

地震時建物倒壊に伴う閉じ込め者の生存限界時間に関する極値分析

An Extreme Value Analysis on Survival Times of Entrapped People under Collapsed Buildings by Earthquakes

太田裕¹, ○中嶋唯貴¹
Yutaka OHTA¹ and Tadayoshi NAKASHIMA¹

¹東濃地震科学研究所

Tono Research Institute of Earthquake Science

One of the critical issues on human consequences following devastating earthquakes is to assess how long the occupants entrapped under collapsed building can survive. To do it this paper attempts an application of the Extreme Value Theory for the existing field data on time-to-rescue in 1998- 2006 worldwide earthquakes. The maximum time-length estimated is slightly longer than 2 weeks. Based on the output information via this analysis, a brief consideration was made for sounding better strategies of SAR (Search And Rescue) activities.

Key Words: Earthquake, Entrapped People, Extreme Value Analysis, Maximum Time-to-Rescue, Search and Rescue Activity

1. はじめに

地震に伴う人間被害について研究を続けている。今回は、その一環として建物倒壊に伴って閉じ込めとなった人々の余命限界の問題を採り上げる。地震直後の人間被害を代表する事象の1つであるが、住家等建物の倒壊に伴う「屋内閉じ込め」があり、これに付随する形で閉じ込めとなった人々が果たして如何程の時間生存出来るのかの問題があり、直後救出の諸戦略はこれに関する知見をベースとして計画し、実行されなければならない。このような視点から、ここでは「閉じ込め生存の極限時間長さ」について現有資料にもとづく極値分析を実施する。その上で、閉じ込めとなった人々の探索と救出に関する諸活動 (SAR, Search And Rescue) との関わりについて考察する。

2. 資料・分析

(1) 資料

関連する研究の中で、実資料の収集に注目したほとんど唯一の研究といえるのがMacintyre et al (2006)¹⁾によるものである。これは閉じ込めとなった人間の生存能力を救出への時間 (Time-to-Rescue) を主指標においた研究であり、地震別の閉じ込め生存の最大時間を集録した貴重な文献である。この論文ではLexis-Nexis (映像) DBによる検索によって資料集めを実施している。これはEnglish-language Media-reportを広くカバーするDBであり、検索語を” earthquake and rescue “として、死者1000人以上の地震23個 (1985-2006年) を識別・抽出している。閉じ込め時間長さは地震時に始まり、ガレキの下から確実に救出された時点までを計っている。その上で、最大時間生存した人の地震別リストを作成している。本論の末尾に原論文が掲げる一覧表の簡略版を収録しておく。

ここで、付録の事例について上記論文の記述を含めて

概観してみる。この表中の「実」最長生存者は14日間 (Philippines, 27男) であり。同じ地震で今1人が11日 (27男, 21女) 生存の上、救出されたことが報告されている。いずれも無傷状態の閉じ込めであり、体力のピークにある青年期の人達である。さらに閉じ込め下にながら、時折の降雨によって水分補給が可能であったと注記されている。1985年Mexico地震では倒壊したRC造病院に閉じ込めとなった幼児が8.3, 8.0, 6.7日の長時間生存で救出されたことが報告されている。また、やや不確かであるがとの注記付きで1988年Armenia地震の際に12日 (16男), 10日 (62男), 8日 (30女, 3幼児) の生存救出が報告されているという。1995年神戸の地震では5.3日 (68男, 76女), 4.4日 (79男, 67男) が生存救出の最長記録となっている。その一方で、長時間生存の後、救出段階とか救出直後に死亡という特異事例も散見される。

以上は倒壊建物内の生存事例であるが、1989年Loma Prieta地震で、高架フリーウェイ倒壊に伴い車中閉じ込めとなり、救出された事例もある (57男, 3.8日)。

なお、Macintyre et alの論文収録外の事例として2004年中越地震時に道路走行中の車が斜面崩壊に巻き込まれ、同乗3人のうち、3才児のみが93時間後に生存救出された特異事例は記憶に新しい。

