

從 311 日本東北地震談起： 大地震不可預測，要防範於未然

以科學的角度釐清地震的前因後果，是理解地震過程的重要目標。

日本大地震的例子提醒我們，應重視防震規劃、災害處理、及地震海嘯基本常識宣導。

陳卉瑄

2011年3月11日，日本當地下午兩點46分，在日本東北海岸發生了規模9.0地震，造成了超過兩萬七千人傷亡或失蹤。這一個地震，震驚全世界、也震起了地震學界的省思，這是完全預料之外的巨大規模地震。

規模大於九的地震極為罕見

過去一百年來，全世界僅發生過五個規模9以上的地震，分別發生在智利(1960, M9.5)、阿拉斯加(1964, M9.2)、印尼(2004, M9.1)、堪察加半島(1952, M9.0)、和日本(2011, M9.0)。目前已知最大的，就是發生在智利規模9.5的地震，這些地震是有共通性的：一、它們都發生在聚合板塊邊界，二、其震央位置近海岸線，三、破壞性海嘯在地震後接踵而來。

發生在聚合板塊邊界

地球表面上平均溫度在攝氏30內，在這個低溫的範圍物質

的力學性質以脆性變形為主，形成由數個板塊組成的岩石圈。在更深處，溫度壓力增加，物質以塑性變形為主，即軟流圈。地表和地球內部的巨大溫度差異，使得地球內部的高溫物質產生對流，讓高溫物質蠢蠢欲動地想要竄出地表、而地表的低溫物質想要回歸地球內部。這就是板塊和板塊之間運動不曾停歇的道理，而這樣的運動，造成不同的板塊邊界。第一種是張裂型板塊邊界(高溫的地函物質竄出)、第二種是聚合型板塊邊界(板塊和板塊相撞，密度大的海洋地殼隱沒到大陸地殼之下，這就是隱沒帶。也有可能兩個密度相仿的板塊相撞，誰也不讓誰的結果，就產生了隆起的山脈)、第三種是板塊之間既沒有伸張、也不是聚合、而是擦肩而過、一左一右的錯動，這就是轉型斷層邊界。

地震要發生，需要區域應力(力源)和累積應力的能力(由岩石性質和斷層面性質所控制)。板塊在軟流圈移動、互相推擠，

這樣的相互作用提供了區域應力。而如同我們用力折斷筷子一樣，施予的力，有效率地作用在筷子的應力聚焦點，使得材料達到破裂臨界值——地震的發生也需要能讓應力聚焦的區域，在地殼尺度，這樣的區域叫做斷層面。和一般的地殼尺度地震不同，板塊和板塊的交界處可長如隱沒帶，它跨越數百公里的空間尺度，是最有潛力的孕震區。由於地震規模和斷層破裂面積成正比，破裂長度大於八百公里便有機會製造一個規模九的地震。

震央位置近海岸線

想像你家住在海岸，你的腳踩著大陸地殼，在它下方是較重的海洋地殼緩緩隱沒。如果板塊的交界面是光滑的像抹了一層肥皂水，那海洋地殼會很快地溜下去，但是事實上這個交界面摩擦係數很大，把一個想要下沉的海洋板塊「卡」在最初的接觸點那裡(海溝)，動彈不得(圖一A)。一年、十年、一百年過去

了，這個每年數公分的板塊相互運動對應到的應變能一直在累積，造成了近海溝的大陸地殼緩緩拱起（圖一 B）。當累積達到材料的破裂臨界值時，「卡」住的交界處瞬間釋放多年來累積的能量，這時候，隱沒邊界上產生錯動（圖一 C），地震應聲而來，上覆的海體產生變形、向上拱起的陸地反而沉降（圖一 D）。

這一個斷層面破裂若發生在近岸，海水在短時間就會向你家傾注，雪上加霜的是，地層已經下陷了數十公分甚至公尺，這使得一波波的海嘯更有破壞力。海嘯過後，陸地下陷的結果帶來長期的地貌地質變化。1960 年智利大地震海嘯，因浪潮在沿岸沉陷後得以氾濫深入內陸，海水於是淹沒了牧場、農田、和森林，地面變得過濕過鹹不適樹木的生存，林區也變成了鹽沼澤地。

