

意見書 (2)

令和2年3月14日

野津 厚



* 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長
博士 (工学)

第1 被告日本原電の準備書面（16）について

1 はじめに

被告日本原電の準備書面（16）は端的に言えば，日本原電が発電所の敷地における地震観測データの提出を拒む理由について述べたものです．その理由として日本原電は，敷地の地下構造はすでに十分に調べられており，地下構造モデルに基づいて地震動の増幅を十分に評価できるからだとして述べていますが，この主張には多くの問題点があります．

2 準備書面（16）において修正すべき点

まず，準備書面（16）において修正すべき点を指摘したいと思います．準備書面（16）の10頁においては，【図4】（以下に図1として再掲）を引用して，「本件発電所の地下構造モデルを用いて求めた地震基盤から解放基盤表面までの増幅率は，1～3倍程度であり，野津意見書に示されている常陸那珂-Uの地震基盤から地表の増幅率とは異なるものである」と述べています（下線は筆者）．

常陸那珂-Uに比べて発電所敷地の増幅率が小さいことを主張したいためにこのように述べておられるのかも知れませんが，地震基盤から解放基盤表面までの増幅率と地表面までの増幅率では当然異なるのであり（図2），公正な比較になっていません．野津意見書（令和元年10月31日付）では常陸那珂-Uと発電所敷地の地震基盤から地表面のサイト増幅特性が類似しているとの見通しの下に発電所敷地での地震動を算定しましたが，日本原電が常陸那珂-Uに比べて発電所敷地の増幅率が小さいことを主張したいのであれば，まずは精度が高いと主張する地下構造モデル（SGFモデル）に基づいて発電所敷地の地震基盤～地表面の増幅率を算定し，常陸那珂-Uの地震基盤～地表面の増幅率（サイト増幅特性）と比較をしていただく必要があります，それをしなければ公正な比較にはなりません．準備書面（16）の【図4】に基づく議論は公正な議論にはなっていないことをぜひ裁判所においても御認識いただきたいと思います．

