

建築学会の方法による南海トラフ三連動模擬波形の作成に関する補足資料

「長周期地震動と超高層建物の対応策－専門家として知っておきたいこと－（日本建築学会編）」¹⁾（図 1）で，長周期成分を含む南海トラフ三連動地震での模擬波形作成手法（以下，「AIJ 南海トラフ模擬波作成手法」と記します）が示されました。詳細は当該文献を参照していただくこととし，本資料ではその概要と，『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』を利用して AIJ 南海トラフ模擬波作成手法に倣った模擬地震波の作成手順を示します。ただし位相特性に用いる地震波や軽微な条件は文献で示しているものと一部で異なります。

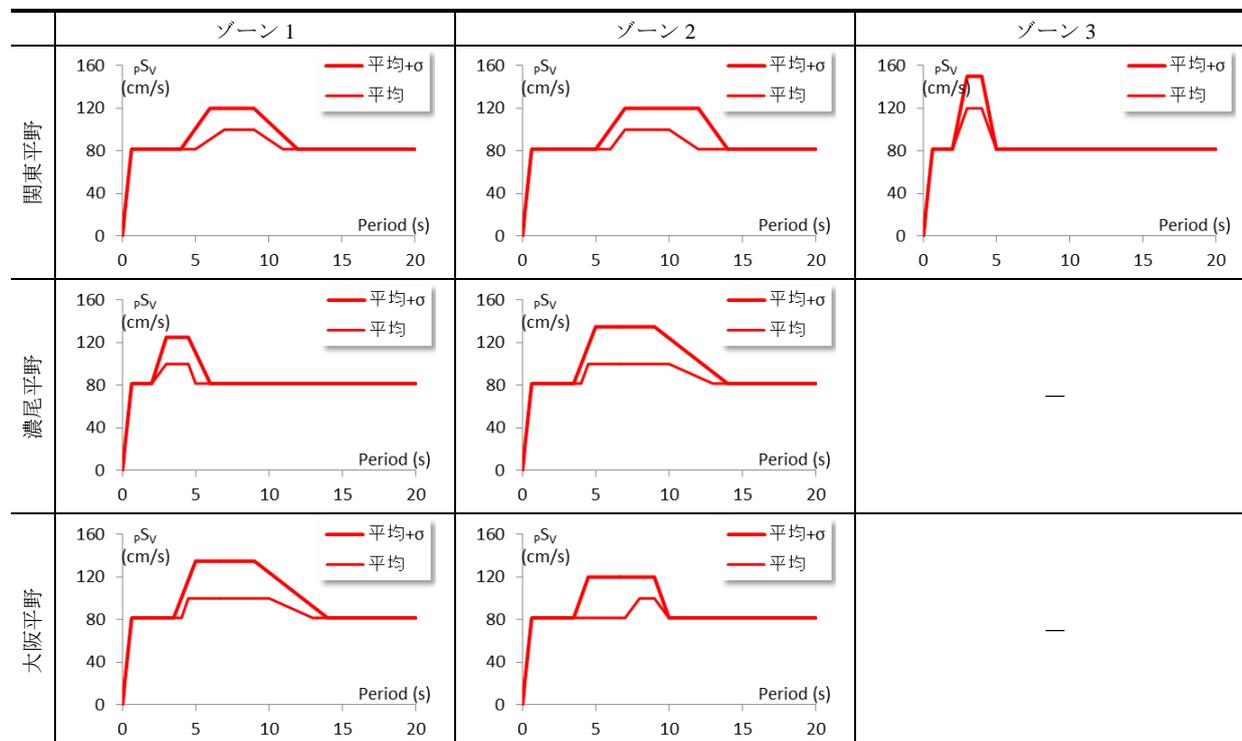


図 1 長周期地震動と超高層建物の対応策（日本建築学会編）

■各サイトのターゲットスペクトル（スペクトル [A]）

AIJ 南海トラフ模擬波作成手法では，その対象サイトを関東平野，濃尾平野，大阪平野とし，それぞれを 2～3 の区域に分けた各ゾーンを対象にターゲット（設計用）スペクトルが設定されています。ターゲットスペクトルは，3 次元 FEM 解析による多くの結果からその平均および平均+ σ （標準偏差）の 2 種類が設定され，長周期成分が告示スペクトルを上回る周期帯を台形状に近似し，告示スペクトルをかき上げたものとなっています（表 1）。このターゲットスペクトル（固有周期は 20 秒まで）をスペクトル [A] と呼びます。

表 1 ターゲットスペクトル（スペクトル [A]）



■スペクトル [B] とスペクトル [C] への分離

AIJ 南海トラフ模擬波作成手法では、地震動において短周期成分の波形が地震継続時間の先頭部分に現れ、後続波の部分は長周期成分のみが卓越する特徴を模擬するために、ターゲットスペクトル[A]を告示スペクトル [B] とかさ上げしたスペクトル [C] に分離し (表 2), それぞれに適合した地震波を足し合わせ、最後にその地震波をスペクトル [A] に適合するようにフィッティングして完了させます (図 2)。スペクトル [B] の固有周期は 10 秒まで、スペクトル [C] は 1 秒~20 秒 (短周期側は告示スペクトル交点から原点に向かう) をそれぞれ適合の周期範囲としています。

表 2 スペクトル [B] とスペクトル [C]

