修士論文　2008 年度（平成 20 年度）

# 身体スキルを探究するためのフォーム可視化ツール

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

西山 武繁

修士論文　2008 年度（平成 20 年度）

# 身体スキルを探究するためのフォーム可視化ツール

様々なスポーツにおいて、競技者とコーチには異なるスキルが求められることが、「名選手は名コーチならず」という言葉として知られている。筆者は中学・高校の部活動のコーチとして、競技者自身が自らのスキルを探究するような場をつくり出すことを目指している。競技者によるスキルの探究は、熟達過程における経験を自らの内に取り込み、自身の理論を構築するために重要な行為である。競技者がスキルを探究するための方法論としてメタ認知を挙げることができる。近年の研究からメタ認知の実践は、身体スキルの熟達を促進する効果があることが明らかになっている。同時に、メタ認知の継続を容易にする支援環境の必要性も示唆されており、運動情報の可視化や即時フィードバックの有効性が唱えられている。本研究は、運動計測によって獲得したデータを用いてメタ認知の促進を試みた初めての実践的研究である。本研究では、野球の打撃スキルを例に、パフォーマンス中のフォームを可視化して競技者に提示するソフトウェアツールの開発に取り組んだ。このフォーム可視化ツールは、光学式モーションキャプチャシステムを用いて獲得したデータを用いて姿勢を複数の三角形によって簡単表現して、パフォーマンス中のフォームを姿勢の類似度に基づいて分節化する。さらに分節化されたフォームを色によって可視化することで、自身のスキルをメタ認知的に探究するための切掛けを与えるものである。野球の打撃スキルを対象としたケーススタディでは、フォーム可視化ツールによるフィードバックがメタ認知に取り組む競技者の新たな変数発見を促し、パフォーマンス向上の一助となることができた。

キーワード：
身体スキル，分節化，可視化，メタ認知，コーチング

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

西山武繁

Abstract of Master's Thesis Academic Year 2008

# A Visualization Tool for Encouraging Meta-cognitive Exploration of Own Body Movements

"A good player is not necessarily a good coach" is a well-known phrase that shows the difference of a skill of athlete and coach. The author certain that exploration for own embodied skill by the athlete is important from the experience as the coach. The exploration for own embodied skills by a athlete is important in a construction of a internal skill model. Meta-cognitive verbalization about own body movements is one method for that exploration. Past literature indicated that meta-cognitive verbalization is effective for acquisition of embodied skills. In addition, the importance of feedback based on motion measurement to support a meta-cognitive verbalization is suggested by past literature. This study is a pioneering study to work on the support of a meta-cognitive verbalization by motion data. This study presents the software tool that visualize and shows the athlete's body posture change. This software segments the performance based on the degree of similarity of posture, and the color is allocated in each segment. The visualization of body posture change by the color gives a chance to meta-cognitive exploration for the skill of the athlete. In case study of swing practice of a baseball, It has provided evidence suggesting that the use of this support helped him discover an important aspect of his batting form in a meta-cognitive custom, and as a result, became a driving force of a remarkable improvement of batting average.

*Key Words :*

*Embodied Skill, Segmentation, Visualization, Meta cognition, Coaching*

Takeshige Nishiyama

Graduate School of Media and Governance, Keio University

# 目次


## 第 1 章　序言

1.1 コーチングの難しさ.....2

1.2 コーチとして伝えたいこと.....3

1.3 本研究の主題.....4

1.4 本論文の構成.....4

## 第 2 章　メタ認知：身体スキルを探究するための方法論

2.1 はじめに.....8

2.2 能々吟味すべし.....8

2.3 メタ認知：能々吟味するために.....9

2.4 スキル学習とフィードバック.....12

2.5 メタ認知を支援するためのフィードバックの検討.....13

2.6 本章のまとめ.....15

## 第 3 章　メタ認知の支援：フォーム可視化ツール"ColorBar"

3.1 はじめに.....16

3.2 フォーム可視化ツール”ColorBar”.....16

3.2.1 “ColorBar”とは.....16

3.2.2 フォームの定義.....17

3.2.3 “ColorBar”の狙い：身体スキル探究の触媒.....18

3.3 ”ColorBar”のワークフロー.....19

3.3.1 モーションキャプチャを用いた運動計測.....21

3.3.2 多次元ベクトルによるフォームの表現.....22

3.3.3 K-means 法を用いたパフォーマンスの分節化.....25
3.3.4 色を用いたフォームの可視化.....27
3.4 “ColorBar”によるフィードバック.....30
3.4.1 パフォーマンス間の比較.....30
3.4.2 パフォーマンスの安定性の確認.....31
3.4.3 映像を用いたカラーバーの意味解釈.....32
3.5 本章のまとめ.....33

## 第 4 章　"ColorBar"開発の経緯とケーススタディ

4.1 はじめに.....35
4.2 ”ColorBar”の開発に至るまで.....35
4.2.1 スキルサイエンス.....35
4.2.2 空手における間合いスキルの抽出と獲得支援.....36
4.2.3 間合いの知識表現.....36
4.2.4 知識表現からメタ認知支援ツールへ.....37
4.3 “ColorBar”開発のためのケーススタディ.....39
4.3.1 ケーススタディの流れ.....39
4.3.2 運動計測とカラーバーによるフィードバック.....41
4.3.3　ユーザー・開発者による議論と仕様変更.....41
4.4 本章のまとめ.....42

## 第 5 章　打撃スキルのメタ認知とカラーバー

5.1 はじめに.....44
5.2 カラーバーによるメタ認知の支援.....44
5.2.1 フォーム修正の確認.....44
5.2.2 パフォーマンスの安定性の確認.....46

5.2.3 新しい注目箇所や変数の発見.....53

5.3 本章のまとめ.....57

第 6 章　ケーススタディに基づく"ColorBar"の改良

6.1 はじめに.....59

6.2 カラーバーの配色.....59

6.3 3 試行以上のカラーバー.....61

6.4 カラーバーの分解能.....63

6.5 カラーバーの意味解釈と映像.....65

6.6 本章のまとめ.....66

第 7 章　結言

7.1 本研究から得られた知見.....68

7.2 今後の課題.....69

7.3 展望.....72

謝辞.....73

参考文献.....74

対外発表一覧.....76

付録 野球における打撃動作のカラーバー

クラスタ数 k = 20.....78

クラスタ数 k = 21.....83

クラスタ数 k = 22.....88

クラスタ数 k = 23.....93

クラスタ数 k = 24.....98

クラスタ数 k = 25.....103

# 第１章

# 序言

## 1.1 コーチングの難しさ

『俺は名選手じゃなかった。だからこそいい選手が作れると思うんだ』

出典：[沢木 92, pp147]

沢木耕太郎の「コホーネス＜肝っ玉＞」という短編の中で、ボクシングの元世界ジュニアミドル級チャンピオンの輪島功一は、4 度目の世界戦に敗れてから三ヶ月後、沢木に今後のことを訊ねられ「選手を作ろうと思う」と答えた[沢木 89]。沢木に「いい選手を作れるかな」と聞かれたときの答えが冒頭の言葉である。

様々なスポーツにおいて、「名選手は名コーチならず」ということが知られている。この言葉は、競技者とコーチはそれぞれ異なるスキルが求められており、高い競技スキルを有する者にとっても更に多様なスキルを必要とするコーチング[1]がいかに難しい問題であるかを示していると言えよう。

コーチングの難しさには 2 つの要因が関係していると考えられる。要因の 1 つは、身体知を選手に伝えなければならないということにある。多くの場合、コーチも元は選手としてその競技に取り組んだ経験を持っている。コーチングにおける指導内容は、自らの競技経験を通じて得た知識に基づいている。中でも訓練学習によって暗黙的に獲得した知識のことを身体知と呼ぶ[植野 05]。身体知は、練習を繰り返す中で暗黙的に身体が獲得する知識であるため、選手に対して指導を行う際、コーチ自身が自らの身体知を形式知にするための困難がつきまとう。これが身体知を伝承するが故のコーチングの難しさであると考えられる。

もう一つの要因が個人差である。身体運動において最適な形は、必ずしも全ての競技者に共通するものではない。競技者ごとに身体特徴や性格などに差異が存在するからである。コーチングにおいて、コーチは選手がどのようなタイプの競技者であるかを知らなければならない。その結果、苦労して形式化した自らの身体知が選手に適さない可能性も存在する。これが、コーチを含めた競技者間に存在する個人差に起因するコーチングの難しさであると考えられる。

[1] 現在、「コーチング」という言葉は、スポーツに限らずビジネス等の分野においても幅広く用いられている。本論文では、スポーツ等の身体運動に関するスキルの獲得を支援する行為として、この語を定義する。

## 1.2 コーチとして伝えたいこと

筆者は過去6年間、中学・高校の空手部に学生コーチの１人として携わってきた。筆者がコーチとして携わる空手部の殆どの部員は、入部するまで競技経験のない初心者である。彼らは、最初にコーチや上級生に指導されたことを忠実に守りながら稽古に取り組む。しかし、彼らは指導されたことを忠実に実行しているつもりが、身体特性に起因する癖や指導内容の曖昧な表現に起因する誤解のために競技スキル上の問題点を抱えてしまう。これを解決する方法の１つとして、コーチが彼ら１人１人の問題点を見つけ出し、その解決策を教えるうという指導方法が考えられる。3年間あるいは6年間の部活動という限られた時間を有効に使い、効率的に上達させるためにはそういった方法が適しているのかもしれない。しかし、それではコーチの指導に依存してしまい、自ら問題点を発見し、それを解決するということが出来なくなってしまうのではないだろうか。さらに、先に述べたコーチングにおける競技者の個人差の問題を考えると、コーチがすべての部員の問題を把握し、解決策を与えることは極めて困難である。

そこで筆者はコーチとして、試合に勝つための競技スキルを獲得させると同時に、そのプロセスを重視したい。そこで、「教え過ぎないこと、考えさせること」を心掛けながら部員達が能動的に自身の問題点の発見と解決に取り組む場を創り出すことを目指している。

筆者が彼らに自らの空手を考えることを望む理由は、単に空手の競技力向上のためだけではなく、身体スキルを通して物事を学ぶ面白さを感じ取って欲しいという思いからである。身体スキルを考えるということは、自分とその周囲に存在する環境との関係を探究することである。この探究を突き詰めていくと、その対象となる環境は、競技に取り組む自分の背景となるすべての事象へと広げることができるのではないだろうか。松濤館流空手の空手弐拾箇条という教えの中に「凡ゆるものを空手化せよ其処に妙味あり」という言葉がある。空手という身体スキルをきっかけとして考えることの妙味を知り、この言葉を実感したことこそが、筆者が空手の稽古から得たものであり、現在この修士論文を執筆するに至った理由である。是非、彼らにもその妙味を味わって欲しいと考えている。

## 1.3 本研究の主題

本研究は、筆者が中学・高校の部活動のコーチとして、競技者（部員）自身が自らのスキルを考える場づくりを実現したいという思いに端を発している。スキルを考えるとは、競技者がスキルを能動的に探究し、問題点の発見と解決に取り組むことを指す。筆者は、競技者が自らのスキルを能動的に探究することで、単に指導されたこと盲目的に実行する段階を脱して新たな競技レベルに達することができると考えている。

しかし、一般的に身体知として暗黙的に獲得されることの多い身体スキルを能動的に探究することを習慣づけさせるためには、問題点の発見や解決に取り組むための動機を与える必要がある。

そこで本研究は、競技者によるスキルの探究を促進するための支援ツールの開発を通じて、熟達を支援する場のデザインに取り組むことを主題とする。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.1 に示す。

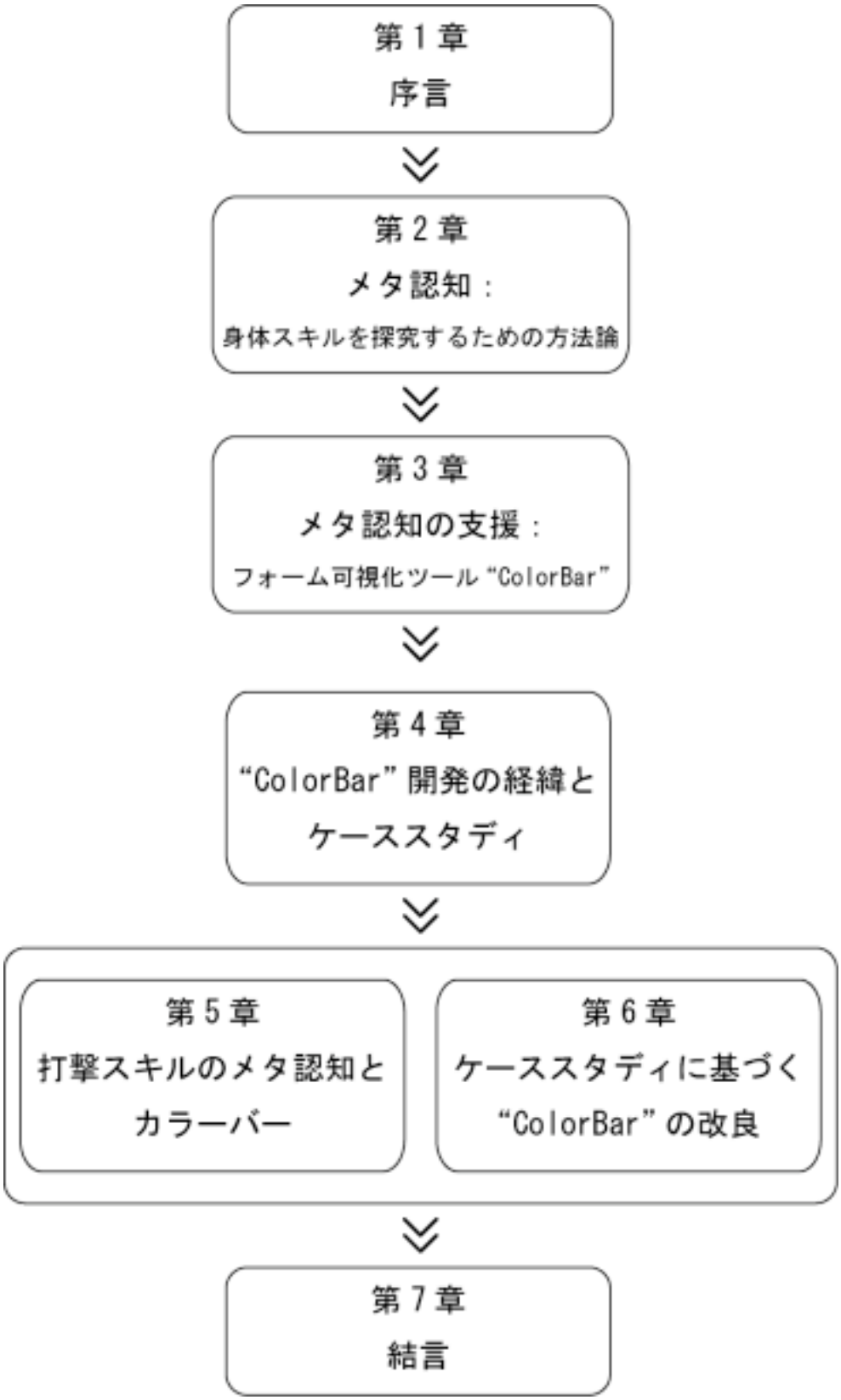

第 1 章
序言
第 2 章
メタ認知：
身体スキルを探究するための方法論
第 3 章
メタ認知の支援：
フォーム可視化ツール“ColorBar”
第 4 章
“ColorBar”開発の経緯と
ケーススタディ
第 5 章
打撃スキルのメタ認知と
カラーバー
第 6 章
ケーススタディに基づく
“ColorBar”の改良
第 7 章
結言

図 1.1　本論文の構成

第 2 章では、本研究では競技者が自身の身体スキルを探究するための方法論としてメタ認知を挙げる。ここでは、メタ認知とその実践を支援する方法を模索する上で重要なフィードバックという２つのトピックについて概観する。

第 3 章では、本研究にて開発した身体スキルを対象としたメタ認知的探究を支援するためのフォーム可視化ツール“ColorBar”について説明する。尚、以降は本研究で開発したフォーム可視化ツールを”ColorBar”、ツールによって生成されるデータをカラーバーと表記する。ここでは、”ColorBar”がどのような原理で身体運動を可視化するのか、その手続きについて説明する。また、可視化された情報がフィードバックされた競技者にどのような影響を及ぼすのかをこれまでの事例研究から得られた知見を述べる。

第 4 章では、フォーム可視化ツール”ColorBar”開発の経緯について述べる。初期段階における研究の動機と問題の所在を示し、”ColorBar”の開発までの経緯を示す。また、”ColorBar”の適応的開発を行うために実施した野球の打撃スキルをドメインとしたケーススタディについて説明する。

第 5 章では、第 4 章で説明したケーススステディから得られた”ColorBar”が競技者によるメタ認知に及ぼす効用に関する知見をまとめる。

第 6 章では、ケーススタディの期間中に実施した”ColorBar”の改良点についてまとめる。

第 7 章では、本研究によって得られた成果と課題をまとめ、今後の展望を示すことにより結言とした。

# 第 2 章

# メタ認知：

# 身体スキルを探究するための方法論

## 2.1 はじめに

本章では競技者が自身の身体スキルを探究するための方法論「メタ認知」と、その支援方法を模索するための「フィードバック」という２つの重要なトピックについて概観する。

## 2.2 能々吟味すべし

『五方のかまへは、上段、中段、下段、右のわきにかまゆる事、左のわきにかまゆる事、是五方也。構五つにわかつといへども、皆人をきらん為也。構五つより外はなし。いづれのかまへなりとも、かまゆるとおもはず、きる事なりとおもふべし。構の大小はことによ利にしたがふべし。上中下は躰の構也。両わきはゆふの構也。右ひだりの構、うへのつまりて、わき一方つまりたる所などにての構也。右ひだりは所によりて分別あり。此道の大事にいはく、構のきわまりは中段と心得べし。中段、構の本意也。兵法大きにして見よ。中段は大将の座也、大将につぎ、あと四段の構也。能々吟味すべし。』

出典：[宮本 85, pp48]

宮本武蔵は彼の代表的な著作である五輪書において、兵法の極意を書き記した後に必ず「能々吟味すべし」という文言を付け加えている。この「能々吟味すべし」という文言は、単に兵法に限ることなく様々な技芸を学ぶ上で極めて重要な意味を持つと考えられる。

スポーツや楽器演奏などの身体スキルを学ぶ上で、多くの人が選択するスキル熟達方法の 1 つとして模倣を挙げることができる。生田は、日本の伝統的な技芸におけるスキルの習得の大きな特徴の 1 つとして、各スキル固有の「形」の「模倣」から出発するとしている[生田 87]。また、佐伯は知的営みや文化の継承において、「学ぶ」こととは「まねて、すること」であるとしている[佐伯 95]。ただし、ここに挙げた「模倣」や「まね」は、行為の外見的なフォームの再現に専心することを指しているのではない。模倣する対象のおかれている状況、

行為の目的や動機、価値を自分の内に取り込むことで、単なる模倣が「模倣」を超えて行くとしている。本節の冒頭に挙げた宮本武蔵の「能々吟味すべし」という言葉も、五輪書に記されている兵法の極意を弟子に単なる外見上の模倣ではなく「学ばせる」ために繰り返し用いられたのではないだろうか。単なる模倣から脱することのできない中途半端な兵法は、諺が示す通り大疵の元となるのである。

これらのことから、身体スキルを含む何らかの技芸を「学ぶ」ためには観察した技を単に外見的に模倣したり、盲目的に教示に従ったりするのではなく、学習者自らが対象について能動的に探究を行うことの重要であると考えられる。

従って、本研究が対象とする身体スキルにおいても、競技者自身にスキルを能々吟味させることを心がけなければならない。

## 2.3 メタ認知：能々吟味するために

前節では、身体スキルなどを学ぶ上で、競技者自身が学習の対象を能々吟味することの重要性を示した。では、コーチングにおいて競技者にどのようにスキルを吟味させればよいのか。選手が、単なるフォームの模倣を超えてスキルを「学ぶ」ためにはどのような方法をとればよいのか。

単なる模倣を学びへと発展させるためには、学び手が模倣する対象のおかれている状況、行為の目的や動機、価値を自分の内に取り込む必要がある。

では、自分の内に取り込むとはどのような行為なのか。河合は、人間は自分が経験したことを自分のものにする、あるいは自分の内に納めるためには、その経験を自分の世界感に組み込む必要があるとしている[河合 02]。河合はこの作業を、経験したことを自分にとって納得のゆく物語として、その中に筋道を見出すことであるとしている。また、諏訪は、スポーツなどの身体スキルにおける熟達は、身体や環境に含まれる変数に気づき、新旧の変数を取り込んだ新たな行為者自身の理論を構築し続ける漸進的プロセスであるとしている[諏訪 05]。つまり、身体スキルにおいて行為者自身の理論を構築するプロセスこそが、自身にとって納得のいく物語を作り出し、経験を自らの内に取り込むことであると考えられる。

自らのスキル獲得過程の経験から自分にとって納得のゆく物語を見出すためには、自分の内で何が起こっていたのかを内部観測を行う必要がある。内部観測とは、神のように全体を観測するのではなく、対象と観測者を分離せず行為者として観測を行うという理論である[井庭 98]。ただし、身体スキルの獲得は本来暗黙的に獲得されるものであるため、内部観測はより能動的に取り組む必要がある。

能動的な内部観測の方法論としてメタ認知を挙げることが出来る。メタ認知とは、知覚・思考・行為からなる認知プロセスを自ら認知することを意味する。諏訪は、メタ認知をさらに 2 つの段階に分類している[諏訪 05]。第 1 段階は、認知プロセスを身体が体感することである。第 2 段階は体感したことを言語化するメタ認知的言語化と呼ばれる段階である。

スポーツなどの身体スキルの獲得に焦点を当てたメタ認知は、あるタスクを無意識のうちに安定して実行出来るようになった定常状態を、あえて言語的に意識すること安定を崩すことからはじまる。そして、競技者自身の視点から、身体や環境、身体と環境の間にある関係性を能動的に探索することで、新たな変数の発見を促し、熟達過程における漸進的プロセスのサイクルを早めることができる。このときメタ認知的言語化は、変数を発見した時点では気付いていなかった変数間の関係性を新たに見出してメタ認知を促進させる役割を果たす。

メタ認知及びメタ認知的言語化が熟達過程における漸進的プロセスに影響を及ぼすプロセスを中島らによる FNS ダイアグラムにマップすることができる[中島 08]。

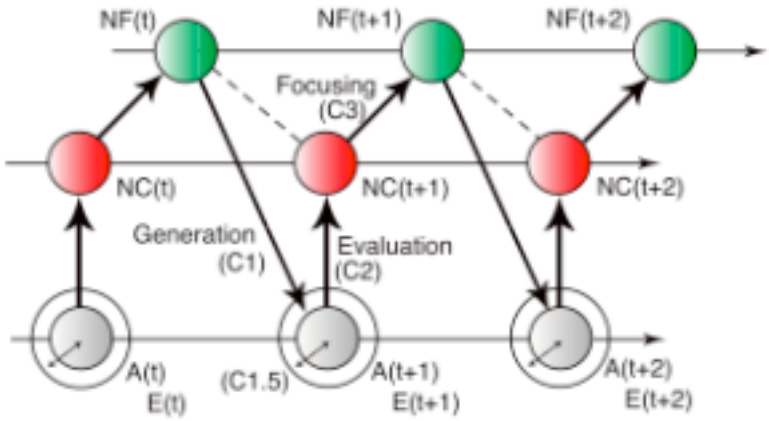



図 2.1　FNS ダイアグラム[中島ら 08]

図 2.1 の FNS ダイアグラムはイノベーションにおける生成・評価・方向性の絞り込みという 3 つのフェーズを、概念の層（ノエマ）と実体の層（ノエシス）の因果関係として示したものである。図中の生成(C1)から方向性の絞り込み(C3)に至までのプロセスを以下に示す。

(C1)：時間 t において実現したい目標の記述「未来ノエマ」NF(t)から下層での行為「ノエシス」A(t+1)が発生する。

(C1.5)：発生したノエシス A(t+1)と環境 E(t+1)とのインタラクションを通じて様々な現象を引き起こす。時間 t+1 における環境とのインタラクションであるため、偶然の要素が比較的大きい。

(C2)：発生したノエシスを認知したものが上層の「現在ノエマ」NC(t+1)となる。(C1.5)におけるインタラクションから新しい変数を発見する行為がこれに当たる。

(C3)：生成された現象ノエマ NC(t+1)から新しい目標 NF(t+1)へと移る行為。方向性の絞り込みは、まだ生み出されていない未来ノエマを創造する非常に難しい行為である。

一般的な身体知の熟達過程では、C2 のフェーズが偶発的な変数の発見や競技者の能力に依存するため、これ以降のフェーズにスムースに移行することが出来ない。メタ認知は、C2 のフェーズを意識的に強化することにより熟達過程における漸進的プロセスの 1 サイクルを回る速度を加速させる効果があると考えられる。

諏訪は、このメタ認知及びメタ認知的言語化による熟達サイクルの加速をより効率的に行うために、外部観測的な計測技術を活用することが重要であると述べている[諏訪 05]。しかし、現段階ではメタ認知を支援するためには、どのような外部観測を行えば良いのか、また、獲得した情報をどのようにフィードバックすればよいのか、という問題を主題とした研究は殆ど行われていない。

## 2.4 スキル学習とフィードバック

本節では、従来のスポーツ科学における運動学習を対象とした研究領域におけるフィードバックというトピックについて概観する。さらに、ここに示すフィードバックの定義をもとに、次節にて本研究が目指すメタ認知をより効率的に実施するための支援方法を検討する。

運動学習の研究におけるフィードバックとは、情報処理的観点に基づいて人間行動の理解を目指す運動システムアプローチにおいて、目標値と実行されたパフォーマンスの差、つまりエラーについての情報のことを指す[山本 05]。また、近年では、フィードバックという語は、運動に関するあらゆる種類の感覚的情報という意味を持つようになってきている[Schmidt 91]。運動学習におけるフィードバックは内在的フィードバックと外在的フィードバックに分類される。

内在的フィードバックは、行為の結果特殊な方法や装置無しに直接的に知覚できる視覚や聴覚によってもたらされる内在的情報である。

外在的フィードバックは審判の評価やコーチのアドバイス、映像などの人工的な手段によって学習者に与えられるパフォーマンスの結果に基づく情報を指す。尚、運動学習に関する研究でフィードバックという表現を用いる場合は、この外在的フィードバックの略記として用いることが一般的である。

外在的なフィードバックには結果の知識とパフォーマンスの知識が含まれている。結果の知識とパフォーマンスの知識の比較を表 2.1 に示す。

表 2.1 結果の知識とパフォーマンスの知識の比較[Schmidt 91, pp237]

| 結果の知識 | パフォーマンスの知識 |
|---|---|
| **類似点** | |
| 言語あるいは言語化が可能 | 言語あるいは言語化が可能 |
| 外在的 | 外在的 |
| 反応の後 | 反応の後 |
| **相違点** | |
| 環境上の目標に関しての結果の情報 | 運動の産出やパターン化の情報 |
| 内在的フィードバックを豊富に有する | 内在的フィードバックと区別される |
| 得点や目標についての情報 | 運動学的側面についての情報 |
| 実験室において最もよく用いられる | 指導においてよく用いられる |

結果の知識はタスクの正否に関する言語情報である。また、パフォーマンスの知識は必ずしもタスクの正否に言及しない運動あるいは運動パターンに関する情報である。

Schmidt は外在的フィードバックを以下に示す４つ作用に要約している[Schmidt 91]。

- 学習者にモチベーションを与える
- 正しい行為と誤った行為にそれぞれ正と負の強化を与える
- パフォーマンスのエラーに関する情報を与える
- 依存性をつくり出し、フィードッバクを取り除いた際に問題をもたらす

但し、これらの作用は相互依存的に同時に作用するため区別することは難しいとしている。

また、Schmidt は、外在的フィードバックの内容の情報量・エラーの方向と量・正確性について以下のように述べている[Schmidt 91]。

- 情報量は、あまりにも多すぎると学習者の情報処理や記憶の能力に負担をかけるため、情報は１度に１つあるいは多くても２つに集中させるべきである
- エラーの方向（早い/遅い、高い/低い など）の情報は、タスクの目標と調和した運動を実現するために不可欠である
- エラーの量（30 度ずれている　など）の情報は、単体では運動を修正すべき方向が明らかでないため用いることが困難である
- フィードバックの正確性は、大雑把に実際の値に近似していればよく、正確性を高めることにあまり利点はない

## 2.5 メタ認知を支援するためのフィードバックの検討

本節では、前節で概観した運動学習の研究におけるフィードバックというト

ピックをもとに、メタ認知を支援するためのフィードバックを検討する。

まず、従来の運動学習におけるフィードバックと本研究におけるメタ認知の支援を目的としたフィードバックの相違点を示す。

前節で述べた運動学習におけるフィードバックは、情報処理的観点に基づいているため、目的値となる「正しい値」の存在が前提となっている。しかし、実世界における人間の運動には、学習者ごとの個人差や運動を実施する環境などの要因によって「正しい値」が一意に定まるとは限らない。本研究は、学習者が自らのスキルを吟味して問題点を発見することを重視するため、「正しい値」を基準としたフィードバックを与えることはない。

そのため、本研究のフィードバックにはエラーの方向や量といった情報は含まない。

次に、運動学習の研究におけるフィードバックに関する知見から、メタ認知の支援を検討する上で重要な意味を持つと考えられるフィードバックの作用及び情報量について述べる。

競技者に与えるフィードバックを検討する際に、Schmidt が示したフィードバックへの依存性について慎重に考慮する必要があると考えられる。フィードバックに対する依存性は、競技者が外部から与えられる外在的フィードバックに依存してしまい、外在的フィードバックがなくなったとき、パフォーマンスの実行によって得られる内在的フィードバックをも軽視するために生じるとされている。メタ認知において内在的フィードバックは極めて重要な情報であるため、メタ認知を支援するためのフィードバックがこれらを軽視するきっかけとならないよう配慮しなければならない。

フィードバックの情報量についても、運動学習の分野における知見は重要な示唆を与えている。フィードバックが学習者の情報処理や記憶の能力に負担をかけないように、可能な限り単純な情報である必要がある。フィードバックはあくまで学習者の熟達を支援するための情報であり、その後のスキル遂行に負荷をかけてはならない。

これらのことから、メタ認知の支援を目的としたフィードバックには以下に示す 3 つの要件を満たす必要があると考えられる。

- 「正しい値」との誤差を示すものではない
- 内在的フィードバックを軽視するきっかけになってはならない
- 情報処理や記憶の能力に負荷をかけない

## 2.6 本章のまとめ

本章では、宮本武蔵の「能々吟味すべし」という言葉を引用し、身体スキルを学ぶ上で自らのスキル獲得過程を内部観測することの重要性を示した。内部観測の具体的な方法論としてメタ認知を挙げ、身体スキル獲得における役割と運動計測に基づく支援の有効性を示した。しかし、現段階では、運動計測に基づくメタ認知の支援に関する先行研究が殆ど存在していない。そこで、運動学習の研究に置けるフィードバックというトピックを概観し、身体スキルを対象としたメタ認知の支援するためのフィードバックについて検討した。

# 第 3 章

# メタ認知の支援：

# フォーム可視化ツール“ColorBar”

## 3.1 はじめに

本章では、本研究にて開発した身体スキルを対象としたメタ認知を支援するためのフォーム可視化ツール”ColorBar”について、その狙いとワークフロー、”ColorBar”によるフィードバックの効用について述べる。

尚、本論文に登場する”ColorBar”と「カラーバー」という 2 つの単語について、ここで改めて定義を行う。”ColorBar”とは、本研究にて開発したメタ認知支援ツールを指し、「カラーバー」は”ColorBar”から生成される身体運動時の姿勢変化の様子を可視化したデータを指す。

## 3.2 フォーム可視化ツール”ColorBar”

### 3.2.1 “ColorBar”とは

”ColorBar”は、モーションキャプチャシステムを用いて計測した身体スキルに基づいて実行されるパフォーマンスを、姿勢の類似度に基づいて分節化し、フォームを色によって可視化するソフトウェアツールである。

