

シリーズ「新・強震動地震学基礎講座」

(第 23 回) 強震動予測レシピ

強震動委員会 松島信一（京都大学防災研究所）・三宅弘恵（東京大学）

1. はじめに

前号の日本地震学会ニュースレター「新・強震動地震学基礎講座」第 22 回（第 71 巻第 NL4 号 15～18 ページ）では、地震動予測地図が解説されている。ここでは、地震動予測地図における震源断層を特定した地震動予測地図（シナリオ地震動予測地図）の計算・検証手法である強震動予測レシピを紹介する。各種パラメータが平均的かつ再現性を持った値となり、得られる強震動も平均的なものとなるように設定される強震動予測レシピの概念や留意事項は、「新・強震動地震学基礎講座」第 8 回（第 70 巻第 NL3 号 25～27 ページ）の強震動予測手法の概要において説明されているので、そちらも参照されたい。

2. 地震調査研究推進本部の強震動予測レシピ

強震動予測レシピとは、入倉・三宅（2001）等の震源に重点を置いた文献に端を発し、その後、地震調査研究推進本部の全国地震動予測地図において、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）として、強震動予測手法の構成要素となる震源特性、地下構造モデル、強震動計算、予測結果の検証の現状における手法や震源特性パラメータの設定にあたって一連の考え方が取りまとめられたものを指す（図 1）。2005 年の公表以来、改訂が重ねられており、最新版は 2017 年 4 月 27 日に改訂されている。改訂では、別途取りまとめられた地下構造モデル作成の考え方（2017 年 4 月 27 日公表）が拡充され、「新・強震動地震学基礎講座」第 18 回（第 71 巻第 NL2 号 32～34 ページ）の強震動予測と速度・減衰構造モデルで紹介されている。ここでは、最新版の震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）に沿って、①特性化震源モデルの設定、②地下構造モデルの作成、③強震動計算、④予測結果の検証の 4 つの要素を概説する。

2.1 特性化震源モデルの設定

特性化震源モデルとは、強震波形記録を用いた震源インバージョンから得られる不均質なすべり分布から、すべりが大きなアスペリティの抽出を系統的に行った Somerville *et al.* (1999) の characterization に由来する。複数のアスペリティとそれらを取り囲む背景領域から成る特性化震源モデルは、解析解や動力学的な震源物理モデルと経験則か

ら得られる短周期レベル（壇・他, 2001）に基づいてアスペリティの応力降下量が決められる。不均質すべりモデルが周期 1 秒以上の強震記録を用いて得られているため、アスペリティはその周期帯の波形説明能力があるが、震源断層を特定した地震動予測地図で取り扱う M7 クラス以下の活断層で発生する地震については、短周期地震動の説明能力も有することが知られている（例えば Miyake *et al.* (2003) や岩田（2009）など）。

強震動予測レシピにおける特性化震源モデルの設定では、断層全体の形状や規模を示す巨視的震源特性、主として震源断層の不均質性を示す微視的震源特性、破壊過程を示すその他の震源特性を考慮して震源特性パラメータを設定する。これらのパラメータは、活断層で発生する地震と海溝型地震（プレート間地震（プレート境界地震）およびスラブ内地震）ごとに設定される。

活断層で発生する地震の特性化震源モデルの巨視的震源特性では、（ア）過去の地震記録や調査結果などの諸知見を吟味・判断して震源断層を設定する場合と、（イ）長期評価された地表の活断層長さ等から地震規模を設定し震源断層モデルを設定する場合に分けられる。強震動予測レシピは元来、（ア）の方法でのパラメータを設定することが考えられていた。一方、確率論的地震動予測地図の計算に用いられる震源情報は長期評価された地表の活断層長さ等から地震規模を設定しており、断層幅については陽に考慮されていなかった。そのため、確率論的地震動予測地図で考慮している震源断層を用いて震源断層を特定した地震動予測地図を作成する折に、断層が存在する地域の地震発生層を考慮した断層幅を用いると（ア）の方法による地震規模と整合しない場合があるため、（イ）の方法によるパラメータ設定が追加された。なお、断層モデル幅が約 18 km の場合に（ア）と（イ）の方法は同じパラメータとなる。（ア）や（イ）で設定されたパラメータは、その後（ウ）と呼ばれる共通の手順に沿って、残りの巨視的震源特性や微視的震源特性、その他の震源特性が決められる。一方、プレート間地震に関しては、震源域あるいは地震規模を設定する方法がとられており、スラブ内地震については長期評価を利用した設定が望ましいとされている。

