

研 究 紀 要

第 53 号

平成 29 年度

奈良工業高等専門学校

目 次

論文

力学的負荷の空間的パターンに注目した物体の「力学的表情」	平 俊男	1
簡易粉末成形-焼結法および曲げ加工金型を用いた鉄道車両模型の製作 三部 竜太郎 藤井 惇平 白木 快 福田 龍一 島田 大嗣 尾崎 充紀 笹山 智仁 谷口 幸典		8
極小容積衝撃波管を用いた超音速噴流の挙動観察	福岡 寛 竹村 凌平 矢尾 匡永 中村 篤人 廣 和樹 榎 真一	14
対向する非定常超音速噴流の挙動に関する数値計算	福岡 寛 木下 稔基 梅津 郁朗	19
高温微小金属球水中急冷時の蒸気膜形成状況の観察	島岡 三義 中村 篤人	24
文禄三年三月四日「何衣」百韻と豊臣家の内紛	勢田 勝郭	38

抄録

Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten/Silicon-based-coated Solid Carbide Thread Milling Cutters in Thread Tapping of Chromium-Molybdenum Steel	和田 任弘	39
Tool wear of sintered cubic boron nitride compact in cutting hardened steel with high-pressure coolant supplied	和田 任弘	40
Cutting Performance of Electroplated Diamond Drill with V-Shaped Groove and through Coolant Hole in Drilling Cemented Carbide	和田 任弘	41
Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten/Silicon-based-coated End Mill Cutters in Milling Hardened Steel	和田 任弘	42
Tool Wear of Multi-layer AlCrWN/AlCrWSiN-coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Sintered Steel	和田 任弘	43

力学的負荷の空間的パターンに注目した物体の「力学的表情」

平 俊男

"Expression in Mechanics Sense" in terms of Distribution Pattern of Load Level

HIRA Toshio

It is emphasized that the design problem is highly dependent on individual skills and sense of aesthetics in general. However, there are also objective aspects in the design process, such as rationality in terms of mechanics. In order to develop the novel design technique, it is a key to reveal the connection between the sensuous- and the objective-aspects in that process. In this article, we assumed that the human designer intuitively see the distribution pattern of load level, such as mechanical stress, strain energy, without the structural analysis. Furthermore we proposed a concept of "expression in mechanics sense" that is the distribution pattern perceived by the designer. The term of *expression* is a metaphor of human facial expression. This virtual expression is regarded as a bridge connecting the sensuous- and objective-aspect. Finally, we showed some methodologies using the deep learning-based captioning engine to estimate the model for perception of shape feature by the human designer.

1. はじめに

一般にデザインと呼ばれる行為は、いわゆるセンスや感性の問題として属人的な文脈で語られ、主観的な側面が強調される。しかしながら、対象とする物体の形態や形状に対する印象の形容には、直観的ではあるものの、その力学的合理性など、物理的特徴に対する言及がみられる。このことは、人が物体から受ける印象のような主観的・感性的側面と、物体のもつ客観的・物理的側面との間に何らかの関連があることを示唆する。すなわち、人の物体形状認識におけるこれら二つの側面の接点を明らかにし、その間の中間的媒介として力学的要因を位置付け、従来経験則的に扱われてきたデザイン方法論を再解釈することで、新たな展開が可能となると考えられる。

本研究では、物体の形態や形状から印象が形成される過程において、物体内部の力学的負荷の空間的パターンが、人には「力学的表情」として心象的に認識されているとの仮説⁽¹⁾に基づき、まず、例として陶磁器カップ形状をとりあげ、物体形状の把握のメカニズムの解明のために深層学習モデルを用いる方法論を示す。次に、単純なはり構造を例に、形状内部の力学的負荷の空間的パターンと感覚との関連を示す。

2. 力学的表情

感性評価に基づく3次元形状デザインを目的とした研究⁽²⁾では、抽象的な3次元造形物体を対象とした評価実験によ

り、嗜好や審美性といった高次の複合的概念を含まない場合、形状に対する感性評価では「均整性」、「活動性」、「力量性」が主要な評価基準となっており、デザインの専門性を持たない一般ユーザであってもその評価の傾向が一致することが示されている。また、機能を満たす形態がそのまま構造として実現され、装飾的要素があまり施されない橋梁構造物では、「機能美」という概念が用いられ、その解釈には「力の流れ」といった表現がみられる⁽³⁾。この表現は、橋梁構造物に限らず、構造設計や機械設計においてもよく用いられており、北村ら⁽⁴⁾は、人がその形状にかかる力の流れを想像する能力を「力学的感性」と呼んでいる。

これらのことは、人が物体の形態や形状に対して想起する印象には、対象物の力学的特徴および物理的特徴が影響を与えていることを示唆している。著者らは、その印象の要因として、物体内部の力学的負荷の空間的パターンを仮定し、そのパターンが心象的な「力学的表情」として把握されているのではないかと考えている。この「力学的表情」は、物体の形態や形状と印象とを関連付ける中間的媒介とみなせるものであり、この関連を探るためには、人が他人の表情を認識する場合と同様に、対象のどの部分（人の表情の場合は「眼」、「口」など）を注視しているか、それらをどのようにパターンとして把握しているかなどを明らかにすることが必要となる。

3. 形状把握と力学的評価

3. 1 深層学習モデルによるキャプション付けに基づく形状把握

物体の形状把握の手がかりを得るために、ここでは、深層学習モデルによるキャプション付けを用いる。深層学習は機械学習のブレイクスルーとして、近年、注目を集め様々な展開がみられる。特に、入力として画像を与えるのみでキャプション付けを行うことが可能であることを示した Google のグループによる研究成果⁽⁵⁾は、深層学習が画像認識だけではなく、画像理解の問題にも応用可能であることを示している。図1に示すように、このような深層学習モデルが、図中左側に示すような陶磁器カップを想定した形状の画像に対して、それがカップの画像であるとの程度の確信度で認識するのか(図中右側)は、その形状のもっともらしさを推定する指標値となる。また、深層学習モデルの中間層における画像への活性化の様子には、形状把握の際の画像中の注目領域といった特徴が反映されていると考えられる。

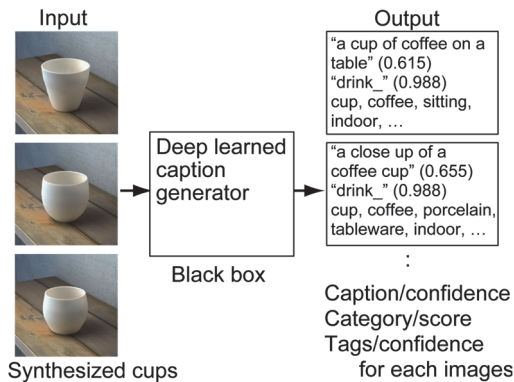


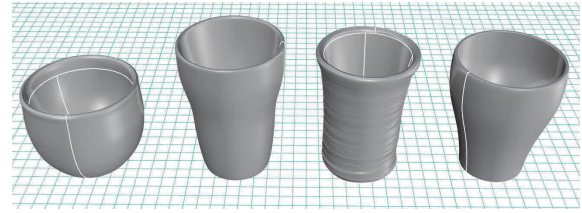
Fig. 1 Captioning for estimating likeliness

3. 2 深層学習モデルによる分類に基づく形状評価

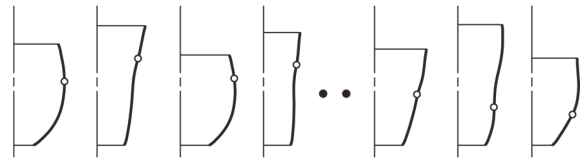
カップ形状に対するもっともらしさを評価するために、まず、実在しない形状を含む多様なカップ形状の画像を用意する。このような新規形状として、3次元スキャンされた既存の陶磁器カップの輪郭曲線(図2(a))を用意し、生成的手法⁽⁶⁾によって120通りの輪郭曲線を得た(図2(b),(c))。ただし、キャプション付けの入力画像の作成にあたっては、背景画像の影響を排除するために、スタジオ状の環境に置かれたカップ形状のレンダリングを行った。入力画像は24ビットカラー、900×900ピクセルとしている。

キャプション付けの学習済みモデルには、Microsoft Cognitive Servicesに含まれるComputer Vision API⁽⁷⁾をブラックボックス的に利用した。このAPIは、COCO Image Captioning Challenge 2015で1位となったFangらのモデル⁽⁸⁾をもとにMicrosoft社が公開しているものであり、与えられた画像に対して2000以上のタグによるタグ付けと、86のカテゴリを出力する汎用のキャプション付けサービスである。

形状の力学的評価にあたっては、半径方向に厚みをつけた輪郭曲線と底に相当する領域を軸対称モデルとして扱



(a) Scanned cups and profiles as references



(b) Synthesized profiles



(c) Rendered images of synthesized cups

Fig.2 Concept for generation of various cup images

い、線形弾性有限要素解析を行った。境界条件は、底部分の垂直方向の変位拘束と、内面に対する圧力である。以下の項において、力学的特徴量としてはカップ側面部の断面内の半径方向の相当応力を取扱う。このとき、対象物は仮想的な線形弾性体としているため、相当応力値は相対的な意味合いのみを持つ。また、相当応力の図示にあたっては、カップの一般的な使用法を想定し、カップ側面部の断面のみを示し、コンター図でのしきい値は、それぞれのカップ側面部断面の相当応力の平均値と標準偏差を用いて決定している。

3. 2. 1 カテゴリ“drink_”と評価された形状

今回、入力として与えた120枚の画像に対して、カテゴリ“drink_”(112枚)と“others_”(8枚)の2種類のみが出力された。図3にComputer Vision APIによってカテゴ



(a) Top quartile on category score



(b) Bottom quartile on category score

Fig.3 Rendered images categorized as “drink_”

リが“drink_”であると分類された画像 112 枚のうち、カテゴリスコアが上位 4 分の 1 のものと下位 4 分の 1 のものを示す。表 1 は、そのカテゴリスコアの上位 3 つ（表中 (a) ~ (c)）と下位 3 つ（表中 (d) ~ (f)）について、入力画像、出力されたキャプション、カテゴリ、タグとカップ側面の断面中の相当応力の分布コンター図、相当応力に関する代表値を示している。

出力されたキャプションは、形状 (a) から (f) のいずれも「コーヒーカップ」に関するものであった。その理由としては、ここで用いた Computer Vision API の学習データセットにおいて、カップ画像が相対的に少なく、また、キャプションの記述に主観的な要素が含まれていないことが挙げられる。一方で、カテゴリ “drink_” に対するスコアに注目すると、Cup B や Cup D（図 2）のような S 字形の

Table 1 Rendered images that are categorized as “drink_” and their generated captions, category, and stress distribution (part of 112 images)













Images	Generated caption (confidence), Category (score), Tags (confidence)	Equivalent stress distribution on side cross section of cups
(a) 	“a cup of coffee on a table” (0.615) “drink_” (0.988) *Highest score cup (0.999), coffee (0.996), sitting (0.957), indoor (0.861), tableware (0.762), black (0.686), ceramic ware (0.522), pitcher (0.299), coffee cup (0.269), Dixie cup (0.090), porcelain (0.069)	 Min: 12.4, Max: 28.7 Median: 14.9 Mean: 15.8, SD: 3.0 CV: 19%
(b) 	“a close up of a coffee cup” (0.655) “drink_” (0.988) *Highest score cup (0.999), coffee (0.995), sitting (0.954), indoor (0.867), tableware (0.755), ceramic ware (0.464), coffee cup (0.306), Dixie cup (0.106), porcelain (0.053)	 Min: 1.7, Max: 10.8 Median: 5.1 Mean: 5.3, SD: 2.5 CV: 47%
(c) 	“a cup of coffee on a table” (0.490) “drink_” (0.988) *Highest score cup(0.999), coffee (0.993), table (0.976), tableware (0.837), ceramic ware (0.378), pitcher (0.254), Dixie cup (0.127), coffee cup (0.118), porcelain (0.048)	 Min: 13.5, Max: 33.9 Median: 16.8 Mean: 17.6, SD: 2.7 CV: 15%
(d) 	“a close up of a coffee cup” (0.693) “drink_” (0.644) *Lowest score cup (0.999), coffee (0.998), tableware (0.667), ceramic ware (0.294), coffee cup (0.253), Dixie cup (0.076), porcelain (0.058)	 Min: 5.4, Max: 11.2 Median: 8.4 Mean: 8.4, SD: 0.7 CV: 8%
(e) 	“a close up of a coffee cup” (0.682) “drink_” (0.646) *Second-lowest score cup (0.999), coffee (0.976), tableware (0.567), ceramic ware (0.467), coffee cup (0.153), porcelain (0.093)	 Min: 4.2, Max: 10.2 Median: 8.5 Mean: 8.5, SD: 0.8 CV: 9%
(f) 	“a cup of coffee” (0.804) “drink_” (0.687) *Third-lowest score cup (0.999), coffee (0.998), tableware (0.660), ceramic ware (0.254), coffee cup (0.192), porcelain (0.063)	 Min: 5.9, Max: 11.2 Median: 9.4 Mean: 9.4, SD: 0.9 CV: 10%



Fig.4 All rendered images categorized as “others_”







輪郭曲線を持つ場合にスコアが高く、Cup Cのように外側に反るような輪郭曲線を持つ場合にスコアが低い。このスコアの大小は、形状の良さを意味するものではないが、スコア値による形状特徴評価の可能性を示していると考えられる。

3. 2. 2 カテゴリ “others_” と評価された形状

図4に、85種類のどのカテゴリにも分類されず “others_”

と出力された8枚の画像を示す。表2は、そのうちスコアが下位の3つを示している。形状(h)を除く7枚の画像のキャプションには「コーヒーカップ」が含まれているものの、カテゴリ “drink_” とは分類されていなかったことから、これらの形状は、表1に示したような形状とは異なる特徴量を持つことが推測される。この結果も学習データセットに依存したものではあるが、これらの形状が実物のカップとしてはあまりみられないことが、深層学習モデルの出力

Table 2 Rendered images that are categorized as “others_” and their generated captions, category, and stress (part of eight images)

Images	Generated caption (confidence), Category (score), Tags (confidence)	Equivalent stress distribution on side cross section of cups
(g) 	“a cup of coffee on a table” (0.707) “others_” (0.023) cup (0.999), coffee (0.998), sitting (0.942), tableware (0.462), ceramic ware (0.378), coffee cup (0.274), porcelain (0.041)	 Min: 4.1, Max: 10.3 Median: 8.5 Mean: 8.5, SD: 1.0 CV: 12%
(h) 	“a vase sitting on a table” (0.351) “others_” (0.031) sitting (0.978), indoor (0.972), ceramic ware (0.219)	 Min: 5.0, Max: 12.3 Median: 9.5 Mean: 9.5, SD: 1.3 CV: 14%
(i) 	“a cup of coffee” (0.715) “others_” (0.035) cup (0.999), coffee (0.995), tableware (0.363), ceramic ware (0.245), coffee cup (0.233)	 Min: 3.7, Max: 9.3 Median: 8.1 Mean: 8.1, SD: 0.9 CV: 11%

として現れていると考えられる。

ここでは、既存の深層学習モデルをブラックボックス的に利用したため、各形状のキャプション付けの鍵となった画像特徴量は直接には明らかでなく、中間層の確認といった検討が今後必要となる。

3. 3 力学的評価からみた形状評価の妥当性

一般に全応力設計の観点からは、応力値のばらつきが小さい方が合理的と評価される。表 1 に示した形状 (a) ~ (c) と形状 (d) ~ (f) の側面の相当応力値の変動係数 (CV 値) を比較すると前者は大きく、後者は小さい傾向がみられた。ただし、ここでとりあげた解析モデルでは、カップ形状側面の肉厚を一定としており、応力分布の様子が実物とは異なっているため応力値のばらつきの程度によって単純な優劣の比較はできない。

カップ側面部断面の相当応力の分布に注目すると、形状 (a) ~ (c) では底部に近いところのみで大きな応力値となり、形状 (d) ~ (f) では口部に近いところにも大きくなっている領域がみられる。一方で、表 2 に示したような形状では、このような共通の傾向はみられない。これらの結果より、前節に示した深層学習モデルが出力するカテゴリスコア値に基づく形状評価は、力学的評価の観点からも妥当性があると考えられる。

4. 力学的負荷の空間的パターン

前章に示したカップ形状の例では、応力値の評価を側面断面で行っているため、力学的負荷の分布は輪郭曲線に沿ったほぼ一次元のものであった。本章では、図 5 に示すような重力下にある矩形一様断面の弾性はりをも 2 点で支持したモデルについて、支間比 $r = s/l$ (ただし支間長 s 、長

さ l) をパラメータとして応力分布の変化をみる。はりには平面応力状態にあるものとし、はり上面には、はりの自重に相当する荷重の 10 倍の分布荷重が一樣に加わっている。有限要素解析にあたっては、はり長さ l の 1/100 を一辺の長さとする正方形要素に分割している。

図 6 に、支間比 r を 100% から 10% に変化させたときの相当応力について、99 パーセンタイル値、中央値、変動係数を示す。ここで、最大応力値を比較の対象としないのは、どの支間比においても支持点で最大値が発生してお

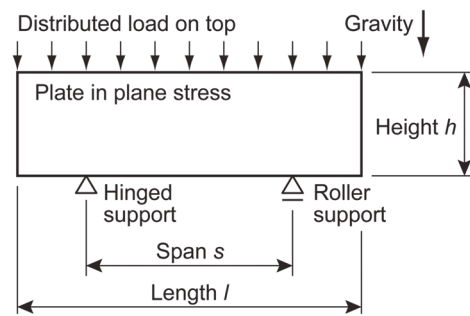


Fig. 5 Structural model

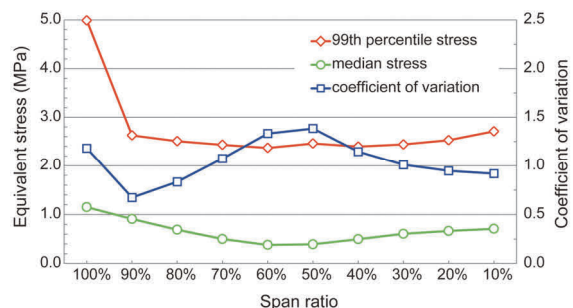


Fig. 6 Equivalent stress vs span ratio

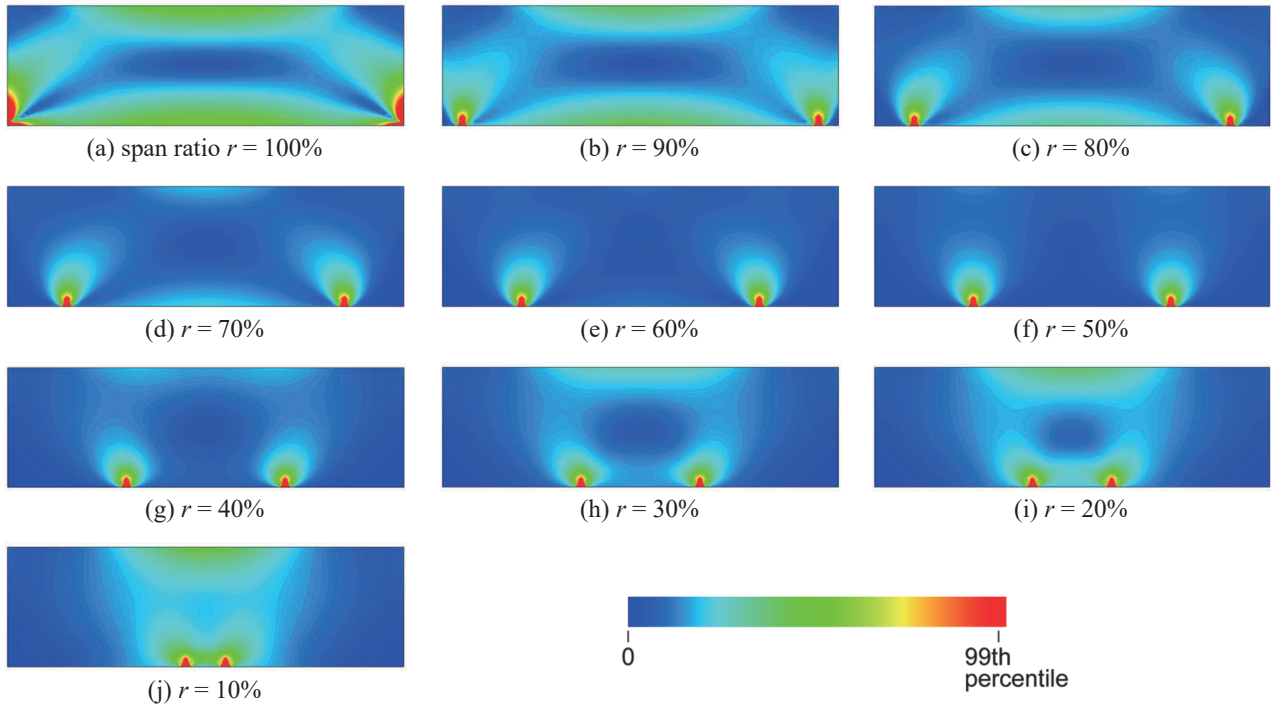


Fig. 7 Stress distribution vs span ratio

り、現実のはり構造と異なりこのモデルが点支持であることに影響され、99パーセンタイル値と比べ約5から9倍の大きさとなっているからである。この図より、相当応力は、支間比が100%の場合において99パーセンタイル値、中央値がともに最も高くなっている。また、その他の支間比においては、相当応力の99パーセンタイル値にあまり差はみられず、中央値は支間比60%及び50%で低くなっている。標準偏差を平均値で割った変動係数は、支間比90%で最も小さく支間比60%及び50%で高い。

弾性はり内の相当応力分布をコンター図として図7に示す。図中のコンターは、応力値が最も高かった支間比100%のはりの99パーセンタイル値を最大値として赤色とし、0を最小値としている。なお、相当応力が99パーセンタイル値を超える部分については最大値と同色としている。これらの図からは、はり上面における相当応力の高い領域の面積が、支間比60%及び50%において小さくなっていることがわかる。このことは、はりの支間比が小さくなるとともに、上向きに凸のはり変形状から下向きに凸の形状に変わり、はり上部中央の応力の水平成分が引張から圧縮に変化し、0(中立状態)となること(図8)が反映されている。この相当応力が小さくなる支間比は、長谷川による構造形態と人間感覚に関する研究⁽⁹⁾における、アンケート集計によって得られた最も安心感を得る支間比60%と対応するものである。一方で、アンケートにより最も不安を感じるとされた支間比20%に関しては、力学的評価との対応は特にみられず、安定性や実構造としてのなじみ深さなどの別の観点からの評価が影響しているものと考えられる。

図9に支間比90%と60%のときの等応力線図を示す。図7のような応力分布や、この線図のようなパターンが人にどのように把握されているのか明らかにすることが、今後の検討課題である。

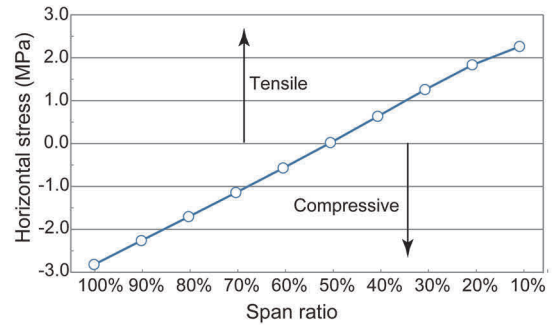


Fig. 8 Horizontal stress at top center of beam

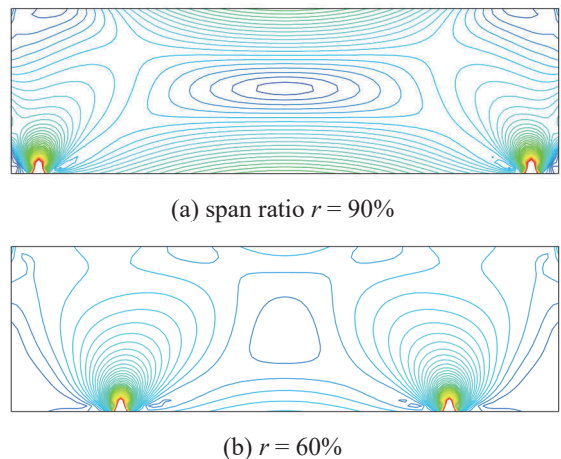


Fig.9 Stress contours

5. おわりに

例として陶磁器カップ形状をとりあげ、その形状把握のメカニズムを探るために深層学習モデルを用いるアプローチを示した。現状では、既存の深層学習モデルをブ

ラックボックス的に用いているため、その形状のもっともらしさとして画像のカテゴリに対するスコアが利用できる可能性を示しているにとどまっている。今後、画像に対する中間層の活性化の様子を検討することで、形状把握の鍵となる画像特徴量を得ることを検討している。

力学的負荷の空間的な分布については、両端突出はりモデルを用いて、感覚との対応を検討した。この結果は、先行研究による最も安心感を持つとされた形態と傾向が一致するものの、感覚的評価と空間的分布との対応付けには至っておらず、詳細な検討が必要となる。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K12517 の助成を受けた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) 平俊男, “力学的表情に関する一考察”, 奈良高等専門学校研究紀要, 第 52 号, (2017), pp.1-4.
- (2) 片平建史, 他 11 名, “3 次元物体の感性評価における主要因子”, 日本感性工学会論文誌, Vol.15, No.4, (2016), pp.563-570.
- (3) 海洋架橋調査会 (編), 橋と景観, (1992).
- (4) 北村隆, 長谷川浩志, 星七海, “脳波情報を用いた形状創生システムの開発”, 日本機械学会 第 27 回設計工学・システム部門講演会 講演論文集, No.17-32, (2017), #1306.
- (5) Vinyals, O., Toshev, A., Bengio, S., and Erhan, D., “Show and tell: A neural image caption generator”, *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (2015), pp.3156-3164.
- (6) 平俊男, “物体の「力学的表情」認識モデルの検討 (多様な感性サンプルの生成)”, 日本機械学会関西支部 第 92 期定時総会講演会 講演論文集, No.174-1, (2017), pp.75-76.
- (7) Microsoft, “Azure Cognitive Services, Computer Vision Documentation”, <https://docs.microsoft.com/ja-jp/azure/cognitive-services/computer-vision/> (参照日 2017-10-12).
- (8) Fang, H., et al., “From captions to visual concepts and back”, *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (2015), pp.1473-1482.
- (9) 長谷川明, “構造形態と人間感覚に関する考察, 構造工学論文集”, Vol. 42A, (1996), pp.463-470.

