

# 医療機関の災害時の機能を 確保するための道路計画

2016. 11. 25 金曜フォーラム

**奥村 誠**

東北大学災害科学国際研究所  
人間・社会対応研究部門被災地支援研究分野

工学研究科土木工学専攻兼務

# 道路計画における 災害時・緊急医療の確保の重要性

- 「無駄な」公共事業を避けるため、道路建設や改良事業を行う場合、事前・途中・事後で、費用と効果を確認することが制度化された。
- 道路整備による時間短縮，輸送費用軽減，交通事故の減少の効果を金銭化した便益（Benefit）を予測し，費用（Cost）と比較する手法のマニュアル化と実施が進んだ。
- 東日本大震災以降，平常時の需要が小さい路線でも，**災害時の安心や緊急医療に与える効果**を考慮すべきという意見が増えた。

# 平常時の道路利用の効果の例 (国土交通省東北地方整備局委員会資料)

<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/h13jhyouka/280930/shiryu2802.html>

## 3. 事業の必要性に関する視点(1) 地域間連携

- ◆青森市～八戸市間は高規格道路ネットワークで結ばれておらず、現道の国道4号、45号等経由で約2時間を要する
- ◆上北自動車道の整備により所要時間が約1時間30分(約23分短縮)に短縮され、県内主要都市間の連携が強化
- ◆県内主要都市間の連携強化により、地域間の交流人口の拡大を支援

## 3. 事業の必要性に関する視点(2) 物流効率化

- ◆青森県では、平成27年4月より新たな流通サービスとして『A!プレミアム輸送サービス』を開始
- ◆上北自動車道の整備により地域間の物流の効率化が図られ、集荷時間が短縮し集荷エリアが拡大
- ◆地域間の物流効率化により、地域産業の活性化を支援

▼『青森県総合流通プラットフォーム(A!プレミアム)』の輸送ルート

▼『青森県総合流通プラットフォーム(A!プレミアム)』の概要

## 3. 事業の必要性に関する視点(3) 企業立地

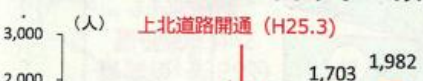
- ◆青森県では、産業集積の形成や活性化を図るため高規格幹線道路等の整備を位置づけ(企業立地促進法に基づく基本計画(県南・下北地域))
- ◆県南・下北地域では、高規格道路の整備に伴い工業団地の分譲率向上や高卒求人数が増加しており、平成26年には新たに六戸町や三沢市に木材加工工場や食肉利品工場等の企業が立地
- ◆上北自動車道の整備により、更なる企業立地の促進や雇用の確保を支援

▼県南・下北地域  
(指定産業集積区域)

▼県南・下北地域の工業団地分譲率



▼県南・下北地域の高卒求人数



フライフーズ 三沢・細谷工場  
処理能力は従来の2倍に向上し、国内需要の伸びに対応

六戸進出の住宅用木材加工工場  
工場としては国内最大規模年産を引上げ、地域産業の発展に貢献

①

フライフーズ三沢・細谷工場  
国内最大規模  
年2000万羽処理

2017年10月20日  
滋強、来月稼働

②

年産1.5万立方メートルに  
六戸進出の住宅用木材加工工場  
目標引き上げ7月稼働へ

弘前市⇄青森市  
約72分

弘前市  
人口:17.8万人  
(H27速報値)

弘前大学・弘前城を  
代表とする学業・歴史  
の拠点都市

至  
能代市

二井田真中IC

凡例

- 計画対象区
- 開通済
- 事業中
- □ 未事業化
- 高規格幹線道
- 地域間幹線道
- 一般国道
- 主要地方道

4



# 災害時・緊急医療の効果の例 (国土交通省東北地方整備局委員会資料)

<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/h13jhyouka/280930/shiryu2802.html>

災害による途絶が防げ、迂回時間がいなくなる

## 2. 事業の必要性に関する視点 (リダンダンシーの確保)

- ◆国道47号は、重要港湾酒田港を有する庄内地方と最上地方を結ぶ唯一の幹線道路として広域交通を支えている。
- ◆一方で、国道47号新庄古口道路並行区間では、災害・事故により過去30年間で全面通行止めが64回と度々発生しており、利便性の高い迂回路が存在しないため、当該区間を利用している企業の経済活動に支障をきたしている。

・新庄古口道路の整備により代替路が確保され、災害発生時等の信頼性向上が期待

### ▼新庄～酒田間の迂回経路



### ▼新庄古口道路並行現道区間の通行止め発生状況

原因	全面通行止め発生回数 (S62.5~H28.5)	全面通行止め規制時間 (S62.5~H28.5)
災害	10回	4.3日
事故	53回	4.0日
火災	1回	0.1日
合計	64回	8.4日

山形河川国道事務所管内の発生件数 約3.7回/km (1,473回/393km) に対して 約5.2回/km (64回/12.2km) の通行止めが発生

資料: 山形河川国道事務所

### ▼国道47号新庄古口道路並行区間の被災状況



### ■国道47号利用企業の声

・毎日最上地域、村山地域の企業に集荷・配送を行うため、国道47号を利用しているが、通行止めが発生した場合でも、国道112号経由では大幅な遠回りとなるため迂回を行わず、取引先に待ってもらう対応を取っている。

・当該区間に高規格道路が整備されることにより、代替路が確保され、さらに所要時間が短縮するので、取引先を増やす余裕が生まれることが期待されます。【H28酒田市内企業ヒアリング結果】

資料: プローブデータ(通常期: H27.10月平日混雑時平均速度)



# 災害時・緊急医療の効果の例 (国土交通省東北地方整備局委員会資料)

<http://www.thr.mlit.go.jp/bumon/b00097/k00360/h13jhyouka/280930/shiryu2802.html>

## 3. 事業の必要性に関する視点 (アクセス性の向上)

- ◆最上二次医療圏域には救急告示病院が少なく、救急患者の約8割は地域の基幹病院である県立新庄病院に搬送さ
- ◆広域な圏域端にある西支署管轄地域からの平均病院収容時間は約42分を要しており、県内平均収容時間より5分

より高度な機能を持つ病院に早く到着できる。  
信号交差点や急カーブがなければ、応急処置がしやすくなる

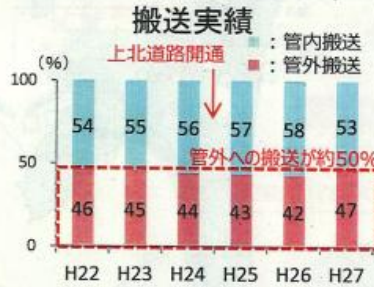
## 3. 事業の必要性に関する視点 (4) 救急搬送の支援

- ◆余目管内の救急搬送の30%が、第3次救急医療機関の日本海総合病院に搬送されている。
- ◆余目酒田道路の利用により、救急搬送の迅速性・安定性が確保される。

## 救急搬送 3. 事業の必要性に関する視点 (4) 救急医療

- ◆上北地域内には三次救急医療施設がないため、重篤な患者は青森市や八戸市へ搬送せざるを得ない状況
- ◆上北道路の開通による搬送時間短縮により、七戸町・東北町から八戸市立市民病院への搬送割合が増加
- ◆さらに、重篤患者の救命率向上を目的としたドクターカーと救急車の合流地点(ドッキングポイント)が増加
- ◆上北自動車道の整備により、救急搬送時の安定性の確保及び早期の救急医療活動を支援

