

2 次の sinh-振動子と sin-振動子

大阪教育大 鯖田秀樹

§ 1. はじめに

単振り子の方程式

$$\ddot{x} = -\sin x \quad (1)$$

は Jacobi の楕円関数を用いると厳密解が得られる。¹⁾ (1) の形に帰着される例は多くあり, sine-Gordon 方程式の進行波である単純解は有名である。そのときは符号がプラスのものも要求されるが, 位相のずれを考えるとどちらか一方のみでよい。同様に

$$\ddot{x} = -\sinh x \quad (2)$$

も Jacobi の楕円関数を用いると解が得られる。¹⁾

(2) の例としては, 当然 sinh-Gordon 方程式の定常的な進行波を表わす解がある。物性の例としては, 戸田格子の最短波長のモードに対応する振動の時間変化があげられる。このことは戸田先生の論文に詳しく述べられている^{2), 3)}。

以上の2つをそれぞれ1次の sin-振動子, 1次の sinh-振動子と呼んでおこう。以下では $\sin 2x$, $\sinh 2x$ の項が加わった場合を考える。すなわち, 振動の原因となる力に2次の harmonics が含まれている場合である。

2次までなら Jacobi の楕円関数で解が表わされることがすぐ分かるのだが, 1次だけの場合に比べると, パラメーターが1つ加わるため, 解の形が複雑になる。そのためか, 著者の知るかぎりでは explicit にすべての場合の解を表わした文献はない。3次以上の harmonics がさらに加わると Jacobi の楕円関数で解を表わすのは無理のようである。

λ_1, λ_2 を任意定数として,

$$\ddot{x} = \lambda_1 \sin x + \lambda_2 \sin 2x \quad (3)$$

鯖田秀樹

$$\ddot{x} = \lambda_1 \sinh x + \lambda_2 \sinh 2x \quad (4)$$

を考える。(3)を2次の $\sin$ -振動子、(4)を2次の $\sinh$ -振動子と呼んでおこう。

2次の振動子は λ_1, λ_2 の符号によって、4つの場合に分けられる。変数の scale 変換により、係数は比だけが問題となる。それで、一般性を失なうことなく、 $\lambda_1 = \pm 1$, $\lambda_2 = \pm r (r > 0)$ にえらんでおくことができる。

§ 2. 2 次の $\sinh$ -振動子

$$[I] \quad \ddot{x} = \sinh x - r \sinh 2x \quad (r > 0) \quad (1)$$

を考える。ポテンシャル関数は

$$U(x) = 1 - \cosh x + r(\cosh^2 x - 1) \quad (2)$$

となる。グラフは図1のように表わされる。

E をエネルギーとすると

$$\begin{aligned} \dot{x}^2 &= 2[E - U(x)] \\ &= 2r \left[-\cosh^2 x + \frac{1}{r} \cosh x + \frac{E - 1 + r}{r} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

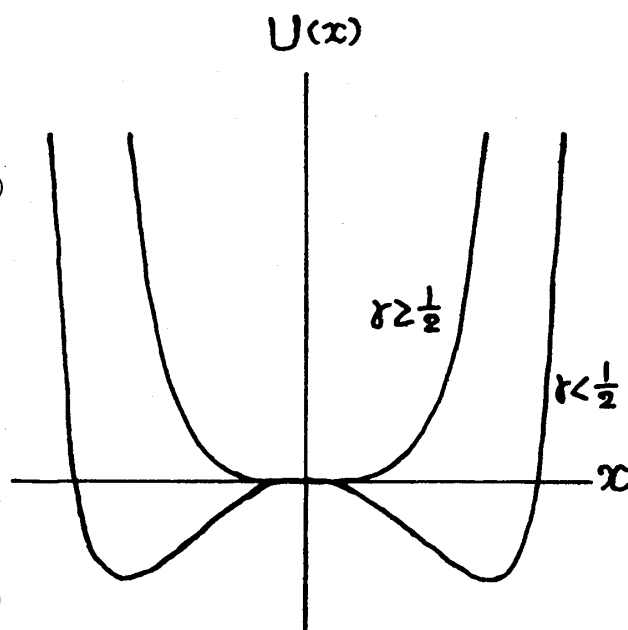


図1 [I] の振動子ポテンシャル

が第1積分である。

$$\cosh x \equiv y$$

とおき、 $\dot{x}^2 = 0$ となる y を求めると、

$$y = \frac{1}{2r} \left[1 \pm \sqrt{(2r-1)^2 + 4Er} \right] \quad (4)$$

となる。

(4)の2根を $\beta < \alpha$ とする。(3)の積分を求めると

$$\int \frac{dy}{\sqrt{(y+1)(y-1)(y-\beta)(\alpha-y)}} = \sqrt{2r} \int dt \quad (5)$$

