

地震工学（3回目）：過去の地震災害から学ぶ1 担当：工学院大学・久田

被災地震から学ぶ1

○**歴史地震**：明治以降に学術的な被害調査が行われ記録される以前の地震で、地震の大きさは古文書や遺跡調査などから地震の被害範囲（震度分布）をもとに推定される（**図1**は関東地方の例）。地震の発生には震源域ごとに規則性が見られる場合がある（特にプレート境界の巨大地震）。さらに地震被害の分布も、地盤の良し悪し等によって、地震の度に類似なパターンが繰り返されるため、地震発生や地震被害の想定などに有効である。**図2**に示すように関東地方では1984年東海地震から150年以上、1923年関東地震から80年以上が経過しており、21世紀は地震の活動期に入ったと言われている

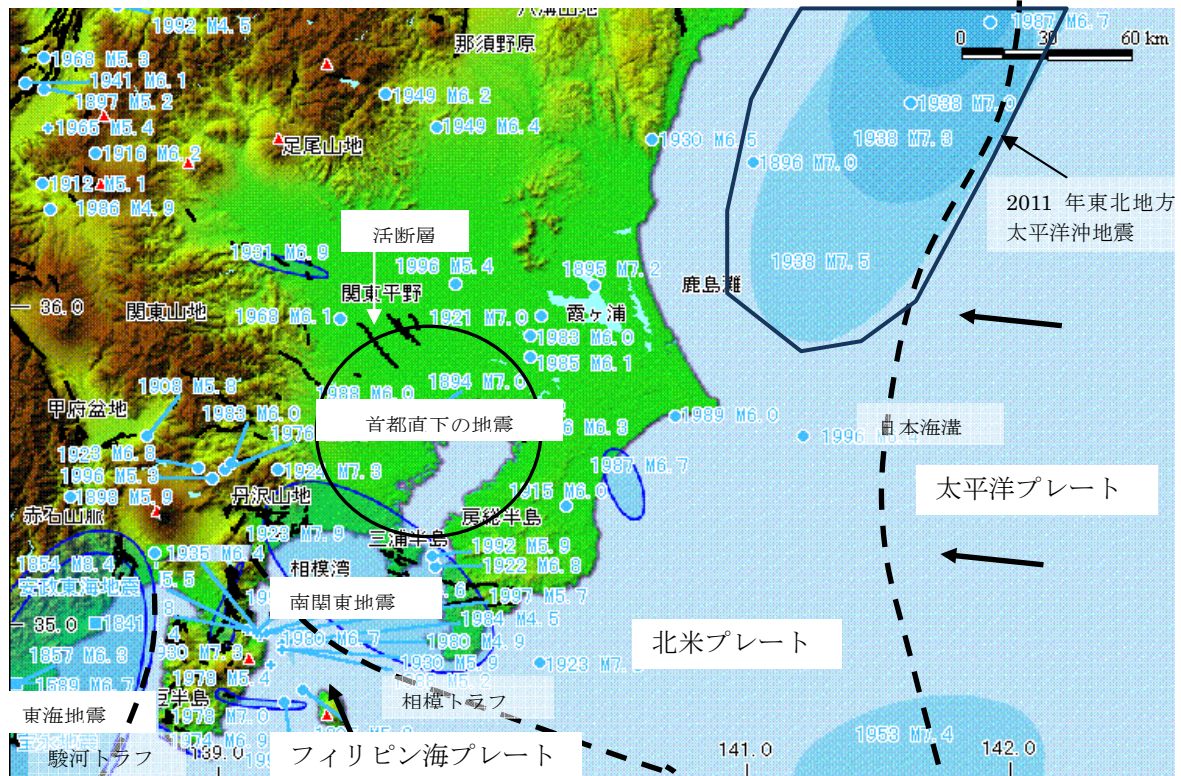


図1 関東地方の歴史地震 (<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>)

図2-3-29 首都直下地震の切迫性

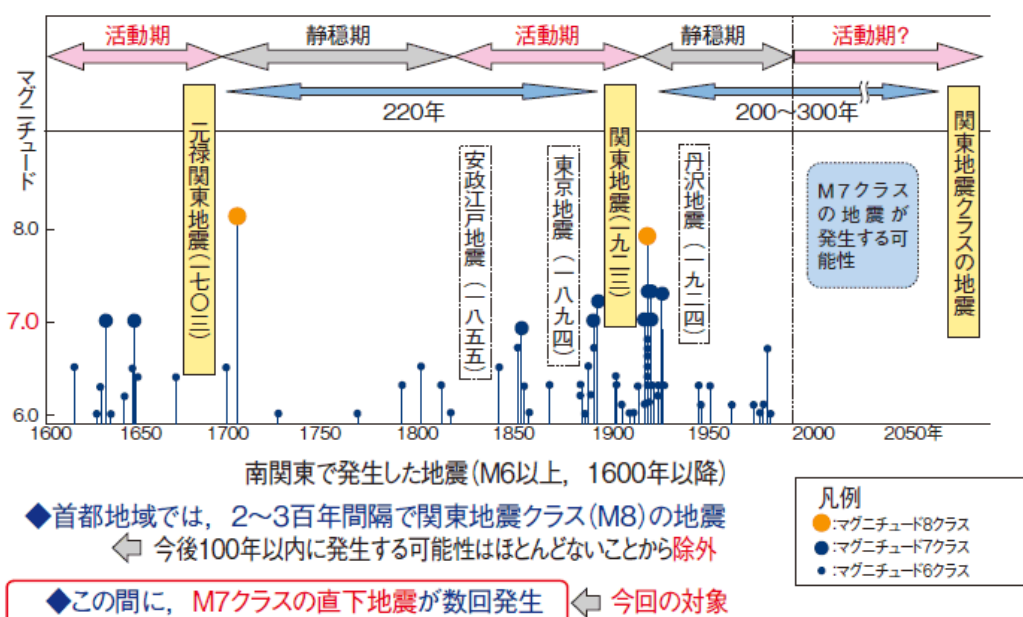


図2 関東地方の主な歴史地震 (防災白書 21年度版 <http://www.bousai.go.jp/hakusho/h21/index.htm>)

