交通行動の中止を考慮した災害時における交通ネットワークモデルに関する研究

A Study on Traffic Network Model Considering the Abandon of Traffic Traveling

北海道大学大学院　○内田　賢悦
北海道大学大学院　若山　祐司
北海道大学大学院　加賀屋　誠一
北海道開発土木研究所　高橋　尚人

1. はじめに

2000 年 3 月の有珠山噴火により（図 1），国道 230 号をはじめとして多くの道路区間が通行不能となった．これにより，道道豊浦洞爺線および道道豊浦京極線の一部区間が国道 230 号に編入され，その代替機能を果たしている．しかし，これは緊急措置としてのものであり，道路利用者の利便性を著しく低下させるものと考えられる．

こうした自然災害により道路区間が通行不能となった場合，自動車利用者の旅行時間が増加し，それに伴い自動車による交通行動を中止する場合も考えられ，これに起因する社会的な損失が発生する．この損失は，交通行動を起こすことによって得られるであろう便益が時間費用の増大により，相対的に低下するために起こるものと解釈できる．時間費用の増大については，道路整備効果を計測する費用便益分析における旅行時間短縮効果のように，自動車利用者の時間価値と旅行時間変化量に基づき，定量的な分析を行うことは部分的には可能である．こうした分析を行う場合，災害により旅行時間が延びたとしても，すべての交通行動は達成されるという仮定に基づく場合が多い．しかし実際には，交通行動を中止することも考えられる．このことを考慮すると，時間費用の増大は交通行動の中止が表現されないため過大評価となり，また交通行動を中止することによる便益の低下は全く評価されないことになる．したがって，全体としての社会損失を過小／過小評価する可能性がある．

本研究では，交通行動を起こして目的を達成することによって得られる便益が存在するものと仮定し，さらに時間費用の増大による交通行動の中止も念頭に置いた災害時における自動車交通行動モデルの構築を行った．さらに，災害として有珠山噴火により道路区間が寸断する場合を想定し，その影響評価を行う．

図 1. 有珠山の位置

2. 有珠山噴火による道路被害の概要

2000 年 3 月の有珠山噴火では，激しい地殻変動も伴い，特に西山西麓では数十メートルもの地盤隆起を引き起した．さらに降灰は道路上に数十センチも積もり，泥流による橋梁流失等の被害も拡大した．有珠山の南麓には道央自動車道，JR 室蘭本線が通過しており，北海道と本州を結ぶ物流機能の大動脈と位置づけられる幹線での被害は甚大なものであった．

噴火による土木被害は，道路・河川等で 59 箇所，約 44 億円に昇った．特に道路ネットワークに着目すると，有珠山周辺の道央自動車道および国道 230 号の寸断を含み，国道 37 号，453 号や主要道道も含めた広範囲な道路区間には，災害対策基本法による通行止め措置がなされた．こうした交通措置に対し，周辺の道道，市町村道が代替機能を果たすことになるが，迂回による旅行時間の著しい増加，さらにこうした道路に自動車交通が集中することによる混雑等，大きな交通混乱が生じた．

道路の寸断により上記のような交通混乱が生じるため，物的被害額だけではなく，道路利用者のユーザーコスト増加分も考慮に入れた場合，実質被害額は飛躍的に増大するものと考えられ，また，こうしたユーザーコストの考え方は，これからますます重要となることが予想される [1]．

3. 既存の評価法と本研究の関係

自然災害等により，道路区間が通行不能となった場合の影響評価法としては，固定需要型の交通量配分により，走行費用および時間費用の増分を計測し，それを貨幣換算した損失額を用いる方法 [2]が一般的である．こうした方法では，道路区間が通行不能となった場合であっても，全ての人間がこれまでと変わらず交通行動を起こすであろうという仮定のもとでは，妥当性がある．しかし，交通行動中止というオプションを考えた場合，需要が固定されるという前提には，無理があるといわざるを得ない．これは，交通行動を中止した方が得られる便益が大きい可能性を否定できないからである．

一方，道路区間が通行不能となった場合，その影響をネットワーク容量の低下として捉える試みもなされている [3,4]．こうした方法では，需要変動を考慮したモデル化がなされており，道路利用者の行動原則も導入されているため，上述した方法の前提は幾分緩和されたモデルとなっている．しかし，容量の議論は可能であるが，その定式化上，旅行時間の議論ができないという点では，さらなる研究の進展が望まれる．