平方根の中の4つの根の大小関係は E の値により異なる。

- (1) $E > 2$ $\alpha > 1 > -1 > \beta$
- (2) $E = 2$ $\alpha > 1 > -1 = \beta$
- (3) $2 > E > 0$ $\alpha > 1 > \beta > -1$
- (4) $E = 0$ $\alpha > 1 = \beta > -1$ ($r < \frac{1}{2}$)
- (5) $0 > E > U_{\min}$ $\alpha > \beta > 1 > -1$ ($r < \frac{1}{2}$)

次に解を列挙する。

$$(1) \quad E > 2$$

$$y = \cosh x = \frac{1 + a_1 \operatorname{sn}^2 \omega_1 t}{1 - a_1 \operatorname{sn}^2 \omega_1 t} \quad (6)$$

ここに,

$$a_1 = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}, \quad \omega_1^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r-1)^2 + 4Er} + E + 2r - 1 \right]$$

sn は Jacobi の楕円関数であり, 母数 k は

$$k^2 = \frac{(\alpha-1)(\beta+1)}{(\alpha+1)(\beta-1)} \quad (7)$$

である。

$$(2) \quad E = 2$$

$$y = \frac{(2r+1) + \sin^2(\sqrt{2r+1} t)}{(2r+1) - \sin^2(\sqrt{2r+1} t)} \quad (8)$$

$$k = 0, \quad \omega_1^2 = \omega_2^2 = 2r+1, \quad a_1 = a_2 = \frac{1}{2r+1}$$

鯖田 秀樹

(3) $2 > E > 0$

$$y = \frac{1 - \beta a_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}{1 - a_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t} \quad (9)$$

$$a_2 = \frac{\alpha - 1}{\alpha - \beta}, \quad \omega_2 = \sqrt{(2r - 1)^2 + 4Er} \quad (10)$$

$$k^2 = \frac{(\alpha - 1)(\beta + 1)}{2(\alpha - \beta)}$$

(4) $E = 0 \left(r < \frac{1}{2} \right)$

このときは $t = 0$ で $y = \alpha$ にとる。

$$y = \frac{2(1 - r) - (1 - 2r) \tanh^2(\sqrt{1 - 2r} t)}{2r + (1 - 2r) \tanh^2(\sqrt{1 - 2r} t)} \quad (11)$$

$t \rightarrow \infty$ で, $y \rightarrow 1$ が (11) からでる。

(5) $0 > E > U_{\min}$

$$y = \frac{\beta - a_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}{1 - a_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t} \quad (12)$$

$$a_3 = \frac{\alpha - \beta}{\alpha - 1}, \quad \omega_3^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r - 1)^2 + 4Er} + 1 - 2r - E \right]$$

$$k^2 = \frac{2(\alpha - \beta)}{(\alpha - 1)(\beta + 1)} \quad (13)$$

$$[\text{II}] \quad \ddot{x} = -\sinh x + r \sinh 2x \quad (r > 0) \quad (14)$$

ポテンシャル関数は

$$U(x) = (\cosh x - 1) - r(\cosh^2 x - 1) \quad (15)$$

である。グラフは図 2 に示す。

$\dot{x}^2 = 0$ となる y は

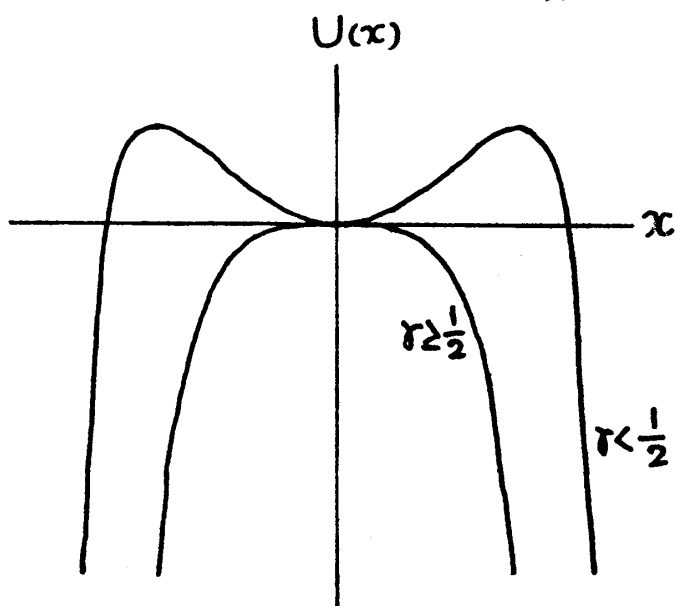


図2 〔Ⅱ〕の振動子のポテンシャル

$$y \equiv \cosh x = \frac{1}{2r} [1 \pm \sqrt{(2r-1)^2 - 4Er}] \quad (16)$$

である。

(5) に対応する積分は

$$\int \frac{dy}{\sqrt{(y+1)(y-1)(y-\alpha)(y-\beta)}} = \sqrt{2r} \int dt \quad (17)$$

