

爆発または衝突により発生する地震の規模について

The Scales of Earthquakes by Explosions or Collisions

武藤大介¹

Daisuke MUTO¹

(Received December 5, 2016; Accepted March 13, 2017)

1 はじめに

地震計で観測される震動は、自然地震によるもののみならず、人工的な爆発及び衝突（以下、爆発等という）によるものも含まれる。人工的な爆発地震の中でも、核実験によるものは、米ソ冷戦時代に盛んに研究されており、例えば、ボルト（1986）に詳しい。一方、核実験よりも小規模な爆発等による地震については、理学的な研究対象になりにくく、社会的な要請もあまり無いと考えられる。そのため、地震観測を行う上で頻りに記録される発破を除き、これまで十分な整理がなされていない。

しかしながら、気象庁業務に即して述べると、核実験に比べて相対的に規模の小さな爆発等であっても、近傍の観測点で検知され、誤って緊急地震速報や震度速報が発表される危険について、しばしば考慮の対象となる。そこで、これら規模の小さな爆発等によって引き起こされた地震の規模について、過去の事例を整理することにした。ここでは、過去の事例を網羅的に収集することはないが、様々なタイプの事例を収集することに留意した。これにより、自然地震以外の要因で発生する震動源の規模（エネルギー）と、それを地震波の振幅等から計算されるマグニチュードに換算した場合の大まかな対応関係を示し、今後の業務の参考とすることとした。

2 調査方法

爆発等そのものの規模と、地震波の振幅等から計算されるマグニチュードの関係を調査した。ここで「規模」とは、例えば爆薬量から計算される爆発エネルギーや、衝突物体の運動エネルギー等を指し、

地震波から計算される「マグニチュード」とは区別する。

気象庁では、爆発等の規模及びマグニチュードをカタログ等で整理しているわけではないので、基本的に文献からの引用に依ることとした。また、一部の事例については、筆者が試算した。引用資料、筆者の試算とも、十分な精度のないものが多数含まれる。また、マグニチュード種別は、本論中で一貫したものはしていない（ただし、文献上その種類が明記されているものについては本論でも付記する）。したがって、本論で示す数字は、厳密な議論に耐えるものでないことをあらかじめお断りしておく。

なお、様々な種類の文献を引用する都合上、SI 単位系以外の単位を使う場合があるので、念のためここに換算式を掲げる。

（エネルギーを TNT 爆薬換算する場合）

$$\text{トン} = 4.184 \times 10^9 \text{ J}$$

$$\text{キロトン} = 4.184 \times 10^{12} \text{ J}$$

$$\text{メガトン} = 4.184 \times 10^{15} \text{ J}$$

（地震計記録の振幅に言及する場合）

$$\mu = 10^{-6} \text{ m}$$

3 各事例

3.1 核実験

核実験については、包括的核実験禁止条約機構（CTBTO）等において多くの事例が詳細に解析され整理されているが、詳細には立ち入らない。ここでは、実験に用いた核爆弾の TNT 当量が明らかにされている米国の実験を 2 例のみ挙げる。

1962 年に米国ネバダ州で行われた地下核実験（セ

¹ 地震火山部管理課, Administration Division, Seismology and Volcanology Department

ダン実験)は、米国で最も大きな人工クレーターを作った核実験である (CTBTO)。この実験の核出力は 104 キロトン、マグニチュードは 4.75 であった (National Nuclear Security Administration, 2015)。

1971 年に米国アラスカ州アムチトカ島で行われた地下核実験 (グロメット作戦カニキン実験) は、これまで米国内で行われた最大規模の地下核実験である。実験には 5 メガトン近い核弾頭が使用された (U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1989)。この実験で生じた地震の実体波マグニチュードは 6.9 とされている (USGS)。

3.2 大規模爆発事故等

1949 年にドイツの Heligoland 島において、イギリス海軍によって 6,700 トンの爆発が行われた (Spiegel Online, 2007)。この爆発による震動が、約 330km 離れたドイツの Göttingen 観測点のウィーヘルト地震計で記録されている (Reich et al., 1951)。この記録の P 波上下動の最大振幅は約 0.22μ (周期約 2.5 秒) と読み取ることができる。ここから、Gutenberg (1945) による実体波マグニチュードを計算すると、4.6 となる。

