

都市間交通ネットワークの強靱化計画モデル

Huseyin TIRTOM¹・奥村 誠²・山口 裕通³・Rubel DAS⁴

¹非会員 東北大学研究支援者 災害科学国際研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館148室)
E-mail:tirtom@irides.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館152室)
E-mail:mokmr@m.tohoku.ac.jp

³学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館147室)
E-mail:h-ymgc@plan.civil.tohoku.ac.jp

⁴非会員 東北大学特別教育研究教員 災害科学国際研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館147室) E-mail:rubeldas@irides.tohoku.ac.jp

本年6月に国土強靱化基本計画が発表された。その中では、太平洋ベルト地帯の幹線などの基幹的陸上海上交通ネットワークの機能停止や、新幹線等の基幹インフラの損壊を避けるべきであるとしている。本研究は、都市間の交通ネットワークの機能を維持する上で、強靱化の効果が大きいリンクを見いだし、その順序付けを行うための数理計画モデルの提案を行う。具体的には、災害等で各リンクが途絶する確率が事前に与えられる場合と未知の場合を想定し、災害後に途絶しなかったリンクを迂回して基本的な交通需要を捌く際の総所要時間の最小化を考える。また複数のリンクを選んで途絶確率を0にするような強靱化投資ができるかと仮定し、総所要時間の増加を最小に抑えるような強靱化リンクを求めるというモデルを提案し、仮想ネットワークでの計算結果を述べる。

Key Words : *intercity transportation, multi-modal, resilience, fortification*

1. はじめに

国土の基本的な幹線交通ネットワークサービスは、災害後の速やかな復旧と復興のための重要な条件である。2013年12月に制定された国土強靱化基本法を受けて、2014年6月に国土強靱化基本計画が制定された¹⁾。その中では、いかなる災害が発生しようとも、(1)人命の保護が最大限図られること、(2)国家及び社会の重要な機能が致命的な障害を受けず維持されること、(3)国民の財産及び公共施設に係る被害の最小化、(4)迅速な復旧復興の4つを基本目標とし、避けるべき最悪の事態の例として、太平洋ベルト地帯の幹線が分断する等、基幹的陸上海上ネットワークの機能停止、複数空港の同時被災、地域交通ネットワークが分断する事態、新幹線等の基幹インフラの損壊により復旧・復興が大幅に遅れる事態を掲げ、広域的・狭域的な視点から代替ルートを早期に確保することを提案している。

特に、速やかに実施すべき重点プログラムとして、基幹的陸上海上交通ネットワークの機能確保の取り組みを掲げ、「輸送モードごとの代替性の確保だけでなく、災

害時における輸送モード相互の連携・代替性の確保を図る必要がある」と指摘している¹⁾。

本研究は、途絶リスクにさらされている都市間の交通ネットワークの機能を維持する上で、強靱化の効果が大きいリンクを選ぶための数理計画モデルを提案する。このとき、一つの輸送モードの中での代替ルートだけでなく、異なる輸送モードとの乗継ぎ利用を含む代替ルートを考慮できるように、著者らが開発した都市間旅客交通のMulti-modal Network Planning Model²⁾ (以下、MNPモデル)を基本として、その外側に強靱化すべきリンクを選ぶ部分を付加した、混合整数計画法のモデルを構築する。

本研究の関心は、都市間交通ネットワークにおいて強靱化を行うべきリンクが、通常時に交通量が多い幹線リンクと一致するのか、あるいは途絶の影響力が大きなリンクと一致するのか、という点にある。さらに、このような強靱化すべきリンクは、災害後に臨時的航空路線や高速バス路線を用意できることにより変化するのか、についても関心がある。もちろんこれらの問いに対する答えは対象ネットワークの構造や災害後に輸送すべきOD交通量の与え方に依存するため、一般的な解の性質

を議論することは困難である。本論文で提案するモデルはMNPモデルをほぼそのまま部分モデルとして用いており、変数の数が想定する途絶パターンの数に比例して増加するために、実用的な規模のネットワークに対しては適用可能となっていない。本論文の分析目的に合わせれば、リンク頻度を明示的に考えない、乗換リンクを省略するなどの方法で変数のサイズを減少させ、適用できる範囲を大きくする改善が残されている。

以下2.では地域に存在するインフラの機能停止の影響の把握およびその影響を最小化する補強計画モデルに関する既存研究を概観する。3.では最適な強靱化リンクを求めるための数理計画モデルを提案する。4.では仮想的な簡易ネットワークに対するモデルの適用結果を述べる。

2. インフラ機能停止と強靱化の既往研究

インフラの機能停止の影響把握と、その強靱化計画モデルに関する既往研究を概観する。

(1) 地域施設の機能停止と強靱化の研究

インフラの機能停止による影響の把握と強靱化は、与えられた複数の地点からの需要に対して少数の地点に施設を配置してサービスを提供する状況を対象に考えられるようになった。Churchら(2004)は、需要点から施設までの総移動距離を小さくするメディアン問題、および施設から制限距離以下にある需要点からの総需要を最大化するセンター問題を対象に、既存の施設のうちの r 個が機能停止する状況(r -interdiction)を考え、その影響が最大となるような機能停止パターンを求める問題を混合整数計画法により定式化した³⁾。さらにChurch & Scaparra(2007)では、事前に補強(fortification)を行っておけば機能停止が防止できると仮定し、補強すべき施設を選ぶ問題を定式化した⁴⁾。

