

# 複雑ネットワーク分析アプローチによる 新規道路の開通候補地選定法

Selecting candidate locations of opening roads  
based on complex network analysis approach

○大久保 誠也<sup>1</sup>, 武藤 伸明<sup>1</sup>, 湯瀬 裕昭<sup>1</sup>, 池田 哲夫<sup>1</sup>, 斉藤 和巳<sup>1</sup>  
Seiya OKUBO<sup>1</sup>, Nobuaki MUTOH<sup>1</sup>, Hiroaki YUZE<sup>1</sup>, Tetsuo IKEDA<sup>1</sup> and  
Kazumi SAITO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 静岡県立大学 経営情報学部

School of Management and Information, University of Shizuoka

We address the problem of modeling and analyzing human behaviors under situations like disaster, and to this end, we propose a notion of group reliability centrality based on a complex network analysis approach. As its typical application, we consider selecting candidate locations of opening roads so as to minimize the expected time for each person to move to one of the nearest facilities, and formalize it as a link addition problem to a given road network. In our simulations using three major cities in Shizuoka prefecture, we experimentally evaluate the characteristics of the selected locations by changing the upper bound distances of opening roads.

**Keywords** : complex network, opening road, link addition problem

## 1. はじめに

2017年4月に「全国地震動予測地図 2017年版」<sup>1)</sup>が公表されたが、その中の確率論的地震動予測地図を見ると、日本のほとんどの場所で大きな地震が起こりうるということがわかる。また、近年においては、地震や豪雨による災害が数多く発生し、災害への対策が全国的に必要とされている<sup>2)</sup>。特に静岡県では、南海トラフ地震などに代表される想定災害に備え、防災・減災対策を高度化することが極めて重要な課題となっている<sup>3),4)</sup>。

2004年の新潟県中越地震の際には、山古志村は道路がすべて寸断されて孤立し、全村民はヘリコプターなどで村外に避難した<sup>5)</sup>。また、2017年7月の九州北部豪雨の際には、土砂災害などで道路が寸断され、福岡県と大分県の両県で29の集落が一時的に孤立した。一般的に、大規模災害が発生した際には、交通網が複数個所で寸断されることにより、多数の孤立地域が発生し、深刻な事態が起こることが危惧される。したがって、多数の専門家や研究者らが同時に指摘するように、道路網の連結信頼性を考慮した研究は、防災・減災において極めて重要な役割を果たす。たとえば、自然災害発生時に一部の道路リンクが切断され、道路網が複数のサブネットワークに分断される可能性を考えると、サブネットワーク内に住民の一時避難所や物資蓄積庫が存在することが必須である。加えて、サブネットワーク内の一時避難所への到達時間や物資蓄積庫間の輸送時間は短い必要がある。また、中山ら<sup>6)</sup>の指摘によれば、道路網には様々な機能が要求されるが、必要な時に必要な場所に行けることを表す可達性と、目的地に早く到達できることを表す速達性が最重要である。

可達性と速達性を実現する能力の指標として連結信頼性と時間信頼性が提案され、使用されている。ただし、これらの指標は主に平常時の指標として用いられている

ため、災害時に対しても用いることができる指標が求められている。

本研究の目的は、災害時の避難を考慮に入れた信頼性の指標を構築するとともに、新たな道を配置する問題を解く手法を提案することである。そこで、本研究では、ネットワーク上での影響最大化問題<sup>7)</sup>と、中心性分析問題<sup>8)</sup>に基づくアプローチを採用する。具体的には、複雑ネットワーク分析アプローチを土台に、重み付きグループ近接中心性<sup>9)</sup>を発展させ、災害時の住民避難行動分析などで重要な役割を果たし得る「グループ移動信頼性」の概念を提案する。その応用として、住民が避難地へ到達するまでの平均時間を最小化するように、道路網(ネットワーク)に新たな道(リンク)を追加する問題に取り組む。シミュレーション実験により、静岡県の主要3都市、浜松市、沼津市、及び、静岡市を対象に、生成可能なリンクの距離に制限を与えたときの特性について評価した結果を示す。

