災害シミュレータによるインフラ被害の可視化とその活用

○漆原史也　吉田壮一郎　岩崎翔吾　柳沢隆己　小森健一郎　市川学　中井豊（芝浦工業大学）

Visualization of damage to infrastructure and use by disaster simulator

* F.Urushibara, S.Yoshida, S.Iwasaki, R.Yanagisawa　K.Komori and M.Ichikawa and Y.Nakai (Shibaura Institute of Technology)

概要－ 大規模災害において，インフラ系には甚大な被害が生じている．その結果，被災地の 広範囲かつ長時間にわたり，停電や断水，通信障害やガス停止等が発生する．これらの災害に対する対応力を向上するために訓練や研修が繰り返し行われているが，真の対応力強化のためには 単一シナリオではなく様々な被災シナリオを用いて行う必要がある．また，その被災シナリオに おける復旧や救援の対応力向上も必要になる．そのため本研究では各インフラに用いるデータを入手，作成を行い，訓練用災害シミュレータを作成することにより，最悪の被害を想定した 4 つのインフラの被害率の算出を行う．この結果を，地理情報システムを利用することで可視化をすることにより，被害の大小を把握することが可能となる．

キーワード: インフラ，災害，シミュレータ

1　はじめに

1.1 研究背景

日本は自然災害の多い地域であり，過去には阪神淡路大震災，最近では東日本大震災など，大きな自然災害が発生しやすい地域に位置している．世界で発生している地震の約 10 分の 1 が発生しており，世界の M6 以上の地震の内約 20%が日本で発生している．他の自然災害も発生しやすく，発災付近の地域では電力・水道・ガス・通信・交通の生活インフラに被害が及んだ場合，社会に大きな影響を与える．近い将来，南海トラフ地震や首都直下地震などの自然災害による甚大な被害が予想されるが，実際に大規模な災害を起こし，訓練や研修を行うことはできない．そのため，被害情報を疑似的に作り出し，実際に起きた際にどのような行動を起こすべきなのかを事前に検討するとともに，被害を軽減するための具体的な対策を立てることが必要になると考えられる．

1.2 研究目的

実際に自然災害が起きた際にどの範囲でインフラの停止が発生するかを示すシミュレータを構築する．

また，災害シミュレータを用いた被災者・救助者それぞれの補助を担う活用法を見出す．

2　災害時のインフラ被害の現状

2.1 全般

東日本大震災の場合，ライフライン被害は従来の被害想定よりも大きく異なった．実際に，想定した震度分布よりも広範囲に渡ったことにより，電力は高域で大規模な停電が発生し，青森・岩手・宮城・秋田での停電率は 95%以上であった [1]．ガスは広域で供給不能，水道は広域で断水が発生，通信は，固定回線において約 190 万回線が被災，各通信会社で最大 80~90%の通信規制を行った．

また，基地局は約 2 万 9 千局が停止した [2]．

2.2 電力被害の現状

電力は火力，水力，原子力などの発電所から送電線を通り変電所に送られ，変電所から配電線を通り各家庭へ送られる．実際に，東日本大震災の際に広域停電が起きた要因は，送電所や変電所の短絡・地絡がほぼ同時に多数発生するとともに，碍子の損害などによる架空送電設備被害，変電所の停止によって引き起こされた．

2.3 都市ガス供給の現状

都市ガスの供給方法として，まず，製造所で作り出されたガスが高圧で送りだされ，整圧器（ガバナ）で中圧に減圧され，大規模工場・施設に届けられる．一般家庭や商業施設には，さらに減圧された低圧ガスが運ばれる．高圧・中圧ガス導管は，阪神・淡路大震災，東日本大震災クラスの大地震にも十分耐えられる構造となっており，基本的にガスの供給を停止することはない [3]．そこで，本研究では比較的破損確率が高い低圧ガバナに着目した．

Fig.1 は公共インフラの復旧速度を比較した図である．都市ガス事業の復旧速度は著しく低い状況が続いている．LP ガスは個別供給のため，災害時には素早く点検・補修ができるので早期復旧が可能である一方で，都市ガスはエリア供給であり，相対的に復旧の時間を要してしまうことが課題になっている [4]．

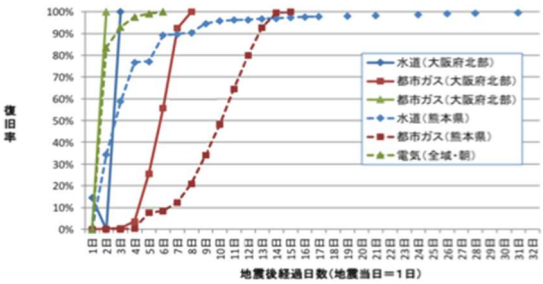

Fig.1 供給系ライフラインの復旧過程の比較 [4]