このとき、機能停止パターンについては、Zhang & Bier(2007)が論じた⁵⁾ように、2つの考え方があり得る。一つは自然災害のように、それぞれの施設の停止確率及びその組合せである複数施設の停止パターンの発生確率を、主観的にせよ想定できる場合である。このときには確率で重みを付けた期待値を考えればよい。もう一つの考え方は、あらかじめどのような形で機能停止が起きるかわからない場合、もしくはテロリストが悪影響を最大にするパターンで攻撃を仕掛けてくるような場合で、計画者としては最大の悪影響を与えるパターンを想定し、悪影響が最小になるように補強する施設を決める必要があるため、ミニマックス構造を持つ2階層の計画問題として定式化される。Gilboa & Schmeidler(1989)は、不確実

性の直面した人間の合理的選択行動は、重み付き期待値とミニマックス関数の組合せで近似できる⁶⁾ことを示した。

Scappara & Church(2008)ではミニマックス問題を2階層の混合整数計画法の形で定式化しているが⁷⁾、Choi & Suzuki(2013)のように、ミニマックス構造は操作変数を停止パターンごとに定義することにより、容易に1階層の混合整数計画問題に帰着できる⁸⁾。ただしその代償として、変数のサイズが大きくなり、実装性や計算時間の問題が生じてしまうという問題がある。

以上の研究では施設の停止(攻撃)および補強は0-1変数で表現され、同時に停止する施設数の r 、および補強を行う施設数は所与としている。しかしながら、Liberatoreら(2011)のように個々の施設の停止確率を与えるものの、同時に停止する施設数を未知として扱うモデル⁹⁾や、Zhuら(2013)のように補強の実施を確率的に与えるモデル¹⁰⁾も提案されている。ただしこのような拡張を行うと最適解の一意性は保証できなくなり、ヒューリスティックな解法に頼らざるを得なくなっている。

(2) ネットワークの途絶と強靱化の研究

ネットワークの機能停止の影響に関する研究は、道路ネットワークの信頼性解析という分野として膨大な研究が蓄積されており、その概要は倉内ら(2007)が簡潔にまとめている¹¹⁾。災害直後には一定時間内に被災地に到達できるか、被災者を搬送できるかが問題となるため、ノードの孤立や一定時間内の到達性に着目した「連結信頼性」の評価が行われる。一方、数日後からは通常時の交通分布や経路選択のパターンと整合するサービスが提供できるかが問題となり、所要時間の増大に着目した評価が行われる。

ネットワーク上のリンクの補強をどのような順序で行うべきかについて、Bellら(2008)¹²⁾やCappanera & Scaparra(2011)¹³⁾は2階層の計画モデルを提案し、その解法について考察している。奥村ら(2009)は、地震による道路網と医療施設の双方が損壊する可能性がある場合に、医療施設の利用を表す仮想的なリンクを設けることで両者の耐震化問題を一つの計画問題として表現できることを示し、複数の被災パターンが想定できるのであれば、発生確率による重み付きの被害の最小化、および発生確率が不明のときのミニマックス最小化の双方とも、混合整数線形計画法モデルで表現できることを示した¹⁴⁾。

(3) 都市間旅客交通ネットワークの強靱化

以上のように、1つの都道府県に収まるような範囲の道路ネットワークを対象とする信頼性評価と耐震化計画についての研究蓄積はあるものの、それを超える国土レ

ベルでの強靱化政策については、観念的に必要性が語られるばかりで研究の蓄積は乏しい。また、緊急支援物資輸送などの点で必要性が理解されやすい地域間物流のための高速道路網や港湾の耐震化に比べて、災害後の都市間旅客交通サービスの維持は話題に上りにくい。

しかし、復旧と復興の計画を立てて実施していく上では、東京などにいる政策決定権限を持つ人々やその代理となる人びとが被災地に入って調査、検討、調整を行うことが必要となり、都市間交通サービスの維持は復旧・復興のスピードを大きく左右すると考えられる。さらに、新幹線網の機能維持策を考える上では、災害後に臨時的航空路線や高速バス路線を用意できる可能性もあるため、既存の輸送モードごとのネットワークをどのように補強するだけでなく、複数モードによる機能の維持を考慮できるような強靱化計画のモデルが必要となる。

3. MNPモデルを内包する強靱化計画モデル

著者らは、複数モードを考慮した最適ネットワークを計画するためのMNPモデルを提案し²⁾、最適ネットワーク上における複数モード間の補完関係について分析してきた¹⁵⁾。本研究では、このMNPモデルに最適な補強リンクを求める部分を新しく導入する。本章では、新しく追加する目的関数に加え、既発表²⁾のMNPモデルの定式化についても簡単に説明する。

(1) MNPモデルの基本構成

MNPモデル²⁾では、複数のOD間の旅客数を所与とした上で、これらの旅客を複数のモードからなるネットワーク上に配分して、利用者全体の総旅行時間と運営費用の和を小さくするような各リンクの航空便・列車の頻度を定める。この問題は、混合整数計画問題として定式化される。このとき、解の実行可能性を保証するため、各リンクにおいては、通過旅客数がリンクの最大頻度によって決まる容量以下であるという制約と、通過旅客数によって決まる収入がその頻度を維持するコストを上回るという制約を置いている。

本研究では災害後の短期的な運営費用は無視できると考え、最大容量の制約のみを考える。

(2) 内生変数とパラメータ

都市ごとにノード $n \in N$ を置き、それらをつなぐ方向別のリンクをモード別 ($m \in M$) に定義する $(i, j) \times m \in L$ 。またモード間の乗り継ぎを明示的に表現するため、各都市ノード n をモード別の着ノード $n_- \times m$ とモード別の発ノード $n_+ \times m$ に区分し、その

