

時空間変量の空間的变化を読み取りやすい可視化手法の開発と評価

千葉 大輝^{1,a)} 兵吾 勇貴² 三末 和男^{3,b)}

概要：気象データに代表される時空間変量データは、地理空間上のあらゆる位置に時間変化する量的データを持っている。時空間変量データの可視化では、データを時刻毎に地図へプロットし、それをアニメーションを用いて時刻順に表示する手法、または縦や横に並べて表示する手法が代表的である。しかし、そのような手法では、データの空間的な変化を読み取る際に地図を1枚ずつ順番に見比べる必要があり、より長い期間での変化を読み取ろうとすると認知的負荷が大きい。本研究では、このような問題を解決するため、全時刻分のデータをプロットする地図を分けずに単一の地図上で表現できる可視化手法を開発した。ここでは、その設計について述べるとともに、評価実験によって得た提案手法の有用性と今後の課題について言及する。

1. はじめに

気象レーダーやアメダスのような気象観測システムから得られるデータのほとんどは「時刻・位置・値」の3つの属性から成り立っている。時刻と位置の情報を持つようなデータは時空間データと称されるが、このうち気象データのように地理空間上のあらゆる位置が時間変化する量的データを持つものを、本研究では時空間変量データと呼ぶ。

時空間変量データの可視化においては、データを時刻毎に地図へプロットし、それをアニメーションを用いて時刻順に表示する手法、または横や縦に並べて Small multiples^[1]にする手法が代表的である。アニメーションを用いた手法では、時間の経過に沿って表現を変化させられるため、値が空間的にどう変化するかを直感的に理解しやすい。一方、Small multiples は全時刻のデータを一覧できるため、時刻間の比較を行いやすい。それぞれの手法は互いを補う利点を持っており目的によって使い分けられている。その反面、これらの手法には共通した弱点がある。いずれの手法でもデータは時刻によって別々の地図にプロットされるが、それゆえにデータから導かれる空間的な変化を読み取

る際、地図を1枚ずつ順番に見比べる必要がある。より長い期間での変化を読み取ろうとすると、この認知的負荷は特に大きく、読み取りに時間がかかってしまう。

我々はこの問題を解決するため、時空間変量の全時刻のデータを単一地図上で一度に表現できる可視化手法を開発した。地理空間を格子状に区切り、それによってできた部分空間毎にその内部のデータ全時刻分を要約した2次元のチャートを配置する手法である。これにより、1つの地図上で位置の比較を行えるため、空間的な変化の読み取りをより短時間で行えるようになると考えられる。

2. 関連研究

2.1 時空間データの可視化

時刻と位置の情報を持つ時空間データについては、これまで多くの研究が行われてきた。時空間データの可視化においては、位置の表現を地図上で行うことにより、データの分布や相対的な位置関係が理解しやすくなるため、地図が主体的な役割を果たしている。一方、時刻の表現については様々なバリエーションが存在し、既存の可視化手法はその違いによって分類することができる。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」などがあるとした^[2]。

静止画像を用いた時空間データの可視化としてよく知られるものには、ナポレオンの行軍の進攻とそれに伴う兵士数の減少を可視化したものがある^[3]。Small multiples^[1]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

¹ 筑波大学情報学群情報メディア創成学類
College of Media Arts, Science and Technology, School of Informatics, University of Tsukuba

² 電通アイソバー株式会社
Dentsu Isobar Inc.

³ 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

a) chiba@vislab.cs.tsukuba.ac.jp

b) misue@cs.tsukuba.ac.jp

トを規則的に並べたものであり、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た [4]。アニメーションについては、どのよう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 [5]。

インタラクティブな手法として代表的な Space-time cube は、Hägerstrand によって原型が作られた [6]。3次元の立体によって情報を提示する手法で、2次元平面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し、それを様々な角度から見るためにマウスなどによるインタラクションを使用する。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 [7]。

また、Space-time cube は可視化手法としてだけではなく、時空間データを表現する際のメタファーとして使われることもある。Bach らはメタファーとしての Space-time cube に対し、2次元平面として地理空間だけを扱うのではなく、静的なデータの可視化で用いられる2次元の表現空間全般を扱うように拡張した Generalized space-time cube という概念を定義した [8]。Bach らはの中で、時空間データの既存の可視化手法が、3次元の Space-time cube から2次元の可視化表現へどのように変換しているかをまとめ、時刻毎のプロットを並べる Small multiples への変換に対しては Time juxtaposing という名前を付けている。以後、本論文では Time juxtaposing による Small multiples を、それ以外の Small multiples と区別するため、単に Time juxtaposing と表記する。

