

# Gomory-Hu 木に基づくコミュニティ セントロイドへのノード集約による ネットワーク縮約手法の構築

成岡 亮佑<sup>1</sup>・杉浦 聡志<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: [naruryoyahoo@eis.hokudai.ac.jp](mailto:naruryoyahoo@eis.hokudai.ac.jp)

<sup>2</sup>正会員 北海道大学准教授 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: [sugiura@eng.hokudai.ac.jp](mailto:sugiura@eng.hokudai.ac.jp)

近年計算機の性能向上と観測技術を背景に道路ネットワーク分析に利用可能なデータは精緻化、詳細化が進められてきた。我が国では道路ネットワークデータも解像度の高いデータが提供されており、分析のための計算コストが課題となる。本研究では、大規模ネットワークに対して極めて簡素な方法でネットワーク縮約が可能となる手法の構築を目指す。具体的には、ネットワークを複数のコミュニティに分割し、各コミュニティ内に一つ存在する需要の発生集中の代表点として設定されるセントロイドのようなコミュニティの核となるノードの存在を仮定し、コミュニティ内のノードを集約させることでネットワーク全体の縮約を目指す。コミュニティの特定には Gomory-Hu 木を用いる。提案手法を北海道の道路ネットワークへ適用し、その挙動を確認する。

**Key Words:** コミュニティ検出, ネットワーク縮約, 最小カット, Gomory-Hu 木

## 1. はじめに

近年計算機の性能向上と観測技術を背景に道路ネットワーク分析に利用可能なデータは精緻化、詳細化が進められてきた。我が国では道路ネットワークデータも極めて解像度の高いデータが提供されており、これらを利用したネットワーク分析が可能となっている。しかしながら、街路も含むような都市圏の道路ネットワークは非常に大規模となり、分析のための計算コストが課題となる。交通量配分や交通シミュレーションなどの大量の計算を伴うような分析において、ノード数が膨大であれば多大な計算コストがかかり大規模ネットワークでの分析が事実上不可能となっているケースもある。一方で、交通量配分等で利用される OD 交通量はゾーンレベルで調査された結果を利用することから、これを利用した分析において、極端に子細なリンクへのフローは結果の解釈が困難となることも生じる。これらの例のように、大規模ネットワークを対象とした分析において、複雑なネットワーク構造を有することは各種分析の重大な障壁となる。

大規模ネットワークを対象とした分析のため、ネットワークをいくつかの有意なクラスター、すなわちコミュ

ニティを検出するための方法論が提案されている。実測された交通観測データを用いてコミュニティ検出した例として、*Macroscopic Fundamental diagram* の分析のために均質な交通状態をもつ空間を抽出することを目的に交通密度をノードの属性とした分割手法が挙げられる<sup>1)2)3)</sup>。これは、*Normalized Cut Algorithm* と呼ばれる手法を用いている<sup>4)</sup>。また、同様の目的で *Modularity* を指標として、この値が最大となるコミュニティ分割手法(*Louvain* 法)も提案されている<sup>5)6)7)</sup>。一方で道路のトポロジーにのみ依存した方法として、リンクの交通容量に基づいて *Spectral partitioning* と呼ばれる手法でネットワークを2つに分割する方法が提供されている<sup>8)</sup>。また、同じくリンクの交通容量に基づいた方法として杉浦・三輪<sup>9)</sup>がある。彼らは Gomory-Hu 木<sup>10)</sup> (以下, GH 木という) と呼ばれるグラフのカット構造を示す概念を用いた簡素なコミュニティ検出法を提供している。

また、ネットワーク構造の簡略化には様々な方法論が蓄積されている。たとえば Heam<sup>11)</sup>は大規模ネットワークから主要道路のみを抽出しその他の道路を省略することでネットワーク構造を簡略化する方法論が挙げられる。しかしながら、このような大規模に省略したネットワー

クでは、もとのネットワークのもつ情報が失われ、分析で得られる出力が乖離する可能性がある。これらの影響を踏まえたものとして、Wright et al.<sup>12)</sup> や Boyles<sup>13)</sup> は主要道路以外の道路を適当に分割し、分割されたリンク集合をさらに抽象化されたリンク集合、すなわちサブネットワークで置き換える方法がある。これらのような既存のネットワーク縮約手法では、ネットワーク簡略化処理の複雑さに関する課題がある。サブネットワークを対象とした簡略化では、リンクの接続構造に基づいて複数の処理方法が存在し、サブネットワークが複雑になるほど定義しなければならない処理のパターンが増えこれは非常に複雑な操作となる。

