ガラス細工を例とした作業結果のマッピングと実験作業行動解析手法の提案

2012 年 9 月修了予定　環境システム学専攻　47-106680　牧田碧夏
指導教員：大島義人 教授

キーワード：ガラス細工、実験作業、マッピング、特徴記述

1. 緒言

近年、社会の安全への関心は急速な高まりを見せ、事故や失敗を未然に予測・予防するという安全管理の観点から様々な取り組みが行われている。大学においても、産業界で用いられる労働安全衛生マネジメントシステムに則り、実験事故を防ぐため、注意喚起や事故事例の収集、安全講習会などの対策が行われている。しかし大学における実験研究の目的は、産業界の生産活動のように同じ作業内容を繰り返し行うことではなく、結果あるいは結果を得るための過程の新規性にその重きが置かれている。そのため、ある未達成の目的の実現に向けて、作業者が試行錯誤を含めた非定常的作業を行うことがその特徴として挙げられ、画一的な安全管理では防ぎきれない事故が起こっているのが現状である。

今まで、大学の実験研究において、結果として表れる失敗や事故は、行う作業の内容や作業者の知識や技術など、作業や作業者の要因を一義的に規定し、それを結果と直接的に結び付けるアプローチが主であった。このアプローチでは、作業・作業者などが全て同じであっても常に同じ結果が生じるとは限らない、という再現性の問題を根源的に抱え、作業結果の予測は確率的でしか表現ができないことが限界となる。すなわち、事故や失敗が目標に至るプロセスの中で発生することに鑑みれば、置かれている作業条件の中で作業がどのように行われるかといった、各作業者の作業行動の特性を、その作業条件と結びつけて解析・評価することが重要であると考えられる。

そこで本研究では、ガラス細工の穴あけ作業をモデルとして、実験作業の結果とその作業が行われる途中過程との関係性に着眼し、作業者の実験行為を物理量で記述した上で、その時間的変化と作業結果との関連性から、実験上の目的を持った作業者の行動をマップとして表現し、マップ上に表れる作業足跡から、作業行動の特徴を整理する手法について検討を行った。

2. 研究目的と方針

ガラス細工の穴あけ作業は、図 1 に示すように、「ガラス管をガスバーナーで熱する」工程に引き続いて、「ガラス管に息を吹き込む」という直列の手順で行われる。穴があくかあかないか、またどの程度の大きさの穴があくかは、この両者の工程のやり方で決まることになる。

まず、「熱し方」「吹き方」を規定する物理的代表値を選び、それらをパラメータとする座標上に作業の結果をプロットしたマップの作成（図 2）について検討を行った。次に、被験者を使って、あける穴の大きさを指示された被験者が実際に行った作業を、このマップ上に表現し、その行動履歴から、その作業が持つ特徴や、作業者の行動との関連性について議論することを目指した。

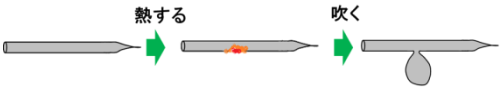

図 1 モデル作業の手順

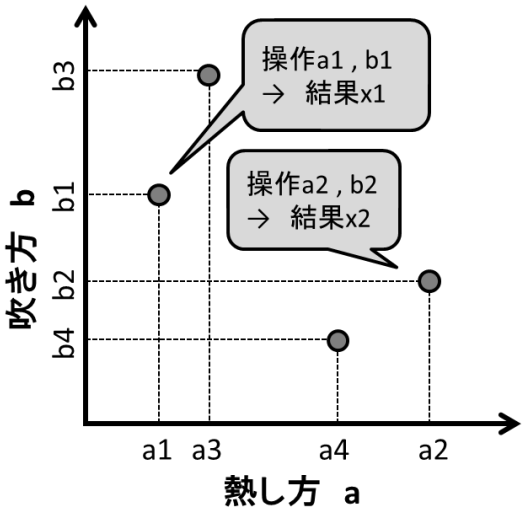

図 2 作業－結果マップの概念図

3. 実験

実験のやり方を図 3 に示す。市販のパイレックスガラス管（内径 10 mm、肉厚 1 mm）を用い、「熱し方」については、炎から外して吹き始める瞬間のガラスの表面温度を、サーモグラフィ（FLIR T360）で計測した。また、「吹き方」については、息を吹き込む管を分岐させ、内圧の変化を圧力センサ（KEYENCE AP-43）で測定した（圧力波形の一例を図 4 に示す）。いずれも、時間変化をデータとして保存することができるので、データ整理の際には、両者を実時間で同期させることが可能である。穴のあき方については、あいた穴の大きさをノギスで測り、膨らみの根元の面積を算出した。

