

飯 田 氏 へ Ⅲ

電総研 近 藤 淳

(1980年7月28日受理)

§ 1. 序

飯田理論(物性研究 31 巻 87 頁)が熱力学の第二法則に違反することを証明した私の論文(物性研究 31 巻 71 頁)に対し、飯田氏が反論を試みておられるが(同 32 巻 14 頁)、殆んどが早トチりに類するものである。今回また同種の論文が出たけれども(同 33 巻 223 頁)、これには今迄にないものがあつた。それはオーソドックスな熱力学の手法を用いて古典電子ガスのマイスナー効果を導くもので、このため議論が非常にしやすくなったし、また飯田氏がどのようにして誤ったかについてある程度の見当もついた。そこでもう一度同じことのくり返しであるが記述の方法を少し変えてのべてみたい。引用の引用をすると外野席にはなんのことも判らなくなってしまうので、多少重複することもあるが始めの方からのべることにする。

§ 2. TE 原理は第二法則に違反する

はじめにモデルについてのべる。 C_2 が問題にする古典電子ガスで適当な容器にはいつている。 C_1 がそれをリング状にとりまき、やはり電子ガスより成る。 C_1 には一定の電流 I_1 が流れており、 C_2 の位置に磁場を作る。 C_1 は I_1 を一定に保つための電源につながれているとする。電源の内部エネルギーを W_1 とする。ジュール熱の発生などはないものとし、 I_1 に外場から仕事はされない限り W_1 は一定であり、仕事はされればそれは W_1 の変化になると考える。更に C_1 , C_2 の外側を黒体壁がとり囲んでいるとする。この全系を孤立系とみなし、温度 T の熱平衡にあるとき C_2 の電流密度分布 $j_2(r)$ は何かという問題を考える。

準平衡状態を定義する。それは $C_1 + C_2$ のエントロピー S , 黒体壁のエントロピー S_B , C_2 の電流分布 $j_2(r)$, I_1 , W_1 によって指定される。 C_1 はエントロピーのない系と思うこともできる。そうすれば $S = S_2$ 。このように指定された準平衡状態を A と名付ける。次に A と同一のエネルギーをもち、これに非常に近い準平衡状態 B を考える。A → B の過程が起るためには、B の全エントロピーが A の全エントロピーより大でなければならぬ。これは熱力学の第二法則である。この過程がどのようにして起るかを飯田氏にならって考察する。今熱揺動のために $j_2(r)$

近藤 淳

が $j_2(r) + \delta j_2(r)$ に変化したとする。これに伴う C_2 のエントロピー変化を δS_2 とする。電流変化に伴って電磁波が誘起され、それは外側に向って進行する。 C_1 に到達して I_1 に仕事を行い、 W_1 を δW_1 だけ変化させる。更に外側に進行する部分の運ぶエネルギーを U_R とする。これは黒体壁に到達して吸収され、 S_B の変化 δS_B をひきおこす。このようにして到達した準平衡状態を B とする。この過程に際して生じた全エントロピーの変化は $\delta S_2 + \delta S_B$ であるから、第二法則により $A \rightarrow B$ が起るためには

$$\delta S_B + \delta S_2 \geq 0 \quad (1)$$

今、黒体壁の内部エネルギーを $U_B(S_B)$ とすると、エネルギー保存より $U_R = \partial U_B = (\partial U_B / \partial S_B) \delta S_B = T \delta S_B$ となるから、(1)は

$$U_R + T \delta S_2 \geq 0 \quad (2)$$

と書かれる。

さて飯田氏はどのように考えられたか。 j_2 が δj_2 だけ変化し、電磁波が放出されたばかりの transient な状況を考え、そのような変化が起るための条件として TE 原理 というものを提出された。この transient な状況では系のパラメータは $S_2 + \delta S_2$, S_B , $j_2 + \delta j_2$, I_1 , W_1 となっている。このパラメータを用いて系のエネルギーを計算すると最初のエネルギーと等しくない。その足りない部分を [TE] とよんだ。(これは勿論電磁波が受持っているエネルギーである) [TE] は“出て行ってしまっ取戻せない”エネルギーと考え、正の [TE] を作るような過程が起り易いと考えられたようである。更にエントロピー増大則とあわせて

$$[TE] + T \delta S \geq 0 \quad (3)$$

が、transient な時点においてある過程の起る条件を表わすとされた。但し δS は transient な時点におけるエントロピー変化であり、我々の場合には δS_2 に等しい (S_B はまだ変化しておらず、 S_1 は 0 とした)。

