

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

# 動的ネットワークの 成長過程と差分の可視化手法

石原 正樹

(コンピュータサイエンス専攻)

指導教員 田中二郎

2007年3月

## 概要

動的ネットワークの変化を表現するために成長過程と差分を可視化する描画手法を開発し、その有効性の評価を行なった。これまで、ネットワークの可視化手法は、ネットワークが変化しないことを前提としている場合が多かった。しかし、現実のネットワークは時々刻々と変化しており、このような動的ネットワークを対象とした成長過程や差分の可視化手法の開発が課題であった。従来、動的ネットワークの成長過程や差分の表現の多くは、複数枚の静止画や動画などを用いる。しかし、これら表現手法では、ネットワークの変化の認識を見る者自身に委ねてしまう問題がある。

本研究では、動的ネットワークを対象として、その成長過程と差分それぞれの表現方法に、時間一覽性と単一性の二つの性質を導入した新しい描画手法を開発した。時間一覽性とは、表示していない情報の記憶を人間に強くないために、ある時点の表示像を切り出してきても、必要な全期間の情報がその像に表示されていることである。また、単一性とは、同一対象物に対する複数像間での同一性の判定を人間に強くないために、一時には単一像だけが表示されることである。

成長過程の表現手法として、「波紋表現」を開発した。これは、時間とともにネットワークが成長してゆく過程を、エッジの長さに時間を対応付けて描画する可視化手法である。また、差分の表現手法として、「差分表現」を開発した。これは、前状態と次状態の二つのネットワーク図を重ねて提示し、ノードの位置が移動したことによる差分を矢印アイコン（ベクトル）で表現する可視化手法である。

波紋表現と差分表現により、動的ネットワークの変化そのものを見る者に分かりやすく提示でき、今まで難しかった、1枚のネットワーク図によるネットワーク構造の時系列分析が可能となった。その適用例として、Weblog 記事のリンク関係の波紋表現と購買履歴の差分表現を行なった。その結果、ネットワークに潜む「リンク構造の時間特性」を表現できるようになった。

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 可視化とは .....	1
1.2 情報可視化とネットワーク .....	1
1.2.1 情報可視化における表現手法 .....	1
1.2.2 ネットワークを可視化する意義 .....	2
1.3 動的ネットワークとは .....	2
1.3.1 現実のネットワークは変化する .....	3
1.3.2 なぜ変化するのか .....	3
1.4 動的ネットワークの変化を可視化する有用性 .....	3
1.4.1 変化が意味するもの .....	3
1.4.2 ネットワークの差分と成長過程の概念 .....	3
1.5 本研究の目的 .....	5
1.6 本研究の貢献 .....	5
<b>第2章 関連研究</b> .....	7
2.1 可視化対象に関連する研究 .....	7
2.1.1 動的ネットワークを可視化対象とした研究 .....	7
2.1.2 動的ネットワークの変化を可視化対象とした研究 .....	7
2.2 可視化手法に関連する研究 .....	8
2.2.1 木構造の可視化手法 .....	8
2.2.2 時系列の可視化手法 .....	8
2.2.3 2部グラフの可視化手法 .....	8
2.3 Weblog に関連する研究 .....	9
<b>第3章 視覚的表現</b> .....	10
3.1 視覚的表現への要求 .....	10
3.1.1 時間一覧性 .....	11
3.1.2 単一性 .....	11
3.2 表現すべき要素 .....	11
3.2.1 ネットワークの差分の可視化において表現すべき要素 .....	12
3.2.2 ネットワークの成長過程の可視化において表現すべき要素 .....	13
<b>第4章 動的ネットワークの変化の提示手法</b> .....	14
4.1 成長過程の可視化手法 .....	14
4.1.1 波紋表現の概要 .....	14

4.2 差分の可視化手法.....	16
4.2.1 差分表現の概要.....	16
<b>第5章 波紋表現.....</b>	<b>19</b>
5.1 描画スタイル.....	19
5.1.1 描画対象 .....	19
5.1.2 グラフの描画規約.....	19
5.1.3 グラフの描画規則.....	19
5.2 自動レイアウト .....	20
5.2.1 ノード位置の決め方 .....	20
5.2.2 波紋の決め方 .....	20
5.2.3 エッジの長さの決め方.....	21
5.2.4 エッジの角度の決め方.....	21
5.3 実装：RippleTree .....	21
5.3.1 システム構成 .....	22
5.3.2 機能説明 .....	23
<b>第6章 差分表現.....</b>	<b>26</b>
6.1 描画スタイル.....	26
6.1.1 描画対象 .....	26
6.1.2 グラフの描画規約.....	26
6.1.3 差の表現法の定式化 .....	26
6.2 自動レイアウト .....	27
6.2.1 マージグラフ .....	27
6.2.2 物理モデル.....	28
6.2.3 マージグラフの表現 .....	28
6.3 実装：DiffGraph.....	29
6.3.1 システム構成 .....	30
6.3.2 機能説明 .....	30
<b>第7章 適用例.....</b>	<b>36</b>
7.1 波紋表現による話題の広がりの可視化 .....	36
7.1.1 Weblog 記事とニュース記事のリンク関係の視覚化 .....	36
7.1.2 Weblog 記事のリンク関係の波紋表現.....	38
7.2 差分表現による購買傾向の可視化 .....	42
7.2.2 購入者の商品に対する趣向変化 .....	42
7.2.3 商品の購買層の変化 .....	42
<b>第8章 評価.....</b>	<b>45</b>
8.1 実験目的.....	45

8.2 実験方法.....	45
8.2.1 被験者.....	45
8.2.2 課題.....	46
8.2.3 採点方法.....	52
8.3 実験結果.....	53
8.3.1 ネットワークの差分を捉える課題における実験結果.....	53
8.3.2 ネットワークの成長過程を捉える課題における実験結果.....	54
8.4 考察.....	55
8.4.1 差分表現の有効性.....	55
8.4.2 波紋表現の有効性.....	55
<b>第9章 議論.....</b>	<b>57</b>
9.1 単一性と時間一覧性の重要性.....	57
9.2 差分表現と波紋表現の連携による適用事例の将来性.....	57
9.3 今後の課題.....	58
9.3.1 リアルタイム対応.....	58
9.3.2 適用限界の克服.....	58
9.3.3 波紋表現の可読性向上.....	58
<b>第10章 結論.....</b>	<b>59</b>
<b>謝辞.....</b>	<b>60</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>61</b>
<b>脚注.....</b>	<b>65</b>

# 目次

図 1	ネットワークの差分と成長過程の概念	4
図 2	本研究で対象としている可視化手法（斜線部）	6
図 3	トポロジ変化とジオメトリ変化	12
図 4	木構造の時系列階層表現と波紋表現との比較	15
図 5	差分表現	17
図 6	波紋表現の座標系	20
図 7	RippleTree の概観	22
図 8	RippleTree のシステム構成とデータフロー	23
図 9	被リンク数とノード直径の関係	24
図 10	スライダ操作によるビューの変化	25
図 11	DiffGraph の外観	29
図 12	DiffGraph のシステム構成とデータフロー	30
図 13	Before Graph View	31
図 14	After Graph View	31
図 15	アンカーノードを商品 ,フリーノードを購入者とした Merged Graph View	32
図 16	移動ベクトル（緑色の三角アイコン）	33
図 17	エッジのハイライト表示	33
図 18	カテゴリごとのアンカーノード配置	34
図 19	追加されたノードの判定	35
図 20	トラックバック記事があるニュース記事の波紋表現	36
図 21	類似度に基づいたトラックバック記事の配置	37
図 22	トラックバック記事の角度の割り当て	38
図 23	Weblog 記事間のリンク関係の波紋表現（7 日目）	40
図 24	Weblog 記事間のリンク関係の波紋表現（14 日目）	40
図 25	Weblog 記事間のリンク関係の波紋表現（21 日目）	41
図 26	2006 年 8 月 1 日から 12 月 1 日までのマージグラフ（アンカーノード： 商品 ,フリーノード：購入者）	43
図 27	2006 年 8 月 1 日から 12 月 1 日までのマージグラフ（アンカーノード： 購入者 ,フリーノード：商品）	44
図 28	ネットワークの差分を捉える課題の例	47
図 29	被験者グループ 1 に対して提示したネットワーク図の例	47

図 30	被験者グループ 3 に対して提示したネットワーク図の例 .....	48
図 31	ネットワークの成長過程を捉える課題の例 .....	49
図 32	被験者グループ 1 に対して提示したネットワーク図の例 .....	49
図 33	被験者グループ 3 に対して提示したネットワーク図の例 .....	50
図 34	ネットワークの差分を捉える課題におけるジオメトリ変化の設問の平均 得点 .....	53
図 35	ネットワークの差分を捉える課題におけるトポロジ変化の設問の平均得 点 .....	54
図 36	波紋表現における被リンク数のカウントミスの例と正しいカウントの仕 方 .....	56

# 表目次

表 1	提示手法の分類 .....	10
表 2	被験者グループとネットワーク図の提示手法の対応 .....	46
表 3	課題の種類と被験者グループごとのネットワーク図の提示方法 .....	46
表 4	ネットワークの差分を捉える課題の条件設定 .....	51
表 5	ネットワークの成長過程を捉える課題の条件設定 .....	52
表 6	トポロジ変化に関する設問の正誤 .....	54

# 第1章 序論

## 1.1 可視化とは

普段、我々は物事を図で理解をすることが往々にしてある。これは、人間が直接「見る」ことのできないデータを、「見る」ことができる表現に変換することで、人間の理解や記憶といった認知能力を視覚的に支援ができるためである。このように、「見る」ことができる表現に変換することを**可視化(Visualization)**と呼ぶ。

コンピュータサイエンスにおける可視化の研究には、科学技術計算の結果をコンピュータグラフィクス(CG)で表現するといった科学的可視化(Scientific Visualization)と呼ばれる研究分野がある[1]。一方で、コンピュータの普及と高性能化により、可視化対象とするデータは科学技術分野だけに留まらず、Web 構造や友人関係といった抽象的なデータへ広がり、その用途はデータマイニングや情報検索、ビジュアルインタフェースなど多様化している。これに伴い、「用途に応じて、いかに分かりやすい表現を行なうか」という課題のもと、**情報可視化(Information Visualization)**と呼ばれる研究が盛んに行なわれている[2]。本研究では、この情報可視化を研究対象としている。

## 1.2 情報可視化とネットワーク

筆者はネットワークを可視化対象にした情報可視化手法について研究を行なった。ネットワークの例として、WWWのハイパーリンク構造やソーシャルネットワークなどが代表的である。なお、本研究で扱うネットワークとは、「オブジェクト(人や物)とオブジェクトのつながりによる構造体」であり、数学的にはグラフでデータ表現することができる。すなわち、オブジェクトがノード(節点・頂点)に対応し、つながりがエッジ(経路・辺・リンク)に対応している。エッジの性質は、有向と無向に分けられる。ノードやエッジの追加的な情報(名前、ラベル、カテゴリ、時刻など)は属性として付属している。

### 1.2.1 情報可視化における表現手法

一般に、情報可視化で対象とするデータには、株価や温度といった数値データの他に、プログラムコードや文書といったテキストデータ、会社組織やファイルといった階層構造を持ったデータ、友人関係やWWWのハイパーリンク構造といったネットワークなど多様にある。これらデータを可視化する表現手法は大きく分けて以下の5つに分類できる[3]。

- (1) 座標系: 折れ線グラフ, 棒グラフなど
- (2) 行列系: 表など
- (3) 領域系: ベン図など
- (4) 連結系: ネットワーク図, フローチャートなど
- (5) 連結系と領域系の複合系: 複合グラフなど

これら表現方法の中で,座標系と行列系は比較的表現方法が既に確立しているのに対し,連結系や連結系およびそれらの複合系は,その描画法があまり発達していない[4].さらに,連結系の表現方法で対象としているネットワークのデータは,数値やテキストデータと比較して,“つながり”や“関係性”といった一般に目に見えにくい構造情報が重要な意味を持っている.したがって,情報可視化の分野においてネットワークを可視化対象とした研究が特に活発に行なわれている.

### 1.2.2 ネットワークを可視化する意義

ネットワークを可視化する主な意義は,以下の2点に集約できる.

- ・ ネットワークの全体像を俯瞰でき,直感的に要素間のつながりを捉えることが可能となる.
- ・ ネットワークから新たな発見や有用な情報を見つけ出せるようになる.

「百聞は一見にしかず」という諺の通り,人間は言葉による理解よりも,視覚的に理解する場面が多い.ネットワークデータは,数値や文字データであり,コンピュータに解釈できても,人間には要素間のつながりを捉えることが難しい.そこで,ネットワークの要素を点で表現し,要素間のつながりを線で表現するといった可視化を行なうことで,人間にとって視覚的に分かりやすい表現形式に変換できる.これにより,人間はネットワークの全体像を俯瞰でき,そして,認知能力を最大限に発揮できるようになる.

この人間の認知能力を利用してビジュアルデータマイニングや情報検索といった知的活動が行える.例えば,友人関係のネットワークを可視化することで,ある友人間のつながりが強いグループ(コミュニティ)やグループ間を仲介する重要な人物を素早く見つけ出せるようになる.

## 1.3 動的ネットワークとは

情報可視化研究において,近年は,「ネットワークは変化する」という前提で動的ネットワークの可視化手法も注目され始めている.以下に,変化するネットワークとその変化の理由について述べる.

### 1.3.1 現実のネットワークは変化する

従来は、可視化対象のネットワークが変化しないことを前提とした、静的ネットワークの可視化手法について主に研究されてきた。しかし、現実のネットワークは時々刻々と成長および変化している。このようなネットワークを「**動的ネットワーク**」と呼ぶ。動的ネットワークとは、「時間経過に伴って構造（ノードおよびエッジの増減）や属性（関係性の強さ）が変化するネットワーク」である。

### 1.3.2 なぜ変化するのか

なぜネットワークが変化するかということについては、ネットワーク科学の分野で研究が進められているが、「ネットワークはそもそも成長を続ける」という前提に立脚してネットワークを分析することが重要とされている。

例えば、Barabasi らは、ネットワークに成長過程のモデルを導入したことにより、スケールフリーネットワークと呼ばれる現実の WWW の構造に近いネットワークを構成できることを 1999 年に発見した [5, 6]。

また、Watts によれば、「ネットワークとは動的な対象である。ネットワークのシステムの中で物事が起こるからということだけでなく、ネットワークそのものが、それを構成する要素の活動や決定に突き動かされて、時とともに展開、変化するからだ。」と説明されている [7]。

## 1.4 動的ネットワークの変化を可視化する有用性

動的ネットワークを可視化するには、単純に従来の静的ネットワークの可視化手法を拡張し、各時点のネットワークを可視化したネットワーク図を用意し、それを時系列に沿って並べて提示する、もしくはアニメーションのように動画で提示することで実現できる。しかし、動的ネットワークの可視化で最も重要なのは、「時間の前後関係で何が変化しているか」ということを観察者に分かりやすく提示することである。これにより「こういった傾向が読み取れるか」という新しい知見を視覚的に抽出できるようになる。

### 1.4.1 変化が意味するもの

具体的な動的ネットワークの例として、Weblog 記事間のリンク関係を考える。リンク構造の時系列的な変化に注目すると、記事の被リンク数の増加（トポロジ変化）は「注目を集めている」という解釈ができる。また、逆に被リンク数は多くても、増加が無くなった場合には、「話題となった記事だが、すでに注目されなくなった記事」といった解釈ができる。このように、動的ネットワークの時系列的な変化には、その時々トレンドに関する重要な情報が含まれていると言われている [8]。

### 1.4.2 ネットワークの差分と成長過程の概念

動的ネットワークの可視化では、静的ネットワークには無かった新たな可視化要素として、「変化」が加わる。例えば、ネットワークを時間関数と見れば、その時間関数を各時刻にブ

プロットしたものが、その時点の静的ネットワーク図となる。このプロット（ネットワーク図）をいくつか眺めることで、時間関数の性質（ネットワークの性質）が見えてくる。このように、ネットワークを時系列に沿って観察するには、各時点のネットワークの静止画を時系列に並べた提示手法と動画による提示手法が考えられる。前者は、いくつかのプロット点を並べて観察し、後者はプロット点を連続的に繋いで観察を行なう手法に相当する（図 1）。しかし、これら提示手法ではこの時間関数を表現する際に、時間に対する変化量（ネットワークの差分）は表現できない。さらに、ある時点のネットワーク図を取り出してきても、過去からその時点までの変化過程（ネットワークの成長過程）は表現されていない。すなわち、ネットワークの差分と、その差分の履歴である成長過程を表現することが、ネットワークの変化を捉える際に有用となる。

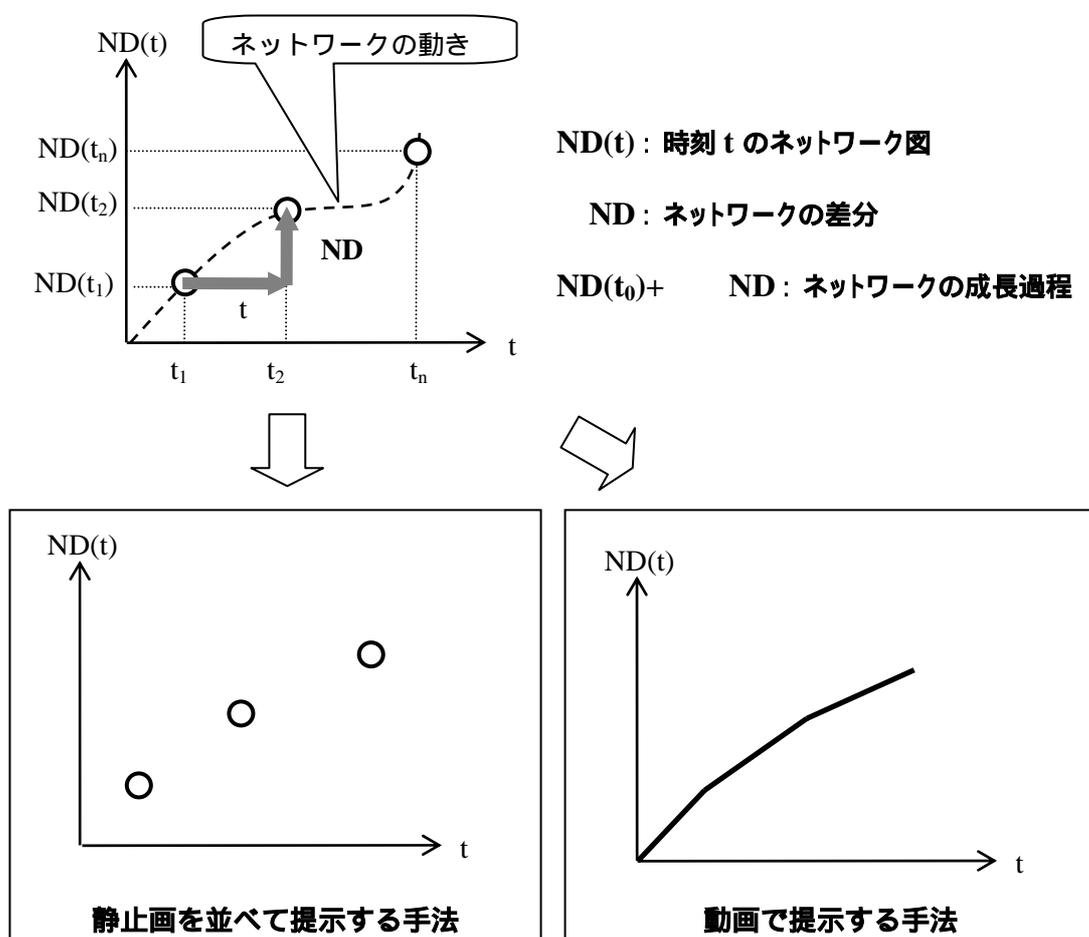


図 1 ネットワークの差分と成長過程の概念

以上のように、時系列にネットワークを分析する際に、前後関係から観察者が見比べて変化（差分や成長過程）を発見するという認知的負荷を与えずに、変化そのものも可視化要素として扱うことを本研究では行なう。

## 1.5 本研究の目的

本研究では、より現実的な動的ネットワークを対象とし、その時間的な変化を適切な表現で可視化する手法を開発する。すなわち、動的ネットワークを構成する要素が「いつ、何が、どのように変化したのか」という観点から、分かりやすい可視手法を開発する。そして、変化そのものを可視化することで、今まで見えなかった「ネットワークが持つ時間特性や傾向」という新たな知見を明らかにする。

## 1.6 本研究の貢献

可視化手法を、その用途と可視化対象の性質で分類すると、図 2 となる。この図において、斜線で示した部分が、本研究が対象とした可視化手法である。これまで、動的ネットワークを対象とした可視化手法は、情報可視化分野においてあまり研究されてこなかった。本研究では、この動的ネットワークを可視化対象とし、その変化を捉えやすい可視化手法を開発した。この可視化手法を用いることで、観察者はネットワークの変化を認知する負荷から解放できる。

また、動的ネットワークの変化である差分や成長過程を可視化することで、今まで行えなかったネットワーク構造の時間特性を分析することが可能となった。例えば、CM や広告前後の話題性や反響、購買傾向などの変化を、ネットワーク図により視覚的に捉えることが期待できる。ネットワーク図は、棒グラフや円チャート、折れ線グラフといった表現手法に比べて、今まであまり利用されてこなかったが、将来的にはマーケティングや費用対効果といった宣伝効果の評価の際に、本研究で開発したネットワーク図が積極的に利用されるようになると思われる。

