

爆弾テロのリスク評価手法について

TERRORIST BOMB RISK ASSESSMENT

清野 純史¹・岡本 直剛²・Charles Scawthorn³

¹博士（工学） 京都大学大学院助教授 工学研究科都市社会工学専攻
(E-mail: kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

²学士（工学） 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻
(E-mail: naotake@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

³工学博士 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻
(E-mail: scawthorn@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

今日、世界はテロの恐怖にさらされており、日本も例外ではない。そのため、テロ対策が急がれることは明白であり、その第一段階として必要なのがリスクの評価である。本研究では、そのテロリズムのリスク評価モデルを提案する。本研究の特徴として、地震のリスク評価モデルに沿ってモデル化を行い、テロ特有の問題には新たな手法を取り入れる。さらに、その提案したモデルを用いて、具体的なケースについてのテロリスク評価を実行する。

キーワード：テロリズム、リスク、リスク評価、TNT爆薬、地震

1. はじめに

2001年に起こったアメリカの9.11テロは、アメリカ国内だけでなく世界を震撼させた想像を絶する出来事として、記憶に新しい。それ以降、世界は非常に不安定で危険な時期に突入しており、世界各地でテロが頻発している。そこで、安全で安心な社会を築くためにこの問題に真摯に向かい合い、あらゆる学術分野で専門的な立場からその対策を検討する必要がある。

本研究では、テロ対策の第一段階として必要なリスク評価手法について考え、そのモデルを提案することを目的とする。そのモデル体系は、既に確立されている地震のリスク評価モデルに倣い、災害とは異なるテロ特有の問題点に関しては、新たな手法を取り入れることとする。また、テロの大半を占める爆弾テロのみに今回は対象を絞り評価を行った。

ここでは、テロリスクに対してこれまで類のない新たなリスク評価の流れを提示する点に重きを置いており、個々の要素技術において用いた仮定の妥当性についての議論はほとんど行っていない。ただこの点については、テロリスク評価の新たな手順を示すことで、様々な仮定を用いた要素に不都合や妥当性を欠いたものがあれば、その部分を改良あるいは交換することで対処可能であると考えられる。テロリズムのリスク評価に関しては、アメリカの大手リスクモデル会社RMS, Eqecat, AIRなどが具体的にそれを試みているが¹⁾、日本での研究はあまり進んでいない。これは、過去の主だったテロ活動が地下鉄サ

リン事件のみに集約される状況にあることだけがその理由ではない。自然災害と異なり、ハザードの発生に社会的背景や人間の意志(悪意)が大きく影響するため、予測不可能な点が入ってくるゆえ、一連のモデル化が困難になることも大きな理由の一つであろう。その対処のための方法として、本論ではベイズ推定の手法を援用するような工夫も行っている。

本研究ではテロリズムを「反政府的または反社会的な目的を遂行するために、自己あるいは自らが所属する組織・団体の政治上の要求を強要すべく、主に政府や国民に向けられた不法な武力や暴力の行使」と定義し、このテロリズムによって生じるリスクの評価手法について検討する。

また、テロリストが講ずる手段としては、爆弾を始め、核・生物・化学物質など様々なペリルが存在するが、前述のように評価手順の構築に重きを置いたため、伝播・拡散性がないため比較的取り扱いの容易な点源ペリルである爆弾テロのみをモデル化の対象とした。

2. テロリスクのモデル化

2.1. 地震リスクのモデル構造

地震リスクの評価手法には様々なものが存在する²⁾が、そのプロセスの枠組みはFig.1に集約することができる。

これに従うとリスク計算の基本的な方程式は次式で表わされる。

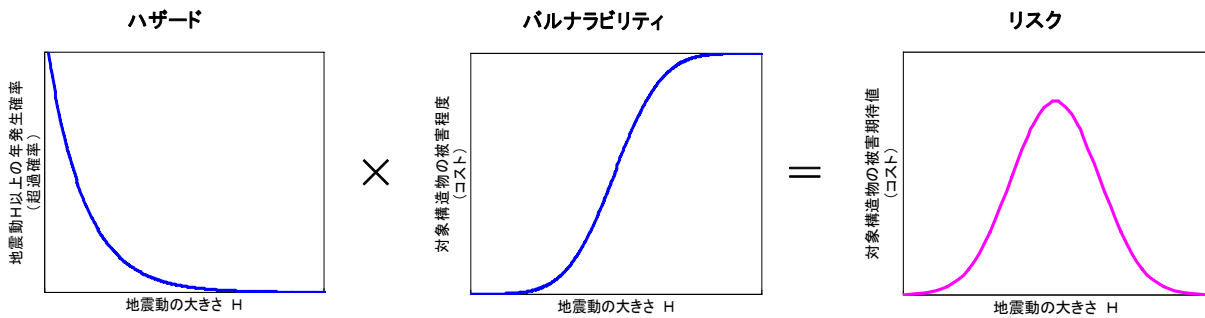


Fig.1 地震のリスク評価モデル

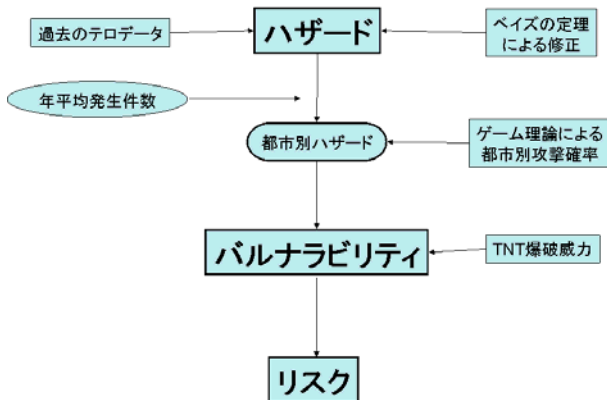


Fig.2 フローチャート

$$[R_{ij}] = [H_j] \cdot [V_{ij}] \quad (1)$$

ここに、 i は構造物などの評価の対象物、 j は地震の強度である。 $[R_{ij}]$ はリスクを表し、強度 j の地震動によって対象物 i が受ける被害の期待値、 $[H_j]$ はハザードを表し、強度 j の地震動が発生する確率を表す。

