

情報消去と熱散逸

—Fokker-Planck 方程式からの導出—

図書館情報大学 鎮目浩輔

〒305つくば市春日1-2 図書館情報大学図書館情報学部

E-mail: shizume@ulis.ac.jp

要旨

Landauerはメモリに記憶された1ビットの情報の消去を行うと必ず $k_B T \ln 2$ 程度以上の熱散逸が起こることを主張した。しかしその正否に関してはなお議論が行われている。本研究ではメモリの基本的な物理的モデルにおいて、情報消去に伴う熱散逸の下限を定量的に調べる。このモデルは動的なポテンシャルのもとでブラウン運動を行う粒子を含む系であり、Langevin 方程式により記述される。そしてその粒子が受けるランダム力が白色ガウスのであり、従って粒子の確率分布の時間発展がFokker-Planck 方程式に従うならば、1ビットの情報消去に伴う熱散逸の平均の下限は正確に $k_B T \ln 2$ になることを証明する。

§ 1. Introduction

1961年、Landauerは計算機の効率の物理的な限界について議論し、特に1ビットの情報の消去には少なくとも $k_B T \ln 2$ 程度以上の熱散逸が伴うことを主張した[Landauer 1961]。まず彼は、基本的な場合として1と0の二つの値を取りうるメモリを取り上げ、このメモリに対する情報消去を次で定義した：

- ・メモリにある決まった値（ここでは1とする）を書き込むこと。ただしこの際、メモリが元々保持していた値の痕跡を系のどこにも残してはならない。

この操作をLandauerにならい、Restore To One (RTO)と呼ぶことにする。定義から、RTO後はメモリの値は1に確定しており、それ以前に保持していた値を知ることは不可能になる。注意すべきは、「元々保持していた値の痕跡を系のどこにも残してはならない」である。例えばメモリの値を何らかの手段で観測し、もし0ならば1に変え、1ならば何もしない、という操作はRTOではない。なぜなら観測して得られた情報が観測者の脳に残ってしまうからである。

具体的に考えるために、メモリの基本的な物理的モデルを導入する。このモデルは、減衰をもち双安定状態と単安定状態の間を行き来する時間依存性を持つポテンシャルと、その中でブラウン運動をする粒子から構成される（図1）。ポテンシャルが双安定状態の場合には粒子は左右どちらかのポテンシャル最小点の周りに留まるので（双安定状態でのポテンシャル障壁は温度より十分高いとする）、粒子が右にあるときにはメモリの値は1であると定義し、左のときは0と定義すればこの系は1ビットの情報を保持するメモリとみなすことができる。

