

用リーマン面の動きについて

滋賀大 教育 山口博史

§0. 序論 \mathcal{D} は2次元の複素多様体, Δ は z -平面上の円板: $|z| < \rho$, π は \mathcal{D} から Δ の上への解析写像とある。triple $(\mathcal{D}, \Delta, \pi)$ は次の性質をもつとある。

i) $\pi: \mathcal{D} \rightarrow \Delta$ は submersion であって, 任意の $z \in \Delta$ に対して, $\pi^{-1}(z)$ は既約である;

ii) 任意の $z_0 \in \Delta$ に対して, z_0 の適当な近傍 $\Delta_0 (subset of \Delta)$ が存在して, \mathcal{D} の部分領域 $\pi^{-1}(\Delta_0)$ は Stein 多様体である。

各 $z \in \Delta$ に対して, $\pi^{-1}(z)$ は \mathcal{D} から自然に導かれる解析構造によって, 一変数の用リーマン面である。上の性質 i), ii) をもつ2つの triples $(\mathcal{D}_1, \Delta, \pi_1)$, $(\mathcal{D}_2, \Delta, \pi_2)$ を考える。今, φ は \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 の上への写像とする。この写像 φ が Δ -homeomorphisme (resp. Δ -difféomorphisme, resp. Δ -isomorphisme analytique) とは, φ が \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 への homeomorphisme (resp. difféomorphisme, resp. isomorphisme analytique) であって, $\pi_2 \circ \varphi = \pi_1$ をみたす, ときを言う。 φ が \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 への Δ -isomorphisme analytique

ならば, 明らかに, 任意の $z \in \Delta$ に対して, 2つの fibres $\pi_1^{-1}(z)$ と $\pi_2^{-1}(z)$ とは一変数リーマン面として同値である。この逆を問題としよう。

問題 上の性質 (i), (ii) をもつ 2つの triples $(\mathcal{D}_1, \Delta, \pi_1)$, $(\mathcal{D}_2, \Delta, \pi_2)$ を考える。今, 任意の $z \in \Delta$ に対して, 2つの fibres $\pi_1^{-1}(z)$ と $\pi_2^{-1}(z)$ とは一変数リーマン面として同値:

$$(*) \quad \pi_1^{-1}(z) \sim \pi_2^{-1}(z) \quad \text{ou} \quad \forall z \in \Delta$$

と仮定する。このとき, いくつかの条件のもとで \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 への Δ -isomorphisme analytique が存在するであろうか?

こゝでは, そのような Δ -isomorphisme analytique が存在するための, いくつかの十分条件をのべる。

§1. 直積の場合 Triple $(\mathcal{D}_2, \Delta, \pi_2)$ が直積の場合を考慮しよう, 即ち

$$(\mathcal{D}_2, \Delta, \pi_2) = (\Delta \times R, \Delta, p)$$

但し, R は一変数のリーマン面, p は $\Delta \times R$ から Δ への射影である。すぐわかるように, R が次の2つの場合には, 性質 (i), (ii) をもつ勝手な triple $(\mathcal{D}_1, \Delta, \pi_1)$ について, 上の条件 (*) は \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 への Δ -isomorphisme analytique の存在を導くとは限らない:

$$R \sim (|w| < 1) \quad \text{又は} \quad (0 < |w| < 1).$$

ところで、この場合を除けば、次が言える (参照 [8-(1)], p. 533)。

Case I R は、上の2つの場合を除く、任意のリーマン面とする。 $(\mathcal{Q}_1, \Delta, \pi_1)$ は性値 i , i_1 をもつ任意の triple であって、各 fibre $\pi_1^{-1}(z)$ ($z \in \Delta$) は R とリーマン面として同値と仮定する。このとき、 $(\mathcal{Q}_1, \Delta, \pi_1)$ から $(\Delta \times R, \Delta, p)$ への Δ -isomorphisme analytique が存在する。

