

「情報量」の特徴付け—Brillouin の Negentropy 原理
の観点から—

京大 理 中込照明

この論文は一つの中心的主張《ある物理系の状態が何らかの可測空間 (Ω, \mathcal{B}) 上の確率測度 p で表わされ、その系についての測定結果が事象 $A \in \mathcal{B}$ で表わされるという設定のもとで、状態 p において測定結果 A を得たときに測定者の受取る情報量 $I(A|p)$ として幾つかの自然な条件を満すものも考えると、その形が一意的に Brillouin の 'negentropy principle of information' に対応する形、即ち

$$I(A|p) = S(p) - S(p_A), \quad S(p) \equiv -k \int dp \log \frac{dp}{d\mu} \quad (k > 0)$$

に決ってしまう》とそれに関連する諸々の議論とから成り立っている。

§ 1. 序

孤立系の振る舞いは一般に系の Hamiltonian から導かれる Liouvillean Δ を使った $\dot{\rho} = \Delta \rho$ の形の発展方程式で与えら

れる。ところが開放系の場合には、このような発展方程式による記述は、特殊な場合例えば一定不変の熱浴と弱く結びついている系 [cf. 1, 27, 2] などを除いて、一般にはできなからず、*system* についての情報を完全に含んだ Hamiltonian 及至それと相当するものを考えることは開放系の場合一般には不可能である。そこで情報量の出入りの問題が開放系を記述する際の重要な側面の一つになると考えられる。「情報量」については Shannon [3], Wiener [4] 以来様々に議論され [5-20]^{*} また Szilard, Brillouin 等 [21-28] による物理的側面からの議論もなされ、種々の定義と特徴付けが行われてきたが、未だ物理量としての正統な位置は与えられていないようである。この原因の一つとしては entropy, 情報量, 不確定性の尺度 (uncertainty) といふ言葉の乱用が挙げられるであろう。この論文においては、Brillouin の 'negentropy principle of information' を一般化する形での情報量及び entropy の特徴付けの一つの試みを提出するのであるが、それは以上の言葉の明瞭な区別を与えるものであり、今後情報量の出入りの問題を考える際の有用な拠所を与えるものになると信ずる。

* [5-8] は離散型情報量の場合, [9-15] は連続型または一般型, [16-19] は非確率型であり, [17, 8, 20] には詳しい文献がある。

まず Brillouin の 'negentropy ……' (以下 Brillouin の原理
 という) の説明から始めて, 以下この論文の問題としている
 事の概略を述べよう。Brillouin [23] は microcanonical ensemble
 であらわされる system の状態を考え, ensemble を構成してい
 る P_0 個の可能な微視的状态の個数を P_1 個に減らすのに必要な
 情報量を $I = -k \log(P_1/P_0)$ で定義し, 各状態の entropy を
 Boltzmann の定義 $S = k \log P$ で与えることによつて,

$$S_1 = S_0 - I \quad (1-1)$$

の関係を得て, 情報は負の entropy (即ち negentropy) とし
 て働くという原理を立てた。

そこで筆者は二つの問題を考えた。一つはこの Brillouin の
 原理を情報量と entropy の間の基本的関係であると見なし,
 これに更に何らかの自然な条件を付け加えて, 逆にそれらか
 ら情報量と entropy の持つべき一般的形が規定できるのかと
 いうことであり, もう一つは情報量だけの一般的性質から,
 この Brillouin の原理に相当するものが導けるのかということ
 である。

第一の問題については, まず状態を Brillouin の考えた micro-
 canonical なものから一般の可測空間 (Ω, \mathcal{B}) 上の確率測度 p
 で与えられるものに一般化し, 一つの測定結果は事象 $A \in \mathcal{B}$

で与えられるという設定を考え、各状態 p に対して entropy $S(p)$ が定義され、状態 p のもとで測定結果 A を得たとき測定者は情報量 $I(A|p)$ を受取るものとして、式 (1-1) を次のように書いた。

$$(a) \quad S(p_A) = S(p) - I(A|p) \quad \text{ただし } p_A(\cdot) \equiv P(A|\cdot)/P(A)$$

