災害時人員対応における 市区町村間の相互支援の在り方

佐藤　千仁[1]・奥村　誠[2]

[1]非会員　東北大学大学院　工学研究科（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, S502b）
E-mail: kazuto.sato.q2@dc.tohoku.ac.jp
[2]正会員　東北大学教授　災害科学国際研究所（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, S502b）
E-mail: makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

災害からの早期回復をする上で，緊急対応の人員確保は重要である．ここで，発生場所や規模が不確実なハザードに有限の人員で対応するには，各市区町村にいる人員が周辺のニーズにも応える必要がある．本稿では，発災後に需要が生じる市区町村に，市区町村内外の人員供給で対応することをモデルで表現した．そして，宮城県を対象として，最も対応人員が不足する需要の発生場所を求める最適化計算を，災害の広がりと強度を変えつつ実施した．この結果を分析し，宮城県内の既存の災害対応能力を評価することを通じ，地域の供給能力やアクセス，地理的条件を考慮した対応体制の在り方を考察した．

Key Words: *Regional Planning, Disaster Response, Miyagi Prefecture*

1. はじめに

近年，多様なハザードが引き起こす災害への対応の重要度が増す中で，事前のダメージ軽減を目的とする防災対策に加え，発災後のダメージから早期に回復し，損失を最小化する，減災対策が重要視されている[注 1)]．その中で，緊急の人員確保[1)2)]は大きなテーマのひとつである．ここで，発災後に生じる被害に関する情報収集や避難所設営，物資配分といった対応が可能な人の数には限りがあり，需要が地域のキャパシティを超えると，地域外からの支援に頼るほかない．また，ハザードは発生時期や範囲，強度が不確実なため，各地域は，受援側にも支援側にもなりうる．よって，地域の人員供給能力の評価は，各地域の人員が自地域だけでなく他の地域の需要充足も担うことを前提とし行われる必要がある．

本稿では，災害発生後に需要が発生した市区町村に対し，当該市区町村内の人員供給と当該市区町村外からの人員支援で対応することを考える．この際，市区町村間の人員の輸送能力や距離といったアクセス性を考慮する．そして，災害の発生分布が不確実であることを踏まえ，最も対応人員が不足する需要の発生場所を数理最適化計算で求める．この計算を，宮城県の医療人員を対象として災害の広がりと強度を変えつつ行い，結果を分析することで，宮城県の災害時の対応人員供給能力の評価を行う．最後に，この評価を通じて，災害時の地域間相互支援の在り方を考察し，知見を得ることを，本稿の目的とする．

本稿の **1.** では，導入として，研究の背景，および目的を述べた．**2.** では，対応人員が最も不足する災害後の需要発生場所を最適化計算により求める方法を説明する．**3.** では，医療人員を例に，宮城県のネットワークを設定したのち，災害の広がりや強度の違いによる計算結果の変化を分析し，宮城県内における災害時の対応能力を評価する．その上で，相互支援体制に関する考察を行う．**4.** では，本稿の結論および今後の研究課題を述べる．

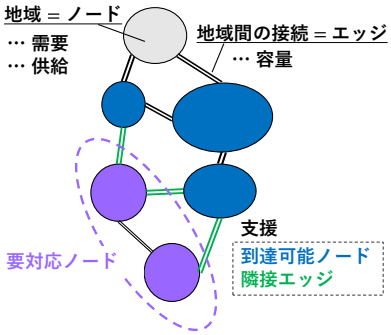
2. 災害後の対応人員不足の計算および分析方法

(1) 要対応地域と対応人員の表現

災害が発生すると，対象とする地域内のいくつかの市区町村が被害を受けて，需要が生じる．これらの市区町村をまとめて要対応地域と呼び，その需要に対して，地域内の人員供給および地域外からの人員支援で対応することを考える．ここで，要対応地域外からの人員の支援量は，同地域外の人員供給能力と，同地域内外の人員輸送能力の内小さい方に制約されると考える．

以上を空間的に表現するために，対象地域の市区町村をノード，その有向の接続状況をエッジで表現したネットワークを定義する．各ノードには対応人員の供給量と需要量を，各エッジには対応人員の輸送容量を与える． 要対応地域は要対応ノードの組合せである．要対応地域が定まると，需要量が決定され，同時に要対応

地域内で確保できる対応人員の供給量が決定する．外部からの支援量は,「要対応ノードのいずれかに一定時間以内に到達可能なすべてのノードの供給量の和」と「要対応ノード内外を接続するすべてのエッジの輸送容量の和」において，小さい方の値で与えられる．以上を**図 1** で概略的に示す.



図–1: 災害時の人員対応の概略図

ここで，災害発生地域の広がりは要対応ノードの数を表すパラメータ K で表現される．また，基準需要量に対して異なる比率で需要が発生すると考える．この基準需要量に乗じる係数 α は，災害の強度を意味することとなる．

(2) 対応人員の不足量とワーストパターンの定義

いま，ある災害によって要対応ノードの組合せが与えられたとする．このときの要対応ノード全ての需要量の和を内部需要量 ID，同ノード全ての供給量の和を内部供給量 IS，同ノード外からの支援量を外部支援量 ES と呼ぶ．要対応地域における不足量 W は，下式のように ID から，IS および ES を引いた量として求めることができる，

$$W \equiv ID - IS - ES \tag{1}$$

W は，要対応地域の全体で対応人員がどれだけ不足しているかを示す数量であり，本稿における災害時人員供給能力を評価するための指標である．この W の値は，要対応ノードの組合せの関数である．多様な災害によって生じる人員不足の中で最も深刻な状況をワーストパターンと呼ぶ．それは，W を最大とするような要対応ノードの組合せとして計算することができる．