○首都直下地震の発生確率が 30 年で 70%とは？：地震調査研究推進本部(2004)によると、今後 30 年間で M7 クラスの首都直下地震の発生確率は 70%以上と発表されている。この根拠は明治以降の過去 119 年間に計 5 回の地震が発生しており、単純な確率モデル（ポアソン過程）に当てはめた結果である。但し、5 回の地震はいずれも 50 km 程度より深い地震であり、被害も大きくは無かった（死者数も **1894 年明治東京地震** の 31 名が最大）。従って、近年の被害想定で用いられる 20 km 程度の浅い M7.3 の地震で、死者が 1 万人以上とされる首都直下地震とは無関係であり、そのような地震の発生確率は不明であることに注意を要する。

○主な関東地方の歴史地震

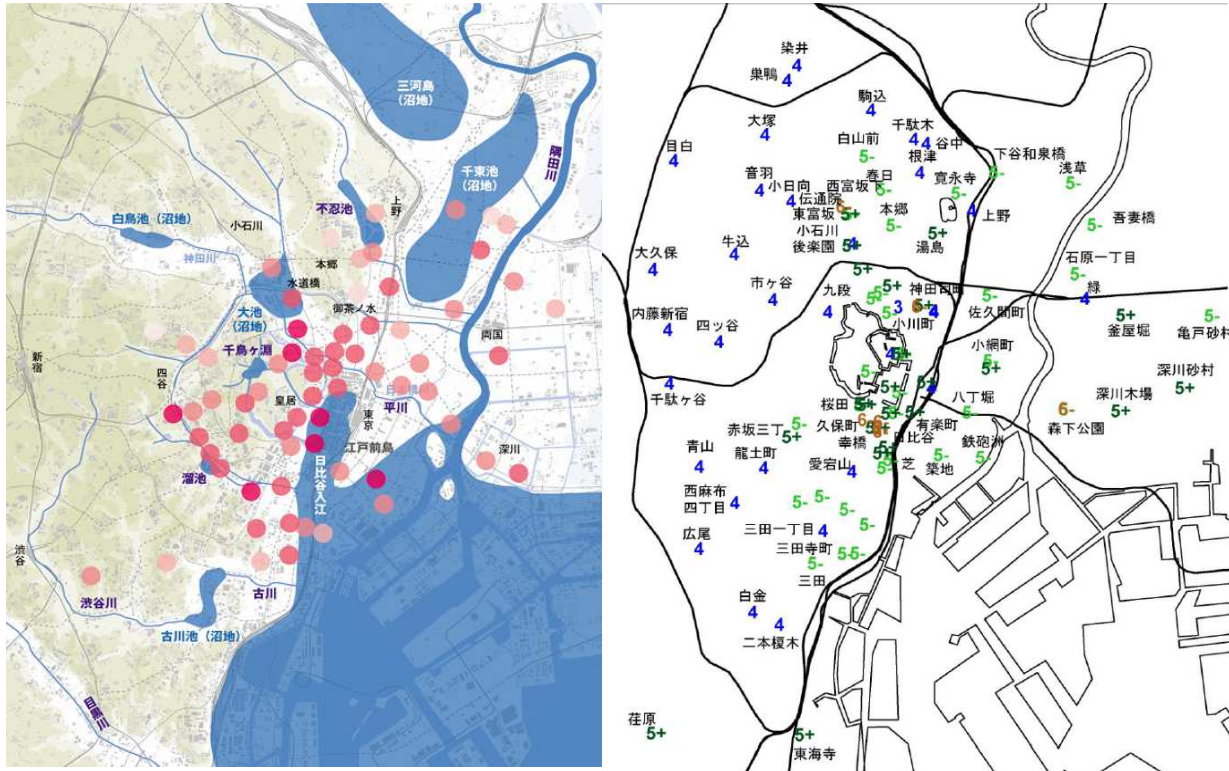


図3 (左図) 1703 年元禄関東地震の震度分布と、1460 年ごろ(室町時代)の東京の地形、
(ミツカン水の文化センター http://www.mizu.gr.jp/fudoki/people/047_tsuji.html)
(右図) 1854 年安政東海地震の震度分布(都司嘉宣、東京大学地震研究所彙報、2010)

- ・ **1703 年元禄関東地震(M8.1)**：1923 年大正関東地震と同じくフィリピン海プレートが相模トラフから北米プレートの下に沈み込む**プレート境界型の巨大地震**である。震源域は大正の地震より南東側に拡大しており、房総半島東岸の**津波**の被害は極めて大きく、江戸にも 2 m 以上の津波が到達している。**地震動**による被害も大きく、倒壊家屋や死傷者があり、火事も発生したが、大正関東地震の震災ほどではなかった。死者は 5000 人以上といわれている。と地形との関係を示すが、江戸時代に埋め立てられた地域で大きな震度が出ている。
- ・ **1854 年安政東海地震(M8.4)**：フィリピン海プレートが駿河・南海トラフからユーラシアプレートの下に沈み込む**プレート境界型の巨大地震**である。震源は東海・東南海地震が連動しており、被害は関東から近畿に及び、特に沼津から伊勢湾にかけての海岸部での被害が著しかった。この地震による家屋の倒壊・焼失は約 3 万軒、死者は 2 千～3 千人と言われている。この地震(11 月 4 日)の後、**1854 年安政南海大地震**(M8.4、11 月 5 日)と、**1854 年豊予海峡地震**(大分と愛媛の間、M7.4、11 月 7 日)が連続して発生している。図3に江戸の震度分布を示す、
- ・ **1855 年安政江戸地震(M6.9)**：江戸の直下で起きた地震で、震央位置は東京湾北部と推定されている。江戸時代の江戸で最も大きな被害が出