これに加え、(b) 平均情報量の普遍性の条件と、(c) ある種の連続性の仮定を置いた。条件 (b) は、 $0 \leq t \leq 1$ で定義され少なくとも一点で正となる実数値関数 $f(t)$ が存在して、任意の (A, p) に対し

$$I(A|p)p(A) + I(A^c|p)p(A^c) = f(p(A))$$

が成立つというものである。これらの仮定を置くと、§2 に示すごとく、 $S(p)$ の形は

$$S(p) = -k \int dp \log \frac{dp}{d\mu} \quad k > 0$$

に決まり、したがって $I(A|p)$ も (a) によって決ってしまう。

この $S(p)$ はいわゆる一般化された Boltzmann-Shannon-Gibbs entropy 或は BGS-entropy [29, 30] と呼ばれるもので、一般的 entropy の表式としてよく使われるものである。以上が第一の問題に対する一つの答えである。

第二の問題については、 $I(A|p)$ の基本的性質として次の四つ：
 (d) 連続する測定についての加法性，

$$I(A|p_B) + I(B|p) = I(ANB|p) \quad \text{if } p(ANB) \neq 0$$

(e) 局所性，もし $p_A = p'_A$ ， $p_B = p'_B$ なら

$$I(A|p) - I(A|p') = I(B|p) - I(B|p')$$

(f) 平均情報量の普遍性（これは (b) と同じ），及び (g) あり種の連続性の仮定，を置いた。すると §2 に示すように，これらから条件 (a) を満たすような S の存在がわかり，第一の公理系 (a) (b) (c) と第二の公理系 (d) (e) (f) (g) とが同等であることが導かれる。以上が第二の問題に対する答えである。

次に以上の公理群の意味を考えてみよう。

(a) (d) (e) の意味：情報量 H entropy は system の「状態」に対して定義されるのであるから，これらの公理の意味をはっきりさせるには，まず「状態」概念の意味するものを認識しておかねばならない。Giles [31] によれば、物理の理論の目的は system の振る舞いを予測することであり，一つの理論は予測のための一連の規則の集りより成り立っている。「状態」はこのような理論の中で予測の根拠を与えるという機能を果たしている。そして予測は system についての情報に基づいて行わ

れるのだから、結局「状態」とは system についての情報の総体にほかならぬ \rangle ということになる。更に、 \langle その情報は system を一定の仕方で準備したことによって得られるのだから、「状態」は具体的には一つの 'method of preparation' に対応させられるが、可能なすべての測定について同一の予測をなす二つの 'method of preparation' は「状態」の機能としては同等だから、同一視されるべきである。したがって、一つの「状態」はこの同一視による 'method of preparation' の一つの類に対応させられる \rangle ことになる。そこでもし予測が、可能な結果に対する確率分布で与えられるとし、また微視的状态というものを仮定するなら、この 'method of preparation' の類はその予測についての機能の面からは微視的状态の上の確率分布で特徴付けられることになる。確率測度 p によって表わられる状態というものを、 Ω を微視的状态の全体と見なし、上述のように解釈するならば、その状態 p が意味する情報の総量を計る尺度 $N(p)$ が存在すると仮定することは自然であり、また測定によって結果 $A \in B$ を得れば状態が p から p_A に変化することも容易に納得できる。更にこの時情報量は $I(A|p)$ だけ増えるわけだから、 $N(p_A) = N(p) + I(A|p)$ を得る。すると、条件 (d) と (e) は直ちに導くことができる。また entropy S を $S(p) = -N(p)$ で定義すれば、上式は (a)

そのものになる。逆に条件 (a) は entropy という量が system に
ついでこの知識の水準を示す尺度に負符号をつけたものである
ことを規定する条件であると言ってもよい。このとき、 N は
negentropy と呼ばれる量になる。このように Giles 流の状
態解釈のもとに entropy を上述のように規定するなら entropy
増大則は当然のものとなる。即ち「ある一定の方法で準備し
た system をその後何もせずにはほうと置く」という 'method
of preparation' に対して情報量は減ることはあっても増え
ることはないということを述べているに過ぎないからである。
(もっとも、熱力学的 entropy が上述の規定に簡単に納まる
かどうかは問題であるか。)

