

(68) アレー観測記録に基づく地震動の水平2成分の相関

東京大学大学院 学生会員〇 中村 博一
 東京大学生産技術研究所 正会員 山崎 文雄

1. はじめに 地震動は3次元空間を進行する波動であるが、一般的には、水平2成分は互いに独立、或いは無相関であるという仮定の下に、震央方向やその直交方向などの各々の振動成分についてのみ地震動がモデル化されている場合が多い。しかしながら、1地点の3成分記録に対する主軸方向や複数地点の地震波形間の時間ラグに対する波動の到来方向は振動数に依存する。従って地震動が複数の振動数成分の波動から構成されている確率波であると考えれば、固定された座標軸に対するモデルに対しては、それら2成分の相互項をも考慮する必要があると思われる。また当然ながら、例えばレーリー波の伝播などを考えた場合には、上下成分と進行方向水平成分とは強い相関を持っていると考えられる。

既往の研究として、同一地点における直交成分間の相関について解析したもの^{1)・2)}があるが、さらに空間的な地震動特性を知るために、異なる地点での相関についても解析の必要がある。また、地震動は局所的な地盤の影響ばかりではなく、その震源特性や伝播経路にも影響されるので、これらの異なる地震に対する検討も必要である。地震波動の空間変動特性を表す確率モデルとしては振動数空間領域におけるコヒーレンスがあり、何らかの方法によりパワースペクトルと見かけの速度が得られれば、確率的に時空間で変動する地震波動を各振動方向成分ごとにシミュレートすることができ、その用途は広い。

地震波動の振動数空間領域における確率モデルを構築するための基礎的研究の一つとして、本報告では、千葉アレー³⁾の4つの観測記録を確率統計的に処理することにより、主に地震波動の水平2成分の相互相関に対する解析を行なう。

2. 確率波モデル 均質自由地盤内を地震波動が伝播する場合に、空間内の水平面に対して、空間座標 (x_r, x_t) と時間 t との関数として2つの水平直交方向振動成分の確率波 $u_j(x_r, x_t, t)$, $j=r, t$ (震央方向及び震央直交方向成分)を考える。平均値をゼロと仮定し、確率波の定常性と均質性との仮定により、時空間領域における共分散関数は次式のように、空間ラグ (ξ_r, ξ_t) と時間ラグ τ との関数として表される。

$$R_{jl}(\xi_r, \xi_t, \tau) = E[u_j(x_r + \xi_r, x_t + \xi_t, t + \tau) u_l(x_r, x_t, t)] \quad (1)$$

ここで、 $E[\]$ は期待値である。振動数空間領域における相互スペクトル密度関数は共分散関数のフーリエ変換として表され、またその逆変換として共分散関数が表される。

$$S_{jl}(\xi_r, \xi_t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{jl}(\xi_r, \xi_t, \tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (2), \quad R_{jl}(\xi_r, \xi_t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{jl}(\xi_r, \xi_t, f) e^{2\pi i f \tau} df \quad (3)$$

地震動の振動数空間相互スペクトルモデルは一般的に次式のように仮定されている。

$$S_{jl}(\xi_r, \xi_t, f) = \sqrt{S_{jj}(0, 0, f) S_{ll}(0, 0, f)} \gamma_{jl}(\xi_r, \xi_t, f) e^{2\pi i \phi_{jl}(\xi_r, f)} \quad (4)$$

ここで、 $S_{jj}(0, 0, f)$ は自己パワースペクトル、 $\gamma_{jl}(\xi_r, \xi_t, f)$ はコヒーレンス、 $\phi_{jl}(\xi_r, f)$ は位相差を表す。式(4)から次式のように相互コヒーレンスが求められる。

$$\gamma_{jl}(\xi_r, \xi_t, f) = \frac{|S_{jl}(\xi_r, \xi_t, f)|}{\sqrt{S_{jj}(0, 0, f) S_{ll}(0, 0, f)}} \quad (5)$$

自己パワースペクトルや位相差についての解析は重要であり、非常に多くの研究が行われている。また、近年、アレー観測記録に基づき、同一方向の振動成分に対して地震動の空間変動特性を表すコヒーレンスの解析が行われている^{4)・5)}。しかし、同一振動方向成分間のコヒーレンスの研究に比較して、各振動方向成分間のものについては余り行われていないと考えられる。そこでここでは、地震波動の空間変動特性に着目して、主に式(5)から求められる水平2成分間の相関を表すコヒーレンスについての解析を行う。