破壞性海嘯接踵而來

重大的傷亡往往都歸諸於破壞性的海嘯，而非地震本身。但不是每一個海底地震，都會造成破壞性的海嘯。

地震只要發生在海床下方，都可能會造成上覆海體的變形，因而激發波浪將能量向四面八方傳遞。這樣的地震，稱作典型的海底地震。它激發的浪高對應著地震釋放的能量，可以由地震波的振幅計算、預估。然而，另一類型的海底地震其激發之浪高遠超出預期、造成異常破壞力的海嘯，這樣的地震稱作海嘯地震。例如 1946 年阿留申的規模 7.3 地震（由地震波最大振幅所估計的表面波規模），其最大浪高所估計的海嘯規模高達 9.3。

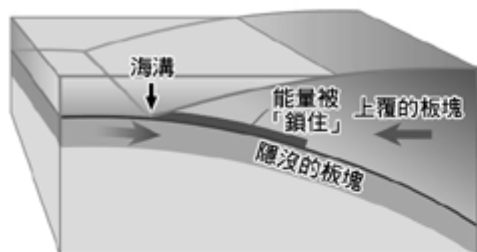
這兩種類型的地震比較示意圖如圖二所示。由驗潮站的海浪波形紀錄和模擬波形比對的結

果，Satake (1994) 發現，異常放大的海床變形行為，必須有特殊地板塊邊界的破裂形態。淺的、狹窄的有限斷層破裂（海溝下方 10 公里之內，破裂寬度少於 40 公里）更利於破壞性海嘯之生成。除了地震震源位置條件之外，造成海嘯地震的原因還有許多，例如難以由儀器測量到的慢速破裂過程、在近海溝處增積岩體區或是海溝外側隆起處的高角度斷層錯動、近岸邊的重大滑坡行為等等，都可無聲無息的「放大」海床的變形程度、造成預料之外的海嘯。因此針對未來海嘯的災害評估而言，嚴謹定義海嘯地震的規模（海嘯規模）、釐清與海底地震的差異、並進一步界定「這一個是不是海嘯地震」是有必要的。

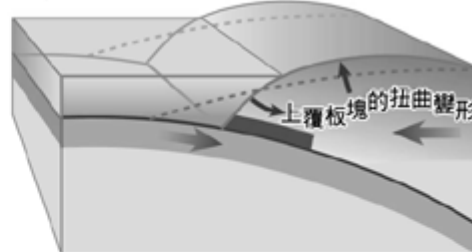
七十年以前，日本的國小教科書裡就編列了一個叫做 活神

仙 的真實人物故事，描述 1854 年 12 月 24 日，南海發生規模 8.4 地震時，一位叫做濱口儀兵衛的村長，由大規模海退露出黑色海底砂的異常現象，警覺到海嘯將席捲而來。他燃起在山丘上自家門前的稻堆，及時警告山下居民逃生。這個教材在 1944 及 1946 年，規模八地震時發揮了減災救

