

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-097 改3
提出年月日	平成30年6月27日

V-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	2
2.1 位置.....	2
2.2 構造概要.....	3
2.3 評価方針.....	17
2.4 適用規格・基準等	19
3. 地震応答解析による評価方法	20
4. 応力解析による評価方法	22
4.1 評価対象部位及び評価方針	22
4.2 荷重及び荷重の組合せ	26
4.3 許容限界.....	101
4.4 解析モデル及び諸元	105
4.5 評価方法.....	108
5. 評価結果.....	118
5.1 地震応答解析による評価結果	118
5.2 応力解析による評価結果	119

1. 概要

本資料は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、原子炉建屋のうち二次格納施設となる原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）の地震時の構造強度及び機能維持の確認について説明するものであり、その評価は、地震応答解析による評価及び応力解析による評価により行う。

原子炉棟は、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設重大事故緩和設備」に分類される。また、原子炉棟を構成する壁及びスラブの一部は、原子炉建屋の二次遮蔽に該当し、その二次遮蔽は、重大事故対処施設において、「常設重大事故緩和設備」に分類される。

以下、それぞれの分類に応じた耐震評価を示す。

2. 基本方針

2.1 位置

原子炉棟は原子炉建屋の一部を構成している。原子炉棟を含む原子炉建屋の設置位置を図 2-1 に示す。

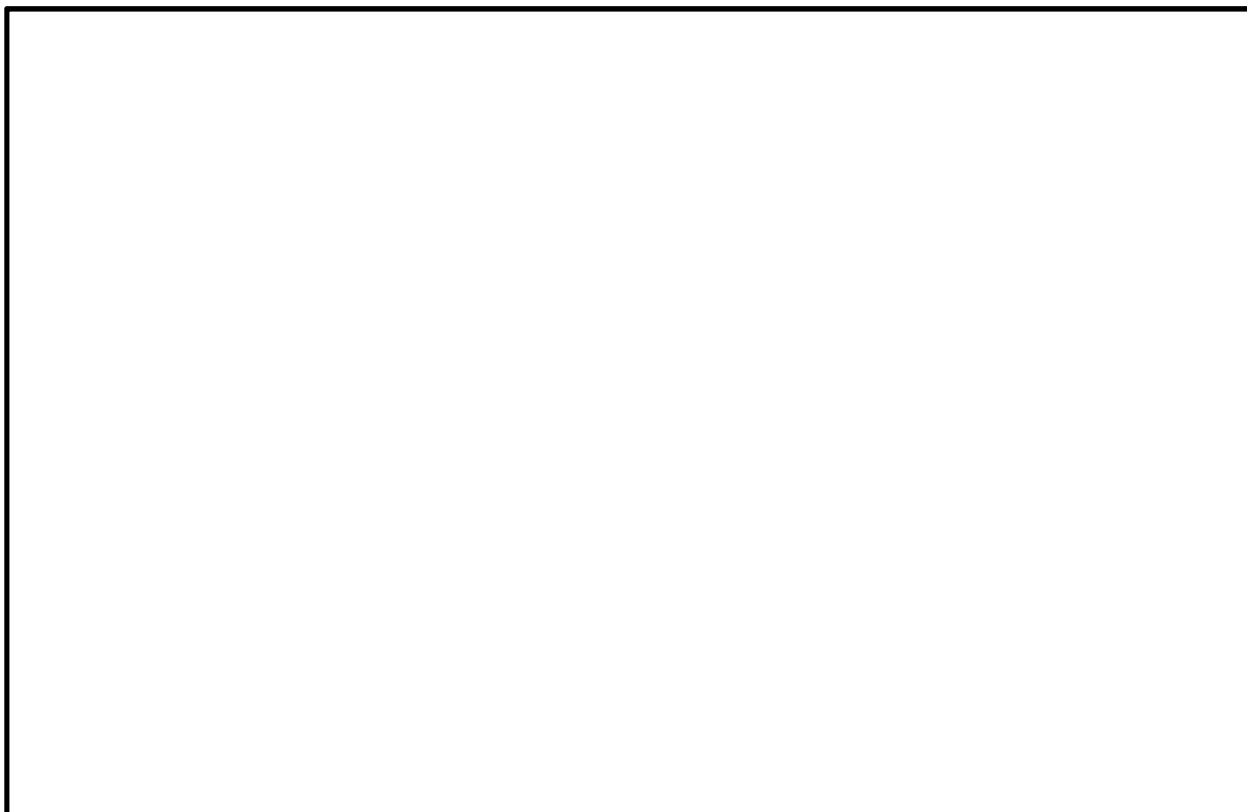


図 2-1 原子炉棟を含む原子炉建屋の設置位置

2.2 構造概要

原子炉建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、鉄骨造陸屋根をもつ地下2階、地上6階の建物である。中央部には、平面が南北方向45.5 m、東西方向42.5 mの原子炉棟があり、その周囲には、平面が南北方向68.5 m、東西方向68.25 m原子炉建屋付属棟（以下「付属棟」という。）を配置している。

原子炉棟は、基礎スラブから屋根面まで連続した、壁厚1.5 m～0.3 mの耐震壁（以下「内部ボックス壁（I/W）」という。）、厚さ約10 cmの鉄筋コンクリート造のスラブ（以下「屋根スラブ」という。）及び鉄骨架構（以下「屋根トラス」という。）で構成される。

内部ボックス壁（I/W）は二次遮蔽となっている。

原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図を図2-2に、概略断面図を図2-3に、原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲を図2-4に、屋根伏図を図2-5に示す。



図 2-2 (1/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図



図 2-2 (2/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

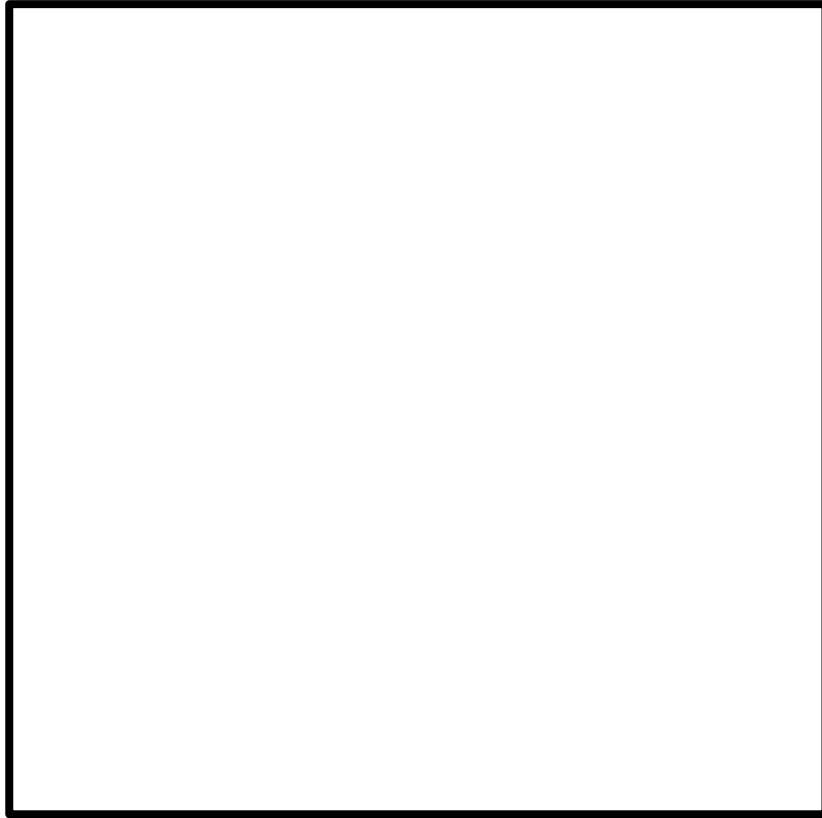


図 2-2 (3/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

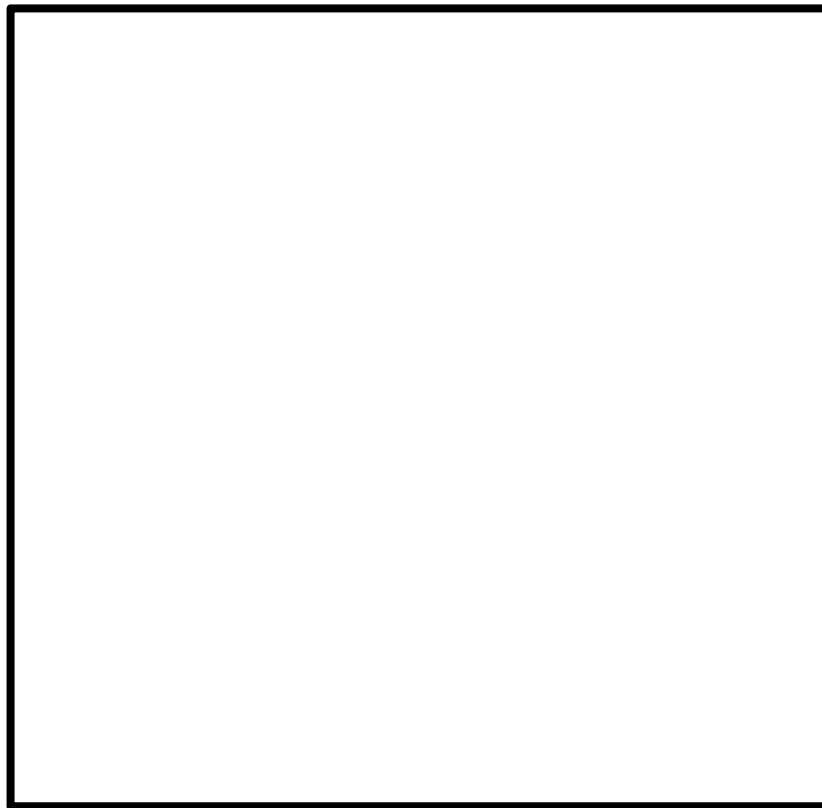


図 2-2 (4/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図



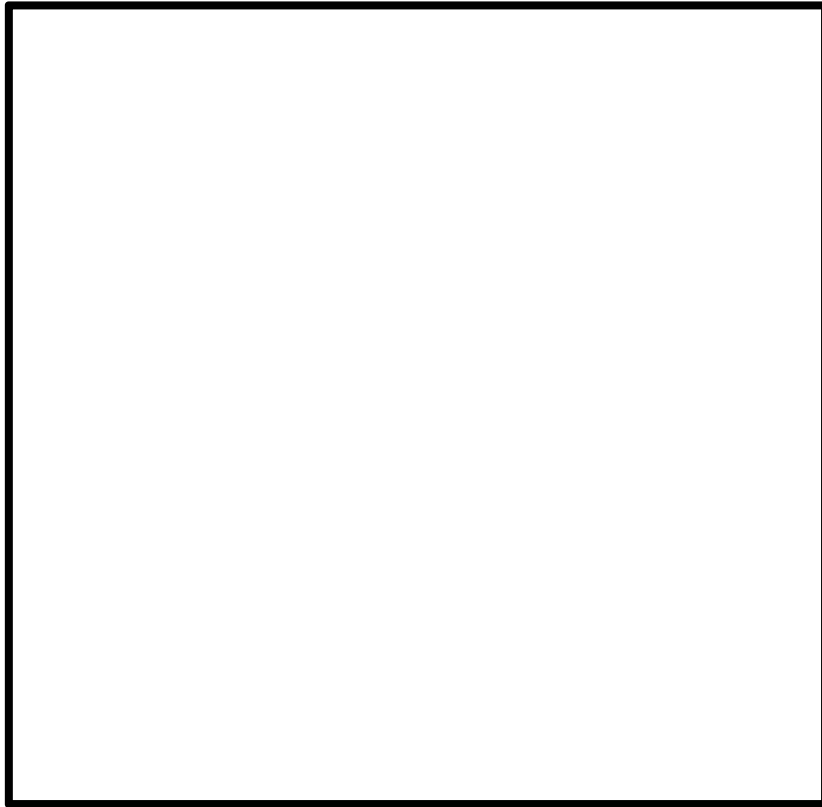


図 2-2 (5/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

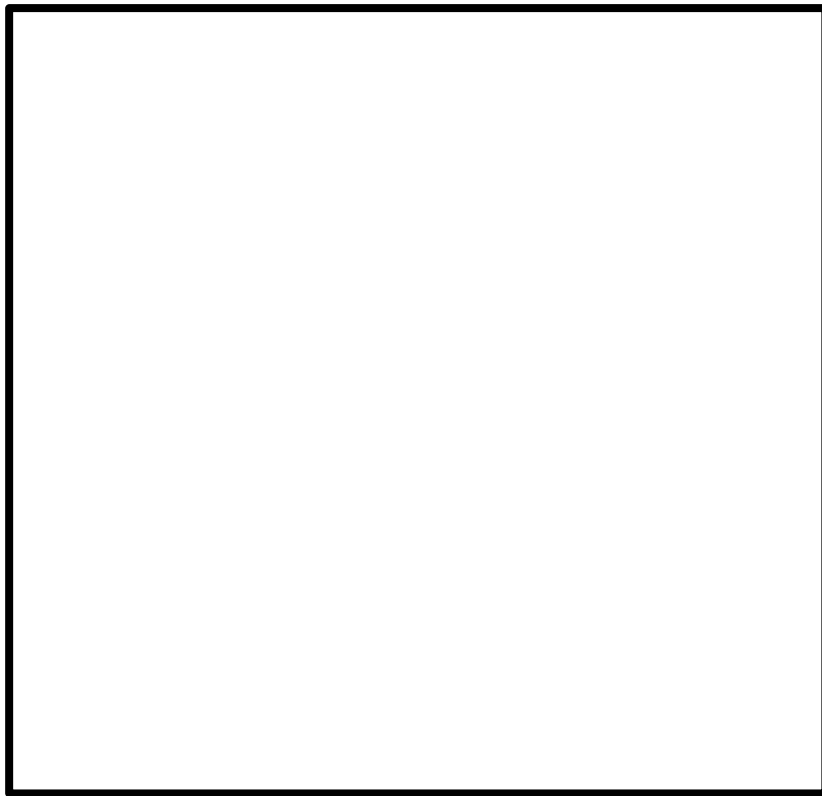


図 2-2 (6/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

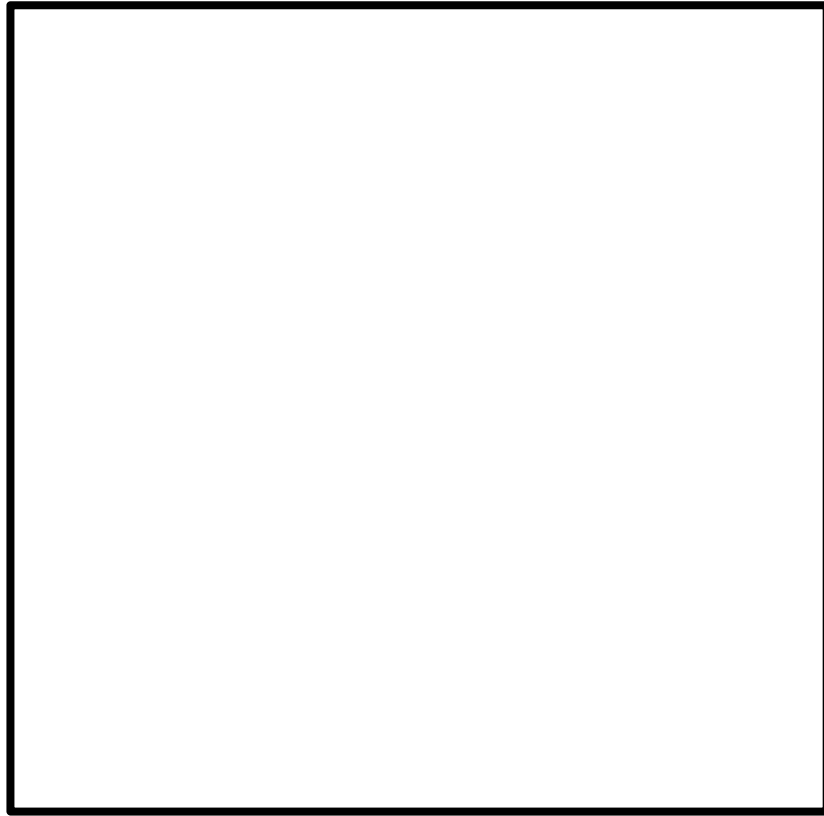


図 2-2 (7/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

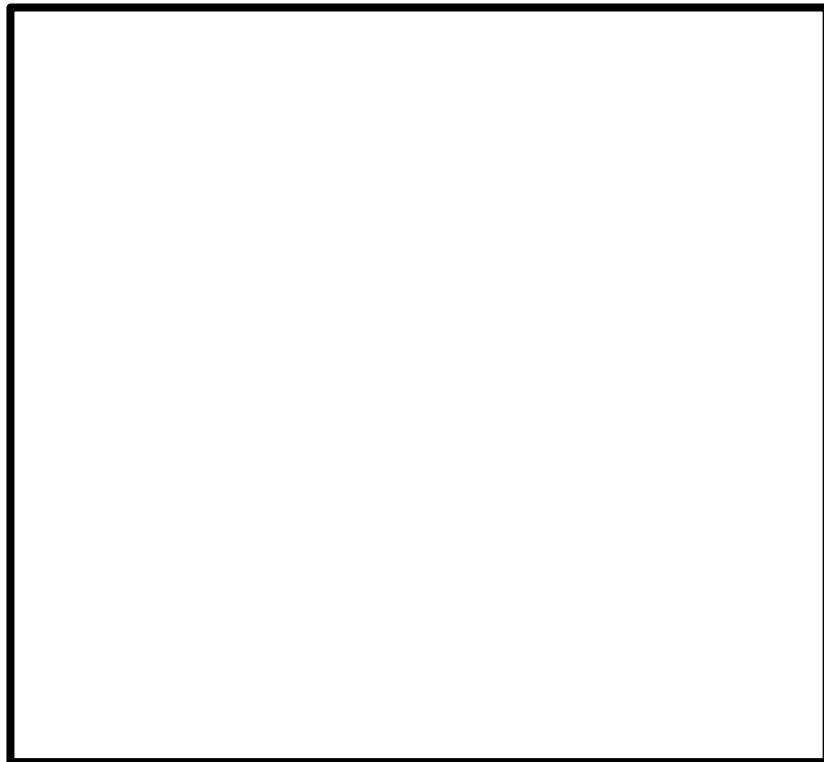


図 2-2 (8/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

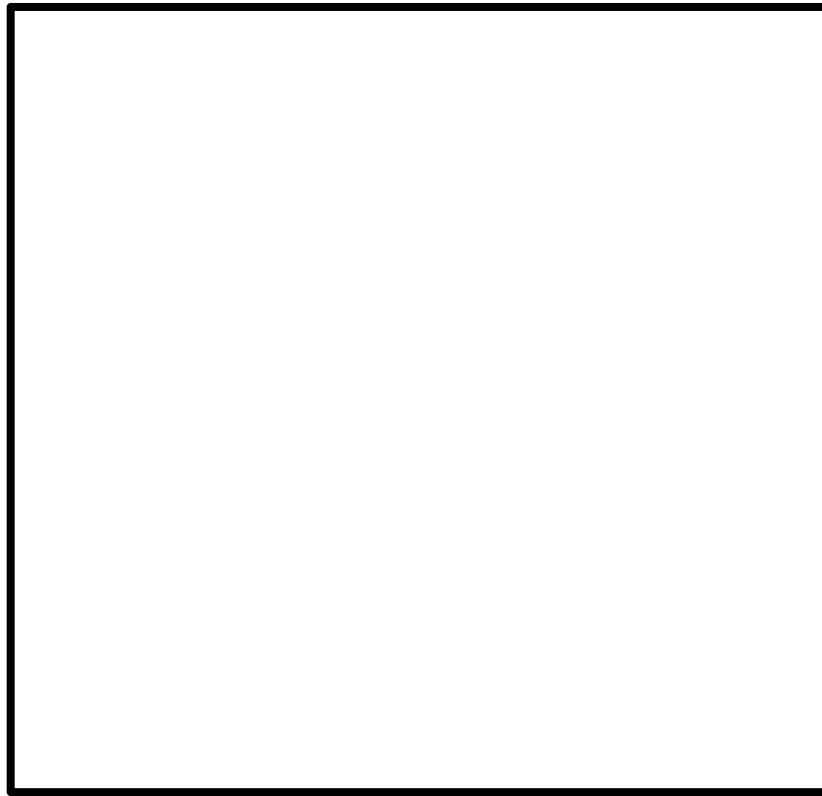


図 2-2 (9/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

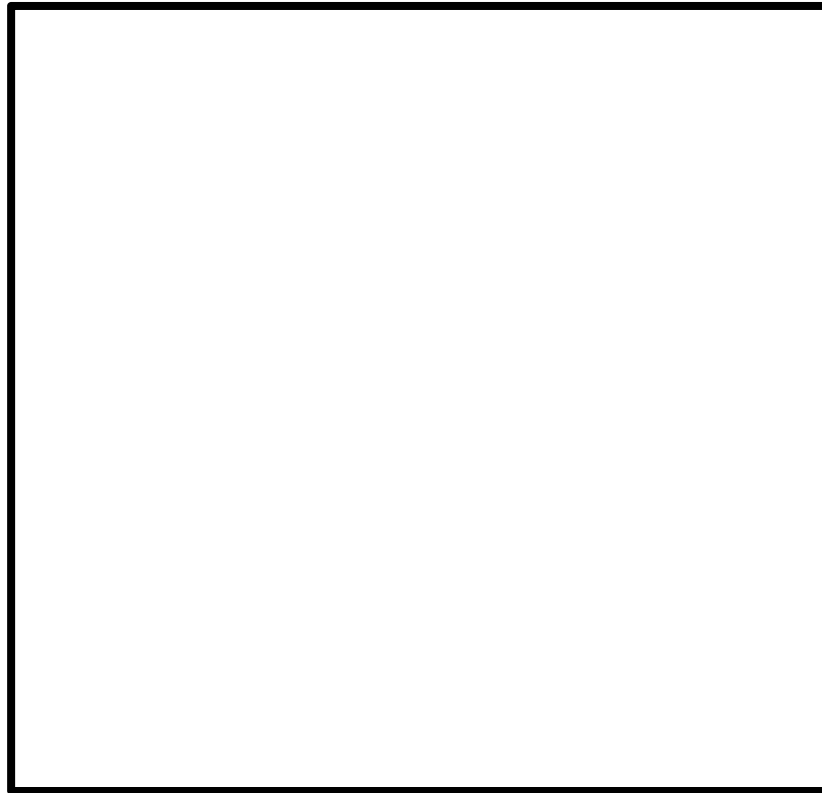


図 2-2 (10/10) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略平面図

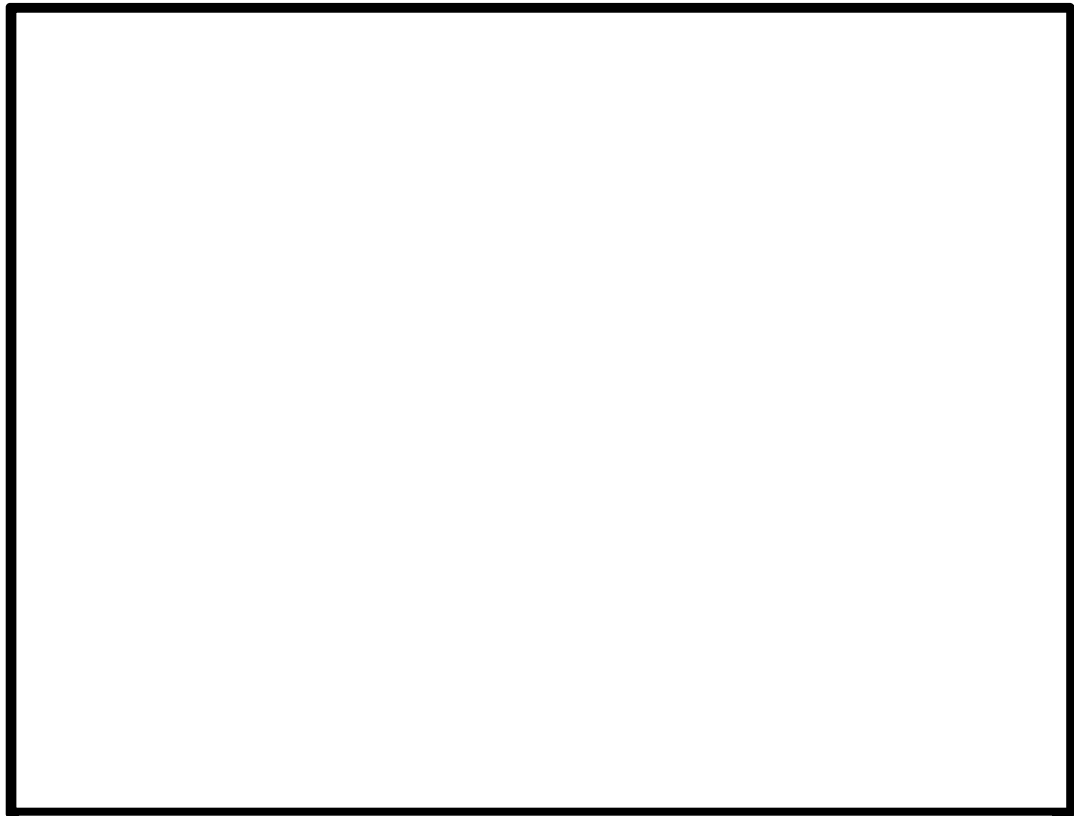


図 2-3 (1/2) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面)

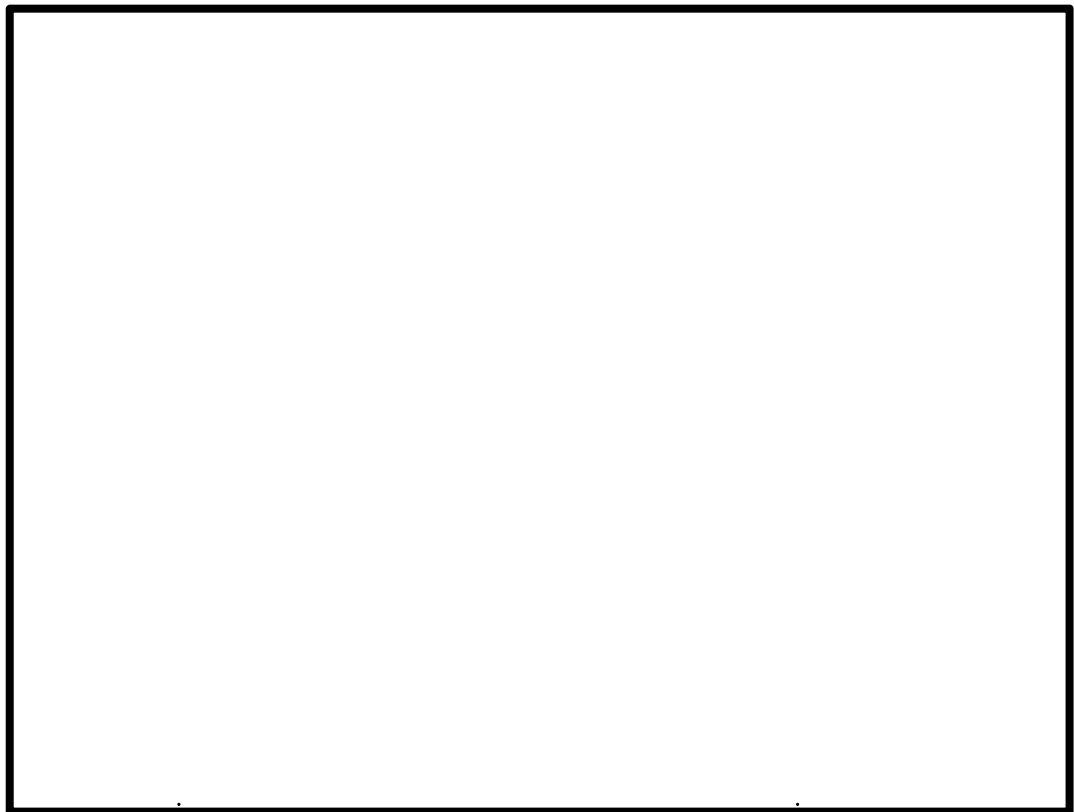


図 2-3 (2/2) 原子炉棟を含む原子炉建屋の概略断面図 (B-B 断面)

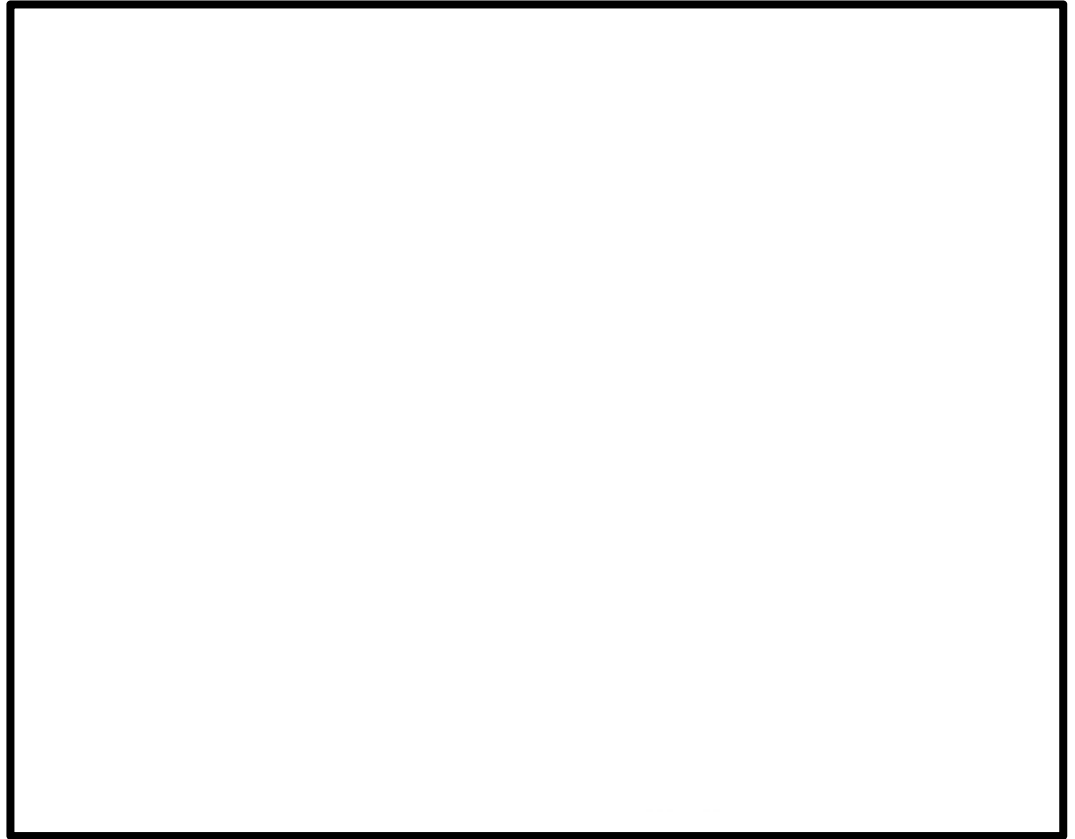



図 2-4 (1/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )

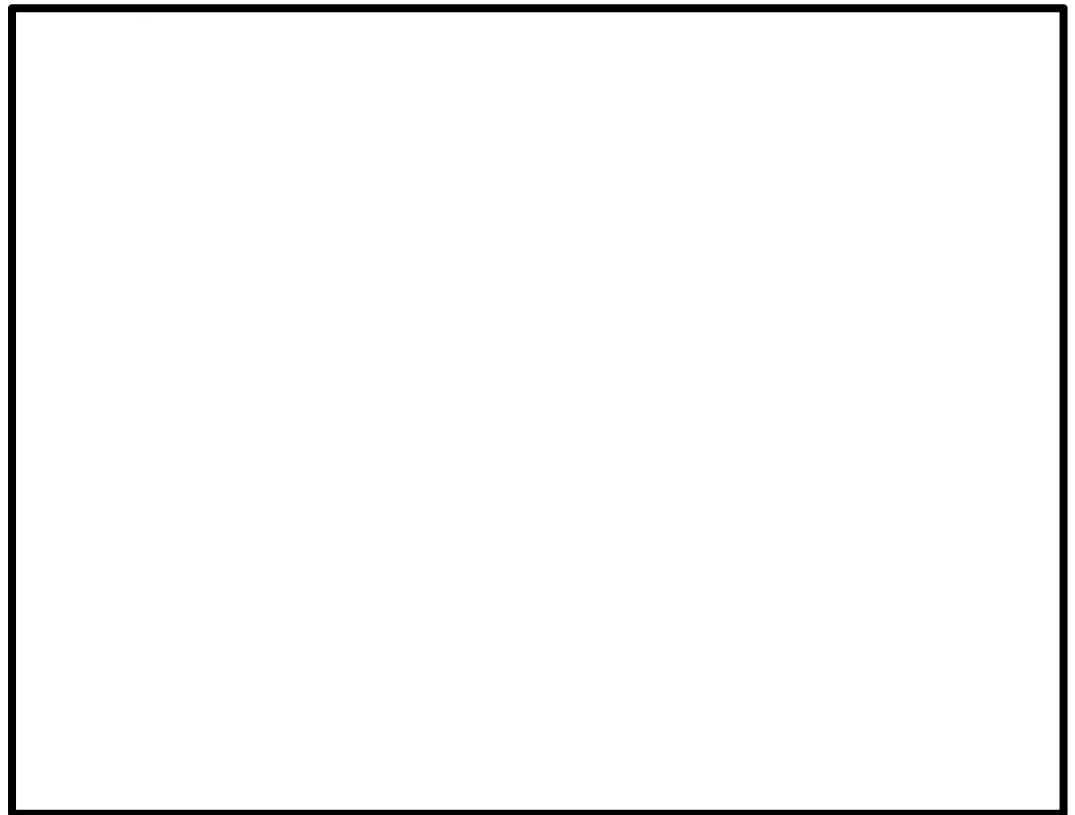



図 2-4 (2/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )

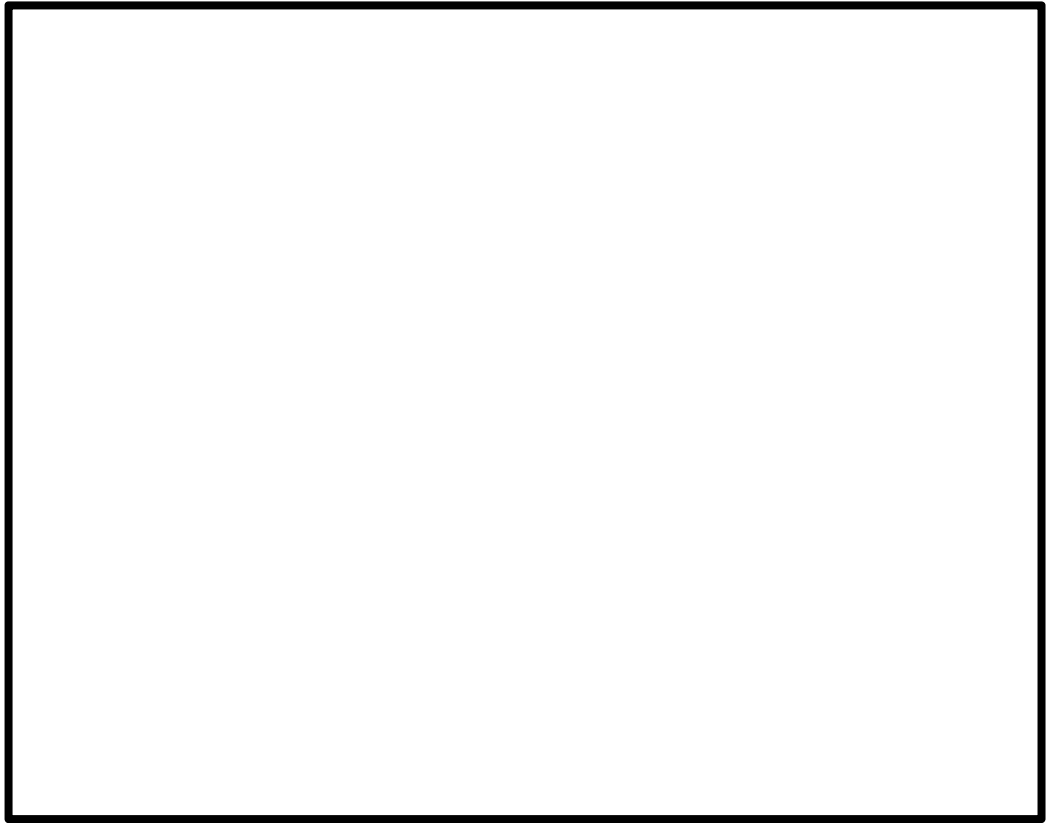



図 2-4 (3/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )

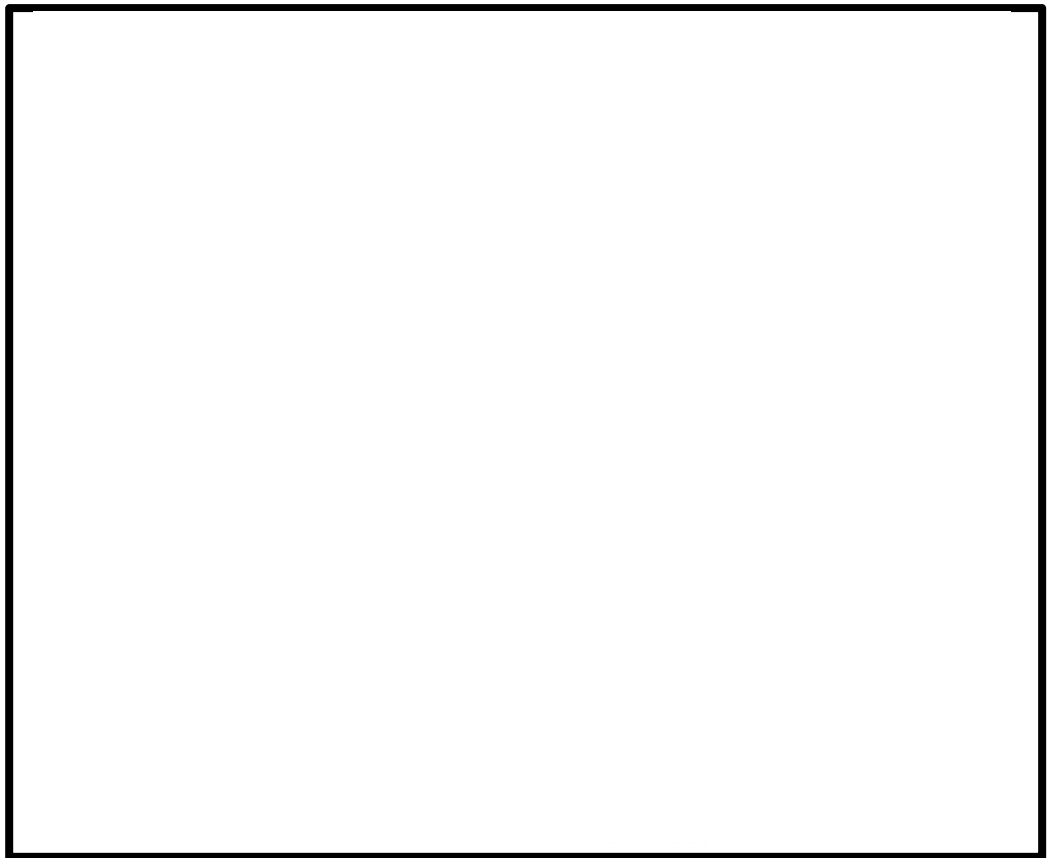



図 2-4 (4/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )

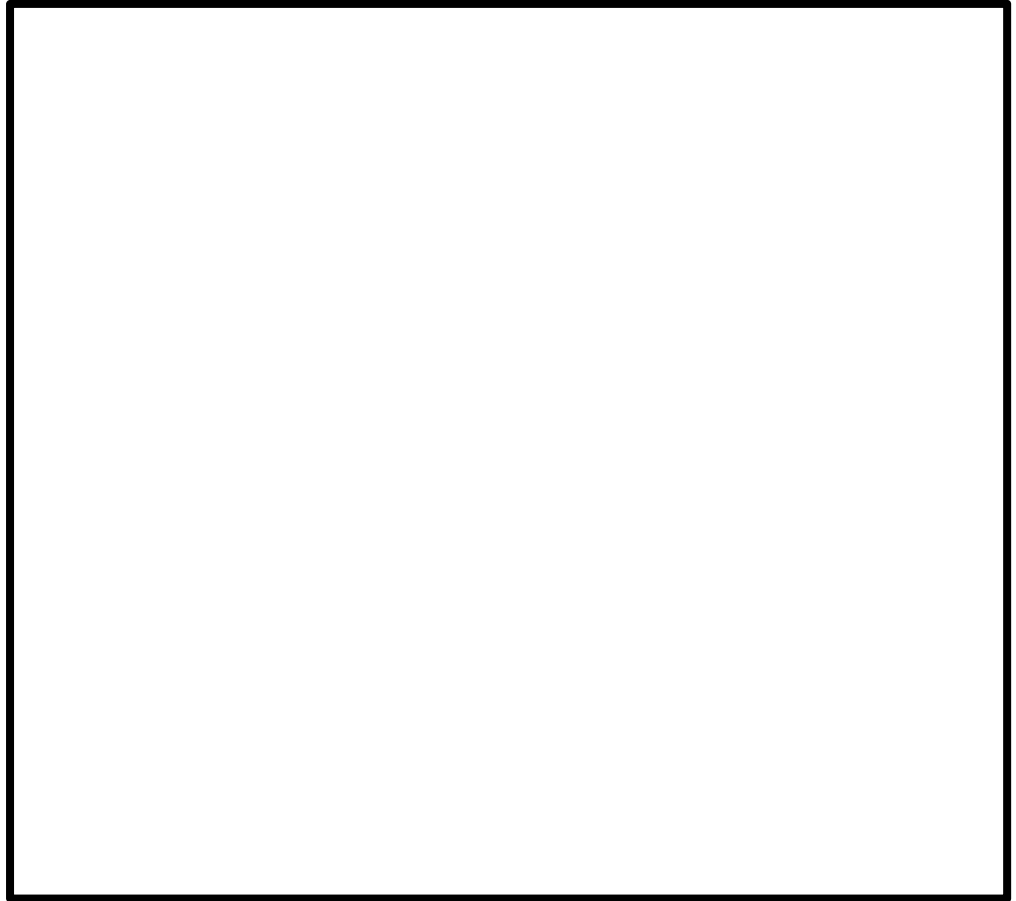




図 2-4 (5/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )



図 2-4 (6/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )

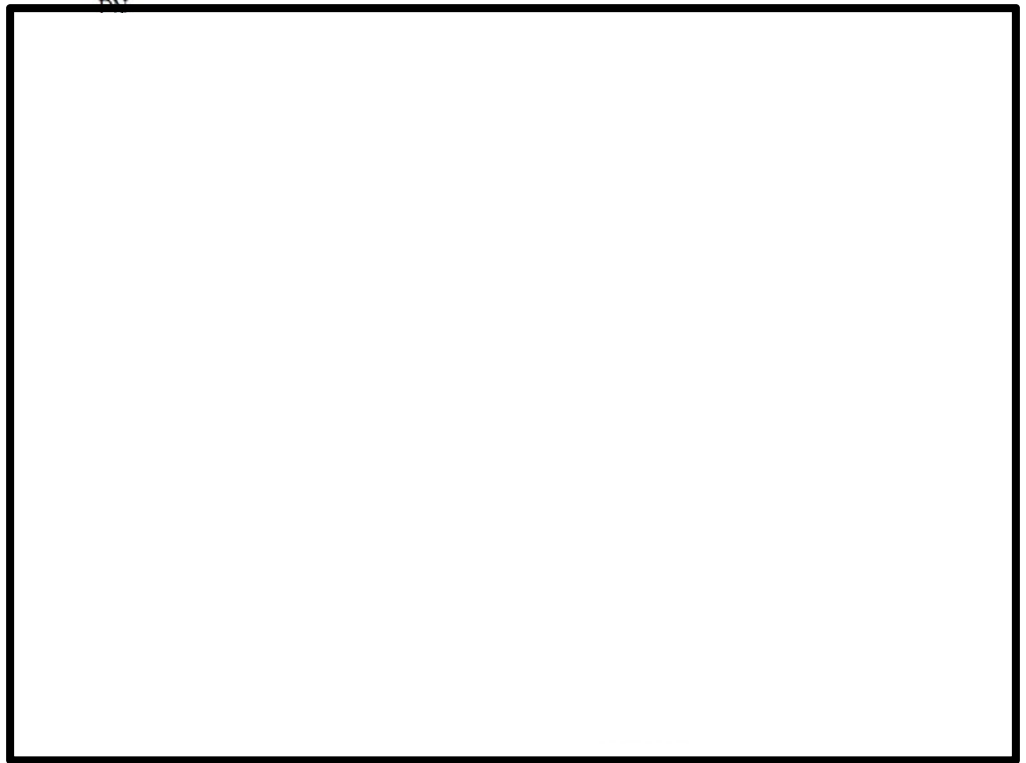




図 2-4 (7/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )



図 2-4 (8/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図 )

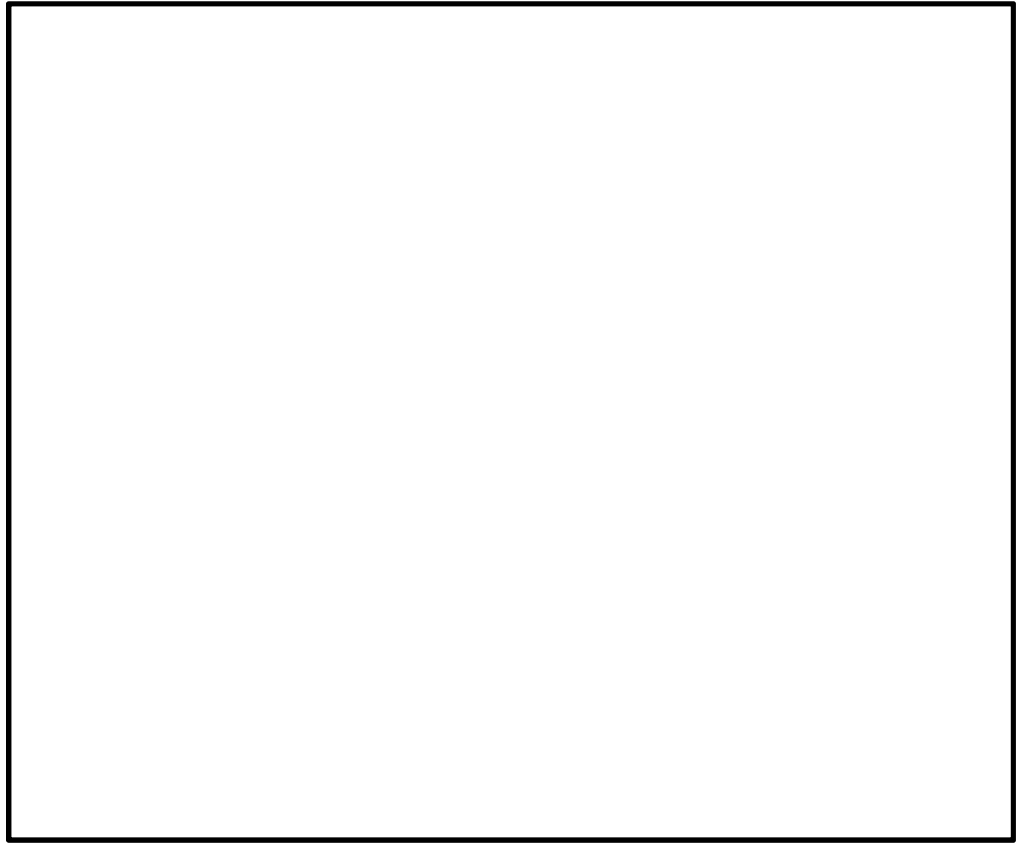


図 2-4 (9/12) 原子炉棟を含む原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図)

