

NOWT-PARI 成分波作成プログラム

使用説明書

平成 26 年 10 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所

海洋水工部 波浪研究チーム

目 次

1. 線境界入射波法における吸収造波境界.....	1
1.1. 線境界入射波法の概要	1
1.2. 理論スペクトルによる成分波の作成	2
2. JONSWAP 型および任意スペクトルの成分波の作成方法	4
3. 成分波作成プログラムの説明	6

1. 線境界入射波法における吸収造波境界

1.1. 線境界入射波法の概要

ブシネスクモデルは、入射境界から解析領域に波を入射する方法として、解析領域の一端に造波境界を設け、この境界上に入射波の水位変動と水平流速を与えることにより発生させる線境界入射波法¹⁾を用いている。

線境界入射波法は、造波境界で線形化された波形および流速の時間変動を与えるモデルであり、解析領域内のある差分格子境界を入射波境界とし、入射境界を挟む差分式を計算する際に、それぞれの領域において入射波の水平流速や水位を加減することにより、反射波を沖側へ透過させながら入射波を岸側方向へのみ造波する。したがって、入射境界より岸側では入射波と反射波が共存する領域、沖側では入射境界を透過した反射波のみが存在する領域となる。線境界入射波法によって沖側に透過される反射波は、沖側に配置されたエネルギー吸収帯により減衰される。このような操作により、入射境界線では入射波が計算領域内に入射されるとともに、計算領域からの反射波が自由に領域外に透過する条件が満足される。

入射波の時間波形の作成方法は、シングルサンメーションとダブルサンメーションの 2 通りの方法がある。ダブルサンメーションに比べてシングルサンメーションは、目標とする多方向不規則波を生成するための成分波数を少なくすることができ、計算時間を短くすることが可能である。そのため、本ブシネスクモデルでは、式(1.1)に示すシングルサンメーションを採用している。

$$\eta = \sum_{n=0}^{N_s} a_n \cos(k_x x \cos \theta + k_y y \sin \theta + 2\pi f_n t + \varepsilon_n) \quad (1.1)$$

式(1.1)中の添字の n は n 番目の成分波の値であることを示し、 k_n ($=2\pi/L_n$; L_n は n 番目の成分波の波長)、 f_n ならびに θ_n はそれぞれ、 n 番目の成分波の周波数、波数ならびに波向を示している。また、 N_s は成分波の総数、 t は時間であり、 n 番目の成分波の振幅 a_n は式(1.2)から計算される。

$$a_n = \sqrt{2S(f_n)\delta f_n} \quad (1.2)$$

ここで、 $S(f_n)$ および δf_n はそれぞれ、周波数スペクトルとスペクトル幅を表す。また、 ε_n は n 番目の成分波の位相差で、 $0 \sim 2\pi$ の値をとる一様乱数を与える。

多方向不規則波を用いた計算を行う際には、上記の周波数スペクトルに加え方向関数が

必要となる．本ブシネスクモデルでは，Mitsuyasu et al.²⁾が現地観測結果から導いた式を合田ら³⁾が改良した式(1.3)の方向関数を用いている．

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (1.3)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (1.4)$$

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f / f_p)^3 & f \leq f_p \\ S_{\max} (f / f_p)^{-2.5} & f \geq f_p \end{cases} \quad (1.5)$$

式(1.5)中の S_{\max} は多方向不規則波の方向集中度を表すパラメータであり，波向がそろっているほど大きな値をとる． S_{\max} の値としては，合田⁴⁾にならい表 1 に示す値を目安として用いる．

表 1 方向集中度パラメータ

風波	$S_{\max}=10$
減衰距離の短いうねり（波形勾配が比較的大）	$S_{\max}=25$
減衰距離の長いうねり（波形勾配が小）	$S_{\max}=75$

1.2. 理論スペクトルによる成分波の作成

線境界入射波法の概要で述べたように，ブシネスクモデルでは入射境界から時間変動波形を入射することで計算領域内へ入射波を与える．

シングルサンメーションを用いて時間変動波形を作成する際には，式(1.1)に示したように，規則波成分を多数重ね合わせることで不規則波形を作成する．そのため，シングルサンメーションによって不規則波を作成するには，入射波の代表量である有義波高，有義波周期，主波向ならびに方向集中度から理論スペクトルを用いて成分波を作成する必要がある．ブレットシュナイダー・光易型の成分波については，NOWT-PARI 中で計算が可能であるが，JONSWAP 型および任意の成分波については，次節に示す方法により成分波を作成する．