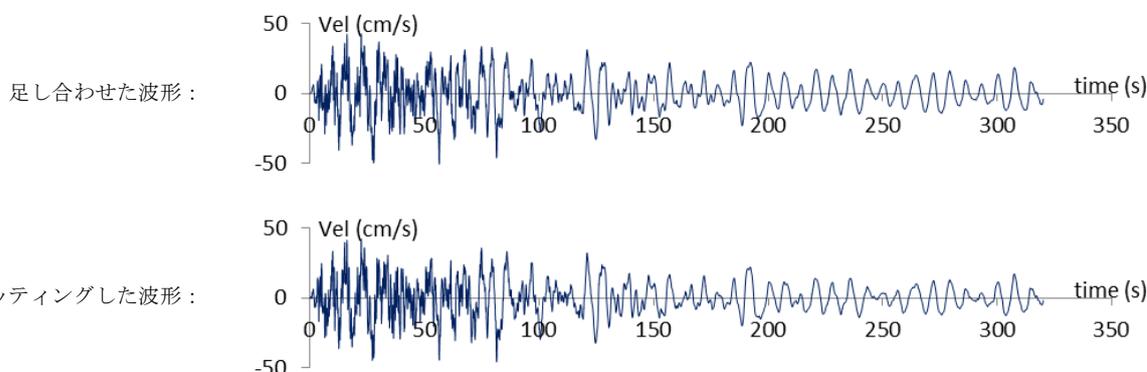
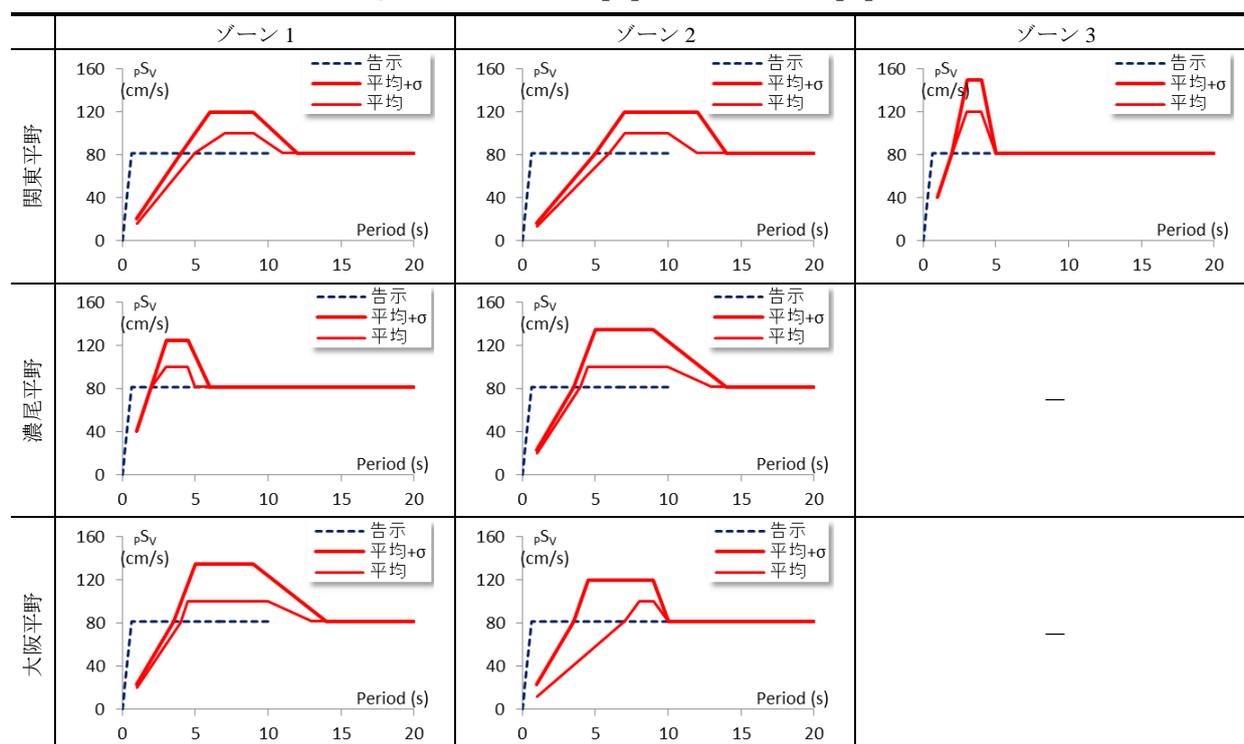


図 2 スペクトル [B] と [C] の適合波を足し合わせた波形と [A] にフィッティングした波形の例 (波形の後半部でフィッティングした波形の振幅が若干小さくなっている)

■ 波形の作成フロー

AIJ 南海トラフ模擬波作成手法の手順を図 3 のフローで示します。

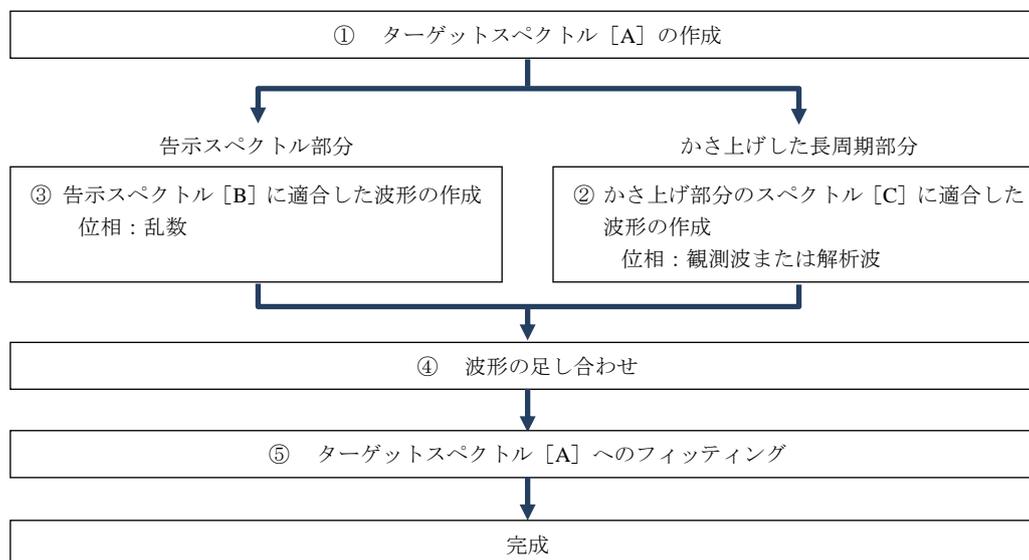


図 3 作成フロー

■ スペクトルの数値データ

AIJ 南海トラフ模擬波作成手法に必要なスペクトルの数値データを以下に示します。

表 3 かさ上げ部分のスペクトル [C] 【平均+σ】の数値データ（網かけがかさ上げ部分の周期）

	ゾーン 1		ゾーン 2		ゾーン 3	
	Period(s)	$S_V(\text{cm/s})$	Period(s)	$S_V(\text{cm/s})$	Period(s)	$S_V(\text{cm/s})$
関東平野	1	20.37	1	16.30	1	40.74
	4	81.49	5	81.49	2	81.49
	6	120.00	7	120.00	3	150.00
	9	120.00	12	120.00	4	150.00
	12	81.49	14	81.49	5	81.49
	20	81.49	20	81.49	20	81.49
濃尾平野	1	40.74	1	23.28	-	
	2	81.49	3.5	81.49		
	3	125.00	5	135.00		
	4.5	125.00	9	135.00		
	6	81.49	14	81.49		
	20	81.49	20	81.49		
	20	81.49	20	81.49		
大阪平野	1	23.28	1	23.28	-	
	3.5	81.49	3.5	81.49		
	5	135.00	4.5	120.00		
	9	135.00	9	120.00		
	14	81.49	10	81.49		
	20	81.49	20	81.49		

「AIJ南海トラフ模擬波作成手法による必要なスペクトルの数値データ」の数値は入力データ(Excel(R))をご利用ください。

また、最後のフィッティングに用いるスペクトル [A] は、以下に示す固有周期 0.02～0.64 秒の告示（速度）スペクトルの数値データを、表 3 のかさ上げ部分の周期（網かけ部）の前に接続します。0.02～0.16 秒まで細かく刻んでいるのは、この周期帯だけ速度スペクトルが周期の 2 次関数になっているためです。