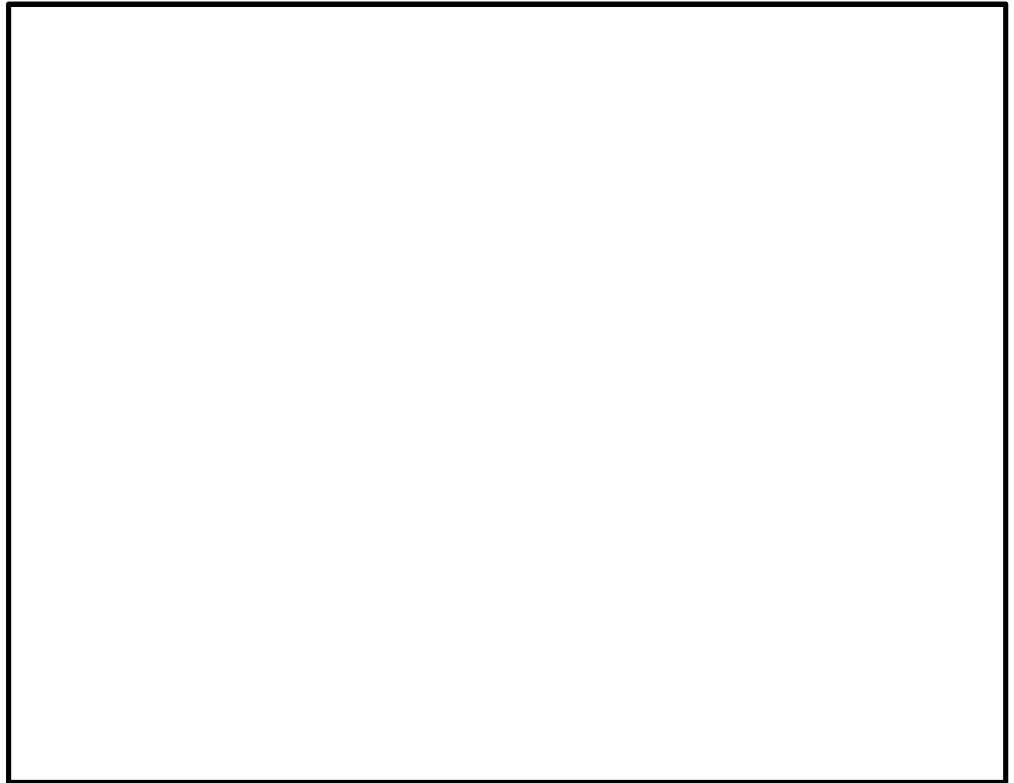


図 2-4 (10/12) 原子炉建屋の遮蔽範囲 (平面図)

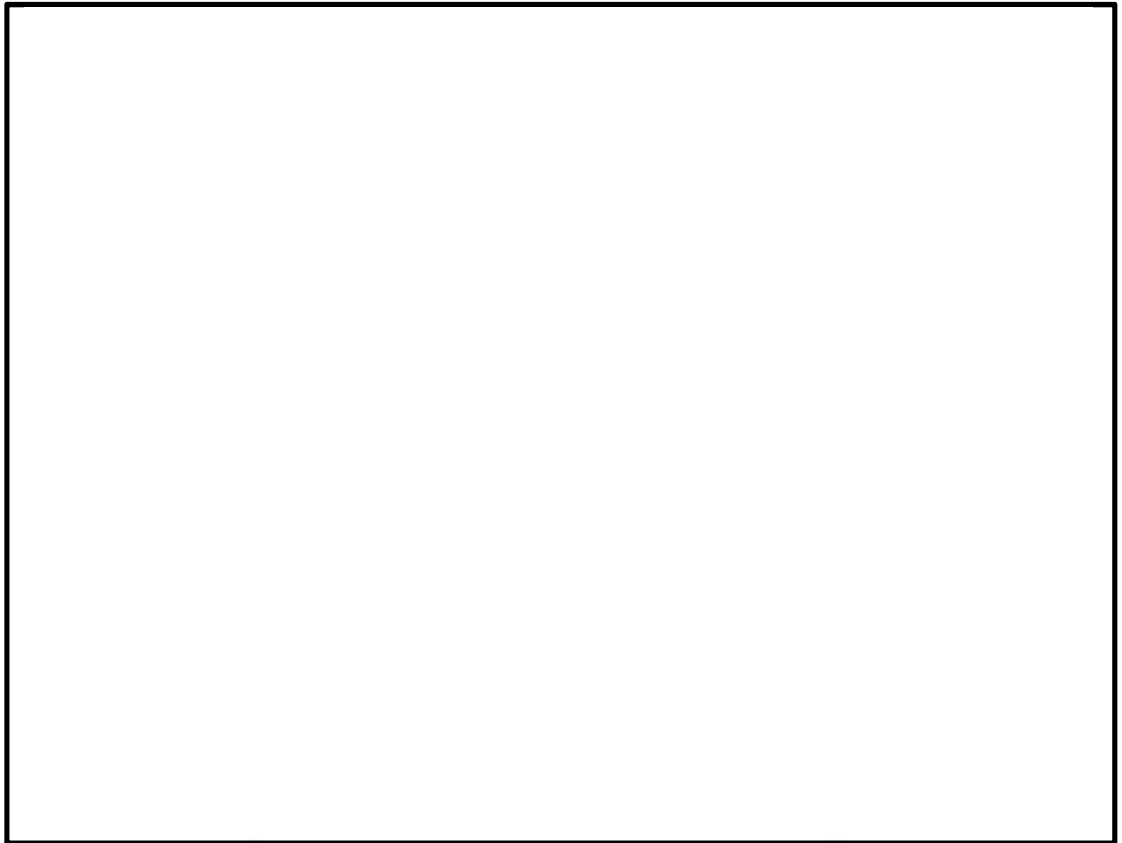


図 2-4 (11/12) 原子炉建屋の遮蔽範囲 (EW 方向 A-A 断面)

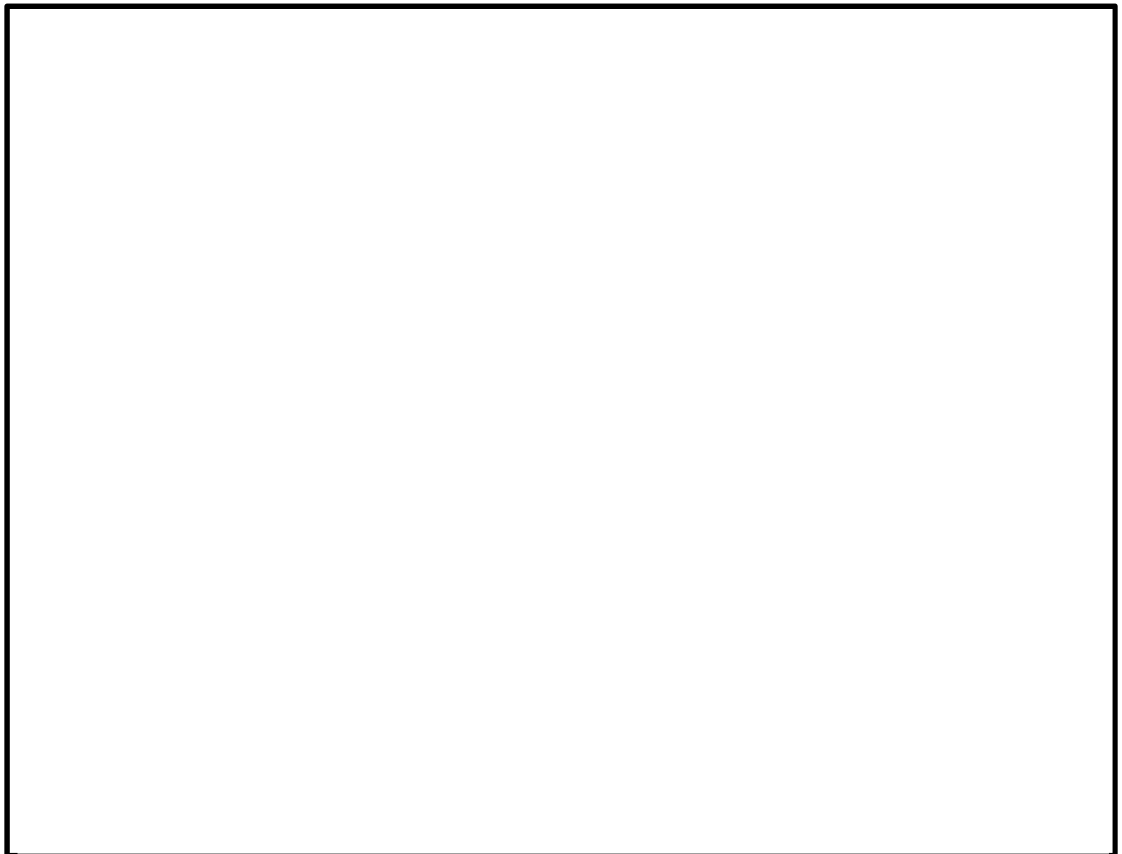


図 2-4 (12/12) 原子炉建屋の遮蔽範囲 (NS 方向 B-B 断面)

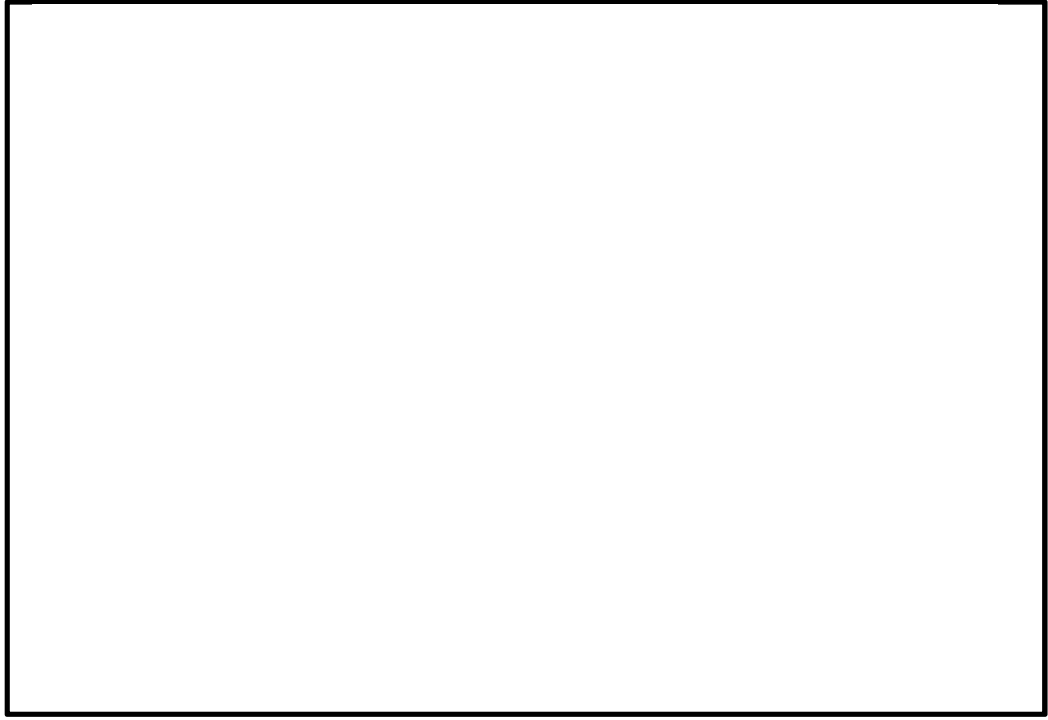


図 2-5 原子炉棟を含む原子炉建屋の屋根伏図



2.3 評価方針

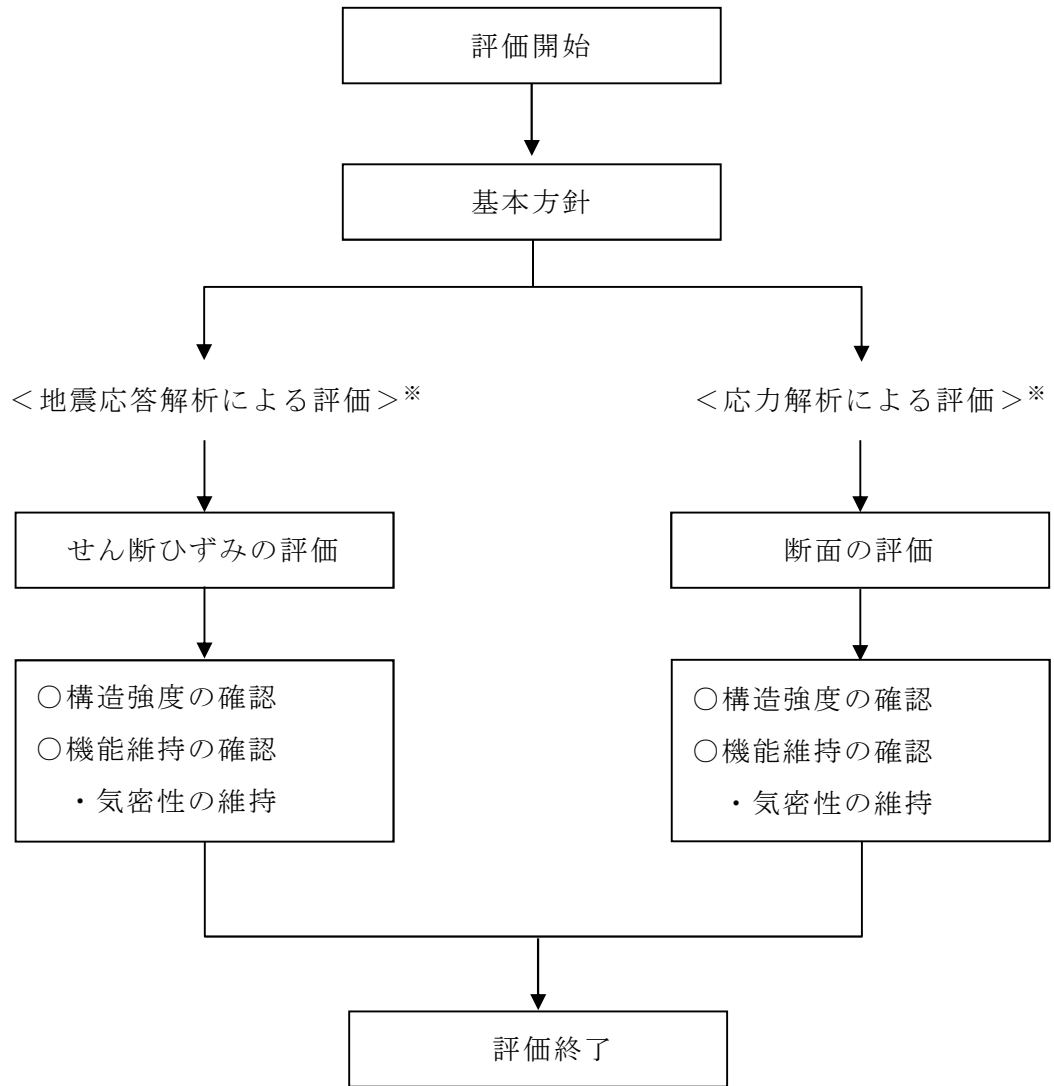
原子炉棟は、設計基準対象施設においては「Sクラスの施設」に、重大事故等対処施設においては「常設重大事故緩和設備」に分類される。また、原子炉棟を構成する壁及びスラブの一部は、原子炉建屋の二次遮蔽に該当し、その二次遮蔽は、重大事故等対処施設において、「常設重大事故緩和設備」に分類される。

原子炉棟の設計基準対象施設としての地震時の評価は、弾性設計用地震動 S_d による地震力または静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対する評価（以下「 S_d 地震時に対する評価」という。）、基準地震動 S_s による地震力に対する評価（以下「 S_s 地震時に対する評価」という。）及び保有水平耐力の評価を行うこととし、それぞれの評価は、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえたものとする。ただし、耐震壁については、常時荷重が設計時と同一であること、また、応答に対して支配的となる水平方向の弾性設計用地震動 S_d による地震力及び静的地震力がいずれも『既工事計画認可申請書第1回 資料Ⅲ-1-4「原子炉建屋の地震応答計算書」（47公第12076号 昭和48年4月9日認可）』の設計用地震力よりも小さいことから、 S_d 地震時に対する評価は行わない。

原子炉棟の評価は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき、地震応答解析による評価においてはせん断ひずみの評価を、応力解析による評価においては断面の評価を行うことで、原子炉棟の地震時の構造強度及び機能維持の確認を行う。評価に当たっては、地盤物性のばらつきを考慮する。なお、保有水平耐力の評価については、原子炉棟が原子炉建屋の一部であることを踏まえ、原子炉棟を含む原子炉建屋全体としての評価結果を資料V-2-2-2「原子炉建屋の耐震性についての計算書」に示すこととする。

また、重大事故等対処施設として評価においては、 S_s 地震時に対する評価及び保有水平耐力に対する評価を行う。ここで、原子炉棟では、運転時、設計基準事故時及び重大事故等時の状態において、圧力、温度等の条件について有意な差異がないことから、重大事故等対処施設としての評価は、設計基準対象施設と同一となる。

原子炉棟の評価フローを図2-2に示す。



※：資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」の結果を踏まえた評価を行う。

図 2-2 原子炉棟の評価フロー

2.4 適用規格・基準等

原子炉棟の評価において、適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1 ・ 補 - 1984 ((社) 日本電気協会)
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版 ((社) 日本電気協会)
- ・ 建築基準法・同施行令
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - ((社) 日本建築学会, 1999)
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ((社) 日本建築学会, 2005) (以下「RC-N規準」という。)
- ・ 鋼構造設計規準 - 許容応力度設計法 - ((社) 日本建築学会, 2005) (以下「S規準」という。)
- ・ 2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所) (以下「技術基準解説書」という。)

3. 地震応答解析による評価方法

地震応答解析による評価において、原子炉棟の構造強度については、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」に基づき、地盤物性のばらつきを考慮した最大せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。

また、気密性の維持については、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」による結果に基づき、地盤物性のばらつきを考慮した最大せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認する。

地震応答解析による評価における原子炉棟の許容限界は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の構造強度上の制限及び機能維持の方針に基づき、表3-1及び表3-2のとおり設定する。

表3-1 地震応答解析による評価における許容限界
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部 位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S_s	耐震壁 ^{※1}	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3}
気密性	換気性能とあいまって気密機能を維持すること	基準地震動 S_s	耐震壁 ^{※1}	最大せん断ひずみが気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} ^{※2}

※1：建屋全体としては、地震力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、梁、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従することと、全体に剛性の高い構造となっており、複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの面内変形が抑えられるため、各層の耐震壁が最大せん断ひずみの許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。

※2：事故時に原子炉格納容器から漏洩した空気を非常用ガス処理系で処理できるように気密性を有する設計とし、地震時においてもその機能を維持できる設計とする。

表 3-2 地震応答解析による評価における許容限界
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部 位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	基準地震動 S_s	耐震壁※1	最大せん断ひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3}
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽性を損なわないこと	基準地震動 S_s	耐震壁※1	最大せん断ひずみが遮蔽性を確保するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3}
気密性	換気性能とあいまって気密機能を維持すること	基準地震動 S_s	耐震壁※1	最大せん断ひずみが気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} ※2

※1：建屋全体としては、地震力を主に耐震壁で負担する構造となっており、柱、梁、間仕切壁等が耐震壁の変形に追従することと、全体に剛性の高い構造となっており、複数の耐震壁間の相対変形が小さく床スラブの面内変形が抑えられるため、各層の耐震壁が最大せん断ひずみの許容限界を満足していれば、建物・構築物に要求される機能は維持される。

※2：事故時に原子炉格納容器から漏洩した空気を非常用ガス処理系で処理できるように気密性を有する設計とし、地震時においてもその機能を維持できる設計とする。

4. 応力解析による評価方法

4.1 評価対象部位及び評価方針

原子炉棟の応力解析による評価対象部位は、屋根スラブ及び屋根トラスとする。屋根トラスについては、屋根スラブを支持するつなぎばりの上弦材、母屋及び主トラスを評価対象部位とする。屋根スラブについては、つなぎばりの上弦材もしくは母屋で支持されたスパンでモデル化した梁により評価を行う。屋根トラスのうち、つなぎばりの上弦材及び母屋については、主トラスで支持されたスパンでモデル化した梁により評価を行い、主トラスについては燃料取替床 (EL. 46.50 m) より上部を取り出した、3次元FEMモデルを用いた弾塑性応力解析により評価を行う。3次元FEMモデルを用いた弾塑性応力解析に当たっては、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」より得られた結果を用いて、荷重の組合せを行う。応力解析による評価フローを図4-1に示す。なお、つなぎばりの上弦材及び母屋の評価については、母屋の断面がつなぎばりの上弦材よりも小さいことから、支配面積の大きい母屋の部材を選定して示す。選定した部材の位置を図4-2及び図4-3に示す。

4.1.1 S_d地震時に対する評価

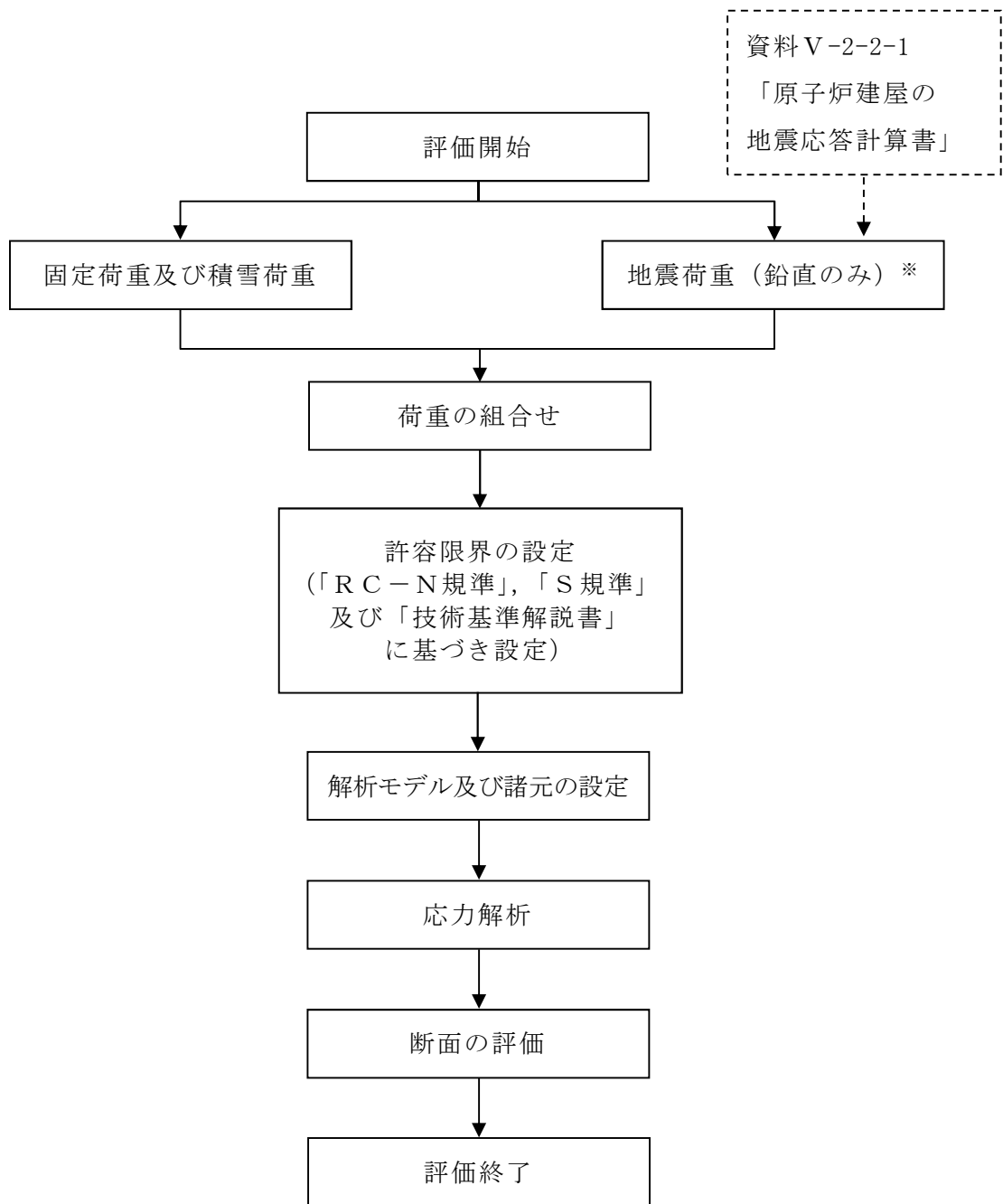
S_d地震時に対する評価は、屋根スラブ及び屋根トラスについて、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が、「RC-N規準」及び「S規準」に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

また、断面の評価については、地盤物性のばらつきを考慮した断面力に対して行うこととする。

4.1.2 S_s地震時に対する評価

S_s地震時に対する評価は、屋根スラブ及び屋根トラスについて、地震力と地震力以外の荷重の組合せの結果、発生する応力が、「RC-N規準」、「S規準」及び「技術基準解説書」に基づき設定した許容限界を超えないことを確認する。

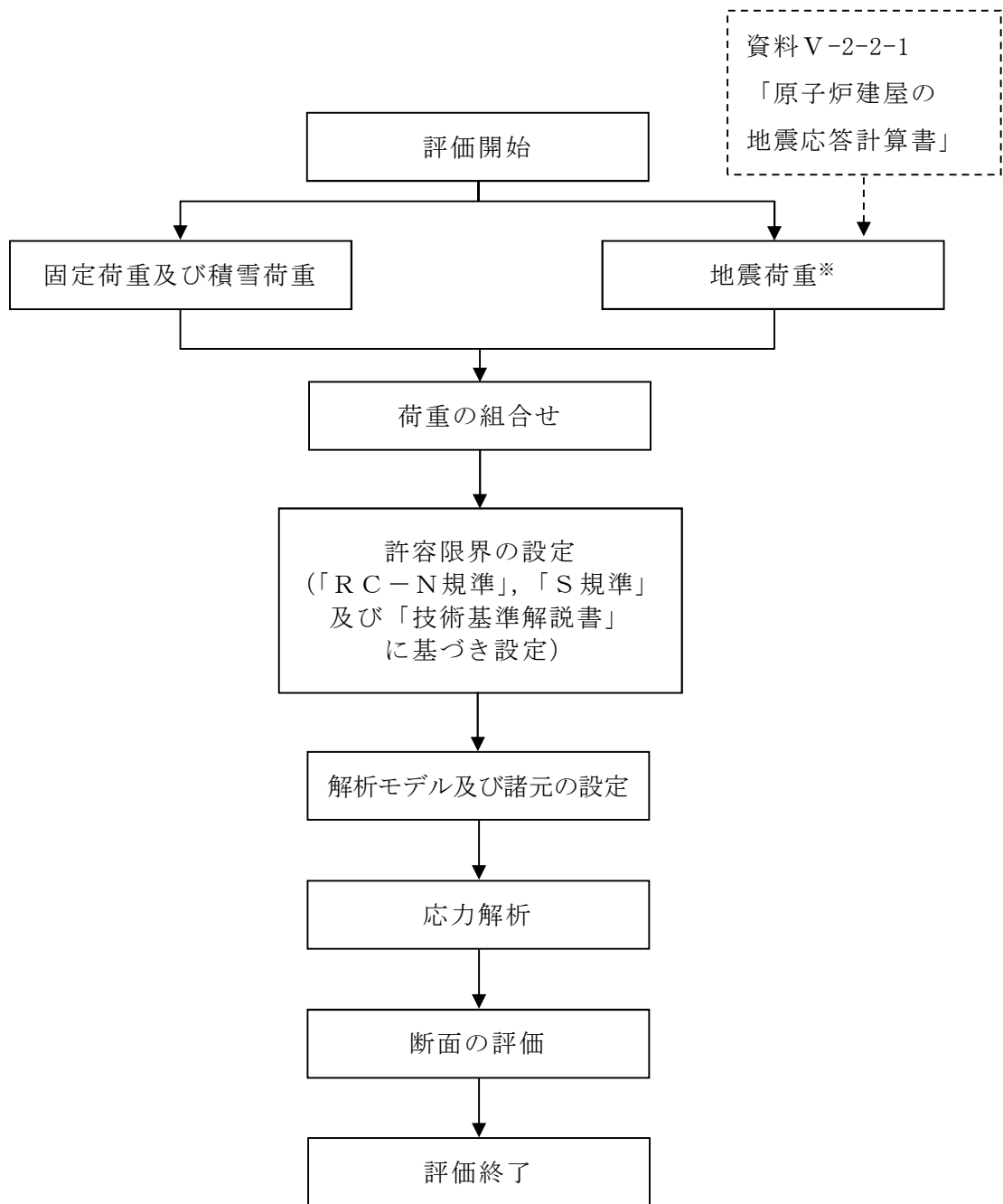
また、断面の評価については、地盤物性のばらつきを考慮した断面力に対して行うこととする。



※：地盤物性のばらつきを考慮する。

(a) 屋根スラブ

図 4-1 (1/2) 応力解析による評価フロー



※：地盤物性のばらつきを考慮する。

(b) 屋根トラス

図 4-1 (2/2) 応力解析による評価フロー



図 4-2 屋根スラブの評価を記載する部材の位置

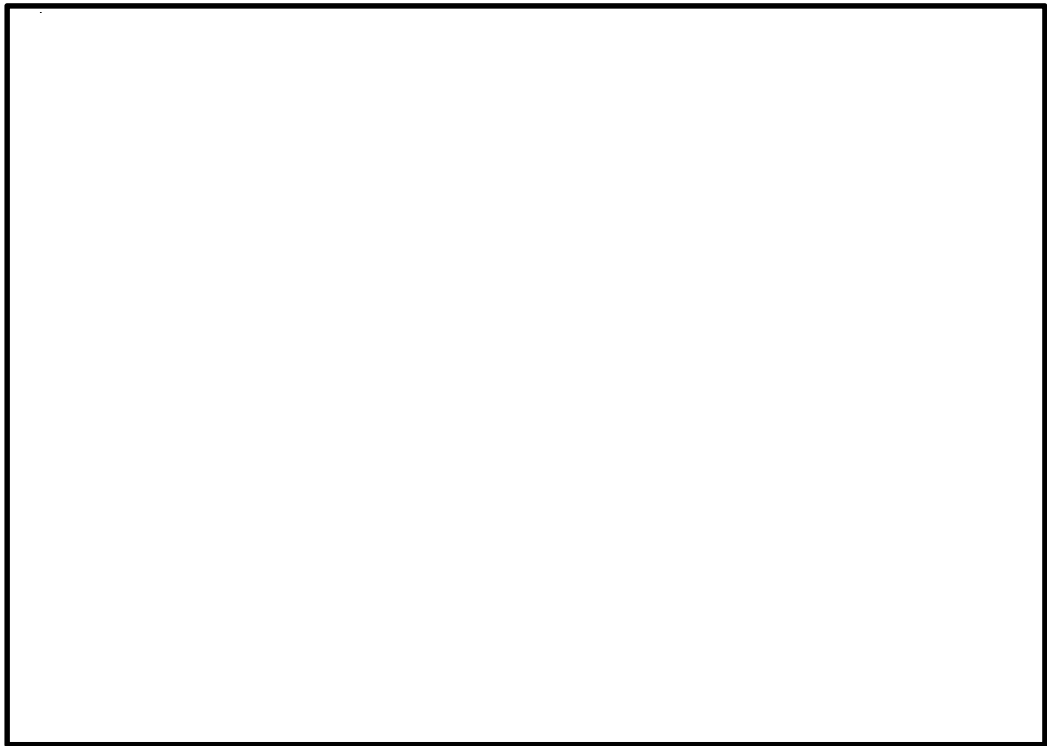


図 4-3 つなぎばりの上弦材及び母屋の評価を記載する部材の位置

4.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している荷重及び荷重組合せを用いる。

4.2.1 屋根スラブ及び母屋

(1) 荷重

a. 固定荷重 (G)

屋根スラブ及び母屋に作用する固定荷重を表4-1、屋根スラブの断面図を図4-4に示す。

表4-1 (1/2) 固定荷重 (屋根スラブ)

部 位	仕 上 げ	固 定 荷 重
屋根スラブ	防水シート	3 kgf/m ²
	アスファルト防水層	37 kgf/m ²
	コンクリート (t=100 mm)	240 kgf/m ²
	デッキプレート部コンクリート	45 kgf/m ²
	デッキプレート	18 kgf/m ²
	合 計	343 kgf/m ² →3400 N/m ²

表4-1 (2/2) 固定荷重 (母屋)

部 位	自 重
母屋 (H-390×300×10×16)	1050 N/m

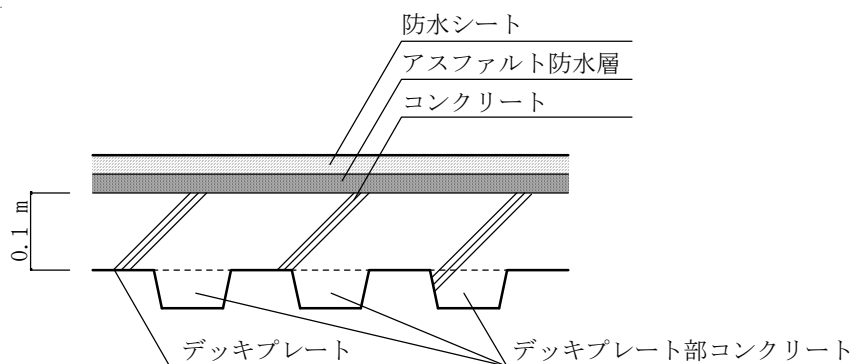


図4-4 屋根スラブの断面図

b. 積雪荷重 (SNL)

積雪荷重は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の地震力と積雪荷重の組合せに基づき、表4-2のとおり設定する。

表4-2 積雪荷重 (SNL)

外力の状態	積雪荷重
地震時	210 N/m ²

c. 地震荷重 (S_d, S_s)

鉛直地震力は、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力に地盤物性のばらつきを考慮して設定する。

屋根スラブが、EW 方向 2.57 m, NS 方向 7.7 m スパンで支持され、厚さ約 10 cm の鉄筋コンクリート造スラブであることから剛とみなす。

地震荷重は、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s に対する質点系モデルの屋根トラス部 (EL. 63.65 m, 質点番号 22~質点番号 25) の鉛直方向最大応答加速度より鉛直震度を算定する。

(2) 荷重の組合せ

荷重の組合せを表4-3に示す。屋根スラブについては S_d地震時及び S_s地震時、母屋については S_s地震時の荷重の組合せを用いる。

表4-3 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S _d 地震時	G + SNL + S _d
S _s 地震時	G + SNL + S _s

- G : 固定荷重
- SNL : 積雪荷重 (地震時)
- S_d : S_d地震荷重
- S_s : S_s地震荷重

4.2.2 屋根トラス

(1) 荷重

a. 固定荷重 (G)

屋根トラスの応力解析において考慮する固定荷重は、資料V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」に示す地震応答解析モデルの重量に基づき設定する。固定荷重を表4-4に示す。

表4-4 固定荷重 (屋根トラス)

部 位	部 材	固定荷重
屋根面 (EL. 64.08 m)	屋根スラブ トラス鋼材	343 kgf/m ² 204 kgf/m ²
	合 計	547 kgf/m ² →5370 N/m ²
EL. 64.08 m	外周梁	33790 N/m
EL. 57.00 m	外周梁	78700 N/m
	天井クレーン	2750 kN

b. 積雪荷重 (SNL)

積雪荷重は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の地震力と積雪荷重の組合せに基づき、表4-5のとおり設定する。

表4-5 積雪荷重 (SNL)

外力の状態	積雪荷重
地震時	210 N/m ²

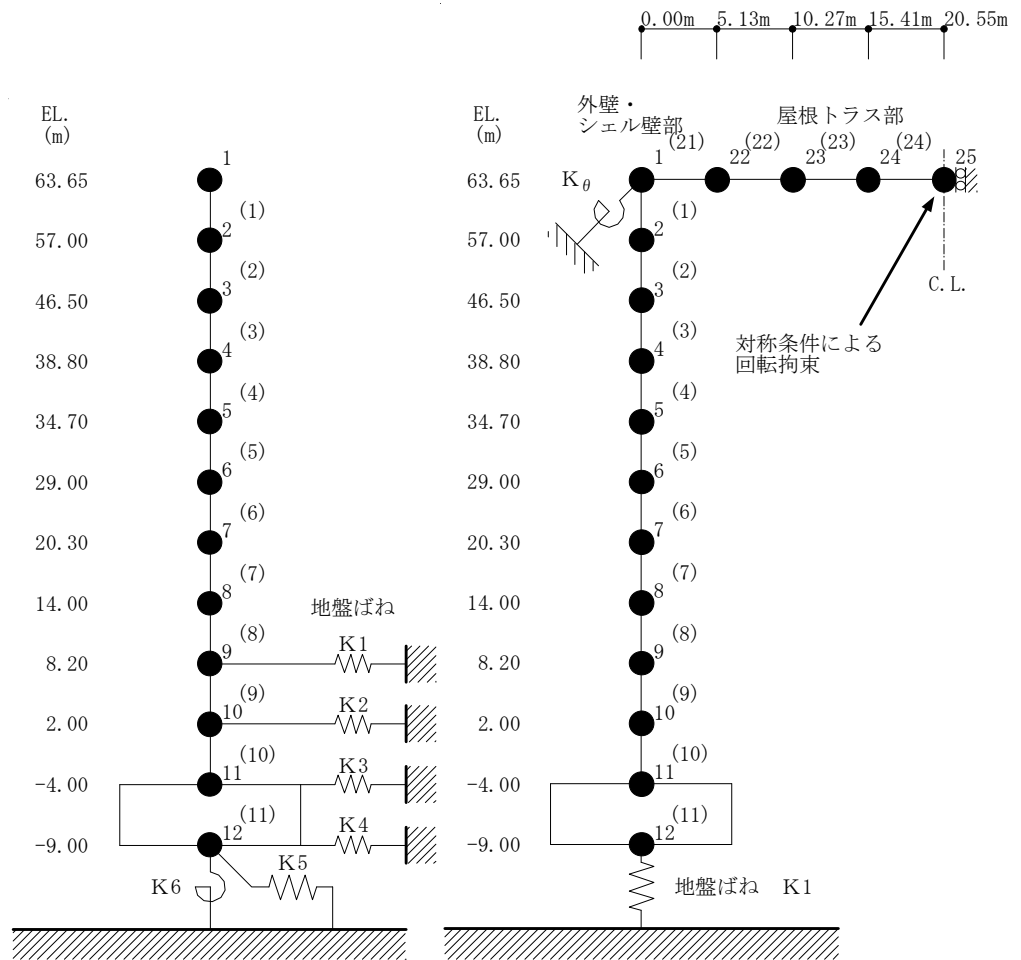
c. 地震荷重 (Sd, Ss)

水平地震力及び鉛直地震力は、弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s に対する地震応答解析より算定される動的地震力より設定する。

地震荷重は、図4-5に示す質点系モデルのうち、3次元FEMモデルの脚部にあたる燃料取替床レベル (EL. 46.5 m, 質点番号3) における S_d 地震時及び S_s 地震時の水平方向及び鉛直方向の動的応答 (時刻歴応答加速度) とする。なお、水平方向の地震荷重には、並進成分と回転成分を考慮する。また、地震荷重については、地盤物性のばらつきを考慮するものとする。

弾性設計用地震動 S_d 及び基準地震動 S_s に対する燃料取替床レベル (EL. 46.5 m, 質点番号3) の基本ケース及び地盤物性のばらつきを考慮した

ケースの加速度応答スペクトル及び加速度時刻歴波形を図 4-6～図 4-66 に示す。



- 数字は質点番号を示す。
- () 内は要素番号を示す。
- ○ 印の動的応答を用いる。

(a) 水平方向

(b) 鉛直方向

図 4-5 地震応答解析モデル

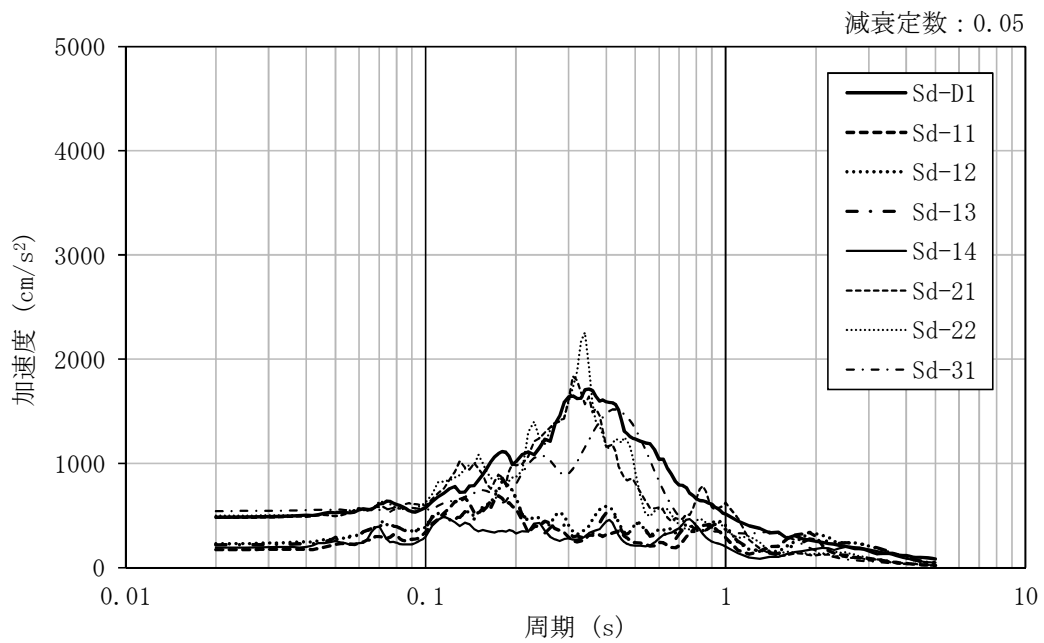


図 4-6 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 S_d , NS 方向並進成分, 基本ケース)

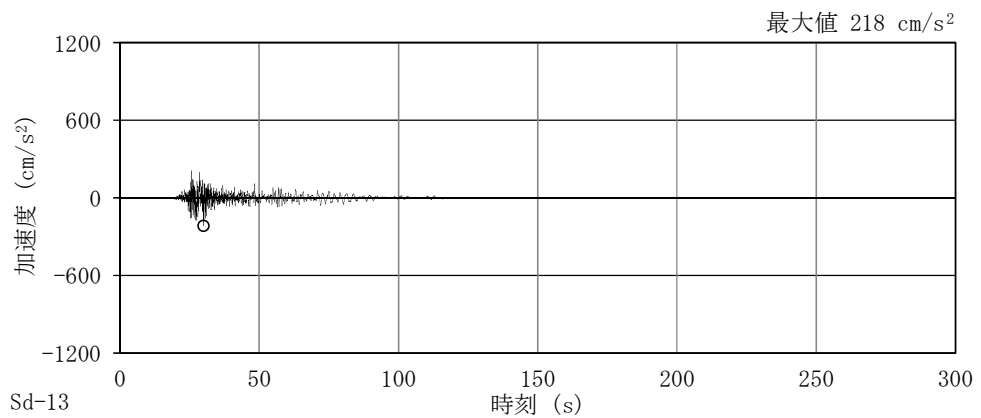
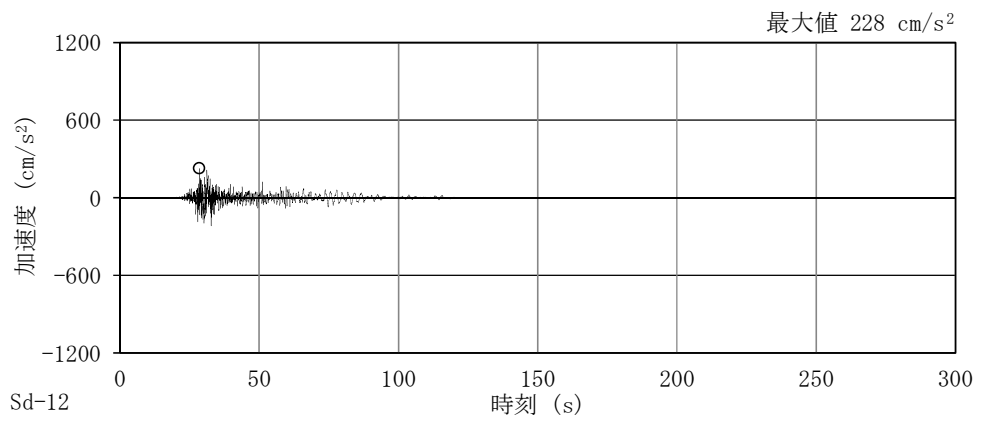
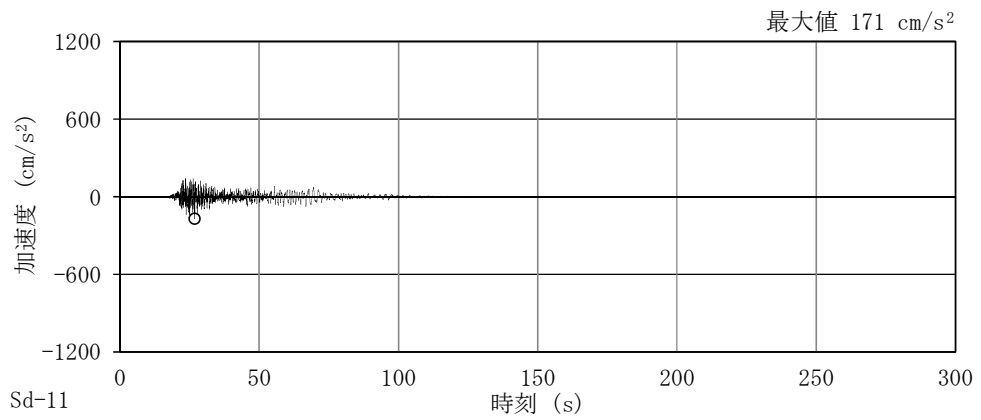
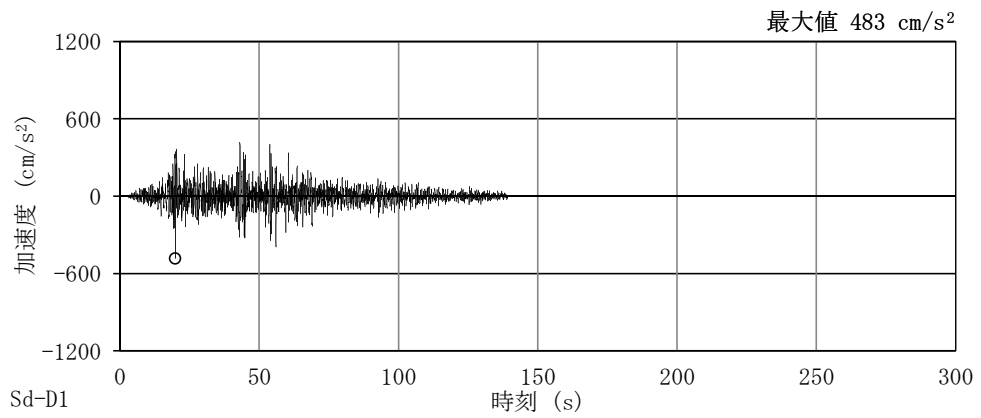