間に乗継リンク $(m, m') \times n$ を設定する。一方起終点ゾーン $(k, l) \in K \times K$ 間のOD交通量 T_{kl} は所与とする。

一方、一度に機能を失うリンクの組み合わせを「被災パターン」と呼び $h \in H$ で表す。本研究ではそれらの発生確率 q^h が既知である場合と、わからない場合を想定する。各被災パターンのもとで、モード別のリンクが途絶するか否かを(0-1)変数 P_{ij}^{mh} で表現する。これらの途絶リスクに対して、補強を行うことにより被災をしても機能の低下を減少できると仮定する。補強により確保できるリンク容量の割合を ρ_{ij}^m で与え、本モデルの政策変数として、どのリンクを補強するかという $\{0,1\}$ 変数 R_{ij}^m を考える。

このほかの内生変数は、旅客の流動を表す4つの変数と、リンクサービスの頻度を表す変数であり、途絶パターン $h \in H$ ごとに定義しておく。なおこれが問題のサイズを大きくする原因となるため、さらに簡略化する方法を検討することが課題である。旅客の流動を表す変数のうち、通常モード別リンクに流れる交通量を出発地 k ごとに定義して X_{ij}^{kmh} で表す。ノードにおける乗継交通量も出発地別に定義して $Y_n^{kmm'h}$ で表す。このほか、出発地における新規の乗車数をモード別に B_k^{mh} と表し、目的地的における各出発地からの到着者数をモード別に A_n^{kmh} と表示する。一方、リンクサービスについては、モードごとの頻度を F_{ij}^{mh} で表す。

外生的に与えるパラメータは以下のとおりである。通常リンクにおけるモードごとの所要時間を t_{ij}^m 、各ノードの一人当たりの乗継所要時間を $\tau_n^{mm'}$ とする。なお同一モード内での乗継は、そのノードを乗車したまま通過する場合と区別しない。モード別の1便当たりの最大旅客容量を s_m 、最大設定可能頻度を g_m とする。リンクごとの補強費用を c_{ij}^m とし、対象ネットワーク全体に使用できる補強費用の総額を C とする。

(3) 2種類の目的関数

まず、各被災パターンの発生の可能性が評価されており、発生確率 q^h が既知である場合を考える。このとき、目的関数として、旅客の総所要時間の期待値を用いることができる。すなわち目的関数は、先に定義したパラメータを用いて次のような内生変数の線形式で与えられる：

$$\min_{R_{ij}^m} ET = \sum_{h \in H} q^h \left(\sum_i \sum_j \sum_m t_{ij}^m \sum_k X_{ij}^{kmh} + \sum_n \sum_m \sum_{m'} \tau_n^{mm'} \sum_k Y_n^{kmm'h} \right). \quad (1)$$

式(1)の右辺カッコ内の第1項は乗車中の総所要時間、第2項は総乗継時間を示す。

他方、各被災パターンの発生確率 q^h がわからない場合には、最も不利な被災パターンを想定して、そのとき

の総所要時間を最小化する必要がある。このミニマックス構造は、以下の2つの式に置き換えることが可能である：

$$\min_{MT, R_{ij}^m} MT. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} MT &\geq \left(\sum_i \sum_j \sum_m t_{ij}^m \sum_k X_{ij}^{kmh} \right. \\ &\quad \left. + \sum_n \sum_m \sum_{m'} \tau_n^{mm'} \sum_k Y_n^{kmm'h} \right), \forall h \in H \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)のMTは総所要時間の最大値を表し、式(3)において、その値がどんな被災パターンのもとでの総所要時間よりも小さくはないことを保証している。

いずれの目的関数を使う場合にも、操作変数 R_{ij}^m に対して補強費用に関する予算制約を考える必要がある。つまり、

$$\sum_i \sum_j \sum_m c_{ij}^m R_{ij}^m \leq C. \quad (4)$$

が成立する必要がある。

(4) 交通量に関する制約条件

つぎに交通量の保存条件を記述する。着ノード n における到着交通量について、以下の2式が成立する：

$$\sum_{i \in N^-(n)} X_{in}^{kmh} = A_n^{kmh} + \sum_{m' \in M} Y_n^{kmm'h}, \quad (5)$$

$$\forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M, \forall h \in H$$

$$\sum_m A_n^{kmh} = T_n^k, \forall n \in N, \forall k \in K, \forall h \in H \quad (6)$$

式(5)は、着ノードに到着した旅客が、そのノードを最終目的地にする旅客とそのノードで乗り継ぎを行う旅客に分かれることを示している。式(6)は各モードで最終目的地に到着した出発地別の交通量の和が、OD交通量に等しいことを表している。

同様に発ノード n から出発する旅客について、次の2式が成立する：

$$B_n^{mh} + \sum_{m' \in M} Y_n^{km'mh} = \sum_{j \in N^+(n)} X_{nj}^{kmh}, \quad (7)$$

$$\forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M, \forall h \in H$$

$$\sum_{l \in N} T_{nl} = \sum_{m \in M} B_n^{mh}, \forall n \in K, \forall h \in H \quad (8)$$

式(7)は、ある発ゾーンを出発地としてモード m に乗車する旅客と、そのゾーンでモード m に乗継いだ旅客が、その発ゾーンからの旅客数に等しいことを表している。式(8)は、そのゾーンを出発地とするOD交通量の和は、いずれかのモードを用いて出発することを保障している。

