

# 博士論文

## 石油精製施設の緊急停止基準で用いる地震動指標と地震計の最適位置の選定手法の確立

Establishment of Selection Method for Seismic Intensity Index Used for Shutdown Trigger Level and Optimal Location of Seismometer in Petroleum Refinery Facility

横浜国立大学大学院  
理工学府

静間俊郎  
Toshiro Shizuma

2022 年 9 月

## 目 次

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 1. 序論                               | 1  |
| 1.1 研究の背景と目的                        | 1  |
| 1.1.1 石油精製施設の緊急停止システムの現状            | 1  |
| 1.1.2 石油精製施設の緊急停止システムに関するニーズ        | 1  |
| 1.1.3 二次被害低減システムの現状の基準値・地震動指標に関する調査 | 2  |
| 1.1.4 二次被害低減システムの基準値・地震動指標に関する既往研究  | 6  |
| 1.1.5 本研究の目的                        | 7  |
| 1.2 本論文の構成                          | 9  |
| 2. 緊急停止基準で用いる地震動指標と地震計の最適位置の選定方法    | 13 |
| 2.1 はじめに                            | 13 |
| 2.2 地震動指標と構造物の地震被害および応答の相関性に関する既往研究 | 14 |
| 2.3 地震動指標と地震計位置の選定における現状の問題         | 16 |
| 2.4 地震動指標と地震計最適位置の選定方法              | 18 |
| 2.5 まとめ                             | 20 |
| 3. 地震計と連動した緊急停止基準の評価方法              | 22 |
| 3.1 はじめに                            | 22 |
| 3.2 地震リスク定量化手法に基づく緊急停止基準の評価方法       | 23 |
| 3.2.1 地震リスク定量化の方法                   | 23 |
| 3.2.2 緊急停止基準の評価方法                   | 25 |
| 3.3 観測値を確定情報とした構造物の Fragility Curve | 28 |
| 3.3.1 Fragility Curve の評価式          | 28 |
| 3.3.2 Fragility Curve の計算フロー        | 33 |
| 3.4 システム信頼性                         | 35 |
| 3.4.1 ブール代数                         | 35 |
| 3.4.2 直列・並列および直列・並列混在システムの信頼性評価     | 36 |
| 3.5 損傷事象の相関を考慮したリスク定量化手法            | 40 |
| 3.5.1 損傷事象の相関                       | 40 |
| 3.5.2 構造物群のリスク定量化の方法                | 41 |
| 3.6 まとめ                             | 44 |
| 4. 評価対象                             | 48 |
| 4.1 はじめに                            | 48 |
| 4.2 対象施設の概要と敷地地盤                    | 49 |
| 4.3 緊急停止基準評価モデル                     | 54 |
| 4.3.1 イベントツリー                       | 54 |

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 4.3.2 | 被害要因の発生確率の評価方法             | 56  |
| 4.3.3 | 損失価値                       | 58  |
| 4.4   | まとめ                        | 59  |
| 5.    | 緊急停止基準に用いる地震動指標と地震計設置位置の検討 | 61  |
| 5.1   | はじめに                       | 61  |
| 5.2   | 入力地震動                      | 62  |
| 5.3   | 地盤増幅特性の評価                  | 66  |
| 5.4   | 地震動指標と地震計設置位置の検討           | 73  |
| 5.4.1 | 地震動指標の検討                   | 73  |
| 5.4.2 | 地震計の設置位置の検討                | 85  |
| 5.5   | まとめ                        | 87  |
| 6.    | 緊急停止基準の評価                  | 89  |
| 6.1   | はじめに                       | 89  |
| 6.2   | 対象構造物のフラジリティ情報             | 90  |
| 6.3   | 緊急停止基準の評価                  | 92  |
| 6.3.1 | 構造物間の損傷を独立とした場合の評価結果       | 92  |
| 6.3.2 | 構造物間の損傷相関を考慮する場合の評価結果      | 98  |
| 6.4   | まとめ                        | 113 |
| 7.    | 結論                         | 115 |

## 1. 序論

### 1.1 研究の背景と目的

#### 1.1.1 石油精製施設の緊急停止システムの現状

地震は、構造物に様々な被害を与える自然の驚異である。工場等の施設の地震被害の特徴として、基礎地盤の崩壊や震動による構造物の直接被害だけでなく、構造物の損傷による危険物の漏洩・飛散や火災・爆発といった二次被害を伴うことが挙げられる。よって、地震被害の低減策としては、施設構造物の耐震性の向上だけでなく、二次被害を未然に防ぐ方策も重要となる。

兵庫県南部地震（1995）や東北地方太平洋沖地震（2011）では、火災・津波・原発事故などの二次被害により、人的・物的損害は甚大なものになった。二次被害の発生は、今後発生が危惧される南海トラフ地震においても特に深刻な事態として認識されている<sup>1)</sup>。原子力発電所をはじめ、ガス供給網、石油精製・石油化学プラントといった危険物を大量に保有する施設は、地震時に施設内の設備を安全に停止する緊急停止システム（Emergency shutdown system）を導入している。同システムは、設備を速やかに停止させると共に内包する危険物を遮断し、危険物の漏洩・飛散や火災・爆発などの回避・低減に有効である。原子力発電所、ガス供給網の緊急停止システムは、施設構内および近隣に設置されている地震計と連動し、あるレベルの地震動（例えば、地表面最大加速度や最大速度等）を感知すると設備を自動停止させるものである。同システムは、多くの石油精製・石油化学プラントでも採り入れられており<sup>2)</sup>、近年では半導体工場をはじめとした製造工場でも BCP（Business Continuity Plan：事業継続計画）の地震対策の一環として、気象庁の緊急地震速報の情報から推定される構内の地震動と連動した停止システムが導入されている<sup>3)</sup>。また、2014 年度より継続して実施されている経済産業省資源エネルギー庁による石油供給インフラ強靱化事業（石油コンビナート対策）<sup>4)</sup>における設備の安全停止対策の 1 つとして、国からの補助対象（補助率 2/3）となっている。

#### 1.1.2 石油精製施設の緊急停止システムに関するニーズ

緊急停止システムは、当該施設の機能を停止させることにより、二次被害への拡大を防止もしくは低減するものである。このシステムが作動した場合、施設の営業運転は中断される。施設が健全であるにも拘わらず緊急停止システムが作動すると、再稼働までに多くの時間と費用を要する。つまり、被害が発生していないにも拘わらず停止させてしまうことにより余計な損害を被ることになる。しかしながら、施設が大きな損傷を受けているにも拘わらず停止させないと二次被害は拡大することになる。東北地方太平洋沖地震では、東燃ゼネラル石油（現 ENEOS）川崎製油所、極東石油千葉製油所が震度 5 弱～5 強で無被害であったが製油所の設備が自動停止し、フル生産再開までに 1 週間から 10 日の期間を要している<sup>5)</sup>。その一方で、コスモ石油千葉製油所の LPG タンク火災時では、火元へのガスが自動遮断されなかった（破損した配管につながる緊急遮断弁を作動しないように固定し



ていた<sup>9)</sup>。ため火災は拡大し、再開（フル生産）に1年以上要することになった<sup>5)</sup>。このように小規模な地震動に対してむやみにシステムを作動させ運転停止してしまうと、被害よりもむしろ緊急停止に伴う弊害が大きくなり、営業損失や設備に支障をきたすような損失を被ることも考えられる一方で、緊急停止のレベルを過度に高く設定すると地震被害の低減に役立たない可能性がある。そのため、石油精製・石油化学プラント等では、停止基準のレベルをどの程度に設定すべきかが喫緊の課題となっている。

一方、石油精製・石油化学プラント等は広大な敷地を有し、緊急停止の対象となる各種構造物は敷地内に散在しており、停止基準のレベルと共に地震計で観測する地震動指標は何にするか、どこに地震計を設置すべきかといった課題がある。以前より地震計で観測する地震動指標は、計測の容易な地表面最大加速度が使用されてきた<sup>7)</sup>。しかしながら、施設被害時における二次被害の低減・防止という緊急停止システムの目的を考えると、施設被害をより説明できる地震動指標を選定する必要がある。地震動指標としては、前記した地表面最大加速度や最大速度が一般的によく知られているが、それらの指標は必ずしも施設被害を完全に説明するものではない。地表面最大加速度は十分なエネルギーを持たない地震についても大きな値を示すことが知られ、地表面最大速度は比較的柔らかい構造物との関連は大きい。剛な構造物については必ずしも良い指標とは言えない。近年では高機能で比較的低価格の地震計が登場し、計測震度やSI値<sup>8)</sup>等も観測・演算できるようになり、構造物の地震被害との相関が高いとされるSI値を地震計で観測する地震動指標の候補として新たに検討している事業所もある。また、地震計の設置位置については、対象となる構造物に地震計を設置し、その応答を観測するのが最適である。しかしながら、危険物の漏洩や火災といった二次被害の原因となりえる構造物は多数存在し敷地に散在しているため、観測に必要となる地震計は膨大な量となり、費用面等の問題を抱えることになる。各事業所では、緊急停止の対象となる設備の近傍（同一の地盤）の設置を基本としているが制約が多く、現状、機械的振動が常在している場所や車両通行の頻繁な道路付近を避け、地震時の振動の影響がほとんどない軽量の平屋内に設置している事業所が多い。

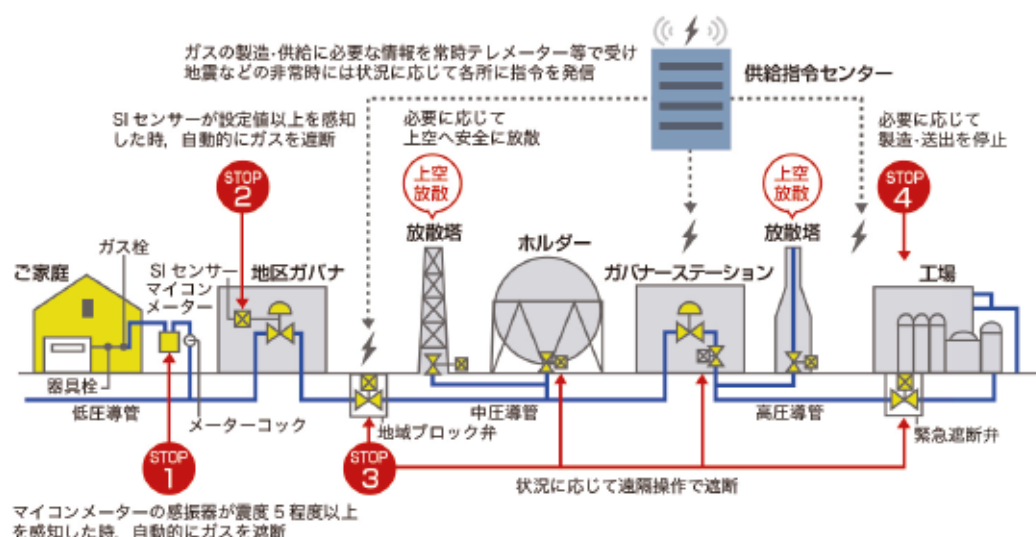
### 1.1.3 二次被害低減システムの現状の基準値・地震動指標に関する調査

現在、実際に利用されている二次被害の低減システムは、都市ガス供給システムの地震時自動シャットダウンシステム、原子力発電所の地震時スクラムシステム、鉄道の地震時緊急制動システム、本研究で対象とする石油精製・石油化学プラントや半導体工場といった生産施設のシャットダウンシステム等がある。これらのシステムは、地震動を感知すると予め定められた手段を自動的に講じ、爆発や危険物質の漏洩・飛散などの地震時の二次災害の低減を図るものである。以下に上記した4システムの概要と現状の自動停止に関する基準値とシステムで使用している地震動指標についてまとめる。

#### (1) ガス供給<sup>例えば、9)、10)</sup>

都市ガス事業者では、地震時のガスの漏洩による二次被害の拡大を防止するため、様々なガス供給レベルで供給を停止する仕組みを構築している（例えば、図1-1-1）。需要家レベ

ルではマイコンメータにより震度 5 相当以上の強い揺れを感知すると、家屋内へのガスの供給を自動的に停止するようになっている（異常がないことを確認できれば、マイコンメータは手動で復帰可能）。また、低圧導管網レベルではブロックを形成し、中圧から低圧に変換する地区ガバナ（ガスの圧力を調整する装置（整圧器））に設置されている SI センサーが 60 kine (cm/s) 以上の揺れを感知すると自動停止する仕組みになっている。これにより、マイコンメータがガスを遮断するのとほぼ同時に、需要家へ供給するガスの圧力をコントロールしている設備でも、ガスが遮断され、地震発生直後に 2 段階でガスを遮断する仕組みになっている。さらに中圧導管網レベルでは、より大きな地域でブロック化し、事業者本社等からの遠隔操作で供給停止が可能である。自動遮断の基準である 60 kine は 1995 年の阪神・淡路大震災におけるねじ接合継手の被害率を基に設定されている。当時は 60～80 kine までの被害率のデータが不足していたため、安全側の暫定値として同値を採用している。なお、2007 年新潟県中越沖地震以降、自動遮断ではなく事業者判断で供給継続・遮断できるようになっている。



## （2）原子力発電所

原子力発電所では、複数の地震計が原子炉建屋内に設置されており、これらがある基準以上の揺れを感知すると、原子炉の制御装置に信号が送られ、制御棒が自動的に挿入されて、数秒で運転中の原子炉を安全に停止する仕組みになっている。自動停止用の地震計は、主に原子炉建屋基礎版（最地下階）および上部階に設置されている。自動停止の基準値は、弾性設計用地震動程度が原則とされ<sup>11)</sup>、原子力発電所毎に設定されているが、国内の原子力発電所では 150 Gal (cm/s<sup>2</sup>)前後としている所が多い<sup>12)</sup>。米国など国外では、地震後の電力

供給を重視しており、地震計と連動した自動停止システムは採用されていない。なお、米国の原子力発電所では、地震動が発生し、時系列の加速度がある閾値を超えた場合の加速度振幅の累積値と定義される CAV (Cumulative Absolute Velocity) <sup>13)</sup>が 0.16 G-sec を超え、さらに 2~10 Hz (周期 0.1~0.5 sec) の加速度応答スペクトルが運転規準地震 OBE (Operating Basis Earthquake, 発電所の運転中に起こりえる地震の中から適切に選定し、これを超えた場合、ただちに運転停止することになる地震動) を超えていると判断される場合は運転員が手動で原子炉を停止することになっている <sup>14)</sup>。

### (3) 鉄道 例えば、15),16)

鉄道では、地震が発生した場合、走行する列車を緊急停止もしくは走行速度を落とし、列車の脱線などによる被害を防ぐ必要がある。特に新幹線は、大きな揺れの中での高速走行や被害箇所への突入の危険を回避するため、地震動の主要動 (S 波) が到達する前にその地震の発生を感知し、走行中の列車に緊急制動をかける早期地震探知システムを構築している (図 1-1-2)。同システムでは、沿線の変電所やき電区分所等 (約 20 km 間隔) の他、沿線周辺の沿岸部や内陸部にも地震計を配置し、地震動の検知後、波形を解析しほぼリアルタイムで地震のマグニチュード、震央位置、震源の深さを推定する。そして、これらの情報から地震被害が予想されるエリアを特定し、そのエリア内の路線区間に対して警報を発令すると共に新幹線の送電を自動停止させ、列車に緊急制動をかける仕組みとなっている。地震計では、最大加速度と SI 値 <sup>8)</sup>が出力される。最大加速度は、鉄道構造物の被害との相関性を考慮し、周波数 0.05~5 Hz のバンドパスフィルタを適用した加速度波形の最大値を採用している。この最大加速度は早期地震探知システムに、SI 値は列車の運転規制に利用されている。沿線の地震計の緊急制動をかける地震動の検知レベルは、できるだけ早く警報を出したいが、不必要な警報は極力少なくしたいという原則的な考え方に則り、器械式地震計の精度、起動加速度の設定誤差、さらに、鉄道被害が生じる始める地震動が 80 Gal 程度であるとの考えを勘案して 40 Gal 以上としている <sup>17)</sup>。この 40 Gal は、海外においても台湾高速鉄道の自動運転停止の閾値として使用されている <sup>18)</sup>。なお、同鉄道では早期地震探知システムは採用されていない。



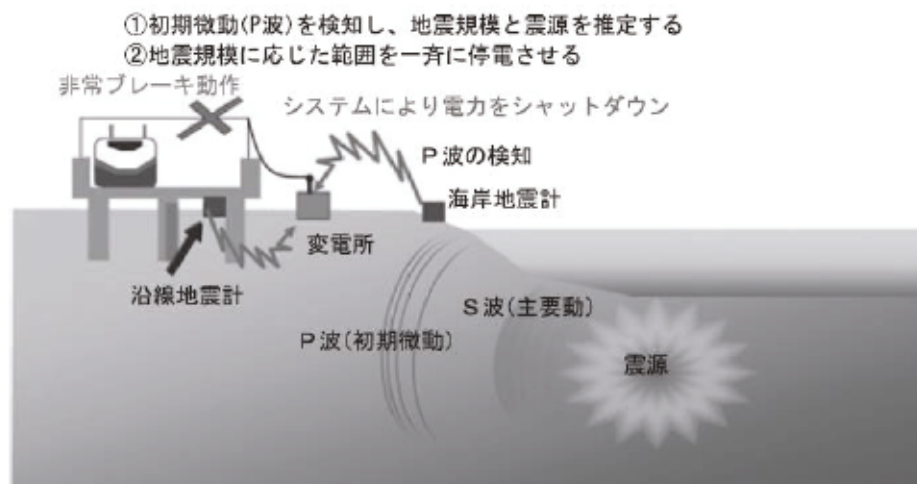


図 1-1-2 新幹線早期地震探知システムの概略（文献 15）より）

#### （４）生産施設

可燃物や有害物質と多量に取り扱う石油精製・石油化学プラントでは、火災・爆発や有毒物質の漏洩・飛散の拡大を低減，防止するため，さらに近年におけるプラントの運転管理の省人化により，製造装置やそれに関わるユーティリティ，出荷設備等を構内の地震計と連動して自動的に停止させるシステムが多くの製油所・製造所で採用されている．また，半導体工場等でも BCP の地震対策として，緊急地震速報の情報を用いて推定される地震動と連動した停止システムが導入されている<sup>3)</sup>．自動停止させる地震動レベルについて，石油精製・石油化学プラントでは各事業所で決めており，主要設備の設計用地震動（0.2～0.3 G，約 200～300 Gal）等を参照し，さらに安全余裕を見込んで構内の地震計が 150～180 Gal を感知すると自動もしくは手動でプラントを停止させている所が多い<sup>2)</sup>．

自動停止の基準値は，都市ガスが SI 値で 60 kine，原子力発電所が最大加速度で 150 Gal 程度，鉄道（新幹線早期地震探知システム）が 40 Gal，石油精製・石油化学プラントで 150～180 Gal に設定されている．基準値は，それぞれ実被害データや設計用地震動を参照し，ある程度の安全余裕を見込んでいる．安全余裕を見込む理由として，施設の地震被害（推定）には大きな不確実性が伴うことが挙げられる．

システムで使用している地震動指標については，都市ガスは実地震の分析結果を参照して SI 値を採用しているが，石油精製・石油化学プラントは計測のしやすさから主に加速度を使用している．原子力発電所は加速度を使用しているが，CAV や気象庁計測震度等の適用可能性について現在検討を進めている<sup>11)</sup>．鉄道（新幹線早期地震探知システム）は，加速度（通過帯域 0.05～5 Hz のバンドパスフィルタを適用したもの）使用の根拠となる検討は行っていないが，列車の運転規制について，各地震動指標と橋梁および土工設備等の実

被害の分析から SI 値を採用している。

#### 1.1.4 二次被害低減システムの基準値・地震動指標に関する既往研究

以下に二次被害低減システムの停止基準，地震動指標に関する既往研究について概要を述べると共に，課題点を挙げる。

##### (1) 停止基準値

石油精製施設における緊急停止基準の設定問題に対処する一つの方法として，システムの作動によって低減される地震損失とシステムの不適切な作動から想定される営業的な損失を比較し（システムの有効性），トレードオフの問題とする視点が存在する。Kotsubo et al<sup>19)</sup>，中村ら<sup>20)</sup>は，地震リスクの定量化手法を援用し，施設の固有性を考慮した最適な停止基準を評価している。不確実性の大きい地震被害を対象とする場合や緊急停止システムの有効性の明確化には地震リスク定量化手法の適用が有効である。同手法は，確率モデルを用いて不確実性を伴う地震被害を期待値等で定量化し，異なる条件（地震動レベル）下での比較が容易に行えるという利点がある。しかしながら，不確実性が大きいとシステムの誤判断の可能性が高くなり，基準値の評価精度の向上が重要となる。文献 19)および 20)は，停止基準で用いる（地震計で観測する）地震動指標は加速度に限定しており，施設構造物の地震被害（応答）と関係の強い地震動指標，さらに地震計の設置位置については言及していない。製造装置や貯蔵，用役設備等の施設構造物は，それぞれ固有の応答特性を持つと共に，多様な増幅特性の地盤に散在している。よって，地震計の設置位置の地震動と各構造物に作用する地震動は同一ではなく，構造物応答も異なるため，地震計で観測される地震動（指標）と各構造物の応答を関係付ける場合，大きな不確実性が存在することになる。

米国の原子力発電所の手動停止の基準値は，177 サイトの実地震記録から算出された CAV（加速度の絶対値が 0.025 G を超えた場合の加速度振幅の累積値）と修正メルカリ震度階級（MMI）を対応させ，構造物に破損が生じるとされる震度 VII のサイトの最小となる CAV（0.16 G-sec）を採用している<sup>21)</sup>。また，同文献 21)では，この CAV（0.16 G-sec）を観測したサイト周辺の発電所は無被害，軽微な被害のあった発電所に近いサイトの CAV の最小値は 0.77～0.94 G-sec であり，基準値（0.16 G-sec）はかなり保守的な値であることも加えて報告されている。

##### (2) 地震動指標

都市ガス施設の自動遮断システムについては，岩田ら<sup>22)</sup>が，国内外の地震における最大加速度，最大速度，最大変位，SI 値および計測震度について家屋や埋設管被害との相関関係を検討し，SI 値が自動遮断の判断指標（地震動指標）として適切であるとしている。また，鉄道の運転規制については，鈴木ら<sup>23)</sup>が，最大加速度，SI 値，計測震度と橋梁および土工設備等の実被害の分析より，SI 値や計測震度は最大加速度よりも運転規制には有利であり，さらに警報のリアルタイム性等を考慮すると SI 値が最適な地震動指標であると結論付けている。都市ガス施設および鉄道施設は，対象構造物が相当数で広域にわたり設置されているため，建屋や土工設備等，様々な構造物が混在した実被害データを分析し，自動



停止や警報に使用する地震動指標を選択している。ただし、分析結果には、対象エリアの表層地盤の増幅特性の相違や施設構造物の応答特性等、対象施設の固有性が考慮されていない。

原子力発電所については、前項で記載のとおり、スクラムシステムで用いる地震動指標を検討中である。落合ら<sup>24)</sup>は、発電所機器・配管設備をバイリニアの復元力特性を有する1自由度系のモデルに置き換え、防災科学技術研究所(NIED)が運用するK-NETやKiK-NETで観測された60地震波を用いて弾塑性応答解析を行い、地震動指標(気象庁計測震度、最大加速度、最大速度、CAV)と機器・配管設備損傷(塑性率)との相関を検討している。その中で気象庁計測震度は、発電所機器・配管設備の損傷程度と結びつける(相関の高い)有効な地震動指標であると述べている。石油精製施設と同様に、施設構造物について地震被害のデータがほぼ存在しないため、機器・設備の地震時の弾塑性挙動の特徴を表現したモデルを使用し、様々な地震波による応答解析結果を分析することで、地震動指標選定の検討をしている。ただし、解析モデルは代表的な機器・設備を模した1つのみであり、対象施設の固有性は十分に考慮されていない。

#### 1.1.5 本研究の目的

前節で挙げた二次被害低減システムの基準値、地震動指標に関する既往研究の課題について、以下の3点に整理する。

- ① 石油精製施設の緊急停止システムの停止基準は、主要設備の設計用地震動の大きさに施設の地震被害(推定)に伴う不確実性を考慮し、安全側にある程度の余裕を持って設定されている。しかしながら、原子力施設のように過度に基準値を小さくすると、施設被害がない状況で緊急停止し、再稼働までに余計な営業損失を被ることが懸念される。施設の固有性を反映した最適な停止基準については、リスク定量化手法を援用した評価方法が既に示されている。同手法は、不確実性を伴う施設の地震被害を期待値等で定量化し、様々な地震動の大きさにおいて比較ができる点で有用である。ただし、不確実性が大きいと緊急停止システムの誤判断の可能性が高くなるため、基準値の評価精度の向上が重要となる。
- ② それぞれ固有の応答特性を持つ製造装置や貯蔵、用役設備等の石油精製施設の構造物は、増幅特性の異なる地盤に散在しているため、地震計の設置位置の地震動と各構造物に作用する地震動は同一とはならず、構造物応答も異なる。よって、地震計で観測される地震動(指標)と各構造物の応答(損傷)を関係付ける場合には大きな不確実性が存在する。
- ③ 緊急停止基準を適切に評価するには、施設の固有性を考慮することが重要であり、そのためには、地震計で観測される地震動と各構造物の応答の関係を把握し、地震動指標や地震計の設置位置を検討すると共に、検討結果を停止基準の評価に反映することが必要である。

本論文では，上記した課題点を解決するため，地震計で観測される地震動指標と散在する各構造物の応答の相関関係を捉え，緊急停止基準に用いる地震動指標および地震計の最適位置の選定手法を確立し，適用事例を用い手法の有効性を確認することを目的とする．

## 1.2 本論文の構成

本論文は全部で7章から構成され、各章の構成と関係を図1-2-1に示す。

第1章は序論である。本研究の動機付けとなる背景について述べ、本研究で対象とする石油精製施設の緊急停止システムを含めた二次被害低減システムの自動停止の基準値およびその設定の根拠、使用している地震動指標についての現状を調査すると共に、これらに関する既往研究を整理した。そして、それを踏まえて本研究で取り組む項目について明示した。

第2章では、評価対象として石油精製施設を想起し、緊急停止基準で用いる地震動指標と地震計設置位置の選定の際に想定される問題を挙げる。そして、その対処として、地震動指標と施設の各種構造物の応答の相関関係を解析的に捉え、適切な地震動指標および地震計の最適な設置位置を選定する実用的な方法を提案する。

第3章では、本研究の緊急停止基準の評価でベースとなるリスク定量化手法に関する既往の要素技術について詳述する。同技術の中において、**Fragility Curve**の評価については、地震計で観測される地震動指標を変数とし、2章でモデル化した施設の各種構造物の応答と地震動指標の相関関係を反映する方法を新たに示す。

第4章では、2章で提案した緊急停止基準で用いる適切な地震動指標および地震計の最適な設置位置の選定方法の有効性を確認する対象として、東京湾岸地域の軟弱な埋立地盤に立地する石油精製施設を想定し、同施設構内の地盤モデルおよび停止基準評価モデルについて示す。

第5章では、地盤応答解析により施設構内の地盤増幅特性を評価し、その情報を用いて施設の各種構造物の応答と地震動指標の相関関係を把握すると共に、散在する構造物の被害をより説明できる地震動指標や地震計の設置位置について検討する。

第6章では、5章で検討した地震動指標と地震計の設置位置、施設構造物の応答と地震動指標の相関関係、および施設構造物の耐震性能等の情報を用い、リスク定量化手法に基づき最適な緊急停止基準を評価する。また、施設の各種構造物間の損傷相関を考慮した場合の停止基準への影響について考察する。

第7章は結論である。本研究で得た知見をまとめ、今後の課題を述べる。

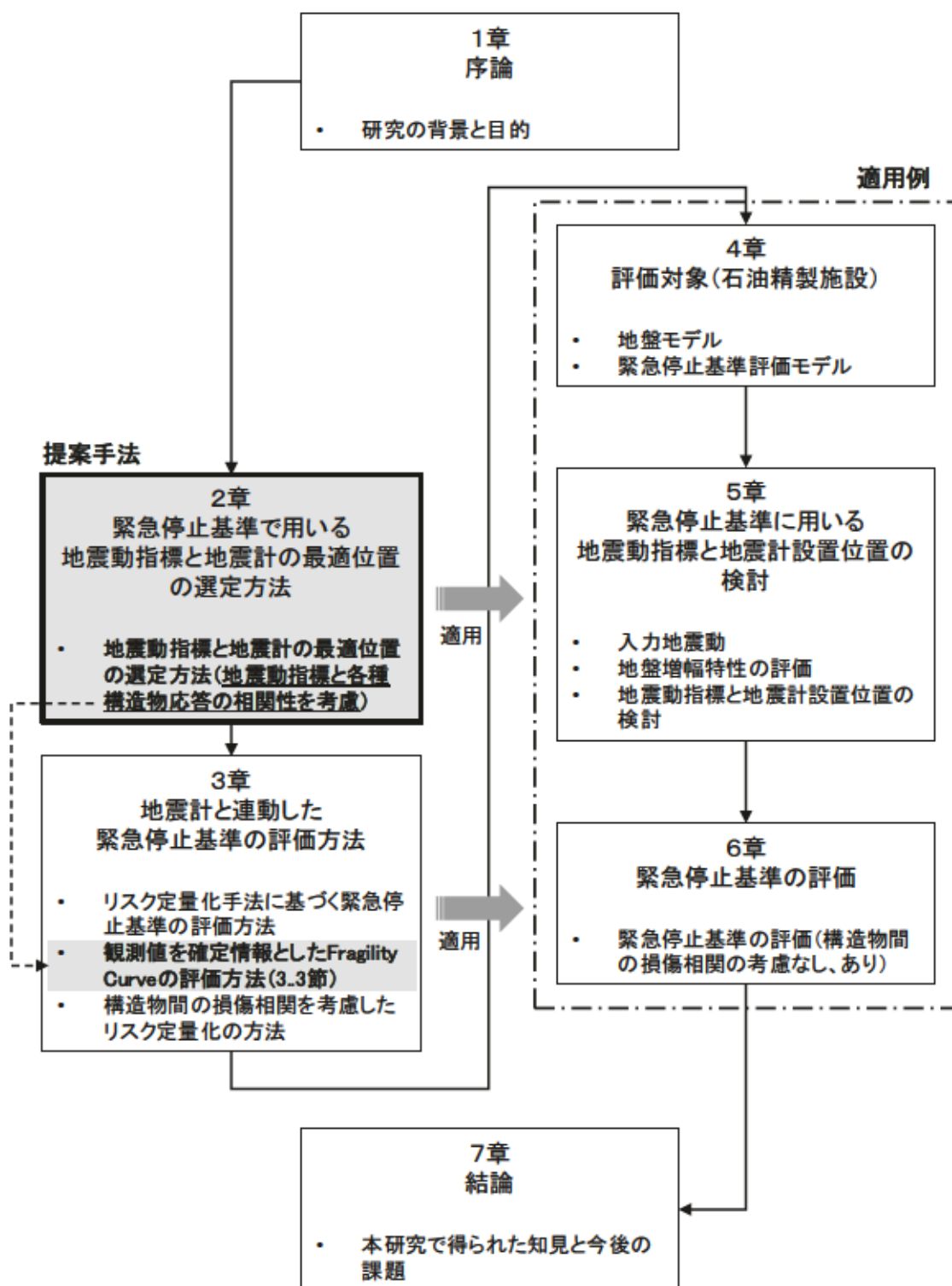


図 1-2-1 本研究の取り組みと各章の関係



## 第1章の参考文献

- 1) 国土交通省 南海トラフ巨大地震・首都直下地震対策本部：国土交通省 南海トラフ巨大地震対策計画 [第2版]，P.54，平成31年1月29日。
- 2) (公社)化学工学会 システム・情報・シミュレーション部会 プラントオペレーション分科会：東日本大震災におけるプラントオペレーションに関するアンケート調査報告書，P.163，2013年2月。
- 3) 吉岡献太郎：半導体工場における緊急地震速報利活用の検討，日本地震工学会誌，No.7，pp. 39-40，2008。
- 4) 経済産業省 HP：令和3年度経済産業省概算要求のPR資料一覧：エネルギー対策特別会計，資源エネルギー庁 燃料安定供給対策 資源・燃料部 石油コンビナートの生産性向上及び強靱化推進事業費，2020。  
[https://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2021/pr/en/enecho\\_nenryou\\_19.pdf](https://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2021/pr/en/enecho_nenryou_19.pdf)
- 5) 橋富彰吾：南海トラフ巨大地震によるわが国の石油精製能力低下にともなう需給支障に関する研究，関西大学学位論文，pp.32-44，2018。
- 6) コスモ石油：コスモ石油グループコーポレートレポート 2011，pp.3-4，2011。  
[https://ceh.cosmo-oil.co.jp/csr/publish/sustain/pdf/2011/sus2011\\_all.pdf](https://ceh.cosmo-oil.co.jp/csr/publish/sustain/pdf/2011/sus2011_all.pdf)
- 7) 池田雅俊：地震防災に関して地震動の強さの尺度について，株式会社プラント耐震設計システムズ HP 耐震設計の基本 解説。  
<http://www.psds.co.jp/seisdesign/e06.pdf>
- 8) Housner, G.W. : Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault, Proceedings of the 3rd WCEE, pp. 94- 115, 1965.
- 9) 東京ガス HP：<https://home.tokyo-gas.co.jp/gas/userguide/anzen/emergency/jishin.html>
- 10) 東邦ガス HP：<https://www.tohogas.co.jp/approach/safety/emergency/>
- 11) 一般社団法人日本原子力技術協会：地震後の機器健全性ガイドライン [地震前計画と地震後の点検・評価]，p.6，2012。
- 12) 松崎伸一：伊方発電所における緊急地震速報の導入事例，地震研究集会「地震動の瞬時解析と直前予測」，2011年9月8，9日。  
[www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/yure2011/09\\_matsuzaki.pdf](http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/yure2011/09_matsuzaki.pdf)
- 13) Electric Power Research Institute: Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, EPRI TR-100082, 1991.
- 14) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Pre-earthquake Planning and Immediate Nuclear Power Plant Operator Postearthquake Actions, Regulatory Guide 1.166, p.1.166-4, 1997.
- 15) 水野光一朗，滝澤彰宏，太貫淳司，大澤裕之：厳しさを増す気象現象に対する鉄道防災の取り組み，JR EAST Technical Review, No.56，pp.31-36，2017。
- 16) 島村誠：自然災害に対する列車運行安全基準の成立と改良，安全問題研究論文集，Vol.4，pp.1-9，2009。



- 17) 美藤恭久, 中村豊, 富田健司: 新幹線の新しい地震警報システム UrEDAS(ユレダス)について, 地震工学研究発表会講演概要, 18 巻, pp.509-512, 1985.
- 18) Ho, T. W., Chen, T. C., Hsieh, C. C. and Chou, C. C.: Design of Multi-agent Emergency Dispatching Model to Strengthen Resiliency of Taiwan High-speed Rail System, *Procedia Engineering*, Vol.145, pp.646-653, 2016.
- 19) Kotsubo, C., Kamemura, K., Ohtsu, H. and Mizutani, M.: Selection of Seismic Trigger Level of Automated Shutdown System for Petrol Chemical Plants on SRM, *ICOSSAR'97 Kyoto*, Vol. 1, pp. 301-308, 1997.
- 20) 中村孝明, 高木政美, 志波由紀夫, 坂下克之: 緊急地震速報を利用したプラント施設の緊急停止に関する研究, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.1330-1333, 2006.
- 21) Electric Power Research Institute: Program on Technology Innovation : Use of Cumulative Absolute Velocity (CAV) in Determining Effects of Small Magnitude Earthquakes on Seismic Hazard Analyses, EPRI TR-1014099, 2006.
- 22) 岩田隆, 山崎文雄, 中根宏行, 児玉英一, 田蔵隆, 清水勝美, 片岡俊一: 制御用センサーに使用する地震動指標の実証的評価, 第 21 回地震工学研究発表会講演概要, 21 巻, pp.613-616, 1991.
- 23) 鈴木直人, 島村誠: 地震時運転規制方法の研究, *JR East Technical Review*, No.3, pp.53-60, 2003.
- 24) 落合兼寛, 長澤和幸: 塑性率を損傷評価の指標とする機械設備の地震 PRA における地震動指標の検討, 日本機械学会 *Dynamics and Design Conference 2016 USB 論文集*, 2016.