以下、付録に示す26事例を原資料とした極値統計分析を行い、閉じ込めとなった人間の生存限界時間 (日) を推定する。

(2) 分析

極値分布型には3種類が知られているが、ここでは上限値を有界とした第III型 (Gumble) 分布を想定する。いま、ある地震について観測された閉じ込め生存時間資料がn個あって、 X_1, X_2, \dots, X_n とすると

$$Z_n = \max \{ X_1, X_2, \dots, X_n \} \quad (1)$$

となる最大値が存在する。したがって、地震の総数を m とするととき $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_m\}$ からなる最大値集合が存在し、このとき第III型極値分布式は

$$G(z) = \exp\left[-\left(-\frac{z-b}{a}\right)^\alpha\right] \quad (z \leq b) \quad (2)$$

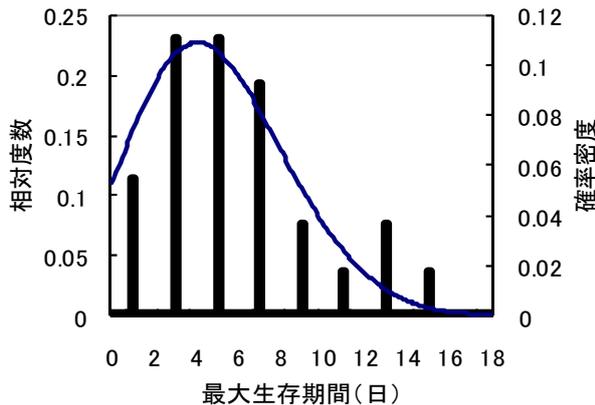
とかける。また、極値分布の平均 μ と分散 σ は次式で与えられる [例えば、統計データ科学事典, 2007] ²⁾。

$$\mu = b - a\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (\alpha > 1) \quad (3)$$

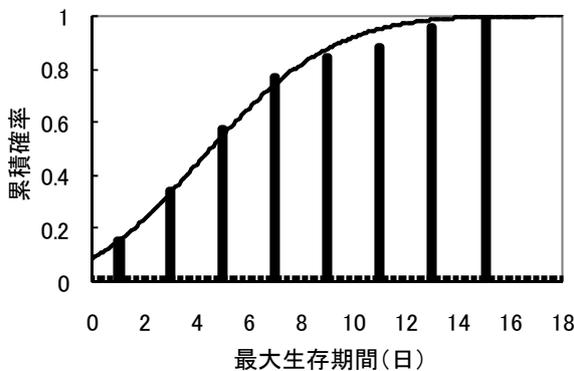
$$\sigma^2 = a^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (4)$$

ここに $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数を表わす。係数 $[a, b, \alpha]$ は付録の実資料から度数分布表を作成した上で、適宜の最適化法により決定すればよい。計算の結果、 $a=16.8$, $b=20.1$, $\alpha=4.9$ を得た。平均値 (μ) = 4.7日、標準偏差 (σ) = 3.7日が得られる。第1(a)図は実資料にもとづく度数グラフと計算による密度分布を比較している。同様に、第1(b)図は実資料による(相対)累積度数グラフと計算による累積確率を対比している。

ここで、第1(b)図を参照しながら、確率1/100 (1%)における実現値を求めると $[T_{\max}(1)=13.6日]$ となり、確率1/1000 (0.1%)の場合、 $[T_{\max}(2)=16.1日]$ となる。



第1(a)図 最大閉じ込め日数の度数分布。



第1(b)図 最大閉じ込め日数の累積度数分布。

いずれにせよ、地震後2週間前後が、閉じ込め環境下の事実上の“生存極限值”となることは間違いない。一

方、確率1/2 (50%) 値は平均値に他ならず、この場合 $[T_{\text{mean}}=4.7日]$ と算定できる。

3. 考察

ここで2つの問題が浮上する。1つは最大生存時間が地震毎に何故このように大きく変動するのかの問題であり、今1つは2週間強という長時間を如何にして生き長らえられるのかの問題である。しかし、後者は前者の自然の延長線で理解できる可能性がある。そこで、閉じ込めに関する既往研究を参照することで、これらの問題に対する解答への糸口を探ってみる。この問題、すなわち、生存の長短を支配する要因について考究した研究の代表が Coburn&Spence (2002)³⁾であろう。彼等は閉じ込め環境下の生命力(持ち時間)がいくつかの要因で決まることを主張し、以下のような取りまとめを行っている。