さて(3)と(2)の関係を論ずるのであるが、まずこれらは同一の過程に対する条件であることに注意しよう。(2)は二つの準平衡状態の間の関係であり、(3)は一つの準平衡状態からどの方向に向けて出発するかという条件であって、同一に論ぜられないと思うかもしれない。しかし δj_2

の変化が起ってしまえば、電磁波が出て行き、 W_1 を δW_1 だけ変化させ、 S_B を δS_B だけ変化させて準平衡状態Bに落ち着かざるを得ない。従って(2)と(3)は同一の過程A→Bに対する条件である。ところが飯田氏によると $[TE] = U_R + \delta W_1$ であるから、(3)は

$$U_R + T\delta S_2 + \delta W_1 \geq 0 \quad (4)$$

となる。これは明らかに(2)と異なる。(2)は第二法則で正しいのですから(4)は誤りなのです!!これは永久機関を発明したとっている人に「永久機関は第二法則に違反するから誤りです」というのに等しい。

§ 3. Miss van Leeuwen の定理の証明

次に熱平衡状態について論じ、Miss van Leeuwen の定理を導いてみよう。前節と同一の系を考えるが C_1 についてももう少し詳しく考察しよう。 C_1 はエントロピーのない系とした方が便利であるから、以前に提案したように電荷が一様に分布した輪を考え、それがマサツなく回転するものとする。更に輪の速度を一定に保つ装置を附加しよう。外場が働いていない場合は輪は一定の早さで廻り続けるが、外場が輪の作る電流に仕事をした場合、輪の速さは不変で仕事は装置の中の或エネルギー（例えばバネのエネルギー）に変換されるようになっているとする。

さてこのような系の内部エネルギー U を考える。装置のエネルギーを W_1 とし、黒体壁の内部エネルギーを $U_B(S_B)$ とする。 C_1 の運動エネルギーは不変だから考えない。 C_1 の作る電流、及び C_2 の電流 $j_2(r)$ は磁場を作る。その磁場のエネルギーを U_m とする。これは $j_2(r)$ の汎関数である。 $(U_m$ は C_1 の速さにもよるが、これは一定であるから無視する)最後に C_2 中の電子の運動エネルギーは、重心運動のエネルギーと、重心に相対的な運動のエネルギーとに分けて考える。今、微小体積 dV を考えその場所のドリフト速度を $v_D(r)$ とすると、重心運動のエネルギーは $(1/2) \int n(r) m v_D(r)^2 dV$ であって、これを U_{2kD} と書く。これは $j_2(r) = en(r)v_D(r)$ の汎関数である。重心に相対的な運動のエネルギーは結局静止した電子ガスの内部エネルギーということであり、これはエントロピーの関数とみることが出来、 v_D には依存しない。これを $U_{2kT}(S_2)$ と書く。飯田氏は U_{2kT} が v_D に依存すると主張され、それが本質的なのだといわれる。しかしなぜ相対運動のエネルギーが重心速度に依存するのか理解できないし、 U_{2kT} が v_D に依存するとした飯田氏の議論も我々の結論(6)と全く同じ結論に導く。従ってこの点はこれ以上問題にすることはやめ、(6)を導くことを行う。

以上のようにして全系の内部エネルギーとして

$$U = U_{2kT}(S_2) + U_{2kD}(j_2(r)) + U_m(j_2(r)) + W_1 + U_B(S_B) \quad (5)$$

をうる。さて全系を孤立系とみなし、 U = 一定の条件の下に $j_2(r)$ を変分して全エントロピー $S_2 + S_B$ を最大にすることを考える。 $\delta U = 0$ 及び $\delta(S_2 + S_B) = 0$ から W_1 を一定とすると直ちに