## 2. 緊急停止基準で用いる地震動指標と地震計の最適位置の選定方法

### 2.1 はじめに

リスク定量化手法を援用した石油精製施設の緊急停止基準の評価では、基準値の評価精度の向上が重要である。地震計で観測する地震動指標を何にするか、敷地のどこに地震計を設置するかが評価精度に大きく関わり、これらを如何に選定するかが現状の課題である。

石油精製施設と同様に多種多様な構造物で構成される都市ガス施設の自動遮断システムや鉄道の運転規制で使用される地震動指標は、前章で示したように、建屋や土工設備等、様々な構造物が混在した地震被害データと相関性の高い指標が選択されているが、対象施設の固有性は考慮されていない。

緊急停止基準の評価において、基準値の評価精度の向上に加え、対象施設の固有性を考慮することも重要である。石油精製施設では二次被害の原因となるような危険性の高い製造エリアは、塔、横置円筒形貯槽、架構等のように応答特性が類似する構造物種別で構成されており、これら構造物群を類型化し、それぞれ1つの構造物として扱うことができる。また、対象エリアもガスや鉄道施設と比べ限定されるので、地盤状況も反映することができる。したがって、地震計で観測される各地震動指標と類型化した各種構造物の被害（応答）の相関関係について、個別に検討が可能である。

本章では、まず地震動指標と構造物の地震被害および応答の相関性に関する既往研究を調査すると共に、広域に散在する構造物を対象とした場合を想起し、緊急停止基準で用いる地震動指標と地震計設置位置の選定の際に想定される問題を挙げる。そして、対象施設の固有性として、施設の各種構造物の応答と地震動指標の相関関係を解析的に捉え、適切な地震動指標および地震計の最適な設置位置を選定する実用的な方法を提案する。

## 2.2 地震動指標と構造物の地震被害および応答の相関性に関する既往研究

地震動指標と構造物の地震被害の相関性については、古くから数多くの研究が行われている。境ら<sup>1)</sup>は、兵庫県南部地震（1995）等、1994～2001年に発生した地震の強震記録と建物被害データを用い、地表面最大加速度（以降、PGA）、地表面最大速度（以降、PGV）、SI値<sup>2)</sup>、計測震度と建物被害率の関係をそれぞれ検討し、被害に対してPGAはほとんど相関がなく、PGV、SI値にはある程度の相関が見られるとしている。境ら<sup>3)</sup>は、同様の検討を2002～2005年以降に発生した新潟県中越地震（2004）等の地震記録と被害データを加えて行い、傾向が同じことを確認している。また、これらの研究の中で、建物被害は、周期1～2秒程度の周期帯の加速度もしくは速度応答スペクトル（減衰定数5%）との相関が高いことを示している。宮腰ら<sup>4)</sup>、呉ら<sup>5)</sup>は、それぞれ台湾集集地震（1999）、東北地方太平洋沖地震（2011）の強震記録と建物被害データを用いて地震動指標と建物被害の相関性を検討している。宮腰らによる検討では、対象は学校校舎（RC造）であり、PGA、PGV、SI値、計測震度と学校被災度（日本建築防災協会の被災度判定のための損傷割合を参考に、無被害・軽微～倒壊の被災度を0～1の値で数値化）との相関係数は概ね0.7以上で、特にPGA、計測震度との相関係数が高い結果となっている。呉らは、地震動指標と建物被害率の関係を示す被害関数を評価する際の地震動指標として、PGA、PGV、SI値、計測震度を採用し、それぞれ評価した被害関数のばらつき（対数標準偏差）を比較している。その中で建物被害率はPGV、SI値と相関が高く、PGA、計測震度との相関は低いとしている。このように建物被害と相関の高い地震動指標は、SI値やPGVであることを指摘している研究が多いが、台湾集集地震の検討結果のようにPGAが建物被害との相関が高い結果となっているものもある。ただし、これらの結果は、RC造建物、低層建物等といったように大まかに類型化された構造物と地震動指標の相関関係であり、構造物の応答特性等の個別性は反映されていない。

一方で、構造物の構造形式等を反映してモデル化し、観測地震波や模擬地震波を用いた弾塑性応答解析の結果から地震動指標と構造物応答（損傷）との相関性を検討している研究も数多く行われている。北原ら<sup>6)</sup>は、模擬地震波を用い、RC造中高層建物を多質点系のモデル（層数5～34、固有周期0.42～2.11 sec）に置換して弾塑性応答解析を行い、地震動指標と構造物応答との関係について分析している。その結果、短周期構造物ではPGAが、中周期構造物ではPGVが、長周期構造物では地表面最大変位（以降、PGD）が構造物の最大応答値と強い相関を有することが示されている。さらに、北原ら<sup>7)</sup>は、地盤との相互作用を考慮した鋼構造物についても2質点3自由度Sway-Rockingモデルに置換し、固有周期の異なる（0.416～1.204 sec）5基について弾塑性応答解析を行い、地震動指標（PGA、PGV、PGD、SI値）と構造物応答との相関性を検討している。RC造建物と同様、構造物の固有周期により最大応答変位との各地震動指標の相関性は変動し、PGAと最大応答変位の相関性は、短周期では強いが長周期になるに従い弱くなり、PGVやSIは全ての周期領域（0.416～1.204 sec）で常に安定して相関が高い結果となっている。石油タンクについては、座間ら<sup>8)</sup>がタンクを

1 質点系のばねマスモデルに近似し、最大加速度が 1 G 程度および断層近傍で得られた実地震波を使用して弾塑性応答解析を行い、地震動指標と塑性率の相関性について検討している。その中で、相関性の高い地震動指標は PGA であり、相関性はやや PGA には劣るものの計測震度や PGA と PGV の積も比較的相関が良いことを指摘している。岸壁については、野津ら<sup>9)</sup>が有限要素法プログラム FLIP<sup>10)</sup>を用い、国内外の様々な実地震波を用いてケーソン式モデル岸壁の変形量と地震動指標の相関関係を、背後および基礎地盤で過剰間隙水圧の発生を許す場合（液状化）と許さない場合（非液状化）の場合の 2 通りのケースについて検討している。同検討では、液状化と非液状化の双方の場合において、PGA が岸壁の残留変形量との相関が最も悪く、非減衰（減衰定数  $h=0$ ）の SI 値、速度の 2 乗の時間積分の平方根である速度の PSI（Power Spectrum Intensity）<sup>9)</sup>が最も高いという結果を得ている。



### 2.3 地震動指標と地震計位置の選定における現状の問題

地震時において、石油精製施設の二次被害の原因となるような危険性の高い製造エリアの構造物としては、塔（タワー）、横置円筒形貯槽（横置ドラム）、架構等が挙げられるが、これらは特殊構造物であり、地震被害データは十分に存在しない。よって、2.2節に示した既往の研究と同様、対象とする各構造物について応答評価のモデルを作成し、地震動指標と応答の相関性の検討を行う必要がある。

一方、地表面で観測される地震動は、震源からの波動伝播を経て、サイト下の工学的基盤面（せん断波速度  $V_s = 350 \sim 700 \text{ m/s}$  相当）に到達し、表層地盤の影響を受けて増幅される。構造物の損傷は、この増幅された地震動によって引き起こされる。石油精製施設のように構造物が多様で構内に散在している場合、表層の地盤増幅は図 2-3-1 に示すように地盤の地層構成の差異により様々となるため、地震計で観測された地震動とは異なる地震動が各構造物に作用し、応答することになる。

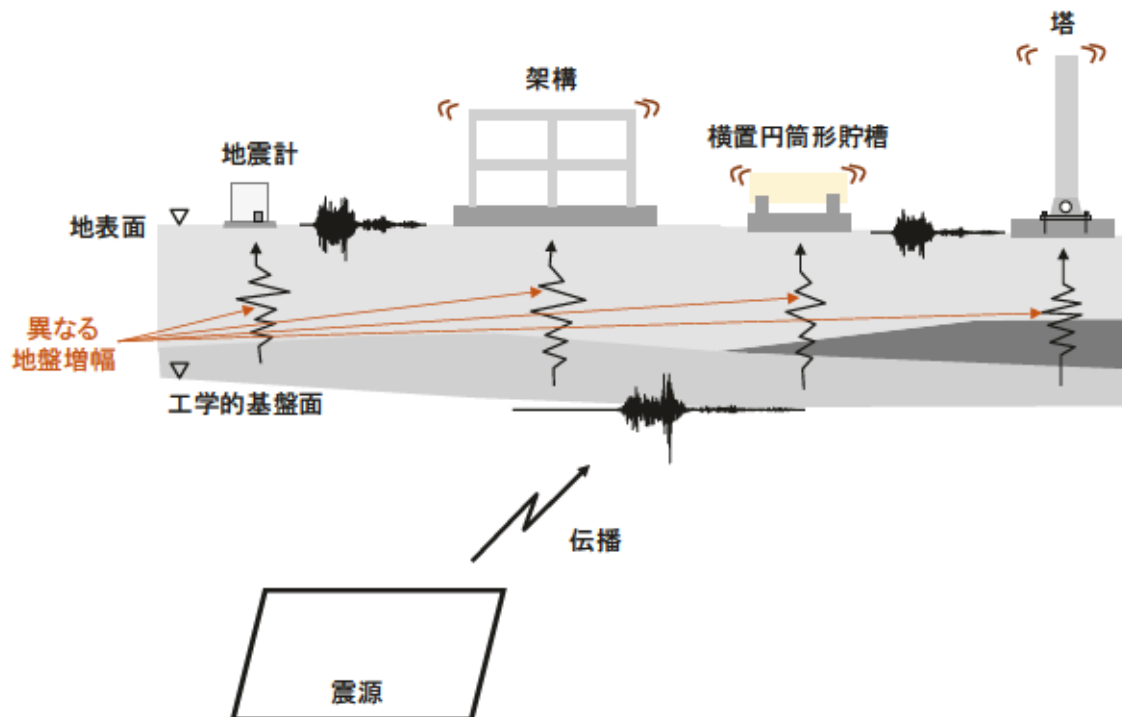


図 2-3-1 広域に散在する構造物に作用する地震動



よって、地震計で観測される地震動指標と構造物応答の相関関係は、各構造物だけでなく、構造物が立地する地盤種、地震計の設置位置によって異なり、周期特性や継続時間が異なる海溝型地震や内陸型地震等、施設に襲来する地震のタイプによっても影響を受けると推察される。図 2-3-2 は施設構造物を塔（タワー）、横置円筒形貯槽（横置ドラム）、架構の 3 種とし、それらが地盤増幅特性の異なる A と B の 2 種の地盤に立地している（地盤種 A にタワー、横置ドラム、地盤種 B に架構）場合の地震動指標と構造物応答の相関関係の概念図である。地震動指標について PGA と SI 値の 2 種、地震計の設置位置について地点①（地盤種 A）および地点②（地盤種 B）の 2 箇所の検討を想起すると、同図に示すように地震動指標と各構造物の応答の相関関係は、地盤種 A に立地する塔と横置円筒形貯槽、地盤種 B に立地する架構について、それぞれ 4 通り（地震動指標 2 種×設置位置 2 箇所）となる。このような場合、構造物応答と相関性の高い地震動指標や地震計の設置位置の選択を試みると、各構造物で最適な地震動指標や設置位置が異なることも考えられる。このように、多様な相関関係を考慮し、地震動指標や地震計の設置位置を選定するのは難しい。

そこで、本研究では、地震計で観測される地震動指標と各構造物の応答の関係についてモデル化し、地震動指標および地震計の設置位置を選定する手法を提案し、次節に示す。

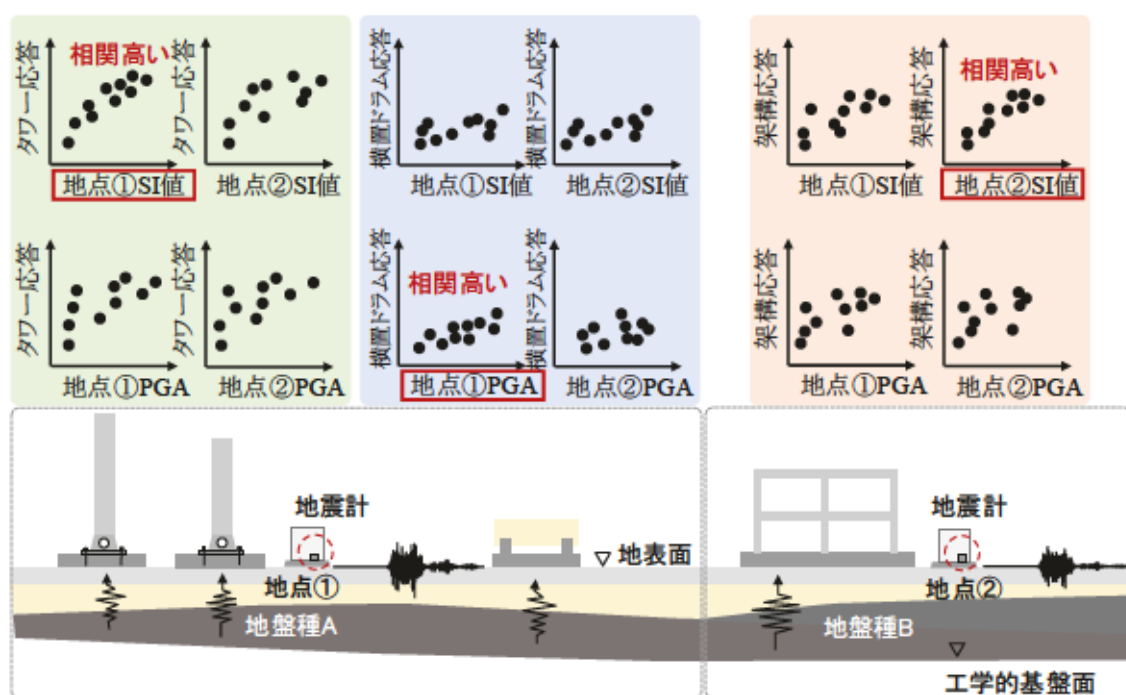


図 2-3-2 地震計で観測される地震動指標と構造物応答の相関関係の概念図

## 2.4 地震動指標と地震計最適位置の選定方法

本研究では、地震計で観測される地震動は、PGA や PGV に加え、近年計測・演算されている SI 値を検討対象とする。一方、構造物の応答評価では一定の精度と簡便さから加速度応答スペクトルを用いるケースが多い。そこで、地震動指標と対象構造物の応答値の相関関係を図 2-4-1 に示すような回帰式で近似する。同図の横軸  $x$  は PGA, PGV あるいは SI 値、縦軸  $y$  は固有周期  $T$  の構造物の加速度応答スペクトル値 ( $Sa(T)$ ) である。固有周期  $T$  および加速度応答スペクトルの減衰定数は、対象構造物の構造種別やタイプに応じ塑性化による影響を考慮する。回帰のサンプル（ここでは計算値）は、まず、海溝型地震や内陸型地震を取り上げ、最大加速度を調整した複数の地震波を工学的基盤に作用させ、修正 R-O (Ramberg-Osgood) モデル<sup>1)</sup>等を用いて地盤応答解析により地表面の加速度波形、速度波形、ならびに加速度応答スペクトルを計算する。

なお、検討で用いる地震動（地震波）は対象施設に被害をもたらす可能性のあるものとして、少なくとも当該地域および周辺の自治体が想定する海溝型や内陸型の計 10 地震動程度は必要である。また、対象施設が立地する表層地盤は、地形等を考慮し適切にモデル化する。

以下に回帰式を示す。

$$y' = ax^b \quad 2.4.1$$

ここに、 $a, b$  は回帰係数である ( $a, b$  の算出手順は 3.3.2 に記載)。計算値  $y_i$  と回帰式の値  $y'_i$  との比を  $K_i = y_i / y'_i$  と定義し、誤差の幾何標準偏差  $\kappa$  を求めると以下のようなになる。

$$\ln \kappa = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln K_i)^2} \quad 2.4.2$$

ここに、 $n$  は地震動のサンプル数である。

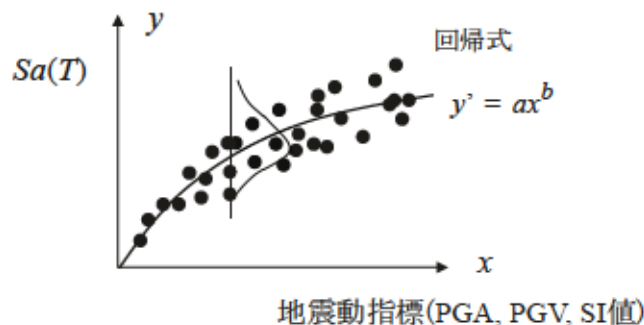


図 2-4-1 地震計で観測する地震動指標と加速度応答スペクトル値  $Sa(T)$  の関係

一方、類似の応答特性（固有周期が同じ）を持つ構造物であっても増幅特性の異なる地盤上に散在しているケースが多い。この場合、任意の固有周期に対し、増幅特性を異にする複数の幾何標準偏差  $\kappa$  が計算されることから、これらを一つに統合する必要がある。統合した幾何標準偏差  $U$  を次式に示す。

$$U = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\ln \kappa_j)^2} \quad 2.4.3$$

ここで、 $m$  は増幅特性の異なる地盤種の数である。この  $U$  を最小とする地震動指標を選定する（図 2-4-2 参照）。また、地震計の構内設置位置については、設置位置を変化させ、被害の対象となる各構造物の幾何標準偏差  $\kappa$  をそれぞれ計算し、2.4.3 式を用いて統合した幾何標準偏差  $U$  が小さい位置を優先して選択する（図 2-4-3 参照）。その際、 $m$  は対象構造物の数となる。例えば、敷地の 1 箇所に地震計を設置する場合は  $U$  が最小の位置、2 箇所の場合は  $U$  が小さい順に 2 番目までの位置を選択する。

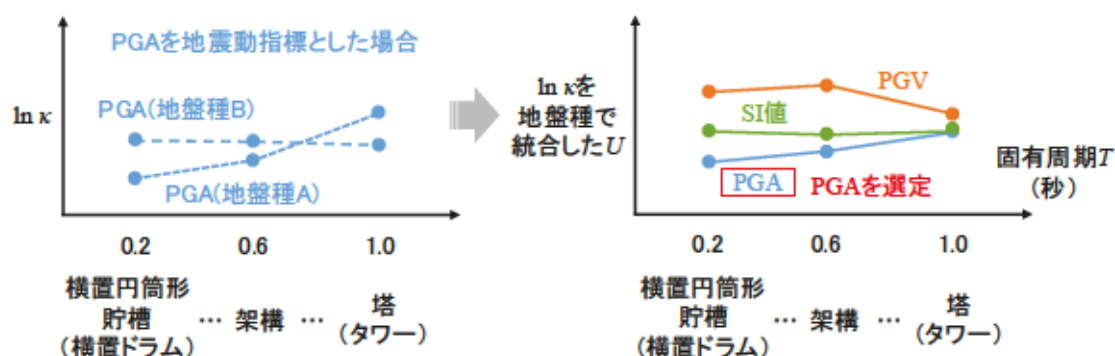


図 2-4-2 地震動指標選定の概念図

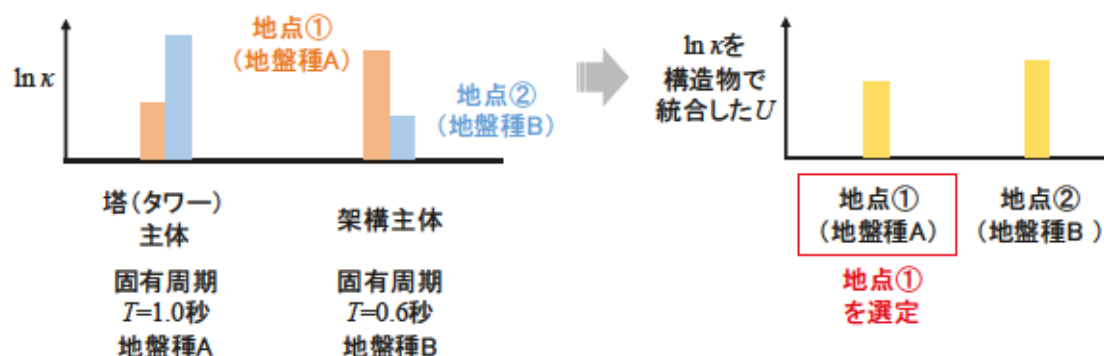


図 2-4-3 地震計設置位置選定の概念図

## 2.5 まとめ

本章では、緊急停止基準で用いる地震動指標および地震計の最適な設置位置の実用的な選定方法を提案した。提案手法は、地震計で観測される地震動指標と各構造物の応答との関係を非線形の回帰式でモデル化し、回帰式による予測値と計算値の誤差を地盤種、構造物毎に統合して、その誤差の大小により地震動指標、および地震計の設置位置を判断するものである。同手法により、緊急停止基準で用いる地震動指標は統合した誤差を最小とする指標として選定され、地震計の設置位置は統合した誤差が小さい順に選択される。

5章では、本提案手法の有用性を確認するため、具体的な石油精製施設を想定し、同手法を用い、地震動指標および地震計の最適な設置位置を選定する。



## 第2章の参考文献

- 1) 境有紀，額瀨一起，神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，No.555，pp.85-91，2002.
- 2) Housner, G.W. : Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault, Proceedings of the 3rd WCEE, pp. 94- 115, 1965.
- 3) 境有紀：強震観測点周辺の被害データを用いた地震動の性質と建物被害の関係の検討，日本地震工学会論文集，Vol.7，No.2（特集号），pp.180-189，2007.
- 4) 宮腰淳一，護雅史，神原浩，林康裕：地震観測記録を用いた台湾集集地震における建物被害と地震動強さの関係，清水建設研究報告，Vol.71，2000.
- 5) 呉浩，正木和明，入倉孝次郎：2011 年東北地方太平洋沖地震における建物被害率と地震動特性の関係，愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書，Vol.08，第2章 東日本大震災関連 研究報告，pp.35-36，2012.
- 6) 北原武嗣，伊藤義人：固有周期依存型 SI の RC 多質点系構造物への適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1357-1362，2000.
- 7) 北原武嗣，清水善行：鋼製橋脚－地盤連成系の弾塑性最大応答変位の簡易推定法に関する研究，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.483-488，2004.
- 8) 座間信作，西晴樹，畑山健：地震動の石油タンク損傷能力指標と危険度評価，消防研究所報告，第94号，pp.11-22，2002.
- 9) 野津厚，井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.18-19，2001.
- 10) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, 1992, pp. 1-15.
- 11) 龍岡文夫，福島伸二：砂のランダム繰返入力に対する応力－ひずみ関係のモデル化について，生産研究，第30巻，pp.356-359，1978.



### 3. 地震計と連動した緊急停止基準の評価方法

#### 3.1 はじめに

気象庁や防災科学技術研究所といった公的機関による地震観測網整備の進捗とともに、重要施設や工場等の個別施設でも地震動が観測され、これら観測情報と連携した防災システム<sup>例えば、1)</sup>や建物の被災度を判定するモニタリングシステム<sup>例えば、2)</sup>が普及している。本研究で対象とする緊急停止システムも地震動の観測情報を利活用する点で類似のシステムである。これらのシステムでは、構内や建物内の地震計、加速度センサー等から得られる観測波を入力とした地震応答解析、システム同定結果を利用して応答を評価し、即時の自動停止や損傷の判定を行っている。応答評価では、例えば、半導体工場等では生産設備設置フロアの最大加速度<sup>3)</sup>、道路橋では応答塑性率<sup>4)</sup>、一般建物では各層の応答加速度<sup>5)</sup>、層間変形角<sup>6)</sup>等が推定されているが、これらには不確実性（評価誤差）が伴う。不確実性が大きいとシステムの誤判定の可能性が高くなるため、評価精度の向上が重要であり、不確実性を考慮したリスク評価等の定量評価は有用である。

一方、地震リスク定量化手法における構造物の損傷確率は、地震動の大きさを変数とした **Fragility Curve** を用いる。しかしながら、地震計と連動した緊急停止基準の評価では、地震動はリアルタイムで観測される確定情報であり、この観測値の情報を変数とした **Fragility Curve** を評価する必要がある。また、この **Fragility Curve** に地震計で観測する地震動指標と施設構造物の応答の相関関係を反映することも、緊急停止基準を適切に評価する上で必要である。

本章では、緊急停止基準の評価でベースとなるリスク定量化手法に関する既往の要素技術について詳述するが、同技術の中において、新規の項目として **Fragility Curve** の評価について、地震計で観測される地震動指標を変数とし、2章でモデル化した施設の各種構造物の応答と地震動指標の相関関係を反映する方法を示す。

### 3.2 地震リスク定量化手法に基づく緊急停止基準の評価方法

本研究において、緊急停止基準の評価はリスク定量化手法をベースとしている。以下にその概要と共に、同手法を用いた緊急停止基準の評価方法を詳述する。

#### 3.2.1 地震リスク定量化の方法

地震リスク定量化の方法は、保険業界で用いられている方法、原子力施設を対象とした安全性評価技術に基づく方法の2つに大別される。

前者は、連邦緊急事態管理庁（FEMA：Federal Emergency Management Agency of the United States）が ATC-13<sup>7)</sup>等で整備した、地震動の大きさに応じた損失率（損失額を再調達価格で除したもの）のデータベースを参照し、損失額、すなわち地震リスクを求める方法であり、主に保険業界において地震保険料率の算出で用いられている。この地震動の大きさと損失率の関係を示す関数は、被害関数（Damage Function）あるいは Vulnerability Curve などと呼ばれ、専門家の判断や実被害データを統計処理して求められている。図 3-2-1 に被害関数の一例を示す。同図の横軸は、最大加速度、最大速度などといった地震動（指標）の大きさ、縦軸は損失率である。この関数が種々の構造物について整備されていれば、地震動の大きさから簡便にリスクを求めることができる。その反面、この方法は、データベースにある構造物の平均的なリスクは求められるものの、構造物個別の固有性を考慮することはできない。さらに、データベースがなく、被災経験（実被害データ）のない構造物のリスクを求めることもできない。

一方、後者の原子力施設を対象とした安全性評価技術に基づく方法は、確率論的リスク評価技術（PRA：Probabilistic Risk Assessment）を背景に、特に学術分野において整備されたものである。その中において、各種構造物の耐震性能（耐力）を解析的に求め、これに実験や被害統計、各種材料のばらつきなどを考慮した関数、いわゆる Fragility Curve<sup>8)</sup>を求めることが作業の主体となっている。Fragility Curve は原子力発電所の地震リスク評価に用いることを目的に作成されたもので、構造信頼性の考え方に基づいている。構造信頼性の基本概念は、ばらつきを含む構造物の応答が、同様にばらつきを含む耐力を超過する確率をもって損傷発生確率（損傷確率）とするものである。Fragility Curve の例を図 3-2-2 に示す。Fragility Curve から軽微、大破といった被害形態毎の発生確率を求め、それぞれの確率に被害形態に応じた損失を乗じてリスクを求める。この方法により、構造物固有のリスクを求めることができる。また、被害統計が少ない、あるいは被害経験のないケースや特殊構造物であっても、数値解析によりリスク評価が可能となる。中村・水谷<sup>9)</sup>は、建築構造物の被害形態を詳細に分析し、それぞれの被害に伴う損失コストを算出した上で、イベントツリー解析により地震動の大きさに対する建築構造物の期待損失コストを求める手法を提案している。

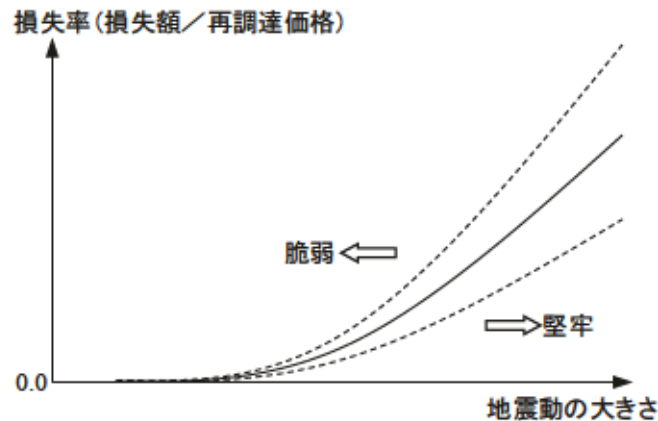


図 3-2-1 被害関数の例

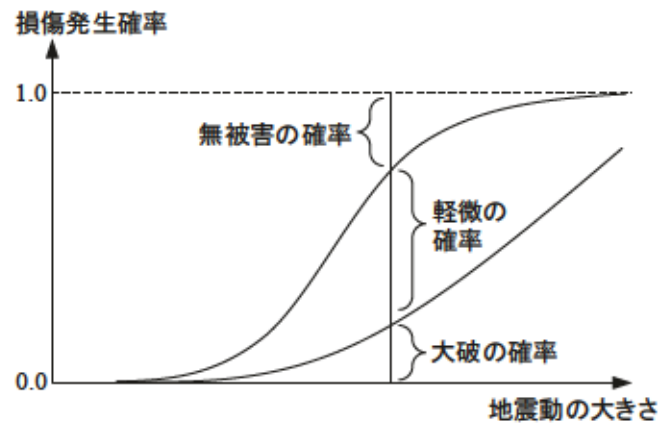


図 3-2-2 Fragility Curve の例

近年では、不動産流動化に伴うデューデリジェンス（エンジニアリング・レポート<sup>10)</sup>）や内閣府による事業継続計画（BCP）に関するガイドライン<sup>11)</sup>の公表により、一般建物・産業施設の地震による被害として財物損失や機能停止被害が注目されるようになり、確率論をベースとした地震リスク評価への要請が高まっている。このような中、構造物や設備機器の損傷相関の扱いが重要な課題となっている。この点については、これまで主として米国で開発された地震時の確率論的安全評価（地震 PSA）では、複数機器の同時損傷確率が変わるため、機器の応答や耐力の相関性を考慮することは重要とされてきた<sup>12)</sup>。日本原子力学会の確率論的安全評価手順<sup>13)</sup>においても、プラント間の機器の応答や耐力の相関係数を考慮した炉心損傷確率の評価例が示されている。

原子力施設以外についても、近年ではシステムを構成する施設間の応答や耐力の相関（損傷相関）を考慮した研究が行われており、物的損失のみの対象であるが、林・福島ら<sup>14)</sup>、中村<sup>15)</sup>の研究がある。前者は、モンテカルロ法により、後者は、全確率の定理を利用した



損失確率関数の評価モデルを用いることで、散在する施設群の損失確率関数を求め、ともに、異地点での地震動（応答）の相関の程度に依存する損失の確率分布形状や平均値、ばらつきなどの特性値について論じている。損傷相関を考慮したシステムの機能停止に関するものとしては、モンテカルロ法による Adachi and Ellingwood<sup>16)</sup>の上水道・電力システムを対象とした研究、全確率の定理を利用した方法を用いた高速道路システムを対象とした静間・中村ら<sup>17)</sup>の研究、水力発電システムを対象とした土居・静間<sup>18)</sup>らの研究、空港の回転翼機（救命救急目的）および水平翼機（物資運搬目的）の運航機能に関する小野・中島ら<sup>19)</sup>の研究などがあり、これらは地震時のシステムの機能性評価とともに、システム構成要素（施設、設備など）間の損傷相関の機能性への影響について考察している。これらの研究で用いられている全確率の定理を利用した方法は、確率変数を独立（耐力）と完全相関（応答）成分に分け、これらの標準偏差を制御することで相関を考慮した組合せ事象の損傷確率をするもので、モンテカルロ法と比べ、計算量が少なく簡便である。また、この他に能島<sup>20)</sup>は、システム構成要素の同時確率密度関数の積分によって損傷相関を考慮する方法を採用しており、損傷相関がシステムの信頼度や復旧期間へ大きく影響すると結論付けている。

### 3.2.2 緊急停止基準の評価方法

Kotsubo et al<sup>21)</sup>、中村ら<sup>22)</sup>は、イベントツリー解析（以下、ETA ; Event Tree Analysis）により、地震動の大きさに応じたリスク（損失額）を緊急停止ありとなしの場合について計算し、それぞれのリスクを比較することで緊急停止基準を評価している。

図 3-2-3 にある地震動の大きさの条件下において、「緊急停止なし」と「緊急停止あり」の場合の損失額（期待値）を計算した例を示す。イベントツリーの各被害要因（構造被害、出火、延焼）の発生確率は、Fragility Curve から評価することになる。図中の太字の数値は、「緊急停止なし」と「緊急停止あり」の相違箇所である。

本例では、「緊急停止なし」の場合、構造被害の発生確率は軽微 0.3、中破 0.19、倒壊 0.01、出火、延焼の発生確率は共に 0.3 としている。緊急停止システムが作動すると延焼の可能性は大きく低減され、「緊急停止あり」の場合、延焼の発生確率は 0 としている。また、それぞれのイベントツリーの帰結には被害形態毎の発生確率と損失額（修復費）、営業損失額を示しているが、イベントツリーの一番上である無被害（構造被害、出火および延焼がない場合）の帰結には営業損失額 10 を見込んでいる。これは、無被害であるにもかかわらず緊急停止システムが作動する（不適切作動）ため、施設の運転停止中の逸失利益等の無駄な費用が掛かることによるものである。「緊急停止なし」と「緊急停止あり」の違いは、基本的にはこの二点である。

損失額期待値は、「緊急停止なし」で 67.3、「緊急停止あり」で 37.0 である。「緊急停止あり」の方が損失額は小さく、この地震動の大きさの条件下において、緊急停止の効果はあると判断できる。

地震動の大きさ  $x$  を変数とし、「緊急停止なし」と「緊急停止あり」の場合の損失額期待

値を計算したものを図 3-2-4 に示す。同図では、地震動の大きさ  $x$  を横軸、縦軸に損失額（期待値）をとり、「緊急停止なし」と「緊急停止あり」の場合の  $x$  に応じた損失額期待値、いわゆる地震ロス関数を比較している。「緊急停止あり」のロス関数は、非常に小さな地震動でも緊急停止を作動させることから、不適切作動による損失が生じ、地震動の小さな領域でも損失額は 0 となっていない。図中の双方のロス関数を見ると、ある地震動の大きさを境（図中矢印）に交差している。このロス関数の交点以下では「緊急停止なし」の方が損失額は小さく、交点以上では「緊急停止あり」の方が損失額は小さくなっている。つまり、緊急停止はこの交点以上の地震動の大きさの場合に作動すればよいということであり、その地震動の大きさは、最適な緊急停止基準と言える。

| 構造被害    | 出火     | 延焼     | 発生確率  | 損失額<br>(修復費) | 営業損失額 | 期待値  |
|---------|--------|--------|-------|--------------|-------|------|
| 無被害 0.5 |        | なし 0.7 | 0.350 | 0            | 0     | 0.0  |
|         |        | あり 0.3 | 0.150 | 100          | 50    | 22.5 |
| 軽微 0.3  | なし 0.7 | なし 0.7 | 0.147 | 5            | 10    | 2.2  |
|         |        | あり 0.3 | 0.063 | 100          | 50    | 9.4  |
|         |        | あり 0.3 | 0.090 | 100          | 50    | 13.5 |
| 中破 0.19 | なし 0.7 | なし 0.7 | 0.093 | 20           | 20    | 3.7  |
|         |        | あり 0.3 | 0.040 | 100          | 50    | 6.0  |
|         |        | あり 0.3 | 0.057 | 100          | 50    | 8.5  |
| 倒壊 0.01 |        |        | 0.010 | 100          | 50    | 1.5  |
| 損失期待値   |        |        |       |              |       | 67.3 |

(a)緊急停止なし

| 構造被害    | 出火     | 延焼     | 発生確率  | 損失額<br>(修復費) | 営業損失額 | 期待値  |
|---------|--------|--------|-------|--------------|-------|------|
| 無被害 0.5 |        | なし 1.0 | 0.500 | 0            | 10    | 5.0  |
|         |        | あり 0.0 | 0.000 | 100          | 50    | 0.0  |
| 軽微 0.3  | なし 0.7 | なし 1.0 | 0.210 | 5            | 10    | 3.2  |
|         |        | あり 0.0 | 0.000 | 100          | 50    | 0.0  |
|         |        | あり 0.3 | 0.090 | 100          | 50    | 13.5 |
| 中破 0.19 | なし 0.7 | なし 1.0 | 0.133 | 20           | 20    | 5.3  |
|         |        | あり 0.0 | 0.000 | 100          | 50    | 0.0  |
|         |        | あり 0.3 | 0.057 | 100          | 50    | 8.5  |
| 倒壊 0.01 |        |        | 0.010 | 100          | 50    | 1.5  |
| 損失期待値   |        |        |       |              |       | 37.0 |

(b)緊急停止あり

図 3-2-3 緊急停止なしとありの場合のイベントツリー解析

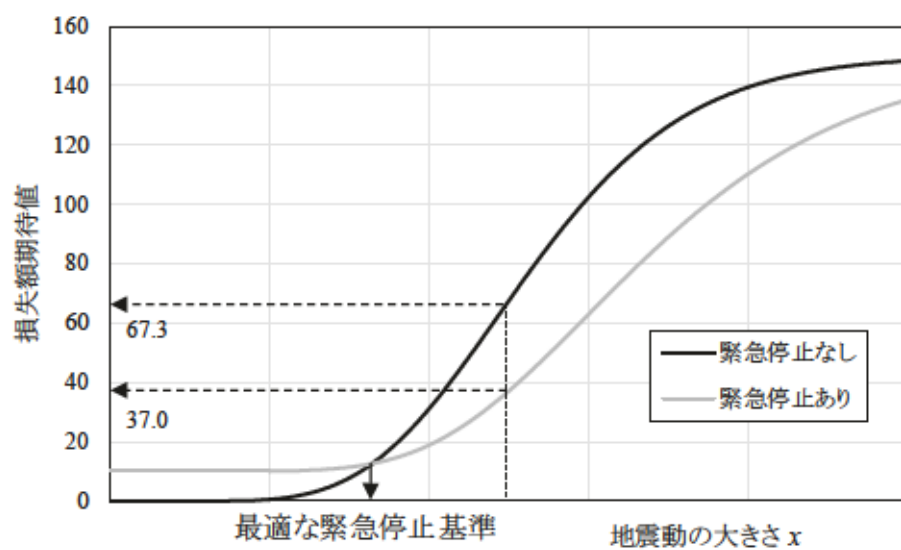


図 3-2-4 最適な緊急停止基準を決定するための地震ロス関数の比較（概念図）

### 3.3 観測値を確定情報とした構造物の Fragility Curve

前節で示したように地震リスク定量化における構造物の損傷確率は、地震動の大きさを変数とした Fragility Curve が用いるが、地震計と連動した緊急停止基準の評価では、地震動はリアルタイムで観測される確定情報であることから、この観測値の情報を変数とした Fragility Curve を評価する必要がある。以下に地震計で観測される地震動の大きさを変数とし、前章で示した地震動指標と施設構造物の応答の相関関係を反映した Fragility Curve の評価方法と手順を示す。

#### 3.3.1 Fragility Curve の評価式

地震動指標 (PGA, PGV, SI 値<sup>23)</sup>) は地震計で観測される値であり、確定値である。構造物の応答の確率分布は、様々な大きさの地震動に対する応答解析により評価されており、応答層間変形角<sup>24), 25)</sup>、残留変位<sup>26)</sup>について対数正規分布に従うとしている。また、本論で用いる地表面加速度応答スペクトルについて文献 27) では、実地震記録から得られた 0.1~4.0 秒の固有周期に応じた応答スペクトルの誤差 (実測値と推定値の比) を対数正規分布としている。一方、入力地震動がある程度大きくなると構造物の塑性化により応答性状が変わるため、応答を一義的に対数正規分布でモデル化することについては議論の余地がある。文献 28) では、入力地震動が大きくなるに従い、建物応答 (最大層間変形角) の確率分布は対数正規分布に一致しなくなることが示され、文献 29) では入力地震動が小さい場合と大きい場合において、建物応答 (最大応答加速度) の確率分布が異なることを示唆している。しかしながら、現状では構造物の応答の分布形を統計的に評価し、確たる分布形を提唱している文献は見当たらない。ここでは、前記したようにリスク定量化を実現する上での統計的裏付けが十分整備されていないこと、本論の軸足は緊急停止基準に用いる地震動指標や地震計の設置位置の評価手法、およびその結果を停止基準に反映する手順に置いていることから、構造物の応答はモデルの精度に課題が残されるものの、対数正規分布を仮定する。応答の確率変数を  $Y$ 、地震動指標を  $x$  とすると、応答の確率密度関数は 2.4.1 式の回帰式を用いて下式のように表すことができる。

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_Y y} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln y - \ln(a \cdot x^b)}{\zeta_Y} \right)^2 \right] \quad 3.3.1$$

上式の応答の対数標準偏差  $\zeta_Y$  について、文献 24), 30) では入力地震動の大きさに対する応答層間変形角、応答せん断ひずみ及びせん断力のばらつき (対数標準偏差) が示されており、応答せん断ひずみのばらつきは、地震動の大きさに従い小さくなっているが、応答層間変形角、応答せん断力のそれについては顕著な傾向は見られない。文献 28) では入力地震動が大きくなるにつれ、建物応答 (最大層間変形角) の確率分布が対数正規分布から二峰性の分布に近づく傾向が示されると共に、応答のばらつきが大きくなることを示唆している。



文献 31)では加速度応答スペクトル推定のばらつき（対数標準偏差）について、地震動振幅が大きくなるに従いばらつきが小さくなることを指摘しているが、顕著な傾向ではなく、ばらつきがほぼ一定の周期もある。また、文献 31)は工学的基盤の応答スペクトルの検討結果であり、地表面の応答スペクトルに関する傾向は示されていない。このように地震動の大きさと構造物の応答のばらつきの関係は複雑であり一定の傾向は見られないことから、応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  は、地震動指標  $x$  の大きさに関わらず一定とした。なお、地震動の大きさに応じ、応答のばらつきを一定とするか否かで施設の損傷確率やリスク（損失額）は異なる場合もある。しかしながら、緊急停止基準に用いる地震動指標や地震計の設置位置は、応答のばらつき（2.4.3 式により算出）の相对比较により選定する。また、緊急停止基準も緊急停止をする場合としない場合の損失額を比較し評価する。よって、地震動指標や地震計の設置位置の選定や停止基準の評価に対し、応答のばらつきを一定とするか否かの影響は小さいと考える。ここで、応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  は幾何標準偏差  $\kappa$  から以下のよう求められる。

$$\zeta_r = \ln \kappa \quad 3.3.2$$

次に、構造物の損傷は、応答  $Y$  が耐力  $C$  を超えた場合に発生すると仮定すると、損傷状態は以下のように表すことができる。

$$Z = \frac{C}{Y} \leq 1.0 \quad 3.3.3$$

耐力  $C$  は構造物の耐力を応答加速度で表現したもので、対数正規分布に従うとすると、損傷確率は確率変数  $Z$  の 1 以下の積分により、以下のように求められる。

$$P_f = \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_z z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln z - \ln(c_m) + \ln(a \cdot x^b)}{\zeta_z} \right)^2 \right] dz \quad 3.3.4$$

ここに、 $c_m$  は応答加速度で表された構造物耐力の中央値である。構造物耐力（中央値）の評価方法は、時刻歴波形による構造物の非線形応答解析を用いる方法、過去の地震被害事例を用いた統計的な方法<sup>例えば 32)</sup>、応答スペクトル法を援用する等の解析的な方法<sup>例えば 33), 34)</sup>がある。施設内の多数の構造物に対して詳細な時刻歴応答解析を行うことは煩雑であること、被害事例の入手は困難であることを考えると、応答スペクトル法を用いる解析的な方法による耐力評価が現実的である。ここで、対数標準偏差（複合偏差） $\zeta_z$  は以下のようになる。

$$\zeta_z = \sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_c^2} \quad 3.3.5$$

ここに、 $\zeta_c$ は構造物耐力（応答加速度で表現）の対数標準偏差である。 $\zeta_c$ は加振試験により求められる<sup>例えば、35)</sup>が構造物種別は限られている。中島ら<sup>34)</sup>は、多種構造物で構成される空港施設の地震リスク（機能性）評価において、様々な構造物の平均的な複合偏差から地震動評価のばらつき（対数標準偏差）を除去することで $\zeta_c$ を求めている。次に、以下のよう  
に積分変数を $z$ から $s$ に変換する。

$$s = a \cdot x^b \cdot z \quad 3.3.6$$

最終的に 3.3.4 式は下式で示される。

$$\begin{aligned} F_s(ax^b) &= \int_0^{ax^b} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta_z s} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln s - \ln(c_m)}{\zeta_z} \right)^2 \right] ds \\ &= \int_0^{ax^b} f_z(\ln s | \ln c_m, \sqrt{\zeta_c^2 + \zeta_r^2}) ds \end{aligned} \quad 3.3.7$$

ここに、 $f_z()$ は $Z$ の正規確率密度関数である。上式は、確定値（ここでは観測値）である地震動指標（PGA, PGV, SI 値）を指標とした構造物の損傷確率を求める **Fragility Curve** である（図 3-3-1）。

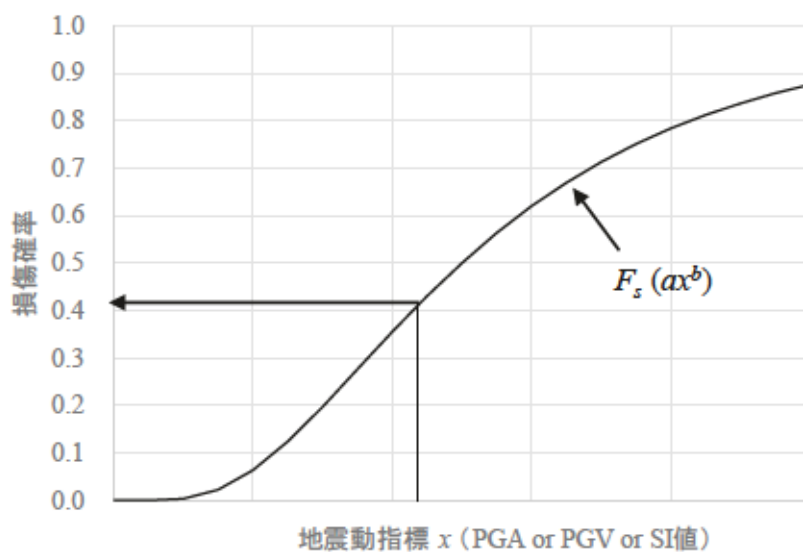


図 3-3-1 確定値である地震動指標（PGA, PGV, SI 値）を指標とした構造物の Fragility Curve

一方, Fragility Curve は全確率の定理を用いて導くこともできる<sup>15),17)</sup>. この評価方法を利用することにより, 地震による構造物間の応答の相関の程度を反映させた損傷確率の評価が可能となる (具体的には, 3.5 節に示す). 以下, この方法を説明する.