(3) ワーストパターンを求める MIP モデルの定式化

2.(1) および **2.(2)** で説明した，ワーストパターンを求める組合せ最適化問題を定式化する．

a) モデルで使用する記号

表–1: 集合とその意味

集合	意味
N	ノードの集合
E	エッジの集合

表–2: パラメータとその意味

パラメータ	意味
P_k	ノード k の基準需要量
S_k	ノード k の供給量
C_{ij}	エッジ ij の輸送容量
α	需要量の係数
U_{ijk}	ノード k がエッジ ij を経由しノード i に一定時間以内に到達可能である場合に 1 を与え，到達不可能である場合に 0 をとる関数.
K	同時に要対応となるノード数の上限

表–3: 変数とその意味

変数	意味
δ_k	ノード k が要対応ノードである場合に 1 をとるバイナリ変数
z_{ij}	エッジ ij が要対応ノード i と要対応でないノード j を接続する場合に 1 をとるバイナリ変数
y_k	要対応でないノード k が要対応ノードのいずれかに一定時間以内に到達可能な場合に 1 をとるバイナリ変数
d	要対応ノード内外を接続するすべてのエッジの輸送容量の和が，要対応ノードのいずれかに一定時間以内に到達可能なノードの供給量の和よりも小さい場合に 1 をとるバイナリ変数
ES	外部支援量
OS	要対応ノードのいずれかに一定時間以内に到達可能なすべてのノードの供給量和
EC	要対応ノード内外を接続するすべてのエッジの輸送容量の和

b) MIP の定式化

ノード k が要対応ノードであるときに 1 をとるバイナリ変数 $\delta_k = \{0,1\}$ を用いて，要対応ノードの組合せを表現する．それを用いると，内部需要量 ID および内部供給量 IS は次の 1 次式で計算できる．

$$ID = \alpha \sum_{k \in N} P_k \delta_k \tag{2}$$

$$IS = \sum_{k \in N} S_k \delta_k \tag{3}$$

基準需要量の P_k はノードの人口に比例して与えるが，対象地域全体の和が供給量の和に等しくなるようにスケーリングしておく．

次に，外部支援量 ES を考える．これは「要対応ノード内外を接続するすべてのエッジの輸送容量の和」EC と「要対応ノードのいずれかに一定時間以内に到達可能なすべてのノードの供給量の和」OS との小さい方の値に制約される．まず，EC と OS は以下のように計算できる．

$$EC = \sum_{ij \in E} C_{ij} z_{ij} \tag{4}$$

$$OS = \sum_{k \in N} S_k y_k \tag{5}$$

$z_{ij} = \{0,1\}$ はエッジ ij が要対応地域の境界にあることを表すバイナリ変数で，エッジ ij が要対応ノード i と要対応でないノード j を接続する場合に 1 をとる．z_{ij} は以下のような関係を通して，バイナリ変数 δ_k から間接的に値が決定できる．

$$z_{ij} \geq \delta_i - \delta_j \qquad \forall ij \in E \tag{6}$$

$$z_{ij} \leq \delta_i \qquad \forall ij \in E \tag{7}$$

$$z_{ij} \leq 1 - \delta_j \qquad \forall ij \in E \tag{8}$$

次に，$y_k = \{0,1\}$ は，ノード k が外部からの支援を行うノードになりうるのかを示すバイナリ変数である．ノード k が要対応でなく，かつ一定時間以内に要対応ノードのいずれかに到達可能な場合に 1 をとる．ノード k がエッジ ij を経由して一定時間以内にノード i に到達可能である場合に 1 を与え，到達不可能である場合に 0 を与える関数 U_{ijk} を用意すると，y_k と z_{ij} は以下の不等式制約を満足する必要がある．

$$y_k \leq \sum_{ij \in E} U_{ijk} z_{ij} \qquad \forall k \in N \tag{9}$$

$$y_k \leq 1 - \delta_k \qquad \forall k \in N \tag{10}$$

$$y_k \geq \frac{\sum_{ij \in E} U_{ijk} z_{ij}}{\sum_{ij \in E} U_{ijk}} - \delta_k \qquad \forall k \in N \tag{11}$$

式 (11) の不等式制約は，境界に近い支援可能ノードを確実に把握するための制約である．これらにより，内生バイナリ変数 δ_k を決めると，z_{ij}，y_k の値が間接的に決まることとなる．

ここで，d は，OS よりも EC の方が小さいときに 1 をとるバイナリ変数 d を導入すると，ES は以下の制約条件式を満足する必要がある．

$$ES \geq (1-d)OS = (1-d) \sum_{k \in N} S_k y_k \tag{12}$$

$$ES \geq dEC = d \sum_{ij \in E} C_{ij} z_{ij} \tag{13}$$

式 (14)(15) は，ES が OS と EC の小さい方に一致するための制約である．

$$d \geq \frac{\sum_{k \in N} S_k y_k - \sum_{ij \in E} C_{ij} z_{ij}}{\sum_{k \in N} S_k} \tag{14}$$

$$1 - d \geq \frac{\sum_{ij \in E} C_{ij} z_{ij} - \sum_{k \in N} S_k y_k}{\sum_{ij \in E} C_{ij}} \tag{15}$$