2.4 水道インフラの現状

自然災害の発災地域ではインフラ系に甚大な被害が生じている．そのため，日本は様々な公共インフラの耐震化を進めているが水道事業の耐震化率は低い状況が続いている（Fig.2）．この原因として水道事業主体が異なるため耐震化の進み具合に差があり，長期間施設を停止する必要があるため改修が困難であることである [5]．

PG0002/20/0000-0098 © 2020 SICE

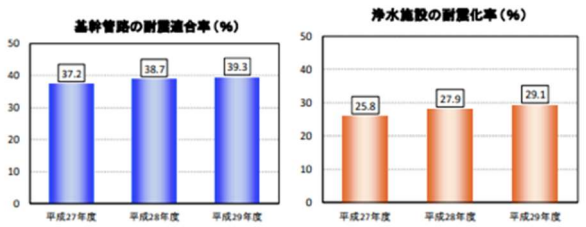

Fig.2 水道施設の耐震化率 5)

3　災害シミュレータの作成手法

3.1 電力インフラ

3.1.1　電力被害の定義

災害シミュレータを構築するにあたり，本研究における電力被害とは，地震や台風など広範囲に影響を及ぼす自然災害による発電所の停止，及び送配電線や変電所の被害により引き起こされる停電とする．

3.1.2　関連データの作成

地理情報システム QGIS，ArcGIS を使用し，電力網を作成する．作成において，各電力会社が公開している電力系統図，オープンデータを利用し，発電所や変電所の位置を取得し，都道府県毎にオープンストリートマップ上にマッピングし電力グリッドのベースを作成する．

3.1.3　電力グリッドの作成方法

公表されていない低電圧のデータは，変電所と配電先となる各地域を直接結ぶことにより仮想的に表現する．仮想的に表現する単位は小学校区単位を利用している．結び方は各ポイントから最近接のポイントに直線を結び，変電所と結ばれた直線を 1 つのまとまりとみなす．

3.1.4　停電の考え方

本研究では，「大元の変電所の破損による電力供給停止」，「小学校区の重心を配電先として置いたポイントの破損による電力供給停止」により停電が引き起こされると想定する．被害判定法は，各変電所の破損判定を行い，被害を受けた変電所に接続されているまとまりは全て停止させる．次に各ポイントの区域で破損判定を行い，破損された区域以下に接続されているポイント区域を停止する．Fig.3 に電力設備マッピング図，Fig.4 に電力被害のフローを示す．

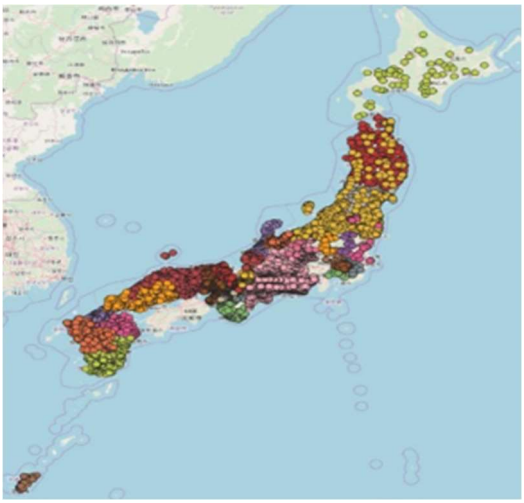

Fig.3 電力設備マッピング図

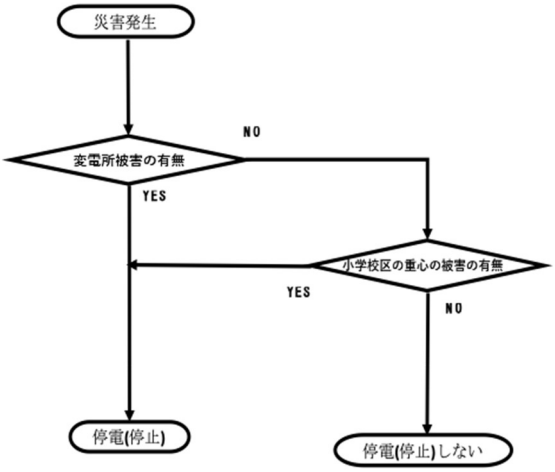

Fig.4 電力被害の流れ

3.2　ガスインフラ

3.2.1　ガスネットワークの作成

ガバナの正確な供給区域を特定することができないため，小学校区の重心に分配ポイントがありその小学校区内に供給すると仮定し，小学校区ごとに供給停止確率を求める．各小学校区の人口に基づいて設置されたガバナから，地理情報システムを用い算出した重心に向かい，最近傍のものを結びつけ近似的にガスグリッドを再現する．(Fig.5)

Fig.5 ガスグリッド図

なお，本シミュレーションで用いた按分・設置したガバナの分布を Fig.6 に示す.

