

### 3 未来社会の地震防災を考える

千葉工業大学工学部建築都市環境学科

長橋 純 男

#### 1. はじめに

筆者が東京工業大学に入学したのは“60年安保”のあった、あの1960年4月のことである。以来今日までの46年半は、日本の社会にとっても、日本の地震工学にとっても、激動の時代に対応する時期であったとって過言でない。そして、筆者が理工学部建築学科を卒業したのは1964年3月。大学院入学後2ヶ月ほどして新潟地震（M=7.5）が発生し、秋田市から新潟市まで1週間をかけて墓石の転倒状況を調査したのであるが、それから数カ月ほどして、我が恩師小林啓美先生から、「設計用入力地震動の問題に取り組んでみる気はないか！」とのお話をいただいた。東京オリンピックが開催される前後のことである。今にして思えば、当時は折しも、高層建築物や原子力発電所、あるいはまた石油タンクのスロッシングを考慮した耐震設計の課題が具体的な問題となってきた時期であった。これらの構造物の耐震設計では、建築物を“剛体”として扱い、静的な地震力を作用させ、各部材の応力や変形を求めて設計する「水平震度0.2の許容応力度設計」、すなわち「1923年関東地震における東京下町の推定地動強さ震度0.3」を対象とした、震度法による耐震設計をしておけばよいというわけにはとても参らぬものであり、地震時の動的応答量を解析して、より実挙動に近い性状を把握することが必要と考えられた。そのためには、強震時の入力地震動特性とその強さのレベルを合理的に想定することが、地震工学の避けられない課題となってきた時代の魁であった。

筆者はかつて、戦後の1950年に建築基準法が制定されて以降の耐震設計用入力地震動に関する研究動向を概観した<sup>1)</sup>。そこで本稿は、始めに、「設計用入力地震動」の研究をライフワークとして、戦後60年間のうちの40年間を一地震工学徒として過ごすこととなった筆者が、この時代とどの様に関わってきたのかを振り返る。筆者の『地震工学事始』である。そのうえで、「来し方」を「行く末」に取って外挿することにより、未来社会の展開に思いを馳せて、今後の地震防災にまつわる諸課題について考えてみようと思つたものである。言うまでもなく、地震防災は一朝一夕にしてなるものではない。ひとつの地震防災計画が成就するまでには相応の時間を要するが、その間に社会の有様も少なからず変容してゆくことになる。“計画として成就した地震防災計画”も、場合によっては時代遅れのものとなりかねない。してみれば、地震防災を計画するに当たっては、出来ることなら社会の変容を見据えたうえでなされることが望ましい。「未来社会の地震防災」を考えようとする所以である。

## 2. 設計用入力地震動の強さの評価と地震動最大振幅 —高層建築物の出現—

明治維新から間もない頃の日本の人口は 3,480 万人 (1872 年) であった。以来 1944 年迄は毎年増加の一途をたどって 7,443 万人と 2.14 倍、更に 1946 年以降も増加を続けて、人口のピーク値 12,784 万人を記録する 2004 年 12 月迄の戦後 59 年間は“右肩上がり”の増加傾向が続いた。戦争の灰燼から立ち上がり始めた 1950 年から 2005 年までの 55 年間で増大した日本全体の人口増加 4,456 万人のうち、その 73%にあたる 3,253 万人が首都圏・中京圏・近畿圏の三大都市圏において激増したのであるが、取り分け首都圏における人口増加は、東京都 629 万人、神奈川県 630 万人、埼玉県 490 万人、千葉県 391 万人と、この間の日本全体の人口増加 4,456 万人のうちの 48%を、国土面積の僅か 3.6%に過ぎない首都圏で抱えたことになるのである。

1963 年の建築基準法第四次改正において容積率制限制度が導入されたことに伴い、市街地建築物法以来の「31mの高さ制限」(旧 100 尺制限)が撤廃された。たしかその翌年、有楽町の読売ホールで「超高層建物」をテーマとした講演会が催された折に、武藤清先生は「国土の狭い日本において急激に膨張する人口をまかない、旺盛な経済活動の基盤を支えるには、国土を増大させねばならない。国土の増大には三つの方法がある。海を埋め立てる、地下空間を利用する、高層建物によって床面積を拡大する、の三つである。我々はいま、このうちの第三の方法を採ろうとしているわけである」という主旨の御講演であった。“本格的超高層ビル第一号”ともいわれた三井霞が関ビル(地上 36 階、高さ 147m、1968 年 4 月竣工)の建設が決定した 1964 年 8 月前後のことであったと記憶している。

この三井霞が関ビルの設計にあたり、ディジタル計算機による地震応答解析に関連して研究を委託された小林啓美先生は、後に、「構造物の応答解析をしていて我慢が出来なくなったのは、例えば最大加速度で地震動を評価しても地震動の性質でその応答量は著しく変動することで、採用した地震記録の観測点次第で如何様にもその地震応答量が変わることである」と当時を述懐しておられる<sup>2)</sup>。この問題の背景には、1962 年 4 月 23 日に発生した広尾沖地震 (M=7.0) の折に釧路気象台で観測された SMAC 記録がある<sup>3)</sup>。この SMAC は「385gal の世界新記録！」を観測したのであるが、釧路市内における建物被害は極めて僅少であった<sup>4),5)</sup>。「世界新記録の大加速度振幅と被害僅少」の事実をどの様に解釈したらよいのであろうか？ そもそも、「構造物に作用する地震動の破壊力」はどの様な物理的尺度で評価したらよいのだろうか？ 爾来 40 年、いまや日本の大都市には高層ビルの林立する時代となったのだが、高層建築物の設計用入力地震動の設定に関して小林先生が懸念なさるを得なかった上記の状況は、その後も 20 年近く続いたことになるのである。

地震動の破壊力を規定する物理量として、地震動の最大加速度よりも最大速度 (の二乗) が適しているとの考え方は、建築物の耐震性能を評価する尺度と合わせた「速度-ポテンシャルエネルギー説」として、棚橋諒先生によって既に 1935 年に提案されていたものである<sup>6)</sup>。しかし、高層建築物が設計され始めた当初にあっては、入力地震動の強さのレベルは「 $100\text{cm/s}^2$ 、 $300\text{cm/s}^2$ 、 $500\text{cm/s}^2$ 」など地震動最大加速度振幅で規準化するのが一般的であった<sup>7)</sup>。この様な状況に対して、筆者らは多質点せん断振動系でモデル化した重層建築物の地震応答量と入力地震動の最大加速度振幅・最大速度振

幅・最大変位振幅との相関性を比較検討することにより、高層建築物の設計用入力地震動を設定するに当たり観測地震動の最大振幅を規準化して用いる場合には、最大速度振幅による規準化の方が最大加速度振幅によるそれよりも適切であることを明らかにした<sup>8), 9), 10)</sup>。幸いにも、この提案は早速に、新宿住友ビル（地上52階、地下4階）の設計において「40cm/s、60cm/s、80cm/s」など地震動速度振幅による規準化として活用されたのである<sup>11)</sup>。これが先鞭となつてか、日本建築センターの構造評定において採り入れられるようになって以降<sup>12)</sup>、高層建築物や免震構造建物等のやや長周期構造物の設計では「地震動速度振幅による規準化」が一般的になってきたことは、よく知られたところである。

### 3. 設計用入力地震動の周期特性

ところで、高層建築物の設計が始められるようになった時期においては、日本での強震観測の歴史はいまだ浅いこともあって、構造物を破壊に至らしめる程の強震動記録の蓄積は皆無に近い状態であった（前記の1962年広尾沖地震による釧路気象台のSMACは“世界新記録”の最大加速度振幅を記録したものであったのだが、「 $T=0.33$ 秒の著しいスペクトル・ピーク」という“クセ”が強すぎて、地震応答解析に用いる設計用入力地震動としては殆ど使用されなかった）。その様な事情もあってのことであろうが、高層建物の地震応答解析に用いる入力地震動としては、El Centro 1940 NS、Taft 1952 EW、Tokyo 101 1956 NSなどの既往観測記録が、その実記録加速度振幅時刻歴を単純に振幅拡大して用いられていた。折しも、1968年7月、久方振りに「東京震度Ⅳ」を感じる東松山地震（ $M=6.1$ ）が発生した。代々木の第二屋内体育館ではバレーボールの試合が行われていた最中で、シャンデリアが激しく揺れたことが大きな話題となった地震である。この地震によって、東京都内では多くのSMACが作動し、「東京震度Ⅳ」の地震動を多数記録した。小林研究室では早速そのアナログ記録を数値化したのであるが、それらをスペクトル解析してみると、同じ東京での観測記録であるにも拘わらず、その周期特性は観測点によって極めて多様であることを実感させられた<sup>13)</sup>。

