

重要インフラにおける防災投資分析*

The Analysis of Investment of Disaster Prevention in Critical Infrastructure *

今井瑛介**, 多々納裕一***, 吉田護****

By Eisuke IMAI**, Hirokazu TATANO***, Mamoru YOSHIDA****

1 はじめに

重要インフラとは物理的施設、物資供給システム、情報技術、情報通信ネットワークなど、ある期間にわたって破壊、機能の低下、利用不可能な状態にされた場合に、国家の社会および経済活動に多大なる影響を及ぼす恐れがあり、また防衛および安全保障を確保するための国家の能力に影響を及ぼしかねないインフラストラクチャーと定義できる¹⁾。また重要インフラはそれらが破壊したり、機能停止したときに治安や社会秩序や主要な政府の責任の遂行といったものを土台から破壊するような物理的な集合や無形の集合とも定義できる²⁾。例えば電力やガスといった公共ネットワークや港湾や空港といった公共施設などは重要インフラに該当する。近年このような重要インフラにおいて災害やテロなどが発生することで機能停止に追い込まれることで被害が複合的に連鎖拡大して時空間的に波及する事例が報告されている。例えば2003年8月14日に北米北東部において停電事故が発生した。このとき送電線の機能停止に追い込まれた地点から遠く離れたニューヨークでも被害が発生した。その被害は停電規模にして6,180万kW、影響は5,000万人にまで及んだ事例がある³⁾。他に1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災によって神戸港が被災した。このとき神戸港などの港湾施設がこうむった損害は1兆円と推計されている⁴⁾。また被害は施設被害だけにとどまらず、神戸港で取引できない多くの企業はほかの港湾へ強制的に代替せざるを得ない状況に陥るなどの影響を与えた⁵⁾。このように重要インフラが機能停止に追い込まれるような事態を防ぐ必要があるが、現実にはそれらを防ぐ枠組みが不十分である可能性がある。

本研究では重要インフラとして港湾に着目する。複数の

港湾において互いに取引がある状況においては、自港が被害を受けていなくても自港が取引をしている相手の港湾が機能停止に追い込まれた場合には間接的に損害をこうむってしまうような外部性が存在する。そこで耐震補強や高波対策などをするといった防災投資行動を行うかどうかの意思決定をするときに、自港が機能停止したときに相手に間接的に与える被害を考慮しないという外部性の問題が発生する。従って港湾の防災投資に関する意思決定は取引相手の港湾の意思決定に依存するという相互依存的な意思決定問題であるといえる。重要インフラにおける安全性投資は港湾以外にも企業間のサプライチェーンやコンピュータウイルス対策なども相互依存的な問題として扱うことができる。本研究では、港湾の防災投資の問題を相互依存的な意思決定問題としてとらえ、ゲーム理論を用いてその構造を分析する。この際、利己的な動機のみに基づく均衡解と社会的最適解とを比較し、いかなる意思決定環境において過少投資が発生するのかを示す。

このような社会的に望ましい最適な行動と利己的な動機に基づく行動の差は改善する必要がある。改善を促す枠組みとして、政府などの公共主体が港湾を整備する上で補助金を出すことで防災投資を促すことや、港を整備しないとペナルティーが課されるような規制を設けることによって状況を改善できる可能性がある。しかし国際的な港湾取引を考えると国家より更に上位の機関が存在しないためこのような政策を講じることができない。

本研究ではそのような状況で港湾同士がお互いに自分の利益を高めるために間接被害補償制度を導入することを検討する。その枠組みとは事前に準備金を徴収して、間接的に損害を被った港湾にその準備金が支払われるような制度的枠組みを指す。本研究ではこの枠組みによって防災投資を促す効果があることを示す。

2 本研究の視点

2.1 既存研究

相互依存的な安全性投資行動が注目され始めたのは2001年9月11日に発生したアメリカ同時多発テロや2003年8月14日に北米北東部で発生した停電事故である。このとき直接的に被害をこうむったところだけでなく、ネット