ツールのユーザーは、計測によって獲得したデータ群の中から可視化する試行を選択し、そのフォームを何色の色を用いて分節化するかを決定する。その結果、生成されるのが図 3.1 に示すようなカラーバーである。図 3.1 のカラーバーは 4 試行分の可視化されたパフォーマンスが並んでおり、その配置は特に指定がない場合、左から試行を計測した順に配される。それぞれの試行は、上から下に向かって時間が経過する。試行内及び試行間で、同じ色が出現する区間はスキルの行為者の姿勢が類似していることを示す。

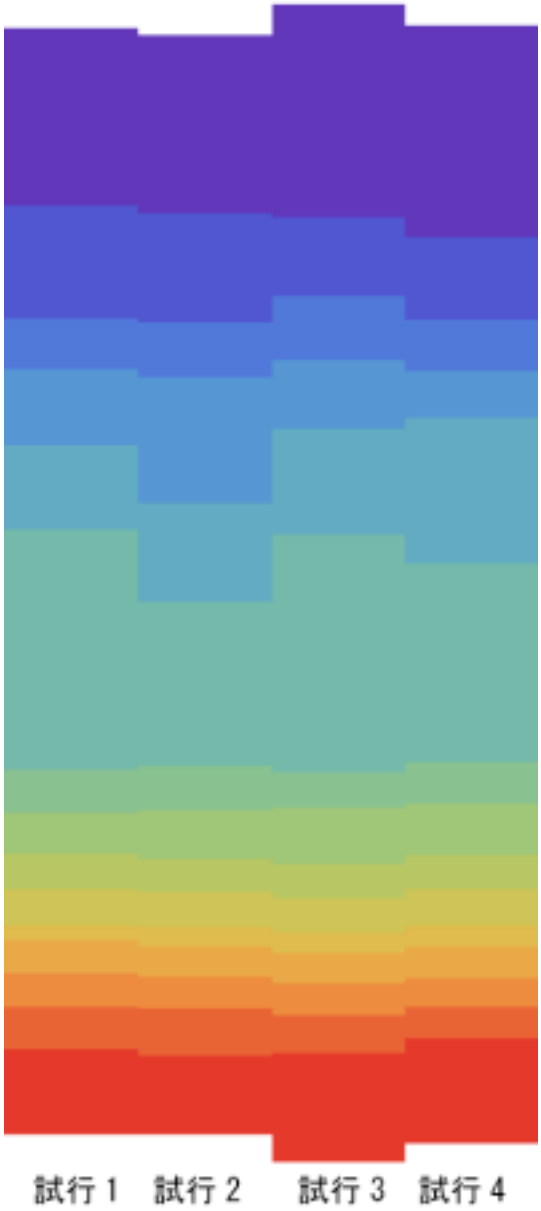



図 3.1 生成されたカラーバー

### 3.2.2 フォームの定義

スポーツなどの身体運動において競技者が用いるフォームという言葉は、多様な解釈が可能な曖昧さを有する語である。本節では本論文におけるフォーム

の定義を明確に示しておきたい。

まず、フォームと似た意味を有する言葉として、姿勢が挙げられる。本研究では､姿勢はある一瞬の時点 t における身体およびパフォーマンスの遂行に用いる道具によって形成される形相として定義する。これに対してフォームは、時間 a から時間 b までといった時間幅を有する、ある一連の姿勢変化の変遷を示すものであると定義する。

フォームが時間幅を有するのに対して、姿勢はある一瞬の身体及道具の成す形相を示す。したがって、フォームという語には、いくつかの姿勢が含まれるのに対して、姿勢という語はある特定の形相を指す。

### 3.2.3 “ColorBar”の狙い：身体スキル探究の触媒

”ColorBar”によって可視化される情報は、光学式モーションキャプチャシステムを用いて計測した試行内のどの区間が類似した姿勢であったのかという極めて単純なものである。この情報が複数集まると、全く同じ運動を実行しない限り、姿勢の変遷を表すカラーバーの各色の長さや配色パターンに差異が現れる｡行為者は､生成されたカラーバー全体を 1 つの模様として俯瞰することで、試行間の差異の発見やフォームの安定性の確認することが出来る。さらに、カラーバーに現れる各色の意味解釈によって、スキルの実行に関する新たな変数や注目箇所の発見を支援できる。

”ColorBar”は、複雑な身体運動を一次元情報として符号化することにより、直感的理解が可能な簡単表現である。さらに、その意味解釈を通じて簡単表現の裏側にある身体スキルを行為者自身がメタ認知的に探究するための触媒として機能することを狙いとしている。

## 3.3 ”ColorBar”のワーク フロー

本節では、”ColorBar”が身体スキルを実行する行為者のフォームを可視化するまでのワークフローの各プロセスについて説明する。各フェーズの詳細な手続きは、本節内で述べる。

カラーバーの生成は、モーションキャプチャシステムを用いた運動計測を実施することから始まる。

次に、行為者にカラーバーとして可視化する試行を選択させてから、計測データの各フレームにおける行為者の姿勢を多次元ベクトルによって表現する。試行の選択は、生成されるカラーバーを行為者自身が操作可能であることを意味するため、データの分析という観点からみれば問題があるかもしれない。しかし、先述したように”ColorBar”は身体スキル探究の触媒となることを狙いとしている。闇雲に全試行の結果を提示するのではなく、行為者自身がどの試行を選択してカラーバーを生成するか吟味することから、スキル探究を促すことが始まるのである。

多次元ベクトルに変換された各フレームのデータを K-means 法を用いてクラスタリングする。尚、カラーバーは 1 試行分の計測データからも生成かのであるが、このクラスタリングによる分節化の精度を挙げるために複数試行のデータを同時に処理することが望ましい。

分節化後、各クラスタに色を割り当ててカラーバーが出力される。

”ColorBar”の模式的なワークフローを図 3.2 に示す。

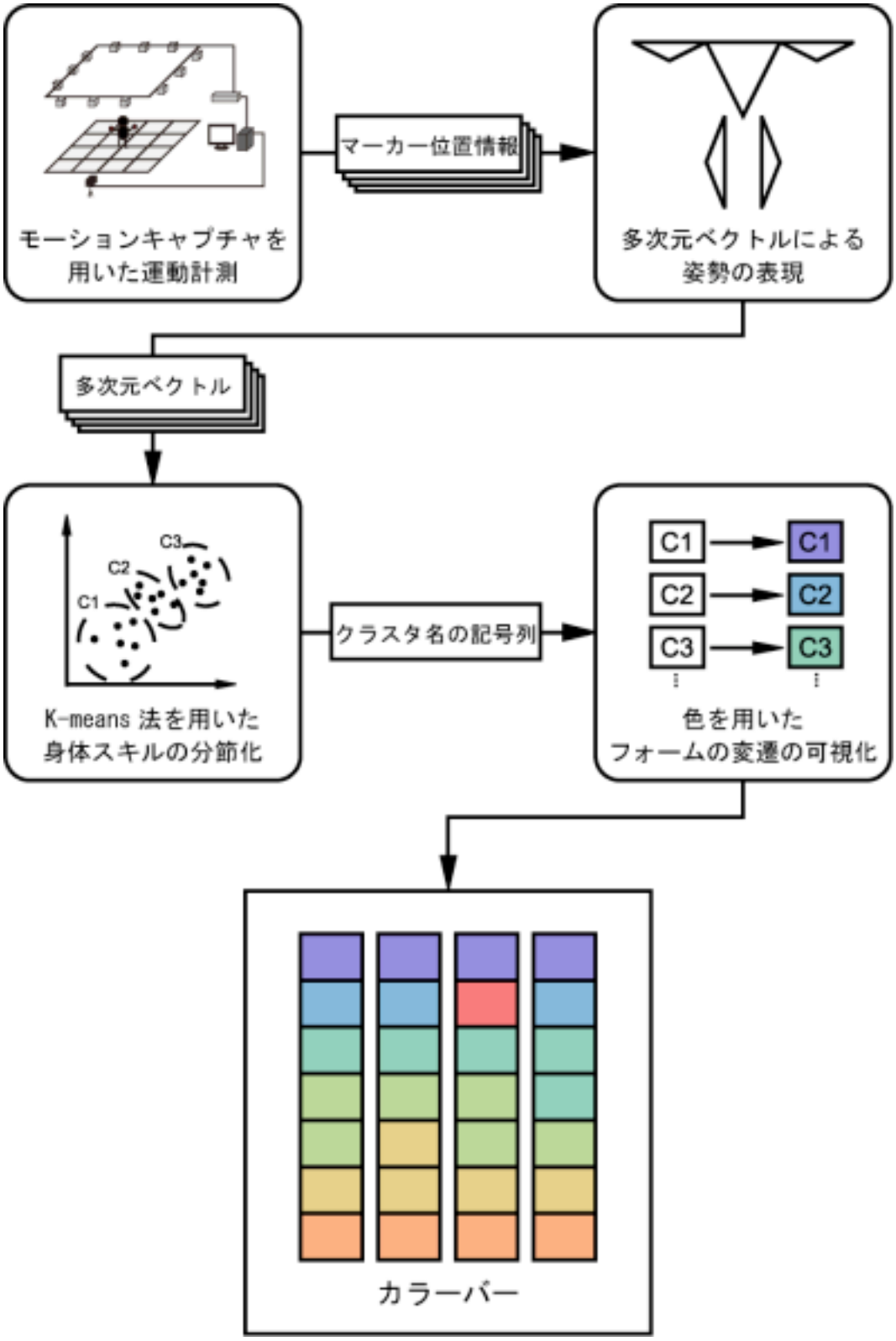



図 3.2　”ColorBar”のワークフロー

### 3.3.1 モーションキャプチャを用いた運動計測

カラーバーを生成するためには、まず光学式モーションキャプチャシステム(MotionAnalysis 社製 MAC3DSystem)を用いた運動計測を実施する。運動計測自体は、厳密には”ColorBar”というソフトウェアツールには含まれないが、カラーバーの生成に密接に関わるため、このプロセスから説明をはじめる。

計測には計 12 台の EAGL-500RT カメラを使用し、各カメラのフレームレートを 240Hz、シャッタスピードを 1/2000sec に設定する。また、システムと同期したデジタルビデオカメラにて通常のビデオ映像も撮影する。計測環境及びマーカーの貼付位置を図 3.3、3.4 に示す。このような計測環境にて、対象となる身体運動を複数回計測する。

計測後、マーカーの座標データ及びシステムと同期して撮影したビデオカメラの映像をトリミングして、パフォーマンスと直接関係のない準備動作などをデータから取り除く。トリミングを行う範囲は、マーカーの座標データ等に基づいて決定する。データの開始位置および終了位置の定義はドメインに応じて決定する。

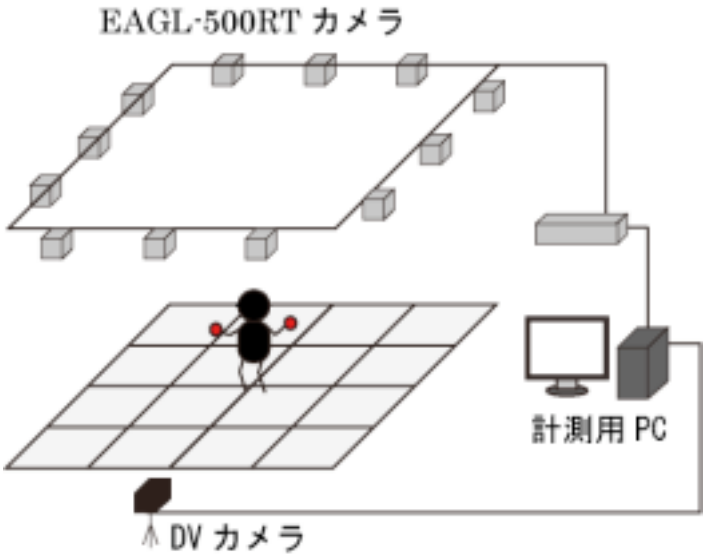



図 3.3　計測環境の概略

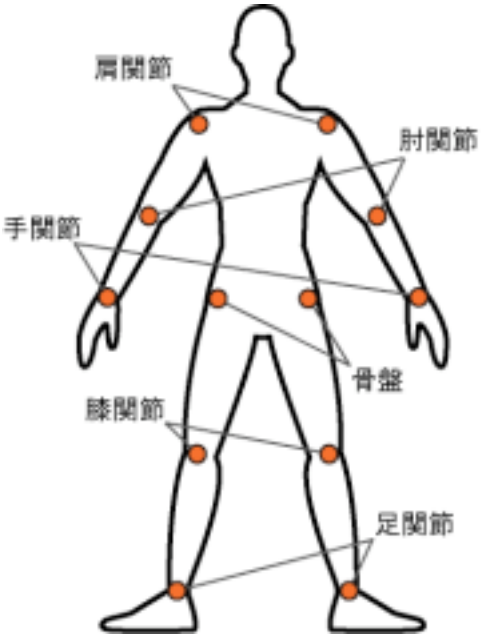



図 3.4　マーカー貼付位置

尚、マーカー位置については対象ドメインによって変化するため、ここでは最も単純なマーカーセットを用いた例を示す。対象が道具を用いるようなドメインの場合、道具も含めて行為者の姿勢を定義することも可能である。

従来、スポーツなどの身体運動を対象とした研究領域では、モーションキャプチャシステムを用いた運動計測実施は、運動中の身体各部の振舞いを精確に分析するために用いられる。そのため、マーカーの貼付位置は慎重に検討され、分析対象の部位が増えるほどマーカーの総数も増加する。しかし、”ColorBar" は、従来の研究で用いられてきた分析手法と異なり、各フレームの姿勢の類似度に基づいて身体運動を分節化することを目的としている。各フレームにおける全身のフォームを包括的に表現することを重視したため、少ないマーカー数での全身運動の計測を可能となった。

### 3.3.2 多次元ベクトルによるフォームの表現

運動計測を実施した後、”ColorBar”では獲得したマーカーの 3 次元位置情報に基づき、計測データの各フレームにおける行為者の姿勢を複数の三角形平面によって表す。平面の数は、カラーバーの空間分解能を調整するパラメータである。分解能を高めるためには計測時のマーカーセットをより計測点の多いも

のに変更する必要がある。先に挙げたマーカーセットを用いた場合、行為者の姿勢は図 3.5 に示す 5 つの三角形平面によって表現される。

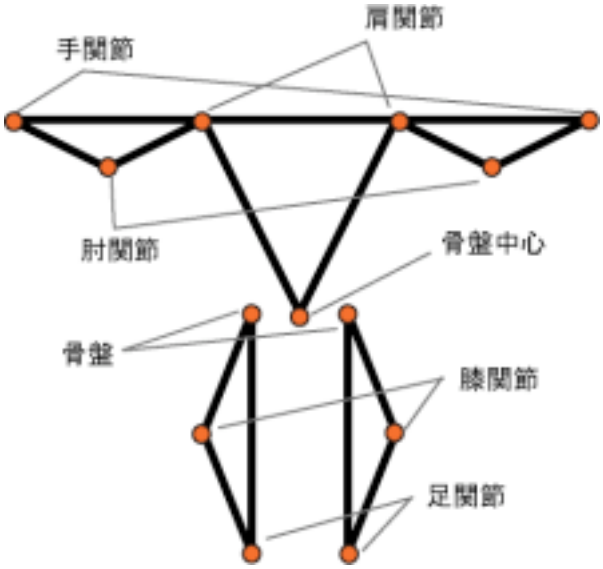



図 3.5　5 面の三角形平面による姿勢の表現

ベクトルの次元数は、姿勢を表現する三角形平面の数によって決定される。図 3.5 に示す 5 面の三角形の場合、まず、図 3.6 に示す角三角形を構成するベクトルの内積と各平面の法線ベクトルを求める。それらに基づく三角形内のベクトルの内積からなる 5 次元と法線ベクトルの組み合わせの数 10 次元をあわせた 15 次元ベクトルとなる。15 次元ベクトルの成分を表 3.1 に示す。

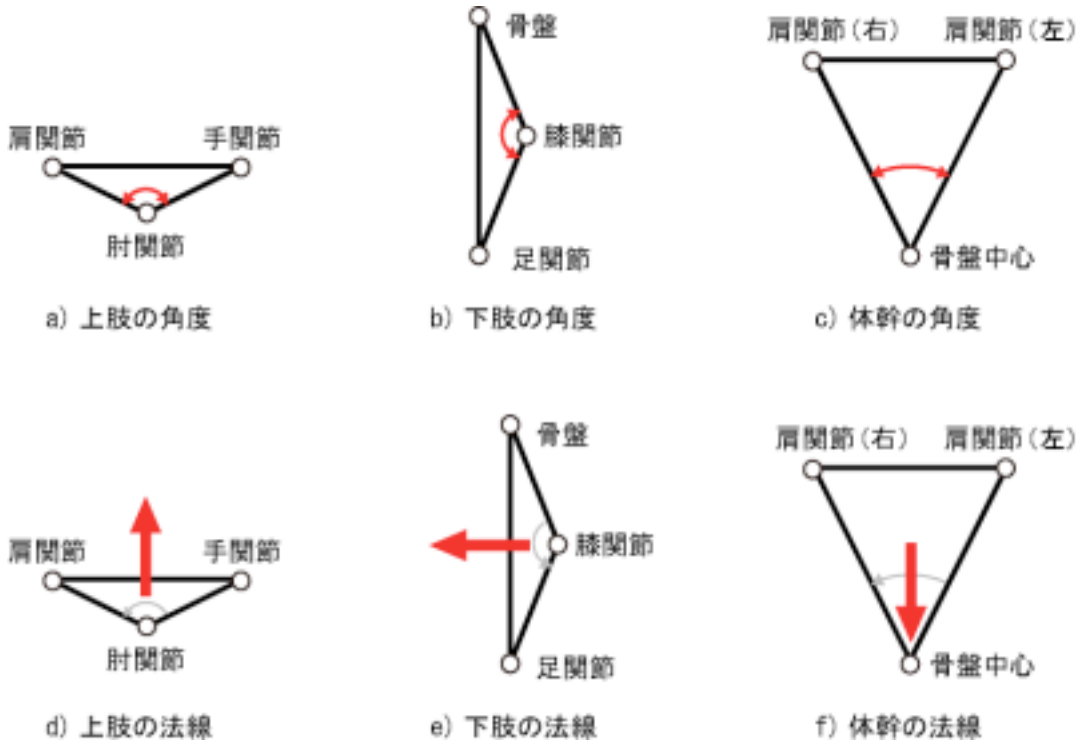



図 3.6 四肢及び体幹の角度と法線

表 3.1　多次元ベクトルの成分の一例（5 面の三角形による姿勢表現の場合）

| 三角形内のベクトルの内積 | | 各三角形の法線ベクトル同士の内積 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 体幹* | 6 | 体幹と右上肢 | 11 | 右上肢と右下肢 |
| 2 | 右上肢（肘関節） | 7 | 体幹と左上肢 | 12 | 右上肢と左下肢 |
| 3 | 左上肢（肘関節） | 8 | 体幹と右下肢 | 13 | 左上肢と右下肢 |
| 4 | 右下肢（膝関節） | 9 | 体幹と左下肢 | 14 | 左上肢と左下肢 |
| 5 | 左下肢（膝関節） | 10 | 右上肢と左上肢 | 15 | 右下肢と左下肢 |

*体幹を構成するベクトルの内積は、骨盤中心と右肩関節及び骨盤中心と左肩関節のベクトルから算出する。

可視化する各試行の計測データの全フレームを多次元ベクトルの時系列データに変換する。このとき、各フレームの姿勢を示す多次元ベクトルには、メタ情報として、試行番号及びフレーム数を付与する。計測データの多次元ベクトルへの変換の概念を図 3.7 に示す。

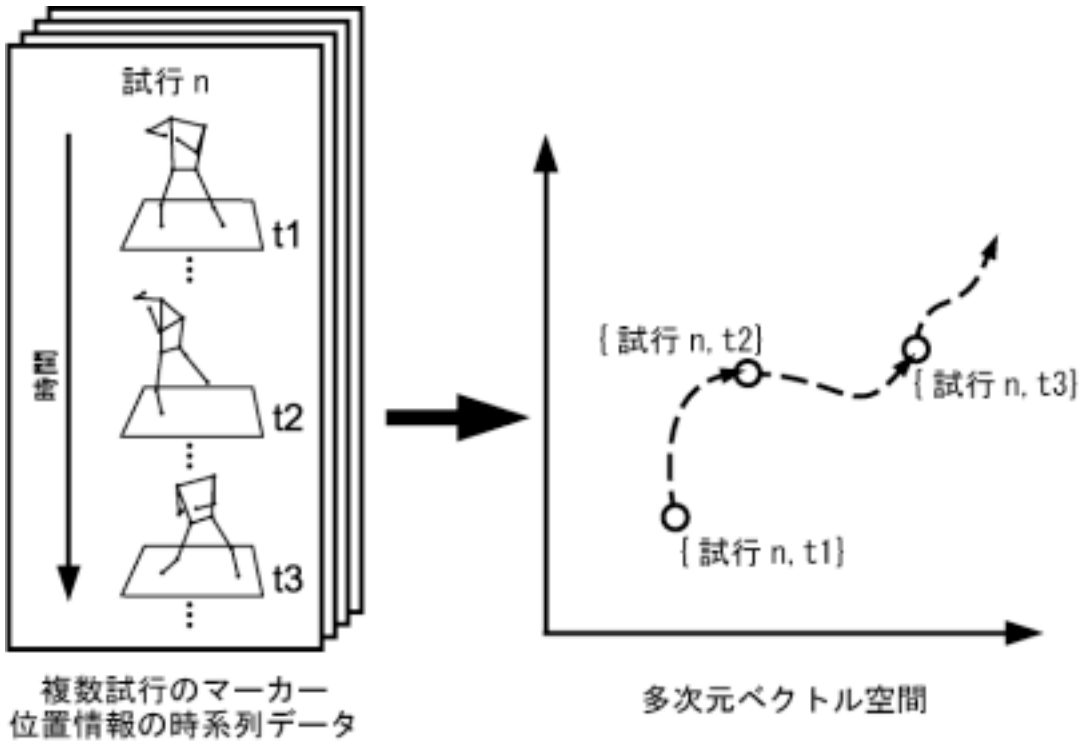



図 3.7　マーカー位置情報の多次元ベクトルへの変換

### 3.3.3 K-means 法を用いたパフォーマンスの分節化

多次元ベクトルの時系列データに変換された全データに対して、K-means 法を用いてクラスタリングを実施する。

K-means 法とは、非階層クラスタリングの代表的な手法の 1 つである。この手法は、はじめにクラスタ数 K を指定してから以下に示す手続きを実行する[岡崎 00, pp.119]。

（ステップ 1）繰り返しステップ数 $L$ を 1 に設定する。$K$ 個の初期クラスタ中心、

$$C_1(1), C_2(1), \cdots, C_k(1)$$

を任意に選んだ $K$ 個のサンプルパターンと同じにする。

（ステップ 2）すべてのサンプルパターン $P_1, P_2, \cdots, P_n$ を次のようにして、これまでに形成されている $K$ 個のクラスタのどの平均パターンに最も近いかによりク

ラス分けする。すなわち、すべての$i, j = 1,2,\cdots,K(i \neq j)$について、

$$\|P - C_j(L)\| < \|P - C_i(L)\|$$

であれば、$P \in S_j(L)$とする。ここに$S_j(L)$は$C_j(L)$をクラスタ中心とするサンプル集合である。

（ステップ 3）前ステップで得られた$S_j(L)$の新しいクラスタ中心を、その平均パターンとする。そして、これらを$(L+1)$ステップでのクラスタ中心とする。すなわち、

$$C_j(L+1) = (1/N_j) \sum_{P \in S_j(L)} P \quad (j = 1,2,\cdots,K)$$

ここに、$N_j$は$S_j(L)$に属するサンプル数である。

（ステップ 4）すべての$j = 1,2,\cdots,K$に対して$C_j(L+1) = C_j(L)$となれば、アルゴリズムは安定したとして終了する。そうでなければ、ステップ数 $L$ を $L+1$ として、上記（ステップ 2）へ。

K-means 法は、画像処理において画像パターンの分類を比較的簡単に実現するために有効な手法である[岡崎 00]。尚、”ColorBar”では上述のアルゴリズム内で各クラスタ中心とサンプルデータの近さを求めるための距離の計算方法にはユークリッド距離を用いる。

“ColorBar”では、K-means 法を多次元ベクトルを成分（各フレームの姿勢）が類似するものごとに分類するために用いる。クラスタ数 k はカラーバーの時間分解能を調整するパラメータである。時間分解能を高めるためにはクラスタ数 k を大きくする。

K-means 法を用いて多次元ベクトルに変換された計測データをクラスタリングすることで、データの時系列情報が失われる。そこでクラスタリング前の各フレームの多次元ベクトルが有するメタ情報に従って、元の時系列に再配置する。この手続きによって、競技者の姿勢の類似度に基づいて計測したパフォーマンスが分節化され、クラスタ名の記号列という 1 次元情報に変換される。

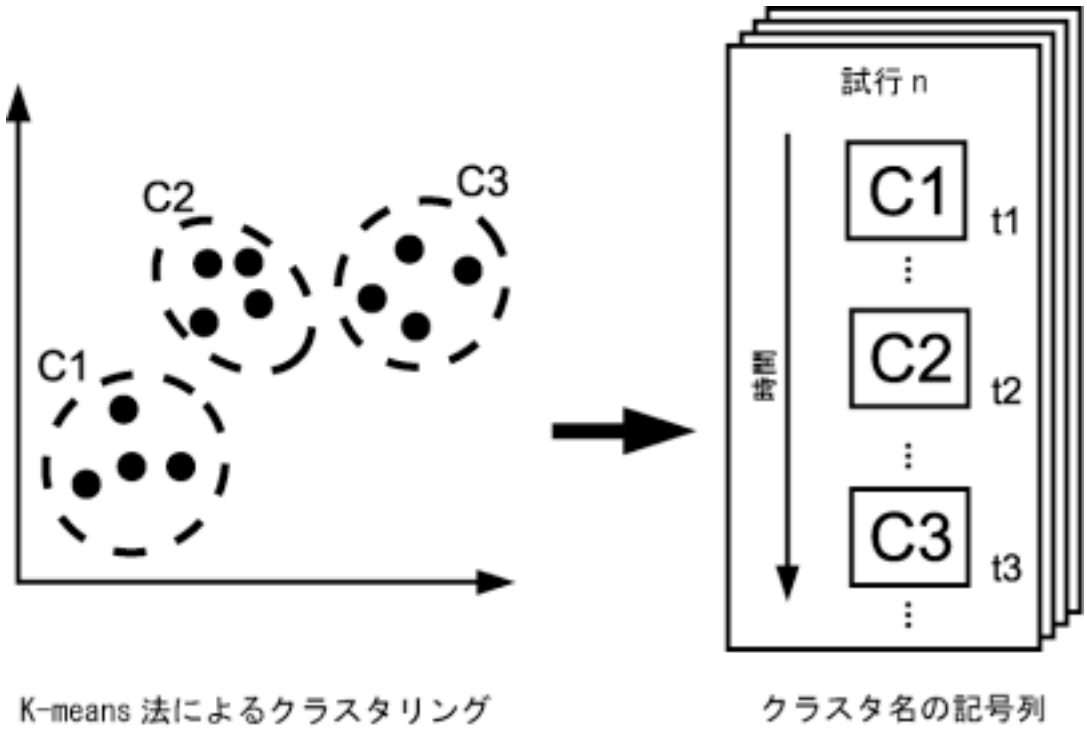



図 3.8　K-means 法による分節化

### 3.3.4 色を用いたフォームの可視化

K-means 法を用いた分節化によって、クラスタ名の記号列という 1 次元情報で表された行為者のパフォーマンス中のフォームを色によって表現する。

パフォーマンスの中でクラスタの出現する順に青から赤へというグラデーションになるように各クラスタに色を割り当てる。

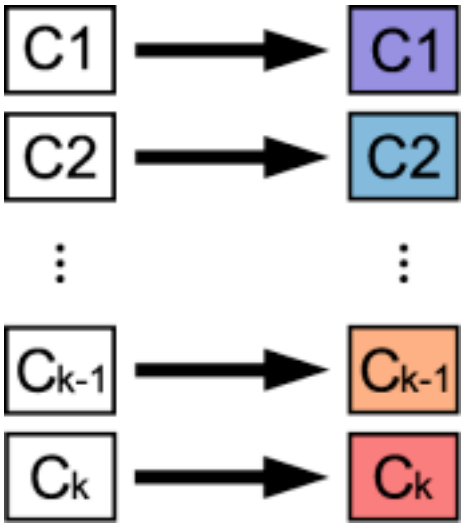



図 3.9　各クラスタへの配色

各クラスタに割り当てる色は、HSB 色空間における色相を青から赤の区間でクラスタ数 k に分割し、クラスタ名の出現順に青から順に決定する。各クラスタ数においてカラーバーに用いる色を図 3.10 に示す。

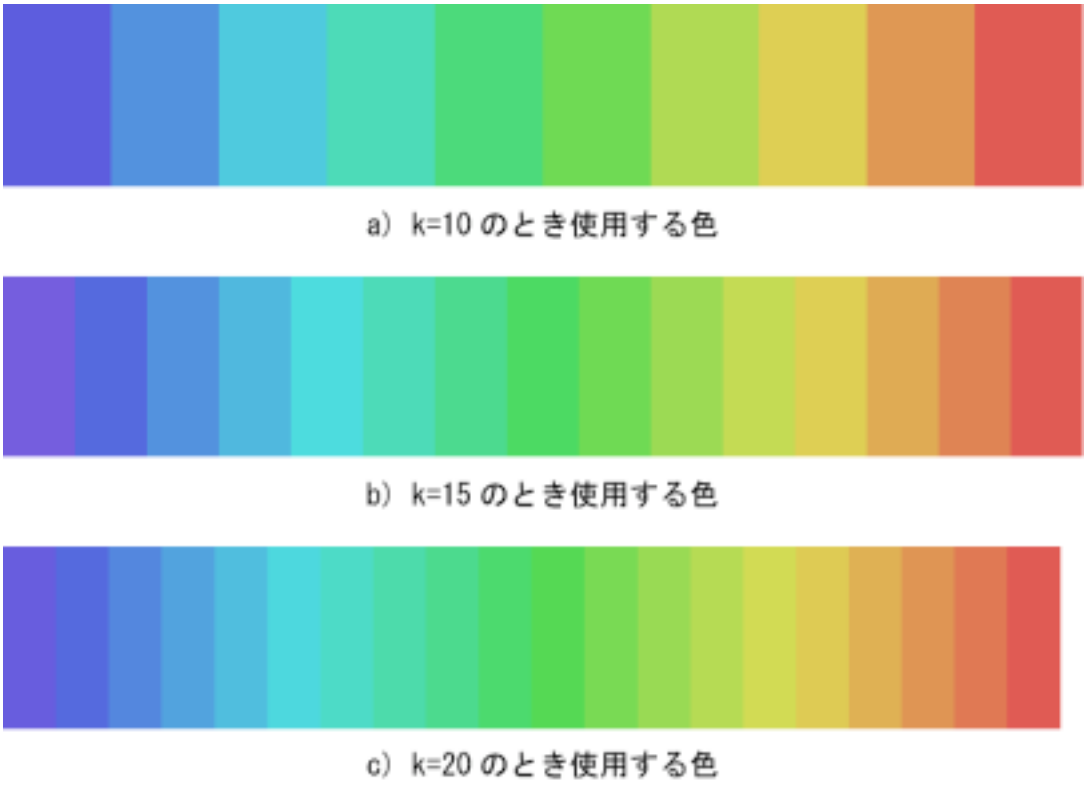



図 3.10 クラスタ数 k=10,15,20 のときの配色パターン

但し、配色は試行ごとに行われるため、先に処理された試行の中に出現しなかった新しいクラスタ(図 3.11 における試行 3 の C7)が出現した場合は青系の色の間に赤が入りグラデーションが崩れる場合もある。従って、色の類似性は必ずしもそこで表される姿勢の類似性を示すものではない。