簡易粉末成形－焼結法および曲げ加工金型を用いた 鉄道車両模型の製作

三部 竜太郎^{*1}, 藤井 惇平^{*1}, 白木 快^{*2}, 福田 龍一,
島田 大嗣, 尾崎 充紀, 笹山 智仁, 谷口 幸典

Fabrication of metal train model by performing metal bending and simplified powder metallurgy technique
in extracurricular activities

Ryutarō SANBE, Junpei FUJII, Kai SHIRAKI, Ryuichi FUKUDA,
Hirosugu SHIMADA, Mitsunori OZAKI, Tomohito SASAYAMA and Yukinori TANIGUCHI

Recently, there are many extracurricular activities which aim to fabricate train model in Japanese high schools. Since the products are exhibited in annual competition and judged by well-informed person, students have to tackle enhancement of their craft to fabricate realistic train model themselves. To enhance its feel of a material, we have designed and produced a HO gauge train model with metal working processes which are simplified to ensure safe and easy operations by young students. Die-bending process and simplified powder metallurgy technique has been conducted to form main body. Metal train model have been successfully fabricated and won the highest award in the competition.

1. 緒 言

鉄道愛好家の中で鉄道模型を主な趣向として交流を図るコミュニティが存在し、そのニーズに合わせた様々なイベントがある。高等学校においても、鉄道模型を扱う文化系のクラブ・サークルが多く存在しているが、自ら手を動かして模型を作ることに興味を示す高校生は少なくなく、鉄道風景のジオラマ製作から鉄道車両の自作まで、ものづくりを主体に据えた活動が成されている。そのような課外活動の成果発表や交流の機会として、(一社)鉄道模型コンテストが主催する「全国高等学校鉄道模型コンテスト」(以下、鉄道模型コンテストと表記)が2009年より毎年開催されている⁽¹⁾。鉄道模型コンテストは、鉄道風景ジオラマや、鉄道車両模型の規格の1つであるHOゲージ車両を自作して出展するものであり、その出来栄が審査員および一般来場者の投票で評価される。なお、HOゲージは実物の鉄道車両に対して1/80の大きさのものを指し、日本において一般的な規格であるNゲージの約2倍の寸法である。

さて、市販の鉄道車両模型の生産工程においては、精巧さを求める愛好家のニーズを満たすために、プラスチック

射出成形はもちろん、ダイカスト成形や板金成形等の各種金属加工法も採用され、精度とともに質感が高められている。鉄道模型コンテストにおいて、金属素材を活用した作品はわずかにあるが、それらは、各種板金成形加工機や高価なレーザー加工機等、金属加工環境を有する工業高校や工業高等専門学校の作品に限られるようである。高等学校の生徒にとって金属の成形加工を行うことは困難であるため、紙やプラ板を素材とした手作業による製作例がほとんどとなる。したがって特に質感の面で市販製品と自作作品の間には大きな隔りがある。

筆者らは工業系高等教育機関に所属する学生・教職員として、高専ロボコンに代表されるような課外学習活動として金属加工作業を行い、金属の質感を活かした作品が製作可能な環境にある。しかし、市販の鉄道車両模型で適用されるような高精度な造形が可能な機器は有していない。これは、ダイカスト成形など高精度かつ大量生産を前提とした高価な金型による金属加工を教育目的で運用することがコスト面で非現実的なためである。ダイカスト成形以外に、意匠の面において高精度な金属加工法は鋳型鋳造～機械加工、となる。鉄道模型では特に顔の部分である車両前面部(以下、前面ブロック)に複雑な造形を行う必要があ

*¹ 機械工学科3年生, 機械研究会部員

*² 電気工学科1年生, 機械研究会部員

るが、そのために CNC フライス盤が必須となり、高度な専門技能が必要となる。加えて、鑄造作業を課外学習活動として実施することは安全性の観点からも困難であり、鉄道模型コンテストの趣旨からも逸脱するものと思われる。一方で模型の車体については、ワイヤーカット放電加工機を使用すれば、車体側板の窓やドア部を高精度に切抜き加工することが可能である。しかし、形状再現性を考えると、側板の上端と下端はそれぞれ天井板と床板と曲面でつながるために、その部分の加工をどのように行うかが問題となる。そのため、HO ゲージ車両模型の自作を金属素材で行うことによる製品の質感向上を目指す場合、車体形状の再現性を多少犠牲にするか、単純形状部品のみ金属加工品とし、それ以外を紙やプラスチック素材で補うか、のいずれかの選択が必要とされる状況にあった。

そこで筆者らはこれまでに、実物の車体に忠実な側板形状を曲げ加工によって成形することを目的として、レーザー加工機で側板形状となるように切り出したアクリル樹脂板を車体長さ分だけ積層した簡易的な曲げ加工型を製作し、真鍮板の曲げ加工を行った⁽²⁾。その結果、この手法ではアクリル樹脂間の接合精度を確保することが困難であり、側板にしわが発生した。またアクリル樹脂の剛性と圧縮強度の不足から加圧力は制限され、目的とする曲率を得ることができなかった。これら成形不良による形状誤差を手作業にて修正する必要が生じたこともあり、鉄道模型コンテストにおいては当日までに製作が間に合わず未完成品を出展せざるを得なかった。

その一方で鉄道模型コンテストにおいては、3Dプリンタやレーザー加工機など、いわゆるデジタルファブリケーション機器を駆使して精巧な造形を実現した作品がいくつか見られる状況になっている。その背景として、FabLab (Fabrication Laboratory) と定義される市民工場の開設が近年急速に進んでいることが挙げられる。大学においても工学部のみならず、教育学部や図書館に FabLab が設置されつつあり、人材育成はもちろん、地域社会とのつながりの構築や地域に根差した商品開発など、様々な目的で運営されている。総務省情報通信政策研究所による報告⁽³⁾では、現在、大量生産・大量消費を前提として企業だけが行うものと暗黙的に認知されている設計製作活動は、多品種少量生産を可能とするデジタルファブリケーション機器の発展と FabLab の普及によって、将来的には誰もが出来るものになる、という予想もされている。デジタルファブリケーション機器で加工可能な素材は現時点では樹脂や木材、紙であるが、アルミや銅の切削加工に対応する比較的低価格な卓上 CNC ミリングマシンも現れている。鉄道模型コンテストのような高校生や学生向けのものづくりイベントへの参加を契機として、一般的な教育機関においても課外活動等でのデジタルファブリケーション機器の導入が増え、今後、金属素材を活用した作品も増えることが示唆される。

本報告では、HO ゲージ鉄道模型の自作を金属素材で行うにあたり、車体側板形状の高い再現性を実現するため、アルミ合金製金型を製作してアルミ板素材の曲げ加工を行った結果について示すとともに、新たな試みとして粉末

冶金法を用いて銅合金製の車両前面ブロックを造形し、車両全体をほぼ金属化した製作内容について述べる。なお、製作した車両は2016年12月に西日本旅客鉄道株式会社によって運行開始された323系(先頭車2両、中間車6両の8両編成)である(図1)。



図1 JR西日本323系の外観写真

2. 設計および製作方法

2.1 設計製作の指針

十分な強度を兼ね備えた車体とするために、図2に示すような車体構成とした。車体を構成するパーツは床板とフレーム、そして側板の3つである。

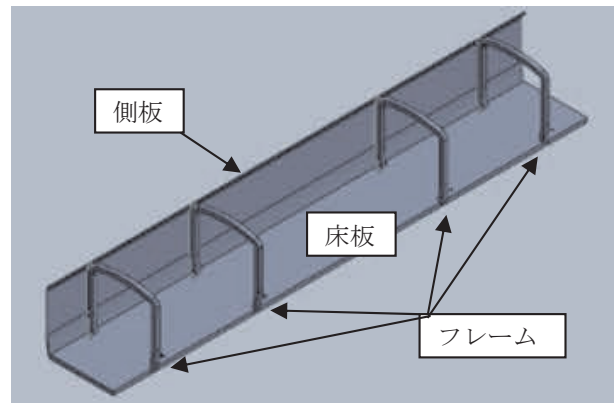


図2 車体構成図

床板となる平板に4つの門型のフレームを差し込み、そのフレームに曲げ加工を施した側板を接着することで、製作の簡略化と車体剛性の向上を図っている。これを計8両分製作する。次に、前面ブロックについて、図3に示すような3D形状データを作製した。

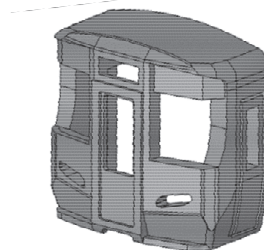


図3 前面ブロックの3D形状

この形状を、銅およびニッケルを素材として簡易粉末成形-焼結法⁽⁴⁾で製作する。一般的な粉末冶金法 (Powder Metallurgy Method: PM 法) は、金属粉末の混合～金型成形～焼結、という生産プロセス⁽⁵⁾で、焼結高速度工具鋼⁽⁶⁾や、鉄道車両においてもパンタグラフのすり板の生産に適用されているなど、各種焼結合金の製法として有名である。これを簡便な作業で誰もが安全に実施できるように改良したのが簡易粉末成形-焼結法である。この手法は、粉末の成形をスリップキャスト法で行うことで手作業にて行えるように簡易化したものであり、金属粉末を液体バインダと混ぜて泥状にして、それをあらかじめ用意した成形型に流し込んで造形する。液体バインダとして寒天水を用いれば、80℃程度の安全な温度で、無加圧で簡単に造形できることが確かめられており、成形型は市販の速乾性シリコーン樹脂に3Dプリンタで製作した任意形状の品物を型取りして製作可能である。ただし、本手法においては成形体の焼結後の体積が約1/3に収縮することがわかっている⁽⁴⁾。したがって型取りする原型は製品の収縮を考慮して大きめに製作する。また、開口部を有した形状の場合、乾燥～焼結時の不均一な収縮によって製品形状が大きくひずむ可能性もある。これらを考慮して、原型形状はその大きさを製品の1.4倍とし、窓開口部などをふさいだものとした。原型の3DデータとそれをPLA樹脂で出力したものを図3に示す。

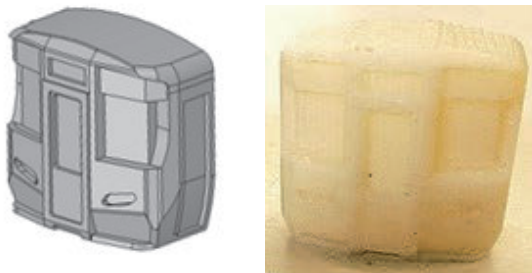


図3 簡易粉末成形のための原型

車体側板は曲げ加工を行うため、加工性の良い材料を用いる必要がある。前回の試みでは厚さ0.2mmの真鍮板を使用した。十分な加工精度と車体剛性を確保できなかったことから、今回は十分な強度を得ることや塗装の手間を省くことを目論み、製作する車両と同様にアルミ板を使用し、その厚さを0.5mmとした。床板とフレームには厚さ2.0mmのアルミ板を使用した。また、排障器は3DプリントしたPLA樹脂製とし、クーラー・床下機器は3Dプリンタにて出力した原型を型取りした型を用いてレジンキャストを用いて大量に複製することで、製作時間と費用の短縮を図った。パンタグラフや台車は市販製品を利用した。

2.2 車体の製作方法と側板の加工結果

床板はワイヤーカット放電加工機を用いて素材を切断し、この時にフレームを接合しやすくするために切り欠きを設ける。同じくワイヤーカット放電加工機を用いて切り出したフレームをこの切り欠きに接合する。これら形状データはフリーの2DCADソフトウェアであるJw_cad (Jiro

Shimizu & Yoshifumi Tanaka) を用いて作成した。

車体側板は、同じくワイヤーカット放電加工機を用いてドアや窓などの部分を切り抜いたものを、金型を用いて曲げ加工を行って製作する。金型素材は側板素材であるアルミ板より硬く、かつ切削加工しやすい材料を選定する必要があり、アルミ合金として強度の高いジュラルミンブロックとした。これをマシニングセンターで切削加工し、図4に示す形状の曲げ加工金型とした。マシニングセンターの加工可能長さの都合で長手方向に二分割した二組を製作し、金具を用いて1つに繋げて使用する。

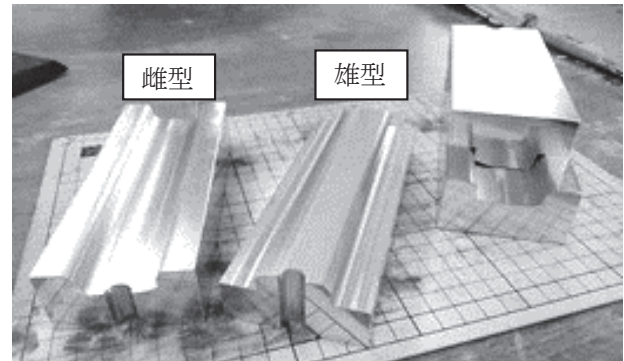


図4 簡易粉末成形のための原型

曲げ加工は、雌型に側板を設置し、雄部を被せて手で押さえつけた状態で、金型の中央と両端の三か所を万力で強圧して行った。これは金型の長さが長いために一度に車体長さ全体を補う加圧力を負荷できないためである。このようにして金型による強圧で曲げ加工された側板を図5に示す。結果、しわの発生も無く、上端と下端における曲面が滑らかに成形されていることがわかる。

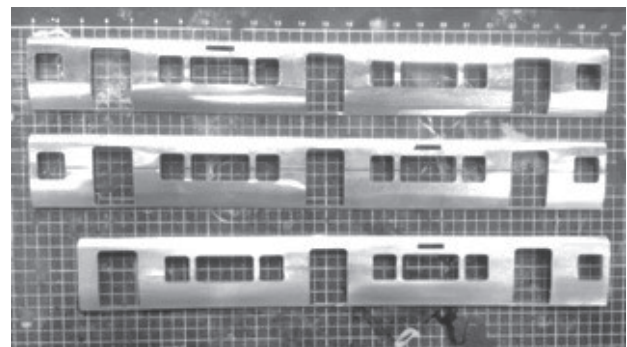


図5 曲げ加工後の側板

2.3 前面ブロックの製作方法

素材として用いた銅粉末 (Cu)、ニッケル粉末 (Ni) および水と寒天粉末 (Agar) の配合量を表1に示す。

表1 簡易粉末成形における成形体素材の配合量

Cu	200 g
Ni	32 g
Water	225 g
Agar	2.5 g

このようにNi粉末をCu粉末に対して16mass%配合することは、焼結後の製品をCu-Ni合金として強度を増加させることを意図している。また、CuにNiを添加すると、いわゆる白銅と呼ばれるようにその色合いが銀白色に近いものになることも、後の塗装工程を考えると好都合となる。

焼結後の製品がどれほど収縮するのかが分からないために、収縮率の測定と、形状精度の調整のための試作実験を三通りの条件で行った。作業行程を以下に箇条書きで記す。

- (1) 表1に基づいて測り取った原料粉末をビーカー内で水と混練する。
- (2) 温度が70～80℃になるようにビーカーを加熱保持しながら十分に混練してスラリーとする。
- (3) スラリーを型に流し込み、15分ほど冷蔵庫で冷却して型から成形体を抜き出す(図6)。
- (4) 成形体を十分に乾燥する。なお、本研究では電気乾燥器にて60℃で24時間以上乾燥させた。
- (5) 乾燥した成形体の端面を紙やすりで平滑にしたものを、ステンレス容器の中に入れ、備長炭粉末を、成形体を覆うように容器に充填する。
- (6) ステンレス容器ごと電気炉に投入し、初めに300℃で60min. 保持して寒天成分を昇華して取り除く。その後、1050℃で必要な時間だけ保持する。図7に焼結における温度-時間グラフの例を示す。
- (7) 焼結後、容器から製品を取り出し、表面の酸化膜をワイヤブラシで取り除く。その後、ボール盤による穴あけと手仕上げにて、所要の形状に仕上げて完成させる。

2.4 前面ブロックの試作実験結果

まず初めに、図3に示した原型を用いて成形型を作製し、前節で述べた通りの手順で作業を進め、焼結時の保持時間を180min.としたものを試作した。図8にその製品外観を示す。側面の形状が全く転写されていないのは、図6でも見られるように、型からの抜き出しの段階で形状が損なわれたためである。製品の寸法を目標値との対比として表2に示す。

この試作より、以下の知見が得られた。

- (1) 3Dプリントした原型表面の積層痕が成形型に転写され、そのまま製品表面に現れる。
- (2) 前面の貫通扉と窓部の間にある段差、および下部の段差など細部形状についてはスラリーの充填が十分ではない、もしくは成形体を抜き出す際に破損してしまうため精巧な形状となっていない。設計の段階で、段差の厚さを広めにとっておく必要がある。
- (3) 製品の寸法が元の模型と比べ、僅かに小さくなるため仕上げしろが取れない。これは焼結時間が長すぎたことが原因と考えられる。

これより、側面部分を別部品として三つのパーツとして分割して製作し、前面と接合させることとした。それらパーツの3D形状を図9に示す。前面をAパーツ、屋根部をBパーツ、左右側面は同形状であるためそれらをCパーツとする。



図6 乾燥前の成形体の外観

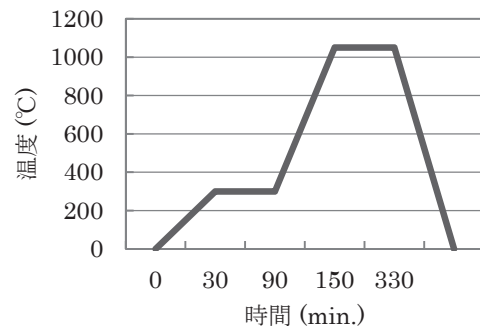


図7 電気炉による焼結時の温度-時間設定の例



図8 焼結後の前面ブロックの外観 (焼結時間 180min.)

表2 焼結時間 180min. で作製した製品の寸法

	目標値	製品
横 (mm)	34.0	33.8
縦 (mm)	32.0	31.4
横誤差率 (%)		-0.588
縦誤差率 (%)		-1.88

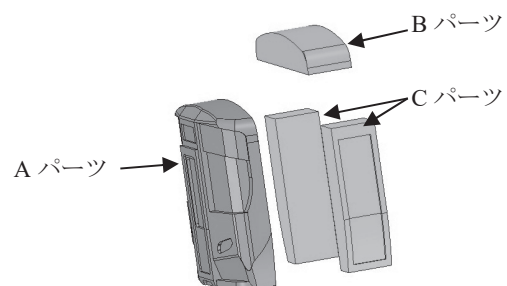


図9 前面ブロックの分割

また、原型の積層痕をパテなどで滑らかに仕上げた上で型取りするとともに、細部形状に適当な抜き勾配を設けて成形体が抜けやすくなるようにした。加えて、A パーツについては肉厚が薄くなったことを利用して、乾燥後の成形体に穴を設けることで、焼結後の穴あけ～手仕上げ加工を省略可能かどうか確かめるものとした。その製品の外観を図 10 に示す。焼結後、左右の窓枠が側方向にひずんでいることがわかる。この原因は、内側部分の体積収縮量が相対的に増加したことで、内側と外側で縦方向のひずみ速度に差が生じた結果、ひずみ速度が遅い窓枠外側が座屈変形したためと考察される。

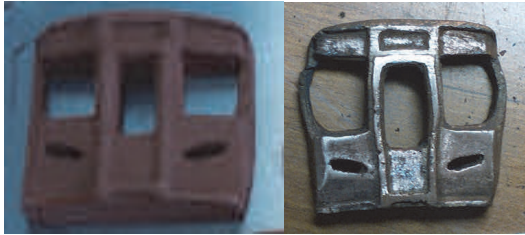


図 10 前面ブロック成形体と焼結後の外観 (A パーツ、開口部を穴あけ後に焼結)

ひずみ速度の差を極力なくすように窓穴の大きさを小さくして試作してみたが、座屈発生を完全に抑制することはできなかった。加えて、肉厚が薄くなったことで若干のねじり変形も見られたため、焼結時において均一に収縮させて形状を保つ観点からは、成形体にある程度の厚みが必要であることがわかった。これら結果を踏まえて、焼結後の手仕上げ加工の省略化については断念し、厚めの肉厚になるように、また段差部についても抜き出し時の破損を回避するために焼結後の後加工で施すこととして A パーツの形状を再設計した。再設計した 3D 形状を図 11 に示す。また、仕上げしろを取るために、焼結温度 1050℃での保持時間を 120min. に変更した。焼結後の外観を図 12 に示す。なお、窓部の穴はボール盤によるもので、手仕上げで加工している最中の子である。

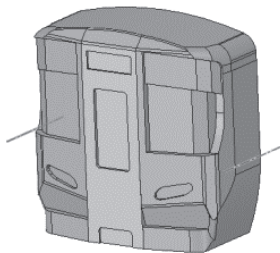


図 11 再設計した A パーツ形状



図 12 再設計 A パーツの焼結後の外観

A パーツについて複数回の試作を行い、最終的に良好な形状となった製品の寸法を表 3 に示す。両者とも収縮量が不十分であり、120min. では保持時間が若干短いことがわかったが、縦横比はおおむね保たれており、誤差量も仕上げしろとして修正可能な範囲であったため、これらを別に作成した B パーツ、C パーツを介して車体と接合して先頭車両 2 両を完成させることに成功した。

表 3 焼結時間 120min. で作製した製品の寸法

	目標値	製品①	製品②
縦 (mm)	34.0	35.8	36.0
横 (mm)	32.0	33.5	33.3
縦誤差率 (%)		5.29	5.88
横誤差率 (%)		4.69	4.06

3. 作品の完成と鉄道模型コンテスト出展結果

塗装した車体部品と前面ブロック部品を全車両分組み立てて、最後に 3D プリンタ等で製作した各種パーツを取り付け、所定のマーキングを施して HO ゲージ車両模型として完成させた。作品の外観写真を図 13 に示す。



図 13 完成した作品の外観写真

本作品を第 9 回全国高等学校鉄道模型コンテスト 2017 に出展した結果、最優秀賞を獲得することができた。したがって、簡易粉末成形-焼結法および曲げ加工金型を用いることで、市販品と同様の質感を有し、かつ形状の再現度の高い鉄道車両模型を製作することができたものと言える。

4. 結 言

HO ゲージ鉄道車両模型を設計製作するにあたって、一般的には紙やプラ板を素材として製作されている車体および前面ブロックの金属化を実現するため、ジュラルミン金型を作製してアルミ板の曲げ加工を行い、実物と同様の車体側板形状を成形するとともに、簡易粉末成形-焼結法

による Cu-Ni 合金製の前面ブロックの製作に成功した。簡易粉末成形－焼結法については、試作を繰り返して検討した結果、手仕上げなど後加工の労力を排除できるほどの精巧な造形法として確立するまでには至らなかったものの、金属加工設備を用いずに、車両の顔となる部品を一定の精巧さで製作することができた。完成した作品を鉄道模型コンテストに出展した結果、最優秀賞を獲得することができたことから、本報告で実施した製作手法は、市販品と同様の質感を有する金属製模型の自作に適しているものと言える。

謝 辞

製作作業においては、奈良工業高等専門学校機械実習工場の設備を利用させていただくとともに、関係する技術職員の先生方の多大なるご協力をいただいた。また、鉄道模型コンテストにおいてはコンテスト関係者や参加校の生徒の方々から鉄道車両模型の自作に関する有益な助言をいただいた。ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- (1) 鉄道模型コンテスト HP, <https://www.moraco.jp/>
- (2) 榎真一, 谷口幸典, 高橋明, 島田大嗣, 福田龍一, 三部竜太郎: 鉄道模型車両 HO ゲージの設計製作, 日本設計工学会関西支部平成 28 年度研究発表講演会講演論文集 (2016), 67-68.
- (3) 総務省情報通信政策研究所: 「ファブ社会」の展望に関する検討会報告書, 2015.
- (4) 谷口幸典: 粉末冶金－焼結法を教材化した小中学生向け教育プログラムの開発, 塑性と加工, 57-671 (2016), 1128-1129.
- (5) 石丸安彦: 粉末冶金の基礎と応用, 67, 技術書院, 1993.
- (6) 黒田大介: 機械・金属材料学, 110, 実教出版, 2015.

極小容積衝撃波管を用いた超音速噴流の挙動観察

福岡寛, 竹村凌平*, 矢尾匡永**, 中村篤人***, 廣和樹**, 榎真一****

Observation of Supersonic Jet using small volume High-Pressure Shock Tube

Hiroshi FUKUOKA, Ryohei TAKEMURA, Masanori YAO,
Shigeto NAKAMURA, Kazuki HIRO, Shinichi ENOKI

The unsteady supersonic jet and the shock wave injected by the small volume shock tube are discussed by experimental results. The experimental was carried out by the BOS(background oriented schlieren) method. The main parameters are the pressure ratio by the high pressure chamber/ a back pressure P_h/P_b and the length of high pressure chamber/diameter ratio L_h/D . The velocity of the shock wave and supersonic jet were estimated by the simplified background oriented schlieren method. It was found that the propagation velocity of the shock wave is almost the same with time. It was found that the propagation velocity of the jet reaches the peak value at first. Then the propagation velocity of the jet decays with the time. When the jet velocity decays in some degree, they are almost same value with time.