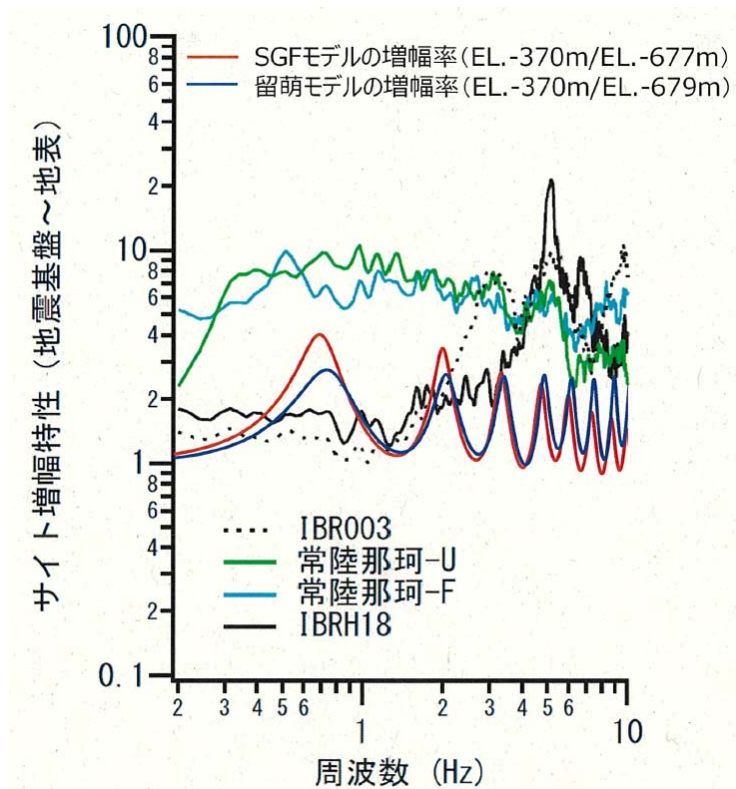


図1 準備書面（16）の【図4】の再掲

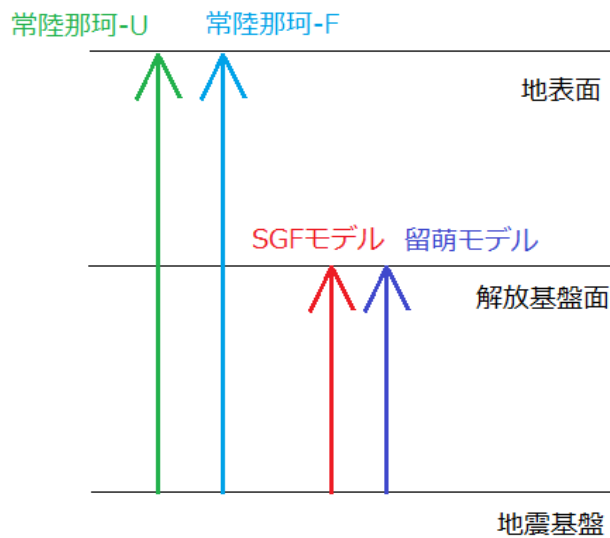


図2 地震基盤から解放基盤面までの増幅率と地震基盤から地表面までの増幅率の違い。準備書面（16）の【図4】では、常陸那珂-Uの増幅率は地震基盤から地表面まで、SGFモデルと留萌モデルの増幅率は地震基盤から解放基盤面までとなっており、公正な比較となっていない。

3 常陸那珂-U との比較の必要性

野津意見書（令和元年 10 月 31 日付）では常陸那珂-U と発電所敷地のサイト増幅特性が類似しているとの見通しの下に発電所敷地での地震動を算定しましたが、日本原電は常陸那珂-U に比べて発電所敷地の増幅率が小さいことを主張したいようです。それであれば、発電所の敷地と常陸那珂-U で共に観測されている地震観測記録について、それぞれフーリエスペクトルを計算し、それらを比較して発電所敷地の地震動の方が有意に小さいことを示せば良いだけです。発電所の敷地における観測記録（多ければ多いほど良いです）を御提供いただければ当方において比較をすることも可能です。このように、地震観測データの提出を行えば「常陸那珂-U に比べて発電所敷地の増幅率が小さい」という主張を裏書きすることのできるチャンスがあるにも関わらず、あえて提出をされないのは、地震観測データをオープンにすれば日本原電の主張の一部が崩れてしまうためではないかとも推察されます。

なお、証人尋問調書 8 2 頁で、日本地震工学会を通じて販売されている東北地方太平洋沖地震と最大余震における発電所敷地の地震観測記録からは、発電所敷地のサイト増幅特性が常陸那珂-U のサイト増幅特性と大きくは異なることを説明しましたが、詳細は以下のとおりです。

東北地方太平洋沖地震と最大余震においては常陸那珂-U における観測記録が得られていないため、防災科学技術研究所の K-NET の観測点である IBR003 を介して比較を行っています。

図 3 は東北地方太平洋沖地震と最大余震における発電所敷地（地表）と IBR003 における観測記録のフーリエスペクトルを示したものです。0.2-2Hz の広い周波数にわたり、IBR003 よりも発電所敷地の方が地震動が大きくなっています。

図 4 は IBR003 に対する発電所敷地のフーリエスペクトルの比を示したものです。同じ地震に対する比較的近い地点における記録の比であるため、概ね、2 地点間のサイト増幅特性の比を示すと考えられます。ただし、最大余震（黄色）よりも東北地方太平洋沖地震（赤）の方が、やや比の値が小さくなっています。これは、より振幅の大きい東北地方太平洋沖地震において地盤の非線形挙動（※）がより顕著に表れたためである可能性があります。

図 5 では、この比の値を、IBR003 に対する常陸那珂-U のサイト増幅特性

https://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/siteamplification_jpn.htmlの比と比較しています。すなわち、IBR003を介して、発電所の敷地と常陸那珂-Uのサイト増幅特性を比較していることとなります。IBR003に対する常陸那珂-Uのサイト増幅特性の比（青）は地盤が線形の状態のものであるため、公平を期すために振幅がより小さく地盤の非線形性の影響がより小さいと考えられる最大余震の比（黄色）に特に着目すれば、常陸那珂-Uと発電所の敷地におけるサイト増幅特性は概ね同等であると考えられます。

発電所の敷地における多数の観測記録を御提供いただければこのような検討をより高い信頼性を持って実施することができます。なお、同一の地震に対して互いに近接する二つの観測点での観測記録のフーリエスペクトルを計算して比較するとサイト増幅特性の違いがわかるという点については付録でも説明しています。

