

地震動記録と同じ継続時間を有する音の作成法

名古屋大学大学院環境学研究科* 平井 敬・福和 伸夫

Synthesis Method of Sound Which Has Same Duration Time as a Seismogram

Takashi HIRAI and Nobuo FUKUWA

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University
Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

(Received July 21, 2010; Accepted November 9, 2010)

Listening to a sound representing ground motion is valuable to understand an earthquake intuitively compared with only seeing a waveform. In this paper, we propose a new method to make a sound of earthquake, in which several rules different from existing methods are used. In our new method, a sound of earthquake is generated by modifying the frequency information of generating function based on the theory of symmetric Fourier analysis. Applying the method to the JMA Kobe seismogram in 1995 South Hyogo Prefecture Earthquake and predicted waveform at Sannomaru, Nagoya, in future Tokai and Tonankai earthquake, three features of the sound generated by this method are confirmed: the sound has same duration time as the seismogram, high sound is heard when the seismogram has high frequency, and loud sound is heard when the seismogram has large amplitude.

Key words: Fourier transform, Symmetric Fourier analysis, Generating function, Complex envelope, Duration time

§1. はじめに

我が国は世界有数の地震多発国であり、研究者から一般人に至るまで、国民全体が地震に対する理解を養い、地震災害への対策を講ずることが求められている。通常、地震動は地点ごとの加速度・速度または変位の時刻歴波形やフーリエスペクトル、応答スペクトルなどによって表現されることが多い。これらは地震動の性質を克明に語る表現方法として、厳密性・論理性を重要視する学術的分野においては有用であるが、一方で地震動の体験的・直観的な理解には結び付きにくい。地震動を人体の感覚によって体験することは、波形記録を眼で見るものと比較して、より直観的な理解につながるため、防災教育・啓発活動の現場においては特に重要となる。このような理由により、体験的に理解する方法が種々考案されてきた。

地震動を感覚として捉える方法のひとつは、対象とする地震動を振動台などで実際に起こして体験することで

ある。現実にこの方法は各地で実用化され、防災教育・啓発活動用の小規模なもの [例えば、花井・他 (2009)] から、建物応答を再現できる程度の大きさのもの [例えば、福和・他 (2007)]、さらには実大建造物の破壊実験を行う規模のもの (実大三次元震動破壊実験施設「E-ディフェンス」等) に至るまで、多数製作されている。それに対して、いまひとつは地震波を何らかの規則に基づいて音声として表現し、これを耳で聞くことによって地震動の性質を理解しようとする方法である。

地震波と音波の間には、ひとつの決定的な異なりが存在する。それは、地震波に含まれる振動数帯域は通常 10 Hz 程度以下であるのに対し、人間が聞き取ることのできる音波の振動数は 20 Hz から 20 kHz 程度であることである [伊藤 (1973)]。このため、地震動記録と相似形の音波を発生しても、人間の聴覚によって聞き取ることにはできない。この問題を解決するために、従来は地震動波形を時間軸方向に圧縮することで振動数を人間の可聴音域まで上昇させる手法が取られていた [例えば、Dombois (2002), U. S. Geological Survey (2009)]。しかしな

* 〒464-8601 名古屋市千種区不老町

からこの手法には、地震動波形を時間軸方向に数十倍から100倍程度圧縮しているため、地震動記録の継続時間に対して音声のそれが極めて短いという欠点が存在する。

そこで本稿では、従来とは全く異なる方法によって地震動を音声によって表現する方法を提案する。本手法では、作成される音声に以下に示す3つの項目を満足することを条件とした。

- ① 地震動記録と同じ継続時間を有すること。
- ② 地震動の振動数が高いときは高い音で聞こえること。
- ③ 地震動の振幅が大きいときは強い音で聞こえること。

本稿で作成する「地震の音」の利用目的としては大別して2種類を想定している。ひとつは地震動の瞬間振動数や振幅・エネルギーといった情報を時系列で表現する音を作成することで、地震動の理解の助けとすることである。もうひとつは地震防災教育・啓発活動の材料に供することであり、特に震動を映像化する機器と同時に地震の音を再生するといった活用法である。地震の音の作成法について、本稿ではいくつかの方法を示しているが、目的に応じてそれらを取捨選択することが望ましい。

以降、第2章では地震動記録から音声波形を作成する新規手法を示し、第3章でこれを1995年兵庫県南部地震の際に気象庁神戸海洋気象台で得られた地震動記録および愛知県設計用入力地震動研究協議会による想定新東海地震〔福和・他(2001)〕(想定東海地震と東南海地震が同時発生することをモデル化)の名古屋三の丸地区における地震動波形に適用した結果を示す。

§2. 音声波形作成の理論

2.1 対称的フーリエ解析の概要

本節では、地震動波形から音声波形を作成する手法の理論的基礎となる、対称的フーリエ解析の概要を記述する。対称的フーリエ解析は、周波数領域のみならず時間領域においても振幅と位相を定義し、通常のフーリエ解析においては無視されがちである位相のもつ情報を最大限に活用する解析手法である。これは、古くはPapoulis(1962)にその考え方の源流が見られ、1980年代以降、和泉・勝倉(1983)、和泉・他(1988)、Katukura *et al.* (1989)、理論地震動研究会(1994)などにより地震動記録への適用が図られるとともに理論的体系化が行われた。

対象とする地震動記録の時刻歴波形を $x(t)$ とする。地震動記録には通常3成分があるが、 $x(t)$ に選定するのは

どの成分でも良い。また、原理的には加速度・速度および変位波形のいずれであっても対称的フーリエ解析は可能であるが、2.2節に後述するように、本研究においては速度波形を用いる。地震動記録は時間が正である領域($t \geq 0$)のみで定義されることが多いが、ここでは $x(t)$ の定義域を $-T \leq t < T$ (T は地震動記録の継続時間)とし、 $t < 0$ の領域では $x(t) = 0$ であるとする。