要対応ノードの数は，災害の広がりのパラメータ K に制約される．

$$\sum_{k \in N} \delta_k \leq K \tag{16}$$

最後に，変数の定義域に関する制約式をまとめる．

$$\delta_k, y_k = \{0,1\} \qquad \forall k \in N \tag{17}$$

$$z_{ij} = \{0,1\} \qquad \forall k \in N, \forall ij \in E \tag{18}$$

$$d = \{0,1\} \tag{19}$$

以上より，目的関数値である対応人員不足量 W を最大化し，ワーストパターンを得る問題は，式 (2) から式 (19) の制約条件のもとで，要対応ノードの組合せ $\delta = \{\delta_k \mid k \in N\}$ に関して次の式 (20) を最大化する混合整数計画問題（MIP）として定式化される．

$$\max_{\delta} W = ID - IS - ES \tag{20}$$

以上で定式化した MIP は，商用ソルバーを用いて求解が可能である．本稿では商用ソルバー，Gurobi Optimizer version 9.5.2[注 2)] を使用して計算を行う．

先述したように，災害の広がりのパラメータ K と災害の強度 α を変化させつつ MIP を計算することで，広がりと強度の異なる災害に対するワーストパターンを求めることができる．

3. 宮城県の災害時人員供給能力の評価と相互支援体制の考察

本章では，**2.** のモデルを用いて，医療人員を例にとった宮城県のワーストパターン分析を行い，災害時の人員供給能力を評価したうえで，地域間相互支援について考察する．**3.(1)** でネットワーク情報および各パラメータを設定し，**3.(2)** ではワーストパターンの分析を行う．以上から得られる知見として，**3.(2)** では宮城県の対応人員供給能力を評価し，**3.(4)** で災害時の市区町村間における人員の相互支援についての考察を行う．

(1) ネットワークおよびパラメータの設定

2. で定式化したモデルの数値計算を行うために，宮城県の市区町村における医療データおよび交通データを用いて，ネットワーク情報および各パラメータを設定する．

市区町村毎にノードを設定する．宮城県内の 39 市区町村と，これらに接続する県外の 12 市区町村を加え，ノード数は 51 である．ただし，県外の市区町村が要対応地域になることは考えない．

有向のエッジ数は 270 個設定している．国土交通省による平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査 [注 3)] より，市区町村境に交通量調査の対象道路が存在する市区町村間に，エッジを設定している．

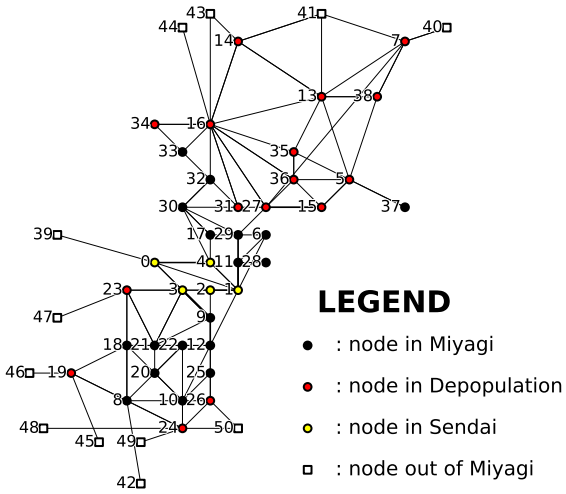
次にネットワークに与えるパラメータを設定する．

各ノードの供給量は，日本医師会が提供する地域医療情報システム [注 4)] より，市区町村別医療機関医師数を与える．

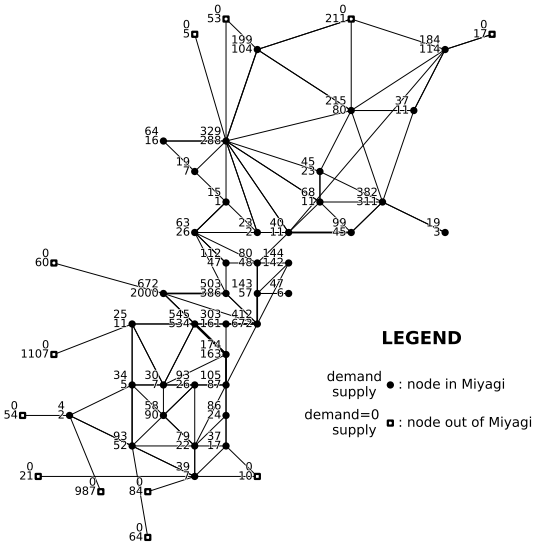
各ノードにおける対応人員の基準需要量は、各市区町村の年代別人口比で与えられる医療需要量 [注 5)] に比例して与える．この際，**2.(3)** で定めた通り，宮城県内の基準需要量の和が供給量の和と一致するようにスケーリングしておく．

各エッジの輸送容量は，国土交通省による平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査の「箇所別基本表及び時間帯別交通量表」[注 3)] より，エッジ毎に道路容量を集計した値に比例させて与えた．以上の手順で設定した具体的な数値は**付録**に示す．

本節で設定したネットワークを**図 2**，**図 3** に図示する．**図 2** では，過疎地域の持続的発展の支援に関する特別措置法で，過疎地域市町村または一部過疎地域市町村に指定された宮城県内の市区町村のノード (2023 年 4 月 1 日時点で) を赤色，仙台市 5 区のノードを黄色で，それぞれ図示した．



図–2: 本章で扱うネットワーク



図–3: 各ノードの基準需要量と供給量

U_{ijk} は，エッジ ij を経由してノード k からノード i へ一定時間 t_{limit} 内に到達できることを示すもので，次の手順であらかじめ設定しておく．