3. 解析方法 千葉実験所構内には高密度な3次元アレーが設置されており、ここでは、その平面アレーにより観測された4つの加速度記録を用いて解析を行う。ただし、各々の加速度記録については、地震動の低振動数(約1 Hz)成分波の到来方向に回転している。また地震動に対しては、時間領域において主要動部分を考えることにより定常とみなし、アレーサイズの自由地盤を考えることから、均質性を仮定している。そして一般的に、2つの波形間の相互スペクトルの絶対値を各波形の自己スペクトルの相乗平均で除したものがコヒーレンスの定義である

ので、ここでは、式(5)により表される振動方向の異なる2成分間に対する相互コヒーレンスを考え解析を行なう。本来、振動数空間コヒーレンスは母集団平均から求められるべきものであるが、実用性という観点から普通は母集団平均の代わりに振動数領域での平滑化により求められる。しかし高振動数域では、地震波動というよりはむしろそれに起因する散乱波などのノイズ的な成分が多く含まれているにもかかわらず、その平滑化のみでは低振動数域よりも高振動数域のコヒーレンスの方が大きくなる場合があり、不十分である。ノイズ的な成分間のコヒーレンスであれば、いくつかの平均をとることによりそれらは互いに打ち消しあって全体としては小さくなると考えられ、本研究では試行錯誤の結果として、振動数域の有効帯域幅が0.6 HzのParzen平滑化ウィンドーに加えて、ウィンドー幅が1000点、移動幅が10点の時間域の重複移動ウィンドー⁵⁾をも用いた。ここで、移動回数は100回とした。この時間ウィンドーは重複しているため、ここから求められる統計量は厳密には独立ではないが、実用上ではほぼ同様の効果をもつものと考えられる。

以上で述べた方法で相互コヒーレンスを求め、定性的な評価を行うが、モデル化の前にある程度の定量的な考察が必要と考えられる。ここでは仮の定量化ということで、0-20 Hzの振動数帯域のうち、0-5 Hz、5-10 Hz、10-15 Hz というように、3つの振動数帯域に対して、各々のコヒーレンスの平均値を比較する。

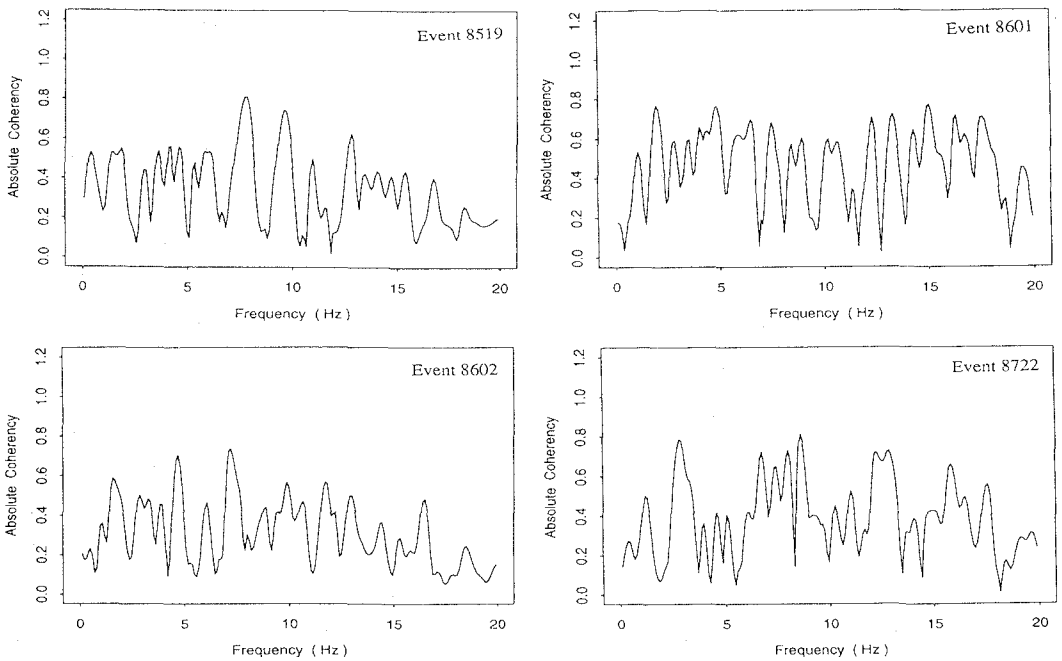


図1 4つの地震記録8519, 8601, 8602, 8722のC0地点の相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi=0)$