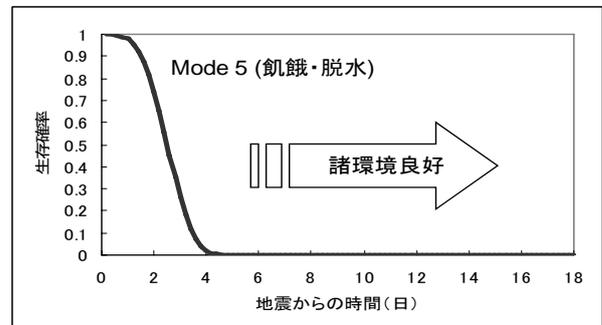
- ・倒壊に伴って受けたケガの種類・重度による。また、建物倒壊に伴う塵埃が原因の窒息死がなければ倒壊建物内の残存空間で生き残りが可能となる。
- ・生存時間長さは [ケガ無し・水補給あり] > 低温下曝露 > 頭頸部損傷 > 大量出血 > 窒息の不等関係にある。
- ・外界との空気の還流の有無・程度に影響される。

要約すれば、[ケガ・拘束の有無、閉じ込め空間の状態・環境、水・食料の問題] 等々となる。

ところで、筆者等は閉じ込めとなった人の余命特性を定量記述するためのモデルを提案している。そこでは、ケガの重度によって余命基本量が決定されるものと考え、[窒息・圧死~ケガなし(健常)]の5つのモードを導入し組み立てている [太田他 (2001)] ⁴⁾。このうち、閉じ込めとなった健常者の余命特性式として次式を与えた。

$$w(\text{健常}) = \exp\left\{-\left(t/T_0\right)^m\right\} \quad (5)$$

ここで、係数 $[m, T_0]$ は形のパラメータおよび位置のパラメータであり、1995年神戸の地震の場合、 $T_0=66.5$ (hour) である。また、第2図はこの特性カーブが地震発生時の諸環境によって変化することを示す概念図である。



第2図 余命特性の概念図 [太田他(1999)].

上記の諸条件が (+) 側で揃っていれば、このカーブは大きく右側—生存限界時間—に伸び、環境が劣悪な状況ではこれが左側へ短縮することで大局説明が可能となる。

そして、これらの諸条件の多くが（+）側に働いたとき、2週間という最大閉じ込め時間に接近出来るものと思われる。なお、これらに加えて、閉じ込めとなった人の属性（年齢、性別、健康状態）・メンタリテイが大きく影響することはいうまでもない。

付録一覧の中では、No.6 1990年Phillipines地震時の14日生存（27男）がそれに近い条件を満たしていたものと思われる。Macintyre et al の論文の枠外であるが、1976年唐山地震時に13日間をRC造倒壊でコンクリートスラブに閉じ込めのまま生き延びた事例（46女）が報告されている。彼女は「自身の小便、衣服、大便」を常食とすることで生き残りに成功したと記録されている [Young et al(1988)]⁵⁾。

閉じ込め生存に関するこれらの知見はSARの在り方を考える際の基本の情報となる。

4. SAR活動

これらの結果を参照しながら、この閉じ込め問題と不測不離の関係にあるSAR (Search And rescue)の戦略について考えてみる。当然ながら、SARの主眼点は閉じ込めとなった人々の出来るだけ多くを救出することにあるが、地震直後の緊急時には対応すべき事項が多発し、限定防災資源量との調和の中でこれを達成するのは容易ではない。本論の枠内限定で考えてもSAR活動の [時間長さ (Time-to-rescue) , 探索(Search)の方法,救出と医療への橋渡し(Optimal Medical treatment)] 等々の問題がある。