図 4-7 (1/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d, NS 方向並進成分, 基本ケース)

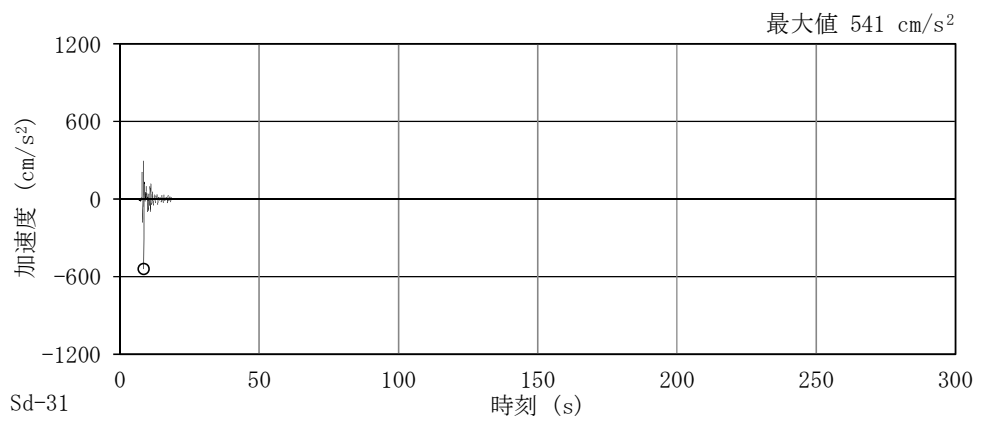
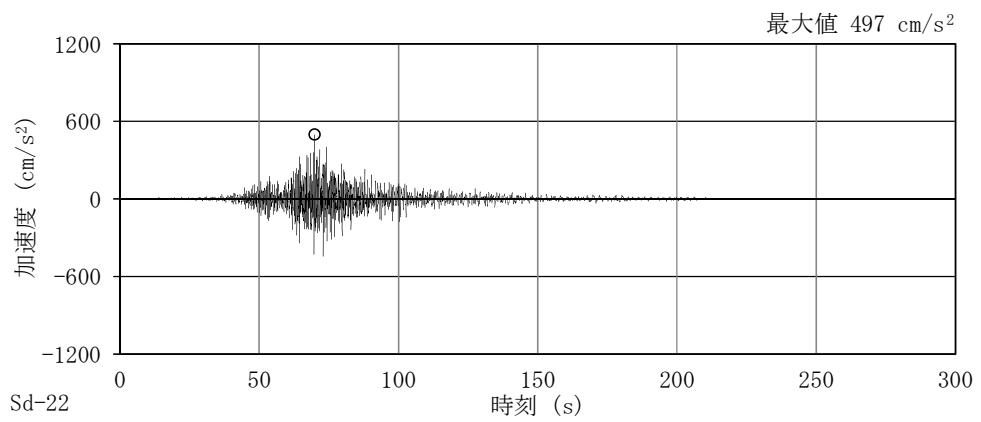
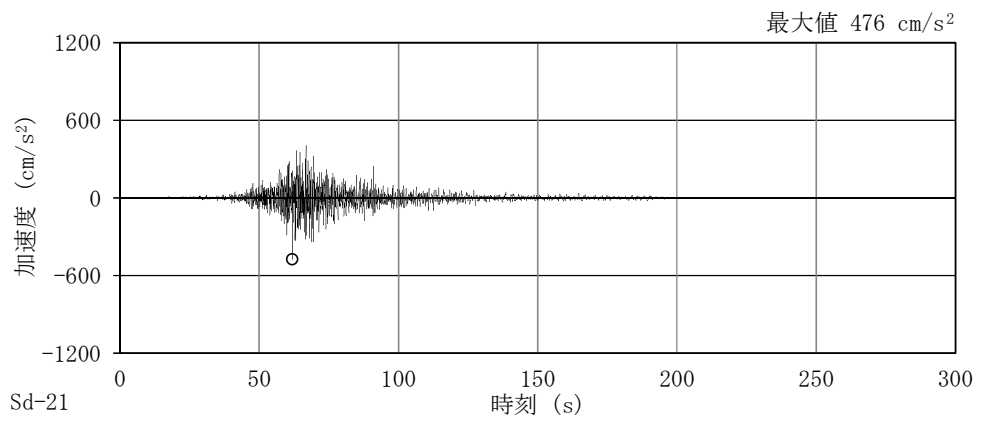
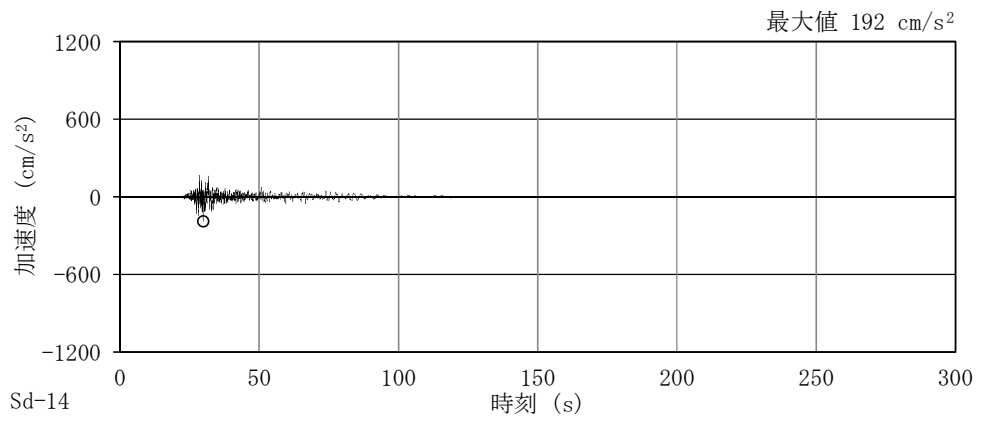


図 4-7 (2/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d, NS 方向並進成分, 基本ケース)

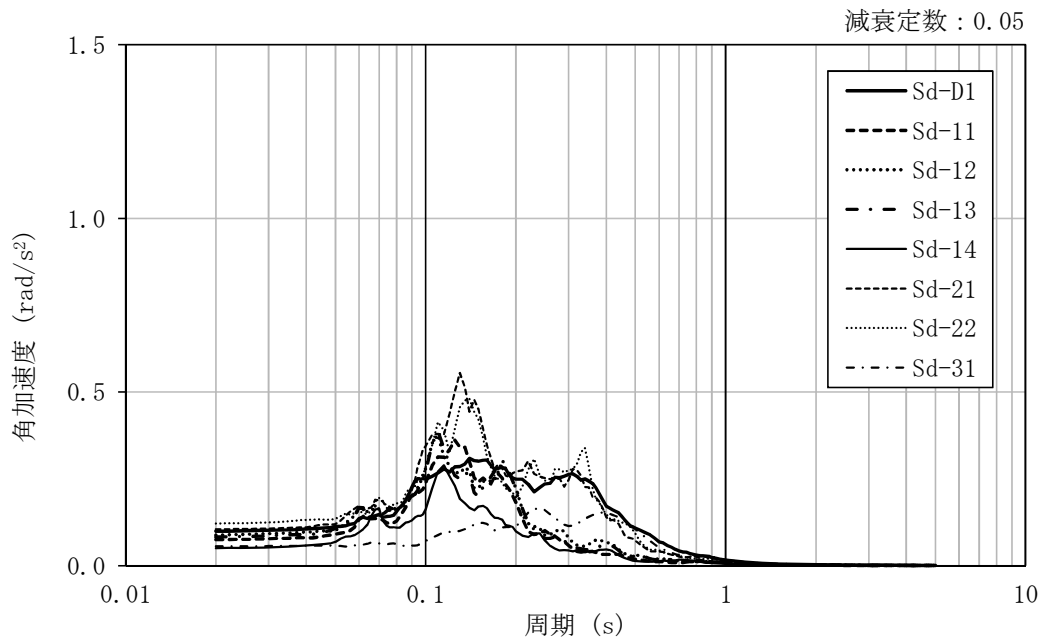


図 4-8 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 S_d , NS 方向回転成分, 基本ケース)

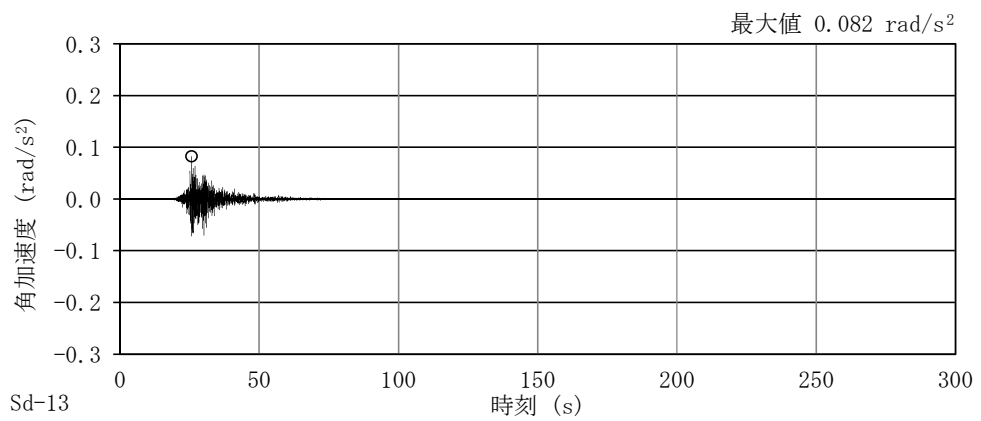
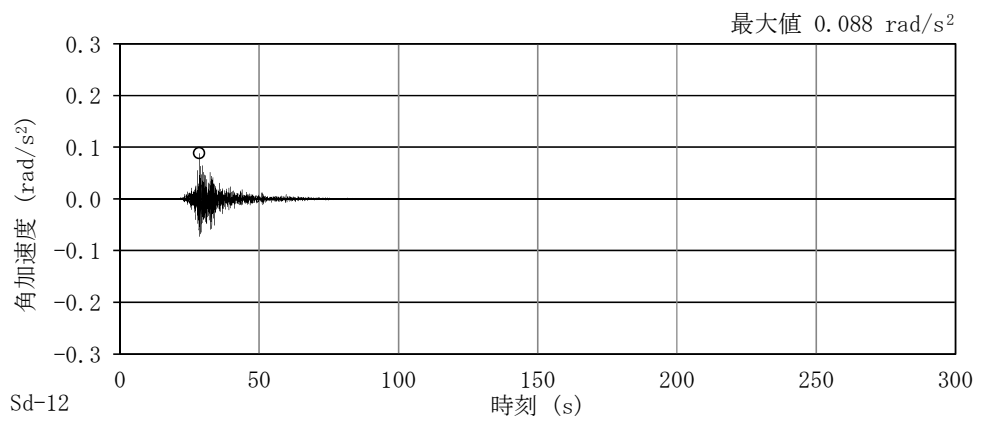
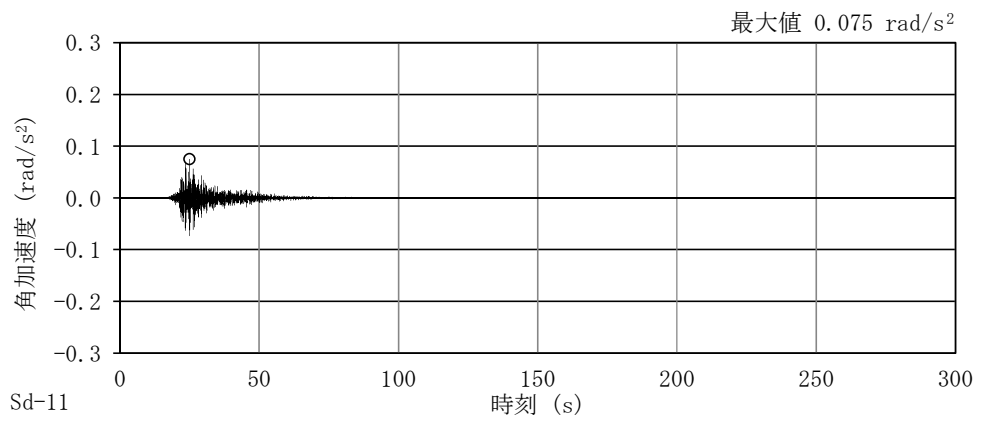
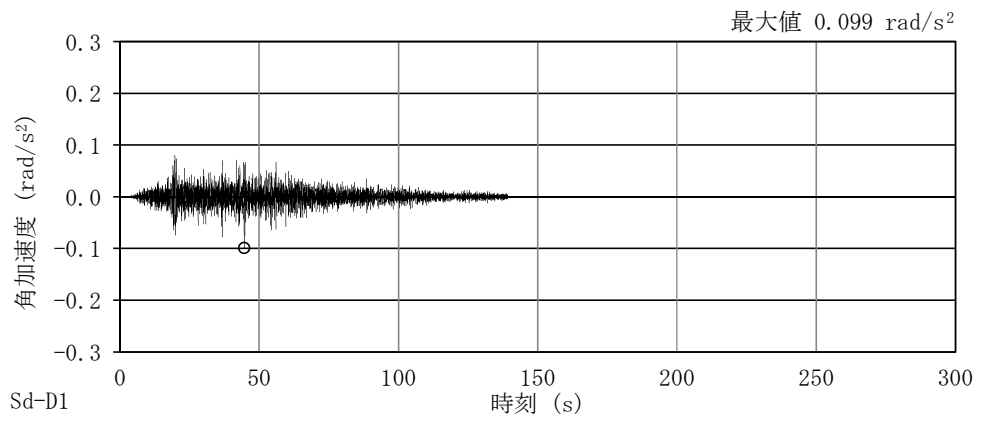


図 4-9 (1/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d, NS 方向回転成分, 基本ケース)

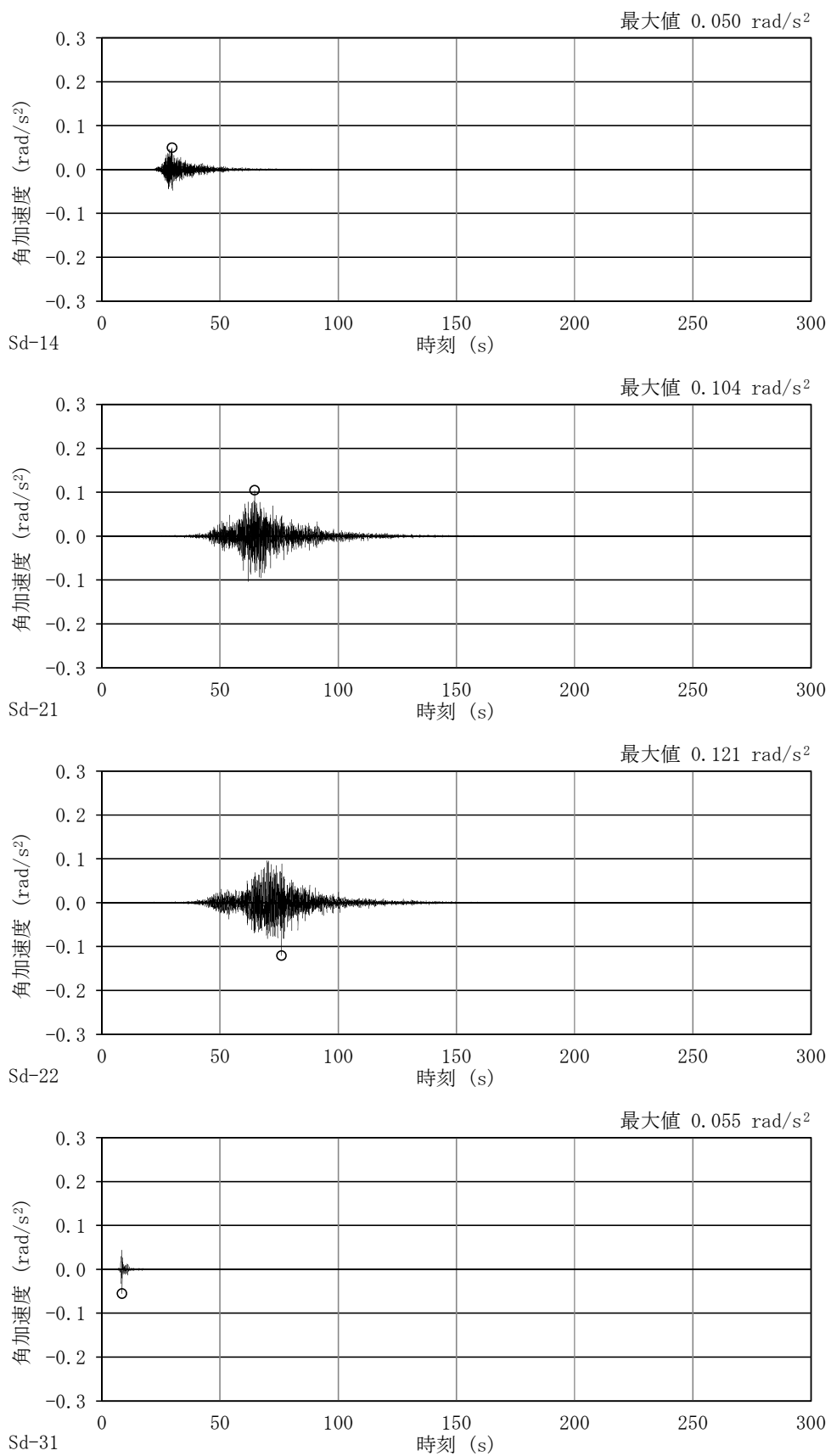


図 4-9 (2/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d , NS 方向回転成分, 基本ケース)

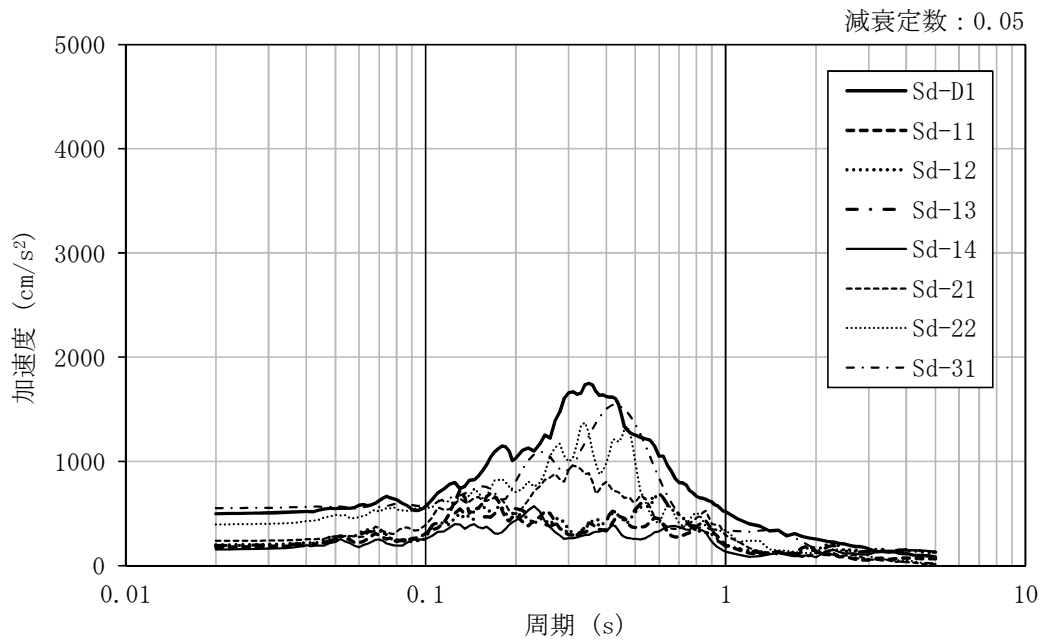


図 4-10 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 S_d , EW 方向並進成分, 基本ケース)

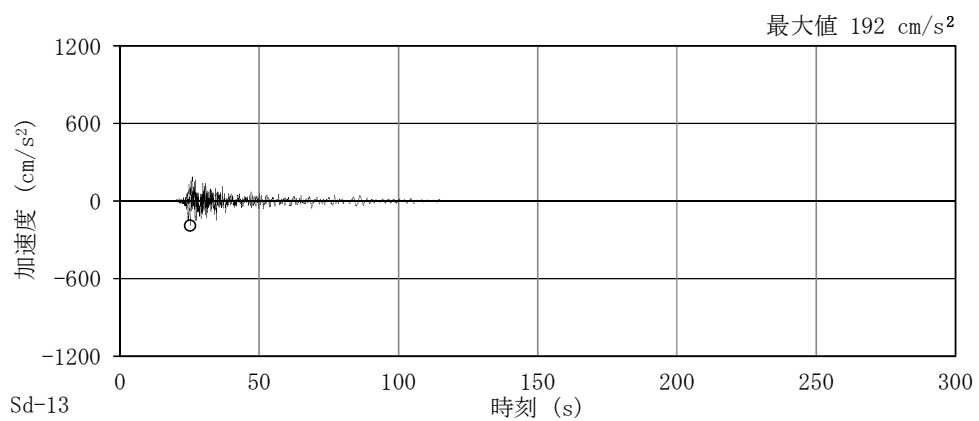
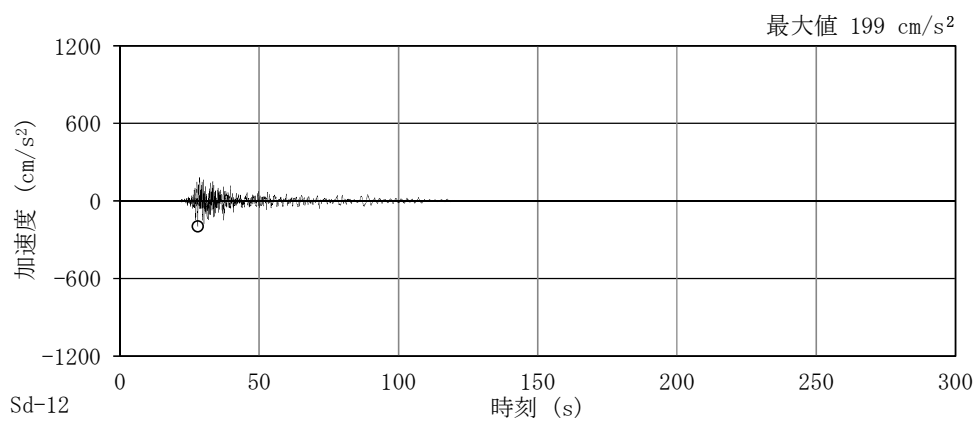
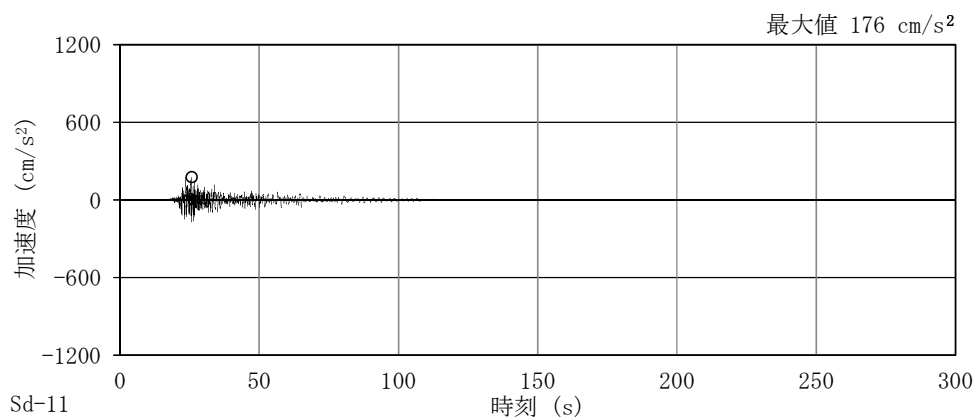
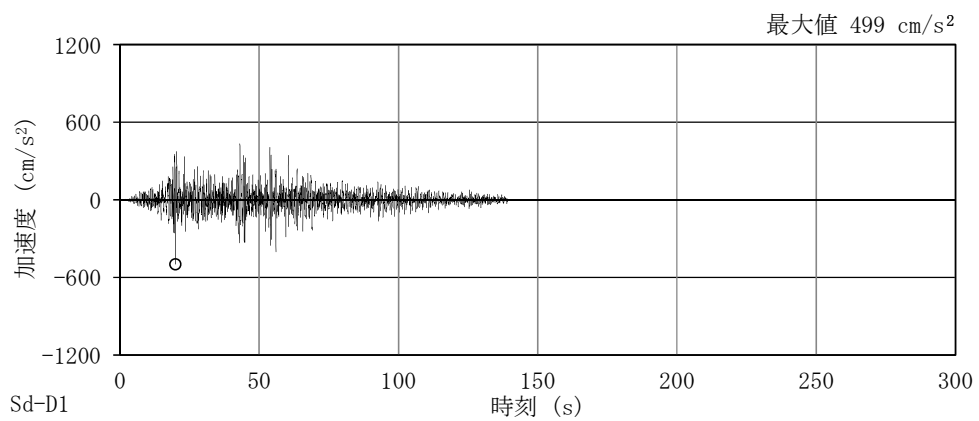


図 4-11 (1/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d , EW 方向並進成分, 基本ケース)

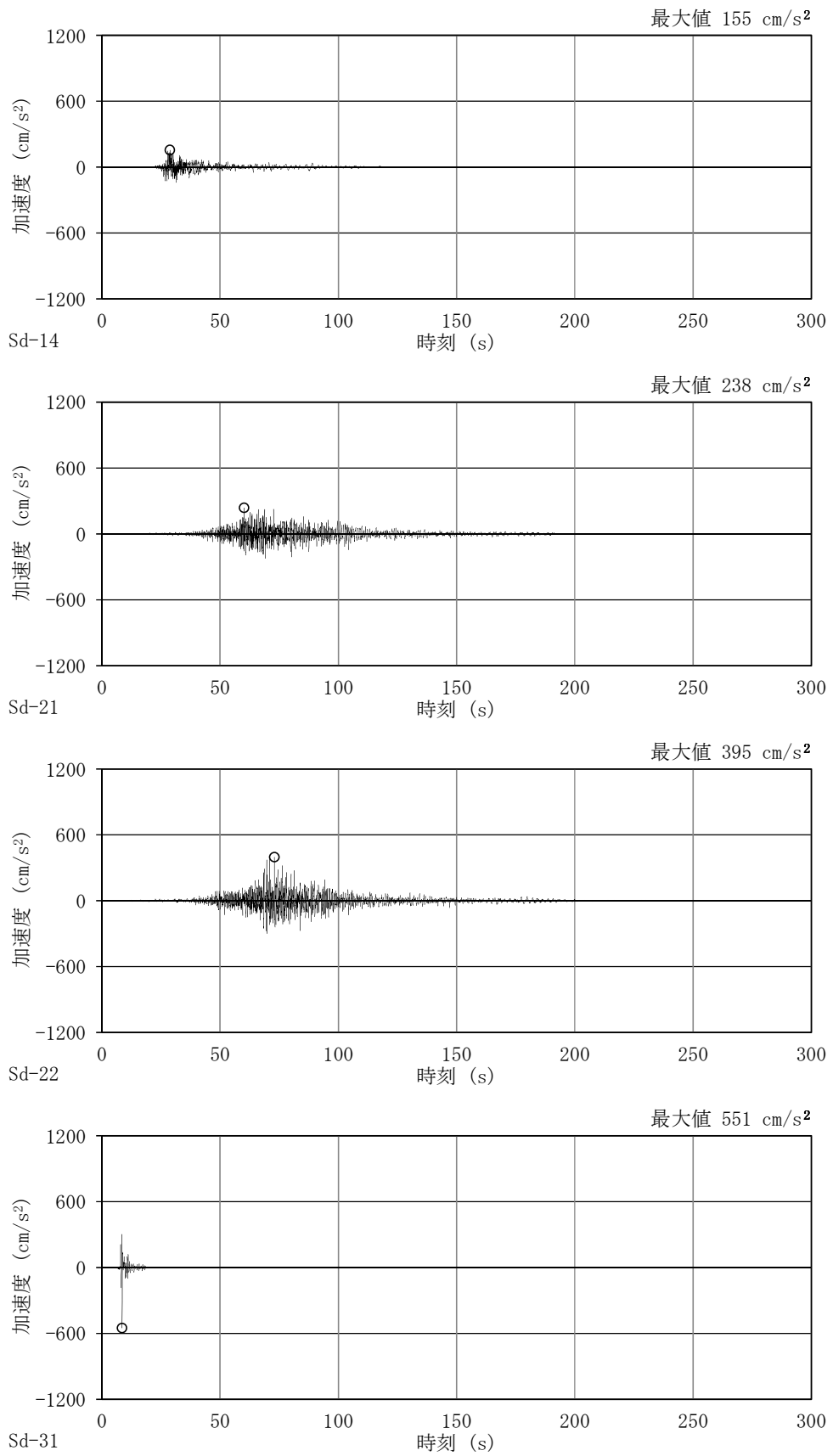


図 4-11 (2/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d, EW 方向並進成分, 基本ケース)

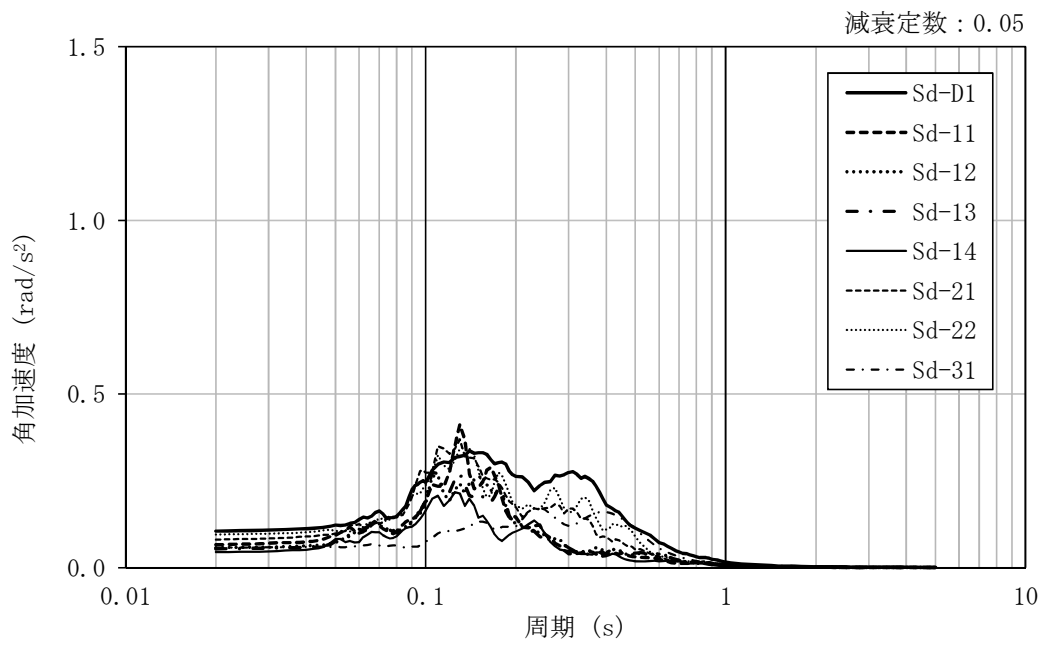


図 4-12 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 S_d , EW 方向回転成分, 基本ケース)

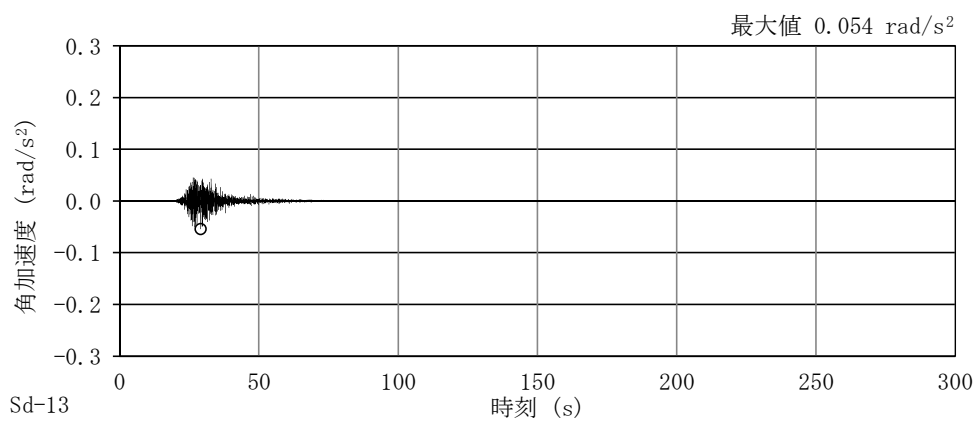
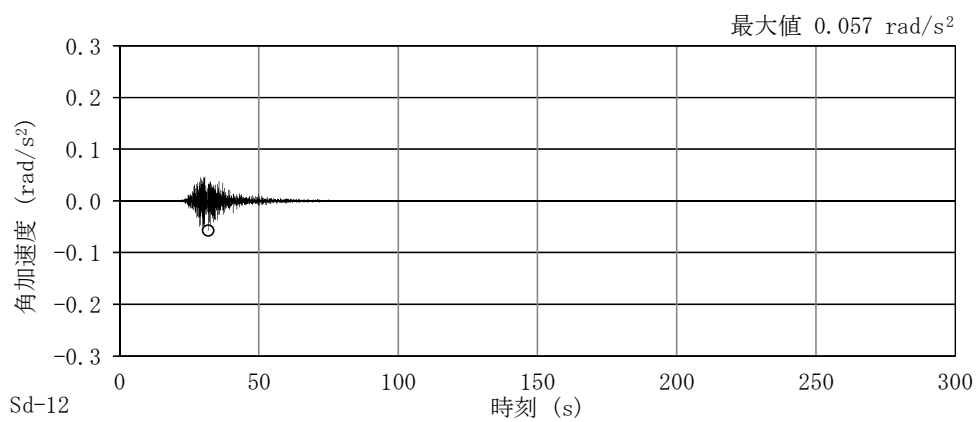
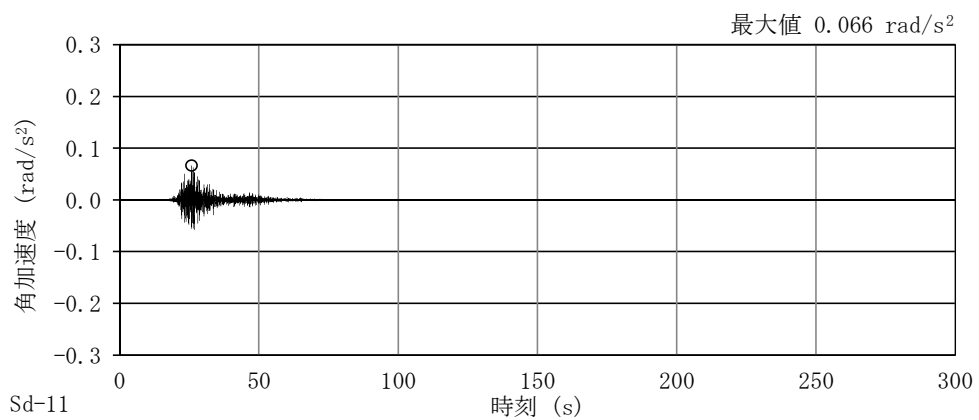
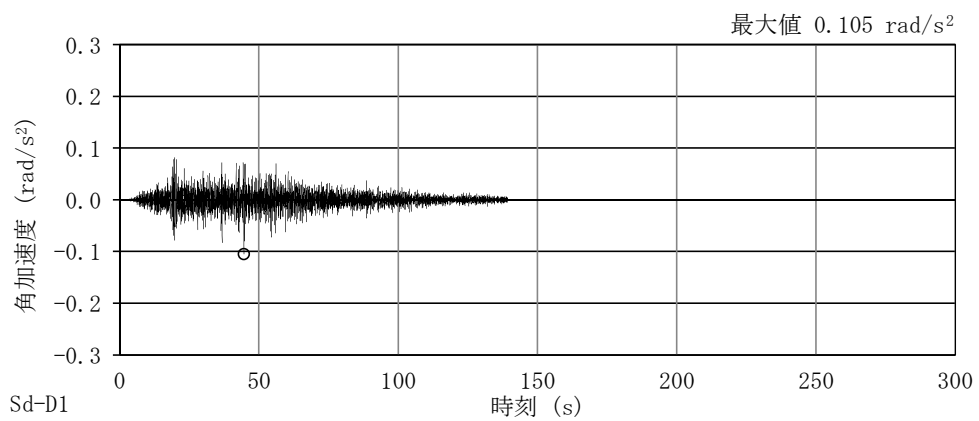


図 4-13 (1/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d, EW 方向回転成分, 基本ケース)

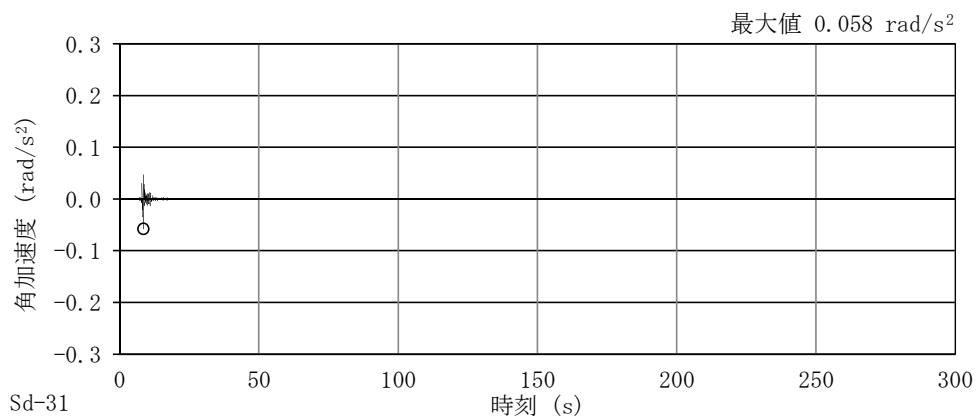
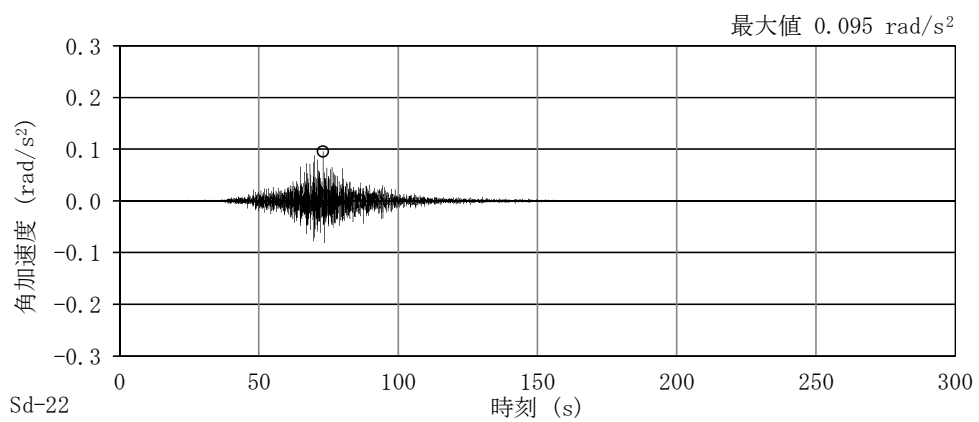
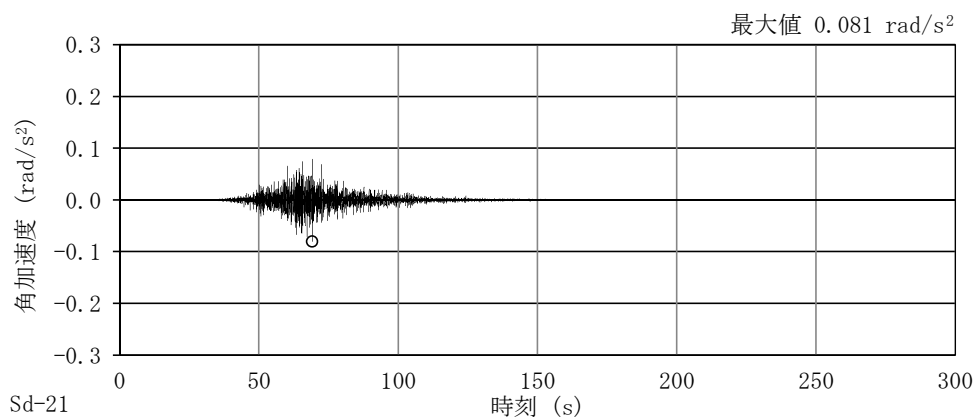
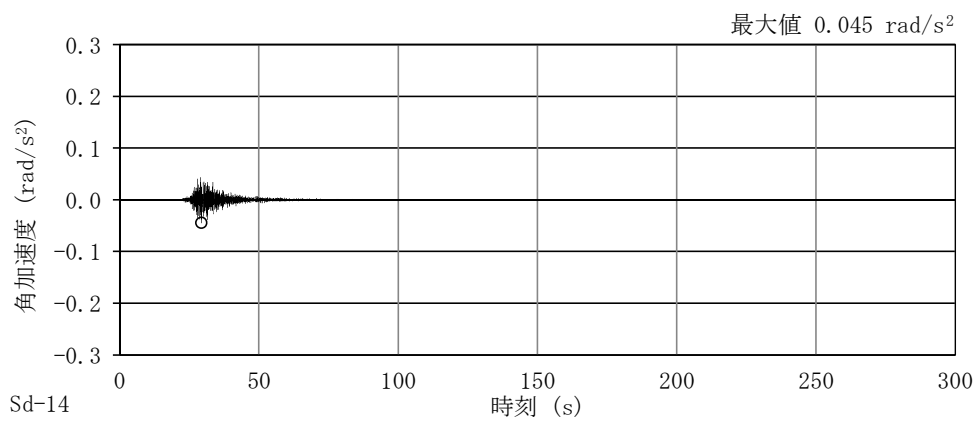


図 4-13 (2/2) 加速度時刻歴波形
(弾性設計用地震動 S_d, EW 方向回転成分, 基本ケース)

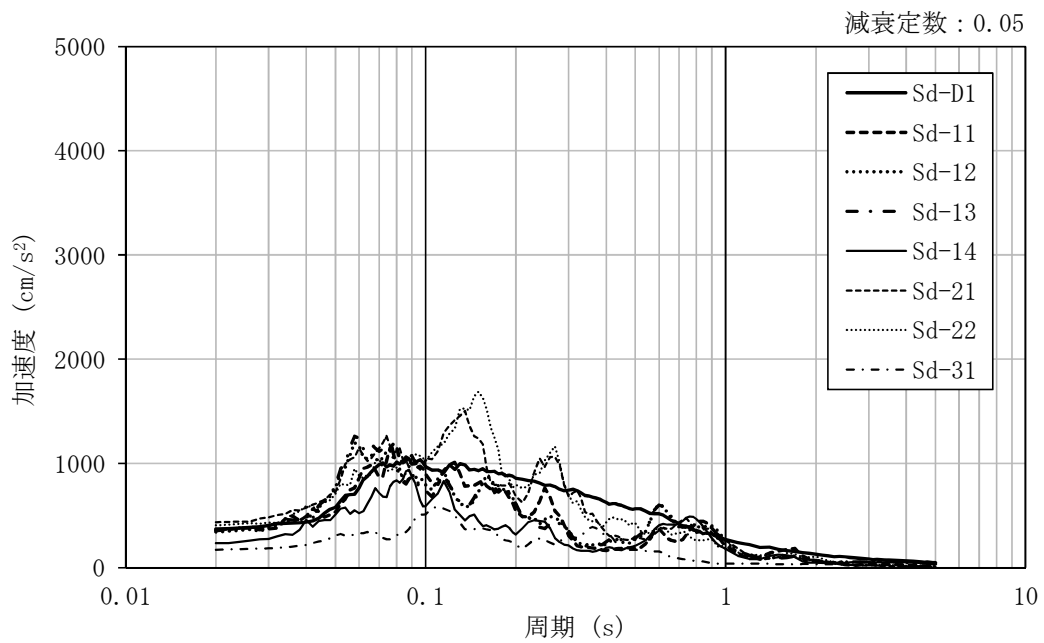


図 4-14 加速度応答スペクトル (弾性設計用地震動 S_d , UD 方向, 基本ケース)