交通行動を買物行動に例えて考えてみよう．この場合，ある品物の値段が交通費用であり，それを消費することによって得られる効用が交通便益と考える．このとき，道路区間が通行不能となることは，品物の値段を上げることになる．消費者は，

品物の値段とそれを消費することによる効用の関係を考え，その品物を購入するかどうかを決定するものと考えられる．当然，値段の上昇が小さい場合，ほとんどの人間は，値段が上昇する前のように品物を購入するものと考えられる．また，値段の上昇幅が大きくなるにつれ，購入する人間の割合が小さくなると考えるのが普通である．これは，道路区間が通行不能となった場合の影響が大きくなると，交通行動を中止する人間の割合が大きくなることに対応する．当然，道路区間が通行不能になることによる影響は，トリップの起点と終点の位置が違う人間同士では異なるものとなる．以下では，こうした考えに基づいた交通行動のモデル化を行っていくことにする．

4. モデルの定式化

4.1 前提

本研究では，以下に示す前提のもと，交通行動のモデル化を行っていく．

- 交通行動は，それを行うことによって得られる便益が存在するために起こる．
- 道路区間が通行不能になることで，旅行時間が増大する交通が存在し，その交通は交通行動を中止する場合がある．
- 災害後に交通行動を中止するか否かの判断は，交通行動を起こすことによって得られる交通便益と時間費用の関係で決定される．ここでは，走行費用は考慮しない．
- 交通行動を中止した場合，目的地を変更する等の代替的な交通行動は考えない．
- 災害後、道路は復旧していないが，交通状況が定常状態に戻った場合を想定する．

4.2 交通行動の定式化

人の交通行動は，目的地に行き，目的を達成することによって得られる便益がそれまでに消費する時間費用より大きいため起こると考えることにする．また，一般に火山災害によって道路区間が寸断した場合，災害後に目的地に到着するまでの所要時間は，迂回道路を利用する必要性から，災害前よりもが長くなる．このように考えると，道路区間の寸断は，時間費用の増分を招くが，目的地に行くことで得られる便益は変化しないことになる．こうした災害前後における時間費用と便益の関係に着目し，交通行動をモデル化していく．ただし，災害前に交通行動を起こしていない人は，災害後も交通行動を起こさないと考え，モデルの対象外とする．すなわち，災害直後の緊急車両が通行するような状況ではなく，ある程度災害から時間経過して定常状態が達成される状況を想定する．また道路区間の寸断は，自動車の走行費用を増大させることにもなるが，これについても考慮しないことにする．

はじめに，災害前に交通行動を起こしていたが，災害後に交通行動を中止する道路利用者を考える．このような利用者は，目的地に行くことによって得られる便益と災害後に目的地に到着するまでの時間費用を比較し，交通行動を中止したと考える．この場合，災害前に目的地に到着するまでに要した時間費用を他の事に費やすことができるため，その分便益が増大する．こうして得た時間費用を利用し，別の交通行動をとることも考えられるが，ここでは考慮しないことにする．一方，目的地に行くことによって得られていた便益を失うため，この分便益の低下が起こる．これらの便益変化分を考慮した結果，全体の便益は低下するものと考えることにする．

次に，災害の前後で交通行動が変化しない道路利用者，すなわち災害前後ともに交通行動をとる利用者を考える．このような道路利用者は，災害後に目的地に到着するまでの時間費用が増えても，そこに行くことによって得られる便益の方が依然として大きいと判断し，交通行動をとるものと考えることにする．