### ▼中部上北広域消防本部の搬送実績



### ▼第三次救急医療施設への搬送実績



**出動1439件前年並み**  
重症に反応方針定着

**新ドクターカー VS さよう運用**  
へき地の住民救いたい

八戸市長 現場で手番可能

資料：東奥日報 (平成28年5月1日、平成28年7月1日)

**救急救命率向上を担うドクターカー**  
(八戸市立市民病院は2台保有)

※ドクターカー：患者監視装置等の医療機械を

# 救命に対する道路整備効果は、 医療体制の在り方に依存している

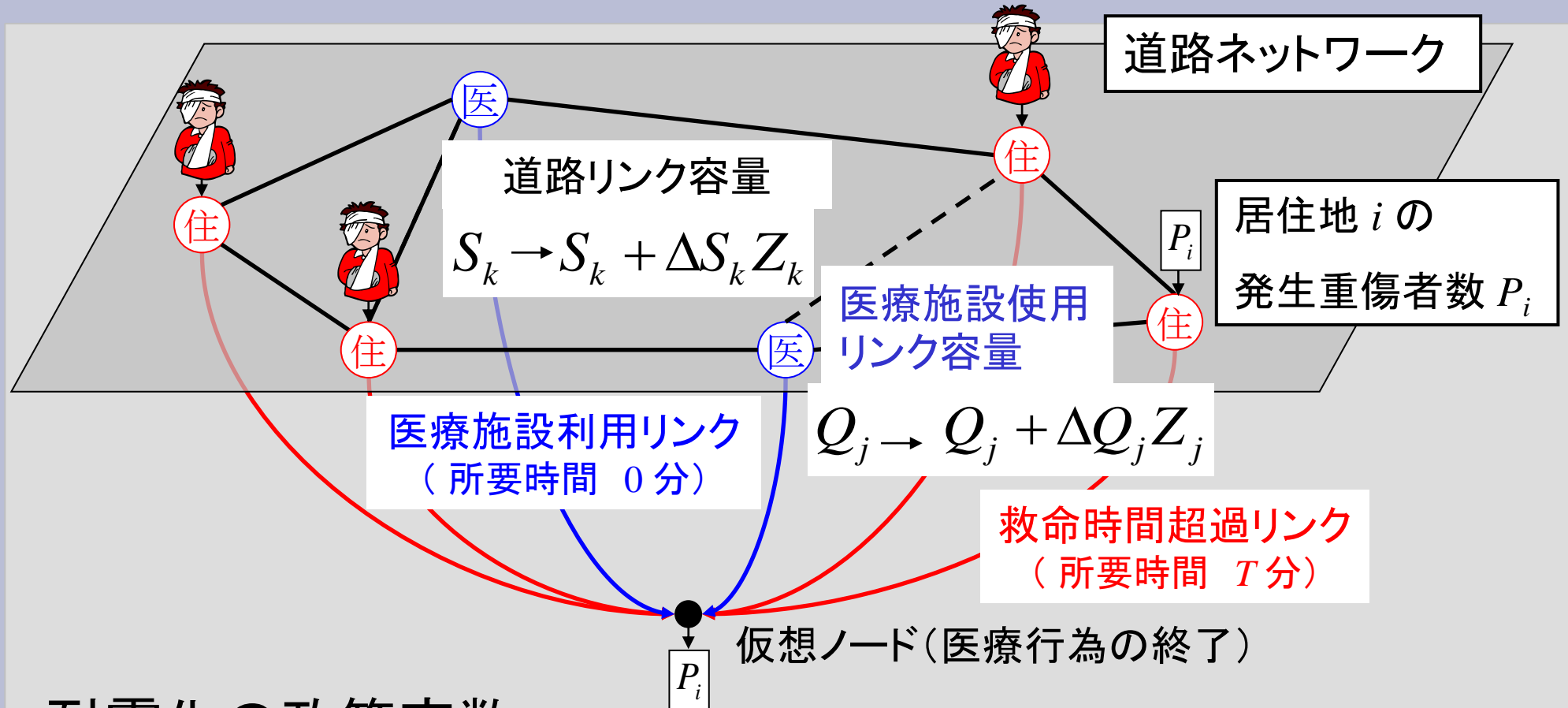
- 重篤な患者をどのレベルの医療施設で受け入れすべきか？(設備や、医師の充実度にも依存)
- 患者を基幹病院まで運ぶのか、ドクターカーに手渡せばいいのか？(ドクターカーやドクターヘリに依存)
- 災害時には、医療施設自身の被災により、受け入れ能力が低下している危険性がある
- **医療施設の耐震化と道路の耐震化をうまく組み合わせる必要がある**

東日本大震災前の2006年ごろからの継続的な研究内容を紹介し、今後の方向性を議論



# 搬送時間と耐震化の表現

地震により同時多発的に発生する重傷者を搬送する



## 耐震化の政策変数

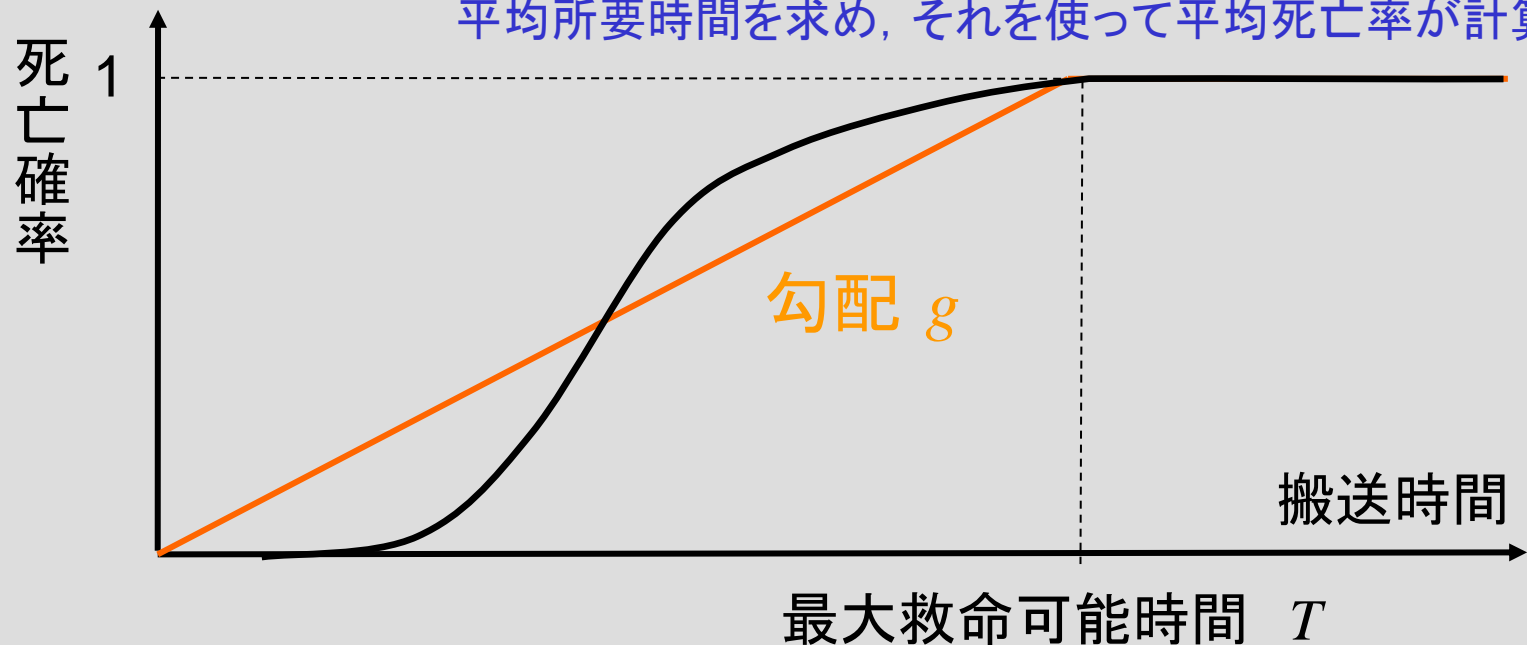
- ▶ 道路の耐震化  $Z_k$  : 道路リンク  $k$  の容量制約緩和( $\Delta S_k$ )
- ▶ 医療施設の耐震化  $Y_j$  : 医療施設使用リンク  $j$  の容量制約緩和( $\Delta Q_j$ )