「地震動と地盤」の相関性については、1923年関東地震における「家屋被害率と沖積層厚」との相関性に関する統計資料等によって知られていたことであり、日本の地震工学研究の中心課題であったのだが、強震記録によって直接裏付けられてみると、地盤の増幅特性の影響が顕著であることについては無視し得ない事実であることを、感覚的にも認識させられたわけである。すると、上記の如き、El Centro 1940 NSやTaft 1952 EWなどを単純に振幅拡大して用いたのでは、建設地の地盤特性を考慮した設計とはならない道理である。今日の様な強震動予測手法の研究も皆無に近く、地盤のPS検層データも、いわんや深部基盤構造の調査研究データも、今日とは比較にならないほどの時代のことである。そこで当時考えられていた一つの有力な方法は、建設予定地において事前に地震観測を実施し、一般には小さな観測振幅であってもそれらの記録には建設地の地盤特性が含まれているものとみなして、観測振幅を設計用入力地震動強さのレベルまで拡幅して用いるものであった。

ところで、その後あって高層ビルが林立することとなる当時の東京新宿副都心において、1967年2月より鉛直アレー（GL-81.6mからGL-1.3mまでの4点における水平2成分の合計8成分同時観測）

の地中地震観測が開始された<sup>14)</sup>。縁あって、幅 10cm のオッシログラフ紙上に記録された 8 成分の加速度時刻歴の数値化作業を担当したのであるが、多くの地震記録をルーペを通して眺め、且つそれらのレスポンススペクトル解析をすると、同じ地点で観測された地震動記録であるにも拘わらず、その“顔つき”や“夕チ”には或る種の共通点と同時にかなり多様なものも認められ、特に地震規模や震源距離の相違によって、そのスペクトル特性には相当の幅があることを痛感させられる毎日であった。

その様な中、前記 1968 年東松山地震の 1 ヶ月前に、1968 年十勝沖地震 ( $M=7.9$ ) が発生した。戦後の日本及び周辺域で発生した地震の中では最大のマグニチュードを有する地震であったこともあり、東北・北海道を中心に多くの SMAC が観測に成功した。取り分け、青森県八戸市の港湾に設置されていた運輸省港湾技術研究所（現独立行政法人港湾空港技術研究所）所管の SMAC が記録した加速度記録は、その応答スペクトルに 2.6 秒の顕著なピークを有する、類い稀な強震記録であった。その 3 年前に起工し地震 1 ヶ前に竣工したばかりの三井霞が関ビルの設計には間に合わなかったものの、それ以降、多くの高層建築物や免震構造建築物の設計用入力地震動として用いられてきた、代表的な「やや長周期地震動」である。“超高層時代の曙”などと言われる様な時期での強震動記録であっただけに、このやや長周期成分の卓越する観測記録が関係者へ与えた衝撃は想像に難くないことであった。

1962 年 5 月、メキシコのアカプルコ付近に震央を有する 2 つの地震 ( $M=7.0\sim 7.25$ ) が発生したのであるが、この地震による Mexico City の Alameda Park で観測された記録のレスポンススペクトルには  $T=2.3$  秒の顕著な卓越周期がみられた<sup>15)</sup>。しかし、この様な長い周期成分が卓越するなどということは、当時の日本の地震工学関係者にとっては到底信じがたいことであった由である。それから 6 年後、1968 年十勝沖地震によって、八戸港や青森港では周期 2.6~2.7 秒の顕著な卓越成分を有する強震動記録が、日本でも疑いなく現実に観測されたわけである。マグニチュードの小さな地震による多くの地震記録にはみられなかった、ショッキングな出来事であった。

そこで、この八戸港湾の SMAC 強震記録の「2.6 秒」のピーク周期である。この八戸港湾に設置された SMAC は 1968 年十勝沖地震以降にも多くの強震記録を観測しているが、筆者は 1968 年~1971 年の期間に当サイトで観測された  $M=5.6\sim 7.9$  の 5 つの強震記録を用いて、周期特性と地震規模との相関性を検討した<sup>16)</sup>。その結果、八戸港湾で観測された SMAC 記録の速度応答スペクトルには、 $T=0.2\sim 1$  秒にはほぼ一定のスペクトル値を示す周期帯の他に、 $T=2\sim 3$  秒の周期帯にも共通したピークがみられる。しかしながら、後者のスペクトル・ピーク値の前者に対する比は概して地震規模が大きいほど大きくなり、 $M=7.9$  の 1968 年十勝沖地震による強震動には  $T=2.6$  秒のピークが顕著にあらわれることとなることが知れたのである。

この様に、同一地点で観測される地震動であっても、その周期特性は地震毎に必ずしも一様ではなく、少なくとも地震規模によって相当の影響を受けることは否定しがたいことと認識された。そうであるならば、前述の、建設予定地において観測された地震規模の小さな地震による加速度記録の観測振幅を拡幅して、大地震時の強震動としての設計用入力地震動に用いることは、その地点における適切な強震動予測とは必ずしもならないことになるわけである。

#### 4. SMAC 記録を用いた地震動スペクトルの周期領域における距離減衰式

そこで、地震動スペクトル特性に及ぼす地震規模の効果を定量的に示すべく、運輸省港湾技術研究所・建設省建築研究所（現独立行政法人建築研究所）・東京大学地震研究所等のご好意により、主だった SMAC 記録 56 記象を拝借して、地盤特性を除去した「地震基盤」における地震動強さの距離減衰式を周期領域で求め、「地震動スペクトルの周期領域における距離減衰式」として提案することになったものである<sup>16)17)</sup>。これによって、(1) 地震基盤における地震動の周期特性は地震規模の大きさによる影響が顕著であり、基盤地震動の速度応答スペクトルは  $M=6.5\sim 7.0$  程度では周期によらず一定であるが、これより地震規模の小さな地震動では周期が長いほど速度応答スペクトル値が小さく、逆に地震規模の大きな地震動では 1 秒より長いやや長周期帯域で速度応答スペクトル値は短周期成分に比してより大きな値を示すこと、(2) 距離減衰効果は、やや長周期成分よりも短周期成分において顕著であること、の 2 点を観測強震記録に基づいて示すことができた。

この後者の地震動周期成分によって異なる距離減衰効果については、その後、1885 年～1975 年までの地震カタログを基に、周期 0.3 秒、1.0 秒、3.0 秒の距離減衰式を用いて算定した日本列島のハザードマップの試みにつながった<sup>18)</sup>。これによれば、特に  $T=3.0$  秒を対象としたハザードマップの分布性状は、おそらくは  $T<1.0$  秒の地震動短周期成分の強さに対応する震度階級を対象とした『河角マップ』<sup>19)</sup> のそれとは、少なからず性状を異にするものである。近年においても、高層建築物や免震構造建築物などのやや長周期構造物の設計においても、建築基準法施行令における「地震地域係数」を用いた設計荷重の低減事例がしばしばみられる。しかしながら、歴史地震等をデータベースとして確率論的に算定されたハザード期待値たる「地震地域係数」については、2005 年福岡県西方沖地震を契機に指摘されているその信頼性もさりながら<sup>20)</sup>、やや長周期帯域を対象として「地震地域係数」を用いることには上記の如き問題点もあり得るものと、筆者は考えている次第である。

序でながら、このようなハザードマップを作成する試みは、地盤地震動の研究者にとっては一度は手掛けてみたい研究課題と思われ、多くの研究者によるハザードマップの提案がなされている。特に都市直下に伏在する活断層が震源となった 1995 年兵庫県南部地震以降にあっては、歴史地震データのみならず、活断層データをも考慮したハザードマップの作成が重視される傾向にある。そこで筆者らは、ハザードマップ作成に関わる確率論研究における近年の研究成果をふまえ、加えて、近年利用が便利になった国土数値情報を活用して地盤の増幅特性を定量評価する翠川らの方法<sup>21)</sup>を援用して、地盤条件を考慮した日本列島の地震危険度評価を行うプログラムを作成し、最大加速度 500 年再現期待値マップ及び最大速度 500 年再現期待値マップを提示した<sup>22)</sup>。この地盤特性を考慮して作成したハザードマップ、取り分け最大速度 500 年再現期待値マップは、従来の「標準地盤を対象としたハザードマップ」に比して、地域特性をより反映した評価を行うことができることを示した。すなわち、例えば関東地方の場合、東京都心から浦和市（現さいたま市南部）付近にかけての三角州低地に広がる地域や多摩川下流・利根川中流では、最大速度 500 年期待値が 50cm/s を超えており、更に相模原や木更津付近では 70cm/s を超えるところも見られることを示した。