以上を踏まえ，OD ペア rs 間における道路利用者の便益を災害の前後で区別し，それぞれを B_{rs}^p, B_{rs}^a と表現し（式(1), 式(2)），それらの関係は式(3)となる．

$$B_{rs}^p = b_{rs} f_{rs}^p - tC_{rs}^p f_{rs}^p \qquad \forall rs \tag{1}$$

$$B_{rs}^a = b_{rs} f_{rs}^p - tC_{rs}^a f_{rs}^a + tC_{rs}^p e_{rs}^a \qquad \forall rs \tag{2}$$

$$B_{rs}^p - B_{rs}^a \geqq 0 \qquad \forall rs \tag{3}$$

b_{rs}：起点 r から終点 s に行くことによって得られる便益（円）
t：時間価値（円/分）
C_{rs}^p：災害前の OD ペア rs 間の所要時間（分）
C_{rs}^a：災害後の OD ペア rs 間の所要時間（分）
f_{rs}^p：災害前の OD ペア rs 間の交通量（台/日）
f_{rs}^a：災害後の OD ペア rs 間の交通量（台/日）
e_{rs}^a：OD ペア rs 間において災害後に交通行動を中止した交通量（台/日）

ここで，災害前の OD ペア rs 間の所要時間（C_{rs}^p）は，交通状況が定常状態にあることを仮定し，需要固定型の利用者均衡配分を行うことによって求めることにする．本研究では，式(4)に示す BPR 関数により所要時間を求めた．

$$t_a(x_a) = t_a(0)\left\{1 + \alpha\left(\frac{x_a}{C_a}\right)^{\beta}\right\} \tag{4}$$

$t_a(x_a)$：リンク a 上の交通量が x_a の時の所要時間
$t_a(0)$：ゼロフロー時のリンク a の所要時間
C_a：リンク a の交通容量
x_a：リンク a の交通量
α，β：パラメータ（$\alpha=0.21$，$\beta=1.59$）

また，災害前の OD 交通量は，災害後の OD 交通量と災害後に交通行動を中止した交通量との和に等しいため，式(5)の関係が成立する．

$$f_{rs}^p = f_{rs}^a + e_{rs}^a \qquad \forall rs \tag{5}$$

災害後の交通行動は，災害前後における便益差の 2 乗和が最小となるような行動をとるものと仮定し，式(6)に示す目的関数を設定した．

$$\min L = \sum_{rs}(B_{rs}^p - B_{rs}^a)^2 \tag{6}$$

また，災害前後における OD 間の所要時間を考慮した制約条件として，式(7)を仮定する．すなわち式(7)は，交通行動における時間制約に相当する条件となっており，災害後に交通行動に費やすことが可能な総時間は，交通行動を中止する利用者も考え，災害前の総時間以下となることを規定するものである．この制約は，災害前の総旅行時間は災害後と比べて小さいか，せいぜい等しい状態となることを示している．

$$\sum_{rs}(C_{rs}^a f_{rs}^a + C_{rs}^p e_{rs}^a) \leq \sum_{rs} C_{rs}^p f_{rs}^p \tag{7}$$

式(1)，式(2)および式(4)の関係を用いると，式(8)の関係が成立

するため，式(6)は式(9)に変形できる．

$$
\begin{aligned}
B_{rs}^{p}-B_{rs}^{a} &= b_{rs}f_{rs}^{p}-tC_{rs}^{p}f_{rs}^{p}-(b_{rs}f_{rs}^{p}-tC_{rs}^{a}f_{rs}^{a}+tC_{rs}^{p}e_{rs}^{a}) \\
&= b_{rs}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})+t(C_{rs}^{a}f_{rs}^{p}-C_{rs}^{p}e_{rs}^{a}-C_{rs}^{p}f_{rs}^{p}) \\
&= b_{rs}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})+t(C_{rs}^{p}f_{rs}^{a}+C_{rs}^{p}e_{rs}^{a}-C_{rs}^{p}f_{rs}^{p}-2C_{rs}^{p}e_{rs}^{a}) \\
&= b_{rs}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})+t\{C_{rs}^{p}(f_{rs}^{a}+e_{rs}^{a})-C_{rs}^{p}f_{rs}^{p}-2C_{rs}^{p}e_{rs}^{a}\} \\
&= b_{rs}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})-2tC_{rs}^{p}e_{rs}^{a} \\
&= b_{rs}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})-2tC_{rs}^{p}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a}) \\
&= (b_{rs}-2tC_{rs}^{p})(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})
\end{aligned}
\tag{8}
$$

$$
\min L=\sum_{rs}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})^{2}
\tag{9}
$$