(b) の意味: この条件 (b) は同一の測定を多数行って得られ
る情報量の平均値は、測定結果の予測に含まれる不確定性を
計る尺度 (uncertainty) として使われるということ、可
能な測定結果が二つしかない場合に述べたものである。情報
量を uncertainty に結びつける考えはよく使われる考え方であ
るが [5], 必ずしも自然な事とは言えない。uncertainty
という量は確率分布 $p(A_1), \dots, p(A_n)$ (A_1, \dots, A_n は可能な結果の全
体) で与えられた予測に対して定義される量 $U(p(A_1), \dots, p(A_n))$
であるから、平均の情報量 $\sum_i p(A_i) I(A_i|p)$ が U として使える
ためには少なくともそれは $p(A_1), \dots, p(A_n)$ だけの函数とらね

はなるとい。また \mathcal{I} はその意味からして、非負であって、また恒等的に 0 であってはならない。残念ながら、これらの条件を平均情報量の性質として要求しうる十分に自然な論理を筆者はまだ持ち合せていない。そこでこの要求を可能なかぎり弱めて (b) のような形で述べた。(a) と組み合わせれば、以上の要求はすべて満たされ、また $\mathcal{I}(p_1, \dots, p_m)$ の形も Shannon の与えたものに決まる。(§2-定理1)

以下 §2 では公理系と定理の数学的定式化が述べられ、§3 ではその結果にもとづいた諸々の議論がなされる。

§2. 数学的定式化

2-1. 記号及び定義

(1) 集合: (Ω, \mathcal{B}) を一つの可測空間とし、その上に定義される凡ての (正の) σ -有限測度の全体を $M(\Omega, \mathcal{B})$ と置き、このうち特に確率測度 (即ち $p(\Omega) = 1$ となる測度 p) の全体を $V(\Omega, \mathcal{B})$ と書く。各 $\mu \in M(\Omega, \mathcal{B})$ に対して、次の二つの集合を定義する。

$$V(\mu) = \{ p \in V(\Omega, \mathcal{B}) ; p \ll \mu \}$$

$$V_0(\mu) = \{ p \in V(\mu) ; \frac{dp}{d\mu} \text{ は階段函数である} \}$$

ここに $p \ll \mu$ は p が μ について絶対連続であることを示し、 $\frac{dp}{d\mu}$ は Radon-Nikodym の密度である。また階段函数とは有限個の特性函数 $\mathbb{1}_A (A \in \mathcal{B})$ の一次結合で表わされる函数のこ

とである。

(ii) 収束 : 列 $\mu_n \in M(\Omega, \mathcal{B})$ ($n=1, 2, \dots$) 及び $\mu \in M(\Omega, \mathcal{B})$ に対し $\mu \ll \nu, \mu_n \ll \nu$ ($n=1, 2, \dots$) とする任意の $\nu \in M(\Omega, \mathcal{B})$ に対して $\frac{d\mu_n}{d\nu} \rightarrow \frac{d\mu}{d\nu}$ ν -a.e. ($n \rightarrow \infty$) とするとき $\mu_n \xrightarrow{D} \mu$ ($n \rightarrow \infty$) と書く。この定義においては、任意の ν を ある ν に変えても同じである。

(iii) その他 : (1) $A \in \mathcal{B}$ $p \in V(\Omega, \mathcal{B})$ に対し $p(A) \neq 0$ のとき、条件付確率 $p_A \in V(\Omega, \mathcal{B})$ が $p_A(B) = p(A \cap B) / p(A)$ ($\forall B \in \mathcal{B}$) で定義される。(2) \mathcal{B} の部分集合 $\{A_1, \dots, A_m\}$ が $A_i \cap A_j = \emptyset$ ($i \neq j$) $\bigcup_i A_i = \Omega$ とするとき、これを Ω の $(m-)$ 分割と呼ぶ。

