

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

微小な図形を用いた単一地図画像による
時空間変量の可視化手法

兵吾 勇貴

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 三末 和男

2016年3月

概要

時空間変量データを微小な図形を用いて表現する可視化手法を開発した。時空間変量データとは、時刻・位置・値の属性を持つデータで、均一に区切られた地理空間上の位置が定時毎に値を持つようなデータである。本研究では、こうした時空間変量データを単一の地図上にプロットする可視化表現を開発した。開発した手法はデータが持つ位置の情報を離散化して捉える。そして、地図上の領域内に時刻と値の関係を微小な図形を用いて地図上にプロットする。これによって、時刻・位置・値の3つの属性を同時に閲覧することを可能にし、「動き」を読み解くことができる。例えば、降雨レーダの観測データを提案手法を用いて可視化すると、雨雲の動きが読み取り可能になる。この可視化手法の有用性を評価するため、既存の時空間変量の可視化手法と比較する被験者実験を行った。結果からは、提案手法が既存手法に比べて動きの読み取り時間を短くできることが確認された。また動きの種類によっては提案手法が適さない場合があることも確認された。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	時空間変量データ	1
1.2	時空間変量と動き	1
1.3	問題意識	2
1.4	目的とアプローチ	2
1.5	貢献	2
第2章	関連研究	4
2.1	時空間データの可視化	4
2.2	時空間変量データの可視化	5
2.3	アニメーションと Small multiples	5
2.4	視覚表現の設計	6
第3章	時空間変量と動き	7
3.1	時空間変量の定式化	7
3.2	時空間変量データの特徴	8
3.3	値分布の動き	8
3.4	動きの可視化表現	9
第4章	あまつぶ手法	13
4.1	基本的なアイデア	13
4.2	位置に基づくデータの集約	14
4.3	視覚変数への割当て	15
4.3.1	視覚変数への割当てに関する考察	15
第5章	被験者実験 1	17
5.1	実験の目的	17
5.2	実験対象手法の選定	17
5.2.1	対象手法の選定理由	17
5.3	実験手順	19
5.3.1	用意した時空間変量データ	19
5.3.2	被験者	19

5.3.3	実験環境	19
5.4	実験結果	20
5.4.1	回答の正誤	20
5.4.2	回答時間の結果	20
5.5	結果の考察	20
5.6	結論	21
第6章	被験者実験2	22
6.1	実験の目的	22
6.2	実験手順	22
6.2.1	用意した時空間変量データ	23
6.2.2	被験者	23
6.2.3	実験環境	23
6.3	実験結果	24
6.3.1	読み取り時間	24
6.3.2	質問紙への回答結果	24
	動きの軌跡の回答	25
	速さ・形状の変化に関する回答	25
6.3.3	事後アンケートの結果	25
6.4	結論	26
6.5	議論	28
第7章	まとめ	30
	謝辞	31
	参考文献	32
付録A	被験者実験1	34
A.1	用いた提案手法の画像	34
A.2	可視化表現の説明書	38
A.3	読み取り時間の分布	43
付録B	被験者実験2	44
B.1	用いた時空間変量データ	44
B.2	用いた可視化表現	46
B.3	被験者に提示した文書	46
B.4	実験結果	61
B.4.1	回答時間の分布	61
B.4.2	質問紙（動きの軌跡に関する質問）の回答結果	63

B.4.3	質問紙（速さ・形状に関する質問）の採点結果	83
-------	---------------------------------	----

目次

3.1	Small multiples を用いて時空間変量データを表現した様子	10
3.2	3 時間分の降雨量データを単一の地図上にプロットした様子	12
4.1	提案手法を用いて可視化した関東地方の 3 時間分の降雨記録の例	13
4.2	棒グラフを用いて領域内の時刻と値の関係を表現した例	16
5.1	被験者実験 1 にて用いたプログラムが動作する様子	19
A.1	被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 1)	34
A.2	被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 2)	35
A.3	被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 3)	36
A.4	被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 4)	37
A.5	被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 A)	38
A.6	被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 B)	39
A.7	被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 C)	40
A.8	被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 D)	41
A.9	被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 E)	42
A.10	被験者実験 1 の回答時間の記録 (箱ひげ図)	43
B.1	被験者実験 2 で用いた時空間変量データ (1~4)	44
B.2	被験者実験 2 で用いた時空間変量データ (5~10)	45
B.3	被験者実験 2 で提示した可視化表現 (データ 1~3)	46
B.4	被験者実験 2 で提示した可視化表現 (データ 4~6)	47
B.5	被験者実験 2 で提示した可視化表現 (データ 7~8)	48
B.6	被験者実験 2 で提示した可視化表現 (データ 9~10)	49
B.7	被験者実験 2 で用いた実験事前説明書	50
B.8	被験者実験 2 で用いた同意書	51
B.9	被験者実験 2 で用いた事前アンケート用紙	52
B.10	被験者実験 2 で用いた実施手順説明書	53
B.11	被験者実験 2 で用いた質問紙 (表)	54
B.12	被験者実験 2 で用いた質問紙 (裏)	55
B.13	被験者実験 2 で用いた動きの軌跡の回答指示書	56

B.14	被験者実験 2 で用いた視覚表現の説明書 (可視化手法 A, Small multiples)	57
B.15	被験者実験 2 で用いた視覚表現の説明書 (可視化手法 B, あまつぶ手法)	58
B.16	被験者実験 2 で用いた事後アンケート (表)	59
B.17	被験者実験 2 で用いた事後アンケート (裏)	60
B.18	被験者実験 2 の回答時間の記録 (手法毎の箱ひげ図)	61
B.19	被験者実験 2 の回答時間の記録 (手法・データセット毎の箱ひげ図)	62
B.20	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 1, Small multiples)	63
B.21	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 1, あまつぶ手法)	64
B.22	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 2, Small multiples)	65
B.23	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 2, あまつぶ手法)	66
B.24	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 3, Small multiples)	67
B.25	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 3, あまつぶ手法)	68
B.26	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 4, Small multiples)	69
B.27	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 4, あまつぶ手法)	70
B.28	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 5, Small multiples)	71
B.29	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 5, あまつぶ手法)	72
B.30	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 6, Small multiples)	73
B.31	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 6, あまつぶ手法)	74
B.32	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 7, Small multiples)	75
B.33	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 7, あまつぶ手法)	76
B.34	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 8, Small multiples)	77
B.35	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 8, あまつぶ手法)	78
B.36	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 9, Small multiples)	79
B.37	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 9, あまつぶ手法)	80
B.38	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 10, Small multiples)	81
B.39	被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 10, あまつぶ手法)	82

第1章 はじめに

1.1 時空間変量データ

衛星測位技術の発達や大規模なデータ処理が可能になったことで、膨大な量の時空間データが得られるようになった。時空間データとは、時刻・位置の情報を含んでいるデータの総称である。例えば GPS 端末で記録された人や物の位置履歴データ、特定の観測所やレーダで観測される気象データ、写真画像に付加されている Exif 情報など社会の広い場面で時空間データが記録・活用されている。これらの時空間データは時刻・位置に加えてどんなデータが付加されているかで分類することができる。位置履歴データであれば端末等の ID が、気象データであれば雨量などの観測値、写真や SNS への投稿であれば画像やテキストである。

時空間変量は時空間データのうち、均一に区切られた地理空間上の位置が定時毎に値を持つようなデータである。データレコードには時刻・位置・値が含まれている。例えば、レーダで観測された降雨のデータなどがこれにあたる。時空間変量が他の時空間データと異なる点は、時空間変量はある特定の地理空間上をデータが網羅している点である。例えば移動体のデータであれば、ある時刻において移動体が存在している地点の分布は疎な部分と密な部分を生み出す。これに対して時空間変量データは任意の時刻において対象とする地理空間上のエリアの全ての地点が値を持っている。

1.2 時空間変量と動き

情報可視化技術は、データを視覚的に表現することによって人間が理解しやすくするための手段である。データ内に記述された数値情報が読み取れることはもちろん、データレコード同士の関係性や属性間の相関などの高次の情報も可視化手法から読み取ることができる。

時空間変量の可視化においても、データそのものを理解するだけでなく高次の情報を読み取ることが可能である。時空間変量の可視化に最も一般的に利用されていると考えられるアニメーションは、時間経過と値の分布の関連性（動き）を読み取り可能にしている。例えば、降雨観測レーダの情報をアニメーションを使って可視化した場合、雨雲の動きを読み取ることができる。ここで読み取れる動きは、データ内に直接的に記載されているものではなく、可視化によって初めて読み取り可能になる高次の情報である。

動きの情報は、データが記録している時刻の次の瞬間にどのような事象が起きるのかを推測する上で重要な情報である。過去の値の分布の推移から、次の瞬間にどの地点でどれくらいの大きさの値が予想されるのかを推測可能にする。

1.3 問題意識

これまで、時空間変量の可視化には主にアニメーションと Small multiples[1] が用いられてきた。アニメーションは時空間変量データから動きの読み取りを可能にする一方で、印刷ができないことや、静止画像にくらべて読み誤りが多い [2] など幾つかの短所がある。また静止画像によって時空間変量を提示する Small multiples は、一般的に時間を離散的に捉えて表現するため、動きの読み取りが困難であると考えられる。本論文では、単に Small multiples と記す場合には、時間を離散的に捉えて表現する一般的な Small multiples を指すものとする。

1.4 目的とアプローチ

時空間変量データから、動きの情報を読み取ることが可能な静止画像による視覚表現を開発することを目的とする。動きの情報は、今後の動向を推測する上で重要な情報である。この情報を静止画像によって表現可能にすることで、短時間での情報の理解・情報共有の推進が見込まれる。アニメーションから情報を詳しく読み取るための繰り返しの再生操作を解消することで、情報の読み誤りを減らし、短時間での情報の理解を可能にできると考えられる。また静止画像にて情報が提示されることで、可視化表現の印刷が可能になったり、コメントの書き込みが可能になることでより一層の情報共有が図られることが期待される。

このためのアプローチとして、時空間変量データを単一の地図上にプロットする可視化表現—あまつぶ手法—を開発した。開発した手法はデータが持つ位置の情報を離散化して捉える。そして、地図上の領域内に時刻と値の関係を微小な図形を用いて地図上にプロットする。これによって、時刻・位置・値の3つの属性を同時に閲覧することを可能にし、「動き」を読み解くことができると考えられる。

提案手法は小さなチャートを並べる Small multiples の1種であると言える。時空間変量データの可視化に一般的に利用される Small multiples は、時刻を離散化し、時刻ごとに地図上へデータをプロットしたチャートを作成する。これに対してあまつぶ手法は、位置に基づく集約を行い、集約された領域ごとに時刻と値の関係を表現する。つまりはあまつぶ手法は空間を離散化する。空間を離散化することは単一の地図上にデータをプロットできるメリットがある。

提案手法の有用性を確認するために被験者実験を行う。これは既存の時刻を離散化する Small multiples と空間を離散化するあまつぶ手法を比較するものである。それぞれの手法で時空間変量データを表現し、読み取りにかかる時間および読み取れた内容を調査した。

1.5 貢献

本研究の貢献は以下のとおりである。

1. 静止画像上で時空間変量データの動きを提示できる可視化手法を開発したこと

2. 微小な図形のもつ視覚変数に対し、情報の読み取りが可能と考えられるものを整理し、時空間データの表現における利用例を示した。

第2章 関連研究

2.1 時空間データの可視化

時空間データの可視化手法についてはこれまで多く研究されてきた。地理情報の場合、緯度経度で記録されたデータであっても、地図を用いて視覚的に表現することによってデータの分布や相対的な位置関係を理解しやすくなる利点がある。そのため多くの時空間データの可視化表現では地図が主体的な役割を果たしている。その反面、時刻の表現については様々なバリエーションが存在している。Andrienko らは、これまでの時空間データの可視化手法について、大きく分けて「静止画像を用いたもの」、「アニメーション」、「インタラクティブな手法 (Space Time Cube や各種ツール)」などがあると述べている [3]。この分類においては、それぞれで時刻の表現が異なっている。

静止画像を用いた時空間データの可視化は、近年の計算機を用いた手法が提案される以前から存在する方法である。その例としてよく知られるものに Minard によるナポレオンの行軍の状況を可視化したものがある。行軍が進むに連れて兵士の数が徐々に減っていく様子が表現されている [4]。現代においてもよく用いられる可視化表現としては、Small multiples[1]がある。Small multiples は、一定の描画規則にしたがって作成された複数のチャートを、規則的に並べて表現する可視化表現である。時空間データに限らず多くのデータに対して利用される方法である。

アニメーションによる可視化手法は、計算機の性能向上やインターネットを通じた配布が容易になったことから、より一般的な手法となってきている [5]。この表現方法の多くはデータレコードの時刻の表現にアニメーションの時間経過を用いている。そのため時刻の経過や値等の変化といった情報を直感的にわかりやすく伝えることができる。時刻の経過に伴って、地図上のプロットが移動したり、データを表現したグラフが変化するなど様々なデータをアニメーションを使って表現することができる。このとき、どんな動的な視覚変数を用いることで可視化表現が有効に作用するのか、アニメーションを理解するプロセスとあわせて研究がすすめられている [6]。

静止画像とアニメーションに加えて、その他のインタラクティブな手法による可視化表現もまた多く提案されている。そのうちの一つである Space-time cube は、Hägerstrand によって原型が作られた [7]。3次元の立体によって情報を提示する手法で、2次元を使って地理空間上の位置を、それに垂直な軸を使って時刻を表現する。その立体空間内に引かれる線を用いて人やバスなどの移動を表現することができる [8]。立体空間にデータが表現されるため、何らかのユーザ操作によってデータを閲覧することになるが、それら操作に加えて様々なデー

タ操作を Space-time cube の表現を通して実現できる [9].

2.2 時空間変量データの可視化

時空間変量データは、ある時刻において地理空間上の対象エリア内の全ての地点が値を持っており、その点で他の時空間データと異なる。例えば人の移動データでは、ある時刻において人がいる位置は疎な部分と密な部分が混在している。これに対して時空間変量データでは、データレコードは地理空間上に均一に存在し、エリアをカバーしている。そのため、複数の時刻のデータを単一の地図上にプロットすると混色やプロットの重複などの視覚的混雑が生じ、情報をうまく読み取ることができない。

時空間変量データの可視化に用いられる表現手法は主にアニメーションと Small multiples が考えられる。よく見慣れた表現は、気象庁等の Web サイトでも見られるアニメーションである [10, 11]。気象の専門家向けの情報可視化ツールにおいても、アニメーションまたはタイムスライダ等の GUI を通じた情報提示手法が用いられることが多い [12]。時空間変量データを Small multiples を用いて表現する際には、時刻毎に地図とプロットからなるチャートを作成し、そのチャートを時系列順に並べる方法がよく用いられる。これは時刻を離散的に捉え、表現していると言える。本論文中では、単に Small multiples と記す場合には、上記の時刻を離散的に捉える Small multiples を指すものとする。

2.3 アニメーションと Small multiples

アニメーションを用いた可視化表現については、時空間データに限らず、教育や Scientific visualization の分野でその有用性や効果について議論がなされてきた。Tversky らは、機械動作のメカニズムの理解や気象データの表現などの目的にアニメーションを用いることは、至って自然な表現であり、情報をうまく伝達することができると述べている [13]。したがって時空間変量データの可視化にアニメーションが多く用いられるのは、情報の伝達能力が高いからである。

一方で Small multiples はアニメーションが多く用いられる以前から広く利用されてきた。Small multiples を時空間データに対して利用する場合には、データ内に含まれる時刻ごとに、その時刻のデータを示すチャートを作成し、それを時系列に並べる方法が使われる。この時、1つ1つのチャートは時空間変量データをアニメーションを用いて表現した時の1フレームと対応している。したがって、アニメーションと Small multiples は、チャート・フレームとそれぞれ見せ方は異なるものの、見せているものには変わりがない。ただアニメーションの場合にはフレームが次々と変わるため、データ全てを一度に閲覧できるわけではない。

アニメーションと Small multiples には関連性があり、その両者について比較・検討を行っている研究が存在する。Robertson らは、アニメーションを使って世界各国の経済情勢を表現した Trendalyzer という方法と、同じデータを Small multiples を用いて表現した2つの方法を比較した被験者実験を行っている [2]。彼らの研究からは、Trendalyzer はプレゼンテーションの

聴衆をひきつける魅力的な方法ではあるものの、情報の読み取り精度の点では Small multiples のような静止画像ベースの可視化表現の方がより好ましいと述べている。また Archambault らは、動的に変化するグラフネットワークをアニメーションと Small multiples を用いてそれぞれ表現し比較する研究を行っている [14]。時空間変量データに近いものでは、Griffin らが時空間変量データの値のクラスターの動きを読み取るには Small multiples とアニメーションのどちらを用いた方が効果的であるかを調査している [15]。結論として、アニメーションの方が値のクラスターが動いている様子を発見しやすいということがわかっている。

これらを勘案すると、データの詳細を詳しく読み解くためには静止画像ベースの Small multiples の方が使われるべきであり、動きの読み解きのためにはアニメーションの方が適していると考えられる。このこととは少し離れるが、Hoerber らは Small multiples をベースに、チャート同士の値の差分をピラミッド状に並べられたチャートを用いて効果的に表現する手法 GTdiff を開発している [16]。この手法はチャート同士の比較にかかる認知的負荷を軽減するものである。しかし、動きの読み取りのためにはチャートの値の比較ができるかどうかではなく、チャート内の特徴的な位置の変化が比較によって理解できるかが重要である。

2.4 視覚表現の設計

可視化とは、データのもつ値を図形の持つ視覚変数へ規則的に割当てることである。視覚変数とは、図形がもっている値を表現できる視覚的な属性のことである。Bertin は視覚変数として、位置・大きさ・色・濃淡・きめ・方向・形の7つを挙げている [17]。例えば散布図は、点がプロットされる位置を使って値の大きさを表している。またその点に色を割当てて別のデータ属性を表現するなど、複数の視覚変数を利用することもできる。ただし、これらの視覚変数の割当て方法によってデータの読み取り精度が異なる [18]。最も読み取り精度が高くデータを表現できるのは位置であることが知られている。また地図上における視覚変数の利用では、図形の大きさが最も精度が高いことも知られている [19]。

第3章 時空間変量と動き

時空間変量データを可視化することによって、高次元な情報である動きが読み取り可能になる。しかしながら、単にデータを可視化しただけでは動きは読み取れない。ここでは、まずはじめに時空間変量データの定式化を行い、動きとは何かおよびそれを可視化表現がどう表現すべきかについてまとめる。

3.1 時空間変量の定式化

ここで扱う時空間変量データとは、地理空間上の領域が、ある時刻に、ある値（非負実数値）を持つものとする。より具体的には、ある矩形領域 L が地理空間上に与えられ¹、経度方向に N_{lon} 個、緯度方向に N_{lat} 個に均等に直和分割されているとする。このとき、直和分割された各領域を $s_{x,y}$ で表し、分割された領域の全体集合を S で表す。すなわち、

$$S = \{s_{x,y} \mid 0 \leq x < N_{lon} \text{ かつ } 0 \leq y < N_{lat}, \text{ ただし } x, y \text{ は整数}\} \quad (3.1)$$

$$L = \bigcup_{s \in S} s = \bigcup_{x=0}^{N_{lon}-1} \bigcup_{y=0}^{N_{lat}-1} s_{x,y} \quad (3.2)$$

$$x \neq v \text{ または } y \neq w \text{ のとき } s_{x,y} \cap s_{v,w} = \emptyset \quad (3.3)$$

とする。

すべての領域 s はある時刻 t において値を持つ。この値を $u_t(s)$ で表す。先に述べた通り、 $u_t(s) \in R_{\geq 0}$ とする。ただし、 $R_{\geq 0}$ は非負の実数全体の集合とする。また値が存在する時刻 t からなる集合を時刻集合 T と呼ぶこととする。そしてこの時刻集合の要素数を N_t で表す。

領域 s の値の時系列を $u(s)$ で表す。すなわち、

$$u(s) = (u_0(s), u_1(s), \dots, u_{N_t-1}(s)) \quad (3.4)$$

とする。

¹地球上の領域であるため厳密には矩形ではないが、ここでは経緯度による直交座標上の矩形とみなす

3.2 時空間変量データの特徴

時空間変量データは、定時性と網羅性の2つの特徴を持ったデータだといえる。これらの特徴は可視化表現を設計するにあたり大きな意味をもっている。

定時性

時空間変量データは、任意の領域 $s \in S$ が値を持っている時刻 t_i, t_{i-1} は常に $t_{i-1} - t_i = \Delta t(\text{const.})$ を満たす。そしてある領域 s が時刻 t に値 $u_t(s)$ を持っているならば、別の領域 $s' \in S$ もまた時刻 t に対して値 $u_t(s')$ を持っている。これは位置履歴データ等の他の時空間データとは異なる特徴である。移動体の位置履歴データであれば、時刻集合に含まれる要素に規則性は求められない。

定時性は Small multiples の個々のチャートの作成や、アニメーションの各フレームの設計に影響する。それらは、多くの場合で時刻 t ごとに1つチャートやフレームを形成し、時刻要素の数 N_t 枚の表現を必要とする。もし、ある領域 $s' \in S$ のみが時刻 t に値 $u_t(s')$ を持たない場合には、近い時刻の情報をもってその領域の値とするなどの処理が必要となる。

網羅性

時空間変量データに含まれている領域は、データが対象とする地理空間 L を網羅し、領域 $s \in S$ は隣り合う領域と隙間も重畳もなく並んでいる。また時空間変量データには、時刻 t 、領域 $s_{x,y}$ に対する値 $u_t(s_{x,y})$ は1つだけである。言い換えれば、時刻と位置が定まれば値は1つしか取り得ない。

網羅性は、時空間変量データの表現に Space-time cube[7] が適さない理由である。もし仮に Space-time cube で用いられる表現空間² に値をプロットした場合、立体の中をプロットが密に埋めてしまい情報が読み取れない。

3.3 値分布の動き

時空間変量データを可視化し、時系列順にその表現を読むことによって動きが読み取り可能になる。動きの情報はデータ内に直接記述された情報ではなく、高次の情報である。そのため、可視化表現による読み取りもしくは動きの抽出を目的とした何らかのデータ処理が必要である。

動きの種類には、「値のピーク地点の移動」と「値の分布の形状変化・移動」の2つが考えられる。

値のピーク地点の移動

ある領域 $s \in S$ と、その周囲にある任意の領域 $s' \in S$ を考える。それらの領域が時刻 t

²可視化表現手法がデータのプロットのために用いる空間。Space-time cube は3次元の表現空間を用いる。

に持つ値 $u_t(s)$ と $u_t(s')$ について、領域 s' が s に近い範囲であれば常に $u_t(s) \geq u_t(s')$ を満たす領域 s が存在することがある。この極大値をとる地点を値のピーク地点と呼ぶこととする。

値のピーク地点は、時空間変量データを理解する上で目印となる情報である。例えば気象レーダのデータであれば、値のピーク地点は雨雲の中心と言える。気象レーダのデータを読み取った結果を他人に伝えるときには、雨雲の中心がどう移動していったかを伝えることで他人にデータを理解してもらえらるであろう。