1959 年に神奈川県横浜市の第二京浜国道で、TNT 火薬 4×10^3 (kg) を搭載したトラックが別のトラックと衝突し、大規模な爆発を起こした (衆議院, 1959)。この時の震動が、現場から約 5km 離れた横浜地方気象台のウィーヘルト地震計で捉えられており、最大振幅は、当時の検測者の読み取りによれば、南北成分 14μ 、東西成分 5μ であった。この記録から坪井 (1954) のマグニチュードを計算する。例えば勝間田 (2004) で示唆されている通り、坪井 (1954) は、震央距離数 10km より近距離での適用はふさわしくないが、この事例について試みにマグニチュードを計算すると 1.6 となる。

1988 年に米国ネバダ州の The Pacific Engineering Production Company of Nevada の工場で火災が発生し、その後 2 回の大規模な爆発に至った。この爆発で、マグニチュード 3.0 と 3.5 の地震が観測された (Routley, 1988)。一連の火災と爆発で 4×10^6 (kg) の過塩素酸アンモニウムが失われた。最大の爆発では、空中爆発の TNT に換算し 1 キロトン相当のエネルギーが放出されたと推定されている (Reed, 1988)。

2015 年に中国天津市で発生した化学薬品保管庫

の爆発では、2 回の爆発が発生した。報道によれば爆発の規模は TNT 火薬換算で 3 トンと 21 トンに相当し、中国地震台によればマグニチュード 2.3 と 2.9 の地震を観測した (鈴木, 2015)。

3.3 航空機の墜落・衝突

3.3.1 日本航空ジャンボ機墜落事故 (1985 年)

1985 年に群馬県に日本航空のジャンボ機が墜落する事故が発生した。この事故により、東京大学地震研究所の川上観測点で震動を記録した。

運輸省航空事故調査委員会 (1987) によれば、同観測点で 8 月 12 日 18 時 56 分 32.7 秒頃に記録された波を、「事故機が地面に激突したときのもの」とみられ」としている。この時刻以降、震動は約 20 秒継続している。そこで、これを震動継続時間 (F-P 時間) と見なす。津村 (1967) が求めた F-P 時間 ($F-P$) とマグニチュード M との関係式

$$M = -2.36 + 2.85 \log(F - P) \quad (1)$$

を用いると、マグニチュードは 1.3 と求められる。なお、F-P 時間は地震計の特性に大きく左右されるため、こうしたマグニチュードの計算には地震計を指定しなければ意味がないとの指摘もある (宇津, 1999)。しかし、本事故と同じ時期 (1985~1986 年) に、川上観測点と同じく東京大学地震研究所が所有する長野県の丸子町御岳堂臨時観測点や、伊豆半島の^{ほうきやま}箒山観測点 (すなわち、地震計特性が似通っている可能性が高い) のデータに対して、それぞれ佃・他 (1988) 及び吉田・他 (1988) は、津村 (1967) と同じ式を用いていることから、本論での試算においても、津村 (1967) を用いることは妥当であると考えた。また、試みに、神奈川県温泉地学研究所の各観測点に関する同様の関係式 (棚田・田中, 1999) に適用してマグニチュードを求めても、多くの場合は、マグニチュードは 1.2-1.8 の間に求められることから、少なくともマグニチュード 1 台である可能性は高いであろう。ちなみに、運輸省航空事故調査委員会 (1987) では「その後の震動波は事故機の激突時に派生した衝撃の反射及び散乱波と推定」しており、激突の衝撃自体が数秒以上にわたったとはしていないため、F-P 時間は、激突自体の継続時間の影響は受けていないと考えられる。

運輸省航空事故調査委員会（1987）では、機体重量 2.39×10^5 (kg)、衝突速度 136m/s としており、ここから計算される衝突時の運動エネルギーは 2.2×10^9 (J) と見積もられる。

