

非線型偏微分方程式の解の *microlocal regularity* について

東大・理 山崎昌男 (Masao Yamazaki)

最近、双曲型非線型方程式の解の特異性の伝播についての研究が広く行なわれている。Beals [1], Beals and Reed [2], Bony [4], [5], B. Lascar [7], [8], Rauch [15] を見よ。大ざっぱに言って、彼らの結果は次のように定式化される:

「非線型方程式 $A(x; u, \frac{\partial u}{\partial x}, \dots) = 0$ の解 $u(x)$ が、ある領域 Ω で存在し、 $H^s(\Omega)$ ($s > s_0$) に属するならば、 Ω 内で H^t -singularity ($s < t < s'$) が、陪特性曲線に沿って伝播する」

ここで s_0 は方程式によって定まる定数であり、 s' は方程式と s によって定まる数である。条件 $s > s_0$ が除けないことは非線型方程式の強解は有限時間で爆発し得ることからわかり、条件 $t < s'$ が除けないことは、非線型方程式では“特異性の相互作用”が起こり得ることからわかる。Rauch and Reed [16], [17], [18], [19], [20] は、特別な場合についてはあるが特異性の相互作用について精密な結果を導いている。

これに対して、[4]で導入され、Meyer [10], [11], [12], [13]によって精密化された *para-differential operator* の概念は、双曲型方程式に限らぬ広い応用範囲を持っている。その基本的なアイディアは次のようなものである:

「例えば、非線型項 uv を、 u の滑らかさのみを反映し、 v の滑らかさを反映しない項 $\pi_1(v, u)$ 、 v の滑らかさのみを反映する項 $\pi_1(u, v) = \pi_3(u, v)$ 、両方の滑らかさを反映する項 $\pi_2(u, v)$ に分解する。この時、 π_2 が他の 2 項より *regular* ならば、これを法として

$$uv \equiv \pi_1(u, v) + \pi_1(v, u)$$

となる。ここで $v = \partial_x u$ ならば、 $\pi_1(u, \partial_x u)$ を $\pi_1(u \partial_x, u) = \pi_1(iu D_x, u)$ と書くことにすると

$$u \partial_x u \equiv \pi_1(iu D_x, u) + \pi_1(\partial_x u, u) = \pi_1(iu D_x + \partial_x u, u)$$

と書ける。ここで、 $\pi_1(iu D_x + \partial_x u, \cdot)$ は線型作用素である。これを $iu \partial_x + \partial_x u$ を *symbol* とする *para-differential operator* とし、これらに対する有界性定理、表象計算等を準備すれば、線型方程式と同じように扱え、特異性についての結果が出る。」

上記の論文の扱っている函数空間は通常 H^s , C^∞ , H^s_p 等に限られ、このため、これらの理論が最も有効に用いられる方程式は、主に楕円型と双曲型である。一方、線型方程式に対しては、R. Lascar [9] によって、座標変数毎に違う重みをつ

けに「準斉次波面集合」が定義され、Schrödinger作用素等についても解の特異性の伝播が調べられている。多くの重要な非線型方程式について、このような取扱いが自然であると思われる。

ここでは、Meyer [6], [7] の結果、すなわち「非線型方程式の解の、非特性方向での超局所的な滑らかさ」を準斉次の場合に拡張できたことを報告する。同時に、最初に解に課せられる滑らかさの条件を、[4], [6], [7] より弱くできること、Triebel-Lizorkin空間においても同様の結果が得られることを報告する。

§1. 函数空間

ここでは、函数の滑らかさを計る空間として、(非同次)非等方的 Besov 空間、及び(非同次)非等方的 Triebel-Lizorkin 空間を定義する。(これは、それぞれ Hölder 空間、一般 Sobolev 空間の一般化である)

$M = (m_1, \dots, m_n)$ を $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ の重みで、 $\min_{1 \leq i \leq n} m_i = 1$ を満たしているものとする。 $|M| = m_1 + \dots + m_n$ と書く。

多重指数 $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \in \mathbb{N}^n$ に対し、 $|\alpha| = \alpha_1 + \dots + \alpha_n$, $M \cdot \alpha = m_1 \alpha_1 + \dots + m_n \alpha_n$ と書き、 $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n) \in \mathbb{R}^n$ に対して $\xi^\alpha = \xi_1^{\alpha_1} \dots \xi_n^{\alpha_n}$, $\partial_x^\alpha = \left(\frac{\partial}{\partial x_1}\right)^{\alpha_1} \dots \left(\frac{\partial}{\partial x_n}\right)^{\alpha_n}$, $D_x^\alpha = (-i)^{|\alpha|} \partial_x^\alpha$ と定める。

$t \in \mathbb{R}^+ = \{t; t > 0\}$ の ξ への作用を $t^M \xi = (t^{m_1} \xi_1, \dots, t^{m_n} \xi_n)$ で定め $[\xi]_M$ を $t^{-M} \xi = (t^{-1})^M \xi$ が S^{n-1} に属するような (唯一の) 正数、すなわち t の方程式 $t^{-2m_1} \xi_1^2 + \dots + t^{-2m_n} \xi_n^2 = 1$ の唯一の正の根と定める。(但し $[0]_M = 0$ とする) また、 $\langle \xi \rangle_M$ を t の方程式 $t^{-2} + t^{-2m_1} \xi_1^2 + \dots + t^{-2m_n} \xi_n^2 = 1$ の唯一の正の根と定める。

次に、 $\Psi(t)$ を $t \in \mathbb{R}^+$ の C^∞ -函数であって、 $0 \leq \Psi(t) \leq 1$, $\Psi(t) \equiv 1$ ($t \leq \frac{11}{10}$), $\Psi(t) \equiv 0$ ($t \geq \frac{13}{10}$) を満たすものとする。この Ψ を用いて次式により 1 の分解 $\sum_{j=0}^{\infty} \Phi_j^M(\xi) = 1$ を作る:

$$\begin{cases} \Phi_0^M(\xi) = \Psi([\xi]_M) \\ \Phi_j^M(\xi) = \Psi(2^{-j}[\xi]_M) - \Psi(2^{1-j}[\xi]_M) \quad (j \geq 1) \end{cases}$$

$s \in \mathbb{R}$, $1 \leq p, q \leq \infty$ の時、非同次非等方的 Besov 空間 $B_{p,q}^{M,s}$ を $B_{p,q}^{M,s} = \{u \in \mathcal{S}' : \|\{2^{js} \mathcal{F}^{-1}[\Phi_j^M(\xi) \hat{u}(\xi)](\alpha)\}\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} = \|u\|_{B_{p,q}^{M,s}} < \infty\}$ で定める。また、 $s \in \mathbb{R}$, $1 < p < \infty$, $1 \leq q \leq \infty$ の時、非同次非等方的 Triebel-Lizorkin 空間 $F_{p,q}^{M,s}$ を