これらの手順で行われる震源域や地震規模の設定は、あくまで平均的な値を目指すものであり、ばらつきをどのよ

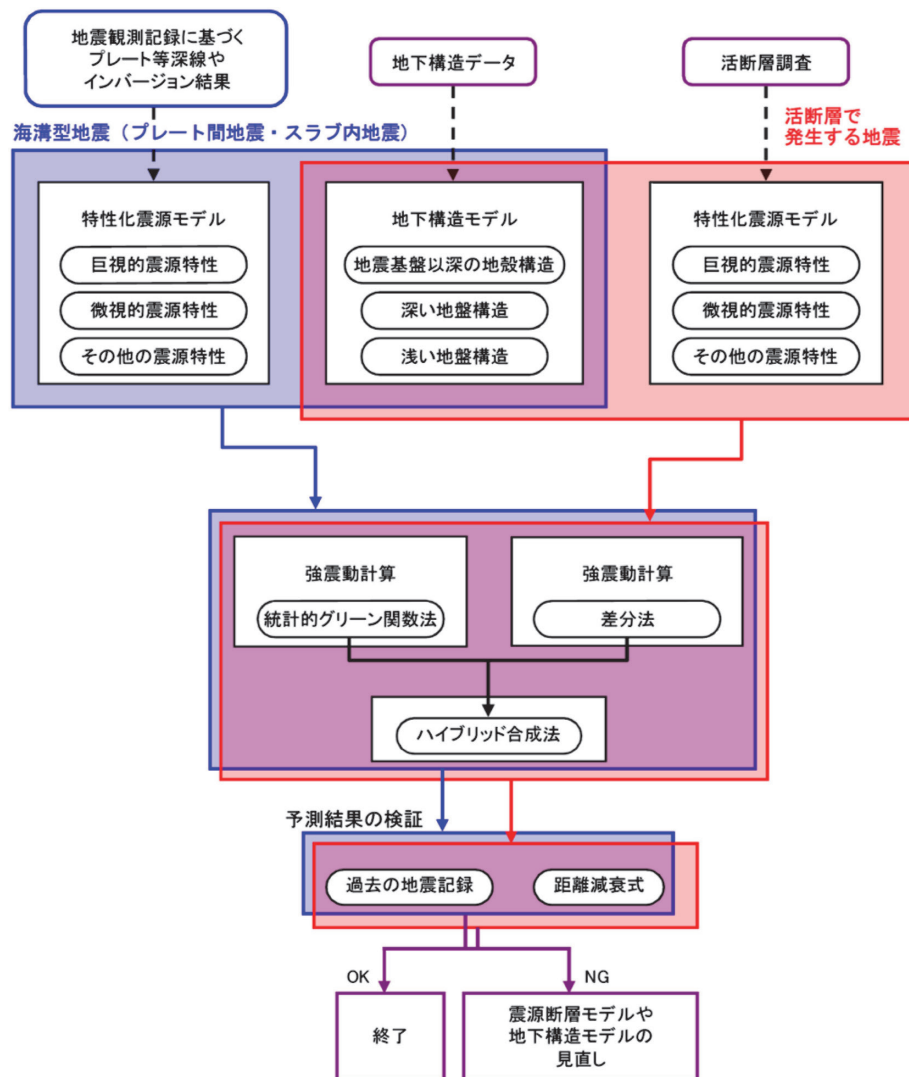


図 1 震源断層を特定した地震の強震動予測手法の流れ（地震調査研究推進本部地震調査委員会，2017）

うに取り扱うかが課題となっている。また、震源断層モデルの上端を地震発生層上端とするか地表とするか、地表とした場合には地震発生層上端で浅く開放される地震モーメントと地表で観測される強震動との関係をどのように考えるか、断層下端深さを地震発生層下端とすべきか、規模の大きい震源断層の場合はより深い部分にまで震源断層が達するのではないかなど、長期評価から求められる地震規模と強震動を再現するための地震規模との整合性に関する議論が進められている。