値のピーク地点の移動にも様々なパターンが考えられる。移動の速さは一定なのか、加減速があるのか。また直線的に移動したのか、蛇行していたのかなど様々である。

値の分布の形状変化・移動

ある領域 $s \in S$ と、その領域に隣接する任意の領域 $s' \in S$ を考える。それらの領域が時刻 t に持つ値 $u_t(s)$ と $u_t(s')$ について、 $|u_t(s) - u_t(s')| \leq \varepsilon$ を満たす領域 s と s' の組み合わせが存在する。ここで ε はしきい値である。このとき、領域 s と条件を満たす全ての s' を足し合わせた領域をクラスタと呼ぶこととする。気象レーダのデータであれば、それぞれのクラスタが雨雲を表現していると言える。

クラスタの形状変化や移動は、それを一意に記述することはできない。可視化手法の読み手によって様々に解釈される。

このクラスタも時刻の経過に伴って、その形が変化したり移動したりする。形の変化には、大きさの変化・分離と合流などが考えられる。

動きは近い将来の値の分布を知るための重要な判断材料となる。値のピーク地点が西へゆっくりと移動していることが読み取れた場合には、その次の時刻にはピーク地点がさらに西へ移動することが分かる。

3.4 動きの可視化表現

時空間変量データから動きの情報を得るためには可視化表現が有効である。しかしながら、単にデータを可視化しただけでは動きは読み取れない。

Small multiples を用いた時空間変量の可視化は、読み手の認知的負荷が高く、動きの読み取りに適さないと考えられる。実例として、図 3.1 に時空間変量データを Small multiples をもちいて表現した図を示す。図は左上から右下に向かって時刻の経過を横並びの順に表現している。もとの時空間変量データでは、西から東へ向かって北・南へ蛇行しながら雨雲が移動している。Small multiples から動きを読み取るためには、チャートから特徴的な地点の発見、次の時刻のチャートから特徴的な地点の発見、その両者の位置関係の把握の3つのことを順に繰り返していかなければならない。これには、1つのチャートを見た時に瞬時に特徴を把握する能力、異なるチャートから対応する特徴点を選択する能力、特徴点同士の違いを考える

能力，さらにはそれらを記憶しながら逐次チャートを読み取る能力が必要となる．これらはチャートが増えるほど認知的負荷が高まることが容易に想像できる．

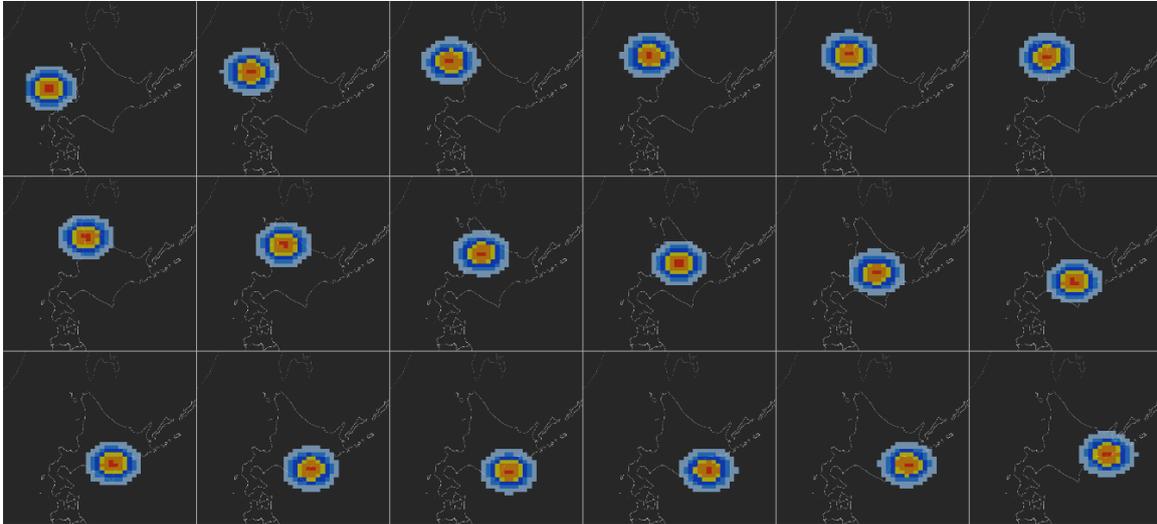


図 3.1: Small multiples を用いて時空間変量データを表現した様子

一方でアニメーションは動きの読み取りに適した表現手法と考えられる．一般的なアニメーションによる表現手法では，Small multiples のチャート 1 つ 1 つがアニメーション 1 フレームになっている．フレーム内の地図は位置を揃えて描画され，時刻ごとのデータが逐次同一の地図上にプロットされていく．これによって，Small multiples で必要であった特徴的な地点の位置関係の把握が容易になる．

しかしながらアニメーションにおいても動きの読み取りに関する短所が存在する．アニメーションは次々とフレームが切り替わり，注意が向いている箇所以外の枝葉の情報を詳細に知るためには再び動画の再生が必要になることもあり，結果として静止画像を用いて情報を提示した場合の方が情報を正確に読み取れる場合がある [2]．詳細に情報を読み取るためには，静止画像を利用したほうが枝葉の情報まで読み取ることが可能になる．

これらを踏まえ，以下の要件を満たす可視化手法によって動きの読み取りがより一層効果的に行えるのではないかと考えた．

要件 1：単一の地図上にデータがプロットされていること

Small multiples による表現で動きの読み取りが困難になる原因に，チャート同士を見比べる時の認知的負荷が高いことが挙げられる．その為，単一の地図を利用して特徴的な位置の比較が不要になるように配慮すべきである．ただしこれと同時に時刻の違いが読み取れる必要がある．図 3.2 に単一の地図上に 3 時間分の降雨データをプロットした様子を示す．降雨量を気象庁 HP で用いられている色 [20] を用いて表現し，地図上にプロットした．時空間変量データがもつ網羅性の特徴は，単一地図上にデータをプロットすることを困難にする．

要件2：静止画像による表現手法であること

静止画像を用いることによって、アニメーションで生じる枝葉の部分の見逃しが解消されうる。アニメーションの再生を繰り返すのではなく、静止画像上で視線を移すだけで動きの全てを読み取れるならばより素早く、より正確に情報を読み取り可能になる。また静止画像は、印刷が可能になる利点や、コメントの書き込みが可能になるなど、情報共有をよりスムーズに行うことが可能になる。さらに動画の再生・停止操作が許されない公共空間においても詳細な情報を提示しうる。

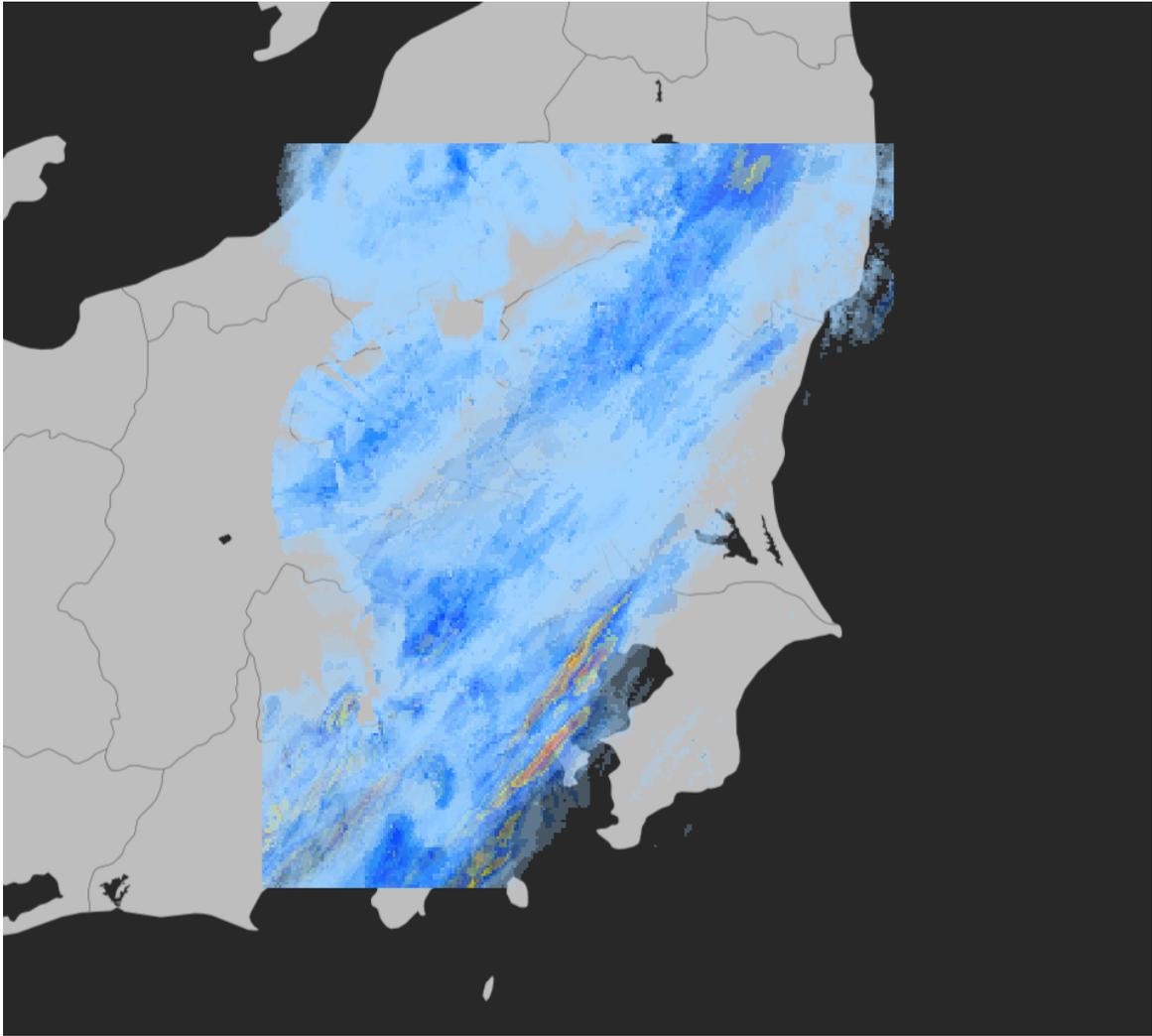


図 3.2: 3 時間分の降雨量データを単一の地図上にプロットした様子

第4章 あまつぶ手法

時空間変量を単一の地図の静止画像で表現する可視化手法—あまつぶ手法—を開発した。ここではその可視化手法の作成手順について述べる。

4.1 基本的なアイデア

あまつぶ手法はデータレコードを微小な図形を用いてプロットすることによって、時空間変量データを表現する手法である。手法によって作成された可視化表現の例を図4.1に示す。

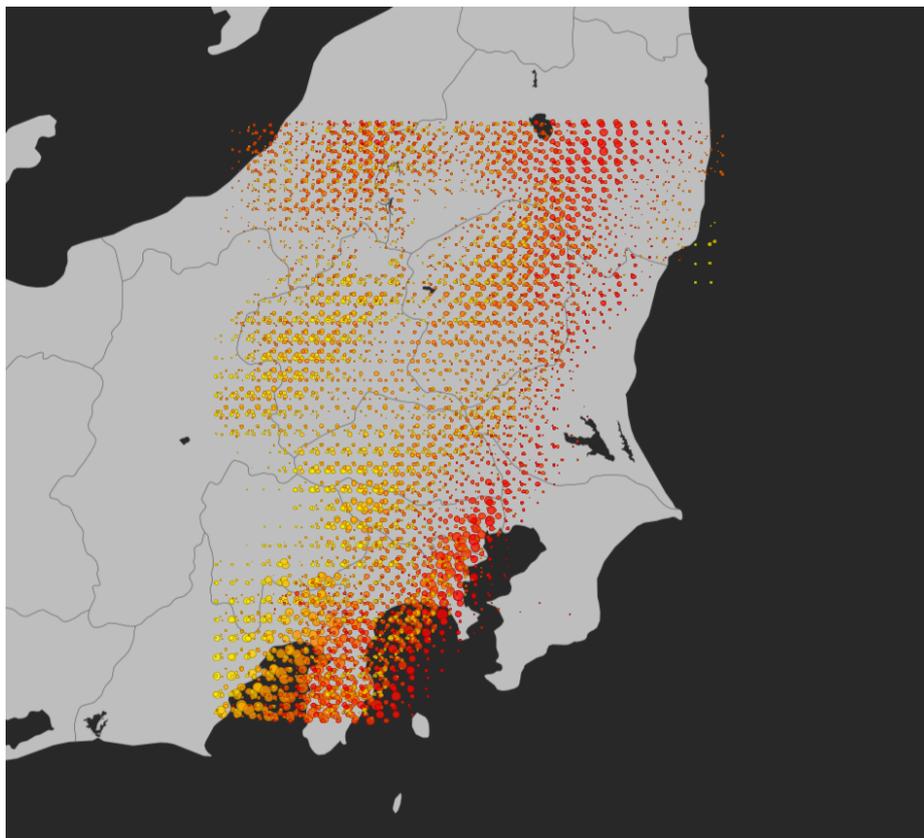


図 4.1: 提案手法を用いて可視化した関東地方の3時間分の降雨記録の例

手法はデータ処理フェーズと視覚変数への割当てフェーズの2つの段階から構成される。

データ処理のフェーズでは、位置情報に基づくデータの集約を行う。集約によってデータレコードを描画するための表現上の空間を確保し、集約された領域ごとに次の段階の視覚変数への割当てを行う。視覚変数への割当て段階では、集約された領域ごとに時刻と値の関係を表すチャートを作成し、そのチャートを地図上に配置する。チャート内には、微小な図形が時刻集合の要素数 N_t 個プロットされる。プロットの際には、データの時刻属性を微小な図形の色（色相や明度）で、値の属性を図形の大きさを用いて割当てる。データ属性の位置は、チャートが配置される地図上の位置で表現する。これ以降論文中で、単に微小な図形と記す場合にはチャート内の個々の図形を指す。

提案手法は Small multiples の 1 種であると言える。時空間変数データの可視化に一般的に利用される Small multiples は、時刻を離散化し、時刻ごとに地図上へデータをプロットしたチャートを作成する。これに対してあまつぼ手法は、位置に基づく集約を行い、集約された領域ごとに時刻と値の関係を表現する。集約された領域ごとに描かれているチャートは時刻と値の関係を表し、そのチャートが規則的に（地図上の位置にしたがって）配置されている。既存の Small multiples と異なる点は、提案手法は空間を離散化している点である。空間を離散化することは単一の地図上にデータをプロットできるメリットがある。

半面、位置に基づく集約を行うため、空間の解像度は粗くなる。この点に関しては、集約の度合いがあまりにも大きくなならない範囲であれば、あまり大きな問題にはならないと考えている。集約の度合いの上限としては、空間を 32 分割する程度までであれば、集約をしても問題にならないと考えている。Tobler's first law of geography によると、時空間データにおいては距離が近いもの同士は似た傾向を示すとされている [21]。その為、ある程度似た傾向を持つデータ同士を集約することは差し当たって動きの読み取りには問題が無いと思われる。

4.2 位置に基づくデータの集約

まずはじめに位置に基づくデータの集約を行う。元となる矩形領域 L は経度および緯度方向それぞれに N_{lon} および N_{lat} 分割されている。その分割された領域の隣り合うもの同士を、経度方向に i 個、緯度方向に j 個ずつ集約する。

集約した領域を $A_{p,q}$ で表す。すなわち、 $A_{p,q} \subseteq S$ であり、

$$A_{p,q} = \{s_{x,y} \in S \mid pi \leq x < (p+1)i \text{ かつ } qj \leq y < (q+1)j\} \quad (4.1)$$

とする。

集約した領域 $A \subseteq S$ の時刻 t における値は、そこに含まれる領域の値の相加平均値とし、 $u_t(A)$ で表す。すなわち、

$$u_t(A) = \frac{1}{|A|} \sum_{s \in A} u_t(s) \quad (4.2)$$

とする。

集約した領域 A の値の時系列を $u(A)$ で表す。すなわち、

$$u(A) = (u_0(A), u_1(A), \dots, u_{N_t-1}(A)) \quad (4.3)$$

とする。

4.3 視覚変数への割当て

集約された時空間変量データについて、領域 $A_{p,q}$ ごとに、データ $u(A)$ を微小な円を用いてチャートにしていく。円を用いてデータを表現するのは、円が最もシンプルな形状であり、図形の傾きや角の数といった他に値を示しうるような属性を持っていないからである。このチャートを用いて、領域 $A_{p,q}$ における時刻 t ・値 $u_t(A)$ の関係を視覚的に表現する。1つの円が表す情報は値 $u_t(A)$ と時刻 t の情報である。その為、1つのチャート内に円は N_t 個配置される。時刻 t は円の色（色相や明度）を、値 $u_t(A)$ は円の面積に割当てる。

4.3.1 視覚変数への割当てに関する考察

視覚変数へのデータ属性の割当てには様々なパターンが考えられる。ここではその割り当ての際に検討した項目について述べる。

可視化手法の設計にあたっては Bertin の示す視覚変数 [17] を参考とした。Bertin は位置・大きさ・色・濃淡・きめ・方向・形の7つを視覚変数として列挙している。どの視覚変数を用いるかによって、可視化手法の値（位置・時刻・値）の読み取り精度が異なることが知られており、散布図のように図形の位置を用いた表現がもっとも値を精度良く提示できると言われている [18]。しかしながら地図上へプロットされる円はとて小くなる。値の表現に位置を用いても読み取ることが難しい。例として、時刻の表現に位置を用いた絵を図 4.2 に示す。図は領域内に棒グラフを描画し、X 軸方向の位置を使って時刻を表現している。また棒の長さを使って値を表現している。図では領域が縦横に繰り返しているため、原点がわからず、時刻を読み取れない問題がある。

残りの視覚変数のうち、濃淡・きめ・方向・形は、小さな図形からは値の読み取りが難しいことと、背景地図との混同が生じるおそれがあるために利用に適さない。よって利用できる視覚変数は色・大きさである。そこで時空間変量の値の表現に大きさ（面積）を用いることとした。もし円以外の図形を用いて（例えば線）データをプロットした場合には角度も利用できる。

時刻の表現には色を用いることとしたが、色の割当て方法は無限に考えることができる。提案手法では色相もしくは明度、どちらかを用いることとした。彩度は背景地図との区別が難しくなると考え、候補から除外した。色相・明度を用いるのは、時刻の順序（古い・新しい）を表現することが可能になると考えたためである。動きを読み取るためには、正確な時刻を知って値のピーク地点の移動を知ることよりも、時系列順にデータレコードを目で追えるかどうかの方が重要である。時刻が色で表現されている場合、時刻の経過が色のグラデーションを作り出し、自然に時刻の順序を考えることが可能であると考えた。

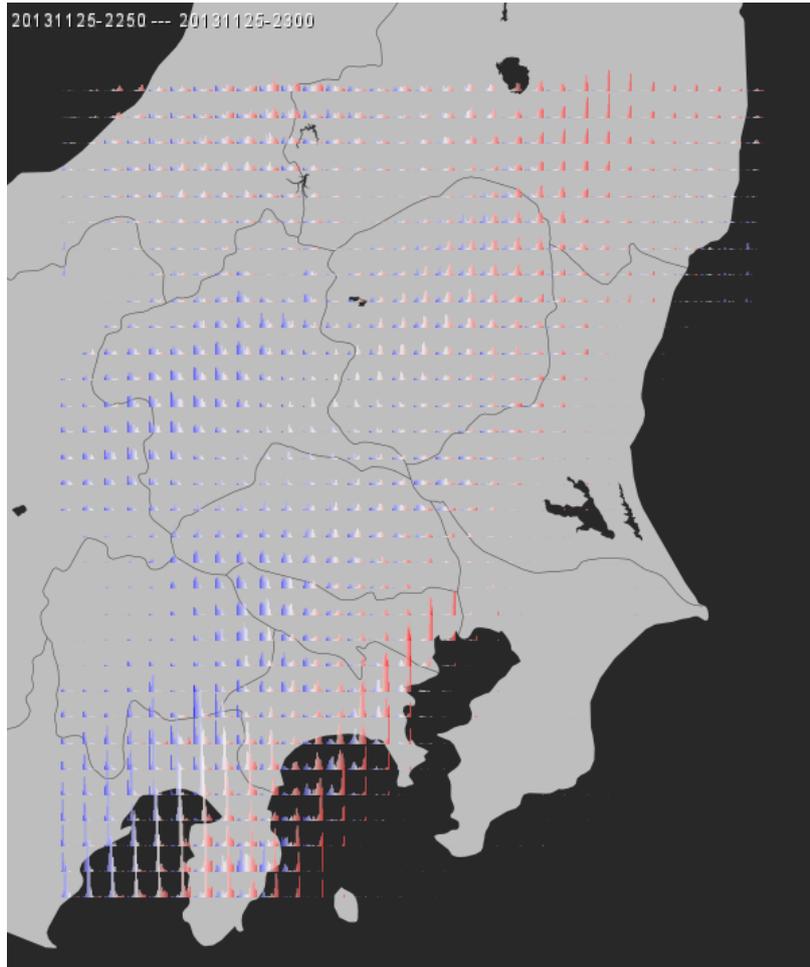


図 4.2: 棒グラフを用いて領域内の時刻と値の関係を表現した例. 位置と同時に色相を用いて時刻を表現している (青: 古い, 赤: 新しい). 棒の高さが雨量を表現する.