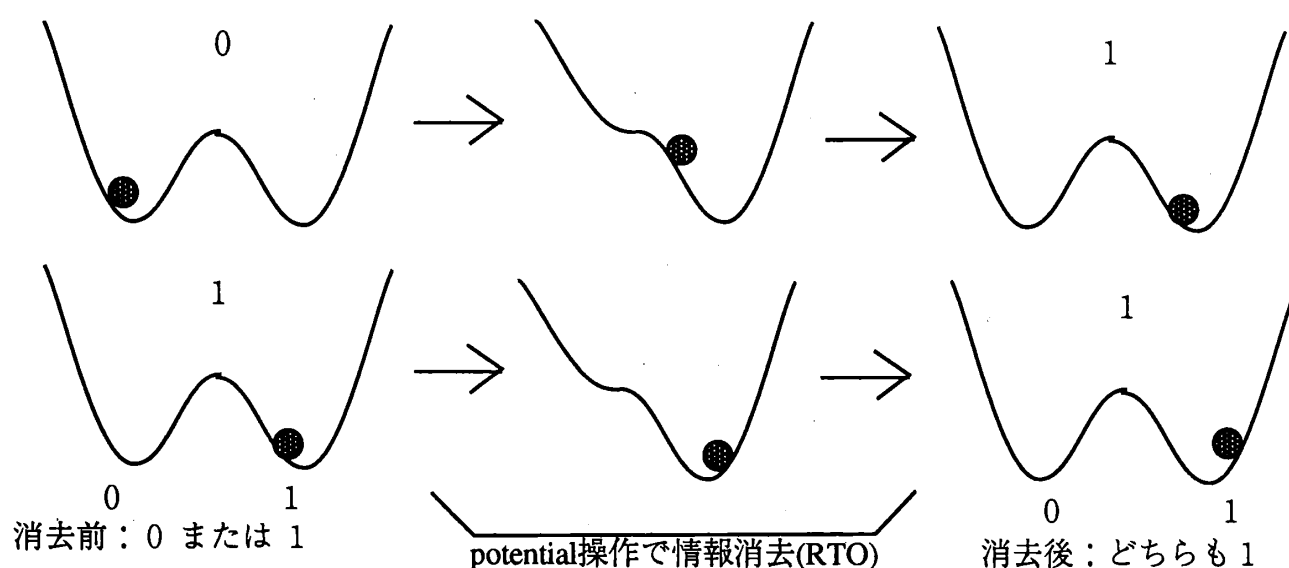


図1 メモリのモデルと情報消去過程

この場合にRTOを達成するには、図1のように、ポテンシャルを適当に操作して粒子を右側に「落とし」、その後また双安定状態に戻せばよい。ただしこの場合、最初に粒子が右にあって左にあって同じポテンシャル操作をしなければならない。つまり粒子がどこにあるかは「見ないで」ポテンシャルを動かし、粒子が最初にどこにいたにせよ、最後には右にいるようにしむけなければならない。上で述べたように、まず粒子の位置を調べ、位置に応じて適当にポテンシャルを動かすという方法だと、調べた粒子の位置情報がどこに残り、それをまた消去するはめになってしまうからである。なお上記から明らかなように、ここでいう情報の消去は情報が「分からなくなる」こと、つまりメモリの値が熱揺動などにより不明になることとは意味が異なる。

Landauerは上記のように情報消去をRTOとして定義した後、次の主張をした：

RTOには $k_B T \ln 2$ 程度以上の熱散逸が必ず伴う。

つまりどのような物理系を用いてメモリを実現しようと、そのメモリに対してRTOを行うと必ず $k_B T \ln 2$ 以上の発熱が起きるということである。ただしメモリの初期値は0の場合と1の場合が半々という前提がつく。上記のモデルの場合にこの主張が意味することは、ポテンシャルを動かして粒子を右に「落とす」際に、どのようにポテンシャルを動かそうと摩擦による発熱が必ず $k_B T \ln 2$ 以上になるということである。Landauerが示した根拠は次の通りである：一つのメモリにRTOを何回も繰り返す場合を考える。RTO前のメモリの状態は1を表す状態の場合と0を表す状態の場合の両方がある。従って、1を表すメモリと0を表すメモリを同じ個数含むアンサンブルを考えて、そこのメモリ全てにある同じ操作を施し、値を全部1にする場合を考えればよい。この操作はアンサンブルのエントロピーを減らす。従って第2法則からその分のエントロピーが環境で増え、その際に発熱が生じるはず。メモリ一つ当たりの発熱量の平均は

研究会報告

$k_B T \ln 2$ 以上になる。

この主張は情報量と熱力学を結びつける基礎とみなされ、Maxwell's demonの解決[Bennet 1981][Leff, 1990]、無発熱計算機の提案[Bennet 1973][Fredkin 1982]、Algorithmic entropyの提案[Zurek 1989]など「情報処理の熱力学」と呼ばれる研究を触発した。

しかしその一方、Landauerが示した上記の根拠は一般性がありもっともらしくはあるものの、具体性や厳密さに欠けるという指摘がされた[Berger 1990]。特に興味深い反論は、Goto等によるもので (§ 2 で紹介)、彼らはQFP (Quantum Flux Parametron)を用いて具体的な反例を挙げた[Goto 1989][Goto 1991][Yoshida 1992]。その後LandauerとGotoの間で議論が行われたが[Landauer 1993][Goto 1993]、はっきりした結論はでていない。その原因の一つに、具体的なモデルでの定量的な議論がなされていないことがあると考えられる。また、Landauerの主張を情報と熱力学の関係を与える基礎として用いるためにも、より堅固な根拠が与えられることが望ましい。

