

1960 年チリ地震震源域で繰り返し生じた過去の巨大地震

Universidad Catorica de Valpalaiso Marco Cisternas

US Geological Survey at University of Washington Brian Atwater

産業技術総合研究所 活断層研究センター 鎌滝 孝信・澤井 祐樹・宍倉 正展*

Repeated paleo-giant-earthquake caused in source area of the 1960 Chilean earthquake

Marco Cisternas

Universidad Catorica de Valpalaiso, Casilla 4-D, Quillota, Chile

Brian Atwater

US Geological Survey at University of Washington, Washington 98195-1310 USA

Takanobu Kamataki, Yuki Sawai, Masanobu Shishikura

Active Fault Research Center, AIST, Site C7 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567 Japan

Although the time since the preceding earthquake spanned 123 years, the estimated slip in 1960 Chile earthquake, which occurred on a fault between the Nazca and South American tectonic plates, equalled 250-350 years a worth of the plate motion. Geological record shows that the penultimate event occurred during 1575, and the average interval between giant earthquakes on this fault spanned 300 years. Two later earthquakes, in 1737 and 1837, produced little if any subsidence or tsunami at the estuary and they therefore probably left the fault partly loaded with accumulated plate motion that the 1960 earthquake then expended.

§ 1. はじめに

近年、海溝沿いで繰り返し発生するプレート間地震の発生様式には多様性があることが明らかになってきた[Satake (2005)]. 通常は海溝沿いの別々のセグメントで、それぞれ 100 年程度の再来間隔で起こっている地震が、まれに(数百～数千年に一度)複数セグメントが連動して長大な震源域をもつ巨大地震となっており、それが地形や地層に残された過去の地殻変動や津波の痕跡として残されている。たとえば千島海溝沿いでは、およそ 50～100 年間隔で地震が発生している(1952 年および 2003 年十勝沖地震や 1973 年根室沖地震など)が、これらの地震に伴う津波よりも大きく、内陸 2～3km まで浸水するような巨大津波の証拠が、津波堆積物として北海道東部太平洋沿岸各地に、およそ 500 年間隔で繰り返し堆積していることが確認されている[Nanayama, *et al.* (2003)]. このような異常な津波は、複数セグメントが連動する地震を想定すれば説明できる。しかし、海溝沿いの連動型地震についてはまだ不明なことが多くあり、その発生様式の

解明には過去数千年まで遡って多くの事例を集め、検討する必要がある。そのため歴史記録だけでなく、地形や地層の痕跡を丹念に調べなければならない。そこで本研究では、観測史上最大のモーメントマグニチュード 9.5 を記録した 1960 年チリ地震[Kanamori (1977)]について注目し、その履歴を解明することを目的に、チリ中南部沿岸の調査を行った。

§ 2. 史上最大規模だったチリ地震

チリ中南部沖の海溝沿いでは、ナスカプレートが南米プレートに年間 8.4cm の速度で沈み込んでいる(図 1)。1960 年 5 月 22 日に発生したチリ地震はこの海溝沿いを震源としており、その破壊領域は長さ約 1000 km におよんだ[Plafker and Savage (1970)]. この地震に伴う津波は、丸一日かけて太平洋を渡り、日本まで到達して犠牲者 142 人にもものぼる大きな被害をもたらした[チリ津波合同調査班(1961)など]。この地震以前にもチリ中南部沖では歴史上、繰り返し大地震が発生している。文書類など記録に残るチリの