Fig.1に示すハザードカーブは超過確率を表すが、計算上は確率密度関数へ変換して用いる。また、 $[V_{ij}]$ はバルナラビリティ（脆弱度）を表し、強度 j の地震動が起こった結果、 \equiv 物 i の受ける被害の程度を表す。一般的に、この被害程度を被害コストへ変換する。

リスクにおいて全ての強度（ $\min \leq j \leq \max$ ）を足し合わせると、その対象物のトータルリスク（総期待コスト）が得られることになる。

2.2. テロリスク評価モデルの開発

(1) リスク指標

地震などの災害では起こりえないテロ特有の問題に関しては新たな手法を加えることとし、Fig. 2のフローに沿ってモデルを考える。また、地震の場合に、震度や加速度で表される強度にあたるものとして、本研究のテロにおいては「TNT爆薬重量」を用いることとする。TNTとは2,4,6-トリニトロトルエンの略称であり、優れた特性を持つため、爆薬として広く用いられている。様々な

爆薬の威力をこのTNT爆薬重量に換算して表すことが多い。本研究では対象テロを爆弾テロのみに絞り、モデルの開発を行う。また、地震の場合に損失額等で表されるリスク指標は、本研究のテロでは「死者数」とした。

(2) ハザードモデル

ハザードにおいては、強度である「TNT爆薬重量」と爆弾テロ発生件数の関係を過去データから得ることが困難なため、まず便宜的に爆弾テロによる「死者数」のデータを収集した。

過去数年の爆弾テロデータを国別にまとめ、死者数ごとの発生件数を取り出し、それぞれの超過確率を計算し、全テロ件数で割ることによって強度別の超過確率を得る。こうして得られた超過確率を各死者数ごとにプロットし、指数関数や双曲線等で近似することにより、強度を「死者数」としたハザードカーブ $P'(n)$ を得る。ここで、本来の強度「TNT爆薬重量」へ変換するため、過去のテロデータから「死者数」と「TNT爆薬重量」の関係を関数として得て強度の変換を行う。TNT爆薬重量を $m[\text{kg}]$ 、死者数を $n[\text{人}]$ としたとき、

$$m = 5.55n \quad (2)$$

の関係が得られ、これを用いることで、

$$P(m) = P'(n/5.55) \quad (3)$$

としてテロ強度を「TNT爆薬重量」へ変換する。

さらに、リスク計算においてはハザードを確率密度関数として扱う必要があるため、超過確率 $P(m)$ を次式により、確率密度関数へ変換する。

$$p(m) = \frac{d(1 - P(m))}{dm} \quad (4)$$

a. ベイズの定理によるハザードの修正

自然災害と異なり、評価前後の発生状況や発生規模によりハザードが短期間で変動するテロの防止においては、効果的で洗練された情報の活用が非常に重要となる。そこで、専門家の知識や判断、テロに関する付加的な情報でハザードを修正するためにベイズの定理を用いる。

いま、事前確率密度関数として式(4)で得た $p(m)$ があり、付加的な情報により尤度関数 $L(m)$ を与えるとき、事後確率密度関数 $p'(m)$ は次式のようになる。

$$p'(m) = \frac{L(m) \cdot p(m)}{\int_0^{\infty} L(m) \cdot p(m) dm} \quad (5)$$

b. 年平均発生件数 ν の導入

ここまではテロ発生条件に基づいた各強度の確率密度について考えた。すなわち、1件のテロにおける強度別の発生確率であり、テロ発生件数に関する情報を持たない。そこで、式(5)へ対象国の年平均発生件数 ν を乗じることで、1年あたりのハザードを得る。したがって、1年あたりのハザードは以下のようになる。

$$p''(m) = \nu \cdot p'(m) \quad (6)$$

c. ゲーム理論による都市別ハザードの算定

上述したハザードは国単位であり、実際のテロは1つのポイントを攻撃するものである。そこで、さらに狭いエリアでの発生確率を得るために、以下に述べるゲーム理論によって都市別攻撃確率を導き、式(6)へ乗じることを考える。

ここではゲーム理論によるテロリスクのモデル化で用いられているターゲット別の攻撃確率を利用する。ここではゲーム理論の性質上、アタッカー・ディフェンダーの戦略など後述するような強い仮定を敷いていることに留意されたい。以下にその概略を述べる。

まず、テロリストの攻撃が成功するか否かは、発見(Detection)と、技術的または兵站的欠陥(Technical or logistical shortcomings)の二つによって決まるとされている²⁾。そこで、二つを個別にモデル化したものを組み合わせテロ攻撃成功確率関数を定める。

1) Detectionの定式化³⁾

搜索、救助活動等で利用されるSearch Theoryを用いる。 G 個の格子から成るターゲット内において D 人のディフェンダーと A 人のアタッカーが存在し、ディフェンダーがアタッカーをパトロールしている状況において、お互いが誰も遭遇しない確率は $(1-1/G)^{AD}$ である。格子数、つ

まり広さ G はこのターゲットのValue(価値) V の平方根に等しいと仮定すると、ターゲット i においてお互い遭遇しない、つまりアタッカーがディフェンダーの発見を逃れる確率は、指数近似を用いて次式のように表わされる²⁾。

$$\Pr(\text{EscapeDetection}) = \exp\left[\frac{A_i \cdot D_i}{\sqrt{V_i}}\right] \quad (7)$$