(※) 一般に地盤の性質はひずみレベルに応じて変化し、強い地震動が作用する場合には、せん断弾性係数が小さくなり、減衰定数は大きくなるという性質があります。このことを地盤の非線形挙動と言います。地盤の非線形挙動の結果として、二地点間のフーリエスペクトルの比が変化することがあります。

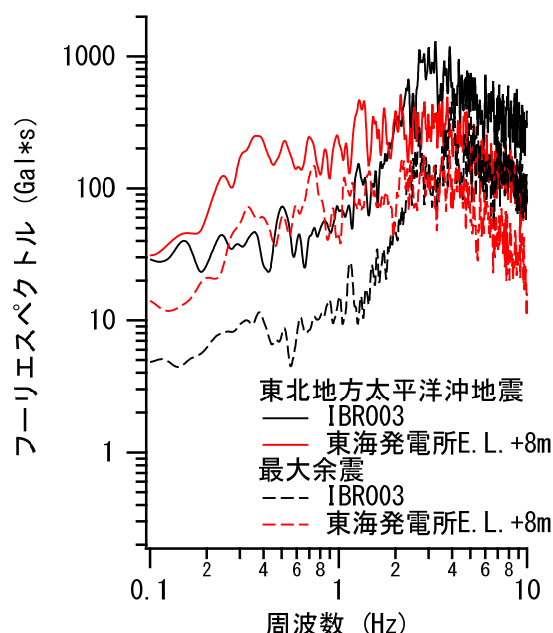


図3 東北地方太平洋沖地震と最大余震における発電所敷地（地表）とIBR003における観測記録のフーリエスペクトル

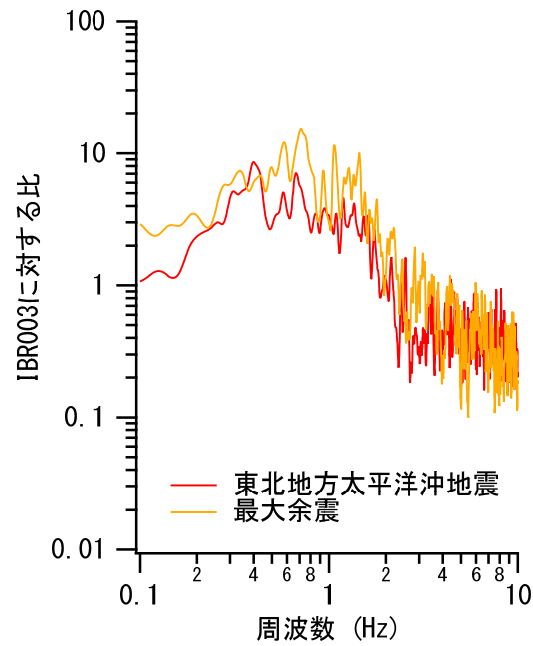


図4 IBR003 に対する発電所敷地のフーリエスペクトルの比

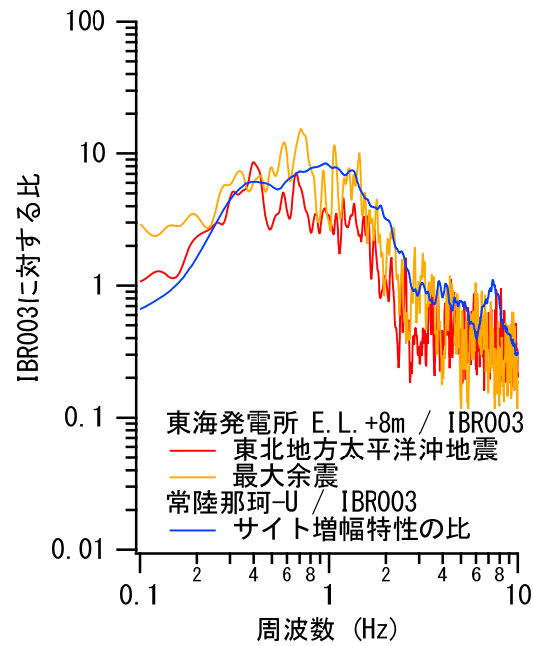


図5 IBR003 に対する発電所敷地のフーリエスペクトルの比と IBR003 に対する常陸那珂-U のサイト増幅特性の比 (IBR003 を介して、発電所の敷地と常陸那珂-U のサイト増幅特性を比較している)