[JONSWAP 型]

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \times \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma]} \quad (1.6)$$

$$\beta_J \doteq \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \times [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (1.7)$$

$$T_p \doteq T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (1.8)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \leq f_p \\ 0.09 & f \geq f_p \end{cases} \quad (1.9)$$

ここで、 $S(f)$: スペクトル密度 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
 $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
 $T_{1/3}$: 有義波周期 (s)
 T_p : ピーク周波数 ($=1.05 T_{1/3}$) (s)
 f : 周波数 (Hz)
 f_p : ピーク周波数 ($=1.0/T_p$) (Hz)
 γ : スペクトルピークの鋭さを表すパラメータ

成分波の波向の決定方法として、シングルサンメーションによる不規則波は、異なった周波数の成分波がそれぞれ異なった波向を持つ成分波の線型重ね合わせとして作成する。

各周波数成分の波向は、まず式(1.6)～(1.9)に示した理論スペクトルから成分波を作成した後、各成分波の方向分布関数を式(1.6)から算出する。第 n 成分の方向角は、第 n 成分の代表周波数 f_m における方向分布関数の累加値 $P(f_m; \theta)$ が、 $[0, 1]$ の範囲の値をランダムに一樣な確率で選ばれるように定める。図 1 に、第 n 成分波の方向角の決定方法の模式図を示す。

$$P(f_m; \theta_m) = \int_0^{\theta_m} G(f_m; \theta) d\theta \quad : \quad 0 \leq P(f_m; \theta_m) \leq 1 \quad (1.10)$$

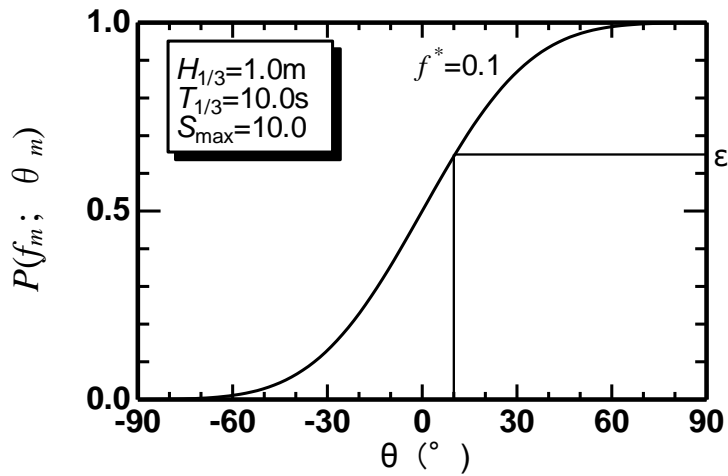


図 1 第 n 成分波の方向分布関数の累加曲線

2. JONSWAP 型および任意スペクトルの成分波の作成方法

JONSWAP 型および任意スペクトル形については、以下の方法により成分波の作成を行っている。

まず、周波数スペクトルおよび方向スペクトルの結果から全エネルギーを算出し、その全エネルギーを成分波の個数 N_s に応じて等分割する。

エネルギー等分割後、その等分割されたエネルギーに応じて成分波の区間を算出する。成分波の区間の算出は、図 2 に示すように Δf 区間内のスペクトル形を直線で近似し、その区間の面積を順次足し合わせていくことで、等分割されたエネルギーと等しくなる区間の周波数を選定している。その際、 Δf を小さく取ること関数の近似度を上げることが可能である。なお、エネルギー等分割となる区間を選定する際には、同時に各区間の面積が半分となる周波数を調べ、それを各成分波の代表周波数としている。

ここで、近似直線の傾きは、微分係数 $S'(f)$ から算出する。JONSWAP 型については、式(1.11)の微分係数 $S'(f)$ を用いて算出している。一方、任意の周波数スペクトルや方向スペクトルを用いる場合には、微分係数式を与えることが出来ないため、離散化されたデータをもとに数値解析により微分係数を算出している。

$$S'(f) = 5\beta_j H_{1/3}^2 \{-T_p^{-4} f^{-6} + T_p^{-8} f^{-10}\} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \\ - \beta_j H_{1/3}^2 \sigma^{-2} T_p^{-3} f^{-5} \exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2 - 1.25(T_p f)^{-4}] \ln \gamma (T_p f - 1) \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (1.11)$$