2.2 時空間変数データの可視化

時空間データの可視化手法のうち、時空間変数データの可視化には主にアニメーションと Time juxtaposing が用いられる。アニメーションは気象予報など大衆向けによく使用されるが、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ド等の GUI を通した情報提示手法が用いられることが多い [9]。時空間変数データを Time juxtaposing で表現する際には、値を色で表現した地図がよく用いられる。図 1 は、国土交通省から提供された X バンド MP レーダによる降雨強度データを、Time juxtaposing と気象庁 HP で使われている配色 [10] を用いて可視化した例である。データは 10 分毎に記録されたもので、図 1 はその 3 時間分を表現している。

3. 時空間変数と空間的变化

時空間変数データを可視化することによって、高次元情報である空間的变化が読み取り可能になる。ここでは、まずはじめに時空間変数データの定式化を行い、その空間的

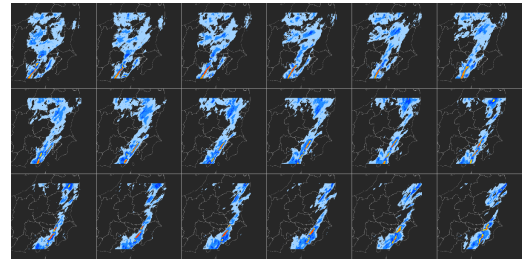


図 1 降雨強度データを Time juxtaposing を用いて可視化した例
Fig. 1 Example of the use of time juxtaposing

変化とは何かについてまとめる。

3.1 時空間変数の定式化

本来、時空間変数データは地理空間上で連続的に値が存在する。しかし、実際に流通する時空間変数データの形式は、地理空間上の任意の範囲内で細かく領域を区切り、各領域から 1 つずつ値をサンプリングした離散的なものである。そこで、ここではある矩形領域 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、

$$S = \{s_{x,y} \mid 0 \leq x < N_{lon} \text{ かつ } 0 \leq y < N_{lat}, \text{ ただし } x, y \text{ は整数} \} \quad (1)$$

$$L = \bigcup_{s \in S} s = \bigcup_{x=0}^{N_{lon}-1} \bigcup_{y=0}^{N_{lat}-1} s_{x,y} \quad (2)$$

$$x \neq v \text{ または } y \neq w \text{ のとき } s_{x,y} \cap s_{v,w} = \emptyset \quad (3)$$

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 $u_t(s)$ で表し、 $u_t(s) \in R_{\geq 0}$ 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、時間も実際扱われるデータでは離散化されているため、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、

$$u(s) = (u_0(s), u_1(s), \dots, u_{N_t-1}(s)) \quad (4)$$

とする。

3.2 空間的变化

人の移動データのような時空間データでは、何らかの意味を持ったオブジェクトに位置が紐付けられ、その変化を追跡することができる。時空間変数データには、空間上の位置にそのようなオブジェクトは紐付けられていない。し

^{*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

かし、地図上で可視化することにより、内側すべての位置の値が特定の範囲に収まるような部分空間を1つのまとまりとして認識することができ、その地理空間上での動きや形状の変化を追跡することができる。このように、時空間変量において空間的变化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空間的变化の抽出を目的とした何らかのデータ処理が必要である。

空間的变化の種類には、「クラスタの形状変化・移動」と「値のピーク地点の移動」の2つが考えられる。

3.2.1 クラスタの形状変化・移動

ある領域 $s \in S$ と、その領域に隣接する領域 $s' \in S$ 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、 $u_t(s) \geq \varepsilon$ かつ $u_t(s') \geq \varepsilon$ 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、条件を満たす領域 s と s' の組み合わせを足し合わせてできる連続した領域をクラスタと呼ぶこととする。気象レーダーのデータであれば、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。クラスタは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、大きさの変化や分離と合流などが考えられる。

3.2.2 値のピーク地点の移動

クラスタ内のある2つの領域 $s \in S$ と $s' \in S$ 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、常に $u_t(s) \geq u_t(s')$ を満たす領域 s が存在する。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。例えば気象レーダーのデータであれば、値のピーク地点は雨雲の中心と言える。気象レーダーのデータを読み取った結果を他人に伝えるときには、雨雲の中心がどのように移動し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は、移動の速さや軌跡の形状などの違いで様々なパターンが考えられる。

4. 提案手法

我々は空間的变化の読み取りに関する問題を解決するため、時空間変量データを単一地図上で表現する可視化手法を開発した。図2は、図1で示したものと同一データを提案手法で可視化したものである。