そこで本論文では、メモリのモデルとして上記の基本的なモデル、つまり動的なポテンシャル中のブラウン運動粒子を取り上げ、粒子が受ける熱的ランダム力が白色ガウスの雑音の場合に、1ビットの情報消去に伴う熱散逸が厳密に $k_B T \ln 2$ 以上になることを示す (§ 3)。さらにその結果を用いてGoto等の反論について議論する (§ 4)。§ 5 はまとめである。

§ 2. Goto等による反論 [Goto, 1989][Goto, 1991]

Goto等はLandauerの主張に対し、次の反論を行った：Quantum Flux Parametron (QFP)を用いれば、操作を十分ゆっくり行うことにより、情報消去に伴う熱散逸をいくらでも小さくできる。従って、情報消去に伴う熱散逸の下限は存在しない。

QFPとはJosephson Junction(JJ)を用いた超伝導回路で、磁束を用いて情報の保持、伝送を行う[Goto 1986, 1991][Harada 1987][Hioe 1991]。ひとつのQFPにはinput flux Φ_s と excitation clocking flux Φ_a が入力され、それらによりoutput flux Φ が制御される。その振舞いはRSJモデルに基づいた次の微分方程式により記述される：

$$2C \frac{d^2 \Phi}{dt^2} + 2 \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} + \frac{\partial V}{\partial \Phi} = -I_R \quad (2.1)$$

$$\text{ただし } V = -2E_J \cos\left(\frac{2\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi\Phi_a}{\Phi_0}\right) + \frac{(\Phi - \Phi_s)^2}{2L_L} \quad (2.2)$$

$$\Phi_0 = h/(2e), \quad I_R : \text{抵抗から来るJohnson noise, } E_J \equiv \Phi_0 I_J / (2\pi),$$

$$I_J : \text{Josephson critical current, } C, R, L_L : \text{定数。} \quad (2.3)$$

式(2.1)はLangevin方程式と数学的に同じ形式をとる。従って Φ は「ランダム力」 I_R を受けな

から「ポテンシャル」 V の中をブラウン運動する粒子の座標とみなせる。 V の形は Φ_s と Φ_a で制御され、その結果 Φ が制御されることになる。重要なのはポテンシャル V の形であり、 $2\pi\Phi_a/\Phi_0 = \pi$ とすると双安定状態、 $\Phi_a=0$ とすると、単安定状態となる。このことを利用すると、§1のモデルのように、双安定状態で情報を保持、単安定状態で消去することができる。このためQFPはまさに§1のモデルを実現化しうる素子とみなすこともでき、物理的観点からも非常に興味深い。

Goto等はQFPにより散逸をいくらでも減らせるという主張の根拠として次を挙げた：QFPでポテンシャルを双安定状態から単安定状態に変化させ情報消去を行うが、その際にロジックコピーの使用により、output flux Φ の障壁を越えての移動を押さえ、 Φ を常にポテンシャルの最小点にいさせることができる（ロジックコピーとは、複数のQFPを直列につなぐ場合に、出力側の値により入力側の値が影響されないようにするための技法。本論文では1つのQFPのみを扱うので、考慮しない）。そして熱生成のもとになるのは $\dot{\Phi}/R$ の項だけなので、障壁を越えての移動がなければ、熱生成率（1クロックサイクルあたりの発熱量） P は

$$P \equiv \int \frac{\dot{\Phi}^2}{R} dt = H_0 f_c \quad (2.4)$$

与えられる。ここで f_c はクロック周波数であり、積分は1サイクルにわたって行われる。よって f_c を小さくすれば P はいくらでも小さくできる。

しかし、Goto等の議論には次の問題があると考えられる。まず $P = H_0 f_c$ の正当性である。 $f_c \rightarrow 0$ の極限を考えると、単位時間当たりの発熱は有限値（平衡値）になる。一方、周期 $1/f_c$ は無限大になるので、単純に考えると $f_c \rightarrow 0$ で P はむしろ無限大になる。従って、(2.4)は少なくとも単純には成り立たないはず。また別種の問題として、情報消去の議論で P を散逸の定義としてよいかということがある。これらについては§4で議論する。