3.3.2 ニューヨーク航空機突入テロ事件（2001年）

2001年に米国ニューヨーク州で発生した世界貿易センタービルで発生したテロ事件では、2度にわたり航空機がビルへ衝突した。この際、Lamont Doherty 観測所で地震動が記録されており、菊地・山中（2001）は、神林・市川（1977）により、マグニチュードをそれぞれ 1.0 及び 0.9 と求めている。

衝突した2機はいずれもボーイング 767-200ER 型機であり、その重量（最大離陸重量）は、おおよそ 1.8×10^5 (kg) 程度である（National Transportation Safety Board）。また航空機は、それぞれ 208m/s 及び 264m/s で衝突したと報告されている（Gann et al., 2005）。これらの値から、衝突時の運動エネルギーは、それぞれ 3.9×10^9 (J) 及び 6.3×10^9 (J) と見積もられる。

3.3.3 航空大学校帯広分校の航空機事故（2011年）

2011年に航空大学校帯広分校所属の小型機が北海道河西郡芽室町の山腹に衝突する事故が発生した。運輸安全委員会（2013）によれば、機体重量約 1.6×10^3 (kg)、衝突速度は約 50m/s であった。衝突時の運動エネルギーは約 2×10^6 (J) と見積もられる。

衝突地点から約 5km 北西に、防災科学技術研究所の高感度地震計（Hi-net）清水観測点が存在する。しかし、衝突時刻の前後で航空機の衝突によるものと思われる震動は観測されていなかった。当時の清水観測点のノイズレベルのおよそ 3 倍以上の振幅があれば検知可能と考え、衝突によりマグニチュード -1.2 以上の地震が発生したとは考えづらい。

3.4 制御人工地震（発破）

垣見・他（1977）は、構造探査の際に発生させる人工地震の爆破地震動について解説している。この中で、「500kg のダイナマイトの爆発による振動エネルギーは M2 よりやや小さい程度である」と解説している。ここではごく大雑把に、TNT0.5 トンの爆発により、マグニチュード 2 の地震が起きると考えることとする。

3.5 大砲射撃

山内（1970）は、樽前山に設置された 62E 型電磁地震計で、陸上自衛隊が演習として行った大砲射撃が捉えられたと報告している。同報告によれば、りゅう弾砲及びカノン砲の衝突エネルギーはそれぞれ、 4.5×10^6 (J) 及び 2.2×10^6 (J) である。また、りゅう弾砲及びカノン砲内の火薬量は、それぞれ 16.670kg 及び 9.233kg とされているので、火薬 1g 当たりのエネルギー 4.2×10^3 (J) を乗じると、その爆発エネルギーは、それぞれ 7.0×10^7 (J) 及び 3.9×10^7 (J) である。ゆえに、着弾（衝突）と火薬の爆発によるエネルギーの和は、りゅう弾砲及びカノン砲について、それぞれ、 7.5×10^7 (J) 及び 4.1×10^7 (J) と求められる。

一方、山内（1970）では、マグニチュードを計算するための振幅を、りゅう弾砲及びカノン砲で、それぞれ 1.3μ 及び 1.2μ としているが、その根拠が明らかでない。そこで同論に示されている「最大振幅の度数分布」をもとに、それぞれ 0.58μ 及び 0.48μ に修正したい。これをもとに坪井（1954）のマグニチュードを再計算すると、それぞれ 1.2 及び 1.1 となる。

3.6 人力により引き起こされた極微小地震

筆者は学生時代に、以下の実験を行ったため、その結果を援用することとした。

筆者ら 8 人（全員 20 代の男性）は、大学の実習の一環として、2007 年に、防災科学技術研究所の Hi-net 豊橋北観測点（地表から地震計までの距離は約 200m）の直上で一斉に跳躍したところ、同観測点において、 2.0×10^{-6} (m/s) 程度の震動が記録されることが判明した。震源距離約 200m の場合に渡辺（1971）を適用することが妥当かどうかは別途検証の必要があるが、試みにマグニチュードを求めたところ、-2.8 であった。なお、跳躍した 8 人の平均体重を 65kg、跳躍した高さを 30cm と仮定すると、地表への衝突時の運動エネルギーは約 1.5×10^3 (J) と見積もられる。