## 5. 硬質地盤の観測記録を用いた地震動スペクトルの周期領域における距離減衰式

ところで、上記の「地震基盤スペクトルの距離減衰式」は、そもそもは地表で観測された SMAC 記録を基礎データとして作成したものである。すなわち、同一地点において観測される地震動スペクトルに地震によらずみられる定常的性質から、地震基盤地震動の速度振幅を対象とした金井の距離減衰式<sup>20)</sup>による速度値で除したスペクトルを求め、その平均的スペクトルを以て評価した「地震基盤から地表までの増幅特性」を用いて算定したところの、「基盤地震動」の距離減衰式である。したがって、地震基盤に相当する地中あるいは地表近くにおいて観測された地震動データを直接用いて作成された「地震基盤スペクトルの距離減衰式」、というわけではない。1970年代の半ばを過ぎて間もない当時としては、地震基盤に相当する地中あるいは地表において観測された地震動データなど端から望むべくもないことではあったが、やはりいずれは果たさねばならないことと切に願っていたことである。

そこで、青森県下北半島の硬質地盤中における観測記録を用いて、あらためて「地震基盤スペクトルの距離減衰式」を作成した<sup>24)</sup>。この観測点は、層厚2~3mの最表層は $V_s=100\text{m/s}$ であるが、それ以深は $V_s=1.15\sim 1.90\text{km/s}$ の硬質地盤であり、地表と地中のG.L.-10m、G.L.-100mの位置で各3成分ずつの同時観測が行われたものである。観測記録数は少ないものであったが、これらのデータを用いて作成された「地震基盤スペクトルの距離減衰式」の回帰係数と周期との関係からみて、SMAC記録を用いた先の距離減衰式<sup>16),17)</sup>に比して物理的に理解しやすい、改善されたものとみなしうる実験式が得られた。そこで、この距離減衰式を用い、東京の基盤構造による増幅特性を加味して、4つの地震ケースを対象に都内12サイトにおける地震動スペクトルを例示した。また、1923年関東地震と同様の $M=7.9$ の地震による震源距離 $X=60\text{km}$ での地表の地震動としては、 $V_{\max}=40\sim 50\text{cm/s}$ 程度が予測されることを示した<sup>24)</sup>。

ところで、この論文を発表したその翌年の1979年6月、折しも、電力共同研究による『岩盤アレー観測委員会』（表俊一郎委員長）は、埼玉県東松山市、千葉県銚子市及び館山市、伊豆半島修善寺町の4サイトの岩盤において広域アレー観測を開始した<sup>25)</sup>。その後、埼玉県小川町・茨城県大洗町・館山市（前記館山サイトの北西6km）の三箇所の補助観測点も追加して、7サイト計21観測点の同時観測が実施された。これら7サイトの岩盤におけるS波速度は、小川町が $2.1\text{km/s}$ 、銚子市が $1.4\text{km/s}$ 、大洗町が $1.0\text{km/s}$ 、その他のサイトは $0.6\sim 0.8\text{km/s}$ であり、従って何れのサイトの岩盤も、「軟岩」と呼ぶ方が適切かもしれないが、何れにせよ貴重な観測記録であったことに相違はない。また、この地震観測アレーは日本における広域アレー地震観測の先駆的な意義を有するものであった。筆者は、観測開始後約10年間の305地震による4,966成分の加速度記録をデータベースとして、関東地方周辺域の距離減衰に関わるQ値の周波数依存性 $f^{0.73}$ 、及び距離減衰の地域性を指摘した<sup>26),27)</sup>。冪指数 $n=0.73$ については、関東地方南東部で $n=0.6$ 、東海地方及び関東地方西部で $n=0.9$ との既往値と比べて、概ね妥当な結果であった。また、地域特性については、館山観測点の記録から、伊豆半島周辺域或いはその南部で発生する地震による地震動は概して短周期成分が少ないこと、逆に茨城県南西部のやや深発地震による地震動には短周期成分が卓越していることを指摘した。

## 6. 設計用入力地震動の位相特性

筆者は学生時代の9年間と教官時代の7年間、合わせて16年を東京工業大学で学んだのであるが、奇しき御縁があって1976年4月に長崎造船大学（1978年7月から「長崎総合科学大学」と名称変更）に赴任し、19年間を彼の地で過ごした。直線距離では、東京よりも上海への方が150km以上も近いところである。

長崎に赴任する少し前のこと、地震学者の村松郁栄先生が、「地震動の継続時間が破壊作用の重要な要素となる」として、日本の大地震記録において長周期成分の震動継続時間は米国加州のそれに比して長いことを指摘しておられた<sup>28)</sup>。「構造物に対する地震動の破壊力」ということであれば、我々地震工学の研究者が担うべき課題と考え、長崎に赴任して間もなく、地震動継続時間と地震動の破壊力の関係について検討を始めた。例えば、9階建SRC造建築物を想定し、これを9質点せん断振動系（1次周期 $T_1=0.7$ 秒、1次減衰定数 $h_1=0.03$ 、完全弾塑性復元力特性）にモデル化して、その地震応答量につき入力地震動の位相特性との相関性を検討した結果によれば、（イ）入力地震動の応答スペクトルが同一であっても、主要動継続時間が長いほど塑性履歴吸収エネルギーは増大する傾向にあること、（ロ）各階の応答塑性率には位相特性によって2倍程度の差異が生じ得ること、などを示した<sup>29), 30)</sup>。

この研究は5年間ほど継続し、1982年長崎水害の半年ほど前に一応の区切りをつけたのであるが、水害に流されて(!?)しまったこともあって、その後長らく“机の引き出し”の中に仕舞ったままになっていた。ところが、2000年6月に施行された改正建築基準法により、建築物の時刻歴応答解析を行う場合には、その入力地震動として「告示波」の時刻歴を作成することとなった。しかしながら、「位相分布を適切に考慮して作成」ということは具体的にはどのようなことなのか、そもそも地震動の位相特性とはどのような物理的因果関係によって定まるものなのか、これらの基本的な事項に関する合理的且つ適切な情報が、法律の施行時点において設計者に然るべく提供されていたわけでは必ずしもない。法律の施行が建築界の実態から先行してしまった感を禁じ得なかった。当時、日本建築センター免震構造審査委員会の委員として、「入力地震動の位相特性を適切に考慮して告示波を作成いたしましたか？」と設計者に尋ねることには、しばしば非常な心苦しさを経験したものである。

これが契機となって、2001年初頭から、山根尚志氏（日建設計構造設計室主査）とともに、最新の観測データを用いてこの問題に取り組むことと相成った次第である。題して『位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究』という、一連の研究である<sup>31)~35)</sup>。これまでの地震工学にあつては、地震動の振幅特性に比して位相特性については余り重視してこなかった傾向にあつた。しかしながら、「地震動特性」をフーリエ級数的に考えれば、振幅情報と位相情報とは同程度の情報を有する筈のものであり、位相情報が「地震動特性」についてどのような地震学的・地震工学的情報を提供してくれるものであるのか、誠に興味深いものであつた。これら一連の研究はいまだ途上にあるものであるが、地震動の位相特性と建築物の応答量との関係に関する数理的な考察や、1968年十勝沖地震や1995年兵庫県南部地震による強震観測記録、及び2000年鳥取県西部地震や2001年芸予地震による膨大なKiK-net記録の解析を通じて得られた既発表5篇の論文による研究成果は、以下の如くである。