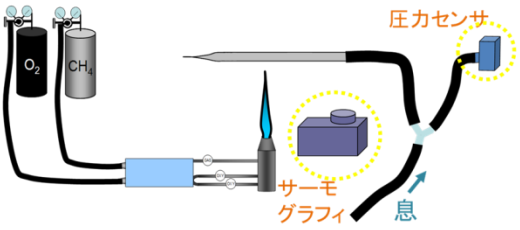

図 3 実験装置図

実験は、被験者として新領域創成科学研究科の教員・学生 7 名に協力を依頼し、①見本と同じ大きさの穴をあける作業を 10 回繰り返す、②見本より小さい／大きい穴を大小交互に 3 回ずつあける、という一連の作業を行わせた。

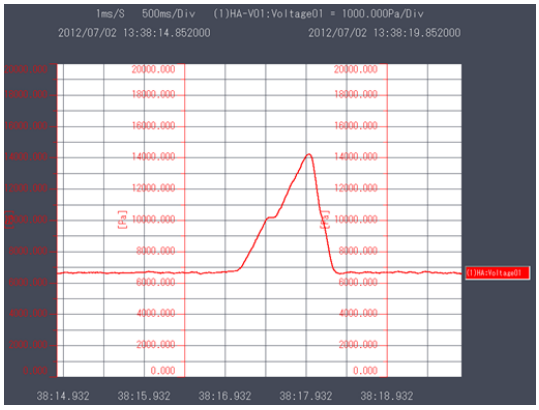

図 4 観測される圧力波形の一例

4. 結果と考察

4-1.作業－結果マップの作成

(1) 穴があく／あかないについて

まず、穴をあけることに成功したサンプルについて、穴があいた瞬間のガラス管の最高温度を横軸に、圧力波形の最高圧力を縦軸にとり、穴があく／あかないの境界を調べた。結果を図 5 に示す。それぞれのガラス管の温度に対し、穴があくために必要な圧力に下限値が存在していることがわかる。また、最高温度が同じでも穴があいた瞬間の圧力の値に幅が見られた。

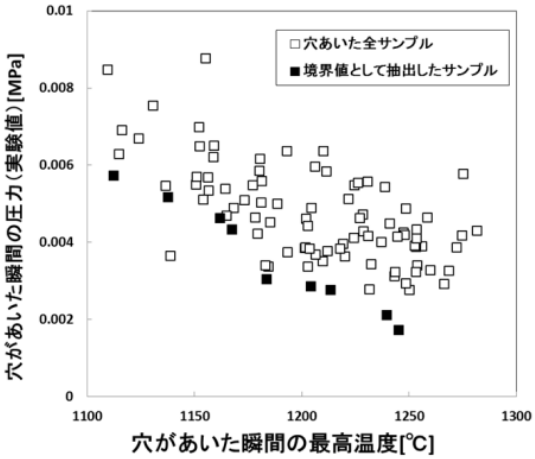

図 5 穴があいた瞬間のガラス管の温度と圧力の関係

この作業において、ガラス管に穴があくためには、管内の圧力が上がった際に変形できるまで、加熱によってガラス管の粘度が低下している必要がある。しかし、炎から外れた瞬間からガラス管の温度は放熱による低下を始め、それに伴ってガラス管の粘度は上昇するため、ガラスの変形に要する圧力も上昇する。つまり、時間に対するガラスの温度低下に、圧力上昇が間に合えば穴があくことになる。

そこで、熱せられたガラス管が炎を放した瞬間から冷えていく様子について、ガラス管の最高部温度の時間変化を調べたところ、初期温度 900～1200 ℃の範囲では、この作業に要する程度の時間内で、ほぼ時間に対して直線的に温度が低下していくことが確認された。この関係を利用すると、図 4 のような圧