本研究では、大規模なネットワークに対してコミュニティの特定およびコミュニティ分割を行い、需要の発生集中の代表点として設定されるセントロイドのようなコミュニティの核となるノード（以下セントロイドと呼ぶ）へ同一コミュニティに属するノードを集約することで、ネットワーク縮約を行う手法を提案する。コミュニティの特定には、杉浦・三輪<sup>9)</sup> の GH 木を利用したコミュニティの検出法を用いる。これは交通量配分の分析結果を縮約前後で大きく変動させないために、リンクの交通容量に基づいたネットワークの縮約を行うためである。杉浦・三輪<sup>9)</sup> のコミュニティ分割の特徴として、簡便な方法でコミュニティ分割が可能となること。セントロイドの存在を前提とするため、交通量配分等ネットワーク上の分析への応用が容易であること。さらに、コミュニティ境界がセントロイド間の最小カットで与えられることが挙げられる。セントロイド間の境界が最小カットで与えられることで、境界内は境界上よりも容量が小さいカットが存在しないことが保証される。すなわち、セントロイド間で最も小さい合計容量のリンク集合が境界上に現れ、境界より内部の混雑状況がその境界上の混雑に依存するネットワーク構造を構築できる。そのようなネットワーク構造は、道路ネットワーク分析において有用な情報をもたらさう。例えば、ある任意のゾーンからあらゆる経路の利用を想定したときの最大可能輸送量は最小カットの特性により、コミュニティ境界によって規定される。また、コミュニティ境界よりセントロイドに近い範囲では境界よりも大きな容量をもつカットしか存在しないことが約束されるため、混雑状況把握のための境界としても有用となる。また、そのように検出されたコミュニティに対して、内部のノードをセントロイドに集約させることでネットワーク内のノード数を減らすことを可能としている。ノードをセントロイドに集約させる操作は簡便な方法で行うことができる。結果として生成される縮約されたネットワークにはセントロイドが存在し、交通量配分等の各種分析への応用を可能としている。提案した手法は北海道の幹線道路ネットワークへ適用

表-1 本稿で用いる記号の定義

$V$	ネットワーク中のノード集合、その成分は $n \in V$ で示す
$A$	ネットワーク中のリンク集合
$C$	セントロイドの集合。 $C \subset V$ である
$G(V, A)$	ノード集合 $V$ 、リンク集合 $A$ で構成される無向グラフで記述されたネットワーク
$a$	ネットワーク中のリンク ( $a \in A$ )。ただし、特に端点ノードを記述するときには、 $a = \{u, v\}$ とする
$S$	ネットワーク中のノードの部分集合 ( $S \subseteq V$ )。
$\lambda$	最大流問題の解
$U$	ネットワーク中のノードの部分集合 ( $U \subseteq V$ )
$y$	最大流問題のデザイン変数
$s$	起点を表現するノード ( $s \in V$ )
$t$	終点を表現するノード ( $t \in V$ )
$out(n)$	ノード $n$ から流出するリンク集合
$in(n)$	ノード $n$ に流入するノード集合
$\mathbf{X}^{(n)}$	繰り返し $n$ におけるハイパーノードの集合
$X_i$	木上のハイパーノード ( $X_i \in \mathbf{X}^{(n)}$ )
$\mathbf{E}^{(n)}$	繰り返し $n$ における仮想リンクの集合
$e_{ij}$	ハイパーノード $X_i$ と $X_j$ を接続する仮想リンク ( $e_{ij} \in \mathbf{E}^{(n)}$ )
$\pi_{e_{ij}}$	仮想リンク $e_{ij}$ の重み
$T_n(\mathbf{X}^{(n)}, \mathbf{E}^{(n)})$	GH 木の構成手順繰り返し $n$ におけるハイパーノード集合 $\mathbf{X}^{(n)}$ と仮想リンク集合 $\mathbf{E}^{(n)}$ で構成される木
$p$	コミュニティを示すインデックス
$\mathbf{P}$	ネットワーク内のコミュニティ集合 ( $p \in \mathbf{P}$ )
$n(p)$	コミュニティ $p$ 内に含まれるノード集合
$\hat{n}(p)$	コミュニティ $p$ の境界をまたぐリンク端点のうち、コミュニティ $p$ 内に含まれるノードの集合。 $\hat{n}(p) \subset n(p)$ である
$\mathbf{E}(p)$	完全グラフに含まれるリンク集合
$\mathbf{a}$	最小カットに含まれるリンク集合
$\mathbf{W}$	OD ペアの集合 ( $(s, t) \in \mathbf{W}$ )

し、その挙動を確認する。

## 2. GH 木によるコミュニティ分割

本稿で用いる記号の定義を表-1 に示す. 杉浦・三輪<sup>9)</sup>による Gomory-Hu 木によるコミュニティ検出法について概説する.