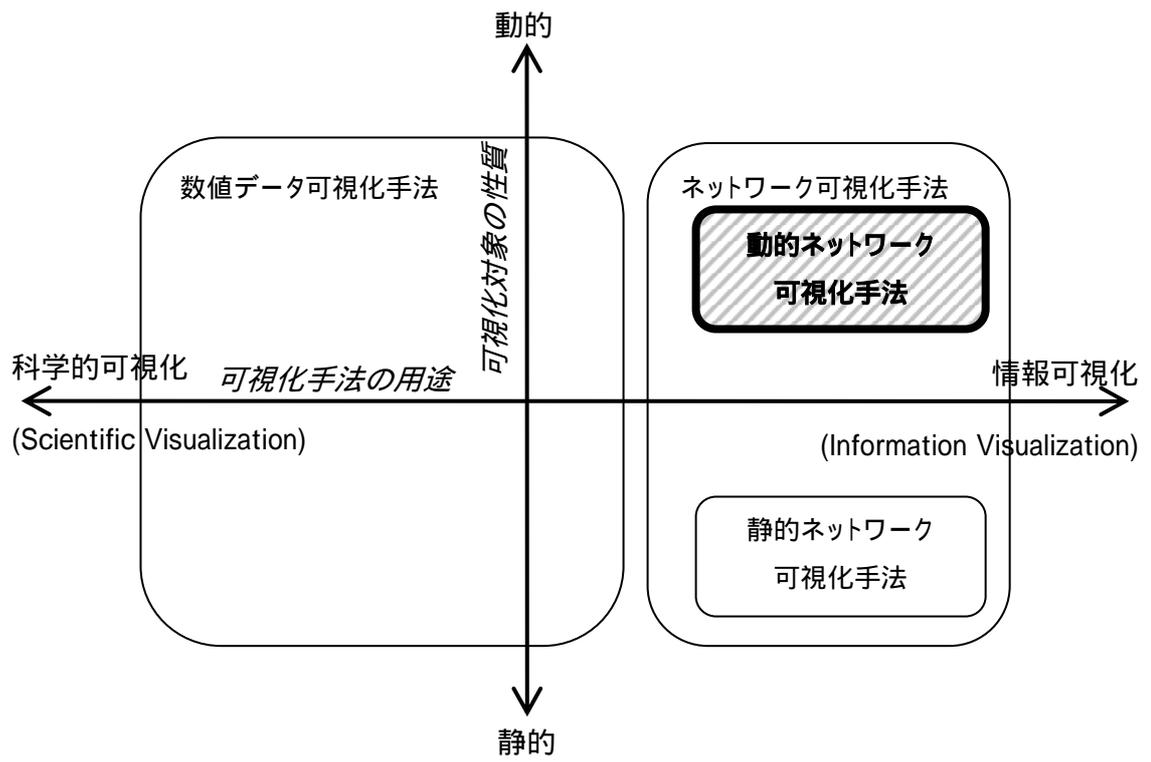


図 2 本研究で対象としている可視化手法（斜線部）

## 第2章 関連研究

本研究が対象としている研究分野において、関連する研究や技術を以下に挙げる。2.1 節では、可視化の“対象”という観点から、2.2 節では、可視化の“手法”という観点から述べる。そして、2.3 節は本研究で開発した可視化手法を実際に適用した時に対象としたデータやその用途に関する研究を述べた。なお、2.1 節で挙げた関連研究は特に、本研究との比較が重要となるため、要点を述べるに留め、詳しい比較と考察は第3章にて述べる。

### 2.1 可視化対象に関連する研究

#### 2.1.1 動的ネットワークを可視化対象とした研究

動的ネットワークの可視化ツールは、いくつか開発されており、その多くがアニメーションによる提示やユーザの操作に対してインタラクティブに提示するものである。

鈴木らが開発した Network Viewer [9]では、シミュレーションによって構築された動的なネットワークをリアルタイムに描画するための機能を実装している。グラフのレイアウトは代表的な4つのレイアウト手法をユーザが選択できるようになっており、アニメーションなどによって変化の過程を提示する。このツールを、ネットワーク構造が変化するモデルと、ネットワーク上で情報が伝播するモデルの可視化に適用している。

また、Moodyらは、ソーシャルネットワークの変化を、static flip book (静的なパラパラ漫画)と dynamic movie (動的な動画)の二つの手法を用いて可視化した。前者の手法は、ソーシャルネットワークの動的関係性を、ノード位置を固定し、エッジを積み重ねて提示する。後者は、ノード位置を関係性の変化とともに移動させて提示する手法である[10]。

#### 2.1.2 動的ネットワークの変化を可視化対象とした研究

動的ネットワークを対象として、その変化を可視化対象とした研究は非常に少ない。Ertenらは、異なる一連のグラフを統一的に観察できるようにするために、Aggregate Layout, Merged Layout, Converging Iterations Layout の3つのグラフレイアウトアルゴリズムを提案している。特に、Aggregate Layout を利用した Aggregate View では、各グラフのノードおよびエッジに別の色を割り当て、複数のグラフを重畳表示することで、複数グラフ間の違いを特定できるように提示できる。さらに、2次元平面図だけでなく、各グラフをレイヤー毎に描画し、それを3次元的に自由な視点から見られるようにしている。これにより、各グラフ間の変化を観察者が認知することを視覚的に支援している[11]。

同様に、中園らは、時系列ごとのネットワーク図をレイヤーごとに管理し、観察者がスライダーを操作することで、インタラクティブに各時点のネットワーク図を差分とともに提

示できる Nel2 を開発している。差分の提示には、ノードおよびエッジの追加と削除のそれぞれに別々の色を割り当てることで実現している。Erten らの提示手法と異なり、変化を観察者に認知させるのではなく、変化そのものを色で提示するというアプローチを取っているのが特徴である[12]。

豊田らは、Web ページのハイパーリンクのリンク関係を対象として、そのリンク構造を時系列に沿って発展過程を可視化するシステム WebRelievo[13]を開発している。この WebRelievo により、ウェブ上でリンク構造の解析を可能とし、注目されているトピックやトレンドを発見することに応用できると述べている。可視化技法の特徴は、差分とクラスタの二つのビューを用意しており、各時間のグラフを時系列に並べて提示している。観察者は、これらグラフを見比べることで、変化を捉えることができる。近年は、この手法を用いて、Web ページのリンク構造変化の可視化に適用し、話題となっている Web ページを視覚的に分析できるようにした[8]。

## 2.2 可視化手法に関連する研究

### 2.2.1 木構造の可視化手法

木構造の視覚化に関して、これまで多くのシステム開発や研究が行われてきた。代表的な木構造表現手法に、Hyperbolic Tree[14]がある。これは、双曲空間上に樹形図を配置する手法である。特徴的なのは、中央に近いノードほど大きく、中央から遠いノードほど小さく表示される点である。これはユーザの注目している視点に配慮した表現法である。

また他にも、木構造の階層に注目し、画面空間の再帰分割で表現した Tree-Maps[15]、データ宝石箱[16]や、三次元空間で入れ子構造を構築し、半透明表示をする手法、Information Cube[17]などがある。これは、木構造の階層がノードがカテゴリを意味しているデータに有効である。つまり、情報をカテゴリ化して捉えるのに有効な表現手法である。Ka-Ping Yee らは、木構造の各階層を同心円に表現している。特に、ユーザの注目ノードに応じて、アニメーションで動的にレイアウトを変化させている点が特徴的である[18]。

### 2.2.2 時系列の可視化手法

John V. C.らは、時間の周期に注目し、時系列をスパイラル上に情報を表現する研究を行っている[19]。また、野田らは、時間属性と空間属性の二つを持つ時空間を、年輪の視覚的特性「年輪メタファ」を利用して表現する手法を開発した[20]。半径方向に時間軸を、そして円周方向に空間軸を割り当てることによって時空間を同時に表現できる。データの「一覧性」と「時間軸の進行方向や時間的関連性」の二つの観点を問題視し、これらを解決している。

### 2.2.3 2部グラフの可視化手法

2部グラフとは、グラフ  $G$  のうち、 $V(G)$ を二つの頂点集合に分割して各集合内の頂点同士に枝が無いようにできるグラフのことである<sup>1</sup>。三末は、この2部グラフの2種類のノードの一方に位置の制約を課した描画スタイルであるアンカーマップ(Anchored Map)を開発した。

この描画スタイルにより，アンカーノードとフリーノード間の関係性の強さが位置（アンカーノードとフリーノード間の距離）により提示することができる[21]．

## 2.3 Weblogに関連する研究

Weblog を対象とした時系列分析は，マーケティングリサーチ<sup>2</sup>やトレンドチェック<sup>3</sup>，データマイニング[22]，コミュニティ抽出[23, 24, 25]，リンク構造解析 [26]，Weblog とニュースのマッピング[27]など，Weblog が比較的浸透してきた近年は，特に注目されている．情報可視化の分野においても同様の用途[28,29]で数多く研究されている．

特に，ネットワーク構造の時間特性に着目し，時系列に沿った Weblog 記事のリンク構造の“可視化”を行なう研究はまだあまりない．内田らは，ネットワークの成長（例えば，コミュニティの形成過程や話題の広がり等）の様子を可視化する研究を行なっている[30]．

## 第3章 視覚的表現

動的ネットワークの変化を可視化する際に、どのような視覚的表現を行えば分かりやすいか、要求される表現の性質について考察する。また、動的ネットワークの差分と成長過程の二つの可視化手法において可視化すべき要素について述べる。

### 3.1 視覚的表現への要求

人間にとって動的ネットワークの変化を捉えやすい視覚的表現とは、以下の二つの性質を満たす必要がある。

- ・時間一覽性
- ・単一性

これらについて以下に詳しく述べるが、端的に表現すれば、「1枚の図で必要な情報全てが分かること」である。この時間一覽性と単一性の観点から、特に関連する研究の分類および比較を行い、目指すべき提示手法について述べる。なお、表 1 に提示手法を分類整理した。

表 1 提示手法の分類

		単一性	
		不満足	満足
時間一覽性	不満足	3次元画像 ( Aggregate View [11] など )	動画 ( Network Viewer [9] dynamic movie [10]など ) インタラクティブ提示手法 ( Static flip book [10] Nel2 [12] など )
	満足	各時刻の図を並べた 複数枚の図による提示手法 ( WebRelievo [13]など )	時間軸を座標系に導入した 1枚図による提示手法 ( 波紋表現, 差分表現 )

### 3.1.1 時間一覧性

時間一覧性とは、表示の切り替えや、表示していない情報の記憶を人間に強いがないために、ある時点の像を切り出して来ても、必要な全期間の情報とその情報に付随するタイムスタンプがその像に表示されていることである。

#### 3次元画像による提示手法：不満足

3次元の3つの軸のうち、1軸に時間軸を割り当てた場合、3次元空間を透視投影図法で2次元平面に写像して表現しているため、各時点の表示像が重なって表示されない情報がでてきてしまう。

#### 動画やインタラクティブ操作による提示手法：不満足

自動もしくは、スライダバーなどのGUI操作により、時間軸に沿って各時点の表示像を切り替えて提示することで、変化の過程を動きで知覚することができる。しかし、全期間にわたって変化を知覚するためには、動画には時間軸が明示されていないので、変化前と変化後の像の記憶による認知的負荷がかかるだけでなく、動画を見るための時間を要する。

#### 時間情報が反映された静止画による提示手法：満足

時間情報が反映された静止画を提示することで、変化の過程を一覧して提示できる。時間軸を座標系に導入した静止画と、各時刻の静止画を並べて提示する2種類がある。

### 3.1.2 単一性

単一性とは、同一対象物に対する複数像間での同一性の判定を人間に強いがないために、一時には単一像だけが表示されることである[31]。

#### 各時刻の図を並べた複数枚の静止画による提示手法：不満足

各時刻の静止画を比較することで、“間違い探し”のように変化を認知する。しかし、複数枚の静止画が必要となり、その枚数が増えるに従って、動画と同様に、記憶による認知的負荷が増大してしまう。

#### 時間軸を座標系に導入した1枚図による提示手法：満足

時間軸を座標系に導入した1枚図による提示手法は、1枚の静止画で全期間の情報を提示できるので、変化を認知する負荷から人間を解放することができる。また、動画のように、表現する時間を必要としない。

## 3.2 表現すべき要素

1章で触れたように、ネットワークの変化で表現すべき要素として、ネットワークの差分と成長過程の二つがある。これら、それぞれについて、3.1節で述べた時間一覧性と単一性

を満たした可視化手法が表現すべき要素について以下に述べる。

### 3.2.1 ネットワークの差分の可視化において表現すべき要素

グラフの差を 1 枚の図として表現する際に、表現すべき要素はトポロジに関するものとジオメトリに関するものに分けられる。

トポロジに関する差は、ノードの増減およびエッジの増減である。トポロジの差だけに着目すれば、要素（ノードおよびエッジ）の増減を表現するだけであるので、容易である。一方のグラフを基準にすれば、増加した要素、減少した要素、変わらない要素の 3 種類を視覚的に表現できる。豊田らはこのような色分けを用いて Web のグラフとしての変化を表現している[13]。

視覚的にグラフを表現した場合には、トポロジカルな観点だけでなく、ジオメトリックな観点も重要である。ネットワークの視覚的表現には、その目的によっては、トポロジカルな情報だけでなくジオメトリックな情報の表現をも重視するものも少なくない。つまり、重みの付与されたエッジによって表現されたノード間の関連性の強さを、視覚的に表現するものも多い。

ジオメトリに関する差は、ノードの移動およびエッジの変形である。トポロジの変化やエッジに付与された重みの変化によって、ノードの位置やエッジの形状が変化する可能性がある。このようなジオメトリックな差は色では表現できないため、トポロジの差の表現のように単純ではない。

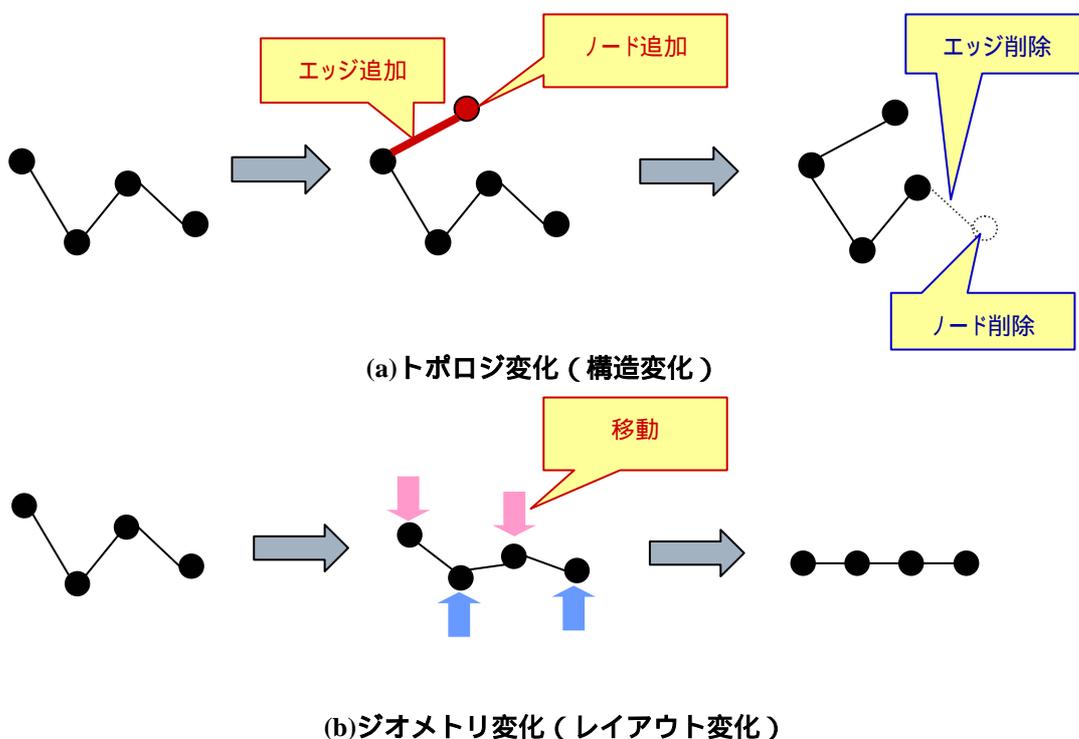


図 3 トポロジ変化とジオメトリ変化

### 3.2.2 ネットワークの成長過程の可視化において表現すべき要素

時間一覽性の「時系列の変化を一覽して表現する」ために，成長過程の可視化には差分の表現要素であるトポロジとジオメトリ変化の他に，各時点の状態を一連に表現する必要がある．

差分では，トポロジとジオメトリの変化の前後関係で異なることが分かればよかったので，色や形状で表現する場合には，2種類用意すればよい．しかし，時系列の各状態を弁別できるようにするには，その各状態数だけ種類が必要となり，表現すべき時系列が長くなればなるほど表現が難しくなる．そこで，連続的な変化が可能かつ，各時点の状態の違いを弁別できるような，描画要素に時間を対応させる必要がある．

## 第4章 動的ネットワークの変化の提示手法

時間一覽性と単一性を満たした動的ネットワークの変化の提示手法として、差分と成長過程の可視化手法を提案する。なお、本章ではそれぞれの可視化手法の概要と利点などを述べるにとどめる。詳しい説明は5章と6章にて述べる。

### 4.1 成長過程の可視化手法

ネットワークの構造と時系列の変化を同時に表現するために、グラフィアウトに時間情報を反映させるアプローチを取った。具体的に時間情報を反映させる描画要素として、エッジ長、ノードの色、ノードの大きさなどがあるが、ここでは、観察者が変化を最も認知しやすいジオメトリ要素（レイアウト要素）の、エッジ長に時間情報を対応付けた。この動的ネットワークの成長過程の可視化手法を「**波紋表現**」と名づけた。

#### 4.1.1 波紋表現の概要

新しい情報を中心に配置し、その情報をもつ時刻（履歴）が古くなるのに従って、中心から離れて行くという波紋の特徴を利用した表現手法「波紋表現」を提案する。対象とするデータ構造は、木と同様であるが、表現の方法が次の二点で違いがある。

- ・最新の情報は、親ノードの近傍に配置される。
- ・子ノード間の関係は、親ノードからのエッジ角度で表現される。

波紋表現のコンセプトは「新しいものは近くに、古いものは遠くに配置する」ことである。これは、波紋が広がる特徴を利用しており、ゆえに波紋表現と呼ぶ。

系統図に代表されるように、従来の木構造の時系列階層表現は図 1(a)のように、時系列の階層がルートからリーフに向かって平行に表現される（ここでは、ノード C-F 間の点線は無視をする）。これに対し波紋表現では、図 4 (b)のように時系列階層が各部分木の親ノードを中心とした同心円（波紋）で表現される。波紋表現は、対象とする木構造データを時系列の階層で表現する場合に有効である。この時系列階層を同心円で表現する。

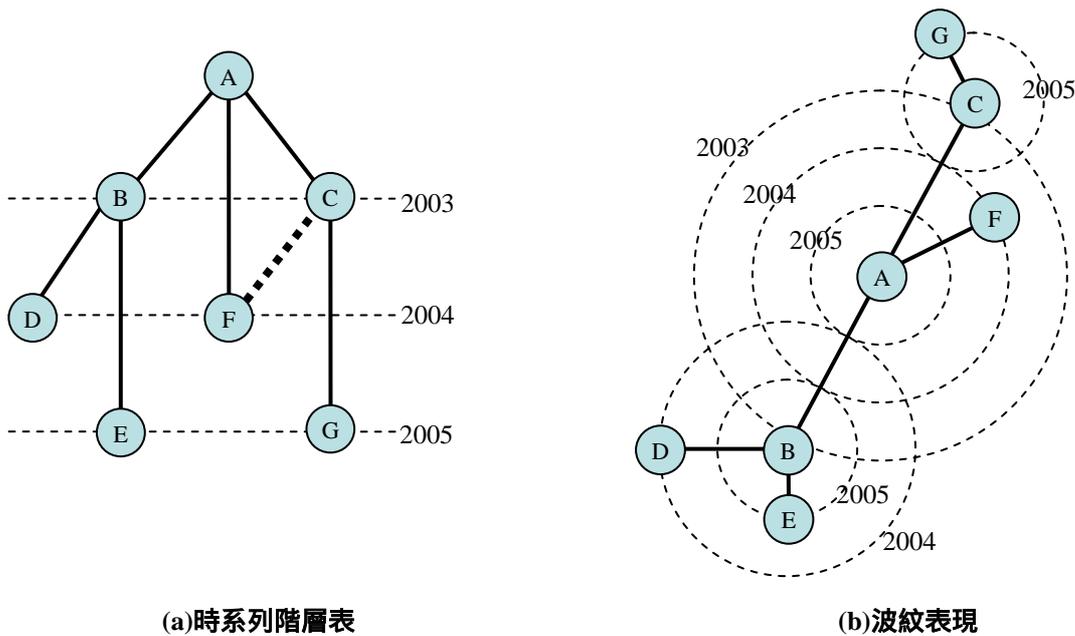


図 4 木構造の時系列階層表現と波紋表現との比較

### 特徴

波紋表現は、時系列階層表現と比較して階層の順番が異なっている。木構造の時系列階層表現の場合、ルートからリーフ方向へ向かって古い時刻から新しい時刻へと順番に配列される。一方、波紋表現では、各部分木の一番古いリーフの時刻から親ノード（中心）に向かって新しくなっていくように配置される。ただし、親ノード位置のみノード生成時刻とする。すなわち、時系列階層の並びが時系列階層表現と逆になっているのが特徴である。

自然界にも波紋や木の年輪のように、波紋表現と同様の時系列の並びを様々な場所で見ることができる。基本的に、時間の経過とともに成長する性質を持つものが、こうした時系列階層の形をとる。年輪の間隔は成長周期の1年であるし、波紋の間隔は周波数の逆数に比例している。両者とも周期は様々であるが、間隔が一定周期でかつ同心円状に広がっていく点共通となっている。

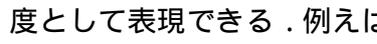
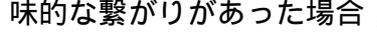
波紋表現においても、各波紋の周期はすべて同じである。この表現では、波紋とノードが同期しており、ノードの生成時刻と波紋の発生時刻が同じである場合、波及してゆくその波紋上にそのノードが配置される。波紋の中心には、親ノードが配置され、ある一定間隔で同心円状に波紋が発生する。すなわち、同一波紋上にあるノードは、すべて同じ時刻に発生したノードを表している。