§3. Fokker-Planck eq.に従う系での熱散逸の下限

QFPは上述のとおり、§1で導入したメモリのモデルを実現したものとみなすこともできる。また、このモデルは基本的であり、Landauerの主張を定量的に調べるための第一歩として取り上げるのに適切と考えられる。そこで、ここではこのモデルで特にランダム力が白色ガウス雑音の場合を考え、その場合には情報消去に必要な散逸の下限が厳密に

$$k_B T \times \text{消された情報量} \quad (3.1)$$

になることを証明する。以下では煩雑さをさけるため、 $k_B=1$ の単位系を用いる。証明の方針は次の通りである：ランダム力が白色ガウス雑音なら粒子の確率分布関数はFokker-Planck eq. (FPE)に従う。そこでFPEに従う系ではポテンシャルに時間依存性がある場合でも「第2法

則」、つまり

$$dQ \leq TdS \quad (3.2)$$

の確率過程版が厳密に成り立つことを導出する。そして導出した(3.2)を情報消去の過程に適用する。いわばLandauerの議論を、(3.2)を用いて基礎付けすることになる。なおよく知られているようにポテンシャルが静的な場合、FPEの解はH定理を満たす[Risken 1989]。この場合にH定理を利用して「第2法則」を導出することはHasegawa等により行われている[Hasegawa 1980]。次に示す証明の特色はポテンシャルが陽に時間依存性を持ち、従ってH定理が成り立たない場合を扱うことである。

3. 1 Fokker-Planck eq. に従う系での「第2法則」 $dQ \leq TdS$

このモデルのブラウン粒子の座標を x とすると、 x は次のLangevin eq. に従う：

$$m\ddot{x} + m\gamma\dot{x} = -\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} + F_R(t) \quad (3.3)$$

ただし $V(x, t)$ は時間依存性を持つポテンシャル。また $F_R(t)$ は白色ガウスのランダム力で、

$$\langle F_R(t)F_R(t') \rangle = 2m\gamma T\delta(t-t') \quad (3.4)$$

を満たすとする。この場合、時刻 t に粒子の位置、速度がそれぞれ $x \sim x+dx$, $u \sim u+du$ に入る確率を $f(x,u,t)dxdu$ とすると、分布関数 $f(x,u,t)$ は次のFPEに従う（例えば[Risken 1989]）：

$$\frac{\partial}{\partial t} f(x,u,t) = \left[-\left\{ \frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial u} \left(-\gamma u - \frac{1}{m} \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\gamma T}{m} \frac{\partial^2}{\partial u^2} \right] f(x,u,t). \quad (3.5)$$

(3.5)から「第2法則」を導く。つまり粒子が熱浴から単位時間に受けるエネルギーの平均値を $\dot{Q}$ としたとき（ここで Q に付けたドットは「単位時間当たり」を表し、時間微分ではない）、

$$\dot{Q} \leq T \frac{dS}{dt} \quad (3.6)$$

が成り立つことを示す。ただし S は分布関数 f に対応するShannon-von Neumannのエントロピー

$$S \equiv - \int_{-\infty}^{\infty} dx du f \ln f. \quad (3.7)$$

まず、エネルギー保存則から

$$\dot{Q} = \frac{d\langle E \rangle}{dt} - \dot{W}. \quad (3.8)$$

ここで

$$E(x, u, t) \equiv \frac{mu^2}{2} + V(x, t), \quad (3.9)$$

$$\langle E \rangle \equiv \int dx du f(x, u, t) E(x, u, t) \quad (3.10)$$

(以下、(3.10)と同様に $\langle X \rangle$ で X のアンサンブル平均を表す)。また $\dot{W}$ は時間変化するポテンシャルが粒子に対して単位時間に行う仕事の平均値で、

$$\dot{W} = \left\langle \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dx du f(x, u, t) \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (3.11)$$