4.1 基本的なアイデア

図3左図に赤色で示した平面をある時刻のデータのプロットだとすると、既存手法の Time juxtaposing はそれを抜き出して表示領域に合うよう縮小し、時刻順で適当な

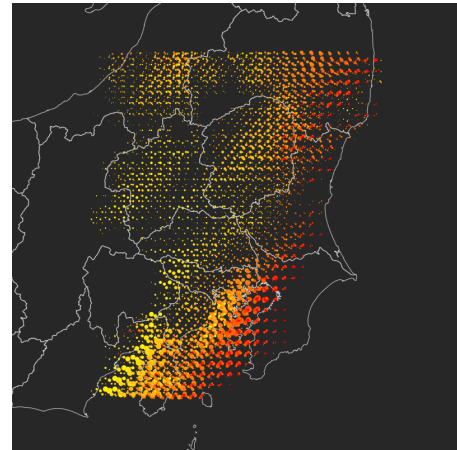


図2 降雨強度データを提案手法を用いて可視化した図
Fig. 2 Example of the use of the proposed method

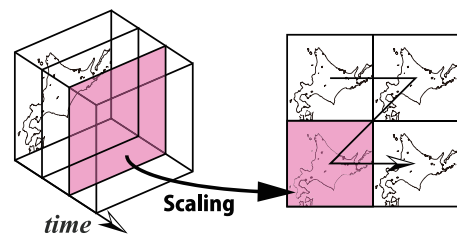


図3 時空間変量データから Time juxtaposing への変換
Fig. 3 Conversion to time juxtaposing from the spatio-temporal variables

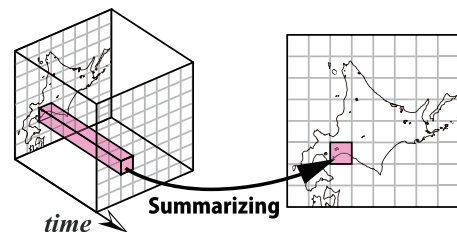


図4 時空間変量データから提案手法への変換
Fig. 4 Conversion to the proposed method from the spatio-temporal variables

位置に配置する手法である。それに対し、提案手法ではまず図4のように地理空間を格子状に区切って部分空間を作る。図4左図に赤色で示したのはそのうちのある部分空間内のデータ全時刻分であり、これを2次元のチャートに要約してその場に配置する。チャートは簡単なものにして表示領域を抑え、地理空間はそれに合わせて細かく区切る。こうすることにより、データを表現する位置とデータを持つ実際の位置とのズレを最小限にできるため、部分空間毎にデータを要約して表現しても、地図全体として空間的な情報の表現力を大きく損なうことはない。

部分空間を要約するチャートには、全時刻分の情報を失っていくい、より簡単な表現であることが求められる。チャートへの要約は、位置に基づくデータの集約と、集約後のデータに対する視覚変数の割当の2つの手順で行う。

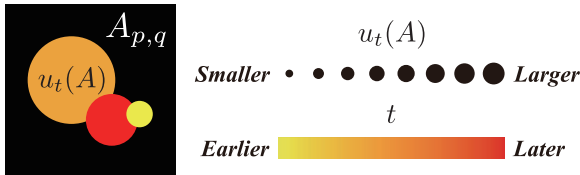


図 5 視覚変数の割当てと凡例

Fig. 5 Allocation and the legend of the visual variables

4.2 位置の基づくデータの集約

チャートを配置する元となる矩形領域 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、

$$A_{p,q} = \{s_{x,y} \in S \mid pi \leq x < (p+1)i \text{ かつ} \\ qj \leq y < (q+1)j\} \quad (5)$$

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、

$$u_t(A) = \frac{1}{|A|} \sum_{s \in A} u_t(s) \quad (6)$$

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、

$$u(A) = (u_0(A), u_1(A), \dots, u_{N_t-1}(A)) \quad (7)$$

とする。

4.3 視覚変数の割当て

集約された時空間変数データについて、領域 $A_{p,q}$ ごとに、 $u(A)$ を小さな円を用いて図 5 のようなチャートにする。円は 1 つのチャート内に N_t 個配置され、1 つの円は時刻 t とその時の値 $u_t(A)$ を表す。視覚変数としては、時刻 t に円の色を、値 $u_t(A)$ に円の面積に割当てる。色と時刻の対応付けは、順序を追いやすように、時間が進むつれて黄色から赤色へ変化するグラデーションとした。ここでの表現に円を用いるのは、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ような属性を持っていないからである。

