

Markov Semigroups on UHF C^* -algebras

松井 卓 (Taku Matsui)

東京都立大学

§1 平衡状態の統計力学が数学的に厳密な形で研究されるようになり約30年が過ぎている。この間、古典統計力学、特に イジング模型 等の Ferromagnetic 系では多くの結果が得られているが、量子系に関して相対的にまだ未知の部分が多いと言える。

これまで量子系を取り扱うには、ハミルトニアンが何らかの意味で (ペロン・フロベニウスの定理での) 正值性を仮定し古典的なマルコフ過程 または イジング・スピンの系の問題に持ち込んで考えてきた。しかしながら 物理的に見て興味深い模型 (ハバード模型 等) は、このまでの方法が適用しにくい。実際 ハバード模型の場合 “古典な基底状態” は 無限に縮退していて Pirogov-Sinai 理論を適用して低温での相転移を研究するのは困難な作業となる。

一方、量子系での Glauber dynamics (= Stochastic Ising 模型) の研究もまあめて 原始的な状態である。70年代から80年代の前半にかけて、ほとんど自由粒子系に対応する場合

だけが研究されたが、ギブス状態・基底状態が不変状態となる量子系での *Glauber dynamics* については何も考察されなかった。

量子系の研究が二のように未発達なのは、一つには、ギブス状態は量子系では局所マルコフ性をもたないためである。古典的な確率論の意味でマルコフ性を量子スピン系のギブス状態に仮定するとハミルトニアンは非常に限られたタイプになり都合が悪い。

([Accardi - Frigerio])

しかしながら基底状態に関してはこの注意はあてはまらない。例えば Affleck Kennedy Lieb Tasaki' によって解かれた反強磁性模型はある種のマルコフ性を持つ。([A-K-L-T] , [F-N-W])

彼らの Valence bond state は構成の仕方より古典的なマルコフ測度の非可換版と見ることが出来るので ([F-N-W]) 本質的に非可換系での非可換確率論の重要な対象であると考えられる。

従って非可換系でのマルコフ過程の性質を研究するのは単なる少数の数学者の趣味的な興味以上に数理論理学の上でも応用が期待される。

以下では Głanber dynamics のような 無限粒子系の研究 ([Liggett]) での いくつかの初等的な部分は 容易に 量子スピン系でも行なえることを示す。 特別な 量子スピン系の基底状態では, この方法は 古典的な場合と同様の結果を与える。

§2 非可換確率論 は コンパクト空間 X 上の連続関数 $C(X)$ を C^* -代数に置き換えるところから出発する。

以下では C^* -代数としては 正方格子 $\mathbb{Z}^d$ (d :次元) 上の パウリ・スピン代数 のなす $A = \overline{\bigotimes_{\mathbb{Z}^d} M_2(\mathbb{C})}^{C^*}$ を考える。 ($M_2(\mathbb{C})$: 2×2 行列環, $\overline{\quad}^{C^*}$ は C^* -代数としての完備化 $\mathbb{Z}^d$ は 無限テンソル積の各成分は $\mathbb{Z}^d$ の点 $j \in \mathbb{Z}^d$ $j = (j_1, j_2, \dots, j_d)$ で表し示しているとする。)

$\sigma_x^{(j)}$ $\sigma_y^{(j)}$ $\sigma_z^{(j)}$ を j 上の パウリ スピン行列 とする。

$$\sigma_\alpha^{(j)} = \dots \otimes \mathbb{1} \otimes \mathbb{1} \otimes \dots \otimes \mathbb{1} \otimes \sigma_\alpha \otimes \mathbb{1} \dots$$

$$\left(\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \right)$$

量子系でのマルコフ過程は 次のように考えられる。

古典的な マルコフ過程と 正値性を保つ $C(X)$ 上の半群と

対応関係がある。そこで 非可換 C^* -代数 上では
マルコフ過程 のかわりに マルコフ半群 を考えることにする。

定義1 S_t が 1 をもつ C^* -代数 上の マルコフ半群
であるとは S_t が 1 を保存する 正值写像 のなす
半群 であること。

以下では Glauber dynamics (Stochastic Ising model) の
アプロシミーとして 次のタイプの マルコフ半群 を考える。

最初に 生成作用素 L としては 並進不変な 次の場合
を考える。

$$L(Q) = \sum_{k \in \mathbb{Z}^d} L_k(Q) \quad (1)$$

$$L_k(Q) = \tau_k L_0 \tau_{-k}(Q)$$

ただし τ_k は $A = \overline{\bigotimes_{\mathbb{Z}^d} M_2(\mathbb{C})}^{C^*}$ 上の シフト

$$\tau_k(\sigma_\alpha^{(j)}) = \sigma_\alpha^{(j+k)} \quad j, k \in \mathbb{Z}^d \quad \alpha = x, y, z$$

