

人為災害リスクの定量化に関する基礎的研究

Fundamental Study on Quantification of Man-made Disaster Risk

○福島誠一郎¹, 矢代晴実²
 Sei'ichiro FUKUSHIMA¹ and Harumi YASHIRO²

¹東電設計株式会社

Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

²東京海上日動リスクコンサルティング

The Tokio Marine & Nichido Risk Consulting Co., Ltd.

Many buildings and structures are surrounded by various risks, such as a natural disaster risk, an accident, and an environmental issue. In recent years, adding to the risks mentioned before, a man-made risk such as a terrorist attack or a crime has been of concern. On the other hand, the corporate social responsibility is focused, so that enterprises have come to be evaluated their capacity for various risks by stockholders or in investment market. This paper describes the fundamental methodology to assess the man-made risk, followed by the illustrating example.

Key Words : Man-made risk, Terrorist attack, Terrorist hazard, Loss estimation, Risk curve

1. まえがき

企業の所有する建物や構造物は、自然災害、事故、環境問題等、多くのリスクに囲まれている。近年ではこれらのリスクに加え、武力攻撃事態等にける国民の保護のための措置に関する法律（通称：国民保護法）が成立すると言った情勢にあり、犯罪やテロと言った人為災害も無視し得ない状況となりつつある。

一方、最近では企業の役割として社会的責任が注目されてきており、企業が市場に優れた製品を供給し、企業倫理や法律を遵守し、継続的な発展を行うことが社会に対する義務であるとされている。また、このような観点で企業は株主や投資市場において評価されるようになり、リスクに先進的な企業ではリスクに対する施策を積極的に展開するようになってきた。

本研究では以上を鑑み、人為災害を対象としたリスク評価の方法について検討・提案を行うとともに、モデル建物を対象とした評価例を示す。

2. 人為災害リスク定量化手法の構築

(1) 評価の枠組み

人為災害リスクは、通常兵器（火器）による攻撃の他、化学兵器や生物兵器の使用等、多岐に亘るが、ここでは、通常兵器による爆破テロを対象として取り上げる。

定量化は確率論的な方法を採用する。確率論的な方法は、テロリズムの頻度-規模関係の定量化が課題である反面、テロ対策の費用対効果を求める場合に必要である。提案する手法の枠組みを図1に示す。

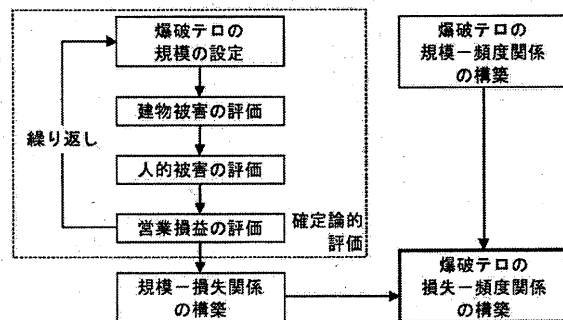


図1 過去の事例に基づく爆破攻撃の規模別分布

(2) 爆破テロの規模の設定

確率論的評価を前提とするならば、あらゆる規模が想定されるが、極僅かな損傷しか与えない規模や、原子爆弾投下のような非現実的な規模を考えることは合理的ではない。そこで、入手可能性や輸送の負担等を考慮して、日本で発生する可能性がある範囲内の規模を設定する。なお、爆破テロの場合、その規模と被害の様相は表1のようにまとめられる。

表1 爆破テロの規模と被害の様相

規模	被害の様相
0.5kg	スーツケース爆弾や自爆テロ ・ 接近して起爆しない限り構造躯体に損傷は生じない ・ S造カーテンウォールの2階までが破壊する可能性がある ・ 窓ガラスの破損はかなりの高さまで及ぶ
10kg	小包爆弾 ・ 接近して起爆しない限り構造躯体に損傷が生じる可能性が高い ・ 爆破階の上下階の床スラブが損傷する ・ 屋外で爆発した場合には、1~4階程度まで外壁が破壊する可能性が高い
200kg	自動車爆弾 ・ 建物から30m離れても構造躯体に損傷が生じる ・ 屋外で爆発した場合には、1~15階程度まで外壁が破壊する可能性が高く、同時に低層階の柱・梁・床スラブが損傷を受ける