そのように視覚変数を割り当てた円は、各時刻の円が重なりにくいように領域 $A_{p,q}$ 内でランダムにずらして配置する。また、円が重なって隠れることがないように、大きい円よりも小さい円が前になるように重ねる。これにより、全時刻分の情報を失いにくい表現が実現できる。

5. 評価実験 1 提案手法の有用性の検証

本研究では、提案手法について 2 つの観点から評価を行った。1 つは提案手法の有用性の検証、もう 1 つは提案

手法の特性の客観的な調査という観点である。いずれの評価実験でも、既存手法のうち、提案手法と同じく静的な手法である Time juxtaposing との比較を行った。

本節では提案手法の有用性の検証について説明する。

5.1 実験内容

擬似的に生成して可視化した降雨強度データを被験者に提示し、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。この実験では、3.2.1 におけるクラスターを雨雲と読み替える。実験では雨雲の空間的变化にあたる以下の項目を問う質問を用意し、全ての読み取りに要した時間と、それぞれの項目の読み取りの正確さを比較した。

- 雨雲が動いた軌跡
(動いた方向・離合の有無・雨雲の数)
- 雨雲の速さの変化
(複数の雨雲が確認できた時には速さの比較)
- 雨雲の大きさの変化
(複数の雨雲が確認できた時には大きさの比較)

読み取れた内容については、質問紙へ書き込んでもらった。ただし、書き込みに要する時間には個人差が大きいと考え、可視化表現から読み取っている最中には質問紙への書き込みを禁じた。

被験者 1 人につき、既存手法を用いて表現したデータ 5 種類と提案手法を用いて表現したデータ 5 種類の合計 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、どちらの手法を先に行うのかを被験者ごとに変えた。また可視化表現の提示は 1 回のタスクにつき 1 度だけとし、読み取り時間は 5.4 で説明する方法により計測した。それぞれの手法でタスクを開始する前には、練習タスクを行って各手法への理解を深めてもらった。

5.2 使用した時空間変数データ

この実験では雨雲の動き方によって可視化手法の効果が異なるのではないかと考え、雨雲の動きに特徴のある 10 種類のデータを用意した。10 種類それぞれの雨雲の動きを表 1 に示す。データの提示に使用する可視化手法は、番号の奇偶と対応付けた。全データで両手法による回答を集めるため、被験者によってその対応付けは入れ替えている。

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、提案手法で可視化表現を作成する際は、4.2 節の処理を省略した。なお、データの中に時刻は 18 あり、その間隔はすべて等しいものとした。

5.3 被験者

大学生および大学院生 20 名 (うち男性 14 名、女性 6 名、年齢 21~25 歳) に協力してもらった。被験者の専攻は 20 名中 11 名が情報科学系で 6 名がその他の理工学系、残る 2 名が文系であった。なお、事前に色覚について調査した

表 1 評価実験 1 で用いた各データの特徴

Table 1 Features of the data used in User Study 1

データ	雨雲の動き
D1	西から東へ向かって直線状に移動する
D2	南西から北東へ向かって北西向きに弧を描く
D3	Y の字型を描くように分離する
D4	人の字型を描くように合流する
D5	十字型に雨雲が交差する
D6	正弦波状に蛇行しながら西から東へ動く
D7	2 つの雨雲が並行して西から東へ動く
D8	小さな雨雲が大きな雨雲を追いかける
D9	直線状に動きながら大きくなっていく
D10	直線状に動きながら小さくなっていく

ところ、1 名から 1 型色覚であるとの申告を受けた。

5.4 実験環境

色が正確に出力されるディスプレイ (EIZO ColorEdge CG277 27 インチ) を使用し、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 [ミリ秒] を計測した。なお、可視化表現を作成する際、既存手法では地図を時刻の順に右に並べ、1 列 6 枚で左下に折り返した。表示領域は縦横比が異なるものの、既存手法と提案手法でほぼ同じ面積 (px^2) となるよう配慮した。

5.5 実験結果

実験の結果得られた読み取り時間と質問紙への回答結果をまとめる。

5.5.1 読み取り時間

読み取りに要した時間は表 2 のとおりである。この実験の全測定結果に対し手法間で t 検定を行ったところ、有意水準 $p < 0.05$ で有意な差が認められた ($p = 4.93 \times 10^{-5}$)。また、データ毎でも t 検定を行っている。これらの結果を表 2 に併記する。なお、表中の「*」は $p < 0.05$ で有意差があることを示している。

5.5.2 動きの軌跡の回答結果

動きの軌跡は地図上に矢印を描くことで回答してもらった。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。

