

# グラフ理論を用いた都市計画道路ネットワークの評価手法に関する研究\*

## The study on the evaluation method of the city planning road network via graph theory\*

松村裕太\*\*・森田哲夫\*\*\*・藤田慎也\*\*\*\*

By Yuta MATSUMURA\*\*・Tetsuo MORITA\*\*\*・Shinya FUJITA\*\*\*\*

### 1. はじめに

都市計画道路とは都市の基本的な骨格を形成し、都市の健全な発展を促すことで、市民の生活の質を向上させることを目的として整備される道路である。近年では、地域ごとの人口の変動や社会基盤の変化により、市民が道路に求めるニーズが変化してきている。そのため、全国の都道府県で都市計画道路を見直すガイドライン等が策定され、都市計画道路の再評価が進められている。

道路ネットワークの検討は四段階推定法による将来交通需要予測が主流であった。しかし群馬県を例にとると、都市計画道路の見直しに関するガイドラインにおける道路整備の検討項目において、将来交通需要予測ばかりでなく都市の将来像や町づくりとの整合性、住民のニーズを反映した見直しを行うこととしている。そのため、将来交通需要の予測作業は、自治体にとって負担になってきているものと考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究は、都市計画道路ネットワークを対象とし、人口分布と利用施設の組み合わせに着目し、数学分野のグラフ理論研究の成果を適用した評価手法を提案するとともに、この手法による評価指標の有用性について考察することを目的とする。

### 2. 既存の分析手法と研究の特徴

#### (1) 既存の分析手法

道路ネットワークの評価手法に関し、従来の四段階推定法に基づく評価手法、グラフ理論による評価手法の2つの視点から整理する。

#### a) 四段階推定法に基づく評価手法

四段階推定法あるいは三段階推定法による将来交通需要推計は、パーソントリップ調査、道路交通センサス

データを用い、段階的に将来交通需要を推計する方法である。最終の段階で、道路ネットワークに将来OD交通量を配分し、区間別の交通需要を推計するものであり、道路ネットワークの評価に広く適用されてきた。近年は、将来交通需要の推計結果を用い、モビリティ・安心安全・環境負荷等の多様な視点からの評価や、費用便益分析が行われ、都市計画実務に活用されている。

都市計画道路の見直しに関するガイドライン等の策定状況は、塚田ら<sup>1)</sup>、佐野ら<sup>2)</sup>の論文に詳しい。2005年頃から全国の都道府県で策定され、都市計画道路の廃止やルート変更、幅員変更に取り組んだ都道府県もある。ガイドライン等には、将来交通需要ばかりではなく、まちづくり支援、防災・医療活動への対応、事業化の見通し等の多様な視点が盛り込まれ、総合的に判断することが求められている。塚田らは<sup>1)</sup>、多様な視点から定量的に総合評価する新たな手法を提案し、前橋市の都市計画道路ネットワークを対象にケーススタディを行っている。

一方、将来交通需要からの検討についてみると、群馬県のガイドライン<sup>3)</sup>では、「将来交通量予測は、多大な作業を伴う可能性のあることから、将来交通網への影響が小さいと判断できる場合は、定性的な判断によるものとし」と記述されているように、多くの都道府県では、将来交通需要からの検討が必要であるとしながらも、作業量が大きいことから簡便な方法での検討も認めている。

#### b) グラフ理論に基づく評価手法

グラフ理論とは頂点の集合と頂点間を結ぶ辺の集合によって表現される図形の性質を分析する数学の研究分野の一つである。計画分野におけるグラフ利用の応用事例は多数あり、森田ら<sup>4)</sup>が体系的に整理している。ネットワーク評価については、1980年代から増加し、道路、管路、ゴミ収集、避難路の分析に応用されている。

