

極小部分多様体の安定性について

富山大 教育 森 博

§1.

M^m を orientable m 次元 Riemann 多様体, \bar{M}^n を n 次元 Riemann 多様体, $x: M^m \rightarrow \bar{M}^n$ を minimal immersion とする。いま $D \subset M^m$ を closure compact な領域 (i.e. D は M^m の open, connected subset で, その closure \bar{D} は compact である) で, その境界 ∂D が, 区分的に滑らかであるとする (もちろん D が, M^m に等しい場合も考えることができる)。 ∂D を固定する trivial でない任意の変分 φ_t (ただし $\varphi_0 = x$) について

$$\frac{d}{dt} \text{Volume } \varphi_t(D) \Big|_{t=0} = 0$$

であるが,

$$\frac{d^2}{dt^2} \text{Volume } \varphi_t(D) \Big|_{t=0} > 0$$

が、常に成り立つとき、 D は、安定しているという。

ここでの目的は、上記のような D の安定性に関する結果を述べることである。

1973年 M. de Carmo と J. L. Barbosa の両氏は、次の興味ある結果を得た。

定理 1 ([1]). $x: M^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$, $g: M^2 \rightarrow S^2 \subset \mathbb{R}^3$ を \mathbb{R}^3 内の minimal surface と、その Gauss map を表わすものとする。 $D \subset M^2$ を closure compact な領域で、その境界が、有限個の区分的に滑らかな曲線から成り立っているものとする。

このとき、 $\text{Area } g(D) < 2\pi$ ならば、 D は安定である。

続いて、1974年 J. Spruck 氏が、定理 1 の拡張を試み、J. Spruck と D. Hoffman の両氏によって得られた Sobolev の不等式 [5] を利用して、次の結果を得た。

定理 2 ([18]). $x: M^2 \rightarrow \mathbb{R}^n (n > 3)$ を minimal immersion とし、 D を上記の性質を有するものとする。このとき、正定数 C_1 があり、 $\int_D |K| dV < C_1$ ならば D は安定である。

ただし、 K は、 M の Gauss 曲率、 dV は M の area element を表わす。(こゝに、 $C_1 = \frac{1}{54\pi}$)

定理3 ([18]). $x: M^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ ($m \geq 3, n \geq 4$) を *minimal immersion* とし、 D を上記の性質を有するものとする。このとき、 m のみに依存する正定数 $C_2(m)$ があり、

$(\int_D \|B\|^m dV)^{\frac{1}{m}} < C_2(m)$ ならば、 D は、安定である。ただし、 B は M^m の第二基本形式で、 $\|B\|$ は、その *norm* を表わし、 dV は、 M^m の *volume element* を表わす。

$$(ここに、 $C_2(m) = 2^{-m} \frac{m-2}{(1+m)^{\frac{1+m}{m}}} \omega_m^{\frac{1}{m}}$)$$

注意. Spruck 氏は、定理2の定数 C_1 を n に依存する正定数のように書いてありますが、[5] の Sobolev の不等式を検討してみると、上記のような定数になることがわかる。

ここで、ambient space \bar{M}^n が、一般の Riemann 多様体である場合を考えてみることにする。

定理4 ([10]). \bar{M}^n ($n \geq 4$) を完備、単連結で、断面曲率が $-\theta^2 \leq \bar{K}_\sigma \leq -\delta\theta^2$ ($0 \leq \theta, 0 < \delta \leq 1$) を満たす n 次元 Riemann 多様体とし、 M^m ($m \geq 3$) をその m 次元 *minimal submanifold*, DCM^m を *closure compact* な領域で、境界 ∂D が、区分的に滑らかであるとする。 D 上の関数 f を $f(p) = \text{Max.} \{0, \|B\|^2(p) - m\delta\theta^2\}$ ($p \in D$) によって定める。このとき、 m のみに依存する正数 $d_1(m)$ があって、

(10)
 $\left(\int_D f^{\frac{m}{2}} dV\right)^{\frac{1}{m}} < d_1(m)$ ならば、 D は安定である。(ここに、 $d_1(m)$ は、定理3の定数 $C_2(m)$ に等しい。)