2.2 地下構造モデルの作成

地下（地震波速度）構造モデルは、地震基盤以深の地殻構造、深部地盤構造と浅部地盤構造から構成される。深部地盤構造は、S波速度が0.3～0.7km/sの工学的基盤からS波速度が3km/s程度の地震基盤を含む三次元構造として定義されている。地震が起ると、大規模な堆積盆地構

造における地震基盤から工学的基盤までの増幅が著しい強震動記録がしばしば観測され、予測、長周期地震動の計算の観点からも重要である。浅部地盤構造は工学的基盤から地表までに対応する。ボーリングデータによるモデル化と微地形区分によるモデル化の方法があり、それぞれの増幅特性が考慮されている。なお、短周期地震動の計算のための地下構造モデルは、直達S波の増幅を主として評価することを念頭において、計算地点直下の三次元地下構造モデルを一次元水平成層構造とみなしたモデルが使用される。このモデルを用いて、いわゆる一次元波動伝播計算が行われる。レシピでは、前述の地下構造モデル作成の考え方に基づいて、浅部・深部統合地盤構造モデルの作成法が新たに加わっている。

2.3 強震動計算

強震動計算では、工学的基盤上面までの計算方法として、

経験的手法，半経験的手法，理論的手法，ハイブリッド合成法が挙げられている．特に，面的に強震動の時刻歴波形を長周期から短周期に至る幅広い周期帯域で計算する方法として，特性化震源モデルおよび詳細な地下構造モデルが利用可能な地域では，半経験的手法である統計的グリーン関数法と理論的手法である三次元差分法を接続周期でマッチングフィルターを用いて組み合わせたハイブリッド合成法が良く用いられる．

また，地表面までの地下構造モデルがボーリングデータによってモデル化された場合として，線形解析法，等価線形解析法，逐次非線形解析法が，面的な評価によってモデル化された場合として，微地形区分から想定される増幅率を用いた計算方法が記載されている．

2.4 予測結果の検証

強震動予測結果の妥当性の検証は，予測結果と過去の観測事実との比較により行われるが，活断層で発生する地震と海溝型地震では，発生間隔や最新活動における地震被害情報や観測情報の多寡に応じて検証される．活断層で発生する地震では，距離減衰式（地震動予測式），震度分布，観測波形記録との比較が，海溝型地震では震度分布，観測波形記録，距離減衰式との比較が挙げられている．地震調査研究推進本部の強震動評価および強震動予測では，これらの複数の指標を用いた比較がなされている．

3. オープンデータとしての強震動予測レシピ

地震調査研究推進本部の強震動予測レシピの一連の手順は，50 ページ程度の文書に数式や図表込みでまとめられている．より詳細な説明は，全国地震動予測地図技術報告書も参考になる．また，強震動予測レシピに関してはオープンデータへの取組も進んでいる．特性化震源モデルの設定は先名・藤原（2011）や米国 SCEC 広帯域地震動プラットフォームにおいて，地下構造モデルは地震調査研究推進本部や防災科学技術研究所 J-SHIS において，強震動計算ハイブリッド合成法のうち三次元差分法は青井・他（2004）

による GMS として，統計的グリーン関数法は先名・藤原（2011）として，震源断層を特定した地震動予測結果は防災科学技術研究所 J-SHIS において公開されている．強震動予測レシピは国際原子力機関（IAEA）などでも引用が開始されており，今後の国際化の加速が期待される．

謝辞

編集担当の岩田知孝委員より有益なご意見を頂いた．記して感謝の意を表す．

参考文献

- 青井・他，2004，物理探査，**57**，651-666.
防災科学技術研究所 J-SHIS 地震ハザードステーション，
<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
壇・他，2001，日本建築学会構造系論文集，**545**，51-62.
IAEA，2015，Safety Reports Series, No. 85.
入倉・三宅，2001，地学雑誌，**110**，849-875.
岩田，2009，地震 **2**，**61**，S425-S431.
地震調査研究推進本部地震調査委員会，2009，全国地震動予測地図技術報告書，https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2009/#06（2018 年 12 月 10 日閲覧）.
地震調査研究推進本部地震調査委員会，2017，地下構造モデルの考え方，15pp，https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17apr_chikakozo/model_concept.pdf（2018 年 12 月 10 日閲覧）.
地震調査研究推進本部地震調査委員会，2017，震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），51pp，https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf（2018 年 12 月 10 日閲覧）.
Miyake et al., 2003, Bull. Seismol. Soc. Am., **93**, 2531-2545.
先名・藤原，2011，防災科学技術研究所研究資料，No. 354.
Somerville *et al.*, 1999, Seism. Res. Lett., **70**, 59-80.