(1) 活動の期間長さ

活動の時間長さについては、生命の重要性を鑑みれば『地震後、2週間は閉じ込め者の探索と救出に専念せよ』との論が浮上する。しかし、これをSARの大前提として採用すべきかどうかの即断は至難である。

既往研究の中でよく知られたものの1つがNoji et al (1990)⁶⁾による1988Armenia地震に対する研究である。彼等は地震に伴うSARについて詳細調査を実施し、地震後の24時間に90%以上の人々が救出されている事実を突き止め、このことから、この時間帯を“Golden Hours”と呼び、以降、これがSAR活動の最優先時間帯として認知されることとなった。しかし、これが短きに過ぎることは本論の結果をみれば、明らかである。

Macintyre et al¹⁾は当該論文の結論として

- ・最初の48時間 (=2日) が特に重要である—新Golden Hours—の提唱でもある。
- ・通常は5~6日が最大生存となるが、特別の場合2週間にも及ぶことがある。
- ・SAR重視戦略から地域復興への戦略転換の時期として5日程度が妥当である。

のように整理している。

この主張は極値統計にもとづく今回の分析結果 [生存極限時間長さ~2週間, 平均値~4.7日] とも整合する。同時に、今後の課題として、地震発生の時間帯・季節、被災域の自然・社会環境等を入力情報として当該地震による閉じ込め者の最大生存 (可能) 時間を的確に予測する手法の開発が“SAR期間の最適決定”に不可欠の課題で

あることを教えてくれる。近年、益々期待される国際救助隊が実利を高めるためにも基本要諦となるに違いない。

(2) 探索の方法

周知のようにSARには3段階ある。第1は家族・近隣によるものであり、次いで消防団等の (一応の) 組織チームによるものであり、最後は一わが国の自衛隊等—組織・行動力・装備に優れたプロ集団によるものである。SAR活動が適切に行われるかどうかを決定する第1の条件は閉じ込め人間の有無を見極め、所在を早期に見当付けすることにあり、このことは3者に共通する基本事項である。Noji (1990)⁶⁾が指摘しているように、生き埋めとなった人々の多くが家族・近隣によって、しかも手近の小道具を使うことで救助されてきている。1995年神戸の場合も同様のSAR活動が活発に実施された。これには所在を知ることが無理なく出来る平常時交流が下支えとなっていたことは間違いない。所在を知り、救出の手段を具体化する上で大きな問題となるのは消防団、さらには機動力に富む自衛隊等の出動が要請される場合である。建築構造学的知見—どこがどのように壊れ、どこに閉鎖空間 (Void) が残存するか等、そして閉じ込めとなった人々の所在推定、救出のための破壊作業がもたらす負の効果 (閉じ込め空間の再破壊) 等々への知見蓄積が重要となることを忘れてはならない。

特に、建物種別 (RC造, 組積造等) では倒壊形式が異なり、倒壊後の内部空間の出来方も異なり、[残存空間] 対 [当初空間] の比率 (Void-to-volume ratio) とか残存空間の存否情報は閉じ込め者の所在・位置を知る上で有力な手掛かりとなる。この比率はRC造で大きく、その逆が組積造であることがよく知られているが、これは国際SAR活動戦略立案の根底知見となる (Krimgold, 1987)⁷⁾。一方、SAR活動の適切発動には不明者 (～閉じ込め候補者) の早期確認が特に重要となる。1995年神戸の地震時に行方不明となった人がガレキとなった我が家 (木造アパート) の下から亡骸として見付かったのが、地震の3ヶ月後であったという極端事例さえ報告されている [上野 (1997)]⁸⁾。

(3) 救出と医療への橋渡し

付録一覧表注記の中にあるように「救出直後に死亡」という事例が間々報告されている。特に、座減性症候群 (Crush Syndrome) の場合、ガレキからの救出即体幹部圧迫からの開放となり、血流動の急変が死を招く場合が間々ある。ここに救出と直後の医療措置との連携プレイの重要性が焦点となる潜在要因がある。極論すれば直後医療の支援なしの救出は効を奏さないケースが間々あるという、救出へのスピードの要請と医療態勢の周到な準備という、背理的難しさが存在する。近年、原位置医療 (On-site Medicine) とかガレキの下の医療 (Confined Space Medicine) [大友 (2007)]⁹⁾の導入が強くいわれるようになった背景でもある。

参考文献:

- 1) Macintyre et al ,2006, Surviving collapsed structure entrapment after earthquake; A Time-to-Rescue, Prehospital and Disaster Medicine, 21, 1, 4-19.