2-2. 情報空間の定義

$V(\Omega, \mathcal{B})$ の部分集合 \mathcal{P} が次の三つの条件を満たすとせよ。

(i) $p \in \mathcal{P}$ $A \in \mathcal{B}$ $p(A) \neq 0$ なら $p_A \in \mathcal{P}$

(ii) $\exists \lambda \in \mathcal{P}$ s.t. $V_0(\lambda) \subset \mathcal{P} \subset V(\lambda)$

(iii) $\exists p \in \mathcal{P}$ $\exists \{A_1, A_2, A_3\}$ (Ω の 3-分割) s.t. $p(A_i) \neq 0$ ($i=1, 2, 3$)

このとき組 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P})$ を 情報可測空間 と呼び、(ii) に出てくる λ を \mathcal{P} の 基本元 と呼ぶ。

注 : \mathcal{P} が二つの基本元 λ, λ' をもつなら、それらは互に絶対好連続である。

次に写像 $I : \mathcal{B} \times \mathcal{P} \rightarrow \mathcal{R}$ (the real line) ($(A, p) \mapsto I(A|p)$) が以下の四つの公理を満たすとする。このとき、 I を 情報量 と

呼び、組 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}, I)$ を 情報空間 と呼ぶ。

公理 A-1. (連続性) (a) $p_n, p, q \in \mathcal{P}$ $\alpha > 0$ $p_n < p + \alpha q$ $p_n \xrightarrow{D} p$ ($n \rightarrow \infty$)
 ならば $p_n(A)I(A|p_n) \rightarrow p(A)I(A|p)$ ($n \rightarrow \infty$) $\forall A \in \mathcal{B}$ 。

(b) $A_n, A \in \mathcal{B}$ $p \in \mathcal{P}$ $p(A_n \Delta A) \rightarrow 0$ ($n \rightarrow \infty$) ならば
 $p(A_n)I(A_n|p) \rightarrow p(A)I(A|p)$, ただし $A \Delta B \equiv (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ 。

公理 A-2. (連続測定に対する加法性)

$$p(A \cap B) \neq 0 \text{ のとき, } I(B|p_A) + I(A|p) = I(A \cap B|p)$$

公理 A-3. (局所性) $=$ の確率測度 $p, p' \in \mathcal{P}$ 及び $A, B \in \mathcal{B}$

に対して, $p_A = p'_A, p_B = p'_B$ ならば

$$I(A|p) - I(A|p') = I(B|p) - I(B|p')。$$

公理 A-4. (平均情報量の普遍性) $0 \leq t \leq 1$ で定義された,
 少なくとも ε 一点で正となる実数値関数 $f(t)$ が存在して,

$$p(A)I(A|p) + p(A^c)I(A^c|p) = f(p(A)) \quad \forall A \in \mathcal{B} \quad \forall p \in \mathcal{P}。$$

定義. Ω の分割 $\{A_1, \dots, A_n\}$ 及び $p \in \mathcal{P}$ に対する 平均情報量 J を次に定義する。

$$J(\{A_1, \dots, A_n\}|p) \equiv \sum_{i=1}^n p(A_i)I(A_i|p)。$$

2-3. 基本定理

定理 1. 情報空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}, I)$ に対して正の定数 k が一意的に存在して, 平均情報量は常に次の形に表わされる。

$$J(\{A_1, \dots, A_n\}|p) = -k \sum_{i=1}^n p(A_i) \log p(A_i) \quad (2-1)$$

定理2. 情報空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}, I)$ に対して, 正の定数 k が一意的に存在し, また \mathcal{P} の基本元 λ と互に絶対連続な σ -有限測度 μ が正の定数倍を除いて一意的に存在して, 情報量 I は次のように書かれる。

$$I(A|p) = -k \int dp \log \frac{dP}{d\mu} + k \int dp_A \log \frac{dP}{d\mu} \quad \text{if } p(A) \neq 0 \quad (2-2)$$