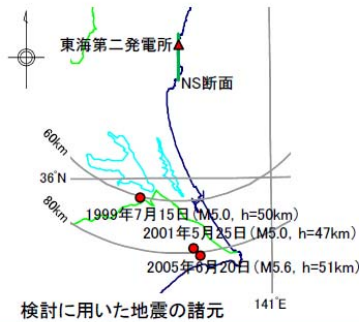
4 敷地の地震観測記録に基づく地下構造モデルの検証の必要性

ここでは、一般論として、敷地の地震観測記録に基づく地下構造モデルの検証の必要性について述べます。

敷地においていかに地下構造探査が精力的に行われているとしても、明らかにされている地下構造は実際の地下構造の一部にすぎません。文献 1)において日本原電は敷地周辺の不整形の地下構造モデルを示していますが、これも、あくまでも二次元的なモデルであって、三次元的な地下構造が明らかになっているわけではありません（ここで二次元モデルとは文献 1)の 4-83 頁にあるような断面内のモデルのことであり、奥行き方向には金太郎飴式になっているモデルのことです。それに対して奥行き方向にも変化するモデルを三次元モデルと呼びます）。また、二次元モデルとしても、精度が保証されているわけではありません。文献 1)の 4-94 頁（以下に図 6 として再掲）において二次元的な地下構造モデルを用いた地震動シミュレーション結果と敷地における地震観測記録との比較が行われていますが、振幅に関して定量的な比較が行われていないだけでなく（定量的な比較を行うためには、周辺の岩盤観測点での観測波が再現されるように震源モデルをチューニングし、その震源モデルにより敷地の観測波が振幅を含め再現されることを確認する必要があります）、波の形状や継続時間も全く合っていません。現状の地下構造モデルでは、仮に二次元モデルを用いたとしても、後続波が表れるという基本的な傾向がなんとか再現できるだけで、定量的な地震動の予測は不可能であり、まして、1次元モデルである準備書面（16）の SGF モデルでは、地震動の定量的な評価は不可能です。よって、敷地の地下構造はすでに十分に調べられており、SGF モデルに基づいて地震動の増幅を十分に評価できるとする準備書面（16）の主張は誤りです。

なお、野津意見書（令和元年 10 月 31 日付）では常陸那珂-U と発電所敷地の地震基盤から地表面のサイト増幅特性が類似しているとの見通しの下に先ず発電所敷地の地表面での地震動を算定しましたが、これと基準地震動（解放基盤面で設定されている）との比較を公正に行うため、算定した地震動を解放基盤面まで引き戻しました。その際、地盤モデルの選定に伴う恣意性を可能な限り避けるため、日本原電の推奨する SGF モデルを使用したにすぎず、筆者自身が SGF モデルの妥当性を保証するものではありません。日本原電が推奨モデルを変更するのであれば、いつでも新たなモデルで引き戻し計算をやり直す用意があります。

- ・NS断面に中心周期1.0秒のリッカー波を入射角40度で入力すると、他のケースより後続波が顕著に表れる特徴が見られるため、敷地での観測記録に同様の特徴が見られるか検討した。
- ・検討方法は、敷地での地震観測記録に周期1.0秒を強調するバンドパスフィルタ処理を行い、中心周期1.0秒のリッカー波を入射角40度でNS断面に入力した場合の発電所位置での応答波と比較した。
- ・解析結果のような主要動の後に後続波が複数回到達する様子は観測記録にも見られ、解析結果と観測記録が整合していることが確認できた。