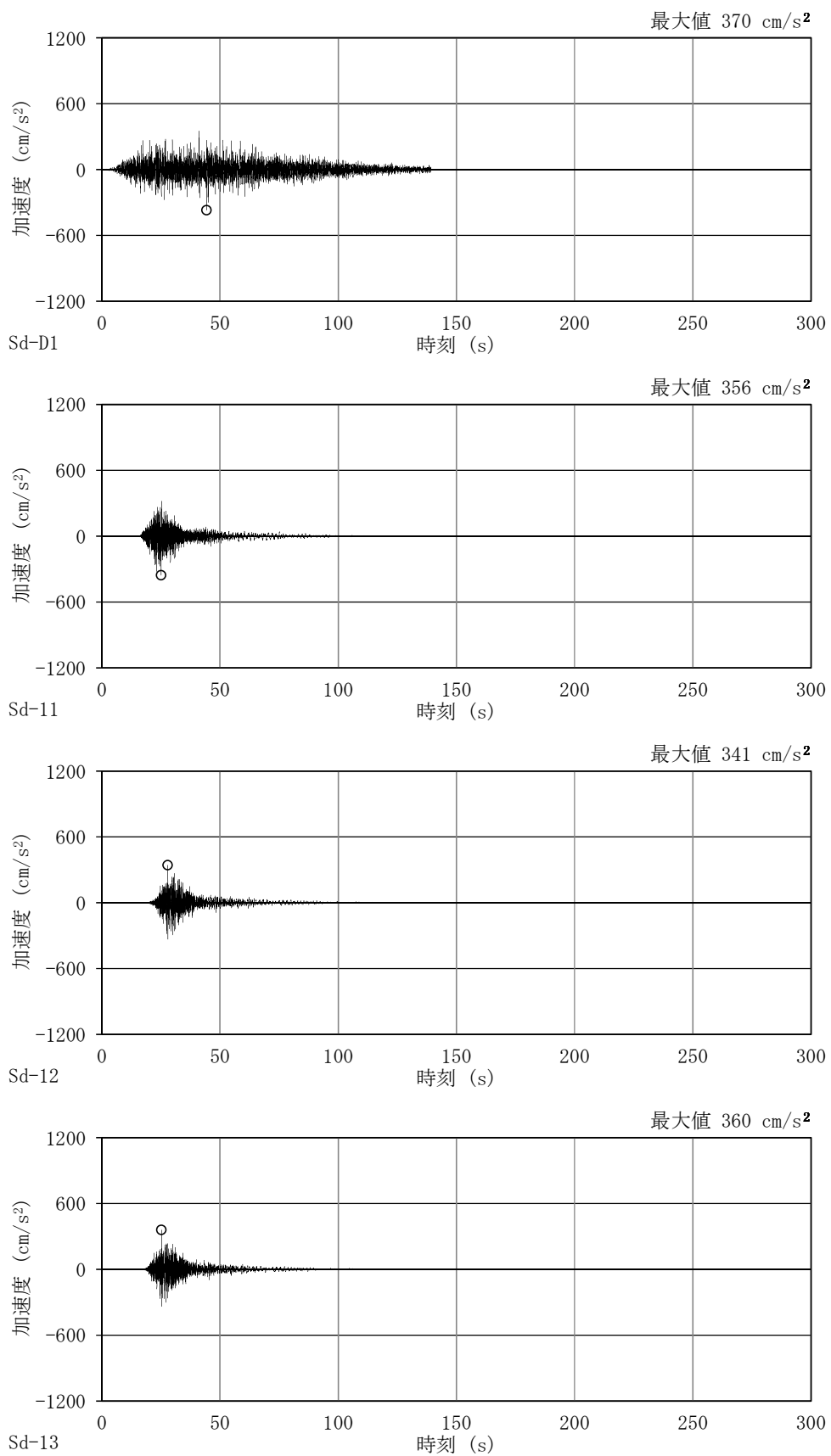


図 4-15 (1/2) 加速度時刻歴波形 (弾性設計用地震動 S_d , UD 方向, 基本ケース)

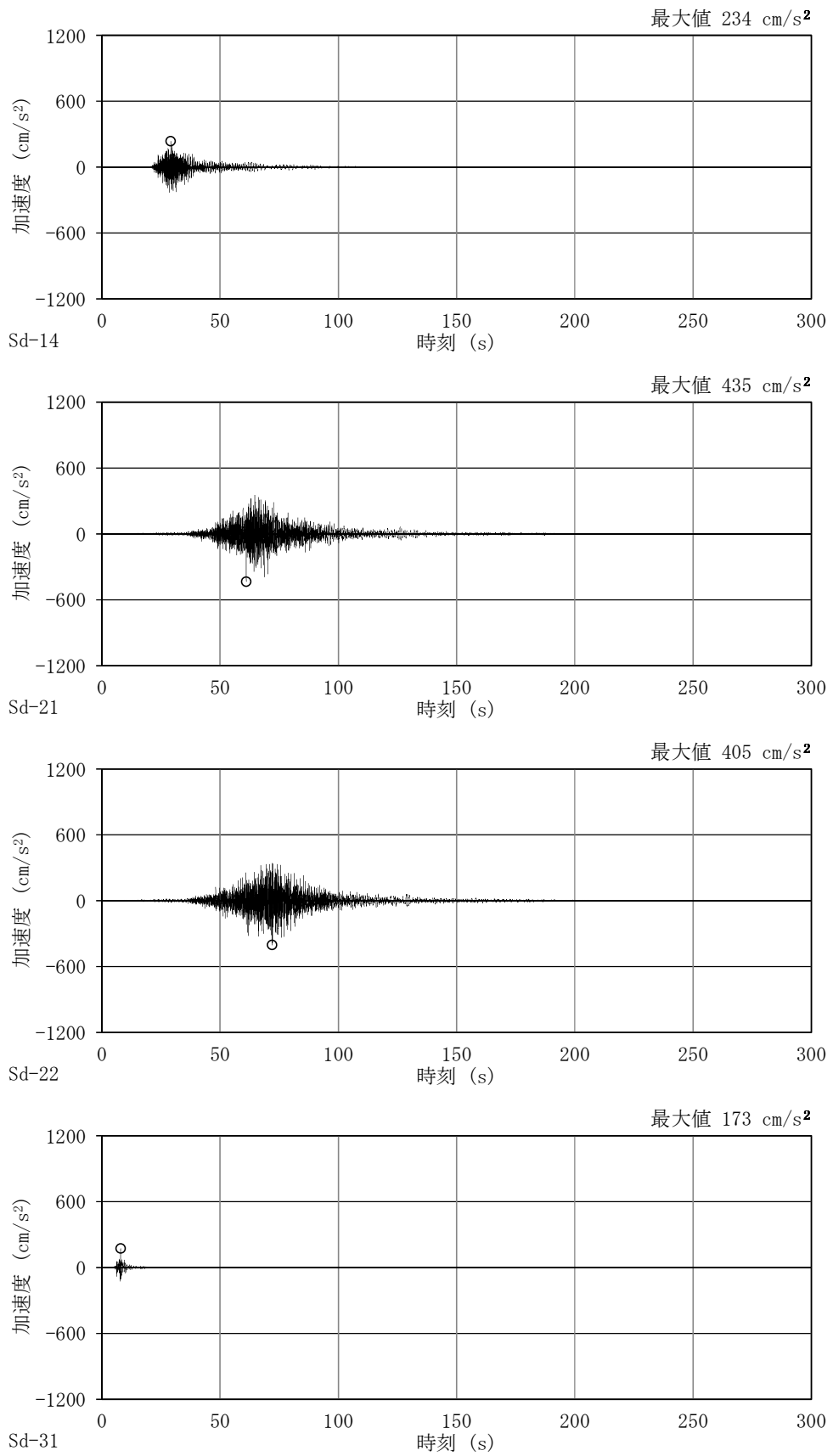


図 4-15 (2/2) 加速度時刻歴波形 (弾性設計用地震動 S_d, UD 方向, 基本ケース)

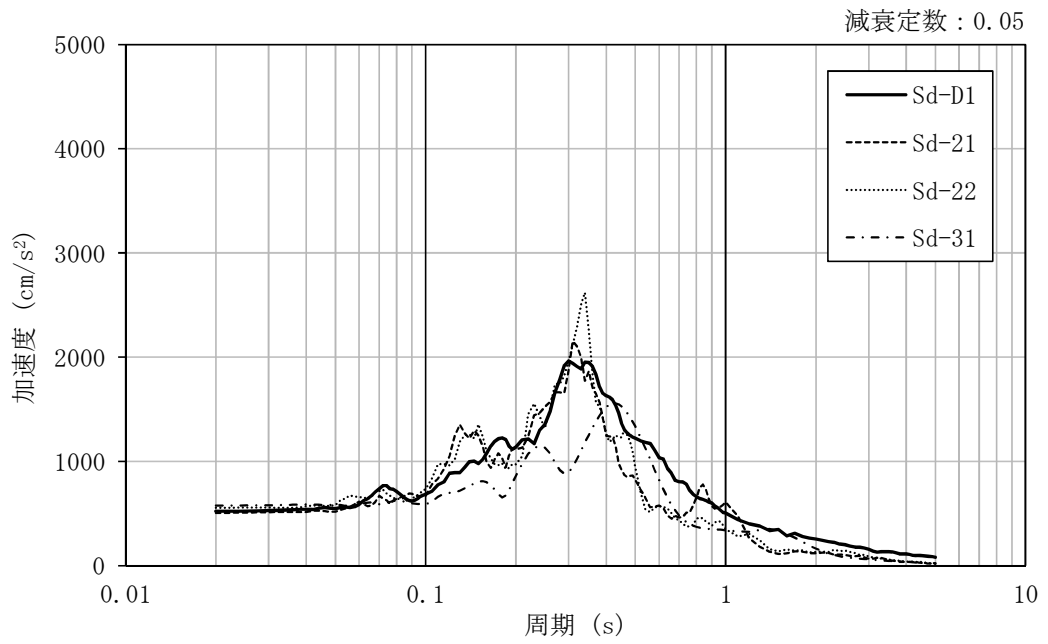


図 4-16 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

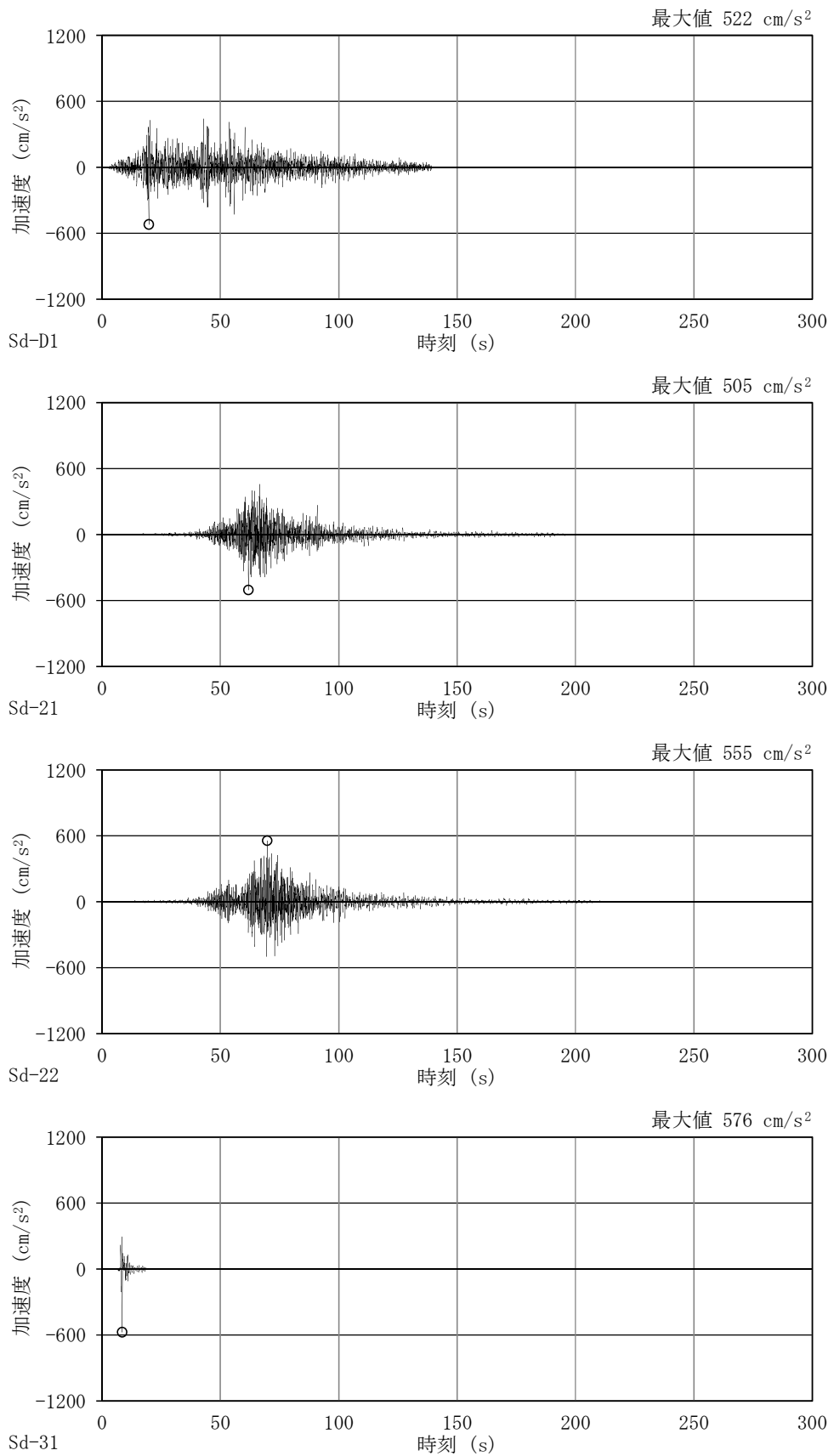


図 4-17 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d, NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+σ))