注意、定理4において、 $\theta = 0$ の場合、定理3に帰着する。

定理5 ([10]). M^n ($n \geq 4$) を断面曲率 \bar{K}_0 が、 $0 < \bar{K}_0 \leq \theta^2$ ($\theta > 0$) を満たし、injectivity radius の M における下限 $\bar{R}(M^m)$ が、 $\bar{R}(M^m) \geq \frac{\pi}{\theta}$ を満たす n 次元 Riemann 多様体とし、 M^m ($m \geq 3$) をその minimal submanifold とし、 D を定理4と同じ性質をもつものとする。このとき、 m にのみ依存する正定数 $d_2(m)$ があって、 $\left[\int_D (\|B\|^2 + m\theta^2)^{\frac{m}{2}} dV\right]^{\frac{1}{m}} < d_2(m)$ ならば、 D は安定である。(ここに、 $d_2(m) = \frac{1}{\pi} 2^{\frac{1-m}{2}} \frac{m-2}{(m+1)^{1+\frac{1}{m}}} \omega_m^{\frac{1}{m}}$)

更に、3次元単位球面 S^3 内の minimal surface の領域の安定性について、次のことが、成立する。

定理6 ([11]). M^2 を3次元単位球面 S^3 内の minimal surface で、その Gauss 曲率 K が、 $K \leq \frac{a-4}{a-2}$ ($a \geq 4$) を満たしているものとする。 D を定理1と同じ性質をもつものとする。このとき $\int_D (1-K) dV < \frac{1}{27\pi a}$ ならば、 D は、安定である。

定理6の応用として、Plateau問題の解に関するある結果が得られる。まず、 $x: D(\mathbb{R}^2 \text{の単位球面}) \rightarrow S^3$ が、 $C^2(\bar{D})$ 写像で、 D において、harmonicかつconformalとし、 $x|_{\partial D}$ は、 ∂D から、 S^3 内の C^2 級 Jordan curve Γ への、homeomorphismを与えたとする。 K を D から、写像 x の singularitiesを除いた所で、定義される曲面の Gauss 曲率とする。すると Gauss-Bonnet の公式と R.D. Gulliver 氏[3]の結果を用いると次のことが、成立する。

系([11]) $x: D(\mathbb{R}^2 \text{の単位球体}) \rightarrow S^3$ を S^3 内の C^2 級 Jordan curve Γ に対する Plateau 問題の解とする。上記の K が、 $K \leq \frac{a-4}{a-2}$ ($a \geq 4$) を満たすものとする。このとき、 $\text{Area } x(D) + \int_{\Gamma} k(s) ds < 2\pi + \frac{1}{27\pi a}$ ならば、 (D, x) は、安定である。ここに $\int_{\Gamma} k(s) ds$ は、 Γ の total curvature を表わす。

§2.

以下定理5の証明の概略を述べることにする。

\bar{M}^n を n 次元 C^∞ Riemann 多様体とし、その Riemann 計量と Riemann 接続をそれぞれ \langle, \rangle , ∇ とする。 $M = M^m$ を m 次元 orientable C^∞ 多様体、 $x: M \rightarrow \bar{M}^n$ を minimal

immersion とし、 $\langle \cdot, \cdot \rangle$, ∇ をそれぞれ x によって、
 induce された M の Riemann 計量, Riemann 接続とする。 TM, NM
 をそれぞれ M の tangent bundle, normal bundle とし、
 TM_p, NM_p ($p \in M$) をそれぞれ点 p における M の tangent
 space, normal space とする。このとき、 M の第二基本形
 式 B は、対応 $B: TM \times TM \rightarrow NM$ で、 $B(X, Y) = \bar{\nabla}_X Y - \nabla_X Y$
 $= (\bar{\nabla}_X Y)^\perp$, $X, Y \in TM$, によって与えられる。ここに、
 $(\cdot)^\perp$ は、 M の tangent vector を M の normal space
 \wedge 射影することを表わす。

次に第二変分公式を導くために、いくつかの定義をする。
 まず、 $E \in NM_p$ に対して、 $\|B(E)\|^2 = \sum_{i, j} (\langle B(e_i, e_j), E \rangle)^2$
 とおく。ここに、 $\{e_i\}$ は、 TM_p の orthonormal basis である。
 更に、 $\|B\| = (\sum_k \|B(E_k)\|^2)^{\frac{1}{2}}$ とおく。ここに $\{E_k\}$ は、
 NM_p の orthonormal basis である。 $\|B\|$ は、 orthonormal
 bases の取り方に依らないという意味において、 well-defined
 である。 $\|B\|$ を第二基本形式 B の norm と呼ぶ。