逆に, σ -有限測度空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mu)$ 及び正の定数 k が与えられれば, $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}_\mu, I_{\mu,k})$ は情報空間になる。ただし,

$$\mathcal{P}_\mu = \left\{ p \in \mathcal{V}(\mu) : \int dp \left| \log \frac{dP}{d\mu} \right| < \infty \right\}$$

であり, $I_{\mu,k}$ は $p(A) \neq 0$ な (A, p) に対しては式 (2-2) で, それ以外の (A, p) に対してはかつた実数値を与えて定義される $\mathcal{B} \times \mathcal{P}_\mu$ 上の実数値関数である。

注. (1) 定理1に出てくる k と定理2に出てくる k とは一致する。(2) かつた情報空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}, I)$ に対して, 上の定理2で決まる μ と k とを取れば $I_{\mu,k}$ は I の拡張になり, この情報空間は $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}_\mu, I_{\mu,k})$ まで拡張される。

定理3. $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P})$ を情報可測空間とする。 I を $\mathcal{B} \times \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{R}$ なる写像とすると, $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}, I)$ が情報空間になることと, 次の三つの公理 B-1, B-2, B-3 を満たす写像 $S: \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{R}$ が存在することとは同値である。

公理 B-1. (連続性) (a) $p_n, p, q \in \mathcal{P}, \alpha > 0, p_n < p + \alpha q, p_n \xrightarrow{D} p (n \rightarrow \infty)$

ならば $p_n(A)S(p_{nA}) \rightarrow p(A)S(p_A) \quad (n \rightarrow \infty) \quad \forall A \in \mathcal{B}$.

(b) $A_n, A \in \mathcal{B} \quad p \in \mathcal{P} \quad p(A_n \Delta A) \rightarrow 0 \quad (n \rightarrow \infty)$ ならば

$$p(A_n)S(p_{A_n}) \rightarrow p(A)S(p_A) \quad (n \rightarrow \infty).$$

ただし, $p(A) = 0$ のときは常に $p(A)S(p_A) = 0$ と置く。

公理 B-2. (Brillouin の原理)

$$I(A|p) = S(p) - S(p_A) \quad \text{if } p(A) \neq 0$$

公理 B-3. 公理 A-4 に同じ。

系. 情報可測空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P})$ と二つの写像 $I: \mathcal{B} \times \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{R}$, $S: \mathcal{P} \rightarrow \mathbb{R}$ とからなる組が公理 B-1, B-2, B-3 を満たすなら, それ

に対して, 正の定数 k が一意的に決まり, また \mathcal{P} の基本元入りに互に絶対連続な σ -有限測度 μ が正の定数倍を除いて一意的に決まると, entropy S は次のように表わされる。

$$S(p) = -k \int d p \log \frac{d p}{d \mu} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (2-3)$$

逆に, σ -有限測度空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mu)$ 及び正の定数 k が与えられるならば, $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}_\mu)$ 及び $I_{\mu,k}, S_{\mu,k}$ の組は公理 B-1, B-2, B-3 を満たす。ここに $\mathcal{P}_\mu, I_{\mu,k}$ は定理 2 にあけるものと同じであり, $S_{\mu,k}$ は式 (2-3) で定義される。

証明の概略. まず平均情報量 $J(\{A_1, \dots, A_n\} | p)$ が $p(A_1), \dots, p(A_n)$ だけの函数 $H(p(A_1), \dots, p(A_n))$ であることを示し, それで, その函数 H が Faddolev の与えた公理 [6, 32, 20] を全て満たすこと

を示す。これによつて、 μ の形が Shannon の与えた情報量の形に決まることになり定理1が証明される。次に写像 \mathbb{E}_p :