(1) Gomory-Hu 木

GH 木は, 無向グラフで記述されたネットワーク中の全てのノードペア間の最小カットを全域木上に表現したものである. なお, 全域木とは, ネットワーク中の全てのノードを開路が含まれないように接続したグラフである. 以下, GH 木の定義である.

定義 : Gomory-Hu 木

無向グラフ  $G(V, A)$  の Gomory-Hu 木  $T(V, E)$  は以下の特徴を満たす重みつき無向全域木である.

1. ノードペア  $(s, t)$  間の最小カットの解は,  $T(V, E)$  内の  $s$  と  $t$  を接続するただ一つの経路中に存在するリンクの重みの最小値として得られる. このリンクを  $e^*$  と呼ぶ. また,  $T(V, E)$  内の  $(s, t)$  間経路に最小の重みをもつリンクが複数存在する場合には, このいずれかを  $e^*$  とすることができる.
2. 任意のノードペア  $(s, t)$  について,  $T(V, E)$  から  $e^*$  を除去することによって生成される 2 つの分割は元のグラフ  $G(V, A)$  における最小  $(s, t)$  カットと一致する. なお,  $e^*$  の候補が複数ある場合, いずれの候補リンクにおいてもこの性質が成立する.

最小カットはよく知られるように最大流-最小カット定理に基づき, 最大流問題を求解することで求められる. 最大流問題は以下で定式化される.

$$\lambda = \max_{x,y} y \tag{1}$$

subject to:

$$\sum_{a \in \text{out}(s)} x_a - y = 0 \tag{2}$$

$$\sum_{a \in \text{in}(t)} x_a - y = 0 \tag{3}$$

$$\sum_{a \in \text{in}(n)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(n)} x_a = 0, \quad \forall n \in V - \{s, t\} \tag{4}$$

$$x_a \leq c_a, \quad \forall a \in A \tag{5}$$

$$x_a > 0, \quad \forall a \in A \tag{6}$$

$$y \geq 0$$

ネットワーク上の 2 点間の最小カットは愚直にはノードペアの数, すなわち  $N^2$  回の最大流問題の求解が必要となるが, Gomory and Hu<sup>10)</sup>によって, GH 木は以下に示

