

過去の災禍を振り返り今後について考える ～「知彼知己者、百戦不殆」で「転禍為福」～

福和伸夫（名古屋大学減災連携研究センター）

1. はじめに

残り3か月で東日本大震災から10年を迎える。震災当日、筆者は東京・青山にある高層ビルの15階で、日本建築センター主催の新・技術セミナー「耐震安全性を視(み)える化しよう！」の講師をしていた。長周期地震動の問題や高層ビルへの減衰付与の重要性を講義していたときに徐々に揺れが始まり、低減衰長周期構造物の共振増幅を経験することになった。実は、震災前の1週間には、大震災での課題を予感させる集会が日々行われていた。

3月4日には建築学会で「長周期地震動対策に関する公開研究集会」を行い、高層建築物の長周期地震動問題について記者発表も行い、長周期地震動への懸念も表明していた。

3月7日には振動運営委員会主催シンポジウム「阪神・淡路大震災を振り返り、来たる大地震に備える-建築振動研究に課せられたもの」があった。筆者は主査として主旨説明し、「建築設計に用いる地震力をより適正なものにするためには、表層地盤の増幅、地盤から建物への入力、建物の応答性状などの理解をより一層高める必要がある。表層地盤の物性評価、非線形性や不整形性、基礎と地盤間の地盤のゆるみや接触非線形、地下逸散減衰効果や、建物応答増幅・立体振動効果などの現象の理解を深め挙動の予測技術を向上させると共に、より性能の高い免震・制震技術や構造同定技術の開発などを進めていく必要がある。」と述べた。

さらに、震災前日の3月10日には、防災科学技術研究所主催の統合化地下構造データベースの構築に関する研究報告会が行われ、パネルディスカッション「地下構造情報のさらなる利活用に向けて」で、地盤データの蓄積・公表の必要性を議論していた。

当時、筆者は、東海地震と東南海・南海地震に分かれていた地震対策を、3地震連動を前提とした対策に見直すため、名古屋大学に減災連携研究センターを設立したところだった。東日本大震災での被災状況は、まさに南海トラフ地震で想定していたことそのものだった。震災直後は、東日本大震災の教訓の整理や大阪府咲洲庁舎の共振対応に携わったが、以後の十年間は、南海トラフ地震の被害軽減のための活動にほぼ専念してきた。

こういった活動の中で、着眼大局着手小局の大切さを強く感じるようになった。そこで、このように考えるに至った経緯を簡単に振り返っておく。その上で、過去の災禍が社会に与えた影響について述べる。そして、現状の社会を点検したうえで、災害被害軽減のために必要なことを整理してみる。最後に、建築振動の立場で何が貢献できるか考えてみる。

2. 波動論から総合防災へ

筆者は、社会人生活40年になる。10年ごとに節目があり、今は災害被害軽減のため幅広に取り組んでいる。学生時代は、微分幾何学・固体力学や複素関数論・弾性波動論を学び、シェルの波動伝播や弾性体のグリーン関数など基礎的な研究に携わり、その後、社会人となった。

(1) 1980年代

10年間勤務した清水建設では、入社早々TQCを叩き込まれ、企業の合理的な考え方に触れ

た。多くの先輩・同僚に恵まれ、原子力発電施設の耐震安全性確保のため、境界要素法や有限要素法を学び、動的相互作用や地盤震動の課題に取り組みつつ、多くの動解プログラムを開発した。免震構造の原発への導入検討にも早い段階で関わった。建設業冬の時代には、拡建築のため大型宇宙構造物や微振動対策にも携わった。

(2)1990 年代

大学に異動すると、大学院重点化や、研究環境改善、新たな研究分野の開拓を指示された。また、構内に建設される高速道路・地下鉄の振動対策を委ねられた。会社を退職したことで解析ツールを失ったため、振動観測・実験に取り組み、学内の中低層 RC 建物の微動計測、交通・工事振動、3 階建鉄骨住宅の振動対策などや、地盤 DB、防災 GIS の開発を始めた。

そんな中、阪神・淡路大震災が起き甚大な被害が発生した。被災地に立ち、耐震研究は成熟したと勘違いしていた自身を恥じた。震災後、既存不適格建物の耐震化促進、直下地震に対する被害想定、免震建築の評定と長周期地震動対応、地震警報システムの環境振動活用などに翻弄された。そんな中、1997 年に先端技術共同研究センターに異動し、大学外との共同研究の推進役になった。社会との協働の枠組み作り、地盤の微動観測、地盤データ、地震観測データ、建物データの収集などを行った。そのために、名古屋地域強震観測研究会や愛知県設計用入力地震動研究協議会などを設立した。合わせて、学生の理解力増進と社会還元のため、振動教材「ぶるる」や、簡易地震計を用いた災害情報システム「安震君」の開発を始めた。また、地震調査研究推進本部が推進する堆積平野地下構造調査などにも加わった。限界耐力計算法の導入前の時期でもあり、地震荷重の考え方に問題を感じ始めるようにもなった。

(3)2000 年代

2001 年に、地球環境問題や大規模自然災害などに対処するため、名古屋大学に文理連携の環境学研究科を設立した。建築学教室は工学研究科から新研究科に移動し、地球科学、土木工学、社会科学の研究者と連携して、持続性学と安全安心学の創成に取り組むことになった。筆者も新研究科に異動し、安全安心学プロジェクトをとりまとめることになった。

時期を同じくして、東海地震の震源域が見直され、名古屋市が地震防災対策強化地域に組み込まれた。東海地震対策が急務となり、合わせて東南海・南海地震対策も始まった。その後、中央防災会議の専門調査会や自治体の被害予測調査に深く関わるようになった。また、社会への正しい防災情報の発信のため、マスメディアと研究者との懇話会（NSL）も始めた。

地球科学研究者との交流機会が急増したため、この時期、地学の基礎を大いに学んだ。この中で、地震学の著しい進化に驚く一方、予測の限界も目の当たりにし、佐野利器の語った「然しながら、諸君、建築技術は地震現象の説明学ではない。現象理法が明でも不明でも、之に対抗するの実技である。建築界は百年、河の清きを待つ余裕を有しない」の気分になった。