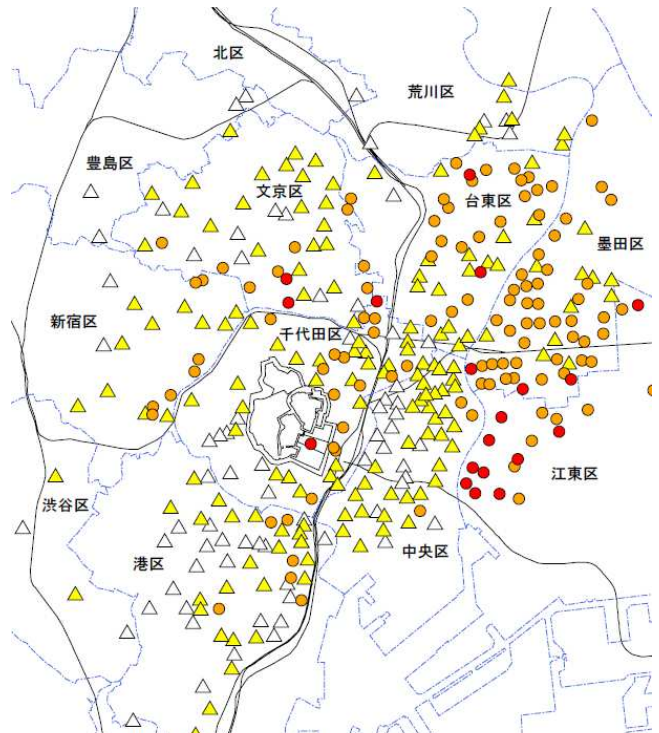


図4 1855 年安政江戸地震の震度分布(中央防災会議：災害教訓の継承に関する専門調査会報告書)

た地震であり、特に下町や丸の内など軟弱地盤での被害が大きかった（図 4）。死者は約 7500 名以上、倒壊家屋は 16,000 軒以上と言われている。冬の夜でもあり火事が市内 30 余ヶ所で発生し大火災となった。

○明治時代の主な被害地震と地震工学：

- ・ **1880 年横浜地震（M5.5?）**：被害は軽微であったが、J. A. Ewing や J. Milne などを中心に 1881 年に日本地震学会が設立された。一方、造家学会（現、日本建築学会）は 1886 年に設立された。
- ・ **1891 年濃尾地震（M8.0）**：根尾谷断層を中心に約 80 km の断層が破壊した活断層によるわが国最大級の内陸地震。図 5 に示すように根尾谷では大きな断層崖が現われた。これを調査した東京大学教授で地質学者の小藤文次郎は地震の原因は断層の急激な運動によると主張した。死者 7273 名、全壊建物 14 万棟、半壊 8 万夜、全焼 7000 戸以上、山崩れ 1 万余という大被害を生じた。建物被害の多くは伝統木造家屋であったが、名古屋をはじめ都市部では文明開化の象徴ともいえる洋式の煉瓦建造物に大きな被害を生じた。この地震を契機に 1882 年に震災予防協会が文部省に設置され、地震学や耐震工学の研究が進められた
- ・ **1894 年明治東京地震（M7）**：深さ 40 km 以上の比較的深い地震と考えられており、東京から横浜の湾岸沿いで、特に本所・深川等の軟弱地盤で最大震度 6 相当の揺れに見舞われた。東京で 24 人、横浜・川崎で 7 人の死者を生じた。煉瓦建造物や煙突の損壊が目立った。



図 5 1891 年濃尾地震の尾根谷断層（左）と地震被害（右）
<http://research.kahaku.go.jp/rikou/namazu/index.html>

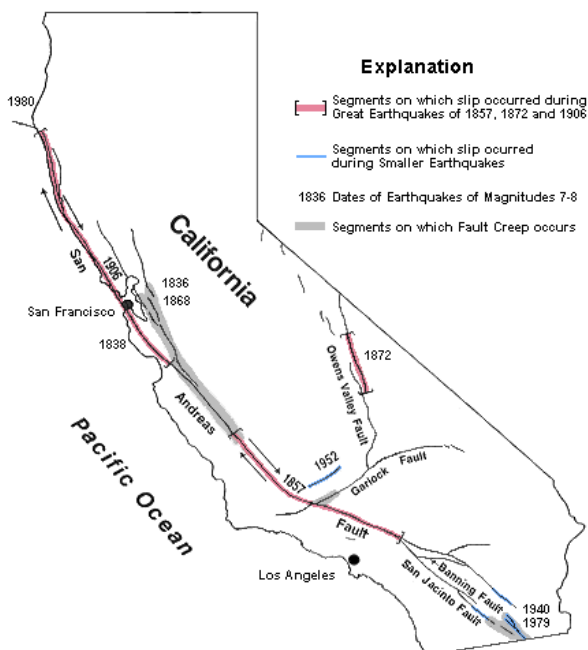


図 6 カルフォルニア州と San Andreas 断層
<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/where.html>



図 7 大火災の発生
<http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/fire1.gif>

- ・ **1896 年明治三陸地震津波（M8.5）**：北海道から東北地方の三陸（旧国名の陸前、陸中、陸奥の総称）を襲ったわが国で最大・最悪の地震津波被害（東日本大震災が更新）。津波高さは最大で 38.2m に達し（岩手県

綾里村)、死者数は 22,066 名、家屋流失全半壊 1 万以上の被害を生じた。震源地は沖合い約 200 km と遠方であり、日本海溝から沈むプレート境界の浅い部分の断層がゆっくりと動いたため、地面の揺れが小さく、地震動に被害は皆無であった(震度はⅡ～Ⅲ、このように地震動は小さいものの、津波を発生する地震を**津波地震**と呼ばれる)。震後約 18 分の退潮に始まり、約 35 分後に第一波の津波、その 8 分後に第二波の津波が襲った。リアス式海岸の V 字湾が津波のエネルギーを集中させ、被害をさらに大きくした。

