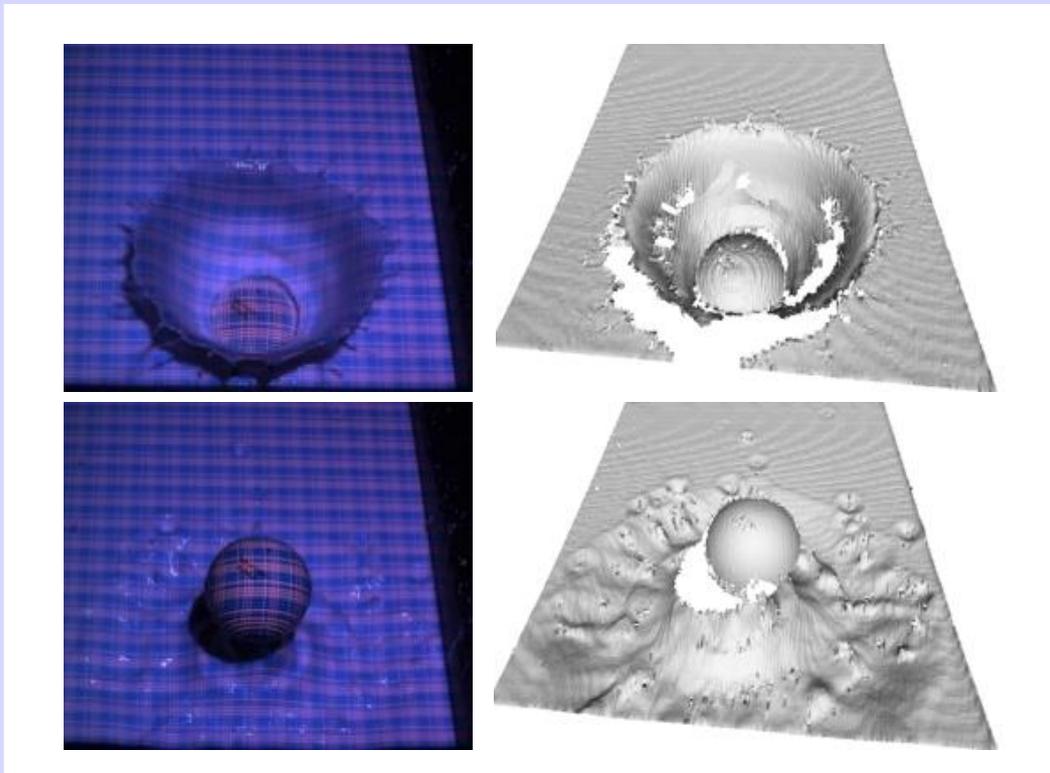


形の科学会誌

第31巻 第2号 2016

BULLETIN OF THE SOCIETY FOR SCIENCE ON FORM



形の科学会

<http://katachi-jp.com/>

目次

【論文】

内外圧力差による弾性円管の座屈

高木隆司 38

面積保存方向保存写像における同周期分岐と周期軌道の安定性の交代

山口喜博 51

【解説論文】

構造化光投影による3次元計測の分類とワンショット動体形状計測法

佐川立昌, 川崎洋, 古川亮 65

【書評】

山口喜博・谷川清隆「馬蹄への道－2次元写像力学系入門－」

関口昌由 77

【シンポジウム】

第82回形の科学シンポジウム「産業技術とかたち」

プログラム 80

第80回形の科学シンポジウム「スポーツ・パフォーマンスに現れる形」

討議記録 84

第81回形の科学シンポジウム「量子科学とかたち」

討議記録 93

【会告など】

会告 99

形の科学会誌の原稿募集 107

内外圧力差による弾性円管の座屈

高木隆司

〒248-0014 鎌倉市由比ガ浜 2-23-12

E-mail: jr.takaki@iris.ocn.ne.jp

Buckling of an elastic tube owing to pressure difference

Ryuji Takaki

2-23-12 Yuigahama, Kamakura, Kanagawa 248-0014, Japan

(2016年7月7日受付, 2016年8月8日受理)

Abstract: An elastic circular tube under a pressure from outside begins to collapse to have a cross sectional shape similar to the ellipse, when the pressure exceeds a certain value. This phenomenon is called “buckling”. In this paper the ratio of longer and shorter diameters of the ellipse-like shape of the cross section is analyzed theoretically based on the mechanics of elastic bodies. This study is motivated by a need of theoretical works in the field of clinical medicine, where the collapse of vein by the outside pressure is a matter of interest.

Keywords: Elastic tube, Pressure difference, Buckling, Nonlinear analysis

1. はじめに

一般に座屈とは、弾性体に加える力を徐々に強めたとき、それがある臨界値を越えると突然大きく変形する現象を指す。その代表的なものは、まっすぐな棒に縦方向に加える力を強めたとき、突然湾曲し始める現象である。この問題については、弾性体力学についての多くの教科書で解説されている(文献1)。本論文で問題にする現象は、弾性体でできた円管の内圧を外圧より低くした場合、圧力差がある臨界値を越すと円管の断面形が円形からずれてつぶれが起きるといふ現象であり、座屈の一種と考えることができる。これらの問題は、従来は、建築工学や機械工学の分野で関心をもたれていたが、最近では生体内の血管や機関の変形の問題に関連して、医学分野でも注目されている。

円管の座屈について機械工学で問題にされた現象は、ある容器内の空気を真空ポンプで抜くときに、パイプの設計を間違えるとパイプがつぶれることがあった。この現象については、座屈が起きる臨界圧力差 Δp_c が、次のように求められている(文献2, 3)。

$$\Delta p_c = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{D}{R_0} \right)^3 \quad (1.1)$$

ここで、 E は物質の弾性の強さを表すヤング率である。ヤング率の値は、ゴムでは $E = (1.5 \sim 5.0) \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、金属などの硬い物質では $E = (5 \sim 20) \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ である。 ν はポアソン比と呼ばれる物質定数で、弾性体のある方向に伸ばしてそれと垂直な方向に縮んだと

き、伸びに対する縮みの割合である。その値は、全ての物質で $0 \leq \nu \leq 0.5$ の範囲にあり、ゴムでは $\nu = 0.5$ に近い。 D は管の壁の厚さ、 R_0 は円管の半径（外径と内径の平均）である。

一方、 Δp_c 以上の圧力差を与えて座屈が始まったとき、円形からどの程度ゆがむかという問題がある。この問題では、管の変形を表す量について非線形の解析をしなければならないので、数学的な困難が伴う。この問題については、Levy によって一般的な定式化が提案された（文献 4）。変形が比較的弱い場合について Carrier によって解析されている（文献 5）。変形後の形については、Tadjbakhsh & Odeh によって、変形が大きい場合も含めて数値解析を用いた結果が得られている（文献 6）。

ところで、本研究の動機は、臨床医学の分野において静脈血管内外の圧力差を管のつぶれの程度から推定したいという希望があり、それを可能にするための理論結果が望まれていることであった（文献 7）。そこで、本研究の目的を、管の変形に対して大胆な仮定を導入しながら、生体に関するいろいろなパラメータを変数として含んだままで、数値解析に頼らずに理論結果を提示することとした。実際の測定においては、変形した血管の長半径と短半径を測定することは容易である。それと比較するために、変形した血管の断面形を楕円形に近い形と仮定し、変形の程度を表す変数について単純化された非線形の方程式を導くという方針を設定した。

なお、生体内の管でも生体外でも、管の内部に流れが生じている場合があり、それが管の変形に影響を及ぼすことが考えられる。この問題は、問題の複雑さを避けるために考慮しないことにし、文献を紹介するにとどめる（文献 8, 9）。

以下では、第 2 節で弾性体力学の基礎的事項として、円管の外部に圧力をかけて円形のままで変形したとき、変形の強さがどのように決まるかという問題について解説する。それから、座屈が起きたときの変形の定性的な様子を述べ、第 3 節以降で展開する非線形理論の前提を説明する。

2. 管の変形についての基礎的な事項

2.1. 弾性変形の基本法則

無限に長い円管に外側から圧力差 Δp が加わったとき、円管が円形のままで縮んだとする。ただし、圧力差をかける以前の円管には内部にひずみがなく、円管を変形させたとき初めてひずみが現れると仮定する。そのとき、半径 R_0 はどれだけ減少するかという問題を考えてみよう。図 2.1 のように、圧力差 Δp によってその半径が ΔR_0 だけ減少したとする。このとき管の上半分の長さ πR_0 は $\pi \Delta R_0$ だけ減少する。この減少は、円管の下側が線分 AB で表した断面を通して上側を押し力によって生じると考えることもできる。今、円管のうち軸方向に長さ W をもつ部分を考え、それにかかる力を考える。その力は、円管の下側にかかる圧力の上方向成分の合計であり、 $2R_0 \Delta p$ に等しい。円管の上側と下側の境界は左右 2 つあり、その片方（断面 AB）には、その半分の力 $R_0 \Delta p$ がかかっている。

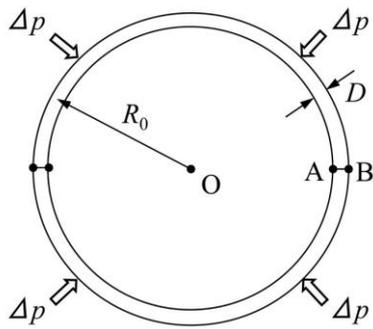


図 2.1 圧力 Δp による円管の縮小

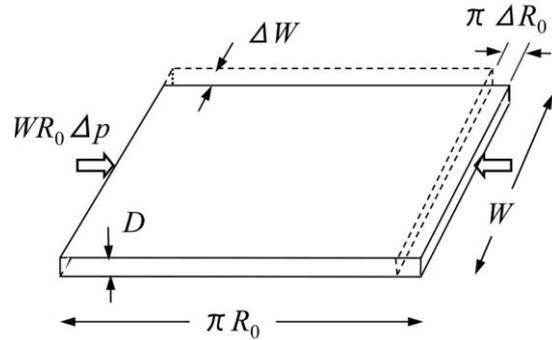


図 2.2 円管の変形を平板の縮小とみなす

ここで求めた力は常に円管の周方向に働いているので、この事情は、図 2.2 のように長さ $\pi\Delta R_0$ 、奥行き W 、厚さ D の平板に両側から $WR_0\Delta p$ の力がかかり、そのために $\pi\Delta R_0$ だけ縮む場合と同じである。このとき、縮む割合 $\Delta R_0/R_0$ と力との関係は、ヤング率 E を用いて次式で与えられる。

$$\text{力} = WR_0\Delta p = E \frac{\Delta R_0}{R_0} WD, \quad \text{したがって} \quad \Delta p = E \frac{\Delta R_0}{R_0} \cdot \frac{D}{R_0} \quad (2.1)$$

なお、断面 AB 内に働く圧力は Δp よりはるかに強く、(2.1)の左の式で表した力を幅 WD で割ったものであり、 $E \cdot \Delta R_0/R_0$ に等しい。

第 1 節で述べたように、弾性体が圧力によってある方向に縮むとその垂直方向に伸びる傾向があり、奥行き方向の長さ（円管では軸方向の長さ） W に対する伸び ΔW の割合は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta W}{W} = \nu \frac{\Delta R_0}{R_0} \quad (2.2)$$

ここでは、無限に長い円管を考え、奥行き方向（中心軸方向）の伸び縮みがないと仮定しているので、その方向に $\Delta W/W$ の割合の縮みを与える必要がある。その結果新たに円周方向に $\nu \cdot \Delta W/W = \nu^2 \cdot \Delta R_0/R_0$ の割合の伸びが生じる。結局、円周方向の縮みの割合は、このあらたな伸びだけ減少し、 $(1 - \nu^2)\Delta R_0/R_0$ となってしまう。そこで、 $\Delta R_0/R_0$ の割合の伸びを生むには、 Δp を $1/(1 - \nu^2)$ 倍だけ強くする必要がある。結局、圧力と伸びの割合との関係は、次式で与えられる。

$$\Delta p = \frac{E}{1 - \nu^2} \frac{\Delta R_0}{R_0} \cdot \frac{D}{R_0} \quad (2.3)$$

以上は、加えた圧力差によって円管は半径を減少させるだけで座屈は起きない場合の結果である。

2.2. 座屈が起きた場合の考え方

圧力が (1.1) 式で与えられる圧力 Δp_c を超えると何がおきるかということ、まず定性的に予想してみよう。

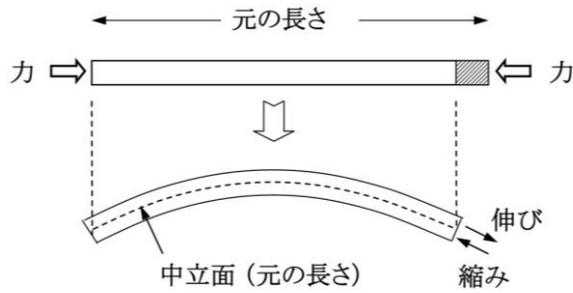


図 2.3 縮んだ平板から曲板への転移

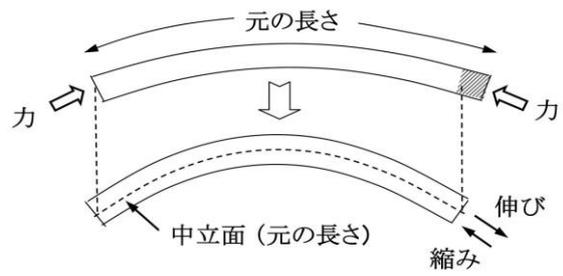


図 2.4 縮んだ円管からより強く曲がった管への転移

管の断面が円形からずれると、いままで考えてきた円周方向の伸び縮みから、板の曲げという状態に転移する。図 2.3 の上側のように平板を左右に圧縮したとき（斜線部分が縮んだ部分）、座屈によって図 2.3 下側のように円弧状に曲がると、板の内部で伸び縮みの分布が生じる。その際、厚さ方向の中央の面（中立面、図中の点線）は伸び縮みせず、上側の伸びと下側の縮みの組み合わせになる。この場合、縮む部分と伸びる部分のそれぞれの体積変化は、平面のまま縮む（上側の図）に比べてはるかに小さい。したがって、板は弾性変形を最小にするように平板から曲板に転移し、上側の図のような全体的な縮みが解消する。これが座屈の仕組みである。

円管の断面が楕円形に近い形に転移する現象も、同じように理解できる。図 2.4 の上側は、円管が円形のまま縮む場合の、その一部分の変化であり、斜線部分だけ縮んでいる。下側の図は、座屈が起きたために管の一部が強く曲がり、内部で伸び縮みの分布が生じ、同時に全体的な伸びが解消した場合を表す。この場合、管の断面形が全体として楕円形に近い形になるので、図 2.4 の部分から離れた所では、より平板に近づく部分もある。ただし、周囲全体の長さは、圧力差 Δp を加える前の円管の周囲長に戻り、そのために図 2.3 の場合と同じように弾性変形が最小の状態になる。

以上から、座屈が起きる圧力差のもとでは、円管は強く曲がった部分をもつ楕円形に近い形になり、管のどの部分も周方向の長さが変化しないような状態に転移すると仮定してよい。

2.3. 弾性変形に伴うエネルギーの増加

2.2 節で「弾性変形が最小になる」という表現を使ったが、より正確には「弾性変形のエネルギーが最小になる」というべきである。弾性体の変形を求める方法として、外から加えられた力（外力）と弾性変形による復元力が釣りあうという考え方と、弾性変形によって弾性体内部に蓄えられたエネルギーと外力がする仕事によって蓄えられたエネルギーの和が最小になるという考え方の2つがある。本論文であつかう問題では、後者の考え方がより容易である。まず、簡単な例によって、これら2つの考え方が同じ結果を導くことを示すことにする。

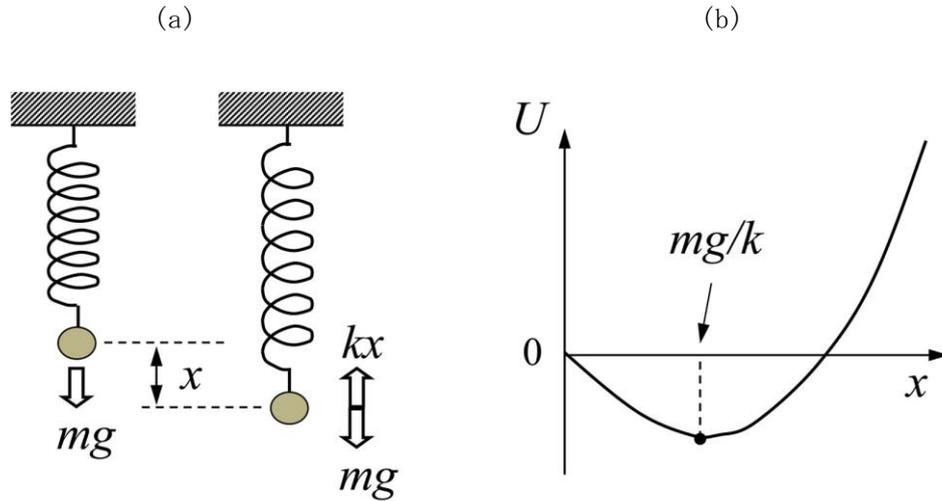


図 2.5 (a)重りによるバネの伸び、(b)エネルギー最小の原理からの解法。

図 2.5(a)は、バネ定数 k のバネでつるされた重さ m の重りが、 x だけ伸びてつりあっている状態を示す。このとき、復元力 kx が重力 mg と等しいということから、伸びは $x = mg/k$ となる。この結果をエネルギーの考え方で求めてみよう。伸びによる弾性変形のエネルギー U_e は $kx^2/2$ で与えられる。重力の位置エネルギー U_g は力と落下距離の積で与えられ、 $U_g = -mgx$ となる。これらの和 $U = kx^2/2 - mgx$ を最小にするような x の値は、図 2.5(b)に示すように、 U を x で微分したものが0になるという条件で求められる。

$$\frac{dU}{dx} = kx - mg = 0, \quad \Rightarrow \quad x = \frac{mg}{k} \quad (2.4)$$

結局、力のつり合いの式を使うことと、弾性エネルギーと重力エネルギーの和を最小にすることは同じ結果に導くのである。

ここで、円管の一部がその曲率を変えた場合について、その部分の弾性エネルギーを表す式を導いておく。図 2.6 は、変形前（曲率半径 R_0 ）と変形後（曲率半径分布 $R(s)$ ）の管の一部分を示し、点線で示した中立面はどちらも ds という短い同じ長さをもつ（上で仮定したように、円管が座屈を起こしても周囲方向の長さが変化しないことに対応する）。ここで、この中立面から測った厚さ方向の座標 z を導入する。

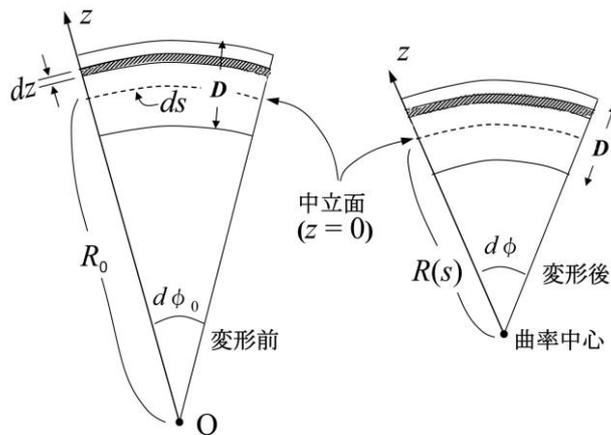


図 2.6 厚さ D の管壁の微小部分。左：変形前、右：変形後。斜線部分の伸び縮みを考える。

z の位置にある厚さ dz の薄い部分では、変形前の長さ l は $(R_0 + z)d\phi_0$ であり、伸び dl は

$$dl = (R_c + z)d\phi - (R_0 + z)d\phi_0 = z(d\phi - d\phi_0) = z\left(\frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_0}\right)ds \quad (2.5)$$

で与えられ、この伸びによる弾性エネルギーは、

$$dU_e = \frac{E}{2}\left(\frac{dl}{l}\right)^2 xV \quad (2.6)$$

である。これは、バネの伸びの弾性エネルギー $kx^2/2$ と類推の形をもつ。ただし、連続に分布する弾性体なので、エネルギーは微小部分の体積 V にも比例する。このエネルギーを円管のすべての部分で積分したものが、全弾性エネルギー U_e である。

一方、変形を引き起こした圧力差 Δp がした仕事 U_p は、円管の変形に伴う内部体積の変化と圧力差との積で与えられる。これらのエネルギーの具体的な表現は、変形後の管の形を導入した後で示す。

3. 管の変形の数学的表現とエネルギー増加の評価

3.1. 理論解析のための仮定

本論文で仮定することを、すでに述べたことも含めて箇条書きで示す。

- (1) 座屈によって管壁は曲るだけで、周方向の伸び縮みはない。
- (2) 管壁の厚さ D や軸方向の長さは変化しない。これは、図 2.6(b)に示したように、曲げによって中立面の上側は伸び下側は縮んでいるので、両方の効果が打ち消しあうことから理解できる。
- (3) 変形前には内部ひずみはなく、弾性力は働いていない。
- (4) 管壁の厚さ D は管半径 R_0 に比べてはるかに小さい(解析を容易にするための仮定)。

3.2. 管の座屈変形を表す変数を導入する

図 3.1 に示すように、管の周囲方向に沿って計った長さ s を独立変数とし、管の形を原点から管壁までの距離 $R(s)$ で表す。変形前は $R(s) = R_0$ である。管は変形後も上下左右の対称性を保つと仮定し、管の 1/4 の部分 ($0 < s < \pi R_0/2$) を解析の対象とする。管が大きく変形しても周方向の長さは一定と仮定しているため、独立変数 s の範囲が一定であり、解析が容易になる。図 2.6(a), (b)に示したのは、この図で原点および曲率中心を含む扇形の部分である。なお、変形後の管壁は円形ではないので、図 2.6(b)は正確には扇形ではない。しかし、角度 $d\phi$ が微小なので扇形とみなしてよい。上の仮定(4)から、図 3.1 の管壁の厚さは小さく、図 2.6 の点線の長さ ds が図 3.1 の ds に対応する。

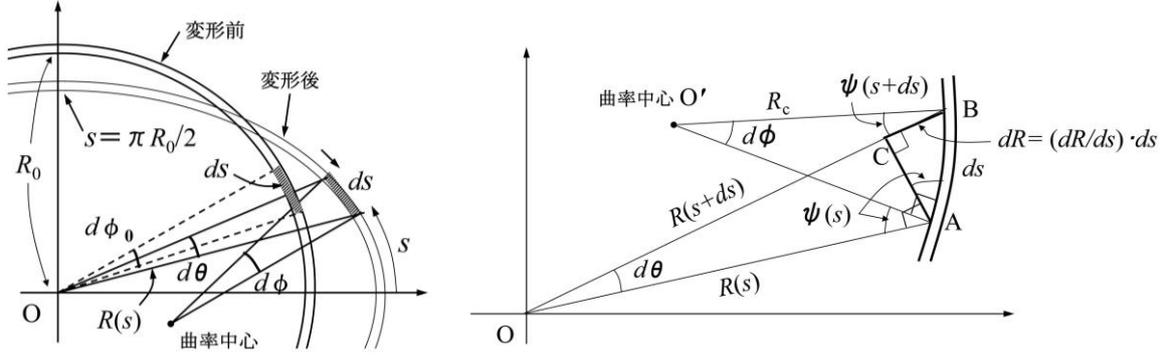


図 3.1 曲げに関する定数や変数 図 3.2 R_c と $R(s)$ の関係。右側は円弧部分の拡大図

ここで、式(2.5)で与えた伸び dl を、変形後の半径分布 $R(s)$ によって表す式を導く。図 3.2 に示すように、中心 O から微小な弧 ds を見る角度 $d\theta$ (図 3.1 の $d\theta$ と同じ)、中心 O からの半径と曲率中心からの半径の間の角度 ψ を導入する。 ψ は、 A 点と B 点とでわずかに異なり、それぞれ $\psi(s)$ 、 $\psi(s + ds)$ と表す。このとき、多少の計算の後に次式が導かれる (Appendix 1 参照)。

$$\frac{d\psi}{ds} = \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} \quad (3.1)$$

図 3.2 からわかるように、 $d\phi + \psi(s + ds) = d\theta + \psi(s)$ であり、微分の公式 $\psi(s + ds) - \psi(s) = \frac{d\psi}{ds} ds$ を使うと、次式が導かれる。

$$d\phi = d\theta + \psi(s) - \psi(s + ds) = d\theta - \frac{d\psi}{ds} ds = \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} \right) ds$$

これから弧 AB の曲率が次のように表される。

$$\frac{1}{R_c} = \frac{d\phi}{ds} = \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} \right) \quad (3.2)$$

3.3. 座屈後の弾性エネルギー増加 U_e を求める

管軸方向の長さ 1 の部分について、座屈変形後の弾性エネルギーを求める。まず、図 2.6(a) と図 2.6(b) における斜線部分の長さの差、すなわち式 (2.5) の伸び dl を、関数 $R(s)$ を用いて次のように表す。

$$dl = z \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} - \frac{1}{R_0} \right) ds \quad (3.3)$$

式(2.6)の中の分母 l は正確には $(R_c + z)d\phi_0$ であるが、仮定(4)から $l = ds$ とした。一方、長さ ds 、厚さ dz をもつ図 2.3 の斜線部分の体積は $V = dz \cdot ds$ なので、その部分の弾性エネルギーは

$$dU_e = \frac{E}{2} \left(\frac{dl}{ds} \right)^2 \times dz \cdot ds = \frac{E}{2} \cdot z^2 \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} - \frac{1}{R_0} \right)^2 \times dz \cdot ds$$

となる。これを図 2.6 に示した $(-D/2, D/2)$ の範囲で z について積分すれば、長さ ds の部分のエネルギーが次のように求められる。

$$dU_e = \frac{ED^3}{24} \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} - \frac{1}{R_0} \right)^2 ds$$

これを s について $(0, \pi R_0/2)$ の範囲で積分すれば、全弾性エネルギー U_e が次の積分形で求められる。

$$U_e = \frac{ED^3}{24} \int_0^{\pi R_0/2} \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} - \frac{1}{R_0} \right)^2 \cdot ds \quad (3.4)$$

3.4. 座屈後の全エネルギーを求める

変形した管内の体積は、奥行きが1であるので、図 3.2 の扇形 OAB の面積の合計である。これは三角形 OAC の合計とほとんど等しいので、 $R(s) \cdot AC/2$ を積分すればよい。ACについては Appendix A の式(A1)を用いれば、変形の前後的で体積変化が次の式で表される。

$$\text{体積変化} = \int_0^{\pi R_0/2} \frac{1}{2} R(s) \cdot \sqrt{1 - (dR/ds)^2} ds - \frac{1}{4} \pi R_0^2 \leq 0 \quad (3.5)$$

圧力差 Δp のもとで体積変化が起きると、それに伴うエネルギーの変化は Δp と体積変化の積である。今の場合は体積変化がマイナスの値をもつので、その値は下記のようにマイナスになる。

$$U_p = \Delta p \cdot \left[\int_0^{\pi R_0/2} \frac{1}{2} R(s) \cdot \sqrt{1 - (dR/ds)^2} ds - \frac{1}{4} \pi R_0^2 \right] \leq 0 \quad (3.6)$$

結局、全エネルギー U は、 U_e と U_p の和であり、

$$U = \frac{ED^3}{24} \int_0^{\pi R_0/2} \left(\frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2} - \frac{1}{R_0} \right)^2 \cdot ds \quad (3.7)$$

$$+ \Delta p \cdot \left[\int_0^{\pi R_0/2} \frac{1}{2} R(s) \cdot \sqrt{1 - (dR/ds)^2} ds - \frac{1}{4} \pi R_0^2 \right]$$

となる。この U の値を最も小さくするような関数 $R(s)$ を求めれば、管の変形が求められる。

4. 変形した管の近似解

4.1. 変数の無次元化

以下では、数式展開の煩雑化を減らすために、変数 $R(s)$ 、 s 、 U を次のように無次元化する。

$$R(s) = R_0 R^*(s^*), \quad s = R_0 s^*, \quad U = \frac{ED^3}{24R_0} U^* \quad (4.1)$$

*をつけた変数は、割合を表す無次元量である。前節の U の式の両辺を $ED^3/24R_0$ で割ると、

$$U^* = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{\sqrt{1 - (dR^*/ds^*)^2}}{R^*} - \frac{d^2R^*}{ds^{*2}} / \sqrt{1 - (dR^*/ds^*)^2} - 1 \right)^2 \cdot ds^* \quad (4.2)$$

$$+ \Delta p C \cdot \left[\int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} R^* \cdot \sqrt{1 - (dR^*/ds^*)^2} ds - \frac{1}{4} \pi \right]$$

となる。 $C = \frac{24R_0}{ED^3}$ は管壁の変形しやすさを表すパラメータである。以後は、無次元変数につけた添え字*を省略する。

4.2. $R(s)$ の近似解

$R(s)$ に対して、 $s = 0$ で最大、 $s = \pi/2$ で最小になるような滑らかな関数として、次の形を仮定する。

$$R(s) = 1 + a \cos 2s, \quad a \ll 1 \quad (4.3)$$

この $R(s)$ の形を図 4.1 に示す。このとき、管の長半径と短半径の比は、 $(1+a)/(1-a)$ となる。

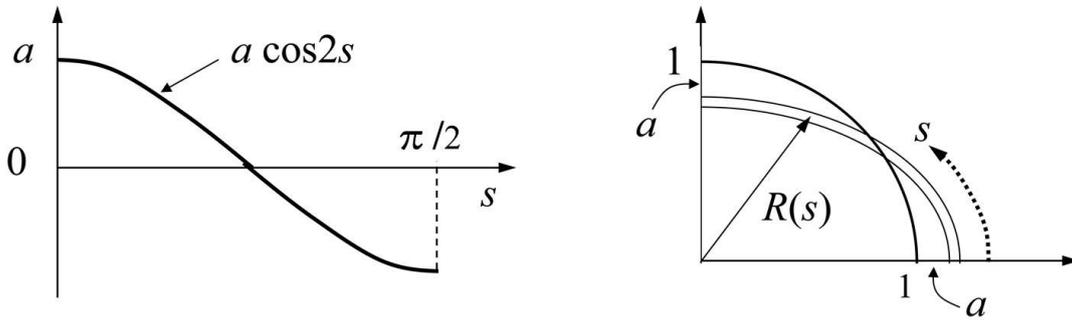


図 4.1 近似解における管の形

式(4.3)を(4.2)に代入し、関数 $R(s)$ に関わる量を a について級数展開し、4 次の項まで残す。ここで、微小量 x についてのつぎの公式をつかう。

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+x} &= 1 - x + x^2 - x^3 + x^4 + \dots, & \sqrt{1+x} &= 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} - \frac{5x^4}{128} + \dots, \\ \sqrt{1-x} &= 1 - \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} - \frac{x^3}{16} - \frac{5x^4}{128} + \dots, & \frac{1}{\sqrt{1+x}} &= 1 - \frac{x}{2} + \frac{3x^2}{8} - \frac{5x^3}{16} + \frac{35x^4}{128} + \dots, \\ \frac{1}{\sqrt{1-x}} &= 1 + \frac{x}{2} + \frac{3x^2}{8} + \frac{5x^3}{16} + \frac{35x^4}{128} + \dots \end{aligned}$$