*キーワード：防災計画，空港・港湾計画

**学生員，京都大学大学院情報学研究所

〒611-0011 宇治市五ヶ庄，Tel 0774-38-4037

E-mail: imai@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

***正員，工博，京都大学防災研究所 社会防災研究部門

〒611-0011 宇治市五ヶ庄，Fax 0774-38-4308

E-mail: tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

****正員，工博，京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂，Tel 075-383-3417

E-mail: yoshida@hse.gcoe.kyoto-u.ac.jp

ワークや市場を介して、直接関係のない主体にまで被害が波及するという事態が生じた。以下に示すような一連の研究はこうした事態の背景に相互依存的な安全性投資に関する問題があると指摘している。

相互依存的な安全性投資問題とは、テロや災害などの外力に対する防御のための投資に関する意思決定が、他の主体の行動の結果に依存して決まる場合の意思決定問題を取り扱うものである。そこには他のプレイヤーが投資を行わなくなると、それぞれのゲームプレイヤーが投資を行うインセンティブを持たなくなるような構造がある⁶⁾。

本研究では港湾などの国際重要インフラの安全性投資問題に関しても、これと同じ構造が背景として存在するものと考えている。

Heal,Kearns,Kleindorfer,Kunreuther(2006)⁷⁾は相互依存的な安全性投資の問題についてどういう問題が発生してどのように改善していくのかを港湾や荷物集積所におけるテロ対策、企業のサプライチェーン、コンピュータウイルス対策などにおいて言及している。

また Heal,Kunreuther(2007)⁸⁾はこの問題に属するあらゆる問題を包括的に取り扱えるモデルを考えている。そしてそれらの問題を三つにクラス分けしている。一つ目のクラスは負の外部性があったときに、それを対策によって部分的にしか防ぐことができない状態の問題で、例えば空港の手荷物のセキュリティチェックなどがこのクラスに属している。二つ目のクラスは負の外部性があったときに、それを対策を講じることで完全に防ぐことができる問題で、例えばワクチンの予防接種などがこのクラスに属している。三つ目のクラスは正の外部性がある問題で、例えば研究開発投資の問題などがこのクラスに属している。港湾における相互依存的な問題はこの中の一つ目のクラスに属するといえる。

また Heal,Kunreuther(2002)⁹⁾は代表的な相互依存的な安全性投資問題である飛行機の手荷物のセキュリティチェックについて着目している。相互依存的な二つの空港におけるセキュリティ強化への投資の意思決定問題をモデル化した。投資を促す方策について、保険を適用することや、被害が波及した場合賠償する責任をとることや、税金を徴収して補助金を提供する方法や、規制をかけることなどについて述べている。また火事の対策やコンピュータウイルス対策などの空港セキュリティチェックと同様の問題と泥棒への対策やワクチン接種などの空港セキュリティチェックと異質の問題を取り上げてどのように似通っているのかやどのように違っているのかを述べている。しかしこの論文では社会的に見て最適な状態というものを定義しておらず社会的最適行動と私的動機による行動の乖離について言及していない。また防災投資を促す政策について具体的に数式を用いて説明しているわけではないという点で不十分で

ある。

2.2 本研究の視点

このような研究背景の中で本研究をどのように進めていくのかを述べる。本研究ではまず既存の研究でなされてきたように港湾の防災投資の問題を相互依存的な意思決定問題としてとらえ、二つの港湾を想定してゲーム理論を用いてその構造を分析することで、ナッシュ均衡解を求める。そして次に社会的最適解を考えていき、ナッシュ均衡解との乖離を示していく。そしていかなる意思決定環境において過少投資が発生するのかを示す。社会的最適な防災投資水準との乖離の状態はどちらの港湾も過小に防災投資をするというナッシュ均衡解になっているのだが、社会的最適解はナッシュ均衡解よりも防災投資するという解になっている状態で、これはまさに囚人のジレンマゲームと同じ状態である。

次にこの乖離を改善するために考えられる方法（ジレンマを解消する方法）を提示していく。その際に国際的な港湾同士の取引を考えるときにこれらの港湾を統括する機関が存在しないのが現状なので補助金を提供することで防災投資を促すことや、防災投資をしなければペナルティーを課すことで防災投資を促すことなどの政策をとることができない。ここで考えられることは港湾同士が互いの利益を向上させるような均衡解に移るために補償制度を導入することである。それは過小な防災投資しかなかった港湾の機能停止によって間接的に被害をこうむった港湾が補償されるような制度を導入する方法（間接被害災害債権）を考える。このときこの制度を導入することによって防災投資を促すことで社会的厚生が改善されることを示す。