被害予測を進める中、土地利用の見直しと耐震化の重要性を再認識し、様々な「ぶるる」や安価な地震計、長周期振動台などの開発、地名や名所図会を用いたハザードの説明力向上などに力を入れた。その過程で、政府が推進する災害被害軽減のための国民運動にも深く関わるようにな



写真 1 中央防災会議での耐震実験

った。これ以降、休日は出前講座のため各地に出向くようになった。メディアと協力して特集記事や特集番組を沢山作るようになり、研究成果の社会還元の大切さを学んだ。文部科学省の防災研究成果普及事業にも取り組み、科学技術振興機構のプログラムオフィサーとして科学技術行政の一端も担うようになった。

また、耐震化促進のため、愛知県、名古屋市、名工大、豊橋技科大、建設業界と、愛知建築地震災害軽減システム研究協議会（減災協議会）を設立した。合わせて、官庁が集中する愛知県・三の丸地区での免震改修のため、東海・東南海地震を想定した三の丸地震動の策定を行った。その後、帝冠様式の県庁・市役所本庁舎を含め、6つの官庁建物が免震改修された。そして、名古屋大学内には、学内外の災害対策推進のため、災害対策室を新たに設置した。

（4）2010 年代

東海地震対策の見直しから 10 年経った 2010 年ごろから、東海地震と東南海・南海地震の連動を考えた対策が議論されるようになった。このため、学内外と相談し、2010 年 12 月に名古屋大学に減災連携研究センターを設立した。東日本大震災が発生したのはその直後である。震災後、想定外を避けるため、最大クラスの南海トラフ地震対策が本格化した。甚大な被害を前にして、社会のあらゆる力を結集が必要と考え、様々な連携の場作りに注力すると共に、減災館を建設して、減災のための研究、教育・啓発、災害対応の拠点作りに奔走した。

とくに市町村や都道府県を超えた広域連携、産官学民連携、業界間連携など、顔が見える関係作りに腐心した。2012 年には産業界から 3 つの寄付部門を招き、2014 年には連携の拠点として、減災館を開設し、地震や防災に関わる展示スペースを常設し、市民に一般公開した。開館後 6 年で、約 9 万人の来館者を迎えることができた。減災館は、免震層にジャッキを常備すると共に、屋上免震実験室をアクチュエータで共振加振できるので、建物ごと揺らすことができる。この環境を活用して、オイルダンパーのデータ不正問題にも取り組んだ。

また、本音の会や、西三河防災減災連携研究会を主宰することで、産業や社会の課題を抽出し、問題点をまとめて経済団体から国に提言すると共に、産業構造の災害病巣の早期検知と治癒、地域社会の耐性の向上を図っている。2017 年には、産官学が協働してあいち・なごや強靱化共創センターを、2020 年には中部防災推進ネットワークなどを設立した。

近年は、地震の直前予知が困難との見解を踏まえ、南海トラフ地震臨時情報の制度設計や臨時情報発表時の社会の混乱防止、長周期地震動に対応した緊急地震速報の運用などについて検討している。また、中部地域における広域防災拠点の立案や、事前復興のためのスーパーシティ構想、官庁街のリニューアル、大規模災害時の住の確保、病院船の建造、社会インフラ整備のためのリスクファイナンスなどを検討している。新型コロナウイルスの流行以降は、地震以外の災害への無知を反省し、日本史・世界史や様々な災害・感染症の歴史を勉強中である。

中部で活動を始めて 30 年が経つが、地域の安全を担うには、様々な災害の素因・誘因を学び、多様な人たちと協力して対策の実践に結びつける必要があると感じる。そのため、新たな課題に直面する度に、研究対象を広げ、社会実装に重点が移ってきた。結果として、原点であった建築振動研究に費やす時間が減ったことは反省すべき点である。



写真 2 減災館の外観

3. 災禍と歴史

災害は常に新たな課題を突き付ける。僅かな人生の経験のみに依拠していると、再び「想定外」と語りかねず、歴史に学ぶ必要性を感じる。昨年の台風 15 号・19 号の検証や、感染症への対応をする中、災害の歴史を学ぶことの大切さに気づかされた。そこで、日本と世界の歴史的出来事と様々な災禍の歴史を横断的に見た年表を作ってみた。表 1 に、日本と世界の歴史、地震の歴史、火山、風水害、疫病、飢饉、大火の歴史を一覧する。

表から、様々な災禍と人類の文明との関わりに気づく。14 世紀半ばのペストの流行とルネサンス、16 世紀の中南米での天然痘の流行とアステカ文明・インカ文明の滅亡、1665 年のロンドンでのペストの流行や翌年の大火とニュートンの三大発明、18 世紀のリスボン地震やラキ火山噴火とイギリス産業革命、フランス革命、アメリカ独立宣言などである。

日本でも 8 世紀半ばの地震の続発と疫病による仏教への帰依と天平文化、9 世紀半ばの疫病、地震・火山の続発と国風文化、19 世紀半ばの黒船来航、地震続発、台風、安政コレラと大政奉還、20 世紀初頭のスペイン風邪、関東地震と太平洋戦争開戦などがある。また、南海トラフ地震前後の地震の活動期は、歴史の転換期とも重なる。これを改元理由から調べてみた。

日本は西暦 645 年の大化以降、南北朝に分かれた時期も含めて、248 の元号を持っている。そこで、明治政府が編纂した古事類苑に記された改元理由を整理してみた。明治以降は、代始改元だけが行われているが、江戸以前には、祥瑞改元、災異改元、革年改元もあった。災異改元は凶事の影響を断ち切るための改元であり。改元の約半分は災異改元である。災異改元に関わる災禍には、地震、干ばつ、風水害、飢饉、大火、疫病、兵乱などがある。年代別に見た災禍の種類の変遷を図 1 に示す。改元には複数の災禍が原因するため、災禍の合計数は災異改元数よりも多い。