式(4.2)の各項の級数展開は Appendix 2 で示し、 U_e と U_p に対する展開式を以下に示す。

$$\begin{aligned} U_e &= \int_0^{\pi/2} [3a \cos 2s + a^2(\cos^2 2s - \sin^2 2s) + a^3(\cos^3 2s + 10 \cos 2s \sin^2 2s) + \dots]^2 ds \\ &= \int_0^{\pi/2} [9a^2 \cos^2 2s + a^4(\cos^2 2s - 2 \sin^2 2s)^2 + 2 \cdot 3a^4 \cos 2s \cdot (-\cos^3 2s + 10 \cos 2s \sin^2 2s) + \dots] ds \\ U_p &= \Delta p C \cdot \left[\frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} (1 + a \cos 2s) (1 - 2a^2 \sin^2 2s - 2a^4 \sin^4 2s + \dots) ds - \frac{1}{4} \pi \right] \\ &= \Delta p C \int_0^{\pi/2} (-a^2 \sin^2 2s - a^4 \sin^4 2s + \dots) ds \end{aligned} \quad (4.4)$$

なお、それぞれの 2 行目においては a 、 a^3 に比例する項は積分の際に消えるので省略し、 a^5 以上の項も省略した。これらの積分に含まれる三角関数の積分公式は、Appendix 3 に示す。

以上から、全エネルギーの a に対する依存性を表す式が、次のように求められる。

$$\begin{aligned}
U &= U_e + U_p \\
&= \frac{9\pi}{4}a^2 + a^4 \left(\frac{3\pi}{16} - \frac{\pi}{4} + \frac{3\pi}{4} \right) + 6a^4 \left(-\frac{3\pi}{16} + \frac{10\pi}{16} \right) + \Delta pC \cdot \left(-\frac{\pi}{4}a^2 - \frac{3\pi}{16} \right) a^4 \\
&= \frac{9\pi}{4}a^2(9 - \Delta pC) + \frac{\pi}{16}a^4(53 - 3\Delta pC)
\end{aligned} \tag{4.5}$$

この結果は、 U の a^2 に対する依存性が、 ΔpC の値に応じて次のように分類されることを示す。

- (1) $\Delta pC \leq 9$: $a^2 = 0$ のとき U が最小、すなわち円管のままである。
- (2) $9 < \Delta pC < 53/3$: a^2 の特定の値で、 U が最小になる。
- (3) $53/3 \leq \Delta pC$ a^2 が大きくなるほど U は小さくなる。すなわち、管は強くつぶれる。

これらの3つの場合について、 U と a^2 の関係を図 4.2 に示す。

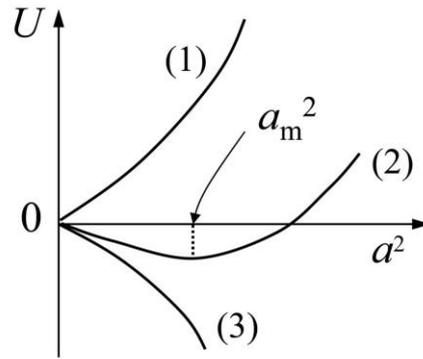


図 4.2 U の a^2 依存性

条件(2)では、与えられた ΔpC の値に対して U が最小値をもつ。そのときの変形の強さ a^2 の値は、 $a^2 = x$ と変換して、 $dU/dx = 0$ という条件から求めることができる。ここで

$$A = \frac{\pi}{4}a^2(9 - \Delta pC), \quad B = \frac{\pi}{8}a^4(53 - 3\Delta pC)$$

と置くと、

$$\frac{dU}{dx} = \frac{d}{dx} \left(Ax + \frac{Bx^2}{2} \right) = 0,$$

となる。以後は、 U を最小にする a の値 a_m を、単に a と記す。

以上から、条件(2)の場合の a^2 と ΔpC の関係が次のように求められる。

$$a^2 = x = -A/B = \frac{2(\Delta pC - 9)}{53 - 3\Delta pC} \tag{4.6}$$

(4.6) の関係、およびそれから導いた a と ΔpC の関係を、図 4.3 に示す。

解析結果の曲線は、 ΔpC が $53/3 \cong 17.7$ のところで発散する。また、変形が 0 になるのは ($a = 0$)、 $\Delta pC = 9$ のときである。横軸上の黒点は、式(1.1)の臨界値に対応する値であり、解析結果の臨界値より小さい。これについては次節で議論する。

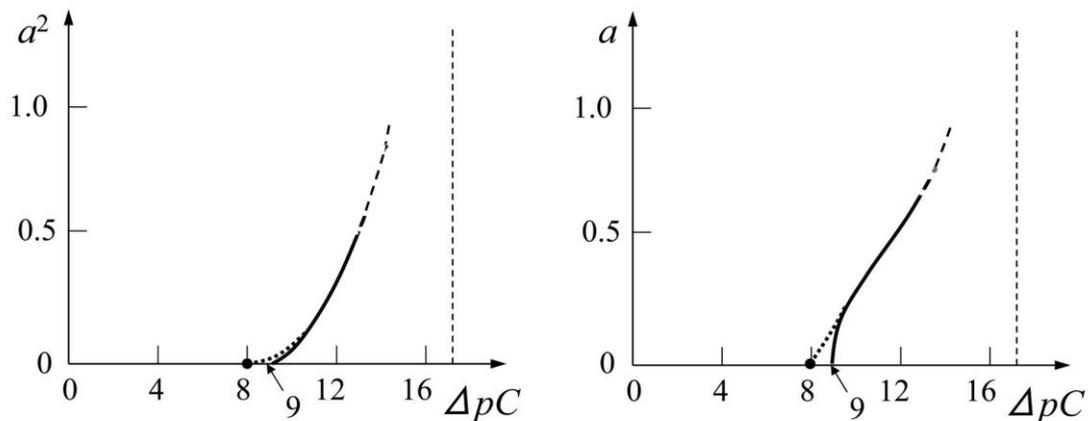


図 4.3 a^2 と ΔpC 、および a と ΔpC の関係。横軸上の黒丸は式(1.1)に示した臨界値に対応する。横軸近くの点線は補正曲線、上部の点線は理論結果の適用外であることを示す。

5. 結果の考察

ここで提示した理論では、 a^2 が 1 に比べて小さいということを仮定した。したがって、図 4.3 に示した曲線は、大ざっぱに言って $a^2 > 0.5$ 、すなわち $\Delta pC > 12$ の範囲ではよい近似ではなくなる。

一方、式(1.1)に示した臨界圧力に C をかけたものは

$$\Delta p_C C = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{D}{R_0}\right)^3 \cdot \frac{24R_0}{ED^3} = \frac{6}{1-\nu^2} \quad (5.1)$$

となり、ゴムについての値 $\nu = 0.5$ を用いると、右辺の値は 8 になる。これは、上に求めた臨界値 9 より少し小さい。この事情は次のように解釈される。本論文では、管壁は曲がるだけで伸び縮みはないということを仮定した。しかし、この仮定は、臨界条件およびそのごく近くの圧力 Δp においては、次の理由で成り立たないと思われる。式(1.1)の圧力をわずかに超えたあたりでは、弱い座屈が起きていて、座屈が起きる前に存在していた周囲長の縮みと、円形からの微小な変形が共存している状況だと考えられるからである。したがって、 a^2 が 0 にごく近い条件では、式(4.6)の結果に修正が必要である。

ΔpC の値が 8 から 9 あたりまでの曲線を、上記の考察に従ってより現実的なものに補正する簡便な方法は、図 4.3 中に点線で示したように $\Delta pC = 8$ の点と理論曲線の $\Delta pC = 9$ あたりを滑らかにつなぐことであろう。しかしながら、より精密な理論によってこの領域での理論曲線を修正することが、将来の課題として残っている。なお、比較的弱い変形についての Carrier の解析は(文献 5)、外力によって構成された円環が、さらに加えられた外力によって変形する現象を扱っているので、本論文であつかっている問題と少し異なる。

ここで求めた圧力差の値を、ヒトの血管における Δp の値と比べてみよう。ここで、理論で用いたパラメータの値を、以下のように仮定する。

管の材料をゴムとすると、 $E = (1.5 \sim 5.0) \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、 $\nu = 0.5$

管のサイズ： 半径 $R_0 = 5 \sim 10 \text{ mm} = 0.005 \sim 0.01 \text{ m}$ 、厚さ $D = 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m}$

典型的な圧力差： $\Delta p = 6 \text{ mmHg} = 800 \text{ Pa}$ (パスカル)。

E と R_0 について、上記の最大値あるいは最小値を選ぶと、 $\Delta p_C C$ の範囲は $0.48 < \Delta p_C C < 12.8$ となる。この範囲は、図 4.3 に示したグラフの実線の範囲を含んでいる。したがって、本論文で導いた理論結果は、血管における座屈の問題に有効に適用できることが期待される。

参考文献

- 1) L.D. ランダウ、E.M. リフシッツ：弾性理論、東京図書(株)、1989.
- 2) 柴田俊忍、能見利彦、中井 浩：複数の減肉部をもつパイプの外圧による破壊強度に関する研究、材料、第 32 巻、第 354 号、1983、pp. 298-303.
- 3) 鶴戸口英善、川田雄一、倉西正嗣：材料力学、下巻、裳華房、1959、12.5 節「円管の圧壊」 pp. 391-393.
- 4) M. Levy: Mmoire sur un cas integrable du problem de l' elastique et l' une des Applications, J.math.pures et appl, ser. 3, 1884, pp.5-42.
- 5) L.G.F. Carrier: On the Buckling of Elastic Rings, J. Math. And Phys, Vol. 26, 1947, pp.94-103.
- 6) I. Tadjbakhsh and F. Odeh: Equilibrium States of Elastic Rings, J. Math, Anal. and Appl., Vol. 18 (1969) pp.59-74.
- 7) 高木俊介、私信、2016.
- 8) J.E. Flaherty, J.B. Keller & S.I. Rubinow, Post Buckling Behavior of Elastic Tubes and Rings with Opposite Sides in Contact. SIAM J. Appl. Math., 23(4) (1972), pp.446-455.
- 9) M. Heil and O.E. Jensen: Flows in Deformable Tubes and Channels, in Flow in Collapsible Tubes and Other Highly Compliant Boundaries, (Ed.by P.W. Carpenter and T.J. Pedley), Kluwer, 2003.

Appendix

Appendix 1

弧 AB と線分 AC、BC で囲まれた領域は、 $d\theta$ が微小であれば直角三角形とみなしてよい。また、 $AB=ds$ 、 $BC=dR=R(s+ds)-R(s)=\frac{dR}{ds}ds$ であるので、

$$AC = Rd\theta = \sqrt{AB^2 - BC^2} = \sqrt{1 - (dR/ds)^2} ds, \quad \Rightarrow \quad d\theta = \frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} ds \quad (A1)$$

一方、 $\frac{dR}{ds} = \frac{BC}{AB} = \sin\psi$ を s で微分して、

$$\begin{aligned} \frac{d^2R}{ds^2} &= \frac{d \sin \psi}{ds} = \frac{d \sin \psi}{d\psi} \cdot \frac{d\psi}{ds} = \cos \psi \cdot \frac{d\psi}{ds} = \frac{AC}{AB} \frac{d\psi}{ds} \\ &= \frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{ds} \cdot \frac{d\psi}{ds} = \sqrt{1 - (dR/ds)^2} \cdot \frac{d\psi}{ds} \end{aligned} \quad (A2)$$

これから、(3.1)式、 $\frac{d\psi}{ds} = \frac{d^2R}{ds^2} / \sqrt{1 - (dR/ds)^2}$ が導かれる。

Appendix 2

式(4.2)の積分において、各項に式(4.3)を代入して展開した結果。

$$1/R = 1 + a \cos 2s + a^2 \cos^2 2s - a^3 \cos^3 2s + a^4 \cos^4 2s + \dots$$

$$dR/ds = -2a \sin 2s, \quad d^2R/ds^2 = -4a \cos 2s$$

$$\sqrt{1 - (dR/ds)^2} = \sqrt{1 - 4a^2 \sin^2 2s} = 1 - 2a^2 \sin^2 2s - 2a^4 \sin^4 2s + \dots$$

$$1/\sqrt{1 - (dR/ds)^2} = 1/\sqrt{1 - 4a^2 \sin^2 2s} = 1 + 2a^2 \sin^2 2s + 6a^4 \sin^4 2s + \dots$$

$$R \cdot d^2R/ds^2 = (1 + a \cos 2s)(-4a \cos 2s) = -4a \cos 2s - 4a^2 \cos^2 2s$$

$$\begin{aligned} \sqrt{1 - (dR/ds)^2}/R &= (1 - 2a^2 \sin^2 2s - 2a^4 \sin^4 2s + \dots)(1 + a \cos 2s + a^2 \cos^2 2s - a^3 \cos^3 2s + a^4 \cos^4 2s + \dots) \\ &= 1 - a \cos 2s + a^2 \cos^2 2s - a^3 \cos^3 2s + a^4 \cos^4 2s + \dots + (-2a^2 \sin^2 2s)(1 - a \cos 2s + a^2 \cos^2 2s + \dots) - 2a^4 \sin^4 2s + \dots \\ &= 1 - a \cos 2s + a^2(\cos^2 2s - 2 \sin^2 2s) - a^3(\cos^3 2s - 2 \sin^2 2s \cos 2s) + a^4(\cos^4 2s - 2 \sin^2 2s \cos^2 2s - 2 \sin^4 2s + \dots) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2R}{ds^2}/\sqrt{1 - (dR/ds)^2} &= -4a \cos 2s \cdot (1 - 2a^2 \sin^2 2s - 2a^4 \sin^4 2s + \dots) \\ &= -4a \cos 2s - 8a^3 \cos 2s \cdot \sin^2 2s + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R \cdot \sqrt{1 - (dR/ds)^2} &= (1 + a \cos 2s)(1 - 2a^2 \sin^2 2s - 2a^4 \sin^4 2s + \dots) \\ &= 1 + a \cos 2s - 2a^2 \sin^2 2s - 2a^3 \cos 2s \cdot \sin^2 2s - 2a^4 \sin^4 2s + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{1 - (dR/ds)^2}}{R} - \frac{d^2R}{ds^2}/\sqrt{1 - (dR/ds)^2} - 1 &= 1 - a \cos 2s + a^2(\cos^2 2s - 2 \sin^2 2s) - a^3(\cos^3 2s - 2 \sin^2 2s \cos 2s) + a^4(\cos^4 2s - 2 \sin^2 2s \cos^2 2s - 2 \sin^4 2s + \dots) \\ &\quad - (-4a \cos 2s - 8a^3 \cos 2s \cdot \sin^2 2s + \dots) - 1 \\ &= 3a \cos 2s + a^2(\cos^2 2s - 2 \sin^2 2s) - a^3(\cos^3 2s + 10 \cos 2s \cdot \sin^2 2s) + a^4(\cos^4 2s - 2 \sin^2 2s \cos^2 2s - 2 \sin^4 2s) + \dots \end{aligned}$$

Appendix 3

エネルギー U を求めるための積分公式。

$$\int_0^{\pi/2} \cos^2 2s \cdot ds = \int_0^{\pi/2} \cos^2 X \cdot dX/2 = \frac{\pi}{4}, \quad \int_0^{\pi/2} \sin^2 2s \cdot ds = \int_0^{\pi/2} \sin^2 X \cdot dX/2 = \frac{\pi}{4}$$

$$\int_0^{\pi/2} \cos^4 2s \cdot ds = \int_0^{\pi/2} \cos^4 X \cdot dX/2 = \frac{3\pi}{16}, \quad \int_0^{\pi/2} \sin^4 2s \cdot ds = \int_0^{\pi/2} \sin^4 X \cdot dX/2 = \frac{3\pi}{16}$$

$$\int_0^{\pi/2} \cos^2 2s \cdot \sin^2 2s \cdot ds = \int_0^{\pi/2} \cos^2 X \cdot \sin^2 X \cdot dX/2 = \frac{\pi}{16}$$

面積保存方向保存写像における同周期分岐と 周期軌道の安定性の交代

山口喜博

帝京平成大学 〒290-0193 千葉県市原市うるいど南4-1

(連絡先 : 〒290-0073 千葉県市原市国分寺台中央2-4-14)

chaosfractal@iCloud.com

Equiperiod bifurcation and the stability exchanges of the periodic orbits in the area and orientation preserving map

Yoshihiro Yamaguchi

Teikyo Heisei University

(2016年6月8日受付, 2016年8月14日受理)

Abstract: The area and orientation preserving map named the sine-sine map is introduced. This map includes the two parameters. Using the sine-sine map, we study the bifurcation that the two daughter periodic orbits appear through the equiperiod bifurcation of the mother periodic orbit. We remark that the periods of daughter orbits and that of the mother orbit are the same. Using the geometrical method, the stability exchanges of the symmetric periodic orbits related to this bifurcation are discussed.

Keywords: Sine-sine map, Equiperiod bifurcation, Symmetric periodic orbits, Stability exchange

1. はじめに

同周期分岐は周期倍分岐ほどよく知られていないと思われるので, 最初に面積保存写像における同周期分岐の説明を行う. 詳細は拙著[1]を参考にしてほしい.

写像 T を二次元面積保存方向保存写像とする. 周期 $q (\geq 1)$ の周期軌道を考える.

周期軌道の軌道点を点 $z_k (0 \leq k \leq q-1)$ とする. 周期軌道点において線形解析を実行すると2行2列の線形化行列 $M(z_k)$ が得られる. q 周期の場合, $M = M(z_{q-1}) \cdots M(z_1)M(z_0)$ の固有値を λ とすると, 下記の固有方程式が得られる.

$$\lambda^2 - 2r\lambda + 1 = 0. \quad (1)$$

この式の左辺の1は2行2列の線形化行列の行列式が1であることによる. この性質は写像が面積保存方向保存写像であることに起因している. r は写像 T を特徴付けるパラメータを含む. $|r| < 1$ 満たす場合, 点 z は楕円型周期軌道点である. この場合, 二つの固有値 λ_{\pm} は複素共役となる.

$$\lambda_{\pm} = r \pm i\sqrt{1-r^2} \equiv \exp(\pm i\theta). \quad (2)$$

ここで $|\lambda_{\pm}| = 1$, $\tan \theta = \sqrt{1-r^2}/r$. 図 1 に示したように, 角度 θ を測る.

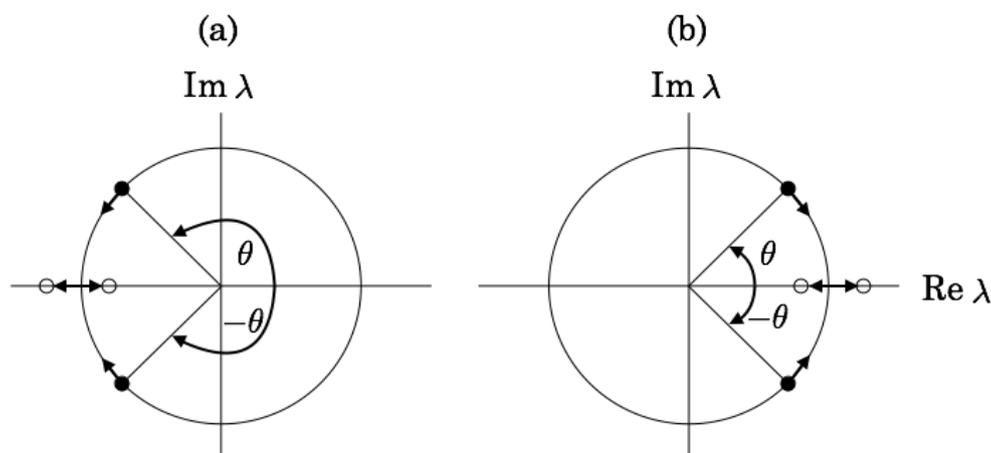


図 1: 複素平面上における固有値の動き. 黒丸で示された複素共役の固有値を持つ場合, 周期軌道は楕円型周期軌道である. (a) 周期倍分岐. パラメータの増加 (または減少) につれて θ は π に近づく. 白丸で示された固有値をもつ周期軌道は, 反転をともなうサドル型周期軌道である. (b) 同周期分岐. パラメータの増加 (または減少) につれて θ は 0 に近づく. 白丸で示された固有値を持つ周期軌道は, サドル型周期軌道である.

周期倍分岐と同周期分岐を対比しながら説明を行う. まず, r を -1 に近づけると, 点 z は周期倍分岐を起こす (図 1(a)). この場合, θ は π に近づく. 一方で, r を $+1$ に近づけると, 点 z は同周期分岐を起こす (図 1(b)). この場合, θ は 0 に近づく.

周期倍分岐が生じた後, 点 z の固有値は $\lambda_- = 1/\lambda_+ < -1 < \lambda_+ < 0$ を満たす. つまり, 点 z は反転をともなうサドル型周期軌道点となる. 同周期分岐が生じた後, 点 z の固有値は $0 < \lambda_- = 1/\lambda_+ < 1 < \lambda_+$ を満たす. つまり, 点 z は通常のサドル型周期軌道点となる.

周期倍分岐によって, 母周期軌道 z から母周期軌道の周期の二倍の娘周期軌道が一つ現れる. 娘周期軌道の周期が母周期軌道の周期の二倍になることより, この分岐は周期倍分岐と呼ばれる. 同周期分岐によって, 母周期軌道 z から母周期軌道の周期と同じ周期の娘周期軌道が二つ現れる. 母周期軌道と同じ周期の娘周期軌道が生じることより, この分岐は同周期分岐と呼ばれる. この逆の過程を逆同周期分岐と呼ぶ.

次に本論文の目的を紹介する. 隣り合っている楕円型周期軌道点 (楕円点と書く) とサドル型周期軌道点 (サドル点と書く) の安定性が入れ替わる現象について, ウィルブリンク (Wilbrink) [2] が 1987 年に報告した. 内容は, あるパラメータで楕円点がサドル点に変わり, 更にパラメータを増加すると隣りにあるサドル点が楕円点になるという現象である. これと同様の現象を筆者は 2001 年に別の写像で見つけた [3]. これら論文では, 安定性の入れ替わりの現象の理論的な解析は行われていない. 本論文の主目的は, 簡単な例を用いて楕円点とサドル点の安定性が交代する現象の理論的な説明を与えることにある. 二つの対称線の周期軌道点での交差の仕方の変化に注目し幾何学的に安定性の交代現象を説明する. そして, 交代現象を引き起こす原因が同周期分岐と逆同周期分岐であることを示す.

第 2 章で, 本論文で使用する写像を紹介し, 写像の対合表現を導入する. 対称線を導入した後, 対合による点の動きを説明する. 第 3 章で, 楕円点とサドル点の安定性が交代する現象と (逆) 同周期分岐の関係を議論する. 第 4 章で, 結果をまとめ今後の課題を述べる.

2. 準備

2.1. 写像

本論文で使用する面積保存写像 (Sine-sine map) $T_{a,b}$ [3]を紹介する. 写像 $T_{a,b}$ はトーラス面 ($0 \leq x < 2\pi$, $0 \leq y < 2\pi$)で定義されている.

$$y_{n+1} = y_n + f_{a,b}(x_n) \pmod{2\pi}, \quad (3)$$

$$x_{n+1} = x_n + y_{n+1} \pmod{2\pi}. \quad (4)$$

ここで $f_{a,b}(x) = a \sin(x + b \sin x)$, $a \geq 0$, $0 \leq b < 1$, $f_{a,b}(x) = -f_{a,b}(-x)$.

周期軌道の軌道点において線形解析を行い得られた固有値が実数で正ならば, この周期軌道をサドル型周期軌道と呼ぶ. 固有値が複素共役である場合, この周期軌道を楕円型周期軌道と呼ぶ. また固有値が実数で負の場合は, 反転を伴うサドル型周期軌道と呼ぶ. 写像 T において, $a > 0$ では, 不動点が二つある. $P = (0,0)$ と $Q = (\pi,0)$ である. 式(3)と(4)の表現をシンプレクティック形式という.

不動点以外の周期軌道の中で, トーラス面を x 軸方向に回転している周期軌道を考える. 本論文では, 特に軌道点が $x = 2\pi$ を左から右へと出て $x = 0$ より入ってくる周期軌道のみ扱う.

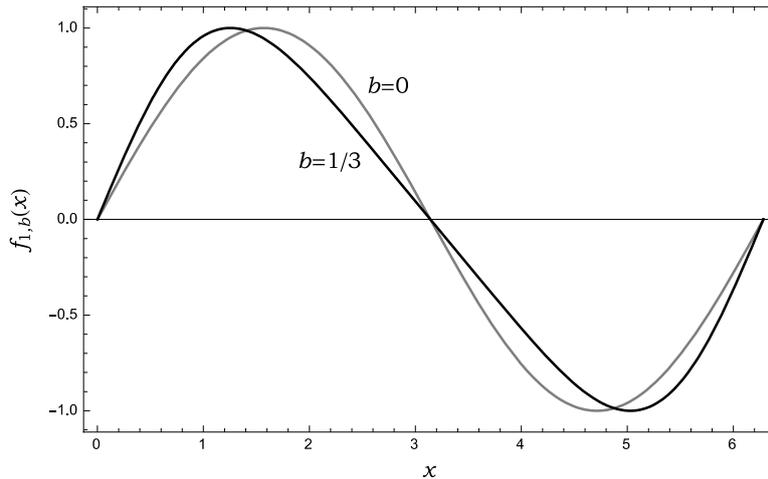


図 2: 標準写像の関数 $f_{1,0}(x)$ は灰色で描かれている. 関数 $f_{1,1/3}(x)$ は黒色で描かれている.

写像 $T_{a,b}$ で, $b = 0$ とすれば標準写像 (Standard map) [4]となる. 図 2 を利用して, 関数 $f_{a,0}(x)$ と $f_{a,b}(x)$ の違いを説明しよう. 区間 $[0,\pi]$ において, 関数 $f_{a,0}(x)$ は $x = \pi/2$ を軸として左右対称である. しかし, 関数 $f_{a,b}(x)$ ($b \neq 0$)は区間 $[0,\pi]$ においてこのような対称性を持たない. 区間 $[0,\pi]$ における, 関数 $f_{a,b}(x)$ の極大は, b の増加につれて $x = \pi/2$ より左に移動する. 区間 $[\pi,2\pi]$ における, 関数 $f_{a,b}(x)$ の極小は, b の増加につれて $x = 3\pi/2$ より右に移動する. これからの議論で誤解を生じない場合, $T_{a,b}$ を T と, $f_{a,b}(x)$ を $f(x)$ と簡便に記す.

本論文で使用する写像 T における性質で最も重要な単調ねじれ性について述べておく. 一般に $\partial x_n / \partial y_n > 0$ (< 0) が成立する写像を単調ねじれ性を有する写像という. ここで使用する写像 T の場合, x 軸の任意の位置に垂直に立てた直線は T によって右に 45 度傾く. よって, $\partial x_n / \partial y_n = 1$ が成り立つ. 例として $x = \pi$ 軸上を不動点 Q より上方に移動するにつれて, x 方向への移動距離が増加する (図 3). これは y 座標値が増えるとより速く回転することを意味している.

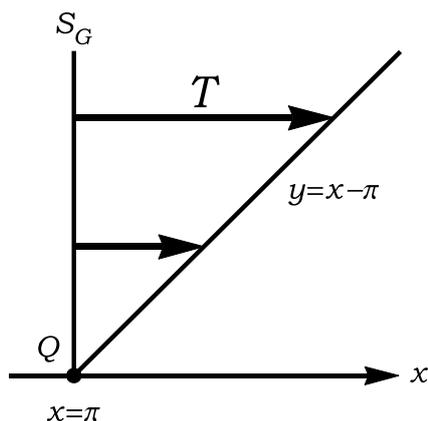


図 3: x 軸に垂直な線分は, T によって右に 45 度傾く. 直線 $x = \pi$ ($y \geq 0$) の場合を描いた.

2.2. 対合と対称線

写像 T を対合 (ついで, Involution) を利用して記述する [1]. 最初は $T = H \circ G$ と分解する. ただし, $H \circ H = G \circ G = id$, $\det \nabla H = \det \nabla G = -1$. 対合による作用は一種の反転操作である. 写像が対合の積で書ける場合, この写像はパーコフの意味での可逆性を持つといわれる. 以下では簡潔に書くために分割の切れ目の \circ を省くことがある. 対合 G と H の定義を下記に示す.

$$G : y \leftarrow y + f(x), x \leftarrow -x, \quad (5)$$

$$H : y \leftarrow y, x \leftarrow y - x. \quad (6)$$

例として, $x \leftarrow y - x$ は, $(y - x)$ をあらためて x にせよという意味である. 他の矢印記号についても同様である. $G \circ G = id$ は, 任意の点に G を二回写像すると元の位置に戻ることの意味している. また, $H \circ H = id$ も同様の意味である. $\det \nabla G = -1$ は, G の線形化行列の行列式の値が -1 であることを意味している. $\det \nabla H = -1$ も同様である.