- (1) フーリエ振幅が同一であっても、位相特性により応答スペクトルは大きく相違する。すなわち、地震応答量はフーリエ振幅のみならず、フーリエ位相にも大きく依存している。したがって、設計入力地震動の作成にあたっては、振幅特性のみならず位相特性も合理的判断に基づいて設定することが肝要である<sup>31)</sup>。
- (2) 震源の破壊過程との相対的位置関係がその地点の地震動の位相特性に明瞭に反映していること、震源近傍での地震動に関しては位相差分布の集中度が高いこと、震源から遠ざかると地震動位相差分布の集中度は低下すること、地震基盤から地表までの波動伝播によっては位相特性はあまり変化しないこと等々、地震動の位相情報には、震源の破壊過程も含めた震源特性や波動伝播特性が明瞭に反映している。したがって、設計入力地震動の設定に当たっては、与条件に適した位相特性を合理的判断に基づいて選択すべきであり、これにより、地震学的知見を反映した論理的根拠をもつ経時特性の設計入力地震動を作成することができる<sup>32)</sup>。
- (3) 地震学に基づく地震動の振幅特性 ( $\omega^2$ モデル) と、上記の知見を踏まえて合理的に選択する位相特性とを組み合わせることにより、地表における地震動特性を、短周期成分からやや長周期成分までの広帯域にわたって比較的精度の良い強震動予測を行うことが可能となる。ここに提案する手法は、 $\omega^2$ モデルに関する2個のパラメータ (サイスミックモーメント  $M_0$  及びコーナー周波数  $f_c$ ) を設定し、適切な位相特性を選択して組み合わせる簡便なものであるが、プレート境界地震・内陸直下地震・スラブ内地震といった、異なるタイプの地震に対しても統一的に適用することのできる、有用性の高い手法である<sup>33)</sup>。
- (4) 上記の研究成果を踏まえて、設計用模擬地震動作成に際して観測強震動記録の中から位相差分特性を適切に選択するための具体的な基準を提案した。すなわち、まず、観測強震動記録の位相差分の分散性について標準偏差を指標に整理し、内陸直下地震とプレート境界地震の位相差分特性を分析した。次に、標準偏差に関して得られた回帰直線から、震源距離のみを情報とした位相差分特性の選択基準とする模擬地震動作成手法を提示した。設定したフーリエ位相には、地震タイプの相違やディレクティビティ、伝播特性が反映されている。この様に、基本概念が地震学・地震工学の知見や波動伝播理論に基づいた本手法は、地震動の振幅特性と位相特性を分離して議論できる点において在来手法に比してより優れたものであり、両特性をそれぞれ論理的に規定できることを意味するものである<sup>34)</sup>。
- (5) 観測地震動の水平成分と鉛直成分に関する位相差分特性には強い相関性があり、S波が伝播する際の位相差分の分散性は水平動と鉛直動で類似した傾向を有している。また、振幅特性に関しては、水平二成分が短周期領域で等方的な放射特性を示すこと、及び放射特性の影響が大きい長周期領域においても平均的に捉えた水平成分と鉛直成分が概ね同等のスペクトルレベルを有していることが確認できる。位相特性と振幅特性に関する上記の知見を基にして、水平成分の模擬地震動作成時に位相特性を選択した観測記録と対をなす鉛直成分のフーリエ位相を採用した設計用模擬地震動作成手法を提案した<sup>35)</sup>。



## 7. 「点の耐震」から「面の地震防災」へ

以上が、筆者の『地震工学事始』である。ところで、前述の如く、筆者は1976年4月から19年間にわたり長崎市に在住した。長崎市は地震を感じる事が極めて稀で、筆者自身が体感したと記憶している有感地震は19年間で5回もあったか、という程度である。「長崎の地震地域係数  $Z=0.8$ 」を大いに得心した次第である。長崎県で近年に発生した地変災害といえば、1991年6月3日に発生した火砕流により43名の死者・行方不明者を生じた雲仙普賢岳噴火であり、その後しばらくのあいだ、風向きによっては30km西方の拙宅の食卓にしばしば灰が飛来したものである。この様な「穏やかな長崎」という土地柄にも拘わらず、長崎市に在住した19年の間には激甚災害を二度も経験することとなった。

1982年7月23日の夜、長崎市を中心に長崎県は猛烈な集中豪雨に見舞われた<sup>36)</sup>。西彼杵郡の大瀬戸町と長与町役場で観測された20~60分降水量は日本記録を更新する程の豪雨であり、長与町では19時からの1時間降水量は187mmという、まさに“バケツをひっくり返した”様な豪雨に見舞われた。長崎海洋気象台のこの日夕方から翌朝までの12時間の降水量は549mmと、長崎市の年平均降雨量が1,960mm（東京は1,467mm）であることを考えると、如何に凄まじい豪雨であったかが知れる。この集中豪雨により、長崎県内の死者・行方不明者299名、うち262名は長崎市内での犠牲であり、88%は土砂災害によるものであった。「坂の町長崎」を襲った土石流水害である。この水害により、梅雨明け直後の猛暑の中、我が家では16日間の断水を経験した。ミネラル・ウォーターを常用する生活慣習が未だ無かった時代である。「坂の町長崎」で2週間の給水車通いを余儀なくされたわけである。

次は、1991年9月27日の台風19号である。202名の犠牲者をもたらした1961年第2室戸台風以来30年ぶりの超大型台風の襲来で、41都道府県で死者・行方不明者62名、長崎県の死者はその内5名であった。長崎市の最大瞬間風速は54.3m/s、拙宅のあった丘陵団地の南斜面でも、瓦の飛散は言うに及ばず、数軒の家では小屋組までが数十メートル飛ばされて“青天井”になった。この台風により市内全域の多くの家屋が翌春までの半年間、青いビニールシートに覆われることとなったのである。

この様に、激甚なる自然災害を被災地住民の立場から二度も体験することとなり、自然災害の怖さを心底思い知らされたわけである。「もしもあの時、一つ間違えていれば…」と、いまにして考えれば背筋の寒くなる様な思いがしてならない。その様な事情も背景となって、「点の耐震設計」から「面の地震防災」へと関心が徐々にシフトしてゆくこととなった次第である。

先ず第一に、長崎豪雨災害が契機となって手掛けることとなった、長崎市の斜面住宅地を対象とした地震危険度評価の問題である。これは、地理情報システムを用いて評価した斜面崩壊危険度・液状化危険度・表層地盤特性による地震災害ポテンシャルに、住居地域や主要な社会施設、居住者特性の分布を重ね合わせることにより、斜面住宅地の地震災害脆弱性評価法を提案した<sup>37)</sup>。

第二には、地震後の断水による生活支障の定量評価に関する問題である。1995年阪神・淡路大震災における上水道機能停止の影響及び被災者の生活実態を詳細に分析することによって、被災地住民の生活支障の要因を探り、以て、断水に伴う利用者の困窮度を定量評価する手法を提案した。また併せて、この評価法を用い、上水道施設復旧過程に関わる適切な戦略についても考察したものである<sup>38)</sup>。

## 8. 首都圏一極集中と大都市の地震脆弱性評価

兵庫県南部地震の発生した直後の1995年4月、筆者は千葉工業大学に赴任したのであるが、首都圏に生活してあらためてその「一極集中」ぶりをみると、地震防災の研究者の一人として考えさせられることは少なくない。面積は国土の3.6%、農業産出額も全国の8.3%に過ぎない一都三県に、総人口の27%が住み、着工建築物は延床面積で28%、全国の23%の電力エネルギーを使用して、経済活動総生産の30%を生み出し、銀行貸出残高に至ってはこれら一都三県で国内の49%を占める集中ぶりである。これは、単に首都圏が日本国内において大きな比重を占めるばかりではなく、“グローバル化”の国際社会にあって世界的な影響力を有している実情に鑑み、仮に首都圏が大震災に見舞われた場合の影響は、国内ばかりか、国際的なダメージを齎すことは避け難いことである。したがって、地震被害の想定にあたっては、地域間の経済・社会・政治等における被災の相互作用を事前評価しておくことが肝要である。この様な思いから、首都圏が大震災を蒙った場合の経済活動力低下の度合を定量的に予測することによって地震脆弱性を評価する手法の研究を、数年来行っているところである。

表1 首都圏一極集中！

項 目	一 都 三 県		東 京 都
	実 数	対全国比	対全国比
面 積	13,557km <sup>2</sup>	3.6 %	0.6 %
人 口	3,447 万人	27.0 %	9.8 %
事 業 所 数	151 万箇所	23.7 %	11.4 %
事 業 所 総 従 業 員 数	1,667 万人	27.7 %	14.3 %
会 社 数	100 万社	35.7 %	20.3 %
電 力 使 用 量	1,329 億 kWh	23.1 %	3.7 %
総 生 産 高	151 兆円	30.6 %	16.6 %
総 所 得	113 兆円	30.5 %	13.4 %
農 業 産 出 額	7,354 億円	8.3 %	0.3 %
工業生産品年間出荷額	51 兆円	19.7 %	4.0 %
着工建築物床面積	5,098 万 m <sup>2</sup>	28.1 %	11.0 %
銀行貸出残高	198 兆円	49.4 %	39.1 %

筆者が東京工業大学に入学する前後、つまり戦後15年を経過した前後であるが、米国では「産軍複合体」(Military Industrial Complex)の実態が問題化していた。2期8年にわたり大統領を務めた第34代アイゼンハワーが、次期大統領ケネディに譲る1961年1月17日の退任演説で、この「産軍複合体」の危険性を警告したことはよく知られたことである。この問題で、国連に『十人委員会』が設けられ、「もしも米国から軍を無くした場合には、米国の産業は成り立つであろうか？」とのテーマについて