道路ネットワークを対象とした研究は、1980年に小林<sup>5)</sup>がネットワークの信頼度に着目した研究を行い、1987年には木村ら<sup>6)</sup>が都市を連携するネットワークの重要性とゆとりに着目した研究を行い、1988年には古山<sup>7)</sup>が地域間ネットワークの評価指標に関する研究を行うなど、継続的に研究が進められている。これらは、主に、ネットワークの形態を評価する研究であり、いくつかの評価指標の提案、評価指標に基づく評価が行われている。

\*キーワード：都市計画、交通ネットワーク分析、道路計画、グラフ理論

\*\*学生員、群馬工業高等専門学校専攻科環境工学専攻

\*\*\*正員、博(工)、群馬工業高等専門学校環境都市工学科  
(群馬県前橋市鳥羽町 580 番地、Tel: 027-254-9000、

Email: tmorita@cvt.gunma-ct.ac.jp)

\*\*\*\*博(理)、群馬工業高等専門学校一般教科(数学)

また最近では、道路ネットワークの評価のみならず、道路ネットワーク上の人口分布と施設の組み合わせを考慮に入れたグラフ分析の手法について研究しているものもみられるようになってきた<sup>4)</sup>。今後のグラフ理論を用いた道路ネットワーク研究では、ネットワークの形態のみの分析だけでなく、人口分布や利用施設を考慮した分析が萌芽的な研究課題として期待されている。

## (2) 本研究の特徴

前項における既存の分析手法との関係で、本研究の位置づけを整理する。パーソントリップ調査データ等を用いた四段階推定法による道路ネットワーク評価は、作業量が膨大になる可能性のあることから、都市計画実務の現場では、より簡便な方法が求められていると考えられる。また、道路ネットワーク評価にグラフ理論を応用する場合には、ネットワークの形態評価だけではなく、人口分布や利用施設を考慮する必要があると考えられる。

本研究の特徴は、グラフ理論の考え方をを用いることで現実の問題をグラフと呼ばれる単純な数学的モデルで表現し分析することにある。このグラフの構造が道路整備により変化することで施設利用者と施設との組み合わせにどのような効果をもたらすか、その解を容易に求めることに意義がある。

## 3. 道路ネットワークの評価手法

### (1) グラフ理論の応用の考え方

道路ネットワークの形態を評価するために、グラフ理論に基づく評価指標は有用性が高いが、居住者と居住者が利用する都市内施設との組み合わせを考慮した道路ネットワークの分析を考えると、これらの指標をそのまま適用することは難しい。なぜならば、グラフ理論に基づく評価指標は、グラフを構成する要素として道路と交通節点のみを対象として定式化されているからである。したがってグラフの頂点集合を定義するものとして人と施設をグラフの要素としてさらに組み込む場合は分析指標として新たに別の指標を用いる必要がある。このために本研究は道路網に加えて人口要素と施設要素をグラフの頂点として新たに組み込む。本研究は都市計画道路整備により市民が施設を利用し易い道路ネットワークを構築できるどうかを、都市内における道路網上の人と施設の組み合わせを反映したグラフを用いて分析する。

### (2) グラフの作成方法

分析対象地域を前橋市都市計画区域とし、都市計画道路ネットワークについてグラフを作成する。施設は対象地域内の病院とし、群馬県病院要覧<sup>8)</sup>に掲載されている範囲内の病床数100以上の12病院を対象とした。施設

の種類は分析目的に応じて変化させることは可能であり、対象地域に広く分布し、範囲内の人が等しく利用する公共性の高い施設として病院を施設として設定した。

本研究では都市計画道路が将来整備されることによる影響を評価するため、グラフは「都市計画道路整備前の道路網」、「都市計画道路整備後の道路網」の2種類を用意する。まず、都市計画道路整備前のグラフの作成方法について述べる。グラフの頂点として定義するものは、交差点、病院、人口代表点である。人口代表点はある範囲に居住する人の分布を一つの頂点として代表するものである。人口代表点は住民基本台帳集計に基づき設定した<sup>9)</sup>。また本研究では、対象病院数12に対し、同数個の12頂点を設定した。両者を同数個とする理由については次節で述べる。グラフの辺は図-1に示すように都市計画道路の整備済区間とし交差点間を結ぶ。交差点間に未整備区間と整備済区間が混在している場合は、その区間は未整備区間としグラフの辺で結ばないものとした。また病院は最も近い交差点と辺で結ぶ。都市計画道路整備後のグラフは、整備前のグラフに未整備区間を図-1に示すように破線として新たに付け加えた。