表 4 スペクトル [A] の告示スペクトル
（短周期）部分（速度スペクトル）

Period(s)	$S_v(\text{cm/s})$
0.02	1.21
0.03	1.96
0.04	2.80
0.05	3.74
0.06	4.78
0.07	5.90
0.08	7.13
0.09	8.45
0.10	9.87
0.11	11.38
0.12	12.99
0.13	14.69
0.14	16.49
0.15	18.38
0.16	20.37
0.64	81.49

■ AIJ 南海トラフ模擬波の作成例の条件

AIJ 南海トラフ模擬波作成例に用いる条件を次表に示します。本例では「大阪平野ゾーン 1（平均+ σ ）」を対象とします。

表 5 地震波の作成条件

波形	項目	条件
波形 B : スペクトル [B] に適合する 波形作成	目標スペクトル	告示（極稀）スペクトル
	継続時間	320 秒（時間間隔は 0.01 秒） 固有周期：0.02～10秒
	位相特性	乱数位相（包絡関数を指定） 包絡関数は、 $T_d=120$ 秒の指針案による Jennings 型 ※120 秒で包絡関数が 0.1 となりそれ以降は 0.0 に漸近
波形 C : スペクトル [C] に適合する 波形作成	目標スペクトル	大阪平野ゾーン 1，平均+ σ 固有周期：1～20秒
	継続時間	320 秒（時間間隔は 0.01 秒）
	位相特性	中央防災会議による東海・東南海・南海地震，大阪市大手前 NS ²⁾
波形 B+C のスペクトル [A] へのフィッティング	目標スペクトル	大阪平野ゾーン 1，平均+ σ 固有周期：0.02～20秒
	継続時間	320 秒（時間間隔は 0.01 秒） ※作成時は地震波の因果性 ³⁾ を考慮し，640 秒で作成することとし，最終的に前半の 320 秒を有効とする

■ 『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』の主な操作・入力箇所

『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』で行う主な操作・入力箇所を次に示します。

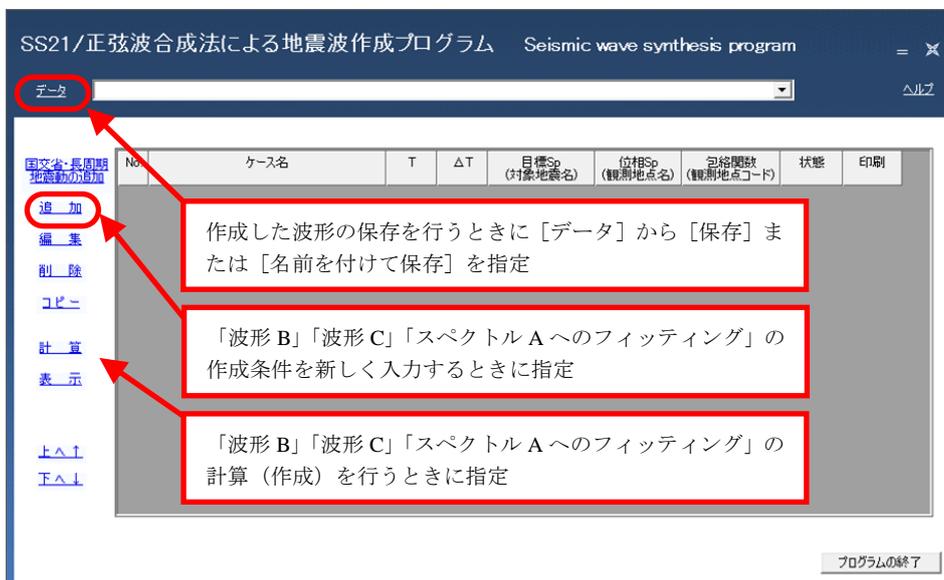


図 4 メイン画面

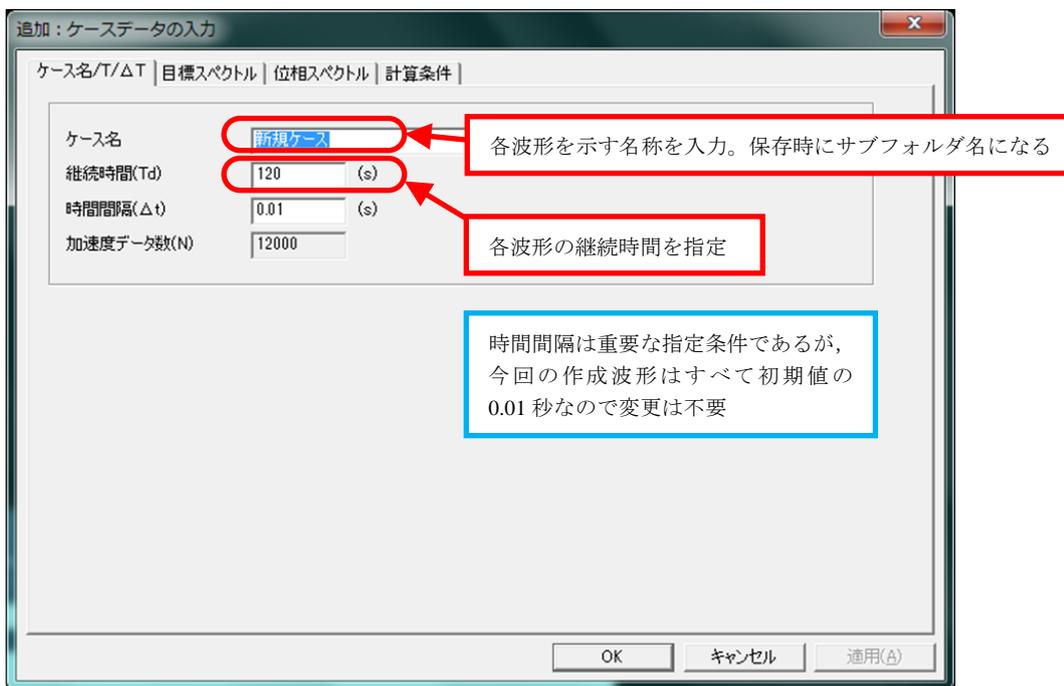


図 5 [ケースデータの入力] - [ケース名/T/ΔT]