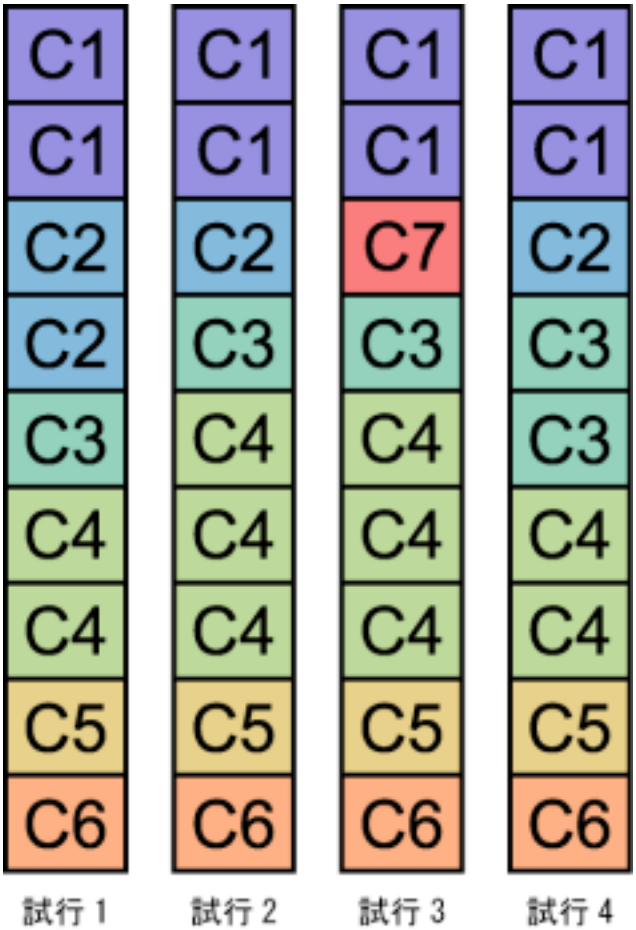



図 3.11　初回以降の試行に新しいクラスタが出現した場合の配色の事例

複数試行のデータからカラーバーを生成する場合、試行ごとにデータ長が異なるため、同期イベントを設定して試行間の比較を容易にする。同期イベントにはパフォーマンス中の特徴的な動作（足部の離地や接地など）を用い、多次元ベクトルに変換する前のマーカー位置情報を用いて同期イベントフレームを特定する。同期イベントはドメインに応じて設定する必要がある。

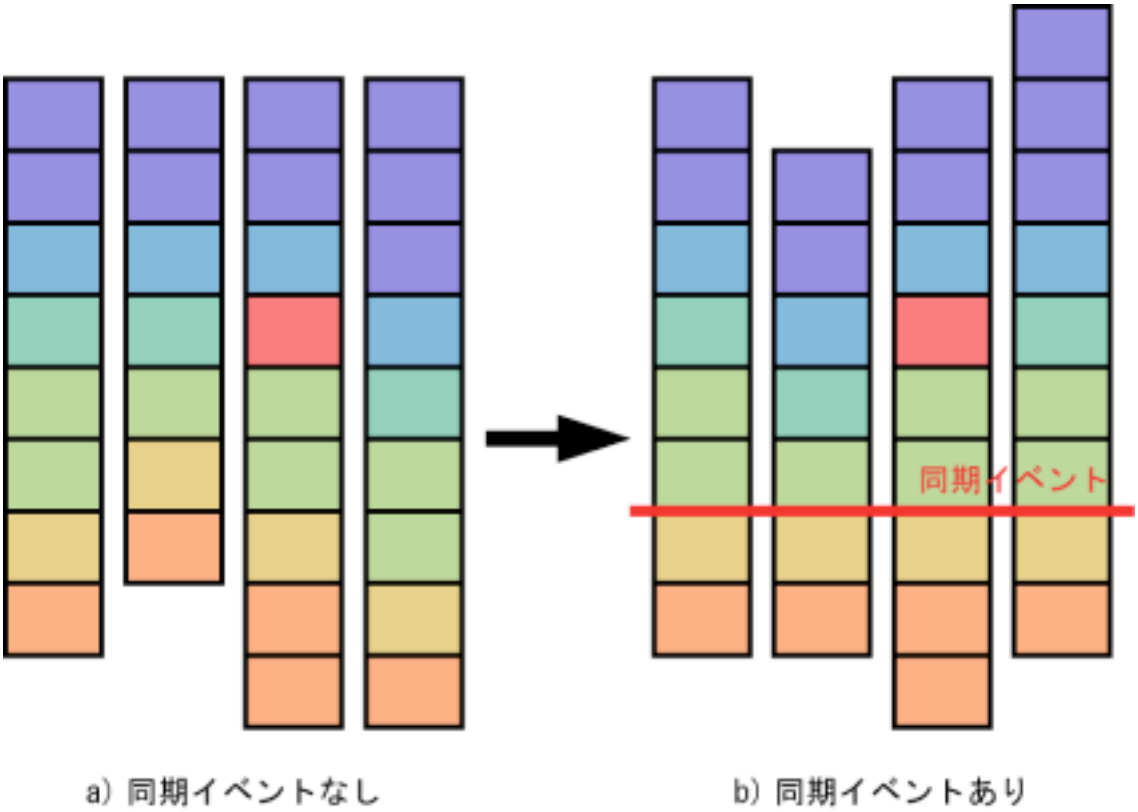



図 3.12　同期イベントに基づく複数試行の同期

## 3.4 “ColorBar”によるフィードバック

本節では、これまでの事例研究から明らかになった”ColorBar”による運動情報のフィードバックがスキルの行為者にどのような影響を及ぼすのかについて、事例研究から得られた知見を述べる。尚、事例研究の詳細な内容については以降の章で詳しく触れる。

### 3.4.1 パフォーマンス間の比較

2 つの試行を比較するとき、それぞれが全く同じ運動を実施していればカラーバー配色パターンや各色の長さは図 3.13a のように等しくなる。しかし、実際に運動計測によって獲得したデータでは、一見すると同じ運動を実行している

ように見えるパフォーマンスに配色パターンや各色の長さに変化が現れる（図 3.13b-c）。

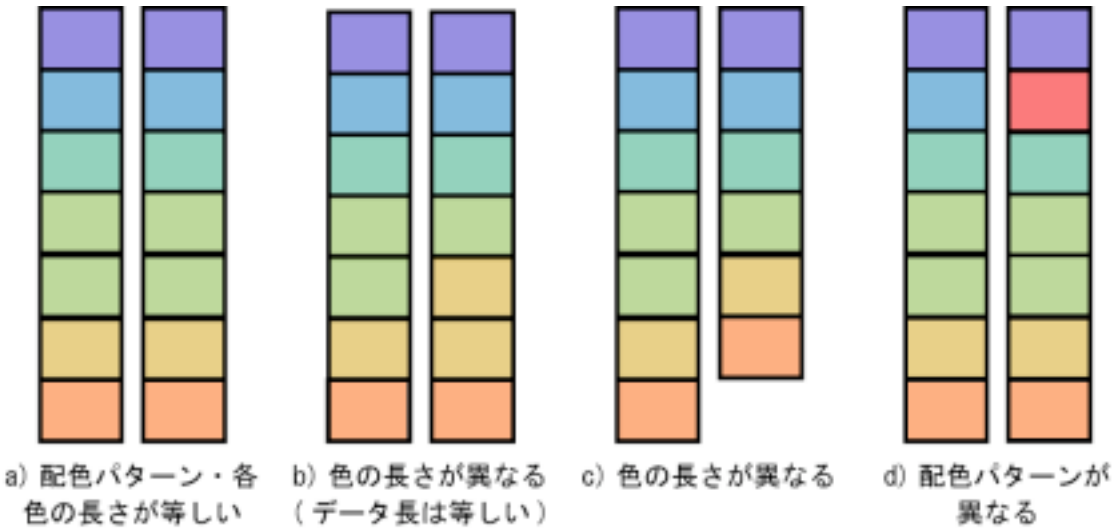



図 3.13 2 つのパフォーマンスの比較

図 3.13b と図 3.13c のような一部の色の長さがことなる場合、その色が示すフォームの継続時間が短い、つまり姿勢が変化する速度が異なることを示す。このようなフォームの継続時間の差異は、行為者のパフォーマンスに対する主観的な評価と密接に関係している。

また、図 3.13d のように配色のパターンが異なる場合、2 つのパフォーマンスは異なるフォームを有することが分かる。フォームの差異は、行為者のスキルが安定している場合は小さく、不安定な場合は大きくなる。

### 3.4.2 パフォーマンスの安定性の確認

複数試行のカラーバーを計測した時系列にそって並べることによって、パフォーマンスの安定性を確認することが出来る。各パフォーマンスを比較する際は、先に述べた配色パターンや各色の長さに注目する。一連のパフォーマンスを俯瞰する場合は、隣接する試行との配色パターンの差異がどのように変化しているかという点に注目する。

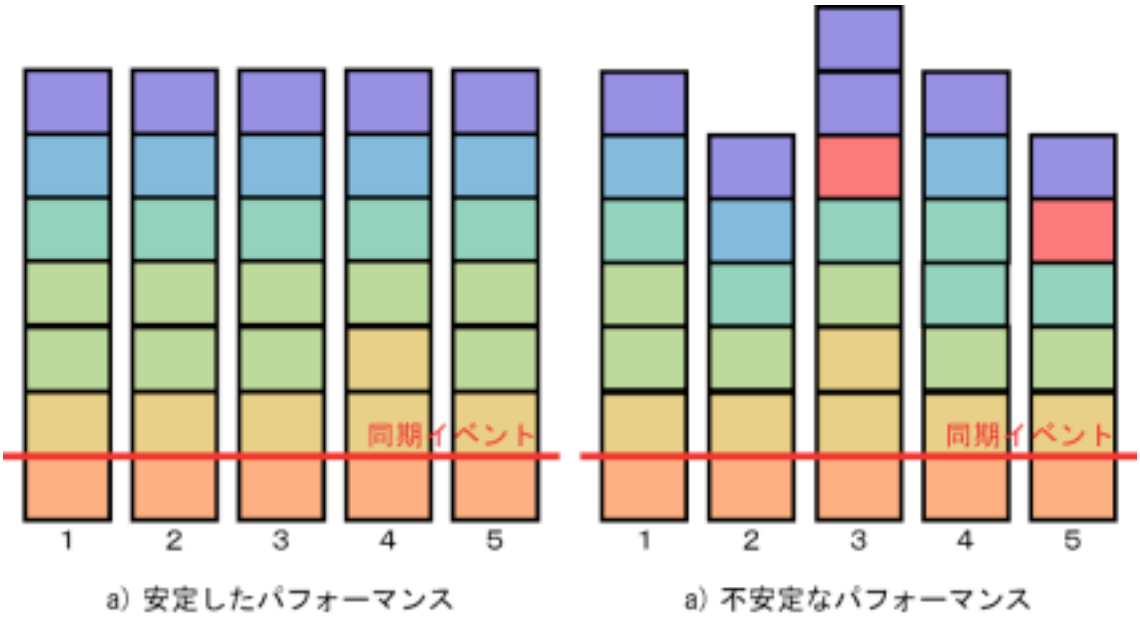



図 3.14 パフォーマンスの安定性

例えば、図 3.14a のパフォーマンス群はデータ長や配色パターン、各色の長さにほぼ差がなく安定している。しかし、図 3.14b のパフォーマンス群は配色パターンや各色の長さに差異があり、図 3.14a と比較すると不安定である。ただし、図 3.14a のように全体的にカラーバーが安定している場合も、クラスタ数 k を大きくすることで、カラーバーの時間分解能が高くなるため、配色パターンなどが変化することも考えられる。但し、クラスタ数 k を過度に大きくすると過剰な分節化が実行されるため、カラーバーの意味解釈が困難になる。

### 3.4.3 映像を用いたカラーバーの意味解釈

カラーバーにおける各色がどのようなフォームを示すのか、その意味解釈はメタ認知的探究を進める上で重要な行為である。

カラーバー単体で色の意味解釈に取り組む場合は、データの開始点や同期イベントなどどのようなフォームであったかが明らかな時点からの距離（時間差）から、その色がどのようなフォームをとっている区間かを大雑把に推測することができる。

さらに、運動計測の際にデジタルビデオカメラで撮影した映像とカラーバーを併せて観察することで、より具体的な色の意味解釈が可能となる。

色の意味解釈によって、行為者は配色のパターンや色の長さがパフォーマンス全体に及ぼす影響を考察可能になり、パフォーマンスに対する主観的な評価との関係に関する仮設を立てることができる。

## 3.5 本章のまとめ

本章では、”ColorBar”が身体スキルに基づいて実施されるパフォーマンスを姿勢の類似度によって分節化し、色を用いてその変遷を可視化するソフトウェアツールであることを示した。このツールは、行為者に身体スキルのメタ認知的探究に取り組むための触媒として機能することを主な目的としている。

また、本章では”ColorBar”がカラーバーを生成するためのワークフローを説明し、”ColorBar”における可視化の原理を明らかにした。さらに、”ColorBar”を用いたフィードバックが競技者にどのような効用をもたらすのか、事例研究から得られた知見を示した。

# 第 4 章

# “ColorBar”開発の経緯とケーススタディ

## 4.1 はじめに

本研究は当初から身体スキルを対象としたメタ認知の支援を目的としていた訳ではない。当初はモーションキャプチャシステムを用いた運動計測とデータマイニング技術を組み合わせて、伝統派空手における身体知、間合いスキルを抽出することを主題としていた。しかし、研究を進めるなかで取り組んだ間合いに関する知識表現の方法を競技者のメタ認知支援に応用出来る可能性に気付き、それが研究の方向性の転換点となった。

本章では、”ColorBar”の開発に至るまでの経緯と、”ColorBar”開発のために取り組んだ野球の打撃スキルをドメインとしたケーススタディについて説明する。

## 4.2 ”ColorBar”の開発に至るまで

### 4.2.1 スキルサイエンス

スポーツや芸術の分野における熟達者の巧みな技は、そのメカニズムを解明するために様々なアプローチで研究が進められてきた。近年では、人工知能の分野を主な背景としたスキルサイエンスという研究領域が、身体知の解明を目指して様々なドメインでの身体知の言語化に取り組んでいる[古川 05]。

スキルサイエンスにおける身体運動スキルの熟達に関する研究は、競技者のパフォーマンス実行に関するする内的な概念モデル、メンタルモデルを修正・更新していく過程に着眼点を置く。スキルサイエンスでは、メンタルモデルの変化によってパフォーマンスの何が変わるのかという What の研究と、メンタルモデルの変化をどのように引き起こすのかという How の研究が進められてきた。

### 4.2.2 空手における間合いスキルの抽出と獲得支援

これまで What の研究では、楽器演奏などの安定した環境を仮定したドメインが取り上げられてきた。しかし、スキルサイエンスの特徴であるデータマイニング技術を用いた研究手法は、試行間の環境変化が著しい対人競技のようなドメインで、その威力を発揮すると考えられた。そこで修士課程における研究は、筆者がコーチとして競技の現場に関与している伝統派空手の組手競技における身体知、間合いの調整スキルを研究のドメインとして選択した。

間合いは武道における重要な概念の１つである。間合いという言葉には「ものとものの隔たり」や「物事を開始するのに適した時期」という意味がある。空手を始めとする格闘技においては、「競技者間の距離」や「攻撃などの技を仕掛けるのに適したタイミング」という競技者間の空間的・時間的な関係性という意味で間合いという言葉が用いられる。競技者は、対戦相手との駆け引きを通じて間合いを調整し、自らに有利な状況を作り出すことを目指す。この間合いの調整スキルは、組手競技において技の正否を分ける極めて重要なスキルであるにも関わらず、競技者間の関係性という目に見えない要素を扱うため、明確な指導・評価の方法が確立されていないという状況にあった。そこで、本研究は組手競技をモーションキャプチャシステムで計測し、データマイニング技術を用いて、間合いの調整スキルを抽出し、その獲得を支援することを目指した。このとき想定していたスキル獲得支援システムは、運動計測によって獲得したデータから自動的に間合いの調整スキルを抽出し、その問題点を言語と 3 次元 CG のアニメーションなどを用いて明示的示し、競技者に代わってスキルの問題発見を行うものであった。

### 4.2.3 間合いの知識表現

データマイニング技術を用いて間合いの調整スキルを抽出するためには、運動計測によって獲得したデータから間合いに関する知識を記述するための変数を属性値として算出する必要があった。

先述したように間合いとは「競技者間の距離」や「技を仕掛けるのに適したタイミング」である。「競技者間の距離」は、水平面上での競技者間の骨盤や頭

部の距離によって表現することが可能である。しかし、もう一方の「技を仕掛けるのに適したタイミング」を記述することが極めて困難な問題であった。「技を仕掛けるタイミング」は、対戦相手の構えによるところが大きい。しかし、競技者の構えを表現するためには無数の変数が関係してくる。どのような変数を用意すれば組手競技における構えを十分に表現出来るか明らかでないため、構えを詳細に表現するためには膨大な数の変数を用意しなければならなかった。

この問題を解決したのが、第 3 章 3 節に示した多次元ベクトルによる姿勢の表現及び K-means 法を用いたパフォーマンスの分節化である。構えを構成する変数を網羅的に記述するのではなく、構え全体を包括的に記述することで変数の選択という問題を回避することが出来た[1]。

### 4.2.4 知識表現からメタ認知支援ツールへ

多次元ベクトルによるフォーム（構え）の表現及び K-means 法を用いた分節化による構えの包括的な記述方法を用いて伝統派空手の組手競技における「技を仕掛けるタイミング」と競技者の構えの関係性を考察するために、自由組手の計測を実施した[西山 08]。

計測によって獲得したデータは多次元ベクトルに変換され K-means 法による分節化でクラスタ名という 1 次元情報の記号列に変換された。この分節化の結果を観察しやすくするためにクラスタごとに色を割り当てたものが図 4.1 に示す最初期のカラーバーである。

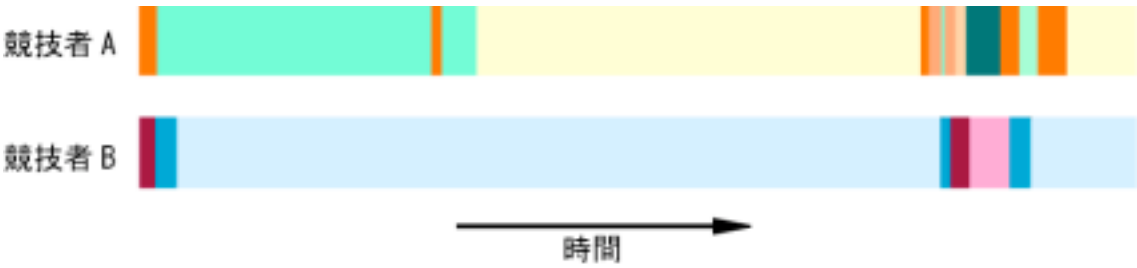



図 4.1 空手の組手競技における競技者のフォームを示す最初期のカラーバー

[1] 構えの包括的記述方法のベースとなるアイディアは慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科仰木裕嗣准教授、今村健一郎氏とのミーティングから生まれた。

組手競技のカラーバーの観察から、攻撃動作の開始とそれに対する反応、ステップの変化のような組手競技の流れを読み取る上で重要なイベントを読み取ることができた。また、攻撃動作のような素早い動作は、短時間で姿勢が変化するため出現する色の幅が短いことも分かった。観察の結果、イベント発生時や発生前の両競技者の姿勢がどのパターンであったのかを分析することで、間合いにおけるタイミング要素に関するルールを抽出可能であることが明らかになった。

色を用いたフォームの可視化表現の理解を更に深めるために、既に計測を終えていたより単純な動作である野球の打撃動作の観察を試みた。野球の打撃動作は再現性が高いため、２試行のパフォーマンスを空手組手のデータと同じように並べることで、パフォーマンスの比較を行うことが可能であると考えられた。また、このデータにおける競技者は、打撃スキルを対象としたメタ認知の実践者であり、各計測試行についての評価を行っていたことから競技者自身によるカラーバーの観察によって、より深い知見をえることが期待された。

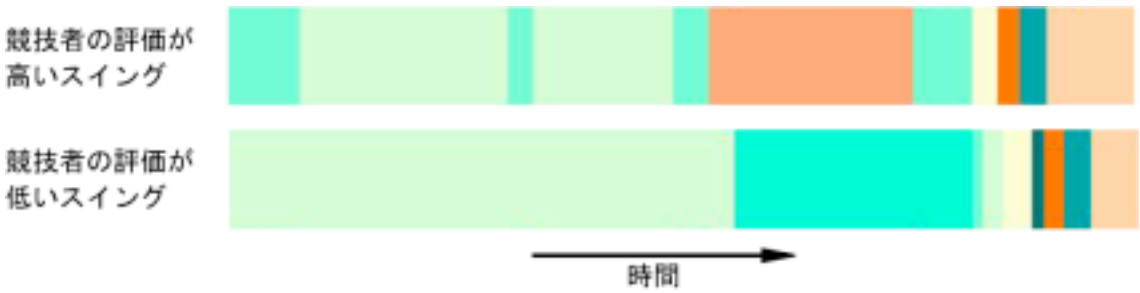



図 4.2 野球の打撃動作の初期のカラーバー

競技者本人によるカラーバーの観察は、試行間で異なる配色パターンの解釈に取り組むことが、メタ認知における気づきを促進する可能性を有することを示唆した。カラーバーによるメタ認知促進の可能性は、知識表現の次のステップとして想定していたデータマインング技術を用いたスキルの抽出を行わずに、本研究が当初から主題としていた身体スキルの獲得支援と同様の結果をもたらすことが期待された。

そこで本研究は、この多次元ベクトルによるフォームの表現と K-means 法による分節化、さらに色を用いた分節化結果の可視化表現を組み合わせたメタ認知の支援ツールの開発を新たな主題とした。

## 4.3 “ColorBar”開発のためのケーススタディ

フォーム可視化ツール”ColorBar”は、2008 年 6 月より野球の打撃動作をドメインとして、ユーザーである競技者からのフィードバックを反映しながら適応的な開発に取り組んだ。

本節では、”ColorBar”開発のために取り組んだケーススタディについてその手続きなどを説明する。

### 4.3.1 ケーススタディの流れ

ケーススタディは、野球の打撃動作のメタ認知に取り組む競技者 1 名を対象として、モーションキャプチャシステムを用いた運動計測とカラーバーによるパフォーマンスのフィードバックを中心に進めた。

一度の計測で 30〜40 試行のデータを獲得した。計測を実施した日付と各計測の試行数を表 4.1 に示す。

表 4.1　計測実施日と試行数

| 計測日 | 試行数 |
|---:|---:|
| 2008 年 6 月 6 日 | 40 |
| 6 月 18 日 | 40 |
| 7 月 2 日 | 30 |
| 8 月 21 日 | 30 |
| 10 月 2 日 | 35 |
| 10 月 23 日 | 33 |
| 11 月 6 日 | 33 |
| 11 月 27 日 | 30 |
| 12 月 18 日 | 40 |
| 計 | 311 |

計測実施日には、光学式モーションキャプチャシステムを用いた運動計測を実施、獲得したデータからカラーバーを生成し、競技者に対して計測中のパフォーマンスに関するフィードバックを与えた。その後、カラーバーの改善点な

どに関するミーティングを行った。

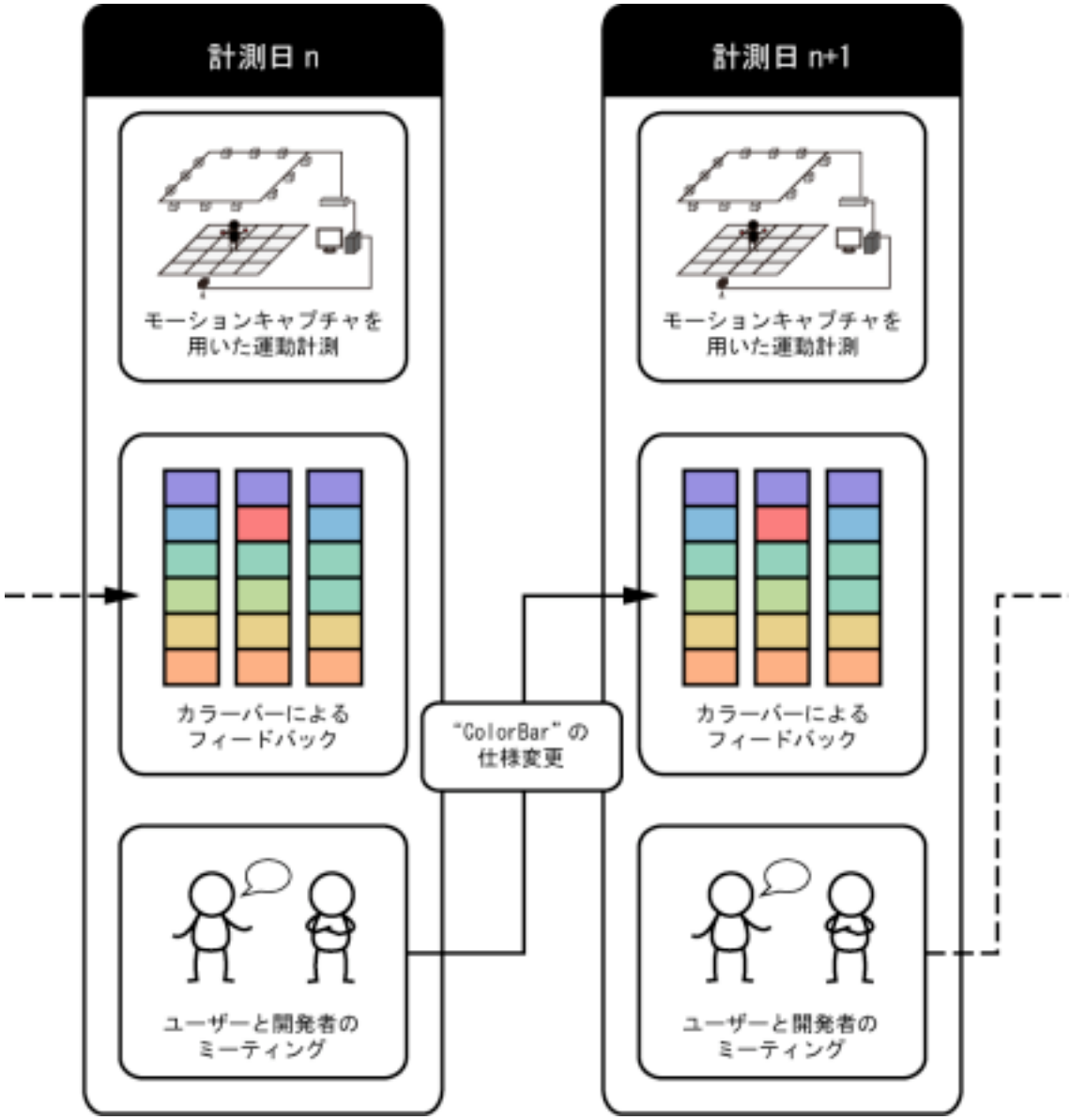



図 4.3 ケーススタディの流れ

以降に、図 4.3 に示した各計測日の運動計測とカラーバーによるフィードバック、ユーザー・開発者間の議論及び”ColorBar”の仕様変更の流れについて説明する。

### 4.3.2 運動計測とカラーバーによるフィードバック

モーションキャプチャシステムを用いた運動計測からカラーバーの生成に至るまでの基本的な手続きは第 3 章に示した通りである。但し、カラーバー生成に用いるデータは、競技者が選択した試行のものとした。

運動計測におけるマーカー貼付位置は図 4.4 に示す。

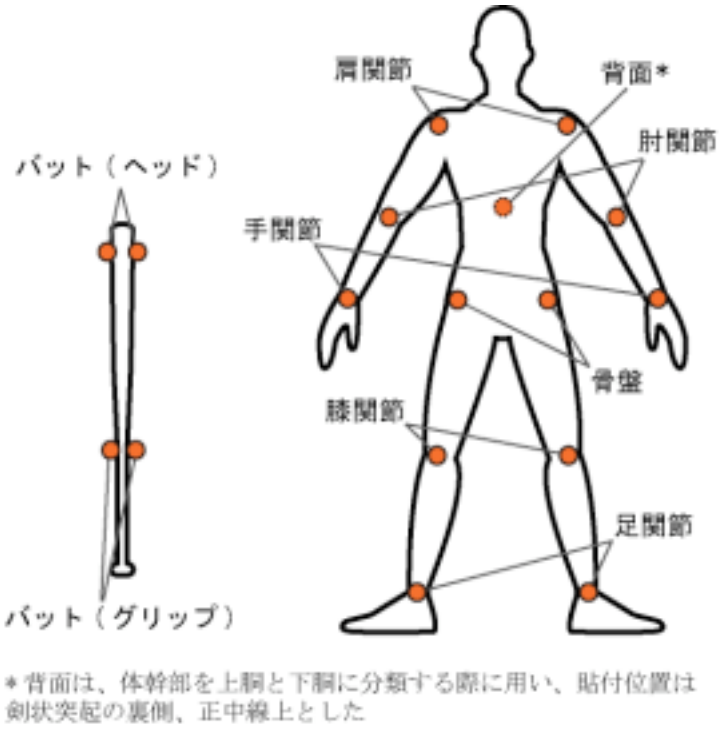



図 4.4 打撃動作の計測におけるマーカー貼付位置

競技者は、各試行の計測の間に自身のメタ認知的思考や気付きをメモ用紙に書き残した。計測後は、記述したメモと生成されたカラーバー、及びパフォーマンスの映像を手がかりとして、自身のスキルのメタ認知に取り組んだ。

### 4.3.3 ユーザー・開発者による議論と仕様変更

競技者による打撃スキルのメタ認知を終えた後、競技者（ユーザー）と筆者（ツールの開発者）でカラーバーの仕様について議論を行った。この議論は、

まず競技者が”ColorBar”のユーザーとしてその日どのようにカラーバーによるフィードバックを解釈したのかをツールの開発者である筆者に説明することから始まる。ユーザーのどのようにツールを利用したのか、という情報を共有することによって、”ColorBar”の改良点や新たな機能をユーザーと開発者が共同で検討した。そして、議論から生まれたアイディアをもとに、筆者は次の計測日までに”ColorBar”の改良・機能の追加といった作業に取り組んだ。

尚、競技者がどのようにこのツールを用いたかは第 5 章に、競技者との議論に基づいたツールの改良点は第 6 章にその詳細を示す。競技者によるツールの使用はツールの改良と密接に関わるため、本論文ではまず具体的な使用事例を示した後に、改良点について述べる。

## 4.4 本章のまとめ

本章では、本研究がフォーム可視化ツール”ColorBar”の開発に至った経緯と、ツールの適応的な開発のために実施したケーススタディについて説明した。

カラーバーは、当初運動計測によって獲得したデータから、データマイニング技術を用いて身体知を抽出するための知識表現の方法として生まれた。その後、カラーバーの意味解釈は競技者によるメタ認知を促進するという可能性が示唆された。そこで、カラーバーによるメタ認知支援の効用を明らかにするために、野球の打撃スキルをドメインとしたケーススタディを開始することとなった。

# 第 5 章

# 打撃スキルのメタ認知とカラーバー

## 5.1 はじめに

本章では、2008 年 6 月から 12 月にかけて実施した、野球における打撃動作の運動計測及び競技者によるメタ認知のケーススタディについて、カラーバーによるフィードバックが競技者のメタ認知的思考に及した影響という観点からの考察に取り組む。

## 5.2 カラーバーによるメタ認知の支援

本節では、カラーバーを用いたフィードバックが競技者のメタ認知的思考にどのような影響を及ぼすのか、ケーススタディによって得られた具体的な事例を示しながらをその用法や効用について考察する。

### 5.2.1 フォーム修正の確認

6 月 18 日の計測終了後、競技者の選択した 16 試行の計測データを用いて図 5.1 に示すカラーバーを生成した。

競技者による試行の選択については第 3 章 3 節で既に述べたが、競技者に「どの試行をカラーバーにしたいか」を考えさせることはメタ認知を促進するツールとして極めて重要な作業である。全試行をカラーバーにすることもツールとしては実行可能である。しかし、全試行を可視化する仕様では、計測とカラーバーによるフィードバックの間に、競技者による思考のフェーズが含まれない。競技者に可視化する試行を選択させることで、”ColorBar”が単なるフィードバック生成のためのシステムではなく、メタ認知を促進するためのツールとなるのである。