§2. 境界が小さい場合 各 fibre $\mathcal{Q}_i(z)$ ($z \in \Delta, i=1, 2$) の境界が大きい場合には、たとえば、 $\mathcal{Q}_i(z)$ の種数や境界要素の数が ≥ 2 である、でも、条件(*) は \mathcal{Q}_1 から \mathcal{Q}_2 への Δ -isomorphisme analytique の存在を導くとは限らない。そこで、各 fibre $\mathcal{Q}_i(z)$ へ条件を加えてみよう：一般に、リーマン面 R がクラス \mathcal{O}_{AD} に属するとは、 R 上の任意の一価正則函数 $f(p)$ で

$$\iint_R \frac{i}{2} df \wedge \bar{d}\bar{f} < \infty$$

を満たすものは、定数に限るときを言う。次のことは良く知られてゐる (参照 Ahlfors-Sario [1], 才IV章)：

(1) \mathcal{O}_{AD} に属するリーマン面 R は、その“境界”が函数的意味において“小さい”

(ii) 開リ - z - 面の全体を函数論的に分類するとき, クラス O_{AD} は一つの重要な, "大きな" クラスである。

各 fibre $\mathcal{D}_i(z)$ が O_{AD} に属しているとき, 我々は次のことを言える (参照 [8-(2)]):

Case II 2つの triples $(\mathcal{D}_1, \Delta, \pi_1), (\mathcal{D}_2, \Delta, \pi_2)$ は性質 i), ii) をもち, 次の条件をみたすと仮定する,

a) φ は \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 への Δ -difféomorphisme であり, φ は各 fibre $\pi_1^{-1}(z)$ ($z \in \Delta$) に制限すれば, 解析的である:

$$\varphi(z, \cdot) : \pi_1^{-1}(z) \sim \pi_2^{-1}(z) \quad \text{où } z \in \Delta ;$$

b) $\pi_1^{-1}(z) \in O_{AD}$ ($\forall z \in \Delta$) ;

c) 各 fibre $\pi_1^{-1}(z)$ ($z \in \Delta$) の種数 ≥ 2 .

このとき, φ は \mathcal{D}_1 から \mathcal{D}_2 への Δ -isomorphisme analytique である。

Case II' triple $(\mathcal{D}, \Delta, \pi)$ は性質 i), ii) をもち, 次の条件をみたすと仮定する,

a)' 任意の $z_0 \in \Delta$ に対して, z_0 の近傍 $\Delta_0 (\subset \Delta)$ が存在して, \mathcal{D} の部分領域 $\pi^{-1}(\Delta_0)$ から, 直積 $(\Delta_0 \times D_0, \Delta_0, p)$ への Δ_0 -homéomorphisme が存在する;

b)' D_0 は平面領域である;

c)' $\pi^{-1}(z) \in O_{AD}$ ($\forall z \in \Delta$)

このとき, \mathcal{D} から直積 $(\Delta \times \mathbb{P}^1, \Delta, p)$ の適当な部分領域への Δ -isomorphisme analytique が存在する。

注意 1 T. Nishino は一連の論文 ([I] ~ [V] dans J. Math. Kyoto Univ. 1968 ~ 1975) にて, 2変数整函数 $f(x, y)$ の研究を, その定数面 $\{f(x, y) = z\}$ (但し $z \in \mathbb{C}$) を観察することによって, 行っている。更に, 次の問題を提示した:

問題 (T. Nishino) \mathbb{C}^2 の 2 つの整函数 $f(x, y), g(x, y)$ が与えられ, 任意の $z \in \mathbb{C}$ に対して, 2 つの方程式 $f(x, y) = z, g(x, y) = z$ によって定まる \mathbb{C}^2 の中の 2 つの定数面 (高々可算個の非リーマン面の集り) は一変数リーマン面として同値: $\{f(x, y) = z\} \sim \{g(x, y) = z\}$ ou $\forall z \in \Delta$, と仮定する。このとき, どのような条件のもとで $f = g \circ \psi$ となる \mathbb{C}^2 から \mathbb{C}^2 の上への解析変換 ψ が存在するであろうか?

