

研 究 紀 要

第 54 号

平成 30 年度

奈良工業高等専門学校

目 次

論文

ポリマー押出金型の設計に関する数値計算	福岡 寛 萩岡 宣旭 峯岸 豊 児玉 謙司	1
フェムト秒レーザーを応用した鉄砲エビが生成するキャビテーションバブルの生成消滅過程の解明	福岡 寛 山本 将也	6
樹脂製緩衝材の開発	寺田 耕輔 中野 実頼 三谷 練	10
ポリマー水溶液-白金球系強制対流下の膜沸騰極小熱流束と限界熱流束	島岡 三義 中村 篤人	21
Volume and commensurability of hyperbolic 3-orbifolds	吉田 はん	27
「東アフリカ沿岸地域経済圏」とグジャラート商人	藍澤 光晴	29
寛正～文明期の連歌における「七賢風」と「宗祇風」	勢田 勝郭	39

抄録

Study on Ductile-Brittle Transition of Single Crystal Silicon by a Scratching Test Using a Single Diamond Tool	Tadahiro WADA	47
Tool Wear of Poly Crystalline Diamond in Cutting Ti-6Al-4V Alloy with High- Pressure Coolant Supplied	Tadahiro WADA	48
Study on Deformation Evaluation of Bracket in Design of Adjustment Hinge	Tadahiro WADA	49
INFLUENCE OF NEGATIVE SUBSTRATE BIAS VOLTAGE ON PROPERTIES AND CUTTING PERFORMANCE OF $TiAlSiN$ COATING FILMS DEPOSITED USING MAGNETRON SPUTTERING ION PLATING	Tadahiro WADA	50
Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel	Tadahiro WADA	51

ポリマー押出金型の設計に関する数値計算

福岡寛, 萩岡宣旭*, 峯岸豊**, 児玉謙司**

Computational Fluid Dynamics to Design of Polymer Extrusion Dies

Hiroshi FUKUOKA, Nobuaki HAGIOKA, Yutaka MINEGISHI, Kenji KODAMA

Extrusion is one of the most widely used processes for polymer processing, e.g., producing film, pipe, sheet, cable and pellet. The shape of extrusion die has an important part for the manufacturing products. The purpose of this study has been to optimize the dimensions of the die for pelletizing. We calculated the die flow simulations in the various parameters. The calculation results are expected to improve the efficiency of pelletization. A commercial computer fluid dynamics program Ansys Fluent was used to calculate the die passage. The parameters for the calculations were taper angle, outlet diameter, properties of polymer and two models. The governing equations were the incompressible momentum equations and the continuity equations. As results, the increase in flow rate was confirmed by increasing taper angle and outlet diameter in the specific dimensional range. The average outlet velocity of single and multi-nozzle models almost corresponded in each same parameter.

1. 緒言

押出加工はポリマー成形において広く使われている方法の一つである。押出加工により作られる製品はフィルム、パイプ、シート、ケーブル、ペレットなど多岐にわたる。どのタイプの押出加工においても、ポリマーが金型を通りぬけることにより望まれた形を作り出している。そのため、金型の形状は製品の製造において重要な役割を持つ。その役割とは主に製品の断面形状を決定し、流れを均一に近づけ形状のムラを低減することである。押出金型の設計には、ポリマーの物性、流体の流れ、熱現象、押出加工についての様々な知識、経験が必要となる^[1]。例えば、バラス効果による加工後の変形量の考慮や、粘性散逸による温度上昇に伴う焦げ付きの対策などが存在する。しかし、それら諸効果の影響を予測することは難しい。そのため、複雑な押出加工金型の設計は未だに科学ではなく、熟練者の経験に依存するところが大きい。

本研究では押出加工におけるプラスチックペレットの製造過程に注目した。プラスチックペレットの製造過程はポリマーの押出と切断技術を組み合わせて行われている。ポリマーが押出加工により紐状、いわゆるストランドに加工され、ストランドが俵状に冷却、切断されたものがプラスチックペレットとなる。このペレット製造における課題の一つに加工時間の短縮が挙げられる。押出加工の際、ポ

リマーは反応しながら金型を通り抜ける。そのため、加工時間によって反応の度合いが異なり、ペレットの物性がわずかに異なっていく。加工時間を短縮することにより、ペレットの物性の安定化と生産効率の向上が期待できる。加工時間の短縮する一つの方法として、ペレットを流す際の圧力の増加がある。しかし、圧力の調整は装置の制約上実現が難しい。

そこで、私たちは金型の最適化を提案する。ポリマーが通り抜けやすい金型を設計することにより、加工時間の短縮と安定した物性のペレットを得ることができる。ペレット製造用の金型にはいくつか型が存在するが、どれも先細ノズル形状が基本となっている。本紙では先細ノズルが二列千鳥型に並んだ金型に注目した。

金型設計における試行錯誤の方法の一つとして数値計算が注目されている。今まで金型の改良や新製品の開発は実験や工場内試験を基礎として発達してきた。数値計算は高価な試験、実験の代用として期待されている。数値計算は目視できない内部の詳細を明らかにするポテンシャルがあり、速度、せん断速度、温度場等を定量的に比較することができる^[1,2]。さらに実験に比べ、時間やコストの改善も期待できる。

押出加工の金型に対する数値計算のアプローチは様々な研究が行われている。しかし、そのほとんどが基礎的事例や、特殊な形状に注目したものがほとんどである^[1-9]。

* システム創成工学専攻 機械制御システムコース 2 年

** アスカ工業株式会社

そのため、ペレット製造における金型の改良について報告されたものはほとんどない。ペレット製造の金型について代表的な形状パラメータは知られていない。

本研究の目的はノズル形状がポリマーの流れに与える影響を調べることである。計算のパラメータはノズルの出口径 D_{out} 、テーパ角度 θ 、ポリマーの物性である。モデルとして、出口が一つの単純な二次元モデルと実際の金型を模した三次元モデルを準備した。各モデルの理由は二次元ノズルにおいてノズル形状及びポリマー物性の効果、三次元モデルにおいてはノズル形状の配列が与える影響の確認である。比較の対象として、各条件の出口の速度に注目した。

主な記号

D_{out}	: 出口径 [mm]
k	: 粘性係数
n	: ベキ乗則指数
p	: 圧力 [Pa]
v	: 速度 [m/s]
γ	: せん断速度 [1/s]
η	: 粘度 [Pa·s]
θ	: テーパ角度 [°]
τ_{ij}	: せん断応力 [Pa]
ρ	: 密度 [kg/m ³]
t	: 時間 [s]

2. 計算方法

本研究では計算ツールとして、Ansys Fluent 17.2 を使用した。本計算に用いたモデルを図 1 および図 2 に示す。図 1 のシングルノズルモデルは Ansys に組み込まれている DesignModeler を用いて作成した。図 2 のマルチノズルモデルは三次元 CAD ソフト、SolidWorks で作成した。この数値計算はシングルノズルモデルと同様の条件で行われた。シングルノズルモデルの寸法は図 2 から決められた。流体は流入口 Inlet からテーパ部を通り流出口 Outlet へ流

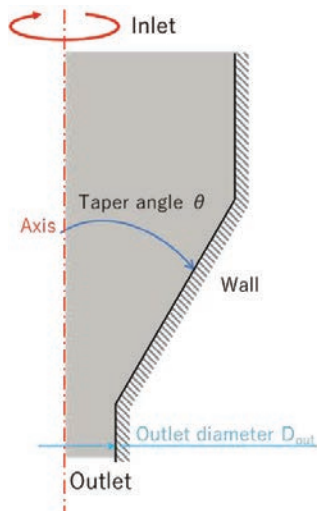


Fig.1 Single nozzle model

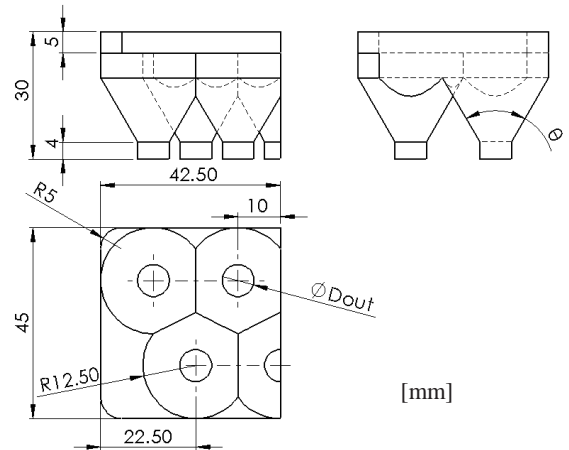


Fig.2 Drawing of multi-nozzle model

れることを想定した。これらのモデルにおいていくつかのパラメータを変え計算を行った。

支配方程式は式 (1) および (2) に示す非圧縮性のナビエーストークスの式および連続の式である。式中では重力の影響を無視した。

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

また離散化の手法として有限体積法および SIMPLE 法を用いた。境界条件として、流入口 Inlet には pressure-inlet, 絶対圧 216325Pa, Outlet には pressure-outlet, 絶対圧 101325 Pa が設定されている。壁条件 Wall には滑りなしの条件が与えられている。本計算は非定常, time step size 0.01 s, time step 数は 300 で行った。結果と考察では最後の time step における速度に注目した。

計算は出口径, テーパ角度, ポリマーの種類および計算モデルを変えて行った。出口径 D_{out} は 7.5, 9.5, 11.5 mm で行った。テーパ角度 θ は 60°, 90° で行った。ポリマーは二種類の物性を準備し, 粘性は式 (3) に示す。

$$\eta = k \gamma^{n-1} \quad (3)$$

ポリマーの物性を図 3 に示す。計算の発散を防ぐため、粘性には上下限値が設けられた。ポリマー A は上限値 800 Pa·s, 下限値 70Pa·s に設定した。ポリマー B には上限値 1400Pa·s, 下限値 100Pa·s と設定した。

メッシュの密度は計算の正確さに多大な影響を与える。そのため、メッシュの要素サイズによる影響を確認する必要がある。同じモデルにおいて要素サイズを変え計算し、比較を行った。モデルはシングルノズルモデル, $\theta = 60^\circ$, $D_{out} = 7.5$ mm, ポリマー A で行った。要素サイズは D_{out} に対し、5分の1, 10分の1, 15分の1, 20分の1, 100分の1の大きさで計算した。それらの結果から、どの要素サイズにおいても解析結果の差はほとんどなかった。本紙において、メッシュの要素サイズは $D_{out}/10$ で計算された。

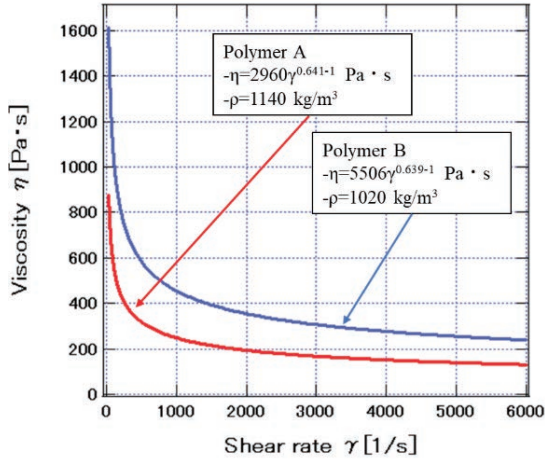


Fig.3 Properties of polymer

3. 結果と考察

3.1 シングルノズルモデル

図4にテーパ角 $\theta = 60^\circ$ ，出口径 $D_{out} = 9.5$ mm，ポリマー A，シングルノズルモデルの速度分布を示す。モデル上部は下部より流れが遅く，壁付近よりも中心よりの場所が速くなっている。最大速度は出口の中心に存在する。また，テーパ部の中ほどから速度が速くなっている。

ポリマーはテーパ部にて加速し，出口の中心で最大速度を得た。そのため，テーパ領域は速度に影響を与えられと考えられる。テーパ角度が流れ場に与える影響を調べるため，図5に出口平均速度とテーパ角度の関係を示す。図5は $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ ， $D_{out} = 9.5$ mm，ポリマー A，シングルノズルモデルの平均出口速度を比較している。他のパラメータの条件と比較するために，出口の平均速度を算出している。90°における出口平均速度は60°と比べ，1.09倍大きい結果となった。

ノズルの出口直径はポリマー流れに影響を与える要素の一つであることは明らかである。その効果を確認するため，出口径を変えた場合の出口平均速度を図6に示す。また，赤いプロットが $\theta = 90^\circ$ ，青いプロットが $\theta = 60^\circ$ を示

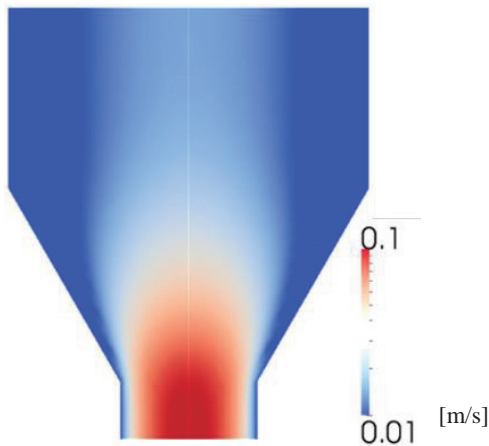


Fig.4 Velocity contour for $\theta = 60^\circ$ ， $D_{out} = 9.5$ mm，polymer A and single nozzle model

す。平均出口速度は出口径が大きくなるにつれ，増加している。どの穴径においても $\theta = 90^\circ$ の平均速度が $\theta = 60^\circ$ の平均速度を上回っている。

生産現場において，1つの金型を用いて物性が異なる複数種類のポリマーが使われる。そのため，ポリマーの物性による影響を確認することは重要である。図7に二種類のポリマーにおける出口平均速度の比較を示す。赤いプロットがポリマー A，青いプロットがポリマー Bを示す。ま

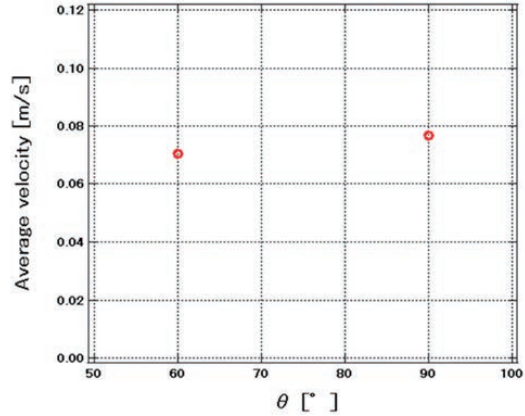


Fig.5 Average outlet velocity for $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ ， $D_{out} = 9.5$ mm，polymer A and single nozzle model

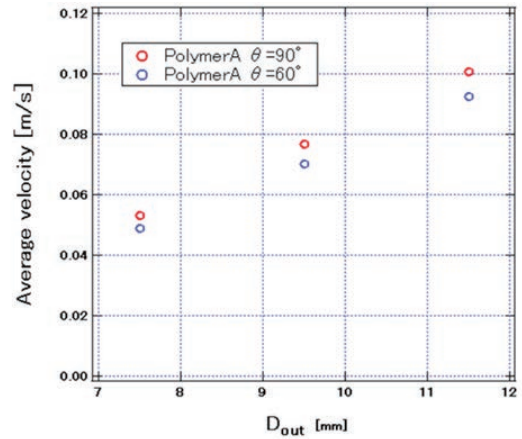


Fig.6 Average outlet velocity for $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ ， $D_{out} = 7.5-11.5$ mm，polymer A, and single nozzle model

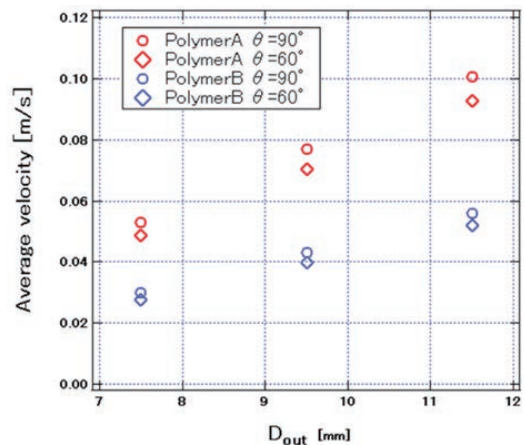


Fig.7 Average outlet velocity for $\theta = 60^\circ, 90^\circ$ ， $D_{out} = 7.5-11.5$ mm，polymer A, B and single nozzle model

た、丸プロットが $\theta = 90^\circ$ 、ひし形プロットが $\theta = 60^\circ$ を示す。ポリマー A の平均速度はどの条件においてもポリマー B の平均速度より大きいという結果となった。出口径を大きくした場合の平均速度上昇の勾配はポリマー A がポリマー B よりわずかに大きいことがわかる。そのため、ポリマー A は出口径の大きさの影響を受けやすいといえる。ポリマー A はポリマー B より粘度が低いため、粘度が低いと出口径の影響が大きくなると考えられる。また、本計算においてはテーパ角の影響は他のパラメータと比べ影響が小さいと言える。

3.2 マルチノズルモデル

ペレット製造用金型には一般的に、テーパノズルが複数並ぶことにより流れの通り道が構成される。それらテーパノズルの間隔、数および配列により、テーパノズルが重なりあい独特な形状になる。この形状はノズルとノズルの継ぎ目において最も形状が変化しており、このような形状の効果は明らかにされていない。そのため、このような形状の影響を確認することは重要だと考えられる。そこで、図 8 にマルチノズルモデルにおける速度分布の断面を示す。このマルチノズルモデルはテーパ角 $\theta = 60^\circ$ 、出口径 $D_{out} = 9.5 \text{ mm}$ 、ポリマー A で計算された。マルチノズルモデルにおける出口毎の最大速度はその出口の中心に確認され

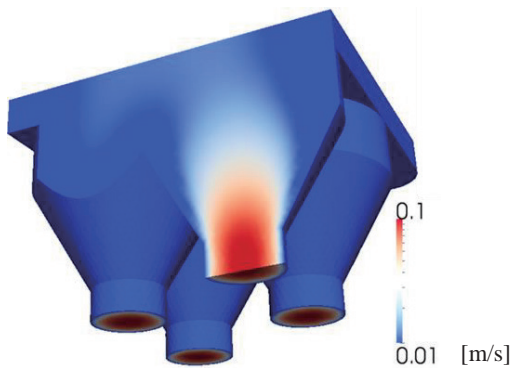


Fig.8 Velocity contour for $\theta = 60^\circ$, $D_{out} = 9.5 \text{ mm}$, polymer A and multi-nozzle model

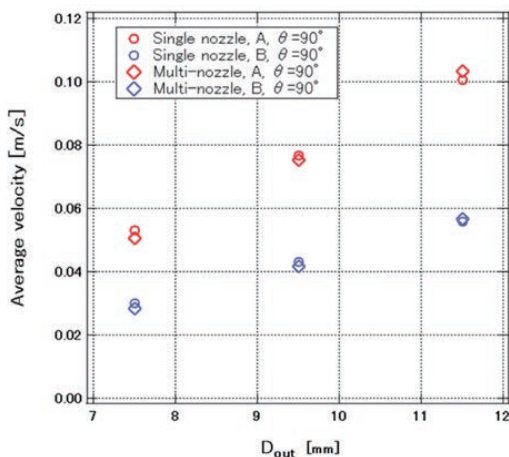


Fig.9 Average outlet velocity for $\theta = 90^\circ$, $D_{out} = 7.5\text{-}11.5 \text{ mm}$, polymer A, single and multi-nozzle model

た。この速度分布は図 4 に示した速度場とほぼ同じ傾向が見られる。しかし、ノズル継ぎ目の上において異なった速度分布が見られた。次にその速度分布が出口平均速度にどのように影響を与えるかを定量的に調べる。

図 9 にシングルノズルモデルおよびマルチノズルモデルの平均出口速度の比較を示す。赤いプロットがポリマー A、青いプロットがポリマー B を示す。また、丸プロットがシングルノズルモデル、ひし形プロットがマルチノズルモデルを示す。平均出口速度はシングルおよびマルチノズルモデルともにほぼ一致した。このことから、この寸法範囲ではノズル継ぎ目の形状変化の影響はほとんどないと言える。計算時間の観点では、シングルノズルモデルが有利である。そのため、このような事例ではシングルノズルが有用であるといえる。一方、より大きな出口径、テーパ角度を設定した場合、ノズル継ぎ目の形状変化が大きくなると予想される。そのため、マルチノズルモデル独自の傾向が大きくなると考えられる。また、テーパノズルの数、配列および間隔についてもノズル継ぎ目の形状に影響を与えるため、さらなる三次元モデルによる計算が必要である。

4. 結論

本研究の目的はノズル形状がポリマーの流れに与える影響を調べることである。そのために、様々なパラメータを変え、金型内流れの計算を行った。そのパラメータは出口径 D_{out} 、テーパ角度、ポリマーの物性、シングルおよびマルチノズルモデルである。計算の結果、最も出口速度が速い条件は $D_{out} = 11.5 \text{ mm}$ 、 $\theta = 90^\circ$ およびポリマー A だった。一方、最も出口速度が遅い条件は $D_{out} = 7.5 \text{ mm}$ 、 $\theta = 60^\circ$ およびポリマー B となった。また、条件ごとの出口平均速度はシングル、マルチノズルモデルでほとんど一致した。さらに計算時間の観点から、本紙の寸法範囲においてはシングルノズルモデルが有用であるといえる。しかし、三次元化に伴う様々なパラメータの考察のためマルチノズルモデルによる計算は必要である。

参考文献

- [1] Kostic, Milivoje M., and Louis G. Reifschneider. Design of extrusion dies, Encyclopedia of Chemical Processing, 10, pp633-649, 2006.
- [2] Sienz, J., A. Goublomme, and M. Luege., Sensitivity analysis for the design of profile extrusion dies, Computers & structures 88.9-10, pp610-624, 2010.
- [3] Reifschneider, Louis G., M. Kostic, and Srinivasa Rao Vaddiraju, Computational Design of U-Profile Die and Calibrator, ANTEC-CONFERENCE PROCEEDINGS-, Vol. 1., 2004.
- [4] Pandey, Vinay Prakash, and Gurmeet Singh Gahir, Analysis of the Effect of Die Angle Variation on the Behavior of Temperature Profile in Extrusion Process by using ANSYS Poly Flow Software, International Journal of Engineering

- and Management Research (IJEMR) 7.3, pp 494-500, 2017.
- [5] Pepliński, Karol, and Arkadiusz Mozer, Design of extrusion die for plastic profile using ansys polyflow software, Journal of Polish CIMAC, 6.3, pp221-226, 2011.
- [6] Kouzilos, G. N., Seretis, G. V., Provatidis, C. G., and Manolakos, D. E, Design of Polymer Extrusion Dies Using Finite Element Analysis, Extrusion of Metals, Polymers and Food Products. InTech, 2018.
- [7] Lin, Z., Juchen, X., Xinyun, W., and Guoan, H, Optimization of die profile for improving die life in the hot extrusion process, Journal of Materials Processing Technology 142.3, pp659-664, 2003.
- [8] Hatzikiriakos, S vvas G., and Evan Mitsoulis., Slip effects in tapered dies, Polymer Engineering & Science 49.10, pp1960-1969, 2009.
- [9] Ahmed A M A, Computer Aided Design for Polymer Extrusion and its Dies, Doctoral dissertation of Sudan University of Science and Technology, 2014.

フェムト秒レーザーを応用した鉄砲エビが生成する キャビテーションバブルの生成消滅過程の解明

福岡 寛, 山本 将也^{*1}

Investigation of Generation and Collapse Processes of Cavitation Bubble Induced by Snapping Shrimp in Comparison with Comparable Processes by Femtosecond Laser Irradiation

Hiroshi FUKUOKA, Masaya YAMAMOTO

This paper studies a simulation method for reproducing cavitation. In addition, we examined the influence that provided to cavitation by initial radius of cavitation bubble and initial pressure. The fundamental equations are the compressible Navier-Stokes equations. The interaction of the liquid and gas is handled with the Volume of Fluid method. Initial conditions were set up maximum radius and pressure based. The result was on the order of agreement with the recent results drawn from studies of Rayleigh-Plesset equation. Increasing initial radius increased radius of bubble at expanded time. And increasing initial pressure, radius of bubble shows very little changed.

1. 緒言

気泡の急激な成長・崩壊に伴う液体破壊の現象はキャビテーションとよばれる⁽¹⁾。キャビテーションはある液体が蒸気圧より圧力低下し、蒸発することで気泡となり発生する。キャビテーションは様々な分野で利用されている。例えば工業ではウォータージェットを噴射する過程で発生するキャビテーションを使い金属を加工する金属加工に利用されている⁽²⁾。医療ではタンパク質の入っている溶液にフェムト秒レーザーを集光し発生するキャビテーションにより形成されるタンパク質の結晶化⁽³⁾や水中に設置した爆薬を起爆することで発生するキャビテーションおよび衝撃波を利用した胆石破壊⁽⁴⁾に利用されている。

しかし代表的なキャビテーション生成手法であるレーザーおよび爆薬を用いた方法には課題がある。レーザーは取り扱い方を誤るとレーザー光が目当たり、失明する可能性のある点である。爆薬は取り扱いを誤ると起爆し爆発することで人に被害を与える可能性のある点である。

そこで新たなキャビテーション生成方法として本研究では鉄砲エビのハサミに着目した。鉄砲エビはハサミを閉じた瞬間にキャビテーションを発生させる⁽⁵⁾。鉄砲エビのハサミの特徴的なところは、大きさおよび形である。片方のハサミは体長の約3分の1をしめており、さらにハサミの上部および下部にそれぞれ突起およびくぼみがある。そ

して鉄砲エビは突起をくぼみにはまり込ませることで水を噴出する。さらに水の速度上昇による圧力低下の結果、キャビテーションが発生する⁽⁶⁾。また鉄砲エビはレーザーおよび爆薬と比べて取扱の容易な生き物である。

しかし鉄砲エビのハサミから発生するキャビテーションバブルを詳細に調べることは困難である。なぜならキャビテーションバブルの再現性が低いからである。さらにハサミの形状は複雑で3次元的な動きをとらえることは難しいからである。

そこで本研究では、フェムト秒レーザーを用いて鉄砲エビによるキャビテーションの生成機構を明らかにすることを考えた。フェムト秒レーザーは、実験の再現性が極めて高く、さらにフェムト秒レーザーによるキャビテーションは、熱を発生することなく水を押しつけて生成されるため、鉄砲エビの代替として期待できるからである。そのためレーザーによるキャビテーションの基礎的な圧力場、密度場、温度場および速度場を明らかにすることは重要である。

本報告では、キャビテーションバブルの基本的な物性を明らかにするために数値計算を行った。本計算では支配方程式に二次元軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式、気泡および周りの水の相互作用に Volume of Fluid 法を用いた。そして本計算手法の妥当性を評価した後に、初期半径および初期圧力のパラメータが気泡の半径に与える影響

^{*} システム創成工学専攻 機械制御システムコース 2年

に注目し、考察を行った。

2. 計算方法

本研究では汎用流体解析ソフト ANSYS Fluent 17.2 および 19.1 を用いて数値解析を行った。支配方程式は二次元軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式である。混相流のモデルおよび粘性はそれぞれ Volume of Fluid 法および $k-\epsilon$ の乱流モデルを用いた。

図 1 は気泡および周囲の液体の計算領域および境界条件を示している。本計算では水中にフェムト秒レーザーを照射することでキャビテーションが発生し、最も膨張したキャビテーションバブルである気泡を低圧空気に置き換えることでモデル化した。青色および赤色の領域はそれぞれ水および気泡である。境界条件として図 1 の水の外側および x 方向の中心軸上はそれぞれ開放条件および軸対称条件である。

本研究における初期条件、物性値および格子は Koukouvinis ら⁽⁶⁾ を参考に設定した。水および気泡の粘度および初期圧力はそれぞれ $0.001\text{kg/m}\cdot\text{s}$ および 100000Pa および $1.7894 \times 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ および 6801Pa である。さらに気泡の初期半径は $r_{ini} = 10\mu\text{m}$ である。ただし、気泡周りの水領域の大きさは 100 倍とした。また水および気泡に共通する条件として、表面張力および密度指数はそれぞれ 0.07N/m および 0.88 である。そして計算格子は非構造格子を採用した。格子の形状は円周に沿う O-grid 型である。さらに格子数は気泡の直径に対して 90 格子とした。

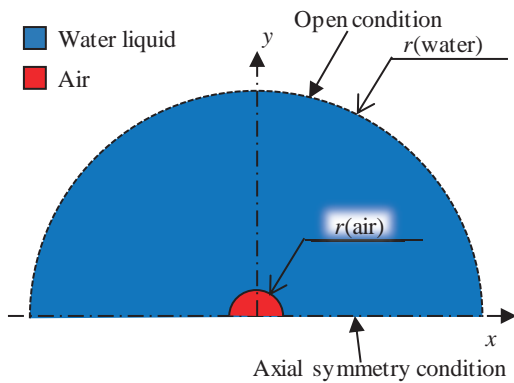


Fig.1 Flow field for computation

3. 結果および考察

3.1 数値計算の妥当性

図 2 に本計算および一般的に数値計算の確かさを評価するために用いられるレイリー・プレセット方程式⁽⁶⁾を算出した結果を示す。図 2 は時間経過するにつれて変化する気泡の挙動を示している。黒および赤のプロットはそれぞれ本計算結果およびレイリー・プレセット方程式から算出した計算結果である。図 2 より、本計算結果は $t = 1.0\mu\text{s}$ において $r = 2.2\mu\text{m}$ まで収縮し、 $t = 1.8\mu\text{s}$ において $r = 8.9\mu\text{m}$ まで膨張し、 $t = 2.9\mu\text{s}$ において $r = 2.7\mu\text{m}$ まで収縮している。一方、レイリー・プレセット方程式から算出

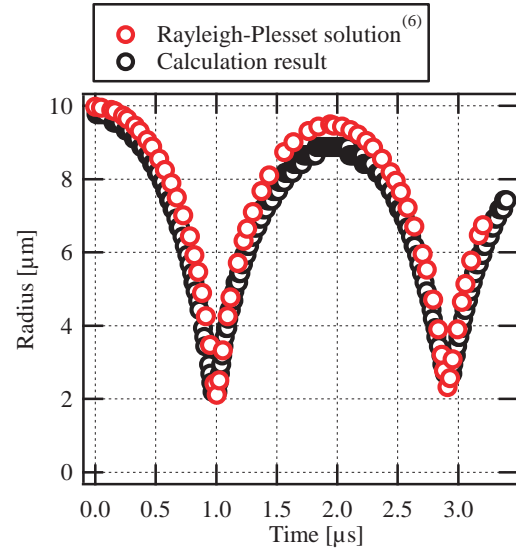


Fig.2 Bubble collapse evolution; comparison between Rayleigh-Plesset solution and calculation result

した結果は $t = 1.0\mu\text{s}$ において $r = 2.1\mu\text{m}$ まで収縮し、 $t = 1.9\mu\text{s}$ において $r = 9.5\mu\text{m}$ まで膨張し、 $t = 2.9\mu\text{s}$ において $r = 2.3\mu\text{m}$ まで収縮している。さらにレイリー・プレセット方程式から算出した結果を理論値としたときの、本計算結果の気泡の大きさの相対誤差は収縮から膨張に切りかわる瞬間および膨張から収縮に切りかわる瞬間において経過時間の短い順でそれぞれ 4.76%、6.32% および 17.4% である。このことから本計算はレイリー・プレセット方程式とおおよそ一致していることから本計算方法に大きな誤りがないと思われる。