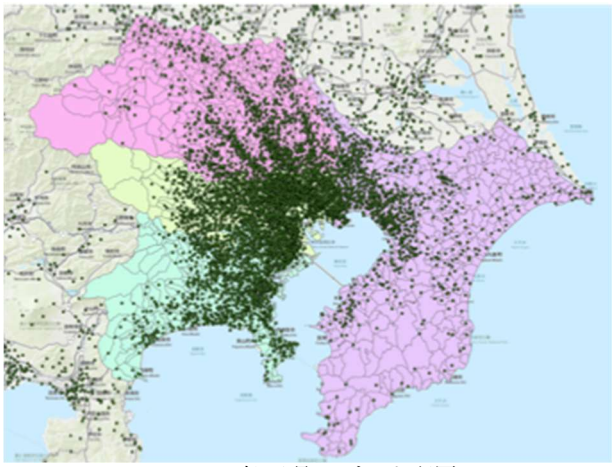

Fig.6 一都三県のガバナ配置

3.2.2 ガス供給停止の考え方

ガス施設の停止手法として，施設(ガスタンク)および，ガス管に分け停止確率をフラジリティ関数（Table1）により決定する[6].

今回のシミュレータでは座屈発生確率は旧基準(準特定)を用いる. ガス管の場合は，配管からの漏洩確率は，既存研究を参考に本体の小破漏洩の 5 倍(液状化危険大)と仮定する.

Table1 フラジリティ確率[6]

震度	計測震度	地表加速度	座屈発生確率		
			新法	旧法・旧基準	準特定・旧基準
5強	5.0	107	1.4E−09	3.0E−05	5.3E−04
	5.1	120	6.3E−09	7.8E−05	1.2E−03
	5.2	135	2.7E−08	1.9E−04	2.5E−03
	5.3	151	1.1E−07	4.5E−04	4.9E−03
	5.4	170	4.3E−07	1.0E−03	9.4E−03
6弱	5.5	191	1.5E−06	2.1E−03	1.7E−02
	5.6	214	5.1E−06	4.3E−03	2.9E−02
	5.7	240	1.6E−05	8.2E−03	4.8E−02
	5.8	269	4.8E−05	1.5E−02	7.6E−02
	5.9	302	1.3E−04	2.6E−02	1.2E−01
6強	6.0	339	3.5E−04	4.4E−02	1.7E−01
	6.1	380	8.7E−04	7.0E−02	2.3E−01
	6.2	427	2.0E−03	1.1E−01	3.1E−01
	6.3	479	4.4E−03	1.5E−01	3.9E−01
	6.4	537	9.0E−03	2.2E−01	4.8E−01

3.2.3 東京ガスの供給ブロック

Fig.7 は東京ガスの供給ブロック図(東京地区等)[7]を参考に地理情報システムを使用しポリゴンを作成したものである. 各ポリゴンと重複する小学校区の最大震度における平均値をブロックの停止確率とし，可視化を行う.

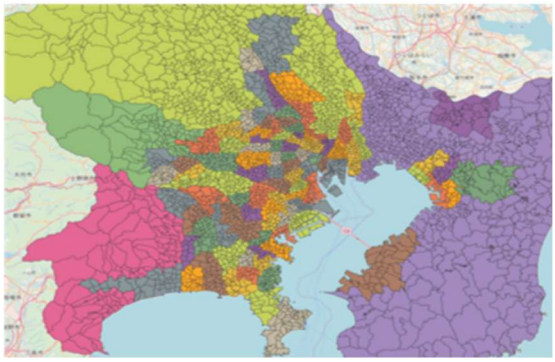

Fig.7 東京ガス供給ブロック図(東京地区等)

3.3 水道インフラ

3.3.1 水道ネットワークの作成

水道インフラのシステムを構築するには水道管の敷設状況や正確な施設の位置情報が必要となるが，データの非開示やフォーマットの不適合性から再現することは不可能である. そのため Fig.8 のようなシステムを想定した上で水道ネットワークを仮に再現をする. 浄水場の給水区域はその浄水場がある市区町村とし，市区町村の重心に送配水施設等の貯留施設が設定されるとする. そして各小学校区の重心へと接続し小学校区全域を最終的な供給エリアとする.

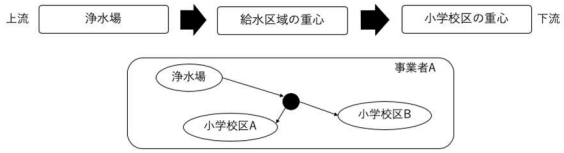

Fig.8 作成した水道システム

3.3.2 断水の考え方

国土数値情報のデータを地理情報システムに入力し，断水アルゴリズム（Fig.9）より断水率の計算を行い，結果を小学校区単位で出力する.