とする。

さらに

$$L_0(Q) = E_0(Q) - \frac{1}{2}(E_0(1)Q + Q E_0(1)) \quad (2)$$

E_0 は A から A への (完全) 正值写像 とする。

もし C^* -代数 A が 有限次元で S_t が 完全正值
(つまり S_t を $A \otimes M_n(\mathbb{C})$ へ $S_t \otimes (\text{identity})$ と拡張して
も 正值となる) なる マルコフ半群の 生成子は
上述の形となる。

(1) (2) のような形の L が マルコフ半群を生成する十分
条件を考える。 [Liggett] にある方法を 今の非可換系
になおすと要易に次の形の結果を得る。

初めに記号を導入する。

$\mathbb{Z}^d$ の有限集合 A ($\subset \mathbb{Z}^d$) に対して

$$\sigma_\alpha(A) = \prod_{A \ni j} \sigma_\alpha^{(j)} \quad (\alpha = x, y, z) \quad (3)$$

$$S_{(\alpha, j)}(Q) = \frac{1}{2} (\sigma_\alpha^{(j)} Q \sigma_\alpha^{(j)} - Q) \quad \left(\begin{array}{l} \alpha = x, y, z \\ j \in \mathbb{Z}^d \end{array} \right) \quad (4)$$

$$Q \in A$$

さらに

$$\| \| Q \| \| = \sum_{\substack{\alpha = x, y, z \\ j \in \mathbb{Z}^d}} \| S_{(\alpha, j)}(Q) \| \quad (5)$$

$$C^1(A) = \{ Q \in A \mid \| \| Q \| \| < \infty \} \quad (6)$$

又 (2) の (完全) 正值写像 E_0 は 次の形とする。

$$E_0(Q) = \sum_{\ell} a(\ell)^* Q a(\ell) \quad (7)$$

ただし

$$a(\ell) = \sum_{\substack{A \subset \mathbb{Z}^d \\ B \subset \mathbb{Z}^d}} C_{AB}^{(\ell)} \sigma_x(A) \sigma_z(B)$$

ここで $C_{AB}^{(\ell)}$ は ($\mathbb{Z}^d$ の有限集合 A, B による) 定数で

$$\sum_{\ell} \left(\sum_{A, B} |C_{AB}^{(\ell)}| |A \cup B|^2 \right) < \infty \quad (8)$$

をみたすとする。

命題 1. (8) が成立するとする。この時 L は

$C^1(A)$ 上で 定義され $\bar{L}$ (L の閉包) は マルコフ

半群の生成作用素となる。この半群を S_t と置くと

S_t は $C^1(A)$ を 不変にして

$$\|S_t(Q)\| \leq 2 e^{Mt} \|Q\| \quad Q \in C^1(A) \quad (9)$$

が成立する。(ここで M は Q によらない定数)

(c.f. [M-1])

次に S_t のエルゴード性について述べる。

定義2 マルコフ半群 S_t がエルゴード的である
とは S_t の不変状態が一意的であることとする。

エルゴード性について精密な判定条件は知られていない。
勿論エルゴード性 (不変状態が複数ある) ものは
いくつでも作れる。ここで問題にするのは格子が
有限集合の時 (有限自由度の量子系の時) エルゴード性
が成立し無限系を考えるとある種の相転移とともに
エルゴード性が破れる場合である。

例の E_0 が単位元を保存する時 ($E_0(1) = 1$) 及び
その振動を加えた時には古典的な場合と同じく量子系
でもエルゴード性の十分条件は得られる。つまり
命題1で $M' > 0$ があり

$$\|S_t(Q)\| \leq 2 e^{-M't} \|Q\| \quad (10)$$

が示す不変状態の一意的性が証明できる。

詳しくは [Liggett] と [M-1] を参照

§3 §2 で与えられたマルコフ半群の不変状態としてはどのようなものが現われるか。又 物理的に興味深い状態が与えられた時 その状態に収束するようなマルコフ半群は構成できるかについて考えてみる。

ここで 単に不変になるだけでなく, “詳細つり合いの条件” (detailed balance condition) が成立する場合を考えてみる。(数学的な文献では reversible とも呼ばれている。)