次に別の分解 $T = h \circ g$ を行う. ただし, $h \circ h = g \circ g = id$, $\det \nabla h = \det \nabla g = -1$. 対合 g と h の定義を与える.

$$g : y \leftarrow -y - f(x), x \leftarrow x, \quad (7)$$

$$h : y \leftarrow -y, x \leftarrow x - y. \quad (8)$$

対合の不動点の集合は対称線と呼ばれる. ここで対合 G の対称線を S_G と書く. 残りの対合の対称線に関しても同様の記法を利用する.

$$S_G : x = 0, \pi, \quad (9)$$

$$S_H : y = 2x, y = 2(x - \pi), \quad (10)$$

$$S_g : y = -(1/2)f(x), y = \pi - (1/2)f(x), \quad (11)$$

$$S_h : y = 0. \quad (12)$$

ここで対称線 S_G の導出について説明する．式(5)から，直ちに $x = 0$ が得られる．式(4)では， x に対して $\text{mod } 2\pi$ を作用する．これより，式(5)は $x \leftarrow 2\pi - x$ と書いてもよい．よって，もうひとつの対称線 $x = \pi$ が得られる．同様に考えて，残りの対称線も決まる．特に S_g の対称線のひとつである $y = \pi - (1/2)f(x)$ については注意が必要である．もし写像 $T_{a,b}$ を円筒面で定義すると，この対称線は存在しない．この対称線はトーラス面でのみ存在する．写像 T の定義面をトーラス面とした理由は，この対称線を利用するためである．

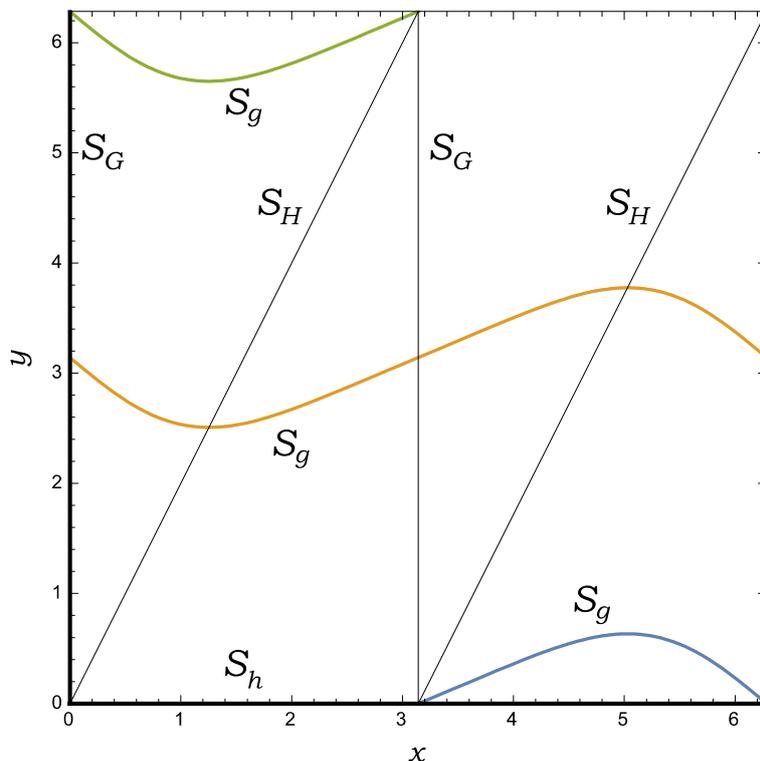


図 4: トーラス面 ($0 \leq x < 2\pi$, $0 \leq y < 2\pi$) における対称線． x 軸 (太線) が S_h である． S_G は二つあり，ひとつは y 軸 (太線)で，もう一つは $x = \pi$ である． $a = 1.2670$. $b = 1/3$. 対称線 $y = \pi - (a/2) \sin(x + b \sin x)$ の極小を $y = 2x$ が通過し，極大を $y = 2(x - \pi)$ が通過している．

トーラス面 ($0 \leq x < 2\pi$, $0 \leq y < 2\pi$) での対称線を図 4 に示した．対称線上に軌道点を持つ周期軌道を対称周期軌道と呼ぶ．

対合による対称線を挟んだ点の動きからから， S_G と S_H を左右の対称線と呼び， S_g と S_h を上下の対称線と呼ぶ．写像 T は左右と上下の対称性を持つので，写像 T は二重対称写像とも呼ばれる．式(3)と(4)のようなシンプレクティック形式の面積保存方向保存写像は上下の対称性を持つ．写像 T が左右の対称性を持つ原因は，写像関数 $f(x)$ が変数 x に関して奇関数であることによる．

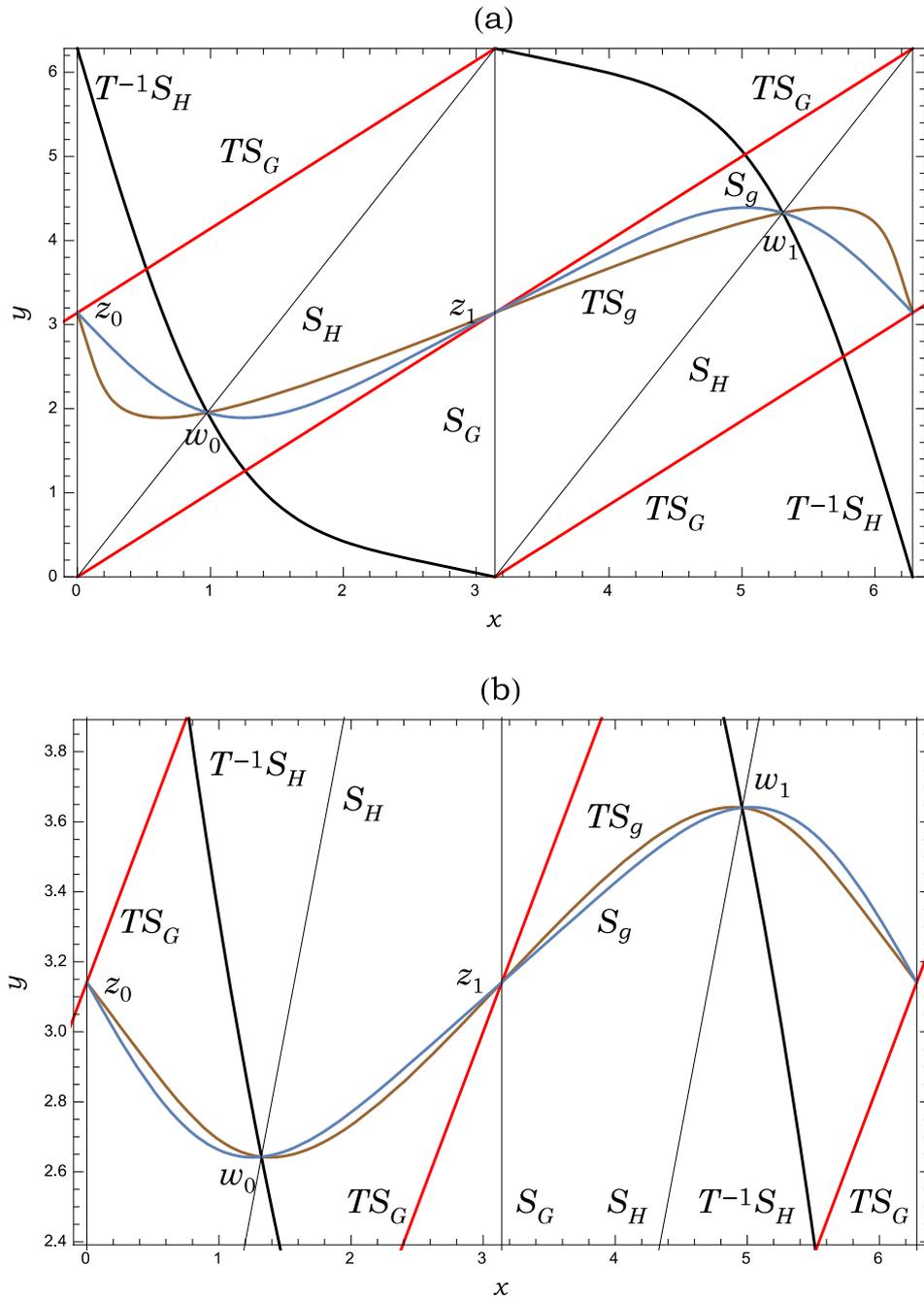


図 5: 二つの周期 2 の軌道点と対称線の関係. 図中の $\{z_0, z_1\}$ と $\{w_0, w_1\}$ が周期 2 の軌道点. (a) $a = 2.5$, $b = 1/3$. (b) $a = 1$, $b = 1/3$.

ここで本論文で議論する周期 2 の周期軌道について図 5 をもとに説明しよう. 一つは対称線 S_G 上に軌道点を持つ周期軌道で, 軌道点は $z_0 = (0, \pi)$ と $z_1 = (\pi, \pi)$ である. もう一つは対称線 S_H 上に軌道点を持つ周期軌道で, 軌道点は w_0 と w_1 である. これらの周期軌道は, 1 周期の間に x 軸方向にトーラスを 1 回転する. このことを考慮すると, これらの周期軌道を回転数 $1/2$ の周期軌道と呼ぶことができる. また, 回転数 $1/2$ の周期軌道の軌道点は左右の対称線上にあり, かつ上下の対称線上にもある. このような対称周期軌道は二重対称周期軌道と呼ばれる. それぞれの軌道点を 4 本の対称線が通過している. 例として点 z_1 における対称線 S_g と TS_g の交差の仕方に注目してほしい. 図 5(a) における交差の仕方と図 5(b) における交差の仕方が逆転している. この現象について次の § 2.3 と § 3 で議論する.

まず、図で TS_G と書かれた対称線の意味を説明する． $T^2 = TH \circ G$ と分解しよう．点 z_1 は S_G 上 ($x = \pi$ 上) にある．よって、点 $z_1 = (\pi, \pi)$ を対合 TH で不変となる対称線が通過しているはずである．天下载的であるが、対合 TH に関して TS_G が不変であることを示す．

$$TH(TS_G) = (HG)H(HG)S_G = HS_G = (HG)S_G = TS_G. \quad (13)$$

簡単に TS_G の表式が得られる．

$$TS_G : y = x, y = x - \pi \pmod{2\pi}. \quad (14)$$

TS_G は対合 TH に関して不変であるから、これも対称線と呼ぶ．

次に、図で $T^{-1}S_H$ と書かれた対称線の意味を説明する．これらは w_0 と w_1 を通過している． $T^2 = H \circ GT$ と分解しよう．対合 GT に関して $T^{-1}S_H$ が不変であることを示す．

$$GT(T^{-1}S_H) = GS_H = (GH)S_H = T^{-1}S_H. \quad (15)$$

最後に、図で TS_g と書かれた対称線の意味を説明する． $T^2 = Th \circ g$ と分解しよう．点 z_1 は S_g 上にある．よって、 $z_1 = (\pi, \pi)$ を対合 Th で不変となる対称線が通過しているはずである．対合 Th に関して TS_g が不変であることを示す．

$$Th(TS_g) = (hg)h(hg)S_g = hg(gS_g) = TS_g. \quad (16)$$

これからの議論で TS_g の表式が必要となる．

$$TS_g : y = \pi + (1/2) f(x - y). \quad (17)$$

2.3. 対合による点の動き

写像 T^2 による軌道点 z_1 の周りの点の運動を調べる．写像 $T^2 = Th \circ g$ を作用することは、まず g を作用し、次に Th を作用することである．点 z_1 の近くの点 u に T^2 を作用しよう．点 u に g を作用することは、 S_g で折り返すことを意味する．次に Th を作用することは、 TS_g で折り返すことになる．運動は x 軸方向に 2π だけ移動しているのだが、上記のように考えると x 軸方向への移動を忘れて、点 z_1 の近傍での運動のように解釈することができる．すなわち、点 z_1 を T^2 の不動点として扱える．

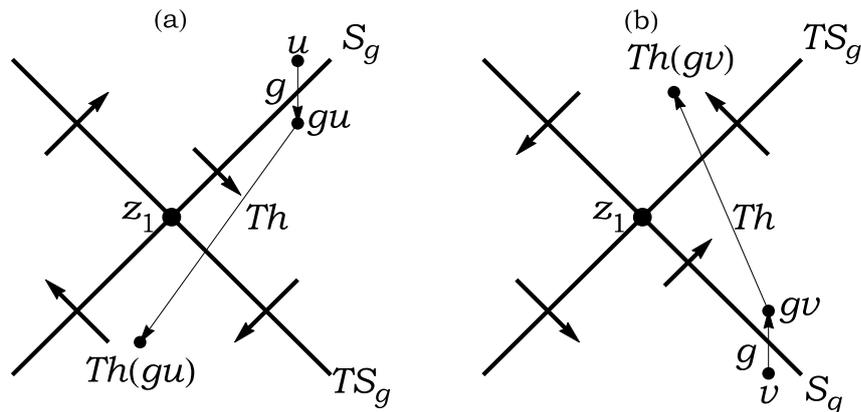


図 6: 対合による点の動き．対称線の交差の仕方での点の動きが異なる．対称線上の矢印は、点 z_1 の近傍の T^2 による対称線を横切る流れの方向を示す．細い矢印は、対合による点の動きを表す．(a) u から $T^2u = Th(gu)$ へは、点 z_1 の周りを時計回りに回転する．(b) v から $T^2v = Th(gv)$ へは、点 z_1 の周りを反時計回りに回転する．

図 6(a)では点 u を S_g の上部に置いた. 点 u に g を作用すると, u は S_g の下部に移動する. この点 gu は, Th によって TS_g の反対側に移される. 点 z_1 から見ると, 点 u から $T^2u = Th(gu)$ へは時計周り回転に見える. 図に描かれた対称線を横切る矢印は T^2 による流れの方向を示す.

一方の図 6(b)では, v から $T^2v = Th(gv)$ へは反時計周り回転に見える. つまり, 点 z_1 における, S_g と TS_g の交差の仕方によって z_1 の周りの点の動きが決まる.

図 6 について補足しておく. 図(a)では対称線 S_g の z_1 における傾きが, 対称線 TS_g の z_1 における傾きより大きいことを意味している. ここでは分かりやすくするために対称線 TS_g の z_1 における傾きを負として描いた. しかし, 対称線 TS_g の z_1 における傾きが正であってもよい. 図(b)では対称線 S_g の z_1 における傾きが, 対称線 TS_g の z_1 における傾きより小さいことを意味している. この図で対称線 S_g の z_1 における傾きが負として描かれているが, 正でもかまわない.

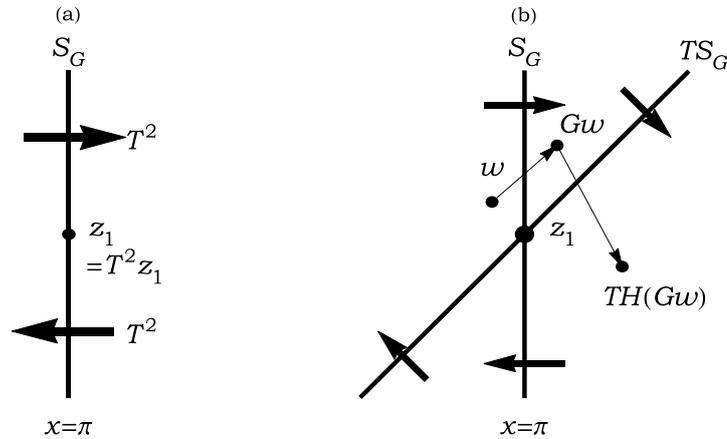


図 7: 対称線上の矢印は, 点 z_1 の近傍の T^2 による対称線を横切る流れの方向を示す. (a) 点 $z_1 = T^2z_1$ を視点とした場合. (b) 細い矢印は, 対合 G と TH による点の動きを示す.

点 z_1 は T^2 について不動点である. ここに視点を置いて近傍の T^2 による流れを観測する. $\partial x/\partial y = 1$ は, Q から離れるにつれて回転の仕方が増加することを意味している. z_1 の上部は z_1 より速く動くから, 点 z_1 を視点とすると時計回りに回転しているように見える. 逆に z_1 の下部は z_1 より遅く動くから, 点 z_1 を視点とすると時計回りに回転しているように見える. これらの様子を図 7(a)に示した. 次に, 点 z_1 を通過する左右の対称線は S_G ($x = \pi$)と TS_G である (図 7(b)). TS_G として $y = x$ を利用する. 図 7(b)では点 w を S_G ($x = \pi$)の左側に配置した. Gw は S_G の右側にある. これに TH を作用することは, 対称線 TS_G について折り返すことである. そうすると $T^2w = TH(Gw)$ は TS_G の右にあることが分かる. これらから点 w の T^2 による z_1 の周りの運動は時計回りの回転であることが再度確認でき, かつ T^2 による対称線 TS_G を横切る流れは時計回りであることが導かれた.

対合 g と Th による点の動きと, 対合 G と TH による点の動きを利用すると, 点 z_1 が楕円点ならば点 z_1 を視点として見たときの周りの流れは図 8(a)のようになり, 点 z_1 がサドル点ならば点 z_1 を視点として見たときの周りの流れは図 8(b)のようになる. 図(a)は, TS_G の点 z_1 における傾き 1 に比べ, S_g の点 z_1 における傾きが小さいという条件のもとで描いた. 図(b)は, TS_G の点 z_1 における傾き 1 に比べ, TS_g の点 z_1 における傾きが小さいという条件のもとで描いた. これらの条件については §3 で検討する.

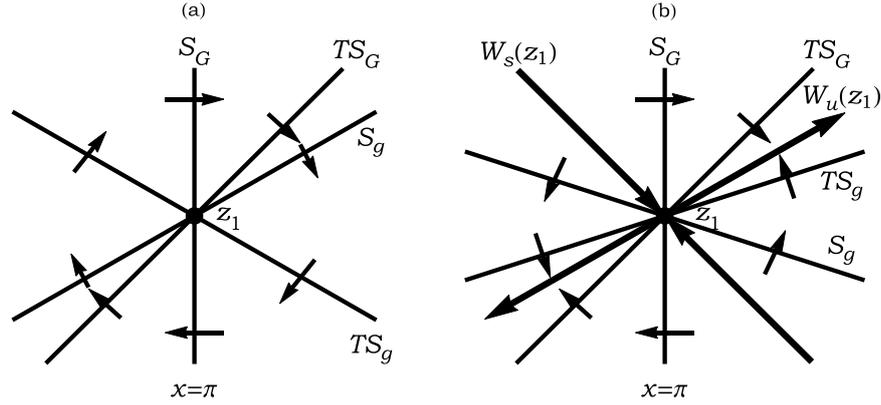


図 8：対称線上の矢印は，点 z_1 の近傍の対称線を横切る流れの方向を示す．(a) 軌道点 z_1 が楕円点の場合．(b) 軌道点 z_1 がサドル点の場合．点 z_1 から出ている太い矢線は z_1 の不安定多様体 $W_u(z_1)$ を表し，点 z_1 に向かう太い矢線は z_1 の安定多様体 $W_s(z_1)$ を表す．

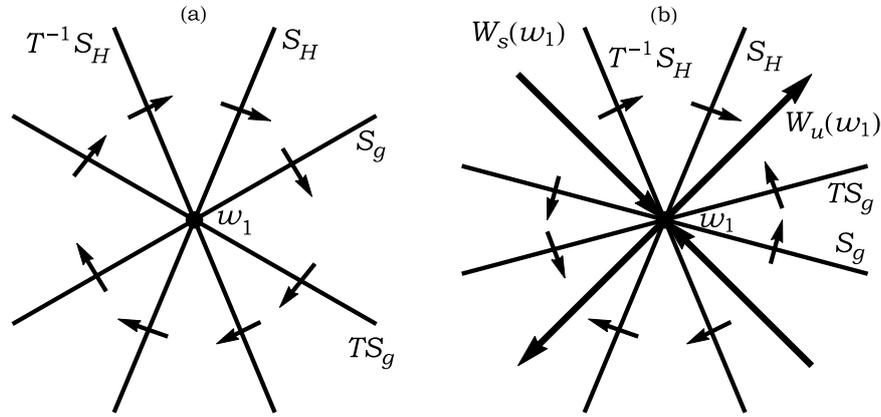


図 9：対称線上の矢印は，点 w_1 の周りの T^2 による対称線を横切る流れの方向を示す．(a) 軌道点 w_1 が楕円点の場合．(b) 軌道点 w_1 がサドル点の場合．点 w_1 から出ている太い矢線は w_1 の不安定多様体 $W_u(w_1)$ を表し，点 w_1 に向かう太い矢線は w_1 の安定多様体 $W_s(w_1)$ を表す．

ここで図 8(b)における点 z_1 がサドル点となる理由を説明する．点 z_1 の右上方にある S_H を横切る流れの方向と，同じく z_1 の右上方にある TS_g を横切る流れの方向を見ると，このままではこれらの流れがぶつかる．流れがぶつからないためには，点 z_1 の右上方にある S_H と TS_g の間に z_1 の不安定多様体が存在していなければならない．また点 z_1 の右下方にある S_G を横切る流れの方向と， S_g を横切る流れの方向について整合性を持たせるためには， z_1 の右下方にある S_G と S_g の間に z_1 の安定多様体が存在していなければならない．以上より点 z_1 がサドル点であることが決まり， z_1 の周りの流れより z_1 の安定多様体と不安定多様体の配置が決定された．

次に点 w_1 の周りの軌道点の動きを調べる．そのために点 z_1 の周りの軌道点の動きを調べた方法を再度利用する．詳細は省くが図 9 が得られる．点 w_1 における S_H の傾きは 2 である．よって，ここでは S_g と TS_g の傾きが 2 より小さい場合を考えている．図 9(a) は点 w_1 が楕円点の場合で，図 9(b) は点 w_1 がサドル点の場合である．対称線の名称が異なるだけで，楕円点かサドル点かの判定については点 z_1 の場合と同じである．

ここで紹介した幾何学的方法は、線形解析を行わなくても周期軌道点の安定性を決められるという利点がある。

3. 安定性の交代の解析

対称線 S_g と対称線 TS_g は、点 $z_1 = (\pi, \pi)$ を通過する。これらの点 z_1 における傾きを調べよう。 S_g の傾き $\xi_{S_g}(\pi)$ は、式(11)を微分して得られる。

$$\xi_{S_g}(\pi) = \frac{a}{2} \times (1 - b). \quad (18)$$

TS_g の傾き $\xi_{TS_g}(\pi)$ は、式(17)を微分して得られる。

$$\xi_{TS_g}(\pi) = \frac{a}{2} \times \frac{(1 + b)}{1 + a(1 + b)/2}. \quad (19)$$

図 8(a)を描くための条件は $\xi_{TS_g}(\pi) < 1$ である。これより a についての条件

$$a < \frac{2}{1 - b} \quad (20)$$

が求まる。

条件 $\xi_{S_g}(\pi) = \xi_{TS_g}(\pi)$ より、臨界値 a_2 が求まる。

$$a_2 = \frac{4b}{1 - b^2}. \quad (21)$$

ここで式(20)を考慮すると

$$a_2 = \frac{4b}{1 - b^2} < \frac{2}{1 - b} \quad (22)$$

が成り立つ必要がある。条件 $b < 1$ より、この関係は成立する。臨界値 a_2 は線形解析を利用しても得られる。しかし、線形解析では点 z_1 を通過している対称線の配置が分からない。そのために上記の方法を用いた。

点 z_1 を通過している対称線の配置についてまとめておく。 $a > a_2$ ならば、 $\xi_{S_g}(\pi) > \xi_{TS_g}(\pi)$ が成立する。図 8(a)より、点 z_1 は楕円型周期軌道点である。 $a < a_2$ ならば、 $\xi_{S_g}(\pi) < \xi_{TS_g}(\pi)$ が成立する。図 8(b)より、点 z_1 はサドル型周期軌道点である。

次にもう一つの周期 2 の軌道点 w_0 と w_1 で、特に点 w_1 を通過する対称線について調べる。点 w_1 における、 S_g の傾き $\zeta_{S_g}(w_1)$ と TS_g の傾き $\zeta_{TS_g}(w_1)$ を求めよう。 $w_1 = (x^*, y^*)$ と書く。

$$\zeta_{S_g}(w_1) = -(1/2)f'(x^*), \quad (23)$$

$$\zeta_{TS_g}(w_1) = \frac{(1/2)f'(x^*)}{1 + (1/2)f'(x^*)}. \quad (24)$$

ここで $f'(x^*) = a \cos(x^* + b \sin x^*)(1 + b \cos x^*)$ 。 $\zeta_{TS_g}(w_1)$ を導くために、 $y^* = 2(x^* - \pi)$ を利用して変数 y^* を消去した。また、 $f'(x)$ が周期 2π の周期的偶関数であることも利用した。 $f'(x^*)$ は $x = x^*$ における関数 $f(x)$ の傾きである。

条件 $\zeta_{S_g}(w_1) = \zeta_{TS_g}(w_1)$ より、 a の臨界値を決めるための関係式

$$f'(x^*) = 0, -4 \quad (25)$$

が得られる。交点 x^* が $\pi - f(x^*)/2 = 2(x^* - \pi)$ を満たすことを利用して、 $f'(x^*) = 0$ を数値的に解いて、 a の臨界値 a_1 が b の関数として求まる。数値計算で得られた a_1 の b 依存性を図 10

に示した. この図には a_2 の b 依存性も示した. b が小さくなるにつれて a_1 と a_2 の値が接近する. 図 10 に描いたパラメータ領域には, $f'(x^*) = -4$ を満たす解は存在しない. a の値が臨界値 a_1 に近い場合, 対称線 S_g と TS_g の点 w_1 における傾きはゼロに近い. よって, これらの傾きが S_H の傾きの 2 より小さいという条件は成立している.

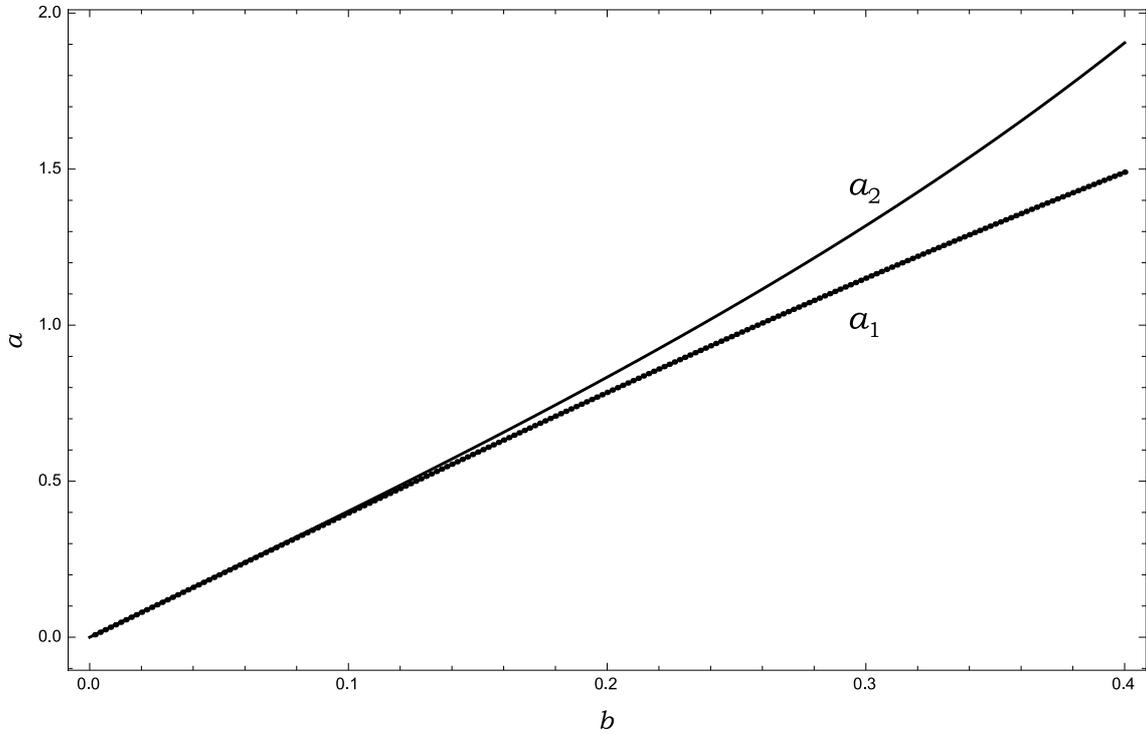


図 10 : 臨界値 a_1 と a_2 の b 依存性.

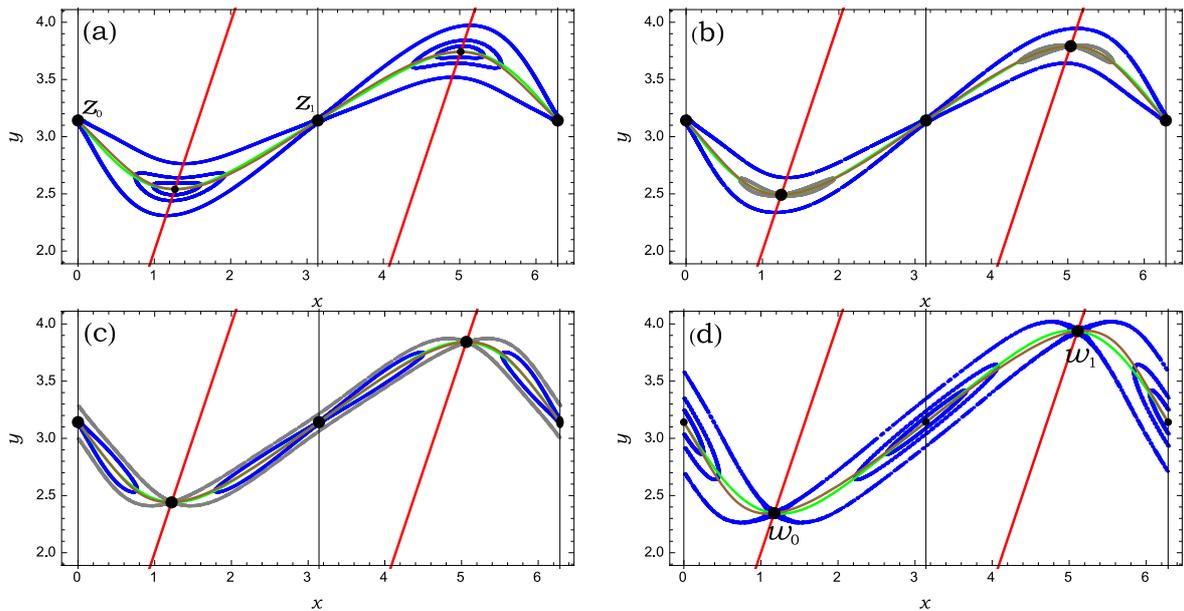


図 11 : 周期軌道の安定性の交代 ($b = 1/3$). (a) $a = 1.2$. 点 w_0 と w_1 が同周期分岐を起こす前の状況. (b) $a = 1.3$. 点 w_0 と w_1 が同周期分岐を起こした後の状況. (c) $a = 1.4$. 点 z_0 と z_1 が逆同周期分岐を起こす前の状況. (d) $a = 1.6$. 点 z_0 と z_1 が逆同周期分岐を起こした後の状況.