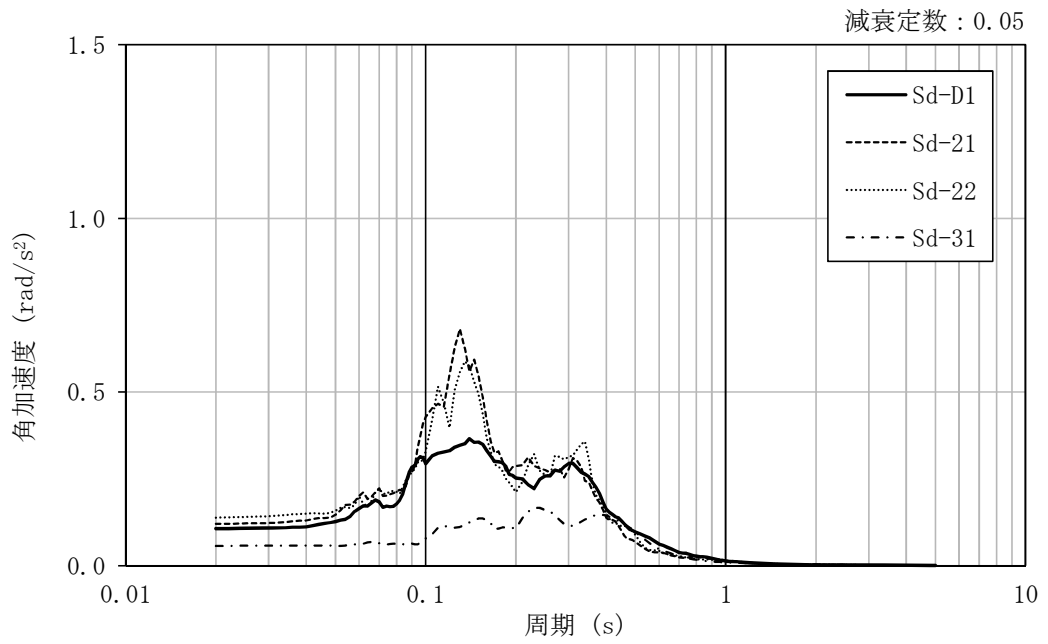


図 4-18 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

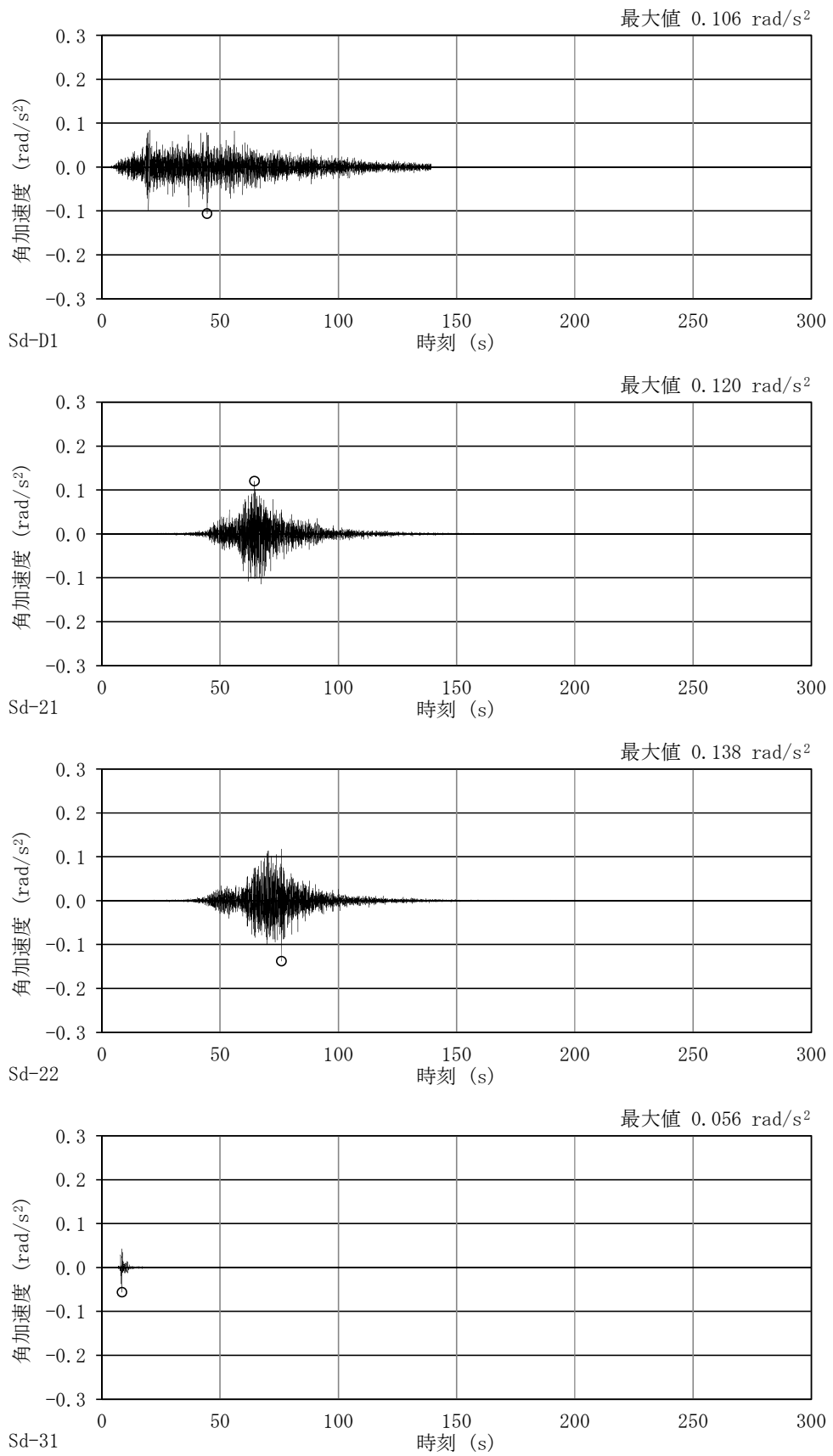


図 4-19 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

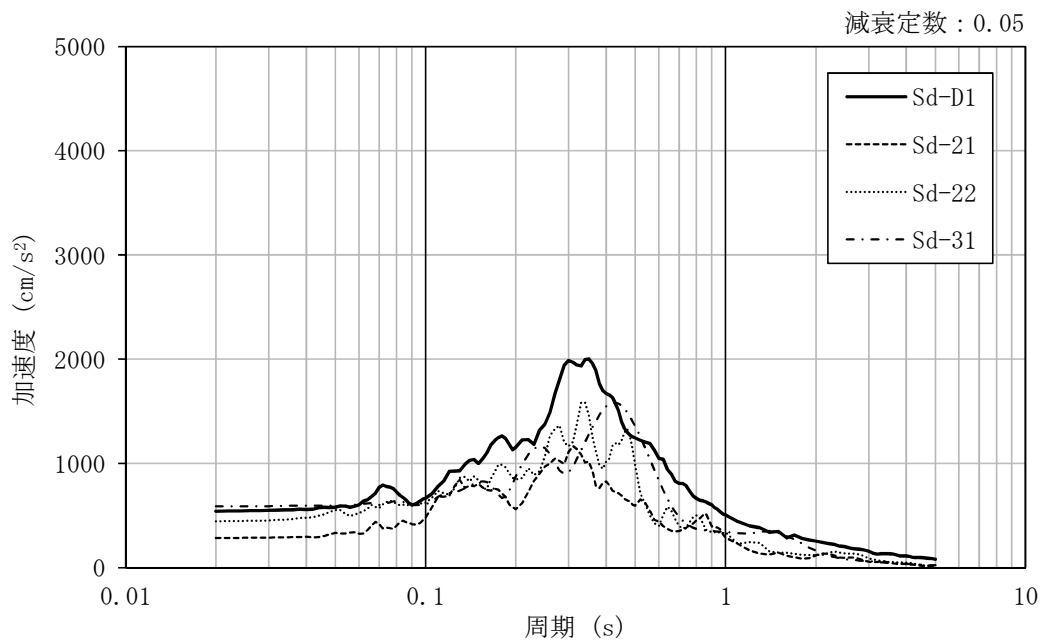


図 4-20 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

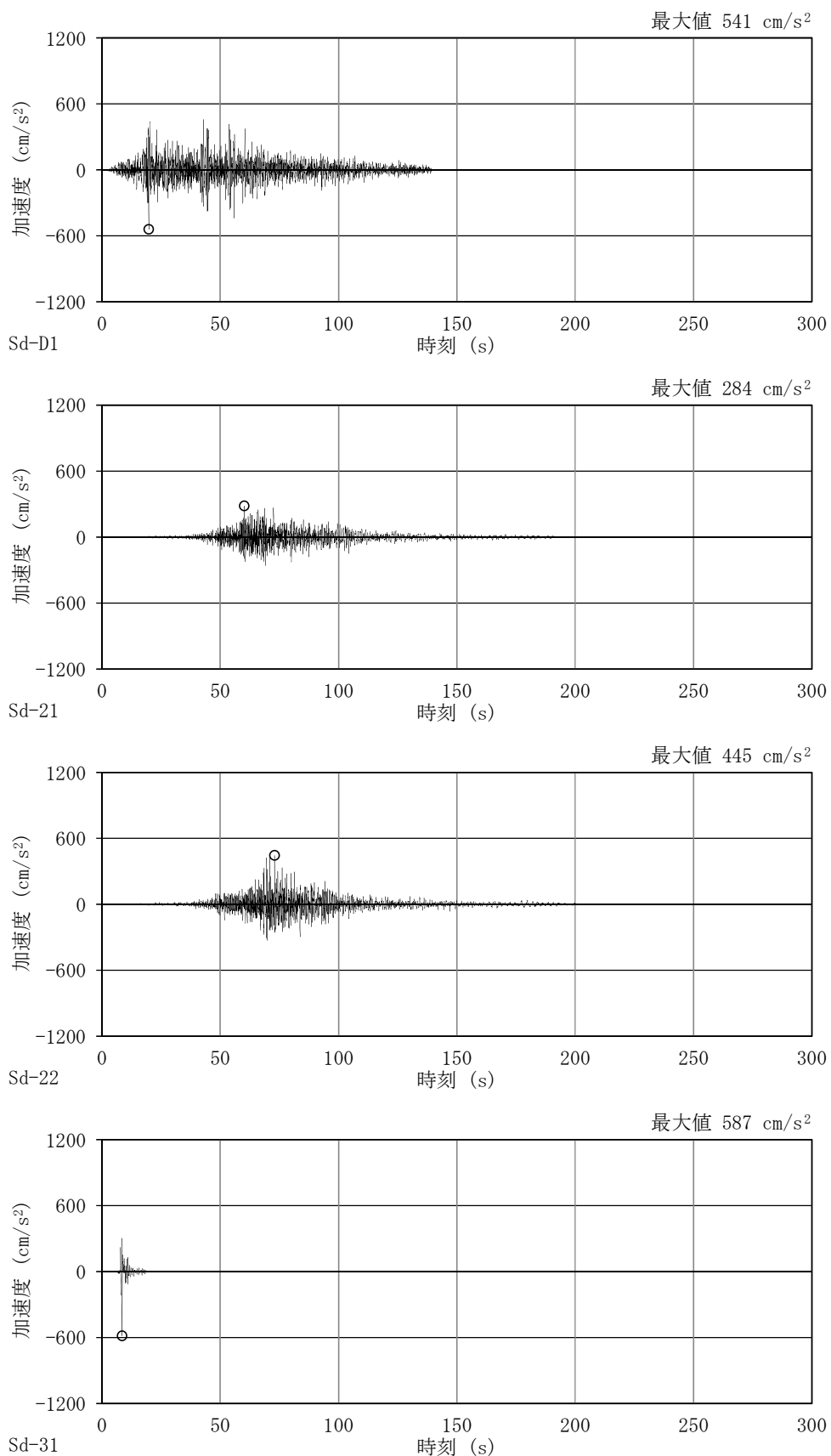


図 4-21 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

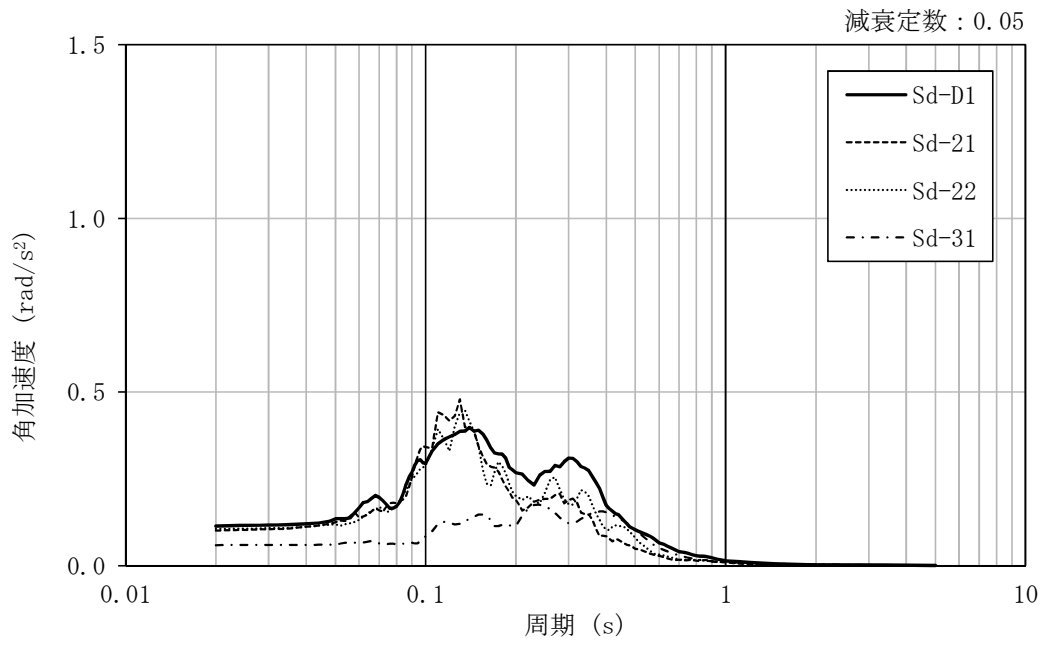


図 4-22 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

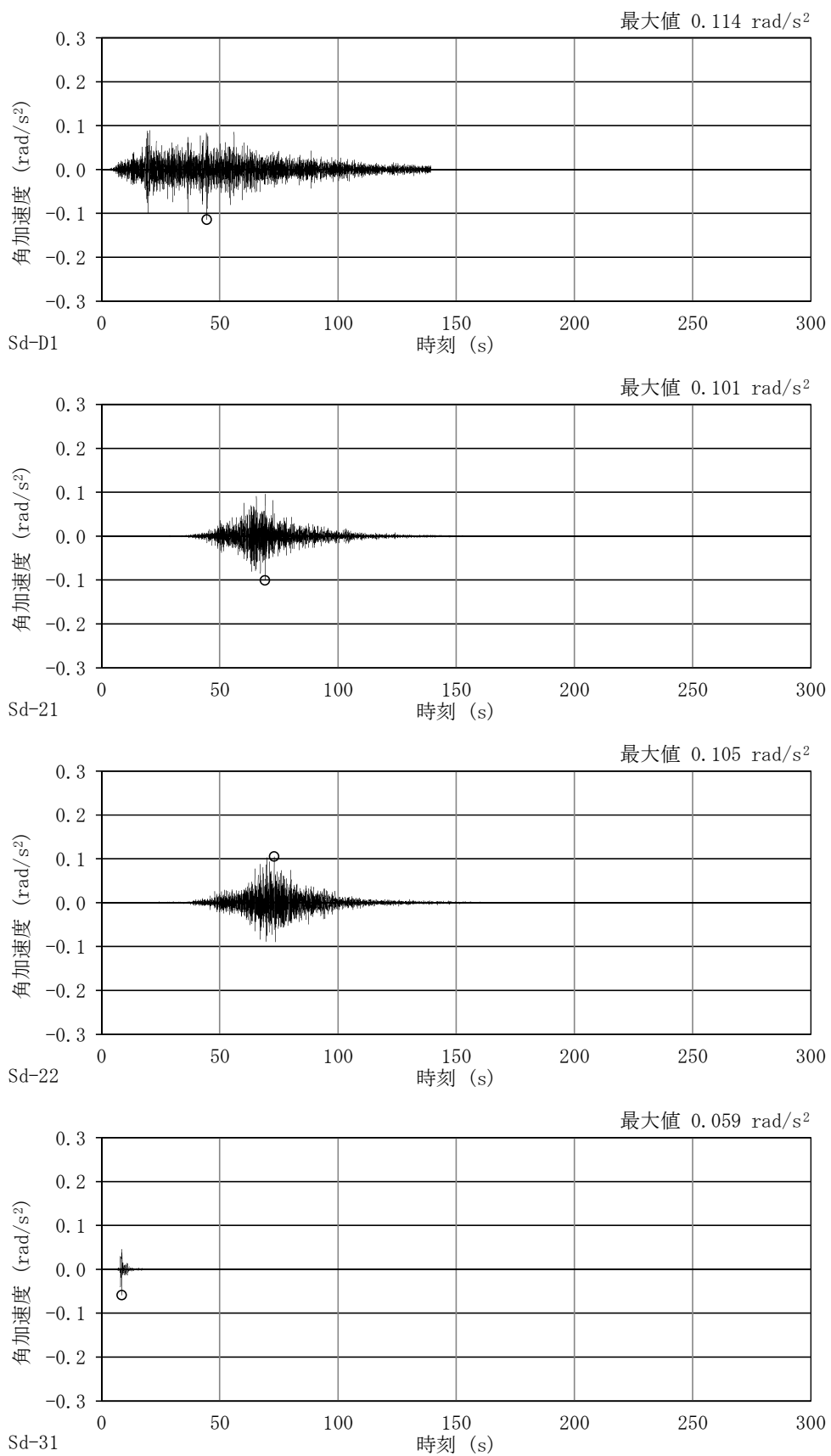


図 4-23 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

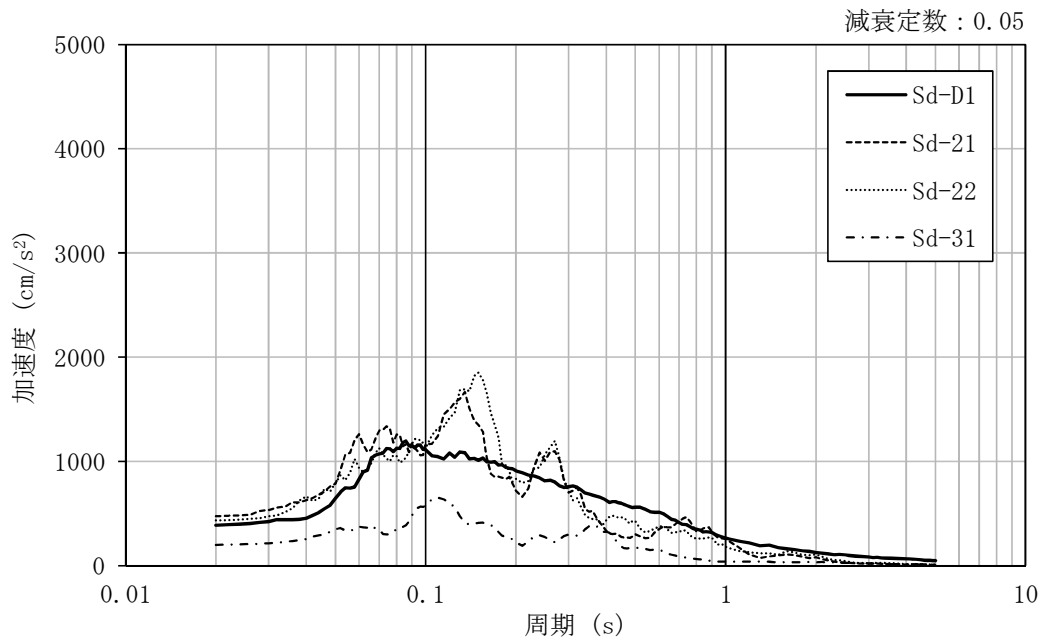


図 4-24 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

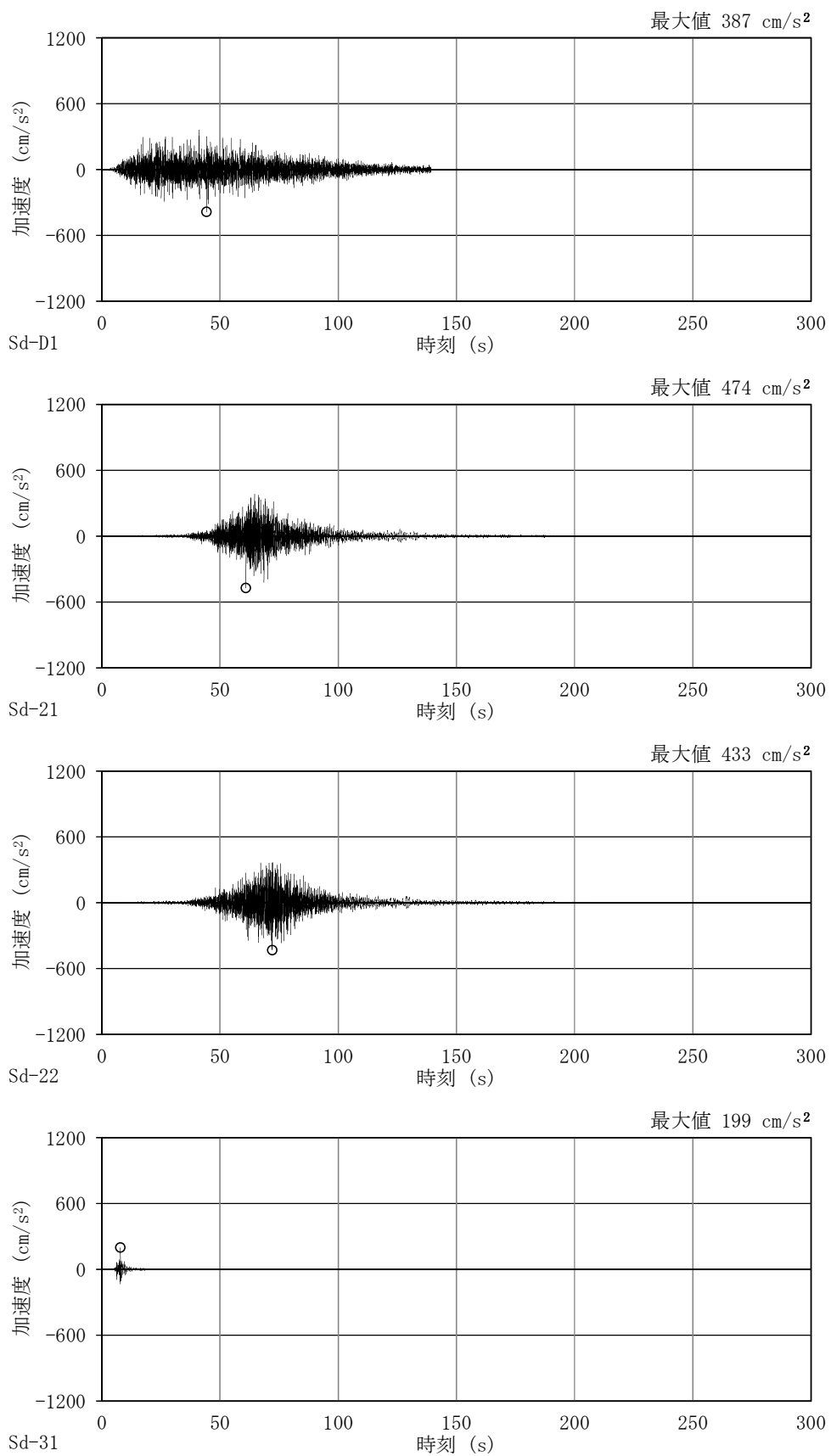


図 4-25 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

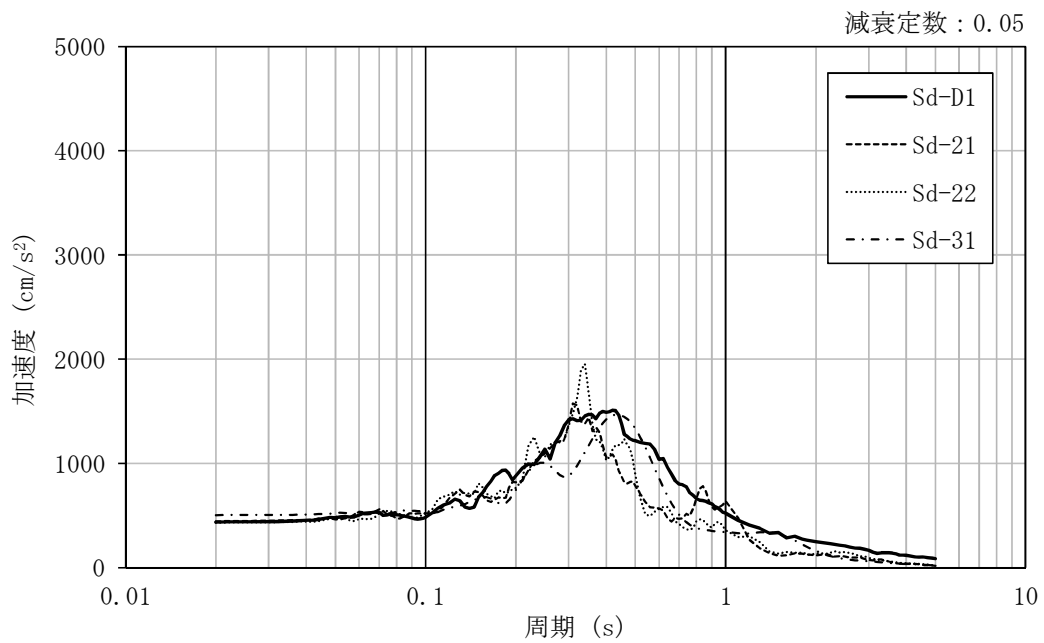


図 4-26 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

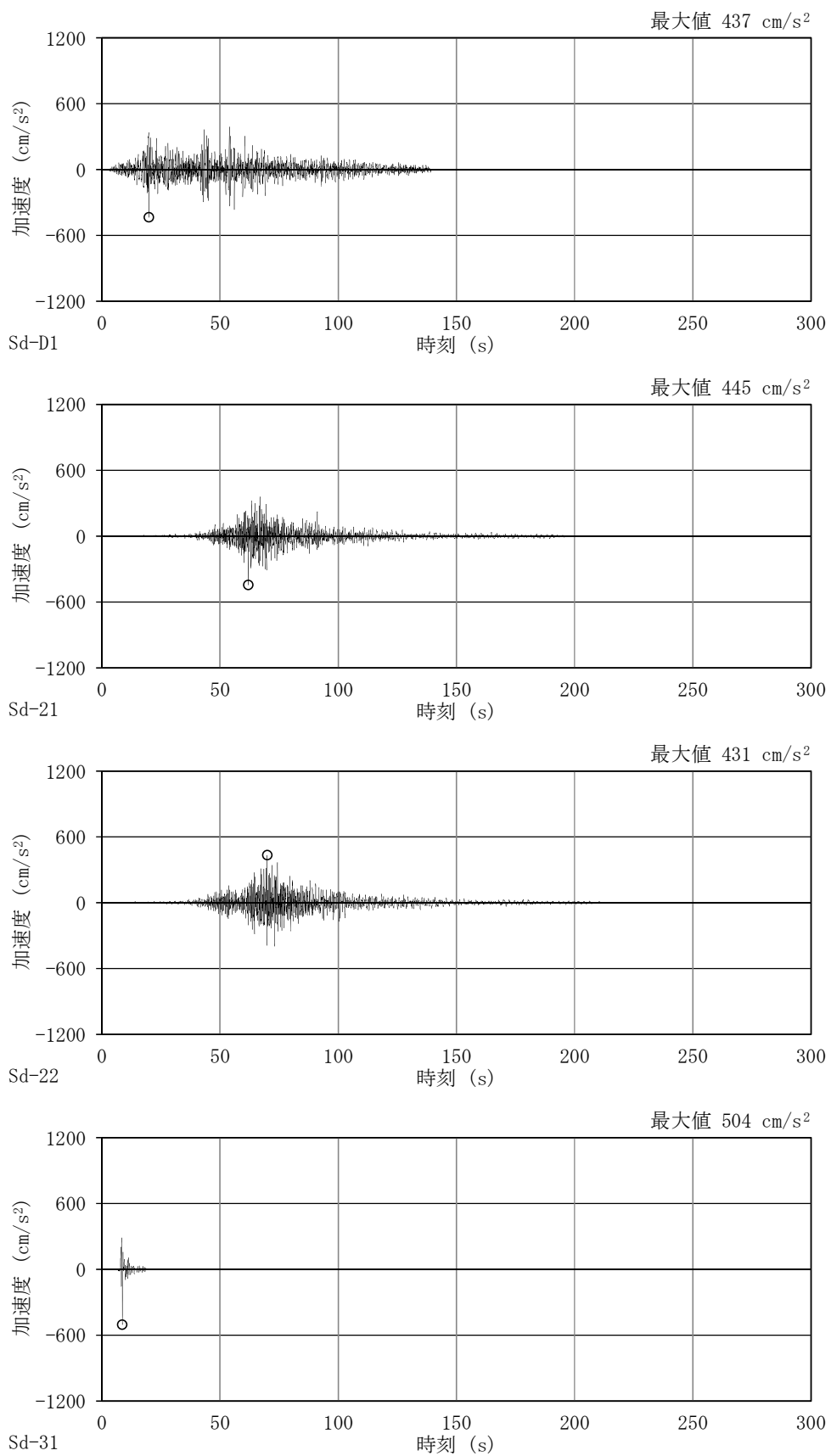


図 4-27 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

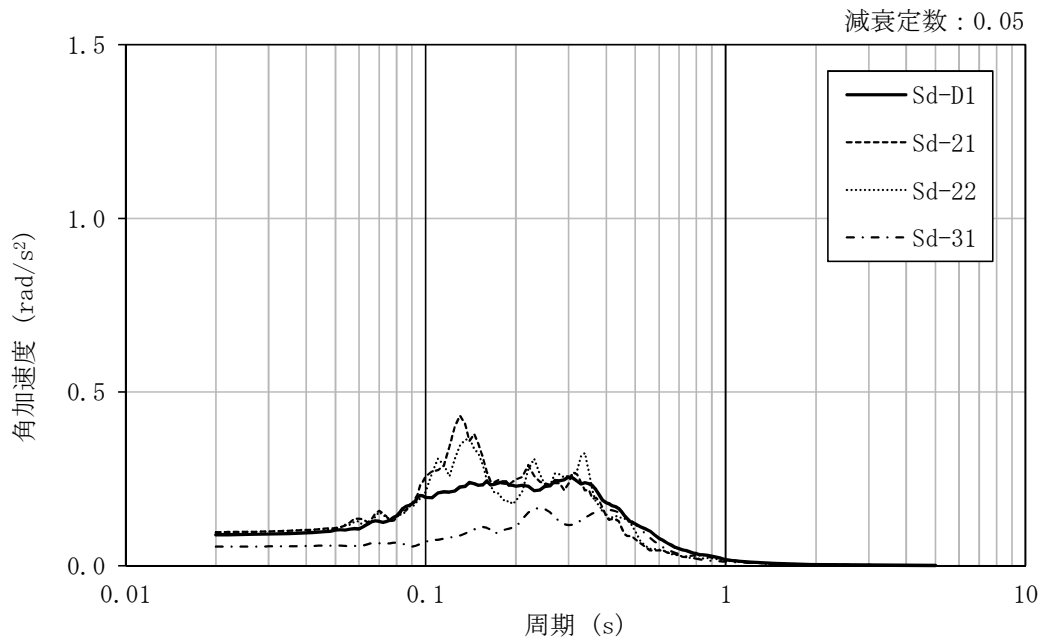


図 4-28 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

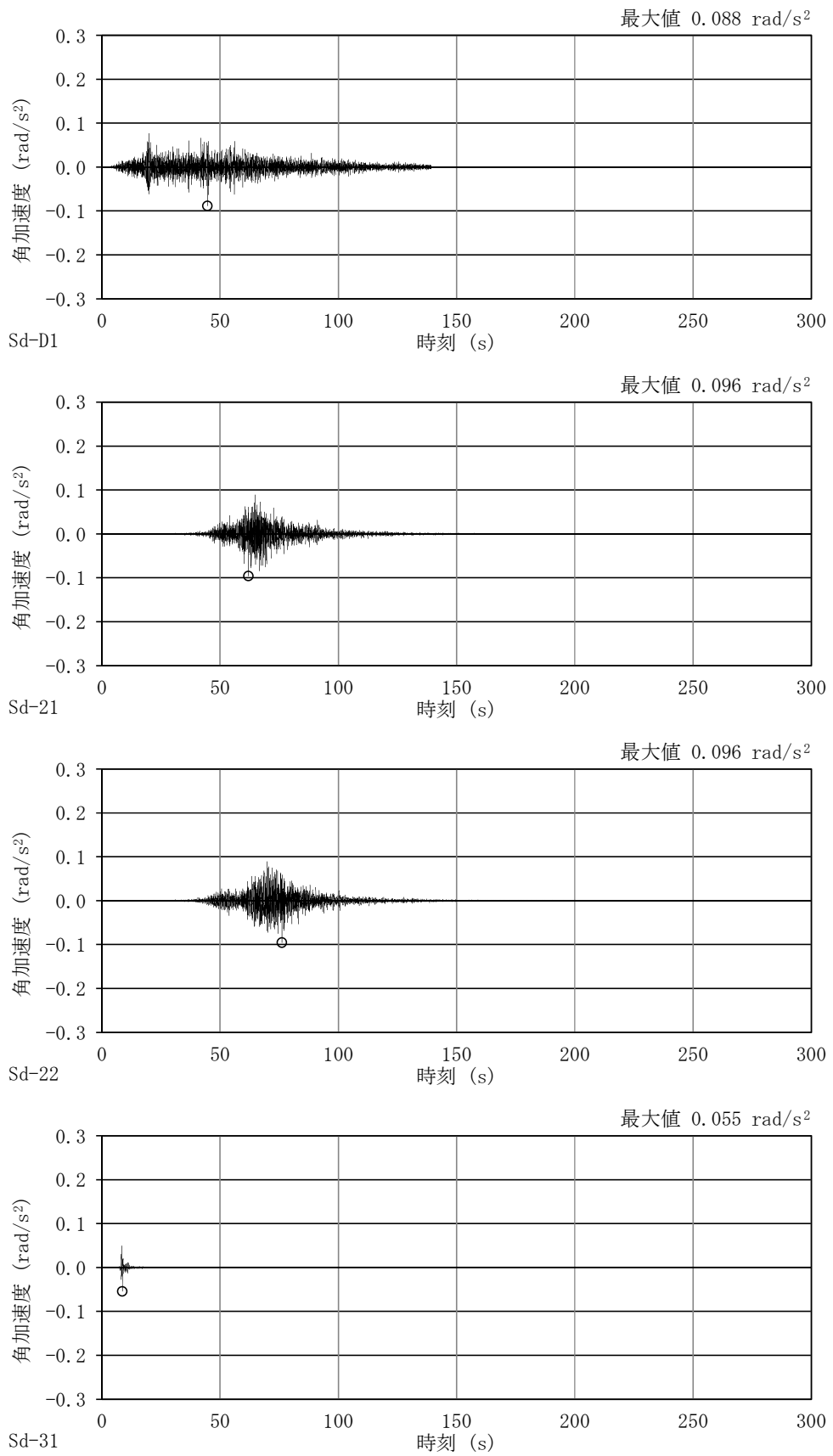


図 4-29 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

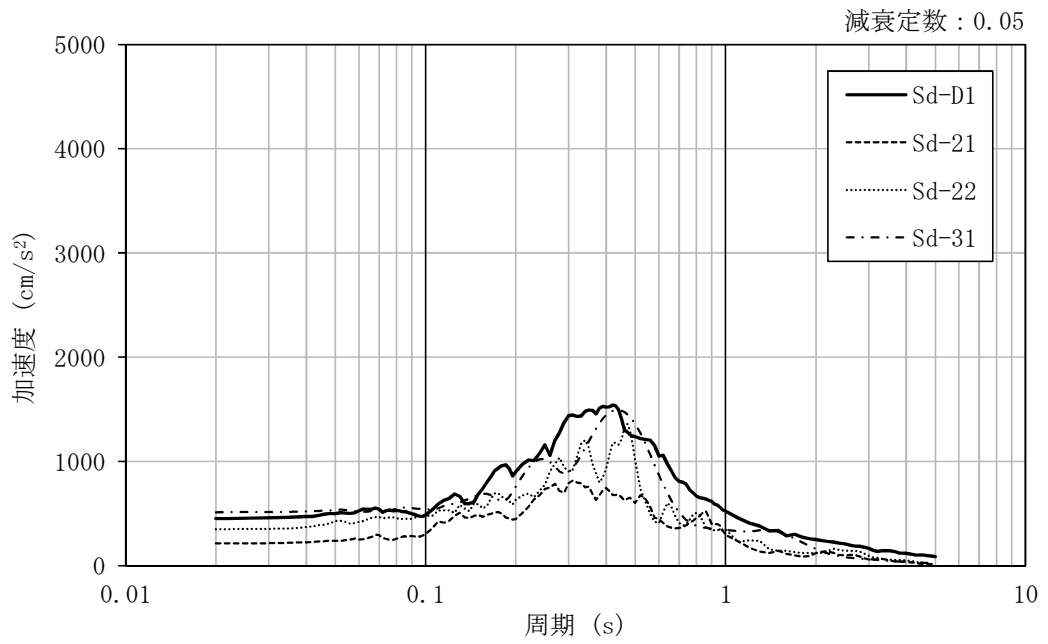


図 4-30 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

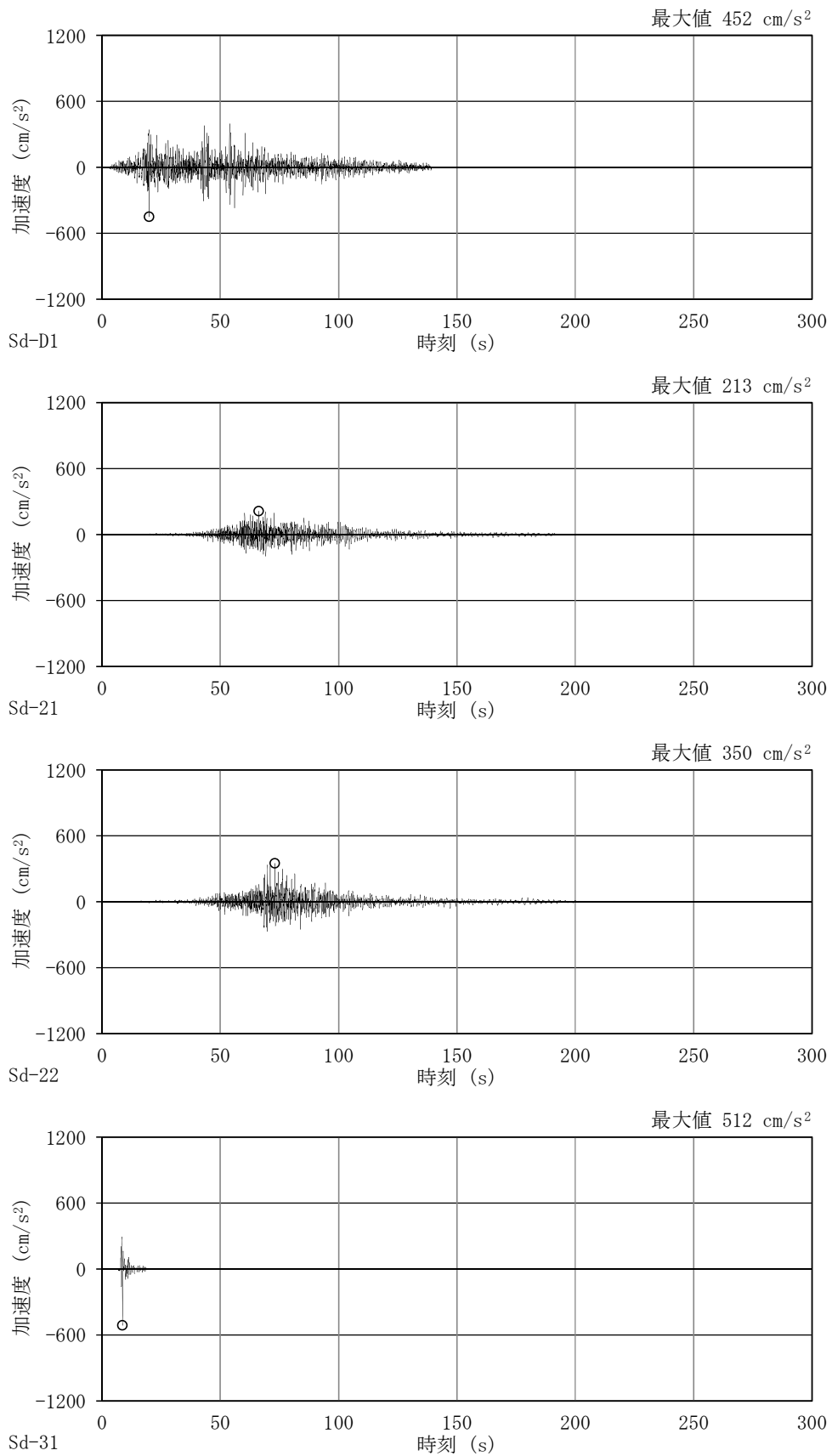


図 4-31 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

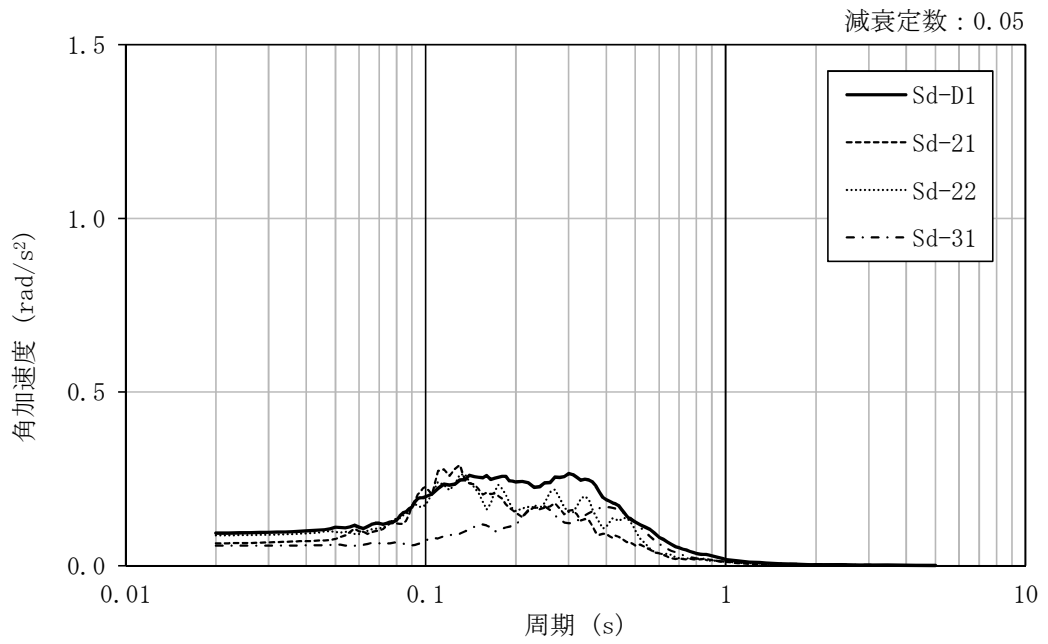


図 4-32 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

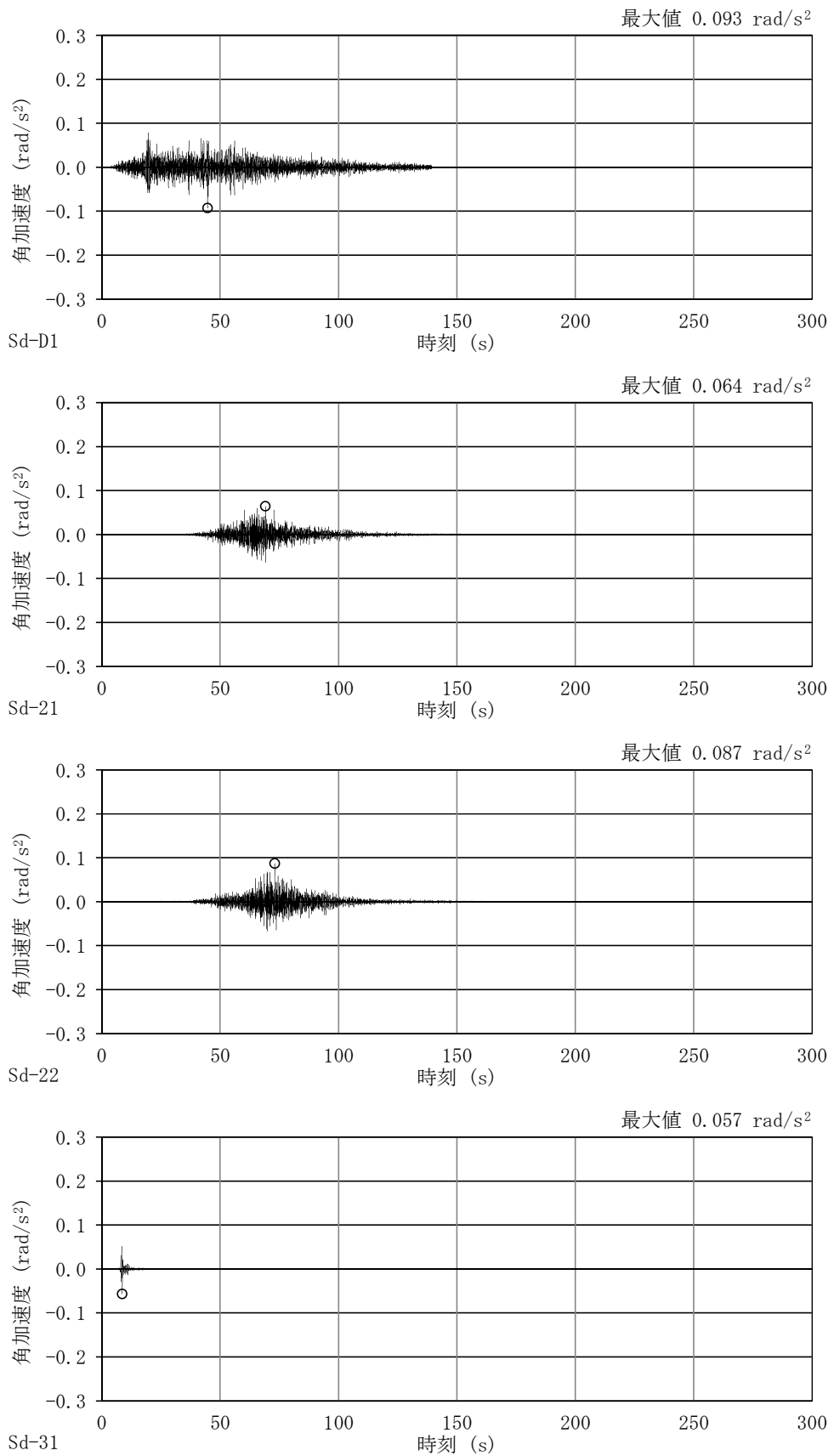


図 4-33 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

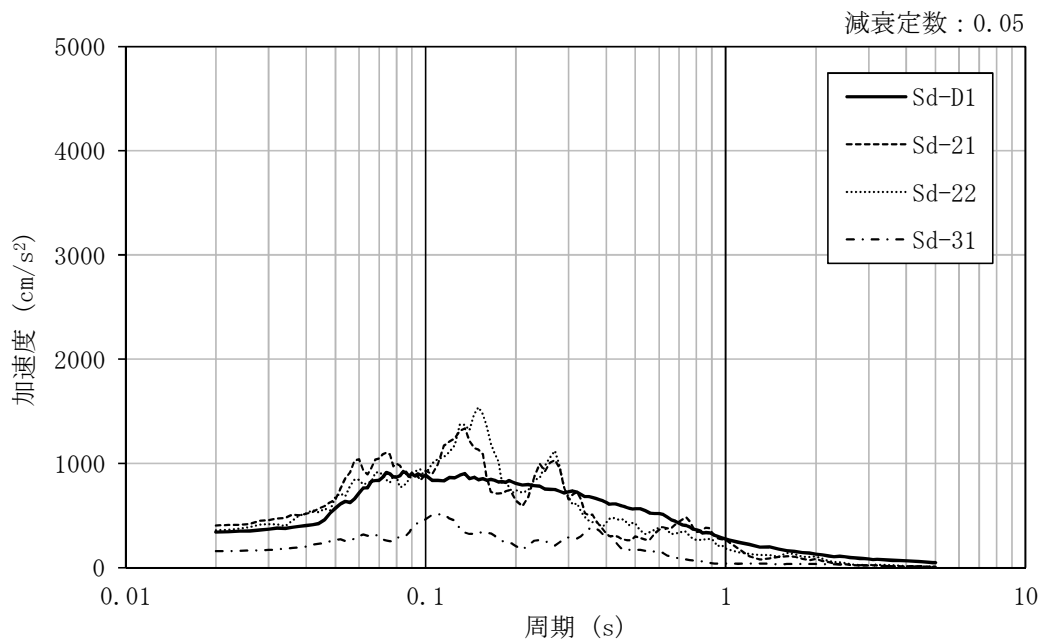


図 4-34 加速度応答スペクトル
 (弾性設計用地震動 S_d , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

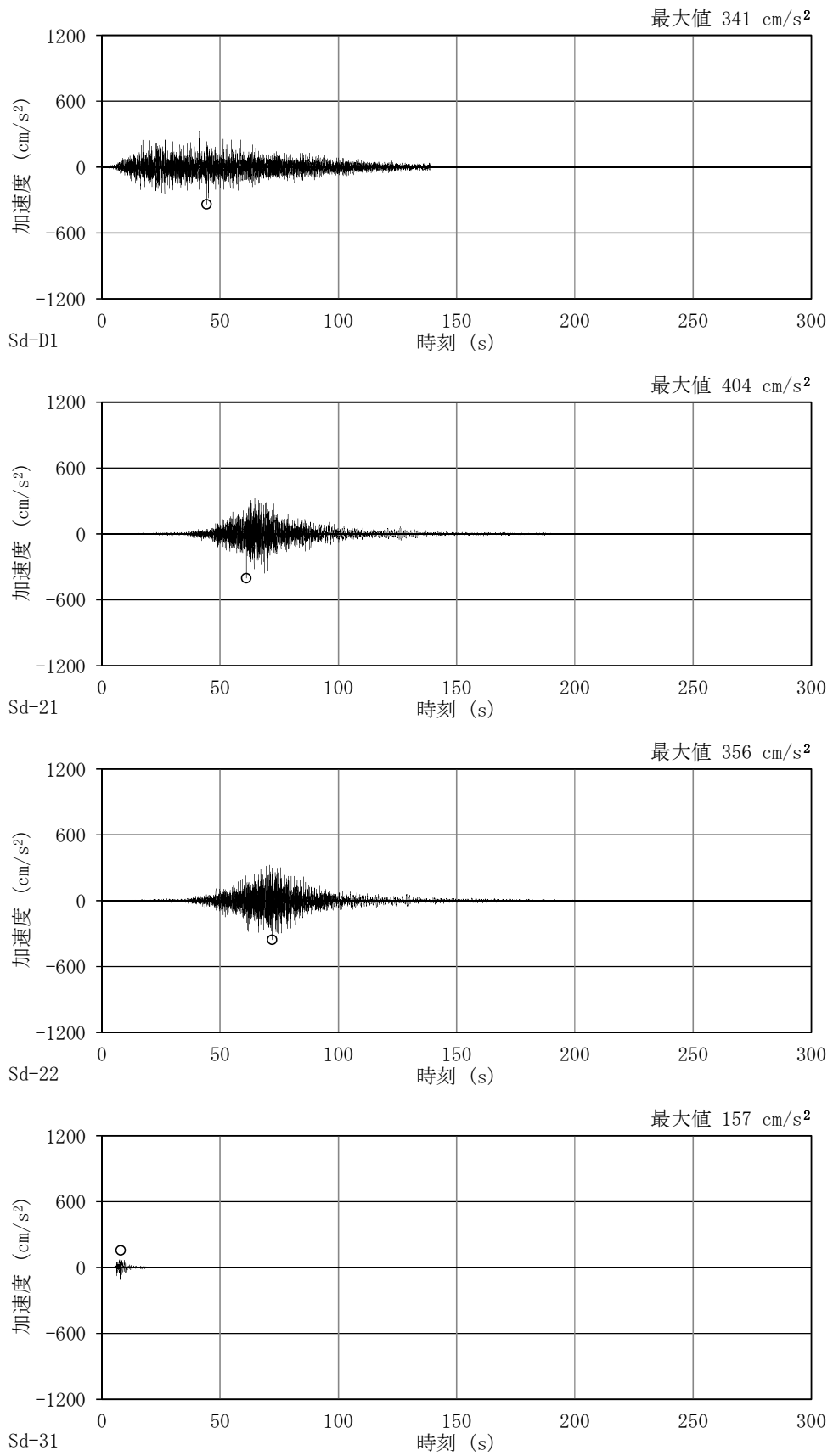


図 4-35 加速度時刻歴波形

(弾性設計用地震動 S_d , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

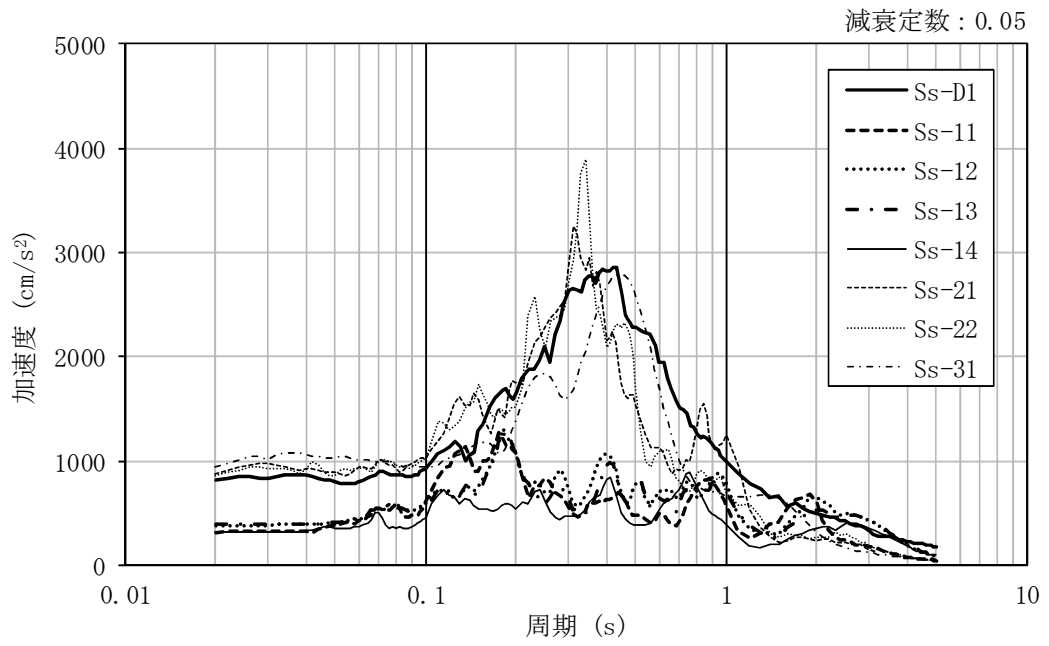


図 4-36 加速度応答スペクトル (基準地震動 S_s , NS 方向並進成分, 基本ケース)

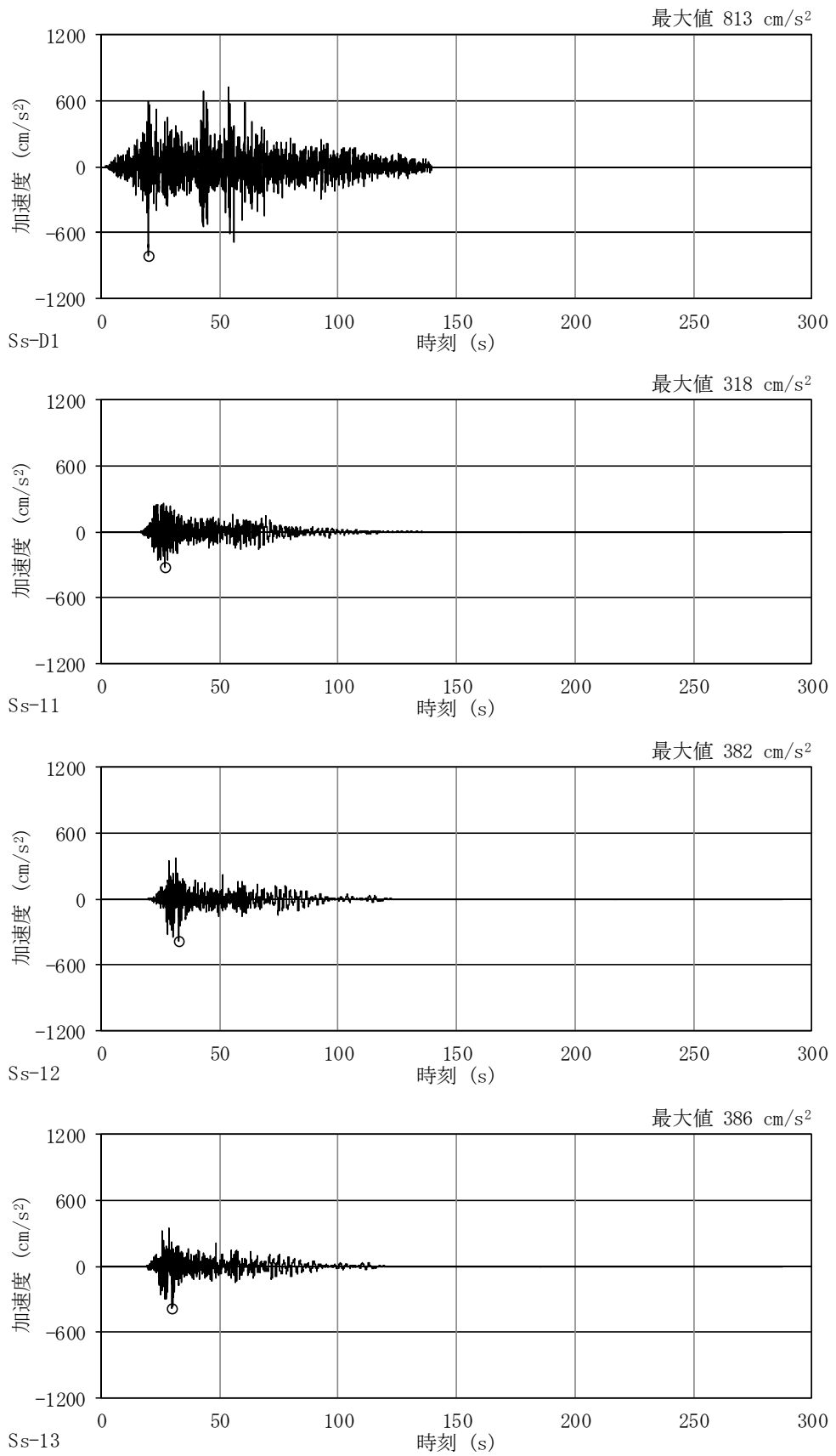


図 4-37 (1/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s, NS 方向並進成分, 基本ケース)

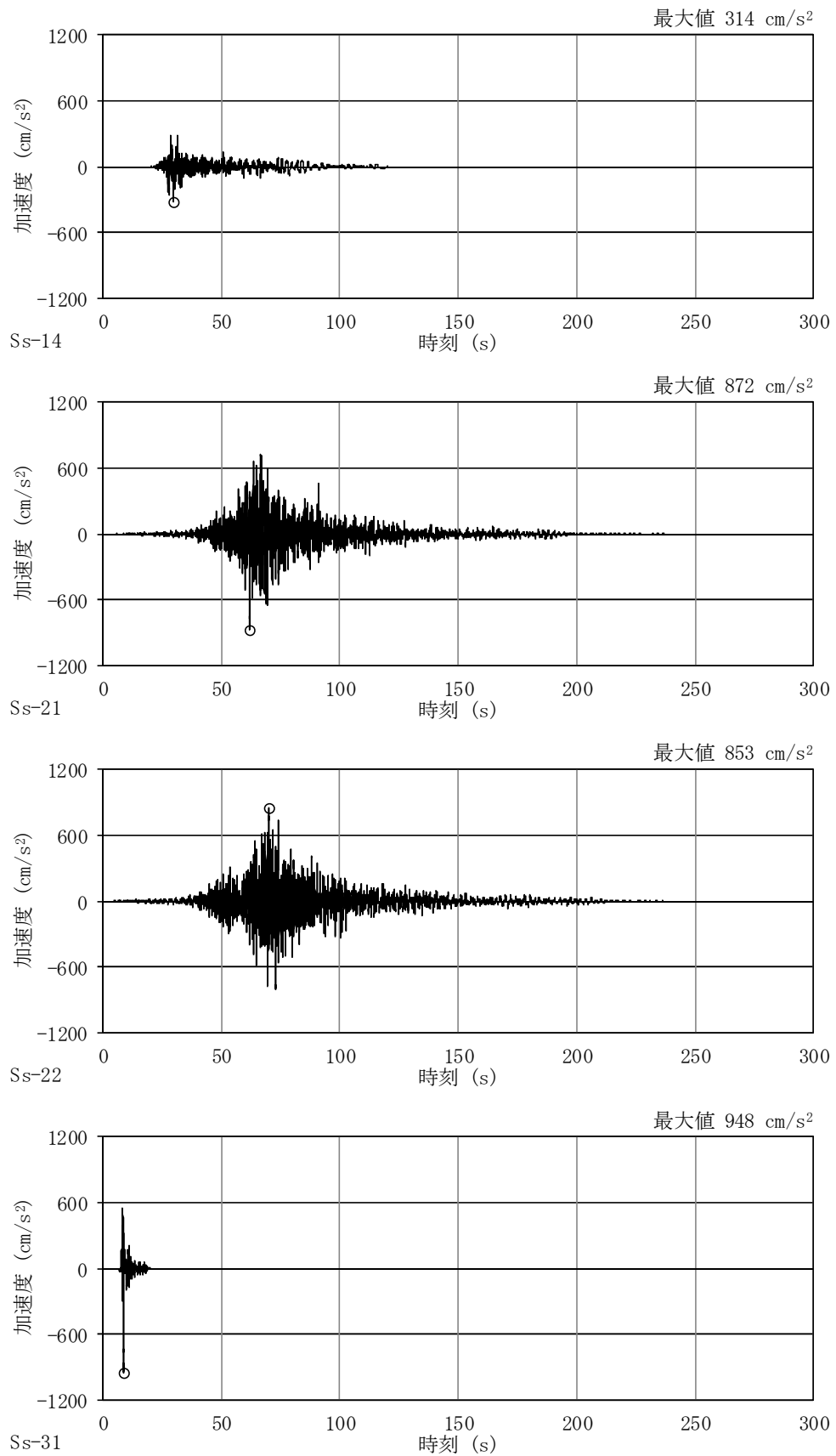


図 4-37 (2/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s, NS 方向並進成分, 基本ケース)

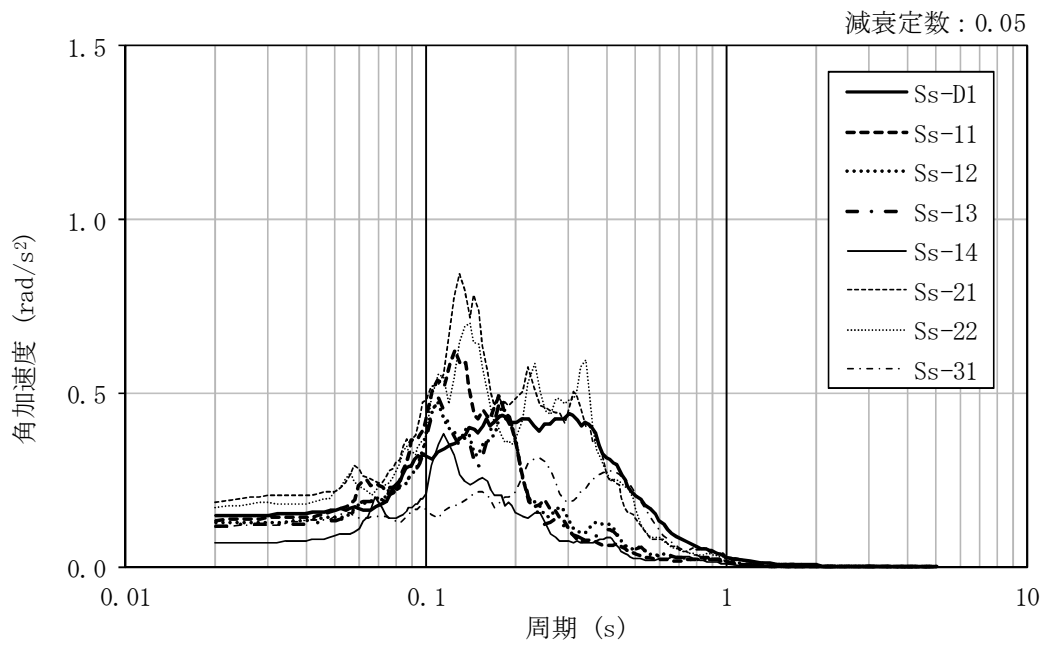


図 4-38 加速度応答スペクトル (基準地震動 S_s , NS 方向回転成分, 基本ケース)

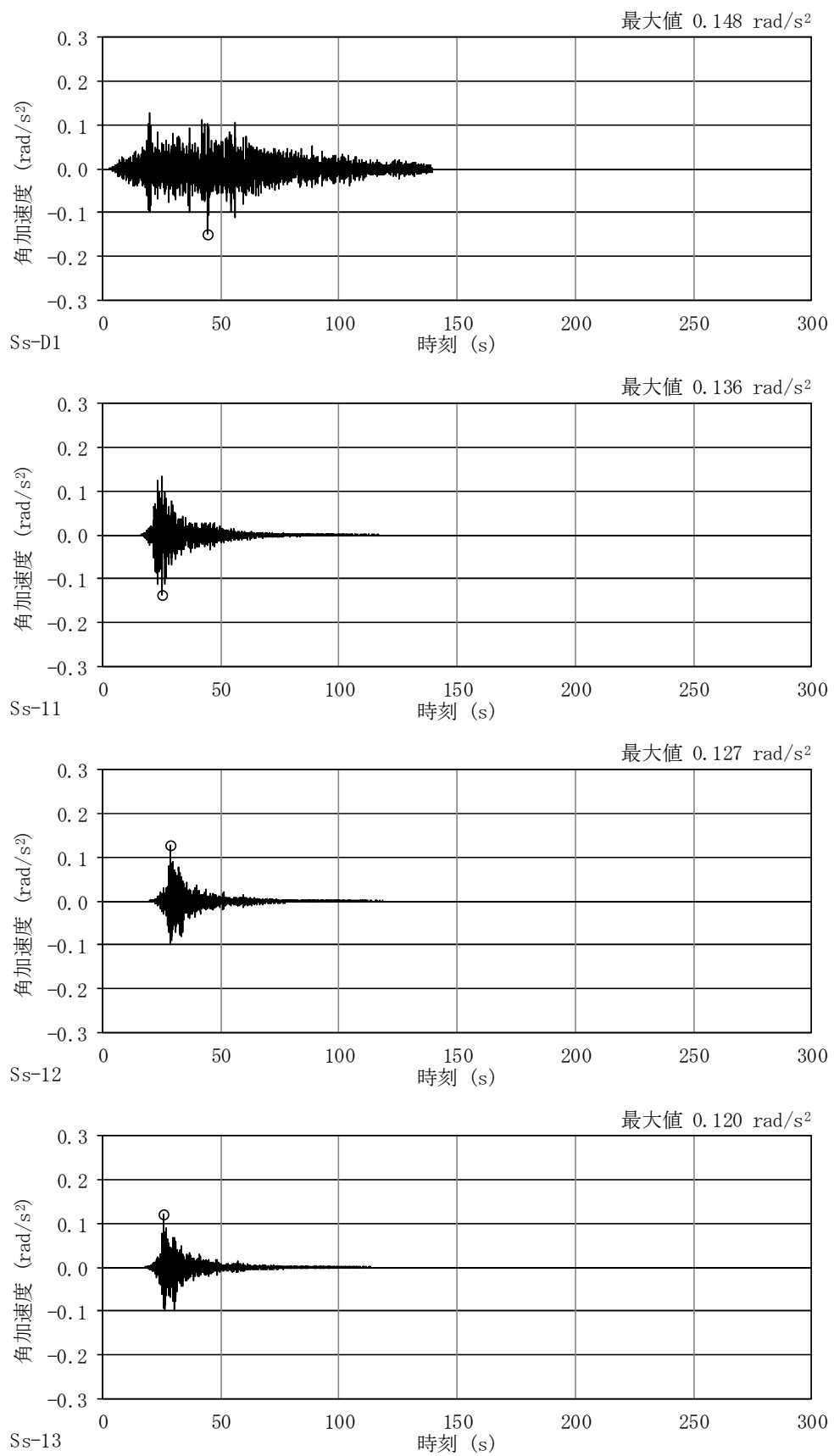


図 4-39 (1/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s, NS 方向回転成分, 基本ケース)

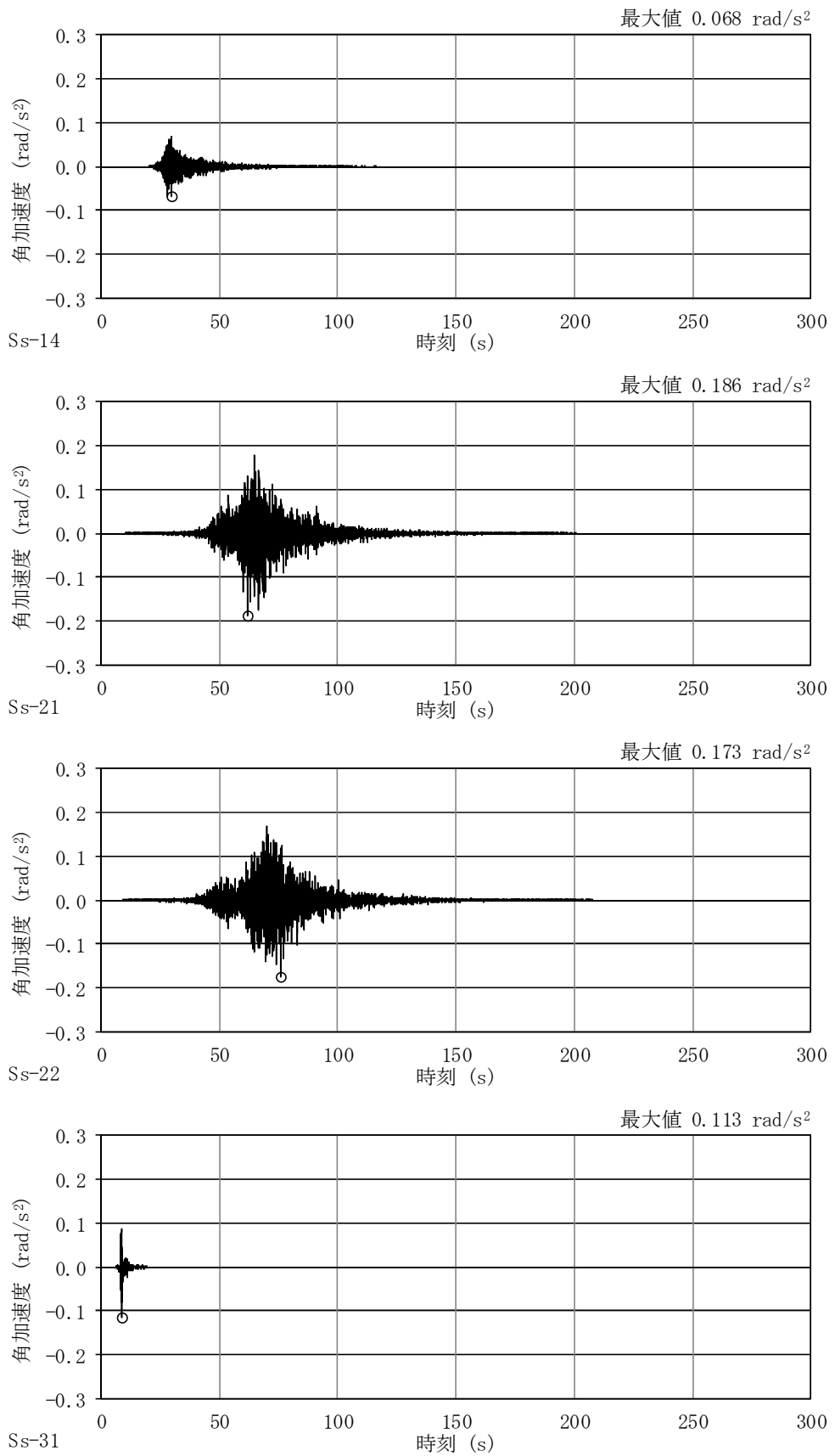


図 4-39 (2/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s , NS 方向回転成分, 基本ケース)

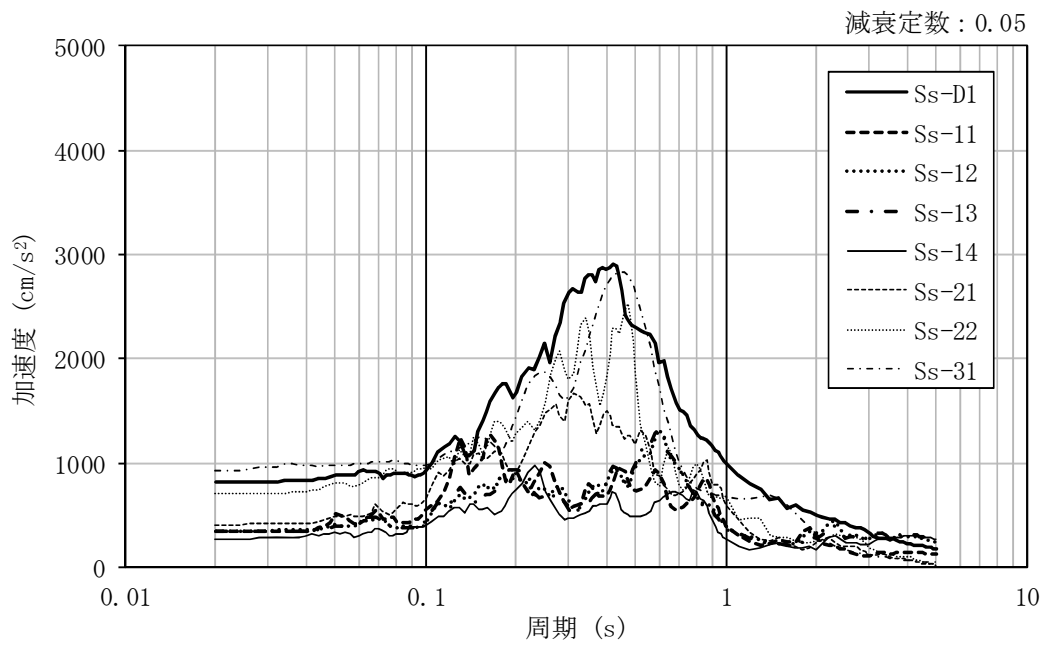


図 4-40 加速度応答スペクトル (基準地震動 S_s , EW 方向並進成分, 基本ケース)

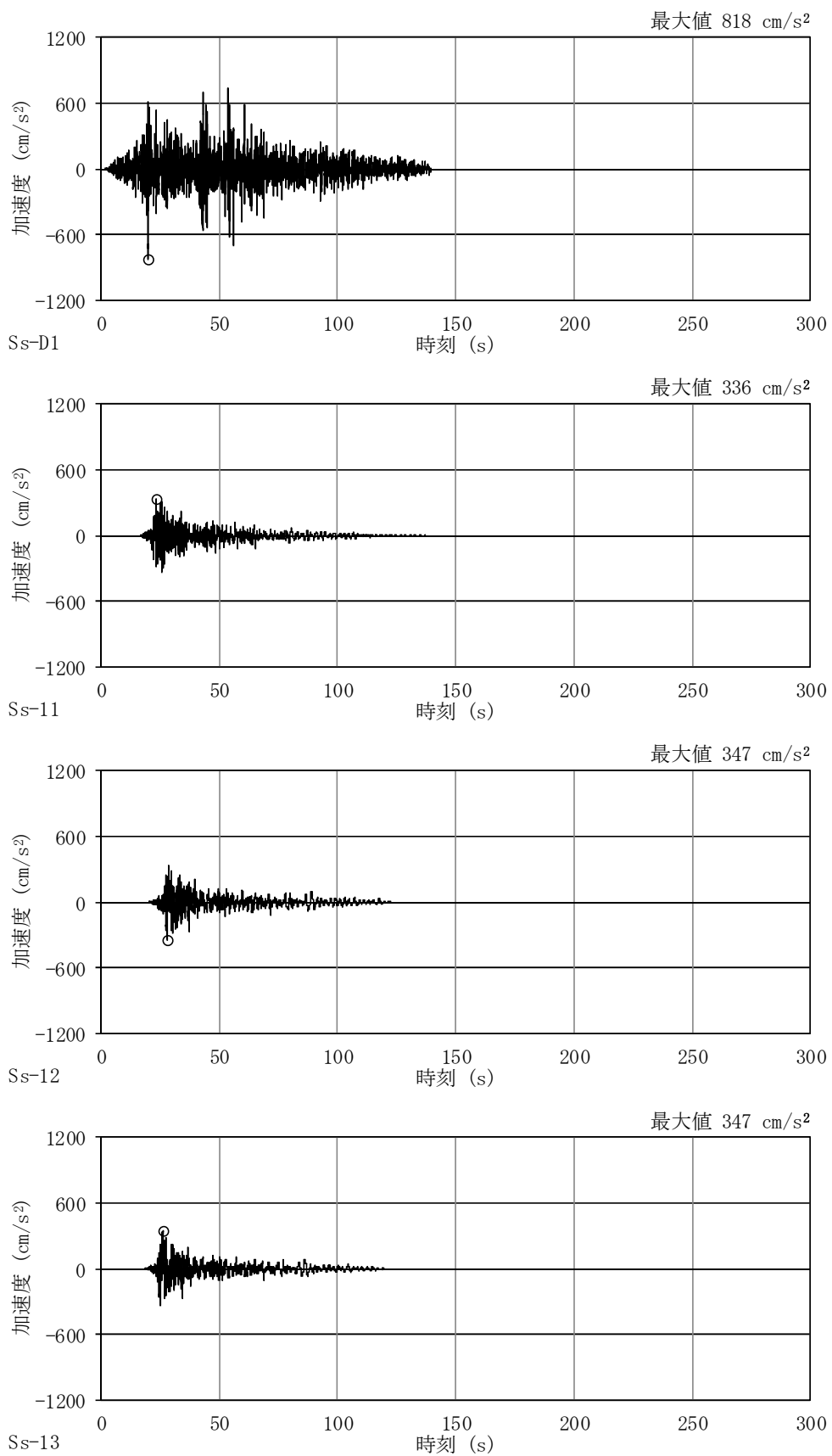


图 4-41 (1/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s , EW 方向並進成分, 基本ケース)