2) Shortcomingsの定式化²⁾

薬学における薬物投与と死亡率の関係を与えるDose-Response Modelを用いる。これによると、服用者 i への薬物投与量を x_i 、 i が死亡する確率を π_i とした場合次式が成り立つ。

$$\ln[\pi_i / (1 - \pi_i)] = \alpha + \beta \cdot x_i \quad (8)$$

ここに α, β は観察データに合ったパラメーターを定める。 π_i を「発見を逃れた後攻撃も成功する確率」とし、変数の x_i を $\ln[A_i], \ln[V_i]$ で表し、パラメーターを $\alpha=0$ 、また $\ln[A_i]$ と $\ln[V_i]$ の組に対して $\beta=(2, -1)$ と定めると

$$\ln[\pi_i / (1 - \pi_i)] = 2 \ln[A_i] - \ln[V_i] \quad (9)$$

となるので、発見を逃れたという条件の下での攻撃の成功確率は次式のようになる。

$$\Pr(\text{Success/EscapeDetection}) = \pi_i = \frac{A_i^2}{A_i^2 + V_i} \quad (10)$$

式(7), (10)より、テロ攻撃成功確率は以下のようになる。

$$p(V_i, A_i, D_i) = \Pr(\text{Success}) = \exp\left[\frac{A_i \cdot D_i}{\sqrt{V_i}}\right] \times \left(\frac{A_i^2}{A_i^2 + V_i}\right) \quad (11)$$

次に、ゲーム理論を適用するにあたり、以下のような前提条件を持つ単純なモデルを示す。

- 各ターゲットを i とし、全ターゲット数を N とする。ターゲット i は価値 V_i を持つ。
- 全資源 A_T を持つあるアタッカーは、1つのターゲットを選択しそこに A_i の資源を充てる。

- ・ 全資源 D_T を持つあるディフェンダーはそれぞれのターゲットに D_i の資源を配分する
- ・ ターゲット i が攻撃されたときに全破壊する確率は $p(V_i, A_i, D_i)$ によって表される.
- ・ 想定被害は

$$EL = \sum V_i \cdot p(V_i, A_i, D_i) \quad (12)$$

で表され、アタッカーはこれを最大化、ディフェンダーはこれを最小化しようと働く。ゲーム理論において、これはアタッカーが EL の利得 (ディフェンダーが EL の損失) を有するゼロ和二人ゲームとなる。

この時、式(12)をゲーム理論で解くことによって、各ターゲットでの均衡点 EL^0 と最適な A_i^0 と D_i^0 が定まる。これらを用い、ターゲット別攻撃確率 q_i を求める。 q_i を用いると EL は次式の様になる。

$$EL(\delta) = \sum q_i \cdot V_i \cdot p(V_i, A_i^0, D_i^0 + \delta_i) \quad (13)$$

ここに、 δ は q_i を導入したことによる D_i の誤差を表し、総和はゼロである。式(13)の δ_i に関する一次テイラー近似は次式で表わされる。

$$EL(\delta) \approx EL^0 + \sum q_i \cdot V_i \cdot \frac{\partial}{\partial D_i} p(V_i, A_i^0, D_i^0 + \delta_i) \cdot \delta_i \quad (14)$$

ここで δ_i の係数を一定とみなすと、 k を定数として次式を得る。

$$q_i = \frac{-k}{V_i \cdot \frac{\partial}{\partial D_i} p(V_i, A_i^0, D_i^0)} = \frac{k}{V_i \cdot A_i^0 \cdot EL^0 \cdot V_i^{-3/2}} = \frac{k\sqrt{V_i}}{A_i^0 \cdot EL^0} \quad (15)$$

これがターゲット別攻撃確率となる。

以上より、ターゲット i の年発生件数を表す関数 $p_i(m)$ は、式(6), (15) から以下のようになる。

$$p_i(m) = q_i \cdot p''(m) \quad (16)$$

(3) バルナラビリティ関数のモデル化

テロにおけるバルナラビリティ (脆弱性) の対象とし

て本研究では「死者数」を考える。FEMA⁴⁾による研究で、「TNT爆薬重量」と「爆心からの致死距離」の関係が得られているので、これを用いる。「TNT爆薬重量」を m [kg]、「爆心からの致死距離」を y [m] とすると、

$$y = 6.96m^{0.35} \quad (17)$$

となり、この致死距離円内の人間が死に至ると考え、爆発周辺状況等を考慮しない単純なモデルを考える。その円面積にその人口密度を乗じることで、簡単な死者数の推定値を得られる。すなわち、ターゲット i の人口密度を d_i [人/km²] とすると死者数 $N_i(m)$ は次式のようになる。

$$N_i(m) = 1.52 \times 10^{-4} m^{0.7} \cdot d_i \quad (18)$$

これをバルナラビリティ関数として用いる。

(4) リスク計算

2.1. で述べたように、リスクはハザードとバルナラビリティを掛け合わせることで得られる。すなわち、式(16)と(18)より、リスク $R_i(m)$ は次のようになる。

$$R_i(m) = p_i(m) \cdot N_i(m) \quad (19)$$

これは、各テロ強度でのターゲット i の年死者数を表すもので、ターゲット i のテロに対する年トータルリスクは次式より得られる。

$$TR_i = \int_0^{\infty} R_i(m) dm \quad (20)$$

これは、爆弾テロによる年間想定死者数となる。

3. テロリスクの算出

3.1. ハザードの決定

ここでは、イラク、アメリカ、日本を対象に、前章までに示した手順に従ったケーススタディを行う。

(1) ケース 1 (イラクを想定した場合)

2.1. で示した手順にしたがって、まずイラクのハザードを考える。イラクにおけるテロは、2003年イラク戦争開戦以降急増していること、また2001年の9.11テロを