力の時間変化を示す波形の横軸を、各時点での温度に変換することが可能となる。実際に、この変換した図を用いて、穴があく／あかないの境界について調べたところ、穴があく／あかないの結果を表現する上で、吹き方を示す曲線の立ち上がり部分の傾きが重要なパラメータであることが確認された。すなわち、穴をあける作業においては、最初にどこまで温めるかという温度に関する要素と、それが冷めていくまでの時間内に十分な圧力を与えるという圧力に関する要素が、連動して行われる必要があることが示された。

(2) 穴の面積について

今回用いたホウケイ酸ガラスの粘度の温度特性より、ガラス加工作業粘度範囲の下限値とされる 107.6 dPa・s となる軟化点温度 821 ℃に着目した。穴があいた全サンプルの 821 ℃以上の面積と、あいた穴の面積との関係を見たところ、正の相関があることが示された（図 6）。そこで、あいた穴の面積を決める温度を表すパラメータとして、吹き始めの瞬間の 821 ℃以上の面積[mm²]を採用した。

一方、吹き方に関しては、圧力波形の山の数や高さ、頂点の鋭さ、角度などは一つ一つ異なっている。その中から、作業の行い方を特徴づけて、かつ作業者の意図を含んでいそうなパラメータを抽出することが望ましい。そこで、(1)での考察をふまえ、作業者の吹き方を表すパラメータとして、圧力の立ち上がり部分の傾きを用いることとした。

圧力波形の吹き始めの近辺で、いくつか区間を設定し、その圧力波形を直線近似し、傾きを求めた。各傾きの値について、穴の面積との関係を回帰分析した。各値をパラメータとして用いた場合の R^2 値の平均と分散を表 1 に示す。これより、圧力波形における最初の頂点に至るまでの区間の 20～50%区間の傾き（以下、「圧力勾配：20~50%[MPa ms^{-1}]」とする）が、吹き方を表す作業パラメータとして最適であることがわかった。

このように、温度と吹き方について採用した二軸をもち、穴の面積ごとにプロットした穴の面積マップを図 7 に示す。

表 1　吹き方に関する作業パラメータの評価

	解析サンプル数	一次近似のR^2値 平均	偏差
① 立ち上がりから最高圧力まで	94	0.94	0.14
② 吹き始めから100ms間	15	0.82	0.28
③ 100～200ms	103	0.95	0.15
④ 1つ目の山までの20～50%区間	103	0.98	0.05

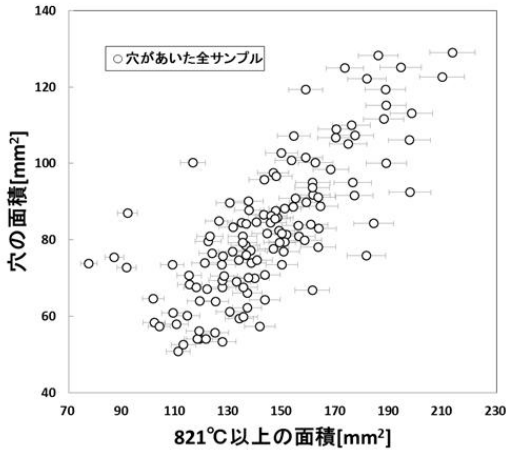

図 6　821 ℃ 以上の面積と穴の面積の関係

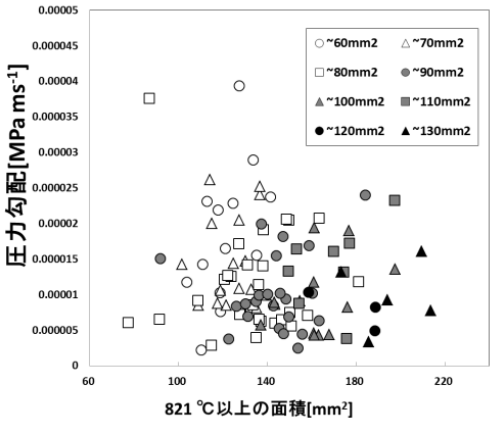

図 7　作成した穴の面積マップ

4-2.マップを用いた作業行動の特徴に関する解析

(1)同じ大きさの穴を繰り返しあける作業

同じ大きさの穴を繰り返しあける作業について、「吹き始めのガラス管の最高温度[℃]」と圧力勾配 20~50%[MPa ms^{-1}]」を 2 軸としたマップ上にプロットした。結果の例を図 8 に示す。両者を比較すると、プロットが 1 次元的に分布する作業者（図左）と、2 次元的