さらに式(9)を目的関数，式(7)を制約条件とする最適化問題は，式(10)に示す Lagrangian 関数で表現される．

$$
\begin{aligned}
\min L' &= \sum_{rs}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})^{2} \\
&\quad +\lambda\sum_{rs}(C_{rs}^{a}f_{rs}^{a}+C_{rs}^{p}e_{rs}^{a}-C_{rs}^{p}f_{rs}^{p}) \\
&= \sum_{rs}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})^{2} \\
&\quad +\lambda\sum_{rs}\left\{C_{rs}^{a}f_{rs}^{a}+C_{rs}^{p}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})-C_{rs}^{p}f_{rs}^{p}\right\} \\
&= \sum_{rs}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})^{2} \\
&\quad +\lambda\sum_{rs}(C_{rs}^{a}f_{rs}^{a}-C_{rs}^{p}f_{rs}^{a})
\end{aligned}
\tag{10}
$$

ここで λ は Lagrangian 乗数であり，(7)式の不等式制約から非負の有限値をとる．λ は非負なので，式(10)の両辺を λ で割ったものを新たな目的関数と考え，式(11)で表現する．

$$
\begin{aligned}
\min L'' &= \frac{L'}{\lambda} \\
&= \frac{1}{\lambda}\left\{\sum_{rs}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})^{2}\right\} \\
&\quad +\sum_{rs}C_{rs}^{a}f_{rs}^{a}-\sum_{rs}C_{rs}^{p}f_{rs}^{a}
\end{aligned}
\tag{11}
$$

一方，経路コストがリンクコストと加算的関係で表される場合，式(12)が成立する．

$$
C_{rs}^{ak}=\sum_{a\in A}t_{a}\delta_{rs}^{a,k}
\tag{12}
$$

ここで C_{rs}^{ak}，$\delta_{rs}^{a,k}$ は，それぞれおける OD ペア rs 間の k 番目経路の所要時間，リンク a が OD ペア rs 間の k 番目経路に含まれる場合に 1，そうでない場合に 0 をとる変数であり，それらは災害後の交通状況で計算される変数である．このとき，ネットワーク全体の総走行時間は全リンクについて足し合わせたものに等しくなり，さらに交通均衡状態を想定すると，利用される経路の所要時間は全て等しいため，式(13)が成り立つ．

$$
\begin{aligned}
\sum_{a\in A}t_{a}x_{a} &= \sum_{rs}\sum_{k}C_{rs}^{ak}f_{rs}^{ak} \\
&= \sum_{rs}C_{rs}^{a}f_{rs}^{a}
\end{aligned}
\tag{13}
$$

ここで，f_{rs}^{ak} は，災害後の OD ペア rs 間の k 番目経路交通量であり，式(14)の関係を満たす．

$$
\sum_{k}f_{rs}^{ak}=f_{rs}^{a}
\tag{14}
$$

式(13)の関係を用いると，式(11)は式(15)で表される．

$$
\begin{aligned}
\min L'' &= \sum_{a\in A}t_{a}x_{a} \\
&\quad +\sum_{rs}\left\{-C_{rs}^{p}f_{rs}^{a}+\frac{1}{\lambda}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-f_{rs}^{a})^{2}\right\}
\end{aligned}
\tag{15}
$$

式(15)において，右辺の第 1 項および第 2 項を積分形式で表現すると，それぞれ式(16)，式(17)で表される．

$$
\begin{aligned}
\sum_{a\in A}t_{a}x_{a} &= \sum_{a\in A}\int_{0}^{x_{a}}\frac{d\{wt_{a}(w)\}}{dw}dw \\
&= \sum_{a\in A}\int_{0}^{x_{a}}\left\{t_{a}(w)+w\frac{dt_{a}(w)}{dw}\right\}dw
\end{aligned}
\tag{16}
$$

$$
\begin{aligned}
&\sum_{rs}\int_{0}^{f_{rs}^{a}}\frac{d\left\{-C_{rs}^{p}v+\frac{1}{\lambda}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-v)^{2}\right\}}{dv}dv \\
&= -\sum_{rs}\int_{0}^{f_{rs}^{a}}\left\{C_{rs}^{p}+\frac{2}{\lambda}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-v)\right\}dv
\end{aligned}
\tag{17}
$$