$\Gamma(NM)$ を NM の C^∞ cross-sections の作る vector space
 とし、 Laplace operator $\Delta: \Gamma(NM) \rightarrow \Gamma(NM)$ の定義を
 M の normal connection ∇^\perp を用いて、

$$(\Delta V)(p) = \sum_j \left\{ \nabla_{e_j}^\perp \nabla_{e_j}^\perp V - \langle \nabla_{e_j}^\perp e_j, V \rangle \right\}(p)$$

$\nu \in NM_p$ による。与える。ここで $\{e_j\}$ は TM_p の *orthonormal basis* である。

\bar{R} を \bar{M}^n の *curvature tensor* とするとき、

$$\bar{R}(X) = \sum_j \bar{R} e_j X e_j, \quad X \in T\bar{M}_p$$

と定める。ここで、 $\{e_j\}$ は TM_p の *orthonormal basis* とする。

$D \subset M^m$ を *closure compact* な領域で、その境界 ∂D は、区分的に滑らかであるとする。 $E \in \mathcal{F}(TM)$ を $E|_D$ は、 D 上の *normal vector field*, $E|_{\partial D} \equiv 0$ とし、 \mathcal{F}_t を $(\bar{M}^n$ 内の) D の近傍において、 E による生成される *flow* とし、

$A(t) = \text{Volume } \mathcal{F}_t(D)$ とおく。このとき第一変分公式は、次の式で表わされる。

$$\left. \frac{d^2 A}{dt^2} \right|_{t=0} = - \int_D \{ \langle E, \Delta E \rangle + \|B(E)\|^2 - \langle \bar{R}(E), E \rangle \} dV$$

そこで、 $E = u\nu$ (ν は、 D 上の *unit normal vector field*, u は、 \bar{D} 上の C^∞ function で、 ∂D 上で *vanish* する) とおいて、上の変分公式を書き直すと、次の *lemma* が成立する。

Lemma 1. \bar{M}^n, M^m, D は、定理 5 の仮定を満たすとする。

このとき、

$$\left. \frac{d^2 A}{dt^2} \right|_{t=0} \geq - \int_D \{ u \Delta u + (\|B\|^2 + mb^2) u^2 \} dV$$

$$= \int_D \{ |\nabla u|^2 - (\|B\|^2 + mb^2) u^2 \} dV$$

が、成立する。ここに ∇u は、 u の gradient vector field である。

定理5の正定数 $d_2(m)$ の存在は、次の Lemma から、わかる。

Lemma 2. M^n , M , D は、定理5と同じとする。 h を \bar{D} 上で、non-negative C^1 級関数 h 、 ∂D 上で、vanish するものとする。 α のとき、

$$\left[\int_D h^{\frac{2m}{m-2}} dV \right]^{\frac{m-2}{2m}} \leq d_2^{-1} \left(\int_D |\nabla h|^2 dV \right)^{\frac{1}{2}}$$

が、成立する。ただし、次の条件を満たすものとする。

$$(i) \ \theta \left[\frac{\text{Vol}(\text{supp } h)}{(1-\alpha) \omega_m} \right]^{\frac{1}{m}} \leq \frac{1}{2}, \quad (ii) \ 2\rho \leq \bar{R}(M^m)$$

$$\text{ここに、} \ \rho = \frac{1}{\theta} \sin^{-1} \left[2\theta \left(\frac{\text{Vol}(\text{supp } h)}{(1-\alpha) \omega_m} \right)^{\frac{1}{m}} \right],$$

$$d_2 = d_2(m, \alpha) = \frac{1}{\pi} 2^{1-m} \alpha (1-\alpha)^{\frac{1}{m} \frac{m-2}{m}} \omega_m^{\frac{1}{m}}, \quad \alpha \text{ は、}$$

$0 < \alpha < 1$ なる free parameter, ω_m は、 \mathbb{R}^m の単位球体の体積とする。

注意. $d_2(m, d)$ は $d = \frac{m}{m+1}$ のとき 最大値をとり、更に定理5の $d_2(m)$ に等しい。この仮定 " \bar{D} 上で C^1 級である" を " $h \in H_1^0(D)$ " に代えても成立する。ここに $H_1^0(D)$ は Sobolev space である。また容易に、定理5の条件から、lemma 2の条件 (i), (ii) が満たされることがわかる。J. Spruck と D. Hoffmann の両氏の得た Sobolev の不等式の証明に gap がありますが、上記の lemma 2は、その gap を補正した後に適用することにより、得たものである。