第5章 被験者実験1

提案手法からは視覚変数への割り当て方法にいくつかのバリエーションが考えられる。そこで、もっともよい割り当て方法について調査を行うために被験者実験を行うこととした。

5.1 実験の目的

この被験者実験の目的は、提案手法から考えられるバリエーションについて、どういったものを選ぶと最も効果的に（読み取り時間が短く）情報を提示できるかを調べることである。提案手法自体が既存手法に対して優越性をもっているかどうかについては、この被験者実験から得られた最善の割り当てと既存手法を比べる実験（被験者実験2）を通して調査する。

5.2 実験対象手法の選定

提案手法の定義から考えられる無数のバリエーションのうち、5つをピックアップした。表5.1に示すものがそのバリエーションである。時空間変量データの位置はすべての手法で地図上の位置で表現する。

5.2.1 対象手法の選定理由

A～Eの提案手法を選定したのは以下の3つの項目について調査を行いたかったためである。

ア. 時刻の表現に色を用いることで、動きの読み取りが可能になるか

時空間変量データの動きを静止画像上で表現するため、あまつふ表現は時刻を色で表現する工夫をしている。その工夫が実際に効果のあるものなのかを調査する。Bertinの7つの視覚変数のうち、微小な図形上で時刻を表現するためには「大きさ・色（もしくは濃淡）・角度」の3つが適当だと考えられる（位置はデータの位置属性の割り当てに使うのが好ましい・きめと形は微小な図形では読み取れない）。これらは、手法A・BとCEを比べることによって確認が可能になる。

イ. 色相と明度のどちらを用いるほうが良いか

ア.の結果から時刻の表現にグラデーションを用いたほうがよい結果が得られると期待している。配色には様々な方法が考えられるが、もっともシンプルには色相・明度・彩

表 5.1: 被験者実験 1 の調査対象手法

手法	時刻の表現	値の表現
A 時刻を傾きに割当て	線分の角度	色 (気象庁配色)
B 時刻を面積に割当て	円の面積 (0~100px ²) (地図縮尺によって変動)	色 (気象庁配色)
C HSV 色相 (0~60 度)	色相 (HSV 色空間) Hue:0~60 S, V : 360 (一定)	円の面積
D L*a*b*色相 (0~270 度)	色相 (L*a*b*色空間) L* : 75 (一定) r : 60, theta : 0~270 a* : $r \times \cos(\theta)$ b* : $r \times \sin(\theta)$	円の面積
E L*a*b*明度 (0~100)	明度 (L*a*b*色空間) L* : 0~100 r : 50/ theta : 270	円の面積

度のいずれかを変化させる方法が考えられる。地図上に配置された図形上で利用することが考えると、彩度が高い色のほうが、背景地図と分けて閲覧できると考えている。その為、色相・明度のどちらを利用したほうがよいのかを、C・D と E を比較することによって確認する。

ウ. 色相はどれくらいの範囲を用いるのが適当か

色を用いることによって、丁度可知差異が大きくなることが知られている。丁度可知差異を大きく取ることによって、ことなる時刻の値のクラス同士を区別可能になる。これによってクラスターの形の違いを読み取ることが容易になると考えられる。しかし時系列順にデータレコードを目で追っていくことができなくなると考えられる。C と D を比較することによって、色相を変化させる幅をどのようにしたら良いのかを検討する。グレースケールよりも色相を用いてデータを提示する方が、提示している値の違いをより敏感に読み取れることが知られている [22]。そして、色空間の中で十分に距離の離れた色を用いることで、それらは明確に区別可能になる。値の違いを敏感に読み取れることができるならば、異なる時刻の値のデータ同士を区別しやすくなる。しかし時系列順にデータレコードを目で追っていくことができなくなると考えられる。C と D を比較することによって、色相を変化させる幅をどのようにしたら良いのかを検討する。

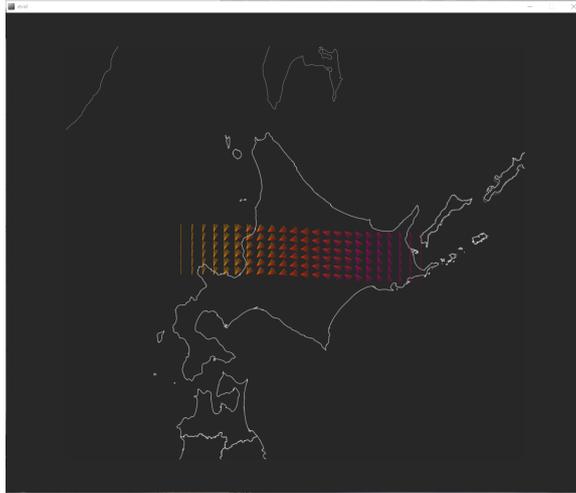


図 5.1: 被験者実験 1 にて用いたプログラムが動作する様子

5.3 実験手順

被験者に対して雨雲の動きを模したデータを可視化した絵を 1 つ提示し、絵を読み取ってもらい、雨雲が上下左右のどちらに移動していったかを答えてもらう実験を行った。1 つの可視化手法あたり 4 回これを繰り返し、5 つの可視化手法すべてでこれを行ってもらった。

この被験者実験を通して、回答までにかかった時間と回答の正誤を記録した。

5.3.1 用意した時空間変量データ

用意したデータは、雨雲が上・下・左・右のどれかに直線的に移動する 4 種類のデータである。1 つの可視化手法の調査にあたり、4 つすべてを 1 回ずつ提示し、提示の順序はランダムとした。また可視化手法の調査順序は被験者それぞれで異なるようにした。

5.3.2 被験者

3 名の被験者に実験に協力してもらった。全員が情報可視化技術について詳しい知識を持ち合わせている。性別は男性 2 名、女性 1 名であった。

5.3.3 実験環境

絵を表示させるプログラム (Processing, 図 5.1) を用い、キーボードの矢印キーを用いた実験を行った。ディスプレイには EIZO 製の色が正確に出力されるディスプレイ (ColorEdge CG277 27 インチ) を用いた。

5.4 実験結果

5.4.1 回答の正誤

被験者 1 名が可視化表現 A において 1 つの誤答があったのみで、他は全て正答であった。

5.4.2 回答時間の結果

回答時間の記録は表 5.2 のとおりである。また回答時間の分布を箱ひげ図にしたものを図 A.10 に示す。

表 5.2: 被験者実験 1 の回答時間の記録

可視化手法	A	B	C	D	E
平均回答時間 [ms]	2327.92	868.75	774.75	829.42	991.17
回答時間標準偏差 [ms]	833.39	254.99	332.37	257.99	568.02

5.5 結果の考察

結果からは可視化手法 A がもっとも回答に時間がかかることが確認された。以下 5.2.1 節に述べた調査項目それぞれに付いて考察を加える。

ア. 時刻の表現に色を用いることで、動きの読み取りが可能になるか

可視化手法 A・B と C~E を比較すると、おおむね C~E のほうは回答時間が短い傾向にあることがわかった（可視化手法 E の回答時間の平均値は可視化手法 B より長い、E でも最も大きな回答時間を外れ値と考えるとこれが言える）。可視化手法 A は回答時間の平均値がもっとも大きい結果となった。また唯一となる誤答も可視化手法 A に対してであった。被験者の一人は、可視化手法 A では角度を読み取る基準がないため情報が読み取れなかったと答えた。A にはさらなる改善の余地がある。可視化手法 B については、A より短い時間での情報の読み取りが可能である。被験者の一人からは、色が先に目に入ってきて他の可視化手法と混同したという意見があった。そのため、今回の実験では可視化手法 B を正しく評価できていない可能性がある。

イ. 色相と明度のどちらを用いるほうが良いか

可視化手法 C・D と E の比較であるが、回答時間の比較には有意差はなかった。（C-E と D-E 間でそれぞれ t 検定を行ったところ、p 値は 0.29 と 0.4031 であった）

ウ. 色相はどれくらいの範囲を用いるのが適当か

可視化手法 C-D 間で、回答時間に差はなかった（t 検定の結果、p 値は 0.671）。

5.6 結論

結論として、選択した可視化手法の中から最もよい可視化手法を決定することはできず、時刻の表現には図形の大きさ・色相・明度のどれかを用いると良いことまでが確認された。有意な差ではないものの、回答時間の最も短かった手法Cを提案手法の代表として、既存手法との比較を行う被験者実験を行うこととした。

第6章 被験者実験2

提案手法が既存手法に対してどれほどの有用であるかを評価するための被験者実験を行った。

6.1 実験の目的

この被験者実験は、提案手法が既存手法よりも動きの読み取りがしやすくなったかを評価するために行う。比較対象となる既存手法は Small multiples である。もう一つの既存手法であるアニメーションについては、提案手法が静止画像を用いるという点で優位性を持っていると考えられる。

今回の被験者実験では、読み取りにかかった時間と読み取れた内容を主に調査した。この2点から Small multiples に対して提案手法が動きの読み取りがおこないやすくなったのかを調べる。

6.2 実験手順

被験者に対して雨雲の動きを模したデータを可視化した絵を提示し、読み取れた内容を質問紙へ回答してもらう実験を行った。被験者実験を通して、可視化表現の読み取りにかかる時間と質問紙への回答内容について調査を行う。

被験者に対して、可視化表現から以下の項目を読み取るよう指示をした。

- 雨雲が動いた軌跡（動いた方向・離合の有無・雨雲の数）
- 動きの速度の変化（複数の雨雲が確認できた時にはそれらの速度の比較）
- 雨雲の大きさの変化（複数の雨雲が確認できた時にはそれらの大きさの比較）

実際に利用した質問紙を付録に示す。可視化表現から上記項目を読み取れたときには、その旨をキーボードの Enter キーを使って答え、それから質問紙へ実際に読み取れた内容を書き込んでもらった。可視化表現を読み取る最中には、書き込みに要する時間には個人差が大きいと考え、質問紙への書き込みを禁じた。また可視化表現の定時は1回のタスクにつき1度だけとした。

一人の被験者あたり、Small multiples を用いた視覚表現5つとあまつぶ手法を用いた視覚表現5つの合計10回のタスクを実施した。実験はカウンターバランスをとるために、被験者に

ごとにどちらの手法を先に行うのかを変えた。またそれぞれの手法でのタスクを開始する前に、練習タスクを行って各種法への理解を深めてもらった。

実験に先立ち、被験者には性別・年齢・専攻領域・色覚についての調査を行った。また実験後には、可視化手法への理解度とタスクの実施しやすさについて聞くアンケートを行った。

6.2.1 用意した時空間変量データ

2つの手法それぞれで動きの種類に対する読み取りの精度や速度を調べるため、10種類の時空間変量データを用意した。用意したデータは以下の表 6.1 のとおりである。

表 6.1: 被験者実験 2 に用いた時空間変量データ

No.	略称	解説
1	Line	西から東へ向かって直線状に雨雲が移動するもの
2	Curve	南西から北東へ向かって北西向きに弧を描きながら動くもの
3	Split	南から北へ向かって進みながら Y 字に雨雲が分離するもの
4	Merge	人の字型を描きながら雨雲が合流するもの
5	Cross	十字型に雨雲が交差するもの
6	Meander	正弦波状に雨雲のが西から東へ動くもの
7	Parallel	2つの雨雲のが並行して西から東へ動くもの
8	Chase	小さな雨雲が大きな雨雲を追いかけるもの
9	Expand	直線状に動きながら形が大きくなっていくもの
10	Reduction	直線状に動きながら形が小さくなっていくもの

データは地理空間を緯度経度方向それぞれに 32 分割したデータで、それぞれの詳細は付録 B.1 に示した。あまつづ手法の場合には可視化手法の作成の際、4.2 節の手順を省略した。

6.2.2 被験者

20名の被験者に実験に協力してもらった。被験者の構成については以下の表 6.2 のとおりである。

6.2.3 実験環境

絵を表示させるプログラム (Processing) を用いて実験を行った。可視化表現から情報の読み取りが完了した場合には Enter キーを押してもらい、提示開始からの経過時間 [ms] を計測した。ディスプレイには EIZO 製の色が正確に出力されるディスプレイ (ColorEdge CG277 27 インチ) を用いた。

表 6.2: 被験者実験 2 の被験者の構成

性別	男性	14	名
	女性	6	名
年齢	最小値	21	歳
	最大値	25	歳
	平均年齢	23.7	歳
	中央値	24	歳
専攻	情報科学系	12	名
	その他理工学系	6	名
	文系	2	名
色覚	正常色覚	19	名
	1型色覚	1	名

6.3 実験結果

被験者実験の結果得られた読み取り時間、質問紙への回答、アンケート結果をまとめる。

6.3.1 読み取り時間

読み取りに要した時間は以下の表 6.3 のとおりである。また回答時間の分布を手法毎に箱ひげ図にしたものを図 B.18 に示す。手法毎・データセット毎に箱ひげ図にしたものを図 B.19 に示す。

表 6.3: 被験者実験 2 の回答時間の記録

可視化手法	Small multiples	あまつぶ手法
平均回答時間 [ms]	23607.71	13819.91
回答時間標準偏差 [ms]	19570.66	12792.48

6.3.2 質問紙への回答結果

質問項目では動きの軌跡を地図上に描いてもらうことと、速さ・形状の変化に関する質問に答えてもらった。それぞれについて結果を記す。

動きの軌跡の回答

動きの軌跡の回答結果を付録に示す。

回答結果からは、それぞれの手法で特有の答え方の癖が読み取れた。まず提案手法では、ある領域が2つの時刻に値のピークを迎えるデータの読み取りが難しいことが分かった。該当するデータセットは、小さな雨雲が大きな雨雲を追いかけるデータ（8-Chase）である。一度大きな雨雲が通った後を、再び小さな雨雲が通る。あまつぶ手法を用いてこのデータを閲覧した被験者10名のうち、7名が雨雲が2つ存在することに気が付かなかった。その他のデータセットについては、雨雲が進んだ距離や方角、他の雨雲との位置関係はほぼ正確に読み取れていた。

Small multiples からは、雨雲を示す矢印が右上方向に伸びた回答が目立った。2つの雨雲が東西・南北方向に垂直に交差するデータセット（5-Cross）では、Small multiples を使ってこのデータを閲覧した被験者10名のうち、8名が右上方向へ歪んだ線を描いており、2つの雨雲が垂直に交差していることに気がついたのは2名だけであった。

速さ・形状の変化に関する回答

速さ・形状の変化に関する質問への回答は正答を表6.4の通り定義し、データセット・可視化手法毎に表6.5の該当する誤りの項目の数を数えた。結果を表B.1にまとめる。

採点の結果からは、小さな雨雲が大きな雨雲を追いかけるデータセット（8-chase）をあまつぶ手法を使って表現した際に、誤答が目立ち、雨雲の個数を読み取れていないことがわかった。ついで誤答が目立ったのは雨雲が分離するデータセット（3-Split）をSmall multiples で表現したときである。用意したデータセットでは、分離後の雨雲の速度に差がある（北西に向かう雲のほうが北東へ向かう雲より速く移動する）。Small multiples では、北東へ向かう雲が静止している用に読み取る被験者や、差が無いと答える被験者が多くいた。

6.3.3 事後アンケートの結果

事後アンケートの結果を表に示す。表6.6は、それぞれの可視化手法（AT：あまつぶ手法、SM：Small multiples）についてその描画規則は理解しやすかったか（1：理解できなかった～5：理解できた）、この表現手法はタスクの実施を行いやすかったか（1：タスクの実施が困難だった～5：タスクの実施が簡単であった）をそれぞれ5段階のリッカート尺度で調査した。表内の数字は該当箇所にマークした人数を示している。未回答の者もあった。表6.7は、2つの可視化手法を比較して、描画規則が理解しやすかった方、タスクが実施しやすかった方を答えてもらった。こちらも判断しかねて未回答の者もあった。

表 6.4: 被験者実験 2 で用いたデータの模範回答一覧

データセット	正答
1-Line	速さは単体で見ると加減速なし 大きさは単体で見ると変化なし
2-Curve	速さは単体で見ると加減速なし 大きさは単体で見ると変化なし
3-Split	速さは単体で見ると加減速なし 速さは (分離前) \leq (分離後右) $<$ (分離後左) 大きさは単体で見ると変化なし 大きさはを比べると変化なし
4-Merge	速さは単体で見ると加減速なし 速さは全て同じ (合流前 2 つ, 合流後 1 つ) 大きさは単体で見ると変化なし 大きさは (合流前右) $<$ (合流前左) \leq (合流後)
5-Cross	速さは単体で見ると変化なし 速さを比べるとほぼ変化なし or 水平方向の方が速い 大きさは単体で見ると変化なし 大きさを比べると変化なし
6-Meander	速さの変化なし (or 減速・加速・減速の繰り返し) 大きさは変化なし
7-Parallel	速さの変化なし 速さを比べると変化なし 大きさは変化なし 大きさは (上の雲) $>$ (下の雲)
8-Chase	速さは単体で見ると変化なし 速さの違いはほぼなし 大きさは単体で見ると変化なし 大きさは (追いかける雲) $<$ (先を行く雲) または (追いかける雲) $<$ (先を行く雲) \leq (合流した雲)
9-Expand	速さは単体で見ると変化なし 大きさは大きくなっていく
10-Reduction	速さは単体で見ると変化なし 大きさは小さくなっていく

6.4 結論

結論として、あまつぶ手法は Small multiples にくらべて回答時間が短く、また軌跡の回答も 8-chase のデータセットを除けばほぼ正確にデータセットの内容を答えていた。

表 6.5: 被験者実験 2 の回答用紙 (速さ・形状に関する質問) の評価項目

表現手法	採点項目		
AT	速さ	単体	実際より速い 実際より遅い
		複数	差を読み取れていない 無い差を読んでいる
	大きさ	単体	実際より大きい 実際より小さい
			差を読み取れていない
		複数	差を読み取れていない 無い差を読んでいる
SM	速さ	単体	実際より速い 実際より遅い
		複数	差を読み取れていない 無い差を読んでいる
	大きさ	単体	実際より大きい 実際より小さい
			差を読み取れていない
		複数	差を読み取れていない 無い差を読んでいる

表 6.6: 事後アンケートの結果 (各手法における手法への理解とタスクの実施難易度, 表内の数字は人数)

		1	2	3	4	5
SM	描画規則の理解しやすさ	0	1	1	5	13
	タスクの実施しやすさ	2	8	5	4	1
AT	描画規則の理解しやすさ	0	0	0	12	8
	タスクの実施しやすさ	0	3	8	7	2

回答時間の記録について, あまつぶ手法と Small multiples のそれぞれで得られた時間を t 検定にかけた. 有意水準 1% で有意な差が認められた ($p = 4.93e - 05$). しかしながら, データセットによっては有意差が認められない物もあった. t 検定の結果を表 6.8 にまとめる.

質問紙への回答結果からは, あまつぶ手法のほうが動きの軌跡を正確に読み取れていることが定性的に言えるであろう. また速さ・形状の変化に関する質問は, 目立ってあまつぶ手

表 6.7: 事後アンケートの結果 (2 手法を比較してどちらを好むのかの調査, 表内の数字は人数)

	SM	AT
描画規則の理解しやすさ	11	7
タスクの実施しやすさ	3	14

表 6.8: 提案手法と Small multiples のそれぞれで得られた回答時間の t 検定の結果

data	p	有意差
すべて	4.93e-05	*
1	0.361	
2	0.0005545	*
3	0.4121	
4	0.008394	*
5	0.4728	
6	0.001862	*
7	0.929	
8	0.01011	*
9	0.7617	
10	0.02574	*

法と Small multiples の間に差があるとは言えない。

アンケート結果からは, Small multiples の描画規則が理解やれやすいことが示され, 一方でタスクの実施にはあまつぶ手法の方が有用であったとの回答を得た。

6.5 議論

質問紙への回答については, Small multiples を閲覧した被験者の動きの軌跡の回答にくせがあることが分かった。斜め方向に引き伸ばされた様な回答が多く見られた。これは, 今回提示した Small multiples は縦 3 行, 横 6 列の横長で合ったことが一因かもしれない。より正方形に近い形になおして実験を行うと, 結果が変わる可能性がある。今回, 横 6 列の Small multiples を用いたのは, 10 分毎の降雨量の観測値を想定してデータを作成したためである。そのため 1 行が 1 時間分のデータを表現する形式となっていた。この点は被験者には伝えていない事項である。また, Small multiples の実際の絵の描画面積については, 縦横比は異なるものの, あまつぶ手法とほぼおなじ面積 (px^2) となるよう配慮した。

アンケート結果からは、Small multiplesの方が描画規則を理解しやすく、あまつぶ手法の方がタスクを実施しやすかったとの回答を得た。あまつぶ手法では、回答速度や軌跡の回答からタスクを実施しやすかったと考えられるが、見慣れない表現であることが結果に影響したことも考えられる。またあまつぶ手法では色を時刻の表現に用いるのに対し、Small multiplesは色を値の表現に用いることも描画規則が理解されにくかった原因であるかもしれない。被験者が実験実施中に混乱したり質問を繰り返すといったことをしなかったものの、見慣れない表現であることが影響しなかったとは言い切れない。

第7章 まとめ

時空間変量データを単一の地図画像上に静止画で提示する可視化表現（あまつぶ手法）を開発した。時空間変量データとは、時刻・位置・値の属性を持つ時空間データのうち、均一に区切られた地理空間上の位置が定時ごとに値を持つようなデータである。時空間変量データを可視化することによって、値の分布の動きを読み取ることが可能になる。既存の可視化手法にはアニメーションと Small multiples がある。アニメーションは時刻の表現に、アニメーション上の時間経過を利用し、一方 Small multiples は時刻ごとにデータをプロットした地図を描画する。

開発した可視化手法（あまつぶ手法）は、空間を離散化することによって時空間変量データがもつ動きの情報を読み取り可能にすることを目指した手法である。あまつぶ手法がデータから可視化表現を作成するまでには2つのフェーズがある。位置に基づくデータの集約フェーズと視覚変数への割当てフェーズである。これらのフェーズを通して、地理空間上の領域ごとに時刻と値の関係を表現する。時刻を離散化する Small multiples に対して、提案手法は空間を離散化すると考えることができる。

提案手法からは、データの視覚変数への割当てにいくつかのパターンを考えることができる。考えられうるパターンの中から、動きの読み取り時間を最も短くできるものを選ぶ被験者実験を行った。被験者実験では5つの割当てパターンを比較した。実験結果からは、時刻の表現に色相の一部を用いる方法が最も読み取り時間の平均が最も短くなることがわかった。しかし、時刻を線分の傾きに割当てする方法以外とは統計的に有意な読み取り時間の差は発見できていない。

提案手法が静止画像上で動きの読み取りを促進できるかどうかを検証するため、同じく静止画で時空間変量データを表現する既存の Small multiples と比較する被験者実験を行った。被験者実験からは、Small multiples に比べて動きの平均読み取り時間を41%短縮することができることが分かった。また同時に動きの軌跡をより正確に読み取ることが可能であった。しかし、動きの種類によっては正確に動きを読み取れない場合があった。特に、ある領域が複数の時刻に値のピークを迎えるデータの場合、そのピーク同士を区別することができない事例がある。

今後の課題として、視覚変数へのデータの割当て方法について検討の余地がある。被験者実験1では、線分の傾きによって時刻を表現する方法と他の割当て方法のそれぞれで得られた読み取り時間の平均値に有意な差が見られた。今回の被験者実験1で調査対象とした5つの割当てパターンには含まれていない他の視覚変数への割当て方法もまた検証が必要である。

謝辞

可視化表現例を作成するにあたり，国土交通省より提供された X バンド MP レーダのデータを利用いたしました（図 3.2, 4.1, 4.2）．ここに感謝申し上げます．

本研究に際しまして，三末和男先生には多大なご指導を賜りました．お忙しい中にもかかわらず，研究の進め方から修論のまとめ方に至るまで，細やかな助言・提案を下さり深く感謝しております．

そして，研究室生活において何より身近な存在でありました VisLab, IPLAB の皆様には公私共に大変お世話になりました．被験者実験にご協力を頂いたほか，様々な形で支えられ研究に取り組むことができました．厚くお礼申し上げます．

最後に，私をここまで育ててくださいました家族に心より感謝申し上げます．

参考文献

- [1] Edward Tufte. *Envisioning Information*. Graphics Press, Cheshire, CT, USA, 1990.
- [2] George Robertson, Roland Fernandez, Danyel Fisher, Bongshin Lee, and John Stasko. Effectiveness of animation in trend visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 14, No. 6, pp. 1325–1332, 2008.
- [3] Gennady Andrienko, Natalia Andrienko, Urska Demsar, Doris Dransch, Jason Dykes, Sara Irina Fabrikant, Mikael Jern, Menno-Jan Kraak, Heidrun Schumann, and Christian Tominski. Space, time and visual analytics. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 24, No. 10, pp. 1577–1600, 2010.
- [4] Menno-Jan Kraak. Geovisualization illustrated. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, Vol. 57, No. 5, pp. 390–399, 2003.
- [5] Mark Harrower. A look at the history and future of animated maps. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 39, No. 3, pp. 33–42, 2004.
- [6] Mark Harrower and Sara Fabrikant. The role of map animation for geographic visualization. *Geographic visualization*, pp. 49–65, 2008.
- [7] Torsten Hägerstrand. What about people in regional science? *Papers in regional science*, Vol. 24, No. 1, pp. 7–24, 1970.
- [8] Menno-Jan Kraak. The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. In *Proceedings of 21st International Cartographic Conference*, pp. 1988–1996, 2003.
- [9] Benjamin Bach, Pierre Dragicevic, Daniel Archambault, Christophe Hurter, and Sheelagh Carpendale. A review of temporal data visualizations based on space-time cube operations. In *Eurographics Conference on Visualization*, 2014.
- [10] 気象庁 — レーダー・ナウキャスト (降水・雷・竜巻). <http://www.jma.go.jp/jp/radnowc/>. Accessed: 2015-12-18.
- [11] National weather service — doppler radar national mosaic. <http://www.weather.gov/Radar>. Accessed: 2015-12-18.