契機に世界的にテロが急増し始めたことから、2001年から2005年の爆弾テロデータ⁵⁾を使用する。Table 1 に発生超過確率の計算結果を示す。

ここで得た発生超過確率をプロットし、双曲線により近似を行うと Fig.3 のようになり、次式のように強度を「死者数」としたハザードが得られる。

$$P'(n) = \frac{2.71}{n + 2.71} \quad (21)$$

Table 1 イラク 死者数別発生超過確率

死者数	01~05年発生件数	01~05年超過件数	発生超過確率
0	948	3089	1.000
1~5	1808	2141	0.693
6~15	232	333	0.108
16~30	62	101	0.033
31~100	34	39	0.013
101~300	5	5	0.002

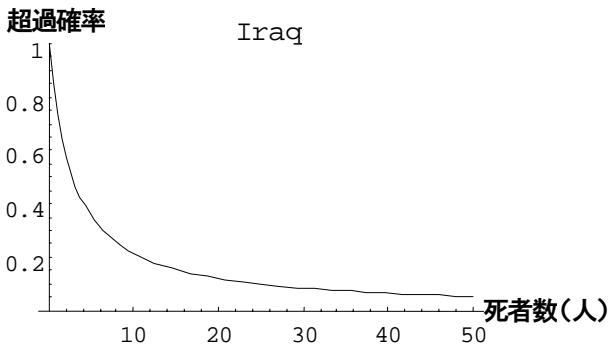


Fig.3 イラク データの近似 (強度: 死者数)

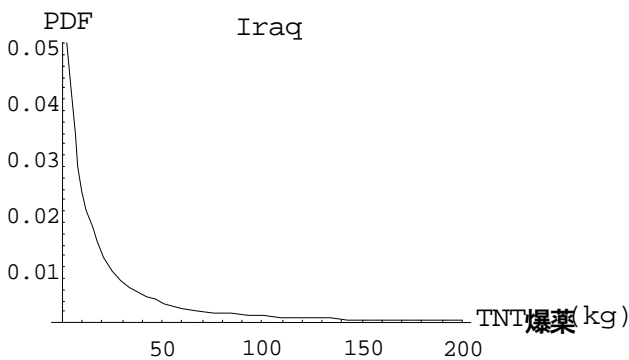


Fig.4 イラク 確率密度関数 (強度: TNT 爆薬重量)

次に、式(3)により強度を「TNT 爆薬重量」へ、式(4)により分布関数を確率密度関数へ変換する。

$$P(m) = P'(n/5.55) = \frac{2.71}{0.180m + 2.71} \quad (22)$$

$$p(m) = \frac{d}{dm}(1 - P(m)) = \frac{0.488}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (23)$$

これを図示したものが Fig.4 である。

a. ベイズの定理によるハザードの修正

次に、ベイズの定理⁶⁾を用いて付加的情報によるハザードの修正を行う。テロに関する情報は個人や組織を超えた国レベルで集約されることが通常であり、またその情報にも不確定性が常に付きまとう。しかし、現時点でのテロの発生可能性が通常レベルなのか、高いレベルなのか、あるいは差し迫った危機的なレベルなのかの情報が入手できれば、過去の平均的なデータに基づく推定結果は更新できるはずであり、また過去1年または1か月などの短期間でのテロ発生状況、発生規模の情報によっても更新できそうである。このような情報によりテロ発生の関数が設定できたとすればこれを尤度関数としてベイズの定理が適用できるであろう。

ここでは危険度別に Fig.5 のようなガンマ分布に従う3つの尤度関数を仮定した。仮定した関数をそれぞれ以下に示す。

$$L_1 = \frac{1}{5.55} \frac{m^0 \exp[-m/4 \times 5.55]}{4^1 \Gamma(4)}$$

$$= 4.50 \times 10^{-2} e^{-4.50 \times 10^{-2} m} \quad (24)$$

$$L_2 = \frac{1}{5.55} \frac{(m/5.55) \exp[-m/4 \times 5.55]}{4^2 \Gamma(2)}$$

$$= 2.03 \times 10^{-3} e^{-4.50 \times 10^{-2} m} \cdot m \quad (25)$$

$$L_3 = \frac{1}{5.55} \frac{(m/5.55)^3 \exp[-m/8 \times 5.55]}{8^4 \Gamma(4)}$$

$$= 4.29 \times 10^{-8} e^{-2.25 \times 10^{-2} m} \cdot m^3 \quad (26)$$

いて式(5)により式(23)を修正したものが次式である。

Table 2 アメリカ 死者数別発生超過確率

死者数	91~05年発生件数	91~05年超過件数	発生超過確率
0	35	38	1.000
1	1	3	0.079
6	1	2	0.054
100~	1	1	0.027

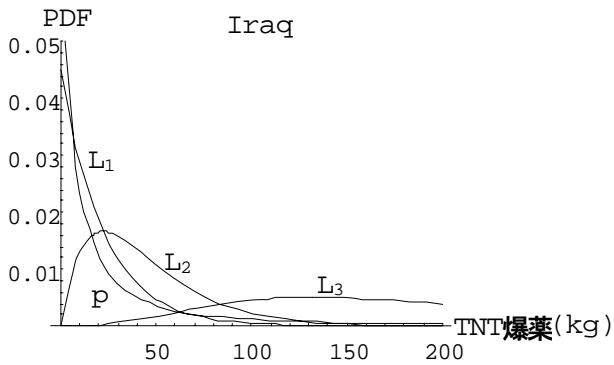


Fig.5 事前分布と尤度関数

Fig. 6 にはその曲線を示す。

$$p'_1(m) = \frac{1.02 * e^{-4.50 * 10^{-2} * m}}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (27)$$