3 防災投資行動の解析

3.1 本章の狙いと概要説明

本章では相互依存的な二つの港湾しか存在しない場合を想定した上で、二つの港の防災投資行動について分析する。間接的に損害を被ることが想定できないような状況においてはそれぞれの港で私的動機に基づいて防災投資の意思決定を行ったとしてもそれが社会的に最適な行動になる。しかし間接的に損害をこうむるような状況が考えられるときには私的動機に基づいて防災投資の意思決定を行ったときと社会的に最適な防災投資の意思決定をしたときに差が出てくる。このことをモデルを組み立ててゲーム理論を用いて分析していく。

3.2 モデルの前提条件

ここでは、お互いに物流の取引を行っている二つの港を想定する。当然、現実的には多くの港が存在しており、相互に取引を行っているが、本研究では相互依存リスクの特徴を明確に表現するため、もっとも簡易な場合を取り扱う。二つの港をそれぞれ、港1、港2としよう。港1、港2を管理している国は異なることを仮定し、それぞれの防災投資の水準を決めるものとする。港*i* ($i = 1, 2$) を管理する国の防災投資の水準に関して防災投資水準 k_i ($0 \leq k_i \leq 1$) を決定することができる。また、投資費用 $C_i(k_i)$ に関して $\frac{\delta C_i}{\delta k_i} \geq 0$, $\frac{\delta^2 C_i}{\delta k_i^2} \geq 0$, $C_i(1) = C_i$, $C_i(0) = 0$ (C_i は十分大きなオーダーとする。) であることを仮定する。また港*i* はそれぞれ港湾の機能停止に追い込まれるような地震リスクにさらされているものとし、その発生確率を $(1 - k_i)r_i$ であらわす。なお分析を簡易化するため、 $r_1 = r_2 = r$ ($r < 1$) とおく。また、港*i* が被災した場合、その港湾施設が損害を受ける。国や港湾管理者などが負担するこの港湾の修復にかかるコストを L_i とする。また、港*i* が被災するとき、港*j* ($j = 1, 2, i \neq j$) との取引が停止する。こうした国際物流が停止することによる、被災した国の損害を M_{ii} で表そう。さらに、港*i* が被災した場合の被害は港*i* だけに留まらない。両港間の取引が停止することにより、港*j* も被害を被る。この被害額を M_{ij} で表す。以下では分析を簡易化するため、 $L_1 = L_2 = L$, $M_{11} = M_{21} = M_{12} = M_{22} = M$ が成立する場合を想定する。港*i* は防災投資費用と期待被害額の和を最小にするように防災投資水準を決定する。この和のことを以下ではリスクコストと呼び、港*i* のリスクコストを $RC_i(k_1, k_2)$ とおく。

3.3 非協力ゲームを用いた防災投資行動モデル

港*i* のリスクコストの定式化を行う。港*i* は防災投資水準 k_i を決定することで防災投資費用 $C_i(k_i)$ を支払うことになる。次に防災投資水準を決定すると機能停止に追い込まれる確率は $(1 - k_i)r$ となるので、自港が機能停止することによる期待被害額は $(1 - k_i)r_i(L + M)$ となる。また相手の港*j* が機能停止する確率は $(1 - k_j)r$ となるので、港*j* が機能停止することによる期待被害額は $(1 - k_i)rM$ となる。

ここで港*i* のリスクコスト $RC_i(k_1, k_2)$ は、各港の防災投資戦略 (k_1, k_2) を所与としたとき

$$RC_1(k_1, k_2) = C_1(k_1) + (1 - k_1)r(L + M) + (1 - (1 - k_1)r)(1 - k_2)rM \quad (1)$$

$$RC_2(k_1, k_2) = C_2(k_2) + (1 - k_2)r(L + M) + (1 - (1 - k_2)r)(1 - k_1)rM \quad (2)$$