図 3-3-2 に応答加速度で表現した耐力  $C$  の非超過確率関数を  $F_C(c)$  と置き, 応答  $Y$  の確率密度関数を  $f_Y(y)$  と共に示す. 損傷確率は応答の条件付非超過確率であり, 応答は同図のように分布している. ここで, 応答を要素に離散的に記述すると, 要素の発生確率は以下のようになる.

$$P(E_{yi}) = f_Y(y_i) \Delta y, \quad i = 1 \sim m \quad 3.3.8$$

ここに,  $E_{yi}$  は地震による応答  $y_i$  の発生事象であり, 添字  $i$  は離散化要素を示す.  $\Delta y$  は離散化された応答の微小区間である. ここで, 図 3-3-3 に示すように全確率の定理を利用すると, 損傷確率  $P(E_Z)$  は応答発生時  $E_{yi}$  の確率として, 次式のように表すことができる.

$$P(E_Z) = \sum_{i=1}^m P(E_Z | E_{yi}) P(E_{yi}) \quad 3.3.9$$

上式の  $E_Z$  は損傷事象,  $i$  は応答の離散化要素数である. また, 事象  $E_{yi}$  と  $E_Z$  が独立であれば, 3.3.9 式は以下となる.

$$P(E_Z) = \sum_{i=1}^m P(E_Z) P(E_{yi}) \quad 3.3.10$$

そして, 3.3.10 式に 3.3.8 式と耐力の非超過確率関数  $F_C(c)$  を用いることで, 損傷確率  $P(E_Z)$  は以下のように表すことができる.

$$P(E_Z) = \sum_{i=1}^m F_C(y_i) f_Y(y_i) \Delta y \quad 3.3.11$$

また, 3.3.11 式の  $f_Y(y_i) \Delta y$  を連続量とすると, 下式となる.

$$P(E_Z) = \int_0^{\infty} F_C(y) \cdot f_Y(y) dy \quad 3.3.12$$

さらに, 3.3.12 式の耐力の非超過確率関数 (累積確率関数)  $F_C(y)$  を密度関数表示にすると, 同式は以下のようになる.

$$P(E_Z) = \int_0^\infty \int_0^y f_C(s) \cdot f_Y(y) ds dy \quad 3.3.13$$

ここで、上式中の各関数は対数正規分布であり、応答、耐力の中央値  $\alpha x^b, c_m$ 、対数標準偏差  $\zeta_r, \zeta_c$  を用いると、3.3.13 式は次のようになる。なお、 $a, b$  は 2.4.1 式の回帰係数、 $x$  は地震計で観測される地震動指標である。

$$P(E_Z) = \int_0^\infty \int_0^y f_C(\ln s | \ln c_m, \zeta_c) \cdot f_Y(\ln y | \ln \alpha x^b, \zeta_r) ds dy \quad 3.3.14$$

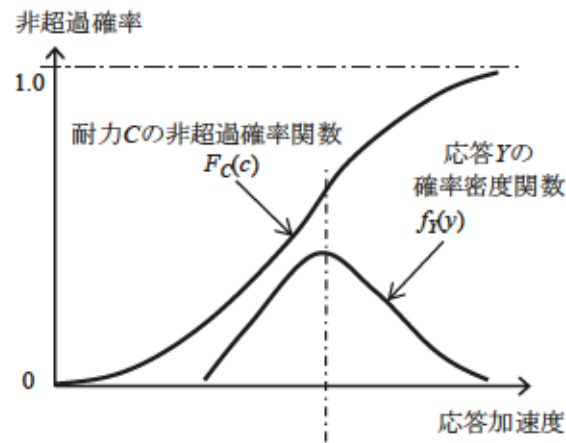


図 3-3-2 耐力  $C$  の非超過確率関数と応答  $Y$  の不確実性

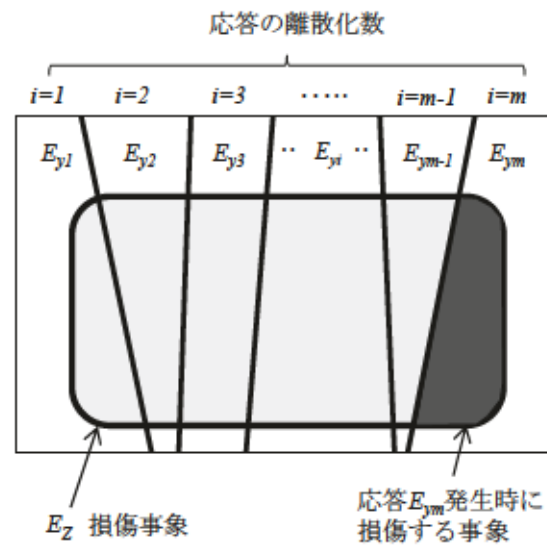


図 3-3-3 全確率の定理を利用した損傷確率



ここで、 $t = s / y$  と置き変数変換を行う。なお、 $s = ty$ ,  $ds / dt = y$  である。3.3.14 式は下式のようになる。

$$P(E_z) = \int_0^{\infty} \int_0^{s/t} f_z(\ln t + \ln y | \ln c_m, \zeta_c) \cdot f_y(\ln y | \ln ax^b, \zeta_r) y dt dy \quad 3.3.15$$

3.3.15 式の外側の変数  $y$  の積分を行うと、同式は以下のように示される。

$$\begin{aligned} P(E_z) &= \int_0^{s/t} f_z(\ln t | \ln c_m - \ln ax^b, \sqrt{\zeta_c^2 + \zeta_r^2}) dt \\ &= \int_0^{s/t} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\zeta_c^2 + \zeta_r^2)} t} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - (\ln c_m - \ln ax^b)}{\sqrt{(\zeta_c^2 + \zeta_r^2)}} \right)^2 \right\} dt \end{aligned} \quad 3.3.16$$

さらに、 $s = tax^b$  と置き、変数変換を行う。 $t = s / ax^b$ ,  $dt / ds = 1 / ax^b$  であり、最終的に以下のように誘導できる。

$$F_s(ax^b) = \int_0^{ax^b} f_z(\ln s | \ln c_m, \sqrt{\zeta_c^2 + \zeta_r^2}) ds \quad 3.3.17$$

3.3.17 式は、3.3.7 式と同じとなる。ここでは、耐力の不確実性と応答の不確実性とを分け、独立の仮定の下、全確率の定理を利用し **Fragility Curve** を誘導した。

### 3.3.2 Fragility Curve の計算フロー

図 3-3-4 に本研究で用いる **Fragility Curve** の計算フローを示す。まず、①対象施設構内の地盤の地層構成等から応答特性を考慮して幾つかの地盤種のエリアに分割し、②各エリアについて地盤モデル（層構成、物性値、動的変形特性）を設定する。この各エリアの地盤に対し、③入力地震動として海溝型や内陸型といった様々なタイプの地震波（10 波）について、最大加速度を調整（地震動の小さな領域から大きな領域において、PGA, PGV, SI 値に対する加速度応答スペクトルの強非線形性を表すことのできるよう 10 段階程度で最大加速度を漸増）し、工学的基盤に作用させて、④応答解析（修正 R-O モデル等）を実施し、⑤PGA, PGV, SI 値および地表面応答スペクトル値  $Sa(T)$  を算出する。そして、エリア毎に⑥PGA, PGV, SI 値および任意の固有周期  $T$  の地表面加速度応答スペクトル値について回帰分析を行い、回帰式の係数  $a, b$ , および  $\ln \kappa$  を算出する。エリア（地盤種）毎、構造物（固有周期）毎に  $\ln \kappa$  を統合し、この統合された  $U$  を判断指標に、⑦緊急停止基準で用いる地震動指標（PGA, PGV, SI 値）の選定（エリア（地盤種）毎に統合した  $U$  を最小とする地震動指標を選定）、⑧最適な地震計位置（エリア）の選択（構造物（固有周期）毎に統合した  $U$  が小さい位置を地震計の設置位置として優先して選択）を行う。⑨各構造物の **Fragility**

Curve (3.3.7 式, 3.3.17 式) は回帰係数  $a$ ,  $b$ , および  $\ln \kappa$  を反映させ, 緊急停止基準の評価に用いる。

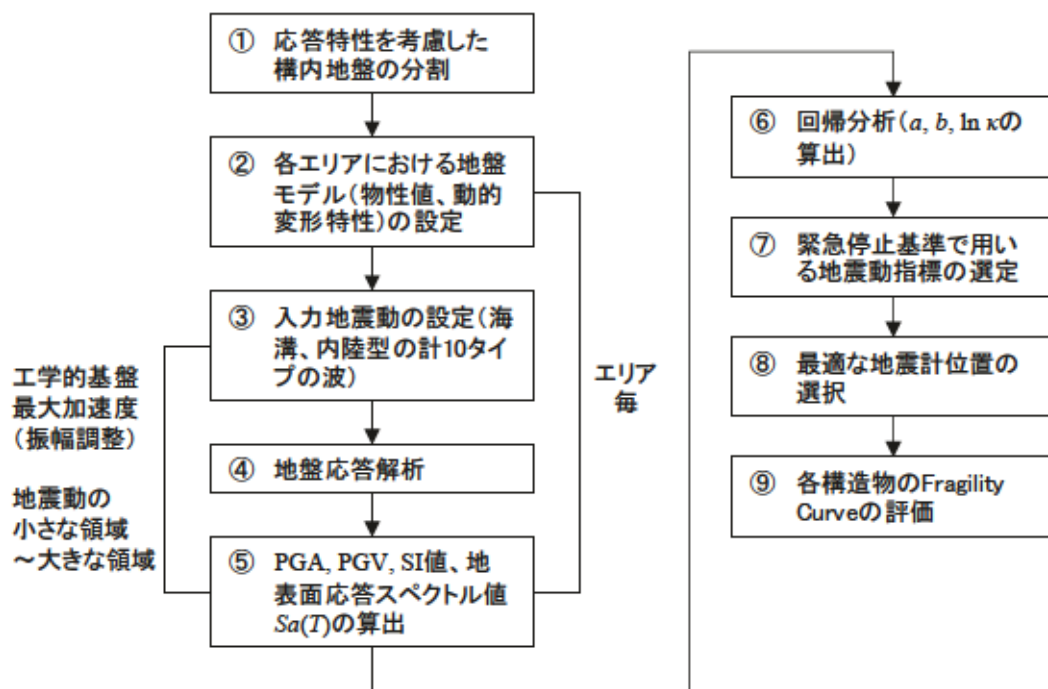


図 3-3-4 Fragility Curve の計算フロー

### 3.4 システム信頼性

火災危険の高い施設の地震リスクを評価する場合、防消火設備やユーティリティ施設等が評価の対象となる。これらの設備・施設の機能が喪失するか否かはリスクに大きな影響を与えるため、その確率の評価が重要となる。これには、システムの信頼性評価が必要であり、以下に説明する。

#### 3.4.1 ブール代数

ブール代数は、複雑な電気回路を単純化し、より効率的な回路を作成するための基本演算手法である。具体的には繋がっているか、否か（開閉）といった 2 値反応を示す構成要素があり、これが複雑に連なった回路、いわゆるシステムとして構成され、このシステムの導通性（繋がっているか、否か）を解く演算手法と考えると分かりやすい。

ブール代数で使われる演算子は、一般的に 2 項演算子  $+$  と  $\cdot$ 、さらに補元演算子  $\neg$  などがある。また、回路が繋がっているか、否かの 2 値を評価するため、使われる数字は 0 と 1 となる。ここで、演算子  $+$  については確率変数の和算と混同するため、ここではこれを  $\oplus$  と記す。

まず、回路の開閉は図 3-4-1 に示すように、繋がっていれば 1、繋がっていなければ 0 とする。図中の  $R_A, R_B$  は、0 と 1 の 2 値変数を持つものの、確率変数ではないことに注意する。

また、並列に接続されている回路は演算子  $\oplus$  で表現し、直列の場合は  $\cdot$  と表現する。

ブール代数の公理を説明する。公理は交換法則、分配法則、さらに単位元と呼ばれ、以下のようになる。

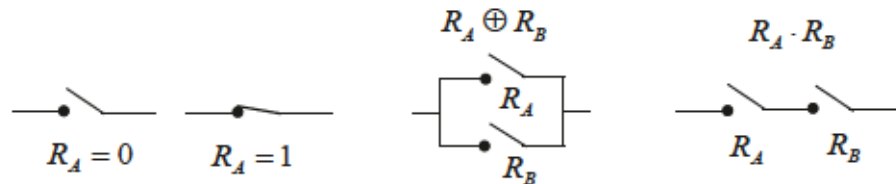


図 3-4-1 回路の開閉と並列・直列接続

交換法則： $R_A \oplus R_B = R_B \oplus R_A$ ， $R_A \cdot R_B = R_B \cdot R_A$

分配法則： $R_A \cdot (R_B \oplus R_C) = R_A \cdot R_B \oplus R_A \cdot R_C$ ， $R_A \oplus (R_B \cdot R_C) = (R_A \oplus R_B) \cdot (R_A \oplus R_C)$

単位元： $R_A \oplus 0 = R_A$ ， $R_A \cdot 1 = R_A$

補元： $R_A \oplus \bar{R}_A = 1$ ， $R_A \cdot \bar{R}_A = 0$

さらに、上記公理を用いて以下の定理を導くことができる。

結合則： $R_A \oplus (R_B \oplus R_C) = (R_A \oplus R_B) \oplus R_C$ ， $R_A \cdot (R_B \cdot R_C) = (R_A \cdot R_B) \cdot R_C$

巾等律： $R_A \oplus R_A = 0$ ， $R_A \cdot R_A = R_A$

$R_A \oplus 1 = 1$ ， $R_A \cdot 0 = 0$

吸収則： $R_A \oplus R_A \cdot R_B = R_A$ ， $R_A \cdot (R_A \oplus R_B) = R_A$

$$\text{ドモルガン} \quad \overline{(R_A \oplus R_B)} = \overline{R_A} \cdot \overline{R_B}, \quad \overline{(R_A \cdot R_B)} = \overline{R_A} \oplus \overline{R_B}$$

上記公理，定理を使うことで複雑な回路を単純化し，その導通性（機能性）を評価できることになる。

一方， $R_A, R_B$  は変数 0 と 1 を持つ 2 値の確率変数と置き換えることができる。演算結果はある回路が繋がっている確率，その余事象である繋がっていない確率などを求めることができる。0, 1 のみならず，0 と 1 の生起確率を併せて評価できることにより，応用範囲は広がる。以降ではシステムの信頼性評価への応用について示す。

### 3.4.2 直列・並列および直列・並列混在システムの信頼性評価

機器系や生産システム，消火システムを対象とした信頼性解析は，そのシステムが故障し，本来の機能が喪失する可能性を評価する問題を対象としている。一般にシステム機能が健全である可能性をシステムの信頼度，その逆を不信頼度と呼んでいる。信頼度や不信頼度は確率により定量的に表現され，定量化するための一連の解析手法をシステム信頼性解析と称する。なお，ここでは信頼度を健全確率，不信頼度を喪失確率と呼ぶこととする。

まず，直列・並列システム，あるいは直列と並列が混在するシステム（以降，直列・並列混在システム）を対象にシステム信頼性解析の方法を概説する。

図 3-4-2 には，直列，並列システム，直列・並列混在システムの例を示している。それぞれ 6 要素で構成されている。図 3-4-2 中の  $R_i$  ( $i=1\sim6$ ) は，図 3-4-3 に示すように変数 0 と 1 を持つ 2 値の確率変数とする。

ここで，ブール代数では 0 は繋がっていないことになるが，ここでは 0 の場合は機能が喪失しているとみなす。また，その余事象である 1 は健全とみなす。直列システムを対象とする場合，同システムが健全であるためには，1～6 の要素が全て 1（健全）でなければならない。直列システムが健全あるいは機能喪失の状態は，以下のように表すことができる。

$$R_{\text{sys}} = \min_{i=1}^6 R_i \tag{3.4.1}$$

ここに， $\min$  をミニマム演算（以下， $\min$  演算）と呼ぶ。 $R_{\text{sys}}$  はシステム機能の確率変数， $R_i$  は要素機能のそれであり，それぞれ 0, 1 の 2 値の確率関数（図 3-4-3 参照）である。3.4.1 式は状態関数である。同式をブール代数の表記ルールに従い表すと，以下のようなになる。



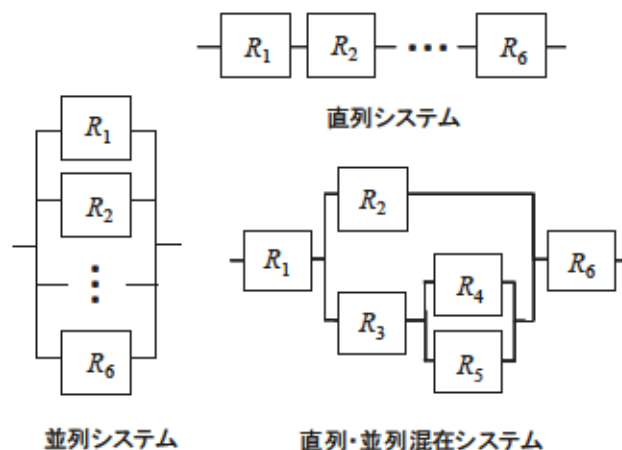


図 3-4-2 直列・並列システムおよび直列・並列混在システムの例

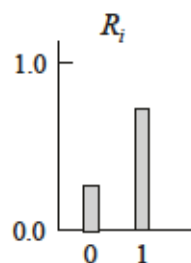


図 3-4-3 要素機能の確率関数

$$R_{sys} = R_1 \cdot R_2 \cdots R_6 \quad 3.4.2$$

3.4.2 式は論理式と呼ばれている。ここに、 $\cdot$ は積事象を表す。ここで、要素が 0 になる確率、つまり各要素の機能喪失確率を  $p_{fi}$  とすると、システムの機能喪失確率を  $p_{f\_sys}$  は以下のよう  
に表すことができる。

$$p_{f\_sys} = 1 - \prod_{i=1}^6 (1 - p_{fi}) \quad 3.4.3$$

一方、システムの健全確率  $p_{s\_sys}$  は以下のようになる。

$$p_{s\_sys} = \prod_{i=1}^6 p_{si} \quad 3.4.4$$

ここに、 $p_{si}$ は要素が 1 である確率、つまり各要素の健全確率である。

並列システムでは、要素 1～6 のどれか一つでも健全あれば、システムは健全となる。こ

れより、どれか一つでも健全である状態関数は以下のように求められる。

$$R_{sys} = \max_{i=1}^n R_i \quad 3.4.5$$

ここに、**max** をマックス演算（以下、**max** 演算）と呼ぶ。ブール代数の表記ルールに従えば、論理式は以下になる。

$$R_{sys} = R_1 \oplus R_2 \oplus \dots \oplus R_6 \quad 3.4.6$$

ここに、 $\oplus$  は和事象を表す。システムの機能喪失確率  $p_{f\_sys}$ 、および健全確率  $p_{s\_sys}$  は以下のようになる。

$$p_{f\_sys} = \prod_{i=1}^6 p_{fi} \quad 3.4.7$$

$$p_{s\_sys} = 1 - \prod_{i=1}^6 (1 - p_{si}) \quad 3.4.8$$

なお、2 値を対象としているので、システムの機能喪失確率と健全確率は、以下の関係である。

$$p_{f\_sys} = 1 - p_{s\_sys} \quad 3.4.9$$

次に、直列・並列混在システムを取り上げる。図 3-4-2 に示した同システムの状態関数は以下となる。

$$R_{sys} = \min(R_1, (\max(R_2, \min(R_3, \max(R_4, R_5))))), R_6) \quad 3.4.10$$

論理式は、ブール代数の表記ルールに従い、以下のようになる。

$$R_{sys} = R_1 \cdot (R_2 \oplus R_3 \cdot (R_4 \oplus R_5)) \cdot R_6 \quad 3.4.11$$

システムの機能喪失確率  $p_{f\_sys}$  および健全確率  $p_{s\_sys}$  は、以下のように求められる。

$$p_{f\_sys} = 1 - (1 - p_{f1}) \{ 1 - p_{f2} \{ 1 - (1 - p_{f3}) \{ 1 - p_{f4} \cdot p_{f5} \} \} \} (1 - p_{f6}) \quad 3.4.12$$

$$p_{s\_sys} = p_{s1} [1 - (1 - p_{s2}) \{1 - p_{s3} (1 - (1 - p_{s4}) (1 - p_{s5}))\}] p_{s6}$$

3.4.13

表 3-4-1 に、直列と並列システムの状態関数、論理式、機能喪失確率、健全確率等をまとめ、一般的に示す。

表 3-4-1 システムの状態関数、論理式、機能喪失確率と健全確率

| システム形態 | 直列システム  | 並列システム  |
|--------|---|---|
| 状態関数   | $R_{sys} = \min_{i=1}^n R_i$                  | $R_{sys} = \max_{i=1}^n R_i$                        |
| 論理式    | $R_{sys} = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n$          | $R_{sys} = R_1 \oplus R_2 \oplus \cdots \oplus R_n$ |
| 機能喪失確率 | $p_{f\_sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{fi})$ | $p_{f\_sys} = \prod_{i=1}^n p_{fi}$                 |
| 健全確率   | $p_{s\_sys} = \prod_{i=1}^n p_{si}$           | $p_{s\_sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{si})$       |

### 3.5 損傷事象の相関を考慮したリスク定量化手法

3.2.2 項で示した ETA, 3.4 節で示したシステムの健全確率, 機能喪失確率の評価では, 被害 (構造損傷, 火災等) 事象の独立を前提としている. 本節では, 全確率の定理を利用し, 独立を前提としたこれまでの計算ロジックを変えずに損傷事象の相関を考慮できる方法<sup>15),17)</sup>を示す.

#### 3.5.1 損傷事象の相関

構造物の損傷事象は, 構造物の持つ耐力と応答によって定めることができる. 構造物間の耐力はほぼ独立を仮定できるが, 応答は一定の相関があると考えられる. ここでの相関は, 地震動による複数の構造物の応答の統計的な相関である. 例えば, 同一地点に立地する構造物には同じ地震動が作用することから, 地震動については完全相関と考えることができる. しかしながら, 構造物はそれぞれ固有の応答特性を持つことから, 構造物間の応答については完全相関とは言えない. これは, 構造物内に設置されている設備も同様である. 一方, 一定の距離がある構造物間では, 構造物に作用する地震動は完全相関とはならず, 距離が離れるに従い相関の度合いは低下することになる. そこで, 構造物間の耐力を独立, 応答は一定の相関を有する場合について, 損傷事象の相関係数の算出方法を以下に示す.

図 3-5-1 に示すように同一地点に立地していても応答特性が異なる 2 構造物を想起する. 構造物の耐力の確率変数を  $C_1, C_2$  とし, 構造物の応答の確率変数を  $Y_1, Y_2$  とすると共に,  $C_1, C_2$  は互いに独立,  $Y_1, Y_2$  は一定の相関があるものと仮定する.

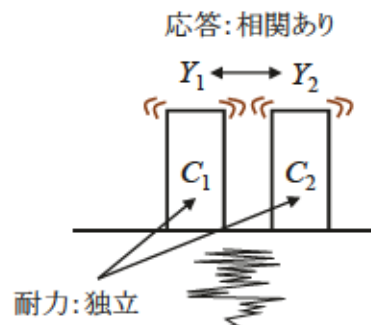


図 3-5-1 2つの構造物の応答と耐力の関係

3.3.3 式の性能関数の両辺について対数を取ると下式となる.

$$\ln Z_i = \ln C_i - \ln Y_i \quad , i=1 \sim 2 \quad 3.5.1$$

ここで,  $\ln Z_i$  の共分散は, 3.5.1 式の関係および,  $C_1$  と  $C_2$ ,  $C_1$  と  $Y_1$  の関係等を独立としていることから, 最終的に  $\ln Y_i$  の共分散と同一となる.



$$\text{cov}(Z_1, Z_2) = \text{cov}(Y_1, Y_2) \quad 3.5.2$$

3.5.2 式より  $Z_1, Z_2$  の相関係数（損傷相関係数）は以下のように表される．

$$\rho_{Z12} = \frac{\text{cov}(\ln Y_1, \ln Y_2)}{\sqrt{\text{var}(\ln Z_1)} \sqrt{\text{var}(\ln Z_2)}} \quad 3.5.3$$

一方，構造物 1, 2 の応答  $Y_1, Y_2$  の相関係数  $\rho_{r12}$  は下式で示される．

$$\rho_{r12} = \frac{\text{cov}(\ln Y_1, \ln Y_2)}{\zeta_{r1} \zeta_{r2}} \quad 3.5.4$$

上式の関係を用いると，相関係数  $\rho_{Z12}$  は以下となる．

$$\rho_{Z12} = \frac{\rho_{r12} \cdot \zeta_{r1} \zeta_{r2}}{\zeta_{Z1} \zeta_{Z2}} \quad 3.5.5$$

また，3.5.5 式は応答および耐力の対数標準偏差  $\zeta_r, \zeta_c$  を用い，以下のように表すこともできる．

$$\rho_{Z12} = \frac{\rho_{r12} \cdot \zeta_{r1} \zeta_{r2}}{\sqrt{\zeta_{c1}^2 + \zeta_{r1}^2} \sqrt{\zeta_{c2}^2 + \zeta_{r2}^2}} \quad 3.5.6$$

上式より，損傷相関係数  $\rho_Z$  は，応答の相関係数  $\rho_r$  と対数標準偏差  $\zeta_r$ ，耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$ ，複合偏差  $\zeta_Z$  を 3.5.5 式あるいは 3.5.6 式に適用することで求めることができることがわかる．

### 3.5.2 構造物群のリスク定量化の方法

以下に全確率の定理を利用した損傷事象の相関を考慮できるリスクの定量化の方法<sup>15),17)</sup>を示す．

まず<sup>a</sup>，全確率の定理を用い導出された損傷確率として，3.3.9 式を再記し，改めて 3.5.7 式とする．

$$P(E_Z) = \sum_{j=1}^m P(E_Z | E_{y_j}) P(E_{y_j}) \quad 3.5.7$$

ここに、 $E_Z$ は構造物の損傷事象、 $E_T$ は構造物の応答の発生事象であり、応答を  $m$  個の要素に離散化し、それぞれの発生確率を  $P(E_{Tj}) ; j=1 \sim m$  としている。また、 $P(E_Z | E_{Tj})$ は応答  $E_{Tj}$  による条件付きの損傷確率である。

次に、地震  $E$  を想定し、表層地盤の増幅特性や構造物の応答の不確実性（ばらつき）等、これらが複合した応答を確率変数  $Y$  と置く。  $y$  を連続量とすると、3.5.7 式は以下のように表すことができる。

$$P(E) = \int_0^{\infty} P(y) \cdot dp(y | E) \quad 3.5.8$$

ここに、 $P(E)$ は応答の不確実性を考慮した地震  $E$  による損傷確率である。 $dp(y|E)$ は地震  $E$  による応答  $y$  が生じる微小確率を示している。3.5.7 式と 3.5.8 式は、損傷の相関を考慮した確率演算の基本式となる。

ここで構造物数を  $n$  とし、各構造物の **Fragility Curve** を以下のように定義する。

$$P_i(y_i) = F_{Ci}(\ln y_i; c_{mi}, \zeta_{Ci}), \quad i=1 \sim n \quad 3.5.9$$

上式の  $F_{Ci}()$ は耐力の非超過確率関数、 $c_{mi}, \zeta_{Ci}$ は各構造物の耐力中央値と対数標準偏差である。 $y_i$ は構造物  $i$  の応答を表す。この段階では、応答の不確実性は考慮していない。

次に、地震  $E$  による各構造物の応答  $y_i$  が生じる微小確率を以下のように定義する。

$$dp(y_i | E) = f_n(\ln y_i; a_i x^{b_i}, \zeta_n | E) dy_i \quad 3.5.10$$

ここに、 $f_n()$ は構造物  $i$  の応答の確率密度関数であり、ここでは対数正規分布を仮定している。 $a_i x^{b_i}, \zeta_n$ は各構造物の応答の中央値と対数標準偏差であり、 $x$ は地震計で観測される地震動、 $a_i, b_i$ は構造物  $i$  の回帰係数である（2.4 節参照）。

ここで、 $n$  個の構造物において、全ての構造物が損傷する確率は、3.5.9 式と 3.5.10 式を全確率の定理から導出された 3.5.8 式に適用することで以下のように求められる。

$$P_{failure\_all}(E) = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n P_i(y_i) f_n(\ln y_i; a_i x^{b_i}, \zeta_n | E) dy_i \quad 3.5.11$$

また、全ての構造物が健全な確率は、以下となる。

$$P_{safe\_all}(E) = \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n (1 - P_i(y_i)) f_n(\ln y_i; a_i x^{b_i}, \zeta_n | E) dy_i \quad 3.5.12$$

と表すことができる。3.5.11 式, 3.5.12 式は  $n$  個の構造物の損傷の組み合わせの中で, 全て損傷, 全て健全の 2 事象 (排反事象) のみを取り上げたものである。全ての事象を尽くし, また, 各事象の損失額を考慮すると以下のように表すことができる。

$$P_D(d|E) = \int_0^\infty P_D(d|y_i) f_n(\ln y_i; a_i x^b, \zeta_i | E) dy_i, \quad i=1 \sim n \quad 3.5.13$$

ここに,  $P_D(d|y_i)$  は総数  $n$  の構造物群の損失額の確率関数であり, 構造物の応答  $y_i$  の条件付である。 $P_D(d|y_i)$  は各構造物の損傷が独立であることを前提に, ETA などを使い計算することができる。一方の  $P_D(d|E)$  は, 地震  $E$  による応答の不確実性を考慮した構造物群の損失の確率関数である。

各構造物について, 応答の対数標準偏差  $\zeta_r$ , 耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$ , および回帰係数  $a, b$  を 3.5.13 式に適用すると, 損傷事象の相関 (損傷相関係数  $\rho_Z$ ) を考慮した構造物群の損失額の確率関数を求めることができる。

### 3.6 まとめ

本章では、緊急停止基準の評価に関わるリスク定量化手法の要素技術について詳述すると共に、地震計で観測される地震動指標を変数とした **Fragility Curve** を構造信頼性に基づき、導出した。この **Fragility Curve** は、非線形の回帰式による各構造物の応答の予測値と計算値（地盤応答解析による値）の誤差を反映したものである。本研究では、対象とする各構造物について本章で導出した **Fragility Curve** により損傷確率を算出し、緊急停止基準評価に用いる。



### 第3章の参考文献

- 1) 長島一郎, 内山泰生, 欄木龍大, 糸井達哉, 末田隆敏, 志波由紀夫, 坂下克之: 大成リアルタイム地震防災システム～システム開発と展開, 大成建設技術センター報, 第39号, 2006.
- 2) 森清宣貴, 成島慶, 関谷英一, 藤井睦: 建物の構造ヘルスマonitoringに関する基礎的研究, 鴻池組技術研究報告, pp.53-60, 2019.
- 3) 糸井達哉, 内山泰生, 高木政美, 末田隆敏, 長島一郎: 緊急地震速報と現地地震計の初期微動情報を併用した地震防災システムの開発と性能評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.16, No.33, pp.827-832, 2010.
- 4) 小林寛, 運上茂樹, 加納匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 地震工学論文集, Vol.28, pp.1-7, 2010.
- 5) 加藤貴司, 境茂樹, 仲野健一: 地震後における建物の安全性・使用性判定支援のための構造ヘルスマonitoringシステム, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.99-100, 2014.
- 6) 鈴木悠, 三田彰: 少数の加速度センサーを用いた出力のみによる建物の層間変形角推定手法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.725, pp.153-158, 2008.
- 7) Applied Technology Council (ATC): Earthquake damage evaluation data for California, (ATC-13), 1985.
- 8) Kennedy, R. P., Cornell, C. A., Campbell, R. L., Kaplan, S. and Perla, H. F.: Probabilistic Seismic Safety of an Existing Nuclear Power Plant, Nuclear Engineering and Design, Vol.59, No.2, pp.315-338, 1980.
- 9) 中村孝明, 水谷守: 地震リスクマネジメントにおけるイベントツリー解析, 第3回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, Vol.3, pp.75-80, 1995.
- 10) 建築・設備維持保全推進協会 (BELCA): 不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン (2007年版), pp.149-168, 2007.
- 11) 内閣府 (防災担当): 事業継続ガイドライン 第二版, 2009.11.
- 12) M. P. Bohn, et al.: Application of the SSMRP Methodology to the Seismic Risk at the Zion Nuclear Power Plant, NUREG/CR-3428, 1983.
- 13) (社) 日本建築学会: 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価手順: 2007 (AESJ-SC-P006:2007), 2007.
- 14) 林孝幸, 福島誠一郎, 矢代晴美: 地震動強度の空間的相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響, 建築学会構造系論文集, 第600号, pp.203-210, 2006.
- 15) 中村孝明: 相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価, 建築学会構造系論文集, 第623号, pp.49-56, 2007.
- 16) Adachi, T. and Ellingwood, B. R.: Impact of Infrastructure Interdependency and Spatial

Correlation of Seismic Intensities on Performance Assessment of a Water Distribution System, Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (Proc. ICASP10), CH204, Taylor & Francis Group, London, 2007.

- 17) 静間俊郎, 中村孝明, 吉川弘道: 地震損傷相関を考慮した施設群の機能停止評価, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.299-309, 2009.
- 18) 土居賢彦, 静間俊郎, 中村孝明: 調整池の Buffer 効果を考慮した水力発電水路施設の復旧過程に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.3, pp.505-515, 2013.
- 19) 小野正博, 中島由貴, 中村孝明, 静間俊郎: 空港の性能維持・早期復旧に関する地震リスクマネジメント, 国土技術政策総合研究所資料 No.830, 2015.
- 20) 能島暢呂: 要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション, 土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, pp.776-788, 2009.
- 21) Kotsubo, C., Kamemura, K., Ohtsu, H. and Mizutani, M.: Selection of Seismic Trigger Level of Automated Shutdown System for Petrol Chemical Plants on SRM, ICOSAR'97 Kyoto, Vol. 1, pp. 301-308, 1997.
- 22) 中村孝明, 高木政美, 志波由紀夫, 坂下克之: 緊急地震速報を利用したプラント施設の緊急停止に関する研究, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.1330-1333, 2006.
- 23) Housner, G.W.: Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault, Proceedings of the 3rd WCEE, pp. 94- 115, 1965.
- 24) 諏訪仁: 兵庫県南部地震における地震被害データを用いた建物の地震リスク評価法に関する研究, 東京大学学位論文, pp.32-44, 2007.
- 25) 長江拓也, 吹田啓一郎, 中島正愛: 層降伏する鉄筋コンクリート造ピロティ建物の耐震性能 — 確率論的評価を通して —, 日本建築学会構造系論文集, No.610, pp.123-130, 2006.
- 26) 伊藤義人, 和田光永: イベントを考慮した交通基盤施設のライフサイクル評価手法に関する研究, 土木学会論文集, No.745/I-65, pp.131-140, 2003.
- 27) 片山恒雄, 岩崎敏男, 佐伯光昭: 地震動加速度応答スペクトルの統計解析, 土木学会論文報告集, 第 275 号, pp.29-40, 1978.
- 28) 久保田雄大, 小豆畑達哉, 皆川隆之, 花井勉: 公開ハザード情報を用いた建築物の耐震余裕度評価の検討 その 2.鉄筋コンクリート造建物による信頼性解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.B-2, 構造 II, pp.1081-1082, 2010.
- 29) 成田修英, 藤堂正喜, 保井美敏, 金子治: 確率変動する復元力特性を持つ多質点系モデルによる地震応答解析を用いた建物の地震被害評価と被害の確率分布, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, pp.1670-1677, 2010.
- 30) 三明雅幸, 小林和禎, 水野淳, 杉田浩之, 美原義徳: 原子力発電所建屋のフラジリティ評価における不確実さの検討 (その 1) 偶発的不確実さの影響に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.B-2, 構造 II, pp.1103-1104, 2005.

- 31) 坂本成弘, 内山泰生, 翠川三郎: 応答スペクトルの距離減衰のばらつき, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.362-365, 2006.
- 32) 中村孝明, 長沼敏彦, 静間俊郎, 篠塚正宣: 統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.3165-3170, 1998.
- 33) 日本建築学会: 地震リスク評価とリスクコミュニケーション, 156p., 2011.
- 34) 中島由貴, 佐藤健宗, 羽原敬二, 中村孝明: 空港土木施設の耐震信頼性の限界値に関する研究, 土木学会論文集 F6, Vol.73, No.1, pp.11-24, 2018.
- 35) (独)原子力安全基盤機構: 原子力施設などの耐震性評価技術に関する試験及び調査 機器耐力その 3 (総合評価) にかかる報告書, 2006.