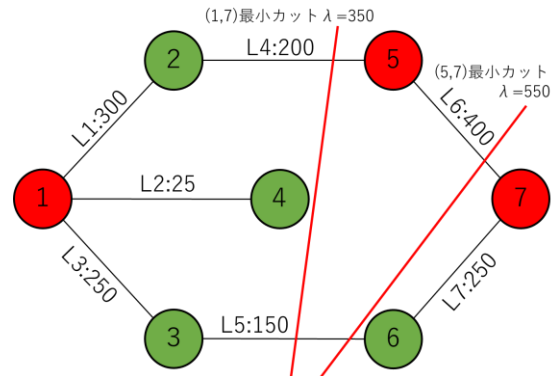


図-1 例題ネットワーク

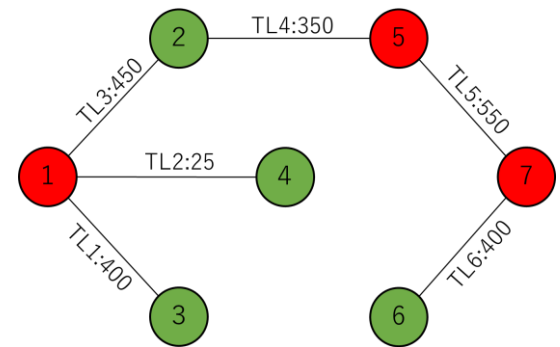


図-2 例題ネットワークに対する GH 木

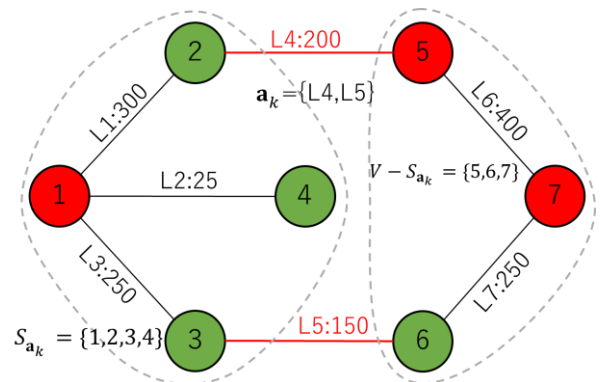


図-3 GH 木上に TL4 で表現される例題ネットワーク上の最小カットを構成するリンク

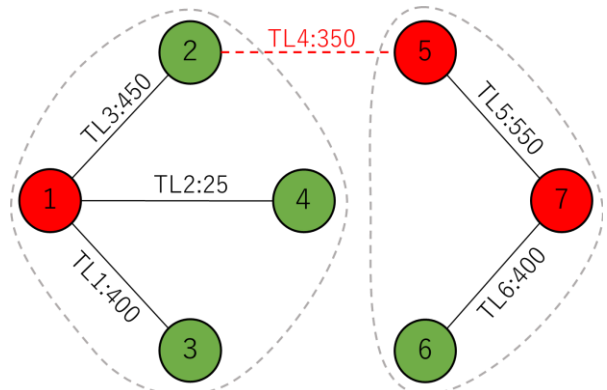


図-4 GH 木から TL4 を除いた時にできる二つのサブノードセット

す手順のとおり、 $N - 1$ 回の最大流問題の求解で構築できることが示されている。

1. 元のネットワーク $G(V, A)$ ，初期化されたイテレータ $n = 1$ ，ネットワーク中の全てのノードの集合 $V$ を含むハイパーグラフ $\mathbf{X}^{(1)}$ ，空の仮想リンクセット $\mathbf{E}^{(1)} = \emptyset$ ，無向グラフ $T_1(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{E}^{(1)})$ を入力として与える。
2.  $X_i \in \mathbf{X}^{(n)}$ であり，二つ以上のノードを含むハイパーグラフ $X_i$ を探し，それに含まれるノード2つを起終点 $(s, t)$ として選択する。
3. 起終点 $(s, t)$ に対して $G(V, A)$ 上で最大流問題を求解し，最小カットを構成するリンク集合 $\mathbf{a}^{(n)} \in A$ と最適解の値 $\lambda_{st}$ を得る。 $\lambda_{st}$ はリンク集合 $\mathbf{a}^{(n)}$ の容量の合計値と等しい。
4.  $G(V, A)$ から $\mathbf{a}^{(n)}$ を削除することで， $V$ を2つのサブノード集合 $S_{\mathbf{a}^{(n)}}$ と $V - S_{\mathbf{a}^{(n)}}$ に分割する。ハイパーグラフの集合 $\mathbf{X}^{(n)}$ に次のような条件をもつ2つのハイパーグラフ $X_p = X_i \cap S_{\mathbf{a}^{(n)}}$ と $X_q = X_i \cap (V - S_{\mathbf{a}^{(n)}})$ を加える。
5.  $X_i$ に接続する仮想リンク $e_{ki} \in \mathbf{E}^{(n)}$ を以下のように付け替える。
6. 
$$\left\{ \begin{array}{l} e_{ki} \rightarrow e_{kp} \quad \text{if } \forall k | X_k \subseteq S_{\mathbf{a}^{(n)}} \\ e_{ki} \rightarrow e_{kq} \quad \text{if } \forall k | X_k \subseteq (V - S_{\mathbf{a}^{(n)}}) \end{array} \right\}$$
7.  $\mathbf{X}^{(n)}$ から $X_i$ を削除し， $X_p$ と $X_q$ を $\lambda_{st}$ の重みをもつ $e_{pq}$ で接続し， $e_{pq}$ を $\mathbf{E}^{(n)}$ に加える。
8.  $T_n(\mathbf{X}^{(n)}, \mathbf{E}^{(n)})$ を更新し， $n = n + 1$ として次の繰返しに進む。
9. ステップ2から5を $n = N$ になるまで繰り返す