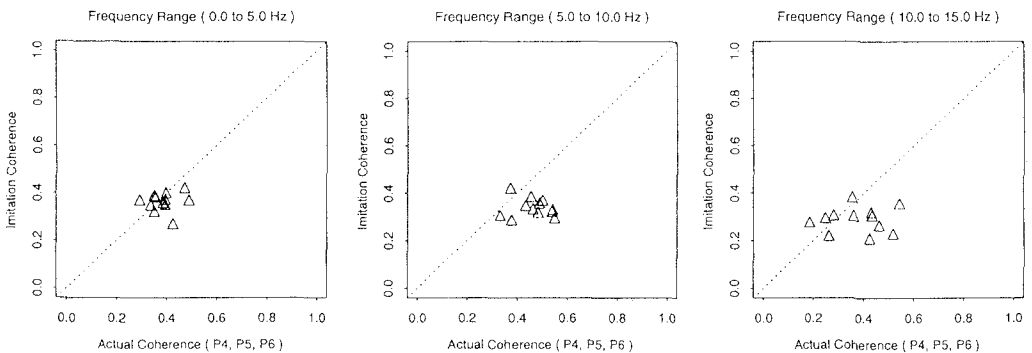


図2 P4, P5, P6地点における4地震の相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi=0)$ と記録間のコヒーレンスとの比較 (RT8519 vs. R8519-T8601, RT8601 vs. R8601-T8602, RT8602 vs. R8602-T8722, RT8722 vs. R8722-T8519)

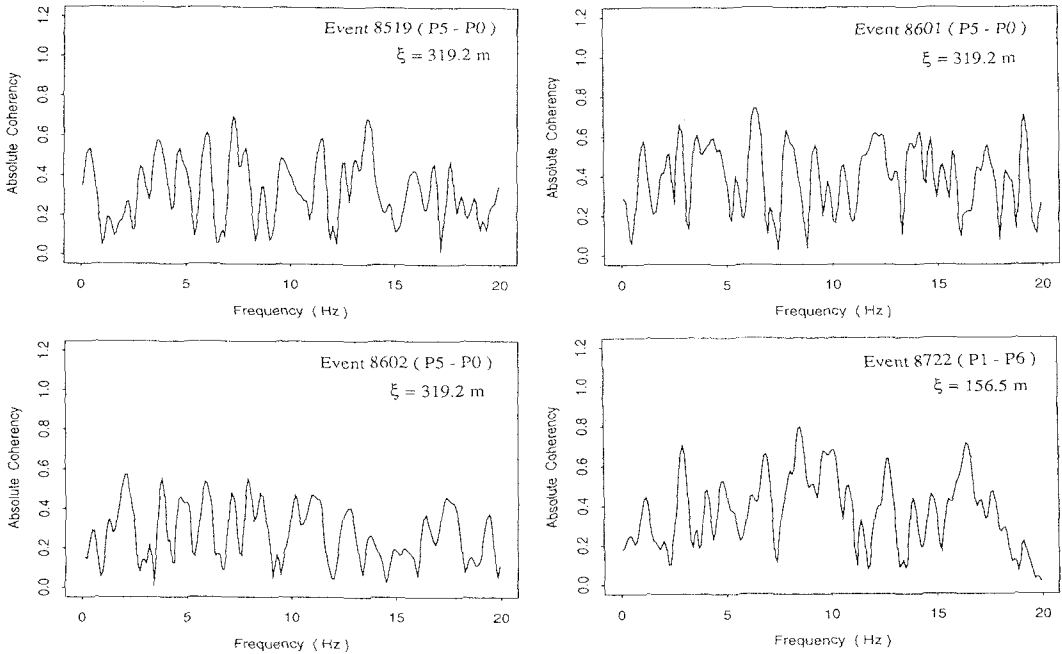


図3 離れた2点間の相互コヒーレンス γ_{rr} ($\xi \neq 0$)
 (地震記録 8519, 8601, 8602 は P5 - P0、地震記録 8722 は P1 - P6)