定理5の証明

D が安定であることを示すには、lemma 1によって、

仮定 $\left(\int_D (\|B\|^2 + mb^2)^{\frac{m}{2}} dV \right)^{\frac{1}{m}} < d_2(m)$ から、

$$(1) \int_D (\|B\|^2 + mb^2) u^2 dV < \int_D |\nabla u|^2 dV$$

for all $u \neq 0$ in $H_1^0(D)$

であることを示すとよい。このことを背理法を用いて示す。つまり、

$$(2) \int_D |\nabla u|^2 dV \leq \int_D (\|B\|^2 + mb^2) u^2 dV$$

for some $u \neq 0$ in $H_1^0(D)$

であると仮定して矛盾を導く。Sobolev space $H_1^0(D)$ の性質から不等式(2)における u が " $u \geq 0$ on \bar{D} " であるとしてよい。すると lemma 2 の注意から、

$$(3) \left(\int_D u^{\frac{2m}{m-2}} dV \right)^{\frac{m-2}{2m}} \leq d_2(m)^{-1} \left(\int_D |\nabla u|^2 dV \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2), (3) と Hölder の不等式から、

$$\begin{aligned} \left(\int_D u^{\frac{2m}{m-2}} dV \right)^{\frac{m-2}{2m}} &\leq d_2(m)^{-1} \left(\int_D (\|B\|^2 + m\ell^2) u^2 dV \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq d_2(m)^{-1} \left[\left(\int_D (\|B\|^2 + m\ell^2)^{\frac{m}{2}} dV \right)^{\frac{2}{m}} \left(\int_D u^{\frac{2m}{m-2}} dV \right)^{\frac{m-2}{m}} \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

従って、

$$\left(\int_D (\|B\|^2 + m\ell^2)^{\frac{m}{2}} dV \right)^{\frac{1}{m}} \geq d_2(m)$$

となり、矛盾が生ずる。故に定理5が示されたことになる。

§3.

定理5の例を述べることにする。まず、ambient space \bar{M}^n を標準的 Riemann 計量を持つ $(m+1)$ 次元単位球面 S^{m+1} ($n=m+1$) とする。 \bar{M}^{m+1} は明らかに、 $\ell=1$ に対して、定理5の仮定を満たしている (i.e. $K_0 \equiv 1$ かつ $R(M) \equiv \pi$)。

次に、 $0 < \alpha < 1$ なる実数 α に対して、

$$\Sigma_\alpha^m = \{x = (x^1, \dots, x^{m+1}) \in S^m : x^{m+1} \geq \alpha\}$$

とおく。ここに S^m は m 次元単位球面とする。このとき、 Σ_α^m は S^{m+1} の compact orientable, n 次元 totally geodesic submanifold で、境界 $\partial \Sigma_\alpha^m = \{x = (x^1, \dots, x^{m+1}) \in S^m : x^{m+1} = \alpha\}$ を持つ。他方 $\text{Vol } \Sigma_\alpha^m$ は α に関する単調減少、連続関数で、 $\alpha \rightarrow 1$ のとき $\text{Vol } \Sigma_\alpha^m \rightarrow 0$ である。

従って、定理5の条件、つまり、

$$\left(\int_{\Sigma_\alpha^m} (\|B\|^2 + m)^{\frac{m}{2}} dV \right)^{\frac{1}{m}} = m^{\frac{1}{2}} (\text{Vol } \Sigma_\alpha^m)^{\frac{1}{m}} < d_2(m)$$

を満たす α が存在する。故に、ある α ($0 < \alpha < 1$) が存在し、
 “ S^{m+1} 内に、境界を持つ compact orientable, m 次元 totally geodesic (ゆえに故 minimal) submanifold Σ_α^m が、安定である” が成立する。次に別の例を構成するため、
 \mathbb{R}^{m+2} を \mathbb{R}^{p+1} と \mathbb{R}^{q+1} の直積と考え、

$$\Sigma_\alpha^p(r) = \{x = (x^1, \dots, x^{p+1}) \in S^p(r) : x^{p+1} \geq \alpha\}$$

$$\Sigma_\beta^q(\rho) = \{y = (y^1, \dots, y^{q+1}) \in S^q(\rho) : y^{q+1} \geq \beta\}$$

とおく。ここに $p+q=m$; $r, \rho > 0$, $r^2 + \rho^2 = 1$; $0 < \alpha, \beta < 1$ であり、 $S^p(r)$ は \mathbb{R}^{p+1} の原点を中心とする半径 r の球面とし、 $S^q(\rho)$ についても同様とする。