1. 緒 言

近年, 様々な溶射技術が厚膜形成に提案されている。溶射技術の1つとしてコールドスプレー法がある¹⁾。コールドスプレー法はラバルノズルによって加速された固体粉末を基板へ衝突させ成膜する溶射方法である。加速された粉末は300m/sから1200 m/sの速さで基板に衝突する²⁾。コールドスプレー法の利点は酸化や熱影響を抑制し, センチメートルオーダーの被膜を形成することである。このためコールドスプレー法は, 固体状態での成膜プロセスに効果的であると言える。しかしながらコールドスプレー法には, 粉末供給装置や粉末を温めるためのヒーターなど様々な装置が必要であり大規模なものになってしまう。また成膜技術の向上には, 装置の小型および簡易化が必要となる。このためコールドスプレー法は, 固体状態での成膜プロセスに効果的であると言える。しかしながらコールドスプレー法には, 粉末供給装置や粉末を温めるためのヒーターなど様々な装置が必要であり大規模なものになってしまう。また成膜技術の向上には, 装置の小型および簡易化が必要となる。

そこで私たちは, コールドスプレー法の代わりに極小容

積衝撃波管を使うことを提案した。衝撃波管は衝撃波やガス膨張の動態を明らかにするための基礎実験装置である。衝撃波管は高圧室と低圧室から構成されており隔膜によって仕切られている簡素な構造になっている。衝撃波管によって形成された衝撃波は通過後に高温領域を作ることが報告されている。私たちはこれらの特徴および特性に着目し被膜形成に応用することを考えた。また従来の衝撃波管は衝撃波管の直径と高圧室長さの比である直径比が大きいものであった。極小容積衝撃波管とは衝撃波管の原理を応用した高圧室長さを極めて小さくした衝撃波管のことである。本衝撃波管は数値計算により高温領域の生成が有効であることが報告されている³⁾。しかし, 極小容積衝撃波管を使った実験の報告は少ない。また本衝撃波管は, 高圧室長さを容易に変更できることも特徴である。高圧室長さを伸ばすことは噴流の持続時間を長くし, このことが成膜の場合に噴流が粉末を加圧する時間を長くすると期待している。そこで本研究は極小容積衝撃波管を用いた高圧室長さとして圧力比を変えた場合の噴流の挙動を調査する。

流体の挙動を調査するためには流体の可視化を行う必要がある。高速流体を可視化する手法として, シュリーレン法が一般的に知られている。シュリーレン法の原理

* 機械制御工学専攻2年 ** 奈良高専機械工学科

*** 奈良高専電子制御工学科 **** 大阪産業大学工学部機械工学科

は密度変化により生じる光の屈折を利用している。しかし、シュリーレン法は複雑な光学系を必要とすることや、可視化範囲がレンズやミラーの直径に依存してしまう欠点がある。Meier は、シュリーレン法の欠点を改善した Background Oriented Schlieren (BOS) 法と呼ばれる可視手法を提案している。この原理はシュリーレン法と同様に密度変化によって生じる屈折率の変化を利用したものである。従来のシュリーレン法は、平行光束を作り出すための凹面鏡、ピンホールおよびナイフエッジなど複数の光学装置が必要であった。一方、BOS 法ではシュリーレン法で必要となる光学装置が必要なく、適当な光源、背景画像およびカメラのみの非常に簡素な撮影系で計測を行うことができる。また BOS 法は、可視化範囲がレンズやミラーの直径に依存しないため大型の計測対象に対しても安価に適用することができる。さらにこの手法は、適当な画像処理を行って撮影された背景画像のずれ量を求めることにより、密度情報を定量的に求めることが可能である⁴⁾。最近では太田らによって高精度な密度画像を作る手法が提案されている⁵⁾。この手法はカラーグリッド背景パターンが使われており、一般の BOS 法と比較してより定量的に密度計測ができると期待されている。しかし BOS 法は可視化手法としては確立されていないことが問題とされている。

本研究では簡易な BOS 法を用い高圧室長さおよび圧力比が噴流の速度に与える影響を調査することが目的である。

2. 実験装置および方法

2.1 Background Oriented Schlieren (BOS) 法

図2に BOS 法の計測原理の概要を示す。構成要素は背景画像、密度変化領域およびカメラである。密度勾配が存在しない場合の光の経路を実線で示す。密度勾配がある場合、光が通過すると密度変化に伴った屈折率変化によって通過光が屈折する。この光の経路を破線で示す。この2つの光の経路のずれ量を Δh とする。 Δh は屈折率勾配の積分量と、背景画像と密度勾配までの距離 L_b 、密度勾配からカメラまでの距離 L_c およびカメラの焦点距離 f により式(1)のように表される⁷⁾。また、屈折率と密度の関係は式(2)で表される。ここで n, ρ, G および r はそれぞれ屈折率、密度、Gladstone-Dale 定数および背景画像のストライプと垂直な方向の座標である。

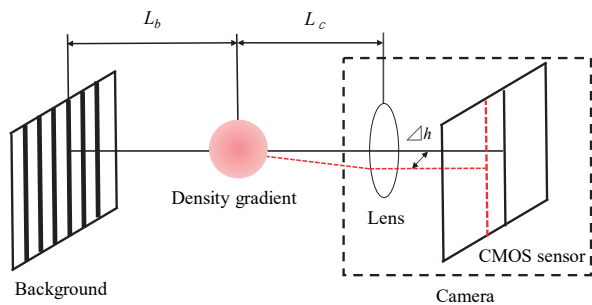


Fig.2 Measurement principle of background oriented schlieren

$$\Delta h = \frac{l_b f}{(l_b + l_c - f)n_0} \int_{l_b - \Delta l_b}^{l_b + \Delta l_b} \frac{\partial n}{\partial r} dl \quad (1)$$

$$G = \frac{n-1}{\rho} \quad (2)$$

2.2 簡易 BOS 法

BOS 法で Δh を算出するためには画像処理を用いる必要がある。しかしながら、可視化画像のみを即時に得ようとする場合、BOS 法は画像処理を経ずに密度勾配を可視化することができる。他の手法と分けけるために画像処理なしの BOS 法を簡易 BOS 法と呼称する。本実験の衝撃波および噴流の挙動観察はこの手法を用いた。衝撃波および噴流の伝播速度は二つの画像の衝撃波および噴流の伝播距離を比較し移動距離を算出することで求めることができる。

2.3 実験方法

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は極小容積衝撃波管および可視化装置で構成されている。高圧空気はボンベからレギュレータで減圧調整し、衝撃波管に充填する。高圧室および低圧室は隔膜によって仕切られており、隔膜を破ることによって高圧室に充填された高圧ガスが低圧室に流れ込む。そして高圧ガスは低圧室の開口端から噴流となり撮影領域に噴射される。衝撃波管の直径および低圧室長さはそれぞれ $D=10\text{mm}$ $L_f=12\text{mm}$ である。隔膜にはルミラーフィルムを用いた。パラメーターは高圧長さ $L_h/D=1, 10$ および圧力比 $P_h/P_b=10.9-50.8$ とした。 P_h および P_b はそれぞれ高圧室の圧力および大気圧である。隔

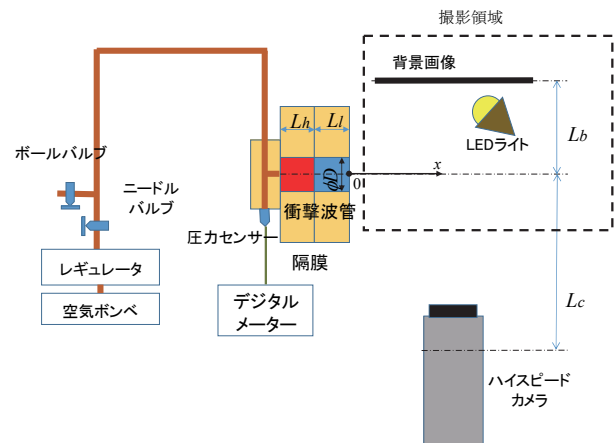


Fig.1 Experimental apparatus

膜厚さは圧力比を変えるために $T_f=25, 50, 75, 100 \mu\text{m}$ をそれぞれ使用した。圧力比は調節するために、隔膜厚さを $T_f=25, 50, 75, 100 \mu\text{m}$ に変更し $P_h/P_b=10.9-11.0, 23.8-24.7, 35.4-38.0, 50.6-50.8$ にそれぞれ対応している。

撮影領域に噴射された噴流は簡易 BOS 法を用いて可視化映像を撮影した。簡易 BOS 法で使用した実験装置は背景パターンを印刷した紙、発光ダイオード(連続光)およびハイスピードカメラ (Phantom v7.3) を使い構築した。衝撃波および噴流の伝播速度は時系列ごとに撮影した画像と参照画像のずれによって算出される。ゆえに衝撃波と

噴流の伝搬速度は画像処理なしで簡素に算出することができる。撮影条件はレンズの焦点距離 200mm, F 値 22, シャッタースピード $16\mu\text{s}$ (62500fps), 露光時間 $14\mu\text{s}$, 解像度 $320 \times 104\text{pixel}$, 背景画像と撮影対象物の距離 $L_b=500\text{mm}$ および撮影対象物とハイスピードカメラの距離 $L_c=3000\text{mm}$ とした。背景パターンは Sin 波 (幅 2 mm) の背景パターンを使う。

3. 結果および考察

3. 1 代表的な流れ場

図 4 (a) ~ (f) は $L_h/D=1$ および $P_h/P_b=50.2$ の場合の撮影領域における背景画像を示している。図 4 において、噴流が開口端から噴射した直後の画像の 1 フレーム前の写真を $t=0\mu\text{s}$ とした。また衝撃波管の開口端および開口端中心をそれぞれ $x/D=0$ および $y/D=0$ とした。図 4 (b) ~ (f) は図 4 (a) と比較すると背景画像にゆがみを確認することができる。このゆがみは密度勾配によって光線が屈折することで作られる。このゆがみを噴流とし、 $y/D=0$ における x/D 軸上のゆがみの先頭を噴流の先頭とする。図 2 (b) および (c) より、噴流の先頭はそれぞれ $x/D=2.07$ および 3.76 に達している。また、図 4 (c) より出口角から噴流境界やバレル衝撃波の形成が確認でき、瞬間的に不足膨張噴流の流れ場に似た状態となっている。このことから簡易 BOS 法は衝撃波管から噴射された噴流を可視化することができたと言える。図 4 (d) および (e) より噴流の先頭は、それぞれ $x/D=5.20$ および 6.29 に達している。このことから、図 4 (d) から (e) の間における噴流の伝搬距離は、図 4 (b) から (c) の間における噴流の伝搬距離と比べると短くなっていることがわかる。つまり噴流の伝播速度が、時間経過ごとに減衰していると考えられる。これは高圧室の容積が小さいため、噴流の持続時間が短いからである。

上述より噴流の伝播速度は時間経過ごとに減速していることがわかった。同じ条件における衝撃波および噴流の挙動をより詳細に調べるために、図 5 に BOS 画像の時空間断面画像を示す。図 5 は図 4 の $y/D=0$ における横軸上を切り取り撮影順に積み重ねた画像である。図 5 は $\Delta t=16\mu\text{s}$ の画像を 27 枚重ねている。縦軸および横軸はそれぞれ時間および x/D である。衝撃波および噴流はそれぞれ $t=208$ および $384\mu\text{s}$ の間において $x/D=8$ に達している。図 5 において、衝撃波は直線状に伝搬していること様子が確認できる。一方噴流の先頭は、 $t=224\mu\text{s}$ まで曲線状に伝搬し、 $t=224\mu\text{s}$ から直線状に伝搬していることがわかる。定量的にこれらの現象を調べるために、図 6 に衝撃波、噴流の伝搬速度および x/D の関係を示す。図中○および●はそれぞれ衝撃波および噴流の伝搬速度を示している。図 6 中 $x/D=2.0, 2.2$ および 6.9 を除くと衝撃波の伝搬速度は 377 から 410m/s で伝搬していることがわかる。このことから衝撃波の伝搬速度はほとんど一定で伝搬していることがわかる。また噴流の伝搬速度は $x/D=0.77$ で最大値 431m/s の値をとる。噴流の伝搬速度は $x/D=1.4\sim 5.6$ の間で時間経過ごとに減速している。また噴流の伝搬速度は $x/D=5.6$ で

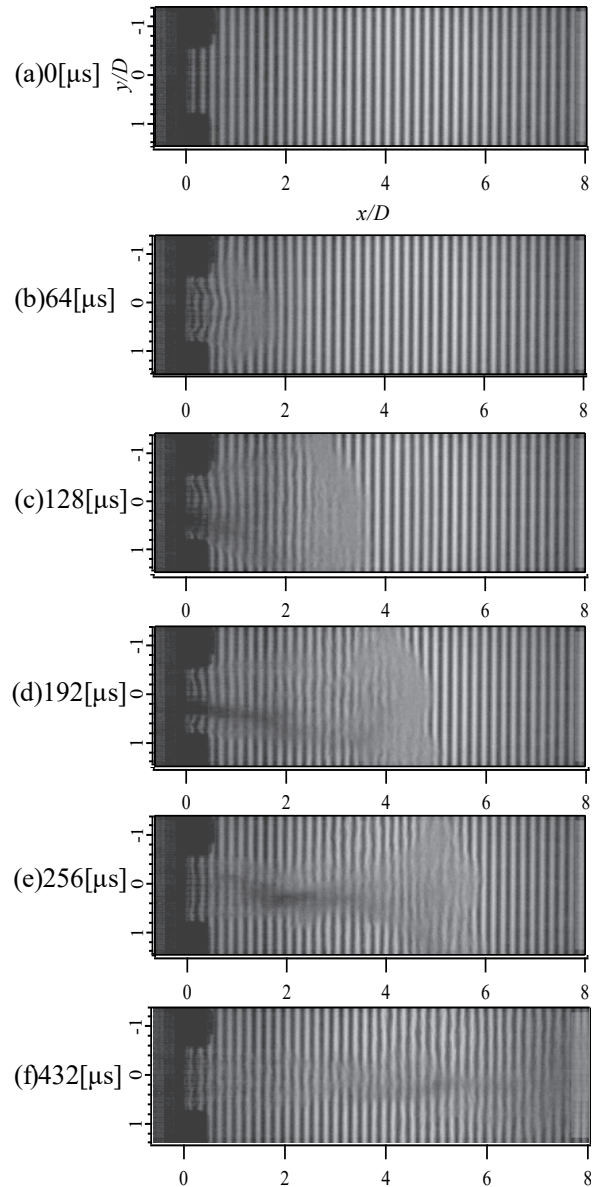


Fig.4 Typical flow fields for $L_h/D=1, P_h/P_b=50.2$

161m/s まで減衰する。そして $x/D=5.6$ から 8.3 の間において、噴流の伝搬速度はおよそ 161m/s である。つまり $x/D=5.6$ から 8.3 の間において噴流の伝搬速度はほぼ一定の値をとる。

3. 2 高圧室長さが流れ場に与える影響

前節より高圧室長さ $L_h/D=1$ および圧力比 $P_h/P_b=50.2$ における衝撃波の伝播速度はほとんど一定であることがわかった。一方噴流の伝播速度は最大値の値をとる、そして時間経過ごとに減速することがわかった。従来の衝撃波管は高圧室長さを伸ばせば噴流の噴射時間は長くなることがわかっている。これは高圧室内部の気体容量が大きくなるためである。そのため、極小容積衝撃波管の場合においても高圧室長さを長くすれば噴射時間が長くなると考えられる。そこで本節では、高圧室長さ L_h/D が衝撃波および噴流に与える影響を調べるために、図 7 に $L_h/D=10$ および $P_h/P_b=53.0$ における時空間断面画像を示す。縦軸

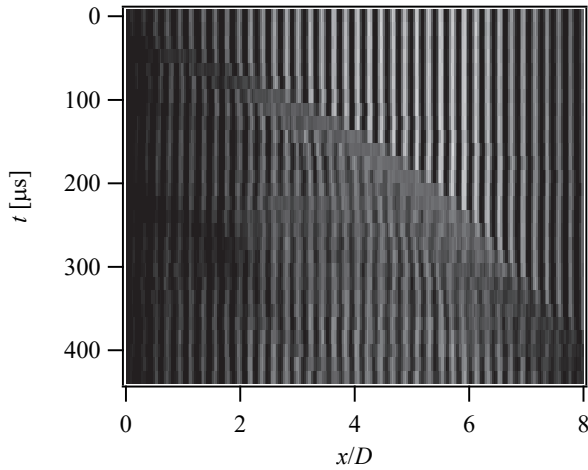


Fig.5 Time dependence of BOS photographs for $L_h/D=1, P_h/P_b=50.2$

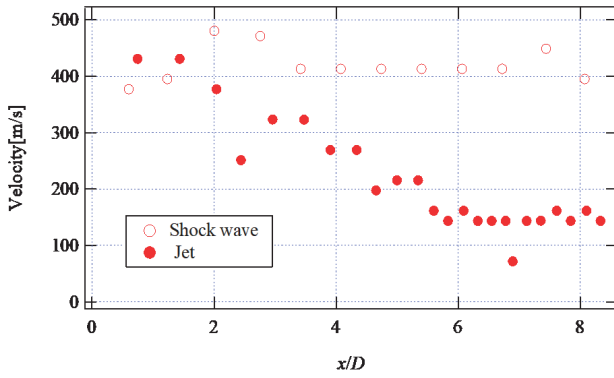


Fig.6 Relation between velocity and x/D for $L_h/D=1, P_h/P_b=50.2$

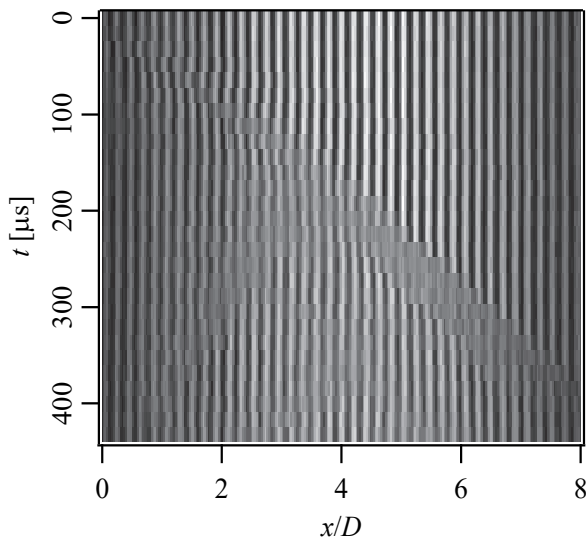


Fig.7 Time dependence of BOS photographs for $L_h/D=10, P_h/P_b=53.0$

および横軸はそれぞれ時間および x/D である。衝撃波および噴流の先頭が $x/D=8$ に到達した時間はそれぞれ $t=192$ および $384 \mu\text{s}$ である。図 7 において、図 5 同様に衝撃波は直線状に伝搬していることが確認できる。また噴流の先頭は、 $t=208 \mu\text{s}$ まで曲線状に伝搬し、 $t=208 \mu\text{s}$ から直線状に伝搬していることがわかる。

高圧室長さ L_h/D が衝撃波および噴流に与える影響を定量的に調べるために、図 8 には高圧室長さ $L_h/D=1$ および 10 における衝撃波および噴流の伝搬速度と x/D の関係を示す。図中丸および四角はそれぞれ高圧室長さ $L_h/D=1$ および 10 を示す。また白抜きおよび塗りつぶされたシンボルはそれぞれ衝撃波および噴流を示す。図 8 の縦軸および横軸は衝撃波および噴流の伝搬速度および x/D を示している。図 8 中 $x/D=4.7$ および 5.4 を除くと高圧室長さ $L_h/D=10$ における衝撃波の伝搬速度は 468 から 500m/s で伝搬していることがわかる。 $L_h/D=1$ および 10 における衝撃波の伝搬速度はほとんど一定で伝搬していることがわかる。高圧室長さ $L_h/D=10$ における噴流の伝搬速度は $x/D=1.4\sim 3.9$ の間で時間経過ごとに減速し、 $x/D=3.9$ から 7.0 の間においてほぼ等速である。また最大速度および等速の速度はそれぞれ 404 および 184m/s である。また、高圧室長さ $L_h/D=10$ における噴流の伝搬速度は $L_h/D=1$ に比べて等速の速度が小さいことがわかる。これは高圧室を伸ばすことにより高圧室の気体質量が増加したため、噴流の噴き出す量が増えたためだと考えられる。

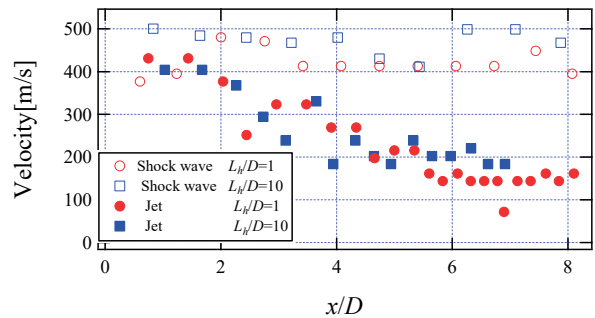


Fig.8 Relation between velocity and x/D for $L_h/D=1$ and $10, P_h/P_b=50.2$ and 53.0

3. 3 圧力比が流れ場に与える影響

次に圧力比 P_h/P_b が噴流の最大伝搬速度に与える影響を調べるために、図 7 に $L_h/D=10$ における噴流の最大伝搬速度および圧力比 P_h/P_b の関係を示す。図中●は圧力比 $P_h/P_b=10.9\sim 11.0$, ○は圧力比 $P_h/P_b=23.8\sim 24.7$, ■は圧力比 $P_h/P_b=50.2$ を示す。

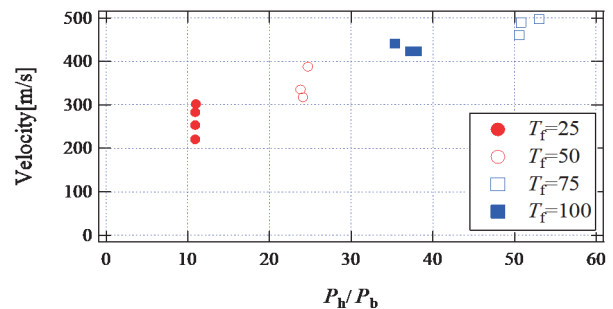


Fig.9 Relation between maximum jet velocity and P_h/P_b for $L_h/D=10$

$/P_b = 35.4\sim 38.0$, □は圧力比 $P_h/P_b = 50.6\sim 53.0$ を示している.
 図 9 より, 圧力比 $P_h/P_b = 10.9\sim 11.0, 23.8\sim 24.7, 35.4\sim 38.0$
 および $50.6\sim 53.0$ において噴流の最大速度は $220.5\sim 302.1,$
 $317.6\sim 388.2, 423.5\sim 441.2$ および $460\sim 497.6\text{m/s}$ の値をとる.
 つまり最大伝搬速度は圧力比 P_h/P_b が大きくなるにつれて
 大きくなっていることがわかる.

4. 結 言

簡易 BOS 法を用いて極小容積衝撃波管の高圧室長さおよび圧力比を変化させたときの流れ場の挙動に与える影響について実験を行い調査した. 本研究により得られた結論は以下のとおりである.

1. 簡易 BOS 法は噴流および衝撃波を可視化することが出来た.
2. 高圧室長さ $L_h/D=1$ および, 衝撃波は伝搬速度がほとんど一定であることがわかった.
3. 高圧室長さ $L_h/D=1$ および 10 において噴流の伝播速度はピーク値から時間経過ごとに減速し, その後一定の値をとった.
4. 圧力比 $P_h/P_b = 10.9\sim 53.0$ の間で P_h/P_b を大きくしていくと噴流の最大伝搬速度が大きくなることがわかった.

References

- (1) Karthikeyan, J, Cold spray technology, International status and USA efforts. 44203 (2004): 1-14.
- (2) A. Moridi, S. M. Hassani-Gangaraj and M. Guagliano, Cold spray coating: review of material systems and future perspectives, Surface Engineering, 30.6, 369-395, 2014.
- (3) H. Fukuoka, M. Yaga and T. Takiya, Small High-Pressure Chamber Shock Tube, ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, 4, 53-58, 2012.
- (4) G. E. A. Meier, Computerized background oriented schlieren, Exp Fluids, 33, 181-187, 2002.
- (5) M. Ota, H. Kato and K. Maeno, Improvements of spatial resolution of colored-grid background oriented schlieren (CGBOS) technique by introducing tele centric optical system and reconstruction of density field, Proceedings of 15th international symposium on flow visualization, ISFV15-077, 2012.
- (6) F. Leopold, F. Jagusinski, C. Demeautis, D. Klatt, Increase of accuracy for CBOS by background projection, Proceedings of 15th international symposium on flow visualization, ISFV15-087, 2012.
- (7) 太田 匡 則, 濱 田 健 太, 前 野 一 夫, Colored grid background oriented schlieren (CGBOS) 法による軸対称物体まわりの超音速流れ場に対する CT 密度計測, 可視化情報学会論文集, 31, 51-56, 2011.