都市計画道路ネットワークの整備前・整備後の2種類のグラフをまとめて図-2(次頁)に示す。各交差点間は距離が異なるため、概ね500m毎に頂点を設置し、頂点間距離の目安とする。この頂点を細分点と呼ぶこととする。図-2は、紙面制約のため、ネットワークの一部を圧縮している。

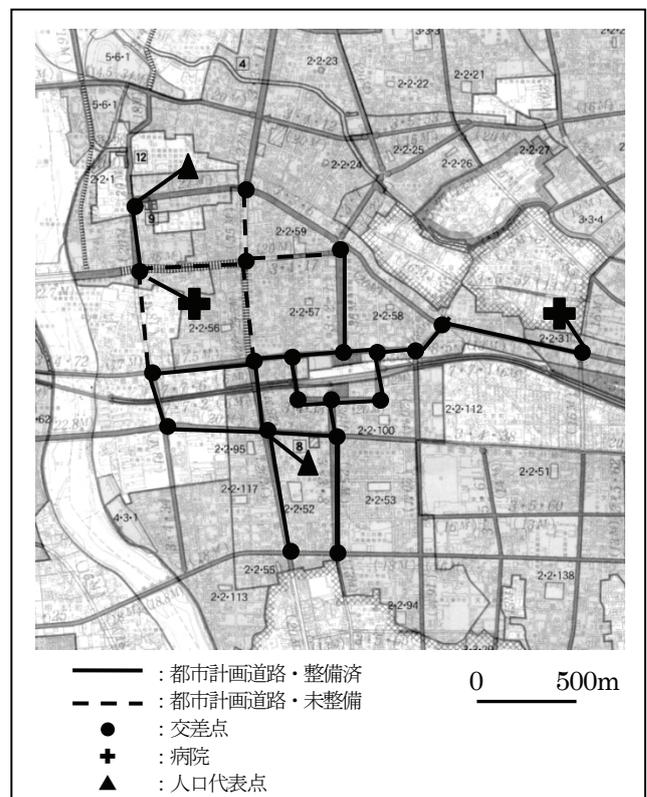


図-1 グラフ作成方法の概略

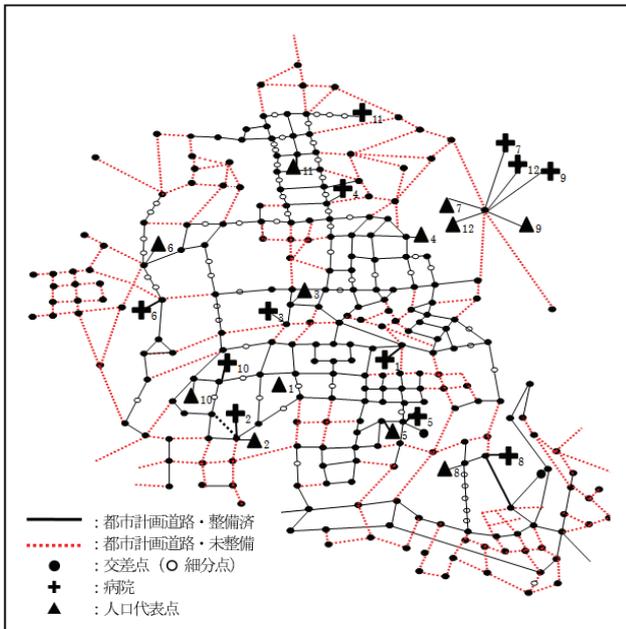


図-2 都市計画道路ネットワークのグラフ化

### (3) グラフ理論の適用方法と評価指標

次に図-2で示したグラフを分析するために用いるグラフ理論の用語ならびに概念について概説し、本研究で用いたグラフ理論に基づく評価指標について説明する。グラフ理論用語の詳しい定義については参考文献<sup>10)</sup>等を参照されたい。