（第 24 回）耐震設計

強震動委員会 高井伸雄（北海道大学大学院工学研究院）

地震国である日本では，地震を要因とした何らかの影響で，多くの土木・建築物等の人工構造物が損傷を受けることにより，人的・物的な被害が発生してきた．地震を要因として，と書いたが，例えば規模が長大となる土木構造物であれば，地表地震断層の永久変位による破壊や，地震に伴う斜面崩壊による構造物被害，2018 年北海道胆振東部

地震時に札幌市内で多数発生した液状化による宅地被害も地震被害と言える．しかし，ここでは地震に伴う強震動により引き起こされる地震被害（震動被害）を地震被害と限定することとする．

耐震という言葉はまさに地震動に耐えるという意味であるから，そのために構造物を設計することが耐震設計であ

る。しかし建築分野においては昨今、免震（積層ゴム等を用いて短周期の地震動が構造物に直接入力される事をやり過ごす技術）や制震（ダンパー等を用いて構造物の振動を制御する技術）という言葉と並列で使われ、その場合は狭義の耐震として免震や制震ではない従来の耐震設計方法を指すこととなる。ここでは前者の広義の耐震を念頭におき、これまでに本シリーズで解説されてきた強震動に関わるテーマや技術と建築構造物との関係がどのように考えられているかを紹介したい。

ある地点に人工構造物を建設する場合、その人工構造物を使用する期間にその地点で発生する最も危険な地震動が分かっているならば、その地震動に耐えうる構造物を設計でき、過剰性能の構造物を建設する必要もなく経済的である。しかし、その危険な地震動の生成要因を正確に知る術である強震動地震学が発達する以前では、耐震設計は地震被害から学び発展してきた。1920年に施行された市街地建築物法では地震力に触れられていないが、佐野利器が1916年に記した「家屋耐震構造論」の木構造の案が木造建築物の仕様規定（作り方）に反映されており、我が国初めての耐震設計に関する法制定と言える。この佐野の仕様は、1891年濃尾地震の被害を経験した翌年に設立された震災予防協会による活動の成果が大きい（大橋，1993）。後にこの法律は、1923年の大正関東地震を経験して、翌年の1924年に改正がなされ、鉄筋コンクリート造等に関して地震力として水平震度0.1が規定されるようになった。この法令による耐震設計の規定は世界に先駆けたものである。

ここで読者は震度？？となるであろう。“震度”という用語に関しては、「新・強震動地震学基礎講座」第2回（第69巻第NL6号11～13ページ）で詳細に解説されているが、当時既に、関谷清景による4段階の震度階（1884）が用いられていたにもかかわらず、佐野利器は「家屋耐震構造論」で震度を「地震時に構造物にかかる水平加速度を重力加速度に対する比」と定義し（例えば震度0.1は98 gal (cm/s^2) に相当する）、強震動による動的な構造物の応答を静的な外力に置き換え、その外力に耐えうる構造・材料の選択により構造物を設計する震度法を提案した（武村，2008）。この0.1という水平震度は、関東地震の際の東京本郷での地震動がおおよそ300 galであると石本巳四雄が推定した（鏡味・小林，1971）ことと、実際の建物被害から建築材料の安全性を考慮して1/3とした値である。

戦後、1948年福井地震を受け、1950年に市街地建築物法の後継の建築基準法において、水平震度は名称こそ標準層せん断力係数（層とは建物の各階の意味）となり、0.2に引き上げられたが（戦時中に材料難から建築材料の安全性が甘く見積もられていたため、実は耐震性能は水平震度0.1の時に戻ったに過ぎない）、地域係数と呼ばれる国内の