検討に用いた地震の諸元

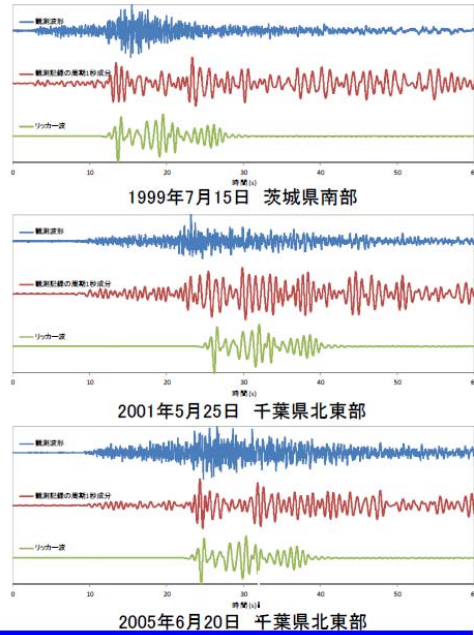


図6 文献1)の4-94頁

準備書面(16)では「詳細な地質調査を利用して地盤モデルを作成し、敷地の地盤増幅特性を反映した地震動評価を行うとの統計的グリーン関数法による手法が、地震動審査ガイドやレシピなどにおいて広く採用されているところである」「あえて経験的サイト増幅特性を用いるべき理由もない」と述べていますが、これは大きな誤りです。レシピ²⁾では浅部・深部統合地盤構造モデルの作成(30頁)において「手順(3) 経験的サイト特性による短周期領域の検証・調整」として「中小地震の地震観測記録から経験的手法により短周期(例えば2秒未満の周期)のサイト特性を推定し、手順(2)で調整した統合地盤構造モデルを用いて理論的手法で計算した結果と比較し、モデルの検証を行う。サイト特性の再現性に問題がある場合、手順(2)に戻りモデルの再調整を行う」とされており、地下構造モデルの検証に経験的サイト特性が必要であることが示されています。検証の結果、現状の地下構造モデルで経験的サイト増幅特性を十分に再現できないことが判明した場合は、地下構造モデルの再調整を行う必要があります。

5 水平成層構造を仮定していることの問題点

準備書面（16）の【図4】において敷地の地下構造モデルに基づく増幅率は地震基盤～地表のものに置き換えていただく必要があることは既に述べましたが、現在提示されている地震基盤～解放基盤面の増幅率（図1および図7の赤線）に着目すると、周期的に山と谷を繰り返す特徴的な形状になっていることが注目されます。この特徴的な形状は、地震基盤以浅の地下構造が水平成層で表されると仮定したことにより人為的に表れているものであり、実際の現象を表したものとは考えられません。実際の地震観測記録に基づけば、増幅率がこのような周期的に山と谷を繰り返す特徴的な形状となることはまれです。もしもこの増幅率が真であるとするなら、震源特性や伝播経路特性にそれを打ち消すような山谷がない限り、観測記録のフーリエスペクトルに同様の周期的な山と谷が含まれるはずですが、ところが、震源特性にそのような周期的な山谷があることは、2つあるいはそれ以上の破壊が短い時間間隔を置いて生じる場合など特殊な場合を除けば一般には考えにくく、伝播経路特性にそのような周期的な山谷があることも考えにくいと言えます。よって、もしもこの増幅率が真であるなら、大多数の観測記録に同様の周期的な山谷が見られることになるはずですが、観測記録を確認することで、増幅率が真であることを確認することができます。

準備書面（16）で発電所の地盤を水平成層構造とみなして地震動を評価できるとしている点（4頁）には多くの疑問があります。準備書面（16）の3頁では重力探査の結果として敷地周辺に船底状の構造（強震動研究の分野では盆地構造という場合が多い）が見られるとしています。これは敷地周辺が水平成層構造では表されない地下構造であることを示しています。このような構造では、盆地生成表面波が生じ³⁾、長時間継続する地震動が生じやすいと言えます。実際に敷地においては、文献1)の4-94頁（図6）の赤線にみられるように、長時間にわたる地震動が観測されており、かつ、S波初動（1999年7月15日の地震に関しては13秒前後、2001年5月25日の地震に関しては26秒前後、2005年6月20日の地震に対しては24秒前後の揺れ）よりも後続位相の方がかえって振幅が大きくなる場合も見られます。このような現象は水平成層構造を仮定する限り説明が付きません。水平成層構造を仮定した場合の振幅が2次元不整形モデルによる振幅を上回る（4頁）と言っても、それはシミュレーション上の話であり、実際には地震観測記録による地下構造モデルの検証ができていなければ意味をなしません。水平成層構造モデル（例えばSGFモデル）が十分に妥当であると日本原電が主張するのであれば、文献1)の4-94頁（図6）と同様の地震波を対象としてSGFモデルによるシミュレーションを行い、シミュレーション結果を観測と比較すべきです。その際は、周辺の岩