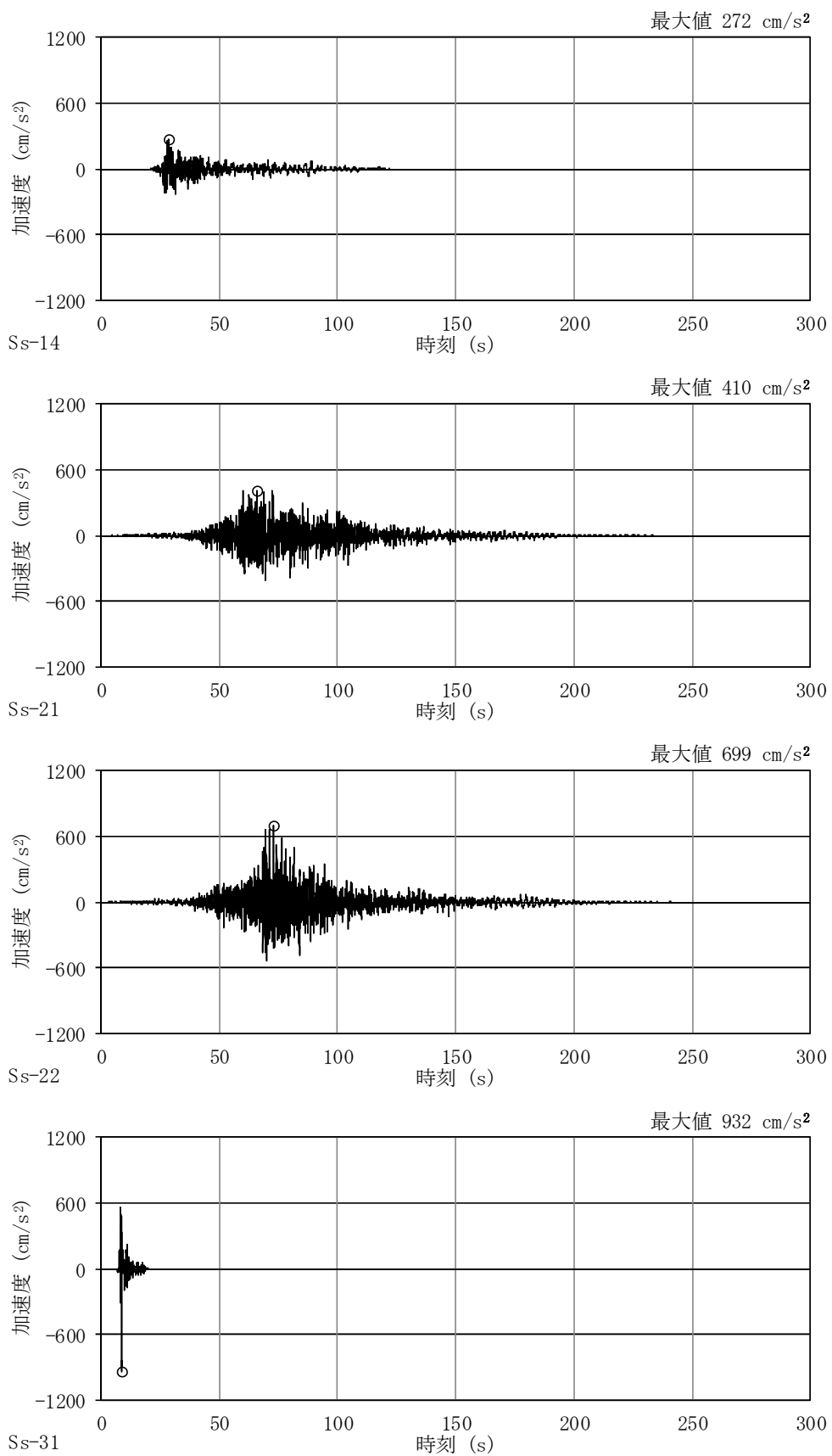


図 4-41 (2/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s, EW 方向並進成分, 基本ケース)

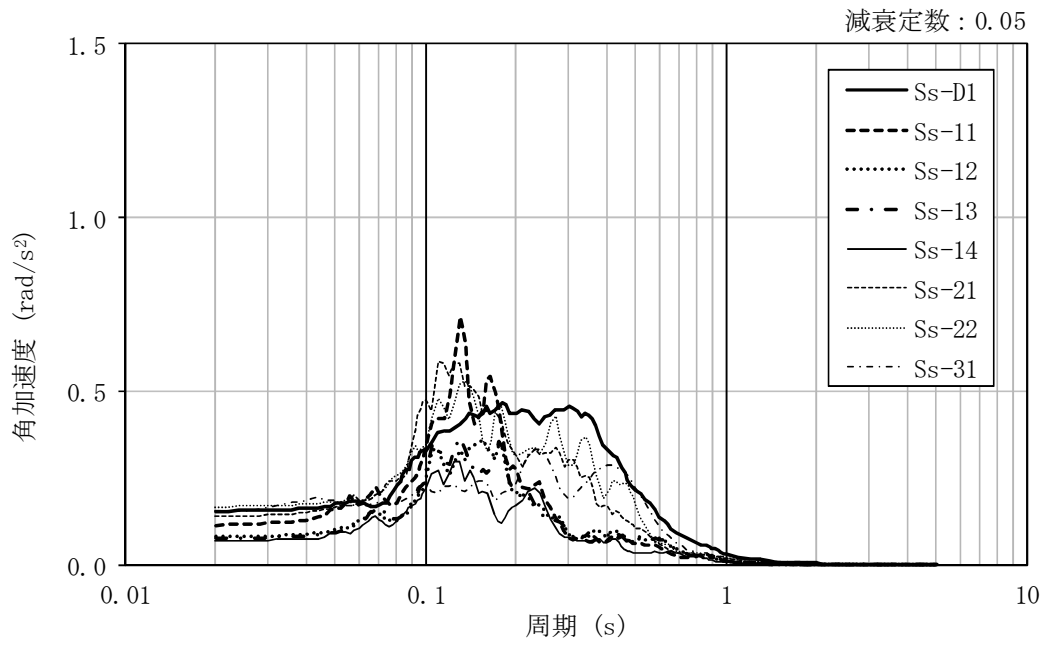


図 4-42 加速度応答スペクトル (基準地震動 S_s , EW 方向回転成分, 基本ケース)

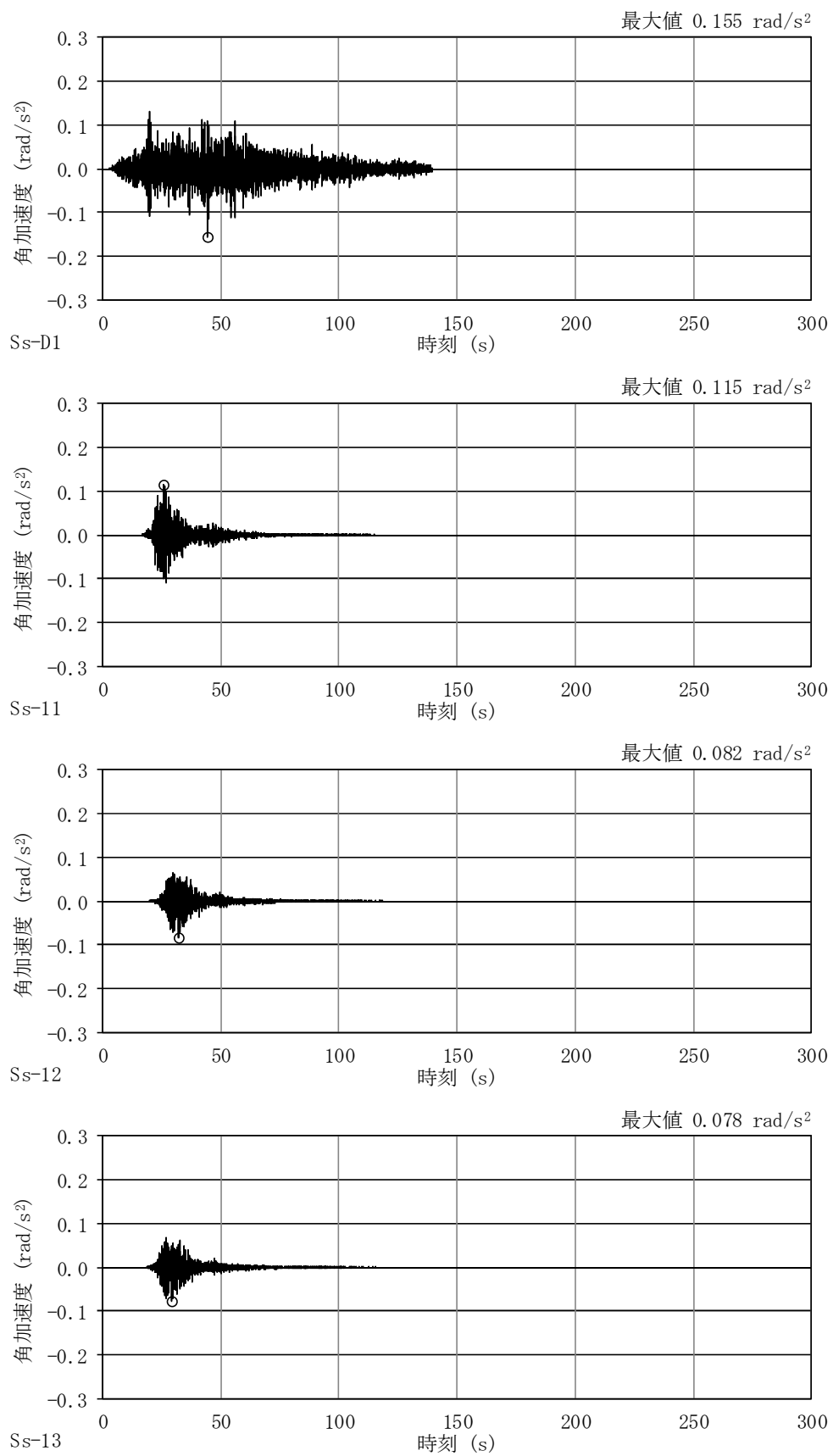


図 4-43 (1/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s, EW 方向回転成分, 基本ケース)

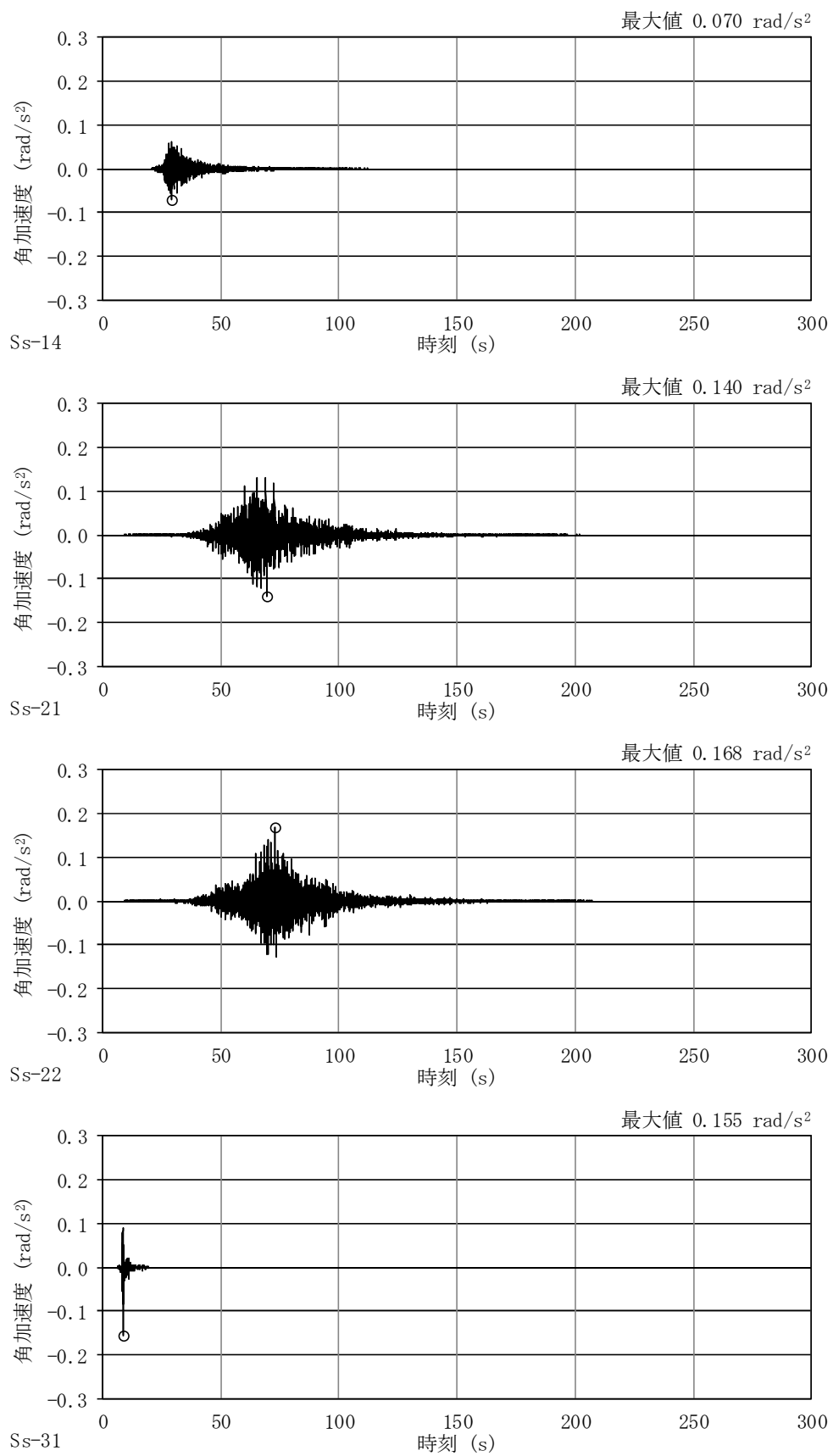


図 4-43 (2/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s , EW 方向回転成分, 基本ケース)

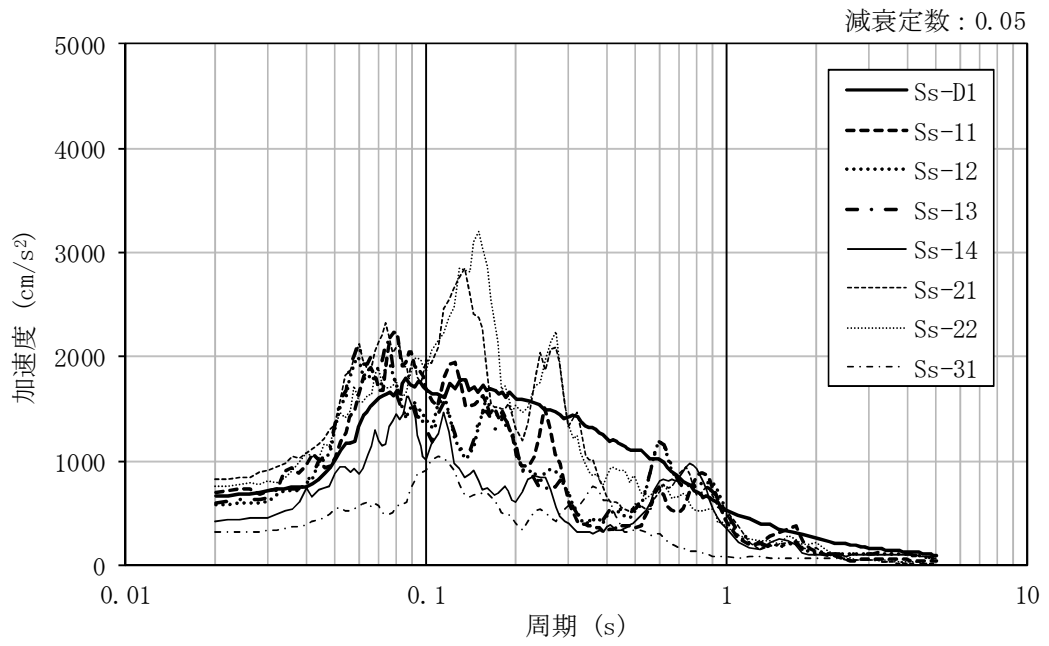


図 4-44 加速度応答スペクトル (基準地震動 S_s , UD 方向, 基本ケース)

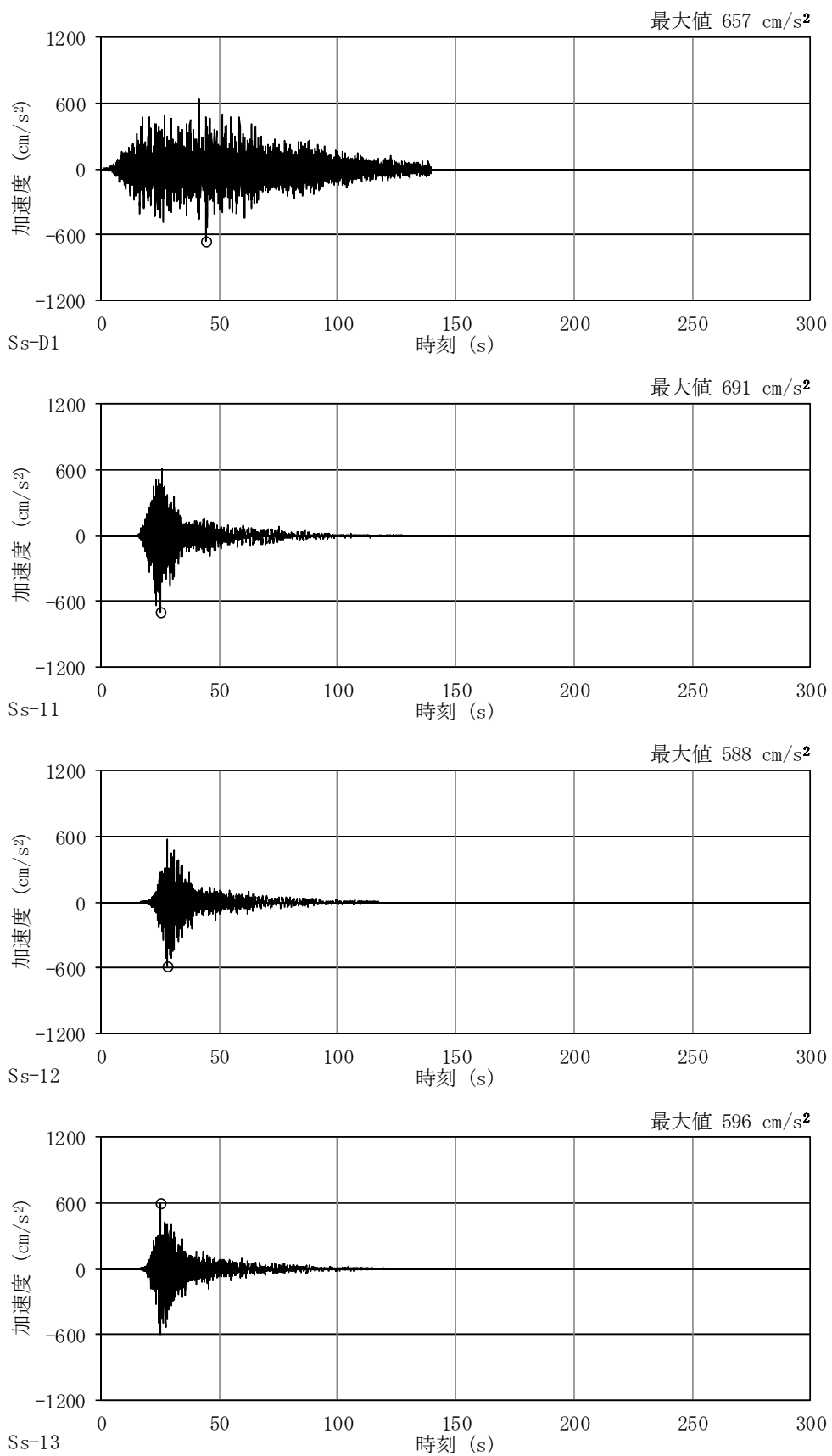


図 4-45 (1/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s , UD 方向, 基本ケース)

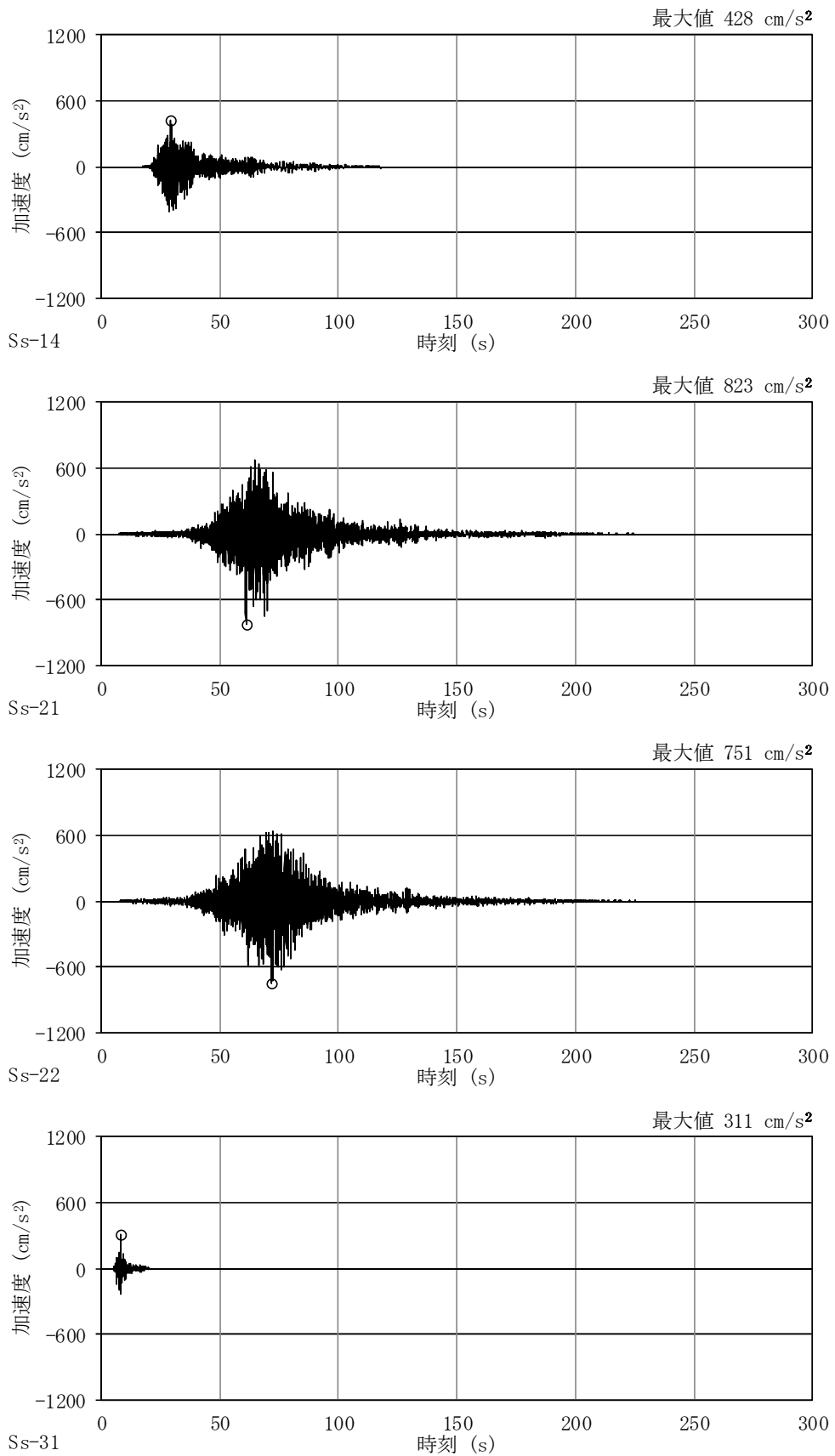


図 4-45 (2/2) 加速度時刻歴波形 (基準地震動 S_s, UD 方向, 基本ケース)

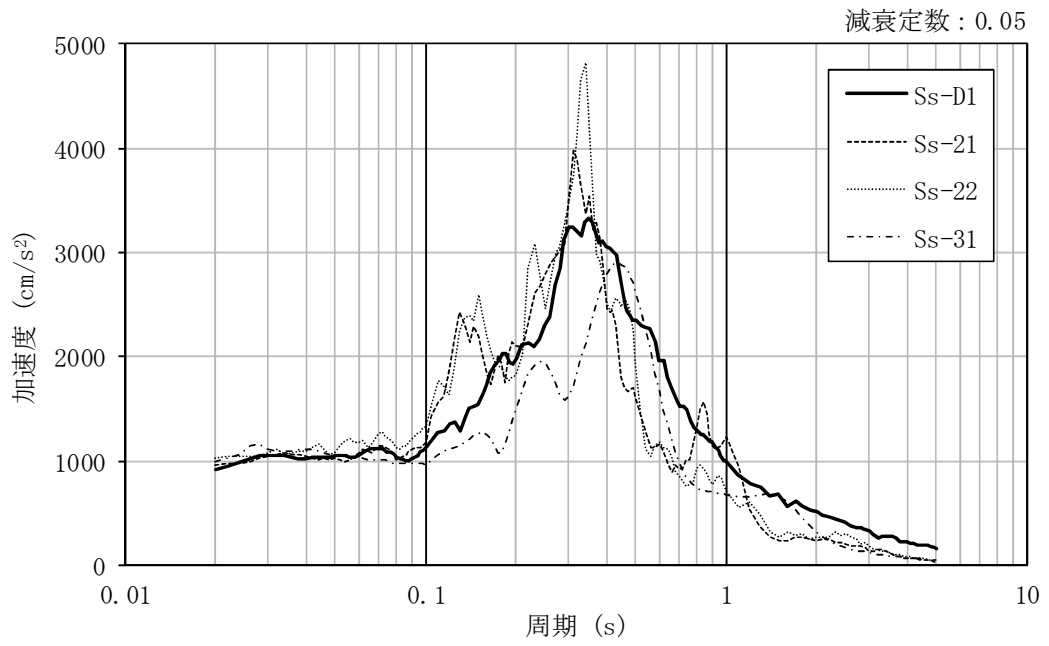


図 4-46 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

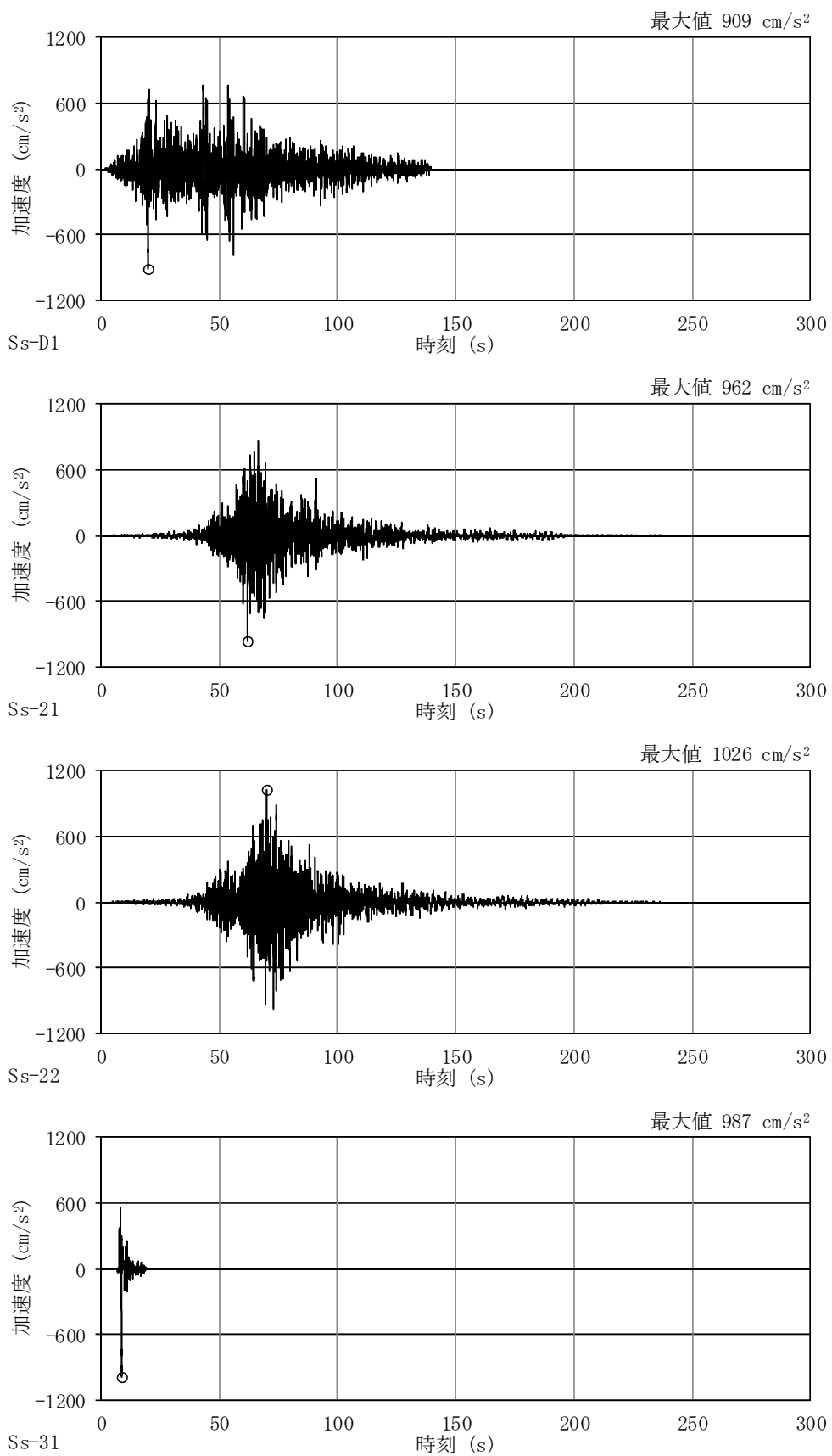


図 4-47 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

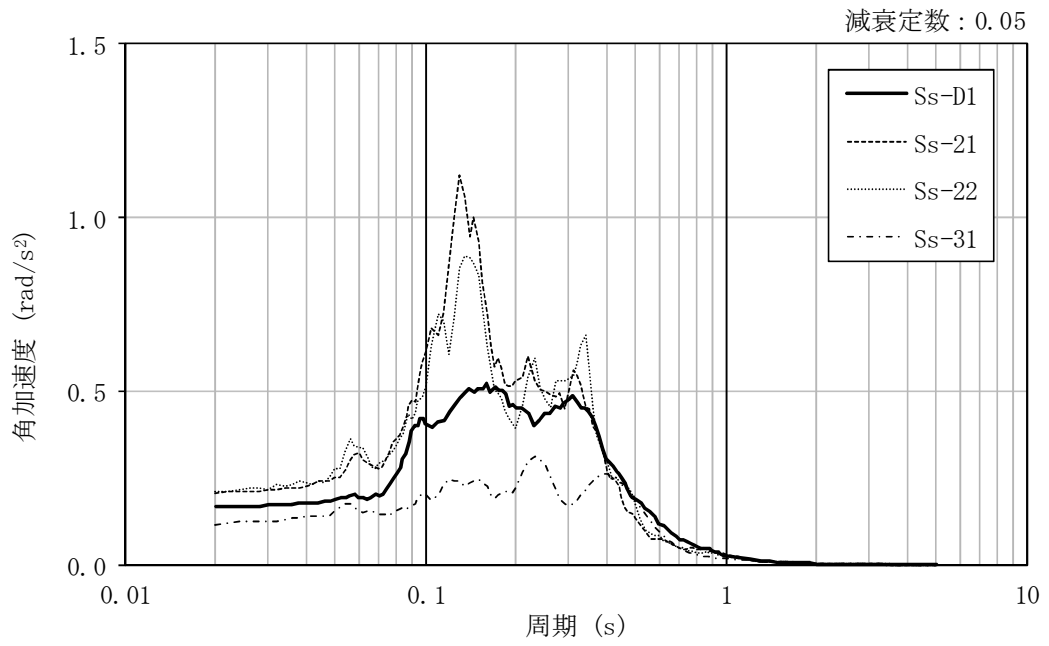


図 4-48 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

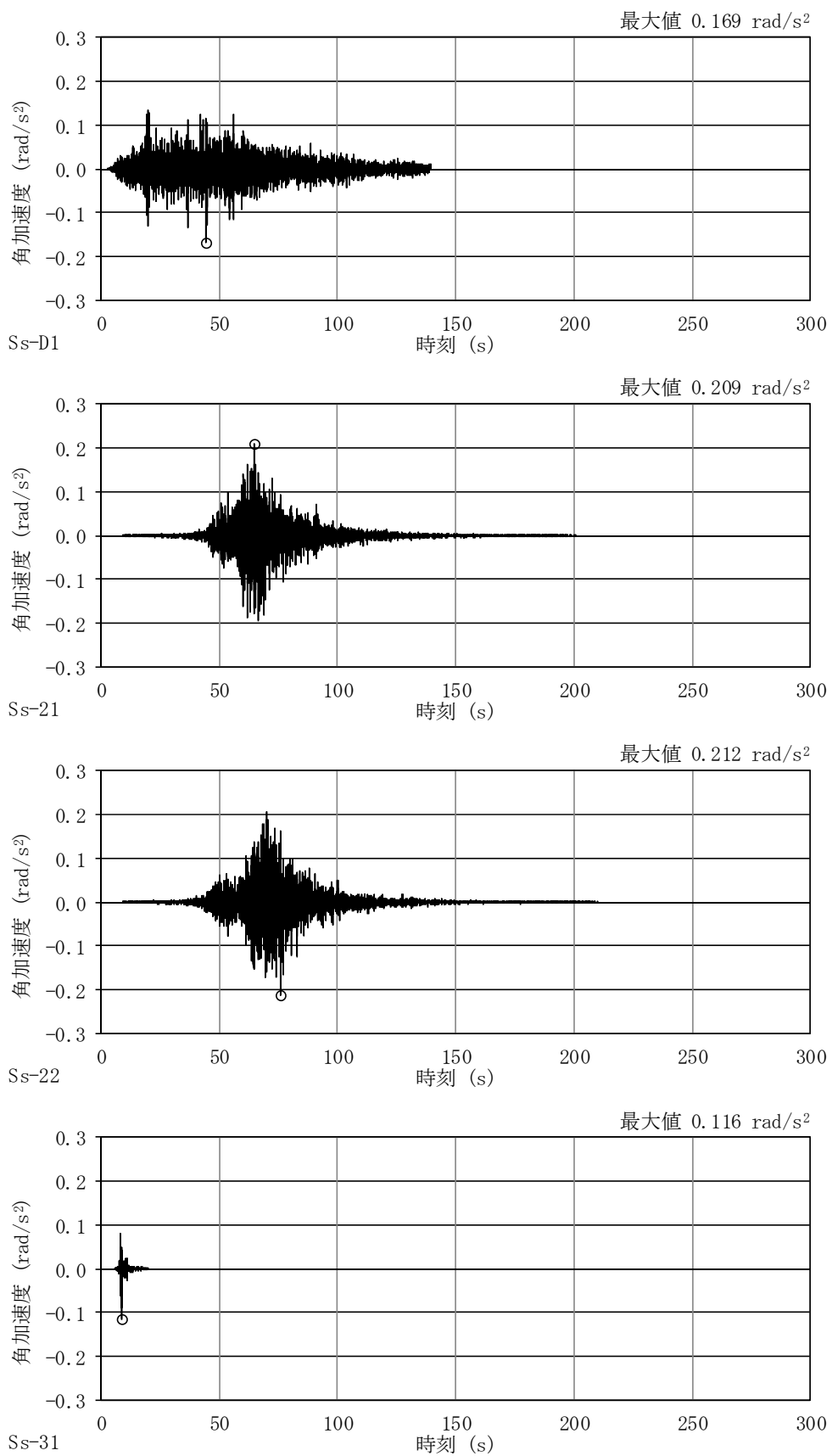


図 4-49 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s, NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+σ))

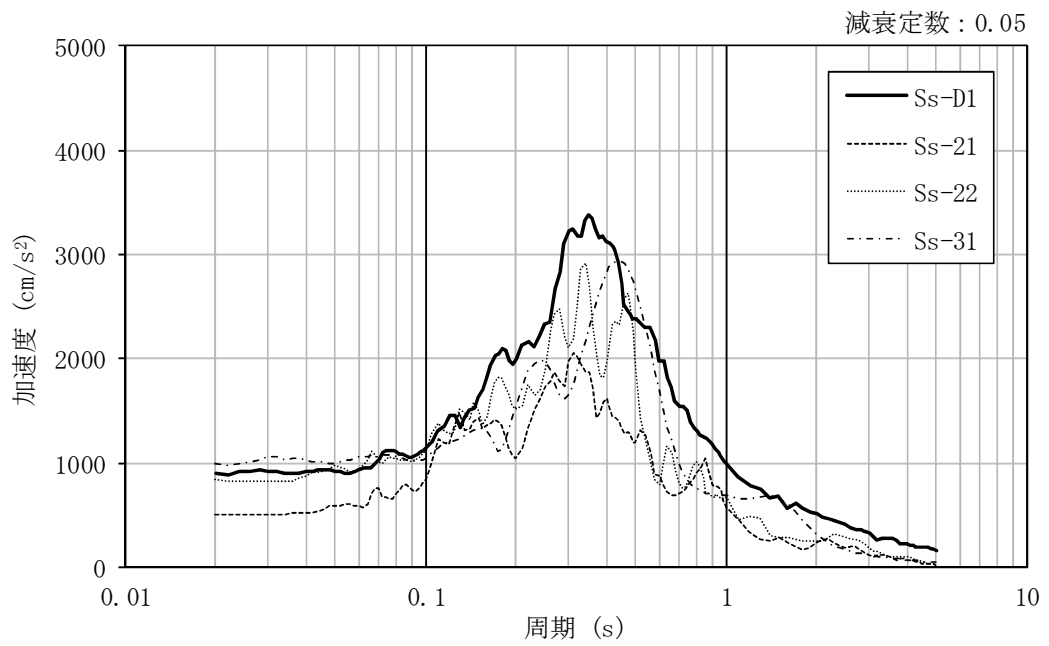


図 4-50 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

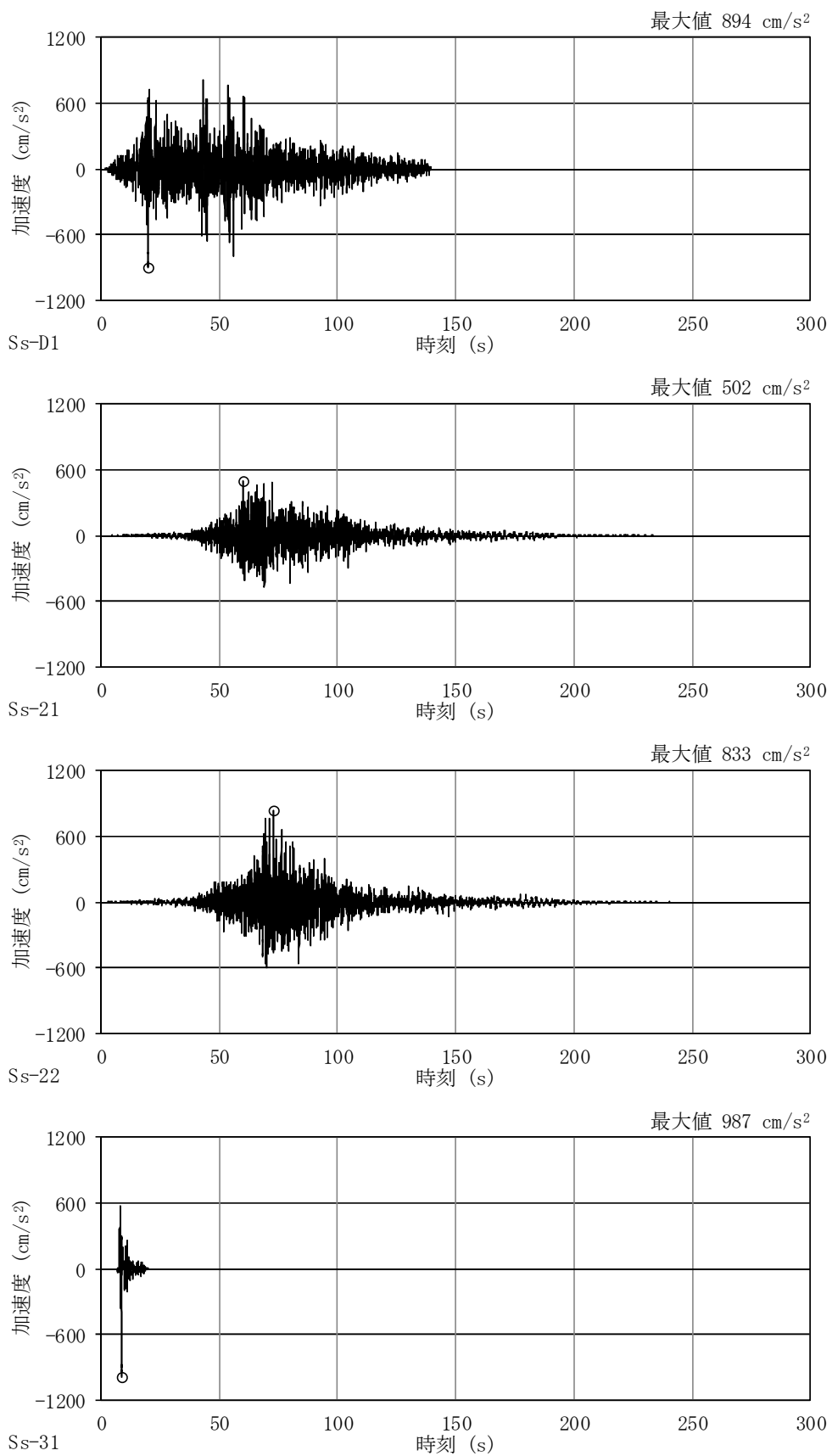


図 4-51 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

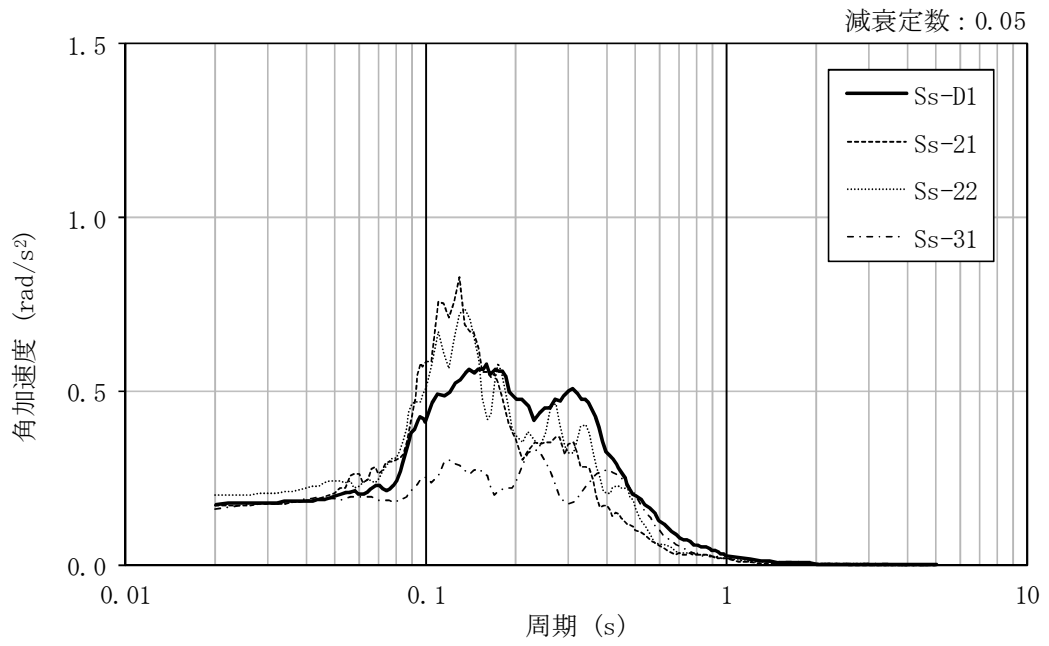


図 4-52 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

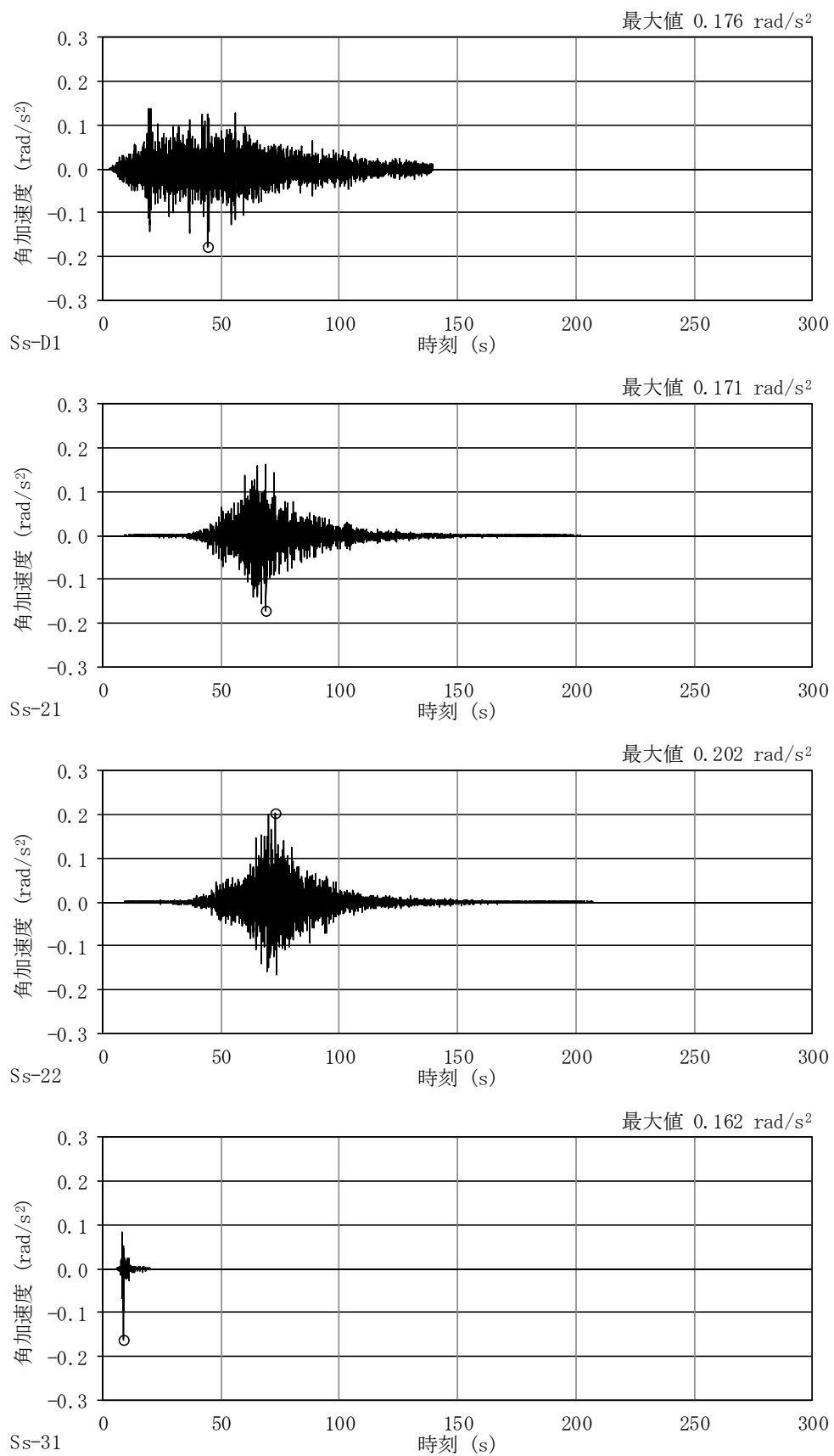


図 4-53 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

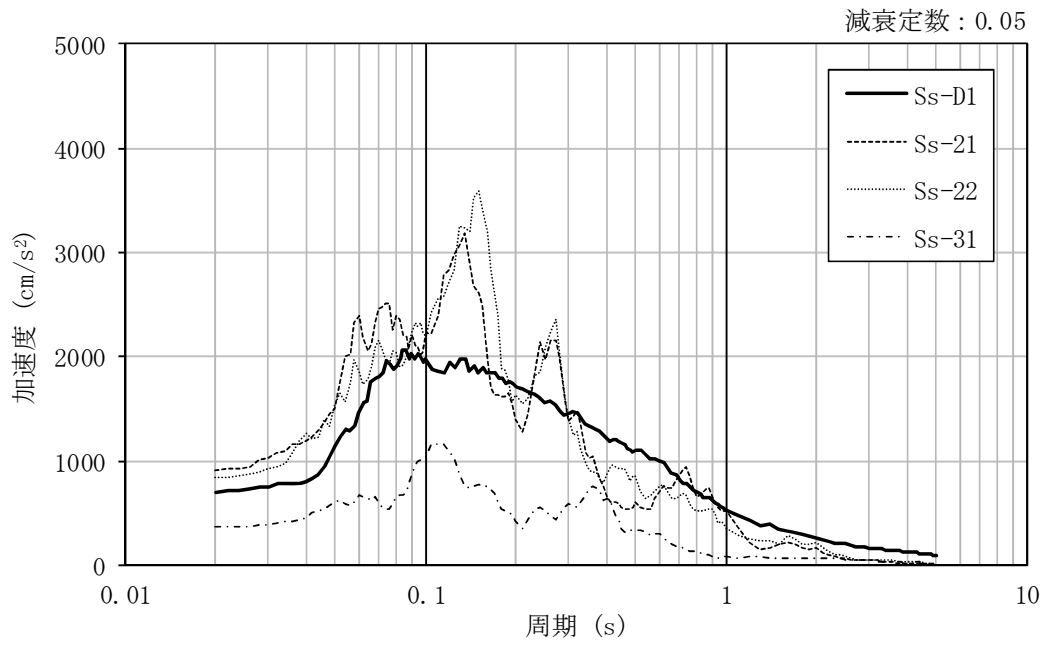


図 4-54 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 (+ σ))