地域（都道府県レベル）毎の低減率（1.0～0.7）や地盤種別による増幅係数と掛け合わされて地震力として用いられている。地震第2輯20巻記念特集号の「耐震設計基準（日本）と地震学」（金井，1968）の中で、確率論的地震予測地図（「新・強震動地震学基礎講座」第20回（第71巻第NL3号16～19ページ））のいわばその嚆矢となった河角マップ（Kawasumi, 1951）を基にした地域別（地域係数）と地盤種別・構造種別を組み合わせた設計震度の係数に関して、その法制化された経緯が述べられている。この地盤種別とは建築基準法施行令の告示（1793号）での例を簡略化して示すと（道路橋示方書，高圧ガス保安法等，他にも同名の地盤種別が設定されているものがある）。

第1種地盤：岩盤，硬質砂れき層，その他主として第3紀以前の地層

第2種地盤：1，3種以外

第3種地盤：腐植土，泥土などで大部分が構成される沖積土で、深さが30m以上

と定義され、表層地質が地震動に与える影響に関する研究（「新・強震動地震学基礎講座」第6回（第70巻第NL2号26～28ページ））の成果が建築設計の実務レベルに大まかに落とし込まれていると言える。なお、耐震設計の成り立ちから手法確立黎明期の詳細な歴史に関しては「耐震建築論の文化史」（滝澤，2018）が2018年11月に出版されている。

その後1968年十勝沖地震，1978年宮城県沖地震を経験し、1981年に建築基準法は大きな改正がなされ（新耐震設計法）、「建築物の存在期間中に数度遭遇することを考慮すべき稀に発生する地震動に対してほとんど損傷が生ずるおそれの無いこと」，「建築物の存在期間中に1度は遭遇することを考慮すべき極めて稀に発生する地震動に対して倒壊・崩壊するおそれのないこと（人命を傷つけないこと）」という要求や、それぞれの地盤種別に設定された卓越周期と設計する建物の固有周期との関係から、地震力の値を変化させる係数が考慮されるというように、これまでの静的な設計から動的な設計項目が取り入れられた。なお、1995年兵庫県南部地震を受けて2000年に建築基準法及び同施行令改正が行われて導入された告示スペクトルはこの値とかけ離れないように設定されている。

ここまで読まれて、地震学会会員でなくとも、地震の多い日本に住む読者は、強震動はまさに“動”であって、重力のように一定の加速度で一方向に作用しているものではないのに、水平震度といった静的な力での評価でよいのか？と疑問をもたれるかもしれない。現在、建築基準法施行令で認められている構造計算法には上記のように従来から用いられている仕様規定とも呼ばれる計算法に加えて動的な設計法を選択する事も可能である。特に高さ60m

表 1 告示スペクトル

周期 (秒)	加速度応答スペクトル (単位 m/s^2)	
	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
$T < 0.16$	$(0.64 + 6T)Z$	稀に発生する地震動に対する加速度 応答スペクトルの 5 倍の数値とする
$0.16 \leq T < 0.64$	$1.6Z$	
$0.64 \leq T$	$(1.024/T)Z$	

(解放工学的基盤の減衰定数 5% の加速度応答スペクトル, Z は地域係数を表す.
建築基準法告示 1461 号)

を超える超高層建築物で義務づけられている時刻歴応答解析では、強震動に対応した動的解析（高さ 60m を超える建物に適用される）を行う必要があり、それに用いる地震動の加速度応答スペクトルが告示（平 12 建告第 1461 号）により規定された（表 1）。この表 1 をみると「新・強震動地震学基礎講座」第 4 回（第 70 巻第 NL1 号 21～23 ページ）（以下、第 4 回）の観測される複雑な応答スペクトルの形状を、非常に簡単な数値で規定として示していることに驚くであろう。この告示によるスペクトルを擬似速度応答スペクトルとして、第 4 回と同じ対数軸で示すと図 1 となる。ここに示した告示スペクトルは極めて稀に発生する地震動に対するもので、極めて稀に発生するとは前述したが、国土交通省は住宅性能表示制度の解説（国土交通省、2000）においてより具体的に「数百年に一度程度の頻度で起こる地震」として「一概には言えないが、例えば東京を想定した場合、気象庁の震度階で震度 6 強から 7 程度」に相当するとしている。図 1 の解放工学的基盤とは、工学的基盤（地中であって十分な層厚と剛性を有し、せん断波速度が約 400m/s 以上の地盤で、建物を支持するのに十分な地層を意味する）から地表までの堆積層を剥ぎ取った状態をイメージして頂ければ良い。そして、表層地盤による増幅の影響がこれに掛け合わされて地震力となるが、図 1 では先の地盤種別によって簡略的に計算できる増幅率を掛け合わせたスペクトルも図中に示している。これら地盤増幅に関わる詳細な法制度化の技術的な背景が、建築物の種類と耐震設計手法の対応関係も含めて小山（2006）により解説されているので興味のある方は一読されたい。本稿の図 1 の応答スペクトルと第 4 回の図 3 に示されている過去の主な被害地震の応答スペクトルと比較して頂きたい。厳しい地震動であろうか？ 甘いであろうか？