1. 各市区町村の役所の座標 [注 6)] をノードの代表点とし，ノード間距離を求める
2. エッジを構成する道路の交通容量と交通速度の加重平均からエッジの旅行速度を求める
3. ノード間距離とエッジ旅行速度で最短経路探索を行い，ノード間最短所要時間を求める

$$U_{ijk} = \begin{cases} 1 & t_{ij} + t_{jk} \leq t_{limit} \\ 0 & t_{ij} + t_{jk} > t_{limit} \end{cases} \tag{21}$$

ただし，t_{ij}，t_{jk} はノード ij，ノード jk 間の最短所要時間を示す．本稿では，制限時間 t_{limit} を 1 時間と設定した．

(2) 宮城県のワーストパターン分析

3.(1) で設定したネットワークおよびパラメータを用いて，災害の強度や広がりを変えながら宮城県のワーストパターン分析を行った．まず **3.(2)a)** では，2 つの代表的なワーストパターンを分析し，その特徴を比較した．次に，災害の広がりと強度を表す 2 つの外生パラメータ K, α の内，**3.(2)b)** では α を，**3.(2)c)** では K を，それぞれ変化させ，ワーストパターンの変化を読み取った．

次に，**3.(2)d)** では，K を変化させたワーストパターンの変化を理解するために，MIP の目的関数を変更して計算したパターンと比較し，ワーストパターンとの類似性を調べる．

a) 代表的なワーストパターンの分析

災害の強度 $K = 10$ に対し，災害の広がりを $\alpha = 1.50, 3.00$ の 2 ケースとして，それぞれにおけるワーストパターンを，**図 4, 5** に示した．

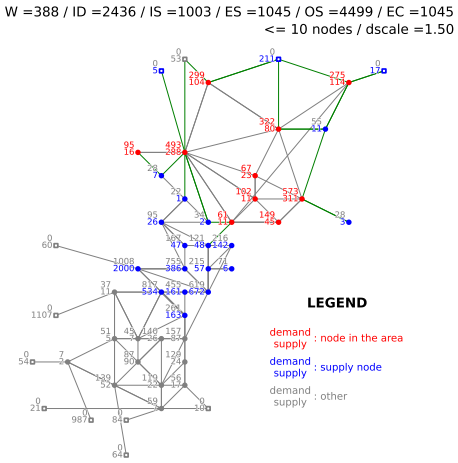
図 4 より，$\alpha = 1.50$ では，北部の過疎・一部過疎地域に含まれる 10 ノードが選択されているが，**図 5** より，$\alpha = 3.00$ では北部の 4 ノードに加え，仙台市を含む中部 6 ノードにノードの組合せが変わっている．この間では，α が 2 倍になったのに対し，内部需要量 ID，内部供給量 IS ともに 4 倍以上に増加していることから，$\alpha = 3.00$ のケースでは，供給量，需要量ともに大きなノードが優先的に選ばれていることが読み取れる．

次に外部支援量 ES を決定づける要因を見る．$\alpha = 1.50$ では $EC < OS$ で $EC = ES$ である．ここから，遠くない場所に人員は存在するものの，輸送能力が小さいために支援が得られていないことがわかる．$\alpha = 3.00, K = 10$ では $EC > OS$ に変化し $OS = ES$ となっている．

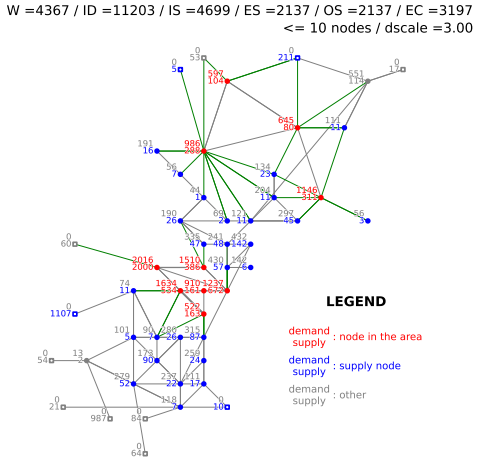
以上のことから，宮城県のワーストパターンは，少なくとも，北部の過疎地域のノードが選択され，地域の対応・受援能力の低さが読み取れる場合と，中部の人口の多いノードが選択され，人口集中が読み取れる場合の 2 種類を含んでいることが確認できる．

b) 災害の強度とワーストパターンの変化

α を 1.00 から 3.50 まで 0.05 刻みで変化させたワーストパターンを K=2,6,14 に対して求め，**図 6** に結果を示した．この図では横軸に α をとり，北に位置するノードから順に並べ，$\delta_k = 1$(受援側) の場合には赤，$y_k = 1$(支援側) の場合には青で表示した．この図から，K の値に関わらず，α の値が小さいときは北部のノードから多く選ばれるが，α の値が大きくなると仙台市を含む中部のノードが選ばれるようになることが読み取れる．また，K の値が大きくなるにつれ，中部のノードが選ばれ始める α の値が小さくなっていることがわかる．