### 利点

波紋表現では、各波紋の周期が分かれば、ある時点から最も古い時間までの履歴を視覚的に把握することが可能となる。さらに、波紋の周期を変化させることで、様々な時間周期で情報を整理することができ、情報のもつ周期性や出現頻度といったことが分析可能となる。

木は、閉路をもたないグラフである。さらに、ルートを決めた場合、階層をもった有向木となる。例えば、組織図の場合には、各階層は組織の単位を表し、系統図の場合には、年代を表す。有向木を時系列階層で表現した場合、最新の情報は常に最下層に配置される。一方、

波紋表現の場合は，最新情報は常に親ノードから見て最上層に配置される．すなわち，最新の情報を知りたいときは波紋の発生点（親ノード）の近傍に注目するだけでよい．

波紋表現では，木の構造上，表現することができなかつた，リーフ同士のリンク関係を角度として表現できる．例えば， 4(a)の点線で示したように，ノード F とノード C の間に意味的な繋がりがあった場合，波紋表現では 4(b)に示したように，角度的に近い場所に配置して，このリンク関係を表現することができる．実世界の情報は，複数の属性を持つことがあり，木のように明確に構造化できる場合が少ない．このように“見えないリンク関係” [32] も視覚化することが重要である．

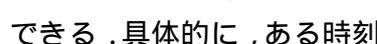
### 適用限界

波紋表現は，閉路のないグラフ構造すなわち木のみ表現可能である．また，表現すべき要素の，ジオメトリックな変化は，そもそも時間的変化をレイアウトに反映させてしまっているため，表現ができない．したがって，波紋表現で表現できるのは，トポロジ変化（グラフ要素の増加）とその時間的変化の表現のみである．

## 4.2 差分の可視化手法

ネットワークの差分を表現するために，二つのグラフを重ねて表示するマージグラフを利用する．グラフの物理モデルに Spring-Embedding [33]を適用し，前後で対応するノード同士を，仮想的に自然長 0 のバネで連結する．エッジに埋め込んだスプリングの強さを，関係性の属性値（関連度など）に対応させると，変化の前後で，ノード位置が変化する．このノード位置の変化量を，三角アイコン等で示すことで，差分を可視化する．これを「差分表現」と名づけた．

### 4.2.1 差分表現の概要

差分表現では，二つのグラフを重ねることで，トポロジの変化とジオメトリの変化を表現できる．具体的に，ある時刻  $t$  のグラフ  $G_1$  と，時刻  $t+1$  のグラフ  $G_2$  をマージすると， 5(c) のようなマージグラフができる．この時の重ね順は，時刻が古いグラフ  $G_1$  が上側になり，時刻が新しいグラフ  $G_2$  が下側になるようにする．このような重ね順にすることで， $G_2$  と  $G_1$  とでトポロジおよびジオメトリの変化がないグラフ要素（ノードとエッジ）は，同じ位置に完全に重なり合う．なお，このような位置が重なるように  $G_2$  と  $G_1$  とで対応するノード同士を，仮想的に自然長 0 のバネで連結する．

一方，追加によるトポロジ変化があった  $G_2$  のグラフ要素は，重ならずマージグラフに現れる．ここでは，追加要素はノード  $c$ ，エッジ  $Bc$ ，エッジ  $Dc$ ，エッジ  $Bb$ ，エッジ  $Ab$  である．この追加によるトポロジ変化と削除によるトポロジ変化（エッジ  $Cb$ ）によって， $G_2$  にジオメトリ変化が現れる．この理由は，エッジにバネ埋め込みを行なっているためであり，トポロジ変化により，力学的なつり合いが変化するからである．すると，マージグラフでは，トポロジ変化の場合と同様に， $G_1$  のグラフ要素と重ならないノード  $b$  が現れる．このノード  $b$

は追加要素ではないが、トポロジ変化の結果として現れるジオメトリ変化のグラフ要素である。このグラフ要素は、 $G_1$  と  $G_2$  で共通するノードなので、対応関係を示すために、前状態の  $G_1$  に帰属するノード  $b$  から次状態の  $G_2$  に帰属するノード  $b$  に向かって、移動を表すベクトル（三角アイコン）を描く。

さらに、以上のようなルールを用いてトポロジ変化とジオメトリ変化をマージグラフにて分かりやすく提示できるように、グラフ  $G_1$  のグラフ要素を青色、グラフ  $G_2$  のグラフ要素の色を赤色で色分けを行なう。これにより、どちらのグラフに帰属するグラフ要素なのか色によって判別が可能となる。

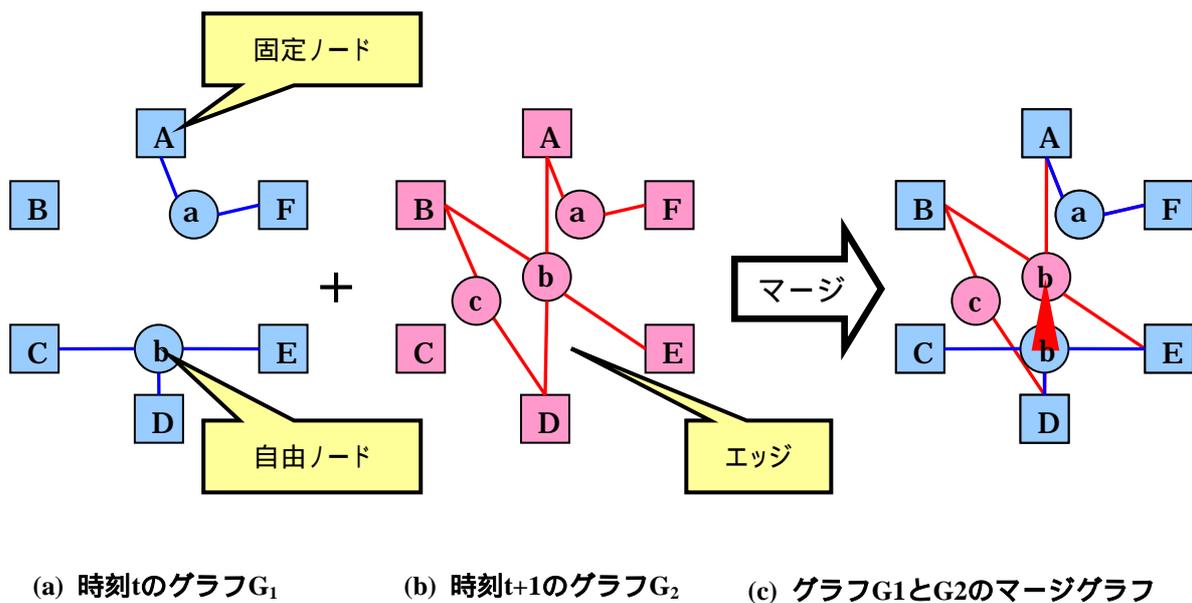


図 5 差分表現

### 利点

エッジのトポロジの変化がそのままジオメトリ変化に反映され、その結果、ノードの移動ということに帰着できる。また、エッジの長さも関係性の強さを対応させることで、ジオメトリ変化に反映できる。このように、ジオメトリ変化を統一的に移動ベクトルによって表現できる利点がある。

また、ノードの追加というトポロジ変化は、マージグラフにおいて色の特異点を見つけるだけという作業で、比較的簡単に追加ノードを見つけることが出来る。このような、特徴を備えた差分表現により、例えば可視化対象のグラフが大規模となった場合に、従来は間違い探しといった前状態と次状態の図の比較作業では、ジオメトリ変化要素とトポロジ変化要素の発見が困難であったが、この作業から解放できる。

### 適用限界

マージグラフでは、トポロジ変化のノードおよびエッジの追加のみ表現可能である。例えば、ノードの削除は、マージグラフでは上側に重ねる前状態のノードに隠されてしまい、表

現することができない。また、エッジの削除も同様である。したがって、トポロジ変化のうち、グラフ要素の増加だけ表現可能である。

また、ジオメトリ変化は、前状態のグラフ要素の位置から変化であり、少なくとも前状態のグラフ要素に1つ以上の位置的基準点が必要となる。すなわち、ノードのうち少なくとも1つは位置を固定し、その座標を基準とした次状態における位置の変化を求める必要がある。

## 第5章 波紋表現

グラフの「成長過程」を1枚の静的な図として表現する表現スタイル「波紋表現」を考案した。その具体的な描画手法について、5.2節にて数学的な定式化を述べ、5.3節にて実装したシステムについて述べる。まず、定式化を行なう準備として、5.1節にて波紋表現の描画対象や座標系、グラフの描画ルールといった描画スタイルを定義する。

### 5.1 描画スタイル

#### 5.1.1 描画対象

描画対象は、時間情報をもった根付き木である。この根付き木は $G=(V, E)$ で与えられ、エッジの集合 $E \subset V \times V$ とノードの集合 $V$ で構成されている。また、子ノードにリーフノードしか持たないノードを根とする部分木を $G_{sub}$ と表記する。さらに、根付き木の各ノード $v \in V$ は属性として生成時刻とカテゴリの二つの属性を保持している。したがって、 $V$ は時系列データとなっている。また、 $v$ の生成時刻を $d(v)$ と表記する。

#### 5.1.2 グラフの描画規約

##### ノードの配置規約

$G_{sub}$ の波紋表現の配置規約は、同心円配置である。従って、 $G_{sub}$ の入れ子構造である $G$ の波紋表現の配置規約は、再帰的同心円配置となる。

##### エッジの配線規約

配線規約を、エッジの線種と配置規約の座標系との関係で説明する。まず、波紋表現のエッジの線種は、直線配線である。また、この配線は波紋表現の座標系と独立している。

#### 5.1.3 グラフの描画規則

波紋表現の描画規則について、意味的規則と構造的規則に分けて述べる。まず、ノードの持つ属性による配置規約（意味的規則）として、“時間属性が新しいノードの集合を中央付近に配置”が挙げられる。また、 $G$ が持つグラフ理論的な概念や特徴に関係した配置規則（構造的規則）に関しては、特に制約を設けていない。

## 5.2 自動レイアウト

### 5.2.1 ノード位置の決め方

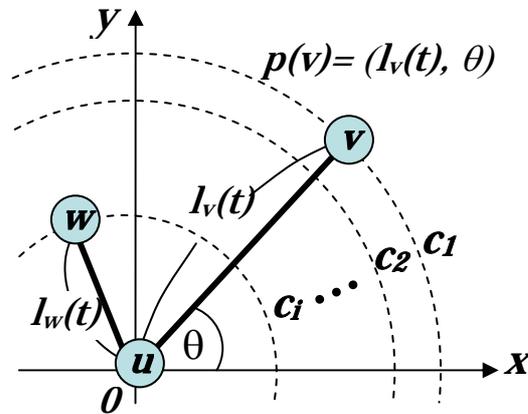


図 6 波紋表現の座標系

ノードの位置は、図 6 で示したように極座標で表現する。すなわち、 $G$  の描画の際には、エッジの長さや角度をパラメータとして各ノードの位置を決定する。例えば、 $v$  の位置  $p(v)$  は、エッジの長さを  $l_v(t)$ 、角度を  $\theta$  とすると、 $(l_v(t), \theta)$  と表せる。すなわちルートを決めると相対的に全てのノードの位置が定まる。

### 5.2.2 波紋の決め方

波紋の描画は、 $G_{sub}$  の親ノードの位置を中心として、ある一定時間ごとに波紋を生成している。そして、ノードと波紋の描画位置が互いに一致している。すなわち、 $G_{sub}$  の親ノード以外のノードの中で最も古い時刻のノード（一番外側のノード）を  $v$  とすれば、その時刻  $t_0 = d(v)$  から波紋が発生する。また、子ノード位置と一致している波紋以外に、一定の時間間隔ごとに波紋が発生している。このように波紋は、ノードの時刻と経過時間のスケールを視覚的に理解できる役目がある。

$G_{sub}$  の親ノードを中心とする波紋の集合を  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  とする。時刻  $t$  における時刻  $t_0$  に発生した波紋（最も外側の波紋） $c_1$  の半径  $r_1(t)$  は(9)式で計算される。ただし、波紋の周波数を  $f$ 、波長を  $\lambda$  とする。

$$r_1(t) = \lambda \cdot f \times (t - t_0) \quad (1)$$

このとき、描画される波紋の個数  $n$  は(10)式を満たさねばならない。

$$n = \left\lceil \frac{r_1(t)}{\lambda} \right\rceil \quad (2)$$

したがって、波紋  $c_1$  を基準として、時刻  $t$  における時刻  $t_0$  以降に発生した波紋 ( $c_1$  よりも内側に発生する波紋)  $c_i$  の半径  $r_i(t)$  は(11)式で表せる。

$$\begin{aligned} r_i(t) &= r_1(t) - \lambda(i-1) \\ (i &= 2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (3)$$

### 5.2.3 エッジの長さの決め方

ノード  $w \in V$  の時刻  $t$  におけるエッジの長さ  $l_w(t)$  は、(12)式で計算される。

$$\begin{aligned} l_w(t) &= r_1(t) - \lambda(j-1) \\ (j &= \lceil f \times (d(w) - t_0) \rceil) \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち、波紋の周波数  $f$  に応じて、各ノードのエッジの長さが波紋の半径と必ず一致することを表している。

### 5.2.4 エッジの角度の決め方

エッジの角度は、親ノードから見た子ノード間の関係で決められる。例えば、各ノードの内容がニュース記事であり、社会、政治、経済等のカテゴリ属性を持つ場合。同じカテゴリをもつ子ノードをもつエッジの角度は、ある一定の角度範囲内に設定する。

## 5.3 実装: RippleTree

前節で述べた描画スタイルと自動レイアウトに基づき、波紋表現のビューワ (以下、RippleTree) をシステム実装した。図 7 にシステムの外観を示した。本節では、主にシステムの実装上のポイントと、そのシステムの使い方を機能説明とともに述べる。



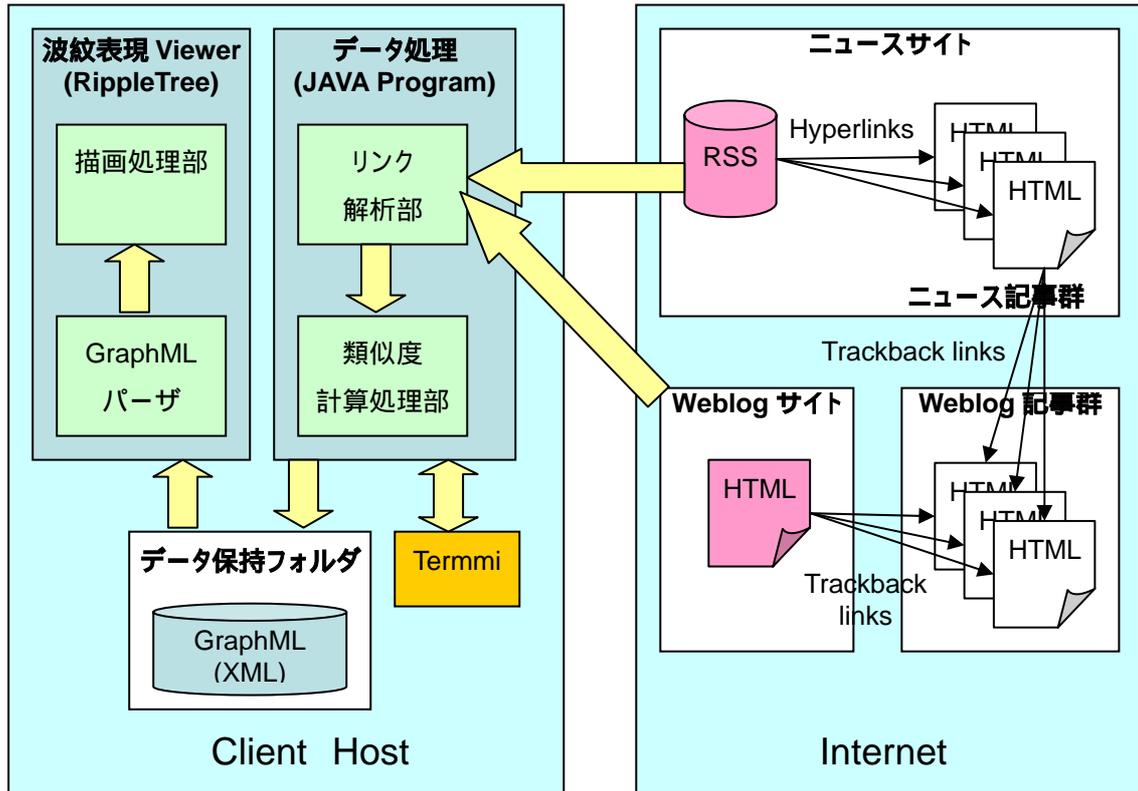


図 8 RippleTreeのシステム構成とデータフロー

### 5.3.2 機能説明

ビューにおけるアニメーション描画を行う際に、ユーザがレイアウトに関する各パラメータ調整を行えるようにした。これにより、データの特性とユーザの視点に応じた表示が得られる。具体的には、ビュー画面の上部に描画の為のパラメータを変更できる3つのスライダを実装している。

これら機能の使用例を図4に示す。図4(b)は図4(a)の状態から9日後の時刻のビューを表している。図4(c)は図4(b)と同じ時点のビューであるが、ビューのスケールを縮小し、かつ波紋の時間間隔を1時間から1日へ変更したビューである。このように、目的に応じて各パラメータを変更することで、様々なビューが得られる。

その他の機能として、ノードをクリックすると、ブラウザが起動し、そのノードが持つURLのページにアクセスすることができる。また、ノード以外のキャンバス上をドラッグすると、ルートノードの位置(視点)を移動できる。

#### 拡大縮小

1つ目のスライダでは、ビューのスケール値を変更できる。すなわち、(9)式の波長 $\lambda$ に反映される。これにより、ビューの拡大と縮小を調節できる。

## 速度

二つ目のスライダでは、ビューの時刻の進行速度を変更できる。すなわち、3章の描画規約で述べた時刻 $t$ の進行速度に対する比例定数に反映される。

## 波紋の時間間隔

3つ目のスライダでは、各波紋の時間間隔を変更できる。すなわち、(9)式の周波数 $f$ に反映される。時間間隔は、1時間から24時間(1日)まで、1時間刻みで調節でき、1日から7日(1週間)までは1日刻みで調節ができる。

## 視覚表現

描画するノードの大きさは、被リンク数に応じて大きくなるように設定している(図9参照)。ノード直径をある一定値で収束するように次式のようにパラメータを設定している。

$$\text{ノード直径}[\text{pixel}] = \frac{2}{\pi} \text{Arc tan}(\text{被リンク数}) \times 20 + 10$$

したがって、被リンク数が約10個以上になった場合でも、ほぼ30pixel程度にノードの大きさが保たれる。

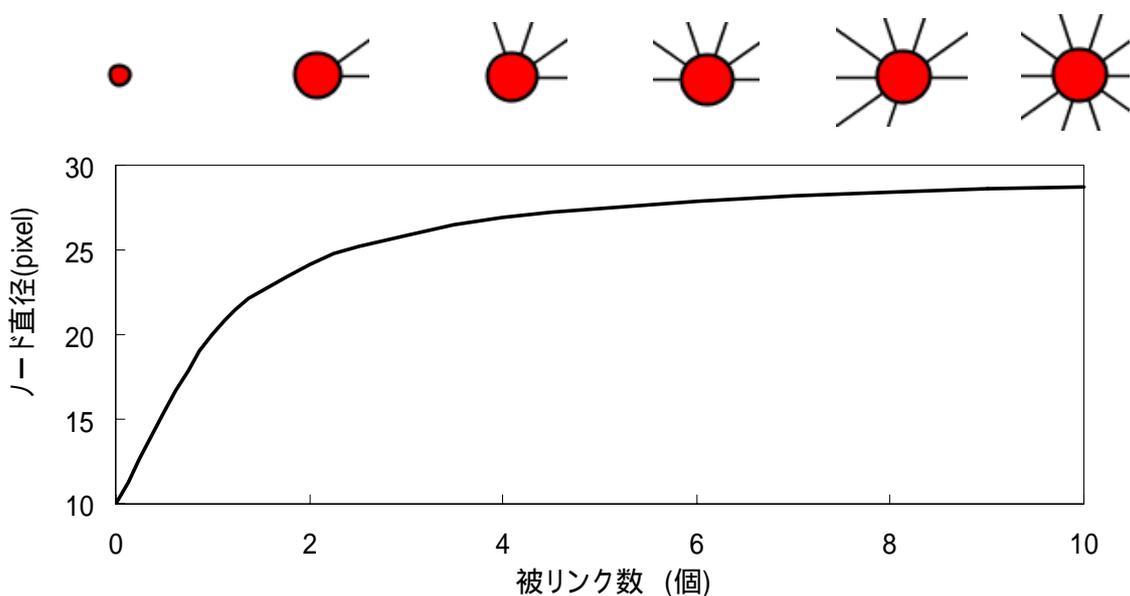
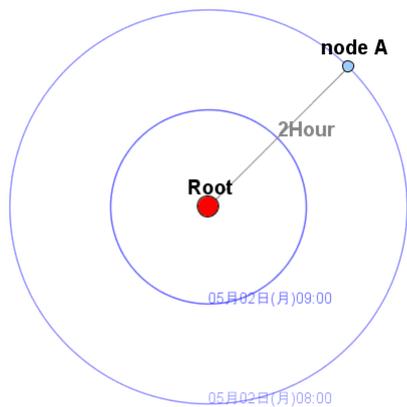
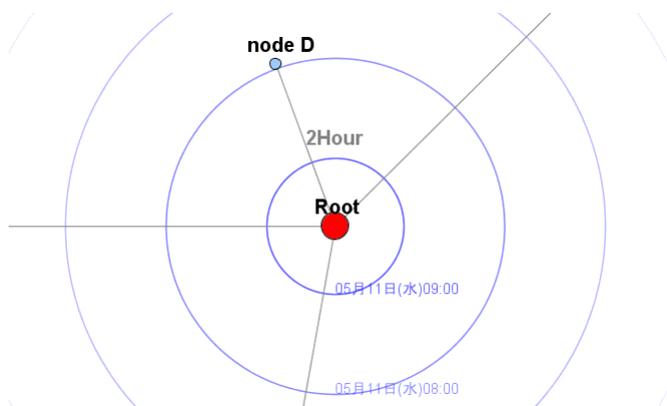