ここで、 $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
 f : 周波数 (Hz)
 γ : スペクトルピークの鋭さを表すパラメータ
 β_j : 式(1.7)から求まる値
 T_p : 式(1.8)から求まる値
 σ : 式(1.9)から求まる値

成分波を算出後、各成分波の波向を求める。波向を算出する際、JONSWAP 型および任意の周波数スペクトルについては、上記の方法により成分波の代表周波数を算出した後、式(1.3)から方向関数を算出し、その方向関数の累加値 $P(f_m; \theta)$ に乱数を当てはめることで各成分波の波向を決定する。

一方、任意の方向スペクトルを与える際には、与えられた方向スペクトルから成分波毎の方向スペクトルの累加値を算出し、その累加値に乱数を当てはめることで成分波の波向を決定する。なお、方向スペクトルは離散データであるため、代表周波数に対応する方向関数値を求める際には、3 次スプライン関数を用いて補完し算出している。

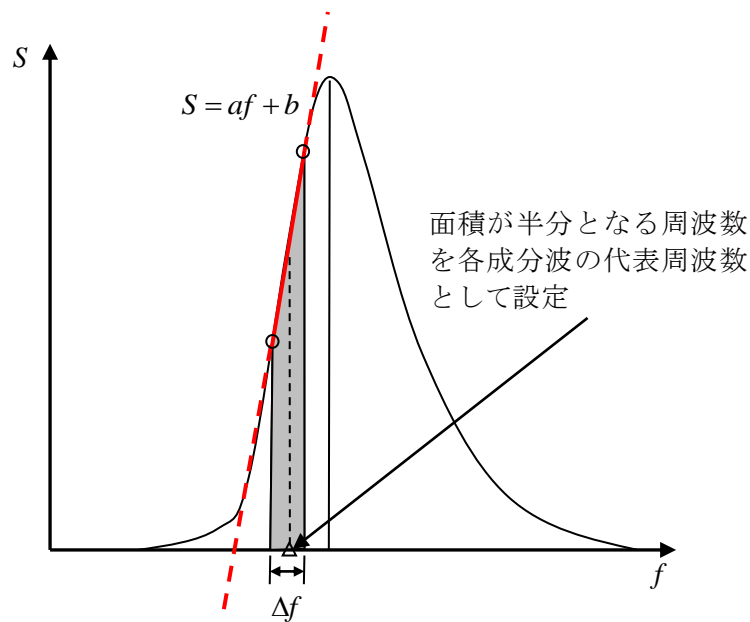


図 2 エネルギー等分割

また，現地観測データの解析結果やエネルギー平衡方程式計算結果から得られる，入射複数の方向スペクトルを与えて境界線上で計算することができる．これは，実務における現地の地形特性や計算容量，演算時間等の制約に対応することを目的とするものであり，詳しい手順や手法については平山ら⁵に詳しい．簡単な手順を以下に示す．

- 手順(1)：造波境界上の複数の代表地点で与えた任意形状の方向スペクトルを平均し，造波境界全長に対して仮想的な方向スペクトルを 1 つ作成．
- 手順(2)：手順(1)で作成した仮想方向スペクトルに対しエネルギー等分割法を適用し，各成分波の代表周波数を決定．さらに，各周波数に対する方向分布の累積曲線に乱数を当てはめ，各成分波の波向を決定．
- 手順(3)：手順(2)で決定した各成分波の代表周波数を用いて，代表地点で与えた周波数スペクトルを分割し，代表地点における各成分波の振幅を決定．
- 手順(4)：代表地点間の各計算格子上で与える各成分波の振幅を，線形補間により決定．ただし，手順(2)で決定した周波数，波向に加え，初期位相は各計算格子で共通．
- 手順(5)：手順(4)で得た各計算格子上的各成分波諸元を用いて，従来の境界入射法により，複数の方向スペクトルからなる 1 つの多方向不規則波を造波．

3. 成分波作成プログラムの説明

JONSWAP 型および任意スペクトルから成分波を作成するには，成分波作成プログラムを使用して作成する．図 3 に，任意の周波数・方向スペクトルから成分波を作成するためのプログラムのディレクトリ構成を示す．

mkspec : mkspe.exe (実行プログラム), cont.txt (必須)