- [12] P Samuel Quinan and Miriah Meyer. Visually comparing weather features in forecasts. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 22, No. 1, pp. 389–398, 2016.
- [13] Barbara Tversky, Julie Bauer Morrison, and Mireille Betrancourt. Animation: can it facilitate? *International journal of human-computer studies*, Vol. 57, No. 4, pp. 247–262, 2002.
- [14] Daniel Archambault, Helen C Purchase, and Bruno Pinaud. Animation, small multiples, and the effect of mental map preservation in dynamic graphs. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 4, pp. 539–552, 2011.
- [15] Amy L Griffin, Alan M MacEachren, Frank Hardisty, Erik Steiner, and Bonan Li. A comparison of animated maps with static small-multiple maps for visually identifying space-time clusters. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 96, No. 4, pp. 740–753, 2006.
- [16] Orland Hoerber, Garnett Wilson, Simon Harding, Rene Enguehard, and Rodolphe Devillers. Exploring geo-temporal differences using gtdiff. In *2011 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, pp. 139–146. IEEE, 2011.
- [17] Jacques Bertin. *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. University of Wisconsin Press, 1983.
- [18] Jock Mackinlay. Automating the design of graphical presentations of relational information. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 5, No. 2, pp. 110–141, 1986.
- [19] Simone Garlandini and Sara Irina Fabrikant. Evaluating the effectiveness and efficiency of visual variables for geographic information visualization. In *Spatial information theory*, pp. 195–211. Springer, 2009.
- [20] 気象庁 — 気象庁ホームページにおける気象情報の色合いの統一について. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1205/24a/120524hpcolor.html>. Accessed: 2016-01-10.
- [21] Harvey J Miller. Tobler’s first law and spatial analysis. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 94, No. 2, pp. 284–289, 2004.
- [22] Haim Levkowitz and Gabor T Herman. Color scales for image data. *IEEE Computer Graphics and Applications*, No. 1, pp. 72–80, 1992.

付録A 被験者実験1

A.1 用いた提案手法の画像

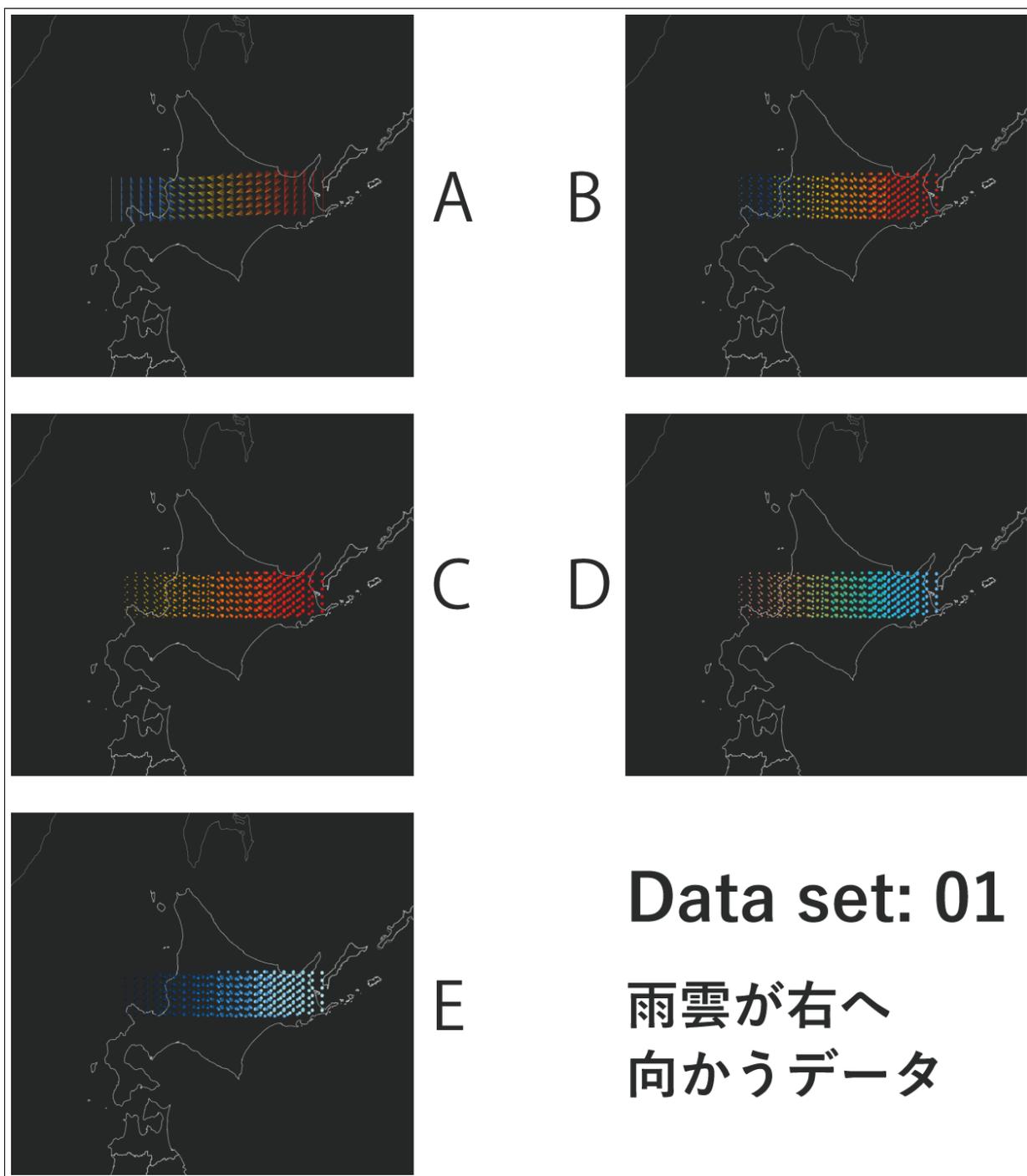


図 A.1: 被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 1)

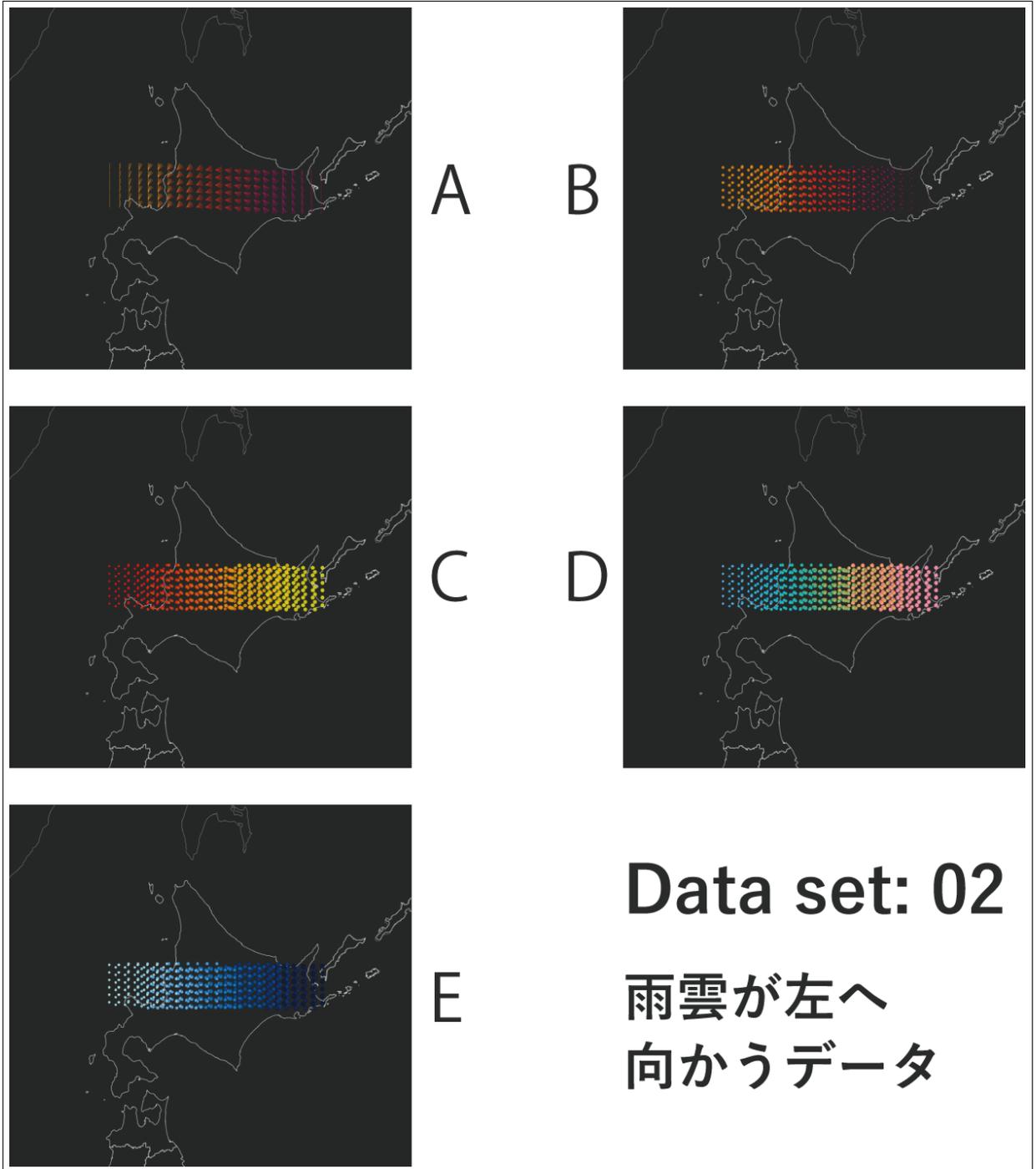


図 A.2: 被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 2)

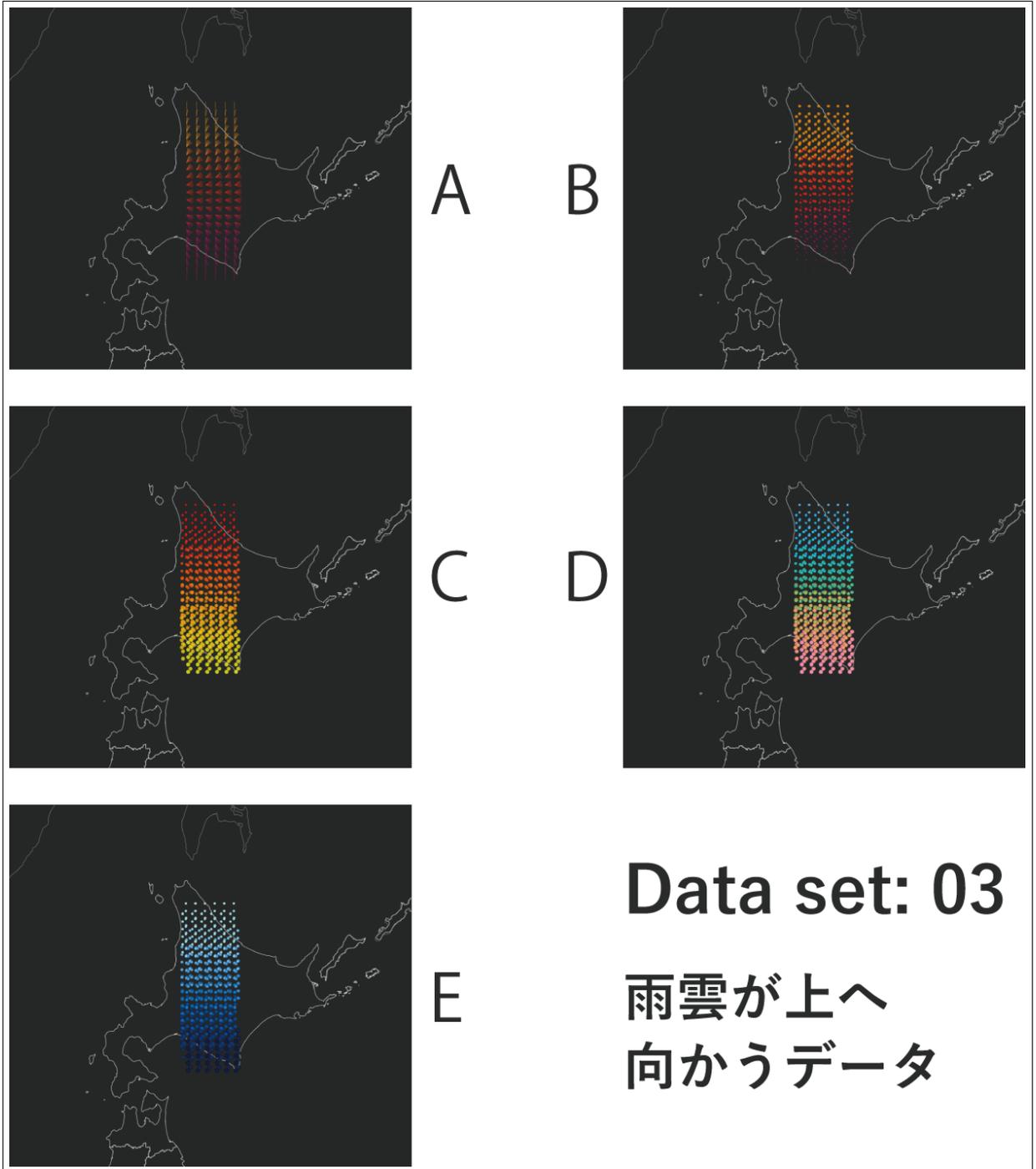


図 A.3: 被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 3)

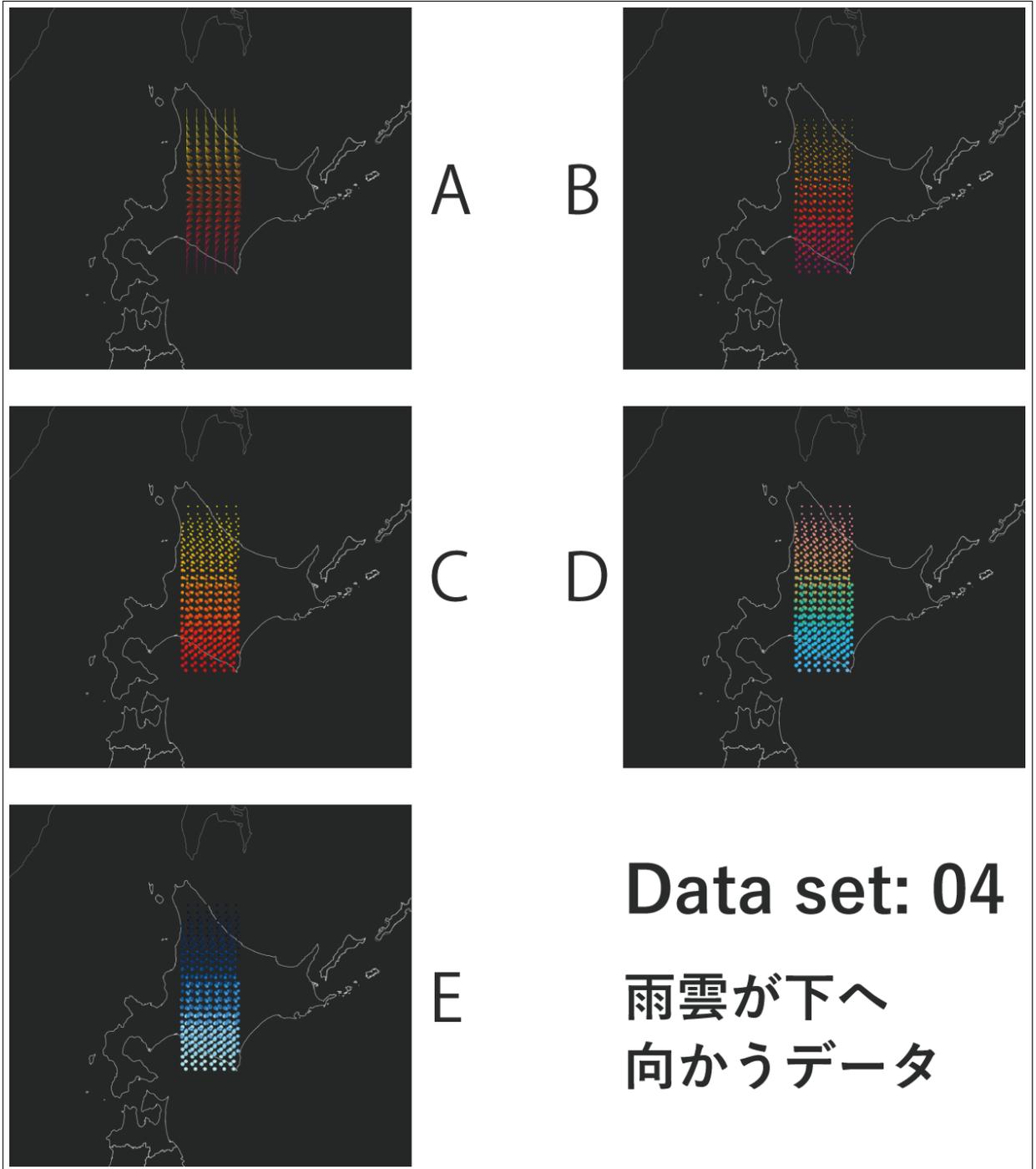
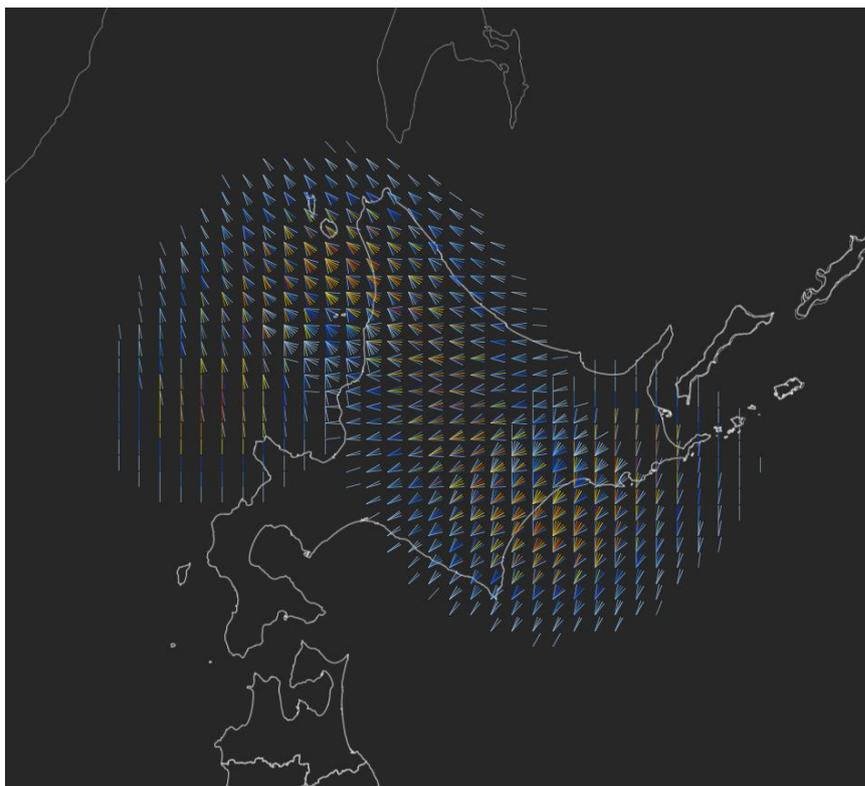


図 A.4: 被験者実験 1 に用いた可視化表現 (データ 4)

A.2 可視化表現の説明書

視覚表現 1

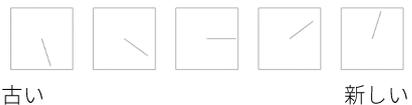


線を利用した視覚表現

データ属性と図形の視覚的な属性の対応

データ属性	視覚属性
位置	線の位置
時刻	線の傾き
値	線の色

時刻の凡例

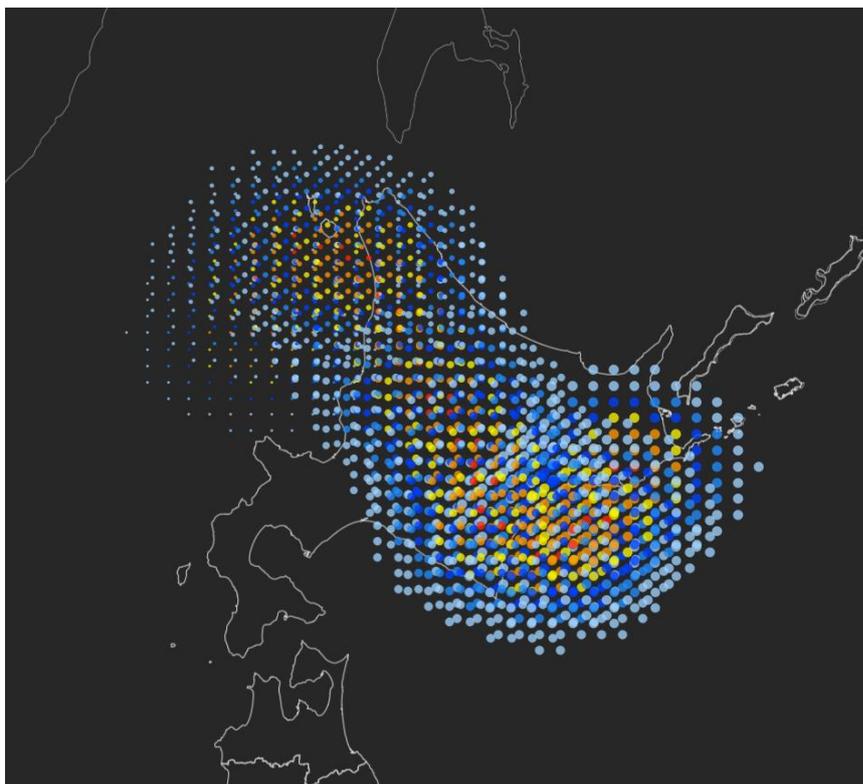


値の凡例



図 A.5: 被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 A)

