

K.d.V および Modified K.d.V 方程式の相似解

東大宇宙研 橋本 英典・篠原 勝

概要

Korteweg-de Vries (K.d.V) 方程式

$$u_t + u u_x + u_{xxx} = 0 \tag{1}$$

および修正 K.d.V 方程式

$$v_t + v^2 v_x + v_{xxx} = 0 \tag{2}$$

の相似解が共に、可動かわり点を持つ標準型非線型方程式

$$w'' - \xi w = \pm w^3$$

の解から導かれることを示し、 $\xi \ll -w^2$ における振動部の漸近解が非線型のためにいちじるしい位相のずれをおこすことを明らかにした。また数値計算の実行によって、かわり点の移動による複雑な挙動を明らかにした。なお(1)の相似解につき、3階の方程式の数値積分によって得られる Beregin & Karpman (1964) の数値解に別の特異性存在すること示した。

§1. まえがき

非線型媒質中の長波長伝播波を支配する典型的な方程式である Korteweg-de Vries の方程式が浅水波に対して導かれ、その厳密解である孤立波 (Soliton) や定常波列が求められたのは古いこと。近時、成層流体⁽²⁾⁴⁾、回転流体⁽³⁾⁵⁾⁶⁾、混相流体⁽⁷⁾、フロアス⁽⁸⁾¹⁰⁾ の内

題にも同様な方程式があらわれることが明らかにされ、Solitonの集合や定常波列の性質が最近多くの人によって論じられている。

しかし一般の非定常波については、Gardner, Green, Kruskal & Miura⁽¹⁾ によって初期問題がGelfand-Leritan型の積分方程式に帰着されることが示されているもの、純数値計算との関係については研究が少ない。

筆者らは非定常解の中でも、その形が時間と長さのスケールの変換に対して相似に保たれるもの、すなわち相似解についてしらべているので、その一端をここに述べておきたい。この種の相似解はすでにBerezin Karpman⁽²⁾ により、3階の常微分方程式の数値積分にもとづいて若干論じられているが、筆者はこれが2階のある標準型の非線型常微分方程式(Painlevéの方程式⁽⁵⁾の一種)の解から導かれることを示す。これはまた非線型のアルフベン波⁽³⁾や格子振動のあるものを支配するModified K.d.V方程式の相似解とも密接な関連を持ち、方程式の解が波動型から指数型に移行する。後者は振動によって移動する典型的な常微分方程式であり、その解を求めておくことは数学的にも興味あることであろう。

§2. K.d.VおよびModified K.d.V方程式の相似解

K.d.V方程式(1)とModified K.d.V方程式(2)とを同時に考えよう。(1)と(2)の

6x

$$u(x,t) = \tau^{-2/3} f(\xi), \quad v(x,t) = \tau^{-1/3} g(\xi) \quad (3), (4)$$

ただし,

$$\tau = t/\sqrt{3}, \quad \xi = x/(3t)^{1/3} \quad (5), (6)$$

の形の相似解を持つことは次元解析によつてただちにわかる。

実際直接代入によつて, f, g に対する常微分方程式

$$L_2[f] \equiv f''' - \xi f' - 2f = -3ff' \quad (7)$$

$$L_1[g] \equiv g''' - \xi g' - g = -3g^2g' \quad (8)$$

が得られる。特に

$$\xi \rightarrow \infty \text{ 時 } f \rightarrow 0, \quad g \rightarrow 0 \quad (9)$$

となるものを問題にしよう。このとき(8)は積分によつて

$$L[g] \equiv g'' - \xi g = -g^3 \quad (10)$$

を与えるが(1), (2)に対応する Miura の変換⁽⁴⁾を想起すれば、条件(9)を満足する(7)の解が g を用いて

$$f = g^2 \pm i\sqrt{2}g' \quad (11)$$

となることは、

$$L_2[f] + 3ff' = (\pm i\sqrt{2} \frac{d}{d\xi} + g) \{L_1[g] + 3g^2g'\} \quad (12)$$

となることから確かめられる。あるいは(10), (11)で

$$g = ih \quad (13)$$

とおけば

$$f = -h^2 \mp \sqrt{2}h'$$

$$L[h] \equiv h'' - \xi h = h^3 \quad (14)$$

となり、 ϵ, η に対して右辺の符号に土のちがいしかない2階
 の非線型の常微分方程式

$$L[w] \equiv w'' - \epsilon w = \pm w^3 \quad (15)$$

を解けばよいことになる。(15)は可動分岐点を持たぬ2階の
 非線型常微分方程式の標準形としてPainlevéが見いだした型
 の一つになっている[5].