$x(t)$ は言うまでもなく時間領域の実因果関数である。 $x(t)$ のフーリエ変換

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

は周波数領域の共役複素関数であり、その実部と虚部は互いにヒルベルト変換対の関係をなす。すなわち、

$$\text{Im}[G(\omega)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Re}[G(\zeta)]}{\omega - \zeta} d\zeta$$

および

$$\text{Re}[G(\omega)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[G(\zeta)]}{\omega - \zeta} d\zeta + C \quad (2)$$

である。ここで積分はコーシーの主値とし、 C は $x(t)$ が原点に特異性を有している場合に必要となる定数であるが、本論では $x(t)$ に特異点は存在しないので $C=0$ として良い。次に、 $G(\omega)$ をもとに新たな関数

$$X(\omega) = U(\omega) \text{Re}[G(\omega)] \quad (3)$$

を定義する。 $U(\omega)$ は ω を独立変数とする単位ステップ関数である。 $X(\omega)$ はその定義から明らかなように、周波数領域の実因果関数である。 $X(\omega)$ の4倍のフーリエ逆変換

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} 4X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4)$$

は時間領域の共役複素関数であり、その実部と虚部が互いにヒルベルト変換対の関係をなす。この関数 $g(t)$ の実部について、次式のように単位ステップ関数を乗ずることにより、元の地震波形 $x(t)$ が得られることが知られている。

$$x(t) = U(t) \text{Re}[g(t)] \quad (5)$$

以上の議論から、時間領域と周波数領域に整然とした対称性が存在することが分かる。Fig. 1 に式(1)~(5)の関係を要約して示した。

式(1)で定義される周波数領域の共役複素関数 $G(\omega)$ は、 $X(\omega)$ の母関数と呼ばれ、極形式で次式のように表示することができる。

$$G(\omega) = A(\omega) e^{i\phi(\omega)} \quad (6)$$

ここで

$$A(\omega) = \sqrt{[G_{\text{re}}(\omega)]^2 + [G_{\text{im}}(\omega)]^2} \quad (7)$$

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1}[G_{\text{im}}(\omega)/G_{\text{re}}(\omega)] \quad (8)$$

である。 $G_{\text{re}}(\omega)$ と $G_{\text{im}}(\omega)$ はそれぞれ $G(\omega)$ の実部と虚部

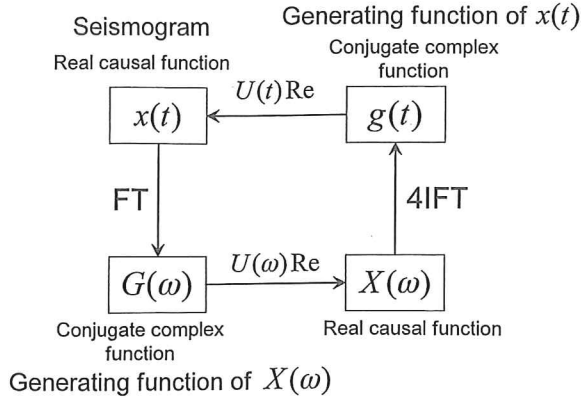


Fig. 1. Calculation flow of symmetric Fourier analysis of real causal function $x(t)$. “FT” and “IFT” mean Fourier transform and inverse Fourier transform, respectively.

である。このとき、 $G(\omega)$ の絶対値 $A(\omega)$ は角振動数 ω の成分の $x(t)$ に対する寄与の大きさを表しており、位相の傾き $t_{gr}(\omega) = d\phi(\omega)/d\omega$ は角振動数 ω の成分がいつ到達するか、すなわち群遅延時間を表している。

一方、式(4)で定義される時間領域の共役複素関数 $g(t)$ は、もとの地震動波形 $x(t)$ の母関数と呼ばれ、 $x(t)$ の特徴を表す重要な関数である。 $g(t)$ を極形式で

$$g(t) = \alpha(t)e^{i\varphi(t)} \quad (9)$$

と書く。ここで

$$\alpha(t) = \sqrt{[g_{re}(t)]^2 + [g_{im}(t)]^2} \quad (10)$$

$$\varphi(t) = \tan^{-1}[g_{im}(t)/g_{re}(t)] \quad (11)$$

である。 $g_{re}(t)$ と $g_{im}(t)$ はそれぞれ $g(t)$ の実部と虚部である。式(9)および式(5)は、 $\alpha(t)$ なる包絡形状の中に $e^{i\varphi(t)}$ なる搬送波を流し込んだものの実部の $t \geq 0$ の範囲が $x(t)$ であることを示している。したがって、 $t \geq 0$ の範囲において絶対値 $\alpha(t)$ は $x(t)$ の包絡形、位相の傾き $\omega_{gr}(t) = d\varphi(t)/dt$ は時刻 t における角振動数の瞬時値を表すと解釈することができる。以降 $\omega_{gr}(t)$ およびこれを振動数に換算したもの $f_{gr}(t) = \omega_{gr}(t)/2\pi$ をそれぞれ瞬間角振動数・瞬間振動数と呼ぶことにする。

本節において述べた周波数領域の母関数 $G(\omega)$ および時間領域の母関数 $g(t)$ と元の地震動波形 $x(t)$ との関係が、2.2節で述べる音の作成において重要となる。

2.2 母関数を利用した音圧波形の作成法

本節以降混乱を避けるために、地震波に関わる諸量には上付添字 E を、音波に関わる諸量には上付添字 S を付する。

1章で述べたように、地震動に含まれる振動数成分はおおよそ 10 Hz 程度以下が大部分であるのに対し、人間の可聴音域は 20 Hz から 20 kHz の範囲である。したがって、地震動波形をもとに何らかの方法で高振動数を

有する波形を作成する必要がある。本研究においては、これを時間領域の母関数を利用することで実現した。すなわち、地震動の速度波形を $x^E(t)$ とし、これについて Fig. 1 に示した対称的フーリエ解析の経路を一周すると再び元の波形 $x^E(t)$ が得られるが、その経路中に現れる母関数 $g^E(t)$ に適当な処理を施して新たな母関数 $g^S(t)$ を作成し、最後に可聴振動数帯の波形 $x^S(t)$ を得るというものである。