## 2. 問題設定

多数の移動主体(住民など)が起点から目的地(避難地など)に移動する基本行動モデルを定義する。 $G=(V, \mathcal{E})$ を道路網の無向グラフ構造とし、 $V=\{u, v, w, \dots\}$ は交差点に対応するノードの集合、 $\mathcal{E}=\{e=(u, v), \dots\}$ は交差点間の道となるリンクの集合を表すとする。また、 $\mathcal{D}$ を目的地の集合とし、便宜上、それぞれを最寄りのノード(交差点)に対応させ $\mathcal{D} \subset V$ であるとする。同様に、移動主体の起点もノードに対応させ、ノード $u$ が起点の主体数を $n(u)$ とし、その総数を $N=\sum_{u \in V} n(u)$ と表すとする。一方、各リンク $e=(u, v)$ に対し、ノード間距離 $d_G(u, v)$ が付与されているとする。また、直接リンクが張られておらず、複数のリンクをたどる必要がある任意のノードペア $u$ と $w$

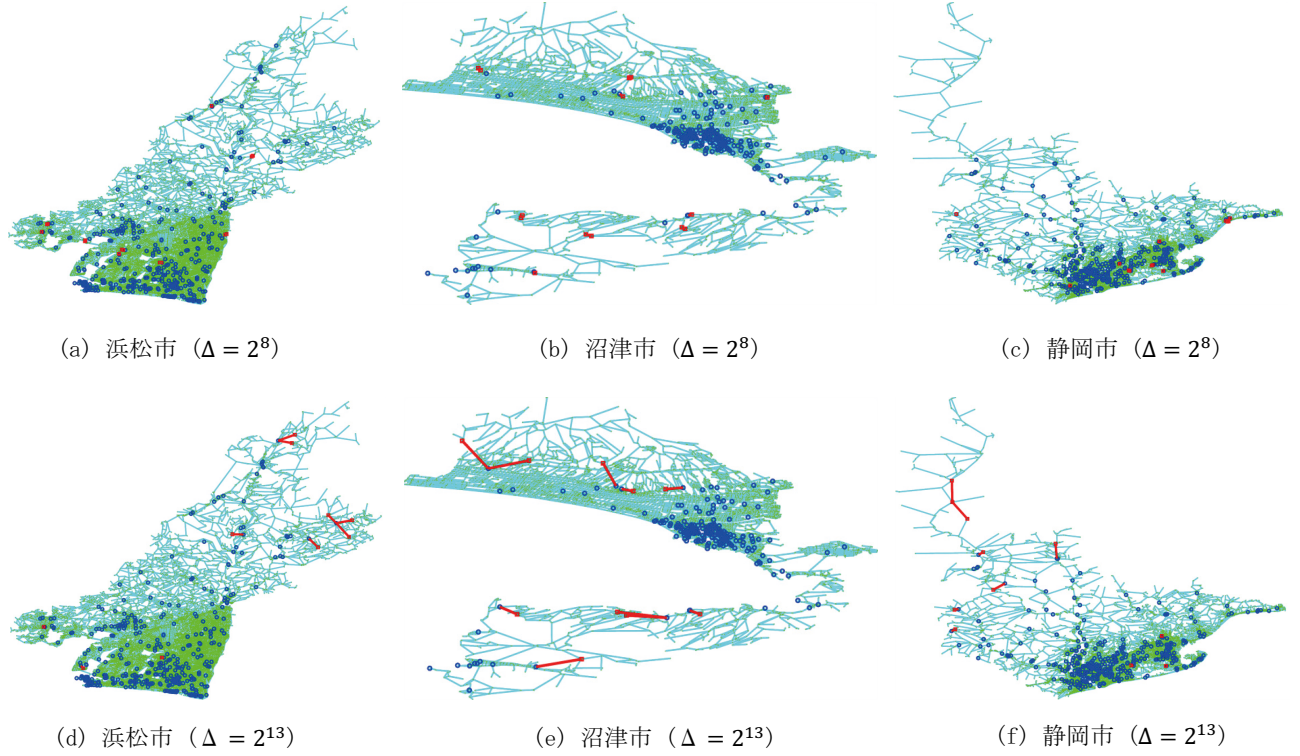


図 1 生成したリンクの可視化による評価

の間の距離  $d_G(u, w)$  は、これらを結ぶすべての経路のうち、経路上の距離の和が最小値（測地距離）をとる経路の距離として定義する。このとき、移動主体が起点から最寄りの目的地までの移動する際に必要となる最短距離の平均  $C_G(\mathcal{D})$  は次式で与えられる。

$$C_G(\mathcal{D}) = \frac{1}{N} \sum_{u \in \mathcal{V}} n(u) \min_{w \in \mathcal{D}} d_G(u, w) \quad (1)$$