$L[w]=0$ の解がAiryの関数として $\epsilon > 0$ で指教型、 $\epsilon < 0$ で
 振動型となる固定変わり点 $\epsilon=0$ を持つものに対して、かわり
 点が振幅とともに変化する($\epsilon = \mp w^2$)ことは著しい特長が
 ある。

§3. 解の具体形

方程式(15)の解の具体的な形はあまり知られていないよう
 なので、その近似解と数値解をしらべた。

i) $\epsilon \rightarrow -\infty$ の漸近解

$|\epsilon| \gg w^2$ では右辺が無視され、一般に振動型のAiry関数
 で近似されようであるが、位相のずれが大きいのので特異攝動
 法に訴える必要がある。そのためWKBJ式の変数変換⁽⁶⁾

$$\zeta = \frac{2}{3}(-\epsilon)^{3/2}, \quad w = (-\epsilon)^{1/2} \zeta^{-1/2} \phi(\zeta) \quad (16)$$

によって ϕ に対する方程式

$$\frac{d^2}{d\zeta^2} \phi + \left(1 + \frac{5}{36} \frac{1}{\zeta^2}\right) \phi = \pm \frac{1}{\zeta} \phi^3 \quad (17)$$

に書き直し

$$\phi = C_0 e^{iQ} + \sum_{n=2}^{\infty} b_n e^{inQ} \quad (18)$$

の形の解を、 dQ/ds , b_n が s の逆べき (定数から始まる) に展開できるとして、逐次近似によって見いだした。

すなわち

$$Q = P \pm \frac{3}{4} i C_0^2, \quad P = s \mp \frac{3}{2} C_0^2 \log s + \left(-\frac{5}{72} + \frac{15}{16} C_0^2\right) \frac{1}{s} + O\left(\frac{1}{s^2}\right) \quad (19)$$

$$\phi = \left(C_0 \mp \frac{3}{4} \frac{C_0^3}{s}\right) e^{iP} - \frac{C_0^3}{8s} e^{3iP} + c.c. + O\left(\frac{1}{s^2}\right). \quad (20)$$

C_0 によらぬ項は Airy の関数の漸近展開と一致するが、位相が非線型効果によって $\mp 3/2 C_0^2 \log s$ と、大きくずれるのは特筆すべきところであろう。ここで c.c. は複素共役をあらわす。

ii) 教値積分

教値積分は次のように行なわれた。

i) $\varepsilon = 0$ における初期値 w_0 と w_0' を与え、 $\varepsilon \rightarrow \infty$ で $w \rightarrow +0$ となるように w_0' を調整。-0 となるものは対称性から単に w の符号を変えればよい。(図 1, 2)

ii) $\varepsilon_0 \gg w^2$ の真で $w = \alpha Ai(\varepsilon)$, $w' = \alpha Ai'(\varepsilon)$ と与え ε の小さい方に積分する。ただし Ai は Airy の関数。

iii) 特に g については i) の w_0 が w_0 の多価関数となるが、これは $\varepsilon = 0$ が、 $w - \varepsilon$ 面の振動域 $\varepsilon < w^2$ にあるためで、このときは $w = \varepsilon^{1/2}$ に沿って $w(\varepsilon) = \varepsilon^{1/2}$, $w'(\varepsilon)$ と与える方が好都合

合であり、そこで ξ が大きいと $w'(\xi) \approx -\xi/\sqrt{2} + \text{定数}$ の関係が示される。(図3).

iv) $\xi < -2.25$ に対しては式(17)を用いて積分した。

図4は $\xi \rightarrow \infty$ での初期値 g, g' を与えて g を数値積分した結果を示す。 $\xi \rightarrow +\infty$ での初期値 g は下からそれぞれ $A_i, 1.5A_i,$

