

# 人間関係のネットワークに着目した 津波の防災教育に関する一考察

熊谷 兼太郎<sup>1</sup>・小野 憲司<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部  
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)  
E-mail: kumagai-k27n@mlit.go.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学客員教授 経営管理大学院 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)  
E-mail: ono.kenji.5z@kyoto-u.jp

津波が発生した場合、沿岸地域の住民は迅速に避難して安全を確保する必要がある。そのため、防災教育を継続的に行って津波避難意識を一定水準まで向上・維持する必要がある。本研究は、感染症のSISモデルを参考に、防災教育の情報の伝播・風化の数値シミュレーションを構築することにより、人間関係のネットワークが津波避難意識の向上・維持に及ぼす効果を評価することを試みた。伝播・風化のモデルを提案し、防災教育の対象者として人間関係におけるハブの住民を優先的に抽出したケースと、人間関係を考慮せずランダムに抽出したケースの試算を行った結果、伝播率の大きさなどの十分な検討ができていないものの、設定した条件のもとでは10年間で前者のほうが後者よりも約9%だけ効果が大きくなっていった。

**Key Words :** *knowledge management, tsunami disaster, complex network, numerical model*

## 1. 序論

### (1) 研究の背景

南海トラフ地震などに伴う津波が発生した場合、沿岸地域の住民は迅速に避難して安全を確保する必要がある。そのため、平常時には継続的な防災教育を行って、住民の津波避難意識を一定水準に向上・維持する必要がある。

以下では、防災教育とは、住民を対象とした津波避難意識を啓発する内容の講演会という形態に限定して考える。多数の参加者を募るような大規模に、かつ、一定の期間のあいだで何度も行うような高頻度に防災教育を行えば、住民に及ぼす効果は大きいと考えられる。しかし実際には、防災教育の実施のためには費用などの制約があり、当然ながら、無制限に行うことは出来ない。このことは、住民の津波避難意識が一定水準に向上・維持された状態が実現することを目的として、制約条件のもとで防災教育の適切な規模、対象者の抽出方法及び頻度を求める問題とみなすことができる。

防災教育のなかには、1回限りの短期的な取り組みもある。しかし、本研究ではそれよりも長い、例えば数年～10年程度の中期的な取り組みを考える。そのときに「住民が講演会に参加し、津波避難意識が地域の平均的なレベルよりも高まる。すると、周囲の人とその情報を共有し、

周囲の人の津波避難意識も高まる(伝播)。やがて、時間経過とともに各人の津波避難意識はそれぞれ低下する(風化)」という変化を仮定する。なお、より長期的な、例えば数十年かけて世代を超えた災害文化を醸成していく取り組みもあるが<sup>1)</sup>、本研究では対象としない。

### (2) 既往の研究

伝播・風化に関する既往の研究について述べる。

まず、感染症の数理モデルとしてよく知られたSISモデルとSIRモデル<sup>2)</sup>がある。前者のモデルは、初期状態として全体を健康な人 ( $S$ : Susceptible)、ある感染症に罹患している人 ( $I$ : Infected) の2つの状態に分ける。時間経過とともに、 $S$ は $I$ と接触するとある感染率 $\alpha$ で罹患して $I$ になる。また、 $I$ はある治癒率 $\beta$ で $S$ に戻る。なお、このあと再び罹患する可能性がある。すなわち、この感染症はいったん治っても再感染するような疾患である。例えば、風邪などの比較的症状の軽い疾患が考えられる。

後者のモデルは、初期状態として全体を $S$ 、 $I$ 、治癒して免疫を獲得したり隔離されたりまたは死亡したりといった人 ( $R$ : Removed) の3つの状態に分ける。時間経過とともに、 $S$ は $I$ と接触すると $\alpha$ の確率で罹患して $I$ になる。また、 $I$ は $\beta$ の確率で $R$ になる。再感染しない疾患であり、例えばインフルエンザなどが考えられる。時刻 $t$ の $S$ 、 $I$ の

値をそれぞれ $S(t)$ ,  $I(t)$ とし,  $\tau = \beta/\alpha$ とすると,  $S(0) < \tau$ ならば $I(0)$ がかなり大きな値でも流行が起こらない. また,  $S(0) > \tau$ ならば $I(0)$ がかなり小さな値でも流行が起こることを解析的に示すことが出来る<sup>3)</sup>.  $S(0)$ と $\tau$ の大小関係で流行の有無が決まるので,  $\tau$ は流行の有無に関する閾値であると言える.