対向する非定常超音速噴流の挙動に関する数値計算

福岡寛, 木下稔基*, 梅津郁朗**

Numerical Analysis of Behavior on Opposing Unsteady Supersonic Jets
in a Flow Field with Shields

Hiroshi FUKUOKA, Toshiki KINOSHITA*, Ikurou UMEZU**

Collision dynamics of opposing unsteady supersonic jets injected in background gas with shock waves were calculated to simulate double pulsed laser ablation. Since the jets are deflected by collision and the motion of debris is ballistic. This characteristic can be used to reduce the number of debris when shields are mounted in front of substrate. The flow of jets through installed shields is complicated by the interaction between shields and jets, and between shields and shock waves. We investigate influence of shield position on the shock waves and the jets by numerical calculations. Axisymmetric two-dimensional compressible Euler equations were solved using the finite volume method by using ANSYS Fluent 14.0.0 code. The shields with slit was mounted parallel to the direction of initially injected jets. In order to investigate the influence of shield position on the shock waves and the jets, the shield position and background gas pressure were adopted as parameters. The jets and shock wave are deflected by collision and they can pass through the slit of shields. The passed shock wave reflects at the substrate mounted behind the slits and it forces back the jet to decrease the jet velocity. The shield position governs the velocity and amount of the jet that reach the substrate.

1. 緒 言

高出力パルスレーザーをターゲット材料表面に照射すると、原子、分子およびイオンなどの蒸気群が爆発的に放出され、材料表面がエッチングされる。この現象は Laser ablation(LA) と呼ばれる。LA によって放出された蒸気群はプルームと呼ばれ、ターゲット材料表面より垂直方向に超音速で噴射される。そのため、衝撃波がプルーム前方に形成される。

Pulsed Laser Ablation(PLA) は LA によって放出されたプルームをターゲット材料表面と平行に設置した堆積基板に衝突させることで基板上にナノ結晶を堆積させ、薄膜を生成する手法である^[1-5]。PLA において基板には衝撃波が初めに衝突する。基板に衝突した衝撃波は反射し、衝撃波後方を進展しているプルームと干渉する。衝撃波には通過した点の圧力、密度および温度を上昇させる特性があるため、プルーム内の物理量を変化させ、ナノ結晶の凝集過程に影響を与える。そのため、衝撃波およびプルームの挙動を解明することは高品質のナノ結晶薄膜を生成する上で

重要である。

PLA において数百 nm から数 μ m の粒子がプルームの放出直前にレーザー照射点から放射状に放出される。この大粒径粒子はデブリと呼ばれ、ターゲット材料表面がレーザー照射直後に比較的低温で熔融されることで生成される。デブリはプルーム後方を進展し、生成した薄膜表面に堆積する。デブリは薄膜を構成するナノ結晶と比べて非常に大きいため、生成した薄膜表面に付着することで薄膜の構造観察が困難になり、性能の劣化につながる。この問題を解決する方法として Eclipse 法が提案された。Eclipse 法とはターゲット材料表面と堆積基板の間に遮蔽板を設置することで基板に到達するデブリを除去する方法である^[6-7]。

2 台のレーザーを対面したターゲット材料表面に照射することで、それぞれのターゲット材料表面から対向したプルームが放出される。対向したプルームは互いに衝突し、混ざり合うことで複合ナノ結晶構造をもつプルームとなる。これを基板に衝突させることで複合ナノ結晶を堆積させ、複合ナノ結晶薄膜を生成する。この方法は Double

* 機械制御工学専攻 2 年

** 甲南大学理工学部

Pulsed Laser Ablation(DPLA) と呼ばれ, Umezu らによって提案された^[8-9]. DPLA において PLA と同様にデブリが薄膜表面に付着するが, この問題を解決する方法は提案されていない.

そこで基板に到達するデブリを除去するために, 我々は DPLA の流れ場中にスリットを持つ遮蔽板を設置する方法を提案した. 遮蔽板の設置により衝撃波とプルームおよびプルーム同士の相互作用に加え, 遮蔽板とプルームおよび遮蔽板と衝撃波の相互作用が生じ, 非常に複雑な流れ場となる. そのため, 実験により遮蔽板を設置した DPLA における衝撃波およびプルームの挙動を明らかにすることは困難である. また, 実験により遮蔽板の設置位置が薄膜の堆積量を左右することが確認されている.

本研究では複雑な LA 過程を簡易化するために LA によって放出されるプルームを非定常超音速噴流と置き換えた. 本研究は遮蔽板の設置位置を変化させた場合における噴流および衝撃波の挙動を解明し, その影響について数値解析を用いて調べることを目的とする. また, 基板に到達する噴流量から薄膜の堆積量の傾向を明らかにする. さらに遮蔽板による基板上的遮蔽距離を考慮した検討も行う.

2. 数値解析法

本研究では汎用流体解析ソフト ANSYS Fluent を用いて数値解析を行った. 支配方程式は式 1 に示す二次元軸対称圧縮性オイラー方程式を用い, 有限体積法を用いて離散化を行った.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial r} + H = 0, \quad (1)$$

式 (1) 中の従属変数ベクトル U , 非粘性ベクトル F および G , 軸対称ベクトル H はそれぞれ式 (2) に示す.

$$U = \begin{pmatrix} \rho_b \\ \rho_s \\ \rho_g \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} \rho_b u \\ \rho_s u \\ \rho_g u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e+p)u \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \rho_b v \\ \rho_s v \\ \rho_g v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e+p)v \end{pmatrix}, \quad H = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} \rho_b v \\ \rho_s v \\ \rho_g v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e+p)v \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ここで ρ , u , v , p および e はそれぞれ密度, x/D 方向の速度, r/D 方向の速度, 圧力および単位体積当たりの内部エネルギーを表す. 下付き文字 b, s および g はそれぞれ雰囲気ガスの成分である He, 噴流の成分である Si および Ge を表す. また, 圧力 p , 温度 T , 音速 a および独立変数は式 (3) および (4) に示す関係が成り立つ. ここで γ は比熱比である.

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho}{2}(u^2 + v^2), \quad (3)$$

$$a^2 = \gamma RT = \gamma \frac{p}{\rho} = \gamma(\gamma - 1) \left(\frac{e}{\rho} - \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \right), \quad (4)$$

時間の離散化には 4 次のルンゲクッタ法を用いた. 2 次風上差分である Flux-Difference Splitting スキームを Roe の近似を用いて行った.

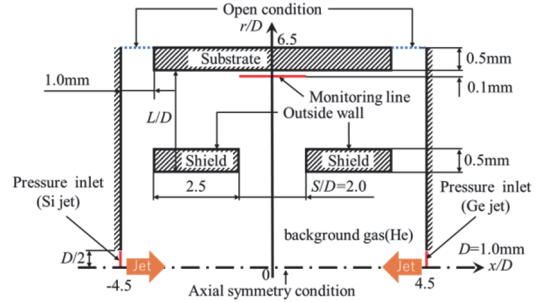


Fig.1 Flow field for computation and boundary conditions

Table1 Initial condition of Si and Ge jet

Jet	specific heat ratio[-]	Gas constant[J/kg*K]
Si	1.6102	522.93
Ge	1.6451	339.4
Gauge total pressure[Pa]	Initial gauge pressure[Pa]	Total temperature[K]
18238500	911925	319578
19454400	911925	819790

Table2 Shielding distance

$L/D[-]$	2	2.5	3	3.5	4
Shielding distance[mm]	1.5	0.33	5.0	4.6	3.5

図 1 は DPLA の計算領域および境界条件を示している. LA によって放出されるプルームに対応する Si および Ge 噴流は対称軸中央付近で衝突し, 遮蔽板の間に設けられたスリットを抜けて堆積基板に到達する. 計算領域は噴流入口直径である $D=1\text{mm}$ で無次元化した. 境界条件として流入口以外の左右端, 遮蔽板および基板に壁条件を与えた. 計算モデル上端の $r/D=6.5$ および下端の $r/D=0$ はそれぞれ開放条件および軸対称条件とした. Si および Ge 噴流は圧力流入によって与える. 表 1 は Si および Ge 噴流の流入条件を示す. 流入条件は実験から算出したプルームの初期速度 18000m/s となるように決定した. Si および Ge 噴流はそれぞれ $x/D=-4.5$ および 4.5 に設置された圧力流入口より $t=0\text{ns}$ において噴射され, 50ns 後に停止する. これはプルームが LA によって瞬間的に噴射されることに対応している. 雰囲気ガスには He を用い, その初期温度は 300K とした. 遮蔽板は図 1 に示すように流入口と基板との間に設置した. 遮蔽板の設置位置が衝撃波および噴流の挙動に与える影響を調べるためにスリット間距離 S/D を 2.0 と固定し, 基板-遮蔽板間距離 L/D および雰囲気ガス圧 P_b をパラメーターとした.

遮蔽板の効果を検討するため, 放射状に進展するデブリが遮蔽板によって除去される基板上的範囲を遮蔽距離とした. 遮蔽距離は基板-遮蔽板間距離 L/D に依存しており, L/D と遮蔽距離の関係を図 2 に示す.

格子依存性の評価はグリッド幅を $D/10$, $D/20$ および $D/30$ と変化させて行った. その結果, 噴流の進展速度に

グリッド幅が与える影響は小さく、計算コスト削減のため、 $D/10$ (0.1 mm) を採用した。また、グリッドのアスペクト比は1とした。基板に到達する噴流の観察は基板付近の計測線で行う。

3. 結果および考察

3.1 代表的な流れ場

図 2(a)-(h) は基板 - 遮蔽板間距離 $L/D=3.0$ および雰囲気ガス圧 $P_b=1000\text{Pa}$ における代表的な流れ場を示している。これは He の質量分率に等密度線図(白線)を重ねた図である。He の質量分率および等密度線図はそれぞれ噴流および衝撃波に対応する。図中の矢印は衝撃波の進展方向を示す。図 2(a) に示す $t=145\text{ns}$ において左右の流入口から Si および Ge 噴流の噴射が確認できる。また、衝撃波はそれぞれの噴流前方に形成され、放射状に進展することが確認できる。図 2(b) に示す $t=230\text{ns}$ は対向する衝撃波が流れ場中央付近で互いに衝突する瞬間を示している。また、衝撃波は遮蔽版下部にも衝突することが確認できる。図 2(c) に示す $t=836\text{ns}$ より衝撃波はスリットを通過し、基板に到達した瞬間を示している。また、噴流の先頭位置はスリット付

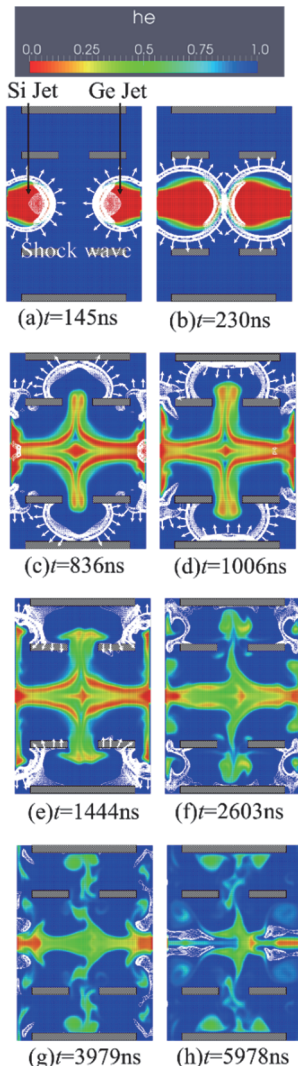


Fig.2 He mass fraction and density contours for $L/D=3.0$ and $P_b=1000\text{Pa}$

近に確認できる。これは噴流が流れ場中心付近で互いに衝突し、遮蔽版下部からの反射衝撃波によって基板方向に押し出されたためである。図 2(d) に示す $t=1006\text{ns}$ において衝撃波の進展方向が反転したことが確認できる。これは衝撃波が基板に衝突した後、反射したためである。この反射した衝撃波を基板からの反射衝撃波と呼ぶ。図 2(e) に示す $t=1444\text{ns}$ において基板からの反射衝撃波は遮蔽版上部に衝突したことが確認できる。また、噴流の先頭位置は図 2(d) よりも遮蔽板に近いことが確認できる。これは基板からの反射衝撃波によって噴流が押し戻されたためである。図 2(f) に示す $t=2603\text{ns}$ より噴流が基板に到達したことが確認できる。これは遮蔽版上部で反射した衝撃波によって誘起された速度により、噴流が基板方向に進展したためであると考えられる。図 2(g)-(h) は基板に衝突後の噴流の挙動を示している。これらより、基板に衝突した噴流は反射することなく、基板上を左右に進展することが確認できる。

基板に衝突する衝撃波および噴流を定量的に観察することはそれぞれの基板に衝突する噴流量およびその進展速度を明らかにするうえで重要である。図 3 は計測線中心における r/D 方向の速度および Si と Ge の質量分率の時間変化を示す。図中の赤の実線および青の一点鎖線はそれぞれ r/D 方向の速度および Si と Ge の質量分率の合計を示す。図 3(c), (f), (g) および (h) はそれぞれ図 2(c), (f), (g) および (h) に対応する。図 3 に示す $t=836$ および 2107ns においてパルス状の速度上昇が確認できる。この速度上昇は図 2(c) に示す、衝撃波の基板衝突のタイミングとはほぼ一致することから、基板に衝突する衝撃波によって誘起されたことがわかる。また、 $t=2107\text{ns}$ における速度上昇は遮蔽版上部からの反射衝撃波により誘起された速度であると考えられる。図 3(g) に示す $t=3953\text{ns}$ においてピークとなる滑らかな速度上昇が確認できる。この速度上昇と同時に質量分率も上昇していることが確認できる。このことより、この速度上昇は噴流の通過によるものであると考えられる。一方、質量分率の上昇は図 3(h) に示す $t=5978\text{ns}$ においても確認できるが、同じ時刻において速度の上昇は確認できない。このことから、噴流は r/D 方向の速度成分をもたないため、基板に沿って進展していると考えられる。

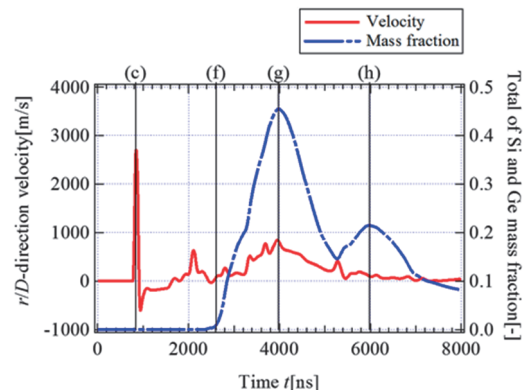


Fig.3 Relation between mass fraction, velocity and time for $L/D=3.0$ and $P_b=1000\text{Pa}$

3. 2 遮蔽板の設置位置が流れ場に与える影響

前節より噴流は、遮蔽板上部からの反射衝撃波によって誘起された速度により、基板方向に進展することがわかった。そこで本節では遮蔽板の設置位置が衝撃波および噴流の進展に与える影響について調べる。図4は雰囲気ガス圧 $P_b=1000\text{Pa}$ とし、基板 - 遮蔽板間距離 $L/D=2.0, 3.0$ および 4.0 と変化させた場合の代表的な流れ場を示す。図4(a), (d) および (g) は衝撃波が基板に到達した瞬間を示している。衝撃波は L/D を変化させた場合においてもほぼ同時に基板に到達することがわかる。これより、衝撃波の進展速度は遮蔽板の設置位置にほとんど依存しないと考えられる。一方、噴流の先頭位置と基板間の距離は L/D を大きくするにつれ、近くなることを確認できる。このことより、 L/D を大きくすることで、噴流の進展速度が早くなったことがわかる。遮蔽板下部からの反射衝撃波は中央付近で衝突した噴流と干渉する。反射衝撃波が噴流と干渉するタイミングは L/D を大きくすることで早くなる。そのため、噴流は膨張する前に衝撃波と干渉し、スリット間から押し出されることで加速されたと考えられる。図4(b), (e) および (h) は基板からの反射衝撃波が遮蔽板上部に到達した瞬間を示している。これらより噴流の先頭位置と基板の間の距離が L/D を大きくするにつれ、近くなることがわかる。このことより、噴流は L/D を大きくすることで基板からの反射衝撃波によって押し戻されにくくなることがわかる。このことより、噴流は L/D を大きくすることで加速されるためであると考えられる。図4(c), (f) および (i) より

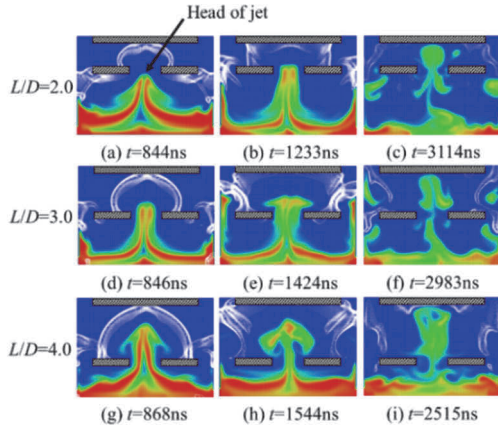


Fig.4 Typical flow with increasing L/D for $P_b=1000\text{Pa}$

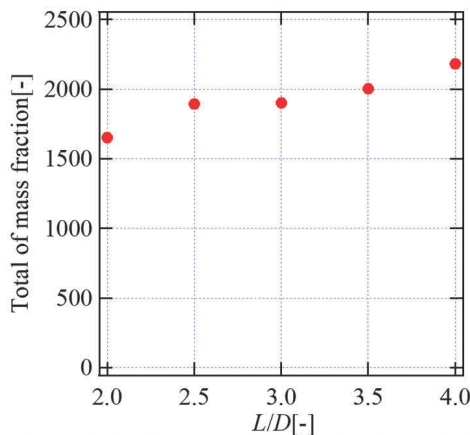


Fig.5 Relation between total mass fraction and L/D for $P_b=1000\text{Pa}$

り噴流が基板に到達したことが確認できる。これより、スリットを通過した噴流量は L/D を大きくするにつれ、多くなることをわかる。そのため、基板に到達する噴流量は L/D の影響を受けると考えられる。

図5は雰囲気ガス圧 P_b を 1000Pa とし、基板 - 遮蔽板間距離 L/D を $2.0 - 4.0$ と変化した場合の質量分率の合計を示す。ここで質量分率の合計は計測線を通過した Si および Ge の質量分率を合計した値である。図5より L/D を大きくするにつれ、質量分率の合計値は多くなることがわかる。これは L/D を大きくすることでスリットを通過する噴流量が多くなったためであると考えられる。この結果より L/D を大きくすることで基板に到達するプルームの量は多くなり、実験における薄膜の堆積量が増加すると考えられる。

3. 3 雰囲気ガス圧が流れ場に与える影響

前節より雰囲気ガス圧 $P_b=1000\text{Pa}$ と固定した場合、基板に到達する噴流量は L/D を大きくすることで多くなることをわかった。次に雰囲気ガス圧 P_b が基板に到達する噴流量に与える影響について調べる。一般的に雰囲気ガス圧を高くすることで噴流の進展は阻害される。ここでは雰囲気ガス圧 $P_b=1000, 1200$ および 1400Pa と変化させる。図6は計測線を通過する Si および Ge 噴流の質量分率の合計値と雰囲気ガス圧 P_b の関係を示している。図6より雰囲気ガス圧の上昇により質量分率の合計値は減少傾向にあることがわかる。これは噴流の進展は雰囲気ガス圧が高くなることにより阻害され、基板に到達する噴流量が少なくなったと考えられる。

薄膜の堆積量を見積もるうえでデブリが除去される範囲である遮蔽距離を考慮することは重要である。薄膜は基板中央にピークをもつガウス分布状で基板上に堆積する。そのため、図7に基板 - 遮蔽板間距離 $L/D=3.0$ および雰囲気ガス圧 $P_b=1000\text{Pa}$ における計測線を通過した質量分率の合計をガウス分布に従って分散させたグラフを示す。遮蔽距離は表2より 5mm である。そのため、遮蔽距離を考慮した基板に到達する質量分率の合計値は図中の斜線部に対応し、その値は 1766.03 であった。

次に基板 - 遮蔽板間距離 L/D および雰囲気ガス圧 P_b を変化させた場合について調べる。図8は基板 - 遮蔽板間距

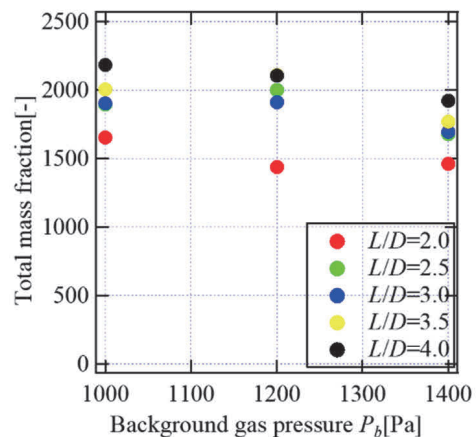


Fig.6 Relation between total mass fraction in monitoring line and background gas pressure P_b

離 L/D を変化させた場合の遮蔽距離を考慮した質量分率の合計値と雰囲気ガス圧の関係を示す。これより、遮蔽距離を考慮した質量分率の合計値は $L/D=3.5$ において他の条件より大きくなることがわかる。そのため、雰囲気ガス圧 $P_b=1000, 1200$ および 1400Pa の場合、遮蔽距離を考慮した薄膜の堆積量は基板 - 遮蔽距離 $L/D=3.5$ において多くなると期待できる。

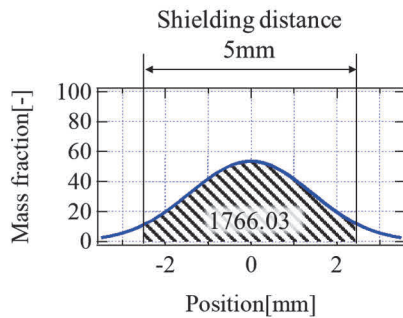


Fig.7 Distribution mass fraction for $L/D=3.0$ and $P_b=1000\text{Pa}$

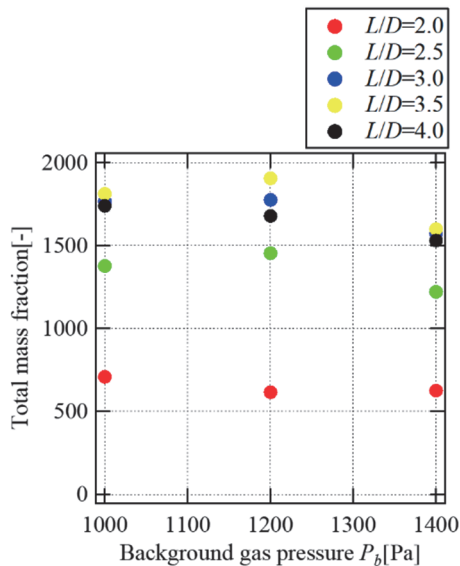


Fig.8 Relation between total mass fraction at shielding distance and background gas pressure P_b

4. 結 言

本研究では複雑な LA 過程を簡易化するために LA によって放出されるプラズマを非定常超音速噴流と置き換えた。本研究は遮蔽板の設置位置を変化させた場合における噴流および衝撃波の挙動を解明し、その影響について数値解析を用いて調べることを目的とする。また、基板に到達する噴流量から薄膜の堆積量の傾向を明らかにする。さらに遮蔽板による基板への遮蔽距離を考慮した検討も行った。その結果を以下に述べる。

(1) 噴流前方に形成された衝撃波は基板に衝突し、反射することがわかった。噴流は基板からの反射衝撃波によって押し戻されることがわかった。一方、反射衝撃波は遮蔽板上部で反射し、押し戻された噴流の進展を助長することがわかった。このことより、衝撃波によって誘起される速度と噴流の進展の方向が一致する場合

にその進展を助長し、対抗する場合に阻害することがわかった。

- (2) 雰囲気ガス圧 $P_b=1000\text{Pa}$ において衝撃波の進展速度は遮蔽板の設置位置にほぼ依存しないことがわかった。一方、スリットを通過した噴流は L/D を大きくすることで加速することがわかった。
- (3) 計測線を通過した Si および Ge の質量分率の合計は $L/D=2.0$ から 4.0 と大きくすることで多くなることがわかった。
- (4) 雰囲気ガス圧 $P_b=1000, 1200$ および 1400Pa の場合、計測線を通る質量分率の合計は雰囲気ガス圧の上昇により減少傾向にあることがわかった。また、遮蔽距離を考慮した質量分率の合計値は $L/D=3.5$ において他の条件より大きくなることがわかった。そのため、薄膜の堆積量は基板 - 遮蔽距離 $L/D=3.5$ において多くなると期待できる。

参考文献

- [1] J. C. Miller, Laser ablation, Springer Series in Material Science 28, Springer-Verlag, 1994.
- [2] Michael N. R. Ashfold, Frederik Claeyssens, Gareth M. Fuge and Simon J. Henley, Pulsed laser ablation and deposition of thin films, Chemical Society Reviews, 33.1, pp. 23-31, 2004.
- [3] Douglas B. Chrisey and Graham K. Hubler, Pulsed Laser Deposition of Thin Films, John Wiley & Son, 1994.
- [4] V. Ya. Bratus, S. M. Okulov, É. B. Kaganovich, I. M. Kizyak, and É. G. Manoliv, ESR Studies of Nanocrystalline Silicon Films Obtained by Pulsed Laser Ablation of Silicon Targets, Semiconductors, 38, pp. 621-625, 2004.
- [5] I. Umezu, S. Yamamoto and A. Sugimura, Emission induced by collision of two plumes during pulsed laser ablation, Applied Physics A, 101, pp. 133-136, 2010.
- [6] K. Kinoshita, I. Hiroshige, and K. Takeshi, Improved Surface Smoothness of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ Films and Related Multilayers by ArF Excimer Laser Deposition with Shadow Mask “Eclipse Method”, Japanese journal of applied physics, 33, L417, 1994.
- [7] A. Marcu, C. Grigoriu, W. Jiang, & K. Yatsui, Pulsed laser deposition of YBCO thin films in a shadow mask configuration, Thin Solid Films, 360, pp. 166-172, 2000.
- [8] I. Umezu, N. Sakamoto, H. Fukuoka, Y. Yokoyama, K. Nobuzawa and A. Sugimura, Effects of collision between two plumes on plume expansion dynamics during pulsed laser ablation in background gas, Applied Physics A, 110, pp. 629-632, 2012.
- [9] I. Umezu, S. Yamamoto and A. Sugimura, Emission induced by collision of two plumes during pulsed laser ablation, Applied Physics A, 101, pp. 133-136, 2010.