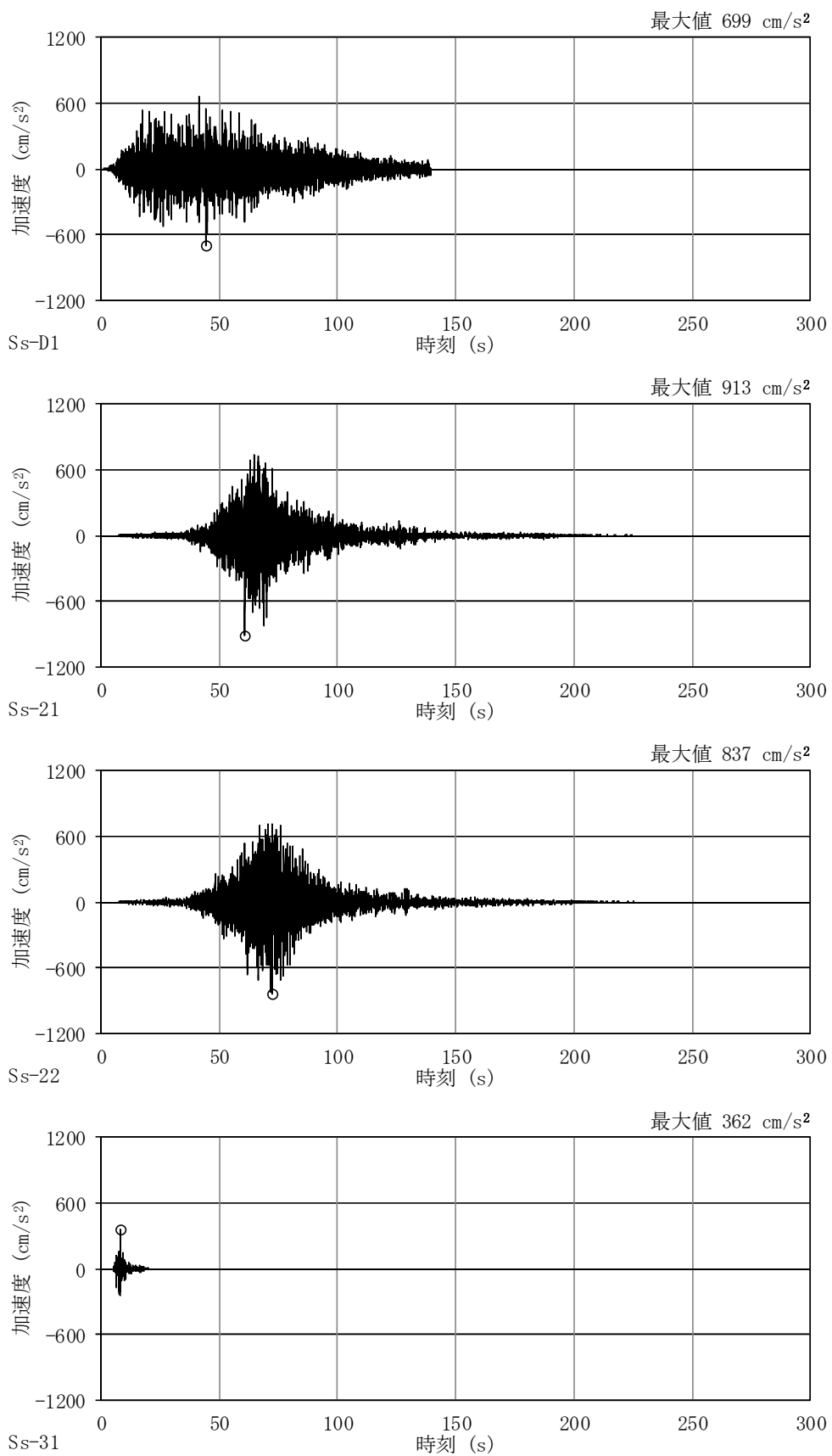


図 4-55 加速度時刻歴波形
 (基準地震動 S_s, UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 (+σ))

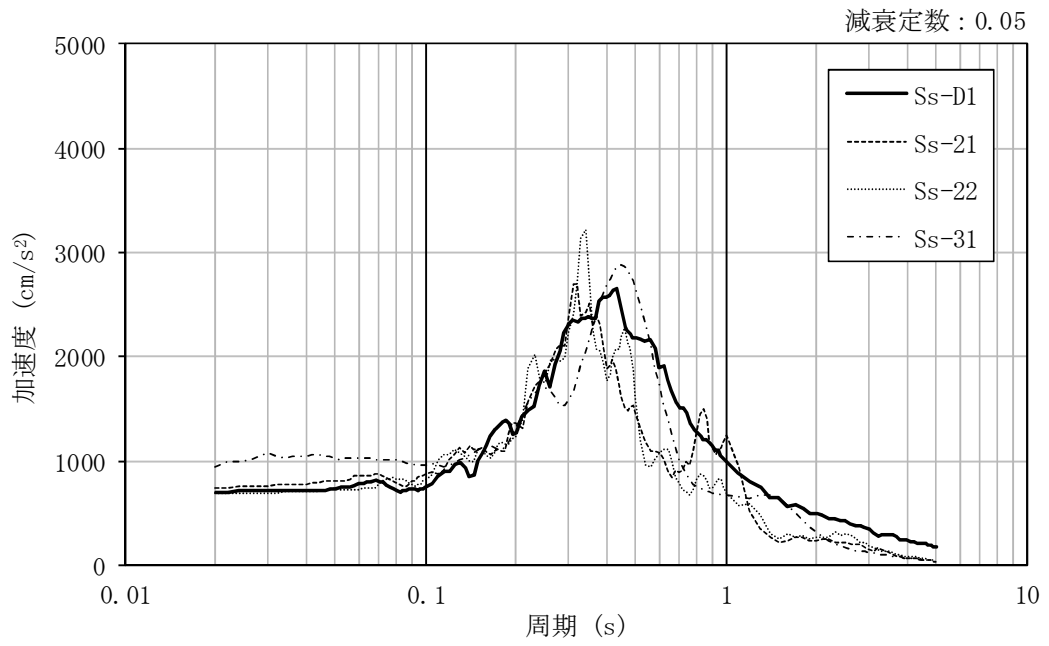


図 4-56 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

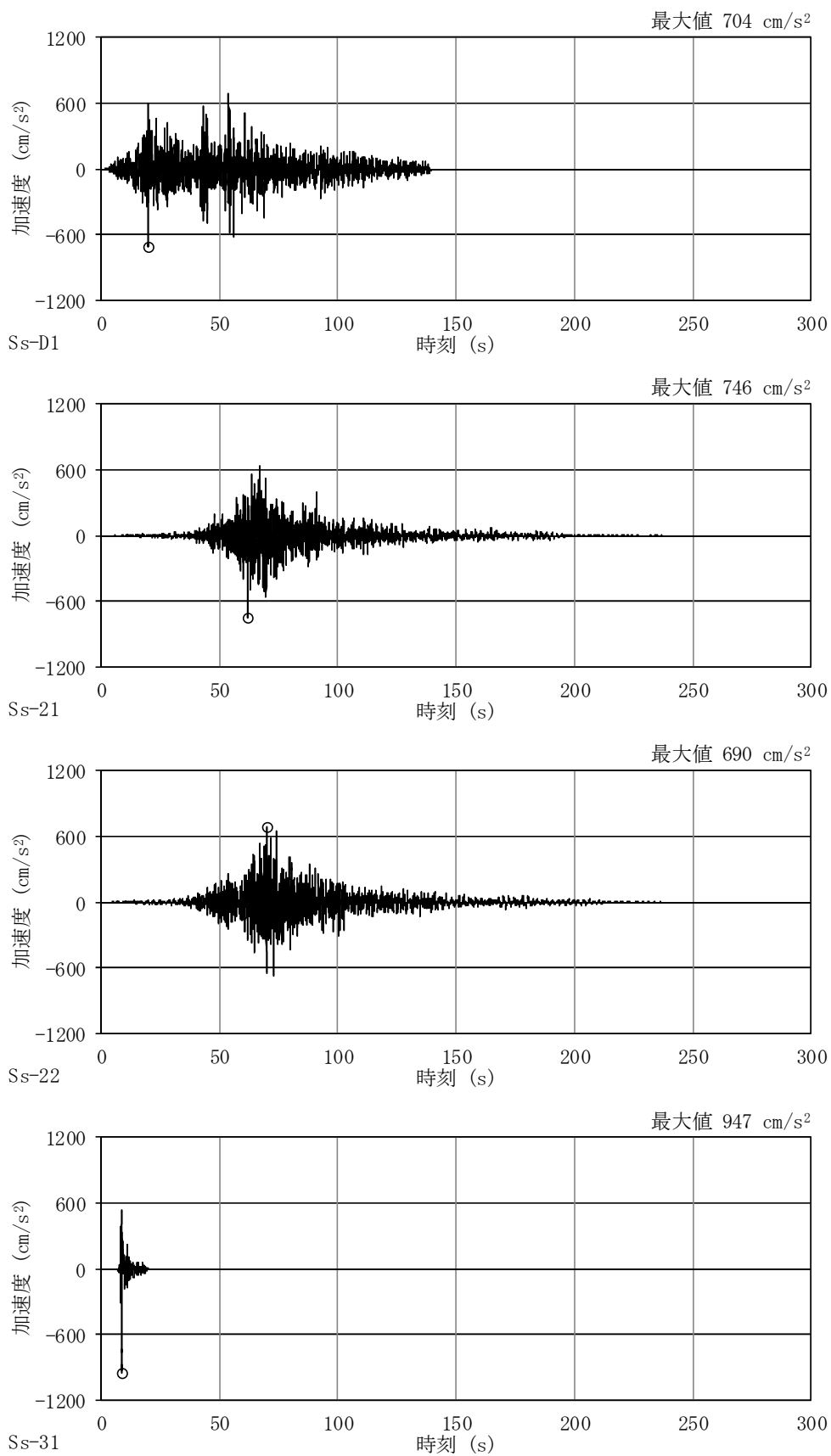


図 4-57 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s , NS 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

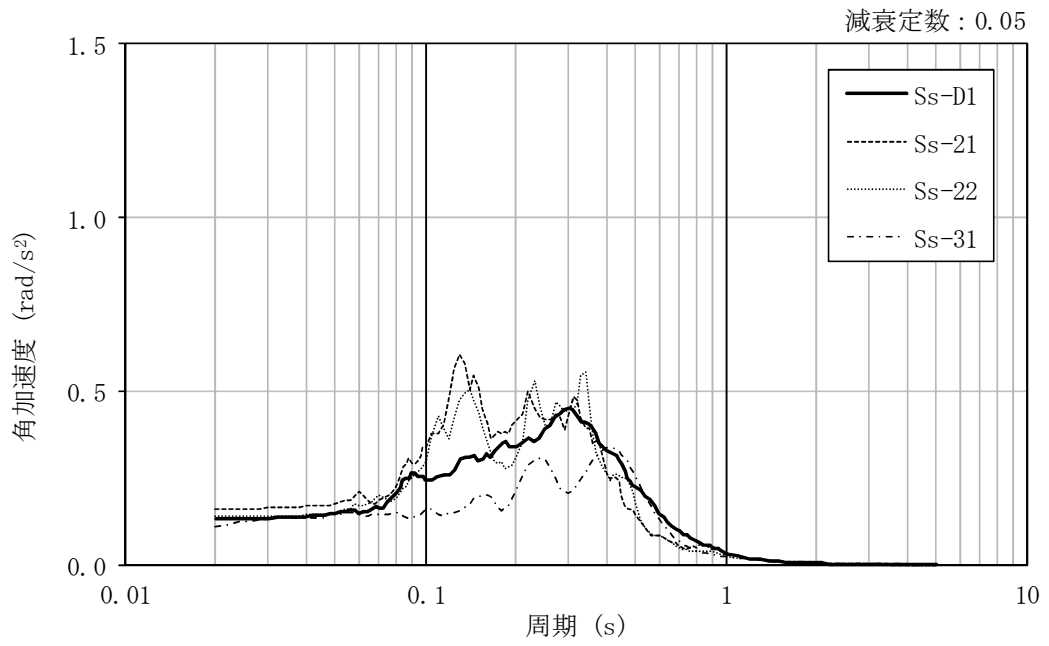


図 4-58 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

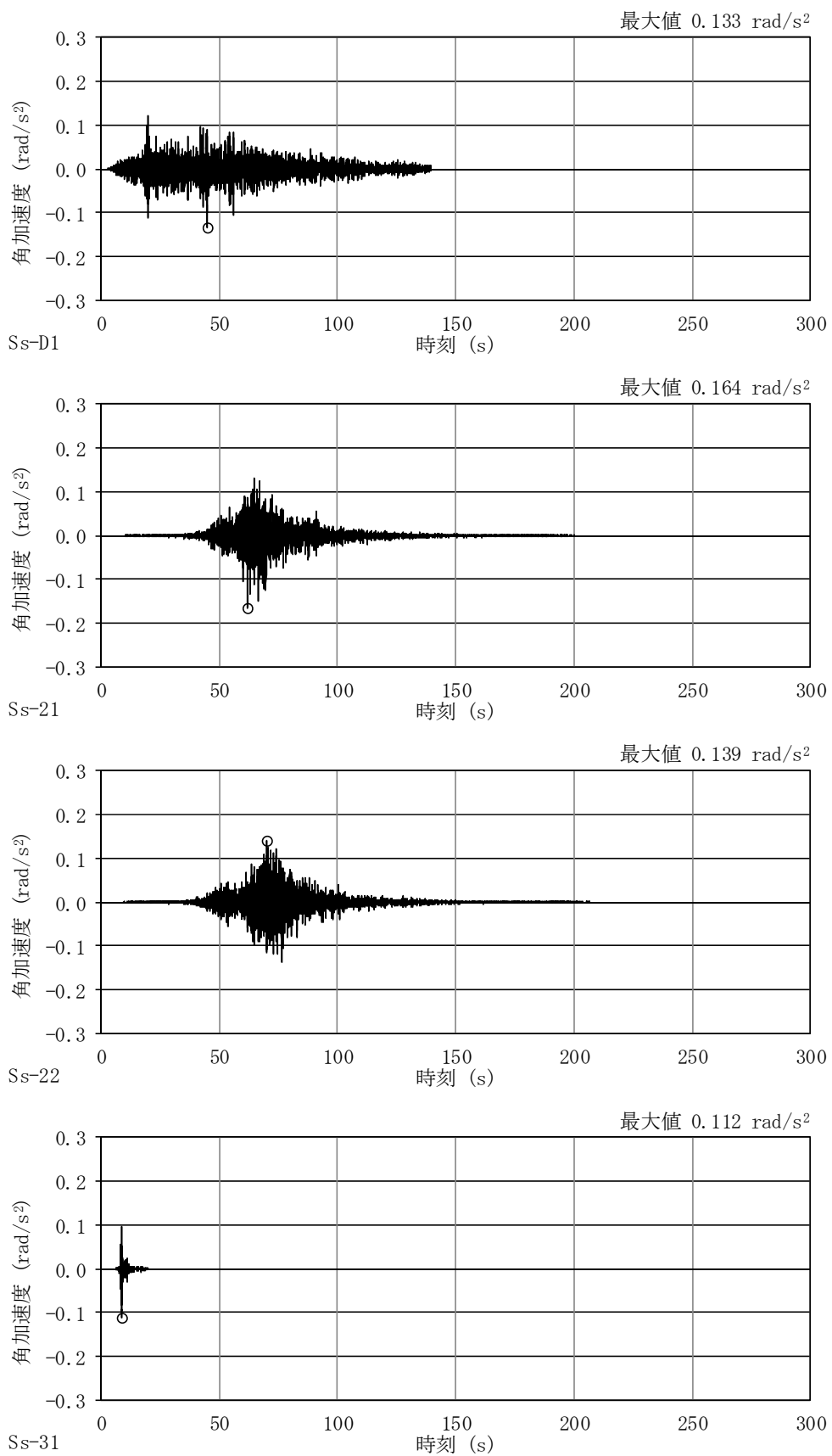


図 4-59 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s, NS 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (-σ))

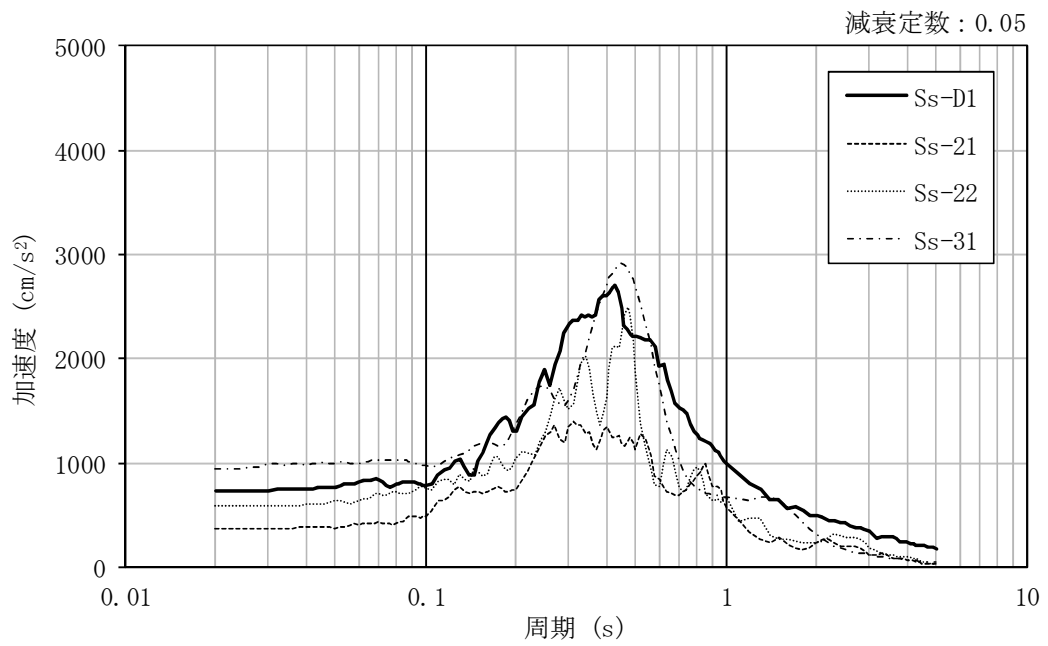


図 4-60 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

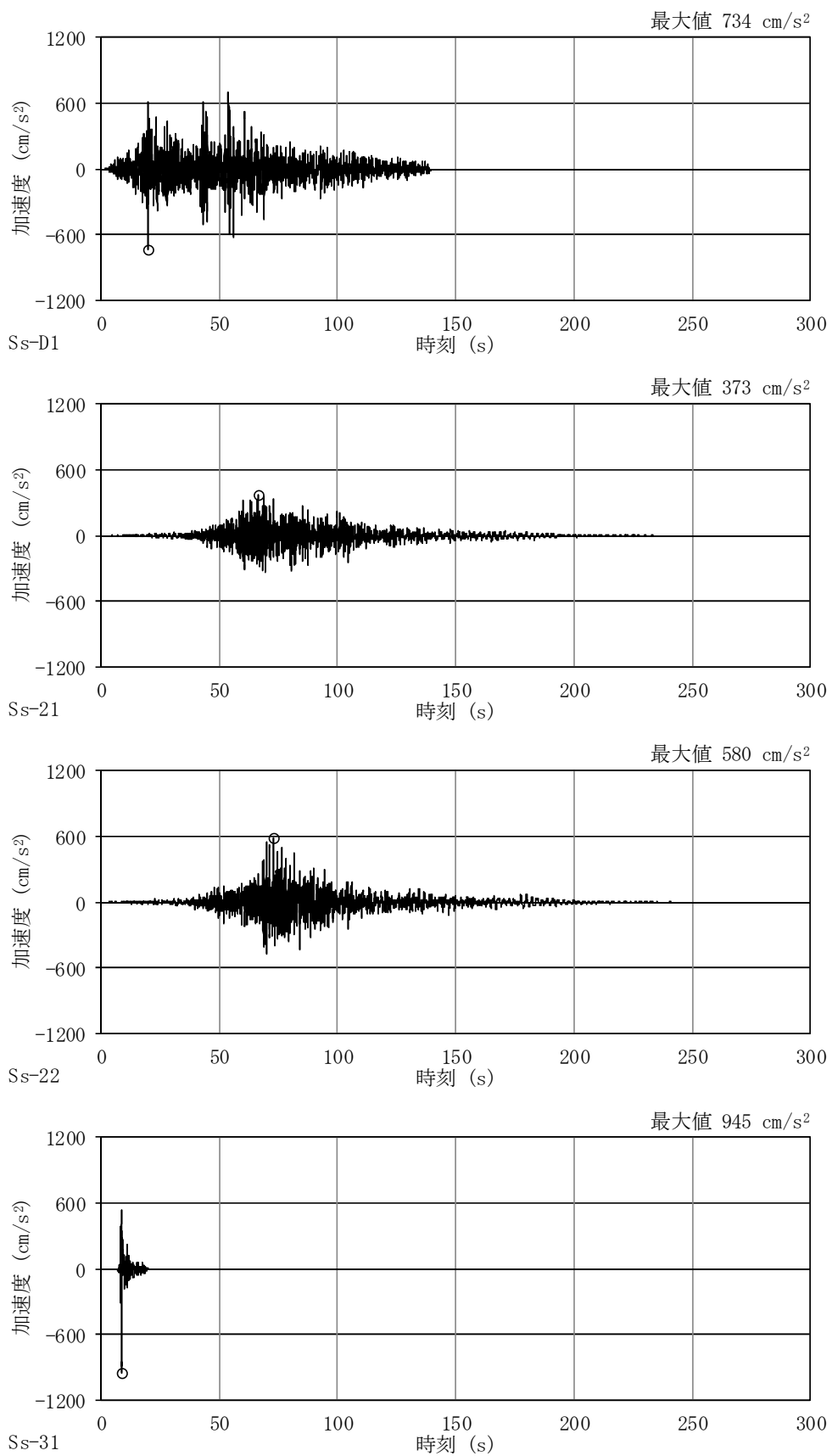


図 4-61 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s , EW 方向並進成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (- σ))

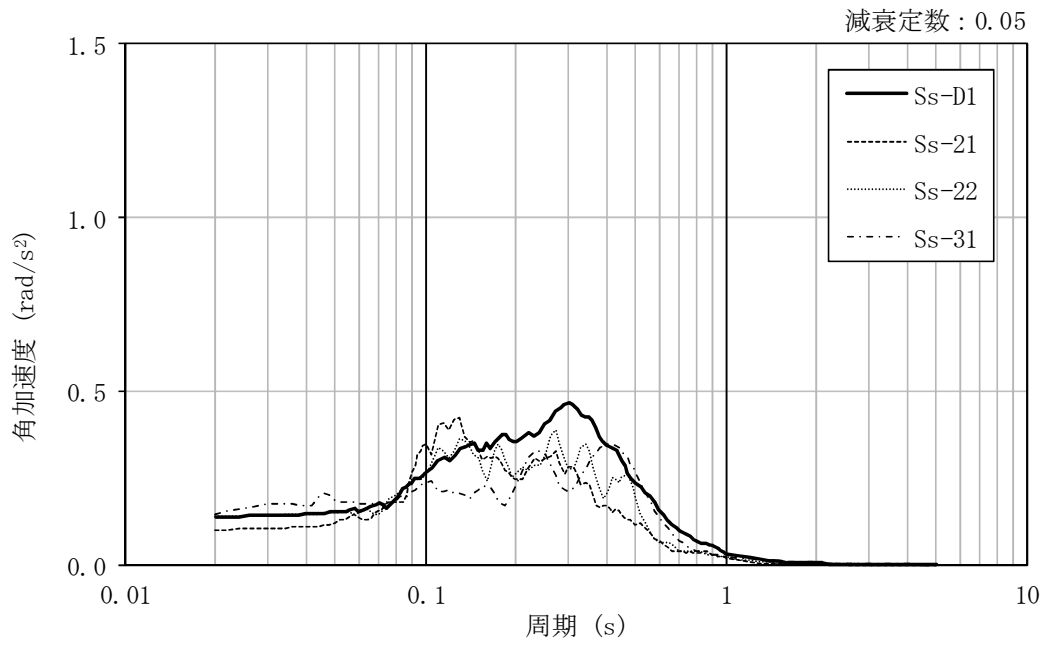


図 4-62 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

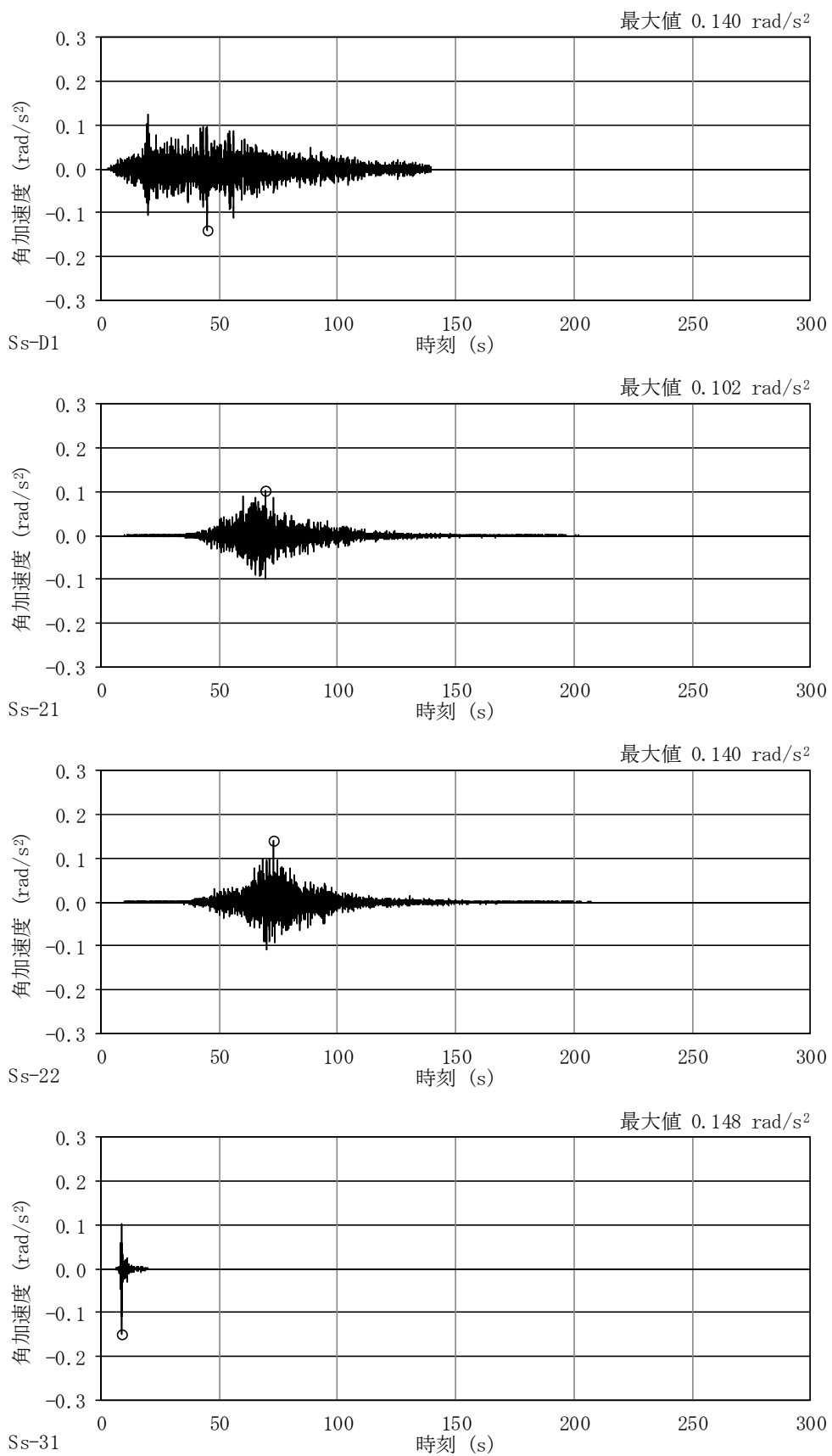


図 4-63 加速度時刻歴波形

(基準地震動 S_s, EW 方向回転成分, 地盤物性のばらつきを考慮 (-σ))

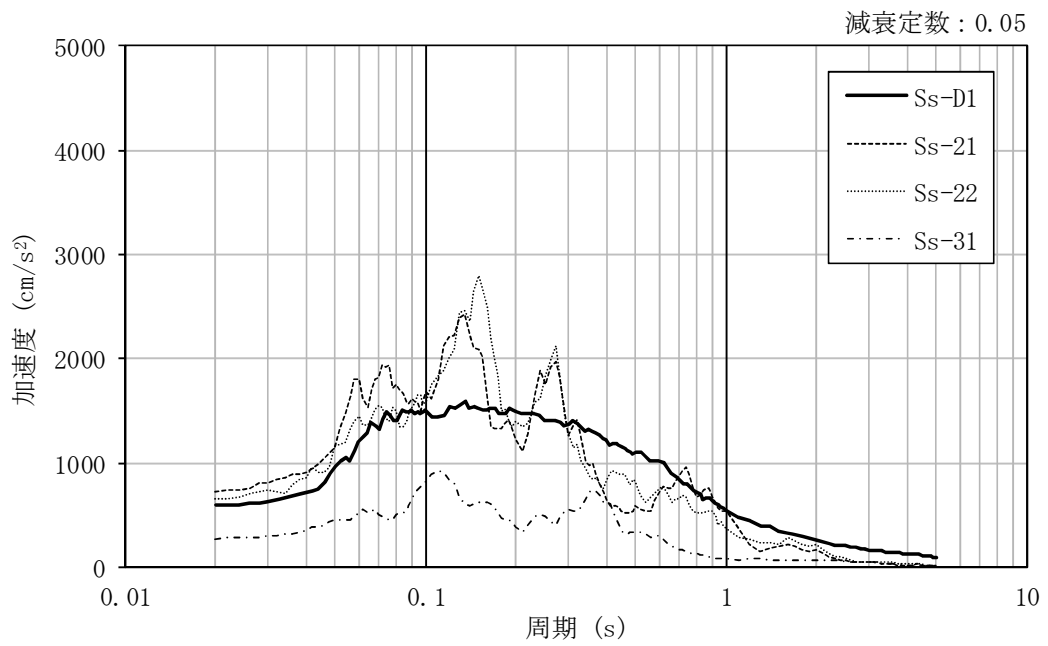


図 4-64 加速度応答スペクトル
 (基準地震動 S_s , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

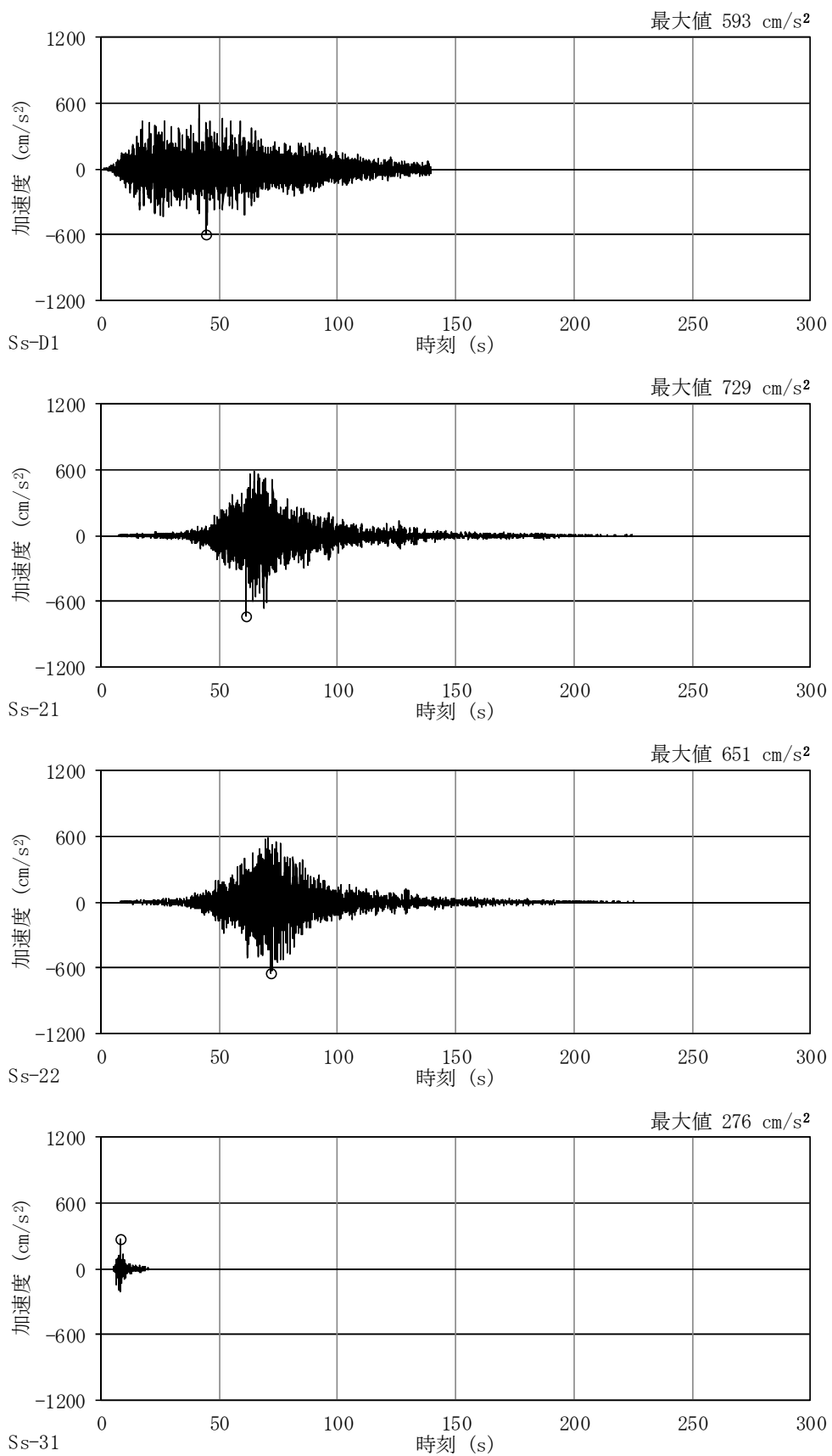


図 4-65 加速度時刻歴波形
(基準地震動 S_s , UD 方向, 地盤物性のばらつきを考慮 ($-\sigma$))

(2) 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 4-6 に示す。

表 4-6 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S_d 地震時	$G + SNL + S_d$
S_s 地震時	$G + SNL + S_s$

G : 固定荷重
SNL : 積雪荷重 (地震時)
S_d : S_d地震荷重
S_s : S_s地震荷重

4.3 許容限界

応力解析による評価における原子炉棟の許容限界は、資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」に記載の構造強度上の制限及び機能維持の方針に基づき、表4-7～表4-8のとおり設定する。

また、鋼材、コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表4-9～表4-11に、鋼材及びボルトの引張強さを表4-12に示す。

表 4-7 応力解析による評価における許容限界
(設計基準対象施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部 位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	弾性設計用 地震動 S_d	屋根スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度
			屋根トラス	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「S規準」に基づく短期許容応力度
		基準地震動 S_s	屋根スラブ	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく終局強度
			屋根トラス	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「S規準」に基づく弾性限強度 ※1, ※2
気密性	換気性能とあいまって気密機能を維持すること	弾性設計用 地震動 S_d	屋根スラブ	部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度
		基準地震動 S_s	屋根スラブ	部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度※3

※1:「技術基準解説書」に基づき、F 値に 1.1 倍の割増しを考慮し、圧縮及び曲げについては座屈強度を用いる。

※2: 母屋については、母屋及び屋根スラブの落下防止の観点から、仕口部（ボルト、スプライスプレート及びウェブ）が先行して破断しないことを確認する。

※3: 許容限界は終局耐力に対し妥当な安全余裕を有したものとして設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

表 4-8 応力解析による評価における許容限界
(重大事故等対処施設としての評価)

要求機能	機能設計上の性能目標	地震力	部 位	機能維持のための考え方	許容限界 (評価基準値)
—	構造強度を有すること	弾性設計用 地震動 S_d	屋根スラブ	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度
			屋根トラス	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「S規準」に基づく短期許容応力度
		基準地震動 S_s	屋根スラブ	部材に生じる応力及びひずみが構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく終局強度
			屋根トラス	部材に生じる応力が構造強度を確保するための許容限界を超えないことを確認	「S規準」に基づく弾性限強度 ※1, ※2
遮蔽性	遮蔽体の損傷により遮蔽性が損なわないこと	弾性設計用 地震動 S_d	屋根スラブ	部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度
		基準地震動 S_s	屋根スラブ	部材に生じる応力が遮蔽性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度※3
気密性	換気性能とあいまって気密機能を維持すること	弾性設計用 地震動 S_d	屋根スラブ	部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度
		基準地震動 S_s	屋根スラブ	部材に生じる応力が気密性を維持するための許容限界を超えないことを確認	「RC-N規準」に基づく短期許容応力度※3

※1:「技術基準解説書」に基づき、F 値に 1.1 倍の割増しを考慮し、圧縮及び曲げについては座屈強度を用いる。

※2: 母屋については、母屋及び屋根スラブの落下防止の観点から、仕口部（ボルト、スプライスプレート及びウェブ）が先行して破断しないことを確認する。

※3: 許容限界は終局強度に対し妥当な安全余裕を有したものと設定することとし、さらなる安全余裕を考慮して短期許容応力度とする。

表 4-9 鋼材の許容応力度

種 類	F 値 (N/mm ²)	短 期 (N/mm ²)		
		引 張	圧縮及び曲げ	せん断
SS400 ^{※1}	235	235	235 ^{※3}	135
SM400A ^{※2}				
	t ≤ 40 (mm)			

※1：建設当時の鋼材の種類は SS41 であるが現在の規格（SS400）に読み替えた許容応力度を示す。

※2：建設当時の鋼材の種類は SM41A であるが現在の規格（SM400A）に読み替えた許容応力度を示す。

※3：上限値であり、座屈長さ等を勘案して設定する。

表 4-10 コンクリートの許容応力度

F _c (N/mm ²)	圧縮 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
22.1	14.7	1.06

表 4-11 鉄筋の許容応力度

SD345 [※]	
引張及び圧縮 (N/mm ²)	面外せん断補強 (N/mm ²)
345	345

※：建設当時の鉄筋の種類は SD35 であるが現在の規格（SD345）に読み替えた許容応力度を示す。

表 4-12 鋼材及びボルトの引張強さ

種類	引張強さ (N/mm ²)
SS400 [※]	400
F10T	1000

※：建設当時の鋼材の種類は SS41 であるが現在の規格（SS400）に読み替えた引張強さを示す。

4.4 解析モデル及び諸元

4.4.1 屋根スラブ及び母屋

(1) モデル化の基本方針

屋根スラブは母屋で支持された1方向スラブとして単位幅を、母屋は主トラスで支持されたスパンの支配幅を取り出した範囲についてモデル化する。

屋根スラブの解析モデルは両端固定梁として、母屋の解析モデルは単純梁として評価する。スラブの解析モデルを図4-6に、母屋の解析モデルを図4-7に示す。

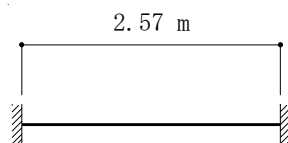


図4-6 解析モデル（屋根スラブ）

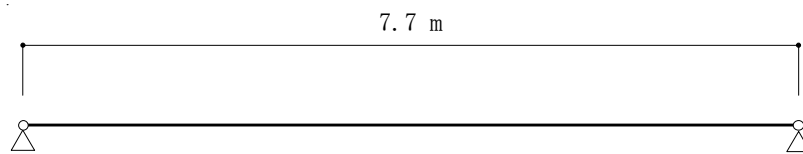


図4-7 解析モデル（母屋）

(2) 解析諸元

鉄筋コンクリートの物性値を表4-13に、鋼材の物性値を表4-14に示す。

表4-13 鉄筋コンクリートの物性値

コンクリートの 設計基準強度 F_c (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
22.1	2.21×10^4	0.2

表4-14 鋼材の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
鉄 骨：SS400※	2.05×10^5	7.9×10^4

※：建設当時の鋼材の種類はSS41であるが現在の規格(SS400)に読み替えた。

4.4.2 屋根トラス

(1) モデル化の基本方針

a. 基本方針

屋根トラスの各部応力は、3次元FEMモデルを用いて弾塑性応力解析を実施することにより評価する。解析には、解析コード「DYNA2E Ver. 8.0.4」を用いる。また、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、付録16「計算機プログラム（解析コード）の概要・DYNA2E」に示す。

解析モデルは、原子炉棟の燃料取替床（EL.46.5 m）より上部について、壁、柱、梁及び屋根トラスをモデル化した解析モデルを用いる。なお、屋根スラブについては剛性を考慮しないことからモデル化していない。

解析モデルを図4-8に、屋根トラスの部材リストを表4-15に示す。

b. 使用要素

解析モデルに使用する要素は、シェル要素、梁要素及びトラス要素とする。解析モデルの節点数は274、要素数は849である。

(2) 境界条件

応力解析モデルは燃料取替床レベル（EL.46.5 m）を固定とする。

(3) 解析諸元

使用材料（鉄筋コンクリート及び鉄骨）の物性値を表4-16に示す。

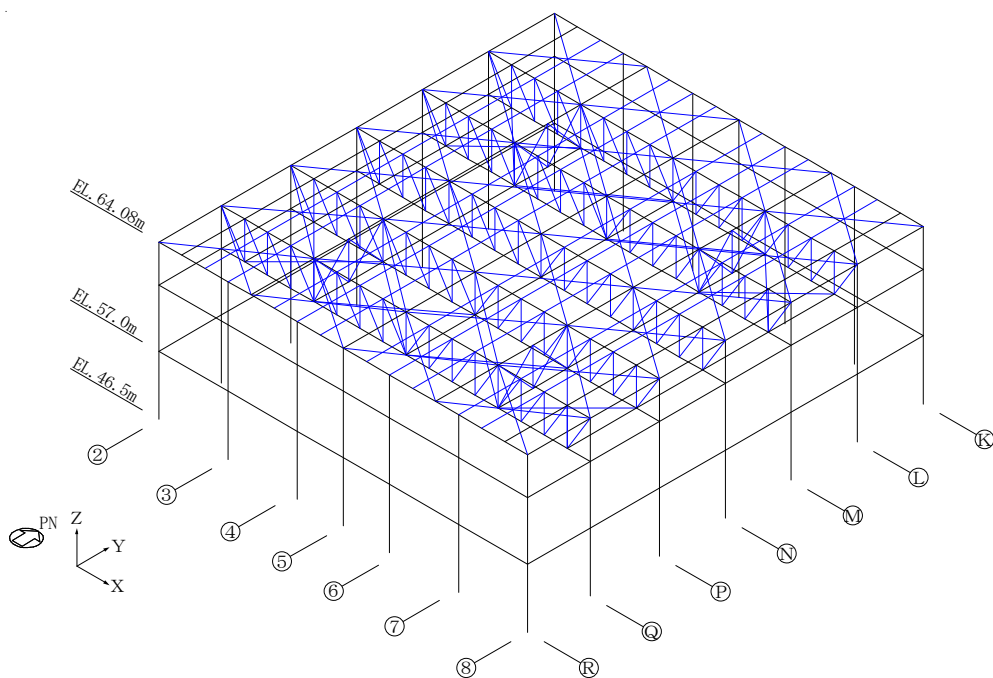


図4-8 解析モデル（屋根トラス）

表 4-15 部材リスト

部 材	断面積 A (cm ²)	断面 2 次モーメント I (cm ⁴)
H-400×400×13×21	218.7	66600
2Ls-200×200×15+2FBs-9×150	142.5	—
2Ls-200×200×15	115.5	—
2Ls-150×150×15	85.48	—
2Ls-150×100×12	57.12	—
2Ls-100×100×10	38.00	—
H-390×300×10×16	136.0	38700
H-582×300×12×17	174.5	103000
H-250×250×9×14	92.18	10800
2CTs-200×400×13×21	218.6	—
CT-300×200×11×17	67.21	—
2Ls-90×90×10	34.00	—

