測は意味を無くした(している)であらうか。尤もその前に古典的観測とは何かを定義しなければならないだろう。それはシーハン氏の言説を辿れば簡単で、単に「地上からの望遠鏡による徹底した観測」である。CCDを使っても古典的である。

そうした観測が無意味になったのであろうか。

勿論、われわれはそうは考えない。それを追々述べるが、英語の方で丁寧に書いたつもりなので、そちらも合わせ読みして頂きたい。

多分、時代の進展の中で、何處かでボタンを掛け間違ったのであろう。ローエル天文臺が古典的観測から撤収したことは驚きであった。「宇宙時代」の國家予算の分配獲得の爲に遁走する人たちにとっては、古典にのめり込んで「時流」に乗り遅れは赦されないものだろう。ローエル天文臺の變節は火星観測の何たるかを知らない人達に依って起こされたものであろうが、もとを辿ればローエル自身が、その後の將來の進展に對處出来るような思想も何も準備していなかったということである。事實、古典観測閉鎖前のローエル天文臺も幾らか世界的なネットワークを作ろうとしたけれども、予算不足だったかどうか、時流に合わず、いい加減なところで頓挫している。

もともと、われわれから見ればローエルに限らず、過去の観測者達の多くは果たして古典観測者と呼べるかどうか分らない。古典的観測を徹底的に追求した観測者は皆無であらうと思う。観測方法すら確立した観測者は少数であらう。スキアパレッリやアントニアディにはそれなりの功績はあろうけれど、繰り返すがローエルとかその一派などには古典的観測者ともいえない。

明らかに、火星観測には綿密に用意され長期に亙る計画的な観測が必要だが、そうしたことの見られない観測者が過去には澤山存在する。こうした似而非観測者は古典的ともいえず、半分デマゴグである。様々な観測を集計する團體や習慣も早くから存在するが、それらが古典的観測を極めているとは言い難い。

更に言えば、ローヴァーを走らせて火星面に生命の證を求めようとする試みも謂わば「火星人」を信じたローエル達の試みの延長に過ぎず、古典的以前である。周回船が表面の瓦礫の影像を送ってくるからといって、なんら新しい状況やフォーマリズムを提供しているわけではない。

これはマリナーの時代からそうである。新しい映像の提供は何ら革命的なものでもない。地上からは捉えられなかった影像は多々あると思うが、古典的基盤を総浚えするものではない。

科學的観測の醍醐味は、實證や發現の前に眞の姿を預見、預想することである。私の好く擧げる例は、クリスチアーン・ホイヘンス(1629-1695)の土星の環を「環」と捉えた古典的發見である。彼は耳たぶとか腕とか、そうした一回切りのアイデアを述べたのではなく、好くは見えもしない環の經年の(多分他人の観測も含めて)傾きや位置關係から環が「環」であれば非常に理解しやすいことを認識したのである。(話は些し小さいが)衛星のティタンに就いても1655年から1659年に掛けて何

度も観測し、周期16日ほどで土星を巡っていることを調べ挙げている。

環に就いては、1656年早くには「腕」が消失していることを観測し、同年十月にはやや回復している様子、1657年十二月には両腕が環らしくなっているのを観測している。1659年二月には更に開いていることを突きとめている。こうした場合、彼は環の向きと黄道の関係を意識しているようである。このような観測の継続や検出方法を経たものを「科学的」と稱えられるであろう。その後、公轉周期は詳しくなったし、素晴らしい土星の環の寫眞も得られたけれど、これは古典的内容のリファインメントに過ぎない。

もっと近くの月については、表面の詳しい多くの観測がなされていたが、詳しくに關係なく時には首を傾げたくなるものもあった。例えば、カッシーニ(ジョヴァンニ・ドメニコ・カッシーニGiovanni Domenico CASSINI、1625-1712)が虹の入江の西端に女性の顔を描いたものとか、シュレーター(ヨハン・ヒエロニムス・シュレーターJohann Hieronymus SCHRÖTER、1745-1816)やグルイテュイゼン(Franz von Paula GRUITHUISEN、1774-1852)が月の高等住人の存在を暗示するような言説を行ったときがあるが、こうしたことは、観測の「適用限界」を超えており、當時においてもそういう指摘や認識は可能であったと思う。

火星に關しても、いろいろ地球から見た現象が把握されていたけれど、多くは古典にさえ至らない戯れ言にしか過ぎなかった。例えばローエルの書いたことの多くはそうである。一シーズン終えたばかりに書いた最初の本にも矢鱈詳しいことが書いてある。どれも火星の自然を見て來た様な話である。近くでは佐伯恆夫氏の次のように述べた例をみるといい:「・・・ハロンの三叉路の肥大現象は、火星の晩春の頃に於ける季節的變化の一種であることは疑うべくもないが、今回の奇形は異常なものであり、・・・極地氷原が急速に縮小した結果として、ここより南下した多量(比較的)の水と、雲霧とが、この水路に大洪水を惹き起こし、その結果、この水路上に点在する大湖群に水が溢れ、(又は滲出して)、大湖の周辺の凹地を濕地化せしめたと考えられる。・・・今回の異常現象に対して、火星世界に惹起させられた所の大洪水であろうとの断定を下す以外に方法はないと思われる。・・・」(1948年度の火星観測報告(4)、「北極冠が溶け、運河の大洪水」、『天界』1949年第303号定價40円から)。