3.2 代表的な流れ場

図 3(a)-(i) に気泡の初期圧力 6801Pa および初期半径 $10\mu\text{m}$ における気泡部分を拡大した領域の流れ場を示す。これは体積分率を示した図であり、青色および赤色はそれぞれ水および気泡である。本計算ではキャビテーションが発生してから最も膨張した気泡を低圧空気に置き換えることでモデル化しており、その瞬間を $t = 0\mu\text{s}$ とする。図 3(a) に示す $t = 0.01\mu\text{s}$ において水および気泡の存在が確認できる。ここで気泡の半径は $r = 9.8\mu\text{m}$ である。図 3(a)-(c) に示す $t = 0.01\mu\text{s} - 0.97\mu\text{s}$ において気泡が $r = 2.2\mu\text{m}$ まで半径方向に収縮している。そして図 3(c)-(e) に示す $t = 0.97\mu\text{s} - 1.83\mu\text{s}$ において気泡が $r = 8.9\mu\text{m}$ まで半径方向に膨張している。さらに図 3(e)-(g) に示す $t = 1.83\mu\text{s} - 2.89\mu\text{s}$ において気泡が $r = 2.7\mu\text{m}$ まで半径方向に収縮している。そして図 3(g)-(i) に示す $t = 2.89\mu\text{s} - 3.40\mu\text{s}$ において気泡が半径方向に膨張している。このことから、気泡が短時間で収縮膨張を繰り返しているため、気泡の挙動はキャビテーションだと考えられる。

上述より気泡はほぼ円形を保った状態で収縮膨張することがわかった。次に気泡の挙動をより詳細に調べるために図 4 に気泡の半径の時間変化を示す。気泡の初期圧力および初期半径はそれぞれ 6801Pa および $10\mu\text{m}$ である。気泡は計算開始と同時に初期半径 $10\mu\text{m}$ から収縮し $t =$

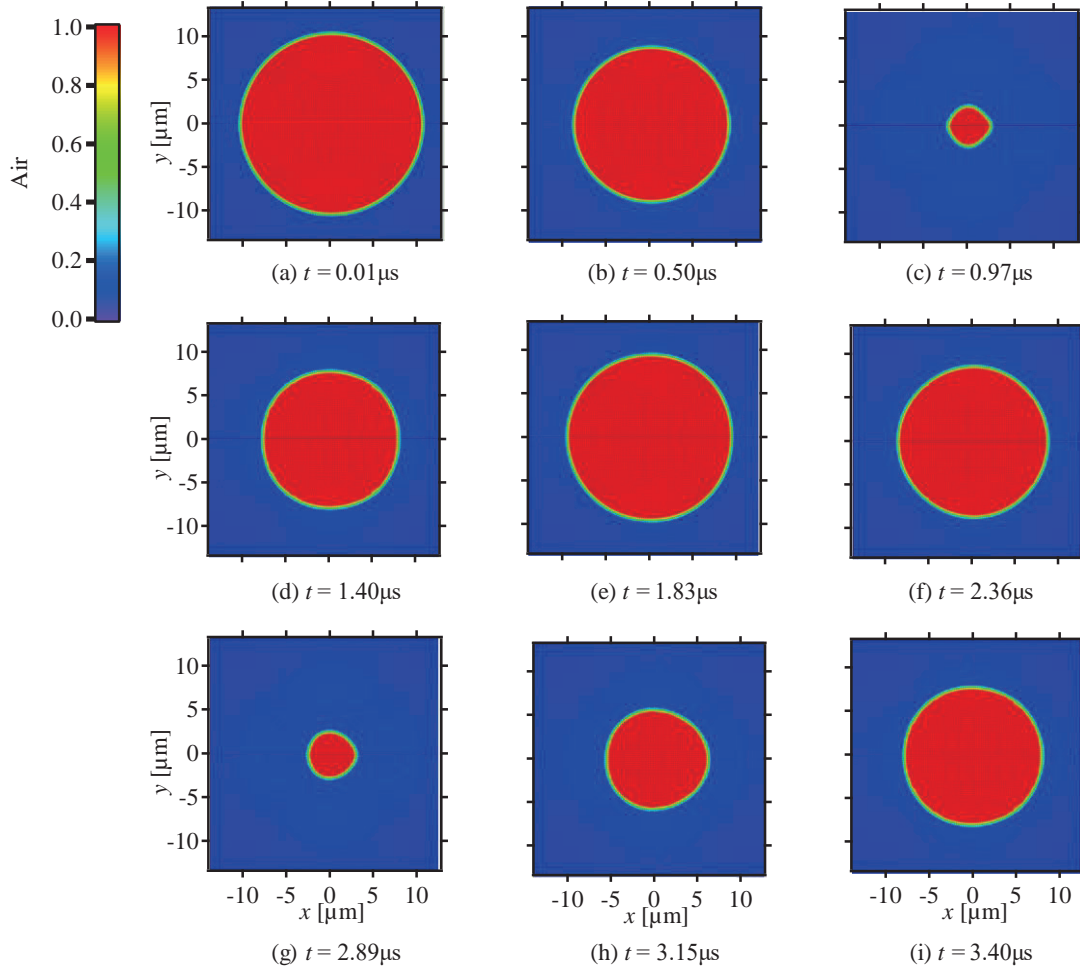


Fig.3 Air volume fraction for $P_{ini} = 6801\text{Pa}$ and $r_{ini} = 10\mu\text{m}$

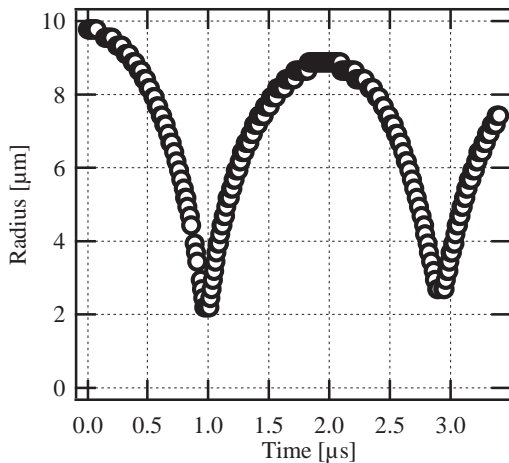


Fig.4 Relation between radius and time for $P_{ini} = 6801\text{Pa}$ and $r_{ini} = 10\mu\text{m}$

1.0 μs において最小半径 $r = 2.2\mu\text{m}$ となる。その後気泡は $t = 1.0\mu\text{s} - 1.8\mu\text{s}$ において膨張する。さらに時間が経過すると気泡は $t = 1.8\mu\text{s} - 2.9\mu\text{s}$ において再び収縮する。次に収縮から膨張に切りかわる瞬間の気泡の大きさの変化に注目すると、 $t = 1.8\mu\text{s}$ における気泡は初期半径の0.8倍である。このことは、一度収縮した後、膨張する過程において気泡内のエネルギーが外に流出したことで、元の大きさより小さくなったと考えられる。一方、膨張、収縮の切りかわ

りの場合、1回目より2回目の半径が大きく1.23倍となった。また、1回目の収縮、膨張および2回目の収縮の切りかわりまでの経過時間はそれぞれ1.0 μs 、0.8 μs および1.1 μs である。このことから、1回目の収縮、膨張の場合、収縮より膨張にかかる時間は短い。さらに、収縮にかかる時間は、1回目より2回目の方が長いことがわかる。

3.3 気泡の初期半径がキャビテーションに与える影響

前節より、気泡は計算開始と同時に収縮し、ある程度まで収縮後は、膨張し、ほぼ初期半径まで膨らむことがわかった。次に気泡の初期半径がキャビテーションに与える影響を調べるために図5に初期半径を変えた場合の気泡の半径の時間変化を示す。図中の緑、赤および黄色のプロットはそれぞれ20 μm 、35 μm および50 μm を示している。図5より3つの初期半径において、気泡は収縮、膨張を繰り返すことがわかった。一方、収縮、膨張後の気泡の大きさに注目すると、 $r_{ini} = 50\mu\text{m}$ において最も大きく $r = 47.5\mu\text{m}$ 、 $r_{ini} = 20\mu\text{m}$ において最も小さく $r = 4.8\mu\text{m}$ になった。このことは初期半径が大きいほど膨張後の気泡も大きくなると考えられる。また、1回目の収縮後の気泡の大きさも同様に、初期半径が大きいほど大きい。

3.4 気泡の初期圧力がキャビテーションに与える影響

次に気泡の初期圧力がキャビテーションに与える影響

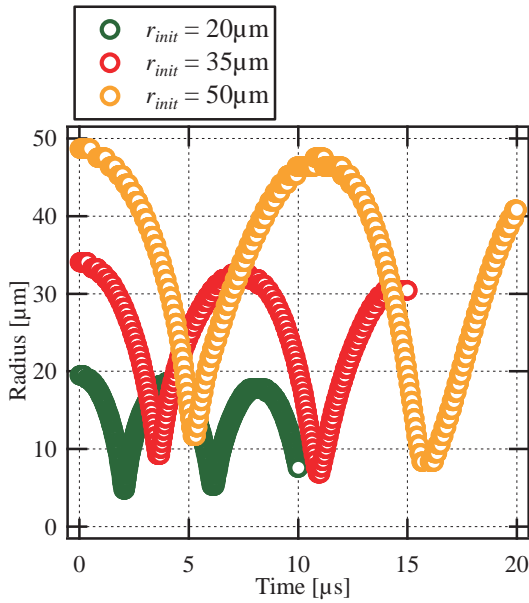


Fig.5 Relation between radius and time for $P_{init} = 6900\text{Pa}$

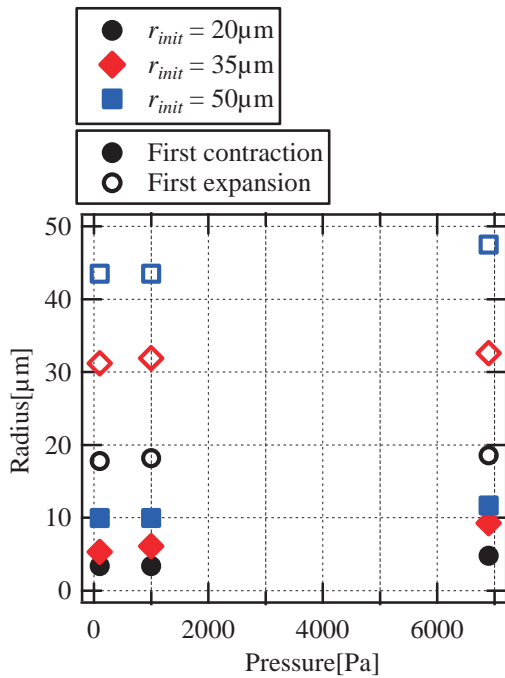


Fig.6 Relation between radius and pressure for $r_{init} = 20\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ and $50\mu\text{m}$

について調べた。図6に初期圧力を変えた場合の1回目に最も収縮および膨張した瞬間の気泡の大きさの変化を示している。図中の黒、赤および青色のプロットはそれぞれ $20\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ および $50\mu\text{m}$ を示している。また、色塗りおよび白抜きはそれぞれ1回目に最も収縮した瞬間および膨張から収縮に切りかわる瞬間の気泡の大きさを示している。図6より初期圧力を変化させることで収縮および膨張する気泡の大きさは大きく変化しないことがわかる。

4. 結言

本研究ではまずレイリー・プレセット方程式から算出し

た計算結果と比較することで本計算においてキャビテーションを再現できることを確認し、次にその計算方法をもとに気泡の初期半径および初期圧力を変化させ計算を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 気泡の初期半径および初期圧力をそれぞれ $10\mu\text{m}$ および 6801Pa に設定したときのレイリー・プレセット方程式および本計算で算出した気泡の挙動はおおよそ一致する。このことより本計算に大きな誤りがない。
- (2) 気泡の初期半径および初期圧力をそれぞれ $10\mu\text{m}$ および 6801Pa に設定したときの気泡の挙動は $t = 0.01\mu\text{s}$ から $t = 3.40\mu\text{s}$ の間に短時間で収縮膨張を繰り返している。このことより気泡の挙動はキャビテーションだと考えられる。
- (3) 気泡の初期半径を $20\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ まで変化させるにつれ、収縮および膨張した瞬間の気泡の大きさは大きくなる。
- (4) 初期圧力を 100Pa から 6900Pa に変化させることで気泡の大きさは大きく変化しない。

参考文献

- [1] 加藤洋治, 新版キャビテーション - 基礎と最近の進歩 -, 1999, p.1, 槇書店.
- [2] 日高到洋, 前原弘法, 三原敬之, 伊東繁, 水中衝撃波によるステンレス鋼板の爆発成形, 熊本県産学官技術交流会講演論文集, 22, pp.104-105, 2008.
- [3] 安達宏昭, 細川陽一郎, 増原宏, 吉村政志, 森勇介, 佐々木孝友, 短パルスレーザーを用いた蛋白質の結晶化, 一般社団法人レーザー学会, 34, pp.135-138, 2006.
- [4] 北山修, 伊勢秀雄, 新谷史明, 阿部裕, 高橋良延, 鈴木範美, 松野正紀, 高山和樹, 水中衝撃波フォーカシングによる胆石破砕法に関する基礎的実験 (第2報) - とくに臓器障害の検討 -, 日本胆道学会, 33, pp.234-241, 1989.
- [5] Michel Versluis, Barbara Schmitz, Anna von der Heydt, Detlef Lohse, "How Snapping Shrimp Snap: Through Cavitating Bubbles", Science, 289, pp. 2114-2117, 2000.
- [6] P. Koukouvini, M. Gavaises, O. Supponen, M. Farhat, Numerical simulation of a collapsing bubble subject to gravity, Physics of Fluids, 28, p.032110, 2016.

樹脂製緩衝材の開発

寺田 耕輔, 中野 実頼*, 三谷 練*

Development of Plastic Buffer Material

TERADA Kousuke, NAKANO Mirai, MITANI Ren

In recent years, there is a great need for lightweight, high stiffness structural technology that can realize fuel efficiency improvement as CO₂ reduction measures to prevent global warming. For example, honeycomb panel as lightweight and high stiffness panel is widely applied into various structure. However, honeycomb panel, which needs glue process, is very weak for shear stress and hot temperature. Also rapidly developing home delivery industries need reusable / absorption buffer materials. Therefore, innovative high stiffness structure technologies have been required. In response to these needs, Assembly Truss Core Panel (ATCP) by using origami forming, suggesting the possibility to make much wider range of structure than before has been developed, which was reported as lightweight, high stiffness structural technology in 2014. This paper presents not only PP (Polypropylene) shock absorbing buffers as reusable ATCP with no glue, but also studies based on experimental tests by using prototype ATCP and FEM analysis.

1. 緒 言

昨今においては、EC 市場が劇的に急増している。国土交通省の報告¹⁾によると 2014 年で EC 市場は全体で 12.8 兆円規模であり、宅配便件数も 5 年間で約 4.7 億個 (+11%) 増加している。そのなかで輸送時に必要となる梱包や緩衝材を現行のように使い捨てではなく、資源の有効活用とごみ量削減のための環境問題の視点から再利用可能かつ耐久性に優れた緩衝材の開発が重要になってくると考えられる。また、地球温暖化防止対策のための環境問題として、

CO₂ 削減に向けた省エネルギー化の実現や構造物の安全性向上のために、軽量高剛性構造に関する開発のニーズも非常に大きい。これらのニーズに応えるため、2014 年に組立式トラスコアパネル (ATCP: Assembly Truss Core Panel) が提案され、ATCP の試作と曲げ剛性評価結果について報告されている^{2,3)}。

ATCP の特徴は、図 1 に示すように正四面体コアと正八面体コア (あるいは正八面体ハーフコア) を組立てることによって空間充填して高剛性化を図った構造体である。使用する素材の材質や板厚などは適用される用途に合わせて

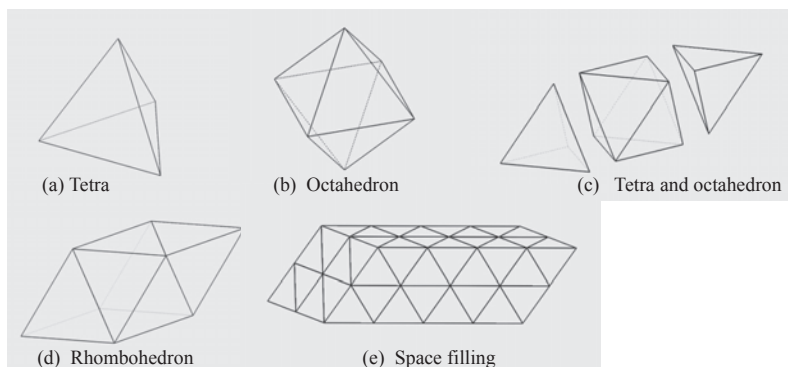


Fig.1 Space filling with cores

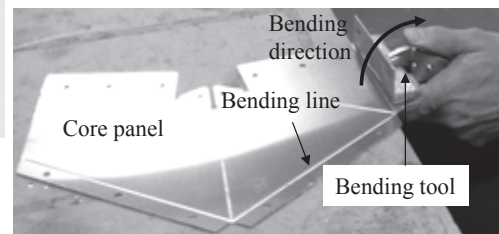


Fig.2 Bending process in origami forming

^{*)} 奈良工業高等専門学校 機械工学科

て選定し、図2に示すように素材を折り曲げて加工しコアを組立てる。

ここでは、構造強度および耐久性に優れた緩衝材として、樹脂製シートを利用した折紙工法⁴⁾によるATCPからなる樹脂製緩衝材⁵⁾を提案する。なお、最近においては、樹脂製品がごみとして捨てられることによって、野生動物に悪影響を与えることを懸念した意見が報道されているため、ここでは紙製緩衝材も並行して開発する方針をとっている。本稿では、開発のために行った試作、FEM (Finite Element Method) 解析、剛性試験などから得られた知見について報告する。

2. 開発コンセプト

2.1 基本方針

現在、市販の紙製緩衝材としては、ハニカムパネル(図3)が知られているが、正六角形断面の柱が上下プレートに接着剤で接合された構造になっている。輸送用貨物コンテナの荷物の周辺に紙製ハニカムパネル(HCP: Honey Comb Panel)が緩衝材として活用されている。しかし、HCPは、接着剤を使用しないと上下プレートの柱が固定できないため、いろいろな方向から荷重を受けると柱が偏り、ついには緩衝材として機能できなくなる。このため、接着剤を不可欠とするHCPには次の欠点がある。

- 温度上昇する環境では、接着剤の粘着力がなくなるため使用に適さない。
- 接着剤で固めているため、荷重を受けて損傷するともはや修復できず廃却となる。
- 材料費として、接着剤はグラムあたりの単価が紙代の10倍から数10倍以上程度と非常に高価である。



Fig.3 Paper honeycomb panel



Fig.4 Sealed air buffer within cardboard

- 接着剤を用いて形状凍結するため、形状自由度は低い。
- 構造的に正六角形柱の軸方向からの圧縮荷重には強いが、いろいろな方向から荷重が作用すると弱い。
- 接着剤を使用するため、HCP内に物品を格納するようなことは取り出しにくくなるから困難である。

他方として、市販の樹脂製緩衝材としては、樹脂製フィルム内の空間に空気を充填(Sealed air)して、その空気圧によるクッションを利用したタイプ(図4)もよく利用されている。このようなタイプの緩衝材は、強い荷重が作用すれば樹脂製フィルムは簡単にパンクし、使用後はごみとして破棄されてしまうのが実際のところである。構造的に耐久性はほとんどない。このようにHCPやSealed airなどの市販緩衝材は、使用前と後を通して、その形体を変化できるような自由度がないため、使用後は破棄せざるをえない。

そこで、ここでのATCP緩衝材の開発においては、接着剤がなくても使用できること、折紙のように使用後は平面状態に戻し再利用できること、用途に応じた様々な形体に対応できること、いろいろな荷重条件に適応できるような耐久性があることなどを基本方針としている。

2.2 折紙による形状凍結性

折紙をしたことがある人なら誰でも、紙を折ることによって飛行機や鶴など様々な形体を創出した後、また平坦な紙の状態にもどせることを経験している。本開発では、接着剤を使用せずに、必要な時に緩衝材としての形体をとることができるように、この折紙による形状凍結性を利用して折り紙工法と呼んでいる。折紙のための折線加工は、種々のメーカーが市販しているようなカッティングマシン(図5)を用いる。カッティングマシンに、切断線と折線のCAD情報を入力し、折線においては素材厚さの半分程度の深さまでカットする。紙や樹脂製シートを利用して、折紙工法でコアを製作する際、どのようなフランジ形状寸法であれば接着剤がなくてもコアとして形状凍結できるかについて、多数のフランジ形状寸法のコア展開図をもとに試作実験を行った結果、下記のような知見を得ている。なお、ここでの樹脂製シートは、加工性や耐久性に優れた市販品としてよく知られているポリプロピレンシー

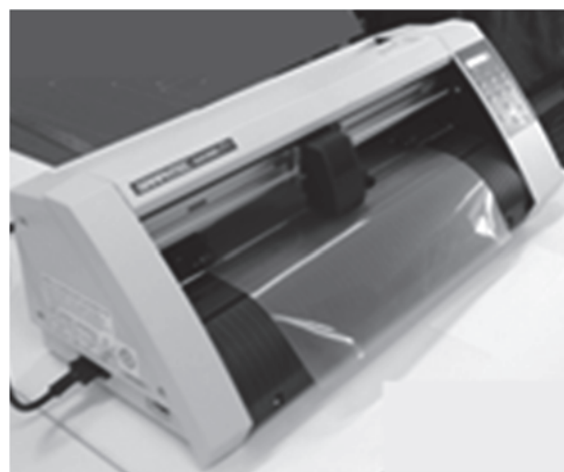


Fig.5 Cutter machine for origami

ト (PP:polypropylene) の厚さ 0.3,0.5 mm を選定している. PP シートの単価は紙代とほぼ同程度で, 紙に比較すると水に強く耐久性は大幅に向上する.

- (1) コアフランジ幅が長すぎると (図 6 (a)), コアを折り曲げる際にダンボール用紙が干渉し作業を行いにくく, かつ材料を必要以上に余計使い無駄である.
- (2) コアフランジ幅が短すぎると (図 6 (b)), 作成されたコアに荷重が作用するとフランジ面がコア面から

離れてくずれやすくなる.

- (3) フランジ角は, コア面を形成している正三角形の一つの角度 60° と同じであれば, 折り曲げ角度の誤差等によりコア辺上に段差 (図 6 (c)) が生じるため, フランジ角度は 60° よりも小さい方がよい.

以上の知見をもとに, コア展開図を種々検討した結果, 展開図の角度は三角定規の角度 ($30, 45, 60, 90^\circ$) をベースにすると作図が行い易く, 正四面体コアおよび正八面体ハーフコアの展開図 (図 7, 8) においては, フランジ角を 45° としコア底面重心位置とフランジ側辺が 90° となるフランジ幅にすれば, 上記の3つの項目が解決できることを紙や PP シートを折って見いだしている^{5,6)}.

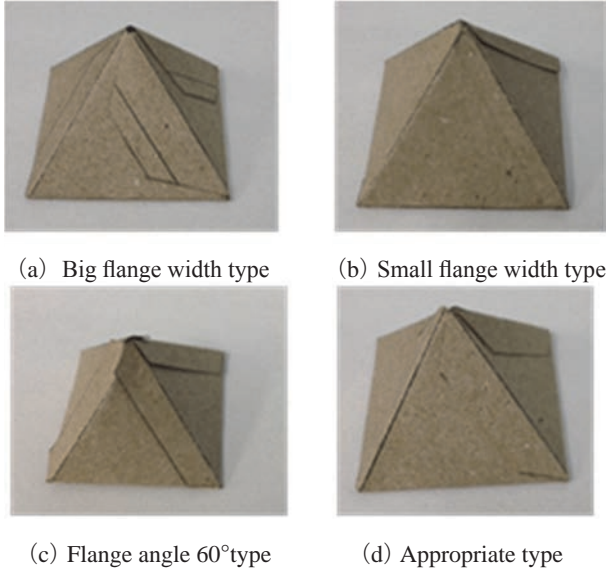


Fig.6 Various flange type

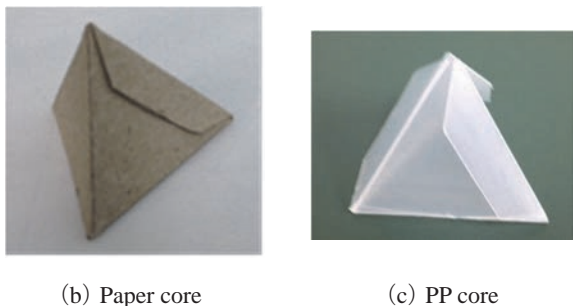
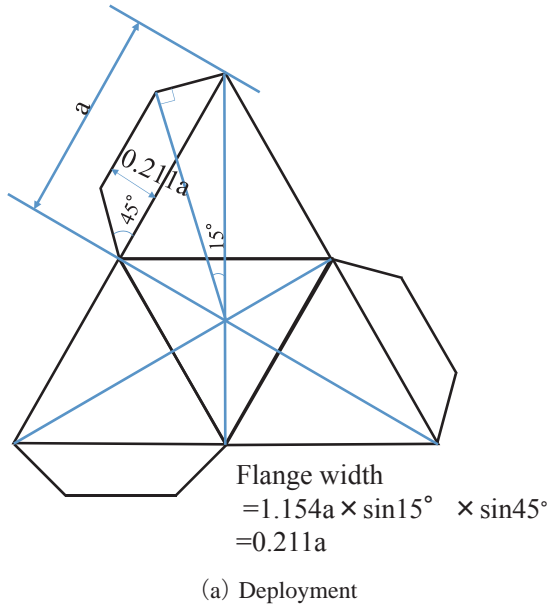
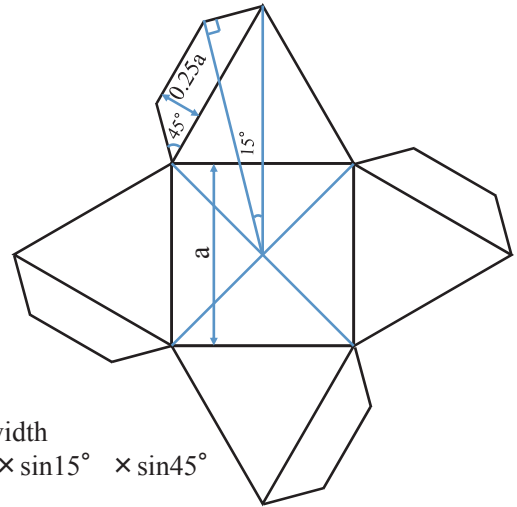
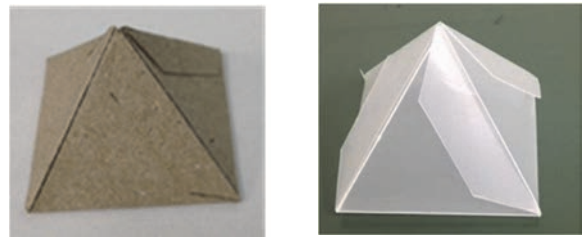


Fig.7 Appropriate flange design for regular tetrahedron core



(a) Deployment



(b) Paper core (c) PP core

Fig.8 Appropriate flange design for regular octahedron half core

2.3 ATCP におけるコアによる空間充填構造

正四面体コアおよび正八面体ハーフコア単体だけでは, 緩衝材としての機能はないが, これらコアを多数用いて空間充填構造を組立てると衝撃荷重を吸収できる緩衝材となる. 接着剤は不要であるが, 多数のコアを包み込む格納用アウターは必要である. 図 9 の例では, FEM モデルを用いて 41 個 (= 25+16) の正八面体ハーフコアと 40 個の正四面体コアにより空間充填した 81 個 (= 25+16+40) のコアからなるマットタイプ ATCP を示している.