Daley and Kendall<sup>4)</sup>は, SIRモデルを噂の伝播へと適用している. 噂を知らない人 ( $S$ ) が噂を知っていて他人に伝えている人 ( $I$ ) と接触して $\alpha$ の確率で $I$ になるのは先ほどと同じである. 噂を知っているが他人に伝えるのを止めている人を $R$ として,  $I$ は $\beta$ の確率で $R$ になる. なお,  $I$ が $R$ になるのは忘却したからではなく, 別の $I$ または $R$ と接触してニュースとしての価値が無いことを知り興味を失った結果であるとしている.

矢守<sup>5)</sup>は, 1982年長崎大水害について発生直後から10年後までの長崎新聞の紙面を収集し, 同水害の月単位の記事量を測定することにより, 風化の速度を調べた. その結果, 記事量が時間とともに指数関数的に減少することを見出した. すなわち, 記事量を対数値で縦軸にとり時間を等間隔で横軸にとって毎月の値をプロットすると, 直線回帰した右下がりの直線とよくフィットするとしている. また, 原子崩壊過程になぞらえて, 風化の崩壊定数 $\lambda$ を $\lambda = 0.037$ と報告している. この成果から,  $t$  (単位: 月) における記事量を $N(t)$ とし,  $\Delta t$ のあいだの記事の変化量を $\Delta N$ とすると

$$\Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t \quad (1)$$

微小時間 $dt$ について,

$$\begin{aligned} dN &= -\lambda \cdot N(t) \cdot dt \\ \therefore \frac{dN}{N(t)} &= -\lambda \cdot dt \end{aligned} \quad (2)$$

両辺を積分して,

$$\begin{aligned} \int \frac{1}{N(t)} dN &= -\lambda \cdot \int dt + c \\ \therefore \log_e N(t) &= -\lambda t + c' \\ N(t) &= e^{-\lambda t + c'} = C e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

ここで,  $c$ ,  $c'$ は積分定数であり,  $C = e^{c'}$ で定数である. 上の式で $t=0$ としたとき $C=N(0)$ であるから,

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式(3)を用いると, 例えば半減期 ( $N(t)/N(0)=0.5$ ) は $t=18.7$ であると確認できる. 災害の発生直後に比べて, 約1年半で記事量が半分減少したことになる. ただし, 矢守は同文献で「災害の「風化」とは単なる忘却の過程ではない. それは, 当該の出来事の意味が人々のコミュニケーションを通して一定の方向への収束し, 共有され, 定着していく過程でもある」とも述べている. すなわち, 風化という現象が単にゼロに戻るのではない可能性を指摘しており, この点は留意が必要である.

これらの既往の研究をふまえると, 情報が伝播・風化するという面に着目して, Daley and Kendall<sup>4)</sup>の検討が参考になる. ただし, 風化の部分については,  $I$ から $R$ になるのではなく,  $I$ から $S$ に戻ったのち再び $I$ になる可能性があると考えられる. それであれば, SIRモデルよりもSISモデルの方がよさそうである. 矢守<sup>5)</sup>の知見は, 津波避難意識の風化の速度について参考になる.

また, 人間関係のネットワークの多くは, 後述するように, ある住民からみて交友関係がある人数 $k$  (図に描いたとき, 各端点から伸びる枝の数に相当する. 以下, この人数のことを, 複雑ネットワーク分野での標準的な用語を用いて「次数」と呼ぶ.) の確率 $p(k)$ の分布がべき則に従うような, スケールフリー性を有している. すなわち, ネットワーク内には $k$ が非常に大きい, いわば人間関係における「ハブ」の位置の住民がいる. その場合, 次数の平均値 $\bar{k}$ 及び分散 $\sigma^2$ を計算して正規分布 $N(\bar{k}, \sigma^2)$ をあてはめてみると, 特に $k$ が十分に大きい部分について,  $N(\bar{k}, \sigma^2)$ よりも実際のほうが多くなる. 仮に, ハブの住民に優先的に防災教育を行えば, ランダムに抽出した住民に行うよりも, 情報が効率的にネットワーク内に伝播されるのではないかと考えた.