## 4. 評価対象

### 4.1 はじめに

本研究で対象とする石油精製施設は、製造装置、配管類等の移送設備、タンク等の貯蔵設備、受変電や動力施設等の各種ユーティリティ、生産・品質管理施設、護岸や栈橋等で構成され、海外からの原料輸入、製品輸送の都合上、沿岸部に立地している。同施設は、多量の可燃性溶液やガスを保有しており、地震時では火災の危険性が非常に高い。特に高温高压の状態で稼働している製造装置やボイラー等が損傷した場合は、その時点で出火する。さらに、付属配管等の破断による可燃物の漏洩から引火し、火災となることもある。このため、出火は地震の主要動の到来とほぼ同時に発生すると考えられ、緊急停止システムにより出火そのものを抑えることは難しい。しかしながら、可燃物の供給を遮断することで火災の拡大を防止することはできる。

本章では、緊急停止基準に用いる地震動指標や地震計の設置位置の選定手法の有用性を確認する対象として、東京湾岸地域の軟弱な埋立地盤に立地する石油精製施設を想定し、同施設の緊急停止基準を評価するためのモデルを詳述する。



## 4.2 対象施設の概要と敷地地盤

対象施設の敷地地盤は施設構内地盤の地層構成などから応答特性を考慮し、図 4-2-1 に示すように 5 エリアに分割できるものとし、ここでは、エリア A～E と呼称することとする。同図右には各エリアにある主な構造物を、表 4-2-1 には主要構造物と共に損傷時発火する装置（高温での稼働や空気との接触で引火する危険物質を含む装置）、可燃物を多量に含む設備の数を記載した。

各エリアの表層地盤は東京湾岸地域の軟弱な埋立地盤をモデル化した文献<sup>1)</sup>に記載されている層構成、物性値を参照した。各エリアの地層区分と各地層の物性値を表 4-2-2 に示すように設定し、応答解析用の地盤モデルを作成した。対象地盤が不整形な場合は、2 次元、3 次元の地盤モデルとする必要があるが、当該地盤の地形は工学的地盤がやや傾斜しているものの表層の地層構成は複雑ではなく、1 次元の平行成層地盤としてモデル化した。工学的基盤面は、せん断波速度  $V_s = 400 \text{ m/s}$  以上となる Ds 層上面とした。また、地盤の塑性化に関するモデルは、修正 R-O (Ramberg-Osgood) モデル<sup>2)</sup>を用いる。

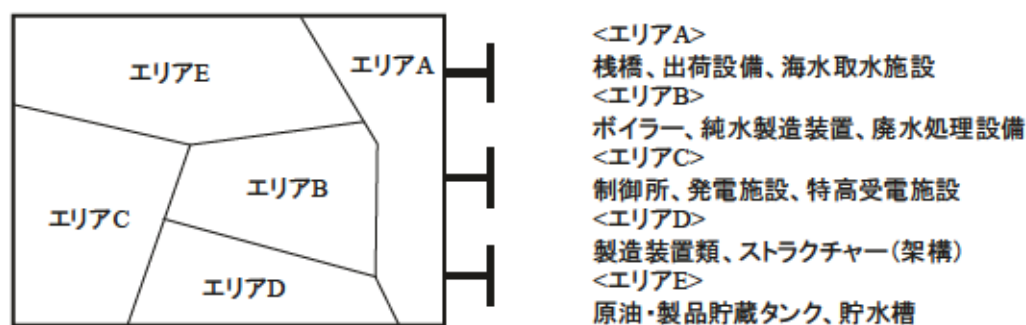


図 4-2-1 評価対象とする石油精製施設概観

表 4-2-1 各エリア主要装置・設備

| エリア名 | 主な構造物              | 損傷時発火する装置        | 可燃物を多量に含む設備       |
|------|--------------------|------------------|-------------------|
| A    | 棧橋、出荷設備、海水取水施設     | なし               | なし                |
| B    | ボイラー、純水製造装置、廃水処理設備 | なし               | なし                |
| C    | 制御所、発電施設、特高受電施設    | なし               | なし                |
| D    | 製造装置類、ストラクチャー(架構)  | 加熱炉(建屋型)2基、タワー5基 | タワー10基、横置ドラム10基   |
| E    | 原油・製品貯蔵タンク、貯水槽     | なし               | 円筒形タンク10基、球形タンク3基 |

表 4-2-2 各エリアの地層区分と各地層の物性値

エリアA

| 深度<br>(m) | 土質<br>記号 | 土質名   | 単位<br>体積<br>重量<br>$\rho(t/m^3)$ | せん断波<br>速度<br>$V_s(m/s)$ |
|-----------|----------|-------|---------------------------------|--------------------------|
| 5.7       | Bs       | 埋土    | 1.79                            | 80                       |
| 10.0      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.79                            | 80                       |
| 16.3      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.48                            | 120                      |
| 19.5      | As       | 沖積砂質土 | 1.48                            | 120                      |
| 21.0      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.48                            | 120                      |
| 21.7      | As       | 沖積砂質土 | 1.48                            | 120                      |
| 36.0      | Ac2      | 沖積粘性土 | 1.70                            | 120                      |
| 50.7      | Dc       | 洪積粘性土 | 1.70                            | 180                      |
| 52.4      | Dg       | 礫質土   | 1.80                            | 340                      |
| 61.4      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.80                            | 340                      |

エリアB

| 深度<br>(m) | 土質<br>記号 | 土質名   | 単位<br>体積<br>重量<br>$\rho(t/m^3)$ | せん断波<br>速度<br>$V_s(m/s)$ |
|-----------|----------|-------|---------------------------------|--------------------------|
| 6.8       | Bs       | 埋土    | 1.53                            | 90                       |
| 13.3      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.53                            | 90                       |
| 16.1      | As       | 沖積砂質土 | 1.53                            | 90                       |
| 35.2      | Ac2      | 沖積粘性土 | 1.57                            | 130                      |
| 44.8      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.70                            | 200                      |
| 50.8      | Dc       | 洪積粘性土 | 1.50                            | 140                      |
| 51.4      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.70                            | 230                      |
| 55.4      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.80                            | 230                      |
| 66.2      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.80                            | 330                      |

エリアC

| 深度<br>(m) | 土質<br>記号 | 土質名   | 単位<br>体積<br>重量<br>$\rho(t/m^3)$ | せん断波<br>速度<br>$V_s(m/s)$ |
|-----------|----------|-------|---------------------------------|--------------------------|
| 4.6       | Bs       | 埋土    | 1.72                            | 130                      |
| 11.6      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.72                            | 130                      |
| 15.5      | As       | 沖積砂質土 | 1.72                            | 130                      |
| 25.1      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.72                            | 130                      |
| 31.5      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.79                            | 270                      |
| 38.9      | Dc       | 洪積粘性土 | 1.79                            | 270                      |
| 50.8      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.80                            | 390                      |
| 53.6      | Dc       | 洪積粘性土 | 1.75                            | 320                      |
| 69.9      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.75                            | 320                      |

エリアD

| 深度<br>(m) | 土質<br>記号 | 土質名   | 単位<br>体積<br>重量<br>$\rho(t/m^3)$ | せん断波<br>速度<br>$V_s(m/s)$ |
|-----------|----------|-------|---------------------------------|--------------------------|
| 1.0       | Bs       | 埋土    | 1.80                            | 60                       |
| 3.6       | Bs       | 埋土    | 1.63                            | 120                      |
| 12.9      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.63                            | 120                      |
| 14.3      | As       | 沖積砂質土 | 1.63                            | 120                      |
| 32.5      | Ac2      | 沖積粘性土 | 1.63                            | 120                      |
| 54.0      | Ac2      | 沖積粘性土 | 1.62                            | 160                      |
| 57.5      | Ac2      | 沖積粘性土 | 1.50                            | 230                      |
| 59.5      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.50                            | 230                      |
| 63.8      | Dc       | 洪積粘性土 | 1.50                            | 230                      |
| 64.9      | Dc       | 洪積粘性土 | 1.80                            | 330                      |
| 75.3      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.80                            | 330                      |

エリアE

| 深度<br>(m) | 土質<br>記号 | 土質名   | 単位<br>体積<br>重量<br>$\rho(t/m^3)$ | せん断波<br>速度<br>$V_s(m/s)$ |
|-----------|----------|-------|---------------------------------|--------------------------|
| 6.2       | Bs       | 埋土    | 1.80                            | 80                       |
| 7.0       | As       | 沖積砂質土 | 1.80                            | 80                       |
| 10.5      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.80                            | 80                       |
| 14.8      | Ac1      | 沖積粘性土 | 1.56                            | 130                      |
| 16.9      | As       | 沖積砂質土 | 1.56                            | 130                      |
| 35.0      | Ac2      | 沖積粘性土 | 1.56                            | 130                      |
| 45.3      | Ds       | 洪積砂質土 | 1.80                            | 390                      |

修正 R-O モデルの基本式として、骨格曲線のせん断応力～せん断ひずみ関係を以下に示す。

$$\frac{\gamma}{\gamma_y} = \frac{\tau}{\tau_y} \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_y} \right)^\beta \right\} \quad 4.2.1$$

本モデルでは、 $\gamma_y$ ,  $\tau_y$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  の 4 つのパラメータがある。一般に土に対しては、 $\gamma_y = \gamma_r$ ,  $\tau_y = \tau_f$  と置いて、以下のように書き換えられる。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \alpha (\tau/\tau_f)^\beta}, \quad \tau_f = G_0 \gamma_r \quad 4.2.2$$

ここに、 $\gamma_r$  は基準ひずみ、 $\tau_f$  はせん断強度である。

さらに、 $G/G_0 \sim \gamma$  関係、 $h \sim \gamma$  関係は以下のように表される。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha (G/G_0 \cdot \tau/\tau_f)^\beta}, \quad h = h_{\max} (1 - G/G_0) \quad 4.2.3$$

ここに、 $h_{\max}$  は最大減衰定数である。

基準ひずみ  $\gamma_r$  を  $G/G_0 = 0.5$  の時のひずみ  $\gamma_{0.5}$  と置くと、パラメータ  $\alpha, \beta$  は以下のように設定できる。

$$\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}}, \quad \alpha = 2^\beta \quad 4.2.4$$

また、せん断ひずみ  $\gamma$  は以下となる。

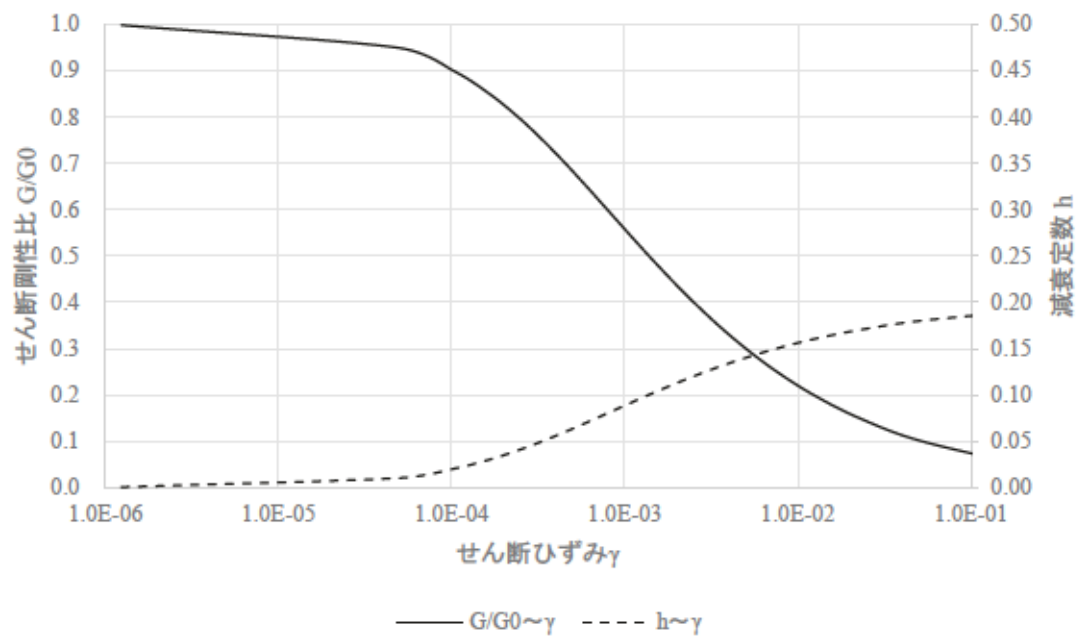
$$\gamma = \frac{1}{G/G_0} \sqrt[\beta]{\frac{1 - G/G_0}{\alpha \cdot G/G_0}} \cdot \gamma_{0.5} \quad 4.2.5$$

表 4-2-3 に各層を構成する土質の動的変形特性と修正 R-O モデルのパラメータであるせん断剛性比  $G/G_0 = 0.5$  となるせん断ひずみ  $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数  $h_{\max}$  を示した。これらの値は、土木研究所の式<sup>3)</sup>を参考に設定した。

図 4-2-2 には、表 4-2-3 の修正 R-O モデルのパラメータ ( $\gamma_{0.5}$  と  $h_{\max}$ ) による各層（沖積粘性土、洪積粘性土、沖積砂質土・洪積砂質土・礫質土の 3 種）の動的変形曲線を示す。

表 4-2-3 各層の修正 R-O モデルのパラメータ ( $\gamma_{0.5}$  と  $h_{max}$ )

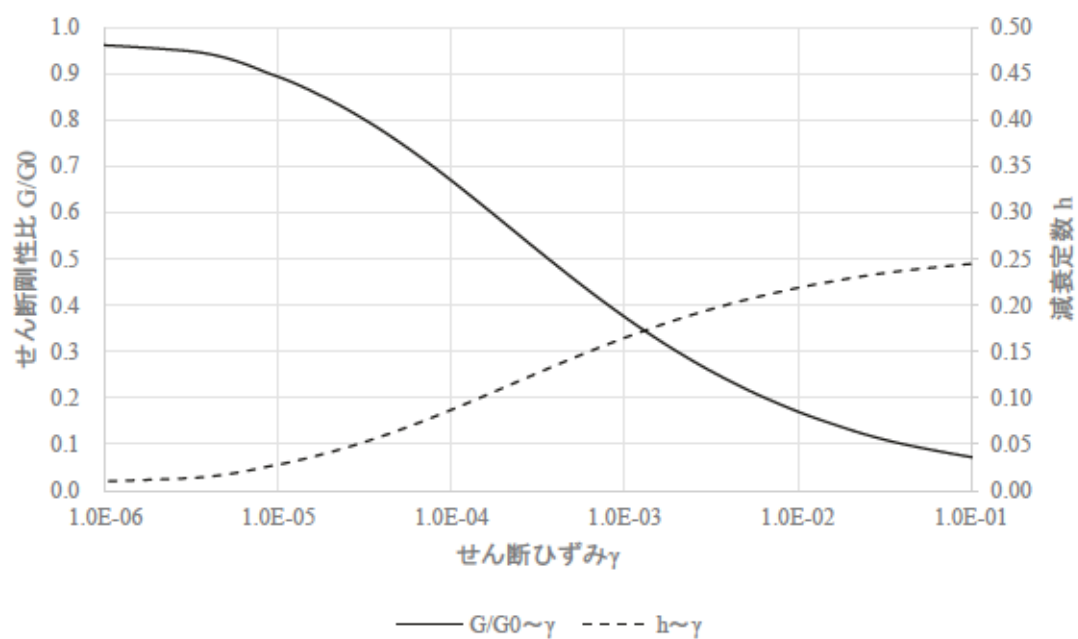
| 層区分             | $\gamma_{0.5}$ | $h_{max}$ |
|-----------------|----------------|-----------|
| 沖積粘性土           | 0.001238       | 0.2       |
| 洪積粘性土           | 0.000732       | 0.264     |
| 沖積砂質土・洪積砂質土・礫質土 | 0.0005         | 0.3       |



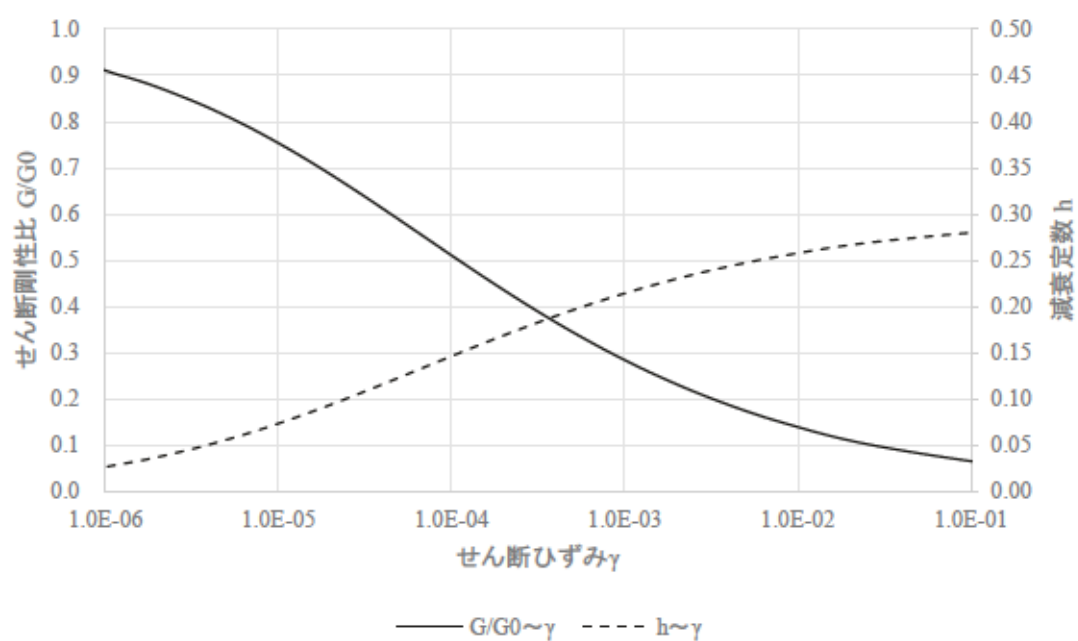
(a) 沖積粘性土

図 4-2-2(1/2) 各層の動的変形曲線





(b) 洪積粘性土



(c) 沖積砂質土・洪積砂質土・礫質土

図 4-2-2(2/2) 各層の動的変形曲線

### 4.3 緊急停止基準評価モデル

#### 4.3.1 イベントツリー

緊急停止基準の評価では、製造装置の集中するエリア D に加え、相互延焼範囲を考慮し、隣接するエリア B を対象とする。エリア D 最端の火災の可能性がある構造物（損傷時発火する装置、可燃物を多量に含む設備）発火時の輻射熱の影響範囲<sup>4)</sup>より、エリア A と C はエリア D との相互延焼はないものとした。緊急停止システムは火災と可燃物の漏洩等、二次被害の防止に効果があることから、火災・可燃物漏洩による損失額のみを比較すればよい<sup>5)</sup>。そこで、考慮する被害はエリア D の構造物（製造装置等）の大破以上の損傷に伴う自己出火（損傷時発火）、可燃物漏洩、および漏洩からの出火、エリア B への延焼とする。ここで、大破とは終局限界状態に概ね対応する。なお、各エリアの地盤の GL-20 m 以浅は粘性土が主体であり、装置損傷、配管破断に至るような大規模な液状化は発生しないと仮定し、それに伴う火災は本評価では考慮しない。

評価で用いるイベントツリーを図 4-3-1 に示す。(a)は「緊急停止あり」、(b)は「緊急停止なし」の場合である。被害要因は自己出火、可燃物漏洩、着火、消火活動の 4 要因とする。財物損失率は損失額を当該エリアの再調達価格で除したもので、被害状態から微損、小損、全損の 3 パターンに分け、それぞれの損失率、営業停止期間を 5, 20, 100%, 60, 180, 360 日とした。営業停止に伴う損失額は、停止期間に 1 日当たりの営業損失を乗じて算出する。なお、エリア全損時の営業停止期間を 360 日（1 年）と設定している。停止期間が 1 年以上（3~5 年）になる場合、通常の営業損失だけではなく、経営の主体が変わるほどの状況や信用の失墜、費用調達の問題など、派生的な状況が生じる可能性があり、1 年以上の営業停止に伴う損失額の推計自体に意味がないと考えられることが理由である。また、「緊急停止あり」のイベントツリーには、緊急停止不適切作動（被害が発生していないにも拘わらず停止する）による損失を考慮する。これは健全であるにも拘わらず緊急停止した際、再開までの期間に営業損失が生じるからである。緊急停止した際、通常稼働までの期間をここでは 30 日とし、図 4-3-1 のイベントツリーに反映している。この 30 日の影響が及ぶ範囲は、イベントツリーの上から 2 番目までの帰結である。3 番目より下の帰結は、エリア D の営業停止期間（60, 180, 360 日）の方が長いため、30 日はその期間内に含まれる。

| 被害要因 |          |      | 状態(帰結)                          | 財物損失率<br>(損失額/再調達価格) |          | 営業<br>停止期間(日) |          | 緊急停止<br>不適切作動<br>損失(日) |
|------|----------|------|---------------------------------|----------------------|----------|---------------|----------|------------------------|
| 自己出火 | 可燃物漏洩 着火 | 消火活動 |                                 | エリア<br>D             | エリア<br>B | エリア<br>D      | エリア<br>B |                        |
| なし   | なし       | あり   | 無損                              | 0%                   | 0%       | 0             | 0        | 30                     |
|      |          | なし   | 無損                              | 0%                   | 0%       | 0             | 0        | 30                     |
|      | あり       | なし   | 可燃物小量漏洩、微損                      | 5%                   | 0%       | 60            | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 可燃物小量漏洩、微損                      | 5%                   | 0%       | 60            | 0        | 0                      |
|      | あり       | あり   | 可燃物小量漏洩、(着火)出火、消火活動あり、小損        | 20%                  | 0%       | 180           | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 可燃物小量漏洩、(着火)出火、消火活動なし、全損、他エリア延焼 | 100%                 | 100%     | 360           | 360      | 0                      |
| あり   |          | あり   | 構造物出火、可燃物供給停止、消火活動あり、小損         | 20%                  | 0%       | 180           | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 構造物出火、可燃物供給停止、消火活動なし、全損、他エリア延焼  | 100%                 | 100%     | 360           | 360      | 0                      |

(a) 緊急停止あり

| 被害要因 |          |      | 状態(帰結)                          | 財物損失率<br>(損失額/再調達価格) |          | 営業<br>停止期間(日) |          | 緊急停止<br>不適切作動<br>損失(日) |
|------|----------|------|---------------------------------|----------------------|----------|---------------|----------|------------------------|
| 自己出火 | 可燃物漏洩 着火 | 消火活動 |                                 | エリア<br>D             | エリア<br>B | エリア<br>D      | エリア<br>B |                        |
| なし   | なし       | あり   | 無損                              | 0%                   | 0%       | 0             | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 無損                              | 0%                   | 0%       | 0             | 0        | 0                      |
|      | あり       | あり   | 可燃物大量漏洩、微損                      | 5%                   | 0%       | 60            | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 可燃物大量漏洩、微損                      | 5%                   | 0%       | 60            | 0        | 0                      |
|      | あり       | あり   | 可燃物大量漏洩、(着火)出火、消火活動あり、全損        | 100%                 | 0%       | 360           | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 可燃物大量漏洩、(着火)出火、消火活動なし、全損、他エリア延焼 | 100%                 | 100%     | 360           | 360      | 0                      |
| あり   |          | あり   | 構造物出火、可燃物漏洩大、消火活動あり、全損          | 100%                 | 0%       | 360           | 0        | 0                      |
|      |          | なし   | 構造物出火、可燃物漏洩大、消火活動なし、全損、他エリア延焼   | 100%                 | 100%     | 360           | 360      | 0                      |

(b) 緊急停止なし

図 4-3-1 緊急停止基準に用いるイベントツリー

#### 4.3.2 被害要因の発生確率の評価方法

イベントツリーの各被害要因（自己出火、可燃物漏洩、着火、消火活動）の発生確率は、以下のように求める。

自己出火ありは損傷時発火する装置、可燃物漏洩ありは可燃物を多量に含む設備が 1 基でも大破以上の損傷をした場合に発生するものとした。双方の発生確率は、それぞれの装置、設備の大破以上の損傷の和事象確率として算出する。表 4-2-1 に示す損傷時発火する装置、可燃物を多量に含む設備の種類および基数より、自己出火ありの発生確率は 4.3.1 式、可燃物漏洩ありの発生確率は 4.3.2 式より求められる（共に 3.4.2 節の直列システムの機能喪失確率の算出方法を参照）。

$$P_{FI}(x) = 1 - (1 - P_{fm\_TF}(x))^5 \cdot (1 - P_{fm\_F}(x))^2 \quad 4.3.1$$

$$P_{LE}(x) = 1 - (1 - P_{fm\_TC}(x))^{10} \cdot (1 - P_{fm\_D}(x))^{10} \quad 4.3.2$$

ここに、 $x$  は作用地震動の大きさ、 $P_{fm\_TF}(x)$ 、 $P_{fm\_F}(x)$  は損傷時発火するタワー、加熱炉（建屋型）の大破以上損傷確率、 $P_{fm\_TC}(x)$ 、 $P_{fm\_D}(x)$  は可燃物を多量に含むタワー、横置ドラムの大破以上損傷確率である。タワー、加熱炉、横置ドラムはエリア内に多数存在するが、4.3.1 式、4.3.2 式の大破以上の損傷確率はこれらの装置・設備の代表的な値であり、式中のべき乗は装置、設備の数を表す（表 4-2-1 より）。

着火ありは、スパークや裸火等による漏洩した可燃物への引火であり、その確率  $P_{IG}(x)$  は文献<sup>9)</sup>を参照し、0.1 とする。可燃物漏洩からの出火の確率は、4.3.2 式に着火確率  $P_{IG}(x)$  (= 0.1) を乗じて算出する。

消火活動なしの確率（消火活動できない確率）は、図 4-3-2 に示す消火活動に関するシステムモデルを用いて求める。図の矩形（□）で示されたシステムの各要素は、消火活動に必要な構造物の機能喪失要因を表し、各要素の右上には番号を記している。各要素について地震動の大きさ  $x$  を条件とした機能喪失確率（損傷確率）を用い、システムの並列部では積事象、直列部では和事象として計算し、消火活動なしの確率を算出する。想定施設の消火用水は、工業用水および海水取水の 2 系統の供給とした。図 4-3-2 のシステムモデルに示す通り、工業用水系統は貯水槽、工水ポンプ室建屋の他、工水ポンプ（電動モーター駆動）の動力に関わる特高受電・送電設備の損傷（外部電力供給停止）および発電設備、変電室建屋、屋外変電設備の損傷を、海水取水系統は海水ポンプ室建屋の損傷を考慮した。海水ポンプ（ディーゼルエンジン駆動）は電力不要である。なお、本評価では前述したように大規模な液状化は発生しないと仮定しており、液状化による護岸の移動、および地盤変状（側方流動、不同沈下）が機能喪失の主要因である取水口（海水取水）、送水配管、送水ポンプの損傷はシステムモデルから除いた。消火活動なしの確率  $P_{FF}(x)$  は、下式で求められる



(3.4.2 節の直列・並列混在システムの機能喪失確率の算出方法を参照)。

$$P_{FF}(x) = (1 - (1 - P_{E1}(x)) \cdot (1 - P_{E2}(x)) \cdot (1 - P_{E3}(x) \cdot P_{E4}(x)) \cdot (1 - P_{E5}(x)) \cdot (1 - P_{E6}(x))) \cdot P_{E7}(x) \quad 4.3.3$$

ここに、 $P_{E1}(x) \sim P_{E7}(x)$  は図 4-3-2 に示す各要素（構造物）の大破以上の確率である。

なお、4.3.1～4.3.3 式で示される確率は、構造物間の損傷について独立を仮定している。

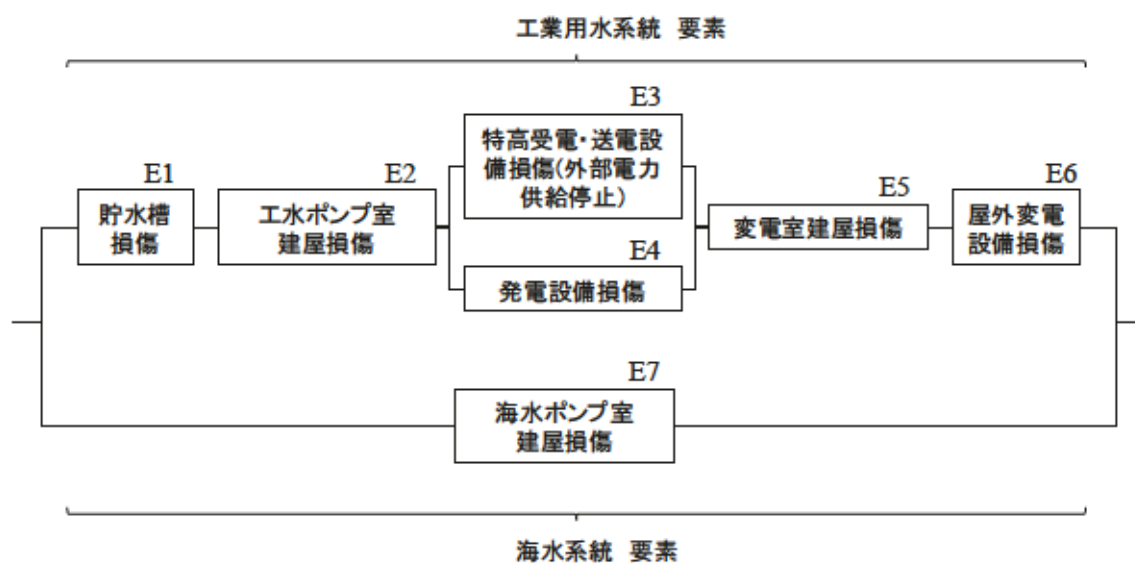


図 4-3-2 対象施設の消火活動に関するシステムモデル

#### 4.3.3 損失価値

緊急停止基準の評価対象エリア（エリア D、エリア B）の装置・設備の再調達価格および各エリアの装置・設備が 1 日停止した場合の営業損失（逸失利益）は、表 4-3-1 に示すとおりである。なお、エリア D および B の装置・設備が双方停止した場合は、それぞれが停止した場合と同様に 0.6 億円／日の損失である。

不適切作動（被害が発生していないにも関わらず停止する）時の損失については、緊急停止から通常稼働させるまでの期間（30 日）を考慮し、30 日間停止×0.6 億円/日＝18 億円とした。

表 4-3-1 再調達価格および営業損失

| エリア | 再調達価格<br>(億円/日) | 営業損失<br>(億円/日) |
|-----|-----------------|----------------|
| D   | 500             | 0.6            |
| B   | 200             | 0.6            |

#### 4.4 まとめ

本章では、緊急停止基準に用いる地震動指標や地震計の設置位置の検討および停止基準の評価対象として、東京湾岸地域の軟弱な埋立地盤に立地する石油精製施設を想定し、施設の概要を詳述した。そして、構内敷地の地盤モデル（層序、各層の物性値・動的変形特性）およびイベントツリーを用いた「緊急停止あり」および「緊急停止なし」に関するリスク定量化モデルを構築した。

構築したリスク定量化モデルについて、次章以降で得られる地震計の設置位置、地震計で観測する地震動指標と施設構造物の応答の相関関係や構造物の耐震性能の情報を取り込むことにより、地震動の大きさを条件とした「緊急停止あり」および「緊急停止なし」の場合の損失額が算出され、緊急停止基準を評価することができる。

#### 第4章の参考文献

- 1) 野津厚, 安中正, 佐藤陽子, 菅野高弘: 羽田空港の地震動特性に関する研究 (第1報) 表面波の特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1022, 39p., 2002.
- 2) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰返入力に対する応力-ひずみ関係のモデル化について, 生産研究, 第30巻, pp.356-359, 1978.
- 3) 建設省土木研究所: 地盤地震時応答特性の数値解析法 -SHAKE: DESRA-, 土研資料第1778号, 1982.
- 4) 消防庁特殊災害室: 石油コンビナート等防災アセスメント指針, 169p., 2013.
- 5) 中村孝明, 高木政美, 志波由紀夫, 坂下克之: 緊急地震速報を利用したプラント施設の緊急停止に関する研究, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.1330-1333, 2006.
- 6) 神奈川県石油コンビナート等防災対策検討会: 神奈川県石油コンビナート等防災アセスメント調査報告書, 520p., 2015.



## 5. 緊急停止基準に用いる地震動指標と地震計設置位置の検討

### 5.1 はじめに

本章では、対象施設敷地の地盤増幅特性を把握するとともに、その情報を用いて散在する各種構造物の地震損傷をより説明できる地震動指標（PGA, PGV, SI 値）、すなわち緊急停止基準で用いる地震動指標や地震計の設置位置について、2 章で提案した手法を用いて検討する。なお、石油精製施設では、一般的に誤作動や故障に対する信頼性を高めるため **2 out of 3 system**（地震計 3 台中 2 台以上の停止基準以上の地震動の観測で緊急停止実施と判断）を採用し、1 箇所につき 3 台の地震計を設置している。しかしながら、設置箇所は振動等の制約により限定され、多くても敷地に 2～3 箇所程度である。ここでは、敷地に設置する地震計を 1 箇所 1 台として設置位置の検討を行う。

## 5.2 入力地震動

入力地震動は、海溝型および内陸型地震など様々な周期特性や継続時間の異なったタイプの地震動を採用する。ここでは、KiK-net（横浜）<sup>1)</sup>や東京都港湾局（夢の島）<sup>2)</sup>の観測点で得られた実地震動，および内閣府中央防災会議<sup>3)</sup>で公開されている模擬地震動の合計 10 の加速度波形を用いる。表 5-2-1 に入力地震動 10 波の概要を示す。

図 5-2-1 に海溝型地震 5 波，図 5-2-2 に内陸型地震 5 波の工学的基盤面 ( $V_s = 400$  m/s 相当) における加速度波形を示す。なお，加速度値は各波形の最大加速度で基準化している。これら加速度波形を振幅調整して表層地盤への入力地震動とする。なお，KiK-net（横浜）や内閣府中央防災会議の工学的基盤の加速度波形は，それぞれの当該地域の深部地盤の情報<sup>4),5)</sup>を用い，1 次元重複反射理論により求めている。図 5-2-3 には，工学的基盤面における加速度応答スペクトル（減衰定数  $h = 0.02$  (2 %)）を示す。(a)が海溝型地震，(b)内陸型地震である。同図より，内陸型地震については，約 0.2～0.8 秒と比較的短い周期帯において応答が卓越しているのに対し，海溝型地震については，1.0 秒以降の長周期の領域において応答が卓越する地震が多いことが分かる。

表 5-2-1 入力地震動概要

### (a) 海溝型地震

| 地震名称     | 成分 | 観測場所(観測日)・出典           |
|----------|----|------------------------|
| 東南海      | NS | 内閣府中央防災会議              |
| 東海東南海南海  | NS | 内閣府中央防災会議              |
| 東北地方太平洋沖 | EW | 東京都港湾局有明観測所(2011.3.11) |
| 東海       | NS | 内閣府中央防災会議              |
| 駿河湾      | EW | KiK-net横浜(2009.8.11)   |

### (b) 内陸型地震

| 地震名称         | 成分 | 観測場所(観測日)・出典         |
|--------------|----|----------------------|
| 都心東部直下       | NS | 内閣府中央防災会議            |
| 三浦半島断層帯      | NS | 内閣府中央防災会議            |
| 茨城県南部        | EW | KiK-net横浜(2014.9.16) |
| 埼玉県北部        | NS | KiK-net横浜(2015.5.25) |
| 神縄・国府津-松田断層帯 | EW | 内閣府中央防災会議            |

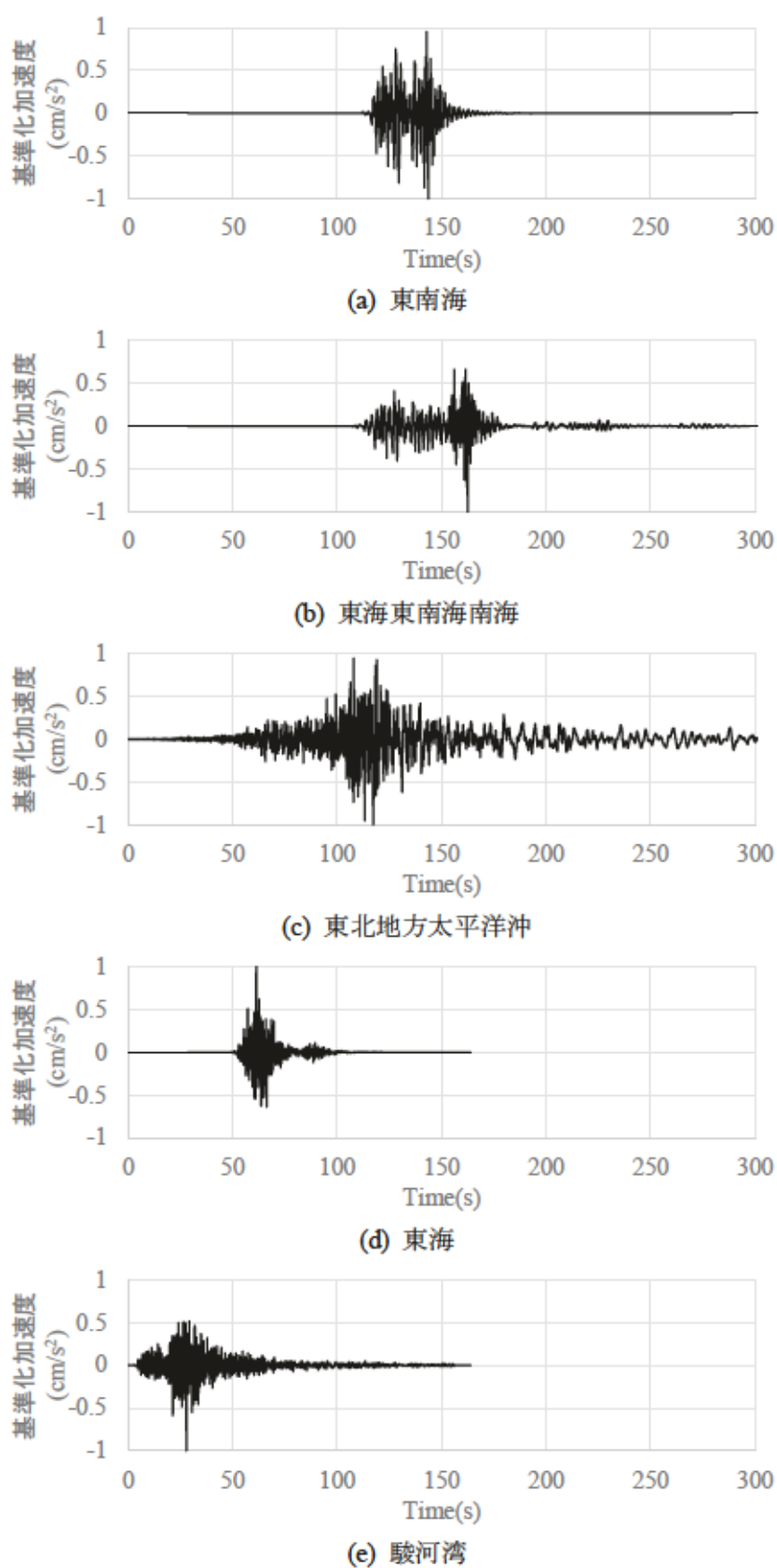
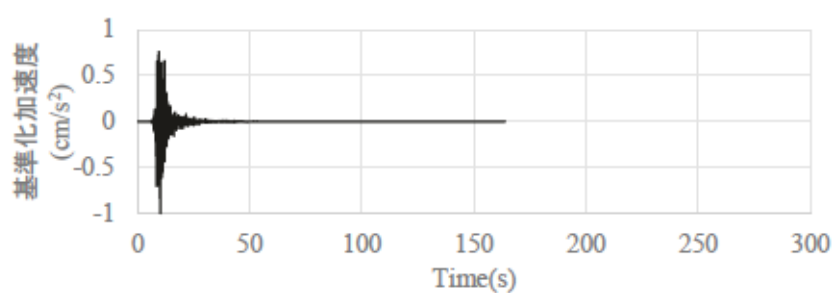
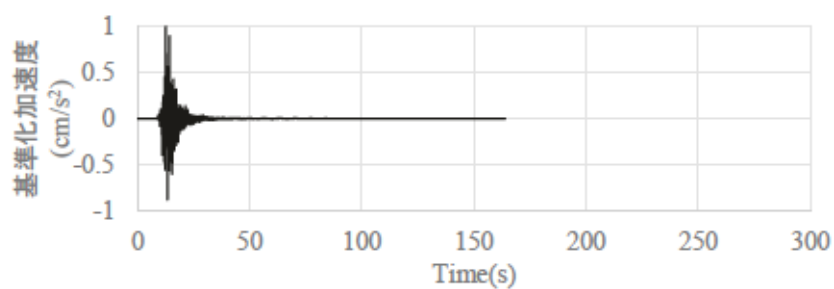


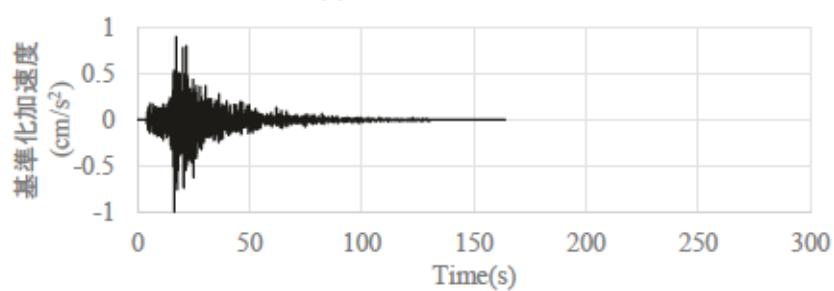
図 5-2-1 工学的基盤面 ( $V_s = 400 \text{ m/s}$ ) における基準化加速度波形 (海溝型地震)