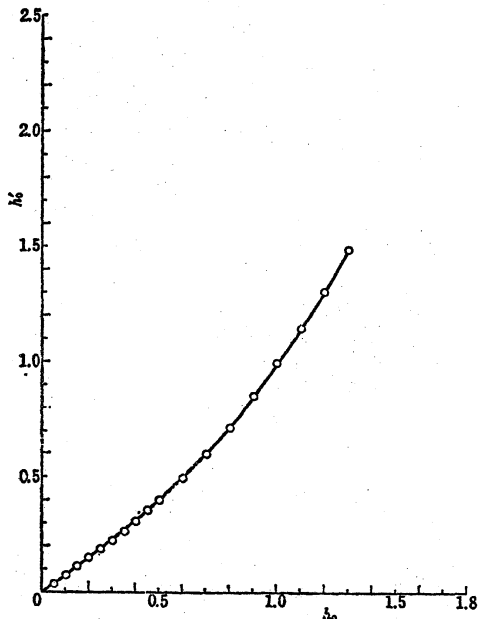


図 1

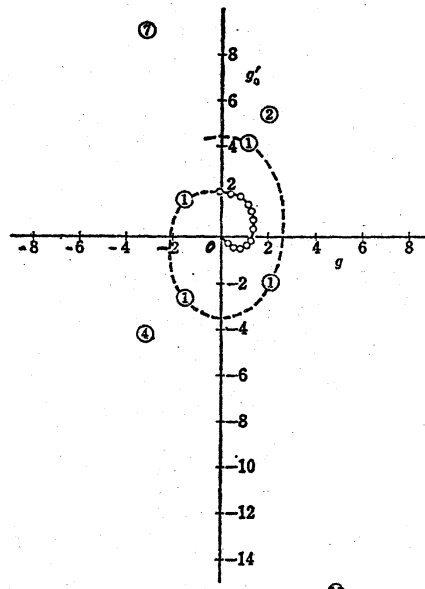


図 2

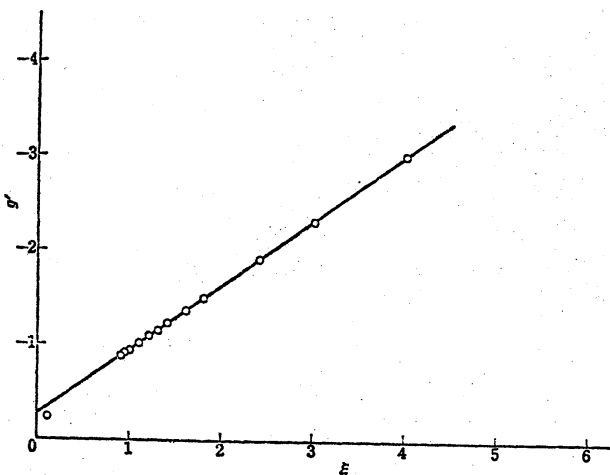
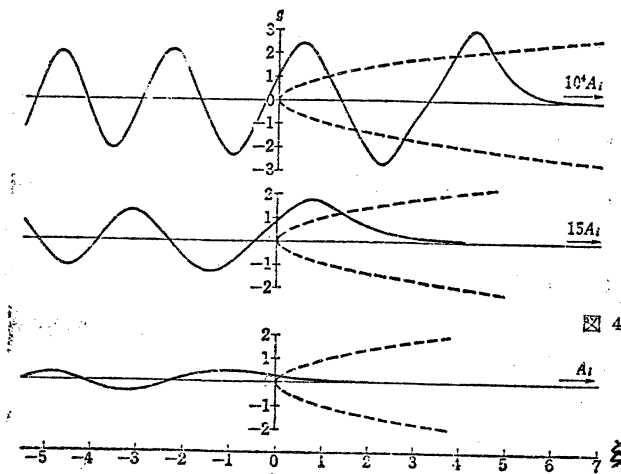


図 3

$10^4 A_i$ にとつてある。
 非線形項がないと、 w は Airy 関数となり、 $\xi=0$ が指数型と振動型の解をわける turning point であるが、非線形項の影響でそれが移



動し、 $\xi - \eta$ 面では放物線が二つの型を区別することになる。したがって振幅が小さいときにはこの全領域にわたって Airy 関数に近かつたもの

ものが、振幅が大きくなるにつれて $\xi = 0$ 付近を中心 Airy 関数からずれて放物線の外側にくる部分が增大して複雑な形を示す。特に $\xi = 0$ での η が 1.5 より大きくなると傾き η' が正となり、 $\xi < 0$ の部分だけにあつた振動が振幅の増大につれて $\xi \rightarrow \infty$ 方向に伸びていく。これは図示したように $\eta'' (= (\xi - \eta^2)\eta)$ の符号の変化が $\eta = 0$ と $\xi = \eta^2$ 上で起きることに注意すれば容易に理解できる。振幅が大きくなると相対的に、関数 η の放物線内に入る部分が少なくなり、正で小さな ξ の領域では放物線内の指数関数的な振舞があまり影響しなくなる。