$\alpha > \beta$ は (16) で表わされる 2 根である。

E の値により分類すると、

(1) $E > U_{\max}$ α, β 虚根

(2) $E = U_{\max}$ ($r \neq \frac{1}{2}$) $\alpha = \beta = \frac{1}{2r} \begin{cases} r > \frac{1}{2} & (1 \text{ 種類}) \\ r < \frac{1}{2} & (2 \text{ 種類}) \end{cases}$

(3) $U_{\max} > E > 0$ ($r \neq \frac{1}{2}$) $1 > \alpha > \beta > -1$ ($r > \frac{1}{2}$)
 $\alpha > \beta > 1 > -1$ ($r < \frac{1}{2}$) (2 種類)

(4) $E = 0$ $r > \frac{1}{2}$ $\alpha = 1 > \beta > -1$
 $r < \frac{1}{2}$ $\alpha > 1 = \beta > -1$
 $r = \frac{1}{2}$ $\alpha = \beta = 1$ ((2), (3) と同じ。)

鯖田 秀樹

$$(5) \quad 0 > E > -2 \qquad \alpha > 1 > \beta > -1$$

$$(6) \quad E = -2 \qquad \alpha > 1 > -1 = \beta$$

$$(7) \quad -2 > E \qquad \alpha > 1 > -1 > \beta$$

となる。しかし、物理的に興味のある $t \rightarrow \infty$ まで続く周期解は (3) のうち $r < \frac{1}{2}$ の 1 種類だけである。

$$(1) \quad y = \frac{1 - b_1 \operatorname{cn} \omega_1 t}{-b_1 + \operatorname{cn} \omega_1 t} \qquad (18)$$

$$b_1 = \sqrt{E(E+2)} - (E+1), \quad \omega_1^2 = 2\sqrt{E(E+2)}$$

$$k^2 = \frac{E - (2r-1) + \sqrt{E(E+2)}}{2\sqrt{E(E+2)}}$$

(2) $r > \frac{1}{2}$ のとき。 $k = 0$ となるから

$$y = \frac{1 - b_1 \cos \omega_1 t}{-b_1 + \cos \omega_1 t} \qquad (19)$$

$r < \frac{1}{2}$ のとき。 $k = 1$ となる。 $b_1 = -2r$ 。

$t = 0$ のとき $y_0 = 1$ となる解は

$$y = \frac{1 + 2r \operatorname{sech} \omega_1 t}{2r + \operatorname{sech} \omega_1 t} \qquad (20)$$

$t = 0$ のとき $y_0 > \frac{1}{2r}$ となる解は、 $y_0 = \frac{1 - 2r \operatorname{sech} \epsilon}{2r + \operatorname{sech} \epsilon}$ として

$$y = \frac{1 - 2r \operatorname{sech} (\omega_1 t + \epsilon)}{2r + \operatorname{sech} (\omega_1 t + \epsilon)} \qquad (21)$$

となる。

(3) $r > \frac{1}{2}$ のとき

$$y = \frac{1 - \alpha b_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}{1 - b_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t} \qquad (22)$$

$$b_2 = \frac{2}{\alpha+1}, \quad \omega_2^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r-1)^2 - 4Er + 2r - 1 - E} \right] \quad (23)$$

$$k^2 = \frac{2(\alpha-\beta)}{(1-\beta)(\alpha+1)}$$

$r < \frac{1}{2}$ のとき

$t = 0$ のとき $y = 1$ となる解は

$$y = \frac{1 + b_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}{1 - b_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t} \quad (24)$$

$$b_3 = \frac{\beta-1}{\beta+1}, \quad \omega_3^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r-1)^2 - 4Er + E + 1 - 2r} \right] \quad (25)$$

$$k^2 = \frac{(\beta-1)(\alpha+1)}{(\alpha-1)(\beta+1)}$$

$t = 0$ で $y = \alpha$ となる解は

$$y = \frac{\alpha - \beta b_4 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}{1 - b_4 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t} \quad (26)$$

$$b_4 = \frac{\alpha+1}{\beta+1} \quad k, \omega_3 \text{ は (25) と同じ。}$$

(4) $r > \frac{1}{2}$

$$y = \frac{2(r-1) \tanh^2(\omega_2 t + \epsilon) - (2r-1)}{(2r-1) - 2r \tanh^2(\omega_2 t + \epsilon)} \quad (27)$$

$$r = \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{(t+\epsilon)^2 + 1}{(t+\epsilon)^2 - 1} \quad (28)$$

もちろん $t=0$ で $y = \frac{\epsilon^2+1}{\epsilon^2-1} > 1$ にえらぶ。(28) は (27) で $r \rightarrow \frac{1}{2}$ としても得られる。