なお、「音の波形」という場合、通常用いられる物理量は音圧 $p^S(t)$ の時刻歴波形であり、これは空気を伝わる疎密波の変位 $u^S(x, t)$ と以下の関係にある。

$$p^S(x, t) = -K \frac{\partial u^S(x, t)}{\partial x} = -\frac{K}{c} \frac{\partial u^S(x, t)}{\partial t} \quad (12)$$

ここでは簡単のために空間座標は x のみの一次元とした。 K は空気の体積弾性率、 c は空気を伝わる疎密波の位相速度である。式(12)から明らかなように、音圧波形は空気を伝わる疎密波の速度波形と相似である。また、振動のエネルギーと最も密接に結び付いているのは速度波形であり、その包絡形関数の2乗は各時刻におけるエネルギー密度を表していると考えられる。そこで、目的の音声波形が満足すべき条件のひとつ、「③地震動の振幅が大きいときは大きな音で聞こえる」ことをエネルギーの大小に結び付け、元となる波形 $x^E(t)$ には地震動の速度波形を用いることとした。

2.1節で述べた通り、時間領域の母関数 $g^E(t)$ の絶対値 $\alpha^E(t)$ と位相の傾き $\omega_{gr}^E(t) = d\varphi^E(t)/dt$ は、時刻 t における $x^E(t)$ の包絡形と瞬間角振動数をそれぞれ表している。そのため、包絡形状はそのままに、瞬間角振動数を上昇させることによって、可聴振動数帯域の波形を作成することが可能であると考えられる。

$$\alpha^S(t) = \alpha^E(t) \quad (13)$$

$$\omega_{gr}^S(t) = k\omega_{gr}^E(t) \quad (14)$$

地震動の速度と音圧とは次元の異なる量であるが、作成した音を音響機器によって再生するとき、音の強さは自由に制御できるのが普通である。したがって、音圧の絶対値にこだわることは意味がなく、時間変化のパターンのみが重要となる。そのため、式(13)においては地震動の速度から音圧への換算係数を省略した。これらを元に新たな時間領域の母関数を次式のように定義する。

$$g^S(t) = \alpha^S(t)e^{i\varphi^S(t)} \quad (15)$$

ただし

$$\varphi^S(t) = \int_0^t \omega_{gr}^S(\xi) d\xi$$

これを Fig. 1 に示した対称的フーリエ解析中の $g(t)$ に対応させ、残りの処理を施すことで音圧波形 $x^S(t)$ を得る。この一連の操作を Fig. 2 にフローチャートとして

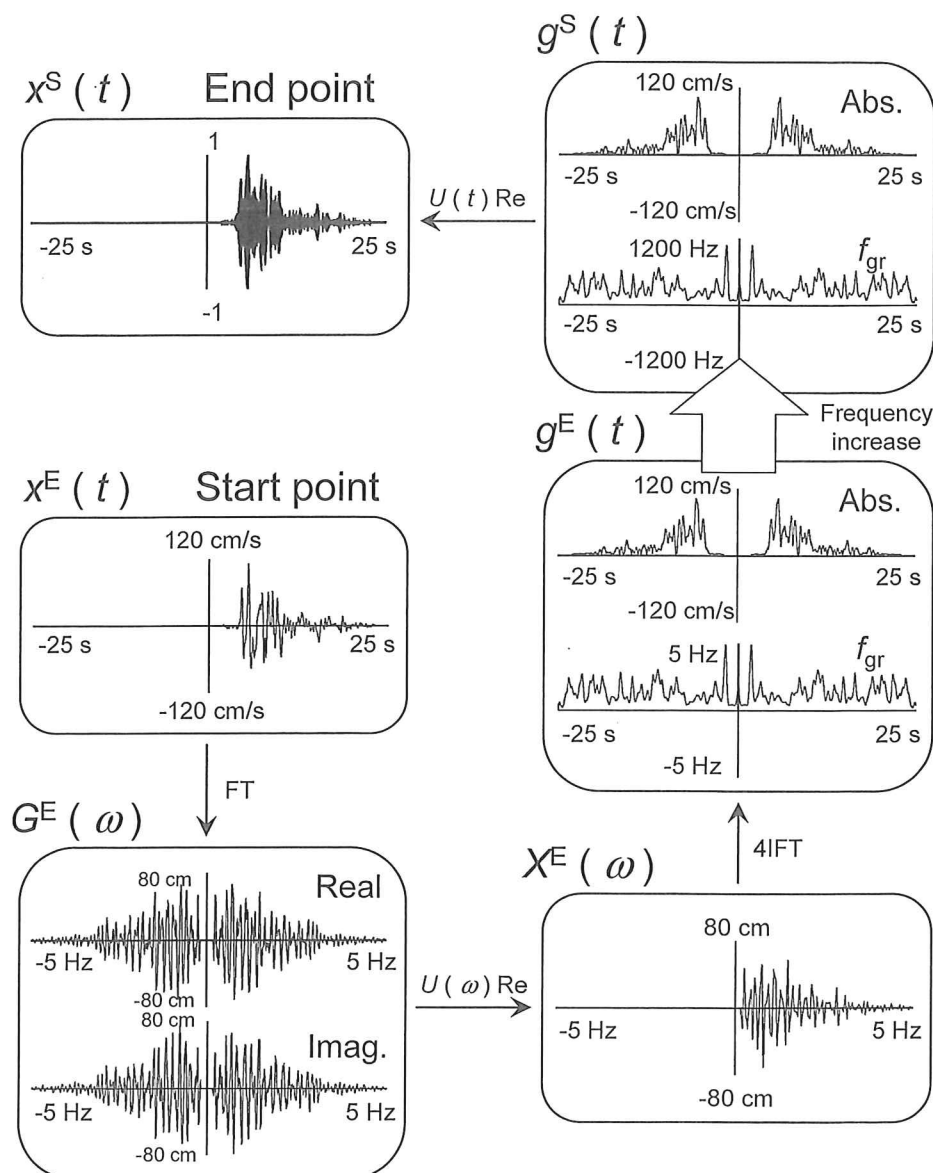


Fig. 2. Flowchart of synthesis of sound waveform using time-domain generating function. Symbols are based on description in Section 2.2. "Real," "Imag." and "Abs." mean real part, imaginary part and absolute value, respectively.