で与えられる(実際、粒子と熱浴(環境)の合成系のハミルトニアンを H とすると、 H の中で陽に時間に依存する部分は $V(x, t)$ のみ。従って、各力学変数を運動に沿った時間の関数とみなして H を時間微分すると

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.12)$$

が得られ[Landau, 1969]、これが粒子+熱浴のエネルギーの変化率、従ってポテンシャルが粒子+熱浴に対して行う単位時間当たりの仕事でもある。しかし実際にはポテンシャルが結合しているのは粒子のみなので、仕事をされるのは粒子のみ。従ってこの量のアンサンブル平均 $\langle \partial V(x, t) / \partial t \rangle$ が求める $\dot{W}$ となる)。 (3.8)~(3.11)により $\dot{Q}$ は次で与えられる:

$$\dot{Q} = \int_{-\infty}^{\infty} dx du \frac{\partial f(x, u, t)}{\partial t} E(x, u, t) \quad (3.13)$$

ここでFPEを用いると次が得られる:

$$\dot{Q} = \gamma(T - \langle mu^2 \rangle) \quad (3.14)$$

また、(3.7)とFPEから

$$\frac{dS}{dt} = \gamma \left(\frac{T}{m} \left\langle \left(\frac{\partial \ln f}{\partial u} \right)^2 \right\rangle - 1 \right) \quad (3.15)$$

が得られる。よって、これら2つの式から

$$\begin{aligned} \dot{Q} - T \frac{dS}{dt} &= \gamma(T - \langle mu^2 \rangle) - T \gamma \left(\frac{T}{m} \left\langle \left(\frac{\partial \ln f}{\partial u} \right)^2 \right\rangle - 1 \right) \\ &= -\frac{\gamma}{m} \left\langle \left(T \frac{\partial \ln f}{\partial u} + mu \right)^2 \right\rangle \leq 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

(ここで $\left\langle \frac{\partial \ln f}{\partial u} u \right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} dx du f \frac{\partial \ln f}{\partial u} u = \int_{-\infty}^{\infty} dx du \frac{\partial f}{\partial u} u = - \int_{-\infty}^{\infty} dx du f = -1$ を用いた)

研究会報告

以上で(3.6)は証明された。

不等式(3.6)を時刻 t_1 から t_2 まで積分すると次が得られる：

$$Q(t_1, t_2) \leq T\Delta S(t_1, t_2) \quad (3.17)$$

ただし、

$$Q(t_1, t_2) \equiv \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt : \text{時刻 } t_1 \text{ から } t_2 \text{ までの間に系に入ったエネルギー、}$$

$$\Delta S(t_1, t_2) \equiv S(t_2) - S(t_1)。$$

特に $\Delta S(t_1, t_2) \leq 0$ の場合には次が成り立つ：

$$Q(t_1, t_2) \leq 0, \text{ かつ } |Q(t_1, t_2)| \geq T|\Delta S(t_1, t_2)|。 \quad (3.18)$$

これらの結果から分かることは次の通りである：FPEに従う系では、ポテンシャルが時間依存性を持ちH定理が成り立たない場合でも、エントロピーとしてShannon-von Neumann entropy S を取ることにより熱力学と形式的に同じ議論ができる。特に S が減少する場合には、熱浴にエネルギーが熱として流れ出し、その大きさの平均の下限が $T|\Delta S(t_1, t_2)|$ で与えられる。

3. 2 情報消去に伴う散逸の下限

FPEで記述される系をメモリとして用いた場合、1ビットの情報消去には必ず $T\ln 2$ 以上の熱散逸が起きることを(3.18)を用いて証明する。まずこのメモリの値が0の場合の粒子の分布関数を $f_0(x, u)$ 、1の場合のものを $f_1(x, u)$ とする。情報消去RTOはポテンシャルを適切に動かし、初期分布が f_0 、 f_1 のいずれであったにせよ最終分布を f_1 にすることにより行われる（図2）。