視覚表現 5

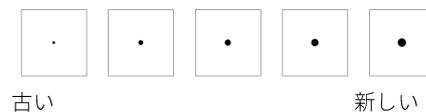


円を利用した視覚表現

データ属性と図形の視覚的な属性の対応

データ属性	視覚属性
位置	円の位置
時刻	円の大きさ
値	円の色

時刻の凡例



値の凡例

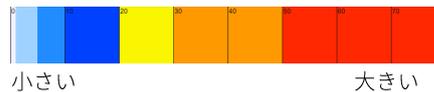
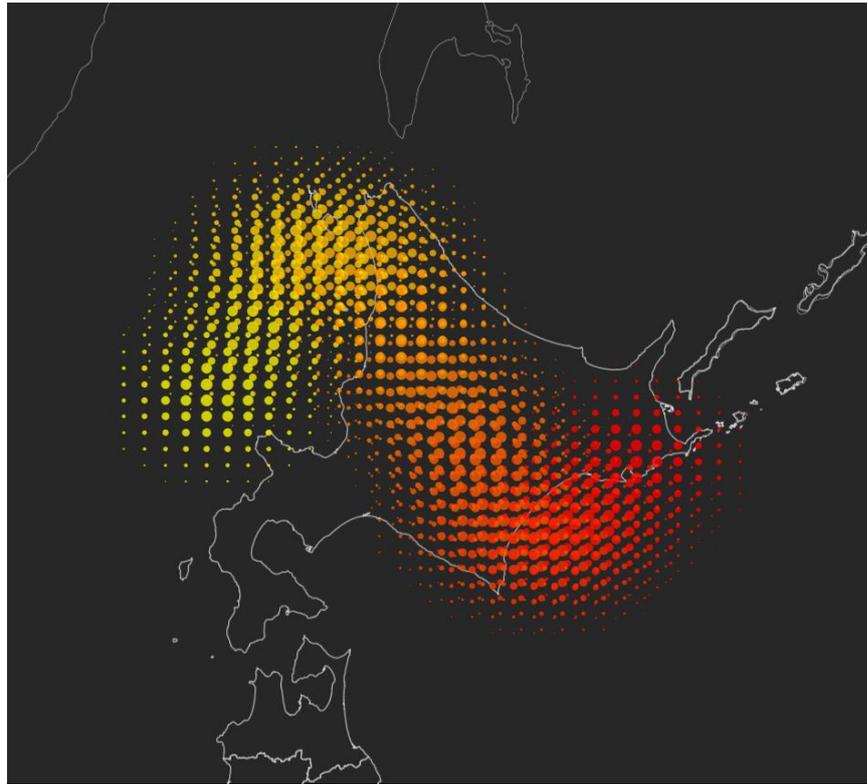


図 A.6: 被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 B)

視覚表現 3



円を利用した視覚表現

データ属性と図形の視覚的な属性の対応

データ属性	視覚属性
位置	円の位置
時刻	円の色
値	円の大きさ

時刻の凡例



古い

新しい

値の凡例



小さい

大きい

図 A.7: 被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 C)

視覚表現 4



円を利用した視覚表現

データ属性と図形の視覚的な属性の対応

データ属性	視覚属性
位置	円の位置
時刻	円の色
値	円の大きさ

時刻の凡例



値の凡例

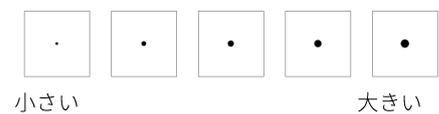
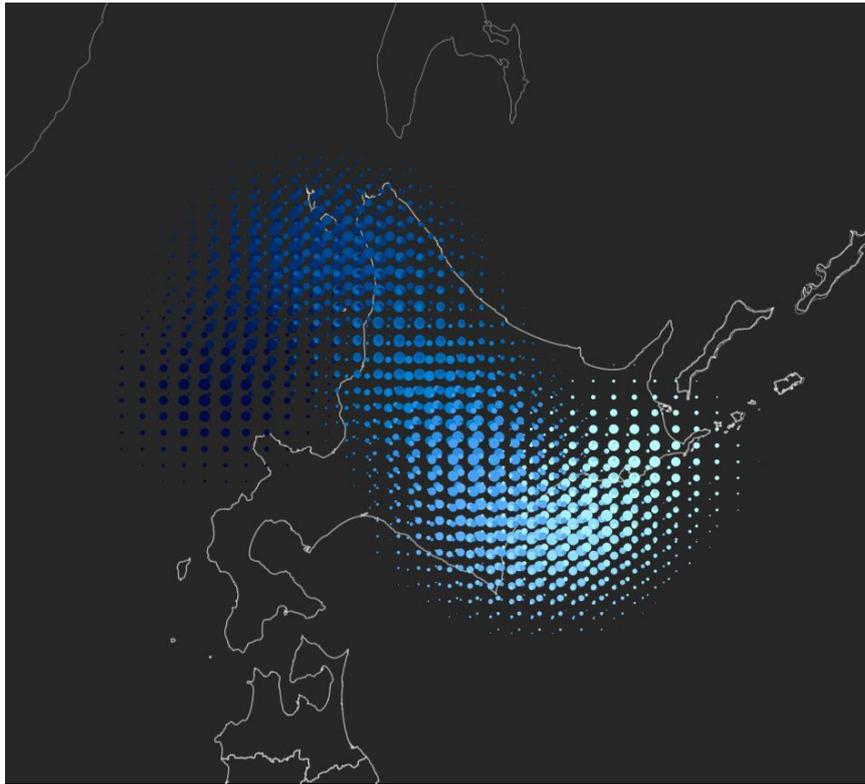


図 A.8: 被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 D)

視覚表現 2



円を利用した視覚表現

データ属性と図形の視覚的な属性の対応

データ属性	視覚属性
位置	円の位置
時刻	円の色
値	円の大きさ

時刻の凡例



古い

新しい

値の凡例



小さい

大きい

図 A.9: 被験者実験 1 の可視化手法の説明書 (可視化表現 E)

A.3 読み取り時間の分布

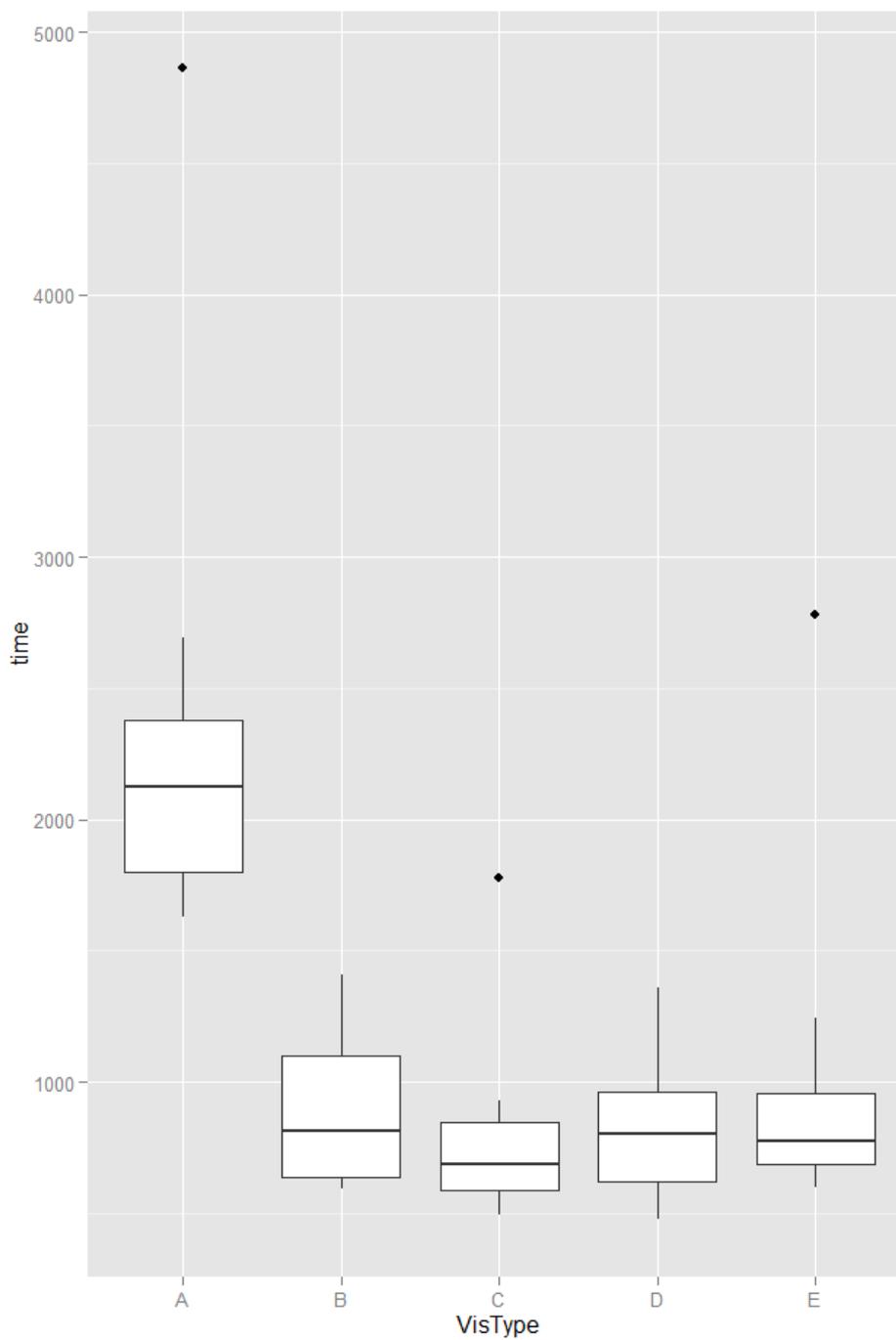


図 A.10: 被験者実験 1 の回答時間の記録 (箱ひげ図)

付録B 被験者実験2

B.1 用いた時空間変量データ

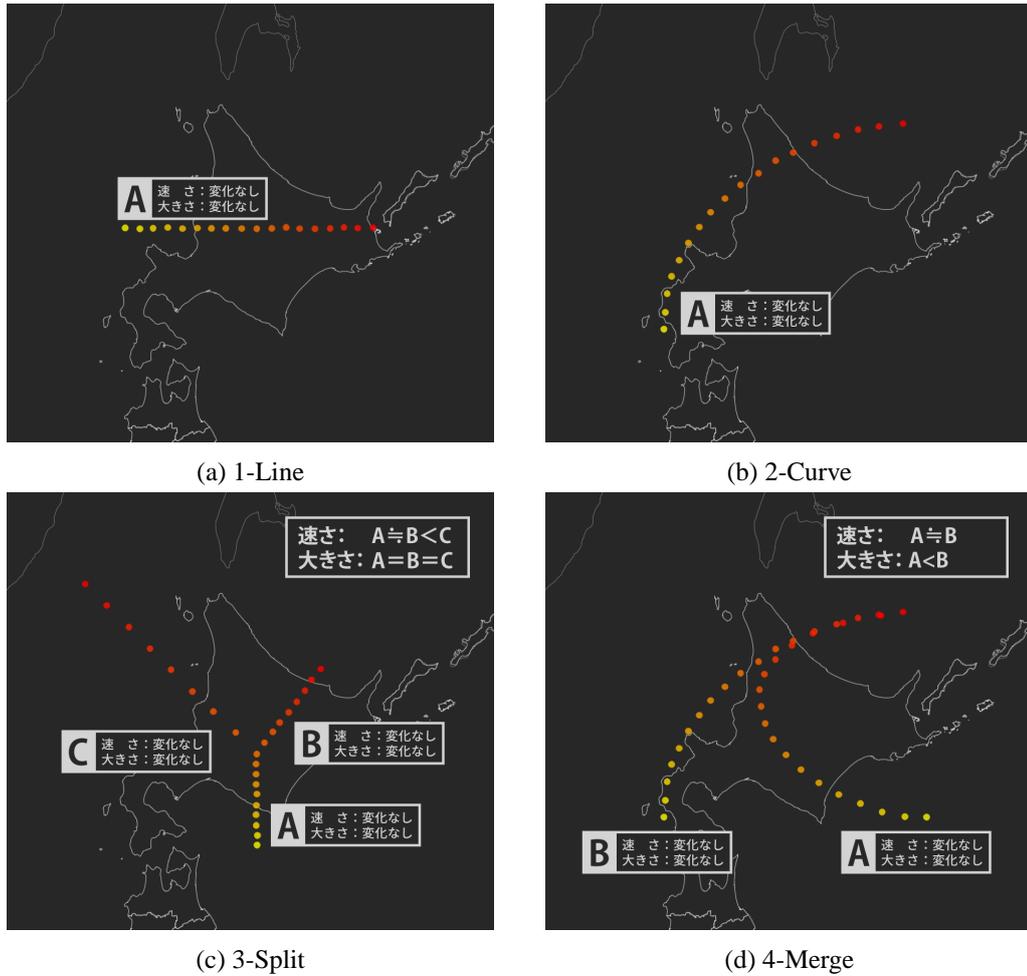
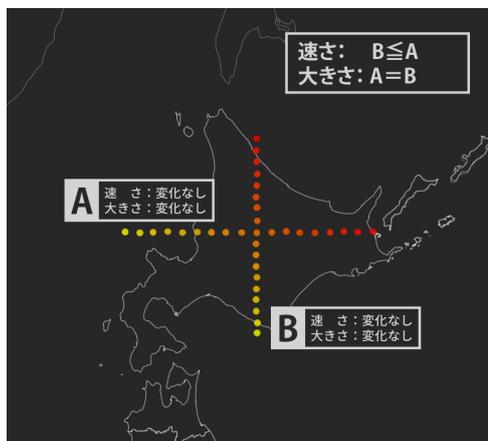
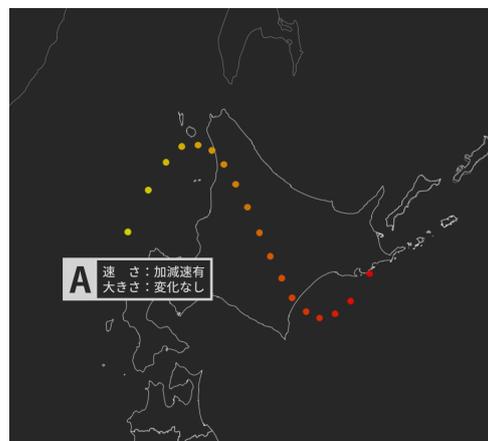


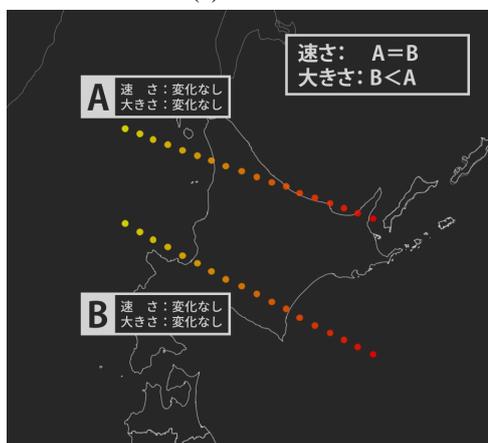
図 B.1: 被験者実験2 で用いた時空間変量データ (1~4). 点が雨雲の中心を示し, 色は時刻 (黄色から赤に向けて新しい時刻) を表現している.



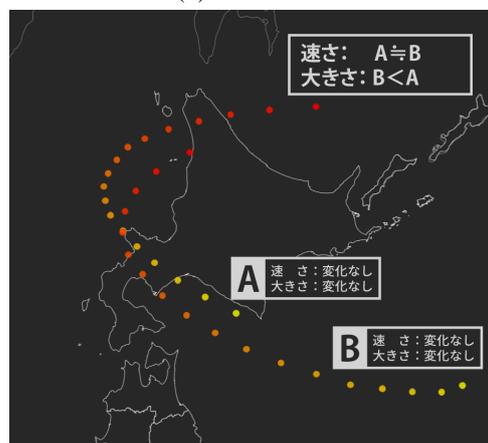
(a) 5-Cross



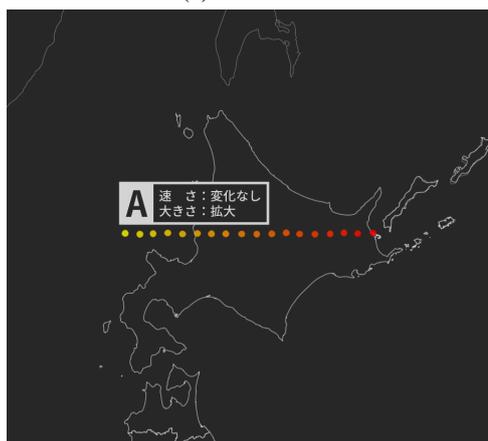
(b) 6-Meander



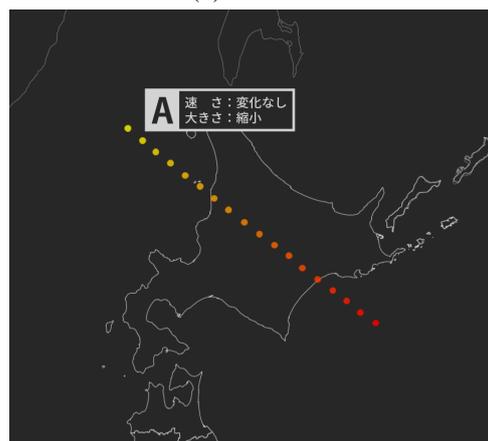
(c) 7-Parallel



(d) 8-Chase



(e) 9-Expand



(f) 10-Reduction

図 B.2: 被験者実験 2 で用いた時空間変量データ (5~10). 点が雨雲の中心を示し, 色は時刻 (黄色から赤に向けて新しい時刻) を表現している.

B.2 用いた可視化表現

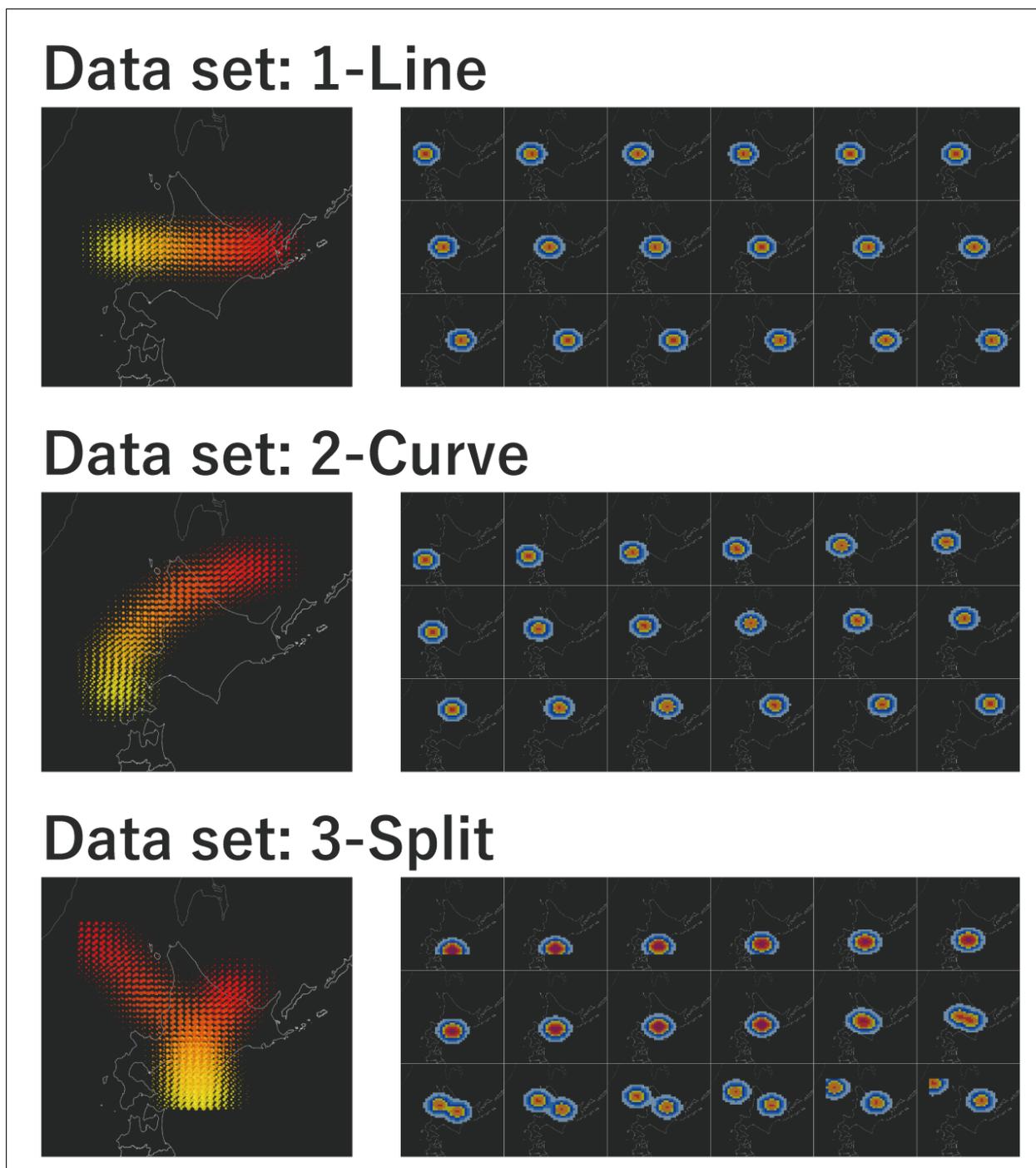
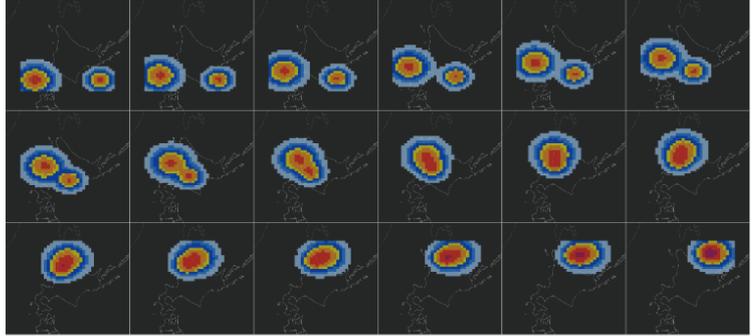
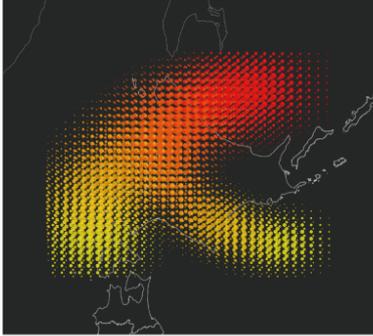


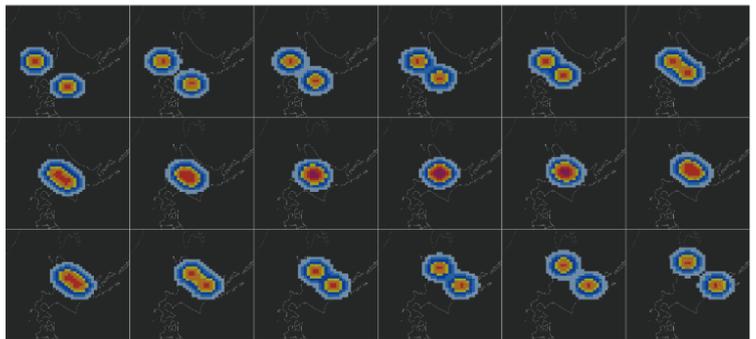
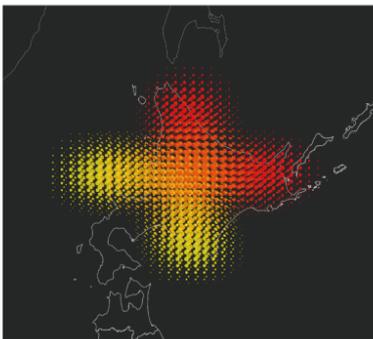
図 B.3: 被験者実験2で提示した可視化表現 (データ1~3). 左があまつぶ手法, 右が Small multiples.