- ・ **1933 年昭和三陸地震津波 (M8.1)** : 日本海溝の太平洋側 (アウターライズ) で発生し、明治三陸地震の広義の余震と考えられている。津波により死者 1522 名、行方不明者 1542 名、という大被害をもたらした。
- ・ **1906 年サンフランシスコ地震 (M8.3)** : 太平洋プレートと北米プレートの境界の**右横ずれ断層**であり、カリフォルニアを南北に縦断する**サンアンドレアス断層**が活動した巨大地震(図 6)。3 日間続いた大火災による約 40 万人の人口の市の 3 分の 1 が消失し、死者は 3000 名以上、破壊された建物 2 万 8 千棟、家屋を失った人は約 23 万名、被害総額は約 3 億ドル(当時)にのぼり、治安も悪化した(図 7)。米国の **H.F.Reid** はこの地震を契機に、地震の原因説として**弾性反発説**を唱えた。現在ではこの説は受け入れられているが、地震には地表に断層が現れない**伏在断層**が多いため、地震は断層によって生じるのか、地震によって断層が生じるのか、大きな論争になった。東京帝国大学工学部教授の**佐野利器(としかた)**などが現地調査を行い、レンガ造に比べ、**鉄骨造**や**鉄筋コンクリート構造**は耐震性・耐火性に優れていることなどを報告した。

○1923 年関東大震災前の主な動向

- ・ **気象庁震度階** : 体感により 1898 年から微震、弱震、強震が各 2 種類、列震の計 7 階級で始まった。1908 年からは微震(感覚なし)に代わり、無感覚地震となり、さらに 1936 年からは無感、微震、軽震、弱震、中震、強震、列震の 7 階級となった。**1948 年福井地震**を契機に 1949 年に激震を追加し 8 階級となった。さらに **1995 年兵庫県南部地震**を契機に 1996 年から震度階級を 10 階級に増やすとともに、震度階級は即時発表可能なように地震計による**計測震度**の値によって定義することとし、体感による観測は廃止された。
- ・ **大森・今村論争** : 1906 年春、東京帝国大学地震学教室の助教授であった**今村明恒**が雑誌「太陽」に過去の関東地方の地震や被害の特徴、将来の地震被害の姿と現在の不十分な地震火災対策など、市民を対象に啓蒙的な内容の論文を発表した。この論文は翌年の新聞に、「**大地震襲来説、東京大被災の予言**」と仰々しい見出しで紹介された。当時は不吉と言われる丙午の年で、さらに東京で強い地震もあり、流言は次第に広がり、大騒動に発展した。同じ地震教室の教授であった**大森房吉**は騒動を鎮静化するべく、新聞や雑誌、講演会で激しく今村説を批判した。そのため騒動は次第に収まったが、16 年後の 1923 年に**関東大震災**が発生し、東京や横浜を中心に 10 万人以上が大火災などで死亡した。この知らせはオーストラリアに滞在していた大森にも伝わり急遽帰国した。震災で焼け野原の横浜港の船中に出迎えた今村に詫びたと言う。大森はその直後に他界したが、今村は震災から 3 ヶ月後に教授となり、日本の地震学の中心的な存在となって活躍する(参考:『君子未然に防ぐ 一地震予知の先駆者 今村明恒の生涯』、山下文男 著)。

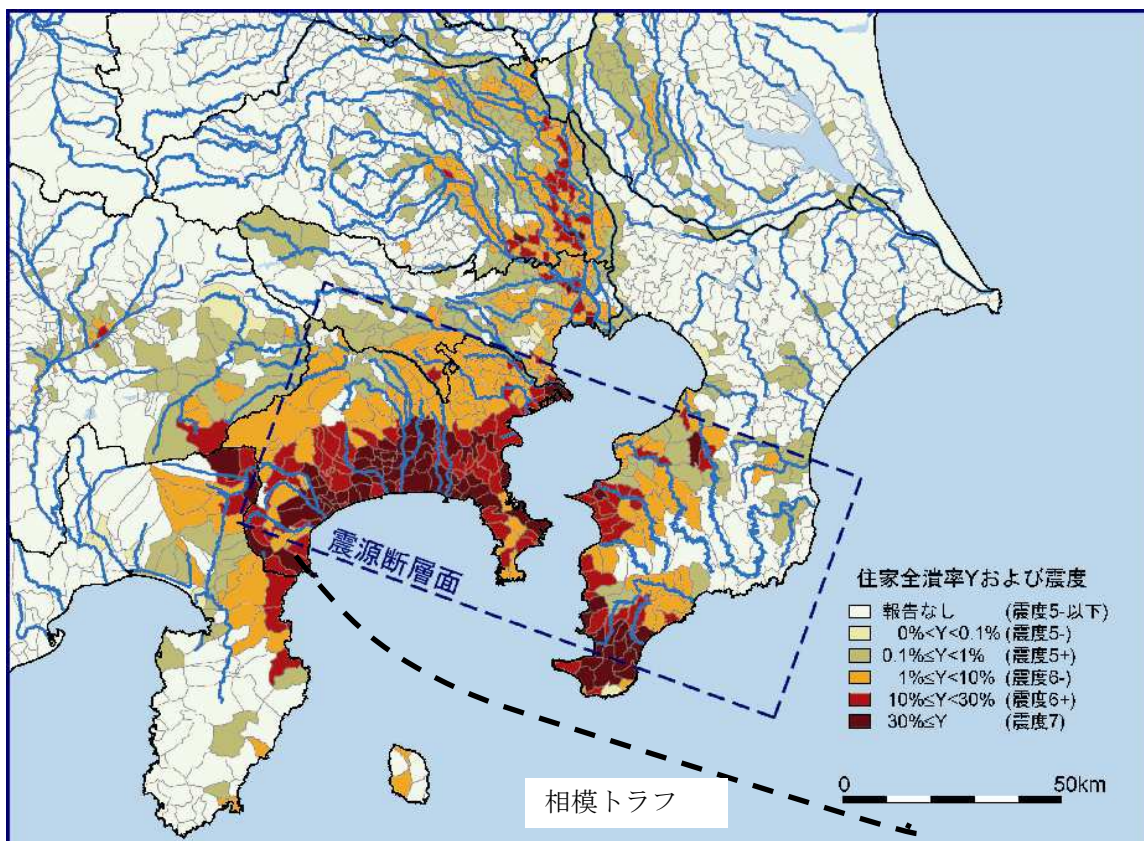


図 8 1923 年関東地震の震源域と家屋全潰率 (武村正之、「関東大震災 (鹿島出版)」)