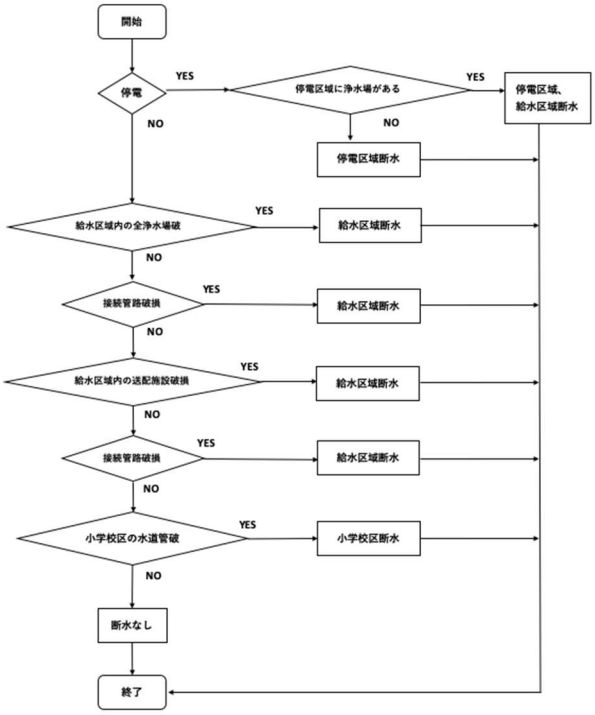

Fig.9 断水アルゴリズム

電力により送水するため，停電地域に水道施設がある場合は，機能が停止する. そして各家庭へも電力で送水するため，施設が停止しない場合も停電区域は断水する. 各市区町村に浄水場が複数存在する場合, 1 つが破損しても残りの浄水場が給水を続けるため断水が起こることはない.

各施設の破損確率[8]は，震度 4〜5 弱で 1%，5 強〜6 弱

で1.6%，6強～7で6.2%とする．

水道管路の計算に関しては，まず計測震度Ｉを最大加速度α[gal]に変換し管路被害率を出す．

$$\alpha = 10^{\left(\frac{I-0.94}{2}\right)} \qquad (1)$$

管体被害率$R(\alpha) = 2.88 \times 10^{-6} \times (\alpha - 100)^{1.97}$と属具被害率$R_z(\alpha) = 3.90 \times 10^{-5} \times (\alpha - 100)^{1.33}$を(いずれも[件/km])足し合わせた管路被害率 X[%]が算出できる[9]．これより，川上[10]による管路被害率と断水率Y[%]の関係を用いて，

$$Y = 1/(1 + 0.0473X^{-1.61}) \qquad (2)$$

より断水率Yを算出する．

3.4 通信インフラ

3.4.1 通信ネットワークの作成

通信インフラに関しては，無線通信に重点を置く．また，基地局・交換局の正確な位置を把握することは困難と判断した．したがって，交換局といった中継があることは本研究では除外し，基地局が単体で通信を担っていると仮定する．

まず，小学校区の境界データ，5次メッシュの人口統計データ，通信インフラとして扱う基地局のデータを準備する．その境界データと統計データにより，各小学校区の人口密度比を算出する．それにより人口密度比*全国総基地局数[11]で基地局数を各小学校区に分配する．その際，基地局数が10以下の小学校区があり，その数で一つの小学校区をカバーするのは現実的でないとし，その小学校区すべてに10足すこととした． Fig.10はデータの一部となる．

	ID	SNM	kitikyoku
1	111011001	指扇小学校	42
2	111011002	馬宮東小学校	18
3	111011003	馬宮西小学校	15
4	111011004	植水小学校	15
5	111011005	大宮西小学校	43
6	111011006	栄小学校	323
7	111011007	宮前小学校	87
8	111011008	指扇北小学校	11
9	111021001	東大成小学校	79
10	111021002	日進小学校	75
11	111021003	日進北小学校	63
12	111021004	宮原小学校	37

Fig.10 基地局のデータ(例)

3.4.2 停波の考え方

上記で作成したデータを使用し，通信インフラの被害の出力を行う．

通信被害の主な要因は停電であり，設備の倒壊が続く．したがって，停電による停波は電力の出力結果と照らし合わせることで求める．また，倒壊に関しては，Fig.11に示すアルゴリズムで確率的にシミュレートする．