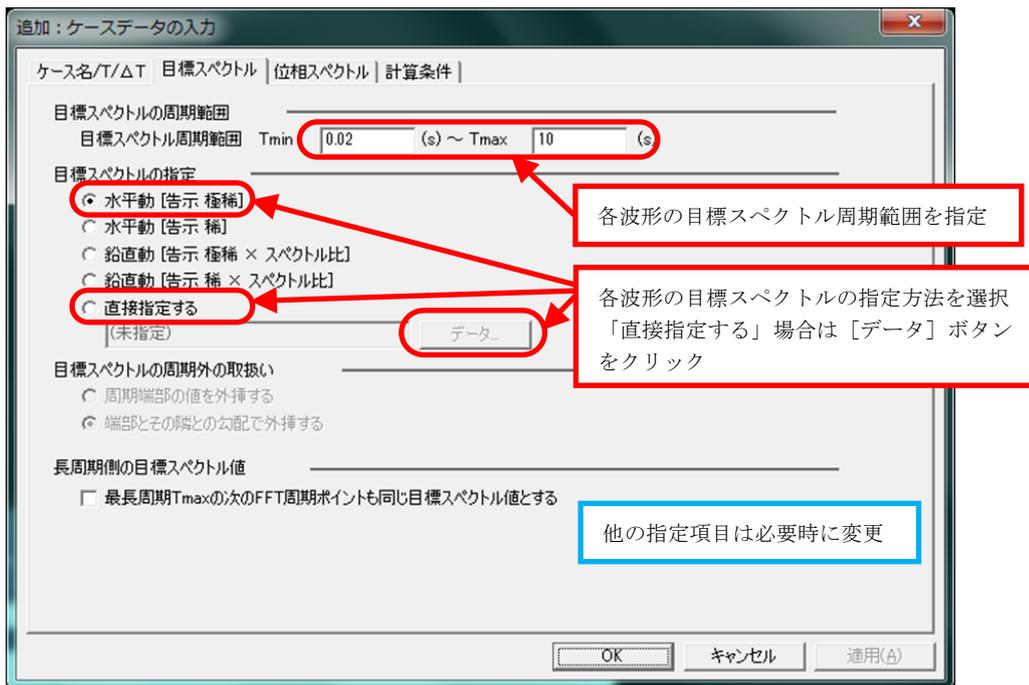


図6 [ケースデータの入力] - [目標スペクトル]

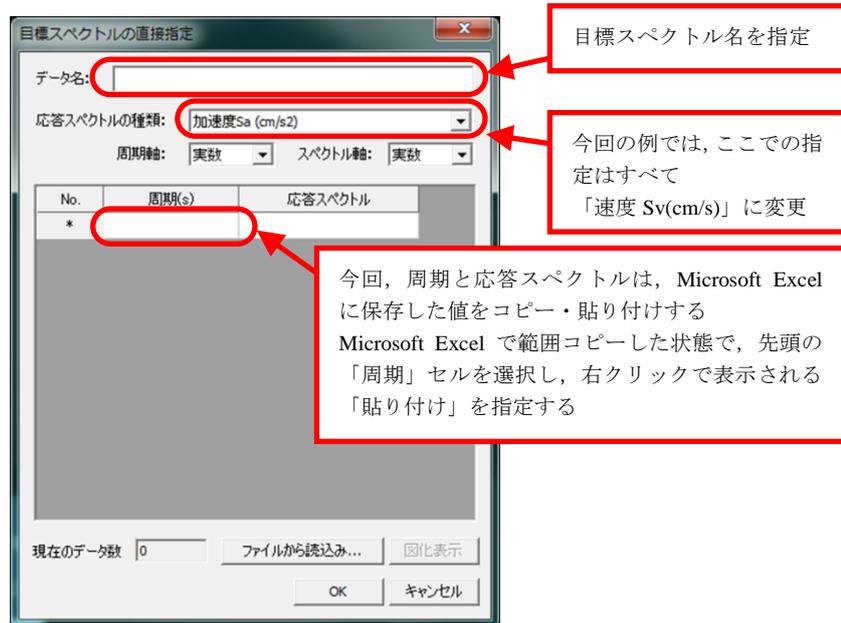


図7 [ケースデータの入力] - [目標スペクトル] - [データ]