試行の選択に関連する”ColorBar”の改良点については、第 6 章 3 節にて改めて述べる。

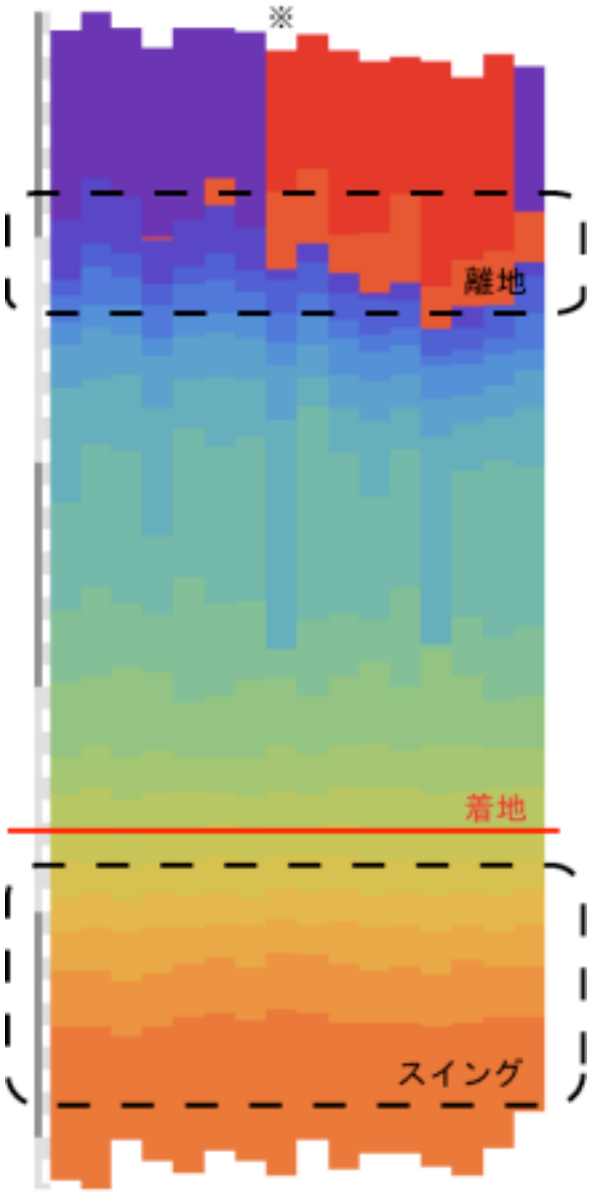



図 5.1　6 月 18 日のデータから生成したカラーバー

再び 6 月 18 日の事例に戻る。このカラーバーを生成した際の設定は、身体のフォームを示す多次元ベクトルは 5 つの三角形を用いたモデルに基づく 15 次元ベクトル、クラスター数 k は 20 であった。また、各試行はスイングにおける左足の着地のタイミングで同期させた。

図 5.1 のカラーバーをフィードバックされると、競技者は左から数えて 8 番目のカラーバー（図 5.1 中の※印がついた試行）から離地前の色が濃い青から赤に変化したことに注目した。8 番目のカラーバーは 6 月 18 日の計測における第

11 試行を示すものであった。競技者は、この 1 つ前の第 10 試行の計測が終了した時点で、離地前に膝が曲がり過ぎていることに気付き、「次からは少し膝の曲げを少なくして立とう」という記述を残している。

両試行の離地前のフォームにおける膝の屈曲角度の差異は、映像で比較してもかなり小さなものである。図 5.2 に離地前の姿勢の画像を示す。

a) 第 10 試行　　b) 第 11 試行

図 5.2 第 10、11 試行における離地前のフォームの比較

カラーバーは微細なフォームの変化を如実に表現可能であり、競技者は自らが試みたフォームの修正が狙い通りに機能したことを確認出来た。この事例について競技者は「”ColorBar”のフォームの差異を表現する能力を信頼し、ツールに愛着を持つきっかけとなった」としており、ツールの使用を継続するための動機の 1 つとなった。

この事例から、カラーバーには、競技者がメタ認知的思考のなかで意識したフォームの修正を、実際のパフォーマンスに反映し、それを継続することが出来たかを確認するという用法があることが分かった。

### 5.2.2 パフォーマンスの安定性の確認

ケーススタディの期間中、競技者はそれまで 1 年半以上固定してきた打撃フォームの改造に取り組んだ。フォームの改造は 6 月末から 7 月初旬ごろに実施された。

フォーム改造直後の 7 月 2 日の計測データから、競技者の選択した 14 試行のデータを用いて生成したカラーバーを図 5.3 に示す。

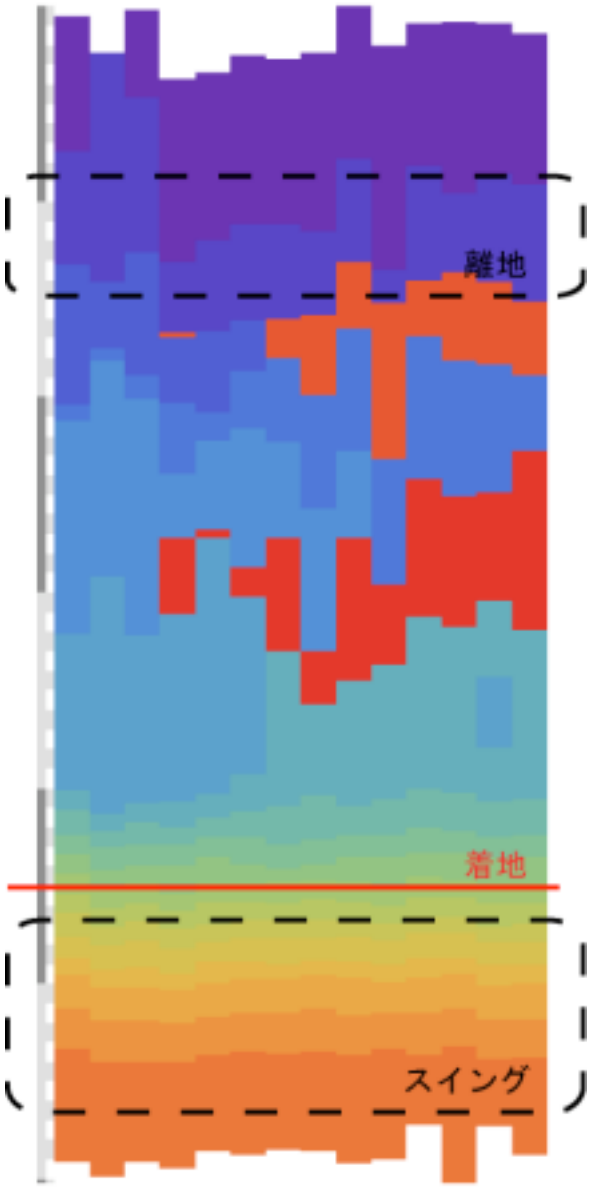



図 5.3 7 月 2 日のデータから生成したカラーバー

このカラーバーを生成した際の設定は、図 5.1 に示した 6 月 18 日のカラーバーと同じく 5 つの三角形を用いたモデルに基づく 15 次元ベクトル、クラスター数 k は 20 である。

改造前と改造後の打撃フォームを図 5.4 に示す。

a) 改造前のフォーム

b) 改造後のフォーム

図 5.4　改造前・後の打撃フォームの比較

フォームの主な改造点の 1 つとして、左足の使い方を挙げることが出来る。改造前のフォームでは、左足の離地後、膝を高くあげていたのに対して、改造後のフォームではあまり左膝を高くあげることなくスイングを行っている。その結果、図 5.1 に示した 6 月 18 日は、離地前のフォームを競技者が意図的に変化させた以外はカラーバーの配色パターンがほぼ安定していたのに対して、図 5.3 に示した 7 月 2 日のカラーバーは、左足の離地から着地に至るまでの区間に複数の配色パターンが現れていることが分かる。これは、6 月 18 日のカラーバーは 1 年半以上固定してきたフォームであったため、1 日の計測におけるパフォーマンスが安定していたのに対して、7 月 2 日のカラーバーは、フォーム改造直後であったため、同じ計測日内でもパフォーマンスが不安定であったことを示すものであると解釈できる。

フォーム改造から約 1 ヶ月半が経過した 8 月 21 日の計測データから、競技者の選択した 11 試行のデータを用いて生成したカラーバーを図 5.5 に示す。

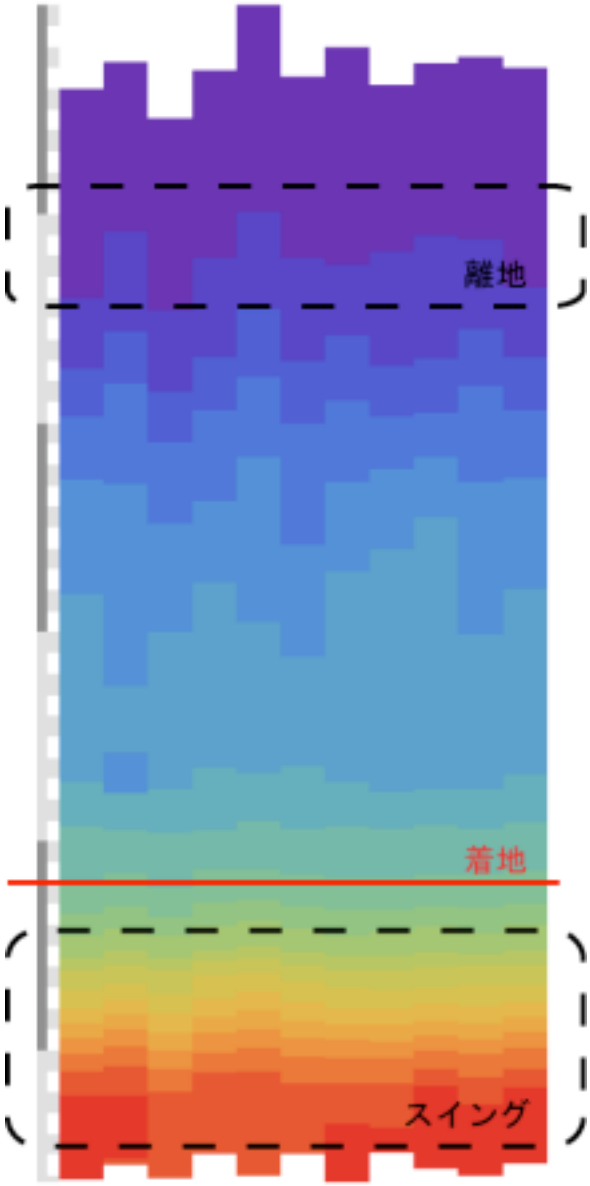



図 5.5 8 月 21 日のデータから生成したカラーバー

カラーバーを生成した際の設定も先述の 2 つのカラーバーと同じく、5 つの三角形を用いたモデルに基づく 15 次元ベクトル、クラスター数 k は 20 である。

8 月 21 日のカラーバーでは、フォーム改造直後のカラーバーで複数の配色パターンが出現していた離地から着地に至までの区間が、再び 1 つのパターンにまとまり始めていることが確認出来る。各色の長さには、まだばらつきが見られたが、7 月 2 日のカラーバーの配色パターンと比較することで、競技者はパフォーマンスが再び安定し始めていることを確認した。

7 月 2 日の計測から 8 月 21 日の間に 7 試合に出場するなど、競技者による打撃スキルのメタ認知的探究や実践が密に行われる期間を経たことが、このようなパフォーマンスの安定状態獲得の要因であると考えられる。

フォーム改造前後のパフォーマンスの安定性という観点から俯瞰するために図 5.1、図 5.3、図 5.5（6 月 18 日、7 月 2 日、8 月 21 日）のカラーバーを図 5.6 にまとめて示す。

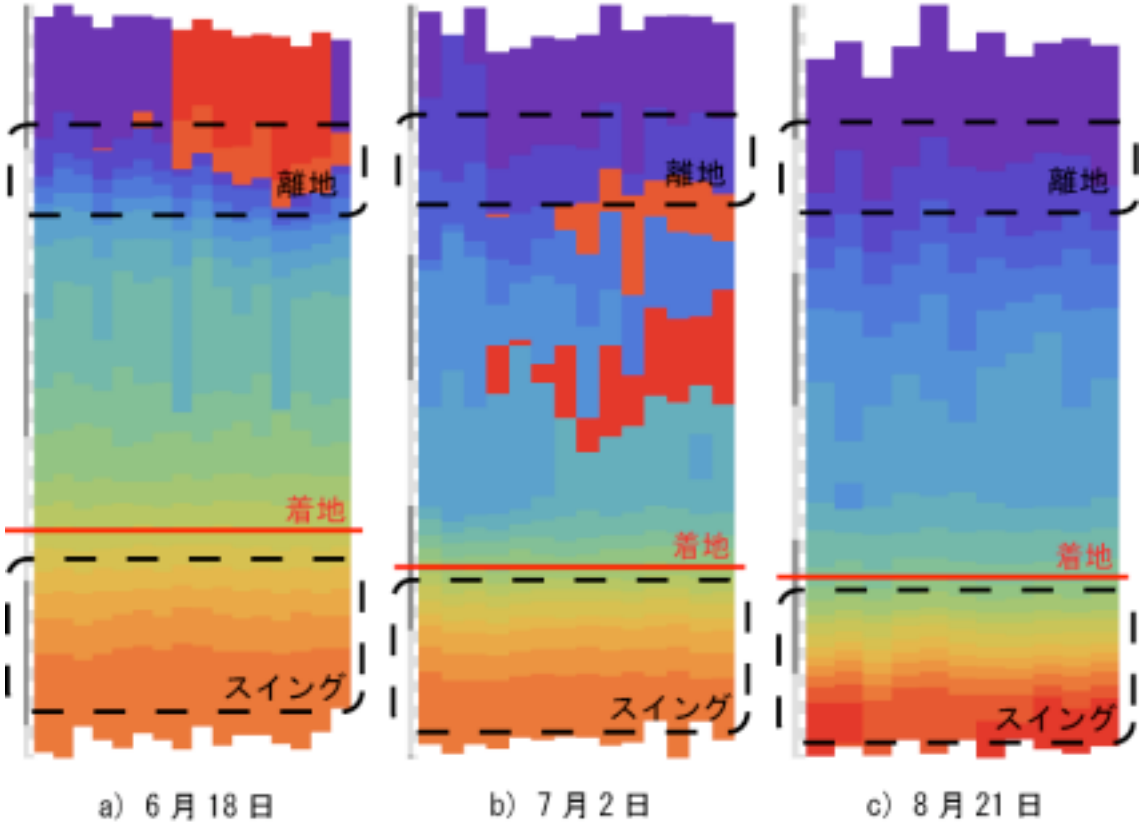



図 5.6 打撃フォーム改造前後のカラーバー

また、フォーム改造前後の競技者の 3 試合移動平均打率の変遷を図 5.7 に示す。フォーム改造直後（7 月 2 日）、カラーバーが不安定になっていた時期に打率が下がり始める。しかし、7 月 21 日の試合を境に、競技者の打率は再び上昇し、その後のカラーバー（8 月 21 日）に再び安定性が現れた。このことから、試合におけるパフォーマンスとカラーバーの安定性との間には、何らかの関係性があると解釈することが出来る。

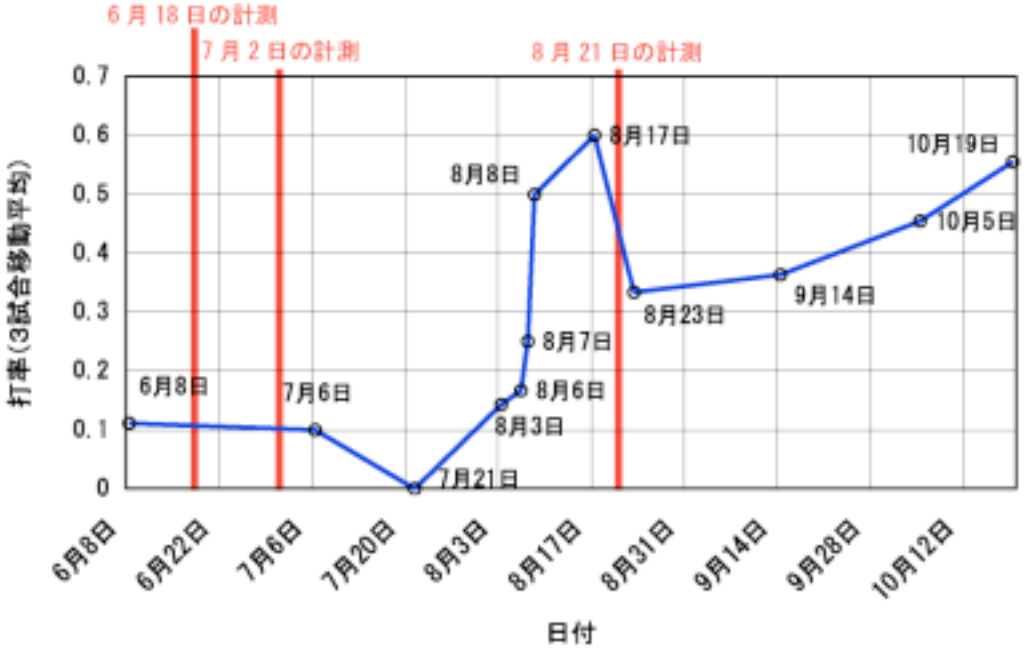



図 5.7 フォーム改造期と打率

伊藤は、競技者の打率が向上し始めた 7 月 21 日を境界として、5 月 3 日から 7 月 21 日まで（前期）と 7 月 27 日から 11 月 29 日（後期）の 2 つの期間中に競技者が書きためたメタ認知の記述内容の構造について分析を行っている[伊藤 08]。その結果、記述に高頻度で出現する語が、前期は「位置」「インパクト」「身体」「力」なのに対して、後期は「つまさき」「重心」「みぞおち」「アウトコース」となっている。前期から後期にかけてカラーバーに現れたフォームの変化とともに、競技者がメタ認知的に意識していた内容も変化したことが分かる。

この事例で示したような劇的なフォームの変更は以降の計測期間では起こらなかった。しかし、改造後の新たなフォームを用いた打撃スキルの熟達が進む中で、パフォーマンスの安定状態の獲得と崩壊、再構築というプロセスが再び繰り返されている。このプロセスを繰り返すうちに、競技者はカラーバーによるフィードバックを与える前に「今日のカラーバーはきれいにそろっている」や「今日のカラーバーは無茶苦茶になっている」といった、その日計測したパフォーマンスの安定性を予測することができるようになった。

図 5.8 に 10 月 23 日、11 月 27 日のデータから生成したカラーバーを示す。

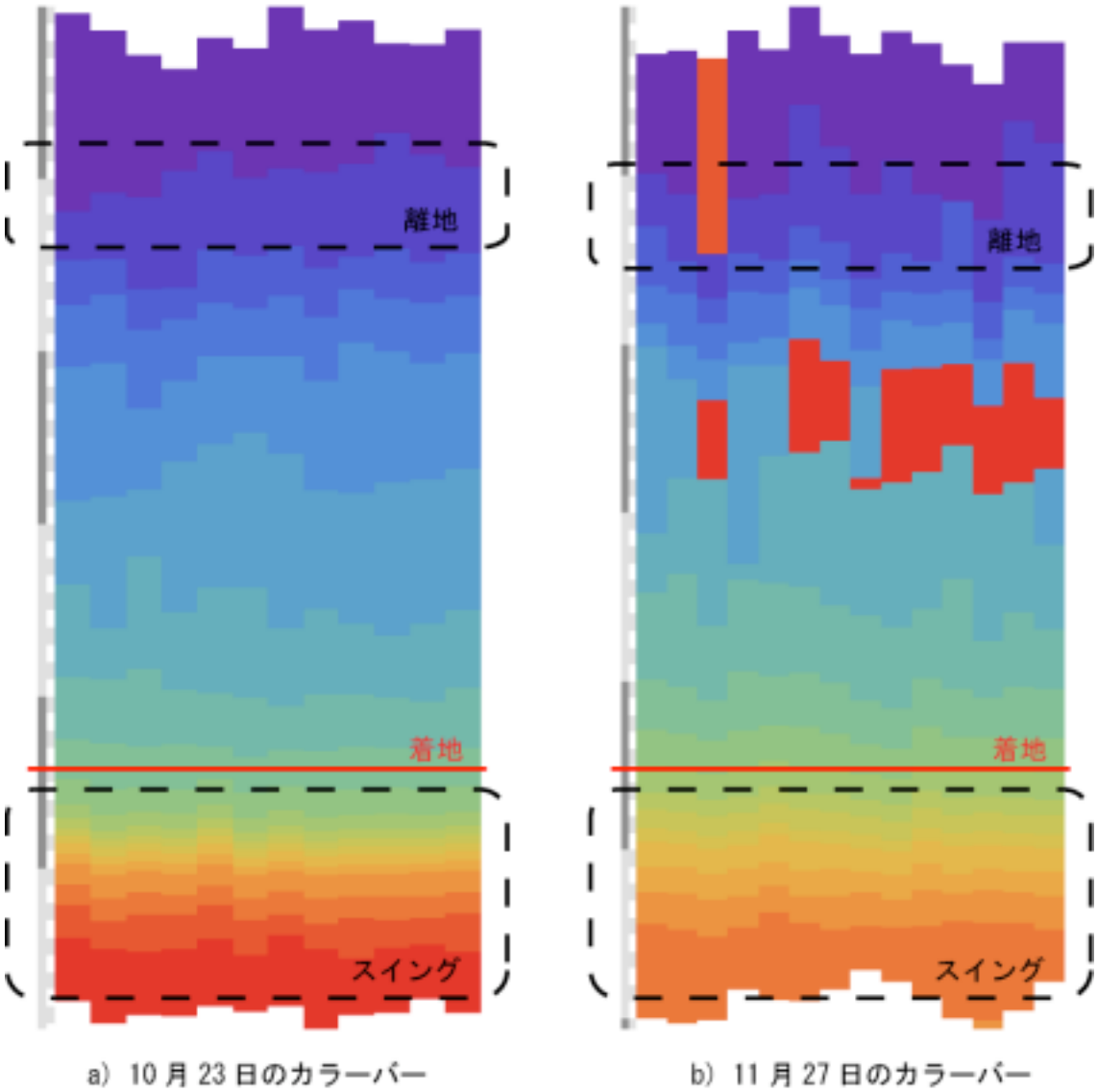



図 5.8 10 月 23 日、11 月 27 日のデータから生成したカラーバー

10 月 23 日の計測では、競技者はカラーバーを生成する前から「カラーバーがきれいになる」、つまり、自らの選択した試行の配色パターンが安定することを予想していた。選択した試行は評価の高いものだけではなく、評価の低いものも含まれていたため、この日のパフォーマンスが特に安定していたと解釈できる。また、11 月 27 日の計測後、競技者はカラーバーの配色パターンが乱れることを予想している。その理由として「シーズンオフに入り下半身がきかない」ということを挙げている。打撃フォームにおける下肢の使い方については次節に詳しく示す。

これらの事例から、カラーバーによるフィードバックは、パフォーマンスの安定性をはかる指標として機能し、競技者がある日のパフォーマンスを評価するための基準を与えていると考えられる。

### 5.2.3 新しい注目箇所や変数の発見

図 5.9 に 8 月 21 日のカラーバーを示す。

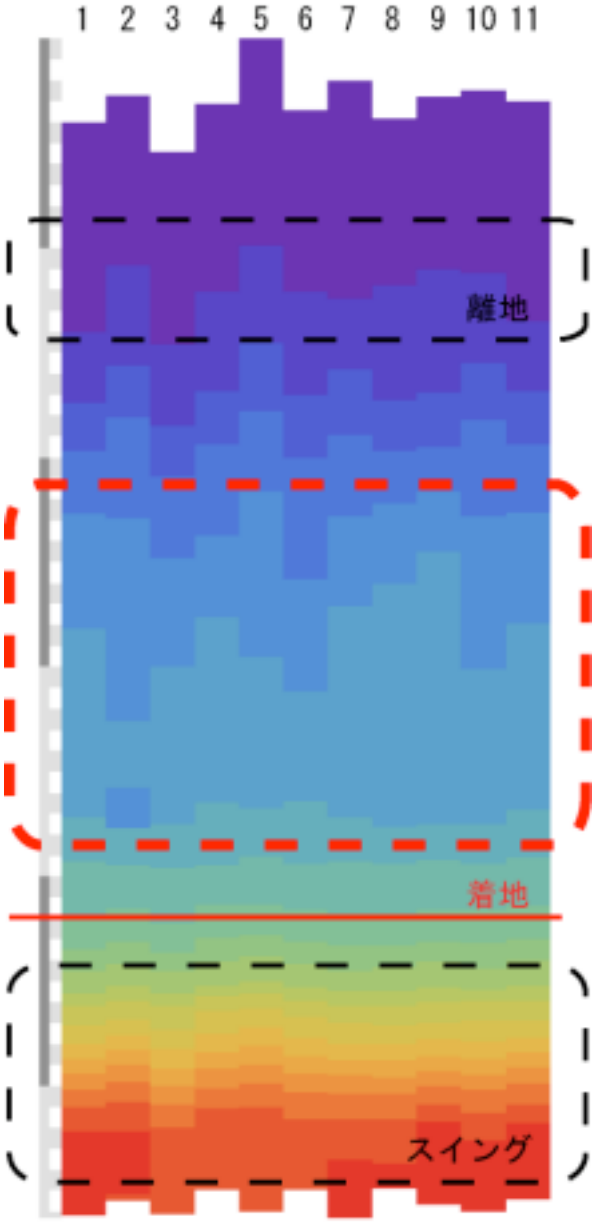



図 5.9 8 月 21 日のカラーバーにおける競技者の注目箇所

競技者は、8 月 21 日のカラーバーを観察するうちに、離地から着地にいたるまでの間の区間に現れる 2 色の長さの割合に注目し始めた（図 5.9 中の赤い破線の枠に含まれる 2 色）。

競技者は、各試行の計測の間にメタ認知的思考や気付きを書き残したメモの中で、高評価であった 4、7、9、10、11 番目のカラーバー（第 12、19、24、29、30 試行）の注目箇所の色の長さの割合に規則性を見出した。

そこで、競技者による評価の高かった 4、7、9、10、11 番目の試行とそれ以外の試行を分けた図 5.10 に示すカラーバーを生成した。

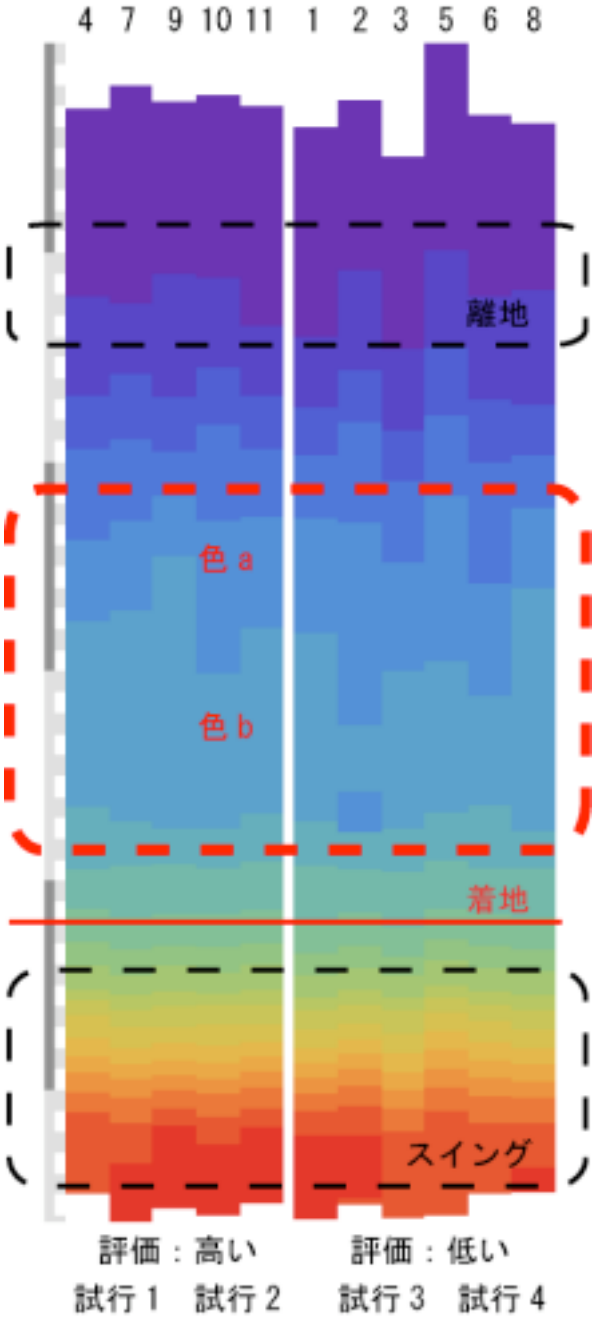



図 5.10 競技者による評価ごとに分類した 8 月 21 日のカラーバー

図 5.10 のカラーバーは左から順に、競技者による評価の高かった第 4、7、9、10、11 試行、評価の低かった第 6、7、8、14、16、20 試行と並んでいる。

評価の高い試行群は注目箇所を構成する色 a（離地寄りの色）と色 b（着地寄りの色）に注目すると、

- 色 a の開始位置がほぼ一定
- 色の長さの割合が a よりも b の方が長い

とうパターンが見られるのに対して、評価の低い試行群には様々な配色パターンが出現している。

競技者は、この離地から着地に至までの区間の動作やメタ認知的思考や気付きを書き残したメモの記述内容から、この注目箇所の２色には打撃スキルにおける「矯め」と表現される要素が強く関係しているという仮説を立てた。

被験者は、運動計測の際に同期して撮影されたビデオ映像をカラーバーと併せて観察することにより、この 2 色が打撃フォームにおけるどの動作を示すものかという、より詳細な意味解釈を行った。その結果、色 a は左足の膝が最高到達点に達した後、右足膝関節が屈曲して身体全体が沈み込む動作、色 b は左足足部の着地点への前進、及び身体全体が前方に動き始めるまでの姿勢を保持する区間を示すという解釈に至った。

さらに、この「矯め」に関する変数の発見がきっかけとなり、競技者は「みぞおち（背面のマーカーを指す）と左腰のマーカーの位置情報と、バットのヘッドの加速度の情報が見たい」という、より具体的なフィードバックの提示を求めはじめた。これは、新たな変数の発見が、計測データから無数に獲得可能な情報からフィードバックとして観察したい情報を絞り込む一助となった可能性を示す。

この事例から、カラーバーのユーザーがカラーバー内の特徴的な配色パターンを発見し、その意味解釈を行うことで身体スキルの新たな変数に気付くことが可能であることが分かった。また、変数の発見は、より具体的なフィードバック選択の一助となることが分かった。

第 6 章 5 節に、この事例をきっかとして生まれたに映像とカラーバーを組み合わせた意味解釈の方法について述べる。

## 5.3 本章のまとめ

本章では、野球の打撃動作をドメインとしたケーススタディから得られた、カラーバーのフィードバックとしての効用に関する知見について述べた。フィードバックとしてのカラーバーには以下に示す効用があることが確認された。

- 競技者のメタ認知的思考において意識したフォーム修正が、以降のパフォーマンスに反映されたかを確認できる
- ある計測日内のパフォーマンスの安定性の確認、及び計測日間でパフォーマンスの安定性がどのように変化しているのか確認できる
- カラーバーに現れる特徴的な配色パターンを発見し、その意味解釈を通じて身体スキルの新たな変数に気付くことができる
- 新たな変数の発見は、運動計測によって獲得可能な膨大な情報の中から、競技者自身がフィードバックとして用いる情報を絞り込むための一助となる

また、これらの効用の発見至った事例は、競技者の打撃フォーム改造と密接に関係している。このことから競技者のスキルが劇的に変化する時期に、カラーバーによってフォームを可視化することで、このツールの様々な効用を明らかにすることができると考えられる。