- 道：2頂点間を結ぶ点と辺の交互列。
- 木：閉じていない連結なグラフ。
- 連結グラフ：グラフ内の任意の2頂点間において道が存在するグラフ。
- グラフの彩色：グラフの頂点あるいは辺に色を割り当てること。本研究ではグラフの頂点に色を割り当てる頂点彩色のみを扱う。

次に本研究で用いた分析手法に関連の深いグラフ理論の均衡分解の概念について述べる。連結グラフGの頂点集合 $V(G)$ における点素な部分集合R、Bで、 $|R|=|B|$ を満たすものを任意にとる。 $V(G)$ における部分集合Xが次の2条件を満たすとき、Xは均衡集合であると呼ぶことにする。

- (i) XはGにおいて連結グラフを誘導する。
- (ii)  $|X \cap R| = |X \cap B|$

Gの頂点がこのような均衡集合により分割されるとき、その分割をGの均衡分解と呼ぶ。本論ではこの均衡分解を単にグラフの成分と言い換える。

与えられたグラフGにおいて考えられる全てのパターンにおける同数個の青点赤点の彩色（本研究では、青点と赤点はそれぞれ病院、人口代表点）について、それぞれ最適な均衡分解F（「最適」の意味の詳細は論文を参照のこと<sup>11) 12)</sup> 見つけたときの位数（グラフの頂点数）最大となる均衡集合のサイズの最小値を与える関数を

$f(G)$ とおき、グラフ理論の先行研究ではいろいろなグラフの族に関して $f(G)$ の正確な値、もしくはそれを決定することが難しいときは非自明な上界や下界を与えている。青点赤点の彩色について全てのパターンについて考察するという部分はグラフ理論の数学的立場からの要請なので、都市計画における現実的問題の要請からは明らかに考える必要のないパターンについては除外して考える。

このような背景から本研究では、人口と利用施設の距離に着目し、式(1)の評価指標を提案する。グラフの均衡分解に関する研究は現在盛んに進められているが、更なる詳しい内容は本論では割愛する。詳しい内容は、参考文献を参照されたい<sup>11)12)</sup>。本研究では均衡分解に関する文献<sup>11)12)</sup>をもとに、グラフの均衡分解の概念を用いた次のような指標を導入して、検証した。

$$\mu(G, F) = t \times \sum_{i=1}^t |H_i| \quad (1)$$

ここで $t$ はネットワーク内の均衡分解の数、 $|H_i|$ は各均衡分解内に存在する青点と赤点をそれぞれ端点にもつ位数最小の木のサイズ（グラフの辺数）である。本論文では、「グラフが $n$ 点からなる木の場合、そのグラフは $n-1$ 本の辺をもつ」という性質があるため、 $|H_i|$ は辺の数に着目して計算を行う。Gと与えられた均衡分解Fに対して、部分グラフHをGの全ての自明でないFの均衡集合を含む位数最小の部分グラフとする。ここで自明な均衡集合は $|H \cap R| = |H \cap B| = 0$ を満たす均衡集合Xのことである。この指標は均衡集合の総和に均衡集合の成分数を掛け合わせたものであるが、 $t=1$ のときは一つの自明でない均衡集合として全域にわたるものを誘導しているため、自然な定式化である。人口と施設との組み合わせを考えると成分数が極端に少ない状況を考えることは意味がない。なぜなら、同一成分内に存在する人口と施設間には距離に関係なく利用するという関係が成り立ってしまうからである。この指標が有効なのは成分数が大きいときに限られる。しかし、既存のグラフ構造と新しいグラフ構造との比較分析においては有用な指標となり得る。なぜなら人口と施設とを結ぶネットワークの問題では、既存の道路ネットワークと整備後の道路ネットワークの比較分析に適用できるからである。