B.3 被験者に提示した文書

Data set: 4-Merge



Data set: 5-Cross



Data set: 6-Meander

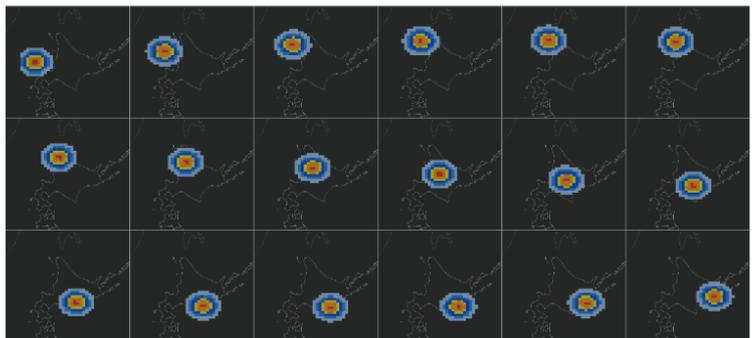
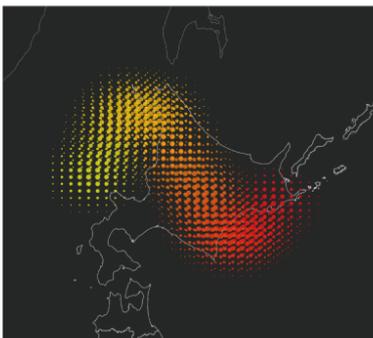
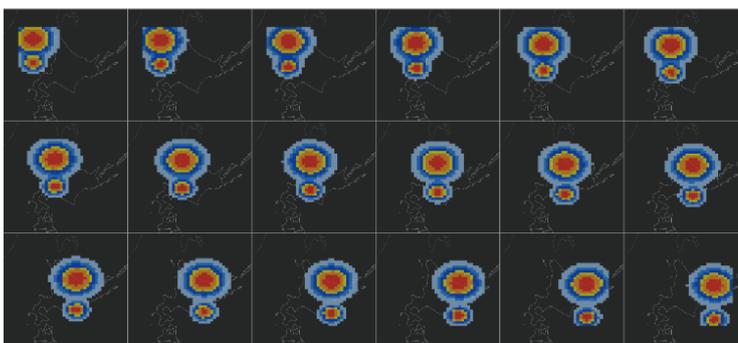
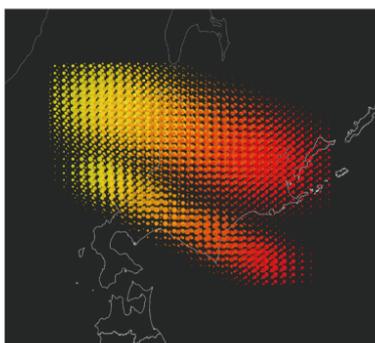


図 B.4: 被験者実験2で提示した可視化表現 (データ4~6). 左があまつぶ手法, 右が Small multiples.

Data set: 7-Parallel



Data set: 8-Chase

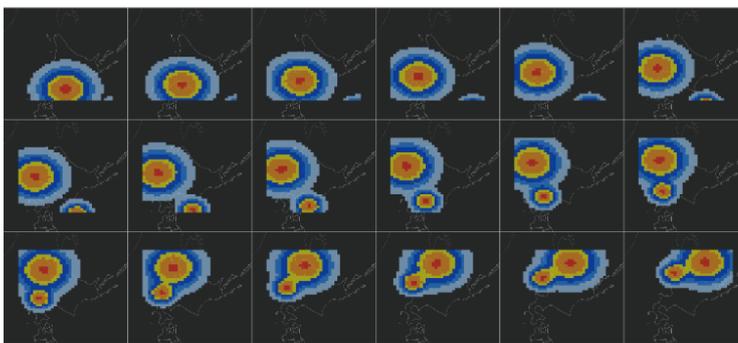
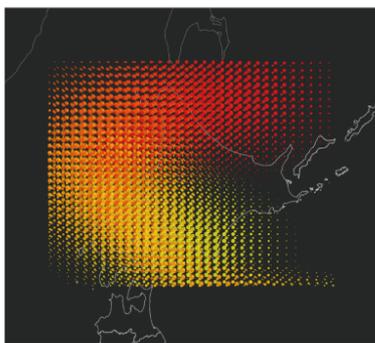
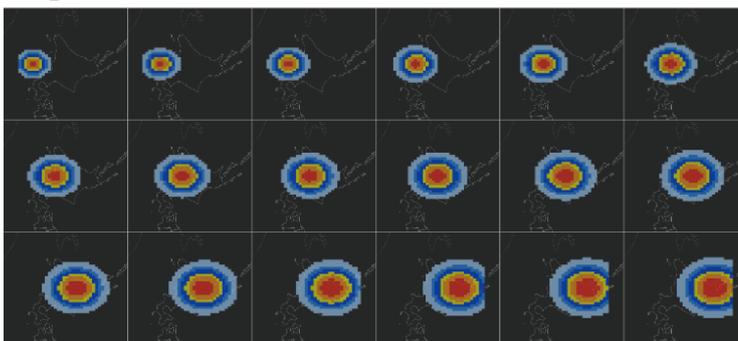
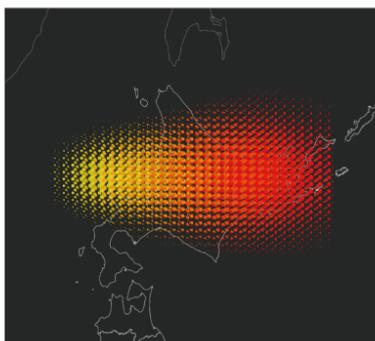


図 B.5: 被験者実験2 で提示した可視化表現 (データ7~8). 左があまつぶ手法, 右が Small multiples.

Data set: 9-Expand



Data set: 10-Reduction

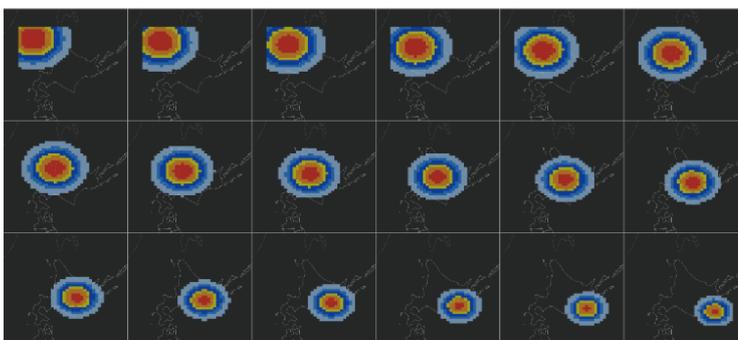
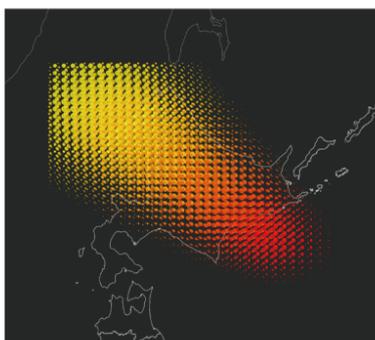


図 B.6: 被験者実験 2 で提示した可視化表現 (データ 9~10) . 左があまつぶ手法, 右が Small multiples.

実験の前に

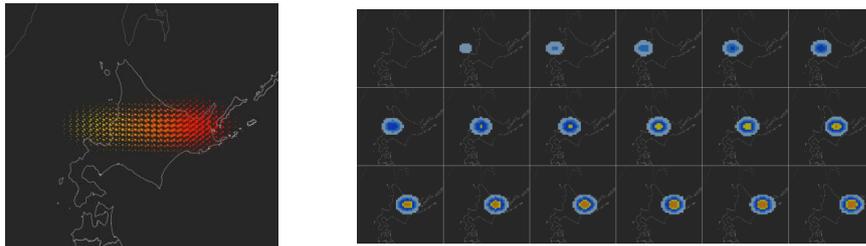
このたびはお忙しい中、被験者実験にご協力いただきありがとうございます。
この被験者実験は 30 分程度で完了する予定です。

実験では以下のタスクに取り組んで頂きます。

1. 被験者についての調査（性別・年齢・色覚・専攻など）
2. 可視化表現Aについての読み取り×5
3. 可視化表現Iについての読み取り×5
4. 事後アンケート

今回は降雨データを模したデータの可視化表現 2 種類について、ディスプレイを通してその内容について読み取っていただく実験です。読み取りのあとに質問紙に読み取れた内容を書き込んでもらいます。

使用する可視化表現 2 種類は以下のような表現です。



表現の詳しい説明は各実験の前に行います。

この実験は

- 性別、年齢、色覚など視覚表現の読み取りに関わる個人の情報をうかがいます。
- 長くて 1 分弱ほどディスプレイを見るタスクを計 10 回繰り返します。
- 実験中に気分が悪くなるなどした場合にはいつでも実験を中止できます。
- 被験者の健康、プライバシーには十分に配慮を行います。

何か不明な点があればいつでも質問してください。
この後同意書に署名していただき実験を開始します。

ビジュアルゼーションとインタラクティブシステム研究室
兵吾勇貴 (hyougo@vislab.cs.tsukuba.ac.jp)

図 B.7: 被験者実験 2 で用いた実験事前説明書

同意書

筑波大学システム情報系長 殿

私は、視覚的表現の設計および評価に関する研究について、研究の概要、被験者の必要性、方法、その成果、危険の回避、個人情報の保護について十分な説明を受けました。

説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、いつでも撤回できることも聞きました。私は、このことを理解した上で被験者になることに同意します。

平成 年 月 日

氏名 (才)

(保護者等：被験者が未成年の場合)

氏名 (本人との続柄：)

時空間変量データの可視化に関する研究について、平成 年 月 日に次の内容について説明を行い、上記のとおり同意を得ました。

説明者 所属

氏名

① 研究の概要について

この研究の目的は様々な情報を対象に視覚的表現を設計および評価することです。特に大規模なデータあるいは複雑なデータから情報を効率的に把握できるような視覚的表現の設計・開発を目指しています。この実験では、設計・開発中の視覚的表現の特性および効果を計測します。

② 被験者の必要性、方法、その成果について

視覚的表現の特性および効果は人間が実際に見て計測する必要があるため、設計過程および最終評価において被験者実験が必要となります。実験では、提示された視覚的な表現を見て、簡単なタスクを行っていただきます。具体的なタスクについては別紙にて説明します。タスク毎に達成時間および回答を記録し、後でそれらを分析します。

③ 個人情報の保護について

学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属を公表することがあります。

(注) 同意書は2通作成し1通は本人の控えとして手渡すこと。(コピー可)
未成年の場合には保護者と一緒に説明して保護者からの同意を得ること。

被験者 ID

研究や実験に協力した結果、不都合があった場合の連絡先

実施分担者 (所属：システム情報工学研究科 氏名：兵吾勇貴 TEL：029-853-5402)

実施責任者 (所属：システム情報系 氏名：三末和男 TEL：029-853-5802)

事務担当者 (筑波大学システム情報系研究倫理委員会事務局)

システム情報エリア支援室 TEL：029-853-4989)

図 B.8: 被験者実験 2 で用いた同意書

被験者についての調査

被験者の属性と実験結果の関係性について調査を行いたいため、以下の項目についてあなた自身のことを回答してください。

回答したくない項目がある場合には、その旨申し出てください。

被験者 ID

実験実施者が記入

性別

当てはまる数字に○

1. 男性
2. 女性

年齢

満年齢を記入

歳

学類・専攻

当てはまる数字に○

その他を選択の場合は

学類・専攻まで記入

1. システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻
2. 情報学群 情報科学類
3. 情報学群 情報メディア創成学類
4. その他

学群・研究科：

学類・専攻：

色覚について

当てはまる数字に○

1. 正常色覚
 2. 1型色覚
 3. 2型色覚
 4. 3型色覚
-

図 B.9: 被験者実験 2 で用いた事前アンケート用紙

実験のながれ

これから可視化手法の読み取りタスクを実施します。実験は1つの可視化手法に対して、練習タスク1回と、2～4のタスクを5回繰り返していきます。

1. 練習タスク

可視化表現について説明を行い、その読み取り方法を練習します。
読み取り方法を練習するのみで、本番のタスクとは異なります。

2. 質問紙の内容の理解

質問紙をあらかじめ渡しますので、質問項目を確認してください。
質問の内容は主に、表現内に提示される雨雲の以下の項目です。

- 動きの軌跡について
- 動きの速さの変化と違いについて
- 形の変化と違いについて

3. 提示された可視化手法から情報の読み取り

ディスプレイに可視化表現が提示されます。その表現から質問紙の内容を読み取ってください。読み取りの最中に質問を確認しても問題ありませんが、できるだけ正確に、できるだけ速く読み取ってください。
読み取りが完了したらキーボードの Enter キーを押してください。

4. 読み取った情報の質問紙への回答

可視化表現から読み取った内容をペンで質問紙に回答してください。質問紙の書き方は指示書を参考にしてください。

【注意事項】

- 可視化表現の読み取りにかかる時間を計測していますので、Enter キーを押した後には可視化表現をもう一度見ることができません。3のタスクは読み取った内容を思い出しながら答えて頂きます。
- また2のタスクの最中に質問紙に回答することはできません。メモなども、書き込みにかかった時間が計測されることを防ぐために認めていません。

【提示される時空間変量データについて】

- 提示される可視化表現は、いずれも降雨データを模したデータを用いて作られた表現です。5回の繰り返しではそれぞれ異なるデータが表現されています。
- 雨雲が1つ～数個用いられており、全ての情報を読み取ってください。

図 B.10: 被験者実験2 で用いた実施手順説明書

質問用紙 (/)

日付 _____ 月 _____ 日 _____ :

被験者 _____ # _____

調査対象手法 _____

A. 動きに関する質問

1. 雨雲は下記のどの場所を通過して動きましたか？ 地図上に線を描いてください。
複数の雨雲がある場合は雲の数だけ線を描き、各線にアルファベットを振ってください。
また雨雲が合流・分離した場合にはその地点に○を描いてください。



図 B.11: 被験者実験 2 で用いた質問紙 (表)

2. 途中で動きの速さが変わった雲はありましたか？ア・イのどちらかを選択してください。

(ア)なかった

(イ)あった（以下の該当する選択肢にチェック（レ点）を入れ、該当する雲を記号で記述）

だんだんと遅くなった雲があった（雨雲： ）

だんだんと速くなった雲があった（雨雲： ）

3. 複数の雨雲が確認できた方に伺います

動きの速さに違いはありましたか？

(ア)なかった

(イ)あった（雲に割り振った記号と等号・不等号を用いて速さの順を教えてください）

(e.g. $A = B < C$: Cの雨雲が最も速く動いていた場合に左のように回答)

B. 形状に関する質問

1. 途中で雨雲の大きさが変わった雲はありましたか？ア・イのどちらかを選択してください。

(ア)形が変わった雨雲はなかった

(イ)あった（以下の該当する選択肢にチェック（レ点）を入れ、該当する雲を記号で記述）

だんだん大きくなった雲があった（雨雲： ）

だんだん小さくなった雲があった（雨雲： ）

2. 複数の雨雲が確認できた方に伺います

雨雲の大きさに違いはありましたか？

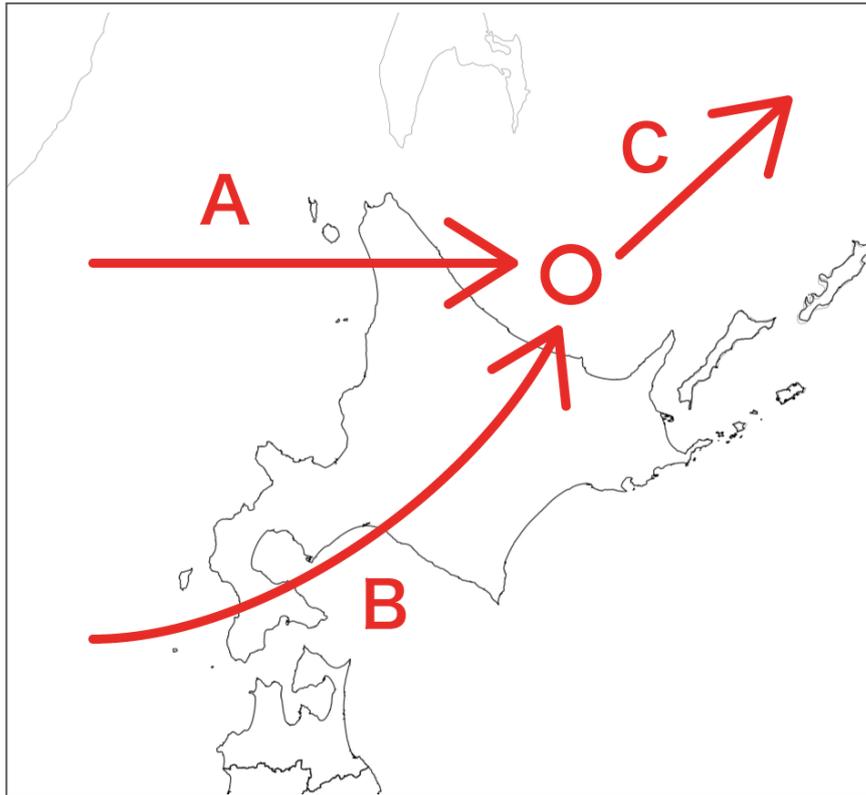
(ア)なかった

(イ)あった（雲に割り振った記号と等号・不等号を用いて大きさの順を教えてください）

(e.g. $A = B < C$: Cの雨雲が最も大きかった場合に左のように回答)

図 B.12: 被験者実験2で用いた質問紙（裏）

動きの回答方法



赤色の記述のように回答してください。

回答には赤色のペンを用いてください。不明な点はいつでもたずねてください。

【回答方法】

- 雨雲の動きを矢印で地図上に描きます。
- 複数の雲がある場合それぞれの雲にアルファベットを好きな順に振ってください。
- 雲が合流・分離した場合、それぞれが起こった場所に円を記述してください。

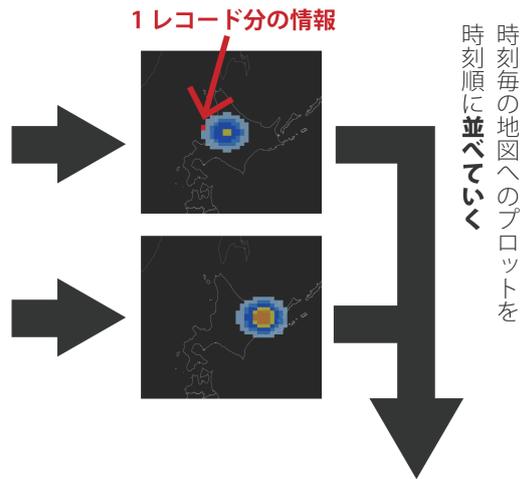
図 B.13: 被験者実験 2 で用いた動きの軌跡の回答指示書

可視化手法 A

この可視化手法は、時刻ごとの時空間変量データを1つの地図上に描きます。時空間変量のデータレコード1件の情報を、対応する時刻の地図上の図形の1つが表しています。位置の情報を読み取るには、地図上に描かれた図形の位置を見てください。時刻の情報を読み取るには、読み取りたい時刻の地図を見てください。値の情報を読み取るには、図形の色を見てください。

時空間変量データ

時刻	経緯度	値
12/01 18:00	138.30, 34.9	0.2
12/01 18:00	138.30, 35.0	0.5
▲ 1レコード分の情報 :		
12/01 18:10	138.30, 34.9	0.8
12/01 18:10	138.30, 35.0	1.2
:	:	:

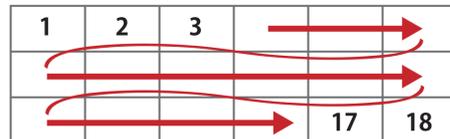


可視化表現の一例



時刻の凡例

時刻は右の凡例の通りです。左上から右下にかけてふり順に地図が並んでいます。



値の凡例

値は右の凡例の通りです。気象庁のHPで見る降雨量の表現と同じになっています。



図 B.14: 被験者実験 2 で用いた視覚表現の説明書 (可視化手法 A, Small multiples)

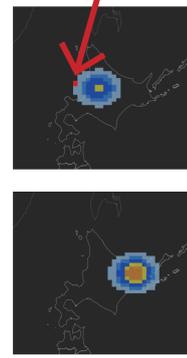
可視化手法 B

この可視化手法は、時空間変量データの全ての時刻のデータを1つの地図上に描きます。
 時空間変量のデータレコード1件の情報を、地図上に描かれた図形の1つが表しています。
 位置の読み取るには、地図上に描かれた図形の位置を見てください。
 時刻の読み取るには、図形の色の変化を見てください。
 値の読み取るには、図形の大きさを見てください。

時空間変量データ

時刻	経緯度	値
12/01 18:00	138.30, 34.9	0.2
12/01 18:00	138.30, 35.0	0.5
▲ 1レコード分の情報 :		
12/01 18:10	138.30, 34.9	0.8
12/01 18:10	138.30, 35.0	1.2
:	:	:

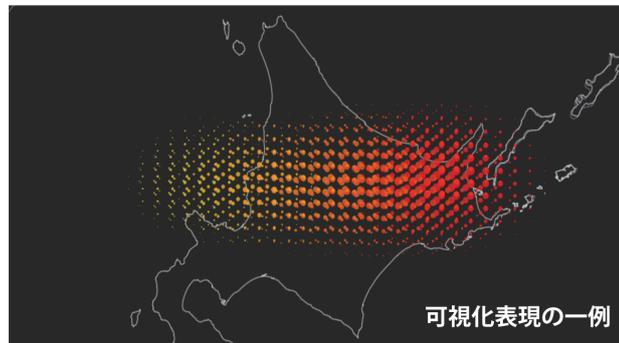
1レコード分の情報



時刻毎の地図へのプロットを
ひとつの地図上へ重ね合わせる

小さな円のひとつひとつが
1レコード分の情報を表す

円の色	:	時刻
円の位置	:	経緯度
円の大きさ	:	値



時刻の凡例

時刻は右の凡例の通りです。
色相が黄色から赤色にかけて
変化していきます。



値の凡例

値は右の凡例の通りです。
円の面積が変わっています。

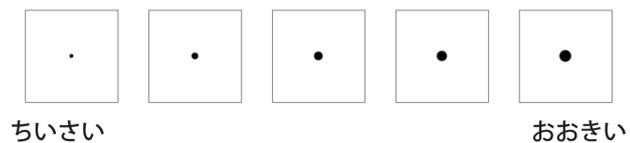


図 B.15: 被験者実験2 で用いた視覚表現の説明書 (可視化手法 B, あまつぶ手法)