式 $f'(x^*) = 0$ は、 $a = a_1$ では周期 2 の軌道点が対称線 $y = \pi - f(x)/2$ の極大点と極小点にあることを意味している。つまり、極小点を S_H のひとつである $y = 2x$ が通過し、極大点を S_H のもうひとつである $y = 2(x - \pi)$ が通過している (図 2 を参照のこと)。前者が点 w_0 で、後者が点 w_1 である。

図 5(b) では、対称線 S_g の w_1 での傾きは正である。これより、 $0 < a < a_1$ では $f'(x^*)$ は負であることが分かる。よって $\zeta_{S_g}(w_1) > \zeta_{TS_g}(w_1)$ が成り立つ。図 9(a) より、点 w_0 と点 w_1 は楕円型周期軌道であることが導かれる。図 5(a) では、対称線 S_g の w_1 での傾きは負である。よって、 $f'(x^*)$ は正である。つまり $a > a_1$ では、 $\zeta_{S_g}(w_1) < \zeta_{TS_g}(w_1)$ が成り立つ。図 9(b) より、点 w_0 と点 w_1 はサドル型周期軌道であることが得られる。

$b = 1/3$ の場合の分岐現象をまとめる。数値計算で得られた a_1 は $a_1 = 1.2670 \dots$ である。明らかに $a_1 < a_2 = 3/2$ 。安定性の交代の様子を図 11 に示した。対称線の形状の変化を描いた模式図 12 も参考にしてほしい。

- (1) $0 < a < a_1$. 点 w_0 と点 w_1 は楕円型周期軌道点で、点 z_0 と点 z_1 はサドル型周期軌道点。
- (2) $a = a_1$. 点 w_0 と点 w_1 が同周期分岐を起こす。 a の値を、 a_1 より大きくすると点 w_0 から楕円型周期軌道 u_0 と u_1 が生じ、点 w_1 から楕円型周期軌道 v_0 と v_1 が生じる。生じたこれらの周期軌道点は対称線上にある。つまり、これらは対称周期軌道である。
- (3) $a_2 > a > a_1$. 点 w_0 と点 w_1 はサドル型周期軌道点で、点 z_0 と点 z_1 もサドル型周期軌道点。パラメータの増大とともに、 u_1 は w_0 から右に移動し、 z_1 に左から近づく。 u_0 は w_0 から左に移動し、 z_0 に右から近づく。 v_0 は w_1 から左に移動し、 z_1 に右から近づく。 v_1 は w_1 から右に移動し、 z_0 に左から近づく。対称線の形状が変化することで、これらの対称線上の移動が可能になる。
- (4) $a = a_2$ で、点 z_0 に u_0 と v_1 が吸収され、点 z_1 に u_1 と v_0 が吸収される。逆同周期分岐によって、点 z_0 と点 z_1 はサドル型周期軌道点から楕円型周期軌道点に変わる。
- (5) $a > a_2$. 点 w_0 と点 w_1 はサドル型周期軌道点で、点 z_0 と点 z_1 は楕円型周期軌道点。

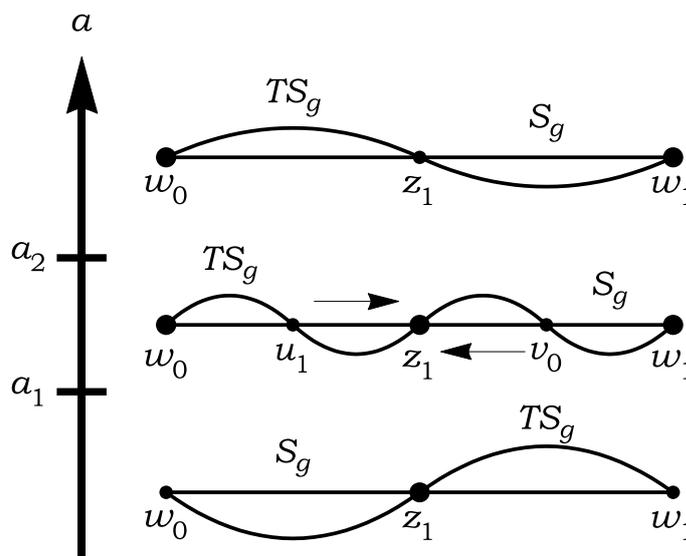


図 12 : $b = 1/3$ に固定して、 a を増加したときの安定性の交代の模式図。ここでは対称線 S_g を直線として描いた。下から上へとパラメータ a の値は増加する。二点 u_1 と v_0 が対称線上を移動し、これらは点 z_1 に吸収される。

4. まとめと今後の課題

この論文で使用した関数 $f_{a,b}(x) = a \sin(x + b \sin x)$ ($a > 0, 0 < b < 1$)は、通常の標準写像とは異なった性質を持つ。写像 $T_{a,b}$ で生じる周期軌道の安定性の交代という現象を通して、(逆)同周期分岐の意味と重要性が理解できるであろう。特に、対称線の周期軌道点での交差の仕方と周期軌道点の性質の違いに注目する方法は他の現象の理解にも応用できる[1]。安定性の交代現象にはいくつかのバリエーションが考えられるので以下で紹介する。

- (1) サドル点がサドル型娘周期軌道を二つ放出し楕円点になる。放出された二つのサドル点が別の楕円点に吸収されて、楕円点がサドル点になる。
- (2) 左右の対称性のみを持つ周期軌道の安定性の交代の場合、同周期分岐で生じた娘周期軌道は非対称周期軌道である。これを理解するためには図12で描かれている対称線は無視すれば良い。対称線上を移動しないにもかかわらず、二つの周期軌道の吸収が行われる。この現象は非常に不思議である。例は参考文献[2, 3]の図版を見てほしい。
- (3) 生じた娘周期軌道の吸収が行われない交代も考えられる。例として、楕円点から二つの楕円型娘周期軌道を放出する。サドル点から二つのサドル型娘周期軌道を放出する。これらの結果、安定性の交代は完了する。生じた二つの楕円型娘周期軌道と、二つのサドル型娘周期軌道が存在し続ける可能性がある。

標準写像の関数 $f_{a,0}(x) = a \sin x$ を変形する別の方法を紹介する。一つは $f_1(x) = a \sin x + b \sin 3x$ とか $f_2(x) = a \sin x + b \sin 2x$ のように、サイン関数に高調波を追加する変形である[2, 5, 6]。これらの写像では、標準写像で生じない様々な現象が生じることが報告されている。しかし、現象の理解は進んでいない。

ウィルブリック[2]による関数 $f_3(x) = \sqrt{1+\epsilon} \sin^{-1}(\sin x / \sqrt{1+\epsilon})$ を見てみよう。 ϵ を0にする極限では、この関数は折れ線関数となる。逆に ϵ を無限大にする極限では、この関数はサイン関数となる。この関数は、 ϵ を変えることで微分可能な関数から折れ線関数まで記述できるため扱いやすい。関数の形状がサイン関数から外れると様々な分岐が生じる。この写像についても多くの未解決の問題が残されている。

関数 $f_1(x)$ と $f_3(x)$ は、標準写像の関数 $f_{a,0}(x)$ の持つ対称性(区間 $[0, \pi]$ と区間 $[0, 2\pi]$ のそれぞれの区間における左右対称性)を維持している。このような写像でも楕円点とサドル点の交代が生じる。安定性の交代現象は、関数の幾何学的な対称性の破れだけでなく、関数の解析的な性質の違いでも生じる。交代現象を引き起こす原因は(逆)同周期分岐であることが分かったのは一歩前進である。写像関数の何が原因で(逆)同周期分岐が生じるのかについての検討が今後必要である。

参考文献[3]で指摘したように、ホモクリニック点における安定多様体と不安定多様体の交差の仕方が変化することも、周期軌道の安定性の交代と関係している。周期軌道の安定性の交代は、系全体に影響を与える。このような視点での研究が今後必要である。

本論文に適切なコメントをしてくださった査読者に感謝いたします。

参考文献

- [1] 山口喜博, 谷川清隆, *馬蹄への道*, 共立出版, (2016). 可逆性と対合については第 1.2 節を, 同周期分岐については第 1.4 節を参照のこと. 対称線の周期軌道点での交差の仕方を利用する応用例は第 3.5 節にある.
- [2] Wilbrink, J., *Erratic behavior of invariant circles in standard-like mappings*, Physica, 26D (1987), 358-368. 関係する図版は Fig.10.
- [3] Yamaguchi, Y., and Tanikawa, K., *Running homoclinic and periodic points in standard-like mappings*, Prog. Theor. Phys., 105, (2001), 399-407. 関係する図版は Fig.4.
- [4] MacKay, R. S., *Renormalisation in area-preserving maps*, World Scientific (1993).
- [5] Baesens, C., and MacKay, R. S., *Cantori for multiharmonic maps*, Physica, D69, (1993), 59-76.
- [6] Baesens, C., and MacKay, R. S., *The one to two-hole transition for cantori*, Physica, D71, (1994), 372-389.

構造化光投影による3次元計測の分類と ワンショット動体形状計測法

佐川 立昌¹⁾, 川崎 洋²⁾, 古川 亮³⁾

1) 産業技術総合研究所 知能システム研究部門

2) 鹿児島大学 理工学研究科

3) 広島市立大学 情報科学研究科

ryusuke.sagawa@aist.go.jp

Classification of 3D Acquisition by Structured Light Methods and One-shot 3D Scanning of Moving Objects

Ryusuke Sagawa¹⁾, Hiroshi Kawasaki²⁾, and Ryo Furukawa³⁾

1) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

2) Kagoshima University

3) Hiroshima City University

(2016年8月13日受付, 2016年9月21日受理)

Abstract: The methods of active 3D reconstruction measure 3D shapes of objects using special light sources in addition to passive optical sensors like cameras. Some of those methods that project 2D patterns, for example, using a video projector are called structured-light methods for 3D reconstruction. While the structured-light methods were developed to measure static objects in the early stage of research, the recent studies have attracted the attention by extending them to measure dynamic objects. In this paper, we classify various structured-light methods from the viewpoint of the solution of correspondence problem, and introduce our one-shot 3D reconstruction to measure dynamic objects.

Keywords: structured light, correspondence problem, one-shot 3D scanning

1. はじめに

カメラを用いた3次元距離計測法、形状計測法の原理の1つに、2台以上のカメラを用い、三角測量に基づいて距離を計測する方法が挙げられる。三角測量では、カメラ間の相対位置が既知であることを仮定し、2つのカメラ画像で同じ3次元点が写っている画像点を見つけると、交差する視線方向を用いて2台のカメラと3次元点からなる三角形が計算でき、カメラからの距離がわかるものである。

コンピュータビジョンの分野において、パッシブセンサであるカメラのみを利用した3次元計測の代表例は、ステレオ復元である。しかし、近年の最先端の多視点ステレオ法を

利用しても、同じ点がどこに写っているか正確に決められない場合（例えば、滑らかで一様な表面を持つ工業製品など）、対象物の形状を高密度、高精度に計測することは困難である。一方、特殊な光源を利用してパターン光（構造化光）を投影するアクティブ 3 次元計測では、上記の問題を比較的容易に解決でき、高精度、高密度な計測結果が得られる。このことから、実際の形状計測では、アクティブ 3 次元計測手法が多く利用されてきた。

構造化光によるアクティブ 3 次元計測の多くは、プロジェクタ・カメラ系による三角測量システムとして実現されるため、その本質的な課題は、撮影されたカメラ画像と投影したパターンのどの部分が同じか、という対応点問題を解決することである。本稿では、対応点問題について、その代表的な解決手法である、時間エンコード法および空間エンコード法を中心に解説する。より詳しい内容については、文献[1]を参照されたい。さらに、近年注目されつつある動いている観測対象の形状計測を行う方法として、ワンショット形状計測法を紹介する。

2. 対応点問題およびその解決方法による分類

構造化光による形状復元では、プロジェクタで単一又は複数のパターンをシーンに投影し、撮影することで 3 次元復元を行う。そのためには、投影パターン上の点と撮影されたシーンとの対応関係を知ることが必要である。典型的なシステム構成および対応点問題を図 1(左)に示す。プロジェクタの光学系はカメラと同等とみなせるため、計測システムはステレオカメラにおける 1 台のカメラをプロジェクタに置き換えたものに等しい。従って、対応点問題の解決にエピポーラ拘束を用いることができる。エピポーラ拘束とは、2 台のカメラで撮影された画像上における幾何的な性質から導かれ、片方の画像上で撮影された点は、その点の奥行きに関わらず、もう一つの画像上で一本の線上にある（これをエピポーラ線と言う）という拘束である[2]。このため、カメラ画像上でのプロジェクタ上の特徴点の探索は、エピポーラ線上の 1 次元に限定される。この性質を利用すれば、例えば縦方向に同じ色を持つストライプパターンなどを用いることができ、実際に多くの手法はそのようなパターンを用いている。対応関係の取得方法としては、パターンの時間的あるいは空間的变化を用いて位置情報を埋め込むことが考えられる[3]。時間エンコード法は図 1(中)に示すように複数枚のパターンを投影し、その時間的な変化に位置情報を埋め込む。一方で、空間エンコード法は図 1(右)に示すように色情報などを利用して、ある一定の空間的領域に位置情報を埋め込む。時間的変化のみを利用する方法は実装が容易であり、精度も高く密で安定なため、実アプリケーションにおいて広く利用されている。しかし、この手法は複数の画像を必要とするため、動きのある物体の形状復元には不向きである。一方で、プロジェクタから投影する画像に、各々の画素位置を同定するための情報をパターンとして空間中に埋め込む方式だと、一枚の撮影画像のみからシーンを復元することができるため動きのあるシーンに適している。しかしこの場合、対象物体が複雑な形状や色をしているとパターンの見え方が大きく変わり、画像位置の情報を正しく取り出せなくなり、正しく計測できなくなることがある。この問題を解決することが空間エンコード法の課題となる。

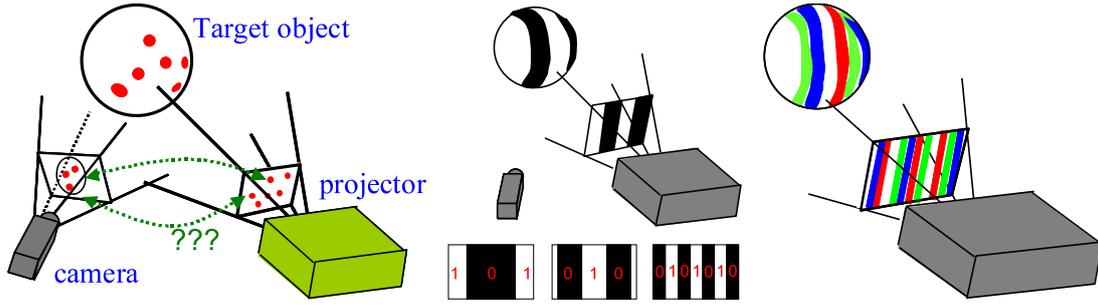


図 1: (左)プロジェクタ・カメラ系の対応点問題、(中)時間エンコード法、(右)空間エンコード法。

2.1. 時間エンコード法

時間エンコード法では、プロジェクタの画素の位置情報を複数のパターンに時間的にコード化することでこれを行なう。このような画像の時間的変化を利用する方法は、実装が容易なため、古くから利用されている[4, 5, 6, 7, 8]。以下では、基本的な時間エンコード法である、バイナリコードパターン投影法と位相シフト法について説明する。

2.1.1. バイナリパターン投影法

時間エンコード法としてよく用いられる方法が、図 1 (中) のように白黒 2 値ストライプパターンを投影する方法である。投影するパターンの各画素の x 座標が、 N ビットの符号 $\mathbf{c} = c_0c_1 \cdots c_{N-1}$ で表されるとする。この時、パターンを各ビットを表す N 個の画像に分割し、 i 番目の画像の各画素は、 \mathbf{c} の最上位ビット (MSB) から i ビット目の値 c_i で決められる ($c_i = 0$ なら黒, $c_i = 1$ なら白) とする。このような N 個のパターンを時系列でシーンに投影して、その白黒を判別することにより各画素について N ビットのバイナリ系列 $\mathbf{d} = d_0d_1 \cdots d_{N-1}$ を得ることができる。観測の誤りがなければ $\mathbf{d} = \mathbf{c}$ であり、 \mathbf{c} とに対応するプロジェクタ座標 x は一意に決定できるので、画像の画素とプロジェクタ座標 x との対応が求められる。

座標値 x から \mathbf{c} を作る単純な方法は x の 2 進コードを \mathbf{c} とするものであるが、この方法は、誤りに弱いことが知られている。例えば $N = 4$ の場合に c_0 が誤ると、 x は正しい値から 4 ずれてしまう。

これを避けるために、バイナリ系列としてグレイコードがよく用いられる。 x の 2 進表示を $\mathbf{b} = b_0b_1 \cdots b_{N-1}$ 、グレイコード表示を $\mathbf{g} = g_0g_1 \cdots g_{N-1}$ とすると、 \mathbf{b} から \mathbf{g} への変換は排他的論理和 \oplus を用いて、

$$g_0 = b_0, \quad g_{i+1} = b_i \oplus b_{i+1}, \quad (1)$$

逆に \mathbf{g} から \mathbf{b} への変換は

$$b_0 = g_0, \quad b_{i+1} = b_i \oplus g_{i+1} \quad (2)$$

で行うことができる。例えば、バイナリコード 0101 はグレイコードの 0111 に対応する。

グレイコードには、座標値 x のコード $\mathbf{c}(x)$ と、隣り合う座標 $x+1$ のコード $\mathbf{c}(x+1)$ が、1 ビットしか変化しないという性質がある。これには二つの利点がある。一つは、パターンの境界 (ここでは白黒判別の誤りが生じやすい) が、 $\mathbf{c}(x)$ と $\mathbf{c}(x+1)$ の間で一つの画像のみに現れ、パターン全体の境界の数が最小になることである。もう一つはパターンの境界において判別誤りが生じても、誤った \mathbf{c}' は正しいパターン \mathbf{c} の隣のパターンになるため、 x の誤

差が1に抑えられることである。

2.1.2. 位相シフト法

時間エンコード法でよく用いられるもう一つの方法として位相シフト法がある。位相シフト法では、正弦波パターンなどの周期的な輝度値パターンを位相をずらしながら複数回観測対象に投影する。位相に伴う輝度値変化を観察すると、各画素について周期の位相を計算できる。輝度値を利用して位相を決定するため、サブピクセル精度でカメラ、プロジェクタ間の対応を得ることができる。

$N(\geq 3)$ 個のパターンを利用し、輝度値から位相を計算するための方法を説明する。単位プロジェクタ座標に対するパターンの空間周波数を f とすると、プロジェクタ座標 x における正弦波の位相は、 $2\pi fx$ となる。これを $\phi(x)$ とおく。 n 番目($0 \leq n \leq N-1$)のパターンを

$$P_n(x) = A \cos\left(\phi(x) + \frac{2\pi n}{N}\right) + B \quad (3)$$

とする。ただし、 A は正弦波の振幅で、 B は直流成分である。これは、 $1/N$ 周期だけずらされた N 個の正弦波パターンである。

あるカメラ画素 p での n 番目の観測値を I_n ($0 \leq n \leq N-1$)とする。対応するプロジェクタ座標を x とし、直接反射成分が、入射光の強さに対して線形であることを仮定すると、観測値は、

$$I_n = C \cos\left(\phi(x) + \frac{2\pi n}{N}\right) + D \quad (4)$$

となる。ただし、 C と D は観測される正弦波の振幅と直流成分で、画素 p によって異なる。

$$I_n = \cos(2\pi n/N) (C \cos(\phi(x))) - \sin(2\pi n/N) (C \sin(\phi(x))) + D \quad (5)$$

から、 $E \equiv C \cos(\phi(x))$, $F \equiv C \sin(\phi(x))$ と置きなおすと、未知数 D , E , F についての N 個の線形方程式が得られる。 $N=3$ なら直接これを解くことができ、 $N>3$ なら疑似逆行列を用いて最小二乗解を求められる。すると、 E , F から画素 p の位相 $\phi(x)$ を求められる。

$\phi(x)$ はプロジェクタ座標に関する周期的な相対座標を表している。したがって、各周期内での対応は一意に決定できるが、周期の曖昧性が残っている。そのため、位相アンラッピングと呼ばれる曖昧性を取り除く処理を行い、各カメラ画素とプロジェクタ座標を一意に対応づける必要がある。位相アンラッピングには、積分順序を工夫する方法[8]、バイナリコードと組み合わせる方法[9]、複数波長の周期パターンを利用する方法[10]などが提案されている。いずれの手法でも、撮影枚数が大幅に増えてしまうという問題があるが、最近、縦横2方向のフェーズ画像のみから、その間の拘束条件を用いることで位相アンラップを実現するという手法も提案されている[11]。

2.2. 空間エンコード法

第2.1節で紹介した時間エンコード法は、簡易な構成で比較的高い計測精度が実現できるため、これまで数多く研究・商品化されてきた。一方で、特殊なパターンを用いて空間的にエンコードする手法は、対象物体の形やテクスチャの影響を受けやすく、精度や密度を高くすることが難しく、これまで実用化が遅れていた。しかし、最近になり、単一フレ

ーム画像のみによる形状計測が、動物体などの計測に向いているとして注目されるようになり、多くの研究が行われるようになってきている¹ [12, 13, 14, 15]。

アクティブ計測の最も重要な課題は、安定かつ曖昧性のない対応点を十分な密度で獲得することである。第2節の冒頭で述べたように、構造化光による3次元形状計測システムでは、対応点の獲得に関してエピポーラ線上における1次元の曖昧さがある。空間エンコード法ではこれを解消するため、パターンの2次元的な配置の中に対応点情報を埋め込む(エンコードする)。このため高密度な計測を行おうとすると、パターンの密度を高める必要があるが、高密度なパターンでは、繰り返し同じパターンが出現する可能性が増すため、曖昧さが増す。一般に、マッチングの曖昧さを無くすためには、色数を増やしたり、パターンの形状を利用するなど、パターンを複雑にすることが行われるが、画像処理の精度や、対象物体の表面形状やテクスチャなどの影響を考慮すると、パターンの色数や形状は、逆に少ない程(単純な程)良い。このように、パターンの複雑さや解像度・精度などにはトレードオフの関係がある。さらに、実際の計測シーンでは、投影する対象が3次元物体であることや、これをカメラで撮影する際に2次元に射影されることから、必然的にパターンが歪むという問題がある。このように厳しい条件の中で、高密度かつ曖昧さが少ない、と言う矛盾した要求を同時に満たす効率的なパターンを生成することが、空間エンコード法の重要な目的の一つである。

これまで、このような空間エンコード法として提案されてきた手法は、対応点の獲得方法により、大きく以下の3つの手法に分類することができる。それぞれの手法の概要を図2に示す。以下で各手法の詳細について紹介する。

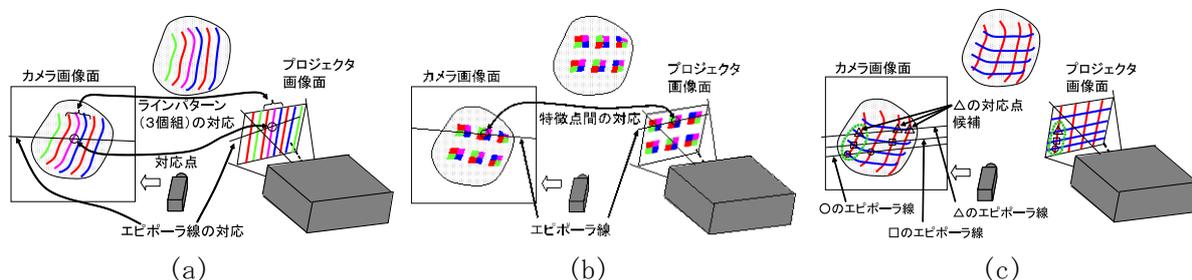


図2: ワンショット方式のエンコード法: (a)ラインベースの手法の例。図において、ライン同士の対応関係の判定は、連続した3個のラインの色で判定されている。(b)エリアベースの手法の例。対応関係は、4個の色から成る2次元特徴のマッチングで判定される。特徴のマッチングは、エピポーラ線に沿って行われる。(c)グリッドグラフベースの手法の例。○、□、△の対応点候補をエピポーラ線に沿って探索するとそれぞれ複数あるが、それらの接続の関係から、候補の曖昧性を解消可能である。緑色の点線は、正しい対応点の位置を表す。

2.2.1. ラインベースの手法

この方式では、ラインパターンを投影し、これとエピポーラ線との交点により対応関係を確定させる。このため、検出されたラインが、投影パターン上のどのラインか、という対応関係を得るため、その情報をラインに埋めこむ。この手法の例を図2(a)に示す。

これまで提案されてきた手法としては、ラインに直接情報を埋め込む方式が取られることが多い[4, 13, 19, 20, 21, 22]。最も単純な手法としては、輝度値をそのままIDとすること

¹ このような、単一フレーム画像を用いた計測手法は、ワンショットスキャンと呼ばれる。

が考えられ、これはダイレクトメソッドと呼ばれる。ダイレクトメソッドでは輝度値を直接用いるため、特殊な条件下での例が幾つか報告されているだけであり、精度や信頼性の低さから実用化は難しいと考えられる。そこで、動物体などの実用的な計測に用いるために、エピポーラ線上に沿ってその前後の輝度値も同時に利用することで安定性を増すことが通常行われている。例えば、RGB それぞれの輝度値を用いる手法[13]や、さらにダブルイン系列を用いて色つきのラインに情報を埋め込む手法などがある[23]。しかし、輝度値自体に情報を持たせる手法は、パターンの輝度値が、投影対象の物体表面のテクスチャの影響を直接受けるため、その精度は一般に低く不安定である。このため、その問題を回避するために、パターンの On/Off という 2 値のみを用いる方法が考えられる。例えば、ラインを破線にしてその破線パターンとして情報を埋め込む手法[20]や、ラインの太さを凸凹にすることで、情報を埋め込む手法[21]などがある。

2.2.2. エリアベースの手法

ラインベースの手法では、対応情報をラインに沿って埋め込んだり、ライン単位によるデコードを前提としているため、ある程度の長さのラインが検出されるか、ある程度連続したパターン列が観測されなければならない。これは現実的には大きな制約となるため、エンコードに際して On/Off 以外に、連続的な輝度情報が用いられることも多く、その場合、今度はテクスチャの影響を受けやすくなり復元が不安定となる。この問題を解消する手法として、ある程度の広がりを持ったエリアに情報を埋め込み、ウィンドウマッチングなどにより対応関係を得る手法が提案されている [12, 14, 15, 16, 17, 24]。この手法の例を図 2(b)に示す。

例えば Morano らは M-array という $M \times M$ ピクセルのエリアで一意性を確保するパターンを用いた手法を提案している [16]。木村らは 2×2 のセルに RGB により対応点情報を埋め込む手法を提案している [17]。Kinect [25]は単色でありながら、ドットをうまく配置することで、視差の範囲内で一意性を保つパターンを使用している。

エリアベースの手法でも、ラインベースの手法同様にエピポーラ幾何が成り立つため、ローカルエリアのパターンのユニークさは各エピポーラ線上でのみ実現されていれば良い。このため、エリアベースの手法では情報を 2 次元的に効率良く埋め込むことが可能であり、対象の大きな形状変化や、テクスチャの変化に比較的ロバストとなる。ただし、精度向上のためにカメラとプロジェクタの距離（ベースライン）が離れていたり、対象物体の表面の向きが視線方向に対して垂直に近い場合等にはパターンが大きく歪むため、単純なエリアマッチング手法では対応付けに失敗し形状復元ができなくなるという問題がある。パターンのエンコード・デコードで工夫することで、ある程度の歪みにも対応できる手法も提案されているが、限界がある。

2.2.3. グリッドグラフ（ラインどうしの接続関係）による手法

前述のようにエリアベースの手法では、現実には、ベースラインや形状変化によるパターンの歪や、物体テクスチャの影響を受けて精度が低下する。一方で、ラインパターンの場合、ラインが連続的につながってさえいれば歪みの影響はほとんど受けない。しかし、ラインベース法で必要となる長く連続したラインまたはパターンの検出は、テクスチャの

影響や形状の不連続部分においてラインが必然的に切れてしまうため現実には難しい。

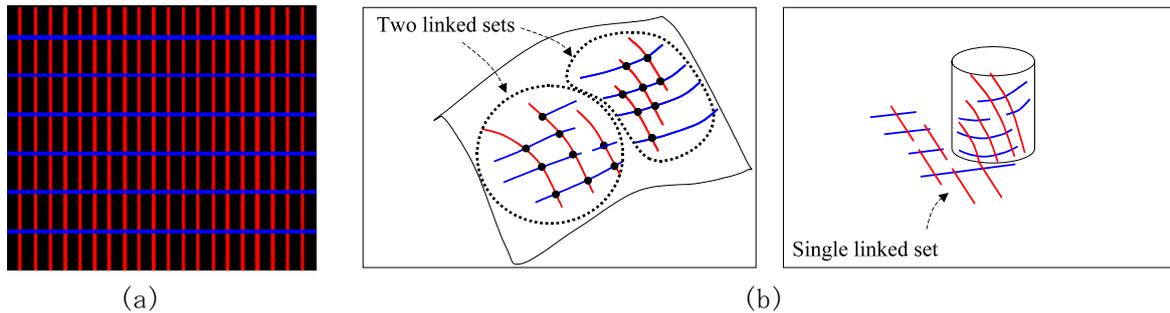


図 5: (a) グリッドグラフベースのパターン例、(b) グラフ連結の例 (左)2つの連結グラフ、(右)一つの連結グラフ

もし図 5(a)に示したラインパターンが図 5(b)のようにグラフ状に連結されて撮影されており、そのグラフ上での連結性（接続性）が、ライン一本一本の連続性に準じて利用可能であれば、パターンの歪みの影響を受けにくい極めてロバストな対応関係の取得が可能となる。このような考えに基づき、ラインどうしの交点の「配置」と、その交点どうしの「つながり」により、対応関係を確定させる手法が提案されている[26, 27, 28]。この手法では、ラインやエリアそのものには何の情報も埋め込まれないため、パターンは非常にシンプルとなり、検出もロバストであり、形状が激しく変化することが多い動物体計測などに適している。この手法の例を図 2(c)に示す。

最初に提案された手法では、1台のプロジェクタから縦横2種類の直線状パターンをグリッド状に照射し、これらパターンどうしの交点に共面性条件が成立することを利用して、3次元形状の復元を行うものであった[26]。共面性条件とは、画像上で観測される平面どうしの交線や交点に存在する幾何学的な拘束条件であり、解空間が4自由度であることが知られている[29, 30]。

これにより 1000 コマ/秒で撮影した風船が破裂する瞬間の形状計測に成功している。その後、解の安定性を増すために、デブルーイン系列を色[27]や、パターン間隔[28]に用いる手法などが提案されている。デブルーイン系列とは、記号数 q 、位置を一意に特定するのに必要な長さ n からなる長さ q^n の数列である。長さ n 、記号数 q のデブルーイン系列は、長さ q^n の数列であり、長さ n の部分数列を観測すれば、数列中の位置が一意に特定可能という特徴を持つ。このため、アクティブスキャンのカラーコードの識別などにも用いられている[12, 15, 23]。

3. ワンショット形状計測法

アクティブ方式の形状計測に基づいて、動体の形状計測を実現するため、我々は第 2.2.3 節に述べたグリッドグラフによって得られる拘束条件を利用したワンショット計測法を研究開発してきた。本節では、カラーパターンを用いた密な形状計測、単色波線パターンを用いた形状計測、全周形状計測への拡張という3つの方法について紹介する。

3.1. カラーグリッドパターンを用いた密な形状復元

時間エンコード法は当初よりピクセル毎の対応関係が得られるため、一般に高い密度での形状復元が実現できる。一方で空間エンコード法（ワンショット計測）の場合、2.2 節で述べたように、一定のエリアに情報を埋め込む性質上、高密度な形状復元が原理的に難しい。動物体計測のニーズの高まりから、空間エンコード法による計測システムの実用化が進む中、空間エンコード法においても密な形状復元手法が強く望まれるようになってきている。

そこで、デブルーイン系列に基づいたカラーパターン[27]の画像処理を拡張し、滑らかな領域ごとにセグメンテーションして、そのセグメント内においては全ピクセルが非常に密なグリッドを構成していると考ええることで、高密度かつ安定した復元を実現する手法も提案した[11, 31]。グリッドグラフのラインの間をガボールフィルタを用いて効率よく補間することで、ピクセル単位での形状復元を実現する手法となっている。この手法により、液体にボールが投げ込まれた際の細かい水面波の形状変化や、顔の筋肉の微妙な変形などの計測に成功している(図 6)。

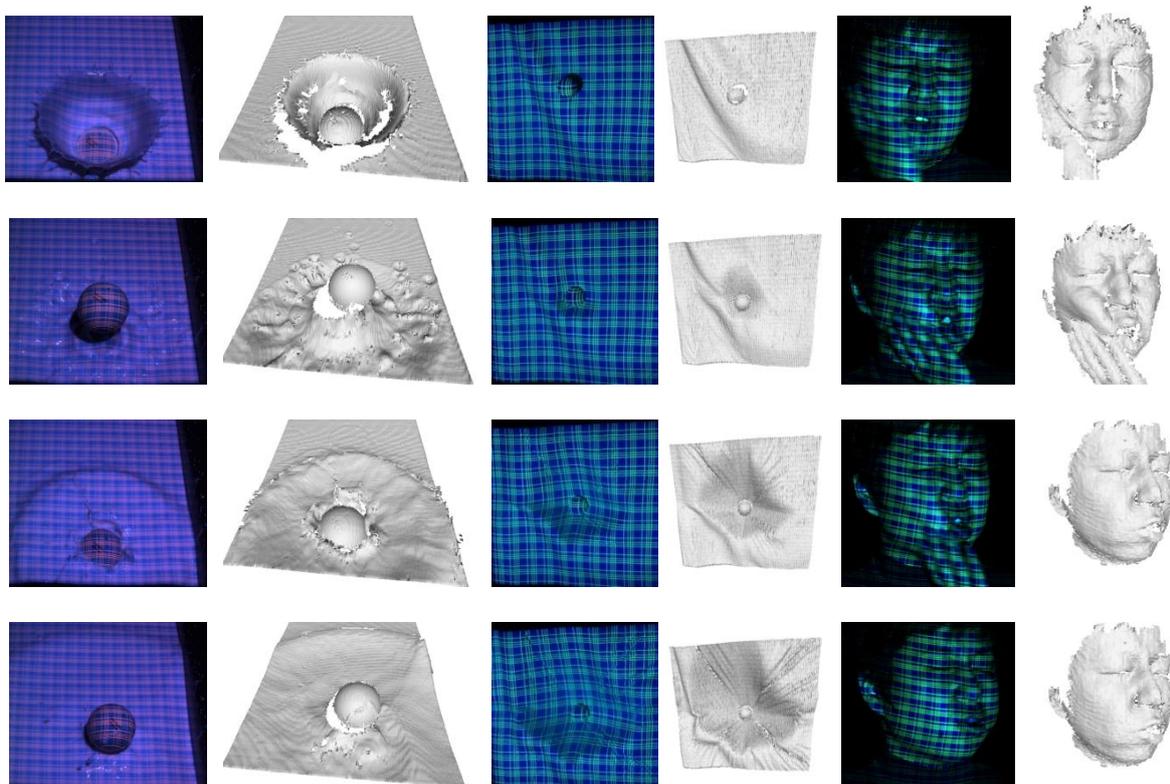


図 6：密な形状復元例：(左) ボールの水しぶきの様子 (中) 布とボール (右) 人物の顔

3.2. 単色波線グリッドパターンを用いた形状計測

色情報を利用すると、パターンの自由度を上げることができ、一意に決定できるパターンを作りやすくなる、という利点がある。しかし、色情報を利用すると、観測対象の表面が RGB の各色要素を十分に反射する必要がある。また、市販のプロジェクタでは各色要素間のスペクトル分布が干渉するため、各画素の色の決定には誤差が生じやすいという問題