# 第 6 章

# ケーススタディに基づく

# “ColorBar”の改良

## 6.1 はじめに

本章では、野球における打撃スキルを対象としたケーススタディから得た知見をもとに行った”ColorBar”の改良について説明する。

各計測日の計測及びフィードバックの終了後、競技者と筆者が以降の”ColorBar”の仕様について議論を行った。その議論から得られたアイディアをもとに適宜”ColorBar”の改良を行い、ユーザーである競技者に適したツールを用意してメタ認知を促進させることを試みた。

## 6.2 カラーバーの配色

初期のカラーバーは図 6.1 に示すように、その配色に規則性がなく単純に類似する姿勢ごとに筆者が恣意的に選択した色を割り当てるというだけのものであった。

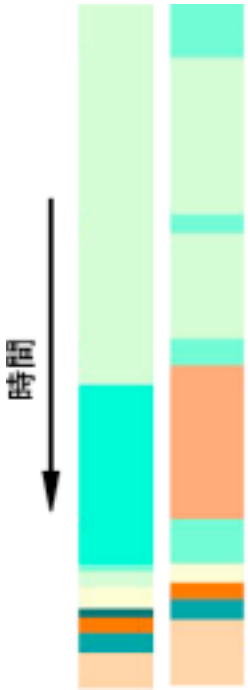



図 6.1 初期のカラーバーの配色

メタ認知を促進するためのツールとして、”ColorBar”の改良は配色方法から始まった。ケーススタディ開始時には、競技者によるカラーバーの意味解釈がメタ認知を促進するという仮説を有していた。そこで、直感的なカラーバーの意味解釈を実現するために、一目で配色規則が読み取れる図 6.2 に示すようなグラデーションを用いることにした。配色の規則については第 3 章 3 節に示した。

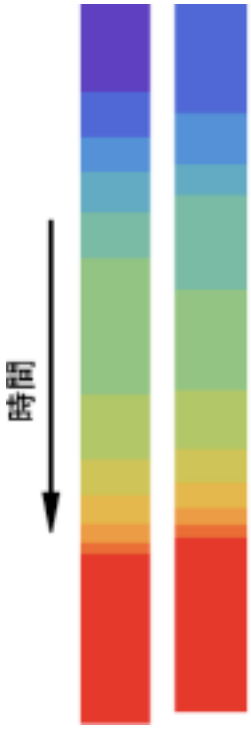



図 6.2 グラデーションを用いた配色

配色をグラデーションにすることで、野球の打撃動作のような単一動作を試行とする場合、色によってパフォーマンス内のおおよその区間を特定することが可能であると考えられた。しかし、第 3 章 3 節でも述べたように、複数試行を選択してカラーバーを生成した場合、グラデーションが崩れてスイング初期に赤系の色が出現する場合がある。配色方法を変更することで、グラデーションを崩すことを防止できたが、あえてグラデーションが崩れる可能性のある仕様にすることで、試行間の差異を際立たせる効果があることが分かった。

## 6.3 3 試行以上のカラーバー

カラーバーは、本来は空手の組手競技における 2 名の競技者の構えの変化を表現するための知識表現方法であった。そのため、フォームの可視化ツールとして活用し始めた初期段階では 1 度に 2 本のカラーバー（組手競技中の競技者 2 名分のフォームの変遷）を表示する仕様となっていた。この仕様は、野球の打撃スキルをドメインとしたケーススタディ開始時にも変更されておらず、初期の”ColorBar”は 1 度に 2 試行の比較を行うことしかできなかった。

6 月 6 日の競技者との議論において「一度にカラーバーとして可視化する試行数を増やしたい」という要望が競技者から出た。

第 5 章でも述べたように、”ColorBar”は全試行をカラーバーとして可視化するのではなく、可視化する試行を選択する手続きを設けることで、競技者がメタ認知を行う手がかりを与えることを狙いとしていた。

しかし、40 回の試行の中から比較したい 2 試行を選択することは競技者に過度な負担をかけていた。また、比較する試行の組み合わせを変更する度にカラーバーを生成し直していたのでは、フィードバックに要する時間が増加して、ツール使用への障壁となることが分かった。

そこで、6 月 18 日から使用した”ColorBar”は、一度にカラーバーとして可視化する試行数を自由に決定出来るように仕様を変更した。2 試行以上の試行を表示したカラーバーを図 6.3 に示す。

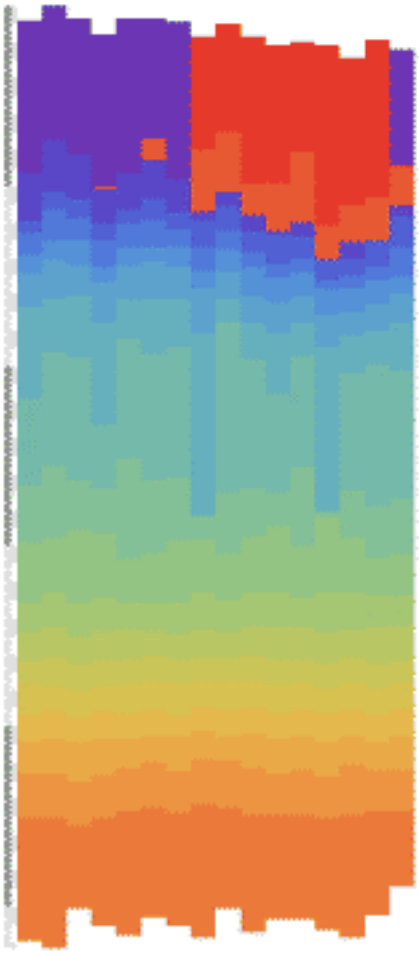


図 6.3 16 試行を同時に表示したカラーバー

表示する試行数が増えると、試行ごとにデータ長が異なることから、それぞれの意味解釈や比較を行うための基準となるイベントを設定する必要が生じた。そこで、打撃動作における左足（マウンド側の足）の着地を試行の同期イベントとして設定し、各カラーバーの開始位置を調整した。

野球の打撃フォームの意味解釈を行うためのイベントを表 6.1 に示す。

表 6.1 野球の打撃フォームの意味解釈を行うためのイベントと抽出方法

| イベント | 抽出方法 |
|---|---|
| 左足離地前 | 左足離地イベントの 100 フレーム前 |
| 左足離地 | 左足関節のマーカーが閾値を超えた時点を抽出 |
| 左膝最高到達点 | 左膝関節マーカーの Z 軸方向ピークの時点を抽出 |
| 左足着地 | 左足関節のマーカーが閾値を再び下回る時点を抽出 |
| スイング終了 | バット先端の加速度が閾値を下回る |

また、同期イベントの位置や、同期イベントを基準としてその他の特徴的な動作の位置を知るための目安としてカラーバーの左端に 10 フレーム・100 フレーム幅の目盛りを描画した。

これらの仕様変更によって、カラーバーに表示する試行数を増やすことで 1 日の計測における試行の安定性の変遷を俯瞰できるという利点が明らかになった。

## 6.4 カラーバーの分解能

カラーバーの時間分解能はクラスタ数 k によって決定される。また、空間分解能は、多次元ベクトルを生成するための姿勢表現の三角形の数によって決定される。

8 月 21 日の計測で、フォーム改造後はじめてカラーバーが安定した配色パターンを示した。この計測後のミーティングで競技者は「カラーバーで分類するフォームにバットを含めたり、体幹を上胴と下胴に分けたりするとカラーバーはまだまだ不安定になるのではないだろうか」という点に気付いた。

そこで、以降の計測ではバットをフォームに含めた 7 面の三角形平面による姿勢表現、さらに体幹を上胴・下胴に分けた 8 面による姿勢表現のモデルを用意して、分解能を高めたカラーバーを生成した。したがって、ケーススタディ中に姿勢表現モデルは 2 度の変更が行われている。しかし、本研究のケーススタディでは、同じ計測日のデータを 2 種類の姿勢表現モデルに基づいて生成されたカラーバーの比較は実施していない。異なる姿勢表現モデルに基づいて生成されたカラーバーを比較することで、競技者に新たな気づきを促す可能性が考えられる。

本論文では、付録として掲載したカラーバーは、ケーススタディ後に全計測データを 8 面のモデルを使用して生成したものである。

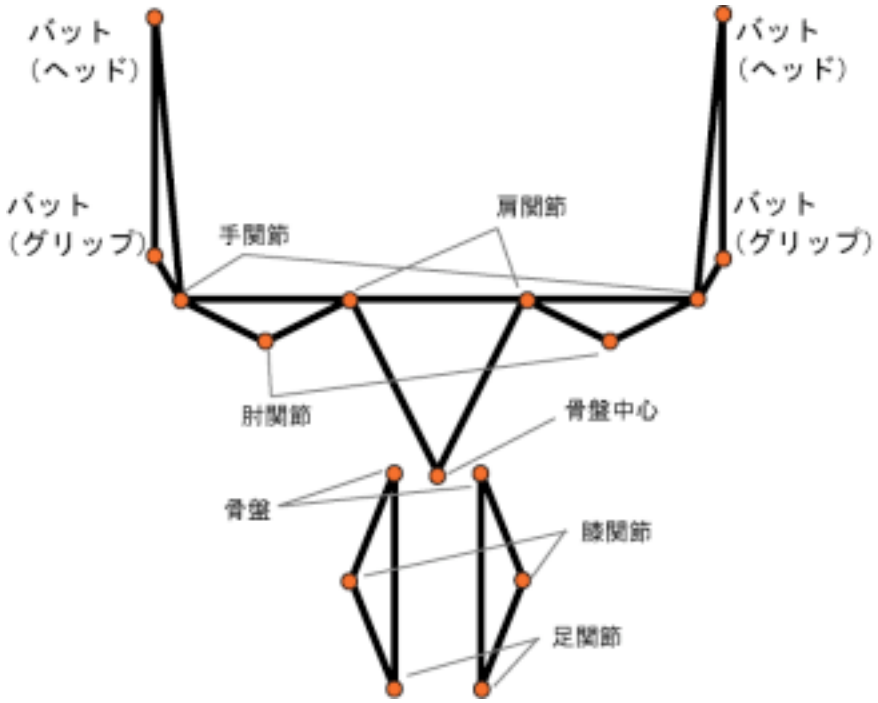



図 6.4　7 面の三角形平面による姿勢表現

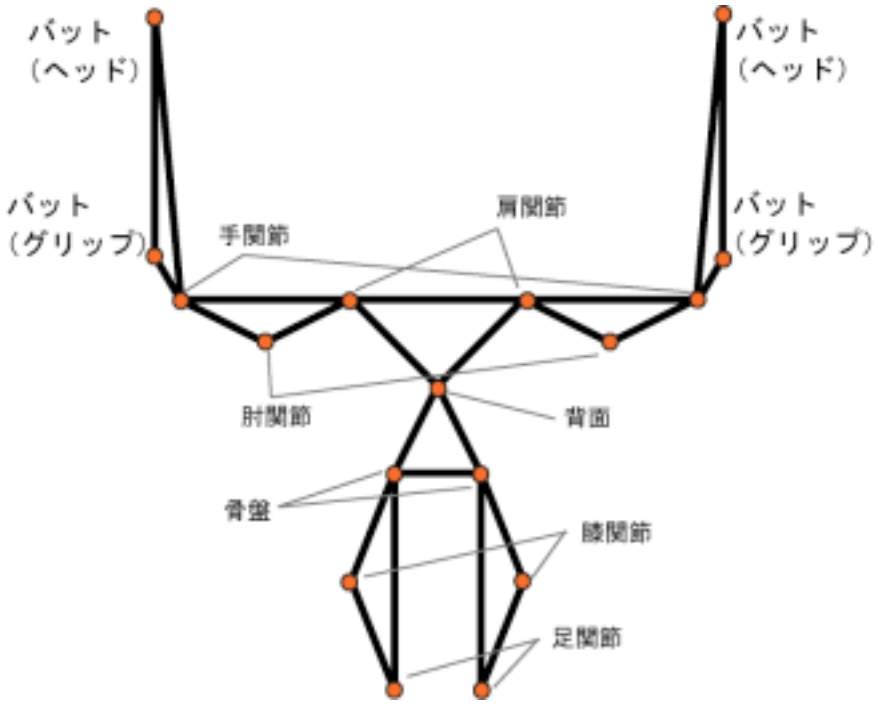



図 6.5 8 面の三角形平面による姿勢表現

## 6.5 カラーバーの意味解釈と映像

ケーススタディにおけるカラーバーの意味解釈は、試行の同期に用いた左足の着地や離地のような特徴的な動作のフレーム数を手がかりに進められた。カラーバーの各部が打撃フォーム中のどの動作に対応を明らかにして、動作の中で色が変化している箇所に注目し、各色が示すフォームの考察が行われた。

各色が示すフォームの考察には、計測時に撮影された映像が用いられた。第 5 章で示した 8 月 21 日のカラーバーの意味解釈を通じて「矯め」に関する変数の発見が、その具体例の 1 つである。

このように、”ColorBar”の運用を続ける過程で、カラーバーの意味解釈にはカラーバーと映像と併せて観察することの重要性が明らかになった。そこで、競技者によるカラーバーの意味解釈をより円滑にするために、図 6.6 に示すような映像ファイルを視聴する際に用いられるメディアプレイヤーのスライダー部分にカラーバーを表示するソフトウェアを開発した[1]。

図 6.6 カラーバーを表示可能なメディアプレイヤー

[1] このソフトウェアの開発には慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科の伊藤貴一氏にご協力頂いた。

10 月 2 日の計測よりこのメディアプレイヤーを競技者へのフィードバックに導入した。その結果、競技者は自らが選択した試行群から生成されたカラーバーを用いて計測全体の傾向を俯瞰した後、このメディアプレイヤーを 2 つ起動して、注目した試行の比較を行うようになった。

## 6.6 本章のまとめ

本章では、野球の打撃スキルをケーススタディの期間中に実施した”ColorBar”の改良点について示した。”ColorBar”の改良は、競技者との議論の中で生まれたアイディアに基づいて実施した。その結果、競技者は”ColorBar”の新たな運用方法を見出し、第 5 章に示した様々な知見を得ることが出来た。

# 第 7 章

# 結言

## 7.1 本研究から得られた知見

本研究は、身体スキルを姿勢の類似度に基づいて分節化・可視化するフォーム可視化ツール”ColorBar”を開発し、行為者によるメタ認知的探究の支援環境をデザインすることを目指したものである。

フォーム可視化ツール”ColorBar”の開発は、1 人の競技者による野球の打撃スキルを対象としたメタ認知をドメインとしたケーススタディの中で適応的に進めた。このケーススタディを通じて、競技者が”ColorBar”という新たな環境とどのような関係性を構築するか、また、その関係性がメタ認知的思考に与える影響について以下に示す知見を得ることが出来た。

- 競技者は、カラーバーのフィードバックをもとに、メタ認知的思考において意識したフォーム修正が以降のパフォーマンスに反映されたかを確認する
- カラーバーは、ある計測日内のパフォーマンスの安定性の確認、及び計測期間におけるパフォーマンスの長期的な安定性の確認に用いられる
- 競技者は、カラーバーに現れる特徴的な配色パターンを発見し、その意味解釈を通じて身体スキルの新たな変数に気付くことができる
- 新たな変数の発見は、運動計測によって獲得可能な膨大な情報の中から、競技者自身がフィードバックとして用いる情報を絞り込むための一助となる
- 上述した競技者による”ColorBar”の利用方法・効用を受けて、適宜ツールの改良に取り組むことで、さらに新しい利用方法を発見することができる

## 7.2 今後の課題

本家研究の今後の課題が 3 つ考えられる。

1 つは、”ColorBar”の一連のワークフローをより簡易的に実行可能にすることが挙げられる。ワークフローの簡易化は、”ColorBar”を実際の競技現場に取り入れることを可能にする。”ColorBar”を競技現場に導入することで、競技者の求めに応じた即時にフィードバックを提供可能になり、より綿密なメタ認知支援を実現できる。

ワークフローの簡易化にあたって、重要な問題となるのが運動計測である。現在の”ColorBar”は、光学式モーションキャプチャシステムを用いて獲得した競技者の身体各部位の位置情報に基づいてカラーバーを生成している。光学式モーションキャプチャシステムは、ビデオカメラと比較して高いサンプリングレートを有し、計測やデータの獲得を容易に行えるという利点がある。しかし、計測環境自体が極めて大掛かりなものとなり、システム導入のための費用や設置場所など、実際の競技の競技現場に導入するためには多くの問題点を抱えている。そこで、より安価で簡易計測可能なセンサ等を用いた運動計測の方法を検討する必要があると考えられる。

もう一つの課題は、ソフトウェアのユーザーインタフェースの開発である。本研究は、競技者による身体スキルのメタ認知的探究を支援するツールとして”ColorBar”の開発に取り組んできた。これまで取り組んで来た開発の中心的課題は、競技者に対して運動計測によって獲得したデーから生成したカラーバーを見せる、その意味解釈を支援するために映像を用いるという 2 つの機能の充実させることであった。今後は、メタ認知的探究の触媒として、これらの機能を統合しユーザーとの親和性の高いインターフェースの設計に取り組む必要があると考えられる。

図 7.1 に現時点で想定しているインターフェースを示す。

図 7.1　“ColorBar”のユーザーインターフェース

現在想定しているインターフェースは、これまでのケーススタディから明らかになった以下に示す”ColorBar”の運用方法を 1 つのソフトウェア内で実行可能にすることを目指している。

- 選択した試行のデータから生成されたカラーバーを観察する
- 映像とカラーバーを併せて観察する
- 2 つの試行を比較する
- カラーバー及び映像の観察を通して気付いたことをメモとして記録する

ここに示した将来的な”ColorBar”のインタフェースは、本研究のケーススタディで対象としてきた野球の打撃動作のような、試行間の安定性の高いドメインにおけるフィードバックを想定したものである。

本研究が当初ドメインとしていた、空手における組手競技のような複数の競

技者・試行間の再現性が低いといったより複雑な条件のドメインに対するフィードバックの方法は今後の重要な検討課題である。

この第 3 の課題を解決するために、本研究は空手の組手競技を対象としたフィードバックを行うためのソフトウェアの開発に取り組み始めている。開発中のソフトウェアを図 7.2 に示す。

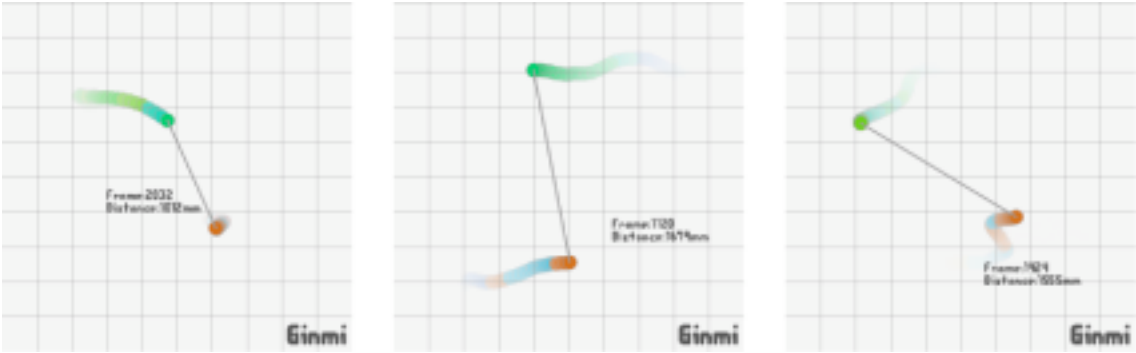



図 7.2 開発中の組手競技のフィードバック用ソフトウェア

このソフトウェアは、”ColorBar”と同様の手続きによって組手競技中の両競技者のフォームを色で表現し、競技コートを真上から見たときの競技者の位置にその時点の姿勢（構え）を表す色のオブジェクトを表示する。さらに、マウスをクリックした時点での競技者間の距離を表示することが可能である。

このような２次元のアニメーションとして組手競技を簡単表現して、両競技者の位置情報と構え、競技者間の関係性（現在は距離）をフィードバックすることで、競技者に組手のスキルに関する新たな変数の発見を促すことを目指している。今後、このソフトウェアを競技者に対するフィードバックとして用いながら、適応的な開発に取り組む予定である。

## 7.3 展望

本研究を通して得られた知見は、ケーススタディを実施した競技者個人の特性である。しかし、運動計測によって獲得した情報による身体スキルのメタ認知支援の具体的研究はまだ始まったばかりである。このような研究の初期段階において、ケーススタディを通じて多くの事例を蓄積していくことこそ、今後メタ認知の支援環境を模索する上で有意義な知見となりうると、筆者は信じている。

本研究では、今後も更なるケーススタディを重ねながら、身体スキルの行為者が能動的にメタ認知的探究に取り組むための場づくりの方法論を探究していきたいと思う。

# 謝辞

# 参考文献

[古川 05] 古川康一，植野研：AI とスキルサイエンス，人工知能学会論文誌，Vol. 20，No. 2，pp. 510-517（2005）

[井庭 98] 井庭崇，福原義久：複雑系入門−知のフロンティアへの冒険，NTT 出版（1998）

[生田 87] 生田久美子：「わざ」から知る，東京大学出版会（1987）

[伊藤 09] 伊藤貴一，諏訪正樹，大澤幸生：メタ認知を促進するツールとしての属性付き KeyGraph 分析，人工知能学会第 2 種研究会「身体知研究会」2008 年度第 3 回研究会（2008）

[河合 02] 河合隼雄：物語を生きる−今は昔、昔は今，小学館（2002）

[宮本 85] 宮本武蔵：五輪書，岩波文庫（1985）

[中島 08] 中島秀之，諏訪正樹，藤井晴行：構成的情報学の方法論からみたイノベーション，情報処理学会論文誌，Vol. 49，No. 4，pp. 1508-1514（2008）

[西山 08] 西山武繁，古川康一，加藤貴昭：伝統派空手における間合いスキルの考察，第 22 回人工知能学会全国大会論文集（2008）

［岡崎 00］岡崎 彰夫：はじめての画像処理技術，工業調査会（2000）

[佐伯 95] 佐伯胖：「学ぶ」ということの意味，岩波書店（1995）

[沢木 92] 沢木耕太郎：王の闇，文春文庫（1992）

[Schmidt 91] Shmidt, R. A. : *Motor learning and performance: From principles to practice*, Champaign（1991）（調枝孝治 監訳：運動学習とパフォーマンス−理論から実践へ，大修館書店（1984））

[諏訪 05] 諏訪正樹：身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語化，人工知能学会論文誌，Vol. 20，No. 2，pp. 525-532（2005）

[植野 05] 植野研：時系列データマイニングに基づく身体知の構築に関する研究−PESTRO 法によるチェロ運弓スキルのピークタイミングシナジーの発見−，2005 年度（平成 17 年度）博士論文．政策・メディア研究科（2005 年度）