示す。

2.3 防災教育への応用を指向した音質の調整

2.2 節において、地震動の速度波形を元に音圧波形を合成する手法の基礎を述べた。本節では、防災教育・啓発活動への応用を視野に入れ、一般の人が聞いた場合に地震を表現する音としてより臨場感を感じさせるための工夫を記す。

音には強さ・高さ・音色の三要素があり、それぞれ音圧波形の振幅・基本振動数・高調波成分の割合によって定まる。このうち音の強さの時間変化は音圧波形の包絡形、高さと音色の時間変化は搬送波によっておおむね決定される。以降、2.3.1 節にて音の高さ、2.3.2 節にて音色、2.3.3 節にて音の強さの時間変化（包絡形）をそれぞ

れ調整する方法を記す。

2.3.1 音の高さに関する調整

人間が感じる音の高さは、振動数の対数に依存する。振動数が2倍になると音の高さは1オクターブ変化する。2.2 節にて述べた方法により、可聴音域の波形を作成することは可能であるが、その振動数の範囲はどの程度であろうか。たとえば地震動の瞬間振動数が0.1 Hz から10 Hz までの範囲で時間変化する場合、作成された音は6.64 オクターブもの高低差を有することになる。音響機器の特性や人間の音に対する敏感性の周波数特性を考慮すると、これは音の高さの範囲としては広すぎる可能性がある。そこで、例えば地震動の振動数10倍を1オクターブ、つまり音の振動数2倍に対応させるなどと

いった方法が考えられる。一般に地震の振動数 β 倍を 1 オクターブに対応させる場合、瞬間振動数の上昇は式 (14) の代わりに次式を用いる。

$$\log_2 f_{gr}^S(t) = \log_2 f_{gr}^E(t) + \log_2 f_0^S \quad (16)$$

上式において、振動数の単位を Hz とすると、 f_0^S は地震動の瞬間振動数 1 Hz に対応させる音の瞬間振動数である。

2.3.2 音色に関する調整

音色は音圧波形に含まれる高調波の割合によって決まる。式 (15) によって作成される音圧波形は、搬送波に正弦波が用いられた形になっている。そこで、 $\omega_{gr}^S(t)$ の整数倍の瞬間角振動数を有する搬送波を重ね合わせたものを新たな搬送波とすることで、異なる音色の音を作成することが可能である。

ある音色のサンプル音圧波形 $h(t)$ が、次式のようにフーリエ級数で表されるとする。

$$h(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega_1 t} \quad (17)$$

ここで C_n は n 次高調波の複素フーリエ係数、 ω_1 は基本角振動数である。このサンプルと同じ音色を有する地震の音の母関数を、次式のように合成する。

$$g^S(t) = \alpha^S(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega_1^S(t)} \quad (18)$$

ただし

$$\omega_1^S(t) = \int_0^t n \omega_n^S(\xi) d\xi = n \varphi^S(t)$$

式 (17) を考慮して式 (18) を整理すると、次式を得る。

$$g^S(t) = \alpha^S(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\varphi^S(t)} = \alpha^S(t) h\left[\frac{\varphi^S(t)}{\omega_1}\right] \quad (19)$$

この式は、 $\alpha^S(t)$ なる包絡形にサンプル波形 $h[\varphi^S(t)/\omega_1]$ を搬送波として流し込んだものと理解できる。 $h(t)$ は音色のサンプルとして採用するものなので、短い継続時間のものを繰り返し流し込んで良い。ただし搬送波の独立変数が t ではなく $\varphi^S(t)/\omega_1$ となっているので、地震動の振動数変化に合わせてサンプル音の再生速度が上下することが分かる。

しかしながら、式 (19) による音は、ある形に歪んだ波の繰り返しであるため、式 (15) を用いた場合と比較すると音色は異なるものの、単調であることには変わりない。実際の地震時に聞かれる騒音は、ある波形の波が繰り返されるという構造を取っていない。こうした音をサンプルとして用いることで、さらに現実味のある音を合成することが可能になる。この場合、サンプル音圧波形 $h(t)$ は次式のようにフーリエ積分の形で表すことができる。

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (20)$$

ここで $H(\omega)$ は $h(t)$ のフーリエ変換である。サンプル音 $h(t)$ を利用して、地震の音の母関数を、次式のように合成する。

$$\begin{aligned} g^S(t) &= \alpha^S(t) \int_{-\infty}^{\infty} H(n\omega_1) e^{in\varphi^S(t)} dn \\ &= \frac{2\pi}{\omega_1} \alpha^S(t) h\left[\frac{\varphi^S(t)}{\omega_1}\right] \end{aligned} \quad (21)$$

この式において ω_1 は、ある基準となる振動数である。

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\varphi^S(t)}{\omega_1} \right] = \frac{\omega_{gr}^S(t)}{\omega_1} \quad (22)$$

であることを踏まえると、式 (21) は、瞬間振動数 $\omega_{gr}^S(t)$ の ω_1 に対する大小に対応してサンプル音の再生速度を変化させながら包絡形 $\alpha^S(t)$ の中に流し込むことで母関数とすることを意味する。 $\omega_{gr}^S(t) = \omega_1$ であるときは、サンプル音がその本来の速度で再生されることになる。式 (21) には、式 (19) には存在しなかった係数が現れているが、前述のとおり音圧の絶対値は意味をもたないので、式 (21) は実質的に式 (19) と同じ形であると考えて良い。