次に頻度設定に関する制約条件を記述する。あるリンクのモード m に対して正の頻度を設定できるのは、そのリンクが被災しないか、事前に補強されているときであり、その値は最大でも g_m であるという条件は、次の2本の式で表現できる：

$$F_{ij}^{mh} \leq g_m(1 - P_{ij}^{mh} + \rho_{ij}^m R_{ij}^m), \quad (9)$$

$$\forall (i, j) \times m \in A, \forall h \in H.$$

$$F_{ij}^{mh} \leq g_m, \forall (i, j) \times m \in A, \forall h \in H. \quad (10)$$

最後にリンク×モードごとに、頻度・旅客数の関係を記述する。旅客数は頻度から計算される容量の範囲内におさまる必要がある：

$$\begin{aligned} \sum_k X_{ij}^{kmh} &\leq s_m F_{ij}^{mh}, \\ \forall (i, j) \times m &\in A, \forall h \in H. \end{aligned} \quad (11)$$

(6) 定式化のまとめと解法

最後に、変数の定義域として

$$\begin{aligned} X_{ij}^{kmh} &\geq 0, Y_n^{kmm'h} \geq 0, A_n^{kmh} \geq 0, \\ B_n^{mh} &\geq 0, F_{ij}^{kmh} \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

および、

$$R_{ij}^m \in \{0,1\} \quad (13)$$

が加わる。

以上、式(1)を目的関数とし式(4)～(13)を制約条件とする期待総所要時間最小化問題、および式(2)を目的関数とし式(3)～(13)を制約条件とするミニマックス問題は、いずれも少数の $\{0,1\}$ 変数(R_{ij}^m)を含む混合線形計画問題となる。したがって多くの数学ソフトウェアに実装されている混合整数計画法のプログラムのパッケージを利用して容易に解くことができる。

4. 仮想ネットワークへの適用例

(1) 仮想ネットワークの設定

3で定式化したモデルは複数モードのネットワークに適用可能であるが、本論文ではまず、8都市を結ぶ13本の鉄道リンクで構成される図-1のようなネットワークを考える。

各鉄道リンクの所要時間はすべて等しく $t_{ij}^{\text{rail}} = 50$ とする。一方、空港が存在する都市間において災害後に臨時のサービスが提供でき、その所要時間を $t_{ij}^{\text{air}} = 120$ と仮定する。この仮定により、3リンク以上の迂回が必要になる時だけ臨時航空リンクが使用される状況を想定している。また各ノードの乗継時間は、 $\tau^{\text{rail,rail}} = 15$, $\tau^{\text{rail,air}} = \tau^{\text{air,rail}} = \tau^{\text{air,air}} = 60$ とする。つまり、航空と鉄道との乗継は代替鉄道ルートが存在しないときにしか発生しない設定としている。1便当たりの容量は、 $s_{\text{rail}} = 400$, $s_{\text{air}} = 200$ とする。便数の設定容量はどのリンクとも十分($g_{\text{rail}} = 50$, $g_{\text{air}} = 50$)で、必要な頻度が自由に設定できるとする。

災害後のOD需要は、すべてのノード間において距離に関わりなく一律に $T_{nl} = 200$ とする。

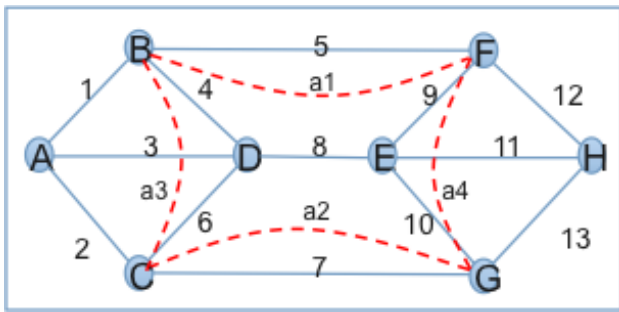


図-1 対象とする仮想ネットワーク

表-1 被災による総所要時間への影響

Destruction Set		Line Frequencies												
Destructed Links	Travel time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
none	1,028,000	2.0	2.5	1.5	1.5	2.0	2.0	3.0	3.5	2.0	1.0	1.5	1.0	1.5
1	1,080,000	0.0	1.5	2.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0
2	1,080,000	1.0	0.0	2.5	2.0	1.5	4.0	2.5	4.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0
3	1,080,000	2.0	3.5	0.0	1.0	1.5	3.0	3.5	3.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.5
4	1,054,000	3.0	2.5	2.0	0.0	3.0	2.0	2.5	3.0	2.5	1.0	1.5	1.5	1.5
5	1,132,000	1.5	2.5	2.0	2.0	0.0	2.0	3.0	5.5	3.0	1.0	2.0	0.5	1.5
6	1,054,000	2.5	3.0	2.0	1.5	2.0	0.0	3.0	4.0	2.0	3.0	1.5	1.0	1.0
7	1,132,000	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	2.5	0.0	6.5	2.0	3.0	2.0	1.0	0.5
8	1,132,000	2.0	3.0	0.5	1.5	3.0	2.5	5.0	0.0	2.0	3.0	0.5	1.0	2.0
9	1,054,000	2.0	2.0	1.5	2.0	3.0	1.5	3.0	3.0	0.0	1.0	2.0	3.0	2.5
10	1,054,000	2.0	2.5	1.0	1.0	1.5	2.0	3.5	3.5	1.5	0.0	1.5	2.0	3.0
11	1,080,000	2.0	2.5	1.0	1.0	2.0	1.0	3.0	3.0	1.5	2.5	0.0	1.5	3.0
12	1,080,000	2.5	2.5	1.5	1.5	3.0	1.5	3.5	3.5	4.0	2.5	2.5	0.0	1.5
13	1,080,000	2.0	2.0	1.5	1.0	1.5	2.5	3.0	4.5	2.0	2.5	2.5	1.0	0.0
(5,8) (7,8) (max)	1,444,000	3.0	5.0	0.5	2.0	0.0	4.0	8.0	0.0	3.0	5.0	0.5	0.5	2.5
(4,6) (4,10) (6,9) (9,10) (min)	1,080,000	3.0	3.0	2.5	0.0	3.0	0.0	2.5	3.0	2.5	2.5	1.5	1.0	1.0