評価指標 $\mu(G, F)$ が小さいほど、個々の成分において対応させるべき2頂点間すなわち人口と利用施設との距離が小さくなることを示している。

### (4) グラフの分割

ここでは、前節で述べた(1)式で示される評価指標 $\mu(G, F)$ の値を算出するために、3章(1)節で作成した図-2のグラフを用いて、分析に必要なグラフの分割について説明する。本研究で扱うグラフの分割とは作成

したグラフ上に存在する人口代表点と施設頂点に対して一対一対応の組み合わせを作ることである。この組み合わせは各施設頂点と各人口代表点が互いに最も近いもので生成される。図-3 にグラフの分割を示す。破線内の人口代表点の人は同一破線内の施設を利用するもの考える。このように破線でグラフを部分的に区分けすることをグラフの分割あるいは成分と呼ぶこととする。

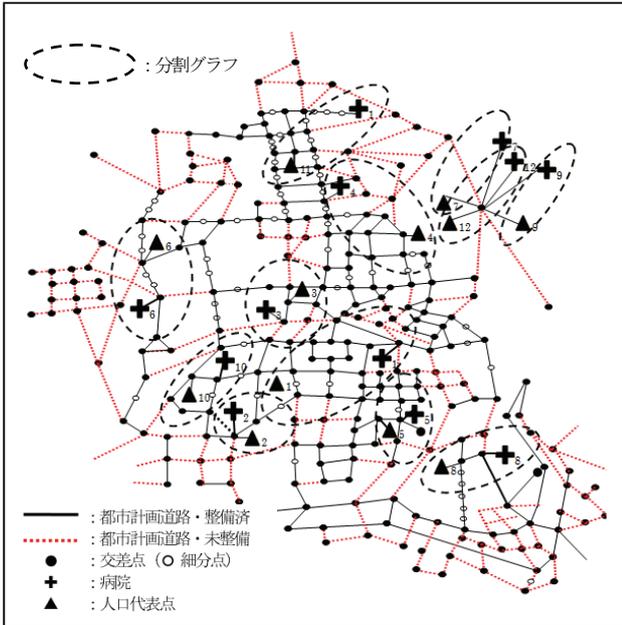


図-3 成分によるグラフの分割

(5) グラフの成分統合と評価指標の計算方法

簡単なモデルを用い式(1)の評価指標の具体的な計算方法ならびにグラフの成分統合の方法について説明する。

a) 都市計画道路整備前における評価指標の算出

図-4 は都市計画道路整備前のグラフ G、図-5 は都市計画道路整備後のグラフ G' を表している。図-4、図-5 のグラフの頂点集合のうち、P1、P2 は人口代表点を、H1、H2 は都市施設を表している。

まず図-4 について説明する。グラフ上には施設 H1、H2、そして人口代表点 P1、P2 がある。P1 の居住者はルート 1 あるいはルート 2 を通ることによって H2 の施設を利用することができるが、一般に同一属性の施設を利用するにあたって距離が近い H1 を利用すると考えられる。P1 の居住者は施設 H1 を、P2 の居住者は施設 H2 を距離が他の同一属性の施設よりも距離が小さいという理由から優先的に利用するものと想定し、前節で述べたように各々成分 F1、F2 を生成する。F1 内の人口代表点と病院を端点にもつ位数最小の木のサイズは 3 であり (P1 と H1 を結ぶ最短ルートは、P1 と H1 をそれぞれ端点にもつ頂点数 3 の木となっている)、同様に F2 は 2 である。成分数は 2 であるので評価指標を算出すると、 $\mu(G, F) = 10$  を得る。

b) 都市計画道路整備後の評価指標の算出

次に図-5 について説明する。図-5 の破線で示された辺の区間は都市計画道路が整備されている。図-5 のグラフ上でも図-4 のグラフの各成分 F1、F2 内で利用・被利用の相互関係が生じている。しかし、図-5 では破線区間の道路が整備されたことによって、P1 の居住者が H2 を、P2 の居住者が H2 を利用しやすくなったと考えることができる。本研究ではグラフの成分統合とは、このような状況に際して 1 成分内に人口代表点と施設頂点が 2 個以上、それぞれ同数個となるように成分を合成することをいう。また、本研究ではこのように成分統合の要因となる都市計画道路を特別に統合成分間都市計画道路と呼ぶこととする。グラフの成分統合を行うとネットワーク内の成分数が減少する。ここでは、成分数は 1 であり、評価指標を算出すると  $\mu(G, F) = 7$  を得る。