ATCP の空間充填率 ϕ は, 次のように定義している.
 $\phi = \Sigma$ (構成する各コア体積) / アウター内部体積

図 9 の ATCP の正四面体と正八面体ハーフコアの各コア

1 個の体積は、 $4.713a^3$ と $9.662a^3$ である。よって、81 個コアの総体積は $585.342a^3$ となる。いくつかのコアがなくても ATCP は構成できるが、 ϕ は 1.0 未満となる。例えば、図 9 の例で、正四面体コアが全てない場合、 $\phi = 0.68$ の ATCP 緩衝材となる。つまり、多数のコアで幾何学的に空間を完全充填していなくても、格納体の空間内を多数のコアがある程度充填されていれば、緩衝材として機能する。このような ATCP 緩衝材の各コア内部あるいはコア外の空

間に卵、野菜、お菓子、各種製品などを格納すれば、搬送時に必要なクッションマットとして活用できる。次に、図 10 の例では、正五角形筒（ペンタゴンタイプ）のなかに 10 個（= 5+5）の正八面体ハーフコアと 5 個の正四面体コアにより合計 15 個のコアで空間充填した ATCP を示している。コア 5 個を円周方向に並べて 1 セットとしており、もっとセット数を増すこともできる。円周方向における正八面体ハーフコアの頂点における角度 θ は、約 70.6° であ

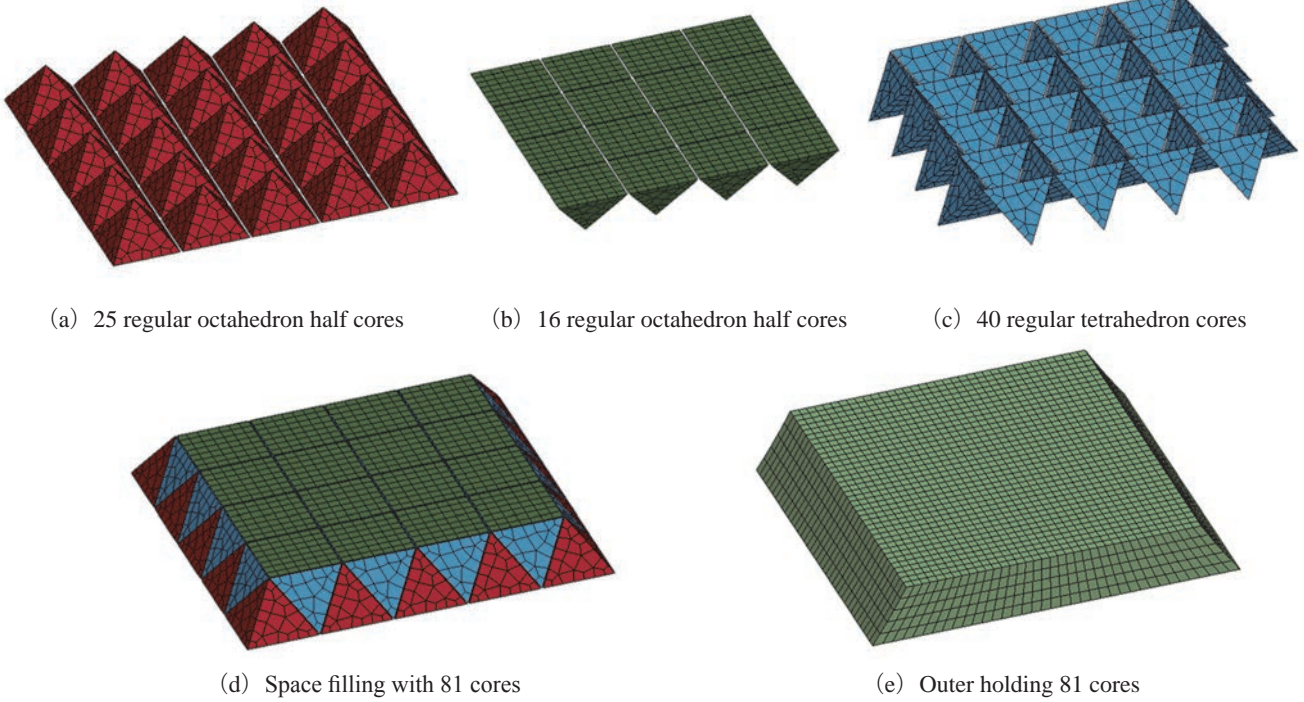


Fig.9 Mat type ATCP buffer model with 81 cores and outer

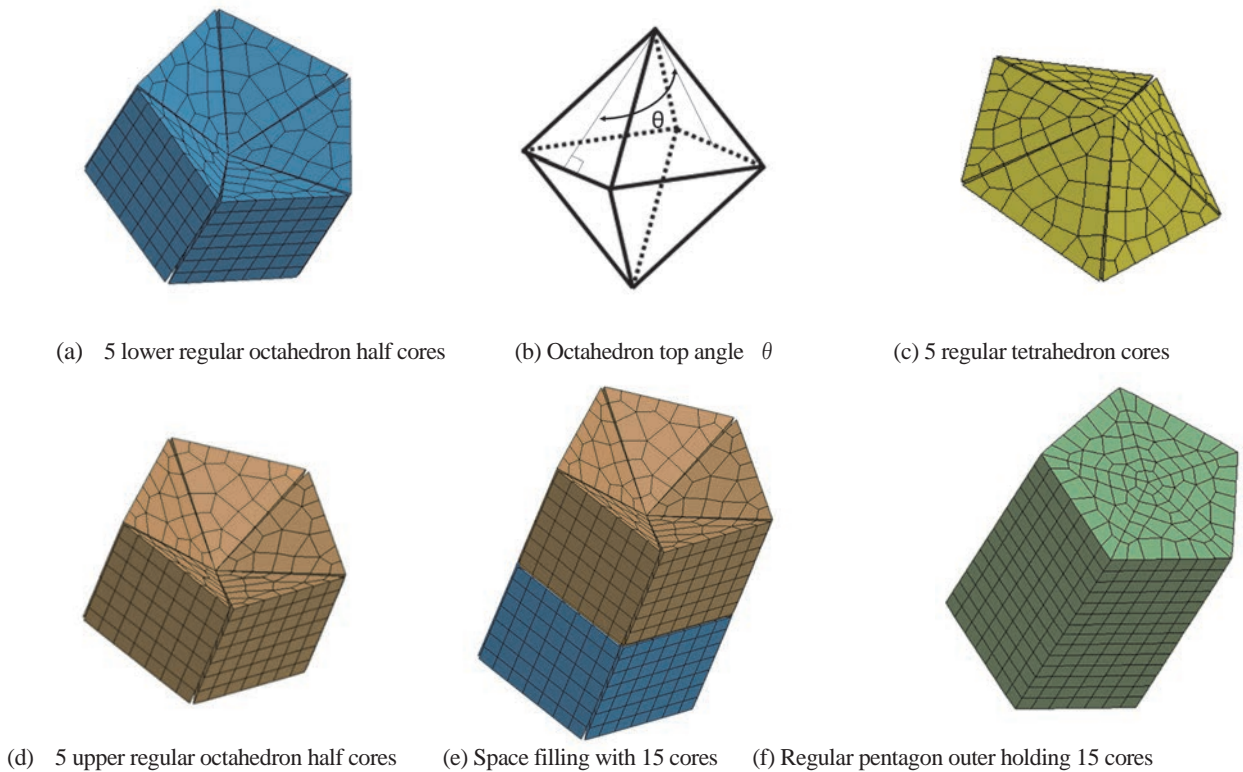


Fig.10 Pentagon type ATCP buffer model with 15 cores and outer

るから、正八面体ハーフコア 5 個分で約 353° となり 360° に約 7° 満たない。しかし、実際には板厚が寄与するため空間充填率 ϕ ほぼ 1.0 の ATPC 緩衝材として機能する。この正五角形の外接円の半径は $0.866a$ であり、コアを構成する板厚を t とすると、側面とフランジ面が各コア面にあるから、円周方向の板厚 $20t (= 4t \times 5)$ となる。例えば、 $a = 100 \text{ mm}$ 、 $t = 0.5 \text{ mm}$ とすると、板厚分の角度は、 $7^\circ (= 360 \times 4t / (1.732a \times \pi))$ となる。また、正五角形の底面積は $1.77a^2$ であるから、正八面体ハーフコアの底面積 a^2 の 2 個分よりも小さい底面積上に 5 個のコアが設置されるから非常にコンパクトな構造である。

以上、このような ATPC 緩衝材を、様々な機械構造物や各種搬送工程における再利用可能な衝撃吸収体、またはコア内部や外側の空間に食料や製品などを格納して搬送時に利用することを提案している。

3. ATPC 緩衝材試作品事例

3.1 紙製マットタイプ ATPC 緩衝材

素材として紙は容易に入手でき利用しやすいので、最初の試作では素材として紙を適用している。紙製のメリットとしては、手軽に折紙加工できることに加えて多様な色彩によるデザイン画などを印刷できることなどがあげられる。紙製緩衝材の ATPC を構成するコアの正三角形の 1 辺の長さ a の設定では、折り曲げ作業のし易さと完成後の緩衝材 (クッションマット) の厚さとして、実用的に約 50 mm がよいと考え、長さ $a = 65 \text{ mm}$ としている。図 11 に 121 個のコアから構成される ATPC の組立手順を示す。紙製であるが、図 12 に示すように人間一人程度の荷重が作用しても損傷しない。また、コア表面にユニークなデザイン画 (図 13) を印刷することもできる。

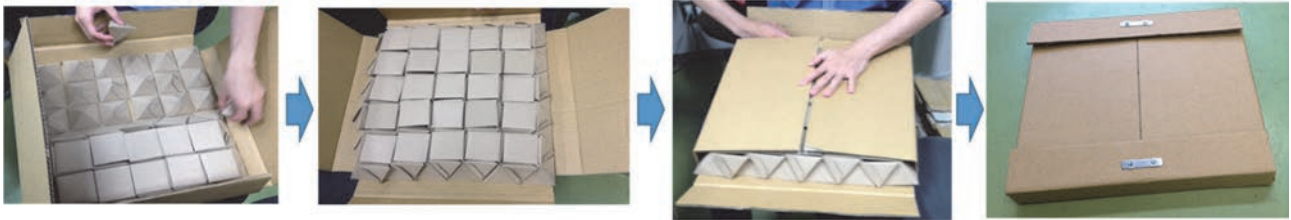


Fig.11 Paper ATPC buffer with 121 cores and outer box(size 410 × 410 × 55, weight 600g)



Fig.12 Paper ATPC buffer loaded by a man



Fig.13 Printed various design on paper cores

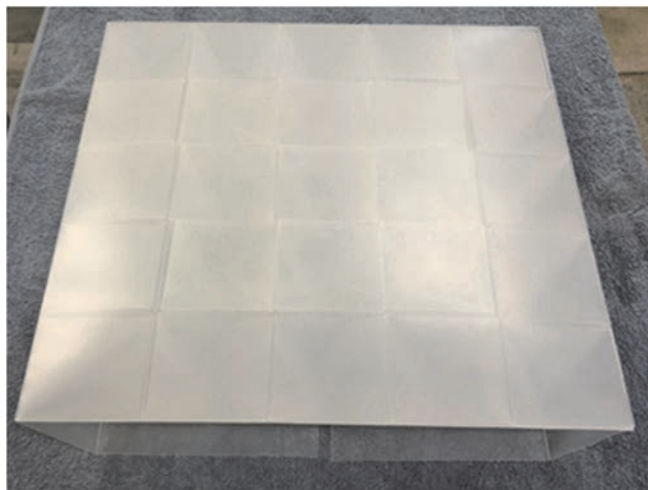


Fig.14 PP ATPC buffer composed with 81 cores and outer box (size 350 × 350 × 55, PP sheet thickness 0.5mm, weight 634g)

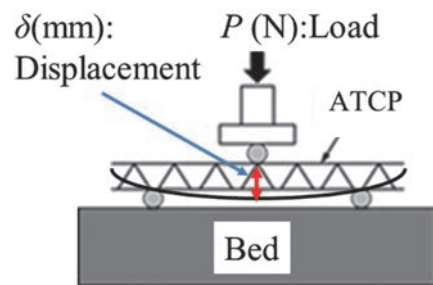


Fig.15 Three points bending mechanism

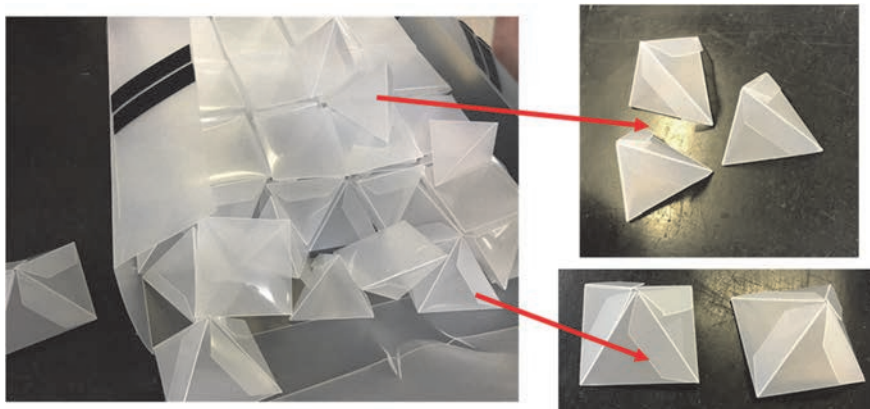
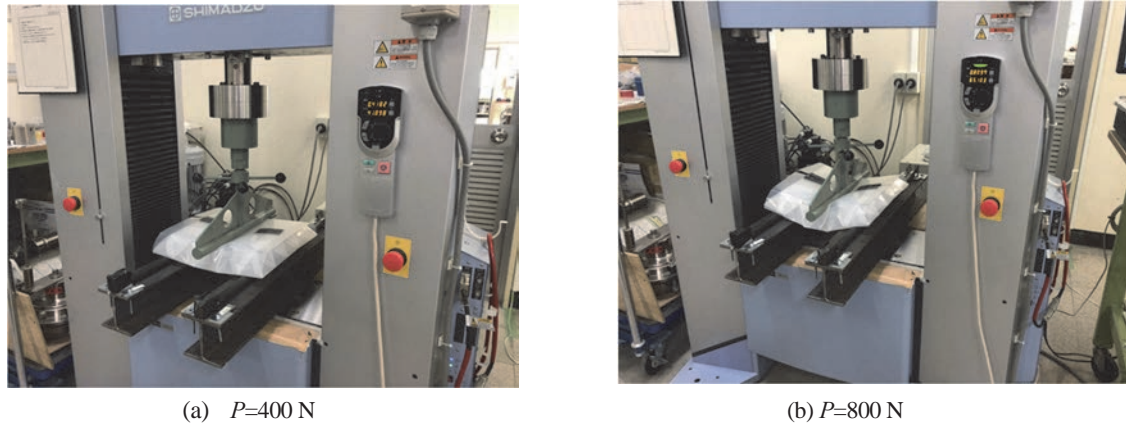
3.2 PP製マットタイプ ATCP 緩衝材

用途に応じて ATCP の材質を選定する必要があるが、紙よりも PP の方が強度、耐水性、耐久性等において優れているので、PP 製 ATCP は実用性がある。ATCP を構成するコアの正三角形の1辺の長さ a は、紙製の場合と同様に長さ $a = 65 \text{ mm}$ としている。図 14 に 81 個のコアで構成された PP 製 ATCP 緩衝材の事例を示す。この試作品では、PP シート厚さ 0.5 mm を使用し、図 15 に示すような3点曲

げ剛性試験を行っている。受け治具ロッド間隔は 250 mm としている。試験結果 (図 16, 17) から、押付荷重 $P = 800 \text{ N}$ の荷重を受け荷重ロッド降下量 $\delta = 70 \text{ mm}$ ほど撓んでもアウターの損耗はあるが PP 製 ATCP コアには再利用できなくなるような損傷は生じていない。

3.3 PP製ペンタゴンタイプ ATCP 緩衝材

日常生活において現行の市販卵パッケージ (図 18) を



(c) No damaged cores after bending test

Fig.16 Three points bending tests for PP ATCP with 81 cores and outer ($a = 65 \text{ mm}$, PP thickness 0.5 mm)

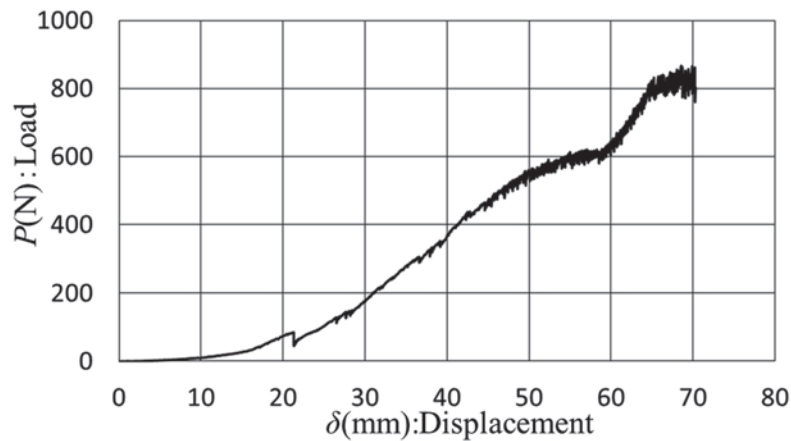


Fig.17 Measured data by three points bending tests for PP ATCP with 81 cores and outer ($a = 65 \text{ mm}$, PP thickness 0.5 mm)



Fig.18 Current commercial egg package

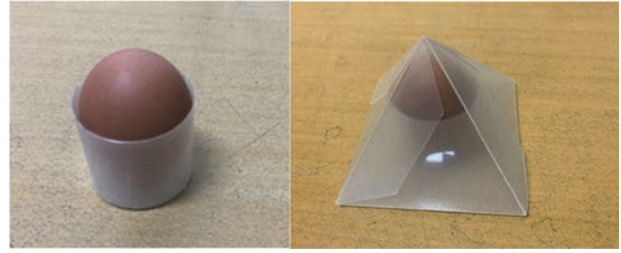


Fig.19 Egg in regular octahedron half core (a = 100mm)

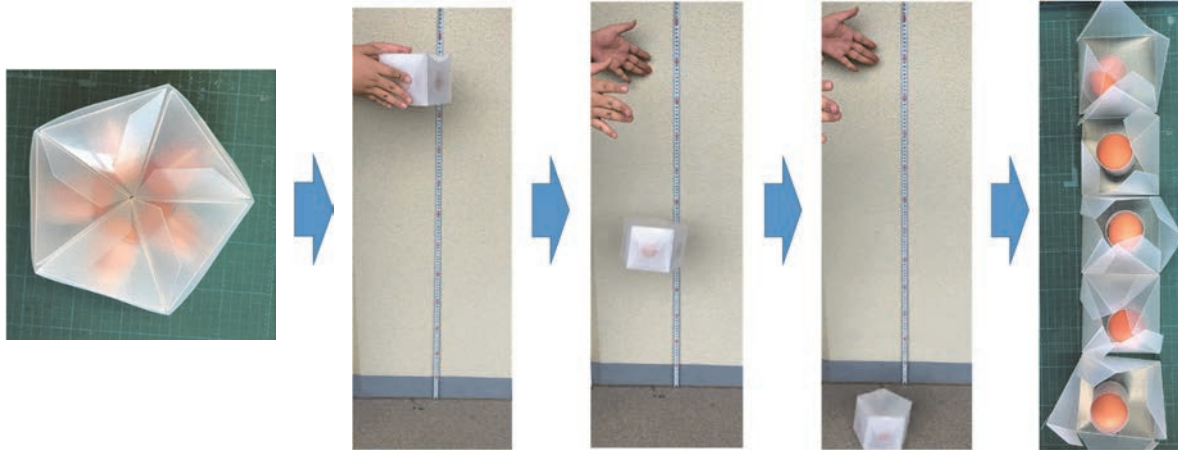


Fig.20 Drop test for PP Pentagon ATCP holding five eggs from height 1m

使用し卵を搬送中に、強い接触や落下させることによって卵を割ってしまうこともある。現行の市販卵パッケージでは卵はわれやすく、使用後はごみとなり再利用されていない。ここでは、卵がわれにくくかつ再利用できるペンタゴンタイプ PP 製 ATCP による卵パッケージを提案する。

図 19 に示すように、コアの正三角形の 1 辺の長さ a を 100 mm とすると卵を格納することができる。卵はコア内で静止できるように PP シートの輪を巻いている。PP シート厚 0.5 mm、正八面体ハーフコア 5 個とアウターからなる試作品は、質量 137g である。卵 5 個を格納した試作品(図 20) を、搬送中の落下事故を想定し、高さ 1m から落下させる実験を行ったところ、卵 5 個とも全て割れやひびなどの損傷はなく ATCP 緩衝材の有効性が認められる。

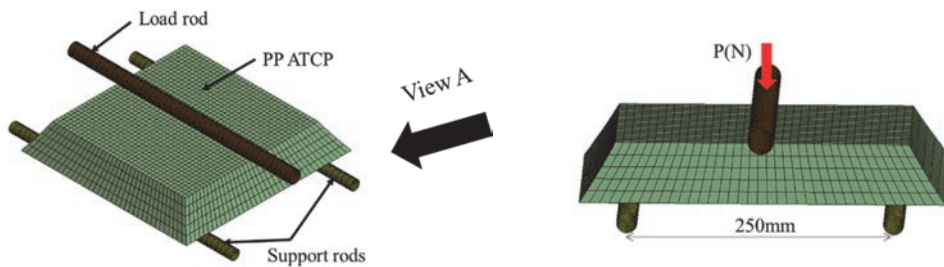
4.FEM 解析と実験による剛性評価

4.1 FEM 解析手法

用途に応じて ATCP 設計変数 (コア数, 正三角形の 1 辺の寸法, 材質, 板厚等) を検討できるように, FEM 解析を用いた剛性評価を行っている。ここでは, PP 製 ATCP の 3 点曲げ剛性試験を対象とした FEM 解析モデル例を図 21 に示す。FEM 解析ソルバーは, 市販ソフトである LS-DYNA (LS-DYNA Version 971 User's Manual, 2012) を用いている。本解析は緩衝材の大変形現象を対象としていることから, 陽解法で行っている。FEM モデル化では, 格納用アウターおよびコアをシェル要素 (完全積分シェル要素タイプ) で表し, 材料モデルとして弾塑性体モデルを用いて, PP シートメーカーの推奨値と文献⁷⁾ から表 1 の材料定数 (ヤング率 E (MPa), 降伏応力 σ_y (MPa), 塑性係数

Table 1 Material constants

E (MPa)	σ_y (MPa)	F (MPa)	n	ν
1000	20.0	30.0	0.1	0.4



(a) Three points bending test by FEM

(b) View A

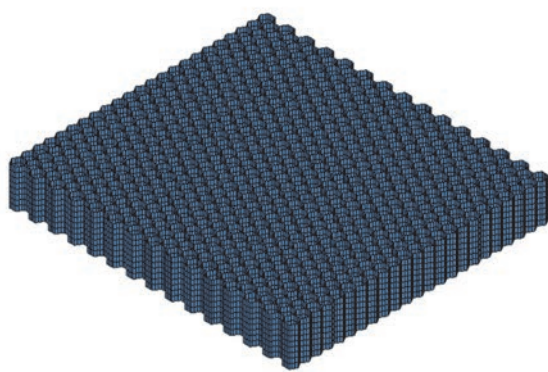
Fig.21 Three points bending test by FEM model for PP ATCP with 81 cores and outer

F (MPa), 加工硬化指数 n , ポアソン比 ν) を入力し, その他の材料定数はデフォルト値でミーゼス降伏条件を使用している.

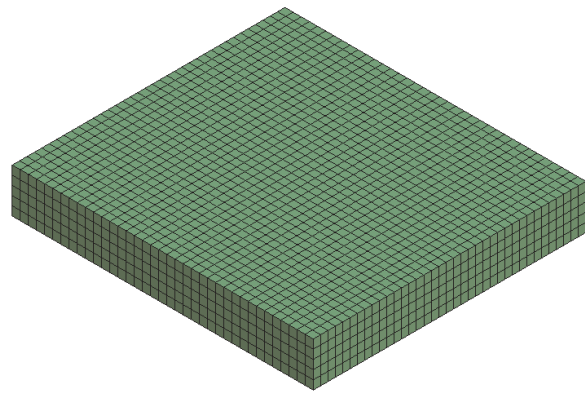
3点曲げ剛性試験を対象とした解析モデル(図21)では, 図14に示した81個のコアからなるPP製ATCP試作品を対象としたFEMモデルを表し, 両サイドと中央の3つの丸棒治具を剛体モデルとしている. 両サイドのサポートロッドの間隔は, 3点曲げ剛性試験の実験条件と同じ250mmとしている.”両サイドのサポートロッドとPP製ATCPアウター” および”中央の荷重ロッドとPP製ATCPアウター”, ”PP製ATCPアウターとコア, コア同士”等の接触を伴う変形問題はペナルティ法で解析し, 摩擦係数および動摩擦係数等はすべて0.1としている. 解析条件としては, 両サイドのサポートロッドは完全位置固定とし,

中央の荷重ロッドを鉛直下方に降下させている. 荷重ロッドの降下量を δ (mm), 鉛直下方荷重を P (N) と表す.

次に, Fig.21のPP製ATCPと同じ素材PPシート厚0.5mm, ATCPコア高さと同じHCP高さ, 同程度の全体質量, 同程度の全体サイズ(横・縦寸法)となる仮想HCPを想定し, そのFEMモデル(図22)を作製し, 同様のFEM解析手法によって3点曲げ剛性試験を対象とした剛性評価を行う. PP製ATCPと仮想HCPのモデル比較を表2に示す. PP製ATCP試作品は実際に製作できているが, 仮想HCPモデル品を製作することはかなりの費用と工数がかかりそうで現実的には困難であろう. しかし, PP製ATCP試作品と剛性特性を比較するために仮想HCPも解析対象としている.



(a) Virtual HCP FEM model without outer



(b) Virtual outer model

Fig.22 FEM models for virtual PP HCP

Table 2 Comparison between FEM model of PP ATCP and Virtual HCP without outer

	Number of cores	Total area of cores (mm ²)	Size (mm)
PP ATCP	81	765958.7	325 × 325 × 46
Virtual HCP	653	758816.0	320 × 352 × 46

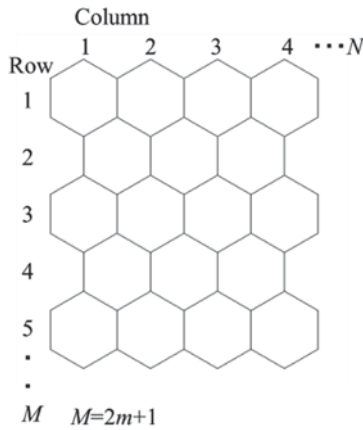
仮想HCPの形状寸法サイズを, 次の手順⁸⁾から決定している.

- (1) 仮想HCPの正六角形コアの基本レイアウトを図23のように表し, 奇数行のコア列数は偶数行のコア列数よりも1つコアが多いものとする.
- (2) 列数を N , 行数を M と表し, 行数 M は必ず奇数とし, $M = 2m + 1$ ($m = 0, 1, 2, 3 \dots$) と表す.
- (3) 上記2項の規則により, 仮想HCPコアの総辺数 $6Nm + 5N + m + 1$, 総コア数 $2Nm + N - m$ となる. 図23(b)の基本例では, $N = 4$, $m = 2$ であるから, コアの総辺数71, 総コア数18となっていることが確認できる.
- (4) コア辺長さを D とすると, $(2m + 1)$ 行 \times N 列のHCP全体サイズは $1.732DN \times (3m + 2)D$ となる.
HCP全体サイズをATCP全体サイズにほぼ等しくするためには, $1.732DN \approx 325$ かつ $(3m + 2)D \approx 325$ である.
- (5) HCPコア総面積がATCPの81個のコア総面積 765958.7 mm^2 にほぼ等しくなり, かつHCP高さをATCPコア高さ ($46 \text{ mm} = 65 \text{ mm} \times 0.707$) に等しいとすると, HCPコアの総辺長さ $\approx 765958.7 \text{ mm}^2 / 46$

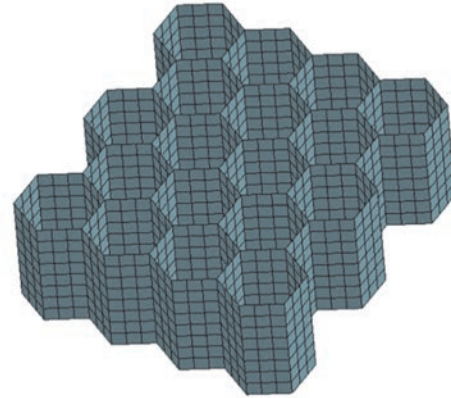
$\text{mm} = 16651.3 \text{ mm}$ とする必要がある.

- (6) したがって, $(6Nm + 5N + m + 1)D \approx 16651.3$ となるいま $D = 15 \text{ mm}$ とすると, 上記(4)より $N = 13$, $m = 7$ となり, $(6Nm + 5N + m + 1)D = 589 \times 15 = 8835 < 16651.3$
次に $D = 10 \text{ mm}$ とすると, " $N = 18$, $m = 10$ となり, $(6Nm + 5N + m + 1)D = 1181 \times 10 = 11810 < 16651.3$
次に $D = 8 \text{ mm}$ とすると, " $N = 23$, $m = 14$ となり, $(6Nm + 5N + m + 1)D = 1923 \times 8 = 16496 \approx 16651.3$
よって, $D = 8 \text{ mm}$ のとき, 仮想HCPのコア総面積とPP製ATCPのコア総面積がほぼ等しくなっている.

上記の手順により, PP製ATCP試作品とほぼ同質量, 同サイズとなる仮想HCPの仕様として $D = 8 \text{ mm}$, コア総数653個 ($= 2 \times 23 \times 14 + 23 - 14$), 全体サイズ $320 \times 352 \times 46$ 等を決定している.



(a) Column N and Row M in virtual basic HCP



(b) Virtual basic HCP by FEM model ($N=4, m=2$)

Fig.23 Concept on virtual PP HCP

4.2 結果と考察

図 24 に FEM 解析による PP 製 ATCP の変形図とミーゼス応力分布図, 図 25 に仮想 HCP の変形図とミーゼス応力分布を示す. ミーゼス応力分布図のカラーレベルは全て統一している. 図 26 に PP 製 ATCP 試作品を用いた 3 点曲げ剛性試験による測定結果, PP 製 ATCP と仮想 HCP についての FEM 解析結果等を示す. FEM 解析結果と実験から得られた知見は, 次のとおりである.

(1) 仮想 HCP の場合, 降下量 $\delta = 15 \sim 25$ mm において押付荷重 P は約 800N くらいで横ばい (図 26) となり, 素材 PP に発生する最大ミーゼス応力値 (図 25) は 25.9MPa で目安としている許容応力値 24MPa を超えている. この目安の許容応力値 σ_s の設定は, 材料の

応力とひずみの関係式が $\sigma = F\varepsilon^n$ で表される場合, くびれ時のひずみ ε は n 値で表されることから, $\sigma_s = 30 \times 0.10.1 = 24$ としている. 仮想 HCP は $P-\delta$ 線の傾きが大きいため剛性は高いと評価できるが, 押付荷重 $P = 800N$ 以上の条件において使用すれば破損することが推測される.

(2) PP 製 ATCP の場合, 降下量 $\delta = 25$ mm では PP 素材に発生する最大ミーゼス応力値は 21.9MPa 程度であり, 降下量 $\delta = 50$ mm で P が 1000N を超えても最大ミーゼス応力値 (図 24) は 23.8MPa であり許容応力値 σ_s 以内である. したがって, PP 製 ATCP では, 押付荷重 $P = 800N$ では破損しないと考えられる. 実際の PP 製 ATCP の 3 点曲げ剛性試験結果 (図 16) でも, 押

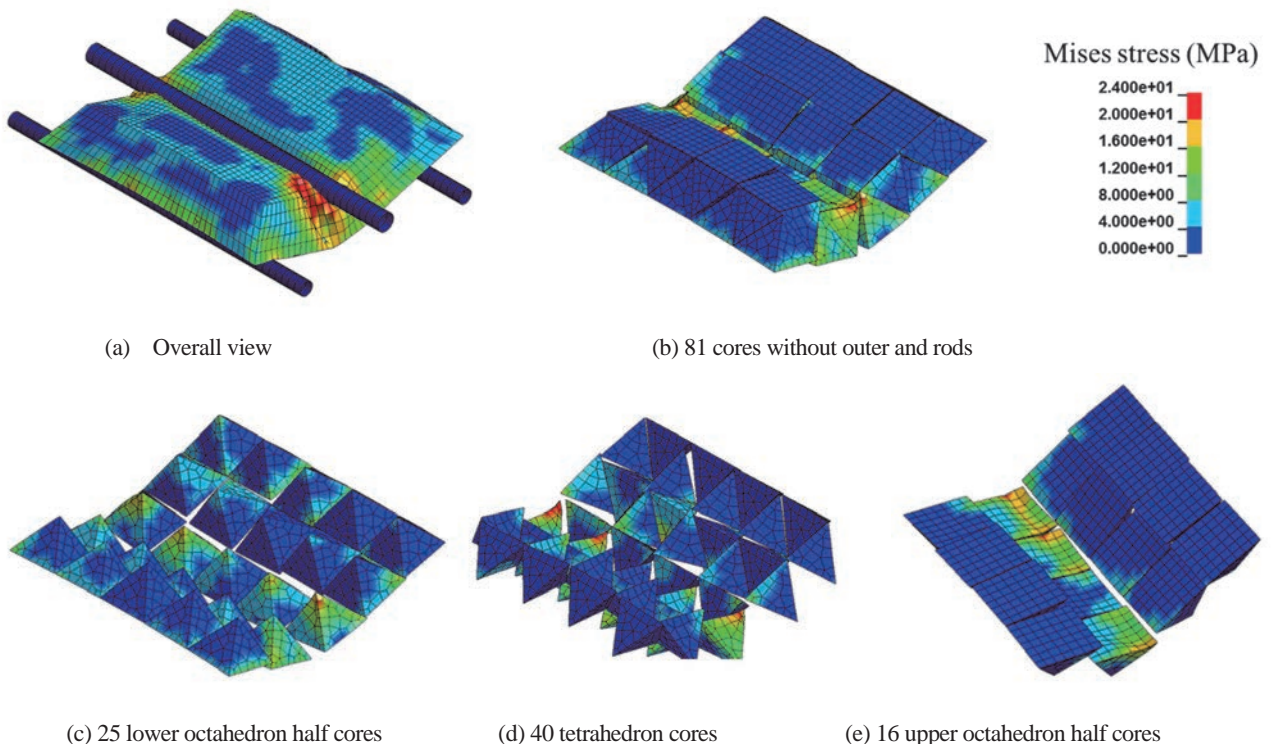


Fig.24 Mises stress distributions for PP ATCP at $\delta = 50$ mm (Maximum Mises stress 23.8 MPa)

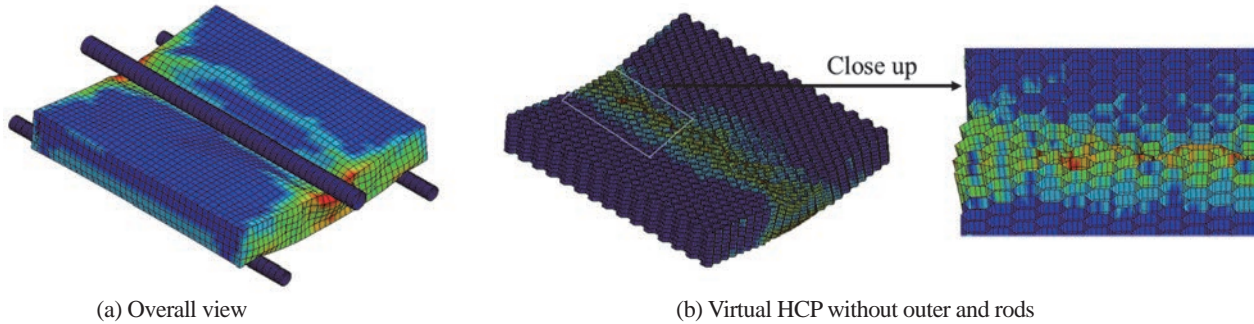


Fig.25 Mises stress distributions for virtual PP HCP at $\delta = 25\text{mm}$ (Maximum Mises stress 25.9 MPa)

