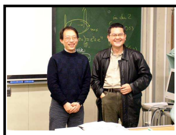
循環するハミルトニアン
～相互作用の階層

鈴木　貴（阪大・基）



研究歴

基礎工学研究科
未来研究ラボシステム
2002~

双対変分原理（変分構造）
爆発包の方法（スケーリング）

自己双対ゲージ理論(1996)
乱流平均場理論（1991, 1995)

粘菌方程式
(2000~2007)

新しい原理に基づく非線形・非平衡
現象の数理モデリングと数学解析
2008~

非線形解析

楕円型方程式
(1988~)

漸近解析(1990)
大域解析(1992)

放物型方程式
(1996~)

1. 非平衡熱力学方程式
2. 乱流平均場理論
3. Hamilton構造
4. 非局所項方程式
5. 自己相互作用流体
6. 化学反応平均場

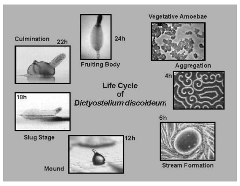
非線形楕円型方程式の解(1988)
変分問題とその周辺(1989～)
京都大学数理解析研究所研究集会

<u>東アジア偏微分方程式会議</u>
2000~

<u>日本応用数理学会</u>
<u>数理医学研究部会</u>
2004～

上岡友紀・<u>鈴木貴</u>
偏微分方程式講義－
半線形楕円型方程式の理論
（培風館） 2005

理論応用力学講演会
2007～



Wet matters
Dry matters

非適切問題の新しい数理的解法と
工学・医学応用2006~

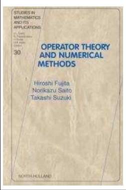
逆問題

Gel'fand-Levitan理論
とその応用(1983-1988)

未来開拓推進事業
(1997-2001)

平行最適化
(2005)

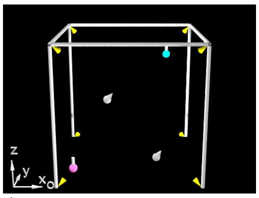
数値計算の
数学的基礎



有限要素法
(学位・1981)

非線形問題
(1995-6, 2003)

自由境界問題
(2005)



輸送問題
(2005)

自己組織化の理論

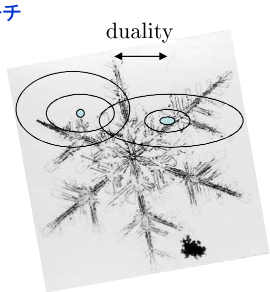
H. Fujita, N. Saito, and <u>T. Suzuki</u>,
Operator Theory and Numerical Methods
Elsevier, Amsterdam, 2001.

T. Senba and T. Suzuki
Applied Analysis
Imperial College Press
2nd Edition, in press

非線形・非平衡現象 - 原理とアプローチ

1. 循環的階層

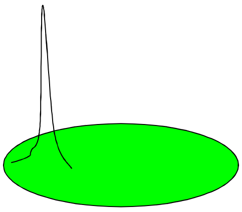
A. 平均場方程式
B. 調和写像
C. Smoluchowski-Poisson方程式

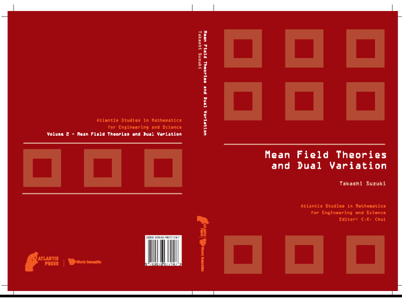


4. 非線形スペクトル力学

3. 場と粒子の双対性

2. 量子化する爆発機構





TS
Mean Field Theories and Dual Variation
Atlantis Press
Amsterdam 2008

A. 平均場方程式

ハミルトニアン→Gibbsの平衡統計

小正準統計

H 全エネルギー

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i}, \quad 1 \le i \le N$$

$\mathbf{R}^{6N}/\{H\}$ 小正準集団

$$x = (q_1, \ldots, q_N, p_1, \ldots, p_N)$$

$$dx = dH \cdot \frac{d\Sigma(H)}{|\nabla H|}$$

$$d\Sigma(H) \leftrightarrow \{x \in \mathbf{R}^{6N} \mid H(x) = H\}$$

$$d\mu^{H,N} = \frac{1}{\Omega(H)} \cdot \frac{d\Sigma(H)}{|\nabla H|}$$

$$\Omega(H) = \int_{\{H(x)=H\}} \frac{d\Sigma(H)}{|\nabla H|}$$

熱平衡

$$\beta = \frac{\partial}{\partial H} \log \Omega(H)$$

正準統計

$\mathbf{R}^{6N}/\{T\}$ 正準集団

$\beta = 1/(kT)$ 逆温度

$$d\mu^{\beta,N} = \frac{e^{-\beta H} dx}{Z(\beta, N)}$$

$$Z(\beta, N) = \int_{\mathbf{R}^{6N}} e^{-\beta H} dx$$

等重率の仮定

N→∞ … 平均場極限

Onsager49
2D Euler 運動方程式
単連結領域

$$v_t + (v\cdot\nabla)v = -\nabla p$$
$$\nabla\cdot v = 0 \text{ in } \Omega\times(0,T)$$
$$\nu\cdot v = 0 \text{ on } \partial\Omega\times(0,T)$$

$$\omega = \nabla\times v$$
$$\omega(dx,t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \delta_{x_i(t)}(dx)$$

$\alpha_i = \alpha,\ N\uparrow+\infty$ 高エネルギー極限

$\Rightarrow$

$$\rho = \frac{e^{-\beta\psi}}{\int_\Omega e^{-\beta\psi}}$$ 粒子密度

$\updownarrow$

$$\psi = \int_\Omega G(\cdot,x')\rho(x')dx' \text{ in } \Omega$$ 流れ関数

$\lambda = -\beta$ 平均場方程式

負の逆温度で顕著に現出する秩序構造

渦度場方程式

$$\frac{dx_i}{dt} = \nabla_{x_i}^{\perp} H_N$$
$$H_N(x_1,\ldots,x_N) =$$
$$\sum_i \frac{\alpha_i^2}{2}R(x_j) + \sum_{i<j}\alpha_i\alpha_j G(x_i,x_j)$$

$G = G(x,x')$ Green 関数

$$R(x) = \left[G(x,x') + \frac{1}{2\pi}\log|x-x'|\right]_{x'=x}$$

Robin 関数

渦度場のハミルトニアン

$$\rho_1^n(x_i)dx$$
$$= \int_{\Omega^{n-1}} \mu^n(dx_1\cdots dx_{i-1}dx_{i+1}dx_n)$$ 1点 pdf

小正準測度
[等重率の仮定]

$$\rho(x_1,\cdots,x_k)dx_1\cdots dx_k$$
$$= \int_{\Omega^{n-k}} \mu^n(dx_{k+1}\cdots dx_n)$$ k点 pdf

$$\langle\omega_n(x)\rangle = \left\langle \sum_{i=1}^{n}\alpha\delta_{x_i}(dx)\right\rangle$$
$$= \sum_{i=1}^{n}\int_{\Omega^n}\alpha\delta(x_i-x)\mu^n(dx_1\cdots dx_n)$$
$$= n\alpha\rho_1^n(x)$$

2強度系
Joyce-Montgomery 73

正準測度
Pointin-Lundgren 76

$$\lim_{n\to\infty}\langle\omega_n(x)\rangle = \rho(x) = \lim_{n\to\infty}\rho_1^n(x)$$ 平均場極限

$$\rho_k^n \rightharpoonup \rho^{\otimes k} = \Pi_{i=1}^{k}\rho(x_i)$$

カオスの伝播 $\longrightarrow$ 平均場方程式

Caglioti-Lions-Marchioro-Pulvirenti 92, 95

Kiessling 93

a) relative Boltzmann factors $\{Z\}$ 有界

b) 平均場方程式の一意解の存在

定理 [S. 92]

$0 < \lambda < 8\pi \Rightarrow$ 一意解存在

平均場方程式

$\Omega \subset \mathbf{R}^2$ 有界領域, $\partial\Omega$ 滑らか, $\lambda > 0$ 定数

$-\Delta v = \dfrac{\lambda e^v}{\int_\Omega e^v}$ in Ω, $v = 0$ on $\partial\Omega$

Onsagerの点渦平均場方程式
（流れ関数による記述）

$\Rightarrow$ （正準統計）

1) 極限への収束

2) 平均場での正準・小正準集団の同等性

3) カオスの伝播の実現

a), b) OK if $\lambda < 8\pi$

$\lambda \geq 8\pi$?