例として図-1に示すネットワークに対して生成されたGH木を図-2に示す。GH木の各リンクの重みは，その端点間の最大流問題の解の値となっている。例えば，ノード4と7の間にあるリンクは重みが550であるが，これはノード4とノード7を起終点とした元のネットワークにおける最大流問題の解と一致する。このときの最小カットは{L5, L6}であり，これらの容量の合計は550である。また，ノード1とノード7を起終点とした時の最大流問題の解は350であり，最小カットは{L4, L5}である。GH木上でのノード1，7間の経路は{TL3, TL4, TL5}を通過し，それぞれの重みは{450, 350, 550}である。したがって，定義の1つ目の特徴で示した $e^*$ はTL4で特定される。以上のことからGH木の定義で示した一つ目の特徴が実現していることを確認できる。図-3，図-4はGH木の定義で示した2つ目の特徴を示している。二つのサブノード集合 $S_{\mathbf{a}_k} = \{1, 2, 3, 4\}$ と $V - S_{\mathbf{a}_k} = \{5, 6, 7\}$ は図-3で示すように元のネットワークから $\mathbf{a}_k$ を削除したときに生成される。この二つのサブノード集合は図-4で示すGH木から $e^*$ を削除したときにできる二つのノード集合と一致

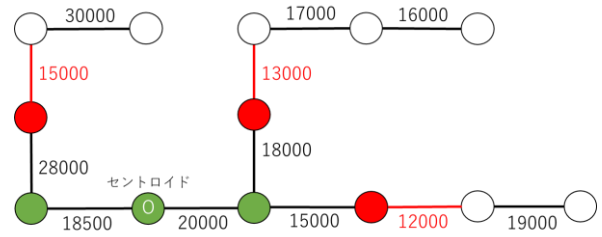


図-5 GH木に基づくコミュニティの探索イメージ

する。したがって，2つ目の定義も実現していることが確認できる。

## (2) Gomory-Hu 木によるコミュニティ検出手法

以下の二つの条件によりコミュニティ分割を行う。

- 分割されたノード集合には必ず1つのセントロイドが存在する。
- 分割されたノード集合とその外側のノードは，最小カットによって境界が与えられる。

対象となるセントロイドそれぞれについて，コミュニティの境界とすべき最小カットの位置を特定する。この操作はGH木の特性を利用することで非常に簡便な手順で実行できる。GH木は木であることから，任意のノードから他のノードへは必ず1つのみ経路が存在する。また，GH木の定義から，任意の2点間の最小カットはGH木上における2点間経路に存在するリンクの重みの最小値をとるリンクとして特定できる。これらの特性より，任意のセントロイドの境界は以下のように発見することができる。まず，対象とするセントロイド( $0 \in C$ としよう)を一つ選ぶ。このセントロイドからすべての他のセントロイド( $\forall d \in C | d \neq 0$ )への経路を探索し，最小の重みをもつリンク $e^* = \{e_1^*, e_2^* \dots e_d^* \dots e_{|C|-1}^*\}$ を特定する。特定された $e^*$ をGH木から削除することにより，GH木はいくつかの連結成分に分割される。この連結成分のうちで，セントロイドを含むものがコミュニティとなる。コミュニティの最小境界の特定方法は図-5のように図化できる。なお， $e^*$ にはセントロイド間で同一のGH木上のリンクが特定されることも生じうる。しかしながら，重複したリンクが含まれていてもGH木から除去した連結成分の結果には影響しない。

図-5中の赤く示した値がセントロイド間の最小容量となる値であり，このリンクがコミュニティ境界である。このリンクをGH木から削除した時にできた連結成分のうち，セントロイドに連結しているのは，緑色に着色されたノードと赤色のノードである。GH木の2つめの定義により，GH木上のリンクを削除した時にできるサブ

グラフは元のネットワークにおいて対象のセントロイドと他のセントロイド間の最小カットを除去したときに生成されるサブグラフと同一となるため、このコミュニティは元のネットワークにおいて最小カットを除去したノード集合と一致する。

この方法では、各セントロイドから最も隣接した最小カットでコミュニティを特定するため、いずれのコミュニティにも属さないノードも存在しうる。このノードについては、いずれかに含めるような操作はしないこととする。

### 3. Gomory-Hu 木によるネットワーク縮約手法

本研究で提案する縮約手法は、元ネットワークの交通容量を入力として出力された GH 木に対してコミュニティを特定し、コミュニティ内のノードをセントロイドに集約することで縮約されたネットワークを構築するものである。まず、元ネットワークの交通容量に基づいて GH 木を生成し、最小カット構造に基づいてネットワークを複数のコミュニティに分割する。次にコミュニティ毎にコミュニティ内のノードをセントロイドに属させ集約させることでネットワーク全体を再構築する。

