平成２７年度　博士論文

実験作業での行動シミュレートに向けた
実験行動のモデル化と操作特性の定量的解析

東京大学大学院新領域創成科学研究科

環境システム学専攻

小渕　喜一

1　背景 1
1.1　実験室における創造性と安全性の両立とバリエーション 1
1.2　事故とヒューマンエラー 2
1.3　人間の性質についての研究例 6
1.4　数理手法を利用した行動分析・行動予測 9
1.5　作業に関する研究例 10
1.6　本研究の目的および方針 11
2　水の秤量操作を例とした作業者特性の 数値化手法の開発 18
2.1　背景 18
2.2　実験方法 19
2.3　実験結果 21
2.4　主成分分析による成分化と主成分得点による各試行の表現 21
2.4.1　指標値の設定 22
2.4.2　主成分分析による指標値の成分化 23
2.5　数理モデルの作成と作業者の数値化 25
2.5.1　数理モデルによる作業行動の表現 26
2.5.2　数理モデルによる作業者の数値化 29
2.5.3　作業者の数値についての全体の傾向 30
2.5.4　作業行動の予測による数理モデルの検証 32
2.5.5　数理モデルの拡張性の展望 34
2.6　まとめ 37
3　中和滴定操作における作業者の探索的な学習行動 59
3.1　背景 59
3.2　実験方法 60
3.3　実験結果 61
3.4　試行回数の依存性について 62
3.4.1　各試行の指標化 62
3.4.2　指標の試行回数の依存性について 63
3.5　作業者の学習行動についてのパラメータ化とパターン化 64
3.5.1　ロジスティック関数によるフィット 64
3.5.2　作業者の学習行動についてのパラメータ化および学習行動のパターン化 65
3.6　探索的学習後と水の秤量操作との比較についての数理的解析 66
3.6.1　水の秤量操作を用いた作業者特性のパラメータ化 67
3.6.2　滴定操作における学習前後と重み付けの算出方法 70
3.6.3　水の秤量操作からの予測値と滴定操作での実測値との比較 71
3.7　まとめ 72

4　実験テキストからの操作のコード化と自己組織化マップとしての表現.................. 99
4.1　背景.. 99
4.2　実験テキスト向けのテキストマイニングの設計と実装.................................. 101
4.2.1　実験操作に分割する手順.. 101
4.2.2　文字列化の手順とその評価基準.. 101
4.2.3　文字列からの **bit** 化変換 103
4.3　Friedel-Crafts 反応実験を例とした実験テキストからの実験操作の解析.... 104
4.3.1　実験操作への分割... 104
4.3.2　文字列化および **bit** 化 104
4.3.3　自己組織化マップによる可視化.. 105
4.3.4　実験作業**(**実験操作の連続体**)**の表現 108
4.4　拡張性に向けた評価と展望.. 109
4.4.1　他の実験作業への拡張性の検討.. 109
4.4.2　テキストの表記の違いについての拡張性の検討..................................... 111
4.4.3　連続性に関する表現に関する評価.. 113
4.5　まとめ.. 114
5　作業者側と操作側の両面からのアプローチの融合とその活用.............................. 153
5.1　作業者側と操作側の両面からのアプローチの融合....................................... 153
5.2　秤量操作と滴定操作の自己組織化マップ上での位置づけ............................... 154
5.3　作業者が行う実験操作の整理や集約の仕方の可視化...................................... 155
5.4　まとめ.. 156
6　総括と今後の展望.. 165
参考文献... 170
Appendix-1 12 試行回×12 人(2 章の被験者)の 7 つの指標値.................................. 179
Appendix-2 液面挙動についてのデータ 184
Appendix-3 12 試行回×10 人(3 章の被験者)の 7 つの指標値.................................. 216
Appendix-4 テキスト原文.. 221
謝辞.. 226

1　背景

1.1　実験室における創造性と安全性の両立とバリエーション

実験室は、歴史的には 16 世紀後半の錬金術を行う工房を起源として(Hannaway, 1990)、(橋本、1993)、その後、機器や器具を用いながら科学者が身体を動かして科学的な実験をする場として発展し、現代まで、先端性や新規性の高い実験をする場として、未知の現象の発見や新規な方法論を社会に還元する役割を担ってきた。特に今日の大学や研究所における実験室は、研究者がイニシアチブを持って、自由に創造性を発揮する場所として期待されている。

一方、大学が社会的責任を果たすことが求められ、環境や安全、健康について、実験室を対象とした様々な研究や取り組みが行われている。国内の例を見ても、環境については、廃液の処理についての検討例や化学物質の管理についての例が報告され、より環境負荷が少ない廃液処理方法の提案や、また化学物質の盗難や不明試薬の軽減についての検討が進められている(高月ら、2006)、(伊永、2006)、(有馬、2002)。安全については、事故の報告を管理する体制の整備(高月ら、2006)が進められており、今後もより多くの情報の収集と事故防止に関する取り組みが期待されている。健康については、実験室内のヒュームフードに関する研究例(Saunders, 1993) 、(Shuhara et al., 2015)や、化学物質の曝露に関する研究例(Nomura, 2006)、(本間ら、2009)が報告され、継続的な研究や調査が求められている。

その中でも、安全については、Maslow の人間の欲求のピラミッドによると、食欲などの生理学的欲求に次ぐ 2 番目の段階の欲求に位置するとされ(Maslow, 1943)、人間にとって、根源的なものであるといえる。実験室は、2008 年に米国の大学で起きた事故(Kemsley, 2009)で示されたように、扱うものの扱い方を間違えると、危険な場にもなり

うる場であり、その安全性の確保も不可欠であると言える(Noorden, 2013)。

このように、実験室においては創造性と安全性の両立が求められ、いかにして創造性を生かしながら安全性を担保するのかという問いに対する答えを方法論として提示することが求められているといえる。その方法論の提示において、とり得る行動の多様性への対応は重要である。なぜなら、創造性を生かそうとすると、自由度が高くなり行動の多様性が増すやすくなるにもかかわらず、安全性についての既報の解析手法においては、1.2 章で記述するように、行動の多様性に対応できないという問題を抱えているからである。この行動の多様性を生む要因として、個人差や個人内の変化といった作業者のバリエーションと実験室で扱われる多種多様な実験操作のバリエーションが考えられ、実験操作の動きの中で生じる作業者のバリエーションと実験操作のバリエーションとをまとめて整理する手法の開発は不可欠であると言える。

1.2　事故とヒューマンエラー

事故は、「よくないことが起こること」全般をさすものであり(広辞苑)、交通事故や航空機事故、医療事故、プラント事故など様々な場面で問題となる。結果的に、人間の怪我や生命にもかかわる人的な損害や、高価な機器や設備の破損、長期間の活動停止などによる経済的な損失も起こるため、事故を防止することは、どの人間にとっても大きな課題であるといえる。アメリカ合衆国の安全技術者であるハインリッヒが提唱したハインリッヒの法則(Heinrich, 1931)によれば、1 件の大事故が起こるまでには、29 件の中程度の事故があり、その背後には 300 件の小さな事故があると言われている。この小さな事故には、実際に怪我を負わないまでも、飛散したガラスが顔付近を通過したというようないわゆるヒヤリハットも含まれる。この法則は、結果的に大きな損害を被った事故だけに注目するだけでは不十分であり、その背後にある数多くの事故にも着目すべきことを示唆しているといえる。

小松原によると、事故の発端となる原因は主に 3 つあるといわれる(小松原、2003)。1 つ目は、地震や台風などの自然要因である。自然要因に関しては、基本的にそれ自体を止めることは不可能であるといえる。そのため、自然要因によって起きうる事故を最小にするための努力や起きた際の適切な対処が求められる。2 つ目は、人工物である。人工的に作られた機械や設備の故障や破損などによる事故であり、これらの事故防止には、適切な設計と保守・点検が有効であるといえる。3 つ目は、人間であり、人間の行動が事故を引き起こす直接的な原因となる場合である。

これら 3 つは、あくまでも発端となる原因であり、実際には、自然要因が発端でさらに人間の不適切な対応で被害を拡張させるなど、3 つの要因は関係し合いながら事故が起きたり、事故の大きさが決まったりすると考えられる。本論文では、3 つ目の人間の行動に着目する。人間の行動は、事故の発端にならないまでも間接的な形での関与も含めると、ほとんどの事故に関わっているといわれている。事故に至らずに失敗で留まった場合も含めると、全ての失敗は人的要因が関わっているとの報告もある(畑村、2006)。これらの人的要因はヒューマンエラーと呼ばれ、これまでヒューマンエラーの分類やヒューマンエラーを生む原因の分析手法に関して、様々な報告がある。以下に、(1)事故要因の分類や整理を目指す手法と、(2)要因同士の関係性からシステムの評価を目指す手法について示す。

1.2.1　事故要因の分類や整理を目指す手法

Meister らは、ヒューマンエラーの原因を作業者の能力やモチベーションの不足といった個人の資質や技能によるものと、機器や装置の不備、作業空間の不備といった環境条件などの外部要因とに分けた。さらにシステム開発のどの段階でエラーが発生し、何に起因するのかを分類した(Meister, 1971)。また、組織の問題点を洗い出すのに向いていると言われる手法(関岡、2005)として 4M-4E マトリクス法がある。4M-4E マトリクス

法は、アメリカ空軍が開発し、連邦運輸安全評議会(National Transportation Safety Board)が採用し、1984 年に国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization, ICAO)による「事故防止マニュアル」(ICAO, 1984)によって広まった 4M 法に 4E を付け加えたものである(Swans et al., 1971)。この手法は、事故要因を MAN(人間=当事者)、MACHINE(設備・機械・器具)、MEDIA(環境)、MANAGEMENAT(管理)の 4 つの観点と、Education(教育・訓練)、Engineering(技術・工学)、Enforcement(強化・徹底)、Examle(模範・事例)の 4 つの観点で整理することで問題点の明確化を目指すものである(Reason, 1990)、(橋本、1981)、(米山ら、1985)。4M 法と同時期に開発され、4M と同じように、起きた事故事例を分析する手法として、SHEL モデルが知られている。これは、1972 年に Edwards によって開発されたものを Hawkins が改良したものである(Hawkins, 1987)。Liveware(作業者本人)を、作業手順や作業指示の出し方といった Software(ソフトウエア)、作業に使われる器具や機器といった Hardware(ハードウエア)、照明や騒音、作業空間の広さといった Environment(環境)、その人に指示する人や同僚といった Liveware(周りの人たち)を取り囲んだ形で表現され、中央に描かれる作業者本人とそれを取り囲む 4 つの要因との間の接面に隙間ができたときにヒューマンエラーが発生するという意味を表している。

これらの手法は、上述のように 30 年～40 年程度前に開発された手法を基にしており、その後随時、モデルの改良が進められてはいるが(河野、1999)、原理的に、事故原因の分類を目指すものであり、事故予測に向けてバリエーションに対する対処法を示したりするものではない。

1.2.2　要因同士の関係性からシステムの評価を目指す手法

複数の要因からなるシステムの安全性評価や事故解析手法として、Fault Tree Analysis (FTA)や Variation Tree Analysis(VTA)、Event Tree Analysis(ETA)が報告されている(菅野、

1978)、(林、1978)、(行侍、1976)。FTA は、1961 年に初めて提案されたものであり(Leveson, 1995)、事故のように起こり得る望まない結果を出発点として逆算する形で、その要因を洗いざらい出していく方法で、例えば、**図 1.1** にように、ガス爆発という事故につながる要因をツリー上に書いていくという手法である。VTA は、作業者内の変動を主に対象とするもので、「通常では成功するパフォーマンスに関して、多数の“変動“によって放出された、あるいは条件づけられた事象の連鎖」として表現するものである。FTA が発生しうるすべての可能性を示すのに対して、VTA は、悪くなりそうなものおよび同じ結果を導くものを捉えようとしており、FTA よりも事故に結びつく要因のみを要約的に表せるという利点がある。これら手法の場合、事故から逆算するため、逆に予測をするということが原理的に難しいという問題がある。また、作業者のバリエーションに対応できないという問題も抱えている。ETA は、FTA とは逆向きの流れで分析する手法であり、**図 1.2** のようにある事象から起こりうる事象をすべて書き表し、それぞれの事象が起こる確率を求めるという方法のため、予測を目的とした手法である。しかし、マニュアル式の作業を主な対象としており、決まりきっていない非定型の作業に向かないという問題を抱えている。また、作業者のバリエーションに対応できないという課題も FTA と同様にある。

以上のように、ヒューマンエラーの分野における報告は、事故を解析する手法として事故を生む要因やその事故要因同士の関わりについてモデル化したものである。これらのモデルを、演繹的に各例に当てはめていくことで、体系的に見落としなく事故要因を抽出することができる。一方で、予測手法として、事故が起こる前に予測するということは難しく、また、作業者の違いなどといったバリエーションへの対応という点でも課題が残る。

1.3　人間の性質についての研究例

本節では、安全性を考える上で、重要な要素である人間に関わる既往の報告について記述する。人間の特性の理解に関わる代表的な分野として、(1)心理学や認知などの分野における内的な現象論についての仮説を検証するという形式の研究と、(2)人間工学などで見られる平均的な人間像を仮定し、工学的な観点から最適な条件を導くという研究、(3)個人認証の手法の開発と精度の精緻化を目的とするバイオメトリクス認証の研究の 3 つを紹介する。これらは必ずしも独立のものではなく、行動経済学のように(Kahneman *et al.*, 1979)、(2)の既存のアプローチに対する問題提起として、(1)の形で提示するという例や、感性工学といった形で、(2)の工学的な考えをベースとしながらも、より感覚や認知といった(1)の要素を取り込もうとする分野も存在する。

1.3.1　心理学や認知学における検討

心理学は歴史が深い研究分野であり、19 世紀に哲学から分化したといわれている(鹿取ら、2004)。行動・意識・脳などに焦点を当て、分析を行っていく。研究法はさまざまあるが、実験法や質問紙法、観察法、面接法、心理テストなどがある。すでにそれぞれの方法論の確立がある程度なされており、それらの応用例も多い(無藤ら、2004)、(南風原ら、2001)。しかし、心理学における目的は、心の理解であり、統計的手法などを用いて集団の特性を分析することが多く、各個人の特性よりは人間全般の普遍性の理解に主眼がある。

認知学は、主に心理学、言語学を中心に発展してきたもので、認知心理学とは情報処理の観点から生体の認知活動を研究する学問である。外的な情報を知覚器官によって知覚し、脳を中心とする器官によって理解・記憶・思考学習・推論・問題解決などの情報処理が行われるという人間の高次認知機能を研究対象とし、脳科学、神経科学、情報科学、言語学、人工知能などとの関わり合いのなかで認知科学として扱われることもある。

これら認知に関わる学問分野でも、認知の個人差に関する報告(Richetin,2008)、(Kalyoncuoglu, 2008)、(Hough, 2008)はあるものの、主には、人間全般を対象とした普遍性の追究に主眼があるといえる。また、個人差を測定し、特定の職業における適性を測る手段とする例もある。例えば、鉄道運転士に対して、内田クレペリン検査(内田、1964)や反応速度検査、点数え検査などの心理や認知に関する検査が行われているほか、航空機の操縦士に対しては、ロールシャッハテストやミネソタ多面人格目録といった質問紙による検査が行われると言われている(箱田、2011)。また、心理学や認知学は、失敗や事故などに対する視点として活用される場合もある。例えば、失敗との関わりを論じるヒューマンエラーに関する研究例(林、1994)や、交通事故を例にしたリスク行動に関する心理学研究も報告されている(ワイルド、2007)。

　このように内面的な心理の診断手法の開発が進められている一方で、実験操作の仕方の違いに直接関係する行動から直接、指標の診断手法の開発は遅れているのが現状である。

1.3.2　人間工学における検討

　人間工学とは、人間を取り囲むさまざまなものと人間とのバランスを図るための技術であり、なかでも人間が自らの生活をより豊かにするために生み出したものを、人間が効果的、効率的にかつ満足して使うことが出来るように、人間の心理的・生理的・身体的特性に合わせて設計することに注目している(横溝ら、1987)。そのため、ある人間像を仮定して、最適な条件を出すというアプローチによって、快適さを最大化するためのデザインや危険性の最小化を目指して行われてきた(Hurst, 1999)、(Salvendy, 2012)。対象とする範囲は広く、例えば安全・快適・楽しい商品開発への提案や高齢者や障害者の暮らしやすい環境を目指すユニバーサルデザインの研究や、工場においてより効率的な条件を求めるための作業効率の算出はその代表的な例といえる。また、安全性に着目し

た 1.2 節で述べたヒューマンエラーについての検討例も人間工学の分野で検討されたものである。また、生体信号や生体の物理的な位置を計測する研究も行われており、近年は、眼球運動を計測する研究例(福田監修、2004)や、モーションキャプチャーによって身体の関節などの移動位置を計測する研究例(持丸ら、2006)があるなど、計測手法も豊富になってきている。

個人差や個人の変動といった人間のバリエーションに対する対応については、(1)共通をとる方法、(2)立場の弱いユーザに合わせる方法、(3)ユーザごと、ユーザ層ごとに合わせる方法、(4)平均的なユーザに合わせる方法の 5 つがあるとされているが(横溝ら、1987)、ユーザごとを除くいずれの方法も、誰かに強いる結果となってしまうことが問題であり、人間のバリエーションが大きい場合には、あまり向かない考え方といえる。

1.3.3　バイオメトリクス認証についての検討

バイオメトリクスは、その人間の特徴を計測し、計測した特徴を画像処理や信号処理技術により統計処理することを意味し、識別や認証への応用を目的とする技術である(バイオメトリックセキュリティコンソーシアム、2010)。特徴量としては、身体的特徴と行動的特徴とに分けられる。身体的特徴としては、例えば、よく知られる指紋や顔、静脈や掌、耳、匂いなどといった情報まで個人を識別する情報として、これらの研究分野の対象となっており、報告例がある(半谷、2012)、(小松ら、2008)、(佐藤、2006)。行動的特徴としては、音声によるものや署名による筆跡などがあり、特に、筆跡に関する筆字運動に関する研究例は比較的多く(中村ら、2009)、(張ら、1994)、(古川、2006)、筆圧なども認証の対象として研究例がある。また近年はキーボードの打ち方から個人を認証する例も報告されている(櫻井ら、2010)、(村上ら、2006)。いずれの特徴の取得方法にしても、認証システム自体は、データ取得、信号処理、データ格納、比較および判定という手順で行われる(バイオメトリックセキュリティコンソーシアム、2010)。

これらは、個別の特徴の発見と同一性の認識には長けたものであるが、特定の動作に特化したものであり、適用できる動作は限られるという課題がある。

以上のような心理学や認知学、人間工学の研究は、主には、人間一般の理解を目指し、普遍的な人間についての現象の解明を目指している。一方、人間の個別性を対象とした研究として、バイオメトリクス認証と呼ばれる分野で個人認証を目的とした研究が行われているが、発声や署名といった特定の行動に特化したもので、実験操作における作業者の違いや個人の中の変動について直接応用し、予測に生かしていくことは難しい。

1.4　数理手法を利用した行動分析・行動予測

サイバネティクスは、Norbert Wiener が軍事面での利用を目的とした予測モデルの作成に端を発しており(Wiener, 1948)、生物個体の行動と通信機器の動作のフィードバックといった制御・通信を同一の視点で研究しようとするものである。C. E. Shannon による情報理論(Shannon, 1948)や J. von Neumann によるデジタル計算機械のプログラム内蔵方式の提案(Neumann, 1951)によって、情報科学の分野として発展した。その後、その中から、派生した意思決定モデルといった人間行動に関する分析手法(Simon, 1957)は、経済や経営などの視点における行動分析手法として活用されている(Simon, 1976)。

一方で、数学の分野において発展されてきたグラフ理論は、ノードの集合とエッジの集合で構成されるグラフの数理に関する理論であるが、グラフが確率変数の依存関係になっているモデルがグラフィカルモデルであり、ベイジアンネットワーク、マルコフネットワークといった種類のモデルが提案されている(本村、2009)、(山本、2007)。これらは、ベイズ統計や機械学習で使用され、行動分析や行動予測のためのアルゴリズムとして活用されている。

また、ビッグデータの活用に関する盛り上がりもあり、民間企業からの関心も高く、

例えば、プレディクティブ・アナリティクス(Davenport, 2013)は、プレディクティブ・アナリティクス・ワールドという予測分析に関する代表的なカンファレンス(Predictive Analytics World)が開かれるなど規模の大きな分野となりつつある。予測の対象となるのは、マーケティング、広告、ウェブ上でのクリックや購買だけでなく、疾患になるか否かといったことや薬を飲み忘れるかなどの医療分野、犯罪対策、システムエラーや交通の遅れや混乱など多岐に渡る。政治の世界では、大統領選挙の結果、経営の分野では、全従業員の退職予測をしている企業もあると言われている(Davenport, 2013)。これらのような活用例の報告は、現在では、民間での利用が多いが、今後、学術的な報告例やそれに伴う新たな手法の開発が検討されることが考えられる。

このように、これらの手法は、原理的に非連続な状態同士を確率で記述したり、デジタルな情報を分析したりするのに向いており、既に設定されている項目、例えば人の性別や年齢、購入した物の名前などについて情報化させた属性に対して適用する手法である。一方で、項目化されていない連続的な行動から特性として抽出して情報化するのには、原理的に合わず、適用することも難しい。

1.5 作業に関する研究例

作業療法では、作業の種類を日常生活活動(self-care)、仕事・生産的活動(productivity)、遊び・余暇活動(leisure)の 3 つに分類しており(鷲田ら、1999)、調理や自動車の運転などが日常生活活動に分類され、デスクワーク業務や工場での活動、水産業における労働、航空機の操縦(Hart *et al*., 1988)、(芳賀ら、1996)などが仕事・生産活動に分類される。そして、楽器の演奏(Bangert *et al*., 2006)やスポーツ(宮本、2009)、(Ross *et al*., 2003)が遊び・余暇活動に分類される。1 つ目の日常生活活動に分類される調理については、レシピのテキストマイニング的解析手法に関する報告例がある(高田ら、2014)、(苅米・藤井、2012)、(志土地ら、2010)。苅米らの報告によると、料理レシピを構造解析することで、食材の

調理過程を表すフローチャートを出力できる。2 つ目の仕事・生産活動に分類される工場における作業を対象とした研究例では、見積工数に関する例(飯島、1990)や漁業といった第一次産業(高橋ら、2012)やコンピュータを使ったデスクワークなどにおいては、目の疲れや集中力の低下などの神経系の精神的な疲労が対象となった研究例が報告されている(三澤ら、1984)、(尹ら、1987)。3 つ目の遊び・余暇活動に分類されるスポーツにおける研究例としては、乳酸の増加という筋肉系の肉体的疲労が対象とされた研究例(宮本、2009)、(Ross *et al*., 2003)が報告されている。

実験操作をこれら 3 つの観点で考えてみると、2 つ目と 3 つ目の仕事・生産活動的な要素と遊び・余暇活動的な要素を共に持っている作業であると考えられる。また、調理が、レシピを読んで材料に手を施すことで、目的の料理を得ようとする作業である点は、実験操作が実験テキストを読んで対象物質に手を施すことで、目的とする状態の物質を得ようとする作業である点と似ている。さらに、レシピを読まずに、頭で考えながら作りたい料理を作る場合があるのと同様に、実験テキストを使わずに、頭で考えながら目的とする物質を合成したり精製したりすることがある点も実験操作との酷似点である。いずれにしても、調理は上記の分類だと、1 つ目の日常生活活動に分類されており、これらを踏まえると、実験操作は、1 つ目から 3 つ目までの全ての要素を持った作業と考えることが可能である。

1.6　本研究の目的および方針

本章ではこれまで、研究対象とする実験室、安全性についての解析手法、人間の特性についての研究例、行動予測手法に関する研究例について概説してきた。その中で、実験室では創造性と安全性が求められるが、これまでの安全性の関する既報の解析手法では、予測手法に向かないものが多く、また、創造性を生かそうとして自由度が高くなると、個人差や個人内の変動といった作業者のバリエーションが生じやすくなるにもかか

わらず、それに対応できない点が課題となっていることについて記述した。そこで、本論文では、作業者や実験作業のバリエーションを生かし尊重しながら、何が起こるのかを予測する手法、すなわち行動シミュレートの提案を目指す。そのため、行動に関連する要因として、作業者と操作という２つに着眼し、その両面からのアプローチを行う。まず、作業者側からのアプローチでは、個人差や個人内の変動を含んだ形でのモデル化を目指す。続いて、実験操作側からのアプローチでは、実験操作の定量的な表現手法の開発を目指す。**図 1.3** にこれらのアプローチを図示したものを示す。なお、本論文では、**図 1.4** にように、複数の実験操作が連なったものを実験作業と定義し、実験操作と区別する。逆にいうと、実験作業の中に実験操作がいくつも含まれているという表現もできる。このようなアプローチの下、本論文では、作業者、実験操作の両面からのアプローチによるバリエーションを含んだ行動シミュレートに向けた知見の獲得を目的とする。**図 1.5** に示すように、作業者側については、被験者実験によって実験行動のモデル化による作業者特性の数値化を目指す。2 章では、水の秤量操作を例として、作業者のバリエーションを含んだ形でのモデル化を行い、3 章では、中和滴定操作を例として、学習行動について検討を行う。実験操作の側については、4 章においては、実験操作の一般化に向けた情報化と可視化を目指し、テキストマイニングによる検討を行う。5 章においては、作業者側からのアプローチと実験操作側からのアプローチとを併せる意義とその可能性について、2 章、3 章、4 章での結果を用いて具体的に検討する。6 章では、本論文の総括と今後の展望について述べる。

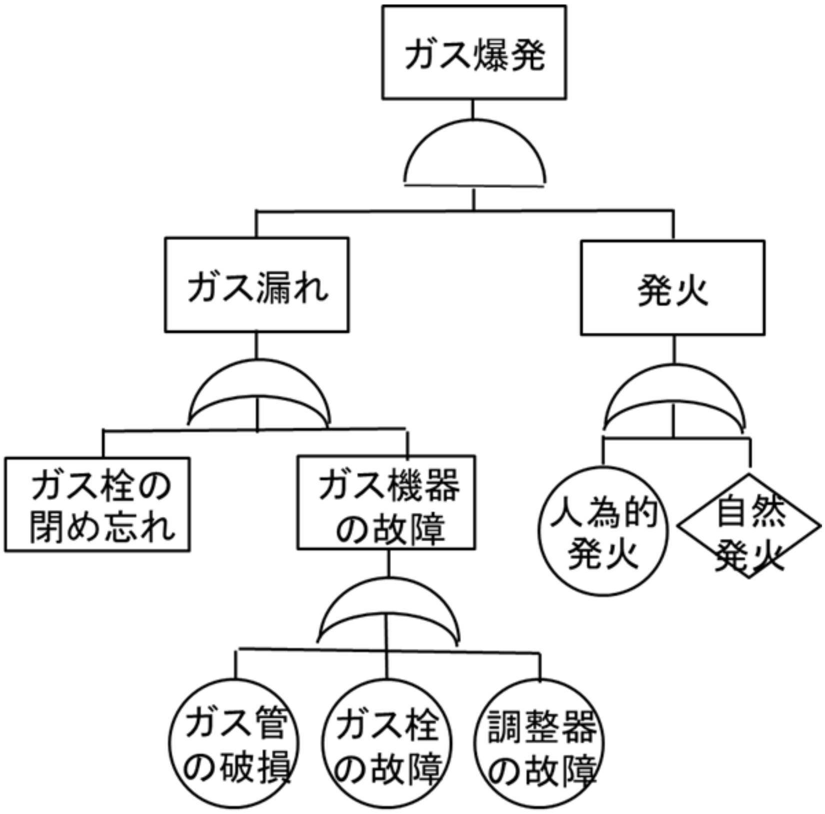


図 1.1　Fault Tree Analysis (FTA) の一例 (小松原、2003)

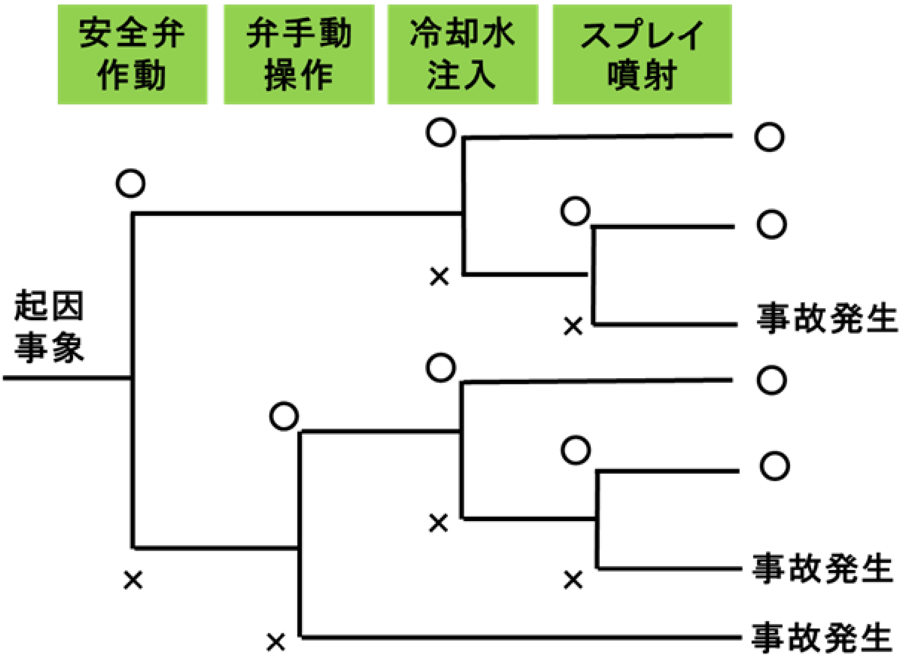


図 1.2　Event Tree Analysis (ETA) の一例 (小松原、2003)

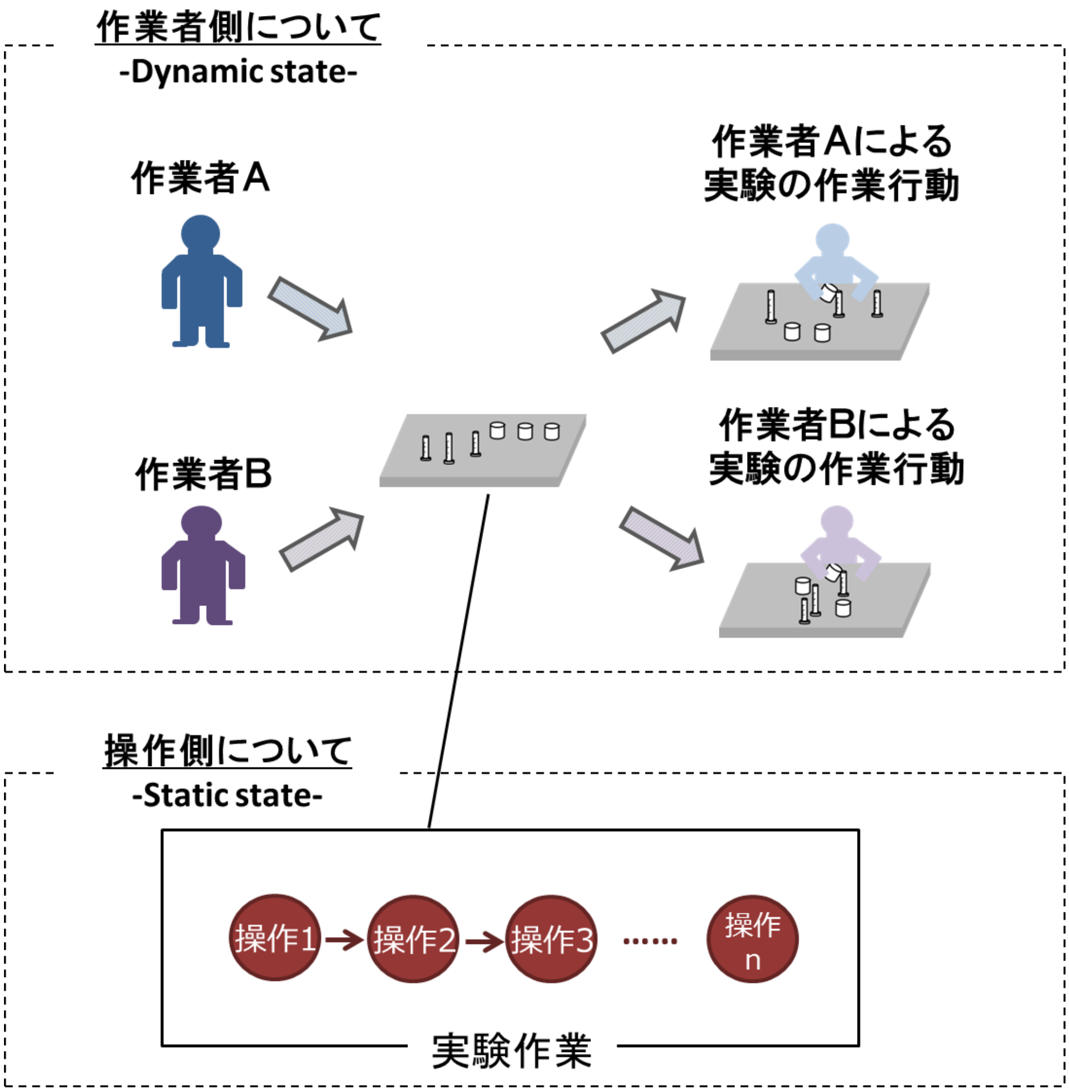


図 1.3　本論文における２つのアプローチ

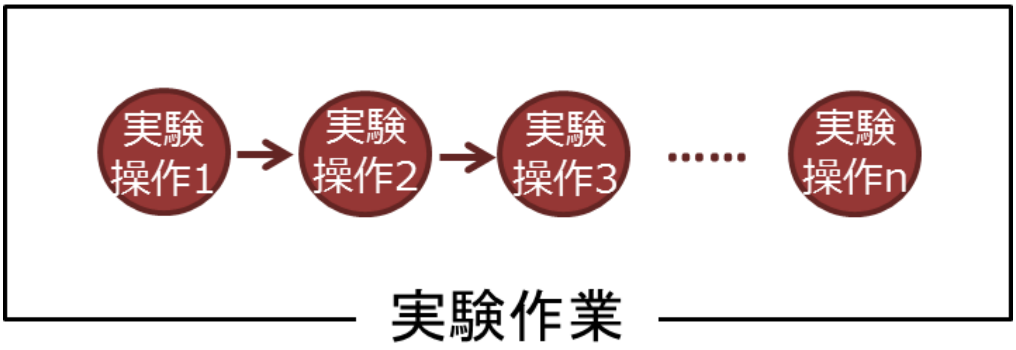


図 1.4　本論文における実験作業と

実験操作の定義

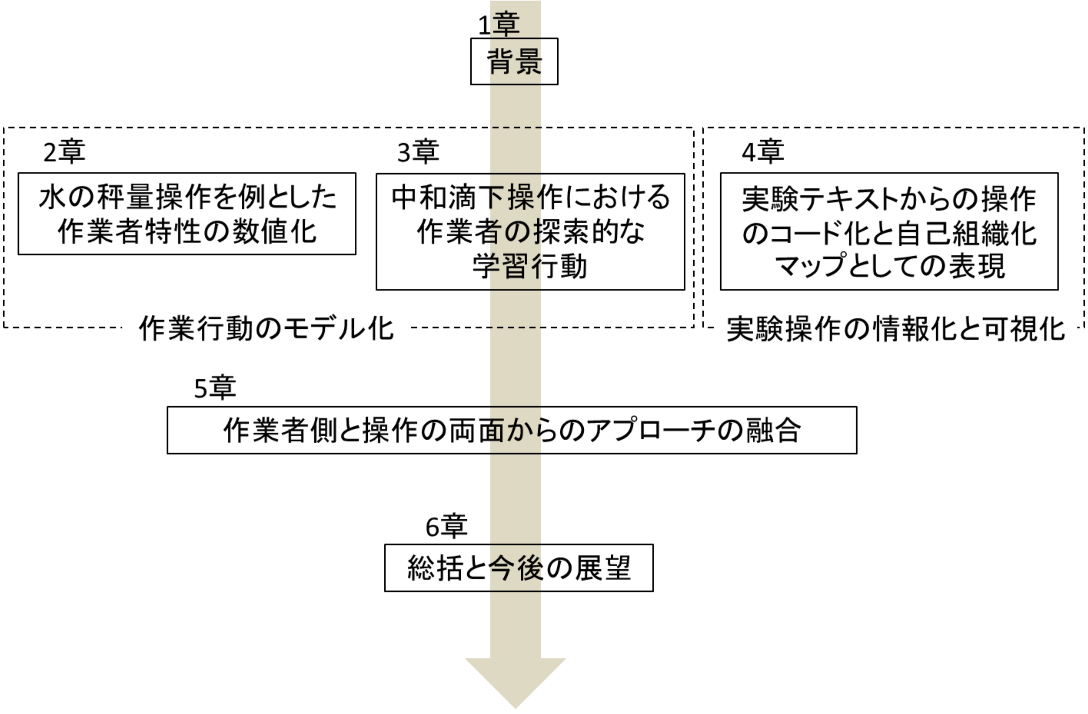

1章
背景
2章
水の秤量操作を例とした
作業者特性の数値化
3章
中和滴下操作における
作業者の探索的な
学習行動
4章
実験テキストからの操作
のコード化と自己組織化
マップとしての表現
作業行動のモデル化
実験操作の情報化と可視化
5章
作業者側と操作の両面からのアプローチの融合
6章
総括と今後の展望

図 1.5　本論文の構成

2　水の秤量操作を例とした作業者特性の数値化手法の開発

2.1　背景

2 章では、作業を行う人間側に着目し、作業者の特性の数値化を目指す。作業者の行動については、同じ作業であっても、作業者によって作業行動に違いが生じると考えられる。また、同じ作業者であっても、状況によって、変動が生じることが考えられる。特に、これまで研究対象とされることが多かった産業界における作業に比べ、作業者にイニシアチブを与えることが多い実験操作は、自由度が高くバリエーションが生じやすいと言える。航空機操縦についての研究において、自由度が高い場合の方がより個人差が生じやすいとの報告もある(加藤、1993)。同様にして、個人内変動も自由度が高い方が発生しやすいと予想され、個人差、個人内の変化といったバリエーションを含めてモデル化することは、自由度の高い作業系において、重要であると言える。

これまで、個人差や個人内の変化についての検討は、1.3 節で述べた通り、人間一般の性質としての理解を目指す研究が行われてきた。例えば、回数を繰り返すことによる学習効果については、素材に関する質感についての研究例(Ofen *et al.*, 2007)や外科で使用される腹腔鏡での例(Talebpour *et al.*, 2009)がある。習熟とともに疲労も考慮した検討としては、産業工程におけるエラーの数をコンピュータによってシミュレーションする検討(Gonzalez *et al.*, 2011)や、刺激に対する反応時間についての検討例(Myszewski, 2010)がある。これらは、いずれも最終的な成否にフォーカスしているといえる。一方、操作が現在の状態の認識やフィードバック、予測などの作業者の認知や運動を介して実施されることを考えると、操作において、最終的な目標値に向けてどのような過程を辿ったかという途中の過程に注目することで、作業者についての特性をより深く理解できるこ

とが予想される。

そこで、本章では、水の秤量作業における秤量操作を例として、作業の途中の過程と作業者特性の関係性をモデル化することを目指す。秤量操作は、目標の高さまで液体を正確に注ごうとする操作であり、実験操作において頻度の高い「加える」という操作の1つである。また、作業者にとって、ビーカーやフラスコといった実験器具を回転させ、角度を傾けたり戻したりする動作のみによって、水面を現状の高さから目標値まで近づけていくというシンプルな操作である。一方、現在の状態の認識やフィードバック、予測などが求められる操作でもあり、本章で目指す作業の途中の過程からの作業者特性の解析のためのモデルケースとして適していると考えられる。また、一度入れた水は戻せないものと実験条件を設定したことで、目標値を超えさせない（オーバーシュートしない）ように入れるという条件での検討であるという点は、不可逆性という制約によって自由度を奪ったという前提を置いたと言える。本章では、この秤量操作において、作業行動をモデル化し、目標の高さまで水を入れていく過程を表す時系列データから、直接観測不可能な各作業者の内在的な要因のパラメータ化を行う。その後、得られたパラメータから、作業者全体の傾向について考察し、作業者個々の行動予測を行う。

このようなアプローチによって作業者個人の特性を分析することは、これまで広く用いられてきた人の性別や学年といった個人の属性を行動と結びつける手法に比べて、より直接的に個人を分析する手法となりうる。

2.2　実験方法

被験者実験によって行った。ある大学院において、修士課程または博士課程の学生を募り、12人を被験者とした。これら12人は、生化学や高分子化学を専門として、化学をバックグラウンドに持った8名と、フィールドワークで収集したサンプルの分析操作を行っている4名である。実験作業の基本的作業である水の秤量を作業の対象として実

施した。なお、本学の 2011 年 9 月付で倫理審査を受けて実施した(審査番号 11-43、その後被験者対象の変更により、2011 年 11 月付で審査番号 11-60 に変更された)。

2.2.1　実験内容

水が入ったビーカーからメスシリンダーに対して指定量の水を注ぐという水の秤量操作を行ってもらった。3 種類のメスシリンダーを準備し、100 ml 用のメスシリンダー(SIBATA、100 ml 用メスシリンダー)に対して 4 回行った後、20 ml 用(SIBATA、20 ml 用メスシリンダー)と 10 ml 用(SIBATA、10 ml 用メスシリンダー)に対してそれぞれ 4 回ずつ行った。3 種のメスシリンダーの詳しいサイズについては**表 2.1** に示す。一度入れた水は戻せないものとし、毎回、作業前の条件が同じになるようビーカー(SIBATA、100 ml 用ビーカー)内の水の量を一定の 60 ml とし、メスシリンダー内は空の状態から始めるようにした。また、被験者同士が影響を受けないように、互いが行っているところを見ることなく、1 人ずつ行った。なお、操作の間の間隔については、どの被験者に対しても、同じ実験実施者がルーチン的に次の試行の用意をしており、各操作の間隔は 15 秒～20 秒程度とほぼ一定であった。

2.2.2　実験装置

水の秤量操作に関する時系列的なデータの計測装置を**図 2.1** に示す。0.2 秒ごとに重量を計測する電子天秤(エー・アンド・デイ、GR-200)を用意し、その上にメスシリンダーを置いた。計測された水の重量に関する時間挙動はデータロガー(エー・アンド・デイ、AD-1688)によって記録した。水の比重を 1.0 とし、重量から体積に換算し、体積をメスシリンダーの断面積で割ることで水の高さに関する時間挙動を計算した。水を入れ始める時間を 0.0 秒とし、メスシリンダーの内壁の最下部を地点 0.0cm とした。

2.3　実験結果

横軸に時間、縦軸に水面の高さとしてグラフ上に作業の過程をプロットした。**図 2.2** にある作業者 A の 100 ml 用メスシリンダーに対する作業(task1)の 1 回目を一例として示す。

図 2.2 の場合、まず、スタートから 1.6 秒後に 0.76 cm の地点で一度止められ、その後何度も入れる、止めるという動作を繰り返した後、24.2 秒地点、1.48 cm の地点から最後の調整が行われ、最終的には 30.2 秒に作業を終えた、ということを表している。このような水の時間挙動に関するグラフは、作業者(12 人)×メスシリンダーのサイズ(3 種)×試行回(4 回)の 144 回分、得ることが出来た。**図 2.3** のように、作業者と使用したメスシリンダーが同じであっても、試行回が異なった場合、1 回目と 2 回目で異なったグラフになった。また、メスシリンダーのサイズが異なった場合、作業者が同じ場合でも異なるグラフが得られた。一例を**図 2.4** に示す。このように作業者、メスシリンダーのサイズ、試行回によって全て異なったグラフが得られた。

2.4　主成分分析による成分化と主成分得点による各試行の表現

以上のような結果を受け、多様性を含んだ形でのモデル化を目指す。まず、各グラフを特徴化するために指標値を設定する。続いてこれら指標を集約し、評価の観点となる軸を出し、その観点に基づき各グラフを各観点についての値を算出する。その後、その値を基に、作業者の値を数値化していく。このように波形データから特徴値を抽出し、定量的に評価していく手法としては、フーリエ解析やウェーブレット解析がよく知られている(新ら、2005)、(大川、2005)。だが、主に、何百もの振動から成る波形の解析を得意とするフーリエ解析やウェーブレット解析は、本系で得られたようなデータに対して適用するのが困難であると同時に、本章での波形データのように 1 つ 1 つの波に意味

が含まれているデータに対しては、1つ1つを指標化する方が適切である。そこで、独自に指標の設定から汎用的に利用されている統計手法である主成分分析によって、成分を抽出することとした。

2.4.1　指標値の設定

「最初に止めた時間」、「最初に止めた位置」、「最後に止めた時間」、「最後に止めた位置」、「作業を終えた時間」、何回に分けて入れたかという「ステップ数」、「指数関数による近似曲線の係数」の7つを、各グラフの違いを表す特徴的な指標と考え、得られたグラフを表す指標とした。これら7つの指標の取り方を**図2.5**に示す。他にも、2回目や3回目に止めた時間や位置といった指標を取ることは可能であるが、これら7つの指標を基に、元のグラフはある程度再現できるため、今回は以上の7つの指標で議論することとした。

このうち、近似曲線として用いた指数関数は、**式2.1**のように設定し、最小二乗法によってグラフごとに得た。

$$y = a\{1 - \exp(-bt)\} \qquad （２．１）$$

(y: 液面の高さ(cm), t: 開始からの時間(s), a: 最終的な値(cm), b: 係数(1/s))

この**式2.1**は、両辺を時間 t で微分すると、**式2.1.1**のようになる。**式2.1.1**は**式2.1**から**式2.1.2**のように変形できる。

$$dy/dt = a \cdot b \cdot \exp(-bt) \qquad （２．１．１）$$

$$= b \cdot [a - a\{1 - \exp(-bt)\}]$$

$$= b(a - y) \qquad （２．１．２）$$

(∵式2.1より $a \cdot exp(-bt)=a-y$)

(dy/dt: 水面の速度, y: 液面の高さ(cm), a: 最終的な値(cm), b: 係数(1/s))

式 2.1.2 の左辺は、水面の速度であり、右辺の(*a*-*y*)は、現時点の高さからあとどのくらいで最終的な値に到達するかを表す値である。したがって、右辺の *b* は、現時点の水面の高さから最終値までの距離に対応して、一定の割合で減速させると仮定した際の比例定数 *b* である。つまり**式 2.1.2** は、作業者が、ある瞬間の水面の速度を、その瞬間、最終的な水面の高さまであとどのくらいであるかに応じて、決定していると仮定し、さらにその係数が時間によらず一定であると仮定している。

この近似の妥当性の検証として、観測値と近似曲線との重相関 R を求めたところ、全試行で最もフィットが悪い試行回においても、R の値が.86 であったことから、この仮定**(式 2.1)**が有効であることを示している。

7 つの指標は各グラフから得られ、作業者×メスシリンダーのサイズ×試行回のグラフに対し、それぞれ 7 つの指標値が得られることとなる。今回の場合は、12 人（作業者）×3 種類（メスシリンダーのサイズ）×4 回（試行回）の計 144 のグラフから 7 つずつ得られた(**Appendix-1** 参照)。

2.4.2　主成分分析による指標値の成分化

2.4.1 項で設定した 7 つの指標を、主成分分析を用いて集約することを目指す。これにより、各回の試行をより少ないパラメータで評価できる可能性がある。言い換えるなら、各回の試行を評価する観点となる軸の抽出といえる。

12 人の全作業者の全試行について 7 つの指標に関して主成分分析を行った。主成分分析は統計ソフトである SPSS(IBM SPSS Statistics Version 21.0)を用いて行った。各指標値の単位が異なるため、相関行列による分析を行った。また、主成分の基準は固有値が 1 以上の成分とした。

得られた主成分分析の固有値に関する結果を**表 2.2** に示す。固有値が 1 以上の成分は 2 つ得られ、それぞれの固有値は 3.0、2.6 という値となり、同程度の大きさの主成分が

2 つ得られる結果となった。因子のスクリープロットを**図 2.6** に示す。寄与率を見てもわかるように、これら 2 つの成分で 80%近く説明可能である。

続いて、**表 2.3** に成分行列を示す。1 つ目の成分に対しては、「最初に止めた位置」と「ステップ数」と強い関連があり、「指数関数による近似曲線の係数」は寄与が殆どなかった。また、2 つ目の成分とは、「最後に止めた時間」や「作業を終えた時間」とが強い関連を示し、「指数関数による近似曲線の係数」との関連が見られた。これらの結果から、1 つ目の成分は、最初どのあたりの位置で止め、何回くらい止めるのかについての成分であるため、"プランニング"の成分と名付けた。また、2 つ目の成分は、「最後に止めた時間」や、「作業を終えた時間」に関わる成分として、"調整"に関する成分とした。1 つ目の"プランニング"に関する成分は、最初どのあたりの位置で止め、何回くらい止めるのかということを、全体を直感的でヒューリスティック的にイメージすることで決めていると考えることができ、これらヒューリスティック的なイメージに関する力と関連がある可能性がある。これに対し、2 つ目の"調整"に関する成分は、「最後に止めた時間」や「作業を終えた時間」という操作における終盤に関わる指標や「指数関数による近似曲線の係数」という現時点からゴールまでの距離に比例して速度を決定させるとした際の比例定数 b は、ゴールから逆算的でアルゴリズム的にイメージすることで決めていると考えることができ、これらアルゴリズム的な力と関連がある可能性がある。

また同時に、主成分分析の結果、各試行について"プランニング"、"調整"の成分についての主成分得点が得られた。全体としては、成分 1 については-2.3～1.6、成分 2 については-2.3～2.7 の値となった。1 つ目の"プランニング"についての成分が、最初に止めた位置と正の強い関連であり、ステップ数と負の強い関連があることを考慮すると、成分 1"プランニング"についての主成分得点が大きくなるにつれて、「目標値により近い位置まで接近してから止め、あまり回数をかけずに、目標値まで到達するプ

ランニング」であるといえる。逆に、小さくなるにつれて、「開始点により近い位置で止め、途中で何度も止めながら目標値まで到達するプランニング」であるといえる。また、2 つ目の“調整”についての成分が、最後に止めた時間や作業を終えた時間と正の関連があることを考慮すると、“調整”についての主成分得点が大きくなるにつれて、「ゆっくり穏やかな調整」であり、小さくなるにつれて「短い時間で急激な調整」となる。これをまとめると、**表 2.4** のようになる。実際に、**図 2.7 (a)**および**図 2.7 (b)**のように成分 1 の値が小さく、成分 2 の値が大きい**図 2.7 (a)**は、**図 2.7 (b)**に比べ、より開始点に近い位置で止め、途中で何度も止めながら目標値まで到達していることがわかる。

さらに、成分値を作業者ごとに整理した。その一例として、ある作業者 A の 12 回分の試行についての主成分得点を**表 2.5** に示す。また、これら 2 つの成分値を 2 次元上にプロットしたものの一例を**図 2.8** に示す（作業者 A の場合）。シリンダーが細くなるにつれ、**図 2.8** において右に、つまり “プランニング”値が大きくなっていく。また、それぞれのシリンダーで回数を重ねるに従い、**図 2.8** において下へ、つまり“調整”の値が小さくなっている傾向が見て取れる。このように、12 回の試行における行い方の変化が 2 次元上に可視化することができた。

2.5　数理モデルの作成と作業者の数値化

前項における主成分分析によって、水の秤量操作の構成する成分として、“プランニング”、“調整”が得られた。また、各成分についての主成分得点（成分値）が試行ごとに得られた。本項では作業者、試行ごとに異なる成分値を、各作業者の特性と結びつけることで、成分値から各作業者の特性の定量化を目指す。そのために、まず、数理モデルを作成する。それに基づいて作業者ごとの数値を得る。その後、得られた数値について考察したのち、実測値と予測値との一致度から本手法の検証について議論する。

2.5.1　数理モデルによる作業行動の表現

まず、各作業者が固有の能力を有していると仮定した。その上で、どんな変動を与えうる外的要因があっても、変動することなく、機械のように常にその固有値の能力を発揮する場合に生じる値を基本値と名付けた。続いて、外的な要因によって、その能力のうち、ある係数が観測可能な形で現れると仮定し、その係数を変動値と名付けた。さらに、その変動による能力への影響の大きさは作業者によって異なり、その感度は作業者ごとに固有であると仮定した。すなわち、変動を与える要因とそれらから各作業者が影響を受ける係数（感度）で決定されると仮定した。

これらの仮定を数式によって表すと**式 2.2** のようになる。右辺の基本値 I_{task} は、その作業者が持っている能力を意味する成分値であり、変動値 $\alpha_{context}$ は、各試行において、その作業者が持っている能力のうちどの程度発現したかを表す係数である。**式 2.2** では、この変動値 $\alpha_{context}$ が基本値 I_{task} に対して、掛け算の形で影響を与え、実際の成分値 I_{theory} になると仮定した。

$$I_{theory} = \alpha_{context} \cdot I_{task} \qquad (2.2)$$

(I_{theory}: 成分値、$\alpha_{context}$: 変動値、I_{task}: 基本値)

この**式 2.2** を、各成分に対して適用すると、成分 i の場合は、**式 2.2.0** のようになり、

（成分 i の場合）
$$I^i_{theory} = \alpha^i_{context} \cdot I^i_{task} \qquad (2.2.0)$$

(i=1,2,3, …)

成分１については、i=1 となり、**式 2.2.1** のようになる。同様に、成分２の場合は**式 2.2.2** となる。

（成分１の場合）
$$I^1_{theory} = \alpha^1_{context} \cdot I^1_{task} \qquad (2.2.1)$$

（成分２の場合）　$I_{theory}^2 = \alpha_{context}^2 \cdot I_{task}^2$　（２.２.２）

続いて、基本値 I_{task} を**式 2.3** のように立式した。今回、作業の違いは 3 種のメスシリンダーの太さに関するものである。細くなるにつれ、一定量の水を入れたときの水面の上昇スピードが上がることから、作業の内容の違いは、メスシリンダーの太さに起因する、一定量の水を入れた際の水面の上昇スピードであると考えられる。したがって、これを変数 V とし、その係数を各作業者のスピードに対する感度 v_i として、作業者個々が有するパラメータとした。例えば、直径 3 cm のメスシリンダーの場合、一定量の水を入れたときの水面の上昇スピードは、直径の 2 乗の逆数である 0.11 に比例するため、V の値は 0.11 となる。

$$I_{task}^i = (v_i, const.) \cdot (V, 1) \quad （２.３）$$

I^i_{task}: 基本値
v_i: 水面の上昇スピードに関するパラメータ
(基本パラメータ)
V: 一定量の水を入れたときの水面の上昇スピード

今回の場合、基本値 I_{task} について、シリンダーの太さのみを変更したため、1 つの要因で決定されると考えられ、1×1 の形で表現されたが、複数の要因で決定されると仮定される作業については、**式 2.3.1** のように、j 列の要因 **T** とそれに対する係数をベクトルに持つ $\mathbf{A}_i$ の $j \times j$ のベクトルの内積として拡張した形で表せる。

$$I_{task}^i = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{T} \quad （２.３.１）$$

I^i_{task}: 基本値
$\mathbf{A_i}$: 作業者の基本能力ベクトル
T: 作業の要因ベクトル

続いて、変動値 $\alpha_{context}$ について、何の変動もない場合（$\alpha^i_{context}$=1 のとき）に対して、

変動要因が加わる形で表現することで、立式を行った。

これまで、人間の行動に影響を与える要因の研究例があり、習熟に関する研究(Ofen *et al.*, 2007)、(Talebpour, 2009)や失敗した際の生体信号についての研究(Miltner *et al.*, 1997)、(Talsma, 2006)、疲労についての研究(Myszewski, 2010)、(Gonzalez *et al.*, 2011)が報告されている。そこで、変動を与えうる要因を、同じ作業の繰り返し回数（L）、直前の試行の最終的な値（M）、作業全体のスタートからの累積時間（N）の 3 つとした。例えば、3 回目の試行で直前 0.3 cm オーバーし、1 回目からの累積時間が 35 秒である場合、L=3、M＝0.3、N=35 となる。なお、全体の 1 回目の場合、M、N の値は 0 とした。

また、それら変数に対する係数をこれらの要因に対する感度として、繰り返し同じ作業を行うことによる学習効果 l_i、直前の作業の最終的な結果によって受ける心理的効果 m_i、作業を行う時間が延びることによって蓄積される疲労効果 n_i と名付け、各作業者が有する変動パラメータとした。

式 2.4 に、以上の 3 つの要因を変動要因として立式した変動値 $\alpha_{context}$ に関する式を示す。

$$\alpha^{i}_{context} = 1 + (l_i, m_i, n_i) \cdot (L, M, N) \qquad (2.4)$$

$\alpha^{i}_{context}$: 変動値
l_i: 繰り返し同じ作業を行うことによる学習効果(変動パラメータ)
m_i: 直前の作業の最終的な結果によって受ける心理的効果(変動パラメータ)
n_i: 作業を行う時間が延びることによって蓄積される疲労効果(変動パラメータ)
L: 同じ作業の繰り返し回数
M: 直前の試行の最終的な値
N: 作業全体のスタートからの累積時間

すなわち、今回は、変動値 $\alpha_{context}$ が、学習効果、心理的影響、疲労効果から構成される値であるとして議論を進めるが、それ以外の要因については、今後拡張性の中で取り込むこととする。

今後の拡張性を考えると、基本値 I_{task} の際と同様に、**式 2.4** で表された変動値 $\alpha_{context}$ に関しては、3 つの要因の 3 行のベクトル同士の内積を 1 に足した事を意味しており、より多次元なものへと拡張可能である。変動を与える要因 **C** とそれに対する係数 **F** とのベクトル積で表現したものを**式 2.4.1** に示す。

$$\alpha^{i}_{context} = 1 + \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{C} \qquad (2.4.1)$$

$\alpha^{i}_{context}$: 変動値
$\mathbf{F_i}$: 作業者の変動ベクトル
$\mathbf{C}$: 変動を与える要因ベクトル

以上をまとめると、**式 2.5** のようになる。

$$I^{i}_{theory} = \{1 + (l_i \cdot L + m_i \cdot M + n_i \cdot N)\} \cdot (v_i \cdot V + const.) \qquad (2.5)$$

I^{i}_{theory}: 成分値
v_i: 水面の上昇スピードに関するパラメータ(基本パラメータ)
l_i: 繰り返し同じ作業を行うことによる学習効果(変動パラメータ)
m_i: 直前の作業の最終的な結果によって受ける心理的効果(変動パラメータ)
n_i: 作業を行う時間が延びることによって蓄積される疲労効果(変動パラメータ)
V: 一定量の水を入れたときの水面の上昇スピード
L: 同じ作業の繰り返し回数
M: 直前の試行の最終的な値
N: 作業全体のスタートからの累積時間

2.5.2　数理モデルによる作業者の数値化

続いて、前項で作成した数式を用いて、実際に得られた成分値を作業者ごとにフィッティングすることで、作業者のパラメータ（v_i,l_i,m_i,n_i）の算出を行った。フィッティングは、**式 2.10** で示すように、最小二乗法を用いて行った。**式 2.10** は**式 2.10.1** のように

展開される。**式 2.5** における V、L、M、N に各値を代入して得られる 12 回分の計算値 I_{theory} と、**表 2.4** のような各試行の実測値 I_{actual} とが代入され、$S(v_i,l_i,m_{i,},n_i)$が得られる。$S(v_i,l_i,m_i,n_i)$は v_i、l_i、m_i、n_i の関数として得られ、この関数 $S(v_i,l_i,m_i,n_i)$が最小となる(v_i,l_i,m_i,n_i)を Excel ソルバーによって求めた。

$$S(v_i,l_i,m_i,n_i)=\sum_{j=1}^{3}(I_{theory(1)}^{i,task(j)}-I_{actual(1)}^{i,task(j)})^2+(I_{theory(2)}^{i,task(j)}-I_{actual(2)}^{i,task(j)})^2$$

$$+(I_{thoery(3)}^{i,task(j)}-I_{actual(3)}^{i,task(j)})^2+(I_{thoery(4)}^{i,task(j)}-I_{actual(4)}^{i,task(j)})^2 \qquad (2.10)$$

$$S(v_i,l_i,m_i,n_i)=\underbrace{(I_{theory}^{i}-I_{actual}^{i})^2}_{\text{task1-1st}}+\underbrace{(I_{theory}^{i}-I_{actual}^{i})^2}_{\text{task1-2nd}}+\cdots\cdots+\underbrace{(I_{theory}^{i}-I_{actual}^{i})^2}_{\text{task3-4th}} \qquad (2.10.1)$$