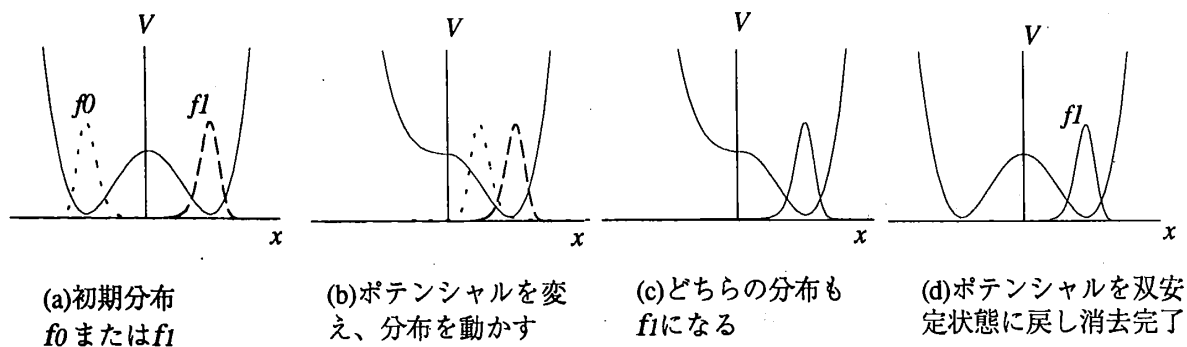


図2 情報消去過程における分布の変化

初期時刻 t_i で値が0である確率を p_0 、1である確率を p_1 とすると、アンサンブル全体の、時刻 t_i での粒子の位相空間における分布関数は

$$f_{ini} \equiv p_0 f_0 + p_1 f_1 \quad (3.19)$$

で与えられる（アンサンブルが含むメモリの個数を N とすると、 Np_0 個のメモリの値が0、

Np_1 個の値が1なので、アンサンブル全体としての粒子の分布は $N(p_0f_0 + p_1f_1)$ になる)。よってエントロピーは

$$S_{init} = - \int dxdx f_{init} \ln f_{init} = - \int dxdx (p_0f_0 + p_1f_1) \ln(p_0f_0 + p_1f_1). \quad (3.20)$$

粒子の位置、または速度の測定によりメモリの値が0か1かを識別できるためには f_0 と f_1 の重なりは無視できるほど小さいはず。従って

$$\begin{aligned} S_{init} &\approx - \int dxdx (p_0f_0 \ln(p_0f_0) + p_1f_1 \ln(p_1f_1)) \\ &= -p_0 \int dxdx f_0 \ln f_0 - p_1 \int dxdx f_1 \ln f_1 - p_0 \ln p_0 - p_1 \ln p_1 \\ &= p_0 S[f_0] + p_1 S[f_1] + S[\{p_0, p_1\}], \end{aligned} \quad (3.21)$$

但し $S[f] \equiv - \int_{-\infty}^{\infty} dxdu f \ln f$: 分布 f のエントロピー

$$S[\{p_1, \dots, p_n\}] \equiv - \sum_{i=1..n} p_i \ln p_i : \text{分布 } \{p_1, \dots, p_n\} \text{ のエントロピー} \quad (3.22)$$

となる。(3.21)の最初の2項は、メモリの値が決まっても粒子の位置に不確定が残ることに由来するエントロピー(の平均)、最後の項はメモリの値が不確定なことに由来するエントロピーと解釈できる。特に

$$S[f_0] = S[f_1] \quad (3.23)$$

ならば、

$$S_{init} = S[f_1] + S[\{p_0, p_1\}]. \quad (3.24)$$

一方、RTOを行った後ではエントロピーは

$$S_{final} = S[f_1]. \quad (3.25)$$

従って $\Delta S(t_i, t_f) = -S[\{p_0, p_1\}]$ となり、(3.18)から散逸されるエネルギーの下限

は $TS[\{p_0, p_1\}]$ となる。特に $p_0 = p_1 = 1/2$ の場合には下限は $T \ln 2$ となる。以上でこの系では Landauer の主張が厳密に成り立つことが示された。