└─ spectrum フォルダ : 入力データ

図 3 プログラムディレクトリ構成

任意の周波数・方向スペクトルから成分波を作成する際には，spectrum フォルダに現地観測またはエネルギー平衡方程式から得られた周波数スペクトルや方向スペクトルを入力データファイルとして入れた後，cont.txt で設定したパラメータを基に成分波の作成を行う．

表 2 に各設定パラメータの書式，表 3 に設定ファイル (cont.txt) の条件設定変数の一覧を示す．

表 2 成分波作成のための設定変数の書式 (cont.txt)

1 行目	: (10X,A50)	STYPE			
2 行目	: (10X,I10)	NS			
3 行目	: (10X,F10.0)	SMAX			
4 行目	: (10X,A50)	FILEIN			
5 行目	: (10X,A50)	FILEOUT			
6 行目	: (10X,4F10.0)	H13	T13	SIT0	GAMMA
7 行目	: (10X,2F10.0)	STARTE	ENDE		
8 行目	: (10X,I10)	EPS			

表 3 パラメータの説明 (cont.txt)

変数	Format	変数の説明
STYPE	A5	入力ファイルとして用いるスペクトルデータの形式 JNS : JONSWAP Emep : 方向スペクトル Sspe : 周波数スペクトル Ene : エネルギー平衡方程式の出力スペクトルデータ (港研フォーマット)
NS	I10	成分波数 (500 ≤ NS ≤ 1000)
SMAX	F10.0	光易型方向関数の方向集中度パラメータ STYPE に JNS または Sspe を指定した場合に有効. Smax=9999.0 を指定した場合, 一方向波となる
FILEIN	A50	入力する周波数・方向スペクトルのファイル名
FILEOUT	A50	成分波ファイル出力名
H13,T13,SIT0 GAMMA	4F10.0	有義波高, 有義波周期, 波向, γ JONSWAP 型の成分波ファイル作成時以外では, 本パラメータは使用しないが, 計算条件確認のために入力することが望ましい.
STARTE, ENDE	2F10.0	JONSWAP 型スペクトルから成分波を求める際の周波数範囲 STARTE : スタート周波数 (Hz) ENDE : エンド周波数 (Hz) ※図 4 参照
EPS	I10	式(1.1)に示す ε (位相差)を求めるための乱数初期値

任意スペクトルを用いる場合の入力データファイルの書式は, STYPE で指定したファイルタイプによって異なる. 以下に, ファイルタイプ別の入力データファイルの書式を示す.

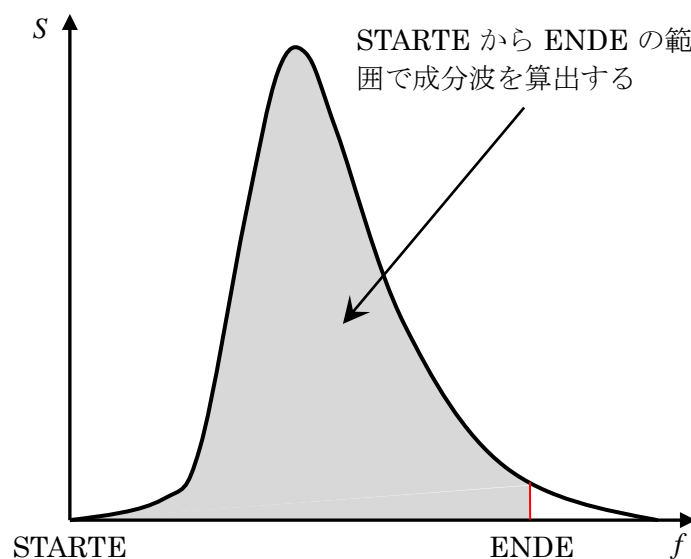


図 4 JONSWAP 型スペクトル積分範囲

[STYLE に JNS を指定した場合]

STYLE に JNS を指定した場合には、式(1.6)～(1.9)に示した JONSWAP 型の関数スペクトルから成分波を作成する。そのため、外部入力データファイルは必要とせず、cont.txt 内の FILEIN パラメータはダミーとなる。

[STYLE に Ene を指定した場合]

STYLE に Ene を指定した場合には、エネルギー平衡方程式から得られた方向スペクトルを外部入力データとして成分波を作成する。なお、エネルギー平衡方程式の解析結果から得られた方向スペクトル（外部入力データ）は、コントロールファイル（cont.txt）で FILEIN として指定する。