フィッティングを作業者ごとに行うことで、作業者ごとに各成分“プランニング”、“調整”についてのパラメータ群(v_i,l_i,m_i,n_i)を得た。一例として、作業者 A の各成分についてのパラメータを**図 2.9** に示す。成分ごとに得られる行列内の値を、表に整理したものを**表 2.6** に示す。この結果、水面の上昇スピードの変化や繰り返しの回数、直前の作業の最終結果、累積の時間によって各作業者が“プランニング”と“調整”に対して、どの程度影響を受けるのかが個人の特性として定量化された。

2.5.3 作業者の数値についての全体の傾向

本項では、以上のようにして得られた 12 人の作業者のパラメータを比較することで、全体の傾向について議論する。

前項で行ったフィッティングの結果得られた“プランニング”、“調整”の２つの成分に関する 4 つのパラメータ：水面のスピードの感度についてのパラメータ v_i、試行を繰り返すことによる学習効果 l_i、直前の作業の結果による心理影響の感度 m_i、累積の時

間による疲労についての感度 n_i をパラメータごとに“プランニング”、“調整”の 2 成分を軸とするグラフ上にプロットした。**図 2.10** に各グラフを示す。

図 2.10 (a)に示すように、水面のスピードの感度を表す v_i は、成分 1 に関して、12 人の被験者のうち 10 人が正の値を示した。また、残りの 2 人は、絶対値が他の作業者に比べ、十分小さい値となった。今回、その 10 人の全試行回分、120 回分の $\alpha_{context}$ の符号は、98%にあたる 117 回において、正の値となった。したがって、水面のスピードが速くなるにつれて、成分 1 の値が大きくなる傾向があるといえる。2.4.2 項の考察より、成分 1 が大きくなることは、「目標値により近い位置まで接近してから止め、あまり回数をかけずに、目標値まで到達するプランニング」となることから、スピードが速くなるにつれて、目標値により近い位置まで接近してから止め、あまり回数をかけずに、目標値まで到達するようになるといえる。作業の特性を考えると、メスシリンダーが細くなり、水の動くスピードが速くなった際に、それに対応しようとしなければ、止める位置が必然的に目標値に近くなる。したがって、スピードが速くなっても、「止める位置を開始点に近くするなどの“プランニング”」への変更をあまり行おうとしなかったと考えられる。

一方、成分 2 に関しては、12 人の作業者のうち 10 人が正の値となった。成分 1 の際と同様に、その 10 人の全試行回、120 回分の $\alpha_{context}$ の符号を見ると、87.5%に当たる 105 回において $\alpha_{context}$ が正の値となった。したがって、水面のスピードが速くなるにつれて、成分 2 の値が大きくなる傾向があるといえる。2.4.2 項の考察より、成分 2 が大きくなることは、「ゆっくり穏やかな調整」になることを意味している。以上より、スピードが速くなると、それに対応する形でゆっくり穏やかな調整を行うと考えられる。

これら成分 1 と成分 2 についての結果から、水の動くスピードが速くなると、プランニングの段階において、対応しようとするのでなく、調整の段階において対応しようとする傾向があるといえる。

図 2.10 (b)に示すように、繰り返しの試行による学習効果については、成分２に関しては、正負がほぼ均等な割合で分布したのに対し、成分１については、負の値をとるものが多い結果となった。また、**図 2.10 (c)**に示すように、直前の結果による心理的影響についても、成分２に関しては正負がほぼ同じ割合で分布したのに対して、成分１については負の値をとるものが圧倒的に多い結果となった。これら l_i や m_i の成分１の値が負となるということは、回数を重ねたり、直前の回で目標値より大きくオーバーしてしまったりするとプランニングの段階で予め、「開始点により近い位置で止め、途中で何度も止めながら目標値まで到達するプランニング」になることを意味している。つまり、作業の繰り返しや直前の失敗は"プランニング"に影響を与えるといえる。累積時間に関しては、**図 2.10 (d)**に示すように、成分１、２ともに正負に比較的均一に分散する結果となった。これは、疲労効果によって"プランニング"や"調整"が、作業者によって大きくも小さくもなることを表している。つまり、スピードの変化に対しては、"プランニング"に比べて"調整"に対する意識が高くなる一方、学習を重ねたり前回の失敗があったりすると、予めの"プランニング"への意識が高まると考えられる。

このように、秤量操作を行う際の作業者のやり方の特徴を定量的に表現でき、行い方からプロファイリング的に特徴化し、作業者を属性ではなく特性によって一般化する手法の提案がなされたと言える。また、実験操作を行われ方によって特徴化し、整理する方法論としても有効であると考えられる。

2.5.4　作業行動の予測による数理モデルの検証

本項では、これまでに得られた作業者のパラメータを用いた予測手法としての可能性を検討する。これまで行ってきた検討は、2.2.1 項で記載した通り、3 種のメスシリンダーに対して 4 回ずつ行った 12 回の試行に関するものであった。本項では、予測手法としての有効性の検討するため、各種の 1 回目から 3 回目のデータ（9 回分）から残りの

3 回分の予測を行った。

各種 1 回目から 3 回目のデータを基に、2.4 項および 2.5 項で述べてきた解析方法で解析を行った結果、被験者 12 人それぞれのパラメータが算出された。このパラメータから 2.5 項における**式 2.5** を用いて、各作業者の各種 4 回目の成分値を計算した。その後、主成分分析の逆変換を行い、成分値から 4 回目の各指標値の計算を行った。12 人分のこれら各種 4 回目の計算値と実測値とをグラフにプロットした。それぞれのグラフを**図 2.11 (a)～(g)**に示す。グラフ上に右上に向けて 45°の角度で引かれた直線は、予測値と実測値との一致を表す目安となる直線であり、この直線の付近にプロットが多いほど一致が良いことを表す。また、定量的に一致の度合いを表すために、実測値と予測値との相関係数(Pearson の積率相関係数)と予測誤差の平均である平均絶対誤差(MAD)を指標ごとに算出した。その結果も**図 2.11** に記載した。

図 2.11 の各グラフを見ると、指標として設定した 7 つの各指標値全てについて、予測値と実測値とが大まかに一致する結果となった。ただ、**図 2.11 (f)**の相関係数を見るとわかるように、近似の係数が最も予測精度が低くなった。これは、**表 2.7** に示すように、主成分分析後の説明率が他の指標に比べて低いからであると考えられる。また、**図 2.11** に示すように、最初に止める時間や最初に止める位置の方が、最後に止める時間や位置に比べ、予測精度が高い結果となった。これは、時系列的に前の事象の方が、全体的にバラつく幅が狭く、より予測がしやすいからということが考えられる。また、時系列的に後の事象に比べ、様々な要因が複雑に絡み合う可能性が低く、作業者の特徴が直接的に表れやすいからということも考えられる。

誤差を表す平均絶対偏差については、全ての指標に関して、実測値よりも小さい値となった。**図 2.11 (c)**を見るとわかるように、「最後に止めた時間」が最も大きな値となったが、これは、実測値が最も大きいからであると考えられる。この場合においても、4.2 秒であり、7 秒～32 秒程度に分布する実測値に関する予測としては、精度が高いも

のであるといえる。このように、本項において、予測手法としての可能性が示され、今後予測手法としての活用が期待される。

2.5.5 数理モデルの拡張性の展望

続いて、拡張性を考え、**式 2.6** のように、変動値 $\alpha_{context}$ を行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ で表現し、i 個の成分に対応できる形とした。

$$\mathbf{I}_{\mathbf{theory}} = \boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}} \cdot \mathbf{I}_{\mathbf{task}} \qquad (2.6)$$

$\mathbf{I}_{\mathbf{theory}}$: 成分ベクトル
$\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$: 変動行列
$\mathbf{I}_{\mathbf{task}}$: 基本能力ベクトル

式 2.6 を成分で表現したものを**式 2.6.1** に示す。左辺が i 個の各成分値 I_{theory} を持つ成分ベクトル $\mathbf{I}_{\mathbf{theory}}$ となり、右辺が i 行 i 列目が作業者の変動値 $\alpha^i_{context}$ それ以外の成分が 0 となる行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ に i 個の各基本能力値 I^i_{task} を持つ基本能力ベクトル $\mathbf{I}_{\mathbf{task}}$ を掛けたものになる。

$$\begin{pmatrix} I^1_{theory} \\ I^2_{theory} \\ \vdots \\ I^i_{theory} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha^1_{context} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha^2_{context} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha^i_{context} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I^1_{task} \\ I^2_{task} \\ \vdots \\ I^i_{task} \end{pmatrix} \qquad (2.6.1)$$

また、それとともに、$\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ に関する式も**式 2.7** のように、単位行列に、i 行 i 列目が作業者の変動ベクトル $\mathbf{F_i}$ と変動を与えるベクトル $\mathbf{C_i}$ の内積となり、それ以外の成分が 0 となる行列を足した行列で表現した。

$$\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{C}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_2 \cdot \mathbf{C}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{C}_i \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

なお、**式 2.6.1** の行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ において、0 の値となっている *i* 行 *j* 列目は、成分 *i* と成分 *j* の相互作用を表す値であり、**式 2.6.1** の行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ および**式 2.7** において、対角成分以外の値が 0 であるのは、成分ベクトル $\mathbf{I}_{\mathbf{theory}}$ 内の *i* 個の各成分値 I_{theory} が互いに独立であることを表している。今回の場合、直交座標を各軸とした主成分分析を行ったのちの主成分得点を各成分値 I_{theory} としているため、常に、成分ベクトル $\mathbf{I}_{\mathbf{theory}}$ 内の *i* 個の各成分値 I_{theory} が互いに独立となることが保障されている。しかし、以上のように、行列式で表現することで、相互作用があり、互いの独立性が保障されない系への拡張性についても表現されたと言える。

加えて、これまで、その実験操作がその作業者にとって、どのような時に行われたかという時間的な文脈によって変動が生じると仮定し、基本能力に変動をかけた形で数理モデルを仮定し、照明の明るさや作業スペースの広さ、同じスペースを共通する他の作業者からの影響といった空間的な影響はないものとしてきた。しかし、今後の拡張性を考え、空間的な制約による影響を擾乱と呼び、擾乱に関する行列、擾乱行列を加えた数理モデルを作成した。その式を**式 2.8** に示す。なお、これまでの変動行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ は、その操作が置かれた時間的な文脈で発生する変動であり、擾乱行列 $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}}$ は、その操作が置かれた空間的な条件で発生する変動であるとして、区別する。

$$\mathbf{I_{theory}} = \boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}} \cdot \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}} \cdot \mathbf{I_{task}} \qquad (2.8)$$

$\mathbf{I_{theory}}$: 成分ベクトル
$\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$: 時間的な変動行列(時間的な文脈によって発生する変動)
$\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}}$: 空間的な擾乱行列(空間的な制約によって発生する擾乱)
$\mathbf{I_{task}}$: 基本能力ベクトル

式 2.8 を成分で表現したものを**式 2.8.1** に示す。左辺が i 個の各成分値 I_{theory} を持つ成分値ベクトル $\mathbf{I_{theory}}$ となり、右辺が i 行 i 列目が作業者の変動値 $\alpha^{i}_{context}$ で、それ以外の成分が 0 となる行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$ に i 行 i 列目が作業者の擾乱値 $\beta^{i}_{disturbance}$ で、それ以外の成分が 0 となる行列 $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}}$、 i 個の各基本能力値 I^{i}_{task} を持つ基本能力ベクトル $\mathbf{I_{task}}$ を掛けたものになる。

$$\begin{pmatrix} I^1_{theory} \\ I^2_{theory} \\ \vdots \\ I^i_{theory} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha^1_{context} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha^2_{context} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \alpha^i_{context} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta^1_{context} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \beta^2_{context} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta^i_{context} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I^1_{task} \\ I^2_{task} \\ \vdots \\ I^i_{task} \end{pmatrix}$$

(2.8.1)

また、行列 $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}}$ は、式 2.9 にように、単位行列に、i 行 i 列目が作業者の擾乱ベクトル $\mathbf{R_i}$ と擾乱を与える要因に関するベクトル $\mathbf{D_i}$ の内積で、それ以外の成分が 0 となる行列を足した行列で表現した。

$$\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{R_1} \cdot \mathbf{D_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{R_2} \cdot \mathbf{D_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{R_i} \cdot \mathbf{D_i} \end{pmatrix} \qquad (2.9)$$

また、**式 2.6.1** および**式 2.7** の際と同様に、式 8.1 における i 行 j 列目の成分の値は、成分 i と成分 j との相互作用を表している。したがって、今回のように、直交座標を各軸とした主成分分析を行った後の主成分得点を**式 2.8.1** における各成分値 I_{theory} とする場合、成分ベクトル $\mathbf{I_{theory}}$ 内の i 個の各成分値 I_{theory} が互いに独立であることが保障されるため、**式 2.8.1** における、行列 $\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{context}}$、行列 $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{disturbance}}$、**式 2.9** における行列の対角成分以外は常に 0 となる。しかし、以上のように、行列式で表現することで、相互作用があり、互いの独立性が保障されない系への拡張性についても表現されたと言える。

2.6 まとめ

本章では、水の秤量操作をモデル作業として、作業者の特性の数値化手法の開発を行った。

まず、被験者実験により、水の高さ挙動についてのデータを収集し、得られた各グラフを 7 つの指標を用いて定量的に指標化した。続いて、得られた指標について、作業者全員の全データにおいて主成分分析を行った。その結果、作業を行う前に予め思い描いている“プランニング”に関する成分 1 と作業中の終盤での“調整”に関する成分 2 が抽出された。同時に、これら 2 つの成分に関する値（主成分得点）が各試行について得られた。これら成分値と作業者の特性を関連付ける形で数理モデルの作成を行った。その際、各作業者が固有の能力を持っており、その能力のうちのある係数が、繰り返す回数や、前の作業の結果、累積の時間といった外的な要因によって、観測可能な形で現れると仮定した。これらの仮定を基にして作成した数式モデルによってフィッティングすることで、各要因に関するパラメータを算出した。得られたパラメータの結果から、水面の動くスピードが速くなるにつれ、“プランニング”ではなく、“調整”の段階でゆっくり穏やかに調整しようとすることで対応しようとする傾向があることがわかった。また、同じ作業を繰り返したり、直前に目標値をオーバーしたりした場合、「開始点か

ら近い位置で止めて、途中で何度も止めながら目標値まで到達する“プランニング”を行う傾向があることもわかった。これらから、スピードの変化に対応する場合は、“プランニング”より“調整”への意識が高いのに対し、学習を重ねたり、前回失敗したりすることで、予めの“プランニング”への意識が高まると考えられる。このように、秤量操作を行う際の作業者のやり方の特徴を定量的に表現でき、行い方からプロファイリング的に、作業者の特性を一般化する手法の提案がなされたと言える。続いて行った作業行動の予測に関する検討では、指標とした 7 つ全てについて、大まかに予測値と実測値とが一致する結果となり、本系における作業行動の予測可能性が示唆された。

今後、モデルの改良や拡張性の検討として、線形モデルから非線形モデルへ展開による最適なモデルの探索や、時間的変動を与えうる新たな要因の導入や空間的制約による擾乱を与える要因の追加によるモデルの精緻化が望まれる。また、本章で得られた“プランニング“や“調整“について、意識の観点から生体信号と結び付けることで、本章で得られた数値の生体科学的な意味づけについて解析することや行動科学におけるヒューリスティックやアルゴリズムとの関わりについての検討も望まれる。

表 2.1　12 回の試行に関する条件設定

	task1				task2				task3			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
メスシリンダーの種類	100 ml				20 ml				10 ml			
直径（cm）	3				1.6				1.4			
入れるべき水の量（ml）	10				10				10			
最終的な目標となる水面の高さ（cm）	1.7				6.8				11			

図 2.1　水の秤量操作における計測の様子

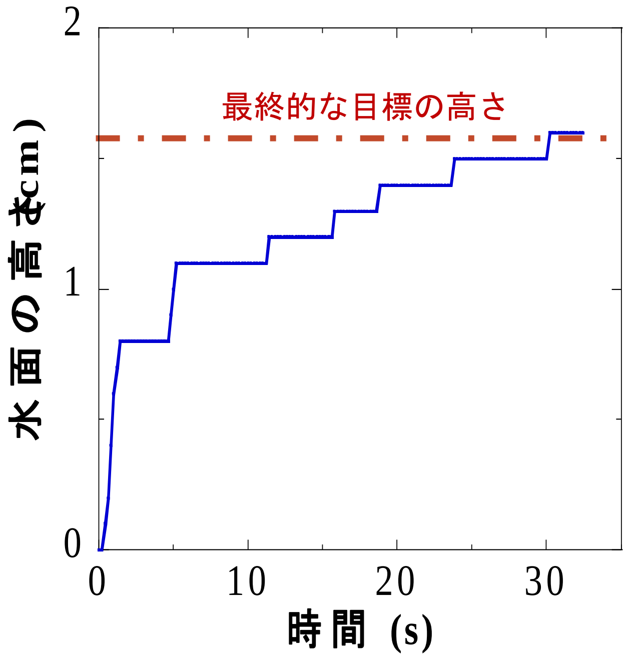


図 2.2　水の秤量操作における水面の挙動の一例
(作業者 A、task1、1 回目)

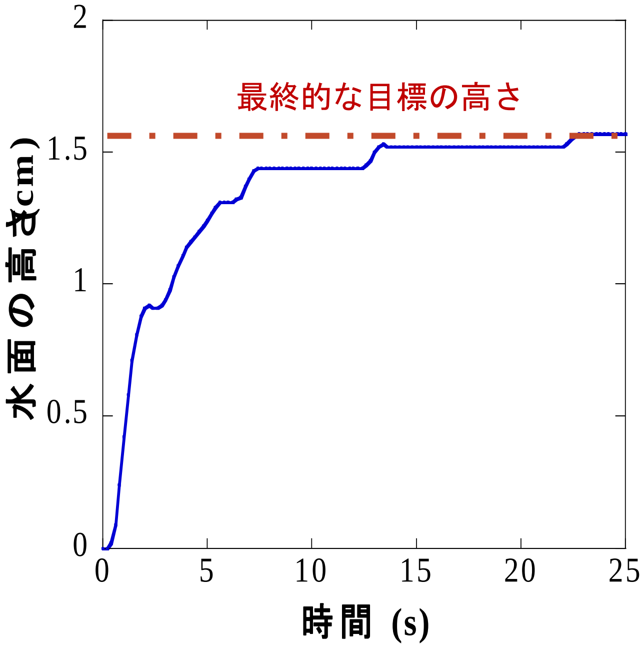


図 2.3　水の秤量操作における水面の挙動の一例
(作業者 A、task1、2 回目)

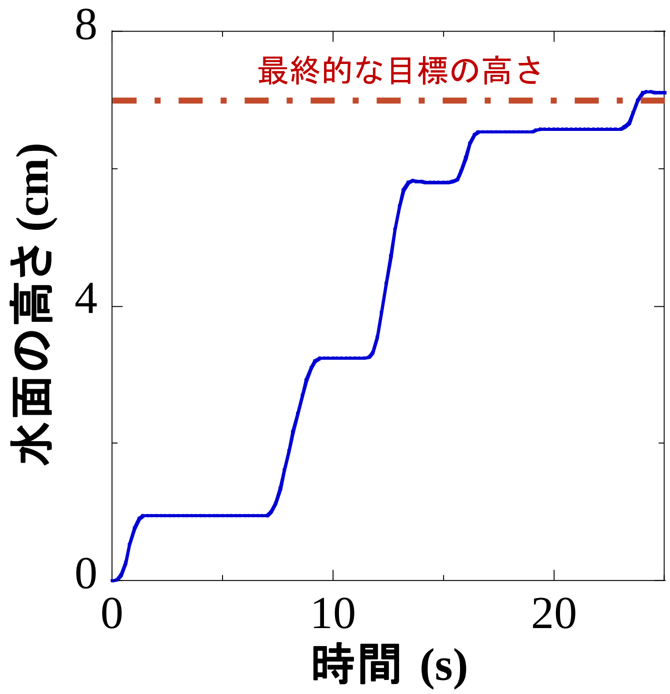


図 2.4　水の秤量操作における水面の挙動の一例
(作業者 A、task2、1 回目)

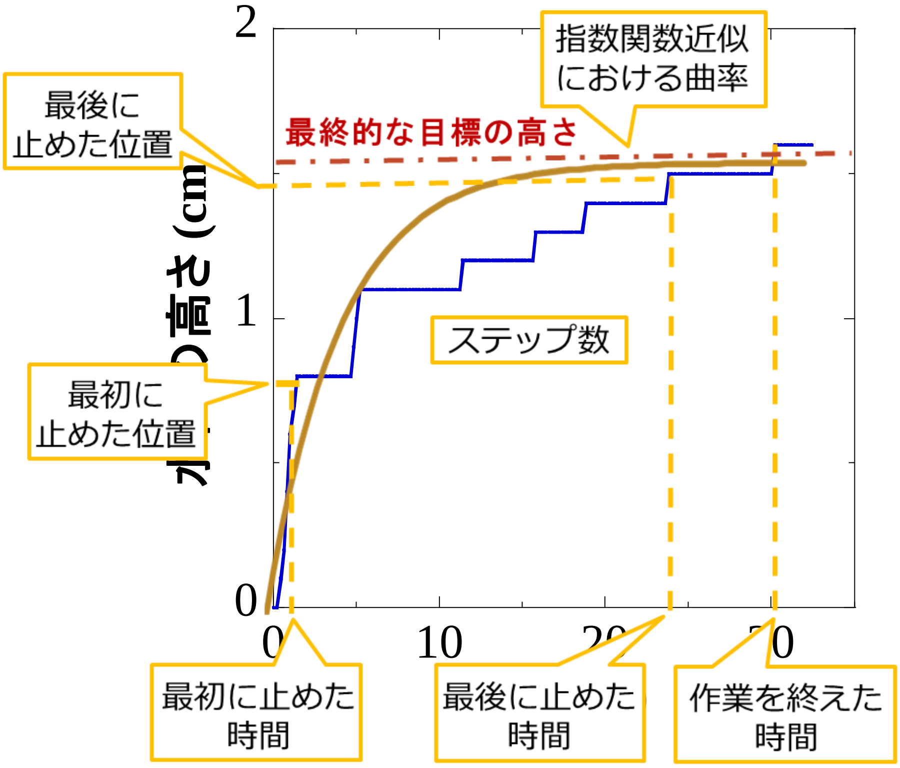


図 2.5　7 つの指標のとり方

表 2.2　主成分分析の固有値

	初期の固有値		
成分	合計	寄与率	寄与率の累積
1	3.0	42.7	42.7
2	2.6	37.5	80.2
3	0.7	9.5	89.7
4	0.4	6.3	96.0
5	0.2	2.7	98.7
6	0.1	0.7	99.4
7	0.0	0.6	100.0

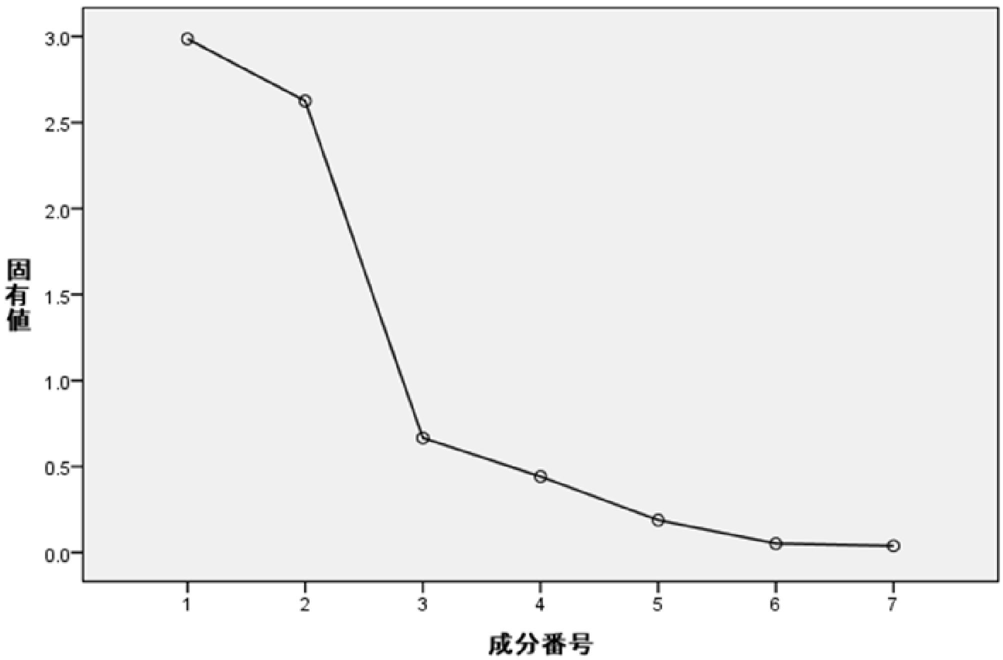


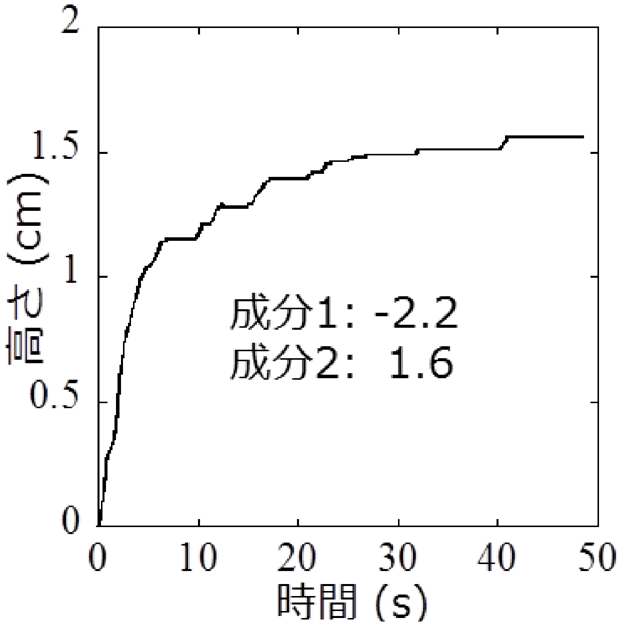
図 2.6　因子のスクリープロット

表 2.3　成分行列

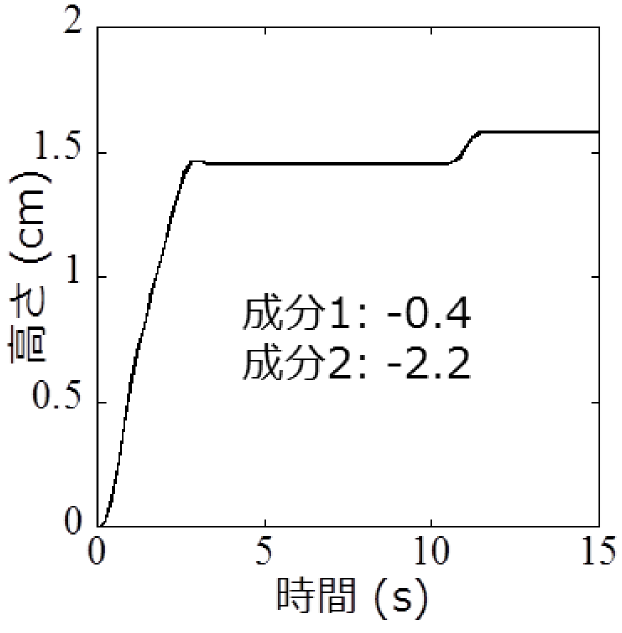
	成分	
	1	2
最初に止めた時間	0.73	0.45
最初に止めた位置	0.89	0.34
最後に止めた時間	-0.43	0.87
最後に止めた位置	0.73	0.53
作業を終えた時間	-0.50	0.81
近似曲線の曲率	-0.17	-0.66
ステップ数	-0.81	0.43

表 2.4　主成分得点の大小とその意味

	成分1："プランニング"に関する成分	成分2："調整"に関する成分
大きくなるにつれて	目標値により近い位置まで接近してから止め、あまり回数をかけずに　目標値まで到達するプランニング	ゆっくり穏やかな調整
小さくなるにつれて	開始点により近い位置で止め、途中で何度も止めながら目標値まで到達するプランニング	短い時間で急激な調整



(a)　成分 1 が-2.2 で成分 2 が 1.6 の場合



(b)　成分 1 が-0.4 で成分 2 が-2.2 の場合

図 2.7　グラフの形状と成分値

表 2.5　作業者Aの 12 回分の試行についての主成分得点

シリンダーの種類		100 ml				20 ml				10 ml			
試行回		1回目	2回目	3回目	4回目	1回目	2回目	3回目	4回目	1回目	2回目	3回目	4回目
作業者A	成分1	-2.02	-0.98	-1.21	-1.39	-0.93	-0.42	-0.78	-0.17	-0.19	0.07	0.54	0.57
	成分2	0.73	0.66	-0.44	-0.46	0.71	-0.01	0.30	-0.84	0.30	0.22	-0.25	-0.53

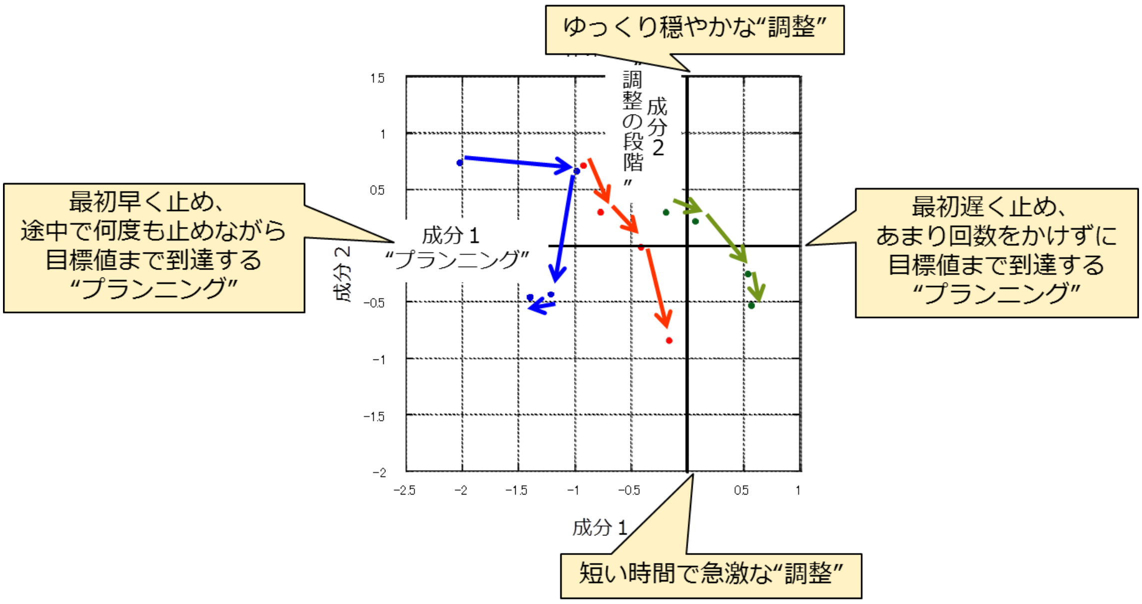


図 2.8　作業者 A の 12 回分の成分値

(青線：100 ml シリンダーの場合

赤線：20 ml シリンダーの場合

緑線：10 ml シリンダーの場合)

“プランニング”　　“調整”

$$\text{作業者A}\quad \begin{pmatrix} v \\ l \\ m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.1\times10^{0} \\ 6.4\times10^{-2} \\ -1.7\times10^{-3} \\ -1.6\times10^{0} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 7.1\times10^{0} \\ -1.6\times10^{-1} \\ 6.7\times10^{-4} \\ -1.5\times10^{0} \end{pmatrix}$$

v_i: 水面の上昇スピードに関するパラメータ

l_i: 繰り返し同じ作業を行うことによる学習効果

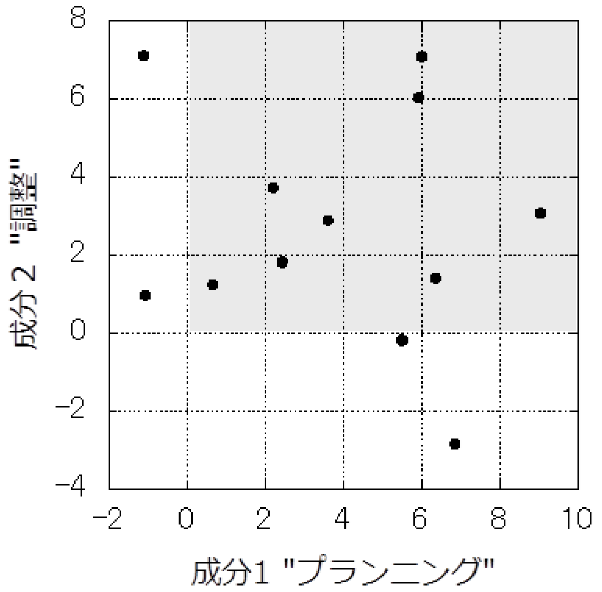
m_i: 直前の作業の最終的な結果によって受ける心理的効果

n_i: 作業を行う時間が延びることによって蓄積される疲労効果

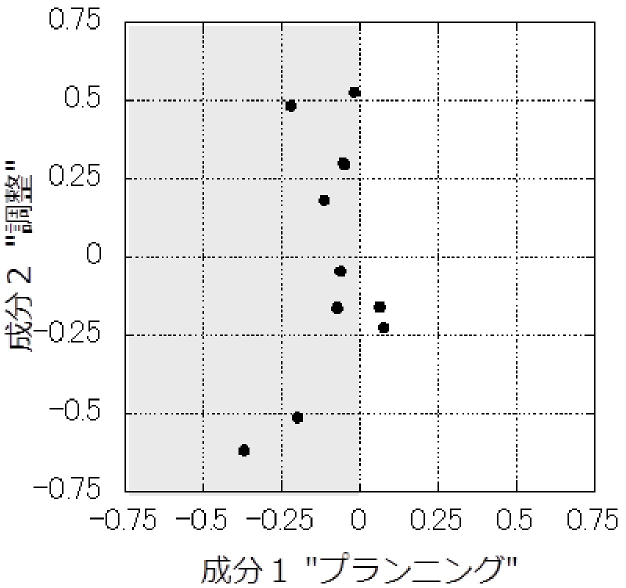
図 2.9　パラメータについての一例

表 2.6　パラメータについての表

		作業者の基本ベクトル**A**内のパラメータ	作業者の変動ベクトル**F**内のパラメータ		
		v	l	m	n
作業者A	成分 1	-1.1×10^{0}	6.4×10^{-2}	-1.7×10^{-3}	-1.6×10^{0}
	成分 2	7.1×10^{0}	-1.6×10^{-1}	6.7×10^{-4}	-1.5×10^{0}

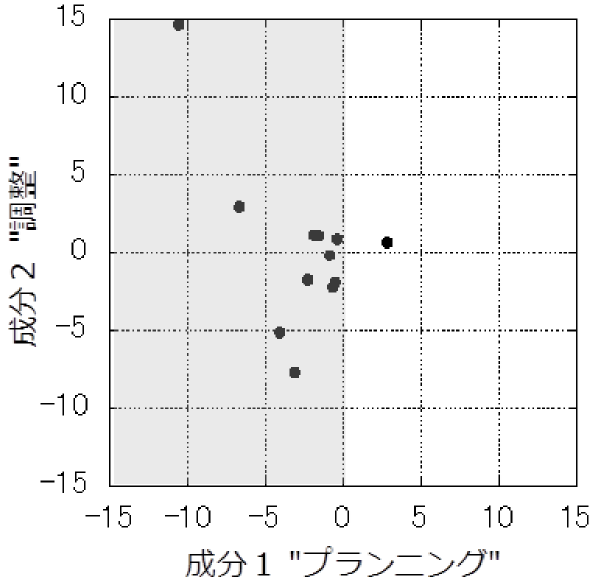


(a) *v*: 水の動くスピードに関するパラメータ

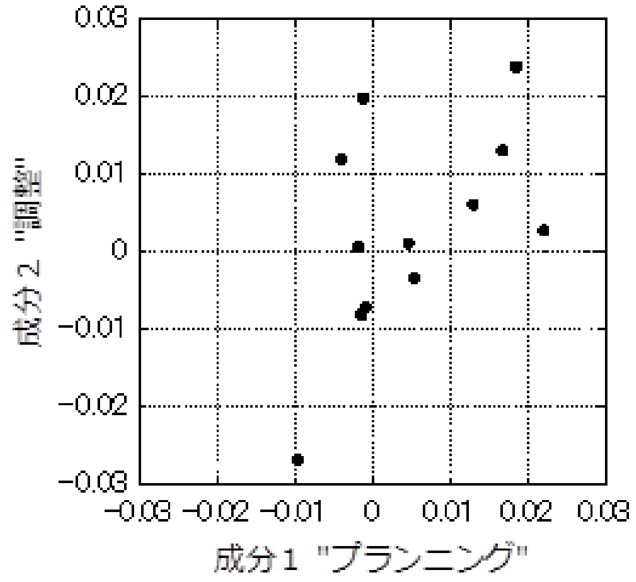


(b) *l*: 同じ作業の繰り返し回数に関するパラメータ

図 2.10　全作業者の各種パラメータ



(c) *m*: 直前の結果に関するパラメータ



(d) *n*: 累積時間に関するパラメータ

図 2.10　全作業者の各種パラメータ

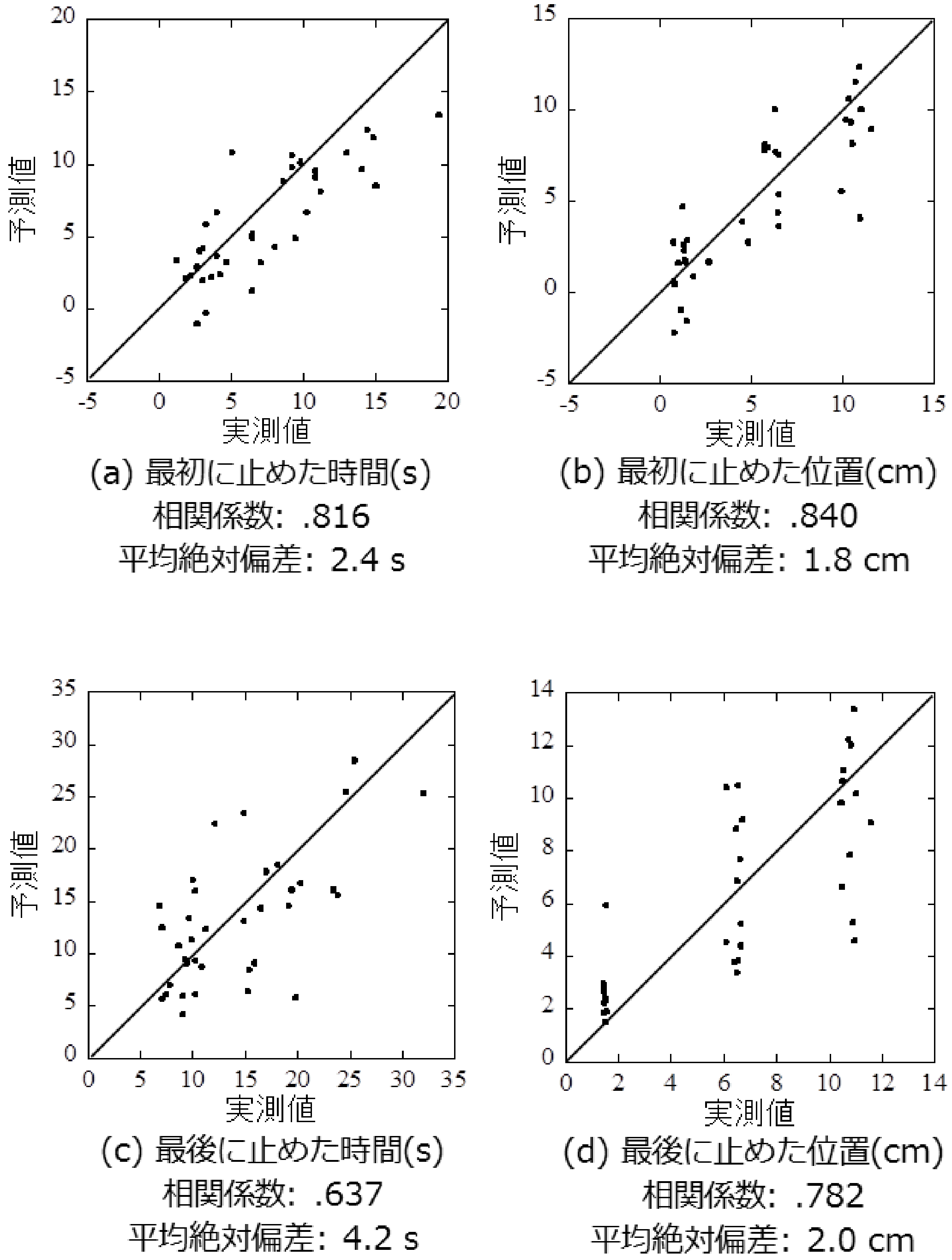
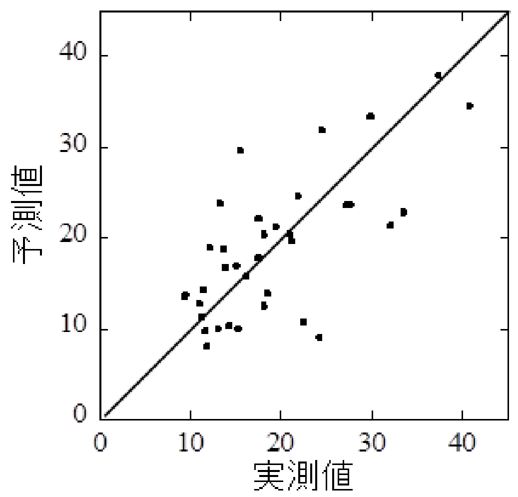
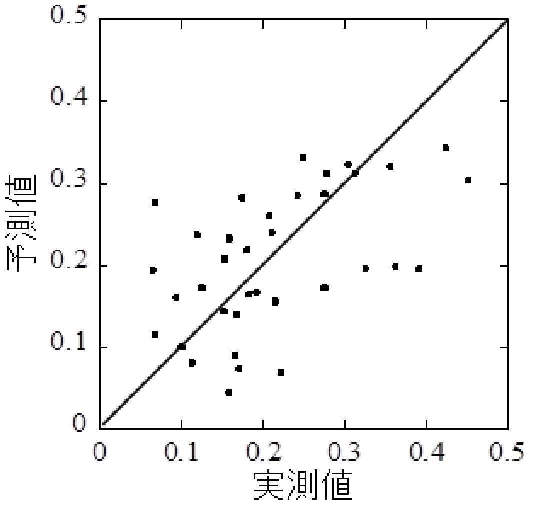


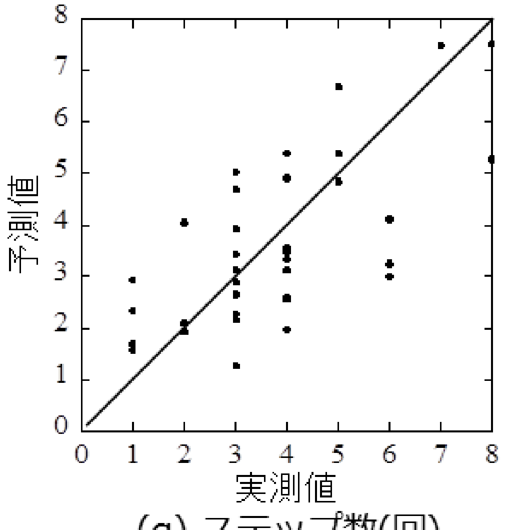
図 2.11　各指標の実測値に対する予測値



(e) 作業を終えた時間(s)
相関係数: .695
平均絶対偏差: 4.7 s



(f) 近似の曲率
相関係数: .527
平均絶対偏差: 0.073



(g) ステップ数(回)
相関係数: .677
平均絶対偏差: 1.1 回

図 2.11　各指標の実測値に対する予測値

表 2.7　主成分分析後の説明率

	因子抽出後の説明率
最初に止めた時間	60%
最初に止めた位置	87%
最後に止めた時間	94%
最後に止めた位置	72%
作業を終えた時間	94%
近似曲線の曲率	30%
ステップ数	75%

3　中和滴定操作における作業者の探索的な学習行動

3.1　背景

大学での実験操作では、同じ実験操作を繰り返し行うことで学習して、その作業者の操作の仕方が変わってくるというケースは多いといえる。その中でも、始め曖昧にしかわかっていない状態から、探索的に行うことでわかっていくという探索的な学習は、実験操作の特色といえる。この探索的な学習は、2 章で変数の 1 つとして取り上げた、正確に行えなかったものが行えるようになるスキルの上達という意味の学習とは異なり、頭の中のイメージにおいて、始め曖昧にしかイメージしていなかったものが、ある時から明確にわかるようになるという意味の学習のことである。本章では、このような探索的な学習に着目し、各作業者の特性をパラメータ化することを通じて、探索的学習についての作業者の特性の大別化と個人の特性の表現、探索的な学習を求められる実験操作の特性について考察を行う。ここでは、中和滴定操作をモデル操作とした。中和滴定操作は、操作の前の段階では、入れる量が正確にはわからない液体を、入れた結果生じる呈色液の変色を見ながら、入れる量を調整していくことが必要な操作である。また、一度入れた水は戻せないものと実験条件を設定したことで、目標値を超えさせない（オーバーシュートしない）ように入れるという条件での検討であるという点は、2 章の秤量操作と同様に、不可逆性という制約によって自由度を奪ったという前提を置いたと言える。

これまで、学習過程についての既往の報告として、1986 年の Atkinson & Shiffrin の報告(Atkinson et al., 1968)以降、長期記憶や短期記憶のような知識の獲得の過程に関する報告例がある(Daneman et al., 1996)、(King et al., 1991)。また、身体的運動の学習過程の研究として、外科手術(Sanfey et al., 2010)、(Talebpour et al., 2009)や楽器の演奏(Fitzpatrick et

al., 2006)のような技能の熟達の報告例がある。一方で、本章における学習行動に検討は、作業者ごとに特性を定量的に表すことに主眼があり、実験操作における探索的な学習を定量的に表現することで、作業者の多様性を整理することが期待される。加えて、中和滴定の操作が、予め曖昧にしかわかっていない最終値に対して、行いながら見つけていく操作であり、中和滴定操作での最終値がわかった後の状態が、これまで筆者らが行ってきた予め最終値を正確に把握した状態で行う水の秤量操作と、どのような類似性があるのかを、数理的手法によって比較し、学習するとは何をどのように学習したのかというような学習の意味について議論する。

3.2　実験方法

実験は被験者実験によって検討を行った。ある大学院において、生化学や高分子化学を専門とし、バイオマテリアルやソフトマテリアルの開発を行っている修士博士課程の学生に対して募集し、10 名の協力を得た。

中和滴定における滴定操作をモデル作業として一人ずつ互いに影響を受けあうことなく行ってもらった。実験内容や装置の詳細を以下に示す。なお、2014 年 5 月付で本学の倫理審査を受けている(審査番号 14-22、その後作業内容の変更に伴い、同年 7 月付で審査番号 14-69 に変更)。

3.2.1　被験者実験の内容

中和滴定操作を 5 回繰り返し行ってもらった。ビュレット(アズワン製、PTFE 活栓付きビュレット　容量 100ml　直径 1.7 cm)に水酸化ナトリウム水溶液を、液面が作業者の目の高さ付近になるように用意し、コニカルビーカーに希塩酸 10 ml と酸塩基指示薬のフェノールフタレインが数滴入った溶液を用意した。作業者に対して、ビュレットからゆっくり滴下し、反応液が淡紅色を呈し、数回かき混ぜても退色しない点まで行うよう指

示した。希塩酸の濃度が 0.001 M であり、水酸化ナトリウム水溶液の濃度が希塩酸とほぼ同じであることを伝えた。撹拌はスターラーを用いて行うよう指示した。これを各作業者に対し 5 回繰り返し行ってもらった。

3.2.2　被験者実験の計測および解析方法

ビュレット内の溶液の液面をハンディ・カメラ(SONY 製、HDR-CR700V)で動画撮影した。その結果得られる動画の一コマである画像を**図 3.1** に示す。ハンディ・カメラの時間分解能は 1/25 秒で撮影したため、このような画像が 1/25 秒ごとに得られた。これを、動画解析ソフトの move-tr/2D(ライブラリー製、TKD-OSML)によって、液面の時間挙動を得た。具体的には、液面の影の部分を色彩検知するよう設定し、検知された中心部を追跡した。追跡された結果得られる軌跡の一例を**図 3.2** に示す。**図 3.2** における赤線が、この時点までの液面の軌跡を表している。その際、似た色彩領域が検知範囲にならないようフィルターを掛けることで、液面の部分だけを追跡するようにした。その後、手ブレによる影響を減らすために、スムージングとサンプリングを行い、0.8 秒ごとの液面挙動として得た。

3. 3　実験結果

得られた液面に関する時間挙動の一例を**図 3.3** に示す。この例の場合、-8.0 cm 付近までほぼ一定の速度で溶液を投入した後、入れる速度が緩やかになるよう調整したのち、-13.0 cm 付近で一度止め、50 秒ほどそのままにし、その後少しずつ入れるという行為を 3 回行った後に、-14.5 cm 付近で作業を終了した。このようなグラフは試行ごとに違った形で得られた。また、**図 3.3** のグラフに示したように、得られた液面の時間挙動は直線が連続した形で得られた。これは、滴定操作の特性上、コックの角度を一定にしておくと、一定量の溶液が投入できるからである。このことから、作業者にとって思った

ことを実施することは簡単な操作であり、得られるグラフのバリエーションは運動機能よりも認知機能の差異が反映されていると考えられる。全グラフについては**Appendix-3**を参照。

3.4　試行回数の依存性について

得られた各グラフを、指標を設定することで定量化し、その指標の試行回依存性を調べることで、作業者の学習についての検討を行った。

3.4.1　各試行の指標化

試行回数の依存性について、最終的な値を代表する指標と作業の途中を表す指標との2つの観点で検討した。最終的な値については、最終的な液面の高さを指標とし、作業の途中を表す指標としては、液面の時間挙動を**式 3.1**のような指数関数で近似した際に得られる係数 *b* とした。**図 3.4** に液面挙動の観測値と近似曲線の一例を示す。

$$y = a\{1 - \exp(-bt)\} \qquad (3.1)$$

(y: 液面の高さ(cm), t: 開始からの時間(s), a: 最終的な値(cm), b: 係数(1/s))

式 3.1 の意味および係数 *b* の意味について、2 章で同様に行ったものを再掲する。

この**式 3.1** は、両辺を時間 *t* で微分すると、**式 3.1.1** のようになる。**式 3.1.1** は**式 3.1** から**式 3.1.2** のように変形できる。

$$dy/dt = a \cdot b \cdot \exp(-bt) \qquad (3.1.1)$$

$$= b \cdot [a - a\{1 - \exp(-bt)\}]$$

$$= b(a - y) \qquad (3.1.2)$$

(∵式 2.1 より $a \cdot exp(-bt)=a-y$)

(dy/dt: 水面の速度, y: 液面の高さ(cm), a: 最終的な値(cm), b: 係数(1/s))

式 3.1.2 の左辺は、水面の速度であり、右辺の(a-y)は、現時点の高さからあとどのくらいで最終的な値に到達するかを表す値である。したがって、右辺の b は、現時点の水面の高さから最終値までの距離に対応して、一定の割合で減速させると仮定した際の比例定数 b である。つまり**式 3.1.2** は、作業者が、ある瞬間の水面の速度を、その瞬間、最終的な水面の高さまであとどのくらいであるかに応じて、決定していると仮定し、さらにその係数が時間によらず一定であると仮定している。

この近似の妥当性の検証として、観測値と近似曲線との重相関 R を求めたところ、全試行の R の値が 0.95～1.00 となった。最もフィットが悪い試行回でも 0.95 であったことから、この仮定が有効であることを示している。

3.4.2　指標の試行回数の依存性について

本項では、3.4.1 項での解析結果として、液面の高さに関する最終的な移動距離と途中の過程を表す係数 b の試行回数に対する依存性を示す。

図 3.5 に被験者 10 人分の液面の高さに関する最終的な移動距離の試行回数 5 回分を示す。最終値は 1 回目と比較した値とした。その結果、右上がりや右下がりなどの試行回数に対する依存性は見られなかった。このことから、最終的な移動距離だけでは、探索的な学習について議論するのは難しいことがわかった。

続いて、**図 3.6** に係数 b の回数依存性を示す。横軸に試行回、縦軸に係数 b を取ったグラフ上に作業者ごとに 5 回の試行の係数 b をプロットした。その結果、試行回を重ねるに従い、係数 b の値が大きくなる傾向を得た。係数 b は、現時点からゴールまでの距離に比例して速度を決定させるとした際の比例定数であり、いわゆるブレーキのかけ方を意味していることから、試行回を重ねると、ブレーキのかけ方が急になることを意味しているといえる。この結果より、近似曲線における係数 b は学習行動を見るうえで、適切な指標であることが示唆された。これまで、学習行動については、最終的な成否で

判断されることが多かったが、途中の行動を見ていくことで、学習について見ていくことが可能になると考えられる。

3.5　作業者の学習行動についてのパラメータ化とパターン化

3.5.1　ロジスティック関数によるフィット

一般的に、経験数とともに、作業時間が短縮され効率が良くなることが知られており、学習曲線として表される(Wright, 1936)。学習曲線の形は、指数関数として扱われる場合(山城ら、2000)や、情報系の教育における研究例(宮地、1994)を始めロジスティック関数として扱われる場合があり、どのような場合にどちらの関数を使うべきかについての体系的な整理はまだなされていない。

本研究では、曖昧にしかわかっていない最終値を、行いながら見つけていくという操作の特徴から、**図 3.7** にような 2 つの平坦な状態を持つ S 字状のロジスティック関数を用いて議論することとした。このようなロジスティック関数の仮定は、平坦な状態が 1 つである場合や、平坦な状態を持たない直線的な関数も包含的に議論できる。関数に含めるパラメータの数は、最大値(A_{max})、最小値(A_{min})、学習タイミング(x_0)、学習スピード(h)の 4 つとし、5 回の試行における各回の係数(b_n)の学習行動を作業者ごとに最小二乗法でフィットした。この 4 つのパラメータのロジスティック関数を**式 3.2** に示す。始めの最小値 A_{min} から終点の A_{max} に S 字状に到達する関数であり、x_0 は点対称であるこの関数の対称点、h はその x_0 での接線の傾きを示している。

$$b_n = A_{\min} + \frac{A_{\max} - A_{\min}}{1 + \left(n / x_0\right)^{-h}} \qquad (3.2)$$

(A_{max}: 最大値、A_{min}: 最小値、x_0: 学習タイミング、$|h|$: 学習スピード)

フィッティングは作業者ごとに行い、5 回分の関数値と実測値との差の和が最小となるよう最小二乗法を用いて行った。

3.5.2　作業者の学習行動についてのパラメータ化および学習行動のパターン化

本項では、ロジスティック関数による学習行動のフィッティング結果を示し、滴定操作におけるパラメータの抽出と学習パターンについて議論する。

各作業者におけるフィッティングの結果を**図 3.8** に示す。フィッティングの結果を点線で、実測値を実線で示した。このようにフィッティングを行った結果、各作業者の特性が、各作業者の学習曲線とパラメータという形で得られた。得られた学習曲線の結果を**図 3.9** に示す。これらを形状で分類すると大きく 2 つに分けられる。1 つ目は、2 つの平らな状態を持った S 字の学習曲線を描くタイプであり、作業者(A)、(C)、(D)、(G)、(H)がこのタイプに属する。もう 1 つは、5 回の中で直線的な形状で、少しずつ学習するタイプであり、作業者(B)、(E)、(F)、(I)がこのタイプに属する。また、作業者 J のように、2 つの平らな状態を持っているが、その 2 つの状態の差である最大値 A_{max} と最小値 A_{min} の差の値が小さく、2 つのどちらのタイプにも分類できない作業者が存在することもわかった。各作業者のパラメータ x_o および $|h|$ を**表 3.1** に示す。3.5.1 項で記した通り、x_o は学習タイミングを表すパラメータであり、$|h|$ は学習スピードを表すパラメータである。x_o の値が大きいほど学習タイミングが遅くなり、小さいほど早いことを意味する。また、$|h|$ の値が大きいほど学習スピードが急激であることを意味し、小さいほど学習スピードが緩やかであることを表している。例えば、被験者 10 人の中で、x_o が一番大きいのは作業者 I であり、一番小さいのは作業者 B である。このことから、作業者 I は最も学習のスタートが遅く、作業者 B は早いといえる。同様に、被験者 10 人の中で、$|h|$ が一番大きいのは作業者 J であり、一番小さいのは作業者 E である。このことから、作業者 J は最も学習スピードが急激で、作業者 B は学習スピードが緩やかであるといえ

る。これら 2 つのパラメータを 2 軸として、10 人の被験者の特性を可視化した図を**図 3.10** に示す。このように、学習タイミングや学習スピードといった学習行動に関する特性が作業者ごとに得られた。全体の傾向としては、x_0 が大きくなると$|h|$も大きくなる傾向がある。これは、学習スタートが遅いとその分、その後急激に学習するということを意味していると考えられる。

以上のように、滴定操作における学習行動に関する 2 つのパラメータ、学習タイミングと学習スピードについて、学習パターンの大別と作業者ごとの定量化を行い、液面の変化挙動の試行回数依存性をロジスティック関数で整理し、得られた 2 つのパラメータから作業者の学習行動の違いについて定量的に表現することができた。

3. 6　探索的学習後と水の秤量操作との比較についての数理的解析

前節までで、中和滴定操作を例として、探索的な学習について、最終値が曖昧にしかわかっていない状態（学習前）と最終値を見つけた後の状態（学習後）の 2 つの状態を持つロジスティック関数を用いて、作業者個々の特性の表現とタイプの大別を行ってきた。このロジスティック関数における学習後の平坦な状態は、作業者にとって何かコツのようなものを掴んだことを意味しており、この状態は、最終値を明確に頭でイメージしながら行っている状態であると考えられる。そこで本節では、2 章で検討した水の秤量操作との比較を行うことで、最終的な目標値が予めシリンダーの目盛りとして明確に見える状態で行う実験操作である秤量操作と、目標値が明確に目に見えない実験操作である滴定操作との比較を行い、これらの操作同士の類似性について数理的手法を用いて検討することとした。具体的には、2 章で行った作業者の特性の数値化手法を用いて、滴定操作の指標 b_{cal} を計算し、これらの関連性について考察を行った。比較対象として、学習前についても同様に検討した。

指標 b_{cal} の算出方法は、3.6.1 項において、水の秤量操作からのパラメータの算出、パラメータから成分の値の算出について記述し、3.6.2 項において、成分の値から中和滴定操作の指標 b_{cal} の算出について示す。さらに、3.6.3 項において、算出された計算値 b_{cal} と実測値 b との比較を行った。

3.6.1　水の秤量操作を用いた作業者特性のパラメータ化

まず、各作業者の特性については、2 章で行った水の秤量操作からパラメータ化を行うことで、それぞれの作業者のパラメータを（作業の各成分）×（状況に関する感度）の形で得ることを目指す。

2 章で行った手順を以下に再掲する。

3.6.1.1　実験方法

本章の滴定実験を行った被験者と同じ学生を対象に､水の秤量操作を行ってもらった。

水の秤量操作については、2 章と全く同じように、3 種のサイズの異なるシリンダーを用意し、各シリンダーに対して 4 回ずつ、計 12 回行ってもらった。詳細は 2 章を参照。

シリンダーを電子天秤の上に置くことで､0.2 秒ごとに投入された水の重量を計測し、それをロガーを用いて保存・記録した。それを断面積で割り算する形で、最終的に水の液面の時間挙動を得た。その結果得たグラフについては、**Appendix-2** を参照。

3.6.1.2　解析方法

水の高さ挙動についてのグラフをデータとして得たのち､「最初に止めた時間」､「最初に止めた位置」、「最後に止めた時間」、「最後に止めた位置」、「作業を終えた時間」、何回に分けて入れたかという「ステップ数」、「指数関数による近似曲線の係数

b」の 7 つを、作業の過程に対して作業者の特性が反映されうる指標として、指標化を行った。続いて、得られた 7 つの指標について、主成分分析を行い、成分を抽出した。その後、抽出した成分ごと、作業者ごとに数理モデルを用いてフィッティングを行い、作業者の特性についてのパラメータを得た。