4 結果と考察

4.1 爆発または衝突のエネルギーとマグニチュードの関係

3 で示した各事例を図 1 にまとめた。爆発等のエ

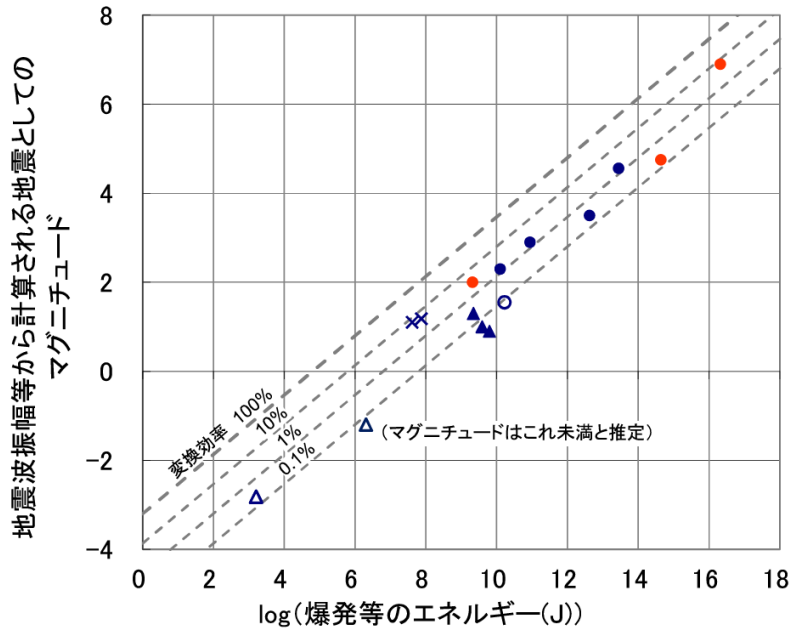


図 1 爆発または衝突のエネルギーと地震波の振幅等から計算される地震としてのマグニチュードの関係

爆発事例を●で、衝突事例を▲で、両方の要素を含む大砲射撃を×で表示。エネルギーまたはマグニチュードの推定精度に問題があると思われる場合は白抜きとした。地下爆発は●の色で、地表または地上の構造物等での爆発は●の色で示した。破線は爆発または衝突のエネルギーが 100%、10%、1%、0.1%の効率で地震波に変換されたと仮定した場合の関係式である。

エネルギーとマグニチュードの間には、一見して相関があることが分かる。図中に、爆発等のエネルギーが 100%、10%、1%、0.1%の効率で地震動に変換された場合に期待されるマグニチュードを破線で示した。

2001 年の米国での航空機突入事件は、変換効率が小さい。これは、航空機が高層ビルの高層階に衝突し、そのエネルギーが高層ビルの振動や破壊に消費されたためと考えられる。同様に、1959 年のトラックの爆発事故も、爆薬（トラックの荷台）が地表に接していない状態で爆発したと考えられることから、地震波への変換効率が小さくなった可能性が考えられる。2011 年の航空大学校帯広分校の航空機事故も、現場は雑木林であり、衝突エネルギーの多くが立木に吸収された可能性が考えられる。

これら、変換効率が小さいことについて定性的な説明ができるものを除けば、本論で取り上げた事例については、爆発等の規模によらず、変換効率は 0.1%~10%の範囲に入る。

4.2 核実験等の知見との関係

前述のポルト（1986）は、地下核爆発の放射化学的規模（換算葉量）と地震学的規模とを換算する係数、すなわち効率を示している。これによれば、地下核実験の場合、花崗岩中で 1%、岩塩中で 0.8%、凝灰岩中で 0.3%、沖積層中で 0.2%とされている。また、通常爆薬による砕石爆破については、概ね 0.1%としている。一方、山内（1970）も、「一般に、火薬を爆発させたとき地震波の energy になるのは 1/100 以下といわれている」と指摘している。