$F_{p,q}^{M,s} = \{u \in \mathcal{S}' : \|\{2^{js} \mathcal{F}^{-1}[\Phi_j^M(\xi) \hat{u}(\xi)](\alpha)\}\|_{L^p(\mathbb{R}^n)} = \|u\|_{F_{p,q}^{M,s}} < \infty\}$ で定める。ここで、 $1 \leq p, q < \infty$ ならば

$$\begin{aligned} \| \{f_j(\alpha)\} \|_{L^q(\mathbb{R}^n)} &= \left[\sum_{j=0}^{\infty} \left\{ \int_{\mathbb{R}^n} |f_j(\alpha)|^p d\alpha \right\}^{\frac{q}{p}} \right]^{\frac{1}{q}} \\ \| \{f_j(\alpha)\} \|_{L^p(\mathbb{R}^n)} &= \left[\int_{\mathbb{R}^n} \sum_{j=0}^{\infty} |f_j(\alpha)|^q \right]^{\frac{1}{p}} \end{aligned}$$

であり、 p 又は $q = \infty$ の時は対応する部分を \sup に替える。
注意 1: これらの空間は Banach 空間であり、 Ψ のとり方に

よらずに定まる。より一般的に、次の定理が成り立つ。

定理 1. $s \in \mathbb{R}$, $1 \leq p, q \leq \infty$ [resp. $1 < p < \infty$, $1 \leq q \leq \infty$] とする。

今、緩増加超関数の列 $\{u_j\}$ が

1) 定数 $A > 0$ が存在し

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{supp } u_0 \subset \{\zeta : |\zeta|_M < A\} \\ \text{supp } u_j \subset \{\zeta : 2^j A^{-1} < |\zeta|_M < 2^j A\} \quad (j \geq 1) \end{array} \right. \quad \text{となる。}$$

2) $\|\{2^{sj} u_j\}\|_{\mathcal{L}^q(L^p)} < \infty$ [resp. $\|\{2^{sj} u_j\}\|_{L^p(\mathcal{L}^q)} < \infty$]

の 2 条件を満足すれば、 $u = \sum_{j=0}^{\infty} u_j$ は $B_{p,q}^{M,s}$ [resp. $F_{p,q}^{M,s}$] に属し、かつ A によって定まる定数 C により

$$\|u\|_{B_{p,q}^{M,s}} \leq C \|\{2^{sj} u_j\}\|_{\mathcal{L}^q(L^p)} \quad [\text{resp. } \|u\|_{F_{p,q}^{M,s}} \leq C \|\{2^{sj} u_j\}\|_{L^p(\mathcal{L}^q)}]$$

と評価される。

定理 2 $s > 0$ ならば、定理 1 の 1) の条件の式を

$$\text{supp } u_j \subset \{\zeta : |\zeta|_M < 2^j A\} \quad (j \geq 0)$$

でおきかえても、同じ結論が成り立つ。

定理 3 $p < r$, $s - |M|/p = t - |M|/r$ ならば、ノルムも含めて

$$B_{p,q}^{M,s} \subset B_{r,q}^{M,t}, \quad F_{p,q}^{M,s} \subset F_{r,q}^{M,t} \text{ が成立つ。$$

非等方的 Besov 空間は Besov [3] によって、非等方的

Triebel-Lizorkin 空間は Triebel [2] によって定義された。

これらの空間については、Triebel [22], [23] 及びそこに挙げられた文献を見られたい。ここでは、 $\langle \zeta \rangle_M$ を表象とする擬微分作用素と関係づけるため少し定義を変形した。

注意 2 $1 < p < \infty$ ならば

$F_{p,2}^{M,s} = H_p^{M,s} = \{u \in \mathcal{D}' : \|\mathcal{F}^{-1}[\langle \xi \rangle_M^s \hat{u}(\xi)](\alpha)\|_{L^p} = \|u\|_{H_p^{M,s}} < \infty\}$
 であり、特に $F_{p,2}^{M,0} = L^p$ である。また、 $1 \leq \ell \leq n$ に対して
 s/m_ℓ が整数であれば、 $B_{\infty,\infty}^{M,s}$ は各 x_ℓ について s/m_ℓ 次の
 Holder 空間である。

§2. para-differential operator の定義

$P(x, \xi)$ を $(x, \xi) \in \mathbb{R}^{2n}$ の函数で、 ξ について C^∞ であるものとする。 $\hat{P}(\xi, \eta) = \int e^{-ix\xi} P(x, \eta) dx$ と書く。

$m, s \in \mathbb{R}, 1 \leq p, q \leq \infty$ の時、 $S(B_{p,q}^{M,s})^m$ を、 $\forall \alpha \in \mathbb{N}^n$ に対し

$$C_\alpha = \|\{2^{jA} \sup_\eta \langle \eta \rangle_M^{-m+M \cdot \alpha} \|\mathcal{F}_3^{-1}[\Phi_j^M(\xi) \partial_\eta^\alpha \hat{P}(\xi, \eta)](\alpha)\|_{L^p}\|_{\ell^q} < \infty$$

なる $P(x, \xi)$ の集合として定める。また、 $m, s \in \mathbb{R}, 1 < p < \infty,$

$1 \leq q \leq \infty$ の時、 $S(F_{p,q}^{M,s})^m$ を、 $\forall \alpha \in \mathbb{N}^n$ について

$$C_\alpha = \|\{2^{jA} \sup_\eta \langle \eta \rangle_M^{-m+M \cdot \alpha} \|\mathcal{F}_3^{-1}[\Phi_j^M(\xi) \partial_\eta^\alpha \hat{P}(\xi, \eta)](\alpha)\|_{L^p(L^\infty)}\| < \infty$$

なる $P(x, \xi)$ の集合として定める。

$m, s \in \mathbb{R}, 1 \leq p \leq \infty$ の時、 $S(H_p^{M,s})^m, S'(H_p^{M,s})^m$ を、それぞれ、 $\forall \alpha \in \mathbb{N}^n$ について

$$C_\alpha = \sup_\eta \langle \eta \rangle_M^{-m+M \cdot \alpha} \|\partial_\eta^\alpha P(x, \eta)\|_{H_p^{M,s}} < \infty$$

$$C_\alpha = \|\sup_\eta \langle \eta \rangle_M^{-m+M \cdot \alpha} \|\mathcal{F}_3^{-1}[\langle \xi \rangle_M^s \partial_\eta^\alpha \hat{P}(\xi, \eta)]\|_{L^p} < \infty$$

なる $P(x, \xi)$ の集合として定める。

これらの空間は可算個のセミノルムによって位相が入る。

一般に $P(x, \xi)$ をシンボルとする擬微分作用素は

$$\begin{aligned} u(x) \mapsto P(x, D_x)u(x) &= \int e^{ix\xi} P(x, \xi) \hat{u}(\xi) d\xi \\ &= \mathcal{F}^{-1} \left[\int \hat{P}(\xi - \eta, \eta) \hat{u}(\eta) d\eta \right] (x) \quad (2.1) \\ &\quad (\mathcal{F} \xi = (2\pi)^{-n} d\xi) \end{aligned}$$