調査研究を行った。この産軍複合体の問題は、当時の総合月刊誌でも取り上げられ、折しもフレッド・クックが『戦争国家』を著していたこともあって、筆者はたいへん興味深く関心を抱いた。そこで、学部2年のとき、経済学の授業でこの問題について報告をすべく、先生から関連論文を拝借して少しく勉強したのであるが、その時に始めて知った「産業連関分析」という分析手法に甚く興味を持ったことを記憶している。この手法が、以来筆者の頭に残って、それに類した考え方で、地震被害の想定における地域間の被災の相互作用を評価する試みを考えていたところであった。

1995年阪神・淡路大震災は、都市機能が高度に集中した現代日本の大都市において激甚被害を受けた初めての大地震であった。この震災により、現代都市における地震災害が複雑に相互連関し、被害を連鎖的に拡大させてゆくこと、またその被害は特定の自治体のみにとどまらず広範囲にわたって深刻な影響を被ることを経験した。このような教訓に鑑み、上記の「一極集中の首都圏」の如き、社会的・経済的にも重要な地域で、且つそれぞれの地域が相互に強く依存し合っている一つの圏域を形成しているところにおいては、他地域で発生した被害の影響をも考慮して、複数の自治体を一つの地域として捉えることが肝要である。そこで、国勢調査・事業所統計・商業統計・貨物地域流通統計等の各種統計資料などを用いて、地域の経済活動に関するポテンシャル及び指標等を定義し、幾つかの市区町村を一まとまりの圏域と考えて市区町村毎に地域間の影響関係を考慮した通常時の経済活動力を評価し、これらが震災によりどの程度低下するかに基づいた地震危険度予測手法を提案したものである。また、兵庫県南部地震による阪神地域の実被害データを用いて、本評価手法の妥当性を検証した<sup>39)</sup>。

この方法を東京湾岸域の地震脆弱性評価に適用し、東京都区部直下地震 ( $M=7.2$ ) 及び南関東地震 ( $M=7.9$ ) を想定した東京湾岸域の地震被害予測を行い、予測された地震被害が発生した場合の東京湾岸域の経済活動力低下を評価した。また、東京湾岸域における地震災害と京阪神地域における兵庫県南部地震時の実被害状況とを比較して、東京湾岸域の地震災害危険度に関する地域特性、すなわち「一極集中」状態がもたらす首都圏の地震脆弱性の特色を、定性的・定量的に指摘した。すなわち、①東京湾岸域における震災時の経済活動力低下は兵庫県南部地震時の兵庫県以上に大きくなること、②東京都特別区部からの経済活動支障の波及効果は顕著であり、この地域の防災対策は各自治体毎の枠にとらわれることなく、複数の自治体が協力して防災計画を考慮する必要性が高いこと、③この地震脆弱性評価手法は、既往の関連自治体による被害想定結果など、従来の被害想定では得られなかった新たな地震危険度が評価されること、等を示してその有用性を提示した<sup>40)</sup>。

以上の研究は、対象範囲を首都圏から、更に一つの都市圏を超えた複数の都市圏、特に日本社会の中枢機能を担う名古屋・大阪を含む三大都市圏間相互の影響をも踏まえて、それぞれの地域や都市に潜在する地震被害種・時系列別毎の地震危険度や、社会活動の停滞、地域相互間の経済支障等の諸支障をも考慮した、総合的な地震災害脆弱性評価を行うことが肝要であると思われ、少しくその試みを手掛け始めたところである<sup>41)</sup>。このことは、市区町村単位・生活圏単位・都市圏・国レベルまでへと、広範囲の自治体に対応したリスクマネジメントを行ううえで、有効な基礎的資料になるものと筆者は考えている。

## 9. 戦後日本社会の展開と地震工学の新たな課題

敗戦の焦土から立ち上がった戦後日本の復興とその目覚ましい高度成長は、戦前には問題とならなかった様な新たな地震防災上の諸問題を日本社会にもたらした<sup>42)</sup>。

### (1) エネルギー消費の増大

高度成長は、必然的にエネルギー消費の急激な増大を惹起した。最近30年間における日本のエネルギー消費量は3倍もの伸びであるが、とりわけ注目すべきは、エネルギー消費に占める石油の重みである。たとえば、1953年時点における第一次エネルギー供給の構造は、石炭53%、水力20%、石油18%、そしてこの頃の国産比率は77%、輸入は23%であった。ところが、第一次オイルショックの1973年には、石油が77%、次いで石炭16%、水力4%という具合であり、石油依存の割合は、1973年と1978年の二度の石油ショックを経て減少はしたものの、2000年における石油依存率はなお52%の高さである。1953年には77%であった国産エネルギー供給比率は、2000年でも18%に留まっており、エネルギーの海外依存はなお顕著な状態である。このため、第一次石油ショックを経た1975年に『石油備蓄法』が公布され、当時71日分であった備蓄量が、現在では北海道から九州までの全国12の備蓄基地に、170日分弱の石油が備蓄されている実情にある。そこで生じた地震工学上の新たな問題が、石油タンクの耐震設計である。1964年新潟地震や1978年宮城県沖地震、そして近年の2003年十勝沖地震(M=8.0)により、スロッシングによるタンク火災が発生した<sup>43)</sup>。石油タンクのスロッシングは長周期地震動による影響の大きな事象である。1995年兵庫県南部地震を契機に進められている地震基盤までの深部地下構造の調査と合わせて、長周期帯域における構造物の耐震問題は、2003年十勝沖地震を契機に、学界・建築業界・行政等の関係諸機関において見直しがなされつつあるところである<sup>44)</sup>。

### (2) 電力需要の激増

一次エネルギー総供給量自体が最近の30年間で1.75倍にも増大しているのであるが、その間の家庭用電力消費量の伸びはおおよそ4倍に増大して、一次エネルギー総供給量における電力の占める比率は2000年度で41%に達している。日本の電源別発電電力量は、1970年代は石油火力が中心であったが、2000年度の構成比は、原子力30%、石炭23%、天然ガス22%、石油15%、水力8%である。英国から導入された原子炉による東海発電所が1966年に営業運転して以来、2006年5月現在では17発電所の合計55基が全国で稼働しており、ほかに2基が建設中、5基が建設準備中である。いうまでもなく、地震国日本における原発の耐震設計には特段の安全性が求められ、活断層や歴史地震などの詳細な調査を基に、敷地周辺において想定されるいかなる地震力に対しても十分な耐震性を有するように、重要な建物・構築物は強固な岩盤上に設置する、重要な施設は建築基準法の3倍の地震力に耐えるように設計する、という基本方針で設計されることになっている<sup>45)</sup>。原子力施設は剛構造物の耐震設計であるが、短周期領域における強震動予測の地震学的な難しさもあって、震源直上域ではどの程度の地震力が作用すると想定すべきか定かではない。そこで、このたび原子力安全委員会は、兵庫県南部地震など幾多の地震経験を背景とした様々な知見の蓄積と技術の進歩を踏まえ、発電用原子炉施設の耐震安全性に係わる安全審査指針類について2006年8月に改定指針案を作成したところである<sup>46)</sup>。

### (3) Motorization と高速輸送の時代

戦後の日本社会におけるモータリゼーションの進展に加え、高度経済成長を支える社会基盤としての交通・運輸・物流の大量化・高速化も相俟って、高速の鉄道・道路や長大橋が相次いで建設された。

1964年10月に開催された東京オリンピックにあわせて、東京―大阪間に東海道新幹線が開通し、東京都内には首都高速道路や東京モノレールが建設された。その後、山陽・東北・上越・北陸の各新幹線が通じ、営業時速300kmの500系『のぞみ』は東京～博多間の1,175kmを最速4時間55分の高速で走っている。2003年5月26日宮城県沖の地震では、東北新幹線の高架橋橋脚における被害が報告されており<sup>47)</sup>、1995年兵庫県南部地震では山陽新幹線新大阪―西明石間の計8ヶ所の高架鉄道橋総延長約600mで落下崩落被害が発生し、東京～博多間の全通には80日間を要したのである<sup>48)</sup>。これら時速200km以上の高速で運転する新幹線では、地震発生時間帯によっては多くの人命を奪う惨事に繋がる可能性もあり、その耐震安全性は現代社会の重要課題といわなければならない。最高速度で走行中の新幹線が地震に遭遇した場合にはどのような事態になるのか、2004年10月23日新潟県中越地震による上越新幹線の列車脱線事故（浦佐駅～長岡駅間）は記憶に新しい、初めての経験であった。