3.6.1.3　結果および考察

2 章と同様に、横軸に時間、縦軸に水面の高さとしてグラフ上に作業の過程をプロットした。

続いて、「最初に止めた時間」、「最初に止めた位置」、「最後に止めた時間」、「最後に止めた位置」、「作業を終えた時間」、何回に分けて入れたかという「ステップ数」、「指数関数による近似曲線の係数 *b*」の 7 つを、作業の過程に対して作業者の特性が反映されうる指標とした。指標のとり方は 2 章における**図 2.5** と同様である。その結果、10 人（作業者）×3 種類（シリンダーのサイズ）×4 回（試行回）の計 120 のグラフから 7 つずつ得られた(**Appendix-3** 参照)。

得られた指標値を基に、主成分分析によって、主成分の抽出と各試行の主成分得点による表現を行った。主成分分析においては、本章での被験者 10 人のみで分析した場合と、2 章での被験者 12 人と本章の 10 人を併せた 22 人で分析した場合とで行い、2 章での結果と比較する。

まず、本章での被験者 10 人のみで分析した場合の主成分分析の固有値に関する結果を**表 3.2** に示す。固有値が 1 以上の成分は 2 つ得られ、それぞれの固有値は 3.9、1.7 という値となり、1 つ目の成分が全体の半分近くを集約したという結果になった。因子のスクリープロットを**図 3.11** に示す。寄与率を見てもわかるように、1 つ目の成分で 50%近く説明可能であり、この水の秤量操作において、大きなウェイトを占める成分であるといえる。続いて、**表 3.3** に成分行列を示す。1 つ目の成分に対しては、「最初に止め

た位置」と「ステップ数」と強い関連があることがわかった。また、2 つ目の成分とは、「最後に止めた時間」や「指数関数による近似曲線の係数 b」と強い関連があることがわかった。

続いて、2 章での被験者 12 人と本章の 10 人を併せた 22 人で分析した場合の主成分分析の固有値に関する結果を**表 3.4** に示す。固有値が 1 以上の成分は 2 つ得られ、それぞれの固有値は 3.1、2.5 という値となった。因子のスクリープロットを**図 3.12** に示す。また、**表 3.5** に成分行列を示す。1 つ目の成分に対しては、「最初に止めた位置」と「ステップ数」と強い関連があることがわかった。また、2 つ目の成分とは、「最後に止めた時間」や「作業を終えた時間」と強い関連があることがわかった。

以上から、本章での被験者 10 人のみで分析した場合と、2 章での被験者 12 人と本章の 10 人を併せた 22 人で分析した場合とで、ともに、2 章の結果と同様に、2 つの主成分が得られ、1 つ目の主成分とは、「最初に止めた位置」と「ステップ数」と強い関連があることがわかった。しかし、2 つ目の主成分と関連が強い指標の順番に若干の違いがあるため、成分行列における値を成分 1、2 を軸とするグラフにプロットし、比較することとした。その結果を**図 3.13(a)、(b)**に示す。比較対象として、2 章のみで解析した場合の結果も**図 3.13(c)**に示した。7 つの指標のプロットの分布は、3 つともにほぼ重なったものであり、同様の結果が得られたと言える。したがって、“プランニング“と“調整“の二つの主成分であるといえる。以下においては、本章のみを対象とした場合の結果を用いて、解析を進めることとした。

続いて、作業者 10 人×12 回分の試行回について、これらについての主成分得点で表現した。一例として、ある作業者 A の 12 回分の試行についての主成分得点を**表 3.6** に示す。

この主成分得点を各試行の I^i_{theory} とし、2 章のときと同様に**式 3.3** において L、M、N、V に各値を代入することで、I^i_{theory} を v_i、l_i、m_i、n_i の関数で表現し、**式 3.4** における $I^{i,task(j)}_{actual}$ に

代入した。その上で、**式 3.4** における$I_{thoery}^{i,task(j)}$に実測値を代入し、S が最小になるように作業者ごとに最小二乗法を適用することで、作業者ごとに v_i、l_i、m_i、n_i を得た。

$$I_{theory}^{i} = \{1 + (l_i \cdot L + m_i \cdot M + n_i \cdot N)\} \cdot (v_i \cdot V + const.) \qquad (3.3)$$

$$S(v_i, l_i, m_i, n_i) = \sum_{j=1}^{3} (I_{theory(1)}^{i,task(j)} - I_{actual(1)}^{i,task(j)})^2 + (I_{theory(2)}^{i,task(j)} - I_{actual(2)}^{i,task(j)})^2$$

$$+ (I_{thoery(3)}^{i,task(j)} - I_{actual(3)}^{i,task(j)})^2 + (I_{thoery(4)}^{i,task(j)} - I_{actual(4)}^{i,task(j)})^2 \qquad (3.4)$$

3.6.1.4　各試行における各成分値の算出

前項では、秤量操作における L、M、N、V から v_i、l_i、m_i、n_i を得たが、本項では、得られたパラメータ v_i、l_i、m_i、n_i を滴定操作における L、M、N、V と合わせ、各試行における成分値 I^i_{theory} を求める。滴定操作における状況に関するパラメータ L、M、N、V は、2 章での設定と同じく、それぞれの試行回や直前の結果、累積時間であり、例えば、3 回目の試行で直前 15 cm オーバーし、1 回目からの累積時間が 200 秒である場合、L=3、M＝15、N=200 となる。なお、全体の 1 回目の場合、M、N の値は 0 とした。また今回、2 章の水の秤量操作と異なり、M においてオーバーした量を知る事が困難なため、5 回のうちの最小値を入れるべき量としてその作業者にとっての基準値とし、オーバーとなった高さを計算した。一例を**表 3.7** に示す。その後、**式 3.5** における V、L、M、N の値に代入し、各作業者の特性(v_i、l_i、m_i、n_i)と併せることで、各試行において発現する各作業者の成分値を算出した。

$$I_{theory}^{i} = \{1 + (l_i \cdot L + m_i \cdot M + n_i \cdot N)\} \cdot (v_i \cdot V + const.) \qquad (3.5)$$

3.6.2　滴定操作における学習前後と重み付けの算出方法

本項では、前項で算出された I^i_{theory} から b_{cal} の算出を行う。その際、3.5.2 項で 2 つの平らな状態を持ち S 字の学習曲線を描くタイプに分類された 5 名が学習前後の違いが明

確であるため、その5名が行った各5回の試行の25回を本項の解析の対象とした。また、b が最大値 A_{max} の90%以上に初めてなった試行回以降の学習後と定義し、それ以外の試行を学習前とした。その結果、5人×5回=25回の試行のうち、17回が学習後、8回が学習前の試行に該当する結果となった。その後、学習後の試行である17回を対象に以下に示す方法で指標 b_{cal} を算出した。

算出では、2.5.4 項の主成分分析の逆変換に倣って行い、同様の手順によって、水の秤量操作における成分値から中和滴定操作における係数 b_{cal} が算出されるとした。**式 3.6** のように、重み付け係数 c_i と成分値 I^i_{theory} とを掛け合わせたものに平均値と標準偏差を足したものが中和滴定操作における係数 b_{cal} となると仮定した。以上の仮定の下、重み付け係数 c_i を求め、各試行の係数 b_{cal} の算出を行った。

$$b_{cal} = \sum_{i=1}^{2}(c_i \cdot I^i_{theory}) + (\text{平均値}) + (\text{標準偏差}) \tag{3.6}$$

(b_{cal}: 中和滴定操作における係数、c_i: 成分 i に対する重み付け係数、
I^i_{theory}: 成分 i についての成分値)

3.6.3　水の秤量操作からの予測値と滴定操作での実測値との比較

本項では、前項で得られた各成分に対する重み付け($c1$、$c2$)を、**式 3.6** に代入することで計算値 b_{cal} を算出し、実測値の b と比較を行う。比較では、算出された各試行の係数 b_{cal} と実測値の係数 b との一致の度合いを決定係数 R^2 を算出することで行った。

その結果、決定係数 R^2 についても、学習前が0.70だったのに対し、学習後は0.93となり、1に近い値となった。

これらの結果から、学習前は、中和滴定操作の指標とした近似曲線の係数 b を、水の秤量操作で得た成分だけで説明することができない。一方、学習後の場合は、中和滴定操作の係数 b は、秤量操作の要素によって説明可能であると解釈できる。つまり、最終的な目標値がわかった後は、最終的な目標値が明確な水の秤量操作と同じような操作と

して捉えられていると考えられる。

3.7 まとめ

本章では、中和滴定の中和滴定操作をモデル操作として、実験操作における探索的学習についての数理モデルによる解析を行った。各被験者がビュレットから投入する水酸化ナトリウム水溶液の液面の時間挙動から、探索的学習についての作業者の特性の大別化と個人の特性の表現、中和滴定操作の実験操作としての特性について考察を行った。

被験者が 5 回繰り返し行った様子から得た指標 b の変動を、学習曲線としてよく知られるロジスティック曲線によってフィットすることで、学習が始まるタイミングと学習するスピードについてのパラメータによって、表現できることが明らかになった。同時に、フィッティングした結果得られた曲線の形状から、段階的に学習するタイプと、少しずつ学習するタイプとの 2 つのタイプに大別されることがわかった。

加えて、中和滴定操作での最終値を見つけた後の状態（学習後）と最終値が明確である水の秤量操作との比較を行った。2 章で行った秤量操作からの作業者の特性のパラメータ化手法を用いて、滴定操作の指標 b がどの程度計算可能であるかを検討を行った。まず、滴定操作を行った被験者を対象に水の秤量操作を行い、2 章と全く同じ解析を行った結果、主成分の抽出や全体のパラメータについては、概ね 2 章と同じ傾向が得られた。次に、得られたパラメータを用いて、滴定操作を学習する前と後とで、それぞれ係数 b の計算を行った。その結果、学習前は計算値と実測値との一致が悪い結果となったが、学習後は、計算値と実測値との一致がある程度良い結果として得られた。この結果から、滴定操作は、学習前は、秤量操作と同じ要素で説明することはできないが、学習後は説明できるようになるといえる。つまり、中和滴定操作は、最終的な目標値がわかった後は、最終値が明確な水の秤量操作と同じような実験操作として認識されるようになったと考えられる。

本章の検討において、予測が困難であった学習前の予測に関しては、その作業者がこれまで行ってきた経験や日常行っている癖などが学習前の行動に強く反映されると予想される。したがって、これらをこれまでの実験に関する経験を尋ねるアンケートを実施することや、実験以外の場面、例えば自動車の運転や調理や工作における行動から癖を抽出し、関連を見ていき、学習前の予測に役立てていくといった展開が期待される。

また、今後も、作業系を拡張していくことで、多様な作業者の個人特性の情報化へと展開し、大学実験室の安全管理や教育などへの応用されることが期待される。さらに、多種多様な大学等での実験操作の一般化に向けて、一見異なる実験操作同士の類似性の発見や特徴の整理が望まれる。

図 3.1　撮影された動画の一コマについての一例

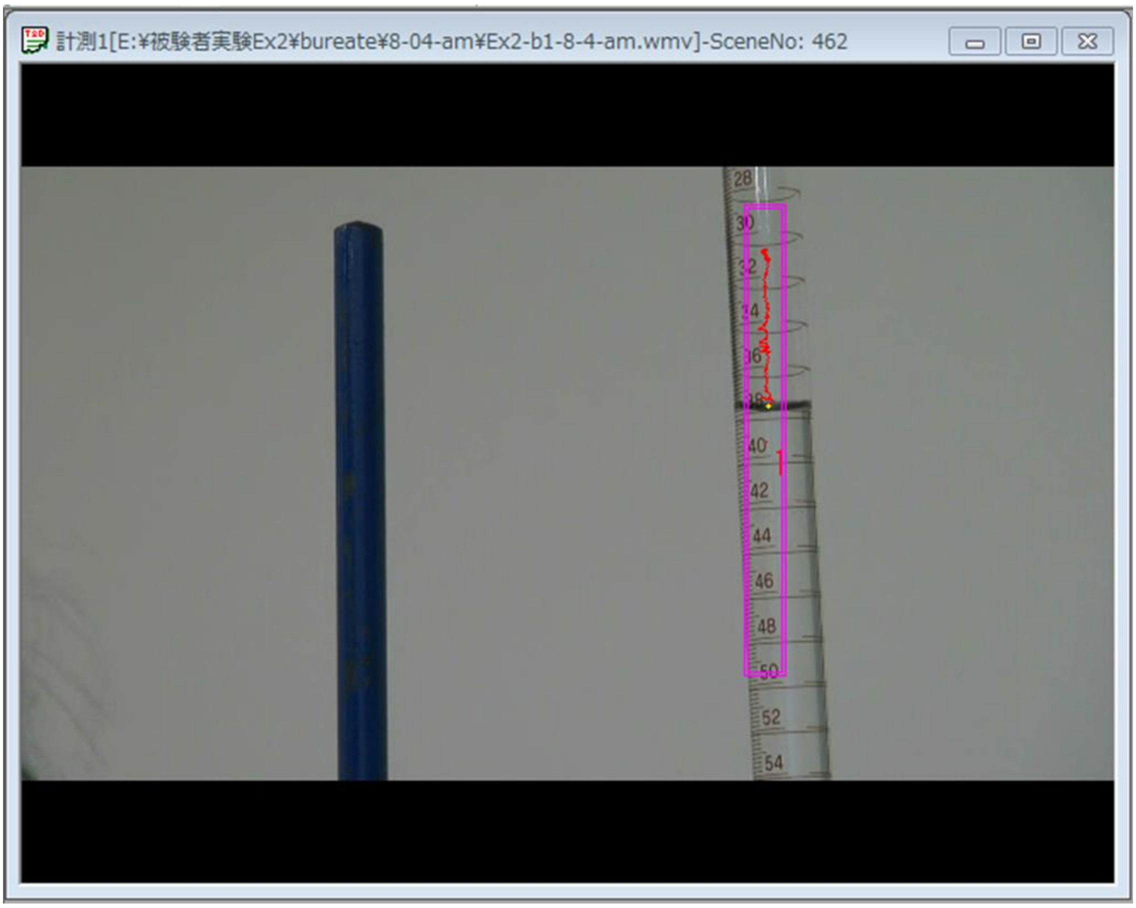


図 3.2　液面の動画のトラッキング

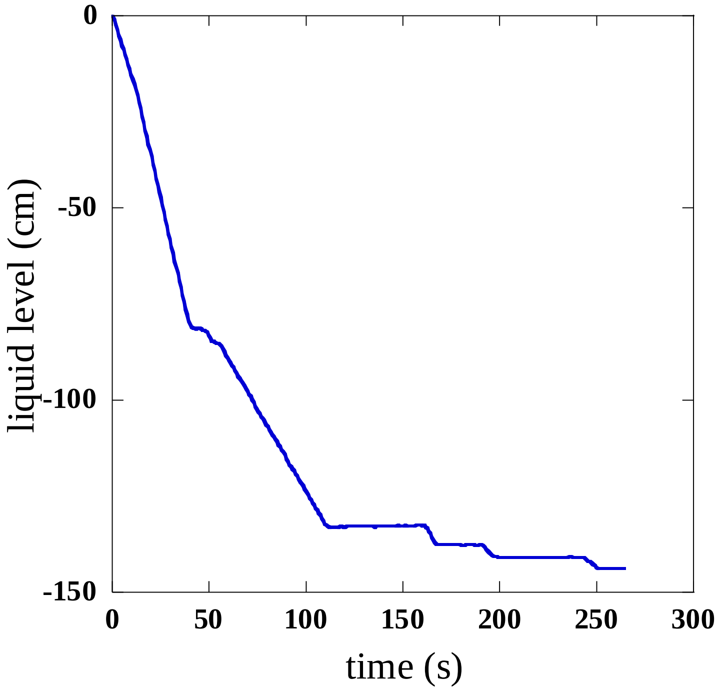


図 3.3　滴定操作における液面の時間挙動の一例

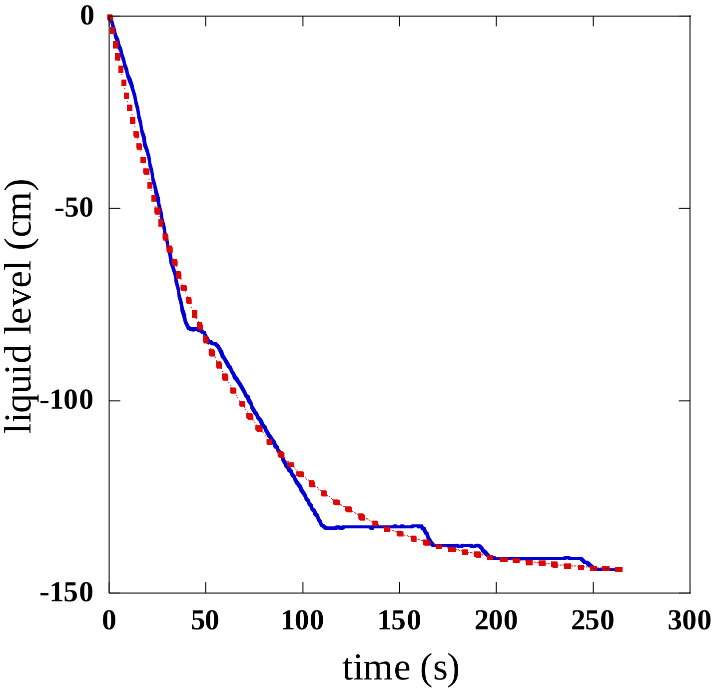


図 3.4　滴定操作における指標のとり方

———：液面の時間挙動についての観測値

………：式 3.1 による近似曲線

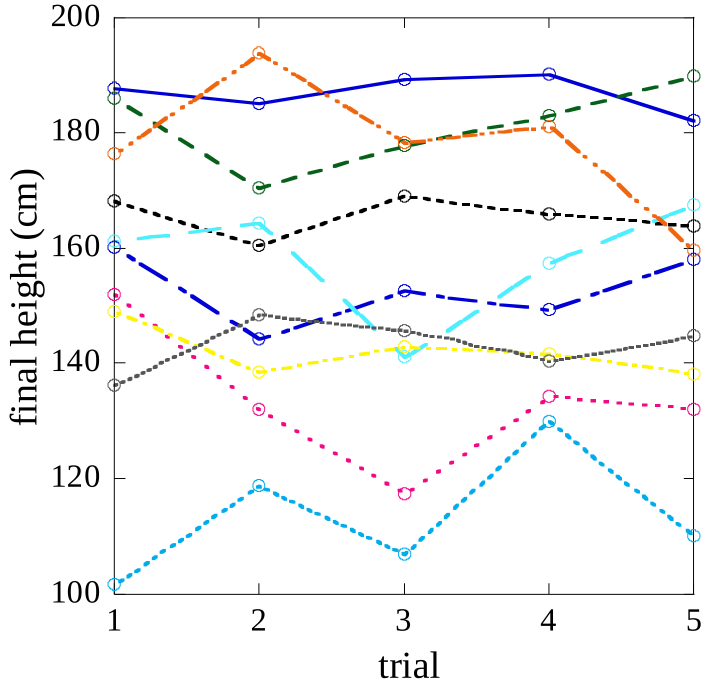


図 3.5　最終的な値に関しての試行回数依存性

(各色の点線は、それぞれ各作業者 A～J に対応する)

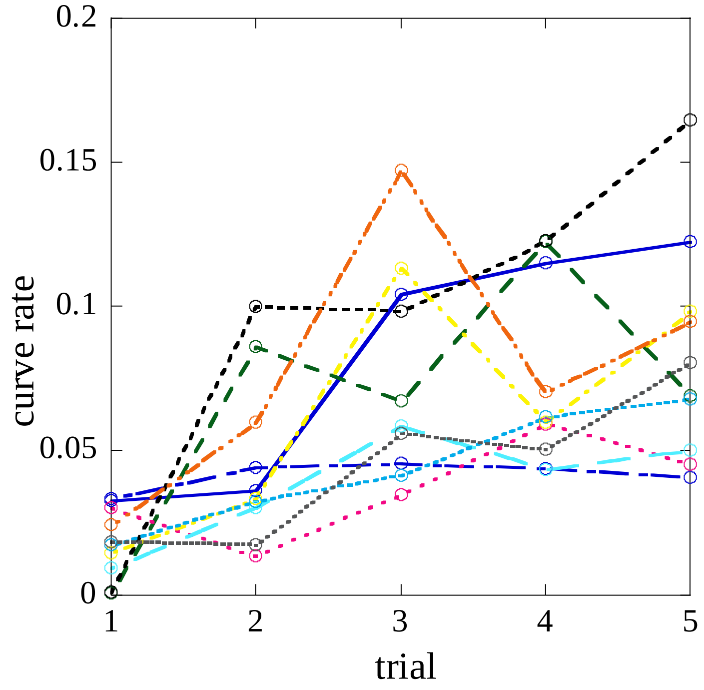


図 3.6　指数関数による近似曲線の係数に

関する試行回数依存性

(各色の点線は、それぞれ各作業者 A～J に対応する)

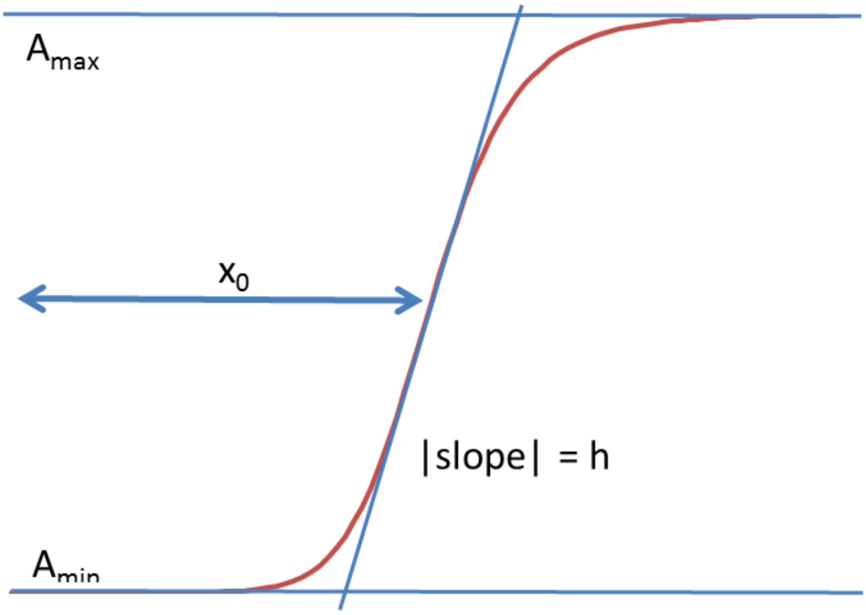


図 3.7　4 パラメータ・ロジスティック関数

(—— : ロジスティック曲線)

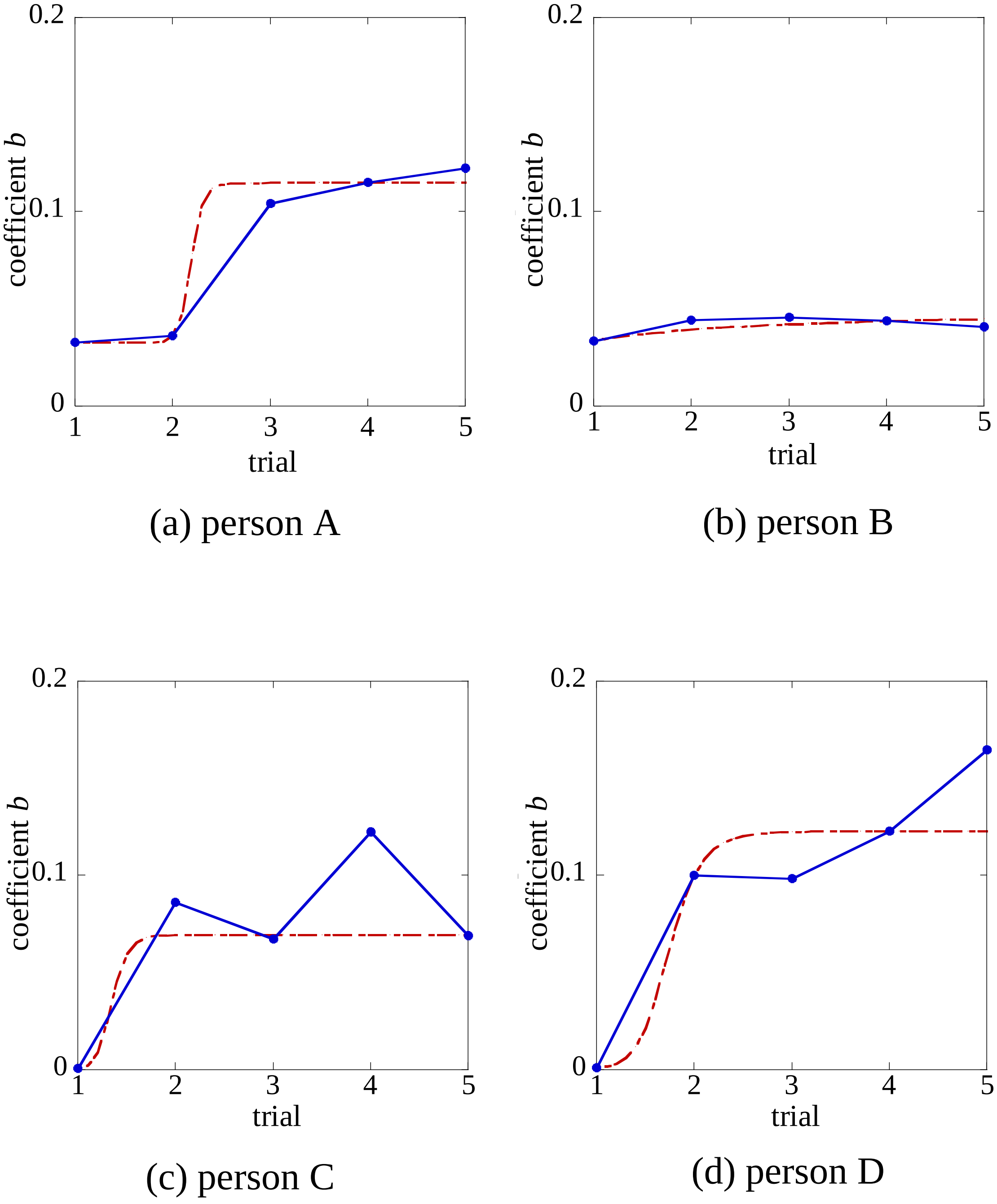
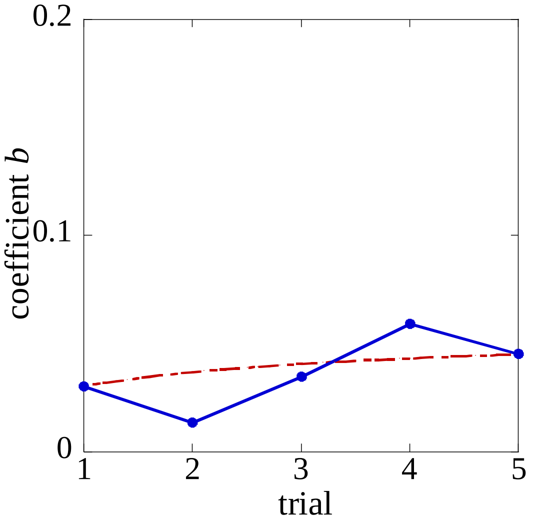
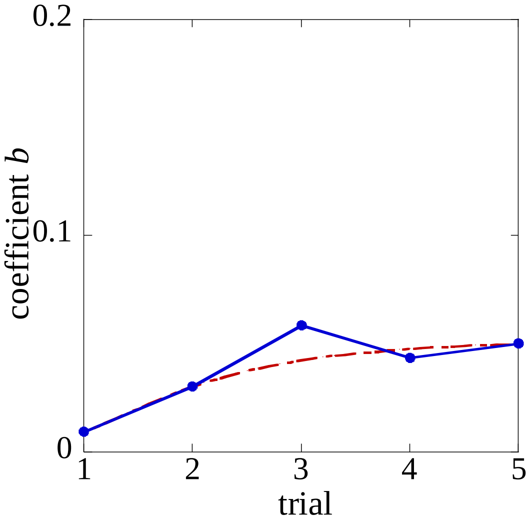


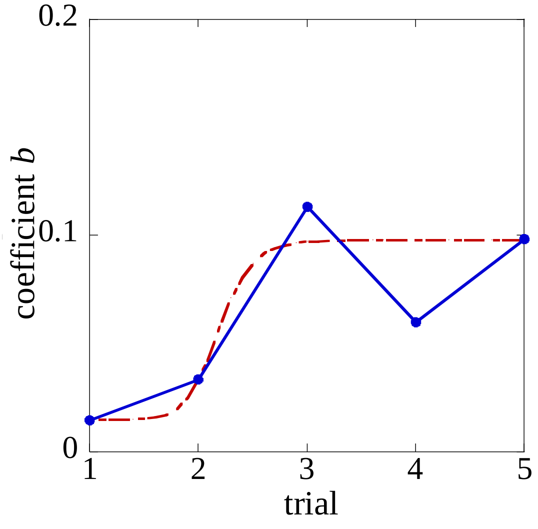
図 3.8　ロジスティック関数によるフィッティング結果



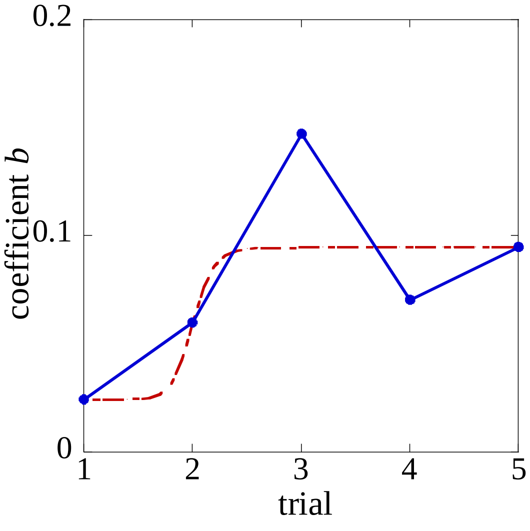
(e) person E



(f) person F

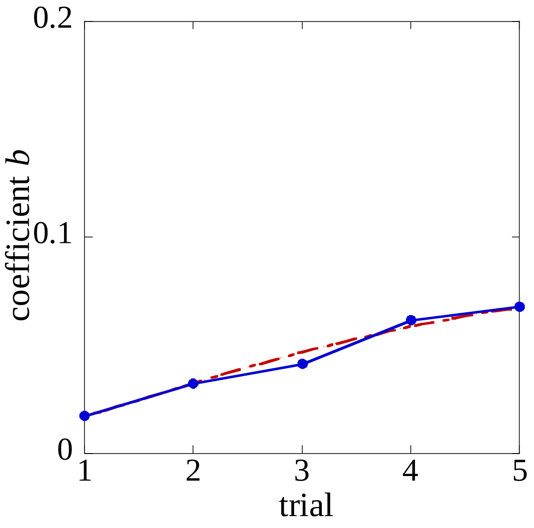


(g) person G

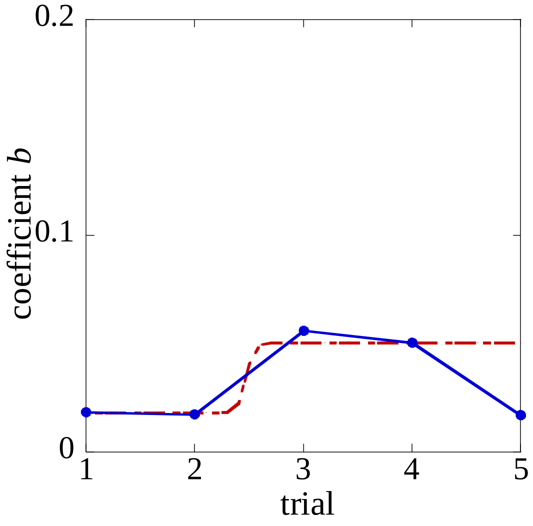


(h) person H

図 3.8　ロジスティック関数によるフィッティング結果



(i) person I



(j) person J

図 3.8　ロジスティック関数によるフィッティング結果

表 3.1　10 人のパラメータの結果

	x_0	$\|h\|$	A_{max}	A_{min}	residual sum of squares
person A	2.2	35	0.11	0.03	0.02
person B	1.0	1.0	0.05	0.02	0.01
person C	1.3	17	0.07	0.00	0.07
person D	1.7	11	0.12	0.00	0.07
person E	1.2	0.62	0.06	0.00	0.05
person F	1.8	2.7	0.05	0.00	0.02
person G	2.2	14	0.10	0.01	0.05
person H	2.0	21	0.09	0.02	0.08
person I	3.9	1.7	0.11	0.01	0.01
person J	2.5	66	0.05	0.02	0.04

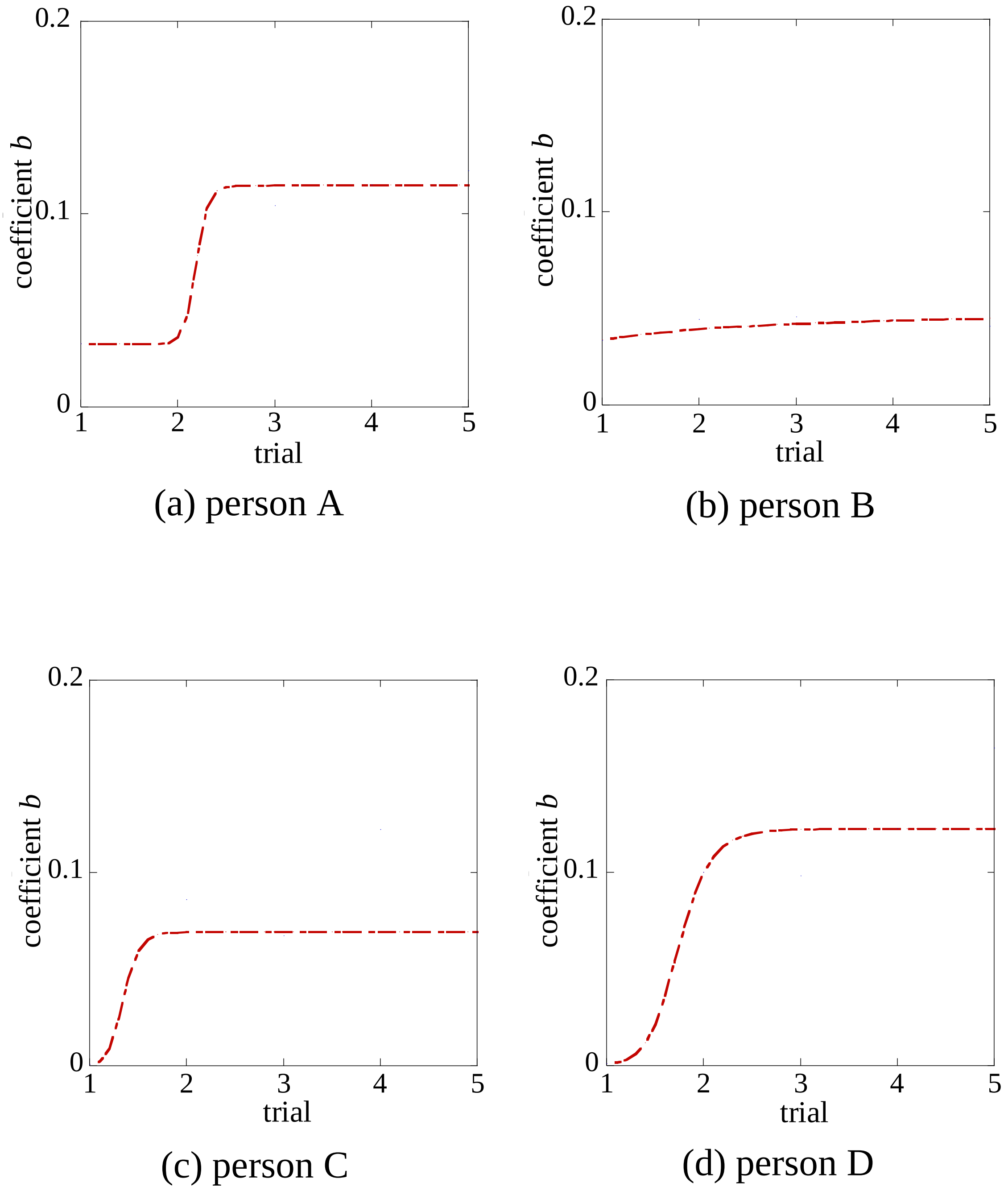

0.2
0.1
0
coefficient b
1
2
3
4
5
trial
(a) person A
(b) person B
(c) person C
(d) person D

図 3.9　学習曲線の形状

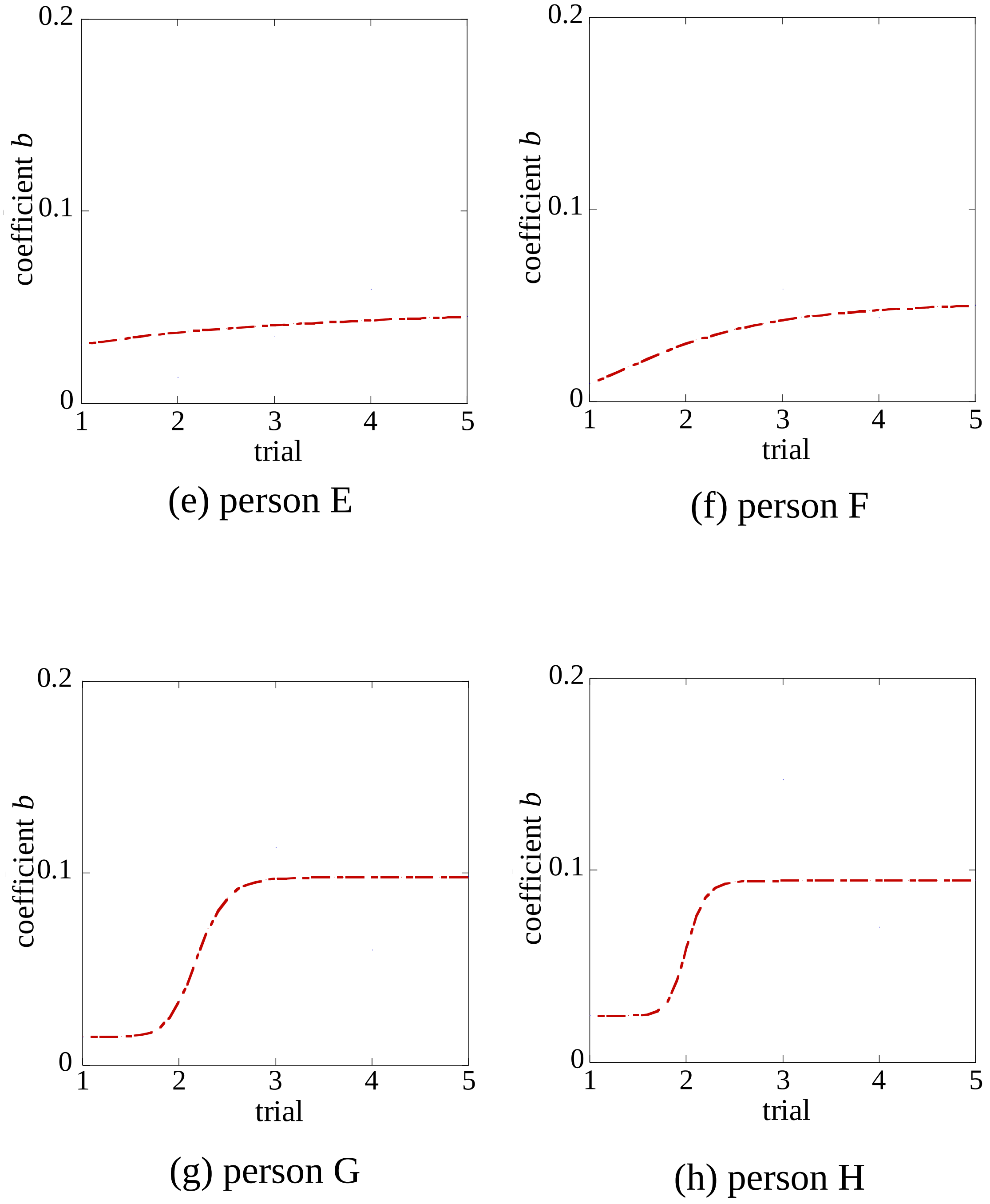
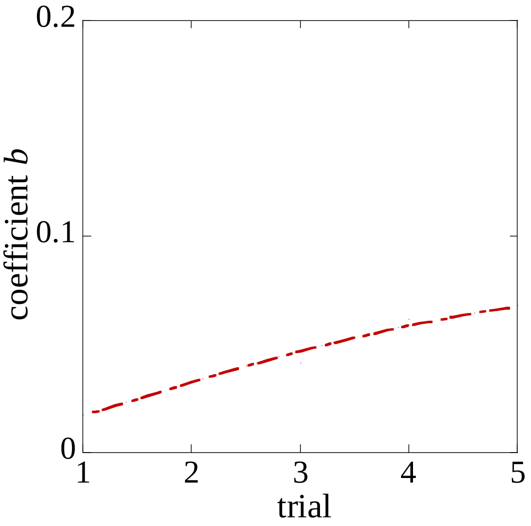
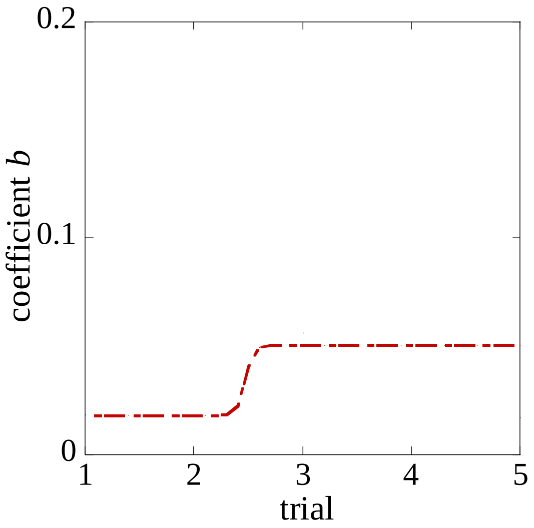

0.2
0.1
0
coefficient b
1
2
3
4
5
trial
(e) person E
0.2
0.1
0
coefficient b
1
2
3
4
5
trial
(f) person F
0.2
0.1
0
coefficient b
1
2
3
4
5
trial
(g) person G
0.2
0.1
0
coefficient b
1
2
3
4
5
trial
(h) person H

図 3.9　学習曲線の形状



(i) person I



(j) person J

図 3.9　学習曲線の形状

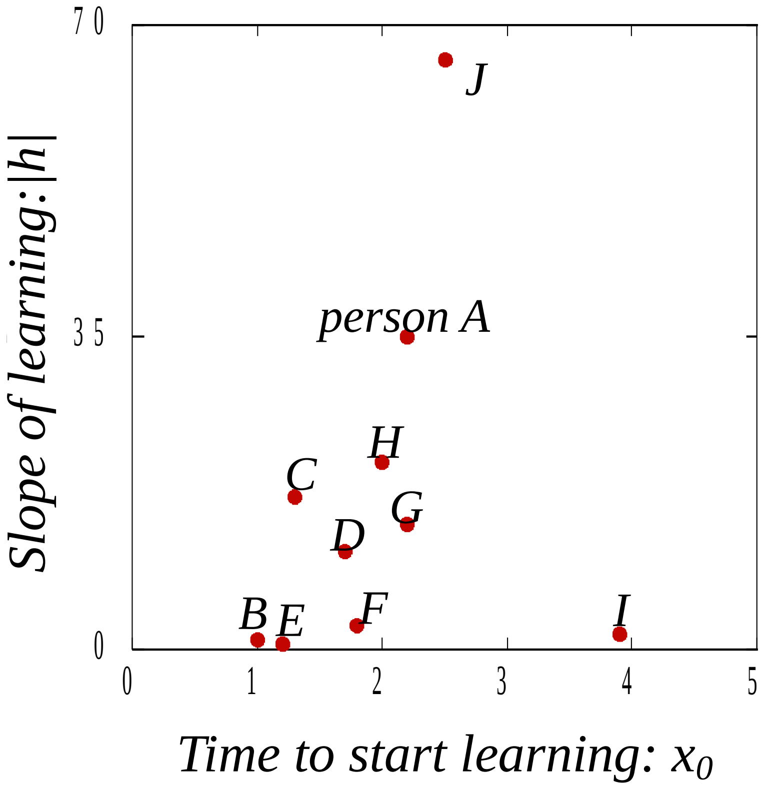


図 3.10　10 人の作業者のパラメータ x_0、h について

表 3.2　3 章の被験者のみの場合の主成分分析の固有値

	初期の固有値		
成分	合計	寄与率	寄与率の累積
1	3.9	55.9	55.9
2	1.7	24.2	80.1
3	0.7	10.0	90.1
4	0.4	5.8	95.9
5	0.1	2.0	97.9
6	0.1	1.4	99.3
7	0.0	0.7	100.0

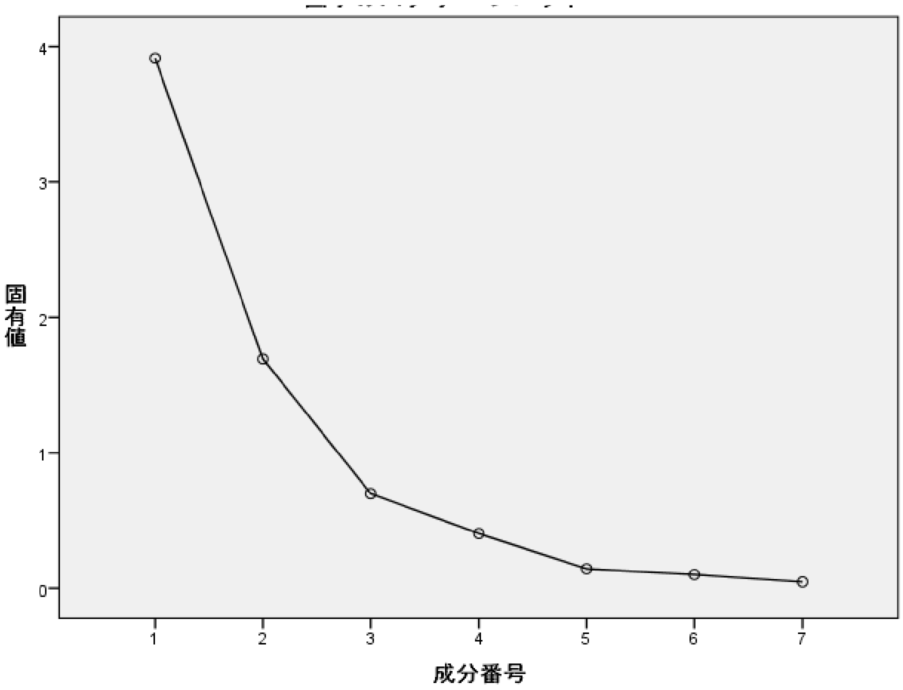


図 3.11　3 章の被験者のみの場合の因子のスクリープロット

表 3.3　3 章の被験者のみの場合の成分行列

	成分	
	1	2
最初に止めた時間	0.76	0.45
最初に止めた位置	0.89	0.34
最後に止めた時間	-0.64	0.67
最後に止めた位置	0.79	0.44
作業を終えた時間	-0.82	0.43
近似曲線の曲率	0.07	-0.73
ステップ数	-0.92	0.17

表 3.4　2 章と 3 章の被験者を併せた場合の

主成分分析の固有値

	初期の固有値		
成分	合計	寄与率	寄与率の累積
1	3.1	44.4	44.4
2	2.5	35.2	79.6
3	0.7	10.4	90.0
4	0.4	6.2	96.3
5	0.2	2.2	98.4
6	0.1	0.9	99.3
7	0.0	0.7	100.0

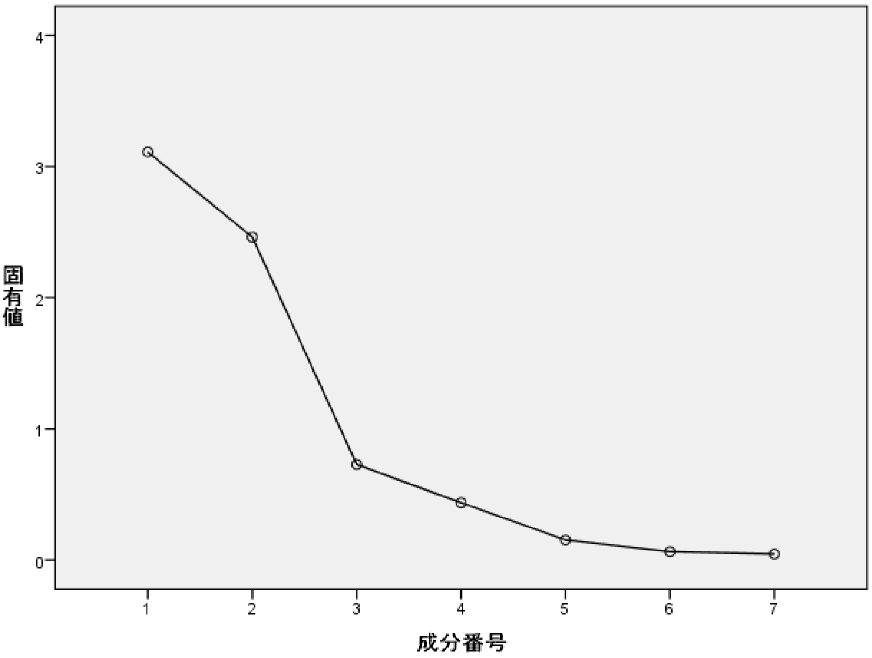


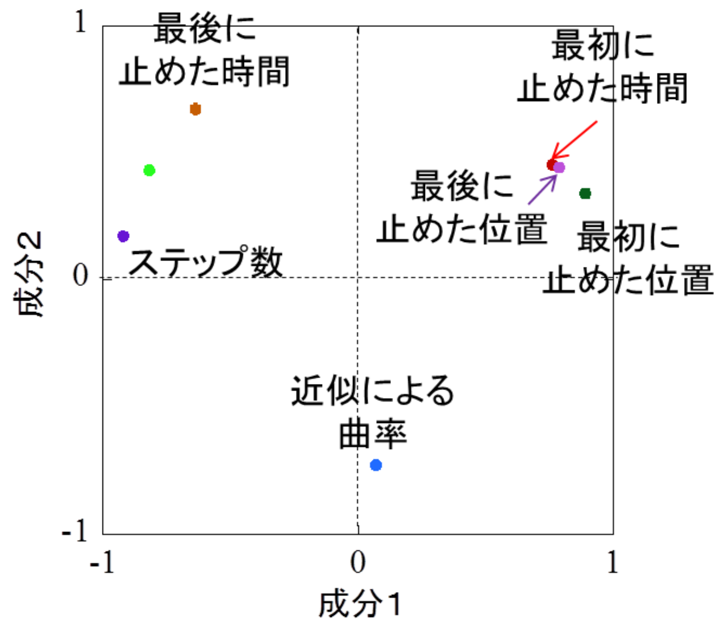
図 3.12　2 章と 3 章の被験者を併せた場合の

因子のスクリープロット

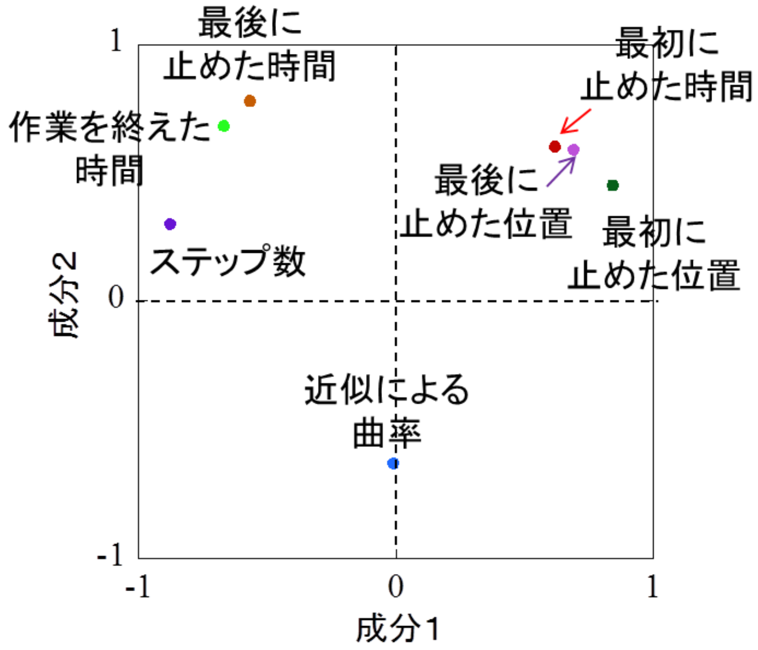
表 3.5　2 章と 3 章の被験者を併せた場合の

成分行列

	成分	
	1	2
最初に止めた時間	0.62	0.60
最初に止めた位置	0.84	0.45
最後に止めた時間	-0.57	0.78
最後に止めた位置	0.69	0.59
作業を終えた時間	-0.67	0.68
近似曲線の曲率	-0.01	-0.63
ステップ数	-0.88	0.30

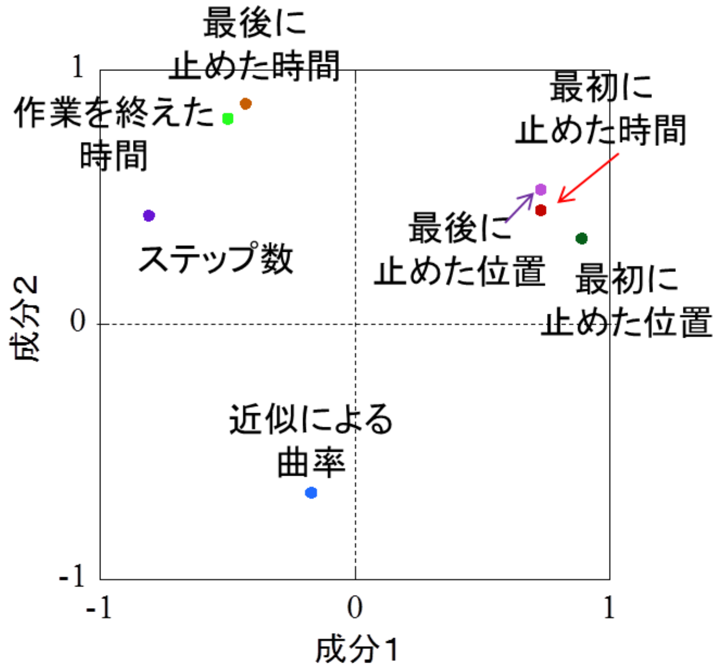


(a)　3 章の被験者のみの場合



(b)　2 章と 3 章の被験者を併せた場合

図 3.13　3 つの被験者群の成分プロット



(c)　2 章の被験者のみの場合

図 3.13　3 つの被験者群の成分プロット

表 3.6　12 回分の試行についての主成分得点の一例

シリンダーの種類		100 ml				20 ml				10 ml			
試行回		1回目	2回目	3回目	4回目	1回目	2回目	3回目	4回目	1回目	2回目	3回目	4回目
作業者A	成分1	-2.24	-0.82	-1.88	-0.33	-0.50	0.63	-1.38	-0.12	-0.89	1.31	0.91	0.81
	成分2	1.66	-1.25	0.62	-2.23	0.09	0.15	1.19	-0.98	0.78	1.64	-0.07	0.97

表 3.7　滴定操作における状況に関するパラメータの一例

		1st trial	*2nd trial*	*3rd trial*	*4th trial*	*5th trial*
person A	V	3.5×10^{-1}	3.5×10^{-1}	3.5×10^{-1}	3.5×10^{-1}	3.5×10^{-1}
	L	1	2	3	4	5
	M	0.0	5.7	3.0	7.2	8.1
	N	0	60	114	171	210

4　実験テキストからの操作のコード化と自己組織化マップとしての表現

4.1　背景

　大学実験室においてなされている研究は多岐に渡り、各大学に、各学部や研究科、学科や専攻、各研究室があり、さらに研究者ごとに各研究テーマがあることを踏まえると、多種多様な実験作業が存在するといえる。ひとつひとつの実験作業が複数の実験操作で構成されることを考えると、実験操作の種類はさらに多いものと考えられる。これら多種多様な実験操作を共通の指標で情報化することは、実験操作における各作業者の行動シミュレートに向けた有用な情報となり得るものである。しかし、これまで、実験操作を分類し、統一的な形で実験操作を整理するという試みは殆ど例がない。

　一方、テキストマイニングは、テキストを単語やフレーズなどの単位に分割し、それらの出現頻度や共起関係（同時出現）などを集計し、定量的に解析できる手法で、項目や変数によって定型化されていないデータを定量化する手法として有効である。テキストを統計的に分析する分野である計量言語学では、文章を構成する要素である文字や単語、文節、文、段落などについて文学作品のジャンルや著者の特定などについて研究が行われてきた。例えば、Mendenhall の単語の長さの分布と著者との関係性についての論文(Mendenhall, 1887)をはじめ、Yule による文の長さの分布に関する計量的研究(Yule, 1938)がこの分野における初期の研究として代表的な研究と言われている。その後、文章の要素同士や構造についての解析手法として、形態素解析および構文解析(Chomsky, 1957)が開発され、テキストマイニングにおける工程で重要なステップとなっている。形態素解析とは、文章を文法的に意味のある単位の構成要素に分割し、各要素の文法的素性（品詞など）を決定する解析の事であり、構文解析とは、形態素解析によって分割

された要素間の文法的な関係を判定し、結びつけることである。テキストマイニングの手順としては、これらのステップの後、出現頻度や共起関係（同時出現）などの解析が行われ、分割された要素についての情報を得る。テキストマイニングの応用としては、近年マーケティング分野での応用例が多く、サポートセンターにおけるクレームやアンケート調査における自由記述の文章の解析として用いられている(石田、2008)。また、テキストマイニングのアプローチでゲノムデータの解析も行われている(Ray-chaudhuri, 2006)、(金、 2009)。以上のような既存のテキストマイニングは、形式を問わず、テキスト化されれば解析できるという応用性の高さが長所であるが、そのまま実験テキストに適用した場合、同じ単語自体の出現頻度は低く、そもそもデータベースとなるべき辞典に掲載されていない専門用語も多い。また、そもそも単語単位の分析手法のため、本章で目指す実験操作同士の類似性を得ることは原理的に難しい。

そこで本章では、以上の課題を解決する形での実験テキスト向けの新たなテキストマイニングの開発を目指す。文章から実験操作を整理し、操作同士の類似性を可視化するテキストマイニングの設計と実装をした後に、実際の実験テキストの Friedel-Crafts 反応実験を対象に検討する。設計と実装においては、文章における動詞に着目し、文章を実験操作に分割する。その後、分割された各実験操作を評価することで、各実験操作を情報化する。このような手順で情報化された各実験操作は、情報科学における既存の手法によって、それらの類似性を可視化することができ、本論文では、その一例として、自己組織化マッピングによる実験操作同士の類似性の可視化を検討する。さらに、実験操作が連続的に繋がった実験作業を表現する手法としての検討を行う。一方、開発したテキストマイニング手法の評価を行い、現時点の適用範囲と拡張性に向けた今後の展望についても議論を行う。実験作業の拡張性については、Friedel-Crafts 反応実験以外の実験作業について行い、テキストの表記の違いについての拡張性については、同じ Friedel-Crafts 反応実験の他のテキストと記述について比較を行う。また、実験操作の連

続体としての実験作業へ展開した場合の課題についても、同じ Friedel-Crafts 反応実験を対象とした既往の研究例の結果と比較することで考察を行う。

4.2 実験テキスト向けのテキストマイニングの設計と実装

4.2.1 実験操作に分割する手順

テキストマイニングでは、まず文章を最小単位に分ける必要がある。既存のテキストマイニングでは、形態素解析と呼ばれる解析によって、形態素と呼ばれる単語に近い形にまで分割する工程がある。しかし、4.1 節で記述した通り、本章では単語に関する情報ではなく、実験操作についての情報を得ることを目的とするため、実験操作を最小単位とする必要がある。そこで以下の手順で実験操作に分割することとした。