定理 [Nagasaki-S. 90]

$\{(\lambda_k, v_k)\}$ 解の列

$\lambda_k \to \lambda_0 \in (0, \infty)$, $\|v_k\|_\infty \to \infty$

$\Rightarrow$

$\lambda_0 = 8\pi\ell$, $\ell \in \mathbf{N}$

$^\exists$ 部分列 $^\exists\mathcal{S} \subset \Omega$, $\sharp\mathcal{S} = \ell$

$v_k \to v_0$ 局所一様 in $\overline{\Omega} \setminus \mathcal{S}$

$v_0(x) = 8\pi \sum_{x_0 \in \mathcal{S}} G(x, x_0)$ 特異極限

$\mathcal{S} = \{x_1^*, \ldots, x_\ell^*\}$ 爆発集合

$$\nabla_{x_i} H_\ell|_{(x_1,\cdots,x_\ell)=(x_1^*,\cdots,x_\ell^*)} = 0,\ 1 \leq i \leq \ell$$

$$H_\ell(x_1, \ldots, x_\ell) = \frac{1}{2}\sum_i R(x_i) + \sum_{i<j} G(x_i, x_j)$$

$\Omega \subset \mathbf{R}^2$ 有界領域, $\partial\Omega$ 滑らか, $\lambda > 0$ 定数

$-\Delta v = \dfrac{\lambda e^v}{\int_\Omega e^v}$ in Ω, $v = 0$ on $\partial\Omega$

循環的階層
量子化する爆発機構
場と粒子の双対性

1. non-radial bifurcation on annulus
(S.S. Lin 89, Nagasaki-S. 90)

2. spherical mean value theorem
(S. 90)

3. localization
(Brezis-Merle 91)

4. entire soltion
(Chen-Li 91)

5. sup + inf inequality
(Shafrir 92)

6. singular perturbation
(S. 93, Baraket-Pacard 98)

7. blowup analysis
(Li-Shafrir 94)

8. Chern-Simons theory
(Tarantello 96)

9. global bifurcation
(Mizoguchi-S. 97, Chang-Chen-Lin 03)

10. mimi-max solution
(Ding-Jost-Li-Wang 99)

11.local estimate
(Y.Y. Li 99)

12. variable coefficient
(Ma-Wei 01)

13. refined aysmptotics
(C.C. Chen- C.S. Lin 02)

14. topological degree
(Chen-Lin 03, Malchiodi 08)

15. asymptotic non-degeneracy
(Gladiali-Grossi 04, Grossi-Ohtsuka-S.)

16. isoperimetric profile
(Lin-Lucia 06)

17. deformation lemma
(Lucia 07)

18. Morse index
(Gladiali-Grossi 09)

続々発見される新しい構造と技法, その応用

まとめ 1　（点渦平均場方程式）

1. 一意性→カオスの伝播 (92)
2. ハミルトニアン→特異極限 (90)
3. 特異極限→古典解 (98)
4. 境界条件→爆発点衝突の回避 (94)
5. 量子化する爆発機構→非量子化質量下での位相不変性 (03)

ハミルトニアンは階層を循環して相互作用を制御する

幾何的背景 (Liouville 積分)

$\lambda = \sigma \int_\Omega e^v$, $-\Delta v = \sigma e^v$

$\Rightarrow$

$^\exists F = F(z)$ 有理型

$z \in \Omega \subset \mathbf{R}^2 \cong \mathbf{C}$, s.t.

$$\rho(F) = \left(\frac{\sigma}{8}\right)^{1/2} e^{v/2} = \frac{|F'|}{1+|F|^2}$$

球面導関数

Onsager 方程式

$\Leftrightarrow$ $\rho(F)|_{\partial\Omega} = \left(\frac{\sigma}{8}\right)^{1/2}$

等角はめ込み

$\sqrt{8}F : \Omega \to S^2$

$$\left.\frac{d\Sigma}{ds}\right|_{\partial\Omega} = \sigma^{1/2}$$

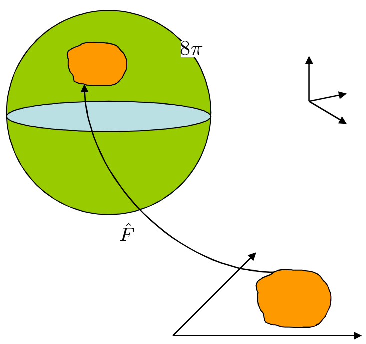
$(S^2, d\Sigma)$　球面 $|S^2| = 8\pi$

$$\int_\Omega \left(\frac{d\Sigma}{ds}\right)^2 dx = 8\int_\Omega \rho(F)^2 dx = \int_\Omega \sigma e^v$$

...　$\sqrt{8}F(\Omega)$ のはめ込み面積

$\lambda = \int_\Omega \sigma e^v \to 8\pi\ell \Rightarrow \ell$-covering

... 質量量子化



B. 調和写像

(Ω, g) m-コンパクト多様体

$N \hookrightarrow \mathbf{R}^n$ コンパクト多様体, $\partial N = \emptyset$

$H^1(\Omega, N)$

$= \{u \in H^1(\Omega, \mathbf{R}^n) \mid u \in N, \text{ a.e. on } \Omega\}$

$$E(u) = \frac{1}{2}\int_\Omega |\nabla u|^2$$

$u \in H^1(\Omega, N)$ 調和写像

$\Leftrightarrow$ (定義)

${}^\forall \phi \in C^\infty(\Omega, \mathbf{R}^n)$

$$\left.\frac{d}{d\varepsilon}E(\Pi(u+\varepsilon\phi))\right|_{\varepsilon=0} = 0$$

$\Pi : U \to N$ 最短距離射影

U: N の管状近傍

$m = 2$

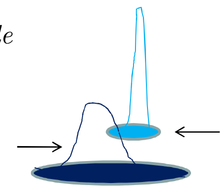
$\Rightarrow$

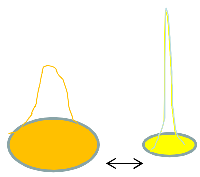
エネルギー量子化

${}^\exists$*bubble on bubble*

${}^\exists$*separated bubble*

$\to$ *bubble tree*





定理 $(m = 2)$

$\{u_k\}_k$ 調和写像

$\sup_k E(u_k) < +\infty$

$\Rightarrow$ (部分列)

$u_k \rightharpoonup u$ in $H^1(\Omega, N)$ 調和写像

$$u_k = u + \sum_{j=1}^{p}\left[\omega^j((\cdot - x_k^j)/\delta_k^j) - \omega^j(\infty)\right]$$

$+o(1)$ in $H^1(\Omega, N)$

$$\max_{i \neq j}\left\{\frac{\delta_k^i}{\delta_k^j}, \frac{\delta_k^j}{\delta_k^i}, \frac{\left|x_k^i - x_k^j\right|}{\delta_k^i + \delta_k^j}\right\} \to +\infty$$

$\{x_k^1\}_k, \cdots, \{x_k^p\}_k \subset \Omega$, $p \in \mathbf{N}$

$\{\delta_k^1\}, \cdots, \{\delta_k^p\} \downarrow 0$

$\{\omega^1\}, \cdots, \{\omega^p\} : S^2 \to N$

非定数調和写像

$$\lim_{k\to\infty} E(u_k) = E(u) + \sum_{j=1}^{p} E_0(\omega^j)$$

$$E_0(\omega) = \frac{1}{2}\int_{S^2} |\nabla \omega|^2$$

1. bubble on bubble $i \neq j$

$$\frac{\delta_k^i}{\delta_k^j} \to 0$$

2. separated bubble $i \neq j$

$$\frac{\left|x_k^i - x_k^j\right|}{\delta_k^i + \delta_k^j} \to +\infty$$

まとめ 2　（調和写像）

1. 2 次元定義域の調和写像はエネルギー量子化
2. エネルギー粒子の衝突
3. ハミルトニアンの制御？

動的統計力学～初期設定された系の時間変化

孤立系	エネルギー一定	エントロピー増大	小正準集団
閉じた系	温度一定	ヘルムホルツ自由エネルギー減少	正準集団
開放系	圧力一定	ギブス自由エネルギー減少	大正準集団

熱力学

ボトムアップ ↑ ↓ トップダウン

統計力学

ハミルトン系→粒子の衝突→エントロピー増大

平衡状態での同等性

C. Smoluchowski-Poisson 方程式
～粒子の移動

I. ボトムアップモデリング

1. 輸送理論(Debye)

マスター方程式 $\Rightarrow$

Fokker-Planck 方程式

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial v}\left[-F + \gamma v + \frac{D}{m^2}\frac{\partial}{\partial v}\right]P$$

Smoluchowski 方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\gamma m}\frac{\partial}{\partial x}\left(-Kf + kT\frac{\partial f}{\partial x}\right)$$

$$f(x,t) = \int P(x,v,t)dv, \ F = K/m$$

$P(x_2, t_2 \mid x_1, t_1)$ 存在確率（粒子密度）
$F(x)$ 外力　（勾配）

半導体物理学
高分子化学

2. カイネティック理論 (Chavanis)