提案手法からは、D8 を除く全てのデータで、雨雲が進んだ距離や方角、他の雨雲との位置関係をほぼ正確に回答できていた。提案手法を用いて実際に被験者へ提示した D8 を図 6 に示す。D8 は、一度大きな雨雲が通った後を再び小さな雨雲が通るようなデータであるが、このデータに限っては読み誤りが多く、提案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 名は雨雲が 2 つ存在することに気が付かなかった。

表 2 データ毎の回答時間 [秒] と t 検定の結果

Table 2 Durations of reading [sec.] and results of t-test for each data set

データ	既存手法		提案手法		p	
	$\bar{x}$	s_d	$\bar{x}$	s_d		
D1	16.13	11.06	11.81	9.447	0.361	
D2	20.89	8.723	6.985	3.937	0.000555	*
D3	18.50	9.939	23.83	17.28	0.412	
D4	32.39	21.26	9.797	4.595	0.00839	*
D5	18.95	12.19	24.43	20.13	0.473	
D6	31.72	16.26	9.659	5.401	0.00186	*
D7	15.02	7.258	15.51	15.35	0.929	
D8	54.63	35.78	17.30	14.75	0.0101	*
D9	12.72	6.337	11.65	8.985	0.762	
D10	15.13	8.701	7.227	5.038	0.0257	*
全体	23.61	19.67	13.82	12.86	0.0000493	*

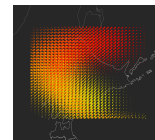


図 6 提案手法を用いて被験者に提示した D8

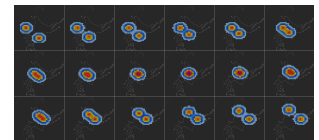


図 7 既存手法を用いて被験者に提示した D5

Fig. 6 D8 presented with the proposal method Fig. 7 D5 presented with time juxtaposing

一方、既存手法からは軌跡を示す矢印が右上方向に伸びた回答が見られ、2 つの雨雲が東西・南北方向で垂直に交差する D5 では特にそれが目立った。既存手法を用いて実際に被験者へ提示した D5 を図 7 に示す。既存手法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。

5.5.3 速さ・形状の変化に関する回答結果

速さ・形状の変化に関する質問への回答は、各データに対して雨雲の速さと大きさの変化を、雨雲が複数あればそれに加えて速さと大きさの比較をそれぞれ模範解答として設定し、データ毎にその誤りの数を数えた。

誤りの数の差を t 検定を行って調べた結果、どのデータでも有意な差がなかった。その一方、データ間で回答を見比べると 5.5.2 と同様の理由で D8 での誤答が目立った。

5.6 考察

提案手法は既存手法に比べて短い時間で回答できることが分かった。その一方で、回答の正確さについては今回の実験から有意な差を見出すことができなかった。しかしこのことは、既存手法が時間をかけることで内容をある程度正確に読み取れる手法であるのに対し、提案手法は同程度の正確さでより短い時間内に読み取れる手法であるということを示している。また、軌跡の読み取りについては提案

手法の方が正確だと言えるであろう。

データ毎の読み取り時間に関しては、有意差が認められるデータとそうでないデータがあった。しかし、表2の一覧を見るとそれがデータ番号の奇偶ではっきり分かれている。5.2で述べたように、この実験ではデータ番号の奇偶で被験者と提示に用いる手法との対応付けが固定されていたため、この結果には被験者の読み取り能力の偏りが影響した可能性がある。このことから、ここではデータ毎の効果について言及を避ける。

既存手法との比較を行わず、提案手法のみに注目すると、D8で本来は2本ある軌跡が1本に見えてしまうという読み誤りが多かった。このことから、提案手法の弱点として、複数のクラスが時間差で同じ軌跡を描くようなデータに対し、表現力が低いということが分かる。これに関しては、時刻の配色に2色間のグラデーションを用いていることにより、離れた時刻の円が隣り合うと、加法混色によってそれらの時刻の色の中間色に見えるため、結果的に軌跡が1本に見えてしまうことが原因であると考えられる。

6. 評価実験2 提案手法の特性の客観的な調査

評価実験1では、空間的変化の読み取りに対する効果のみを評価した。評価実験2では、時空間変量データを構成する要素を個別に読み取ってもらい、それぞれ既存手法と比較することで、提案手法の特性を客観的に調査した。

6.1 実験内容

評価実験1の読み取り項目に代え、この実験では時空間変量データを構成する「時刻・位置・値」の3つの要素の組合せから、読み取る項目として以下8つの質問を用意した。

- Q1 雨雲の中心位置はどのような軌跡を描くか
- Q2 この時刻の雨雲はどのような範囲にかかっているか
- Q3 この時刻の値のピーク地点はどこにあるか
- Q4 この地点に雨雲は何時にかかるか
- Q5 この地点に雨雲は何時間かかっているか
- Q6 この地点でこの時刻の一時間後に値はどう変化するか
- Q7 地点A・Bで雨雲が早くかかるのはどちらか
- Q8 地点A・Bで雨雲が長くかかっているのはどちらか