以上の結果から、都市計画道路整備による効果を評価指標から判断することができた。評価指標の大小は成分統合による成分数 t の減少が値に効いていることがこの例から分かる。しかし、グラフの成分統合を行うことで、必ず評価指標が小さくなるとは限らない。

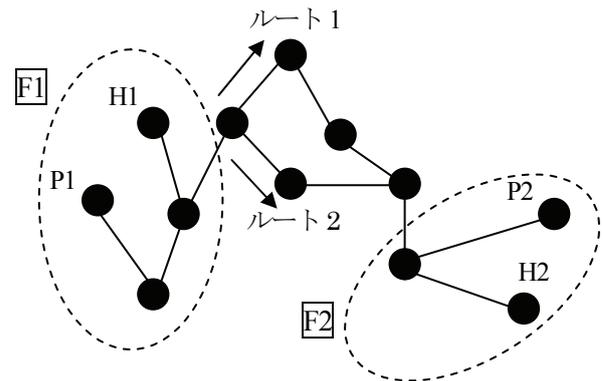


図-4 都市計画道路整備前のグラフ G

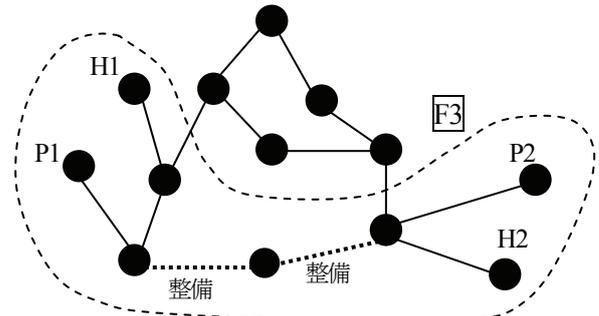


図-5 都市計画道路整備後のグラフ G'

4. 評価結果

(1) 分割パターンの検討

前章で述べた成分統合の方法に基づいて図-3に示したグラフ分割に対しての成分統合について検討する。先に

記述したように、成分統合の意味は成分内に居住する人は同一成分内の施設を利用することから、ある範囲の居住者に対して利用する病院の選択枝が増えることである。式(1)から成分数を小さくすることで評価指標を小さくすることは望めるが、最小成分数である $t=1$ の場合のように、現実的な問題として考えられないこのパターンは除外する。その他のパターンについても複数考えられるが、今回の分析では次の3つの条件を満たすものに絞って統合パターンを設定した。

- (i) 成分間に都市計画道路の未整備区間が存在する。
- (ii) (i)を満たす2成分のうち、成分どうしの距離が5km以内である。
- (iii) 全ての成分統合パターンにおいて成分統合後のグラフ全体の総成分数は11とする。

## (2) 評価結果

表-1 に分析結果を示す。ケース0 は都市計画道路の整備前であり、ケース1 からケース9 は整備後、すなわち、グラフの成分統合をした場合である。 $\Delta\mu(G, F)$ は、整備前後の、 $\mu(G, F)$ の差であり、負の場合に整備効果があると判断できる。 $|\Delta\mu(G, F)|/L$ は、評価指標の減少と道路整備の比であり、整備の効率性を表わす指標と考える。