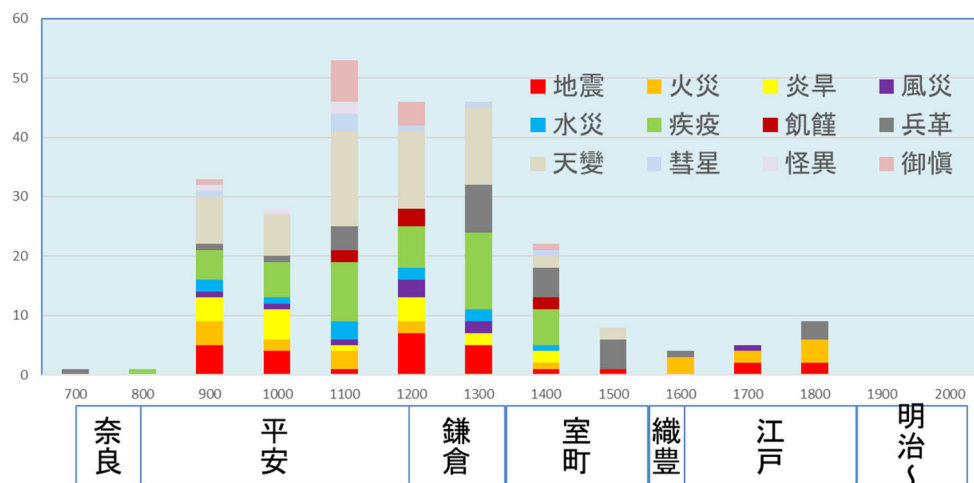


図 1 災異改元の原因となった災禍

図を見ると、900 年～1400 年代は疫病が多い。気候変動によって干ばつや冷害、風水害が発生し、それによって農作物が凶作になって飢饉が起き、その結果、疫病が発生し、社会が混乱して兵乱が生じるといった関係が見て取れる。戦乱による改元が多い時期は、応仁の乱から戦国時代に重なる。これに対し、平和になった江戸時代には、家屋密集による大火による改元が多い。

地震による改元も多くある。例えば、南海トラフ地震では 1096 年永長東海地震、1099 年康和南海地震、1361 年正平・康安地震、1854 年安政東海・南海地震、関東地震では 1293 年永仁関東地震、1703 年元禄地震、内陸直下の地震では 1596 年慶長伏見地震の後に改元している。

切迫する巨大地震を前に新型コロナ禍と対峙する現在は、大きな時代の転換期でもある。地球温暖化により、風水害も激甚化している。自然災害との付き合い方を考えなおす時である。