定義 3 状態 φ が マルコフ半群 S_t に対し

$$\varphi(Q_1, S_t(Q_2)) = \varphi(S_t(Q_1), Q_2) \quad (11)$$

$$(\forall Q_1, Q_2 \in A \quad \forall t > 0)$$

を満たす時 φ を reversible state と呼ぶ。

もし φ が 次のハミルトニアン

$$H = \sum_{k \in \mathbb{Z}^d} d_k^* d_k$$

に対し

$$\varphi(d_k^* d_k) = 0 \quad (\forall k \in \mathbb{Z}^d) \quad (12)$$

をみたすとする。これは エネルギー を最小にすることを意味するので φ は H の 基底状態である と言って 宜い。この時

$$L_k(Q) = d_k^* Q d_k - \frac{1}{2} (d_k^* d_k Q + Q d_k^* d_k)$$

$$L(Q) = \sum_k L_k(Q)$$

とすると もし L が マルコフ 群 を生成するならば φ は reversible state となる。

このようなタイプの 基底状態 は 現在 多く 知られている。§1 の Valence bond state や [M-2] の 基底状態は 全て 二種の タイプ である。[M-2] で考えた 基底状態 については 次のような結果が成立する。

$\{J_A : A \in \mathbb{Z}^d\}$ を イジング スピン系 の interaction とする。つまり ハミルトニアン は

$$H = \sum J_A \sigma_z(A)$$

ここで $\sigma_z(A)$ は $\{1, -1\}^{\mathbb{Z}^d}$ 上の関数と 自然に同一視する。

簡単のため interaction は finite range ($J_A = 0$ if diameter of $A > r$) 並進不変 とする。

測度 μ は $(\{1, -1\}^{\mathbb{Z}^d})$ 上のギッブス測度 であるとは

$$\frac{d\mu(\sigma_k)}{d\mu(\sigma)} = \exp\left(2 \sum_{k \in A} J_A \sigma_k(A)\right) \quad (13)$$

ただし 左辺は $k = (k_1, \dots, k_d)$ でのスピンの $(1 \rightleftharpoons -1)$ flip に関する Radon-Nikodym 微分である。

$$H = \sum d_A^* d_k$$

$$d_k = 1 - \exp\left(-\sum_{k \in A} J_A \sigma_k(A)\right) \sigma_k^{(k)} \quad (14)$$

とする。

命題 2 $\varphi(d_k^* d_k) = 0 \quad \forall k \in \mathbb{Z}^d$ は 次と同値

① ある ギッブス測度 μ があり

$$\varphi(\sigma_k(A) \sigma_k(B)) = \mu\left(\sigma_k(B) \exp\left[\sum_{|A \cap C|: \text{odd}} J_C \sigma_k(C)\right]\right) \quad (15)$$

任意の ギッブス測度 μ に対し (15) で定まる state は (14) の

基底状態となる。

命題 3

$$E_k(Q) = d_k^* Q d_k + d_k^* \sigma_z^{(k)} Q \sigma_z^{(k)} d_k$$

$$L(Q) = \sum_k \left(E_k(Q) - \frac{1}{2} (E_k(1) Q + Q E_k(1)) \right)$$

とすると, L の生成するマルコフ群 S_t については
次が同値となる。

(i) φ は reversible

$$(ii) \quad \varphi(d_k^* d_k) = 0 \quad (\forall k \in \mathbb{Z}^d)$$

上の命題により reversible state と基底状態が対応
することになる。

このような形で Glauber dynamics の量子系への
拡張ができたことになる。

以上は 古典スピン系の場合のごく初歩的段階での解析
に対応しているが 今後 この方法を より精密化する
ことで 量子系の理解が深まることを期待している。

参考文献

- [Accardi - Frigerio] Accardi, L., Frigerio, A. :
Markovian Cocycle Proc. R. Ir. Acad. 83 A
251-263 (1983)
- [A-K-L-T] Attleck, I. Kennedy, T. Lieb, E. Tasaki, H. :
Valence bond ground states in isotropic quantum antiferromagnets
Commun. Math. Phys. 115, 477-528 (1988)
- [F-N-W] Fannes, Nachtergaele, Werner :
Finitely Correlated States on Quantum Spin Chains
Commun. Math. Phys. 144, 443-490 (1992)
- [Liggett] Liggett : Interacting Particle Systems
1985 Springer
- [M-1] Taku Matsui : Markov semigroups on UHF algebras
Rev. Math. Phys. 5, 587-600 (1993)
- [M-2] 同上 : Gibbs measure as quantum ground states
Commun. Math. Phys. 135, 79-89 (1990)

その他 量子系の統計力学の数学を扱、大本として

"Bratteli Robinson : Operator Algebras and Quantum Statistical Mechanics
Springer" があるが、これはある種の「文法書」であり

具体例に対する解析手法は何せ教えてくれない。

Quantum Spin を古典系の言葉に書きかえて研究する方法
は、古くは 1960年代後半 (Ginibre) にさかのぼる。比較的
新しくスマートな方法は 次の論文にある。

M. Aizenmann B. Nachtergaele : Geometric Aspects of
Quantum Spin States (preprint)

古典スピْنَ系についての数学的取り扱い方で、新しい本
は B. Simon : The Statistical Mechanics of Lattice Gases
(Princeton Univ. Press) がある。(まだ見てないので内容
については何も言えない。)