* 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7

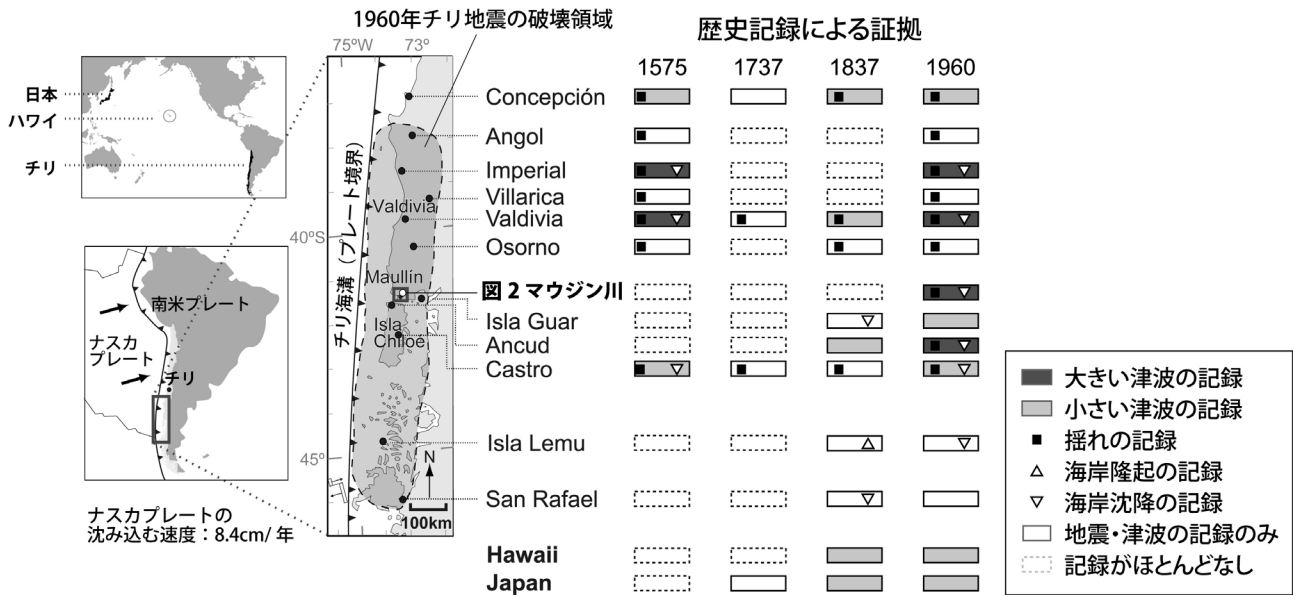


図 1 1960 年チリ地震の破壊領域内における各地の歴史地震の記録

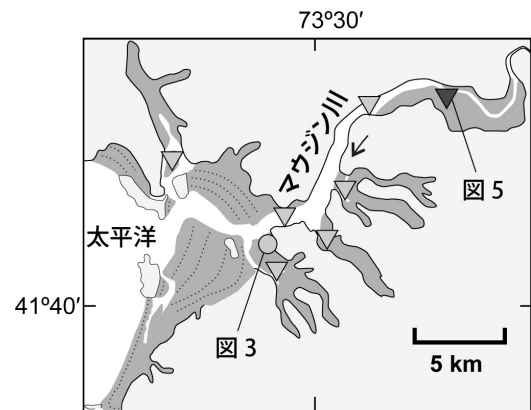
Fig. 1 Historical records of each area in the rupture area of the 1960 Chile earthquake

歴史は、16 世紀にスペインが征服して以降のもので、それによると、西暦 1575 年、1737 年、1837 年と 100～150 年おきに起きており[Lomnitz (2004)], 1960 年の地震は前回の地震から 123 年経過後に起きたことがわかる(図 1)。しかし、1960 年の地震ではプレート境界が一度に 20～30m もすべったことが知られており[Barrientos and Ward (1990) など], これだけの量の歪を蓄積するには、プレートの沈み込む速度から考えて、前回の地震から 250～350 年の時間が必要だったはずである。この問題を解決するには、津波や地殻変動などの諸現象を歴史記録や沿岸の地層や植生の痕跡から見つけ、検討する必要がある。

§ 3. 歴史地震に伴う諸現象の比較

歴史記録に残されたそれぞれの地震における津波高や地震動、地殻変動を、1960 年の震源域における沿岸各地で比較した(図 1)。一般に古い記録ほど史料の数や精度が悪くなる。たとえば最南部の Isla Lemu や San Rafael といった場所では、1575 年や 1737 年の地震に関する記録がないが、その頃はまだ入植が行われていなかった。つまり津波や地殻変動がなかったことを意味するわけではなく、記録そのものがなかった可能性が高い。それにもかかわらず、最も古い 1575 年の地震が、最も広範囲での揺れと大きい津波、地殻の沈降を伴っていたことが明らかであり、1960 年の地震に良く似ていたことがわかる。一方、1737 年や 1837 年の地震は 1575 年や 1960 年ほどの規模はなかった可能性がある。1737 年の地震は津波の記録がほとんどないが、同じ時期に本地域より北方のチリ中部を震源とする 1730 年や 1751 年の地震では津波が記録され[Lockridge (1985)], 日本にも到