表-1 の結果より、ケース1、2、3、5、8 では評価指標は減少となった。またケース4、6、7、9 では評価指標は増加となった。したがってケース1、2、3、5、8における成分統合は都市計画道路の整備効果を期待できるものであり、その統合成分内の都市計画道路は優先して整備すべき区間であると考えられる。ケース1による成分統合は評価指標の減少が最も大きい。人口代表点の数と病院の数は変化させていないので、評価指標は距離の総和を表わしており、値が小さいほど対象ネットワーク全体をみたときに人口代表点と病院間の距離が小さくなっていると考えることができる。ケース1が最も整備効果があり、ケース1における統合成分間の都市計画道路が優先的に整備されるべき区間として考えることができる。

統合成分間の都市計画道路延長  $L$  をみると、整備効果を期待できるケース1、2、3、5、8 はいずれも0.5km前後で、これに対して評価指標が増加したケース4、6、7、9 は1km以上の整備区間であり、比較的短い区間の整備であっても効果が得られる。整備効率を表わす $|\Delta\mu(G, F)|/L$ をみると、ケース1が最も効率がよく、次いでケース2、5、8の効率が高いことがわかる。

図-6 に、整備効果のある都市計画道路の未整備区間を示した。本分析の人口分布と施設間の距離を小さくする未整備区間は、ケース1、3、8の成分統合に係る区間、ケース2に係る区間、ケース5に係る区間である。

表-1 評価結果

	ケース	統合成分	$\mu(G, F)$	$\Delta\mu(G, F)$	統合成分間 都市計画 道路延長 $L$ [km]	$ \Delta\mu(G, F) /L$
整備前	ケース0	なし	828		0.000	
	ケース1	H1, H3	693	-135	0.400	338
	ケース2	H1, H5	814	-14	0.425	33
	ケース3	H2, H3	825	-3	0.400	8
整備後	ケース4	H2, H5	847	+19	1.125	—
	ケース5	H2, H10	803	-25	0.650	38
	ケース6	H3, H4	836	+8	1.225	—
	ケース7	H3, H6	836	+8	1.300	—
	ケース8	H3, H10	814	-14	0.400	35
	ケース9	H5, H8	858	+30	1.275	—

注1:  $\Delta\mu(G, F) =$  整備後  $\mu(G, F) -$  整備前  $\mu(G, F)$

注2: 「—」は、 $\mu$  が大きくなるケースであるため算出していない。

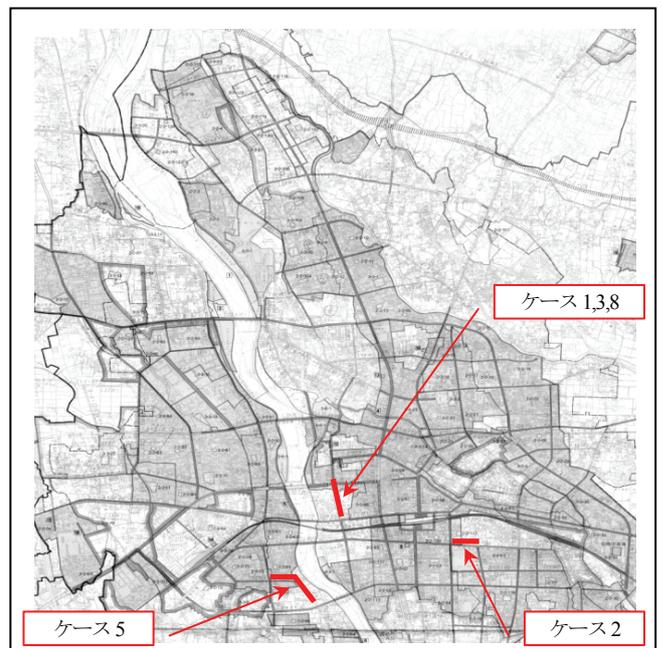


図-6 統合成分間の都市計画道路

## 5. おわりに

### (1) 本研究のまとめ

本研究では、都市計画道路ネットワークを対象とし、数学分野のグラフ理論研究の成果を適用したネットワーク評価手法を提案した。計画分野におけるネットワーク評価の研究は、ネットワークの形態評価がほとんどであったが、本研究では人口分布と利用施設の組み合わせに着目した評価手法と評価指標 $\mu(G, F)$ を示した。

