数理解析研究所講究録
第464巻 1982年 61-69

時間に関して二階のある微分方程式について

姫工大　工学部
丸尾　健二

<u>序</u>　Hを実Hilbert空間とし、内積を(,)によりノルムを$\|\cdot\|$で表わす。φはHから$(-\infty,+\infty]$への下半連続な凸関数とする。但し$\varphi\not\equiv 0$。$\partial\varphi$をφの劣微分作用素 すなわち

$$\partial\varphi x = \{ f\in H;\ \varphi(y)-\varphi(x) \geqq (f, y-x) \text{ for any } y\in H\}$$

とするとき 次の方程式の解の存在と一意性について考える。

$$\begin{cases} \dfrac{d^2}{dt^2}u + \partial\varphi u \ni f \\ u(0)=a,\quad \dfrac{du}{dt}(0)=b \end{cases}$$

今まで上記の問題に関しては Hが実有限次元Hilbert空間の場合に Schatzman [1] がやっている程度であまり論文を見ない。[2]の中にも述べてある通り上記の方程式の解の存在と一意性を示す事は難しい問題である為 この論文ではまず第一歩として $\partial\varphi$が自己共役作用素Aと内点をもつ閉凸集合K上の定義関数$I_K(\cdot)$の劣微分作用素∂I_Kとの和で表現される場合に限り 解の存在、一意性を議論する

事を目的にしよう。すなわち

$$(1.1)\quad \begin{cases} \dfrac{d^2}{dt^2}u + Au + \partial I_K u \ni f \\ u(0) = a, \quad \dfrac{du}{dt}(0) = b \end{cases}$$

の型をした方程式を解く問題である。

仮定と定理　まず記号を示す。$D(A^{1/2}) = V$とおき V の共役空間をV^*とする。そしてVにおけるノルムを$\|\cdot\|_V$　V^*におけるノルムを$\|\cdot\|_{V^*}$で表わす。又常に使用される様に $C([0,T]; V)$, $C^1([0,T], H)$, $W^{1,\infty}([0,T]; H)$ 等は $[0, T]$から V に値をとる連続関数全体, Hに値をとる一回微分して連続な関数全体, Hに値をとり超関数微分したものがいたる所有界な空間等とする。　さて$[0, T]$上の (1.1) の解を次の様に決める。

定義　$u \in C([0,T]; H)$が (1.1) の解とは 次の条件をみたす uが存在するときである。

1) $u \in W^{1,\infty}([0,T]; H)$ かつ $u \in$ weak-$C([0,T]; V)$

2) For any $t \in [0,T]$ に対して $u(t) \in V \cap K$

3) For any $t \in [0,T]$ に対して 右微分 左微分が弱の意味で存在する。(但し 0 と T においては存在する方のみ)

4) エネルギー不等式をみたす

$$\left\|\frac{du^{\pm}}{dt}(t)\right\|^2 + (Au(t), u(t)) \leqq \|b\|^2 + (Aa, a) + 2\int_0^t \left(\frac{du}{ds}(s), f(s)\right) ds$$

for any $t \in [0,T]$　（0とTでは存在する方のみ）

ここでVとV^*の積も$(\ ,\ )$によって表現した

5)　次の条件を満す$C([0,T];H)$上の線型汎関数Fが存在する

$$F(\xi - u) \leqq 0 \qquad \text{for any } \xi \in C([0,T];K)$$

かつ

$$\int_0^T \left(\frac{du}{ds}(s), \frac{d\xi}{ds}(s)\right) ds - \int_0^T (f(s) - Au(s), \xi(s))\, ds + (b, \xi(0)) - \left(\frac{du^-}{dt}(T), \xi(T)\right) = F(\xi)$$

for any $\xi \in C([0,T],V) \cap C^1([0,T],H)$

6)　初期条件は次の意味で満す

$$u(0) = a \quad \text{and} \quad b - \frac{du^+}{dt}(0) \in \partial I_K a$$

<u>定理1</u>　Hは可分な実Hilbert空間として　VからHへの埋め込み作用素はcompact作用素とする。任意の$a \in V \cap K$ and $b \in H$に対して(1.1)の解はすくなくとも一つは存在する。但し$f \in W^{1,\infty}([0,T];H)$とする。