以上より, 感染症のSISモデルを防災教育の情報の伝播・風化へと適用した数値シミュレーションを, 人間関係のネットワークを考慮した場合と考慮しない場合とについてそれぞれ行って, その違いを比較することにより, 人間関係のネットワークが津波避難意識の向上・維持に及ぼす効果を評価することを着想した.

### (3) 研究の目的

本研究は, 感染症のSISモデルを参考に, 防災教育の情報の伝播・風化の数値シミュレーションを構築することにより, 人間関係のネットワークが津波避難意識の向上・維持に及ぼす効果を評価することを目的とする.

以下, 2章は本研究で模擬的に用いた人間関係のネットワークについて, 3章は伝播・風化のモデル, 試算の結果などについて述べる. 4章は結論である.

図-1 Newman<sup>7)</sup>の複雑ネットワーク

## 2. 人間関係のネットワーク

### (1) 定義

増田・今野<sup>6)</sup>は、「人間関係のネットワークのほとんどは、スモールワールド性を持ち、多くがスケールフリー性をもつ」と指摘している。ここで、ネットワークの平均距離を $L$ 、クラスター係数を $C$ とする。文献6)は、「スモールワールド性をもつ」とは $L$ が小さく $C$ が大きいこととしている。また、「スケールフリー性をもつ」とは、 $p(k)$ の分布がべき則に従うことである。すなわち、

$$p(k) \propto k^{-\gamma} \quad (4)$$

なる関係が成立することである。ここで、 $\propto$ は比例していることを示し、また、 $\gamma$ は正の実数でべき指数と呼ばれる。式(4)の関係を満たしているときは、グラフの横軸及び縦軸にそれぞれ $k$ 及び $p(k)$ を対数目盛でとった図を描くと、プロットした点が $\gamma$ の傾きで直線状に並ぶ。

### (2) 利用したネットワーク

図-1に、複雑ネットワークの例を示す。これは、Newman<sup>7)</sup>が複雑ネットワーク分野の2つのレビュー論文<sup>8)</sup>に基づいて、研究論文の共著関係を整理したものである。文献7)には、その成果の図が掲載されるとともに、詳細はウェブサイト<sup>10)</sup>を参照するように、と記載されている。図-1はそのウェブサイトに掲載されている図を読み取って隣接行列を作成し、統計ソフトウェアRで可視化したものである。なおこの際、ネットワークの頂点を

図上に配置するための方法として、代表的手法の一つであるKamada and Kawai<sup>11)</sup>の手法を用いた。

図中の頂点(ノード) $n$ は379個あり、それぞれが研究者を示している。ノードの下に付された数字は、順不同で割り当てられたID番号である。ある2つのノードに共著関係がある場合、ノードとノードのあいだに線(エッジ)が引かれている。エッジの数は928本あった。従って、 $\bar{k} = 928 \times 2 \div 379 \approx 4.90$ となる。すなわち、平均的には5人程度と共著関係があると言える。なお、計算式の左辺で2倍する理由は、 $i \neq j$ のとき頂点 $i$ から頂点 $j$ への共著関係があつてエッジが存在するならば、 $j$ から $i$ に向かう共著関係も同時に成立するためである。 $k$ の最小値は1であった。すなわち、ネットワークから孤立している $k = 0$ の人はいない。最大値は32であった。また、全てのノードは何らかのかたちで一つにつながっている。すなわち、他から完全に分断された子ネットワークは存在しない。

$L$ の値を求めると、 $L = 6.05$ であった。この値は、文献6)が紹介するミルグラムらの手紙を使った実験( $L = 6$ )、ワッツらの電子メールを使った実験( $L = 5$ または7)と整合的であるように見える。ただし、同文献6)は「 $L$ が小さい」とは下の式(5)の性質を有していることであり、 $L$ の絶対値そのものが重要ではないと指摘している。