本研究では、利用施設を病院として分析したが、施設種類は分析目的に応じて変化させることは可能であり、本評価手法の適用範囲は広い。また、四段階推定法による評価手法と比べ、本評価手法の作業量は非常に小さく、

都市計画道路の見直しガイドライン等による計画実務においても適用しやすいものである。

また、本研究では、数学分野のグラフ理論研究の最新の成果を正確に適用したものであり、計画分野における萌芽的な研究課題としての意義があると考えられる。

## (2) 今後の研究課題

本研究を通じた研究課題について次の2点をあげる。

### a) 本評価手法・評価指標の更なる検証に関する課題

本稿に示した成分統合パターン間の比較分析など評価指標の有用性についてはいまだ検討の余地がある。

本稿では、成分統合パターンについて4章(1)節の(i)、(ii)、(iii)の条件で行ったが、都市計画道路以外の道路を含めた分析、より多くの成分統合を行った場合の分析が必要であろう。

評価指標 $\mu(G, F)$ は、対象とするネットワーク全体の評価を試みる指標であるが、評価指標が小さくなった統合パターンにおいて、成分統合は行わなかった地域への影響を検証する必要がある。

また、評価指標 $\mu(G, F)$ は、都市計画道路の整備効果を相対的に比較評価する指標であるが、指標値の変化量が人の移動や利便に及ぼす影響については明らかにできていないため検討が必要である。

### b) 従来の評価手法との比較における課題

四段階推定法による道路ネットワークの評価手法は、本研究の評価手法と比べ、多くの長所がある。第四段階の配分交通量の予測段階について長所を列举すると、分布交通パターンを用いている、道路幅員・車線数等の道路構造を考慮できる、道路の混雑度・所要時間等のサービス水準を算出できる、である。一方、本研究の評価手法は、分析作業量が小さく、都市計画道路の見直しガイドライン等に活用しやすい手法であるが、車線数については都市計画道路の検討のために重要な情報であり、道路構造についても知見を得られるよう、今後の研究課題として検討したい。

## 参考文献

- 1)塚田伸也, 湯沢昭, 森田哲夫: 都市計画道路の再評価の現状と評価手法の検討—群馬県前橋市を事例として—, 日本都市計画学会都市計画論文集, No.44-3, pp.241-246 2009.
- 2)佐野育実, 岡崎篤行, 梅宮路子: 都道府県による都市計画道路の見直しガイドラインに関する運用実態と課題, 日本都市計画学会都市計画論文集, No.44-3, pp.247-252, 2009.
- 3)群馬県県土整備局都市計画課: 都市計画ガイドライン(都市計画道路の見直し編), 2006.
- 4)森田哲夫, 藤田慎也, 塚田伸也: 交通計画課題に対応

したグラフ理論の適用性に関する考察, 土木学会土木計画学研究講演集, No.36, CD-ROM(V-177), 2007.

- 5)小林正美: 道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究, 日本都市計画学会都市計画論文集, No.15, pp.385-390, 1980.
- 6)木村一裕, 清水浩志郎: 都市を連携する道路ネットワークの評価手法について, 日本都市計画学会都市計画論文集, No.22, pp.493-498, 1987.
- 7)古山正雄: 地域間ネットワークの評価指標Uの値について, 日本都市計画学会都市計画論文集, No.23, pp.25-30, 1988.
- 8)群馬県健康福祉部医務課: 群馬県病院要覧, 2010.
- 9)前橋市: 住民基本台帳集計, 2010.
- 10)仁平政一, 西尾義典: グラフ理論序説(改訂版), プレアデス社, 2010.
- 11)S. Fujita & H. Liu: The balanced decomposition number and vertex-connectivity, 投稿中.
- 12)S. Fujita & T. Nakamigawa: Balanced decomposition of a vertex-colored graph, Discrete Applied Mathematics156, pp.3339-3344, 2008.