高温微小金属球水中急冷時の蒸気膜形成状況の観察

島岡 三義 中村 篤人

Observation of Vapor Film around a High Temperature Small Metal Sphere during Water Quenching

Mitsuyoshi SHIMAOKA and Shigeto NAKAMURA

Observation of the vapor film formed around a small ball probe and its collapse process is indispensable to clear the boiling phenomenon during water quenching of the high temperature probe. The quenching experiments using a inconel 600 ball probe of 4mm in diameter have been performed with the test system which was restructured and improved by Arimoto follows Tawara's concept. This probe is fixed to the top of a rotary arm of 100mm in turning radius. The experimental conditions are as follows, water subcooling are 55 – 85°C, the tangential velocities of probe are 15 – 70mm/s, respectively. Video images have photographed in the conditions of frame rate of 1/30s and of shutter opening time of 1/1000s. Obtained cooling curves showed good repeatability in the same quenching condition. The vapor film formed around the probe collapsed from the staked part of the thermocouple inserted the probe. The collapsing direction of vapor film depended on the probe velocity rather than the water subcooling.

1. はじめに

金属材料は焼入れや焼戻しなどの熱処理によって、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。熱処理において重要なのは金属材料の冷却過程の制御である。鋼の焼入れでは A_3 変態点（共析鋼で727°C）以上のオーステナイト組織の高温状態から適切な熱処理剤中で急冷するが、膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰および対流の過程を経て冷却される。

熱処理冷却剤の冷却性能試験法としては、熱処理油冷却性能試験方法 JIS K 2526-1965⁽¹⁾ があり、現在は熱処理油剤 JIS K 2242-2012⁽²⁾ に引き継がれている。いずれも試験体は直径 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、銀-アルメル熱電対を形成させるものである。冷却剤の冷却特性を簡便に把握でき、その特性の変化を敏感に判断できる試験装置が望まれている。

このような現状を踏まえ、俵の試験システム⁽³⁾ をモデルとして、試験装置のコンパクト化並びに試験方法とデータ処理の自動化を図り、インコネル 600 小球プローブを採用した試験システムが提案されている⁽⁴⁾。これは、プローブ中心部に K 型シース熱電対を挿入し、シース部を金属棒（アーム）で支え、プローブを所定の温度に加熱した後にアームを回転させて冷却剤に浸漬させるものである。JIS の熱処理冷却剤の冷却性能試験法においては、プローブの初期温度は 850°C であり、水中浸漬ではプローブ周りに厚い蒸気膜が形成され、遷移沸騰、核沸騰を経て強制対

流下で室温レベルに冷却される。このような過渡沸騰現象では膜沸騰から熱流束が急激に増大する膜沸騰下限温度や熱流束の把握が重要であり、多くの研究者により様々な試験体、冷却液体、系圧力において調査されている。しかしながら、強制対流下の沸騰現象においては、試験体が冷却液体中で俵式のような軌道を描く場合を扱った研究例は見当たらない。

そこで本報では、この俵の試験システムの改良型を用い、高温微小球を水中に浸漬し、微小球まわりの蒸気膜形成とその崩壊挙動をビデオ観察し、冷却過程の概況について調査した結果を報告する。

2. 実験装置実験方法

2.1 俵の試験システム

俵の試験システム⁽³⁾ の概略を Fig. 1 に示す。球プローブは直径が 4 mm で、半球状のアルメルとクロメルを溶接して成形している。支持棒も同一材としており、球プローブが K 型熱電対の熱接点を構成しているので、プローブの温度を直接測定できるものの、その温度はプローブの平均温度である。ニクロム電熱線によってプローブを加熱し、支持棒をモーターで回転させて冷却剤中に浸漬する形式であり、従来の多くの研究で認められる鉛直浸漬とは異なった方式である。

なお、焼入れ試験体をアーム先端に取り付け、そのアームを回転させて試験体を冷却剤に浸漬する方法は俵以前にも考案されており、Benedicks⁽⁵⁾ は Fig. 2 に示すよう

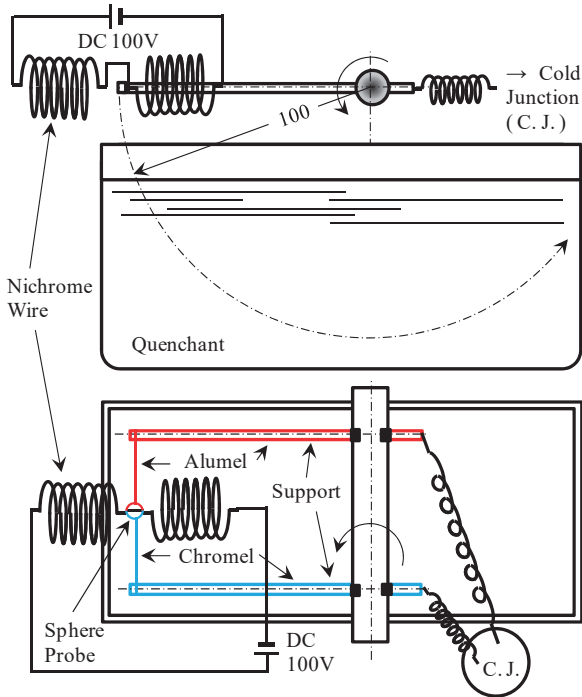


Fig. 1 Outline of the Tawara's quenching equipment ⁽³⁾.

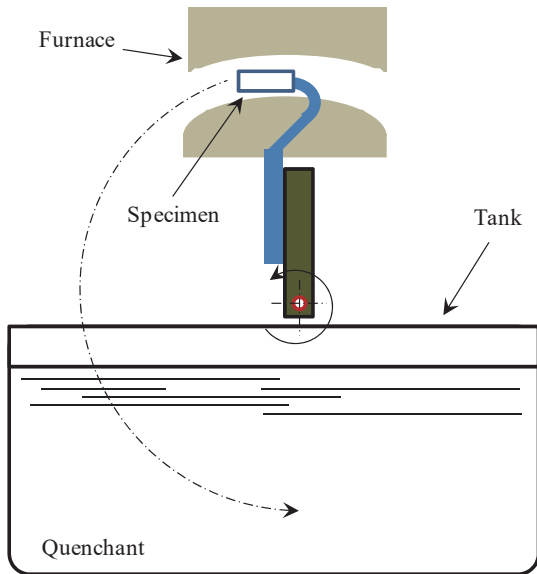


Fig. 2 Outline of the Benedicks apparatus ⁽⁵⁾.

に、電気炉内で加熱した試験体 (steel, 標準体で直径 6.5 mm, 長さ 50 mm) をバネを用いてアームを回転させている。その後、Pilling, & Lynch も同様の試験システム (試験体は Ni - 5wt%Si 合金, 直径 6.4 mm, 長さ 50 mm) を構築している ⁽⁶⁾。アームの長さは Benedicks の装置で約 400 mm, Pilling, & Lynch の装置で約 300 mm であり、俵の試験システムは試験体サイズも含めてコンパクトになっていて、熱処理現場に設置しやすいシステムと言える。俵は、旧日本海軍技術研究所において、プローブを集中熱容量近似して水道水、石けん水、植物油、動物油などの多くの冷却剤の冷却特性を調査した。冷却実験の繰り返し精度は優れたものであったが、残念ながらその後の研究報告は見あたらない。

2. 2 俵の試験システムの改良型

俵の試験システムの改良型 ⁽⁴⁾ の概略を Fig. 3 に示す。当初、俵の試験システムの再現が試みられたが、半球状のアルメルとクロメルの溶接加工が実現できなかったことから、直径 4 mm のインコネル 600 製球の中心に K 型シース熱電対 (シース外径 0.25 mm) を挿入して試験体とした。プローブ (試験体) 径, 回転アーム長 (100 mm), プローブと冷却剤表面との垂直距離 (40 mm) は俵の試験装置を踏襲している。

なお、プローブを加熱するハロゲンランプの電源の ON - OFF, アーム回転, プローブ温度計測などの制御やプローブを集中熱容量近似しての冷却曲線, 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が LabVIEW によって自動化されている。

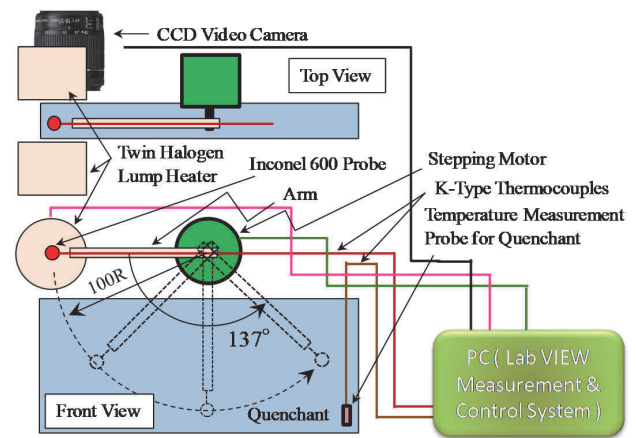


Fig. 3 Outline of the quenching equipment ⁽⁴⁾.

2. 3 実験方法

一対のハロゲンランプヒーターでインコネル 600 製プローブを加熱し、850°C に達すると加熱を停止させると共にステッピングモータを作動させ、モータに取り付けられたアームを回転させてプローブを静止液体中に浸漬して冷却した。プローブの中心温度を K 型シース熱電対 (シース外径 0.25 mm, 応答時間 4ms) で、サンプリング周期を $\Delta t = 10\text{ms}$ として測定した。膜沸騰熱伝達に関して水での先行研究が多いことから、冷却液体には水道水を用い、水道水のサブクール度を、 $\Delta T_{\text{sub}} = 55^\circ\text{C}$, 70°C および 80°C とした。アームの回転速度によって冷却水との相対速度が異なるので、プローブの移動軌跡上の接線速度 (以後、プローブ速度と称する) を $V = 15\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $35\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ および $70\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ として強制対流の影響を調べた。プローブまわりの蒸気膜の形成並びに蒸気膜の崩壊過程をフレームレート 1/30s, シャッター開放時間 0.001s のモノクロ CCD ビデオカメラで観察した。ただし、ビデオカメラの視野内一杯にプローブを映すことを最優先して、定点カメラとしてプローブ周りの蒸気膜形成、崩壊状況を観察した。現状のシステムでは、プローブ温度測定とアーム回転の同期が不完全であること、ビデオカメラのフレームレートと温度測定のサンプリング周期が同じではないことから、着水後の経過時間のみを示すことにする。なお、本試験シス

テムでは、アーム回転開始から停止するまでの間に、プローブの温度が冷却水温度付近まで低下するということが重要であるが、すべての実験条件においてこの条件が達成されていることを確認した。

インコネル600の熱伝導率が $\lambda = 25.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (at 600°C) と小さく、俵や有本の水 (20°C) での冷却実験から、蒸気膜崩壊後の温度域での最大熱伝達率が $h = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 程度あり、これより Biot 数, Bi を求めれば, $Bi = h \cdot d / 2\lambda = 10000 \times 0.004 / (2 \times 25.7) = 0.78$ となり、プローブ中心温度と表面温度には無視しがたい温度差が生じると考えられる。しかしながら、本研究では熱伝達率が上記より1桁程度低い膜沸騰段階に着目することから、集中熱容量近似して冷却曲線、冷却速度および熱伝達率を求めることとした。時刻 $t = i \cdot \Delta t$ における温度を T_i として、冷却速度と熱伝達率は式 (1) および式 (2) で求めた。

$$\dot{T}(t = i \cdot \Delta t) = \left. \frac{dT(t = i \cdot \Delta t)}{dt(i \cdot \Delta t)} \right|_{t=i \cdot \Delta t} = \frac{dT(i)}{dt(i)} = \frac{dT_i}{dt_i} = \frac{T_{i-1} - T_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (1)$$

$$h(T_i) = \rho(T_i) \cdot C_p(T_i) \cdot \frac{V_p}{S_p} \cdot \frac{dT_i}{dt_i} \cdot \frac{1}{T_f - T_i} \quad (2)$$

ここで、 V_p はプローブの体積、 S_p はプローブの表面積で、 T_f は冷却液体 (水) の温度であり、密度 ρ と定圧比熱 C_p には温度依存性を持たせ、Clark & Tye の測定結果⁽⁷⁾ から次式の直線近似式を求めて使用した。

$$\rho(T) = 8415.3 - 0.3839 \times T [^\circ\text{C}] \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (3)$$

$$C_p(T) = 448.11 + 0.1954 \times T [^\circ\text{C}] \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4)$$

3. 実験結果と考察

3. 1 冷却実験の繰り返し特性

冷却剤の冷却特性試験システムにおいては、同一条件において同じ冷却特性が得られることが必要であり、繰り返し実験によって得られる冷却曲線の再現性、すなわち高い繰り返し特性が求められる。アーム回転からのプローブの冷却曲線を Fig. 4 に示す。同一条件における5回の実験結果である。アームを回転させるステッピングモータの分解能が1回転あたり200ステップと粗いため、回転ムラが生じている(この問題は現在改良中)こともあって⁽⁸⁾、低プローブ速度において実験の繰り返し特性が劣っている。(a) では時間軸のシフトが認められるが、(b) では水中での冷却の様相が異なる場合が認められる。これらの冷却曲線に対する沸騰曲線は Fig. 5 のようになり、低サブクール度において繰り返し特性が良好であることがわかる。また、沸騰が終了した後の強制対流域での高い繰り返し特性が認められ、本試験システムは膜沸騰段階から強制対流段階まで高い繰り返し特性を有すると判断できる。

3. 2 プローブまわりの蒸気膜形成とその崩壊過程

冷却水のサブクール度が 85°C 、プローブ回転周速度が $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ でのプローブまわりの蒸気膜形成とその崩壊過

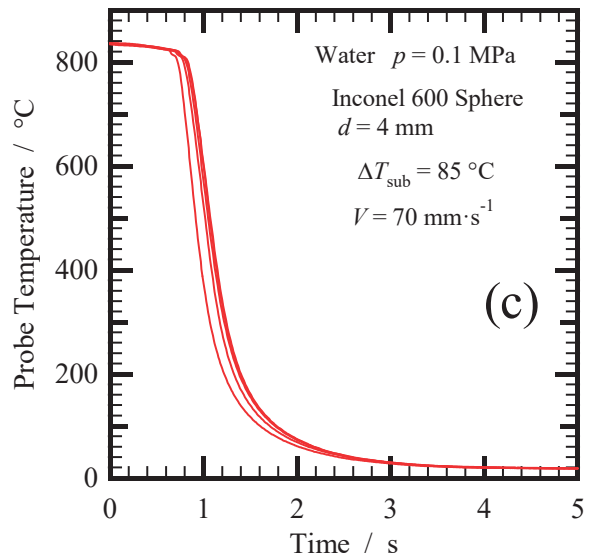
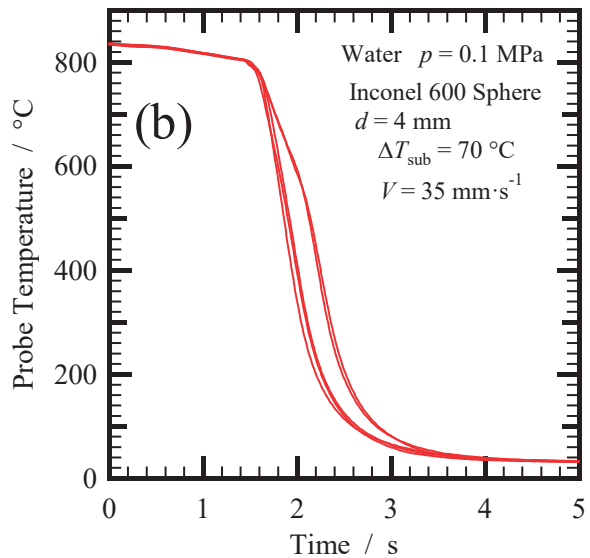
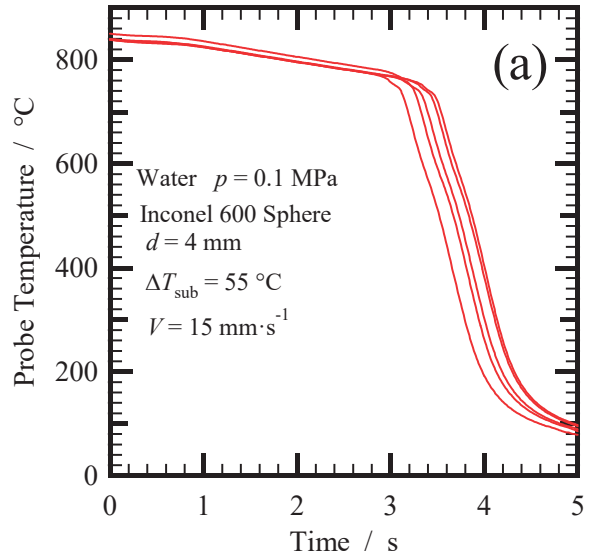


Fig. 4. Cooling curves of Inconel 600 sphere probe during water quenching.

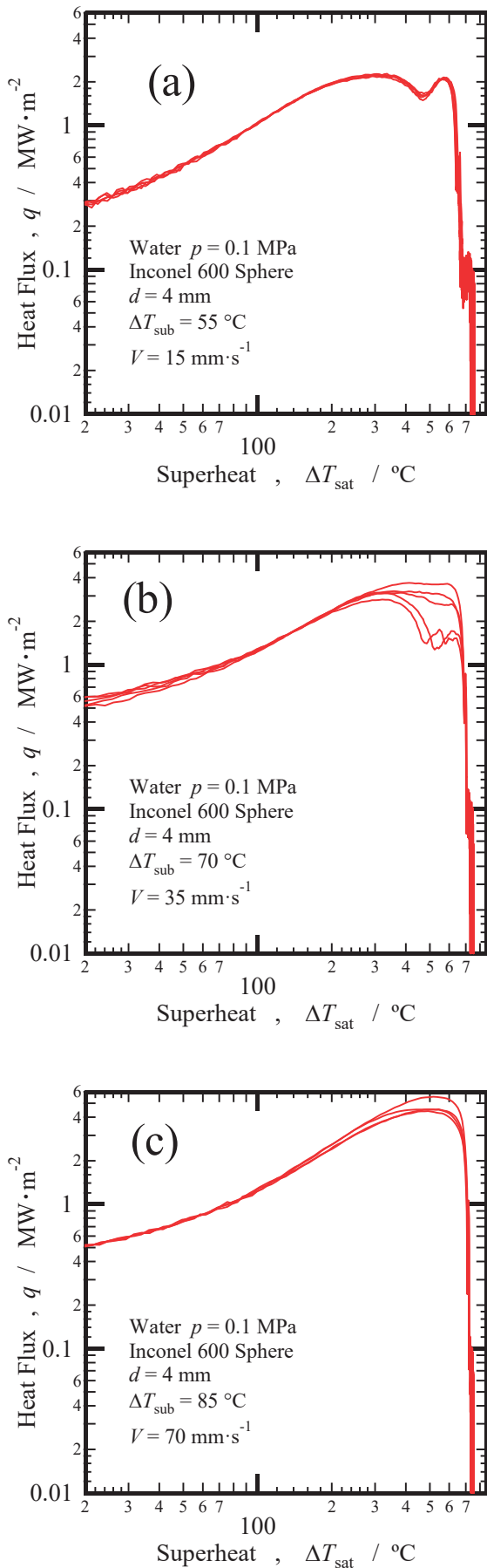


Fig. 5 Boiling curves of Inconel 600 sphere probe during water quenching.

程の様子を Fig. 6 に示す。入水直後はほぼ同心円状の蒸気膜が形成されており、入水 0.3s 後には、インコネル球内に挿入した熱電対の脱落防止のためにかしめた部分から蒸気膜が崩壊しており、プローブ回転周速度が遅いために熱電対の軸線方向に崩壊が伝播していることがわかった。

Fig. 7 に冷却水のサブクール度が 85°C、プローブ回転周速度が 35 mm·s⁻¹ でのプローブまわりの蒸気膜形成とその崩壊過程の様子を示し、Fig. 8 に沸騰曲線と蒸気膜形成・崩壊状況の大まかな対応を示す。プローブ回転周速度が 35 mm·s⁻¹ に増大しても蒸気膜形成とその崩壊過程は 15 mm·s⁻¹ 大差はない。Fig. 7 の画像の 2 コマ目と 3 コマ目の時間間隔と 3 コマ目と 4 コマ目の時間間隔は同じであるが、3 コマ目から 4 コマ目にかけてのプローブの移動量が大きくなっている。これは、アームを回転させているステッピングモータの回転ムラが大きすぎるために、プローブが停止している瞬間を捉えている場合があることを示している。また、Fig. 7 の 9～11 コマ目にかけて蒸気膜が上方に膨らんでいることがわかり、Fig. 8 においても蒸気膜がプローブの後方に突き出ている様子が見える。これもステッピングモータの回転ムラが大きすぎてアームが回転、停止を繰り返す、その回転、停止の振動によって蒸気膜が膨張、収縮していると考えられる。

一方、Fig. 9 の冷却水のサブクール度が 55°C、プローブ回転周速度が 35 mm·s⁻¹ では、蒸気膜崩壊しかけた後に厚い蒸気膜が再形成される状況が観測され、Fig. 10 に示すように、蒸気膜の再形成によって沸騰曲線上で熱流束が低下したと考えられる。このような沸騰曲線を筆者らは「双

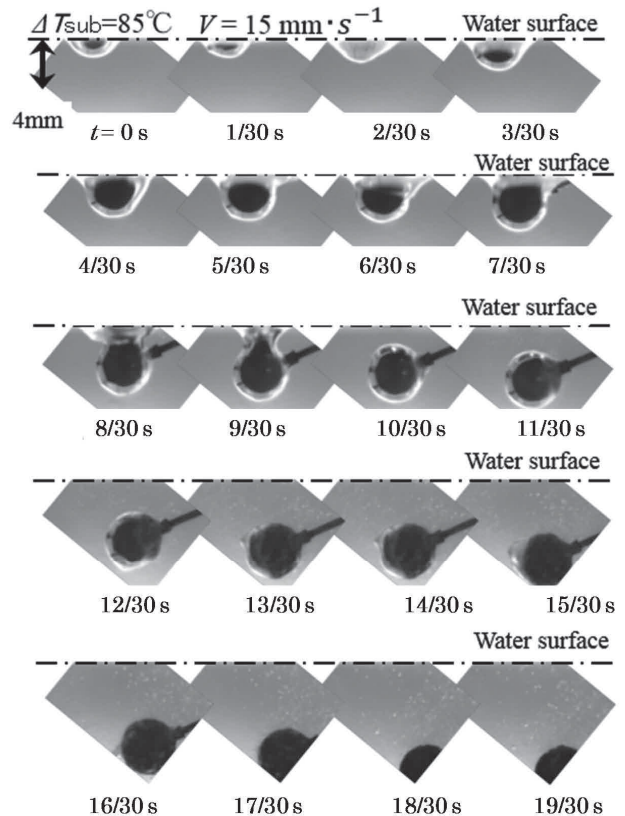


Fig. 6 The change of vapor film formed around the probe at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is 15 mm·s⁻¹.