図–4: $\alpha = 1.50, K = 10$ のワーストパターン

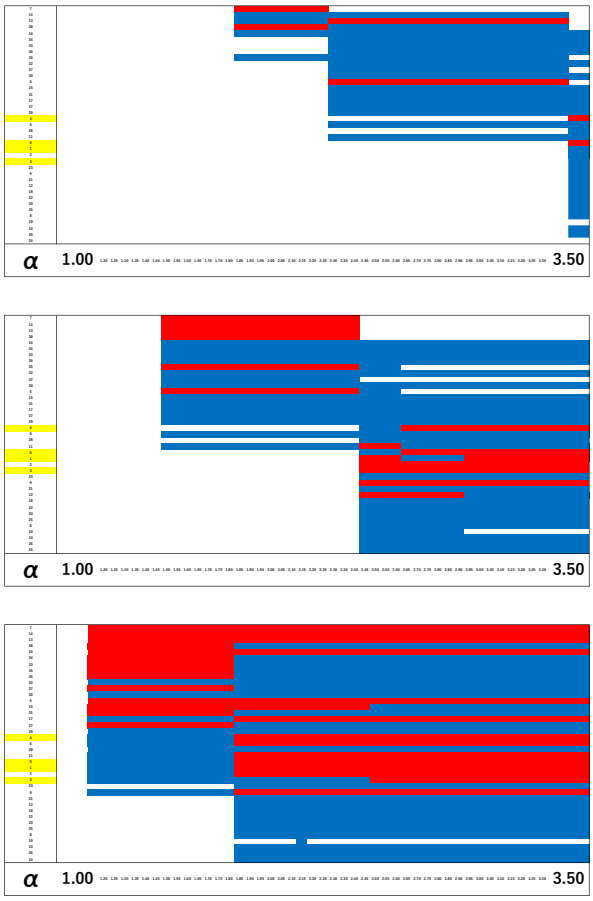


図–5: $\alpha = 3.00, K = 10$ のワーストパターン

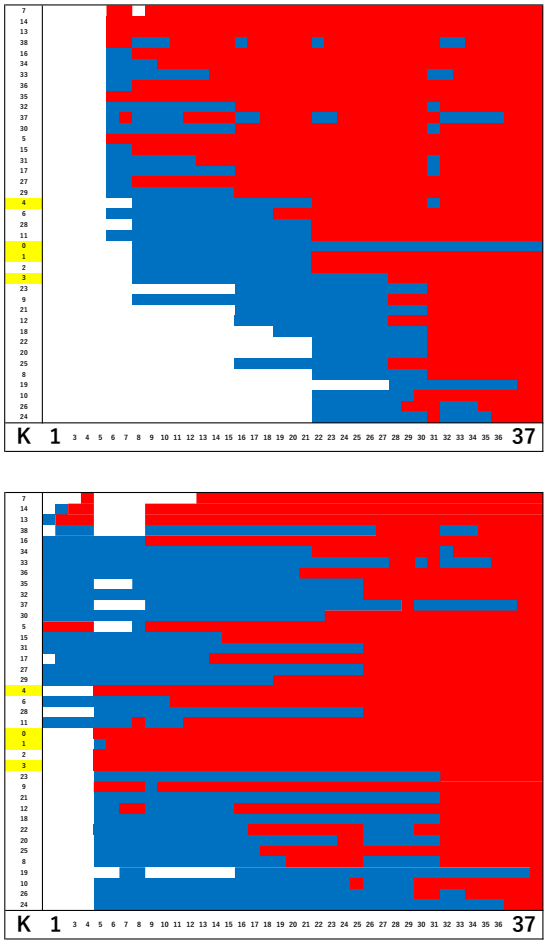
c) 災害の広がりとワーストパターンの変化

K を 1 から 39 まで変化させたワーストパターンを，$\alpha = 1.50, 2.00, 3.00$ に対して求め，その結果を，K を横軸にとり，**図 6** と同様の形で，**図 7** に並べて図示した．この図から，$\alpha = 1.50$ では，K が小さいときには北部が選ばれ，K が大きくなるにつれ追加で中部，南部の順に選ばれていることが読み取れる．また，$\alpha = 3.00$ では，K が小さいうちから中部のノードが選ばれていることが分かる．

3.(2)b) と **3.(2)c)** より，災害の強度 (α) と災害の広がり (K) がともに小さいときは北部のノードが選ばれ，それぞれが大きくなると中部のノードが選択される．



図–6: α とワーストパターンの変化
(上から $K = 2, 6, 14$)



図–7: K とワーストパターンの変化 (上から $\alpha = 1.50, 3.00$)

d) **ワーストパターンと MIP の目的関数を変化させたパターンの比較**

ここでは，ワーストパターンの特徴の理解を進めるために，本稿の MIP モデルにおける目的関数を変更した問題を考えた．具体的には，以下に示す i. ,ii. について，$\alpha = 1.50, 3.00$ に対し，K を 1 から 39 まで変化させ，パターン得た．その結果を，K を横軸にとり，**3.(2)c)** と同様の形で，**図 8**($\alpha = 1.50$)，**図 9**($\alpha = 3.00$) に並べて図示し，比較した．