戦後日本社会におけるモータリゼーションには凄まじいものがある。敗戦直後の1945年度では2.5万台であった乗用車保有台数は、2002年度で5,447万台、2020年には6,540万台のピークになるものと予測されている。因みに、この自動車保有台数総計の対年度伸び率が最も大きかったのは1961年度の31.5%増、池田内閣が「国民所得倍増計画」を閣議決定して間もない時期のことであった。また、モータリゼーションの展開を自動車走行台キロでみると、同じくこの半世紀で200倍に増大しており、これに伴い道路実延長もこの半世紀間で14万kmから118万kmへと、8.4倍の伸びである<sup>49)</sup>。とりわけ、地震工学の観点からして重要な問題は高速道路の建設である。2002年度の高速道路総延長は6,915km、東名高速道路が全通した1969年に比べて10倍の延長距離である。この高速道路については、1995年兵庫県南部地震によって阪神高速道路3号神戸線の東灘高架橋は635mにわたって倒壊した。3号神戸線の全面復旧には1年7ヶ月を要した。地震発生時刻が午前5時46分からもう少し遅れていた場合には、いったいどのような事態が生じることとなったのであろうか。

本州と四国を橋で結ぶ「本四架橋」。1988年開通の瀬戸中央自動車道（児島―坂出）、1998年開通の神戸淡路鳴門自動車道、1999年全橋開通の西瀬戸自動車道（尾道―今治）の、3ルートである。このうち、神戸淡路鳴門自動車道の明石海峡大橋は橋長3,911m、中央支間長1,991m、主塔高さ海面上約297mで世界最長の吊り橋であり、その固有周期はたわみ周期15.6秒、ねじり周期6.3秒という長周期構造物である<sup>50)</sup>。前述の石油タンクのスロッシング問題や、横浜ランドマークタワー（地上70階、最高部高さ296m、 $T_1=6.0$ 秒）を始めとしていまや大都市に林立する高層建築物と同様、長周期地震動の影響が大きな巨大構造物である。

これら鉄道橋・高速道路橋・長大橋は、仮にその一部が地震によって損傷を蒙った場合でも、その運輸・物流に及ぼす長期間の社会的・経済的影響はまことに深刻なものが予想され、その耐震安全性は現代の生命線に関わる、戦後日本の耐震技術が抱えた大きな課題である。

## 10. 高齢化社会の地震防災力

### (1) 高齢化社会の到来

前節に記した様に、戦後60年間の地震工学・耐震技術の諸課題は、高層建築物、新幹線、高速道路、長大橋梁、石油タンク、原子力発電所の耐震安全性など、戦後日本社会の発展と不即不離の関係をもって展開してきた。しからばこれから先、21世紀の“未来社会”における地震防災の課題はどのようなものであろうか？ 筆者はこの問題を本稿のテーマに掲げたのであるが、今更申すまでもなく、固より筆者の手に余る難問題である。激動のこの時代、10年先の展開を何人が言い当て得ようか。

1995年兵庫県南部地震から10年余を経過した2005年11月末日、首都直下地震被害調査体制の準備の為に、日本建築学会関東支部地震災害調査連絡会総会が開催された折、兵庫県南部地震被害調査の陣頭指揮に当たられた中島正愛先生は当時の被害調査を振り返り、「被害調査に関わることで当時と今とでは事情が大違いである。インターネット、携帯電話、デジカメ。もしも当時、これらが現在の様に普及していたら…」と述懐しておられた。僅か十年の時の経過である。事程左様に、「現代」という時代の変容は目まぐるしく、滅法早い。十年先の時代の展開を言い当て得よう筈もない道理である。しかしながら、十年先をかなりの精度で予測できることが一つある。人口動態の予測である。

しばらく前までは、「日本の総人口は2006年にピークとなり、以降は下降傾向に入る」と予測されていた。しかしながら、少子化の実態は予想以上に甚だしく、2006年10月31日の総務省発表によれば、2005年10月1日に実施した国勢調査による日本の総人口の確定値は1億2776万7994人であった。前回2000年の国勢調査に比べれば84万人の増加ではあるが、人口増加率は戦後最低の0.7%である。また、2004年10月に比すれば1年間で22,000人の減少であり、日本の総人口は2004年12月の1億2784万人をピークに、予想よりも早く「人口減少時代」に突入したことが確認されたわけである。更に今後の人口動態については、国立社会保障・人口問題研究所の推計（2006年版）によれば、2025年には12,178万人と2004年12月のピーク時に比して95.3%、2050年には10,059万人と78.7%にまで減少すると予測されている。

この2005年国勢調査による人口動態を年齢別にみると、「生産年齢人口」（15歳以上65歳未満）は8,409万人で、前回調査比2.1ポイント減の65.8%、15歳未満の「年少人口」は1,752万人で同0.9ポイント減の13.7%となり、いずれも最低割合を更新しているのに対して、65歳以上の「高齢者人口」は2,567万人で、同2.8ポイント増の20.1%と最高値を更新し、紛う方なく少子高齢化社会の実態を浮き彫りにしているのである。

また、都道府県別に5年間の人口増減比をみると、東京都+4.20%、神奈川県+3.54%、沖縄県+3.23%、愛知県+3.00%など15都府県では人口が増加しているのに対して、秋田県-3.68%、和歌山県-3.16%、青森県-2.65%、島根県-2.54%、長崎県-2.50%など、32道県では減少している。すなわち、東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県首都圏では+105万人、愛知県・静岡県の中京圏で+24万人、大阪府・兵庫県の阪神圏では+5万人の増大であり、大都市圏への人口集中、取り分け首都圏への集中傾向がなお進行している一方で、地方の過疎化にはいまだに歯止めの掛かっていない実情である。

## (2) 高齢化社会の豪雪災害

ところで、1963年（昭和38年）1月～2月にかけて新潟県から京都府北部の日本海側を襲った「三八豪雪」では、新潟県長岡市では318cm、福井県今立町（現越前市）では315cm、福井市（福井気象台）では213cmの最深積雪量を記録する豪雪により、死者・行方不明者231名、全壊家屋753棟の被害をもたらすとともに、新潟～上野間の急行列車が106時間も遅延して物流に甚大な影響をもたらした。また、1980年12月から1981年2月にかけて、滋賀県・福井県・岐阜県を中心に日本海側から東北地方の各地を襲った「五六豪雪」は、死者133名、全潰家屋91棟の被害をもたらすとともに、宮城県・福島県では送電鉄塔が多数折損し、為に仙台市・郡山市などで電力供給が長時間ストップし都市機能を麻痺させることとなった。そして、2006年冬期に発生した「平成18年豪雪」である。2005年12月から全国的に異常な低温に見舞われ、青森県酸ヶ湯では408cmの積雪深を記録する大雪で、151名の犠牲者が生じ、新潟県では65万戸が31時間にわたって停電するなど大規模な被害を蒙った。

そもそも豪雪災害の様な気象災害は、地震とは異なって予知しやすく、しかも台風の如く高速で襲来するものではないのであるから、事前の対策はさして困難ではない筈であるのに、科学技術の発達したこの現代の日本社会にあって何故に100名を超える人的被害が生じるのであろうか、筆者にとってまことに解し難いことであった。「五六豪雪」の被害調査報告<sup>51)</sup>によれば、雪下ろしによる雪荷重低減が有効に行われていないことが構造的被害の一因であること、また、建物崩壊による人命の損失は稀であり、豪雪犠牲者は雪崩・滑落によるものや雪下ろし時の落下による場合が多いことが指摘されている。そこで2006年の犠牲者151名であるが、その65%に相当する98名は高齢者であったこと、屋根の雪下ろし等の除雪作業中の死者が112名を占めたことが報道されている<sup>52)</sup>。高齢化社会が犠牲者の背景となっていることを示唆したものと見えよう。