で表される。

このとき、各港の防災投資水準は、ナッシュ均衡解 (k_1^*, k_2^*) として

$$RC_1(k_1^*, k_2^*) = \arg \min_{k_1} RC_1(k_1, k_2^*) \quad (3)$$

$$RC_2(k_1^*, k_2^*) = \arg \min_{k_2} RC_2(k_1^*, k_2) \quad (4)$$

で表される。この解は内点解であることを仮定する。

この最小化問題の一階条件を考えると

$$C_1'(k_1) - r(L + M) + (1 - k_2^*)r^2M = 0 \quad (5)$$

$$C_2'(k_2) - r(L + M) + (1 - k_1^*)r^2M = 0 \quad (6)$$

とあらわされる。

これを解いて導出された解を $(k_1^*, k_2^*) = (k_{1n}^*, k_{2n}^*)$ とする。

ここで $C_i(k_i) = Ck_i^2$ として解く。一階条件は

$$2Ck_1 - r(L + M) + (1 - k_2^*)r^2M = 0 \quad (7)$$

$$2Ck_2 - r(L + M) + (1 - k_1^*)r^2M = 0 \quad (8)$$

と表わされる。

これを解くと

$$(k_{1n}^*, k_{2n}^*) = \left(\frac{r(L + M - rM)}{2C - r^2M}, \frac{r(L + M - rM)}{2C - r^2M} \right) \quad (9)$$

となる。

3.4 社会的最適な防災投資行動モデル

ここでは、社会的最適な防災投資水準を導出しよう。社会的費用を港1、港2がそれぞれ負担する費用の和と定義しよう。このとき社会的費用 $SC(k_1, k_2)$ は、

$$SC(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^2 RC_i(k_1, k_2) \quad (10)$$

で表される。

そして社会的最適な防災投資水準は、

$$SC(k_1^*, k_2^*) = \min_{k_1, k_2} SC(k_1, k_2) \quad (11)$$

により導出される。

この問題の一階条件を考えると

$$\frac{\delta SC(k_1, k_2)}{\delta k_1} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\delta SC(k_1, k_2)}{\delta k_2} = 0 \quad (13)$$

とあらわされる。

すなわち

$$\begin{aligned} C'_1(k_1) - r(L + M) + (1 - k_2)r^2M \\ - (1 - (1 - k_2)r)rM = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} C'_2(k_2) - r(L + M) + (1 - k_1)r^2M \\ - (1 - (1 - k_1)r)rM = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

と表わされる。

これを解いて導出された解を $(k_1^*, k_2^*) = (k_{1s}^*, k_{2s}^*)$ とする。

ここで $C_i(k_i) = Ck_i^2$ として解く。一階条件は

$$\begin{aligned} 2Ck_1 - (1 - (1 - k_2)r)rM \\ - r(L + M) + (1 - k_2)r^2M = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 2Ck_2 - (1 - (1 - k_1)r)rM \\ - r(L + M) + (1 - k_1)r^2M = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

と表わされる。

これを解くと

$$(k_{1s}^*, k_{2s}^*) = \left(\frac{r(L + 2M - 2rM)}{2C - 2r^2M}, \frac{r(L + 2M - 2rM)}{2C - 2r^2M} \right) \quad (18)$$

と表わされる。

さきほどの (k_{1n}^*, k_{2n}^*) と比較すると

$$k_{1n}^* \leq k_{1s}^* \quad (19)$$

$$k_{2n}^* \leq k_{2s}^* \quad (20)$$

となる。

よって社会的に最適な防災投資と比較すると、過小な防災投資となっていることが分かった。

4 災害債権の導入

この制度の前提条件について述べる。この制度が導入されたときを考える。この制度が導入された場合、防災投資の意思決定を行う前に港1と港2から I という準備金を徴収する。そして、防災投資の意思決定を行う。その後、一方の港湾が被災し、もう一方の港湾が間接的に損害をこうむったとする。その場合、もう一方の港湾に二つの港から預けた準備金 $2I$ が支給される。また、両方の港湾に何も起こらなかったときは、徴収した準備金が返還される。また、両方の港湾が被災した場合も同じ額 I ずつ支払われるという制度である。

この制度を導入した時の港1、港2のリスクコストを考える。双方ともが被災することがなければ、どちらにも準備金が返還されるので、制度を導入しない場合と同じである。また両方とも被災した場合は、支払われる金額は同じ I になるはずなので、制度を導入しない時と同じである。