[1]でも述べられている通り少なくともエネルギーを保存する解でなければ一意性はない。この為閉凸集合Kにある条件をつけてエネルギーを保存する解をみつける

事を次にやろう。 まず

__定義__ (energy conserving solution) u が energy conserving solution とは u が (1.1) の解であり 次の条件をみたすときをいう

1) $u \in C([0,T]; V)$

2) For any $t \in [0,T]$ $\frac{du^{\pm}}{dt}(t)$ が強の意味で存在し (但し 0, T では存在する方のみ)

3) For any $t \in [0,T]$ で エネルギー等式を満す (但し 0, T では存在する方のみ)。

__仮定 A__

1) For any $x \in \partial K$ (Kの境界の点の集合) $\partial I_K x$ は次の集合に等しいとする

$$\{ \lambda \gamma(x) ;\ \lambda \geqq 0,\ \gamma(x) \in \partial I_K x \text{ and } \|\gamma(x)\| = 1 \}$$

2) For any $x, y \in \partial K \cap G(R)$ に対して

$$\| \gamma(x) - \gamma(y) \| \leqq N_R \|x - y\|$$

をみたす ここで $G(R)$ は原点を中心半径 R の球であり ここで N_R は十分大きな R にのみ関係する定数である。

__定理 2__ 仮定 A のもと 少なくとも一つの energy conserving solution が存在する。但し $f \in W^{1,\infty}([0,T], H)$ とする。

今 energy conserving solution でも 特別な場合をのぞき

一意性は存在しない（[1]参照）。

<u>命題 3</u>　u は energy conserving solution として F は定義の中にでてくる汎関数としよう。仮定 A のもと任意の $\xi \in C([0,T];H)$ に対して

$$F(\xi) = \int_0^T (\xi(s), \bar{\eta}(s))\, d\varphi_u \ , \qquad \varphi(0) = 0$$

をみたす左連続単調増加な関数 φ_u が唯一つ存在する。ここで

$$\bar{\eta}(s) = \begin{cases} \eta(u(t)) & \text{if } u(t) \in \partial K \\ 0 & \text{if } u(t) \notin \partial K \end{cases}$$

さて $\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ - energy conserving solution を定義しよう。

<u>定義</u>（$\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ - energy conserving solution）　$\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ は $[0,T]$ で dense な set としよう。

$M_0 = \{u \,;\, u$ は energy conserving solution$\}$ として帰納的に $\{M_j\}$ をきめる。

$$M_{j+1} = \{u \in M_j \,;\, \min_{w \in M_j} \varphi_w(t_j) = \varphi_u(t_j)\} , \quad j = 0,1,2,3,\cdots$$

できめる。ここで $\bigcap_{j=1}^{\infty} M_j$ の元の事を (1.1) の $\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ - energy conserving solution とよぶ。

<u>定理 4</u>　仮定 A のもと (1.1) の $\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ - energy conserving solution は一意的に存在する。但し $f \in W^{1,\infty}([0,T];H)$ とする。

<u>定理の証明</u>　まず定理 1 について

∂I_K の吉田近似を $\partial I_{K,\lambda}$ であらわし　I_K の吉田近似を $I_{K,\lambda}$

で表わす。 まず次の方程式を考える。

$$(3.1) \quad \begin{cases} \dfrac{d^2}{dt^2}u_\lambda(t) + Au_\lambda(t) + \partial I_{K,\lambda}u_\lambda(t) = f(t) \\ u_\lambda(0) = a \qquad \dfrac{du_\lambda}{dt}(0) = b \end{cases}$$

上記の解は Barbu [3] p.p 288 によって存在一意がわかる。次に (3.1) のエネルギー等式

$$(3.2) \quad \|\frac{du_\lambda}{dt}(t)\|^2 + (Au_\lambda(t), u_\lambda(t)) + 2I_{K,\lambda}u_\lambda(t) = \|b\|^2 + (Aa, a) + \int_0^T (\frac{du}{ds}(s), f(s))\,ds$$