i. $\min_\delta (IS + ES)/ID$

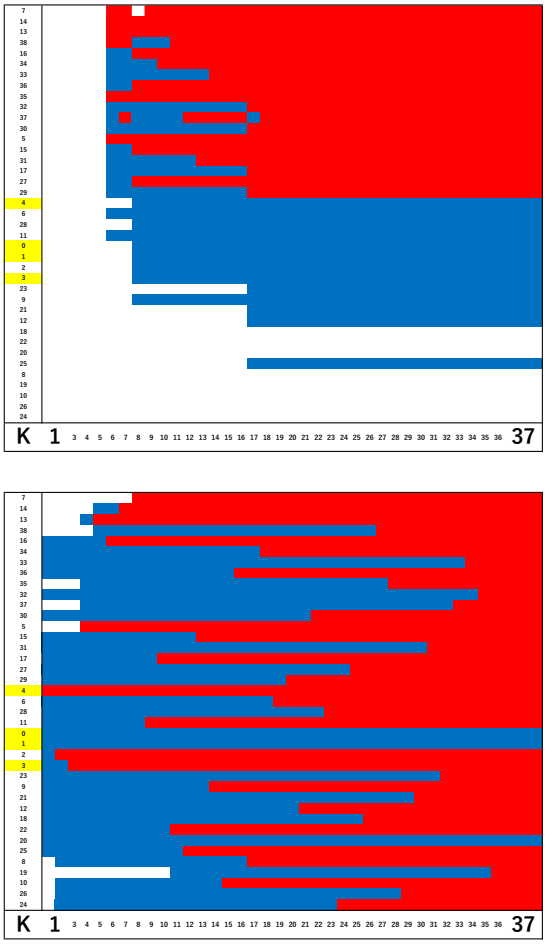
ii. $\max_\delta ID - IS$

i. は，内部供給量 IS と外部支援量 ES の和を内部需要量 ID で除した目的関数を最小化する問題であり，需要のスケールにかかわらず，需要に対して地域内外の供給割合が小さなノードが選択される．ii. は内部需要量 ID と内部供給量 IS の差を目的関数とした最大化問題である．ii. では外部支援は考慮されず，需要が供給をより上回っているノードが順に選択される．

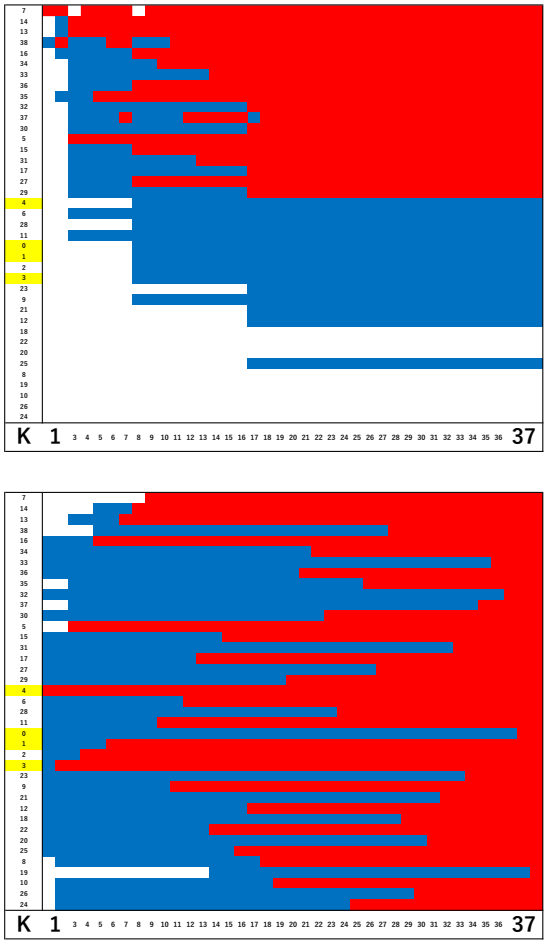
図 7，**図 8** より，$\alpha = 1.50$ では，$K = 6$ から $K = 18$ において，ワーストパターンと i. のパターンが一致しており，北部ノードが選択されている．さらに K が大きくなると，県全域のノードが選択され，ワーストパターンは i. よりも ii. のパターンに近くなるとわかる．

図 7，**図 9** より，$\alpha = 3.00$ では，$\alpha = 1.50$ に比べ，K が小さな値であっても，ii. のパターンがワーストパターンに近いことが読み取れる．

このことから，需要に対して地域内外の供給割合がより小さいのは北部であり，α および K が小さい場合にワーストパターンとして選択されやすい．また，単独で見た際に需要が供給をより上回っているノードが多いのは中部であり，α および K が大きい場合にワーストパターンになりやすい．



図–8: K と目的関数の異なるパターンの変化
($\alpha = 1.50$, 上から i,ii)



図–9: K と目的関数の異なるパターンの変化
($\alpha = 3.00$, 上から i,ii)

(3) 宮城県の災害時対応人員供給能力の評価

3.(2) で行ったワーストパターン分析により，宮城県の災害時の対応人員供給能力を以下のように評価する．

- 北部には基準需要量に比べて供給量が小さな市区町村が集中しており，輸送能力も小さいことから，大きな供給量をもつ市区町村からの支援を受けにくいため，K, α の値がともに小さい場合でも，ワーストパターンに選ばれる市町村が多い．このことから，狭い範囲の小規模な災害でも人員不足が生じやすいといえる．
- 仙台市があり，人口の大きな中部では，内部の供給量も大きく，強度の小さな災害では人員不足が生じにくい．しかし，災害の広がりや強度が大きくなると，内部の需要が増大して支援側から受援側にシフトし，大きな人員不足を生じるため，ワーストパターンに選ばれている．
- 南部は内部の供給量が小さな市区町村が存在するものの，大きな供給量のある中部や県外に近接し，輸送も余裕をもって行われるために支援が得やすく，人員不足を生じにくい．そのため，ワーストパターンには選ばれにくい．

(4) 災害時の市区町村間相互支援についての考察

以上を踏まえて，災害時の市区町村間相互支援の在り方について考察する．もし大規模な災害だけに対応することを考えると，より大きな人員不足が生じる人口の大きな市区町村において，供給人員を増強することが有効と思われる．

しかし，大規模災害よりも発生頻度が大きい小規模災害への対応も不可欠である．内部の供給力が小さい市区町村がまとまって存在し，外部とのアクセス性も低く，供給力の大きな市区町村からの支援が受けにくい，「孤立した地域」では，小規模な災害であっても人員が不足しやすい．一般に，人口の少ない過疎地域では供給力も小さい傾向にあり，「孤立した地域」になりやすいが，輸送能力が高かったり周辺に大きな供給力