(2) 機能停止の影響の推定

まず、補強のための総予算を $C = 0$ とおいて式(1)および式(4)~(13)からなるモデルを解き、各被災パターン下での最小所要時間を計算した。被災パターンとして、13本のリンクの1本のみが被災するケース(13通り)と、2本が被災するケース(${}_{13}C_2 = 78$ 通り)を考える。それらの発生確率は均等であるとし、 $q^h = 1/13$ 、または $q^h = 1/78$ とおく。各ケースにおける総所要時間と各リンクで必要となる頻度を表-1に示す。設定したパラメータ値より、各リンクを利用するODペア数の半分が必要な頻度となる。

まず、被災を受けない状況下での総所要時間は1,028,000で、交通量を400で割った頻度の値に基づくと、東西に連絡する役割を持つ中央部のリンク{7,8}の重要性が高く、次いでリンク2の交通量が多い。その後リンク{1,5,6,9}、{3,4,11,13}の順で、リンク{10,11}の交通量が少ない。

1本だけが被災する時の影響は、以上の順番と類似しているが、完全には一致しない。つまり東西に結ぶリンク{5,7,8}はすべて同じ影響力を持ち、104,000の所要時間増加を招く。次いで最端部にあるリンク{1,2,3,11,12,13}の影響力が大きく被災により52,000の影響を持つ。これらに比べて中間部にあるリンク{4,6,9,10}の影響力は小さく26,000である。

表-1の最後の2行は、2本が同時に被災するときの影響

表-2 2本が被災する場合の最適補強案

Results			Worst Case		
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time
2	2	1,122,000	5,7	(1,4) (2,6) (9,12) (10,13)	1,236,000
2	3	1,105,333	5,7,8	(1,4) (2,6) (9,12) (10,13)	1,236,000
2	4	1,094,667	5,7,8,1	(2,6) (9,12) (10,13)	1,236,000
2	5	1,084,000	5,7,8,1,2	(9,12) (10,13)	1,236,000
2	6	1,073,333	5,7,8,1,2,12	(10,13)	1,236,000
2	7	1,062,667	5,7,8,1,2,12,13	(3,4)(3,6)(3,11)(4,9)(6,10)(9,11)(10,11)	1,132,000
2	8	1,054,000	5,7,8,1,2,12,13,3	(4,9)(6,10)(9,11)(10,11)	1,132,000
2	9	1,045,333	5,7,8,1,2,12,13,3,11	(4,9)(6,10)	1,132,000
2	10	1,040,667	5,7,8,1,2,12,13,3,11,4	(6,10)	1,132,000
2	11	1,036,000	5,7,8,1,2,12,13,3,11,4,6	(9,10)	1,080,000
2	12	1,032,000	5,7,8,1,2,12,13,3,11,4,6,9	(*,10) (...)	1,054,000
2	13	1,028,000	5,7,8,1,2,12,13,3,11,4,6,9,10		1,028,000

表-3 3本が被災する場合の最適補強案

Results			Worst Case		
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time
3	3	1,193,818	1,7,12	(2,5,8) (5,6,8) (5,8,10) (5,8,13)	1,574,000
3	4	1,153,091	1,7,12,5	(2,6,8) (8,10,12)	1,496,000
3	5	1,125,455	1,7,12,5,8	(2,3,4) (2,6,10) (6,10,13) (9,11,13)	1,392,000
3	6	1,104,909	1,7,5,8,2,13	(4,9,12) (10,11,12)	1,392,000
3	7	1,084,364	1,7,5,8,2,13,12	(3,4,6) (9,10,11)	1,236,000
3	8	1,070,182	1,7,5,8,2,13,12,3	(9,10,11)	1,236,000
3	9	1,056,000	1,7,5,8,2,13,12,3,11	(4,6,9) (4,6,10) (4,9,10) (6,9,10)	1,158,000
3	10	1,048,000	1,7,5,8,2,13,12,3,11,4	(6,9,10)	1,158,000
3	11	1,040,000	1,7,5,8,2,13,12,3,11,4,6	(9,10,*) (...)	1,080,000
3	12	1,034,000	1,7,5,8,2,13,12,3,11,4,6,9	(10,*,*) (...)	1,054,000
3	13	1,028,000	1,7,5,8,2,13,12,3,11,4,6,9,10		1,028,000

を示している。最大の影響は中央部のリンク{5,7,8}の中の2本が被災する場合で、1本の影響の4倍の影響力がある。最後の行から、{4,6,9,10}という影響力が小さいリンクは、2本が被災しても影響は多くの場合、1本の影響の2倍である52,000になっていることが確認できる。

(3) 期待総所要時間を最小化する鉄道リンクの補強案

まず、1本のリンクが被災するケースを考える。また補強により完全に機能が維持でき、 $\rho_{ij}^{rail} = 1$ とする。このときは補強したリンクが被災する確率は1/13で、そのときのみ効果が生じる。 $C = c_{ij}^{rail} = 1$ であり1本のみが補強できるケースでは、表-1で示した影響の大きさの1/13が効果の期待値となり、同じ順序で補強案の整備効果が期待できる。2本以上が補強できる場合には、表-1で示した途絶の影響が大きいリンクから順に補強すればよい。