によって定義される。一方、既に構成した $\{\Phi_j^M(\xi)\}_{j=1}^n$ より \mathbb{R}^{2n} における 1 の分解

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 \chi_j(\xi, \eta) &= \sum_{j,k=0}^{\infty} \Phi_j^M(\xi) \Phi_k^M(\eta) = 1 \\ \text{但し } \begin{cases} \chi_1(\xi, \eta) &= \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{k=0}^{j-2} \Phi_k^M(\xi) \Phi_j^M(\eta) \\ \chi_2(\xi, \eta) &= \sum_{r=-1}^1 \sum_{j=0}^{\infty} \Phi_{j+r}^M(\xi) \Phi_j^M(\eta) \\ \chi_3(\xi, \eta) &= \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{k=0}^{j-2} \Phi_j^M(\xi) \Phi_k^M(\eta) \end{cases} \end{aligned}$$

が構成できる。これを用いて (2.1) の右辺を 3 つの項

$$\begin{aligned} \pi_j(P(x, D_x), u)(x) &= \mathcal{F}^{-1} \left[\int \chi_j(\xi - \eta, \eta) \hat{P}(\xi - \eta, \eta) \hat{u}(\eta) d\eta \right] (x) \\ &\quad (j=1, 2, 3) \end{aligned}$$

に分解し、写像 $u(x) \mapsto \pi_j(P(x, D_x), u)(x)$ を $P(x, \xi)$ をシンボルとする para-differential operator と呼ぶ。Bony [4] は $\pi_1(P(x, D_x), \cdot)$ を para-differential operator と呼び、いわゆる“古典的シンボル”を持つ para-differential operator の Hölder 空間 C^σ 及び Sobolev 空間 H_x^σ 上での有界性を証明した。Meyer [10], [11] はより一般のシンボルを持つ作用素に

対して、一般の Sobolev 空間 H_p^s ($1 < p < \infty$) 上での有界性を示した。この結果は $p=2$ の場合の Bony の結果の改良になっている。また、Bourdaud [6] は上の考えを擬微分作用素の有界性の問題に応用し、Nagase [14] の結果を拡張した。

§3. para-differential operator の有界性定理及び合式法則

定理4 $1/p = 1/p_1 + 1/p_2 \leq 1$, $1 \leq q \leq \infty$, $m, \delta \in \mathbb{R}$ ならば、 π_1 [resp. π_3] は、 $S(H_{p_1}^{m, \delta})^m \times B_{p_2, q}^{m, \delta}$ から $B_{p, q}^{m, \delta - m}$ への [resp. $S(B_{p_1, q}^{m, \delta})^m \times B_{p_2, 1}^{m, m}$ から $B_{p, q}^{m, \delta}$ への] 連続双線型写像である。

定理5 $1/p = 1/p_1 + 1/p_2 \leq 1$, $1/q = 1/q_1 + 1/q_2 \leq 1$, $m, \delta_2 \in \mathbb{R}$, $\delta_1 < 0$ ならば、 π_1 [resp. π_3] は、 $S(B_{p_1, q_1}^{m, \delta_1})^m \times B_{p_2, q_2}^{m, \delta_2}$ から $B_{p, q}^{m, \delta_1 + \delta_2 - m}$ への [resp. $S(B_{p_1, q_1}^{m, \delta_1})^m \times B_{p_2, q_2}^{m, \delta_1 + m}$ から $B_{p, q}^{m, \delta_1 + \delta_2}$ への] 連続双線型写像である。

定理4の意味は概ね次の通りである：

「 $P(x, \xi)$ が x について $H_{p_1}^{m, \delta}$ 程度の滑らかさを持てば、どんなに大きい $\delta \in \mathbb{R}$ に対しても、 $\pi_1(P(x, D_x), \cdot)$ は $B_{p_2, q}^{m, \delta}$ から $B_{p, q}^{m, \delta - m}$ への有界写像である。」

すなわち、 u の正則性をほぼ忠実に $\pi_1(P(x, D_x), u)$ が反映するのである。但し、 P の x についての滑らかさが $H_p^{m, \delta}$ より悪ければ、結果も弱くなる。その定式化が定理5である。同

様に考えれば、 $\pi_3(P(x, Dx), u)$ は $P(x, \zeta)$ の正則性を反映する項であるといえる。

これらに対し、 $\pi_2(P(x, Dx), u)$ は両方の滑らかさを共に反映する項である。すなわち、次の定理が成立つ。

定理6 $1/p = 1/p_1 + 1/p_2 \leq 1$, $1/q = 1/q_1 + 1/q_2 \leq 1$,

$m, s_1, s_2 \in \mathbb{R}$, $s_1 + s_2 - m > 0$ ならば、 π_2 は $S(B_{p_1, q_1}^{M, s_1})^m \times$

B_{p_2, q_2}^{M, s_2} から $B_{p, q}^{M, s_1 + s_2 - m}$ への連続双線型写像である。

また、次の定理が成立つ。

定理7 定理4~6において、 $1 < p_2 < \infty$, $p > 1$ ならば、

B -空間と F -空間に、 $S(H_{p_1}^{M, 0})^m$ を $S'(H_{p_1}^{M, 0})^m$ に、

さらに $p_1 < \infty$ ならば $S(B_{p_1, q})$ を $S(F_{p_1, q})$ に置き換えた命題が成立つ。

以上の定理を用いて、 $\langle \zeta \rangle_m$ を尺度函数とする擬微分作用素についての有界性定理が導ける。Yamazaki [24] を参照。

また、 p_2, p が1より小さい場合にも、より複雑な条件の下で同様の結果が成立つ。(Yamazaki [26])

次に、2つの para-differential operator の合成写像

$\pi_1(P(x, Dx), \pi_1(Q(x, Dx), \cdot))$ を、1つの para-differential operator $\pi_1(R(x, Dx), \cdot)$ で表わすことを考えよう。まず、

シンボル $P(x, \zeta)$, $Q(x, \zeta)$ 及び定数 $\delta, \varepsilon \geq 0$ に対して条件

$(H1\varepsilon)$ $P(x, \zeta) \in S(B_{p_1, q_1}^{M, s_1 + \varepsilon})^{m_1}$ 及び

$$Q(x, \bar{z}) \in S(B_{\tilde{p}_2}^{M, -\varepsilon})^{m_2} \quad (\varepsilon > 0), \in S(H_{\tilde{p}_2}^{M, 0})^{m_2} \quad (\varepsilon = 0)$$

$$(H2\delta) \quad Q(x, \bar{z}) \in S(B_{\tilde{p}_2, \tilde{q}_1}^{M, \delta_1 + \delta})^{m_2} \quad \text{及 } u^i$$

$$P(x, \bar{z}) \in S(B_{\tilde{p}_1}^{M, -\delta})^{m_1} \quad (\delta > 0), \in S(H_{\tilde{p}_1}^{M, 0})^{m_1} \quad (\delta = 0)$$