$\mathcal{B} \rightarrow \mathbb{R}$ を各 $p \in \mathcal{P}$ に対して、

$$\mathbb{E}_p(A) \equiv p(A)I(A|p) + k p(A) \log p(A)$$

によつて定義する。kは定理1に出て来たものである。この写像 \mathbb{E}_p が \mathcal{B} 上の σ -加法的な有限集合函数であることが分かり、Radon-Nikodym の密度 $\frac{d\mathbb{E}_p}{dp}$ が定義される。そして、これが \mathcal{P} の基本元 λ に対して、

$$\frac{d\mathbb{E}_p}{dp} = k \frac{d\mathbb{E}_\lambda}{d\lambda} - \log \frac{dp}{d\lambda} = C_{p,\lambda} \quad p\text{-a.e.}$$

を満すことを示す。ここに $C_{p,\lambda}$ は Ω 上の定数函数。そこで、

$$\mu(A) \equiv \int_A \exp\left(-\frac{1}{k} \frac{d\mathbb{E}_\lambda}{d\lambda}\right) d\lambda \quad A \in \mathcal{B}$$

を定義すると、これが条件も満す有限測度であることが分かるのである。このようにして定理2が示され、続いて定理3も系も直ちに示される。詳しくは[37]参照のこと。

§3. μ の性質とその物理的意、その他

以下は §2 の議論から導ける事象発展をせらる事柄を、かなり雑然と、それほど論理的厳密を求めることなく書き並べたものである。

3-1. μ の意味. 情報空間 $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}, I)$ に対して、定理2に

よって定まる有限測度 μ 及び正の定数 k を取る。このとき $\mu(\Omega) < \infty$ であらば, $\tilde{\mu} \equiv \mu/\mu(\Omega) \in \mathcal{P}$ ならば $p \in \mathcal{P}$ に対する以下の四つの条件は同等である。(注. $\mu(\Omega) < \infty$ ならば $\tilde{\mu} \in \mathcal{P}_\mu$ となるから, $\tilde{\mu} \notin \mathcal{P}$ のときは $(\Omega, \mathcal{B}, \mathcal{P}_{\mu,k}, I_{\mu,k})$ に拡張して考えれば, ここの議論は使える。)

$$(a) \quad p = \tilde{\mu}$$

$$(b) \quad \max_{p \in \mathcal{P}} S(p) = S(p)$$

$$(c) \quad p(A) = \exp\left\{\frac{1}{k}(S(p_A) - S(p))\right\} \quad \text{if } p(A) \neq 0$$

$$(d) \quad I(A|p) = -k \log p(A)$$

(証明略す。[37]参照。)

このことから $\tilde{\mu}$ は entropy 最大の原理を満す状態に対応することがわかり, したがって熱力学的な平衡状態を意味するものであると解釈される。そこで, (c) の関係は, 平衡状態におけるゆらぎと entropy の関係を与える Einstein の関係式 [33] であると思なせる。また (d) は一つの事象 A に対する情報量の普通の定義 [34, 35] であるが, 上に述べた定理は, この関係が成立するのは平衡状態の場合即ち $p = \tilde{\mu}$ の場合だけであると言っているのである。非平衡状態においては, Einstein の関係も一つの事象についての普通の情報量の定義を成り立たないことが, ここでの情報量 - entropy の定式化のことで示されたわけである。

3.2. $I(A|p)$ の定義の拡張. 今までには一つの測定過程 $p \rightarrow p_A$ に対して得られる情報量のみを考えたのであるが、ここで、もっと一般の過程 $p \rightarrow p'$ について得られる情報量の定式化を考えてみよう。このような拡張の必要性は、熱力学的な過程に伴う情報量の変化を定式化する試みにとりかかると生ずるのであるが、それだけでなく、測定過程をより現実的に表わそうとすることからも生ずる(3-4参照のこと)。さて、情報可測空間 (Ω, \mathcal{B}, P) における過程 $p \rightarrow p'$ ($p, p' \in \mathcal{P}$) に対する情報量 $I(p'|p) \in \mathbb{R}$ として次の三つの条件を満たすものを考える。