達していたらしい[渡辺(1998)]。すなわち記録の欠損というよりは 1737 年の津波自体があまり顕著なものではなかった可能性がある。1837 年の地震は多くの地域で被害の記録があり、ハワイでは 6 m の津波が襲ったらしく[Lander and Lockridge (1989)], 日本にも到達している[渡辺(1998)]。しかし、チリ中南部沿岸では 1960 年の津波のような顕著な浸水被害はなく、地殻変動の記録も南部に限られている。



- 丘陵・台地
- 低地・湿地
- 津波堆積物が見つかった地点 (図 3 参照)
- ▽ 沈降した証拠が見つかった地点
- ▼ 立ち枯れ木の見られる地点 (図 5 参照)

図 2 調査地域の地図

Fig. 2 Index map of the study area

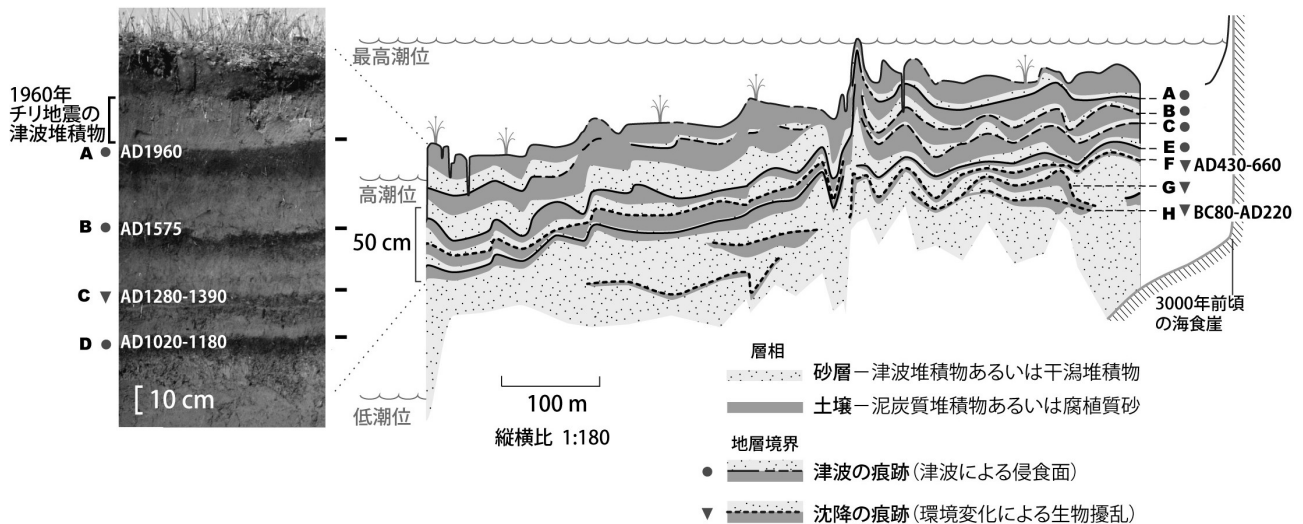


図3 湿地のトレンチ調査から明らかになった調査地域の層序と地質断面図

Fig. 3 Stratigraphy and geological profile in the study area revealed by trench survey in salt marsh

§ 4. 地層に残された巨大地震の痕跡

筆者らは、マウジン川河口周辺の湿地に狙いを定め、トレンチ掘削調査を行い、地層の観察から過去の地震の証拠を探した(図2)。この地点はチリ地震の震源域の中央に位置することから、過去の地震の震源域が仮に南や北へ偏って部分的に破壊していた場合でも、津波や地殻変動を伴う場所と考えられ、それらの痕跡がほとんど残されているとみなされる。

湿地では約2kmの範囲で60箇所のトレンチ掘削調査を行い、地表から深さ1~1.5mまでの堆積物の観察を行った(図3)。湿地は通常、泥炭質の土壌が堆積しているが、1960年チリ地震の際には津波によって運ばれた砂が約10cmの厚さで湿地表面を覆ったことが地元住民により目撃されている。トレンチ壁面では、当時の砂が下位の土壌表面を一部削りながら堆積して、その後再び土壌に覆われている様子が観察された。層厚や層相の変化をみると、最も海側のトレンチから約1km内陸のトレンチにかけて、厚さが10cmから4cmに減少し、粒径もやや細粒化している。また、場所により土壌と砂層との境界は、干潟の生物が巣穴等を掘って乱した跡が見られ、地盤の沈降によって湿地から干潟へ環境が変化したことを示している。これらの侵食面や生物擾乱、陸側への層厚の減少といった特徴を有する砂層や土壌との関係は、さらに下位にも互層となって積み重なっており、合計で8層のイベント堆積物が検出できた。これは1960年チリ地震以前にも、同規模の地震がくり返し発生し、津波や地盤の沈降の痕跡を残してきたことを示す。