盤観測点での観測波が再現されるように震源モデルをチューニングし、その震源モデルにより敷地の観測波が振幅を含め再現されることを確認する必要があります。

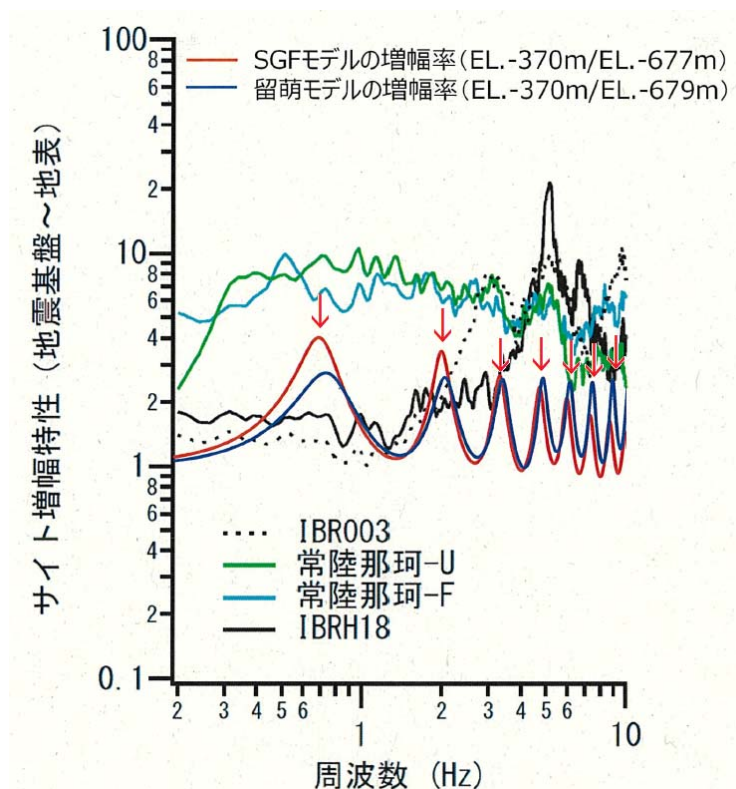


図7 図1の再掲（周期的に表れる山を矢印で示した）

第2 証人尋問の際の質問に対する補足

反対尋問で聞かれたことの中で、特に、SPGA4の応力降下量を算出できない理由（74頁）について、簡単に補足します。

応力降下量とは、準備書面（16）の23頁にもあるように、断層面上において「解放されたせん断応力、すなわち、地震発生前のせん断応力と地震発生後のせん断応力の差のこと」です。

この応力降下量については円形クラックの式⁴⁾と呼ばれる著名な式があります。これは図8の左に示すように、断層面上の円形領域だけですべりが生じると仮定し、円形領域の内部で一様な応力降下が生じた際のすべり分布を求める式です。この場合は、クラックの外部は固定されていると仮定しますので、その分、周囲の影響によって、クラック内部もすべりにくい条件になります。したがって、大きくすべるためには応力降下量が大きな値であることが必要で

す。したがって、この式を適用すると、与えられたすべり量に対して、比較的大きな応力降下量が算定されます。

それに対して SPGA モデル (図 8 の右) では、SPGA の外部でもすべりは (そして応力降下も) 生じていると考えています。しかしながら、SPGA の外部は (すべり速度が相対的に小さいなどの理由により) 強震動への影響が小さいため、モデル化の対象外としています。これはちょうど SMGA モデルにおいて「SMGA の外部もすべっているが強震動への影響は小さい」と考えて SMGA の外部をモデル化していないのと同じことです。ただし SPGA の外部もすべっていますので、無理に円形クラックの式を当てはめて SPGA 部分の応力降下量を計算してしまうと誤った結果になります。便宜上円形クラックの式を当てはめるとなんらかの値は出てきますが、それが本来の応力降下量だと考えるのは誤りです。SPGA 上における真の応力降下量を求めるためには、外部の領域も含め微細なすべり分布の解明が必要であり、それは今後の研究に待つ必要があります。