# 耐震化計画問題と死亡リスク

## 耐震化計画問題

重傷者搬送中の死亡リスクを最小化するように、  
予算の範囲内で耐震化すべき道路と医療施設の組合せを求める

死亡リスク = 発生重傷者数  $P_i$  × 死亡確率  
カーラーの救命曲線 (搬送時間と死亡確率の関係)を直線近似し使用  
平均所要時間を求め、それを使って平均死亡率が計算できる。





# 耐震化計画問題(基本モデル)の定式化(1)

重傷者搬送中の死亡リスクの最小化

$$\min_{x,Y,Z} F = \sum_{i \in I} \left( \underbrace{g \sum_{k \in \bar{K}} d_k x_{ik}}_{\text{総搬送時間}} \right) \quad (1)$$

道路と医療施設の容量制約

$$s.t. \quad \sum_{i \in I} x_{ik} \leq S_k + \Delta S_k Z_k \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq Q_j + \Delta Q_j Y_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

耐震化の予算制約

$$\sum_{k \in K} c_k Z_k + \sum_{j \in J} e_j Y_j \leq B \quad (4)$$

政策変数の0-1制約

$$Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (5) \quad Y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (6)$$

文字の定義

$x_{ik}$ : 居住地  $i$  の重傷者搬送に対し、リンク  $k$  を使用する人数

$d_k$ : 地震発生時の道路リンク  $k$  の所要時間

$c_k$ : 道路リンク  $k$  の耐震化費用

$e_j$ : 医療施設  $j$  の耐震化費用

$B$ : 耐震化総予算

# 耐震化計画問題(基本モデル)の定式化(2)

居住地の全ての重傷者が搬送の対象となる

$$\sum_{k \in L_i} x_{ik} \geq P_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

全ての重傷者が何らかの医療行為を受ける

$$\sum_{k \in M_f} x_{ik} \geq P_i \quad \forall i \in I \quad (8)$$

ネットワーク保存則

$$\sum_{k \in L_a} x_{ik} = \sum_{k \in M_a} x_{ik} \quad \forall a \in A - \{i\}, \forall i \in I \quad (9)$$

非負条件

$$0 \leq x_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in \bar{K} \quad (10)$$



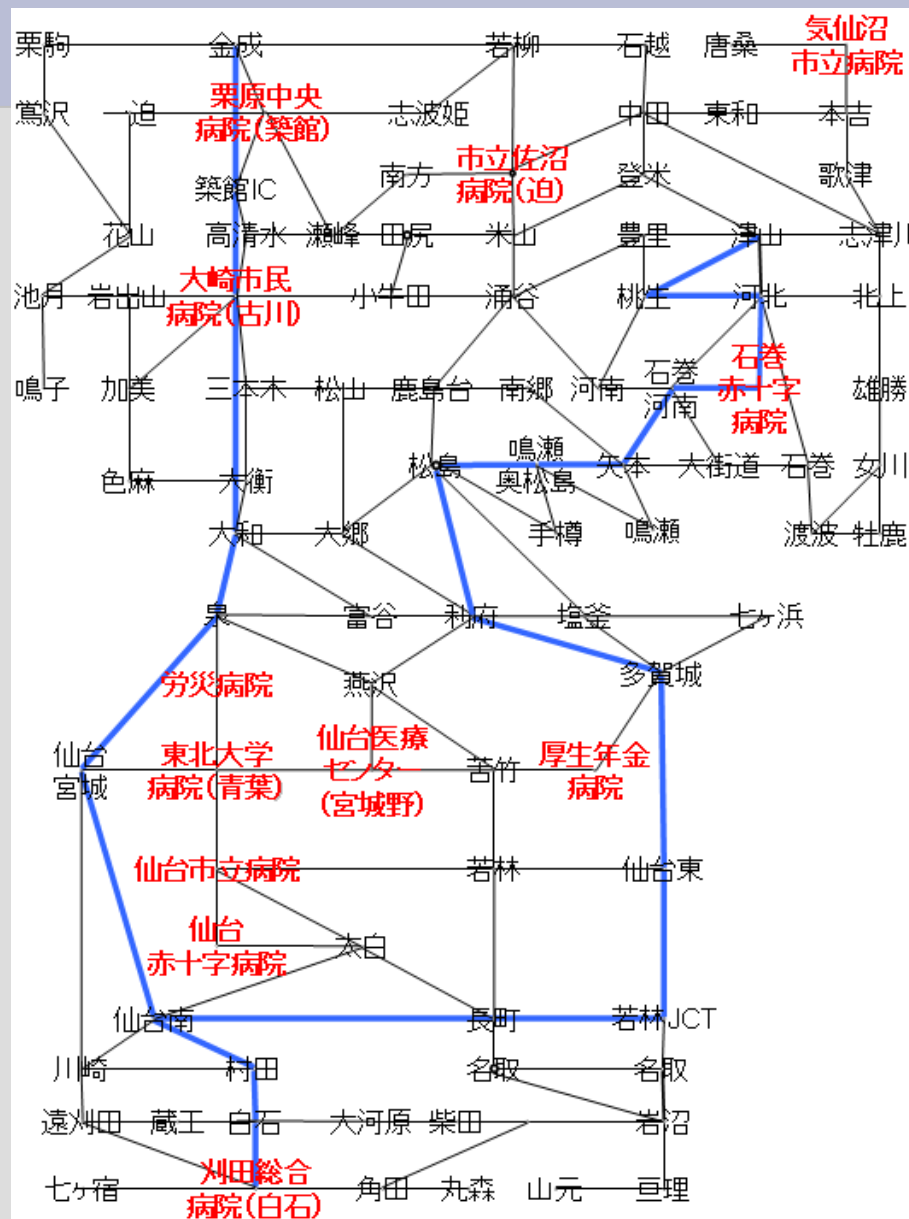
# 宮城県における計算対象ネットワーク

## □ ノード(97)

- 居住地のセントロイド(66)
- 災害拠点病院(12)
- インターチェンジ(18)
- 仮想ノード(1)

## ■ 有向リンク(402)

- 緊急輸送道路(312)
- 医療施設ダミーリンク(12)
- 時間超過ダミーリンク(78)