次に2本のリンクが被災するケースを考える。 $C = pc_{ij}^{rail} = p$ であり p 本のリンクを補強できるとする。この p を順番に増やしながら、式(1)および式(4)~(13)からなるモデルを解いた結果を表-2に示す。表-2では、補強後のネットワークにおいて最大の影響を与える被災パターンとその時の総所要時間も示している。得られた補強の順序は、1本のリンクの途絶の影響力の順序とほぼ一致しており、中央のリンク{5,7,8}、最端部のリンク{1,2,3,11,12,13}、中間部のリンク{4,6,9,10}の順序となる。ただし、細かな順序には違いがみられる。

表-4 3本が被災する場合のミニマックス補強案

Results		Worst Case			
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time
3	3	1,193,818	1,7,12	(2,5,8) (5,6,8) (5,8,10) (5,8,13)	1,574,000
3	4	1,158,000	1,7,8,12	(2,3,4)(2,6,10) (6,10,13) (9,11,13)	1,392,000
3	5	1,137,181	1,2,5,8,13	(3,6,7)(4,9,12) (7,10,11) (10,11,12)	1,392,000
3	6	1,110,909	1,2,5,7,12,13	(4,6,8) (4,9,10)	1,288,000
3	7	1,084,363	1,2,5,7,8,12,13	(3,4,6)(9,10,11)	1,236,000
3	8	1,093,000	1,3,5,6,8,9,10,11	(2,4,7)(2,7,12) (4,7,12) (7,12,13)	1,210,000
3	9	1,064,000	1,2,3,5,7,8,9,10,11	(4,12,13) (6,12,13)	1,158,000
3	10	1,052,000	1,2,3,5,7,8,9,10,11,12	(4,6,13)	1,132,000
3	11	1,040,000	1,2,3,4,5,6,7,8,11,12,13	(*9,10) (..)	1,080,000
3	12	1,034,000	1,2,3,4,5,6,7,8,9,11,12,13	(10,*) (..)	1,054,000
3	13	1,028,000	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13		1,028,000

さらに、3本のリンクが被災するケース (${}_{13}C_3 = 286$ 通り) に対する最適補強策の計算結果を表-3に示す。このネットワークでは、ノードAおよびHは3本のリンクにしか接続していないため、それらの3本が同時に被災すると孤立ノードが生じる。この孤立を避けるために、最低でもこれらのノードに接続する2本のリンクの補強が不可欠であり、ここでは{1,12}が補強されている。その後の補強順序は中央のリンク{7,5,8}、両端のリンク{2,13}、中間部のリンク{4,6,9,10}の順序となり、1本途絶時の影響力の順序と同じである。ただしp=6の段階では、それまで補強することになっていたリンク12を外し、代わりにリンク13を補強するという政策の変化がみられる。

(4) 最大総所要時間を最小化する鉄道リンクの補強案

次に3本が被災するケースに対して、式(2)を目的関数とし式(3)~(13)を制約条件とするミニマックス問題を解いた結果を表-4に示す。まず孤立を避けるために両端のノードA,Hに接続するリンク{1,12}が補強され、ついで中央のリンク{7,8}が補強される。

しかしp=5の段階で両端のリンク{2,13}を補強する代わりにそれに接続するリンク7は補強しなくなる。p=6の段階では中央のリンク{5,7}を補強して外周を固めるために中央部のリンク8の補強をやめるという変化があり、1本途絶時の影響力の順序とはかなり異なったものとなる。p=8, p=11の段階にも補強リンクの入れ替えが発生しており、順序の安定性は小さいことがわかる。

(5) 臨時航空リンクが補強策に与える影響

次に3本の鉄道リンクが被災する場合において図-1の中のa1の区間に臨時航空便が設定できるケースを考える。ここでは航空リンクの被災は考えず、 ${}_{13}C_3 = 286$ 通りの被災パターンに対する期待値の最小化問題を計算した結果を表-5に示す。右端には航空リンクの頻度を示している。これを表-3と比較すると、臨時航空リンクが鉄道リンク5の代わりに存在することによりその補強は後回しとなり、反対側に存在するリンク{2,13,7}が優先的に補強される。p=5で鉄道リンク5が整

表-5 臨時航空リンクが1本ある場合の最適補強案

Best Protection		Worst Case				
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time	Freq. a1
3	2	1,224,266	2,13	(5,7,8)	2,324,000	16
3	3	1,180,657	2,13,7	(1,4,5) (5,9,12)	1,540,000	7
3	4	1,148,140	2,13,7,8	(1,4,5) (5,9,12)	1,540,000	7
3	5	1,125,455	7,8,1,5,12	(2,3,4) (2,6,10) (6,10,13) (9,11,13)	1,392,000	0
3	6	1,104,909	7,8,1,5,12,2	(6,10,13) (9,11,13)	1,392,000	0
3	7	1,084,364	7,8,1,5,12,2,13	(3,4,6) (9,10,11)	1,236,000	0
3	8	1,070,182	7,8,1,5,12,2,13,3	(9,10,11)	1,236,000	0
3	9	1,056,000	7,8,1,5,12,2,13,3,11	(4,6,9) (4,6,10) (4,9,10) (6,9,10)	1,158,000	0
3	10	1,048,000	1,2,3,5,7,8,11,12,13,4	(6,9,10)	1,158,000	0
3	11	1,040,000	1,2,3,4,5,7,8,11,12,13,6	(*9,10) (..)	1,080,000	0
3	12	1,034,000	1,2,3,4,5,7,8,11,12,13,6,9	(*9,10) (..)	1,054,000	0
3	13	1,028,000	1,2,3,4,5,7,8,11,12,13,6,9,10		1,028,000	0