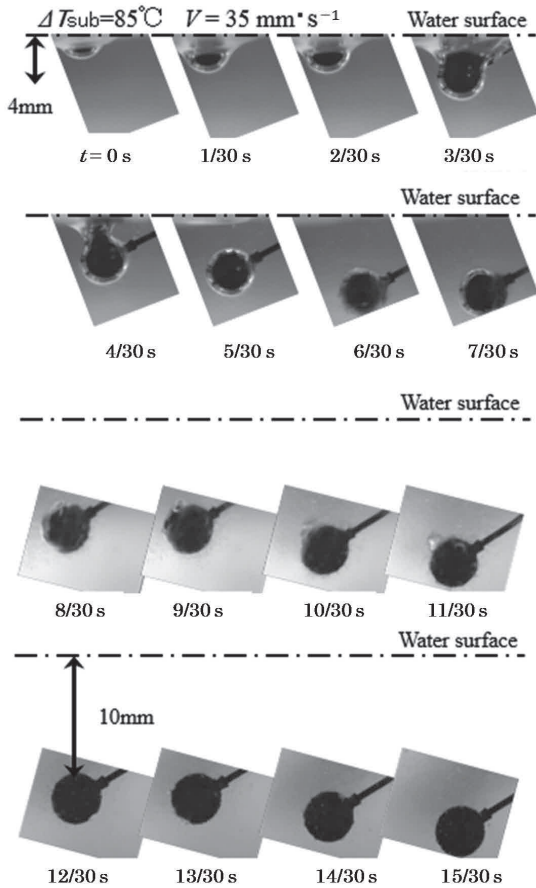


Fig. 7 The change of vapor film formed around the probe at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

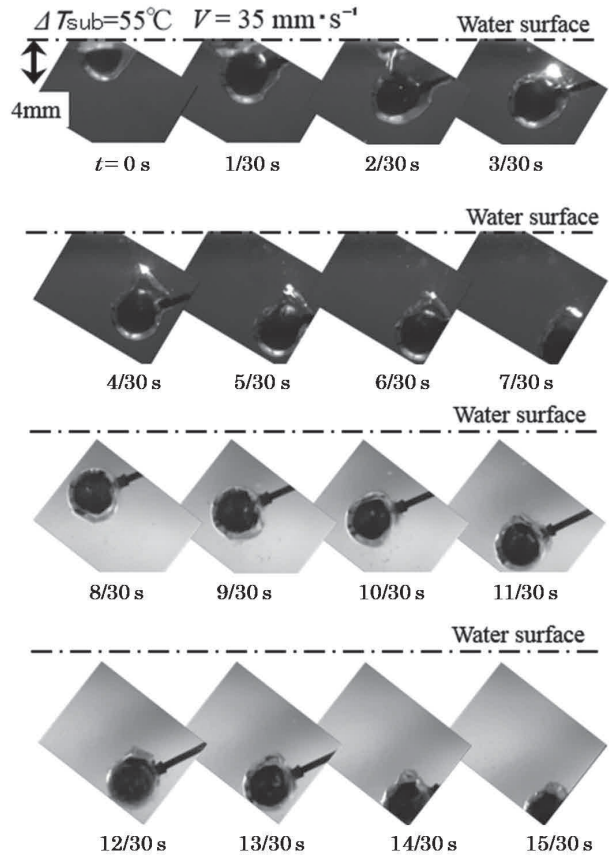


Fig. 9 The change of vapor film formed around the probe at the water subcooling is 55°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

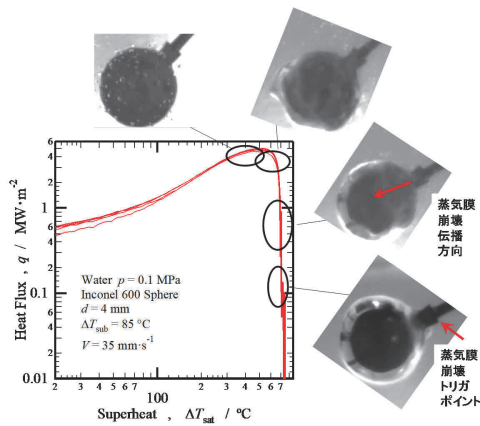


Fig. 8 The correspondence between the formation of vapor film formed around the probe and the boiling curve at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

こぶ型」沸騰曲線と称することにした。前出の Fig. 5 (a) と (b) で観測されているが、(b) では双こぶ型にならないこともあった。実験条件が同じでも冷却過程が異なるというのは、蒸気膜の崩壊トリガポイント（プローブ温度、プローブ着水後の経過時間（熱電対の軸線と重力方向とのなす角度））が異なっているためと、ステップモータの回転ムラによる振動の影響と考えられる。

冷却水のサブクール度が 85°C、プローブ回転周速度が 70 mm · s⁻¹ では、Fig. 11 に示すように、蒸気膜の崩壊のトリガポイントは熱電対の脱落防止のためにかしめた部分で、他の実験条件と同じであるが、崩壊の伝搬方向が鉛直

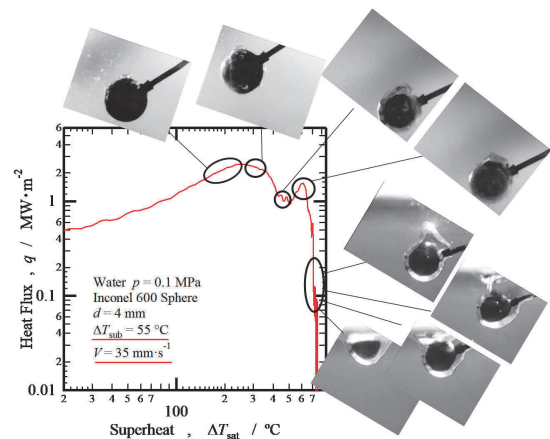


Fig. 10 The correspondence between the formation of vapor film formed around the probe and the boiling curve at the water subcooling is 55°C and the probe velocity is 35 mm · s⁻¹.

下方（プローブのよどみ点側）になっている。これは、プローブ移動速度の増大に伴って強制対流の冷却の効果が大きくなる（よどみ点側の冷却が速くなる）ことによると考えられる。

4. 結 言

アームの先端に固定されたインコネル 600 小球プローブを高温に加熱し、アームを回転させて水中浸漬急冷した場合の蒸気膜形成とその崩壊挙動を観察し、膜沸騰極小熱流束点についても調査し、以下の知見を得た。

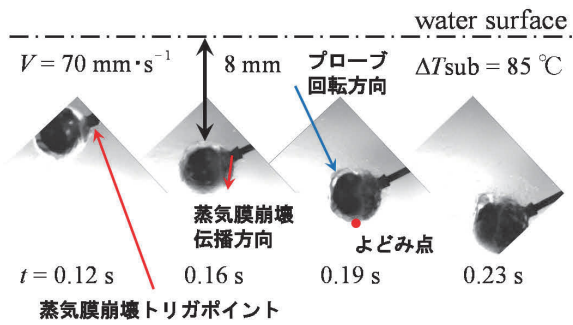


Fig. 11 The propagation direction of the collapse of vapor film formed around the probe and the boiling curve at the water subcooling is 85°C and the probe velocity is $70\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

- (1) 同一条件での冷却実験によって得られた結果の繰り返し特性は比較的良好であった。
- (2) 蒸気膜の崩壊はプローブに埋め込んだ熱電対の脱落防止のために施したかしめの部分で開始し、プローブ速度の増大と共にプローブのよどみ点に向かって伝播的に崩壊していくことがわかった。
- (3) 低サブクール度においては、蒸気膜が崩壊した後に再度厚い蒸気膜が形成される現象が観察され、双こぶ型の沸騰曲線になる場合があった。伝熱学的な問題というよりは、アームを回転させるステッピングモータ分解能の粗さが原因と考えられた。

最後に、本研究を進めるにあたり、(有)アリモテックの有本享三氏に有益なご助言をいただいた。また、本校学生、金井達哉君と木内拓君の両名には実験でご協力いただいた。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、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 日本規格協会, 熱処理油冷却性能試験方法, JIS K 2526, 1965.
- (2) 日本規格協会, 熱処理油剤, JIS K 2242, 2012.
- (3) 俵, 鉄と鋼, 27-8 (1941), 583.
- (4) 有本, 熱処理, 55-1 (2015), 20.
- (5) C. Benedicks, J. Iron & Steel Inst., 77, 1908, 153.
- (6) N. B. Pilling. and T. D. Lynch, Trans. AIME, 62, 1920, 665.
- (7) J. Clark and R. Tye, High Temperatures – High Pressures, 35/36, 2003/2004, 1.
- (8) 島岡・他2名, 奈良工業高等専門学校研究紀要, 52 (2017), 5.

注35…テキストは『高野春秋編年輯録』巻第十二に拠る。二八四ページ。

注36…境内をおほへる大樹なり。文禄三年、豊太閤高野参詣のとき、帰路、当寺に止宿し給へるとき、馬を繋ぎしより此名ありとぞ。

注37…例えば、『紀伊国名所図会』三編卷之五には、「禁管絃（中略）当山尤も禁の厳なる事、文永八年の置文に、案高祖御記文、管絃不应当山、琵琶箏依背制可停止之、而刺鳳笙龍笛之声、動聞于壇上、是則妨修学之魔障、乱閑寂之蟲害也。設寄事於垂髮、何不違冥慮乎。永可禁遏之とあるにて知るべし」と見える。ただし、引用されている「文永八年の置文」は未確認である。

注38…信長の葬儀、聚楽第行幸、北野大茶会、醍醐花見など。

注39…『室町殿日記』には、高野下山の途次、「山よりも廿余町ばかりこなた」の「桜もと云ふ所」で雨宿りしたという記述がある。『室町殿日記』は、史実としてそのまま受け入れることはとてできない資料であるが、そこに幾分かの事実の痕跡があるのだとしたら、私は、「桜もと云ふ所」は、「桜茶屋」の集落（現在は消滅）である可能性が高いと考える。そうすると、秀吉一行の帰路は、『紀伊続風土記』とは違って、今の京大阪道であったことになる。

注40…豊臣家は高野山にとって最大のパトロンであったが、一方、高野山がそれまで保持してきた伝統的特権の剥奪者でもあり、山内の豊臣家に対する感情には一律背反的なものがあった。特に、高野山領に検地を実施した秀長への否定感情は強く、彼の死は高野山領の富貴庄で蜂に刺されたのが原因で、それは法罰であると信ぜられた（『高野春秋編年輯録』巻第十二）。

注13…論旨をはっきりさせるために、「他人ばかり」という言い方をしたが、厳密には、

例えば家康は、故人の娘・旭姫の婿であるから、「他人」ではない。また、菊亭晴季は秀次の正室の父であるし、前田利家は秀吉の養子・豪姫の実父である。

注14…孝蔵主は、秀吉・北政所方のメッセンジャーとして大活躍の女性である。

注15…一、木村常陸方へ、上様御腰物・御脇指、吉野花見以前に出来候様に、急可申由、為御詫書状。

注16…一、北政所様へ、吉野御同道の時の御用に、御火うち袋為御所望、駒井參、則、有合はせを可被進、重而、吉野への御用火うち袋ぬはせまいらせらるべきのよし。

注17…一、吉野花見の御供衆、得御詫相定。(中略)一、大坂より山中山城為承、吉野花見の儀、来月二日三日比に可被成御立の由、申来。

注18…橋本市橋本。応其上人が、高野山と京・大坂方面との往來の際の休宿のために経営した寺である。

注19…特別展「没後四〇〇年 木食応其」(和歌山県立博物館・平成二〇年)四五ページに写真が掲載されている。

注20…発句は主賓、脇は亭主、以下、格式順でメンバー全員が一句ずつ出句する。それが済むまでは他のメンバーは句を出さないのが連歌の作法。裏を言えば、一順の間に誰かがうまく付句できなくなっても、誰も助け舟を出すことができないということになる。従って、無難に一座を進行させる必要がある場合、そこまでを先に作っておくのである。

注21…秀保と秀俊は、秀次に次いで秀吉の後継者たることを期待されている立場にあった。おひろひが後継者になれば、豊臣家の家督は、おひろひの子孫が継承してゆくことになり、自分たちは排除される。

注22…新日本古典文学大系『太閤記』五ページ。一九九六年・岩波書店。

注23…以下、服部英雄『河原ノ者・非人・秀吉』(二〇一二年・山川出版社)に負う所が大きい。

注24…その場合の最有力者は、多分、秀吉と北政所に養子として育てられていた秀俊であろう。

注25…もし女子であったら、恐らく後継者についての問題は生じなかったであろう。

秀次の男子が、将来その子の配偶者となればよいのである。確率二分の一で、豊臣家の運命は悪い方に転んだと言える。

注26…実際には、豊臣姓を名乗る者は、前田利家や宇喜多秀家など数多いので、その点では不正確な表現であるが、秀吉・秀次・秀保・秀俊の四名を、このような表現で抽出することは許されると考える。了解されたい。幼少時から秀吉に対して肉親的な親愛の情を持って生育した男子ということである。同時に、それは、豊臣家の家督を継承する可能性が有り得ると自らを認識している者ということにもなる。

注27…このように書くと、事の流れから、秀吉が秀保の死を望んでいたと感ぜられる

かも知れないし、実際、小説的興味で、秀保は謀殺されたと臆測する向きがあるが、私はその説は採らない。秀吉は、肉親的な情愛を強く感じるタイプの人間であり、肉親の生命を奪うことも何ら躊躇しない冷血漢ではなかった。それは、後の秀次自刃事件についても言え、秀吉ははじめ、秀次の生命までを奪うつもりはなかったと私は考えている。この点については、拙稿「関白秀次失脚自刃事件と木食応其上人」(『奈良工業高等専門学校紀要』第五一号・平成二八年)を参照していただけるなら幸甚である。

注28…なお、秀保の死に対し、秀吉は哀悼の意を示さず、葬儀も完全な秘密裡に行うよう命じたとする見解があるが、誤読であろう。『駒井日記』文禄四年四月二十二日の記事中の「聊不可被成御愁傷由」は、単に「いざれ時間によつて癒されるのだから、余り悲しみすぎないように」というほどの儀礼的な措辞であり、「隠密に而可被成」も、「秘密裡に」ということではなく、本文で引用した孝蔵主の書簡と比較すれば、「おしはれてはかたく御むよう」に相当する表現であろう。

注29…引用に続く予定記事の中に、「一、千五百人、いろ着大和衆。一、五百人、間五町辻かため、大和衆」と見える。それなりの規模であろう。

注30…「太閤様は、関白様比度の御歎笑止に思召由、様々被仰に付て、能き御序と思召、関白様脇に御子様候得共、太閤様如何思召候はんと被成御氣遣、御沙汰も無之由、被仰上候へは」云々というものである。意味のとりづらい記述であるが、「今回の出来事に対する秀次の嘆きが甚だしいのを見て、秀吉が色々(慰めを)言うのを、秀次は、よい機会と思つて、秀吉に対し、『自分には側室腹に息子がいるが、それを、太閤様がどのようにお思いになるかが気掛かりで、今まで表沙汰にはしていませんでした』と探りをいれた所」ということであろう。

注31…前注の秀次の対する秀吉の返答は、「何とて、左様之事御隠候哉(中略)子之なき者は、つる葉をも尋出、又は養子などさへ仕候に、いくたり御子候而も飽はなきよし被成御意、不大方御満足たるよし」云々というものであるが、記述の文意が、私には今一つ分明でないので、自身の理解が正しいかどうか、自信がもてない。

注32…「増田右衛門尉へ郡山ノ城被下。当国にて廿万石被下歎云々」(増補続史料大成『多聞院日記 五』一三三ページ)

注33…秀次の頑な拒否の背景には、おひろひの出生に対する根本的な疑念が存在したのではないかと私は考える。豊臣家の血を引く男子は、実は自分だけだという自負である。ただし、臆測を含むし、いずれであっても本稿の結論は変わらないので、これ以上はたち入らない。

注34…秀次の謀反については、古くから冤罪とする説が根強くあり、近年は、さらに、自らの冤罪を証するために秀次は切腹したのだとする見解も発表されているが、私は、秀次の謀反は冤罪ではなかったと考える者である。これも注27に掲げた論考で言及した所である。

生護国寺の境内に存在したことが記されている(注36)。

以下、以上のことがどれほど事実にもとづくものかを検証したい。

まず、①は全て事実であろう。先の「I」の資料に見えたとおりである。

次に、②も事実である。高野山内には、宗教的聖地として様々な禁制が存在した。女人の入山を禁止するのは、その代表であるが、笛などの音曲が禁じられていたことも諸書に見える(注37)。それなら、当然、伝統を重視する人々から、能興行への危惧が述べられたことであろう。

③については、能興行が予定されていた三月五日、近畿地方に降雨があったことは事実である。即ち、『言経卿記』には「下米、晩晴」、『多聞院日記』には「日中前ヨリ雨下」と、当日の天候が記されている。ただし、「III」のごとく、秀吉一行は、その日に高野を下山して、未刻に兵庫寺に到着しているのだから、その雨は終日強く降り続くものではなかったと考えられる。ただし、当日、能が行われていたとすると、雨が降った時点で中止となったはずである。

④については、今までに論じたごとく、秀吉が予定をはやめて高野を下山したのは事実であるが、「公大駈遽、奄乗駿馬、自千手院山道逃下」というようなことは、いくら何でも有りえない。千手院から下山する道は、不動坂口を経由しようと、黒河口を経由しようと、人間の足でも走り下ることが危険な急坂である。まして、雨の降る中、乗馬してなど有りえないことは、現地に行けば誰でも納得できることである。

最後に、⑤については、当日中に雨が降り止んだことは、先の『言経卿記』に「晩晴」とあることから、事実であると考えられる。

以上のごとく事実を確認した上で、私が最もあり得ると考えるストーリーを記すと、以下のごとくになる。

まず、六日に予定されていた連歌興行と奥の院参拝が四日に前倒しされたのは、五日の下山を前提とした処置のはずだから、秀吉の五日下山は、四日には決まっていたはずである。問題は、五日に予定されていた能興行と下山の関係であるが、私は、秀吉は、自分自身は五日朝下山するが、能興行だけは、人々が楽しみにしているイベントだからということで、予定通り開催するように指示していたのではないかと推測する。イベントの開催を通して人心を収攬するのは、秀吉が好んで行った手法である(注38)。五日早朝、まだ雨は降っていない(『多聞院日記』には「日中前ヨリ雨下」とあり、奈良で雨が降り始めたのは「日中前」からであることが知れる。高野山と奈良の間は直線距離で五〇キロ程に過ぎない)。従って、予定通り秀吉一行は下山の途につき、山上では能が始まった。間もなく天候が急変、能は中止された。山内の人々は、それを、お大師さまの意思だと理解した。下山途中の秀吉一行も雨に見舞われたが、道すがらの集落で雨宿りしつつ(注39)、未刻、下兵庫の利生護国寺について。

以上、推測の部分を多く含むので、事実として主張するものでは決してないことを了解されたい。いずれにせよ、「能興行の中止」「天候の悪化と回復」「予定を早めての秀吉の下山」という説話の素材三つが事実としてあったことは、ほぼ確実であると私は考える。当該の説話は、それらが、高野山内に伏流として存在した反豊臣家感情(注40)によって紡がれることによって、形成されたものである。

注1…一部写本に「近衛信尹」と注記するのは誤り。

注2…以下、『太閤記』の引用は、新日本古典文学大系本を用いるが、句読点・送り仮名・濁点などは、私見に依る所がある。

注3…戦国史料叢書第二期2『真田史料集』三五九ページ。

注4…このような言い方は、もし私に先立って研究成果を公にされている方がいた場合、まことに申し訳ないことになるが、その場合は、御寛恕を願ひあげる次第である。

注5…『駒井日記』の本文は、『改訂史籍集覧 第廿五冊』に拠るが、一部、表記・句読点を、私見により改めた所がある。下同。

注6…現在の橋本市隅田町下兵庫の利生護国寺。太閤駒繫松の伝説が残っている(補論参照)。

注7…文禄三年二月は大の月である。

注8…依拠テキストには「兵庫守」とあるが、「兵庫寺」の誤りであることは明白。

注9…吉野の周辺に太田という地名は存在しないようである。或いは「土田」の誤りか。現在では、橿原市方面から南下する国道一六九号線が、五条方面から吉野川北岸を通って伊勢方面にむかう国道三七〇号線に合流する地点である。吉野を下山して一六九号線を選べば、橿原市を経て郡山に至るし、三七〇号線を選べば、五条市を経て橋本市下兵庫に至る。

注10…この記事が目されるべきであるという指摘は、既に藤田恒春氏によってなされている(人物叢書『豊臣秀次』一五五ページ。二〇一五年・吉川弘文館)。同氏はまた、「この吉野花見はたんなる花見ではなく、秀次へ、お拾への禪讓が話題にのぼることが期待されたような政治的要素をもっていたと思われる」(同書、一五四〜一五五ページ)というような、私が真相と考える所に肉薄した指摘もなされている。

注11…人物叢書『豊臣秀次』には、秀保が、大政所の娘・ともの実子ではない可能性が述べられている(九ページ)。仮令そうであっても本稿の結論は変わらないので、以下、実子(つまり、大政所の遺伝子的な孫)として論を進める。

注12…天正十六年、僅か七歳(異説あり)で従三位権中納言に任ぜられ、同年四月の後陽成天皇の聚楽第行幸の際の、前田利家以下の諸侯の起請文提出の宛先となっている。勿論、全て秀吉の差配に依るものであるが、豊臣家の将来を担うべき者として、この少年をアピールしておく意図があったことは勿論である。

ても、故人への厚い思いということで、世間の非難をあびることはない。それだけに、問われるのは、本人(秀次)が秀吉の意思に従う気があるかどうかだけの踏み絵となる。秀次は、それにどう対応したか。『駒井日記』の次の日の記述を引用する。

秀保様御葬礼御中院之事、従大上様、北政所様へ御理被仰候処、如何様共心之假に被仰付候へと、北政所様御請取之御書、并小少将にも御直に被仰聞由、即、閑白様も、右之段尤に被思召之由、大上様・大和宿老衆^五、為御使、拙者相越、御葬礼、来廿八日相定る。(下略)

秀次は、踏み絵を踏まなかった。大上様からのルートで北政所に働きかけ、その承諾を受けて、四月二十八日に葬儀を催行する。それは、それなりの盛儀であったようであるが(注29)、秀吉の後押しがない以上、「野も山も人くづれ也」と形容されるほどであった秀長の葬儀とは、比較にならないものであったろう。その様子を伝聞して、世間は、秀次・秀保に対する秀吉の「おぼえ」が、秀長に対するほどではないことに気づくという仕掛けである。

続いて、当然、秀保の後継が問題となるが、四月二十三日の『駒井日記』には、秀次サイドから、秀次の男子をそれに当てる提案が暗示的になされたと言われる(注30)が見える。それに対して、秀吉は祝意を表する(注31)。しかし、祝意が表されただけであって、郡山豊臣家は後継が立てられないまま断絶する。そして、郡山城は、後に、秀吉の側近である増田長盛の手にゆだねられる(注32)。

秀吉としては、おひろひが豊臣家の後継者であることを、秀次自身が認めさえすればよいのだから、何度もその機会を用意したはずであるが(この点については、諸資料にみえる以後の二人の面会の機会が全てそれであったと考えてよいであろう)、秀次は頑なにそれを拒んだ(注33)。そして、追い詰められ、謀反を計画し(注34)、露見して高野山に追放され自刃するというのは、周知のストーリーである。それは、秀保の死から、僅か三か月の間の出来事である。

以上、文禄三年三月四日「何衣」百韻は、母・大政所の追善法要の機会を利用して、徳川家康・前田利家・伊達政宗・菊亭晴季等々の武家・公家の有力者の面前で、おひろひが自らの後継者であることを宣言して、おひろひ誕生によって生じた自らの後継問題に終止符を打つと共に、豊臣家の再結束を図ろうとする秀吉の意図のもとに計画されたものであったが、秀次・秀保・秀俊の結束した想定外の拒否にあって、逆に、豊臣家内部の対立が露呈し、対立をより深刻化させる結果となった事件であったということ、本稿の結論としたい。なお、吉野での歌会に参加しながら、高野山での連歌百韻に名を見ない者として、秀次・秀保・秀俊の他に宇喜多秀家がいるが、彼の動静については、論の拡散を避けるため、あえて本稿では触れなかった。了解せられた

い。ただし、彼が、仮に、高野山へ向かう秀吉一行に同行していなくとも、本稿の結論が大きく変わることはないというのが、現在の私の見通しである。

《補論》秀吉の高野遁走下山説について

先述のとおり、秀吉の高野参詣は、「I」に掲げたごとく、はじめ三月七日下山の予定であったが、予定が二日はやめられ、五日に下山したと推測される。この予定変更について、地元では様々な憶測がなされ、伝説・口碑の類となって伝えられている。その最終的に集約された形が『高野春秋』に見えるので(注35)、まず、それを引用する(引用中に「木上」とあるのは、「木食上人」の略で、つまり、応其上人のことである。また、括弧内は割注、返り点は省略した)。

六日。御能興行。欲令大衆、都見乱舞曲。(就其、高野詣新曲者、於大阪、兼日被閑講之。是、以木上、先達招能役者、造立舞台於青巖寺西庭。大衆白言、当山開闢已来、制笛声、胡為可催之乎。木上不肯之、棧敷座配、学侶・兒・大小童子等、行列青寺縁通、上首之僧侶者、居座敷、行人三千人、庭下並居焉。晴天照曜。于時、一曲之笛声響四山、俄然黑雲弥布、電火迸十方、雷震恰如滿山之崩裂、讖言的乎。公大駭遽、奄乘駿馬、自千手院山道遁下。頃刻間、下著兵庫寺。矧於公卿・武将・士卒乎。或单騎、或奔走、雖主従、各々別々信足散下于七口、而須臾天氣清明也。)

一部、私には文意の明瞭でない所があるが、要点は以下のごとくであろう。

- ① 秀吉が高野山で能を興行しようとし、応其上人がその準備をした。
- ② 大衆たちは、高野山では、古来、笛を吹くことが禁止されていると言って反対したが、応其上人は受けなかった。
- ③ 当日は、晴天だったが、衆人が笛を吹きはじめるや否や、天候が激変した。
- ④ 雷雨の凄まじさに驚いた秀吉は、禁制を侵した祟りだと恐れ、馬に乗って千手院口から逃げ下り、兵庫の寺に着いた。同行の公家・武家たちも、各自ばらばらに山を下った。
- ⑤ 秀吉が逃げ下ると、直ぐに天気は回復した。

ということになるか。追加すれば、秀吉は慌てて逃げ下ったのだから、そのルートは距離的にもっとも近い道のはずだということ、『紀伊統風土記』には「豊太閤下山の時、千手院口、銅嶽の北より、久保村・市平村を経て丹生川を越え、わらん谷を経て明神が鬘を越え、橋本町に出でしといふ」という口碑が記され、また、『紀伊国名所図絵』には、逃げ下った秀吉が乗っていた駒を繋いだという「太閤駒繫松」が利

選択した以上、このままでは秀次が後継者であり続けるのだから、いつ、どのような形で自らの意思を公にすることが次の問題となる。そして、秀吉は、大政所の追善法要の機会を選んだ。現在でもそうであるが、故人の追善法要というのは、一族の結束が再確認される場でもある。そこに、大勢の有力な武家・公家を招待し、法要の後の連歌において自らが詠ずる発句によって、自らの意思を間接的に伝える。その意思は、同座の人々によって理解され、伝聞によって拡散し、次第に世間の共通理解となってゆく。秀吉が文禄三年三月一日まで考えていたストーリーは、以上のごときものであったと私は考える。