を考える。ここで、仮定

$$1 \leq p_1, p_2, p_3, \tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \tilde{q}_1, \tilde{q}_3 \leq \infty, \delta_1 \geq 0, m_1, m_2, \delta_3 \in \mathbb{R},$$

$$\frac{1}{\tilde{q}} = \frac{1}{\tilde{q}_1} + \frac{1}{\tilde{q}_3} \leq 1, \quad \frac{1}{p} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{\tilde{p}_2} + \frac{1}{p_3} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} \leq 1$$

をおく。この時

$$R(x, \bar{z}) = \sum_{\substack{\alpha \in \mathbb{N}^n \\ M \cdot \alpha \leq \delta_1}} \frac{\partial_{\bar{z}}^\alpha P(x, \bar{z}) \cdot D_x^\alpha Q(x, \bar{z})}{\alpha!}$$

とおくと、次の定理が成立つ。

定理 8

$\delta_1 < M \cdot \alpha \leq \delta_1 + \varepsilon$, $\delta_1 < M \cdot \alpha \leq \delta_1 + \delta$ のうちの少なくとも一方を満足する任意の $\alpha \in \mathbb{N}^n$ に対して

$$\partial_{\bar{z}}^\alpha P(x, \bar{z}) \equiv 0$$

が成立つならば、 $u(x)$ に

$$\pi_1(P(x, D_x), \pi_1(Q(x, D_x), u))(x) - \pi_1(R(x, D_x), u)(x)$$

を対応させる写像は、条件 (H1\varepsilon), (H2\delta)

(但し $\varepsilon, \delta \geq 0$) の下で $B_{\tilde{p}_3, \tilde{q}_3}^{M, \delta_3}$ から $B_{\tilde{p}, \tilde{q}}^{M, \delta_1 + \delta_3 - m_1 - m_2}$ への

有界線型写像になる。

これより、 $\pi_1(P(x, D_x), \pi_1(Q(x, D_x), u))$ と $\pi_1(R(x, D_x), u)$

との差は、 δ_1 が大きければ大きいほど滑らかになり、特に

$P(x, \zeta)$, $Q(x, \zeta)$ が x について C^∞ ならば、 δ はいくらでも大きく取れる。一方この時 $P(x, D_x)u(x)$ と $\pi_1(P(x, D_x), u)(x)$ との差も C^∞ だから、定理 8 は擬微分作用素に対する通常の漸近展開公式になる。

定理 8 の応用として、regular term を法としての para-differential operator の割り算、特に microlocal parametrix の構造が得られる。

シンボル $P(x, \zeta)$, $Q(x, \zeta)$ は、条件

$$\begin{cases} P(x, \zeta) = \sum_{j=0}^{j_0} P_j(x, \zeta) & P_j(x, \zeta) \in S(B_{p, \zeta}^{M, \mu - \sigma_j})^{m - \sigma_j} \\ Q(x, \zeta) \in S(B_{p, \zeta}^{M, \mu})^m \end{cases}$$

但し

$$\begin{cases} \frac{|M|}{p} - \delta \leq \sigma, \quad 1 \leq p, \zeta \leq \infty, \quad m, \mu \in \mathbb{R} \\ 0 = \sigma_0 < \sigma_1 < \dots < \sigma_{j_0} = \delta - \frac{|M|}{p} \\ \sigma_h + \sigma_j + M \cdot \alpha < \delta - \frac{|M|}{p} \quad \forall \text{ 任意の } h, j, \alpha \in \mathbb{N}^n \text{ に対して} \\ \text{適当な } k \text{ を取れば, } \sigma_h + \sigma_j + M \cdot \alpha = \sigma_k \end{cases}$$

を満足しているとする。さらに、 $\mathbb{R}_x^n \times \mathbb{R}_\zeta^n = \mathbb{R}^{2n}$ の開集合 Ω 及び定数 $d, A > 0$ が存在して、

$$\begin{cases} \Omega_d = \{ (x, \zeta) : |x - x'| \leq d, [\zeta' - \zeta]_M \leq d \langle \zeta \rangle_M \Rightarrow (x', \zeta') \in \Omega \} \\ \text{と } \forall \zeta < \zeta', \quad \text{supp } Q(x, \zeta) \subset \Omega_d \\ (x, \zeta) \in \Omega \Rightarrow |P_0(x, \zeta)| \geq A \langle \zeta \rangle_M^m \end{cases}$$

が成立つと仮定する。

この時、帰納的に $\{R_j(\alpha, \beta)\}_{j=0}^{j_0}$ を

$$\left\{ \begin{array}{l} R_0(\alpha, \beta) = \frac{Q(\alpha, \beta)}{P_0(\alpha, \beta)} \\ j \geq 1 \text{ の時} \end{array} \right.$$

$$R_j(\alpha, \beta) = - \frac{1}{P_0(\alpha, \beta)} \sum_{k \leq j} \sum_{\substack{\sigma_k + \sigma_k + M \cdot \alpha = \sigma_j \\ k \leq j}} \frac{\partial_k^\alpha R_k(\alpha, \beta) \cdot D_x^\alpha P_k(\alpha, \beta)}{\alpha!}$$

によって定義すると、 $R_j(\alpha, \beta) \in S(B_{p, q}^{M, \alpha - \sigma_j})^{u - m - \sigma_j}$ となり、
さらに次の定理が成立つ。

定理 9 $R(\alpha, \beta) = \sum_{j=0}^{j_0} R_j(\alpha, \beta)$ とおくと、 $u \in B_{p, q}^{M, \alpha}$ ならば

$$\pi_1(R(\alpha, D_x), \pi_1(P(\alpha, D_x), u))(\alpha) - \pi_1(Q(\alpha, D_x), u)(\alpha)$$

は $B_{p, q}^{M, \alpha + 1 - |M|/p - \mu}$ に属する。ここに、 $1 \leq p' \leq \infty$,
 $1 \leq q' \leq \infty$, $1/q'' = 1/q + 1/q' \leq 1$

定理 8, 定理 9 は、定理 7 と同じ方法で読みかえれば、
F-空間に対しても成立つ。また、上と同じような方法で、
“右からの割り算”もできる。

§4. 非線型項の線型化

$u \in B_{p, q}^{M, \alpha}$, $\lambda > \frac{|M|}{p}$ とすると、

$$\begin{aligned} u^2 &= \pi_1(u, u) + \pi_2(u, u) + \pi_3(u, u) \\ &\equiv \pi_1(2u, u) \pmod{B_{p, q}^{M, 2\alpha - |M|/p}} \end{aligned}$$

である。これと §3 の結果より

$$\begin{aligned}
 u^3 &= \pi_1(u, u^2) + \pi_3(u, u^2) + \pi_2(u, u^2) \\
 &\equiv \pi_1(u, \pi_1(2u, u)) + \pi_1(u^2, u) \\
 &\equiv \pi_1(u \cdot 2u, u) + \pi_1(u^2, u) \\
 &= \pi_1(3u^2, u)
 \end{aligned}$$