カイネティック方程式 $\Rightarrow$

$$\mu_t = \nabla[D_* \cdot (\nabla p + \mu \nabla \varphi)]$$
$$\Delta \varphi = \mu$$

$\mu = \mu(x,t)$ 粒子密度
$\varphi = \varphi(x,t)$ ポテンシャル
$p = p(\mu, \theta)$ 圧力, θ 温度

Smoluchowski-Poisson 方程式

粒子密度の時間発展を規定する流束
＝拡散項＋粒子密度×内部相互作用力

内部相互作用力
＝粒子の作り出すポテンシャル(場)の勾配

天体物理学

Reinforced Random Walk

Ichikawa-Rouzi-S.
Othmer-Stevens 97

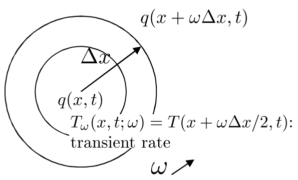
障害モデル（正規化）

$$\frac{1}{|\Delta t|}\int_{S^{N-1}} T_\omega(x,t)d\omega = \tau^{-1}$$

$$\frac{\tau}{\Delta t}T_\omega(x,t)$$

$$= \frac{T(x+\omega\frac{\Delta x}{2},t)}{\int_{S^{N-1}} T(x+\omega'\frac{\Delta x}{2},t)d\omega'}$$

$$T = T(x,t)$$



マスター方程式

$q = q(x,t)$ 粒子密度

$T = T_\omega(x,t)$ 遷移確率

$\omega \in S^{N-1}$ ジャンプ方向

Δt 計算時間, Δx ジャンプ巾

$$q(x,t+\Delta t) - q(x,t) =$$

$$\int_{S^{N-1}} T_{-\omega}(x+\omega\Delta x,t)q(x+\omega\Delta x,t)d\omega$$

$$-\int_{S^{N-1}} T_\omega(x,t)d\omega \cdot q(x,t)$$

Einstein の公式

$\Rightarrow$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D\nabla\cdot(\nabla q - q\nabla \log T)$$

$$\tau^{-1}(\Delta x)^2 = 2ND$$

Smoluchowski 方程式

～粒子密度の時間変化を規定する流束に現れる遷移確率平均場

細胞数理生物学

II. トップダウンモデリング

1) 補給-消費

$u_t = \alpha,\ v_t = -\beta$

2) 産生-消滅

$u_t = \alpha u,\ v_t = -\beta v$

3) 輸送

$u_t = -\nabla\cdot j$

j... 流束

4) 勾配

$j = -d_u\nabla u$... 拡散

$j = d_v u\nabla v$... 走化性

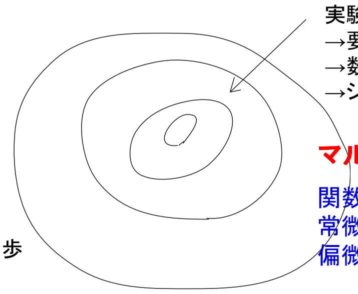
5) 化学反応

$A + B \to C\ (k)$

$\Rightarrow$ (質量作用)

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A][B]$$

$$\frac{d[B]}{dt} = -k[A][B]$$



実験からの知見
→要因の摘出
→数式を用いた統合
→シミュレーションによる検証

マルチスケール性

関数関係 ↑ 信号伝達、知覚特性
常微分 化学反応
偏微分 ↓ 物質輸送

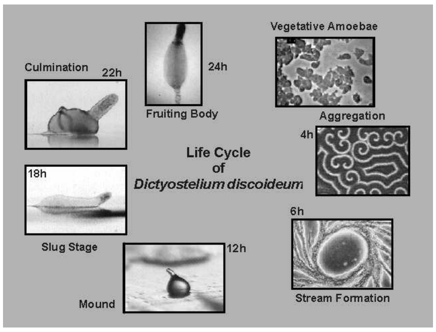
原理と現象－数理モデリングの初歩
培風館（鈴木・山岸）

例題（細胞動力学）

Keller-Segel 70

$$u_t = \nabla\cdot(d_1(u,v)\nabla u) - \nabla\cdot(d_2(u,v)\nabla v)$$
$$v_t = d_v\Delta v - k_1 vw + k_{-1}p + f(v)u$$
$$w_t = d_w\Delta w - k_1 vw + (k_{-1}+k_2)p + g(v,w)u$$
$$p_t = d_p\Delta p + k_1 vw - (k_{-1}+k_2)p$$

$u=u(x,t)$ 細胞性粘菌
$v=v(x,t)$ 化学物質
$w=w(x,t)$ 酵素
$p=p(x,t)$ 複合体



4. 化学反応

$$V+W \underset{\leftarrow\,(k_{-1})}{\overset{(k_1)\,\rightarrow}{}} P \overset{(k_2)}{\rightarrow} W+A$$

1. 拡散 u,v,w,p

2. 走化性 $v\to u$

3. 産生 $u\to(v,w)$

$$v_t = -k_1 vw + k_{-1}p$$
$$w_t = -k_1 vw + (k_{-1}+k_2)p$$
$$p_t = k_1 vw - (k_{-1}+k_2)p$$

Michaelis-Menten

1. 準静的 $k_1 vw - (k_{-1}+k_2)p = 0$
2. 質量保存 $w+p=c$

$\Rightarrow$

$$u_t = \nabla\cdot(d_1(u,v)\nabla u) - \nabla\cdot(d_2(u,v)\nabla v)$$
$$v_t = d_v\Delta v - k(v)v + f(v)u$$
$$k(v) = \frac{ck_1k_2}{(k_{-1}+k_2)+k_1 v}$$

Nanjundiah 73

$d_1(u,v),\ k(v),\ f(v)$ 定数
$d_2(u,v) = u\chi'(v)$

$$u_t = d_u\Delta u - \nabla\cdot(u\nabla\chi(v))$$
$$v_t = d_v\Delta v - b_1 v + b_2 u$$

$\chi'(v)$ 知覚関数

Smoluchowski-Poisson 方程式

Jäger-Luckhaus 92

$$u_t = \nabla\cdot(\nabla u - u\nabla v)$$
$$-\Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \text{ in } \Omega\times(0,t)$$
$$\frac{\partial u}{\partial\nu} - u\frac{\partial v}{\partial\nu} = \frac{\partial v}{\partial\nu} = 0 \text{ on } \partial\Omega\times(0,T)$$
$$\int_\Omega v = 0$$

Smoluchowski-ODE 系

$$q_t = \nabla\cdot(\nabla q - q\nabla\varphi(v))$$
$$v_t = q \text{ in } \Omega\times(0,T)$$
$$\left.\frac{\partial q}{\partial\nu}\right|_{\partial\Omega} = 0,\ q|_{t=0}=q_0,\ v|_{t=0}=v_0$$

Rascle's Smolchowski-ODE quation 1978

$$u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u \nabla v)$$
$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u \frac{\partial v}{\partial \nu}\Big|_{\partial\Omega} = 0$$
$$v_t = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u$$

Nonlocal ODE equation

$$v_t = \lambda \left(\frac{e^v}{\int_\Omega e^v} - \frac{1}{|\Omega|} \right) \quad \text{in } \Omega \times (0,T)$$

Full system of chemotaxis (Keller-Segel 1970)

$$\varepsilon u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u \nabla v)$$
$$\tau v_t - \mu \Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \quad \text{in } \Omega \times (0,T)$$
$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u \frac{\partial v}{\partial u} = \frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \times (0,T)$$

$\mu = 0$

$\varepsilon = 0$

$\tau = 0$

Smoluchowski-Poisson equation (Jäger-Luckhaus 1991)

$$u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u \nabla v)$$
$$-\Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \quad \text{in } \Omega \times (0,T)$$
$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u \frac{\partial v}{\partial \nu} = \frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \quad \text{on } \partial\Omega \times (0,T)$$
$$\int_\Omega v = 0$$

セル動力学と関連する数理モデル

Nonlocal parabolic equation (Wolansky 1997)

$$v_t = \Delta v + \lambda \left(\frac{e^v}{\int_\Omega e^v} - \frac{1}{|\Omega|} \right)$$

Hamilton's normalized Ricci flow 1988

$$u_t = \Delta \log u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \quad \text{in } \Omega \times (0,T)$$

III. 質量と自由エネルギー

$$u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u \nabla v)$$
$$-\Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \quad \text{in } \Omega \times (0,T)$$
$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u \frac{\partial v}{\partial \nu} = \frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \text{ on } \partial\Omega \times (0,T)$$
$$\int_\Omega v = 0, \quad \Omega \subset \mathbf{R}^2$$