$r < \frac{1}{2}$ の場合はつぎの (5) で $E \rightarrow 0$ にしたものである。

鯖田 秀樹

$$(5) \quad y = \frac{\operatorname{sn}^2 \omega_4 t - \alpha b_5}{\operatorname{sn}^2 \omega_4 t - b_5} \quad (29)$$

$$b_5 = \frac{2}{\alpha+1}, \quad \omega_4^2 = \sqrt{(2r-1)^2 - 4Er}$$

$$k^2 = \frac{(1-\beta)(\alpha+1)}{2(\alpha-\beta)} \quad (30)$$

(6) グラフから明らかなように、(5) と (7) の場合の解で $E \rightarrow -2$ にすると得られる。関数形は双曲線関数であるが、有限の短い時間の間に粒子が $y \rightarrow \infty$ となるから不思議ではない。

$$(7) \quad y = \frac{\operatorname{sn}^2 \omega_2 t - \alpha b_6}{\operatorname{sn}^2 \omega_2 t - b_6} \quad (31)$$

$$b_6 = \frac{1-\beta}{\alpha-\beta} \quad k^2 = \frac{2(\alpha-\beta)}{(1-\beta)(\alpha+1)} \quad (32)$$

$$[\text{III}] \quad \ddot{x} = \sinh x + r \sinh x \quad (r > 0) \quad (33)$$

ポテンシャルは

$$U(x) = -(\cosh x - 1) - r(\cosh^2 x - 1) \quad (34)$$

である。グラフは図3に示す。

$\dot{x}^2 = 0$ になる y は

$$y \equiv \cosh x \\ = \frac{1}{2r} [-1 \pm \sqrt{(2r+1)^2 - 4Er}]$$

である。

(35) の2根を $\alpha > \beta$ で表わす。

E の値により、積分の中の根の大小を分類する。

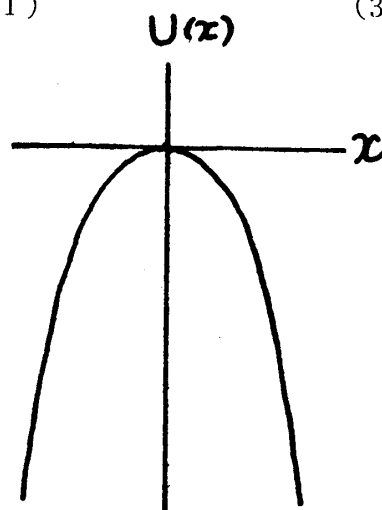


図3 [III] の振動子のポテンシャル

$$(1) \quad E > \frac{(2r+1)^2}{4r} > 2 \quad (r \neq \frac{1}{2}) \quad \alpha, \beta \text{ 虚根}$$

$$E > 2 \quad (r = \frac{1}{2})$$

$$(2) \quad \frac{(2r+1)^2}{4r} > E > 2 \quad (r \neq \frac{1}{2}) \quad r > \frac{1}{2} \quad 1 > \alpha > \beta > -2$$

$$r < \frac{1}{2} \quad 1 > -1 > \alpha > \beta$$

$$(3) \quad E = 2 \quad r > \frac{1}{2} \quad 1 > \alpha > -1 = \beta$$

$$r < \frac{1}{2} \quad 1 > \alpha = -1 > \beta$$

$$r = \frac{1}{2} \quad \alpha = \beta = -1$$

$$(4) \quad 2 > E > 0 \quad 1 > \alpha > -1 > \beta$$

$$(5) \quad E = 0 \quad \alpha = 1 > -1 > \beta$$

$$(6) \quad E < 0 \quad \alpha > 1 > -1 > \beta$$

積分は

$$\int \frac{dy}{\sqrt{(y+1)(y-1)(y-\alpha)(y-\beta)}} = \int dt \quad (36)$$

以下結果を列举する。

$$(1) \quad y = \frac{1 - c_1 \operatorname{cn} \omega_1 t}{\operatorname{cn} \omega_1 t - c_1} \quad (37)$$

$$c_1 = E - 1 - \sqrt{E(E+2)}, \quad \omega_1^2 = 2\sqrt{E(E-2)}$$

$$k^2 = \frac{E - (2r+1) + \sqrt{E(E-2)}}{2\sqrt{E(E-2)}} \quad (38)$$

$$(2) \quad r > \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{1 - \alpha c_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}{1 - c_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t} \quad (39)$$