まず、文章を動詞の箇所で分割し、その動詞までの部分を 1 つの塊とする。続いて、各動詞を「加える(A 型)」、「混ぜる型(M 型)」、「待つ型(W 型)」、「つなげる型(J 型)」の 4 つに大別し、その 4 つの動詞型に該当した場合は、その塊を 1 つの実験操作とする。該当しなかった場合は、「加熱還流する」のように、その動詞の意味からさらに複数の動詞に分割し、各動詞が 4 つの動詞型に該当するか確認する。該当しない動詞がなくなるまで複数の動詞への分割と動詞型の確認を繰り返す。以上の手順をまとめたものを**図 4.1** に示す。

4.2.2 文字列化の手順とその評価基準

続いて、4.2.1 項で分割された各操作を項目で評価し、文字列で表現することを目指した。「目標とする状態を目指して状態を近づけていくこと」と定義された操作を評価する上で、何をするかを表す動詞とどこまでするかを表す目標値に関する事柄、どのようにするかを表す副詞的制約を加えた 3 つの観点に着眼した。

動詞については、操作型という項目を設定し、前項で設定した A 型、M 型、W 型、J 型の 4 つに分類し、それぞれ A、M、W、J とコード化した。

目標値については、知覚可能性と不確定性、要求精度という 3 つの項目を用意し、評価した。知覚可能性とは、操作を開始する時点で目標値が指定線やマーキングなどとして知覚できるか、目標値に到達した時点でないと知覚できないかということであり、例えば、液体を指定線まで入れる場合は、指定線が開始時に見えるため、知覚可能だが、固体を電子天秤を用いて量り取る場合は、重量が指定量に達した段階で、天秤の表示として視覚化できるが、開始時にはできないため、知覚不可能と見なされる。また、目標値を知覚を伴わずに行える場合は、この項目に関しては、関係ないと見なされる。知覚可能な場合は a、関係ない場合は b、不可能な場合は c の文字がそれぞれ与えられるとした。目標値の不確定性とは、テキストに書かれた文面に曖昧さがあり、作業者によって解釈の違いが生じうるという意味である。例えば、「100 ml」や「10 g」は曖昧さではないが、「淡黄色になったら」という表現や「十分混合したら」という表現には、曖昧さが残る。前者は明確であると見なされ、この項目は a、後者は曖昧であると見なされ、c の文字が与えられる。また、どちらの記載もない場合は関係ない場合として処理され、この項目は b となる。要求精度とは、文面において目標値の精度についての記述があるかどうかであり、「正確に」や明確に「100 ml」などと数値で表記されている場合は正確であるとし、a とした。一方、「約 10 g」や「一時間程度」、「一晩」などといった表記がある場合は、大体であるとし、c とした。

副詞的制約については、目標値までどのように行うべきかについての注意事項がテキストに付加されているかどうかに注目し、付加されている場合には、その内容をコード化した。具体的には、目標値まで連続的に変化させるか断続的に変化させるか、激しく行うか穏やかに行うか、一気に行うか少しずつ行うかの 3 つの項目を用意した。例えば、

「激しく撹拌する」や「ゆっくりと滴下する」といった表記があった場合、激しくや少しずつに相応することとなる。主に、液体を量り取る場合には連続的にメーターは動くため、連続的であるとし、固体を量り取る場合には断続的にメーターが動くため、断続的であるとした。また、断続的な場合、激しく行うか穏やかに行うかの評価を行い、連続的な場合、一気に行うか少しずつ行うかの評価を行った。

以上の 7 つの項目とそのコード化の仕方をまとめたものを**表 4.1** に示す。

4.2.3　文字列からの bit 化変換

4.2.3 項で文字列として表現されたものを本項では、情報科学において、処理しやすい bit 表現に変換した。bit 化とは、情報処理において、頻繁に用いられる方法であり、0 と 1 の二つの数字で表すことである。コンピュータ処理においては、この bit 化された二進法での表現が不可欠である。今回の場合、**表 4.1** に示したように、4.2.3 項で設定した項目が、動詞の操作型については 4 つの選択肢、その他 6 つの目標値や副詞的制約については 3 つの選択肢があるため、取り得る文字列は 4×3^6=2916 通りであり、2^{11}=2048 以上で 2^{12}=4096 より小さいため、0 と 1 で bit 化するには最小で 12 ケタの bit で表現できる。しかし、各項目を一塊のブロックと考えた方が意味として理解しやすいため、1 つの項目につき 2 ケタの bit で表現し、2 ケタずつの 7 つのブロック、計 14 ケタの bit で表現することとした。

2 ケタずつの 7 つのブロックを用意し、各ブロックにおいて、A や M、a や c といった文字を bit 化する**表 4.2** のような変換表を作成した。この変換表によって、7 つの文字列を 14 ケタの bit で変換する。最初のブロックにおける 2 つの数字は操作型に相当し、A 型の場合は 00、M 型の場合は 01、W 型および J 型の場合はそれぞれ 10、11 となる。2 つ目のブロック(3 つ目および 4 つ目の数字)は目標値の知覚可能性を表し、知覚可能である a の場合は 00、関係ない b の場合は 01、知覚不可能である c の場合には 10 とな

る。同様にして、他についても、a の場合 00、b の場合 01、c の場合 10 となる。このようにして、14 個の 0 と 1 の配列として bit 化する。

4.2.2、4.2.3、4.2.4 の手順をまとめたものを**図 4.2** に示す。

4.3　Friedel-Crafts 反応実験を例とした実験テキストからの実験操作の解析

本節では、ある大学の化学生命系の有機実験で実際に使用されている実験テキストの Friedel-Crafts 反応実験を対象とし、4.2 節で行った設計・実装に基づいて、実験テキストからの操作特性のマッピングの実証を行う。このことで、操作を類似性によってマップとして可視化することを目指す。

4.3.1　実験操作への分割

実験テキストの原文を**図 4.3** に示す。これを**図 4.2** に手順に従って、実験操作への分割を行った。

まず、動詞の箇所で分け、続いて、実験操作に分割した。その結果、**図 4.4** に示すように、19 個の文、および 30 個の実験操作に分割された。

4.3.2　文字列化および bit 化

続いて、分割された各実験操作の文字列化を行った。行われた文字列化の結果の一例を**図 4.5(a)**、**(b)**に示す。**図 4.5(a)**に示すように、「300 ml 三ツロフラスコに塩化アルミニウム 25 g を入れる。」という文の場合、入れるという動詞から、動詞型は Add 型となり、目標値は知覚不可能で明確で正確さが求められる、となった。また、副詞的制約は断続的に行うとなり、それ以外の 2 項目は関係がなかった。以上より、7 つの文字列

として A-c-a-a-c-b-b となる。同様にして、「無水酢酸 8.9 g を滴下ロートよりゆっくり滴下する。」という文は、**図 4.5(b)**のように、A-c-a-b-a-c-c という文字列となる。このようにして、Friedel-Crafts 反応実験における各操作を 7 つの文字からなる文字列によって表現した。文字列によって表現された 30 個の操作を時系列的に並べることで、Friedel-Crafts 反応実験としてテキストに書かれた文章を、7 個の文字列が 30 個配列されたものとして表現した。

続いて、文字列の bit 化を行った。その結果を**図 4.6** に示す。右側に書かれた英語の数字 one、two…がそれぞれ、**図 4.4** で分解された各操作の番号に対応する。例えば、one の横に記された 14 個の bit が**図 4.4** の①の操作である「還流冷却器、塩化カルシウム管、・・・」に対応する。

4.3.3　自己組織化マップによる可視化

続いて、14 次元で表現された bit を基に、2 次元上への表現を目指す。そのひとつに、自己組織化マップがある。自己組織化マップとは、1980 年代にコホネンによって開発されたものであり、多次元のデータの分類や解析のためのツールとして知られている(Kohonen、1984)、(Kohonen、1995)、(大北ら、2008)、(徳高ら、2007)、(徳高ら、1999)。自己組織化マップの特徴は、多次元のベクトル集団を学習することで、2 次元のマップ上にそれらのベクトルの関係を写像として可視化することができることである。類似性の高いベクトルはマップ上の近い位置に配置され、類似性の低いベクトルはマップ上で遠い位置に配置される。

基本原理は、競合学習型ニューラルネットワークと同様であり、入力層と出力層の 2 層からなる。コホネンが提案した生物の神経細胞、主に脳の情報処理の仕方についてのモデルを**式 4.1** に示す(Kohonen、1984)。

$$\mathbf{m}_i(t+1)=\mathbf{m}_i(t)+h_{ci}(t)\left[\mathbf{x}(t)-\mathbf{m}_i(t)\right] \quad (4.1)$$

時刻 t で神経細胞（ノード）i が処理している情報処理能力が $\mathbf{m}_i(t)$である。このノードは、$\mathbf{x}(t)$という入力信号に対し、この入力信号を学習して次の時刻 $t+1$ には、入力信号により近い $\mathbf{m}_i(t+1)$を持つようになるということを表している。$h_{ci}(t)$は、学習率係数と近傍関数とで構成される。近傍関数とは、学習する範囲を表し、多くの場合、ガウス型近傍関数が用いられる。学習率係数とは、一回の学習でノードをどれだけ更新するかを表し、通常、学習時間が経つにつれて単調減少する形で表すことが多い(徳高ら、2007)。本稿でもそれに準じて行った。

アルゴリズムの概要としては、まず、出力層にノードを配し、それぞれの入力層をランダムな数値で初期値を設定する。続いて、入力ベクトルと最もよく一致する競合層におけるベクトルを勝者ノードとし、この勝者ノードの近傍のノードを**式 4.1** に従って更新する。これを学習回数分繰り返す(徳高ら、2007)。

今回、トーラス型の自己組織化マップの作製を行った。トーラス型の自己組織化マップは、基本型の自己組織化マップの問題であるマップの隅の部分での学習を改良したものである。基本型の自己組織化マップでは、隅に近い部分では、学習に関する近傍円が形成されないため、学習が行われないという問題があった。そのため、中央付近の方が多く学習が行われ、上下左右に引っ張られやすくなっていた。そこで、マップからはみ出した部分に対して、対称な位置で学習が行われるようアルゴリズムを作成したのがトーラス型である。これにより、均一な学習が行われ、基本型に比べ、正確なマップが形成されると考えられる。今回、学習回数としての条件は 100 万回とし、フリーソフトウエアの Mr.Torus を使用し、トーラス型の自己組織化マップの作製を行った。

得られた結果を**図 4.7** に示す。操作 1～操作 19-2 までの計 30 個の操作が二次元上に

マップとして可視化された。図 4.12 中の one から操作 nineteen-2 までの数字は操作 1〜操作 19-2 に対応する。トーラス型の場合、立体を展開した形で得られ、右端と左端とが実際は繋がったものであり、上端と下端とが繋がったものを切り開いた形となっている。自己組織化マップの性質上、位置関係は互いのノードの性質の近さを表し、グレースケールで表された各ノードの色の違いは、そのノードと周りのノードとの距離の平均値を表したものである。したがって、中央やや左にある two と five とは似た作業である。また中央やや右の six と seventeen2 との間に縦線として縦断している黒い線は、その左右が遠い距離であることを示している。

以上を踏まえ、見てみると、A 型の入れるという操作は、**図 4.8** におけるカラーの部分であり、全体として、A 型は**図 4.8** の四隅に固まって位置しており、同じグループであると考えられる。また、**図 4.8 に**おける(1)の部分は、正確に入れるという操作であり、その中で、液体を入れるか固体を入れるかで分かれている。**図 4.8** における(2)の部分は、ゆっくり入れるという操作であり、(3)の部分に、少しずつ入れるという操作、(4)の部分に、移すという操作が位置している。また、移すという操作が、固体を正確に入れるという操作と近い位置にマッピングされ、似た要素が必要とされる操作であることが示唆された。続いて、他の部分について見ていると、**図 4.9** に示すように、M 型、J 型、W 型という操作型によって、それぞれがクラスター化していることがわかる。また、W 型の中では、時間が大体でよい操作が右側に、正確にしなければいけない操作が左側に並んでいる。時間が正確でなければならない操作の付近にある A 型を見てみると、正確に入れる操作があることから、これらの付近は、正確性が求められる操作であるといえる。また、マップ中央の操作 ten を見てみると、2 層が分離するまで待つという操作 ten は W 型でありつつ、一方で M 型の分液漏斗で振る操作である eleven2 などと近い位置にある。したがって、これら操作 ten は、Mix 型の six や eleven-2 と同じ放っておけない操作としてのグループであると解釈できる。**(図 4.10)**

このように、自己組織化マップによって、操作についての類似性の高さが可視化された。操作の類似性の可視化により、設定した項目のうち支配的な項目が観察できるだけでなく、操作 ten のように、項目として設定していない新たな類似性の発見が得られることが示唆された。

補足として、3 次元の表現についての検討も記す。トーラス型の場合、2 次元の長方形で表す必要があり、歪みを表現することが出来ない。そこで、3 次元の表現を行い、それぞれの操作の位置関係についての確認を行った。フリーソフトウエア blossum_demo を使用し、球面 SOM を作製した。学習回数は当ソフトウエア最大の 1000 回とした。得られた結果を**図 4.11** に示す。

その結果、各操作の位置関係は、トーラス型 SOM とほぼ一致する結果となったが、学習回数が 1000 回と比較的少ないため、今回は参考程度の結果とする。今後、ソフトウエアの更新によって、十分な学習回数を得られることで 3 次元の表現が期待される。

4.3.4 実験作業(実験操作の連続体)の表現

これまで、実験操作同士の類似性について、マップ上に可視化してきた。これら実験操作を操作の順に繋いでいくことで、実験操作の連続体である実験作業を表現することができる可能性がある。そこで、実際に、前節で得られた結果を用いて、操作を順に繋いだ。この際、最も近い距離である操作から次の操作に移るとした。

図 4.12 (a)～図 4.12(f)に、Friedel-Crafts 実験における操作 1～操作 19-2 までの計 30 個の操作の軌道を示す。**図 4.12(a)**に示すように、最初の操作 1 から操作 7-1 までは、右斜め上または左下に進むという軌跡を描いた。その後、操作 7.1 から操作 9 まで、**図 4.12(b)**のように、マップ上で上下に進む軌跡を辿った。**図 4.12(c)**のように、操作 9 から操作 10 まで右横に進んだ後、操作 10 から 12、操作 12 から 14 は、同じ場所を 2 周蛇行した

(図 **4.12(d)**)。その後、操作 14 から操作 16 でやや斜め右横に動き(図 **4.12(e)**)、図 **4.12(f)** にように、操作 16 から最後の操作 19-2 までは、操作 17.2 の箇所を除き、横の動きをした。特に、操作 17.3～操作 19.2 では、全く同じ場所を行ったり来たりするという動きであった。

このように、本章の方法で表現されたマップ上の実験操作を繋いでいくことで、実験操作が連続した実験作業を、マップ上の軌跡として表現できることがわかった。

4. 4　拡張性に向けた評価と展望

本節では、前節までで開発してきたテキストマイニング手法の評価を行い、現時点の適用範囲と拡張性に向けた今後の展望について議論を行う。まず、実験作業の拡張性について、同じテキストに記載された Friedel-Crafts 反応実験以外の実験作業を対象に、動詞に着目して検討する。このことで、他の実験作業への適用可能性について議論する。続いて、同じ実験作業でもテキストの表記が異なる場合が予想されるため、同じ Friedel-Crafts 反応実験の他のテキストと記述について比較を行うことで、テキストの表記の違いについて整理し、一般化を目指す。また、実験操作の連続体としての実験作業へ展開した場合の課題についても、同じ Friedel-Crafts 反応実験を対象とした既往の研究例の結果と比較することで議論する。

4.4.1　他の実験作業への拡張性の検討

これまで Friedel-Crafts 反応実験を対象にテキストマイニングによるマップ化を行ってきたが、本項では、この手法の他の実験作業への拡張可能性を検討するため、4.2.1 項で行った動詞の分類について、検証することとした。対象とした実験は、p-メチルアセトフェノンの合成（Friedel-Crafts 反応）、1,3-ジ-p-トリル-プロペン-1-オンの合成（アルドール縮合）、7-オキサビシクロ[2.2.1]ヘプト-5-エン-2,3-exo-ジカルボン酸無水物の

合成（Diels-Alder 反応）、トリフェニルメタノールの合成（Grignard 反応）、ポリ酢酸ビニル（高分子）の合成の 5 つとし、順に実験 1〜実験 5 と呼ぶこととする。

まず、これらの原文から動詞を全て抜き出した。その中には、「析出し始める」といった対象物質の状態変化を表す動詞や「加え終わったら」といった条件などを表す副詞節内の動詞、「得られた」というような結果を表す動詞、「分離した有機物」のように名詞を修飾する動詞が含まれ、これらは、作業者が行う操作とは関係のない動詞であると考えられるため、分析対象の動詞から除去した。ただし、「減圧蒸留にて得る」といった結果を表す動詞の前に、その結果をもたらす手段が書かれている場合は、その手段を動詞化した。このクリーニングをした結果、得られた動詞を**表 4.3** に示す。これら動詞は、全部で 92 個あり、「入れる」と「加える」のように意味上似ている動詞も多い。

そこで、意味が似ている単語同士を、加える型(A 型)、混ぜる型(M 型)、待つ型(W 型)、つなげる型(J 型)、分ける型(D 型)、洗浄する型(S 型)、見る型(L 型)の 7 つの型で整理した。92 個の動詞を 7 つの動詞型にまとめた結果を**表 4.4** に示す。また、それぞれの実験における各動詞型の数とその合計について**表 4.5** にまとめた。また、それを円グラフで表したものを**図 4.13**、**図 4.13(1)〜図 4.13(5)**に示す。合計としては、加える型が一番多く全体の 30%を占めており、分ける型が 2 番目に多く約 20%である。個々の実験で見ても、加える型が多い傾向はあるが、各型の割合はそれぞれの実験で異なっている。

続いて、7 つの動詞型について、作業者が行う操作を直接表す動詞であるか精査した。加える型(A 型)、混ぜる型(M 型)、待つ型(W 型)、つなげる型(J 型)、は行う操作を表していると考えられるが、分ける型(D 型)、洗浄する型(S 型)は、どのように分けるかが直接的な操作を表し、洗浄するには、複数の操作が必要であると考えられる。また、見る型(L 型)については、実際に手などを使って操作をするわけではない。そこで、分ける型(D 型)、洗浄する型(S 型)については、さらに分割した。また、見る型(L 型)については、対象としない動詞とし、除去した。分ける型(D 型)の分割については、直接行って

いることを考慮し、分離するのをただ待つ場合は待つ型(W 型)、ロ別や吸引ろ過のように、装置を組み立てて、物質を入れ、分離されるのを待つ場合はつなげる型(J 型)と加える型(A 型)、待つ型(W 型)の合併型、蒸留や還流のように、装置を組み立てて物質を設置し､待つ場合はつなげる型(J 型)と待つ型(W 型)の合併型と見なせると考えられる。

これまでの手順を図示したものを**図 4.14** に示す。

また､**図 4.2** の手順に従って､4 つの動詞型に整理された結果を**表 4.6** に示す。また、それを円グラフで表したものを**図 4.15**、**図 4.15(1)**～**図 4.15(5)**に示す。**図 4.15** に示すように、全体としては、加える型(A 型)が 40％を占め、待つ型が 3 分の 1 程度であり、つなげる型と混ぜる型が 10%台となる結果となった。また、**図 4.15(1)**～**図 4.15(5)**に示すように､各実験における 4 つの動詞型の割合は､実験 1 と実験 4 は非常に似た割合となった。

このように、対象とした 5 つの実験作業に含まれる 92 個の動詞の全てを、以上のような手順によって 4 つの動詞型に大別できることがわかった。今後、さらに対象とする実験作業を増やしていき､4 つの動詞型以外の動詞型の導入について検討することが期待される。

4.4.2　テキストの表記の違いについての拡張性の検討

前項では、他の実験作業への拡張性を検討したが、同じ実験作業でも、テキスト作成者の違いなどによって、テキストの表記が異なる場合がある。そこで本項では、これまで検討してきた Friedel-Crafts 反応実験を対象に､本章で用いてきたテキストと､他のテキストの文章を比較し、マップの結果への影響について考察する。ただし、これまでの p-メチルアセトフェノンを合成する Friedel-Crafts 反応実験と全く同じ物質を使った別のテキストは見つからなかったため､違う物質での Friedel-Crafts 反応実験の 2 種を対象に行った。1 つ目は、市販の書籍「若手研究者のための有機合成ラボガイド（山岸ら、

2010）」に記載されている 4-メトキシ-3-メチルアセトフェノンの合成であり、2 つ目は、市販の書籍「有機化学実験書（漆原ら訳、1959）に記載されているベンゼンと無水酢酸からアセトフェノンの合成である。原文については **Appendix-4** を参照。

これら 2 種とこれまでの Friedel-Crafts 反応実験の計 3 種の実験を動詞で大まかに塊に区切った。本項では、比較が目的であり、4.2.1 で手順化した実験操作まで細かく細分する必要がないと考え、実験操作よりも大きな塊までの分割とした。分割された塊について、互いに対応するもの同士を繋いだ図を**図 4.16** に示す。その結果、48 個の塊のうち、73%に相当する 35 個が対応する塊となり、扱う物質が異なるにもかかわらず、似た実験作業であることが現われているといえる。

続いて、塊同士が全て互いに対応関係にある**図 4.16** の右上の部分である p-メチルアセトフェノンの合成の①～⑥とベンゼンと無水酢酸からアセトフェノンの合成の(1)～(8)について詳しく比較した。この部分を抜き出したものを**図 4.17** に示す。**図 4.17** の左右の対応関係を確認すると、大きく以下の 3 つの相違点があることがわかる。

1 つ目は、左側の p-メチルアセトフェノンの合成の①に対して、右側のベンゼンと無水酢酸からアセトフェノンの合成の(1)～(3)の 3 つが対応していること、2 つ目は、左側の②と右側の(5)、左側の③と右側の(4)の部分が交差していること、3 つ目は、左側の⑤の「ゆっくり」の部分と右の(7)の「半時間かかって」という部分の表現が異なることである。1 つ目の違いは、実験を始めるときに、実験器具がどのような状態であるかによるものであり、左側は、始めからいくつかの器具同士が繋がれた状態でスタートしており、右は器具同士がバラバラな状態から始めるため、このような違いが生じていると考えられる。このように、同じ実験作業でも、詳しく記述することによる表記の違いが存在することがわかった。また、この場合、マップ上では位置や移動が変わると考えられる。

2 つ目は、順不同の実験操作が入れ替わって書かれているということによる違いであ

る。このように、同じ実験作業でも、順番が入れ替わって記述されることがあることがわかった。また、この場合、マップ上では各位置は変化しないが、移動が変化すると考えられる。

3 つ目は、表現の仕方や作成者の性格による違いである。左側の書籍は、日本人が書いたものに対して、右側の書籍はドイツ人の Gattermann と Wieland が記したものを漆原らが訳したものである。したがって、半時間という明確な表現を好むのは、国民性や文化的背景、個人の性格といった要因が影響しているよるものと予想される。このように、同じ実験内容でも、各実験操作の表現の仕方という点で表記に違いが生じることがわかった。この場合、マップ上では位置が変わる、または移動の仕方が変化すると考えられる。

以上のように、(i) 詳しい記述による実験操作の細分化、(ii) 実験操作の順番の入れ替え、(iii) 実験操作の表現の仕方の違いという 3 つの点において、同じ実験作業でもテキストの表記が異なりうることがわかった。以上の 3 つの点を一般化すると、ある実験作業が P、Q、R の 3 つの実験操作で構成されており、その順に表記されたものを、P-Q-R と表現するとする。(i)は、例えば Q の実験操作の表記が変わった場合、P-Q1-Q2-R となることを意味している。(ii)は、例えば、Q と R の順番が入れ替わって表記された場合、P-R-Q となることを意味している。(iii)は、例えば、Q の表現が Q’になり、P-Q’-R となることを意味している。

今後も、表記の違いに着目して、多くの実験作業を検討することで、本項で行った 3 つの点での整理についての十分性の検証を行っていくことが望まれる。

4.4.3　連続性に関する表現に関する評価

本項では、4.3.4 項で行った連続性に関する表現についての拡張性の検討として、同じ Friedel-Crafts 反応を対象にして、各実験操作を構成する因子の抽出を行った既報の研

究例(主原ら、2011)での結果と比較を行った。主原らが行ったこの報告では、17 名の学生が Friedel-Crafts 実験を行う様子をビデオ撮影し、化学実験に精通する評価者による評価を統計的手法で解析することで、実験を構成する要素として「予測力」、「技術力」、「観察力」の 3 つの因子を抽出した。さらに、Friedel-Crafts 実験の一部を 9 つの作業工程に分割し、各工程に対する評価者による評価を統計的手法によって、これら 3 因子と各作業工程との関連を調べた。その結果が**表 4.7** である。**表 4.7** における⑧⑨は、本章でいう操作 9, 10 に相当し、マップ上での軌跡は横に動く箇所である。この箇所は、操作 10 までで唯一横に動く箇所であり、本章でのマップ上での動きと、既往の報告の表 4.7 内の「予測力」は何らかの関連がある可能性がある。また、他の要素「技術力」や「観察力」は、本章でいう厳密さや待つという動詞型に近い概念であり、これらが関連性を持っている可能性がある。しかし、「予測力」が求められるとされた①（本章でいう操作 1,2）はそのような動きをしていない。これは、本章の実験操作の分割と既往の報告の分割が 1 対 1 対で対応していないことによることや、本章のテキストマイニングが操作同士の関係性を考慮していないことが影響していると考えられる。

このように、本章で行ってきたテキストマイニングの手法は、それぞれの実験操作を独立なものとして扱っているが、実験操作の連続体へ展開した場合、操作同士の関係性を議論していくことが必要であると考えられる。

4.5　まとめ

本章では、実験テキスト向けの新たなテキストマイニングの開発について検討した。文章から実験操作を整理し、操作同士の類似性を可視化するテキストマイニングの設計と実装を行い、実際の実験テキストを用いて具体的に検討した。設計と実装においては、文章における動詞に着目し、文章を実験操作に分割する手順を作成した。その後、各実

験操作を情報化するために、分割された各実験操作を評価する方法を作成した。

具体的な検討としては、化学系の学生実験で行われる Friedel-Crafts 実験を例として、実験テキストの情報から、各操作をコード化（情報化）し、操作の類似性を自己組織化マップとしての可視化を行った。

Friedel-Crafts 実験の前半部分についての実験テキストを 30 個の操作に分割し、各操作を動詞のタイプやどこまで行うかという目標値、その操作の制約となる副詞について計 7 つの項目を設定し、評価した。その結果、A-c-a-a-c-b-b などといった 7 つのアルファベットの文字列として、各操作が表現された。続いて、これら文字列に対して bit 化を行うことで、0 と 1 から構成される bit を得た後、ソフトウエアを用いて自己組織化マップによる表現を行った。その結果、30 個の各操作が 2 次元上にマッピングされ、操作の類似性の高さが可視化された。マップ上において、同じ操作型の操作は近い場所に集約されており、操作型が支配的な項目のひとつであると考えられる。その中で同じ操作型の操作は、副詞的な制約などの違いによって、異なった場所に位置された。また、設定した項目以外に、操作 ten が属すると考えられる、放って置けないグループのように、項目として設定していない新たな類似性の発見が得られることが示唆された。

加えて、実験作業を操作の連続体として捉え、マップを用いることで、実験作業をマップ上の操作を連続的に繋がった軌跡として表現した。

一方、テキストマイニング手法の評価を行い、現時点の適用範囲と拡張性に向けた今後の展望について議論を行った。まず、実験作業の拡張性について、同じテキストに記載された Friedel-Crafts 反応実験以外の実験作業を対象に、動詞に着目して検討した結果、本章で設定した 4 つの動詞型で他の実験作業における動詞も分類できるできることがわかった。したがって、本章での動詞の分類の有効性が示されたと言える。続いて、同じ実験作業でもテキストの表記が異なる場合についての検討として、同じ Friedel-Crafts 反応実験の他のテキストと記述について比較を行った結果、(i) 詳しい記述による実験

操作の細分化、(ii) 実験操作の順番の入れ替え、(iii) 実験操作の表現の仕方の違いという 3 つの点において、同じ実験作業でもテキストの表記が異なりうることがわかった。さらに、同じ Friedel-Crafts 反応実験を対象とした既往の研究例の結果と比較することで、実験操作の連続体としての実験作業へ展開した場合、操作同士の関係性を議論する必要があることがわかった。今後、これらを踏まえて、拡張を行っていくことが期待される。

また、本章の手法の精緻化として、本章における bit 化のプロセスである分割や項目化の妥当性や任意性に関して、更なる項目の追加や、文章から一意に決まらず任意性がある場合の扱いについて検討することも期待される。

さらに、そのマップに作業者のパラメータの情報を色で表現して加えることで、ホットマップによって、その作業者がある実験作業において気を付けるべき脆弱なポイントを可視化するツールとしての応用も期待される。

また、本章の手法の応用として、作業者に実験後、実験操作を文章化してもらい、それをマッピングすることで、理解についての脳内マッピングの作成として活用することができると考えられる。この作業者の理解についてのマッピングは、元のマッピングと比較することで、理解度を測るツールとしての活用が期待される。

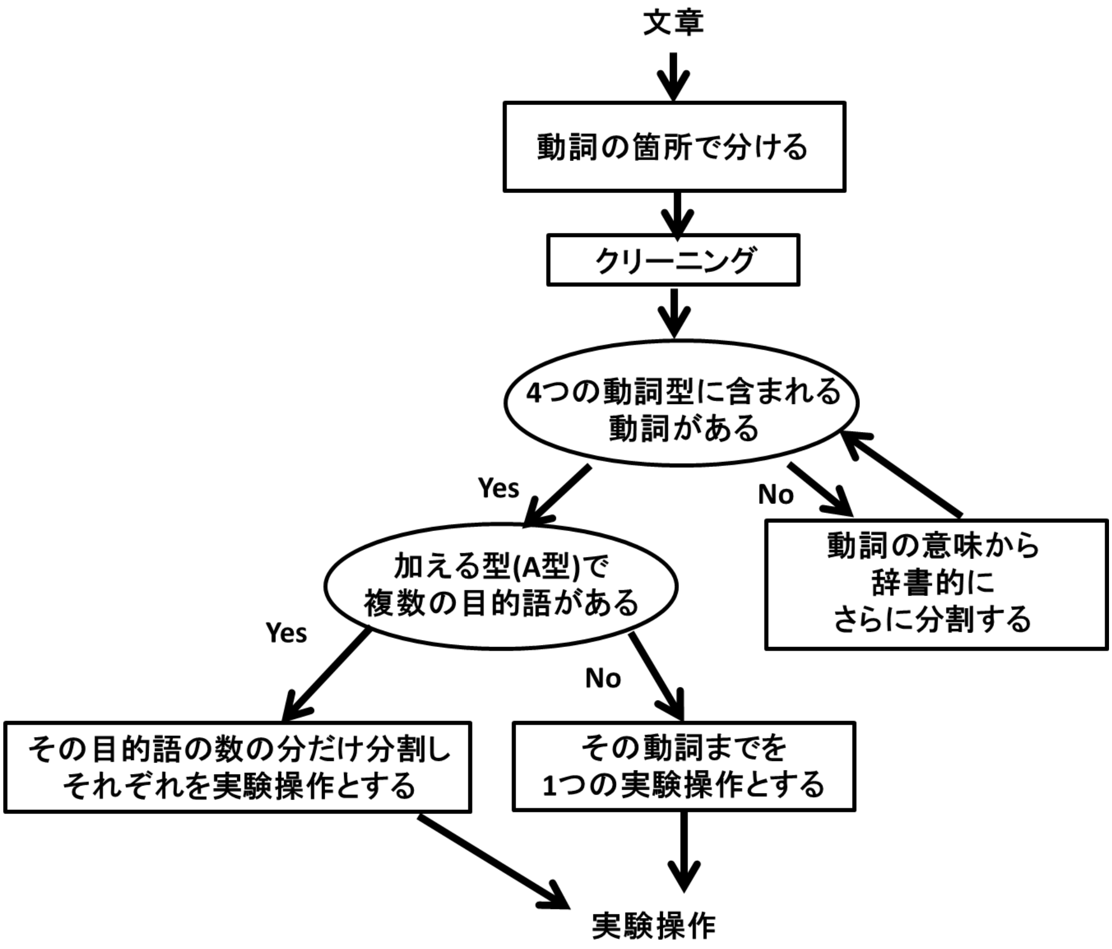


図 4.1　文章から実験操作までの分割の手順

表 4.1　コード化に関する 7 つの項目

動詞	操作型	Add(A): 加える、移す、量り取る、注ぐ Mix(M): 撹拌する Wait(W): 乾燥（加熱、冷却）するまで待つ Joint(J): 器具同士をつなぐ、設置する
目標値	知覚可能性	可視(a)、関係ない(b)、不可視(c)
	不確定性	明確(a)、関係ない(b)、あいまい(c)
	要求精度	正確(a)、関係ない(b)、大体(c)
副詞的制約		連続的(a)、関係ない(b)、断続的(c)
		激しい(a)、関係ない(b)、穏やか(c)
		一気に(a)、関係ない(b)、少しずつ(c)

表 4.2　各文字から bit 表現への変換表

文字列		bit表現
A	→	00
M	→	01
W	→	10
J	→	11

文字列		bit表現
a	→	00
b	→	01
c	→	10

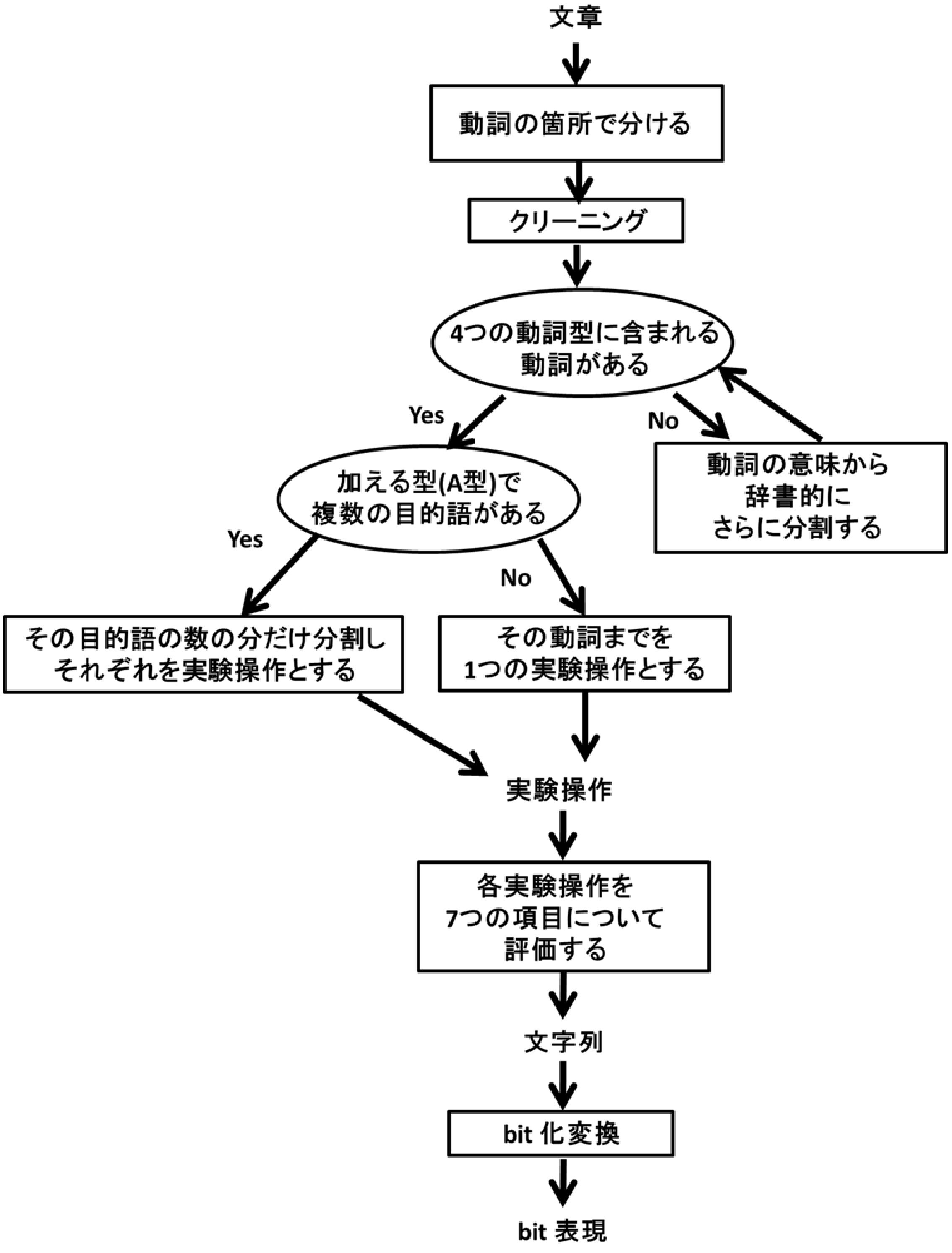


図 4.2　文章から bit 表現までの手順

還流冷却器、塩化カルシウム管（塩化カルシウム管とアスピレーターを穴の開いたベント管でつなぎ、発生する塩化水素を除去する)、２００℃温度計および滴下ロートをつけた３００ｍｌ三ツロフラスコに磁気撹拌子および塩化アルミニウム２５ｇを入れる。つぎに乾燥トルエン７０ｍｌを加え、磁気撹拌子でよく撹拌しながら無水酢酸８．９ｇを滴下ロートよりゆっくり滴下する（この時滴下速度が速いと混合物は発熱して塩化水素が激しく発生するのでアスピレーターの水の流し方を調整して塩化水素が外に漏れないようにする)。無水酢酸を全部加え終わったら、そのまま撹拌しながらオイルバスで３０分間過熱還流する。次に反応混合物を氷水（氷：水＝約９：１程度）の中に注ぐ（この時氷水を撹拌しながら反応混合物をゆっくり注ぐ)。次に氷水に注いだ反応混合物を、５００ｍｌ分液ロートに移し、有機層と水層を分離する。分離した有機層を最初、水（５００ｍｌ×１）で洗浄、分離し最後に水（５０ｍｌ×３）で洗浄、分離したのち、乾燥した１００ｍｌ三角フラスコに有機層を移し、無水塩化カルシウムを入れて一晩乾燥する。乾燥剤をロ別（ひだ折りロ紙を使用し、直接すり付１００ｍｌナスフラスコにロ過する）し、ロータリーエバポレーターでトルエンを追い出したのち、減圧蒸留（操作法はテキストの減圧蒸留および減圧下の沸点を知る方法の項参照）にてｐ－メチルアセトフェノンを得る。

図 4.3　Friedel-Crafts 反応実験における実験テキスト
(有機化学実習および演習、*東京大学出版*)

【実験1：p-メチルアセトフェノンの合成（Friedel-Crafts反応）】

①還流冷却器、塩化カルシウム管、200℃温度計および滴下ロート
をつけた300ml三ツロフラスコに磁気撹拌子（を入れる）
②塩化アルミニウム25gを入れる。
③つぎに乾燥トルエン70mlを加え、
④磁気撹拌子でよく撹拌しながら
⑤無水酢酸8．9gを滴下ロートよりゆっくり滴下する
⑥（無水酢酸を全部加え終わったら、）そのまま撹拌しながら
⑦オイルバスで30分間過熱還流する。
　⑦-1．オイルバスをセットする。
　⑦-2．30分待つ。
⑧次に反応混合物を氷水（氷：水＝約9：1程度）の中に注ぐ。
⑨次に氷水に注いだ反応混合物を、500ml分液ロートに移し、
⑩有機層と水層を分離する。
　⑩-1．分離するまで待つ
⑪分離した有機層を最初、水（500ml×1）で洗浄、
　⑪-1．水を少しずつ加える
　⑪-2．十分振る
　⑪-3．しばらく待つ
　⑪-4．コックをひねって下層を出す
⑫分離し
　⑫-1．分離するまで待つ
⑬最後に水（50ml×3）で洗浄、
　⑬-1．水を少しずつ加える
　⑬-2．十分振る
　⑬-3．しばらく待つ
　⑬-4．コックをひねって下層を出す
⑭分離したのち、
　⑭-1．分離するまで待つ
⑮乾燥した100ml三角フラスコに有機層を移し、
⑯無水塩化カルシウムを入れて一晩乾燥する。
⑰乾燥剤をロ別し、
　⑰-1．漏斗などを設置する
　⑰-2．目的物を入れる
　⑰-3．しばらく待つ
⑱ロータリーエバポレーターでトルエンを追い出したのち、
　⑱-1．エバポレーターを設置する
　⑱-2．しばらく待つ
⑲減圧蒸留にてpーメチルアセトフェノンを得る。=減圧蒸留する
　⑲-1．蒸留装置を設置する
　⑲-2．しばらく待つ

図 4.4　Friedel-Crafts 反応実験における実験操作

（例） ②300ml三ツロフラスコに塩化アルミニウム25gを入れる。

動詞	操作型	Add(A): 加える、移す、量り取る、注ぐ Mix(M): 撹拌する Wait(W): 乾燥（加熱、冷却）するまで待つ Joint(J): 器具同士をつなぐ、設置する
目標値	知覚可能性	可視(a)、関係ない(b)、不可視(c)
	不確定性	明確(a)、関係ない(b)、あいまい(c)
	要求精度	正確(a)、関係ない(b)、大体(c)
副詞的制約		連続的(a)、関係ない(b)、断続的(c)
		激しい(a)、関係ない(b)、穏やか(c)
		一気に(a)、関係ない(b)、少しずつ(c)

②
A
c
a
a
c
b
b

(a) 文章②の場合

図 4.5　コード化の一例

（例）　⑤無水酢酸8．9gを滴下ロートよりゆっくり滴下する。

動詞	操作型	Add(A): 加える、移す、量り取る、注ぐ Mix(M): 撹拌する Wait(W): 乾燥（加熱、冷却）するまで待つ Joint(J): 器具同士をつなぐ、設置する
目標値	知覚可能性	可視(a)、関係ない(b)、不可視(c)
	不確定性	明確(a)、関係ない(b)、あいまい(c)
	要求精度	正確(a)、関係ない(b)、大体(c)
副詞的制約		連続的(a)、関係ない(b)、断続的(c)
		激しい(a)、関係ない(b)、穏やか(c)
		一気に(a)、関係ない(b)、少しずつ(c)

⑤
A
c
a
b
a
c
c

(b) 文章⑤の場合

図 4.5　コード化の一例

```
14
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 one
0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 1 two
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 three
0 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 four
0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 five
0 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 six
1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 seven1
1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 1 seven2
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 eight
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 nine
1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 ten
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 eleven1
0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 eleven2
1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 eleven3
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 eleven4
1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 twelve
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 thirteen1
0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 thirteen2
1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 thirteen3
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 thirteen4
1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 fourteen
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 fifteen
1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 sixteen
1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 seventeen1
0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 seventeen2
1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 seventeen3
1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 eighteen1
1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 eighteen2
1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 ninteen1
1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 ninteen2
```