これらの質問は「時刻・位置・値」を表3に示すように組合せたもので、それぞれその表に併記した回答方法で回答してもらった。なお、二者択一で回答してもらう質問には、読み取れなかった場合に偶然正解するというを防ぐため、別途「分からない」という選択肢も設けた。

評価実験2では質問を1つずつ一定時間をかけて読み取ってもらい、その正確さのみを比較した。回答用紙は質問毎に分け、1つの質問の内容を全てのデータ・可視化手法から読み取った後、次の質問へ進むという順序で進めた。採点方法の都合上、出題した問題数は質問によって異なり、既存手法と提案手法の両方で表3に示した回数行っても

表3 評価実験2における質問の詳細

Table 3 Details of the questions in User Study 2

質問	要素の組合せ	回答方法	問題数
Q1	位置の時刻間比較	図示（曲線）	5
Q2	位置	図示（閉曲線）	5
Q3	値の位置間比較	図示（小円）	5
Q4	絶対時刻	数値	5
Q5	相対時刻	数値	5
Q6	値の時刻間比較	二者択一（増減）	10
Q7	絶対時刻の位置間比較	二者択一（AB）	10
Q8	相対時刻の位置間比較	二者択一（AB）	10

表4 評価実験2で用いた時空間変量データ

Table 4 Types of the data used in User Study 2

タイプ	設定した特徴
T1	雨雲が1つ
T2	雨雲が2つ、軌跡が交差しない
T3	雨雲が2つ、軌跡が交差する
T4	雨雲が1つから2つに分岐、または逆に結合する
T5	雨雲が2つ、軌跡が時間差で重なる

らった。なお、実験はカウンターバランスをとるため、どちらの手法を先に行うのかを被験者ごとに変えた。各質問の各手法で、本番を開始する前には練習問題を行い、質問に対する答えの読み取り方を短い時間考えてもらった。

6.2 使用した時空間変量データ

評価実験1により、雨雲の軌跡の複雑さによって読み取り結果に影響が出ることが分かった。そのため、評価実験2では軌跡の複雑さ別に5つのデータタイプを設定し、それぞれでの提案手法の効果を調査することにした。それぞれのタイプに対しては、設定に沿って問題の難易度になるべく差がないようなデータを2つずつ用意した。Q1~5では、そのタイプをそれぞれ1つの群として扱い、手法間の比較を行う。5つのタイプの設定は表4のとおりである。

表3において問題数が5問の質問は、各手法で各タイプから1問ずつ、10問のものは各手法で各タイプから2問ずつ出題した。このとき、同じデータを両方の手法で見ることがないように、各タイプで用意した2つのデータのうち、片方を既存手法で、もう片方を提案手法での問題に使用した。なお、そのようなデータと手法の対応付けは、カウンターバランスを取るため、被験者によって入れ替えている。また、評価実験1ではデータの時刻の間隔を明示しなかったが、この実験ではそれを1時間とすることを伝えた。

6.3 被験者

大学生および大学院生20名（うち男性18名、女性2名、年齢21~24歳）に協力してもらった。被験者の専攻は20名中15名が情報科学系で3名がその他の理工学系、残る2名が文系であった。なお、色覚異常の申告はなく、評価

表 5 Q1~3 の採点結果の平均

Table 5 Results of the grading of the answers for Q1-3

質問	手法	T1	T2	T3	T4	T5
Q1	既存手法	5.35	4.43	2.18	3.93	3.72
	提案手法	7.92	7.00	7.70	6.58	4.17
Q2	既存手法	7.55	6.75	6.60	7.32	6.73
	提案手法	2.33	3.15	3.17	3.45	3.38
Q3	既存手法	8.10	7.75	7.82	8.92	8.17
	提案手法	4.40	3.33	3.28	3.82	2.68

表 6 Q4・5 の回答における正答とのズレの平均 [時間]

Table 6 Deviations between the correct values and the answers for Q4 and Q5 [hour(s)]

質問	手法	T1	T2	T3	T4	T5
Q4	既存手法	0.55	0.20	0.40	0.45	1.75
	提案手法	1.45	1.65	2.35	1.25	1.95
Q5	既存手法	0.60	0.60	1.80	0.70	3.55
	提案手法	1.10	1.30	4.90	1.05	4.00