表 4-16 材料の物性値

使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
鉄筋コンクリート : Fc22.1	2.21×10^4	9.21×10^3	5
鉄 骨 : SS400 ^{※1} SM400A ^{※2}	2.05×10^5	7.9×10^4	2

※1：建設当時の鋼材の種類は SS41 であるが現在の規格 (SS400) に読み替えた。

※2：建設当時の鋼材の種類は SM41A であるが現在の規格 (SM400A) に読み替えた。

4.5 評価方法

4.5.1 応力解析方法

(1) 屋根スラブ及び母屋

屋根スラブ及び母屋について、両端支持梁に対する一般材料力学公式により応力を算定する。

a. 荷重ケース

S_d 地震時及び S_s 地震時の応力は次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

- G : 固定荷重
- SNL : 積雪荷重 (地震時)
- S_{dDU}^{**} : 鉛直方向 S_d 地震荷重
- S_{sDU}^{**} : 鉛直方向 S_s 地震荷重

※：計算上の座標軸を基本として、鉛直方向は上向き加力を記載している。

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表4-17に示す。

作用荷重のうち地震荷重は、固定荷重及び積載荷重と同じ下向きに作用する場合に生じる応力が最大となるため、地震荷重は鉛直下向きの場合のみ考慮する。

表4-17 荷重の組合せケース (屋根スラブ及び母屋)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S_d 地震時	1	$G + SNL - 1.0S_{dDU}$
S_s 地震時	2	$G + SNL - 1.0S_{sDU}$

c. 長期荷重の算出方法

長期荷重時の端部モーメント、中央モーメント及びせん断力の算出方法は下式の通り算出する。長期荷重時の端部モーメント、中央モーメント及びせん断力を表4-18に示す。

(両端固定梁)

- ・長期荷重時の端部モーメント (M_E)

$$M_E = -\frac{1}{12}w \cdot l^2$$

- ・長期荷重時の中央モーメント (M_C)

$$M_C = \frac{1}{24}w \cdot l^2$$

- ・長期荷重時の端部せん断力 (Q_E)

$$Q_E = 0.5w \cdot l$$

(単純梁)

- ・長期荷重時の中央モーメント (M_C)

$$M_C = \frac{1}{8}w \cdot l^2$$

- ・長期荷重時の端部せん断力 (Q_E)

$$Q_E = 0.5w \cdot l$$

ここで,

l : 有効スパン (m)

w : 単位長さあたりの長期荷重 (kN/m)

表 4-18 長期荷重時の端部モーメント, 中央モーメント及びせん断力

部 位	端部モーメント (kN・m)	中央モーメント (kN・m)	せん断力 (kN)
屋根スラブ	1.99	0.99	4.64
母 屋	—	76.5	39.8

d. 応力の算出方法

「c. 長期荷重の算出方法」における長期荷重時の端部モーメント, 中央モーメント及びせん断力を, 屋根トラス部 (EL. 63.65 m, 質点番号 22~質点番号 25) の鉛直方向最大応答加速度より算出した鉛直震度により係数倍することで応力を算出する。鉛直方向最大応答加速度を表 4-19 に, 算出した端部モーメント, 中央モーメント及びせん断力を表 4-20 に示す。

表 4-19 地震応答解析による最大応答加速度

(a) 弾性設計用地震動 S_d

部位	質点番号	基本ケース※ ¹ (cm/s^2)	地盤物性の ばらつきを考慮 ($+\sigma$)※ ² (cm/s^2)	地盤物性の ばらつきを考慮 ($-\sigma$)※ ² (cm/s^2)	最大値 (cm/s^2)
屋根	22	761	852	683	1353
	23	871	931	800	
	24	978	1001	962	
	25	1305	1353	1254	

※1: S_d-D1 , S_d-11 , S_d-12 , S_d-13 , S_d-14 , S_d-21 , S_d-22 及び S_d-31 の最大値

※2: S_d-D1 , S_d-21 , S_d-22 及び S_d-31 の最大値

(b) 基準地震動 S_s

部位	質点番号	基本ケース※ ¹ (cm/s^2)	地盤物性の ばらつきを考慮 ($+\sigma$)※ ² (cm/s^2)	地盤物性の ばらつきを考慮 ($-\sigma$)※ ² (cm/s^2)	最大値 (cm/s^2)
屋根	22	1396	1637	1203	2551
	23	1594	1717	1464	
	24	1868	1923	1810	
	25	2450	2551	2332	

※1: S_s-D1 , S_s-11 , S_s-12 , S_s-13 , S_s-14 , S_s-21 , S_s-22 及び S_s-31 の最大値

※2: S_s-D1 , S_s-21 , S_s-22 及び S_s-31 の最大値

表 4-20 鉛直震度より算出した端部モーメント, 中央モーメント及びせん断力

(a) 弾性設計用地震動 S_d

部位	検討用 鉛直震度	端部モーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	中央モーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	せん断力 (kN)
屋根スラブ	2.38	4.74	2.36	11.0
母屋	2.38	—	182	94.7

(b) 基準地震動 S_s

部位	検討用 鉛直震度	端部モーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	中央モーメント ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	せん断力 (kN)
屋根スラブ	3.61	7.18	3.57	16.8
母屋	3.61	—	276	144

(2) 屋根トラス

屋根トラスについて，3次元FEMモデルを用いた弾塑性応力解析を実施する。

a. 荷重ケース

S_d 地震時及び S_s 地震時の応力は，次の荷重ケースによる応力を組合せて求める。

G	: 固定荷重
SNL	: 積雪荷重 (地震時)
Sd_{WE}^{**}	: W→E 方向 S_d 地震荷重
Sd_{SN}^{**}	: S→N 方向 S_d 地震荷重
Sd_{DU}^{**}	: 鉛直方向 S_d 地震荷重
Ss_{WE}^{**}	: W→E 方向 S_s 地震荷重
Ss_{SN}^{**}	: S→N 方向 S_s 地震荷重
Ss_{DU}^{**}	: 鉛直方向 S_s 地震荷重

※：計算上の座標軸を基本として，EW方向はW→E方向加力，NS方向はS→N方向加力，鉛直方向は上向き加力を記載している。

b. 荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表4-21に示す。

水平地震力と鉛直地震力は，加速度時刻歴波を同時入力することにより組合せる。ここで，地震荷重に極性をもたない S_s-D1 及び S_s-31 については，水平1方向と鉛直方向の正負を組合せた4ケースについて解析を行い，地震荷重が位相を含めて設定されている S_s-11 ， S_s-12 ， S_s-13 ， S_s-14 ， S_s-21 及び S_s-22 については，水平2方向及び鉛直地震力を組合せたケースについて解析を行う。

表 4-21 荷重の組合せケース（屋根トラス）

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S _d 地震時	1-1 ^{※1}	G + SNL + S _{dWE} + S _{dDU}
	1-2 ^{※1}	G + SNL + S _{dWE} - S _{dDU}
	1-3 ^{※1}	G + SNL - S _{dWE} + S _{dDU}
	1-4 ^{※1}	G + SNL - S _{dWE} - S _{dDU}
	1-5 ^{※1}	G + SNL + S _{dSN} + S _{dDU}
	1-6 ^{※1}	G + SNL + S _{dSN} - S _{dDU}
	1-7 ^{※1}	G + SNL - S _{dSN} + S _{dDU}
	1-8 ^{※1}	G + SNL - S _{dSN} - S _{dDU}
	2-1 ^{※2}	G + SNL + S _{dWE} + S _{dSN} + S _{dDU}
S _s 地震時	3-1 ^{※3}	G + SNL + S _{sWE} + S _{sDU}
	3-2 ^{※3}	G + SNL + S _{sWE} - S _{sDU}
	3-3 ^{※3}	G + SNL - S _{sWE} + S _{sDU}
	3-4 ^{※3}	G + SNL - S _{sWE} - S _{sDU}
	3-5 ^{※3}	G + SNL + S _{sSN} + S _{sDU}
	3-6 ^{※3}	G + SNL + S _{sSN} - S _{sDU}
	3-7 ^{※3}	G + SNL - S _{sSN} + S _{sDU}
	3-8 ^{※3}	G + SNL - S _{sSN} - S _{sDU}
	4-1 ^{※4}	G + SNL + S _{sWE} + S _{sSN} + S _{sDU}

※1：S_d-D1及びS_d-31による地震荷重に適用する。

※2：S_d-11, S_d-12, S_d-13, S_d-14, S_d-21及びS_d-22による地震荷重に適用する。

※3：S_s-D1及びS_s-31による地震荷重に適用する。

※4：S_s-11, S_s-12, S_s-13, S_s-14, S_s-21及びS_s-22による地震荷重に適用する。

c. 荷重の入力方法

(a) 固定荷重及び積雪荷重

屋根面の固定荷重及び積雪荷重は面荷重として，外周梁の固定荷重は線荷重として，天井クレーンの重量は対応する節点に集中荷重として入力する。

(b) 固定荷重及び積雪荷重

地震荷重は，図 4-6～図 4-65 に示した加速度時刻歴波を 3 次元 F E M モデルの脚部に入力する。

4.5.2 断面の評価方法

(1) 屋根スラブ

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象部位に生じる曲げモーメントが、短期許容曲げモーメントを超えないことを確認する。

$$M_A = a_t \cdot f_t \cdot j$$

ここで、

M_A : 短期許容曲げモーメント (N・mm)

a_t : 引張鉄筋断面積 (mm²)

f_t : 引張鉄筋の短期許容引張応力度 (N/mm²)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

b. 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 許容せん断力の割り増し係数

(2 を超える場合は 2, 1 未満の場合は 1 とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M/(Q \cdot d) + 1}$$

M : 曲げモーメント (N・mm)

Q : せん断力 (N)

d : 断面の有効せい (mm)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度で表 4-10 に示す値 (N/mm²)

(2) 母屋

曲げモーメント及びせん断力による応力度を算定し、各許容値を超えないことを確認する。また、仕口部が先行して破断しないことを確認する。

a. 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「S規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる応力度が、 S_d 地震時に対しては表4-11に示した鋼材の許容応力度、 S_s 地震時に対しては鋼材の許容応力度に1.1倍の割増しを考慮した弾性限応力度をそれぞれ超えないことを確認する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここで、

- σ_b : 曲げ応力度 (N/mm²)
- M : 曲げモーメント (N・mm)
- Z : 部材の断面係数 (mm³)

b. せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「S規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じるせん断応力度が表4-9に示した鋼材の許容応力度とした弾性限応力度を超えないことを確認する。

$$\tau = \frac{Q}{A_s}$$

ここで、

- τ : せん断応力度 (N/mm²)
- Q : せん断力 (N)
- A_s : 部材のせん断断面積 (mm²)

c. 仕口部の評価方法

仕口部の評価は、「技術基準解説書」に基づき、評価対象部位の短期許容せん断力が次式をもとに計算したボルト、スプライスプレート及びウェブプレートの破断耐力を超えないことを確認する。

(部材の短期許容せん断力)

$$Q_A = A_s \cdot f_s$$

ここで、

A_s : 部材のせん断断面積 (mm^2)

f_s : 鋼材の短期許容せん断応力度で、表 4-9 に示す値 (N/mm^2)

(仕口部の破断強度)

$$Q_u = \min({}_b Q_u, {}_s Q_u, {}_w Q_u)$$

ただし、

$${}_b Q_u = 0.75 {}_b A \cdot {}_b \sigma_u$$

$${}_s Q_u = {}_s A_e \cdot {}_s \sigma_u / \sqrt{3}$$

$${}_w Q_u = {}_w A_e \cdot {}_w \sigma_u / \sqrt{3}$$

ここで、

${}_b A$: ボルトのせん断断面積 (mm^2)

${}_b \sigma_u$: ボルトの引張強さで、表 4-12 に示す値 (N/mm^2)

${}_s A_e$: スプライスプレートの有効断面積 (mm^2)

${}_s \sigma_u$: スプライスプレート鋼材の引張強さで、表 4-12 に示す値 (N/mm^2)

${}_w A_e$: ウェブプレートの有効断面積 (mm^2)

${}_w \sigma_u$: ウェブプレート鋼材の引張強さで、表 4-12 に示す値 (N/mm^2)

(3) 主トラス

断面の評価は、「S規準」に基づき、次式をもとに計算した評価対象部位に生じる軸力及び曲げモーメントによる応力度が、 S_d 地震時に対する評価については短期許容応力度、 S_s 地震時に対する評価については表4-9に示した鋼材の許容応力度に1.1倍の割増しを考慮した弾性限応力度を超えないことを確認する。

(圧縮)

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A}$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここで、

 N_c : 圧縮軸力 (N) A : 部材の軸断面積 (mm^2) M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$) Z : 部材の断面係数 (mm^3) f_c : 鋼材の短期許容圧縮応力度及び弾性限圧縮応力度 (N/mm^2) f_b : 鋼材の短期許容曲げ応力度及び弾性限曲げ応力度 (N/mm^2)

(引張)

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1.0$$

ただし、

$$\sigma_t = \frac{N_t}{A}$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

ここで、

 N_c : 引張軸力 (N) A : 部材の軸断面積 (mm^2) M : 曲げモーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$) Z : 部材の断面係数 (mm^3) f_t : 鋼材の短期許容引張応力度及び弾性限引張応力度 (N/mm^2)

5. 評価結果

5.1 地震応答解析による評価結果

原子炉棟について、 S_s 地震時の各層の最大せん断ひずみが許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認する。

地盤物性のばらつきを考慮した最大せん断ひずみは 0.60×10^{-3} (要素番号(5), 地盤+ σ ケース, NS方向, S_s-31) であり, 許容限界 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。地盤物性のばらつきを考慮した各方向の $Q-\gamma$ 関係と最大応答値を図 5-1 に示す。

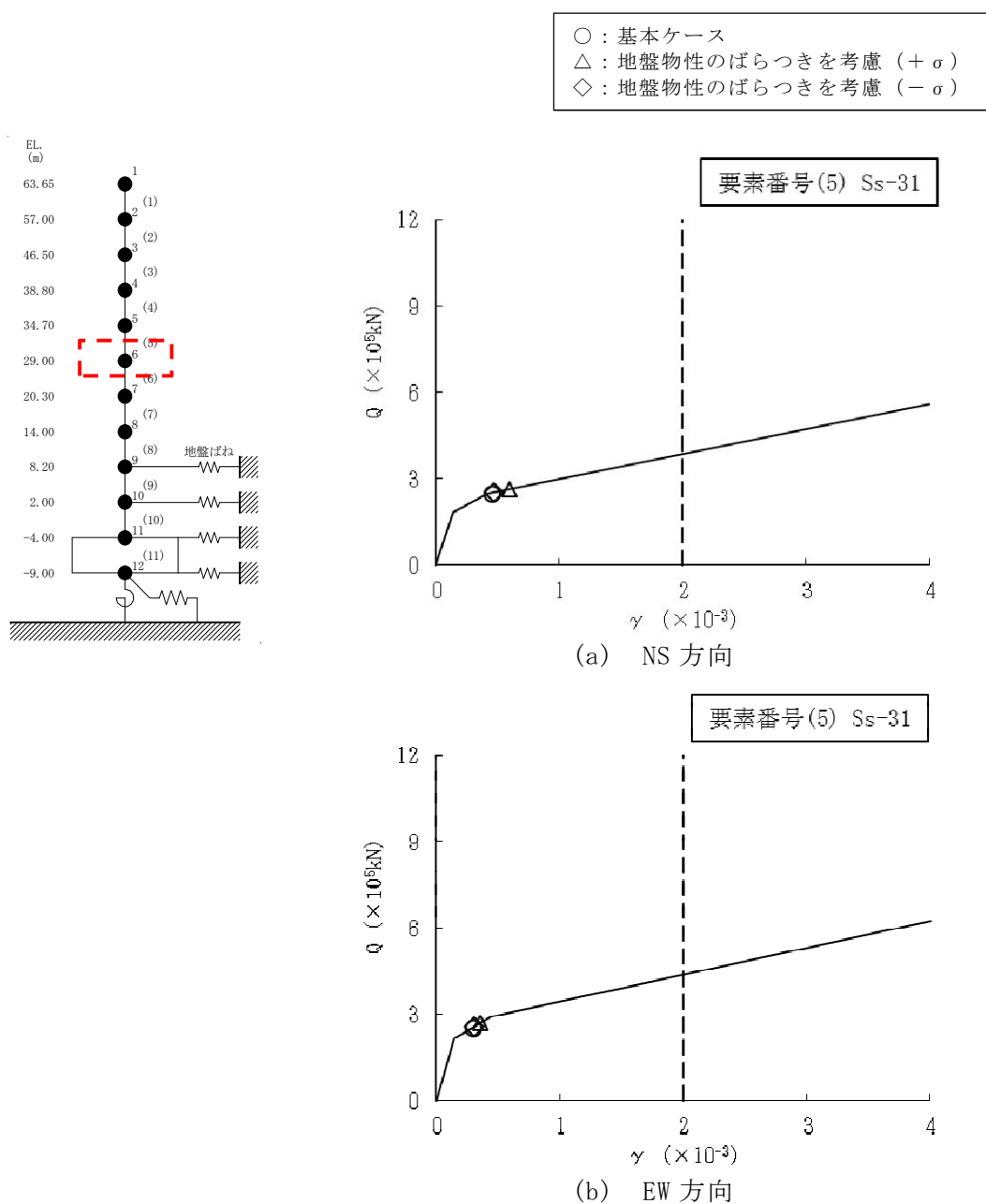


図 5-1 $Q-\gamma$ 関係と基準地震動 S_s に対する各部材の最大応答値

5.2 応力解析による評価結果

5.2.1 屋根スラブ

(1) 屋根スラブ

「4.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を表 5-1 及び表 5-2 に示す。

S_d 地震時及び S_s 地震時において、曲げモーメントによる鉄筋応力度及び面外せん断応力度が許容値を超えないことを確認した。

表 5-1 評価結果（屋根スラブ，弾性設計用地震動 S_d ）

厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		100×1000
有効せい d (mm)		50
配筋	上端	D13@180 (709.3 mm ²)
	下端	D13@180 (709.3 mm ²)
発生曲げモーメント M (kN・m)		4.74
鉄筋引張応力度 σ_t (N/mm ²)		154.0
許容値 f_t (N/mm ²)		345
検定値 σ_t/f_t		0.45
発生せん断力 Q (kN)		11.0
せん断スパン比による割増係数 α		1.00
許容値 Q_A (kN)		46.3
検定値 Q/Q_A		0.24
判定		可

表 5-2 評価結果 (屋根スラブ, 基準地震動 S_s)

厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		100×1000
有効せい d (mm)		50
配筋	上端	D13@180 (703.9 mm ²)
	下端	D13@180 (703.9 mm ²)
発生曲げモーメント M (kN・m)		7.18
鉄筋引張応力度 σ_t (N/mm ²)		233.2
許容値 f_t (N/mm ²)		345
検定値 σ_t/f_t		0.68
発生せん断力 Q (kN)		16.8
せん断スパン比による割増係数 α		1.00
許容値 Q_A (kN)		46.3
検定値 Q/Q_A		0.37
判定		可
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		100×1000
有効せい d (mm)		50
配筋	上端	D13@180 (703.9 mm ²)
	下端	D13@180 (703.9 mm ²)
発生曲げモーメント M (kN・m)		7.18
鉄筋引張応力度 σ_t (N/mm ²)		233.2
許容値 f_t (N/mm ²)		345
検定値 σ_t/f_t		0.68
発生せん断力 Q (kN)		16.8
せん断スパン比による割増係数 α		1.00
許容値 Q_A (kN)		46.3
検定値 Q/Q_A		0.37
判定		可

5.2.2 屋根トラス

(1) 母屋

「4.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を表5-3に、仕口部の評価結果を表5-4に示す。

S_d 地震時及び S_s 地震時において、発生応力度が許容値を超えないことを確認した。また、仕口部が先行して破断しないことを確認した。

表5-3 (1/2) 評価結果 (母屋, 弾性設計用地震動 S_d)

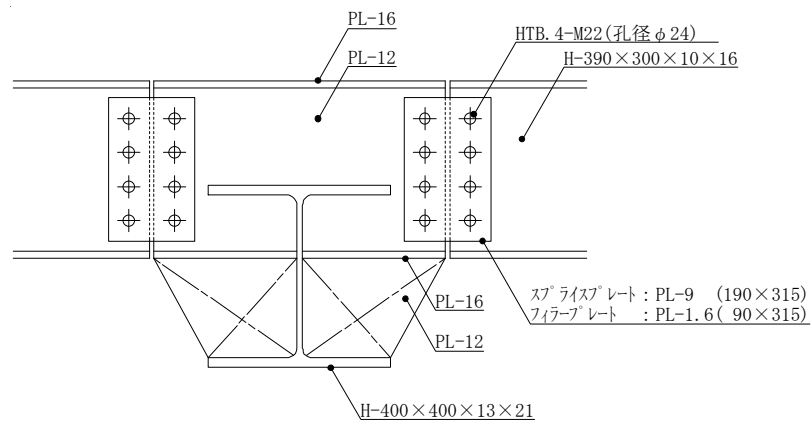
部 材		H-390×300×10×16
断面係数 Z (cm ³)		1980
せん断断面積 A _s (mm ²)		3580
曲 げ モー メント	発生曲げモーメント M (kN・m)	182
	曲げ応力度 σ_b (N/mm ²)	92.0
	許容値 (N/mm ²)	235
	検定値	0.40
せん 断 力	発生せん断力 Q (kN)	94.7
	せん断応力度 τ (N/mm ²)	26.5
	許容値 (N/mm ²)	135
	検定値	0.20
判 定		可

表 5-3 (2/2) 評価結果 (母屋, 基準地震動 S_s)

部 材		H-390×300×10×16
断面係数 Z (cm ³)		1980
せん断断面積 A_s (mm ²)		3580
曲 げ モ ー メ ン ト	発生曲げモーメント M (kN・m)	276
	曲げ応力度 σ_b (N/mm ²)	139.4
	許容値 (N/mm ²)	258
	検定値	0.55
せん 断 力	発生せん断力 Q (kN)	144
	せん断応力度 τ (N/mm ²)	40.3
	許容値 (N/mm ²)	135
	検定値	0.30
判 定		可

表 5-4 評価結果 (母屋仕口部)

部 材		H-390×300×10×16
短期許容せん断力 Q_A (kN)		483.3
仕口部 破断耐力	ボルト ${}_bQ_u$ (kN)	2280
	スライスプレート ${}_bQ_u$ (kN)	910
	ウェブプレート ${}_bQ_u$ (kN)	605
判 定		可



仕口部概要図

(2) 主トラス

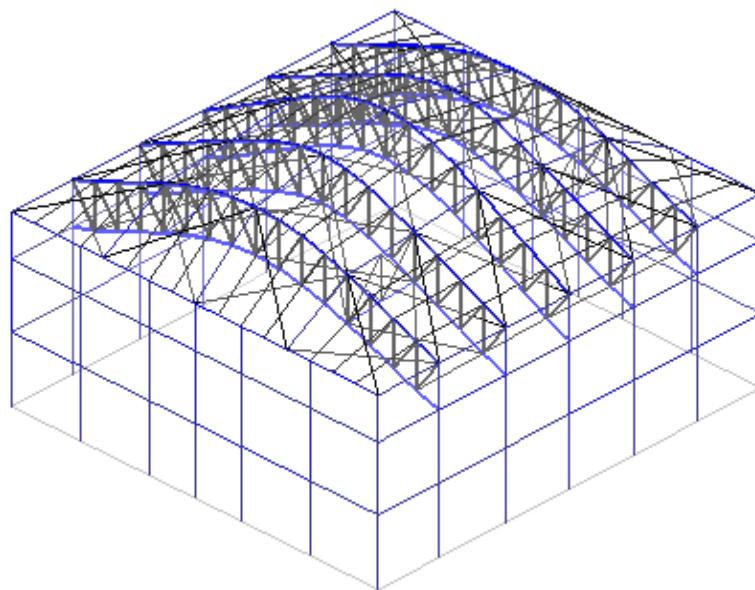
a. 固有値解析結果

3次元フレームモデルの固有値解析結果を表5-5に、主要な固有モード図を図5-2に示す。

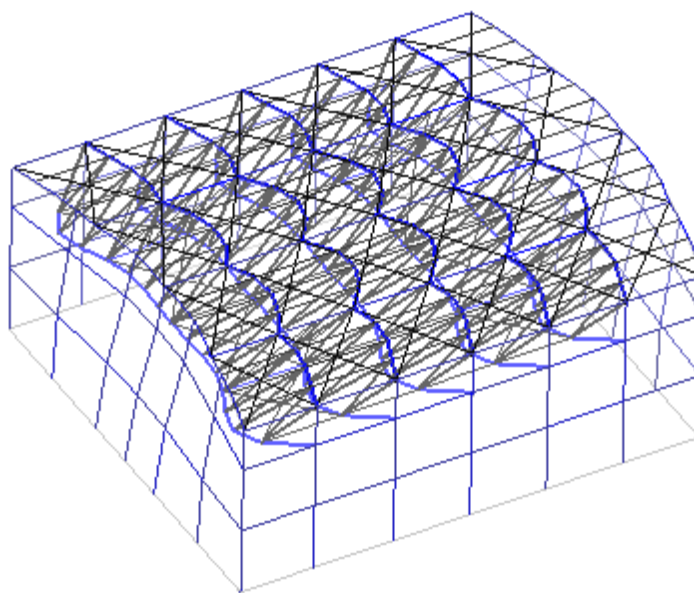
UD方向の1次モードは全体1次に現れており、固有振動数は3.00 Hzである。NS方向の1次モードは全体4次に現れており、固有振動数は5.77 Hzである。EW方向の1次モードは全体6次に現れており、固有振動数は6.66 Hzである。

表5-5 固有値解析結果

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	備考
1	0.333	3.00	UD方向1次
2	0.293	3.41	
3	0.210	4.77	
4	0.173	5.77	NS方向1次
5	0.170	5.88	
6	0.150	6.66	EW方向1次

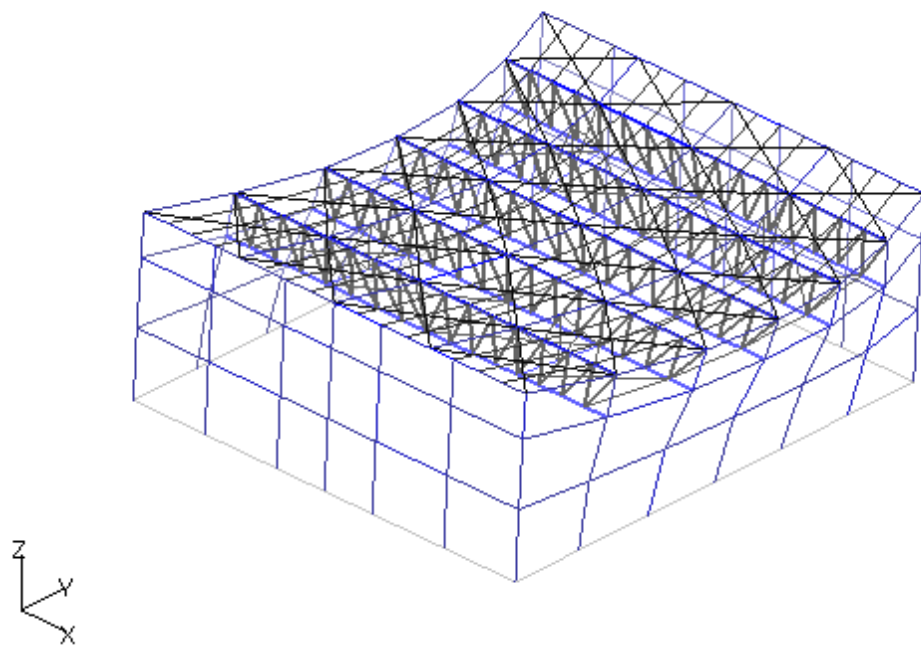


(a) 1次 (3.00 Hz) (UD方向1次)



(b) 4次 (5.77 Hz) (NS方向1次)

図5-2 (1/2) 固有モード図



(c) 6次 (6.66 Hz) (EW方向1次)

図5-2 (2/2) 固有モード図

b. 断面算定結果

「4.5.2 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果は、許容値に対する発生値の比率が最大となる要素を選定し示す。評価結果を表5-6及び表5-6に、評価位置を図5-3及び図5-3に示す。

S_d地震時及びS_s地震時において、発生応力度が許容値を超えないことを確認した。

表5-6 評価結果（主トラス，弾性設計用地震動S_d）

部 材		応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	位 置	判 定
上弦材 (H-400×400×13×21)	(圧縮)	71.4	233	0.44	TU ₉ (M通り)	可
	(曲げ)	30.6	235			
下弦材 (H-400×400×13×21)	(引張)	128.1	235	0.71	TL ₉ (M通り)	可
	(曲げ)	37.7	235			
斜材 (2Ls-150×100×12)	(引張)	165.8	235	0.71	O ₁₅ (M通り)	可
束材 (2Ls-150×150×15)	(圧縮)	141.1	162	0.88	V ₁₃ (M通り)	可

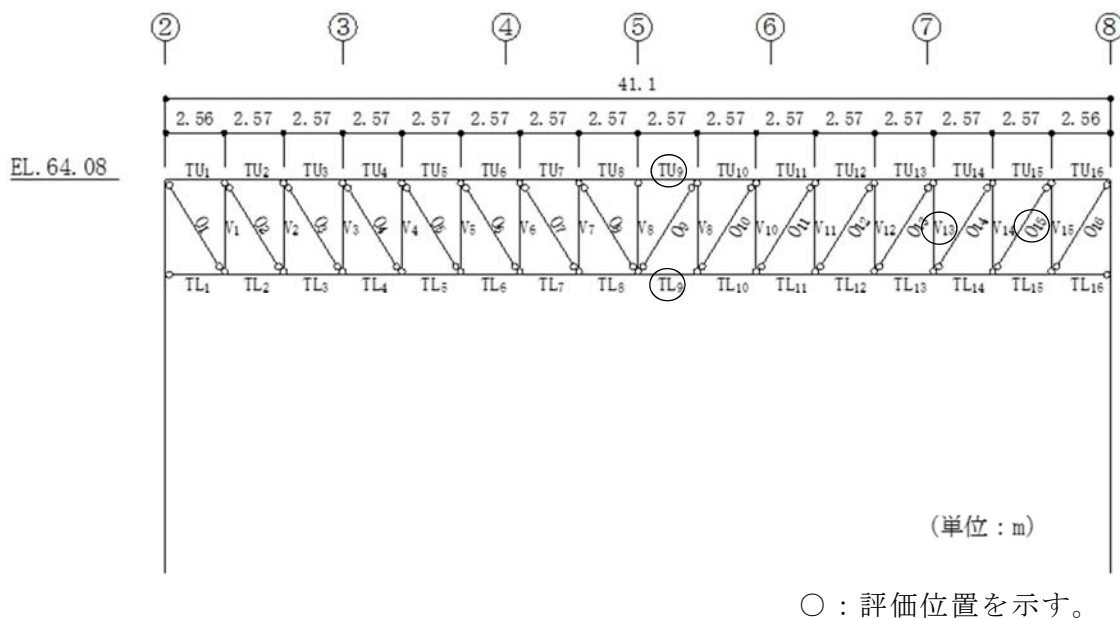
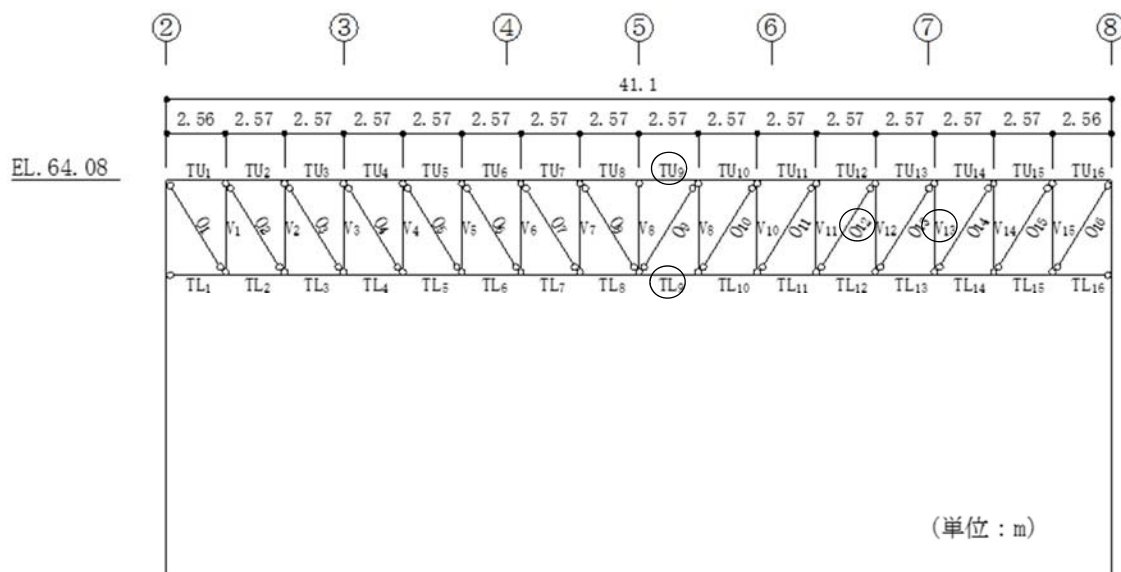


図5-3 評価結果の位置（主トラス）

表 5-7 評価結果 (主トラス, 基準地震動 S_s)

部 材		応力度 (N/mm ²)	許容値 (N/mm ²)	検定値	位 置	判 定
上弦材 (H-400×400×13×21)	(圧縮)	109.8	257	0.61	TU ₉ (M 通り)	可
	(曲げ)	46.7	258			
下弦材 (H-400×400×13×21)	(引張)	187.1	258	0.95	TL ₉ (M 通り)	可
	(曲げ)	57.2	258			
斜材 (2Ls-150×100×12)	(引張)	236.7	258	0.92	O ₁₂ (N 通り)	可
束材 (2Ls-150×150×15)	(圧縮)	199.7	208	0.96	V ₁₃ (M 通り)	可



○ : 評価位置を示す。

図 5-4 評価結果の位置 (主トラス)

別紙 原子炉建屋原子炉棟の気密性に関する計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 既往の知見等の整理.....	1
3. 原子炉建屋原子炉棟における空気漏えい量に対する影響検討.....	3
3.1 検討方針.....	3
3.2 空気漏えい量の算定結果.....	6
3.3 総漏えい量と非常用ガス処理系放出流量の比較.....	7
3.4 検討結果.....	7
4. まとめ.....	7

1. 概要

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（昭和53年9月制定）におけるAクラスの施設の気密性について、原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（（社）日本電気協会以下「JEAG4601-1987」という。）では、S1地震動に対し弾性範囲であることを確認することで、機能が維持されるとしている。

資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」の機能維持の設計方針では、耐震壁のせん断ひずみが概ね弾性状態にとどまることを基本としたうえで、概ね弾性状態を超える場合は、地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が、設置する換気設備の性能を下回ること必要な気密性を維持する設計としている。その場合、気密性を要求される施設に対し、基準地震動 S_s による鉄筋コンクリート造耐震壁の許容限界を最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} としている。

二次格納施設の気密バウンダリを構成する原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）の地震応答解析による評価において、耐震壁の許容限界として設定した最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} の適用性について確認するために、耐震壁のせん断ひび割れと空気漏えい量の関係に係る既往の知見を整理するとともに、原子炉棟における空気漏えい量に対する影響を評価する。

2. 既往の知見等の整理

（財）原子力発電技術機構は、「原子力発電施設耐震信頼性実証試験に関する報告書^(注1)」において、JEAG4601-1987による許容限界の目安値（S2地震時に対してせん断変形角 $2/1000\text{rad}$ 、静的地震力に対して $\tau = \tau_u/1.5$ ）において想定されるひび割れを残留ひび割れと仮定した場合の外気侵入量を算出し、気圧差維持のためのファン容量と比較することで、空気漏えい量に対する評価を実施している。その結果「残留ひび割れからの外気侵入量は、ファン容量に比較すると無視できるほど小さいことが明らかになった」としている。

また、（財）原子力発電技術機構は、「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書^(注2)」において、耐震壁の残留ひび割れからの通気量の評価式が、十分に実機への適用性があることを確認している。更に、開口部の存在による通気量割増率の評価式も示されており、「開口部の残留ひび割れ幅の割増率がおおよそ推定できる」としている。

したがって、二次格納施設の気密バウンダリとなる原子炉棟の壁が鉄筋コンクリート造であり、壁厚も「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書」に示される壁厚と同程度であることから、同文献にて提案されている各評価式を用い、原子炉棟における空気漏えい量の算出を行う。以下に評価式を示す。

$$Q = C \gamma^{2.57} \Delta P / T \quad \dots (\text{式 } 5.3.1-4)$$

ここで、

Q : 単位面積あたりの流量 (L/min/m²)

C : 定数

(中央値は 2.24×10^6 , 95%非超過値は 1.18×10^7 , 5%非超過値は 4.21×10^5)

γ : 最大せん断ひずみ

ΔP : 差圧 (mmAq)

T : 壁厚 (cm)

$$\Delta_Q = \left\{ (\alpha^2 - 1) \left(\frac{Q'}{Q_0} - 1 \right) - 1 \right\} \beta + 1 \quad \dots (\text{式 } 6.2.4-31)$$

ここで、

Δ_Q : 通気量割増率

α : 通気量割増範囲 (=3)

$\frac{Q'}{Q_0}$: 定数

(中央値とみなされる評価法では 1.81, 安全側とみなされる評価法では 7.41)

β : 壁の見付け面積に対する開口の総面積

(注 1) 財団法人 原子力発電技術機構「原子力発電施設耐震信頼性実証試験 原子炉建屋総合評価 建屋基礎地盤系評価 に関する報告書 (その 2) 平成 8 年度」

(注 2) 財団法人 原子力発電技術機構「耐震安全解析コード改良試験 原子炉建屋の弾塑性試験 試験結果の評価に関する報告書 平成 5 年度」

3. 原子炉建屋原子炉棟における空気漏えい量に対する影響検討

3.1 検討方針

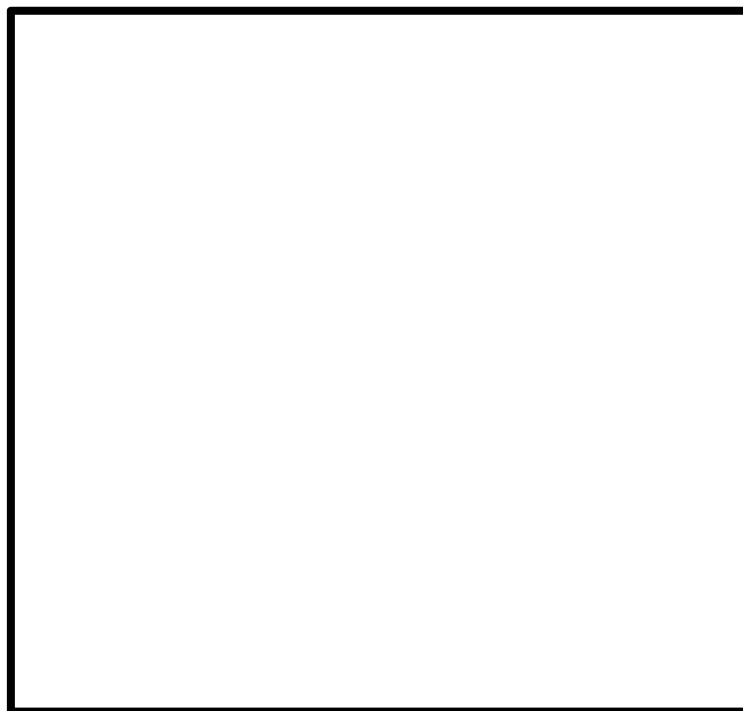
「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書」に基づき、式 5.3.1-4 及び式 6.2.4-31 により気密バウンダリを構成する壁の最大せん断ひずみが許容限界 2.0×10^{-3} に達したときの空気漏えい量を算定し、非常用ガス処理系放出流量以下となっていることを確認する。

原子炉棟の概略図を図 3-1 に示す。原子炉棟 (EL. -4.0m~EL. 64.08m) を構成する壁の壁厚は約 30cm から約 150cm である。



----- : 気密バウンダリ

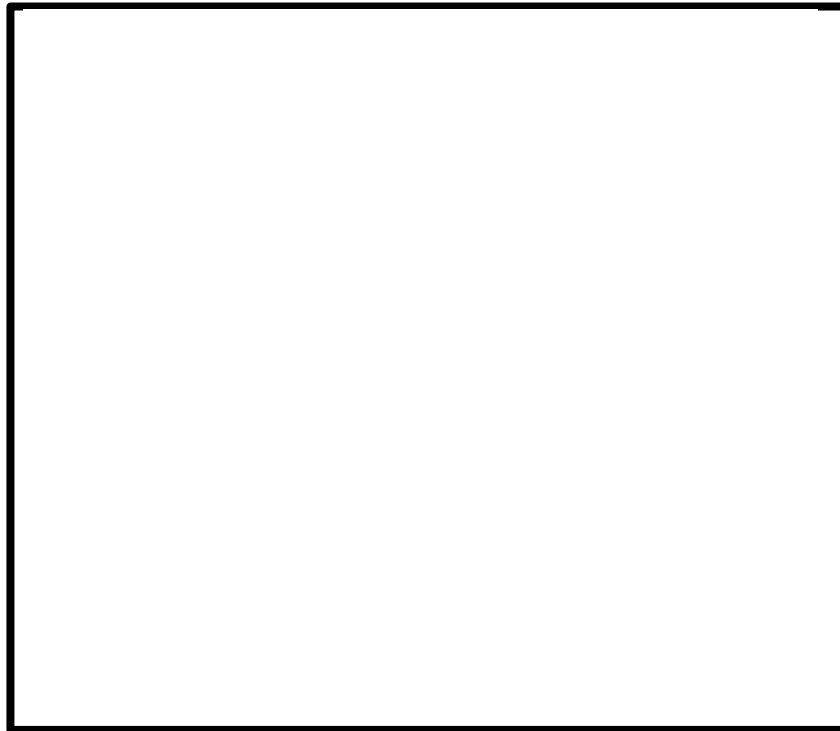
(a) 平面図 (EL. 14.0m)



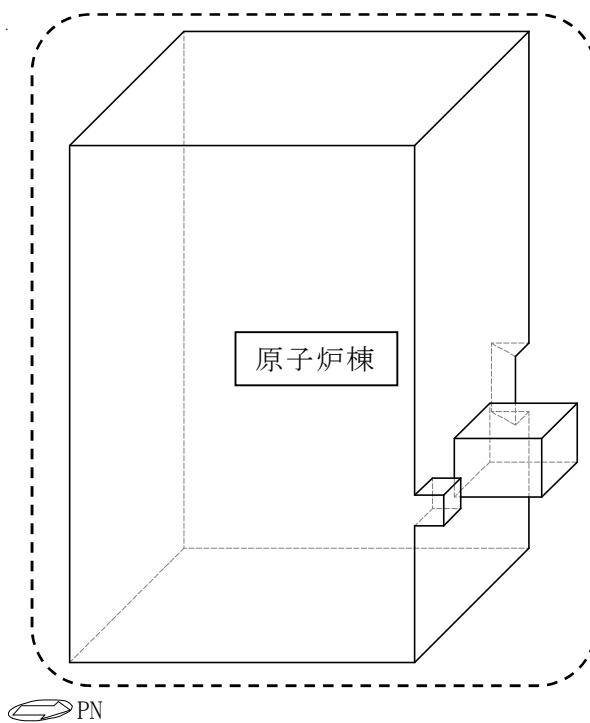
----- : 気密バウンダリ

(b) 平面図 (EL. -4.0m)

図 3-1 原子炉棟の概略図(1/2)



(c) 断面図 (A-A 断面)



[] : 評価対象範囲

(d) 気密バウンダリの概要

図 3-1 原子炉棟の概略図 (2/2)

3.2 空気漏えい量の算定結果

原子炉棟の壁厚ごとに空気漏えい量を算定した。本検討は、地震応答解析のせん断ひずみの許容限界として最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} を用いることの適用性を確認することが目的であることから、評価式における定数について、安全側の値を用いた。算定結果を表 3-1 に示す。

表 3-1 算定結果 (原子炉棟)

壁厚 T (cm)	定数		^(注1) 最大 せん断 ひずみ γ	^(注2) 差圧 ΔP (mmAq)	^(注3) 壁の 面積 A (m^2)	漏えい量 Q (L/min/ m^2)	壁の見 付け面 積に対 する開 口の総 面積 β	通気量 割増率 Δq	総漏えい量 $Q \times A \times \Delta q$ (L/min)
	C	$\frac{Q'}{Q_0}$							
30	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	3150	0.30	0.039	2.97	2807
40	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	1101	0.22	0.058	3.92	950
60	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	1401	0.15	0.000	1.00	211
90	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	1202	0.10	0.011	1.56	188
100	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	1305	0.09	0.007	1.36	160
120	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	387	0.08	0.001	1.06	33
140	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	393	0.07	0.000	1.00	28
150	1.18×10^7	7.41	2.0×10^{-3}	6.4	3168	0.06	0.014	1.71	326
								合計	4703

(注 1) 保守的に各壁の最大せん断ひずみが同時に許容限界となることを想定し、評価する。

(注 2) 設計気密度の差圧条件とする。

(注 3) 気密バウンダリを構成する壁の総面積を用いる。

3.3 総漏えい量と非常用ガス処理系放出流量の比較

原子炉棟の総漏えい量と非常用ガス処理系放出流量を表 3-2 に示す。

表 3-2 総漏えい量と非常用ガス処理系放出流量の比較

総漏えい量 (m ³ /min)	非常用ガス処理系放出流量 (m ³ /min)
5	59.5 (注)

(注) 非常用ガス処理系排風機容量とする。

3.4 検討結果

原子炉棟について総漏えい量は非常用ガス処理系放出流量以下となっていることを確認した。

よって、原子炉棟は、耐震壁の許容限界を最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} とした場合において、換気設備とあいまって機能を維持できる気密性を有している。

4. まとめ

原子炉棟は、耐震壁の許容限界として最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} を適用した場合において、原子炉格納容器から漏えいした空気を非常用ガス処理系で処理できる気密性を有していることを確認した。

以上より、原子炉建屋の地震応答解析による評価において、換気設備とあいまって気密性を維持するために設定する許容限界として、最大せん断ひずみ 2.0×10^{-3} を用いることの適用性を確認した。