図 4.6　30 個の操作についての bit 化の結果

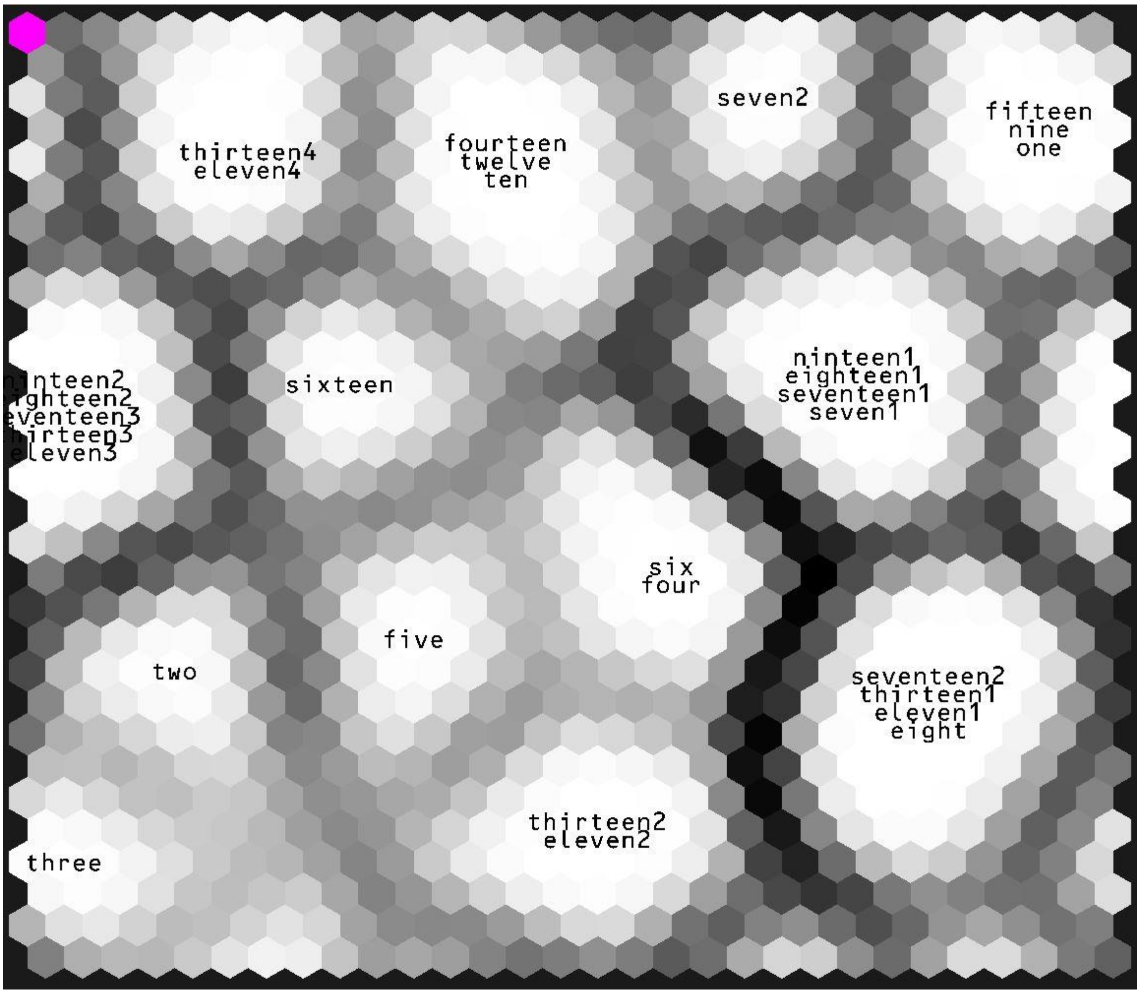


図 4.7　30 個の操作についての自己組織化マップ

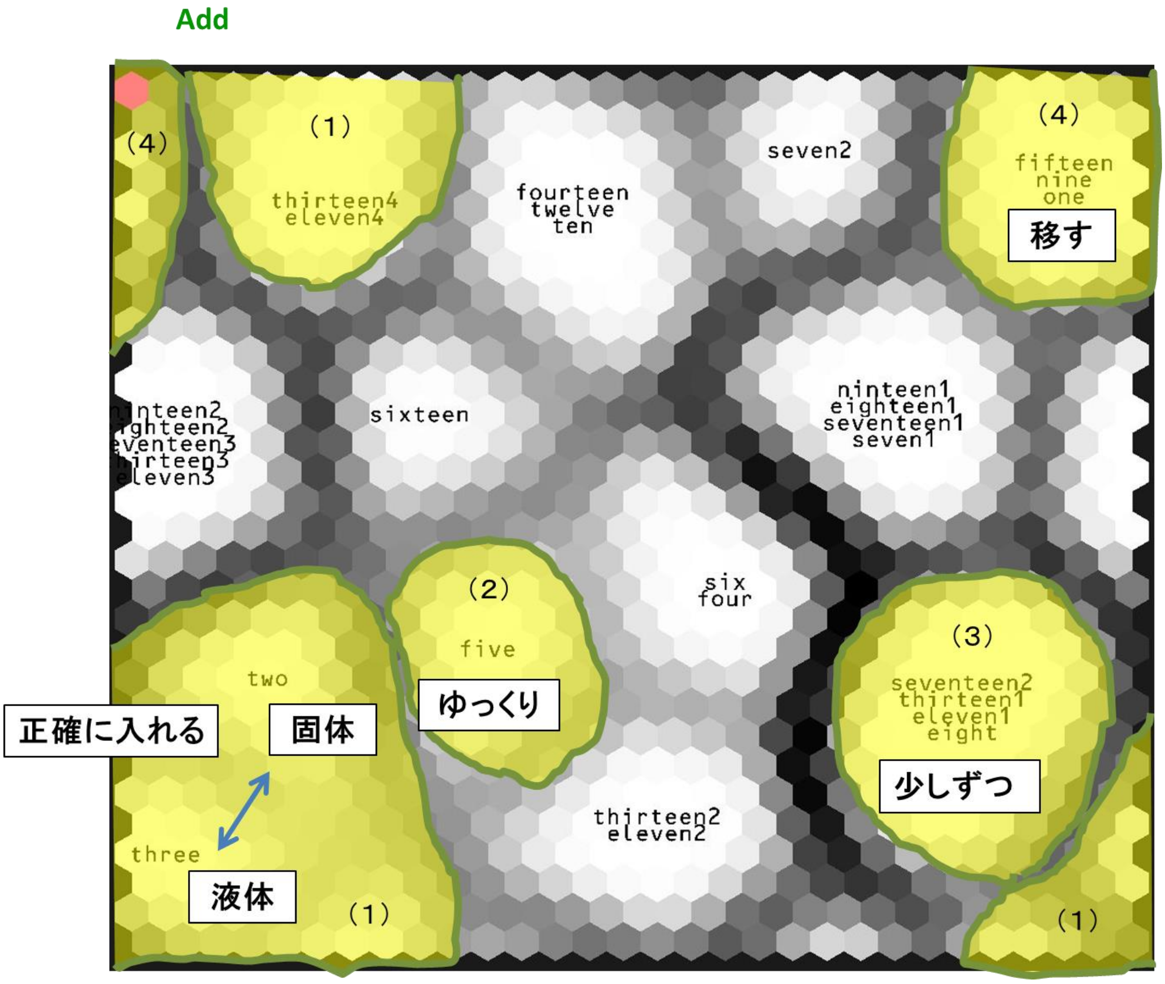


図 4.8　自己組織化マップの操作型 Add 型

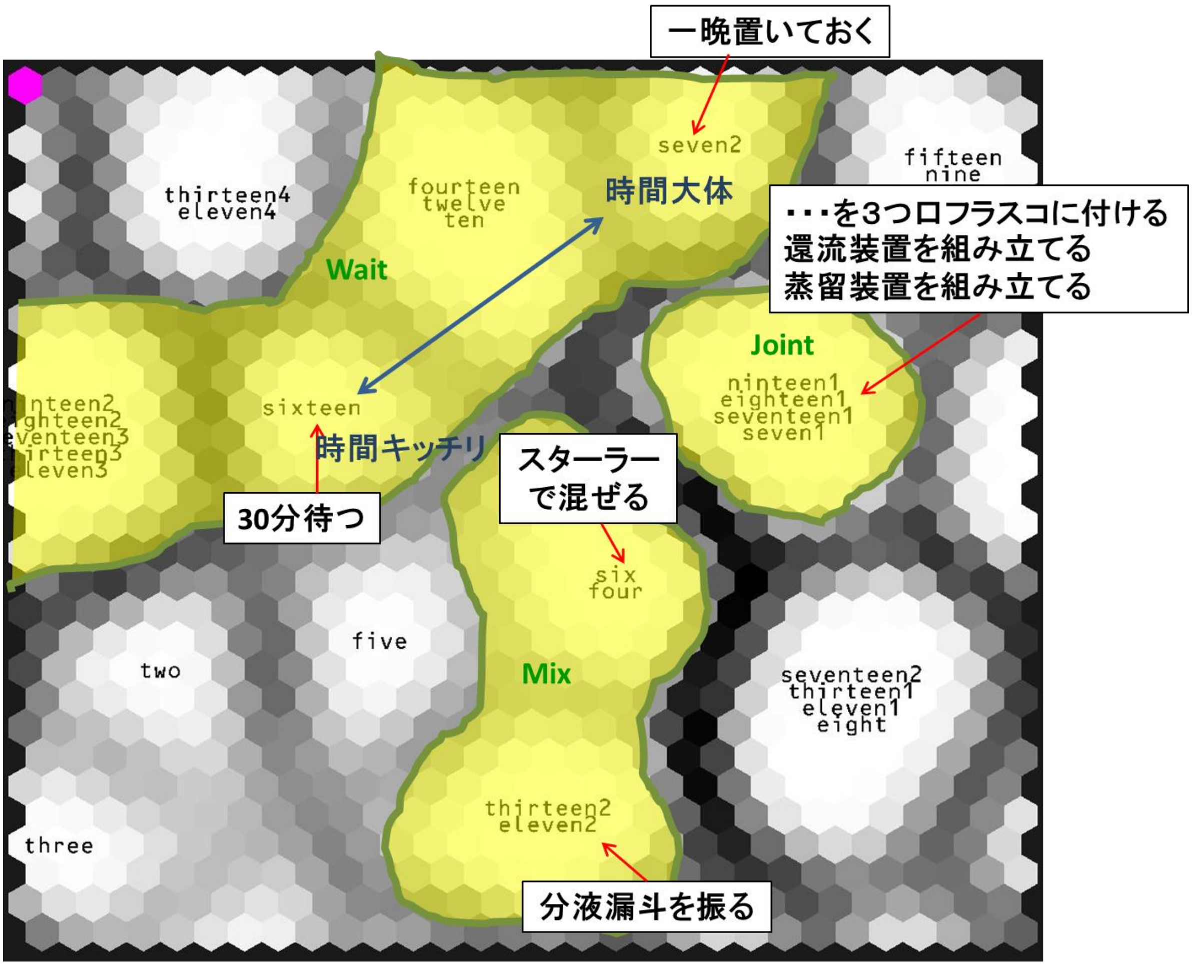


図 4.9　自己組織化マップの操作型 Mix 型、Wait 型、Joint 型

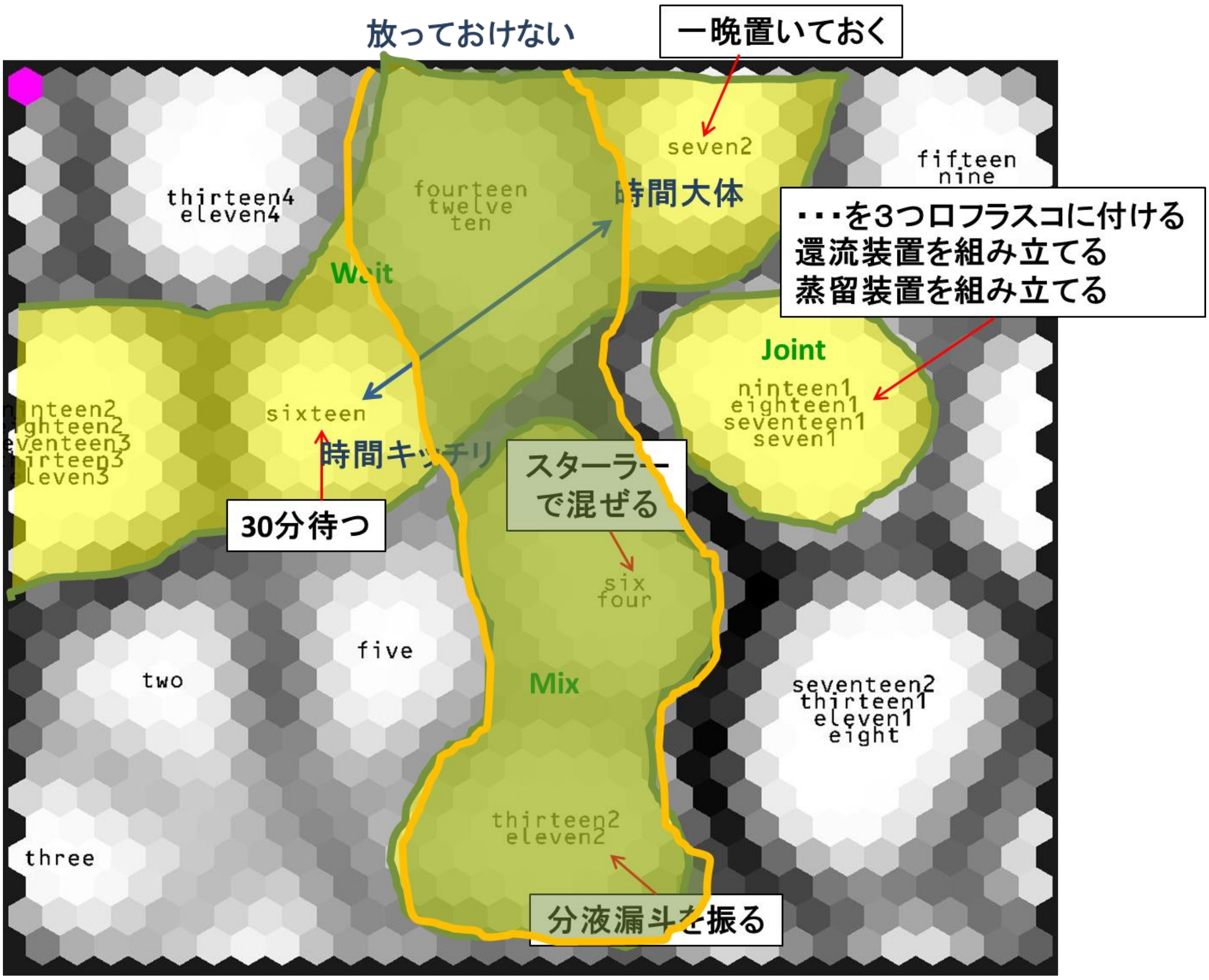


図 4.10　自己組織化マップの放っておけない群

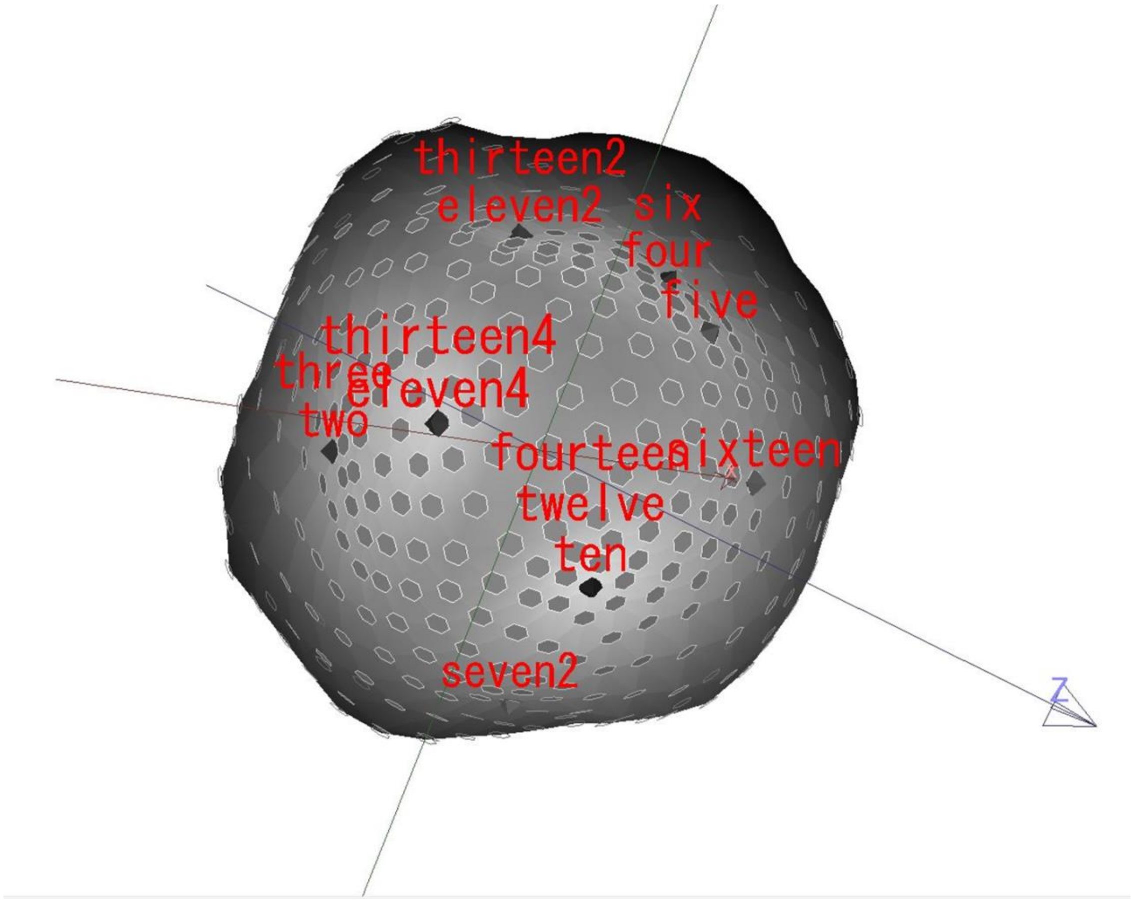


図 4.11　3 次元の自己組織化マップ

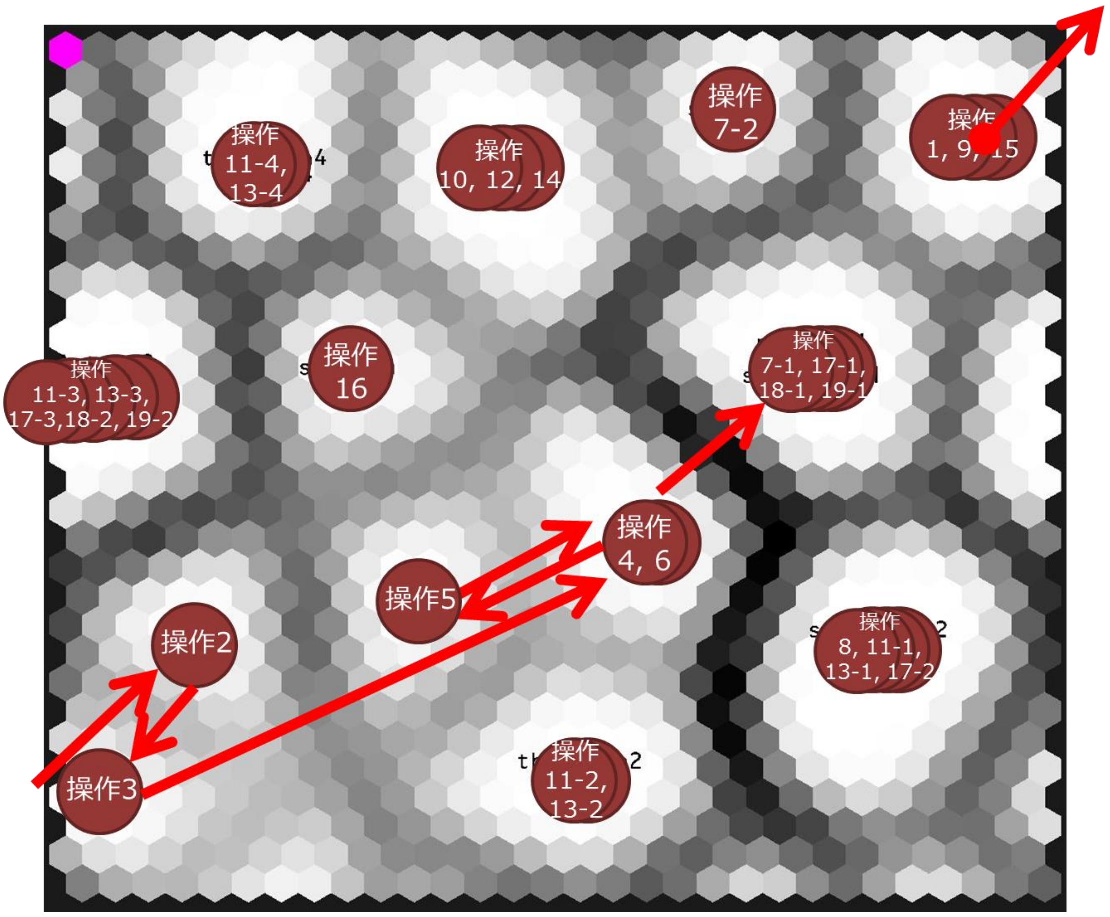


図 4.12　マップ上の軌跡

(a) 操作 1～操作 7-1

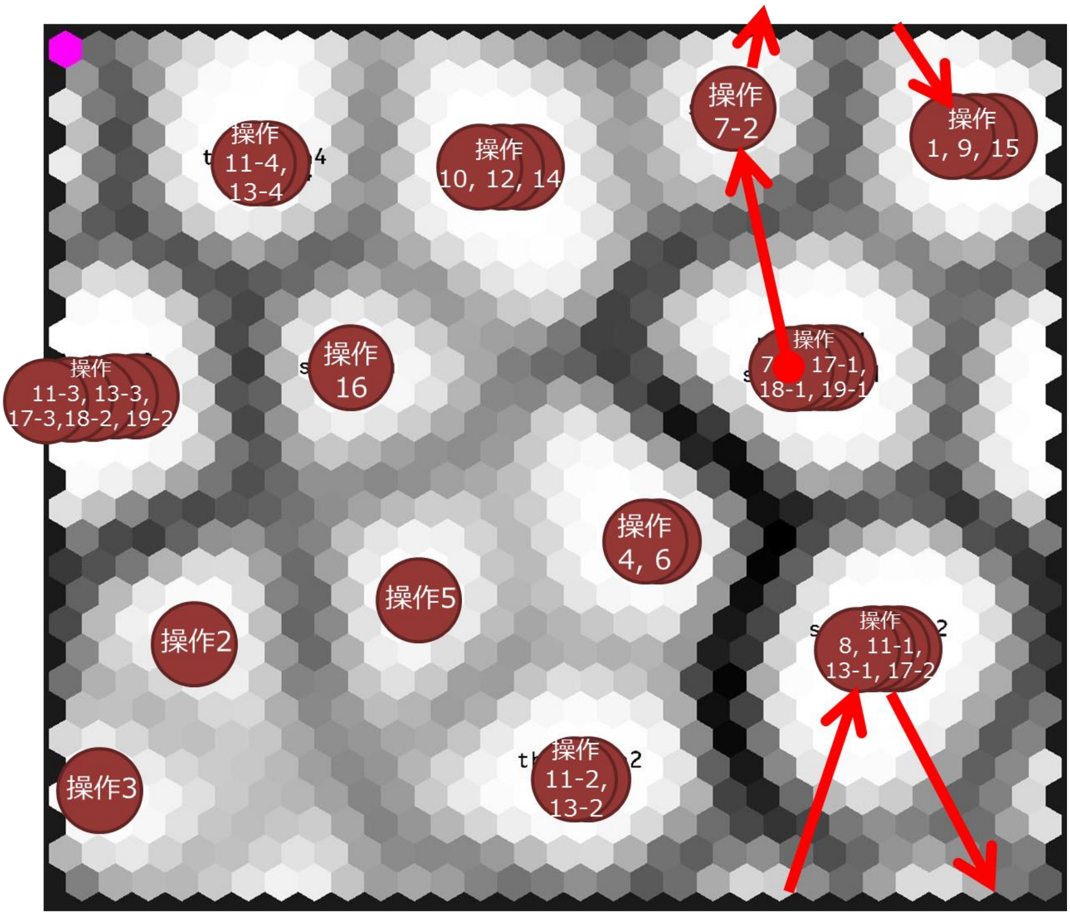


図 4.12　マップ上の軌跡

(b) 操作 7-1～操作 9

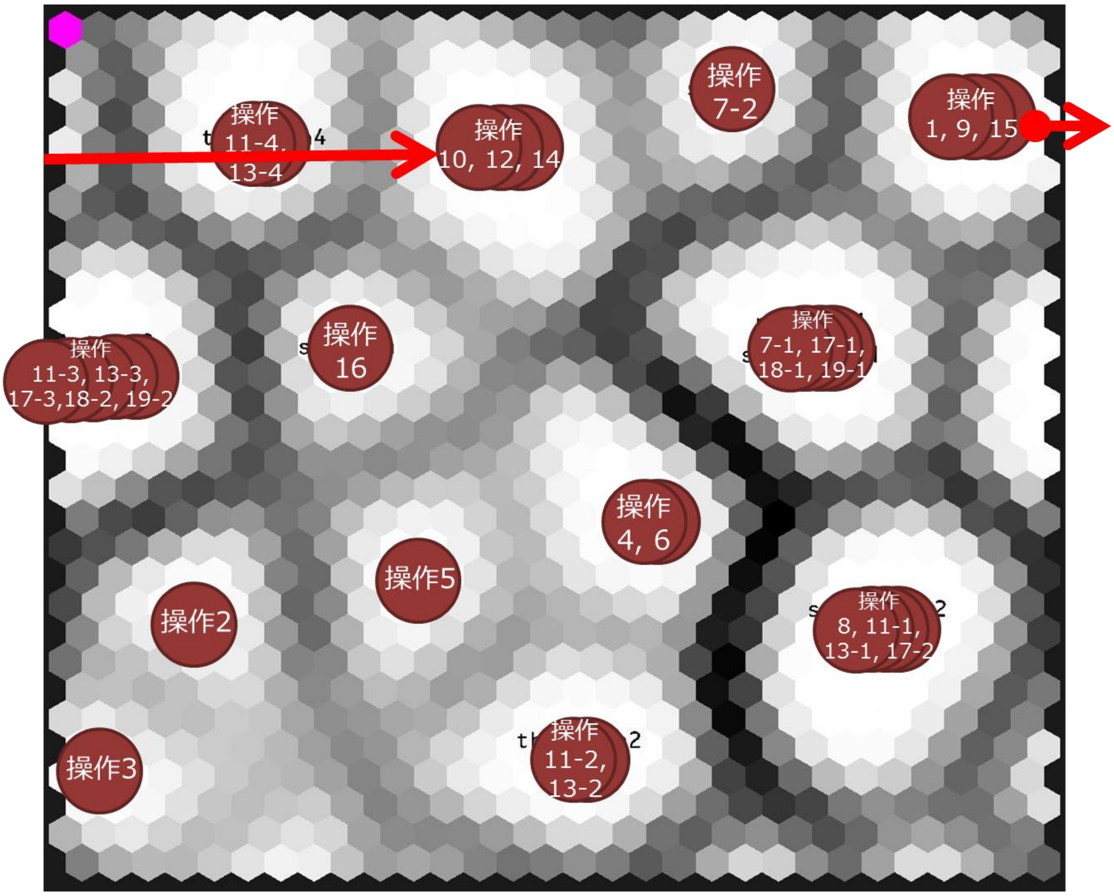


図 4.12　マップ上の軌跡

(c) 操作 9～操作 10

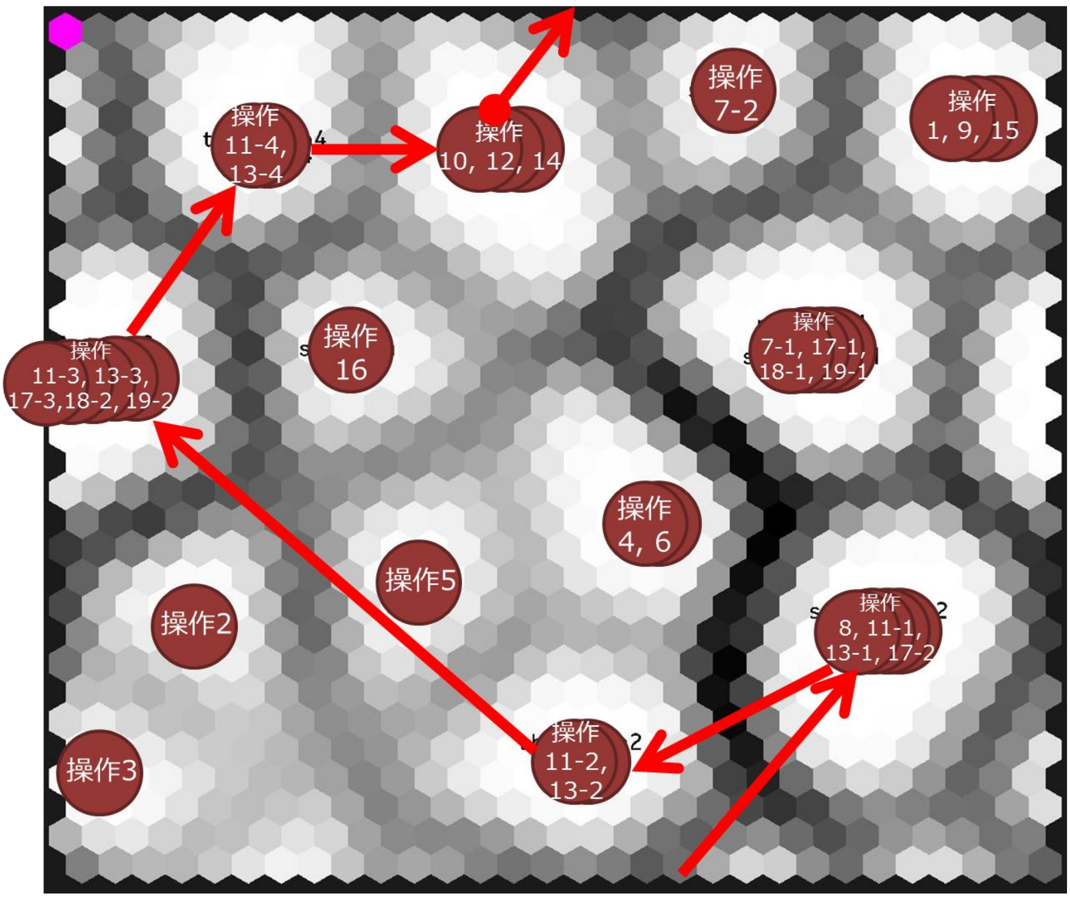


図 4.12　マップ上の軌跡
(d) 操作 10～操作 12、
操作 12～操作 14

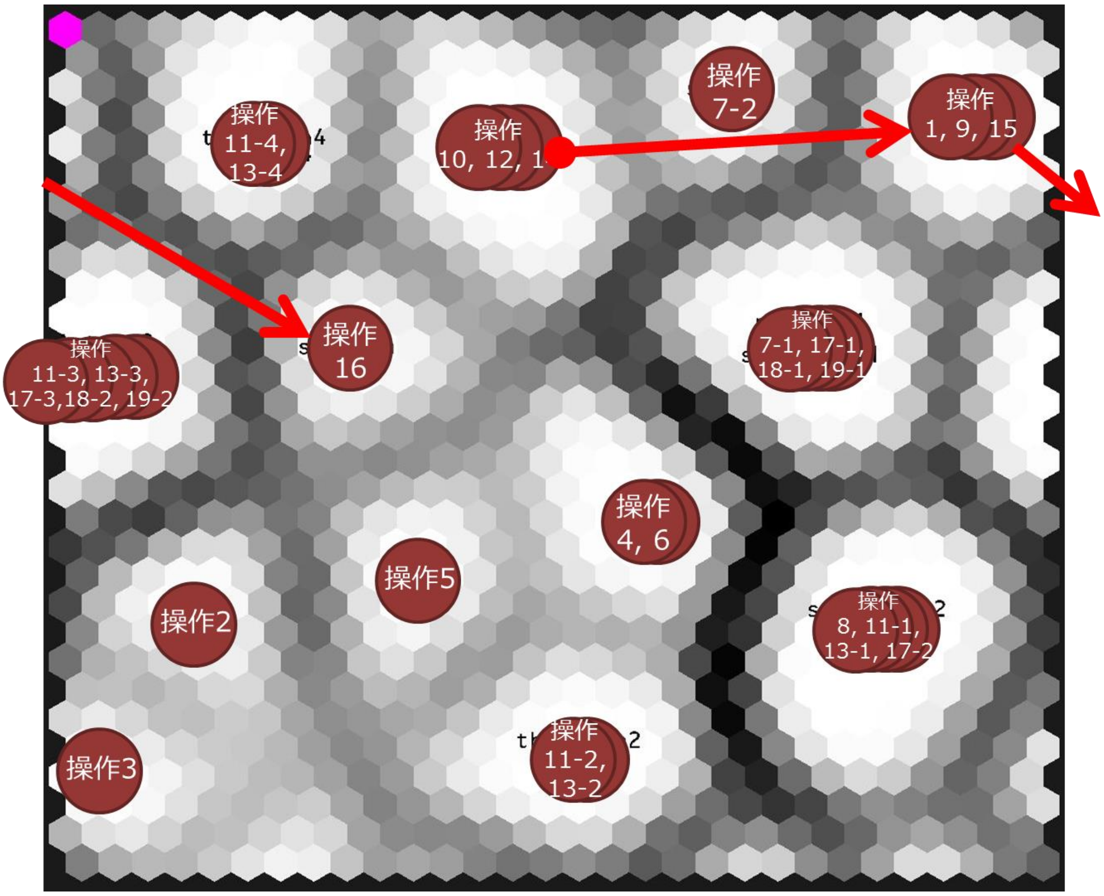


図 4.12　マップ上の軌跡

(e) 操作 14～操作 16

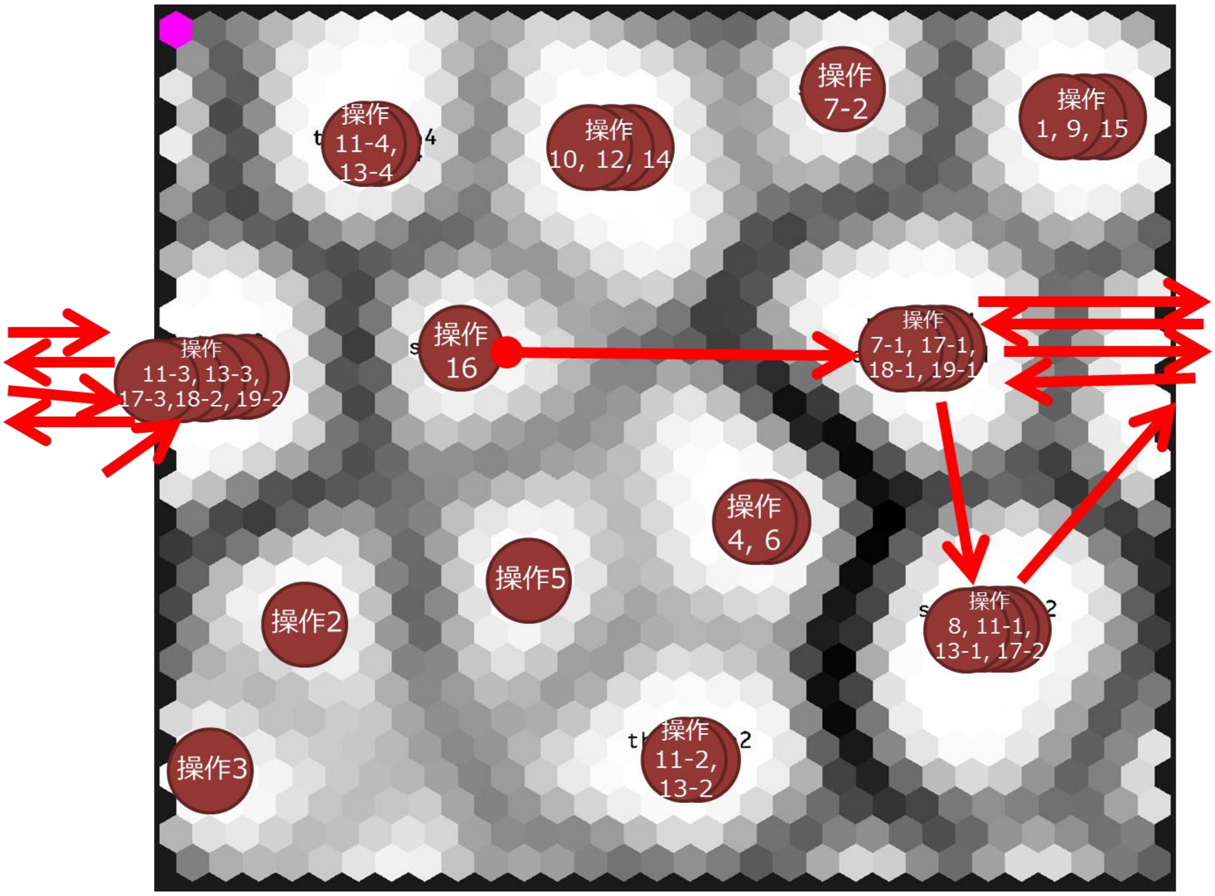


図 4.12　マップ上の軌跡

(f) 操作 16～操作 19-2

表 4.3　実験 1～5 における動詞

実験名	動詞
実験1	入れる、加える、撹拌する、滴下する、撹拌する、還流する、注ぐ、移す、分離する、洗浄する、分離する、洗浄する、分離する、移す、入れる、乾燥させる、ロ別する、追い出す、減圧蒸留にて得る→減圧蒸留する
実験2	測り取る、加える、撹拌する、加える、撹拌する、放置する、ロ別する、洗浄する、洗浄すると得られる→洗浄する
実験3	撹拌する、加える、撹拌する、除く、蓋をする、密封する、放置する、ロ別すると得られる→ロ別する
実験4	取り付ける、付ける、入れる、測り取る、加える、加える、入れる、観察する、開始する、冷やす、加熱する、確認する、冷やす、滴下する、還流する、つける、測り取る、加える、入れる、滴下する、撹拌する、つける、撹拌する、滴下する、分離する、洗う、放置する、ロ別する、留去する
実験5	入れる、撹拌する、加える、撹拌する、観察する、入れる、撹拌する、上昇させる、継続する、上昇させる、保つ、徐冷する、移す、洗う、入れる、流す、洗う、洗う、吸引ろ過する、除く 溶解する、加える、撹拌する、放置する、吸引ろ過する、洗浄する、吸引ろ過する、洗浄する、乾燥させる

表 4.4　実験 1～5 における動詞の種類と動詞型

動詞型	動詞
加える型 (A型)	実験1：入れる、加える、滴下する、注ぐ、移す、移す、入れる 実験2：測り取る、加える、加える 実験3：加える 実験4：入れる、測り取る、加える、加える、入れる、 滴下する、測り取る、加える、入れる、滴下する、滴下する 実験5：入れる、加える、入れる、移す、入れる、加える
混ぜる型 (M型)	実験1：攪拌する、攪拌する 実験2：攪拌する、攪拌する 実験3：攪拌する、攪拌する 実験4：攪拌する、攪拌する 実験5：攪拌する、攪拌する、攪拌する、攪拌する
待つ型 (W型)	実験1：乾燥させる 実験2：放置する 実験3：放置する 実験4：冷やす、加熱する、冷やす、放置する 実験5：上昇させる、継続する、上昇させる、保つ、 徐冷する、放置する、乾燥させる
つなげる型 (J型)	実験3：蓋をする、密封する 実験4：取り付ける、付ける、つける、つける
分ける型 (D型)	実験1：還流する、分離する、分離する、分離する ロ別する、追い出す、減圧蒸留する 実験2：ロ別する 実験3：除く、ロ別する 実験4：還流する、分離する、ロ別する、留去する 実験5：流す、吸引ろ過する、除く、吸引ろ過する、吸引ろ過する
洗浄する型 (S型)	実験1：洗浄する、洗浄する 実験2：洗浄する、洗浄する 実験4：洗う 実験5：洗う、洗う、洗う、洗浄する、洗浄する、
見る型 (L型)	実験4：観察する、確認する 実験5：観察する

表 4.5　実験 1～5 における各動詞型の数

	加える型	混ぜる型	待つ型	つなげる型	分ける型	洗浄する型	見る型	計
実験1	7	2	1	0	7	2	0	19
実験2	3	2	1	0	1	2	0	9
実験3	1	2	1	2	2	0	0	8
実験4	11	2	4	4	4	1	2	28
実験5	6	4	7	0	5	5	1	28
計	28	12	14	6	19	10	3	92
割合	30%	13%	15%	7%	21%	11%	3%	100%

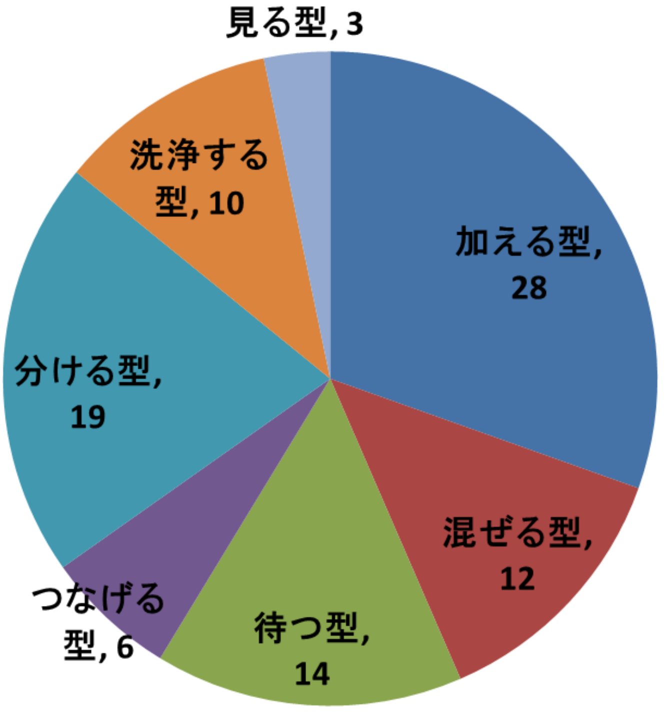


図 4.13　実験 1～5 における動詞の大別化

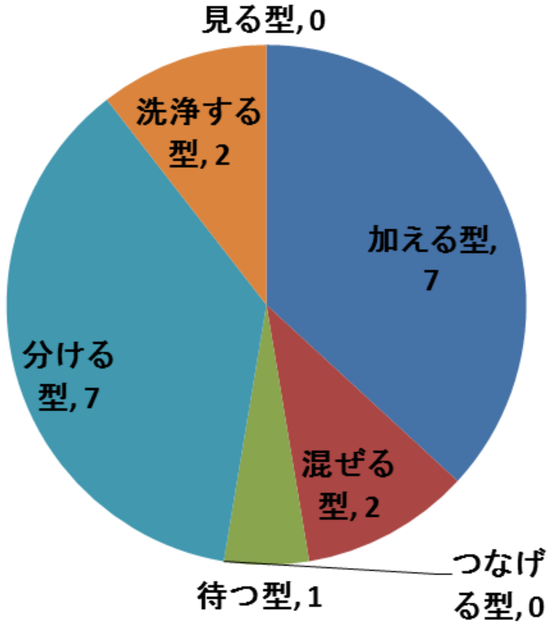


図 4.13 (1)　実験 1 における動詞の大別化

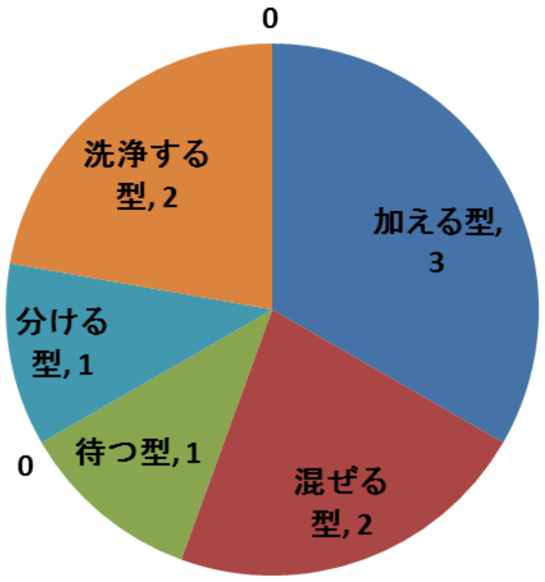


図 4.13 (2)　実験 2 における動詞の大別化

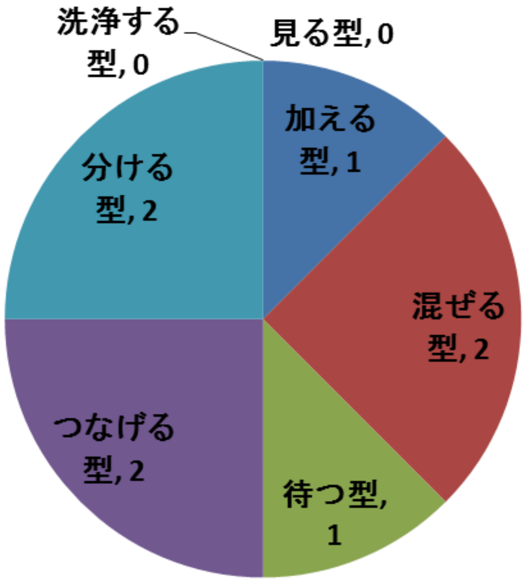


図 4.13 (3)　実験 3 における動詞の大別化

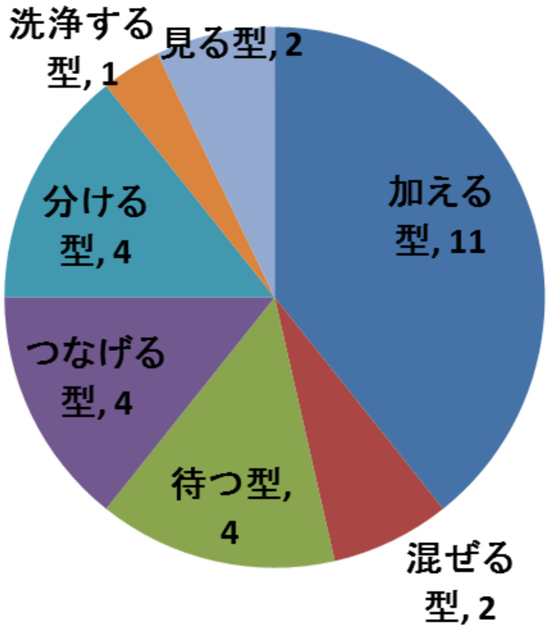


図 4.13 (4)　実験 4 における動詞の大別化

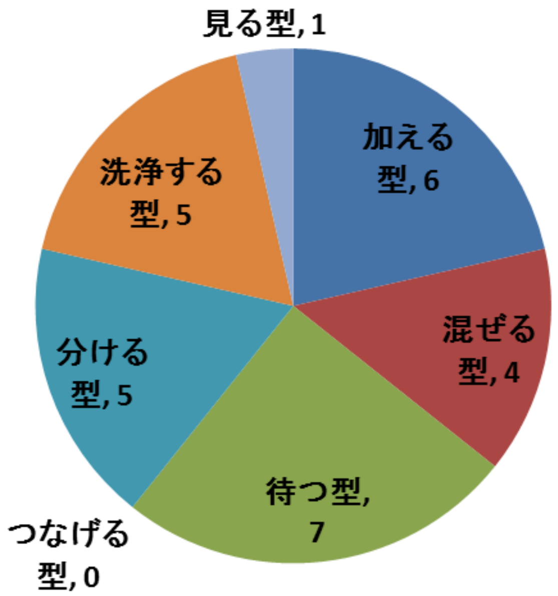


図 4.13 (5)　実験 5 における動詞の大別化

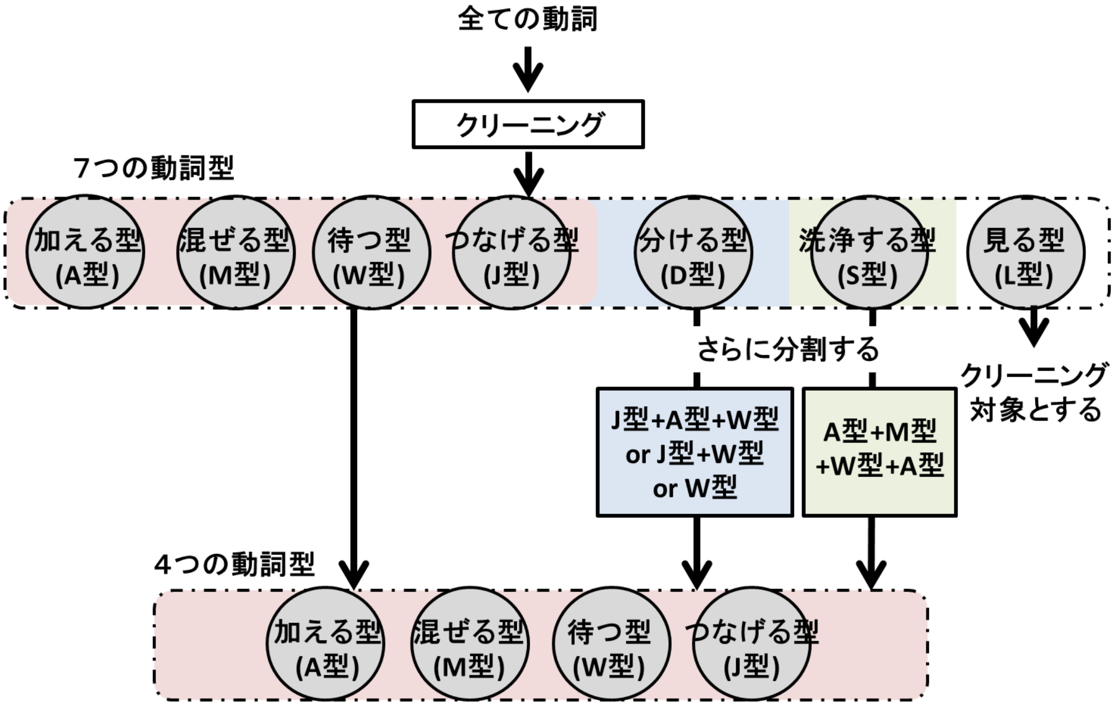


図 4.14　動詞の大別化の手順

表 4.6　実験 1～5 における 4 つの動詞型

	加える型	混ぜる型	待つ型	つなげる型	計
実験1	12	4	10	4	30
実験2	8	4	4	1	17
実験3	2	2	3	3	10
実験4	14	3	9	7	33
実験5	19	9	17	3	48
計	55	22	43	18	138
割合	40%	16%	31%	13%	100%

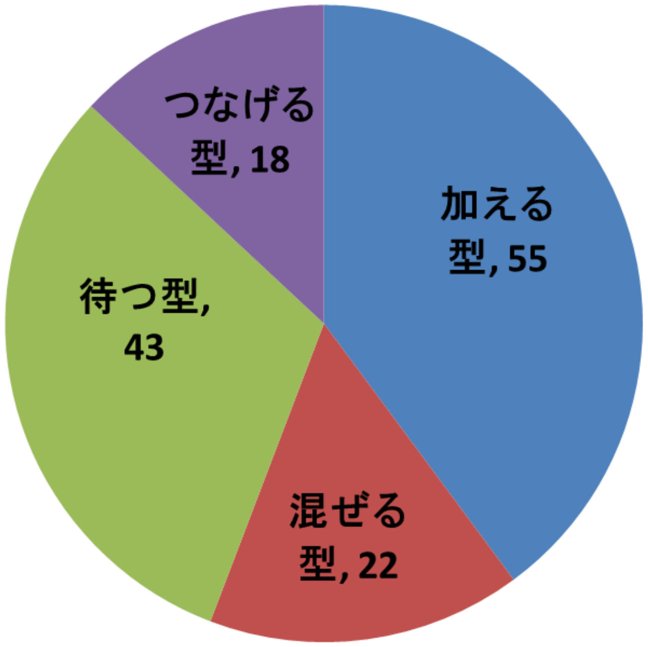


図 4.15　実験 1～5 における 4 つの動詞型の割合

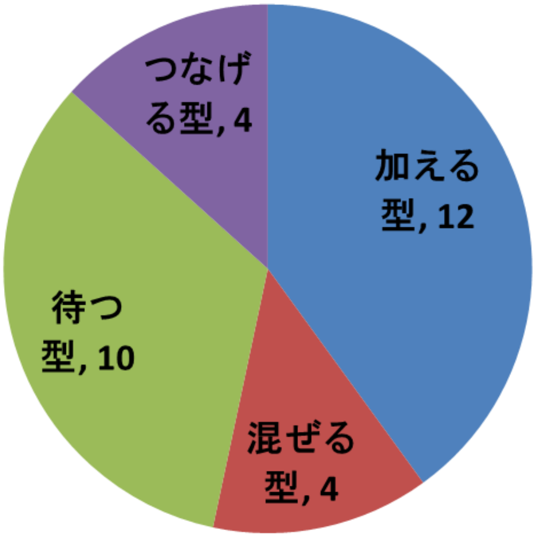


図 4.15 (1)　実験 1 における 4 つの動詞型の割合

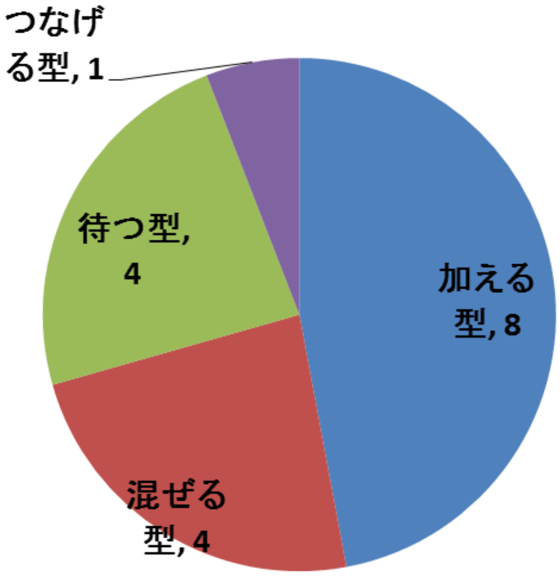


図 4.15 (2)　実験 2 における 4 つの動詞型の割合

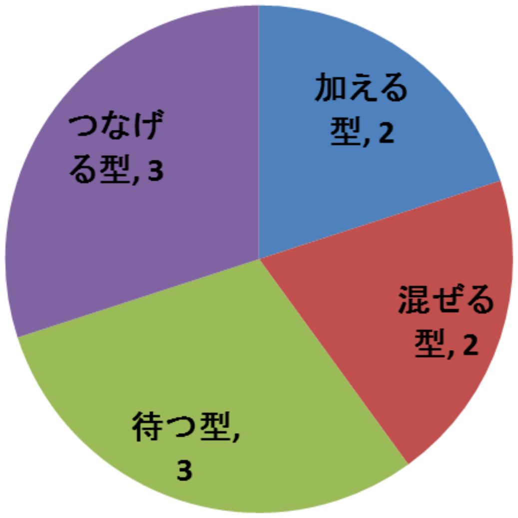


図 4.15 (3)　実験 3 における 4 つの動詞型の割合

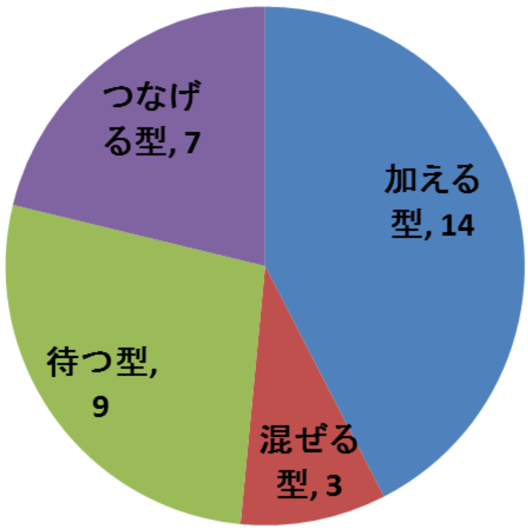


図 4.15 (4)　実験 4 における 4 つの動詞型の割合

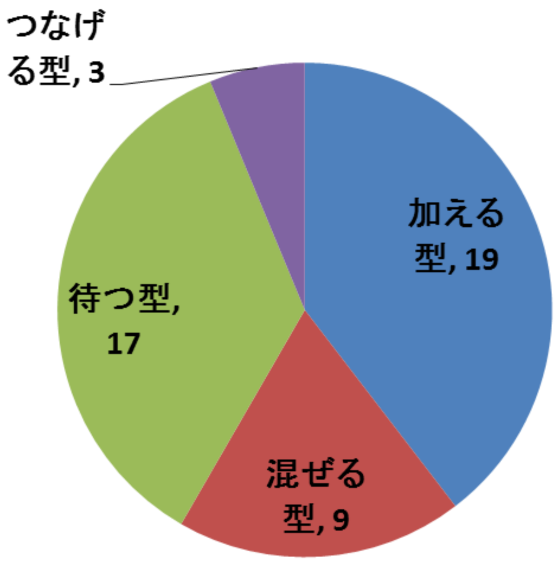


図 4.15 (5)　実験 5 における 4 つの動詞型の割合

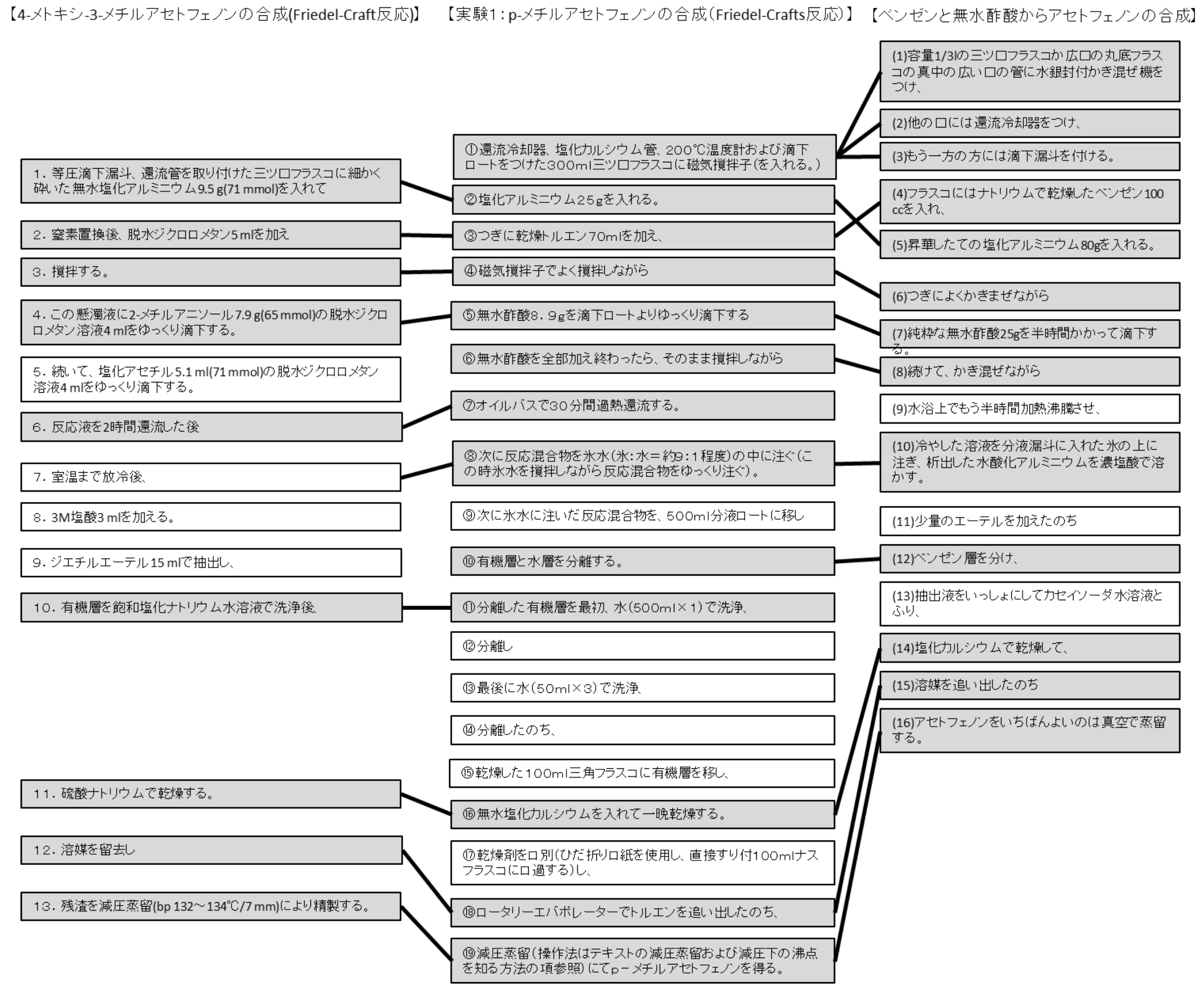


図4.16　3つのFriedel-Crafts実験テキストの文章の比較

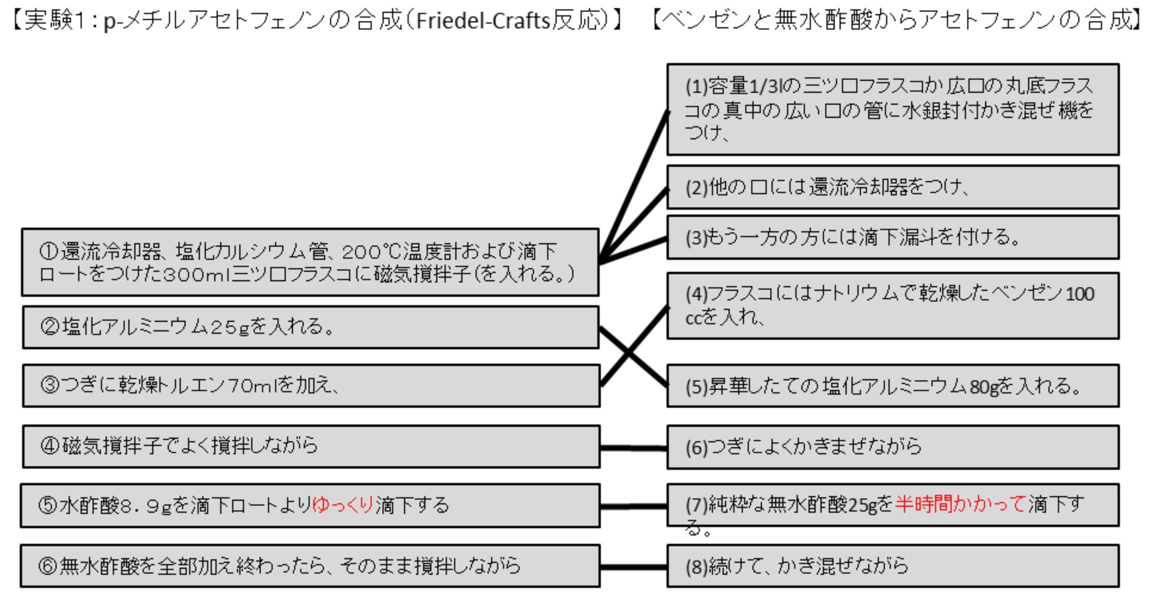


図 4.17　2 つの Friedel-Crafts 反応実験テキストの比較についての抜粋

表 4.7　Friedel-Crafts 反応実験における操作と因子の相関係数についての引用資料(主原ら、2011)

実験操作	相関係数		
	予測力	技術力	観察力
① 還流冷却器、カルシウム管[1](塩化カルシウム管とアスピレーターを穴の開いたベント管でつなぎ、発生する塩化水素を除去する)、200℃温度計および滴下ロートをつけた300mL三ッロフラスコ[2]に	**.451**	.315	-.008
② 磁気撹拌子および塩化アルミニウム[3]25gを入れる。	.136	.187	-.099
③ つぎに乾燥トルエン70mLを加え、	.160	**.373**	.152
④ 磁気撹拌器でよく撹拌しながら無水酢酸8.9gを滴下ロートよりゆっくり滴下する(この時滴下速度が速いと混合物は発熱して塩化水素が激しく発生する[4]のでアスピレーターの水の流し方を調整して塩化水素が外に漏れないようにする)。	.125	-.082	.302
⑤ 無水酢酸を全部加え終わったら、そのまま撹拌しながらオイルバス[5]で30分間加熱還流[6](還流が始まってから)する。	.358	-.150	**.519**
⑥ 次に反応混合物を氷浴(ウォーターバスを使用する)で室温付近まで冷却し、	-.030	-.022	-.277
⑦ 200mLの氷水(氷:水=約9:1程度)の中に注ぐ(この時氷水を撹拌しながら反応混合物をゆっくり注ぐ)。	-.016	-.227	.108
⑧ 次に注いだ反応混合物を500mL分液ロートに移し、	**.440**	.243	.259
⑨ 有機層と水層を分離する。	**-.365**	-.324	-.200

1)使用後の塩化カルシウムは指定した場所に廃棄する、2)十分に乾燥した装置類を用いること、3)塩化アルミニウムの秤量は出来る限り手早く行うこと、4)アスピレーターの水を流し、発生した塩化水素を溶解廃棄すること、5)加熱中(100℃以上)に水などが入ると、オイルがはねて火傷することがあるので十分注意する。使用後ただちに蓋をして異物の混入を防ぐ。シリコンオイルは高価であり、水などが混入すると使用不能となる。6)加熱は冷却管より1秒間に2—3滴くらいトルエンがおちる程度。

5　作業者側と操作側の両面からのアプローチの融合とその活用

5.1　作業者側と操作側の両面からのアプローチの融合

本論文では、実験作業におけるバリエーションに対応できる形での行動予測に向け、作業者と実験操作とに着目して検討してきた。作業者側の検討として、2 章と 3 章において、作業者側のバリエーションに着目し、人間が実験操作を理解し行動した結果からの各人間の特性の数値化を行った。2 章では、作業者の行動から実験操作の構成要素の抽出する手法の開発を行い、3 章では、2 章で得られた要素によって、別の実験操作が説明可能か検討を行った。これらは、作業者を介した作業者の行動から得るアプローチであり、同じ構成要素で説明ができるとは、同じような実験操作だと作業者によって捉えられているという意味である。一方、4 章では、実験操作のバリエーションを定量的に整理し可視化する手法として、実験操作向けのテキストマイニングの開発を行った。4 章で検討したテキストからの実験操作の類似性の可視化は、実験操作の文章から得るアプローチであり、人間の認識などを介さない類似性の整理であるといえる。したがって、作業者側の特性と実験操作側のマッピングを組み合わせることで、特性値を持ったある作業者がマップ上に記されたある実験操作をどのように行うのかをシミュレートすることが可能になると考えられる。

そこで、本章では、2 章および 3 章で取り上げた水の秤量操作と滴定操作を、テキストで表現し、4 章で開発した手法を用いてマップ上での表現を目指す。その上で、3 章の 3.6 節で検討した中和滴定操作において、「最終値がわかった後に、予め最終値がシリンダーの線という形で直接的に知覚できる水の秤量操作と同じ操作だと捉えられる」という結果についてもマップを用いた考察を行う。

5.2　秤量操作と滴定操作の自己組織化マップ上での位置づけ

本節では、2 章および 3 章でモデル操作とした水の秤量操作と滴定操作の各操作を 4 章の方法に従い、文字列化、bit 化を行い、マップ上への表現が可能か検討を行い、モデル操作における作業者特性に関するパラメータの活用について議論する。

水の秤量操作は「10 ml の水をビーカーから正確に量り取る。」という文章で、滴定操作は「ビュレットから水酸化ナトリウム水溶液をビーカー内の色が変わるまで、少しずつ滴下する。」という文章であるとした。その文章を 4 章で作成した手法によって、bit 化した結果を**図 5.1** に示す。水の秤量操作は 00,00,00,00,00,01,01 という形で bit 化され、一方、滴定操作は 00,10,10,01,00,10,10 という形で bit 化された。これら 2 つの操作を 4 章で扱った 30 個の操作と併せて、自己組織化マップを作成した。

図 5.2 に、マップの結果を示す。秤量操作が左下位置に、滴定操作が中央下部に位置された。全体の中では比較的近い位置であり、これら 2 つの操作はある程度類似性が高いが、bit 表現において、5 箇所の違いがあり、それが位置の違いになって表れていると考えられる。また、秤量操作と同じ場所に操作 3、滴定操作と同じ場所に操作 5 が位置づけられている。マップ上で水の秤量操作に近い場所に位置づけられた操作は、水の秤量操作と同じような要素が求められる操作であることが予想され、同様に、マップ上で中和滴定操作に近い場所に位置づけられた操作は、中和滴定操作と同じような要素が求められる操作であると予想されるが、今後、マップ上での位置と求められる要素との関連について検証を行うことが期待される。その結果、検証がなされた場合、2 章や 3 章で得たパラメータの活用が、マップ上の同じ場所の実験操作に適応できるといえる。また、それ以外の位置にある実験操作については、水の秤量操作や中和滴定操作とは違うモデル操作を用意し、作業者の特性を抽出することで、全ての実験操作で求められる要素についての特性の定量化が期待される。

5.3　作業者が行う実験操作の整理や集約の仕方の可視化

続いて、3 章の 3.6 節で検討した中和滴定操作において記述した「最終値がわかった後に、予め最終値がシリンダーの線という形で直接的に知覚できる水の秤量操作と同じ操作だと捉えられる」という考察について、マップを用いて解釈する。

図 5.3 に示すように、水の秤量操作はマップ上の左下に、中和滴定操作はマップ上の中央左下にテキストマイニングによる解析では位置する。しかし、3 章の 3.6 節の検討により、最終値がわかった後は、中和滴定操作は水の秤量操作と同じような操作だと認識されることがわかっている。これを、マップを用いて考えると、始めは中和滴定操作は、**図 5.3** のマップ上の中和滴定操作の位置で捉えられていたが、最終値がわかった後、**図 5.3** のマップ上の水の秤量操作の位置だと置き換えていると解釈できる。つまり、捉え方次第でその人の中で、実験操作をマップ上の違う位置だと置き換えているといえる。

さらに、このような置き換えがいつ起こるのかという個人の特性は、3 章で得られたパラメータを活用することで、個人の実験操作や整理や集約の仕方を表現することが可能になると考えられる。置き換えがいつ起こるのかについて、より数学的な形で組み込むために、確率を導入した例を以下に示す。

滴定操作の学習前後を bit 表現すると、**図 5.4** に示すように、始め 00,10,10,01,00,10,10 という表現形だったが、学習後、00,00,00,00,00,01,01 という秤量操作の形に置き換えが起こる。この置き換えは、始めは全く起きない。その後、徐々に起きやすくなり、学習した後は、ほぼ起こるようになると考えられる。置き換えが起こる確率で考えてみると、始めのうちは、置き換えが起こる確率が 0%であり、回数を重ねるに従い徐々に上がり、最終的には 100%になると考えられる。**図 5.5** に 3 章で得た作業者Ａの学習曲線を示す。この学習曲線と置き換えが起こる確率とを関連付けてみると、**図 5.6** のように、始めのうちは 0%であり、その後徐々に上がっていき、学習後に 100%になると仮定すると、認識の変化を含めることができるようになる。さらに、3 章で得た学習曲線は、作業者

によって異なるため、**図 5.7** のような形状の作業者 D の場合は、**図 5.8** のように置き換えが起こる確率を設定することで、認識の変化を適切に表現できる。以上のように、確率を導入し、各作業者の学習の仕方についての学習曲線を活用することで、マップ上での位置の置き換えについて個人ごとに表現することが可能になった。

このように、マップの表現と人間の特性とを併せることで、今後、人間側の上達といったポジティブな置き換えや、勘違いといったネガティブな置き換えを可視化していくことが期待される。さらに、これらの置き換えがどのように変化し、その置き換えが各作業者でどのような確率で起こるのかを知ることで、マップ上での置き換えをカスタマイズド化された形で作業者ごとに表現することが期待される。

さらに、実験作業を実験操作の連続体として考えた場合、**図 5.9** のように、4 章で可視化されるマップ上での動き方と 2 章 3 章で得られる特性との関係性を調べることで、実験作業における行動シミュレートに向けた重要な知見を得ることが望まれる。

5.4　まとめ

本章では、作業側と操作側の両面からのアプローチを融合させ、作業者個人の特性とマップとを組み合わせる手法の有効性の検討と提案を行った。具体的検討として、2 章および 3 章で取り上げた水の秤量操作と中和滴定操作のテキストによる表現と、4 章で開発した手法による bit 化およびマップ上による表現を行った。その結果、水の秤量操作と中和滴定操作とがマップ上に位置された。今後、様々な実験操作をテキスト化することで、マップ上に可視化されることが期待される。また、マップ上で水の秤量操作や中和滴定操作に近い場所に位置づけられた操作で、2 章や 3 章で得られたパラメータが活用できるか検討することが期待される。

続いて、3 章の 3.6 節の検討により、最終値がわかった後は、中和滴定操作は水の秤量操作と同じような操作だと認識されることがわかっている。このことを、マップを用

いて考えると、始めは、マップ上の中和滴定操作の位置で捉えられていたが、最終値がわかった後、マップ上の水の秤量操作の位置だと置き換えていると解釈できる。つまり、捉え方次第でその人の中で、実験操作をマップ上の違う位置だと置き換えているといえる。また、3 章で得た学習曲線を、実験操作をマップ上で置き換える確率として設定することで、一般的な傾向だけでなく、マップ上での位置の置き換えについて個人ごとに表現することが可能であることがわかった。

今後、人間側の上達といったポジティブな置き換えや、勘違いといったネガティブな置き換えを可視化していくことや、これらの置き換えが各作業者でどのように起こるのかを知ることで、カスタマイズ化された形で各作業者のマップ上での置き換えを表現することが期待される。今後このような方法で、さらに実験操作を増やしていくことで、実験操作の集約・整理の仕方についての一般的傾向や個々の特性の可視化が期待される。