確率については，過去災害による電線の被害率を代替として使用した[12]．

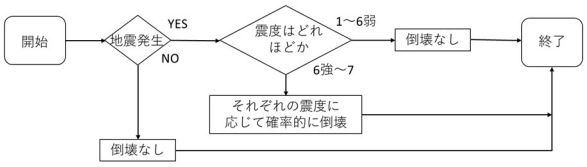

Fig.11 基地局の倒壊のアルゴリズム

4 災害シミュレータの実行結果

首都直下地震を想定した場合の災害シミュレータの4つのインフラの実行結果を示す．使用している震度データは， 震源地東京湾北部， 最大震度6.4， 最小震度4.3のデータである．また，Fig.12はそのデータの一都三県の分布図である．

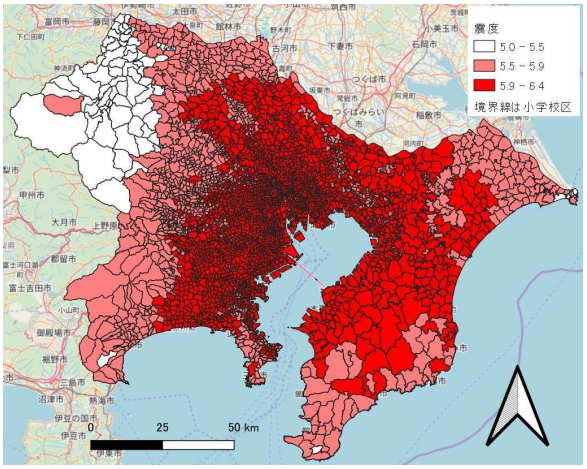

Fig.12 震度の分布図

4.1 電力インフラの結果

Fig.13は停止した区域を赤，それ以外を白で表現したものである．

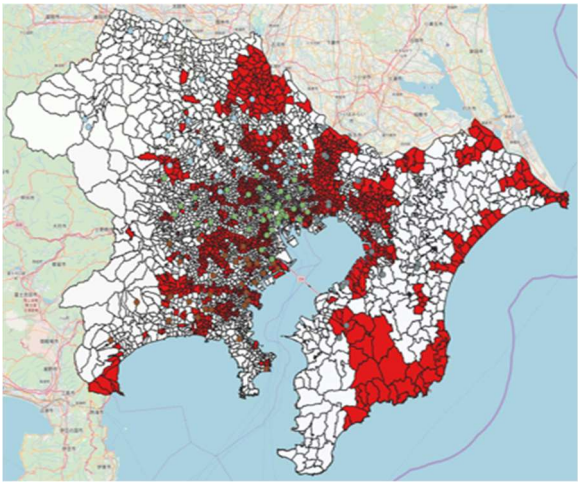

Fig.13 一都三県の停電予測図

4.2 ガスインフラの結果

Fig.14 は小学校区単位のガスの供給停止確率を示したものである．濃赤に近づくほど確率は高くなる．

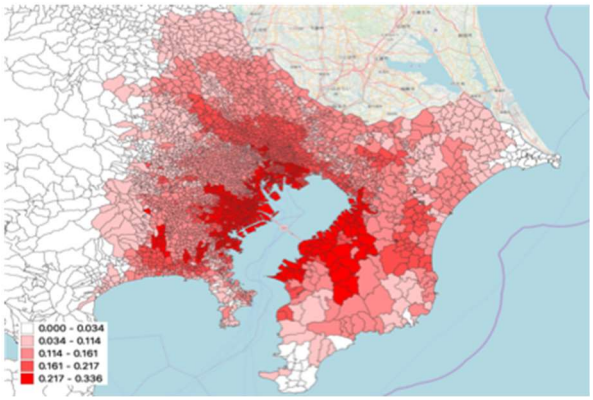

Fig.14 一都三県のガス供給停止確率

また，Fig.15 は東京ガス供給ブロック（東京地区等）[7]ごとの停止確率である．

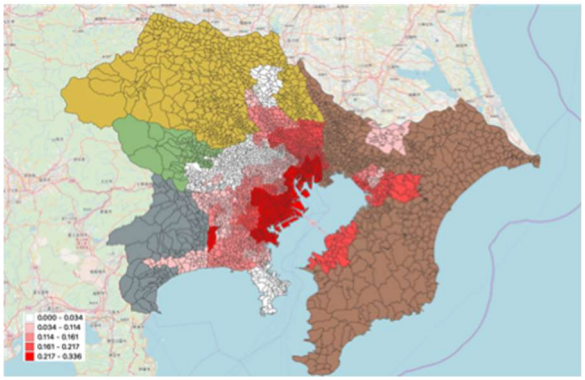

Fig.15 一都三県の各供給ブロックの供給停止確率

4.3 水道インフラの結果

Fig.16 は断水率を可視化したものである．確率を赤の濃淡で表しており濃ければ断水しやすいということになる．

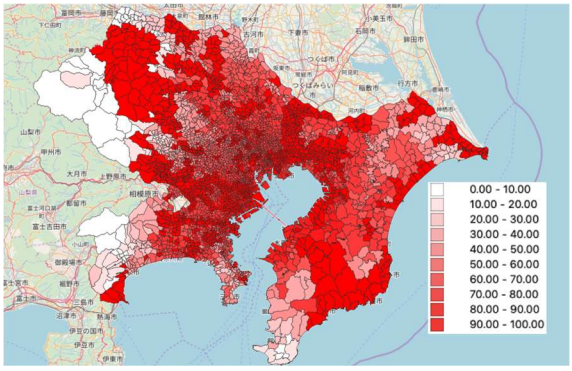

Fig.16 一都三県の断水率

4.4 通信インフラの結果

Fig.17 は，基地局が倒壊したことによる停波地区を可視化したものである．

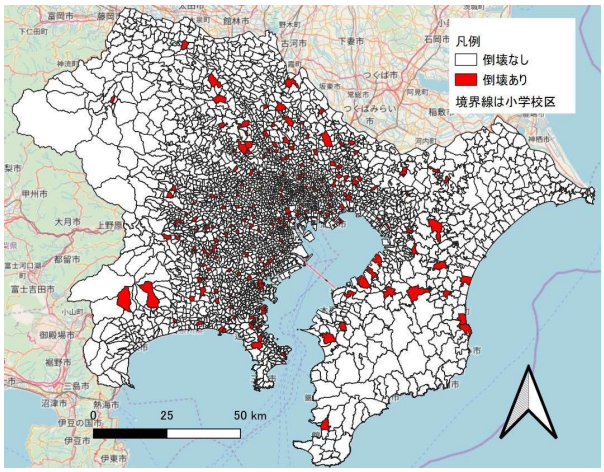

Fig.17 倒壊による停波エリア

また，Fig.18 は倒壊と停電による停波地区を可視化したものである．

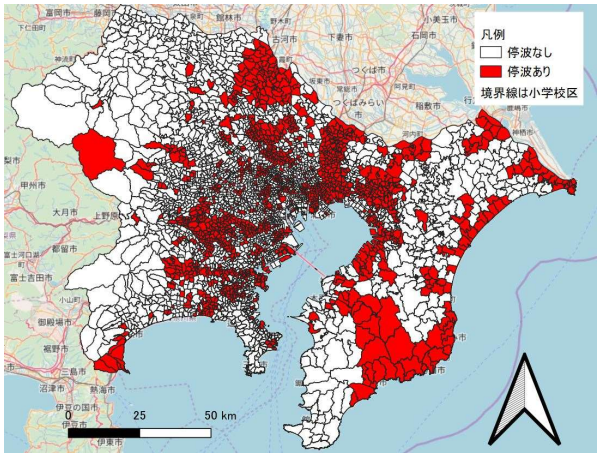