な分布をする作業者（図右）といった点で、変遷が大きく異なることがわかる。これは、同じ大きさの穴をあけるという作業に取り組むとき、その作業者が変化させている行い方のバリエーションを意味していると考えられる。2 次元的な分布をする作業者は、その作業の変え方が複数あり、一方、直線的な分布の作業者は同じ軸上でしか作業を変化させていないことになる。また、2 次元的な分布を示す被験者の方が、目的とする大きさの穴をあけることに成功していることも読み取れる。他の被験者についても、全く同様の傾向が見られており、この作業を通じて、目指す作業目標（見本と同じ大きさの穴をあける）に対するアプローチに、二種類が存在することが明らかになった。

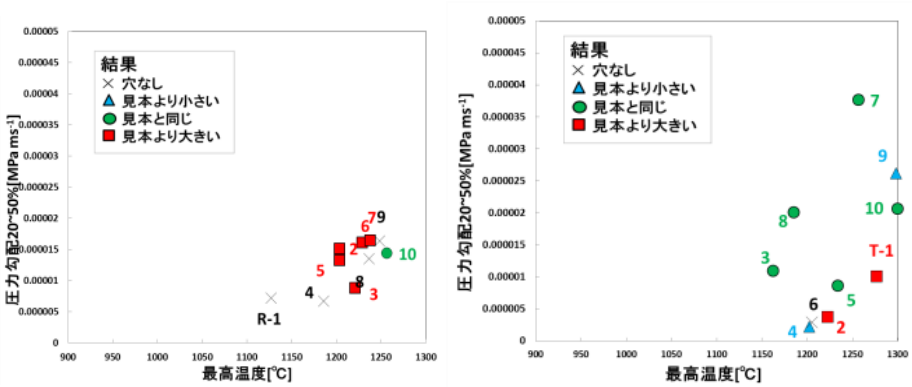

図 8 同じ大きさの穴をあける作業のプロット分布（例）

(2)大小の穴を交互にあける作業

横軸に「821 ℃以上の面積」、縦軸に「圧力勾配：20~50%[MPa ms^{-1}]」をとったマップを用い、ある被験者に大小の穴を交互にあけるように指示した際の作業行動の変遷を、図 9 に示す。プロットの変遷から、この被験者の場合、穴の大小を矢印に沿ってコントロールしていることが読み取れる。他の被験者についても同様のプロットを行ったところ、軸の向きや変化幅は異なるものの、被験者ごとに同じ方向の軸で穴の大小をコントロールしていることが明らかとなった。このように、作業の結果をマッピングすることで、目的に近づくための方法が可視化できることになり、作業者の作業を行う上での特徴を記述する有効な方法論としての可能性が示された。

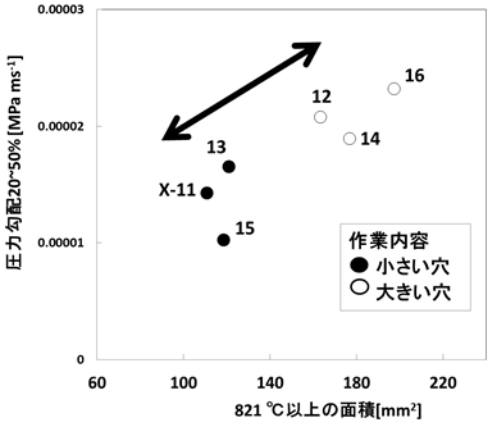

図 9　大小の穴を交互にあける作業のプロット分布（例）

5. 結言

ガラス細工の穴あけ作業をモデル作業に用いて、実験作業行動と結果の関係性を定量的に示す手法として、作業者の意図を含みかつ結果を表現することができるパラメータを軸に持つ作業－結果マップを作成した。これにより、各作業者が行った作業を同じマップ上にプロットとして表現することが可能となった。また、「熱して吹く」という連立の操作と結果の関係が可視的に示された。

同じ作業でも、作業者によってマップ上のプロットの変遷は異なり、前回から次の作業へのプロットの変化量、方向、分布の仕方などから作業者に特徴的な作業の行い方と、その作業のおかれた状況を記述できる指標の抽出を行った。

今後、その指標を用いて作業者を定量的に示し、ほかの作業を行った際に特徴として抽出されたパラメータとの相関をみることで、作業者がどのような時にどんなふるまいをするのか、行動の予測に役立つ知見が得られると期待される。