図 5 は η に関して $\xi = 0$ での初期値 η_0 と η_0' を与えて数値積分したものである。これは $\xi \rightarrow \infty$ において、 η が下からそれぞれ $0.56 A_i$, $1.4142135 A_i$, $1.4142138 A_i$, $1.6 A_i$ に近づくもので、初期値がある臨界値をこえると $\eta \rightarrow +\infty$ に発散する。

これは η'' の符号の変化をみればわかるように、 η とは逆に放物線の内部が振動部分になっているためである。

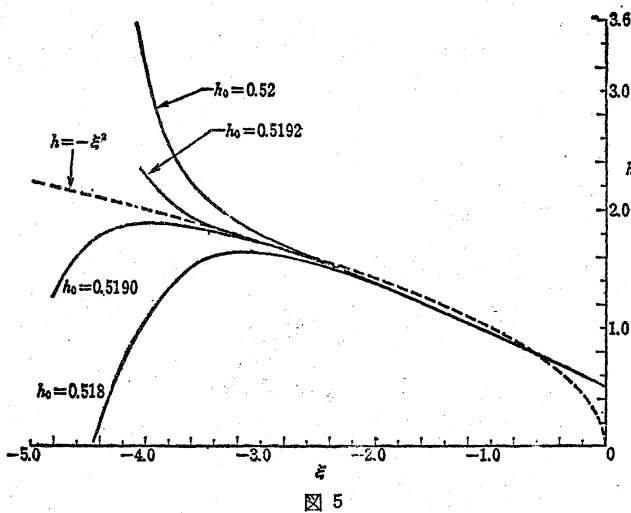
以下で $\xi < 0$ において放物線の外側へ発散していくものについて ξ が十分大きいところでの漸近解を求めてみる。

まず $\xi \sim c_0$ で ξ が非常に大きくなるとすれば ξ^3 に比べて $\xi \eta$ を無視できるので、 η は $\eta'' = \xi^3$ の近似解として、

$$\eta = \frac{I\sqrt{2}}{\xi - c_0} \quad (21)$$

の形に求められる。これを主項として残りの項 $\mathcal{E} = \xi - c_0$ のべき級数に展開し、(14) に代入して係数を定めれば

$$\eta = \pm \frac{\sqrt{2}}{\xi - c_0} \left[1 - \frac{c_0}{6} \mathcal{E}^2 - \frac{1}{4} \mathcal{E}^3 + a \mathcal{E}^4 + \frac{1}{72} c_0 \mathcal{E}^5 + O(\mathcal{E}^6) \right] \quad (22)$$



の形に求められる。ただし、 \mathcal{E}^4 の係数 a は不定である。したがって $\xi = 0$ で η が双曲線的に発散することと示す。 $\xi \rightarrow \infty$ で $\eta \rightarrow +0$ になる条件を満たすものについて

については初期微分 η' が負であり、 $\xi < 0$ での分岐は放物線の外側にある限り $\eta'' > 0$ なので発散することになる。したがって図々において放物線に漸近するものは放物線の内部 ($\eta' < 0$) に入ってから内側から近づくものでなければならぬ。また放物線の中にあるものでも大振幅のものはかなりの範囲にわたって、Airy の関数とは、かなり異った挙動を示す。これを見る

ために(14)式で別の変数変換

$$\eta = (-\xi)^{1/2} w(\zeta), \quad \zeta = \frac{2}{3} (-\xi)^{3/2} \quad (23)$$

をすれば $-1 \leq w \leq 1$ が放物線の内部を与え(14)式から

$$\ddot{w} + w - w^3 = -\frac{1}{\zeta} \dot{w} + \frac{1}{9\zeta^2} w \quad (24)$$

を得る。 ζ が十分に大きく、左辺に比べて右辺を小として無視できるときは積分

$$\frac{1}{2} \dot{w}^2 + U(w) = E \quad (25)$$

$$U(w) = \frac{1}{2} w^2 - \frac{1}{4} w^4 \quad (26)$$

が得られ、運動は U というポテンシャルの中での質点の一次元運動に帰着する。

この解は一般に楕円関数

$$w = a \operatorname{sn} \left(\frac{a}{\sqrt{2-k}} (\zeta + C), k \right) \quad (27)$$

$$k = \frac{a}{\sqrt{2-a^2}}, \quad E = \frac{a^2}{4} (2-a^2) \quad (28)$$

であらわされ、 $a < 1$ ならば放物線の周を振動する。(もちろん長い振動の後は無視した項の影響で振幅が減少する)