(1). (連続性) $I(p'|p)$ が p 及び p' について A-1 の (a) の形の連続性をもつ。

(2). (継続過程に対する加法性) $I(p''|p) + I(p'|p) = I(p''|p')$

(3). (測定過程での平均情報量の普遍性) $0 \leq t \leq 1$ で定義をせよとすると一点で正となる実関数 $f(t)$ が存在して、

$$I(p_A|p)P(A) + I(p_{A^c}|p)P(A^c) = f(P(A))$$

となる。

このとき、 $I(A|p) \equiv I(p_A|p)$ とおくと、公理 A-1, ..., A-4 は I で満たされることから

$$I(p'|p) = S(p) - S(p')$$

と書けることが簡単に示せる。ただし、 $S(p)$ は式(2-3)で

定義されるものである。

この $I(p'|p)$ の定式化は過程の初めと終とにのみ依存して、その中間でどんな過程を取るかに全く依らなるといふ点で不十分であるが、中間過程まで含めた一般的定式化は困難で今の所できこいな。以下の §3-3, 3-4 では中間過程を考えなくともできる議論がなされている。

3-3. 熱浴と接してゐる系。 一つの系が孤立してゐる場合の情報量 $I_0(p'|p)$ とその系が熱浴に接してゐる場合の情報量 $I_1(p'|p)$ との間に次の関係を設定しよう。

$$I_1(p'|p) = I_0(p'|p) + \frac{1}{T} Q(p'; p) \quad (3-1)$$

ここに T は熱浴の温度であり、 $Q(p'; p) = \int dp' \epsilon - \int dp \epsilon$ である。 ϵ は系のエネルギー函数（そのようなものが Ω 上の可測函数として存在するとして）である。 $Q(p', p)$ は $p \rightarrow p'$ の過程によつて熱浴から系にながれ込んだエネルギーの平均量である。この関係 (3-1) は、もちろん、熱力学における熱と entropy の関係にヒントを得たものであるが、これはエネルギーが一定量の情報を運ぶことを表わしてゐる。 I_1, I_0 に対して定理 2 で定まる μ, k に相当するものをそれぞれ μ_1, k_1 ; μ_0, k_0 とおくなら、関係 (3-1) より

$$k_1 = k_0, \quad d\mu_1 = c e^{-\frac{\epsilon}{T}} d\mu_0 \quad (c > 0)$$

をうる。即ち熱浴に接している系の平衡状態は Canonical 分布で与えられる。ここに μ_0 は孤立している場合の平衡状態から状態密度を表わすものと見なされる。

3-4. fuzzy 事象の情報量. 測定結果は実際には一つの明瞭な事象 $A \in \mathcal{B}$ で示されることは希であり, 一般には幾らか曖昧を含んだ statement で与えられる。即ち一つの fuzzy 事象で表わされることになる。fuzzy 事象 A は Ω 上に定義される一つの帰属函数 $m_A(\omega)$ で表わされる。 m_A は集合の特性函数の拡張であって $0 \leq m_A(\omega) \leq 1$ を満たすものである。 $m_A(\omega) = 1$ or 0 なら, A は普通の事象になる。fuzzy 事象 A の確率 $p(A)$ は $p(A) = \int m_A dP$ で定義され, また A に対する条件付き確率測度 P_A は $P_A(B) = \int_B m_A dP / p(A)$ ($B \in \mathcal{B}$) で与えられる。 ω にて状態 p の測定で fuzzy 事象 A で表わされる測定結果を得たときの情報量は §3-2 の拡張された定義を使えば簡単に,

$$I(P_A | p) = S(p) - S(P_A)$$

で与えられる。特に平衡状態を考えれば,

$$\begin{aligned} I(P_A | p) &= -k \log p(A) + \frac{1}{p(A)} k \int dP m_A \log m_A \quad (3-2) \\ &\leq -k \log p(A) \end{aligned}$$

となる。普通の事象を得たときより少ない情報を受取るわけ

である。(fuzzy set については[36]を参照のこと。そこには、情報量として式(3-2)に相当するものが出されてくる。)