付荷重 $P = 800\text{N}$ を超えても 81 個のコアに破損はまったく生じていない。

- (3) 仮想 HCP の方が ATCP よりも破損しやすい要因としては、押付荷重により変形が生じた際、HCP を構成する正六角形コア群は配置を変えられないが、ATCP は大変形するとコア配列が変形形状に合わせて隙間分布が生じる分だけ移動できる組立構造 (図 24) であるため、局所的な応力集中を回避できるから破損しにくいことが要因として挙げられる。HCP は圧縮変形には強いとされているが、3 点曲げ剛性試験では、押付荷重 $P = 800\text{N}$ が負荷した場合、仮想 HCP は破損するが、PP 製 ATCP はしなやかに変形して破損しな

い利点があることが実験と FEM 解析からわかる。

- (4) PP 製 ATCP の 3 点曲げ剛性試験結果と FEM 解析結果 (図 26) を比較すると、同じ押付荷重 $P = 800\text{N}$ において、試作品は $\delta = 65\text{mm}$ であるが、FEM 解析結果では $\delta = 43\text{mm}$ 程度と小さい。これは試作品のコアとコア間の隙間が作業上は、FEM モデルよりも少し広がる傾向があるため、試作品の方が撓みやすいことと、FEM モデルのコアは一体物であるが、試作品のコアは折り曲げているだけで一体物ではないため、試作品の方が FEM モデルよりも剛性が小さくなることが要因と考えられる。

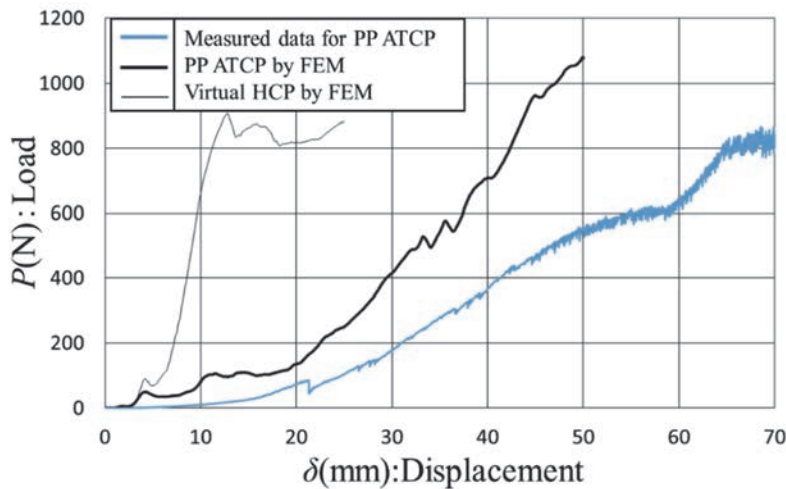


Fig.26 FEM results and measured data by three points bending tests

5. 結 言

ここでは、樹脂製 ATCP 緩衝材を提案し試作品を製作し、剛性試験と FEM 解析を行い、得られた知見について報告している。ATCP 緩衝材試作品は、HCP や Sealed air などの市販緩衝材に比較して、接着剤を使用せずコアによる空間充填構造であるため、形状自由度が高く耐久性があり製作コストが安く再利用しやすいし、使用後はもとの平面状態に戻してしまえるなど非常に多くの利点がある。ATCP のコア内部および外側の空間に多種多様な農

作物、食料品、工業製品などを格納して搬送時の緩衝材として、また ATCP を機械構造物や各種搬送工程における衝撃吸収体としても利用できると期待している。ここで提案した以外の様式による ATCP 緩衝材の開発も含めて、これらの実用化を目指して研究開発をさらに進めていきたい。

参考文献

- (1) 国土交通省物流審議官部門 物流政策課企画室，“宅配の再配達削減に向けた検討について”，2016.11.25 発表資料。

- (2) 寺田耕輔, 佐藤秀俊, 牧田哲暢, 高橋徹, 萩原一郎, “組立式トラスコアパネルの開発:”, 福島工業高等専門学校研究紀要, 55, 1-5, (2014) .
- (3) 寺田耕輔, 戸倉直, 佐藤秀俊, 牧田哲暢, 萩原一郎, “組立式軽量高剛性構造パネルの曲げ剛性評価”, 日本機械学会論文集, No. 15-00039, Vol.81, No.828, DOI: 10.1299/transjsme.15-00039, (2015) .
- (4) 寺田耕輔, 萩原一郎, “自由自在な折紙のような工法”, 日本機械学会誌 119-1175, 564-565, (2016) .
- (5) 寺田耕輔, 戸倉直, 高橋徹, 萩原一郎, “組立式トラスコアパネル (ATCP) の実用化開発”, 福島工業高等専門学校研究紀要, 58, 1-8, (2017) .
- (6) 萩原一郎, 寺田耕輔: 特願 2017-166169.
- (7) Kousuke Terada, Kota Kadoi, Sunao Tokura, Takamichi Sushida, Ichiro Hagiwara, “The deformation mechanism on origami-based foldable structures”, International Journal Vehicle Performance 3 (4) 334-346, 2017.
- (8) 寺田耕輔, 萩原一郎, “折紙工法による紙 / 樹脂製緩衝材の開発”, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会講演論文集, 18-7, No.243, (2018-8) .

ポリマー水溶液－白金球系強制対流下の膜沸騰極小熱流束と限界熱流束

島岡 三義 中村 篤人

Minimum Heat Flux on Film Boiling and Critical Heat Flux in Forced Convection of Polymer Aqueous Solution - Platinum Small Ball System

Mitsuyoshi SHIMAOKA and Shigeto NAKAMURA

In this paper, optimal test conditions for evaluating the cooling characteristics of aqueous polymer solutions have been investigated and discussed. In the case where the vapor film collapses far before stopping the rotation of the arm, or in the case where the arm stops far behind after the collapse of the vapor film, the MHF (Minimum Heat Flux) point showed a boiling curve clearly distinguishable. And it was found that the characteristic temperature obtained by the tangential intersection method shows good agreement with the MHF point temperature. For the concentration of 5 to 30 vol.%, the influence of the tangential velocity and the arm rotation stop angle on the MHF point and CHF (Critical Heat Flux) point has investigated. Because their dependence differed depending on the concentration of the polymer aqueous solution, the optimum test conditions for evaluating the cooling characteristics were could not obtained. From the observation of the vapor film collapse process using a high speed video camera, it has been revealed that the starting point of collapse is the laser welded part of the Pt pipe and the disintegration time is about 60 ms.

1. はじめに

金属材料は焼入れや焼戻しをはじめ、さまざまな熱処理によって、合金組成をそのままにして機械的性質を変化または向上させることができる。熱処理においては金属材料の冷却過程の制御が重要になる。空中放冷では、金属材料はほぼニュートン冷却になるが、液体中での冷却過程は単純ではない。冷却剤の冷却特性（膜沸騰終了後の急冷開始温度（特性温度）、急冷開始後の冷却速度など）の把握も重要であり、JIS K 2242-2012 に熱処理油剤の冷却性能試験法が規格化されている⁽¹⁾。しかしながら、試験体は直径 10 mm、長さが 30 mm の銀棒体で、銀棒長手方向中央部の円筒表面部に、銀棒内部側からアルメル線を接触させて銀－アルメル熱電対を形成させる必要があること、加熱・冷却試験によって酸化した試験体表面を浸漬急冷試験のたびに研磨しなければならぬ煩わしさがある。筆者らはこの問題を解決し、さらには冷却剤の冷却特性（冷却（温度－時間）曲線、冷却速度（温度－冷却速度）曲線、熱伝達率（温度－熱伝達率）曲線、熱流束（温度－熱流束）曲線、JIS K 2242 での特性温度（急冷開始温度で蒸気膜崩壊温度に相当）を簡便に把握でき、その特性の変化を敏感に判断できる、しかもコンパクトな試験システムの開発に取り組んできている^{(2)～(6)}。試作した最新のシステムは、回転

アームの先端に取り付けられた直径 4 mm の白金球体（温度測定プローブ）を、およそ 850°C に加熱した後に所定のプローブ回転移動周速度で冷却剤に浸漬して、Pt 球中心部に挿入したシース径 0.25mm の K 型熱電対で温度履歴を測定し、温度履歴から冷却特性（蒸気膜段階から沸騰段階へ変化する温度（特性温度）、臨界区域や危険区域での冷却速度など）を調べるものである。この試験システムは、従前の試験システム⁽⁷⁾を参考にしている。筆者らは熱処理現場での使用を意識して、冷却曲線から冷却速度や熱伝達率などを計算、図示化する機能を有し、装置もコンパクト化しているが、熱処理冷却剤の冷却特性を評価するに当たって、プローブ回転移動周速度などの最適試験条件の確立までには至っていない。

そこで本研究では、熱処理冷却剤としても使用されるポリマー水溶液の冷却特性を調べるのに最適な試験条件を明らかにするための知見を得ることを目的として、特に、膜沸騰極小熱流束（Minimum Heat Flux : MHF）と限界（最大）熱流束（Critical Heat Flux : CHF）に着目して、ポリマー水溶液の濃度、プローブ回転移動周速度、回転アーム停止角度の影響を調べた。また、高速度ビデオカメラによる蒸気膜形成や蒸気膜の崩壊過程の観察結果についても報告する。

2. 実験装置および実験方法

Pt (純度 99.95wt%) 小球プローブ (直径 4 mm) 支持体 (アーム) の構造を Fig. 1 に, Pt 小球を Fig. 2 に示す。Pt 小球の温度測定用 K 型シース熱電対 (シース外径 0.25 mm) を Pt 小球中心部まで挿入した。K 型熱電対の熱的保護と曲げ剛性付与のため, 外径 0.5 mm, 内径 0.3 mm の Pt パイプを Pt 小球中心部まで挿入して, 付け根部をレーザー溶接し, Fig. 2 に示すように, 小球とパイプが滑らかに接続するようにした。冷却剤の Pt パイプ内への進入を阻止するために, Fig. 1 に示すようにいくつかのステンレス製金具で密封, 保持した。試験システムを Fig. 3 に示すが,

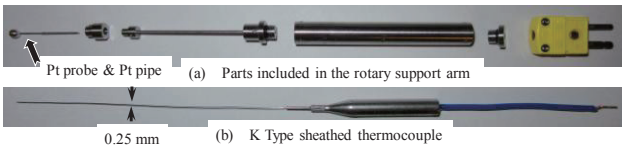


Fig. 1 Platinum probe, K type sheathed thermocouple and the parts of the support arm.

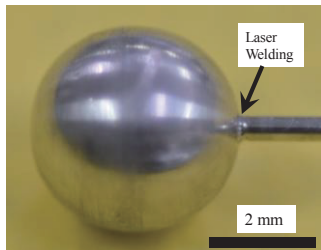


Fig. 2 Platinum ball laser welded platinum pipe.

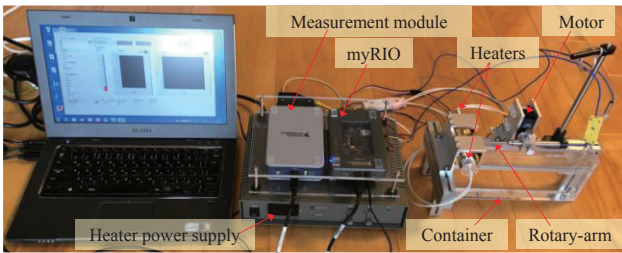


Fig. 3 Photograph of the developed test equipment.

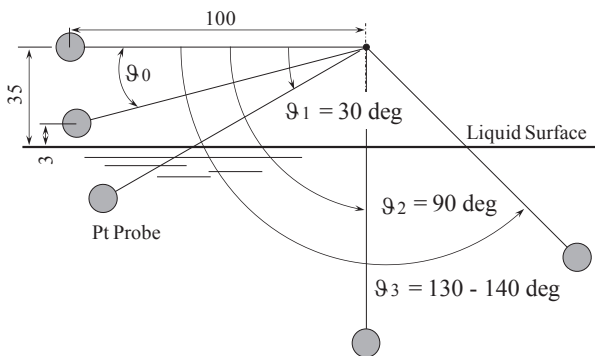


Fig. 4 Rotation angle of the rotary support arm with platinum small ball probe.

回転アーム長は 100 mm である。Pt プローブの加熱源であるハロゲンランプヒーター電源の ON, OFF, アーム回転, プローブ温度計測などの一連の制御, 冷却曲線, 冷却速度曲線, 熱伝達率曲線および熱流束曲線などの作図データ生成等は日本 NI 製 LabVIEW によって自動化した。Fig. 3 に示したように, 対向設置したハロゲンランプヒーターの焦点に Pt プローブを設置し, 850°C に加熱後, Fig. 4 に示すように, プローブ中心が冷却液体表面から 3 mm の位置までプローブ中心の回転周速度 (以後, 「接線速度」と記す), $V_0 = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の接線速度で回転させた後, 所定の回転角度 ($\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 130 \sim 140^\circ$) まで所定の接線速度, $V = 30 \sim 105 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で回転させ, 容器内の冷却液体 (640cc) 中に浸漬, 急冷した。

冷却液体としてポリマー水溶液 (大同化学工業製, ソリュブルクエンチ TY-300A, 濃度 5 ~ 30vol.%, 動粘度 $87 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 原液 at 40°C, $1.6 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 濃度 10vol.% at 40°C) を用いた。白金プローブの温度は 10ms のサンプリング周期で測定し, Pt プローブの定圧比熱と密度には温度依存性⁽⁸⁾を持たせ, 集中熱容量近似してプローブの冷却速度, プローブ表面での熱伝達率および表面熱流束を求めた。また, 高速度ビデオカメラ (フレームレート: 250fps, シャッター開放時間 1/1000 秒) でプローブまわりの蒸気膜形成状況や崩壊状況の観察を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 ポリマー水溶液中での急冷時の冷却曲線

Fig. 5 に冷却曲線のポリマー水溶液の濃度依存性を示す。濃度が 5 ~ 15vol.% においては冷却曲線に著しい違いはないが, 30vol.% の場合は冷却が極端に遅くなっていることがわかる。また, 急冷開始温度も 15vol.% 以下の場合より 150°C 以上も低くなっている。鋼の焼入れ性を高めるには, マルテンサイト変態開始温度まで急冷され, その後マルテンサイト変態終了温度まではゆっくり冷却される必要があり, 濃度が 30vol.% の場合はこの条件とは逆の冷却過程になっていることがわかる。

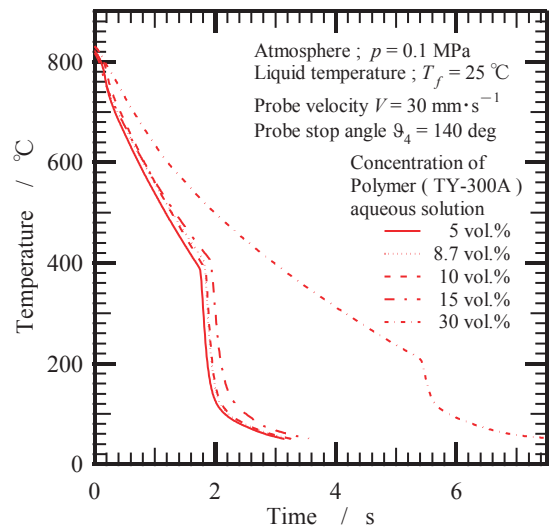


Fig. 5 Effect of the concentration of the polymer water solution on the cooling curve.

次に、接線速度による冷却曲線の変化を Fig. 6 に示す。いずれもアーム回転停止角度は $\theta_1 = 30^\circ$ である。接線速度の増大に伴って θ_1 に到達する時間が短くなり、その間は接線速度が大きいほど冷却が速くなるので、少しわかりづらいが Fig. 6 から認められる。当然のことながら θ_1 で停止した以降の冷却過程は同じになるはずであるが、接線速度が大きいほど停止するまでの減速度が大きくなり、停止時の衝撃によりプローブまわりの蒸気膜の乱れなどの影響により、特に、濃度が 30vol.% の場合は、急冷開始温度に違いが表れている。

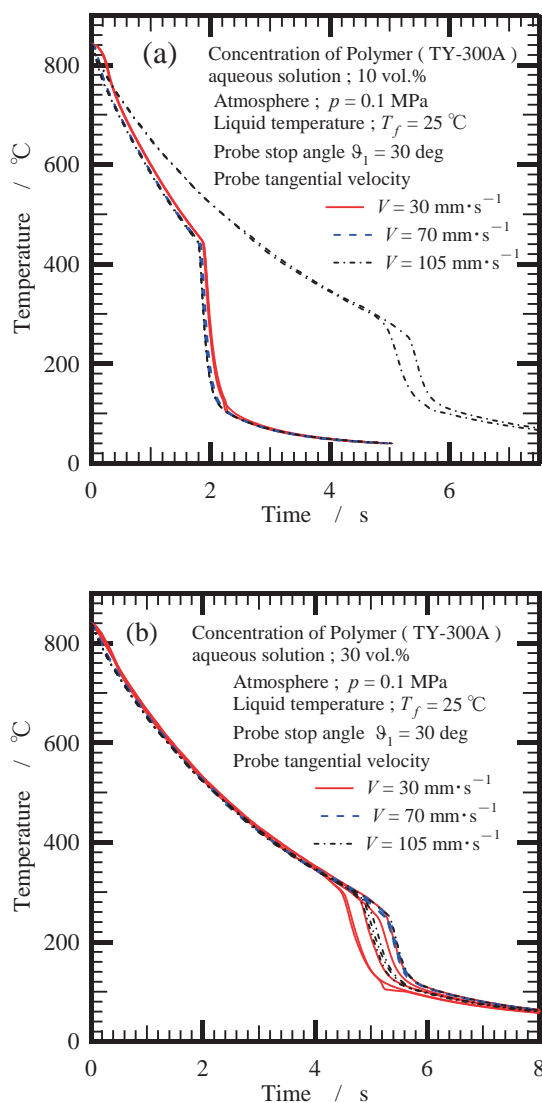


Fig. 6 Effect of the tangential velocity of Pt probe on the cooling curve.

接線速度が $V = 105 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ におけるアーム回転停止角による冷却曲線の変化を Fig. 7 に示す。濃度が 10vol.% では、アーム回転停止角度が $\theta_3 = 140^\circ$ で蒸気膜段階が終了しているが、30vol.% ではアームの回転が停止しても蒸気膜段階である。冷却剤の冷却特性を評価する場合は、冷却条件が同じである必要があるので、接線速度が $V = 105 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合には、Fig. 7(a) $\theta_3 = 140^\circ$ の条件での冷却実験は避けるべきである。

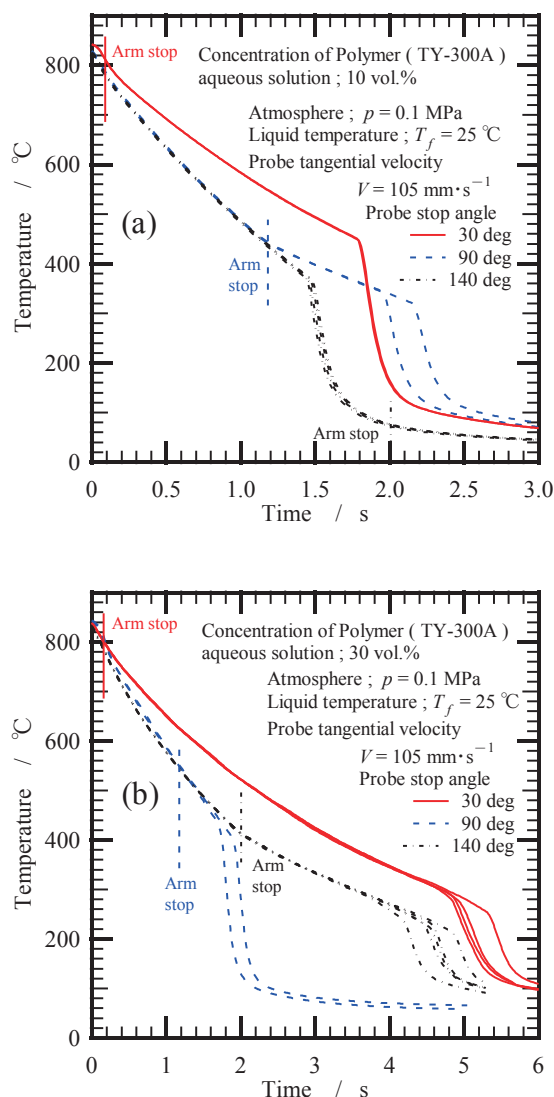


Fig. 7 Effect of the stop angle of the rotary arm with Pt probe on the cooling curve.

3.2 水とポリマー水溶液中での急冷時の沸騰曲線と蒸気膜崩壊様相

アーム回転停止角度が $\theta_3 = 140^\circ$ における水とポリマー水溶液 (濃度 8.7vol.%) の沸騰曲線を Fig. 8 に示す。水 (約 15 分煮沸) の場合では、高温から冷却される過程での膜沸騰域での熱流束がほぼ一定となる温度域が存在するが、ポリマー水溶液では温度の低下に伴って減少している。また、Fig. 9 からわかるように、ポリマー水溶液では膜沸騰極小点が水より明確に判定でき、遷移沸騰域の熱流束が急激に増大している。

Fig. 10 と Fig.11 に水とポリマー水溶液の蒸気膜崩壊様相を示す。アームの回転停止角度を $\theta_2 = 90^\circ$ とした場合で、蒸気膜崩壊開始を $t = 0$ にしている。フレーレートを 250fps にしているため、0.004sec 毎の画像である。蒸気膜崩壊の起点は Pt パイプの溶接部であるが、水の場合は崩壊の起点から底部に向かって伝搬的に崩壊していて、その所要時間は 80msec 程度ある。一方、ポリマー水溶液では蒸気膜崩壊のスピードが速く、およそ 60msec で水より速

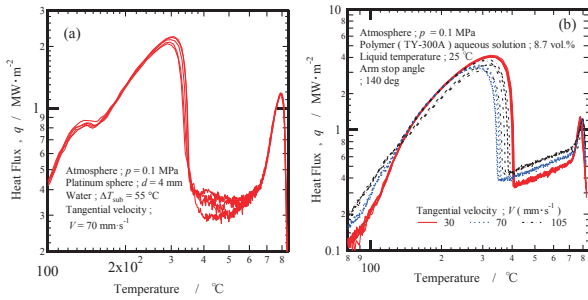


Fig. 8 Boiling curves in water(a) and in polymer aqueous solution with the concentration of 8.7vol.%(b).

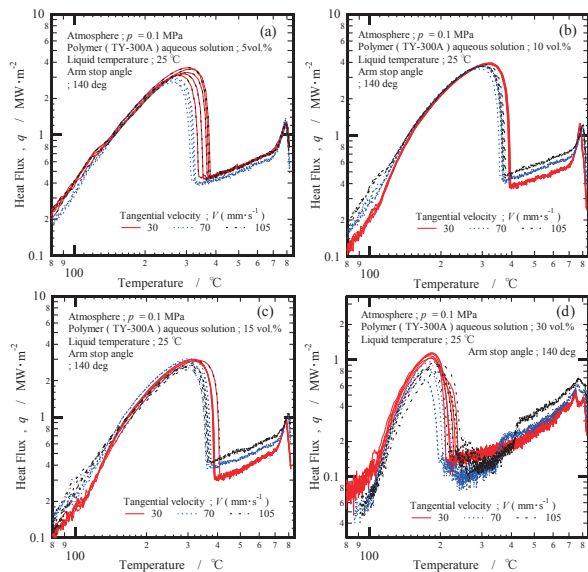


Fig. 9 Effects of tangential velocity on boiling curve in polymer aqueous solution with the concentration of 5, 10, 15 and 30 vol.%.

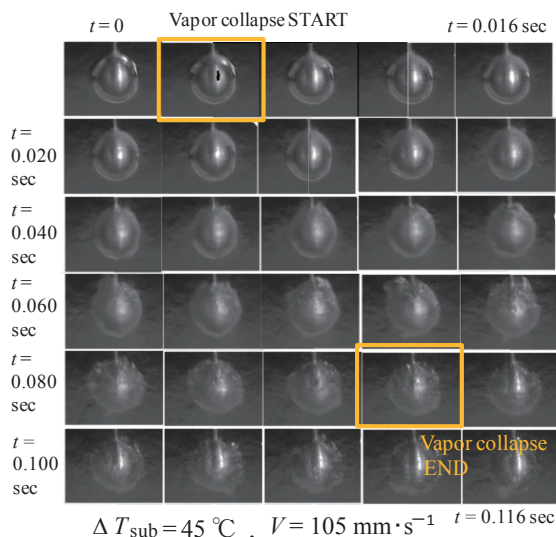


Fig. 10 Time series high speed video image of vapor collapse process during water quenching.

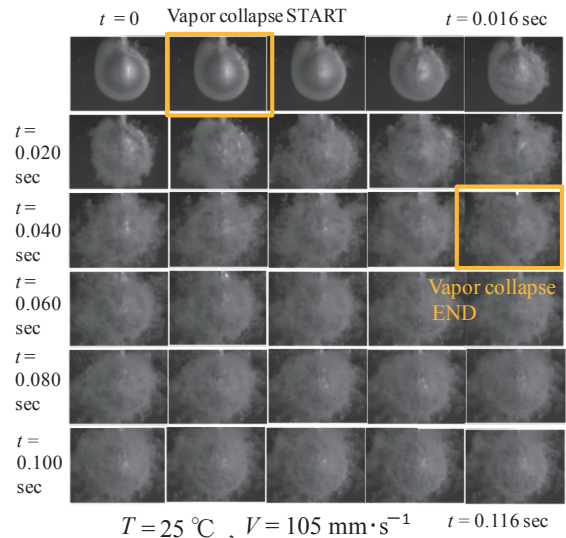


Fig. 11 Time series high speed video image of vapor collapse process during quenching into polymer aqueous solution in concentration of 10 vol.%.

いし、本格的な崩壊時間は水よりさらに短く、瞬時的な崩壊様相である。このような崩壊様相、崩壊時間の違いが、膜沸騰から遷移沸騰、核沸騰への移行時の沸騰曲線の違いとして現れているものと考えられる。

沸騰曲線におよぼすアーム回転停止角度の影響を Fig. 12 に示す。接線速度は $105 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ である。Fig. 12(a) の 10vol.% の場合は、蒸気膜崩壊前にアームが停止している (Fig. 7(a)) が、アーム回転停止角度が 90° の時に、蒸気膜崩壊開始の少し前にアームが停止しているので、アームの停止による強制対流の効果がなくなって熱流束が急減することが明瞭に現れている。Fig. 12(b) の 30vol.% の場合は 10vol.% より冷却が遅いために、アーム回転停止角度が 140° では蒸気膜崩壊の少し前にアームが停止しているので (Fig. 7(b))、この場合も、強制対流の効果がなくなって熱流束が急減することが明瞭に現れている。アーム停止角が 30° の場合は、初期の蒸気膜段階でアームが停止しているために、いずれの濃度においても沸騰曲線上で熱流束の急減現象は見られなかった。

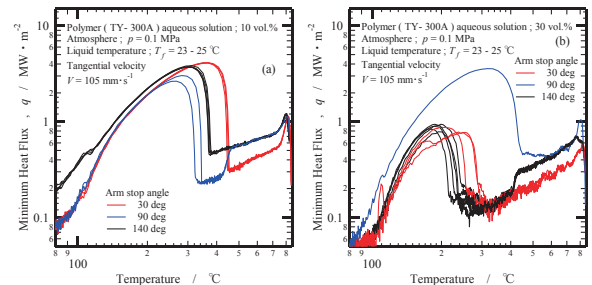


Fig. 12 Effect of the arm stop angle on the boiling curve.

3.3 ポリマー水溶液中での急冷時の MHF, MHF 点温度, CHF および CHF 点温度

接線速度が $105 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合で、濃度が 10vol.% と 30vol.% について、MHF, MHF 点温度, CHF および CHF 点温度を Fig. 13 と Fig. 14 に示す。MHF はいずれの濃度

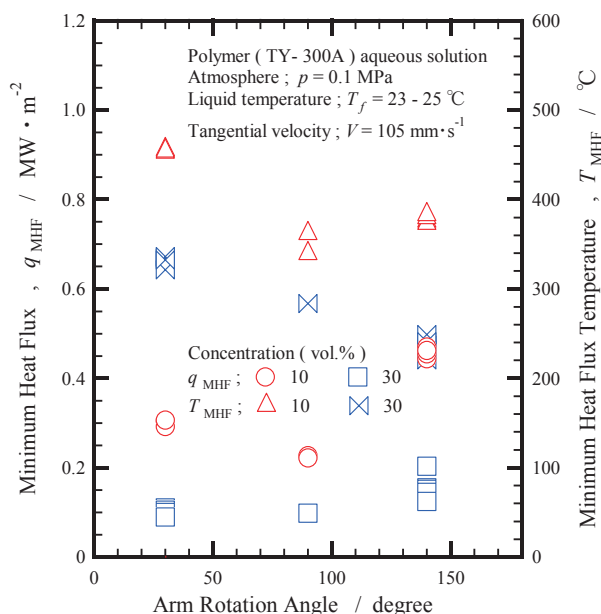


Fig. 13 Effects of the arm stop angle on the minimum heat flux and the minimum heat flux point temperature.

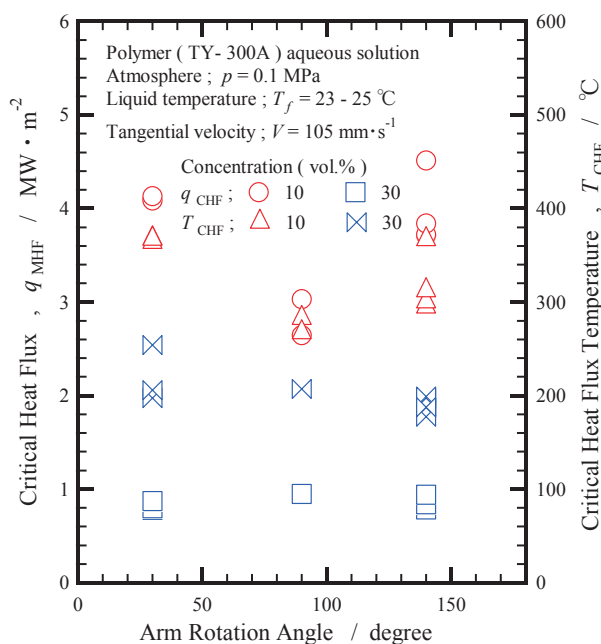


Fig. 14 Effects of the arm stop angle on the maximum(critical) heat flux and the critical heat flux point temperature.