次に港 i は被災をせず、港 j が被災した場合を考えてみよう。港 i は間接的に被った損害がに対して準備金 I が港 j から支払われる形になる。

この制度が導入されなかった場合を考える。その場合、その後防災投資の意思決定を行い、前章と同じリスクコストがかかるものとする。

この制度が導入される条件について考える。少なくとも片方の港湾がこの一連の制度に納得しなければ、この制度が合意に至らないものとする。この制度に納得がいくかはこの制度を導入することによって予想されるリスクコストとこの制度を導入しないことによって予想されるリスクコストを比較して前者が小さいときである。これら一連のゲームをまとめると、第一段階でこの制度を導入するかしないかの意思決定をそれぞれの港湾で行う。その際に、準備金 I を設定するが、二つの港湾がその制度を導入することでリスクコストを小さくすることができる範囲で、社会的厚生をできる限り改善できるように設定するものとする。そして準備金 I をいくらに設定しても両方の港湾でリスクコストを小さくすることができなければ、この制度が導入されることなく、第二段階で防災投資の意思決定を行う。またそのような準備金を設定することができたならば、この制度が導入され、その下で第二段階で防災投資の意思決定を行う。そして第三段階で災害が発生する。そして第四段階として、集めた準備金が配分されるという順序である。

また社会的最適な防災投資の意思決定を二つの港湾の総コストの和で定義しているのので、この制度を導入してもしなくても二つの港湾内部での金銭の移動になるので、社会的最適な防災投資の意思決定の問題には変化がない。

このとき、港1の総コストを $RC_1(I, k_1, k_2)$ 、港2の総コストを $RC_2(I, k_1, k_2)$ とする。そのとき、各港の防災投資戦略 (k_1, k_2) を所与としたとき

$$\begin{aligned} RC_1(I, k_1, k_2) &= C_1(k_1) + (1 - k_1)r(1 - k_2)r(L + M) \\ &+ (1 - (1 - k_2)r)(1 - k_1)r(L + M + I) \\ &+ (1 - (1 - k_1)r)(1 - k_2)r(M - I) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} RC_2(I, k_1, k_2) &= C_2(k_2) + (1 - k_1)r(1 - k_2)r(L + M) \\ &+ (1 - (1 - k_1)r)(1 - k_2)r(L + M + I) \\ &+ (1 - (1 - k_2)r)(1 - k_1)r(M - I) \end{aligned} \quad (22)$$

で表される。

このとき、各港の防災投資水準は、ナッシュ均衡解 (k_1^*, k_2^*) として

$$RC_1(I, k_1^*, k_2^*) = \arg \min_{k_1} RC_1(I, k_1, k_2^*) \quad (23)$$

$$RC_2(I, k_1^*, k_2^*) = \arg \min_{k_2} RC_2(I, k_1^*, k_2) \quad (24)$$

で表される。

この最小化問題の一階条件を考えると

$$\begin{aligned} C'_1(k_1) - (1 - k_2^*)r^2(L + M) \\ + (1 - k_2^*)r^2(M - I) \\ - (1 - (1 - k_2^*)r)r(L + M + I) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} C'_2(k_2) - (1 - k_1^*)r^2(L + M) \\ + (1 - k_1^*)r^2(M - I) \\ - (1 - (1 - k_1^*)r)r(L + M + I) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

とあらわされる。

これを解いて導出された解を $(k_1^*, k_2^*) = (k_{1n}^{**}(I), k_{2n}^{**}(I))$ とする。

ここで $C_i(k_i) = Ck_i^2$ として解く。一階条件は

$$\begin{aligned} 2Ck_1 - (1 - k_2^*)r^2(L + M) \\ - (1 - (1 - k_2^*)r)r(L + M + I) \\ + (1 - k_2^*)r^2(M - I) = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} 2Ck_2 - (1 - k_1^*)r^2(L + M) \\ - (1 - (1 - k_1^*)r)r(L + M + I) \\ + (1 - k_1^*)r^2(M - I) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

と表わされる。

これを解くと

$$(k_{1n}^{**}(I), k_{2n}^{**}(I)) = \left(\frac{r(L + M - rM + I)}{2C - r^2M}, \frac{r(L + M - rM + I)}{2C - r^2M} \right) \quad (29)$$

となる。

この制度に少なくとも一方が同意しなかった場合は前章と同様になるので

$$\begin{aligned} (k_1^*, k_2^*) &= (k_{1n}^*, k_{2n}^*) \\ &= \left(\frac{r(L + M - rM)}{2C - r^2M}, \frac{r(L + M - rM)}{2C - r^2M} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