エネルギー平衡方程式における格子番号(I_{Ene} , J_{Ene})と NOWT-PARI 計算の格子番号(I_n , J_n)の情報を与えるデータファイル（格子情報ファイル）を準備する。ファイル名は方向スペクトルデータファイル名[FILEIN]の後ろに「.pnt」を付けたものとする。ただし、 I_{Ene} は沿岸方向に共通の格子番号であるためファイルのヘッダ一部分に保存することとしている。また、 I_n は入射波境界格子 ($I_n=I0$) であるため不要である。

以下に示すエネルギー平衡方程式から得られる方向スペクトルの書式（外部入力データの書式）は、「独立行政法人港湾空港技術研究所」保有の「波浪変形計算システム Ver.2.2R7」の計算結果から得られる方向スペクトルの出力結果に合わせた書式となっている。

CC							
A20							
NF_P				ND_P			
I5				I5			
F_P(I), I=1, NF_P							
8E10.3							
F2_P(I), I=1, NF_P							
8E10.3							
NUM_P1							
I5							
NB_P	N2_P	IENE	JENE	H_P	T_P	DIR_P	SMAX_P
I5	I5	I5	I5	F10.4	F10.4	F10.4	F10.4
D_P(J)		SP_P(I,J), I=1, NF_P					
8E10.3							

- CC : 注釈（プログラム中では使用されない）
NF_P : 周波数分割数 ($NF_P \leq 3000$)
ND_P : 方向分割数 ($ND_P \leq 200$)
F_P(I) : 周波数分割数 I 番目の中心周波数 (Hz)（プログラム中で使用しない），($I \leq 3000$)
F2_P(I) : 周波数分割数 I 番目の周波数幅 (Hz)，($I \leq 3000$)

NUM_P1 : データ数 (収録されているスペクトルデータのセット数)
 NB_P : 地点番号 (プログラム中で使用しない)
 N2_P : (プログラム中で使用しない)
 IENE : I 方向 (岸沖方向) 格子番号
 JENE : J 方向 (沿岸方向) 格子番号
 H_P : 有義波高 (m) (プログラム中で使用しない)
 T_P : 有義波周期 (s) (プログラム中で使用しない)
 DIR_P : 波向 (deg) (プログラム中で使用しない)
 SMAX_P : 方向集中度パラメータ (プログラム中で使用しない)
 D_P(J) : 方向 (deg.)
 SP_P(I,J) : エネルギー平衡方程式から得られた方向スペクトル

```

READ(FILE 番号,'(A15)') CC
READ(FILE 番号,'(2I5)') NF_P, ND_P
READ(FILE 番号,'(8E10.3)') (F_P(I), I=1, NF_P)
READ(FILE 番号,'(8E10.3)') (F2_P(I), I=1, NF_P)
READ(FILE 番号,'(I5)') NUM_P1
READ(FILE 番号,'(4I5,4F10.4)') NB_P,N2_P,IN_P,JN_P,H_P,T_P,DIR_P,SMAX_P
DO J = 1, ND_P
  READ(FILE 番号,'(8E10.3)') D_P(J), (SP_P(I,J), I=1, NF_P)
ENDDO
  
```

〈Ene→NOWT-PARI データ受け渡し, 格子情報ファイル書式〉

NUM_P	IENE_P
I5	I5
JN_P(K)	JENE_P(K)
I5	I5

ファイル名は, FILEIN の後ろに
「.pnt」を付加したもの

存在しない場合には, 入射境界で単
一のスペクトル(スペクトル入力デ
ータの1つめ)を入射させる

NUM_P : 抽出する地点の数 (NUM_P ≤ 1000)
 IENE_P : エネルギー平衡方程式における岸沖方向格子番号
 JN_P(K) : NOWT-PARI における沿岸方向格子番号
 JENE_P(K) : エネルギー平衡方程式における沿岸方向格子番号

```

READ(FILE 番号,'(2I5)') NUM_P, IENE_P
DO K = 1, NUM_P
  READ(FILE 番号,'(2I5)') JN_P(K), JENE_P(K)
ENDDO
  
```

[STYPE に Emep を指定した場合]

STYPE に Emep を指定した場合には、方向スペクトルの解析結果を外部入力データとして成分波を作成する。なお、方向スペクトルデータ（外部入力データ）は、コントロールファイル（cont.txt）において FILEIN で指定する。