2.3.3 音圧波形の包絡形に関する調整

2.2.2 節においては、式 (13) に示すように、音圧波形の包絡形には地震動速度波形の包絡形をそのまま利用した。これは、地震動の振幅が大きい区間において強い音が鳴り、逆に地震動の振幅が小さければ弱い音となることを示している。しかしながらこの方法には、周期が 1 s を超えるようなゆっくりとした地震動を音声化する場合には、不自然な音として聞こえる可能性がある。すなわち、地震動が周期の長い正弦波のような波形が連続するものである場合、地震動の包絡形関数はほぼ一定値となり、その区間では常に同じ強さの音が鳴り続けることになる。そこで音圧波形の包絡形として、地震動速度波形の絶対値を用いることが考えられる。

$$\alpha^S(t) = |x^P(t)| \quad (23)$$

これにより、長周期地震動の場合に、速度に比例する振幅の音圧波形を作成することができる。

§ 3. 実地震動記録への適用例

本章では、2 章において述べた音の作成法を、実際の地震波形について適用した結果について記す。地震動波形としては、1995 年兵庫県南部地震の際に気象庁神戸海洋気象台で得られた地震動記録（以降 JMA 神戸波と呼ぶ）、および愛知県設計用入力地震動研究協議会による想定新東海地震の名古屋三の丸地区における地震動波形 [宮腰・他 (2005)]（以降三の丸波と呼ぶ）の 2 種類を用いた。前者は比較的周期の短い地震動、後者は周期の長い地震動の代表として採用した。地震動波形はすべて速度波形としてから音の作成に供している。本章で紹介

する地震の音については、筆者らの所属研究室のウェブページ (URL, <http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/etaiken/staiken.html>) において公開している。

3.1 JMA 神戸波の音への変換

JMA 神戸速度波形に対し、A) 2.2 節の手法による音 (2.3 節の調整を施していない)、B) 2.3.1 節と 2.3.2 節の調整を加えた音、C) 2.3.1 節、2.3.2 節および 2.3.3 節の調整を加えた音、の 3 種類の音を作成した。それぞれの場合のパラメータについては Table 1 のとおりである。2.3.2 節に記した音色に関する調整には、Fig. 3 のような非定常的な波形をサンプル音として用いた。これは、地鳴りの効果音として市販されているものの音圧波形を抽出したものである。Fig. 4 に元の JMA 神戸速度波形および A, B, C の音圧波形をそれぞれ示す。また、元の JMA 神戸速度波および A と B の瞬間振動数を Fig. 5

に示す。C の瞬間振動数は B のものと共通であるため、Fig. 5 では省略した。

まず、A の音について考察する。Fig. 4(b) において、

Table 1. Parameters used to synthesize sounds.

	Frequency increase	Tone	Envelope
A	Linear Eq. (14) $k=220$	Harmonic Eq. (15)	Envelope Eq. (13)
B	Logarithmic Eq. (16) $f_0=310 \text{ Hz}, \beta=10$	Realistic Eq. (21) $\omega_1=1382 \text{ s}^{-1}$	Envelope Eq. (13)
C	Logarithmic Eq. (16) $f=310 \text{ Hz}, \beta=10$	Realistic Eq. (21) $\omega_1=1382 \text{ s}^{-1}$	Velocity Eq. (23)

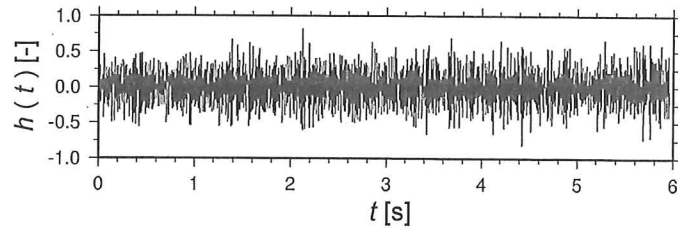


Fig. 3. Waveform of tone sample used to synthesize realistic sound of earthquake (relative value).

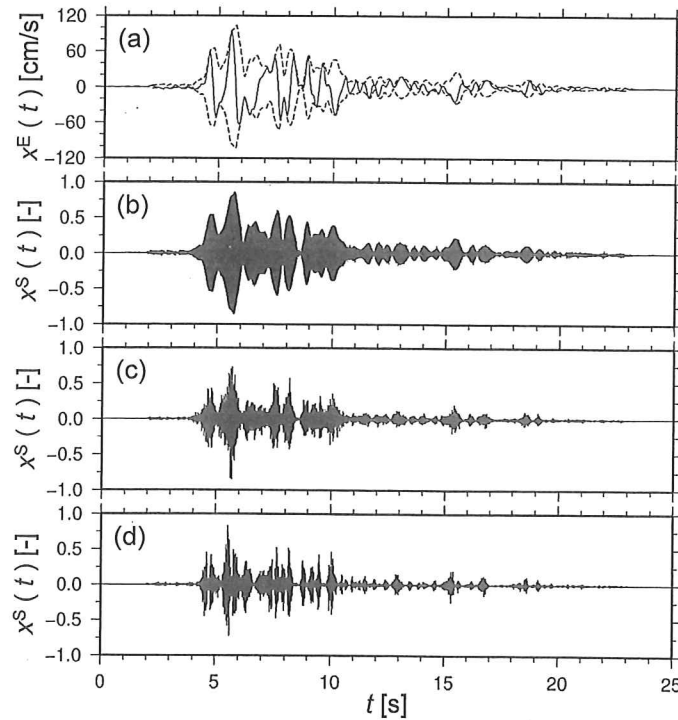


Fig. 4. (a) Velocity waveform $x^E(t)$ of JMA Kobe seismogram (solid line) and its envelope (broken line). (b) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using time-domain generating function (Sound type A, relative value). (c) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using realistic tone sample (Sound type B, relative value). (d) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using realistic tone sample and velocity-based envelope (Sound type C, relative value).