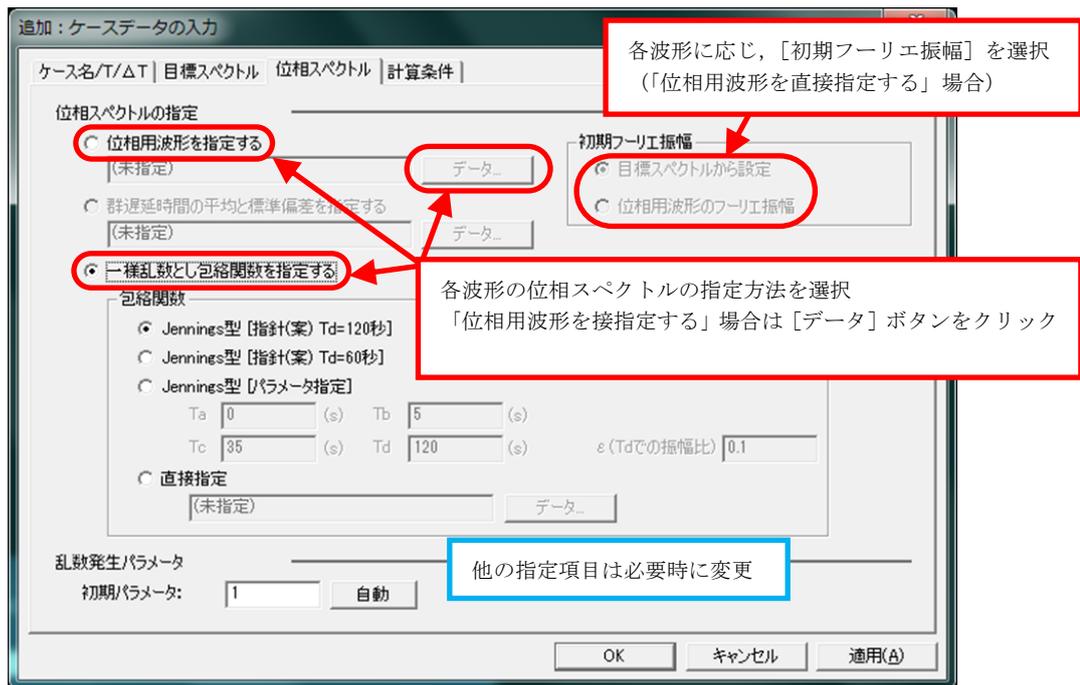


図 8 「ケースデータの入力」 - 「位相スペクトル」

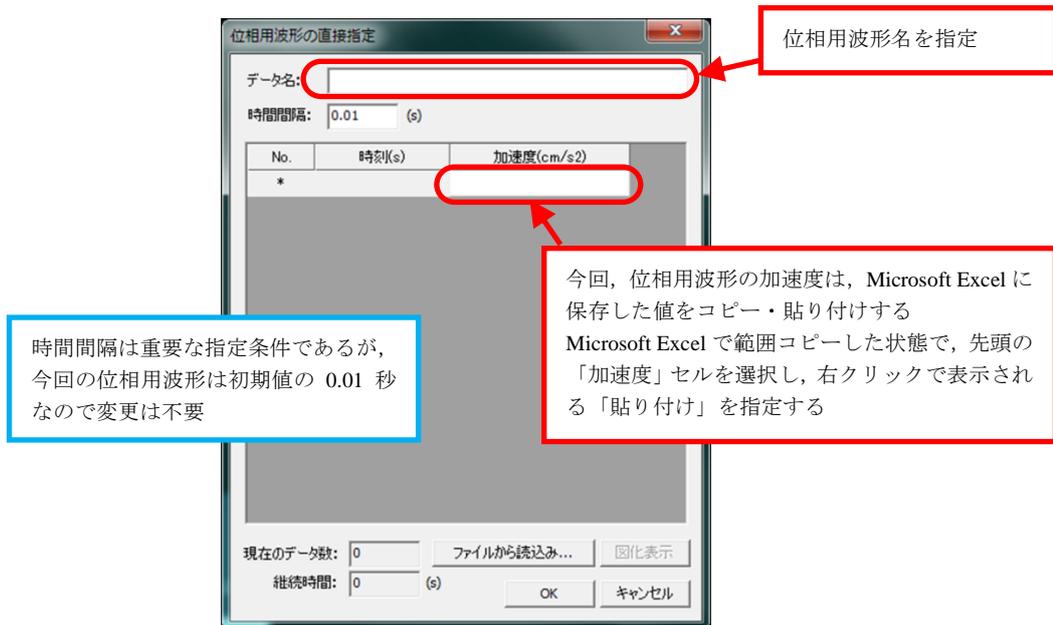


図 9 「ケースデータの入力」 - 「位相スペクトル」 - 「データ」

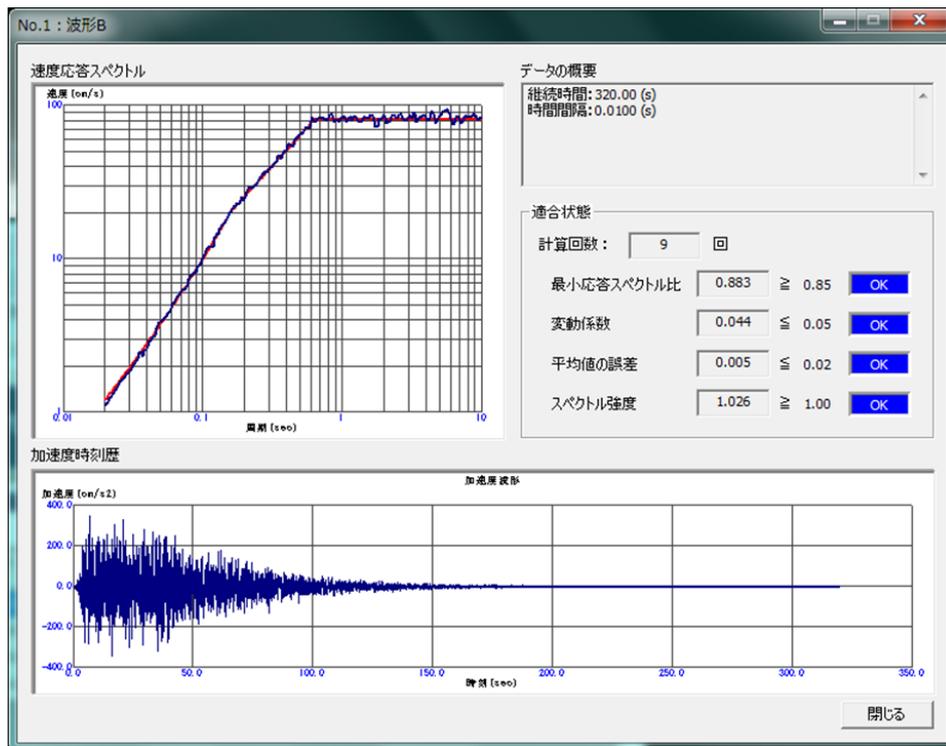


図 10 計算（波形 B の作成）終了

■ 『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』での作成手順

『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』での作成手順と、それに必要な Microsoft Excel で行う操作を以下に示します。

本例では次の手順で行います。

- ① 波形 B の作成条件を入力し、波形を計算（作成）する
- ② 波形 C の目標スペクトルと、位相特性に用いる波形を Microsoft Excel に作成する
- ③ 波形 C の作成条件を入力し、波形を計算（作成）する
- ④ データの保存（または名前を付けて保存）
- ⑤ フィッティング用スペクトル [A] と、波形 B と C の足し合わせを Microsoft Excel に作成する
- ⑥ 波形 A（スペクトル [A] へのフィッティング）の作成条件を入力し、波形を計算（作成）する

以下、初期値から変更する入力項目と Microsoft Excel に対する操作を示します。

➤ 波形 B の作成条件

表 6 波形 B の作成条件

タブ名, ダイアログ名	項目	単位	入力値
ケース名/T/ ΔT	ケース名	(s)	“波形 B” (任意)
	継続時間	(s)	320

➤ 波形 C の目標スペクトルと位相特性に用いる波形を Microsoft Excel に作成

波形 C の目標スペクトル「大阪平野ゾーン 1(平均+ σ)」のスペクトルデータ(表 3)を Microsoft Excel に保存します。

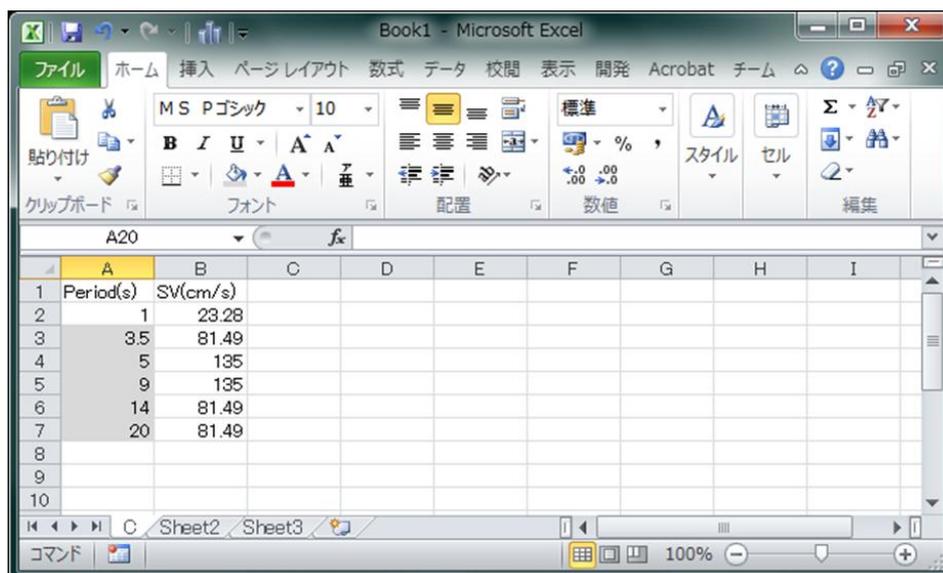


図 11 Microsoft Excel に作成されたスペクトル [C] (A 列: 固有周期, B 列: 速度スペクトル)