鯖田 秀樹

$$c_2 = \frac{2}{\alpha+1}, \quad \omega_2^2 = \frac{1}{2} [2r+1-E+\sqrt{(2r+1)^2-4Er}]$$

$$k^2 = \frac{2(\alpha-\beta)}{(1-\beta)(\alpha+1)} \quad (40)$$

$$r < \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{1 - c_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}{1 + c_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t} \quad (41)$$

$$c_3 = \frac{1-\beta}{1+\beta}, \quad \omega_3^2 = \frac{1}{2} [2r+1-E-\sqrt{(2r+1)^2-4Er}]$$

$$k^2 = \frac{(1+\alpha)(1-\beta)}{(1-\alpha)(1+\beta)} \quad (42)$$

(3) この場合はポテンシャルの形からわかるように定性的には特異なことはおこらない。定量的には(2), (4)の解の $\lim$ でよいが、楕円関数が双曲線関数に変わる。有限の短い時間で質点は ∞ に達する。

$$(4) \quad y = \frac{1 - \alpha c_4 \operatorname{sn}^2 \omega_4 t}{1 - c_4 \operatorname{sn}^2 \omega_4 t} \quad (43)$$

$$c_4 = \frac{1-\beta}{\alpha-\beta}, \quad \omega_4^2 = \sqrt{(2r+1)^2-4Er}, \quad k^2 = \frac{(\alpha+1)(1-\beta)}{2(\alpha-\beta)} \quad (44)$$

$$(5) \quad y = \frac{(2r+1) \tanh^2(\sqrt{2r+1} t + \epsilon) - 2(r+1)}{2r - (2r+1) \tanh^2(\sqrt{2r+1} t + \epsilon)} \quad (45)$$

$$(6) \quad y = \frac{\operatorname{sn}^2 \omega_2 t - \alpha c_5}{\operatorname{sn}^2 \omega_2 t - c_5} \quad (46)$$

$$c_5 = \frac{1-\beta}{\alpha-\beta}, \quad \omega_2, k^2 \text{ は (40) 式に同じ。}$$

$$[IV] \quad \ddot{x} = -\sinh x - r \sinh 2x \quad (r > 0) \quad (47)$$

ポテンシャルは

$$U(x) = (\cosh x - 1) + r (\cosh^2 x - 1) \quad (48)$$

である。グラフは図 4 に示す。

$\dot{x}^2 = 0$ になる根 y は

$$y \equiv \cosh x = \frac{1}{2r} \left[-1 \pm \sqrt{(2r+1) + 4Er} \right] \quad (49)$$

である。2 根を $\alpha > \beta$ とする。

$E > 0$ の場合だけを考えたらい。

解は

$$y = \frac{1 + d \operatorname{sn}^2 \omega t}{1 - d \operatorname{sn}^2 \omega t} \quad (50)$$

$$d = \frac{\alpha+1}{\alpha-1}, \quad \omega^2 = \frac{1}{2} \left[2r+1+E+\sqrt{(2r+1)^2+4Er} \right] \quad (51)$$

$$k^2 = \frac{(\alpha-1)(\beta+1)}{(\alpha+1)(\beta-1)}$$

となる。 $\alpha > 1 > -1 > \beta$ であるから x についても相異なる 2 実根をもつ。振動解である。

以上 4 つの振動子とも解の中に ϵ が現われていない場合は $t=0$ で $y=1$, $x=0$ にとつてある。 ϵ が現われている場合は $x=0$ が平衡点になるときで、初期条件を原点以外のところにえらび $t \rightarrow \infty$ で原点に達する解を現わしている。この解は他の解のパラメーターを変えても得られない。

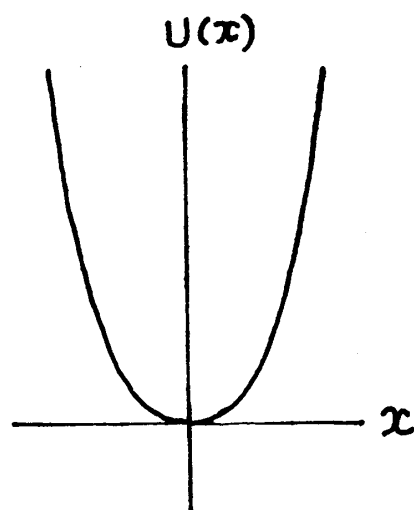


図 4 [IV] の振動子のポテンシャル

§ 3. 2 次の sin-振動子

$$[I] \quad \ddot{x} = \sin x - r \sin 2x \quad (r > 0) \quad (52)$$

ポテンシャルは

$$U(x) = \cos x - 1 + r(1 - \cos^2 x) \quad (53)$$

鯖田 秀樹

で、グラフは図5である。

$\dot{x}^2 = 0$ の根は $\sinh$ - 振動子の [II] に対応している。

E の値で分類する。

$$(1) \quad E > \frac{(2r-1)^2}{4r} \geq 0$$

α, β 虚根 等号は $r = \frac{1}{2}$ のとき。

$$(2) \quad E = \frac{(2r-1)^2}{4r} \quad (r \neq \frac{1}{2})$$

$$\alpha = \beta = \frac{1}{2r} \begin{cases} r > \frac{1}{2} \\ r < \frac{1}{2} \end{cases}$$