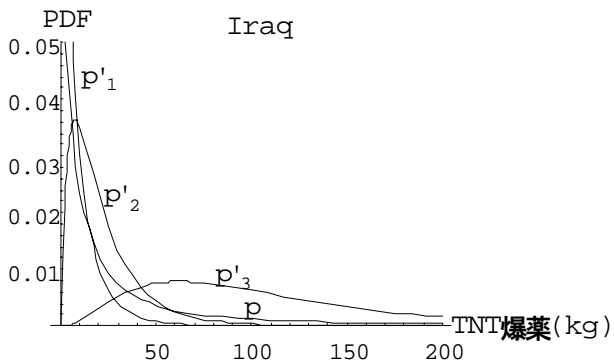


Fig.6 ベイズによる修正結果

$$p'_2(m) = \frac{0.112 * e^{-4.50 * 10^{-2} * m} * m}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (28)$$

$$p'_3(m) = \frac{2.54 * 10^{-5} * e^{-2.25 * 10^{-2} * m} * m^3}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (29)$$

b. ゲーム理論と年平均発生件数の導入

イラクはアメリカや日本と異なり、地理的要因や経済的要因により首都のバグダッド内の一極に人口や経済価値が集中しており、テロの傾向から考えてもその部分に集中する。また、都市別そこで、イラクにおいてはゲーム理論による都市別攻撃選択確率は考えず、式(27), (28), (29)がバグダッド内の人口集中地区でのハザードであるとする。したがって、イラクの年平均爆弾テロ件数 $v=260$ [件/年] のみを導入すると式(30),(31),(32)が求まり、これを図示したものがFig.7 である。ただし、 p_0 は修正前の曲線である。

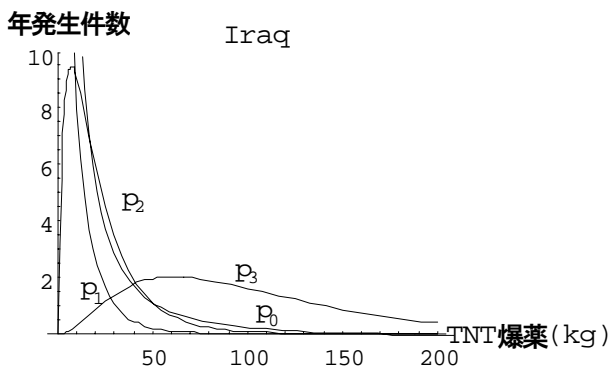


Fig.7 イラク 年単位ハザード

$$p_1(m) = \frac{265 e^{-4.50 * 10^{-2} * m}}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (30)$$

$$p_2(m) = \frac{29.2 e^{-4.50 * 10^{-2} * m} * m}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (31)$$

$$p_3(m) = \frac{6.61 * 10^{-3} e^{-2.25 * 10^{-2} * m} * m^3}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (32)$$

これらは、近い過去に起こったテロの規模に応じて設定するか、付加的情報により起こり得るテロの規模を想定できる場合に用いる。もしくは、テロの発生頻度と発生規模に相関があるならば、発生頻度の情報からこれらを設定することもできるであろう。具体的に、これらを用

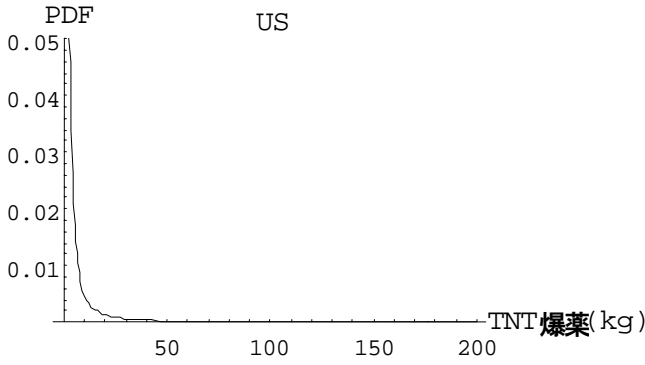


Fig.8 確率密度関数 (強度 : TNT 爆薬重量)

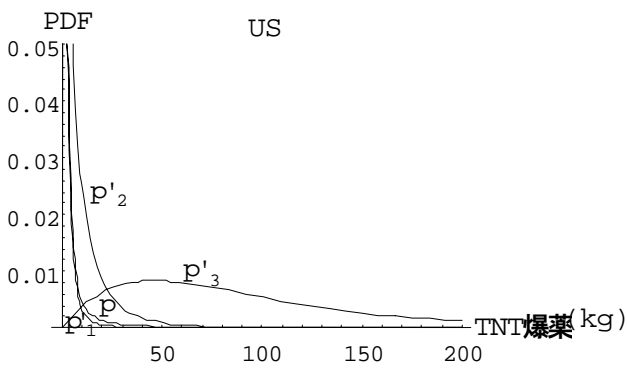


Fig.9 ベイズによる修正結果

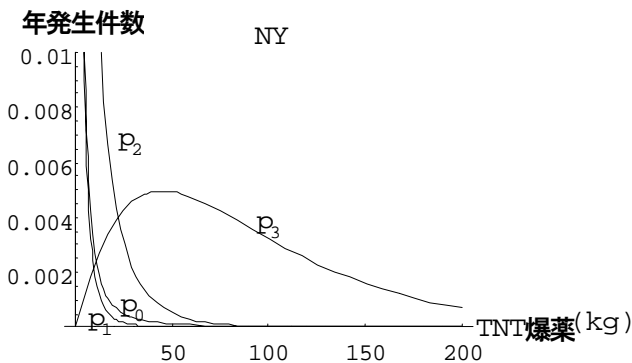


Fig.10 ニューヨーク 年単位ハザード

(2) ケース 2 (アメリカを想定した場合)