が発生する。このため、色を利用しない空間符号化手法を実現するとこのような問題を解決できる。そこで、線検出ができれば良いというグリッドグラフに基づいた手法の利点を生かしつつ、単色で一意に決定できるパターンとして、図7のようにグリッドパターンを構成する線を波線にする方法を提案した[32, 33]。正弦波で表される縦横の波線の周期とずれるように波線間隔を設定すると、交点が起こる波線の位相が変わるため、交点付近の波線の形を使ってパターンを見分けることができる。この局所的なパターンから得られる特徴量と、グリッドグラフから得られる拘束条件を使って一意に対応を決めることができる手法である。図8に動作する人物の形状計測例を示す。

3.3. 全周形状計測

一つの視点からの画像を利用した3次元形状計測では、3次元形状の一部しか計測できない。しかし、多くの応用では、3次元形状全体を計測することは大きな重要性を持つ。このためには、複数の視点からの3次元形状計測を同時に行う必要がある。

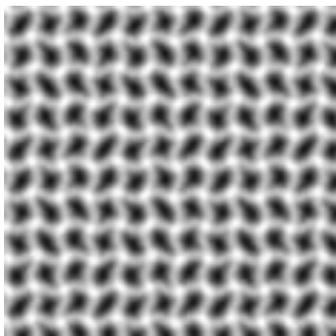


図7：縦横の波線からなる単色波線グリッドパターン



図8：単色波線グリッドパターンを用いた人物の三次元形状計測

アクティブ光源を利用する計測において、全周囲計測を行うためには、複数の光源を対象物体に投影する必要がある。この場合、複数の光源が干渉するため、これを分離できるようにすることが必要となる。このための方法としては、時分割による方法や、色による方法などが考えられるが、利用可能な色数の問題や、装置が複雑になるなどの問題がある。

そこで我々は、プロジェクタとカメラを交互に円周状に配置し(図9)、動的なシーンの全周囲形状計測を行う手法を提案した[34]。投影される光源は、それぞれ2色の平行パターンである。平行パターンは、角度情報等を用いて、比較的簡単に分離することができる。上記文献の手法では、確信伝搬法(Belief Propagation)によるセグメンテーションにより、平行線群が連続性を考慮して分離される[27]。

抽出された平行線パターンからの復元は、パターン同士の交点を利用して、グリッドグラフによる復元手法[26, 27, 28]と(2.2.3節を参照)類似した方法で行われる。交点に置けるパターン同士の接続性を考慮すると、連結なパターン集合の3次元位置は、ほぼ1次元の曖昧性を持つ。この曖昧性を、複数のカメラによる照合によって解消することで、安定した3次元復元が実現されている。図9(右)に復元結果を示す。複雑なパターンが重なっているにもかかわらず全周の形状が復元できていることが分かる。



図 9：全周囲形状計測システム：(左)機器構成、(中)入力画像、(右)計測結果。

4. おわりに

本稿ではプロジェクタ・カメラ方式による構造化光を用いたアクティブ 3 次元計測について、その主たる問題である対応点問題の解決法の観点から様々な方法を分類した。また、これを動物体計測に応用するための手法として、これまでに提案してきたグリッドグラフに基づいたワンショット形状計測法を紹介した。今後は、爆発や衝突シーン、ジェットエンジン内で回転するタービンブレードなど、さらに高速な動きでも計測可能な超ハイスピードスキャンや、炎天下の屋外で広い範囲にわたり運動するスポーツ選手などを計測可能なワイドレンジなスキャンシステムの開発が望まれる。そのためには、計測アルゴリズムに加えて、強力かつ被写界深度の深い光源の開発が必要になってくると考えられ、レーザーと組み合わせたパターン光源などの新たな光学機器の開発も課題となっている。本解説が、そのようなアクティブ 3 次元計測の今後の発展や理解に役立つことを期待する。

参考文献

- [1] 川崎洋, 古川亮, 佐川立昌. 構造化光を用いたアクティブ 3 次元計測の原理と展開. コンピュータビジョン最先端ガイド 5. アドコム・メディア, 2012.
- [2] O. Faugeras. Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint. The MIT press, Cambridge, MA, 1993.
- [3] J. Batlle, E. M. Mouaddib, and J. Salvi. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition*, Vol. 31, No. 7, pp. 963982, 1998.
- [4] K. Sato and S. Inokuchi. Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask. In *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, pp. 657-661, 1987.
- [5] D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir. Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 20, No. 5, pp. 470-480, 1998.
- [6] K. L. Boyer and A. C. Kak. Color-encoded structured light for rapid active ranging. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 9, No. 1, pp. 14-28, 1987.
- [7] H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor, F. Lilley, and C. J. Moore. Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, Vol. 46, No. 2, pp. 6623-6635, 2007.
- [8] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, And Software*. Wiley-interscience, 1998.

- [9] J. Gühring. Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. In *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, Vol. 4309, pp. 220-231, 2001.
- [10] H. Zhao, W. Chen, and Y. Tan. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes. *Applied Optics*, Vol. 33, No. 20, pp. 4497-4500, 1994.
- [11] R. Sagawa, H. Kawasaki, R. Furukawa, and S. Kiyota. Dense one-shot 3D reconstruction by detecting continuous regions with parallel line projection. In *ICCV*, pp. 1911-1918, 2011.
- [12] C. Je, S. W. Lee, and R.-H. Park. High-contrast color-stripe pattern for rapid structured-light range imaging. In *ECCV*, Vol. 1, pp. 95-107, 2004.
- [13] J. Tajima and M. Iwakawa. 3-D data acquisition by rainbow range finder. In *ICPR*, pp. 309-313, 1990.
- [14] J. Pan, P. S. Huang, and F.-P. Chiang. Color-coded binary fringe projection technique for 3-d shape measurement. *Optical Engineering*, Vol. 44, No. 2, pp. 23606-23615, 2005.
- [15] J. Salvi, J. Batlle, and E. M. Mouaddib. A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement. *Pattern Recognition*, Vol. 19, No. 11, pp. 1055-1065, 1998.
- [16] R. A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, and J. Nissanov. Structured light using pseudorandom codes. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 20, No. 3, pp. 322-327, 3 1998.
- [17] M. Kimura, M. Mochimaru, and T. Kanade. Measurement of 3D foot shape deformation in motion. In *4th Digital Human Symposium*, 3 2009.
- [18] Primesense. United States Patent Application US 2010/0118123, 2010j.
- [19] S. Zhang and P. Huang. High-resolution, real-time 3D shape acquisition. In *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, p. 28, 2004.
- [20] M. Maruyama and S. Abe. Range sensing by projecting multiple slits with random cuts. In *SPIE Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision IV*, Vol. 1194, pp. 216-224, 1989.
- [21] Artec. United States Patent Application 2009005924, 2007j.
- [22] T. P. Koninckx and L. V. Gool. Real-time range acquisition by adaptive structured light. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 28, No. 3, pp. 432-445, March 2006.
- [23] L. Zhang, B. Curless, and S. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *3DPVT*, pp. 24-36, 2002.
- [24] P. Vuytsteke and A. Oosterlinck. Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 12, No. 2, pp. 148-164, 1990.
- [25] Microsoft. Xbox 360 Kinect, 2010. <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [26] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, and Y. Yagi. Dynamic scene shape reconstruction

- using a single structured light pattern. *CVPR*, pp. 1-8, June 23-28 2008.
- [27] R. Sagawa, Y. Ota, Y. Yagi, R. Furukawa, N. Asada, and H. Kawasaki. Dense 3d reconstruction method using a single pattern for fast moving object. In *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2009.
- [28] A. O. Ulusoy, F. Calakli, and G. Taubin. One-shot scanning using de bruijn spaced grids. In *The 7th IEEE Conf. 3DIM*, pp. 1786-1792, 2009.
- [29] R. Furukawa and H. Kawasaki. Self-calibration of multiple laser planes for 3D scene reconstruction. *3DPVT*, pp. 200-207, 2006.
- [30] 古川亮, 川崎洋. 共面性情報および幾何学的条件を用いた影からの3次元形状復元. 情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 1, No. 2, pp. 111-123, 2008-07-24.
- [31] 佐川立昌, 川崎洋, 古川亮, 清田祥太. 平行線投影を用いた連続領域の検出による高密度なワンショット形状復元. 第14回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), pp. 416-423, 2011.
- [32] R. Sagawa, K. Sakashita, N. Kasuya, H. Kawasaki, R. Furukawa, and Y. Yagi. Grid-based active stereo with single-colored wave pattern for dense one-shot 3d scan. In *Proc. 2012 Second Joint 3DIM/3DPVT Conference*, pp. 363-370, 2012.
- [33] 阪下和弘, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, 八木康史. 高密度3次元形状復元のための単色波線パターンを用いたグリッド能動ステレオ. 第15回画像の認識・理解シンポジウム予稿集, 2012.
- [34] R. Furukawa, R. Sagawa, H. Kawasaki, K. Sakashita, Y. Yagi, and N. Asada. One-shot entire shape acquisition method using multiple projectors and cameras. In *4th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, pp. 107-114. IEEE Computer Society, 2010.

山口喜博・谷川清隆「馬蹄への道－2次元写像力学系入門－」

関口昌由

木更津高専

masa@kisarazu.ac.jp

Yamaguchi and Tanikawa "Roads to Horseshoe – Introduction to Two-dimensional Reversible Mappings"

Keywords: Smale Horseshoe, Topological Entropy, Non-Birkhoff Periodic Orbits, Homoclinic Orbits

1. はじめに

あらかじめお断り申し上げておくが、評者は両著者に日頃お世話になっている。そのため、この書評が偏っている可能性はあながち否定できない。

評者はこの分野（離散力学系）の専門家ではない。「門前の小僧」程度である。もし読者も評者と同程度、との自覚がおありならば、本書の「はじめに」を熟読されることを推奨する。通常、評者は、序文は斜めに読む。なぜならば内容を理解するためにはそれで十分だと思っているからだ。一方、本書では「はじめに」は必携の道案内である。評者もこれで迷わずに済んだ。

「はじめに」では、まず完全可積分系（等速並進運動系）を内包するカオス系（可逆スメール馬蹄系）を俯瞰できる。等速並進運動系を出発し、接続写像族なるワンパラメータ写像族に沿って、記号力学を頼りに、位相的エントロピーで高度を測りながら、可逆スメール馬蹄系という頂上に到達する。ここに書名の由来がある。

次に、本書の全体構成を眺めることができる。第1章から第6章までは準備である。ただし、第6章は後回しにしてよいらしい。第7章と第8章が本論である。また、対比としてエノン写像への言及がある。これによって本書の位置づけが明らかにされる。

末尾には、必要な『数学的道具』が列挙されているが、著者の謙遜なのか、過少である。少なくとも参考文献に挙げられているうちの1冊には目を通しておいた方がよい。本書副題に「入門」の文字があるが、どちらかと言えばハードである。あるいは、それでも入門編と称するほどに、この分野が難解であることを物語っているのかもしれない。我々には、馬蹄系のほかにもう一つの山がある。本書の通読もまた登山に譬えられよう。

2. 諸概念の準備（第1章～第5章）

第1章では、2次元接続写像が定義され、面積保存性、方向保存性、可逆性、軌道の対称性も説明されている。不動点の分岐に伴うポアンカレ指数の変化が詳細に記述され、安定多様体、不安定多様体と基本領域が導入される。

第 2 章では、基本領域上の写像の不変集合として可逆スメール馬蹄 Λ が定義される。 Λ は記号列空間と全単射で対応するため、写像系は記号力学で研究できる。周期軌道に対応する有限記号列（コード）の回転数、偶奇性、時間反転対称性が説明される。とくにコードの順序保存性の解説に伴い、順序保存周期軌道としてバーコフ型周期軌道が定義される。

第 3 章では、普遍被覆面上の対称線と楕円型不動点の回転数を用いて対称周期軌道が分類され、そのコードの時間反転対称性や主軸定理が説明される。さらにサドル型、楕円型の周期軌道のコード決定、とくに対称バーコフ型のコード決定が紹介される。

第 4 章では、楕円型周期点の共鳴領域と共鳴鎖が定義され、コードの最大値表示・最小値表示の決定方法が与えられる。サドル型不動点に伴う安定・不安定多様体の弧による共鳴領域の分割に基づいてブロックが定義される。またブロックが示す 2 領域間の遷移行列が与えられる。さらに周期軌道のコードはすべてブロックで表示できることが示される。

第 5 章では、主ホモクリニック軌道と 2 次ホモクリニック軌道が定義され、その違いや記号列の特徴が説明される。とくに核と内核はホモクリニック軌道の特徴づける重要な概念である。内核のブロック表示が与えられ、核のデコレーションが定義される。ホモクリニック点の方向指数が定義され、ホモクリニック軌道の記号列に対応して決定することが示される。

3. 位相的エントロピー (第 6 章)

位相的エントロピーを用いると接続写像系の複雑さを測定できる。まず周期解の個数の増加率をもとに位相的エントロピーが定義される。その下限は、不動点の個数の増加率、とくに順序保存性を利用して評価できるというボウエンの定理が示される。6.4 節ではホモクリニック交差を利用した位相的エントロピーの計算方法であるトレリス法が紹介される。トレリス法は、軌道を組みひもに置き換えることで力学系を分類するニールセン・サーストンの定理を前提としている。この解説に、6.2 節、6.3 節が割り当てられている。

4. 本論 (第 7 章、第 8 章)

7.3 節は、展望台と言うべきところで、前後左右の関係性が概観できる。また、8.1 節を読むと、著者の研究意図が見えてくる。すなわち、2 次元写像系の順序関係は半順序であるから、本書は、可逆スメール馬蹄 Λ の周期軌道全体を線形順序に従う族たちに分類整理しようという挑戦であることがわかる。7.5 節、8.4 節に分類と順序の例が与えられている。そういえば登山道にもこのような案内板がところどころあるものだ。

第 7 章では、対称非バーコフ型周期軌道の出現順序が整理される。ボウエンの定理に基づいて位相的エントロピーの下限が評価される。それらの出現順序は位相的エントロピーの大小関係に一致する。その両極限にホモクリニック軌道が位置する。

第 8 章は、ホモクリニック軌道を対象とする。その出現順序から、内核のブロック表示を利用した議論が展開される。こうして第 2 の方法で位相的エントロピーが計算される。圧巻は図 8.10 (p. 245) である。この山の断面図のようにも見え、象徴的だ。

5. おわりに

付録だけでも 40 ページを超える。ポアンカレ・バーコフの定理や線路算法、様々なアルゴリズム、第 7 章 (pp. 215-216) に収めきれなかった周期軌道のデータ、プログラムに至るまで網羅されている。参考文献も 110 件を数え、著者の苦労が想像できる。

評者はこの山を制覇したつもりだが、その理解は怪しい。おや、と思われる諸兄におかれてはぜひご購入の上、ご自身で確かめられたい。

書籍情報

書名：馬蹄への道—2次元写像力学系入門—

著者：山口 喜博・谷川 清隆

ISBN：978-4-320-11149-3

判型：A5

ページ数：322 ページ

発行年月：2016 年 04 月

本体価格：4,600 円

第82回形の科学シンポジウム 「産業技術と私たち」要旨

(講演予稿集は <http://katachi-jp.com/paper/Symposium82v2.pdf> よりダウンロードできます)

10月7日(金)

産業技術と私たち (公開講演)

【招待講演】

材料の原子構造を表現するための多面体の命名法

西尾憲吾 (産業技術総合研究所)

Polyhedra are ubiquitous. For example, when we look at materials at the atomistic level, each atom is surrounded by neighboring atoms and the neighboring atoms form the vertices of a polyhedron. In amorphous materials, in particular, atoms form a variety of polyhedra. Some polyhedra may be highly symmetric ones such as icosahedra [1,2]. But most of them are non-symmetric ones, and are nameless. Since names are a fundamental tool to identify and distinguish objects, the lack of names of polyhedra is a serious problem in understanding how atoms are arranged in materials. In this talk, as a solution of this problem, I explain a method to give names to polyhedra in such a way that their names instruct how to construct them from their building-block polygons [3]. The method can be generalized to higher-dimensional polytopes, and provides the basis for studying structures in any dimension.

構造化光投影による3次元計測の分類とワンショット動体形状計測法

佐川立昌 (産業技術総合研究所)、川崎洋 (鹿児島大学)、古川亮 (広島市立大学)

カメラのようなパッシブな光学センサだけでなく、特殊な光源を利用して、光を対象物体に照射することで計測を行う手法をアクティブ3次元計測という。その中でビデオプロジェクタなどを利用して2次元パターンを投影する方法は、構造化光投影3次元計測と呼ば

れる。これらの手法は、静止物体の計測から研究が始められたが、近年では動的な物体の計測にも利用され、注目を集めている。本稿では、様々な構造化光投影法を対応点問題の解決法の観点から分類するとともに、動的な物体の計測法としてワンショット形状計測法を紹介する。

形の科学一般

対称周期軌道の安定性は何が決めているのか

山口喜博 (元帝京平成大学)

Stability of symmetric periodic orbits is determined by the configuration at which the two symmetry axes intersect. Using this fact, we obtain the necessary and sufficient condition for the dominant axis theorem to hold in the area preserving maps.

ニュートン力学誕生そしてヤコブ・ヘルマンの逆問題解析

ウエルフェア ジャスティン飛鳥 (神奈川大学大学院)、山口幸 (同)、杉本剛 (同)

Isaac Newton (1642-1727) solved the direct Kepler problem: given the first and second Kepler's laws, find the physics of the universe. His method of solution is geometry with limiting operations. In 1687 Newton publish his treatises as 'Principia.' There occurred a conflict nominally between Gottfried Leibniz (1646-1717) and Newton: who invented 'calculus' first. Leibniz's ranks accused Newton of not solving the inverse Kepler problem: given the inverse-square laws, find the orbit. Jacob Hermann (1672-1733) is the first to solve this problem in 1710, although he made mistakes twice and hence reached spuriously the

right conclusion. His treatise includes the Laplace-Runge-Lenz vector. Hermann, augmented by the Leibnizian calculus, could solve the said problem.

Forum

反応拡散アルゴリズムを用いた肝臓パターン抽出法とその応用

昌子浩登 (京都府立医科大学)、山田耕太郎 (阿南工業高等専門学校)

In hepatic lobule, which is the basic unit of liver, each hepatocyte contacts with hepatic blood vessel, sinusoid, which form three-dimensional (3D) periodic network patterns. Confocal laser microscope (CLM) images are used for observing 3D images of sinusoidal endothelial cells, but CLM image alone cannot detect 3D networks of sinusoid. We propose a new approach for image segmentation based on the Turing reaction-diffusion model. We here applied this method to test groups of steatohepatitis related to metabolic syndrome and their controls. Significant difference was found in the spatial scaling parameter. Therefore, this approach may have the power not only for image segmentation but also detecting the periodicities of patterns.

10月8日(土)

展示説明

数理を応用したアート制作

高木隆司 (東京農工大学)、山岡久俊

Two artworks are exhibited, which are created by applying computer graphics mathematics, especially analyses of complex functions, and by combining them with calligraphies. The motifs of the artworks are taken from Haikus by Buson Yosano, a famous poet in Edo era. One work “Nanohanaya” is a combination

of a graphical presentation of solving complex polynomial equation, developed by a mathematician Prof. Bahman Kalantari, and a calligraphy by Takaki. The other work “Fijihitotsu” is a combination of a graphical presentation of mapping of complex numbers, developed by the second author Yamaoka, and a calligraphy by Takaki.

大学生に対するアンケートによる 2009 年～2015 年の糸魚川ジオパーク認知度の推移

大河内春香 (新潟大学)、松岡篤 (同)

The Itoigawa Global Geopark was established in 2009. Questionnaire survey on the geopark has been carried out at a classroom in Niigata University since 2009. Results of the questionnaire revealed that about 80% students belonging to eight faculties do not recognize the existence of the Itoigawa Global Geopark in spite of continuous efforts of the people concerned. This tendency does not change in the last seven years.

放散虫のトランプ

松岡篤 (新潟大学)、大河内春香 (同)

A set of playing cards using images of radiolarian skeletons was prepared for enhancing a degree of social recognition of radiolarians. This will be utilized to advertise the 15th meeting of the International Association of radiolarists (InterRad 15) held in October 2017 in Niigata, Japan.

形の科学一般

福島第1原発の放射能汚染パターン

小川進 (長崎大学)、斎藤恵介 (同)

A particle model expressed more actually than atmospheric diffusion models in Fukushima.

凸五角形 (Rice1995) を用いて形成出来るタイリング
杉本晃久 (科学芸術学際研究所 ISTA)

In 1995, Marjorie Rice discovered an interesting tiling by using the convex pentagon that belongs to both type 1 and type 5 in convex pentagonal tiles. We have discovered new tilings by using the convex pentagon of the tiling discovered by Rice in 1995.

第 15 回国際放散虫研究集会 (新潟, 2017 年) と形の科学

松岡篤 (新潟大学)

The 15th Meeting of the International Association of Radiolarists (InterRad 15) will be held in Niigata, Japan in October, 2017. The Society of Science on Form is one of co-organizing associations of the meeting. The main theme of the InterRad 15 will be “The evolution of marine plankton since 500 million years ago”. The purpose of the InterRad 15 covers not only research field but also educational and outreach ones.

形と知

長方形の可撓体の一部を重ね合わせて作る立体の研究
阿竹克人 (阿竹研究所)

This study shows a method to almost cover various curved surfaces without a gap by putting the diagonal of the rectangular bendable body on the side of the polyhedron.

ポリゴンメッシュで再現された歴史的木彫に対する形態分析

王健 (千葉大学)、久保光徳 (同)

The study aims to determine the basic styling preferences of the wooden carving sculptors. The existence of ‘Imaginary circle’ hidden in the wave of Ihachi and ‘Imaginary sphere’ hidden in the dragon of Yoshimitsu are detected. According to the result of k-means cluster analysis to the normal

vectors of all polygons of 3D models, ‘Wave styling by 2.5D lamination’ and ‘Dragon body styling concentrated on mass’ are proved to be the styling preference of Ihachi and Yoshimitsu.

平面画像の立体認識による分離方法と製品

鈴木英雄 (株式会社一心助け)、鈴木博英 (同)

show it while being a plane image as if there is a three-dimensional thing and let it is hard to let the other division Zone invade it from the running traffic division Zone and do it and am a method to let an accident decrease sharply and a product.

形と知

可視化された相互コメントの時間的変化の分析

河野広和 (東京学芸大学附属世田谷小学校)、松浦執 (東京学芸大学)

A collaboration tool for iPad was used for students’ mutual commenting on the results of group experiments on plant growth. A concentration of commenting on the particular groups was found in the earlier phase of the activity.

3次元技術の活用によるカンボジア文化遺産の模型作製

内田龍之介 (千葉工業大学)、宮本圭佑 (同)、手嶋吉法 (同)

It is very significant that the shape of the historical spot is preserved as a digital data. We generated 3D shape data of historical spots in Sambor Prei Kuk in Cambodia and created 3D real models by 3D printing.

形の科学一般

空間曲線による幾何学模様の生成

森田克己 (札幌大谷大学)

10月9日(日)

形の科学一般

筋電及び動作解析からみた剣道

西畑大輔 (福井大学大学院)、高田宗樹 (同)、平田隆幸 (同)

剣道における身体運動の計測をバランス Wii ボードと筋電計同時計測によって行った。武道における重心の移動は重要である。我々は、バランス Wii ボードにより、構えおよび打ちの動作中の重心移動を計測できる可能性を示せた。また、未経験者、経験者の打ち動作の違いを明らかにするため筋電図の比較を行った。その結果、剣道の経験の有無による違いが筋電図にもみられることを明らかにした。

シミュレーションから連なり線を決定する新手法

根岸利一郎 (埼玉工業大学)、関口久美子 (同)、内田正哉 (同)

We calculated parastichies in sunflower seeds and pineapple rementa using Fourier. The parastichies for the seeds and rementa were simulated. We found that as imperceptibly changing the divergence angle, Fibonacci and Lucas sequences alternately appeared. In conclusion, it is effective to apply Fourier transform in calculating the parastichies.

形の科学一般

画像セグメンテーション用アルゴリズム GrowCut の紹介

中島善人 (産業技術総合研究所)

The 'GrowCut' is a simple but useful digital image segmentation algorithm using cellular automata. The brief description of the GrowCut technique and examples successfully applied to the segmentation of sand dykes induced by the earthquake liquefaction are presented.

触覚学習用地球儀の開発と評価

手嶋吉法 (千葉工業大学)、細谷洋介 (同)、酒井一磨 (同)、中野司 (産業技術総合研究所)、田中明子 (同)、青松利明 (筑波大学附属視覚特別支援学校)、山澤建二 (理化学研究所)

Three-Dimensional tactile models of Earth were constructed for the visually impaired. We utilized exact topography data obtained by planetary explorations. Therefore, 3D models of Earth by additive manufacturing possess exact shape of relief on their spherical surfaces. Several improvements were given to models to suit tactile learning. Experimental results showed that the Earth models developed in this study by additive manufacturing were useful for tactile learning of the globe of the visually impaired.

第80回 形の科学シンポジウム 「スポーツ・パフォーマンスに現れる形」

討論記録（記録のあるもののみ掲載）

【主催】形の科学会

【会期】2015年11月21日（土）、22日（日）、23日（月・祝）

【会場】東京電機大学 鳩山キャンパス 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂

講演会場：12号館1階124教室（11月22日の最終セッションのみ1階アトリウム）

展示会場：12号館1階アトリウム

【代表世話人】松浦昭洋（東京電機大学理工学部）

【参加費】会員・非会員ともに一般5,000円、学生1,000円

【懇親会】2015年11月21日（土）18:00より、HATO CAFEにて（一般4,000円、学生2,000円）

【第80回 形の科学シンポジウム WEB サイト】<http://katachi-jp.com/sympo80>

討論記録は、質問者が討論記録用紙に記載した内容にもとづいており、講演者の校正がないものもあります。

Q: 質問、A: 回答、C: コメント

討論記録

11月21日（土）

講演会場：12号館1階124教室

形の科学一般

アルコール摂取時における重心動揺の数値解析

森柚樹（福井大学）、木下史也（名古屋大学）、平田隆幸（福井大学）、高田宗樹（福井大学）

Q1. 野村和泉

被験者の平均値で比較しているが、算術平均値がそれぞれのカテゴリの最確値と扱ってよいか。残差のばらつきはどうか。

A1.

ヘモグロビン濃度については有意な差が出ていると言っているのではないか。

重心動揺についても充分有意。

Q2. 野村和泉

血中濃度 0.5mg/ml, 1.0mg/ml の違いで、各検査について、被験者の意識の試験への影響はどうか。

A2.

ほろ酔い程度なので、立位試験は自覚的に受けられる。

Q. 根岸利一郎（元埼玉工業大学）

重心動揺は中心動揺ではいけないのか。

A.

今回は重心動揺で計測した。

Q. 手嶋吉法

血中アルコール濃度を 0.5mg/ml と 1.0mg/ml で一定値と仮定して議論していたが、それ自体が時間とともに変化するのでは？

A.

変化する。血中アルコール濃度は約 30 分後にピーク値をとる。0.5 および 1.0mg/ml がピーク値になる様に被験者ごとに酒量を調整して実験を行った。

姿勢変化時における胃電図とその数値モデル化に関する研究

木下史也（名古屋大学）、森柚樹（福井大学）、松浦康之（福井大学）、宮尾克（名古屋大学）、高田宗樹（福井大学）

Q1. 手嶋吉法

今回の数値モデルを採用した事の妥当性は？（他分野の聴衆にもわかる様に説明してほしい） これ以外の数値モデルで説明できる可能性は？

A1.

今回の数値モデルの基となるファンデルポール方程式は、断続的な（？）波形をモデル化する際に使われる基本的な方程式であり、先行研究でも使われていたので、今回もこれを用いた。

Q2. 手嶋吉法

今回の数値モデルで実験結果をうまく説明できてない点はあるか？

A2.

現在のモデルで実験を完全に再現できるわけではない。基礎的な検討の段階である。

C. 高木隆司

ファンデアポール方程式を使ったことについての質問があった。それについてコメントを追加する。この方程式は構造安定であり、どんな摂動項を加えても解の挙動が大きく変化することがない。この意味で、この方程式は使いやすいと言える。

書写書道教育の視点から見た左利き手書き漢字のメカニズム

杓名健一郎（福井大学）、高田宗樹（福井大学）

Q. 手嶋吉法

左利きの場合、「引く」ではなく「押す」という結論だった。今回の実験はシャープペンシルだが、毛筆の場合は押すのは難しいのでは？

A.

熟練者は押すことが可能であるが、非熟練者は毛羽立ち、押すのは難しい。

Q1. 野村和泉

書く道具は何を使ったのか。

A1.

使い慣れたシャープペンシル、0.5mm 芯太。

Q2. 野村和泉

らせんの向きは反時計回りに固定か。

A2.

回転向きは自由。

Q1. 佐々木康成

書かれたラセンの角度の分析はされてはどうか？

ラセンの方向と書字方向との関係もあると思うが？

A1.

角度分析はまだしていない。

あくまでも書字教育の中での研究との位置づけ

Q2. 佐々木康成

教育（？）は「できるだけたくさんのラセンを描くこと」か？

A2.

ハイ

手書き書字時の手の使い方

宮原優美（静岡大学）、佐藤大樹（静岡大学）、永田瀬里菜（静岡大学）、杓名健一郎（福井大学）

Q. 手嶋吉法

個人的に鉛筆等（シャープペンシル、ボールペンを含む）の持ち方に興味があり、授業中に学生の筆記具の持ち方を観察しているのだが、意外と2本がけの人もいる。これは幼い頃の

癖がそのまま続いていると考えるが、一本がけに変更すべきと考えるか。

A.
一本がけが適切と考える。

Q. 高田宗樹
筆跡(画像)から回転量は推定できますか？

A.
鉛筆の場合、一画ごとに回転させる。筆の場合、現在のところ不明。

書道作品の視点と散らしについて

佐藤大樹(静岡大学)、宮原優美(静岡大学)、永田瀬里菜(静岡大学)、杵名健一郎(福井大学)

Q1. 手嶋吉法

補空の点は特定の文字だけで打てるのか？(素人が勝手に打つと誤字とされるように思う)

A1.
補空の点を打つ明確なルールはない。今回示したのは中国の古典からである。我々書道を学ぶ学生も勝手に打つ事はない。

Q2. 手嶋吉法

1 文字だけを見たバランスと周りの文字を含めたバランスは異なるので、補空の点を打つべきかどうかの判断はどのようになされるか。

A2.

1 文字と全体のバランスのどちらによるかは一概には言えない。

Q. 高田宗樹

補空の点や散らしを定量的に分析して、それらの必要性を機械的に規定するようなことはできないでしょうか？

A.
現在のところ感覚的な部分が多く、定量化をおこなっていない。

星型一様多面体の構成面形状(稜線長さ)を求める

山口陸幸

Q. 高田宗樹

最初の定義で、一様多面体に対する双対多面体は1対1対応していると考えて良いのか？

A.

Yes.

Q. 根岸利一郎

双対多面体に見える五角形は必然か？

A.