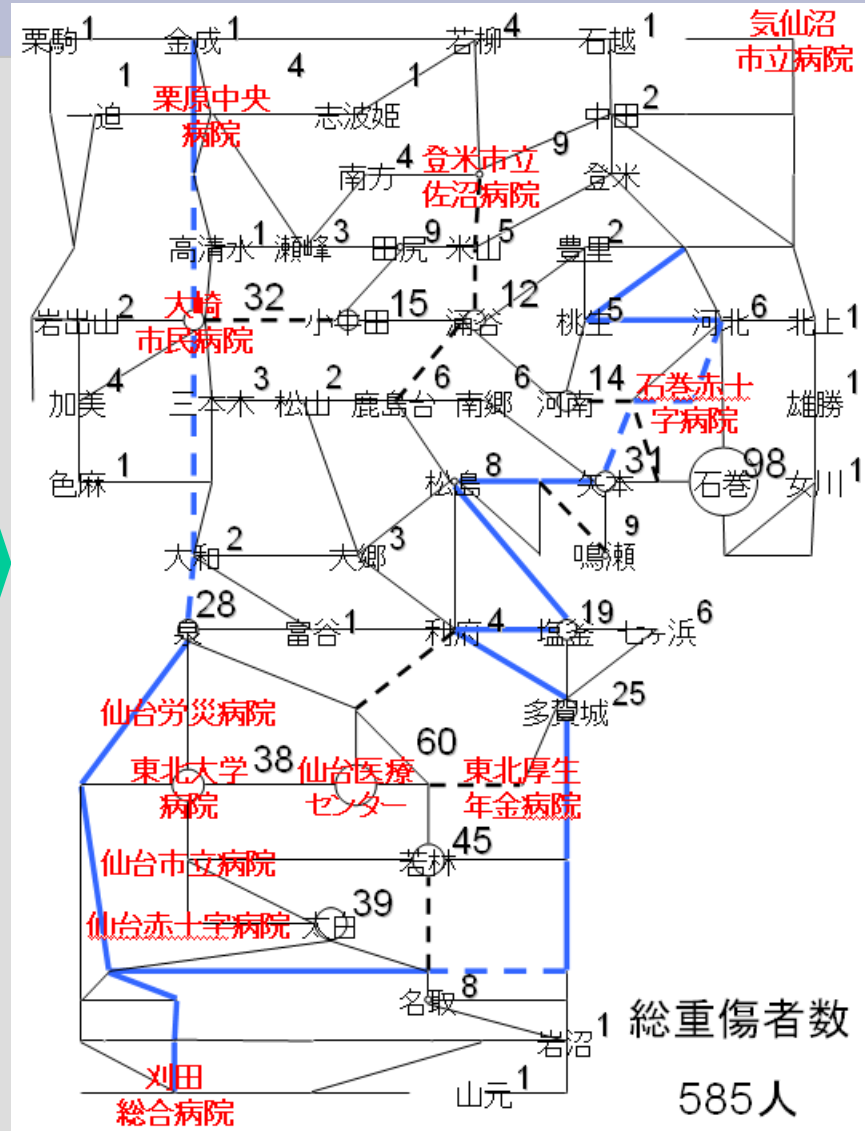


# 宮城県沖地震の被害設定

4時（火災なし）



県の被害想定



道路区間の途絶と発生重傷者数

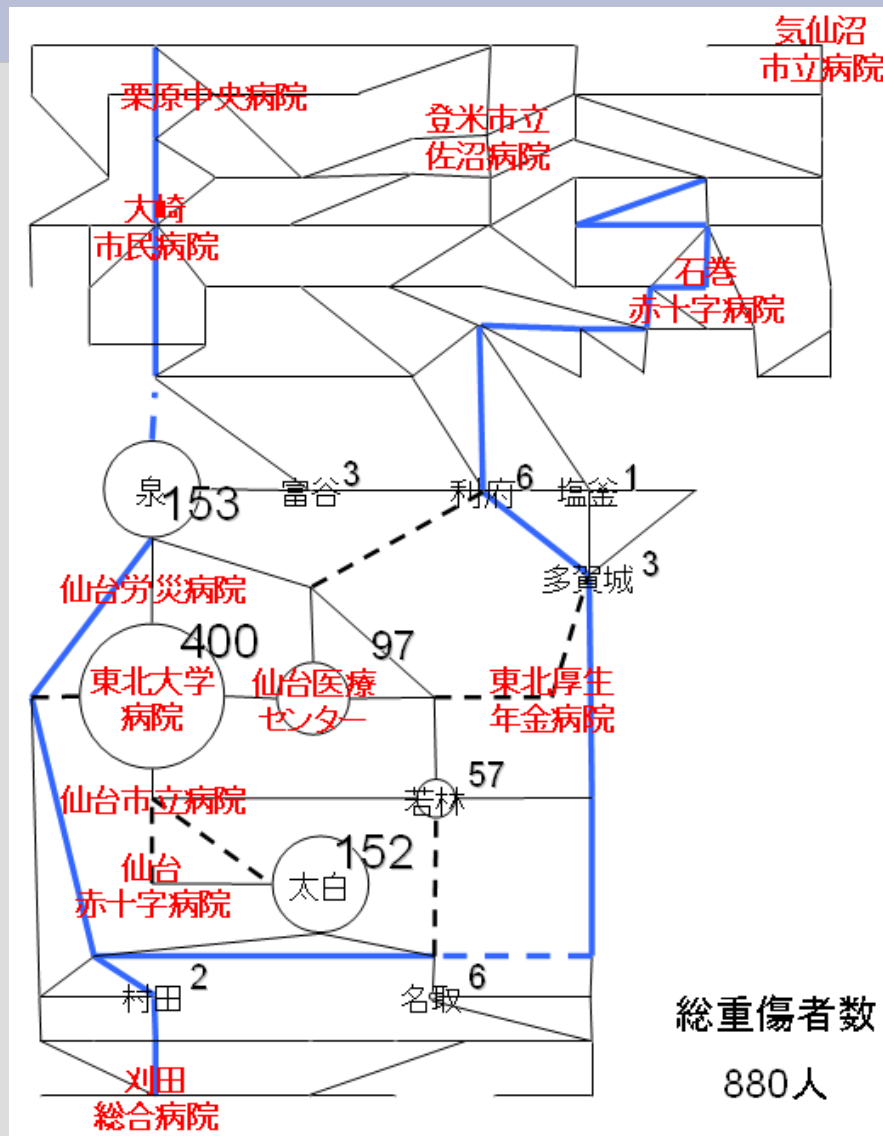