## (3) 高齢化社会と地震災害

では、近年に発生した地震災害の場合はどうであろうか。1978宮城県沖地震（M=7.4）では、宮城県における死者27名のうちの18名はブロック塀・石塀・門柱・記念碑の転倒による圧死者であったが、年齢別でみると61歳以上が12名（上記圧死者は7名）、9名が10歳以下（同8名）の子供たちであったことはよく知られたことである<sup>53)</sup>。1995年兵庫県南部地震（M=7.4）では、死亡率率の高い神戸市内の沿岸6区と芦屋市・西宮市の何れにおいても、65歳以上の年齢階層の死亡率率が他のそれに比し概ね5～10倍も高く、何れの各市区においても半数前後の死亡者が65歳以上であった<sup>54)</sup>。2000年鳥取県西部地震（M=7.3）では、死者は発生しなかったが、鳥取県内で141名の負傷者が発生し、このうち鳥取西部消防局が救急搬送した135名について年齢別分布をみると、人口分布では21.5%の65歳以上高齢者が53.3%であった<sup>55)</sup>。2001年芸予地震（M=6.7）では、外壁ブロック落下の下敷き及び2階ベランダ落下の下敷きによって何れも女性が亡くなっているほか、女性は高齢者に負傷が多かった<sup>56)</sup>。そして、2004年新潟県中越地震（M=6.8）では51名の死者が発生したが、震災直接死18名のうち15歳未満と75歳以上がともに6名ずつの計12名、震災関連死33名のうち65歳以上が24名と、著しく偏在していることが報告されている<sup>56)</sup>。

#### (4) 災害時における高齢者の避難

『国土交通白書 2006』は、2004年に続発した台風、集中豪雨等に伴う水害・土砂災害による死者・行方不明者のうち約60%が高齢者であったこと、2005年の台風第14号による死者・行方不明者22名のうち68%が高齢者（被災が特に多かった九州地方において死者・行方不明者が発生した市町村の平均高齢化率が28%）であったことなど、近年の少子高齢化の中で、高齢者を始めとする災害時要援護者が自然災害により被災する事例が多発していることを指摘している。その上で同白書は、高齢者は一般に身体機能の低下等から、避難に時間を要する場合や避難するための支援を必要とする場合が多いが、高齢者の単身世帯の増加とともに、高齢者の子どもが近隣に住んでおらず、また高齢者の避難を支援する中心的な役割を担う筈の若年・中年層の減少して、災害発生直後に高齢者の避難を支援することが困難な実情にあることに鑑み、今後の支援体制の充実が重要な課題であるとしている。

平成18年版『高齢化白書』（内閣府）によれば、2005年現在の高齢化率は19.9%（うち75歳以上は8.9%）であるが、2025年の高齢化率は28.7%（同16.7%）、そして2050年には35.7%（同21.5%）にまで増大するものと予測されている。高齢化社会が震災に及ぼす影響は前述の如く既に顕著にみられているのであるが、高齢化が更に益々進む中で、震災の諸相は如何なことになるのであろうか。

#### (5) 外国人滞在者の増加傾向

前記2005年国勢調査によれば、3カ月以上日本に定住している外国人の数は、2000年国勢調査では131万人であったが、2005年国勢調査では155.5万人と大幅に記録を更新した。韓国・朝鮮人の47万人が最多であり、約25万人の増加のうちの10万人は中国人である。法務省入国管理局統計によると、上記の155.5万人以外も含めて、外国人登録者数は2005年末現在で201万人である。国籍別には、韓国・朝鮮29.8%、中国25.8%、ブラジル15.0%、フィリピン9.3%である。このうち、日本に滞在する外国人労働者は、一般永住者を除き、合法・不法の労働者と、推定される不法入国者を加えると、90万人近くになると推定されている<sup>57)</sup>。

14歳以下の年少人口は2005年国勢調査では1,765万人であるが、国立社会保障・人口問題研究所『日本の将来推計人口』（2002年1月）によれば、2025年に1,408万人（対2005年比で79.8%）、2050年には1,084万人（同61.4%）と、著しく減少してゆくものと推計されている。このことは、将来の日本社会における労働力が確実に不足することを意味している。この人口減少問題については、「仮に2100年に日本の人口が6000万人まで減少したとしても、それでもまだ明治初期の2倍もあるのだから…」という考え方もあるのだが<sup>58)</sup>、労働力減少の補填には外国人労働力を期待せざる得ない状況にあることもしばしば指摘されているところである。すると上記の「90万人」と推定されている外国人労働者は、例えば介護サービス部門における外国人従事者の増加傾向が既にみられているように、時間の経過とともに社会の広い分野において今後益々増大することになるものと思われる。

阪神・淡路大震災の折に、外国人被災者に対する諸々の救援策は、医療保険無加入者の問題もあって、日本人に対するそれに比して必ずしも平等ではなかったことが指摘された（毎日新聞1995.3.3）。避難所等における相談窓口や避難時も含めた情報伝達などにおける“言葉の壁”は大きな問題となる。



## 11. 都心回帰の高層免震マンション

長寿命・高齢化社会のなかにあつて、「都心回帰」が言われている。かつての高度成長期に、都心部の土地利用が商業・業務利用に転換することに伴い、都心部の人口が減少して郊外の人口が増加した時期があつた。しかし近年、バブル崩壊のあと、地価が下落してマンションなどの住宅供給が増加し、特に子育てを終えた世代がニュータウンや郊外から、利便性を求めて都心に移り住むケースが多くなつているというわけである<sup>59)</sup>。この都心マンションであるが、地価下落に加えて、容積率等の規制緩和、企業による土地売却の増加等を背景として、地上20階を超える高層マンションの建設ラッシュが起きている<sup>57)</sup>。この傾向は、このままでは、次の大震災に直面するまで続くかも知れない。

そこで、この高層マンションであるが、免震構造で設計される高層マンションがこの数年来目立って増えている。しかも、摺り比（アスペクト比）の大きな免震高層マンションが増える傾向にあり、アスペクト比が6.5を超える免震高層マンションまで建てられているようである。言うまでもなく、積層ゴムアイソレータを用いた免震構造建築物では、アイソレータに上部構造の重量が圧縮荷重として作用していることが大前提の構造物であり、このことは地震時の応答挙動においても当然の大前提である。1995年兵庫県南部地震以前、免震構造建築物の設計・施工の実績がまだ少なかった頃（1985～1994年度に日本建築センターが構造評定を完了した免震構造建築物は82件）、レベル2の設計用入力地震動に対する設計クライテリアとしてはアイソレータに引張面圧（引き抜き）を生じさせないことが一般的であつた。しかしながら、兵庫県南部地震以降、取り分け2000年建築基準法改正後には、極稀地震動入力に対して「1N/mm<sup>2</sup>」までの引張面圧を許容する傾向が強くなつてきた。

免震構造建築物の設計における最重要のポイントは、免震層相対変位応答量（通常の設計で50～70cm程度）と、アイソレータの引き抜きに関わる安全性の確認である。後者に関わる設計条件には、上下動の効果を「鉛直震度0.30」として設計している場合が一般的である。…が、この「鉛直震度0.30」は妥当な設計条件であろうか？ 筆者は、かねてよりこの問題に疑問をもち、国内外の主要な強震動観測原波の水平・上下両成分を同時入力した地震応答解析を多数行うことにより、鉛直震度に換算すると1.0を超える応答量をもたらす強震動も少なからずあることを指摘した<sup>60)</sup>。この研究はその後も継続中であるが、アスペクト比の大きな免震高層建築物の設計に見直しを迫られる様な首都直下地震が発生してからでは手遅れになりかねないことなので、早期の研究成果をと心しているところである。