ここで、式 (1) は、重み付きグループ近接中心性 (weighted group closeness centrality)<sup>9)</sup> と見なすことができる。一方、本論文では、式 (1) を、災害時の住民避難行動分析などで重要な役割を果たし得る「グループ移動信頼性」として利用することを提案する。

いま、道路網  $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$  に対し、リンク集合 (新たな道)  $\mathcal{R} \subset \mathcal{V} \times \mathcal{V}$  を追加 (建設) し、構成される道路網を  $G(\mathcal{R}) = (\mathcal{V}, \mathcal{E} \cup \mathcal{R})$  で表す。明らかに、式 (1) の起点から目的地までの移動に必要な最短時間の平均を、より小さくするリンク集合の追加 (新たな道の建設) が望まれる。しかしながら、一般に、非常に距離の長いリンク (道) を建設するのは困難な場合も想定される。よって本研究では、追加できるリンクの距離上限が  $\Delta$  として与えられているとし、この制約を満たすリンク集合  $\mathcal{H}(\Delta)$  を次式で定義する。

$$\mathcal{H}(\Delta) = \{(u, v) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V} \mid d_G(u, w) \leq \Delta\}.$$

また、追加できるリンク本数は  $k$  とする。すなわち、 $|\mathcal{R}| = k$  である。したがって、本研究でのリンク生成問題は、次式の目的関数を最大にするリンク集合  $\mathcal{R}$  を求める問題となる。

$$F(\mathcal{R}) = \arg \max_{\mathcal{R} \subset \mathcal{H}(\Delta), |\mathcal{R}|=k} \{C_G(\mathcal{D}) - C_{G(\mathcal{R})}(\mathcal{D})\} \quad (2)$$

### 3. 提案法

提案法は、与えられた道路網  $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 、目的地集合  $\mathcal{D}$ 、リンク距離上限  $\Delta$ 、及び、追加リンク本数  $k$  を入力とし、目的関数  $F(\mathcal{R})$  を最大化するリンク集合  $\mathcal{R}_k$  を出力する。詳細には、以下の 3 ステップで構成される。

- I. [Cent. Comp. ステップ]  
重み付きグループ近接中心性 (式 (1)) を計算する。
- II. [Par. Sel. ステップ]  
任意のノード  $v$  に対して、目的関数  $F(\mathcal{R})$  を向上させ得る親ノード集合を選定し、 $\mathcal{H}(\Delta)$  の要素を限定させる。
- III. [Link Sel. ステップ]  
最良要素  $e_{h+1}$  を追加  $\mathcal{R}_{h+1} \leftarrow \mathcal{R}_h \cup \{e_{h+1}\}$  し、 $h = h + 1$  に設定する。以上を  $k$  回繰り返し、 $\mathcal{R}_k$  を決定する；

まず、Cent. Comp. ステップでは、目的地集合  $\mathcal{D}$  から各ノードへの距離に基づく最良優先探索により、重み付きグループ近接中心性 (式 (1)) を計算する。このステップで求めた距離は、生成リンク  $e = (u, v)$  に対し、距離が短い方を親ノード  $u$  とし、長い方を子ノード  $v$  として指定するのに利用する。次に、Par. Sel. ステップでは、任意の子ノード  $v$  に対し、上限距離範囲で目的関数  $F(\mathcal{R})$  で正と成る親ノード集合を選定する。ここで、子ノード  $v$  からの上限距離の範囲に目的地集合  $\mathcal{D}$  に属すノード  $x$  が存在すれば、リンク  $e = (x, v)$  を生成する。これは、子ノード  $v$  に対して、目的関数  $F(\mathcal{R})$  を最大にすることが保証されるので、探索をスキップすることができる。最後に、Link Sel. ステップにおいて  $\mathcal{R}_k$  を求めるが、目的関数を最大化する厳密解を求めることは NP 困難なので、提案法では、以下に示す貪欲アルゴ