2D-SP 方程式

$u \geq 0$ 正値性

$$\frac{d}{dt}\|u(\cdot,t)\|_1 = \int_{\partial\Omega} \nu \cdot (\nabla u - u \nabla v) = 0$$

全質量保存

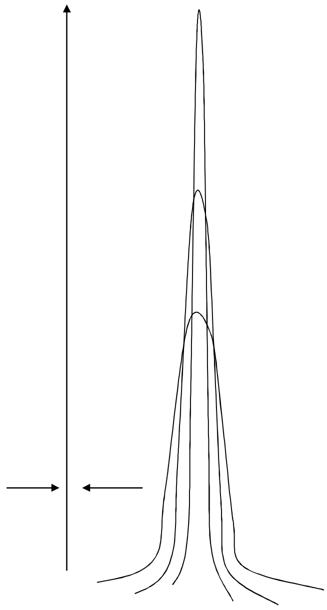
$$u_t = \nabla \cdot u \nabla (\log u - v)$$
$$v(\cdot,t) = \int_\Omega G(\cdot,x')u(x',t)dx'$$
$$\int_\Omega u_t(\log u - v) = -\int_\Omega u |\log u - v|^2$$
$$\frac{d}{dt}\int_\Omega u(\log u - 1) = \int_\Omega u_t \log u$$
$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\int_{\Omega\times\Omega} G(x,x')u \otimes u = \int_\Omega u_t v$$

ヘルムホルツ自由エネルギー減少

$$\frac{d}{dt}\mathcal{F}(u(t)) \leq 0$$
$$\mathcal{F}(u) = \int_\Omega u(\log u - 1) \quad \text{エントロピー項}$$
$$-\frac{1}{2}\int_{\Omega\times\Omega} G(x,x')u \otimes u \quad \text{内部エネルギー項}$$

L^1（全質量） 制御下の凝縮

$C'(\overline{\Omega}) \cong \mathcal{M}(\overline{\Omega}) \Rightarrow$ collapse の形成



定理 (Nagai-Senba-Yoshida 97
Biler 98, Gajewski-Zacharias 98)

$\|u_0\|_1 < 4\pi \ \Rightarrow T_{\max} = +\infty$

証明

双対 *Trudinger-Moser* 不等式

$\inf\{\mathcal{F}(u) \mid u \geq 0, \ \ \|u\|_1 = 4\pi\} > -\infty$

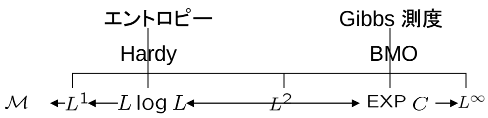
$+$ 全質量保存

$\lambda = \|u(t)\|_1 < 4\pi$

$\Rightarrow \sup_{t\geq 0} \|u(t)\|_{L\log L} < +\infty$

放物型正則性

$\Rightarrow T = +\infty, \sup_{t\geq 0} \|u(t)\|_\infty < +\infty$



IV. 定常状態 – 非線形スペクトル力学

$$u_t = \nabla \cdot u\nabla(\log u - v)$$

$$-\Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \ \text{ in } \Omega \times (0,T)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u\frac{\partial v}{\partial \nu} = \frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \text{ on } \partial\Omega \times (0,T)$$

$$\int_\Omega v = 0, \quad \Omega \subset \mathbf{R}^2$$

定常状態

$\log u - v = \text{constant}$

$\|u\|_1 = \lambda$ 全質量

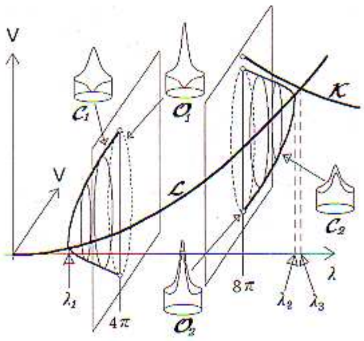
$\Rightarrow$

$$u = \frac{\lambda e^v}{\int_\Omega e^v}$$

$$-\Delta v = \lambda\left(\frac{e^v}{\int_\Omega e^v} - \frac{1}{|\Omega|}\right) \text{ in } \Omega$$

$$\frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \text{ on } \partial\Omega, \int_\Omega v = 0$$

... 点渦平均場方程式



Senba-S. 00

$\lambda = 8\pi \ (4\pi)$
... 内部 (境界) 爆発閾値質量

V. 爆発条件

定理 (Senba-S. 01) ⟵ **対称化** （弱形式）

$^\exists \eta > 0$ 絶対定数 s.t.

$x_0 \in \overline{\Omega}, \quad 0 < R \ll 1$

$$\frac{1}{R^2}\int_{\Omega\cap B_{2R}(x_0)} |x-x_0|^2 u_0(x)dx < \eta$$

$$\int_{\Omega\cap B_R(x_0)} u_0(x)dx > m_*(x_0)$$

$\Rightarrow$

$T = T_{\max} = o(R^2) < +\infty$

$$m_*(x_0) = \begin{cases} 8\pi, & x_0 \in \Omega \\ 4\pi, & x_0 \in \partial\Omega \end{cases}$$

$G(x', x) = G(x, x')$

$\Rightarrow$

$$\frac{d}{dt}\int_\Omega u(\cdot,t)\varphi = \int_\Omega u(\cdot,t)\Delta\varphi$$
$$+\frac{1}{2}\int_{\Omega\times\Omega} \rho_\varphi(x,x')u(x,t)u(x',t)dxdx'$$

$$\varphi \in C^2(\overline{\Omega}), \ \left.\frac{\partial\varphi}{\partial\nu}\right|_{\partial\Omega} = 0$$

$$\rho_\varphi(x,x') = \nabla\varphi(x)\cdot\nabla_x G(x,x')$$
$$+\nabla\varphi(x')\cdot\nabla_{x'}G(x,x') \in L^\infty(\Omega\times\Omega)$$

VI 双対変分構造 – 平衡状態におけるSmoluchowski-Poisson 方程式 と 点渦平均場方程式 の同等性

X Banach 空間 $/\mathbf{R}$

$F : X \to (-\infty, +\infty]$ prop. c'x l.s.c.

$\Rightarrow$

Legendre 変換

$F^* : X^* \to (-\infty, +\infty]$ prop. c'x l.s.c.

$$F^*(p) = \sup_{x\in X}\{\langle x,p\rangle - F(x)\}$$

Fenchel-Moreau 双対

$F^{**} = F$

$$F^{**}(x) = \sup_{p\in X^*}\{\langle x,p\rangle - F^*(p)\}$$

Toland 双対 78, 79

$F, G : X \to (-\infty, +\infty]$ prop. c'x l.s.c.

$J(x) = G(x) - F(x)$

$J^*(p) = F^*(p) - G^*(p)$

SP方程式 **自由エネルギー** ⟷ **双対** ⟷ 点渦平均場方程式 **場の汎関数**

$$\mathcal{F}(u) = \int_\Omega u(\log u - 1)$$
$$-\frac{1}{2}\left\langle(-\Delta)^{-1}u, u\right\rangle, \ \|u\|_1 = \lambda$$

粒子分布

$$\mathcal{J}_\lambda(v) = \frac{1}{2}\|\nabla v\|_2^2$$
$$-\lambda\log\int_\Omega e^v + \lambda(\log\lambda - 1)$$

ポテンシャル密度

まとめ 3 (粒子の移動と非平衡熱力学)

1. Keller-Segel 系 ... 走化性, 拡散, 産生, 消滅, 化学反応 (70)
2. 簡略化 → Smolchowski-Poisson 方程式, 粒子密度運動 (73)
3. 定常問題→爆発閾値の予測 (81), 証明 (95)
4. 点渦系との双対... 定常 Smoluchowski-Poisson 方程式 (08)

TS, *Free Energy and Self-Interacting Particles*
Birkhäuser, Boston, 05

H.A. Levine, "Book Review"
Bull. AMS 44 (07) 139-145

Abstract

Smoluchowski-Poisson 方程式は粒子密度の時間変化に関する数理モデルで, 輸送・カイネティック理論から導出され, 物性物理学, 高分子化学, 細胞生物学, 天体物理学などにおいて用いられる. Toland 双対によってその定常状態は Onsager の点渦平均場方程式と同等であり, そこでは量子化された爆発機構が観察される. 本講演では空間 2 次元の非定常 Smoluchowski-Poisson 方程式での質量量子化の証明, 関連する数理的対象, およびその背景にある物理原理を述べる

Plan

1. 主結果 (1)
2. 変分構造 (1)
3. 爆発解析 - 階層的議論と部分正則性 (5)
4. 弱解とスケール極限 - 非定常質量量子化 (5)