こうした「適用限界」を超える例は情報不足に據るとも考えられるが、實は情報の整備が足りない事に基づくと考えた方が好い。

ホイヘンスの例は少ない情報に依據しながらも正しい道を紡ぎ出している。われわれは火星の少ない現象から、先入主に頼らない火星の實際の特質や實際の状況を把握する道を探るべきであり、その道は古典的ではあるけれど、まだいくつも遺されていると考えられる。

實のところ、火星観測に就いて古典的なアプローチが破綻しているというあからさまな證據は見当たらないと思うし、寧ろ古典的範囲内で、まだまだ方法の改善とか、連携の強化など、なすべきことが山積しているというのが實情であろうと思う。観測方法や地上の連携の更なる向上なくして、例えば大掛かりな口径

の採用などは必ずしも改善に結びつかない。事実、火星に関しては19世紀以來大望遠鏡が必ずしもこれまで際だった結果を遺していないことを見れば判る。

最後に、もう一つ、先行する論評の中で見過ごされている点について述べる。以下のことを度外視して地上からの観測は不十分と決めつけるのは早計である。

實は、火星に降り立った地べたからの観測ではない、という点が缺點では無く、長所かも知れないということである。

實際、火星観測はディテールを暴くことが第一ではなく、火星表面のリモート・センシングを行っているという立場を採るのが要諦と考えられる。われわれはホイヘンスのように少ない情報から遠隔地の正しい大きな状況を紡ぎ出すのが筋だと考えるわけである。

例えば、一ヘクタールあたりの穀物の生育具合や収穫は、その場に臨んで調べれば好いだろうが、ローヴァーが動き廻れる範囲を超えるような擴大な土地の穀物の生育度や収穫度を予想するには、上空にバルーンを上げるなりして、リモート・センシングに頼る方がより効果的なのである。海や湖の汚染度を調べるにも、この方が遙かに優れている。険しい山の荒廃がどの様に河川の下流域や海に影響しているかも、上空から探査する方が理に適っている。シベリアの豊作・凶作の予想はアメリカ大陸に居て精度好く行われたことはよく知られている。軍事的な見地だけでなく、賣った買ったの投機にもリモート・センシングは重要な情報源であったのである(多くは秘密裏にやられたであろうし、情報の効用についても餘り明らかにされないのが普通である。所謂スパイ衛星は地上にいるスパイよりも遙かに多角的に情報を齎して居る筈である)。

火星についても近年、周回船からの影像によって、クレータの壁面から湧水があった事実が明らかにされているのは、ローヴァーなんぞが地表に這い蹲って土石の「がらくた」を調べているより上空の周回船のほうが遙かに優れた観測手段であることを示している。

黄雲の擴大や影響なども上空から得られた資料の方が遙かに優れている。實際、これまでの黄雲の地球からの観察はこれまでのところ「宇宙時代」になって得られたものより未だ優れていると思う。ただ諸般の事情から分析が覺束ないだけである。今後火星上に幾つステーションを作ろうとも、遠隔から情報を得る観測の結果の方がより正しい、また包括的な結果を齎すと考えられる。要するに、火星の表面を掘るという土建業的發想はわれわれの望む天文学には属さないということである。

要するに、火星の古典的観測は時代遅れでは無い、まだまだ可能性があると言えると思う。ただ、火星の上に立ったような言説とは縁を切らなければならない。寧ろ遠くからの古典的方法には未だ光明があると考える立場を堅持すべきである。

實はわれわれの脳ミソは量子力学で扱うような極微の世界には適用しないよう

に作られているのである。われわれは本質的にその外の古典的世界に生存する。量子論の不確定性原理でも判るように、われわれは「確率波」というものを實視で捉えることは出来ない。波は乾板にも寫らない。常に摩訶不思議な實態を古典的な「観測」によって知るのみである。回折格子群を抜けた確率波は最終的に「粒子」として検出される。その依ってくるところはいつも確率に支配されるが、観測に依って齎されたものは、古典的粒子であって、結果われわれが理解し記述するのは古典的に顕わになったものだけである。

従って、様々な物事を古典的に並べ、調べ、整理することは缺點ではなく、肯定されて然るべきことである、というのがこのエッセイの結びである。

日本語版ファサードに戻る : http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/~cmo/cmo/oa_mars.html

『火星通信』シリーズ3の頁に戻る : http://www.hida.kyoto-u.ac.jp/~cmo/cmo/S3_J_index.htm