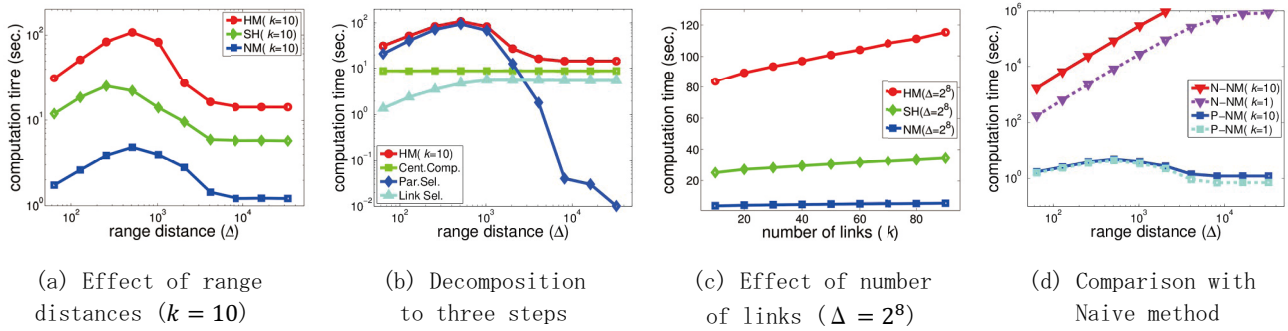


図 2 リンク距離上限  $\Delta$  または追加リンク本数  $k$  を変化させたときの提案法の計算効率の評価

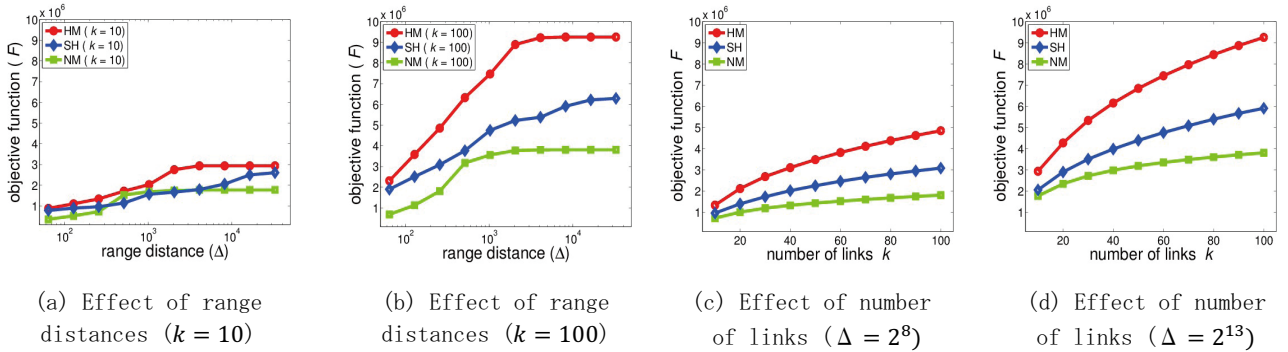


図 3 リンク距離上限  $\Delta$  または追加リンク本数  $k$  を変化させたときの目的関数の向上度の評価

リズムに基づき、目的関数  $F(\mathcal{R})$  を近似的に最大化する  $\mathcal{R}_k$  を求める。

1. 反復制御変数を  $h = 0$  とし、結果を格納する集合を空  $\mathcal{R}_0 = \emptyset$  に初期化;
2. 集合  $\mathcal{R}_h$  を固定し、 $\mathcal{H}(\Delta)$  から最良要素  $e_{h+1} = \arg \max_{e \in \mathcal{H}(\Delta)} \{F(\mathcal{R}_h \cup \{e\}) - F(\mathcal{R}_h)\}$  を計算し決定;
3. 最良要素  $e_{h+1}$  を追加  $\mathcal{R}_{h+1} \leftarrow \mathcal{R}_h \cup \{e_{h+1}\}$  し、 $h = h + 1$  に設定;
4.  $h = k$  ならば  $\mathcal{R}_k$  を出力し終了、さもなければステップ 2. へ戻る。

#### 4. 実験による評価

提案手法の有効性を評価するため計算機実験を行った。本研究では、静岡県的主要 3 都市である浜松市、沼津市、静岡市に着目し、OSM (OpenStreetMap) データ<sup>10)</sup> を元に道路網の構造  $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$  を求めた。また、隣接している交差点間の距離は、交差点ペアの座標から GRS80<sup>11)</sup> に基づき計算している。距離の単位は m (meter) である。

表 1 に実験で用いた各都市の道路網のノード数とリンク数、避難地数を示す。ここで、避難地とは、静岡県の指定する避難地または一時避難地とした。また、以下の実験では、基本性能を確認するために、全ての  $u \in \mathcal{V}$  で  $n(u) = 1$  とした。