複数のスペクトルを入力する際には、NOWT-PARI の（沿岸方向）格子番号を指定する必要がある。地点数と、方向スペクトルデータの保存順と同じ順序で NOWT-PARI の格子番号を保存したファイル（格子情報ファイル）を作成する必要がある。ファイル名は方向スペクトルデータファイル名[FILEIN]の後ろに「.pnt」を付けたものとする。

以下に、外部入力データとして用いる方向スペクトルデータと格子番号データ pnt ファイルの書式を示す。

一行目

NUM_SPE

I5

NUM_SPE : 方向スペクトルデータの保存順の番号（プログラム中では使用されない）

二行目

CC	IDAY(5)	NSS	MDD
A15	5I5	I5	I5

CC : 注釈（プログラム中では使用されない）

IDAY : 観測日時（プログラム中では使用されない）

NSS : 周波数分割数 ($NSS \leq 3000$)

MDD : 方向分割数 ($MDD \leq 200$)

三行目以降 方向スペクトルデータ

FR(I)	SP(I)
E12.5	E12.5

EMEP(I,J),J=1,MDD

6E12.5

FR(I) : 周波数 (Hz)

SP(I) : パワースペクトル ($m^2 \cdot s$)

EMEP(I,J) : 方向スペクトル解析結果

```
DO K=1, NUM_P
```

```
  READ(FILE 番号,'(I5)') NUM_SPE
```

```
  READ(FILE 番号,'(A15, 7I5)') CC, (IDAY(I),I=1,5), NSS, MDD
```

```
  DO I = 1, NSS
```

```
    READ(FILE 番号,'(2E12.5)') FR(I), SP(I)
```

```
    READ(FILE 番号,'(6E12.5)') (EMEP(I,J), J=1, MDD)
```

```
  ENDDO
```

```
ENDDO
```

〈格子情報ファイル書式〉

NUM_P

I5

JN_P(1)

I5

JN_P(2)

I5

JN_P(NUM_P)

I5

ファイル名は、FILEINの後ろに
「.pnt」を付加したもの

存在しない場合には、入射境界で単
一のスペクトル(スペクトル入力デ
ータの1つめ)を入射させる

NUM_P : 方向スペクトルデータの数
JN_P(K) : NOWT-PARI における沿岸方向格子番号

```
READ(FILE 番号,'(2I5)') NUM_P
DO K = 1, NUM_P
  READ(FILE 番号,'(2I5)') JN_P(K)
ENDDO
```

[STYPE に Sspe を指定した場合]

一行目

H13	T13	DIREC
-----	-----	-------

2F10.2

H13 : 有義波高 (m)
T13 : 有義波周期 (s)
DIREC : 波向

2行目以降 スペクトルデータ

F(I)	S(I)
------	------

2E15.5

F(I) : 周波数 (Hz)
S(I) : パワースペクトル ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

```
READ(FILE 番号,'(2F10.0)') H13, T13
DO I = 1, NUM
  READ(FILE 番号,'(2E15.5)') F(I), S(I)
ENDDO
```

[出力データファイル書式]

プログラム実行後, 'spectdat.in' というファイル名で成分波データがファイル出力される.
以下に, 出力データファイルの書式を示す.

一行目

NS

I5

NS : 成分波数

2 行目以降 成分波データ

FCN(I)	AMP(I)	SITW(I)	EPS(I)
E20.7	E20.7	E20.7	E20.7

FCN(I) : 代表周波数 (Hz)

AMP(I) : 振幅 (m)

SITW(I) : 各成分波の方向角 (rad)

EPS(I) : 位相差 ($0 \sim 2\pi$ の値を取る一様乱数)

```
WRITE(FILE 番号,'(I5)') NS
```

```
DO I = 1, NS
```

```
  WRITE(FILE 番号,'(4E20.7)') FCN(I),AMP(I),SITW(I),EPS(I)
```

```
ENDDO
```

-
- 1) 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺晃 (1993) : 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.31-35
 - 2) Mitsuyasu,H. et al. (1983) : Observation of the directional spectra of long-travelled swell, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.22, No.1, pp.3-41
 - 3) 合田良実 (1985) : 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第 24 巻, 第 4 号, pp.65-102
 - 4) 合田良実・鈴木康正 (1975) : 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, p.45
 - 5) 平山克也・岩瀬浩之・加島寛章 (2010) : 任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, 2010, pp.11-15