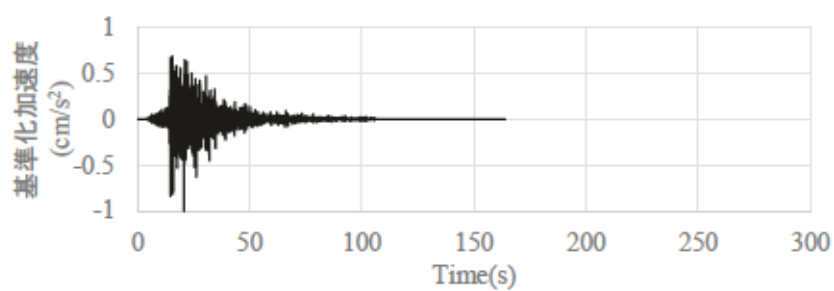
(a) 都心東部直下



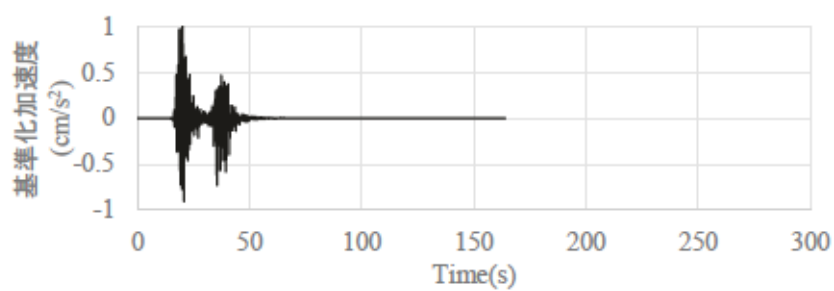
(b) 三浦半島断層帯



(c) 茨城県南部



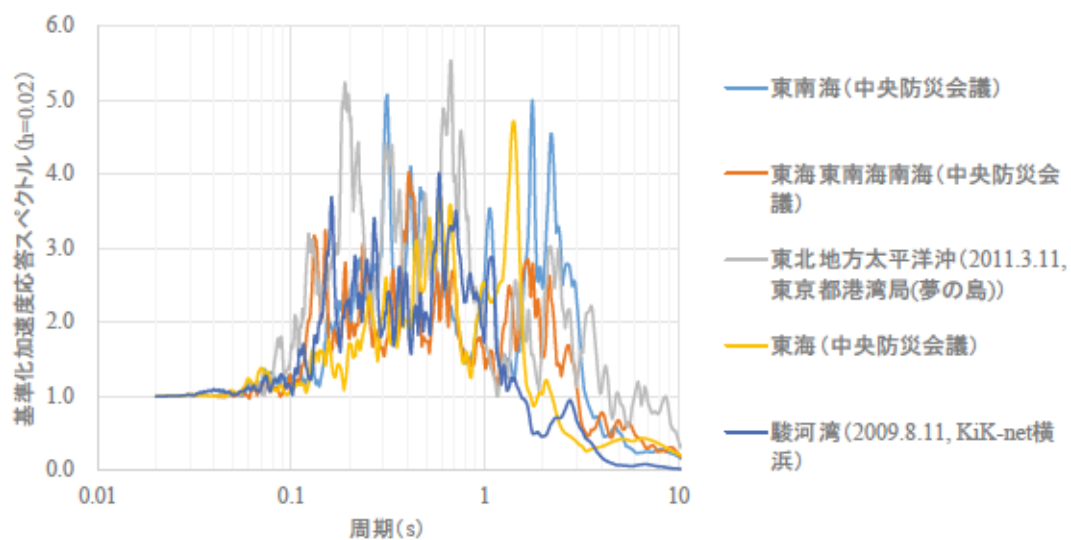
(d) 埼玉県北部



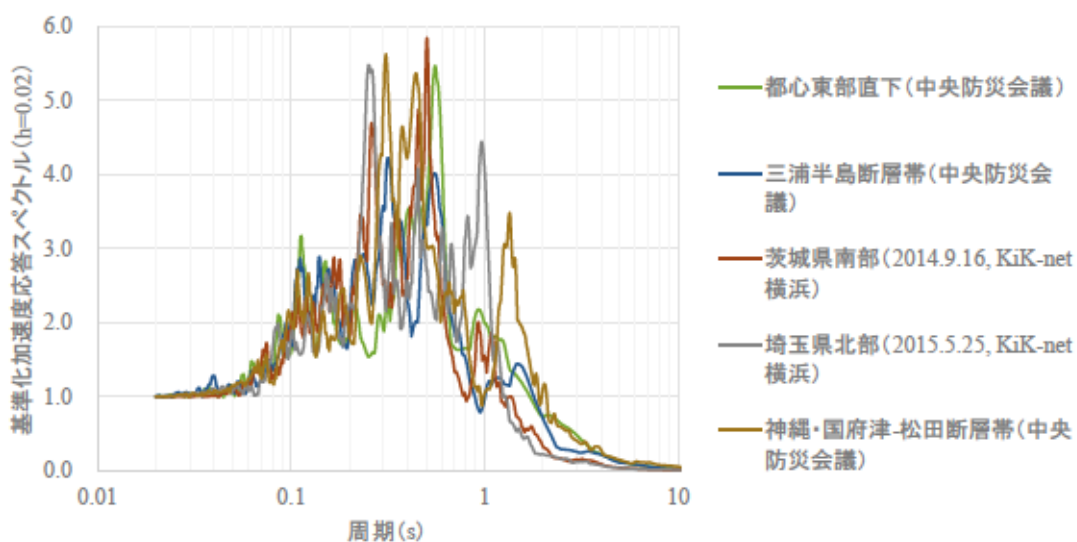
(e) 神縄・国府津-松田断層帯

図 5-2-2 工学的基盤面 ( $V_s = 400 \text{ m/s}$ ) における基準化加速度波形 (内陸型地震)





(a) 海溝型地震



(b) 内陸型地震

図 5-2-3 入力地震動の標準化加速度応答スペクトル (減衰定数  $h = 0.02$ )

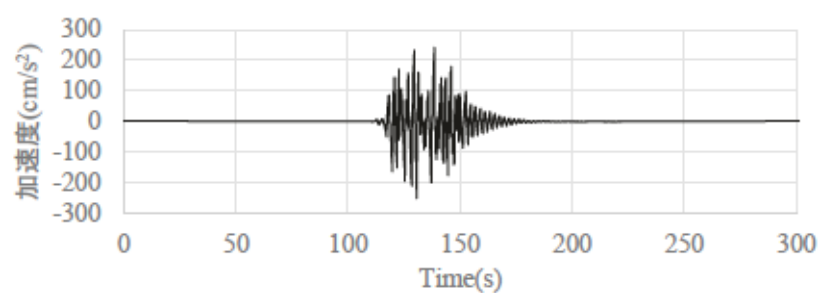
### 5.3 地盤増幅特性の評価

地盤のひずみに依存した非線形応答を評価するために、工学的基盤波（計10波）の最大加速度について、敷地最大級の地震動の大きさ（都心東部直下地震の工学的基盤の最大加速度が約  $600 \text{ cm/s}^2$ ）を考慮し、50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600,  $700 \text{ cm/s}^2$  と振幅調整した上で、A~Dの5エリアの表層地盤モデル毎に解析コード DYNES3D<sup>®</sup>を用いて時刻歴非線形の応答解析を行った。入力地震波形10種、振幅調整10ケースより、応答解析は各エリアで計100ケースである。

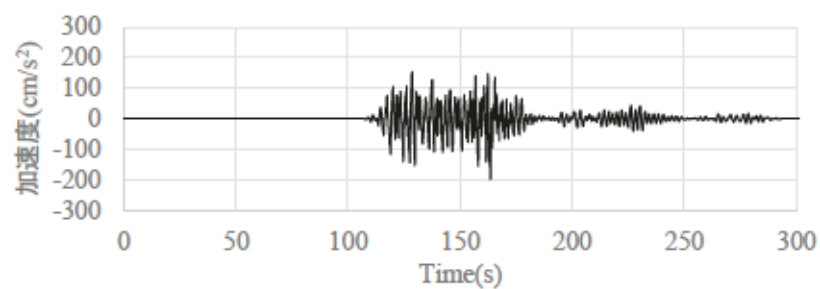
エリアDについて、最大加速度を  $300 \text{ cm/s}^2$  に振幅調整した海溝型地震の地表面の加速度波形を図5-3-1、内陸型地震の加速度波形を図5-3-2に示す。また、図5-3-3および図5-3-4にエリアAとDの地表面加速度応答スペクトルを示す。図5-3-3のエリアAは減衰定数  $h = 0.02$  (2%)、図5-3-4のエリアDは  $h = 0.1$  (10%)の加速度応答スペクトルである。ここで、各エリアの地表面加速度応答スペクトルを求める際の減衰定数は、エリア内の構造物の塑性化による減衰の増加を考慮した。緊急停止基準の評価では各構造物の大破以上の損傷を対象としていることが理由である。塔や架構が集中するエリアB, C, Dの減衰定数は、実際に損傷した建物（鉄骨鉄筋コンクリート造3棟、鉄骨造1棟）の強震観測記録から求められた時系列の減衰定数の最大値（3~30%）<sup>7)</sup>を参照し、それらの平均的な値として  $h = 0.1$  (10%)とした。エリアA, Eの減衰定数は、同エリアの構造物の多くが原料および製品移送、消火用の地上配管であることから、 $h = 0.02$  (2%)とした。

図5-3-3(a)に示すエリアAにおける海溝型地震による加速度応答スペクトルと、(b)に示す内陸型地震による加速度応答スペクトルを比較すると、海溝型地震は、総じて長周期の応答が大きく現れている。この傾向は海溝型の地震波形の特徴であり、内陸型地震との長周期領域における応答の差が顕著である。図5-3-4(a), (b)に示すエリアDの加速度応答スペクトルも減衰定数の違い（エリアAは  $h = 0.08$  (8%)、エリアDは  $h = 0.02$  (2%)）により、エリアAのスペクトル値と比べ値は総じて小さいものの、類似の傾向が表れている。

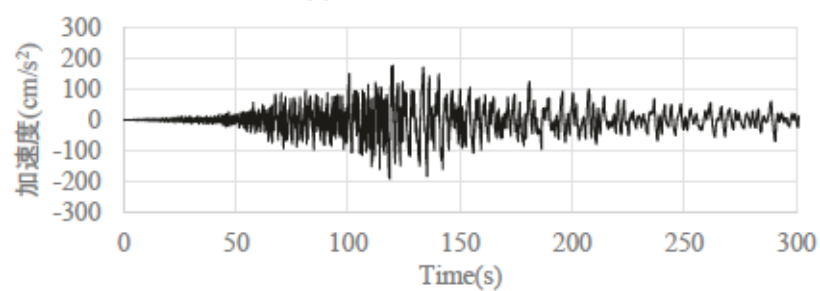
図5-3-5および図5-3-6にエリアDにおける振幅調整毎（50~ $700 \text{ cm/s}^2$ ）の加速度応答スペクトル比（入力地震動に対する地表面波の加速度応答スペクトルの比、地盤増幅率）を示す。図5-3-5が海溝型地震、図5-3-6が内陸型地震である。両図の加速度応答スペクトル比を概観すると、入力地震動が大きくなるに従い、地盤のひずみの増加に起因した地盤の非線形化による影響が大きく、短周期領域の応答スペクトル比が大きく低下していることが分かる。その一方で、周期3.0~4.0秒以上の長周期領域では、短周期領域ほどの影響はないものの、応答スペクトル比は上昇している。また、周期  $T = 2.0 \sim 3.0$  秒以上の範囲においてスペクトル比は高い値となっている。当該地盤の1次固有周期が2.0秒程度と考えると、この傾向についても、地盤の非線形化が要因で地盤の持つ周期が長周期側にシフトした結果と推察される。



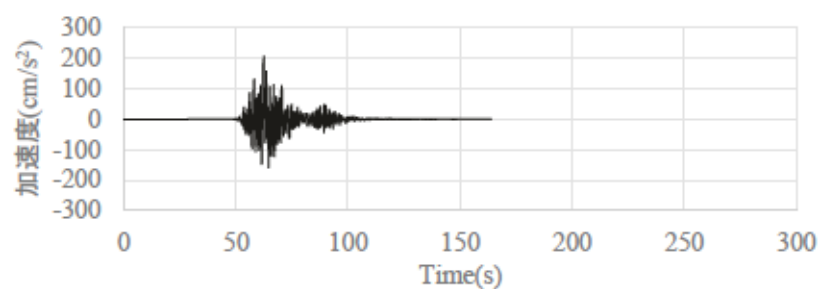
(a) 東南海



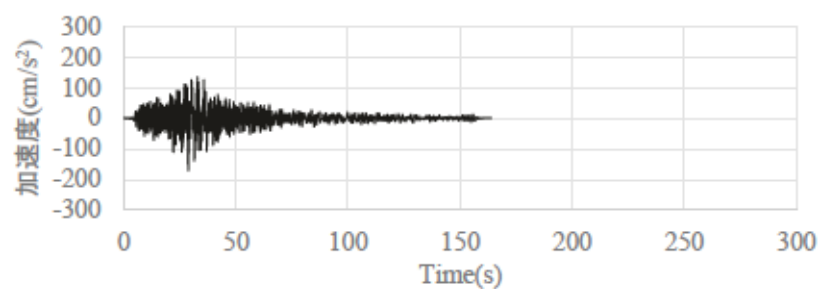
(b) 東海 東南海 南海



(c) 東北地方太平洋沖

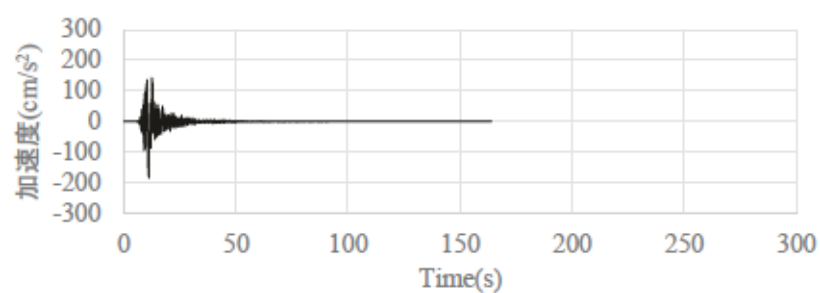


(d) 東海

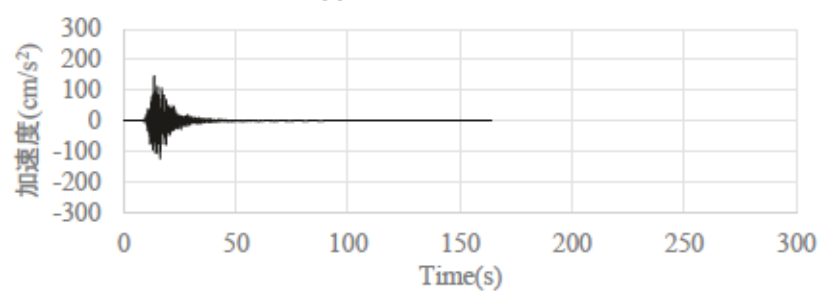


(e) 駿河湾

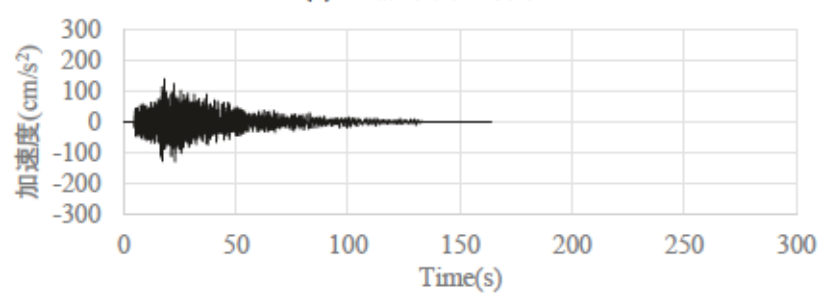
図 5-3-1 エリア D の地表面の地震波形 (海溝型地震, 工学的基盤の最大加速度  $300\text{cm/s}^2$  時)



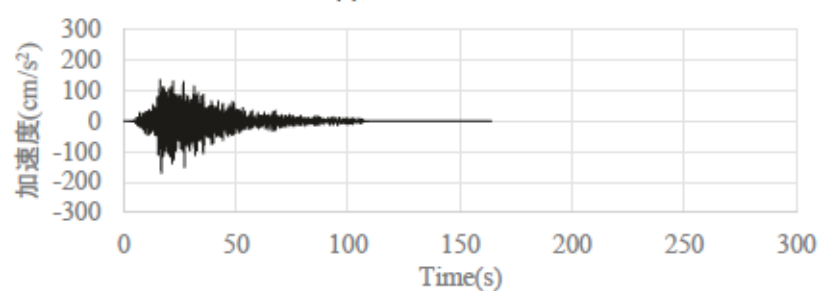
(a) 都心東部直下



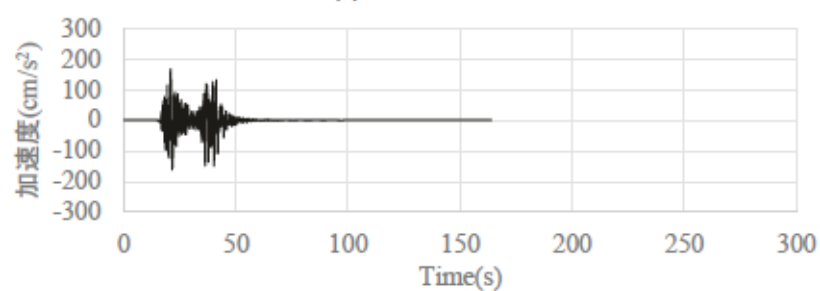
(b) 三浦半島断層帯



(c) 茨城県南部



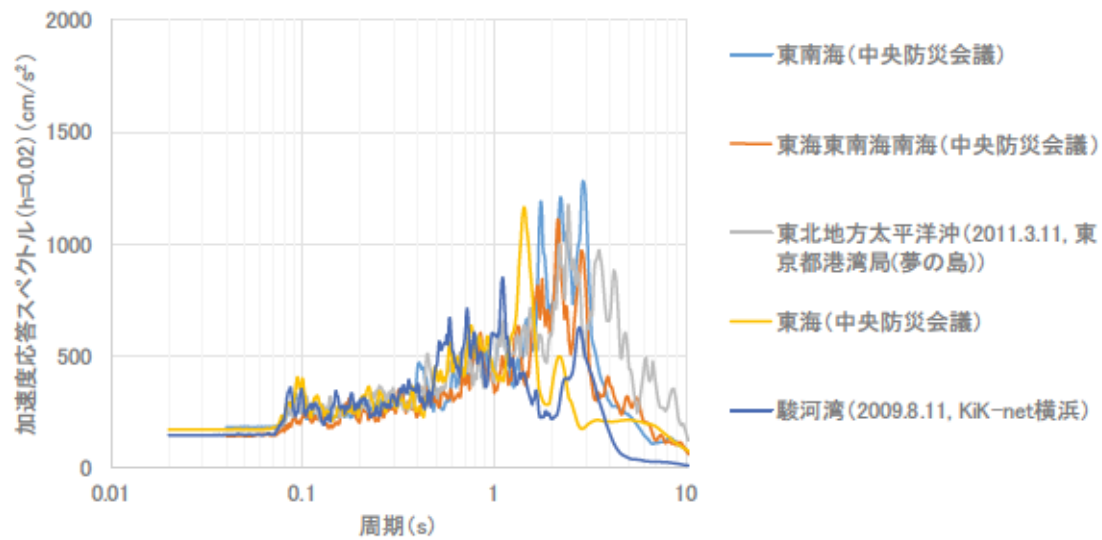
(d) 埼玉県北部



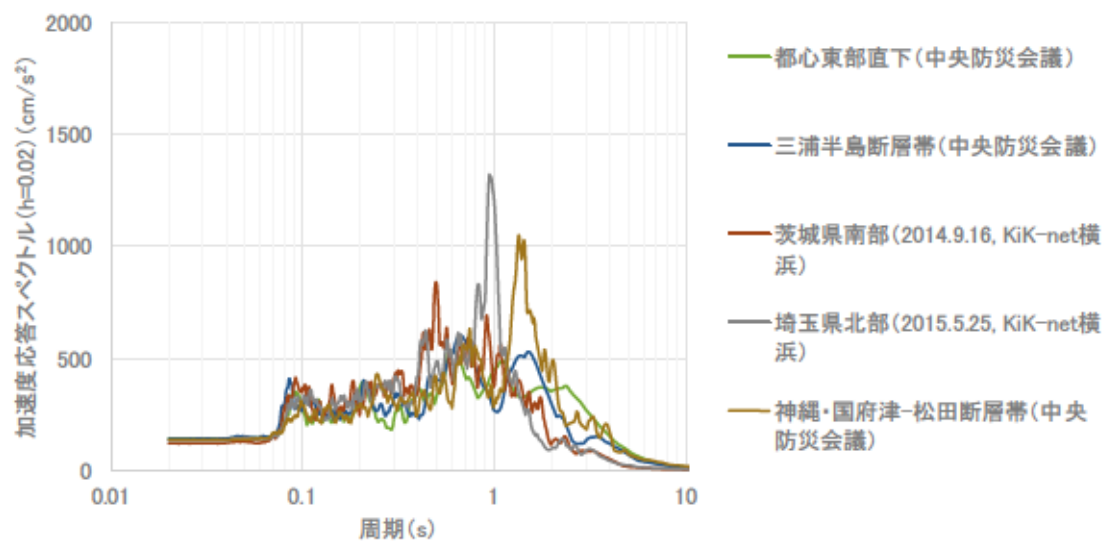
(e) 神縄・国府津-松田断層帯

図 5-3-2 エリア D の地表面の地震波形 (内陸型地震, 工学的の基盤最大加速度  $300\text{cm/s}^2$  時)



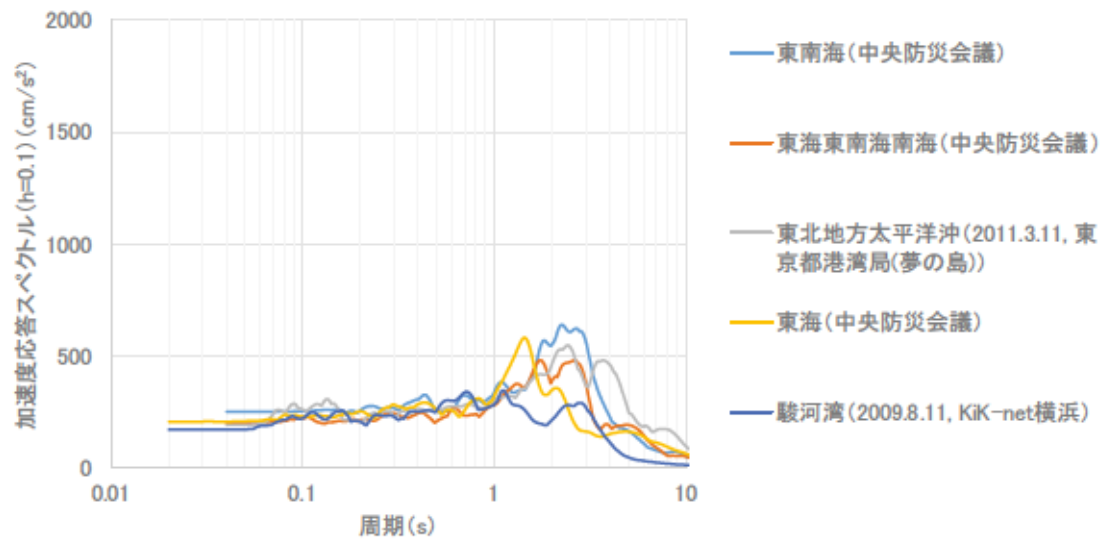


(a) 海溝型地震

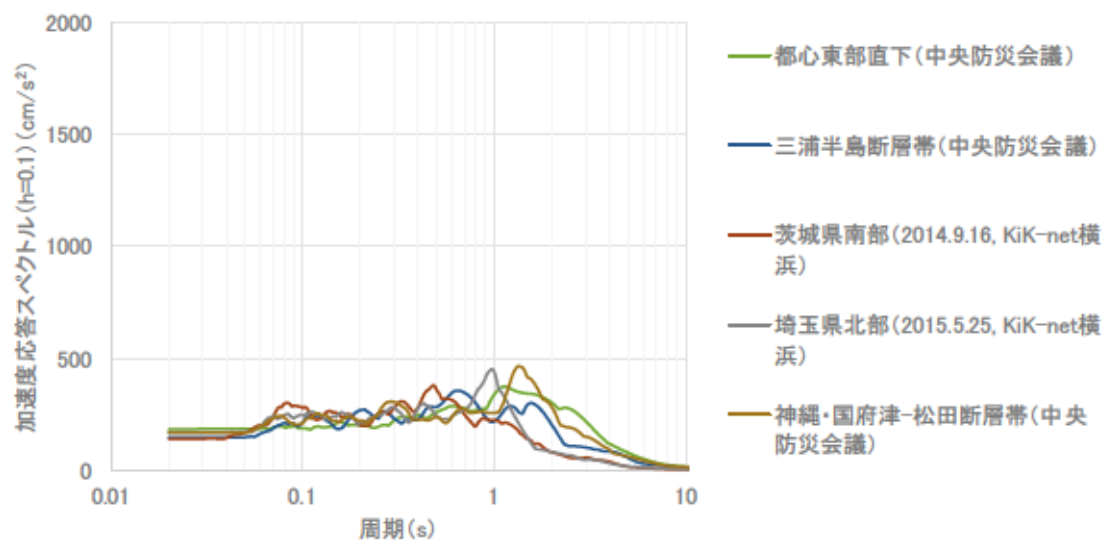


(b) 内陸型地震

図 5-3-3 エリア A の地表面加速度応答スペクトル(工学的基盤の最大加速度  $300 \text{ cm/s}^2$  時)

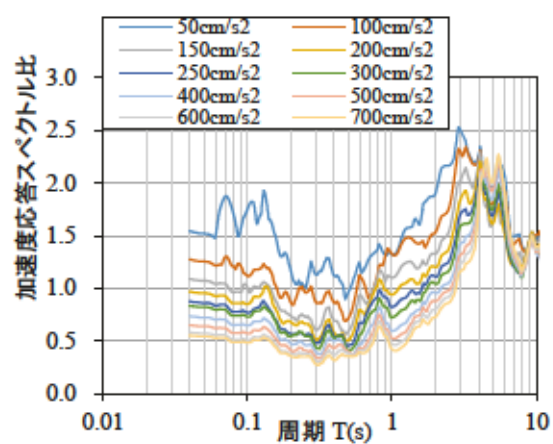


(a) 海溝型地震

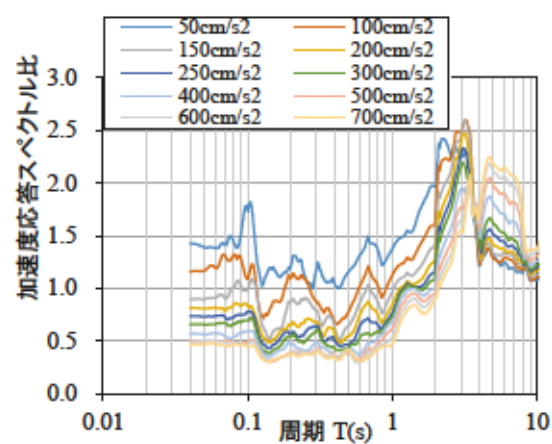


(b) 内陸型地震

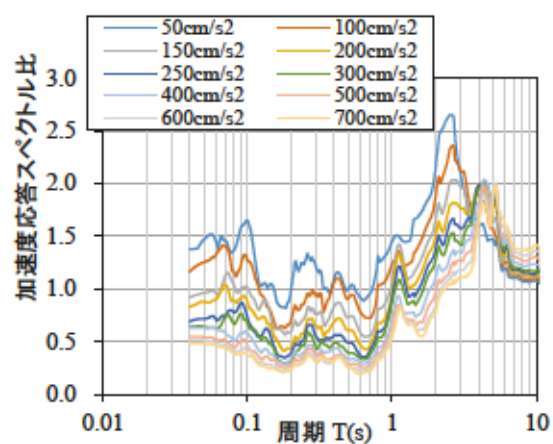
図 5-3-4 エリア D の地表面加速度応答スペクトル(工学的基盤の最大加速度  $300 \text{ cm/s}^2$  時)



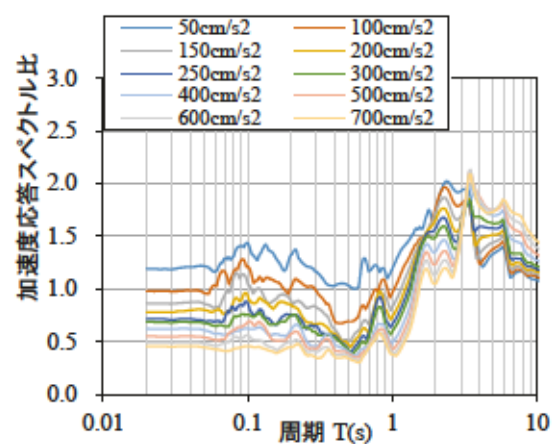
(a) 東南海



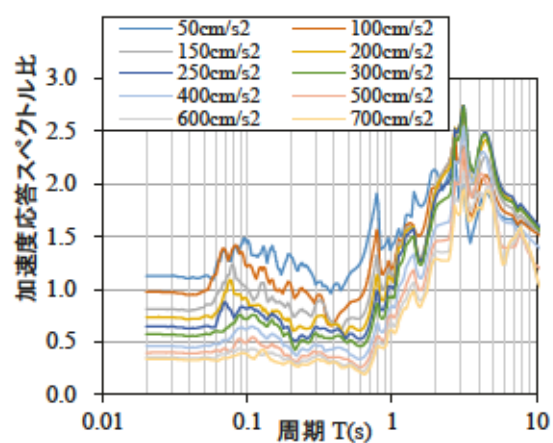
(b) 東海東南海南海



(c) 東北地方太平洋沖

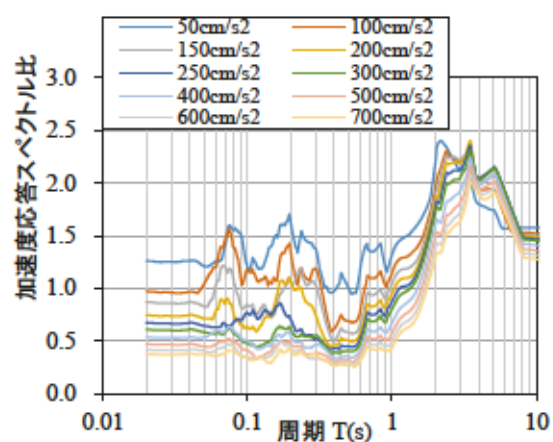


(d) 東海

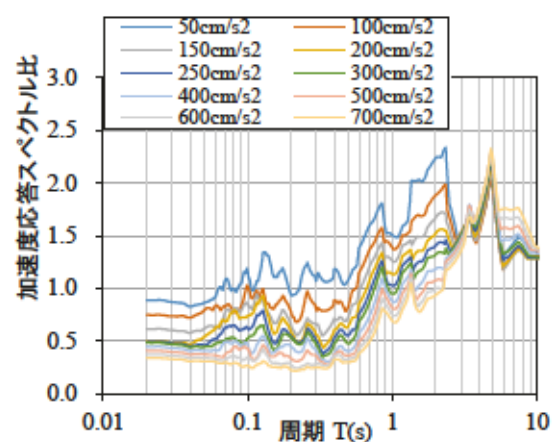


(e) 駿河湾

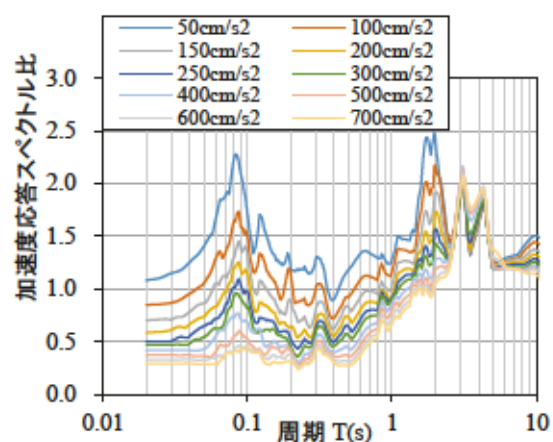
図 5-3-5 エリア D における加速度応答スペクトル比 (海溝型地震)



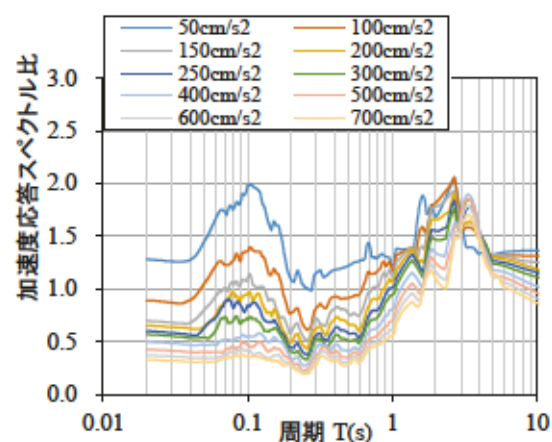
(a) 都心東部直下



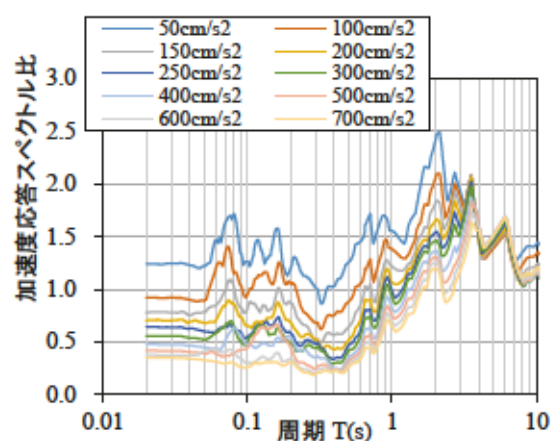
(b) 三浦半島断層帯



(c) 茨城県南部



(d) 埼玉県北部



(e) 神縄・国府津-松田断層帯

図 5-3-6 エリア D における加速度応答スペクトル比 (内陸型地震)



## 5.4 地震動指標と地震計設置位置の検討

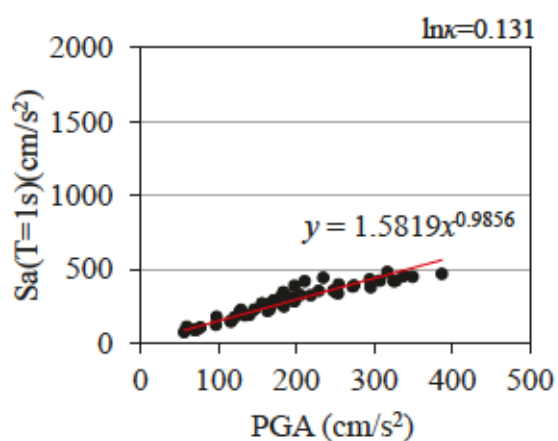
### 5.4.1 地震動指標の検討

エリア D での地震動指標 (PGA, PGV, SI 値) と同エリアの周期  $T=1.0$  秒の加速度応答スペクトル値の回帰分析結果を図 5-4-1, 図 5-4-2 に示す. 図 5-4-1 は海溝型, 内陸型地震の地震タイプ別の回帰分析結果であり, 図 5-4-1 の 6 ケース ((a)~(f)) は, 地震タイプ (海溝型地震, 内陸型地震) とエリア D で観測される各地震動指標 (PGA, PGV, SI 値) によって分けている. (a), (c), (e) が海溝型地震, (b), (d), (f) が内陸型地震であり, (a), (b) が PGA, (c), (d) が PGV, (e), (f) が SI 値の結果である. 例えば, (a) は海溝型地震を対象に, 地震動指標としてエリア D で観測される PGA を採用したケースである. 図 5-4-2 は海溝型, 内陸型地震を合わせて回帰したケースである. 同図の (a) は PGA, (b) は PGV, (c) は SI 値であり, 図 5-4-1 と同様にそれぞれ回帰曲線と共に  $\ln \kappa$  の値を併記している.  $\ln \kappa$  は PGA, PGV, 加速度応答スペクトルの有効数字が 4 桁であることを考慮し, 有効数字 3 桁に丸めた. なお, 周期  $T=1.0$  秒はエリア D の出火危険の高い塔の固有周期に近いことから設定した. また, これらの図の縦軸の範囲は, 各エリア (A~E) の加速度応答スペクトルの最大値を, 横軸は PGA, PGV, SI 値の最大値を参照している.

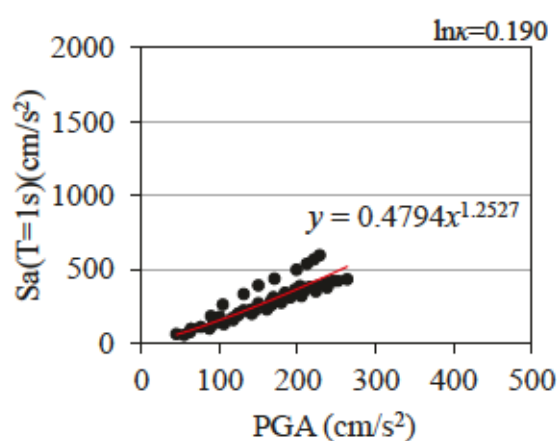
図 5-4-1 の海溝型と内陸型, それぞれの地震の回帰誤差 ( $\ln \kappa$ ) に比べ, 図 5-4-2 の海溝型と内陸型地震を合わせた回帰誤差は, SI 値を除き大きくなっている. これは, 海溝型地震と内陸型地震の周期特性等の相違によるものと考えられる. また, 図 5-4-2 の各地震動指標間の回帰誤差を比較すると, エリア D の周期  $T=1.0$  秒の加速度応答スペクトル値と PGA との  $\ln \kappa$  は 0.194, PGV との  $\ln \kappa$  は 0.335, SI 値との  $\ln \kappa$  は 0.268 であり, 誤差は PGA, SI 値, PGV の順で小さくなっている. この結果からは, エリア D の固有周期  $T=1.0$  秒の構造物のみを対象とするのであれば, 緊急停止基準に用いる地震動指標は PGA が適していると言える. 図 5-3-5 および図 5-3-6 の固有周期に応じた加速度応答スペクトル比 (増幅率) を見てもわかるように, 当該地盤の非線形化により, 地震波の短周期成分は地表に伝わりにくく, 入力地震動が大きくなるに従い PGA は小さくなり, 周期 1.0 秒の加速度応答スペクトルも同様である. 一方で, 地震波の長周期成分の影響が大きい PGV は大きくなる. SI 値は, 速度応答スペクトルの積分値であり, PGA より PGV と関連性のある指標である. 以上が, 周期  $T=1.0$  秒の加速度応答スペクトル値と PGA との  $\ln \kappa$  が最も小さい結果となる理由である. また, 海溝型と内陸型地震の周期特性等による両者の応答の差から, 各地震動指標と周期 1.0 秒の加速度応答スペクトル値の散布は, 地震動が大きくなるに従い末広がりの傾向にある. これも地盤の非線形性が要因と考える. そこで, 各地震動指標 (PGA, PGV, SI 値) に対する加速度応答スペクトル値のサンプル  $y_i$  と回帰式による値  $y'_i$  の比を採ったものを図 5-4-3(a)~(c) に示す. 同図の散布状況より, 地震動の大きさに対して末広がりの傾向は見られない. これは, 2.4.2 式で示した誤差の比から求めた対数標準偏差が地震動の大きさに依存しないことを示している. 一方,  $y_i$  と  $y'_i$  の比において, (a) の PGA では 1.6 前後, (b) の PGV では 2.1 前後, (c) の SI 値では 2.0 前後に散布し, 全体から外れている幾つかの

サンプルが見られる。これらは全て埼玉県北部（2015）の地震波である。図 5-3-4(b)から分かるように、同地震波は周期 1 秒付近にピークがあることから、波形の特性の影響が現れたものと推察する。このことから、地震波の周期特性によっては、応答を過小評価することもある点に注意が必要である。

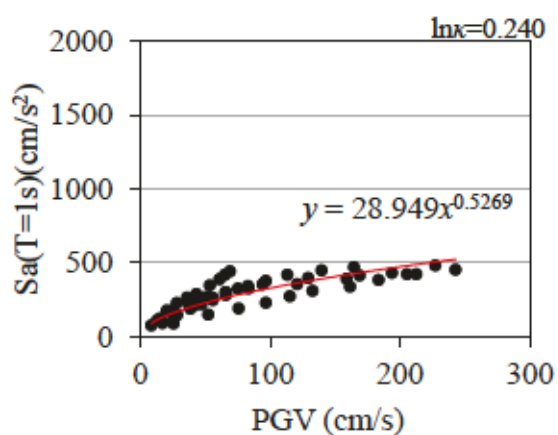
同様に図 5-4-4, 図 5-4-5 にエリア D での各地震動指標と同エリアの周期  $T=0.2$  秒の加速度応答スペクトル値の回帰分析結果を示す。双方の図より、海溝型と内陸型地震それぞれの回帰誤差に比べ、海溝型と内陸型地震を合わせた回帰誤差が大きい傾向は、図 5-4-1, 図 5-4-2 で示した周期  $T=1.0$  秒の場合と変わらず、地震動指標と加速度応答スペクトルの散布の末広がり傾向についても若干見られる。地震動指標間の回帰誤差については、周期  $T=0.2$  秒の加速度応答スペクトル値と PGA との  $\ln \kappa$  は 0.146, PGV との  $\ln \kappa$  は 0.253, SI 値との  $\ln \kappa$  は 0.202 であり、PGA の回帰誤差が最も小さい。図 5-4-6 に地震動指標に対する  $y_i$  と  $y'_i$  の比を示す。同図より、周期  $T=1.0$  秒の場合と同様、地震動の大きさに対して末広がり傾向は見られない。なお、回帰分析は周期  $T=0.04\sim 3.0$  秒の間を 0.1 秒刻み、3 種の地震動指標（PGA, PGV, SI 値）、5 エリア（A~E）の計 465 ケースについて行っている。表 5-4-1(a)~(c)に 465 ケースの回帰分析結果を示す。