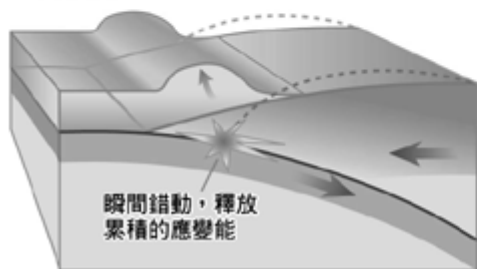
A. 隱沒帶橫切剖面圖



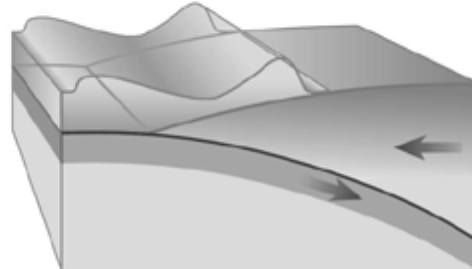
B. 震間期



C. 同震期



D. 地震發生數分鐘後



圖一：隱沒帶地震前後變形行為示意圖。(A) 隱沒帶橫切剖面圖。板塊交界處相對運動發生最劇烈的區段（深色粗線）處於鎖定狀態。(B) 應力累積的穩定期。此時隱沒帶仍處於鎖定狀態，但陸地漸隆起。(C) 地震發生時的同震期。鎖定帶發生錯動、釋放累積已久的應變能，此時地震發生，陸塊逆衝的結果造成上面的海水瞬間抬升，而已隆起的陸地則相對沉陷。(D) 地震發生數分鐘後海水波動向四面八方傳播，海嘯發生。（修改自 Atwater et al., 1999）

人的作用。目前全世界現代化觀測網廣布，太平洋海嘯預警系統的警鐘精確地發揮作用，然而，對如何從海嘯中及逃生，卻是人人必須熟知的基本常識。在美國地調所發布的《如何在海嘯中倖存》一文（2005），由過去海嘯倖存者的經驗，明確地定義了幾種自救方式：

一、留心自然界的警告：巨大地震發生後可能會帶來海嘯，住在沿岸區的民眾要留意突然的海水位變化。

二、留心官方的警告：當智利海嘯在 1960 年 5 月 22 日越過太平洋時，夏威夷居民事實上有足夠的時間撤退。在夏威夷時間晚間 6 時 47 分，正式的警告發布。首波海嘯在午夜抵達時只有幾英尺高，未造成重大損害，其後雖然警笛仍大作，已返回家中的人選擇低估可能的災害而不做

疏散。然而最大一波海嘯不久後接續而來，造成了更大的傷亡。

三、海嘯可能持續好個幾小時，耐心等待、嚴防下一波的海嘯。

四、前往高處、等待海嘯危機解除。若已被困住，盡速前往堅固的高樓或爬上屋頂。

五、如果海嘯已迎頭而來，尋找東西作為浮板。

311 日本大地震是預料之外的地震？

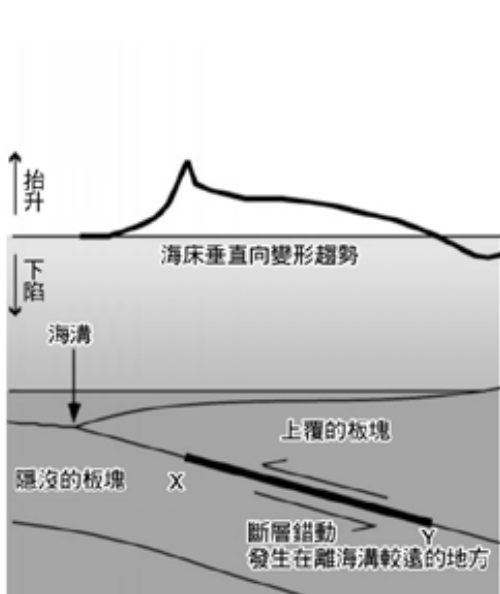
從過去的歷史地震地點、時間、區域應力的累積速率、和區域地震釋放的能量，你可以推算有多少應變能在地底下持續累積，這是為什麼地震潛能可以被預先估計。然而，二、三十年來在日本被高度重視的地震高危險區，是約 100~150 年會有一次規模 8 地震的關東以南，即圖三灰

色區塊標示的南海（Nankai）、東南海（Tonankai）、東海（Tokai）。然而，這一次卻被歷史地震記錄中從未有過規模 8 以上的東北地區取而代之，成為日本有史以來最大的震災區。