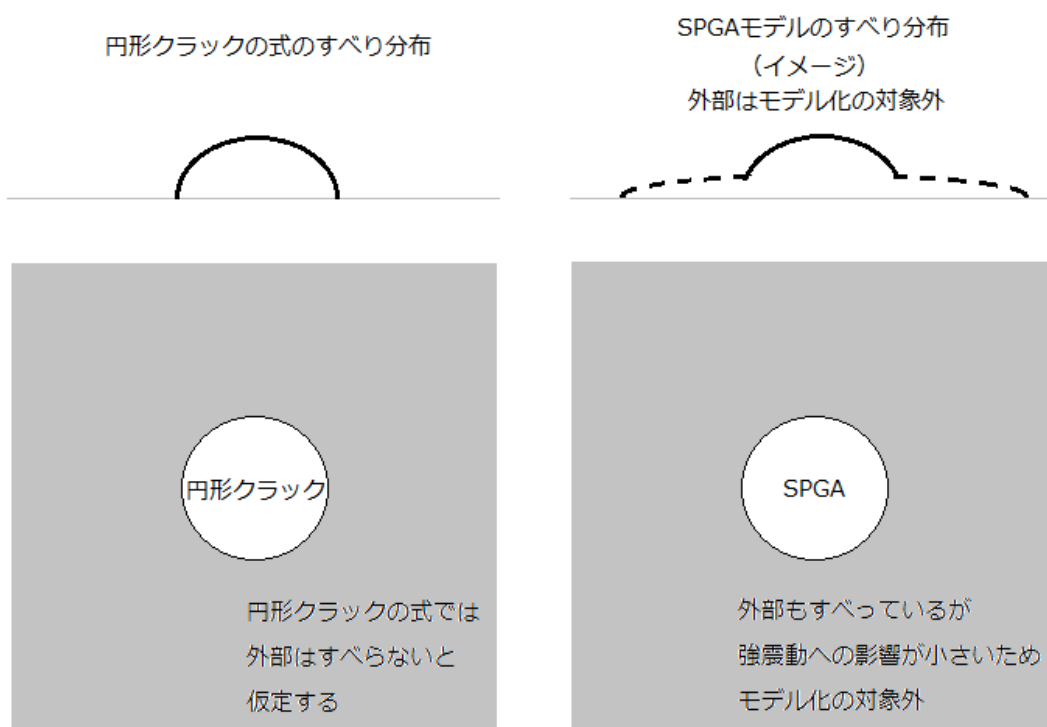


図 8 円形クラックの式⁴⁾と SPGA モデル

謝辞

本稿では防災科学技術研究所の K-NET の強震記録と日本地震工学会を通じて販売されている東海第二発電所の強震記録を利用しました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本原子力発電株式会社：東海第二発電所，基準地震動の策定について，2017年11月10日.
- 2) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），2017年4月，
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf.
- 3) 川瀬博：表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション，地震2，第46巻，pp.171-190，1993.
- 4) Esheryby, J.D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A 241, pp.376-396, 1957

付録

同一の地震に対して互いに近接する二つの観測点での観測記録のフーリエスペクトルを計算して比較するとサイト増幅特性の違いがわかるのは次のような理由からです。一般に地震動のフーリエスペクトルは地震動に含まれる異なる周波数成分の強さを表しますが、これは震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の3つの要因で決まるものであり、次式^{例えば1)}で表されます。

$$O(f) = S(f)P(f)G(f) \quad (1)$$

ここに $O(f)$ は地震動のフーリエスペクトル、 $S(f)$ は震源特性、 $P(f)$ は伝播経路特性、 $G(f)$ はサイト増幅特性です。いま、ある一つの地震に対して二つの観測点 A,B で得られた記録に着目すると、

$$O_A(f) = S_A(f)P_A(f)G_A(f) \quad (2)$$

$$O_B(f) = S_B(f)P_B(f)G_B(f) \quad (3)$$

と書くことができます。ここに添え字 A は観測点 A で得られた記録に関する量を、添え字 B は観測点 B で得られた記録に関する量を表します。式(2)を式(3)で割ると

$$\frac{O_A(f)}{O_B(f)} = \frac{S_A(f)P_A(f)G_A(f)}{S_B(f)P_B(f)G_B(f)} \quad (4)$$

が得られます。ここで、二つの観測点 A,B が互いに近接している場合は、震源からこれらの観測点に向かってはほぼ同一の地震波が放射されると考えられるため $S_A(f) \approx S_B(f)$ であり、震源からこれらの観測点までの伝播経路もほぼ共通となりますので $P_A(f) \approx P_B(f)$ です。したがって式(4)より次式が得られます。

$$\frac{O_A(f)}{O_B(f)} \approx \frac{G_A(f)}{G_B(f)} \quad (5)$$

このように、同一の地震に対して互いに近接する二つの観測点での観測記録のフーリエスペクトルを計算し、それらの比をとることにより、サイト増幅特性の比を推定することができます。

参考文献

- 1) 岩田知孝・入倉孝次郎：観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み，地震 2，第 39 巻，pp.579-593，1986.