においてもアーム回転停止角度が90°で最低値を示し、140°で最大となり、濃度が10vol.%でその傾向が顕著である。MHF点温度は濃度が10vol.%でMHFと同様の傾向を示すが、30vol.%ではアーム回転停止角度の増大に伴って単調に減少している。CHFとCHF点温度については、10vol.%においてアーム回転停止角度が90°で最低値を示し、140°で最大となった。30vol.%の場合は、CHFにアーム回転停止角度の依存性は見られないものの、CHF点温度はアーム回転停止角度の増大に伴って単調に減少している。冷却剤の冷却特性を評価するにあたってMHF点とCHF点に着目したが、ポリマー水溶液の濃度によってア

ーム回転停止角度の依存性が大きい場合があることがわかった。

3.4 特性温度と沸騰曲線の対応

JIS K2242で急冷開始温度である特性温度の求め方の一例として「接線交差法」を呈示している。接線交差法で求まる特性温度と沸騰曲線上のMHF点温度との対応関係をFig. 15とFig. 16に示す。Fig. 15に示した、水の場合では、Ptプローブの温度サンプリング周期が関係してMHF点をはっきりしないので、接線交差法で求めた特性温度とMHF点温度に若干のずれが生じている。しかし、Fig. 16のポリマー水溶液ではMHF点が明瞭に判別できており、

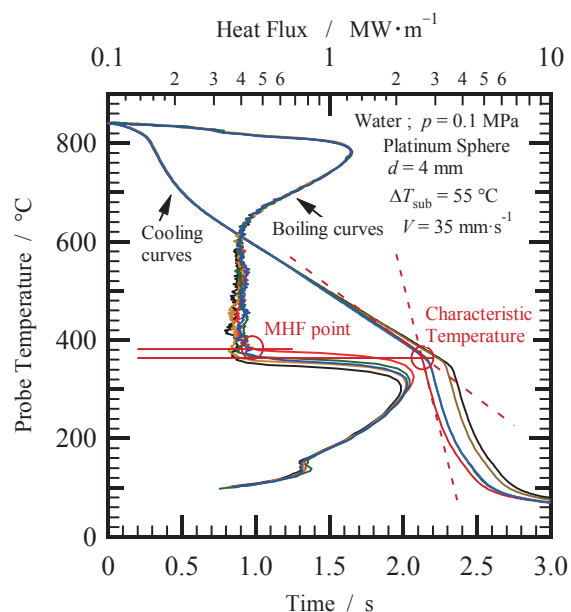


Fig. 15 Correspondence relation between the characteristic temperature and the minimum heat flux point temperature in water.

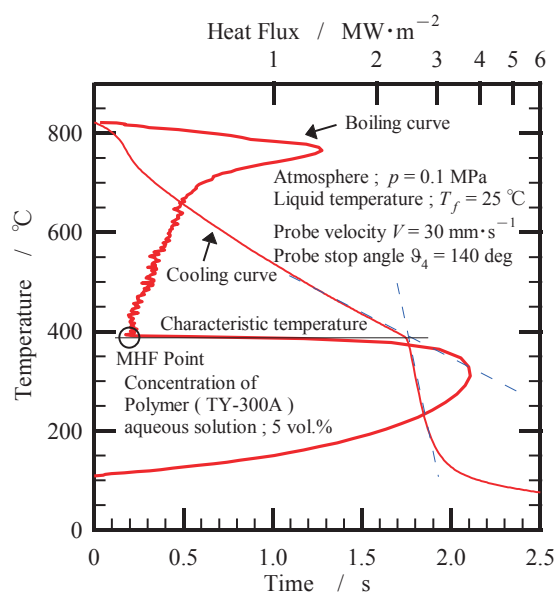


Fig. 16 Correspondence relation between the characteristic temperature and the minimum heat flux point temperature in polymer aqueous solution.

接線交差法で求めた特性温度とも良く一致するので、沸騰曲線から特性温度を求めやすい冷却剤と言える。ただし、アーム回転停止角度や接線速度によってはMHF点がかきりしない場合もあるので、MHF点温度と接線交差法で求めた特性温度が完全に一致するかは検討の余地がある。

4. おわりに

熱処理冷却剤としても使用されるポリマー水溶液の冷却特性を調べるのに最適な試験条件を明らかにするための知見を得ることを目的として、特に、膜沸騰極小熱流束 (Minimum Heat Flux : MHF) と限界熱流束 (Critical Heat Flux : CHF) に着目して、ポリマー水溶液の濃度、プローブ回転移動周速度、回転アーム停止角度の影響を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) ソリュブルクエンチ, TY-300A は、アーム回転停止のはるか手前で蒸気膜が崩壊する、あるいはまた、蒸気膜崩壊後のはるか後方でアームが停止する場合には、MHF点 が明瞭に判別できる沸騰曲線を示し、冷却曲線上で接線交差法によって求められる特性温度とMHF点温度が良い一致を示すことがわかった。
- (2) 濃度が5～30vol.%について、MHF点とCHF点におよぼす接線速度とアーム回転停止角度の影響を調べたが、濃度によってそれらの依存性が異なり、冷却特性を評価するための最適試験条件までは絞り込めなかった。
- (3) 高速度ビデオカメラにより、蒸気膜の崩壊の起点はPtパイプ溶接部であることが明確に観測できた。蒸気膜崩壊速度は60msec程度であり、瞬時に崩壊すると解釈できる速さであった。

冷却剤の冷却特性をより正確に把握するための試験条件の探索と、蒸気膜崩壊挙動の観察による伝熱工学的な新たな知見の獲得などが今後の課題である。

最後に、本研究は(有)アリモテック代表、有本享三

氏および高周波熱錬(株)、生田文昭氏に多大なご助言をいただき、実験においては本校電子制御工学科卒業研究生、東 優稀君のご協力を得た。また、大同化学工業(株)、辰己和夫氏にはポリマー水溶液をご提供いただいた。なお、本研究は、平成28年度科学研究費基盤研究(C)16K06139の補助を受けて行った。以上、ここに記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- (1) 日本規格協会：熱処理油剤, JIS K 2242(2012).
- (2) 有本享三：熱処理冷却剤に対する小型球プローブ・回転アーム式冷却特性試験システムの試作, 熱処理, 55-1, pp. 20-29, 2015.
- (3) K. Arimoto, F. Ikuta and H. Yokota : First Prototype of Rotary-Arm Type Test System Using a Small Ball Probe for Determination of Cooling Characteristics of Quenchants, ASTM International, 3-4, 2014.
- (4) K. Arimoto, M. Shimaoka and F. Ikuta : Developing Rotary-Arm Type Test System with a Small Platinum Ball Probe for Determination of Cooling Characteristics of Quenchants, Proceedings of the 29th ASM Heat Treating Society Conference, October 24-26, 2017, Columbus, Ohio, USA.
- (5) 島岡三義, 中村篤人：高温微小球の水中急冷時の沸騰熱伝達, 第54回日本伝熱シンポジウム講演論文集, No. 1840 (2017-5).
- (6) 島岡三義, 吉田大志, 生田文昭, 中村篤人：高温微小白金球の液体急冷時の冷却過程第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集, No. 2234 (2018-5).
- (7) 俵 信次：焼入用冷却剤の冷却能力に関する研究 (第1報), 鉄と鋼, 27-8(1941), 583.
- (8) 日本機械学会：伝熱工学資料 (改訂第4版), 養賢堂 (1986), 315.

Volume and commensurability of hyperbolic 3-orbifolds

Han YOSHIDA

We show a relationship between the commensurability and volume of hyperbolic 3-orbifolds. Let M_1 and M_2 be non-arithmetic orientable cusped hyperbolic 3-orbifolds. If $0 < |\text{vol}(M_1) - \text{vol}(M_2)| < v_0/4$, then M_1 and M_2 are incommensurable, where $v_0 = 1.0149 \dots$ is the volume of a regular ideal tetrahedron.

1. Introduction

Two hyperbolic 3-orbifolds are commensurable if they have a common cover, of finite degree. Two commensurable orbifolds have necessarily commensurable volumes. However, little is known about the relationship between the volume and commensurability of hyperbolic 3-orbifolds. In this paper, we show the following theorem.

Theorem 1. *Let M_1 and M_2 be non-arithmetic orientable cusped hyperbolic 3-orbifolds. If $0 < |\text{vol}(M_1) - \text{vol}(M_2)| < v_0/4$, then M_1 and M_2 are incommensurable, where $v_0 = 1.0149 \dots$ is the volume of a regular ideal tetrahedron.*

2. Preliminaries

In [1], C. Adams has determined six cusped orientable hyperbolic 3-orbifolds of volume less than $v_0/4$. W. Neumann and A. Reid have shown that these six orbifolds are arithmetic [6]. Thus we have the following proposition.

Proposition 1. *The volume of non-arithmetic orientable cusped hyperbolic 3-orbifold is larger than or equal to $v_0/4$*

For a nonarithmetic hyperbolic orbifold or manifold, G. Margulis has shown the following theorem [3].

Theorem 2. *Let M be a non-arithmetic hyperbolic 3-orbifold. Then there is an orbifold $C(M)$ which is finitely covered by any other manifold and orbifold in the commensurability class of M .*

3. Proof of Main Theorem

Suppose that M_1 and M_2 are commensurable. As M_1 and M_2 are non-arithmetic, they cover a common orientable orbifold C . Let $P_i : M_i \rightarrow C$ be an n_i -fold covering map. Then we get $\text{vol}(M_i) = n_i \text{vol}(C)$ ($i = 1, 2$). Since $|\text{vol}(M_1) - \text{vol}(M_2)| > 0$, $n_1 \neq n_2$. We

have $|\text{vol}(M_1) - \text{vol}(M_2)| = |n_1 \text{vol}(C) - n_2 \text{vol}(C)| = |n_1 - n_2| \text{vol}(C)$.

By Proposition 1, $\text{vol}(C) \geq v_0/4$. Therefore $|\text{vol}(M_1) - \text{vol}(M_2)| \geq v_0/4$. This contradicts the assumption.

4. Application

T. Marshall and G. Martin have shown that the volume of a closed orientable hyperbolic 3-orbifold is larger than or equal to v_1 , where $v_1 = 0.00390 \dots$ is the covolume of the Coxeter tetrahedral group [3; 5; 3] [5]. We can prove the following theorem in the same way as the proof of Theorem 1.

Theorem 3. *Let M_1 and M_2 be non-arithmetic orientable closed hyperbolic 3-orbifolds. If $0 < |\text{vol}(M_1) - \text{vol}(M_2)| < 0.039$, M_1 and M_2 are incommensurable.*

Corollary 2. *Let M be an n -cusped hyperbolic 3-manifold. Put $X(M)$ be a set of hyperbolic manifolds which is obtained by Dehn filling on the i -th cusp of M . Then $X(M)$ contains infinitely many commensurability classes.*

(Proof of Corollary 2.) Let $M(p, q)$ be a hyperbolic manifold obtained by doing a (p, q) -Dehn surgery on the i -th cusp ($i = 1, \dots, n$). Then we have $\text{vol}(M(p, q)) < \text{vol}(M)$. Let $K > 0$. Then there are at most finitely many arithmetic hyperbolic 3-manifolds with volume less than K . (See Theorem 11.2. in [4].) Thus at most finitely many Dehn surgeries on M can yield arithmetic hyperbolic manifolds.

By hyperbolic Dehn surgery Theorem, $\text{vol}(M(p, q)) \rightarrow \text{vol}(M)$ ($p^2 + q^2 \rightarrow \infty$). By Theorem 1 and 3, $X(M)$ contains infinitely many commensurability classes.

Remark: The above Corollary 2 is already proved in [2].

References

- [1] C. Adams, Non-compact hyperbolic 3-orbifolds of small volume, TOPOLOGY '90, Proceedings of the Research Semester in Low Dimensional Topology at Ohio State University, (1992), pp.1-16 De Gruyter Verlag
- [2] J. W. Anderson, Incommensurability criteria for Kleinian groups, Proceedings of the American Mathematical Society 130(1), pp. 253-258, (2002)
- [3] G. Margulis, Discrete Subgroups of Semi-simple Lie Groups, (1989), Ergeb. der Math. 17, Springer-Verlag
- [4] C. Maclachlan, A. Reid, The Arithmetic of Hyperbolic 3-Manifolds. (2003), Graduate Texts in Mathematics 219, Springer
- [5] T. Marshall, G. Martin, Minimal co-volume hyperbolic lattices, II: Simple torsion in a Kleinian group, Annals of Mathematics (176), pp.261-301 (2012)
- [6] W. Neumann, A. Reid, Notes on Adams' small volume orbifolds. In TOPOLOGY '90, Proceedings of the Research Semester in Low Dimensional Topology at Ohio State University. (1992), pp.311-314, De Gruyter Verlag

「東アフリカ沿岸地域経済圏」とグジャラート商人

藍澤 光晴

La zone économique sur la côte d’afrique de l’est et Les communautés commerçantes d’origine goudjarati

Mitsuharu AIZAWA

Dans cet article, j’éclaircirai les activités économiques des communautés commerçantes d’origine indienne dans *la zone économique sur la côte d’afrique de l’est* avant de tailler en petites pièces par les puissances occidentales.

La communauté indienne est présente à Madagascar depuis presque deux siècles. Elle représente 0.2% de la population. Il est quasi-impossible de trouver le recensement de cette communauté minoritaire. Toutefois, actuellement le nombre des indiens présents à Madagascar est à peu près de 40,000 dont 2.500 à 3,000 ayant des passeports indiens et 30,000 à 40,000 titulaires des passeports malgaches et français (un bon nombre sont des doubles nationalités), d’après le renseignement obtenu à l’Ambassade de l’Inde. On remarque que très peu ont une nationalité malgache et les indiennes pour cela depuis un certain temps.

D’après l’histoire, ces indiens sont des descendants des commerçants de l’État de Goujarat, situé au nord-ouest de l’Inde, au 19ème siècle. Ils sont très habiles, très économes et travailleurs. De plus, ils s’entaient mutuellement – bien que ça a un peu changé dernièrement – en créant des fonds de développement pour ceux qui sont financièrement en difficulté. Et enfin, ils ne se contentent pas des bénéfices mais ils investissent beaucoup pour élargir leurs champs d’action. Ce sont des vrais hommes d’affaires et des vrais battants.

Malgré le fait que les données statistiques sur les activités économiques des indiens ne sont pas disponibles pour le moment, les secteurs d’activités dans lesquels ils opèrent et les noms des quelques entreprises qu’ils possèdent parlent d’eux-même sur leur grande influence dans l’économie de Madagascar.

1. はじめにー「東アフリカ沿岸地域経済圏」の歴史的概観ー

マダガスカル在住のインド系ムスリムであるコージャ Khoja は、マダガスカル島に初めて移住してきた状況を、以下のように語り継いでいる¹。

1865年にザンジバルからヌシ・ベ Nosy-Bé にきたシェリフ・ジヴァ・スルティ Sherif Jiva Sourti²、モロウ・カンジェー Molou Kanjee、アリバイ・タワール Alibhay Tahwar の3人が、マダガスカルにきた最初のコージャだ。とく

に、アリバイ・タワール（ザンジバル生まれ）は、ザンジバルで金物やその他の商品一般を扱う商人、いわゆる金物屋 *Quincaillerie* として成功しており、さらなる販路拡大のためにマダガスカルに新たな拠点を築くために、「港でのカウンター業務係 *Comptoir*（仲買人・卸業者）」としてやってきた。その後彼は、ザンジバル、グジャラートとマダガスカル間の取引に従事し、ヌシ・ベの他にマジュンガ Majunga、メンティラヌ Maintirano、スアララ Soalala、ムルンダヴァ Morondava、ベルー Belo、チュレアール Tuléar へ、インドやザンジバルから持ってきた商品を卸すための、商店を次々と設立した。これらの商店には、彼の親戚

¹ ロッシャン・ジャミール氏による聞き取りより（2007年8月18日、アンタナナリヴ市内のマドラサの校長室にて）。

² なお再移住先での活動については、Charifou-Jewa の名前で、「昔からディエゴ・スアレスで食料品、織物 *tissus* やインドから輸入された商品を小売する商店を運営していた」[*Guides Annuaire de Madagascar* 1908 : 326] と記録されている。

をインドやザンジバルから呼び寄せて派遣した。1870年、義弟カミス・スマ Khamis Souma を、グジャラートのラナヴァヴからヌシ・ベに呼び寄せ、その後ムルンダヴァ、ベルー Bélo の支店長として派遣した。カミス・スマは現在のマドラサ校長モハメッド・ラーザ・カミス氏の祖父である。またアリバイ・タワーは、敬虔な十二イマームシーア派の信者であり、1870年ヌシ・ベにマダガスカルで最初の十二イマームシーア派のモスクを建設した。

筆者は、マダガスカルにおけるインド亜大陸西域グジャラート Gujarat 地方出身のグジャラート商人の社会経済活動の歴史について描写してきた。

19世紀から多くのグジャラート商人が、ザンジバルやグジャラート地方から商業活動のためにマダガスカルへ移住し始め、フランスの植民地支配がマダガスカルにおいて進む過程で、宗主国フランスと連携しつつ経済規模の拡大に成功したことを描写してきた [藍澤 2016 : 223-237]。その結果 1960年フランスから独立したマダガスカルですでに確固たる経済的地位を築いていたことを明らかにした [藍澤 2010 : 135-148]。

そこで本研究では、15世紀末のポルトガルによる環インド洋交易への侵入以降から、19世紀のイギリス支配が東アフリカ沿岸地域で確立し始める時期まで、グジャラート商人が、重要な存在であり続けたことを説明する。なぜなら、19世紀のマダガスカルへのグジャラート商人の移住は、東アフリカ沿岸地域、さらに環インド洋経済圏における政治・経済状況を射程に考察しなければ理解できないからである。

15世紀末から、ポルトガルによる環インド洋世界への侵入は、それ以前、すなわちグジャラート商人が、東アフリカ沿岸地域で展開していた商業ネットワークに大きな

打撃を与えた。近代以前、キルワ Kilwa を中心に繁栄していた東アフリカ沿岸地域の海洋都市国家群 City-States は、ポルトガルによって大きなダメージを受けたのである。

しかし、ポルトガルのアジア支配は、おもにグジャラート商人からもたらされる関税によって支えられていた。ポルトガルの環インド洋経済圏の支配の確立とグジャラート商人による交易の繁栄は、コインの表と裏の関係にあったのである。

ポルトガルの後にオマーン王が、東アフリカ沿岸地域において覇権を握るのだが、しかしオマーン王の経済的基盤も、やはりグジャラート商人によって支えられており、グジャラート商人の経済活動は、より一層の繁栄の時期に入った。イギリスの支配が強まりつつあった 19世紀中葉以降も、グジャラート商人の経済活動は活発化していた。

13世紀から 14世紀にかけての環インド洋文明圏の基本構造は、ポルトガルが本格的に進出する 16世紀初頭まで、大きく変わらなかった。

それでは、インド洋世界の西部に位置する東アフリカ沿岸地域の歴史的概念を、以下先行研究をレビューしながら照射する。

ジャネット・L・アブールゴドの『ヨーロッパ覇権以前』 [Abu-Lughod 1989 ; 佐藤他訳 2001] は、13世紀以前から 16世紀にかけての環インド洋文明圏を考察する際、きわめて重要な文献である。アブールゴドによれば、「世界システム」は、ウォーラステインやブローデルが主張するより、はるか以前から、つまり遅くとも 13世紀後半には、すでに完成しており、16世紀までヨーロッパ勢力は、このシステムに加わるきわめて小さな参加者にすぎなかったことが理解できる。このシステムには、覇権勢力は存在しておらず、複数の「中核」が存在しており、それぞれが緩やかな「国際関係」を築いていた点に特徴がある。さらにフランクは、環インド洋圏を、アブールゴドとチャウデュリ [Chaudhuri 1990] を引用しつつ、13世紀には、単一のアフロユーラシア世界システムとして存在しており、そのなかは、互いにリンクした八つの都市中心的地域が統合されており、この相互にリンクした八つの地域は、互いに関係づけられ、さらにかみ合わされた三つのサブシステムに分けることができる [フランク 2000 : 134] と述べている。

図2は、環インド洋³文明圏の三つのサブシステムを図式化したのである。

回路 I で活動していたのは、おもにイスラム商人とヒンドゥーの船主であり、グジャラート商人の活躍する東アフリカ沿岸地域であり、本研究でもおもに考察する経済圏である。

さらに、回路 I の東アフリカ沿岸地域は、バントゥー諸語を基盤にインド・アラブ文化の発展、象牙や奴隷交易の発達、グジャラート商人の活躍などの共通の基盤が見られ、1250年から 1500年前後まで、とくに繁栄していた。現在のソマリアにあたるモガディシュー Mogadishu から現在のモザンビークのソファアラ Sofala までの約 2,000 マイルにおよび、いくつかの都市国家が存在していた。

回路 I の東アフリカ沿岸地域との交易は、季節風とい



図1 マダガスカルのおもな民族と地名
筆者作成

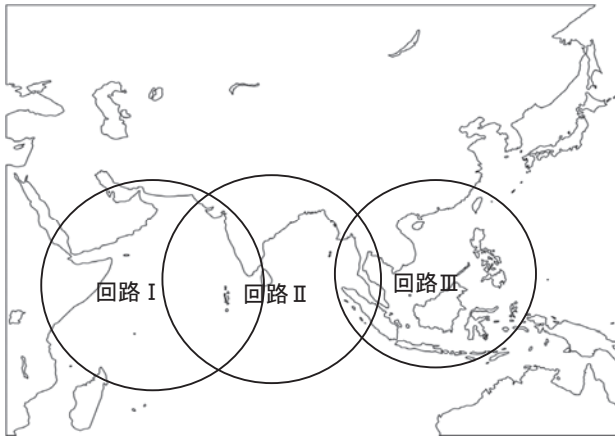


図2 環インド洋圏の三つの回路と東アフリカ沿岸地域経済圏
(出所) アブールゴド、佐藤他訳『ヨーロッパ覇権以前(下)』岩波書店、2001年、p.51. より作成。

う自然環境によって支えられていた。11月初旬から3月にかけて、インド・ペルシャ湾からマダガスカルに至るまで、北東からのモンスーンが吹き、逆に4月から9月にかけて、東部アフリカからインドやペルシャ湾方向にモンスーンが吹き、年間を通じて異なる風向きのモンスーンが、東アフリカ沿岸部とインド亜大陸を結びつけていた。25日足らずで、2,200マイルもの距離をダウ船⁴で航海が可能であり[Nicholls 1971: 74]、筆者がかつてマダガスカルでインタビューしたアスガール・バルダイ氏 Asgar Barday によると、風が強ければ、早くても3週間、遅くても2ヶ月でチュレール Tuléar とグジャラートのポルバンダル Porbandar を結んでいたという。

家島は、ダウ船によるインド洋海域ネットワークが、7世紀から8世紀には、ペルシャ湾岸からアラビア海はもとより、東アフリカ沿岸地域から東は中国の光州や揚州の諸港にまで拡大していたと説明している[家島 1992: 45]。さらに、イスラム教の成立と拡大が、ムスリムによるインド洋沿岸地域間⁵、とくに14世紀までにはインド洋世界西部地域の交易の活性化を促した。要するに、東アフリカ沿岸地域では、15世紀末に、ポルトガルが進入する以前から、

季節風による自然現象に大きく依存した海上交易が、2000年にもおよぶ長期の歴史を持つネットワークが形成されていたのである[Abu-Lughod 1989: 251-253; 家島 2006: 102-103]。

このように自然環境に大きく依存した環インド経済圏に関して長島は、グジャラートのカンバヤ Cambay を中心に、西は地中海へと繋がるアデン Aden、東はマラッカ Malacca からなる貿易中心港 entrepot が、それぞれいくつかの周辺を抱えていたと分析している。とくに、アデン=カンバヤ間の航路は商業的に重要で、これらの地域ではムスリム商人がおもに活躍しており、東アフリカ沿岸地域から金、象牙、奴隷を、さらにアデンやその周辺地域からの馬をカンバヤに輸送し、カンバヤからは綿布、ガラス玉(ビーズ、彩色ガラス)、藍、真珠、コーチンの周辺からの胡椒、マラッカから運ばれてきたクロブ、米、小麦、白檀などを持ち帰った。環インド洋交易で、とくに重要な商品が織物であり、とりわけブルーの綿織物(藍染綿布)、米、胡椒や馬であったと詳細に述べている[長島 1976]。

さらにピアソンは、環インド洋交易で中心的な役割を担っていたのは、グジャラート商人であり、とくにアデン=グジャラート=マラッカという環インド洋交易の大動脈では、グジャラートのインドムスリムの活躍が目立っていたと指摘した[Pearson 1976: 10-14]。東アフリカ沿岸地域にまで、グジャラート商人は、良質なインド産織物を携えて交易に従事しており、環インド経済圏における交易、とくに東アフリカ沿岸地域の交易は、おもにグジャラート商人によって支えられていたのである。

そもそもバントゥー系諸語を基層にアラブ・インド文化が融合した東アフリカ沿岸地域は、ロビンソンによれば、1250年から1500年前後まで、とくに繁栄しており、現在のソマリアにあたるモガディシュから現在のモザンビークのソファールまでの約2,000マイルにおよび、いくつかの都市国家が存在していたという[Robinson 2004: 32-33]。

具体的に吉国は、12世紀にキルワを中心に成立したイスラム王朝であるシラーズ朝は、ザンベジ Zambezi 川上流(グレートジバブエ Great Zimbabwe)で、採掘された金や

³「地理学上のインド洋は、インド亜大陸が大きく南に突き出ていることによって、東側のインド洋(ベンガル湾を中心とする)と西側のインド洋(ペルシャ湾、紅海、アラビア海を含む)に分かれる。その東側を区分するマライ半島、スマトラ島、スンダ列島から、西側を区分するアフリカ大陸まで6,000~9,000キロの隔たりがあり、南側は南極大陸までの限りなく広大な海洋がつづく。マダガスカルとスリランカの大島、ソコトラ、コモル(コモロ)、セーシェル、モーリシャス、マルディヴ、ラッカディヴ(ラクシャディーバ)、ニコバル、アンダマンなどの島嶼群をのぞいて、全般的に島は少ない。一方、歴史的世界としてのインド洋は、以上の海域に加えて太平洋の附属海としての南シナ海、ジャワ海、スルー海、セレベス海とバンダ海などの東南アジア島嶼部と南中国にまたがる海域が含まれる[家島 1993: 11-12]。またトメ・ピレスによると「とくにカンバヤは二本の腕をのぼし、右手でアデンを握り、一方の手でマラカを握っている」と形容されるほど重要な港であった[ピレス、生田他訳 1966: 114]。

⁴ダウ船についての詳細な記述は、[家島 1990]を参照のこと。英語でダウと一般に称されている木造帆船は、本来は船種ごとに名称が異なっている。また、グジャラートでも木造帆船の製造が盛んであった。現在でも、湾岸アラビア諸国の造船所では、グジャラート出身のイスラム教徒が働いているという。

⁵イスラム商人による環インド洋での交易は、環インド洋地域の多くを、イスラム教へと変えていった。マダガスカルへのイスラム教のさまざまな影響についての研究としては、[Dez 1967: 1-38]を参照のこと。なお、マダガスカル沿岸部の人びとには、現在も豚肉を食することへの禁忌や暦へのイスラム教の影響が見受けられる。

象牙を独占的に輸出する強力な都市国家として成長した様子を描写している [吉国 1999]。

13世紀には、アデンからマダガスカルまでのモンスーン航海が、一回の航海で結ばれるようになると、東アフリカ沿岸地域は、より活発な「域内」交易で繁栄していた [家島 1993 : 328-344]。ポルトガルによる本格的な侵入以前、東アフリカ沿岸地域は、バントゥー諸語を基盤にインド・アラブ文化の発展、象牙や奴隷交易の発達、グジャラート商人の活躍などの共通の基盤が見られた [Bouchon and Lombard 1987 : 56]。さらに、いくつかの都市国家がゆるやかに結ばれ、「東アフリカ沿岸地域経済圏」を形成していたのである。

以上が、西洋列強による本格的な支配が始まる以前の東アフリカ沿岸地域経済圏、ひいては環インド洋経済圏の基本構造であるが、ポルトガルが本格的に進出する16世紀初頭まで、この基本構造は大きく変わらなかった。なぜならば、環インド洋経済圏は、外来の商人や船舶に対して開放的で、取引は友好的に行われており [家島 2006 : 398]、参加者の一人がシステム全体を支配するようなことはなく、すべての参加者は、共存 co-existence していたからである [Abu-Lughod 1989 : 361-362]。

本稿では、第一に環インド洋世界の歴史を明らかにし、第二に東アフリカ沿岸地域におけるグジャラート商人の役割を描き、第三にマダガスカルを含めた東アフリカ沿岸地域は、おもにグジャラート商人によって支えられていたことを明らかにする。そこで具体的には、先行研究で描写されている歴史的概念としての東アフリカ沿岸地域経済圏が、西洋列強により支配を受けつつある過程におけるグジャラート商人の経済活動について描写する。

2. グジャラート商人と東アフリカ沿岸地域経済圏—ザンジバルの台頭と東アフリカ沿岸地域経済圏の再編—

2.1 グジャラート商人とポルトガル

グジャラート商人は、西洋列強の進出以前、東アフリカの金や象牙とグジャラート産の綿布やガラス玉の交易に従事していた [Alpers 1976 : 24]。

グジャラート商人は、おもにヒンドゥーのパニアン Banian⁶ と十二イマームシーア派のコージャ Khoja から構成されている。コージャは、内陸のプランテーション経営者であるオマーン＝アラブ人と貿易商のパニアンとその間を仲介するロハナ Lohana のジャーティ jati に由来する「港でのカウンター業務係 Comptoir (仲買人・卸業者)」として経済活動に従事していた [藍澤 2010 : 136]。グジャラート商人は、それぞれ環インド洋交易において、仲買人・卸業者＝コージャ、輸出入業者＝パニアンの協力関係によって成立していたのである。また、コージャは、金融業者でもあったパニアンから融資された前借金を携え、港で商品の仕入れと卸業に従事し [Landen 1967 : 142]、経済的にも、ジャーティでも、パニアンより下位に位置づけられて

いた。

このような棲み分けのもとグジャラート商人の積極的な活動により、モザンビーク＝グジャラート間の交易の規模は、1639年10月期のグジャラートのディウ Diu からモザンビークへは、インド産の布 24万 kg (1000バレル)、モザンビークからは、象牙 11万 3400ルピー⁷分に上っていた [Pearson 1998 : 242-243]。

一方、14世紀には、マダガスカルにおける東アフリカ沿岸地域における交易の拠点としては、ムスリム化した北西部のマジュンガ Majunga とヴヘマール Vohémar がすでに発展していた。また、1500年までにはマダガスカルとコモロ諸島 Comoros は、キルワに米や凍石製の壺などを供給する周縁地域として発展していた [Newitt 1987 : 206]。その交易に従事していた北西アフリカのムーア人であり、マダガスカルにおいても見られていた [Vérin 1976 : 73-82] という。

16世紀まで、東アフリカ沿岸地域経済圏は、環インド洋経済圏においてとりわけて経済的に重要な地位を占めていたわけではなかった。エドワード・オルペアーズの試算によると、ポルトガルが、環インド洋経済圏へ介入し始めた15世紀末、グジャラートから東アフリカ沿岸地域向けの輸出は、環インド洋交易の全体の約4%にすぎなかった [Alpers 1976 : 22-44] という。それにもかかわらず、地理的に東アフリカ沿岸地域は、ポルトガルやそれ以降のイギリスとフランスなどのヨーロッパ勢力にとって、アジアへと続く重要なルート上にあることは否定できないだろう。

東アフリカ沿岸地域経済圏は、15世紀中葉になるとキルワの政治・経済力に翳りが見え始めた上に、モンバサ Mombassa やモガディシュ Mogadishu などの都市国家間の対立などが重なった [家島 1993 : 340]。まさにその混乱に乗じ、ポルトガルは東アフリカ沿岸地域の都市国家群を占領した。キルワやモンバサなどは、1505年にポルトガルの海軍力のまねに占領を許したのである [マトベイエフ 1992 : 694]。とくに、キルワは徹底的に破壊された。その後、ポルトガルは、1507年、ホルムズ Hormuz とソコトラ Socotra、1509年には、グジャラートのディウと次々に侵略し、東アフリカ沿岸地域においてゆるやかに結ばれていた海洋都市国家群は崩壊した。環インド洋文明圏は、ポルトガルのアジア帝国である、いわゆる「インドシア州 Estado da India」⁸の形成を許したのである。