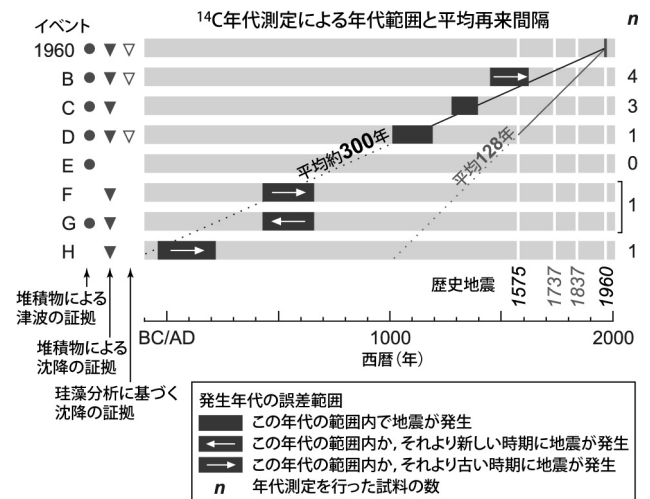


図4 堆積物の証拠に基づく津波及び沈降イベントの発生時期

Fig. 4 Timing of tsunami and subsidence events deduced from evidence of deposits

それぞれの砂層及び下位土壌との境界部を上からイベントA~イベントHと呼び(1960年チリ地震がイベントA)、各土壌中から当時生息していた植物の遺体を採取し、放射性炭素年代測定を行った。イベントの発生年代は、砂層を挟む上下の土壌の年代の間と考えられ、それぞれの年代範囲を図4に示した。イベントB, F, Gは、それぞれの砂層下位の土壌の年代しか得られておらず、イベント発生時期はその年代以降となることから、右方向の矢印で示した。逆にイベントGは砂層上位の土壌の年代のみであるため、そ

の年代より前にイベントが発生しており、左方向の矢印で示してある。1960年の一つ前のイベントBの層準ではAD1450-1510かAD1590-1620以降という年代が得られた。これは歴史上の地震では1873年ではなく、1575年の地震に対応する。以下、C:AD1280-1390, D:AD1020-1180, F:AD 430-660以降, G:AD 430-660より前, H:BC 80-AD 220以降と推定された(図4)。すなわち最も古いイベントはおよそ2000年前と推定され、平均すると約300年間隔で巨大地震が地層に記録されていたことになる。これはプレートの沈み込み速度から計算される発生間隔(250~350年)と矛盾しない。

§5. 立枯れ木が語る歴史地震の地殻変動

湿地での掘削調査では、1737年と1837年の地震の痕跡は確認されなかった。これは歴史記録の検討からも明らかなように、この2つの地震が1960年チリ地震よりも規模が小さく、地層に痕跡を残すほどの津波や地殻変動を伴わなかったためと考えられる。これを支持するデータがマウジン川河口付近の植生から得られた。この地域では1960年チリ地震時に地盤が約1.5m沈降して森が浸水し、樹木が枯死したことが地元住民の証言から知られている。その立枯れ木は40年以上たった現在でも多く見られる(図5)。この地点は感潮域であり、川の周囲に広がる低地では、地盤の上下動に伴う潮位の変化に対して、植生が敏感に反応する。しかし、1874年に描かれた同地点の古

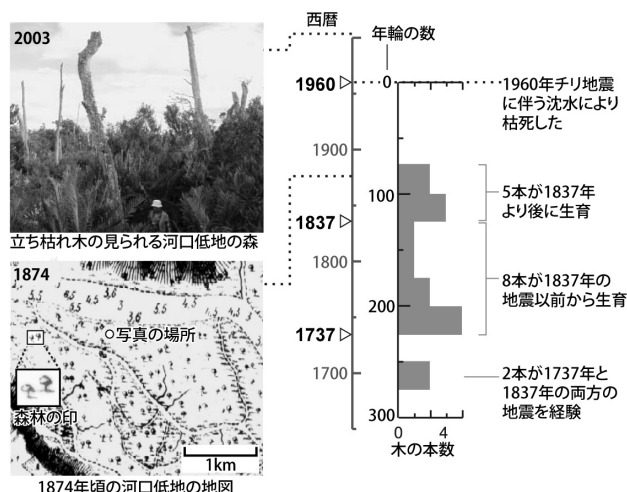


図5 マウジン川下流における過去約300年間の地殻変動を示す立ち枯れ木。

Fig. 5 Arboreal evidence for vertical crustal movement in last 300 years in the lower Maullin River