$$L \propto \log n \quad (5)$$

すなわち、 $n$ が指数的に増加しても $L$ は線形的にしか増加しないことが要件であると述べている。この点は、現時

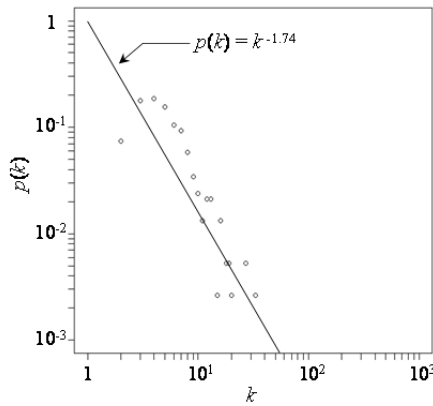


図-2 次数の確率分布

点では十分な検討は出来ておらず今後の課題である。

$C$ の値を求めると、 $C=0.426$ であった。文献(6)によれば、まず、元のネットワークの $n$ 及び各点の次数を変えずにエッジを無作為につなぎかえることにより、より”ランダムな”ネットワークを発生させる。そうして生成した新たなネットワークのクラスター係数 $C_{random}$ と、元の $C$ とを比較する。そして、 $C_{random}$ に比べて $C$ が有意に大きければ、 $C$ が大きいと評価すればいいとしている。この点は、現時点では十分な検討は出来ておらず今後の課題である。ただし、矢久保<sup>12)</sup>が多くの分野における複雑ネットワークについて $C_{random}$ を計算して表にまとめている。それによると、 $C_{random}$ の値は最大でもたかだか $10^2$ のオーダーに留まっている。そこで、今回の $C$ の値(0.426)は有意に大きいとみなした。

$L$ と $C$ の大きさについての検討をふまえて、現時点では十分な検討が出来ていない部分があるものの、図-1のネットワークはスモールワールド性をもつとみなした。

図-2は、このネットワークの $p(k)$ の分布である。横軸及び縦軸に対数目盛でそれぞれ $k$ 及び $p(k)$ をとり、白丸印でプロットした。また、Clauset et al.<sup>13)</sup>の方法により、 $\gamma$ の値を求めると $\gamma=1.74$ であった。図中に、 $(k, p(k))=(1, 1)$ を通り傾き-1.74である直線を記した。その結果、プロットした点は、概ね直線に沿って並んでいた。すなわち、 $p(k)$ の分布は概ねべき則に従っていた。これをふまえ、このネットワークはスケールフリー性をもつとみなした。

なお、 $L$ 、 $C$ 及び $\gamma$ の値の算出、 $p(k)$ の分布の描画はいずれも統計ソフトウェアを用いて行った。

以上より、図-1のネットワークは人間関係のネットワークと類似しているとみなした。現段階では、沿岸地域の住民について、人間関係のネットワークの情報が得られていないため、3章の分析ではこのネットワークを便宜的に利用する。ただし、あくまで便宜的に利用するものであり、実際の人間関係のネットワークについて情報を収集することが今後必要である。

表-1  $I$ から $S$ になる確率 ( $\beta$ )

Time elapsed, unit in year	$1-\beta$	$\beta$
1	0.641	0.359
2	0.411	0.589
3	0.264	0.736
4	0.169	0.831
5	0.109	0.891
6	0.070	0.930
7	0.045	0.955
8	0.029	0.971
9	0.018	0.982
10	0.012	0.988

### 3. 津波避難意識の変化のモデル

#### (1) 伝播・風化のモデル

感染症のSISモデルを参考に、防災教育の情報の伝播・風化の数値シミュレーションを構築した。

伝播のモデルは、SISモデルを参考に、防災教育に参加するなどして情報を知った人 ( $I$ ) が、人間関係のネットワークを通じて、情報を知らない人 ( $S$ ) に確率 $\alpha$ で伝えることとした。SISモデルとの違いは、情報が伝わる可能性がある人を、ネットワーク上でエッジを介して直接に繋がっている人だけに限定している点である。 $\alpha$ の値は参考となる文献が無かったので、一律に20%と仮定した。その理由は、図-1のネットワークの $\bar{k}$ が5人程度であり、そのうち少なくとも1人には、後述する時間ステップが1つ進むあいだに情報が伝播することを仮定したためである。また、 $\alpha$ の平均的な大きさの問題だけでなく、 $\alpha$ は人によって異なるであろうから、分布も適切に考慮する必要がある。今回は基礎的検討であるため一律に仮定したが、こうした点は今後の課題である。なお、講演会に参加していない人でも、 $I$ になれば $S$ に情報を伝えることができる。

また、風化のモデルは、時間経過とともに、 $I$ が確率 $\beta$ で $S$ に戻るとした。 $\beta$ の値は、矢守<sup>9)</sup>を参考に、式(3)で $\lambda=0.037$ として表-1のとおり設定した。例えば、 $I$ になってから1年後には35.9%の確率で $S$ に戻る。プログラム上では、時間ステップが1つ進むたびに $I$ の一人ひとりに乱数 $r$  ( $0 \leq r \leq 1$ ) を1つずつ発生させて、 $r \leq 0.359$ の場合は $I$ から $S$ に戻し、 $0.359 < r$ の場合は $I$ のまま留めるというように実装した。