- ・ **設計震度**：佐野利器により 1916 年に**家屋耐震構造論**が発表され、設計震度など耐震構造工学の基礎がつけられた。**設計震度**とは、地震により建物に作用する水平加速度を重力加速度 g で基準化した値である（例えば、設計震度 0.5 と 0.5 g の加速度を水平に作用させること。30 度傾けることと等価）。
- ・ **市街地建築物法**：1920 年に施行され、工学的建物（S 造、RC 造など）の強度計算規定が定められたが、耐震規定はなかった。耐震規定（設計震度など）は 1924 年に関東地震を契機に導入された。
- ・ **耐震壁**：内藤多仲は 1916 年アメリカ留学中に、旅行用トランクの仕切板や船の構造からヒントを得て、**耐震壁**の有効性に着目した耐震構造を研究し、1922 年に RC 造と耐震壁を中心とした**架構建築耐震構造論**を発表した。さらにこの理論に基づき、日本初の耐震構造ビルとなる（旧）**日本興業銀行本店**を東京丸の内内に設計した。この耐震壁をとりいれた 7 階建て鉄骨鉄筋コンクリート造の建物は完成後わずか 3 ヶ月後に発生した関東大震災での軽微な被害に止まり、隣にあった鉄骨とカーテンウォールによる米国直輸入の**内外ビル**が倒壊したのに対比され、耐震壁理論の有効性が改めて実証された。その際に使用した**設計震度の値は 2/15 (0.133)**であった。その後、内藤博士は耐震工学の権威となり、様々な建築や多数のテレビ塔を設計した（特に 1953 年の名古屋テレビ塔、'56 年の通天閣、'58 年の東京タワーなどが有名）。

○1923 年関東大震災

- ・ **1923 年関東地震 (M7.9)**：図 8 示すように模湾湾、神奈川、房総半島の南部を含む**相模トラフ**沿いの広い範囲を震源域として発生した**プレート間の巨大地震**であると同時に**南関東の直下型地震**である。関東地方の南部を中心に震度 6 が、相模湾沿岸地域や房総半島南端では震度 7 相当の揺れであった。特に地盤の悪い沖積低地の震度が大きくなった。震源域に近い熱海では地震発生後約 5 分で**津波**が到達し、その高さは静岡県熱海で 12m、房総半島の相浜で 9.3m であった。

- ・ **被害概要**：大正 12 年 (1223) 9 月 1 日午前 11 時 58 分の相模湾下で発生した**関東大地震 (M7.9)**による被害概要は以下の通り。地震動は神奈川県と千葉県南部が激烈であり、津波による被害も多発したが、東京・横浜では地震による火災が加わって最大の被害を生んだ。この震災の被害は、死者・行方不明者は約 10 万 5 千（うち、9 万 2 千人が火災による）、負傷者約 10 万、全壊家屋・半壊家屋とも各約 13 万戸、焼失家屋約 4 万 5 千戸、流出家屋約 8 百戸で、罹災者数は 340 万人、被害総額は数十億円、当時の国家予算の 1 年 4 カ月分に達すると言われている（注：文献によって差異あり）。

神奈川県や千葉県南部では強い地震動により、家屋の倒壊、山崩れ・崖崩れ（丹沢・箱根など）などが生じたほか、沿岸部に**津波**や河川（根府川など）では**土石流（山津波）**が襲い、日本史上、最も大きな被害が発生した地震となった。

当時の東京市の殆どの震度は 5 程度であったが、旧沼地や下町など軟弱地盤の地域では震度 6 以上の強い揺れであり、死者・行方不明者の大半は下町に集中した（図 9・10・11：図 3 と比較せよ）。