00,10,10,01,00,10,10　水の秤量操作

00,00,00,00,00,01,01　中和滴定操作

図 5.1　秤量操作および滴下操作の bit

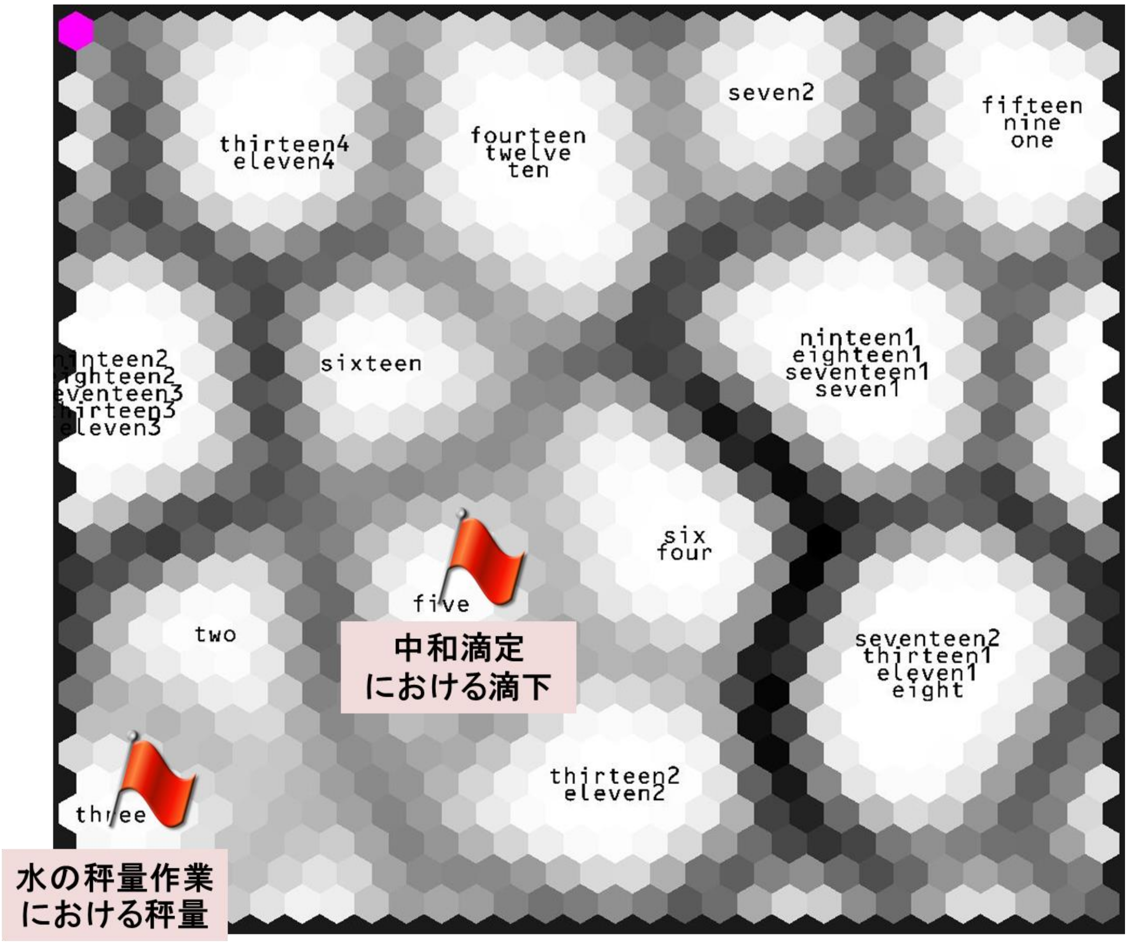


図 5.2　秤量操作および滴下操作を

加えて行った自己組織化マップ

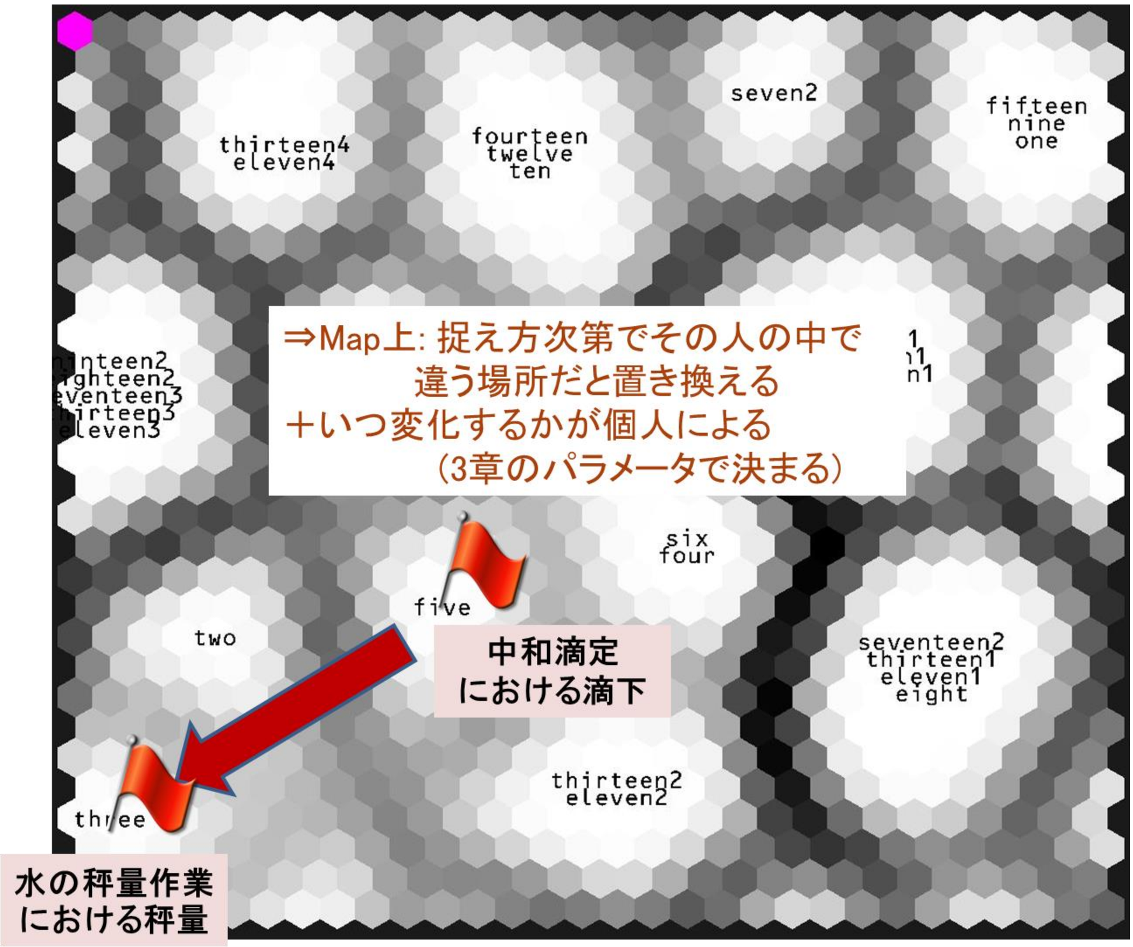


図 5.3　滴定操作における学習前後での

捉え方の変化のマップ上での表現

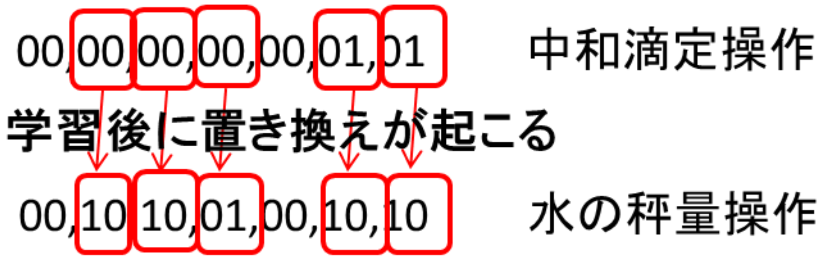


図 5.4　滴定操作における学習前後での

捉え方の変化の bit による表現

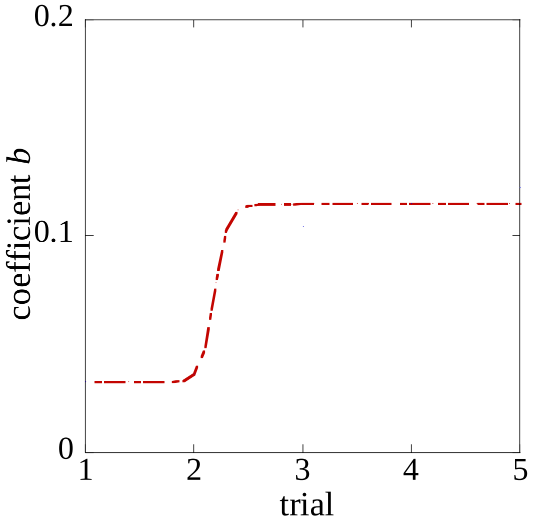


図 5.5　3 章の滴定操作の検討から
得られた作業者 A の学習曲線の形状

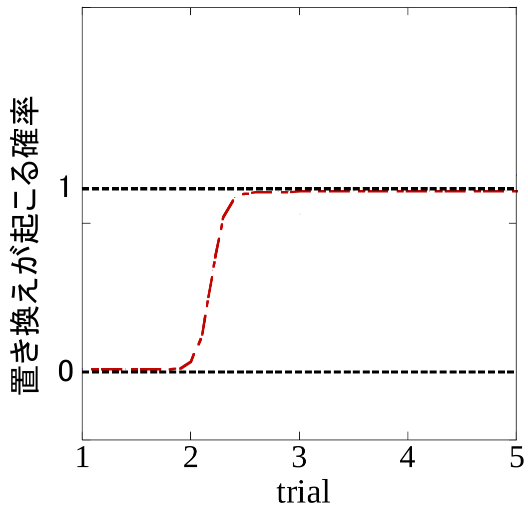


図 5.6　作業者 A の置き換えが起こる確率に関する曲線

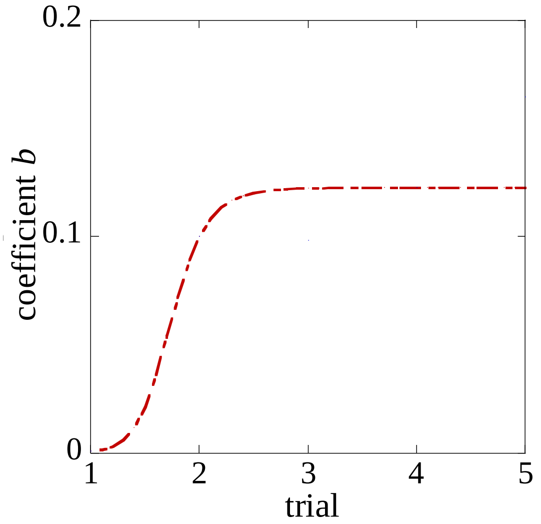


図 5.7　3 章の滴定操作の検討から
得られた作業者 D の学習曲線の形状

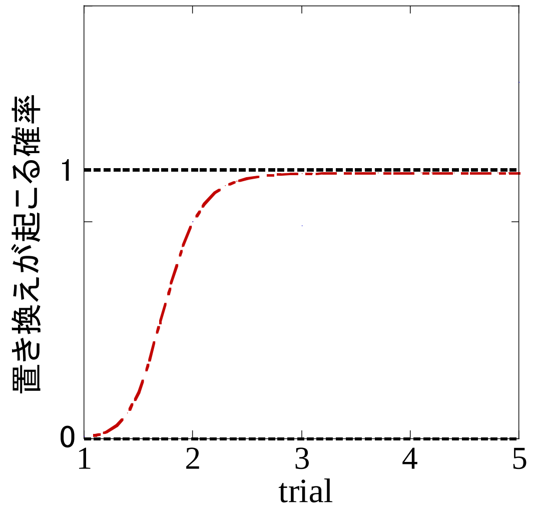


図 5.8　作業者 D の置き換えが起こる確率に関する曲線

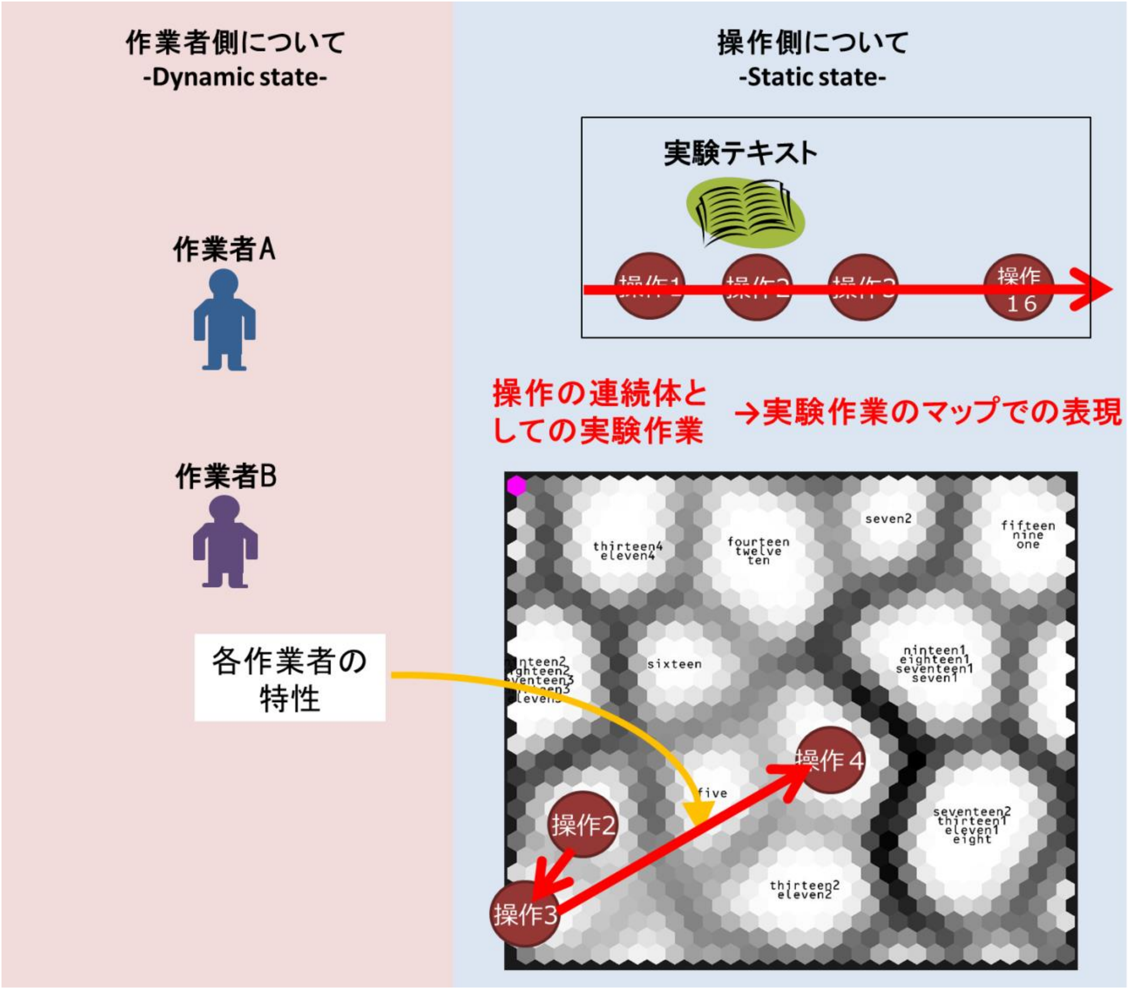


図 5.9　実験作業と作業者と特性との関係性の

検討についてのイメージ図

6　総括と今後の展望

1 章では、研究対象とする実験室、安全性についての解析手法、人間の特性についての研究例、行動予測手法に関する研究例について概説した。そして、実験室では創造性と安全性が求められるが、これまでの安全性の関する既報の解析手法において、予測手法の提案が少ないこと、また、創造性を生かそうとして自由度が高くなると、個人差や個人内の変動といった作業者のバリエーションが生じやすくなるにもかかわらず、それに対応できない点が課題となっていることについて記述した。

そこで、本論文では、作業者や実験作業のバリエーションを生かし尊重しながら、何が起こるのかを予測する手法、すなわち行動シミュレートの提案に向けて、行動に関連する要因として、作業者と操作という 2 つに着眼し、その両面からのアプローチを行った。まず、作業者側からのアプローチでは、個人差や個人内の変動を含んだ形でのモデル化を目指し、被験者実験によって作業者特性の数値化を行った。2 章において、水の秤量操作を例として、作業者のバリエーションを含んだ形でのモデル化を行い、3 章では、中和滴定操作を例として、学習行動について検討を行った。続いて、実験操作側からのアプローチでは、4 章において、実験操作の一般化に向けた情報化と可視化のためのテキストマイニングによる検討を行った。5 章においては、作業者側からのアプローチと実験操作側からのアプローチとを併せる意義とその可能性について、2 章、3 章、4 章での結果を用いて具体的に検討した。以下に各章において得られた成果についてまとめる。

2 章では、水の秤量操作をモデル作業として、作業者の特性の数値化手法の開発を行った。まず、被験者実験によって、水の高さ挙動についてのデータを収集した。続いて、得られた各グラフを 7 つの指標を用いて指標化したのち、指標について、作業者全員の

全データにおいて主成分分析を行った。その結果、“プランニング”に関する成分 1 と“調整”に関する成分 2 が抽出された。同時に、これら 2 つの成分に関する値（主成分得点）が各試行について得られた。続いて、これら成分値と作業者の特性を関連付ける形で数式モデルの作成を行った。その際、各作業者が固有の能力を持っており、その能力のうちのある係数が、繰り返す回数や、前の作業の結果、累積の時間といった外的な要因によって、観測可能な形で現れると仮定し、それを基にして数式モデルを作成した。その後、作成した数式モデルでのフィッティングにより、各要因に関するパラメータを算出し、得られたパラメータの結果について考察を行った。予測に関する検討では、指標とした 7 つ全てについて、大まかに予測値と実測値とが一致する結果となり、本系における作業行動の予測可能性が示唆された。

3 章では、滴定操作を対象として、回数を繰り返す際の探索的な学習行動について検討を行った。まず、被験者が行う滴定操作において、ビュレットから投入する溶液の液面についての時間挙動を得た。続いて、この時間挙動を指数関数で近似し、その係数 b を各試行を表す指標とした。その上で、係数 b の試行回依存性を作業者ごとに検討したところ、試行回を重ねるに従い、係数 b が大きくなる傾向がある結果となった。このことから、作業の途中を表す係数 b が、学習効果を表す指標であることが示唆された。続いて、学習曲線として広く知られる S 字ロジスティック曲線を用いて、滴定作業における学習行動に関するパラメータの抽出と学習パターンの分類を行った。学習が始まるタイミングと学習するスピードを表す 2 つのパラメータを導入し、作業者ごとにフィッティングすることで、各作業者のこれらパラメータを得た。また、フィッティングした結果得られた曲線の形状から学習パターンという観点で 2 グループに分類した。また、2 章で行った秤量操作での作業者の特性のパラメータを用いて、滴定操作の行い方全体を表す係数 b がどの程度計算可能であるかを検討した。滴定操作を行った被験者が水の秤量作業を行った結果を、2 章と全く同じ手法によって解析を行って得たパラメータを用

いて、滴定作業を学習する前と後とで、それぞれの係数 b の計算を行った。その結果、学習前は計算値と実測値との一致が悪い結果となった一方、学習後は、計算値と実測値との一致がある程度良い結果として得られた。この結果から、滴定操作は、学習前は、秤量作業と同じ要素で説明することはできないが、学習後は説明出来るようになるといえる。この結果は滴定操作が、始めのうちは、秤量操作と違った作業だと作業者に捉えられていたが、最終的な目標値がわかった後は、同じような作業として認識されるようになったと解釈できる。

4 章では、実験テキスト向けの新たなテキストマイニングの開発について検討した。文章から実験操作を整理し、操作同士の類似性を可視化するテキストマイニングの設計と実装を行い、実際の実験テキストを用いて具体的に検討した。設計と実装においては、文章における動詞に着目し、文章を実験操作に分割する手順を作成した。その後、各実験操作を情報化するために、分割された各実験操作を評価する方法を作成した。具体的な検討としては、化学系の学生実験で頻繁に行われる Friedel-Crafts 実験を例として、実験テキストの情報からのコード化とマップとしての表現を行った。まず、Friedel-Crafts 実験の前半部分についての実験テキストを 30 個の操作に分割し、各操作を動詞のタイプやどこまで行うかという目標値、その操作の制約となる副詞について計 7 つの項目を設定し、評価した。その結果、A-c-a-a-c-b-b といった 7 つのアルファベットの文字列として、各操作が表現された。続いて、これら文字列に対して bit 化を行うことで、0 と 1 から構成される bit を得た後、ソフトウエアを用いて自己組織化マップによる表現を行った。その結果、操作の類似性の高さという観点によって、30 つの各操作が 2 次元上にマップとして可視化された。さらに、実験作業を操作の連続体として捉えることで、実験作業をマップ上の操作を連続的に繋がった軌跡として表現した。

5 章では、作業側と操作側の両面からのアプローチを融合させ、作業者個人の特性とマップとを組み合わせる手法の有効性の検討と提案を行った。具体的検討として、2 章

および3章で取り上げた水の秤量操作と中和滴定操作のテキストによる表現と、4章で開発した手法による bit 化およびマップ上による表現を行った。その結果、水の秤量操作と中和滴定操作とがマップ上に位置され、テキスト化されれば、実験操作がマップ上に位置づけられることが確認された。加えて、3 章における「最終値がわかった後は、中和滴定操作は水の秤量操作と同じような操作だと認識されるようになる」という結果を、マップを用いて考察したところ、始めは、マップ上の中和滴定操作の位置で捉えられていたが、最終値がわかった後、マップ上の水の秤量操作の位置だと置き換えていると解釈できる。つまり、捉え方次第でその人の中で、実験操作をマップ上の違う位置だと置き換えているといえる。また、3章で得た学習曲線を、実験操作をマップ上で置き換える確率として設定することで、一般的な傾向だけでなく、マップ上での位置の置き換えについて個人ごとに表現することが可能であることがわかった。

今後の展望を以下にまとめる。

2章3章で検討を行ってきた作業者の特性については、最適なモデルの探索を行うことが望まれる。そのために、不足しているパラメータの追加が望まれる。実験室での実験操作の特性を考えると、マルチタスクの際の時間的制約による影響や共通空間での空間的制約による影響、使用する物質の違いによる行動の違いといった要因についてのパラメータの追加が特に期待される。そして、作業者の特性を計測する手法として、弱点診断のような人間側の評価手法として応用されることが期待される。

4章で行ってきた実験操作については、今後、多くの実験作業をひとつのマップ上に上書きしていくことで、普遍的なマップの精緻化が期待される。そして、実験作業を実験操作の連続体とした場合、作業者に求められる要素をマップ上での動きと関連付け、操作の難易度として定量化するような操作側の評価手法としての応用が期待される。

今後、5章で行ったように、実験操作側と作業者側とを併せ、マップ上での操作の位

置やマップ上での動きと作業者の特性との関連性を検討することで、行動シミュレートが作成されることが期待される。さらに、行動と失敗・事故との関連性を検討することで、ある作業者がある実験作業を行う場合の危険箇所や脆弱性を未然に発見することができる失敗シミュレートや事故シミュレートの作成が期待される。

参考文献

1 章

O. Hannaway, Advocate of History in an Age of Science by Lynn Sumida Joy. Isis, *Review of Mersenne and the Learning of the Schools by Peter Dear and Gassendi the Atomist,* **81**, 77-80, 1990

橋本毅彦、実験と実験室（ラボラトリー）をめぐる新しい科学史研究、化学史研究、**20**、107-121, 1993

高月紘、環境安全学－これからの研究教育の必須学、*丸善株式会社*、2006

伊永隆史編、環境・安全・衛生－大学のアピール―、*三共出版株式会社*、2006

有馬朗人監修、これからの大学等研究施設 第 1 編「物質科学編」、*社団法人文教施設協会, 株式会社科学新聞社*、2002

G. T. Saunders, Laboratory Fume Hoods: A User's Manual, *Wiley-Interscience*, 1993

A. Shuhara, Y. Oshima, Survey on Actual Status of Usage of Fume Hood in Experimental Laboratory, *Journal of Environment and Safety*, **6**, 107-109, 2015

T. Nomura et. al., Estimation and Control of Atmospheric Emissions of Chloroform and Dich loromethane Due to Laboratory Activity, *Environmentak Sciences*, **13**, 219-234, 2006

本間直人ら、某国立大学法人における実験室内の作業環境管理状況について、*作業環境*、**30**、59-66、2009

A. H. Maslow, A theory of human motivation, *Psychological Review*, **50**, 370-396, 1943

J. N. Kemsley, Learning From UCLA, *The Chemical, Life Sciences & Laboratory Worlds*, **87**, 29-31, 2009

R. V. Noorden, Safety survey reveals lab risks, *Nature News*, **493**, 2013

H. W. Heinrich, Industrial accident prevention: a scientific approach, *McGraw-Hill*, 1931

小松原明哲、ヒューマンエラー、*丸善株式会社*、2003

畑村洋太郎、失敗学実践講義、*株式会社講談社*、2006

畑村洋太郎、危険学のすすめ、*株式会社講談社*、2006

Meister, D., Human Factors-Theory and Practice, *Wiley & Sons. Inc.*, 1971

関岡保二、経営組織におけるエラー管理、*中央学院大学商経論叢*、**19**、67-78、2005

ICAO, Accident Prevention Manual, Doc 9422-AN/923, *ICAO*, 1984

A. D. Swain, and H. E. Guttmann, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Application, *U.S.NRC-NUREG/CR-1278*, 1971

J. Reason, Human error, *Cambridge University Press*, 1990

橋本邦衛、ヒューマンエラーと安全設計、*人間工学*、**17**、1981

米山信三・池田敏久・大嶽ヒサ、ヒューマンエラーの背景要因の分析、*鉄道労働科学研究所*、**39**、1-12、1985

F. H. Hawkins, Human Factors in Flight, *Gower Technical Press Ltd.*, 1987

河野龍太郎、ヒューマンエラー低減技法の発想手順：エラープルーフの考え方、*日本プラント・ヒューマンファクター学会誌*、**4**、121-130、1999

菅野文友、信頼性工学の基礎、*日刊工業新聞社*、1978

林喜男、FTA-システム安全解析の技法、*日本経営工学会誌*、**28**、359-365、1978

行侍武生、FTA と人間工学(Ⅰ)、*人間工学*、**12**、183-190、1976

N. G. Leveson, Safeware-system safety and computers, *MA: Addison- Wesley*, 2005

D. Kahneman and A. Tversky, Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica*, **47**, 263-292, 1979

鹿取廣人・杉本敏夫、心理学、*東京大学出版*、2004

無藤隆ら、心理学、*有斐閣*、2004

南風原朝和ら、心理学研究法入門－調査・実験から実践まで－、*三陽社*、2001、

J. Richetin and D. S. Richardson, Automatic process and individual differences in aggressive behavior, *Aggression and Violent Behavior*, **13**, 423-430, 2008

S. F. Kalyoncuoglu and M. Tigdemir, Modelling of personality, attitudes and risky driving, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport*, **161**, 37-43, 2008

L. M. Hough and F. L. Oswald, Personality Testing and Industrial Organizational Psychology: Reflections, Progress, and Prospects, *Industrial and Organizational Psychology*, **1**, 272-290, 2008

内田勇三郎, 内田クレペリン精神検査手引, *日本精神技術研究所・A Developmental Study of Letter Recognition－Factor Analysis of Hiragana・Letters－*, 1964

箱田裕司編、現代の認知心理学 7　認知の個人差、*北大路書房*、2011

林喜男、ヒューマンエラー－認知科学的アプローチ－、*海文堂出版*、1994

ジェラルド・J・S・ワイルド著・芳賀繁訳、交通事故はなぜなくならないか－リスク行動の心理学、*新曜社*、2007

横溝克己・小松原明哲、エンジニアのための人間工学、*日本出版サービス*、1987

N. W. Hurst, Risk Assessment The Human Dimension, *Royal Society of Chemistry*, 1999

G. Salvendy, Handbook of human factors and ergonomics, *John Wiley & Sons, Inc.*, 2012

福田忠彦監修、人間工学ガイド、*サイエンティスト社*、2004

持丸正明・河内まき子、人体を測る－寸法・形状・運動、 *東京電機大学出版局*、2006

バイオメトリクスセキュリティコンソーシアム、国際標準に準拠したバイオメトリクスの用語および基本モデル、*日本工業出版株式会社*、2010

半谷精一郎、バイオメトリクス教科書－原理からプログラミングまで－、*コロナ社*、2012

小松尚久ら、バイオメトリスクのおはなし－あなたの身体情報が鍵になる－、*日本規格協会*、2008

佐藤政次著・バイオメトリクスセキュリティコンソーシアム編、バイオメトリックセキュリティ・ハンドブック、*オーム社*、2006

中村善一・木戸出正継、筆跡鑑定の知見に基づく特性値を用いたオンライン筆者照合、*システム制御情報学会論文誌*、**22**, 37-47, 2009

張イトンら、ニューラルネットによる手書き漢字生成の一手法、*システム制御情報学会論文誌*、**22**, 404-410, 1994

古川猛、赤外線スキャナと陰影モデルを使用した手書き文字の筆圧痕の検出、*情報科学技術レターズ*、2006

櫻井啓志ら、ニューラルネットワークを用いたキーストローク特徴によるユーザ認証、*電子情報通信学会*、**3**, 101-105, 2010

村上敦・堂薗浩、自己組織化マップを用いたキーボード入力タイミング解析、*情報処理学会*、**56**、329-333、2006

N. Wiener, The Human Use Of Human Beings: Cybernetics And Society, *DaCapo Press*, 1988

C. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Thchnical Journal*, **27**, 379-423, 1948

J. V. Neumann, Various techniques used in connection with random digits, National Bureau if Standards Applied Math Series 12, **36**, 1951

H. A. Simon. Models of Man: Social and Rational, *John Wiley and Sons, Inc.*, 1957,

H. A. Simon. Administrative Behavior: A study of Decision-Making Processes in Administrative Organization, *Free Pr*, 1976,

T. H. Davenport, Predictive Analysis: The Power to Predict Who Will Click, Buy, Lie, or Die, *Wiley*, 2013

http://www.predictiveanalyticsworld.com/

本村陽一、大規模データからの日常生活行動予測モデリングー実サービスを通じたベイジアンネットワークの学習と推論ー、*Synthesiology*、**2**、1-11、2009

山本誠・谷本浩昭・新田直子・馬場口登、個人的選好獲得のための特定人物のテレビ視聴時における興味区間推定、*電子情報通信学会論文誌*、**8**、2202-2211、2007

日本作業療法士協会監修 鷲田孝保編、作業療法における作業 基礎作業学第二版、*協同医書出版社*、1999

S. G. Hart and L. E. Stavelan, Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, *Human Mental Workload*, 139-183, 1988

芳賀繁・水上直樹、日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定 ：各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度、*人間工学*、**32**、71-79、1996

M. Bangert and et al., Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: Evidence from fMRI conjuction, *NeuroImage*, **30**, 917-926, 2006

宮本淳一ら、卓球運動における脳賦活部位、*日本臨床スポーツ医学会誌*、**17**、24-29、2009

J. S. Ross and et al., The Mind's Eye: Functional MR Imaging Evaluation of Golf Motor Imagery, *American Society of Neuroradiology*, **24**, 1036-1044, 2003

高田夏彦ら、類似度分析に基づく未知レシピへのメタデータ自動付与方式の提案、*DEIM Forum 2014*、2014

苅米志帆乃・藤井敦、料理レシピテキストの構造解析とその応用、*言語処理学会第 18 回年次大会発表論文集*、2012

志土地由香ら、料理レシピマイニングによる代替可能食材の発見、*電子情報通信学会*、2010

飯島正樹、保全工数見積資料作成のための要素作業分類に関する一考察、*四日市大学論集*、**3**、155-167、1990

高橋秀行ら、愛知県南知多郡における小型機船底曳網漁業の漁労作業分析、*水産工学*、**49**、133-140、2012

三澤哲夫ら、VDT 作業の一連続作業時間に関する実験的研究、*産業医学*、**26**、296-302、1984

尹哲ヒロ、VDT 作業内容の違いによる生理・心理的影響の考察、*日本経営工学*、**38**、132-138、1987

2 章

加藤 象二郎 、メンタルロードワークの個人差について. *人間工学*、**29**、 365-368、1993

N. Ofen, A. Moran and D. Sagi, Effects of trial repetition in texture discrimination. *Vision Research*, **47**, 1097-1102, 2007

M. Talebpour, A. Alijani, G. B. Hanna, Z. Moosa, B. Tang and A. Cuschieri, Proficiency-gain curve for an advanced laparoscopic procedure defined by obseavation clinical human reliability assessment (OCHRA), *Surgical Endoscopy*, **23**, 869-875., 2009

C. Gonzalez et al., A cognitive modeling account of simultaneous learning and fatigue effects, *Cognitive Systems Research*, **12**, 19-32, 2011

J. M. Myszewski, Mathematical Model of the Occurrence of Human Error in Manufacturing Processes. *Quality and Reliability Engineering International*, **26**, 845-851, 2010

新誠一・中野和司、図説ウェーブレット変換ハンドブック、*朝倉書店*、2005

大川善邦、波形の特徴抽出のための数学的処理、*CQ 出版*、2005

上田尚一、主成分分析、*朝倉出版*、2003

内田治、主成分分析の基本と活用、*日科技連出版社*、2013

H. H. Harman, Modern Factor Analysis, *University of Chicago Press*, 1976

石村貞夫、SPSS による多変量データ解析の手順、*東京図書株式会社*、1998

3 章

R. C. Atkinson and R. M. Shiffrin, Human memory: A proposed system and its control processes., *K. W. Spence*, 1968

M. Daneman and P. M. Merikle, Working momery and language comprehension: A meta-analysis, *Psychonomic Bulletin & Reviews*, **3**, 422-433

J. King and M. A. Just, Individual differences in syntactic processing: The role of working memory, *Journey of Memory and Language*, **30**, 580-602

H. Sanfey, J. Kethum, J. Bartlett, S. Markwell, A. H. Meier, R. Williams and G. Dunnington, Verification of proficiency in basic skills for postgraduate year 1 residents, *Surgery*, **148**, 759-767, 2010

M. Talebpour, A. Alijani, G. B. Hanna, Z. Moosa, B. Tang and A. Cuschieri,

Proficiency-gain curve for an advanced laparoscopic procedure defined by obseavation clinical human reliability assessment (OCHRA), *Surgical Endoscopy*, **23**, 869-875, 2009

K. R. Fitzpatrick, The Effect of Instrument Music Participation and Socioeconomic Status on Ohio Four-, Sixth, and Ninth-Grade Proficiency Test Performance, *Journal of Research in Music Education*, **54**, 73-84

T. P. Wright, Factors Affecting the Cost of Airplanes, *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3, 122-128, 1936

山城光雄・星野直人, 指数関数型習熟曲線に関する定数を求める方法, *日本経営工学会誌*, **50**, 440-444, 2000

宮地功, 算術代入文用 CAI による繰り返し学習の効果-実変数と整変数の内部記憶の記憶について, *教育情報研究*, **10**, 39-47, 1994

4 章

T. C. Mendenhall, The Characteristic Curves of Composition, *Science IX*, 237-248, 1887

G. U. Yule, On Some Properties of Normal Distributions, Univariate and Bivariate, based on sums of squares of Frequencies, *Biometrika*, **30**, 1-10, 1938

N. Chomsky, Syntactic Structures, *Moutons & Co.*, 1957

石田基広、R によるテキストマイニング入門、*森北出版株式会社*、2008

金明哲、テキストデータの統計科学入門、*株式会社岩波書店*、2009

有機化学実習および演習、*東京大学出版*

T. Kohonen, Self-Organization and Associative Memory, *Springer Series in Information Sciences*, **8**, 1984

T.Kohonen, Self-Organizing Maps, *Springer Series in Information Sciences*, **30**, 1995

大北正昭ら、自己組織化マップとそのツール、*シュプリンガー・ジャパン株式会社*、2008

徳高平蔵ら、自己組織化マップとその応用、*シュプリンガー・ジャパン株式会社*、2007

徳高平蔵ら、自己組織化マップの応用、*海文堂出版*、1999

主原愛・大島義人、大学学生実験における作業評価基準と作業工程との関連性に関する統計的学解析、環境と安全、**2**、119-125、2011

山岸敬道・山口素夫・佐藤潔、若手研究者のための有機合成ラボガイド、*株式会社講談社*、2010

漆原義之・荒川久雄、有機化学実験書、*共立出版株式会社*、1959

Appendix-1

12 試行回×12 人(2 章の被験者)の 7 つの指標値

※この Appendix-1 における作業者 A,B…は、3 章における作業者 A,B,…とは
対応しているものではなく、同一人物ではない。

作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数b	ステップ数
作業者A	100 ml	1回目	2.4	1.28	5	1.45	11	0.59	3
		2回目	2.8	1.46	3.4	1.45	11.4	0.57	2
		3回目	3.8	1.44	3.8	1.44	7.4	0.46	2
		4回目	3.6	1.39	9	1.47	11.8	0.42	4
	20 ml	1回目	7.2	6.82	7.2	6.82	7.4	0.00	1
		2回目	8.0	6.62	8	6.62	8.2	0.13	1
		3回目	10.6	6.56	10.6	6.56	14.6	0.20	2
		4回目	11.2	6.47	15.4	6.59	18	0.18	4
	10 ml	1回目	10.2	11.07	10.2	11.07	10.2	0.04	1
		2回目	10.0	10.69	10	10.69	12.8	0.16	2
		3回目	9.6	11.01	9.6	11.01	9.6	0.15	1
		4回目	9.2	11.01	9.2	11.01	9.2	0.13	1
作業者B	100 ml	1回目	3.2	0.92	13.6	1.45	17.8	0.18	4
		2回目	4.0	1.48	4.8	1.47	8.4	0.35	2
		3回目	3.4	1.24	17.8	1.52	27.4	0.35	6
		4回目	3.2	1.42	7	1.50	13.6	0.45	3
	20 ml	1回目	1.8	0.20	15.2	6.44	21.4	0.05	3
		2回目	3.6	3.51	15.8	6.35	21.6	0.15	3
		3回目	11.2	6.33	17	6.47	21.4	0.17	3
		4回目	10.2	6.49	10.2	6.49	17.4	0.28	2
	10 ml	1回目	9.6	10.37	11.2	10.44	14.8	0.21	2
		2回目	17.4	10.91	17.4	10.91	27.6	0.21	2
		3回目	10.4	10.86	10.4	10.86	17	0.19	2
		4回目	19.4	10.91	19.4	10.91	19.4	0.17	1
作業者C	100 ml	1回目	2.8	1.02	13.6	1.49	19.4	0.28	5
		2回目	7.8	1.25	12.4	1.38	16.6	0.14	3
		3回目	7.6	1.53	5.6	1.31	7.8	0.15	2
		4回目	7.0	1.33	10.2	1.40	11.4	0.17	3
	20 ml	1回目	11.0	6.85	11	6.85	11	0.04	1
		2回目	8.6	6.35	11.2	6.47	15	0.17	3
		3回目	8.0	6.41	10.4	6.56	17	0.25	3
		4回目	6.4	4.47	19.2	6.62	20.8	0.15	6
	10 ml	1回目	12.2	10.80	15.4	10.99	15.4	0.16	4
		2回目	8.4	10.22	16	10.87	22.6	0.21	5
		3回目	14.2	10.32	14.4	10.33	17.6	0.04	2
		4回目	14.4	10.71	14.8	10.72	17.4	0.07	2

作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数b	ステップ数
作業者D	100 ml	1回目	1.8	0.32	10.8	1.41	17	0.12	5
		2回目	5.0	1.22	7.6	1.35	12.2	0.30	3
		3回目	3.0	0.83	11.2	1.34	13.8	0.19	6
		4回目	4.6	1.28	9	1.41	13	0.31	3
	20 ml	1回目	11.8	6.62	11.8	6.62	17.4	0.11	2
		2回目	3.4	4.67	20.6	6.37	25.2	0.28	6
		3回目	17.8	6.18	31.2	6.60	41.6	0.13	6
		4回目	14.0	6.29	24.6	6.52	29.8	0.16	4
	10 ml	1回目	9.2	7.59	22.2	11.00	28.2	0.11	3
		2回目	11.8	10.80	11.8	10.80	22.2	0.20	2
		3回目	9.0	10.54	13.8	10.86	24	0.24	4
		4回目	13.0	10.11	18	10.52	21.8	0.17	4
作業者E	100 ml	1回目	9.6	1.23	17	1.44	20.6	0.11	5
		2回目	5.8	1.03	17.2	1.42	20.4	0.13	5
		3回目	2.6	0.58	27.2	1.52	31.6	0.13	9
		4回目	6.4	1.14	32	1.51	40.8	0.19	8
	20 ml	1回目	9.2	5.82	9.2	5.82	15.8	0.17	2
		2回目	5.0	5.44	9.2	6.14	17.2	0.35	3
		3回目	6.8	5.34	12.4	6.38	18.6	0.21	3
		4回目	10.8	5.90	23.8	6.69	32	0.17	4
	10 ml	1回目	10.0	10.00	10	10.00	15.6	0.14	2
		2回目	8.2	10.30	14.2	10.96	20	0.25	3
		3回目	8.6	10.53	15.2	10.94	18	0.31	4
		4回目	9.8	10.42	9.8	10.42	16	0.18	2
作業者F	100 ml	1回目	3.6	0.99	6.6	1.31	10.6	0.19	4
		2回目	1.2	0.13	6	1.42	10.8	0.13	3
		3回目	4.2	1.53	4.2	1.53	10.6	0.26	2
		4回目	4.2	1.36	7.4	1.52	14.2	0.30	3
	20 ml	1回目	6.2	6.61	9	6.72	10.4	0.34	3
		2回目	1.8	1.44	1.8	1.44	6.8	0.02	2
		3回目	9.0	6.58	9	6.58	13.6	0.19	2
		4回目	6.4	6.42	10.2	6.64	15.2	0.24	3
	10 ml	1回目	6.4	10.45	6.4	10.45	9.8	0.14	2
		2回目	8.0	10.95	8	10.95	14	0.15	2
		3回目	5.8	10.00	5.8	10.00	10.6	0.20	2
		4回目	10.8	11.56	10.8	11.56	11	0.07	1

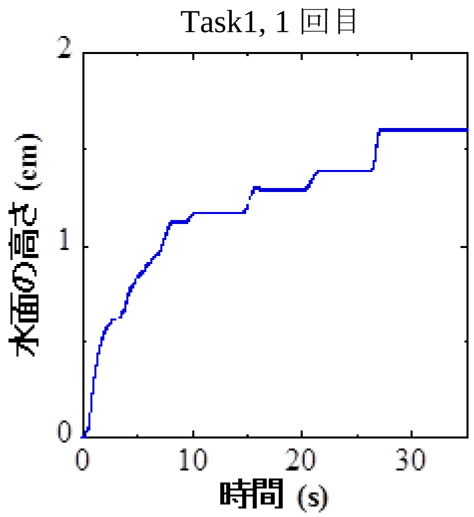
作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数b	ステップ数
作業者G	100 ml	1回目	1.6	0.99	7.2	1.30	13.8	0.19	3
		2回目	1.4	0.73	15.8	1.42	26	0.16	4
		3回目	2.0	0.68	22.8	1.45	32	0.11	5
		4回目	1.8	0.75	20.2	1.46	27.6	0.16	5
	20 ml	1回目	2.4	1.76	19.4	6.35	29.8	0.06	5
		2回目	2.8	2.52	37.4	6.61	47.4	0.12	6
		3回目	3.0	2.95	17.2	6.32	29.8	0.11	5
		4回目	2.6	1.80	14.8	6.35	24.4	0.09	5
	10 ml	1回目	2.8	2.88	32.4	10.82	45	0.05	7
		2回目	3.0	3.96	23.2	10.87	39	0.06	5
		3回目	3.6	4.87	26.8	10.75	37.4	0.14	7
		4回目	2.8	2.64	25.4	10.88	37.2	0.10	7
作業者H	100 ml	1回目	3.8	1.46	3.8	1.46	14.8	0.48	2
		2回目	4.6	1.46	4.6	1.46	9.8	0.25	2
		3回目	2.2	1.35	11.8	1.60	13	0.66	3
		4回目	3.2	1.22	6.8	1.49	18	0.33	3
	20 ml	1回目	8.0	6.96	8	6.96	8	0.17	1
		2回目	6.0	6.46	6	6.46	16.4	0.29	2
		3回目	4.8	7.32	4.8	7.32	4.8	0.32	1
		4回目	8.0	6.49	7.8	6.50	11.2	0.27	3
	10 ml	1回目	11.4	10.77	13.2	10.93	27	0.22	3
		2回目	11.8	11.07	11.8	11.07	11.8	0.03	1
		3回目	8.6	11.35	8.6	11.35	8.6	0.20	1
		4回目	5.0	6.24	11.2	10.49	15	0.15	3
作業者I	100 ml	1回目	1.2	0.42	25.8	1.48	32.6	0.12	10
		2回目	1.2	0.24	12.6	1.45	18.4	0.16	5
		3回目	3.2	1.03	21.2	1.44	27.8	0.26	6
		4回目	3.0	0.82	23.4	1.45	33.4	0.21	8
	20 ml	1回目	5.8	6.05	15	6.58	21.6	0.30	4
		2回目	9.2	5.69	21.4	6.62	24.6	0.18	5
		3回目	16.8	6.53	20.4	6.66	26	0.09	4
		4回目	9.2	5.74	12	6.08	15.4	0.22	3
	10 ml	1回目	8.4	10.72	8.4	10.72	14.2	0.24	2
		2回目	9.4	10.08	13.4	10.81	15.6	0.11	3
		3回目	12.0	9.92	12	9.92	19.6	0.11	2
		4回目	14.8	10.30	17	10.81	27.2	0.11	3

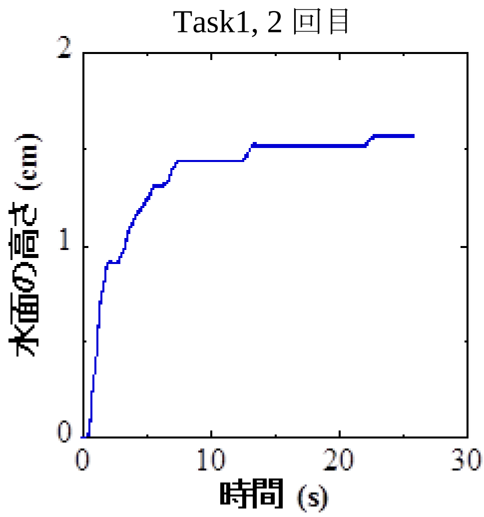
作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数b	ステップ数
作業者J	100 ml	1回目	1.6	0.48	24.4	1.43	30.4	0.14	6
		2回目	1.8	0.80	12.4	1.35	18.4	0.26	5
		3回目	1.8	0.87	16.6	1.48	24	0.40	5
		4回目	2.6	0.77	8.6	1.34	13.8	0.25	5
	20 ml	1回目	2.8	2.95	18.6	6.58	24.4	0.19	8
		2回目	8.0	5.04	14.6	6.50	18.6	0.14	5
		3回目	2.8	3.89	8.6	6.54	12.6	0.30	5
		4回目	4.0	1.46	15.8	6.49	18.4	0.07	6
	10 ml	1回目	9.2	10.63	9.2	10.63	10.8	0.10	2
		2回目	8.6	10.36	14.4	10.80	18.2	0.19	4
		3回目	6.8	10.68	6.8	10.68	10.4	0.31	2
		4回目	9.4	10.94	9.4	10.94	9.4	0.21	1
作業者K	100 ml	1回目	2.2	1.01	7.4	1.16	13.4	0.35	2
		2回目	1.2	0.52	11	1.48	18	0.26	4
		3回目	2.6	1.68	2.6	1.68	2.6	0.57	1
		4回目	1.2	0.75	7	1.40	11.6	0.28	4
	20 ml	1回目	3.2	3.55	10.6	5.62	14.8	0.16	3
		2回目	8.2	4.68	16.4	6.61	20.8	0.13	5
		3回目	5.0	5.40	14.4	6.47	17.2	0.34	5
		4回目	8.6	5.70	16.4	6.46	21	0.22	4
	10 ml	1回目	1.6	0.99	15.6	11.04	27.2	0.01	3
		2回目	16.2	8.79	31	11.23	37.4	0.06	4
		3回目	17.2	10.84	17.2	10.84	24.2	0.13	2
		4回目	15.0	10.52	19.8	10.78	24.2	0.12	3
作業者L	100 ml	1回目	1.6	0.76	24.2	1.48	30.2	0.21	8
		2回目	1.8	0.93	11.6	1.50	21.6	0.26	4
		3回目	1.2	0.74	15.4	1.45	19.6	0.24	5
		4回目	2.2	1.02	15.2	1.41	22.4	0.36	6
	20 ml	1回目	1.4	0.95	19.6	6.59	24.2	0.01	5
		2回目	4.0	5.06	15.2	6.53	19.6	0.28	5
		3回目	3.4	3.88	17	6.56	23.2	0.25	6
		4回目	3.0	4.81	10	6.10	13.2	0.36	4
	10 ml	1回目	2.6	5.05	13	10.89	22.2	0.21	5
		2回目	3.4	7.89	14.2	10.82	19.2	0.28	5
		3回目	3.8	7.67	9.2	10.64	16.2	0.25	3
		4回目	4.0	9.91	9.6	10.45	12	0.39	4

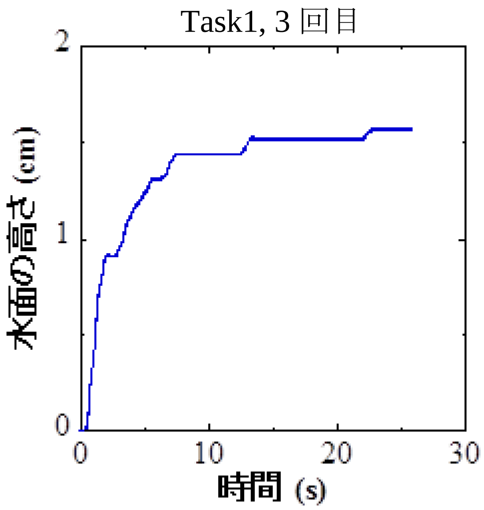
Appendix-2
液面挙動についてのデータ

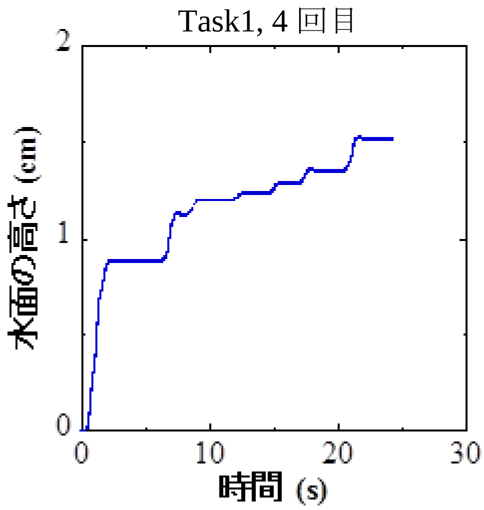
3 章で行った 10 人分の水の秤量操作と滴定操作のグラフを添付する。
前半の 20 ページは、水の秤量操作であり、各作業者につき 12 個のグラフがあり、task 名と試行回が記載されている。
後半の 10 ページは、滴定操作であり、各作業者につき 5 つのグラフがあり、その試行回が記載されている。

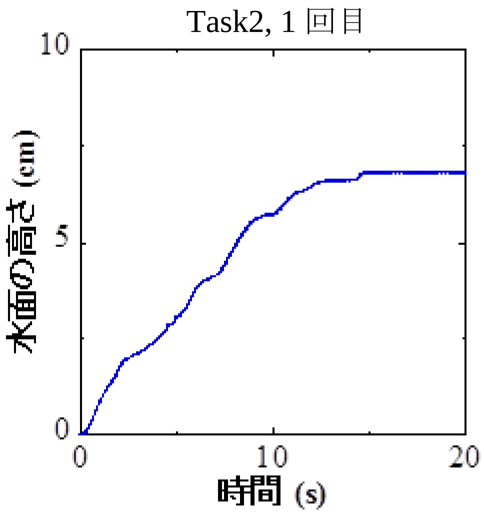
※この Appendix-2 における作業者 A,B…は、2 章における作業者 A,B,…とは対応しているものではなく、同一人物ではない。