本稿に述べていることを考える動機を与えたのは, この提示された問題である。さて, T. Nishino [6-(2)] は \mathbb{C}^2 の整函数の全体 (E) を分類した。 $f(x, y) \in E$ のうちで, 各定数面 $\{f(x, y) = z\}$ (但し $z \in \mathbb{C}$) の既約成分がリーマン面として, 楕円型となるような $f(x, y)$ の全体を考え, それを (P) と記した。ところで楕円型リーマン面はクラス O_{AD} に属するから, Case II によってほぼ「 $f(x, y), g(x, y) \in (P)$, 各定数面 $\{f(x, y) = z\}$ (但し $\forall z \in \Delta$) の種数が ≥ 2 という条件のもとでは, 上の問題にのべた ψ の存在が与えられる。」

注意 2 Case II' は, T. Nishino [6-(1)] の中の lemme fondamentale (即ち, Case II' の条件 b)' の D_0 が全平面 \mathbb{C} の場合である) を一般化したものであるが, これには次のような応用がある: 良く知られているように, P. Koebe (1910) は論文 [5] の中で,

円リマン面 S (但し種数 ≥ 2) の Schottky 被覆面 \tilde{S} はクラス O_{AD} に属する円リマン面で, \tilde{S} には単葉な有理型函数 $\varphi(p)$ が存在する。

ことを示している。今, 円リマン面 S_z がパラメータ $z \in \Delta$ とともに 解析的に 変化してゆくと仮定しよう。各 S_z の Schottky 被覆面を \tilde{S}_z とし, p を $\tilde{S}_z \rightarrow z \in \Delta$ なる射影として,

$$\text{triple } \left(\bigcup_{z \in \Delta} \tilde{S}_z, \Delta, p \right)$$

を考えよう。これは性質 i), ii) 及び上の3つの条件 a)', b)', c)' を満たすことは明らかである。従って Case II' から「各 Schottky 被覆面 \tilde{S}_z (但し $z \in \Delta$) 上の単葉な有理型函数 $\varphi_z(p)$ で, パラメータ $z \in \Delta$ について解析的であるものが存在する。」ことがわかる。これは L. Bers [2-(1), (2)], Hejhal [3] と関連をもつ事実である。

§ 3. Koebe 領域の場合 各 fibre $D_i(z)$ (où $z \in \Delta, i=1, 2$)

の境界が大きし、特別の場合を考えよう。P. Koebe [5] は次のことを示した:

N 個の境界要素をもつ平面領域は、常にリーマン球面 $P^1 = (|w| \leq \infty)$ から N 個の互いに交わらなしい円板又は点を除いた残りの領域に一対一解析的に写される。更に、後者のような領域は P^1 の一次変換を除き一意に定まる。

これに因んで、§3 では便宜上、次の定義を設けよう:

定義 球面 P^1 から互いに交わらなしい有限個の円板又は点を除いた残りの領域を Koebe 領域と言う。

Case III をのべるために良く知られた次の定義をのべよう:
 Ω は直積 $\Delta \times P^1$ (但し $\Delta = (|z| < \rho)$, $P^1 = (|w| \leq \infty)$) の部分領域であつて、境界は滑らかとする。即ち、 Ω のある近傍 $(C \Delta \times P^1)$ で定義された C^2 -クラスの实数値函数 $\varphi(z, w)$ があり、次の条件をみたす:

$$\Omega = \{ (z, w) \in \Delta \times P^1 : \varphi(z, w) < 0 \}$$

$$\partial\Omega = \{ (z, w) \in \Delta \times P^1 : \varphi(z, w) = 0 \}$$

定義 上の如き Ω が両面擬凸状領域であるとは、 Ω を定義する、上ののべた函数 φ の Levi form $L\varphi$ が $\partial\Omega$ 上で零であるときと言う、即ち

$$\begin{aligned} L\varphi &= \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial \bar{z}} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial w} \right|^2 - 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial w} \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{w}} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right\} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial w \partial \bar{w}} \left| \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|^2 \\ &= 0 \quad \text{sur } \varphi = 0 \end{aligned}$$