(3) 建物被害の評価

爆風影響を評価するためには、爆破物の規模や対象物までの距離の他、爆風と対象物の相互作用を考える必要がある。これは一般には干渉や回折・収束等のために極めて複雑な現象となるため、大規模なシミュレーションや精度の高い実験が不可欠で、それらを欠いた場合には精度の高い評価は困難となる。しかしながら、物体の形状や爆風の持続時間等から、反射圧や激み圧等をパラメータとして、おおよその評価は可能となっている。

例えば、極めて大きい平面物体に爆風が垂直に作用する場合には、反射圧のみを考慮すれば良いとされている。また、爆風が壁と同じ方向に伝播する場合、壁にかかる圧力は静水過圧で評価可能である。長い棒状の物体の先端に棒と同じ方向から入射する爆風の圧力は激み圧で評価可能である。

ここでは、(1)式で与えられる工業技術院物質工学工業技術研究所の物質研（青地-松永）式を用いる。

$$\ln \Delta P = 0.2972x^2 + 2.8745x + 7.3629 \quad (1)$$

ここで、 ΔP はピーク静水過圧、 x は $\ln[R/W^{1/3}]$ で与えられる値で、 R は爆源からの距離(m)、 W は爆発物の量(kg)である。なお、(1)式は空中爆破の場合の式であり、地上爆破の場合は、 W を2倍する。

爆風ピーク静水過圧と建物の損傷との関係は、表2のように与えられている。ここでは、地震リスク評価の場合と同様、建物の損傷をいくつかの被害程度（小破、中破等）に区分することとし同表を基に、表3に示すような関係を設定した。

いくつかの爆破規模（TNT等量）について爆源からの距離と建物被害の関係を求めた結果を図2に示す。例えば、TNT等量で1kgの爆破があった場合には、爆源から4m以内のものは倒壊、5m以内は大破、9m以内は中破、20m以内は小破となる。

表2 爆風ピーク静水過圧と建物の損傷との関係

ΔP (kPa)	建物被害
1	● ガラスが破損する
7-14	● アスベスト波板が破壊する ● 鉄やアルミの波板が曲がり、壊れる
9	● 建物のスチール製フレームが多少曲がる
14	● 家の壁や屋根が一部破壊する
14-21	● 非補強コンクリートやブロック壁が破壊する
21	● スチール製フレームでできた建物が破壊する
21-28	● 無筋建物、鋼板建物が破壊する ● 油貯槽が破裂する
35-50	● 家屋が破壊する
50-55	● 強化していない厚さ 8-12 インチのブロックが、せん断あるいは曲げで破損する
70	● ほとんどの建物が崩壊する ● 重量機械（7000ポンド）が移動し破壊する ● 極重量機械（12000ポンド）は残存する

表3 設定した被害程度と爆風ピーク静水過圧との関係

被害程度	ΔP (kPa)	被害の概要
小破	5-15	● 構造躯体：補修無しで使用可能 (0%) ● 間仕切り、外壁：軽微な補修 (10%) ● 設備：軽微な補修 (10%)
中破	15-35	● 構造躯体：補修後使用可能 (10%) ● 間仕切り、外壁：中規模補修 (20%) ● 設備：中規模補修 (20%)
大破	35-70	● 構造躯体：補修後使用可能 (30%) ● 間仕切り、外壁：大規模補修 (50%) ● 間仕切り、外壁：大規模補修 (50%)
倒壊	70-	● 構造躯体：使用不可 (100%) ● 間仕切り、外壁：使用不可 (100%) ● 間仕切り、外壁：使用不可 (100%)

括弧内の数値は再調達価額に対する比

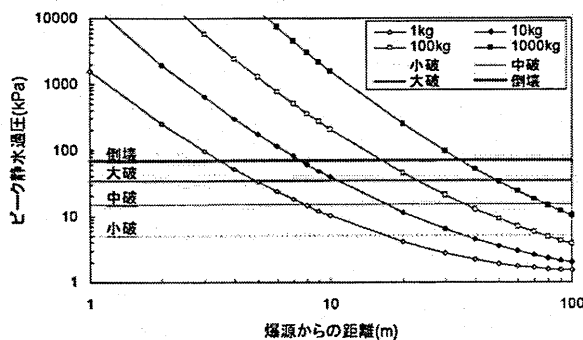


図2 爆発規模と建物被害の関係

(4) 人的被害の評価

テロの事例における人的被害の主要因は、その分析によれば、瓦礫等による二次災害、あるいは建物倒壊によるものであることが明らかとなっている。そこで、本研究では表4に示すようなマトリクスを用いて、建物の被害程度と死傷者の関係付けを行うこととする。なお、負傷の程度は、軽傷、中程度、危篤、死亡の4段階とした。