となる。

これら二つを比較すると、この制度が合意にいたらなかったときよりこの制度が合意に至るときのほうが防災投資がなされることを示している。よって社会的最適解と非協力ゲームのナッシュ均衡解の乖離の解消につながる可能性がある。

次にこのゲームの制度に合意するかどうかの段階を表す式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} [RC_1(I^*, k_1^*, k_2^*) + RC_2(I^*, k_1^*, k_2^*)] \\ = \min_I [RC_1(I, k_1^*, k_2^*) + RC_2(I, k_1^*, k_2^*)] \end{aligned} \quad (31)$$

$$s.t. 0 \leq I \quad (32)$$

$$RC_1(I, k_{1n}^{**}(I), k_{2n}^{**}(I)) \leq RC_1(0, k_{1n}^*, k_{2n}^*) \quad (33)$$

$$RC_2(I, k_{1n}^{**}(I), k_{2n}^{**}(I)) \leq RC_2(0, k_{1n}^*, k_{2n}^*) \quad (34)$$

この式において制約条件式の一つ目は準備金 I が必ず 0 以上でなければならない条件である。制約条件式の一つ目と三つ目はこの制度に合意するための誘引両立性制約条件式である。

誘引両立性制約条件式を $k_{1n}^* = k_{2n}^*, k_{1n}^{**}(I) = k_{2n}^{**}(I)$ という条件を使って整理すると

$$\begin{aligned} k_{1n}^{**}(I)^2(C - r^2M) - k_{1n}^{**}(I)r(L + 2(1 - r)M) \\ + r(L + M) + r(1 - r)M \\ \leq k_{1n}^{*2}(C - r^2M) - k_{1n}^*r(L + 2(1 - r)M) \\ + r(L + M) + r(1 - r)M \end{aligned} \quad (35)$$

となる。

ここで次のような関数

$$\begin{aligned} f(x) &= x^2(C - r^2M) - xr(L + 2(1 - r)M) \\ &\quad + r(L + M) + r(1 - r)M \end{aligned} \quad (36)$$

を考える。

この関数をもとに誘引両立性制約条件式を表現すると

$$f(k_{1n}^{**}(I)) \leq f(k_{1n}^*) \quad (37)$$

となる。

この関数の増減を考えるため一階条件を考えると

$$f'(x) = 2x(C - r^2M) - r(L + 2(1 - r)M) = 0 \quad (38)$$

となり、すなわち

$$x = \frac{r(L + 2M - 2rM)}{2C - 2r^2M} = k_{1s}^* \quad (39)$$

となる。

よってこの関数を図で表現すると図 1 のようになる。

誘引両立性制約より $k_{1n}^{**}(I)$ が動ける範囲は図 1 の赤線の部分である。

そして準備金 I を操作することになるが、動ける範囲内で二港のリスクコストの総和が最小になるところを選ぶことになるが、その範囲内に社会的最適解が存在するのでそこに落ち着き、解の乖離が解消されることが分かった。

その時の準備金を求めると

$$k_{1n}^{**}(I^*) = k_{1s}^* \quad (40)$$

でありすなわち

$$I^* = \frac{2CM(1 - r) + r^2LM}{2(C - r^2M)} \quad (41)$$

となる。

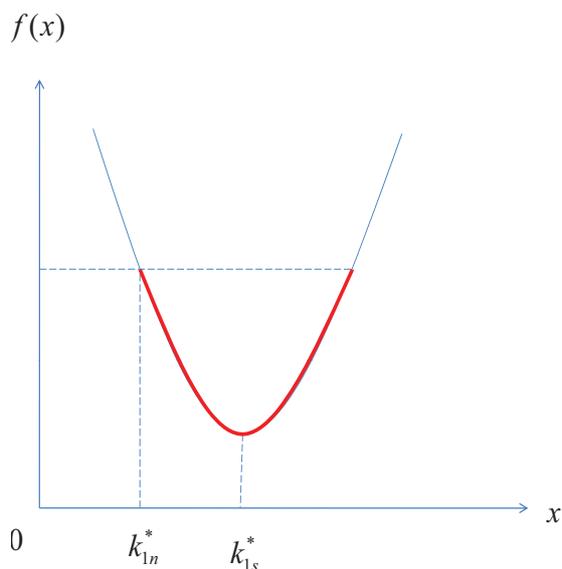


図 1: 関数 $f(x)$ の形状

5 おわりに

本論文では、重要インフラである港湾の防災投資問題に関して、他国の港湾の被災が自国に影響を及ぼすような相互依存的なリスクに着目した上で、社会的に望ましい投資水準を促すための制度的枠組みについて検討した。得られた結論は以下の通りである。