念のために言うが、秀吉の発句のメッセージは、単に、自らの後継者はおひろひであるというだけで、決して秀次の排除までを意味するものではない。むしろ、秀次もおひろひの保護者となってほしいというのが、秀吉が望んでいた所のものであったろうと私は思う。それを推測させるのが、秀吉の発句を承けて、応其上人が詠じた「霞む砌の広き垣内」という脇である。この句も事前に準備され（そして、秀吉の承認を受け）ていたものであることは、ほぼ一〇〇パーセント確実であるが、表面の意味は、「秀吉の寄進によって建立されたこの青巖寺の寺域は広大で、垣に囲まれており、それが霞んで見える」というほどのものである。ただし、「垣」の語が詠みこまれていくことの意味は大きい。発句と統合すれば、「豊臣家の菩提寺たるべき青巖寺の境内に植えられた、まだ花を咲かせることができない一本の若木の桜、それをとり囲む壮大な垣」という構図が浮かびあがる。発句の「若木」がおひろひなら、脇の「垣」が、その座に席を連ねている人々であることは言うまでもない。応其上人の脇は、列座の人々（当然、秀次も秀保も秀俊も、そこに列席しているはずであった）に、おひろひの保護を期待するものなのである。この句が、もし「荒く吹き峰の春風」などという類であったら、それは、おひろひが後継者となることに対して妨害する者は容赦しないぞというメッセージとなる。権力者が興行する連歌の句は、それほどまでのメッセージ性を持ち、また、周到に準備されるべきものであったことを、研究者は知るべきであろう。

しかし、秀吉のメッセージは、秀次によって拒否された。あるうことか、秀保と秀俊も、秀次に同調した。秀吉にとっては想定外のストーリーである。高野山にむかう道すがら、秀吉は、この想定外に展開したストーリーをどのようにまとめるかを考えたはずである。高野山行を今更とやりやるようなことはできないが、かといって、人界と隔絶した高野山においては、何らかの対策を講じるにしても、テキパキとした指示は出せない。「I」に見えるごとく、当初は七日までの滞在予定であったものを、二日早めて五日に下山したのは、そのためであったろう。なお、秀吉の下山が予定を早めてのものであったことの傍証としては、『言経卿記』文禄三年三月十日の「江戸亜相昨日南方ヨリ上洛云々、今日罷向対顔了、夕餐有之、相伴了、細川幽齋同相伴了」

という記事が挙げられよう。家康が、三月九日に「南方」から京都に戻ってきたという記事である。「南方」が吉野・高野を指すことは間違いない。そして、九日に京都に戻ったのなら、家康の高野下山は（途中寄り道しなければ）七日だったはずである。つまり、家康（多分、幽齋も）は、当初の予定どおり七日まで高野に滞在したことになり、秀吉の五日下山が予定外の行動であったことは、この記事からも推測できると私は考える。なお、秀吉が予定より早く下山したことについて、山麓地域には、後世、様々の雑説が生じているが、これについては『補論』として論じたい。

一連の経緯において、秀吉が思い知らされたことは、豊臣家の成人男子四名（注26）の中、自分以外の三名が結束して、自分の意思を知った上でも、なおかつそれに反して、おひろひが豊臣家の後継者となることに反対しているという現実である。この状態を放置すれば、自分が生きていく間はずもかく、その死後、きつとおひろひは、この三人によって排除されてしまうであろう。自分が生きていく間に、豊臣政権の意思決定過程から、この三人が将来的に排除されるように（ことを荒だてないやり方でこれが大切である）処置しておかねばならない。どうするか？

秀吉が最初に手を付けたのは、同年の十月、秀俊に対してであった。すなわち、小早川家の養子とすることである。これで、秀俊は、豊臣家の人間ではなくなった。その半年後、文禄四年四月十六日、秀保が、保養先の十津川で急死する。これで、残るのは秀次のみ（注27）。あとは、一対一の心理戦である。そうなれば、勝敗は既に明らかであろう。秀保の葬儀を宰領するのは、当然秀次である。それに対し、秀吉は、簡素に行うべきことを指示する（注28）。『駒井日記』文禄四年四月二十二日の所に載せられている孝蔵主の書簡を引用する。

御意として申候。中なごん様御さうれい、おしはれてはかたく御むようにて御座候。御しゆいんにて仰られ候はんずれども、わたくしより申候へと仰られ候。御とぶらひもおしはれて御むようと仰られ候。くはしく大せんとより御申上候べく候。此ぶんご少将殿まで申入候。又、やまと御としよりしゆへも申候。かしこ。

「御意として申候」とあるから、ここに記されているのは、秀吉の意思である。ここで秀吉と秀次が共に念頭においているのは、その四年前に、同じ郡山城主として死んだ豊臣秀長の葬儀である。その宰領をしたのは、当時閑白職にあった秀吉自身、その葬儀の様は「郡山へ、從早旦大納言葬送了了了。両門跡良家衆悉御出。（中略）天氣快然、京衆高野衆当国諸寺甲乙人見物衆、以上人数廿万人も可在之。野も山もくづれ也」『多聞院日記』天正十九年正月二十九日」というほど盛大なものであった。それに対抗するようなことはするなということである。

葬儀を簡素にするのは、誰にでもできることである。また、それに反して盛大に行っ

を知る。この発句は、秀次にとっては、全く予想外の衝撃的なものであったはずである。何故、そう言えるのか？

繰り返しになるが、一行の高野登山の目的は、大政所の追善法要であり、当該の連歌は、それに続く一連の行事として（現代で言えば、法事が済んだ後の一同の会食のようなものとして）張行されたものであった。そうであるなら、その連歌は、当然、懐旧または追善の連歌であり、発句も、それに相応したものと予想されたはずである。例えば、天正十年七月十五日、織田信長の葬儀の後に張行された懐旧百韻において、細川藤孝の詠んだ発句が「墨染の夕べや名残袖の露」というものであったごとくである。

しかし、秀吉の発句は、そうではなかった。表面上の意味は、「高野山の（秀吉の寄進によって新造された）青巖寺の境内に植えられた桜の若木は、今はまだ花を咲かせていないが、何年かすれば、成長して立派な花を咲かせることだろう」という程のものである。しかし、儀式的な連歌の場で詠まれる発句のメッセージ性を考慮すれば、そこに詠まれている「若木」が、実は、前年八月三日に秀吉の側室・茶々が産んだ「おひろひ」を指すことは、当時の多少とも連歌の嗜みのある者なら、誰でも分かったことである。そして、それが「何年かすれば、成長して立派な花を咲かせることだろう」というのは、秀吉が、豊臣家の将来を「おひろひ」に託すと宣言したに等しい。そのような発句が、徳川家康や前田利家や伊達政宗等の武将、また菊亭晴季以下の公家が居並ぶ席で披露されるのである。そして、一度披露されてしまえば、その場でそれに異議を挟むことは、儀礼上もうできない。自分こそが秀吉の後継たるべき者と考える秀次にとつて、恐らく到底受け入れられないシチュエーションであったであろう。

以下は、多少小説的な想像を交えた記述となるが、秀次は、自分と同じ考えであるはずの（注21）秀保と秀俊を誘い、高野山に同行できない旨を、（人を介して）秀吉に伝える。秀吉にとつて、この事態は、恐らく想定外であったかと私は考えるが、それでも、秀吉には、秀次が同行しないと言う理由は明白であったはずである。しかし、大勢の賓客の前で、内輪もめを表沙汰にすることはできない（と言っても、秀次等が突然いなくなれば、内輪もめはバレバレになるが）。彼は、高野山での予定行事を、秀次等が不在の形でやってしまうことを決意する。私は、文禄三年三月一日の吉野の夜を、以上のごとく想像するものである。

たかが発句一つのこと、そこまでの騒動になるのかと感じる向きもあるかも知れないが、それは、当時の社会における連歌のメッセージ力を、現在では実感できなくなっているからである。もし披露される発句が、例えば「このままに花咲き誇れ高野山」などであったら、おひろひが生まれても、秀次が今までどおり豊臣家の後継者であるというメッセージになるし、「枝交はす花や二木の高野山」などであったら、秀次とおひろひの双頭体制を秀吉が構想しているというメッセージになると言えば、

納得していただけであるだろうか？

『太閤記』に拠れば、秀吉は、その治世において二度「金配り」と称されることを行っているとのことであるが、その二度目に当たるのは、天正十七年五月二十日のことであることが、研究者によって明らかにされている（注22）。これは、同時代の記録にも多く記されている所であるが、今、『多聞院日記』同月二十四日の記事を引用する。

一、去る廿日、聚楽従関白殿、諸大名衆へ金銀被遣了。金千枚・銀千枚上にて、次第々々悉被遣。筒井四郎へ銀三百枚給了。惣じて金銀の數、事々敷儀也。（下略）

『太閤記』には、それを、その八日後の秀吉の第一子・鶴松の誕生に結びつける見解は見えないが、それが、今で言う所の内祝の前倒しであることは、論を俟たない（注23）。まだ生まれてくる子の性別も分からないのであるが、男子ならば本人が、女子ならば、将来のその配偶者（注24）が、秀吉の後継者となるというメッセージである。世間もそれを理解し、鶴松誕生のその時から、慶賀の気分に含まれた。例えば、『お湯殿の上の日記』によれば、鶴松誕生の当日（二十八日）の宮廷の様子は、「くはんばく、よどの女ばうしゆに若君いできたるとて、ひしめきなり。御たちたぶ」云々のごとくで、秀吉に若君が誕生したというニュースで大騒ぎとなり、天皇は、早速、太刀一腰を贈っている。京都のこのような様子は、直ぐに奈良まで伝わり、『多聞院日記』の翌日の条には、「去廿八日、関白殿の淀の御内、男子誕生云々。事々敷祝著云々」と記されているごとくである。

しかし、鶴松が、天正十九年八月に夭折した後、同年十二月、秀吉は、秀次に関白職を譲り、自らは太閤と称する。これは、勿論、自らの後継者として秀次を選んだということである。そのような状況下にあつて、秀吉の側室・茶々の再度の懐妊が明らかとなり、文禄二年八月三日、男子（おひろひ）が誕生する（注25）。その際、四年前の鶴松誕生の時のような目立った慶賀行事は、豊臣家の内部でも、外部でも、なされなかった。何となれば、既に秀次という「確とした」後継者が存在する以上、今度の男子の誕生は、豊臣家の後継者の誕生でも何でもなく、形式的には、単に側室に男子が一人生まれたというに過ぎないからである。問題は、既に豊臣家の後継者として世間に認知されている秀次と、新たに誕生した男子と、この二人の関係がどうなるか、秀吉の立場で言えば「どうするか」ということである。秀吉は、この問題に、きつと悩みに悩んだことだろうと私は思う。「おひろひが誕生した結果、それを溺愛する秀吉は、邪魔になった秀次を高野山に追放し、切腹させた」というのは、解かりやすいが、所詮、結果からの遡及によってしか過去を見ないものである。そして、結果として、秀吉は、秀次に代わって、おひろひを後継とすることを選んだ。秀吉が何故そのような選択をしたのかは、本稿では詮索しない。それは別なテーマである。ただし、そう

人物であることは言うまでもないが、しかし、その中に、追善法要の対象たる大政所の遺伝子を承けているものは、秀長と秀保の二名のみである(注11)。その二人が法事に参加していない。もう一人の不参加者である秀俊といえ、秀吉の正室・北政所の兄(木下家定)の子であるが、幼くして秀吉夫婦の養子となって溺愛されていたと伝えられており(注12)、大政所にとつては、血の繋がりはなくとも、実の孫同然の存在であったと推測される。その秀俊もまた、法事を欠席している。結局、文禄三年三月四日の高野山における大政所の追善法要は、施主・秀吉を除いて、故人が血縁的感情を抱いていたであろうものは全て欠席し、他人ばかり(注13)の中で営まれたという図式になる。それは、異常な光景であり、そして、その異常さをもたらしたものは、当時の豊臣家の内部に存在した深刻な対立であると私は考えるものである。以下、その所以を述べる。

初めに、秀次・秀保・秀俊の途中離脱が、スケジュールに従った了解事項であったのか、ハプニングであったのかをpushしておきたい。『駒井日記』に初めて吉野での花見の計画が記されるのは、文禄三年二月五日のことで、「吉野へ御花見の儀、関白様も可被成御同道間、御供小勢にて可被成御出由、仰出。又、来十日の御能可被御見物由、孝蔵主を以、仰出」と見え、それが、秀吉の方から持ち出された企画であったことが知れる(注14)。引き続き、二月六日(注15)、八日(注16)、十一日(注17)の条にも見えるが、そこまでは、まだ「吉野」とのみ記され、高野行のことは見えない。高野行が初めて話題となるのは、二月十六日の記事で、それを引用する。

- 一、関白様、伏見^江被成御成、大閣様^江被成御対面、則、夕御膳御相伴にて御振舞。則、関白様^江聚衆へ還御。
- 一、大閣様吉野御花見の事、大坂を来廿九日に可被成出御由。
- 一、関白様者、廿九日に京都被成出御、奈良通被成御座、於吉野御出合可被成由。
- 一、大閣様、従大坂当摩御泊。当摩より吉野。吉野より兵庫の寺。其より高野へ御参詣。高野より兵庫之寺へ可有還御由。兵庫之寺より、郡山へ可被成御座由。

高野行を述べるのは第四条であるが、問題は、その中の「吉野より兵庫の寺」以下の記述の主語を、秀吉に限ったものと考えるか、吉野での合流以後は、秀次の同行を当然の前提として考えるかということである。日本語としては、どちらの読みも可能で、この記述からだけでは判断できないとすべきであろう。ただし、周囲の状況までを考慮に入れると、(余りに俗な言い方だが)徳川さんも、前田さんも、伊達さんも、遠い所からわざわざお婆ちゃん(孫)の法事に足を運んで下さるのである。そんな人たちの目の前で、実の孫と、実の孫同前に育った孫養子が、三人揃って、花見には出たくせに、法事には出ないと行って途中で帰るなどというのは、余りに礼を失した行動であろう。そんなことになるなら、法事は最初から止めにする方がずっとましだと私は考

えるが、いかがであろうか? つまり、私は、秀次と秀保と秀俊は、三人とも、引き続いて高野山で行われる大政所の追善法要にも出席する予定で吉野へやって来たのであるが、以後、三月一日の夜までの間に、予想外の事態に直面し、それによって、三人は、高野山への同行を拒否し、郡山へ戻ることになったと考えるのである。では、三人が高野へ同行できなくなった予想外の事態とは、どのようなものであったのか。これが本稿の一番のポイントなのであるが、私は、それは、法事後で張行される予定の連歌での秀吉の発句を、三人が事前に知ったことではなかったかと考えるものである。

連歌の発句は、基本的には当座で当意即妙に詠むべきものであったが、先だって興行が予定されている場合は、事前に作って準備しておくことが行われていた(というより、この時代では、むしろそうしておくべきものとされていた)。例はいくらでもあげられるが、応其寺(注18)に所蔵される所の文禄二年十一月二十四日の前田玄以宛応其上人書状(注19)を採りあげよう。

昨日の御約束のごとく、明日廿五日に、互に被成御出候て可被下。御発句は出来申候や。早くより老人参候て待申候。紹巴よりも言伝共御座候。(下略)

大仏殿の完成間近となった方広寺で張行予定の連歌において、亭主として応其上人は脇を詠まねばならないのであるが、そのためには発句ができていないといけないので、それを早く知らせてほしいと催促している書状である。張行以前に発句と脇が準備されていたことが知れる。発句・脇だけではなく、一順を先に作っておき、当日、それらを、さも当座で詠まれたように披露することも普通に行われていた(注20)。例えば、『時慶記』文禄二年正月十八日の条には、「紹巴より一順雖到来、沈酔故不見、夜中に披見候」とあるが、予定されている連歌の一順を、事前に作っておくために、紹巴から、時慶の順番の前までできたものを書きよこしてきたが、当座は酔っ払っていたために見る気になれず、夜中になってそれを見たという内容である。従って、次の日の記述は「雨天、所勞、紹巴へ一順早天に遣、次飛鳥井中将へ」云々となる。「所勞」は二日酔い、自分の次の出句者は、飛鳥井雅枝だということである。

当該の連歌の場合も、当然そのような手続きがとられたであろう。というより、多少とも研究者として連歌に係わってきた者として言えば、当時において、このような儀式的な強い(つまり、文芸としての連歌の興よりも、滞りなく一座を進行させることが重要な)連歌の場合、とられなかった(つまり、ぶっつけ本番で張行された)と考えることの方が余程不自然である。それが、二月三十日か三月一日になされた。メンバーの序列から言って、秀次は、秀吉(主賓)、応其上人(亭主)に続いて第三を詠むはずである。彼の所には、秀吉の発句と応其上人の脇を記したものが届けられたはずである。彼は、そこで、秀吉の発句が「年を経ば若木も花や高野山」であること

ている兄弟がいたとしたら、世間はどう思うであろうか。それと全く同じパターンの出来事が、文禄三年三月四日、豊臣家において生じている。法事の施主となったのは豊臣秀吉、法事の対象は、その母である天瑞院（大政所・なか。以下「大政所」の称呼を用いる）、その法事にわざと欠席した三人の孫は、豊臣秀次（関白）・秀保（大和中納言）・秀俊（丹波中納言）である。

事実を確認しておこう。『駒井日記』文禄三年三月六日の所に載せられている藤堂佐渡・木下大膳・孝蔵主の書簡、また三月七日の所に載せられている郡十右衛門の注進に関する記事を、順に「Ⅰ」「Ⅱ」「Ⅲ」「Ⅳ」として引用する（注5）。

〔Ⅰ〕一、藤堂佐渡方より、於高野太閤様御機嫌の様子申来。去三日、高野^江御登山。

四日に大政所様御いはい所にて御法事。御供公家諸大夫、何れも装束の由。五日に御能。六日に奥院^江御入堂、其日、御連歌可被成由。七日^ニ塚まで可被還御由、申来。

〔Ⅱ〕一、木下大膳従高野書状到来、

一、去四日^ニ仏前^ニ而御焼香の由、内陣^江聖門・菊亭殿・中山・日野・右衛門督・飛鳥井御供の由。

一、法事論議律師経の由。右過候而、連歌百韻被成由。奥院^江御参候而、こんだう・大塔・弘法大師五筆共被成御覽由。

一、五日^ニ御能、老松・井筒・皇帝・松風被成由。

〔Ⅲ〕一、孝蔵主より五日の文に、

一、太閤様、五日未刻、兵庫寺まで被成還御由、申来。

〔Ⅳ〕一、太閤様、昨日六日未刻、至大坂還御被成旨、郡十右衛門注進被申上。

〔Ⅰ〕は、「去三日」とあるので、四日に書かれたものと推定される。ただし、四日に興行された連歌について、六日の予定と記されているので、五日以降の記事は、四日朝の時点での予定を記したものとと思われる。

〔Ⅱ〕は、「去四日」とあるので、四日までの記事は、事実を記したものと考えられる。即ち、大政所の法事の後、当該の連歌百韻が興行されたのは三月四日であったということである。また、同日、秀吉が奥の院へ参詣したことも知れる。

〔Ⅲ〕は、三月五日未刻に、秀吉一行が兵庫寺（注6）に到着したとする記事である。そして、「Ⅳ」から、一行は次の六日の未刻ころ、大坂に帰りついたことが知れる。「Ⅰ」には「七日^ニ塚まで可被還御由」とあるから、大坂に帰着するのは次の八日ではなく、二日分予定を早めて下山したことになる。何故、秀吉は下山を急いだか？ あるいは

〔Ⅰ〕の記事自体が間違った推測で、秀吉は最初から五日下山の計画であった可能性も皆無とは言いきれないが、一方、当初の予定を変更して下山を急がねばならないような状況になったという可能性が高いと私には考えられる。これについては、また後に論じたい。

では、その時、秀次や秀保や秀俊はどうしていたか？ 周知のように、秀吉の高野参詣は、有名な吉野での花見に継続してなされたものである。花見の期日は二月二十七日から三月一日までの五日間（注7）、そして、三月二日に吉野を出て、その日は兵庫寺（注8）に宿泊、翌三日、高野山上に到着したものである。その花見には秀次も秀保も秀俊も同行していた。その花見の様子は『太閤記』等に詳しいが、三月二十九日に開催された歌会のメンバーを列挙すると、秀吉公、関白秀次公、右大臣晴季（菊亭）、権大納言親綱（中山）、権大納言輝資（日野）、大納言家康卿、権中納言秀保、権中納言秀俊、参議中納言秀家、参議左近衛中将利家、左近衛中将雅枝（飛鳥井）、右衛門督永孝（高倉）、侍従政宗、准三宮道澄（聖護院）、入道前内大臣常真、法印玄旨、法印全宗、法眼紹巴、法眼由己、法橋昌叱の二十名で、秀次・秀保・秀俊、三名とも名を連ねている。そして、二十名中十六名は、当該の連歌にも参加しているのであるが、三名の名は、連歌には見えない。何故か？ 『駒井日記』三年三月二日の条から引用する。

一、從吉野、太閤様、高野^江御参詣。

一、関白様、從吉野、和州郡山^江被成御帰座、和州太田（注9）之在所に而太閤様^江御暇乞被成、郡山へは丹波中納言殿御同道。関白様御座所、御城之内山里也。

その日、太閤様（秀吉）は、吉野から高野に向かったが、関白様（秀次）は、それに同行せず、丹波中納言殿（秀俊）と共に、郡山へ戻ったという記事である（注10）。一体、何故、彼らはそのような行動をとったのか。翌三日の『駒井日記』の記事は、以下のごとくである。

一、郡山御舞台に而御能有。翁・金剛大夫、弓八幡・大和中納言殿、八島・関白様、羽衣・丹波中納言殿、紅葉狩・大和中納言殿、源氏供養・関白様。（下略）

緊急なことは、何も起こっていない。二人は、祖母の法事を欠席して、郡山で、能のシテを演じて興じているのである。見過ごしてならないのは、前日の記事には出てこなかった秀保（大和中納言）も、郡山城主であるから当然であるが、ここに加わっていることである。

二月二十九日の歌会のメンバーは、秀吉を除いて十九名、全て秀吉と係わりの深い

文禄三年三月四日「何衣」百韻と豊臣家の内紛

勢田 勝郭

Internal trouble of the Toyotomi family and renga "Nanikoromo" in 1594

Katsuhiko SETA

天正十九年十二月、豊臣秀吉は、関白職を甥の秀次に譲り、自らは太閤と称する。これは、自らの後継として、秀次を指名したということの意味する。そのような状況下で、側室・茶々が男子（おひろひ）を出生し、豊臣家の後継者問題が再燃する。本稿は、当該の連歌が、豊臣家のルーツたる大政所・なかの三回忌の場を利用して、徳川家康以下の有力武将・貴族の眼前で、おひろひが自らの後継者であることを宣言すると同時に、豊臣家の再結束を図ろうという秀吉の意図のもとに計画されたものであったが、秀次・秀保・秀俊三名の結束した拒否によって、逆に、豊臣家内部の対立を顕在化させ、より深刻化させる結果となったことを論証しようとするものである。

本稿で取り扱う連歌百韻は、文禄三年三月四日、豊臣秀吉の高野参詣の際に興行されたもので、発句は、主賓たる秀吉（一字名・松）の作で「年を経ば若木も花や高野山」。脇は、亭主たる木食応其上人で、「霞む砌の広き垣内」。以下、連衆は、出句順に、聖護院道澄（白）（注1）、菊亭晴季（鳥）、織田常真、紹巴、徳川家康（徳川大納言）、細川幽斎（玄旨）、中山親綱（中山大納言）、日野輝資（日野大納言）、前田利家、蒲生氏郷、昌叱、施薬院全宗、飛鳥井雅枝、高倉永孝（右衛門督）、伊達政宗、橋本長俊、大村由己というごとくで、当時の公家社会・武家社会・連歌界のビッグネームが名を連ねているものである。

いわゆる戦国武将と呼ばれる人物には、連歌に関心を持ち自らも嗜んだ者が多い。織豊期に限っても、明智光秀、黒田如水、毛利元就、最上義光等の名がすぐに思い浮かぶ所である。近年のベストセラーで映画化もされた『のぼうの城』の忍城主・成田氏長も、『太閤記』には（注2）、「忍の城主・成田は、常に連歌に好き侍りにければ、毎年、秀逸の句を記し付け、紹巴法橋へ使者を上せ、点を取りにけり」云々と記されている人物である。また、NHKのドラマ「真田丸」で評判の真田信繁（幸村）にも、連歌を嗜んだという記録が残っている（注3）。ただし、連歌というものが現代人には極めて馴染薄い文芸であるためかどうか、右にあげたこと著著名な武将たちを論じる際にも、連歌それ自体を歴史的資料としてとりあげ、その内容にまで踏み込んで検討されることは——本能寺の変に先立って明智光秀が興行した所謂「愛宕百韻」（天正十年五月二十四日「何人」）を、恐らく唯一の例外として——全くといってない。当該の百韻もその例にもれず、これだけの有名武将が名を連ねているものにもかかわらず、過去に、歴史的資料として内容にまで踏み込んで検討されたことはないようである（注4）。では、歴史的資料として当該百韻の内容を検討すれば、どのような結果を新たに呈示することができるか、本稿は、その試みである。

もし、自分たちの祖母の法事をわざと欠席して、別な所で、三人そろって能に興じ

Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten/Silicon-Based-Coated Solid Carbide Thread Milling Cutters in Thread Tapping of Chromium-Molybdenum Steel

Tadahiro WADA

Proceedings of 2016 7th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE),
18-20 July 2016, London, United Kingdom
(ISBN: 978-1-4673-8829-0, IEEE Catalog Number: CFP1647L-ART), pp. 219-223.

When tapping with taper pipe thread taps with a straight flute, the thickness of chips increases with the increase in tapping processing, these chips become clogged between the thread of the tap and the workpiece, and the thread of the tap very frequently causes tool breakage. It is considered that the helical milling method with thread milling cutters in thread tapping is effective against problems associated with tapping chips. Thread milling is a method of producing a screw thread by a milling operation [1]-[3]. Internal thread milling operation is possible for stable operation because chips are divided and chip clogging can be prevented. However, for internal thread tapping of chromium-molybdenum steel, there are no studies examining how to improve tool damage of pipe thread taps.

On the other hand, in order to improve resistance fractures of the thread milling cutter, cemented carbide, which has good fracture toughness, is often used as the substrate material for the tap. The physical vapor deposition (PVD) method is a widely used coating technology.