[山本 05] 複雑系としての身体運動−巧みな動きを生み出す環境のデザイン，東京大学出版会（2005）

# 対外発表一覧

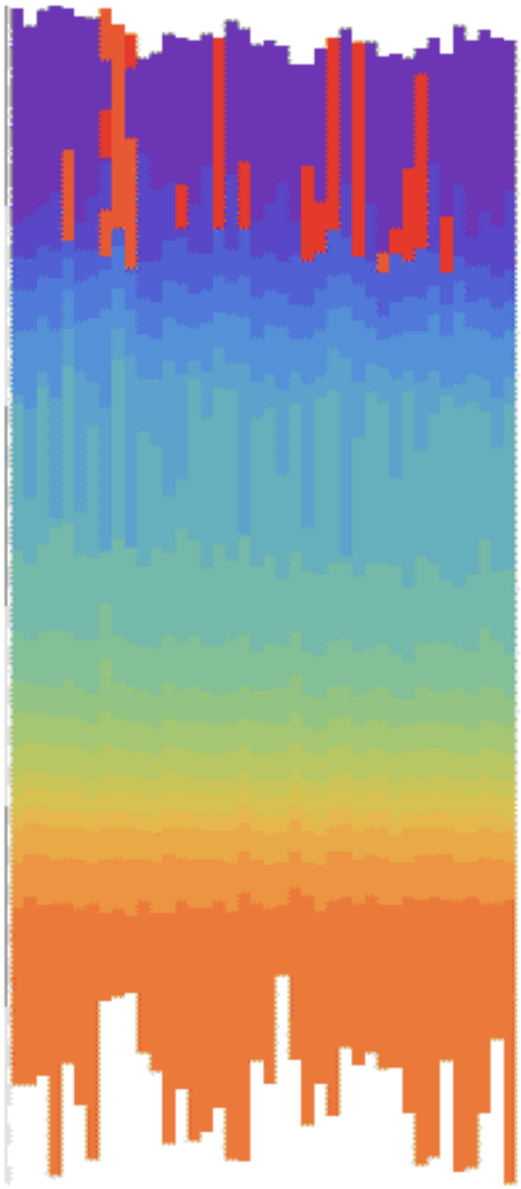
# 付録

# 野球における打撃動作のカラーバー

# クラスタ数 k = 20

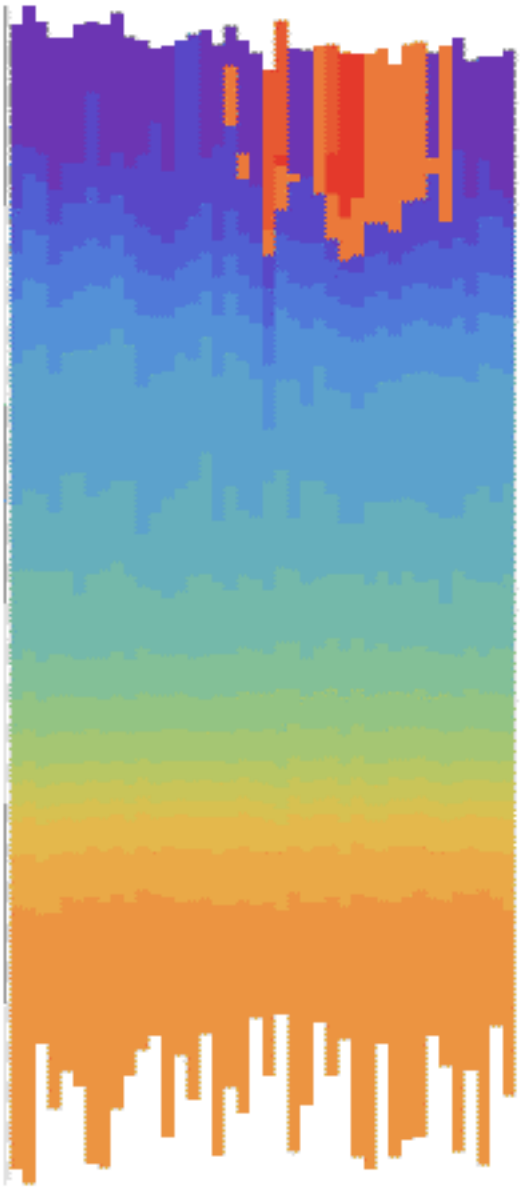
## 8 面モデル

6 月 6 日



試行数：40

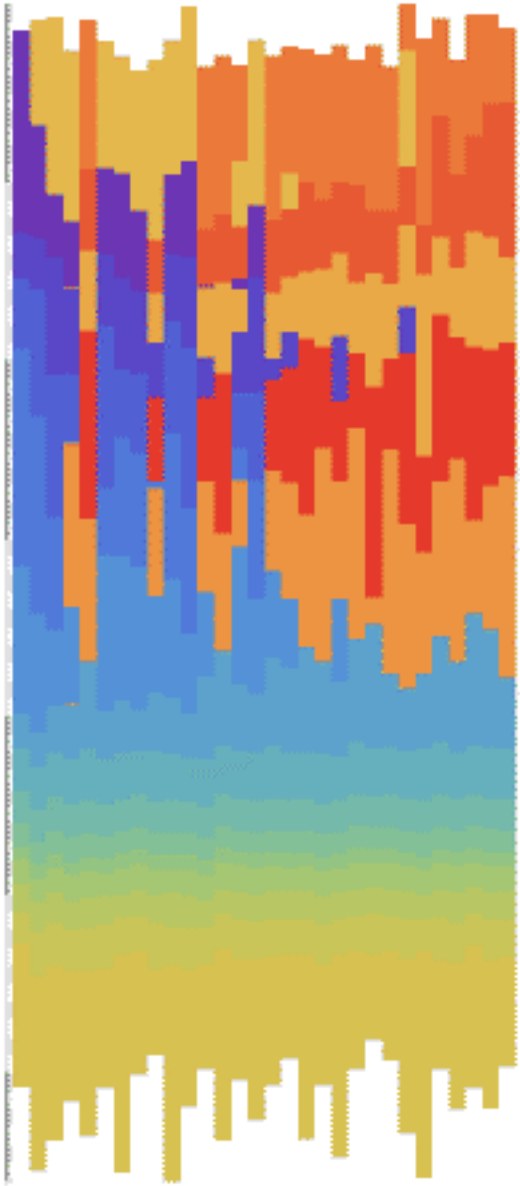
6 月 18 日



試行数：40

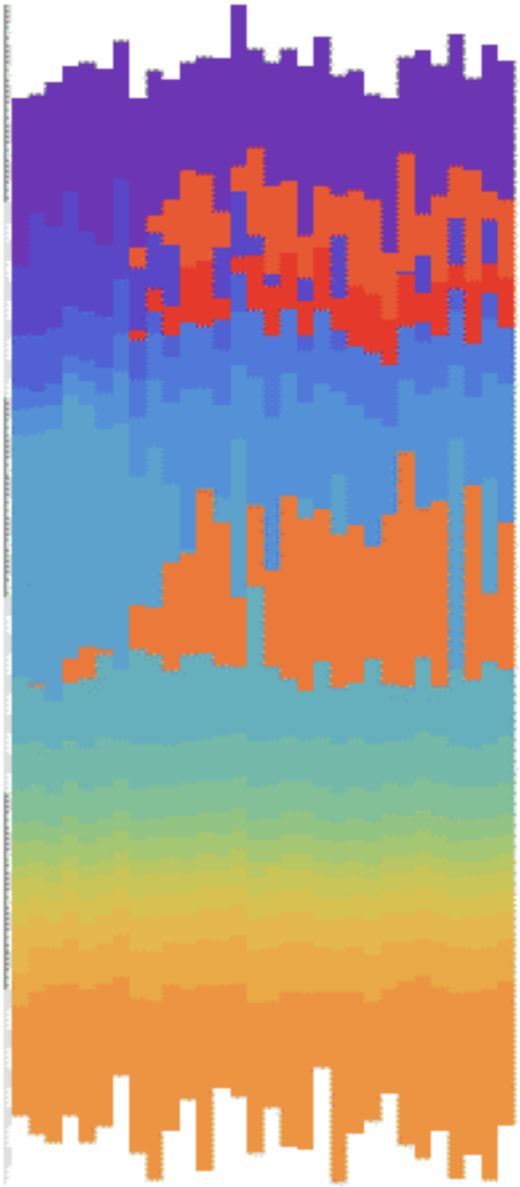
## クラスタ数 k = 20

7 月 2 日



試行数:30

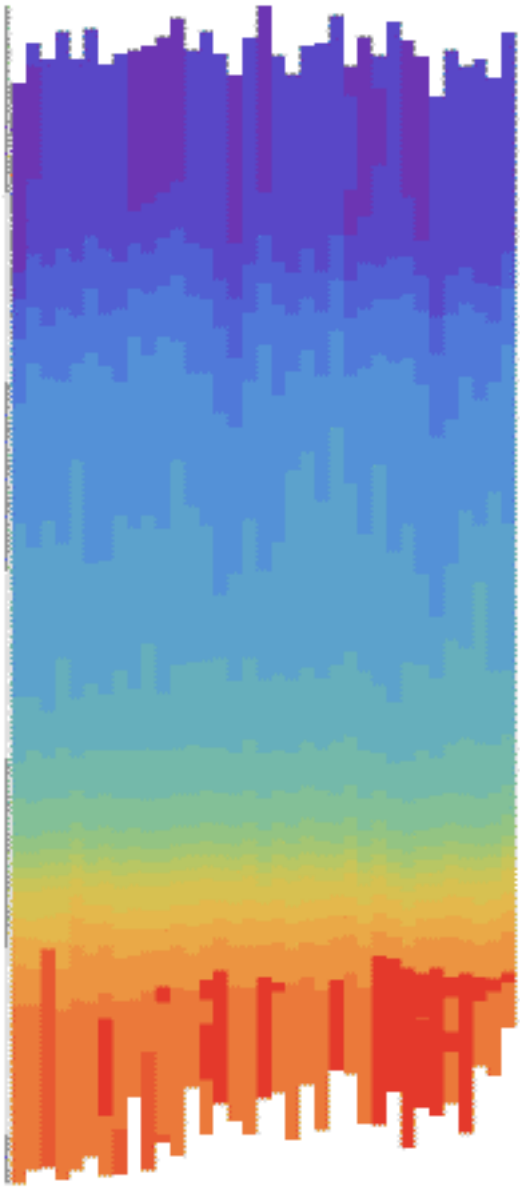
8 月 21 日



試行数:30

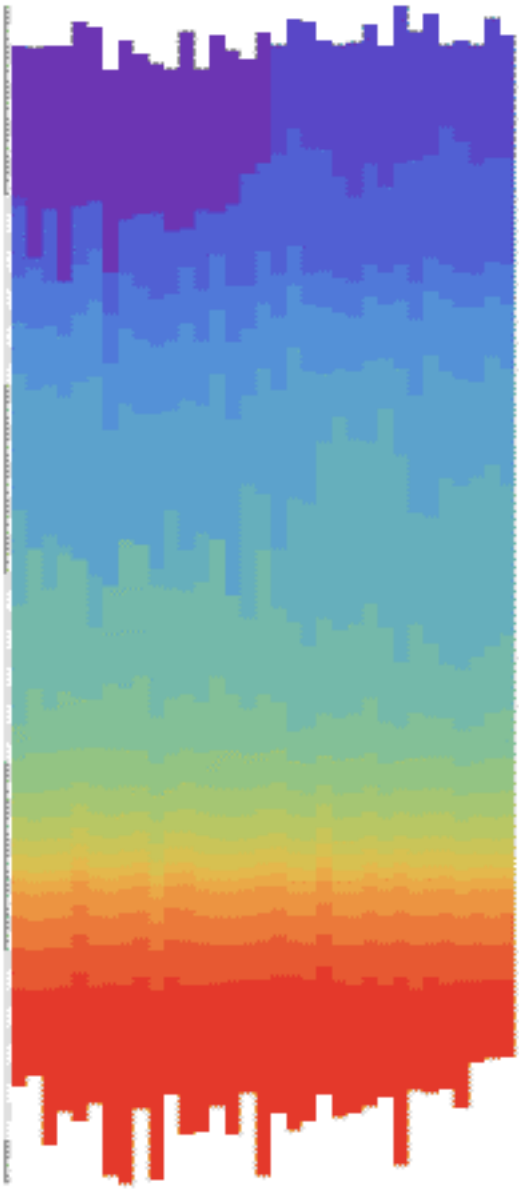
## クラスタ数 k = 20

10 月 2 日



試行数:35

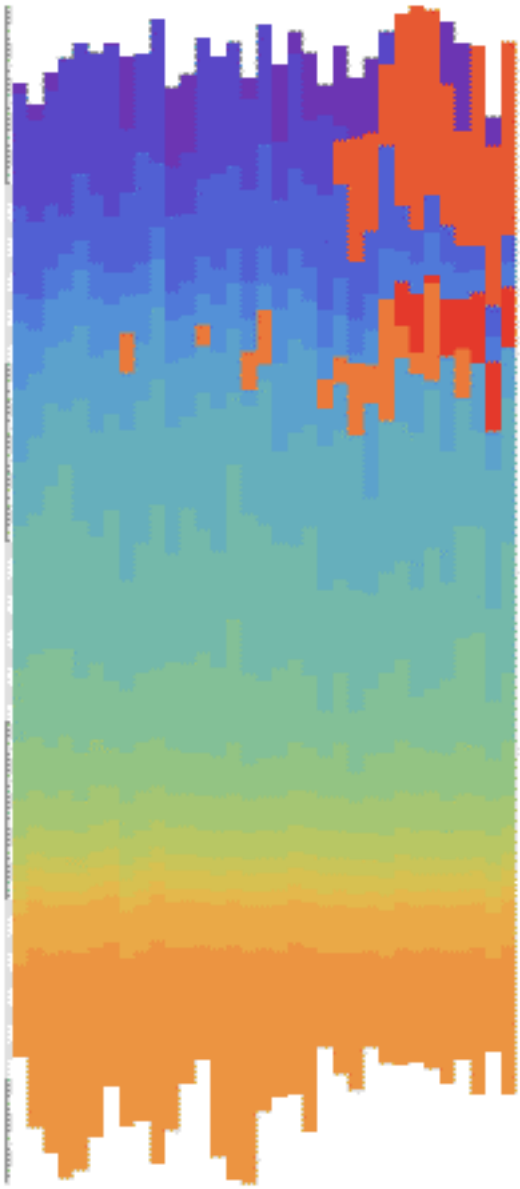
10 月 23 日



試行数:33

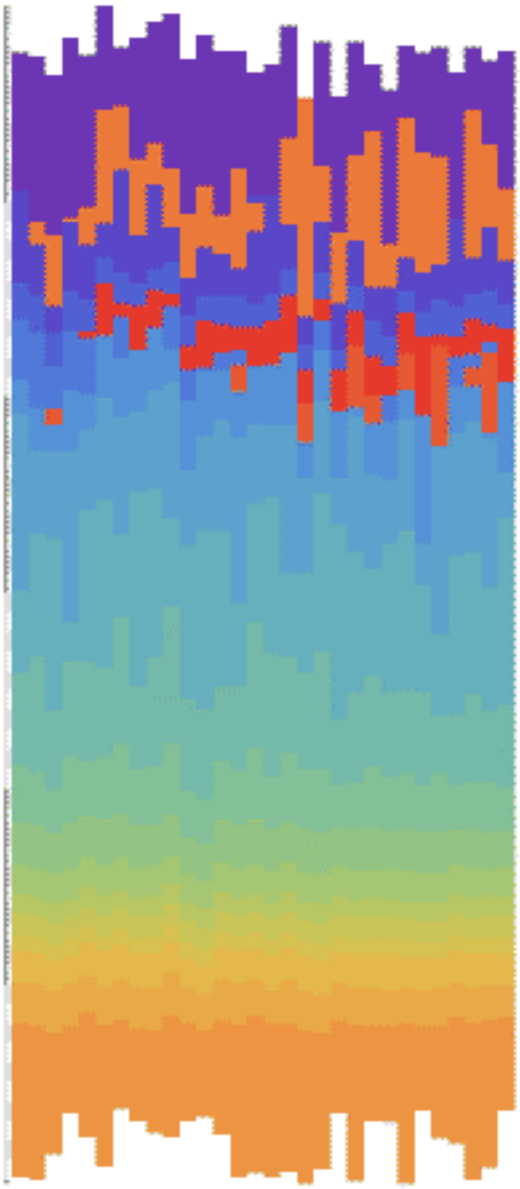
## クラスタ数 k = 20

11 月 6 日



試行数:33

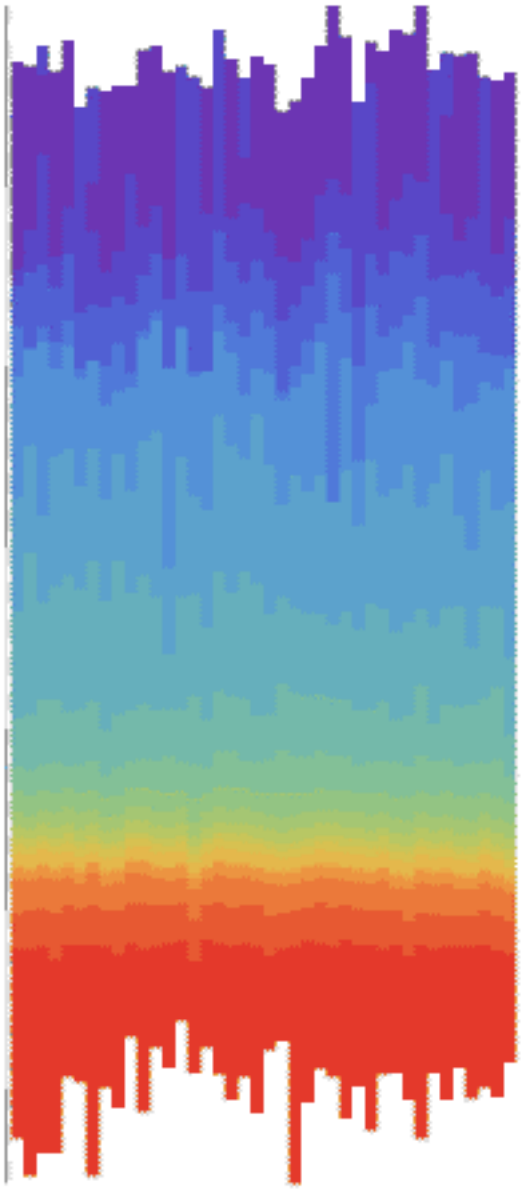
11 月 27 日



試行数:30

# クラスタ数 k = 20

12 月 18 日

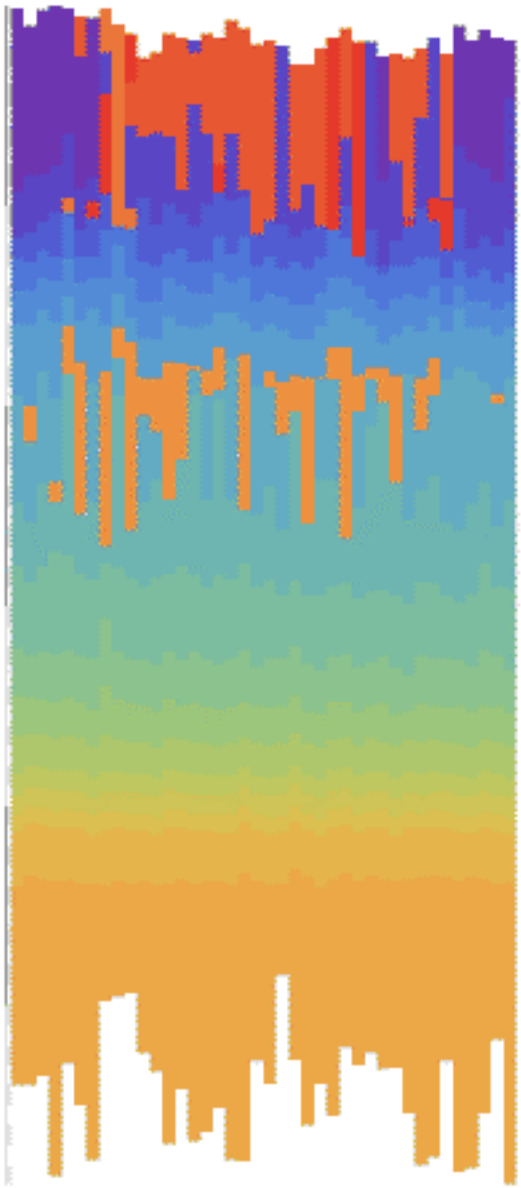


試行数：40

# クラスタ数 k = 21

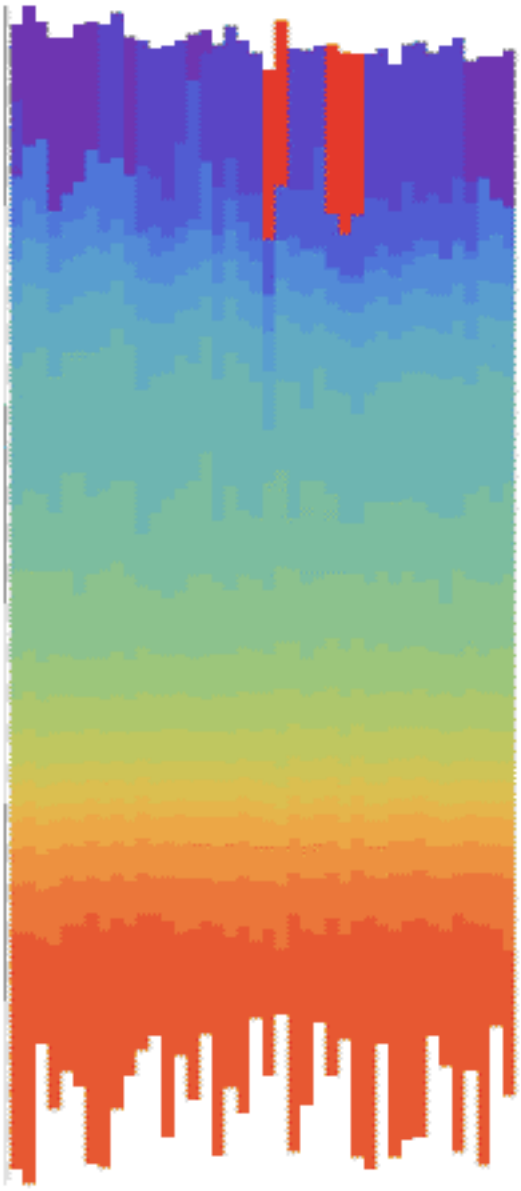
## 8 面モデル

6 月 6 日



試行数：40

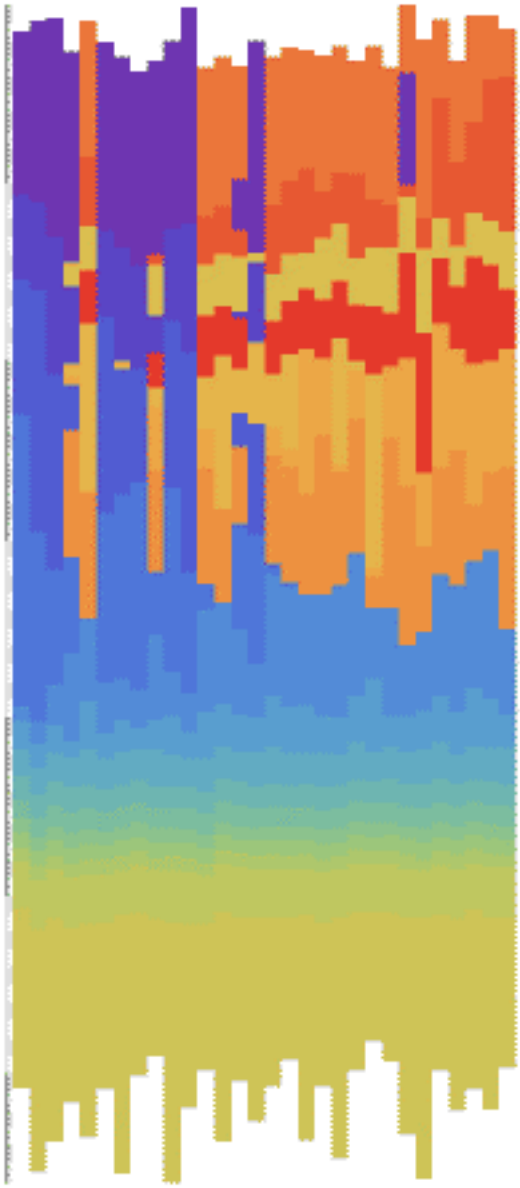
6 月 18 日



試行数：40

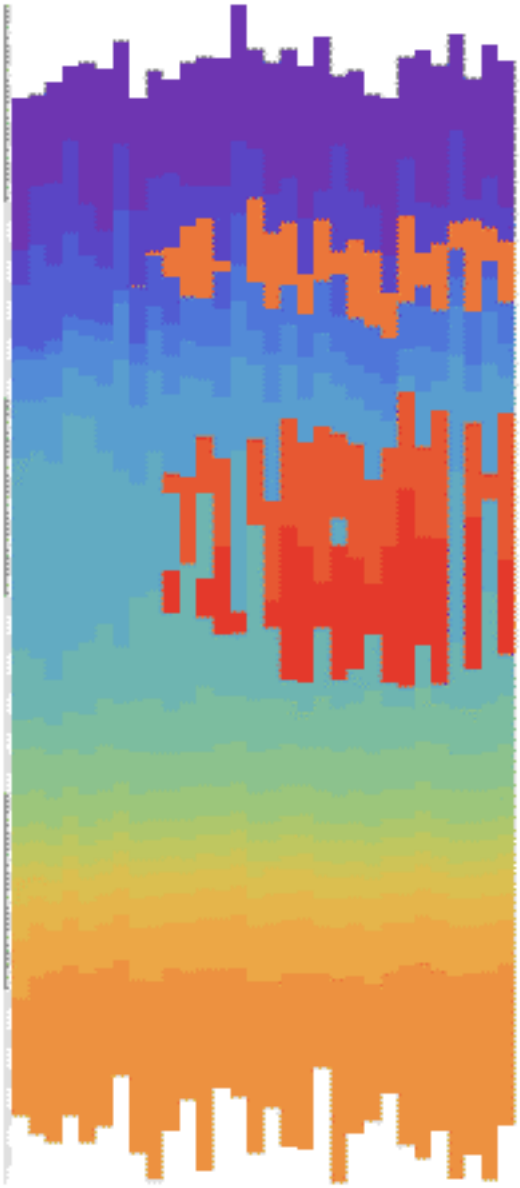
## クラスタ数 k = 21

7 月 2 日



試行数:30

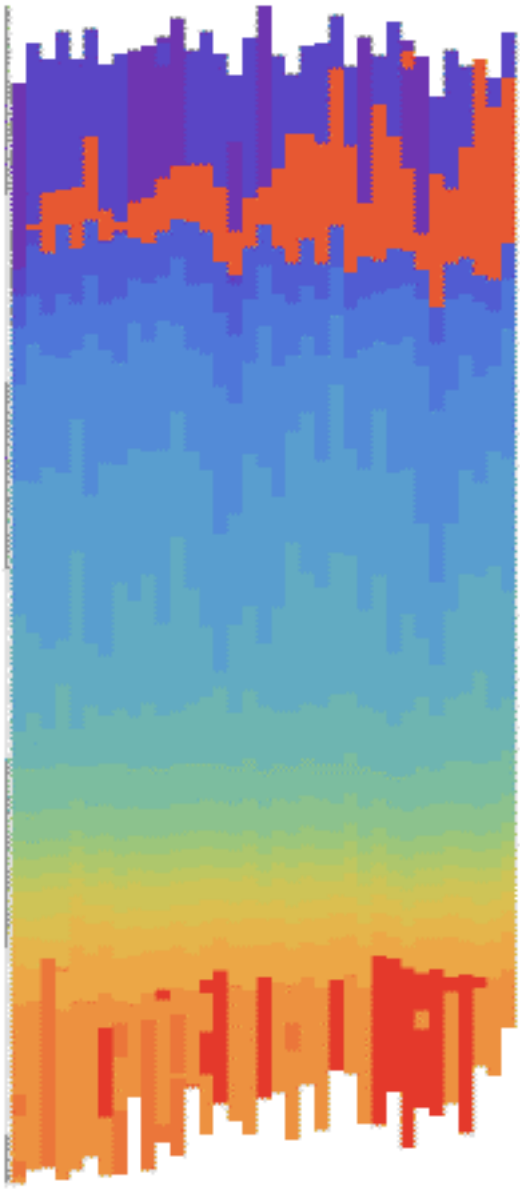
8 月 21 日



試行数:30

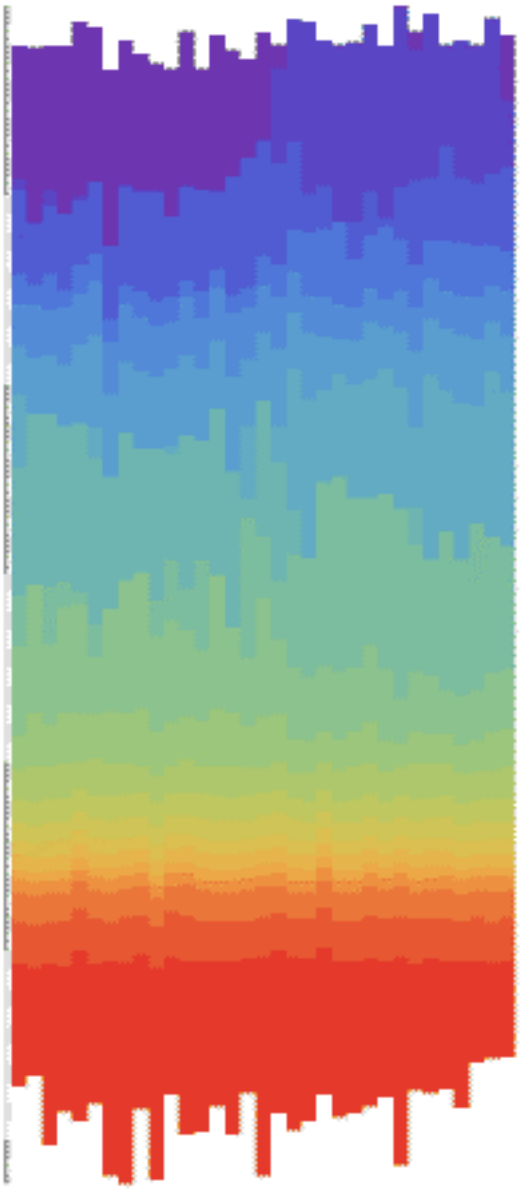
## クラスタ数 k = 21

10 月 2 日



試行数:35

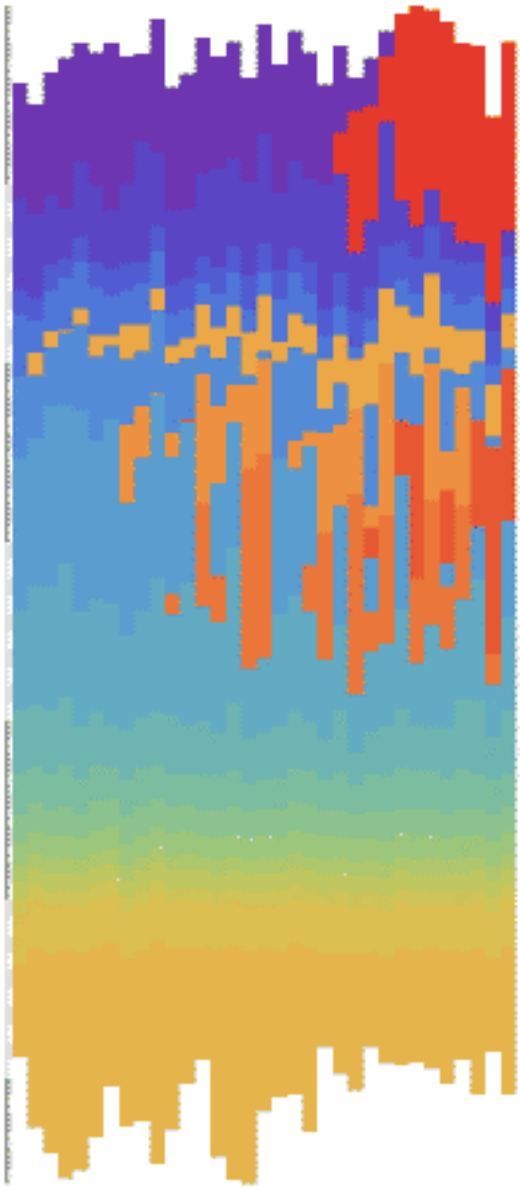
10 月 23 日



試行数:33

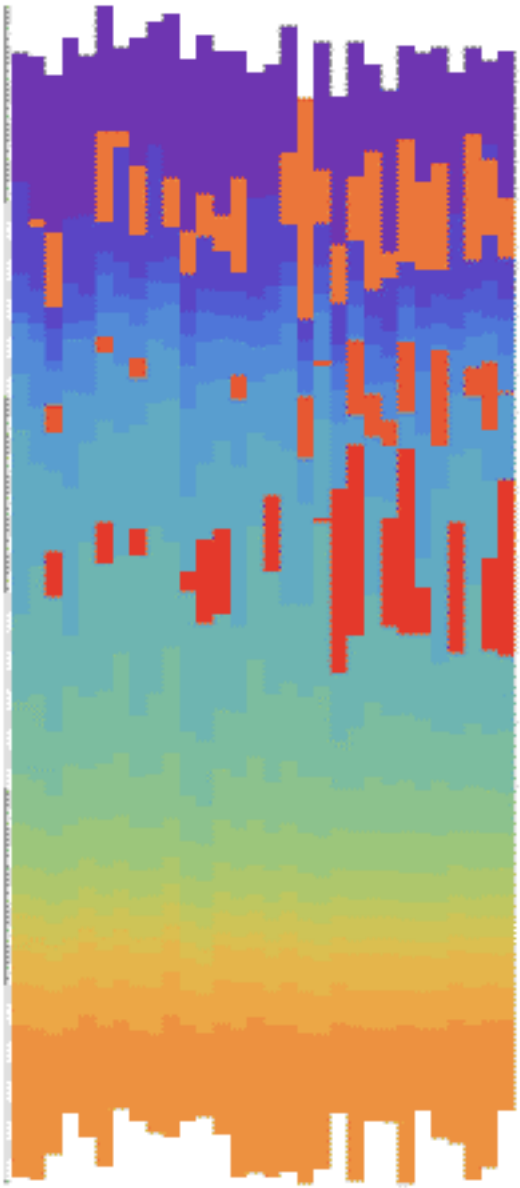
## クラスタ数 k = 21

11 月 6 日



試行数:33