がわかる。より一般に、次の定理が成立つ。

定理 10 $u_1(x), \dots, u_N(x) \in B_{p,q}^{M,\delta}$, $\delta > \frac{|M|}{p}$ とする。さらに

(HR) $F(x_1, \dots, x_N)$ は \mathbb{R}^N 上の C^M 函数, u_1, \dots, u_N は実数
値函数, $F(0, \dots, 0) = 0$

(HC) $F(x_1, \dots, x_N)$ は各 x_j の整函数, u_1, \dots, u_N は複素
数値函数, $F(0, \dots, 0) = 0$

の一方が成立っていると仮定する。この時、

$$\begin{aligned}
 &\bullet F(u_1(x), \dots, u_N(x)) \in B_{p,q}^{M,\delta} \\
 &\bullet F(u_1(x), \dots, u_N(x)) - \sum_{j=1}^N \pi_1\left(\frac{\partial F}{\partial x_j}(u_1(x), \dots, u_N(x)), u_j\right)(x) \\
 &\in B_{p,q}^{M, \delta - \frac{|M|}{p}}
 \end{aligned}$$

である。

$F(u_1(x), \dots, u_N(x))$ が一部の変数について多項式になっている場合は、いくつかの単項式に分解して考えることにより、より弱い条件の下で成立つ次の定理が適用できる。

定理 11 F, u_1, \dots, u_N については定理 10 の仮定と同じ条件が成立しているとする。さらに、 $v_j(x) \in B_{p,q}^{M,\delta_j}$ ($j=1, \dots, K$)

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_{k-1} \leq t_k \leq \Delta$$

であるとする。

$$t_j = \Delta \quad (j > k) \quad \text{とおく。}$$

$$\begin{cases} t_1 + t_2 > 0 \\ \min_{2 \leq j \leq k} \left(\sum_{k=1}^j t_k + |M| - \frac{j}{p} |M| \right) > 0 \end{cases}$$

ならば $v_1(x) \cdot v_2(x) \cdot \dots \cdot v_k(x) \cdot F(u_1(x), \dots, u_n(x)) = G(x)$ は定義され、 $B_{p, \bar{t}}^{M, \bar{t}}$ に属する。但し

$$\bar{t} = \min_{1 \leq j \leq k+1} \left(\sum_{k=1}^j t_k - \frac{j-1}{p} |M| \right) \quad \text{である。}$$

また、この時、任意の多重指数 α に対して、

$\partial_x^\alpha G(x)$ を形式的に $\partial^r v_k(x), \partial^\beta u_j(x)$ 達の関数で表わした式を $G_\alpha(\dots, \partial^r v_k(x), \dots, \partial^\beta u_j(x), \dots)$ とおく。

$$\begin{aligned} \partial_x^\alpha G(x) &= \sum_{r \leq \alpha, k} \pi_1 \left(\frac{\partial G_\alpha}{\partial (\partial^r v_k)} (\dots, \partial^r v_k(x), \dots, \partial^\beta u_j(x), \dots), \partial^r v_k(x) \right) \\ &\quad t_k - M \cdot r \leq |M|/p \\ &= \sum_{\beta \leq \alpha, j} \pi_2 \left(\frac{\partial G_\alpha}{\partial (\partial^\beta u_j)} (\dots, \partial^r v_k(x), \dots, \partial^\beta u_j(x), \dots), \partial^\beta u_j(x) \right) \\ &\quad \Delta - M \cdot \beta \leq |M|/p \end{aligned}$$

は $B_{p, \bar{t}}^{M, t_1+t_2-M \cdot \alpha - |M|/p}$ に属する。さらに

$$\begin{cases} \frac{\partial G_\alpha}{\partial (\partial^r v_k)} (\dots, \partial^r v_k(x), \dots, \partial^\beta u_j(x), \dots) \in B_{p, \bar{t}}^{M, t_k - M(r-\alpha)} \\ \quad (k=1 \quad (k \geq 2), \quad k=2 \quad (k=1)) \\ \frac{\partial G_\alpha}{\partial (\partial^\beta u_j)} (\dots, \partial^r v_k(x), \dots, \partial^\beta u_j(x), \dots) \in B_{p, \bar{t}}^{M, t_1 - M(\beta-\alpha)} \end{cases}$$

が成立つ。

定理10は Meyer [11]と同じ方針で証明される。定理11は定理10と §2, §3の結果を用いて、組合せ論的を考察により、証明される。

§5. 函数空間の超局所化と波面集合

\mathbb{R}^n の開集合 Ω に対して $(T^*\Omega)^x = \{(x, \xi) \in \Omega \times \mathbb{R}^n, \xi \neq 0\}$ と書く。 $\Gamma \subset (T^*\Omega)^x$ が $(x_0, \xi_0) \in (T^*\Omega)^x$ の M -錐近傍であるとは、十分小さな $d > 0$ を取れば

$$U_{(x_0, \xi_0)}(d)$$

$$= \{(x, \xi) \in (T^*\Omega)^x : |x - x_0| < d, |\xi|_M > d^{-1}, |[\xi]_M^{-M} - [\xi_0]_M^{-M}| < d\}$$

が Γ に含まれることを言う。

また、 $\psi(\xi) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ が m 次 M -準斉次であるとは、ある $A > 0$ が存在して、 $|\xi|_M \geq A, m \geq 1$ ならば

$$\psi(t^M \xi) = t^m \psi(\xi) \quad \text{とすることを言う。}$$

以上の用語を用いて、 $E = B_{P, \delta}^{M, d}$ 又は $F_{P, \delta}^{M, d}$ に対して以下のよう定義する。

定義 $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$ が $(x_0, \xi_0) \in (T^*\Omega)^x$ で microlocal に E に属するとは、 $\varphi(x) \in C_0^\infty(\Omega)$ 及び m 次 M -準斉次の $\psi(\xi) \in C^\infty(\mathbb{R}^n)$ が存在して、 $\varphi(x)\psi(\xi)$ は (x_0, ξ_0) の M -錐近傍 Γ で 0 にならず。

$$\psi(D_x)(\varphi(x)u(x)) = \mathcal{F}^{-1}[\psi(\xi) \widehat{\varphi u}(\xi)] \quad (x) \in E$$

が成立していることを言う。また、集合

$$\{(x, \xi) \in (T^*\Omega)^X; u \text{ は } (x, \xi) \text{ で microlocal に } E \text{ に属する}\}$$

を E における u の波面集合といい、 $WFE(u)$ と記す。

もし、 $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$ が x_0 の近傍で $v(x) \in B_{p,q}^{M,t}$ [resp. $F_{p,q}^{M,t}$],