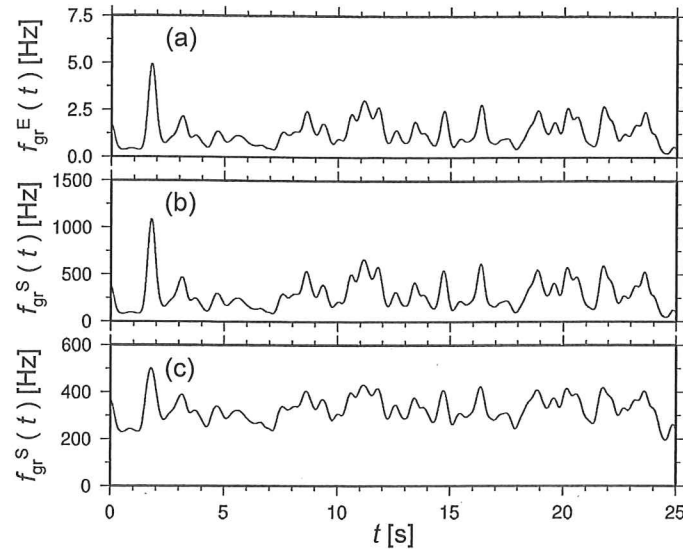


Fig. 5. (a) Instantaneous frequency $f_{gr}^E(t)$ of JMA Kobe seismogram. (b) Instantaneous frequency $f_{gr}^S(t)$ of synthesized sound using time-domain generating function (Sound type A). (c) Instantaneous frequency $f_{gr}^S(t)$ of synthesized sound using realistic tone sample (Sound type B).

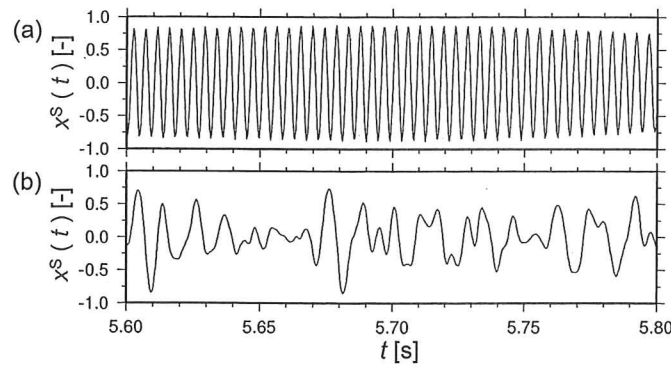


Fig. 6. An enlargement of (a) synthesized sound waveform $x^S(t)$ without any tuning (Sound type A) and (b) synthesized sound waveform $x^S(t)$ with realistic tone (Sound type B) from $t=5.6$ s to $t=5.8$ s.

音圧波形は高振動数のために細部を視認することはできないが、音圧の包絡形は地震動の包絡形と一致しているため、音の強さは地震動のエネルギーの大小に対応して時間変化していることが分かる。Fig. 5(b)からは、式(14)による当然の帰結ではあるが、音の瞬間振動数が地震動の瞬間振動数と同期して上下していることが分かる。その範囲は 100 Hz から 1100 Hz 程度であり、これは音程にして 3.46 オクターブの幅に相当する。以上より、2.2 節の方法により作成した音が 1 章において示した 3 つの条件、①地震動記録と同じ継続時間を有すること、②地震動の振動数が高いときは高い音で聞こえること、③地震動の振幅が大きいときは強い音で聞こえること、を満足していることが確認できる。

次に、B の音について考察する。B の音は、Fig. 4(c) に見えるように音圧波形の包絡形については地震動波形のそれを維持しているが、Fig. 5(c) のように振動数の分布範囲は 200 Hz から 500 Hz 程度（音程にして 1.32

オクターブ）に狭まっている。これが 2.3.1 節で述べた音の高さに関する調整を施した結果である。Fig. 4(b), (c) の時刻 5.6 s から 5.8 s の区間を拡大して Fig. 6 に示す。Fig. 6(a), (b) を比較すると、2.3.2 節の調整を施すことで音圧波形に非定常性が導入され、音色が変化していることが確認できる。B の音の場合、その振動数は地震動の瞬間振動数に対応する値を基本としつつも、音色を変えるために別の振動数成分を混入させている。そのため、1 章で記した 3 つの条件のうち②に関しては、人間の感覚のうえではおおむね守られているように感じられるものの、物理的に厳密なものではなくなっている。

C の音については、B の音とは包絡形が異なっている。Fig. 4(d) より、C の音量変化が A ならびに B の音よりも激しいことが分かる。物理的意味としては、B の音量変化は比較的長い時間スケールで見た地震動の最大振幅の変化を表しており、C の音量変化は地震動の瞬間的な速度を表現していると言える。B と C との差は 1 章

で記した3つの条件のうち③の解釈の違いであり、どちらがより地震の音として優れているかは、一概に決することはできないものと思われる。

3.2 三の丸波の音への変換

三の丸波を元として、Table 1 に示した3種類の音を

作成した。Fig. 7 に元の三の丸速度波形および A, B, C の音圧波形をそれぞれ示す。また、元の三の丸速度波および A と B の瞬間振動数を Fig. 8 に示す。C の瞬間振動数は B のものと共通であるため、Fig. 8 では省略した。

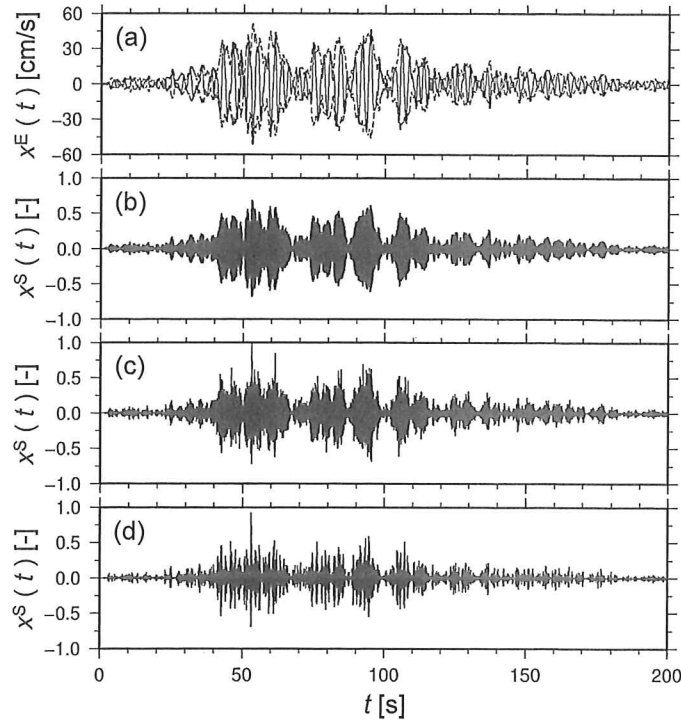


Fig. 7. (a) Velocity waveform $x^E(t)$ of assumed Sannomaru seismogram (solid line) and its envelope (broken line). (b) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using time-domain generating function (Sound type A, relative value). (c) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using realistic tone sample (Sound type B, relative value). (d) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using realistic tone sample and velocity-based envelope (Sound type C, relative value).