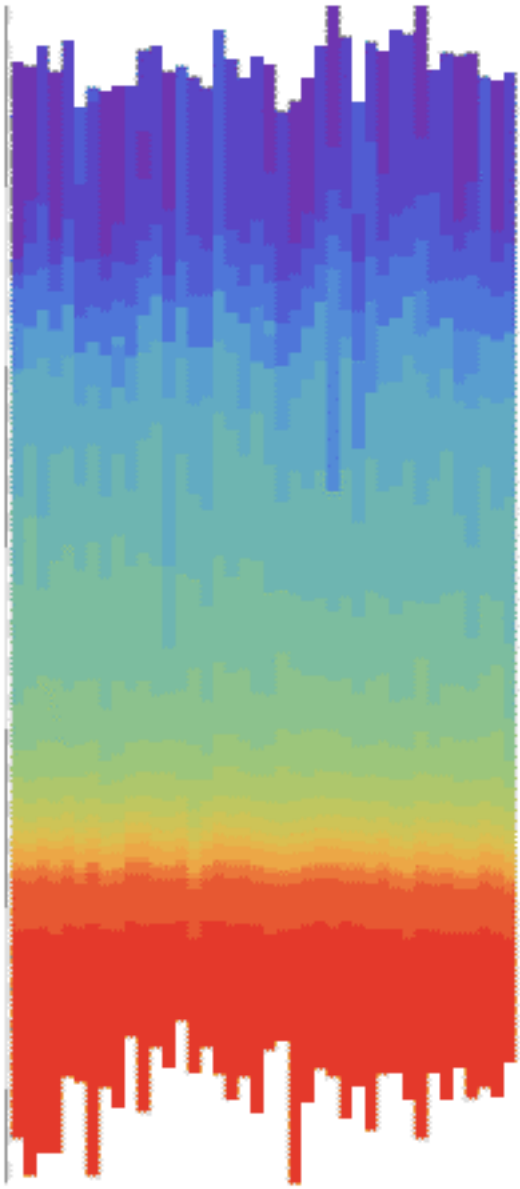
11 月 27 日



試行数:30

# クラスタ数 k = 21

12 月 18 日

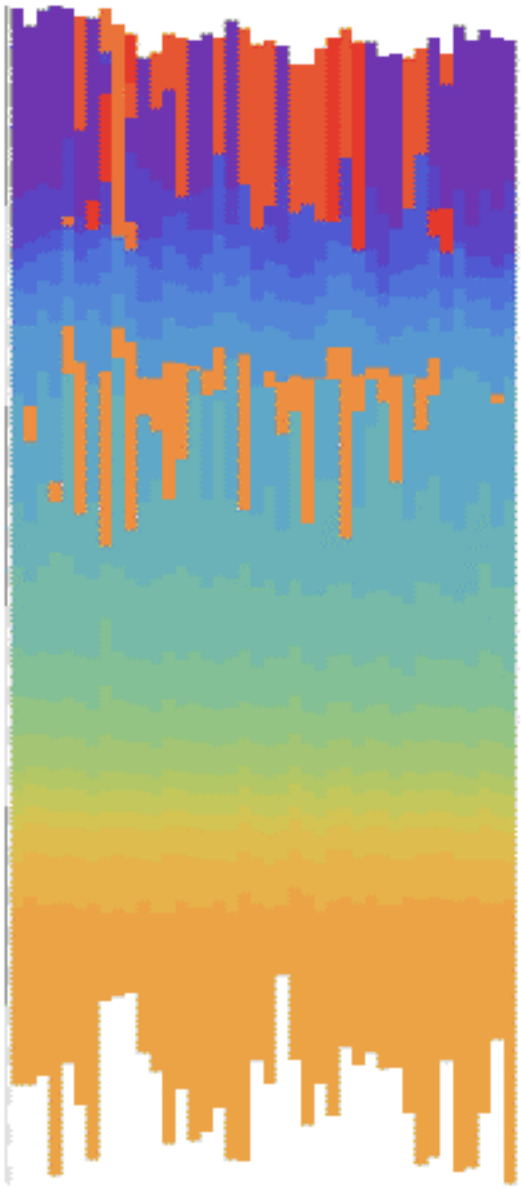


試行数：40

## クラスタ数 k = 22

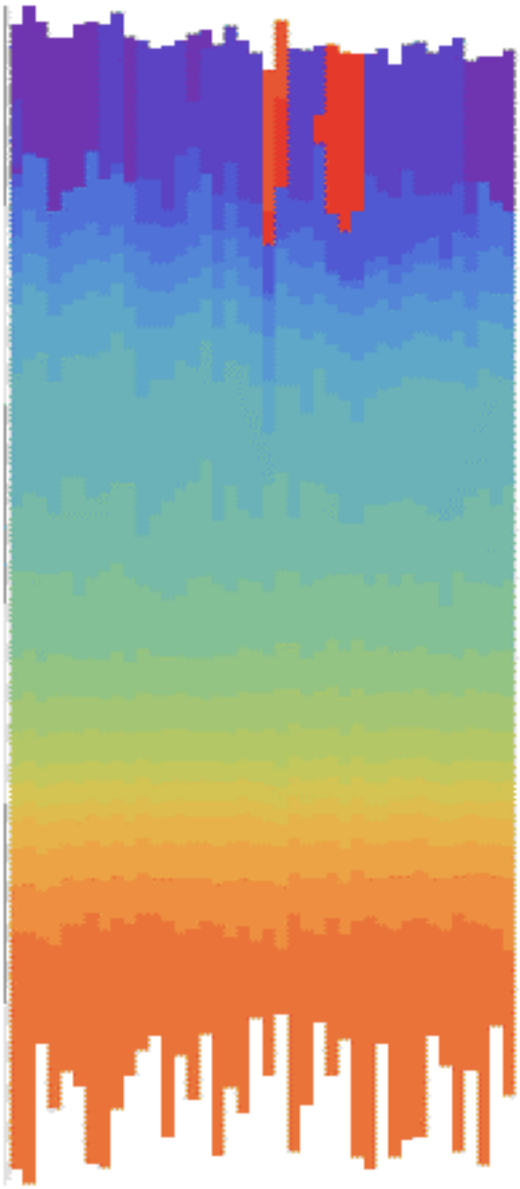
### 8 面モデル

6 月 6 日



試行数：40

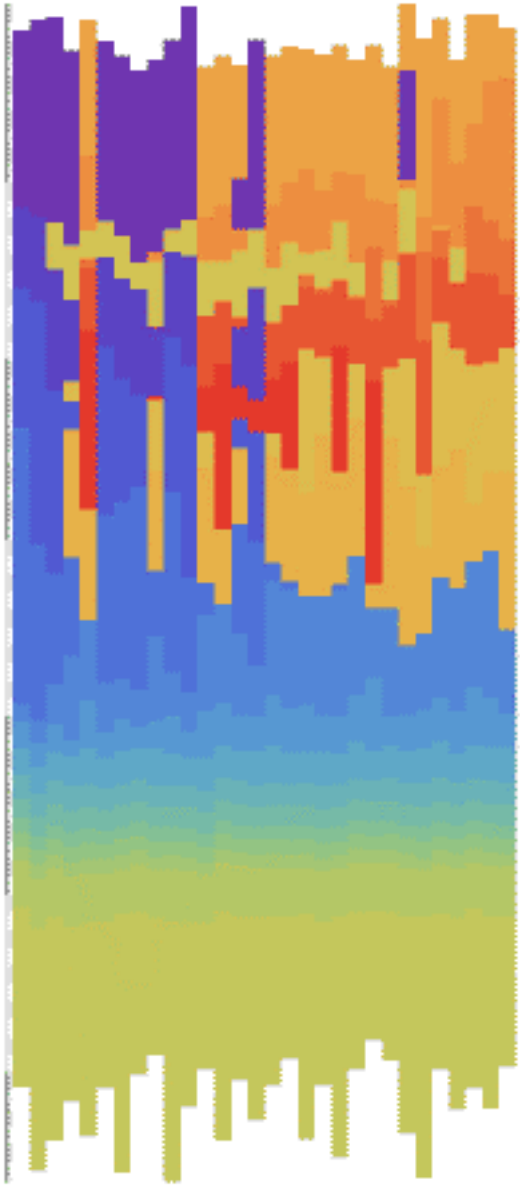
6 月 18 日



試行数：40

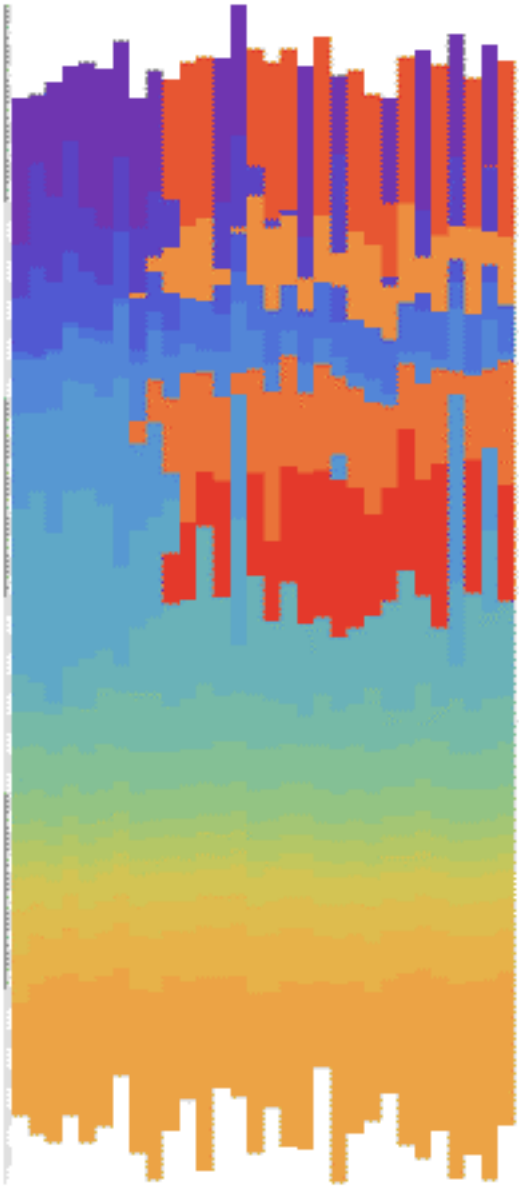
## クラスタ数 k = 22

7 月 2 日



試行数:30

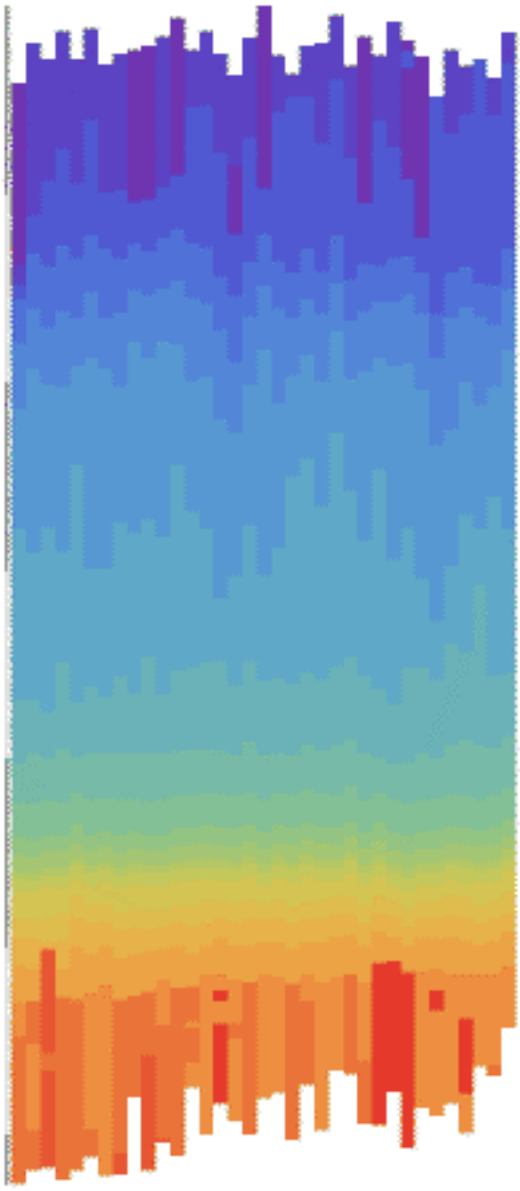
8 月 21 日



試行数:30

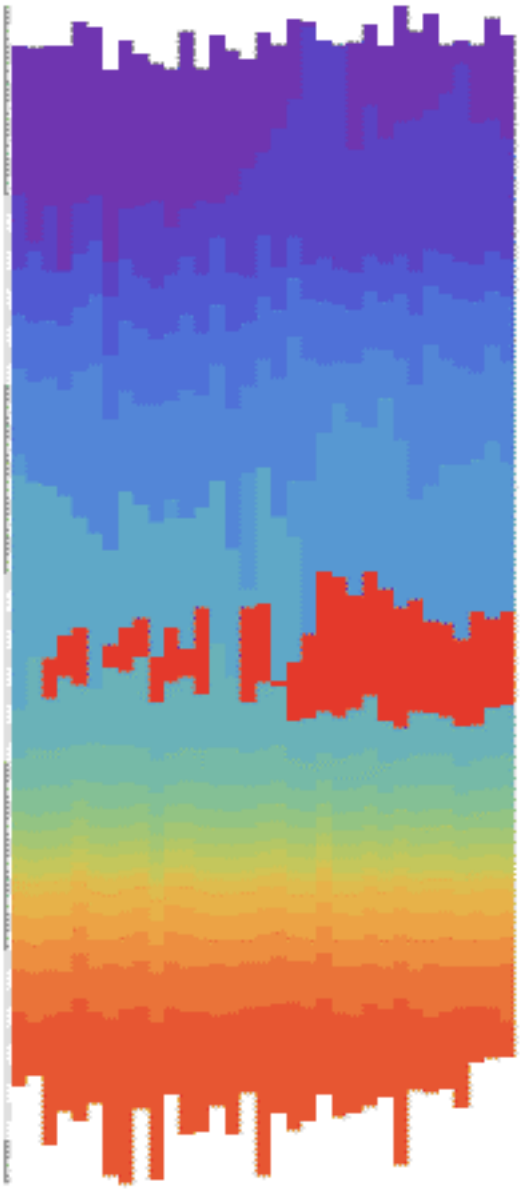
## クラスタ数 k = 22

10 月 2 日



試行数:35

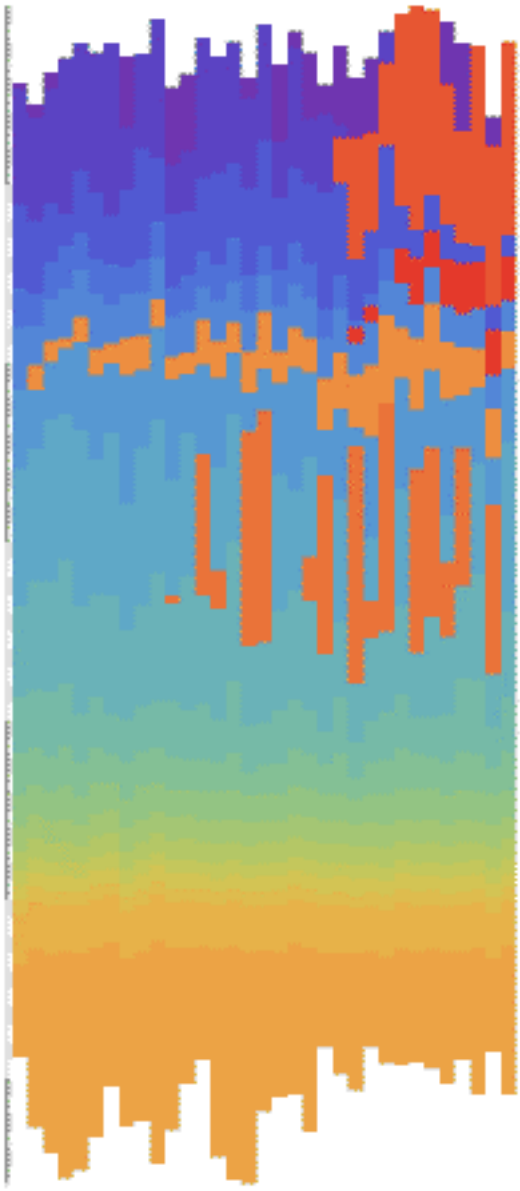
10 月 23 日



試行数:33

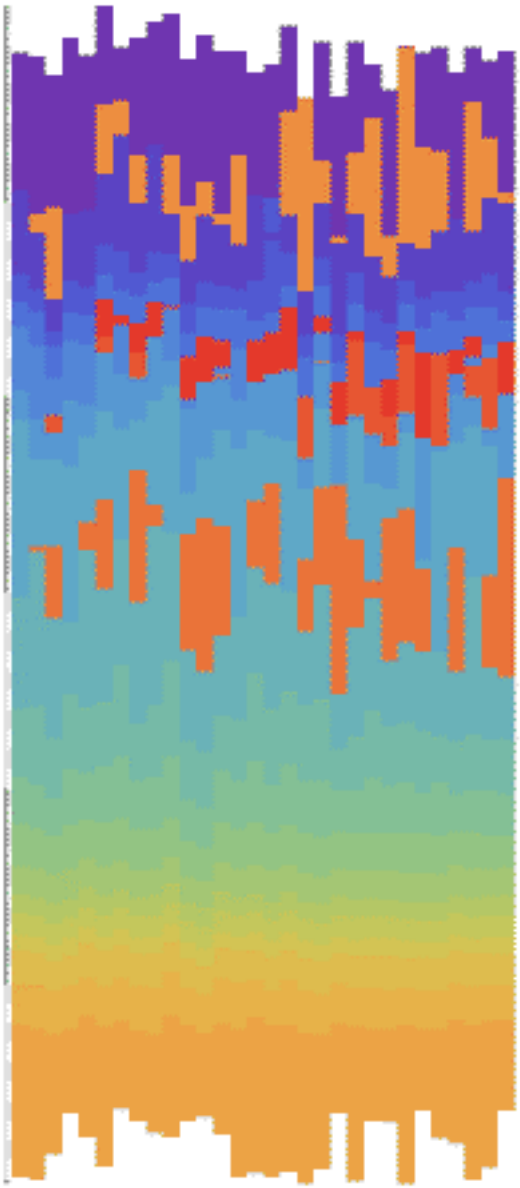
## クラスタ数 k = 22

11 月 6 日



試行数:33

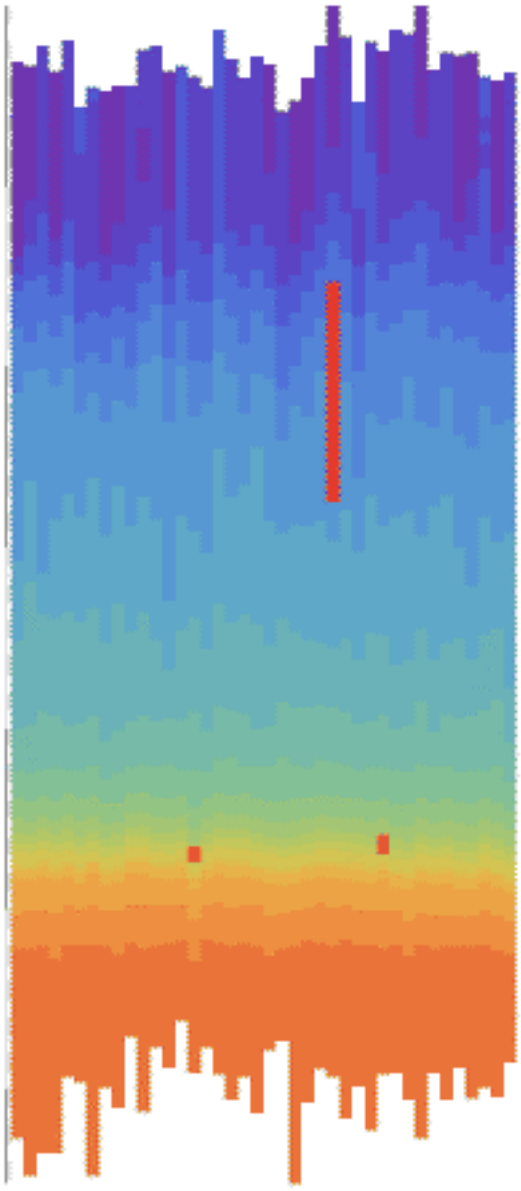
11 月 27 日



試行数:30

# クラスタ数 k = 22

12 月 18 日



試行数：40

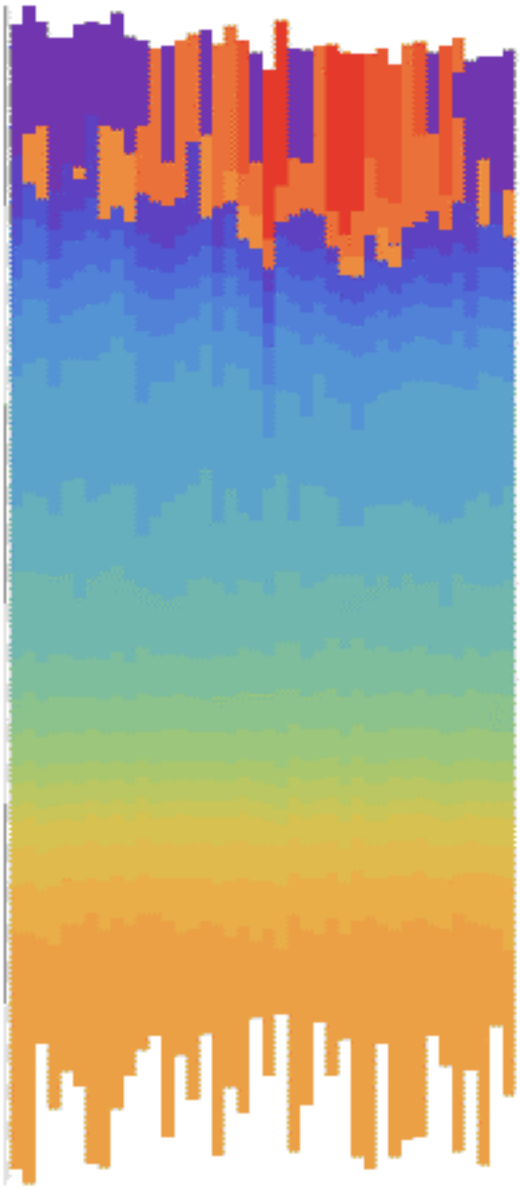
# クラスタ数 k = 23

## 8 面モデル

6 月 6 日

試行数：40

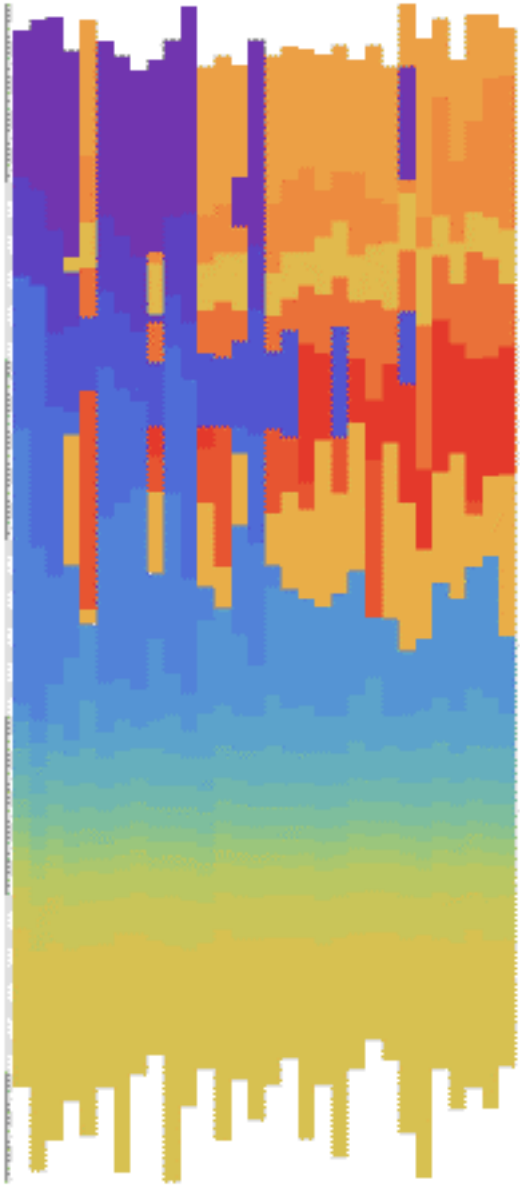
6 月 18 日



試行数：40

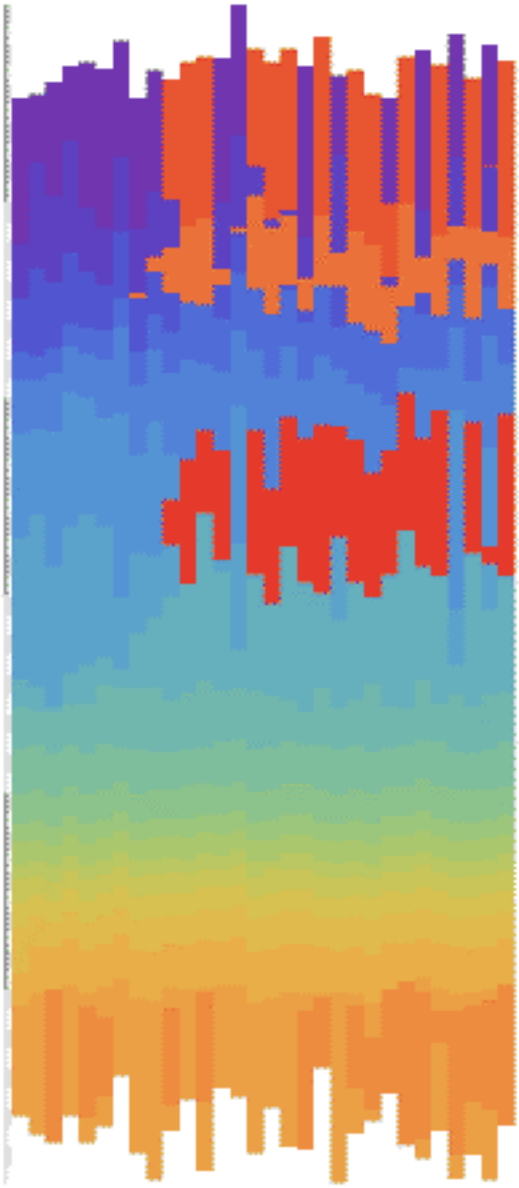
## クラスタ数 k = 23

7 月 2 日



試行数:30

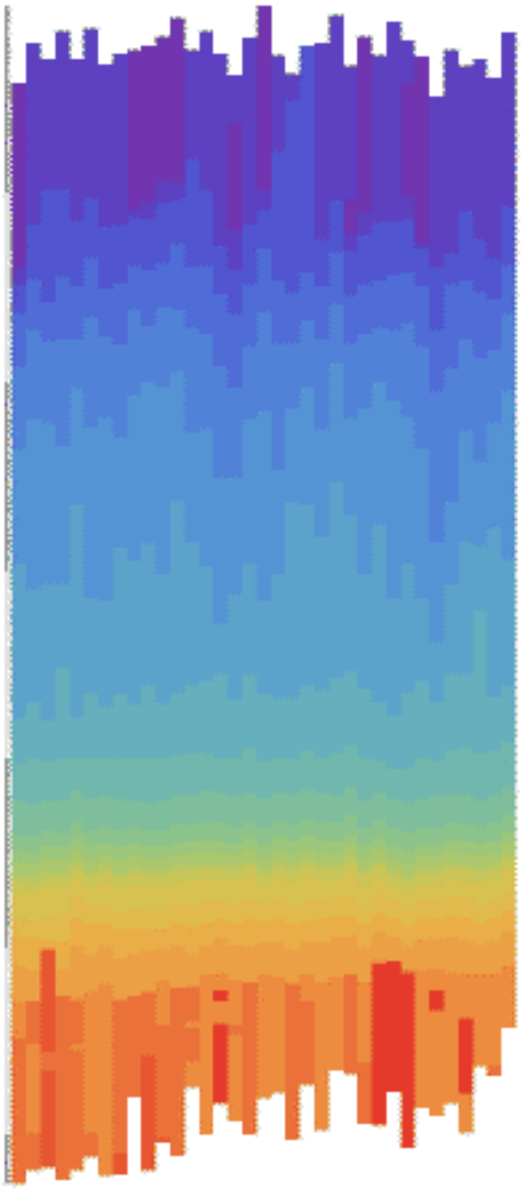
8 月 21 日



試行数:30

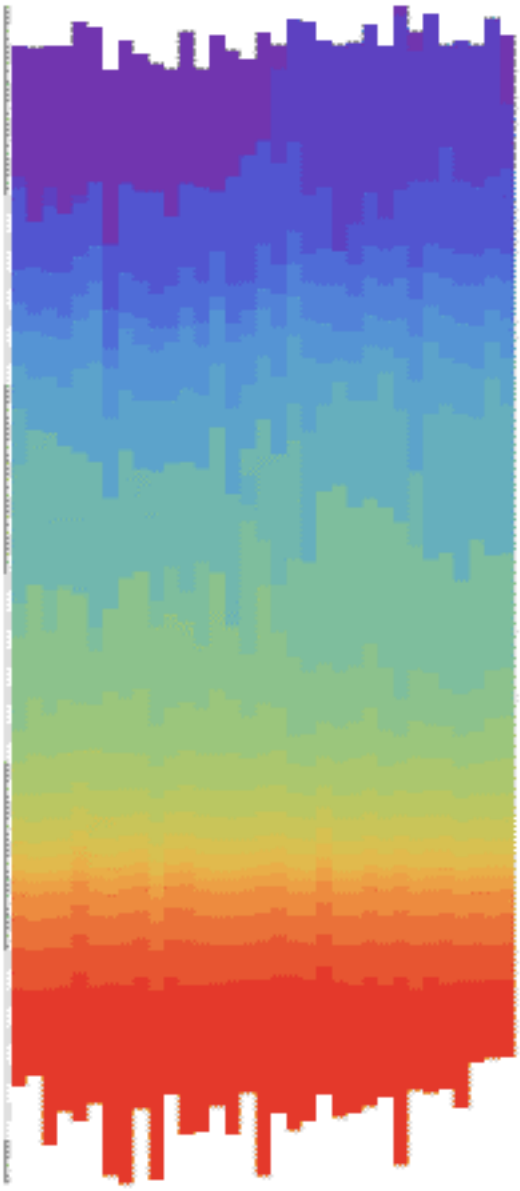
## クラスタ数 k = 23

10 月 2 日



試行数:35

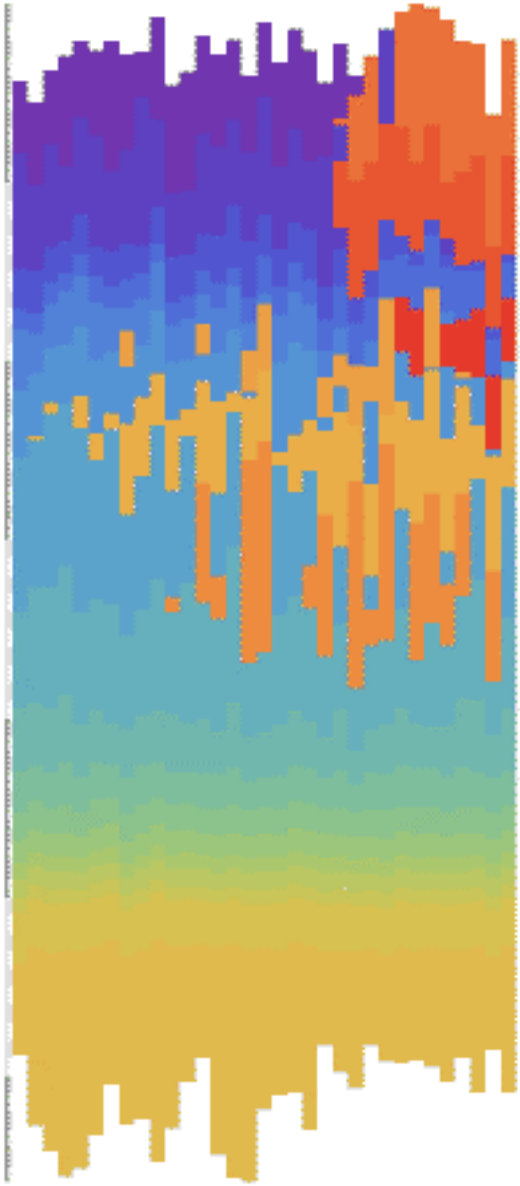
10 月 23 日



試行数:33

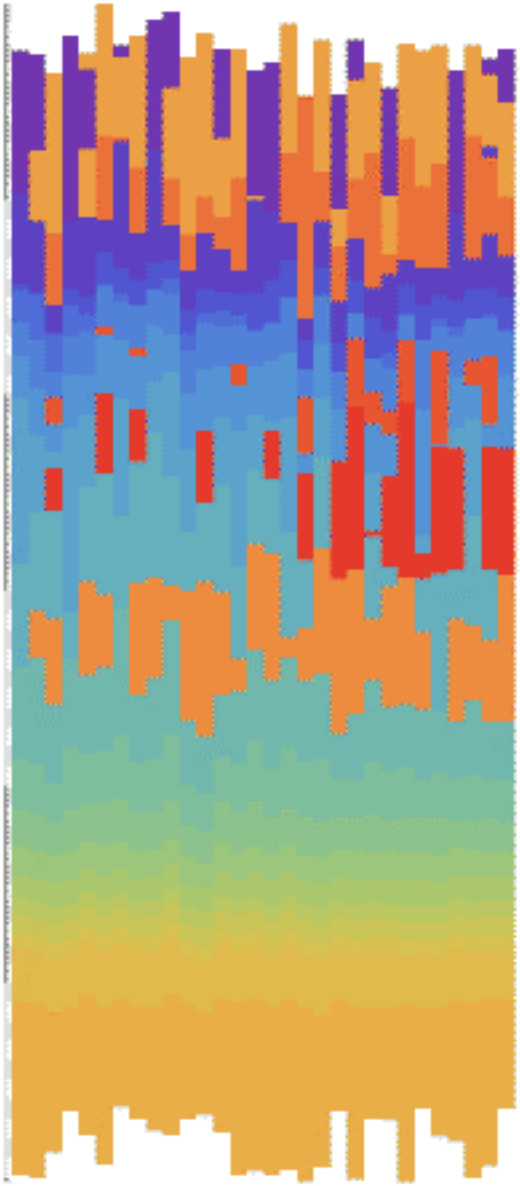
## クラスタ数 k = 23

11 月 6 日



試行数:33

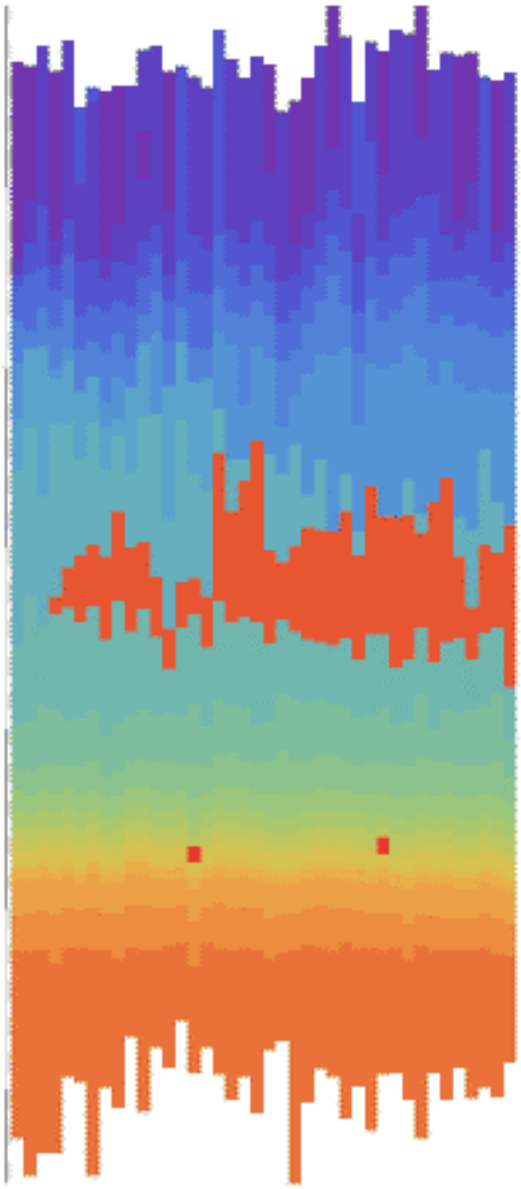
11 月 27 日