図9 被リンク数とノード直径の関係

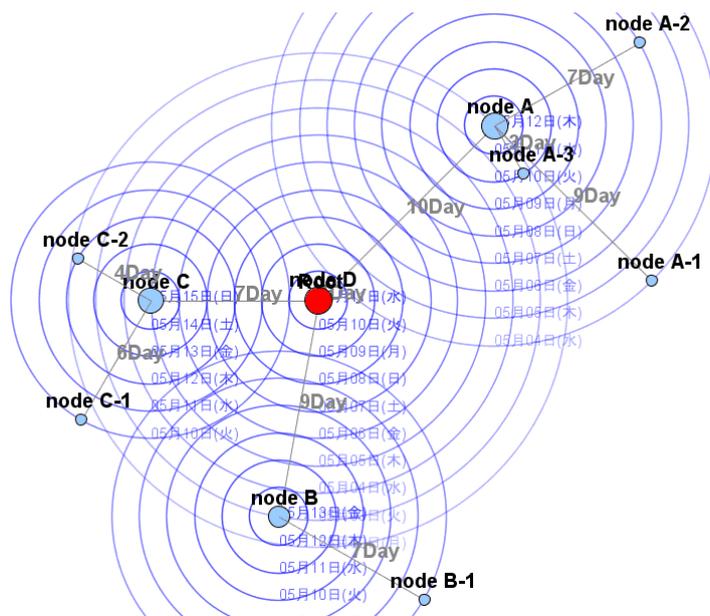
他に、ルートノードは赤色で、任意のノードは水色、クリックによりブラウジングしたノードは青色で表現する。



(a) スケール: 50, 時間間隔: 1時間 (ビュー時刻 : 2005年5月2日AM9:00)



(b) スケール: 50, 時間間隔: 1時間 (ビュー時刻 : 2005年5月11日AM9:00)



(c) スケール: 25, 時間間隔: 1日 (ビュー時刻 : (b)と同時刻)

図 10 スライド操作によるビューの変化

## 第6章 差分表現

グラフの「差」そのものを1枚の静的な図として表現する表現スタイル「差分表現」を考案した。その具体的な描画手法について、5.2節にて数学的な定式化を述べ、5.3節にて実装したシステムについて述べる。まず、定式化を行なう準備として、5.1節にて差分表現の描画対象や座標系、グラフの描画ルールといった描画スタイルを定義する。

### 6.1 描画スタイル

#### 6.1.1 描画対象

描画対象は無向グラフ  $G=(V, E, \varphi)$  とする。スプリング埋め込みによってレイアウトを求めらるものとする。

#### 6.1.2 グラフの描画規約

描画規約は、グラフの描画に際し、必ず満たされるべき制約である[4]。

##### ノードの配置規約

ノードは点（小さい円や小さい長方形）で表現する。配置位置に制約はないものとする。

##### エッジの配線規約

エッジは直線分で表現する。

#### 6.1.3 差の表現法の定式化

グラフの差の表現法の基本的な考え方を手続的に示す。ここでは、二つのグラフ  $G_1=(V_1, E_1, \varphi_1)$  と  $G_2=(V_2, E_2, \varphi_2)$  を描画対象とする。ノード  $v_1 \in V_1$  と  $v_2 \in V_2$  が共通のノードであるとき、 $v_1 \cong v_2$  のように表す。

1. グラフ  $G_1=(V_1, E_1, \varphi_1)$  と  $G_2=(V_2, E_2, \varphi_2)$  をそれぞれ別に、スプリング埋め込みによってレイアウトする。グラフ  $G_i$  のレイアウトを  $L(G_i)$  で表す。
2.  $L(G_1)$  と  $L(G_2)$  を重ね合わせる。その際、 $v_1 \cong v_2$  であるノード  $v_1$  とノード  $v_2$  ができるだけ近くなるように、 $L(G_2)$  を平行移動したり回転したりする。

$v_1 \cong v_2$  であるノード  $v_1$  とノード  $v_2$  の位置が異なる場合、 $v_1$  から  $v_2$  に向かう矢印（あるいは  $v_1$  の位置を底辺の中点に、 $v_2$  の位置を頂点とする三角形）を描く。ノード  $v_1$  とノード  $v_2$  の位置が同じ場合（つまり  $v_1$  と  $v_2$  が重なって描かれている場合）には、なにもしない。

## 6.2 自動レイアウト

### 6.2.1 マージグラフ

下記のような二つのグラフ  $G_1$  と  $G_2$  の差分表現を生成することを考える .

$$G_1 = (V_1, E_1, \varphi_1) \quad (5)$$

$$G_2 = (V_2, E_2, \varphi_2) \quad (6)$$

ここで , グラフ  $G_1$  と  $G_2$  はノードの一部 (または全部) を共有するものとする . 二つのグラフのノード集合が全く異なる場合には , 変化を考える意味がないからである (総入れ替えと考えれば , 無意味ではないが , その変化を可視化する意味はほとんど無い) . しかしながら , ここでは集合の要素として , それらは別のものとして扱う . つまり  $V_1 \cap V_2 = \phi$  とし , 共有されるノードは  $v_1 \cong v_2$  のように表すことにする .

差分表現を作成するために , 二つのグラフをマージしたグラフ  $G_m$  (「マージグラフ」と呼ぶ) を生成する .

$$G_m = (V_m, E_m, \varphi_m) \quad (7)$$

ここで  $V_m$  と  $E_m$  は次のように表される .

$$V_m = V_1 \oplus V_2 \quad (8)$$

$$E_m = E_1 \oplus E_2 \oplus W_1 \times W_2 \quad (9)$$

ノード集合  $V_m$  は  $V_1$  と  $V_2$  をマージした集合である . ノード集合  $V_m$  において  $V_1$  と  $V_2$  は共通要素を持たないため ,  $\cup$  ではなく  $\oplus$  を用いた . エッジ集合  $E_m$  は  $E_1$  と  $E_2$  をマージし , さらに集合  $W_1 \times W_2$  を加えたものである . 集合  $W_1 \times W_2$  の要素は  $V_1$  と  $V_2$  の共通ノード間を接続するエッジであるとする . ここで  $W_1$  と  $W_2$  集合は次のように表される .

$$W_1 = \{v_1 \in V_1 \mid \exists v_2 \in V_2, v_1 \cong v_2\} \quad (10)$$

$$W_2 = \{v_2 \in V_2 \mid \exists v_1 \in V_1, v_1 \cong v_2\} \quad (11)$$

つまり ,  $W_1$  は  $V_1$  の部分集合で ,  $V_2$  に対応するノードが存在するノードの集合であり ,  $W_1$  も同様である .

このとき接続関数  $\varphi_m : E_m \rightarrow V_m \times V_m$  は次のように表される .

$$\varphi_m(e) = \begin{cases} \varphi_1(e) & \text{if } e \in E_1 \\ \varphi_2(e) & \text{if } e \in E_2 \\ e & \text{if } e \in W_1 \times W_2 \end{cases} \quad (12)$$

## 6.2.2 物理モデル

Eades の Spring-Embedding[33]を利用してマージグラフのレイアウトを求める．基本的には Eades のモデルと同じものを利用するが，以下の点において異なる．

マージグラフの構成において導入したエッジに対して特殊なモデル化を行なう．つまり， $W_1 \times W_2$  の要素は，仮想的に自然長が 0 のスプリングとし，その強さについても，オリジナルのエッジとは異なるモデル化をする．具体的には，スプリングの強さは一定値として扱う．

## 6.2.3 マージグラフの表現

前節で述べた物理モデルを利用してレイアウトを求めた後，各ノードや各エッジに視覚的な表現を与え，グラフの差分表現を得る．

### ノードの表現

ノード集合  $V_1$  の要素と  $V_2$  の要素はどちらも小円あるいは長方形で描く．その際， $V_1$  の要素と  $V_2$  の要素にはそれぞれ異なる色を割り当てる．ただし， $v_1 \cong v_2$  なる  $v_1$  と  $v_2$  が同一の場所に位置する（完全に重なっている）時には，基準とするグラフのノードを表示する．たとえば， $V_1$  の要素には青色を， $V_2$  の要素には赤色を割り当て，基準とするグラフを  $G_1$  にした場合には， $v_1 \cong v_2$  なるノードが完全に重なっていると， $v_1$ （青色）がその位置に表示される．こうすることで，例えば， $G_1$  には無く  $G_2$  で追加されたノードは， $v_2$  のノード色である赤色で表現されることになる．逆に削除されたノードは表現できない制約がある．

### エッジの表現

エッジ集合  $E_1$  の要素と  $E_2$  の要素はどちらも直線分で描く．その際， $E_1$  の要素と  $E_2$  の要素には，それぞれ異なる色を割り当てる．たとえば， $E_1$  の要素には青色を， $E_2$  の要素には赤色を割り当てる．マージグラフの構成において導入したエッジ  $W_1 \times W_2$  は，本来はエッジではなく，ノードの移動を表すものであるため， $W_1$  の要素から  $W_2$  の要素に向かう矢印（三角形）で描く．このエッジの長さによって，ノードの位置の差（移動量）を提示できる．

## 6.3 実装: DiffGraph

前節までに説明した描画スタイルと自動レイアウトに基づき,差分表現のビューワ(以下, DiffGraph)をシステム実装した. 図 11 にシステムの外観を示した. 本節では,主にシステムの実装上のポイントと,そのシステムの使い方を機能説明とともに述べる.

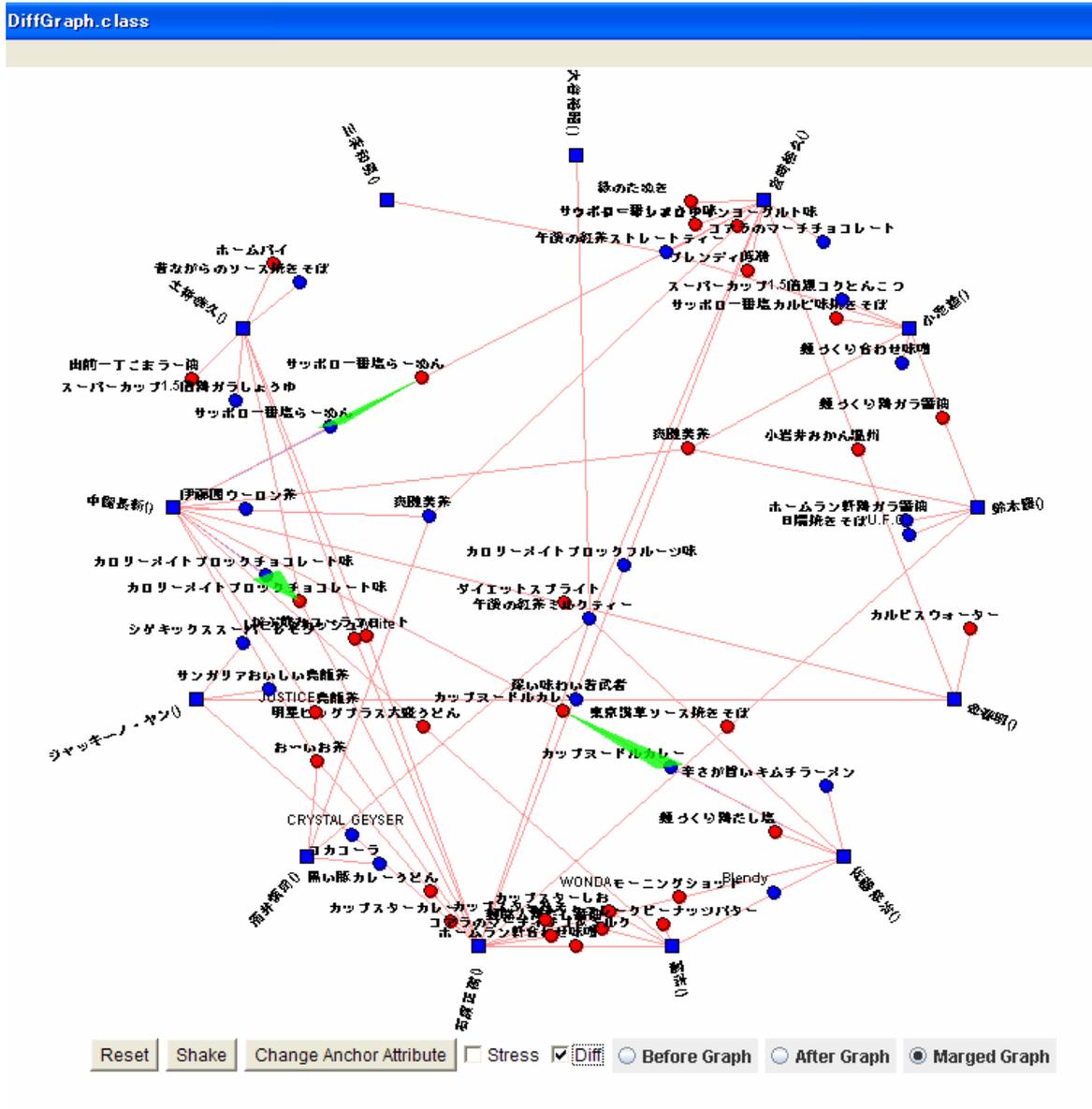


図 11 DiffGraphの外観

### 6.3.1 システム構成

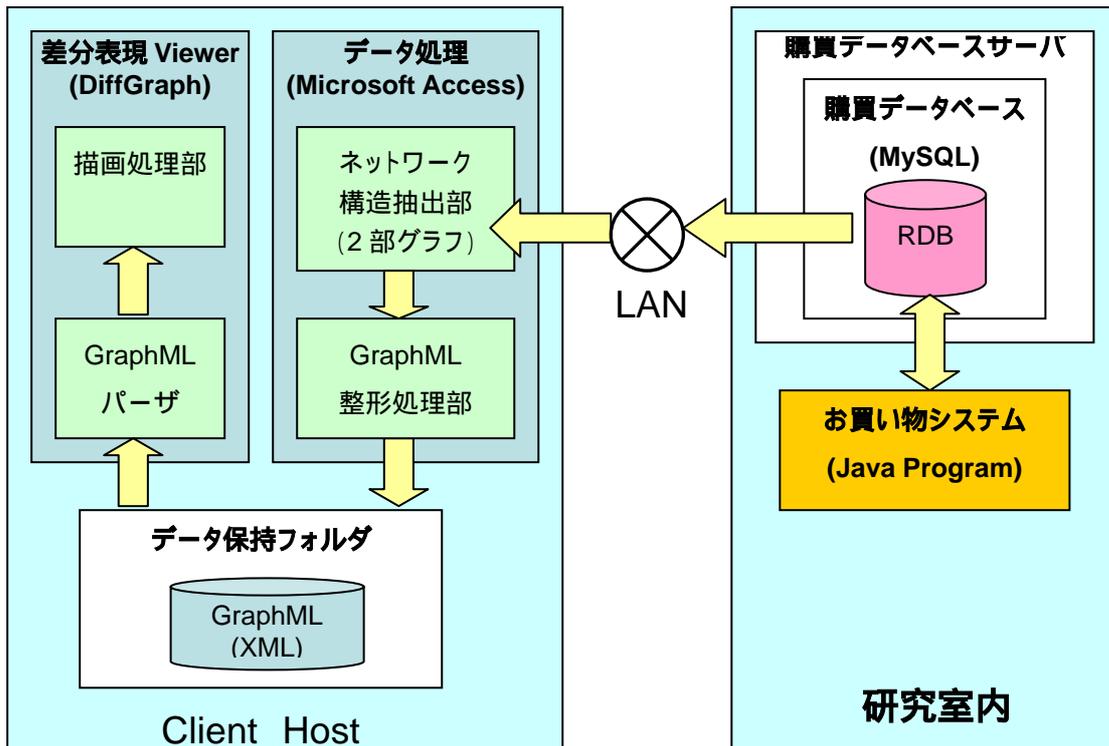


図 12 DiffGraphのシステム構成とデータフロー

DiffGraph は RippleTree 同様，JAVA1.4 を開発言語としている．読み込むデータ形式は GraphML<sup>6</sup>とした．使用するデータは，筆者の研究室で 2006 年 6 月から運用されている「お買い物システム」によって蓄積された購買履歴データである．この購買履歴データは，リレーショナルデータベースである MySQL によって管理されているので，このデータベースからネットワーク構造を抽出するモジュールを作成した．このモジュールは，Microsoft Access 2003 の VBA で実装した．このモジュールを用いて，商品 購入者関係の 2 部グラフを抽出し，日付ごと GraphML 形式で XML を出力する．

DiffGraph は，この XML を読み込み，差分表現で描画を行なう．得られたビューは，マウスドラッグで視点の移動や，マウススクロールで拡大縮小ができる．

### 6.3.2 機能説明

#### Merged Graph View

ある二つのグラフのマージビューは，画面下にある「Merged Graph」のラジオボタンを ON にすることで得られる．これにより，画面中央のキャンバスへマージグラフを描画する（図 11）．

#### Before Graph および After Graph View

Merged Graph View のラジオボタンの左側には，Merged Graph で重ねて表示している二つのグラフを単独で表示する画面切り替えのラジオボタンがある．例えば，「Before Graph」

のラジオボタンを ON にすると、キャンバスへ時間が古い側のグラフ（これを Before Graph と呼ぶ）を描画する（図 13）。また、Merged Graph でマージしている時間が新しい側のグラフ（これを After Graph と呼ぶ）をキャンバスに表示する場合には、「After Graph」のラジオボタンを ON にする（図 14）。

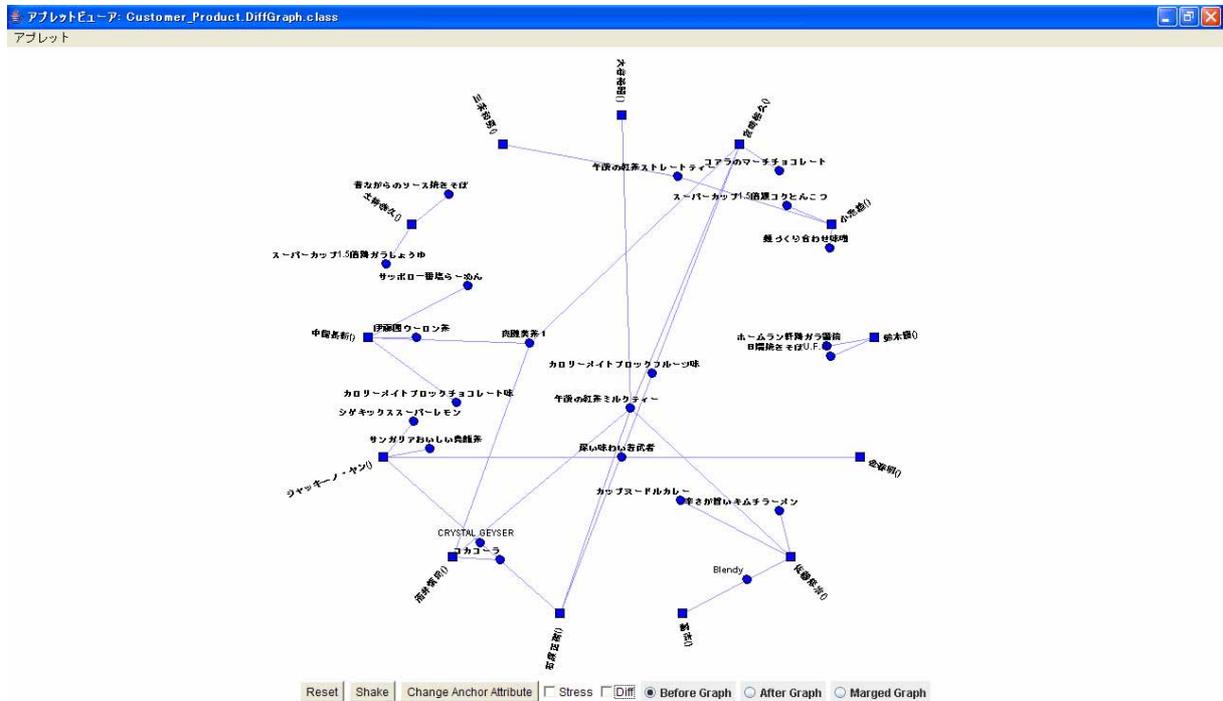


図 13 Before Graph View

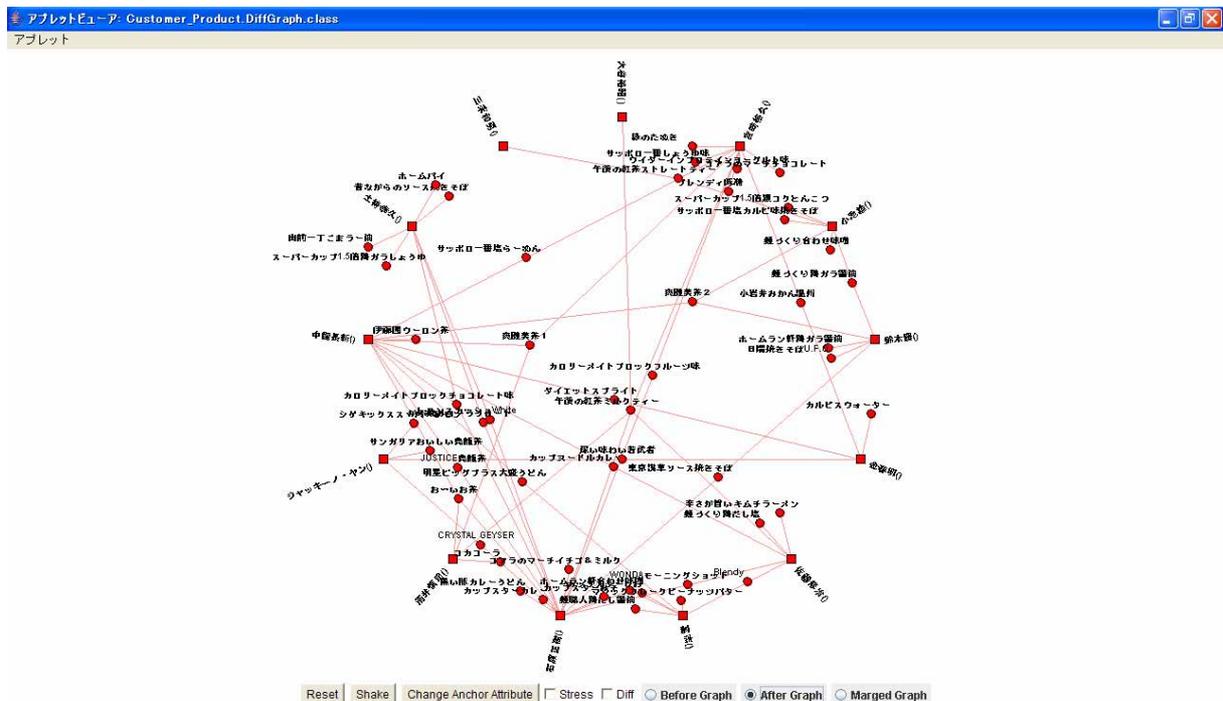


図 14 After Graph View

## アンカーおよびフリーノードのレイアウト切り替え

DiffGraph で描画するグラフのレイアウトは、アンカーマッピングレイアウト[21]を適用している。これは、2部グラフを構成する2種類の属性をもったノードに対して、一方の属性のノードの位置に制約を付け、他方の属性のノードは、Spring-Embeddingにより位置が決定されるレイアウト手法である。位置に制約を設けた属性のノードを、**アンカーノード**と呼び、もう一方の属性のノードを**フリーノード**と呼ぶ。アンカーノードに割り当てたノード群を円配置する。