表1 日本と世界の歴史、地震の歴史、その他災害の歴史

出来事	地震災害	その他の災禍
前 500 年頃 仏教成立、ペルシア戦争 前 221 年 秦、中国を統一 25 年 後漢滅亡(魏・呉・蜀) 220 年 魏の成立 375 年 ゲルマン大移動 538 年 仏教の伝来 604 年 十七條憲法を制定 618 年 唐の成立 684 年 藤原京に遷都 708 年 和同開帳 729 年 長屋王の乱 743 年 聖武天皇私財法制定 750 年 アッバース朝成立 800 年 カール大帝の戴冠 843 年 フランク王國分裂、仏独併のもと 870 年 菅原道真が左大臣に合格 875 年 サムーン朝成立 894 年 遣唐使の廃止 960 年 宋(北宋)成立 1086 年 白河上皇、院政を開始 1159 年 平治の乱、平清盛 1208 年 テンギスハン即位 1232 年 靖康城敗北 1334 年 建武の新政 1368 年 明の成立 1455 年 享徳の乱 1489 年 加賀の一方向一揆 1493 年 明初の政変 1521 年 スペインがフィリピンを征服 1560 年 朝鮮の戦い 1588 年 スペイン無敵艦隊敗退 1597 年 慶長の役 1603 年 徳川家康、江戸幕府 1614 年 大坂冬の陣 1620 年 メイフラワー号 1637 年 島原の乱 1680 年 ギャリステ王政復古	前 334 年 アレクサンドロス大王東方遠征 前 27 年 アウグストゥス、ローマ帝国 ローマの五賢帝時代 239 年 郭馬台国・卑弥呼、魏に使者 416 年 8 月 23 日 尤恭地震、大和国 599 年 5 月 28 日 推古地震、大和国 679 年初頭 筑紫地震 684 年 11 月 29 日 白鳳地震 701 年 5 月 12 日 大室地震、丹波 715 年 7 月 4 日 越前地震、三河国・遠江国 734 年 5 月 18 日 畿内七道地震、生駒断層 745 年 6 月 5 日 天平地震、養老断層 818 年 8 月 2 日 弘仁地震、上野国・武蔵国 800 年 11 月 27 日 文治地震(元暦大地震) 868 年 8 月 3 日 福原地震、山崎断層 869 年 7 月 13 日 鳥羽地震、御雲会一紙御祭 878 年 11 月 1 日 桓仁・武蔵地震 886 年 8 月 26 日 仁和地震、976 年 7 月 22 日 山城・近江の地震 1027 年 6 月 16 日 万寿地震、石見国で津波 1096 年 12 月 17 日 永長東海地震、1099 年 2 月 22 日 康和南海地震 1185 年 8 月 13 日 文治地震(元暦大地震) 1257 年 10 月 9 日 正嘉康平地震 1293 年 5 月 27 日 永仁関東地震、国府津一松田断層 1361 年 5 月 3 日 正平・康安地震 1408 年 1 月 21 日 応永地震、1433 年 11 月 6 日 永享相模の地震 1454 年 12 月 21 日 享徳地震、東北沖 1495 年 9 月 12 日 明応康平の地震、大仏殿が破壊? 1498 年 9 月 20 日 明応地震 1520 年 4 月 14 日 永正地震 1569 年 1 月 1 日 永禄地震、養老断層、阿寺断層 1596 年 9 月 18 日 慶長伊予地震、4 日 慶長豊後地震、9 月 5 日 慶長伏見地震 1605 年 2 月 3 日 慶長地震 1611 年 9 月 27 日 会津地震、12 月 2 日 慶長三陸地震 1614 年 11 月 27 日 高田地震 1633 年 3 月 1 日 寛永小田原地震 1648 年 6 月 13 日 慶安相模の地震、1649 年 7 月 30 日 慶安武蔵の地震 1662 年 6 月 16 日 寛文近江・若狭地震 1666 年 2 月 1 日 越後高田地震、1665 年 ニュートン・万有引力 1677 年 11 月 4 日 延宝房総沖地震 1683 年 10 月 20 日 日光地震 1700 年 1 月 26 日 アメリカ・カスケード地震 1703 年 12 月 31 日 元禄地震、同日、豊後地震 1707 年 10 月 28 日 宝永地震 1718 年 8 月 22 日 遠山地震 1751 年 5 月 21 日 高田地震 1755 年 11 月 1 日 ポルトガル・リスボン地震 1771 年 4 月 24 日 八景山地震 1782 年 8 月 23 日 天明小田原地震 1793 年 2 月 17 日 寛政地震宮城県沖 1804 年 7 月 10 日 文政近江地震 1819 年 8 月 2 日 文政三陸地震 1828 年 12 月 18 日 三宅地震 1847 年 5 月 8 日 清光寺地震 1853 年 3 月 11 日 小田原地震(嘉永小田原地震) 1854 年 9 月 9 日 安政上野地震 1855 年 11 月 1 日 安政江戸地震 1858 年 4 月 9 日 飛越地震 1872 年 3 月 14 日 1875 年 東京気象台設置 1889 年 7 月 28 日 原本地震 1891 年 10 月 28 日 海蔵地震 1894 年 3 月 22 日 横濱半島地震 1896 年 6 月 15 日 明治三陸地震 1905 年 6 月 2 日 雲手地震 1906 年 4 月 18 日 サンフランシスコ地震、大火 1909 年 8 月 14 日 畑川地震 1914 年 3 月 15 日 仙北地震、秋田 1918 年 11 月 11 日 大町地震 1923 年 9 月 1 日 関東地震 1925 年 5 月 23 日 北信馬地震 1927 年 3 月 7 日 北丹後地震 1930 年 11 月 26 日 北伊豆地震 1933 年 3 月 3 日 昭和三陸地震 1943 年 9 月 10 日 東海地震 1944 年 12 月 7 日 東南海地震 1945 年 1 月 13 日 三河地震 1946 年 12 月 21 日 南海地震 1948 年 6 月 28 日 福井地震 1952 年 3 月 4 日 十勝沖地震 1952 年 11 月 4 日 カムチャツカ地震 1957 年 3 月 9 日 アリューシャン地震 1960 年 5 月 2 日 デリ地震津波 1961 年 海洋学誌大説 1962 年 ブループリント 1964 年 3 月 28 日 アラスカ地震 1968 年 5 月 6 日 十勝沖地震 1974 年 5 月 16 日 伊豆半島沖地震 1975 年 2 月 4 日 海城地震、地震予知 1976 年 7 月 28 日 唐山地震 1978 年 1 月 14 日 伊豆大島近海地震 1983 年 5 月 26 日 日本海中部地震 1984 年 9 月 14 日 長野県西部地震 1985 年 9 月 19 日 メキシコ地震 1989 年 10 月 17 日 米、ロサンゼルス地震 1990 年 7 月 16 日 平成元地震 1993 年 1 月 15 日 釧路沖地震 1994 年 10 月 23 日 北海道東部地震 1995 年 1 月 17 日 兵庫県南部地震 1999 年 8 月 17 日 コジャリ地震 2000 年 10 月 6 日 鳥取県西部地震 2000 年 3 月 24 日 雲手地震 2003 年 9 月 26 日 十勝沖地震 2004 年 10 月 23 日 新潟中越地震 2005 年 3 月 20 日 福岡県西部地震 2007 年 3 月 25 日 能登半島地震 2008 年 5 月 12 日 四川大地震 2010 年 1 月 12 日 ハイチ地震 2011 年 2 月 27 日 NZ 地震 2011 年 3 月 11 日 東北地方太平洋沖地震 2018 年 6 月 18 日 大阪府北部地震 2019 年 6 月 18 日 山形県沖で地震	前 5300 年 鬼界カルデラ噴火 前 429 年 アテナイのペスト 64 年 7 月 19 日 ロマ大火 79 年 8 月 24 日 ヴェスヴィオ火山、ポンペイ全滅 165-180 年 アントニヌスの疫病(天然痘?) 542 年 ユスティニアヌスのペスト →飛鳥文化 735-37 年 天平の疫病(天然痘) 藤原 4 兄弟死去 764 年 桜島、3 つの島 →平安文化 800 年 4 月 11 日 富士山、延暦噴火 861 年 5 月 24 日 直方磐石が落下 863 年 都で疫病(痘症)、神泉苑において御霊會 864 年 7 月 2 日 富士山、貞観噴火、青木ヶ原 886 年 7 月 3 日 伊豆諸島噴火、安房国で降石と地震 915 年 十和田湖噴火 →国風文化 998 年 日本で初の麻疹の流行 1108 年 浅間山天元噴火 1177 年 安元の大火、1180 年 治承の辻風、1181 年 養和の飢饉 1230 年 奥喜の飢饉 1258 年 正嘉の飢饉 1347 年 10 月 ペストがシチリア島に上陸 1419 年 応永の飢饉 1448 年 文安の飢饉 1459~61 年 長祿・寛正の飢饉 コロンブス交換、梅毒を持ち込む 1512 年 日本で初の梅毒流行 1540 年 天文の飢饉 中雨来で天然痘などで人口激減 1540 年 天文の飢饉 北海道駒ヶ岳、1640-43 年 寛永の飢饉 1657 年 9 月 2 日 元禄の大火、名古屋 明暦の大火 1663 年 8 月 16 日 有珠山 1665 年 ロンドンでコレラ流行 1675 年 延宝の飢饉 1666 年 9 月 2 日 ロンドン大火 1683 年 1 月 25 日 英和の大火(お七の火事) →元禄文化 1703 年 12 月 16 日 富士山、享永噴火、 1708 年 享和の享永の大火 1732 年 ~ 享保の飢饉 1739 年 8 月 18 日 榊原山噴火 1741 年 8 月 27 日 鎌倉大火、寛保岳噴火、津波 1742 年 8 月 30 日 成の満水 1772 年 4 月 1 日 明和の大火、1788 年 3 月 7 日 京都天明の大火 1779 年 11 月 8 日 桜島、享永大噴火、1782 年 ~天明の飢饉 1783 年 6 月 8 日 云々火山、8 月 5 日 浅間山、天明大噴火 1786 年 明和の大噴火、1792 年 5 月 21 日 島原大反逆後述 ロシア戦役で発生するコレラ、1806 年 4 月 22 日 文化の大火 1817~80 年 コレラ、22 年文政、58 年安政コレラ 1828 年 9 月 17 日 シーボルト台風、子年の大風 1833-1839 年 天保の飢饉 1856 年 9 月 23 日 安政の台風 1858 年 安政コレラ 1862 年 麻疹が大流行 1863 年 大坂・新町焼け 1871 年 10 月 8 日 シカゴ大火 1888 年 7 月 15 日 磐梯山、山体崩壊 1910 年 8 月 明治 43 年の大水害、関東 1914 年 1 月 12 日 桜島、大正大噴火、科学不慮の碑 1917 年 9 月 30 日 大正 6 年高潮災害(東京湾台風) 1918-20 年 スペイン風邪 1926 年 5 月 十勝岳、融雪による火山泥流 1934 年 3 月 21 日 西園大火、9 月 21 日 室戸台風 1938 年 7 月 3 日 阪神大水害 1944 年 ~ 昭和和山 1945 年 9 月 17 日 秋田台風 1947 年 4 月 20 日 飯田大火 1947 年 9 月 15 日 カスリーン台風 1948 年 9 月 16 日 アイオン台風 1949 年 6 月 20 日 テラ台風、8 月 30 日 ケティ台風 1950 年 9 月 3 日 ジェーン台風 1951 年 10 月 14 日 ルース台風 1952 年 4 月 17 日 鳥取大火 1954 年 9 月 26 日 洞爺丸台風 1958 年 9 月 26 日 狩野川台風 1959 年 9 月 26 日 伊勢湾台風 1961 年 9 月 18 日 第 2 室戸台風 1962 年 12 月 ~63 年 2 月 三八豪雪、昭和 38 年 1 月豪雪 1967 年 7 月 昭和 42 年 7 月豪雨 1972 年 7 月 昭和 47 年 7 月豪雨 1976 年 9 月 昭和 51 年台風第 17 号、安八豪雨 1976 年 10 月 29 日 酒田大火 1979 年 7 月 11 日 日本坂田ネル火災事故 1980 年 5 月 18 日 セントメリス山、山体崩壊 1982 年 7 月 23 日 昭和 57 年 7 月豪雨、長崎大水害 1983 年 10 月 3 日 三宅島 1984 年 11 月 谷島ケブル火災 1985 年 日航御巣鷹大惨事事故 1986 年 10 月 11 日 阿蘇山全山火災避難 1991 年 6 月 3 日 雲仙普賢岳 1991 年 6 月 15 日 ビナトゥボ山、クラーク基地 1994 年 4 月 26 日 中華航空 140 便墜落事故 1997 年 ナホトカ号重油流出 1999 年 JCO 臨界事故 2000 年 菅田日比谷線殺傷衝突事故 2000 年 3 月 8 日 有珠山、事前避難 2000 年 9 月 11 日 東海豪雨、死者 10 人 2001 年 9 月 11 日 アメリカ同時多発テロ事件 2003 年 重症急性呼吸器症候群(SARS)流行 2005 年 8 月 ハリケーン・カトリナ 2009 年 新型インフルエンザ流行 2010 年 4 月 14 日 エイフヤトラヨロコ、航空機墜落 2011 年 1 月 ~ 新幹線、空害 2013 年 4 月 11 日 福島県浜通りで地震 2014 年 2 月 15 日 ロシアに磐石が落下 2014 年 9 月 27 日 御岳山、8 月 広島土砂災害、エボラ出血熱 2015 年 5 月 29 日 口永良部島、9 月 関東・東北豪雨 2016 年 12 月 22 日 糸魚川市大規模火災 2017 年 7 月 九州北部豪雨 2018 年 6 月 28 日 ~ 西日本豪雨、9 月 4 日 台風第 21 号 2019 年 9 月 9 日 房総半島台風、10 月 12 日 東日本台風 2020 年 新型コロナウイルス、熊本豪雨