事後アンケート

被験者 ID

最後に今回用いた2つの可視化表現についてのアンケートにご協力ください。

1. 地図を並べて提示する可視化表現について

表現手法への理解度	1	2	3	4	5
どのような規則でデータが表現できたか理解できましたか？ 当てはまる数字に○	理解できなかった	あまり理解できなかった	どちらでもない	おおよそ理解できた	理解できた
この表現手法の使いやすさ	1	2	3	4	5
この表現手法では与えられたタスクを行いやすかったですか？ 当てはまる数字に○	タスクの実施が困難だった	タスクの実施がやや困難だった	普通	タスクの実施がやや簡単であった	タスクの実施が簡単であった
この表現手法について 何か思ったことがあれば自由にお答えください。 (改良すべき点など)	(自由記述)				

2. 地図を重ね合せて提示する可視化表現について

表現手法への理解度	1	2	3	4	5
どのような規則でデータが表現できたか理解できましたか？ 当てはまる数字に○	理解できなかった	あまり理解できなかった	どちらでもない	おおよそ理解できた	理解できた
この表現手法の使いやすさ	1	2	3	4	5
この表現手法では与えられたタスクを行いやすかったですか？ 当てはまる数字に○	タスクの実施が困難だった	タスクの実施がやや困難だった	普通	タスクの実施がやや簡単であった	タスクの実施が簡単であった
この表現手法について 何か思ったことがあれば自由にお答えください。 (改良すべき点など)	(自由記述)				

図 B.16: 被験者実験 2 で用いた事後アンケート (表)

3. 2つの可視化表現について

理解度の比較

どちらの可視化表現のほうが、データの表現規則を理解できましたか？

当てはまる数字に○

1. 地図を並べて提示する可視化表現
2. 地図を重ね合せて提示する可視化表現

使いやすさの比較

どちらの可視化表現のほうが、与えられたタスクを行いやすかったですか？

当てはまる数字に○

1. 地図を並べて提示する可視化表現
2. 地図を重ね合せて提示する可視化表現

4. 自由記述

最後にこの被験者実験全体を通して何か思ったことなどがございましたらご記入ください。

お忙しい中被験者実験にご協力いただきありがとうございました。

以上で今回の実験を終了させていただきます。

最後に同意書の控えを忘れずにお持ち帰りください。

ビジュアルイゼーションとインタラクティブ研究室

CS 専攻 M2 兵吾勇貴

図 B.17: 被験者実験 2 で用いた事後アンケート (裏)

B.4 実験結果

B.4.1 回答時間の分布

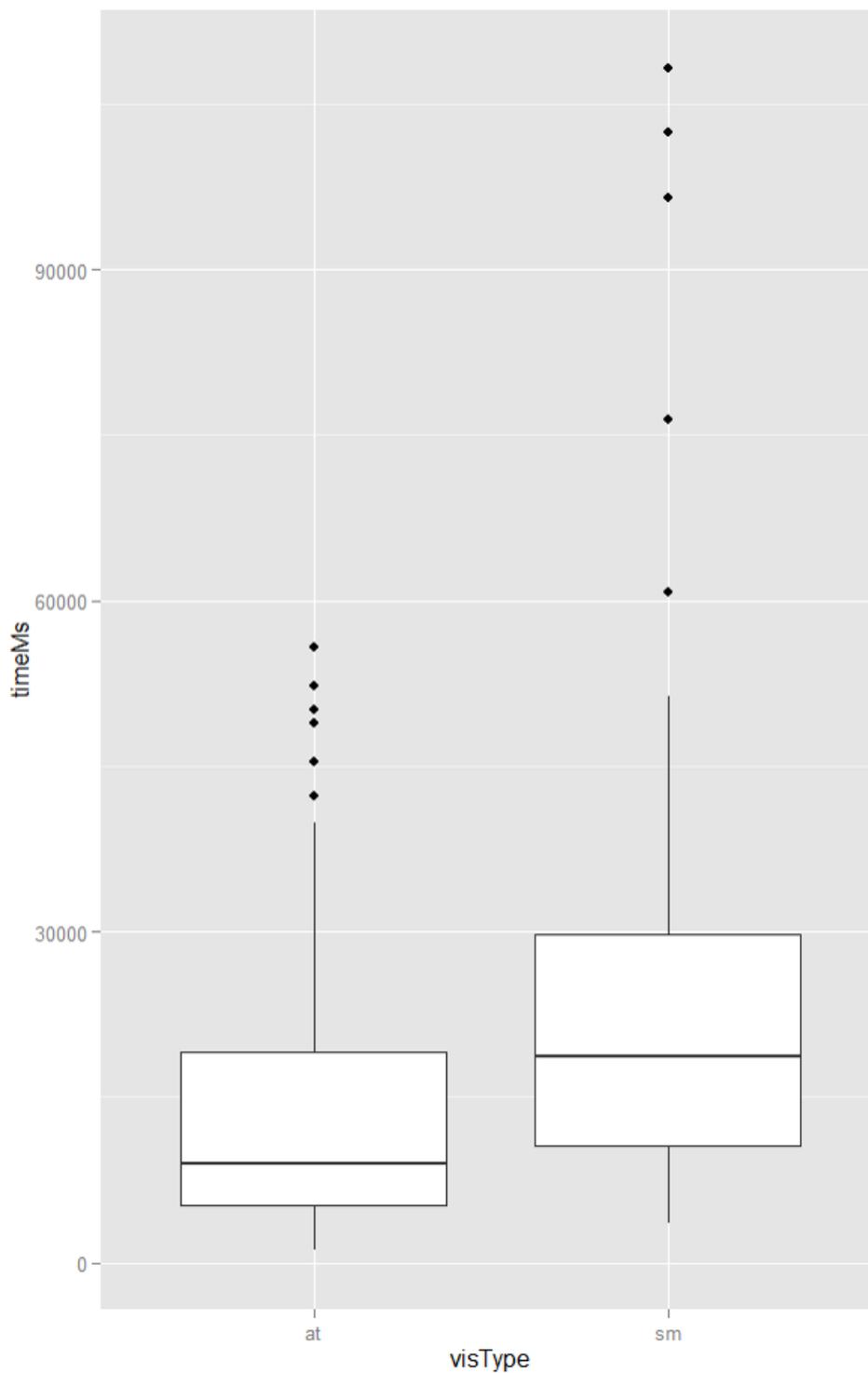


図 B.18: 被験者実験 2 の回答時間の記録 (手法毎の箱ひげ図)

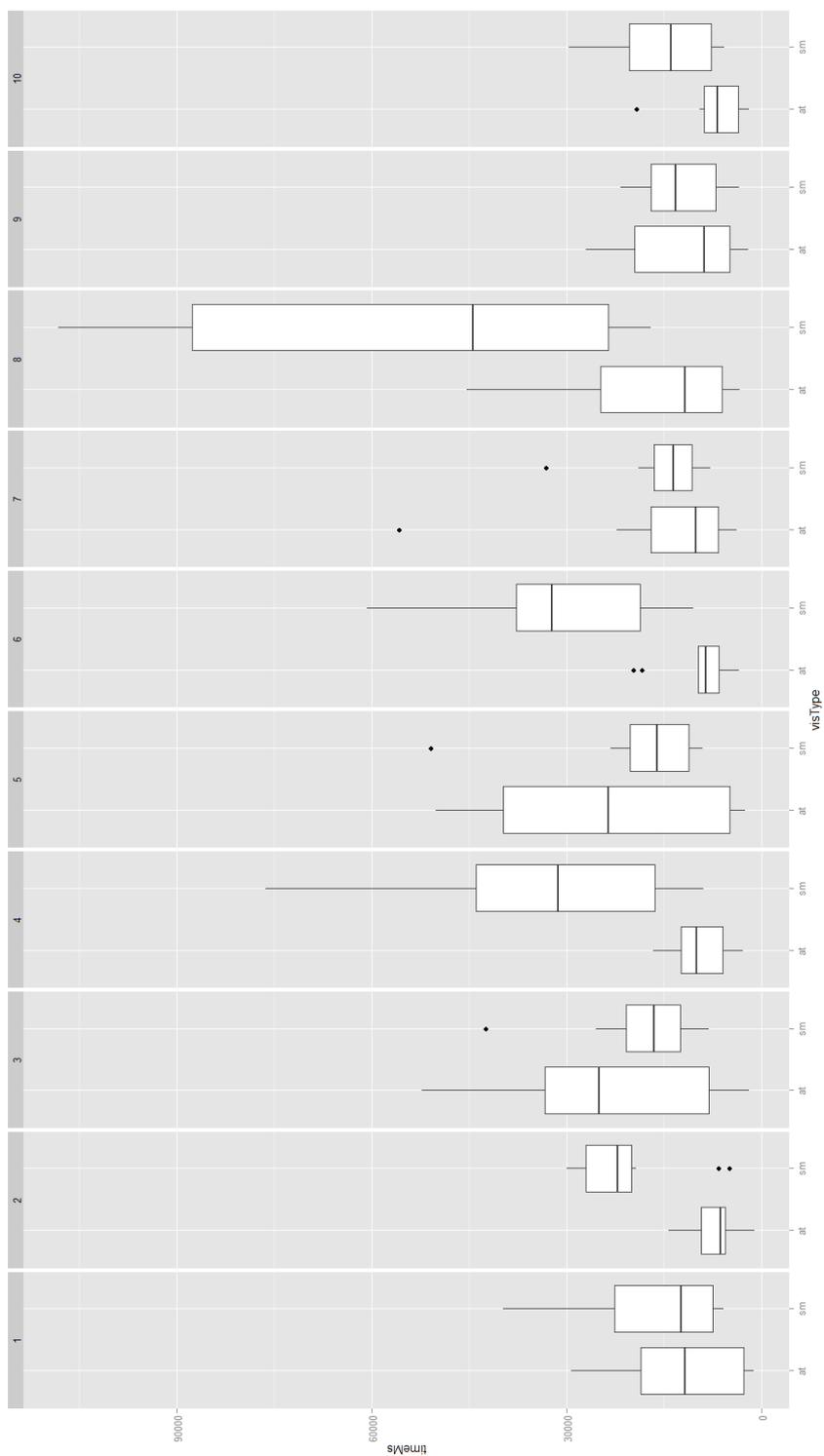


図 B.19: 被験者実験 2 の回答時間の記録 (手法・データセット毎の箱ひげ図)

B.4.2 質問紙（動きの軌跡に関する質問）の回答結果



図 B.20: 被験者実験2の動きの回答結果（データ1, Small multiples）

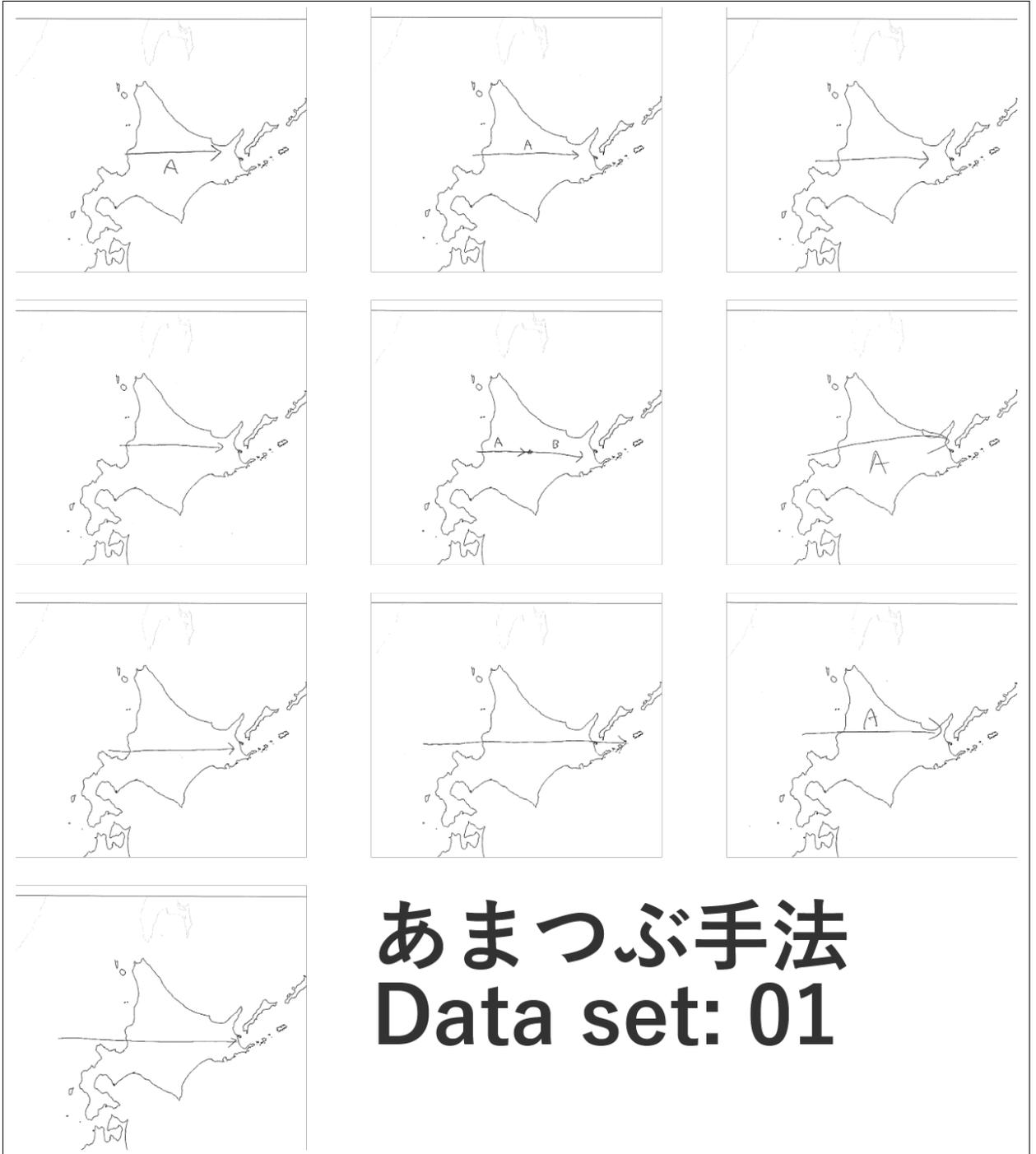


図 B.21: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 1, あまつぶ手法)



図 B.22: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 2, Small multiples)



図 B.23: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 2, あまつぶ手法)



図 B.24: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 3, Small multiples)



図 B.25: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 3, あまつぶ手法)



図 B.26: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 4, Small multiples)

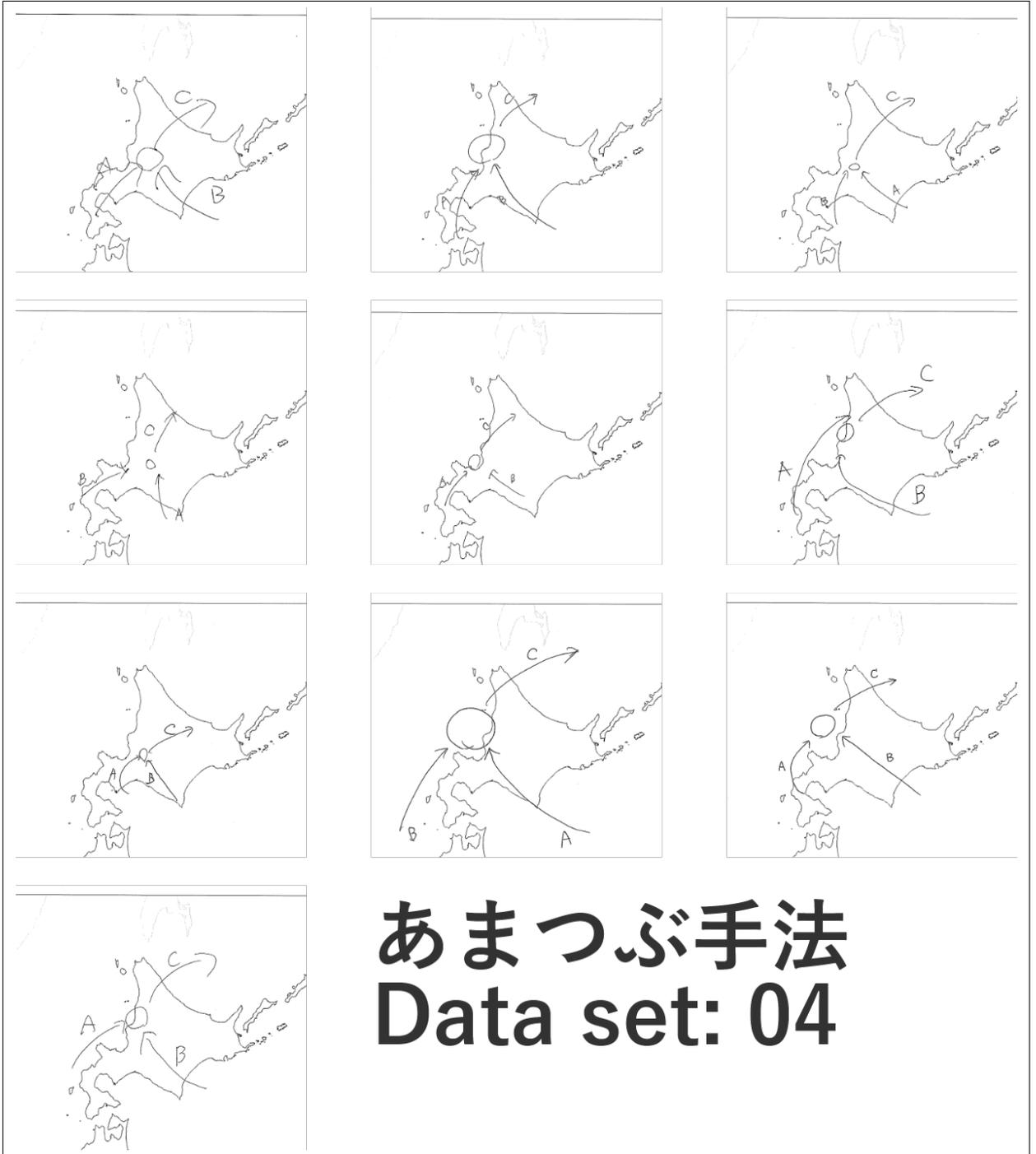


図 B.27: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 4, あまつぶ手法)



図 B.28: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 5, Small multiples)

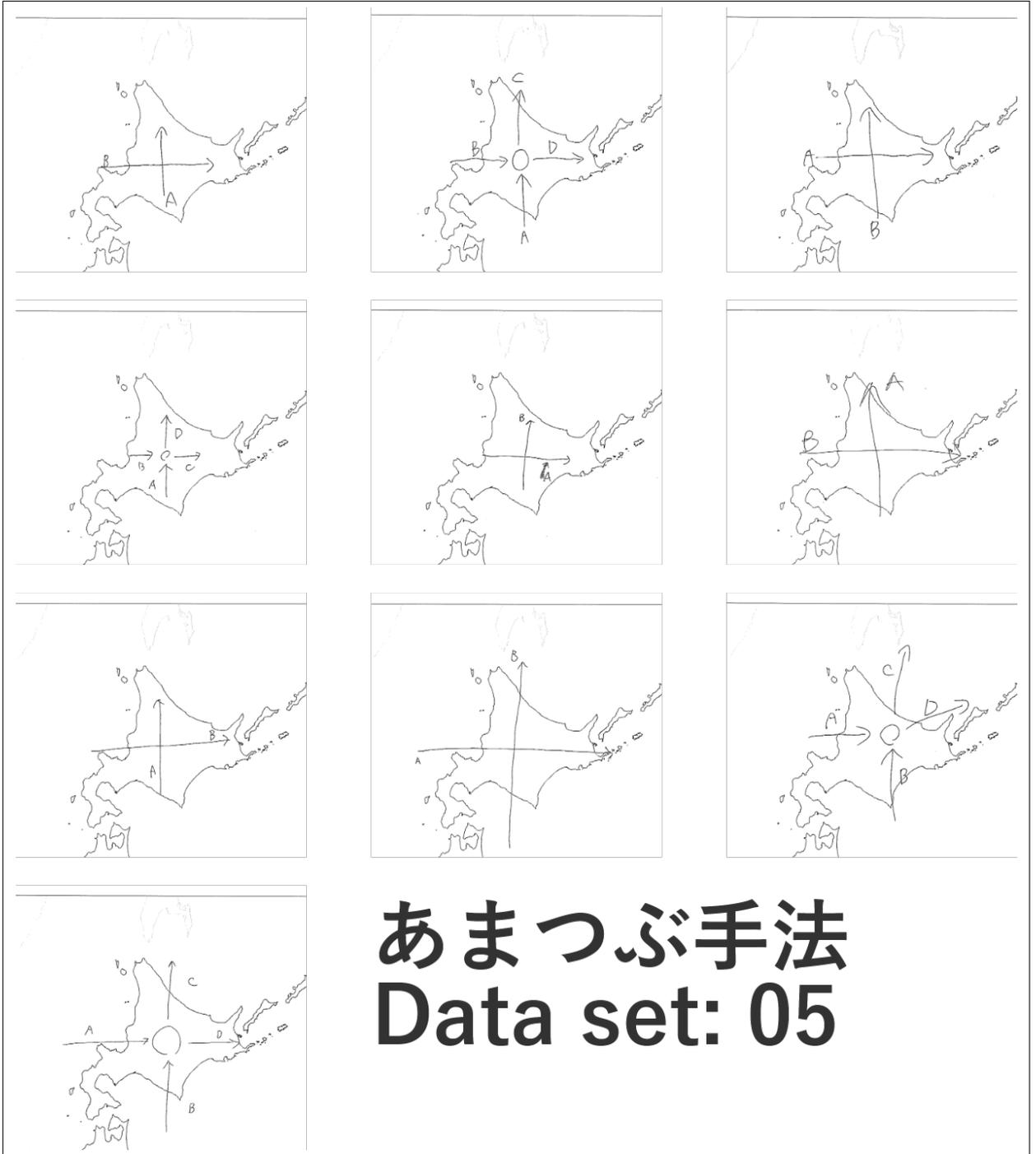


図 B.29: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 5, あまつぶ手法)



図 B.30: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 6, Small multiples)