なお、ポルトガルがグジャラートのディウを比較的容易に攻略できたのは、以下のような理由である。「グジャラート国王がバッセインやディウをポルトガルに割譲したのは、グジャラート船の航海の安全の確保のためと、ムガル皇帝フマーユーンの攻撃からの防御のためにポルトガルの援助を得るため」であり、またグジャラート商人は、「ヨーロッパ船の海軍力の圧倒的優越を認識していた」ためである [長島 1984 : 92-93]。

⁶ パニアンは「ソーニー Soni」というジャーティに属する集団である。

⁷ ピアソンは、1ルピー＝200リアル(ポルトガル)としており、さらに当時の1ルピーは、現在の4米ドル(1970年現在)に相当すると試算している [ピアソン 1984 : iv - v]。つまり当時の1ルピーは、1440円(1970年現在)と考えられる。

しかしながら、ポルトガルの植民地支配にもかかわらず、グジャラート商人の活動が衰退することはなかった。福田によると、ポルトガルは、当初グジャラートなどの在地商人の交易活動に軍事攻撃を仕掛けたが、ポルトガルの海洋支配を認めた在地商人が関税を払い、香辛料や武器の原料となる鉄などを運ばないなどとした条件を守れば、交易を行うことを許可した。さらに、このような規制も時間の経過とともに次第に緩くなり、17世紀には、再びグジャラート商人による取引量は増加に転じた〔福田 2000 : 118-119〕。

一方、17世紀の東アフリカ沿岸地域経済圏では、ポルトガルによるザンベジ川上流のテテ Tete での金採掘活動が活発化していた。ちなみに、ザンベジ川上流で採掘された金輸出量は、1585年に574kg、1591年に716kg、17世紀には1tを超え、次第にその採掘量は増加した〔増田 1998 : 490〕。16世紀のヨーロッパ諸国は、12万tから15万tの香料を輸入していたが、その対価として、アフリカから収奪した150tの金で支払った〔ウォーラーズティン 1981 : 267〕という。つまり、ヨーロッパがアフリカで採掘した金は、アジア産の香料の対価として、アジアに飲み込まれていたのである。

そればかりか、ポルトガルの金採掘のための活動資金や「インディア州」の維持費は、おもに、グジャラート商人からもたらされる関税によって賄われていた。

グジャラートの関税収入は、グジャラート商人が16世紀中葉よりポルトガルとの関係を強化し、おもにグジャラートやゴア＝モザンビーク間での綿布と象牙の交易によって、もたらされたものであった。ポルトガルは、東アフリカ沿岸地域＝グジャラート、ゴア間の交易を支配しようと試みたが、グジャラート商人の交易活動のまえに、後退して行くことになった。つまり、ポルトガルのテテでの金採掘の資本と「インディア州」の維持費は、グジャラート商人の東アフリカ沿岸地域経済圏での交易から得られる関税収入に大きく依存していたのである。

グジャラートの関税収入だけで、アジアにおけるポルトガルのアジア帝国が絶頂にあった1586年から1587年にかけて、グジャラートでの関税収入を除くアジア帝国の歳入全体のほぼ3倍近くに達していた〔ピアスン 1984 : 176〕。したがって、グジャラートからの関税収入のために、ポルトガルは、グジャラート商人に対し、東アフリカ沿岸地域＝グジャラート間の交易の独占を容認せざるをえなかった。事実、1686年、モザンビークのポルトガル人長官は貿易権独占を放棄し、グジャラート産綿布の輸入権が、結果としてグジャラート商人に売却されることになったのである。

グジャラート商人が、環インド洋世界各地で世界商品として、グジャラート産綿布の販売を可能にしたのは、17世紀のグジャラートにおいて商品経済が発展しており、グジャラート商人による商業・金融組織も確立されており、遠隔地送金的手段として手形制度が、すでに発達していたからである〔小谷 1969 : 197-226〕。

18世紀初頭まで、東アフリカ沿岸地域経済圏におけるグジャラート商人の経済活動は、再び活発になっていた〔Pearson 1998 : 227-249〕。ポルトガルは、環インド洋を完全に掌握できずに、17世紀には急速にその勢力を衰退させていった。ポルトガルにとって、インド洋を支配するにはあまりにも広すぎた。その最盛期といわれる16世紀後半にさえ、植民地支配は十分に貫徹しえず、既存のグジャラート商人などの商業ネットワークの統制に失敗し、その後急速に破綻することになった〔富永 1987 : 38-39〕。

最終的に、「インディア州」の経営は、利益をもたらさず、ポルトガル政府の財政収入は赤字であった〔カーティン 2002 : 202〕。グジャラートから莫大な関税収入があったにもかかわらず、最終的に、「インディア州」は、1564年には12万5千ルピーの赤字を抱えるまでになったのである〔ピアスン 1984 : 88〕。

やがてポルトガルは、オマーンのイスラム在地勢力の台頭によって東部アフリカ沿岸地域、とくにモンバサからデルガード岬 Delgado までの支配権を失い、ザンベジ川流域を除いて、撤退をせざるをえなくなる。ポルトガル撤退後、東アフリカ沿岸地域経済圏の交易拠点は、ポルトガルによって破壊された都市キルワから、新興都市であるモンバサ、マスカット Masqat、ザンジバルへと移っていく。これは、東アフリカ沿岸地域経済圏における商業ネットワークの変化をも意味していた。オマーンのムスリム在地王権の確立で、マスカットは、ポルトガルの支配からオマーンで確立した王朝の手に移り、グジャラート商人もまた、オマーン王権のもとで経済活動を続けることになる。

2.2 ザンジバルの覇権の確立とグジャラート商人

ポルトガル勢力の環インド洋文明圏からの撤退は、その後のイギリス、オランダ、フランスの新興勢力の台頭を意味していた。とくにイギリスの進出によって、グジャラートのカンバヤに代わり、マドラスやボンベイが新たな交易都市として成立した。ポルトガルとその後のオランダ、イギリス、フランスの環インド洋世界への侵入は、グジャラート商人にとって以下のような意味を持っていた。

17世紀後半から、イギリス、オランダをはじめとする西洋列強のアジアにおける軍事的・経済的な優位性が、グジャラート商人によって結ばれていた自由交易圏として

⁸ ポルトガルのアジア経済の掌握は、東アフリカから東シナ海の日本までの広大な海域に及んでいた。ポルトガル商人は、インド洋から南シナ海までを重要点におさえ、制海権を握り、地域間交易で、主導的な役割を演じた。1590年代、オランダとイギリスが、登場するまで、アジア＝ヨーロッパ間の貿易を独占した。ポルトガルのアジア帝国である、いわゆる「インディア州 Estado da India」を形成したのである。「インディア州」は、領土国家ではなく、要塞をつなぐ貿易航路と、それを保障する海上軍勢力の体系にすぎなかった。〔増田 1998a : 31-32〕。「インディア州」の本部は、形式上リスボンに置かれていたが、実際には、ゴア総督が権限を持っていた。アフリカのザンベジ川流域から中国のマカオに至るまで、40もの要塞やフェイトリアが築かれていた〔カーティン 2002 : 204〕。

の環インド洋文明圏に、新しい海上支配と市場独占の原理を持ち込むことで達成されていった。したがって、その後の環インド洋文明圏の歴史は、グジャラート商人によって形成されていた伝統的な交易ネットワークが分断し、従来の都市機能が破壊したこと、そして新しく成立した港市（マニラ、バタビア、カルカッタ、マドラス、ボンベイなど）と西ヨーロッパ中心の世界システムとが一つの強力な連関軸をもつことで、環インド洋文明圏の内的統合関係が大きく変化させられていく過程でもあった〔家島 1992 : 47〕。

しかしながら、東アフリカ沿岸地域経済圏の覇権は、ポルトガル、オマーン、イギリスへと移っていくが、これらの覇権の推移の裏には、いずれもグジャラート商人の積極的な関与が見られた。たしかに、インド亜大陸や東アフリカ沿岸地域における拠点貿易港は、グジャラートからボンベイ、キルワからモザンビーク、ザンジバルへと移った。そのこと自体は、ヨーロッパ列強の環インド洋文明圏への侵入の影響によるものである。それにもかかわらず、グジャラート商人は時代の流れをたくみに把握しながら、東アフリカ沿岸地域経済圏で大きな影響力を行使し続けるのである。

グジャラート商人は、ポルトガルが環インド洋から撤退した後、新たなパートナーを探し始めていた。ボンベイへ移住したグジャラート商人は、イギリスのボンベイでの支配体制を支え、シンド *Sindh* に移住したものは、オマーンのブー・サイド朝の東アフリカ沿岸地域経済圏における勢力の拡大を支えた〔長島 2000 : 162〕。

オマーンでは、イスラムの一派イバード派のヤアーリバ朝が、1620年代に成立した。1650年にヤアーリバ朝は、マスカットをポルトガルから奪還し、その後もポルトガルの拠点を攻撃した。その結果、ポルトガルの東アフリカ沿岸地域の拠点の一つであったモンバサはオマーン勢力の支配下に入り、18世紀初頭、モザンビーク以北の沿岸部地域ではオマーン勢力が強まり、ザンジバルもオマーンの勢力下に入り、東アフリカ沿岸地域経済圏からポルトガル勢力を排除した。

18世紀半ばになると、ヤアーリバ朝の後を受けて、ブー・サイド朝が東アフリカ沿岸地域経済圏で成立した。1806年にサイド・ビン・スルターン *Said bin Sultan* が在位すると、東アフリカ沿岸地域への進出⁹を明確に打ち出し、マスカットと同様にザンジバルも王都とし、オマーン勢力が東アフリカ沿岸地域経済圏で覇権を確立した。

ザンジバルでのサイドの支配は、関税制度を整備することから始まった。サイドは、関税の徴収を商人に委託する「関税徴収請負制度」を導入した。関税徴収請負制度は、東アフリカ沿岸地域一帯で、課税制度の「ムリマ *Mrima*」を整備することから始められた。ムリマとは、対岸の東アフリカ沿岸地域での取引において、サイドが

関税率を独占的に決定する権利のことである。これにより、サイドはアメリカとヨーロッパとの取引を独占し、自らの許可なく取引を行うことを禁止した。さらにサイドは、ザンジバルでの輸出入関税を引き下げ、ヨーロッパ人、アメリカ人貿易商の積極的な誘致を行った〔Nicholls 1971 : 80-81〕。しかし、この関税徴収請負は、実質上シヴジ族により独占されていった。当初、サイドが整えた関税徴収の請負は、入札によって決定されていたが、1830年代半ばには、グジャラート商人のパニアンが、独占して請け負うことになったのである〔鈴木 2008 : 67〕。

関税徴収請負には、おもにマスカットからサイドとともに移住したグジャラート商人、とりわけパニアンのシヴジ・トープン *Shivji Topan* が独占的に担うようになっていった。このような状況は、サイドにとって、グジャラートのパニアンが重要な金庫番であったと同時に、サイドの財布がグジャラート商人によって握られていたことを意味している〔富永 2001 : 69-83〕。サイドは巨額の富を手に入れたが、しかしその富の多くは、彼がパニアンから受け取った請負金であった。彼がパニアンから受け取った請負金は、1837年には15万米ドル、1856年には22万米ドルに上り、彼の年間収入の9割以上に相当する〔富永 1990 : 299-230〕。

さらに1839年、ザンジバルは、イギリスと通商条約を締結した。折しもこの時期は、1858年の「インド統治改善法」によってイギリスのインド植民地が成立してゆく時代でもあり、グジャラートもまたイギリス支配体制に組み込まれ、グジャラート商人の法的地位は、大英帝国臣民となっていた〔富永 2001 : 115 ; 篠田 1994 : 209〕。したがって、大英帝国臣民のグジャラート商人の活動は、イギリスの権力を背景に、東アフリカ沿岸地域経済圏において活発化していた。その数は、6,000人にまで上り¹⁰〔Beachey 1995 : 365〕、イギリスの報告書によれば、ザンジバルのコージャの数は、1840年頃の165家族から、1870年には703家族の2,558人にまでなり〔福田 1997 : 239〕、コージャは、東アフリカ沿岸地域経済圏において大きな影響力を有する数にまで増加していた。

19世紀中葉は、イギリスの支配がボンベイとザンジバルで確立されると、東アフリカ沿岸地域とインドの交易の中心は、ザンジバル＝ボンベイ間の直接交易へとシフトした〔富永 1996 : 40-41〕。図2によると、1850年頃を境に、オマーン王による関税収入は、ザンジバルのそれがマスカットのそれをはるかに凌ぎ、増大していく様子が理解できる。これは、東部アフリカ海洋文明圏における交易の中心が、マスカットからザンジバルへと移行したことを示唆している。

東アフリカ沿岸地域とインドとの交易の主流は、16世紀のポルトガル覇権のもとのマスカットやホルムズ＝グジャラート＝モザンビークから、19世紀前半には、オ

⁹ オマーン王サイド・ビン・スルターンが、東アフリカへ軍事侵攻した背景については〔富永 1996 : 38-50〕を参照のこと。

¹⁰ イギリス海軍による報告によると、19世紀初頭、グジャラート商人の数は、ごく僅かに過ぎなかった。しかし、1830年代半ばには、200人程度、70年代半ばには、4,000人程度、19世紀末には、8,000人を超えるグジャラート商人が東アフリカ沿岸地域一帯に居住していたという〔鈴木 2008 : 62-64〕

マーン、イギリス覇権のもとでマスカット＝ボンベイ＝ザンジバルを経て、19世紀中葉以降は、ボンベイ＝ザンジバル間の直接交易へと移行した。

また19世紀中葉以降、コージャは、アメリカへの輸出業においても中心的役割を担っていくことにもなる。マスカットからアメリカには、おもにナツメヤシを、ザンジバルからアメリカには、象牙とクローブを輸出していた。輸入に関しても、アメリカ産綿布の輸入が増加し、その量はインド産綿布をはるかに凌ぐものであった。さらに、コージャの経済活動は活発になっていたのである。

東アフリカ沿岸地域経済圏の覇権は、ポルトガル、オマーン、イギリスへと移った。しかし、これらの覇権の裏には、グジャラート商人の積極的な活動が見られた。たしかに、インド亜大陸や東アフリカ沿岸地域における拠点貿易港は、グジャラートからボンベイ、キルワからモザンビーク、ザンジバルへと移った。そのこと自体は、ヨーロッパ列強の環インド洋文明圏への侵入の影響によるものである。しかし、それにもかかわらず、グジャラート商人は戦略的に時代の流れをたくみに把握しながら、すなわちポルトガルの「インディアナ州」とオマーン王のサイド・ビン・スルターンに歳入を実質的に支え、大英帝国臣民としても東アフリカ沿岸地域経済圏で大きな影響力を行使し続けた。

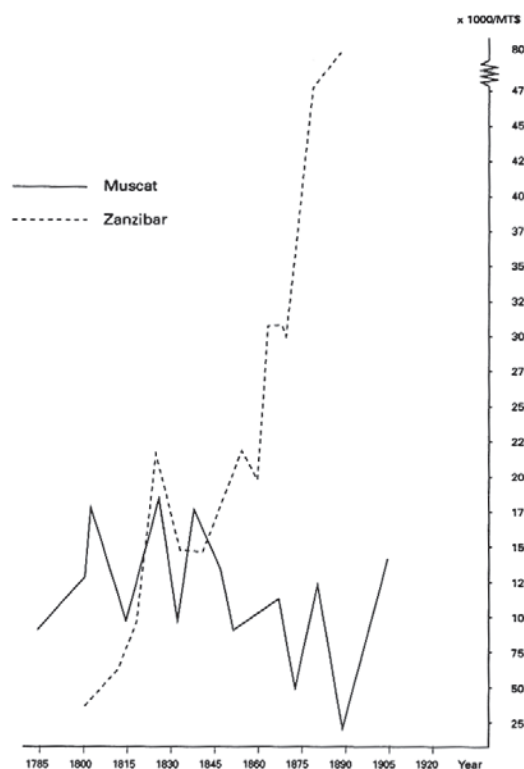


図3 ブー・サイド朝のマスカットおよびザンジバルにおける関税収入額

(出所) Bhacker, M. Reda, *Trade and Empire in Muscat and Zanzibar: Roots of British Domination*, Routledge, London and New York, 1992, p.77.

(注) MTドルとは18世紀から19世紀、中東、アフリカ地域で広く流通していた貨幣でオーストリア銀貨のマリーア・テレージア・ドルのこと。ちなみに1ポンド=4.75 MT\$ [富永 2001: 70] もしくは1 MT\$ = 2.11 ルピー。

2.3 コージャの台頭

19世紀初頭、グジャラート商人の商業ネットワークは、ザンジバル、ナタール Natal、ケープ Cap、モザンビーク Mozambique、インド北西部、マダガスカル北西海岸部から東南アジア、日本までと拡張傾向にあった [Chambell 2005; 大石 2003; 北川 1997; 富永 1996]。ザンジバルにおけるオマーン王の支配体制の確立で、1820年代からパニアン商業ネットワークは、とくに拡大傾向にあり、ペルシャ湾＝アラビア海＝東アフリカ南部まで拡大した。グジャラート商人は、1860年代には、マダガスカルを含む東アフリカ沿岸地域経済圏から紅海までの広範に、仲介業者 middleman、金融業者や船主として、環インド洋交易を支配する立場にあった。

すでに述べた通り、グジャラート商人は、オマーン王のもと、マスカットですでに存在していたムスリムであるコージャとヒンドゥーであるパニアンとで役割を分担していた。

ザンジバルにおいても、この役割分担は適用されていた。コージャは、オマーン＝アラブ人からクローブ、なつめやし、象牙、奴隷やゴムなどを入手し、それらをパニアンに卸すという役割を担っており、マスカットだけにとどまらず東アフリカ沿岸地域経済圏全域においても、この役割で経済活動に従事していた [富永 1987: 43-47]。ザンジバル在住のコージャは、1840年頃の165家族から1870年まで、703家族の2,558人へと急激に増加し [福田 1997: 239]、東アフリカ沿岸地域経済圏においてその勢力を強めた。

しかしながら、アラビア半島への奴隷輸出に大きく介入していたオマーン＝アラブ人は、ヨーロッパ諸国による相次ぐ奴隷貿易の廃止の余波を受けて、東アフリカ沿岸地域経済圏から退場せざるをえなくなった。東アフリカ沿岸地域経済圏における交易は、グジャラート商人がさらに独占的に支えることになった [Pearson 1998: 242]。次第に、東アフリカ沿岸地域経済圏では、オマーン＝アラブ人が目立たなくなり、グジャラート商人、とくにコージャの商業活動は、現地のアフリカ系、さらにイギリス人などのヨーロッパ人のなかに拡大し、彼/彼女らを顧客にすることで、地域経済のなかで必要不可欠な存在となっていた [大石 2001: 114]。

また、マダガスカルにおいても、同様にグジャラート商人は、ザンジバルとイギリスの威光を背景に、新たな市場開拓と商業ネットワークを拡大させつつあった。その先導的な役割を担っていたのが、港湾代理店の役割を担った「港でのカウンター業務係 Comptoir (仲買人・卸業者)」のコージャであった。

3. マダガスカルにおけるグジャラート商人

18世紀以前におけるグジャラート商人のマダガスカルへの接触について知ることは、ブランシー [Blanchy 1995: 34] も認めているように、以下の一部の報告書等を除いて、難しいことである。

1508年、二人のグジャラート商人が、北西部のメンテ
イラヌ Maintirano にいたことが、ポルトガル人ディエゴ・
ロペス Diego Lopes によって記録されている。彼らグジャ
ラート商人は、1470年頃にカンバヤを出港した船が難破
したときの生存者であった [Grandidier, Alfred et Guillaume
1908 : 411-413]¹¹ という。おそらく、この二人が、19世紀
以前に、ヨーロッパ人によって、記録されているもっとも



写真4 ムルンダヴァに停泊中の二本マストの木造帆船ブートル (1898年) F.T.M., Antananarivo 所蔵。

(注) アスガール・バルダイ Asgar Barday 氏によると、ブートル Boutre とは、2本マストのスクナー船のことで、インドから来る大型船の多くが、ブートルであり、20世紀前半まで、ブートルは、グジャラート商人にとって重要な交通手段でもあったという。

古いマダガスカルにおけるグジャラート商人であろう。

また、1792年には、グジャラート商人が以下のように報告されている。マジュンガには、6,000人以上のアラブ人とインド人のイスラム教徒が、家族とともに生活しており、宗派別にモスクや学校(マドラサ Madrasa)などをつくっていた。グジャラート商人は、スーラト Surat から毎年2隻の定期船のブートル Boutre (写真3)で、おもにマダガスカルへ布(おそらく藍染綿布)を持ってきて、アラブ人の行商人や、フランス人にフヴァ Hova とマダガスカル語で呼ばれていた、現在の首都であるアンタナナリヴ Antananarivo 周辺の中央高地に住むマレー系のメリナ人に卸していた。グジャラート商人は、マジュンガでは、ヨーロッパ人の目にはその活発な経済活動で目立つ存在だった。この当時、17世紀、セント・オーギュスタン St. Augustin やセント・マリー島 St. Marie などの海岸部からは、イギリスのアメリカ植民地向けに奴隷が運搬されており、大西洋奴隷貿易圏の一部として、重要な拠点になっていた [下山 1991 : 27-58]。またマジュンガでは、東アフリカへ

向かう西洋諸国の奴隷貿易船が補給のために立ち寄る港としても繁栄していた [Dumaine 1810 : 27-28] という¹²。

以上に報告されているように、グジャラート商人は、遅くとも18世紀後半までには、マダガスカルの北西部海岸地方のマジュンガを中心に植民していたことがわかる。なおグランディディエールが、グジャラート商人から聞いた話として、毎年グジャラートから2隻の定期船ブートルがマダガスカルへ来航していたが、1838年に嵐に遭遇し、一時的にグジャラートからの航路は途切れてしまった [Grandidier, Alfred et Guillaume 1908 : 563] という。

冒頭で紹介したコージャに語り継がれている移住に関する話は、遅くとも19世紀中葉にはマダガスカル島北西海岸地域にまで、グジャラート商人による経済活動の範囲が拡大していることを意味している。さらに、ザンジバル在住のコージャが、1840年頃から1870年までの2,558人へと急激に増加し、東アフリカ沿岸地域経済圏においてその勢力を強めた時期と一致している。

4. むすびにかえて

グジャラート商人による経済活動は、19世紀以降東アフリカ沿岸地域経済圏において、その勢力が衰退することはなかった。東アフリカ=インド間の交易の主流は、16世紀のポルトガル覇権のもとで、マスカット、ホルムズ=グジャラート=モザンビークから、19世紀前半には、オマーンとその後のイギリス覇権のもとで、マスカット=ボンベイ=ザンジバルを経て、19世紀中葉以降は、ボンベイ=ザンジバル間の直接交易へと移行した。それに伴い、東アフリカ沿岸地域経済圏の覇権は、ポルトガル、オマーン、イギリスへと移った。しかし、それにもかかわらず、グジャラート商人は、時代の流れをたくみに把握しながら、東アフリカ沿岸地域経済圏において、大きな影響力を行使し続けた。その原因として、17世紀のグジャラートでは、世界商品となった藍染綿布が分業生産されており、その商品を、まさに世界商品とするための交易を担う商人が、存在していたということが一つの大きな理由として挙げられる。

グジャラート商人が、環インド洋世界各地で世界商品の藍染綿布の販売を可能にしたのは、17世紀のグジャラートでは商品経済が発展しており、グジャラート商人による商業・金融組織も確立されており、遠隔地送金的手段として手形制度が、すでに発達していたからである。

さらに、グジャラート商人であるヒンドゥーとムスリムの役割分担が確立していたことも重要な要因であった。そ

¹¹ アルフレッド・グランディディエール (1836~1921) は、フランス人の地理学者、文化人類学者、歴史学者である。後に、パリの地理学協会 la Société de Géographi の代表に就任する。マダガスカルには、1865年初訪問。その後1869年から1870年まで、二回にわたりマダガスカルを訪問した。現在でも、19世紀のマダガスカルの様子を知るための貴重な資料として、彼の著書もしくは報告書は、しばしば引用される。なお、グイラウム・グランディディエール Guillaume Grandidier (1873~1957) は、彼の息子である [Ranivoson 2005 : 79-81]。

¹² ドゥメンヌの文献を入手できなかった。そこで本稿では、グランディディエール [Grandidier, Alfred et Guillaume 1908 : 658-659] の引用文からの引用である。またブランシー [Blanchy 53-54] も同じように、グランディディエールから引用している。

の役割分担を支えていたのは、ジャーティというインド独特の職業集団の存在であった。ブートルを所有し、商業・金融部門を担当していたのは、おもに、バニアンといわれていたヒンドゥー¹³あり、コージャは、オマーン＝アラブ人と組んでアフリカ大陸の内部との取引に介入していた。グジャラート商人は、仲買人・卸業者＝コージャ、輸出入業者＝バニアンとの協力関係によって成立していたのである。また、コージャは、金融業者でもあったバニアンから融資された前借金を携え、港で商品の仕入れと卸業に従事していた。コージャは、オマーン＝アラブ人から象牙、奴隷やゴムを入手し、バニアンに卸しており、東アフリカ沿岸地域経済圏において重要な役割を担っていた。コージャは、東アフリカ沿岸地域経済圏において、まさに「港でのカウンター業務係」として活躍していたのである。

史料と文献

未公刊史料

- ・ *Guides Annulaires de Madagascar* 1908.
- ・ ロッシャン・ジャミール氏による聞き取りより（2007年8月18日、アンタナナリヴ市内のマドラサの校長室にて）

公刊史料

- ・ Dumaine, Idée de la côte orientale de Madagascar depuis Ancouala au nord jusqu'à Moroundava en 1792, *Annales des Voyages*, t. X I (ou *Annales de Malte-Brun*, t. II) , 1810.
- ・ Grandidier, Alfred and Guillaume, *Histoire Physique, Naturelle et Politique de Madagascar*, Vol. IV : *Ethnographi de Madagascar* , t. I : *Les Habitants de Madagascar*, Deuxième Partie: *Les Etrangers*, Paris, Imprimerie Nationale, 1908.

欧語文献

- ・ Abu-Lughod, Janet L, *Before European Hegemony : the world system A.D. 1250-1350*, Oxford University Press, 1989 (佐藤次高、斯波義信、高山博、三浦徹訳『ヨーロッパ覇権以前（上・下）』岩波書店、2001年）。
- ・ Alpers, A. Edward, Gujarat and the Trade of East Africa, c. 1500-1800, *The International Journal of African Historical Studies*, Vol.9 No.1, 1976, pp.22-44.
- ・ Beachey, R. W., *A History of East Africa, 1592-1902*, London, 1995.
- ・ Bhacker, M. Reda, *Trade and Empire in Muscat and Zanzibar : Roots of British Domination*, Routledge, London and New York, 1992.
- ・ Bouchon, G. and Lombard, D., The Indian Ocean in the Fifteenth Century, in Ashin Das Gupta and Pearson (eds.) *India and the Indian Ocean 1500-1800*, Oxford University Press, 1987, pp.46-69.
- ・ Blanchy, Sophie, *Karana et Banians : Les Communautés Commerçantes d'Origine Indienne à Madagascar*, L'Harmattan, 1995.

・ Champbell, Gwyn, *An Economic History of Imperial Madagascar, 1750-1895 : The Raise and Fall on an Island Empire*, Cambridge University Press, 2005.

・ Chaudhuri, K.-N., *Asia before Europe : Economy and Civilization of the Indian Ocean from the Rise of Islam to 1750*, Cambridge University Press, 1990.

・ Dez, Jacques, De l'influence arabe à Madagascar à l'aide de faits de linguistique, *Taloha 2 : Arabes et Islamisés à Madagascar et dans l'Océan Indien*, Revue de l'Institut de Civilisations Musée d'Art et d'Archéologie de l'Université d'Antananarivo, 1994, pp.1-38.

・ Landen, Robert, *Oman since 1856 : Disruptive Modernization in a Traditional Arab Society*, Princeton University Press, 1967.

・ Nicholls, C. S., *The Swahili Coast : Politics, Diplomacy and Trade on the East African Littoral 1798-1856*, Africana Publishing Corporation, New York, 1971.

・ Newitt, M. D. D., East Africa and Indian Trade Ocean: 1500-1800, in Ashin Das Gupta and Pearson (eds.) *India and the Indian Ocean 1500-1800*, Oxford University Press, 1987, pp. 201-223.

・ Pearson, M.N., *Merchants and Rulers in Gujarat*, University of California, 1976 (生田滋訳『ポルトガルとインドー中世グジャラートの商人と支配者ー』岩波書店、1984年）。

・ Pearson, M. N., Indians in East Africa : The Early Modern Period, in Mukherjee and Subramanian (eds.) *Politics and Trade in the Indian Ocean World : Essays in Honour of Ashin Das Gupta*, pp.227-249, 1998.

・ Ranaivoson, Dominique, *Madagascar : Dictionnaire des Personnalités Historiques*, Antananarivo, 2005.

・ Razafimandimamby, Noro, Communauté Indienne: 0.2% de la Population 15% du PIB, *Révue de l'Océan Indien*, juin 1999, pp.25-33.

・ Robinson, David, *Muslim Societies in African History*, Cambridge University Press, 2004.

・ Toussaint, Auguste, *Histoire de l'Océan Indien*, Press Universitaires de France, 1961.

・ Vérin, Pierre, Note sur Le Commerce, Economique des Cotes Nord-Ouest de Madagascar au 19e Siècle, *Révue Economique de Madagascar* n°6, 1971, pp.137-145.

日本語文献

・ 藍澤光晴「マダガスカル植民地化と十二イマームシーア派コージャの経済活動」日本オーラル・ヒストリー学会『日本オーラル・ヒストリー研究』第12号、2016年、pp.223-237.

・ 藍澤光晴「マダガスカルにおける十二イマームシーア派コージャ（Khoja Shia Ithana-Asheri）の移住と経済活動」日本移民学会『日本移民年報』第16号、2010年、pp.135-148.

・ ウォーラーステイン, I., 川北稔訳『近代世界システム』II、

¹³ 1891年、グジャラートのスーラトの住民の大部分がバニアンであるとされ、グジャラート地方のヒンドゥーの90%以上がバニアンに属していたといわれている [長島 1982: 86]。

岩波書店、1981.