次に、アメリカにおけるハザード計算を行う。1991年から2005年までの15年間の爆弾テロデータから死者数別の発生超過確率を計算する(Table 2)。これを双曲線で近似し、さらに強度を「TNT 爆薬重量」へ変換し、確率密度関数としたものが Fig.8 である。

a. ベイズの定理によるハザードの修正

尤度関数はイラクの場合と同様に式(24), (25), (26)を仮定し、ベイズの定理により修正を行うと Fig.9 を得る。

Table 3 アメリカ都市別攻撃選択確率

都市	V($\times 10^{10}$)	D	A	q	都市攻撃選択確率
New York	7.60	6.122	0.826	33.36k	0.237
Los Angeles-Long Beach	2.23	2.955	0.782	19.09k	0.136
Chicago	1.35	2.137	0.761	15.27k	0.108
Orange Country	1.03	1.748	0.751	13.52k	0.096
Jersey City	0.79	1.410	0.743	11.97k	0.085
Philadelphia	0.67	1.220	0.739	11.07k	0.079
Boston	0.57	1.048	0.737	10.24k	0.073
Detroit	0.51	0.937	0.738	9.68k	0.069
Oakland Country	0.39	0.695	0.744	8.40k	0.060
Washington	0.37	0.651	0.746	8.15k	0.058

b. ゲーム理論と年平均発生件数の導入

次に 2.2. (2)-c で述べたゲーム理論を用い、都市別攻撃選択確率を計算する。本研究においては、このゲーム理論により都市別の相対的な攻撃選択確率を得ることを目的とするため、価値 V 、両者の資産 A, D の単位に関しては言及しない。まず入力値として都市の価値 V を決めることが必要であり、ここでは [人口密度 \times 人口] で得られる値を使用した⁷⁾。この価値の高い上位 10 都市を選び、それぞれ式(12)においてゲーム理論を解くことにより Table 3 のような結果を得た。この表において 10 都市間で $\Delta q = 1$ を仮定し、最右列の都市別攻撃選択確率を得た。これを用いると、例えばニューヨークにおいては $q = 0.237$ であり、またアメリカの年平均爆弾テロ件数が $v = 2.53$ [件/年] であることより、Fig.9 の関数にこれらをそれぞれ乗じることで Fig.10 に示すようなニューヨークの 1 年単位のハザードを得ることができる。

(3) ケース 3 (日本を想定した場合)

日本においては、近い将来の大規模なテロの発生の可能性も指摘されているが、現在までの発生件数は極端に少ない。このため、ベイズの定理によるハザードの修正として仮定した尤度関数に結果が大きく依存することになるが、評価プロセスの適用例として日本のリスク計算も試みる。まず、1991 年から 2005 年の 15 年間にける全テロを対象としたデータを示したものが Table 4 である。また、日本において 1995 年の地下鉄サリン事件のような死者 12 名重傷者 5510 名を出すような重大なテロが発生しているが、対象期間に爆弾テロによる犠牲者が出ていないので、この全テロの強度別発生確率を爆弾テロのそれと仮定する。これを双曲線で近似したものを本研究の手順に従って強度を「TNT 爆薬重量」へ変換し、確率密度関数としたものが Fig.11 である。

a. ベイズの定理によるハザードの修正

尤度関数はイラクの場合と同様に式(24), (25), (26)を仮定し、ベイズの定理により修正を行ったものが Fig.12 である。

Table 4 日本 死者数別発生超過確率

死者数	91~05年発生件数	91~05年超過件数	発生超過確率
0	21	24	1.000
1	1	3	0.125
4	1	2	0.083
10~	1	1	0.042

Table 5 日本都市別攻撃選択確率

都市	V($\times 10^{11}$)	D	A	q	都市攻撃選択確率
東京	8.18	6.372	0.828	34.53k	0.240
大阪	2.17	2.943	0.781	18.86k	0.131
横浜	1.25	2.201	0.758	14.75k	0.103
名古屋	1.18	1.937	0.756	14.37k	0.100
札幌	0.70	1.269	0.740	11.31k	0.079
福岡	0.62	1.136	0.738	10.67k	0.074
神戸	0.59	1.083	0.738	10.41k	0.072
京都	0.58	1.066	0.738	10.33k	0.072
広島	0.47	0.860	0.738	9.28k	0.065
川崎	0.45	0.820	0.739	9.08k	0.063

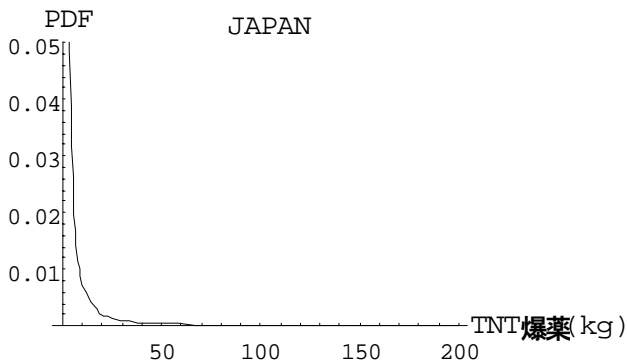


Fig.11 確率密度関数 (強度: TNT 爆薬重量)