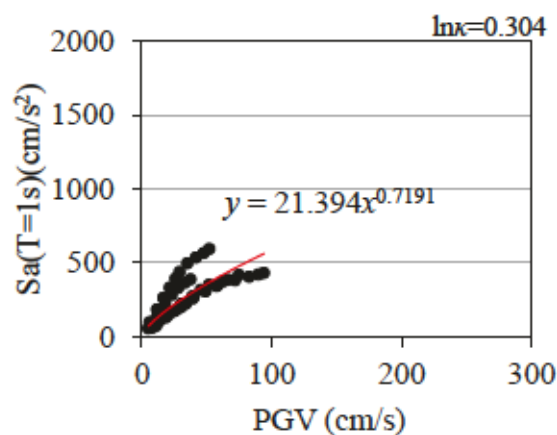
(a) 海溝型－PGA



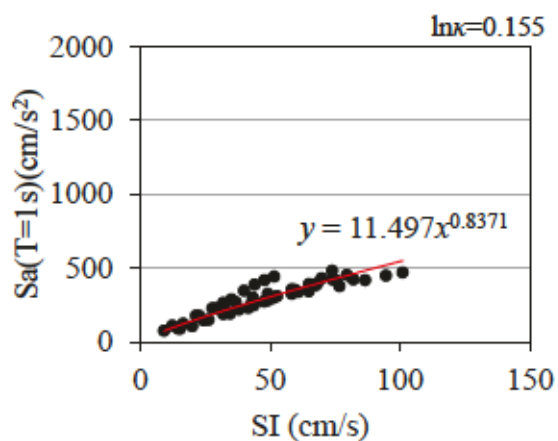
(b) 内陸型－PGA



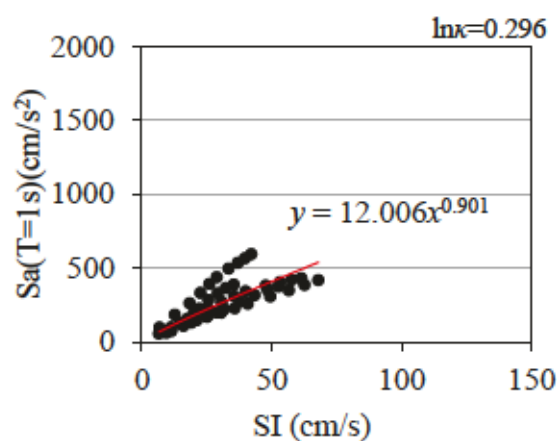
(c) 海溝型－PGV



(d) 内陸型－PGV

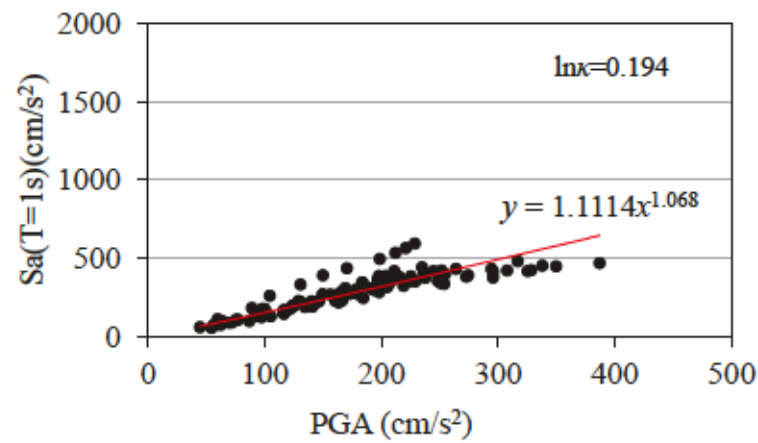


(e) 海溝型－SI 値

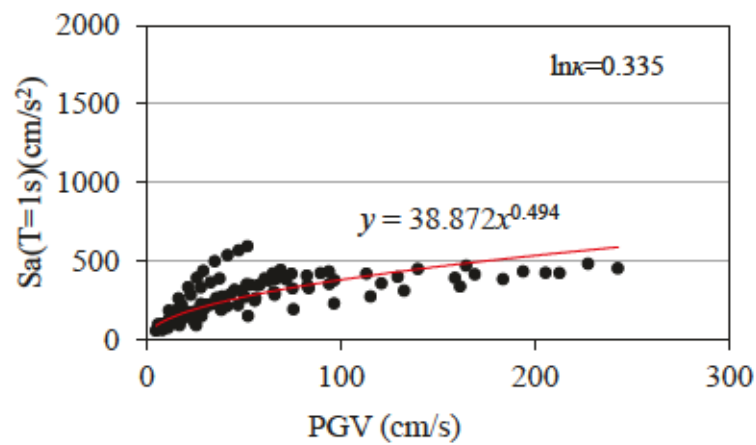


(f) 内陸型－SI 値

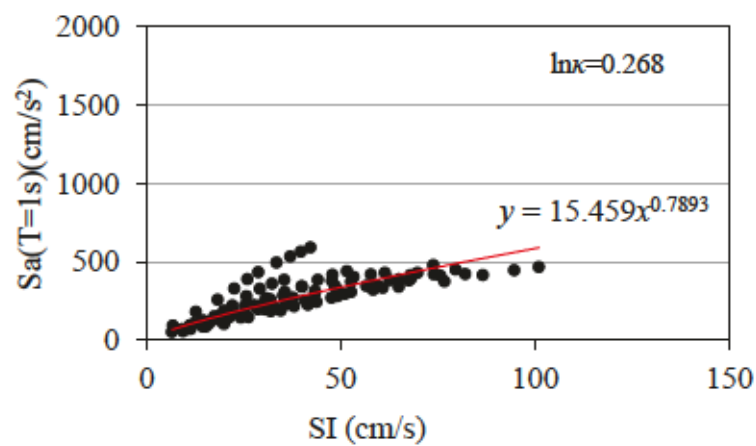
図 5-4-1 エリア D の地震動指標に対する  
加速度応答スペクトル値 ( $T=1.0$  s, エリア D) の回帰分析結果 (地震タイプ別)



(a) PGA

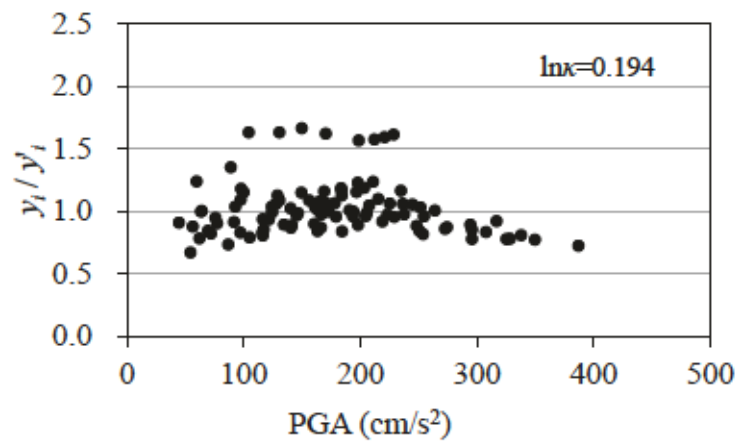


(b) PGV

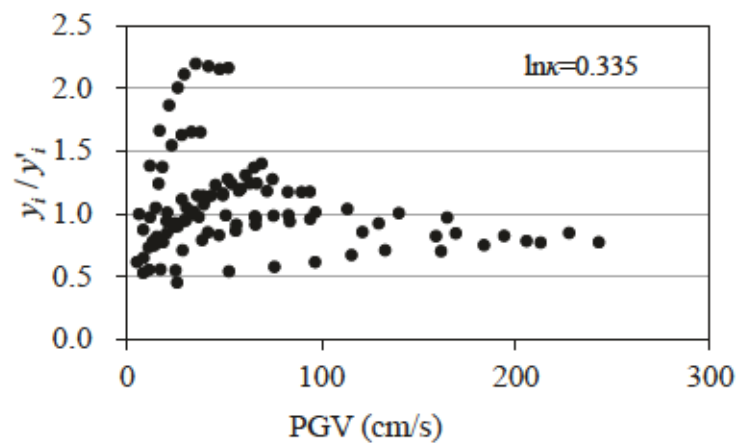


(c) SI 値

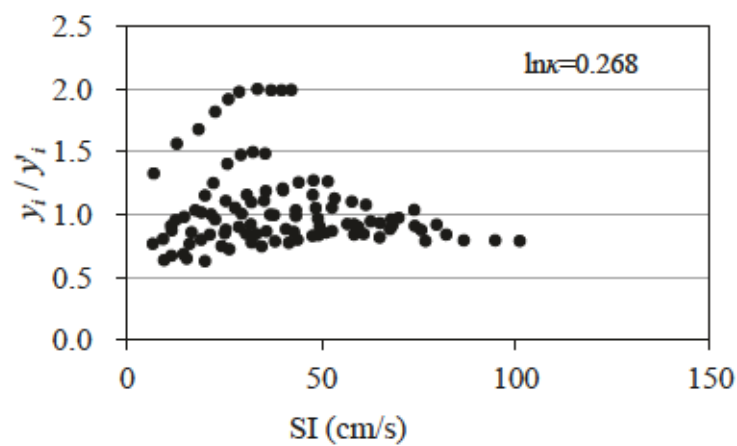
図 5-4-2 エリア D の地震動指標に対する  
加速度応答スペクトル値 ( $T=1.0$  s, エリア D) の回帰分析結果



(a) PGA



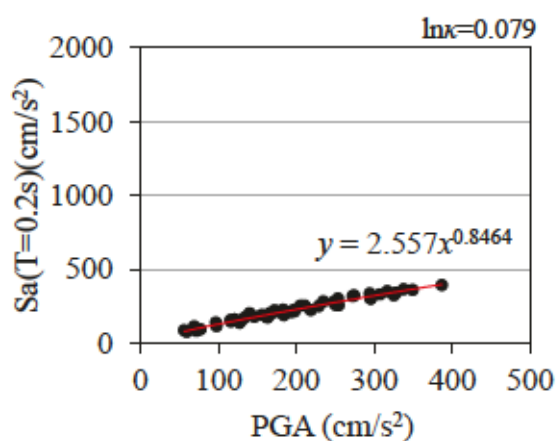
(b) PGV



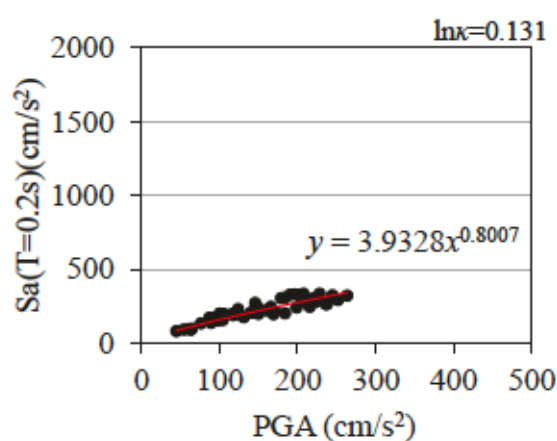
(c) SI 値

図 5-4-3 エリア D の地震動指標に対する  
加速度応答スペクトル値 ( $T=1.0$  s, エリア D) のサンプル  $y_i$  と回帰式による値  $y'_i$  の比

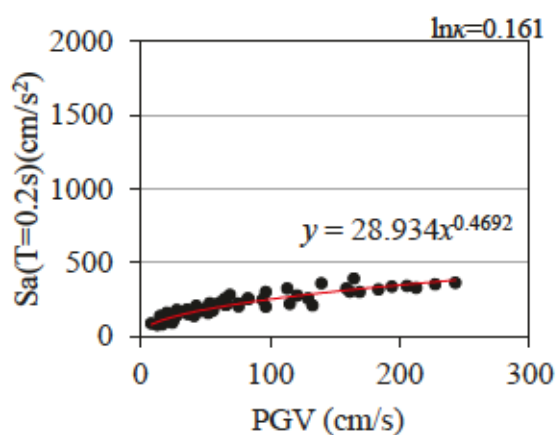




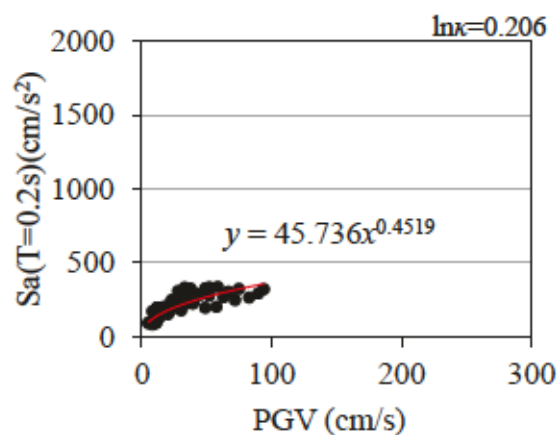
(a) 海溝型－PGA



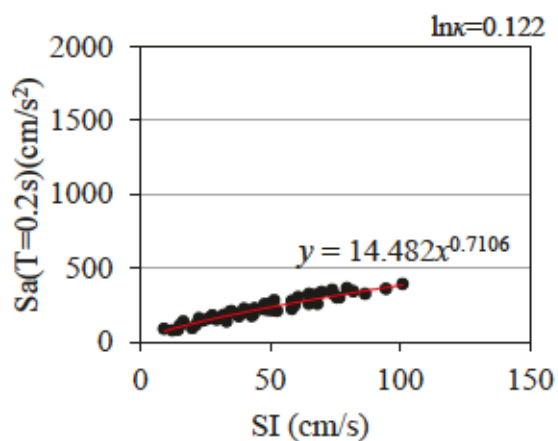
(b) 内陸型－PGA



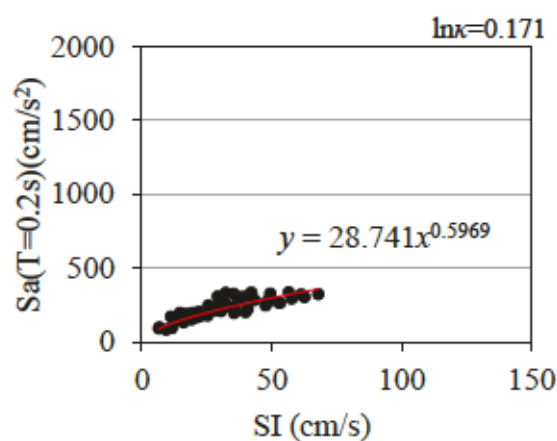
(c) 海溝型－PGV



(d) 内陸型－PGV

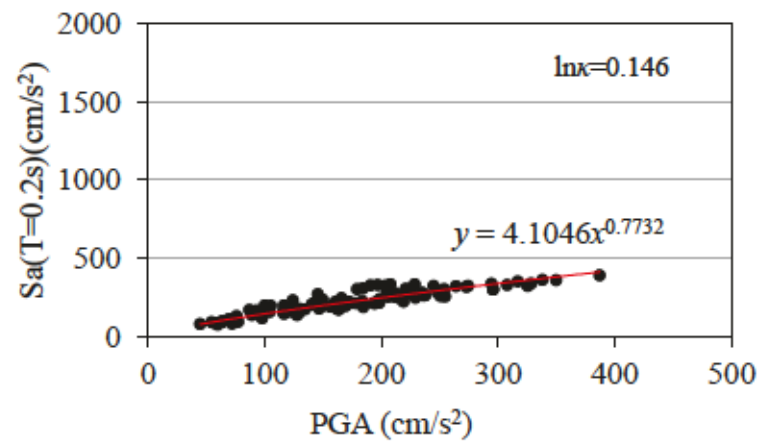


(e) 海溝型－SI 値

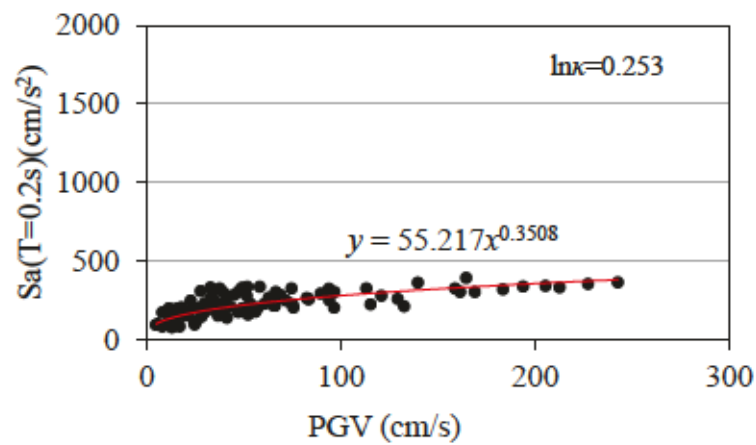


(f) 内陸型－SI 値

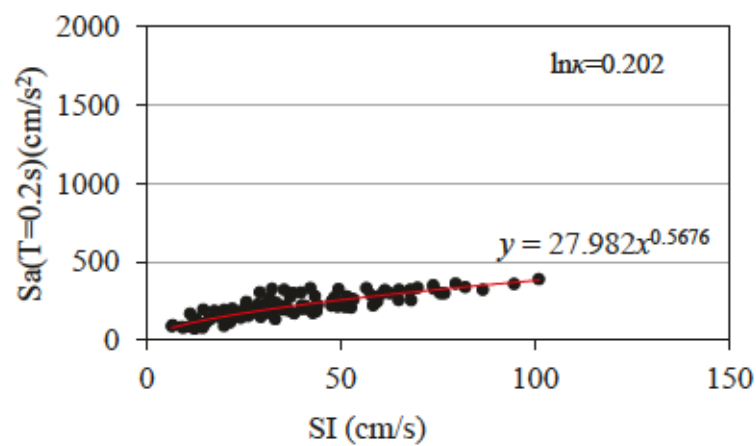
図 5-4-4 エリア D の地震動指標に対する  
加速度応答スペクトル値 ( $T=0.2$  s, エリア D) の回帰分析結果 (地震タイプ別)



(a) PGA

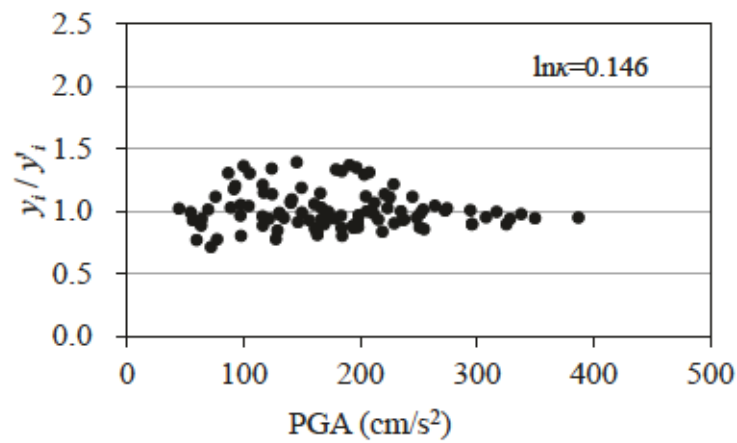


(b) PGV

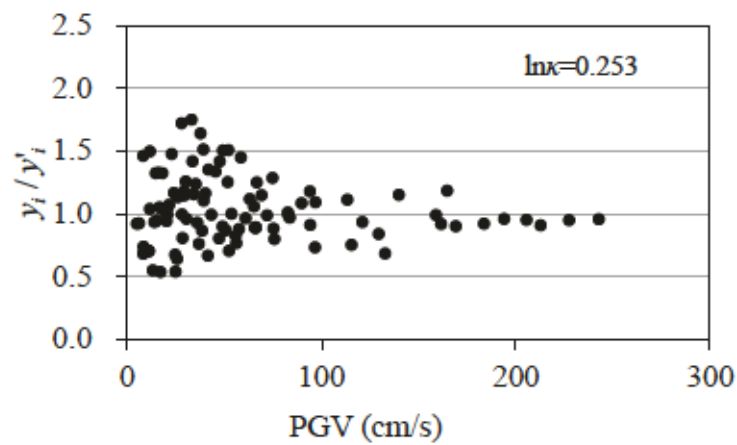


(c) SI 値

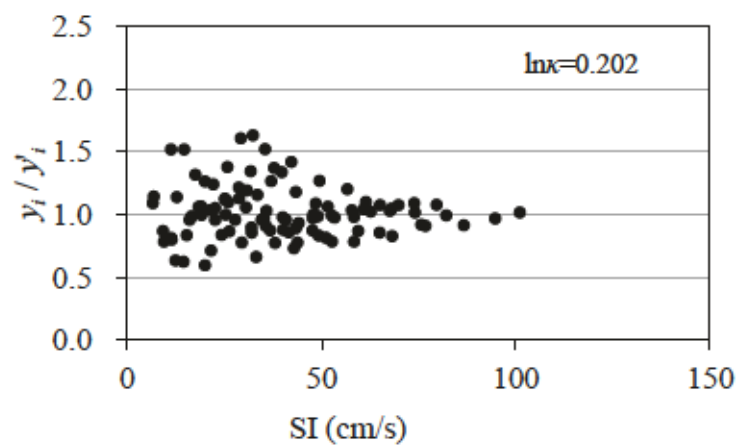
図 5-4-5 エリア D の地震動指標に対する  
加速度応答スペクトル値 ( $T=0.2$  s, エリア D) の回帰分析結果



(a) PGA



(b) PGV



(c) SI 値

図 5-4-6 エリア D の地震動指標に対する  
加速度応答スペクトル値 ( $T=0.2$  s, エリア D) のサンプル  $y_i$  と回帰式による値  $y'_i$  の比

表 5-4-1(1/3) ある特定の固有周期に着目した各地点の回帰誤差

(a) PGA

| 固有周期<br>(s) | エリア   |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | A     | B     | C     | D     | E     |
| 0.04        | 0.009 | 0.018 | 0.043 | 0.025 | 0.014 |
| 0.10        | 0.202 | 0.176 | 0.132 | 0.166 | 0.153 |
| 0.20        | 0.206 | 0.137 | 0.162 | 0.146 | 0.205 |
| 0.30        | 0.228 | 0.161 | 0.200 | 0.167 | 0.254 |
| 0.40        | 0.208 | 0.178 | 0.181 | 0.150 | 0.209 |
| 0.50        | 0.340 | 0.208 | 0.211 | 0.208 | 0.351 |
| 0.60        | 0.236 | 0.209 | 0.204 | 0.189 | 0.239 |
| 0.70        | 0.227 | 0.195 | 0.201 | 0.198 | 0.259 |
| 0.80        | 0.297 | 0.208 | 0.193 | 0.190 | 0.323 |
| 0.90        | 0.366 | 0.229 | 0.220 | 0.199 | 0.389 |
| 1.00        | 0.417 | 0.228 | 0.218 | 0.194 | 0.426 |
| 1.10        | 0.295 | 0.188 | 0.191 | 0.164 | 0.317 |
| 1.20        | 0.234 | 0.195 | 0.223 | 0.211 | 0.253 |
| 1.30        | 0.354 | 0.234 | 0.275 | 0.269 | 0.323 |
| 1.40        | 0.414 | 0.266 | 0.310 | 0.325 | 0.427 |
| 1.50        | 0.337 | 0.282 | 0.339 | 0.365 | 0.358 |
| 1.60        | 0.359 | 0.293 | 0.375 | 0.410 | 0.385 |
| 1.70        | 0.412 | 0.305 | 0.407 | 0.430 | 0.433 |
| 1.80        | 0.502 | 0.319 | 0.421 | 0.451 | 0.517 |
| 1.90        | 0.510 | 0.335 | 0.429 | 0.467 | 0.501 |
| 2.00        | 0.553 | 0.343 | 0.443 | 0.482 | 0.498 |
| 2.10        | 0.605 | 0.360 | 0.468 | 0.512 | 0.540 |
| 2.20        | 0.638 | 0.383 | 0.487 | 0.550 | 0.572 |
| 2.30        | 0.562 | 0.407 | 0.507 | 0.586 | 0.513 |
| 2.40        | 0.639 | 0.427 | 0.526 | 0.606 | 0.564 |
| 2.50        | 0.661 | 0.445 | 0.540 | 0.619 | 0.587 |
| 2.60        | 0.678 | 0.462 | 0.548 | 0.629 | 0.618 |
| 2.70        | 0.771 | 0.465 | 0.546 | 0.632 | 0.676 |
| 2.80        | 0.805 | 0.459 | 0.537 | 0.632 | 0.699 |
| 2.90        | 0.791 | 0.441 | 0.524 | 0.621 | 0.688 |
| 3.00        | 0.718 | 0.419 | 0.512 | 0.593 | 0.637 |

表 5-4-1(2/3) ある特定の固有周期に着目した各地点の回帰誤差

(b) PGV

| 固有周期<br>(s) | エリア   |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | A     | B     | C     | D     | E     |
| 0.04        | 0.173 | 0.128 | 0.222 | 0.213 | 0.175 |
| 0.10        | 0.278 | 0.220 | 0.259 | 0.268 | 0.215 |
| 0.20        | 0.263 | 0.170 | 0.259 | 0.253 | 0.271 |
| 0.30        | 0.290 | 0.194 | 0.284 | 0.277 | 0.309 |
| 0.40        | 0.263 | 0.211 | 0.296 | 0.271 | 0.265 |
| 0.50        | 0.386 | 0.244 | 0.314 | 0.300 | 0.407 |
| 0.60        | 0.286 | 0.239 | 0.290 | 0.273 | 0.291 |
| 0.70        | 0.295 | 0.229 | 0.297 | 0.295 | 0.322 |
| 0.80        | 0.392 | 0.245 | 0.302 | 0.310 | 0.393 |
| 0.90        | 0.471 | 0.270 | 0.326 | 0.346 | 0.467 |
| 1.00        | 0.503 | 0.269 | 0.336 | 0.335 | 0.499 |
| 1.10        | 0.396 | 0.226 | 0.325 | 0.300 | 0.419 |
| 1.20        | 0.361 | 0.224 | 0.341 | 0.307 | 0.368 |
| 1.30        | 0.419 | 0.249 | 0.354 | 0.314 | 0.380 |
| 1.40        | 0.424 | 0.261 | 0.342 | 0.305 | 0.449 |
| 1.50        | 0.350 | 0.265 | 0.335 | 0.290 | 0.367 |
| 1.60        | 0.335 | 0.281 | 0.341 | 0.303 | 0.369 |
| 1.70        | 0.380 | 0.300 | 0.350 | 0.321 | 0.402 |
| 1.80        | 0.461 | 0.318 | 0.347 | 0.329 | 0.474 |
| 1.90        | 0.427 | 0.331 | 0.324 | 0.320 | 0.418 |
| 2.00        | 0.418 | 0.324 | 0.299 | 0.301 | 0.386 |
| 2.10        | 0.413 | 0.319 | 0.280 | 0.299 | 0.390 |
| 2.20        | 0.411 | 0.329 | 0.269 | 0.319 | 0.393 |
| 2.30        | 0.364 | 0.350 | 0.286 | 0.351 | 0.366 |
| 2.40        | 0.422 | 0.380 | 0.314 | 0.376 | 0.397 |
| 2.50        | 0.442 | 0.407 | 0.341 | 0.402 | 0.411 |
| 2.60        | 0.467 | 0.432 | 0.369 | 0.431 | 0.453 |
| 2.70        | 0.582 | 0.451 | 0.383 | 0.450 | 0.529 |
| 2.80        | 0.638 | 0.460 | 0.388 | 0.457 | 0.577 |
| 2.90        | 0.662 | 0.454 | 0.391 | 0.454 | 0.609 |
| 3.00        | 0.593 | 0.438 | 0.389 | 0.435 | 0.572 |



表 5-4-1(3/3) ある特定の固有周期に着目した各地点の回帰誤差

(c) SI 値

| 固有周期<br>(s) | エリア   |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | A     | B     | C     | D     | E     |
| 0.04        | 0.125 | 0.119 | 0.122 | 0.143 | 0.117 |
| 0.10        | 0.251 | 0.209 | 0.173 | 0.229 | 0.189 |
| 0.20        | 0.241 | 0.169 | 0.193 | 0.202 | 0.245 |
| 0.30        | 0.266 | 0.198 | 0.227 | 0.228 | 0.281 |
| 0.40        | 0.238 | 0.208 | 0.219 | 0.219 | 0.240 |
| 0.50        | 0.373 | 0.236 | 0.255 | 0.263 | 0.387 |
| 0.60        | 0.272 | 0.229 | 0.238 | 0.232 | 0.274 |
| 0.70        | 0.262 | 0.207 | 0.230 | 0.239 | 0.276 |
| 0.80        | 0.332 | 0.230 | 0.230 | 0.247 | 0.348 |
| 0.90        | 0.427 | 0.256 | 0.262 | 0.285 | 0.432 |
| 1.00        | 0.475 | 0.252 | 0.261 | 0.268 | 0.476 |
| 1.10        | 0.345 | 0.206 | 0.217 | 0.213 | 0.366 |
| 1.20        | 0.277 | 0.193 | 0.216 | 0.211 | 0.285 |
| 1.30        | 0.335 | 0.211 | 0.231 | 0.224 | 0.299 |
| 1.40        | 0.381 | 0.224 | 0.239 | 0.239 | 0.387 |
| 1.50        | 0.307 | 0.222 | 0.240 | 0.243 | 0.302 |
| 1.60        | 0.293 | 0.211 | 0.248 | 0.261 | 0.284 |
| 1.70        | 0.321 | 0.211 | 0.263 | 0.271 | 0.313 |
| 1.80        | 0.396 | 0.215 | 0.274 | 0.279 | 0.386 |
| 1.90        | 0.384 | 0.217 | 0.275 | 0.281 | 0.364 |
| 2.00        | 0.394 | 0.223 | 0.288 | 0.291 | 0.347 |
| 2.10        | 0.438 | 0.246 | 0.320 | 0.323 | 0.395 |
| 2.20        | 0.479 | 0.280 | 0.357 | 0.371 | 0.461 |
| 2.30        | 0.412 | 0.322 | 0.396 | 0.415 | 0.419 |
| 2.40        | 0.506 | 0.351 | 0.423 | 0.437 | 0.496 |
| 2.50        | 0.509 | 0.369 | 0.439 | 0.450 | 0.518 |
| 2.60        | 0.522 | 0.385 | 0.449 | 0.463 | 0.542 |
| 2.70        | 0.597 | 0.389 | 0.448 | 0.468 | 0.595 |
| 2.80        | 0.644 | 0.381 | 0.437 | 0.467 | 0.616 |
| 2.90        | 0.627 | 0.362 | 0.427 | 0.455 | 0.599 |
| 3.00        | 0.552 | 0.336 | 0.418 | 0.427 | 0.555 |

緊急停止基準の評価では、エリア D 以外の様々な構造物の被害も対象となる。そこで、任意の固有周期（構造物）の加速度応答スペクトル値に対する各地震動指標の  $\ln \kappa$  を、2.4.3 式を用いてエリア A～E で統合し、PGA、PGV、SI 値の  $U$  の大小より、緊急停止基準に用いる地震動指標としてどれが適切かを判断する。横軸に構造物の固有周期、縦軸にエリア A～E で統合した PGA、PGV、SI 値の  $U$  をとり図 5-4-7 に示す。同図より、周期 1.2 秒以下で PGA、1.2～2.2 秒で SI 値、2.2 秒以上で PGV の  $U$  が最小となっている。この短周期領域で PGA、長周期領域で SI 値および PGV が構造物の応答との相関が高いという傾向は、地震動指標と応答塑性率<sup>8)</sup>、最大応答変形角<sup>9)</sup>、最大応答変位<sup>10)</sup>との相関性に関する研究と同様の結果である。また、長周期となるにつれ、各地震動指標の  $U$  は高くなっているが、これは、図 5-3-3(a)、(b)および図 5-3-4(a)、(b)の 2 秒以上の加速度応答スペクトル値を見ても分かるように、長周期領域における海溝型（東南海、東海東南海南海、東北地方太平洋沖等）および内陸型地震（都心東部直下、茨城県南部等）による応答の差が大きいために要因である。SI 値の  $U$  は周期 0.04～2 秒付近まで比較的低い値で推移しており、SI 値は PGA や PGV と比べ、0.04～2 秒程度の周期帯の応答に対し安定して相関が高いことが分かる。これは、SI 値が周期 0.1～2.5 秒の範囲の平均的な応答値<sup>11)</sup>（減衰定数  $h=0.2$  (20%)）を表す指標であることが理由である。石油精製施設にある構造物の固有周期は、フレースタック等の一部を除き、概ね 1.0 秒以内程度である。この周期帯において、図 5-4-7 で示した各地震動指標の  $U$  を比較すると PGA の  $U$  が最も小さく、緊急停止基準に用いる地震動指標として適切であることが確認できる。その一方で、エリア内には架構等をはじめ、塑性化により固有周期が長周期化する構造物も存在する。文献 7) では地震で損傷した建物 4 棟（5.3 節で示した鉄骨鉄筋コンクリート造 3 棟、鉄骨造 1 棟）の固有振動数は、地震中で 0～50% 低下しており、塑性化による固有周期の伸びは 1～2 倍程度と推察される。この損傷した建物の振動特性の分析結果を考慮すると、地震動指標として SI 値の採用も選択肢となる。

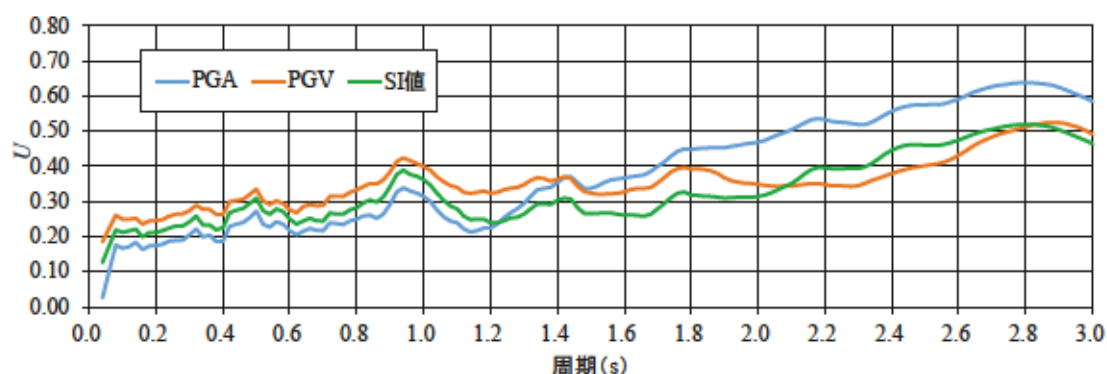


図 5-4-7 各エリアで統合した  $U$  の比較による地震動指標選定の検討

#### 5.4.2 地震計の設置位置の検討

次に地震計の設置位置を検討する。対象となる構造物は複数であり、エリア A～E の加速度応答スペクトル値に対する各地震動指標の  $\ln \kappa$  を 2.4.3 式より固有周期（構造物）で統合し、 $U$  の小さいエリアを最適な位置とする。ここで、施設の各エリア内の主体構造物の固有周期より、エリア A～E で参照すべき周期は、それぞれ 0.2, 0.8, 0.3, 1.0, 0.3 秒とした。

表 5-4-2 に設定した固有周期（主体構造物）の加速度応答スペクトル値に対する(a)PGA, (b)PGV, (c)SI 値の  $\ln \kappa$  を示す。同表(a)～(c)の 1 列目は、固有周期  $T = 0.2$  秒の加速度応答スペクトル値に対するエリア A～E の PGA, PGV, SI 値の回帰から得られた  $\ln \kappa$  である。同様に 2～5 列目は、固有周期 0.8, 0.3, 1.0, 0.3 秒の加速度応答スペクトル値に対する値である。最も右列の  $U$  は、各行（固有周期 0.2, 0.8, 0.3, 1.0, 0.3 秒）の  $\ln \kappa$  を 2.4.3 式より統合した値である。同表(a)より、地震計で観測する地震動指標を PGA とするのであれば、地震計の設置位置は、 $U$  が最も小さいエリア D に設置するのが最適であることが分かる。また、塑性化による構造物の固有周期の長周期化を考慮し、地震動指標として SI 値を採用する場合は、同表(c)よりエリア A が地震計の最適位置となる。

表 5-4-2(1/2) 固有周期（構造物）で統合した  $U$  の比較による  
地震計設置位置選択の検討

(a) PGA による回帰

| ln κ 一覧            |   | 構造物位置の応答 ( $S_a(T)$ )             |                                  |                                  |                                  |                                   |       |
|--------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------|
|                    |   | エリアA                              | エリアB                             | エリアC                             | エリアD                             | エリアE                              | U     |
|                    |   | $T = 0.2 \text{ s}$<br>$h = 0.02$ | $T = 0.8 \text{ s}$<br>$h = 0.1$ | $T = 0.3 \text{ s}$<br>$h = 0.1$ | $T = 1.0 \text{ s}$<br>$h = 0.1$ | $T = 0.3 \text{ s}$<br>$h = 0.02$ |       |
| 観測<br>地震動<br>(PGA) | A | 0.206                             | 0.162                            | 0.192                            | 0.227                            | 0.229                             | 0.205 |
|                    | B | 0.247                             | 0.208                            | 0.241                            | 0.295                            | 0.288                             | 0.258 |
|                    | C | 0.218                             | 0.174                            | 0.200                            | 0.224                            | 0.242                             | 0.213 |
|                    | D | 0.208                             | 0.159                            | 0.183                            | 0.194                            | 0.221                             | 0.194 |
|                    | E | 0.223                             | 0.187                            | 0.217                            | 0.245                            | 0.254                             | 0.226 |

(b) PGV による回帰

| ln κ一覧             |   | 構造物位置の応答 (Sa(T))      |                      |                      |                      |                       |       |
|--------------------|---|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------|
|                    |   | エリアA                  | エリアB                 | エリアC                 | エリアD                 | エリアE                  | U     |
|                    |   | T = 0.2 s<br>h = 0.02 | T = 0.8 s<br>h = 0.1 | T = 0.3 s<br>h = 0.1 | T = 1.0 s<br>h = 0.1 | T = 0.3 s<br>h = 0.02 |       |
| 観測<br>地震動<br>(PGV) | A | 0.263                 | 0.234                | 0.278                | 0.337                | 0.306                 | 0.286 |
|                    | B | 0.272                 | 0.245                | 0.288                | 0.370                | 0.323                 | 0.303 |
|                    | C | 0.273                 | 0.249                | 0.284                | 0.368                | 0.318                 | 0.301 |
|                    | D | 0.264                 | 0.234                | 0.278                | 0.335                | 0.303                 | 0.285 |
|                    | E | 0.267                 | 0.241                | 0.278                | 0.347                | 0.309                 | 0.291 |

表 5-4-2(2/2) 固有周期（構造物）で統合した  $U$  の比較による  
地震計設置位置選択の検討

(c) SI 値による回帰

| ln $\kappa$ 一覧     |   | 構造物位置の応答 ( $Sa(T)$ )              |                                  |                                  |                                  |                                   |       |
|--------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------|
|                    |   | エリアA                              | エリアB                             | エリアC                             | エリアD                             | エリアE                              | $U$   |
|                    |   | $T = 0.2 \text{ s}$<br>$h = 0.02$ | $T = 0.8 \text{ s}$<br>$h = 0.1$ | $T = 0.3 \text{ s}$<br>$h = 0.1$ | $T = 1.0 \text{ s}$<br>$h = 0.1$ | $T = 0.3 \text{ s}$<br>$h = 0.02$ |       |
| 観測<br>地震動<br>(SI値) | A | 0.241                             | 0.198                            | 0.234                            | 0.267                            | 0.272                             | 0.244 |
|                    | B | 0.258                             | 0.230                            | 0.259                            | 0.323                            | 0.301                             | 0.276 |
|                    | C | 0.244                             | 0.199                            | 0.227                            | 0.275                            | 0.271                             | 0.245 |
|                    | D | 0.243                             | 0.200                            | 0.235                            | 0.268                            | 0.271                             | 0.245 |
|                    | E | 0.247                             | 0.208                            | 0.239                            | 0.290                            | 0.281                             | 0.255 |

## 5.5 まとめ

本章では、海溝型や内陸型地震といった周期特性や継続時間の異なる様々なタイプの 10 地震波を設定し、対象施設各エリアの地盤に対して非線形応答解析（修正 R-O モデル）を実施し、各地震動指標（PGA, PGV, SI 値）および地表面応答スペクトル値  $Sa(T)$  を算出すると共に、エリア毎に地震動指標および任意の固有周期  $T$  の地表面応答スペクトル値について回帰分析を行い、地震動指標と対象施設の各種構造物の応答の関係を把握した。そして、各種構造物の応答について、回帰式による予測値と計算値の誤差を算出して地盤種、構造物毎に統合し、統合した誤差の大小により緊急停止基準で用いる適切な地震動指標、および最適な地震計の設置位置を検討した。

得られた知見を以下に示す。

- ① 石油精製施設にある主要構造物の固有周期を概ね 1.0 秒以内程度と考えると、緊急停止基準で用いる地震動指標として PGA は適切であるが、施設構造物の塑性化による固有周期の長周期化を考慮すると、SI 値も選択肢となる。
- ② 地震動指標と構造物の応答（加速度応答スペクトル等）との相関は、短周期領域では PGA、長周期領域では SI 値、PGV の方が高い。
- ③ SI 値は PGA や PGV と比べ、0.04～2 秒程度の周期帯の応答に対し安定して相関が高い。

上記は様々な仮定や条件の下での結果であり、一般的な傾向を示すものではない。しかしながら、実際の石油精製施設の評価で用いた値を参照しており、立地状況が似通っている施設には参考になる結果である。また、提案手法は広大な敷地のどの位置に地震計を設置すべきか、緊急停止基準で用いる適切な地震動指標は何かという問題に有効な判断材料を提供するものである。



## 第5章の参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-net），  
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) 東京都港湾局：港湾局地震観測所で観測された東北地方太平洋沖地震等の記録  
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/keiyaku/kisojoho/>
- 3) 内閣府中央防災会議：中央防災会議専門調査会において検討された震度分布・浸水域等に係るデータ提供について「東海地震，東南海・南海地震等に関する専門調査会」「首都直下地震対策専門調査会」  
[http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai\\_nankaijishin/datakoukai/index.html](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/datakoukai/index.html)
- 4) 野津厚，安中正，佐藤陽子，菅野高弘：羽田空港の地震動特性に関する研究（第1報）表面波の特性，港湾空港技術研究所資料，No.1022，39p.，2002.
- 5) 神奈川県：地震被害想定調査，地震被害想定調査報告書手法編（平成27年3月），2015.  
<http://www.pref.kanagawa.jp/docs/j8g/cnt/f5151/documents/772932.pdf>
- 6) 吉田望：DYNES3D, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stress-nonlinear method, Version 2.71, 2006.
- 7) 飯場正紀，大川出，斎藤大樹，森田高市，長谷川隆：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震において観測された強震記録に基づく建築物の地震時挙動の分析，建築研究資料，No.138，p.123，2012.
- 8) 星幸江，丸山喜久，山崎文雄：数値解析に基づく地震動SI値と木造建物被害の関係の分析，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.65，No.1（地震工学論文集第30巻），pp.606-613，2009.
- 9) 北原武嗣，伊藤義人：固有周期依存型SIのRC多質点系構造物への適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.3，pp.1357-1362，2000.
- 10) 北原武嗣，清水善行：鋼製橋脚—地盤連成系の弾塑性最大応答変位の簡易推定法に関する研究，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.483-488，2004.
- 11) Housner, G.W. : Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault, Proceedings of the 3rd WCEE, pp. 94-115, 1965.