絵図によれば、1837年の地震から37年経過した時点で森林が存在し、樹木が生い茂っていたことがわかる。

本地域の立枯れ木について15本の年輪を計測したところ、8本が1837年以前、2本が1737年以前から生育しており、2回の地震を経験しても枯死することにはなかったことを示している。すなわち1960年チリ地震のような地盤の沈降による浸水は、少なくともこの地域ではなかったと考えられる。

§6. おわりに

チリ中南部沖の海溝沿いでは、100~150年間隔で地震がくり返し発生しているが、それが平均約300年間隔で1960年チリ地震のような巨大地震となり、地層に痕跡を残していることが明らかになった。このような性質は前述の千島海溝の例など、最近世界各地の海溝沿いで明らかにされつつあり、2004年スマトラ-アンダマン地震もその例の一つである[Lay *et al.* (2005)]. これは沈み込み帯で起こるプレート間地震の一つの特徴を示していると考えられる。今後は1960年より過去の地震の正確な震源域の把握のため、調査地域を北と南に広げて堆積物の証拠を探す必要がある。

謝辞

本稿は査読者の西村裕一氏の助言により改善されました。記して謝意を表します。

本調査は2003年から2005年にかけて行われ、本稿の筆者らに加え、以下のメンバーが参加した。Fernando Torrejon, Gonzalo Machuca, Marcelo Lagos, Annaliese Eipert, Cristian Youlton, Ignacio Salgado, C. P. Rajendran, Javed K. Malik, Yan Rizal, Muhammad Husni.

本稿は筆者らの一人、宋倉がNature Vol. 437に掲載されたCisternas *et al.* (2005)の報告の内容に加筆修正し、歴史地震向けにまとめ直したものである。

文献

Barrientos, S. E. and Ward, S. N., 1990, The 1960 Chile earthquake: inversion for slip distribution from surface deformation, *Geophys. J. Int.*, **103**, 589-598.
Cisternas, M., Atwater, B.F., Torrejon, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T.,

- Shishikura, M., Rajendran, C.P., Malik, J.K., Rizal, Y. and Husni, M., 2005, Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake, *Nature*, **437**, 404-407.
- チリ津波合同調査班(代表:東大地震研究所, 高橋龍太郎), 1961, 1960年チリ地震津波に関する論文及び報告, 丸善, 東京, 397pp.
- Kanamori, H., 1977, The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.* **82**, 2981-2987.
- Lander, J.F. and Lockridge, P.A., 1989, United States tsunamis 1690-1988, National Geophysical Data Center Publ. 41-2, Boulder, Colorado.
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C.J., Nettles, M., Ward, S.N., Aster, R.C., Beck, S.L., Bilek, S.L., Brudzinski, M.R., Butler, R., DeShon, H.R., Ekstrom, G., Satake, K. and Sipkin S., 2005, The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004, *Science*, **305**, 1127-1133.
- Lockridge, P.A., 1985, Tsunami in Peru-Chile, Report SE-39, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Boulder, Colorado.
- Nanayama, F., Satake, K., Furukawa, R., Shimokawa, K., Shigeno, K. and Atwater, B.F., 2003, Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril Trench, *Nature*, **424**, 660 - 663.
- Plafker, G. and Savage, J. C. (1970) Mechanism of the Chilean earthquakes of May 21 and 22, 1960, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, 1001-1030.
- Satake, K., 2005, Variable rupture mode at subduction zones around the Pacific, *Abstract of AGU 2005 Fall Meeting*, T11A-0346
- Lomnitz, C., 2004, Major earthquakes of Chile: a historical survey, 1535-1960, *Seism. Res. Let.*, **59**, 938-960.
- 渡辺偉夫, 1998, 日本被害津波総覧[第2版], 東京大学出版会, 236 pp.