T. Senba and T. Suzuki
Applied Analysis
Imperior College Press
London, scond edition, 2010

キーワード
平均場方程式, 調和写像, Smoluchowski-Poisson 方程式, 循環的階層, 量子化する爆発機構, 場と粒子の双対性, 非線形スペクトル力学

1. 主結果

$$u_t = \nabla\cdot(\nabla u - u\nabla v)$$
$$-\Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \quad \text{in } \Omega\times(0,T)$$
$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u\frac{\partial v}{\partial \nu} = \frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \text{ on } \partial\Omega\times(0,T)$$
$$\int_\Omega v = 0, \quad \Omega\subset\mathbf{R}^2$$

定理 [collapse の生成]

$T = T_{\max} < +\infty \Rightarrow$

$$u(x,t)dx \rightharpoonup \sum_{x_0\in\mathcal{S}} m(x_0)\delta_{x_0}(dx) + f(x)dx$$

as $t\uparrow T$ in $\mathcal{M}(\overline{\Omega})$,

$0\le f = f(x)\in L^1(\Omega)\cap C(\overline{\Omega}\setminus\mathcal{S})$

$\mathcal{S} = \{x_0\in\overline{\Omega} \mid {}^\exists(x_k,t_k)\to(x_0,T)$
s.t. $u(x_k,t_k)\to+\infty\}$

定理 [質量量子化]

$$m(x_0) = m_*(x_0) \equiv \begin{cases} 8\pi, & x_0\in\Omega \\ 4\pi, & x_0\in\partial\Omega \end{cases}$$

$[\ \|u(t)\|_1 = \|u_0\|_1 \Rightarrow$
$2\sharp(\mathcal{S}\cap\Omega) + \sharp(\mathcal{S}\cap\partial\Omega) \le \|u_0\|_1/(4\pi)]$

c.f. 爆発閾値
Senba-S. 01b
Biler 98
Gajewski-Zacharias 98
Nagai-Senba-Yoshida 97
Nagai 95
Childress-Percus 81

c.f. 凝縮
Senba-S. 01a
Herrero-Velázquez 96
Nanjundiah 73

1/12

2. 変分構造

2.1. モデル(B)方程式

$$\frac{d}{dt}\|u(t)\|_1 = 0$$

全質量保存

$$\frac{d}{dt}\mathcal{F}(u(t)) = -\int_\Omega u|\nabla(\log u - G*u)|^2$$

全自由エネルギー減少

$$u_t = \nabla u\cdot\nabla\delta\mathcal{F}(u)$$
$$\mathcal{F}(u) = \int_\Omega u(\log u - 1) - \frac{1}{2}\langle G*u, u\rangle$$

2.2. 作用反作用の法則→対称化

$$\frac{d}{dt}\int_\Omega \varphi(x)u(x,t)dx$$
$$= \int_\Omega \Delta\varphi(x)\cdot u(x,t)dx$$
$$+\frac{1}{2}\int_{\Omega\times\Omega}\rho_\varphi(x,x')u(x,t)u(x',t)dxdx'$$

$$\varphi\in C^2(\overline{\Omega}),\ \left.\frac{\partial\varphi}{\partial\nu}\right|_{\partial\Omega} = 0$$

弱形式

$$G(x,x') = G(x',x)$$

$$\boxed{\begin{aligned}&\rho_\varphi(x,x') = \nabla_x G(x,x')\cdot\nabla\varphi(x)\\ &+\nabla_{x'}G(x,x')\cdot\nabla\varphi(x')\\ &\in L^\infty(\Omega\times\Omega)\end{aligned}}$$

2/12

3. 爆発解析 – 階層的議論と部分正則性

自己相似変換 (全空間)

$u_\mu(x,t) = \mu^2 u(\mu x, \mu^2 t),\ \mu > 0$

$\leftrightarrow \|u(t)\|_1 = \|u_\mu(t)\|_1$

$\Leftrightarrow$

$n = 2$

$$\boxed{\begin{array}{l} u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u \nabla \Gamma * u) \\ (x,t) \in \mathbf{R}^n \times (0,T) \\ -\Delta \Gamma = \delta \end{array}}$$

双対 Trudinger-Moser 不等式

$n = 2$

$\Rightarrow$

$\inf \{ \mathcal{F}(u) \mid u \geq 0,\ \|u\|_1 = 8\pi \} > -\infty$

$$\mathcal{F}(u) = \int_{\mathbf{R}^2} u(\log u - 1) - \frac{1}{2}\langle \Gamma * u, u \rangle$$

臨界質量 $\lambda = 8\pi$

$u_\mu(x) = \mu^2 u(\mu x) \geq 0,\ \mu > 0$

$\Rightarrow$

$\|u_\mu\|_1 = \|u\|_1 \equiv \lambda$

$$\mathcal{F}(u_\mu) = \left(2\lambda - \frac{\lambda^2}{4\pi} \right) \log \mu + \mathcal{F}(u)$$

スケール不変性 → 爆発解析

例題

$1 < p < \infty,\ \mu > 0$

$-\Delta v = v^p$

$v_\mu(x) = \mu^{2/(p-1)} v(\mu x)$

$\Rightarrow$

$-\Delta v_\mu = v_\mu^p$

定理 [Gidas-Spruck 81]

$\Omega \subset \mathbf{R}^n$ 有界領域 $\partial\Omega$ 滑らか

$1 < p < \frac{n+2}{n-2}$

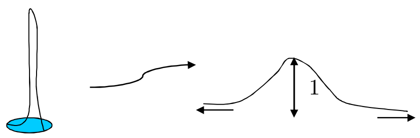
$\Rightarrow$

$^\exists C > 0$ s.t.

$\|v\|_\infty \leq C,\ ^\forall v$ s.t.

$-\Delta v = v^p, \quad v > 0 \quad \text{in } \Omega \subset \mathbf{R}^n$

$v = 0 \quad \text{on } \partial\Omega$



1. 背理法

${}^{\exists}\{v_k\}$

$-\Delta v_k = v_k^p$, $v_k > 0$ in Ω

$v_k = 0$ on $\partial\Omega$

$m_k = v_k(x_k) = \|v_k\|_\infty \to +\infty$

2. スケーリング

$\tilde{v}_k(x) = \mu_k^{\frac{2}{p-1}} v_k(\mu_k x + x_k)$

$\Rightarrow$

$\|\tilde{v}_k\|_\infty = \tilde{v}_k(0) = 1$

$\mu_k = m_k^{-\frac{2}{p-1}} \downarrow 0$

3. 楕円型正則性

$\Rightarrow$

${}^{\exists}$ スケール極限 $v = v(x)$

$-\Delta v = v^p$, $0 \le v \le v(0) = 1$ in $\mathbf{R}^n$

or

$-\Delta v = v^p$, $0 \le v \le v(0) = 1$ in $\mathbf{R}^n_+$
$v = 0$ on $\partial\mathbf{R}^n_+$

4. Liouville 性

$1 < p < \frac{n+2}{n-2}$

$\Rightarrow$

$\not\exists$ スケール極限

5/12

ε-正則性 + 単調公式

$\Rightarrow$

部分正則性 (爆発点の有限性)

調和写像流　(例)

$\Omega = \mathbf{R}^2/a\mathbf{Z} \times b\mathbf{Z}$

$u = u(x,t)$:

$\Omega \times [0,T) \to S^{n-1} \subset \mathbf{R}^n$

$u_t - \Delta u = u\,|\nabla u|^2$

$|u| = 1$ in $\Omega \times (0,T)$

定理 (Struwe 85)

時間大域的 ${}^{\exists}$ H^1 弱解

$\Omega \times [0,+\infty)$ で有限個の特異点

$B_R = B(0,R)$

$E(u,R) = \dfrac{1}{2}\displaystyle\int_{B_R} |\nabla u|^2$

$E_0 = \frac{1}{2}\|\nabla u_0\|_2^2$

ε-正則性

${}^{\exists}\varepsilon_0 > 0$

$\sup_{t\in[0,T]} E(u(\cdot,t), B_R) < \varepsilon_0$

$\Rightarrow$

$u = u(x,t)$ 正則 in $B_{R/2} \times [0,T]$

単調公式

$E(u(\cdot,T), B_R)$
$\le E(u_0, B_{2R}) + CE_0T/R^2$

6/12

まとめ５（スケーリングと単調公式）

2D Smoluchowski-Poisson 方程式

1. 爆発解析
   (a) スケール不変性
   (b) スケール解の遠方での制御
   (c) 階層的議論
   (d) スケール極限の分類
2. 部分正則性
   (a) ε-正則性... 放物型局所理論
   (b) 単調公式 ... 時間と空間のトレードオフ

$$u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u\nabla G * u)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u\frac{\partial G * u}{\partial \nu}\Big|_{\partial\Omega} = 0$$

$$v = G * u$$

$$\Leftrightarrow$$

$$-\Delta v = u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u$$

$$\frac{\partial v}{\partial \nu}\Big|_{\partial\Omega} = 0, \ \int_\Omega v = 0$$