- ・大石高志「南アフリカにおける経済自由化とマイノリティ・ビジネス・インド・ムスリム系衣料製造販売業者の事例を中心にして」南埜猛、関口真理子、澤宗則編『越境する南アジア系移民－ホスト社会とのかかわり－』文部省科学研究費・特定領域研究（A）「南アジア世界の構造変動とネットワーク」2001年、pp.43-58.
- ・大石高志「南アフリカのインド系移民－商人・移民のネットワークと植民地体制との交差と相違－」秋田茂、水島司編『現代南アジア⑥世界システムとネットワーク』2003年、東京大学出版会、pp.299-325.
- ・北川勝彦「日本－南アフリカ通商関係史研究」『日文研叢書13』国際日本文化研究センター、1997年.
- ・小谷汪之「17・18世紀グジャラートの政治経済」松井透・山崎利男編『インド史における土地制度と権力構造』東京大学出版会、1969年、pp.197-226.
- ・カーティン,P., 田村愛理、中堂幸政、山影進訳『異文化間交易の世界史』NTT出版、2002年.
- ・下山晃「大西洋奴隷交易圏とイギリス東インド会社」浅羽良昌編『経済史－西と東－』泉文堂、1991年、pp. 27-58.
- ・篠田隆「インド・グジャラートの宗派・カースト構成－1931年国勢調査の分析－」『大東文化大学紀要(社会科学)』第32巻、1994年、pp.201-232.
- ・鈴木英明「マドラサは一着の服とコップひとつで旅立った－スワヒリ世界のバティヤー商人たち－」『インド洋海域世界一人とモノの移動－(自然と文化そしてことばNo.4)』葫蘆社、2008年.
- ・富永智津子「ザンジバル社会とクローブ生産－アラブ支配からイギリス支配へ－」山田秀雄編『イギリス帝国経済の構造』新評論、1986年、pp.353-403.
- ・富永智津子「旅と商人と－インド洋世界から－」『歴史評論』第445号、1987年5月号、校倉書房、pp.39-49.
- ・富永智津子「東部アフリカをめぐる王権と商業－ザンジバルの笛－」『移動と交流－シリーズ世界史への問い3－』岩波書店、1990年、pp.287-313.
- ・富永智津子「インド洋海域における東部アフリカ沿岸地域－19世紀スワヒリ世界の展開－」歴史学研究会『歴史学研究』No.691、青木書店、1996年11月号、pp.38-50.
- ・富永智津子『ザンジバルの笛－東アフリカ・スワヒリ世界の歴史と文化－』未来社、2001年.
- ・増田義郎「ポルトガルとアジア（2）」亜細亜大学『国際関係紀要』第9巻第1,2合併号、1998、pp.475-495.
- ・マトベイエフ, V. V., 宇佐美久美子訳「スワヒリ文明の発展」『ユネスコ・アフリカの歴史』第4巻（下）、pp.662-694、1992年.
- ・長島弘「16世紀インド海上貿易の構造－主要貿易品の分析を中心として－」東洋史研究会『東洋史研究』第35巻第2号、1976年、pp.1-38.
- ・長島弘「ムガル帝国下のバニヤ商人－スーラト市の場合－」東洋史研究会『東洋史研究』第40巻第4号、1982年、pp.85-118.
- ・長島弘「16、17世紀グジャラートにおける海上貿易と国家－M.N. ピアソン氏の所説をめぐって－」長崎県立大学『国際経済大学論集』第18巻第1号、1984年、pp.87-117.
- ・長島弘「インド洋とインド商人」岩波講座世界史14『イスラーム・環インド洋世界』岩波書店、2000年、pp.141-165.
- ・ピレス, トメ, 生田滋『東方諸国記〈大航海時代叢書〉』岩波書店、1966年.
- ・フランク, A. G., 山下範久訳『リオリエントーアジア時代のグローバル・エコノミー』藤原書店、2000年.
- ・福田安志「インド洋交渉史」宮本正興、松田素二編『新書アフリカ史』講談社現代新書、1997年、pp.210-248.
- ・福田安志「ペルシア湾と紅海の間」『岩波講座世界歴史14－イスラーム・環インド洋世界－』岩波書店、2000年、pp.115-140.
- ・家島彦一「ダウ船とインド洋海域世界」『生活の技術生産の技術(シリーズ世界史への問い2)』岩波書店、1990年、pp.105-128.
- ・家島彦一「インド洋海域の交易都市ネットワーク」『学術月報』第45巻第1号、1992年、pp.40-47.
- ・家島彦一『海が創る文明－インド洋世界の歴史－』朝日新聞社、1993年.
- ・家島彦一『海域から見た歴史－インド洋と地中海を結ぶ交流史－』名古屋大学出版会、2006年.
- ・吉国恒雄『グレートジンバブウェー－東南アフリカの歴史世界－』講談社現代新書、1999年.

注18…(d)(e)の①の欄が除外されているのは、この両百韻は、全句に名所を賦しとおす特殊な作品であるので、名所句の数は最初から一〇〇に決まっており、調査は無意味だからである。

注19…⑤については、『三島千句』においても下句「サ止め」の句が存在しないものがある。この欄が×となることはない。その点で余り意味はないが、全般の様子を直観的に把握する一助にはなるので、敢えて示す所である。

右の独吟百韻八巻について、千句の場合と同じ①②③④⑤の五つの項目について調査すると、【表Ⅲ】の結果が得られる(注18)。数値の列挙だけでは、直観的に判断し難いので、得られた数値が、『三島千句』から得られる値の範囲であるなら○、『享徳二年千句』に近い範囲外の値であるなら×、『三島千句』の範囲を越えて『葉守千句』に近い値なら◎という記号に置き換えると(例えば③「心情形容詞の増加」で言う)、【表Ⅱ】のごとく、『三島千句』を構成する十巻の百韻において、心情形容詞の例数が最も多いものは第七「何木」の一、最も少ないものは第二「何船」の五であるから、得られた数値が五以上一以下であるなら○、四以下なら×、一以上なら◎となるということである)、【表Ⅲ】の結果は【表Ⅳ】のごとくとなる(注19)。(b)の寛正二年九月二十三日「何人」において、名所句が九句と、一句多すぎると一点を除いて、全て○または◎が入る。つまり、これらの百韻は、『三島千句』の各百韻と同等またはそれ以上に「宗祇風」な作品だということである。宗祇の連歌は、中央の連歌界にデビューしたその最初から、「宗祇風」であったということである。

注1…テキストは古典文庫『千句連歌集』第二冊を基礎とするが、ただし、諸本との校合や式目作法との対照によって、私がより正しいと考えた本文を用いる。以下、一々断らないが、この手法は、本稿で取り扱う全ての連歌作品に当てはまる。ただ

	a	b	c	d	e	f	g	h
	寛正二年正月一日「何人」	寛正二年九月二十三日「何人」	寛正四年三月某日「何船」	寛正五年正月一日「名所」	文正二年正月一日「名所」	応仁二年正月一日「何人」	「何船」(はるはまた)	「何路」(かすみかは)
①	4	9	5			6	4	7
②	14	15	17	14	15	19	18	21
③	11	7	10	8	11	7	9	8
④	18	18	17	18	16	19	11	16
⑤	0	2	0	0	0	1	5	0

	a	b	c	d	e	f	g	h
①	○	×	○			○	○	○
②	○	○	○	○	○	○	○	○
③	○	○	○	○	○	○	○	○
④	○	○	○	○	○	○	◎	○
⑤	○	○	○	○	○	○	◎	○

し、仮令依拠テキストの相違でデータに多少の増減があつたとしても、方法論的に、結論に大差は生じないはずである。

注2…テキストは江藤保定『宗祇の研究』資料編を基礎とする。

注3…宗祇は、名所を多くつかうまづるにや。当奉行・能阿も、好み侍る也。是は、ただ好むと侍らねども、事を広く覚えて侍るままに、似合ひたる事には取り出だして、おのづから付くる事也。

注4…接尾辞「さ」が付いて名詞化された例も含める。

注5…「はかなし」は必ずしも端的に心情を表現する形容詞とはいいがたいが、宗祇風連歌で非常に好まれる形容詞であるので、ここに数えることとした。ただし、それを除いても、結論が大きく相違することにはならない。

注6…同様の作業を、私は以前もう少し詳しい形で行っているのであるが、限られたスペースの中で、余りに細かく論を展開するのは、かえって論旨を不明瞭にするので、右の五項目に整理したものである。気になる向きは、拙著『連歌の新研究 論考編』第四章第一節「宗祇連歌との比較から見た宗祇連歌の特徴」を参照されたい。

注7…テキストは、『熊野千句』と『河越千句』は古典文庫『千句連歌集』第五冊、『三島千句』は金子金治郎『連歌古注釈の研究』、『美濃千句』と『因幡千句』と『表佐千句』は古典文庫『千句連歌集』第四冊を基礎としたものを用いた。また各千句の「追加」は対象外とした。

注8…この表現は、「宗祇風」の成立過程に關していうものであつて、連歌文芸としての達成度に関していうものではないことを御理解いただきたい。『三島千句』の連歌文芸としての達成度は極めて高いと私は考えているが、今、それを論ずる余裕はない。

注9…専順等他者の発句を立句として借用したものも含む。

注10…テキストは江藤保定『宗祇の研究』資料編を基礎とする。

注11…同右。

注12…テキストは、北海学園大学北駕文庫本の手写ノートを基礎とする。

注13…テキストは江藤保定『宗祇の研究』資料編を基礎とする。

注14…テキストは同右。成立には異説もあるが、通説に依る。

注15…テキストは同右。成立には異説もあるが、通説に依る。

注16…テキストは古典研究会叢書第二期『連歌百韻集』を基礎とする。文明六年の作とする本もあるが、それが用いられないことは、伊地知鐵男氏のそこでの解説のとおり。「寛正年間の成立か」とする両角倉一『宗祇連歌の研究』(四ページ)。

注17…テキストは江藤保定『宗祇の研究』資料編を基礎とする。両角倉一『宗祇連歌の研究』では文明五年以前として掲げるが、専順の発句を立句にしているので、(a)(d)等とはほぼ同時期の作と推定される。

それを推し進めたものであると言えよう。

各千句の総括

以上を確認した上で、調査した各千句について総括する。

『熊野千句』……「名所句の減少」と「体言止め下句末七字「三十四型」の減少」の二項目で新しい傾向が看取されるが、他の点では、『享徳二年千句』の値と余り変化はなく、特に「願望表現・命令禁止表現・疑問詞も用いた句の増加」の点では、むしろ後退している。宗祇も一座する作品であるが、全般的に宗祇らしさはほとんど感じられず、むしろ、宗砌没後の「後期七賢風」の作品と総括すべきであろう。

『河越千句』……「心情形容詞の増加」と「体言止め下句末七字「三十四型」の減少」の二項目では、宗祇独吟である『三島千句』よりも、『葉守千句』に近い値が得られる。また「名所句の減少」「下句「サ止め型」の増加」の二項目でも、『熊野千句』より更に進んだ値が得られる。従って、非常に「宗祇風っぽい」作品ではあるのであるが、宗祇の風体の眼目とも言うべき「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」の点において、なお、『享徳二年千句』レベルの値しか得られず、その点で「宗祇風」の作品とすることはできない。連歌の風体が「七賢風」から「宗祇風」に変わってゆく過程での過渡的な風体と総括すべきであろうか。

『三島千句』……宗祇の独吟で、宗祇連歌の当時の姿そのものを示す作品であり、調査で得られた値は、五つの項目の全てで、「宗祇風」と呼べるレベルのものとなっている。とりわけ「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」の項目で、後の『葉守千句』に匹敵する値となっているのは、この作品を「宗祇風」と判断させる所の最も重要なファクターである。ただし、「宗祇風」と呼べるレベルではあっても、五項目全てで『葉守千句』の数値に及ばないのは、まだこの作品が「宗祇風」の成立過程の途上にあつたことを示すものである（注8）。

『美濃千句』……『三島千句』から比較して、「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」「体言止め下句末七字「三十四型」の減少」「下句「サ止め型」の増加」の三項目で値が後退する。特に、「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」の項目での後退度は大きい。それでも、『河越千句』以前のレベルまでは落ち込んでおらず、二者択一的には「宗祇風」とし得る作品であると考えられる。宗祇自身が既に「宗祇風」の風体を確立していることは『三島千句』において検証したごとくであるが、同座している専順との関係上、他の連衆との間に自らの手法を共有せしめることが十分にできなかったからであろう。「宗祇風」ではあるが、不鮮明な感のある

ものとも総括すべきであろうか。

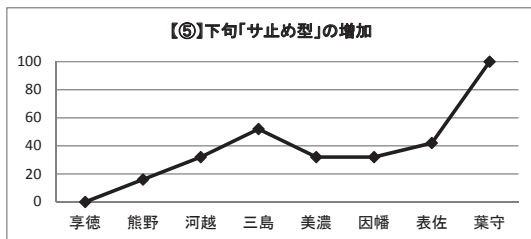
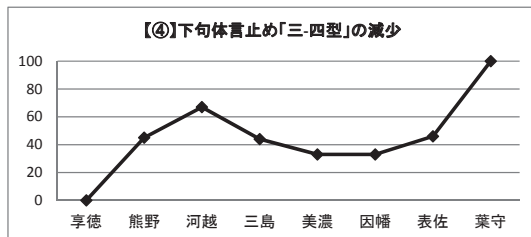
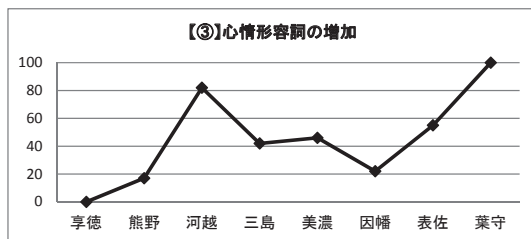
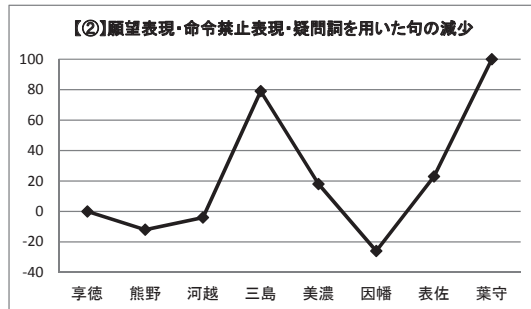
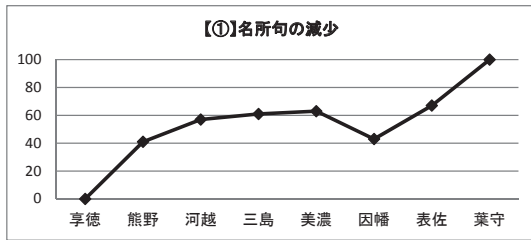
『因幡千句』……『美濃千句』から比較しても、「名所句の減少」「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」「心情形容詞の増加」の三項目で、大きく値が後退する。とりわけ「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」では著しく、『河越千句』以前のレベルまで後退する。これでは、とても「宗祇風」の作品とすることはできない。当該千句は、取り扱った『熊野千句』以降の作品中、宗祇が一座しない唯一のものであるが、当時の連歌が、宗祇が一座しないとどのようなものになるかということが知れるという点で、逆に貴重なものであるとも言える。風体的には「七賢風」の最末期のものとして総括できよう。

『表佐千句』……『美濃千句』と同じく専順・宗祇を主要メンバーとする作品で、得られる値も、五項目全て『美濃千句』と同レベルと言える範囲である。『美濃千句』と同様に、「宗祇風」ではあるが、不鮮明な感のあるものと総括されよう。ただし、『美濃千句』と比較して、五項目の全てで『葉守千句』の値に少し近づいているのは、その間に、連衆に対する宗祇の影響力がそれだけ大きくなっていったことを覗わせるものである。この二か月後（文明八年三月二十日）専順が没し、以後、「宗祇風」が次第に世を風靡するようになる。『葉守千句』は、そのメルクマールとなる作品と言えよう。

『三島千句』以前の宗祇の独吟百韻

以上、現存千句資料について、その風体が「七賢風」から「宗祇風」へと移行してゆく過程を検証した。では、宗祇個人のキャリアにおいて、その連歌が「宗祇風」の面貌を呈するようになったのは、いつ頃なのであろうか。幸いなことに、宗祇の場合、『三島千句』以前の独吟作品（注9）が多く現存している。それを検討してみよう。対象とするのは、次の八巻である。

- (a) 寛正二年正月一日「何人」（あまのとを）（注10）
- (b) 寛正二年九月二十三日「何人」（いはがねに）（注11）
- (c) 寛正四年三月某日「何船」（はらふべき）（注12）
- (d) 寛正五年正月一日「名所」（はなのほろ）（注13）
- (e) 文正二年正月一日「名所」（ふじのねも）（注14）
- (f) 応仁二年正月一日「何人」（つきのあき）（注15）
- (g) 成立年月日未詳「何船」（はるはまた）（注16）
- (h) 成立年月日未詳「何路」（かすみかは）（注17）



中の「指標値」というのは、『享徳二年千句』の平均値を〇(ゼロ)とし、『葉守千句』の平均値を一〇〇とした場合、その値がどこに当たるかを示す数値である。例えば、『享徳二年千句』の平均値が一〇〇、『葉守千句』の平均値が二二・〇の場合、その数値が一三であれば二五、一六であれば五〇、一九であれば七五が「指標値」となる。七であれば、マイナスイ二五が「指標値」となる(注7)。以下①～⑤の各項目について、【表II】の結果を検討する。

①(名所句の減少)について、『享徳二年千句』から『葉守千句』に至る八種の千句の平均値の変化を指標値によって図表にして示すと【①】のごとくとなる。まず『熊野千句』の時点で大きく進み、それが『河越千句』で更に進み、『三島千句』『表佐千句』と、同レベルで推移し、『因幡千句』では一旦『熊野千句』のレベルに後退するが、『表佐千句』では、再度進み、『葉守千句』に至る。これは、「宗祇風」における「名所句の減少」という現象が、心敬・専順の志向を継承し、それを推し進めたものであることを示していると言えよう。

②(願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加)について、同様に指標値によって図表にして示すと【②】のごとくになる。結果は①の場合と大きく相違する。『熊野千句』『河越千句』においては、まだ『享徳二年千句』と同レベル(と言うより、むしろ後退した)数値しか得られず、それが、『三島千句』において、一挙に増加する。

しかし、それも『美濃千句』でかなり後退し、『因幡千句』では、また『享徳二年千句』よりも後退した数値となる。それが『表佐千句』で『美濃千句』のレベルに回復し、『葉守千句』に至る。研究者には今更の念押しになるが、『三島千句』は宗祇の独吟である。そこには、専順の影響も、心敬の影響も入りこむ余地はない。即ち、「願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加」という現象が、宗祇連歌に特有の大きな特徴であると判断される。

③(心情形容詞の増加)について、同様に指標値によって図表にして示すと【③】のごとくになる。『熊野千句』で少し増加した後、『河越千句』で大きく数値を上げる。『三島千句』では、また少し後退し、以下の推移は、ほぼ①②の場合と同様である。『河越千句』は心敬をトップ・メンバーとする作品である。このことから、宗祇連歌における「心情形容詞の増加」という現象は、心敬の志向を継承したものであると推定することもできるかも知れないが、そうすると、同じく心敬をトップ・メンバーとする『熊野千句』の数値が何故低いのかという疑問が生ずる。いくつかの考え方が可能であるが、ことさらな推測は慎み、今は、事実の提示にとどめたい。また、この点で専順の連歌が旧態であることは、『因幡千句』の数値から知れよう。

④(体言止め下句末七字「三・四型」の減少)について、同様に指標値によって図表にして示すと【④】のごとくになる。『熊野千句』で、既に『享徳二年千句』に比べかなり進んだ値が得られ、『河越千句』で更に進む。『三島千句』では『熊野千句』のレベルに戻り、『美濃千句』『因幡千句』『表佐千句』と、ほぼ同レベルで推移し、最後に『葉守千句』に至って再度大きく進む。①の場合と同じく「体言止め下句末七字「三・四型」の減少」という現象も、心敬・専順の志向を継承し、それを推し進めたものであると言えよう。

⑤(下句「サ止め型」の増加)について、同様に図表にして示すと【⑤】のごとくになる。『熊野千句』『河越千句』『三島千句』と、段階的に増加し、『美濃千句』『因幡千句』で、一旦『河越千句』のレベルに戻り、『表佐千句』で少し回復した後、『葉守千句』で大きく増加する。①④の場合と同じく、「下句「サ止め型」の増加」という現象も、心敬・専順の志向を継承し、

		第一	第二	第三	第四	第五	第六	第七	第八	第九	第十	平均	指標値
享徳二年千句	①	6	11	9	15	12	10	9	9	8	12	10.1	0
	②	8	13	11	9	8	11	14	13	12	10	10.9	0
	③	4	4	6	6	7	5	4	5	4	6	5.3	0
	④	24	21	18	24	17	17	22	21	25	16	20.5	0
	⑤	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0.4	0
葉守千句	①	1	3	3	1	1	1	4	1	5	2	2.2	100
	②	23	21	15	18	19	17	22	16	22	17	19.0	100
	③	8	11	14	15	14	9	9	16	8	14	11.8	100
	④	14	14	14	5	10	12	14	12	13	8	11.6	100
	⑤	2	4	1	8	3	4	1	7	1	4	3.5	100

		第一	第二	第三	第四	第五	第六	第七	第八	第九	第十	平均	指標値
熊野千句	①	5	4	5	9	8	7	9	9	5	8	6.9	41
	②	9	12	14	10	10	7	8	10	10	8	9.8	-14
	③	4	5	7	9	6	5	7	8	5	8	6.4	17
	④	20	19	15	18	17	16	14	13	17	16	16.5	45
	⑤	1	0	1	2	2	0	0	1	0	2	0.9	16
河越千句	①	3	6	5	7	7	9	6	4	5	4	5.6	57
	②	11	9	7	12	6	10	13	10	15	13	10.6	-4
	③	11	11	10	15	8	8	8	10	12	13	10.6	82
	④	14	17	14	7	17	18	18	14	13	13	14.5	67
	⑤	2	1	0	1	0	2	2	2	1	3	1.4	32
三島千句	①	8	8	3	3	3	8	2	4	8	6	5.3	61
	②	18	17	21	18	15	13	19	17	17	19	17.4	81
	③	10	5	9	6	8	10	11	8	7	6	8.0	42
	④	13	16	15	13	21	16	21	13	19	19	16.6	44
	⑤	2	4	0	2	2	2	1	4	1	2	2.0	52
美濃千句	①	7	5	6	5	8	8	4	4	2	2	5.1	63
	②	16	8	15	13	16	8	7	14	11	16	12.4	19
	③	9	8	5	10	7	9	5	9	13	8	8.3	46
	④	16	22	19	18	17	12	18	20	18	17	17.6	33
	⑤	0	1	1	3	3	2	0	0	4	0	1.4	32
因幡千句	①	6	7	3	10	5	7	7	8	7	7	6.7	43
	②	8	7	8	8	17	10	8	7	5	13	8.8	-26
	③	7	9	7	7	4	6	8	7	5	7	6.7	22
	④	18	16	26	20	15	15	16	18	19	13	17.6	33
	⑤	2	2	1	0	1	2	1	1	3	1	1.4	32
表佐千句	①	4	6	11	5	3	4	7	2	0	6	4.8	67
	②	15	8	15	13	17	9	7	14	13	17	12.8	23
	③	7	6	10	8	8	9	9	10	13	9	8.9	55
	④	15	20	19	20	20	13	11	15	19	12	16.4	46
	⑤	0	1	0	2	1	3	1	3	2	4	1.7	42

「判然とした」と言えるほどの相異のあることが確認できる(注6)。

各項目について千句六巻を調査する

享徳二年から長享元年の間に、連歌の風体は以上のごとく変化した。それは、どのような経過をたどったものか。その間に成立した心敬・専順・宗祇が一座する「千句」(ただし、百韻十巻が揃っているもの)としては、『熊野千句』(寛正五年、心敬・専順・宗祇他)、『河越千句』(文明二年、心敬・宗祇他)、『三島千句』(文明三年、宗祇独吟)、『美濃千句』(文明四年、専順・宗祇他)、『因幡千句』(文明七年、専順他)、『表佐千句』(文明八年、専順・宗祇他)の六種が現存する。その六種について、『享徳二年千句』『葉守千句』と同様の調査を行なうと、順に【表Ⅱ】の結果が得られる(表

は、『享徳二年千句』の最小値は一七(第五「何路」と第六「白何」)であるのに対し、『葉守千句』の最大値でも、それを下回って一四(第一「何人」と第二「何路」と第三「白何」と第七「一字露頭」)である。また、下句「サ止め型」の句は、一句をボーダーとして、『享徳二年千句』の場合は全てそれ以下、『葉守千句』の場合は全てそれ以上である。以上、両千句の間には、ほとんど

⑤下句「サ止め型」の増加という現象が、決して偶然的なものではないことは、各項目について千句全体に調査を及ぼせば、すぐに明らかとなる。結果は【表Ⅰ】のごとくである(表中「指標値」の数値については後述)。注意されたいのは、『享徳二年千句』を構成する十巻の百韻中、名所句の数が最も少ないものは第一「何玉」の六句であるが、『葉守千句』の場合、十巻中最多の第九「朝何」でも五句にとどまり、それを下回っているという点である。同様に、願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の数については、『享徳二年千句』における最大値が第七「手何」の一四句であるのに対し、『葉守千句』の場合は最少でも一五句(第三「白何」)である。心情形容詞の例数でも、『享徳二年千句』における最大値が七(第五「何路」)に対し、『葉守千句』の最小値でも、それを越えた八(第一「何人」と第九「朝何」)である。体言止め下句末七字「三四型」の句数

④「浦の苔屋に松風ぞ吹く」という句を体言止めで仕立てようとすると、「浦の苔屋に吹くは松風」とするのが普通であろう。しかし、「浦の苔屋に吹く松の風」とすることもできるし、もう工夫して「浦の苔屋の松に吹く風」とすれば、口調はずっとなだらかになる。この体言止め下句の末七字の仕立について、次の五類型を立てて考える。

- (i) サ止め型……例…夢のはかなき、世の中の憂さ
 - (ii) 二五型……例…たゞ／春の空、また／仮枕
 - (iii) 三四型……例…秋の／夕暮、遠き／山の端
 - (iv) 五二型……例…遠方の／雲、春の夜の／夢
 - (v) 七型……例…山時鳥、大和言の葉
- 古道さびし柳ちる里 (五八)
うしろ安くも頼まれよかし (六八)
あだなれば覚束なきを思ひにて (六九)
女のうへぞ見るも悲しき (七六)
神やなほ乱れたる世のつらからむ (八一)
陰さびし楸うち散る露の暮 (八九)
憂きに耐へたる恋は恨めし (九六)
秋の夕べのあぢきなき空 (九八)

応永く永享期の連歌では、体言止め下句の末七字の仕立に好まれたのは、圧倒的に(iii)の三四型であったが、その傾向は、七賢の時代にも変わらせず、『享徳二年千句』第四「何人」においても、三六句の体言止め下句中、三四型が二四句を占める。それに対し、『葉守千句』第四「薄何」では、五句(二九句中)を数えるのみである。それぞれ列挙すると、以下のごとくである。

- | | |
|---------------------|--------------------|
| ▽『享徳二年千句』第四「何人」 | ▽『葉守千句』第四「薄何」 |
| 野分の風の かよふ／山もと (四〇) | 雨の中なる 野辺の／里々 (〇八) |
| 出づる朝日の 浮かぶ／海づら (〇六) | 誰をかとはむ 知らぬ／夕暮 (七〇) |
| 春浅くなる 雪の／木隠れ (〇八) | あらぬ跡とも 霞む／故郷 (八四) |
| 心ありとも 見えぬ／山賤 (二〇) | 月さし出づる 船の／白波 (八六) |
| 風も音する 森の／下水 (二〇) | 渡る時雨も 荒き／浜荻 (八八) |
| 友待つ暮の 門の／やすらひ (二二) | |
| ぬるゝ木曾路の 麻の／狭衣 (二八) | |
| さそふや波の 花の／春風 (三二) | |
| 我が頼みなる 雁の／玉章 (四〇) | |
| さだかに匂ふ 梅の／朝風 (四四) | |

- (i) 体言止め下句の末七字の仕立について、もう一つの大きな相違は、宗祇風の連歌では(i)の「サ止め型」が好まれるようになることである。『享徳二年千句』第四「何人」と『葉守千句』第四「薄何」について該当句を列挙すると、前者には該当する例が存在しないのに対し、後者には、以下のごとく八例が数えられる。
- 憂きや仏の 後の／常闇 (四六)
那智の湊の 秋の／入り塩 (五〇)
春はとへやと 思ふ／柴の戸 (五四)
帰らむ道も 知らぬ／古寺 (五八)
船のぼりえぬ 富士の／はや川 (六二)
身に汗ながし 急ぐ／旅人 (六四)
とへど答へぬ 宿の／古人 (六八)
明けなむとする 月の／入り方 (七二)
岨なる橋や 霧の／うもれ木 (七四)
困ひまばらに 見ゆる／草の屋 (七八)
火をとる虫の あだの／玉の緒 (八二)
粟の葉高く 茂る／古畑 (八八)
船路の花の 生の／浦梨 (九二)
春や隣を しむる／梅が香 (〇〇)

▽『享徳二年千句』第四「何人」

▽『葉守千句』第四「薄何」

(該当例なし)

- 起き出づる夜の 鐘のさやけさ (四〇)
- 急ぐもしるき 道の遥けさ (二〇)
- 飽かざりし中と 慕ふはかなさ (三二)
- 滝かすかなる 雪の静けさ (三六)
- 露の命の かゝるあはれさ (四〇)
- ひとり寝の 驚のはかなさ (五〇)
- 風も声とき 山の寒けさ (五四)
- 思ひを遠く かけし愚かさ (六〇)

論点を明瞭にしようとして、わざと両者の差異がはっきりと看取できる作品を選んだのであるが、今、列挙した所の、

- ①名所句の減少
- ②願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いた句の増加
- ③心情形容詞の増加
- ④体言止め下句末七字「三四型」の減少

第四「薄何」における名所の句を列挙し比較すると、以下のごとくで、前者では十五句を数えるのに対し、後者においては、一句が存在するのみである。

- | | |
|---------------------|------------------|
| ▽『享徳二年千句』第四「何人」 | ▽『葉守千句』第四「薄何」 |
| 尋ね入野の鈴虫の声 (一一四) | 音羽川砌も岩も古りはて (三五) |
| 天の川渚の岡に波あれて (一九) | |
| 秋ははや猪名の山陰うち時雨れ (二七) | |
| ぬるゝ木曾路の麻の狭衣 (二八) | |
| 誰か知る高野の室のその昔 (三五) | |
| 那智の湊の秋の入り塩 (五〇) | |
| 御熊野や夕なぎの葉の浦さびて (五一) | |
| 船のぼりえぬ富士のはや川 (六二) | |
| 箱根山はしり下れば湯本にて (六三) | |
| 秋寒き田上川の網代もり (八三) | |
| 吉備の山中をしのぎて吹く風に (八七) | |
| 波かよ霞も白く鳴海湯 (九一) | |
| 船路の花の生の浦梨 (九二) | |
| 雲も憂し姨捨山の秋の暮 (九七) | |
| 霧やはかゝる風越の峰 (九八) | |

②宗祇風連歌の特徴として、まず、第一にあげられるべきは、句の仕立の多様性という点である。例えば「惜しみもあへず春ぞ暮れゆく」という前句に対し、どのような付句が可能かを考えてみる。「吹く風に残りなく散る桜花」と、平凡に付けることもできるが、また「山風の吹くにも散らぬ花もがな」と、願望表現を用いて付句を仕立てることもできる。「心なく花な散らしそ山風」と禁止(命令)表現を用いることもできるし、「残る花見捨てゝいづこ帰る雁」などと、所謂「疑問詞」を用いて、疑問・反語表現で付けることもできる。そして、どのような仕立を用いるかは、句の作者の意思に委ねられ、その出された句を懐紙に書きとめる(採用する)かどうかは、一座の宗匠の意思に委ねられる。そこで、『享徳二年千句』第四「何人」と『葉守千句』第四「薄何」について、願望表現・命令禁止表現・疑問詞を用いて仕立てられた句を列挙すると、前者においては九句であるのに対し、後者では十八句と、二倍の増加を示している。

- | | |
|---------------------|--------------------|
| ▽『享徳二年千句』第四「何人」 | ▽『葉守千句』第四「薄何」 |
| 月と誰が中の衣ぞ秋の雲 (〇一) | いづく都とかへり見る空 (〇六) |
| いづくにか消えし氷は流るらむ (〇七) | 身も弱れとやつれなかるらむ (二六) |

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 忍ぶる心通ふとも知れ (二四) | 山を誰木綿付鳥に越えぬらむ (一九) |
| 誰か知る高野の室のその昔 (三五) | 何にか人の身は帰るらむ (三〇) |
| 幾千代の菊の下露つもるらむ (三七) | 憂きをたゞ忘れがたみに慰めよ (三三) |
| 春はとへやと思ふ柴の戸 (五四) | 風吹かぬ山路も花はいかならむ (四五) |
| つたへ聞け君が言葉の謀 (六五) | 誰住みて峰に砧を急ぐらむ (五五) |
| 友はなど身をも我をも捨てつらむ (六九) | いつまでの川辺の橋の朽ちぬらむ (五九) |
| 誰がつくるその古ごとく残るらむ (七五) | うしろ安くも頼まれよかし (六九) |
| | 誰をかとはむ知らぬ夕暮 (七〇) |
| | さきだゝば花もあはれめ草の原 (七一) |
| | 鶯も鳴けいつを待つらむ (七四) |
| | 何の罪残りてかかく生まるらむ (七七) |
| | 心深さをよしやあらはせ (七八) |
| | 物怪となりても人に知らればや (七九) |
| | 注連の中なる花な手折りそ (八二) |
| | 偽りと知れどもなとか待たるらむ (九七) |
| | 小菽が露は風も乱すな (〇〇) |