An aluminum/chromium-based coating film, namely (Al,Cr)N coating film, has recently been developed. An aluminum/chromium-based coated tool was evaluated through the machining of sintered steel, and showed greatly improved performance [4]. It was clarified that the (Al,Cr)N-coated cemented carbide is an effective tool material for cutting hardened sintered steel [5]. To improve both the scratch strength and the micro-hardness of the (Al,Cr)N coating film, the cathode material of an aluminum/chromium/tungsten target was used in adding tungsten (W) to the cathode material of the aluminum/chromium target [6]-[8]. Furthermore, to improve the tool life in cutting hardened steel, the cathode material of an aluminum/chromium/tungsten/silicon target was used in adding silicon (Si) to the cathode material of the aluminum/chromium/tungsten target [9]. In this report, the new (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N) coating film has both high hardness and good adhesive strength, and can be used as a tool material in cutting hardened steel.

However, it is not clear whether these coating films are effective tool materials for helical milling with a thread milling cutter.

In this study, chromium-molybdenum steel (ISO 34CrMo4, AISI 4137) was helical milled with two physical vapor deposition (PVD)-coated cemented carbide end thread milling cutters in order to determine effective tool materials for tapping chromium-molybdenum steel. The coating films used were (Ti,W)N/(Ti,W,Si)N and commercial (Ti,Al)N coating films. The inner layer of the (Ti,W)N/(Ti,W,Si,Al)N coating system is (Ti,W)N coating film, and the outer layer is (Ti,W,Si,Al)N coating film. In order to identify an effective tool material for thread tapping of chromium-molybdenum steel, tool wear was experimentally investigated.

The main results obtained are as follows:

- (1) The critical scratch load measured value by the scratch tester of the (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N) coating film was over 130 N.
- (2) In thread tapping of chromium-molybdenum steel at a cutting speed of 1.00 m/s, the tool wear width of the (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N)-coated tool was smaller than that of the (Al,Cr)N-coated tool.
- (3) It was possible for the (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N)-coated thread milling cutter to perform stable tapping for a long period.

The above results clarify that the (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N) coating film, which is a new type of coating film, has both high hardness and good adhesive strength, and can be used as a coating film for WC-Co cemented carbide cutting tools. Moreover, the new (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N) coating film can be used as a tool material in thread tapping of chromium-molybdenum steel.

Acknowledgment

The author would like to express thanks for the cooperation of OSAKA JACK CO., LTD. for supplying the workpiece.

References

- [1] S.W. Lee, A. Kasten, A. Nestler, "Analytic mechanistic cutting force model for thread milling operations", *Procedia CIRP* 8 (14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO)), 2013, pp.546-551.
- [2] Anna Carla Araujo, Jose Luis Silveira, Martin B. G. Jun, Shiv G. Kapoor, Richard DeVor, "A model for thread milling cutting forces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol.46, 2006, pp.2057-2065.
- [3] Anna Carla Araujo, Guillaume Fromentin, Gérard Poulachon, "Analytical and experimental investigations on thread milling forces in titanium alloy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 67, 2013, pp.28-34.
- [4] Tadahiro Wada, Koji Iwamoto, Hiroyuki Hanyu, and Kinya Kawase, "Tool wear of (Al,Cr)N coated cemented carbide in cutting sintered steel", *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, vol. 58, 2011, pp.459-462 (in Japanese).
- [5] Tadahiro Wada, Mitsunori Ozaki, Hiroyuki Hanyu, and Kinya Kawase, "Tool Wear of Aluminum-Chromium Based Coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Sintered Steel", *International Journal of Engineering and Technology*, Vol.6, No.3, 2014, pp.223-226.
- [6] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, "Wear Mechanism of Aluminum/Chromium/Tungsten-based-coated Cemented Carbide in Cutting of Hardened Sintered Steel", *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMME)*, Vol. 3, Issue 2, 2015, pp. 56-60.
- [7] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, "Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten-Based-Coated Cemented Carbide Tools in Cutting Sintered Steel", *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering* Vol:9, No:8, 2015, pp. 826-829.
- [8] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, "Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten-based-coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Steel", *Applied Mechanics and Materials* Vol. 798, 2015, pp 377-383.
- [9] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, "Tool Wear of Aluminum / Chromium / Tungsten / Silicon-Based-Coated Cemented Carbide Tools in Cutting of Hardened Steel" *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 6, 2016, pp. 406-409, in press.

Tool Wear of Sintered Cubic Boron Nitride Compact in Cutting Hardened Steel with High-Pressure Coolant Supplied

Tadahiro WADA, Kazuki OKAYAMA and Yusuke MORIGO*

High Performance and Optimum Design of Structures and Materials II (Proceedings of the 2nd International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials (HPSM 2016)), pp. 191-200.

Hardened steel is used for dies and molds, and is quenched and tempered to improve its mechanical properties and wear resistance. For dimensional accuracy, hardened steel is machined by the metal removal process. High-speed cutting is an effective method of improving productivity. As the cutting temperature rises very high in high-speed cutting, the tool materials require both good wear-resistance and heat-resistance, and the cutting parts must be cooled for efficacy and efficiency.

Polycrystalline cubic boron nitride compact (cBN) seems to be an effective tool material because it has better features as a tool material such as hardness, heat-resistance, etc. There are many studies on the tool wear of cBN tools [1, 2, 3, 4]. However, the cutting performance of cBN tools depends on the content of both the cBN grain and the binding phase [5], the binding phase [6]. Therefore, an effective binding phase, etc. for cBN tools should be selected for cutting hardened steel.

High-pressure coolant cutting is effective for reducing the cutting temperature. For this reason, many studies on high-pressure coolant cutting have recently been carried out.

Itakura et al. [7] reported that high speed cutting of Inconel 718 was attempted at increased cutting fluid flow rate by injecting fluid at a high pressure to the cutting edge. As a result, as the injection speed of the cutting fluid went up, the cutting temperature was reduced and flank wear was reduced. Thus, high-pressure coolant cutting is considered effective for reducing tool wear [8, 9, 10]. Further, the improvement of chip control, particularly chip breaking performance, is also expected by the high-pressure coolant supplied [11].

However, the influences of both the cutting speed and the coolant pressure on merchantability in high-speed cutting hardened steel with high-pressure coolant supplied have not been reported.

In this study, hardened steel was turned with high-pressure coolant supplied, the chip configurations, the tool wear and the surface roughness were experimentally investigated. The hardened steel used was an ASTM D2 cold-worked die steel (60HRC).

The results are as follows:

- (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 of the coolant pressure, and the chip length was longer with the increase of the cutting speed.
- (2) In the case of a cutting speed of 10.00 m/s, large wear on the flank face was observed in dry cutting. It was possible to suppress the tool wear on the flank face with high-pressure coolant supplied.
- (3) In the high-pressure coolant cutting method of hardened steel with a cBN tool at a cutting speed of 10.00 m/s, the cBN grain size of 5.0 μm , 45 cBN grain/55 binding phase and main element of the binder phase of TiCN-Al was an effective tool material. And, the surface roughness by cutting with this cBN tool was almost constant up to a cutting distance of 1080 m.

Acknowledgment

We would like to thank TOKUPI Corporation (3-167 Otake Yao Osaka, 572-8530, JAPAN) for their support in the turning test, which enabled this work to be carried out. The authors would also like to express thanks for the cooperation of Tungaloy Corporation for the supply of cBN inserts.

References

- [1] Ge' rard Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, Se' bastien Pheulpin, Emmanuel Seguin, The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, pp.139-144, 2003.
- [2] Ge' rard Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, Se' bastien Pheulpin, Emmanuel Seguin, Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels, *Wear*, 256, pp. 302-310, 2004.
- [3] G.K. Dosbaeva, M.A. El Hakim, M.A. Shalaby, J.E. Krzanowski, S.C. Veldhuis, Cutting temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50, pp. 1-8, 2015.
- [4] J.A. Arsecularatne, L.C. Zhang, C. Montross, P. Mathew, On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 171, pp. 244-252, 2006.
- [5] J. Guddat, R. M'Saoubi, P. Alm, D. Meyer, Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity, *Procedia Engineering (1st CIRP Conference on Surface Integrity (CSI))*, 19, pp. 118 – 124, 2011.
- [6] K. Shintani, H. Katoh, et al., Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Austempered Bainitic Spheroidal Graphite Cast Iron, *Journal of Japan Soc. Precision Engineering*, 56(12), pp. 2261-2266, 1990 (in Japanese).
- [7] K. ITAKURA, M. KURODA, Y. DOI, H. TSUKAMOTO, Y. ARIURA, High Speed Cutting of Super Heat Resisting Alloy Inconel 718 -On the Finish Cutting with High Pressurized Cutting Fluid-, 66, pp. 1611-1615, 2000 (in Japanese).
- [8] E. O. Ezugwu, J. Bonney, Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools, *Journal of Materials Process Technology*, 152-154, pp. 1045-1050, 2004.
- [9] E. O. Ezugwu, R. B. Da Silva, J. Bonney, A. R. Machado, Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(9), pp. 1009-1014, 2005.
- [10] E.O Ezugwu, J Bonney, Y Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134(2), pp. 233-253, 2003.
- [11] E. O. Ezugwu, High speed machining of aero-engine alloys, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(1), pp. 1-11, 2004.

* TOKUPI Corporation

Cutting Performance of Electroplated Diamond Drill with V-Shaped Groove and through Coolant Hole in Drilling Cemented Carbide

Tadahiro WADA

International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 5, No. 2, May 2017, pp. 79-82.

Cemented carbides have been developed as a material for cutting tools. They were first demonstrated at the Spring Fair at Leipzig in 1927, cutting cast-iron and 12% manganese steel at 2-3 times the normally accepted cutting speeds [1]. Due to the excellent mechanical properties of cemented carbides, such as compressive strength, hardness and toughness they are used for wear resistant material [2], such as drawing dies, molds, rolling rolls etc., in addition to the cutting tool. Cemented carbides are generally machined to improve the dimensional accuracy after sintering. Owing to the high material hardness, machining is generally performed with diamond grinding wheels [3]. Resin-bonded diamond wheels are usually used for grinding various cemented tungsten carbides [4].

For machining difficult-to-cut materials, such as tungsten carbide, micro-electrical discharge machining (EDM) is one of the most effective methods for making holes because the hardness is not a dominant parameter in EDM [5]. However, as die sinking EDM requires the use and subsequent production of tool electrodes, machining time is longer and costs higher than cutting methods such as milling by a machining center [6]. The method with a diamond drill is considered one of the most effective methods for making holes. There have been many studies on drilling ceramics by diamond drills [7-9]. However, few studies on drilling cemented carbides have been reported.

Cutting Performance of Electroplated Diamond Drill with V-Shaped Groove and Through Coolant Hole in Drilling Cemented Carbide

In this study, cemented carbides were holed by electroplated diamond drills with a through coolant hole. Two types of drills with different flute shape, namely with a V-groove and without a V-groove, were used. Furthermore, two types of cemented carbides with different hardness were used, too.

The following results were obtained:

- (1) None of the drilled holes showed noticeable burrs or corner dullness.
- (2) The main tool failure of the electroplated diamond drill was the flaking of the diamond layer on the drill tip.
- (3) The addition of the V-groove on the drill tip extended the tool life by 1.7 times.
- (4) Both the drilled hole's diameter of the entrance side and that of the outlet side decreased with the increase of the drilled hole length.
- (5) The tool life of the electroplated diamond drill was dependent on the hardness of the cemented carbide.

Acknowledgment

I am grateful to Dr. Eng. Hidenobu Gonda in OSG Corporation for his kind advice and support of the present work.

I am also grateful to Mr. Naoki Kondo, who was a team leader of JAPAN team of HOKOTATE team of Nara National College of Technology, for his help in the execution of the drilling experiment. I would also like to thank OSG Corporation and UEMURA Co. Ltd. for their support in the drilling test, which enabled this work to be carried out.

References

- [1] Geoffrey E. Spriggs (1995). A History of Fine Grained Hardmetal, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 13, 241 - 255.
- [2] J. B. J. W. Hegeman, J. Th. M. De Hosson, G. de With (2001). Grinding of WC-Co hardmetals, Wear, 248, 187 - 196.
- [3] Philip Koshy, V.K. Jain, G.K. Lal (1997). Grinding of cemented carbide with electrical spark assistance, Journal of Materials Processing Technology, 72, 61 - 68.
- [4] S. Y. Lao, Y. C. Liu, C. C. Chou, T. C. Chen (2001). Performance of powder filled resin-bonded diamond wheels in vertical dry grinding of tungsten carbide, Journal of Materials Processing Technology, 118, 329 - 336.
- [5] Hyun-Seok TAK, Chang-Seung HA, Dong-Hyun KIM, Ho-Jun LEE, Hae-June LEE, Myung-Chang KANG (2009). Comparative study on discharge conditions in micro-hole electrical discharge machining of tungsten carbide (WC-Co) material, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 19, 114 - 118.
- [6] ZhanBo Yu, Takahashi Jun, Kunieda Masanori (2004). Dry electrical discharge machining of cemented carbide, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, Issues 1-3, 353 - 357.
- [7] Chao Gao, Juntang Yuan (2011). Efficient drilling of holes in Al₂O₃ armor ceramic using impregnated diamond bits, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, Issue 11, 1719 - 1728.
- [8] Q.H. Zhang, J.H. Zhang, D.M. Sun, G. D. Wang (2002). Study on the diamond tool drilling of engineering ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 122, 232 - 236.
- [9] F.L. Zhang, P. Liu, L.P. Nie, Y.M. Zhou, H.P. Huang, S.H. Wu, H.T. Lin (2015). A comparison on core drilling of silicon carbide and alumina engineering ceramics with mono-layer brazed diamond tool using surfactant as coolant, Ceramics International, Vol. 41, Issue 7, 8861 - 8867. S. Chen, B. Mulgrew, and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 4, pp. 570-578, July 1993.

Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten/Silicon-Based-Coated End Mill Cutters in Milling Hardened Steel

Tadahiro WADA and Hiroyuki HANYU*

Solid State Phenomena, Vol. 263, pp 85-89 (Accepted:2017-06-27, Online: 2017-09-15).

Hardened steels used for dies or molds are widely cut as a substitute for grinding. Polycrystalline cubic boron nitride (cBN) compact tools are used for cutting hardened steels, due to their high hardness and high thermal conductivity. However, in milling, major tool failure of cBN readily occurs by fracture because cBN has poor fracture toughness. Coated cemented carbide is an effective tool material for milling hardened steels because it has good fracture toughness and wear resistance. The physical vapor deposition (PVD) method is widely applied to cutting tools because it enables the application of coatings at relatively low treatment temperature and high adhesion of the deposition to the substrate. In this case, titanium based films (e.g. TiN, (Ti,Al)N) are generally used as the coating film [e.g. 1, 2].

An aluminum/chromium-based coating film, namely (Al,Cr)N coating film, has recently been developed. An aluminum/chromium-based coated tool was evaluated through the machining of sintered steel, and showed greatly improved performance [3]. It was clarified that the (Al,Cr)N coated cemented carbide is an effective tool material for cutting hardened sintered steel [4]. To improve both the scratch strength and the micro-hardness of the (Al,Cr)N coating film, the cathode material of an aluminum/chromium/tungsten target was used in adding tungsten (W) to the cathode material of the aluminum/chromium target [5,6]. Furthermore, to improve the wear-resistance of the cutting tool, the cathode material of an aluminum/chromium/tungsten/silicon target has been developed in adding silicon (Si) to the cathode material of the aluminum/chromium/tungsten target. However, it is not clear whether aluminum/chromium/tungsten/silicon-based-coating films are effective tool materials for milling hardened steel.

In this study, hardened steel was milled with three PVD-coated cemented carbide end mill cutters in order to clarify effective tool materials for milling hardened steel (AISI D2, 60HRC) at the cutting speed of 2.5 m/s. The coating films used were two types of aluminum/chromium/tungsten/silicon-based-coating films and (Ti,Al)N-coating film. The tool wear of three PVD-coated end mill cutters was experimentally investigated in milling hardened steel.

The main results obtained are as follows:

- (1) In milling hardened steel at a cutting speed of 2.5 m/s, Type II coating film was the best coating material among the three types of coated film. The Type I coating film was superior to the (Ti,Al)N-coating film.
- (2) The critical scratch load of both Type I and Type II of over 130 N was larger than that of the (Ti,Al)N-coating film of 65 N.
- (3) The multi-layered structure is expected to improve the tool life.

Acknowledgment

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 24560149 (Grant-in-Aid for Scientific Research (C)).

References

- [1] Kusuhiro Sakagami, Gao Yongming and Tsutomu Yamamoto, "Effects of Substrate and PVD-Coated Layers on Flank Notch Wear of Carbide Tool in Stainless Steel Cutting", PROGRESS OF CUTTING AND GRINDING (Proceedings of the Fourth International Conference on Progress of Cutting and Grinding), pp.38-42, 1998.
- [2] Heisaburo Nakagawa, Toshiki Hirogaki, Yoshiaki Kakine and Iwao Yamaji, "STUDY ON TOOL LIFE IN END-MILLING OF HARDENED STEEL", PROGRESS OF MACHINING TECHNOLOGY (Proceedings of 6th International Conference on Progress of Machining Technology), pp.81-86, 2002.
- [3] Tadahiro Wada, Koji Iwamoto, Hiroyuki Hanyu, and Kinya Kawase, "Tool wear of (Al,Cr)N coated cemented carbide in cutting sintered steel", Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, vol. 58, pp.459-462, 2011 (in Japanese).
- [4] Tadahiro Wada, Mitsunori Ozaki, Hiroyuki Hanyu, and Kinya Kawase, "Tool Wear of Aluminum-Chromium Based Coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Sintered Steel", International Journal of Engineering and Technology, Vol.6, No.3, pp.223-226, 2014.
- [5] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, "Wear Mechanism of Aluminum/Chromium/Tungsten-based-coated Cemented Carbide in Cutting of Hardened Sintered Steel", Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Properties of Materials, Workshop of ICPSE 2014, December 18-20, 2014, Barcelona, Spain.
- [6] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, "Wear Mechanism of Aluminum/Chromium/Tungsten-based-coated Cemented Carbide Tools in Dry Cutting of Hardened Sintered Steel", Proceedings of 3rd International Conference on Aerospace, Mechanical, Automotive and Materials Engineering (ICAMME'15), March 29-30, 2015, Singapore.

* OSG Corporation

Tool Wear of Multi-layer AlCrWN/AlCrWSiN-Coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Sintered Steel

Tadahiro WADA

Solid State Phenomena, Vol. 266, pp. 69-75 (Accepted: 2017-06-26, Online: 2017-10-02).

An aluminum-chromium based coating film has been developed. Comparing the performance of AlCrN coated tool inserts with that of TiN coated ones, the former can achieve approximately 33% more depth of cut and can attain higher cutting speed due to better thermal resistance of the coated inserts [1]. In milling, the tool life of the end mills with the TiAlN coating is much lower as compared to the cutting tools with the AlCrN coatings [2-3]. As a result, the wear progress of the AlCrN coated cemented carbide tool was slower than that of the TiN or the TiAlN coated cemented carbide tool. However, the results of our study indicate that the critical scratch load, which is the value measured by the scratch test, of the AlCrN coating film is 77 N and the micro-hardness is 2760 HV0.25N. Therefore, in order to improve both the scratch strength and the micro-hardness of the AlCrN coating film, cathode material of an Al-Cr-W target was used in adding tungsten (W) to the cathode material of the Al-Cr target [4]. The Al-Cr-W based 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 [4]. Furthermore, the addition of W reduces friction [5-6].

The addition of Si to TiN coatings transforms the [111] oriented columnar structure into a dense finely grained structure, and thin films of Ti-Si-N have been deposited by physical vapor deposition to improve the wear resistance of TiN coatings [7]. Cutting experiments have shown that the TiAlSiN coated end mill with Si content of 4.78 at.% had the least flank wear, the milling distance of which was improved about 20% more than the TiAlN coated end mill. Furthermore, the hardness of the AlCrSiWN coating film is higher than that of the AlCrN at temperatures below 700 degrees Celsius, and the addition of Si leads to grain refinement and significantly affects the phase composition and the mechanical properties owing to the formation of amorphous Si₃N₄ and .

Many multi-layer coating materials to improve the tool life have been developed. The wear progress of the multilayered AlCrWCN/AlCrWSiCN-coated tool was slower than that of the monolayer AlCrWSiCN-coated tool in cutting hardened steel at a feed rate of 0.2 mm/rev. However, the tool wear of the multi-layer AlCrWN/AlCrWSiN-coated tool has not been clarified. The characteristics of the multi-layer AlCrWN/AlCrWSiN-coated coating film have also not been clarified.

In this study, in order to clarify the effectiveness of the multi-layer AlCrWN/AlCrWSiN-coated cemented carbide tool, the wear progress was investigated in cutting hardened sintered steel using the three types of coated tools. Namely, Tool I had the dual-layer (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N)-coating film, Tool II had the multi-layer (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)(C,N)/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N)-coating film and Tool III had the multi-layer (Al₆₀,Cr₂₅,W₁₅)N/(Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)N-coating film.

The following results were obtained:

- (1) The main tool failure of the three types of coated tools was the flank wear within the maximum value of the flank wear width of 0.2 mm.
- (2) The critical scratch load of the three types of coated tools was 130 N or more.
- (3) The micro-hardness of Tool III 3000 HV0.25N was highest among the three types of coated tools.
- (4) The mean value of the friction coefficient of the (Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)N coating film, 0.21, was approximately half that of the (Al₅₃,Cr₂₃,W₁₄,Si₁₀)(C,N) coating film, 0.41.
- (5) In the case of the higher cutting speed, the wear progress of the multi-layer coating system was slower than that of the dual-layer coating system.
- (6) In the case of cutting hardened sintered steel using the multi-layer coated tool, the wear progress of the Type III coated tool was slower than that of the Type II coated tool.

Acknowledgment

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 24560149 (Grant-in-Aid for Scientific Research (C)).

References

- [1] Yueh-Jaw Lin, Ashutosh Agrawal, Yunmei Fang, Wear progressions and tool life enhancement with AlCrN coated inserts in high-speed dry and wet steel lathing, *Wear*, Volume 264, Issues 3-4(2008)pp. 226-234.
- [2] G.S. Fox-Rabinovich, B.D. Beake, J.L. Endrino, S.C. Veldhuis, R. Parkinson, L.S. Shuster, M.S. Migranov, Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings, *Surface and Coatings Technology*, Volume 200, Issues 20-21, 22 May(2006)pp. 5738-5742.
- [3] W. Kalss, A. Reiter, V. Derflinger, C. Gey, J.L. Endrino, Modern coatings in high performance cutting applications, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 24, Issue 5, September(2006)pp. 399-404.
- [4] Tadahiro Wada and Hiroyuki Hanyu, Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten-based-coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Steel, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 798 (2015)pp. 377-383.
- [5] K. Bobzin, N. Bagcivan, M. Ewering, R.H. Brugnara, S. Theiß, DC-MSIP/HPPMS (Cr,Al,V)N and (Cr,Al,W)N thin films for high-temperature friction reduction, *Surface & Coatings Technology*, 205(2011)pp. 2887-2892.
- [6] Wan-Yu Wu, Chia-Hao Wu, Bo-Hong Xiao, Ting-Xin Yang, Shi-Yi Lin, Ping-Hung Chen, Chi-Lung Chang, Microstructure, mechanical and tribological properties of CrWN films deposited by DC magnetron sputtering, *Vacuum*, 87(2013)pp. 209-212.
- [7] M. Diserens, J. Patscheider, F. Levy, Improving the properties of titanium nitride by incorporation of silicon, *Surface and Coatings Technology* 108-109(1998)pp. 241-246.

奈良工業高等専門学校 研究紀要第53号

平成 30 年 3 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

Papers

“Expression in Mechanics Sense” in terms of Distribution Pattern of Load Level	Toshio HIRA	1
Fabrication of metal train model by performing metal bending and simplified powder metallurgy technique in extracurricular activities. Ryutaro SANBE, Junpei FUJII, Kai SHIRAKI, Ryuichi FUKUDA,	Hirotsugu SHIMADA, Mitsunori OZAKI, Tomohito SASAYAMA and Yukinori TANIGUCHI	8
Observation of Supersonic Jet using small volume High-Pressure Shock Tube Hiroshi FUKUOKA, Ryohei TAKEMURA, Masanori YAO, Shigeto NAKAMURA, Kazuki HIRO, Shinichi ENOKI		14
Numerical Analysis of Behavior on Opposing Unsteady Supersonic Jets in a Flow Field with Shields Hiroshi FUKUOKA, Toshiki KINOSHITA*,Ikurou UMEZU**		19
Observation of Vapor Film around a High Temperature Small Metal Sphere during Water Quenching Mitsuyoshi SHIMAOKA and Shigeto NAKAMURA		24
Internal trouble of the Toyotomi family and renga”Nanikoromo” in 1594	Katsuhiko SETA	38

Abstract

Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten/Silicon-Based-Coated Solid Carbide Thread Milling Cutters in Thread Tapping of Chromium-Molybdenum Steel	Tadahiro WADA	39
Tool Wear of Sintered Cubic Boron Nitride Compact in Cutting Hardened Steel with High-Pressure Coolant Supplied Tadahiho WADA, Kazuki OKAYAMA and Yusuke MORIGO*		40
Cutting Performance of Electroplated Diamond Drill with V-Shaped Groove and through Coolant Hole in Drilling Cemented Carbide	Tadahiro WADA	41
Tool Wear of Aluminum/Chromium/Tungsten/Silicon-Based-Coated End Mill Cutters in Milling Hardened Steel Tadahiho WADA and Hiroyuki HANYU*		42
Tool Wear of Multi-layer AlCrWN/AlCrWSiN-Coated Cemented Carbide in Cutting Hardened Sintered Steel Tadahiho WADA		43