# 長町利府断層地震の被害設定

4時（火災なし）



県の被害想定

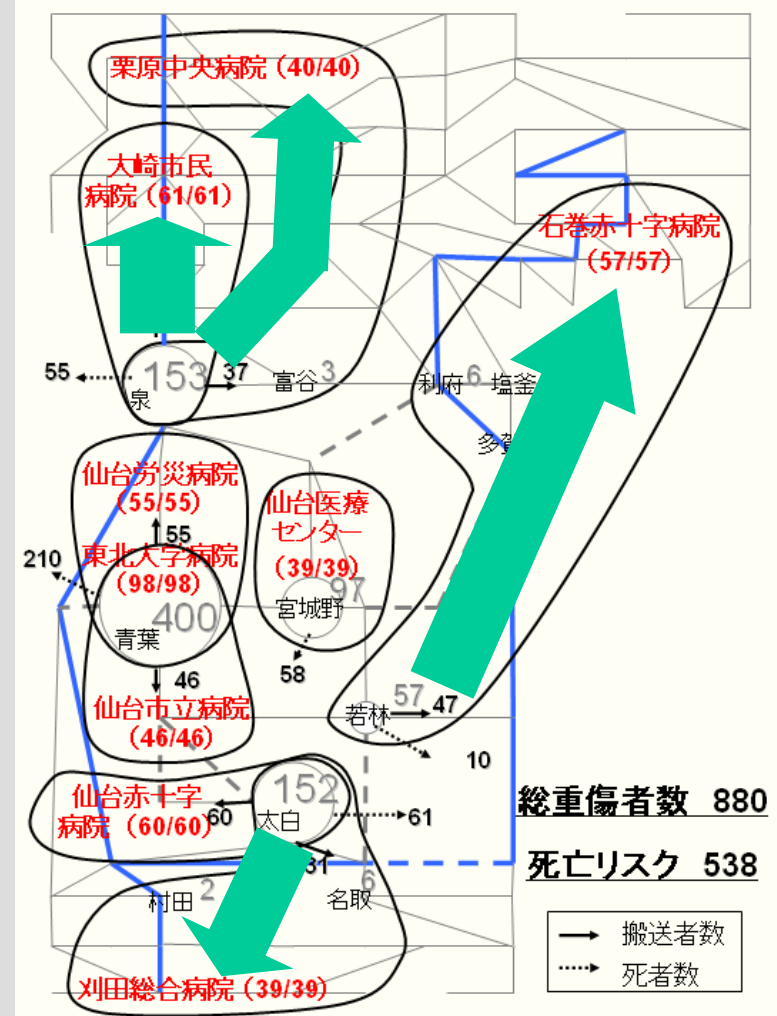
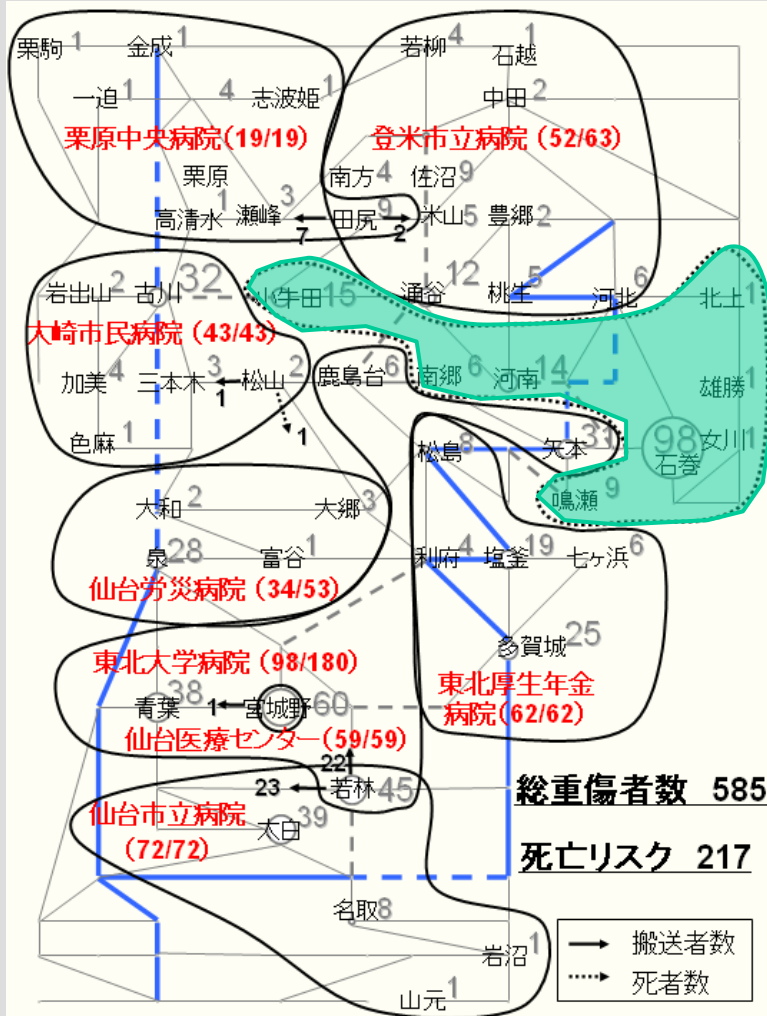