③宗祇風連歌の特徴として今一つあげられるべきは、著しい心情性という点である。その表象の一つとして、「憂し」とか「寂し」とか「悲し」とか「惜し」とか、端的に心情を表現する形容詞(以下、便宜的に「心情形容詞」と呼ぶ)が多用される。『享徳二年千句』第四「何人」と『葉守千句』第四「薄何」についてそれを数えてみると(注4)、前者では、「憂し」が四例、「惜し」が一例、「悲し」が一例の三種、六例に対し、後者では、「憂し」が三例(第二六・三三・九六句)、「寂し」が三例(第二三・五八・八九句)、「悲し」が二例(第一四・七六句)、「はかなし」が二例(第三二・五〇句)(注5)、「うしろ安し」が一例(第六八句)、「覚束なし」が一例(第六九句)、「つらし」が一例(第八一句)、「恨めし」が一例(第九六句)、「あぢきなし」が一例(第九八句)の九種一五例で、二・五倍に増加している。列挙すると、以下のごとくである、

- | | |
|----------------------|---------------------|
| ▽『享徳二年千句』第四「何人」 | ▽『葉守千句』第四「薄何」 |
| 立ちよれば踏む跡惜しく花ちりて (〇九) | あはに結べる契り悲しも (一四) |
| 徒らに住む世の憂き身古りにけり (一一) | さびしさの限りか霞む夕ま暮 (二三) |
| 憂しや仏の後の常闇 (四六) | 今日も憂き世ぞよしや恨みじ (二六) |
| なさけに酔へる後ぞ悲しき (七〇) | 飽かざりし中と慕ふはかなさ (三二) |
| 憂き後朝は明けはてにけり (八〇) | 憂きをたゞ忘れがたみに慰めよ (三三) |
| 雲も憂し姨捨山の秋の暮 (九七) | ひとり寝は寝じの驚のはかなさ (五〇) |

寛正く文明期の連歌における「七賢風」と「宗祇風」

勢田 勝郭

Shichiken-style and Sougi-style of Renga in 1453~1487

Katsuhiko SETA

寛正期から文明期にかけて、連歌の風体はいわゆる「七賢風」から「宗祇風」へと大きく変貌を遂げる。本稿は、その経緯を、実際の連歌の場における作品たる百韻千句資料を直接取り扱うことよって、客観的なデータから跡付けようとするものである。

後世「中古」と呼ばれる応永く永享期の連歌の風体を否定して成立したのが、宗祇の風体であり、宗祇の連歌は、その宗砌の風体を、心敬・専順を介して継承・発展させたものであるというのが、現在、連歌史の通説とされている所である。つまり、応永く永享期の連歌と宗砌以下の七賢の連歌との間では、その風体の断絶性が、七賢の連歌と宗祇の連歌との間には、その継続性の説明が今まで研究者の主たる対象とされて来たと言えよう。それは、基本的には正しい把握であることに間違いはないが、一方、実際に、七賢と呼ばれる作者達の連歌と、宗祇連歌の代表作とされる長享二年正月二十三日「何人」や延徳三年十月二十日「何人」などを読み比べてみると、両者の間には、かなり判然とした相異が看取できることも事実である。本稿は、七賢の連歌風体（以下、「七賢風」と宗祇のそれ（以下、「宗祇風」との関係）を、後者は前者を継承するものであったことを認めつつも、両者互いに対比されるべきものでもあるとの立場に立った上で、

(Ⅰ) 後者が、前者に比較して、どのように変貌を遂げたものであるかを明らかにし、
(Ⅱ) その新風が、どのようにして連歌界に普及していったかを、実際の連歌の場における作品たる百韻千句資料を直接取り扱うことよって、客観的なデータから跡付けようとするものである。

「七賢風」と「宗祇風」——『享徳二年千句』と『葉守千句』の比較検討

「七賢風」の作品のサンプルとして、『享徳二年千句』第四「何人」百韻（注1）、「宗祇風」の作品のサンプルとして、『葉守千句』第四「薄何」百韻（注2）を採りあげる。前者は、七賢の中、宗砌・心敬・専順の三名が一座するもの、後者は、その三十四年後の長享元年十二月に興行された宗祇以下、肖柏・宗長など、宗祇一門による作品である。

①これは、七賢というよりも、むしろ宗砌個人の作風の特徴といえるべきかも知れないが、彼の連歌に名所の句が非常に多いことは、宗祇が『角田川』で指摘している所である（注3）。それに対して、「大かた、名所の事は、（中略）常に侍らぬ名所を、詠むべからずとなり」というのが、宗祇の態度である。当然、宗祇風の連歌では、名所の句が減少すると予想されるが、『享徳二年千句』第四「何人」と『葉守千句』

Study on Ductile-Brittle Transition of Single Crystal Silicon by a Scratching Test Using a Single Diamond Tool

Koki MUKAIYAMA* , Mitsunori OZAKI and Tadahiro WADA

Proceedings of 2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), July 22-25, 2017, Prague, Czech Republic, pp. 40-44.

INTRODUCTION

Single crystal silicon is used in many fields, such as semiconductor circuits and solar batteries [1]. Single crystal silicon can also achieve ductile mode cutting when the cutting depth is less than the critical cutting depth for the ductile-brittle transition point (dc). Earlier studies suggest that many factors influence the ductile-brittle transition such as temperature dependence, crystallographic orientations, tool rake angles and cutting speeds [2]-[5]. In the recent cutting process from a silicon ingot to a silicon wafer used as semiconductor materials, a multi-wire saw with fixed diamond abrasive grains is widely used due to recent increases in wafer size [6] and reductions in wafer thickness. In this study, we conducted scratch tests of single crystal silicon using a single crystal diamond tool. The purpose of this study is to conduct basic studies for improvement of a multi-wire saw, dc was also measured while scratch speeds (Vc) were changed. We examined the relationship between Vc and thrust force (Ft) at that time.

DUCTILE-BRITTLE TRANSITION

The removal modes of brittle materials have two main material removal modes: ductile mode cutting from plastic deformation removals and brittle mode cutting from brittle fracture removals [7]-[8]. There are many conditions for the ductile-brittle transition and many influential factors.

CONCLUSIONS

Single crystal silicon can also achieve ductile mode cutting when the cutting depth is less than the critical cutting depth for the ductile-brittle transition point (dc). In this study, we conducted scratching tests of single crystal silicon using a single diamond tool at scratch speeds of 1.88, 5.65, 17.00 and 22.6 m/s. The purpose of this study is to conduct basic studies for improvement of a multi-wire saw. Also, dc was measured while scratch speeds (Vc) were changed. Moreover, we examined the relationship between Vc and cutting resistances (thrust force) at that time.

The following conclusions were obtained:

- 1) dc is not dependent on scratch speeds.
- 2) In plastic flow in ductile mode cutting, scratch marks were observed.
- 3) dc is about 0.5 μm at room temperature.
- 4) Thrust force at the ductile-brittle transition decreases by increasing scratch speeds.

REFERENCES

- [1] K. Naoe, "Next-generation high-performance single crystals", Fujikura technical journal, vol. 2, no.123, pp. 116-119, 2012(in Japanese).
- [2] N. Morita, Y. Yoshida, E. Kobayashi, N. Nagata, "Study on Brittle-Ductile Transition of Monocrystal Silicon at High Temperature and its Application to Ductile Mode Cutting", Transactions of the JSME (in Japanese), vol. 64, no.621, pp. 378-383, 1998.
- [3] T. Shibata, S. Fujii, E. Makino, M. Ikeda, "Ductile-regime turning mechanism of single-crystal silicon", Precision Engineering, vol. 18, no. 2-3, pp. 129-137, April-May. 1996.
- [4] T.P. Leung, W.B Lee, X.M. Lu, "Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime", Journal of Materials Processing Technology, no. 73, pp. 42-48, 1998.
- [5] T. Sugita, K. Ueda, K. Endo, "Possibility of plastic deformation type removal in microcutting of brittle materials", Journal of the Japan Society for precision Engineering, vol. 52, no. 12, pp. 144-147, 1986(in Japanese).
- [6] H. Oishi, K. Asakawa, K. Tsukamoto, Y. Uno, "Effects of Wire Running Speed and work Feed Rate on Multiwire Saw Slicing", Journal of the Japan Society for precision Engineering, vol. 67, No. 5, pp. 791-796, 2001(in Japanese).
- [7] M. Arif, M. Rahman, W. Yoke San, "Analytical model to determine the critical feed per edge for ductile-brittle transition in milling process of brittle materials", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 51, No. 3, pp. 170-181, March. 2011.
- [8] P. Feng, C. Zhang, Z. Wu, J. Zhang, "Effect of Scratch Velocity on Deformation Features of C-plane Sapphire during Nanoscratching", Journal of Mechanical Engineering, vol. 59, No. 6, pp. 367-374, 2013.

* Faculty of Advanced Engineering,

Tool Wear of Poly Crystalline Diamond in Cutting Ti-6Al-4V Alloy with High- Pressure Coolant Supplied

Tadahiro WADA and Kazuki OKAYAMA*

Proceedings of 2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), July 22-25, 2017, Prague, Czech Republic, pp. 50-55.

INTRODUCTION

TITANIUM alloys have high strength, low density, and corrosion resistance. Titanium alloys such as nickel-based types have a very high strength-to-weight ratio, making them very suitable for aircraft engines and airframe manufacture [1]. For dimensional accuracy, titanium alloys are machined using the metal removal process. Titanium and titanium alloys have low thermal conductivity and high chemical reactivity with many cutting tool materials [2]. Hence, on machining, the cutting tools wear very rapidly due to the high cutting temperature and strong adhesion at the tool-chip interface and tool-workpiece material interface [2]. The machinability of titanium and its alloys is considered to be poor owing to several inherent properties of the materials [3]. At the higher cutting speed, the chemical and mechanical properties of Ti-6Al-4V cause complex wear mechanisms such as adhesion and diffusion [4]. Therefore, during the machining of the titanium alloy, it is necessary to maintain a cutting speed lower than that used for carbon steels [5]. On the other hand, high-speed cutting is an effective method for improving productivity. As the cutting temperature rises significantly in high-speed cutting, the tool materials require both good wear-resistance and heat-resistance, and the cutting parts must be cooled to achieve efficacy and efficiency. In this case, sintered cubic boron nitride compact (cBN) or poly crystalline diamond (PCD) are effective tool materials because they have better features such as hardness, heat-resistance, etc. There are many studies on the tool wear of cBN tools [6] or PCD tools [7]. According to Honghua Su et al. [8], in high-speed milling of Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V (TA15) alloy, the performance and wear mechanism of the tools were investigated. As a result, compared to the PCBN tool, the PCD tool has a much longer tool life, especially at higher cutting speeds. Farhad Nabhani [9] compared the performance of cBN and PCD with that of the coated tungsten carbide tool currently being used to machine titanium aerospace alloy, and tests confirmed that the tool life of PCD is longer than that of other tools. High-pressure coolant cutting is effective for reducing the cutting temperature and many studies on high-pressure coolant cutting have recently been conducted [10]. Itakura et al. [11] reported high speed cutting of Inconel 718 at an increased cutting fluid flow rate by injecting fluid at a high pressure to the cutting edge. As the injection speed of the cutting fluid increased, the cutting temperature was decreased and flank wear was reduced. Thus, high-pressure coolant cutting is considered effective for reducing tool wear [12]. The improvement of chip control, particularly chip breaking performance, is also expected by the high-pressure coolant supplied [13]. Y. Ayed, G. Germain, A. Ammar, and B. Furet et al. [14] reported the experimental results concerning the machinability of the titanium alloy Ti17 with and without high-pressure water jet assistance using uncoated WC/Co tools at cutting speeds of 0.83 m/s to 1.67 m/s. As a result, the optimum water jet pressure was determined, leading to an approximately 9-fold increase in tool life. Compared to conventional lubrication, an increase of about 30% in productivity can be obtained. Z.G. Wang et al. [15] reported milling of Ti-6Al-4V by binderless cubic boron nitride at a maximum cutting speed of 6.7 m/s with high-pressure coolant supplied. Z.G. Wang et al. [16] reported the experimental results concerning the machinability

of Ti-6Al-4V alloy with high-pressure coolant supplied using a binderless cubic boron nitride tool at a maximum cutting speed of 5.8 m/s. E. O. Ezugwu et al. [17] evaluated the performance of different cBN tool grades in finish turning of Ti-6Al-4V alloy with high-pressure coolant supplied at high cutting conditions, up to 4.2 m/s. E.O. Ezugwu [18], or Rosemar B. da Silva et al. [19] reported that Ti-6Al-4V can be cut with PCD tools by the high-pressure coolant supplied at much higher cutting speeds, up to 4.2 m/s, conditions that are impossible to obtain under conventional coolant supply. However, the influences of the cutting speed on the tool wear in higher speed cutting of Ti-6Al-4V with high-pressure coolant supplied have not been reported. In this study, in order to identify an effective PCD tool for the high-speed cutting of Ti-6Al-4V, the influences of the diamond content and the diamond particle size on the tool wear were experimentally investigated. As the Ti-6Al-4V was turned with high-pressure coolant supplied, the chip configurations and the tool wear were experimentally investigated.

CONCLUSIONS

In this study, Ti-6Al-4V was turned with high-pressure coolant supplied, and the chip configurations and the tool wear were experimentally investigated.

The following results were obtained:

- (1) In turning with high-pressure coolant supplied, the effectiveness of chip breaking performance was improved. In this case, the chip length was shorter with the increase in the coolant pressure.
- (2) In the case of a cutting speed of 7.50 m/s, large wear on the cutting part was observed at the cutting of conventional-pressure coolant supplied by both the CVD coated tool and the cermet tool.
- (3) In the case of the cutting of conventional-pressure coolant supplied by the cBN tool, tool wear of the PCD tool was smaller than that of both the CVD coated tool and the cermet tool.
- (4) In a comparison of cutting of the conventional-pressure coolant supplied and cutting of the high-pressure coolant supplied by the cBN tool, the tool wear in cutting with the high-pressure coolant supplied was slightly smaller than that in cutting with the high-pressure coolant supplied.
- (5) In a comparison of the cBN tool and the PCD tool in the case of cutting of the high-pressure coolant supplied, the PCD tool could cut to a cutting distance of 4521 m.
- (6) In the case of the cutting of the high-pressure coolant supplied by the PCD tool, which has a large diamond particle size, Ti-6Al-4V could be cut at the higher cutting speed of 12.50 m/s.
- (7) In the case of the cutting of high-pressure coolant supplied by the PCD tool, the tool wear of the PCD tool decreased with the increase in the diamond particle size.

ACKNOWLEDGMENT

We are grateful to Mr. Yusuke Morigo, who is a researcher of TOKUPI Corporation (3-167 Otake Yao Osaka, 572-8530, JAPAN), for his help in the execution of the turning experiment. We would like to thank TOKUPI Corporation for their support in the turning test, which enabled this work to be conducted. We would also like to express thanks to Tungaloy Corporation for the supply of poly crystalline diamond inserts and polycrystalline cubic boron nitride compact inserts.

* Faculty of Advanced Engineering

Study on Deformation Evaluation of Bracket in Design of Adjustment Hinge

Morio FUJIMOTO*, Takuji MORIGUCHI**, Tadahiro WADA and Shinichi ENOKI

Proceedings of The 4th International Conference on Design Engineering and Science, ICDES 2017, Aachen, Germany, September 17-19, 2017, Paper No. 122.

INTRODUCTION

As for the living environment of our country, barrierfree correspondence is required as represented by an increase in care recipients [1]. In nursing care at home, opening and closing the door by moving the room is indispensable. However, conventional doors for general homes do not take into consideration the opening and closing with the vulnerable ability of the care recipient, and the opening and closing situation while the carer is holding the care recipient. Therefore, it is expected that demand for doors assuming home care in the future will increase. In particular, it is expected that hinges will also be required to adjust opening and closing force and automatic opening and closing functions. When considering realization of added value by hinges, high functionality is required for hinges. Therefore, it is necessary to realize cost reduction and material saving of hinges. Therefore, we aim to realize material saving and cost reduction by using materials with thinner thickness than before. For that purpose, it is necessary to realize the same strength and life as the conventional one with a thin plate thickness. In addition, it is necessary to reduce the number of times of durability tests and prototypes to reduce both development period and cost. In this research, as a high function hinge, think about hinges with adjustment function. It is a hinge that can adjust the distance between the door and the frame in order to avoid interference with the frame of the door after setting the door. In order to realize a more accurate analysis in considering the product life of the hinge, we try to establish an analysis method of the adjustment mechanism.

CONCLUSION

A stress assuming axial force was applied to the female threaded portion of the bracket, and the state of the adjustment mechanism at the time of fixation was analyzed. Although the result of deformation amount is different from experiment, the tendency of deformation is similarity relationship. Therefore, it is considered that a constant evaluation can be made as a stress condition. In the future, we will clarify the deformation of the hinge in the plastic region by nonlinear analysis and clarify the method for setting the condition of more accurate analysis.

REFERENCES

- [1] Ministry of Health, Labour and Welfare Health and Welfare Services for the Elderly, <http://www.mhlw.go.jp/english/wp/wphw9/dl/10e.pdf> [Accessed August 23, 2016]
- [2] Morio FUJIMOTO, Takuji MORIGUCHI and Shinichi ENOKI, "Prediction of Deformation and Damage of a Hinge Adjustment Mechanism by Finite Element Analysis", JSDE Fall Meeting 2016, (2016), pp.145-146 (in Japanese).
- [3] ISO 16047:2005 Fasteners -- Torque/clamp force testing
- [4] Bernard J. Hamrock, Bo Jacobson and Steven R. Schmid, *Fundamentals of Machine Elements*, (1999), pp.672-675.

* Faculty of Advanced Engineering

** NISHIMURA CO., LTD.

INFLUENCE OF NEGATIVE SUBSTRATE BIAS VOLTAGE ON PROPERTIES AND CUTTING PERFORMANCE OF TaWSiN COATING FILMS DEPOSITED USING MAGNETRON SPUTTERING ION PLATING

Tadahiro WADA

Proceedings of Academicsera 19th International Conference, Taipei, Taiwan, 26th-27th May 2018, pp. 5-9.

INTRODUCTION

Many difficult-to-cut materials such as hardened steels, titanium- or nickel-based alloys, etc., are widely used today. For dimensional accuracy, these difficult-to-cut materials have to be machined by the metal removal process. As these difficult-to-cut materials must be machined under high efficiency to improve productivity, the tool materials should be wear resistant. Polycrystalline cubic boron nitride compact (cBN), or poly crystalline diamond (PCD) are effective tool materials because they are heat resistant and hard. However, in cutting, e.g. turning at a high feed or a large cutting depth, milling, drilling and tapping, a major tool failure of cBN or PCD readily occurs by fracture because cBN and PCD have poor fracture toughness. In this case, coated cemented carbide tools, which have good fracture toughness and wear resistance, are effective tool materials. Conventionally, titanium based coating films (e.g. TiN and TiAlN [e.g., 1, 2]) have been widely used as coating films.

Studies on Ta-based coating films as new coating films are also being conducted [3-5]. Furthermore, M. Nordin et al. [6] reported that when milling austenitic stainless steel, a multilayered TiN/TaN coating outperformed single-layered TiN and TaN due to its lower chip/tool interaction, which resulted in a lower comb crack density, and superior toughness. Wada et al. [7] reported that the TaN coating film has both high hardness and good adhesive strength, and can be used as a coating film of WC-Co cemented carbide cutting tools.

Adding Si (silicon), V (vanadium), C (carbon), etc. to the coating film is also effective for improving the performance of the coating film and improving the cutting performance. K. Kutschej et al. [8] reported that the formation of lubricious oxides due to alloying Ti_{1-x}Al_xN coatings with V is responsible for the improvement of their tribological properties especially at elevated temperatures. J.W. Nah et al. [9] reported that the chemical state of (Ta,Si)N coating reactively sputtered on a high-speed steel substrate was studied by XRD, AES and XPS. M. Kathrein et al. [10] reported the remarkable influence of additional elements on the properties of Ti_{1-x}Al_xN based coatings. Alloying with elements such as V, Ta, and B resulted in a significantly increased lifetime in various cutting applications. Yun Chena et al. [11] reported that AlCrSiCN is harder than AlCrN. Wada et al. [12] reported the coating film performance and cutting performance of the TiWSiN coating film with W added to the TiWN coating film. The results revealed that the TiWSiN coating film in which Si is added to the TiWN coating film is effective for improving the microhardness of the coating film.

The properties of the coating film depend on the negative substrate bias voltage [13-15]. Sung Ryong Choi et al. [15] investigated the influence of substrate bias voltage on deposition behaviors such as the deposition rate, film composition, macro particles and surface roughness for the TiSiN coatings deposited on WC-Co substrates by a hybrid coating system of arc ion plating and sputtering techniques. Also, the hardness and Young's modulus of TiSiN coatings by nanoindentation tests

were investigated with the substrate bias voltage. As a result, the micro-indentation hardness largely increased with the increase of the substrate bias voltage, and reached the maximum value of 60 GPa at the substrate bias voltage of -100 V. The micro-indentation hardness and Young's modulus values, however, gradually decreased with the further increase of the substrate bias voltage above -100 V.

There are few studies on the coating film performance and cutting performance of the TaWSiN coating film with Si added to the TaWN coating film. The influence of negative substrate bias voltage on both the mechanical properties and the cutting performance of TaWSiN coating films remains unclear.

To clarify the influence of negative substrate bias voltage on both the mechanical properties of TaWSiN coating films, this study measured the hardness and the scratch strength of the TaWSiN coating film formed by the magnetron sputter ion plating process with different negative substrate bias voltages. The hardened steel AISI D2 was turned with the TaWSiN-coated cemented carbide tools. The tool wear of the TaWSiN-coated cemented carbide was experimentally investigated and compared with that of the TaWN-coated cemented carbide. The substrate base metal of the coated carbide tools is WC-Co cemented carbides ISO K10.

CONCLUSIONS

In this study, we clarified the influence of negative substrate bias voltage on both the mechanical properties and the cutting performance of TaWSiN coating films. The hardness and the scratch strength of TaWSiN coating film formed on the surface of a substrate of WC-Co cemented carbide ISO K10 by the magnetron sputter ion plating process were measured. Next, the hardened steel AISI D2 was turned with the TaWSiN-coated cemented carbide tools. The tool wear of the TaWSiN-coated cemented carbide was experimentally investigated and compared with that of the TaWN-coated cemented carbide.

The following results were obtained:

1. In all cases, the initial cracks were initiated at the edge/corner of the square specimens. The microhardness of the TaWSiN coating film was slightly less hard with the decrease of the negative substrate bias voltage.
2. The critical scratch load of the TaWSiN coating film increased with the decrease of the negative substrate bias voltage.
3. In cutting hardened steel at a cutting speed of 1.00 m/s, the wear progress of all types of TaWSiN-coated tools was lower than that of the TaWN-coated tool.
4. Within the range of most cutting speeds from 0.67 m/s to 1.50 m/s, the tool life of the coated tool deposited using the negative substrate bias voltage of 105 V was the longest among the four types of TaWSiN-coated tools.

The above results clarify that the TaWSiN coating film decreasing the negative substrate bias voltage of 105 V has both high hardness (microhardness of 2690 HV0.25N), and good adhesive strength (critical load of 90N), and can be used as a coating film of WC-Co cemented carbide cutting tools.

Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel

Tadahiro WADA and Hiroyuki HANYU*

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 264 (2017), doi:10.1088/1757-899X/264/1/012017.

INTRODUCTION

Many difficult-to-cut materials such as hardened steels, titanium and nickel based alloys, etc., are widely used today. For dimensional accuracy, these difficult-to-cut materials are required to be machined by the metal removal process. As these difficult-to-cut materials are required to be machined under high efficiency to improve productivity, it is necessary that the tool materials have good wear-resistance. Polycrystalline cubic boron nitride compact (cBN) seems to be an effective tool material because it has better features as a tool material such as good heat resistance, high hardness, etc. Therefore, regarding the cutting of hardened steel, which is one of these difficult-to-cut materials, there are many studies on the tool wear [1-3], the cutting force [4]-[5] or the surface roughness [6] of cBN tools. The cutting performance of cBN tools depends on the cBN contents rate [7], and the binding phase [8]. Therefore, an effective binding phase, etc. for cBN tools should be selected for the cutting of hardened steel. On the other hand, coating has long been applied to high speed steel and carbide tools, and more recently, on cBN substrates [9]. Reginaldo T. Coelho et al. reported that in turning a hardened ASTM A29 4340 nickel chromium molybdenum steel (AISI 4340) using three types of coated cBN tool, namely the (Ti,Al)N-nano-coated, (Ti,Al)N-coated and (Al,Cr)N-coated, and uncoated cBN tool, the lowest tool wear happened with the (Ti,Al)N-nano-coated cBN tool followed by the (Ti,Al)N-coated, (Al,Cr)N-coated and uncoated cBN tool [9]. A hardened ASTM 52100 bearing steel (DIN 100Cr6, 62 HRC) was turned by two types of coated cBN tool, namely the (Ti,Al)N- and TiN-coated cBN tool, and uncoated cBN tool. As a result, the experimental results showed that in the case of the lower feed rate of 0.08 mm/rev, there is little difference in tool life between the coated and uncoated cBN. However, in the case of the higher feed rate of 0.15 mm/rev, the tool life of coated cBN is longer than that of the uncoated tool, in particular the tool life of (Ti,Al)N-coated cBN is three times longer than that of the uncoated cBN tool [10]. It was reported that the coated cBN tool demonstrated longer tool life (~20%) than the uncoated tool life at a cutting speed of $V < 300$ m/min, and the difference in tool life between the coated and uncoated cBN tool is negligible when $V > 300$ m/min in high speed turning of Inconel 718 with the uncoated and coated cBN tool [11]. Moreover, it was reported that at a cutting speed of 250 m/min, the coated cBN tools had approximately 20% longer tool life than uncoated cBN, and the gap was rapidly closing with the increase in speed and became negligible at a speed of 350 m/min in turning of Inconel 718 with the uncoated and coated cBN tools [12]. In high turning Inconel 718 with the coated and uncoated cBN tool at a cutting speed of 250 m/min, the coated cBN tool had approximately 20% longer tool life than the uncoated cBN tool [13]. However, R. M'Saoubi et al. reported that the uncoated insert displays a lower flank wear and crater wear width when compared to most of the coated tools, except TiSiN, excepted in cutting hardened steel 16MnCr5

(58-62 HRC) with four typeskinds of coated cBN tools [14]. Furthermore, Fatih Taylan et al. reported that in face milling of hardened 90MnCrV8 tool steel (61 HRC), the tool failure was also investigated [15]. As a result, the damage of the cutting tools over the entire range of cutting conditions was mainly in the form of chipping, the breakage ISO type C (ISO 8688 standard) of the TiN-based-coated cBN was four times greater than that of uncoated cBN. Therefore, TiN-based coated cBN was not useful for hard milling application.

In this study, in order to verify the effectiveness of the (Ti,Al) N-coated cBN, which is formed on the substrate of cBN by the physical vapor deposition (PVD) method, the hardened steel was turned with the (Ti,Al)N-coated cBN tool at a cutting speed of 3.33, 5.00 m/s, a feed rate of 0.3 mm/rev and a depth of cut of 0.1 mm. Furthermore, the uncoated cBN, which was the substrate of the (Ti,Al)N-coated, was also used.

The hardened steel used was an ASTM D2 cold-worked die steel (60 HRC). The substrate of (Ti,Al)N-coated cBN used was three types of cBN tools, which had a different contents rate and different main binding phases. The tool wear of the cBN tools was experimentally investigated. This investigation will contribute to the improvement of productivity in the case of high feed cutting hardened steels.

CONCLUSIONS

In this study, in order to verify the effectiveness of the (Ti,Al) N-coated cBN, which is formed on the substrate of cBN by the PVD method, the hardened steel was turned with the (Ti,Al) N-coated cBN tool at a cutting speed of 3.33, 5.00 m/s, a feed rate of 0.3 mm/rev and a depth of cut of 0.1 mm. Furthermore, the uncoated cBN, which was the substrate of the (Ti,Al) N-coated, was also used. The tool wear of the cBN tools was experimentally investigated.

The following results were obtained:

- (1) The contact area between the rake face and the chip of the (Ti, Al)N-coated cBN tool was smaller than that of the uncoated cBN tool.
- (2) The tool wear of the (Ti,Al)N-coated cBN was smaller than that of the uncoated cBN.
- (3) The wear progress of the (Ti,Al)N-coated cBN with the main element phase of the TiCN-Al was slower than that of the (Ti,Al)N-coated cBN with the main element phase of the TiN-Al.
- (4) In the case of the high cutting speed of 5.00 m/s, the tool wear of the (Ti,Al)N-coated cBN was also smaller than that of the uncoated cBN.

These results clarify that the (Ti,Al)N-coated cBN can be used as a tool material in high feed cutting hardened steel.

ACKNOWLEDGMENT

We would also like to express our sincere thanks to the Tungaloy Corporation for their cooperation in the supply of cBN inserts.

* OSG Corporation

奈良工業高等専門学校 研究紀要第54号

平成 31 年 2 月

編集兼
発行者

奈良工業高等専門学校
大和郡山市矢田町22

RESEARCH REPORTS

NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY , Nara College

NO. 54, 2018
CONTENTS

Papers

Computational Fluid Dynamics to Design of Polymer Extrusion Dies Hiroshi FUKUOKA, Nobuaki HAGIOKA, Yutaka MINEGISHI, Kenji KODAMA	1	
Investigation of Generation and Collapse Processes of Cavitation Bubble Induced by Snapping Shrimp in Comparison with Comparable Processes by Femtosecond Laser Irradiation Hiroshi FUKUOKA, Masaya YAMAMOTO	6	
Development of Plastic Buffer Material	TERADA Kousuke, NAKANO Mirai, MITANI Ren	10
Minimum Heat Flux on Film Boiling and Critical Heat Flux in Forced Convection of Polymer Aqueous Solution - Platinum Small Ball System	Mitsuyoshi SHIMAOKA and Shigeto NAKAMURA	21
Volume and commensurability of hyperbolic 3-orbifolds	Han YOSHIDA	27
<i>La zone économique sur la côte d'Afrique de l'est et Les communautés commerçantes d'origine goudjarati</i>	Mitsuharu AIZAWA	29
Shichiken-style and Sougi-style of Renga in 1453-1487	Katsuhiro SETA	39

Abstract

Study on Ductile-Brittle Transition of Single Crystal Silicon by a Scratching Test Using a Single Diamond Tool Koki MUKAIYAMA , Mitsunori OZAKI and Tadahiro WADA	47	
Tool Wear of Poly Crystalline Diamond in Cutting Ti-6Al-4V Alloy with High- Pressure Coolant Supplied Tadahiro WADA and Kazuki OKAYAMA	48	
Study on Deformation Evaluation of Bracket in Design of Adjustment Hinge Morio FUJIMOTO, Takuji MORIGUCHI, Tadahiro WADA and Shinichi ENOKI	49	
INFLUENCE OF NEGATIVE SUBSTRATE BIAS VOLTAGE ON PROPERTIES AND CUTTING PERFORMANCE OF $TaWSiN$ COATING FILMS DEPOSITED USING MAGNETRON SPUTTERING ION PLATING	Tadahiro WADA	50
Tool wear of (Ti, Al) N-coated polycrystalline cubic boron nitride compact in cutting of hardened steel Tadahiro WADA and Hiroyuki HANYU	51	