4. 弱解とスケール極限 － 非定常 質量量子化

下からの評価

定理 [Biler 98, Gajewski-Zacharias 98, Nagai-Senba-Yoshida 97]

$\lambda = \|u_0\|_1 < 8\pi$

$\Rightarrow$

$T = +\infty$

$\uparrow$

$$\inf\{\mathcal{F}(u) \mid u \geq 0,\ \|u\|_1 = 8\pi\} > -\infty$$

$$\mathcal{F}(u) = \int_\Omega u(\log u - 1) - \frac{1}{2}\langle G * u, u\rangle$$

1) 局所化, $\mathcal{S}$: 爆発集合

$T < +\infty$

$$\boxed{\begin{array}{l}\Rightarrow {}^\forall \text{孤立 } x_0 \in \mathcal{S} \\ \lim_{R\downarrow 0}\liminf_{t\uparrow T} \|u(t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))} \geq m_*(x_0)\end{array}}$$

2) ε-正則性

$$\lim_{R\downarrow 0}\limsup_{t\uparrow T} \|u(\cdot,t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))} < {}^\exists\varepsilon_0$$

$\Rightarrow x_0 \notin \mathcal{S}$

$$\boxed{\begin{array}{l}{}^\exists\varepsilon_0 > 0,\ {}^\forall x_0 \in \mathcal{S},\ {}^\forall R > 0 \\ \limsup_{t\uparrow T} \|u(\cdot,t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))} \geq \varepsilon_0\end{array}}$$

3) 弱形式

$\Rightarrow$ (単調公式)

$^\forall\varphi \in C^2(\overline{\Omega}),\ \left.\frac{\partial\varphi}{\partial\nu}\right|_{\partial\Omega} = 0$

$$\left|\frac{d}{dt}\int_\Omega u(\cdot,t)\varphi\right| \leq C_\varphi(\lambda+\lambda^2)$$

$\lambda = \|u(\cdot,t)\|_1$

$^\forall x_0 \in \mathcal{S}$

$\lim_{R\downarrow 0}\liminf_{t\uparrow T}\|u(\cdot,t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))} \geq \varepsilon_0$

$\|u(\cdot,t)\|_1 = \|u_0\|_1$

$\Rightarrow$

$\sharp\mathcal{S} < +\infty,\ ^\forall x_0 \in \mathcal{S}$ 孤立

$\Rightarrow$

$\lim_{R\downarrow 0}\liminf_{t\uparrow T}\|u(\cdot,t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))} \geq m_*(x_0)$

$0 \leq \mu(dx,t) \in C_*([0,T],\mathcal{M}(\overline{\Omega}))$

$u(x,t)dx = \mu(dx,t),\ 0 \leq t < T$

$$\boxed{\begin{aligned}&\lim_{R\downarrow 0}\limsup_{t\uparrow T}\|u(\cdot,t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))}\\&= \lim_{R\downarrow 0}\liminf_{t\uparrow T}\|u(\cdot,t)\|_{L^1(\Omega\cap B(x_0,R))}\end{aligned}}$$

Collapse の形成

$$\mu(\cdot,T) = \sum_{x_0\in\mathcal{S}} m(x_0)\delta_{x_0} + f$$

$m(x_0) \geq m_*(x_0),\ 0 \leq f \in L^1(\Omega)$

上からの評価

定理 [Biler-Hilhorst-Nadzieja 94]

$\lambda = \|u_0\|_1 > 8\pi$

$\Rightarrow$

$T = T_{\max} < +\infty$

$\uparrow$

$u_0 \in L^1(\mathbf{R}^2, (1+|x|^2)dx)$

$\varphi(x) = |x|^2$, 弱形式

$\Rightarrow$

$$\frac{d}{dt}\int_{\mathbf{R}^2}|x|^2u(\cdot,t) = 4\lambda - \frac{\lambda^2}{2\pi}$$

Kurokiba-Ogawa 03
局所2次モーメント＋スケーリング

$u_0 \in L^1(\mathbf{R}^2)$

1) 後方自己相似変換

$y = (x-x_0)/(T-t)$

$s = -\log(T-t),\ t < T$

$+$ ODE 爆発レート

$\Rightarrow$

$z(y,s) = (T-t)u(x,t)$

$$\boxed{\begin{aligned}&z_s = \nabla\cdot(\nabla z - z\nabla(\Gamma * z + |y|^2/4))\\&z = z(y,s) \geq 0\\&y \in (T-t)^{-1/2}(\Omega - \{x_0\})\\&-\log T \leq s < +\infty\\&\|z(\cdot,s)\|_1 = \lambda\end{aligned}}$$

無限遠を除去したスケール極限

2) 階層的議論

$\Rightarrow$

${}^{\forall}s_k \to +\infty,\ {}^{\exists}\{s'_k\} \subset \{s_k\}$

$z(y, s + s'_k)dy \rightharpoonup {}^{\exists}\zeta(dy, s)$

$C_*(-\infty, +\infty; \mathcal{M}_0(\mathbf{R}^2))$

0-拡張, 鏡像（境界爆発点）

$\mathcal{M}_0(\mathbf{R}^2) = C_0(\mathbf{R}^2)'$

$C_0(\mathbf{R}^2) = \{f \in C(\mathbf{R}^2 \cup \{\infty\})$
$\mid f(\infty) = 0\}$

$\forall s \in (-\infty, +\infty)$

$\zeta(dy, s)$ 有限 Radon 測度

$\zeta_s = \nabla \cdot (\nabla\zeta - \zeta\nabla(\Gamma * \zeta + |y|^2/4))$

in $\mathbf{R}^2 \times (-\infty, +\infty)$ の弱解

3)　放物包 $0 < R \le 1$

$$\left|\frac{d}{dt}\int_\Omega u(\cdot, t)\varphi_{x_0,R}\right| \le C_\lambda R^{-2}$$

$\Rightarrow$

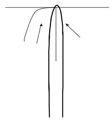
$\hat{m}(x_0) = \zeta(\mathbf{R}^2, s),\ -\infty < s < +\infty$

$$\hat{m}(x_0) = \begin{cases} m(x_0), & x_0 \in \Omega \\ 2m(x_0), & x_0 \in \partial\Omega \end{cases}$$

プリスケール・コラプス質量

= (2×) スケール弱極限全質量

$$\mu(\cdot, T) = \sum_{x_0 \in \mathcal{S}} m(x_0)\delta_{x_0} + f$$



$t = T$

放物包 .. 無限に広い放物領域

10/12

$\zeta_s = \nabla \cdot (\nabla\zeta - \zeta\nabla(\Gamma * \zeta + |y|^2/4))$

in $\mathbf{R}^2 \times (-\infty, +\infty)$

4) スケール引き戻し

$\zeta(dy, s) = e^{-s}A(dy', s')$

$y' = e^{-s/2}y,\ s' = -e^{-s}$

$\Rightarrow$

$A_s = \nabla \cdot (\nabla A - A\nabla\Gamma * A)$

$A = A(dy, s) \ge 0,\ (y, s) \in \mathbf{R}^2 \times (-\infty, 0)$

$A(\mathbf{R}^2, s) = m(x_0)$

5) 平行移動弱極限

${}^{\forall}\varphi \in C_0^2(\mathbf{R}^2) \oplus \mathbf{R}$

$$\left|\frac{d}{ds}\langle\varphi, A(dy, s)\rangle\right| \le C_\varphi$$

$\Rightarrow$

${}^{\forall}s_k \uparrow +\infty,\ {}^{\exists}\{s'_k\} \subset \{s_k\}$

$A(dy, s - s'_k) \rightharpoonup a(dy, s)$

in $C_*(-\infty, +\infty; \mathcal{M}(\mathbf{R}^2))$

$a_s = \nabla \cdot (\nabla a - a\nabla\Gamma * a)$

$a(dy, s) \ge 0,\ (y, s) \in \mathbf{R}^2 \times (-\infty, +\infty)$

$a(\mathbf{R}^2, s) = m(x_0)$

$\mathcal{M}(\mathbf{R}^2) = [C_0(\mathbf{R}^2) \oplus \mathbf{R}]'$ を用いて
スケール全質量を包括