4. 現代社会の災害病巣を俯瞰する

筆者が活動する東海地域は、我が国随一の産業中核拠点である。日本の経済は製造業の国際競争力に依存している。2018年の製造品出荷額は317兆円であり、都道府県別では、1位は愛知県の47兆円で圧倒しており、2位は神奈川県、15兆円以上は大阪府、静岡県、兵庫県の全5府県である。静岡・三重・岐阜の東海4県では80兆円に及ぶ。愛知県の中でも自動車産業が集中する西三河地区は26兆円と神奈川県をしのぐ。

土木学会は、一昨年、最大クラスの南海トラフ地震が発生すると、地震後20年間で1410兆円の経済被害を生じると発表した。西三河地域が大きく被災すればこれが現実となる。そこで、西三河地域の市町と産業界や大学が連携して西三河防災減災連携研究会を設立し、産業界と本音の会を始め、製造業の不具合を洗い出すことにした。

製造業の事業継続のための地震対策は途上にある。図2に示すように、工場の稼働には、建物・機械・技術者・情報システムの全てが必要だが、これらの地震対策が十分に行われている工場は稀である。個々の工場は、部品・素材などの仕入れ先や、製品の納品先が稼働し、物流が健全であることが操業の前提になる。また、工場を支えるのが、電気、ガス、情報通信、上下水、工業用水、燃料などのライフラインであり、従業員が出勤するには、公共交通機関、保育園・学校・福祉施設など、地域社会が健全である必要がある。

製造業の操業に不可欠な電気と工業用水と燃料は、図3のような相互依存関係にある。個々の直接被害が無くても、どれかが止まれば全てが止まる。火力発電所は燃料と工業用水がなければ発電できないし、石油精製には大量の工業用水と電気が必要で、工業用水の浄水・送水には電気と燃料が不可欠である。さらに、全ての基盤は、道路や港湾、インターネットを含む情報通信が担っている。このため、ボトルネック対策を進めると共に、全体の安全性向上が必要である。しかし、水や道路、港湾などには、様々な中央官庁や、都道府県、市町村、公益企業、民間企業など、数多くの組織が関わっており、情報連携不足のため、現状把握が困難になっている。とくに、水は、上水、下水、工業用水、農業用水で監督官庁が異なるため、全貌把握は難しい。