表 7 Q6~8 の正解数

Table 7 Numbers of the correct answers for Q6-8

質問	既存手法		提案手法		分散分析	
	$\bar{x}$	s_d	$\bar{x}$	s_d	手法	交互作用
Q6	8.35	1.39	5.8	1.79	0.00***	0.916
Q7	9.35	0.745	8.95	0.759	0.0419*	0.288
Q8	6.95	1.76	8.35	1.95	0.0156*	0.574

実験 1 と評価実験 2 で被験者に重複はない。

6.4 実験環境

評価実験 2 で用いたプログラムは、Enter キーを押すと 3 秒間カウントダウンした後、可視化表現が 12 秒間提示されるものである。読み取りに時刻や位置などといった条件の指定がある場合は、Enter キーを待機する画面から表現を消すまで、画面左側に表示するようにした。なお、12 秒という時間は、評価実験 1 で提案手法による回答のうち全項目を正しく読めていた回答の平均読み取り時間 12.78 秒をもとに設定したものである。この実験では、提案手法がある程度性能を発揮した上での特性を調べたいと考えたため、このように制限時間を設定した。

また、今回は時刻を答えてもらう質問があるため、既存手法では各地図の右下に時刻を 24 時制で表示し、提案手法では地図の右側に色と 24 時制での時刻の対応付けを示す凡例を設けた。表示に用いる面積は、凡例を含めてほぼ同じになるよう配慮した。

6.5 実験結果

被験者から得られた回答の採点結果について、表 5・表 6・表 7 に示す。

Q1~3 は地図上に回答を描いてもらう質問であったた

め、被験者ではない 3 名に事前に用意した手本とどれだけ類似しているかを 10 点満点で採点してもらい、その平均値を得点とした。表 5 ではその得点の平均値を示しており、数値が大きい方がよい。

Q4・5 は時刻または時間を答えてもらう質問であり、表 6 ではその正答とのズレ [時間] の平均を示している。そのため数値は小さい方がよい。

表 7 については、Q6~8 の回答が必ず正解か不正解のいずれかであるため、各手法で出題した 10 問のうち正解した数の平均 $\bar{x}$ と標準偏差 s_d を示している。

Q1~5 については、データタイプと可視化手法の違いに加え、どちらの可視化手法でタイプ内のどちらのデータを見たかにより被験者グループが分かれるため、合わせて 3 つの要因がある。そこで、この集計結果の分析のため、三元配置分散分析を行った。表 5 および、表 6 では、三元配置分散分析にて、データタイプが以下のいずれかに当てはまり、かつ優れていた方を太字で表記している。

- 2 次の交互作用がなく、タイプと手法の 1 次の交互作用があった場合に、手法の単純主効果が有意であったタイプ ($p < 0.05$)
- 2 次の交互作用があった場合に、被験者グループと手法の単純交互作用の検定を行なって、交互作用が認められず手法の主効果が有意であったタイプ ($p < 0.05$)

一方、Q6~8 ではデータタイプを跨いでの集計となったため、被験者グループと可視化手法の 2 要因であった。そこで、二元配置分散分析を行ったところ、いずれも交互作用は認められず、手法の主効果が有意水準 $p < 0.05$ で有意であった。表 7 の分散分析の結果においては、「*」が $p < 0.05$ 、「***」が $p < 0.001$ である。なお、被験者グループの主効果は省略している。

6.6 考察

Q1 と Q8 においては提案手法が優れており、その他の質問では既存手法が優れていた。

Q2・Q3・Q6 は、いずれも時刻が指定され、その時刻に対応する値のクラスがどれかを判断しなければいけない質問であった。そのクラスを見つける際、既存手法は指定された時刻の地図を見れば良いのに対して、提案手法は時刻を色と対応付けなければならず、時刻間の色差がさほどないため、そこでどうしても曖昧さが生じてしまう。それゆえに、その時刻に紐づく位置や値といった情報も正確に読み取ることができなかったと考えられる。

Q1 の結果からは、提案手法からクラスタの位置の変化を短時間でより正確に読み取れるということを検証できた。一方で、データタイプ別に見たときには、軌跡が時間差で重複する T5 の様なデータでは正確さに欠ける部分があった。これは評価実験 1 と同様の弱点を示す結果であるが、既存手法であっても T5 の得点は低い。実際に被験者が描

いた回答を見ると、提案手法では雨雲の数が合っていないという間違いが多いものの、軌跡の形を重視するとある程度手本と近かった。反対に、既存手法では雨雲の数を読み取れているものの、軌跡で見ると手本とはかけ離れている回答が多かった。このことから、既存手法であってもクラスタの軌跡が複雑になると軌跡の補完が追いつかず、正しい軌跡の形の認識まで至らないということが分かる。