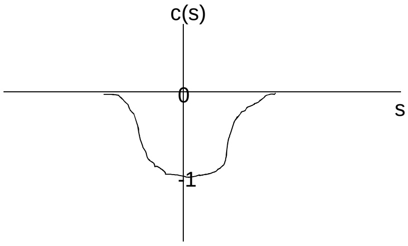
11/12

6) 局所 2 次モーメント

$0 \leq c'(s) \leq 1,\ s \geq 0$

$-1 \leq c(s) \leq 0,\ s \geq 0$

$$c(s) = \begin{cases} s-1, & 0 \leq s \leq 1/4 \\ 0, & s \geq 4 \end{cases}$$



$m(x_0) > 8\pi \Rightarrow {}^{\exists}\eta > 0$

$\boxed{\langle c(|y|^2)+1, a(dy,0)\rangle \geq \eta}$

原点への集中＋全質量過剰
→時間大域存在不可

7) スケール不変性

$a(y,s) \mapsto a_\mu(y,s) = \mu^2 a(\mu y, \mu^2 s)$

$\langle c(|y|^2)+1, a^\mu(dy,0)\rangle \geq \eta,\ {}^{\forall}\mu > 0$

$\Rightarrow$

$\langle c(\mu^{-2}|y|^2)+1, a(dy,0)\rangle \geq \eta$

$0 \leq c(\mu^{-2}|y|^2)+1 \leq 1$

${}^{\forall}y \in \mathbf{R}^2,\ c(\mu^{-2}|y|^2)+1 \to 0,\ \mu \uparrow +\infty$

$\Rightarrow$ (優収束定理)

$0 \geq \eta$, 矛盾　　集中条件の解消

$$\boxed{\begin{aligned} &{}^{\forall}x_0 \in \mathcal{S},\ m(x_0) = m_*(x_0) \\ &m_*(x_0) = \begin{cases} 8\pi, & x_0 \in \Omega \\ 4\pi, & x_0 \in \partial\Omega \end{cases} \\ &\mu(\cdot, T) = \sum_{x_0 \in \mathcal{S}} m(x_0)\delta_{x_0} + f \end{aligned}}$$

12/12

補足

1. 爆発レート

pre-scaled

$u(x,t)dx \rightharpoonup \sum_{x_0 \in \mathcal{S}} 8\pi\delta_{x_0}(dx) + f(x)dx$

$0 \leq f = f(x) \in L^1(\Omega) \cap C(\overline{\Omega} \setminus \mathcal{S})$

(1) collapse の形成

(2) 質量量子化

re-scaled

$z(y,s) = (T-t)u(x,t)$

$y = (x-x_0)/(T-t)^{1/2}$

$s = \log(T-t),\ x_0 \in \mathcal{S}$

$$\boxed{\begin{aligned} &z(y,s+s')dy \rightharpoonup m_*(x_0)\delta_0(dy) \\ &C_*(-\infty,+\infty; \mathcal{M}_0(\mathbf{R}^2)) \\ &s' \uparrow +\infty \end{aligned}}$$

(1) sub-collapse の形成

(2) type II の爆発レート

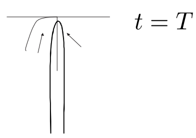
定理 3 [Senba 07, Naito-S. 08]

${}^{\forall}x_0 \in \mathcal{S}$ type II

$\lim_{t \uparrow T}(T-t)\,\|u(\cdot,t)\|_{L^\infty(\Omega \cap B(x_0, b(T-t)^{1/2}))}$

$= +\infty,\ {}^{\forall}b > 0$

全爆発機構は超放物包に押し込められる



超放物包 - 無限小の放物領域

2. エネルギーの量子化

Landau-Ginzburg モデル（定義域2次元）
H-sysytem
Yamabe 問題（臨界Sobolev指数）

… ハミルトニアンの制御（定常・非定常）

調和写像流（定義域2次元）

1. 爆発機構の量子化
1.1. 質量 (SP)
1.2. エネルギー (HH)

2. Lyapunov 関数の有界性
2.1. 創発性(SP)
2.2. エネルギー密度の非負性 (HH)

3. 定常解をprofile とする自己相似的爆発

4. sub-collapse 生成とType II の爆発レート

3. 高次元の質量量子化

$$-\Delta v = \frac{\lambda e^v}{\int_\Omega e^v} \text{ in } \Omega,\ v = 0 \text{ on } \partial\Omega$$

$$w = v + \log\lambda - \log\int_\Omega e^v$$

$$\Rightarrow$$

$$-\Delta w = e^w \text{ in } \Omega,\ w = \text{定数} \text{ on } \partial\Omega \longleftarrow$$

$$\int_\Omega e^w = \lambda$$

$$\Omega \subset \mathbf{R}^n,\ n \geq 3 \text{ 有界領域},\ \partial\Omega \text{ 滑らか}$$

$$1 < q < \tfrac{n+2}{n-2}$$

$$-\Delta w = w_+^q \text{ in } \Omega,\ w = \text{定数} \text{ on } \partial\Omega$$

$$\int_\Omega w_+^q = \lambda$$

スケーリング→ 臨界指数 $q = \dfrac{n}{n-2}$

質量量子化（境界条件無・有）

物理的背景
プラズマ自由境界問題 ↔ 圧縮性自己重力流体
（Toland 双対）

Chavanis のカイネティック理論
（Tsallis エントロピー）

$$u_t = \frac{m-1}{m}\Delta u^m - \nabla\cdot(u\nabla\Gamma * u)$$
$$\text{in } \mathbf{R}^n \times (0,T)$$
$$m = 2 - \tfrac{2}{n}$$

爆発閾値
Type II 爆発点の有限性 (R. Takahashi-S.)

4. 高次元爆発集合

1. (制約条件)

定理 [R. Takahashi-S.]

$\Omega \subset \mathbf{R}^n$, $n \geq 3$, 凸領域, $\partial\Omega$ 滑らか

$\left\{(\lambda_k, v^k)\right\}$ 解の列, $1 < \gamma < \dfrac{n+2}{n-2}$

$-\Delta v = v_+^\gamma$ in Ω, $v = \text{constant}$ on $\partial\Omega$

$\int_\Omega v_+^{\frac{n(\gamma-1)}{2}} = \lambda$, $\lambda_k \to \lambda_0 \geq 0$

$\Rightarrow$

$^\exists$ 部分列

1. $\left\|v^k\right\|_\infty = O(1)$
2. $\sup_\Omega v^k \to -\infty$
3. $\lambda_0 = m_*$ 全空間質量, $^\exists x^* \in \Omega$

$\nabla R(x_*) = 0$, $^\exists x_k$, v^k の極大

$x_k \to x_*$, $v^k(x_k) \to +\infty$

$v^k \to -\infty$, 局所一様 in $\overline{\Omega} \setminus \{x_*\}$

$v^k(x)_+^{\frac{n(\gamma-1)}{2}} dx \rightharpoonup m_* \delta_{x_0}(dx)$ in $\mathcal{M}(\overline{\Omega})$

2. (次元制御)

Ω 有界開集合, $T > 0$

$u = u(x,t) : \Omega \times [0,T] \to (-\infty, +\infty]$ 連続

$D(t) = \overline{\{x \in \Omega \mid u(x,t) = +\infty\}}$

$D = \bigcup_{0 \leq t \leq T} D(t) \times \{t\} \subset \Omega \times [0,T]$

$u_t - \Delta u \geq 0$, $\mathcal{D}'(\Omega \times (0,T) \setminus D)$

$u = u(x,t)$ Lip. 連続 near in $\partial\Omega$, $t \in [0,T]$ 一様

定理 [F. Takahashi-S. 08b]

$n \geq 2 \Rightarrow \int_0^T \mathrm{Cap}_2(D(t))dt \leq \dfrac{L^n(\Omega)}{2}$

系 $\Omega \subset \mathbf{R}^n$, $n \geq 3$, 有界凸領域

$f = f(u,\lambda) \geq 0$, 連続 in (u,λ)

$\{(u_k, \lambda_k)\}$, 解の列

$-\Delta u = f(u,\lambda)$ in Ω, $\quad u = 0$ on $\partial\Omega$

$\int_\Omega f(u_k, \lambda_k)dx \leq C$, $\|u_k\|_\infty \to +\infty$, $\lambda_k \to \lambda_0$

$\mathcal{S}$: 爆発集合 $\Rightarrow \mathrm{Cap}_2(\mathcal{S}) = 0$, $d_H(\mathcal{S}) \leq n-2$

5. 点渦乱流

Stochastic Intensity

Intensities of the vortices: independent random variables $\alpha \in [-1,1]$ subject to the the same distribution $P(d\alpha)$ (one species) $\Rightarrow$

$$\rho = \frac{\int_{[-1,1]} \alpha e^{-\alpha\beta\psi} P(d\alpha)}{\int_{[-1,1]} \left(\int_\Omega e^{-\alpha\beta\psi}\right) P(d\alpha)}, \ \psi = (-\Delta_D)^{-1}\rho$$

neutral case $\Rightarrow$

$$-\Delta v = \lambda \left(\frac{e^v - e^{-v}}{\int_\Omega e^v + \int_\Omega e^{-v}} \right) \text{ in } \Omega, \ v = 0 \text{ on } \partial\Omega$$