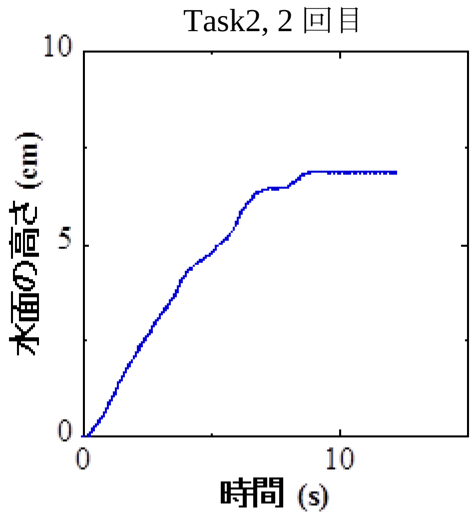

Task1, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
30


Task1, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
30

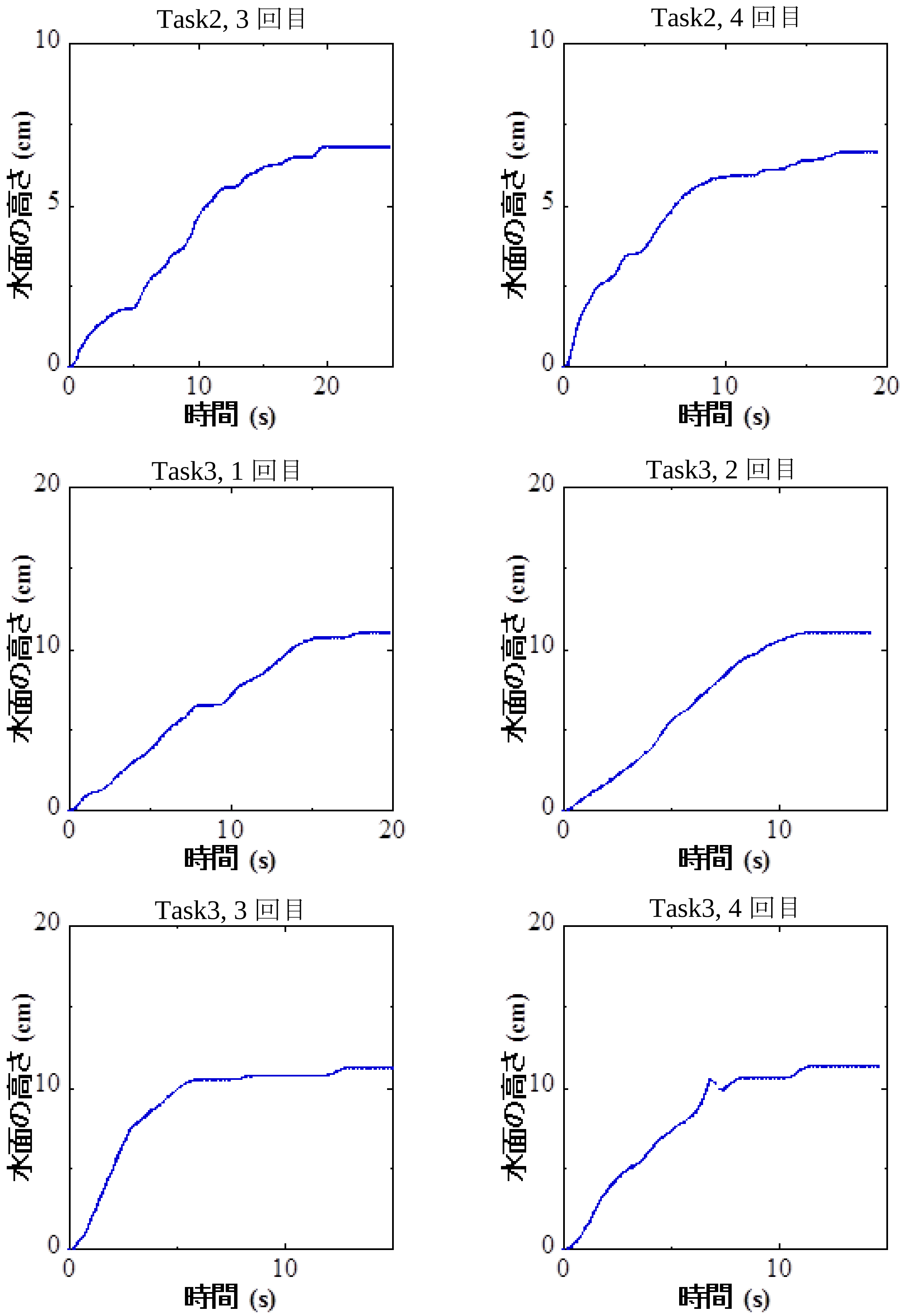

Task1, 3 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
30


Task1, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
30

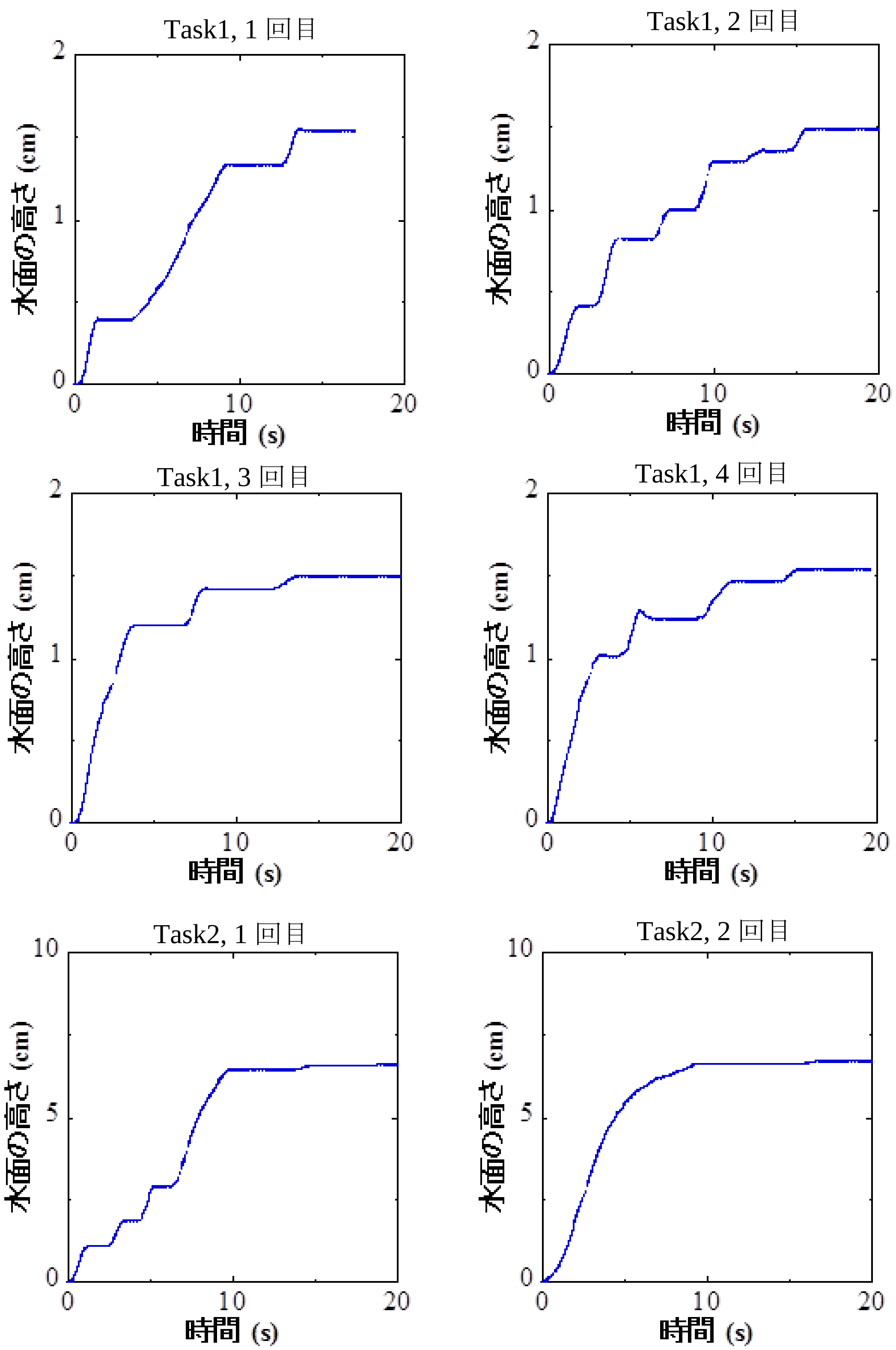

Task2, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
0
10
20


Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
0
10

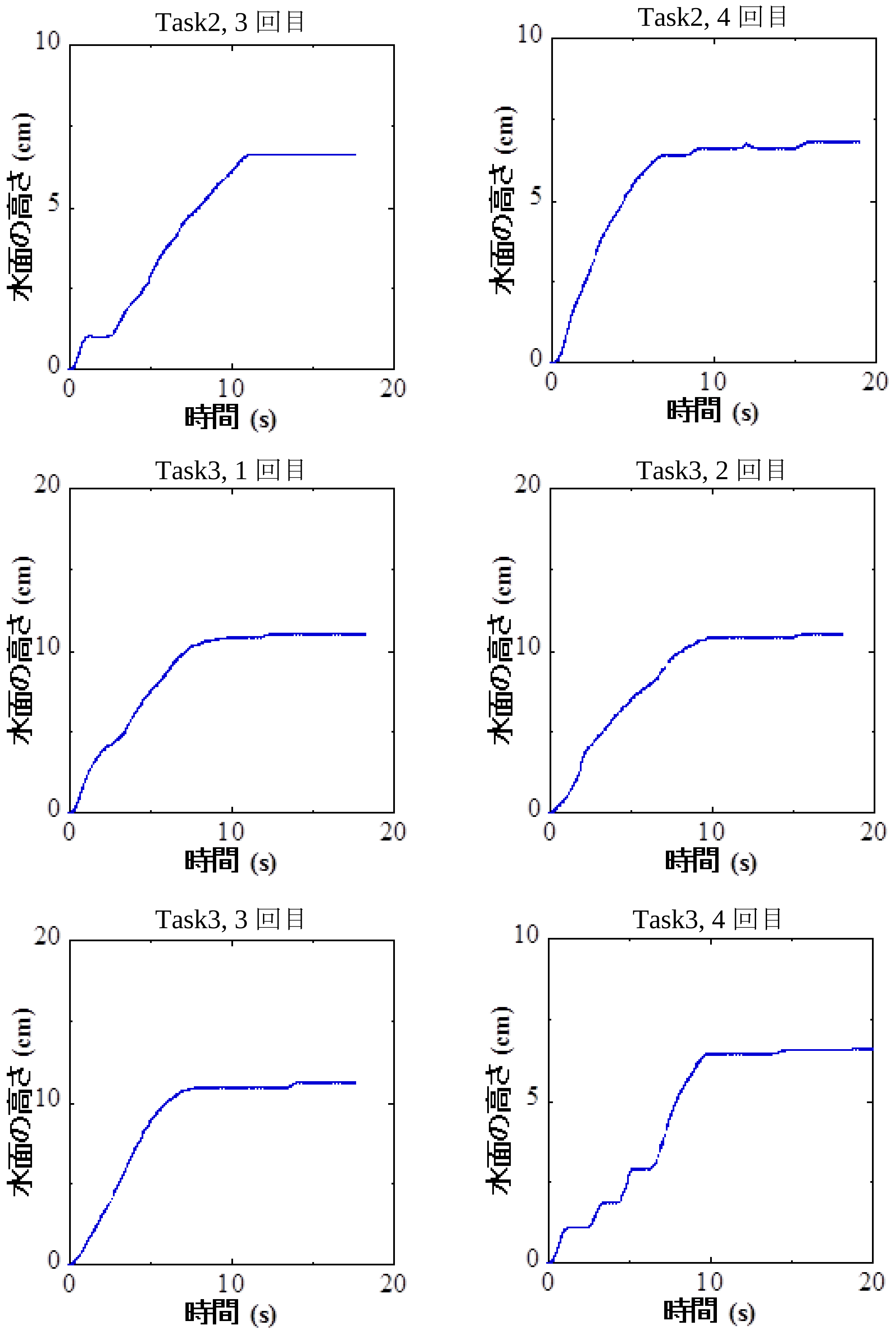
作業者 A


Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20

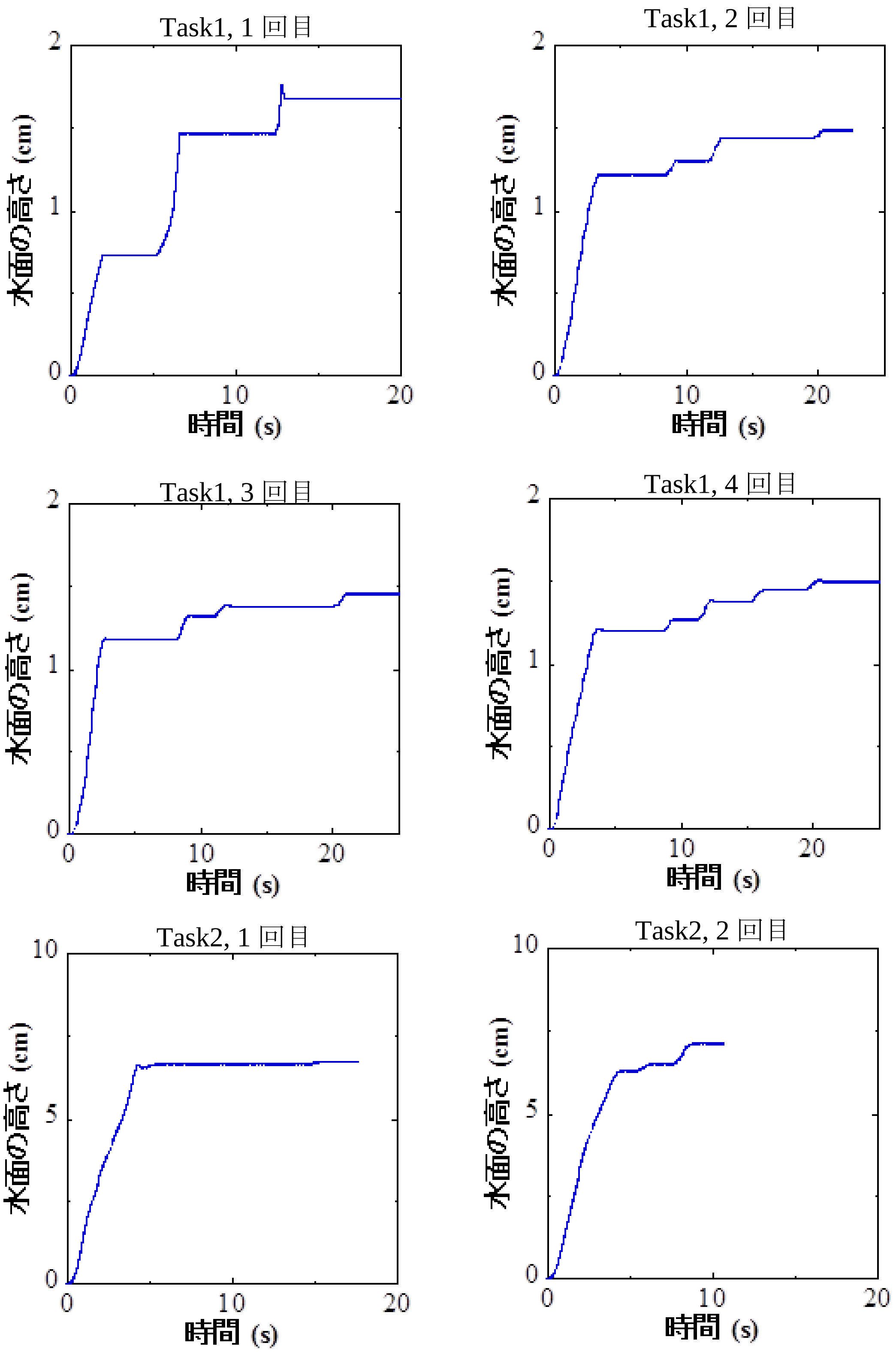
作業者 A


Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
10
20
0
1
2
5
10

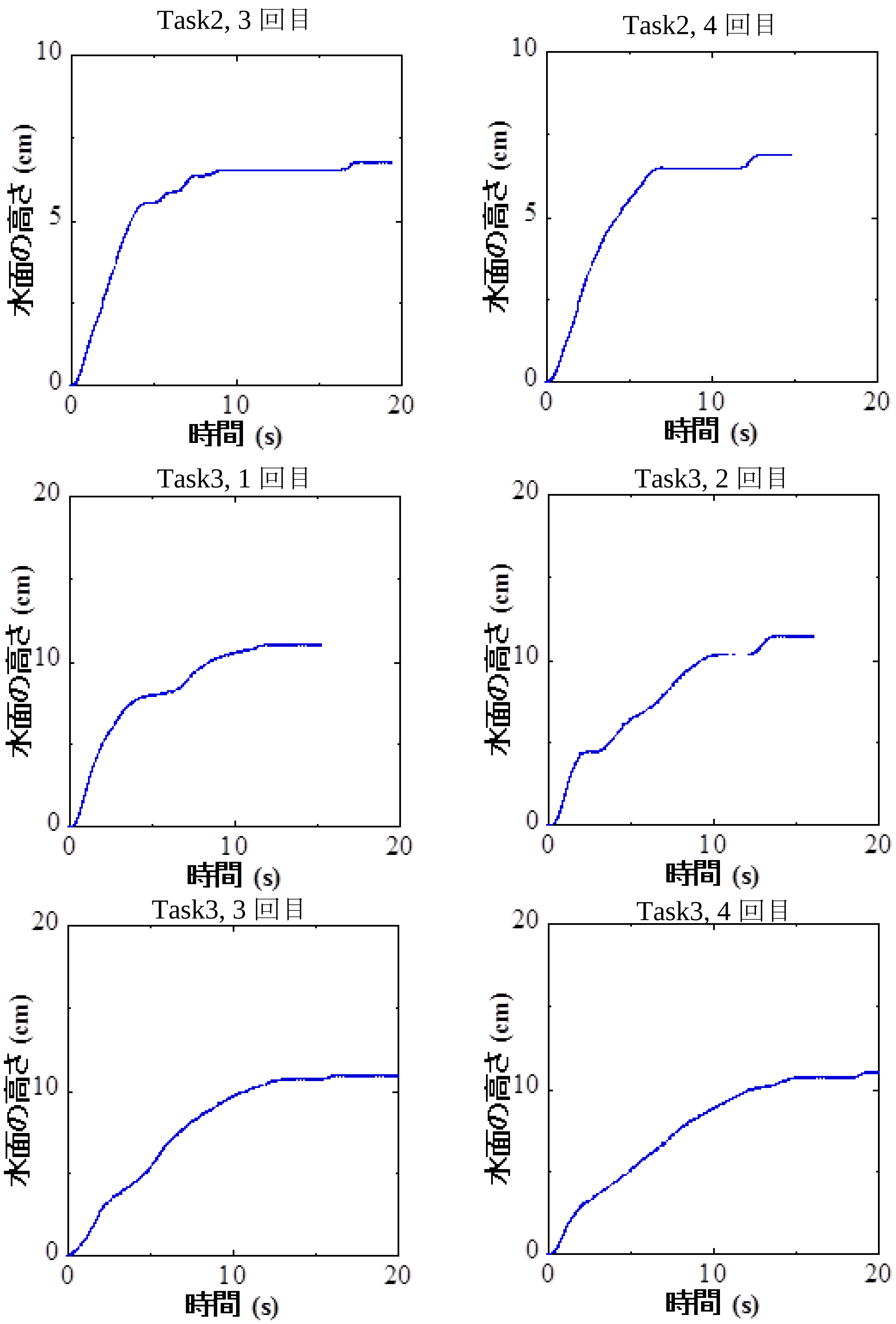
作業者 B


Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20

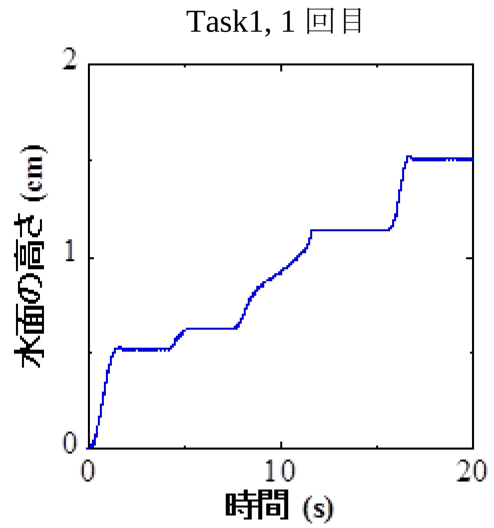
作業者 B

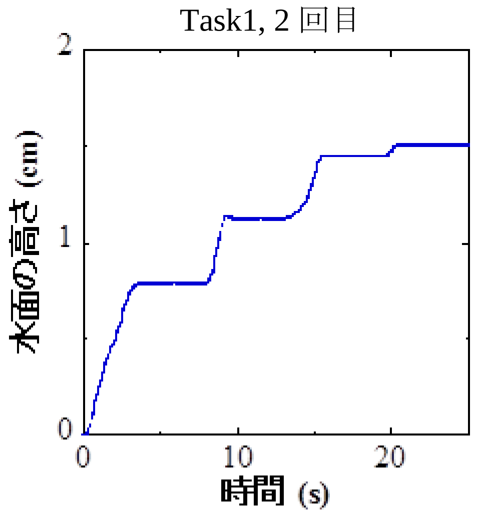

Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
5
10
20

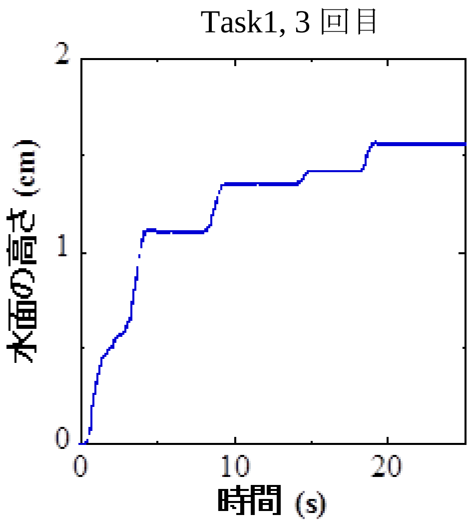
作業者 C

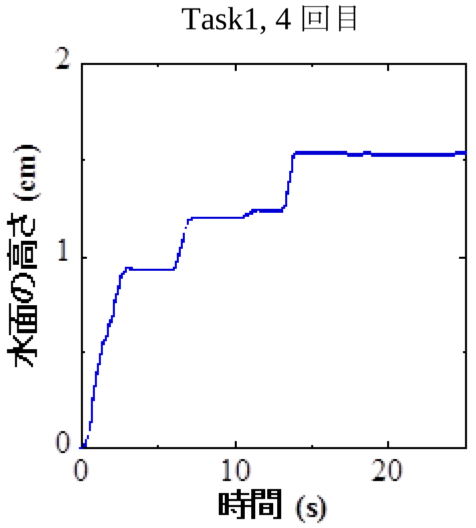

Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20

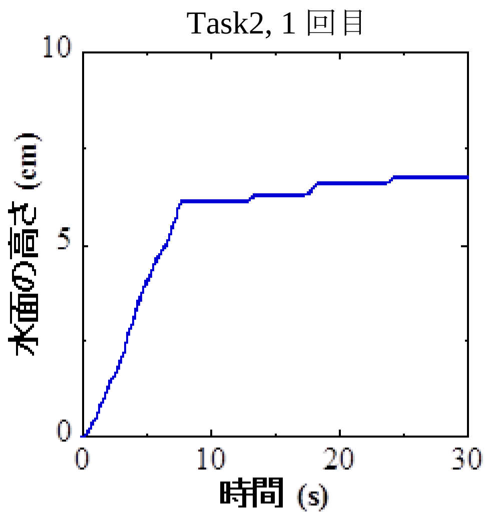
作業者 C

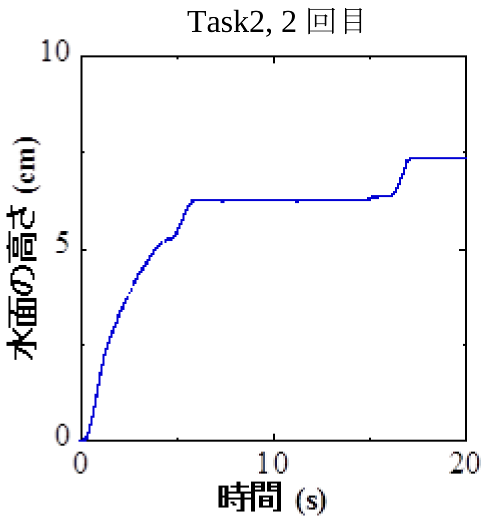

Task1, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20


Task1, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20

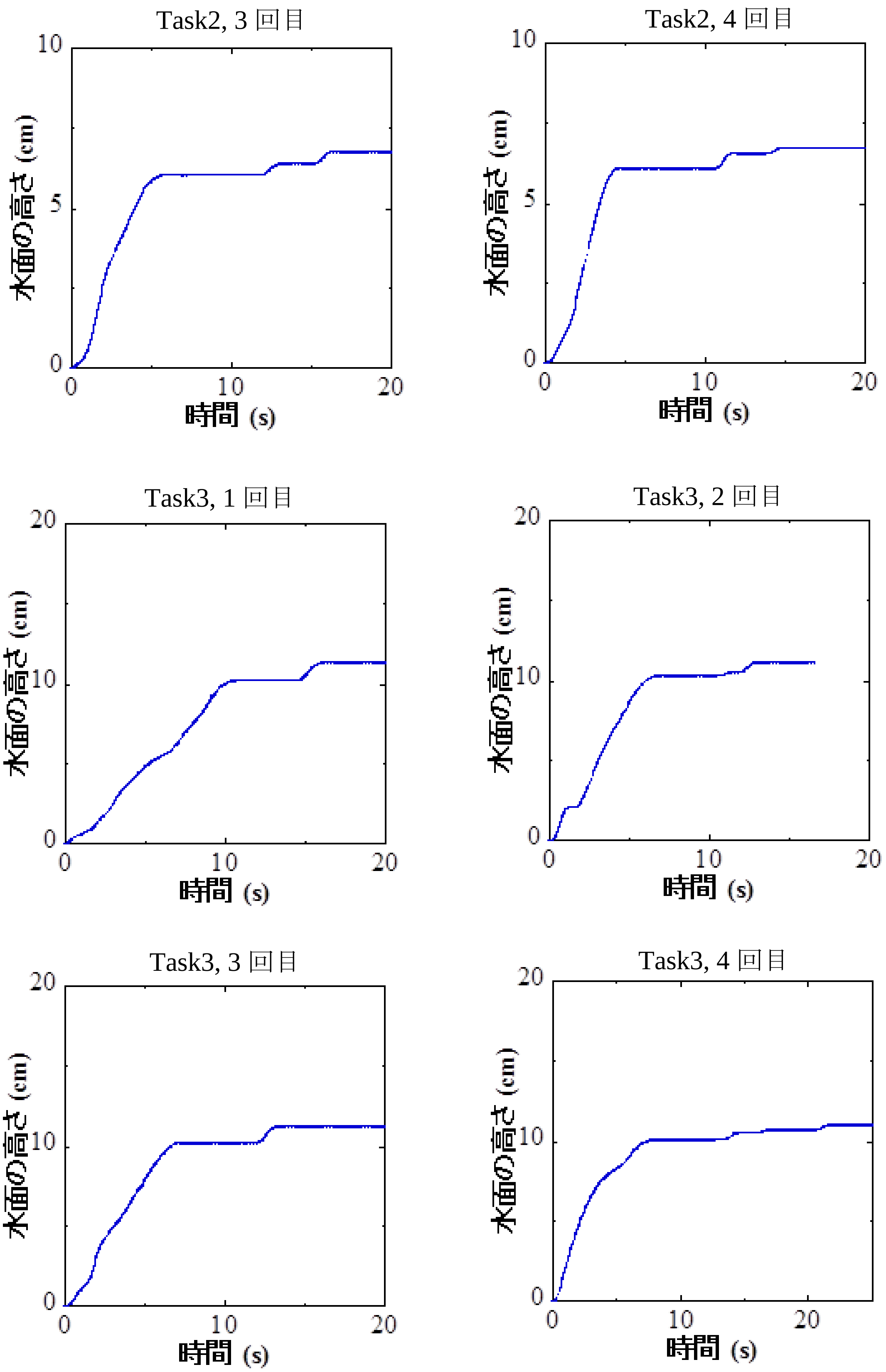

Task1, 3 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20


Task1, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20

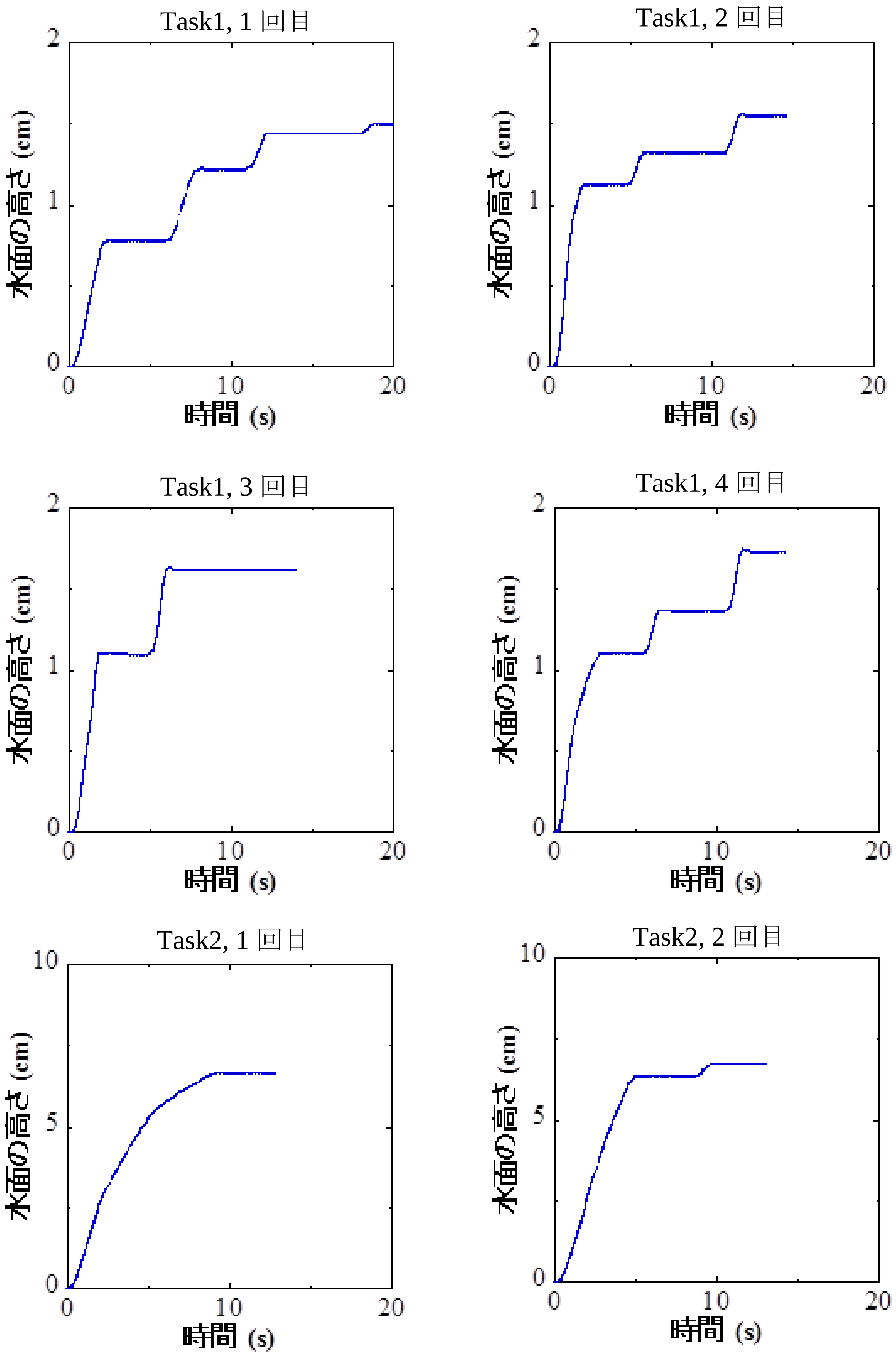

Task2, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
0
10
20
30


Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
0
10
20

作業者 D

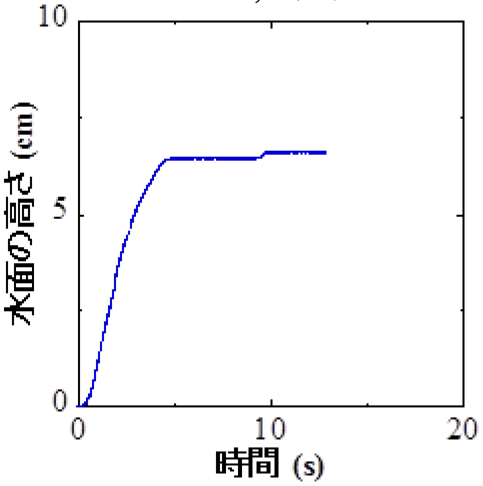

Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20

作業者 D

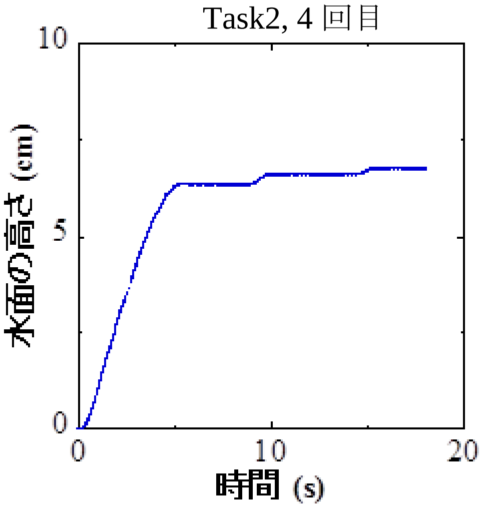

Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)

作業者 E

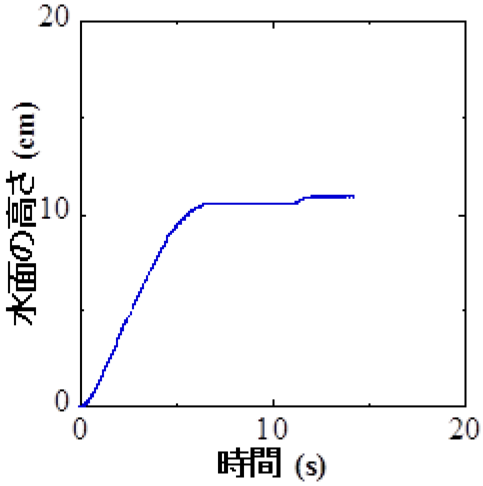
Task2, 3 回目



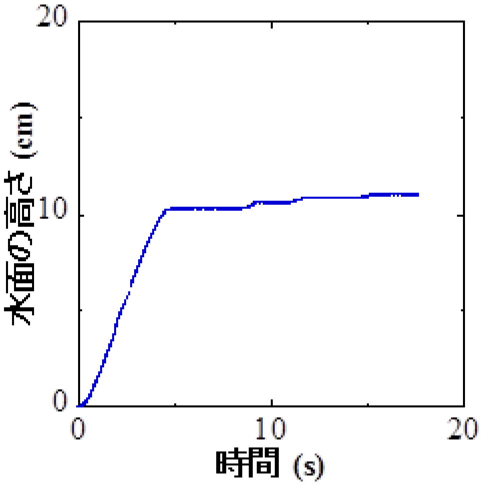
Task2, 4 回目



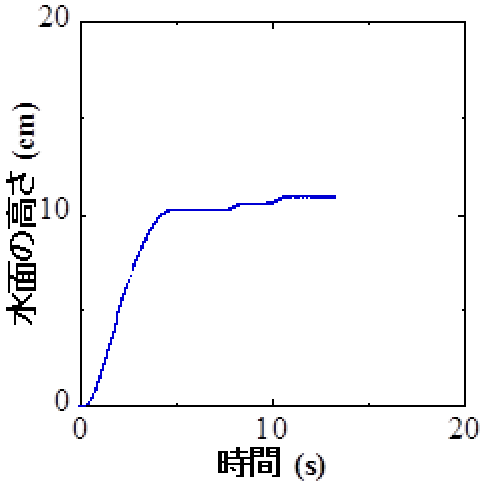
Task3, 1 回目



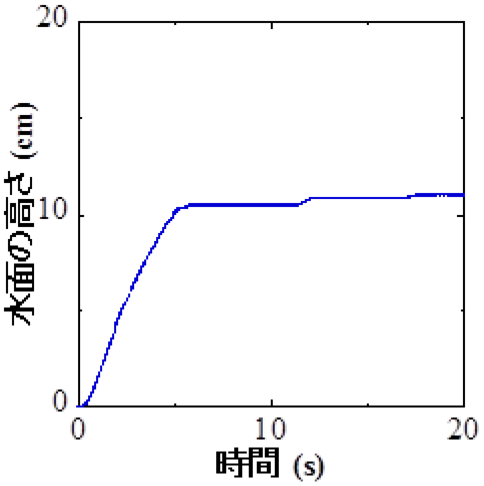
Task3, 2 回目



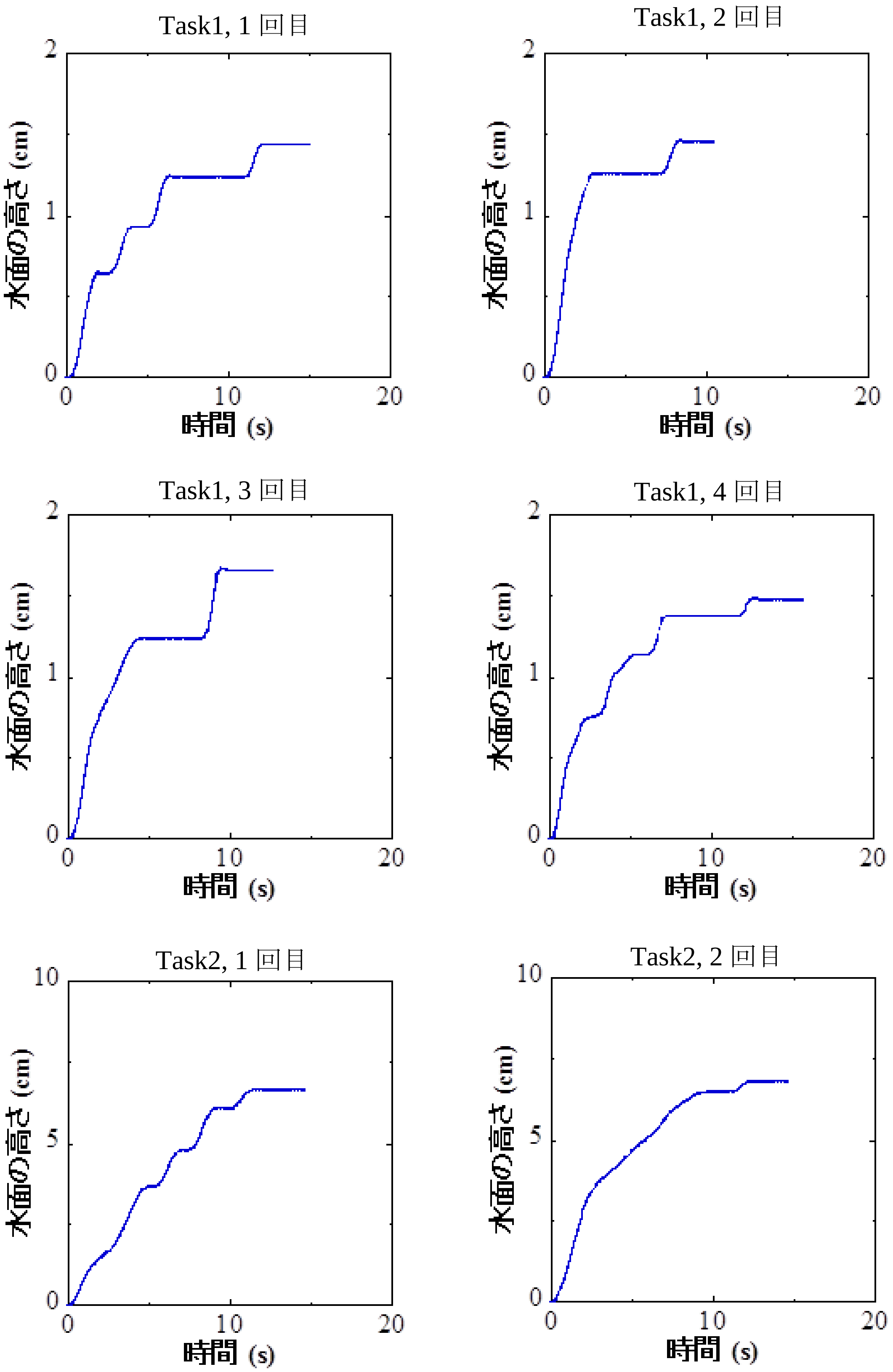
Task3, 3 回目



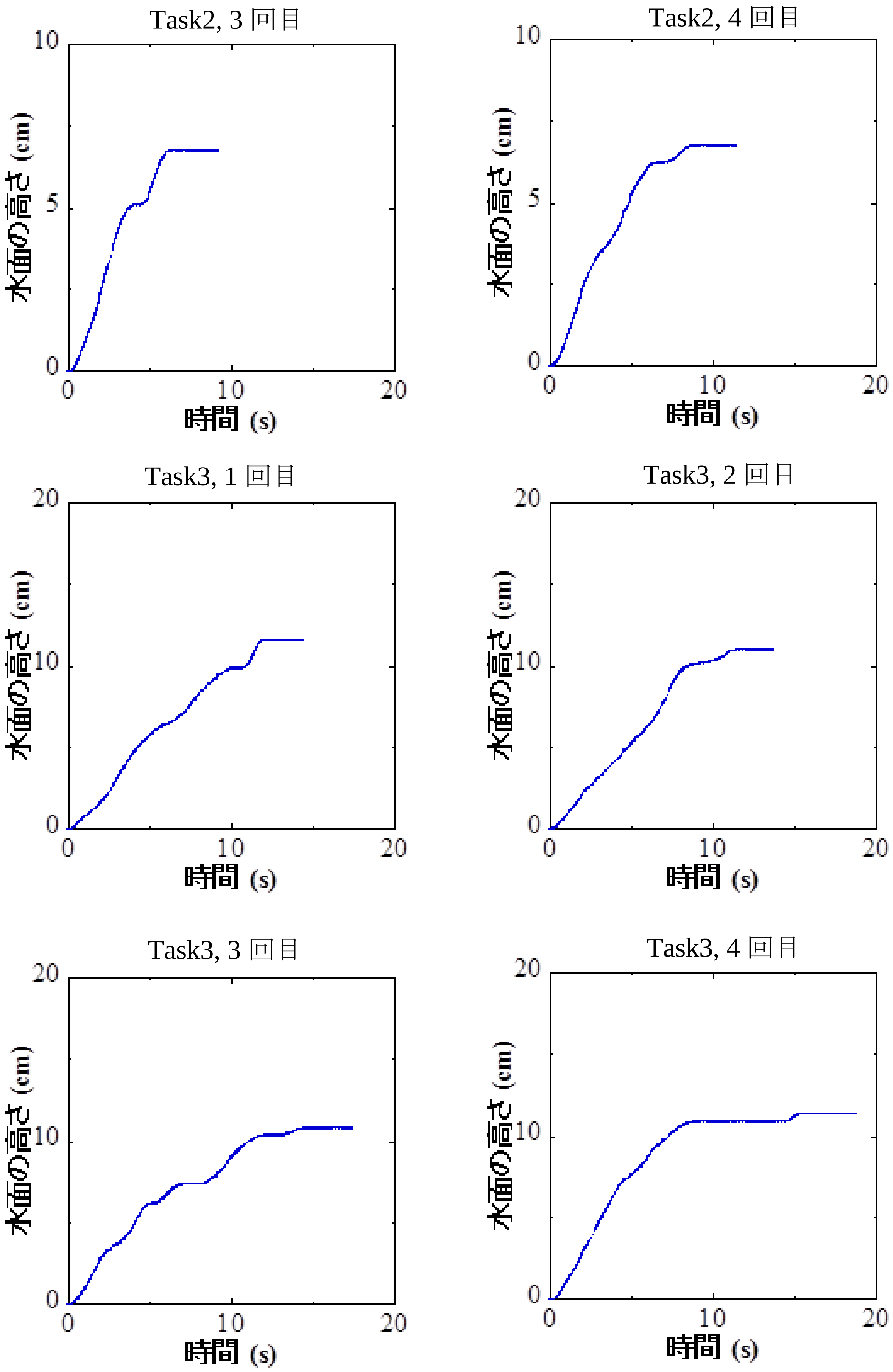
Task3, 4 回目



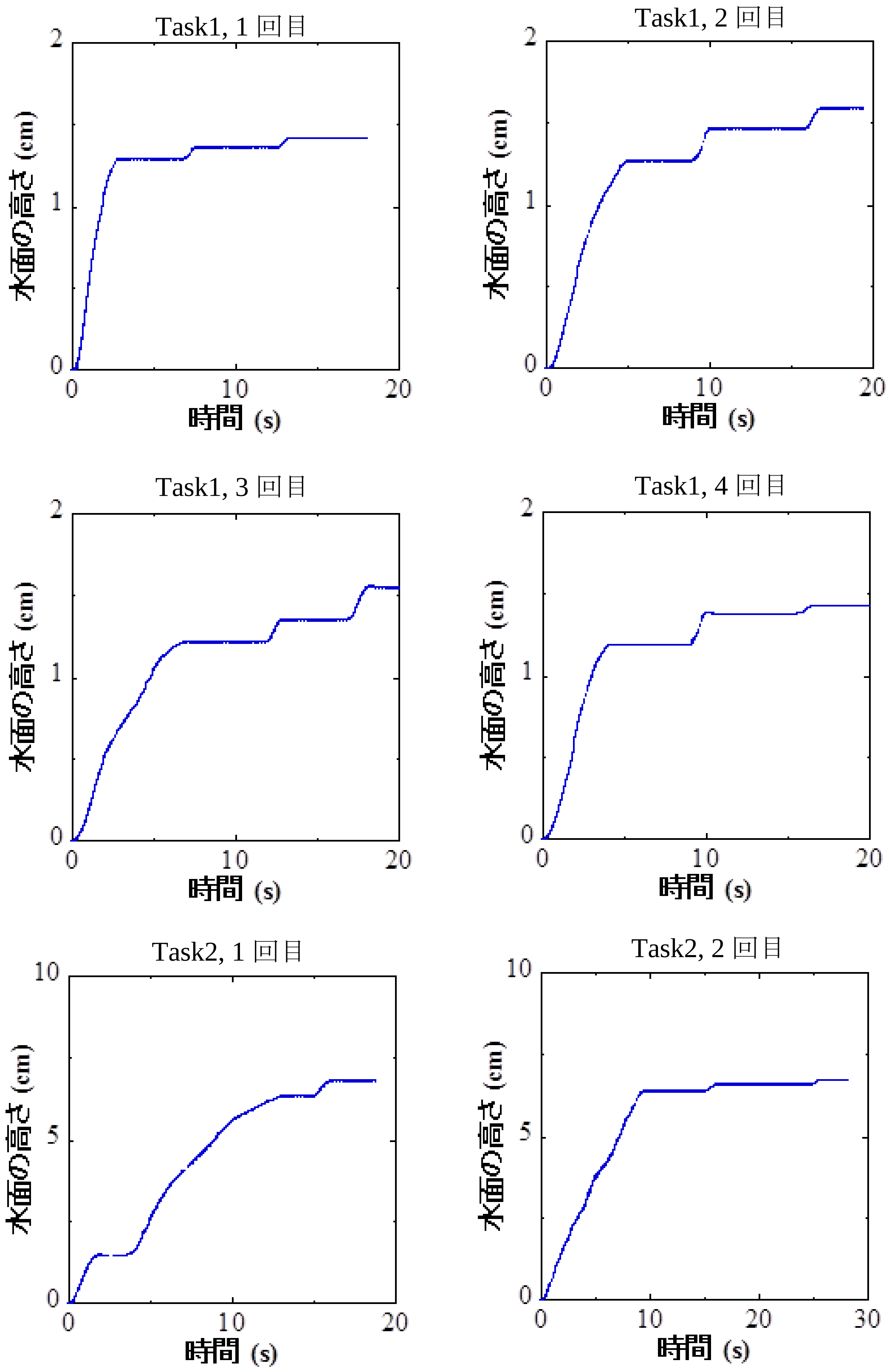
作業者 E


Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
5
10
20

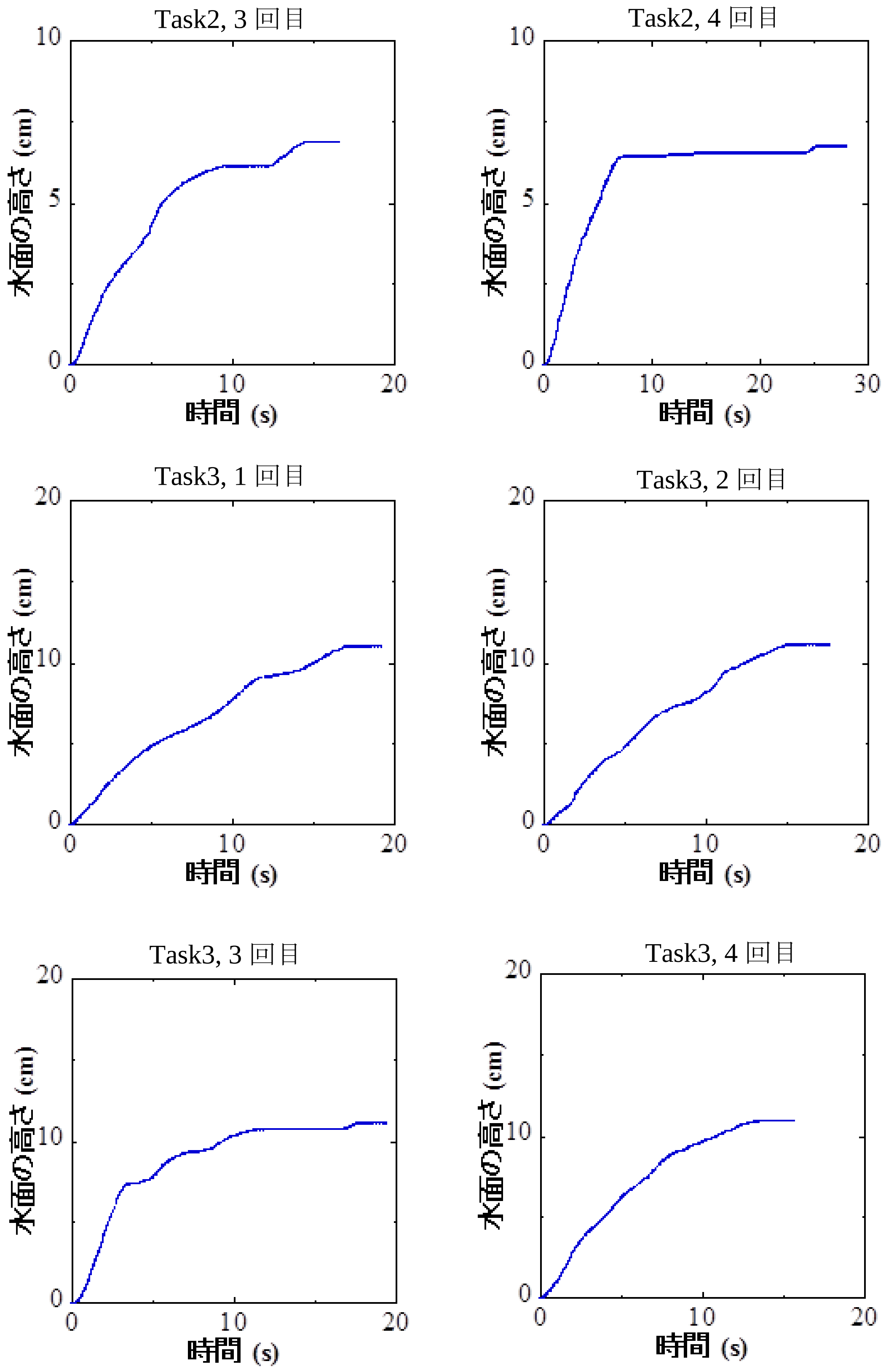
作業者 F


Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20

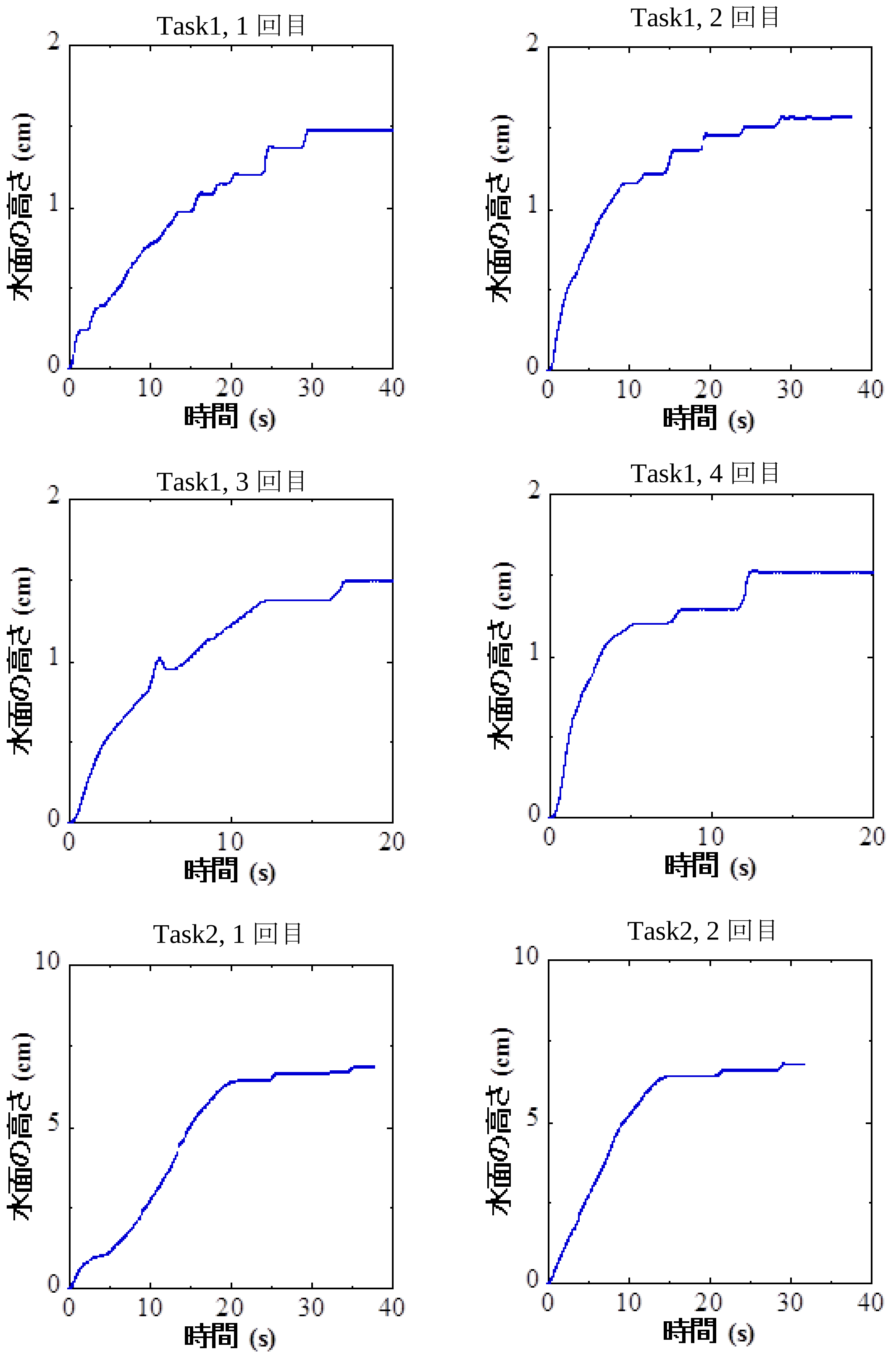
作業者 F


Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
5
10
20
30

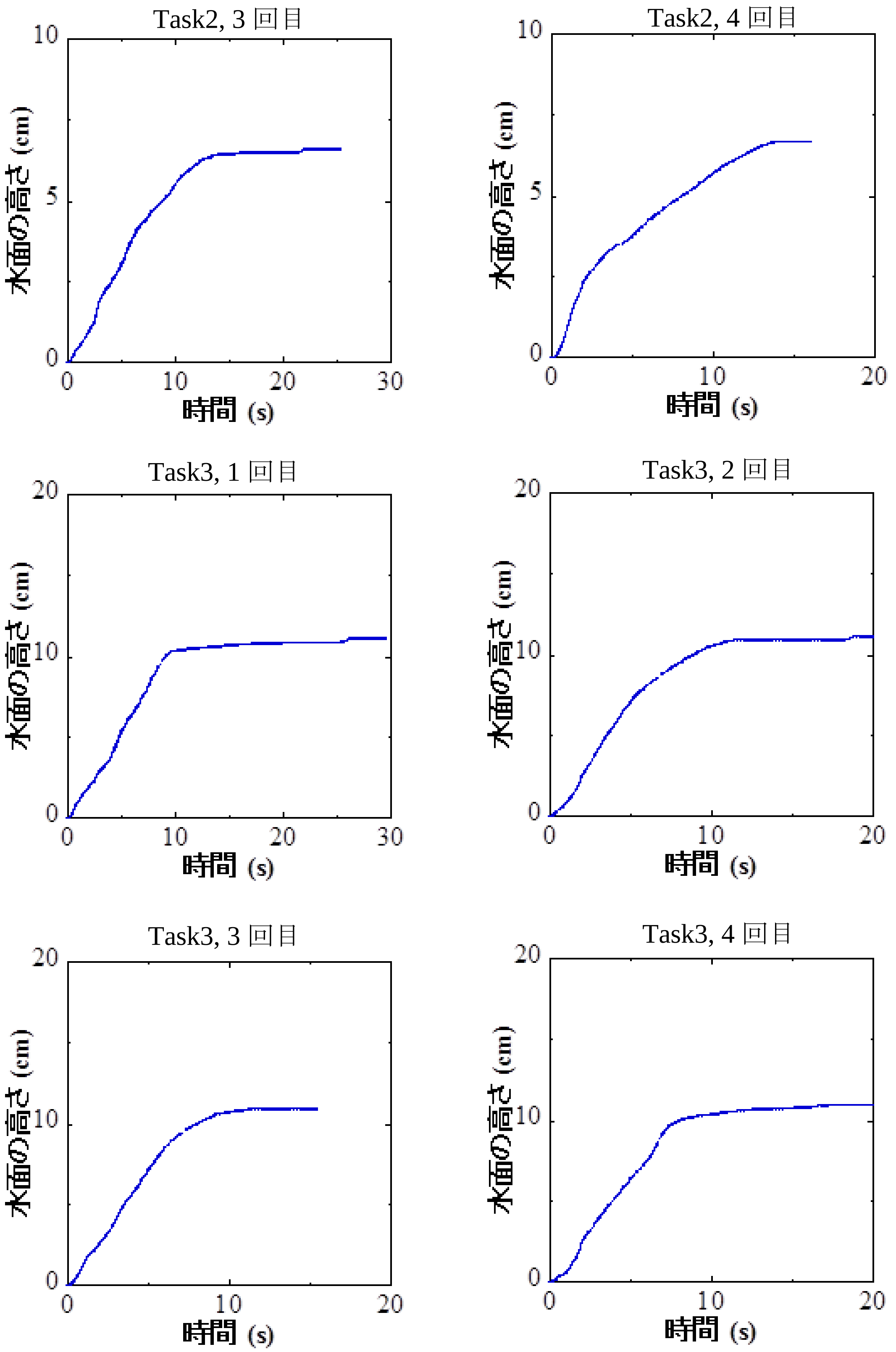
作業者 G


Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20
30

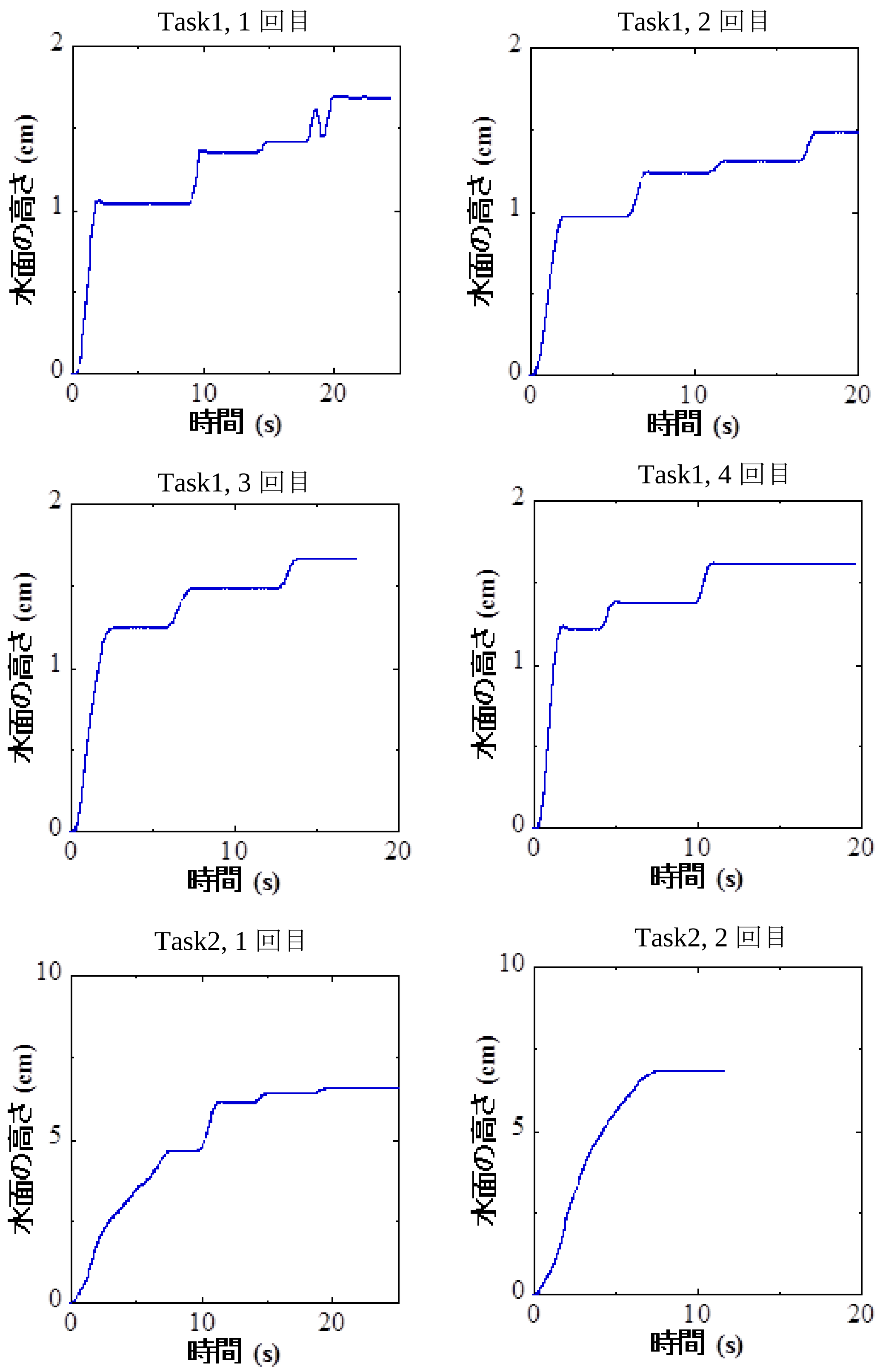
作業者 G


Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
5
10
20
30
40

作業者 H

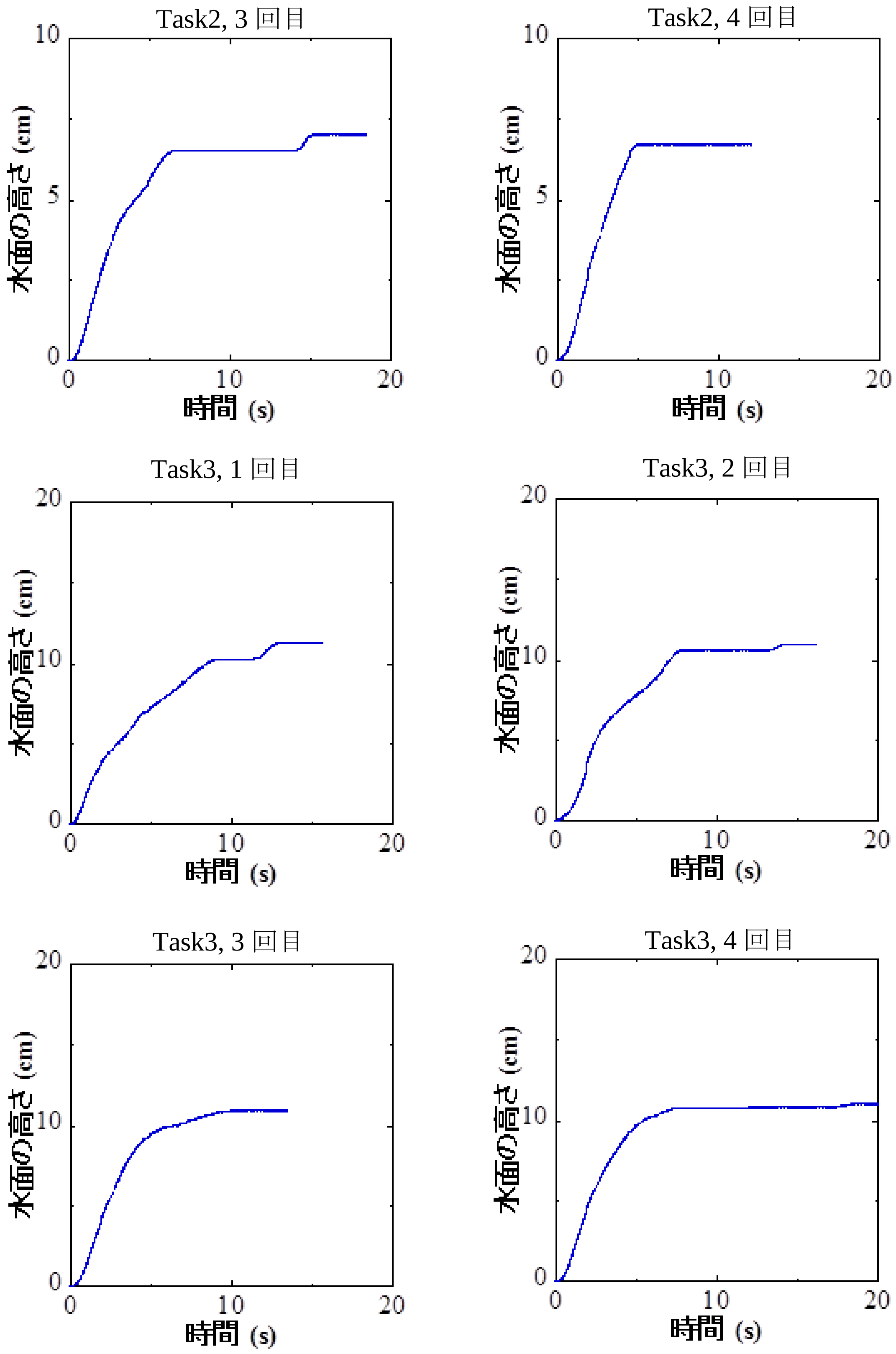

Task2, 3 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
Task2, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
Task3, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
Task3, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
Task3, 3 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)

作業者 H

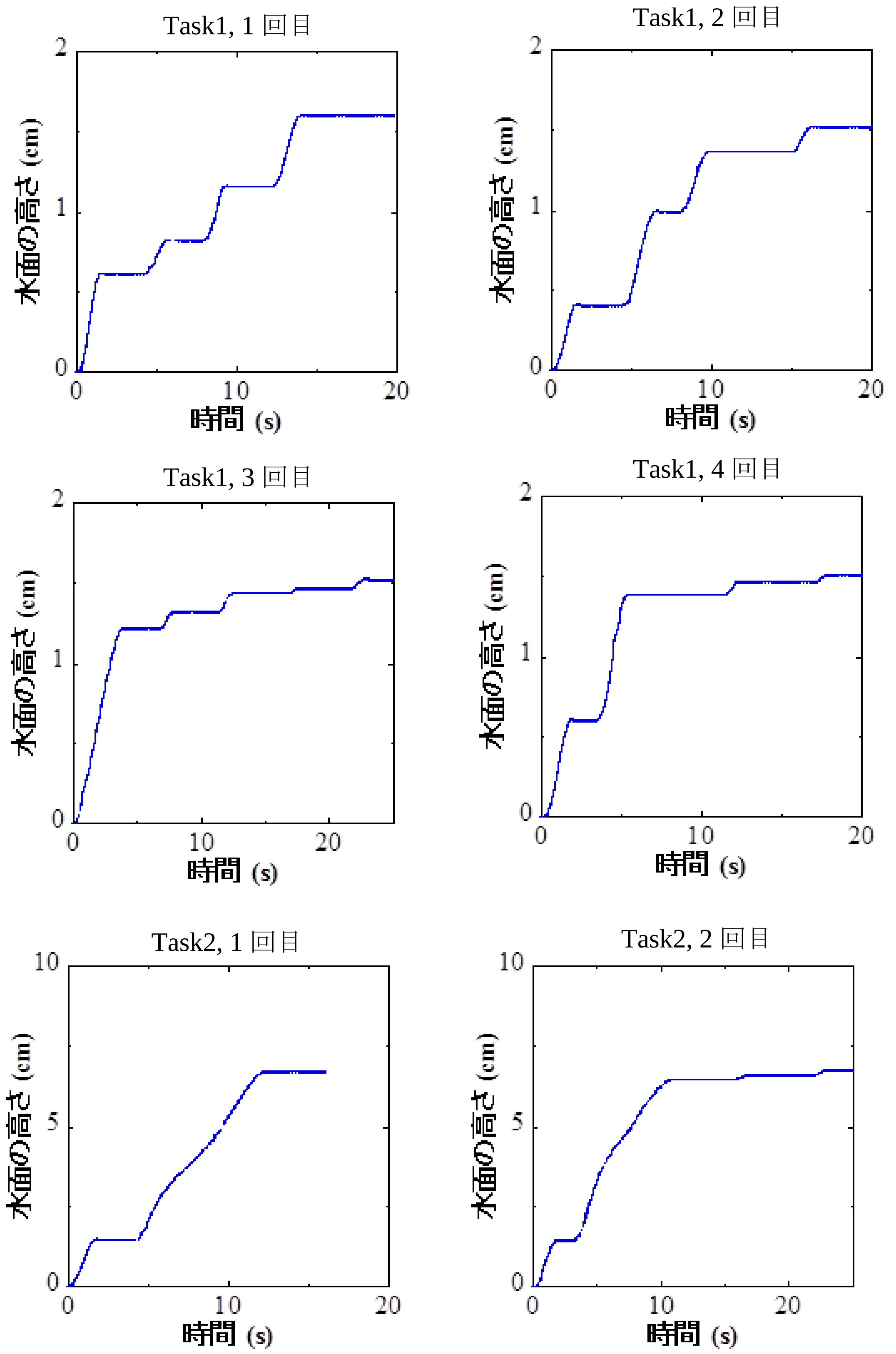


Task1, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
Task1, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
Task1, 3 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
Task1, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
0
10
20
Task2, 1 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
0
10
20
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
0
10
20