パワーポイントに正五角形の図を何度も描いています。これは黄金比系星型一様多面体の双対多面体の構成面の1種である翼型の稜線長さの比が $c/d = \tau$ (黄金比) であることを示すために描いた図です。dの長さを1辺の長さとして描いた正五角形の対角線の長さは τd となり、即ち、その長さが $c = \tau d$ となることを示したものです。白銀比系星型一様多面体では $c/d = \sqrt{2}$ となりますから、正方形の1辺の長さとその対角線長さの比と一致します。

招待講演・公開講演(スポーツ・パフォーマンスに現れる形・第1部)

運動スキル熟達化のダイナミクス

工藤和俊(東京大学)

Q. 高木隆司

動作のゆらぎの解析において、ゆらぎの大きさではなく、そのスペクトルの型(白色か1/fか)に着目されたのは何故か。

A.

運動スキルの熟達化に伴う変動(ゆらぎ)の減少は数多くの先行研究によって示されている。一方、熟達化や運動の時間発展に伴う時系列変動特性の変化についてはこれまで不明であったため、スペクトル型の変化に着目した研究を行った。

Q1. 川上保衛

テニス選手のスキルについての事例として、ATPFにおける、錦織選手とフェデラーとのゲームで、錦織が、2時間の中でストロークの正確さがブレるという波が何回かあったが、こ

れは一体どういう問題なのか。運動スキルの解析の時間分析からみてどうか。

A1.

勝負どころでストロークが決まるかどうかという問題は、時系列特性だけで論じることのできない複雑な問題である。呼吸、体力などの生理学的変数や集中、自信などの心理学的変数を含めた解析が必要になると思われる。個人的には第3セットに、フェデラー選手のストロークが浅くなったところ錦織選手がやや中途半端なアプローチからネットに出て、バックハンドのクロスでパッシングショットを打たれて失点したポイントが一番悔やまれる。

Q2. 川上保衛

彼のように世界トップの熟達者でも、今後のスキルアップとゲーム全時間帯での自己統制の力のアップはあるのかどうか。

A2.

ジョコビッチ選手は、2011年に世界ランキング1位になってから現在に至るまで、安定感のあるプレーに磨きがかかっている。錦織選手も、攻めと守りの見極めなど向上の余地が大いにある。

Q. 成塚拓真

ノイズの漂白化現象を記述する数理モデルは提案されているか？

A.

解析手法としては様々なものが提案されているが、漂白化に関わるパラメータを具体的に記述した数理モデルは未だ提案されていない。

Q. 佐々木康成

溝やカベの単相性のものでと多属性のある現象には探索されているのか

A.

たとえばドラム演奏の例では左右差という制約が制御パラメータとなり溝やカベを作り出していた。実際のドラム演奏では、たとえば筋の脱力やリズムの知覚など学習時間スケールの異なる多くの制約が関与していることから、これら多数のパラメータが関与することにより単相性ではない複雑な振る舞いが観察されると思われる。

バリ舞踊の形と動き

中村美奈子(お茶の水大学)

Q. 北沢美帆

モーションキャプチャで見たバリ人ダンサーと日本ダンサーの手の動きや空間の使い方の違いは、バリの人と日本の人の違いだという印象はありますか？あるとすれば、両者のもつ文化やイメージなどの違いなのでしょうか？

A.

バリ人と日本人の違いだけでなく、個人差という側面のほうが強いと思われます。バリ人の間でも手や空間の使い方の差はあきらかにみとめられますので。そういう状況のなかで、バリらしく踊りたいという気持ちはあるけれど、何がバリらしさなのか、定量化できるものなのか、被験者数も少ないため、未知数です。

Q1. 出原立子

ラバノーテーション(Labanotation)で日本舞踊のような踊りを記譜することも可能ですか？また本方法が現段階で、様々な舞踊を記譜する方法として、一番すぐれたものと評価されているのでしょうか？

A1.

日本舞踊の記譜も可能です。ラバンは、舞踊を記録するためではなく、工場労働者の身体運動を記録して動きを分析するために考案したものですので、身体運動を記述する方法として優れているとされています。よって、どのようなタイプの踊りでも記述が可能な普遍的な記譜法という意味で優れている一方、個別の舞踊の特徴的で平易な動きがとても複雑な記述になってしまう場合もあり、向き不向きがあります。

Q2. 出原立子

モーションキャプチャーを用いて踊ることで、自動的に記譜する、自動記譜システムのようなものはあるのでしょうか？

A2.
作りたいと思っていますが、まだ開発途上です。前述のように、舞踊の動作は複雑なものもあるため、どこまで対応するべきか見極めが難しいところです。現在は、簡単な舞踊動作であれば自動生成が可能なレベルです。

Q1. 川上保衛
<Laban Edition 3>のソフトは公開されているか

A1.
まだ、公開はしていません。ソースコードが整理できたら、いずれオープンにしたいと考えています。

Q2. 川上保衛
モーションキャプチャとラバノーションの結合がありうると思うが、どうかでしょうか？モーションキャプチャを動かす記譜としてのラバノーションであると言えますか？Laban Edition 3があれば、舞踊指導で強力な視覚道具（デバイス）となると思われますが。学生がラバノーションを記譜し、かつそれで表現行動ができるようになるには、5年、10年の学習・修練が必要なのではないでしょうか？

A2.
モーションキャプチャとラバノーションの連携は常に頭の中にあります。ご存知のように、モーションキャプチャのデータ（数値）は、精緻すぎるため、ラバノーションの記号との対応が難しく、今後の研究課題です。現在、キネクトとラバノーションの連携はある程度成果が出ています。

Laban Edition 3の開発が進めば、ラバノーションの学習教材としての利用や、ラバノーションによる舞踊の振り付け支援が可能になると思います。しかし、実際に身体を用いて表現行動をすることは別次元であり、そのためには、かなりの年月を必要とします。

スポーツ・パフォーマンスアーツに現れる形・第2部
サッカーのパス回しネットワークにみられる次数分布について

成塚拓真（早稲田大学）、山本健（中央大学）、山崎義弘（早稲田大学）

Q. 吉野隆
関数 ρ , R の選び方が良かったことが理論と結果がよく合う理由ですか。

A.
導出した次数分布は R , ρ を具体的に与えることで形が決まる。その意味で理論とデータの一致は R と ρ の選び方に依存する。但し、今回仮定した R と ρ の関数にはある程度理論的根拠がある。

凸曲面上のバトンの転がりの物理解析
山田優貴（東京電機大学）、松浦昭洋（東京電機大学）

Q1. 手嶋吉法
塑上運動は、三次元の物理シミュレータで再現出来ているか。

A1.
再現出来ていない。

Q2. 手嶋吉法
塑上運動の実演は、熟練者にしか出来ないか。塑上現象が起きる条件がわかっていたら知りたい。

A2.
実演には一定の練習が必要。
塑上現象は、バトンに加わる力や摩擦等がある条件下でのみ起きる。詳しい条件は調査中である。

Q. 佐々木康成
実世界でバトンは自転するか？

A.
自転する。特に、バトンを曲面の対角方向に転がすと、自転により、直線から逸れた方向に転がる。

Q. 三谷尚
バトンの端の軌跡を解析関数で書けないか。速度、加速度の時間依存性をも解析関数で書けないか？

A.
曲面の湾曲が円弧状なら、解析関数になるが、殆ど場合は

書けない。例えば、放物線のように単純な曲線であっても楕円関数となる。

形の科学一般

ディオクレスの「火取り鏡について」
ウェルフェアジャスティン飛鳥（神奈川大学）、山口幸（神奈川大学）、杉本剛（神奈川大学）

Q1. 手嶋吉法
3D プリンタの精度は高くないので、モデラ（商品名）などで削った方が高精度な曲面ができると思う。

A1.
我々が利用出来る加工機として 3D プリンタを今回は用いた。

Q2. 手嶋吉法
今回用いた 3D プリンタはどのタイプか？材料は？

A2.
ABS 樹脂である。

Q. 根岸利一郎
「火取り鏡」の温度が 3 種で異なった理由は何ですか。

A.
3 種で焦点が異なっているため。

Q. 海野啓明
ヒルベルト、コーン・フォッセン『直観幾何学』に図 2 と同じ図があるが、本にはダンドラン球の名称は使われていなかったと思うが、知っているか。

A.
いいえ。
C. 海野啓明
矢野健太郎『幾何学の発想』にはアポロニウスの節で図 2 を紹介してあったので、講演で活かされたような問題があることがわかった。

4°Cの水 実験と現象論

小川直久（北海道科学大学）、福原朗子（北海道科学大学）、金子文俊（大阪大学）、長澤修一（函館工業高等専門学校）

Q1 手嶋吉法
実験結果のグラフは、さらに時間が経つとすべて -15°C に収束するという理解で良いか。

A1
途中で相転移が起こって、表面は凍り、水と氷の界面温度が 0°C になるため、一旦 0°C に向かって収束してゆくが、全体が凍った後に -15°C に収束します。

Q2 手嶋吉法
実験を 1°C の水からスタートしたら、各温度計の値は上から順に高くなるという予想で良いか。

A2
最初から 4°C よりも温度が低いので、上から順に冷えてゆく。下の方が温度が高い。

Q3 手嶋吉法
水の密度が最大となるのは、 4°C ちょうどか。少しずれるか。理論はあるか。

A3
少しずれる。水の最大密度は 4.0°C のわずかに下にあり、最大値は 0.9999749g/cm^3 。これは CRC ハンドブック（2014-2015）による。もちろん理論ではなく実験。最大密度を与える温度の理論はおそらく存在しないが、MD の計算機実験で議論されることがある。

C. 本多久夫
子供の頃に、池が凍っても、底が 4°C の水だから魚たちは大丈夫と聞いていたが、それを顕著にあらわす実験でおもしろいと思いました。

Q. 三谷尚
氷ができたならやっかいだと思いますが。氷はできなかったですか？

A.
 -2.1°C の過冷却水ができていたが、氷は見られなかった。氷が見られる場合は、水面が -4°C くらいまで過冷却した場合で、出来た瞬間に一旦温度が 0°C に跳ね上がるので、それと

わかる。

11月22(日)

講演会場：12号館1階124教室

形の科学一般

簡単な折り紙としてのフラクタル矩形

根岸利一郎(埼玉工業大学)、関口久美子(埼玉工業大学)

Q. 石原正三

折り紙の講座を実施する際に、正方形ではない折り紙を使うと「折り紙」と見なしてもらえないことがよくあるのですが、長方形の折り紙を用いた講義などを実施しているのでしょうか。

A.

本講演に関する講義は実施していない。

Q. 手嶋吉法

拡張定理1と2は、今回初めて提案されたという理解で良いか。また、この拡張定理を用いると折り回数を減らせるという理解で良いか。

A.

拡張定理は、今回我々が提案した。芳賀の定理の折り回数よりは、拡張定理を用いた折り回数の方が少なくなる。

ルービック・ハイパーキューブの実装

吉野隆(東洋大学)

Q1. 山口陸幸

8色の立体図は、8方向からの透視図ですか？

A1.

そうです。

Q2. 山口陸幸

超立方体は構成胞となっている8ヶの立方体が互いに面を共有しています。この透視図では4面が共有されている様に見えるが、実際そうなのですか？

A2.

中心投影なので、側面の4面のほかに内部と大外の2面も接しています。

Q. 石原正三

白で表現されている部分は白い色をしているところか。

A.

白い色を表現している。あまり良い色ではなく、中心投影した際に見にくくなってしまった。

Q. 手嶋吉法

今回独自に4次元ルービックキューブを実装されたと思うが、既存の4次元ルービックキューブとの違いがあれば知りたい。

A.

既存の4次元ルービックキューブについては、後で知った。回転の仕方などは一意に定まるので同じはず。表示(投影)方法は、一意ではない。

C. 手嶋吉法

今回のお話は3次元ルービックキューブの高次元化であるが、低次元化としては正方形(2面体)の表と裏を2色で塗り分けるのが1つのやり方だと思っている。

楽曲の瞬間波数変動におけるf分の1スペクトルの原因

三谷尚(福岡教育大学)、平原誠(福岡教育大学)、豊田光(福岡教育大学)、荒木裕大(福岡教育大学)

Q. 石原正三

「作曲家のせい」というご発言の意味は、作曲家の個性を意味しているのか。

A.

楽譜音楽と実演奏に差がない、というところから、作曲家に基づくものであるという意味。

Q. 佐々木康成

伴奏が入った時に変化がないというのは解析の仕方によるのではないか。二つの波が重なるとゼロ点も変化しうと思うが。

A.

ゼロレベルクロッシングのみみると下手な人の演奏でもほとんど変化がないというのが結論である。

時間軸上で、ゼロレベルクロス密度、すなわちセミアミクロ量を見る。時間軸上の、ゼロクロスの詳細な位置は、諸要因により変わるが、これは、楽曲全体を扱う当研究では、重要でない。

形と知

空間を埋め尽くす立体形状の開発

宮川大毅(千葉工業大学)、手嶋吉法(千葉工業大学)

C. 本多久夫

エッシャーの2次元でのうめつくしパターンでは三つ巴のような動的な感じのするものなど、興味深いものがある。このようなものの三次元版を期待しています。

Q1. 根岸利一郎

3次元空間での隙間をゆるす形状は何なのか。

A1.

平面上で互いに重ならないように円を詰め込んでいくと、必ず隙間が生じる。これを円のパッキングと呼ぶ。

Q2. 根岸利一郎

空間充填形状を作る方法はどんな方法か。

A2.

例えば、空間を埋め尽くす形状(立方体など)から出発し、1つの面を出っ張らせ、それと反対の面を同じだけ凹ませれば、空間を埋め尽くす形状を維持できる。これを繰り返して行った時、輪郭だけ見た時に何かを想起させる形状に辿り着ければ成功である。

出来た形状を集合させた時に、隙間無く埋め尽くせているか、あるいは干渉がないかは、CADの機能で確認している。

Q1. 三谷尚

鏡映対称性等はパッキングのために必要なのか？(私は必要ないと思うが)

A1.

埋め尽くす為に個別の要素が対称性(点群的な対称性)を持つ必要はない。ただし、埋め尽くした後の周期構造は空間群のどれかに該当する。

本講演では、空間群は未特定である。

Q2. 三谷尚

一個の立体に、他何個の立体が接するか？その数は色々なのか。

A2.

色々である。統一的には言えない。

例えば、立方体は6個、切頂8面体は14個、菱形12面体は12個となる。

回転式パズル遊戯具の開発

宮本圭佑(千葉工業大学)

Q. 野村和泉

(確認)「独立に回転できる理由は、6軸中3軸である」とは？

A.

回転する領域の中心に回転軸がある。その回転領域が重なり合わない場合は独立に回転出来る。そのような回転軸は、全6軸中、3軸である。

形の科学一般

陰影あるテクスチャ画像の音韻による表現と感性評価

佐々木康成(金沢星稷大学)、坂東敏博(同志社大学)

Q1. 本多久夫

ザラザラ、ガリガリがとげとげしいものを表し、なめらかなものとは対応しないようなことは使用する言語などで異なるのか？

A1.

オノマトペは、恣意的であるとされる言葉とは異なり、音の象徴性の高い言葉であり、質感を直接的かつ直感的に表現できるので、音の持つ言語間での共通性はかなり高く、音と質感との対応性は言語間で大きくは異ならないと考えられています。アメリカ人でも似ている傾向のある子音や母音は多く

あります。

Q2. 本多久夫

その対応関係は神経系などを形成するゲノムにより先天的にきまっているのでしょうか。

A2.

人間においてはある程度生得的な傾向はあるかもしれませんが、チンパンジーなど近縁の霊長類を用いて調べてみると面白いと思います。音とテキストとの対提示による連合のされやすさを調べたり、音の提示中にテキストを貼ったボタンを複数提示して自由反応させたりするなど、さまざまな方法が考えられると思います。

Q. 石垣 健

記認識による正答率等の問題と子音分布などの問題が混在する実験をあえて行われたのは何故でしょうか？

A.

画像刺激を「正しく」認識するかどうかは、多分に実験参加者本人の主観に依るところが大きいため、正答率そのものを算出することはしませんでした。また、同じ参加者であっても、ざらざらして見えている画像刺激が、ある瞬間につるつるして見えてしまってくる、という現象も少なからずあり(実際にはその見え方の反転自体も面白い現象なのですが)、テキスト画像のコントラストや明るさをはじめとして様々な要因について今後検討していく予定です。

Q. 野村和泉

180度回転させた2次元図(3次元投影)に対して触感の調査を行っているが、回転の同じ写真ということは、どちらかの解答かが3次的に「正解」であることいえる。正答率は調査したか。

A.

正答率については調査していません。ただし、無意識的に上からの照明を仮定して、影の付き方を脳で補完もしくは補正して知覚しようとする傾向が強ければ(実際、強いわけですが)、下からの照明のある画像を正しい画像として処理するのではなく、上からの照明があるように「正しい」画像として知覚することに結果的にはなるということになります。

Q1. 手嶋吉法

元の画像とそれを180度回転させた画像を見せて「触った時どちらが痛いか」という問いに対する正しい答えは「どちらも同じ痛み」であると感じた。ふだん、上からの照明に慣れすぎているため、180度回転させた画像を見ると凹凸が逆転したような錯覚を起こすという理解で良いか。

A1.

基本的にはその理解で良いと思います。ただし、「どちらも同じ痛み」と感じられたのだとしたら、テキスト画像の部分的な質感、つまり、画像の局所的な見方に依存するものと考えられ、一方「違う痛み」(例えば、ざらざらとつるつる)に感じられたのだとしたら、テキスト画像の全体的な質感、つまり、画像全体から感じられる相対的なざらつき感やすべすべ感を感じるような見方をされることに依るものと考えられます。

Q2. 手嶋吉法

90度回転や270度回転の画像を用いるとどんな結果になるか。

A2.

それぞれの回転による画像は、照明を右からあてた場合や左からあてた場合に対応しています。過去に予備的に調査したところ、左右の印象としての違いは見られる傾向にありました。西洋画によくある室内に窓から光が差している絵画や街並みに光があたっている絵画などにおいても、どちらか一方からの光のあたり方となっている構図のほうが若干多いかかもしれないので、左右の異方性については調べていくと面白いと思います。

自由学園工芸研究所「プラネテ」デザインと音楽のジップ則を利用した融合

高橋由佳(自由学園最高学部)、河原弘太郎(自由学園最高学部)、遠藤敏喜(自由学園最高学部)

Q. 手嶋吉法

今回の発表は、楽譜からプラネテパターン(色付きバーコード)を生成するルールを決めたと理解した。その際、ジップ則を用いるとどういう効果があるのか。

A.

プラネテの持つ色合いと間隔の情報と、楽譜の持つ高低と長短の情報の対応をあわせることができるため、与える印象が同じになることが期待できるかもしれない。

Q. 北沢美帆

音楽から受ける印象とデザインから受ける印象は関連するのでしょうか？例えばリズムカルな音楽を縦模様におきかえたら、リズムカルな印象を与えるデザインになるのでしょうか？

A.

まだ研究はそこまで至っていないが、例えば短い音符がたくさんある音楽なら、細い線がたくさんある模様になるので何らかの相関は出ると考えている。同じ印象を与えるものとそうでないものも勿論あると思うが、今後詳細に研究していきたい。

Q. 石垣健

記譜法における $1/2^n$ 的な時間分割と造形におけるプロポーション(例えば黄金比)の関連について御意見があればお聞かせ下さい。

A.

たいへん興味深いですが、現時点では何もない。

Q. 佐々木康成

プラネテありきの話なのか？プラネテから音に変えることはできるか？

A.

元来は楽譜の図形表現を探求する研究であるが、楽譜の1次元的構造から自然に縞模様になり、その過程で自由学園にとって馴染み深いプラネテデザインと音楽(メロディ)との対応に興味を持った。

プラネテから音に変えることは可能であるが、今のままでは色数が足りず、メロディも特定の音だけになってしまう。そのため、プラネテから脱却する必要がある。今後は縞模様で行う予定である。

招待講演・公開講演(形の科学一般)

空間と形

岩城和哉(東京電機大学)

Q. 高木隆司

講演の中で、建築の本質は困うこと、支えることであるという話があった。さらに、より魅力的にするためのキーワードとして「unitの種類は数少なくする」、「線(竹)の向きを少しずつ変える」という話があった。その2つが、最後のまとめにあった。「単純な原理」と「多様性」に対応すると考えてよいか。

A.

その通りである。各制作においては試行錯誤を繰り返しているが、結局はこれら2つを追及したことになる。

C. 手嶋吉法

竹という直線的な部材で、柔らかい曲面的な構造物を造られていて興味深い。

Q1. 手嶋吉法

斬新な建築デザインに対して、内部に人が入っても安全かどうかのチェックはどの様にされるか。

A1.

紹介した竹の作品は小規模なので制作時に安全の確認を行っている。一般的な建築では、デザインする人と構造計算する人が協力して仕事をする。構造計算は近年は計算機シミュレーションでおこなう。くぎを使わない伝統構法などは、計算に乗せにくく、最近は造りにくくなっている。

Q2. 手嶋吉法

竹を使えないような場合は、紙パイプなどの活用を考えるか。

A2.

紙パイプ、樹脂パイプ、金属パイプの活用を考える。これらは形状がそろっているが故、予期しない変化が起こらないと

いう面はある。

Q. 吉野隆

LACHIKUにおいて、基本となるモジュールの形が5角形になると内部が直線から曲線に変わりました。これは、モジュールの形が複雑になったことと関係していますか？

A. 関係していません。単純な断面でもつなぎ方で曲線にすることができます。

格差社会の自己組織化

小田垣孝（東京電機大学）

Q. 本多久夫

人口過密の結果、格差ができるのは仕方ないとする。しかしせめて負け組が勝ち組になる可能性が残っている制度にはできないだろうか。勝った者がより強くなることになっている。

A.

累進課税制などで勝ち組にリスクを負わせる制度はあるが、勝ち組がいつも損をする社会は受け入れられないのではないか。

Q. 種村正美

複雑な社会現象を比較的簡単な統計力学モデルで説明出来ている点で感銘を受けたが、好戦的人間と平和的人間がどちらも50%ずつという場合に、平和的人間が上位ランクを占める結果になるということに不思議な感じを受けたが、どういう理由でしょうか？

A.

結果的に平和的人間は勝ち抜けたということです。

講演会場：12号館1階アトリウム

スポーツ・パフォーマンスに現れる形・第3部

シアターゲームに現れる形

安藤敏彦（仙台高等専門学校）

Q. 佐々木康成

「負圧」についてもう少し詳しく教えてください。

A.

パントマイムなどでもスペースを区切った表現をしていると、そのスペースの「カベ」からの圧力を感じるように実際になっていくが、それがはずれるときのような感覚が負圧を感じることのともとなっていると考える。

Q. 野村和泉

棒つなぎの相関で、指先 - 指先、肩 - 肩ではなく、体幹 - 指先等になるのは何故か。

A.

肘から先の部位が棒を落とさず支える役割をするのに対し、相手の動きに合わせた制御を体幹が行うので、相手の指先や体幹と自分の体幹の相関が高くなるようである。

最小限に捨象した動きに現れる形とその技術的背景

安本匡佑（神奈川工科大学）

Q. 佐々木康成

モーションキャプチャで線のつながりが起こったときに、子どもたちはどのように行動し始めますか。

A.

相手にちょっかいを出したり、線やポイントの動きや関係性に合わせた動きをし始めた、棒の動きや意味に合うような動きをするようになる。

Q. 北沢美帆

「てんにんげん」では、ミニマルで何点くらいあれば人らしいとして認識されるでしょうか。

A.

前後の文脈があれば2,3点でも人らしいと感ずることがあります。

Q. 野村詩織

人のバイオロジカルモーションが犬のモーションになるというのはどういうことか。

A.

自分だと認識して制御できていた点群が、自分で制御不可能なあらかじめモーションキャプチャされた犬の点群モーション

に1秒程度でモーフィングすることで、自分があたかも犬になってどこかに行ってしまったように感じさせることができる。

Q. 手嶋吉法

「これも自分と認めざるをえない展」の内容を教えてください。

A.

2010年7月～11月まで21_21DesignSightで開催された展覧会。属性をテーマに今まで気付かなかった自分というモノを考えさせる。本展覧会中では「展覧会を楽しむための4つの準備」「属性の積算」「ふるまいに宿る属性」「休憩所」の4作品の制作に関わった。

特別講演（含・実験）

ボールルームダンスにおける身体運動

九矢光章（クヤ・ダンスカレッジ）、勝又洋子（東京電機大学）

Q. 手嶋吉法

世の中は、ドアノブの回す方向にしる、文字の形にしる、右利きの人に都合よく出来ている面が多いが、ボールルームダンスも同様か。例えば先程見せていただいたピクチャーポーズは、男性の右手と女性の左手が引っ張り合う形だったが、逆もあるのか。

A.

ピクチャーポーズに関しては逆もある。スタンダードの基本姿勢は、逆はなく、いつも同じ向きで組むが、右利きのダンサーが有利という訳ではない。ペアによっては、相手が左利きの方が踊りやすい場合もある。

11月23日（月・祝）

講演会場：12号館1階124教室

形の科学一般

大学生の描線速度

野村和泉（中部大学）、野村詩織（京都大学）

Q. 三谷尚

私の経験として、福岡教育大と九州大での授業、いわゆる学力の差が多少ある場合、中級の物理の授業で、数式を含む時、板書を写す時間に遅い速いの差が出るのは、数式の理解度によると考えてきた。

A.

そういう観点は認めるが、数式の割合に関係なく、テンプレートを視写するような簡単な場合においても、なお非常に遅いという現象が出ている為、それを解釈する為に調査を行った。

Q. 松岡篤

本研究の問題設定として、大学生が板書を写すのに時間がかかるという現象の解明だったように思う。この問題設定と実験による描線に対し、描線の正確さを評価することの関連を説明してほしい。

A.

本学の工学系初年次教育基本方針は、実験ノートをはじめとして記録は第三者が読むものである、という原則のもと、「実習を通して、ルール(JIS等)に従って記録をとり、レポート等の報告書として作成する仕方を学ばせる」ことである。従ってノートも、「自分が読めればよい」メモではなく、実習、思考の記録、証拠であり、報告の基礎として位置づけられる。また、文字、数字の美しさは、正確な単位、物理量等の表記の基礎であるため、ノート、レポートの文字、記号の美しさ、正確さは重要であり、それらを測る尺度として、パターン描線の正確さという観点を重要視した

C. 松浦執

質問の時間に関して思うことがいくつかあります。

小学校では、45分で黒板1枚分書かれることが多いですが、子どもの書く分は目当て、いくつかのこと、結論、位が多いと思います。コミュニケーションの高い状態のクラスでは、盛んに言葉が行きかう、そうでない状態では、一定の子は活

発だが、他の子は見ているとなく見ている。最後に学習感想を少しだけゆっくり書く。考えていることと書くことのカップリングが気になります。

モンゴルでは小学校あるいは先生方では、美しい字で沢山書く様子が印象的でした。しかし、自分自身の思考ということについては課題があると感じていました。モンゴルでは美しい文字を書く訓練をされており誇りも持っていると思います。

群れの形状について

毛利紗和子 (東洋大学)、窪田佳寛 (東洋大学)、望月修 (東洋大学)

Q. 手嶋吉法

オオカミが1匹の場合のムービーで、オオカミが過ぎた後に、羊がオオカミを追いかけしているシーンがあった。どのようなルールでシミュレーションをやっているのか。

A.

今回は狼とヒツジに例えた群れのシミュレーションを形に着目して行った。

ヒツジには狼を認識できる範囲(閾値)がある。ヒツジは狼を認識すると速度ベクトルを反転し逃げるようにしたが、範囲によっては狼と並走するように見える逃げ方をすることがある。またオオカミが通り過ぎて、しきい値より大きな距離では(ヒツジは狼を認識していないものとして)羊はランダムな動きに戻るので、オオカミに近づくことも起こりうる。

C1. 手嶋吉法

(回答を受けてのコメント)実際の逃避行動に近いシミュレーションから面白いパターンを探すのか、リアリティを考慮しないシミュレーションから面白いパターンを探すのかで、今後の展開が変わるように思う。

C2. 手嶋吉法

イントロで、鳥が隊列を組んで飛んでいる写真があった。その様な平常時の群れの形と、今回の様な非常事態の群れの形はだいぶ異なる様に思う。普段仲の良い羊であっても、実際の逃避行時には、他をかまっていられないだろうと感じた。

フォーラム

鹿威しによる水滴落下系の計測と大偏差統計解析

山田健太 (京都市立堀川高等学校)、宮崎修次 (京都大学)

Q. 本多久夫

「鹿威し」というのは和風庭園にあって水流を使って音を出すものだと思うのですが、大ざっぱには周期的な音が出るように思います。

A.

確かに、大ざっぱには周期的であるが、流量率にゆらぎがあれば、音の間隔についても、長時間平均からのゆらぎが生じる。

Q. 手嶋吉法

水滴落下の間隔がカオス的な現象であると知られているとのことで、これをコイン投げでモデル化することは適切か。(質問者の予備知識では、コイン投げはランダムな現象であり、ランダムとカオスは異なるので、対応しないのではという疑問を持った)

A.

コイン投げは、無限回試行では裏と表が出る確率は1/2ずつだが、有限回では、スライドのZの式で確率が表される。

A. 宮崎修次 (共著者)

コイン投げとベルヌイシフトは、後者に粗視化した観測を導入することで、共通の統計的な性質を持ち、レート関数(大偏差統計関数)の解析的導出が可能な理想的な数値モデルの例である。

水滴落下のダイナミクスが仮にベルヌイシフトに従って生じるとしたら、初通過時間分布やレート関数がこのような解析的な表式となるという意味で、講演の中で言及した。

形の科学一般

面積ランダム充填(II) - 2次元モデルからの拡張 -

種村正美 (統計数理研究所・名誉教授)

Q. 海野啓明

使用する乱数の性質を、例えば準乱数を使うと結果が違ってくるのかどうか。

A.

乱数発生法としてメルセンヌ・ツイスターを使っている。これは質の良い準乱数として知られているので、結果に違いはないと考える。

Q1. 本多久夫

逐次充填の場合に、わずかな重なりで充填できない場合、少しズラせて充填するという方法がある(調節のある充填)。これを円の半径ではなく円の周囲長で行うことと今回の発表とは同じか。

A1.

そうではない。

Q2. 本多久夫

現実の現象に、このモデルと近いものがあるのか。

A2.

植物個体群が日光を受けて光合成するという競争がある場合、1個体の生存に必要な最低限の面積を確保してできる配置のモデルになっている。

Q1. 手嶋吉法

1次元、2次元、3次元のすべての次元で、ランダム逐次充填よりも面積ランダム充填の方が充填率が高いという結果だった。これは2次元や3次元のランダム逐次充填で生じる隙間が、ボロノイ分割で有効に割り当てられるから、という理解でよろしいか。

A1.

それは違う。両者は別の充填方法。

Q2. 手嶋吉法

2次元や3次元の隙間には形があるが、1次元の隙間は線分長であり形を持たないので、面積ランダム充填の結果がランダム逐次充填と同じ結果になる様に思ったが、そうではなかった。1次元の面積ランダム充填の方が、充填率が高くなる主原因は何か。

A2.

ランダム逐次充填の場合は、2点間の距離は一定以上であるが、面積ランダム充填では2点間の距離は0に近い場合もある。

四つ編み、組ひも、位相的カオス

山口喜博 (帝京平成大学)

Q. 本多久夫

糸をつかうとすると、糸は紡いだ時のねじれがある。その組ひもへの効果があると思うが。

A.

一本のひもを単位として組ひもを考えています。構成単位のひもの微細構造は組ひもには影響しません。よって、ひものねじれは考えていません。

財布を軽くする支払いとフラクタル構造

山本健 (中央大学)

Q. 根岸利一郎

アメリカドルが円よりもフラクタル構造的であって、計算時間が多くなると円も微細構造が見えるのですか。

A.