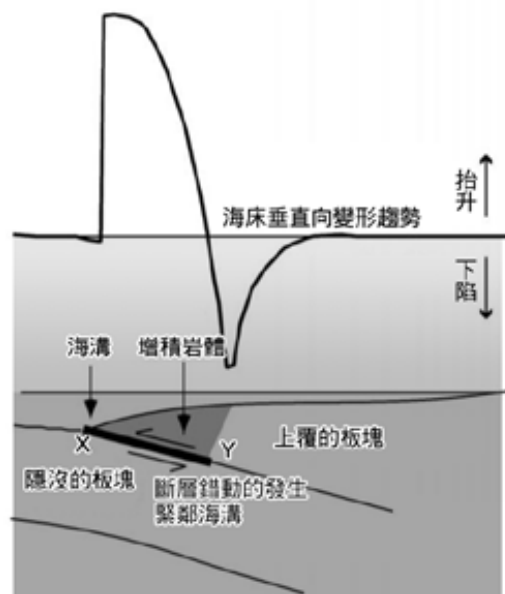
長期地震預報的基本宗旨，源自於早期板塊學說的「特徵地震」理論。一般認為，那些已經較長時期沒有發生過大地震的區段，累積了相對更高的應變能，將會是下一個大地震的危險區域。也因此大地震傾向於發生在同一個地方，其重複週期輔助了地震潛能的推算。這是為什麼日本發布的地震潛勢圖上（圖三），大地震危險性最高的地方，是曾經在 1854、1944、1946 分別有過規模八地震，目前處於「備戰期」的關東以南——東海、東南海、南海區段。然而，這樣的地震潛勢圖所標記出

相對高危險區（圖三陸地上深色區域），與過去三十年來在日本死亡人數超過 10 的真正震央區（圖三同心圓）大部分都不相符，這樣的比對結果引出了一個事實——沒有一種地震潛能評估方法（或地震預測手段）是完美的。不完美的

A. 海底地震



B. 海嘯地震



圖二：一般海底地震和海嘯地震海床垂直變形比較圖。（A）典型海底地震。破裂發生於隱沒海洋地殼和上覆之大陸地殼的交界（海溝）下方、未連接海溝（由粗黑線指示）。斷層錯動、上覆板塊逆衝向上，造成了 X（破裂起點）正上方海床抬升、Y（破裂終點）正上方地殼沉陷。（B）典型海嘯地震。破裂發生於近海溝處（由粗黑線指示），亦造成海底抬升及下陷，唯變形程度比 A 圖高出數倍。（修改自 Satake, 2007）

原因在於：地震記錄的歷史仍不夠久，統計上未能累積夠多資料已驗證各種斷層模型、潛能估算模式的正確性。

地震不可預測，要防患於未然

的確有許多零星的例子證明了大地震前，有特殊的前兆行為。例如地震活動安靜期、電離層濃度、電磁場強度、土壤氫氣異常等等。這些前兆現象對應著大地累積應力、趨近臨界破裂時的物理過程。然而，前兆異常無法總是在同一個地方、以同等規

模出現，打擊了我們利用地震前兆來預測地震的信心。以科學研究角度而言，釐清地震前兆和下一個地震的關係，是理解孕震、發震過程的重要科學目標，但政府、一般民眾卻不應該利用這些科學證據和假說來挑戰「下一個地震在哪裡」這樣攸關人身安危的重大問題。日本大地震的例子提醒我們，身處兩個隱沒帶邊陲的台灣，我們不能輕忽大地震發生的可能性，在防震規劃、災害處理、及地震海嘯基本常識宣導上，我們都要做最壞的打算、盡最大的努力。🌍

註：地震的「震度」不同於地震「規模」。地震規模是描述地震大小的尺度，係依其所釋放的能量而定，不因地而異，且無單位，以實數表示。而地震的震度則是描述地表搖晃，不同地方感受到的搖晃程度不一，因此同一個地震事件各地有不一樣的震度，共分七級，以整數表示。現今地震儀器已能詳細描述地震的加速度，所以震度亦可由地動加速度值來劃分，單位為 cm/s^2 或 Gal。六級的震度對應到的描述為：搖晃劇烈以至站立有困難、家具翻倒、門窗嚴重受損。



圖三：日本政府發布未來三十年內震度高於 6 級〔註〕的可能性分布圖。色階標示著未來三十年發震概率（以百分比表示），預估最高危險區為關東以南沿海區域（偏下方色塊），對應到過去曾發生過規模八地震的南海（Nankai）、東南海（Tonankai）、東海（Tokai）區段。同心圓標示自 1979 年至今日本死亡人數超過 10 人的歷史事件分布圖。311 日本東北地震的破裂範圍由偏右側色塊表示。（圖摘自 Geller, 2011）。