$$(3) \quad \frac{(2r-1)^2}{4r} > E > 0 \quad (r \neq \frac{1}{2})$$

$$\alpha > \frac{1}{2} \quad 1 > \alpha > \beta > -1$$

$$r < \frac{1}{2} \quad \alpha > \beta > 1 > -1$$

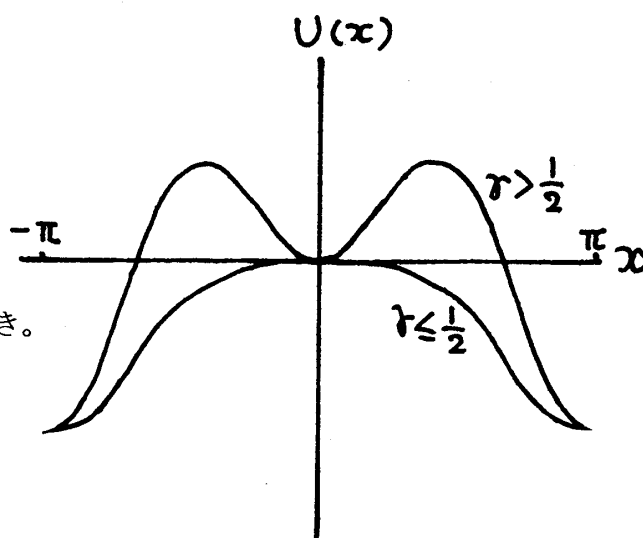


図5 [I] の振動子のポテンシャル

$E = 0$, $E < 0$ は [III] に含まれる。 $\sin$ - 振動子はポテンシャルが周期関数であるため、 $E > 0$ の場合だけを考えればよい。 $E \leq 0$ は他のタイプの振動子の $E > 0$ に対応するからである。

$\sinh$ - 振動子と異なり有限時間で ∞ になる解はなく、周期解か、 $t \rightarrow \infty$ である有限の位置に近づくか2種類だけである。

$y = \cos x$ とおくと積分は

$$- \int_1^y \frac{dy}{\sqrt{(1-y)(y+1)(y-\alpha)(y-\beta)}} = \sqrt{2r} \int_0^t dt \quad (54)$$

である。以下解を列举する。

$$(1) \quad y \equiv \cos x = \frac{\operatorname{cn} \omega_1 t - e_1}{1 - e_1 \operatorname{cn} \omega_1 t} \quad (55)$$

$$e_1 = \sqrt{E(E+2)} - (E+1), \quad \omega_1^2 = 2\sqrt{E(E+2)}$$

$$k^2 = \frac{(2r-1) - E + \sqrt{E(E+2)}}{2\sqrt{E(E+2)}}$$
(56)

$$(2) \quad r > \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{1 + 2r \operatorname{sech} \omega_1 t}{2r + \operatorname{sech} \omega_1 t}$$

$$\text{ここで} \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{4r^2 - 1}{2r}}$$

$$r < \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{2r + \cos \omega_1 t}{1 + 2r \cos \omega_1 t}$$
(57)

$$(3) \quad r > \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{1 + e_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}{1 - e_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}$$
(58)

$$e_2 = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}, \quad \omega_2^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r-1)^2 - 4Er} + 2r - 1 - E \right]$$
(59)

$$k^2 = \frac{(1-\alpha)(\beta+1)}{(1-\beta)(\alpha+1)}$$

$$r < \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{1 - \beta e_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}{1 - e_3 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}$$
(60)

$$e_3 = \frac{2}{\beta+1}, \quad \omega_3^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r-1)^2 - 4Er} + E + 1 - 2r \right]$$
(61)

$$k^2 = \frac{2(\alpha-\beta)}{(\alpha-1)(\beta+1)}$$

鯖田秀樹

〔Ⅱ〕

$$\ddot{x} = -\sin x + r \sin 2x \quad (62)$$

ポテンシャルは

$$U(x) = (1 - \cos x) + r(\cos^2 x - 1) \quad (63)$$

図示すると図6のようになる。

$\dot{x}^2 = 0$ とする y を $\alpha > \beta$ と

する。

積分は

$$\begin{aligned} - \int \frac{dy}{\sqrt{(1-y^2)(\alpha-y)(y-\beta)}} \\ = \sqrt{2r} \, dt \end{aligned} \quad (64)$$

となる。

E の値により分類する。〔Ⅱ〕 だけ例外的に $r > \frac{1}{2}$ のとき $E \leq 0$ を考える必要がある。2根は $\sinh$ -振動子の〔Ⅰ〕と同じである。