上の議論で、(3.23)を前提としたが、これは実は本質的ではない。これまではメモリの値を消去するまでの熱的コストを調べたが、さらにその後新たに値をセットするところまでの熱的コストを考えると(3.23)なしで「自然」な結果を得られる。実際、メモリに消去前と同じ比率で0と1をセットしたとすると、その時のエントロピーは

$$S_{set} \equiv p_0 S[f_0] + p_1 S[f_1] \quad (3.26)$$

(ここでは一つ一つのメモリの値はそれぞれ確定しているため、(3.21)と異なり $S[\{p_0, p_1\}]$ は

研究会報告

現れない)。よって、消去をし、さらにまた値をセットするまでに必要な熱散逸の下限は (3.18), (3.21) および (3.26) のみから (つまり、(3.23) なしで)

$$T(S_{init} - S_{set}) = TS[\{p_0, p_1\}] \quad (3.27)$$

となる。 $p_0 = p_1 = 1/2$ の場合には、再び Landaur の結果が得られる。

以上の議論はメモリのとりうる値が2つより多い M 個の場合へも容易に一般化でき、散逸の下限の平均値は自然な予想通り

$$TS[\{p_k\}] = -T \sum_k p_k \ln p_k \quad (3.28)$$

となる。

§ 4. 議論

1) QFPで散逸なしの情報消去が可能か？

§ 2 で紹介したように、QFPの運動は出力フラックスを粒子の位置、雑音電流をランダム力に対応させることにより Langevin 方程式で記述されるので、QFPを用いた情報消去過程に対しては § 3 の議論がそのまま適用できる。従って QFP の雑音電流が白色ガウスである場合には、または言い換えると QFP で使われる Josephson junction の振舞が FPE で記述される場合には QFP を用いても散逸なしの情報消去は不可能となる。

一方、[Risken 1989][Barone, 1982][Falco, 1974][Ben-Jacob 1983] などによると Josephson junction は FPE による記述がよく行われ、ある R, C, I_c, T の範囲では実験とも比較され、よく合うことが報告されている。しかし FPE の記述と合わない振舞いをする Josephson junction を用いることも考えられ、その場合には3章の議論を非白色ガウス雑音の場合に拡張できるかどうか問題となる。これは今後の課題である。

2) 散逸の定義について

§ 2 で述べたように Goto 等は散逸を

$$P = \int \frac{\dot{\Phi}^2}{R} dt \quad (4.1)$$

により定義し、それが情報消去過程で $T \ln 2$ より小さくなるかどうかを議論した。Landauer もこの定義に基づいて議論している [Landauer 1993]。§ 2 のモデルではこの量は

$$\bar{P} = \int_{t_1}^{t_2} \gamma \mu u^2 dt \quad (4.2)$$

に対応する。しかし、この定義では抵抗の発熱だけで、逆に環境から抵抗に入るエネルギーを考慮していない。従って、§ 2 でも触れたように例えば単なる熱平衡状態においても $\bar{P}$ の被積

分関数 $\gamma\mu^2$ は等分配則で決まる有限の値 γT をとるため、 $\bar{P}$ は時間に比例して増加することになる。散逸した熱量はむしろ、発熱分から「吸熱」分を差し引いた値として定義すべきであり、それは § 2 の $Q(t_1, t_2)$ (の符号を変えたもの) で与えられる。なお § 2 のモデルでは (3.14) から $\bar{P}$ と Q の関係は次式で与えられる：

$$\bar{P} = -Q(t_1, t_2) + \gamma T(t_2 - t_1). \quad (4.3)$$

平衡状態においてはポテンシャルは静的なので $Q=0$ 、よって上述の通り $\bar{P}$ は時間に比例して増大する。

§ 5. まとめ

白色ガウス型のランダム力を受ける粒子系をメモリと見なし、ポテンシャルを変化させることにより情報消去を行おうとすると、その際に必要な、散逸される仕事の平均値は

$$k_B \times \text{温度} \times \text{消去される情報量} \quad (5.1)$$

以上になることを Fokker-Planck eq. から厳密に導いた。QFPによる情報消去は、用いている Josephson junction の磁束の運動が Fokker-Planck eq. で記述される場合には上の範疇にはいり、従って発熱無限小での情報消去は不可能となる。そうでない場合には本研究の議論を非白色ガウス雑音の場合にも拡張できるかどうかが問題となる。これは今後の課題である。