表-6 臨時航空リンクが2本ある場合の最適補強案

Best Protection		Worst Case					
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time	a1	a2
3	2	1,211,524	1,12	(5,7,8)	1,904,000	10	6
3	3	1,171,664	3,8,11	(1,4,5) (2,6,7) (5,9,12) (7,10,13)	1,540,000	7	0
3	4	1,148,140	8,1,5,12	(2,6,7) (7,10,13)	1,540,000	0	7
3	5	1,125,455	8,1,5,12,7	(2,3,4) (2,6,10) (6,10,13) (9,11,13)	1,392,000	0	0
3	6	1,104,909	8,1,5,12,7,2	(6,10,13) (9,11,13)	1,392,000	0	0
3	7	1,084,364	8,1,5,12,7,2,13	(3,4,6) (9,10,11)	1,236,000	0	0
3	8	1,070,182	8,1,5,12,7,2,13,3	(9,10,11)	1,236,000	0	0
3	9	1,056,000	8,1,5,12,7,2,13,3,11	(4,6,9) (4,6,10) (4,9,10) (6,9,10)	1,158,000	0	0
3	10	1,048,000	8,1,5,12,7,2,13,3,11,4	(6,9,10)	1,158,000	0	0
3	11	1,040,000	8,1,5,12,7,2,13,3,11,4,6	(9,10,*) (..)	1,080,000	0	0
3	12	1,034,000	8,1,5,12,7,2,13,3,11,4,6,9	(10,*) (..)	1,054,000	0	0
3	13	1,028,000	8,1,5,12,7,2,13,3,11,4,6,9,10		1,028,000	0	0

表-7 臨時航空リンクが3本ある場合の最適補強案

Best Protection		Worst Case						
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time	a1	a2	a3
3	2	1,205,797	3,12	(5,7,8)	1,892,000	2	10	6
3	3	1,164,573	3,8,11	(5,9,12) (7,10,13)	1,534,000	1	7	0
3	4	1,142,713	3,8,5,12	(7,10,13)	1,534,000	1	0	7
3	5	1,121,091	3,8,5,12,7	(6,10,13) (9,11,13)	1,392,000	0	0	0
3	6	1,100,455	3,8,5,12,7,13	(1,4,9) (2,6,10)	1,304,000	3	0	0
3	7	1,084,364	8,5,12,7,13,1,2	(3,4,6) (9,10,11)	1,236,000	0	0	0
3	8	1,070,182	8,5,12,7,13,1,2,3	(9,10,11)	1,236,000	0	0	0
3	9	1,056,000	8,5,12,7,13,1,2,3,11	(4,6,9) (4,6,10) (4,9,10) (6,9,10)	1,158,000	0	0	0
3	10	1,048,000	8,5,12,7,13,1,2,3,11,4	(6,9,10)	1,158,000	0	0	0
3	11	1,040,000	8,5,12,7,13,1,2,3,11,4,6	(*9,10) (..)	1,080,000	0	0	0
3	12	1,034,000	8,5,12,7,13,1,2,3,11,4,6,9	(10,*) (..)	1,054,000	0	0	0
3	13	1,028,000	8,5,12,7,2,13,3,11,4,6,9,10		1,028,000	0	0	0

表-8 臨時航空リンクが4本ある場合の最適補強案

Best Protection		Worst Case							
r	p	Mean trav. time	Protected links	Destruction set	Travel time	a1	a2	a3	a4
3	2	1,199,608	3,11	(5,7,8)	1,892,000	2	10	6	0
3	3	1,157,566	3,11,8	(1,4,5) (2,6,7) (7,10,13) (5,9,12)	1,340,000	4	3	0	0
3	4	1,136,783	3,11,8,5	(2,6,7) (7,10,13)	1,340,000	4	0	3	0
3	5	1,116,364	3,11,8,5,7	(1,4,9) (2,6,10) (4,9,12) (6,10,13)	1,304,000	3	0	0	0
3	6	1,100,455	8,5,7,11,1,2	(4,9,12) (6,10,13)	1,304,000	0	0	0	3
3	7	1,084,364	8,5,7,1,2,12,13	(9,10,11) (3,4,6)	1,236,000	0	0	0	0
3	8	1,070,182	8,5,7,1,2,12,13,3	(9,10,11)	1,236,000	0	0	0	0
3	9	1,056,000	8,5,7,1,2,12,13,3,11	(4,6,9) (4,6,10) (4,9,10) (6,9,10)	1,158,000	0	0	0	0
3	10	1,048,000	8,5,7,1,2,12,13,3,11,4	(6,9,10)	1,158,000	0	0	0	0
3	11	1,040,000	8,5,7,1,2,12,13,3,11,4,6	(9,10,12) (..)	1,080,000	0	0	0	0
3	12	1,034,000	8,5,7,1,2,12,13,3,11,4,6,9	(1,8,10) (..)	1,054,000	0	0	0	0
3	13	1,028,000	8,5,7,1,2,12,13,3,11,4,6,9,10		1,028,000	0	0	0	0