表 1 道路網データの概要

	ノード数	リンク数	避難地数
浜松	104, 813	255, 296	432
沼津	44, 980	97, 098	232
静岡	53, 903	132, 888	363

#### (1) 生成したリンクの可視化による評価

提案手法がどのような地点にリンクを生成するかを評価するために、可視化による比較を行った。図 1 の (a) から (c) に、リンク距離上限を  $\Delta = 2^8$  とし、追加リンク本数を  $k = 10$  に設定して求めた  $\mathcal{R}$  における浜松市、沼津市、及び、静岡市での可視化結果を示す。ここで、一般の交差点と道は緑の点とシアン色の線で、避難地を青の点で、結果  $\mathcal{R}$  として選ばれた生成リンクを赤い線で示している。また、図 1 の (d) から (f) に、リンク距離上限を  $\Delta = 2^{13}$  とし、追加リンク本数を  $k = 10$  に設定して求めた  $\mathcal{R}$  における可視化結果を同様に示す。

各都市では、ノード数、リンク数、避難地数、さらに都市の形状など、条件が大幅に異なるにもかかわらず、リンク距離上限  $\Delta = 2^8$  と  $\Delta = 2^{13}$  のそれぞれを比較すると、類似した傾向を読み取ることができる実験結果が得られた。具体的には、形成できる道の長さ (リンク距離上限  $\Delta$ ) が短いときは、市街に作ったほうが有効であり、長いときは山間部に作ったほうが有効であることがわかる。また、 $\Delta = 2^8$  と  $\Delta = 2^{13}$  の場合で、長さは異なるものの、比較的同地点に形成されている道がある。このような道は、他の道と比べて重要度が高いということが読み取れる。静岡と浜松にもその傾向が見られるが、沼津においてはより顕著である。

#### (2) 提案法の計算効率の評価

提案法の計算効率の評価を行うために、条件が異なるいくつかの計算機実験を行い、その計算時間を計測した。図 2 の (a) から (d) に、提案法の計算効率の評価結果を示す。

図 2(a) には、追加リンク本数を  $k = 10$  に設定し、リンク距離上限を  $\Delta = 2^6$  から  $\Delta = 2^{15}$  まで変化させた

ときの提案法の計算時間を示す。図より、 $\Delta = 2^{10}$  程度までは、リンク距離上限が大きくなると計算時間も増大していくのに対し、それ以降は計算時間は減少していき、 $\Delta = 2^{14}$ 以降はほぼ一定で推移することが見て取れる。このような状況が起こる理由を考察するため、浜松市を対象として、Cent. Comp. ステップ、Par. Sel. ステップ、及び、Link Sel. ステップの、それぞれの計算に必要とした時間を計測した。結果を図 2(b) に示す。図より、 $\Delta = 2^{10}$  程度までは、Par. Sel. ステップの計算時間が支配的なことが分かる。すなわち、 $\Delta = 2^{10}$  程度までは、リンク距離上限範囲内の親ノード数が多くなるので、計算時間が増大するが、 $\Delta = 2^{10}$  を超えれば、親ノード集合の中に目的地が含まれるようになり、Par. Sel. ステップにおいて目的関数を最も向上させる最良リンクが決定さ。そして、その後の Link Sel. ステップにおける計算がスキップされた結果として計算時間が減少していく。 $\Delta = 2^{14}$ 以降は、Cent. Comp. ステップならびに Link Sel. ステップが支配的となる。これらのステップの計算量は、 $\Delta$ に強くは依存せず、ほぼ一定の値で推移するため、全体の計算量もほぼ一定で推移している。

図 2(c) には、リンク距離上限を  $\Delta = 2^8$  に設定し、追加リンク本数を  $k = 1$  から 100 まで変化させたときの提案法の計算時間を示す。図より、ネットワークのサイズ(表 1 参照)に依存しつつ、 $k$  が大きくなるのに従い、計算時間も大きくなるのが分かる。図 2(d) には、浜松市において、追加リンク本数を  $k = 1$  または  $k = 10$  に設定し、リンク距離上限を  $\Delta = 2^6$  から  $\Delta = 2^{15}$  まで変化させたとき、Par. Sel. ステップを採用しない単純法との比較結果を示す。図中では、N- で単純法を、P- で提案手法を示している。図より、提案手法は $\Delta$ の値が増大しても計算時間は $2^{10}$ 程度で安定しているが、一方で単純法では $\Delta$ の値の増加とともに、指数関数的に計算時間が増大しており、膨大な計算時間が必要になることが分かる。