## 12. むすび

以上、一地震工学徒としての筆者の「来し方」の必然的な延長線上に、筆者の見る地震工学研究課題の「行く末」を少しく述べさせていただいた。既に紙幅を大幅に超えてしまったことでもあり、本稿の本題である「未来社会の地震防災」については、この辺で筆をおきたい。伝統ある『工学地震学・地震工学談話会』の記念すべき第100回の機会に、筆者の意のあるところをお汲み取りいただければ望外のよろこびである。末筆ながら、恩師小林啓美先生と、それから、共に机を並べて学んだ鏡味洋史さん・瀬尾和大さん・翠川三郎さんに、茲にあらためて深甚の謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) 長橋純男：建築構造物を対象とした設計用入力地震動の強さ、地震 第2輯、第46号、1994年3月
- 2) 小林啓美：私の研究人生／私の研究を振り返って、震災予防、No.187、2002年11月
- 3) 長橋純男：1962年広尾沖地震に関する研究成果とその後の地震工学に提起された諸課題、第21回地盤震動シンポジウム講演集、日本建築学会、1993年11月
- 4) 長橋純男・小林啓美：構造物の破壊作用を対象とした地震動の強さの評価、日本建築学会論文報告集、第160号、1969年6月
- 5) 小林啓美・長橋純男：木造建築物地震被害率による地震動の強さの評価、日本建築学会論文報告集、第163号、1969年9月
- 6) 棚橋諒：地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見、建築雑誌、日本建築学会、第49輯、1935年5月
- 7) 武藤清監修・久田俊彦編：超高層建物2/構造編、鹿島出版会、1971年11月
- 8) 長橋純男・小林啓美：地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅、日本建築学会論文報告集、第181号、1971年3月
- 9) 小林啓美・長橋純男：重層建築物の耐震設計を対象とした地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅、日本建築学会論文報告集、第210号、1973年8月
- 10) Kobayashi, H. and S. Nagahashi : Intensity of Earthquake Motion for the Design of Structures, U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering, Sep. 1973
- 11) 小林啓美・鏡味洋史・矢野克巳・水津秀夫：新宿住友ビルの構造に関する研究（その5）動的解析、日本建築学会大会学術講演梗概集〈構造系〉、1972年10月
- 12) 日本建築センター高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について、ビルディングレター、日本建築センター、1986年6月
- 13) Kobayashi, H., S. Nagahashi, Y. Abe and Y. Hata : The Earthquake of July 1, 1968, Response Analysis Data of Strong Earthquake Motions, 1969
- 14) Kobayashi, H., S. Nagahashi, I. Funahashi, Y. Tsusima, J. Jido, S. Abe and K. Nakajima: Observation of Underground Seismic Motions at Shinjuku, Tokyo, Takenaka Technical Research Report, No.3, 1968.12
- 15) Zeevaert, L. : Strong Ground Motions Recorded during Earthquakes of May the 11th and 19th 1962 in Mexico City, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 54, 1964
- 16) 小林啓美・長橋純男：地表で観測された地震動の周期特性から求めた地盤の増幅作用と地震基盤における地震動の性質、日本建築学会論文報告集、第240号、1976年2月
- 17) Kobayashi, H. and S. Nagahashi : Response Spectra on Seismic Bedrock during Earthquake, Proc. of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, Jan. 1977
- 18) 長橋純男：地震基盤における地震動強さの期待値の分布、日本建築学会大会学術講演梗概集〈構造系〉、1976年10月
- 19) Kawasumi, H. : Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity in Historical Times, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 21, 1951
- 20) 北後壽：突然襲う巨大地震 過去の震害から学ぶ-建築構造技術者からの警鐘-、I.P.ジャパン、2006年8月
- 21) 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価、日本建築学会構造系論文集、第442号、1992年12月

- 22) 長橋純男・柴野謙太郎：歴史地震データ・活断層データ及び国土数値情報による地盤条件を考慮した日本列島の地震危険度マップ、日本建築学会構造系論文集、第 516 号、1999 年 2 月
- 23) Kanai, K., K. Hirono, S. Yoshizawa and T. Asada : Observation of Strong Earthquake Motion in Matsushiro Area, Part 1, Empirical Formulae of Strong Earthquake Motions, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 44, 1966
- 24) 長橋純男：東京で期待される地震動の強さ、第 5 回日本地震工学シンポジウム (1978) 講演集、1978 年 11 月
- 25) Nagahashi, S. : A Study on Evaluation of Intensity of Earthquake Rock Motion on the basis of Accelerograms by Seismological Array Observation, Proc. of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, July 1984
- 26) 長橋純男：関東地方周辺域における地震動短周期成分の距離減衰特性、第 8 回日本地震工学シンポジウム、1990 年 12 月
- 27) Nagahashi, S. : A Study on the Evaluation of Q-value and the Attenuation Characteristics of 1 second or Shorter Period Earthquake Ground Motion in and around the Tokyo Metropolitan Area of Japan, Proc. of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, July 1992
- 28) 村松郁栄：地震動の極値および振動継続時間について、地震第 2 輯、第 29 巻、1976 年
- 29) 長橋純男・坂本慎二：地震動の時刻歴特性が重層建築物の地震応答量に及ぼす効果、日本建築学会中国・九州支部研究報告、第 5 号、1981 年 3 月
- 30) 長橋純男・坂本慎二：地震動継続時間が重層建築物の塑性履歴吸収エネルギーに及ぼす効果の定量評価、日本建築学会中国・九州支部研究報告、第 5 号、1981 年 3 月
- 31) 山根尚志・長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その 1 位相差分分布と地震動経時特性の関係に関する理論的背景、日本建築学会構造系論文集、No.553、2002 年 3 月
- 32) 山根尚志・長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その 2 位相差分分布と震源・伝播・地盤特性の関係に関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.559、2002 年 9 月
- 33) 山根尚志・長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その 3  $\omega^2$ モデルに基づいた地震動評価手法、日本建築学会構造系論文集、No.572、pp.55-64、2003 年 10 月
- 34) 山根尚志・長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その 4  $\omega^2$ モデルで規定したフーリエ振幅と位相差分の標準偏差を基準として選択したフーリエ位相を用いた模擬地震動作成手法、日本建築学会構造系論文集、No.590、2005 年 4 月
- 35) 山根尚志・長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その 5 水平動との相関関係に基づいた鉛直動作成手法、日本建築学会構造系論文集、No.609、2006 年 11 月
- 36) 長橋純男：1982 年長崎豪雨災害 —その住民被災の時刻歴—、長崎総合科学大学地域科学研究所紀要『地域論叢』、No.2、1985 年 3 月
- 37) 水田敏彦・長橋純男：地理情報を利用した斜面都市の地震災害ポテンシャル評価 —長崎市を事例対象として—、日本建築学会構造系論文集、第 490 号、1996 年 12 月
- 38) 川崎順子・長橋純男：地震時の上水道機能停止による生活支障の定量評価に関する研究—1995 年兵庫県南部地震後の生活実態をもとにした事例研究—、日本建築学会構造系論文集、第 503 号、1998 年 1 月
- 39) 田邊功一・長橋純男：地域活動力を用いた地震危険度評価に関する研究 その 1. 経済活動力評価手法の提案および兵庫県南部地震激震域を対象とした評価検証、日本建築学会構造系論文集、第 543 号、2001 年 5 月
- 40) 田邊功一・長橋純男：地域活動力を用いた地震危険度評価に関する研究 その 2. 経済活動力を用いた東京湾岸域の地震危険度評価、日本建築学会構造系論文集、第 551 号、2002 年 1 月

- 41) 松原啓介・長橋純男：日本の中枢機能を担う地域における地震災害脆弱性評価に関する研究 その2 評価手法の再構築及び地震時における地域固有のリスクの抽出、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造-II、2005年9月
- 42) 長橋純男：〈地震荷重の変遷と展開—その7：建築構造物〉戦後半世紀における耐震構造の展開、震災予防、No.197、2004年7月
- 43) 座間信作：2003年十勝沖地震被害報告—石油タンクの被害—、震災予防、No.194、2004年1月
- 44) 日本建築学会東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会：巨大地震時に予測される長周期地震動とその耐震問題、2005年9月
- 45) 加藤朝郎：〈地震荷重の変遷と展開—その5：原子力施設〉原子力発電所の耐震設計、震災予防、No.194、2004年1月
- 46) 名倉繁樹・前田洋介・水開英城・青山博之：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改訂について、第12回日本地震工学シンポジウム、S1-4、2006年11月
- 47) 西村康志郎：2003年5月26日宮城県沖の地震によるJR東北新幹線の高架橋橋脚の被害、東京工業大学地震工学研究レポート、No.87、2003年8月
- 48) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告〔土木・地盤7〕土木構造物の応急復旧、補修、補強、土木学会、1999年10月
- 49) 道路経済研究所・道路交通経済研究会：道路交通経済要覧/平成15年度版、2004年3月
- 50) 栗野純孝：明石海峡大橋、橋梁と基礎、Vol.31、No.8、1998年8月
- 51) 日本建築学会：昭和56年豪雪被害調査報告、1981年12月
- 52) 内閣府：平成18年版防災白書、2006年6月
- 53) 日本建築学会：1978宮城県沖地震災害調査報告、1980年2月
- 54) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告共通編—3『都市安全システムの機能と体制』、日本建築学会・土木学会、1999年6月
- 55) 日本建築学会：2000年鳥取県西部地震災害調査報告・2001年芸予地震災害調査報告、2001年10月
- 56) 日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告、2006年8月
- 57) 朝日新聞社：知恵蔵2007、2006年11月
- 58) 原田泰・鈴木準：人口減少社会は怖くない、日本評論社、2005年12月
- 59) 集英社：imidias2007、2006年11月
- 60) 池田雄一・長橋純男：高層免震共同住宅を対象とした積層ゴムアイソレータの引き抜きに及ぼす地震動水平・上下両成分同時入力による影響、日本建築学会構造系論文集、第515号、1999年1月