がわかり

$$(3.3) \quad \|\frac{du_\lambda}{dt}(t)\|^2 \leqq Const$$

がでてくる。

簡単の為 0 を K は内点に持っているとしよう。このとき

$$(\partial I_{K,\lambda}u_\lambda(t),\ u_\lambda(t)) \geqq Const\ \|\partial I_{K,\lambda}u_\lambda(t)\|\,\|u_\lambda(t)\|$$

がでてきて

$$(3.4) \quad \int_0^T \|\partial I_{K,\lambda}u_\lambda(s)\|\,ds \leqq Const$$ を得る。

埋め込みが compact である事と (3.3) から Ascoli-Arezela の定理を使用して $u_\lambda(t) \rightrightarrows u(t)$ 一様収束としてよい（部分列を又入とかく操作はやる）。 又 (3.3) から $\frac{du_\lambda}{dt}(t) \longrightarrow \frac{du}{dt}(t)$ weak-$L^2([0,T];H)$ convergent としてよい。 次に (3.4) と H の可分性より

$$\lim_{\lambda\to 0} \int_0^T (\partial I_{K,\lambda}u_\lambda(s), \xi(s))\,ds = F(s)$$

としてよい。 (3.1) に $\xi \in C([0,T]:V) \cap C^1([0,T]:H)$ を積して部分積分をして上記の事柄を使用すれば定理1が言る。

定理2について

$K_\delta^R = \{x \in H \,/\, dist(x, \partial K) \leqq \delta \sqrt{R}^{-1}\}$ とおく $(0<\delta<1)$

$^\forall x \in K_\delta^R$ に対して $dist(x, \partial K) = \|x - w\|$, $w \in \partial K$ なる w が唯一つ存在する。この w を $C(x)$ とかく。初期値 $a \in \partial K$ で十分小さい $T'>0$ として $[0, T']$ 上で (3.1) を考えるとき

$\|\partial I_{K,\lambda} u_\lambda(t)\| = l_\lambda(t)$ とおけば

(3.5) $\partial I_{K,\lambda} u_\lambda(t) = l_\lambda(t)\, \eta(C_\lambda(t))$ ここで $C_\lambda(t) = C(u_\lambda(t))$ とする。

さて $\mathbb{H}$ は H の複素化した Hilbert space とする。すなわち

$\mathbb{H} \ni {}^\forall \alpha + \beta\sqrt{-1}$ は $\alpha \in H$, $\beta \in H$ と表わされ内積として

$\langle \alpha+\beta\sqrt{-1}, \theta+\gamma\sqrt{-1} \rangle = (\alpha, \theta) + (\beta, \gamma) + ((\beta, \theta) - (\alpha, \gamma))\sqrt{-1}$

を入れる。又 $\mathbb{A}(\alpha+\beta\sqrt{-1}) = A\alpha + (A\beta)\sqrt{-1}$ と定義すれば $\mathbb{A}$ は $\mathbb{H}$ 上の自己共役正値作用素となり $\mathbb{A}^{1/2}$ も定義できる。ここで $\alpha + 0\sqrt{-1} = \alpha$ と表わせば $\mathbb{A}^{1/2}\alpha = A^{1/2}\alpha$ となる。今 $\sqrt{-1}\mathbb{A}^{1/2} = \mathbb{D}$ とかき これを生成素にもつ群 $\{\mathbb{U}(t)\}$ を考える。すると $\dfrac{\mathbb{U}(t)+\mathbb{U}(-t)}{2}\alpha$ の虚部は0となり $\dfrac{\mathbb{U}(t)-\mathbb{U}(-t)}{2}\mathbb{D}^{-1}\alpha$ の虚部も0になることから (3.1) の解は次の表示を持つ事になる。

$$u_\lambda(t) = \frac{\mathbb{U}(t)+\mathbb{U}(-t)}{2}a + \frac{\mathbb{U}(t)-\mathbb{U}(-t)}{2}\mathbb{D}^{-1}b$$
$$- \frac{1}{2}\int_0^t (\mathbb{U}(t-s) - \mathbb{U}(s-t))\mathbb{D}^{-1}(-l_\lambda(s)\eta(C_\lambda(s)) + f(s))\,ds.$$

ここで $u_\lambda(t) - u_\mu(t)$ を計算し Growall's lemma を使用すれば $u_\lambda(t)$ の一様収束を示す事ができる。