....method of the minimal free energy, Neri 04

Ω: compact Riemannian surface

$$-\Delta v = \frac{\lambda(e^v - e^{-v})}{\int_\Omega (e^v + e^{-v})dx} \text{ in } \Omega, \ \int_\Omega v = 0$$

定理 [Jost-Wang-Ye-Zhou]

$\{(\lambda_k, v_k)\}$: non-compact solution sequence

$x_0 \in \Omega$: blowup point

$m_\pm(x_0)$: concentration mass of $\dfrac{\lambda_k e^{\pm v_k}}{\int_\Omega e^{\pm v_k} dx}$

$\Rightarrow$

$m_\pm(x_0) \in 8\pi\mathbf{N}$. ...use of *quaternions*

c.f. Nagasaki-S: complex analysis

Deterministic Intensity

Intensities of the vortices: deterministic subject to the distribution $P(d\alpha)$ (many species) $\Rightarrow$

$$-\Delta v = \lambda \int_{[-1,1]} \frac{\alpha e^{\alpha v}}{\int_\Omega e^{\alpha v}} P(d\alpha) \text{ in } \Omega, \ v = 0 \text{ on } \partial\Omega$$

formal proof, Sawada-S. 08

neutral case $\Rightarrow$

$$-\Delta v = \lambda \left(\frac{e^v}{\int_\Omega e^v} - \frac{e^{-v}}{\int_\Omega e^{-v}} \right) \text{ in } \Omega, \ v = 0 \text{ on } \partial\Omega$$

Joyce-Montgomery 73, Pointin-Lundgren 76

Ω: compact Riemannian surface

$$-\Delta v = \lambda \left(\frac{e^v}{\int_\Omega e^v} - \frac{e^{-v}}{\int_\Omega e^{-v}} \right) \text{ in } \Omega, \ \int_\Omega v = 0$$

予想 [Ohtsuka-S. 06]

$m_\pm(x_0) = 4\pi\ell(\ell \pm 1)$, $\ell = 1, 2, \ldots$

not exclusively

定理 [Esposito-Wei]

$^\exists(m_+(x_0), m_-(x_0)) = (8\pi, 24\pi)$

for the Neumann problem on the disc

6. 双対変分構造

非平衡熱力学モデル

Halperin-Hohenberg-Ma 74

Hohenberg-Halperin 77

$\mathcal{F}$: 自由エネルギー

model (A) $\tau u_t = -\delta \mathcal{F}(u)$

model (B) $\tau u_t = \nabla \cdot (M \nabla \delta \mathcal{F}(u))$

ヘルムホルツ自由エネルギー

$F = U - TS$

$\leftrightarrow$ T 定温

$\leftrightarrow$ 正準集団

S エントロピー

U 内部エネルギー

Smoluchowski-Poisson 方程式 ...

ボルツマンエントロピー

自己重力相互作用

$\rightarrow$ ヘルムホルツ自由エネルギー

$$\mathcal{F}(u) = \int_\Omega u(\log u - 1) - \frac{1}{2}\langle G * u, u\rangle$$

$\rightarrow$ model (B) 方程式

$$u_t = \nabla \cdot (u \nabla \delta \mathcal{F}(u))$$

$\Rightarrow$

$$\frac{d}{dt}\|u(t)\|_1 = 0$$

(全質量保存)

$$\frac{d}{dt}\mathcal{F}(u(t)) = -\int_\Omega u|\nabla \delta \mathcal{F}(u)|^2 \leq 0$$

(全エネルギー保存)

Full-System of Chemotaxis

$$u_t = \nabla \cdot (\nabla u - u \nabla v)$$

$$\tau v_t = \Delta v + u - \frac{1}{|\Omega|}\int_\Omega u \text{ in } \Omega \times (0,T)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \nu} - u\frac{\partial v}{\partial \nu} = \frac{\partial v}{\partial \nu} = 0 \text{ on } \partial\Omega \times (0,T)$$

$$\int_\Omega v = 0$$

Lyapunov 関数

$$L(u,v) = \int_\Omega u(\log u - 1) + \frac{1}{2}\|\nabla v\|_2^2$$

$$-\langle v, u\rangle, \quad u \geq 0, \int_\Omega v = 0$$

$$\frac{d}{dt}\|u(t)\|_1 = 0$$

$$\frac{dL}{dt}(u(t), v(t)) + \tau\|v_t\|_2^2$$

$$= -\int_{\mathbf{R}^2} u|\nabla(\log u - v)|^2 \leq 0$$

Model (B) - Model (A) 方程式

$$u_t = \nabla \cdot (u \nabla L_u(u,v))$$

$$\tau v_t = -L_v(u,v) \text{ in } \Omega \times (0,T)$$

$$u\frac{\partial}{\partial \nu}L_u(u,v) = 0 \text{ on } \partial\Omega \times (0,T)$$

Toland 双対変分構造

$F, G : X \to (-\infty, +\infty]$, prop. c'x l.s.c.

$J(x) = G(x) - F(x)$

$J^*(p) = F^*(p) - G^*(p)$

$L(x,p) = F^*(p) + G(x) - \langle x, p \rangle$

$$\inf_{(x,p)\in X\times X^*} L(x,p) = \inf_{p\in X^*} J^*(p)$$
$$= \inf_{x\in X} J(x)$$

Lagrange関数

[full system]

$$L(u,v) = \int_\Omega u(\log u - 1)$$
$$+\frac{1}{2}\|\nabla v\|_2^2 - \langle v, u\rangle$$
$$u \geq 0,\ \int_\Omega u = \lambda,\ \int_\Omega v = 0$$

unfolding（半定常）
$v = G * u$

unfolding（半定常）
$$u = \frac{\lambda e^v}{\int_\Omega e^v}$$

自由エネルギー

$$\mathcal{F}(u) = \int_\Omega u(\log u - 1)$$
$$-\frac{1}{2}\langle G * u, u\rangle$$

[SP方程式]

場の汎関数

$$\mathcal{J}_\lambda(v) = \frac{1}{2}\|\nabla v\|_2^2$$
$$-\lambda \log \int_\Omega e^v + \lambda(\log \lambda - 1)$$

[点渦平均場]

(半）Toland 双対

相転移 … Fix-Caginalp, Penrose-Fife

相分離 … Coupled Cahn-Hilliard

記憶形状 … Pawlow-Zochowski

流体 … Euler-Poisson

Kuhn-Tucker 双対
（歪勾配系　E. Yanagida)

Gierer-Meinhardt（発生）

Fitz-Hu-Nagumo（神経）

7. 非定常状態のハミルトニアン制御

（LG方程式）

無限時間爆発（2D-SP方程式）
剰余項の消滅 … 未解決

まとめ 6 （質量量子化の証明）

1. 量子化する爆発機構は 2D Smoluchowski-Poisson 方程式の有限時間爆発解に対して成立
2. 基本要因は変分構造に由来. 全質量保存, 自由エネルギーの減少, 弱形式
3. スケール不変性から臨界次元と臨界質量が選択
4. ε-正則性と単調公式から collapse 形成と質量の下からの評価
5. 質量の上からの評価は**スケール弱極限**と**放物包**
6. 自由エネルギー密度は負定値ではないが創発性によりエントロピー汎関数が主部となり sub-collapse が形成
7. スケール不変性と双対変分構造を通して, 物理学, 化学, 生物学, 幾何学などの多くの問題と関係

戦略的創造研究推進事業CREST
数理医学が拓く腫瘍形成原理解明と医療技術革新(2009.10-2015.3)

阪大グループ（鈴木研究室）

鈴木　貴（代表）	教授
高橋　亮	助教
市川　一寿	特任教授
中根　和昭（医）	招聘研究員
ラントラ　バグス	特任研究員（非常勤）
足立　善昭（金沢工大）	招聘研究員
齋藤　卓	特任研究員（常勤）
板野　景子	特任研究員（常勤）
井内　裕子	研究室秘書
雄山　真弓	招聘教授
田崎　創平	D3
リン　ケン	D3
(ロリングオスマンヌハ)	D2
ロージママティ	D1
佐藤　真	D1
稲角　啓	M2
（ヌリマン　ヤセン）	
（李　鴻海）	M2
(張　瀟）	M1
吉岡　貴史	M1
バイケジャン	M1

2010. 9. 6. 日本応用数理学会総合講演

International Research Staff Exchange Scheme
Call: FP7-PEOPLE-2009-IRSES

PEOPLE
MARIE CURIE ACTIONS

マリーキューリーアクション
国際研究者交流スキーム

Euro (Italy-Greece) → Japan
Nov 2009-Aug 2013