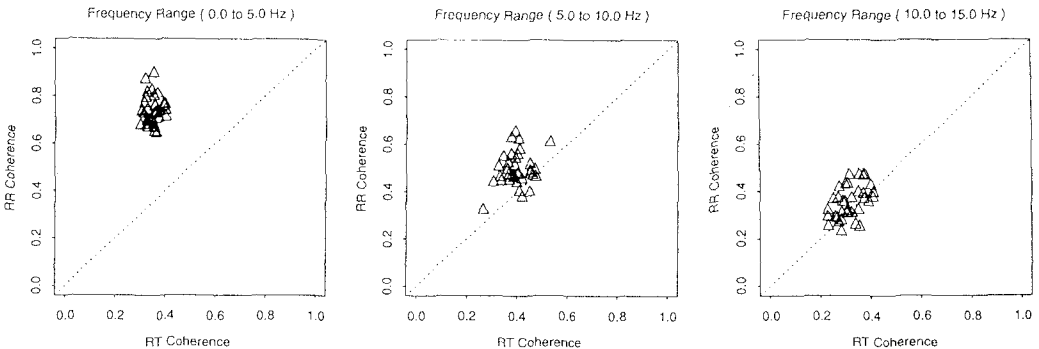


図4 地震記録 8519 (35組)の自己コヒーレンス γ_{rr} ($\xi \neq 0$)と相互コヒーレンス γ_{rr} ($\xi \neq 0$)との比較

4. 解析結果 アレー観測記録の異なる地点間の自己コヒーレンス $\gamma_{jj}(\xi_r, \xi_r, f)$ は、振動数が高くなるにつれて、また地点間距離の増加につれて小さくなる、ということが既往の研究^{3) 4)} などから知られている。しかし、相互コヒーレンス γ_{ji} ($j \neq i$) に対しては、必ずしも自己コヒーレンス γ_{jj} ($j = i$) に成り立つことがそのまま成り立たないと考えられる。そこで、その定性的な傾向(特性)をとらえるために、まず同一地点における相互コヒーレンス γ_{rr} ($\xi = 0$) について検討する。図1に、4つの地震記録 8519, 8601, 8602, 8722 の C0 地点の相互コヒーレンスを示す。この相互コヒーレンスは、高振動数帯域では、無相関なノイズの相関であるために減少していると考えられる。また低振動数帯域でも減少しており、これは、低振動数成分の波動の到来方向が地震動の主軸方向とはほぼ一致しているためと考えられる。また、ここでは C0 地点のものしか示していないが、解析した範囲内での同一地点における相互コヒーレンスは、全体的に、5-10 Hz 付近にピーク(約 0.8)を持つ傾向がある。そこで、この相互コヒーレンス γ_{rr} ($\xi = 0$) が実際にどのような意味を持つのかということを調べるために、ここで選んだ異なる

る地震記録間の実体波の主要動部分において仮にコヒーレンスを計算し、この相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi=0)$ との比較を行ってみる。図2に、3つの振動数帯域(0-5 Hz, 5-10 Hz, 10-15 Hz)に対して、3地点(P4, P5, P6)における4地震記録の相互コヒーレンスと、それらの記録間のコヒーレンスとを比較して示す。実体波と表面波というように明らかに波形が異なるもの場合には、常に同一地点の相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi=0)$ の方が大きくなるのが事前に調べた結果であったが、ここでは、地震記録は異なるが実体波の主要動部分に対するコヒーレンスの比較なので、4組とも余り大きな違いはみられない。しかし全体的な傾向としては、0-5 Hz以外の振動数領域で実際のコヒーレンスの方がいくらか大きく、また振動数が高くなるにつれてばらつきを示している。