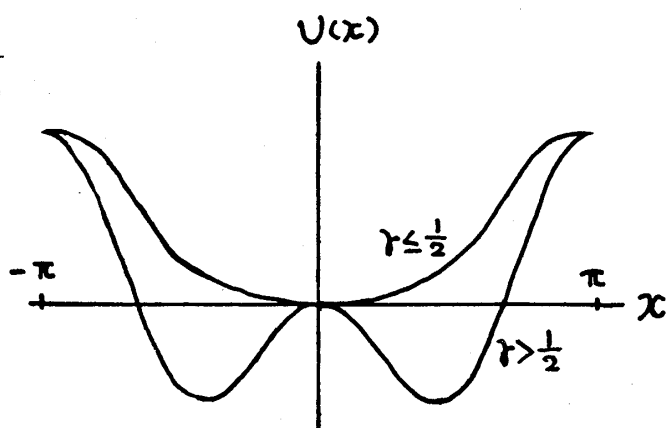


図6 〔Ⅱ〕の振動子のポテンシャル

$$(1) \quad E = 2 \quad \alpha > 1 > -1 = \beta$$

$$(2) \quad 2 > E > 0 \quad \alpha > 1 > \beta > -1$$

$$(3) \quad E = 0 \quad r > \frac{1}{2} \quad \alpha = 1 > \beta > -1$$

$$r \leq \frac{1}{2} \quad \text{平衡点のみで可動範囲は存在しない。}$$

$$(4) \quad 0 > E > U_{\min} \quad 1 > \alpha > \beta > -1$$

$$r > \frac{1}{2} \text{ のみ。}$$

つぎに解を列挙する。

$$(1) \quad y = \frac{(2r+1) - 2(r+1) \tanh^2(\sqrt{2r+1} \, t)}{(2r+1) - 2r \tanh^2(\sqrt{2r+1} \, t)} \quad (65)$$

$$(2) \quad y = \frac{1 - \alpha f_1 \operatorname{sn}^2 \omega_1 t}{1 - f_1 \operatorname{sn}^2 \omega_1 t} \quad (66)$$

$$f_1 = \frac{1-\beta}{\alpha-\beta}, \quad \omega_1^2 = \left[(2r-1)^2 + 4Er \right]^{\frac{1}{2}} \quad (67)$$

$$k^2 = \frac{(\alpha+1)(1-\beta)}{2(\alpha-\beta)}$$

(3) $r > \frac{1}{2}$ のときのみ。 $t=0$ で $y=\beta$ にとる。

$$y = \frac{2(1-r) + (2r-1) \tanh^2(\sqrt{2r-1} t)}{2r - (2r-1) \tanh^2(\sqrt{2r-1} t)} \quad (68)$$

$$(4) \quad y = \frac{\alpha - f_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}{1 - f_2 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t} \quad (69)$$

$$f_2 = \frac{\alpha-\beta}{1-\beta}, \quad \omega_2^2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2r-1)^2 + 4Er} + E + 2r - 1 \right]$$

$$k^2 = \frac{2(\alpha-\beta)}{(1-\beta)(\alpha+1)} \quad (70)$$

[III]

$$\ddot{x} = -\sin x - r \sin 2x$$

(71)

ポテンシャル関数は

$$U(x) = (1 - \cos x) + r(1 - \cos^2 x) \quad (72)$$

グラフは数 7 である。

$\dot{x}^2 = 0$ となる $y \equiv \cos x$ の根は

sinh-振動子の [III] と同じである。2 根

を $\alpha > \beta$ とする。

$r > \frac{1}{2}$ のときの $E > U_{\max}$, $r < \frac{1}{2}$ のときの $E > 2$ は [I] で考察ずみの解に含まれている。

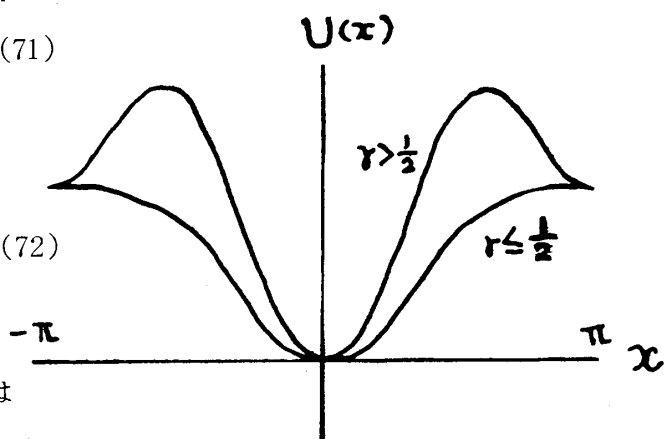


図 7 [III] の振動子のポテンシャル

鯖田 秀樹

$$(1) \quad r > \frac{1}{2} \quad \frac{(2r+1)^2}{4r} = E \quad 1 > \alpha = \beta > -1$$

$$(2) \quad r > \frac{1}{2} \quad \frac{(2r+1)^2}{4r} > E > 2 \quad 1 > \alpha > \beta > -1$$

$$(3) \quad E = 2 \quad 1 > \alpha = -1 \geq \beta \quad (r \leq \frac{1}{2}) \quad 1 > \alpha > \beta = -1 \quad (r > \frac{1}{2})$$

$$(4) \quad 2 > E > 0 \quad 1 > \alpha > -1 > \beta$$

上の4つの場合の解はつぎに列挙される。

$$(1) \quad y = \frac{(2r+1) - (2r-1) \tanh^2 \omega_1 t}{(2r+1) + (2r-1) \tanh^2 \omega_1 t} \quad (73)$$