菊地（2003）は、遠地実体波を用いたモーメントテンソル解析の観点から、核実験の TNT 火薬相当量 W （キロトン）とモーメントテンソルの等方成分 I （ 10^{15}Nm ）について、

$$W = 4I \quad (2)$$

の関係式を示している。この関係式は、爆発エネルギーの地震波への変換効率が約 0.3%であることを示している。

本論で示した事例の変換効率は、オーダーとして、過去の核実験等の知見から得られた変換効率と整合している。

4.3 気象庁業務への応用の可能性と限界

本論での整理について、気象庁業務への応用の可能性を検討する。

例えば、不発弾処理（爆破処理）により発生する地震により、周辺の震度計で震度を観測することが懸念される。そこで、不発弾の爆発により発生する地震のマグニチュードを概算してみる。第二次世界大戦で我が国に投下された爆弾は、その規模もまちまちであるが、比較的大型のもので 900kg 程度（いわゆる 1 トン爆弾）となる。通常、爆薬は爆弾の総重量の半分弱であるから 400kg とし、爆薬の性能を TNT と同程度と仮定すると、変換効率 0.1% の場合と 10% の場合で、それぞれ発生する地震のマグニチュードは 1.0 または 2.3 と求められる。したがって、マグニチュードは 1.0-2.3 程度になると予想できる。

なお、本論では水中の事例を取り上げていない。ボルト（1986）によれば、核実験の場合、同じ爆発規模でも水中の場合は陸上に比べてマグニチュードが大きくなる。そのため、本論の結果を海水に対する爆発等（エアガン等）にそのまま適用することは適切でないと考えられる。

4.4 今後に向けて

本論では、様々なタイプの事例を収集することに主眼を置いたため、既に多くの事例が報告されている核実験と発破については深く立ち入っていない。

例えば、我が国では鉱業や土木事業等のため、日常的に発破が行われ、その震動が気象庁等の地震計で多数記録されている（例えば、西脇・他（1988）、小林（1996）、福田・他（2007））。また、やや古い記録ではあるが、米国内では毎年万単位の発破が行われ、使用される爆薬の総量は 2.2 メガトンになる（Richards et al., 1992）。さらに、地震波を用いた構造探査においても、爆薬量を含む震源の情報と震動記録のデータセットが多数生産されている（例えば、吉井, 1994）。こうした発破について調査を進めれば、少なくとも爆発地震について、より精度の高い議論ができるであろう。

謝辞

日本航空ジャンボ機墜落事故時の川上観測点の波形は、東京大学地震研究所の酒井慎一教授に提供いただいた。一部の事例のマグニチュードの計算には、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）のデータを使用した。筆者の学生時代の実験は、当時の教員の丁寧なご指導のもとに行なわれた。また、匿名の査読者には、有益なご指摘、助言を多数いただいた。記して感謝の意を表する。

文献

- 宇津徳治 (1999): 地震活動総説, 東京大学出版会, 876pp.
- 運輸安全委員会 (2013): 航空事故調査報告書—独立行政法人航空大学校帯広分校所属ビーチクラフト式 A36 型 JA4215 山腹への衝突.
- 運輸省航空事故調査委員会 (1987): 航空事故調査報告書—日本航空株式会社所属ボーイング式 747SR-100 型 JA8119 群馬県多野郡上野村山中 昭和 60 年 8 月 12 日.
- 垣見俊弘・市川金徳・正井義郎 (1977): 爆破地震動, 地質ニュース, **272**, 1-8.
- 勝間田明男 (2004): 気象庁変位マグニチュードの改訂, 験震時報, **67**, 1-10.
- 神林幸夫・市川政治 (1977): 気象庁 67 型地震計記録による近地浅発地震の規模決定について, 験震時報, **41**, 57-61.
- 菊地正幸・山中佳子 (2001): 2001 年 9 月 11 日世界貿易センターの衝撃, EIC 地震学ノート.
http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/EIC_News/010911.html, (参照 2016-09-27).
- 菊地正幸 (2003): リアルタイム地震学, 東京大学出版会, 133-135.
- 小林昭夫 (1996): 松代群列地震観測システムで観測された発破について, 気象庁精密地震観測室技術報告, **13**, 47-52.
- 衆議院 (1959): 第 33 回国会地方行政委員会第 10 号議事録.
- 鈴木拓人 (2015): 天津爆発事故の状況, 損保ジャパン日本興亜 RM レポート, 137, 11pp.
- 棚田俊収・田中丈博 (1999): 温泉地学研究所の地震観測網におけるマグニチュードの算出式, 神奈川県温泉地学研究所報告, **29**, 41-46.