図 11 では、ノード属性が購入者であるノードがアンカーノードとして配置され、ノード属性が商品であるノードがフリーノードとして配置されている。この属性を切り替える場合には、画面下にある「Change Anchor Attribute」ボタンを押す。すると、商品ノードがアンカーノードとして配置され、購入者ノードがフリーノードとして配置される。

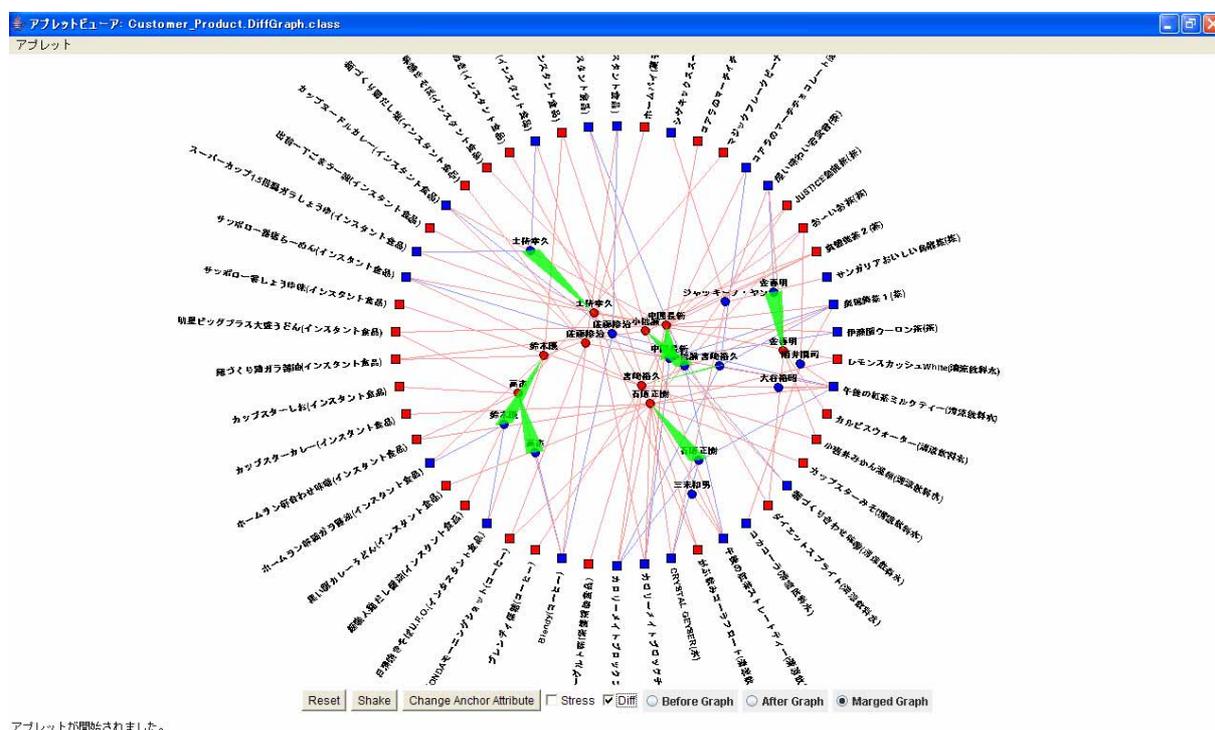


図 15 アンカーノードを商品，フリーノードを購入者としたMerged Graph View

## 移動ベクトル表示

Before Graph と After Graph をマージした際に、両方のグラフに共通したノードで、ジオメトリックな変化があった場合には、その対応関係と移動量を表現するために、移動ベクトルを表示する機能がある。これは、画面下の「Diff」チェックボックスを ON にしている場合に、Before Graph View, After Graph View, Merged Graph View の3つのビューモードにおいて、緑色の三角形で表現される。この機能を使うことで、どのノードがどれくらい移動したのかが、視覚的に認識できる。

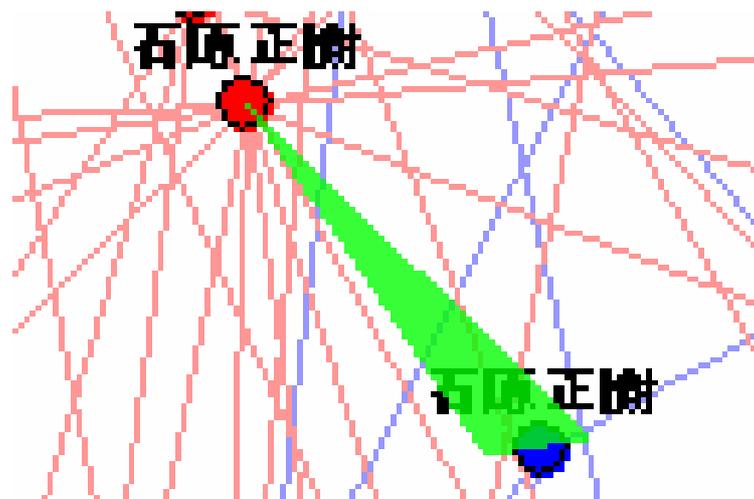


図 16 移動ベクトル (緑色の三角アイコン)

### エッジのハイライト表示

エッジ数が大量になってくると、ある特定のノードに直接連結されたエッジとノードだけを見るということが困難となってくる。そこで、任意のノード上でクリックすると、図 17 のように、クリックされたノードのエッジとそのエッジにより連結されたノード群が赤色でハイライト表示されるインタラクティブ機能を実装した。



図 17 エッジのハイライト表示

## アンカーノードの配置法

アンカーノードに例えば、清涼飲料水や栄養補助食品といったカテゴリ属性があった場合には、その属性でソートして配置する。これは、フリーノードの移動ベクトル方向にどういった属性のアンカーノードのグループがあるかといった分析に役立つ。

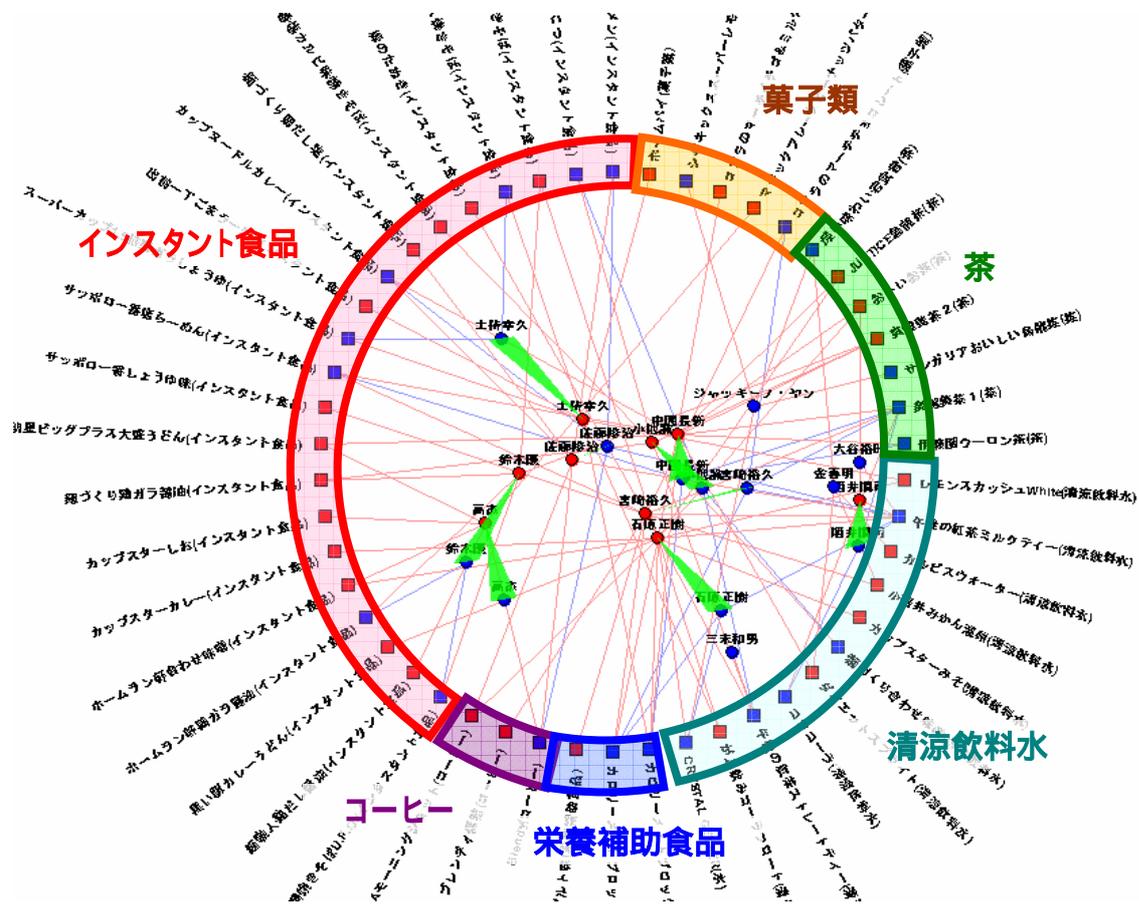


図 18 カテゴリごとのアンカーノード配置

## 視覚的表現

Diff Graph では、Before Graph と After Graph の差分を表現できる。差分のうち、ノードの追加は、Merged Graph の色で判別できる。Before Graph のグラフ要素をすべて青色で表現し、After Graph のグラフ要素をすべて赤色で表現することで、Merged Graph において、赤色のノードが、After Graph にて追加されたノードであることが判別できる(図 19)。

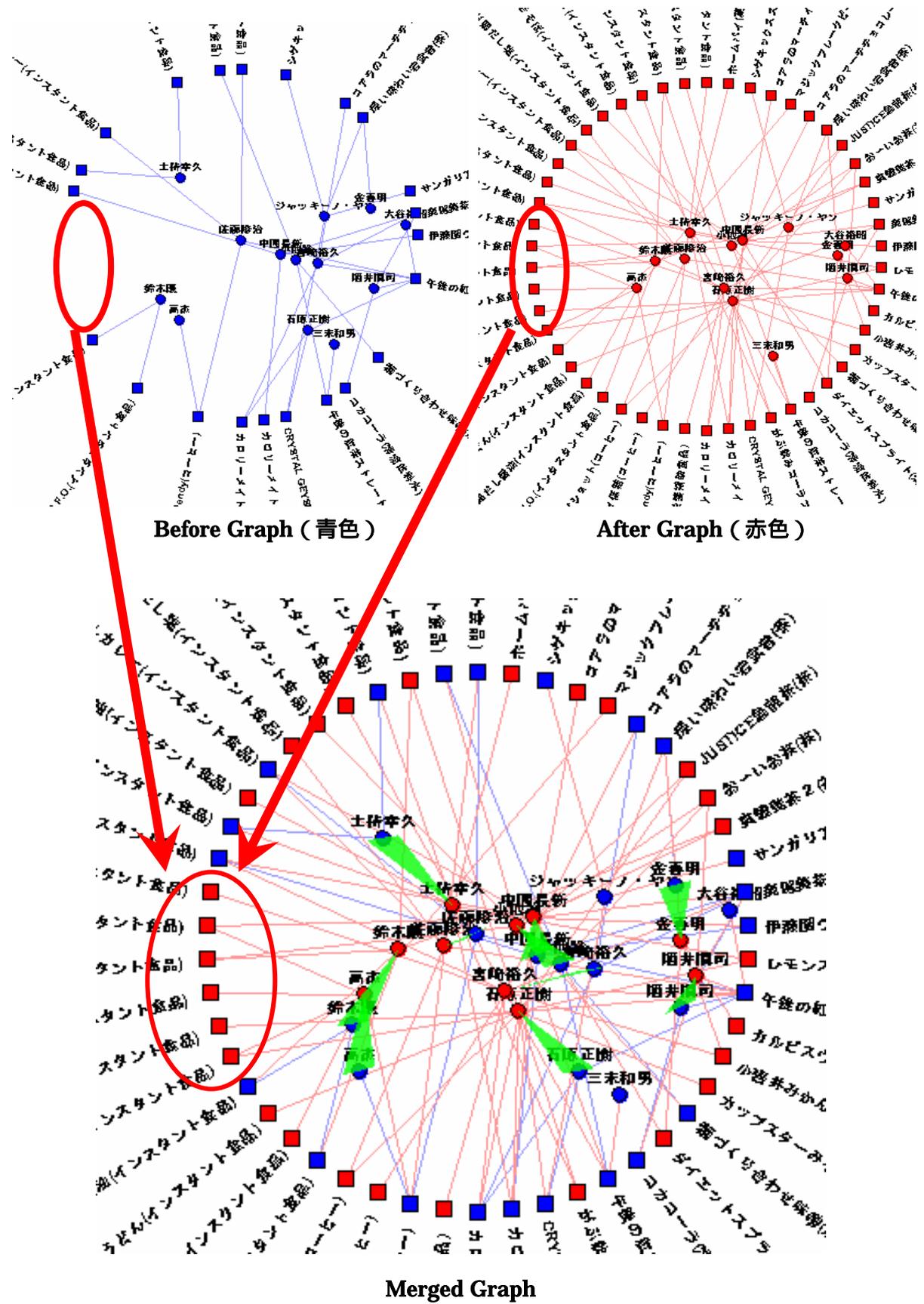


図 19 追加されたノードの判定

# 第7章 適用例

波紋表現と差分表現を用いて、様々な動的ネットワークに対して適用を行なった。具体的に、Weblog 記事のリンク関係の波紋表現を行い、リンク構造の時間的変化を可視化した。また、購買関係のネットワークの差分表現を行い、購買傾向の可視化を行なった。これら二つの適用例から、どういった事が読み取れるようになったかについて考察する。

## 7.1 波紋表現による話題の広がり可視化

### 7.1.1 Weblog記事とニュース記事のリンク関係の視覚化

IT 関連のニュースサイト「CNET Japan」が 2006 年 1 月 12 日に配信した RSS<sup>7</sup> ( 総数 35 記事 ) を元に、波紋表現で表したニュース記事を図 6 に示す。



図 20 トラックバック記事があるニュース記事の波紋表現

図 20 に矢印で示したニュース記事から再帰的に波紋が発生している部分に注目されたい。これは、木構造でいう、親ノードから枝分かれした子ノードがあることを表している。すなわち、このニュース記事にリンクした記事があれば、このように再帰的に波紋が発生する。

CNET Japan は、ニュース記事に対して、関連する記事（Weblog 記事）を誰でも自由にトラックバックによりリンクを張ることができるようになっている。トラックバック記事(図 21 の波線で囲まれたノード)には、カテゴリ情報が無いため、この場合の角度は、トラックバック元記事（ニュース記事）から見たトラックバック記事（Weblog 記事）間の類似度によって決める。具体的には、トラックバック元記事の角度にある記事ほど、類似度が高い記事としている（図 22 参照）。

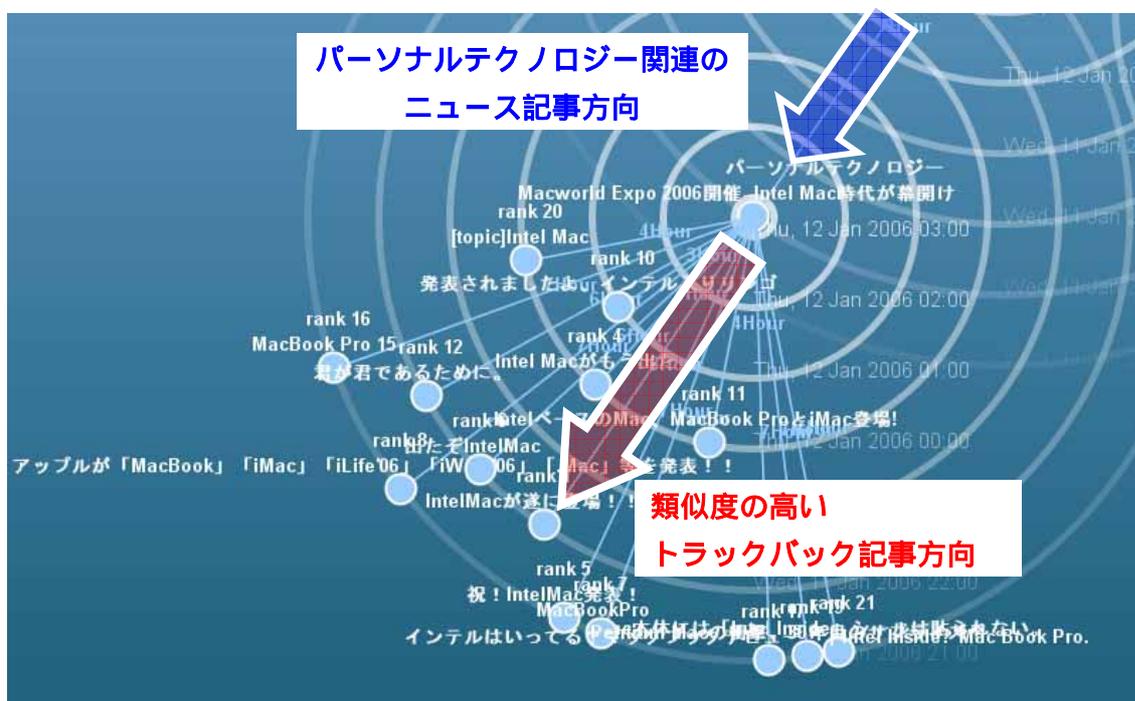


図 21 類似度に基づいたトラックバック記事の配置

### ニュース記事に対する反響の可視化

類似度を角度に対応づけることで、話題となったニュース記事すなわち被リンク数が多いニュース記事に対して、類似性が高い Weblog 記事がどのようなタイミングでリンクされたのか、時系列に分析することができる。類似性が高い Weblog 記事は、リンク元のニュース記事の内容に言及している可能性が高いため、例えば、あるニュース記事に対して、プロガーがいつどのような反応を示したかを、距離と角度で把握することが出来る。

### 角度の決め方

トラックバック記事の角度は、各トラックバック記事とニュース記事との関係性からエッジ角度を算出しなければならない。この時の手順は以下の通りである。

まず、取得したトラックバック記事の概要（description 要素）を用いて、トラックバック元記事であるニュース記事との類似度を算出する。この処理は、外部ツールのテキストマイニングツール Termmi を用いる（図 8 参照）。次に類似度が高い記事から順に、親記事の角度に近くなるよう角度を割り当てて行く（図 22 参照）。

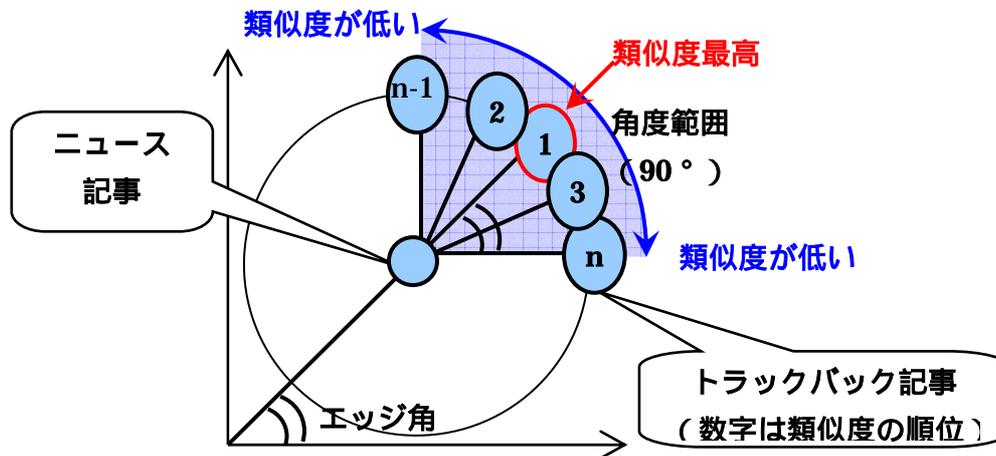


図 22 トラックバック記事の角度の割り当て

### 7.1.2 Weblog記事のリンク関係の波紋表現

注目を集めた Weblog 記事<sup>8</sup> に対してトラックバックによりリンクされた Weblog 記事のリンク関係を波紋表現で可視化した。この記事は 2005 年 12 月 28 日に作成された記事であり、2007 年 1 月 28 日現在までに、直接リンクだけで、109 件のトラックバック記事がある。記事内容は、トラックバックスパム対応策導入にともなうトラックバックの仕様変更について書かれている。一般に、トラックバックに関しては様々な論争があり、この Weblog 記事を発端に、トラックバックについて言及した Weblog 記事が比較的大量にリンクされている。