数値の設定の考え方は、まず、構造被害に対し、何らかの被害が発生する割合を設定した。表4の「被害発生」がこれに相当し、建物小破では半分弱程度、倒壊では全員が負傷するとした。また、中破と大破は、小破と倒壊の値を等分割するように設定した。

次に、各構造被害について、負傷の程度を案分した。小破については、ガラス破損程度であり、応急手当程度は必要であるが、入院には至らないと考え、全てを軽傷に割り当てた。倒壊については、死亡率10%を採用した。また、応急手当のみで入院不要となる割合も10%とし、残り(80%)を等分割した。中破と大破については、小破と倒壊の値を参照して設定した。

表4 構造被害と人的被害の関係付け

		構造被害			
		小破	中破	大破	倒壊
被害の内訳	被害発生率	0.4	0.6	0.8	1.0
	軽傷	0.4	0.3	0.2	0.1
	要治療	-	0.3	0.3	0.4
	危篤	-	-	0.3	0.4
	死亡	-	-	-	0.1

(5) 営業損失の評価

営業損失として、当該施設が使用不可となる期間における収入の減少、追加費用の発生を考える。これらの費用増（収入減を含める）と使用不可の期間は、ともに構造損傷の程度と、その関数である従業員の負傷状況に依存するため、結果として営業損失も構造損傷の関数として表すことが適切であると考えられる。

表5は、被害程度と営業損失の関係をまとめたものである。企業が存続しているという観点からは、長期間に亘り営業活動が停止するとは考えにくく、代替施設を手配する等して、企業活動を維持することを前提とした。同表の数値は、1日当たりの平均収入減を示すもので、長期に亘るほど平均的には通常時の収入に近づくように設定した。

移設費用は、引っ越し料、賃貸料等を1日平均したもので、業務停止日数が長いほど、何らかの割引があると仮定している。人件費は、負傷した従業員の代替者の確保に対応する。ここでは、無傷あるいは軽傷となった従業員はそのまま業務に従事できるとし、要治療以上の従業員については、その1/3を他から補填することとした。

なお、構造被害と業務停止期間の関係については、西川・他¹⁾を参照して設定した。

表5 構造被害と営業損失の関係付け

		構造被害			
		小破	中破	大破	倒壊
業務停止期間(日)		3	15	60	180
営業損失	収入減 ¹⁾	×0.8	×0.4	×0.2	×0.1
	移設費 ²⁾	×10	×0.9	×0.8	×0.7
	人件費 ³⁾	×0.0	×0.1	×0.2	×0.3

*1 業務停止期間に亘っての総売り上げに、表中の値を乗じる

*2 業務停止期間に亘っての賃貸料等に、表中の値を乗じる

*3 要治療者数×派遣費用に、表中の値を乗じる(表4参照)

(6) 規模-損失関係の構築

所与のテロリズムの規模 (TNT 等量で定義) に対し, 建物に占める各被害程度の割合を求める. さらに, 被害程度毎に, 建物被害, 人的被害, 営業損失を算定し, 被害程度の割合を重みとした加重和を求めることで, 当該規模に対する損失とする.

以上の作業を予め設定した複数の規模に対して行うことで, 人為災害に係る規模-頻度関係を得る.

(7) 爆破テロの規模-頻度関係の構築

ここでは, 規模-頻度関係を求める方法として, 国/都市/位置/目標としての適性/攻撃方法/等を考慮し, 現在入手可能な規模-頻度関係を調整することを考える.

元となる規模-頻度関係であるが, 例えば, 図 3 からは, イベント発生数と爆弾のサイズが両対数軸上で 1 次関数で関係付けられることがわかる. また, 日本におけるテロリズムの特徴は表 6 のようにまとめられる.