$a \rightarrow 1$ に近づくと $k \rightarrow 1$ で波長が非常に大きくなり w は

$$w = \operatorname{tanh} \left(\frac{\zeta + C}{\sqrt{2}} \right) \quad (29)$$

に近づく。特に $\zeta \rightarrow \infty$ では

$$w = 1 - 2e^{-\sqrt{2}(\zeta+C)} \sim 1 - c_0 e^{-\sqrt{2}\zeta} \quad (30)$$

の形となり、元の変数にもどると

$$\eta = (-\xi)^{1/2} \left\{ 1 - c_0 e^{-\frac{2\sqrt{2}}{3} (-\xi)^{3/2}} \right\} \quad (31)$$

で放物線に漸近する分枝の漸近形を与える。

図6は $\xi \rightarrow \infty$ でのAiry関数 A_i の振幅を単位として計った g, h の振幅 a_+ と、同様にして計った $\xi \rightarrow -\infty$ での振幅 a_- との関係を示すもので、振幅が小さくAiry関数に近いときは、 $a_+ \approx a_-$ であるけれども振幅が大きく、非線形項の影響が大きくなるにつれて a_- は a_+ からずれてくる。(15)式をみればわかるように、 g と h とは非線形項の符号が逆で、 $\xi < 0$ の領域においてAiry関数 $w'' = \xi w$ に比べて $|w'|$ は g では大きく、 h では小さくしている。だから同じ a_+ の値に対し g は振幅が減り h は増加している。また、 h の方は臨界値を持つために a_+ が $\sqrt{2}$ に近づくにつれ無限大に発散する。図7は振幅 a_+ と位相の定数部分 α の関係を示すもので、図6と同様に振幅が増

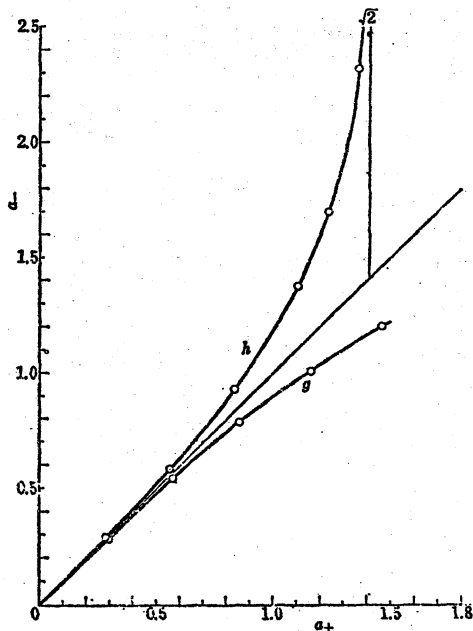


図 6

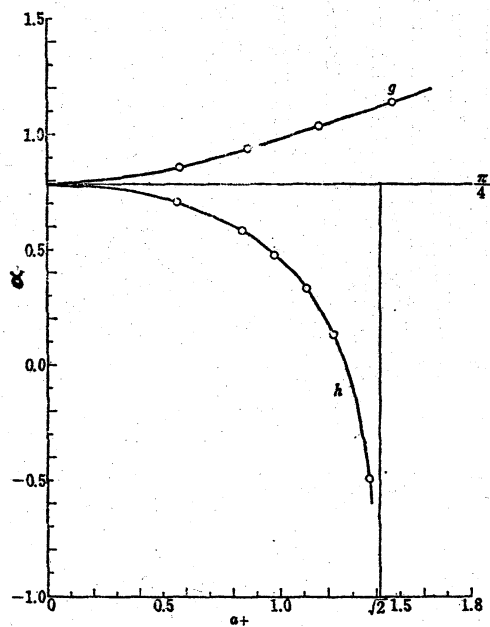


図 7

すにっれて Airy 関数での値 ($\alpha = \pi/4$) から h, h' それぞれに反対方向にずれ. h は $a_+ = \sqrt{2}$ で発散していく。