この Weblog 記事をルートして、4step 目までのリンク記事を 671 件取得した。これらリンク記事群は、その Weblog 記事が掲載されている Trackback Ping Server が、リンク記事の一覧取得の要求に回答した場合のみ取得したものである。つまり、「?\_mode=rss」を付加した Trackback Ping URI による HTTP GET によるリンク記事取得を行なった。なお、重複している記事や RDF に準拠していない記事などは省略している。

#### 話題の広がりを可視化

ルート記事が書かれてから 7 日目のリンク関係を図 23 に示す。1 日目（一番外側の波紋上）に比較的多くの Weblog 記事がリンクされたが、2 日目以降からリンク数が減少している。図 23 に矢印で示した記事 X に注目すると、この記事 X がリンクされた数日後にリンク数が増えていることが、図 24 から読み取れる。それと同時に、初期の頃にリンクされた Weblog 記事 X と Y に注目すると、14 日目までに 2step までリンクが伸びている。さらに、21 日目（図 25）になると、記事 X と記事 Y から始まったリンク記事群が次々に広がっていること

が読み取れる。すなわち，記事 X と記事 Y から話題が伝わっていることを示している。

このような，話題となるトピックを提起した Weblog 記事の投稿者は「TopicFinder」と呼ばれる。また，記事 Y にリンクした記事 Z は，比較的多くのリンク記事を有しており，話題の中心となっている記事と言える。こうした Weblog 記事の投稿者は「Opinion Leader」と呼ばれる[11]。

Weblog 記事のリンク関係の波紋表現を行なうことで，時系列に沿った話題の伝わりや反響が現れる前後のリンク構造の変化などが，視覚的に分析することが可能となる。

### **角度の決め方**

エッジの角度は，前節と同様に類似度を対応づけることも可能であるが，本節では，特に時系列の変化を観察しやすいように，トラックバックされた時間に対応づけられている。すなわち，各時刻に一定に記事がリンクされているとしたら，第 4 象限から第 1 象限にかけてらせん状にノードが並ぶ。エッジの長さや角度がそれぞれ時間に対応していることで，二つの尺度で時間の経過を意識できる。



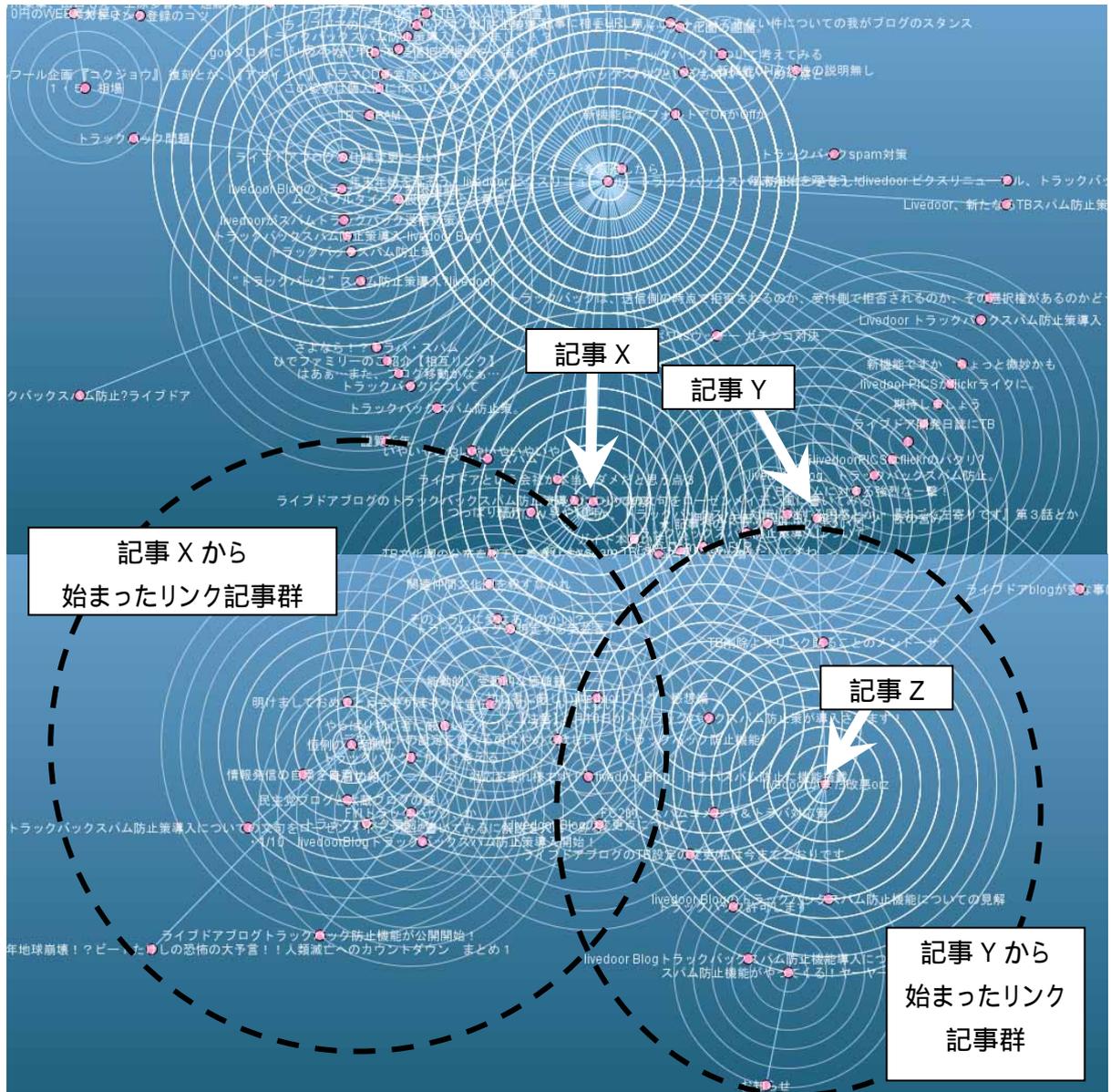


図 25 Weblog記事間のリンク関係の波紋表現（21日目）

## 7.2 差分表現による購買傾向の可視化

### 利用データ

研究室内で運用されている「お買い物システム」の2006年6月4日から2007年1月23日までの購買履歴（商品 購入者）データを利用した。また，商品属性として，商品名，商品カテゴリ，購入日時，購入数を利用した。データ規模は，データ取得の最終日である1月23日の時点で，ノード数321，エッジ数924であった。

### 7.2.2 購入者の商品に対する趣向変化

図26に2006年8月1日までのグラフと2006年12月1日までのグラフをマージしたグラフ（アンカーノードを商品，フリーノードを購入者に設定）を示す。この図を見ることで，4ヶ月間で購入者はどういった趣向に変化したか分かる。例えば，図26に示した点線の中に配置されている購入者（Before Graph側のノード）は，中心にいる購入者に比べて右下のアンカーノード近傍に位置している。このことは，その近傍のアンカーノードである商品を比較的主に購入していることを意味する。すなわち，点線内の購入者は，清涼飲料水を8月まで主に購入していたといえる。一方，12月ごろになると，点線内にいた購入者は左上に向かって移動している。つまり，購入する商品のカテゴリが清涼飲料水から菓子類やインスタント食品へ変化したといえる。このような，購入者の趣向の変化を，差分表現の移動ベクトルの方向や，ノードの位置，エッジの様子などから視覚的に分析することが可能である。

### 7.2.3 商品の購買層の変化

図26と同様のネットワークに対して，アンカーノードとフリーノードの属性を交換した差分表現を図27に示す。この図を見ることで，各商品ひとつひとつにおいて，どのような売れ行きの変化が4ヶ月間であったか分かる。例えば，図26の点線内の商品（Before Graph側のノード）は，8月まで主に卒研究生（上側に配置されたアンカーノード）に買われていたが，4ヶ月間で大学院生（下側に配置されたアンカーノード）にも買われるようになったといえる。すなわち，点線内の商品は，購買層が変化したといえる。



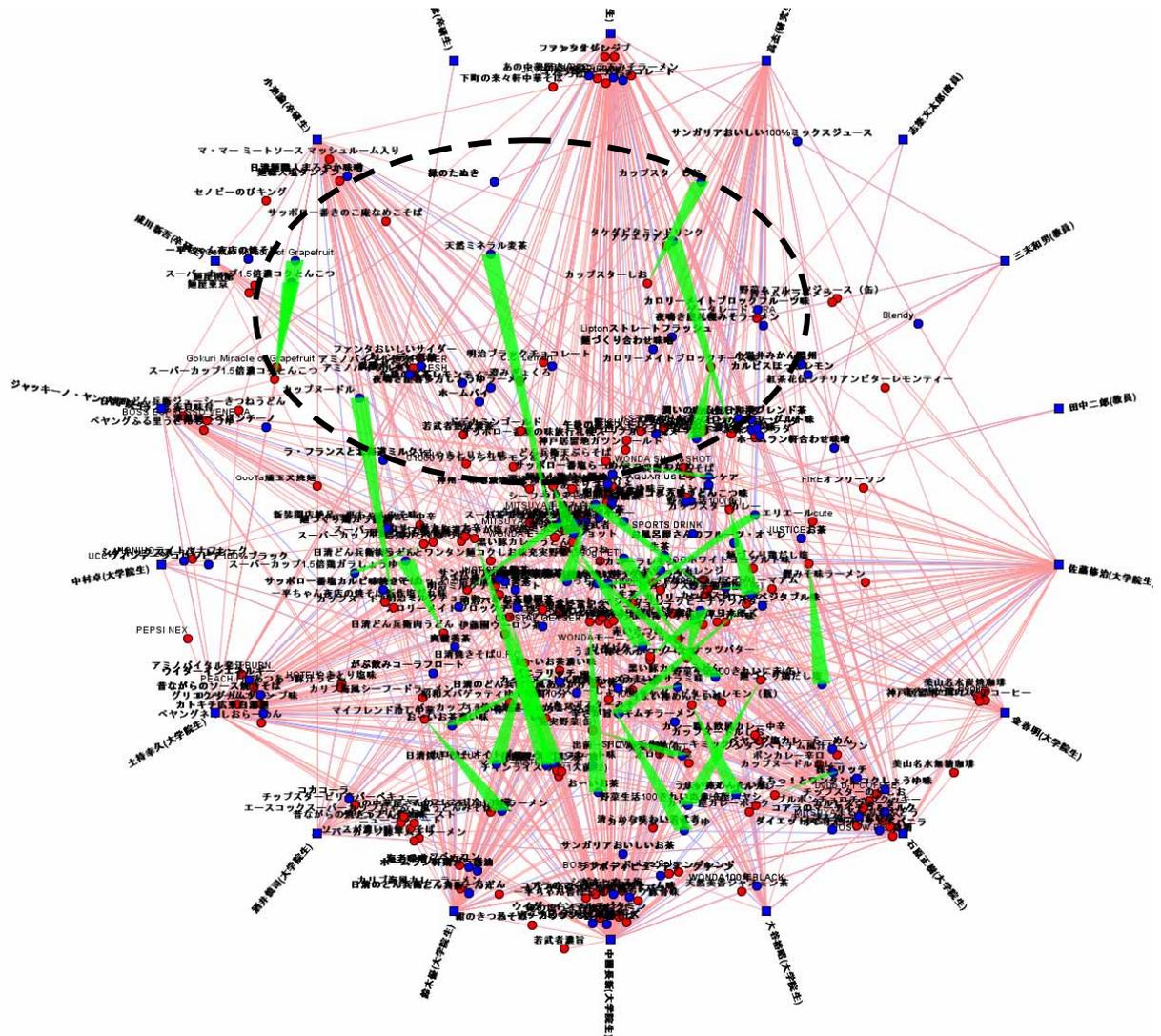


図 27 2006年8月1日から12月1日までのマーシグラフ  
 (アンカーノード：購入者，フリーノード：商品)

## 第8章 評価

2章で述べた時間一覽性と単一性を両方満たした差分表現と波紋表現によって、動的ネットワークの差分と成長過程を、従来の表現より分かりやすく提示できることを比較実験により検証する。従来の表現の提示手法として、時間一覽性だけを満たした「各時刻の図を並べた複数枚の静止画による提示手法」と、単一性だけを満たした「動画やインタラクティブ操作による提示手法」を比較対象に用いた。

### 8.1 実験目的

実験では、以下の仮説を実証することを目的とする。

**仮説 1:** 差分表現は複数枚の静止画と動画に比べて、トポロジ変化とジオメトリ変化を分かりやすく表現できる。

**仮説 2:** 差分表現は可視化する動的ネットワークの規模が大きくなるほど、仮説 1 の特徴が顕著に現れる。

**仮説 3:** 波紋表現は複数枚の静止画と動画に比べて、トポロジ変化を分かりやすく表現できる。

**仮説 4:** 波紋表現は可視化する動的ネットワークの成長過程が長くなるほど、仮説 3 の特徴が顕著に現れる。

### 8.2 実験方法

仮説 1 と仮説 2 を検証するために、動的ネットワークの差分を捉える課題を作成し、その課題を被験者に行なってもらう。差分表現と複数枚の静止画、動画の 3 つの提示手法で、被験者を 3 つのグループに分ける。この課題の成績を評価指標として、グループ間の成績の違いを分析する。仮説 1 と仮説 2 の検証方法と同様に、仮説 3 と仮説 4 では、動的ネットワークの成長過程」を捉える課題を作成し、その課題を波紋表現と複数枚の静止画と動画による 3 つの提示手法で分けたグループの被験者に行なってもらう。

#### 8.2.1 被験者

実験の被験者は理系の大学生および大学院生である。これは、本研究で扱っているネットワーク図にある程度慣れ親しんでいることを前提とするためである。具体的に、年齢層や学力といった個人差があまりない同研究室の学生を 12 名選んだ。なお、被験者全員に色覚障害などは無い。表 2 のように被験者をネットワーク図の提示手法ごとに 3 グループに分けた。

表 2 被験者グループとネットワーク図の提示手法の対応

被験者グループ	人数	ネットワーク図の提示手法	満たされる視覚的表現の要求
グループ 1	4名	複数枚の静止画	時間一覧性
グループ 2	4名	動画（インタラクティブに提示）	単一性
グループ 3	4名	提案手法（差分表現，波紋表現）	時間一覧性 および 単一性

### 8.2.2 課題

課題は大きく分けてネットワークの差分を捉える課題（差分表現の評価用）とネットワークの成長過程を捉える課題（波紋表現の評価用）の二つにわけて作成した。差分を捉える課題では，ネットワークの規模を変えて 3 種類作成した。成長過程を捉える課題では，ネットワークを比較する期間の長さで 2 種類作成した。それぞれの課題に対する被験者へのネットワーク図の提示方法は，表 3 のように設定した。

表 3 課題の種類と被験者グループごとのネットワーク図の提示方法

グループ	課題の種類	被験者グループ 1 （複数枚の静止画）	被験者グループ 2 （動画）	被験者グループ 3 （提案手法）
差分を捉える課題	小規模 （ノード数:35～62 エッジ数:33～79）	DiffGraph の Before GraphとAfter Graphを紙に印刷して提示（計2枚）	DiffGraph の Before GraphとAfter GraphをDiffGraphのビュー切替機能でPC画面に提示(1画面)	DiffGraph の Merged Graphを紙に印刷して提（計1枚）
	中規模 （ノード数:62～86 エッジ数:79～134）	〃	〃	〃
	大規模 （ノード数:86～101 エッジ数:134～178）	〃	〃	〃
成長過程を捉える課題	短期間 （2日間のネットワーク比較）	Graph Viewによる各時点のネットワーク図を紙に印刷して提示（計10枚）	Graph Viewによる各時点のネットワーク図を，PowerPointのスライド機能でPC画面に提示（1画面）	RippleTreeの波紋表現を紙に印刷して提示（計1枚）
	長期間 （5日間のネットワーク比較）	〃	〃	〃

## ネットワークの差分を捉える課題

差分を捉えるグラフ要素として、ノードに焦点を当てた課題を作成した。すなわち、以下の変化を見つけることが課題目標となる。

- ・ トポロジ変化：追加されたノード
- ・ ジオメトリ変化：移動量が大きいノード

実際に作成した課題の例として図 28 を出題した。この課題で提示するネットワーク図は、被験者グループ 1 の場合、図 29(a),(b)の二つネットワーク図をそれぞれ A4 サイズの紙に印刷したものである。被験者グループ 2 に対しては、同様のネットワーク図を、PC 画面上で提示する。被験者は、6 月 23 日のネットワーク図(Before Graph)と 7 月 1 日のネットワーク図(After Graph)を、マウス操作でビューを切替えながら観察を行なう。被験者グループ 3 に対しては、図 30 のような DiffGraph (Merged Graph View) で描画した差分表現を A4 サイズの紙に印刷したものを提示する。

【課題 A-3】(制限時間 4 分)

6 月 23 日と 7 月 1 日のネットワーク図を見比べて下さい。

(1) 移動が大きい商品(上位 3 つ)

(2) 新規追加された商品(任意に 5 つ)

を見つけて、答えを記入して下さい。

該当する購入者がいない場合は「なし」と記入して下さい。

図 28 ネットワークの差分を捉える課題の例

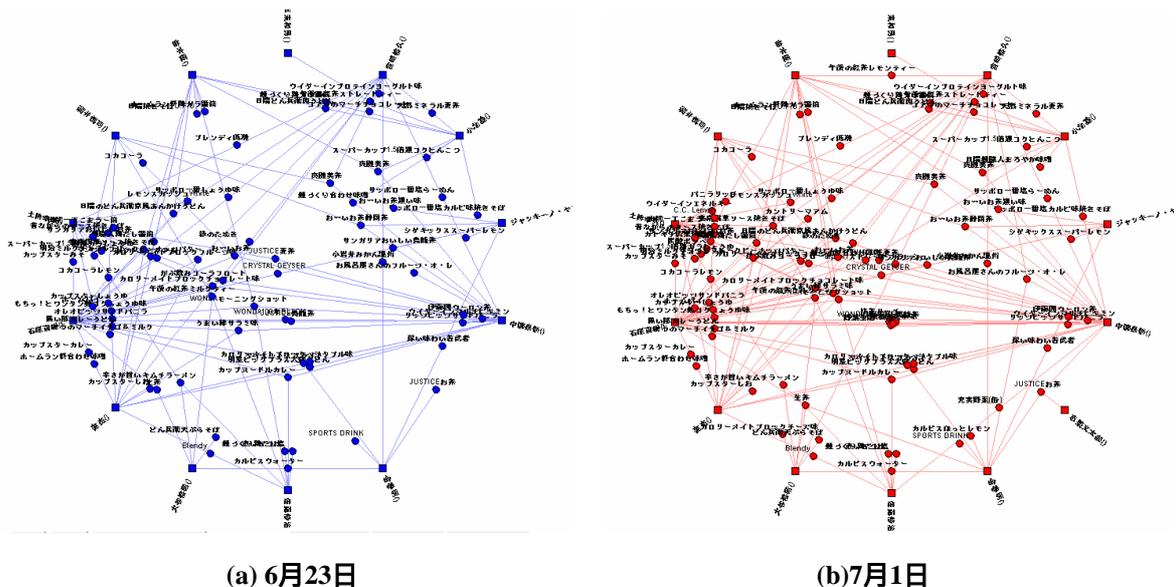


図 29 被験者グループ 1 に対して提示したネットワーク図の例

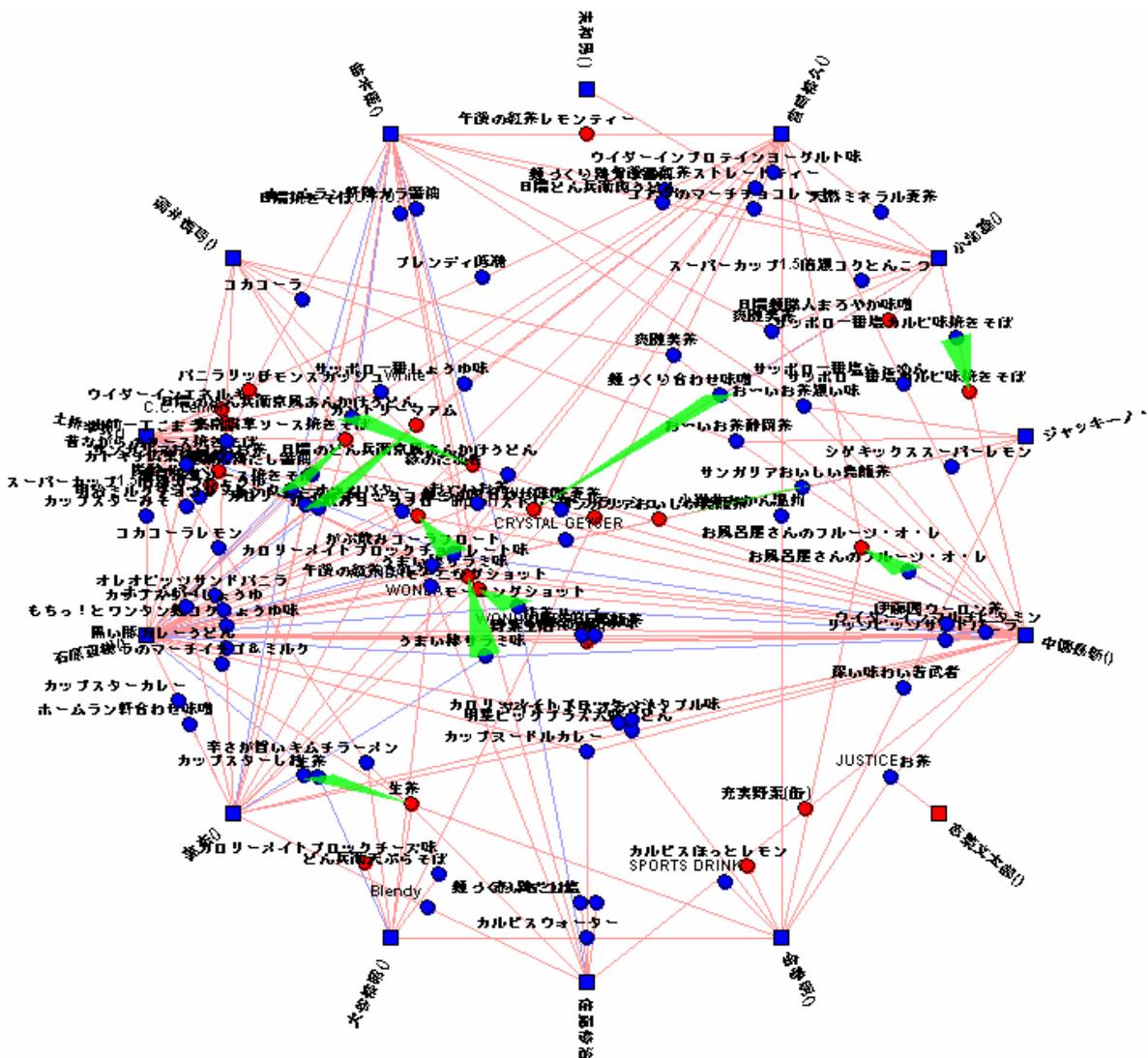


図 30 被験者グループ 3 に対して提示したネットワーク図の例

### ネットワークの成長過程を捉える課題

成長過程を捉えるグラフ要素として、差分と同様にノードに焦点を当てた問題を作成した。以下の変化を見つけることが課題目標となる。

- ・ トポロジ変化：追加されたノード

実際に作成した課題の例として、図 31 を出題した。この課題で提示するネットワーク図は、被験者グループ 1 の場合、図 32(a)~(k)の 10 枚のネットワーク図をそれぞれ A4 サイズの紙に印刷したものである。このネットワーク図は、Graph View<sup>9</sup>を用いて描画したものである。被験者グループ 2 に対しては、同様のネットワーク図を Microsoft PowerPoint のスライドショー機能を使い PC 画面上で提示する。つまり、被験者はキー操作によって、時系列ごとに 10 枚のネットワーク図を紙芝居風に見て行ける。被験者グループ 3 に対しては、図 33 のような RippleTree で描画した波紋表現を A4 サイズの紙に印刷したものを提示する。