又 $\frac{du_\lambda}{dt}(t) = \frac{1}{2}(\mathbb{U}(t)-\mathbb{U}(-t))\mathbb{D}a + \frac{1}{2}(\mathbb{U}(t)+\mathbb{U}(-t))b$

$$- \frac{1}{2}\int_0^t(\mathbb{U}(t-s)+\mathbb{U}(s-t))(-\ell_\lambda(s)\gamma(c_\lambda(s))+f(s))\,ds$$

の表現と $u_\lambda(t)\rightrightarrows u(t)$ に収束すれば $\gamma(c_\lambda(s))\Longrightarrow\gamma(c(s))$ に収束する事から a.e $t\in[0,T]$ で強収束がわかり (3.2)のエネルギー等式と合せて energy conserving solution の存在がわかる。但し $[0,T']$ であるためあと $u_\lambda(t)\in\mathring{K}$（Kの内点の集合）のときは線型問題になりよくわかっている事をもちいて解を接続すれば $[0,T]$ でもとまる。

定理4の証明について

energy conserving solution は Proposition 3 をもちいて $[0,T']$ 上で

$$u(t) = \frac{1}{2}(\mathbb{U}(t)+\mathbb{U}(-t))a + \frac{1}{2}(\mathbb{U}(t)-\mathbb{U}(-t))\mathbb{D}^{-1}b$$

$$(3.6)\qquad - \frac{1}{2}\int_0^t(\mathbb{U}(t-s)-\mathbb{U}(s-t))\mathbb{D}^{-1}\gamma(c(s))\,d\varphi_u$$

$$- \frac{1}{2}\int_0^t(\mathbb{U}(t-s)-\mathbb{U}(s-t))\mathbb{D}^{-1}f(s)\,ds$$

単調増加な関数集合 $\{\varphi_u\}_{u\in M_0}$ に関して Helly の選出定理を使用する。このとき部分列の選び方を各 t で最小になる列で選ぶ。こうして得られた部分列を $\{\varphi_j\}$ とし それに対応する energy conserving solution を $\{u_j\}$ とする。すると (3.6) の表現と $\varphi_j\to\varphi(t)$ に a.e $t\in[0,T]$ で収束する事をつかえば $u_j(t)\rightrightarrows u(t)$ に一様収束する事がわかり $u(t)$ は定理と同じ操作をして energy conserving solution である事がわか

る。　この解は定理4の求める $\{t_i\}_{i=1}^{\infty}$ - energy conserving solution である事は作り方より自明である。　一意性に関しては 2 つの解 u, w に対応する φ_u φ_w は定義より $\varphi_u = \varphi_w = \varphi$ である事がわかる。　又 $t > s \geq 0$ で

$$
\begin{aligned}
u(t) = {} & \tfrac{1}{2}\left(\mathbb{U}(t-s)+\mathbb{U}(s-t)\right)u(s) + \tfrac{1}{2}\left(\mathbb{U}(t-s)-\mathbb{U}(s-t)\right)\mathbb{D}^{-1}\frac{du}{dt}(s) \\
& - \tfrac{1}{2}\int_s^t \mathbb{D}^{-1}\left(\mathbb{U}(t-\xi)-\mathbb{U}(\xi-t)\right)\bar{\eta}_u(\xi)\, d\varphi_u \\
& - \tfrac{1}{2}\int_s^t \left(\mathbb{U}(t-\xi)-\mathbb{U}(\xi-t)\right)\mathbb{D}^{-1} f(\xi)\, d\xi
\end{aligned}
$$

の表現をもつ。

この事より

$$
\| u(t) - w(t) \| \leq \mathrm{Const} \int_s^t \| u(\xi) - w(\xi) \| \, d\varphi
$$

を得て　これを調べる事により一意性が得られる。

文　献

[1] Schatzman, M　a class of nonlinear differential equations of second order in time, Nonlinear Analysis Theory, Method & Application　Vol 2, NO 3　355-377　(1977)

[2] 高村, 小西　非線型発展方程式(1)　岩波講座　基礎数学シリーズ

[3] Barbu, V　Nonlinear semigroups and differential equations in Banach space　Noordhoff　(1976)