## 6. 緊急停止基準の評価

### 6.1 はじめに

本章では、前章に示した石油精製施設各エリアの地震計で観測される地震動指標（PGA, PGV, SI 値）と各種構造物の応答の回帰分析結果，および緊急停止基準評価で対象となる製造装置・消火関連設備等の各種構造物の耐震性能，対象エリアの資産価値，緊急停止から再稼働までの時間，1日当たりの営業損失等の情報を4章で構築した緊急停止基準評価モデルに取り込み，施設の最適な緊急停止基準を評価した．また，施設構造物間の地震損傷相関を考慮した場合の停止基準への影響について考察した．

## 6.2 対象構造物のフラジリティ情報

自己出火（損傷時発火する）、可燃物漏洩（可燃物を多量に含む）、消火活動に関わる構造物の震動被害に関する耐力中央値、対数標準偏差を表 6-2-1 に示す。同表では、固有周期、耐力中央値  $c_m$ 、耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$  に加え、地震動指標（PGA, PGV, SI 値）に対する回帰係数  $a, b$  および対数標準偏差（5.4 節で算出した回帰誤差） $\zeta_r$  を示している。各構造物の耐力中央値は応答加速度値であり、耐震計算書等の設計図書を参照し、応答スペクトル法を用いる解析的な方法により評価した。回帰係数  $a, b$  および対数標準偏差  $\zeta_r$  は、地震計設置位置として最適なエリア D の値である。耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$  は一律 0.4 とした。被災事例を用いた統計解析による様々な構造物の対数標準偏差  $\zeta_c$  は、地震動（応答）評価のばらつきを含み 0.6 程度であり<sup>1)</sup>、地震動評価では距離減衰式を用いている。よって、統計解析による対数標準偏差（複合偏差） $\zeta_c$  から距離減衰式のばらつき（対数標準偏差で 0.45 程度）を除くことで  $\zeta_c = 0.4$ （ $\approx (0.6^2 - 0.45^2)^{0.5}$ ）とした。一方、応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  は地震動指標として PGA を採用した場合は 0.1～0.2 程度、PGV の場合は 0.15～0.35 程度、SI 値の場合は 0.1～0.3 程度の範囲にあった。これらの値を 3.3.7 式に代入して対象構造物の損傷確率（大破以上の確率）を算出する。

表 6-2-1 構造物の震動被害に関する耐力中央値，対数標準偏差

| 構造物                     |                | 固有<br>周期<br>(s) | 耐力<br>(大破)  | 設置<br>エリア   |             | 最大加速度 (PGA) |          |   | 最大速度 (PGV) |          |   | SI値      |          |   |       |
|-------------------------|----------------|-----------------|---|-------------|-------------|-------------|----------|---|------------|----------|---|----------|----------|---|-------|
|                         |                |                 | 中央値<br>(cm/s <sup>2</sup> )<br><i>c<sub>m</sub></i> | 構<br>造<br>物 | 地<br>震<br>計 | 回帰係数        |          | 対数<br>標準<br>偏差<br>$\zeta_Y$<br>(ln $\kappa$ ) | 回帰係数       |          | 対数<br>標準<br>偏差<br>$\zeta_Y$<br>(ln $\kappa$ ) | 回帰係数     |          | 対数<br>標準<br>偏差<br>$\zeta_Y$<br>(ln $\kappa$ ) |       |
|                         |                |                 |   |             |             | <i>a</i>    | <i>b</i> |   | <i>a</i>   | <i>b</i> |   | <i>a</i> | <i>b</i> |   |       |
| 損傷時<br>発火する<br>構造物      | 加熱炉<br>(建屋型)   | 1.0             | 800   | D           | D           | 1.111       | 1.068    | 0.194   | 38.872     | 0.494    | 0.335   | 15.459   | 0.789    | 0.268   |       |
|                         | タワー            | 1.0             | 1400  | D           | D           | 1.111       | 1.068    | 0.194   | 38.872     | 0.494    | 0.335   | 15.459   | 0.789    | 0.268   |       |
| 可燃物を<br>多量に含む<br>構造物    | タワー            | 1.0             | 1000  | D           | D           | 1.111       | 1.068    | 0.194   | 38.872     | 0.494    | 0.335   | 15.459   | 0.789    | 0.268   |       |
|                         | 横置ドラム          | 0.2             | 1100  | D           | D           | 4.105       | 0.773    | 0.146   | 55.217     | 0.351    | 0.253   | 27.982   | 0.568    | 0.202   |       |
| 消火<br>活動に<br>関わる<br>構造物 | 工業<br>用水<br>系統 | 貯水槽             | -   | 1200        | E           | D           | 0.978    | 1.027   | 0.111      | 23.408   | 0.540   | 0.179    | 10.002   | 0.818   | 0.104 |
|                         |                | 工水ポンプ<br>室建屋    | 0.1   | 700         | C           | D           | 2.378    | 0.869   | 0.135      | 41.722   | 0.409   | 0.251    | 19.363   | 0.655   | 0.187 |
|                         |                | 特高受電・<br>送電設備   | -   | 700         | C           | D           | 1.049    | 1.001   | 0.104      | 25.129   | 0.505   | 0.215    | 10.716   | 0.781   | 0.136 |
|                         |                | 発電設備            | 0.3   | 1500        | C           | D           | 6.119    | 0.728   | 0.183      | 73.967   | 0.318   | 0.278    | 38.835   | 0.523   | 0.235 |
|                         |                | 変電室建屋           | 0.2   | 1000        | B           | D           | 7.111    | 0.573   | 0.104      | 44.874   | 0.282   | 0.159    | 28.875   | 0.426   | 0.141 |
|                         |                | 屋外変電設<br>備      | -   | 700         | B           | D           | 2.376    | 0.746   | 0.110      | 22.906   | 0.403   | 0.127    | 12.528   | 0.601   | 0.090 |
|                         | 海水<br>系統       | 海水ポンプ<br>室建屋    | 0.1   | 500         | A           | D           | 13.129   | 0.583   | 0.212      | 101.970  | 0.241   | 0.279    | 60.985   | 0.403   | 0.251 |

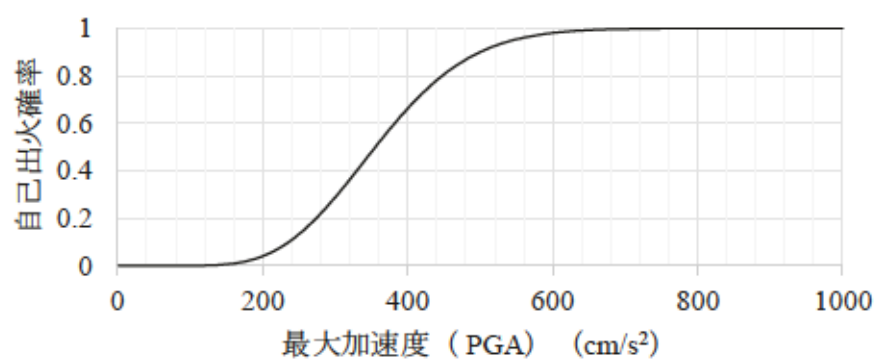
### 6.3 緊急停止基準の評価

#### 6.3.1 構造物間の損傷を独立とした場合の評価結果

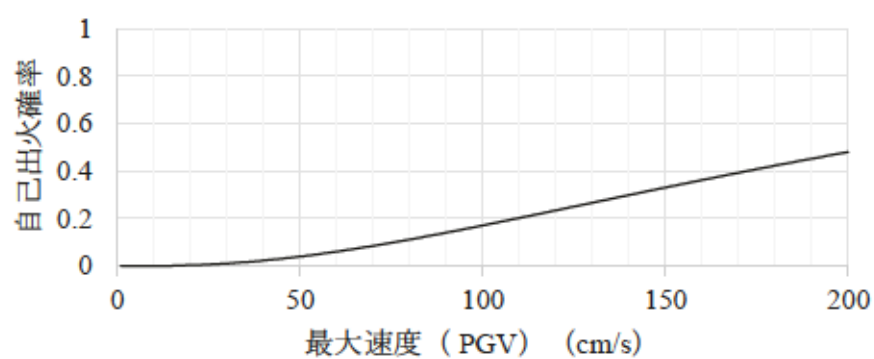
図 6-3-1 にエリア D に地震計を設置した場合の各地震動指標（PGA, PGV, SI 値）に応じた自己出火確率，図 6-3-2 に可燃物漏洩確率，図 6-3-3 に消火不能確率（消火活動なしの確率）を示す．自己出火確率は 4.3.1 式，可燃物漏洩確率は 4.3.2 式，消火不能確率は 4.3.3 式より算出した．同図の横軸はエリア D における各地震動指標（PGA, PGV, SI 値）の観測値である．

図 6-3-1 の自己出火確率は，損傷時に発火する加熱炉 2 基，タワー 5 基の大破以上損傷の和事象確率（4.3.1 式より），図 6-3-2 の可燃物漏洩確率は，可燃物を多く含むタワー 10 基，横置ドラム 10 基の大破以上損傷の和事象確率（4.3.2 式より）である．両図より自己出火確率と比べ，可燃物漏洩確率が高くなっているが，可燃物を多く含むタワー，横置ドラムの総数（7 基）が損傷時に発火する加熱炉，タワーの総数（10 基）より多いことが要因の 1 つである．図 6-3-3 に示す消火不能確率は，自己出火確率や可燃物漏洩確率と比べ低い値である．確率が低い理由としては，消火用水の供給が工業用水および海水取水の 2 系統であること，さらに，電力供給も自家発電と買電（外部からの電力供給）の 2 系統となっており，消火活動の成否に関して，冗長性の高いシステム構成（直列・並列混在システム，図 4-3-2 参照）であることが挙げられる．

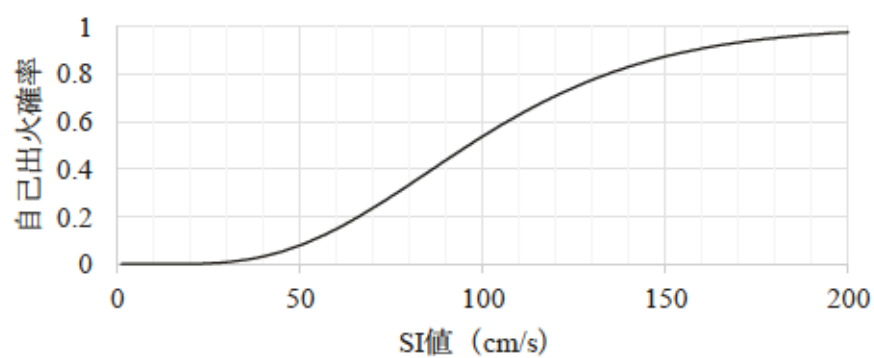




(a) PGA

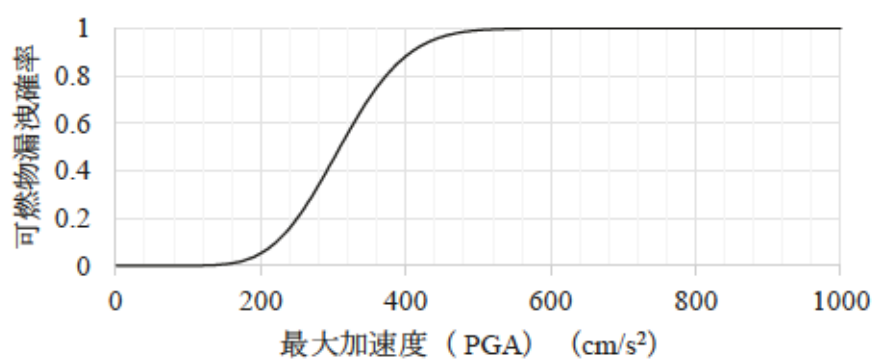


(b) PGV

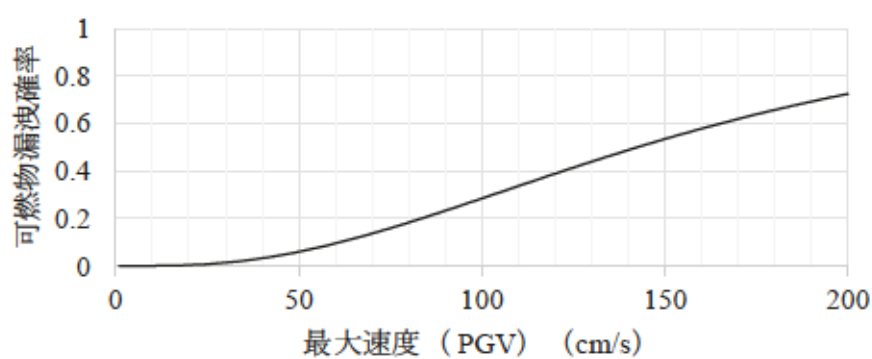


(c) SI 値

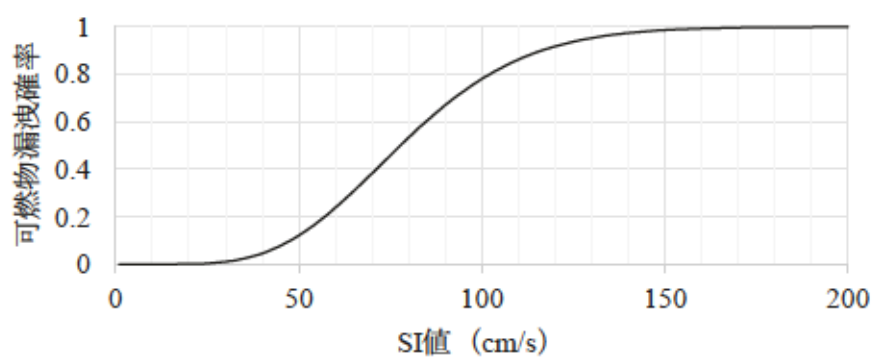
図 6-3-1 自己出火確率（エリア D に地震計を設置した場合）



(a) PGA

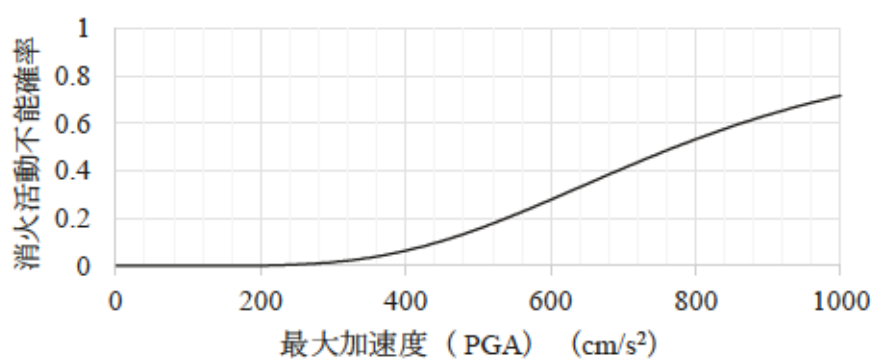


(b) PGV

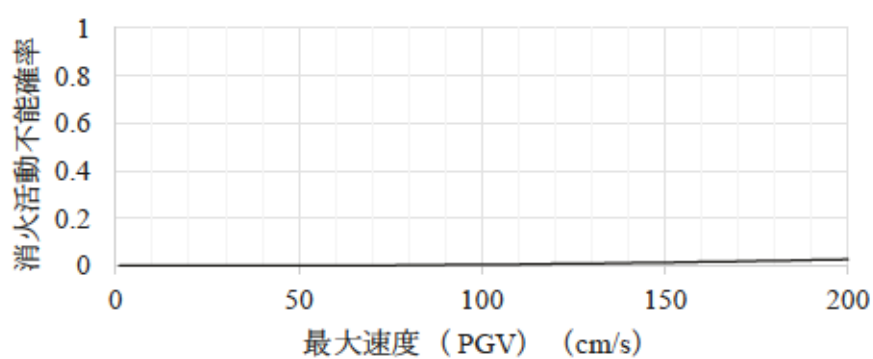


(c) SI 値

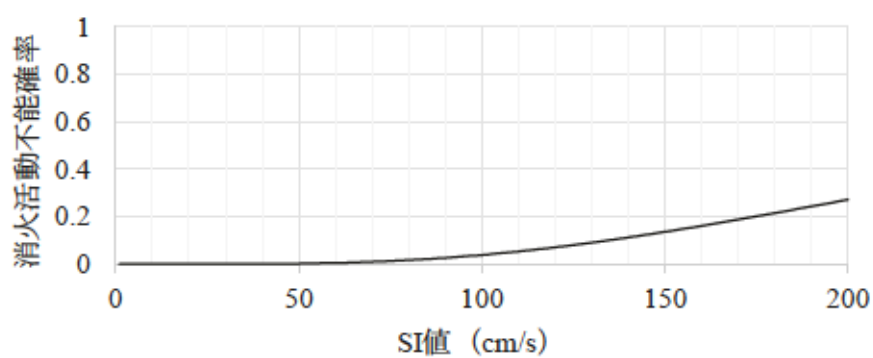
図 6-3-2 可燃物漏洩確率 (エリア D に地震計を設置した場合)



(a) PGA



(b) PGV



(c) SI 値

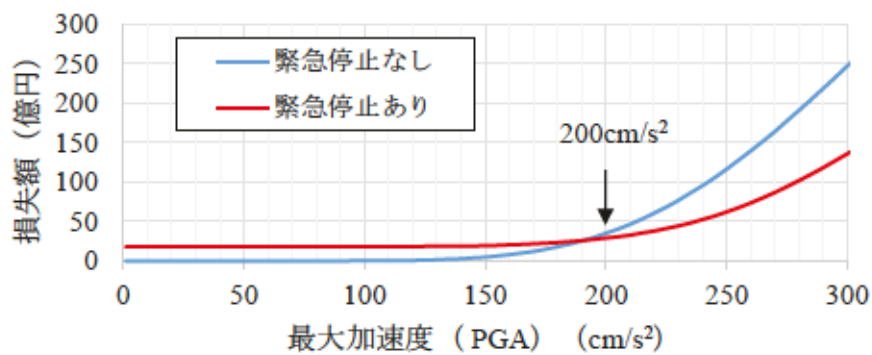
図 6-3-3 消火不能確率（消火活動なしの確率，エリア D に地震計を設置した場合）

図 6-3-1～図 6-3-3 の自己出火、可燃物漏洩、消火活動なしの確率を図 4-3-1 のイベントツリーに反映させ、「緊急停止あり」と「緊急停止なし」の地震ロス関数を中村らの方法<sup>2)</sup>に従い算出した。図 6-3-4 にエリア D に地震計を設置した場合の「緊急停止あり」と「緊急停止なし」の地震ロス関数を比較した。各関数の横軸はエリア D の PGA, PGV, SI 値である。なお、縦軸の損失額は、財物損失額に営業損失額を加えたものであるが、火災・可燃物漏洩によるものであることに注意が必要である。

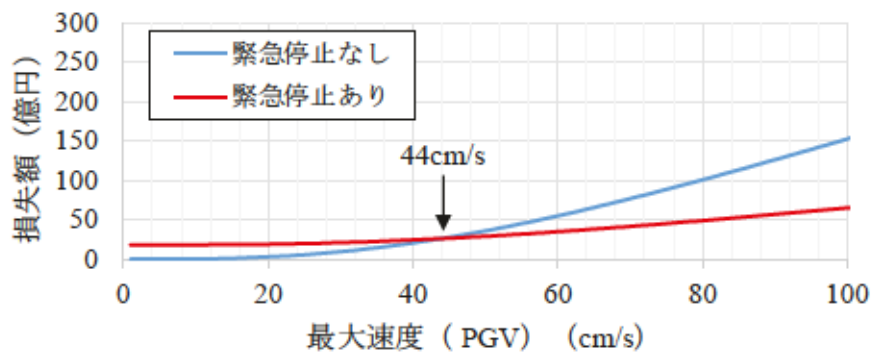
図 6-3-4(a)～(c)に共通して大きな地震動の領域（図の右側）では「緊急停止あり」のロス関数を「緊急停止なし」のロス関数がかなり上回っており、緊急停止システムによる効果が大きいたことが分かる。

図 6-3-4(a)より、 $PGA = 200 \text{ cm/s}^2$  を境に「緊急停止なし」の関数が「緊急停止あり」の関数を上回っている。よって、緊急停止は、 $200 \text{ cm/s}^2$  以上をエリア D に設置した地震計が観測した場合に実施するのが最良であることが分かる。PGV, SI 値については(b), (c)のロス関数の比較から  $44 \text{ cm/s}$ ,  $39 \text{ cm/s}$  が最適な基準値となる。

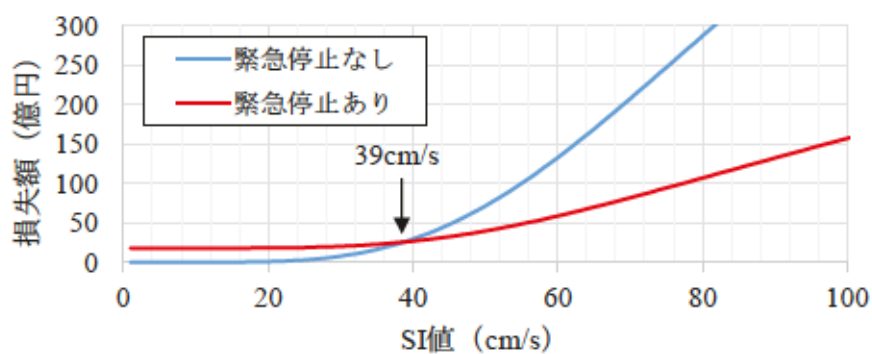
なお、このエリア D において地震計を 2 台追加し 2 out of 3 system を採用する場合は、地盤条件が同一であるため 3 台の地震計の停止基準は同値となる。また、エリア D 以外の地盤条件が異なる箇所に地震計を 2 台分散設置し、エリア D の地震計を含め 2 out of 3 system を採用する場合は、表 6-2-1 の各構造物に対する地震計設置位置（エリア A～C, E）の回帰係数  $a, b$  および対数標準偏差  $\zeta$  を用い、エリア D 以外の 2 箇所の緊急停止基準をそれぞれ評価することになる。その結果、停止基準は各箇所の地震計で異なる（同値の場合もある）。



(a) PGA



(b) PGV



(c) SI 値

図 6-3-4 地震ロス関数の比較による緊急停止基準の評価結果



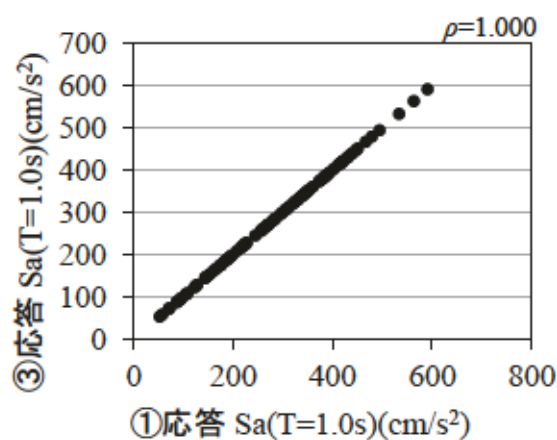
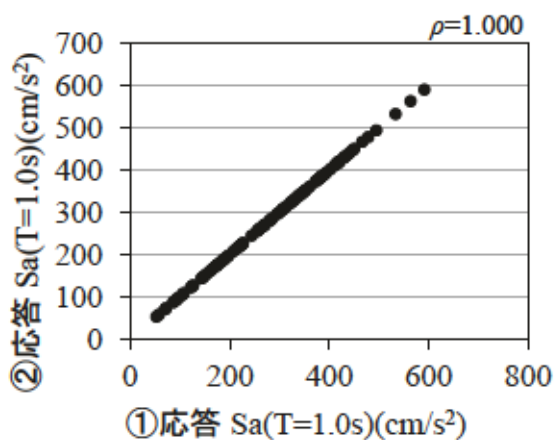
### 6.3.2 構造物間の損傷相関を考慮する場合の評価結果

前項では、対象とする構造物の地震損傷について独立を仮定し、緊急停止基準の評価を行った。しかしながら、各種構造物は、同じ構内に立地しており、構造物間の地震応答および損傷事象には、ある程度の統計的な相関があると考えられる。損傷相関を考慮することにより、構造物間の同時損傷確率が変わるため、和事象や積事象の組み合わせで表される消火システム等のシステム機能の喪失確率等が影響を受ける。これに伴い、最適な緊急停止基準が変わることも考えられ、本節ではこの種の相関を考慮し、緊急停止基準の評価を行う。

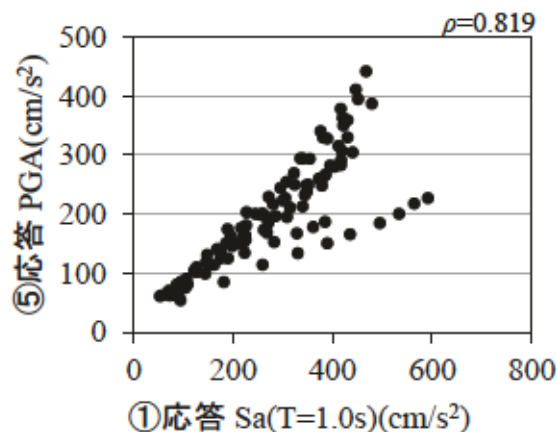
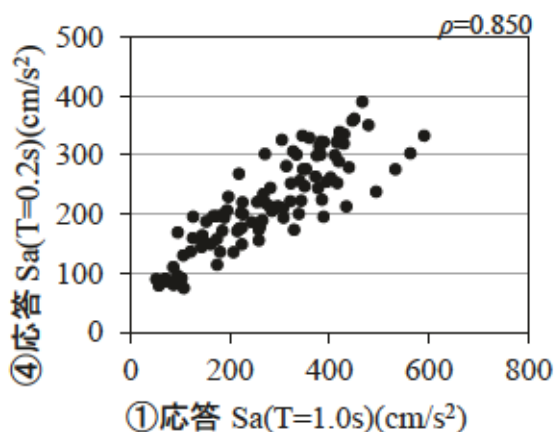
#### (1) 構造物間の地震応答の相関

図 6-3-5 に対象とする各構造物間の地震応答（地表面加速度応答スペクトル値）の相関を示す。各構造物は表 6-2-1 に示すとおり 11 種であり、当該構造物の地震応答値の説明とともに以下の①～⑪に記述する。図 6-3-5 に、①加熱炉（建屋型）と他 10 種（②～⑪の構造物）の構造物の応答値（加速度応答スペクトル値）の散布および応答値の対数の相関係数  $\rho$  を示している。同図は、入力地震波形 10 種（海溝型地震 5 種、内陸型地震 5 種）、振幅調整 10 ケース（工学的基盤最大加速度 50～700  $\text{cm/s}^2$ ）の 100 サンプルからなる散布図である。

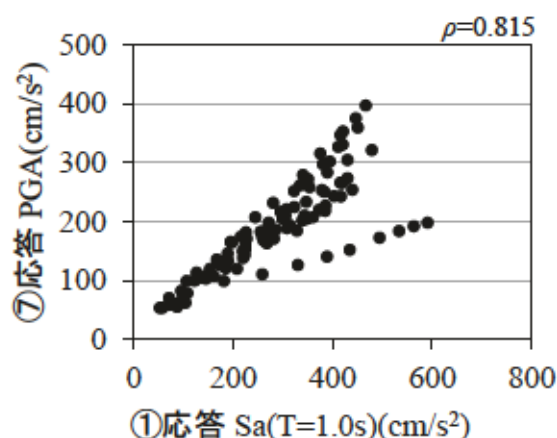
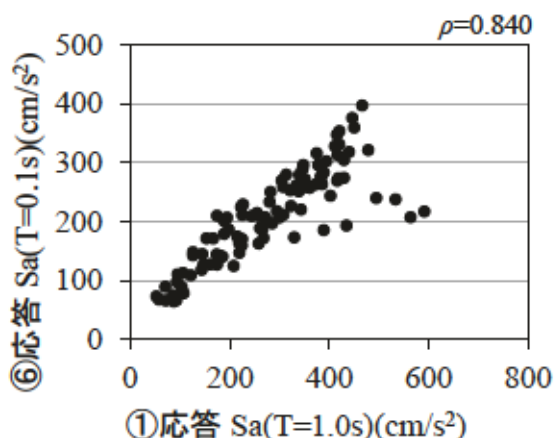
- ① 加熱炉（建屋型）、応答値はエリア D の周期 1.0 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=1.0 \text{ s})$
- ② タワー（損傷時発火する）、応答値はエリア D の周期 1.0 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=1.0 \text{ s})$
- ③ タワー（可燃物を多く含む）、応答値はエリア D の周期 1.0 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=1.0 \text{ s})$
- ④ 横置ドラム、応答値はエリア D の周期 0.2 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=0.2 \text{ s})$
- ⑤ 貯水槽、応答値はエリア E の PGA
- ⑥ 工水ポンプ室建屋、応答値はエリア C の周期 0.1 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=0.1 \text{ s})$
- ⑦ 特高受電・送電設備、応答値はエリア C の PGA
- ⑧ 発電設備、応答値はエリア C の周期 0.3 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=0.3 \text{ s})$
- ⑨ 変電室建屋、応答値はエリア B の周期 0.2 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=0.2 \text{ s})$
- ⑩ 屋外変電設備、応答値はエリア B の PGA
- ⑪ 海水ポンプ室建屋、応答値はエリア A の周期 0.1 秒の加速度応答スペクトル  $Sa(T=0.1 \text{ s})$



(a) ①応答 (エリア D) - ②応答 (エリア D) (b) ①応答 (エリア D) - ③応答 (エリア D)

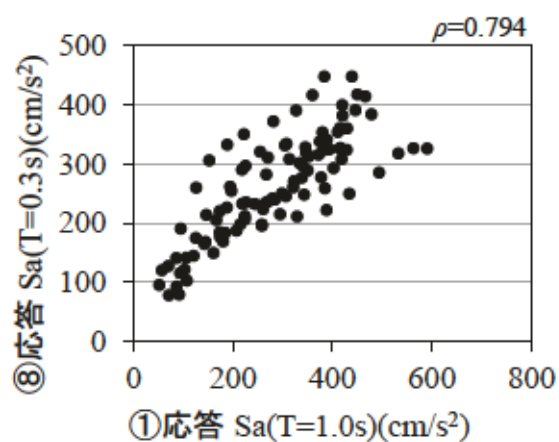


(c) ①応答 (エリア D) - ④応答 (エリア D) (d) ①応答 (エリア D) - ⑤応答 (エリア E)

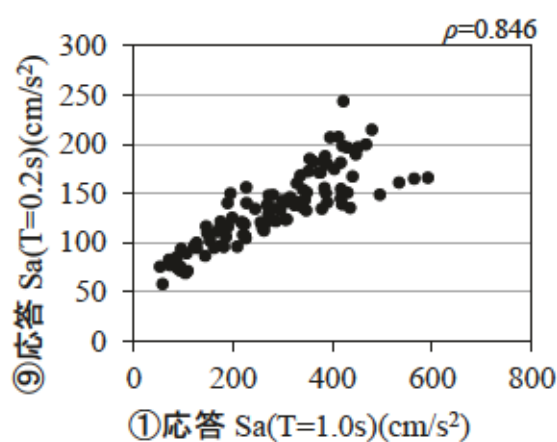


(e) ①応答 (エリア D) - ⑥応答 (エリア C) (f) ①応答 (エリア D) - ⑦応答 (エリア C)

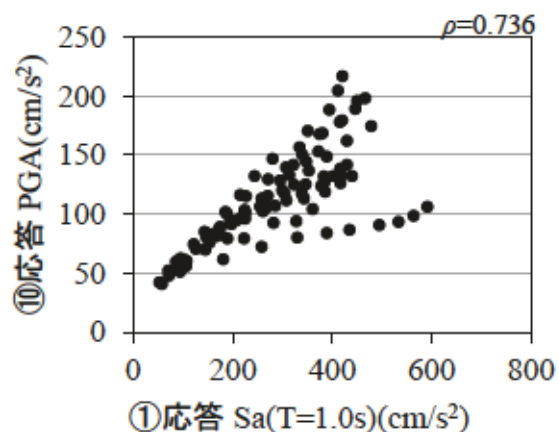
図 6-3-5(1/2) 各構造物間の応答（地表面加速度応答スペクトル値）の相関



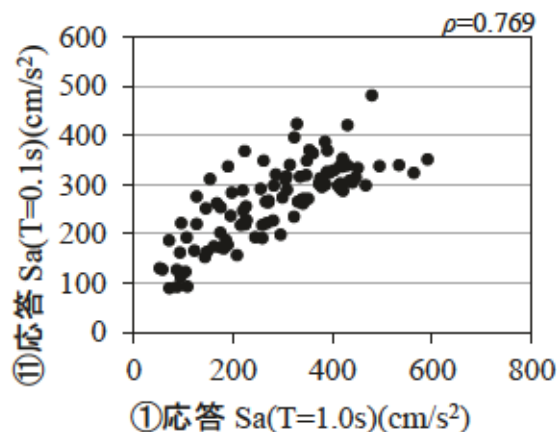
(g) ①応答 (エリア D) - ⑧応答 (エリア C)



(h) ①応答 (エリア D) - ⑨応答 (エリア B)



(i) ①応答 (エリア D) - ⑩応答 (エリア B)



(j) ①応答 (エリア D) - ⑪応答 (エリア A)

図 6-3-5(2/2) 各構造物間の応答 (地表面加速度応答スペクトル値) の相関

図 6-3-5 より，①加熱炉（建屋型）と他 10 種（②～⑪の構造物）の構造物の加速度応答スペクトル値の対数の相関は  $\rho = 0.736 \sim 1.0$ （完全相関）と高いことが分かる．表 6-3-1 に 11 種の構造物間の加速度応答スペクトル値（対数）の相関係数をマトリクスで示す．⑤貯水槽と⑪海水ポンプ室建屋，⑩屋外変電室建屋と⑪海水ポンプ室建屋の相関がそれぞれ  $\rho = 0.668$ ， $\rho = 0.589$  と比較的低いものの，他の構造物間は概ね  $\rho = 0.7 \sim 1.0$ （完全相関）と高くなっている．

表 6-3-1 11 種の構造物間の地震応答（加速度応答スペクトル値）の対数の相関係数

|            | ①加熱炉<br>(建屋型) | ②タワー<br>(発火) | ③タワー<br>(可燃物) | ④横置ドラム | ⑤貯水槽  | ⑥工水ポンプ室建屋 | ⑦特高受電・送電設備 | ⑧発電設備 | ⑨変電室建屋 | ⑩屋外変電設備 | ⑪海水ポンプ室建屋 |
|------------|---------------|--------------|---------------|--------|-------|-----------|------------|-------|--------|---------|-----------|
| ①加熱炉(建屋型)  | 1.000         | 1.000        | 1.000         | 0.850  | 0.819 | 0.840     | 0.815      | 0.794 | 0.846  | 0.736   | 0.769     |
| ②タワー(発火)   | 1.000         | 1.000        | 1.000         | 0.850  | 0.819 | 0.840     | 0.815      | 0.794 | 0.846  | 0.736   | 0.769     |
| ③タワー(可燃物)  | 1.000         | 1.000        | 1.000         | 0.850  | 0.819 | 0.840     | 0.815      | 0.794 | 0.846  | 0.736   | 0.769     |
| ④横置ドラム     | 0.850         | 0.850        | 0.850         | 1.000  | 0.861 | 0.908     | 0.879      | 0.919 | 0.880  | 0.807   | 0.824     |
| ⑤貯水槽       | 0.819         | 0.819        | 0.819         | 0.861  | 1.000 | 0.928     | 0.981      | 0.773 | 0.873  | 0.942   | 0.668     |
| ⑥工水ポンプ室建屋  | 0.840         | 0.840        | 0.840         | 0.908  | 0.928 | 1.000     | 0.953      | 0.891 | 0.902  | 0.901   | 0.769     |
| ⑦特高受電・送電設備 | 0.815         | 0.815        | 0.815         | 0.879  | 0.981 | 0.953     | 1.000      | 0.813 | 0.902  | 0.964   | 0.683     |
| ⑧発電設備      | 0.794         | 0.794        | 0.794         | 0.919  | 0.773 | 0.891     | 0.813      | 1.000 | 0.847  | 0.738   | 0.842     |
| ⑨変電室建屋     | 0.846         | 0.846        | 0.846         | 0.880  | 0.873 | 0.902     | 0.902      | 0.847 | 1.000  | 0.880   | 0.751     |
| ⑩屋外変電設備    | 0.736         | 0.736        | 0.736         | 0.807  | 0.942 | 0.901     | 0.964      | 0.738 | 0.880  | 1.000   | 0.589     |
| ⑪海水ポンプ室建屋  | 0.769         | 0.769        | 0.769         | 0.824  | 0.668 | 0.769     | 0.683      | 0.842 | 0.751  | 0.589   | 1.000     |

(2) 構造物間の損傷相関

11種の構造物間の加速度応答スペクトル値(対数)の相関係数, 表 6-2-1 に示す応答の対数標準偏差  $\zeta_T$ , および耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$  (各構造物一律 0.4) を用い, 耐力について独立 ( $\rho_{Cij}=0$ ) を仮定して, 3.5.6 式より損傷事象の相関係数(損傷相関係数)  $\rho_{Zij}$  を算出した.

ここに,  $\rho_{Tij}$  は応答(加速度応答スペクトル値の対数)の相関係数,  $i, j$  は構造物である.

表 6-3-2 に各地震動指標(PGA, PGV, SI 値)に応じた構造物間(11 種)の損傷相関係数をマトリクスで示す. (a)は PGA, (b)は PGV, (c)は SI 値のそれである. 同表より, 相関係数は PGA で 0.085~0.204 (平均 0.139), PGV で 0.143~0.412 (平均 0.301), SI 値で 0.09~0.310 (平均 0.216) である.