($t < \Delta$) に一致しているならば、 $(x_0, \xi_0) \notin WFE(u)$ と

(x_0, ξ_0) で M -非特性な $P(x, \xi) \in S(B_{\infty,\infty}^{M,\infty})^0$ が存在して

$$P(x, D_x)v(x) \in E$$

とすることは同値である。また、 $P \in S(B_{\infty,\infty}^{M,\infty})^0$, $u \in B_{p,q}^{M,t}$

ならば $j=2, 3$ に対して $\pi_j(P(x, D_x), v)(x) \in B_{p,q}^M$ とすることから、上の条件は

とから、上の条件は

$$\pi_1(P(x, D_x), v)(x) \in E$$

と書いても同値である。ここで m 階のシンボル $P(x, \xi)$ が

(x_0, ξ_0) で M -非特性とは、 $\lim_{t \rightarrow \infty} P(x_0, t^M \xi_0) t^{-m}$ が存在して 0 に等しくなることとする。

次に、 $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$, $x_0 \in \Omega$ に対して

$$1) \forall \xi \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}: (x_0, \xi) \notin WFE(u)$$

$$2) \varphi(x_0) \neq 0 \text{ なるある } \varphi \in C_0^\infty(\Omega) \text{ に対して } \varphi(x)u(x) \in E$$

$$3) x_0 \in U \subset \Omega \text{ なる開集合 } U \text{ が存在し、} \text{supp } \varphi \subset U \text{ なる任意の } \varphi \in C_0^\infty(\Omega) \text{ に対して } \varphi(x)u(x) \in E$$

の 3 条件は同値である。これらの条件が満足される時、 $u(x)$

は x_0 の近傍で local に E に属するという。

この概念を用いて、§4 の結果を局所化することができる。
例えば、定理10の局所化として次の定理を得る。

定理12 $u_1(x), \dots, u_N(x)$ は x_0 の近傍で超局所的に $B_{p, \frac{1}{p}}^{M, d}$

($d > \frac{|M|}{p}$) に属し、さらに条件

(HR Ω) $F(x; X_1, \dots, X_N)$ は $\Omega \times \mathbb{R}^n$ 上の C^∞ -函数で、

u_1, \dots, u_N は実数値函数

(HC Ω) $F(x; X_1, \dots, X_N)$ は $x \in \Omega$ について C^∞ 、各 X_j につ

いて整函数で、 u_1, \dots, u_N は複素数値函数

の一方が成立しているとき仮定する。この時、 $\varphi(x_0) \neq 0$ なる

$\varphi(x) \in C_0^\infty(\Omega)$ を適当に取れば、 $F(x; u_1(x), \dots, u_N(x))$ は

x_0 のある近傍で定義され、そこで $B_{p, \frac{1}{p}}^{M, 2d - \frac{|M|}{p}}$ に属する函数と

$$\sum_{j=1}^N \pi_j \left(\frac{\partial F}{\partial X_j} (\varphi(x)x + (1-\varphi(x))x_0; \varphi(x)u_1(x), \dots, \varphi(x)u_N(x)) \right)$$

の和に等しい。

実際、 $F(x; u_1(x), \dots, u_N(x))$ は、 x_0 の近傍では

$$F(\varphi(x)x + (1-\varphi(x))x_0; \varphi(x)u_1(x), \dots, \varphi(x)u_N(x))$$

に等しい。これに対して定理10を用いると、上の式は

regular term と

$$\sum_{\ell=1}^n \pi_\ell \left(\frac{\partial F}{\partial x_\ell}, \varphi(x)x_\ell + (1-\varphi(x))x_{0,\ell} \right) + \sum_{j=1}^N \pi_j \left(\frac{\partial F}{\partial X_j}, \varphi u_j \right)$$

であるが、 $\varphi(x) \alpha_2 + (1-\varphi(x)) \alpha_0$ は $B_{\infty, \infty}^M$ に属するから結論を得る。

定理11についても同様の局所化ができる。

§6. 非線型方程式の解の超局所正則性

Ω を \mathbb{R}^n の開集合とする。 $u \in \mathcal{D}'(\Omega)$ に許す非線型方程式

$$\sum_{k=1}^N \partial_x^{\beta(k)} (F_k(x; u(x), \dots, \partial_x^\alpha u(x), \dots)) = f(x) \quad (6.1)$$

を考える。但し、各 F_k は条件 $(HR\Omega)$ 又は $(HC\Omega)$ を満足しているとする。

(6.1) を形式的に書直した方程式を

$$A(x; u(x), \dots, \partial_x^\alpha u(x), \dots) = f(x) \quad (6.2)$$

とした時、 $m = \max \{M \cdot \alpha; \partial_x^\alpha u(x) \text{ が } A \text{ に現われる}\}$ を方程式 (6.2) の重み付階数を言う。また、

$$\sum_{\alpha \in \mathbb{N}^n} \frac{\partial A}{\partial (\partial_x^\alpha u)} (x; u(x), \dots, \partial_x^\beta u(x), \dots) (\tilde{x})^\alpha \quad (6.3)$$

を (6.1) の形式的シンボルと言ひ、(6.3) の式で $M \cdot \alpha = m$ なる α についてのみ相をとったものを (6.1) の主シンボルと言ふ。

次に、各 $k = 1, \dots, N$ に對して

$$\lambda_1(k) = \max \{M \cdot \alpha; \partial_x^\alpha u(x) \text{ が } F_k \text{ に現われる}\}$$

$\lambda_0(h) = \max \{ M \cdot \alpha ; \partial_x^\alpha u(x) \text{ が } F_h \text{ に現われ, } \alpha \text{ が } F_h$

は $\partial_x^\alpha u(x)$ について単項式でない} と定める。

$\lambda_1(h) < \lambda_0(h)$ ならば, $\partial_x^\alpha u(x)$ が F_h に現われ

$M \cdot \alpha = \lambda_1(h)$ とするような $\alpha \in \mathbb{N}^n$ を一つとって,

$F_h(1) = F_h / (\partial_x^\alpha u(x))$ と定める。

$\lambda_1(h), \dots, \lambda_{j-1}(h)$ ($j \geq 2$) が定義された時

$\left. \begin{array}{l} \lambda_{j-1}(h) = \lambda_0(h) \text{ の時 } \lambda_j(h) = \lambda_0(h) \\ \lambda_{j-1}(h) < \lambda_0(h) \text{ の時} \end{array} \right\}$

$\lambda_j(h) = \max \{ M \cdot \alpha ; \partial_x^\alpha u(x) \text{ が } F_h(j-1) \text{ に現われる} \}$

と定め、また $\lambda_j(h) < \lambda_0(h)$ ならば, $\partial_x^\alpha u(x)$ が F_h に現われ

$M \cdot \alpha = \lambda_j(h)$ とするような $\alpha \in \mathbb{N}^n$ を一つとって

$F_h(j) = F_h(j-1) / (\partial_x^\alpha u(x))$ と定める。

この時、次のことは明らか。

- $\lambda_0(h) = -\infty \iff F_h$ は $\partial_x^\alpha u(x)$ たちの積
- $\lambda_2(h) = -\infty \iff F_h$ は線型項
- $\lambda_j(h)$ ($j \geq 1$) は j について単調減少
- $\bar{j} \in \mathbb{N}$ があり、 $j \geq \bar{j} \iff \lambda_j(h) = \lambda_0(h)$