Fig.18 停電と倒壊による停波エリア

これらより，倒壊のみの被害と停電も取り入れた被害とでは，停波の規模に大きな差が出ていることがわかる．

5 シミュレータ結果の活用

上記までは，各インフラの被害状況を例示した．以降は，インフラの被害が生活にどの程度の影響を与えるか，給水不足量と被災地区の不便度を例にとって検討を進める．

6 ハフモデルを用いた避難所の給水量の推定

6.1 避難所の給水量の算出方法

埼玉県新座市の 32 個の避難所を対象とし，当日，1 日後と 1 週間後について避難所分析を行う．

ここで，各避難所に給水可能かを収容率[%]より計算することができる[13]．この値が 100 を超えると避難者全員への給水が困難となる．収容率 = 避難者数/収容能力 × 100で求め，収容能力については(延床面積 × 有効率)/2 で算出できる．有効率は学校が 0.5，体育館が 0.8 である．

6.2 避難者数の算出方法

全避難者のうち避難所へ行く人は当日・1 日後は60%，1 週間後は 50%である. 全避難者は，

$$(\text{全倒壊数} + 0.13 \times \text{半倒壊数}) \times 1\text{棟の平均人員} \times \text{断水人口} \times \text{困窮度}$$

で計算する [14]. 断水人口は小学校区人口×断水率，困窮度は当日・1 日後は 0 で，1 週間後は 0.25 となる. 倒壊数は埼玉県が予測したデータを用いる. 1 棟の平均人員については，

$$\frac{((1\text{戸建平均人員} \times 1\text{戸建数}) + \text{集合住宅に住む人数})}{(1\text{戸建数} + \text{集合住宅数})}$$

より計算する. また，集合住宅に住む人数を求めるのに階数別戸数と階数別人員の平均値を用いて算出した [15]. 集合住宅数を 29847[戸]，集合住宅平均人員を 2.07[人]として Table2 に計算結果を示す. これより新座市の 1 棟の平均人員は約 14.93 人である. この数値より避難者数を求める.