本提案手法の特徴として、交通容量に基づいてネットワークを複数のコミュニティに分割している点にある。コミュニティの境界はセントロイド間の最小カットで与え、この手法に基づいて出力されたコミュニティは、任意のセントロイドに対して、それ以外のセントロイドと、最もリンクの合計容量が小さいカットで分割されることとなる。これにより、ある任意のゾーンからあらゆる経路の利用を想定したときの最大可能輸送量は最小カットの特性により、コミュニティ境界によって規定される。すなわち、セントロイド間の断面容量で最も不足する断面は境界上に現れ、境界より内部の混雑状況がその境界上の混雑に依存するネットワーク構造を構築でき、境界内部のノードをセントロイドに集約させることが可能となる。これをコミュニティ毎に行うことで、セントロイドの周辺ノードを集約させたネットワークを構築する。以下で縮約の手順を示す。

#### Step1. GH 木の作成

対象とするネットワークを入力とし、GH 木を生成する。ただし、道路ネットワークにおいては最小カットが起終点に接続するリンクの集合として特定されるケースが多くなることを踏まえ、ネットワークにわずかな修正を加える。具体的には、各ゾーン内の重心にセントロイドとして設定されるノードを新たに置き、最も近接するゾーン内の他のノード間に大きな容量を持つダミーリンクを付与する。これにより最小カットが起終点に接続し

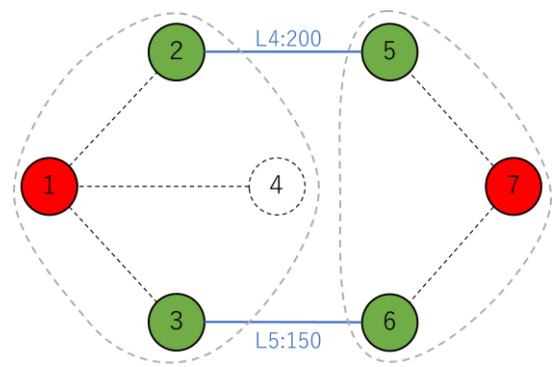


図-6 特定された境界リンク

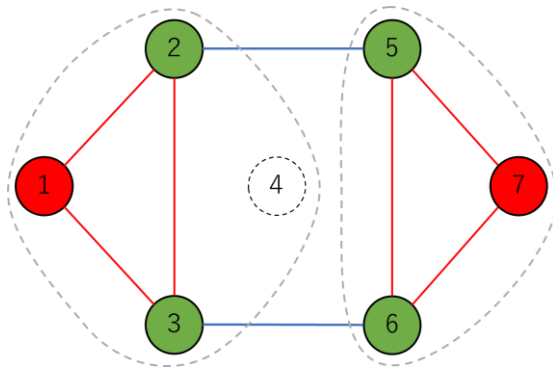


図-7 作成されたコミュニティ内補完グラフ

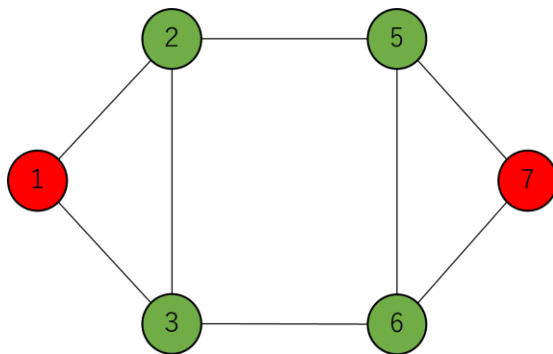


図-8 縮約後の例題ネットワーク

たリンクとして特定されることを回避できる。一方でこの操作はネットワークに恣意的な変更を与えることとなるが、実際にはセントロイドは起終点の代表点であり、この操作は隣接ノードを含めたノードを代表点として設定するものと解釈できるため、出力されるノード集合が結果として不自然なものとなるような影響はないと考える。例として図-1で示されるネットワークを対象として縮約を行う。赤いノードはセントロイドを示す。例題ネットワークに対して図-2で示されるように GH 木が作成された。ただしダミーリンクは付与していない。

#### Step2. コミュニティの特定

前述の杉浦・三輪<sup>1)</sup>のコミュニティ特定手法を用いる。結果として、コミュニティに含まれないノードも含めて

ネットワーク上の全てのノードについて、どのコミュニティに属しているかが出力される。例題ネットワークに対しては図-4で示されるように二つのコミュニティが特定された。