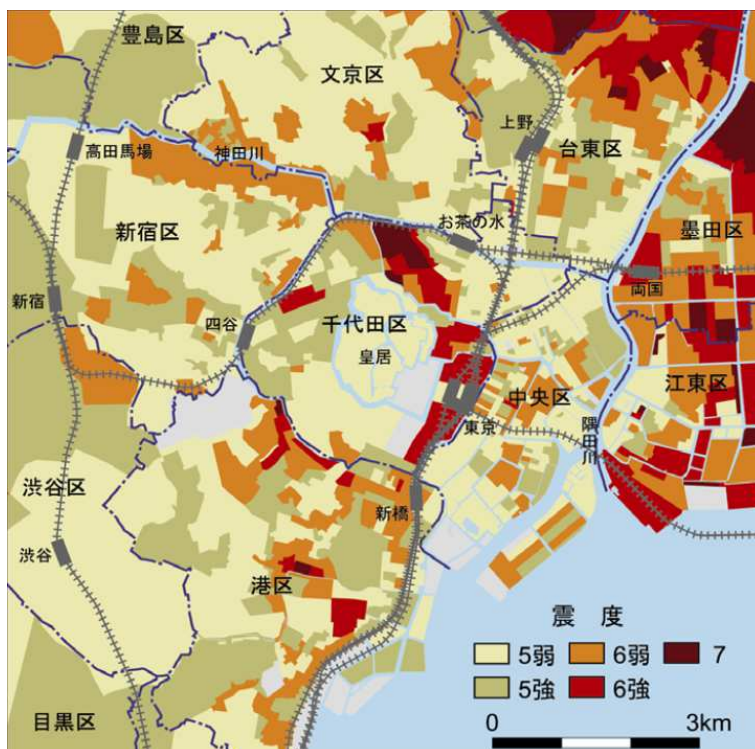


図 9 関東地震による東京市の震度分布（中央防災会議、災害教訓の継承に関する専門調査会報告書、1923 関東大震災）

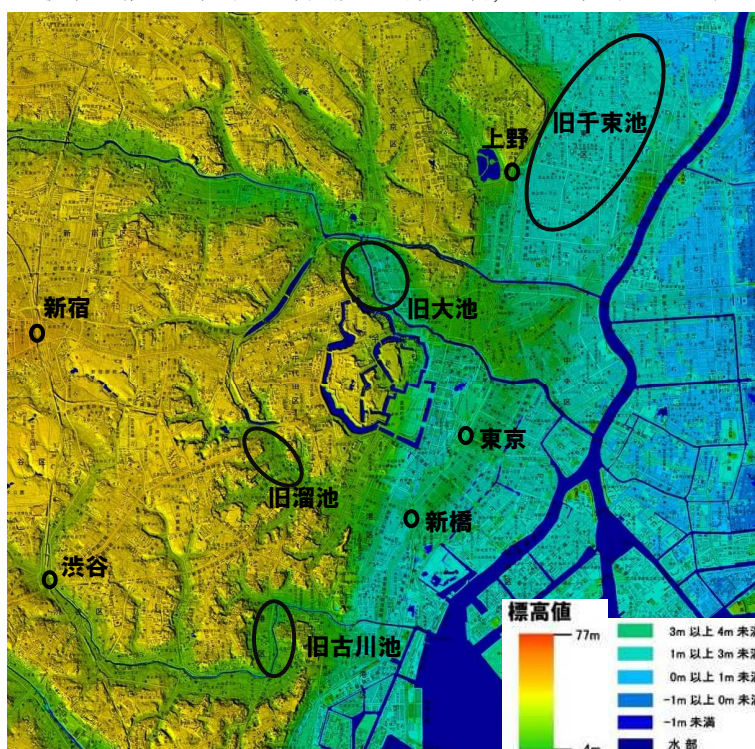


図 10 標高地形図「東京都区部」、国土交通省・国土地理院 (<http://www.gsi.go.jp/kanto/kanto41001.html>)、図中の旧沼地は「関東地質調査業協会、東京の地名と地形」より

東京府の死者数の約7万のうち、圧死者は約4千（約5%）、焼死者は約5万6千名（約80%）、溺死者は約1万名（約15%；隅田川や池への飛び込みなどによる）であり、大半は火災関連で死亡した。地震の発生（9月1日11時58分）が昼食の時間帯と重なったことから火災が各所発生したが、特に建築の被害の大きかった下町では消火活動が困難となった。人々は家財や衣類を大八車などに積んで広場に避難したが、**図10**に示すように地震発生から約4時間後に大火災となる逃げ場を失い、大勢が亡くなった。特に墨田区本所の被服廠跡（現横綱町公園）では約4万人が焼死した。

・ **社会不安**：当時はラジオも無く、人々は「大地震が再び来る」、「朝鮮人が放火した・井戸に毒を入れた」、などのデマが流された。新聞もデマを煽り、恐慌状態の中、自警団が組織され、多くの朝鮮人や社会主義者等が虐殺された。

・ **経済・社会的影響**：震災時は**第一次世界大戦**（1914～1918年）後による好景気に引き続いた**戦後恐慌**の真っ只中であつた。震災は東京や横浜など日本の政治・経済の中心地を襲ったため、日本経済は大打撃を被り、社会的・経済的不安はいっそう増大した。震災によって決済不能になった手形（**震災手形**）が大量に生じ、日本銀行の特別融資で一時を凌いでいたが、1927年には当時の蔵相片岡直温の失言（渡辺銀行が危ない）により全国の銀行で取付け騒ぎが生じ、多くの中小銀行が倒産・休業する**金融恐慌**となった。この結果、財閥系銀行（三井・三菱・住友・安田・第一）に資本が集中することになった。さらに1929年にニューヨーク・ウォール街の株価の暴落により**世界恐慌**が発生し、日本でも都市部での大量の失業者と農村部の窮乏に拍車をかけた**昭和恐慌**となった。英仏など欧米列強は植民地とのブロック経済圏を確立することで恐慌を乗り切るが、日本などの「持たざる国」は軍国主義を強め、1931年**満州事変**、1933年**国際連盟脱退**、1937年**日中戦争**、1941年**太平洋戦争**へと暗い時代に突き進む。

・ **帝都復興計画と復興事業**：図11のように東京市の焼失区域は、下町を中心に全市域の約44%にあたる3,466haにも及んだ。政府は復興計画の審議機関「**帝都復興審議会**」、執行機関「**帝都復興院（のちに内務省復興局）**」に発足させ、審議会の議長には**山本権兵衛**首相が、復興院の総裁には内務大臣を兼任する**後藤新平**が就任し、東京、横浜一帯の復興事業推進の責任を負うことになった。後藤新平を中心に**帝都復興計画**（図12）が策定され、焼失区域だけでなく、焼失を免れた山の手や郡部まで及ぶ大規模な区画整理と公園・幹線道路の整備を目論んだ。しかしながら予算が一般会計国家予算の数倍（30億～80億円）という巨額の予算のために各界から猛反対に会い、計画は焼失地域に限定し、総額も4億6844万円にまで縮小せざるを得なくなった。事業の主なもの、下町一帯の**土地地区画整理**、**ライフライン**など都市施設の近代化、RC建築による**不燃化**、52の**幹線道路**（昭和通り、日比谷通り、晴海通り、靖国通りや1～8号の環状道路）の整備、三大公園（隅田・錦糸・浜町）と五十二小公園による**公園整備**、永代・清洲・駒形・言問・両国などの隅田川の**新架橋建設**などで、都心と下町地域が近代化された。また住宅対策として義援金をもとに1924年に**同潤会**が設立され、不燃建築であるRC造のアパートが建設された。