したがって，式(15)は式(18)で表されることになる．

$$
\begin{aligned}
\min L'' &= \sum_{a}\int_{0}^{x_{a}}\left\{t_{a}(w)+w\frac{dt_{a}(w)}{dw}\right\}dw \\
&\quad -\sum_{rs}\int_{0}^{f_{rs}^{a}}\left\{C_{rs}^{p}+\frac{2}{\lambda}(b_{rs}-2tC_{rs}^{p})^{2}(f_{rs}^{p}-v)\right\}dv
\end{aligned}
\tag{18}
$$

式(18)は，需要変動型の均衡配分モデルと等価な構造を持つ数理最適化問題となっている．すなわち，式(18)第 1 項の積分内はリンクコスト関数，第 2 項の積分内が逆需要関数に対応している．ただし，リンクコスト関数は利用者均衡を示すものではなく，システム最適を達成するものとなっている．式(18)第 1 項の積分内はリンク交通量に対して単調増加関数となり，その積分値は狭義の凸関数となる．また，第 2 項の積分内は OD 交通量に対して単調減少関数であり，その積分値は狭義の凹関数となっている．その値にマイナスが乗じられているため，第 2 項も狭義の凸関数となる．すなわち，式(18)は狭義の凸関数となっており，解の一意性が保証された非線形最適化問題となっている．その解法としては，非負の λ に対して式(18)の最小化問題を解き，このときの目的関数の値が λ に対して最大化されているような（$\mathbf{x}_a$*，λ*）を求めるものを適用する．ただし，$\mathbf{x}_a$*は災害後のリンク交通量ベクトルの最適値である．具体的には，標準的な需要変動型利用者均衡配分モデルのアルゴリズム[5]と適当な λ に関する一元最大化アルゴリズムを組み合わせた繰り返し法を適用すればよく，効率的な解法が開発されている問題となっている[4]．

4.3　交通行動によって得られる便益の定式化

前述のモデルでは，時間価値（t），始点 r から終点 s に行くことによって得られる便益（b_{rs}），ネットワークデータおよび現状の OD 交通量データがあれば解析を行うことができる．時間価値については，第 11 次五箇年計画による 53.12（円/分）を用いることにする．OD データについては平成 11 年交通センサ

スデータを用いることにする．以下では，b_{rs}の求め方について説明を加える．

b_{rs}は，ODペアrsごとに災害前における交通行動による便益と逆需要関数の関係から考えていくことにする．b_{rs}は個人が起点rから終点sへ行き，目的を達成することで得られる便益であり，これから時間費用を差し引いたものをODペア毎で集計すると，ODペアrs間における利用者便益となる．一方，これは消費者余剰と考えることができる．この消費者余剰は，式(18)においてλの値を固定して得られる需要変動型利用者均衡配分を解くと，計算することが可能となる．そこで利用者便益と消費者余剰が等しくなる条件（図2，式(19)）からb_{rs}を求めると，これを内生変数として扱うことが可能となる．

$$b_{rs} f_{rs}^p - tC_{rs}^p f_{rs}^p = \frac{t}{\lambda}(b_{ts} - 2tC_{rs}^p)^2 f_{rs}^{p\,2} \tag{19}$$

具体的には，式(19)を式(3)の条件のもとでb_{rs}について解くと，b_{rs}は式(20)で表される．

$$b_{rs} = 2tC_{rs}^p + \frac{\lambda}{2tf_{rs}^p}\left(1+\sqrt{\frac{4}{\lambda}t^2 C_{rs}^p f_{rs}^p + 1}\right) \tag{20}$$

式(20)にはλが含まれているが，式(18)における$\mathbf{x}$に関する最小化とλに関する最大化問題を繰り返し解くことによって，b_{rs}を収束させた．

式(20)は，災害前における交通行動によって得られる便益は，災害前の交通行動による時間費用の2倍（式(20)右辺第1項）よりも，式(20)右辺第2項の部分だけ大きくなることを示している．この条件は，災害前に交通行動を起こしていること保証するものであり，重要な意味を持つ．たとえば，前述の便益が災害前の交通行動による時間費用の2倍未満である場合，はじめから交通行動を起こさず，その分の時間費用を得た方が得と感じることになり，災害前の交通行動を起こす動機は持たないことになる．式(20)は，こうした行為を禁止するものであり，妥当な条件であると考えられる．