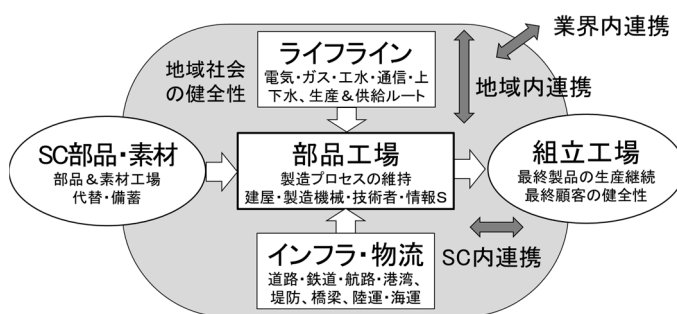


図2 製造業の事業継続のための基本構図

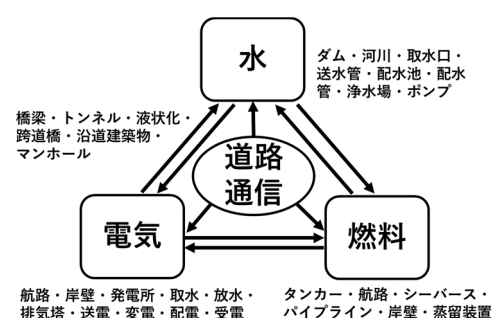


図3 水、電気、燃料の相互依存

自動車産業は、図4に示すように、巨大なサプライチェーンを構成しており、3万社の企業で製造された3万点の部品を組み立てている。中部経済連合会が実施した「企業の地震対策に関するアンケート」（2018年2月）によると、BCP（事業継続計画）等を作成済みの企業割合は、従業員規模が小さいほど低くなっており、従業員20名未満の小企業はわずか4%に留まっており、中小企業発のサプライチェーンの破綻が懸念される。また、部品や自動車の運

搬には、陸路の物流に加え港湾を含めた海路の物流の確保も必要となる。

このような現況を踏まえ、一昨年 6 月に、中部経済連合会が「地震災害から生産活動を守るための方策の提言」をまとめた。要約すると、機能不全波及の全体像が把握できていないため、集团的対策の必要性が認識されておらず、その結果、SC 対策が進んでいない。このため、個社の対策のみでは不十分なため大会社といえども設備対策が進んでおらず、とくに経営資源が不足する中小企業の対応が遅れている、という構図が明らかになった

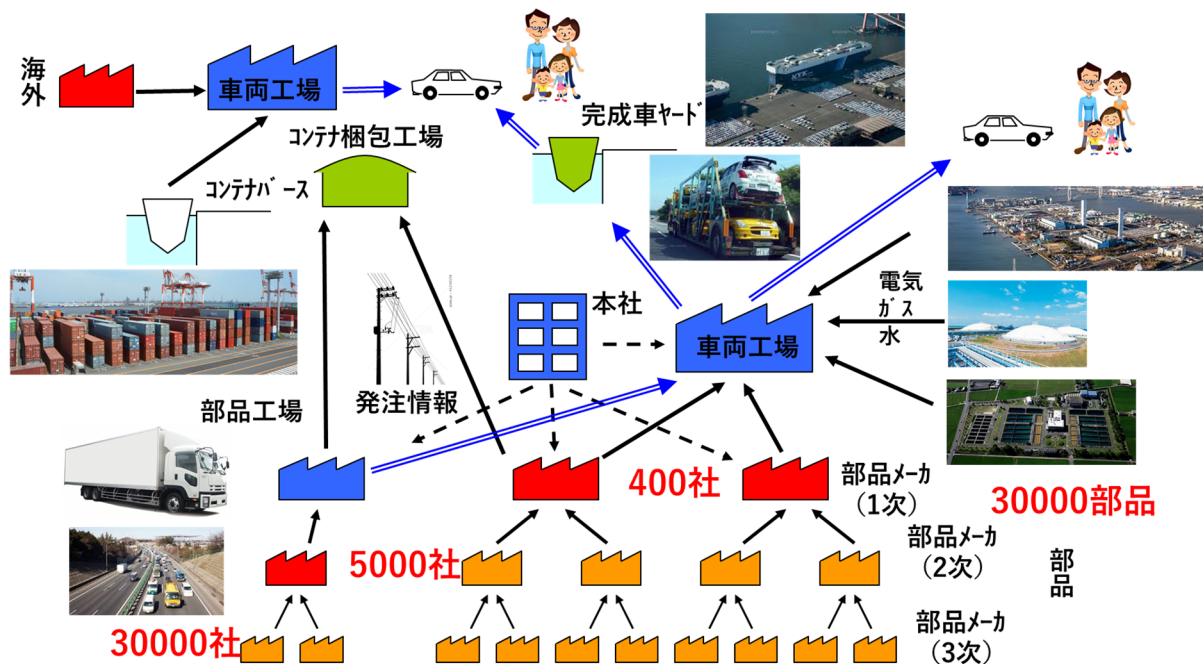


図4 自動車産業のサプライチェーン

現代社会も同様の状況にあり、首都の過密と地方の過疎の課題を抱えている。過密化した大都市では、都市が災害危険度の高い沿岸低地や丘陵地に拡大し、建物が高層化・密集化している。高速鉄道に頼った長距離通勤は帰宅困難問題を招き、ライフラインへの過度な依存は被害波及を拡大させる。建物の長大化は同時被災者を増加させ、家屋密集は火災危険度を増す。海拔 0m 地帯は浸水被害と、丘陵地の谷埋め盛り土は土砂災害と隣り合わせだ。

一方で過疎地では高齢化が進み限界集落化している。山が荒れ田畑の維持も難しく、土地の相続未登記の問題もある。地方創生により人口流出を食い止めなければならない。

公的債務が増大する中、堤防や道路・橋梁などの社会インフラ、電気・ガス・上下水道などのライフラインを全て維持することは困難であり、公助依存にも限界がある。公への依頼心が強い現状を見直し、債務の減少と、自助・共助力を育成しなければならない。