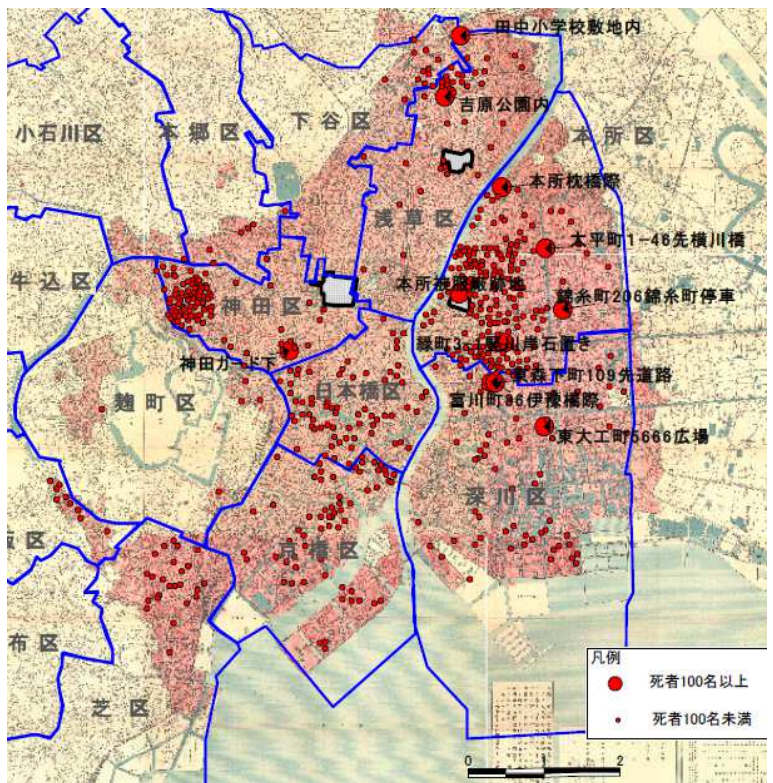


図11 関東地震による東京市の延焼地域と死者分布（中央防災会議、災害教訓の継承に関する専門調査会報告書）

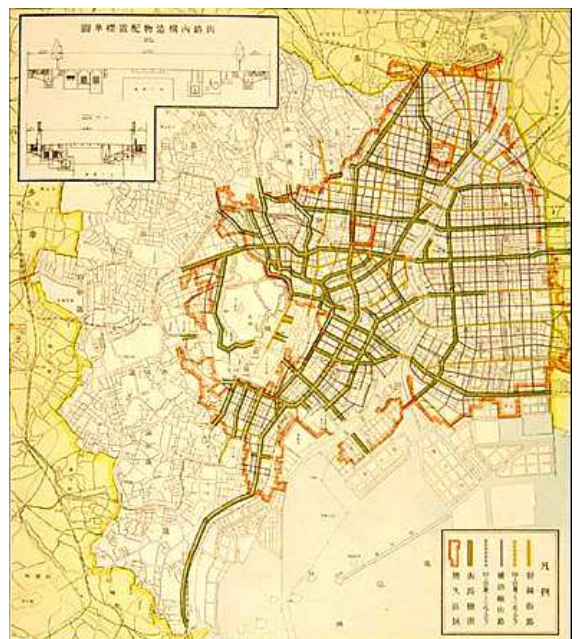


図12 帝都復興計画 (<http://www.mid-tokyo.com/>)

・**構造物被害と市街地建築物法の改正**：震災による東京市での大破以上の建物数は約 3 万 6 千棟であったが、その大多数は木造であり、なかでも下町など軟弱地盤での被害が顕著であった。当時は耐震設計を行っていなかったが、RC（鉄筋コンクリート）造や S（鉄骨）造の被害は比較的軽微であったのに対し、西洋建築の象徴であった石造やレンガ造は壊滅的な被害を受け、以降、姿を消すことになった。これらの結果を受け、東京帝国大学教授の**佐野利器**を中心として**市街地建築物法**（1920 年制定）は **1924 年に改正**された。主な内容は**設計震度 0.1 以上**（東京下町の震度を 0.3、安全率を 3 程度として設定。さらに内藤多仲の設計による震度 1/15 で設計した RC 造建物が無被害であったことなども考慮）の導入、建物の **100 尺（31m）の高さ制限**、木造家屋の**筋違・方づえの設置義務化**、などである。耐震建物の要点は、建物は低層とし、壁や筋違いを多用してがっちり**剛構造**に作るべし、というものであった。

・**剛柔論争**：佐野利器やその後を継いで東京帝国大学教授となった**武藤清**による**震度法**と**剛構造**による耐震設計法は、海軍省建築局長であった**真島健三郎**によって批判された。真島の主張は、耐震設計は本来、振動論を用いた動的設計を行うべきであり、その場合、伝統建築である**五重塔**などに代表されるように建物を**柔構造**として固有周期を 2～3 秒に延ばせば、地震との共振が避けられ、より耐震的になるというものである。一方、佐野や武藤は関東地震で観測した地震波には**長周期成分**も含むため（図 1 3）、いくら固有周期を延ばしても共振は避けられない、と反論した。論争は建築雑誌や新聞紙上などで昭和初期まで続き、**剛柔論争**と呼ばれる。その後、1930 年代に米国で**強震計（加速度計）**が開発され、**G.W. Housner**などにより地震波の**地震応答スペクトル**の研究（1959 年）が行われ、一般に地震動は長周期になるほど建物への入力小さくなるということが明らかになって来た。その結果、**武藤清**を中心にコンピュータと振動論による**柔構造**の研究が進み、1963 年に建築基準法の **100 尺の高さ制限**の撤廃され、**超高層建築**（1968 年竣工の**霞ヶ関ビル**）や**免震建築**（1983 年竣工の**八千代台ユニチカ式免震住宅**）などの柔構造の建設が可能になった。一方で近年では震源断層の近傍や堆積盆地において数多くの**長周期地震動**が観測され、石油タンクなどの長周期構造物に被害を生じており、単に周期を延ばすだけの柔構造の耐震性には問題がある、として新たな議論になっている。