Table2 共同住宅の階数別住居者数 [15]

階数[階]	戸数[戸]	合計戸数[戸]	合計人数[人]
1～2	11939	65665	135598
3	7462	74620	154090
4	4477	71920	148515
5	2985	71632	147920
6～7	1492	46252	95510
8～10	895	39380	81320
11～14	597	46566	96159

なお, 新座市全体の断水率は平均をとり 56.25%とした. この結果より，当日, 1 日後は 1290 人，1 週間後は 12422 人が避難所へ向かう.

6.3 ハフモデルによる避難所選択

ハフモデルは商圏分析に用いられるが，坂田 [16]が避難所選択行動への適応が可能であるとする. 新座市の小学校区の重心から避難限界距離 1.5km のバッファ円を適用した. また, 新座市によれば, 新座市に住む人は基本的に, 新座市内の避難所に行くことになっているため，バッファ円外の他市区町村の避難所については除外した. Fig.19 にバッファ円と避難所（赤）と重心（緑），直線距離を地理情報システムに入力したものを示す.

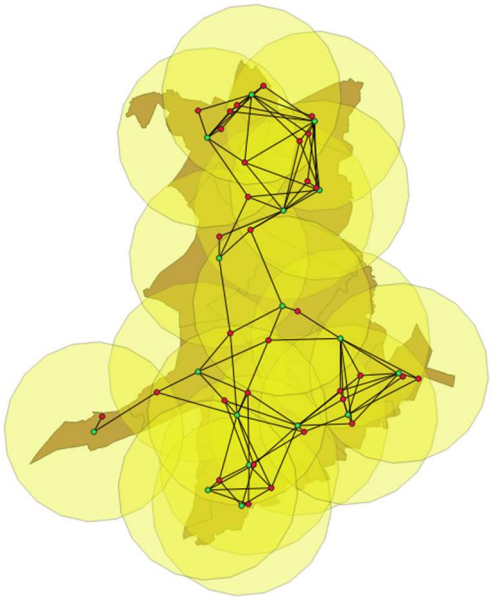

Fig.19 新座市のバッファ円と直線距離

6.4 シミュレーション結果

生命維持に必要な最低応急給水量 3[日/L]（以下給水量）と避難所に来る避難者との関係を分析した. 当日, 1 日後は問題ないが, 1 週間後では給水量不足の起こる避難所が 12 箇所存在した.

(全避難者数 − 受入可能避難者数) × 3で計算し，Fig.20 で避難所と右下に不足給水量[L]を示す.

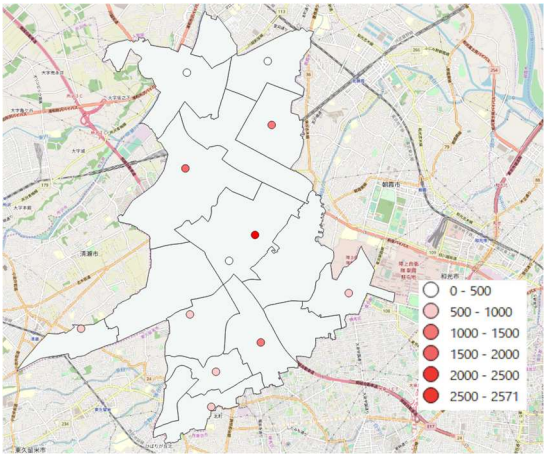

Fig.20 新座市の給水不足避難所

両避難者数は 6.1 および 6.2 より算出した. また，不足避難所を Table3 に示す.

特に最も被害の出る陣屋小学校避難所では，最低応急給水量の 3L を供給することができない避難者が 857 人いる結果となり，全不足避難所の約 25%を占めることがわかった.

Table3 各避難所の給水不足量

避難所名	必要給水量 [L/日]	不足量[L]
十文字学園	2152	1819
新座総合技術高校	987	852
新座中学校	630	12
新座北高校	1803	240
陣屋小学校	1209	2571
石神小学校	1011	641
第二中学校	630	1350
東北小学校	960	66
八石小学校	599	693
片山小学校	630	1032
野寺小学校	783	567
新堀小学校	599	528

7　インフラ被害による生活の不便度

次に，インフラ被害による生活の不便度を検討する．

方法としては，災害シミュレータによる各インフラの被害結果と各小学校区の成人人口，乳幼児人口，高齢者人口，病院・避難施設等の重要施設データを使用することで，小学校区ごとの不便度（復旧優先度）を算出する．インフラ，人口，重要施設の要素ごとに重みの順番を定め，Table4 に示す．