道路区間の途絶と発生重傷者数

# 耐震化なしでの最適搬送 (B=0)

## ■宮城県沖地震に対する最適搬送

## ■長町利府断層地震に対する最適搬送



▶ 病院近傍の道路途絶による搬送不可能な地域の発生

▶ 高速道路を活用した広域搬送の活用

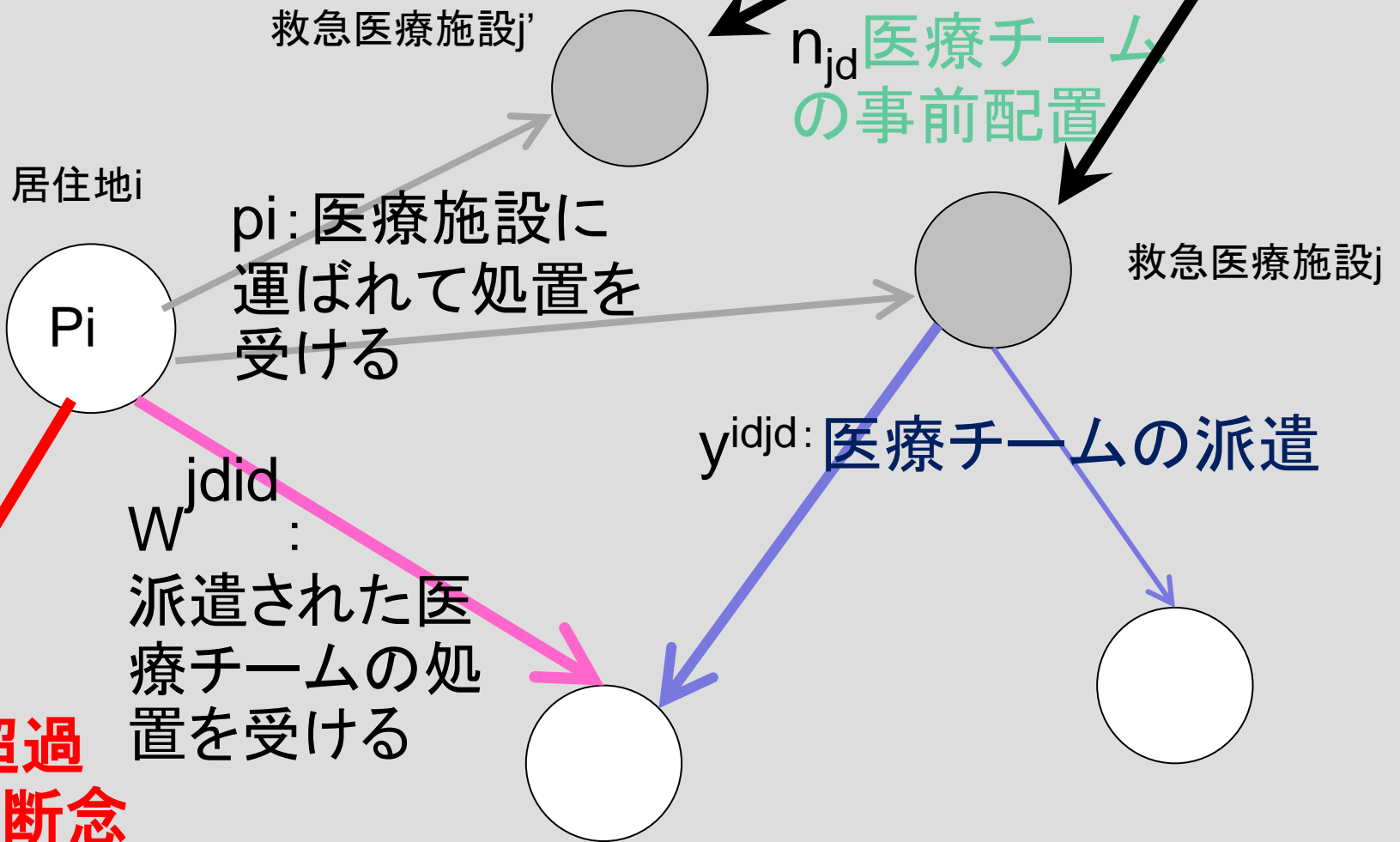


# 被災地への医療チーム派遣

医療部隊の事前配置と事後の派遣

N: 医療チームの総数

$n_{jd}$  医療チームの事前配置



時間超過による断念

$X_{if}$

重傷者の移動時間 VS 医療チームの移動時間

# 被災地への医療チーム派遣の考慮

医療チームの派遣先に、医療チームと重傷者の双方が到着すれば、医療行為ができると仮定する。（両者の移動時間を比較）

$$\min_{x,w,y,Y,Z} \sum_{i \in I} g \left[ \underbrace{\sum_{k \in \bar{K}} d_k x_{ik}}_{\text{基本モデルの総搬送時間}} + \sum_{i_d \in I_d} \sum_{j_d \in J_d} \max \left( \underbrace{\sum_{k \in \bar{K}_1} d_k w_{ik}^{j_d i_d}}_{\text{重傷者の総移動時間}}, \underbrace{\sum_{k \in \bar{K}_1} d_k y_{ik}^{j_d i_d}}_{\text{医療チームの総移動時間}} \right) \right] \quad (15)$$

$$\min_{x,w,y,Y,Z} g \left[ \sum_{i \in I} \sum_{k \in \bar{K}} d_k x_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{i_d \in I_d} \sum_{j_d \in J_d} U_i^{j_d i_d} \right] \quad \begin{aligned} U_i^{j_d i_d} &\geq \sum_{k \in \bar{K}_1} d_k w_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d, \\ U_i^{j_d i_d} &\geq \sum_{k \in \bar{K}_1} d_k y_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d. \end{aligned}$$

## 文字の定義

$w_{ik}^{j_d i_d}$  : 医療施設  $j_d$  から居住地  $i_d$  に派遣される医療チームに治療される居住地  $i$  の重傷者のうち、リンク  $k$  を使用する人数

$y_{ik}^{j_d i_d}$  : 居住地  $i$  の重傷者を治療するために医療施設  $j_d$  から居住地  $i_d$  に派遣される医療チームのうち、リンク  $k$  を使用する班数  
(治療する重傷者数で定義)

# 仮想ネットワークと被害の想定

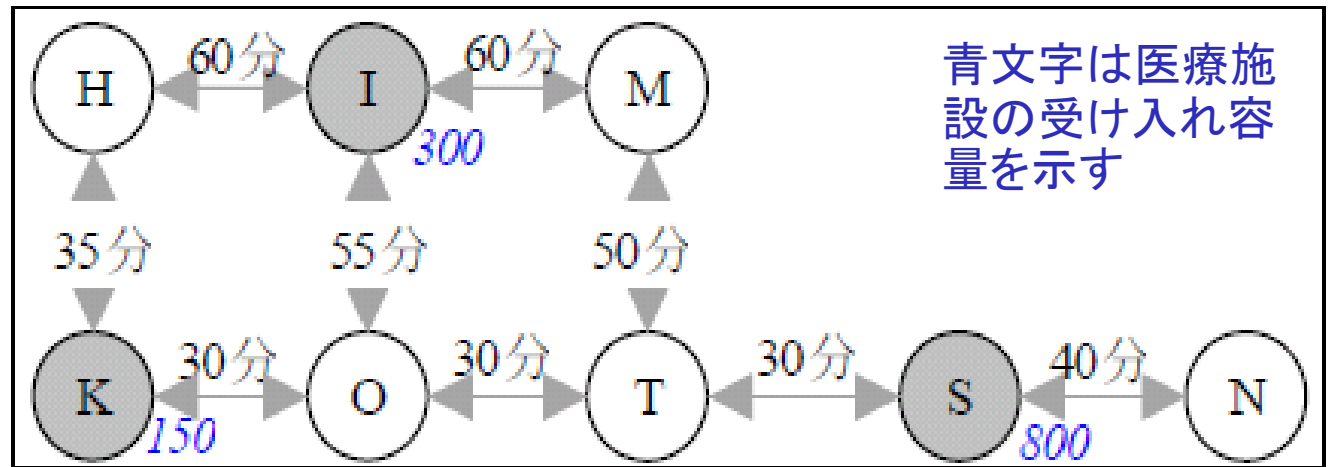


図1 計算例のネットワークと通常時所要時間

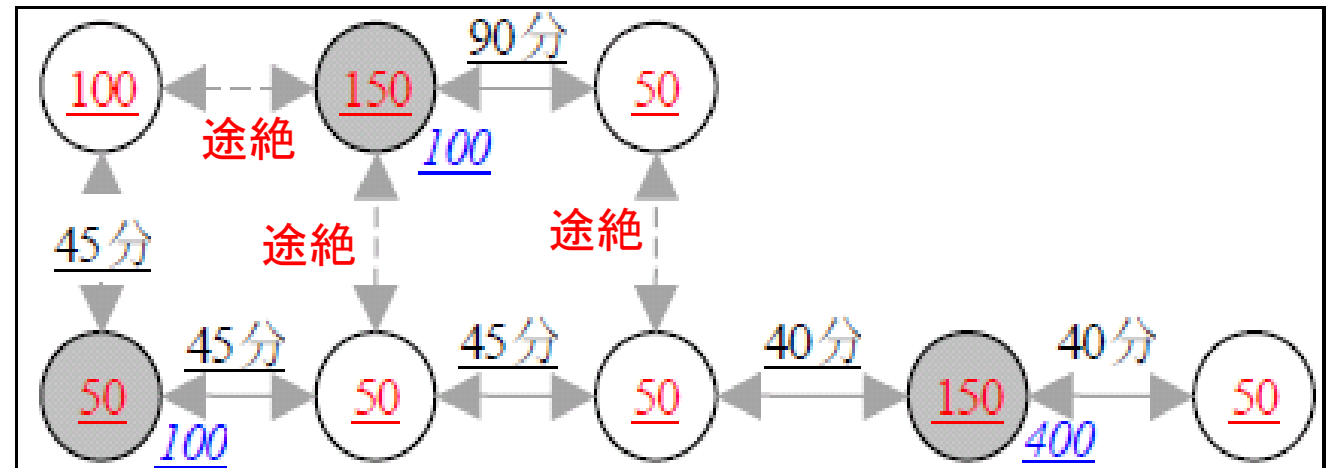


図2 重傷者数と道路, 医療施設能力の被害想定

被害の想定  
重傷者の発生  
道路の途絶  
所要時間の増加  
医療施設の容量低下



# 医療チーム派遣の効果

- 派遣可能な医療チームを増やすと
  - 同一のリスクを格安で達成できる
  - 医療チーム設置の経済効果

表1 総医療チーム数及び耐震化予算と死亡リスク値

		耐震化予算 B(億円)				
		0	10	20	30	40以上
医療 チ ーム 数 N	0	234.0	202.0	170.0	132.0	126.0
	2	221.2	195.6	157.2	127.6	119.6
	4	208.4	189.2	144.4	121.2	113.2
	6	198.8	182.4	134.8	116.8	109.2
	8	192.4	171.2	128.4	114.4	107.6
	10	186.0	160.0	122.0	110.0	106.0