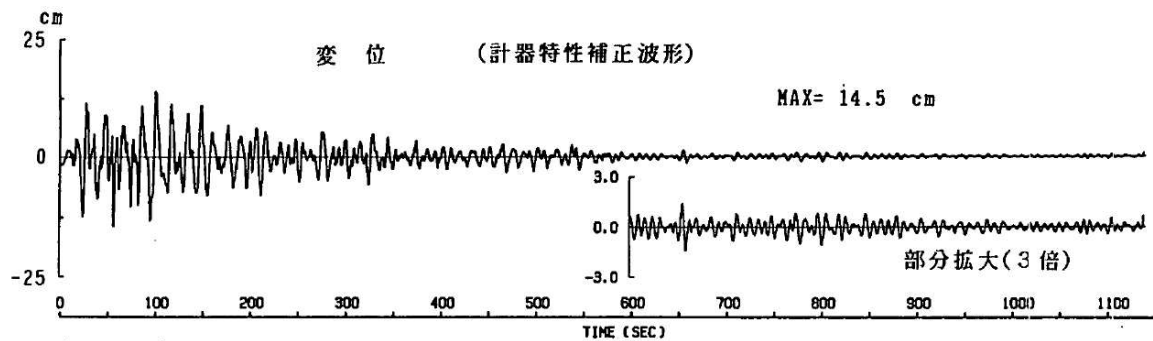
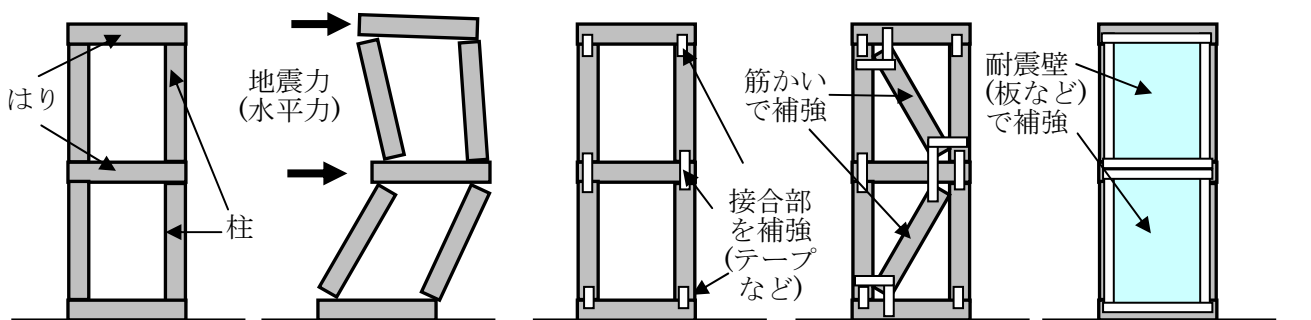


図 1 3 関東地震の際、東京市本郷において今村式 2 倍変位計で観測された地震記録（横田治彦ほか、1989）

・**地域と地震防災対策**：関東大震災を契機に耐震対策に加え、耐火建築の推進や広域避難場所の整備など火災対策も重要視された。9 月 1 日は防災の日指定され、地域防災訓練なども活発に行なわれている。但し、火災対策を重要視するあまり、防災訓練＝避難場所での初期消火・避難訓練であるという誤解も生じるようになった。実際、1995 年阪神・淡路大震災では地域住民が避難場所に避難してしまい、地域内で助けを求めている住民を助けられなかったケースもあると報告されている。



(a) 積木建物と地震力による崩壊 (b) 補強例 1 (接合部補強) (c) 例 2 (筋かい補強) (d) 例 3 (耐震壁補強)

図 1 4 積木の建物と耐震補強例のイメージ

○地震工学・耐震工学の基礎 1

・**建物に作用する地震力と耐震設計の基礎**：建物には常時 1 g (0.98 m/s^2) の重力加速度が作用しており、上から下向きに作用する加速度や荷重には強い。一方、地震動の主要動（S 波）は水平方向に揺れ、建物には

水平方向に大きな加速度と力（慣性力）が作用する。従って、耐震設計の基本は水平力に強い建物をつくることにある。例えば、積木の建物はかなり高く積上げることができるが、水平に押すと簡単に壊れてしまう（図14）。水平力に強くするためには、接合部の補強や筋かい・耐震壁による補強（同図(b)-(c)）が効果的である。但し、柱やはりの部材が非常に丈夫であることが前提である（木材や鉄骨部材など）。

・ **なぜ自重のみ考慮した建物（組石造など）は地震で危険か：** 図15に示すように、レンガ・石造・日干し煉瓦（アドベ）などの組石造は原則として自重のみに耐えるよう造られている。従って地震のような何度も繰り返し作用する水平力を受けると一たまりもなく崩れてしまう。特に屋根も組石造の場合、重い落下物で多くの死傷者を生じる。また RC 造（鉄筋コンクリート）でも自重のみ考慮し、細長い断面の柱を使用した場合、水平力で簡単に倒壊してしまう。



(a) アドベの地震被害(イラン・バム市) (b) レンガ造建物の被害(同バム市) (c) 石積建物の被害(インド・ブジ)



(d) 一階の柱が細長い断面の高層マンション（インド・アーメダバード）

図15 自重のみ考慮した建物の地震被害例

参考文献・資料

地震調査研究推進本部地震調査委員会：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価，2004

http://www.jishin.go.jp/main/chousa/04aug_sagami/

中央防災会議 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書

<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/kyoukun/index.html>

・ 1854 安政東海地震・安政南海地震（平成 17 年 3 月） ・ 1855 安政江戸地震（平成 16 年 3 月）

・ 1891 濃尾地震（平成 18 年 3 月） ・ 1896 明治三陸地震津波（平成 17 年 3 月）

・ 1923 関東大震災（平成 18 年 7 月）ほか、多数の災害報告書がある。

国立博物館地震資料室 地震計資料・関東地震・濃尾地震ほか

<http://research.kahaku.go.jp/rikou/namazu/index.html>

日本の地震活動 <http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm>

The Great 1906 San Francisco Earthquake, USGA, <http://quake.wr.usgs.gov/info/1906/index.html>

The San Andreas Fault, USGS, <http://pubs.usgs.gov/gip/earthq3/contents.html>

The 1906 San Francisco Earthquake and Fire, The Bancroft library

<http://bancroft.berkeley.edu/collections/earthquakeandfire/index2.html>

MID-TOKYO MAPS、関東大震災とその後、<http://www.mid-tokyo.com/>

大橋雄二、日本建築構造基準変遷史、日本建築センター、1993 年

国土交通省・国土地理院 デジタル地形図ってこんなにうれしい！ 東京都区部編 <http://www.gsi.go.jp/kanto/kanto41001.html>

東京都地質調査業協会、技術ノート、東京の地名と地形 <http://www.tokyo-geo.or.jp/>