$$\delta(U_{2kD} + U_m)^{\delta j_2} = 0 \quad (6)$$

となり、これは飯田氏の今回の論文の(10)又は(16)である。これはエントロピーを含まないエネルギー $U_{2kD} + U_m$ を最小にせよということであり、これから直ちにマイスナー効果が導かれる。このように U_{2kT} が v_D に依存することが飯田理論にとって本質的なのではない。飯田さんが今回徹底的に批判された $\delta U_{2kT} = T \delta S_2$ を用いてマイスナー効果が出るのである。(飯田理論には implicit に $\delta U_{2kT} = T \delta S_2$ が含まれていることは前回指摘した) それでは以上の考え方のどこが誤っているのか。まず飯田氏の今回の論文の中から関係のありそうな部分を拾い出し、適当に意識して引用させて頂く。飯田氏によると、「熱力学的手法においては内部パラメータ ($j_2(r)$ や W_1) は人工的に固定できると仮定する。内部パラメータがある値を持つ状態を実際にどうやって実現するかは無視して、そのような状態が実現出来たとして議論する。熱平衡状態はそのような状態のうちでエントロピー最大のものである」更に飯田氏によると、一方不可逆過程を取扱う手法では、系が実際に物理法則に従った素過程を経て移行行く様子を議論せねばならず、そのための一般的な方法として TE 原理を提案されたということになる。飯田氏がこのような区別をしておられることを最近まで気付かず、そのために無用の混乱をひきおこしたと思われる。

現在の例についてまず熱力学的手法を考えてみる。まず U の値をきめ、内部パラメータ W_1 、 $j_2(r)$ をきめると(5)から $U_{2kT}(S_2) + U_B(S_B)$ がきまるから、 $S_2 + S_B$ がきまる。(両者は熱平衡にある) 次に U と W_1 は同一にして、別の $j_2(r)$ をとって $S_2 + S_B$ を求める。そのようにして $S_2 + S_B$ の最大を与える $j_2(r)$ が(6)で与えられる。一方 TE 原理の手法によると、パラメータの値を指定した一つの準平衡状態をとって(その状態を実現する手段は問わない) その状態に $j_2(r)$ の揺動が起ったとし、その後の発展は物理法則を用いておいかける。そうして得られた transient な状態に対して TE 原理を用いて判定する。このようにして最初の状態が熱平衡であったときの条件として(6)が得られる。

TE 原理が第二法則に違反することは既に示したが、その物理的説明は後で行うことにして、

こゝでのべた熱力学的手法の誤りについてまずのべる。一口でいえば、パラメータがある値を持った状態を実現する手段を無視することが誤りである。パラメータの値が $W_1, j_2(r)$ である状態Aをまず考え、次に $W_1, j_2'(r)$ である状態Bを考えてエントロピーを比較するのだが、AやBは人間が人工的に作り出すのではない。系は物理法則に従って運動しているのである。だからAとBは物理法則でつながってはいなくてはならない。ところが物理法則でつながっているのであればBにおいては W_1 が変化するのである。もっと一般に、系は位相空間のあらゆる点を物理法則に従いながらくまなく経巡っている。しかしエントロピー最大の場合が圧倒的に多いので、熱平衡ではエントロピーを最大にするパラメータの値を見付け出せば、それが熱平衡を指定するパラメータの値になる。飯田氏は W_1 を一定とし、 $j_2(r)$ のみを変化させてエントロピーの最大を求めたが、これは教科書を盲目的に適用したものである。正しくは、物理法則に従いながら位相空間の中を運動する系が、エントロピー最大のときどんなパラメータの値をもつか——ということである。

ここから先のことが私の最初の論文に詳しくのべてある。もう一度簡単にくり返すと、まずAとしてパラメータが $j_2(r), W_1, S_2, S_B$ である状態をとり、 $j_2(r)$ に熱揺動による変化 $\delta j_2(r)$ が生じたとする。発生した電磁波は C_1 に対して仕事をし、 W_1 を δW_1 だけ変化させ、黒体壁に U_R のエネルギーを与えて S_B を δS_B だけ変化させる。 $\delta j_2(r)$ に伴う S_2 の変化を δS_2 とする。このようにして到達した状態をBとする。AとBの差を δ と表わすことにすると、エネルギーが保存するから $\delta U = 0$ である。従って(5)から