波形 C の位相特性に用いる，中央防災会議²⁾による東海・東南海・南海地震，大阪市大手前近傍での想定波（NS）の加速度データ（中央防災会議²⁾が提供する地震波）を準備します。

加速度データを Microsoft Excel に保存します。

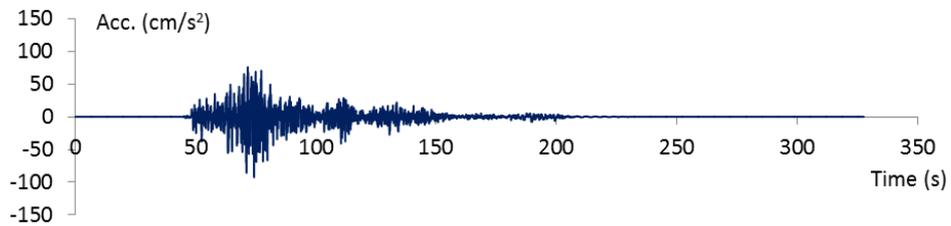


図 12 中央防災会議，東海・東南海・南海地震，大阪市大手前 NS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Time	大手前NS							
2		0							
3	0.01	0							
4	0.02	0							
5	0.03	0							
6	0.04	0							
7	0.05	0							
8	0.06	0							
9	0.07	0							
10	0.08	0							
11	0.09	0							
12	0.1	0							
10002	100	-0.01							
10003	100.01	-1.608							
10004	100.02	-2.973							
10005	100.03	-2.565							
10006	100.04	-0.666							
10007	100.05	2.047							
10008	100.06	3.93							
10009	100.07	3.542							
10010	100.08	2.107							
10011	100.09	0.903							
10012	100.1	1.086							

図 13 Microsoft Excel に保存された大阪市大手前 NS の数値データ（A 列：時刻，B 列：加速度）

➤ 波形 C の作成条件

表 7 波形 C の作成条件

タブ名, ダイアログ名	項目	単位	入力値
ケース名/T/ Δ T	ケース名	(s)	“波形 C” (任意)
	継続時間	(s)	320
目標スペクトル	目標スペクトル周期範囲 Tmin	(s)	1
	目標スペクトル周期範囲 Tmax	(s)	20
	目標スペクトルの指定		直接指定する
目標スペクトルの直接指定 ([データ] で表示)	データ名		“スペクトル C” (任意)
	応答スペクトルの種類		速度 Sv(cm/s)
	周期, 応答スペクトル	(s) (cm/s)	Microsoft Excel で周期, 目標スペクトルの範囲をコピーし, 先頭の周期セルを選択し, 右クリックより貼り付け
位相スペクトル	位相スペクトルの指定		位相波形を指定する
位相用波形の直接指定 ([データ] で表示)	データ名		“大手前 NS” (任意)
	加速度	(cm/s ²)	Microsoft Excel で加速度の範囲をコピーし, 先頭の加速度セルを選択し, 右クリックより貼り付け

- フィットting用スペクトル [A] と, 波形 B と C の足し合わせを Microsoft Excel に作成
 フィットting用スペクトル [A] は, 告示スペクトル [B] の短周期部分 (表 4) にスペクトル [C]
 (表 3) の網掛け部分の周期部分を後続させます。

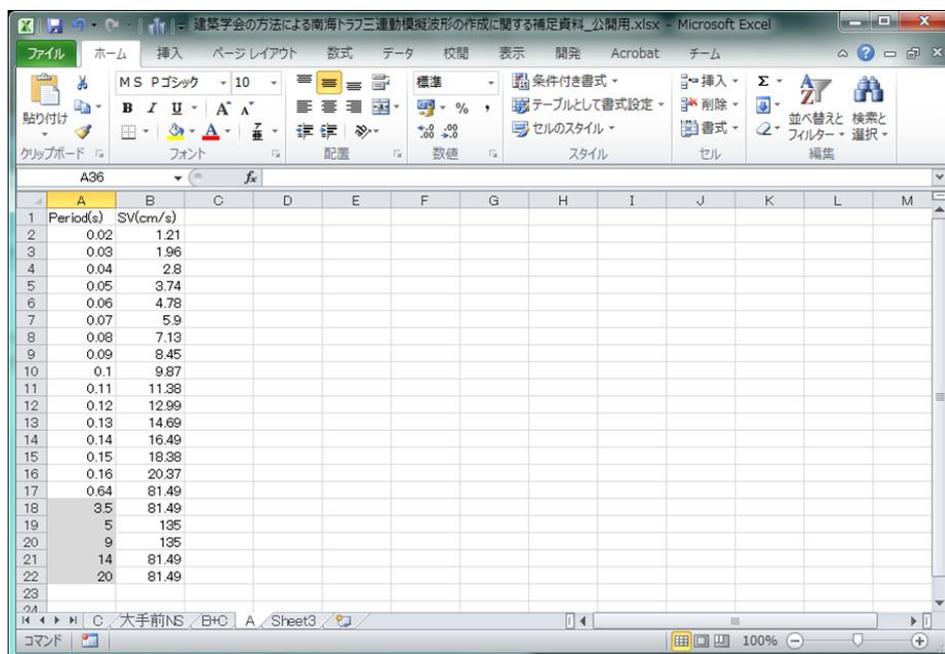


図 14 Microsoft Excel に作成されたスペクトル [A] (A 列: 固有周期, B 列: 速度スペクトル)

「波形 B」と「波形 C」の足し合わせを行うために、データの保存後に生成される各サブフォルダの「加速度波形.csv」の加速度データ（波形 B と波形 C）を貼り付け、各時刻の両者の和（波形 B+C）を計算します。