この告示スペクトルに合致するような地震動を作成して、建物の地震応答解析を実施して、各部材を設計していくのが時刻歴応答解析である。ここに至っても、強震動予測手法がここまで発達したにもかかわらず... と本シリーズの読者は疑問に思うかもしれない。しかし超高層建物の

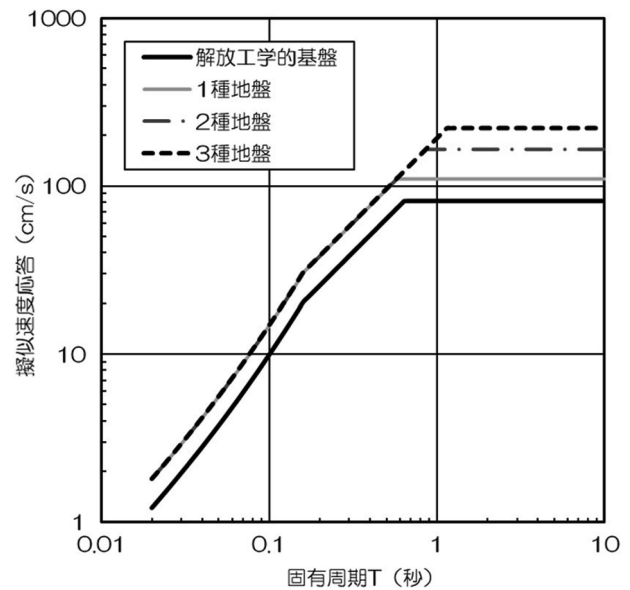


図 1 地域係数 Z を 1.0 とした場合の告示スペクトル
(擬似速度応答で表示)

動的解析に関しては、1990 年頃の東京湾の臨海部で超高層ビルの建設が始まった時期から、サイト波と言われる、いわゆる強震動予測に基づく地震動が実際の設計に用いられるようになってきており（武村、2008）、強震動予測の新たな知見が随時取り入れられてきているので安心されたい。

以上、静的から動的へと進歩してきた耐震設計を早足でたどってみた。これまでの本シリーズからも強震動地震学が発展してきていることは理解されたと思う。ここに示したいいくつかの設計に取り入れられている要素が、その成果を反映させ、今後合理的な耐震設計へとさらに発展していくことが望まれる。

謝辞

本稿の執筆にあたっては名古屋大学の武村雅之博士、干場充之強震動委員会委員長、編集担当の岩田知孝委員、松島信一委員には有益なご意見を頂きました。記して感謝い

たします。

参考文献

鏡味洋史・小林啓美, 1971, 日本建築学会論文報告集, 184, 41-50.
Kawasumi H., 1951, Bull. Earthquake Res. Inst. **29**, 469-482.
金井 清, 1968, 地震, 第2輯, **20**, 319-321.
大橋雄二, 1993, 日本建築構造基準変遷史, 日本建築センター, 318pp.

国土交通省, 2000, 住宅性能表示制度を理解するための手引き, <http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/torikumi/hinkaku/point/point.htm> (2018年12月10日閲覧).

小山 信, 2006, 物理探査, **59**, 163-169.

武村雅之, 2008, 地震と防災—“揺れ”の解明から耐震設計まで—, 中公新書, 236pp.

滝澤春男, 2018, 耐震建築論の文化史, 丸善プラネット, 1424pp.