防災投資行動を解析することで、同質的な港、さらにそれを取り巻く経済を仮定した上で、社会的には防災投資をするべきなのに、私的動機に基づく行動によって防災投資をしないというナッシュ均衡解に陥りうることが示された。こうした均衡解は自国の港の防災投資水準を考える際に他国の港に及ぼす影響を考慮しないために存在する。

この問題を解決する方法として、本研究では災害債権を導入する枠組みについて考察した。被災した港湾によって間接的に損害を被った港湾に補償金が支払われるような枠組み、すなわち間接被害災害債権では、このような解の乖離を解消し、防災投資を促す効果があるということが示された。これはすなわち、自国ではコントロールできないリスクに対する制度が、両港の適切な防災投資基準を促すことを示唆している。得られた結果は、筆者が仮定した状況に強く依存することに注意する必要があるが、以上が、本研究で得られた政策的示唆である。

今後の課題として、機能が停止することで被る損害が非対称である場合を分析する必要がある。この時、間接被害が大きい港をもつ国は、事前に防災投資を促すための政府間援助を実施したり、事故的な復旧費用の支援を実施したりするだろう。こうした事前・事後の投資問題は大変重要な研究課題である。

また二つの港だけしか存在しない先ほどのモデルのネットワークを現実の港湾ネットワークに近いものに拡張していく必要がある。最近の国際物流の現状から、ハブ港湾とハブ港湾からフィーダー輸送されるフィーダー港湾を組み合わせたモデルを構築する必要があり、多数の港が存在するとある港湾が機能停止したときにその港湾を代替する港湾が存在するような状況では間接的に被る損害が少なくなるはずである。しかしハブ港湾が機能停止した場合は世界に対して被害が波及することで甚大なる被害をもたらされる可能性がある。このような状況での防災投資行動というものを分析する必要がある。

最後に間接被害をどう評価するかは大変重要な研究課題である。港湾が機能停止することによってそれらを修復する費用というものは評価するのが容易である。しかし港湾が機能停止して取引できないことによって港湾が被る損害やその港湾を使用している企業への波及効果といったものを定量的に評価するのは容易ではない。どのように適切に間接被害を評価するかは、間接被害災害債権を実現していく上で不可欠の課題である。

参考文献

- 1) Trusted information sharing network for critical infrastructure protection: National Strategy for Critical Infrastructure Protection, 2004
- 2) OECD: Protection of 'critical infrastructure' and the role of investment policies relating to national security, 2008
- 3) 北米北東部停電調査団：2003年8月14日北米北東部停電事故に関する調査報告書, 2004
- 4) 兵庫県災害対策特別委員会：阪神淡路大震災による被害および応急復旧対策について, 1995
- 5) 財団法人運輸経済研究センター：大規模地震災害等における貨物緊急輸送および代替輸送対策に関する調査報告書, 1995
- 6) Howard C. Kunreuther, Geoffrey M. Heal, and David H. Krantz: Interdependent Security in Management for Global Change and Other Extreme Events, Theoretical Project 4 - Interdependent security: Toward realistic behavioral models, CRED, 2009
- 7) Geoffrey Heal, Michael Kearns, Paul Kleindorfer, and Howard Kunreuther: Interdependent Security in Interconnected Networks (Philip E. Auerswald, Lewis M. Branscomb, Todd M. La Porte, Michel-Kerjan Erwann O.: Seeds of Disaster, Roots of Response, pp. 258-275, Cambridge Univ Press, 2006)
- 8) Geoffrey Heal and Howard Kunreuther: Modeling Interdependent Risks, Risk Analysis, Vol. 27, No. 3, pp. 621-634, 2007
- 9) Geoffrey Heal and Howard Kunreuther: Interdependent Security: The Case of Identical Agents, No 8871, NBER Working Papers from National Bureau of Economic Research, Inc, 2002