【課題 B-1】(制限時間4分)

1月1日～1月10日にかけての、日付ごとのネットワーク図を見て、以下の設問に教えてください。

- (1) 1月4日から1月8日までで、最も多くリンクが追加されたノード(被リンク数が最も増えたノード)を見つけてください。但し、直接リンクのみカウントして下さい。
- (2) (1)でカウントした被リンク数を教えてください。

図 31 ネットワークの成長過程を捉える課題の例

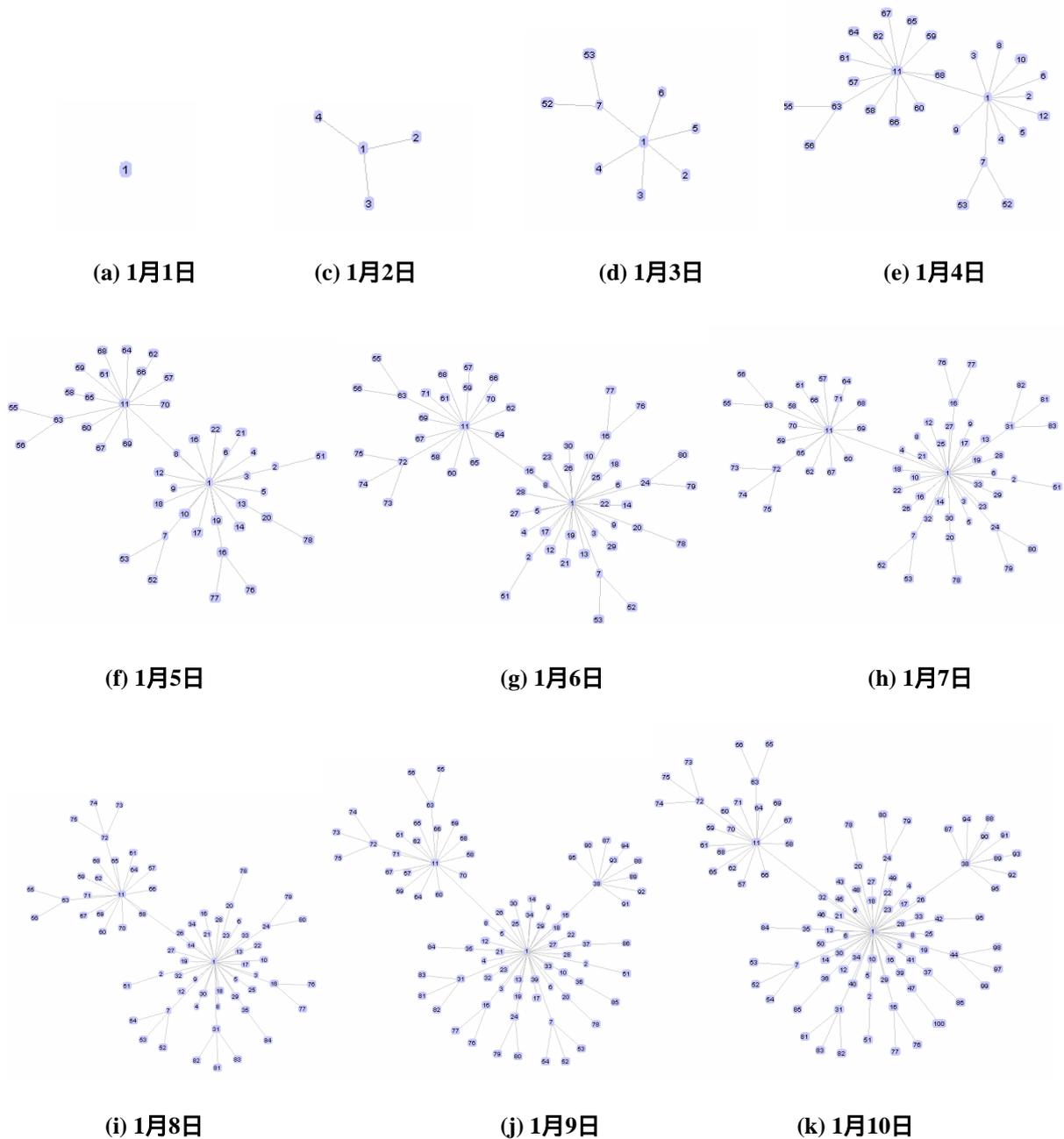


図 32 被験者グループ1 に対して提示したネットワーク図の例

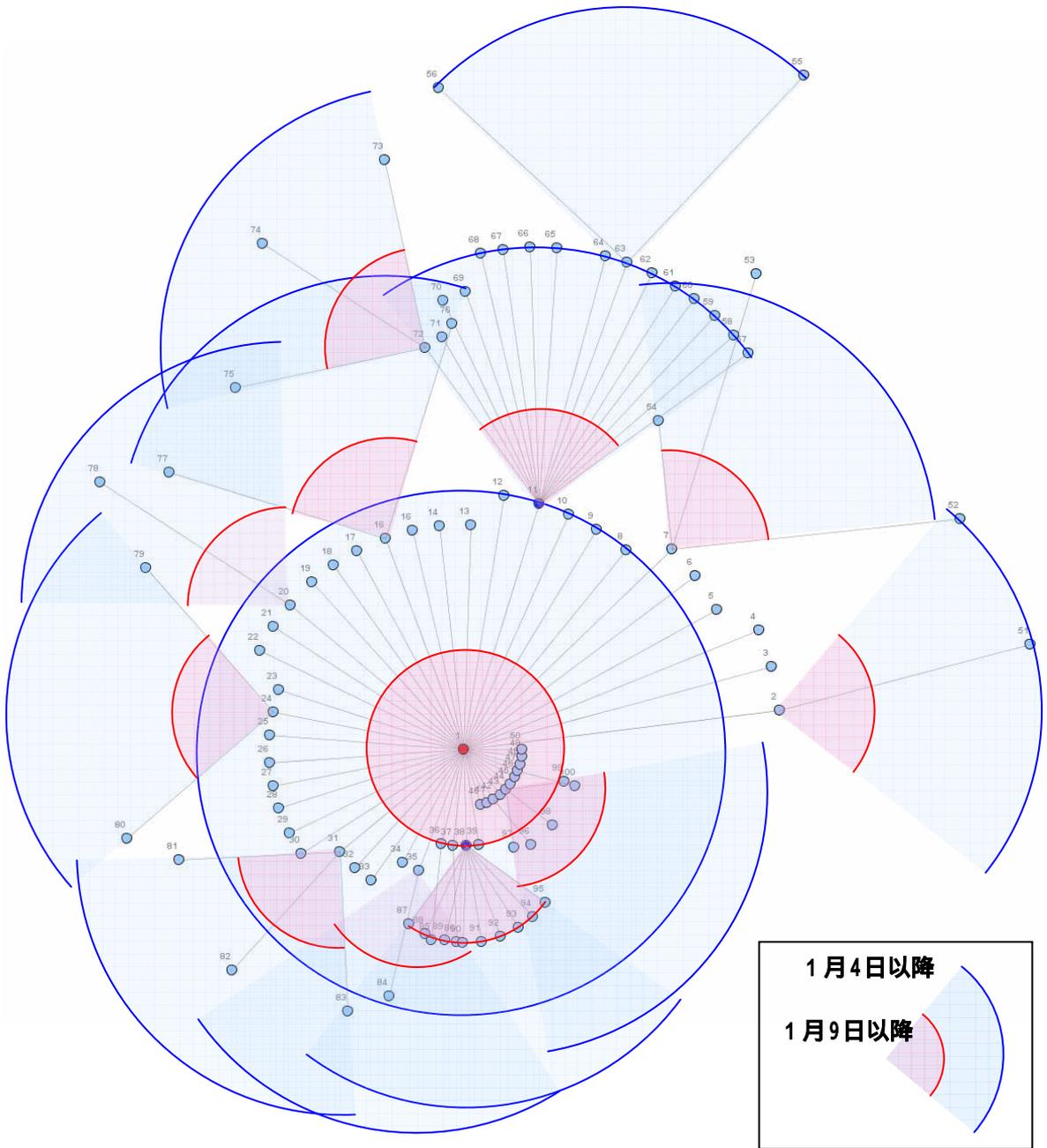


図 33 被験者グループ 3 に対して提示したネットワーク図の例

## 課題の条件設定

各課題で利用したデータや制限時間などの条件設定を表 4 にまとめた。

表 4 ネットワークの差分を捉える課題の条件設定

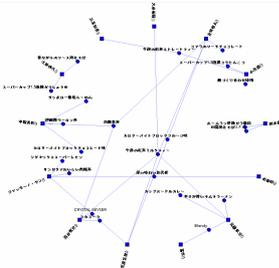
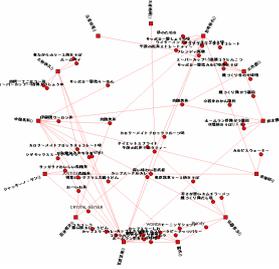
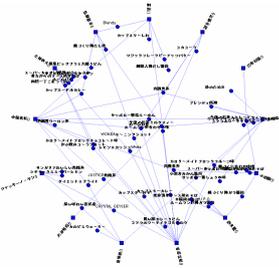
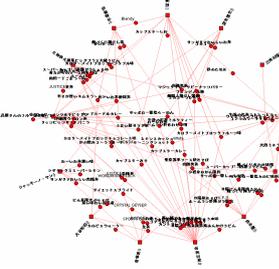
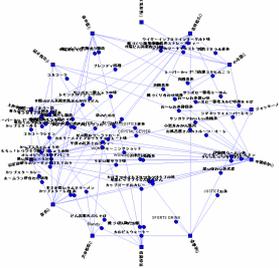
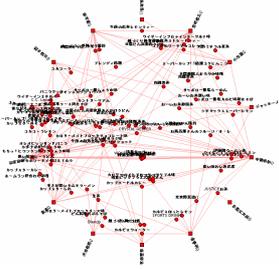
規模 課題目標	小規模	中規模	大規模
ジオメトリ変化の発見 (上位3つ)	<p>【課題番号】 A-1(1) 【制限時間】 4分 【利用データ】 Before Graph: 2006年6月7日までの購買関係の2部グラフ (ノード数:35,エッジ数:33)</p>  <p>After Graph: 2006年6月15日までの購買関係の2部グラフ (ノード数:62,エッジ数:79)</p>  <p>【レイアウト】 アンカーノード属性:購入者 フリーノード属性:商品</p>	<p>【課題番号】 A-2(1) 【制限時間】 4分 【利用データ】 Before Graph: 2006年6月15日までの購買関係の2部グラフ (ノード数:62,エッジ数:79)</p>  <p>After Graph: 2006年6月23日までの購買関係の2部グラフ (ノード数:86,エッジ数:134)</p>  <p>【レイアウト】 アンカーノード属性:購入者 フリーノード属性:商品</p>	<p>【課題番号】 A-3(1) 【制限時間】 4分 【利用データ】 Before Graph: 2006年6月23日までの購買関係の2部グラフ (ノード数:86,エッジ数:134)</p>  <p>After Graph: 2006年7月1日までの購買関係の2部グラフ (ノード数:101,エッジ数:178)</p>  <p>【レイアウト】 アンカーノード属性:購入者 フリーノード属性:商品</p>
	トポロジ変化の発見 (5つ)	<p>【課題番号】 A-1(2) 【制限時間】 4分 【利用データ】 A-1(1)と同様 【レイアウト】 A-1(1)と同様</p>	<p>【課題番号】 A-2(2) 【制限時間】 4分 【利用データ】 A-2(1)と同様 【レイアウト】 A-2(1)と同様</p>

表 5 ネットワークの成長過程を捉える課題の条件設定

規模 課題目標	短期間 (2日間のネットワーク図を比較)	長期間 (5日間のネットワーク図を比較)
トポロジ変化の発見	<p>【課題番号】 B-1(1),(2)</p> <p>【制限時間】 2分</p> <p>【利用データ】 仮想的に作成した10日間(1月1日～10日)の木構造のグラフ (ノード数:1～100,エッジ数:0～94)</p> <p>【レイアウト】 Graph View によるスプリングレイアウトとRipple Treeによる波紋表現</p>	<p>【課題番号】 B-2(1),(2)</p> <p>【制限時間】 2分</p> <p>【利用データ】 課題B-1(1),(2)と同様</p> <p>【レイアウト】 課題B-1(1),(2)と同様</p>

### 8.2.3 採点方法

ネットワークの差分を捉える課題(課題 A)のジオメトリ変化に関する設問の採点方法について述べる。まず, Merged Graph のレイアウトが収束した状態で, Before Graph と After Graph の対応するノード間の移動量(移動ベクトルの長さ)を算出する。そして, 移動量の高い順に点数を 10 点, 9 点, 8 点とつけてゆく。なお, 移動量が同じノードが合った場合には, 同じ点数をつける。被験者が回答したノードに対応する点数を合計した値がその課題の成績となる。上位 3 つを答えるので, 27 点(=10+9+8)満点となる。一方, トポロジ変化に関する設問の採点方法は, 回答したノードが 1 つ正解ごとに, 1 点を与える。計 5 つ答えるので, 5 点満点となる。

ネットワークの成長過程を捉える課題(課題 B)のトポロジ変化に関する設問の採点方法は, 正解か不正解の二つである。設問(1)では, トポロジ変化が最も多いノードを答える問題であるが, 被験者が理由をもって正解したことを裏付けるために, 設問(2)では具体的にトポロジ変化の量(追加リンク数)も回答してもらい, 正解か不正解か採点する。

## 8.3 実験結果

課題 A に対する成績を，被験者グループごとに平均点数を計算し，その結果をグラフで示す．課題 B の成績は，被験者一人一人の正誤を表にまとめた．

### 8.3.1 ネットワークの差分を捉える課題における実験結果

ネットワークの差分を捉える課題（課題 A）のジオメトリ変化に関する設問について，被験者グループごとの平均得点を図 34 に示した．横軸に課題の種類すなわち，ネットワークのデータ規模をとり，縦軸に平均得点をとった．

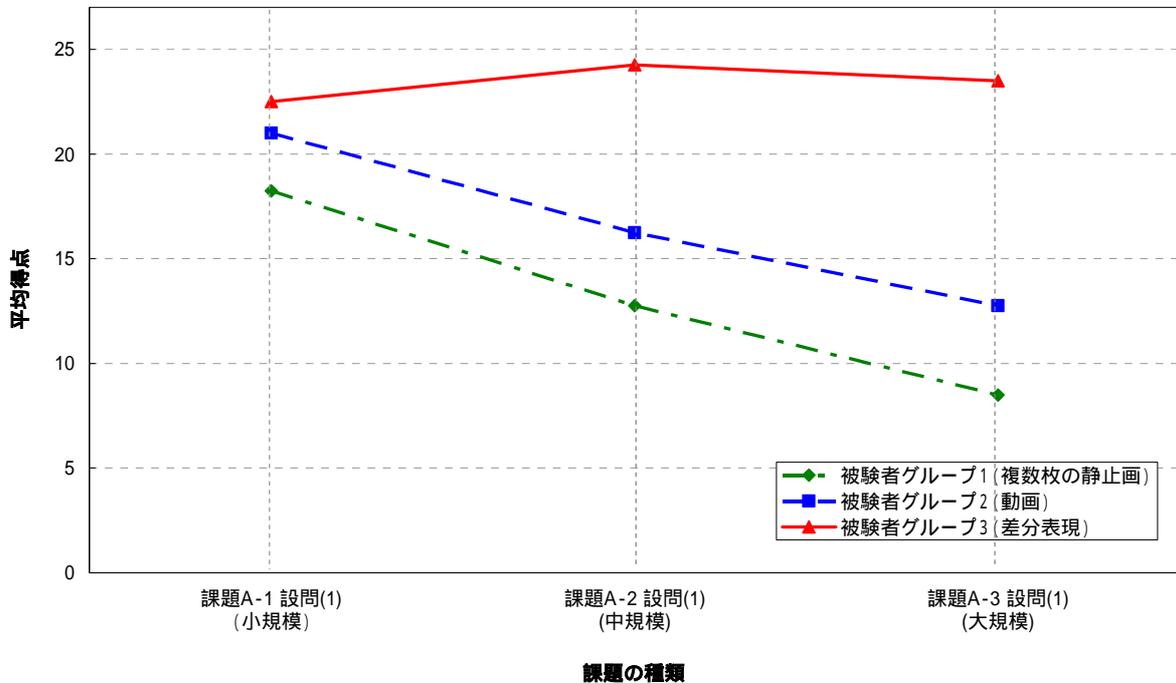


図 34 ネットワークの差分を捉える課題におけるジオメトリ変化の設問の平均得点

一方，トポロジ変化に関する設問について，被験者グループごとの平均得点を図 35 に示した．横軸に課題の種類すなわち，ネットワークのデータ規模をとり，縦軸に平均得点をとった．

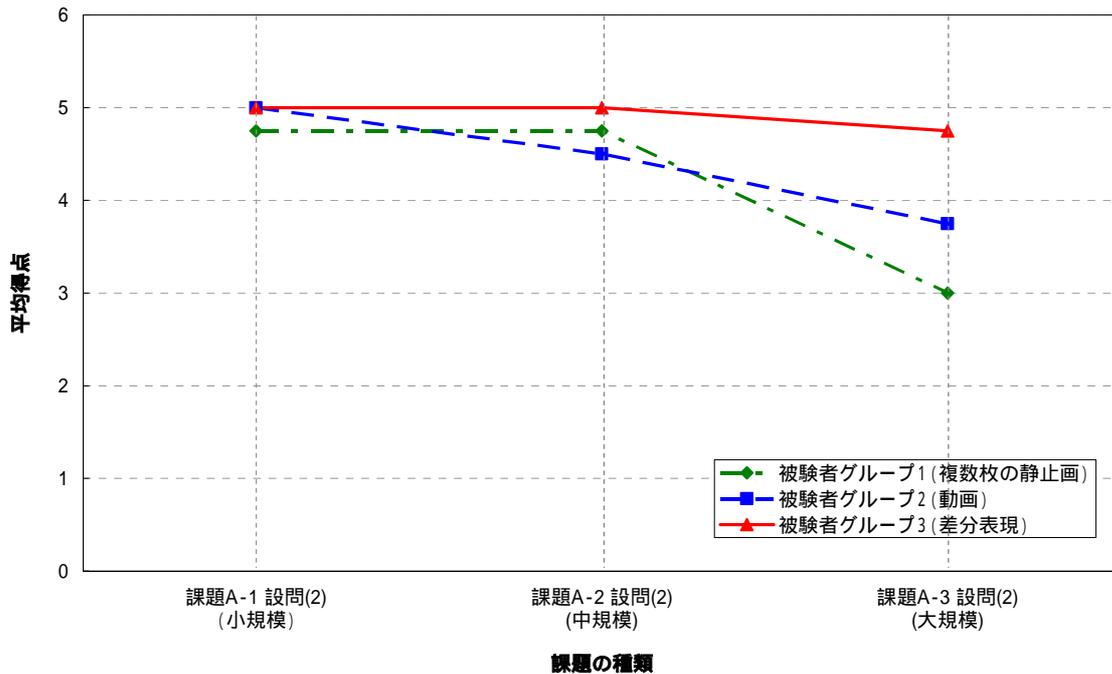


図 35 ネットワークの差分を捉える課題におけるトポロジ変化の設問の平均得点

### 8.3.2 ネットワークの成長過程を捉える課題における実験結果

ネットワークの成長過程を捉える課題（課題 B）のトポロジ変化に関する設問について、被験者ごとの正誤表を表 6 に示した。なお、正解は「○」で示し、不正解は「×」で示した。

表 6 トポロジ変化に関する設問の正誤

被験者	課題の種類	課題B-1（短期間）		課題B-2（長期間）	
		設問(1)	設問(2)	設問(1)	設問(2)
被験者グループ1 (複数枚の静止画)	被験者A		×		×
	被験者B		×		
	被験者C		×		×
	被験者D		×		×
被験者グループ2 (動画)	被験者E	×	×		×
	被験者F		×		×
	被験者G	×	×		
	被験者H		×		×
被験者グループ3 (波紋表現)	被験者I				×
	被験者J				
	被験者K				×
	被験者L		×		×

## 8.4 考察

### 8.4.1 差分表現の有効性

図 34, 図 35 より, ネットワークの差分を捉える課題において, 差分表現は, 従来表現で提示した被験者グループ 1 およびグループ 2 より, ほぼすべての設問において成績が高いことが読み取れる. この特徴は, ジオメトリ変化とトポロジ変化の両方に共通して見られることから, 仮説 1 の「差分表現は, 複数枚の静止画と動画に比べて, トポロジ変化とジオメトリ変化を分かりやすく表現できる」ことが実証された.