表 6-3-2(1/2) 11 種の構造物間の損傷相関係数

(a) PGA

|                | ①加熱炉<br>(建屋型) | ②タワー<br>(発火) | ③タワー<br>(可燃物) | ④横置ド<br>ラム | ⑤貯水槽  | ⑥工水ポン<br>プ室建<br>屋 | ⑦特高受<br>電・送電<br>設備 | ⑧発電設<br>備 | ⑨変電室<br>建屋 | ⑩屋外変<br>電設備 | ⑪海水ポン<br>プ室建<br>屋 |
|----------------|---------------|--------------|---------------|------------|-------|-------------------|--------------------|-----------|------------|-------------|-------------------|
| ①加熱炉(建<br>屋型)  | 0.190         | 0.190        | 0.190         | 0.127      | 0.096 | 0.117             | 0.090              | 0.144     | 0.093      | 0.085       | 0.157             |
| ②タワー(発<br>火)   | 0.190         | 0.190        | 0.190         | 0.127      | 0.096 | 0.117             | 0.090              | 0.144     | 0.093      | 0.085       | 0.157             |
| ③タワー(可燃<br>物)  | 0.190         | 0.190        | 0.190         | 0.127      | 0.096 | 0.117             | 0.090              | 0.144     | 0.093      | 0.085       | 0.157             |
| ④横置ドラム         | 0.127         | 0.127        | 0.127         | 0.150      | 0.100 | 0.127             | 0.096              | 0.167     | 0.097      | 0.093       | 0.168             |
| ⑤貯水槽           | 0.096         | 0.096        | 0.096         | 0.100      | 0.117 | 0.129             | 0.108              | 0.140     | 0.096      | 0.109       | 0.136             |
| ⑥工水ポン<br>プ室建屋  | 0.117         | 0.117        | 0.117         | 0.127      | 0.129 | 0.140             | 0.105              | 0.162     | 0.099      | 0.104       | 0.157             |
| ⑦特高受電・<br>送電設備 | 0.090         | 0.090        | 0.090         | 0.096      | 0.108 | 0.105             | 0.110              | 0.148     | 0.099      | 0.111       | 0.140             |
| ⑧発電設備          | 0.144         | 0.144        | 0.144         | 0.167      | 0.140 | 0.162             | 0.148              | 0.182     | 0.093      | 0.085       | 0.172             |
| ⑨変電室建屋         | 0.093         | 0.093        | 0.093         | 0.097      | 0.096 | 0.099             | 0.099              | 0.093     | 0.110      | 0.102       | 0.154             |
| ⑩屋外変電設<br>備    | 0.085         | 0.085        | 0.085         | 0.093      | 0.109 | 0.104             | 0.111              | 0.085     | 0.102      | 0.116       | 0.120             |
| ⑪海水ポン<br>プ室建屋  | 0.157         | 0.157        | 0.157         | 0.168      | 0.136 | 0.157             | 0.140              | 0.172     | 0.154      | 0.120       | 0.204             |



表 6-3-2(2/2) 11種の構造物間の損傷相関係数

## (b) PGV

|                | ①加熱炉<br>(建屋型) | ②タワー<br>(発火) | ③タワー<br>(可燃物) | ④横置ドラム | ⑤貯水槽  | ⑥工水ポンプ<br>室建屋 | ⑦特高受<br>電・送電<br>設備 | ⑧発電設<br>備 | ⑨変電室<br>建屋 | ⑩屋外変<br>電設備 | ⑪海水ポン<br>プ室建<br>屋 |
|----------------|---------------|--------------|---------------|--------|-------|---------------|--------------------|-----------|------------|-------------|-------------------|
| ①加熱炉(建屋型)      | 0.412         | 0.412        | 0.412         | 0.292  | 0.215 | 0.287         | 0.248              | 0.291     | 0.201      | 0.143       | 0.282             |
| ②タワー(発火)       | 0.412         | 0.412        | 0.412         | 0.292  | 0.215 | 0.287         | 0.248              | 0.291     | 0.201      | 0.143       | 0.282             |
| ③タワー(可燃物)      | 0.412         | 0.412        | 0.412         | 0.292  | 0.215 | 0.287         | 0.248              | 0.291     | 0.201      | 0.143       | 0.282             |
| ④横置ドラム         | 0.292         | 0.292        | 0.292         | 0.343  | 0.226 | 0.310         | 0.267              | 0.337     | 0.209      | 0.157       | 0.303             |
| ⑤貯水槽           | 0.215         | 0.215        | 0.215         | 0.226  | 0.262 | 0.317         | 0.298              | 0.283     | 0.207      | 0.183       | 0.245             |
| ⑥工水ポンプ<br>室建屋  | 0.287         | 0.287        | 0.287         | 0.310  | 0.317 | 0.341         | 0.290              | 0.326     | 0.214      | 0.175       | 0.282             |
| ⑦特高受電・<br>送電設備 | 0.248         | 0.248        | 0.248         | 0.267  | 0.298 | 0.290         | 0.304              | 0.298     | 0.214      | 0.187       | 0.251             |
| ⑧発電設備          | 0.291         | 0.291        | 0.291         | 0.337  | 0.283 | 0.326         | 0.298              | 0.366     | 0.201      | 0.143       | 0.309             |
| ⑨変電室建屋         | 0.201         | 0.201        | 0.201         | 0.209  | 0.207 | 0.214         | 0.214              | 0.201     | 0.237      | 0.171       | 0.276             |
| ⑩屋外変電設<br>備    | 0.143         | 0.143        | 0.143         | 0.157  | 0.183 | 0.175         | 0.187              | 0.143     | 0.171      | 0.194       | 0.216             |
| ⑪海水ポンプ<br>室建屋  | 0.282         | 0.282        | 0.282         | 0.303  | 0.245 | 0.282         | 0.251              | 0.309     | 0.276      | 0.216       | 0.367             |

## (c) SI 値

|                | ①加熱炉<br>(建屋型) | ②タワー<br>(発火) | ③タワー<br>(可燃物) | ④横置ドラム | ⑤貯水槽  | ⑥工水ポンプ<br>室建屋 | ⑦特高受<br>電・送電<br>設備 | ⑧発電設<br>備 | ⑨変電室<br>建屋 | ⑩屋外変<br>電設備 | ⑪海水ポン<br>プ室建<br>屋 |
|----------------|---------------|--------------|---------------|--------|-------|---------------|--------------------|-----------|------------|-------------|-------------------|
| ①加熱炉(建屋型)      | 0.310         | 0.310        | 0.310         | 0.213  | 0.115 | 0.198         | 0.146              | 0.224     | 0.157      | 0.090       | 0.227             |
| ②タワー(発火)       | 0.310         | 0.310        | 0.310         | 0.213  | 0.115 | 0.198         | 0.146              | 0.224     | 0.157      | 0.090       | 0.227             |
| ③タワー(可燃物)      | 0.310         | 0.310        | 0.310         | 0.213  | 0.115 | 0.198         | 0.146              | 0.224     | 0.157      | 0.090       | 0.227             |
| ④横置ドラム         | 0.213         | 0.213        | 0.213         | 0.251  | 0.121 | 0.214         | 0.157              | 0.259     | 0.163      | 0.099       | 0.244             |
| ⑤貯水槽           | 0.115         | 0.115        | 0.115         | 0.121  | 0.140 | 0.219         | 0.176              | 0.218     | 0.161      | 0.115       | 0.198             |
| ⑥工水ポンプ<br>室建屋  | 0.198         | 0.198        | 0.198         | 0.214  | 0.219 | 0.236         | 0.171              | 0.251     | 0.167      | 0.110       | 0.227             |
| ⑦特高受電・<br>送電設備 | 0.146         | 0.146        | 0.146         | 0.157  | 0.176 | 0.171         | 0.179              | 0.229     | 0.167      | 0.118       | 0.202             |
| ⑧発電設備          | 0.224         | 0.224        | 0.224         | 0.259  | 0.218 | 0.251         | 0.229              | 0.282     | 0.157      | 0.090       | 0.249             |
| ⑨変電室建屋         | 0.157         | 0.157        | 0.157         | 0.163  | 0.161 | 0.167         | 0.167              | 0.157     | 0.185      | 0.108       | 0.222             |
| ⑩屋外変電設<br>備    | 0.090         | 0.090        | 0.090         | 0.099  | 0.115 | 0.110         | 0.118              | 0.090     | 0.108      | 0.122       | 0.174             |
| ⑪海水ポンプ<br>室建屋  | 0.227         | 0.227        | 0.227         | 0.244  | 0.198 | 0.227         | 0.202              | 0.249     | 0.222      | 0.174       | 0.296             |

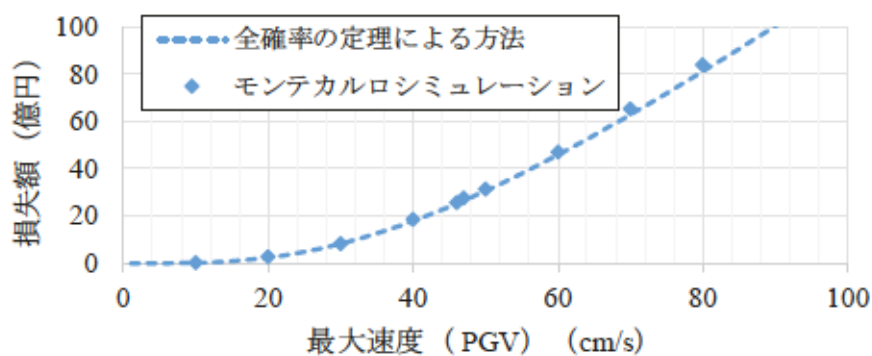
### (3) 損傷事象の相関を考慮した緊急停止基準評価

構造物間の損傷相関を考慮した緊急停止基準は、全確率の定理による方法<sup>3),4)</sup>により評価した。その際、モンテカルロシミュレーションにより、評価結果に対する妥当性の検証も行っている。図 6-3-6 に「緊急停止なし」、図 6-3-7 に「緊急停止あり」の地震ロス関数を示す。両図において、全確率の定理による方法の評価結果を破線、モンテカルロシミュレーションによる結果を矩形(◆)で示し、双方を比較している。モンテカルロシミュレーションは、表 6-3-2 に示す相関を有する各地震動指標(PGA, PGV, SI 値)に応じた構造物の応答について、34 構造物(①～⑪の 11 種、①は 2 基、②は 5 基、③、④は各 10 基)×50000 組を発生させ、表 6-2-1 に示す耐力中央値により、34 構造物の損傷(大破以上)の発生および自己出火、可燃物漏洩、消火活動有無(成否)の判定を行い、各構造物の損傷状況に応じた損失額を算出した。

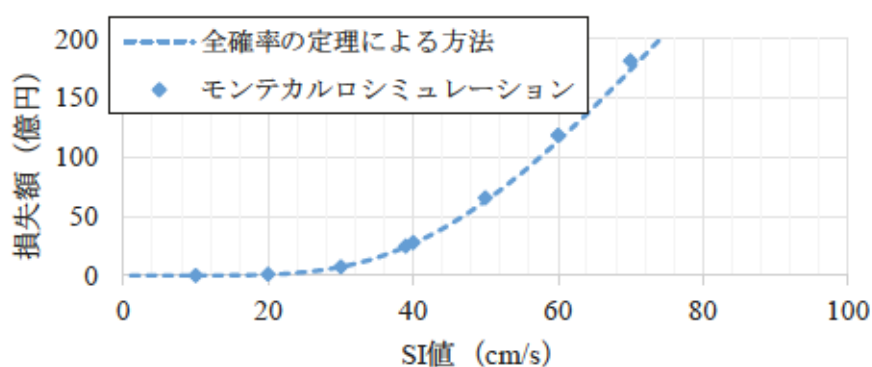
図 5-3-6 および図 5-3-7 より、全確率の定理による方法、およびモンテカルロシミュレーションより算出された地震ロス関数は、概ね一致していることが分かる。また、表 6-3-3 において各地震動(PGA, PGV, SI 値)の大きさに応じた損失額について一覧しているが、両図に加え、同表から全確率の定理による損傷事象の相関を考慮したリスク評価手法の妥当性が確認できる。



(a) PGA

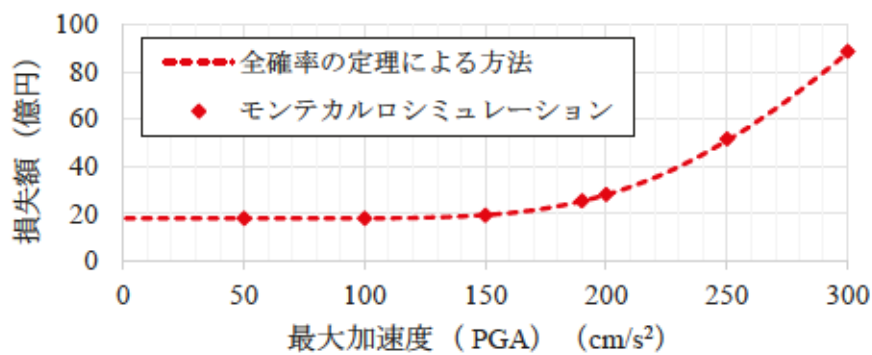


(b) PGV

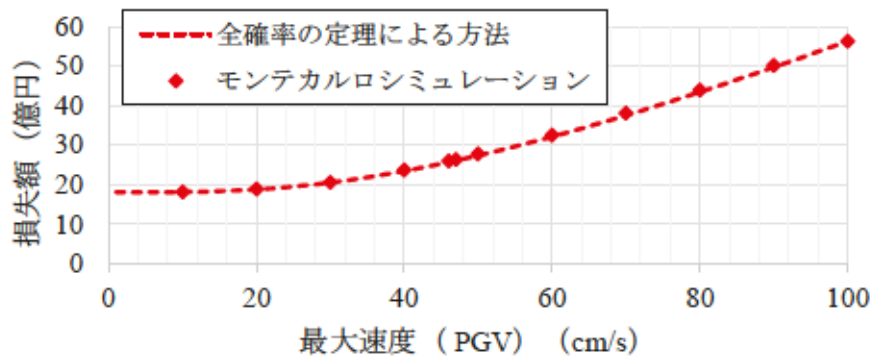


(c) SI 値

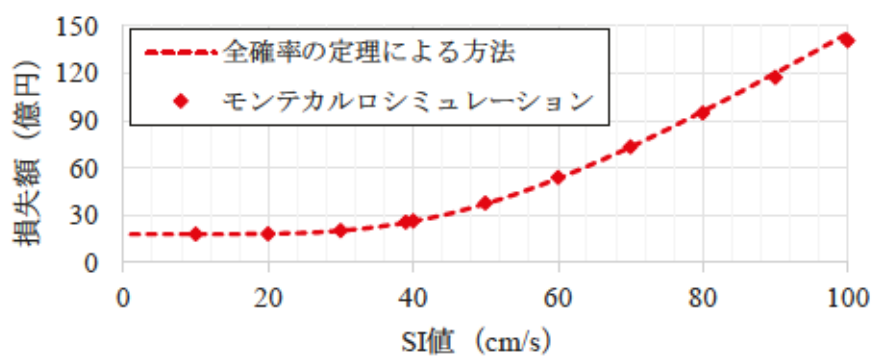
図 6-3-6 全確率の定理による方法とモンテカルロシミュレーションより算出された地震ロス関数の比較（「緊急停止なし」の場合）



(a) PGA



(b) PGV



(c) SI 値

図 6-3-7 全確率の定理による方法とモンテカルロシミュレーションより算出された地震ロス関数の比較（「緊急停止あり」の場合）

表 6-3-3 全確率の定理による方法とモンテカルロシミュレーションより算出された  
損失額の比較

(a) PGA

| PGA<br>(cm/s <sup>2</sup> ) | 損失額(緊急停止なし)(億円) |                        | 損失額(緊急停止あり)(億円) |                        |
|-----------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
|                             | 全確率の定理<br>による方法 | モンテカルロ<br>シミュレー<br>ション | 全確率の定理<br>による方法 | モンテカルロ<br>シミュレー<br>ション |
| 50                          | 0.0             | 0.0                    | 18.0            | 18.0                   |
| 100                         | 0.1             | 0.1                    | 18.0            | 18.0                   |
| 150                         | 4.8             | 4.7                    | 19.4            | 19.4                   |
| 190                         | 24.4            | 24.8                   | 25.3            | 25.4                   |
| 200                         | 33.3            | 33.7                   | 28.0            | 28.1                   |
| 250                         | 107.3           | 110.7                  | 50.8            | 51.6                   |
| 300                         | 222.5           | 229.8                  | 88.1            | 88.6                   |

(b) PGV

| PGV<br>(cm/s) | 損失額(緊急停止なし)(億円) |                        | 損失額(緊急停止あり)(億円) |                        |
|---------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
|               | 全確率の定理<br>による方法 | モンテカルロ<br>シミュレー<br>ション | 全確率の定理<br>による方法 | モンテカルロ<br>シミュレー<br>ション |
| 10            | 0.2             | 0.2                    | 18.1            | 18.1                   |
| 20            | 2.4             | 2.7                    | 18.7            | 18.8                   |
| 30            | 8.3             | 8.3                    | 20.5            | 20.5                   |
| 40            | 17.8            | 18.5                   | 23.4            | 23.7                   |
| 46            | 25.2            | 25.7                   | 25.6            | 25.9                   |
| 47            | 26.5            | 27.6                   | 26.0            | 26.3                   |
| 50            | 30.6            | 31.3                   | 27.3            | 27.7                   |
| 60            | 45.8            | 47.0                   | 32.1            | 32.5                   |
| 70            | 62.8            | 65.3                   | 37.5            | 38.1                   |
| 80            | 81.1            | 83.9                   | 43.4            | 43.9                   |
| 90            | 100.2           | 104.0                  | 49.7            | 50.2                   |
| 100           | 119.8           | 124.0                  | 56.3            | 56.3                   |

(c) SI 値

| SI値<br>(cm/s) | 損失額(緊急停止なし)(億円) |                        | 損失額(緊急停止あり)(億円) |                        |
|---------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
|               | 全確率の定理<br>による方法 | モンテカルロ<br>シミュレー<br>ション | 全確率の定理<br>による方法 | モンテカルロ<br>シミュレー<br>ション |
| 10            | 0.0             | 0.0                    | 18.0            | 18.0                   |
| 20            | 0.8             | 1.1                    | 18.2            | 18.3                   |
| 30            | 7.3             | 7.4                    | 20.2            | 20.2                   |
| 39            | 24.2            | 25.0                   | 25.3            | 25.5                   |
| 40            | 26.9            | 27.9                   | 26.1            | 26.4                   |
| 50            | 63.0            | 65.7                   | 37.2            | 37.8                   |
| 60            | 113.5           | 118.4                  | 53.3            | 53.9                   |
| 70            | 173.7           | 181.5                  | 73.2            | 73.3                   |
| 80            | 238.3           | 248.5                  | 95.8            | 94.8                   |
| 90            | 303.2           | 314.7                  | 120.0           | 117.5                  |
| 100           | 365.1           | 374.2                  | 145.2           | 140.7                  |



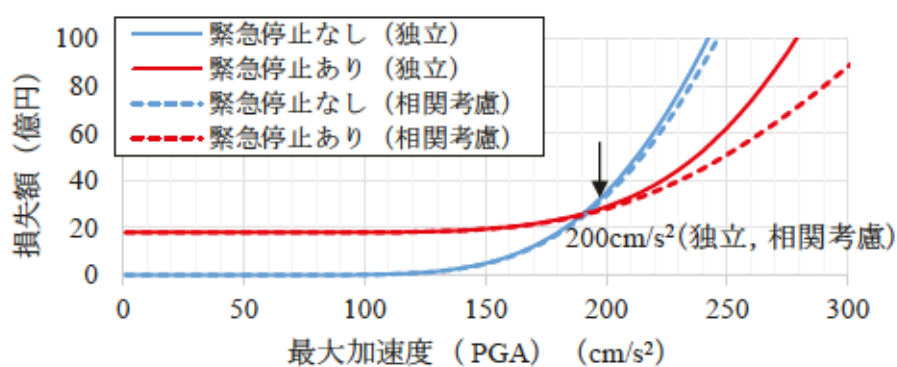
図 6-3-6 の「緊急停止なし」、図 6-3-7 の「緊急停止あり」の地震ロス関数を図 6-3-8 で比較し、対象構造物の損傷相関を考慮した緊急停止基準を評価した。同図では、損傷相関を考慮した緊急停止基準と共に、前項で評価した構造物間の損傷を独立とした場合のロス関数も合わせて記載した。それぞれの条件（相関考慮、独立）の停止基準を判断する「緊急停止なし」（青）と「緊急停止あり」（赤）のロス関数はそれぞれ破線（相関考慮）、実線（独立）で示し、「緊急停止なし」の関数が「緊急停止あり」の関数を上回る境の地震動の大きさを緊急停止基準としている。なお、関数の横軸はエリア D で観測される PGA, PGV, SI 値である。

図 6-3-8(a)～(c)より、損傷相関を考慮した場合の緊急停止基準は、PGA が  $200 \text{ cm/s}^2$ , PGV が  $47 \text{ cm/s}$ , SI 値が  $40 \text{ cm/s}$  である。各地震動指標（PGA, PGV, SI 値）について相関考慮の有無により緊急停止基準はほとんど変わっておらず、PGA については不変であることが分かる。この理由としては、表 6-3-2 に示す PGA, PGV, SI 値の各構造物間の損傷相関係数が PGA で  $0.085 \sim 0.204$ （平均  $0.139$ ）、PGV で  $0.143 \sim 0.412$ （平均  $0.301$ ）、SI 値で  $0.09 \sim 0.310$ （平均  $0.216$ ）と独立（相関係数  $0$ ）に近いことが挙げられる。

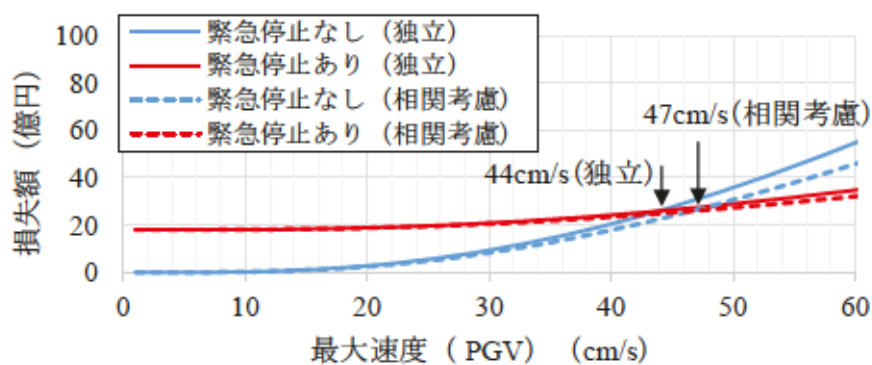
図 6-3-9～図 6-3-11 に自己出火、可燃物漏洩、消火活動なしの確率を相関考慮の有無で比較し、それぞれ示す。破線が相関考慮ありの場合、実線が独立の場合である。

損傷時に発火する加熱炉 2 基、タワー 5 基の大破以上損傷の和事象確率である図 6-3-9 の自己出火確率、可燃物を多く含むタワー 10 基、横置ドラム 10 基の大破以上損傷の和事象確率である図 6-3-10 の可燃物漏洩確率は、損傷相関を考慮することにより、独立の場合の確率と比べ、それぞれ値が低くなっていることが分かる。これは、和事象の確率、言い換えると直列システムの機能喪失確率（1 つでも損傷するとシステム全体の機能が喪失する）の特徴的な傾向である。消火活動なしの確率は、図 4-3-2 に示すように直列・並列混在システムの機能喪失確率であり、相関の有無の影響は直列システムと並列システムの間隔的な傾向となる。並列システム（1 つでも健全であるとシステム全体の機能も健全）は直列システムと逆の傾向であり、相関を考慮することでシステムの機能喪失確率は大きくなる。よって、図 6-3-11 の消火活動なしの確率（消火活動不能確率）は、相関の考慮の有無により、直列および並列システム双方の傾向が反映され、ほとんど確率に差がない結果となっている。

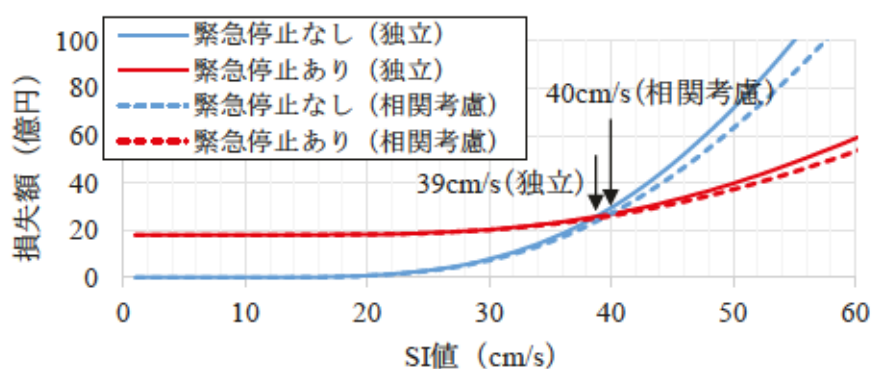
図 6-3-9～図 6-3-11 の PGA, PGV, SI 値に応じた各確率について、図 6-3-8 で示す緊急停止基準付近の地震動の領域において相関考慮の有無による確率の差がほとんどないことが分かる。このことから、各地震動指標（PGA, PGV, SI 値）について相関考慮の有無により緊急停止基準がほとんど変わらないという結果を確認することができる。



(a) PGA

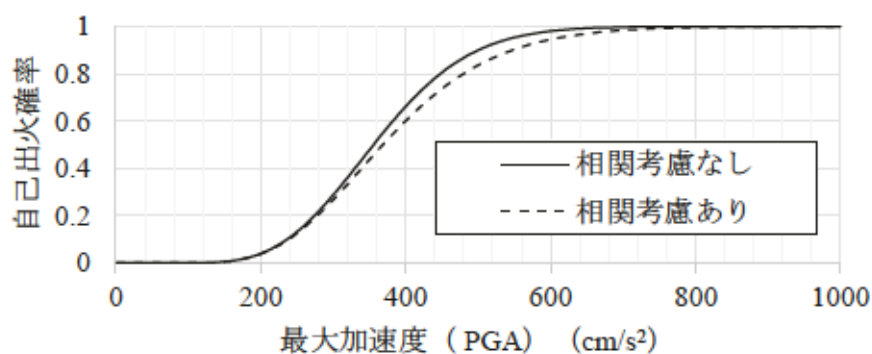


(b) PGV

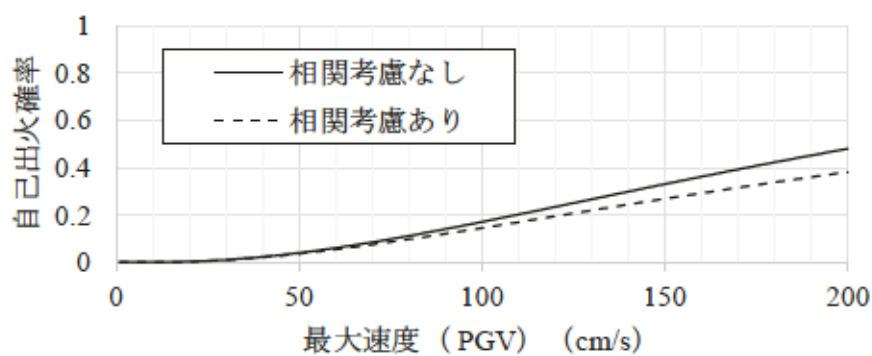


(c) SI 値

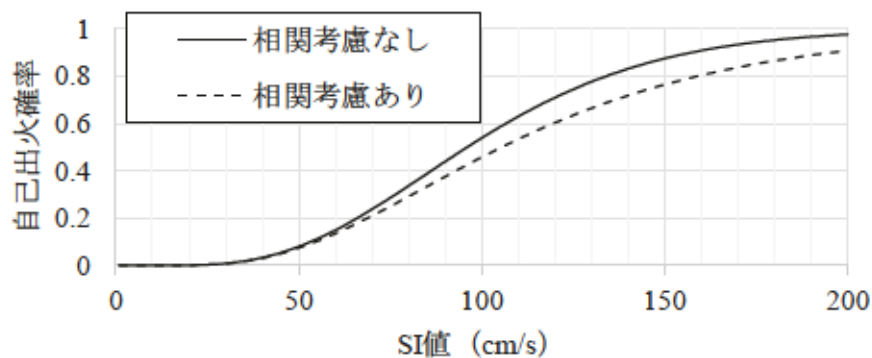
図 6-3-8 損傷相関の考慮の有無による緊急停止基準の比較  
(エリア D に地震計を設置した場合)



(a) PGA

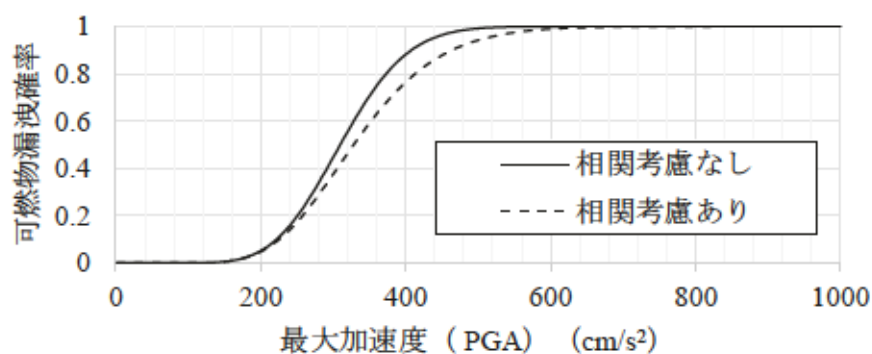


(b) PGV

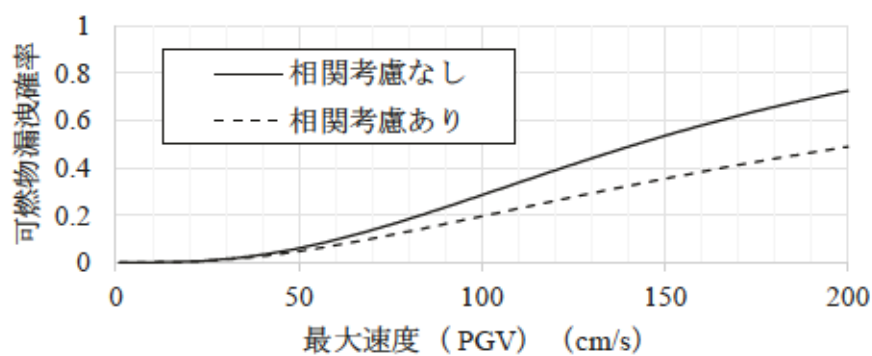


(c) SI 値

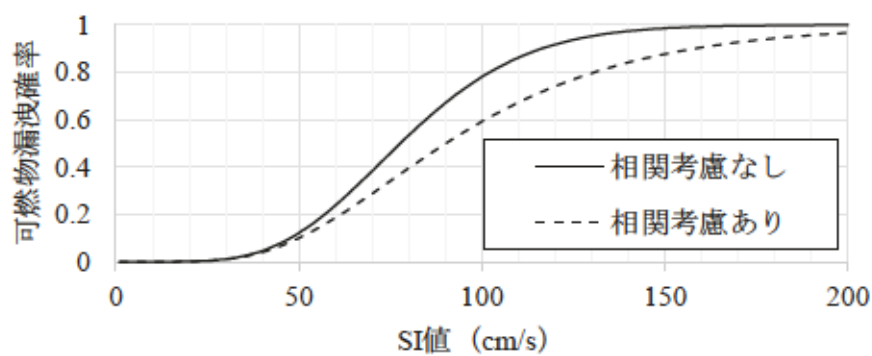
図 6-3-9 損傷相関の考慮の有無による自己出火確率の比較  
(エリア D に地震計を設置した場合)



(a) PGA

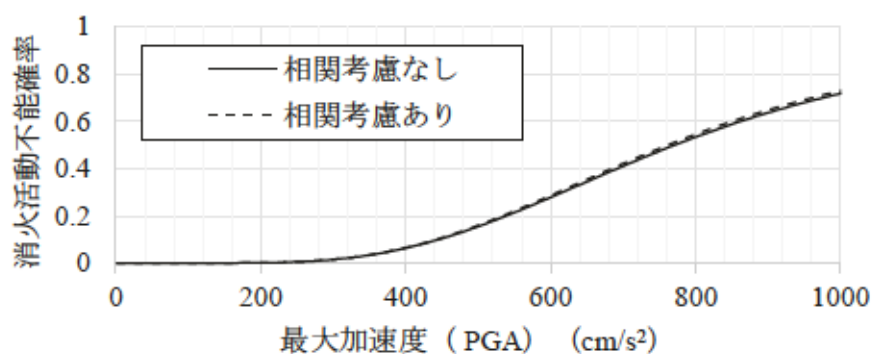


(b) PGV

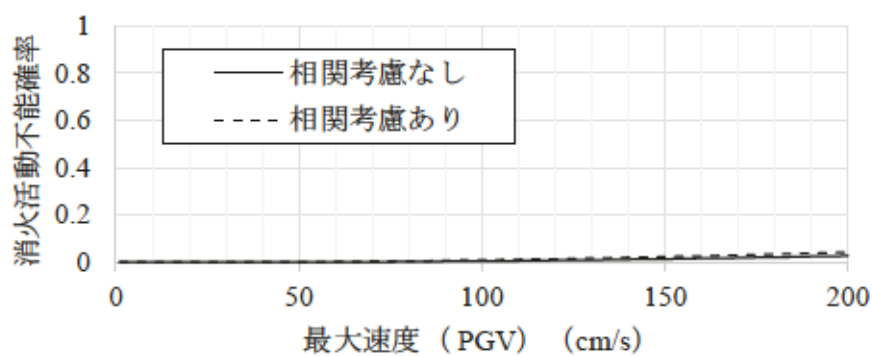


(c) SI 値

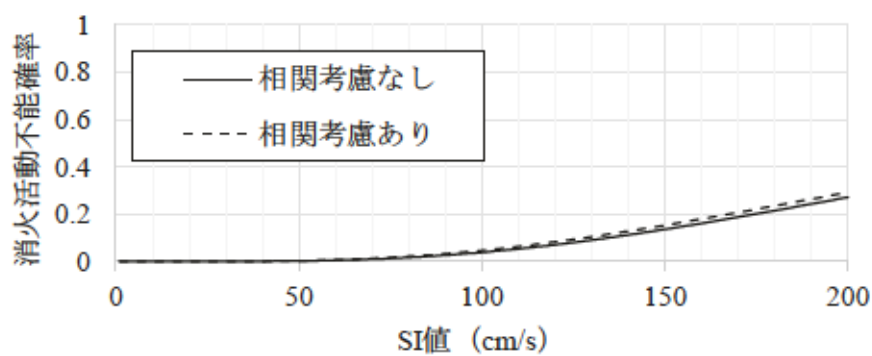
図 6-3-10 損傷相関の相関考慮の有無による可燃物漏洩確率の比較  
(エリア D に地震計を設置した場合)



(a) PGA



(b) PGV



(c) SI 値

図 6-3-11 損傷相関の相関考慮の有無による消火不能確率の比較  
(エリア D に地震計を設置した場合)



## 6.4 まとめ

本章では、地震計で観測する地震動指標および地震計の設置位置の検討結果を反映し、石油精製施設（仮想）の最適な緊急停止基準を評価した。また、地震時の施設構造物間の損傷相関を考慮し、停止基準への影響を考察した。

様々な仮定や条件の下ではあるが、以下の知見が得られた。

- ① 施設構内に立地する各種構造物の応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  は、地震計で観測する地震動指標として PGA を採用した場合、0.1～0.2 程度、PGV の場合、0.15～0.35 程度、SI 値の場合、0.1～0.3 程度の範囲にある。
- ② 地震時の対象構造物の損傷相関を独立とした場合、施設の最適な緊急停止基準は PGA = 200 cm/s<sup>2</sup>, PGV = 44 cm/s, SI 値 = 39 cm/s である。
- ③ 各種構造物間の損傷相関係数は、耐力について独立を仮定すると、PGA で 0.085～0.204, PGV で 0.143～0.412, SI 値で 0.09～0.310 程度である。
- ④ 地震時の構造物間の損傷相関を考慮した場合の緊急停止基準は、PGA が 200 cm/s<sup>2</sup>, PGV が 47 cm/s, SI 値が 40 cm/s である。損傷相関考慮による緊急停止基準への影響は小さい。

④にも述べた通り、構造物間の損傷相関の考慮による緊急停止基準への影響は小さいという結果となった。PGA, PGV, SI 値の損傷相関係数が独立に近いことが一因である。しかしながら、この結果は応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  の中に地盤物性等の不確実性が含まれていないことに注意が必要である。3.5.6 式より、応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  が大きくなるに従い、損傷相関係数も高くなる。また、耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$  についても、対象とする各種構造物に関する加振試験等によるデータはなく、本研究では各構造物について一律 0.4 としている。よって、構造物の応答および耐力の不確実性（対数標準偏差）に関する感度解析を行い、緊急停止基準への影響を検討する必要があると考える。

## 第 6 章の参考文献

- 1) 吉川弘道, 大滝健, 前田欣昌, 中村孝明: 地震リスク解析における fragility 曲線と地震損失関数, コンクリート工学会誌, Vol.45, No.10, pp.26-34, 2007.
- 2) 中村孝明, 高木政美, 志波由紀夫, 坂下克之: 緊急地震速報を利用したプラント施設の緊急停止に関する研究, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.1330-1333, 2006.
- 3) 中村孝明: 相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価, 建築学会構造系論文集, 第 623 号, pp.49-56, 2007.
- 4) 静間俊郎, 中村孝明, 吉川弘道: 地震損傷相関を考慮した施設群の機能停止評価, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.299-309, 2009.

## 7. 結論

本研究では、石油精製施設を対象に地震計で観測される地震動指標と散在する各構造物の応答の相関関係を捉え、緊急停止基準で用いる適切な地震動指標および地震計の最適な設置位置の実用的な選定方法を提案した。そして、提案手法の有用性の確認として、軟弱地盤に立地する施設を想定し、適切な地震動指標および地震計の最適な設置位置を検討すると共に、地震動指標と各構造物の応答の相関関係を反映した **Fragility Curve** を用いて、施設の最適な緊急停止基準を評価した。

本研究の内容と結果を以下にまとめる。

2 章では、緊急停止基準で用いる適切な地震動指標および地震計の最適な設置位置の選定方法を提案した。石油精製施設では多種多様な構造物が広い構内に散在し、各種構造物の応答特性や立地地盤の増幅特性の違いにより構造物に作用する地震動と地震計で観測される地震動は同一とはならない。これより、観測地震動と構造物応答の関係は各構造物について様々なものとなり、各構造物で応答と相関の高い地震動指標や設置位置が異なることが考えられる。提案手法は上記の課題を解決するものである。同手法は、具体的には、地震計で観測される地震動指標と各構造物の応答との関係を非線形の回帰式でモデル化し、回帰式による予測値と計算値の誤差を地盤種、構造物毎に統合して、その誤差の大小により地震動指標、および地震計の設置位置を判断するものである。同手法により、緊急停止基準で用いる地震動指標は統合した誤差を最小とする指標として選定され、地震計の設置位置は統合した誤差が小さい順に選択される。

第 3 章では、本研究の緊急停止基準の評価でベースとなるリスク定量化手法に関する既往の要素技術について詳述すると共に、地震計で観測される地震動（指標）の大きさを変数とした **Fragility Curve** を新たに導出した。この **Fragility Curve** は、非線形の回帰式による各種構造物の応答の予測値と地盤応答解析から求められる計算値の誤差を反映したものである。地震時の各種構造物の損傷確率は、この **Fragility Curve** により求め、リスク定量化手法に基づく施設の緊急停止基準の評価の際に用いられる。

第 4 章では、提案手法の有用性を確認する対象として、東京湾岸地域の軟弱な埋立地盤に立地する施設を想定し、施設の概要と共に構内敷地の地盤モデル（層序、各層の物性値・動的変形特性）および緊急停止基準評価モデル（リスク定量化モデル）を構築した。同モデルは、出火は地震の襲来とほぼ同時に発生し、緊急停止システムにより出火そのものを抑えることはできないものの、可燃物の供給を遮断することで火災の拡大を防止することができることを前提に、「緊急停止あり」および「緊急停止なし」の 2 条件についてイベントツリーを用い構築した。

第 5 章では、増幅特性の違いで類型化した施設の各エリアの地盤について、修正 R-O モデルによる非線形応答解析により、各地震動指標（PGA, PGV, SI 値）および地表面応答スペクトル値  $Sa(T)$  を算出すると共に、エリア毎に地震動指標および任意の固有周期  $T$  の地



表面応答スペクトル値について回帰分析を行い、地震動指標と対象施設の各種構造物の応答の関係を非線形回帰式でモデル化した。そして、提案手法を用い、緊急停止基準で用いる適切な地震動指標、および最適な地震計の設置位置を検討した。知見として、①施設内の主要構造物の固有周期を概ね 1.0 秒以内程度と考えると、地震動指標として PGA は適切であるが、構造物の塑性化を考慮すると、SI 値も選択肢となること、②地震動指標と構造物応答の相関は、短周期領域では PGA、長周期領域では SI 値、PGV の方が高いこと、③SI 値は PGA や PGV と比べ、0.04～2 秒程度の周期帯の応答に対し安定して相関が高いこと、が示された。

第 6 章では、地震計で観測する地震動指標および地震計の設置位置の検討結果を反映し、施設の最適な緊急停止基準を評価した。また、地震時の施設構造物間の損傷相関を考慮し、停止基準への影響を考察した。知見として、①施設の各種構造物の応答の対数標準偏差は、観測地震動が PGA の場合 0.1～0.2 程度、PGV の場合 0.15～0.35 程度、SI 値の場合 0.1～0.3 程度の範囲にあり、②構造物間の損傷相関を独立とすると、最適な緊急停止基準は  $PGA = 200 \text{ cm/s}^2$ 、 $PGV = 44 \text{ cm/s}$ 、 $SI \text{ 値} = 39 \text{ cm/s}$  であること、③各種構造物間の損傷相関係数は、耐力について独立を仮定すると、PGA で 0.085～0.204、PGV で 0.143～0.412、SI 値で 0.09～0.310 程度と独立に近く、④この損傷相関を考慮した場合の緊急停止基準は、PGA が  $200 \text{ cm/s}^2$ 、PGV が  $47 \text{ cm/s}$ 、SI 値が  $40 \text{ cm/s}$  となり、地震時の構造物間の損傷相関考慮による緊急停止基準への影響は小さいこと、が示された。

5～6 章の結果は、様々な仮定や条件の下で得られたものであり、一般的な傾向を示すものではないが、提案手法は、緊急停止基準の設定と共に、広大な敷地のどの位置に地震計を設置すべきか、緊急停止基準で用いる適切な地震動指標は何かという問題に有効な判断材料を提供する。石油精製施設以外にも、火災危険が高く一旦停止すると再稼働まで時間を要する塗装工場や初期投資が大きく停止期間中の損害の大きい半導体工場等に適用でき、汎用性は高いと考える。

また、停止基準値だけでなく、構造物の耐震性能や消火システム構成等をデータベースとして保有することで、発災直後以降についても地震動に加え、被害情報等のモニタリング情報からリスクを精度よく再予測し、避難誘導、危険物保有施設の遮断、事業再開や完全復旧の目的の情報共有等に活用でき、事業者の事後行動の適正化への貢献が期待できる。

今後の主な課題については、以下に示す。

- i. 緊急停止基準の評価では、液状化による装置損傷、配管破断等による火災等を考慮していない。多くの石油精製施設は液状化危険度の高い地域に立地しており課題と考える。
- ii. 応答の対数標準偏差  $\zeta_r$  の中に地盤物性等の不確実性が含まれていない。また、耐力の対数標準偏差  $\zeta_c$  についても、本研究では各構造物について一律 0.4 としている。よって、構造物の応答および耐力の不確実性（対数標準偏差）に関する感度解析を行い、緊急停止基準への影響を検討する必要がある。