このとき $M := \Sigma_\alpha^p(r) \times \Sigma_\beta^q(\rho)$ は S^{m+1} 内の compact

orientable submanifold で、その境界は、

$$(\partial \Sigma_\alpha^p(r) \times \Sigma_\beta^q(\rho)) \cup (\Sigma_\alpha^p(r) \times \partial \Sigma_\beta^q(\rho)) \text{ である。}$$

と 3 で、 M の 第 1 基本形式 B は、固有値として、

$$\frac{\rho}{r} \text{ (multiplicity } p) \text{ と、 } -\frac{r}{\rho} \text{ (multiplicity } q) \text{ を持つから、}$$

M が、minimal であるための必要十分条件は、 $r = \sqrt{\frac{p}{m}}$,
 $\rho = \sqrt{\frac{q}{m}}$ である。よって、 M が、minimal であるならば、

$\|B\|^2 = m$ となる。従って、先程の例の構成の議論から、定理 5 の条件、つまり、

$$\left(\int_{\Sigma_\alpha^p(\sqrt{\frac{p}{m}}) \times \Sigma_\beta^q(\sqrt{\frac{q}{m}})} (\|B\|^2 + m)^{\frac{m}{2}} dV \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$= (2m)^{\frac{1}{2}} \text{Vol } \Sigma_\alpha^p(\sqrt{\frac{p}{m}}) \cdot \text{Vol } \Sigma_\beta^q(\sqrt{\frac{q}{m}}) < d_2(m)$$

を満たす、 α, β が、存在する。故に、ある α, β

($0 < \alpha, \beta < 1$) が、存在して、“ S^{m+1} 内は、境界を持つ、

compact orientable m 次元 minimal submanifold

$\Sigma_\alpha^p(\sqrt{\frac{p}{m}}) \times \Sigma_\beta^q(\sqrt{\frac{q}{m}})$ が、安定である。”が、成立する。

この minimal submanifold は、明らかに、totally geodesic ではない。

References

- [1] J. L. Barbosa and M. do Carmo, On the size of a stable minimal surface in R^3 , preprint (1973).
- [2] S. S. Chern, Minimal submanifolds in a Riemannian manifold, Mimeographed Lecture Notes, Univ. of Kansas, 1968.
- [3] R. D. Gulliver II, Regularity of minimizing surfaces prescribed mean curvature, Ann. of Math., Vol.97 (1973), 275 - 305.
- [4] E. Heinz and S. Hildebrandt, Some remarks on minimal surfaces in Riemannian manifolds, Comm. Pure and Appl. Math., Vol.23 (1970), 371 - 377.
- [5] D. Hoffman and J. Spruck, Sobolev and isoperimetric inequalities for Riemannian submanifolds, Comm. Pure and Appl. Math., Vol.27 (1974), 715 - 727.
- [6] ———, A correction to [5], Comm. Pure and Appl. Math., Vol.28 (1975), 765 - 766.
- [7] S. Kobayashi and K. Nomizu, Foundations of differential geometry, Vol.II, Interscience, New York, 1969.
- [8] H. B. Lawson, Jr., Minimal varieties in constant curvature manifolds, Ph. D. thesis, Stanford Univ., 1968.
- [9] ———, Minimal Varieties in Real and Complex Geometry, Univ. of Montréal Press, Montréal, 1973.
- [10] H. Mori, Notes on the stability of minimal submanifolds of Riemannian manifolds, preprint (1975).

- [11] H. Mori, A note on the stability of minimal surfaces of 3-dimensional unit sphere, preprint (1976).
- [12] C. B. Morrey, Jr., Multiple Integrals in the Calculus of Variations, Springer - Verlag, New York, 1966.
- [13] R. Osserman, A proof of the regularity everywhere of the classical solution to Plateau's problem, Ann. of Math., Vol.91 (1970), 550 - 569.
- [14] T. Ōtsuki, A remark on the Sobolev inequality for Riemannian submanifolds, Proc. Japan Acad., Vol.51 (1975), 785 - 789.
- [15] S. Sasaki, Differential Geometry in the large (in Japanese), Shibundō, Tokyo, 1957.
- [16] ————, On the total curvature of a closed curve, Japan J. Math., Vol.29 (1959), 118 - 125.
- [17] J. Simons, Minimal varieties in Riemannian manifolds, Ann. of Math., Vol.88 (1968), 62 - 105.
- [18] J. Spruck, Remarks on the stability of minimal submanifolds of R^n , preprint (1974).