以上のとおり、時間ステップごとに、防災教育による $I$ の増加、伝播・風化による $S$ と $I$ とのあいだの状態変化を行ったあと、時刻 $t$ における $n$ に対する $S$ の人数の割合 $\hat{S}(t)$ 、 $I$ の人数の割合 $\hat{I}(t)$ をそれぞれ出力する。それを必要な時間ステップの分だけ繰り返した。

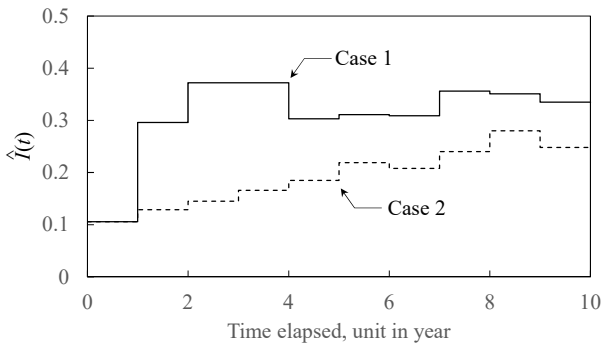


図-3 試算の結果

なお、プログラミング言語はFortranであり、Intel Parallel Studio XE 2017 Update 2 for FortranをMicrosoft Visual Studio Professional 2013に組み込んだ環境で作成した。

## (2) 試算したケース

試算したのは、2ケースである。まずケース1は、防災教育の対象者として人間関係におけるハブの住民を優先的に抽出した。具体的には、 $S$ の状態の人のリストを作っておき、 $k$ の大きい人から順に防災教育の対象者とする仕組みである。次にケース2は、人間関係を考慮せず順不同に割り当てられたID番号に基づいてランダムに抽出した。

その他の条件は、2つのケースとも共通である。人間関係のネットワークは、2章の複雑ネットワーク ( $n = 379$ ) を用いた。計算の対象期間は10年間とし ( $0 \leq t \leq 10$ )、時間ステップ  $\Delta t$  は1年とした。初期状態 ( $t = 0$ ) では、全員を $S$ の状態とする。防災教育は $t = 0$ を第一回目として以後2年に1回、各回40人を集めて行う。なおこの人数は、過去に著者が行った防災教育の際の参加人数<sup>14)</sup>を参考に設定した。

## (3) 試算の結果

図-3に、試算の結果を示す。図は、横軸に経過時間(単位：年)をとり、縦軸に $\hat{i}(t)$ をとっている。縦軸の値が大きいほど防災教育の情報を知っている人が多いことを示すので、津波避難意識を高めるという観点では好ましいことになる。図中の実線が、ケース1の結果を示す。初めの年は、 $t=0$ で実施した初回の防災教育に参加した40人だけが $I$ の状態であり、地域人口に占める割合は10.6%である。1年経過すると、伝播の効果などによって29.6%となった。その後は、増減を繰り返しながら僅かに増えて10年目には33.5%となった。一方、図中の破線はケース2の結果を示す。初年から1年経過時点での伸びはケース1に比べて小さいものの、概ね一定のペースで緩やかに増加を続け、10年目には24.8%となった。

以上のように、今回設定した条件のもとでは、人間関

係のネットワークを考慮した場合の方が考慮しない場合に比べて、10年目に約9%大きい結果となった。このことは、人間関係のネットワークが津波避難意識の向上・維持に及ぼす効果と考えているが、 $\alpha$ の平均的な大きさ及び分布、防災教育の規模・頻度などについて十分な検討ができていないため、今後の検討が必要である。

以下、考えられる課題を順不同で挙げる。

まず、ここまでの文中で既に指摘したが、実際の人間関係のネットワークについて情報を収集すること、及び、 $\alpha$ の平均的な大きさ及び分布を適切に推定する方法が課題である。また、矢守<sup>9)</sup>の指摘する、風化という現象が単にゼロに戻るのではない可能性について留意が必要である。

今回の検討では、ネットワーク上の住民は他地域とは没交渉で影響を受けないことにしている。しかし、他地域で大規模な津波などが起こると、それによって津波避難意識も変化すると考えられる。そうした効果も考慮する必要があるかもしれない。