んに対応する f は (14) 式のように二つの分枝

$$f_1 = -h^2 - \sqrt{2} h', \quad f_2 = -h^2 + \sqrt{2} h' \quad (32), (33)$$

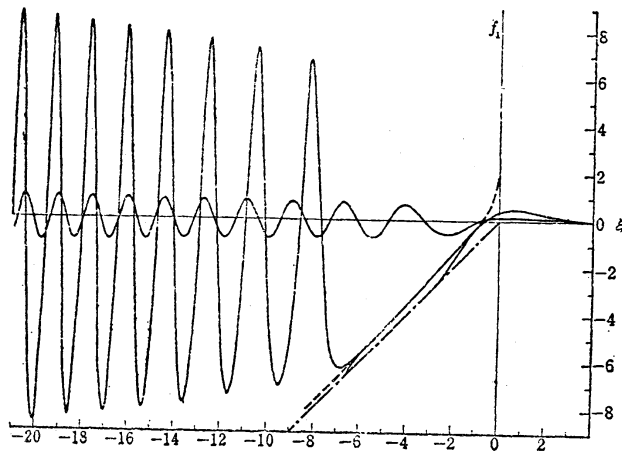


図 8

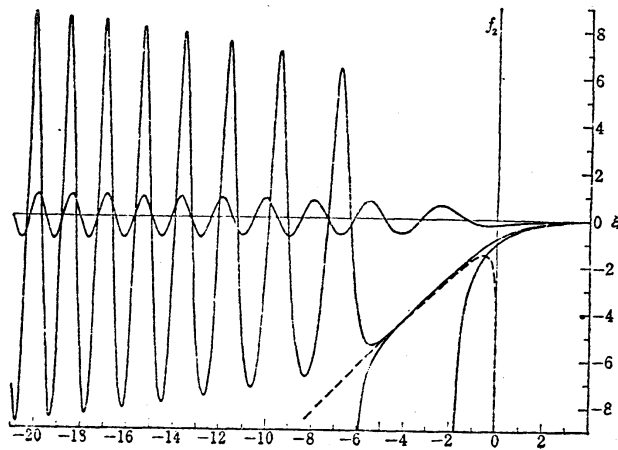


図 9

がある. Berezin, Karpman は $\xi \equiv +\infty$ から数値積分を行ない。この場合に換算して $\xi \rightarrow +\infty$ での f が $0.78 A_i$ と $0.88 A_i$ となる間に臨界値があるといっているけれど、ここでの数値計算では $\sqrt{2} A_i$ となっている。臨界値に近づくときの h の漸近線は $h = \sqrt{-\xi}$ であるから、これの一回微分、 $h' = -1/2 (-\xi)^{-1/2}$ を

(14) 式に代入すると f の漸近線が得られる。

$$f = \xi \mp \frac{1}{\sqrt{-2\xi}} \quad (34)$$

これは f_1, f_2 を示した図 8, 9 に実線で示されている。

f の $\xi \rightarrow \infty$ に相当する近似解は(22)を(14)に代入して求めることが出来る。

$$f_1 \sim C_0 + 2(\xi - C_0),$$

$$f_2 \sim -\frac{4}{(\xi - C_0)^2}.$$

参考文献

- (1) D. J. Korteweg and G. de Vries : Phil. Mag. 5 39 (1895) 422.
- (2) D. J. Benney : J. Math. & Phys. 45 (1966) 52.
- (3) R. R. Long : Tellus 8 (1956) 460.
- (4) T. B. Benjamin : J. Fluid Mech. 26 (1966) 241.
- (5) T. B. Benjamin : J. Fluid Mech. 28 (1967) 66.
- (6) S. Leibovich : Phys. of Fluids 12 (1969) 1124.
- (7) I. V. Wijngaardn : J. Fluid Mech. 33 (1968) 465.
- (8) G. S. Gardner & G. K. Morikawa : Courant Institute of Math, Science Rep. NYO 9082 (1960)
- (9) R. W. Morton : Phys. of Fluids 7 (1964) 1800.
- (10) H. Washimi & T. Taniuti : Phys. Rev. Letters 17 (1966) 996.
- (11) C. S. Gardner, J. M. Greene, M. D. Kruskal & R. M. Miura : Phys. Rev. Letter 6 (1967) 6.
- (12) Yu. A. Berezin & V. I. Karpman : Soviet Physics JETP 19 (1964) 1265.
- (13) T. Kakutani & H. Ono : J. phys. Soc. Japan 26 (1969) 1305.

- (14) R. M. Miura : J. math. Phys. 9 (1968) 1202.
- (15) P. Painlevé : Bull Soc. Math. France 28 (1900) 201.
- (16) I. Imai : Phys. Rev. 74 (1948) 113.
- (17) 寺沢寛一編：自然科学者のための数学概論 応用編 p.216
- (18) 橋本英典, 藤原勝：東京大学宇宙航空研究所報告 920 (1973)