のある市区町村が存在することで，周辺からの受援力が高められれば，大きな被害を免れる可能性がある．

以上のことから，人口の大きな地域に多く人員を配分するだけではなく，供給力の小さな地域がまとまって存在することがないように，アクセスを制限したり，人員の一部を振り分けることで,「孤立した地域」の発生を回避し，災害への脆弱性を下げることが期待できる．

4. おわりに

(1) 結論

本稿では，災害発生後の回復を早め損失を最小化する，減災対策の観点から，市区町村間の相互支援を考慮した人員配分のための研究をおこなった．この際，災害発生場所の不確実性を踏まえ，最も損失が大きくなるようなパターンに着目し，災害時の対応人員不足を表現するとともに，それが最大化されるワーストパターンを求める MIP モデルを定式化した．そして，医療人員を例にとり，宮城県のネットワークに対し，災害の広がりや強度の多様な場合でのワーストパターンの変化傾向を分析し，人員供給能力を評価することで，市区町村間の相互支援の在り方を考察した．

以上の結果として，災害時の対応人員の分配に際しては，人口の大きな市区町村のニーズに応え，大規模災害に備えるだけでなく，資源の偏在による地域の孤立を防ぐことで小規模災害にも備えるという考え方を同時にもつことが必要であるとの考察を得た．

(2) 今後の課題

本稿では，大規模災害を優先した人員分配策と，小規模災害にも被害を生じにくい人員分配策について述べたが，具体的に 2 つの考え方をどのように両立するかの分析はできていない．しかし，テロなどの意図的な攻撃によって最悪な被害を生じるケースを想定し，事前に施設を要塞化する二段階のモデル [3] の先行研究は存在する．このアプローチは，本研究のワーストパターンに対する事前の人員分配にも応用できる可能性があるため，今後の研究課題である．

付録: 宮城県のネットワーク情報

付録-1: 宮城県のネットワークデータ: ノード

市区町村名	ノード番号	人員供給量	人員の基準需要量(α=1)	市区町村名	ノード番号	人員供給量	人員の基準需要量(α=1)
仙台市青葉区	0	2000	1365	山元町	26	17	75
仙台市宮城野区	1	672	838	松島町	27	11	82
仙台市若林区	2	161	616	七ヶ浜町	28	6	96
仙台市太白区	3	534	1106	利府町	29	48	163
仙台市泉区	4	386	1022	大和町	30	26	129
石巻市	5	311	775	大郷町	31	2	47
塩竈市	6	142	293	大衡村	32	1	30
気仙沼市	7	114	373	色麻町	33	7	38
白石市	8	52	189	加美町	34	16	129
名取市	9	163	353	涌谷町	35	23	91
角田市	10	22	161	美里町	36	11	138
多賀城市	11	57	291	女川町	37	3	38
岩沼市	12	87	213	南三陸町	38	11	75
登米市	13	80	436	山形県東根市	39	60	—
栗原市	14	104	404	岩手県陸前高田市	40	17	—
東松島市	15	45	201	岩手県一関市	41	211	—
大崎市	16	288	667	福島県国見町	42	64	—
富谷市	17	47	226	秋田県湯沢市	43	53	—
蔵王町	18	5	68	山形県最上町	44	5	—
七ヶ宿町	19	2	9	福島県福島市(飯坂町)	45	987	—
大河原町	20	90	117	山形県上山市	46	54	—
村田町	21	7	61	山形県山形市	47	1107	—
柴田町	22	26	189	山形県高畠町	48	21	—
川崎町	23	11	50	福島県伊達市	49	84	—
丸森町	24	7	80	福島県相馬郡新地町	50	10	—
亘理町	25	24	175	全体		5619	11410