- 佃為成・酒井要・橋本信一・羽田敏夫・小林勝 (1988): 長野県東部の地震 (1986 年, M4.9) 及びそれに伴った地震群の活動特性とそのテクトニクス的意味, 東京大学地震研究所彙報, **63**, 237-272.
- 坪井忠二 (1954): 地震動の最大振幅から地震の規模 M を求めることについて, 地震 2, **7**, 185-193.
- 津村建四朗 (1967): 振動継続時間による地震のマグニチュードの決定, 地震 2, **20**, 30-40.
- 西脇誠・柿下毅・流精樹 (1988): 松代で観測された発破の識別と削除, 気象庁地震観測所技術報告, **9**, 29-35.
- 福田信夫・春原美幸・伊藤優 (2007): 松代地震と発破について, 気象庁精密地震観測室技術報告, **24**, 77-82.
- ブルース・A・ボルト著 (小林芳正監訳) (1986): 地下核実験探知, 古今書院, 442pp.
- 山内義敬 (1970): 樽前山の電磁地震計に記録された大砲の震動, 験震時報, **35**, 37-40.
- 吉井敏尅 (1994): 人工地震による日本列島の地殻構造, 地震 2, **46**, 479-491.
- 吉田満・溝上恵・千葉平八郎・萩原弘子 (1988): 伊豆半島東岸付近の小地震の P 波震源スペクトルと震源パラメータ, 東京大学地震研究所彙報, **63**, 99-113.
- 渡辺晃 (1971): 近地震のマグニチュード, 地震 2, **24**, 189-200.
- CTBTO, The United States' Nuclear Testing Programme, <https://www.ctbto.org/nuclear-testing/the-effects-of-nuclear-testing/the-united-states-nuclear-testing-programme/>, (参照 2017-01-19).
- Gann, R. G., A. Hamins, K. B. McGrattan, G. W. Mulholland, H. E. Nelson, T. J. Ohlemiller, W. M. Pitts, and K. R. Prasad (2005): Reconstruction of the fires in the World Trade Center Towers, Final Reports from the NIST World Trade Center Disaster Investigation.
- Gutenberg, B. (1945): Amplitudes of P, PP, and S and magnitude of shallow earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., **35**, 57-69.
- National Nuclear Security Administration, U.S. Department of Energy (2015): Sedan Tested use of nuclear explosives to move Earth, <http://www.nv.doe.gov/library/publications/newsviews/sedan.aspx>, (参照 2016-09-27).
- National Transportation Safety Board: Aviation accident database, https://www.nts.gov/_layouts/nts.aviation/index.aspx, (参照 2017-01-26).
- Reed, J. W. (1988): Analysis of the accidental explosion at Pepcon, Henderson, Nevada, May 4, 1988, Sandia Report SAND88-2902, Sandia National Laboratories.
- Reich, H., O. Foertsch, and G. A. Schulze (1951): Results of seismic observations in Germany on the Heligoland Explosion of April 18, 1947, J. Geophys. Res., **56**, 147-156.
- Richards, P. G., D. A. Anderson, and D. W. Simpson (1992): A survey of blasting activity in the United States, Bull. Seism. Soc. Am., **82**, 1416-1433.
- Routley, J. G. (1988): Fire and explosions at rocket fuel plant Henderson, Nevada, Technical Report 021, Federal Emergency Management Agency.
- Spiegel Online (2007): Der tag, an dem Helgoland der megabombe trotzte, <http://www.spiegel.de/panorama/zeitgeschichte/weltkriegsrelikte-der-tag-an-dem-helgoland-der-megabombe-trotzte-a-477076.html>, (参照 2016-11-09).
- U.S. Congress, Office of Technology Assessment (1989): The containment of underground nuclear explosions, 80pp.
- USGS, Can nuclear explosions cause earthquakes?, <https://www2.usgs.gov/faq/node/3339>, (参照 2016-11-02).

(編集担当 鎌谷紀子)