Case III $\mathcal{D}_1, \mathcal{D}_2$ は直積 $\Delta \times P^1$ の部分領域であって, 各 fibre $\mathcal{D}_i(z)$ ($\forall z \in \Delta, i=1, 2$) は P^1 の Koebe 領域とある:

$$\mathcal{D}_i(z) = P^1 - \sum_{j=1}^N [C_{ij}(z)],$$

$$[C_{ij}(z)] = \text{中心 } a_{ij}(z), \text{ 半径 } r_{ij}(z) \text{ の円板}$$

更に次の条件を置く,

$$(a) \quad N \geq 3;$$

(b) $\mathcal{D}_1, \mathcal{D}_2$ は両面擬凸状領域である。

このとき, 各 $z \in \Delta$ に対して, $\mathcal{D}_1(z)$ と $\mathcal{D}_2(z)$ が解析的同値: $\mathcal{D}_1(z) \sim \mathcal{D}_2(z)$ ($\forall z \in \Delta$) ならば, \mathcal{D}_1 と \mathcal{D}_2 とは複素 2 次元の領域として, 解析的同値である。

証明の概略を述べよう:

(1). まず上にのべた Koebe の定理の後半, および $\mathcal{D}_1(z) \sim \mathcal{D}_2(z)$ という仮定より, $\mathcal{D}_1(z)$ から $\mathcal{D}_2(z)$ への一对一解析写像 $\varphi(z, w)$ は次の形である:

$$\varphi(z, w) = \frac{\alpha(z)w + \beta(z)}{\gamma(z)w + \delta(z)} \quad (\text{但し } \alpha\delta - \beta\gamma = 1 \text{ sur } \Delta)$$

更に条件 (a) からこのおなじな $\varphi(z, w)$ は一般には一意的に定まる。従って, 我々の目的は条件 (b) のもとで係数 $\alpha(z), \beta(z), \gamma(z), \delta(z)$ が $z \in \Delta$ について解析的であることを示すことである。

(2). 単純な計算を行うことにより次を得る。

補題 1 Ω は $\Delta \times P^1$ の部分領域であって, 各 fibre $\Omega(z)$ ($\forall z \in \Delta$) が Koebe 領域:

$$\Omega(z) = P^1 - \sum_{j=1}^N [C_j(z)]$$

$[C_j(z)]$ は中心 $a_j(z)$, 半径 $r_j(z)$ の円板,

と仮定する。このとき, Ω が両面擬凸状領域であるのは, 二つの函数 $\{a_j(z), r_j(z)\}$ (但し $\forall z \in \Delta, \forall j = 1, 2, \dots, N$) が Δ での連立微分方程式をみたすときに限る,

$$(E) \begin{cases} \left| \frac{\partial a}{\partial \bar{z}} \right|^2 + \left| \frac{\partial r}{\partial \bar{z}} \right|^2 = r \frac{\partial^2 r}{\partial z \partial \bar{z}} \\ r \frac{\partial^2 a}{\partial z \partial \bar{z}} = 2 \frac{\partial a}{\partial \bar{z}} \cdot \frac{\partial r}{\partial z} \end{cases}$$

さらに, 方程式 (E) をみたす解は次の二つの場合に戻る:

(E1): 中心 $a(z)$ は Δ で正則であり, 半径の対数 $\log r(z)$ は Δ で調和である;

(E2): Δ での二つの正則函数 $f(z), \zeta(z)$ (但し $f(z) \neq 0$ or $\forall z \in \Delta$) 及び非線型微分方程式

$$(E^*) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \bar{z}} = e^{2u}$$

をみたす Δ での実数値函数 $u(z)$ が存在して, 中心 $a(z)$, 半径 $r(z)$ は次の様に一意的に表現される:

$$\begin{cases} r(z) = \frac{e^{u(z)}}{|f(z)|} \\ a(z) = \frac{\partial u}{\partial \bar{z}} / f(z) + \zeta(z) \end{cases}$$