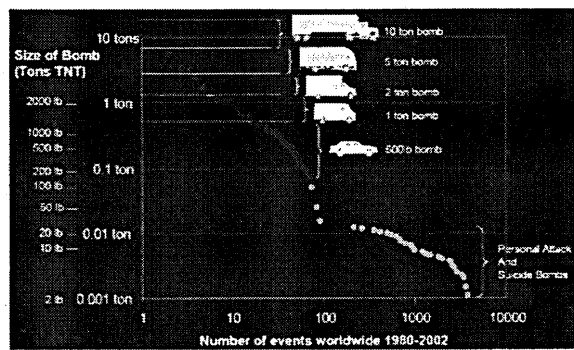


図 3 過去の事例に基づく爆破攻撃の規模別分布

表 6 日本におけるテロリズムの特徴

分類	特徴
小規模	<ul style="list-style-type: none"> 典型的な小型攻撃: 小包爆弾, 発火装置 2001 年以降で, 22 の事件が発生 年間当たりの損失は 200 万米ドル未満 年間死者数は 10 人未満
大規模	<ul style="list-style-type: none"> 過去 15 年間に 4 件発生 今後の推定: 平均 12 ヶ月に 1 回 財産の平均損失: 4 億米ドル 1 攻撃あたりの死者数: 100 人
特大	<ul style="list-style-type: none"> 平均 5 年に 1 回発生, 1 回当たりの成功率 = 1/20 財産の平均損失: 10 億米ドル 1 攻撃あたりの死者数: 500 人

(8) 爆破テロの損失-頻度関係の構築

(6) で求めた規模-損失関係, (7) で求めた規模-頻度関係を基に, 規模を媒介変数として損失と頻度を関連づける. このようにして求められたものが, 人為災害リスクのリスクカーブとなる.

3. 適用試算

(1) 条件設定

対象建物の諸元を表 7 に示す. 建物の財ならびに従業員は, 建物内に一様に分布すると仮定した.

爆発物の位置は, 図 4 に示すように, 建物前面中央の 1 階床位置とした. すなわち, 爆破の形態は地上爆破となるため, ピーク静水過圧の算定においては, 爆発物の量を 2 倍する.

表 7 対象建物の概要

項目	概要
建物概要	<ul style="list-style-type: none"> 規模: 80m (東西) × 50m (南北) × 30m (高さ) 再調達価額: 1000 ユニット (躯体: 30, 仕上げ: 30, 設備 40)
従業員数	700 人
経常利益	200 ユニット (年間)
賃貸料	150 ユニット (年間)

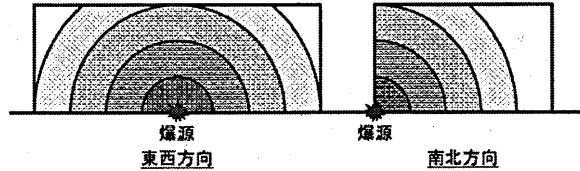


図 4 設定した爆源位置

(2) 損傷度解析結果

横軸に爆破規模を, 縦軸に対象建物内における条件付損傷確率 (所与の被害程度以上となる部分の割合) を取り, 損傷度曲線として表す. 得られた結果を図 5 に示す.

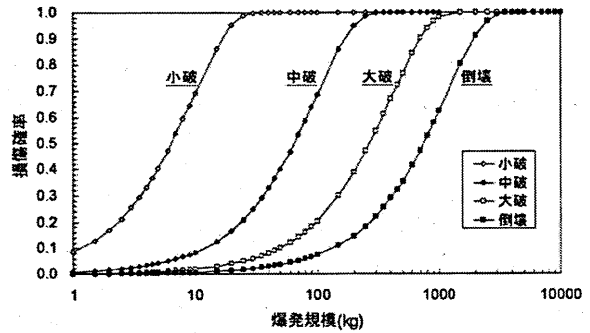


図 5 損傷度解析結果

(3) 規模-損失関係の評価

所与の爆破テロの規模 w に対する直接被害 $L_d(w)$ は, 次式で与えられる.

$$L_d(w) = \sum_{i=1}^3 c_i [p_i(w) - p_{i+1}(w)] + c_4 p_4(w) \quad (2)$$

ここに, i は被害程度を表す変数 ($i=1$ が小破, $i=2$ が中破, $i=3$ が大破, $i=4$ が倒壊) である. $p_i(w)$ は規模 w に対する条件付損傷確率で図 5 より求められる. c_i は被害程度 i に対する再調達価額である. 間接被害 $L_{id}(w)$ についても同様に, 規模 w の関数として評価する. なお, 人件費については, 0.005/人日を設定した.

得られた規模-損失関係を図 6 に示す.