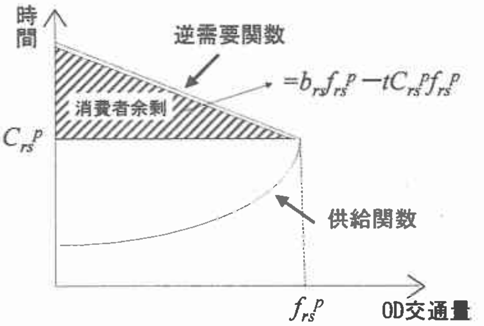

図2. Brsと消費者余剰の関係

5. 有珠山噴火を想定したモデルの適用

5.1 ネットワークの設定

北海道全域の主要幹線を対象とし，有珠山が噴火した際のシミュレーションを行った．道路寸断の想定には，有珠山のハザードマップを参考に，噴火により災害予想区域内の7本の道路区間が寸断するものと想定した．この想定は，2000年3月に起こった噴火による道路被害よりも大規模なものであり，ハザードマップによる寸断する可能性がある道路区間全てを通行不能とした場合の例である（図3）．

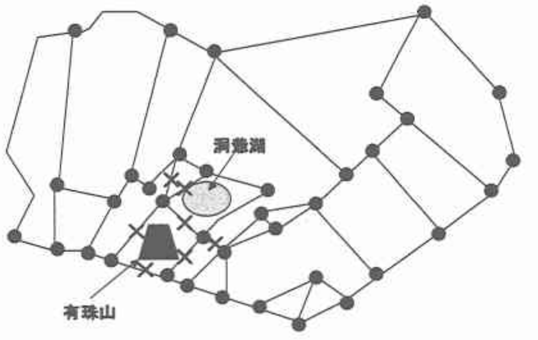

図3. 有珠山周辺の道路ネットワーク

5.2 結果

道路区間の寸断によって有珠山周辺地域におけるリンク交通量が1.5倍～1.1倍に増加した．特に洞爺湖南側のリンクの多くが寸断しているため，北側の交通量が大きく増加していた．その他のリンクでは，交通量は減少傾向にあった．これは，寸断によるリンクコストの増加によって交通行動を中止したか，あるいは経路変更したためと考えられる．

災害による便益の損失は約2（億円/日）と試算された．災害後に交通行動を中止する場合，目的地を変更するか，他の交通機関を利用して目的を達成する可能性があるが，本モデルでは考慮していない．この値はこうした条件下で算出されたものである．

5. まとめ

本研究では，交通行動により得られる便益と時間費用の関係から，災害時の交通行動モデルを構築した．同モデルでは，災害による道路区間の寸断により旅行時間が延びることによる損失と，これに起因する交通行動の中止による損失を表現している．特に交通行動の中止とそれに伴う便益損失の影響は，自然災害を踏まえた道路ネットワーク計画を立てる上で重要になるものである．

本モデルでは，交通目的は区別されてなく，たとえば業務目的や観光目的では，災害後の交通行動は異なると考えられるが，これらは考慮されていない．交通目的を考慮する場合，マルチユーザークラスの考え方により，問題の定式化は可能と考えられるが，これについては，モデルによる解の一意性等，さらなる検討が必要と考えられる．また時間価値も災害前後で変化するものと考えられる．災害前後における時間価値変化は，計測法の確立が必要となる．これらは，今後の課題としたい．

参考文献

1) 杉本博之，首藤諭，後藤晃，渡辺忠朋，田村亨：北海道の橋梁のユーザーコストの定量化の試みとその利用について，土木学会論文集，No.682/I-56，347-357，2001.
2) 田村亨：有珠山噴火に伴う交通規制が地域社会に与えた影響，道路交通経済，No.96，49-54，2001.
3) 加賀屋誠一，内田賢悦，萩原亨：札幌市東北部における水災害時のネットワーク交通容量変化に関する研究，自然災害科学，2003（掲載予定）.
4) 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-，土木学会，1998.
5) 赤松隆，宮脇治：利用者均衡条件下での交通ネットワーク最大容量問題，土木計画学研究・論文集，No12，pp719-729.