試行数:30

# クラスタ数 k = 23

12 月 18 日

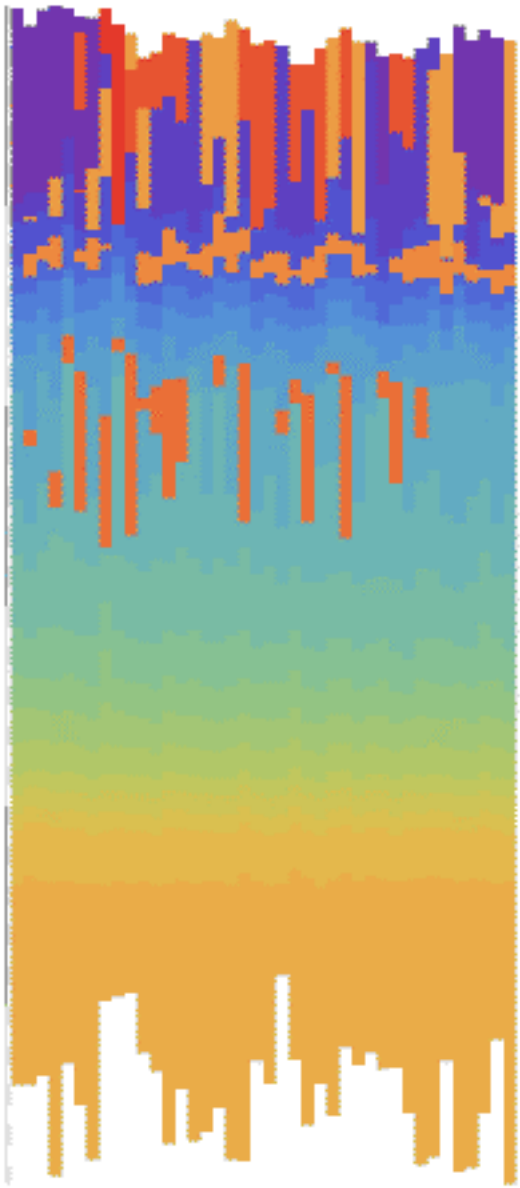


試行数：40

# クラスタ数 k = 24

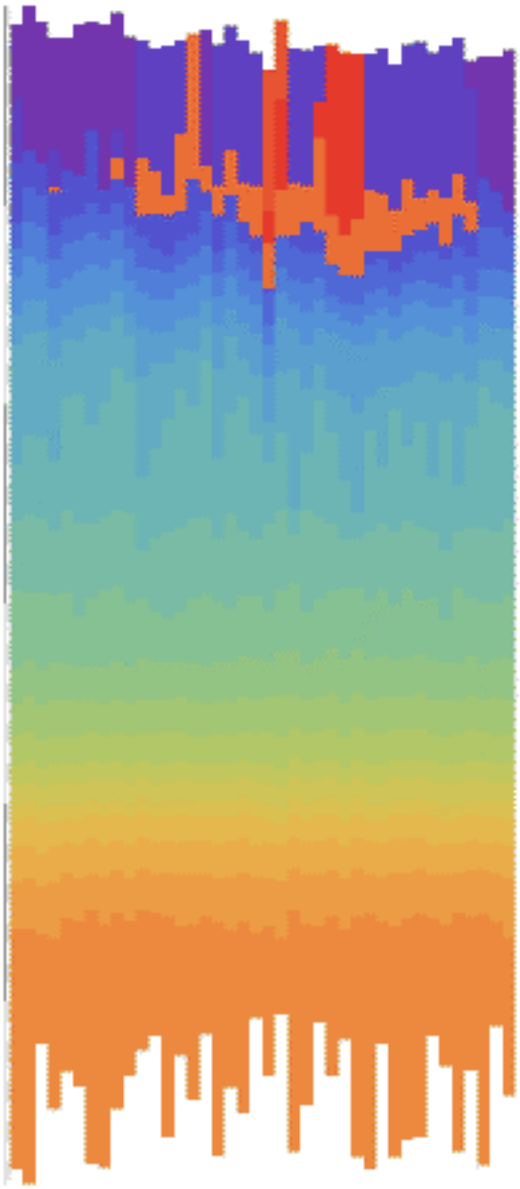
## 8 面モデル

6 月 6 日



試行数：40

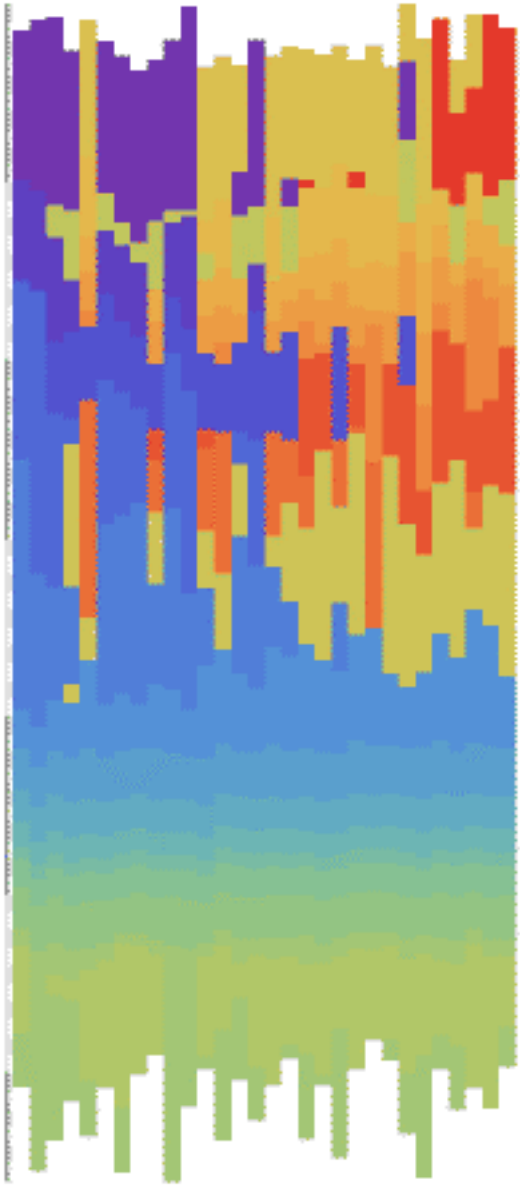
6 月 18 日



試行数：40

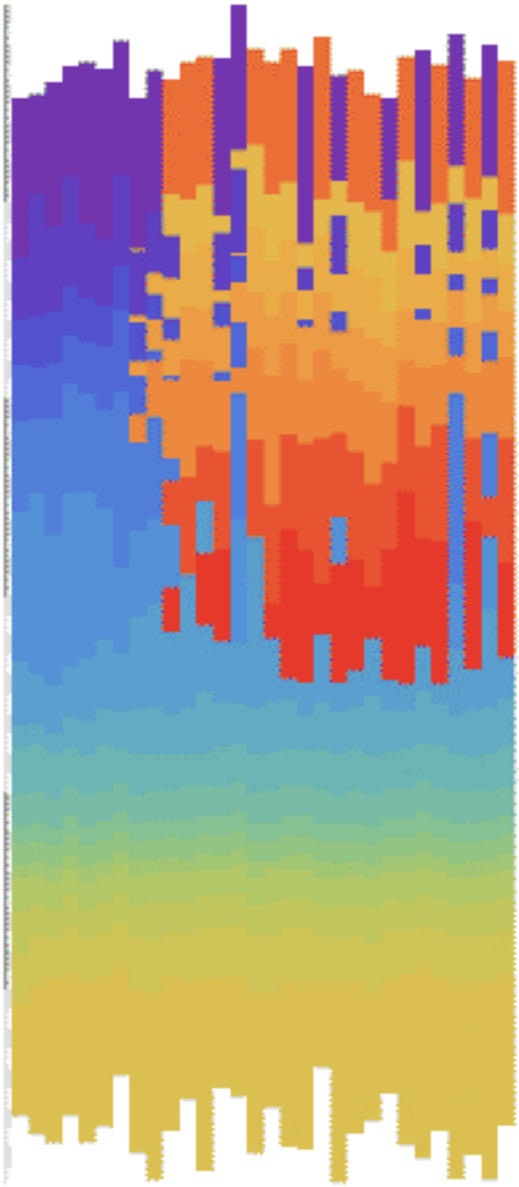
## クラスタ数 k = 24

7 月 2 日



試行数:30

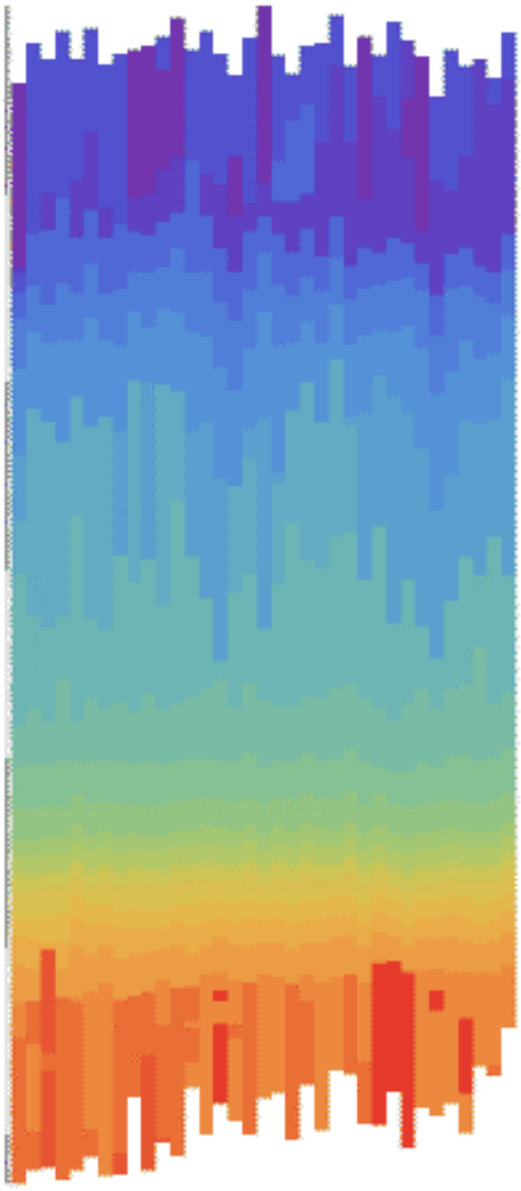
8 月 21 日



試行数:30

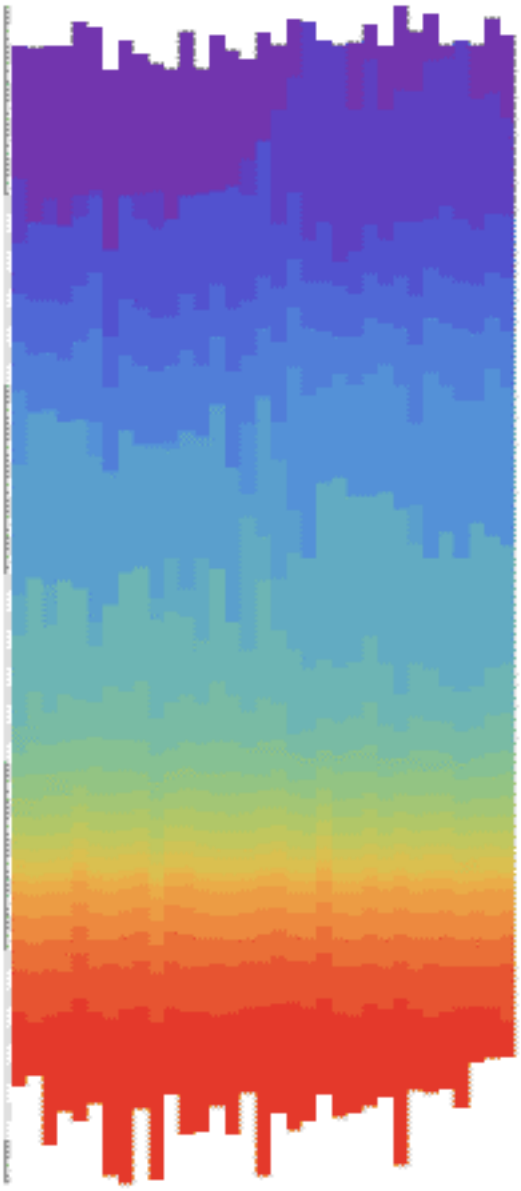
## クラスタ数 k = 24

10 月 2 日



試行数:35

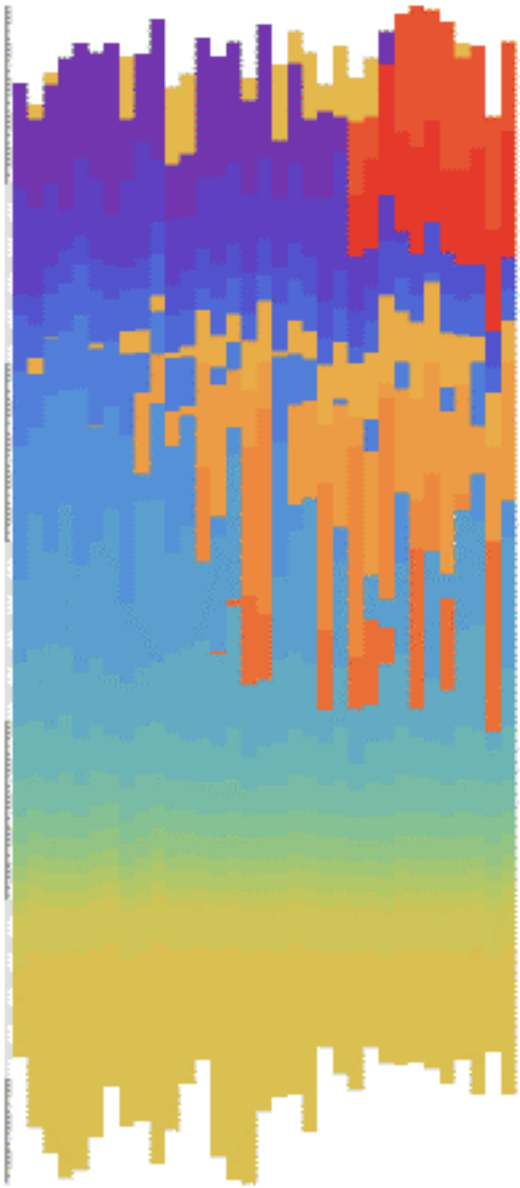
10 月 23 日



試行数:33

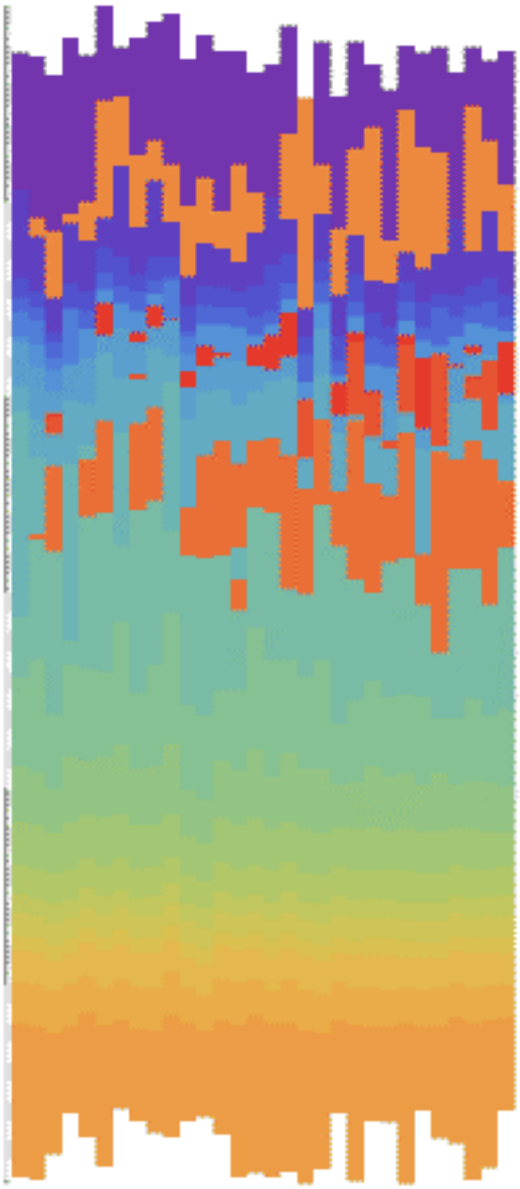
## クラスタ数 k = 24

11 月 6 日



試行数:33

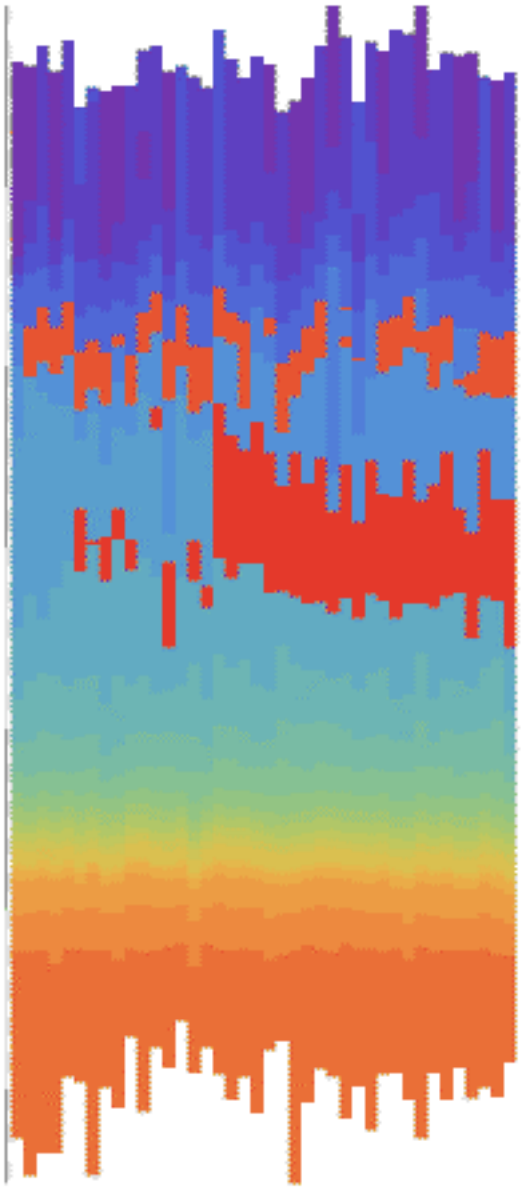
11 月 27 日



試行数:30

# クラスタ数 k = 24

12 月 18 日



試行数：40

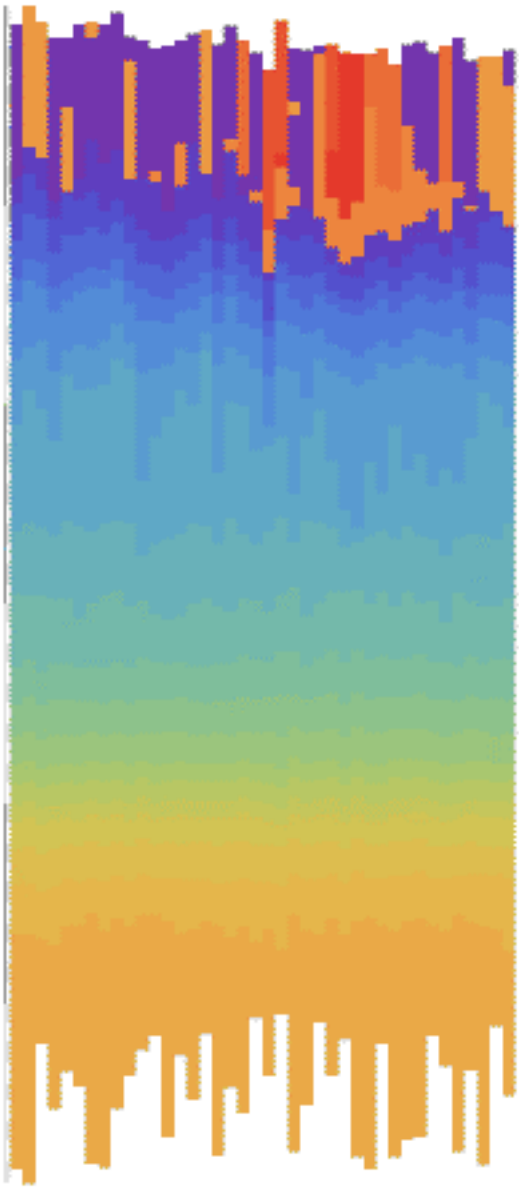
# クラスタ数 k = 25

## 8 面モデル

6 月 6 日

試行数：40

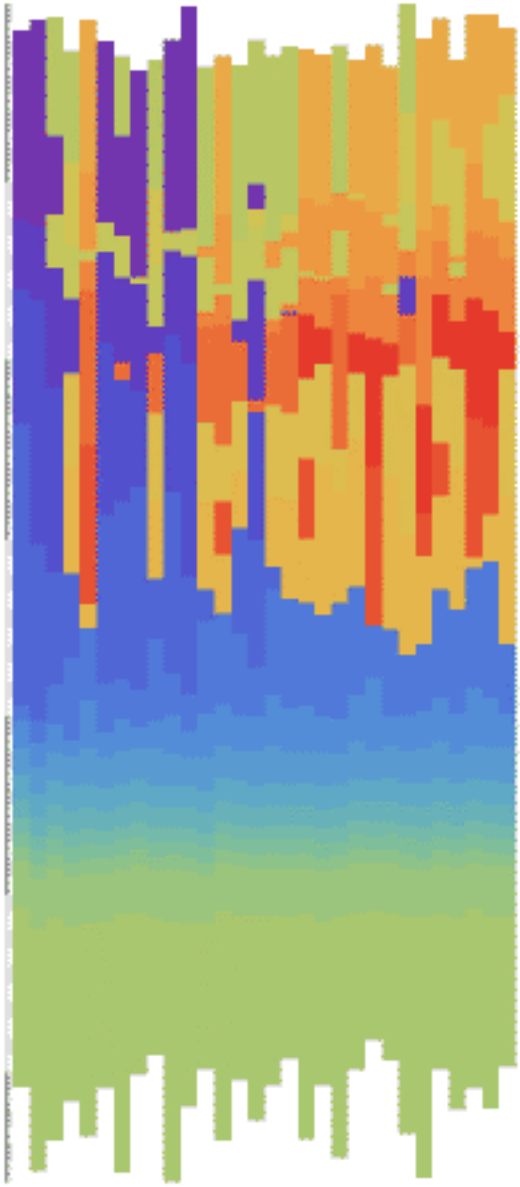
6 月 18 日



試行数：40

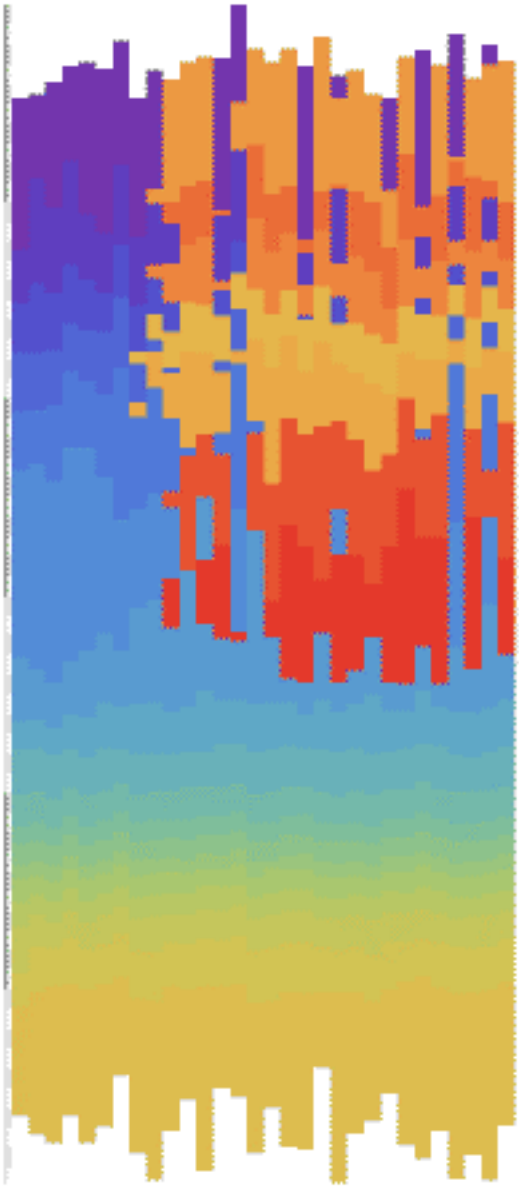
## クラスタ数 k = 25

7 月 2 日



試行数:30

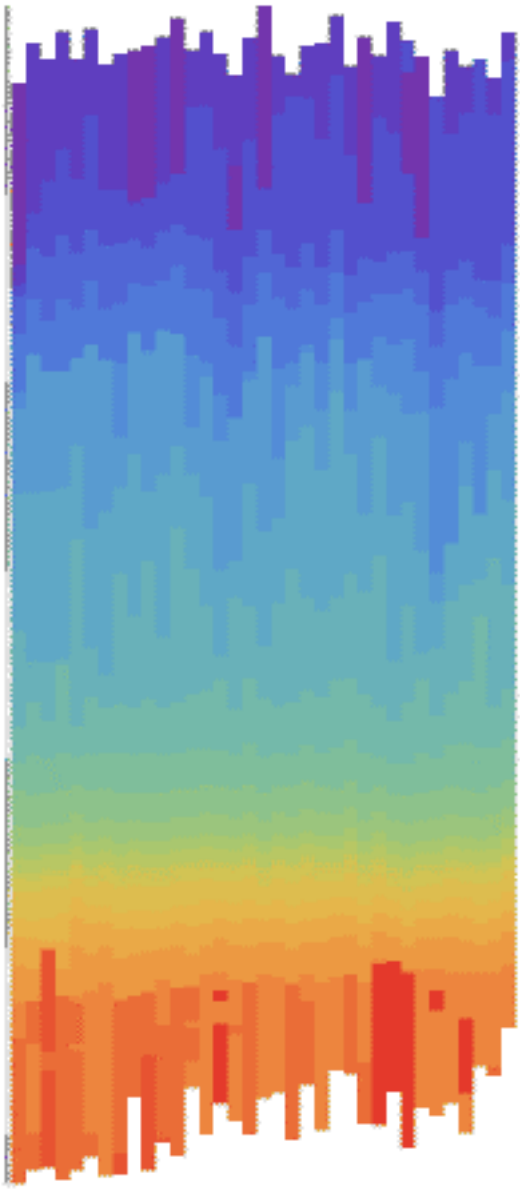
8 月 21 日



試行数:30

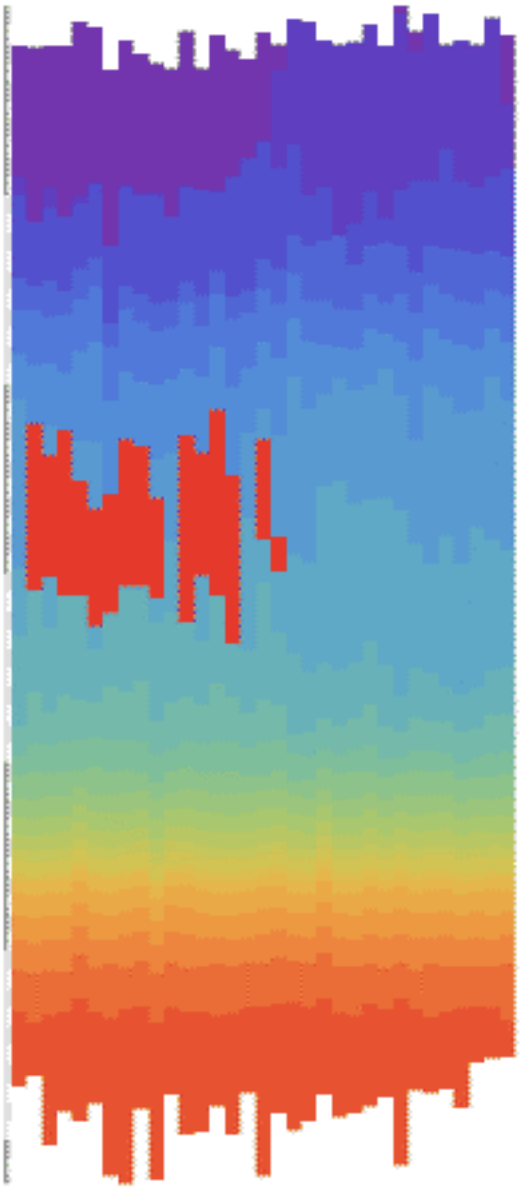
## クラスタ数 k = 25

10 月 2 日



試行数:35

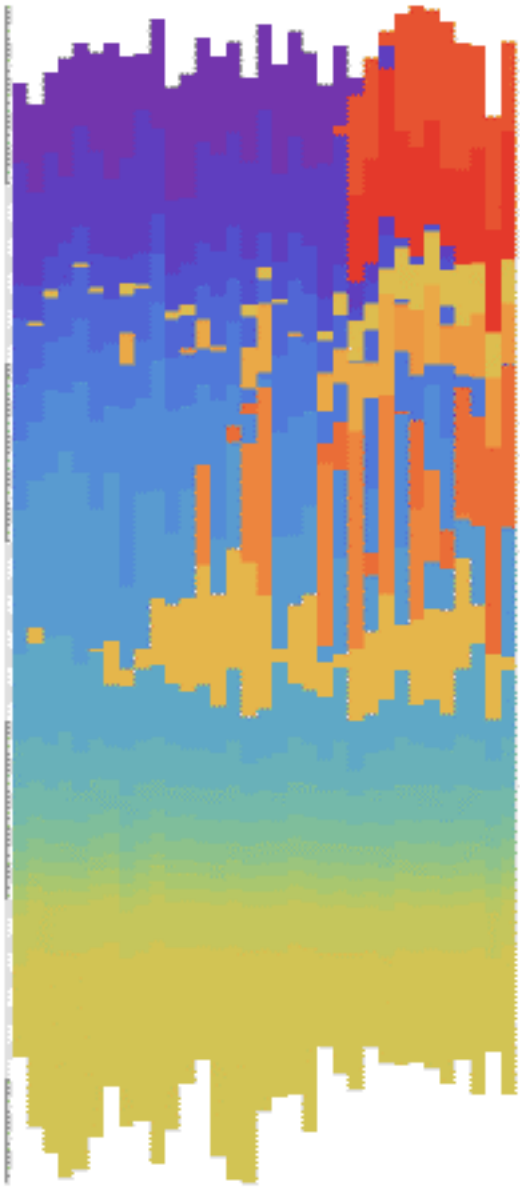
10 月 23 日



試行数:33

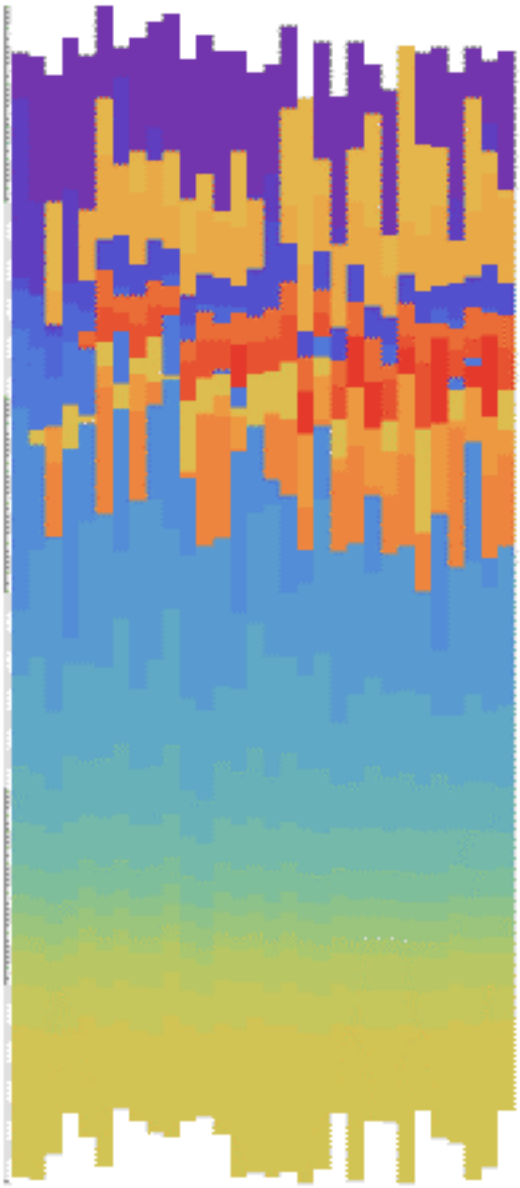
## クラスタ数 k = 25

11 月 6 日



試行数:33

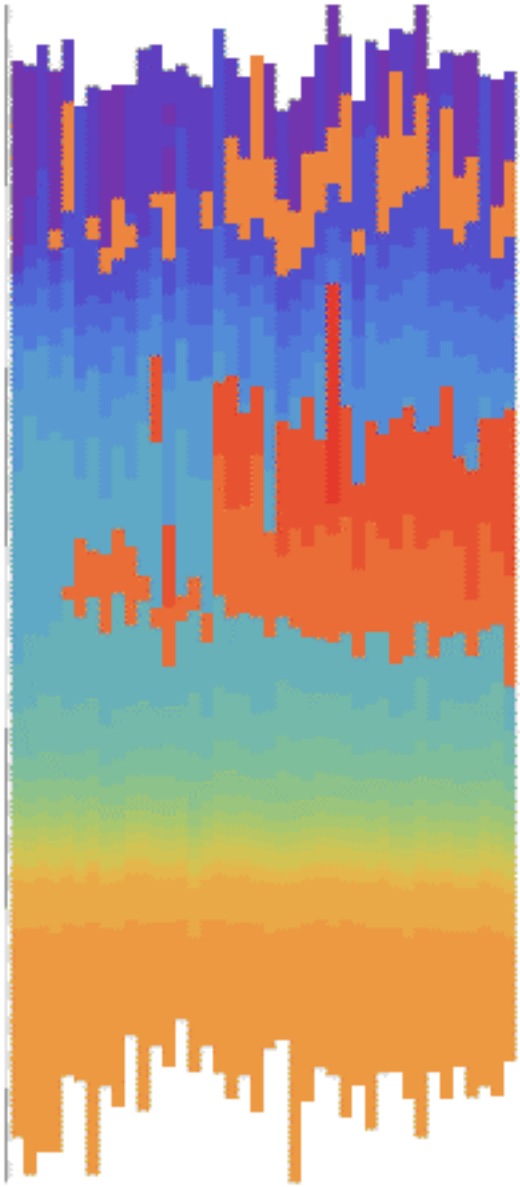
11 月 27 日



試行数:30

# クラスタ数 k = 25

12 月 18 日



試行数：40