さらに, ネットワークの規模が大きくなると, 従来表現で提示した被験者グループ 1 およびグループ 2 では, 成績が下がる傾向が読み取れる. これは, 比較するネットワーク間でノードが増えると, 必然的に観察者の比較作業に要する時間が増え, 記憶や視点移動といった認知的負荷が増大するためであると考えられる. 差分表現は, 単一像に, 二つのネットワーク図をすでにマージした状態で提示することができるため, データ量が増えても成績は高い水準を保ったままである. 特に, ジオメトリ変化を捉える場合に, その成績の違いが顕著に現れていることから, 差分表現は, 大規模なネットワークのジオメトリ変化の表現に, 特に有用であると言える. 従って, 仮説 2 の「可視化する動的ネットワークの規模が大きくなるほど, 仮説 1 の特徴が顕著に現れる」ことが実証された.

### 8.4.2 波紋表現の有効性

表 6 より, 比較するネットワーク期間が短い条件下で, ネットワークの成長過程を捉える課題において, 波紋表現は従来表現より高い正答率が得られた. 特に, 設問(1)と(2)の両方が正解だった場合が, 従来表現では正答率が 0 だったのに対し, 波紋表現では, 4 人中 3 人が正解している(表 6 の囲み線を参照). これは, 波紋表現で提示された場合, 「どのノードが最もリンクを獲得したか」というトポロジ変化を, 被験者は具体的な根拠(カウントしたリンク数)をもって判断できていると考えられる. したがって, 仮説 3 の「波紋表現は, 複数枚の静止画と動画に比べて, トポロジ変化を分かりやすく表現できる」ことが実証された.

一方, 比較するネットワーク期間が長くなると, どの表現手法も正答率は横ばいであった. しかし, 波紋表現における被験者の回答を分析すると, 波紋表現の見方を間違え, リンク数のカウントを誤っていることがわかった. これは, 図 36 に示したように 2 種類のミスがあり, 被験者グループ 3 で不正解だった 3 人のうち, 2 人がこの間違いをしていた. もし, このミスが無ければ, ネットワーク期間が長くなったとしても, 正答率の高い水準を保っていたと考えられる. 他の被験者グループでは, 回答にばらつきが見られた. すなわち, カウントすべきノードが見えていた被験者グループ 3 に対して, 従来表現の被験者グループではカウントすべきノードが見えていない場合が多い. この考察から, 仮説 4 の「波紋表現が, 可視化する動的ネットワークの成長過程が長くなるほど, 仮説 3 の特徴が顕著に現れる」が実証できた可能性がある.

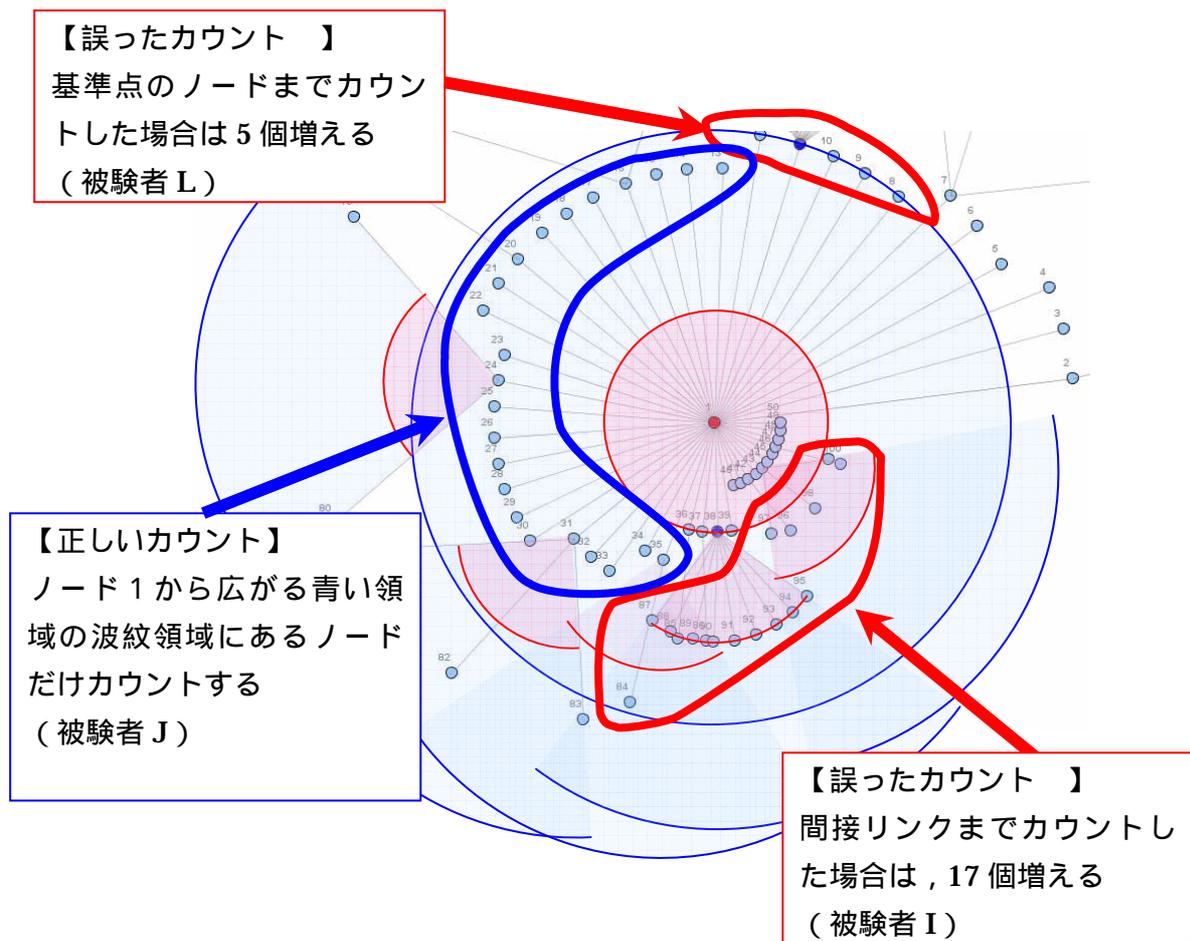


図 36 波紋表現における被リンク数のカウントミスの例と正しいカウントの仕方

## 第9章 議論

### 9.1 単一性と時間一覽性の重要性

動的ネットワークの差分を捉える際に、ネットワークの規模が大きくなるほど、従来表現ではその変化を捉えることが難しくなることが、評価実験にて確認された。このことは、複数枚の静止画による提示手法が、単一性を有していないことが影響していると言える。一方で、動画による提示手法は、単一性を有しているが、Before Graph と After Graph の画面切替えにより、残像を意識して発見を行なうといった内観を評価実験後に得た。これは、動画による提示手法が、時間一覽性を有していないことで、意識的に二つの状態のネットワークをマージする作業を行なう必要性があり、データ量が増えるに従って認知的負荷が増大し、差分の認識が難しくなる傾向があると言える。同様に、ネットワークの成長過程を捉える際に、比較する期間が長くなるほど、従来表現では認知的負荷が増大し、成長過程の認識が難しくなる傾向があると言える。

Eades らによれば、このような動的ネットワークの変化を認識する際には、観察者がネットワークを把握した結果形成されるメンタルマップを保持した表現手法が、観察者にとって分かりやすい表現とされる[34]。すなわち、時間一覽性と単一性を満たす表現は、こうしたメンタルマップをそのまま、図に写像していると考えられる。このようなことから、時間一覽性と単一性は、動的ネットワークの変化の表現として重要な性質であると言える。

### 9.2 差分表現と波紋表現の連携による適用事例の将来性

本研究では、差分表現の適用例として、研究室内での商品の購買履歴データを例に、購入者の商品に対する趣向変化と商品の購買層の変化を可視化できることを示した。一方、波紋表現を用いて、Weblog 記事間のリンク関係を時系列で分析することで、話題の広がりやある Weblog 記事が注目されたタイミングを可視化できることを示した。これらの適用事例の共通点として、動的ネットワークの変化を可視化することで、そのネットワークの時間特性を視覚的に捉えることができることである。すなわち、ネットワーク変化の傾向を分析できる点が特徴である。

この特徴を活かし、例えばある店舗において、「店舗にある商品をどういった客層向けに宣伝したら効果が現れるか」マーケティングリサーチを行なう事例を想定する。従来は、POS といったシステムにより得られた購買履歴から、統計的手法により、どういった購買層にどんな商品が買われている傾向があるのか分析していた。しかし、統計的な分析手法では、分析する商品の品目が大量にある場合に、商品ひとつひとつに対して分析が行えない場合が

多い。差分表現を用いれば、商品をフリーノード、購入者の年齢層や性別といった属性をアンカーノードに設定すれば、商品ひとつひとつについて購買傾向を可視化することができる。

さらに、マーケティングを行なう商品について言及した Weblog 記事を抽出し、それら記事のリンク関係を波紋表現で可視化することで、こういったタイミングで話題となっているか分析ができる。そして、そのタイミングの前後で、その商品の購買傾向がどのくらい変化したのか差分表現で分析することで、「ある購買層に流行の兆しがある商品」を発見することが可能になると考えられる。こうした流行を素早く捉えるために、常にモニタリングして監視ができるような、差分表現や波紋表現などの動的ネットワークの変化に対応した可視化手法が必要不可欠である。

## 9.3 今後の課題

### 9.3.1 リアルタイム対応

RippleTree および DiffGraph は、描画データをシステムのローカルに保持している。このため、最新情報を定期的に取得する必要がある。このデータ取得部をサーバ側の機能として実装すれば、リアルタイムにネットワーク図を描画することができる。動的ネットワークは、常に変化しているので、実利用を考慮すると、こうしたリアルタイム対応は必須である。

また、波紋表現の角度の決め方は、データ取得した時点のリンク構造などをもとに計算を行なっている。しかし、実際には、未来のリンク構造は分からないので、ノード同士が重ならないような動的な角度の計算が必要となるといえる。また、差分表現においても、After Graph はデータ取得時から変化しないので、新たなノードが追加された時に、自動的に最新のグラフを反映させるといった機能が必要となるといえる。

### 9.3.2 適用限界の克服

差分表現は、トポロジ変化とジオメトリ変化を可視化する表現として考案した。しかし、ノードやエッジの削除といったトポロジ変化は、表現できない。また、波紋表現においても、ノードやエッジの削除といったトポロジ変化やジオメトリ変化が表現できないといった制約がある。こうした制約を克服できる表現の改善が必要である。

### 9.3.3 波紋表現の可読性向上

評価実験において、被験者が波紋表現の見方を間違えるケースが多く見られた。これは、木構造のサブツリーごとに波紋が再帰的に発生する描画スタイルのため、描画データに大量のサブツリーがあると、波紋が互いに重なり合ってしまう、可読性が低くなってしまいう問題がある。波紋自体を描画しない方法も考えられるが、時間軸の補助線的な役割を果たしていた波紋が無いと、正確な時間を把握することが難しい問題がある。したがって、波紋表現の描画スタイルに改善を加える必要がある。

## 第10章 結論

動的ネットワークの変化を表現するために成長過程と差分を可視化する描画手法を開発し、その有効性の評価を行なった。まず、成長過程の表現手法として、「波紋表現」を開発した。これは、時間とともにネットワークが成長してゆく過程を、エッジの長さに時間を対応付けて描画する可視化手法である。また、差分の表現手法として、「差分表現」を開発した。これは、時間的に異なる二つのネットワーク図を重ねて提示し、ノードの追加といったトポロジ変化やジオメトリ変化を移動ベクトルで表現する可視化手法である。

評価実験より、差分表現および波紋表現は、従来表現と比べてより分かりやすく動的ネットワークの差分と成長過程を捉えることができることが示された。特に、差分表現は、対象とするネットワークの規模が大きくなった場合でも、差分を分かりやすく提示できることがわかった。

波紋表現と差分表現により、動的ネットワークの変化そのものを見る者に分かりやすく提示でき、今まで難しかった、1枚のネットワーク図によるネットワーク構造の時系列分析が可能となった。その適用例として、Weblogのリンク関係の波紋表現と購買履歴の差分表現を行なった。

# 謝辞

本研究の機会を与えて頂きました筑波大学システム情報工学研究科田中二郎教授には、終始懇切なご指導とご助言を頂きました。さらに、各種研究設備のご支援や研究発表の機会を与えて下さったことで、博士前期課程の2年間を有意義に過ごすことができました。ここに深く感謝致します。

筑波大学システム情報工学研究科三末和男助教授には研究方法の初歩から、研究の内容、展開、論文の執筆に至るまで丁寧にご指導いただきました。心から感謝申し上げます。

さらに、筑波大学システム情報工学研究科高橋伸講師、志築文太郎講師には、研究内容に留まらず進捗等についてもご指導頂きました。心から感謝致します。

筑波大学システム情報工学研究科インタラクティブプログラミング研究室のメンバーの方々にも、研究活動や私生活の両方にわたって大変お世話になりました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。特に、評価実験に協力していただいた、岩村憲一君、大谷裕昭君、酒井慎司君、鈴木優君、中園長新君、土持幸久君、軽部孝典君、徐世旺君、宮崎裕久君、佐藤俊輔君、長尾聡君、成川新吾君には、貴重な時間を割いていただき心から感謝いたします。また、実験データの処理に協力していただいた佐藤修治君には、大変な作業を快く受けていただき心から感謝いたします。そして、非常に良い雰囲気の中 NAIS チームのメンバーとともに研究室で過ごせたことをここに感謝致します。

なによりも、家族の暖かい励ましの言葉や、資金面や精神的な支えなくしては、このような実りある大学院での研究生生活を送ることが出来ませんでした。心から感謝します。

最後に、ここには書ききれなかった方々を含め、学生生活の中でお世話になったすべての方々に心より感謝いたします。本当に有難うございました。

## 参考文献

- [1] B. H. McCormick, T. A. DeFanti, M. D. Brown, "Visualization in scientific computing," *ACM Computer Graphics*, Vol. 21, No. 6, 1987.
- [2] Stuart K. Card, Jock D. MacKinlay, Ben Shneiderman, "Readings in Information Visualization: Using Vision to Think," Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies, San Francisco, Calif., Morgan Kaufmann Publishers, 1999.
- [3] 出原栄一, 吉田武夫, 渥美浩章, "図の体系 図的思考とその表現," 日科技連, 1986 .
- [4] 杉山公造, "グラフ自動描画法とその応用," 計測自動制御学会学術図書, コロナ社, 1993.
- [5] A. L. Barabasi, R. Albert, "Emergence Scaling in Random Networks," *Science*, Vol. 286, pp. 509–512, 1999.
- [6] A. L. Barabasi, "LINKED: The New Science of Networks," Perseus Book Group, Perseus Book Group, 2002.
- [7] ダンカン・ワッツ著, 辻竜平, 友和政樹訳, "スモールワールド・ネットワーク 世界を知るための新科学的思考法," 阪急コミュニケーションズ, 2004.
- [8] 豊田正史, "インタラクティブな動的グラフィレイアウト手法を用いたウェブグラフ発展過程の可視化," 第 14 回 インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2004), pp.143-144 , 2006.
- [9] 鈴木 祐太, 古川園 智樹, 青山 希, 井庭 崇, "動的ネットワークの可視化ツールの構築," 情報処理学会 ネットワーク生態学シンポジウム, 2006.
- [10] James Moody, Daniel McFarland, and Skye Bender-deMoll, "Dynamic Network Visualization," in *American Journal of Sociology*, vol. 110, pp.1206-1241, 2005.
- [11] C. Erten, S. G. Kobourov, V. Le, A. Navabi, "Simultaneous Graph Drawing: Layout Algorithms and Visualization Schemes," in *Proceedings Graph Drawing*, pp. 437-449, 2004.

- [12] N. Nakazono, K. Misue, J. Tanaka, "NeL2: Network Drawing Tool for Handling Layered Structured Network Diagram," in *Proceedings of Asia Pacific Symposium on Information Visualization 2006 (APVIS2006)*, pp.109-115, 2006.
- [13] 豊田正史, 喜連川優, "WebRelievo: ウェブにおけるリンク構造の発展過程解析システム," 第 12 回 インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2004), pp.89-94, 2004.
- [14] Lamping J., Rao R., "The Hyperbolic Browser: A Focus+context Technique for Visualizing Large Hierarchies," in *Journal of Visual Languages and Computing*, 7, 1, pp.125-132, 1993.
- [15] Johnson B., Shneiderman B., "Tree-Maps: A Space Filling Approach to the Visualization of Hierarchical Information Space," In *Proceedings of the IEEE Visualization '91*, pp.275-282, 1991.
- [16] 山口裕美, 伊藤貴之, 梶永泰正, 池端裕子, "階層型データ視覚化手法「データ宝石箱」とウェブサイトの視覚化," 画像電子学会論文誌 VisualComputing 特集号, Vol. 32, No. 4, pp. 407-417, 2003.
- [17] J. Rekimoto, "The Information Cube: Using Transparency in 3D Information Visualization," Third Annual Workshop on Information Technologies & Systems, pp.125-132, 1993.
- [18] Ka-Ping Yee, Danyel Fisher, Rachna Dhamija, Marti Hearst, "Animated Exploration of Dynamic Graphs with Radial Layout," In *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization 2001 (INFOVIS'01)*, p.43, 2001.
- [19] John V. C., Joseph A. K., "Interactive Visualization of Serial Periodic Data," In *Proceedings of Symposium on User Interface Software and Technology 1998 (UIST'98)*, pp.29-38, 1998.
- [20] 野田尚志, 上窪真一, 旭敏之, "時空間の視覚化手法 - 年輪メタファを組み込んだ時空間ブラウジングコンテンツ - ," インタラクシオン 1998 論文集, pp.135-136, 1998.
- [21] Kazuo Misue, "Drawing Bipartite Graphs as Anchored Maps," In *Proceedings of Asia-Pacific Symposium on Information Visualization (APVIS2006)*, pp. 169-177, 2006.

- [22] 奥村 学, 南野 朋之, 藤木稔明, 鈴木泰裕, “日本語 blog ページの自動収集と監視に基づくテキストマイニング,” FIT2004 7K-6, 2004.
- [23] R. Kumar, J. Novak, P. Raghavan, A. Tomkins, “On the bursty evolution of Blogspace,” In *Proceedings of the twelfth international conference on World Wide Web (WWW2003)*, pp.568-576, 2003.
- [24] 谷口智哉, 松尾豊, 石塚満, “Blog コミュニティの抽出と分析,” 第 6 回人工知能学会セマンティック Web とオントロジー研究会, 2004.
- [25] 石田和成, “潜在的 Weblog コミュニティ抽出のための二部グラフ分割アルゴリズム,” 人工知能学会 SIG-SWO-A404-01, 2004.
- [26] 中島伸介, 舘村純一, 日野洋一郎, 原良憲, 田中克己, “リンク構造の時間特性に着目した Weblog 解析に基づくコンテンツの信頼性評価の検討,” 日本データベース学会 Letters, Vol.3, No.1, pp.109-112, 2004.
- [27] Daisuke Ikeda, Toshiaki Fujiki, Manabu Okumura, "Automatically Linking News articles to Blog entries," AAAI Spring Symposium Series Computational Approaches to Analyzing Weblogs, 2006.
- [28] Belle L. Tseng, Junichi Tatemura, and Yi Wu, “Tomographic Clustering To Visualize Blog Communities as Mountain Views,” WWW2005 Workshop on the Weblogging Ecosystem, 2005.
- [29] 是津耕司, 日野洋一郎, 中島伸介, 門林理恵子, 呉受妍, 林正樹, 田中克己, “Weblog 情報を融合したコンテンツ・ブラウジング,” 人工知能学会 第 6 回セマンティックウェブとオントロジー研究会, SIG-SWO-A401-04, 2004 年.
- [30] 内田誠, 柴田尚樹, “ブログ記事ネットワークからの emerging topic の抽出と可視化,” 第 20 回人工知能学会全国大会論文集, 2006.
- [31] 三末 和男, 杉山 公造, 図的思考支援を目的とした図の多視点遠近画法について, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 8, pp. 997-1005, 1991.
- [32] 畑村洋太郎, “失敗学のすすめ,” 講談社, 2002 .
- [33] Peter Eades, “A Heuristic for Graph Drawing,” *Congressus Numerantium*, 42, pp.149-160, 1984.

[34] Peter Eades, Wei Lai, Kazuo Misue, Kozo Sugiyama, "Preserving the Mental Map of a Diagram," In *Proceedings of COMPUGRAPHICS '91*, pp. 34-43, 1991.

## 脚注

- 
- <sup>1</sup> <http://ja.wikipedia.org/>
  - <sup>2</sup> <http://shuncolle.nifty.com/>  
<http://kizasi.jp/>
  - <sup>3</sup> <http://blogwatcher.pi.titech.ac.jp/>  
<http://wadaino.jp/>  
<http://www.accelanavi.com/>  
<http://www.technorati.jp/>  
<http://www.1osi.com/>  
<http://blogsearch.jpn.org/>
  - <sup>4</sup> <http://informa.sourceforge.net/>
  - <sup>5</sup> <http://gensen.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/termmi.html>
  - <sup>6</sup> <http://graphml.graphdrawing.org/>
  - <sup>7</sup> <http://japan.cnet.com/rss/index.rdf>
  - <sup>8</sup> <http://blog.livedoor.jp/staff/archives/50302411.html>
  - <sup>9</sup> <http://prefuse.sourceforge.net/>