死亡リスク値の単位は人

表2 各計算ケースにおける  
最適耐震化戦略と最適医療チーム配置

耐震化予算B (億円)	総医療チーム数 N	死亡リスク (人)	道路耐震化 Zk			医療施設耐震化Yj			医療チーム配置njd			
			HI (5)	IO (5)	MT (5)	K (10)	I (20)	S (40)	K	I	S	
10	0	202.0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	☒3a ☒3b
	2	195.6	0	0	0	1	0	0	0	0	2	
	4	189.2	0	0	0	1	0	0	4	0	0	
	6	182.4	0	1	1	0	0	0	6	0	0	
	8	171.2	0	1	1	0	0	0	8	0	0	
	10	160.0	0	1	1	0	0	0	10	0	0	
20	N		0	1	1	0	1	0	N	0	0	
30	0	132.0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	☒4a
	2	127.6	1	0	1	0	1	0	0	0	2	☒4b
	4	121.2	1	0	1	0	1	0	0	0	4	
	6	116.8	1	0	1	0	1	0	1	0	5	
	8	114.4	1	0	1	0	1	0	3	0	5	☒5a
	10	110.0	0	1	1	0	1	0	5	0	5	☒5b
40	0	126.0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	
	2	119.6	0	1	1	1	1	0	0	0	2	
	4	113.2	0	1	1	1	1	0	0	0	4	
	6	109.2	0	1	1	1	1	0	0	0	6	
	8	107.6	0	1	1	1	1	0	0	0	8	☒6a
	10	106.0	0	0	1	1	1	0	0	0	10	☒6b
50以上	N		0	1	1	1	1	0	0	0	N	

# 医療チーム配置による 最適耐震化政策の変化

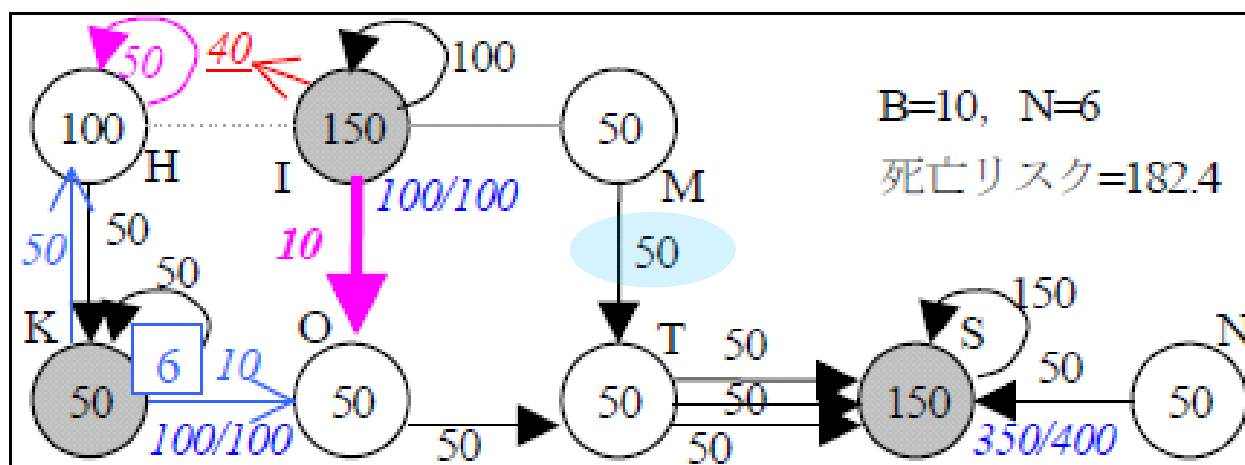
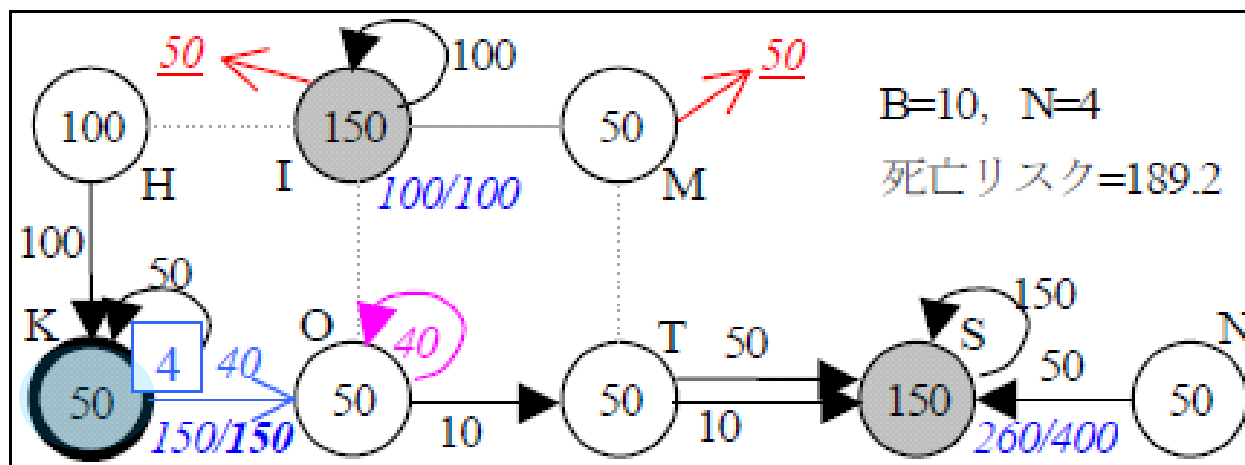