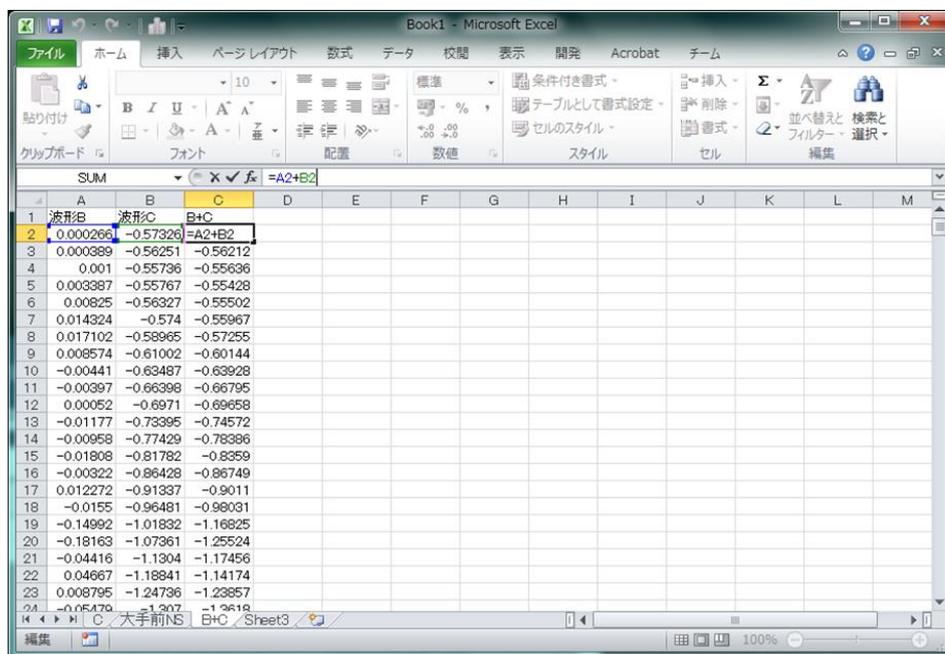


図 15 Microsoft Excel に波形 B と C の足し合わせを計算

➤ 波形 A の作成（スペクトル [A] へのフィッティング）条件

表 8 波形 A の作成条件

タブ名, ダイアログ名	項目	単位	入力値
ケース名/T/ΔT	ケース名	(s)	“波形 A” (任意)
	継続時間	(s)	640
目標スペクトル	目標スペクトル周期範囲 Tmin	(s)	0.02
	目標スペクトル周期範囲 Tmax	(s)	20
	目標スペクトルの指定		直接指定する
目標スペクトルの直接指定 ([データ] で表示)	データ名		“スペクトル A” (任意)
	応答スペクトルの種類		速度 Sv(cm/s)
	周期, 応答スペクトル	(s) (cm/s)	Microsoft Excel で周期, 目標スペクトルの範囲をコピーし, 先頭の周期セルを選択し, 右クリックより貼り付け
位相スペクトル	位相スペクトルの指定		位相波形を指定する
	初期フーリエ振幅		位相用波形のフーリエ振幅
位相用波形の直接指定 ([データ] で表示)	データ名		“波形 B+C” (任意)
	加速度	(cm/s ²)	Microsoft Excel で加速度の範囲をコピーし, 先頭の加速度セルを選択し, 右クリックより貼り付け