參考資料

1. Atwater, B.F. et al, Surviving a tsunami: Lessons from Chile, Hawaii, and Japan, U.S. Geological Survey, 19 p, 1999. (<http://pubs.usgs.gov/circ/c1187/>)
2. McCaffrey, R., The Next Great Earthquake, Science, vol. 315: 1675-1676, 2007.
3. Satake, K., Tsunamis, in Treatise on Geophysics, vol. 4, Elsevier, 483-511, 2007.
4. Geller, R. J., Shake-up time for Japanese seismology, Nature, vol. 472: 407-409, 2011.

陳卉瑄：任教
臺灣師範大學地球科學系

稻堆之火

此文章經 T. Nakai 改寫自散文作家 R. Hearn《佛田的落穗》一書中的「活神仙」人物故事，在 1937~1946 年被納為日本國民小學的教本，後來在 1944 年和 1946 年地震引發海嘯時有效地發揮減災救人的作用。此版本由 O. Muta 譯成英文，並經 John Beavan 修訂，再由陳卉瑄和王克林由英文版譯成中文。

「這個地震來的好怪！」梧平（Gohei）自言自語著走出屋外。沒有感覺到強烈的震動，只有持續很久的微震伴隨著大地的隆隆巨響，這是老梧平從沒有經歷過的事。

「我有不祥的預感」，他憂心地從他的院子向坡下的村落看。村民們太專心地為即將來臨的收割節準備著，竟然沒有感覺到這個地震。

梧平向海面望去，一下子驚呆了。他看到波浪逆著風向退向海洋，傾刻間大片的海底沙石映入眼簾。「我的天！這是海嘯！！」梧平意識到。如果他不趕快想點辦法，坡下四百村民就將被大海吞噬。「怎麼辦？」時間緊迫、刻不容緩。

「啊，有了！」他喊了一聲向屋內衝去。一會兒，擎著一把松枝火炬跑了出來。他的地裡一堆堆的稻子正待運走。「燒掉它們太可惜了。可是這樣也許會挽救村民於滅頂之災！」他先點燃一堆稻子，火苗瞬間隨風熊熊燃起。他又發狂似的繞著所有的稻堆，一一燃火，隨即拋下了火把，憂心忡忡向大海凝視。

這時太陽已落山，天色漸漸陰沈，而稻堆燃起的火束突兀地劃亮天際。有些村民看到了，鳴起山邊的廟鐘。「地主梧平的家起火了！」年輕的人們大叫著衝向山坡上梧平的住處，老弱婦孺們也跟在後頭向坡上走去。

梧平焦急地看著坡下動靜，覺得人們慢得像螞蟻一樣。終於，約莫二十個年輕人飛奔而來、開始滅火。「別滅掉！別滅掉！把所有的人都帶到坡上來！災難就要降臨了！」梧平向他們大聲喊道。

村民們接踵而至，梧平則一個一個地數著到達的男女老少。大家茫然不解地望著他和燃燒的稻堆。突然，梧平指向遠處，大吼起來：「看！來了來了！」大家藉黃昏的餘光順著他的指向望去。他們看到大海邊緣是一條細細的黑線。眼見著那黑線變得越來越寬、越來越粗、隨即洶湧而來。

有人失聲道：「是海嘯！」。奔騰的水牆如同一堵峭壁，向陸地砸來，勢若千鈞。巨大的響聲像萬雷轟頂。驚恐之下，大家都不由自主的向後退。此時除了漫繞著山丘的皚白浪花外，已眼不見物，接著，他們目睹著洶湧的浪潮來回兩三次衝擊著坡下家園。

山坡之上，一陣寂靜。直到海潮退去，大家仍然凍結在木然的呆望中，眼及之處熟悉的家園已遭海潮席捲，未留下任何痕跡。周圍稻堆的零星火苗重燃，隨風起舞，在黯淡的暮色中冉冉亮起。村民們這才醒悟過來，意識到，是梧平燃起的稻堆之火拯救了他們。他們默默地跪倒在梧平面前。