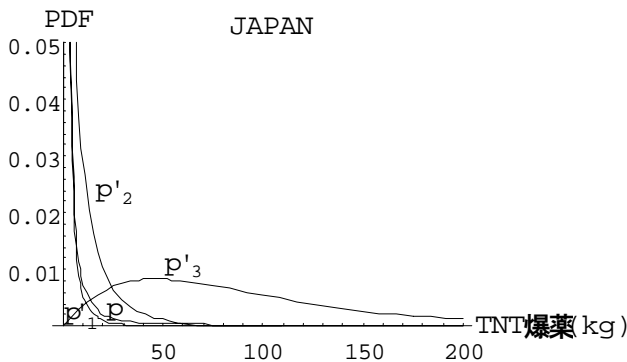


Fig.12 ベイズによる修正結果

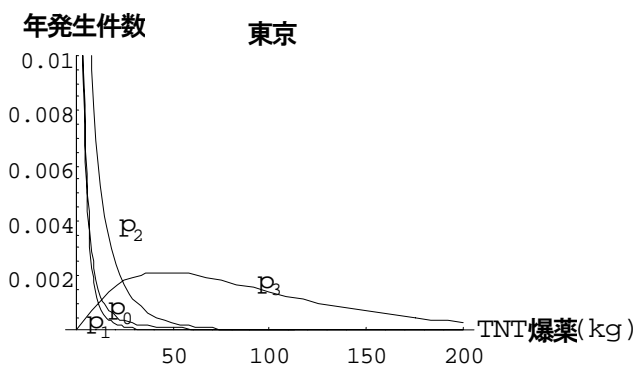


Fig.13 東京 年単位ハザード

b. ゲーム理論と年平均発生件数の導入

日本においては、人口だけでなく都市の経済価値を重視し、都市別の総生産⁸⁾を価値 V として用い攻撃選択確率をゲーム理論により算出した. これを示したものがTable 5である. 例えば東京について考えると、 $q=0.240$ であり、また日本の年平均爆弾テロ件数が $v=1.07$ [件/年]である. これらをFig.12 の関数にそれぞれ乗じることによりFig.13 に示す東京における1年単位のハザードを得る.

3.2. バルナラビリティの決定

式(18)を用いることにより、対象とする都市のバルナラビリティを得ることができる. イラクの人口集中地区の人口密度は $5,000$ [人 km^2]であり、これを式(18)に代入すると次式を得る.

$$N(m) = 1.52 \times 10^{-4} m^{0.7} \times 5000 = 0.761 m^{0.7} \quad (33)$$

これがイラクのバルナラビリティ関数である.

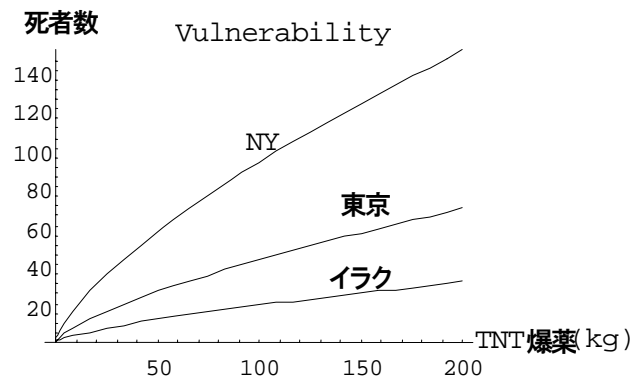


Fig.14 バルナラビリティ関数

同様に、ニューヨークの人口集中地区の人口密度は24,200 [人/km²], 東京は11,080 [人/km²]であり、これらの値を用いてそれぞれ算出した結果を示したものがFig.14である。

3.3 リスク評価

ベイズの定理で修正を行い、年単位のハザードを表す式(30), (31), (32)とバルナラビリティを表す式(33)を用いることにより、以下の様にイラクのリスクを算出する。

$$R_1 = \frac{201 e^{-4.50 \times 10^{-2} m} \cdot m^{0.7}}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (34)$$

$$R_2 = \frac{22.2 e^{-4.50 \times 10^{-2} m} \cdot m^{1.7}}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (35)$$

$$R_3 = \frac{5.03 \times 10^{-3} e^{-2.25 \times 10^{-2} m} \cdot m^{3.7}}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (36)$$

$$R_0 = \frac{96.6 m^{0.7}}{(2.71 + 0.180m)^2} \quad (37)$$

この結果を Fig.15 に示す。また、式(20)によりトータルリスクが以下のように求められる。

$$TR_1 = \int_0^{\infty} R_1 dm = 822.52 \quad (38)$$

$$TR_2 = \int_0^{\infty} R_2 dm = 1601.16 \quad (39)$$

$$TR_3 = \int_0^{\infty} R_3 dm = 4906.53 \quad (40)$$

$$TR_0 = \int_0^{\infty} R_0 dm = 3586.62 \quad (41)$$

同様にアメリカ、ニューヨークのリスクはFig.16のように表され、トータルリスクは以下ようになる。

$$\begin{aligned} TR_1 &= 2.17 \\ TR_2 &= 8.34 \\ TR_3 &= 48.96 \\ TR_0 &= 3.83 \end{aligned} \quad (42)$$