Table4 要素の重み

インフラ	人口	重要施設
水道>電力>通信>ガス	乳幼児>高齢者>成人	病院>避難施設

また，不便度を算出する上で以下の計算式を定め，用いた．

$$X = (e * e_w + g * g_w + c * c_w + w * w_w) * (b * b_w + o * o_w + a * a_w) * (h * h_w + s * s_w) \quad (3)$$

上記の計算式にインフラ，人口，重要施設に関して，変数に値を代入する．各変数については，X：各小学校区の不便度，e：電力の被害，g：ガスの被害，c：通信の被害，w：水道の被害，b：乳幼児の数，o：高齢者の数，a：成人人口の数，h：病院の数，s：避難施設の数，x_w：各要素の重み，となる．これにより，インフラ被害による不便度を算出し，地理情報システム上に可視化する．Fig.21 は埼玉県の出力結果である．この出力結果は，各インフラ被害の有無で変わってくることになる．

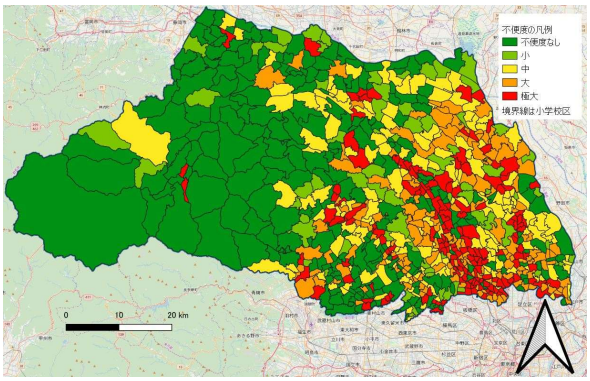

Fig.21 不便度の可視化

8　まとめ

過去の災害の電力に関する被害をみても，東日本大震災のような広域停電は起こりにくい．

ガスの場合は特徴として，震源から遠い地域でも，一部の地域では相応の供給停止確率となる．この理由としてはガバナが密集している地域に比べ遠くのガバナから供給を受けている点が原因と考えられる．これは，供給ブロックにおいても同じことが言える．

水道では全体的に断水率が高いことが特徴的である．さらに電力が停止した場合，水道インフラに影響が生じるため他のインフラに比べて止まりやすい．さらに耐震化が進んでいないため実際に首都直下地震が起きた際に大きな被害が発生する可能性がある．

通信は，倒壊による被害が極端に少なく，停波要因は停電によるものが大半となっている．

以上より，インフラにおいて電力・水道・通信は深い関係にある．ガスについても，停電が起これば家庭内での使用はできなくなる．したがって，大規模な自然災害が発生した際に電力が停止した場合は，各インフラの供給は受けられないと考えられる．

言うまでもなく本結果は予測であるが，それでも，過去のデータや予測データを用いることで少しでも対策をすることは可能である．災害大国であるからこそ蔑ろにしてはいけないこの問題を，個人の生活や社会のためにも知識として活用していくことが，過去の惨劇を繰り返さない未来へと繋げていくはずである．

9　謝辞

本稿の内容は，SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：防災科学研究所）の一環として実施されたものである．

参考文献

1) http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/8/pdf/sub2.pdf
2) http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf
3) https://eee.tokyo-gas.co.jp/service/gas/pressure.html
4) http://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/180723-JSCE 大阪府北部報告会 nojima-Ver.2.pdf
5) https://www.mhlw.go.jp/content/10908000/000477865.pdf
6) https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento100_44_hou

kokusho_assessment.pdf
7) https://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20091112-01.html
8) 堤雅彦, 森脇大輔, 田中吾朗, 武藤裕雄：平成 28 年熊本地震の影響試算の推計方法について(2016)
9) http://www.h2o.nara.nara.jp/file_library/878031298.pdf
10) 川上英二：道路交通システムの形状と連結確率との関係, 第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム, 169/172(1996)
11) https://www.soumu.go.jp/main_content/000572034.pdf
12) http://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/chicyuka/chi_13_06.html
13) 栗原航介, 桑原祐史, 沼尾達弥：生活質の観点から見た避難所の地域特性分析手法の提案, 土木学会論文集, 69, Ⅱ_13/Ⅱ_18(2013)
14) http://www.pref.saga.lg.jp/bousai/kiji003977/3_977_110696_up_waitsdms.pdf
15) https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/155/2.pdf
16) 坂田弘一：.震災時における避難者数推移および避難所選択行動の特性, 日本建築学会計画系論文集, 537, 141/147(2000)