謝辞

有益な議論をいただいた東北大学の岩井博士、佐々木助教授、高木助教授、早川博士、および山形大の 高橋博士 等に感謝いたします。

参考文献

- [Barone] Barone, A. & Paterno, G. , *Physics and Applications of the Josephson Effect*. (John Wiley & Sons, 1982).
- [Ben-Jacobi 1983] Ben-Jacobi, E., Mottola, E. & Schoen, G. Phys.Rev.Let. **51**, 2064-2067 (1983 Nov. 28).
- [Bennet, 1973] Bennet, C.H., IBM J. Res. Dev. **17**, 525-32 (1973).
- [Bennet, 1981] Bennet, C.H., Int. J. Theor. Phys. **21**, 905-40 (1981).
- [Berger 1990] Berger, J., Int. J., Theor. Phys. **29**, 985 (1990).
- [Falco, 1974] Falco, C. M., Parker, W. H., Trullinger, S. E., Phys.Rev. **B10**, 1865-1873 (1974).
- [Fredkin 1982] Fredkin, E. & Toffoli, T. Int. J. Theor. Phys. **21**, 219-253 (1982).
- [Goto, 1986] Goto, E. & Loe, K.F., *DC FLUX PARAMETRON* (World Scientific, Singapore,

研究会報告

1986)

- [Goto, 1989] Goto, E., Yoshida, N., Loe, K.F. & HIOE, W. in *Proceeding of 3rd. Int. Symp. Foundation of Quantum Mechanics*, 412-418 (1989)
- [Goto, 1991] Goto, E., W.Hioe & M.Hosoya., *Physica C* **185-189** , 385-390 (1991).
- [Goto, 1993] Goto, E. & Yoshida, N. (1993). *Author's Comments on "Physical Limit to QFP Operations" and on Landauer's "Comments"* preprint
- [Harada 1987] Harada, Y. Nanane, H., Miyamoto, N., Kawabe, U, and Goto, E., *IEEE Transactions on Magnetics* **MAG-23**, 3801-3807 (1987).
- [Hasegawa, 1980] Hasegawa, H., Nakagomi, T., Mabuchi, M. & Kondo, K. *Jour. Stat.Phys.* **23**, 281-313 (1980).
- [Hioe 1991] Hioe, W. & Goto, E., *Quantum Flux Parametron: A Single Quantum Flux Superconducting Logic Device* (World Scientific, Singapore, 1991).
- [Landau 1969] Landau, L.D. & Lifshitz, E.M. *Mechanics* (Pergamon, Oxford, 1969).
- [Landauer 1961] Landauer, R., *IBM J. Res. Dev.* **5**, 183-91 (1961).
- [Landauer 1993] Landauer, *Physica C* **208**, 205-207 (1993).
- [Leff 1990] Leff, H.S. & Rex, A.F. *Maxwell's demon: Entropy, Information, Computing* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1990).
- [Riskin 1989] Riskin, H., *The Fokker-Planck Equation -Methods of Solution and Applications-* 2nd.Ed. (Springer-Verlag, 1989).
- [Yoshida 1992] Yoshida, N., Goto, E., Loe, K.F. & Hioe, W. in *Advances in Quantum Flux Parametron Computer Design* (eds. Goto, E., Wada, Y. & Loe, K.F.) 148-155 (World Scientific, 1992).
- [Zurek, 1989] Zurek, W.H., *Phys. Rev.* **A40**, 4731-51 (1989).