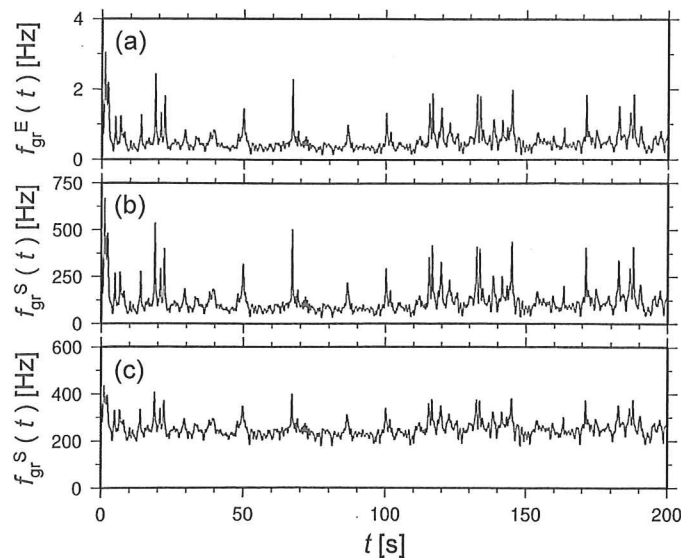


Fig. 8. (a) Instantaneous frequency $f_{gr}^E(t)$ of assumed Sannomaru seismogram. (b) Instantaneous frequency $f_{gr}^S(t)$ of synthesized sound using time-domain generating function (Sound type A). (c) Instantaneous frequency $f_{gr}^S(t)$ of synthesized sound using realistic tone sample (Sound type B).

まず、A および B の音については、JMA 神戸波の音と同様の考察が可能である。しかしながら、JMA 神戸波と比較した場合、A、B ともに長時間（数秒～十数秒）にわたって間断なく音が鳴り続けているという印象である。これは、元となる地震動波形の包絡形および瞬間振動数の変化が極めて緩慢であることによる。このことから、再生される音の音量と高さの変化が緩やかであることは、元の地震動が長時間にわたって変化の少ない包絡形と瞬間振動数を有していることを示していると言える。

また、C の音についてもその表現するところは JMA 神戸波の場合と異なるものではない。しかしながら、三の丸波のような長周期の地震動を映像に写しながら本手法で作成した音を同時に再生するといったことを行う場合、一般向けには C の音がより理解されやすいものと考えられる。

3.3 音波形作成法の選択

本稿では地震動波形を元として音を作成する方法について、いくつかの選択肢を示した。すなわち、2.2 節で記した時間領域の母関数を用いる方法のみによる場合に加え、振動数の上昇方法に関する調整（2.3.1 節）、音色に関する調整（2.3.2 節）、および音圧の包絡形に関する調整（2.3.3 節）をそれぞれ行うか否かによって、ひとつの地震動からさまざまな音を作り出すことが可能である。ここで地震の音を作成する目的に立ち返ってみると、ひとつは地震動をある規則の元に音として表現することで理解の助けとすることであり、もうひとつは地震の音を防災教育に用いる材料として供することである。

前者の目的のためには、なるべくシンプルな処理で地震動波形のもつ情報を保持することが重要である。そのため、2.2 節の手法のみを用い、2.3 節の調整は施さずに作成した音が適している。ただし、あまりに瞬間振動数の変動幅が大きい場合には、聞きやすさを考慮して振動数の上昇方法に関する調整（2.3.1 節）を施すことも考えられる。

一方後者の目的のためには、一般の人々が想像するであろう「地震の音」にある程度近づけることが必要であると考えられる。実際、2.2 節の手法のみによって作成した音は波形が正弦波に近いために澄んだ音色となっており、特に地震の映像と組み合わせる場合において臨場感に欠けるきらいがある。そのため、1 章で挙げた条件②に関してやや厳密性を欠いてでも、音色に関する調整（2.3.2 節）を施すことは許されるのではなかろうか。さらに長周期の地震動の場合には、音圧の包絡形に関する調整（2.3.3 節）を施すことで臨場感をもたせる効果が期待できる。また、本稿においては振動のエネルギーが速

度と関係が深いことを鑑みて地震動記録の速度波形を元に音を作成した。しかし、地震の際に人体が感じるものは速度ではなく加速度である。その意味では、防災教育に應用する際には地震動の加速度波形を元に音を作成することも考えられる。その場合も、2.2 節および 2.3 節で述べた方法と全く同じ操作で音を作成することが可能である。

本稿においては地震の音の作成法として種々の手法を提案したが、それらは用途によって一長一短がある。実際に地震の音を作成して利用する場面においては、2.2 節～2.3.3 節に述べた手法を目的に応じて適宜取捨選択することが望ましい。

§4. ま と め

本研究では、地震動を感覚によって体験するためのひとつの手段として、地震動波形を音によって表現する方法について検討した。従来行われてきた音の作成は、地震動記録を時間軸方向に圧縮したものをそのまま音圧波形とするものであったが、本稿ではそれとは全く異なる新しい手法を提案した。それは、従来の方法では不可能であった次の 3 つの条件、①地震動記録と同じ継続時間を有すること、②地震動の振動数が高いときは高い音で聞こえること、③地震動の振幅が大きいときは大きな音で聞こえること、を満足するものである。音声波形を作成する手法としては、地震動波形について対称的フーリエ解析を行う際、処理途中に現れる時間領域の母関数に注目し、これに振動数を上昇させる操作を行うことで音圧の時刻歴波形を得るというものである。本手法を JMA 神戸地震動記録および想定新東海地震三の丸波に適用した結果、当初の条件を満足する音を作成することが確認された。