例 $F_h = (\partial_x^2 u) \cdot (\partial_x u)^2 \sqrt{1+u^2}$ の時

$$\lambda_0(h) = 0$$

$$\lambda_1(h) = 2, \quad F_h(1) = (\partial_x u)^2 \sqrt{1+u^2}$$

$$\lambda_2(h) = 1, \quad F_h(2) = \partial_x u \sqrt{1+u^2}$$

$$\lambda_3(h) = 1, \quad F_2(z) = \sqrt{1+u^2}$$

$$\lambda_4(h) = \lambda_5(h) = \dots = 0$$

さらに、(6.1) のある解 u について、(6.1) の主シンボルの零点全体の作る $(T^*\Omega)^*$ の閉部分集合を (6.1) の特性多様体といい、特性多様体に属さない点を非特性点という。

特性多様体は、一般には解によって定まる概念であるが、(6.1) が半線型ならば解によらずに定まる。

以上の準備の下に、主定理を述べる。

定理13 $1 \leq p, q \leq \infty$ とする。この時

$$\rho = \max_{1 \leq h \leq N} \left\{ \lambda_0(h) + \frac{|M|}{p}, \frac{\lambda_1(h) + \lambda_2(h)}{2}, \max_{2 \leq k \leq j_h - 1} \left\{ \frac{|M|}{p} + \right. \right. \\ \left. \left. + \max \left\{ \frac{1}{k} \left(\sum_{j=1}^k \lambda_j(h) - |M| \right), \frac{1}{k-1} \left(M\beta(h) + \sum_{j=1}^k \lambda_j(h) - m \right) \right\} \right\} \right\}$$

とおく。

(6.1) の解 $u(x)$ が $x_0 \in \Omega$ の近傍で $B_{p,q}^{m,\delta}$ ($\delta > \rho$) に属し、 (x_0, z_0) が u についての (6.1) の非特性点ならば

$$\mu = \min_{1 \leq h \leq N} \left\{ \min \left\{ 2\delta - 2\lambda_0(h) - \frac{|M|}{p}, \right. \right. \\ \left. \min_{2 \leq k \leq j_h - 1} \left\{ \sum_{j=1}^k \left(\delta - \lambda_j(h) - \frac{|M|}{p} \right) + \frac{|M|}{p} \right\} - M\beta(h) \right\} \right\}$$

とおくと、 $\epsilon < \mu$ なる任意の ϵ に対して、(さらに、 δ の値が高々有限個の除外値でなければ、 $\delta = \mu$ に対して ϵ)

$$(x_0, z_0) \notin WFB_{p,q}^{m,\delta}(f) \Rightarrow (x_0, z_0) \notin WFB_{p,q}^{m,\delta+\epsilon}(u)$$

注意3 $1 < p < \infty$ ならば、 B -空間を F -空間におきかえても成立つ。

注意4 全く一般の重み付 m 階非線型方程式に対しては、

$\rho = m + \frac{|M|}{p}$, $\mu = 2\Delta - 2m - \frac{|M|}{p}$ である。方程式が線型に近づくにつれて ρ は小さく、 μ は大きくなる。線型の時は $\rho = -\infty$, $\mu = \infty$ とする。

注意5 条件 $\Delta > \rho$ は、定義可能性条件 (非線型項が §4 の意味で解釈でき、我々の理論に乗るための条件) と 正則性増大条件 ($\mu + m > \Delta$) を合わせたものである。後者は、主シンボルが x について連続になるための十分条件でもある。

証明の方針 x_0 の近傍で 1 に等しい $\varphi(x) \in C_0^\infty(\Omega)$ を適当にとり

$$\sum_{k=1}^N \partial_x^{\beta(k)} (F_k(\varphi(x)x + (1-\varphi(x))x_0; \dots, \varphi(x)\partial_x^\alpha u(x), \dots))$$

を考える。これは x_0 の近傍で $f(x)$ に一致している。上の式に対して §5 の理論を用いると、 x が x_0 のある近傍上の点の時

$$\sum_{M \cdot \alpha \geq \Delta - \mu} \frac{\partial A}{\partial (\partial_x^\alpha u)}(x; u(x), \dots, \partial_x^\beta u(x), \dots) (i\zeta)^\alpha = \sum_{j=0}^{j_0} P_j(x, \zeta)$$

となるようなシンボル $P_j(x, \zeta) \in S(B_{p, \sigma_j}^{M, \mu+m-\Delta+\frac{|M|}{p}-\sigma_j})_{m-\sigma_j}$

($0 = \sigma_0 < \sigma_1 < \dots < \sigma_{j_0} = \mu + m - \Delta$) があって、

$\sum_{j=0}^{j_0} \pi_j(P_j(x, D_x), u)(x) - f(x)$ は、 x_0 の近傍で局所的に

$B_{p,q}^{M,\mu}$ に属する。 $t \leq \mu$ から、 (x_0, z_0) で非特性的シンボル $Q(x, z) \in S(B_{\infty,\infty}^{M,\infty})^0$ を適当にとると、

$$\pi_1(Q(x, D_x), \sum_{j=0}^{\infty} \pi_1(P(x, D_x, u)) (x) \in B_{p,q}^{M,t}$$

(x_0, z_0) における Q 及び P の microlocal parametrix を順次作用させて結論を得る。

例 1 粘性 0 の Burgers 方程式 $u x_1 + \frac{1}{2} \partial_{x_2} (u^2) = f$

$M = (1, 1)$ とすると、特性多様体は $\{(x, z), z_1 + u(x) z_2 = 0\}$

p, μ は第 2 項のみで定まり、この項について $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, $\lambda_0 = \lambda_3 = \dots = -\infty$ であるから、 $|M| = 2$, $m = 1$ を代入して

$$p = \max \left\{ 0, \frac{1}{2}(-2) + \frac{2}{p}, 1 - 1 + \frac{2}{p} \right\} = \frac{2}{p}$$

$$\delta > \frac{2}{p} \text{ の場合は } \mu = 2\delta - 2 \cdot \frac{2}{p} + \frac{2}{p} - 1 = 2\delta - \frac{2}{p} - 1$$

例 2 粘性 $\neq 0$ の Burgers 方程式 $u x_1 - u x_2 x_2 + \frac{1}{2} \partial_{x_2} (u^2) = f$

$M = (2, 1)$ とすると、この方程式は全方向で非特性的である。

$$p = \max \left\{ 0, \frac{1}{2}(-3) + \frac{3}{p}, 1 - 2 + \frac{3}{p} \right\} = \begin{cases} 0 & (p \geq 3) \\ \frac{3}{p} - 1 & (p < 3) \end{cases}$$

$$\delta > p \text{ の時, } \mu = 2\delta - 2 \cdot \frac{3}{p} + \frac{3}{p} - 1 = 2\delta - \frac{3}{p} + 1$$