付録-2: 宮城県のネットワークデータ: エッジ

ノード1	ノード2	人員輸送容量	エッジ所要時間(h)	ノード1	ノード2	人員輸送容量	エッジ所要時間(h)	ノード1	ノード2	人員輸送容量	エッジ所要時間(h)
0	3	272.6	0.141	14	16	265.3	0.406	27	29	222.7	0.195
0	4	195.1	0.287	15	5	145.0	0.224	27	31	45.6	0.136
1	0	42.2	0.291	15	27	394.0	0.389	28	11	73.4	0.138
1	2	379.6	0.096	16	14	39.9	0.396	29	1	99.5	0.764
1	4	67.6	0.258	16	27	58.4	0.522	29	6	84.9	0.096
1	11	48.5	0.161	16	31	27.8	0.459	29	11	38.8	0.160
1	29	32.1	0.930	16	32	159.5	0.303	30	17	241.3	0.084
2	1	45.2	0.137	16	33	17.6	0.223	30	29	73.4	0.326
2	3	96.4	0.227	16	34	51.9	0.211	30	32	103.2	0.090
2	9	119.6	0.199	16	35	19.7	0.468	31	16	19.0	0.752
3	0	74.9	0.151	16	36	118.6	0.240	31	30	65.5	0.259
3	2	162.1	0.082	17	4	204.5	0.189	32	30	261.9	0.071
3	9	503.6	0.196	17	29	26.7	0.428	32	31	16.6	0.203
3	21	143.1	0.470	17	30	24.8	0.090	32	33	62.2	0.231
3	23	17.3	0.415	18	8	288.2	0.272	33	34	42.9	0.030
4	0	378.8	0.192	18	21	26.6	0.132	34	16	48.8	0.248
4	1	98.5	0.225	18	23	19.4	0.203	35	5	15.9	0.451
4	30	61.8	0.247	19	8	20.2	0.447	35	36	53.8	0.192
5	15	196.3	0.213	19	18	18.3	0.932	36	5	44.6	0.546
5	37	37.5	0.405	20	8	6.8	0.265	36	15	23.8	0.453
6	11	78.7	0.100	20	10	23.3	0.259	36	16	71.1	0.214
7	27	115.6	2.342	20	18	52.7	0.194	36	27	19.6	0.418
7	38	21.4	0.494	20	22	52.9	0.091	36	35	54.1	0.178
8	18	20.5	0.268	21	3	32.5	0.684	37	5	31.2	0.313
8	19	14.6	0.354	21	9	4.6	0.891	38	5	11.8	1.609
8	24	16.6	0.329	21	18	169.1	0.083	38	7	0.6	0.696
9	3	492.7	0.133	21	20	134.5	0.134	38	13	13.2	0.508
9	12	385.7	0.262	21	22	28.8	0.303	39	0	19.5	1.007
10	6	30.1	1.342	21	23	20.6	0.337	40	7	29.8	0.325
10	8	38.3	0.314	22	10	71.7	0.144	41	7	44.4	0.822
10	20	15.2	0.199	22	12	19.2	0.402	40	7	13.7	0.333
10	24	20.3	0.200	22	20	54.9	0.076	42	8	16.0	0.337
10	25	32.9	0.242	22	21	87.4	0.319	41	13	79.4	0.528
11	1	327.9	0.206	23	3	94.6	0.557	41	14	130.2	0.489
11	28	57.7	0.167	23	18	17.7	0.179	43	14	17.5	1.459
12	9	251.3	0.236	23	21	148.1	0.234	41	14	25.3	0.570
12	22	73.1	0.221	24	8	21.8	0.335	44	16	17.8	0.853
12	25	65.4	0.119	24	10	26.4	0.148	43	16	7.5	1.498
13	5	116.0	0.940	24	26	17.4	0.388	45	19	0.5	0.990
13	7	18.2	1.123	25	12	36.7	0.156	46	19	31.6	0.603
13	14	82.9	0.341	25	26	82.1	0.200	47	23	115.6	0.577
13	16	18.1	0.479	26	10	38.1	0.188	48	24	22.1	1.063
13	35	40.8	0.382	26	25	11.3	0.204	49	24	15.4	0.725
13	38	28.6	0.582	27	15	250.3	0.331	50	24	19.6	0.308
14	13	99.7	0.428	27	16	21.0	0.527	50	26	33.0	0.233

NOTES

注 1) 中央防災会議：防災基本計画，内閣府ホームページ，2022-06-17,
https://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basicplan.pdf
（参照 2023-10-13）

注 2) Gurobi Optimizer Release Notes v9.5.2,
https://www.gurobi.com/downloads/gurobi-optimizer-release-notes-v9-5-2/
（参照 2023-10-13）

注 3) 国土交通省：平成 27 年度 全国道路・街路交通情勢調査 一般交通量調査　集計表,
http://www.mlit.go.jp/road/census/h27/index.html（参照 2023-10-13）

注 4) 日本医師会：地域医療情報システム,
https://jmap.jp/（参照 2023-10-13）

注 5) 日本医師会総合政策研究機構：ワーキングペーパー 地域の医療提供体制の現状と将来–都道府県別・二次医療圏別データ集-（2014 年度版）-序章,
https://www.jmari.med.or.jp/result/working/post-1031/（参照 2023-10-13）

注 6) アマノ技研：ASTI — 地理空間データ Data — 地方公共団体の位置データ Location Data of Local Governments in Japan,
https://amano-tec.com/data/localgovernments.html（参照 2023-10-13）

REFERENCES

1) 本荘雄一, 立木茂雄： 大規模広域災害時における自治体間協力に関する考察ー東日本大震災に神戸市職員派遣の事例から, 地域安全学会論文集, Vol. 18, pp. 411-419, 2012. [Yuichi HONJO and Shigeo TATSUKI: A Study on Inter-Local-Government-Assisatance during Large Scale/Wide-Area Disasters − Case Study of Kobe City Assistance to Eastern Japan Earthquake Disaster Hit Municipality Governments, Journal of Social Safety Science, Vol. 18, pp. 411-419, 2012]

2) 本荘雄一, 立木茂雄：東日本大震災後の初動期から応急対応期における自治体間協力による人的支援に関する実証的研究－受援自治体と支援自治体とのデータを一元的に用いた研究－, 地域安全学会論文集, Vol.25, pp. 13-22 2015. [Yuichi HONJO and Shigeo TATSUKI: Empirical Study about Effective Personnel Support by Local Governments during − Emergency Response and Relief after the Great East Japan Earthquake, Journal of Social Safety Science, Vol. 25, pp. 13-22, 2015]

3) Richard L. Church and Maria Paola Scaparra: Protecting Critical Assets: The r-Interdiction Median Problem with Fortification, Geographical Analysis, Vol. 39, Issue. 2, pp. 129-240, 2007.

(Received ?)
(Accepted ?)

MUTUAL SUPPORT AMONG MUNICIPALITIES IN PERSONNEL FOR DISASTER RESPONSE

Kazuto SATO and Makoto OKUMURA

Emergency response staffing is essencial for early recovery from disasters. In order to respond to a hazard of uncertain location and size with a finite number of personnel, personnel in each municipality must also respond to the needs of the surrounding area. In this paper, a model is used to represent the response of municipalities to a demand that arises after a disaster by supplying personnel from inside and outside the municipalities. Optimization calculations were conducted for Miyagi Prefecture to determine the locations of demand that would result in the greatest shortage of personnel, for various cases of disaster spread and intensity. By analyzing the results and evaluating the existing disaster response capacity in Miyagi Prefecture, the authors examined the way of the response system, taking into account local supply capacity, access, and geographical conditions.