(3). Levi form = 0 を Koebe 領域の場合に計算することによつて生じた非線型微分方程式 (E^*) は色々の分野に現われてきて、各々の目的に沿つて詳しく調べられている。

良く知られているように、 z -平面上の境界のある領域では、(E^*) の境界値問題の解の存在と一意性が成立する。また、ポアソナは論文 (1898) "Les fonctions fuchsienues et l'équation $\Delta u = e^u$ " において、 x と y との間に多項式の関係 $f(x, y) = 0$ があるとき、二階線型微分方程式 $\frac{d^2 v}{dx^2} = \varphi(x, y) v$ の全体を考え、これを quelques types に分類すると「各 type には、必ず Fuchs 函数より生じるものが唯一つ存在する。」ことを示している。この証明では、 $f(x, y) = 0$ によつて定まる円リーマン面上に singularités を与えるとき、さきの (E^*) を少し変形した微分方程式を積分することがなされている。また、微分幾何学の Kazdan-Warner [4] の一連の仕事も、(E^*) を変形した微分方程式と取り扱っている。

我々の目的のためには、(E^*) の解の次の性質が必要である。

補題 2 微分方程式 $\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \bar{z}} = e^{2u}$ の、円板 Δ の C^2 -クラスの任意の解 $u(z)$ は常に次の形で表わせる：

$$u(z) = \log \frac{|g(z)|}{1 - |g(z)|^2} \quad \text{ou } z \in \Delta$$

但し、 $g(z)$ は Δ の正則函数で、 $g(0) = 0$ 、 $|g(z)| < 1$ sur Δ である。

補題 3 $u_1(z), u_2(z), v_1(z), v_2(z)$ は円板 Δ で定義された C^2 -クラスの 4 つの実数値関数であって、微分方程式 $\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \bar{z}} = e^{2u}$ をみたすと仮定する。このとき

$$e^{2u_1} + e^{2u_2} = e^{2v_1} + e^{2v_2} \quad \text{sur } \Delta$$

ならば、 $u_1 = v_1, u_2 = v_2$ sur Δ 又は $u_1 = v_2, u_2 = v_1$ sur Δ である。

注意 3 補題 2 によつて、補題 3 は次と同値である：

di-cylindre $D^2 = (|w_1| < 1) \times (|w_2| < 1)$ に非ユークリッド距離： $ds^2 = \frac{|dw_1|^2}{(1-|w_1|^2)^2} + \frac{|dw_2|^2}{(1-|w_2|^2)^2}$ を入れるとき、 $\Sigma = \Delta$ の円板 Δ の埋め込みは rigide である。

(4)。まづ (1) にのべた $f(z, w)$ の係数のうちで、 $\gamma(z) = 0$ sur Δ という特別の場合には、上の補題 1, 2, 3 によつて、 $\alpha(z), \beta(z), \delta(z)$ の $z \in \Delta$ についての解析性を証明できる。次に $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ が \bar{z} について高々一次式の場合には、 $\gamma(z) = 0$ sur Δ の場合に帰着されることが次の補題でわかる。

補題 4 $\Delta \times P^1 \longrightarrow \Delta \times P^1$ への次の写像を考える：

$$z = \bar{z}, \quad W = \frac{\alpha(z)w + \beta(z)}{\gamma(z)w + \delta(z)}.$$

これによつて、 $\Delta \times P^1$ の section $w = \xi(z)$ ($z \in \Delta$) が $\Delta \times P^1$ の section $W = \eta(z)$ ($z \in \Delta$) に写つてゆくと

する, 即ち

$$\eta(z) = \frac{\alpha(z)\zeta(z) + \beta(z)}{\gamma(z)\zeta(z) + \delta(z)} \quad \text{où } z \in \Delta.$$