備されると同区間でより長い所要時間を要する航空リンクは利用されなくなり存在価値が無くなる。p=6の補強パターンは表-3のケースと対称な形であり目的関数値は等しい。p=7以下の結果は全く同じである。

同様に、2区間に臨時航空便が設定できる場合の結果を表-6に示す。p=2において途絶を防ぐための両端ノードとの連結の確保を航空リンクに接続するリンク{1,12}で行っている。p=3では中央のリンクのうち、臨時航空便が存在しないリンク8が優先的に補強されるが、p=5以下の結果は航空リンクがない場合と全く同じである。

さらに航空便が3区間、4区間に設定できるケースをそれぞれ表-7、表-8に示す。補強リンク数pが小さいうちは、航空リンクの存在が補強順序に影響を与えていることが確認できる。

5. おわりに

本研究では、筆者らが提案した都市間旅客交通のMNPモデルを用いて、リンクの被災に伴う途絶の影響を解消するために、リンクの補強(強靱化)政策を最適化するためのモデルを構築した。

ついで簡単な仮定の鉄道ネットワークを対象として、想定した被災パターンに対する期待総所要時間を最小化する最適補強政策を計算した。最適な補強順序は平常時の利用者数の順序とは一致しない。しかし複数のリンクの補強順序は単一リンクの途絶の影響力の順序にほぼ等しいことがわかった。一方、最悪の影響を与える被災パターンにおける所要時間を最小化するミニマックス問題の解は、補強リンク数の変化に応じて不安定に変化することもわかった。

さらに、災害後に臨時で航空リンクが設定できる状況を想定し、鉄道リンクの補強順序に与える影響を検討した。

以上の結果はもちろん、ネットワーク形状やリンクの諸元の設定によって異なってくると思われる。今後は定式化を見直して変数の数を減らし、より効率的な計算を可能にするとともに、様々なケースに対する解の法則性を確認していきたい。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤(B) 25289157)の成果である。

参考文献

1) 内閣官房国土強靱化推進室：政策課題・国土強靱化HP (http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka) 2013年7月29日アクセス。

2) Okumura M., Tirtom H. and Yamaguchi H.: Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB2012), pp.309-314, 2012.

3) Church, R.L., Scaparra, M.P., and Middleton, R.: The r-interdiction Median Problem and the r-interdiction Covering Problem, Annals of the Association of American Geographers, 94, pp.491-502, 2004.

4) Church, R.L. and Scaparra, M.P.: Protecting Critical Assets: The r-interdiction Median Problem with Fortification, Geographical Analysis, 39, pp.129-146, 2007.

5) Zhuang, J. and Bier V. M.: Balancing terrorism and natural disasters—Defensive strategy with endogenous attacker effort. Oper. Res, 55(5), 976–991, 2007.

6) Gilboa, I. and Schmeidler, D.: Maxmin expected utility with non-unique prior, Journal of Mathematical Economics, Vol. 18, pp. 141–153, 1989.

7) Scaparra M. P. and Church R. L.: A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning, Computers & Operations Research, 35, 1905-1923, 2008.

8) Choi Y. and Suzuki T. : Protection Strategies for Critical Retail Facilities: Applying Interdiction Median and Maximal Covering Problems with Fortification, Journal of the Operations Research Society of Japan, Vol.56, (1), pp.38-55, 2013.

9) Liberatore F., Scaparra M.P., and Daskin M.S.: Analysis of facility protection strategies against an uncertain number of attacks: The stochastic r-interdiction median problem with fortification. Computers & Operations Research, 38, 357-366, 2011 .

10) Zhu Y., Zheng Z., Zhang X. and Cai K.: The r-interdiction median problem with probabilistic protection and its solution algorithm, Computers & Operations Research, 40, 451-462, 2013.

11) 倉内文孝・宇野伸宏・嶋本寛・山崎浩気：交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向，土木計画学研究・講演集CD-ROM, Vol.35, No.215, 2007.

12) Bell, M. G. H., Kanturska U., Schmocker, J. D. and Fonzone, A.: Attacker-defender models and road network vulnerability. Philos. Trans. Roy. Soc. A, 366, 1893–1906, 2008.

13) Cappanera, P. and Scaparra M.P.: Optimal allocation of protective resources in shortest path networks, Transportation Science., 45(1), 64-80, 2011.

14) 奥村誠・堀内智司・佐々木和寛：地震被災者搬送のための道路・医療施設耐震化計画モデル，土木計画学研究・論文集, No.26(1), pp.93-100, 2009.

15) Tirtom H. , Yamaguchi H. and Okumura M. : Analysis of Potential Multimodal Connections in Intercity Network of Turkey, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.9 (CD-ROM), 2013.

(2014年8月1日受付)

RESILIENCE IMPROVEMENT MODEL FOR INTERCITY PASSENGER TRANSPORTATION NETWORK

Huseyin TIRTOM, Makoto OKUMURA, Hiromichi YAMAGUCHI and Rubel DAS

In the Action Plan for National Resilience 2014 announced in June,2014 by the Cabinet Secretariat Japan, policies for enhancement of disaster resilience of transportation and logistic facilities are shown as one of the policies to be promoted. This paper proposes a mathematical planning model to find the most effective links to be fortified, in order to secure the inter-city passenger transportation service facing to interdiction risk of each link in the network. If interdicted, the passengers must find a minimum time detour route and endure additional travel time. We assume that fortification of a link can avoid the risk of interdiction. The planning model is formulated based on the Optimal Modal-mix Intercity Transportation Model formulated by the authors. This paper shows the model formulation and case study results on a simple network, including the introduction of emergent airline service after interdiction of railway links.