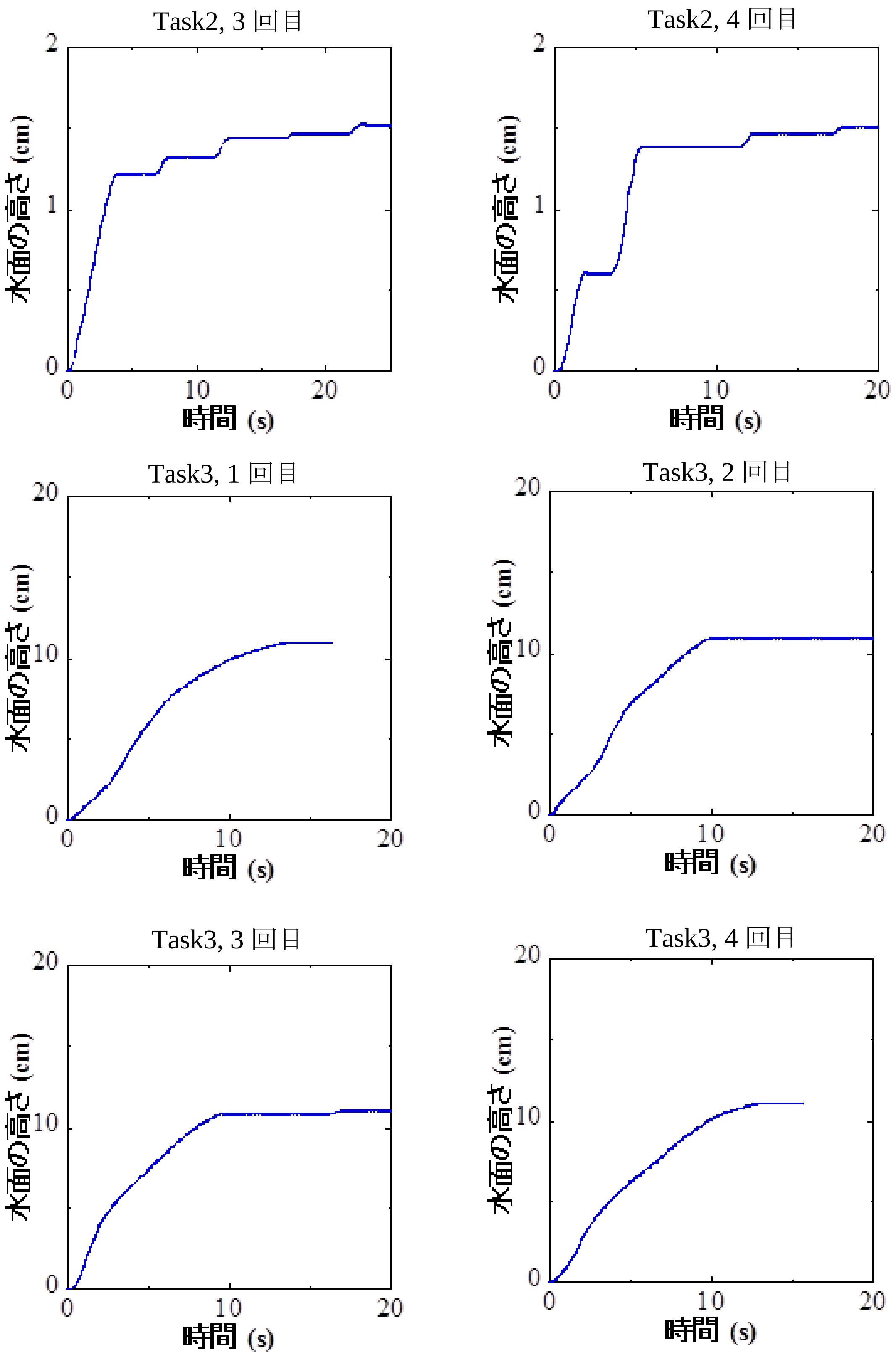
作業者 I


Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
5
10
20

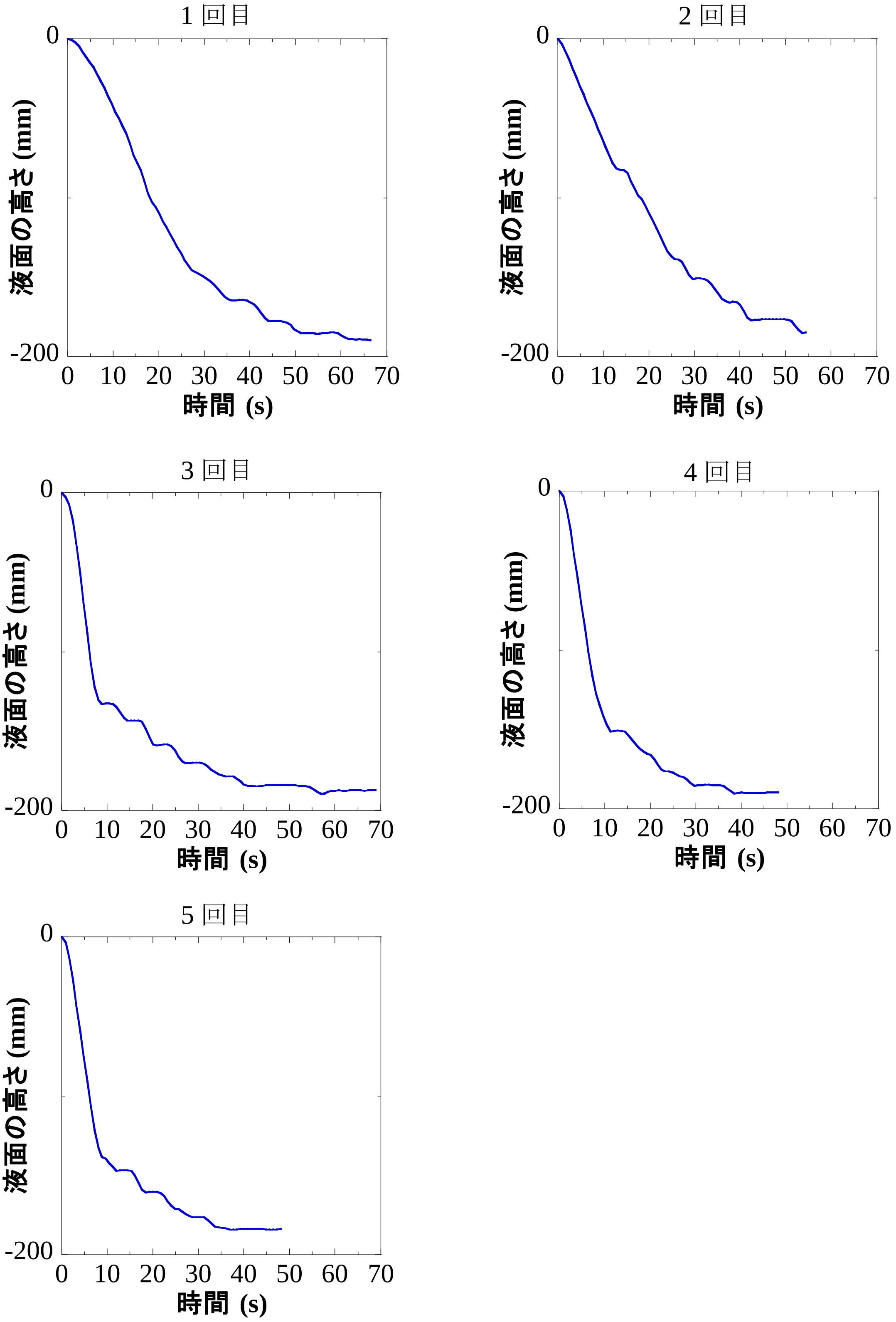
作業者 I


Task1, 1 回目
Task1, 2 回目
Task1, 3 回目
Task1, 4 回目
Task2, 1 回目
Task2, 2 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)
0
1
2
5
10
20

作業者 J

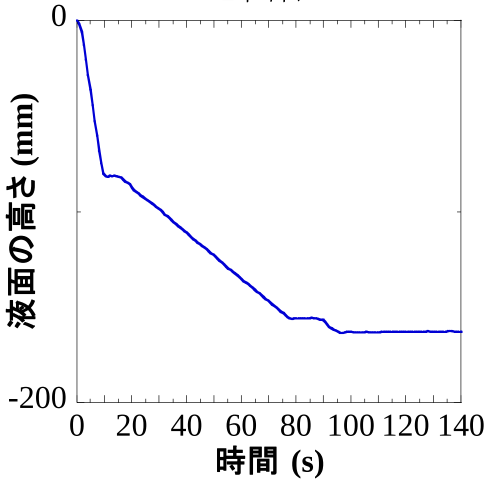

Task2, 3 回目
Task2, 4 回目
Task3, 1 回目
Task3, 2 回目
Task3, 3 回目
Task3, 4 回目
水面の高さ (cm)
時間 (s)

作業者 J

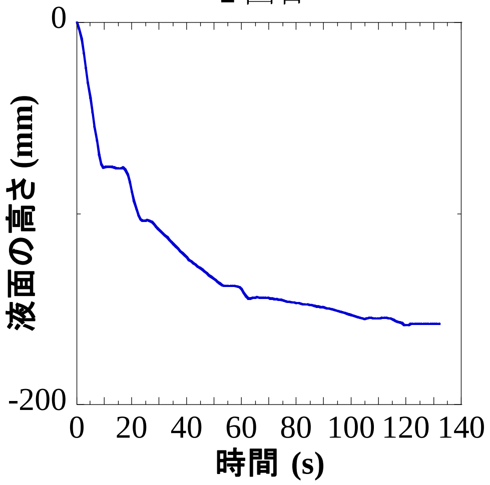


作業者 A

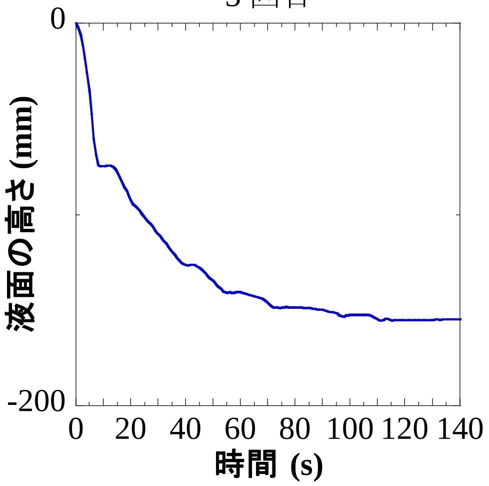
1 回目



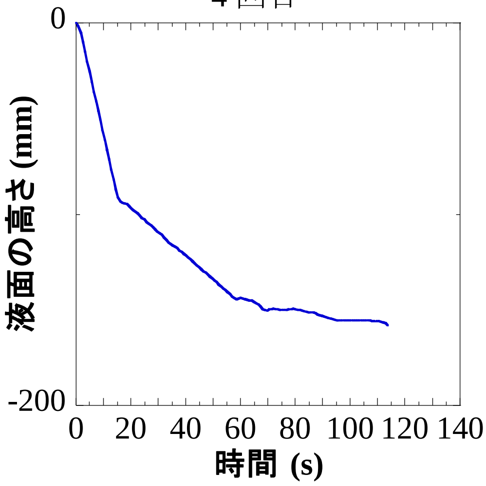
2 回目



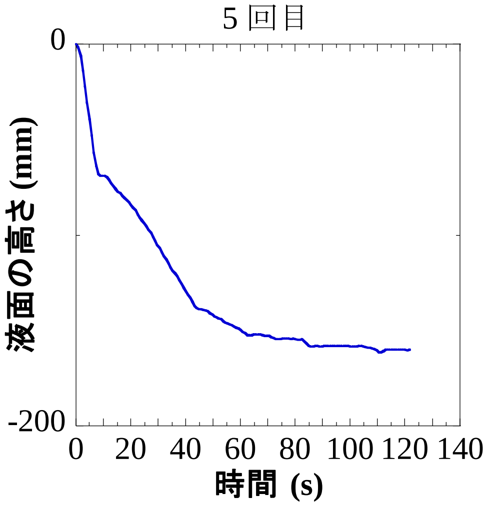
3 回目



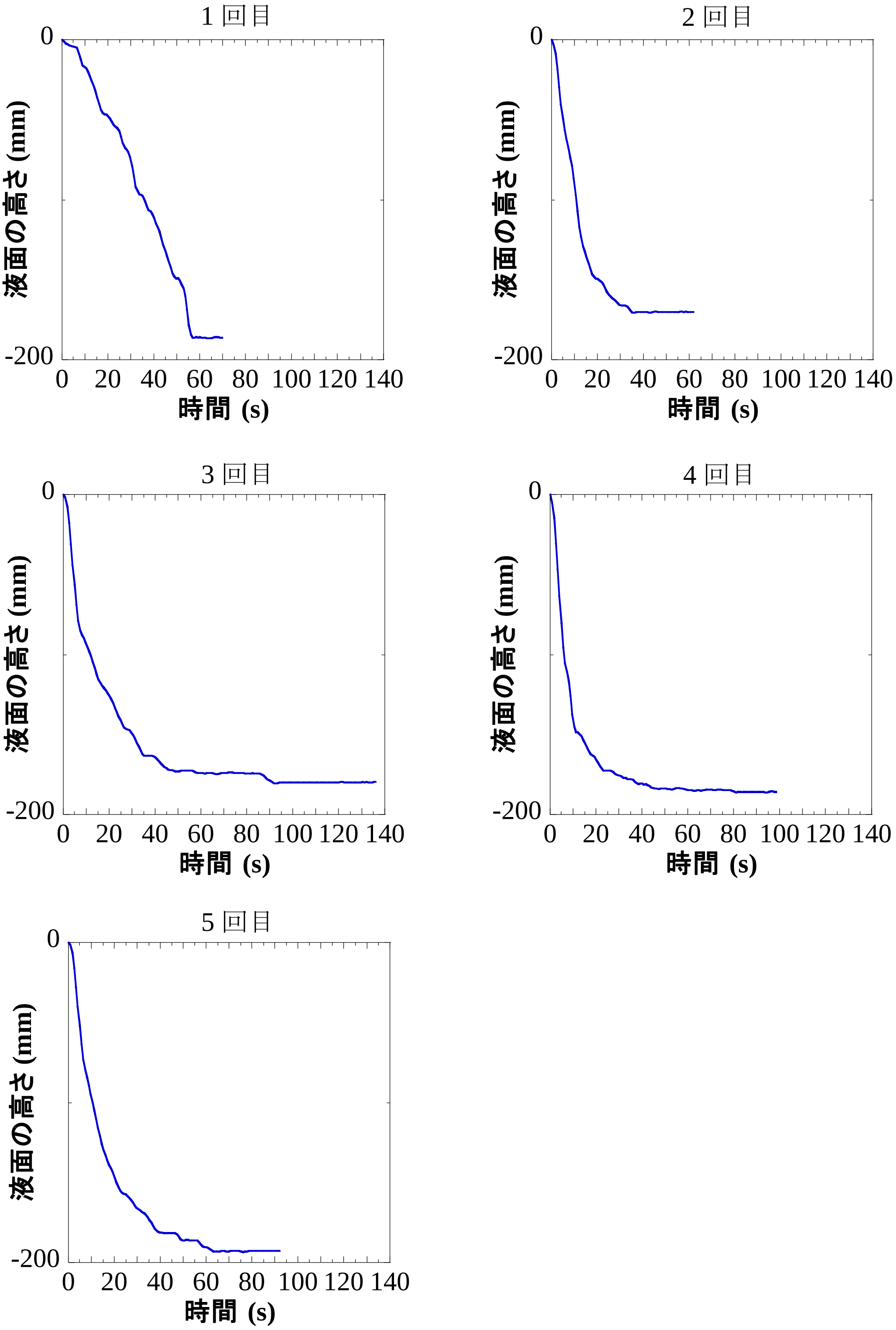
4 回目



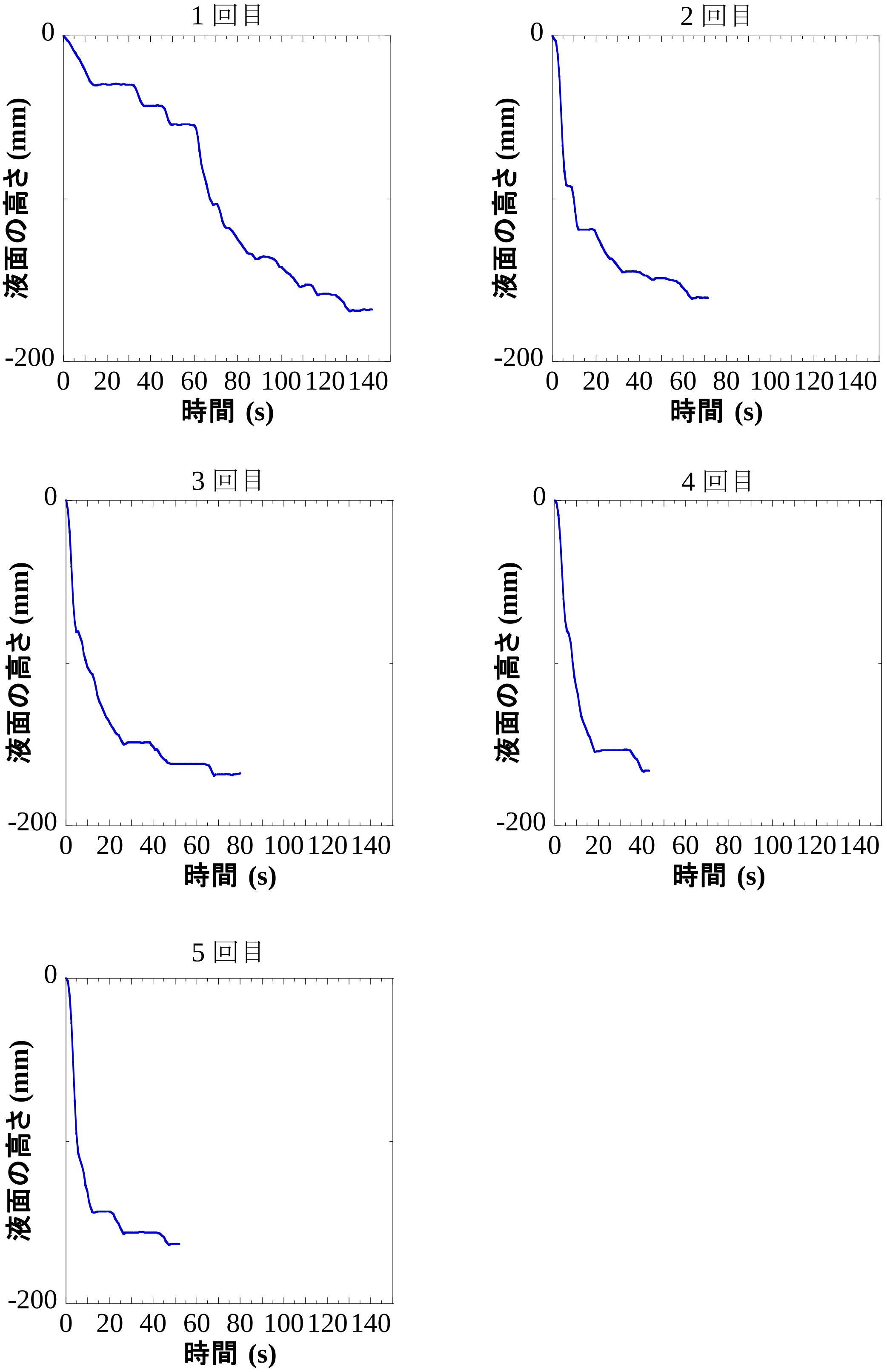
5 回目



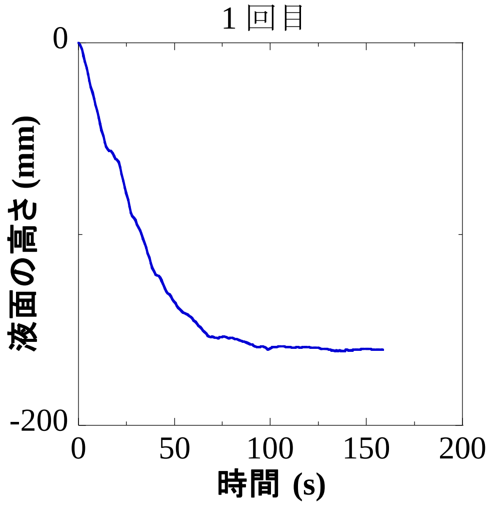
作業者 B

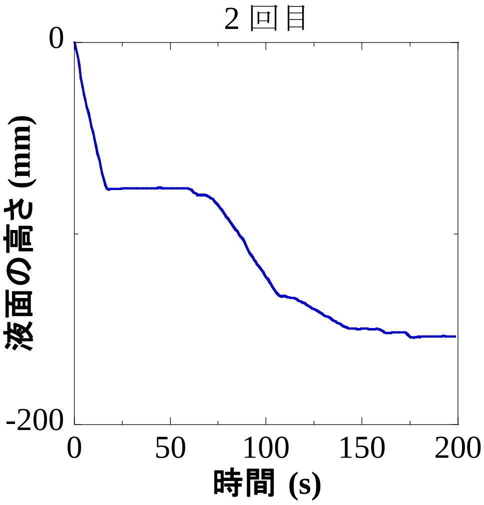

1 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0 20 40 60 80 100 120 140
時間 (s)
2 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0 20 40 60 80 100 120 140
時間 (s)
3 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0 20 40 60 80 100 120 140
時間 (s)
4 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0 20 40 60 80 100 120 140
時間 (s)
5 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0 20 40 60 80 100 120 140
時間 (s)

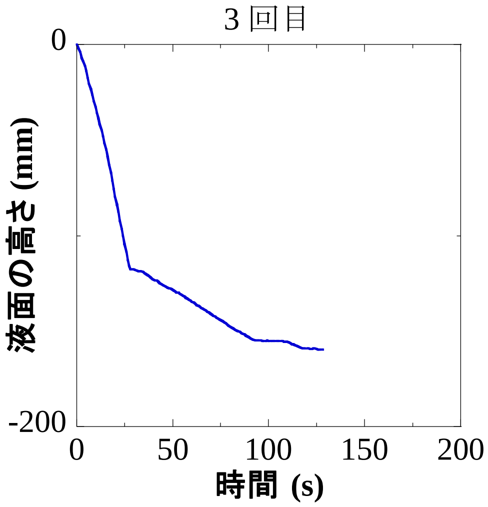
作業者 C

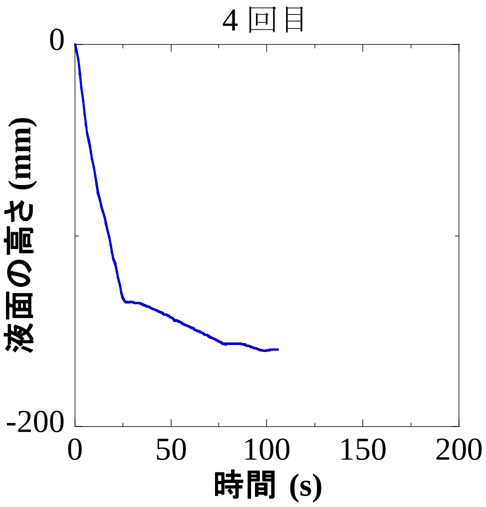


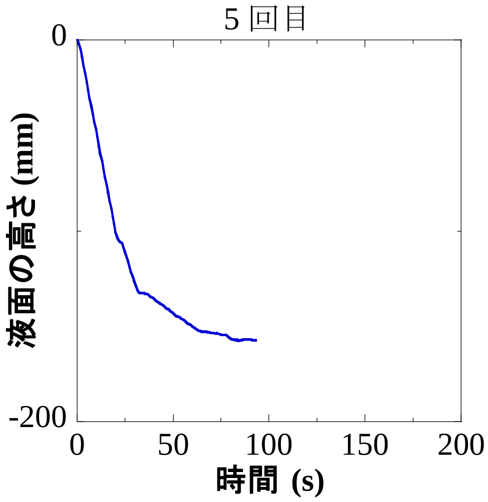
作業者 D


1 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0
50
100
150
200
時間 (s)

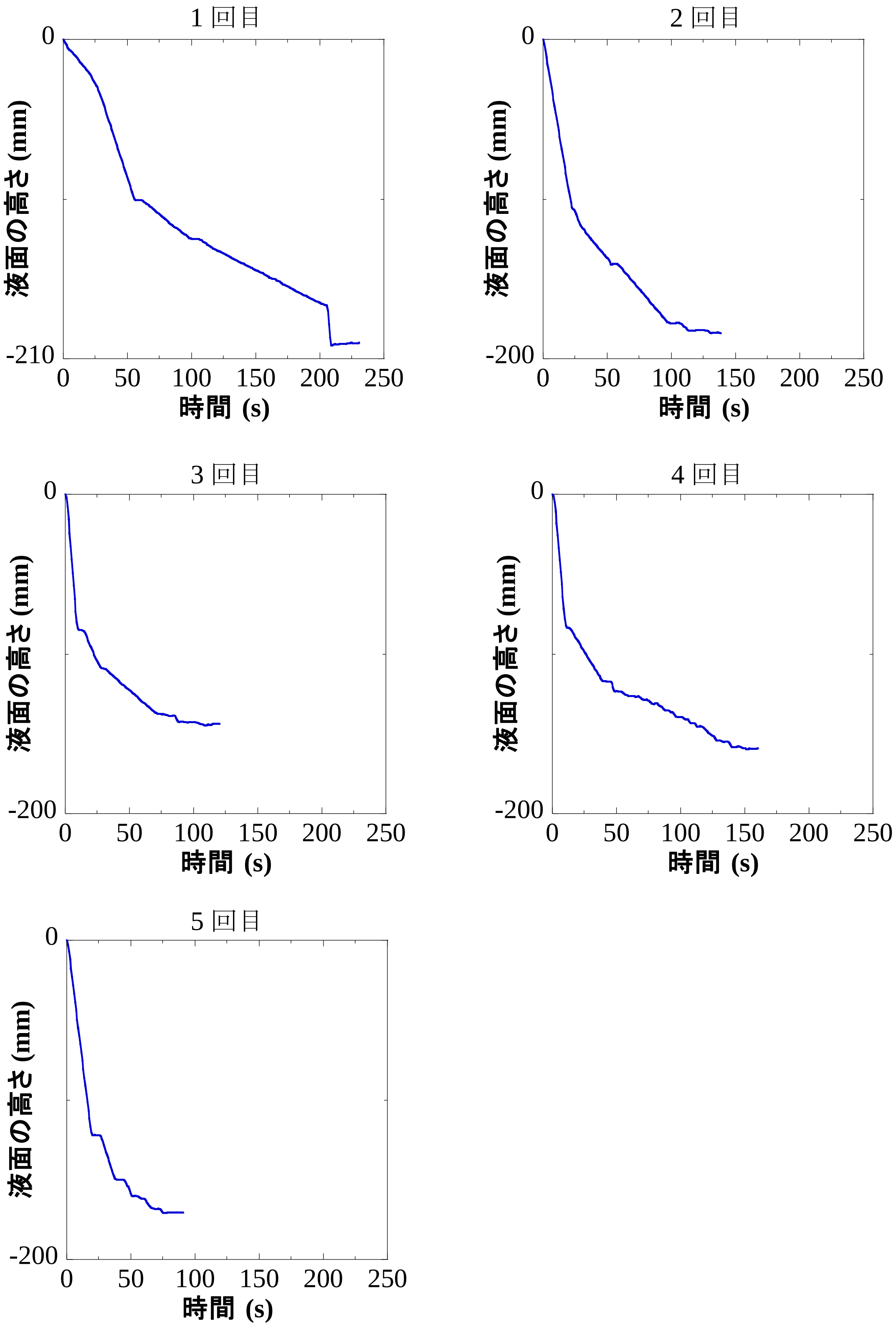

2 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0
50
100
150
200
時間 (s)


3 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0
50
100
150
200
時間 (s)

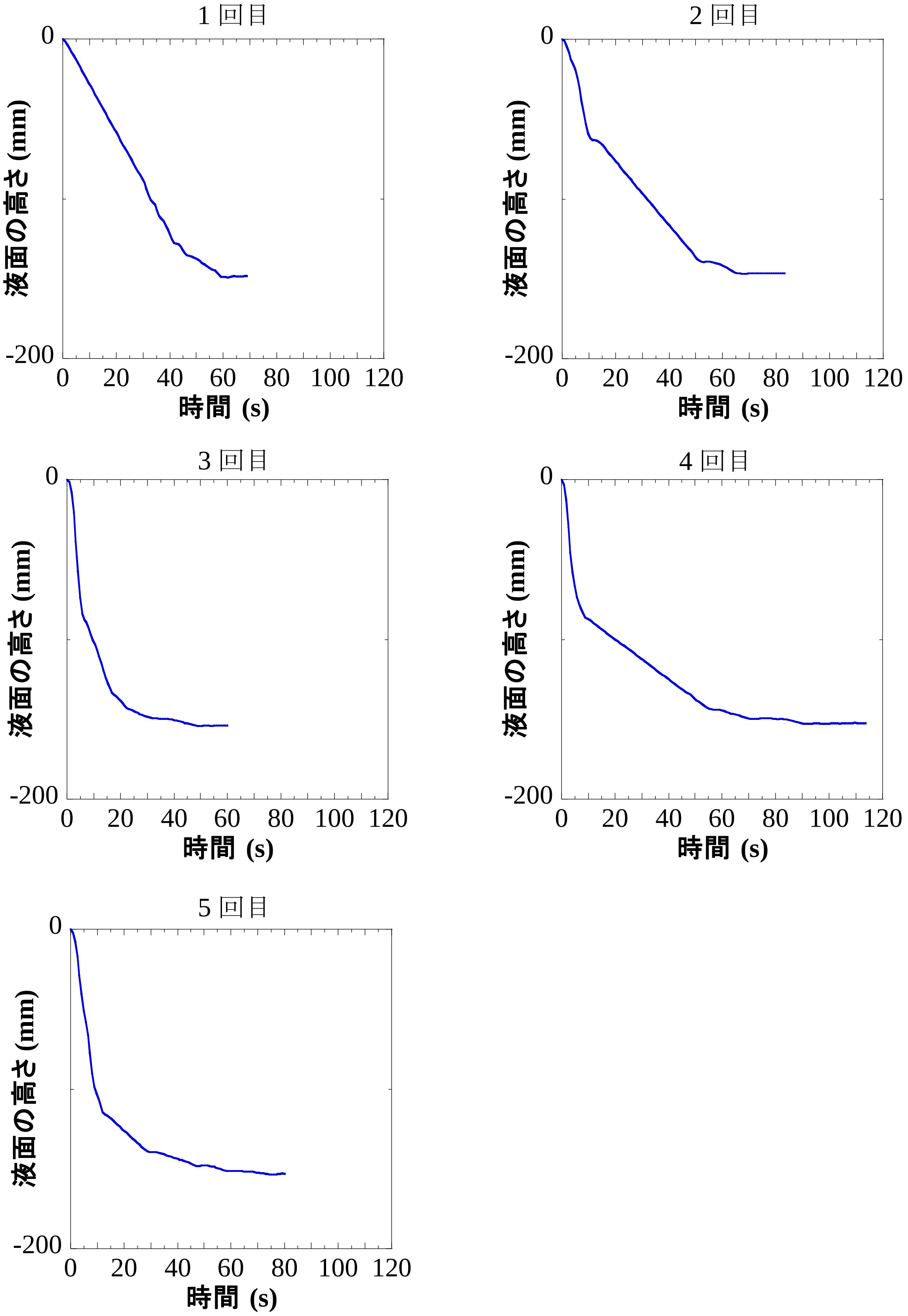

4 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0
50
100
150
200
時間 (s)


5 回目
0
-200
液面の高さ (mm)
0
50
100
150
200
時間 (s)

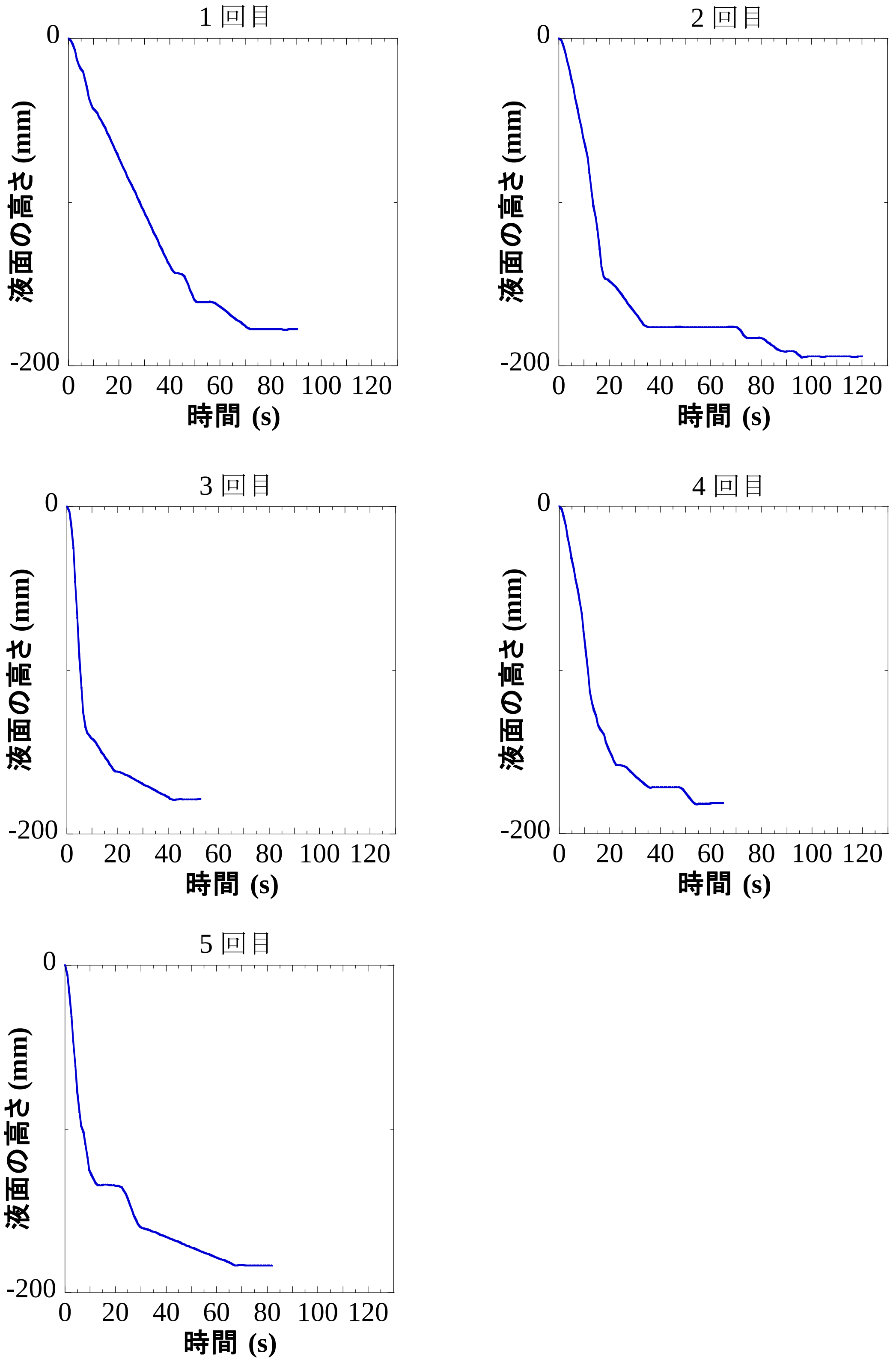
作業者 E


1 回目
0
-210
0 50 100 150 200 250
時間 (s)
液面の高さ (mm)
2 回目
0
-200
0 50 100 150 200 250
時間 (s)
液面の高さ (mm)
3 回目
0
-200
0 50 100 150 200 250
時間 (s)
液面の高さ (mm)
4 回目
0
-200
0 50 100 150 200 250
時間 (s)
液面の高さ (mm)
5 回目
0
-200
0 50 100 150 200 250
時間 (s)
液面の高さ (mm)

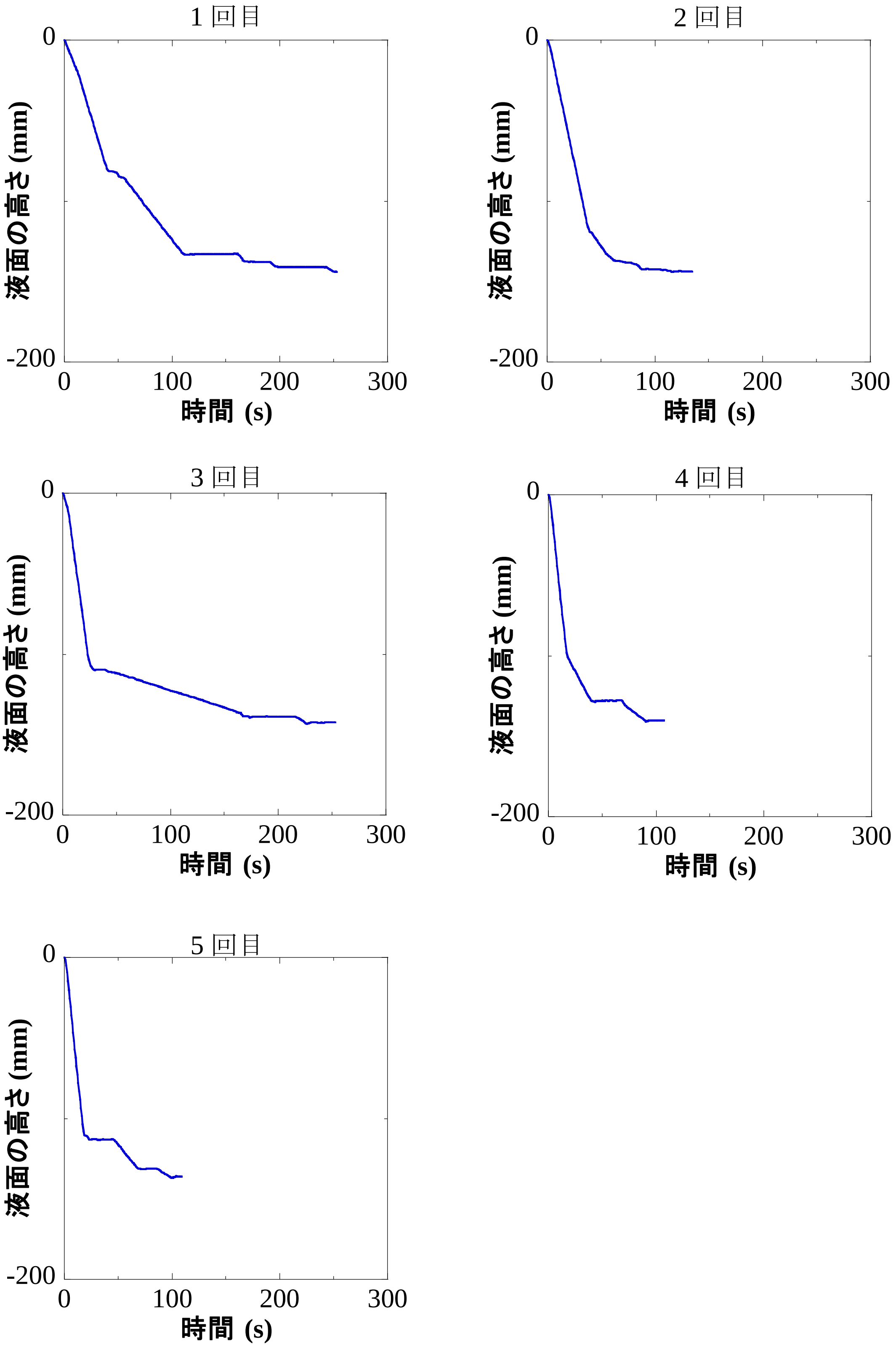
作業者 F



作業者 G

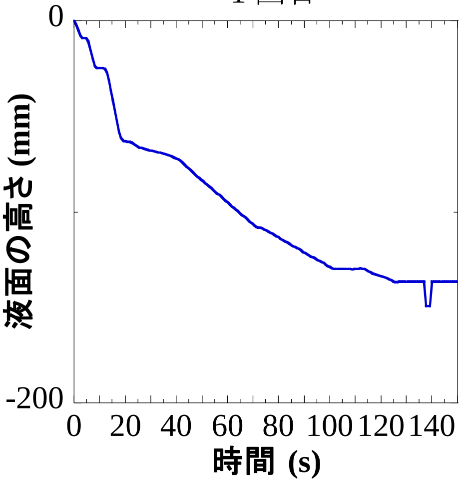


作業者 H

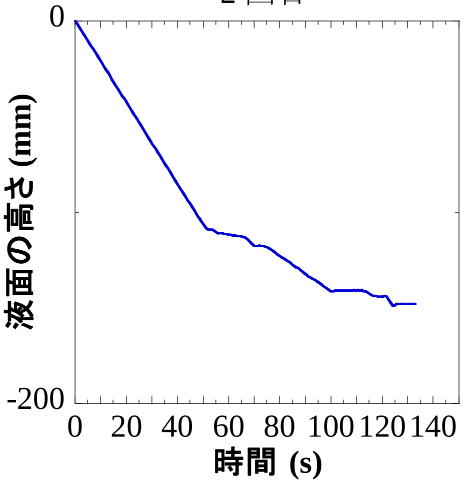


作業者 I

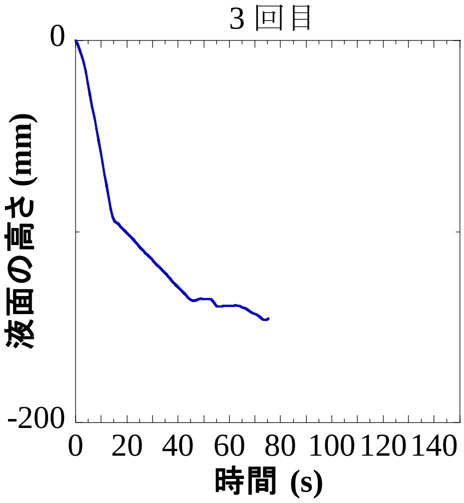
1 回目



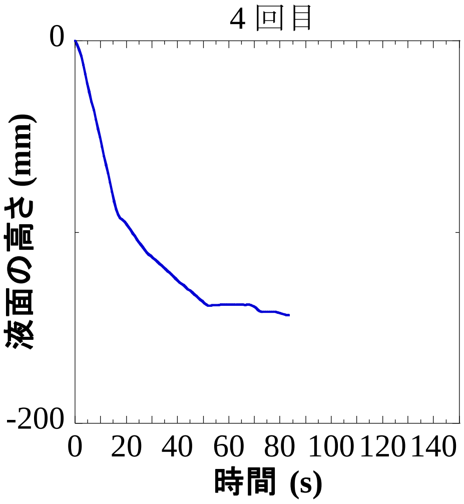
2 回目



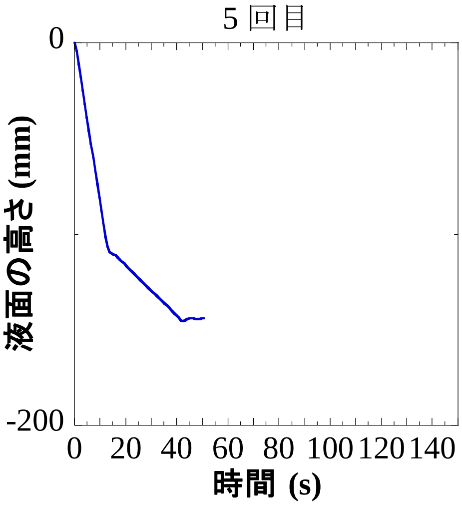
3 回目



4 回目



5 回目



作業者 J

Appendix-3

12 試行回×10 人(3 章の被験者)の 7 つの指標値

※この Appendix-3 における作業者 A,B…は、2 章における作業者 A,B,…とは対応しているものではなく、同一人物ではない。

作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数b	ステップ数
作業者A	100 ml	1回目	2.4	0.59	21.2	1.38	27.2	0.14	6
		2回目	2.0	0.91	7.2	1.43	13.2	0.35	4
		3回目	2.0	0.87	17.6	1.35	21.4	0.25	6
		4回目	2.0	1.10	3.6	1.44	8.6	0.44	3
	20 ml	1回目	2.6	2.03	9	5.59	11	0.12	4
		2回目	6.8	6.35	6.8	6.35	8.6	0.17	2
		3回目	2.2	1.28	13.6	5.87	19.4	0.07	6
		4回目	2.4	2.60	3.8	3.41	8.2	0.18	3
	10 ml	1回目	1.2	1.04	11.4	8.25	14	0.05	5
		2回目	9.8	10.43	9.8	10.43	9.8	0.07	1
		3回目	5.4	10.29	5.4	10.29	12.6	0.34	2
		4回目	7.2	9.97	8	10.51	11.2	0.18	3
作業者B	100 ml	1回目	1.4	0.40	9	1.32	13.6	0.08	3
		2回目	1.6	0.40	15.6	1.49	21.2	0.13	6
		3回目	3.8	1.20	8	1.42	13.2	0.33	3
		4回目	3.0	1.00	6	1.26	11	0.28	4
	20 ml	1回目	1.2	1.10	9.6	6.39	23.4	0.13	5
		2回目	6.0	5.89	6	5.89	6	0.26	1
		3回目	1.0	0.99	1	0.99	10.8	0.09	2
		4回目	6.6	6.35	6.6	6.35	6.6	0.28	1
	10 ml	1回目	7.6	10.26	7.6	10.26	7.6	0.21	1
		2回目	8.4	10.15	8.4	10.15	8.4	0.18	1
		3回目	6.6	10.48	6.6	10.48	6.6	0.24	1
		4回目	7.8	8.51	7.8	8.51	10.2	0.11	2
作業者C	100 ml	1回目	2.0	0.73	9.6	1.48	18.2	0.17	5
		2回目	3.4	1.22	9.2	1.30	12.4	0.37	3
		3回目	2.6	1.17	21	1.46	33.6	0.37	6
		4回目	3.6	1.21	15.8	1.43	20	0.30	5
	20 ml	1回目	4.2	6.61	4.2	6.61	4.6	0.41	2
		2回目	4.2	6.23	4.2	6.23	8.6	0.33	2
		3回目	4.2	5.48	7.2	6.29	17	0.32	4
		4回目	6.4	6.42	6.4	6.42	12.6	0.27	2
	10 ml	1回目	4.2	7.83	4.2	7.83	8.4	0.26	2
		2回目	2.0	4.30	9.4	10.07	13.4	0.14	3
		3回目	9.6	9.47	9.6	9.47	9.6	0.14	1
		4回目	9.2	8.42	9.2	8.42	11	0.12	2

作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数*b*	ステップ数
作業者D	100 ml	1回目	1.4	0.52	16.6	1.52	23.4	0.08	6
		2回目	3.2	0.77	20.2	1.50	27.6	0.11	5
		3回目	1.6	0.47	14.6	1.40	19	0.20	6
		4回目	2.8	0.92	7	1.19	14	0.20	2
	20 ml	1回目	7.6	6.05	7.6	6.05	18.2	0.18	2
		2回目	4.2	5.18	5.8	6.23	17.2	0.32	3
		3回目	5.2	5.92	12.8	6.36	16	0.30	3
		4回目	4.4	6.07	4.4	6.07	11.4	0.31	2
	10 ml	1回目	0.8	0.57	10	10.02	15.6	0.10	3
		2回目	1.2	2.10	6.4	10.24	12.6	0.22	3
		3回目	6.8	10.14	6.8	10.14	13	0.22	2
		4回目	5.0	8.33	7	9.88	14	0.30	3
作業者E	100 ml	1回目	2.2	0.77	12	1.43	18.6	0.17	4
		2回目	2.2	1.12	5.8	1.32	11.8	0.49	3
		3回目	3.2	1.10	3.2	1.10	6	0.36	2
		4回目	2.8	1.10	6.4	1.37	11.6	0.31	3
	20 ml	1回目	6.4	5.90	6.4	5.90	6.4	0.24	1
		2回目	4.8	6.27	4.8	6.27	9.4	0.30	2
		3回目	4.4	6.36	4.4	6.36	4.4	0.40	1
		4回目	5.0	6.29	5	6.29	9.6	0.34	2
	10 ml	1回目	6.2	10.45	6.2	10.45	11.6	0.26	2
		2回目	4.6	10.24	4.6	10.24	4.6	0.34	1
		3回目	4.4	10.14	4.4	10.14	10.4	0.36	2
		4回目	5.4	10.38	5.4	10.38	11.8	0.33	2
作業者F	100 ml	1回目	1.8	0.64	6.2	1.24	12	0.24	4
		2回目	3.0	1.26	3	1.26	8.2	0.53	2
		3回目	4.2	1.23	4.2	1.23	9.4	0.27	2
		4回目	2.2	0.74	7.2	1.38	12.4	0.28	5
	20 ml	1回目	4.6	3.59	8.8	6.00	11.2	0.10	4
		2回目	8.0	6.11	8.6	6.32	12	0.22	3
		3回目	3.8	5.03	3.8	5.03	6	0.20	2
		4回目	6.2	6.17	6.2	6.17	8.4	0.19	2
	10 ml	1回目	5.6	6.29	9.6	9.71	11.8	0.06	3
		2回目	8.4	9.99	8.4	9.99	11	0.07	2
		3回目	4.8	6.09	6.6	7.29	11.4	0.12	3
		4回目	8.2	10.71	8.2	10.71	15	0.20	2

作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数*b*	ステップ数
作業者G	100 ml	1回目	2.8	1.29	7.4	1.35	13.2	0.63	3
		2回目	4.8	1.26	10	1.47	16.6	0.28	3
		3回目	6.2	1.19	12.8	1.35	18	0.19	3
		4回目	4.0	1.19	4	1.19	10	0.30	2
	20 ml	1回目	1.6	1.45	10.4	5.73	15.8	0.08	3
		2回目	9.2	6.36	9.2	6.36	9.2	0.18	1
		3回目	7.0	5.61	7	5.61	14	0.18	2
		4回目	6.8	6.33	6.8	6.33	6.8	0.26	1
	10 ml	1回目	5.6	5.22	11.4	8.96	15.8	0.07	3
		2回目	7.2	6.91	7.2	6.91	11.2	0.07	2
		3回目	3.4	7.35	6.4	9.04	9.6	0.26	3
		4回目	8.0	8.80	8	8.80	8	0.13	1
作業者H	100 ml	1回目	1.2	0.23	24.8	1.38	29.6	0.06	8
		2回目	6.4	0.94	19.4	1.45	28.6	0.13	4
		3回目	6.0	0.95	8.6	1.13	17	0.16	3
		4回目	3.8	1.10	8	1.28	12.4	0.30	3
	20 ml	1回目	1.4	0.63	9.6	2.57	16	0.05	2
		2回目	9.2	4.95	9.2	4.95	12	0.12	2
		3回目	8.0	4.74	8	4.74	10.6	0.13	2
		4回目	3.8	3.40	7.4	4.77	10.4	0.15	3
	10 ml	1回目	9.4	10.18	9.4	10.18	9.4	0.15	1
		2回目	9.0	10.11	9	10.11	9	0.19	1
		3回目	7.8	9.91	7.8	9.91	7.8	0.17	1
		4回目	7.6	9.78	7.6	9.78	7.6	0.17	1

作業者	シリンダーの種類	試行回	指標値						
			最初に止めた時間	最初に止めた位置	最後に止めた時間	最後に止めた位置	作業を終えた時間	近似曲線の係数*b*	ステップ数
作業者I	100 ml	1回目	1.8	1.05	19	1.46	20	0.24	6
		2回目	2.0	0.97	11.6	1.30	17.4	0.30	5
		3回目	2.4	1.24	7.2	1.48	13.6	0.46	3
		4回目	1.6	1.23	4.8	1.38	10.8	0.56	3
	20 ml	1回目	5.2	3.58	11.2	6.14	14.6	0.15	4
		2回目	6.6	6.60	6.6	6.60	6.6	0.22	1
		3回目	6.2	6.44	6.2	6.44	15	0.30	2
		4回目	4.8	6.65	4.8	6.65	4.8	0.33	1
	10 ml	1回目	8.6	10.10	8.6	10.10	12.6	0.19	2
		2回目	7.6	10.51	7.6	10.51	13.8	0.23	2
		3回目	5.2	9.57	5.2	9.57	5.2	0.29	1
		4回目	5.4	9.95	5.4	9.95	5.4	0.33	1
作業者J	100 ml	1回目	1.4	0.61	9.2	1.16	13.8	0.09	4
		2回目	1.4	0.40	9.6	1.35	16	0.13	4
		3回目	3.8	1.22	12.2	1.43	22.4	0.33	4
		4回目	1.8	0.61	5.4	1.39	12.2	0.25	3
	20 ml	1回目	1.6	1.46	1.6	1.46	12	0.02	2
		2回目	1.8	1.42	1.8	1.42	10.4	0.14	2
		3回目	6.8	6.79	6.8	6.79	6.8	0.23	1
		4回目	2.4	2.55	11.4	6.05	13.6	0.15	4
	10 ml	1回目	9.2	9.51	9.2	9.51	9.2	0.11	1
		2回目	9.4	10.69	9.4	10.69	9.4	0.18	1
		3回目	8.8	10.53	8.8	10.53	8.8	0.23	1
		4回目	9.8	9.98	9.8	9.98	9.8	0.12	1

Appendix-4
テキスト原文

【実験１：p-メチルアセトフェノンの合成（Friedel-Crafts 反応）】

還流冷却器、塩化カルシウム管（塩化カルシウム管とアスピレーターを穴の開いたベント管でつなぎ、発生する塩化水素を除去する）、２００℃温度計および滴下ロートをつけた３００ｍｌ三ツロフラスコに磁気撹拌子および塩化アルミニウム２５ｇを入れる。つぎに乾燥トルエン７０ｍｌを加え、磁気撹拌子でよく撹拌しながら無水酢酸８．９ｇを滴下ロートよりゆっくり滴下する（この時滴下速度が速いと混合物は発熱して塩化水素が激しく発生するのでアスピレーターの水の流し方を調整して塩化水素が外に漏れないようにする）。無水酢酸を全部加え終わったら、そのまま撹拌しながらオイルバスで３０分間過熱還流する。次に反応混合物を氷水（氷：水＝約９：１程度）の中に注ぐ（この時氷水を撹拌しながら反応混合物をゆっくり注ぐ）。次に氷水に注いだ反応混合物を、５００ｍｌ分液ロートに移し、有機層と水層を分離する。分離した有機層を最初、水（５００ｍｌ×１）で洗浄、分離し最後に水（５０ｍｌ×３）で洗浄、分離したのち、乾燥した１００ｍｌ三角フラスコに有機層を移し、無水塩化カルシウムを入れて一晩乾燥する。乾燥剤をロ別（ひだ折りロ紙を使用し、直接すり付１００ｍｌナスフラスコにロ過する）し、ロータリーエバポレーターでトルエンを追い出したのち、減圧蒸留（操作法はテキストの減圧蒸留および減圧下の沸点を知る方法の項参照）にてｐ－メチルアセトフェノンを得る。

例として沸点９３．５℃（７ｍｍHg)。収量１０～１０．３ｇ（無水酢酸に対して８５～８９％)。

【4-メトキシ-3-メチルアセトフェノンの合成(Friedel-Craft 反応)】

１．等圧滴下漏斗、還流管を取り付けた三ツロフラスコに細かく砕いた無水塩化アルミニウム 9.5 g(71 mmol)を入れて
２．窒素置換後、脱水ジクロロメタン 5 ml を加え
３．撹拌する。
４．この懸濁液に 2-メチルアニソール 7.9 g(65 mmol)の脱水ジクロロメタン溶液 4 ml をゆっくり滴下する。
５．続いて、塩化アセチル 5.1 ml(71 mmol)の脱水ジクロロメタン溶液 4 ml をゆっくり滴下する。
６．反応液を 2 時間還流した後、
７．室温まで放冷後、
８．3M 塩酸 3 ml を加える。
９．ジエチルエーテル 15 ml で抽出し、
１０．有機層を飽和塩化ナトリウム水溶液で洗浄後、

１１．硫酸ナトリウムで乾燥する。
１２．溶媒を留去し、
１３．残渣を減圧蒸留(bp 132～134℃/7 mm)により精製する。

【実験１：p-メチルアセトフェノンの合成（Friedel-Crafts 反応）】

①還流冷却器、塩化カルシウム管、２００℃温度計および滴下ロートをつけた３００ｍｌ三ツ口フラスコに磁気撹拌子（を入れる）
②塩化アルミニウム２５ｇを入れる。
③つぎに乾燥トルエン７０ｍｌを加え、
④磁気撹拌子でよく撹拌しながら
⑤無水酢酸８．９ｇを滴下ロートよりゆっくり滴下する
⑥（無水酢酸を全部加え終わったら､）そのまま撹拌しながら
⑦オイルバスで３０分間過熱還流する。
⑧次に反応混合物を氷水（氷：水＝約９：１程度）の中に注ぐ。
⑨次に氷水に注いだ反応混合物を、５００ｍｌ分液ロートに移し、
⑩有機層と水層を分離する。
⑪分離した有機層を最初、水（５００ｍｌ×１）で洗浄、
⑫分離し
⑬最後に水（５０ｍｌ×３）で洗浄、
⑭分離したのち、
⑮乾燥した１００ｍｌ三角フラスコに有機層を移し、
⑯無水塩化カルシウムを入れて一晩乾燥する。
⑰乾燥剤をロ別し、
⑱ロータリーエバポレーターでトルエンを追い出したのち、
⑲減圧蒸留にてｐ－メチルアセトフェノンを得る。=減圧蒸留する

【ベンゼンと無水酢酸からアセトフェノンの合成】
(1)容量 1/3l の三ツ口フラスコか広口の丸底フラスコの真中の広い口の管に水銀封付かき混ぜ機をつけ、
(2)他の口には還流冷却器をつけ、
(3)もう一方の方には滴下漏斗を付ける。
(4)フラスコにはナトリウムで乾燥したベンゼン 100 cc を入れ、
(5)昇華したての塩化アルミニウム 80g を入れる。

(6)つぎによくかきまぜながら
(7)純粋な無水酢酸 25g を半時間かかって滴下する。
(8)続けて、かき混ぜながら
(9)水浴上でもう半時間加熱沸騰させ、
(10)冷やした溶液を分液漏斗に入れた氷の上に注ぎ、析出した水酸化アルミニウムを濃塩酸で溶かす。
(11)少量のエーテルを加えたのち
(12)ベンゼン層を分け、
(13)水溶液を抽出し、
(14)抽出液をいっしょにしてカセイソーダ水溶液とふり、
(15)塩化カルシウムで乾燥して、
(16)溶媒を追い出したのち
(17)アセトフェノンをいちばんよいのは真空で蒸留する。

謝辞

生きているものの移ろいや脈動は捉えどころがなく、‘ゆく河の流れは絶えずして、しかももとの水にあらず’（徒然草、鴨長明）。それを科学のルールに従い、切り分けても、分からないものがあると感じつつも、自然の理という大先生と会話し、それを綴ったところ、このような作品が出来上がりました。

それをサポートして下さった方々に対し、以下において謝意を表します。

主査の大島義人先生には、自身の好奇心を基に自由に研究する面白さを教えていただきました。実験室学という新たな学問領域の創設に関わることで、その面白さを味わうと共に、先生が行ってきたことの大変さも少しながら経験できた気がしています。また、相手の心理や性格に気を配りながら組織を束ねていく卓越したマネージメントのお蔭で、充実した時間を過ごすことが出来ました。心から感謝いたします。

副査の大友順一郎先生、田中寿郎先生、徳永朋祥先生、戸野倉賢一先生には、学会や審査において、貴重なご助言をいただきました。ありがとうございました。

研究室や専攻の秘書としてお世話になった方々など、スタッフとして支えていただいた方々に謝意を述べさせていただきます。このような方々のサポートのお蔭で、研究活動に没頭することが出来ました。お世話になりました。

大島研究室、大友研究室の方々に感謝いたします。居室やお茶室などでの他愛のない日々の会話は、何よりも楽しく、力が入り過ぎているときには、肩の力を抜くためのよい時間となりました。特に、大島研究室の秋月信さんには、研究室に入ったころからお世話になりました。明晰な頭脳とコツコツと地道に努力する研究者としてのひとつの像を見せていただき、そこから多くを学ばせていただきました。また大島研究室の根津友紀子さんとは、約 6 年という時間、同じ研究分野を行ってきました。子供のような好奇心と大人としての人間的な成熟が両立することを体現しており、共に研究できたことを幸運に思っています。大友研究室の高坂文彦さんとは、約 7 年という時間、友人として接してきました。本質を突く視点とそれを柔らかく巧みに包む人間性には、大きな影響を受けたと思っています。

最後に、学ぶ楽しさを教えてくれ、また研究活動に対して理解を示して、温かくサポートしてくれた家族に感謝して、謝意と致します。

2016 年 3 月