### (3) 目的関数の向上度の評価

目的関数の向上度を評価するために、リンク距離上限 $\Delta$ ならびに追加リンク本数 $k$ との関係を、計算機実験により評価した。図 3 の (a) から (d) に、目的関数の向上度の評価結果を示す。ここで、図中の HM, SH, NM は、それぞれ浜松、静岡、沼津を意味している。

リンク距離上限 $\Delta$ と目的関数の値の関係を評価するために、追加リンク本数が 10 のときと 100 のときの計算機実験を行った。図 3(a) には、追加リンク本数を  $k = 10$ 、図 3(b) では  $k = 100$  に設定し、リンク距離上限を  $\Delta = 2^6$  から  $2^{15}$  まで変化させたときの目的関数の向上度を示す。どのグラフにおけるどの都市においても、ある程度 $\Delta$ の値が大きくなると、目的関数の値はそれ以上向上せず、ほぼ一定の値となっている。また、目的関数の値が一定となる $\Delta$ の値は都市毎に異なっているが、その一方で、 $k = 10$ のときと $k = 100$ のときでは、 $\Delta$ の値に大きな差は見られない。このことから、追加リンク本数  $k$  が目的関数の値に与える影響は比較的少ないことが分かる。すなわち、目的関数に与える影響は、都市ごとの道路網の構造の影響が大きいが示唆される。

追加リンク本数 $k$ と目的関数の値の関係を評価するために、 $\Delta = 2^8$ のときと $\Delta = 2^{13}$ のときの計算機実験を行った。図 3(c) には、リンク距離上限を  $\Delta = 2^8$  に設定し、図 3(d) には、リンク距離上限を  $\Delta = 2^{13}$  に設定し、追加リンク本数を  $k = 1$  から 100 まで変化させたときの

目的関数の向上度を示す。これら図より、目的関数の向上度がフラットになる領域はほとんど見られず、どの都市でも追加リンク本数  $k$  が大きくなれば、目的関数は向上していることが分かる。すなわち、どの都市でも、リンク生成により、目的関数が向上する所が多数存在していることが示唆される。

## 5. おわりに

本研究では、災害時を考慮した信頼性の指標として、重み付きグループ近接中心性を発展させた、災害時の住民避難行動分析などで重要な役割を果たし得る「グループ移動信頼性」の概念を提案し、この拡張中心性に基づき、避難地へ到達するまでの平均時間を最小にするように、道路網(ネットワーク)に新たな道(リンク)を追加する問題に取り組んだ。特に本実験では、静岡県の主要 3 都市、浜松市、沼津市、及び、静岡市に着目し、生成可能なリンクの距離に制限を与えたときの特性について評価した結果を示した。その結果、都市に依存しない、共通な特性などが観測されることが分かった。また、提案手法は、リンク距離上限が大きくなった際でも、素朴な方法と比較して高速に解を発見できることも示した。このことは、大規模道路を開発する際などの効率に、強く関係している。今後は、さらに多様なデータでの評価実験などを進める。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C) (No. 17K01302)の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) 全国地震動予測地図 2017 年版,  
[http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/shm\\_report/shm\\_report\\_2017/](http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2017/)
- 2) 平成 22 年度防災白書,  
<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h22/index.htm>
- 3) 南海トラフ地震対策,  
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/index.html>
- 4) 南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告),  
[http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough\\_info.html](http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html)
- 5) 長島 忠美, 中越大地震から一生きる力を一, 日本農村医学会学術総会抄録集 56(0), 374-374, 2007.
- 6) 中山 晶一朗他, 道路交通の信頼性評価, コロナ社, 2014.
- 7) D. Kempe, J. Kleinberg, and E. Tardos “Maximizing the spread of influence through a social network” Theory of Computation, vol.11, pp.105-147, 2015.
- 8) M. E. J. Newman “Networks: An Introduction” Oxford University Press, 2010.
- 9) K. Ohara, K. Saito, M. Kimura and H. Motoda, “Maximizing Network Performance based on Group Centrality by Creating Most Effective k-links, ” Proc. of the 4th IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics(DSAA2017), pp. --, 2017. to appear.
- 10) Open Street Map, <http://www.openstreetmap.org/>
- 11) H. Moritz, “Geodetic reference system 1980, ” Journal of Geodesy, vol. 74, no. 1, pp. 128-133, 2000.