よって、 $u(x)$ が x_0 の近傍で local に $B_{p,q}^{M,\delta}$ ($\delta > p$) に属し、しかも $f(x)$ が x_0 の近傍で local に $B_{p,q}^{M,t}$ ($t > \mu$) に属するならば、 $u(x)$ は x_0 の近傍の全余接方向で $B_{p,q}^{M, 2\delta - \frac{3}{p} + 1}$

に属し、従って x_0 の近傍で local に $B_{p,q}^{M, 2s - \frac{2}{p} + 1}$ に属する。

同じ議論を繰り返して、 $u(x)$ は x_0 の近傍で local に $B_{p,q}^{M, t+2}$ に属する。

例 3 KdV 方程式 $u_{x_1} - u_{x_2} x_2 x_2 + \frac{1}{2} \partial_{x_2} (u^2) = f$

これは $M = (3, 1)$ とおいて例 1, 例 2 と同様に扱える。

例 4 弦の方程式 $u_{x_1 x_1} - \partial_{x_2} \left(\frac{u_{x_2}}{\sqrt{1 + u_{x_2}^2}} \right) = f$

$M = (1, 1)$, $m = 2$ とする。展開した形は

$$u_{x_1 x_1} - \frac{u_{x_2} x_2}{(1 + u_{x_2}^2)^{3/2}} = f$$

である。従って、特性多様体は

$$\left\{ (x, \xi); \xi_1 = \pm \frac{\xi_2}{(1 + u_{x_2}^2)^{3/2}} \right\} \text{ である。}$$

非線型項について

$$\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = 1, \quad j_k = 1$$

よって

$$p = \max \left\{ 1 + \frac{2}{p}, \frac{1+1}{2} \right\} = 1 + \frac{2}{p}$$

$$\mu = 2s - 2 - \frac{2}{p} - 1 = 2s - \frac{2}{p} - 3$$

REFERENCES

- [1] M. Beals, Spreading of singularities for a semilinear wave equations, *Duke Math. J.*, 49 (1982), 275-286.
- [2] M. Beals and M. Reed, Propagation of singularities for hyperbolic pseudo-differential operators with non-smooth symbols, *Comm. Pure Appl. Math.*, 35 (1982), 169-184.
- [3] O. V. Besov, Investigation of a family of function spaces in connection with theorems of imbedding and extension, *Trudy Math. Inst. Steklov*, 60 (1961), 42-81.
- [4] J. M. Bony, Calcul symbolique et propagation des singularités pour les equations aux dérivées partielles non linéaires, *Ann. scient. Éc. Norm. Sup.*, 4^e série, 14 (1981), 209-246.
- [5] J. M. Bony, Interaction des singularités pour les equations aux dérivées partielles non linéaires, *Sém., Goulaouic-Meyer-Schwartz*, 1981-82, exp. n^o 2.
- [6] G. Bourdaud, L^p -estimates for certain non-regular pseudo-differential operators, *Comm. in Partial Differential Equations*, 7 (1982), 1023-1033.
- [7] B. Lascar, Singularités des solutions d'equations aux dérivées partielles non linéaires, *C. R. Acad. Sc. Paris*, 287 (1978), 527-529.
- [8] B. Lascar, Propagation des singularités des solutions d'equations aux dérivées partielles non linéaires, *Adv. Math. Suppl. Studies*, 7B (1981), 455-482.
- [9] R. Lascar, Propagation des singularités des solutions d'equations pseudo-différentielles quasi homogènes, *Ann. Inst. Fourier, Grenoble*, 27 (1977), 79-123.

- [10] Y. Meyer, Régularité des solutions des équations aux dérivées partielles non linéaires, Sémin. Bourbaki, 32^e année, 1979/80, n° 560.
- [11] Y. Meyer, Remarques sur un théorème de J. M. Bony, *Supplemento ai rendiconti del Circolo matematico di Palermo*, atti del Seminario di Analisi Armonica Pisa, 8-17 aprile 1980, serie II, numero 1 (1981), 1-20.
- [12] Y. Meyer, Multiplication of distributions, *Adv. Math. Suppl. Studies*, 7B (1981), 603-615.
- [13] Y. Meyer, Nouvelles estimations pour les solutions d'équations aux dérivées partielles non linéaires, *Sem. Goulaouic-Meyer-Schwartz*, 1981-82, exp. n° 6.
- [14] M. Nagase, The L^p -boundedness of pseudo-differential operators with non-regular symbols, *Comm. in Partial Differential Equations*, 2 (1977), 1045-1061.
- [15] J. Rauch, Singularities of solutions to semilinear wave equations, *J. Math. pures et appl.*, 58 (1979), 299-308.
- [16] J. Rauch and M. Reed, A general regularity theorem for semilinear hyperbolic waves in one space dimension, *Bull. Amer. Math. Soc.*, 6(1982), 445-448.
- [17] J. Rauch and M. Reed, Nonlinear microlocal analysis of semilinear hyperbolic systems in one space dimension, *Duke Math. J.*, 49 (1982), 397-475.
- [18] J. Rauch and M. Reed, Jump discontinuities of semilinear, strictly hyperbolic systems in two variables: Creation and propagation, *Comm. Math. Phys.*, 81 (1981), 203-227.

- [19] J. Rauch and M. Reed, Propagation of singularities in non-strictly hyperbolic semilinear systems: Examples, *Comm. Pure Appl. Math.*, 35 (1982), 555-565.
- [20] J. Rauch and M. Reed, Singularities produced by the non-linear interaction of three progressing waves; Examples, *Comm. in Partial Differential Equations*, 7 (1982), 1117-1133.
- [21] H. Triebel, Generalized Function Spaces. III, *Analysis Mathematica*, 3 (1977), 221-249; IV, *ibid.*, 3 (1977), 299-315; V, *Math. Nachr.*, 87 (1979), 129-152.
- [22] H. Triebel, *Fourier Analysis and Function Spaces*, Teubner-*Texte zur Math.*, Teubner Verlag, Leipzig, 1977.
- [23] H. Triebel, *Spaces of Besov-Hardy-Sobolev Type*, Teubner-*Texte zur Math.*, Teubner Verlag, Leipzig, 1978.
- [24] M. Yamazaki, Continuité des opérateurs pseudo-différentiels et para-différentiels dans les espaces de Besov et les espaces de Triebel-Lizorkin non-isotropes, *C. R. Acad. Sc. Paris, Série I*, 296 (1983), 533-536.
- [25] M. Yamazaki, Régularité microlocale quasi-homogène des solutions d'équations aux dérivées partielles non-linéaires, preprint.
- [26] 山崎昌男, 準備次 *para-differential operator* と非線型方程式の超局所解析, 東京大学修士論文, 1983.