これと似たようなことは、時間の読み取りと、その比較を行う Q5・Q8 から言うことができる。これらの質問はどれも位置が指定される質問であり、既存手法からこれらの質問の内容を読み取る場合、各地図でその位置に雨雲が有るかどうかの判定が行えるため、時間があれば正確に答えることができる。一方、提案手法で読み取る場合は指定された位置付近にある円や色の数を数える必要があり、色差のあまり大きくない円同士が部分的に重なって配置されている都合上、その段階でどんなに時間があっても曖昧さが生じる。既存手法において雨雲がかかっているかどうかを判定する作業の回数は、Q5 よりも Q8 の方が多くなっていた。そして結果として、既存手法で地図を追う回数が比較的少なく済む Q5 では既存手法が優位であったが、その作業が多い Q8 では提案手法の方が優位になっていた。これらのことから、雨雲がかかっているかどうかの判定は、それを行う回数が増えるほど必要とする時間が長くなるのに対し、指定位置付近の円や色の数を大まかに数えるのに要する時間はあまり変わらないということが分かる。既存手法において、雨雲がかかっているかどうかの判定は表現する時刻の数が増えるほど多く必要になる。そのため、より長い期間のデータを扱うか、より短い時間での読み取りが必要とされる場合は、Q5 であっても提案手法が優位になると考えられる。

時刻を読み取る Q4 とその比較を行う Q7 においても、提案手法で読み取る際に必要な作業が、その位置付近で最も黄色に近い色を探し時刻と対応付けるという作業に変わるだけで、Q5・Q8 と同じことが言える。Q1 の分析と合わせ、以上のことから、既存手法は読み取るデータの大きさや読み取りにかけられる時間によってその正確さが大きく変わる手法であり、反対に提案手法は読み取りの正確さがそのような条件に依存しにくい方法であると結論付けることができる。

7. まとめと今後の課題

時空間変量データを単一地図上で表現する可視化表現を開発した。提案手法は、空間を細かく分割して要約することにより、時空間変量データが持つ空間的な変化の情報を読み取りやすくすることを目指した手法である。既存手法との2つの比較実験により、提案手法の有用性の検証と特性の調査を行った。結果として、提案手法は空間的变化に関する情報をより短時間で読み取ることができ、目的に対

して有用であることを示すことができた。また、提案手法はデータの大きさや読み取りにかけられる時間といった条件に、読み取りの正確さが左右されにくい手法であるということも分かった。以上のことから、提案手法は時空間変量データをより短時間で提示する必要がある場面での使用に効果が期待できる。

その一方、提案手法には、時刻や値の読み取りに厳密さが求められる場合、表現に適さないという弱点が残った。今後の課題は、視覚変数の改良や補助的な視覚効果の導入などを行って、弱点を補う方法を検討することである。

参考文献

- [1] Tufte, E.: *Envisioning Information*, Graphics Press, Cheshire, CT, USA (1990).
- [2] Andrienko, G., Andrienko, N., Demsar, U., Dransch, D., Dykes, J., Fabrikant, S. I., Jern, M., Kraak, M.-J., Schumann, H. and Tominski, C.: Space, time and visual analytics, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 24, No. 10, pp. 1577–1600 (2010).
- [3] Kraak, M.-J.: Geovisualization illustrated, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, Vol. 57, No. 5, pp. 390–399 (2003).
- [4] Harrower, M.: 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).
- [5] Harrower, M. and Fabrikant, S.: The role of map animation for geographic visualization, *Geographic visualization*, pp. 49–65 (2008).
- [6] Hägerstrand, T.: What about people in regional science?, *Papers in regional science*, Vol. 24, No. 1, pp. 7–24 (1970).
- [7] Kraak, M.-J.: The space-time cube revisited from a geovisualization perspective, *Proceedings of 21st International Cartographic Conference*, pp. 1988–1996 (2003).
- [8] Bach, B., Dragicevic, P., Archambault, D., Hurter, C. and Carpendale, S.: A Descriptive Framework for Temporal Data Visualizations Based on Generalized Space-Time Cubes, *Computer Graphics Forum*, Wiley Online Library (2016).
- [9] Quinan, P. S. and Meyer, M.: Visually Comparing Weather Features in Forecasts, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 22, No. 1, pp. 389–398 (2016).
- [10] 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, 気象庁 (online), available from <http://www.jma.go.jp/jma/press/1205/24a/120524hpcolor.html> (accessed 2016-09-18).