図3 医療チーム派遣の増加により不要となる  
 病院耐震化予算を道路耐震化に回す例



# 医療チーム配置による 最適耐震化政策の変化

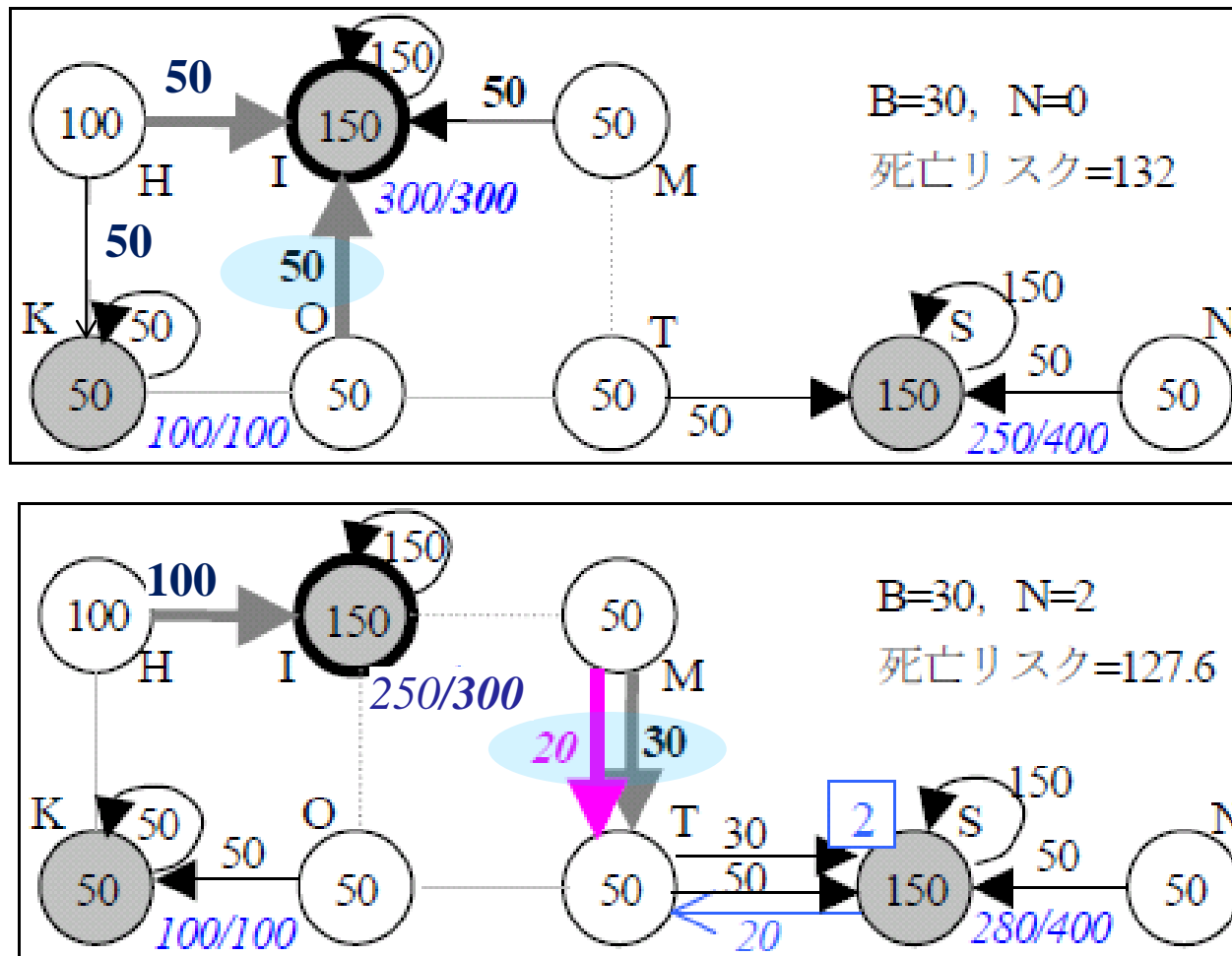


図4 医療チーム派遣の増加により  
耐震化される道路区間が変化する例

# 医療チーム配置による 最適耐震化政策の変化

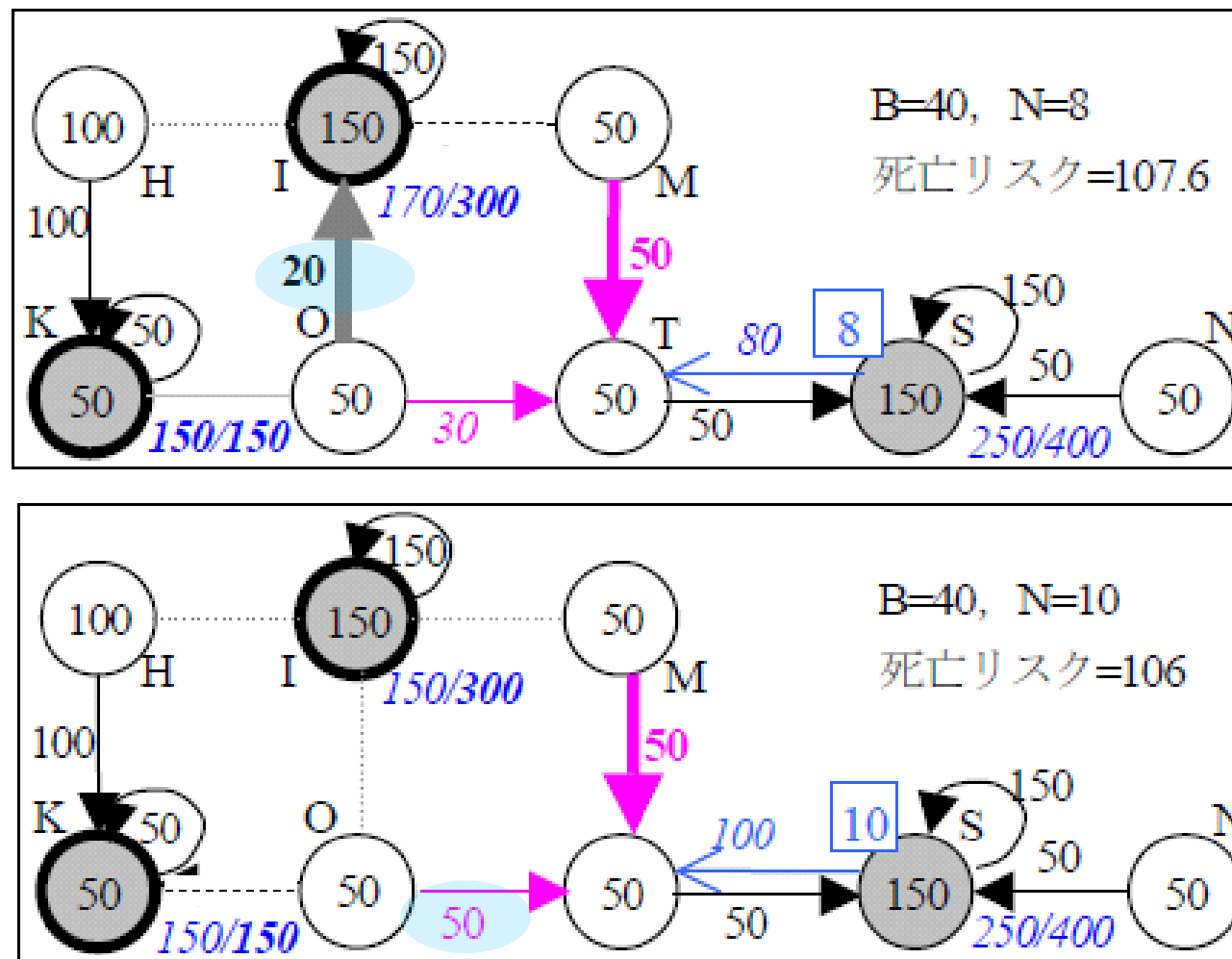


図6 医療チーム派遣の増加により  
道路区間の耐震化が不要になる例

# 医療チーム派遣考慮のまとめ

- ・地震重傷者搬送を考慮した耐震化計画モデルにおいて、重傷者の搬送に加えて医療チームを派遣することも考慮できるように拡張した
- ・総医療チーム数の増加によって救急医療施設の耐震化費用の転用や道路施設の耐震化費用の削減が可能になり、最適耐震化戦略が変化する場合があります

(今後の方向性)

- ・実用的な規模のネットワークに適用する方法を考える
- ・重傷者は医療施設への到着・派遣医療チームとの接触と同時に治療が行われると仮定し、待ち時間を無視している  
→治療時間を考慮した2次計画問題への拡張



# 災害医療との連携研究の必要性

## 真に災害に強い地域とするために

- 災害医療の考え方や体制が異なれば、災害対応力を高めるためのハードな強化策の内容が異なってくる
- 医療機関の数週間程度の運用能力に対して、他の都市圏や地域からの応援部隊（DMAT）の輸送能力や医薬品等の補給能力が影響する
- 平常時の医療施設の役割、災害医療の実際的な課題を確認しながら、本当に役立つ計画作成を目指す必要がある