このとき, 2つの sections ζ, η が θ に解析的であるのは, $\zeta(z)$ (où $z \in \Delta$) が次をみたすときに限る,

$$\frac{\alpha\zeta + \beta}{\gamma\zeta + \delta} = \frac{\alpha_{\bar{z}}\zeta + \beta_{\bar{z}}}{\gamma_{\bar{z}}\zeta + \delta_{\bar{z}}} = \frac{\alpha_{\bar{z}\bar{z}}\zeta + \beta_{\bar{z}\bar{z}}}{\gamma_{\bar{z}\bar{z}}\zeta + \delta_{\bar{z}\bar{z}}} \quad \text{sur } \Delta.$$

特に, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ が \bar{z} について高々一次式ならば上をみたす $\zeta(z)$ (où $z \in \Delta$) が少なくとも一つ存在する。

(5). 最後に $\varphi(z, w)$ の係数が一般の場合には, 次の補題によつて各係数が高々 \bar{z} について一次式であるような $\varphi_1(z, w)$ によつて近似させて, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ の解析性を証明する。

補題5 $z \in \Delta$ を固定するとき, w について z の任意の一次変換: $\varphi(z, w) = (\alpha(z)w + \beta(z)) / (\gamma(z)w + \delta(z))$ を考える。 $z = 0$ の近傍で各係数を Taylor 展開する:

$$\alpha(z) = \alpha_{00} + \alpha_{10}z + \alpha_{01}\bar{z} + \alpha_{11}z\bar{z} + A(z) \quad (= \alpha_1(z) + A(z) \text{ とおく}),$$

$$\vdots$$

$$\delta(z) = \delta_{00} + \delta_{10}z + \delta_{01}\bar{z} + \delta_{11}z\bar{z} + D(z) \quad (= \delta_1(z) + D(z) \text{ とおく}).$$

$z = z_0$, $\varphi(z, w)$ の次の近似一次変換: $\varphi_1(z, w) = (\alpha_1(z)w + \beta_1(z)) / (\gamma_1(z)w + \delta_1(z))$ を考える。 $z \in \Delta$ を固定するとき, 一次変換 $\varphi(z, w)$ 及 w $\varphi_1(z, w)$ による, 単位円 $C = \{|w| = 1\}$ の像

を各々 $C(z)$, $C_1(z)$:

$C(z)$ = 中心 $a(z)$, 半径 $r(z)$ の円

$C_1(z)$ = 中心 $a_1(z)$, 半径 $r_1(z)$ の円

と書こう。このとき, 2つの函数 $\{a(z), r(z)\}$ が補題1でのバタ連立微分方程式 (E) を原点 $z=0$ でみたすのは, $\{a_1(z), r_1(z)\}$ が (E) を原点でみたすときに限る。

文献

- [1] L.V. Ahlfors - L. Sario, Riemann surfaces, Princeton Univ Press, 1960, 382 p..
- [2] L. Bers, (1) Bull. Amer. Math. Soc., 66 (1960), p. 98-103.
(2) Int. conf. on Riemann surfaces and Discontinuous Groups, Maryland (1973), p. 43-55.
- [3] D. Hejhal, Advances Math., 15 (1975), p. 133-156.
- [4] J. Kazdan - F. Warner, Bull. Amer. Math. Soc., 78 (1972)
- [5] P. Koebe, Math. Annal., 69 (1910), p. 1-81.
- [6] T. Nishino, (1) J. Math. Kyoto Univ., 9 (1969) p. 221-274, (2) *ibid.* 13 (1973) p. 217-272.
- [7] H. Poincaré, Oeuvres, tome II (1952) p. 512-591.
- [8] H. Yamaguchi, (1) J. Math. Kyoto Univ., 16 (1976) p. 497-

530. (2) C.R. Acad. Sci. Paris, 286 (1978), p. 1121-1124.

1978年11月6日