また、日本の東京のリスクはFig.17で表され、トータルリスクは次式で与えられる。

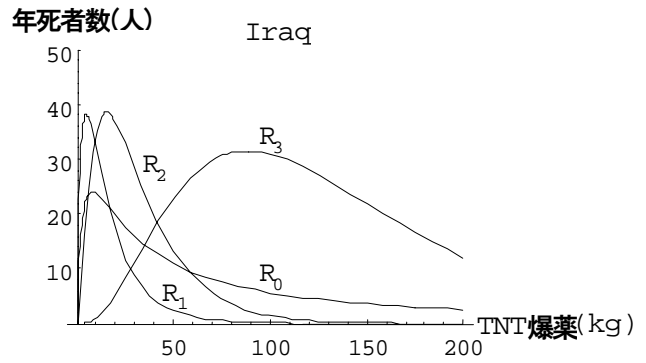


Fig. 15 イラクにおけるリスク

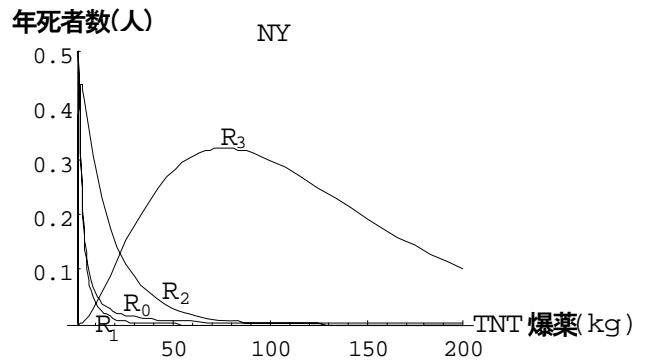


Fig. 16 ニューヨークにおけるリスク

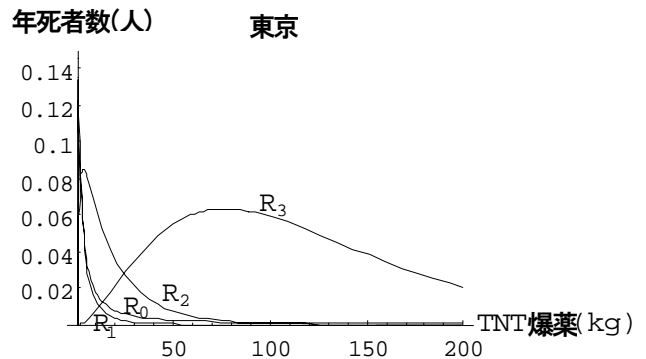


Fig. 17 東京におけるリスク

$$\begin{aligned} TR_1 &= 0.56 \\ TR_2 &= 1.85 \\ TR_3 &= 9.66 \\ TR_0 &= 1.11 \end{aligned} \quad (43)$$

3.4. モデル化とテロリスク算出に関する考察

例えばイラクのケースにおいて、Fig.15のような4つのリスク結果が得られたが、ベイズの定理における尤度関数が影響して、それぞれ特徴的なカーブとなった。したがって、過去の統計の基づく推定値を他の有用な判断

資料で補う場合にはここで用いたベイズの定理が有力なツールとなりうるということがわかったが、その反面、尤度関数決定の重要性も認識できる。今回のモデルは様々な仮定の下に非常にシンプルなモデルを構築しており、また得られた数値結果への信頼性の検討も行っていないが、これは一連の手順の提案に主眼を置いたためである。

バルナラビリティの決定は式(18)で定義したように人口密度によって大きく異なる。ケーススタディでは人口集中地区の人口密度を用いたが、テロはビルや電車、地下などの狭いポイントを狙うものであり、これについてもまたより詳細な検討が必要である。ゲーム理論による都市別攻撃選択確率においても、価値 V の定義に依存して得られる確率が変動するなどの課題も多い。

4. 結論

本研究ではテロリズム、特に爆弾テロのリスク評価モデルを提案した。さらに、提案したモデルにより具体的な計算も行った。以下に、本研究で行ったこと、および得られた成果を列挙する。

- (1) 地震のリスク評価モデルに沿ったテロリズムのモデル化を行った。その際、ハザードの強度を表す物理量としては「TNT 爆薬重量」、リスク評価対象としては「死者数」と定めた。
- (2) テロ発生状況や発生規模などの付加的情報によるリスクの変化に対応できるように、ベイズの定理によるハザードの修正を取り入れた。ケーススタディの結果からその有用性を確認した。
- (3) 都市別のリスクを評価するため、ゲーム理論を用いて都市別攻撃選択確率を導入した。ゲーム理論において各都市の価値 (Value) の定義によって得られる確率が変動するので、その適切な定義が重要になる。

- (4) バルナラビリティ関数に関して、本研究では爆弾の威力と人口密度から単純なモデルを提案したが、テロの場合、多くの要因が絡み合っていることから、今後さらに詳細なモデルを検討する必要がある。
- (5) 今後の課題としては、ハザード・バルナラビリティ・リスクそれぞれに関するより詳細なモデルの構築、爆弾テロに限らないより一般的なリスクモデルの必要性、さらにはネットワーク性を考慮したモデルへの拡張が挙げられる。

参考文献

- 1) Jon Gascoigne (2002). *Terrorism Modelling, Reaction*, pp.25. <http://www.reactionnet.com>.
- 2) Andrew Coburn and Robin Spence. (2002). *Earthquake Protection*. (second edition). JOHN WILEY & SONS, LTD.
- 3) John A. Major. (2004). *Advanced Techniques for Modeling Terrorism Risk*. Guy Carpenter & Company, Inc.
- 4) Michael D. Brown and Anthony S. Lowe. (2003). *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attack Against Buildings*. FEMA.
- 5) National Memorial Institute for the Prevention of Terrorism. *MIPT TERRORISM KNOWLEDGE BASE*. <http://www.tkb.org/Home.jsp>
- 6) 伊藤学, 亀田弘行, (1977), 『土木・建築のための確率・統計の基礎』, 丸善株式会社
- 7) Henry H. Willis, Andrew R. Morral, Terrence K. Kelly, and Jamison Jo Medby. (2005). *Estimating Terrorism Risk*. RAND CORPORATION. http://rand.org/pubs/monographs/2005/RAND_MG388.pdf
- 8) 総務省・総務局, 『統計データ・ポータルサイト』, <http://portal.stst.go.jp/Pubstat/top.html>

TERRORIST BOMB RISK ASSESSMENT

Junji KIYONO¹, Naotake OKAMOTO² and Charles Scawthorn³

¹Dr. Eng. Assoc. Professor, Kyoto University, Dept. of Urban Management
(E-mail: kiyono@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

²B.E. Kyoto University, Dept. of Urban Management
(E-mail: naotake@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

³Dr. Eng. Professor, Kyoto University, Dept. of Urban Management
(E-mail: scawthorn@quake.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

Recently we are faced with the threat of terrorism all over the world. Japan also is no exception. We, therefore, must assess the risk for the first step and take countermeasures against terrorism as soon as possible. In this study, a risk assessment model for terrorism was proposed. Risk of a terrorist attack (probability of occurrence and expected loss) is assessed for cities using traditional hazard-vulnerability modeling framework. Hazard and vulnerability data are derived from terrorism statistics for the US, Iraq and Japan. The model developed was applied to some cities for assessing their terrorism risk.

Key Words: Terrorism, Risk, Risk assessment, TNT- bomb, Earthquake, Seismic risk