フラクタル構造は硬貨の額面により定まるので、計算時間を増やしても構造が変化することはありません。

Q. 佐々木康成

最小支払いをしていると短期的なおつりをかながみて支払えなくなるから、小銭がふえていくような感じもあるがどうしたらいいですか。

A.

長期間にわたる平均を考えると、最小支払いの方が財布が軽くなります。

スポーツ・パフォーマンスに現れる形・第4部

Dr. ナダレンジャーの自然災害実験教室における科学大道芸

納口恭明 (防災科学技術研究所)、鱈優子 (防災科学技術研究所)

Q. 佐々木康成

90°以外の積み方でも同様に縦方向ドミノは可能か。

A.

可能です。一番 いいのは 90°... 180°だ とひっかかることがあったりします。

Q. 手嶋吉法

縦ドミノの実験の発泡スチロールブロックの崩壊は、どの災害を模擬したか。

A.

9.11 の世界貿易センタービルの崩壊をイメージしている。

羽根形状をもつ視覚楽器

松浦昭洋 (東京電機大学)、秋元俊輔 (コムコ)

Q. 野村和泉

「円筒中のボールの運動」の VTR に関して、どこからボールを出し入れして、円筒の壁面はどうなっているか。

A.

ボールは、円筒の壁面に開けた円形の穴から出し入れしている。円筒は透明なアクリル製で、ボールはその内壁上で、穴を避け 8 の字運動する。

Q. 佐々木康成

覚楽器とういふところの楽器の意味、定義は。

A.

実演者による巧みな操作が可能な装置・道具、という意味で用いており、本来の聴覚 (音楽) 表現のための楽器を聴覚楽器、視覚表現のための楽器を視覚楽器と呼んでいる。

Q1. 手嶋吉法

今回の羽根形状には円弧を用いたとすることで、半径はどう決めているのか。

A1.

回転操作時の装置の扱いやすさを考慮し、半径 30cm 弱、中心角 50°程度の円弧を用いた。なお、より曲率の小さな円弧を用いても、円弧同士は一点で接するため、装置の製作・操作は可能である。

Q2. 手嶋吉法

球面内ジャグリングや円筒面内のジャグリングではボールと面の摩擦は大事か。

A2.

大事である。摩擦はボールが滑らない程度まで大きくないとまくいかない。また、ボールも質の良いゴムボールを使う必要がある。

形と知

デザイン系学生による科学活動の推進

高木隆司 (東京農工大学・名誉教授)、大内克哉 (神戸芸術工科大学)、水野慎士 (愛知工業大学)

Q. 野村詩織

学生は発表の場があること知ったうえで、作品制作を行っているのか。

A.

知っている。授業の最終日を発表会にあてている。また、学外での講演や私の原稿で、良い作品を紹介することがあることを伝えている。

Q. 手嶋吉法

六角柱の東が 2 つ合わさった境界の形として、1 つの六角柱の先端にひし形 3 枚が現れ、その内角の 1 つはマラルディ角となる。質問者は、このことを、面心立方格子 (あるいは六方最密格子) 内の 3 次元ポロノイ領域の境界面として現れるひし形と理解していた。単にそれだけではなく、境界の面積が最小にもなっていることで良いか。

A.

そうである。ただし、正六角柱の東 2 つを押しつけた場合について、境界面積の最小がマラルディの角を与えることを確認したのであり、ポロノイ分割と境界面積最小の関係がどの程度一般的に成り立つかは知らない。

書評:マオール・ヨスト共著、高木監訳『美しい幾何学』

海野啓明 (仙台高等専門学校)

Q. 佐々木康成

教養科目の数学の教科書として使うのはどうか。

A.

アメリカのテキストなどでもよいもの (厚くて分かりやすいもの) も出ているが、これも幾何の魅力を知るには相当に使える (全体を網羅している) ので良本である。

Q. 手嶋吉法

この本は、中高生の予備知識で読み通せるものなのか。

A.

読み通せる。とはいえ、高度なことも書かれており、我々研究者にも有益。Coxeter の『幾何学入門』を読むための入門書としても役立つ。

生痕化石からわかる深海生物の進化

松岡篤 (新潟大学)

Q. 野村和泉

生痕 (動きや生物そのものの痕) が、なんであるかどう判断するのか。現存の生物とその動きのデータベースから判断するのか。

A.

新しい時代の生物、浅いところの生物は、生物と動きが比較的分かっていることもあるので、それとの比較から推定する。しかし、深海については生物そのものもいまだ不明。

Q1. 佐々木康成

一枚の生痕の写真は時間的にどのくらいでのものを切り取った写真といえるか。

A1.

結論から言うと、わからない。パターンに別のパターンが重なったりもあるので。東北地方太平洋沖地震の際、海底に新たに形成された地層に対し、どれぐらいの時間にどのような生痕が形成されるのかの研究がなされている。

Q2. 佐々木康成

その写真の生痕を見て、研究者がどのようなところを手掛かりにして生痕であると判断しているのか? 例えば、テクスチャのようなものとしても手掛かりになるのではないかと思うが…。

A2.

通常の堆積作用ではできない形状があると、生物の作用を考えてみるのが普通である。

宇宙実験による氷の結晶成長 —国際宇宙ステーションでの実験成果の概要—

古川義純 (北海道大学)、長嶋剣 (北海道大学)、中坪俊一 (北海道大学)、横山悦郎 (学習院大学)、吉崎泉 (JAXA)、田丸晴香 (JAXA)、島岡太郎 (JSF)、曾根武彦 (JAMSS)

Q. 高木隆司

無重力での雪の結晶成長でも、厚さの分布ができるか。

A.

地上と全く同じで、もちろん厚さの分布は生じる。無重力では、結晶の周辺の熱対流が起こらないので、枝の対称性が良くなるが、形態の 3 次元構造は基本的に変化しない。

Q1. 手嶋吉法

雪の結晶が 60° ずつ 6 方向になるのは、ミクロな視点でどう説明されるか。

A1.

氷の結晶格子が六方格子だから。ただし、ミクロな結晶構造からマクロな形を説明するのはそれほど簡単ではない面もある。

Q2. 手嶋吉法

その 6 つの部分は、完全に同じ形になるか。実際の結晶では違う形のものも多くできるのか。

A2.

良い条件下では、雪の結晶はほぼ完全な六方対称性を持つが、枝の 1 本 1 本を詳細に見ると、必ず違いが発見される。6 本の枝は、それぞれ独立に成長して形作られるにもかかわらず、

なぜ六方対称性が実現するのかを説明するのは、簡単ではない。例えば、1本の枝が先端で枝別れすれば、他の5本も同時に枝分かれが起こらないといけない。これは、6本の枝の先端の成長条件が極めて均一になっていることを示唆している。すなわち、雪の結晶の枝別れは、確率過程ではなく決定論的に決まる。

第81回 形の科学シンポジウム 「量子科学とかたち」

討論記録（記録のあるもののみ掲載）

- 【主催】形の科学会
 【共催】大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所
 【会期】2016年6月3日（金）、4日（土）、5日（日）
 【会場】統計数理研究所 〒275-0016 東京都立川市緑町 10-3
 講演会場：3階 セミナー室1 展示会場：3階 セミナー室2
 【代表世話人】西垣功一（埼玉大学大学院理工学研究科 名誉教授）
 〒338-8571 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 E-mail: koichi@fms.saitama-u.ac.jp
 【共同世話人】中村振一郎（理化学研究所 中村特別研究室）
 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1 E-mail: snakamura@riken.jp
 【参加費】会員・非会員ともに一般5,000円、学生1,000円
 【懇親会】6月4日（土）17:30より、統計数理研究所3階セミナー室2にて
 【懇親会費】一般4,000円、学生2,000円
 【第81回 形の科学シンポジウム WEB サイト】<http://katachi-jp.com/sympo81>
 【第81回 形の科学シンポジウム予稿集 電子版】<http://katachi-jp.com/paper/Symposium81v2.pdf>

討論記録は質問者の討論記録シートの記載にもとづいており、講演者の校正がないものもあります。

Q: 質問、A: 回答、C: コメント

討論記録

6月3日（金）

形と知

ジグソー学習を取り入れた「理科読」による日本列島の形の探究に関する実践研究

原口るみ（東京学芸大学大学院）、松浦執（東京学芸大学）

Q1. 佐々木康成

かたちにこだわるとはいたか？

A1. いる。少なからずいる。

Q2.

ジグソー法の適用に関して、シリアルな知識（パラレルではなく）についても可能となるような事例やアイデアがあるといいが。

A2.

ジグソー学習が万能とは思っていないので、適宜使用することが重要である。今回は、パラレルな知識での事例だが、シリアルなものでも可能となるような事例も探していきたい。

C. 本多久夫

地形をテーマにした例であるのが良かった。個々の興味深い事実がプレートの動きを考えることで全体的な理解が得られた例であることが良かった。理科では、この他にも周期率など色々良い例があるだろう。

Q. 高木隆司

「理科読」という言葉の意味は何か。対応する英語はあるか？

A.

「理科読」の意味は、教科書以外の本を読むことで、①子どもの科学への興味関心を高める、②知識をつけ、理解を深める、③実験や観察の見通しをつける、④子どもたちが自分なりの表現をする、といったことを目指しています。私は特に絵本に注目したいと考えています。

「理科読」は2010年に生み出された造語であり、1対1で対応する英語はないと思う。

Q. 西垣功一

ジグソー学習のジグソーの意味はどういう内容ですか？ エキスパートグループで学習することで、ホームグループに戻った時にうまくすりあわされてビックリとジグソーのピースがはまるというような意味ですか？

A.

教室全体の課題に関する資料を断片化してホームグループのメンバーが1ピースずつ資料を担当する。同一ピースをもつ人々（エキスパートグループ）の間で議論を深めて、元のホ

ームグループに戻って、各々が深めた知識を持ち寄り（ジグソーパズルのように）全体像を描くという意味。

陰影のデザイン

坂口栄紀（同志社大学）、田中秀一（同志社大学）、佐々木康成（金沢星稜大学）、坂東敏博（同志社大学）

Q. 西垣功一

パターンの視覚情報と聴覚や触覚に由来するオノマトペとを対応づけることになりそうですが、脳の異なる領域間の相互作用を知ることになりそうですね。

A.

今回の実験では、脳の領域間の相互作用がどのような関係性にあるかを明らかにすることを目的にした実験ではありませんが、今後この実験を進めていくことで「ぶつぶつ」や「ざらざら」と言ったオノマトペがどのような視覚刺激によって想起されるのかといった関係は明らかにできるのではないかと考えています。その先に、脳の異なる領域間つまり、視覚刺激を処理する部位と聴覚刺激を処理する部位がどのように相互作用しているかを推定することは出来るかもしれません。

C. 本多久夫

オノマトペの子音分布による解析が役立つように思えたが、よく理解できなかった。聴衆の多くが先行研究を理解しているわけではないから、この方法を使った理由が納得できるような典型例のパターンなど出しながらか説明すべきである。

A.

今後同様の発表を行う場合、コメントに頂いたように先行研究についての説明を改善しようと思います。ご指摘いただきましてありがとうございます。

形の科学一般

顕微鏡（形状情報）に依らずにウイルスの宿主を推定するゲノム解析技術—“オリゴスティッキネス”

西垣功一（埼玉大学名誉教授）、Shamim Ahmed (Shahjalal Univ. Science and Technology)、齋藤あゆむ（東京大学医科学研究所）

Q. 福井義浩

マウスの肝炎ウイルスはヒトに感染しない。インフルエンザ感染に関しても、種によって感染性に差が認められる。西垣先生の提示した仮説で、それらの現象は説明できるのか？

A.

ホストとウイルスの共存時間がオリゴスティッキネス（OS）の類似性に関係するというのが本研究の中心仮説です。その意味から、感染期間に長短があれば、OSに影響がある可能性はあり、興味深いご指摘です

通信，暗号，そして多面体

佐藤郁郎（宮城県立がんセンター）、秋山仁（東京理科大学）

Q. 山口陸幸

準正多胞体の表現の（準）と（半）の使用分けを厳格に区別されているのでしょうか？

A.

ここで使用している（準 semi）は宮崎先生の（半）の意味で使用している。しかし、文献上は semi-と quasi-を逆に用いている文献もあるし、Semi-regular という term 自体、用いる人によって定義が異なっていて Confusion の原因になっている。統一がなされるという期待も薄い用語である。

Q. 西垣功一

β ウイルスの疑似 20 面体構造において、各頂点を形成するキャプソミアは複数個(5 とか 6)のタンパク質から形成されるようですが、先生の使われている表記法で表すことはできますか？

A.

関係するかもしれませんが、この場では即答しかねます。レベルの異なる問題という気はします。

リソスフェアの変形の微分幾何学

菊地和平（東北大学大学院）、長濱裕幸（東北大学大学院）

クモの網を模擬した構造の変形特性と冗長性に関する基礎的検討

森山卓郎（阿南工業高等専門学校）

C. 本多久夫

たて糸と横糸がクロスするところは可動なのでしょう。実際の写真をみると固定されているかもしねえ。

A.

実際には、網にかかった獲物が動いても網全体が壊れないように、縦糸との接合部で横糸のみが切れるような接合になっているようです。しかし、今回の解析モデルにおいては、縦糸と横糸の接合部は固定としています。縦糸と横糸の接合方法については、モデル化においての今後の課題になるかと思えます。

C. 山口陸幸

クモの糸は縦糸と横糸と中間の3種類あると思います。縦糸と横糸には粘り気がなく、中間の糸には粘り気があります(と思います)。実用化の検討であれば3種類の検討をされた方がよいのではないかと思います。

A.

クモの網では、一般に横糸が粘り気のある性質のようです。今回の解析では糸の粘性は考慮せず、縦糸と横糸で弾性定数のみを変えていますので、今後は粘性なども考慮したモデルにおいて解析を行うことも検討してみたいと思います。

弾性円管の内外圧力差による座屈

高木隆司（東京農工大学名誉教授）

C. 本多久夫

圧力がかかることで血管断面は楕円に似た断面になる。その平たくなる方向は血管の全体が直線ではなくわずかにでも曲がっていればそれにより決まるということだと思います。

Q. 菊池和平

データはどのようなものを使用されたのか。

A.

医者から頂いたデータ（標準値）を使用した。

文字教育における ICT の活用

香名健一郎（福井大学大学院）、本田容子（盛岡大学）、

高田宗樹（福井大学大学院）

C. 本多久夫

漢字の筆順を考えると、二通り「どちらでもよい。しかし起源からすればこちら。」という教育が良いのではないかと。伝統を伝えながら子供に負担を与えないために。

Q. 佐々木康成

学習の基礎となる標準的な文字（伝統からという意味ではなく）を教えておくという意味は、むしろこの時代にはより必要なのではないか。

A.

その通りで、現在、標準書体という書体が存在していないことは問題だと考えている。文字言語の応用性から文字の成り立ちの意義を確認する意味でも伝統を重視することは大切である。しかし、グローバルな意味での学習効率や ICT 化を考えた場合、最も標準的な文字を示すことが重要である。文部科学省は「伝統的な言語文化」という分野に書写を入れたが、文字も時代に合わせて変化していくため、問題提起を続ける必要がある。

6月4日（土）

量子科学と私たち

SU(2) 代数から対称性と形へ ～方位角の波動関数の形を代数構造から探る～

小川直久（北海道科学大学）

C. 手嶋吉法

私も大学時代に量子力学を学んだが、その後あまり使わずに現代にいたる。今回展示した数学局面の中に球面調和関数の模型も含まれており、確かに対称な形をしている。模型を作るばかりで、数理的な吟味をおろそかにしていることを、ご講演を拝聴して反省した。

C. 高木隆司

量子力学と物の形との関連を理解するためのよい考え方やその体系化のアイデアを拝聴した。

Q. 中村振一郎

パリティを x, y, z と別々に扱うのなら鏡面对称操作と同じと考えるが、そう考えてもすべてのプロセスは同じか。

A.

概念は同じである。ただし通常、鏡面对称操作は結晶構造に関するもので、量子力学的な演算子としては定義されていないと思う。その辺が新しい。また、この演算子を量子力学的な対象物に作用させたときの固有値が-1 になるかどうかで波動関数の位相反転、つまり節面の存在をチェックしている。結晶構造には位相という概念がないので、このような使い方は見当たらない。

量子科学と私たち（公開講演）【招待講演】

分子が認識する分子の私たち ～量子化学情報で深層学習するために～

後藤仁志（豊橋技術科学大学）

Q. 中村振一郎

アスピリンの相転移において、分子内振動と全体のバルクモードのカップルはいかに表現されていますか。

A.

現時点で、我々の CONFLX 計算では、結晶の非対称単位が振動計算の対象となっています。相転移計算では、この非対称単位を意図的に拡張し、単格格子 1～16 個を立方体に積み上げて振動計算をしています。したがって、バルク（目に見えるほどの大きさ）のカップリングまでは考慮していませんが、有限ナノサイズの超微結晶における振動モードに相当すると考えています。また、実際の相転移と結晶内振動との関係は、欠陥の存在とその位置が重要になりますので、それを表現するためには、欠陥の出現率を再現するまで非対称単位相当を大きくする必要があるので、大規模並列計算を行う必要があります。まだ、そこまではできていません。

Q. 松岡篤

化合物記述子と三次元構造の関係についてもう少し説明してください。

A.

分子記述子 (Molecular Descriptor) は、分子の構造特徴量や物性 (反応性) 特徴量のことです。具体的には、分子内の

原子タイプや結合タイプ、ドナー/アクセプタ性、あるいは LogP のような物性値などを含めることもあります。この記述子の組み合わせで様々な分子をユニークに表現することができるのと、その記述子の集合は分子を特定することができる指紋 (Finger Print) であり、分子を情報化 (デジタル表現) したことになります。様々な分子に対してある物性を測定したデータを、分子記述子の Finger Print と物性を結び付けて機械学習させれば、新しい分子記述子を与えて物性を予測することができます。

一般に、分子記述子は分子の二次元情報や内部座標情報に基づいて表現することが多いですが、分子が分子を認識する (つまり、相互作用する) 場合、本質的には 3 次元構造が対象になります。したがって、三次元記述子がこれからの課題であり、それは分子内原子の配置だけでなく、電子状態 (構造) を含めてどのように表現するかという問題です。一つの例として、ファーマコフォア法を紹介しましたが、予測したい物性に対するより適切な表現方法を創造する必要があると考えています。

Q1. 細矢治夫

ケンブリッジの結晶構造予測のコンテスト 5 間にはいろいろな種類の分子やイオンがあると思うが、それをお聞きしたい。

A1.

原子数が数十の分子や、複数のイオン等を含む分子複合体、少し大きなフレキシブルな有機化合物等がありますが、タンパク質のように大きいものはありません。

Q2. 細矢治夫

結晶構造を予測する際に 80 Å の大きさが一つのメドになるといわれるが、それは分子やイオンの種類によって大きく異なるのではないか。

A2.

まず、80 Å というのは、アスピリン結晶における有効結晶半径をそこまで広げると、結晶エネルギーの揺らぎが極めて小さくなる境界のことです。我々の CONFLEX 計算では、通常、有効結晶半径内の非結合相互作用を分子単位で取り込むため、その意味では結晶エネルギーは分子の大きさに依存します。

一方で、原子単位で相互作用を取り込むことも可能であり、その場合は、分子のサイズにはそれほど大きく依存しないと云えます。この時に大きな影響を与えるのは、電荷分布であり、特に有効結晶半径の境界領域における電荷の正負分布に差があると、全エネルギーが揺らぎます。つまり、分子の大きさやイオンの種類というより、有効結晶半径の境界領域における電荷分布の不均一性が結晶エネルギーの安定性に大きく影響するのです。

Q. 高木隆司

巨大分子を結晶成長させるという過程がイメージしにくい。最初何コくらい分子から出発するのか。

A.

実験では、難しい問題で、タンパク質の結晶化を専門とする会社もあり、秘密の手法があるようです。我々の計算で、(比較的小さな分子ですが) 80 オングストロームくらいまで成長させるとエネルギーの揺らぎが減少するという事実と、実際の結晶化プロセスとは何らかの関係があると考えています。余談ですが、我々の CONFLEX 計算でタンパク質の結晶構造も計算したことがあります。その場合、結晶水以外の水分子の存在が結晶構造を再現する上で重要な役割を果たしていることが分かっています。

オービタルのかたち—節面と規則性

時田澄男 (埼玉大学名誉教授)

Q. 小川直久

節面の数の n 依存性について、数学的証明はなされているか?

A.

節面の数式は、波動関数の式を因数分解するだけで得られるので、その数や量子数依存性を求めている。

Q1. 細矢治夫

ミスプリの指摘

A1.

問い合わせ先を studionebula@gmail.com に訂正する。

Q2. 細矢治夫

原子軌道の形について、化学では実関数で s, p, d, f の形が見えるが、物理では複素数で表すから p, d, f の形が見えない。

A2.

s, p, d, f, \dots のうち、磁気量子数が 0 でない軌道の角部分 (球面調和関数) は、複素関数である。講演では、複素数の波動関数の平方を可視化することにより、複素関数と実関数の形の相互関係がわかることを述べた。講演内容を下記にまとめたので、ご参照いただければ幸いです。

時田澄男「オービタルのかたち—節面と規則性」, 形の科学会誌 **31**, 11-20 (2016).

http://katachi.jp.com/paper/31_1.pdf

電子励起状態ポテンシャルの形と光化学反応 ~フォトリミック分子 (ジアリールエテン) の光異性化反応を例に~ 小林高雄 ((株) MCHC R&D シナジーセンター)

Q. 岩田修一

真空中でなく溶液中のシミュレーションの現状についてご教示ください。特に体液中の薬のふるまいを考えた場合は、十分なレベルでしょうか。

A.

B-O 近似を基軸にして、注目する生体系の内、反応に関与する部分とそれ以外の部分に分割し、前者を量子化学的に (QM により) 取り扱い、後者を古典的に (MM により) 取り扱う QM/MM MD シミュレーションを活用すれば、ある精度内でシミュレーション可能である。

プロトンのダイナミックな挙動についても、それを量子的に取り扱えば一定の精度でシミュレーション可能である。

化学素反応における分子軌道の“形”の最小変化: 量子科学の新しい観点と福井—Woodward—Hoffmann 理論の統一

野平博之 (埼玉大学名誉教授)

Q1. 細矢治夫

非交差則の正誤性は感覚的に判断すべき問題ではない。基本的なやさしい理論を次第に複雑で高度なものに積み上げていくことをせずに、基本的なところを初めから否定する教育をしたら、とんでもない科学者が育ってしまう。

A1.

私の判断は、講演で詳しく説明したように、決して感覚的なものではなく、実証的な検討を重ねて到達した結論です。とりわけ重要なものは、非交差則の原点とされる、Neumann-Wigner の論文; *Z. Physik*, **30**, 467 (1929) の記述です。この論文の後半の数行に、“変化の速度が大きき場合、波動関数のエネルギーは非交差とはならずに変化する”とあります。これまで十分に認識されて来ませんでしたが、化学素反応の速さは、 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ sec. であり、(cf. 山内薫著、「超短パルスレーザーによる化学反応の実時間観測」, *A. H. Zewail 教授の業績*、現代化学、2000年1月号)、これから考察すれば、“化学素反応における波動関数の変化に非交差則を適用する必要はない”という結論が導かれるはずで、最も基本的な Neumann-Wigner の原論文を検討していただければ幸いです。

Q2. 細矢治夫

福井のフロンティア軌道理論の HOMO-LUMO の対称性重視の考え方は非交差則を否定するものではない。

A2.

確かに、福井氏は“意識的に”非交差則を否定して、HOMO-LUMO の理論を提唱されているものではありません。しかし、この理論を適用した Diels-Alder 反応の説明、あるいはナフタレンへの求電子核置換反応などの説明は、結果的に非交差則を否定していることになります。(cf. H. Nohira, T. Nohira, *J. Theor. Comput. Chem.* **11**, 379(2012).

なお、福井氏には、私が 1985 年頃までに討論会、雑誌などで公表した講演要旨、別刷などが届けてあります。その代表的なものは、野平著、「軌道相の最小変化、福井理論および

Woodward-Hoffmann 則の論理構造とその統一理論原理」現代化学、1983 年 8 月号です。また、直接意見交換する機会もいただいております。しかし、福井氏からの反論は聞いておりません。そのような記録がどこかにありましたらご教示下さい。

Q. 小川直久

井戸型ポテンシャル中の粒子の波動関数のエネルギー固有値を考えると、基底状態のエネルギーは、壁の広さに依存するので壁には量子力学的な力が作用していると考えている。したがって、壁を瞬時に動かすということは外部とのエネルギーの受け渡しが行なわれたと考えるべきではないか。そうだとすると、同じエネルギーレベルの準位に移るといのは、矛盾するのではないか。

A.

その点は問題であると考えている。しかし、原著者が提起した問題とその回答 (D. J. Tannor, Introduction to Quantum Mechanics A Time Dependent Perspective, pp. 7-10, University Science Books, 2007, 同、山下ほか訳、入門量子ダイナミクス、時間依存の量子力学を中心に (上) pp. 8-12, 化学同人, 2011.) においても、“外部とのエネルギーの受け渡し”は考慮されていない。また、状態は波束として変化しているが、エネルギーの総和は保存されている。“外部とのエネルギーの受け渡し”は無いのとしたモデル的な問題提起と考えればよいのではないのでしょうか。

なお、私の解釈とは切りはなして、原著者が提起している問題とその回答に限ったとき、その当否は如何でしょうか。

Q. 小林高雄

WH 則を考える際、オリジナルな非交差則に基づく軌道相関図ではなく、軌道の形の最小変化に基づいて書かれた相関図から考えた場合、いつでも WH 則を満たす保障が無くなってしまっているのではないかと。

A.

そのようなことはなく、いつでも WH 則を満たす。

公開講演 (一般テーマ) 【招待講演】

ビッグデータ、人工知能、そしてセレンディピティ

樋口知之 (統計数理研究所)

Q. 細矢治夫

高校の数学では「統計」はまますぎ扱い。この分野の研究者として何か動きはないのか。

A.

統計コミュニティとともに改善できるよう努力している。

Q. 川上保衛

政府の経済政策を打ち出す時に、それが当たるかどうかは現代の統計能力から可能ではないか。ただし一つの結果を社会に提示したときに、そのことによって別の行動を人間がすることになるのでこの“自己反省性”をどう数理的に処理するのが問題となろう。

A.

モデル化も含めて、実効的な観点で誰も成功していない難しい課題である。

Q. 高木隆司

コンピュータは、物理学の入試問題が不得意だという話があり、その理由は、物理現象の常識が無いとのことであつた。では、常識がないというものを集めて体系化してコンピュータに教えるということは可能か、あるいはその試みがあるだろうか。

A.

「常識」を定義することは非常に難しい。それよりも背景や文脈依存性を課題に応じてとことん集積する作業を実現するほうが近道である。また、そのような試みは、私は知らない。

Q. 岩田修一

日本の逆問題に関する能力を高めるためには、どうしたらよいか？

A.

データサイエンスの教育が有効であり、文科省もそれに重点を置き始めている。

6 月 5 日 (日)

形の科学一般

力学系平衡点の可視化とデザインへの応用

山岡久俊、竹内琢磨

Q. 手嶋吉法

2 次元 (3D) の平衡点近傍の解軌道のパターンとして示された図は、網羅的か。あるいは幾つかの例か。例えば鞍点に関しては、矢印 2 本が内側で 2 本が外 (隣同士の矢角度 90°) の場合だけが示されたが、矢印 3 本が内側で 3 本が外 (隣の矢との角度 60°)、4 本が内側で 4 本が外 (隣の矢との角度 45°) など、バリエーションが無数にあるように思うが、解軌道としては実現しないのか。2D でのバリエーションが増えれば、3D、4D も様々なパターンが得られると思う。

A.

今回は固有値分布のパターンで分類しています。力学系の解軌道の性質は固有値分布で特徴づけられますので、おおまかな形態としては網羅できていることとなります。

C. 山口喜博

色付けをすともっとわかりやすくなるのではないかと。

14 面体立体パズル「レインボーキューブ」の解法表示ソルバーの開発

竹内琢磨、山岡久俊

C. 手嶋吉法

レインボーキューブは、結晶学者・渡辺泰成博士と機械設計技師・池上裕司 (両者の当時の所属は理化学研究所) が共同開発したものである。

Q. 山口喜博

バラバラの状態がレインボーキューブで許されるのかどうかの判定を行っているのでしょうか。

A.

(回答なし)

ギーリス曲線の特徴とプロダクトデザインへの応用

松浦真也 (愛媛大学)、齋藤邦彦 (滋賀大学)

C. 本多久夫

矩形の角をけずっていく流れでころがっていくもの、楕円が流れでけずれるような造形でできるものとの対応がつくと面白いと思った。

Q1. 高田宗樹

$p < 3$ ($p << 3$) の領域で、最大曲率は解析的に解けないか？

A1.

現段階では挑戦中である。

Q2. 高田宗樹

最大曲率の出るポイントは極座標で表した時定角になるのか？

A2.

定角ではないことは分かっているが、詳細は現段階では挑戦中である。

Q. 山岡久俊

デザイナーが決めた $p=2.5$ という値は結果として何かを最適化しているか？

A.

結果的に最大曲率をほぼ最小化している。

背景揺れを伴う立体映像視認時における体平衡系の数理モデル化

天野直 (福井大学大学院)、木下史也 (名古屋大学大学院)、

平田隆幸 (福井大学大学院)、高田宗樹 (福井大学大学院)

Q. 山岡久俊

数理モデルの意味は？

A.

「 $z = -\text{grad}U + \mu w(t)$ 」 $\text{grad}U$: 体を戻そうとする力、 $\mu w(t)$: ノイズ

Q. 高木隆司

表題にある「背景ゆれ」の意味が分からなかった。(1)実際の映像で揺れているのか、技術的問題でゆれが生じているのか。(2)技術的問題でゆれが生じているのか。(3)錯覚でゆれたように見えるのか？なお、「背景ゆれ」という言葉は、(2)(3)を想像させる。一方、「ゆれる背景」だと(1)になる。

A.

本研究では(1)です。

科学折り紙の結晶—折り紙モデルで結晶物性を考える—

石原正三 (埼玉県立大学)

C. 手嶋吉法

折り紙構造を作る過程で、物性の仮説を立てたり、構造の強度を体感したりする事は大切な事と私も思う。

Q. 手嶋吉法

ダイヤモンド構造の「固さ」をスケルトンの折り紙構造で体感できるとのお話があったが、スケルトン折り紙は正四面体とテトラポッドを合体させたような形。これに対して本来のダイヤモンド構造はテトラポッドだけを結合させた形。正四面体は三角形だけでできており、固くなるのは必然といえるので、テトラポッドだけからなる構造が「固い」ことを体感出来る折り紙構造の教材はできないか。

A.

四面体構造自体が硬いとしても、四面体のつくる構造が鎖状構造か網目構造化によってもモデルの硬さが変化するので、四面体を接合してできる立体構造が必ずしも硬いとは限らない。テトラポッドだけからなる構造のモデルとして、分子ふるいとして知られるゼオライト構造の折り紙モデルを制作しているが、硬さというよりも多孔質という質感を体感できる教材になっている。

Q. 野村和泉

水引きを使った折り紙ユニットのつなぎ方について説明してください。

A.

折り紙に竹串で穴を開け、短い水引きにセメダインをつけて差し込む。反対側も同様。

放散虫の収斂現象

松岡篤 (新潟大学)

Q. 西垣功一

図中のバイオイベントの意味はなんですか？生物界における何かのイベントと対応しているのでしょうか？

A.