災害被害軽減の基本は、ハザード、暴露量、脆弱性を減らし、回復力を増すことにある。ハザード低減の基本は危険の回避にある。安全な場所に撤退する立地適正化が望まれる。まちを集約化し輪中堤の強化などでハザードを軽減する方法もある。インフラ・ライフライン維持のために、コンパクトシティなどの集約化は避けて通れない。合わせて、里山や田畑の維持のため、最新技術を活用したライフラインに頼らない自立住宅化も視野に入れたい。新型コロナウイルスを経験して、社会の価値観も変わりつつある。巨大地震の発生が心配される中、安寧な社会の実現のために、個々の建築物の耐震安全性のあるべき姿を考えていきたい。

5. 建築振動研究の課題

建築振動研究の今後を考えると、従来とは全く異なる研究テーマが見つかりそうである。コロナ禍の今だからこそ旧弊を脱し、新たな世界に踏み出すことができると思う。国民のほとんどは、耐震基準が最低基準であることを知らない。地盤の硬軟によるハザードの違いに応じて安全性を付与しているわけでもない。耐震基準で定められた荷重に対し安全性を確認しているものが殆どである。建築振動研究は、建築物の耐震安全性向上を目的としているが、研究成果が実設計で直接用いられることは多くない。ほとんどの建物が耐震基準に基づいて設計されているためである。実は、ベースシア係数を地動と勘違いしている構造設計者も多い。建物応答だと理解していても応答倍率は一律 2.5 倍だと思っている人もいる。震度 7 は 400 ガル以上だと誤解している人にも出会う。設計ルートによる耐震的実力の差に気づいている設計者も少ない。まず、建築振動研究者がすべきことは、建物と地盤との堅さの違いや、建物と地震動の周期の兼ね合いで建物応答が大きく変動することを周知することにある。本節では、様々な人と防災・減災活動をする中で感じてきた建築振動研究の課題について記す。

(1) 地震と強震動評価

阪神・淡路大震災以降、地震調査研究推進本部を中心に、活断層調査、堆積平野地下構造調査、地震観測網等の整備等が行われ、地震発生の長期評価や地震動予測地図が公表されてきた。気象庁からは、緊急地震速報や長周期地震動階級、南海トラフ地震臨時情報などが発表されるようになった。しかし、科学の限界も明らかになった。現象の説明は可能となったが、正確な地震発生予測や強震動予測には課題も多い。地震発生の階層性や連動の仕方、活断層による地震の規模と発生確率の関係、強震動生成域の位置・大きさや破壊過程の不確定さ、震源からの波動伝播経路と波動干渉など、多くの課題がある。現状の科学の実力に見合った形で、設計用入力地震動や地震荷重の評価幅を考えていく必要がある。また、震度計の高密度化により観測される最大震度が増加傾向にあることは余り知られていない。

(2) 地盤震動

地盤データの公開が進まない。公共財産だと思って民間データも公開してはどうだろうか。平野ごとに地盤データベースを作り、適切な表層地盤モデルを構築する必要がある。そもそも、大地震時に地盤が軟弱な方が強く揺れるかどうかも明確ではない。高層建物や免震建物などの設計では、深部地下構造モデルも必要となる。都市域の増幅度マップや周期マップは設計上も参考になる。また、3 次元的な地下構造を考えると、震源方位によって波動の干渉の仕方は異なる。厚く堆積した軟弱地盤では、深部・浅部の地盤を一緒に考えないと周期を見誤る。インピーダンス比が大きな地層モデルでは地層境界で過度に塑性化し波動が遮断される。液状化の考慮や地盤の履歴モデルで結果は大きく異なる。地盤の重要性を再認識したい。

(3) 動的相互作用

軟弱地盤上の大規模かつ剛な構造物は地盤の影響を強く受ける。振動現象の理解には、相互作用ばねや地下逸散減衰、入力損失効果を適切に考慮する必要がある。しかし、基礎形式は多様であり根入れの有無によってその効果は変動する。接地面の緩みや局所非線形、地盤との剥離や浮上りなどの影響もある。市街地では隣接建物との相互作用も無視できない。構造物を連続体置換すると、共振時の応答増幅は建物と地盤の波動インピーダンス比で表されるので、建物が重く堅いほど揺れにくい。一方、動的相互作用効果を設計に組み入れることは、耐震裕度を減じることにもなる。設計上の取り扱いについて、広範な議論が必要である。

(4)建物応答

地震応答解析に串団子モデルやSRモデルがよく使われるが、このモデルは、剛床仮定が成り立ち、捩れ応答が無視できる程度に偏心が小さいことが前提となる。床剛性や偏心を考慮する場合には立体振動を考慮する必要がある。モデル化に当たっては、重量、剛性、減衰の適切な評価が必要である。剛性評価では接合部の剛域に、減衰評価では振動数依存に配慮したい。とくに高次の減衰を過小評価する初期剛性比例型減衰の使用には注意を要する。また、適切な復元力モデルの採用や、2次部材の存在による振幅依存性などにも気を配りたい。

(5)地震観測

建物の地震観測耐性の整備が遅滞しており、データ公開も芳しくない。設計モデルの妥当性は地震観測データで検証するので、現状は芳しくない。地震観測は地震時の損傷評価にも役立つ。近年はMEMSを利用した安価な地震計も開発されており、IoT時代に相応しい高密度モニタリングシステムを構築し、建物の維持管理や環境振動対策、地震後の継続使用判断などに供したい。地震観測が困難であれば、微動計測や、振動実験などを積極的に進めたい。

(6)免震と制振

1980年代から開発が始まった免震・制振技術は大いに普及し、建築振動研究の果たした役割は大きい。しかし、近年、長周期長時間地震動や長周期パルス、免震装置のデータ改ざんなどの課題も現れた。新たな課題は技術革新のチャンスでもあり、ストップダンパーや、剛性や減衰が可変な装置、免震装置の現地試験法などの開発を進めたい。筆者らも減災館の振動実験環境を利用して種々模索している。不断的な努力で新たな技術を生み出したい。