$$TS(S_2 + S_B) + \delta(U_{2kD} + U_m + W_1) = 0 \quad (7)$$

Aが熱平衡状態であれば $S_2 + S_B$ は極大であり、従って $U_{2kD} + U_m + W_1$ が極小でなければならぬ。

$$\delta(U_{2kD} + U_m + W_1) = 0 \quad (8)$$

これと(6)の違いが本質点なのである。飯田氏によると $\delta W_1 + \delta U'_m = 0$ が成立つ。但し U'_m は U_m と本質的でない項だけ異なる。従って

$$\delta U'_{2kD} = 0 \quad (9)$$

が得られる。 U_{2kD}' は U_{2kD} と本質的でない項だけ異なる。(9)より直ちに $j_2(r) = 0$ が導かれる。

§ 4. Discussion

さて以上の議論で飯田氏にとって最も納得しにくいのは TE 原理がだめだということである。出て行ったエネルギーが戻ってこないのなら出て行く方向は不可逆過程が進行する方向である筈だ。それを式で表わしたのが TE 原理なのである。しかし、今の問題で出て行ったエネルギーは戻ってくるのである。[TE] のうち U_R はたしかに戻ってこない。それはエントロピー増大をおこす。しかし本質的なのは δW_1 である。電磁波の形をとった [TE] のうち C_1 に対して仕事をした部分は C_1 の電源の内部エネルギーとして貯えられる。それが δW_1 である。これはいつでも取戻すことが出来る。実際、揺動 δj_2 に対して δW_1 が生じたのなら、 $-\delta j_2$ に対して $-\delta W_1$ が生じる。飯田氏は TE 原理を作って $-\delta j_2$ を禁止したけれども、それは全くの独断であって理由がない。熱揺動はあらゆる方向に起る。それは実際エントロピーを減小させる方向にも起り得る。A という準平衡状態にいたときに、ある熱揺動が起って最終的に B に落ち着いた時、そのエントロピーが A と較べて減るかどうかどうかということは、未来のことであって、それが現在起る熱揺動に対して何の拘束にもなる筈はない。要はエントロピーが増大する場合の方が圧倒的に多いというだけである。それが見掛上エントロピーが増大する方向にだけ起るように見える。飯田氏はこの最後の所だけ真似をして、[TE] が増す方向にだけ起ると宣言されたがそれは何の根拠もない。[TE] は増すことも減ることもある。あらゆることをやってみて最終的にエントロピー最大の所に落ち着くのである。

以上、エントロピー増大則に基いて飯田理論がいかに誤っているかを指適した。§ 3. § 4 は飯田さんには少しむずかしいかもしれないが、§ 2 は完全に飯田さんの土俵の上で TE 原理が第二法則に違反することを示してある。従って飯田さんにはお願いしますが、§ 2 のどこが誤っているかを明確に指適して下さい。その際必ず理由をのべて下さい。飯田さんは当たり前と思っても、 $\delta U_{2kT} = T\delta S_2$ のように飯田氏の思い違いということもありますから、大学院程度のことでも、一応のべて下さい。もしそうされない場合には、やはり降参なさったものと考えますよ。

附記：

この論文の原稿を飯田氏にお見せした所、飯田氏より電話があつて 2, 3 のやりとりがあつた。その結果もう少し追加した方がよいと思われることがあるのでその一部を附記とし、更に「飯

田氏へⅣ」に詳しくのべる。

飯田氏は回転する輪の速度を一定に保つ装置がお気にいらないうであった。そのような装置はつくれないというのである。私はそうは思わないが、もしそれが気になるなら輪の質量 M が十分大きいとすればよい。そうすれば回転が減衰するのに十分長い時間がかかり、電子系が熱平衡に達するのに要する時間が十分短いとすれば、その時間の程度で電子系の熱平衡を論ずることが出来る。この場合 W_1 は輪の回転の運動エネルギーとする。電磁波が j_1 にした仕事は W_1 の変化になる。このとき輪の速度もごくわずかに変化するが、 M が十分大きいとすればその変化も十分小さくそれを無視することが出来る。もう少し詳しくいうと、すべての量を M^{-1} で展開し、その leading termをとれば本文の議論はそのまゝ成立つ。