- 波形 A の作成（スペクトル [A] へのフィッティング）完了

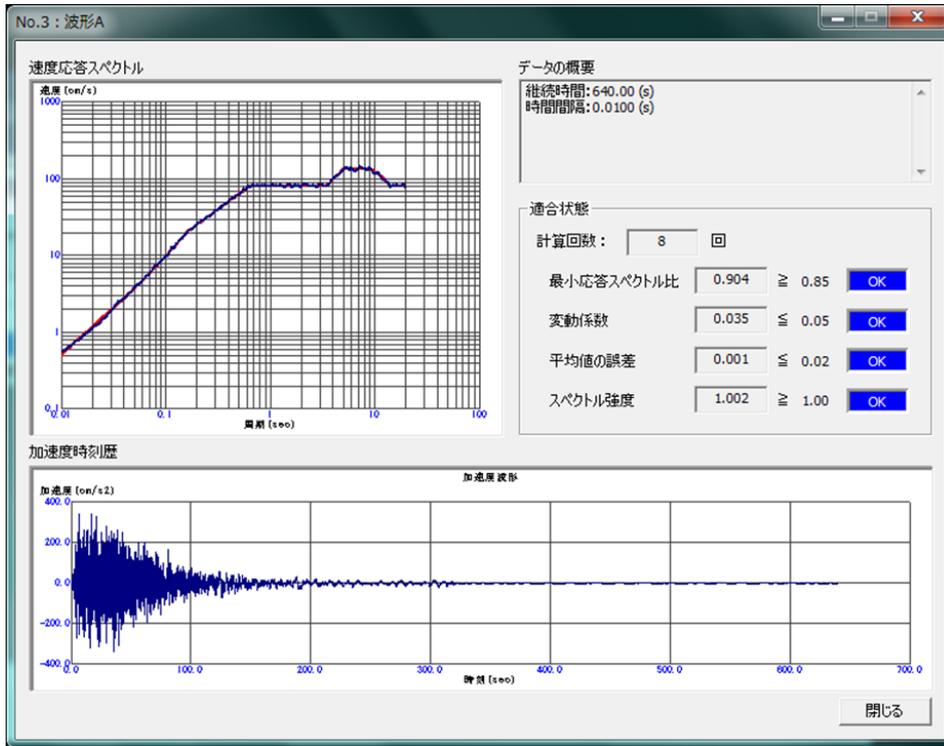


図 16 スペクトル [A] へのフィッティングの完了

■参考1 作成した波形 A, B, C の加速度と速度時刻歴

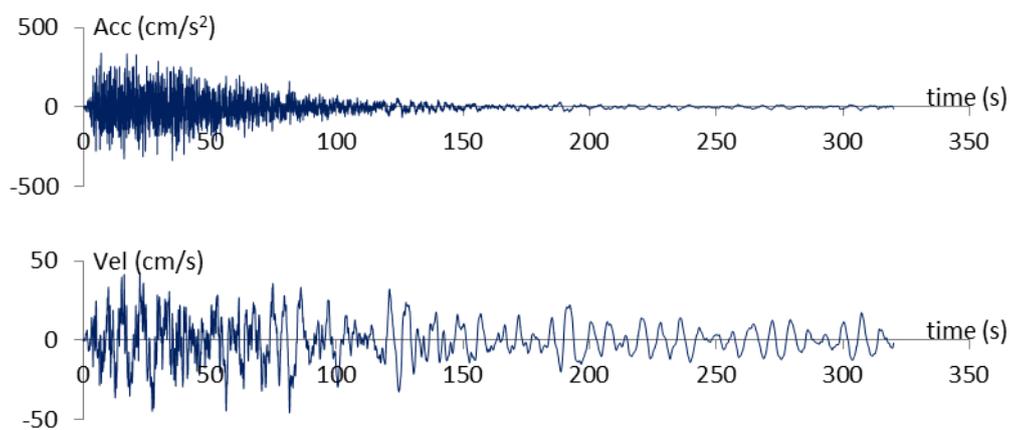


図 17 波形 A

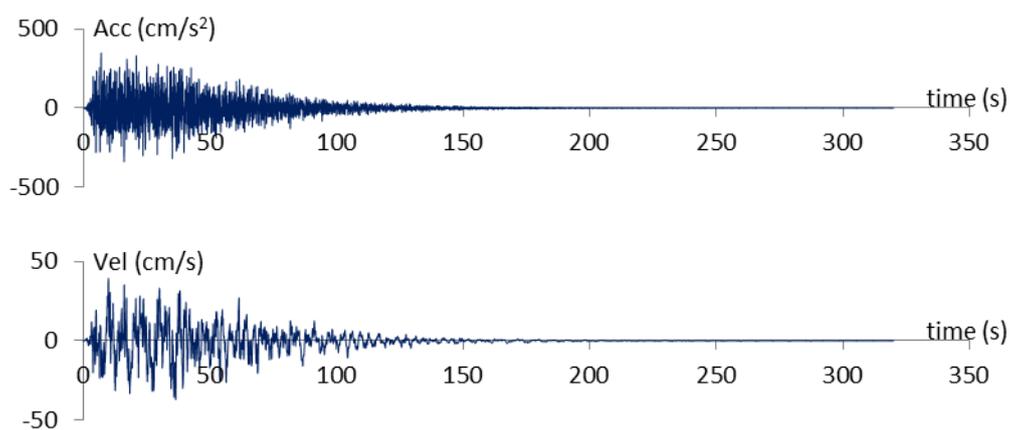


図 18 波形 B

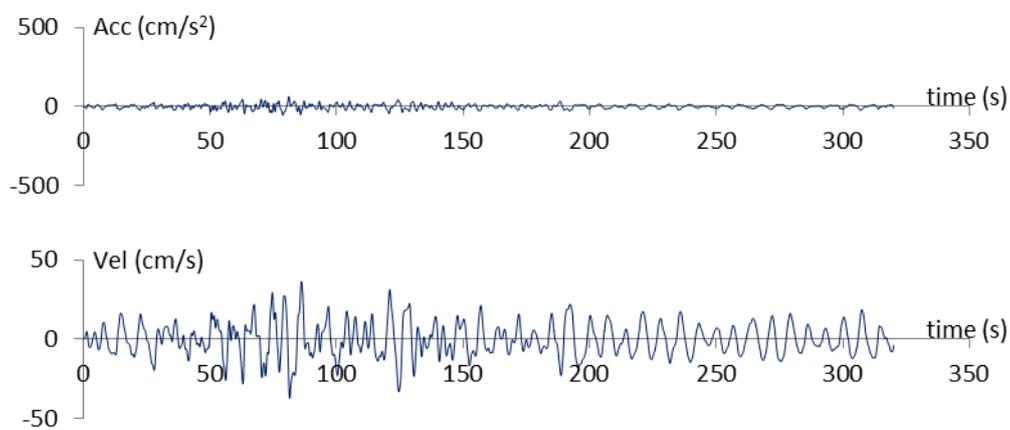


図 19 波形 C

■参考 2 作成した波形 A, B, C のエネルギースペクトル

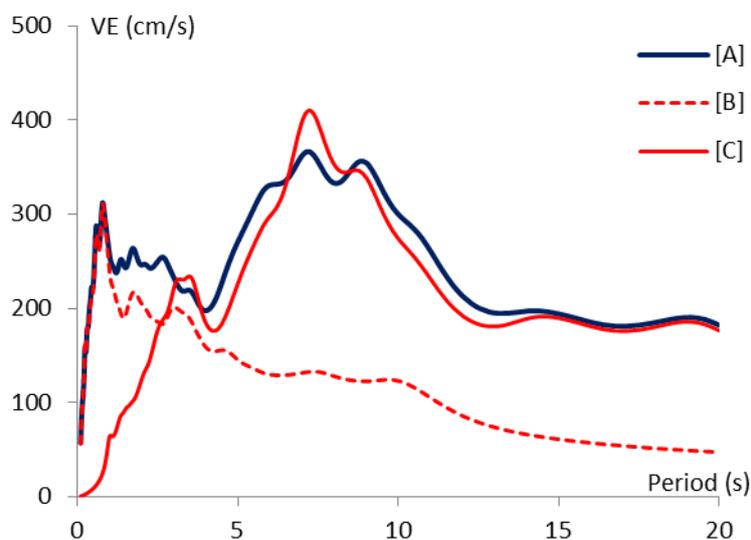


図 20 エネルギースペクトル (周期=0.1~20s, 減衰定数=10%)

■参考 3 スペクトル [A] へのフィッティングにおいて、初期フーリエ振幅の指定を「目標スペクトルから設定」とした場合の結果

下図に、初期フーリエ振幅を「目標スペクトルから設定」した波形 A を示します。波形合成結果としては違和感のない結果ですが、本手法は波形 B と波形 C を足し合わせた波形をスペクトル [A] にフィッティングさせることが目的のため、若干問題があります。

図 17 の波形 A (「位相用波形のフーリエ振幅」とした) の後半の波形は図 19 の波形 C の形状をよく継承した (足し合わせた) ものとなっていますが、図 21 の波形 A の後半部はやや形状が異なり、短周期成分も混在しています。波形の形状が変化したのは、波形合成の初期値に用いるフーリエ振幅に、足し合わせた波形 (B+C) の情報が継承されなくなったことが原因で、このようなフィッティングを目的とする場合は「位相用波形のフーリエ振幅」とすることが必要です。

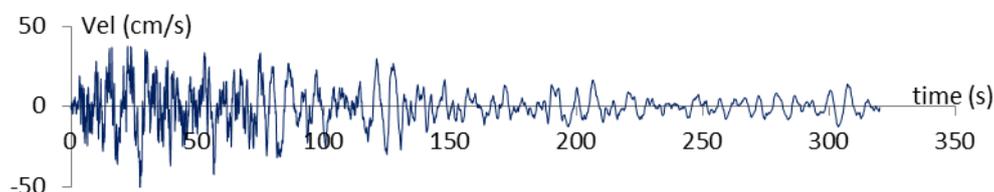


図 21 初期フーリエ振幅を「目標スペクトルから設定」した波形 A

また、通常の波形合成で位相特性に実際の地震波の位相スペクトルを用いる場合にも、初期フーリエ振幅を「位相用波形のフーリエ振幅」とすることで、より位相用波形の形状に近い波形を合成することができます。必要によってこの条件を選択することもできます (本例の波形 C は「目標スペクトルから設定」しています)。

■まとめ

AIJ 南海トラフ模擬波作成手法の概要と、『SS21/正弦波合成法による地震波作成プログラム』を利用した同手法による大阪平野ゾーン1（平均+ σ ）」での模擬地震波作成手順を示しました。

本手法の特徴は、告示スペクトルに長周期成分をかき上げた目標スペクトルを設定し、また告示成分波（波形 B）の後続に長周期成分波（波形 C）を卓越させるため、それぞれに作成した波形を足し合わせて最終調整（フィッティング）する（波形 A）ことにあります。ゾーンごとの目標スペクトルが示されていることと、手法が明快なため設計実務での利用効果は高いものと思われま

す。一方、波形 B と波形 C はそれぞれ独立に作成されることが一般で、互いに時間的関連がないため、それを単純に足し合わせることにやや注意が必要と言えます。現実的には時間ずれによるばらつきを考慮して、いくつかのケースで足し合わせた波形を対象に作成することが必要と思われま

■参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対応策－専門家として知っておきたいこと－，丸善出版，2013.10
- 2) 中央防災会議：東南海、南海地震等に関する専門調査会「東南海、南海地震の被害想定について」（平成 15 年 9 月 17 日）
- 3) 理論地震動研究会：地震動－その合成と波形処理－，鹿島出版会，1995.3

以上

(2014/04/07 山崎久雄)