図3には、異なる観測地点間の相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi \neq 0)$ の例を示している。図1で示した同一地点の相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi=0)$ と比較してみると、 $\gamma_{r_i}(\xi=0)$ と同様に5-10 Hz位にピークを持つというような傾向を示している。また、図1のものと同様と比べるといくらか小さめであることがわかる。図4では、図2と同様の3つの振動数帯域に対する地震記録8519のアレーの密集地点を除いた地点間の35組に対して、自己コヒーレンス $\gamma_{r_r}(\xi \neq 0)$ と相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi \neq 0)$ とを比較している。相互コヒーレンスは自己コヒーレンスと比較して、低振動数帯域0-5 Hzでは、その平均値が約半分であるが、振動数が高くなるにつれて、ほぼ同じ様な値に近づいていることがわかる。最後に図5には、3地震記録(8519, 8601, 8602)に対して、2地点間距離(空間ラグ)が最も離れているP5-P0(319.2 m)とC0との相互コヒーレンスの平均値を比較している。図1と図3とを比較してみてもわかるが、低振動数帯域では、多少図3の方が小さくなっていることがわかる。地震波の到来方向が異なり、同じ距離ベクトルのコヒーレンスは得ることはできないが、多少距離の増加に伴う相互コヒーレンス $\gamma_{r_i}(\xi \neq 0)$ の減少がみられる。

5. まとめ 本報告では、水平2成分間の相互コヒーレンスに着目し、同一の地点の相互コヒーレンスについては異なる地震記録間の見掛けのコヒーレンスと比較し、異なる地点の相互コヒーレンスについては対応する地点の自己コヒーレンスと比較した。そして、相互コヒーレンスと空間ラグとの関係についても基礎的な考察をした。

まず全体的な傾向として、同一地点の相互コヒーレンス自体は、振動数帯域が5-10 Hzの付近でゆるやかなピークを持つ。つまり、相互コヒーレンスは、高振動数帯域と同様に低振動数帯域でも小さくなっている。このことは、既往の解析結果¹⁾と同様の傾向を示すものである。また、異なる観測地点間における相互コヒーレンスは、同一地点のものとはほぼ同様の傾向を示すが、多少そのピークが小さいようである。しかしその平均値の比較においては、地点間距離の増大に伴う相互コヒーレンスの減少の傾向が多少はみられたものの、自己コヒーレンスの様に顕著には減少しないことがわかった。しかし、異なる観測地点間における自己コヒーレンスと相互コヒーレンスとの比較により、高振動数帯域になるにつれてどちらも同じような値を示すようになることがわかった。

以上のことから、水平2成分を考える場合において、それらの相互相関をも考える意義があるのではないかと推測される。

本報告では、振動数領域における空間相関係数の振幅(コヒーレンス)のみに着目した解析により、定性的な考察を行ったが、このコヒーレンスを今後いかにして定量化していくかが今後の課題となる。また、定義から明らかなように振動数空間相関係数は複素数であり、その振幅と位相差とによって表されなければならない。位相差についての解析及び考察も行なわなければならない。

- 参考文献 1) 松島:「3方向地震入力による構造物の確率的応答」,日本建築学会論文集,第217号/pp.29-34,1974.
 2) 星谷・磯山:「多次元非定常確率過程による地震動シミュレーション」,土木学会論文報告集,第269号/pp.41-52,1978.
 3) 片山・山崎・永田・佐藤:「高密度3次元アレーによる地震動観測と記録のデータベース化」,土木学会論文集,第422号/1-14,pp.361-369,1990.
 4) Harichandran & Vanmarcke: "Stochastic Variation of Earthquake Ground Motion in Space and Time", Journal of Engineering Mechanics Division, Proc. of ASCE, Vol. 112, No. 2, pp. 154-174, 1986.
 5) 中村・山崎:「アレー観測に基づくコヒーレンスのモデル化」,土木学会第48回年次学術講演会,1993.

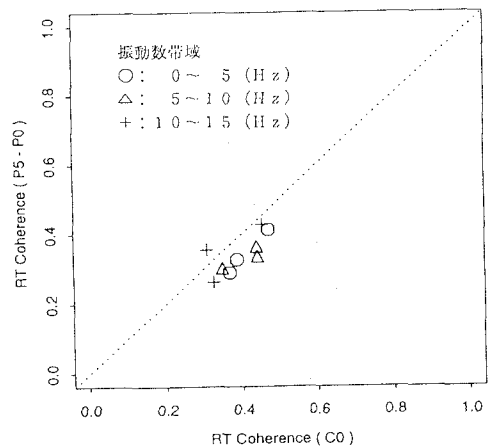


図5 3地震記録(8519, 8601, 8602)のP5-P0(319.2 m)とC0との相互コヒーレンスの平均値の比較