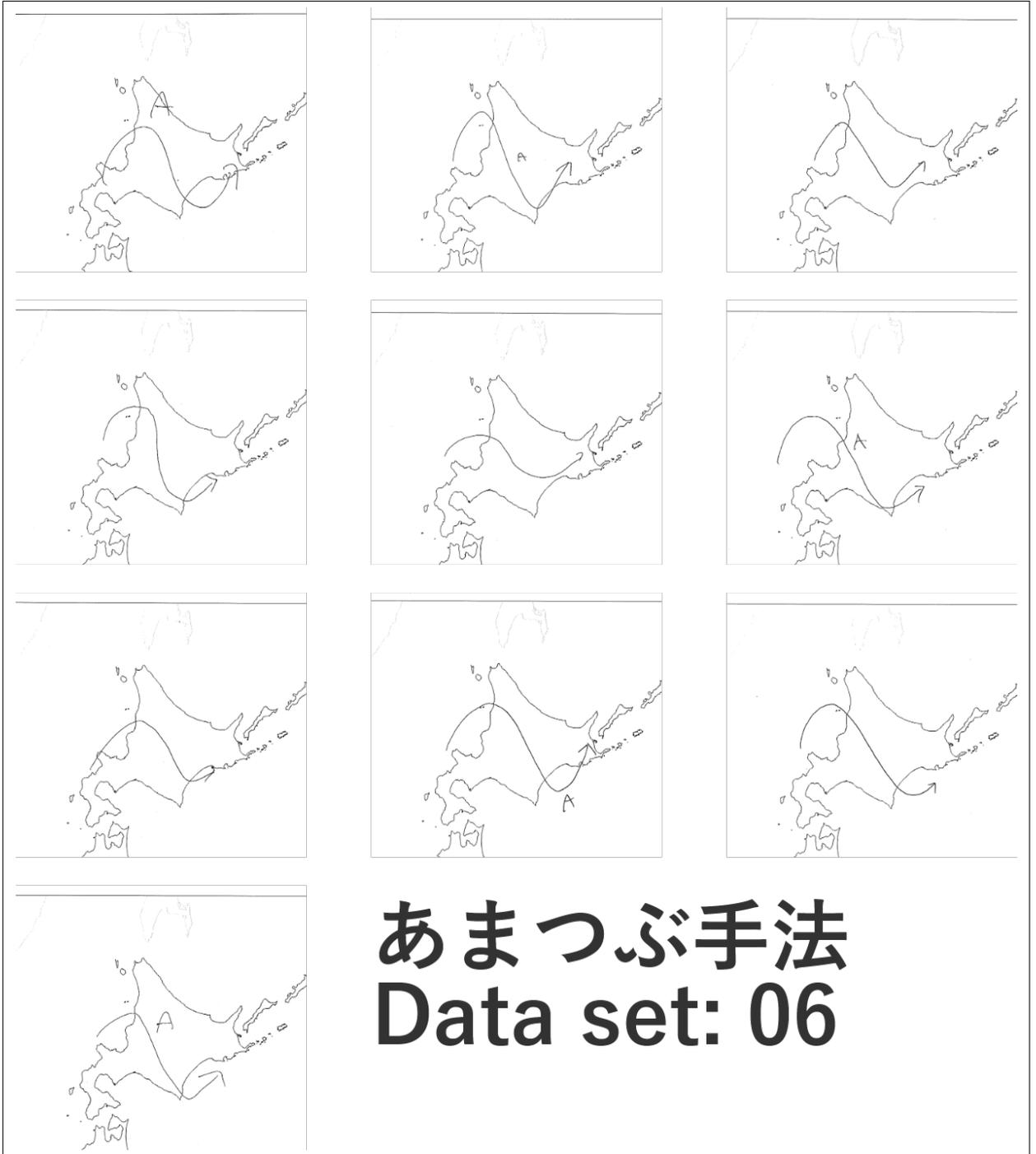


図 B.31: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 6, あまつぶ手法)



図 B.32: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 7, Small multiples)

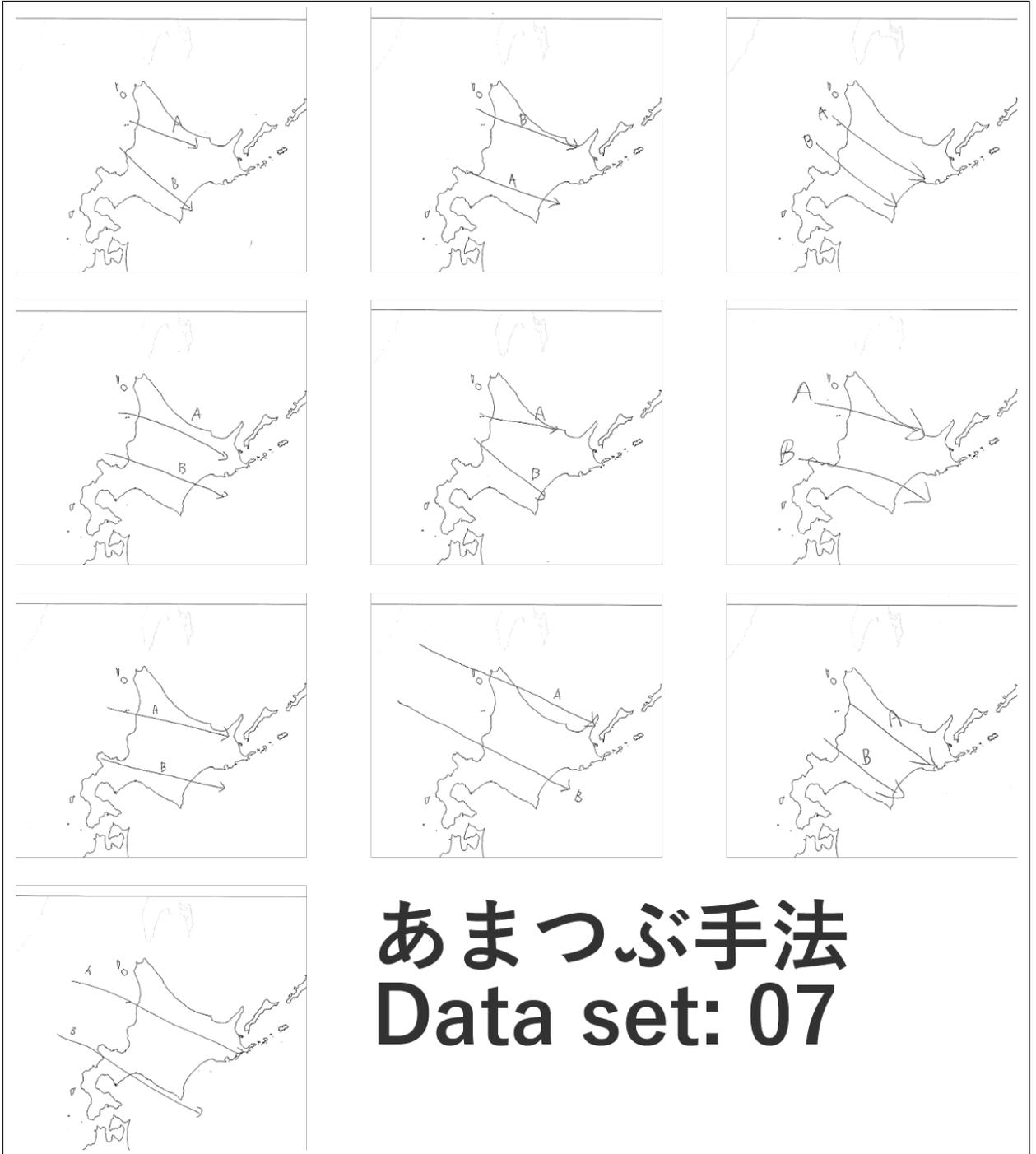


図 B.33: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 7, あまつぶ手法)

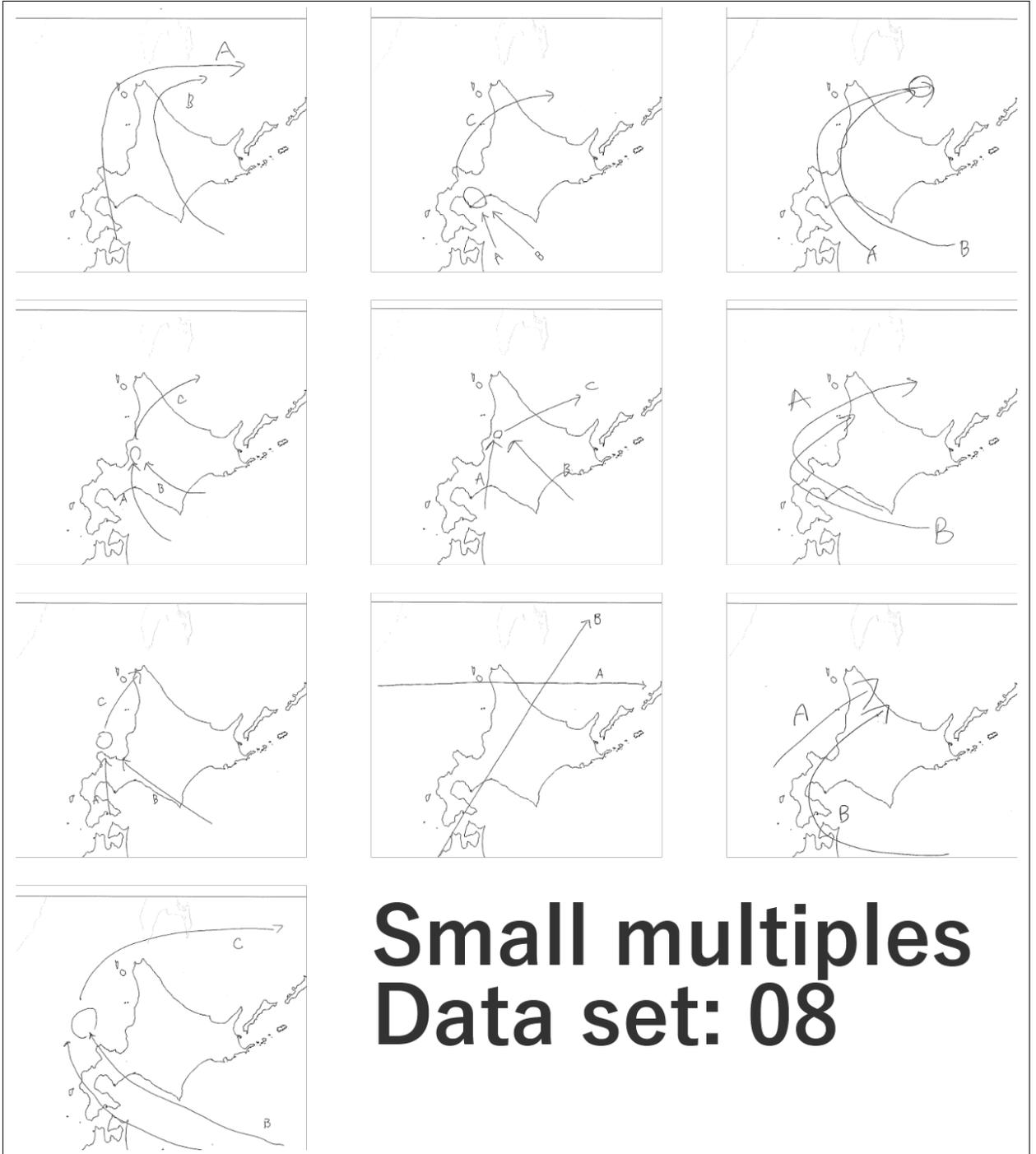


図 B.34: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 8, Small multiples)

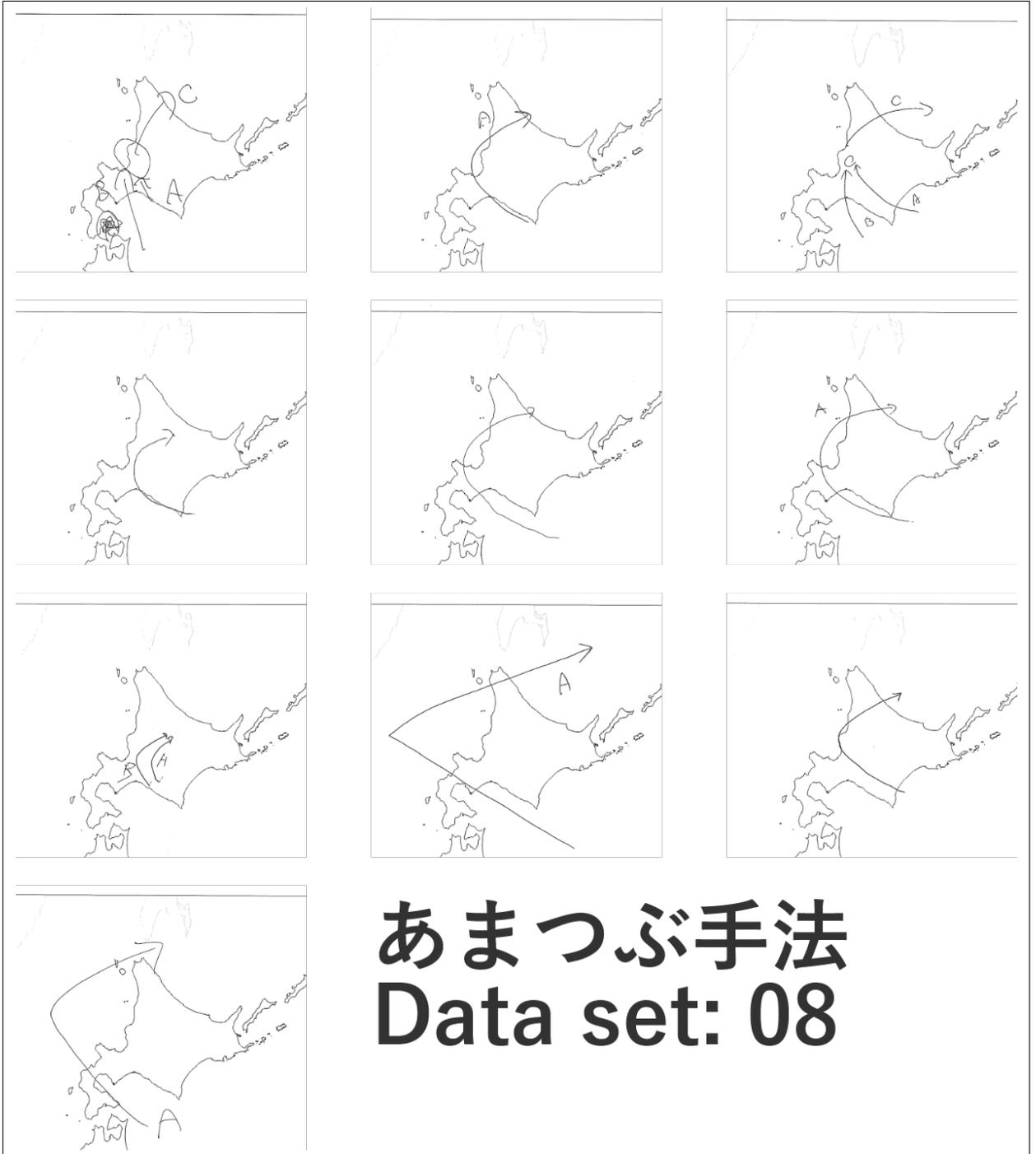


図 B.35: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 8, あまつぶ手法)



図 B.36: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 9, Small multiples)

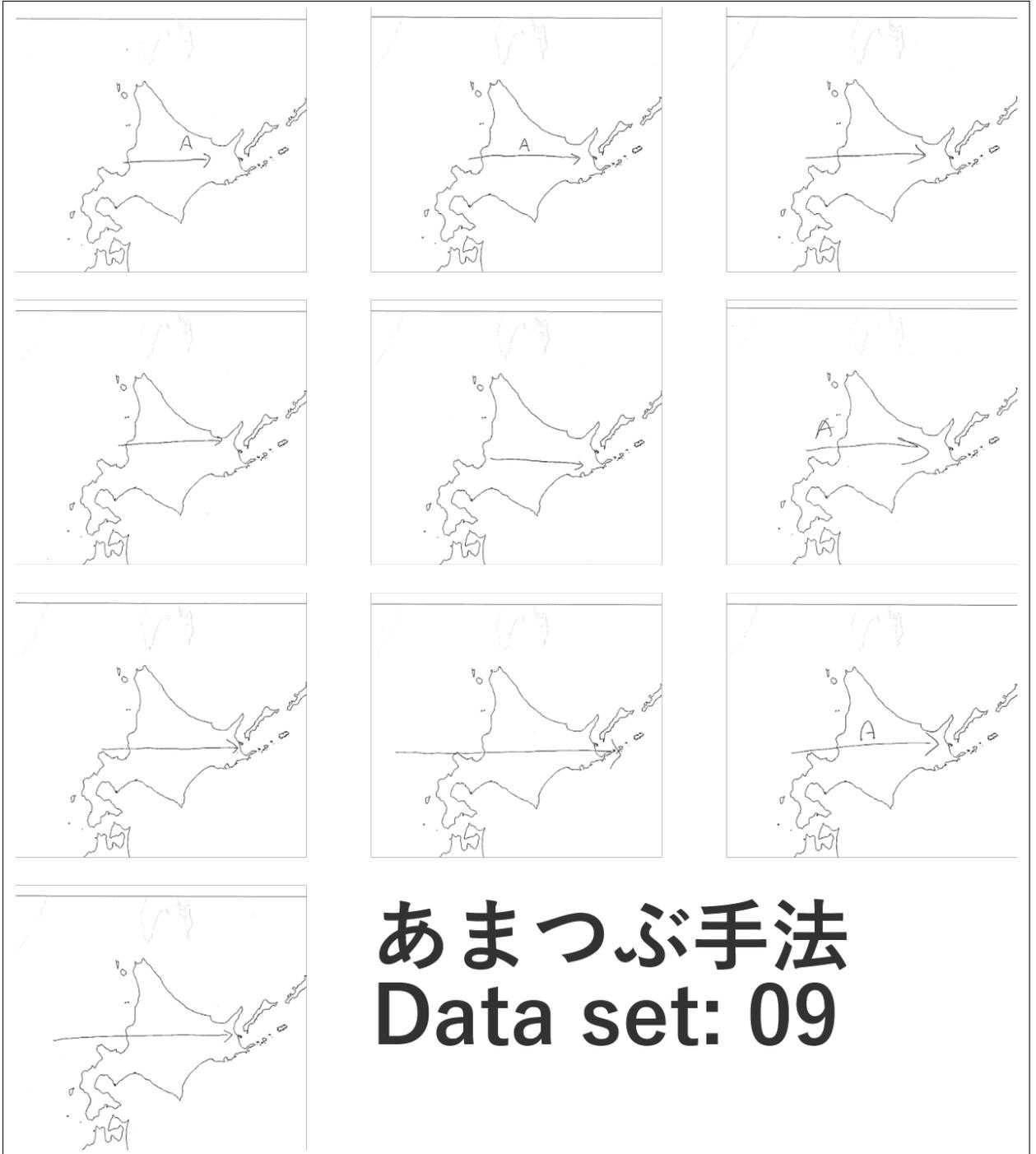


図 B.37: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 9, あまつぶ手法)



図 B.38: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 10, Small multiples)

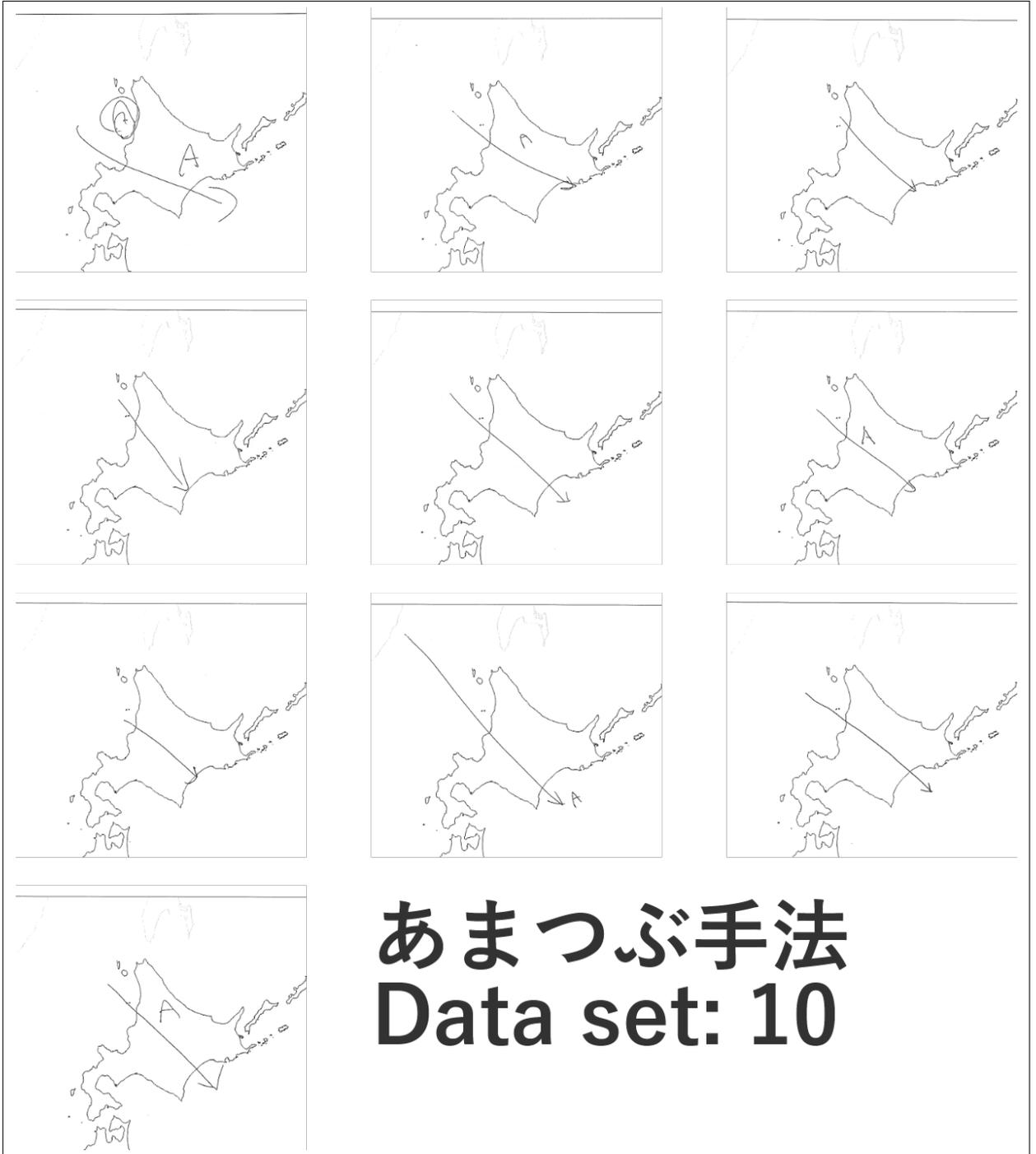


図 B.39: 被験者実験 2 の動きの回答結果 (データ 10, あまつぶ手法)

B.4.3 質問紙（速さ・形状に関する質問）の採点結果

表 B.1: 被験者実験 2 の質問紙（速さ・形状に関する質問）の回答結果

表現手法	項目	データセット									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
あまつぶ手法	速さ	単体	3	1	1	1	2	1	1	1	1
		複数	1	1	2	7	-	-	-	-	-
	大きさ	単体	1	1	1	3	3	1	1	1	1
		複数	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		単体	-	-	2	4	4	1	1	3	-
		複数	-	-	4	4	1	1	3	-	-
Small multiples	速さ	単体	1	2	1	1	1	1	2	1	1
		複数	-	-	4	4	2	3	8	-	-
	大きさ	単体	1	2	1	1	1	1	1	1	1
		複数	-	-	4	4	2	3	8	-	-
		単体	-	-	3	3	1	1	1	1	1
		複数	-	-	4	4	1	1	3	-	-