3-5. 非平衡状態での測定. この論文における情報量 $I(A|p)$ の定義では, p がもし非平衡状態の場合には, その値が負になる場合がありうる。これは測定によって, かつて情報が失われることを意味する。ただし平均情報量は定理1で分かるように負にはならない。測定によって情報が失われるということが物理的にどういうことなのかは分からない。今後, 非平衡状態における測定の意味をもっと突っ込んで考察する必要があるであろう。

参考文献

1. A. Kossakowski, *Rep. Math. Phys.* 3(1972) 247.
2. E.B. Davies, Quantum Theory of Open System, London, Academic Press 1976.
3. C.E. Shannon and W. Weaver, Mathematical Theory of Communication, Univ. of Illinois Press, Urbana, 1949.
4. N. Wiener, Cybernetics, John Wiley & Sons, New York, 1948, (2nd edition: MIT Press, Cambridge, 1961).
5. A. I. Khinchin, Mathematical Foundations of

- Information Theory, Dover, New York, 1957.
6. A. D. Faddeev, *Uspekhi. Math. Nauk.* 11 (1956) 227.
 7. J. Aczél and Z. Daróczy, On Measures of Information and their Characterizations, Academic Press, New York, 1975.
 8. I. J. Taneja, *J. Stat. Phys.* 14 (1976) 263.
 9. E. Reich, *Journ. Math. Phys. M.I.T.* 30 (1951) 156.
 10. H. Hatori, *Kōdai Math. Sem. Rep.* 10 (1958) 172.
 11. S. Ikeda, *Ann. Inst. Stat. Math.* 11 (1959-60) 131,
13 (1961-62) 259, 14 (1962-63) 73.
 12. L. L. Campbell, *Inf. Control* 21 (1972) 329.
 13. B.-S. K. Skagerstam, *Z. Naturforsch.* 29a (1974) 1239.
 14. W. Ochs, *Rep. Math. Phys.* 9 (1976) 331.
 15. B. Forte and C. C. A. Sastri, *J. Math. Phys.* 16 (1975) 1453.
 16. R. S. Ingarden and K. Urbanik, *Collog. Math.* 9 (1962) 131.
 17. R. S. Ingarden, *Fortschr. Phys.* 12 (1964) 567, 13 (1965) 755.
 18. K. Urbanik, *Rep. Math. Phys.* 4 (1973) 289.
 19. J. Černý and P. Brunouský, *Inf. Control*, 25 (1975) 134.
 20. 国沢清典, 梅垣寿春編, 情報理論の進歩, 岩波, 1965.
 21. L. Szilard, *Z. Phys.* 53 (1929) 840.
 22. J. Rothstein, *Science* 114 (1951) 171.
 23. L. Brillouin, Science and Information Theory, Academic

24. H. Grad, *Communication on Pure and Appl. Math* 14 (1961) 323.
25. E. T. Jaynes, in Statistical Physics, Brandel's Lectures, vol. 3 p. 181-218 (ed. K. W. Ford) Benjamin, New York, 1963.
26. M. Tribus and E. C. McIrvine, *Sci. Am.* 1971 (Sept.) p. 119.
27. R. S. Ingarden and A. Kossakowski, *Ann Phys.* 89 (1975) 451
28. B.-S. K. Skagerstam, *J. Stat. Phys.* 12 (1975) 489.
29. W. Ochs, *Rep. Math. Phys.* 9 (1976) 135.
30. A. Wehrl, *Rev. Mod. Phys.* 50 (1978) 221.
31. R. Giles, Mathematical Foundations of Thermodynamics Oxford, Pergamon Press, 1964.
32. H. Tverberg, *Math. Scand.* 6 (1958) 297.
33. P. Glansdorff and I. Prigodine, *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, Wiley-Interscience, London, 1971.
34. N. Abramson, Information Theory and Coding, McGraw-Hill New York, 1963
35. S. Goldman, Information Theory, Prentice-Hall, New York, 1953.
36. 西田俊夫, 作田英二, フジ, 集合とその応用, 北森出版, 1978.
37. T. Nakagomi, 'Characterizations of the 'Information about an event'' (prepri.)