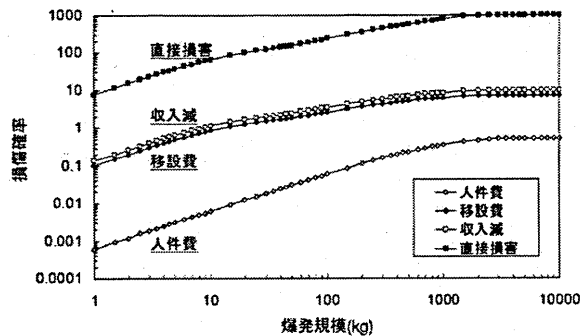


図 6 対象建物の規模-損失関係

(4) 爆破テロの規模-頻度関係の評価

モデル建物に対するテロリズムの規模-頻度関係は、図3を基に、その頻度を調整して設定する。ここでは、小規模テロが1kg程度の爆破テロであると想定し、その頻度を図3に適合させてテロリズムの規模-頻度関係を求める。テロの規模による頻度の相対関係(相対比率)は維持されるとした。

表6によれば、日本におけるテロリズムの特徴として、2001年以降で小規模テロが22件発生している。これより、小規模テロの発生頻度は3.0回/年とする。これは日本全土であるため、これを東京地域のものとする必要がある。ここではおおよそ1/10の確率で東京地域にテロが発生すると仮定する。また、テロの対象としての望ましさを表す指標として、その条件付き確率を1/10とした。

以上より、モデル建物に発生しうる小規模テロの年間頻度 ν は、

$$\nu = 3.0/10/10 = 0.03 \quad (3)$$

と求められる。対象建物に対し設定した爆破テロの規模-頻度関係を図7に示す。

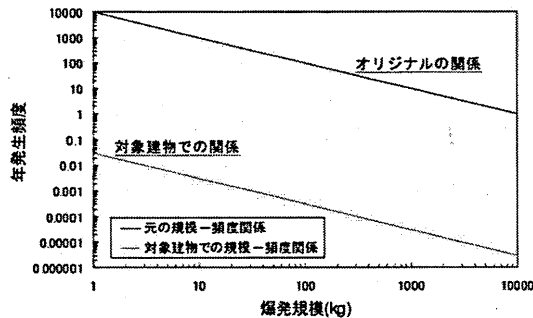


図7 爆破テロの規模-頻度関係

(5) 爆破テロの損失-頻度関係の評価

図6及び図7を組み合わせ、爆破テロの損失-頻度関係を求める。得られたリスクカーブを図8に示す。

例えば、地震リスクの指標として用いられるPML

(年間発生頻度1/475に対応する損失)を、図8から求めると、85程度となる。これは建物再調達価額の0.85%に相当する。なお、福島・矢代²⁾では、地震PMLは総資産の4%程度となっている。

日本におけるテロリズムの発生頻度の評価、特定の建物が狙われる頻度の評価には、大きな不確実性が存在するため、その絶対値の議論は難しいものの、地震リスクに比べて同程度のリスクはあると考えられる。

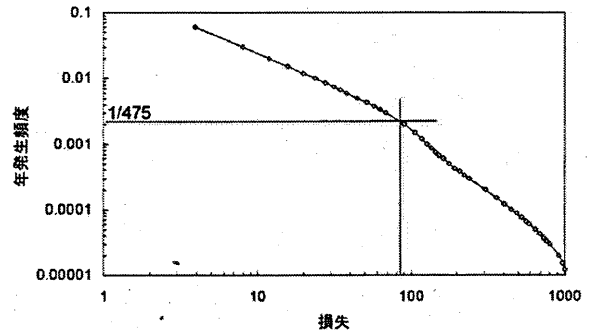


図8 爆破テロの損失-頻度関係

4. まとめ

本研究では、人為災害を対象としたリスク評価の方法について検討・提案を行うとともに、モデル建物を対象とした評価例を示した。評価例では、人員災害によるリスクは地震災害等の自然リスクに比べて小さいもの、無視し得るほどには小さくないことが示された。

今後は、各評価項目の精度向上とともに、自然災害とは異なる人為災害の特徴を加味したリスク評価手法の構築を検討していく。

参考文献

- 1) 西川智, 福島誠一郎, 矢代晴実: 事業継続 (BCP) のためのサプライチェーンのリスク分析手法の提案, 地域安全学会梗概集 No21, pp.39-42, 2007.11
- 2) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, No.552, pp.169-176, 2002.2