### Step3. 境界リンクの特定

リンクの端点である 2 ノードに対し、2 ノードが異なるコミュニティに属しているリンク、1 ノードがコミュニティ、1 ノードがセントロイドを含まない連結成分に属しているリンクを境界リンクと呼ぼう。すなわち、境界リンクは  $a = \{i, j | i \in n(p), j \notin n(p)\}$  で特定できる。境界リンクを全てのコミュニティにおいて特定する。例題ネットワークに対しては図-6に示されるように境界リンクは  $a = \{L4, L5\}$  と特定される。

### Step4. コミュニティ内補完グラフの作成

各コミュニティ内で、境界リンクを構成しているノード  $\hat{n}(p)$  とセントロイドを頂点とする完全グラフを構成する。完全グラフに含まれるリンク集合を  $E(p)$  としよう。例題ネットワークに対してはノード 1 が含まれるコミュニティでは  $\hat{n}(p) = \{2, 3\}$ 、ノード 7 が含まれるコミュニティでは  $\hat{n}(p) = \{5, 6\}$  となる。作成されたコミュニティ内補完グラフを図-7に示す。

### Step5. コミュニティ内一般ノードの除去

縮約による除去の対象となるノードは、コミュニティにおいて境界リンクを構成せず、かつ、セントロイドでないノードである。すなわち、 $i \notin \hat{n}(p)$  であるノードをネットワークから除去する。ネットワーク内のコミュニティに含まれないノードは除去の対象にはならない。例題ネットワークではノード 4 が除去の対象となる。コミュニティ内一般ノードの除去および縮約後の例題ネットワークを図-8に示す。

## 4. 北海道の道路ネットワークへの適用

以上までに構築した提案手法を北海道の道路ネットワークに適用する。ネットワークは 249,625 リンク、84938 ノードで構成されている。ただし、ネットワークに対して新たに置いたセントロイドおよびセントロイドから近接するノードへのダミーリンクを含んでいる。演算の結果、84938 ノードのうち 56864 がいずれかの縮約ノード集合に含まれ、28074 ノードがいずれのコミュニティにも含まれなかった。したがって、67%程度のノードがいずれかのコミュニティに含まれた。演算の結果、特定されたコミュニティ分布を図-9に示す。コミュニティはノードの色で示されている。例として、図-10で余市町の南に位置する赤井川村の分布を載せる。背景色およびノードの色でコミュニティ分布を示している。セントロイドは中央付近に位置する紫色のノードである。図-11は縮約後の赤井川村周辺のネットワークを示す。作成され

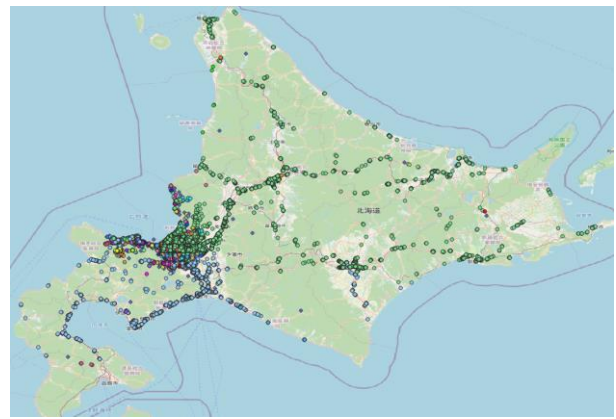


図-9 コミュニティの分布状況全体図



図-10 赤井川村周辺のコミュニティ分布状況

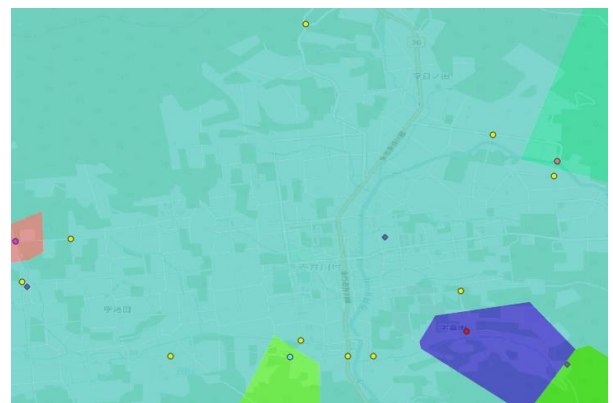


図-11 縮約後の赤井川村周辺のネットワーク

るコミュニティ内補完グラフは煩雑さ回避のために省略している。多くの黄色で着色されたノードがセントロイドに集約されたことがわかる。他のコミュニティと境界リンクを構成しないノードは集約されるため、コミュニティの内側に位置するノードは集約されやすくなっている。ネットワーク全体の縮約の結果、縮約後のノード数は 54571、リンク数は 74,777,109 であった。ただし、74,653,800 はコミュニティ内補完グラフを構成しているリンクである。約 36%のノードが集約された一方で、リンク数は大幅に増加した。これはコミュニティ内補完グ