あくまでも放散虫の微化石から推定された「種分化」や「出現」が生じたと推定される点を示しており、現実の自然界のイベントを直接表しているわけではありません。

Q. 小川直久

時代ごとに形が違うのは、時代の要請によって、必要な機能性がそなわるように形が進化したものと考えられるか？

A.

殻形態の変化が、機能に対応した何かを直接的に示しているのではないと思います。

何度も同じパターンが進化傾向があるのを見ると、ファッションの推移をみているような感じを受けます。何度も起こる共通の原因は何かを突き止めることは、とても重要です。

まだ、よく分かっていません。

Q. 本田久夫

変化したものと変化しないものが共存するのか。

A.

放散虫の分類群によって、速やかに形態変化を示すものと、変化しにくいものがあるように見えます。

Q. 手嶋吉法

放散虫の骨格形成における「きちんと形が決まる部分」と「ランダムネスに委ねられている部分」は分けられているか。(例えば、人間の血管網のパターン形成のある部分はランダムに決まると聞く)それを調べるためには、生きている放散虫を飼い、親と子と子孫の骨格を比較すると良いと思うが、可能か。

A.

形態形質には個体変異の幅が大きいものと、小さいものがあります。飼育実験の条件を変えて、個体変異を明らかにするというのは、とても興味深い研究です。その方面の研究に挑戦していますが、まだ飼育できる種が限られているのが実情です。

どの種が飼育実験がしやすいのか、その理由も含めてようやくわかってきた段階です。

形と知

お笑いフレームと対話の形

細川拓朗 (東京学芸大学)、松浦執 (東京学芸大学)

C. 高木隆司

対話のおかしさという点で、落語家の志ん生が抜群だった。後の話のおかしさは、間の取り方にあったと思う。

A.

その通りである。落語家の枝雀による数多くの落語のサゲの分析によれば、人は緊張が緩和したときに笑うという傾向がある。落語のサゲには、心理的な不安定から安定、安定から不安定という急激な動きがあり、いずれも緊張が緩和する形になっており、笑いが起きるポイントになる。間の取り方も、話芸による心理的な緊張の取り方などに直結するものと思われる。

Q. 蛭原三華

自閉症の子供のためのロボットはどういう目的で作られたのか？

A.

自閉症の子供の教育を目的にしたものと、自閉症の診断を目的にしたものがある。顔認識や音声認識により、単に人の識別や言葉を認識するだけでなく、感情を評価し、それに対応するプログラムが可能である。子どもの言葉や動作を真似して再現してみせたり、ロボットから根気よく単純な提案を繰り返すことができる。また子どもの側からも、ロボットのために明快に表現する練習が自然にできるといった態度が生まれてくるという。近年では、言語処理によって、人に共感したり懐いたりすることが可能なAIも提案されつつある。ロボットが人間のパートナーの一つになることで、心を癒したり、心理的負担を軽減するコミュニケーションを安定的に提供できるようになるかもしれない。

近世日本の立体図法 —三浦梅園「玄語図」と松森胤保「動物系表」より—

出原立子 (金沢工業大学)

Q. 西垣功一

松森胤保の動物系表は進化的な意味や生存価値観のような概念は含まれているのでしょうか？

A.

そのような概念は入っていません。地面から空の方向に存在する位置と対応しているようです。

C1. 本多久夫

三次元配置が頭の中にある時に (図3にあるように立方体の頂点、1, 3, 7, 5, 2, 4, 8, 6 とすると)、1, 5, 7, 3 は同等な ? であるが、立体図法 A や B では同党ではなくなる。(1-5, 1-3 は等距離だが図法 A では異?... など)。これは承知の上仕方なくつくった図法なのか、それとも差異があることを意識しての図法なのか。対象となる具体的なものを考えて検討すれば面白いのではないか。

C2. 本多久夫

左右について価値観などの区別はないのか。その価値観が反映された上でのマッピングなのか (例えば左の物は右の物より重要など) わかると面白いと思う。

Q. 松浦執

3次元的配置の (関連性) を表現するとき 2次元にマッピングするのですが、円環上へのマッピングが優先されているように見えます。円上への配置ということに何か意味はありそうでしょうか。

A.

直ちには解答できないが、梅園は円・球で宇宙を表している。胤保は円が複雑にからみ、解釈が難しい。

形の科学一般

半正多胞体の4接超球半径を求める(パート1)

山口陸幸

n次元超球まわりのストークス流れ

吉野隆(東洋大学)

Q. 手嶋吉法

講演の序盤で言及された「2次元におけるパラドクス」とは何か。

A.

2次元における球(円柱)のまわりの流れはストークス近似で扱えないというものです。

C. 高木隆司

シュレーゼンガー方程式の式は流体力学的な表現が可能(Takabayashi, 2019年)なので、今回の研究から量子力学の解がわかるかもしれない。

ケプラーの円錐曲線論

ウェルフェア ジャスティン 飛鳥(神奈川大学大学院)、山口幸(神奈川大学大学院)、杉本剛(神奈川大学大学院)

Q. 松浦執

双曲線を引くとき、2本の糸が同じ量できるように引くとのことでしたが、何らかの仕組みの工夫があったのでしょうか。

A.

特別な仕組みはなくかけたようだ。

合同円柱の重なりからなる立体形状とその実体化

宮本圭佑(千葉工業大学大学院)、荒川久遠(千葉工業大学)、手嶋吉法(千葉工業大学)

Q. 種村正美

素朴な疑問ですが、相貫体の各面は湾曲しているのですか。表1の表面積及び体制の式には(π)が含まれていないが、それで良いのか?(球をベースとする湾曲した面の表面積、体積には直観的に π が含まれるものと感じられたので。)

A.

湾曲しているが、表面積および体積の計算をした結果、 π は含まれない。これは、先行研究であるMooreらの論文でも指摘されていることだが、意外な結果と言える。

Q. 根岸利一郎

軸数増加に伴って表面積、体積ともに小さくなりますか。

A.

この表(スライド)に示すように小さくなります。

Q. 出原立子

模型制作に関する質問です。ご発表内容では高精度な3Dプリンターを使用されていましたが3DCGソフト(shadeなど)の集合演算を用い、安価な3Dプリンターを使用しても同様に模型を制作することはできますか?

A.

可能です。発表で紹介した模型は、ナイロン粉末を材料としてレーザー焼結法による3Dプリンタで造形しましたが、低価格帯の3Dプリンタ(FDM法による)でも造形を行ないました。造形時、前者はサポート不要で、後者はサポートが付きまますので、サポート除去が綺麗に出来れば、低価格帯の3Dプリンタでも問題ありません。

球状テンセグリティ構造の幾何学特性

浅尾祐樹(千葉工業大学)、手嶋吉法(千葉工業大学)

Q. 高田宗樹

安定性を計算する尺度はあるか。

A.

現在のところ、定性的に行っている。

C1. 本多久夫

正6面体から正8面体への変換の場合、右回転、左回転2通りがあるが、これらは鏡像関係ですね。

C2. 本多久夫

摩擦のない系でつくれば安定な形ではいられないですね。

Q1. 山口陸幸

正四面体ベースで組み上げられた正方形 or 正五角形は一本のゴムから成り立っているのですか?

A1.

ゴムは複数使用します。

Q2. 山口陸幸

正六面体ではなく立方八面体、正十二面体ではなく、二十面十二面体がベースではないか。

A.

連続的な変形が可能な為、中間状態をアルキメデス立体に関連づけることは可能であるが、本研究では、正多面体を基本とした呼び方にした。

Q. 西垣功一

念のためお伺いしますが、テンセグリティを構成する張力ベクトルの総和は0になりますよね。

A.

未確認ですが、そのように予想しています。

○新入会の皆様(敬称略)

山岸 義和 龍谷大学
 西澤 勝
 住田 雅樹 東京大学 生産技術研究所

○新入会の皆様のご紹介(敬称略)

このコーナーでは、交流の促進を目的として、新入会の皆様の「主要研究分野」(A と略記)と「形の興味」(B と略記), もしくは、お寄せいただいたご自身によるプロフィール記事(C と略記)を掲載します。

山岸 義和

A: 応用幾何学 **B:** 折り紙、ビーズ編み

西澤 勝

住田 雅樹

A: 材料組織制御 **B:** 結晶形態、数学モデルなど

○平成 27 年度をもって御退会の会員 (追加)

(故) 長谷田 泰一郎 大阪大学名誉教授

○ご逝去

形の科学会より、謹んでお悔やみ申し上げます。

長谷田 泰一郎 先生

低温と磁性の物理学を中心としたご研究に従事されておりました。平成 17 年度より形の科学会名誉会員として本会をご支援いただけてきました。2016 年 8 月 15 日にご逝去されました。

○2016,17 年度運営委員 (2016 年 6 月 4 日承認)

石原 正三 埼玉県立大学保健医療福祉学部
 出原 立子 金沢工業大学 情報フロンティア学部メディア情報学科
 岩田 修一 事業構想大学院大学
 植田 毅 東京慈恵会医科大学 医学部物理学研究室
 小川 直久 北海道科学大学 高等教育支援センター
 海野 啓明 仙台高等専門学校 広瀬キャンパス
 岸本 直子 摂南大学 理工学部機械工学科
 杳名 健一郎 プリンス オブ ソンクラー大学 人文社会学部東洋言語学科
 小森 雄太 明治大学 研究・知財戦略機構
 塩澤 友規 青山学院大学 経営学部経営学科
 杉浦 明弘 岐阜医療科学大学
 高木 隆司 武蔵野美術大学
 高田 宗樹 福井大学 大学院工学研究科知能システム工学専攻知能基礎講座非線形科学研究室

種村 正美	統計数理研究所 名誉教授
手嶋 吉法	千葉工業大学 工学部機械サイエンス学科
西垣 功一	埼玉大学 名誉教授
沼原 利彦	医療法人社団 むまはら皮ふ科
根岸 利一郎	埼玉工業大学 先端科学研究所
原田 新一郎	埼玉県立浦和東高等学校
平田 隆幸	福井大学 工学部知能システム工学科
福井 義浩	徳島大学大学院 医歯薬学研究部 医科学部門 機能解剖学分野
松浦 昭洋	東京電機大学 情報システムデザイン学系
松浦 執	東京学芸大学 基礎自然科学講座理科教育学分野
松浦 康之	名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科
松岡 篤	新潟大学 理学部地質科学教室
宮坂 寿郎	京都大学大学院 農学研究科地域環境科学専攻
宮本 潔	獨協医科大学 医学総合研究所
山岡 久俊	株式会社富士通研究所
山口 喜博	帝京平成大学 情報学研究科

○2016年度第1回形の科学会運営委員会議事録

日時：2016年6月4日（土）12:20-13:20

場所：〒190-8562 東京都立川市緑町10-3 統計数理研究所・会議室3

出席者（敬称略）：石原正三、小川直久、海野啓明、杳名健一郎、杉浦明弘、高木隆司、高田宗樹、種村正美、手嶋吉法、西垣功一、根岸利一郎、松浦昭洋、松浦執、松岡篤、宮本潔、山岡久俊、山口喜博

議題：

- (1) 会員関係報告：2016年5月28日現在391名（2015年6月20日401名）
- (2) 2016,17年度運営委員信任投票結果が次のように報告された。
会員の信任投票で86票の有効投票があり、29名の運営委員候補者全員が信任された。
- (3) 2016,17年度形の科学会会長候補者が次のように報告された。
会長候補者 獨協医科大学 宮本 潔 氏
上の候補者について委員会に先立ち行われた2016,17年度運営委員による信任投票で、有効投票29票中29票の満票にて信任されたことが報告された。
- (4) 2015年度活動報告が行われた。
 - ・形の科学シンポジウムを次のように開催した。
第79回：「生物に見られる「ねじれ」構造」千葉工業大学津田沼キャンパス 2015年6月12-14日（世話人：本多久夫、手嶋吉法）。
 - 第80回：「スポーツ・パフォーマンスに現れる形」東京電機大学 2015年11月21-23日（世話人：松浦昭洋）。
 - ・会誌第30巻1～3号を刊行した。
 - ・FORMA Vol.30を刊行した。
 - ・2015年度「かたちシュレー」：2015年12月21日～22日福井県あわら市および福井大学文京キャンパス（一般公演は21日のみ。22日は数学協働プログラムワークショップとの共催。参加無料）を行った。
 - ・日本地球惑星科学連合「遠洋域の進化」セッション(2015/5/26)を開設し、佐々木猛智氏に招待講演を依頼。
 - ・新潟大学旭町学術資料展示館サテライトミュージアム企画展示「殻がつくる世界」

(2015/7/11~8/28) を後援した。

- ・第 16 回日本感性工学会大会(2015/9/4~9/6)を協賛した。
- ・46th ISAGA conference/Japan Association of Simulation & Gaming (2015/7/17~7/21) を後援した。

・新潟大学「形の科学研究センター」において下記の活動が行われた。

-2015 年 9 月 2 日 (水) 【シンポジウム】 2015 年度公開シンポジウム

-2015 年 12 月 16 日 (水) 【講演会】 放散虫のかたち 2015

—2017 年国際放散虫研究集会 (InterRad) の新潟開催に向けて

-2016 年 2 月 27 日 (土) 【シンポジウム】 日本海のかたちと生き物

(5) 2015 年度決算報告および監査報告が行われた。

(6) 2016 年度の活動計画が報告された。

・シンポジウムを次のように開催する。

第 81 回：「量子化学とかたち」2016 年 6 月 3 日 (金) -5 日 (日) 統計数理研究所 (東京都立川市) (世話人：西垣功一、中村振一郎)

第 82 回：「産業技術とかたち」2016 年 10 月 7 日 (金) -9 日 (日) 産業技術総合研究所 (茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7) (世話人：中島善人)

・会誌第 31 巻 1~3 号を刊行する。

・FORMA Vol.31 を刊行する。

・2016 年度「かたちシュレー」は検討中。

・日本地球惑星科学連合「遠洋域の進化」セッション(2016/5/23)を開設し、岸本直子氏と佐藤峰南氏に招待講演を依頼。

・第 18 回日本感性工学会大会協賛。

(7) 2016 年度予算案が報告された。

(8) 2016 年度学会賞の選考結果が報告された。

(9) その他 (検討中の事項)

・学会への寄付を受け付ける。他学会での運用を参考に検討する。

・シニア会員の検討 (長年にわたり学会を支援していただいた方に謝意を表し、御退職後も形の科学研究に関心を寄せていただけるよう、年会費 2000 円程度のシニア会員制度を設けることを検討。学会の加入実績が 5 年程度あり、所属先を退職された方)。

・企業展示 (非会員の企業などが対象。形の研究と直接関係しない内容でもよい。シンポジウム開催の支援のため賛助金 10000 円をお支払いいただく。懇親会費は別) の受付を検討する。

・学会 HP へのバナー広告の掲載受付 (12000 円/年) を検討する。

(以上)

○2016 年度形の科学会総会議事録

日時：2016 年 6 月 4 日 (土) 16:30-17:20

場所：〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3 統計数理研究所

議題：(定足数 391 名×1/15=26 名。委任状 43 通、21 名出席。よって定足数は満たされた)

(1) 会員関係報告：2016 年 5 月 28 日現在 391 名 (2015 年 6 月 20 日 401 名)

(2) 2016, 17 年度運営委員信任投票結果報告

会員の信任投票で 86 票の有効投票があり、29 名の運営委員候補者全員が信任された。

(3) 2016, 17 年度形の科学会会長の選出

会長候補者 獨協医科大学・前教授 宮本 潔 氏

新運営委員による会長候補のメール信任投票がおこなわれ、運営委員 29 名全票信任が

得られたので、宮本氏を会長候補として総会に提案することが報告された。拍手により承認され、2016, 17 年度会長は宮本潔氏に決定された。

(4) 2015 年度活動が報告された。

・形の科学シンポジウムを次のように開催した。

第 79 回：「生物に見られる「ねじれ」構造」千葉工業大学津田沼キャンパス 2015 年 6 月 12-14 日（世話人：本多久夫、手嶋吉法）。

第 80 回：「スポーツ・パフォーマンスアーツに現れる形」東京電機大学 2015 年 11 月 21-23 日（世話人：松浦昭洋）。

・会誌第 30 巻 1～3 号を刊行した。

・FORMA Vol. 30 を刊行した。

・2015 年度「かたちシュレー」：2015 年 12 月 21 日～22 日福井県あわら市および福井大学文京キャンパス（一般公演は 21 日のみ。22 日は数学協働プログラムワークショップとの共催。参加無料）を行った。

・日本地球惑星科学連合「遠洋域の進化」セッション(2015/5/26)を開設し、佐々木猛智氏に招待講演を依頼。

・新潟大学旭町学術資料展示館サテライトミュージアム企画展示「殻がつくる世界」(2015/7/11～8/28) を後援した。

・第 16 回日本感性工学会大会(2015/9/4～9/6)を協賛した。

・46th ISAGA conference/Japan Association of Simulation & Gaming (2015/7/17～7/21) を後援した。

・新潟大学「形の科学研究センター」において下記の活動が行われた。

-2015 年 9 月 2 日（水）【シンポジウム】2015 年度公開シンポジウム

-2015 年 12 月 16 日（水）【講演会】放散虫のかたち 2015-2017 年国際放散虫研究集会（InterRad）の新潟開催に向けて

-2016 年 2 月 27 日（土）【シンポジウム】日本海のかたちと生き物

(5) 2015 年度決算および監査が報告され、承認された。

(6) 2016 年度活動計画が報告された。

・シンポジウムを次のように開催する。

第 81 回：「量子化学とかたち」2016 年 6 月 3 日（金）-5 日（日）統計数理研究所（東京都立川市）（世話人：西垣功一、中村振一郎）

第 82 回：「産業技術とかたち」2016 年 10 月 7 日（金）-9 日（日）産業技術総合研究所（茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7）（世話人：中島善人）

・会誌第 31 巻 1～3 号を刊行する。

・FORMA Vol. 31 を刊行する。

・2016 年度「かたちシュレー」は検討中。

・日本地球惑星科学連合「遠洋域の進化」セッション(2016/5/23)を開設し、岸本直子氏と佐藤峰南氏に招待講演を依頼。

・第 18 回日本感性工学会大会を協賛する。

(7) 2016 年度予算が報告され承認された。

(8) 2016 年度学会賞の選考結果が報告された。

(9) その他、下記の事項につき検討が行われていることが報告された。

・寄付の受付

・シニア会員の設定

・企業展示受付

・学会 HP へのバナー広告掲載

（以上）

○2016年度第2回形の科学会運営委員会議事録

日時：2016年10月8日（土）11:45-12:45

場所：〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所つくば本部中央第1つくば本部・情報技術共同研究棟 共用講堂1F小会議室

出席者（敬称略）：石原正三、高木隆司、高田宗樹、種村正美、手島吉法、西垣功一、原田新一郎、松浦昭洋、松浦執、松岡篤、宮本潔、山岡久俊、山口喜博

議題：

(1) 会員関係報告：2016年10月3日現在 399名（2015年11月20日 397名）

(2) 2016, 17年度役員が確認された

[幹事]

庶務幹事：種村 正美

財務幹事：宮坂 寿郎

渉外・広報幹事：石原 正三、塩澤 友規、手嶋 吉法

出版幹事：高田 宗樹、平田 隆幸

FORMA 編集委員長：高田 宗樹

会誌編集委員長：平田 隆幸

学会賞幹事：松岡 篤

監査役：小森 雄太

[そのほかの諸担当]

FORMA 編集幹事：高田 宗樹、日高 芳樹

会誌副編集委員長&会誌編集事務局長：吉野 隆

形シューレ等企画：高田 宗樹

学会 web サイト管理：沓名 健一郎、海野 啓明

シンポジウム開催支援：手嶋 吉法、石原 正三

(3) 2016年度活動および予定について報告された。

・形の科学シンポジウムを次のように開催した。

第81回：「量子化学とかたち」2016年6月3日（金）-5日（日）統計数理研究所（東京都立川市）（世話人：西垣功一、中村振一郎）

第82回：「産業技術とかたち」2016年10月7日（金）-9日（日）産業技術総合研究所（茨城県つくば市東 1-1-1 中央第7）（世話人：中島善人）

・会誌第31巻1~3号を刊行。

・FORMA Vol. 31 を刊行。

・2016年度「かたちシューレ」は検討中。

・日本地球惑星科学連合「遠洋域の進化」セッション(2016/5/23)を開設し、岸本直子氏と佐藤峰南氏に招待講演を依頼。

・第18回日本感性工学会大会を協賛した。

・新潟大学旭町学術資料展示館サテライトミュージアム企画展示「ジオパークの石ころ展」(2016/7/13~8/27)を後援した。

・第18回日本感性工学会大会(2016/9/9~9/11)を協賛した。

・IEEE The 11th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2016)の形の科学サテライトセッション“Forms and Fundamental Fields”を福井大学で開催した。

・新潟大学「形の科学研究センター」において下記の活動が行われた。

-2016年9月3日（土）【シンポジウム】放散虫・魚・樹木のかたち

-2016年6月21日（火）【講演会】カイエビのかたち

-2016年12月21日（水）【講演会】放散虫のかたち

(4) 2017年度活動計画について報告された。

・シンポジウム予定について報告された。

第83回：2017年6月ごろ。金沢工業大学（石川県野々市市）（世話人：出原立子）

第84回：2017年11月ごろ。長崎大学（長崎県長崎市）（世話人：小川進）

（第85回：2018年6月ごろ。東北大学（世話人：村田智）

- ・会誌第 32 巻 1～3 号を刊行する。
- ・FORMA Vol. 32 を刊行する。
- ・2017 年度「かたちシューレ」。
- ・国際放散虫研究集会（InterRad）を協賛する。2017 年 10 月 22-27 日。

<http://interrad2017.random-walk.org>

(5) その他（検討中の事項）

- ・学会への寄付を受け付ける。他学会での運用を参考に検討する。寄付者には承諾が得られれば会誌に寄付者名を紹介する。
- ・シニア会員（長年にわたり学会を支援していただいた方に謝意を表し、御退職後も形の科学研究に関心を寄せていただけるよう、年会費 2000 円程度のシニア会員制度を設けることを検討。学会の加入実績が 5 年程度あり、所属先を退職された方。自己申告制）の設定を提案する。
- ・企業展示（非会員の企業などが対象。形の研究と直接関係しない内容でもよい。シンポジウム開催の支援のため賛助金 10000 円をお支払いいただく。懇親会費は別）の受付を検討する。
- ・学会 HP へのバナー広告の掲載受付（12000 円/年）を検討する。

(以上)

形の科学会 平成 27 年度決算 平成 28 年度予算

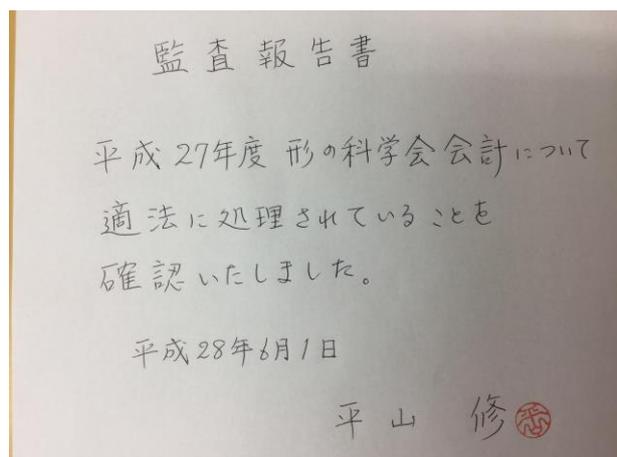
(平成 28 年 6 月 4 日総会)

収入の部		
	平成 27 年度決算	平成 28 年度予算案
前年度より繰越	569,357	709,808
賛助金	0	0
会費	2,037,000	2,000,000
出版助成金	0	0
雑収入(合本等販売) (銀行振込)	280,493	60,000
受取利息	23	20
シンポジウム参加費	728,000	700,000
シンポジウム展示等	0	0
懇親会費	262,000	260,000
合計	3,876,873	3,729,828

支出の部		
	平成 27 年度決算	平成 28 年度予算案
出版・校正費(和文誌)	853,366	530,000
人件費	61,950	220,000
通信費	45,451	85,000
交通費・宿泊費	256,986	260,000
振込手数料	21,092	30,000
諸雑費(事務用品等)	188,531	180,000
会場費	211,462	200,000
講演準備費	160,000	160,000
会合費(懇親会)	248,227	250,000
英文誌出版費	1,080,000	1,080,000
内訳:	学会分担金 (1,080,000)	学会分担金 (1,080,000)
	出版助成金 (0)	出版助成金 (0)
学会賞賞金	40,000	20,000
合計	3,167,065	3,015,000

	平成 27 年度決算	平成 28 年度予算案
収支差引残高	709,808	714,828

○2016 年度会計監査



○2016 年度形の科学会賞選定報告

形の科学会賞選定委員長

宮本 潔

形の科学会賞規則に従い平成28（2016）年度の学会賞選定委員会（学会長、幹事1名、名誉会員1名、委員2名）が、種村正美（学会長）、三浦公亮（名誉会員）、平田隆幸（委員）、海野啓明（委員）、宮本 潔（幹事）をメンバーとして平成28年4月11日に発足した。今年度、学会賞の応募は、功労賞1件と奨励賞1件であった。当応募を受けて、学会賞選定委員会は4月26日から4月28日にかけて審議した。その結果、当委員会は功労賞対象者が学会賞規則に沿うものと評価したが、奨励賞対象者は同規則に沿わず見送った。本年度、選定委員会は形の科学会学会賞候補者に下記の者を推薦することとした。

記

功労賞 松岡篤 氏（新潟大学理学部地質学科 教授）

推薦理由

氏は本学会に入会以来、学会の活動に積極的に関与した。形の科学シンポジウムの代表世話人を務め（第39回1997年6月新潟、第58回2004年11月沖縄、第75回2013年6月糸魚川）、形の科学を海洋生物学・地学分野等へ広げることに大きな功績があった。また氏は本学会の会長（2008年～2012年）や幹事（2012年～）の要職を務めて学会の運営にあたった。その傍ら、学術研究団体「日本地球惑星科学連合」の一員として本学会の参加を図り、その年次大会において毎年、本学会のアウトリーチ活動を行っている。また氏は小中学生を含む若い人々を形の科学に導く研究教育活動を新潟大学に設置された「形の科学研究センター」を拠点に行っており、そのシンポジウムを本学会との協賛として開催するとともに、本学会において「ジュニア会員」制度を設けることに関与して、本学会活動の活性化に積極的に貢献している。

以上のことから、同氏は本学会の活動・発展に多大な貢献があると認められ、十分功労賞に値すると判断でき、功労賞候補者として推薦する。

形の科学会誌の原稿募集

本誌は、“かたち”に関連した研究を促進するため、high quality な論文の発表、及び、できるかぎり自由に意見を発表できかつ討論できる場を提供することを目的として、原稿を募集しています。

原著論文(original paper)、解説論文(review paper)、速報(rapid communications)、討論(commentary)、講座(単発および連載)、エッセイ、交流、ニュースなどを掲載し、形の科学会の会員は本誌に投稿することができます。本誌に投稿された論文(original paper, review paper)は、査読過程を経てから掲載することを原則とします。また、速報、討論、講座、エッセイ、交流、ニュースなどに関しては、より自由な発表場所を提供することを旨とし査読過程を経ずに掲載しますが、編集委員会で掲載が不相当であると判断された場合は、改訂を求めること、あるいは掲載をお断りすることがあります。

本誌の論文を論文中で引用される時は、日本語論文の場合は、形の科学会誌、11、(1997)、1-2. 欧文論文の場合は、Bulletin of Society for Science on Form, 11, (1997), 1-2. というように引用してください。

『形の科学会誌』論文投稿の案内

1 Editorial Board

編集委員長 (Chief Editor)	平田隆幸	
副編集委員長 (Sub-chief Editor)	吉野 隆	(最適化学・地球科学)
編集委員 (Editor)	高木隆司	(物理・美術)
	種村正美	(数学・幾何学)
	本多久夫	(生物)
	鳥脇純一郎	(工学)
	宮本 潔	(医学)
	石原昭三	(結晶学)

2 原稿投稿先

形の科学会誌への投稿論文(original paper, review paper, 講義ノートなど)の宛て先は、原則的に Web からの投稿とする。Web からの投稿が不可能な場合には下記の副編集委員長宛てに送るものとする。

吉野隆 350-8585 川越市鯨井 2100, 東洋大学 理工学部 機械工学科
Phone: 049-239-1396, Fax: 049-233-9779, Email: tyoshino@toyo.jp

3 投稿論文の処理過程

- 1) 編集事務局は、投稿論文を受け取った時点で、論文の種類・受付日を付加してオリジナル原稿1部を副編集委員長に送る。
- 2) 編集委員会は、**original paper, review paper** に関しては、査読者1名を決めて依頼し、修正等の過程を経て受理決定をおこなう。受理原稿は、受理日をつけて副編集委員長に送る。
- 3) 査読を必要としないもの（エッセイ、交流等）に関しては、別に査読者を決めず、編集委員もしくは編集事務局の判断で著者に修正を依頼したり、受理の決定をする。受理原稿は、副編集委員長に送る。
- 4) 副編集委員長は、各号の内容の編集をおこなう。
- 5) 当面、受理原稿の掲載号は次のように決める。原稿が、次回の形の科学シンポジウム開催日の1ヶ月前までに副編集委員長に届けば、会誌の次号に掲載する。なお、著者の特別な申し出がないかぎり、原稿の著作権は形の科学会に帰属するものとする。

原稿作成要領

写真製版可能な原稿のみを受け付けます。論文のテンプレートは <http://katachi-jp.com/gakkaishi> からダウンロードできます。テンプレートは予告なく改訂される可能性があります。投稿された原稿はそのまま印刷されますので、以下の点に注意してください。

- 1) 上下左右それぞれ約 **2.5 cm** のマージンを残す。
- 2) 1頁40ー45行程度、1行40字程度。原著論文、解説論文等は刷り上がり10頁、速報は刷り上がり4頁以内を原則とします（現在、第4種郵便物として出版していくために、この条件は少し緩くなっています）。
- 3) 図や表は、本文中に張り込み、図の下に必ずキャプションを付けてください。
- 4) 最初の頁には、タイトル、氏名・所属（できれば電子メールアドレスも）・英文 **Keywords** (5個以内)をお書きください。英文のタイトルおよび所属を併記してください。独立した英文の **abstract** をつけることを歓迎します。
- 5) タイトル、氏名・所属と本文の間（英文 **abstract** がある場合は英文 **abstract** の前）には、受付日と受理日を印刷するため、上下 **2.0 cm** のスペースを開けてください。
- 6) 引用文献は、本文の最後に「文献」という見出しとともに出現順に記してください。
- 7) ページ番号は印刷せず、原稿の右上に鉛筆で1から通し番号をつけてください。
- 8) 以上の作成要領と大きく異なる場合は、改訂をお願いすることがあります。

形の科学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会により許諾を受けてください。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会
〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
FAX : 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、形の科学会へお問い合わせください。

学会誌に関する情報は <http://katachi-jp.com/gakkaishi> で発信しています。

形の科学会誌 Vol. 31 No. 2 (2016, 11月)

発行： 形の科学会
会長： 宮本 潔
〒321-0205 栃木県下都賀郡壬生町若草町 4-12
E-mail : tomoyami@cc9.ne.jp
編集委員長：平田 隆幸
〒910-8507 福井市文京 3-9-1
福井大学大学院工学研究科 知能システム工学専攻
phone : 0776-27-8778 fax : 0776-27-8420
E-mail : hirata@u-fukui.ac.jp
副編集委員長&編集事務局：吉野 隆
〒350-8585 川越市鯨井 2100
東洋大学理工学部 機械工学科
phone : 049-239-1396 fax : 049-233-9779
E-mail : tyoshino@toyo.jp