(7)地震荷重

新耐震設計法が導入されて40年が経ち、矛盾も抱えている。中層ラーメン構造と低層壁式構造とでは設計で想定している地動強さに大きな差がある。例えば、①建物応答を表す標準せん断力係数 C_0 には地盤や建物の揺れやすさを考慮する、②固有周期 T には構造材料と建物高さに加え建物のアスペクト比や壁量を考慮する、③長周期の低減を表す R_t は G_s と同様に地盤卓越周期での増幅に改める、④ Z には地震動予測地図の成果を反映し重要度に応じて活断層の影響を考慮する、などを検討したい。また、偏心率や剛性率の算定では大地震時に部材が塑性化し剛性低下する影響を考慮し、 D_s にも最新の知見を反映したい。

(8)耐震設計

耐震基準が最低基準であることを社会に周知し、その安全レベルを説明する必要がある。建物応答を規定する許容応力度等計算法と解放的工学基盤面応答を規定する限界耐力計算法とでは考え方が異なる。原子力施設で動的地震力と静的地震力を考えていたように、両者を包絡する設計が望ましいと考えている。また、建物の耐震的実力も解説が必要である。例えば、直接基礎の低層壁式構造は、ルート1の弾性設計で、応答増幅はほとんど

地震の揺れや仕組みを実験動画で学んでみよう！(防災・減災WEBピクニック)

1. 小麦粉とココアの断層実験
(用意するもの) 小麦、ココア、透明ボックス、押さえるモノ、プラスチック板



2. プリンとようかんで地盤の揺れ実験
(用意するもの) プリン、ようかん、紙皿 (2枚)



3. プリンと色えんぴつで免震実験
(用意するもの) 丸い鉛筆 (2本)、下敷き、画用紙、プリン、紙皿



図5 損保協会の耐震教材動画

(<https://www.sonpo.or.jp/about/useful/jishinshikumi/index.html>)

無く、地下逸散減衰や滑動による免震効果が期待でき、短周期域の R_f の裕度もあり、その実力は極めて高い。社会に説明責任を果たすには分かりやすく伝える必要がある。そうすれば、安易な VE も防ぐことができる。筆者も、誰にも分かる教材が必要と考え、振動教材「ぶるる」や動画教材（図 5、損保協会）、減災館の展示ギャラリーなどを作ってきた。

(9)被害軽減に向けて

地震被害軽減には、新築建物の設計に加え、既存建物の耐震改修、被災後の応急危険度判定も重要となる。建築物の継続使用には、構造損傷に加え 2 次部材の損傷回避、ライフライン、機械・電気設備やエレベータの保全など、総合的な安全性が必要となる。さらに、防災的には、土砂災害や浸水、強風、火災などの対策も総合的に行う必要がある。

近年の情報通信技術の進展は著しい。BIM と AR や VR との接続による災害時のイメージの共有、ロボティクスを活用した施工に加え、地震後の救出や危険度判定・応急復旧への活用、BIM から地震応答モデルを自動生成し構造計算や現場監理へと結びつける一貫システム、IoT 用センサーの地震観測活用と AI を用いた損傷把握など、様々な可能性が考えられる。筆者らも、車載加速度センサーの活用検討を進めている。

5. おわりに

近年の風水害や新型コロナウイルスを経験する中で、改めて社会を取り巻く多様なリスクに向き合うことの必要性を感じるようになった。これらのリスクは複合し、その影響を拡大していく。建物はそれ単独で存在するわけではなく、自然環境や都市環境の中の一部として存在し、多くの事柄と相互依存の関係にある。そういった視点で、建物の耐震安全性を考えていきたいと思っている。図 6 に、安全な社会を作っていくために考えておくべき連携の姿を描いてみた。建築振動研究者として、「着眼大局、着手小局」の態度で、「知彼知己者、百戦不殆」を実践し、「転禍為福」を成し遂げ、次世代に社会をつないでいきたいと考えている。様々な新技術を積極的に取り入れ、新たな価値観で、明るく楽しく前向き（あたま）に、軟らかい頭で新たなものを「つくり」、多くの知見や人を「つなげ」、学術・技術を継承して次世代に「つなぐ」、という 3 つの「つ」を実践していきたい。

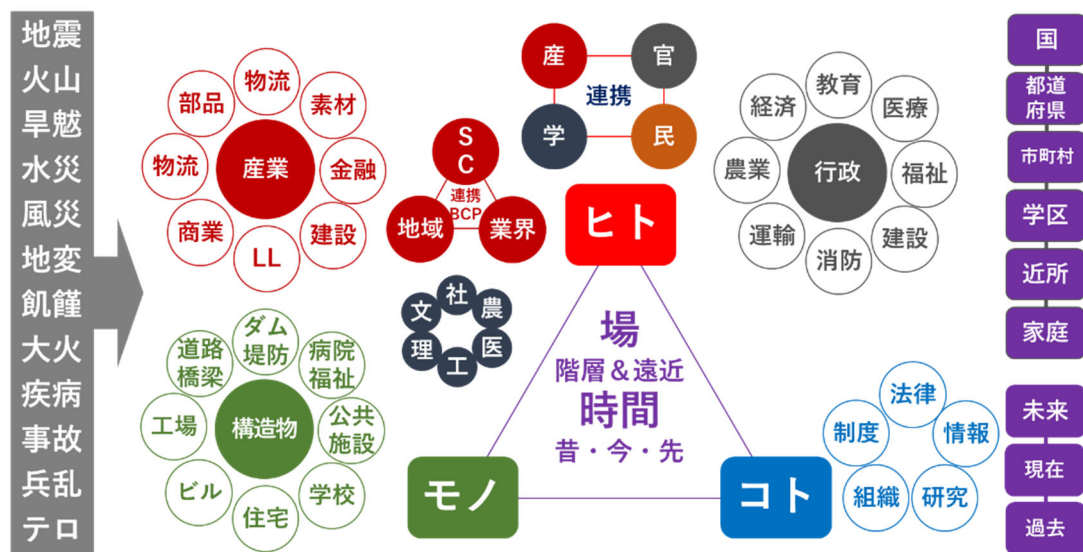


図 6 様々なリスクを乗り越えるための多様な連携