また、著者のうち小野は、国土交通省近畿地方整備局とともに和歌山県沿岸域において津波避難意識などを把握するためのアンケートをこれまでに行っており、その結果を基礎的資料として活用することが考えられる。

## 4. 結論

本研究は、防災教育の情報の伝播・風化の数値シミュレーションを構築し、人間関係のネットワークを考慮した場合と考慮しない場合とについてそれぞれ行ってその違いを比較することにより、人間関係のネットワークが津波避難意識の向上・維持に及ぼす効果を評価することを試みた。

その結果、感染症のSISモデルを参考に、伝播・風化のモデルを構築した。また、防災教育の対象者として人間関係におけるハブの住民を優先的に抽出したケースと、人間関係を考慮せずランダムに抽出したケースの試算を行い、設定した条件のもとでは10年間で前者のほうが後者よりも約9%だけ津波避難意識の向上・維持に及ぼす効果が大きくなっていった。ただし、伝播率の大きさ及び分布、防災教育の規模・頻度などについて十分な検討ができていない。そうした点も含めて、課題を整理して示した。

**謝辞**：国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋・防災研究部・佐々木綾さんに、人間関係のネットワークのデータ作成にご協力頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 大野隆造：地震と人間，朝倉書店，pp. 51-52，2007.
- 2) Kermack W. O. and McKendrick A. G.: A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 115(772), pp. 700-721, 1927.
- 3) 佐藤總夫：自然の数理と社会の数理－微分方程式で解析する II，日本評論社，pp. 165-182，1987.
- 4) Daley, D. J. and Kendall D. G.: Epidemics and Rumours, *Nature*, 204, pp. 1118, 1964.
- 5) 矢守克也：災害の「風化」に関する基礎的研究－1982 年長崎大水害を事例として－，*実験社会心理学研究*, 36(1), pp. 20-31, 1996.
- 6) 増田直紀，今野紀雄：複雑ネットワーク 基礎から応用まで，近代科学社，pp. 51-55，2010.
- 7) Newman, M. E. J.: Finding community structure in networks using the eigenvectors of matrices, *Physical Review E*, 74, Article No. 036104, 2006.
- 8) Boccaletti S., Latora V., Moreno Y., Chavez M. and Hwang D.-U.: Complex networks: Structure and dynamics, *Physics Reports*, 424(4-5), pp. 175-308, 2006.
- 9) Newman, M. E. J.: The Structure and Function of Complex Network, *SIAM Review*, 45(2), pp. 167-256, 2003.
- 10) Newman, M. E. J.: Community Centrality, <http://www-personal.umich.edu/~mejn/centrality/>, accessed at 1, March, 2019.
- 11) Kamada, T. and Kawai S.: An Algorithm for Drawing General Undirected Graphs. *Information Processing Letters*, 31/1, pp. 7-15, 1989.
- 12) 矢久保孝介：複雑ネットワークとその構造，共立出版株式会社，pp. 211-257，2013.
- 13) Clauset A., Shalizi C. R. and Newman M. E. J.: Power-law distributions in empirical data, *SIAM Review*, 51(4), pp. 661-703, 2009.
- 14) 熊谷兼太郎，小田勝也，片田敏孝，本間基寛：津波リスクコミュニケーションの効果の測定方法及び測定事例，*土木計画学研究・講演集*，土木学会，38，No. 121，2008.

(2019.3.10 受付)

## A STUDY ON INFLUENCE OF SOCIAL NETWORK ON KNOWLEDGE MANAGEMENT OF TSUNAMI DISASTER

Kentaro KUMAGAI and Kenji ONO

In the event of a tsunami, residents of coastal areas need to evacuate quickly to ensure their safety. It is necessary to continuously improve disaster prevention education and maintain tsunami literacy to a certain level. This study tries to evaluate the effect of complex network of human relations on maintenance of tsunami knowledge, by constructing numerical simulation of information transmission with reference to SIS model for disease infection.

As a result, we proposed a model of propagation and disintegration. And two cases of trial calculation were conducted, such as a case where the residents of the hub are preferentially extracted, and, a case extracted randomly without considering human relations. Although it was not sufficiently studied effects of simulation parameters, the former case was about 9% more effective than the latter case, according to the simulation for 10 years.