2) 杉山高一他(編), 2002. 統計データ科学事典, (分担: 牧本直樹) 338-341, 朝倉書店.

3) Coburn A. and R. Spence, 2002, Earthquake Protection, 1-420, 2nd Ed., John Willey & Sons, Ltd.

4) 太田裕・小山真紀・和藤幸弘, 2001, 震後余命特性曲線の試算: 訂正と補足-1995年兵庫県南部地震の場合-東濃地震科研報告, Seq. No 7, 93-100.

5) Young et al, 1988, The Great Tangshan Earthquake of 1976-An anatomy of Disaster, 1988, Pergamum Press.

6) Noji E., et al., 1990, The 1988 earthquake in Soviet Armenia: A case study, Ann Emerg Med 19, 891-897.

7) Krimogold F., 1989, Earthquake casualty estimation and response modeling, Intern. Workshop Earthquake Injury Epidemiology, The John Hopkins Univ., 1989, 17-25.

8) 神戸大学震災研究会(編), 1997, 苦闘の被災生活-被災者の健康と死の問題-(上野易弘), 139-154.

9) 大友康裕(編), 2007, 多数傷病者対応, プレホスピタルM OOK シリーズ 4, 1-285, 長井書店.

付録 地震別最長生存時間(日単位) [Macintyre et al, 2006 を簡略化]¹⁾

No	地震	年	年齢	性別	最大生存時間		注記
					日単位	時間単位	
1	Mexico	1985	幼児	幼児	8.3	200	倒壊病院内に閉じ込め
2	El Salvador	1986	33	男	3.1	75	救出直後に下肢切断手術
3	Armenia	1988	16	男	12	288	救出時点で瀕死状態
4	Loma prieta, USA	1989	57	男	3.8	90	倒壊高架フリーウェイにおける車中閉じ込め
5	Iran	1990	9	男	6.8	162	救出時昏睡状態
6	philippines	1990	27	男	14	336	雨水による水分補給
7	Egypt	1992	36	女	3.4	82	救助を待つ間, 高温下に曝露
8	Turkey	1992	22	女	8	192	病院に搬送後, 腎臓不全を確認
9	India	1993	35	男	7	168	火葬用燃料の上におかれた状態で発見
10	Northridge, USA	1994	43	男	0.3	9.5	機械力に依る救出
11	Kobe, Japan	1995	66	男	5.3	128	
12	Columbia	1995	22	女	0.9	22	救出の途中で死亡
13	Sakhalin, Russia	1995	22	男	5	120	
14	Greece	1995	8	男	1.8	44	脱水状態だが, 他は安定
15	Indonesia	1995	37	男	2	48	
16	Iran	1997	32	男	1.1	27	
17	Turkey	1998	35	女	2	49	
18	Columbia	1999	16	男	2	48	
19	Marmara, Turkey	1999	4	男	6.2	146	救出時中静脈注液を受ける
20	Taiwan	1999	20	男	5.4	130	食料入り冷蔵庫直近に閉じ込め. 水は建物のスプレイから入手. 弟も同時救出
21	Duzce, Turkey	1999	42	女	4.4	105	腕のケガによる座減症候群を確認
22	El Salvador	2001	22	女	1.4	33	救出の途中で死亡
23	India	2001	-	男	10	240	大空間に閉じ込め, 食料にアクセス
24	Italy	2002	9	男	0.7	16	
25	Algeria	2003	13	女	4	96	パンケーキで生存. 妹は救出時建物の2次崩壊で死亡
26	Iran	2003	56	男	13	312	救出後, 野外仮設病院で死亡