$$\omega_1^2 = \frac{4r^2 - 1}{8r}$$

$$(2) \quad y = \frac{1 - g_1 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t}{1 + g_1 \operatorname{sn}^2 \omega_2 t} \quad (74)$$

$$g_1 = \frac{1-\alpha}{\alpha+1}, \quad \omega_2^2 = \frac{1}{2} [2r+1 - E + \sqrt{(2r+1)^2 - 4Er}] \quad (75)$$

$$k^2 = \frac{(1-\alpha)(\beta+1)}{(1-\beta)(\alpha+1)}$$

$$(3) \quad r > \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{(2r-1) - \sin^2(\sqrt{2r-1} t)}{(2r-1) + \sin^2(\sqrt{2r-1} t)} \quad (76)$$

$$r < \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{(2r-1) - 2(r-1) \tanh^2(\sqrt{2r-1} t)}{(2r-1) - 2r \tanh^2(\sqrt{2r-1} t)} \quad (77)$$

$$r = \frac{1}{2}$$

$$y = \frac{1 - t^2}{1 + t^2} \quad (78)$$

(4)

$$y = \frac{1 + \beta g_2 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t}{1 + g_2 \operatorname{sn}^2 \omega_3 t} \quad (79)$$

$$g_2 = \frac{1-\alpha}{\alpha-\beta}, \quad \omega_3^2 = \sqrt{(2r+1)^2 - 4Er} \quad (80)$$

$$k^2 = \frac{(1-\alpha)(\beta-1)}{2(\beta-\alpha)}$$

〔IV〕

$$\ddot{x} = \sin x + r \sin 2x \quad (81)$$

ポテンシャルは

$$U(x) = (\cos x - 1) + r(\cos^2 x - 1) \quad (82)$$

グラフは図 8 である。

$\dot{x}^2 = 0$ の根 $\alpha > \beta$ は sinh-振動子の〔IV〕と同じである。

積分は

$$\begin{aligned} -\int_1^y \frac{dy}{\sqrt{(1-y^2)(\alpha-y)(y-\beta)}} \\ = \sqrt{2r} t \end{aligned}$$

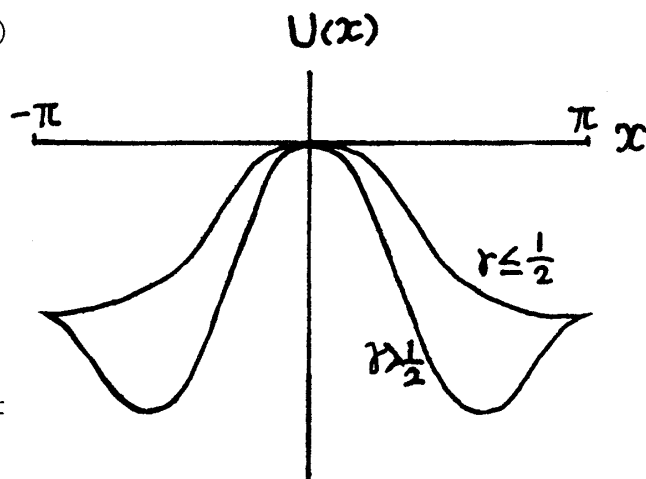


図 8 〔IV〕の振動子のポテンシャル

である。 $y \equiv \cos x$ で、 $t=0$ で $y=1$ ($x=0$) である。

$E < 0$ の場合は〔II〕の解に含まれているので、 $E > 0$ のみを考えたらよい。 r による分類も不要となる。解を書くと $\alpha > 1 > -1 > \beta$ なので

$$y = \frac{1 - \alpha h \operatorname{sn}^2 \omega t}{1 - h \operatorname{sn}^2 \omega t} \quad (83)$$

$$h = \frac{2}{\alpha+1}, \quad \omega^2 = \frac{1}{2} [2r+1+E+\sqrt{(2r+1)^2+4Er}] \quad (84)$$

鯖田 秀樹

$$k^2 = \frac{2(\alpha - \beta)}{(\alpha + 1)(1 - \beta)}$$

となる。

§ 4. おわりに

計算が意外に長くなり、2 次の sinh-振動子の熱膨張への応用は次の機会になった。公式の羅列になってしまったが、公式は万古不易のものだから、計算しておくことも必要だろう。

おわりに図の作成について、大阪教育大の中野恵子、木村貞弓両君にお世話になった。

参考文献

- 1) 戸田盛和： 振動論 培風館 (1968)
- 2) M. Toda : J. Phys. Soc. Japan 22 (1967) 431.
- 3) M. Toda : Prog. Theor. Phys., Suppl. 45 (1970) 174.

楢田関数については

友近 晋： 楢田関数論 共立出版

戸田盛和： 楢田関数入門 「数学セミナー」

(連載中)