ラフを作る過程でノードを多く含むコミュニティではリンク数が大きく増加するためと考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、大規模交通ネットワークに対して GH 木を利用して複数のコミュニティに分割し、各コミュニティ内に一つ存在するセントロイドにコミュニティ内のノードを集約させることでネットワーク全体の縮約をした。提案手法は北海道の道路ネットワークに適用し、その特性を確認した。提案手法では、コミュニティ内部のノードを大幅に除去することが可能である一方で、各コミュニティ内で補完グラフの作成を行うためリンク数が増大することが明らかとなった。また、提案手法ではネットワークに対して交通容量にのみ着目し分割をしており、縮約されたネットワークのコミュニティ内のリンク所要時間などのリンク特性は失われている。コミュニティ内のリンク特性が失われることで、各種分析における誤差が発生する可能性も考えられる。今後は提案手法を適用したネットワークはもとのネットワークのもつ情報が失われるため、各種の分析に利用するための例えば所要時間やリンクコスト関数の付与方法等を検討する。

**謝辞：**本研究は国土交通省「道路政策の質向上に資する技術研究開発」の令和 2 年度研究助成（テーマ名：公共交通ターミナル整備の空間経済分析に関する研究開発）の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) Ji, Y. and Geroliminis, N.: On the spatial partitioning of urban transportation networks, *Transportation research Part B*, 46(10), pp.1639-1656, 2012.
- 2) Geroliminis, N. and Daganzo, C.F.: Macroscopic modeling of traffic in cities. *Transportation Research Record 86th Annual Meeting*. Washington, DC, USA, 2007.
- 3) Geroliminis, N. and Daganzo, C.F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), pp.759-770, 2008.
- 4) Shi, J. and Malik, J.: Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22 (8), 888-905, 2000.
- 5) Ge, Q., Wang, P. and Fukuda, D.: A Community Detection for Identifying Neighborhoods. *Proceedings of the 21st HKSTS (Hong Kong Society for Transportation Studies) Conference*, 2016.
- 6) Newman, M.E.J. and Girvan, M.: Finding and Evaluating Community Structure in Networks, *Physical Review E* 69, 026113, pp.1-16, 2004.
- 7) Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R. and Lefebvre, E.: Fast unfolding of communities in large networks, *J. Statist. Mech.: Theory Exp.*, vol. 2008, no. 10, 2008.
- 8) Bell, M.G.H., Kurauchi, F., Perera, S. and Wong, W.: Investigating transport network vulnerability by capacity weighted spectral analysis, *Transportation research Part B*, 99, pp.251-266, 2017.
- 9) 杉浦聡志, 三輪三太: Gomory-Hu 木を利用した最小カット構造に基づくコミュニティ検出方法, 第 63 回土木計画学研究発表会・講演集, 2021
- 10) Gomory, R.E. and Hu, T.C.: Multi-terminal network flows. *SIAM Journal of Applied Mathematics* 9, pp.551-570, 1961.
- 11) Heam, D. W: Practical and theoretical aspects of aggregation problems in transportation planning models, In Florian, M. (Ed.) *Transportation Planning Models*, New York, Elsevier. 1984.
- 12) Wright, I., Xiang, Y., Waller, L., Cross, J., Norton, E., and Van Vliet, D: The practical benefits of the Saturn Origin based assignment algorithm and network aggregation techniques, In *European Transport Conference*, 2010.
- 13) Boyles, S. D.: Bush-based sensitivity analysis for approximating subnetwork diversion, *Transportation Research Part B: Methodological*, 46.1, pp. 139-155. 2012.

## A NETWORK CONTRACTION METHOD BASED ON GOMORY-HU TREE WITH NODE AGGREGATION TO COMMUNITY CENTROID

Ryosuke NARUOKA and Satoshi SUGIURA