本稿で提案した手法を用いると、音は地震動記録と同じ継続時間を有しており、かつ地震波の振動数や振幅・エネルギーといった特性を時系列で表現することが可能である。また、震動を映像で見せる機器と本手法による音を組み合わせることで、視聴覚をもって地震を擬似的に体験することが可能となる。地震動波形を音によって表現することは、振動台等を用いた防災教育・啓発活動の場にあっても有効に活用できると考えられる。

謝 辞

実地震動波形として、気象庁神戸海洋気象台の観測記録を使用させていただきました。また、本論文は 1 名の匿名査読者と山田伸之氏に査読を行っていただき、大変有益なコメントを頂戴いたしました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- Dombois, F., 2002, Auditory seismology on free oscillations, focal mechanisms, explosions and synthetic seismograms, Proceedings of the 2002 International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan, ICAD02-1.
- 福和伸夫・山岡耕春・鈴木康弘・釜江克宏・香川敬生・佐藤俊明, 2001, 名古屋地域の強震動予測の試み: 協議会方式による設計用地震動策定の現状, 地球惑星科学合同大会 2001.6.
- 福和伸夫・佐武直紀・原 徹夫・太田賢治・飯沼博幸・鶴田庸介・飛田 潤, 2007, 長周期構造物の応答を再現するロングストローク簡易振動台の開発, 日本建築学会技術報告集, 25, 55-58.
- 花井 勉・石井 渉・押田光弘・村尾秀己・福和伸夫, 2009, 防災教材, 振動論教材としての卓上 2 軸振動台とその模型の開発, 日本建築学会技術報告集, 15, No. 29, 57-60.
- 伊藤 毅, 1973, 音響工学原論 第 8 版 (下巻), コロナ社, 439-453.
- 和泉正哲・勝倉 裕, 1983, 地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 327, 20-28.
- 和泉正哲・勝倉 裕・大野 晋, 1988, 地震動の因数分解に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 390, 27-33.
- Katukura, H. S., S. Ohno, and M. Izumi, 1989, Symmetrical FFT technique and its Applications to Earthquake Engineering, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 717-725.
- 宮腰淳一・中田 猛・福和伸夫・柴田昭彦・白瀬陽一・齊藤賢二, 2005, 名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基盤地震動の作成, 日本地震工学会年次大会, 2005.1.
- Papoulis, A., 1962, The Fourier integral and its applications, McGraw-Hill Book Company, 134-136.
- 理論地震動研究会, 1994, 地震動 その合成と波形処理, 鹿島出版会, 171-175.
- U. S. Geological Survey, 2009, Earthquake Sounds

for Fun, <<http://earthquake.usgs.gov/learn/listen/allsounds.php>>, (参照 2010-9-21).

付 録

対称的フーリエ解析では, 時間領域・周波数領域それぞれに母関数が定義される. 本稿では時間領域の母関数を用いて地震の音を作成したが, 周波数領域の母関数を用いることによっても音を作成することは可能である. しかしながら, 周波数領域の母関数を用いて作成した音は 1 章で述べた 3 つの条件を満たしているとはいいがたく, かつこれを聞いたときの解釈が非常に困難である. そのため本編からは外したが, 検討を行ったので掲載する.

2.1 節において触れたとおり, 周波数領域の母関数 $G^E(\omega)$ の絶対値 $A^E(\omega)$ と位相の傾き $t_{gr}^E(\omega) = d\Phi_{gr}^E(\omega)/d\omega$ は, 角振動数 ω の成分の $x^E(t)$ に対する寄与の大きさと遅延時間をそれぞれ表している. そのため, これらのグラフの形を保ったまま振動数を上昇させることにより, 可聴音域の波形を作成することが可能である.

$$A^S(\omega) = A^E(\omega/k) \quad (A1)$$

$$t_{gr}^S(\omega) = t_{gr}^E(\omega/k) \quad (A2)$$

ここで k は振動数の上昇倍率である. 式 (A1) および式 (A2) をもとに新たな周波数領域の母関数を次式のように定義する.

$$G^S(\omega) = A^S(\omega) e^{i\Phi^S(\omega)} \quad (A3)$$

$$\text{ただし } \Phi^S(\omega) = \int_0^\omega t_{gr}^S(\xi) d\xi$$

これを Fig. 1 に示した対称的フーリエ解析中の $G(\omega)$ に対応させ, 残りの処理を施すことで音圧波形 $x^S(t)$ を得る.

JMA 神戸速度波形に対し, 本手法を用いて音圧波形を作成した. 式 (A1) および式 (A2) に現れる振動数の上

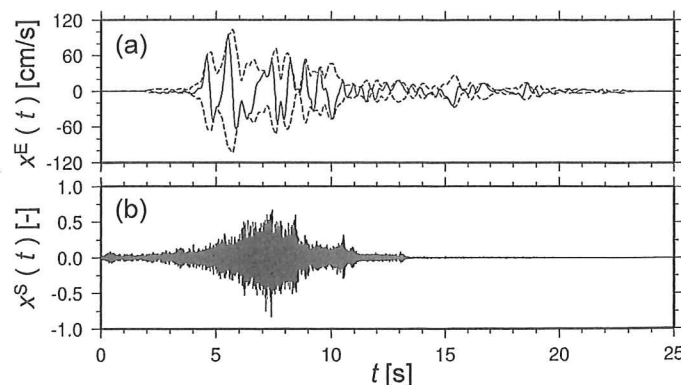


Fig. A1. (a) Velocity waveform $x^E(t)$ of JMA Kobe seismogram (solid line) and its envelope (broken line). (b) Synthesized sound waveform $x^S(t)$ using frequency-domain generating function (relative value).

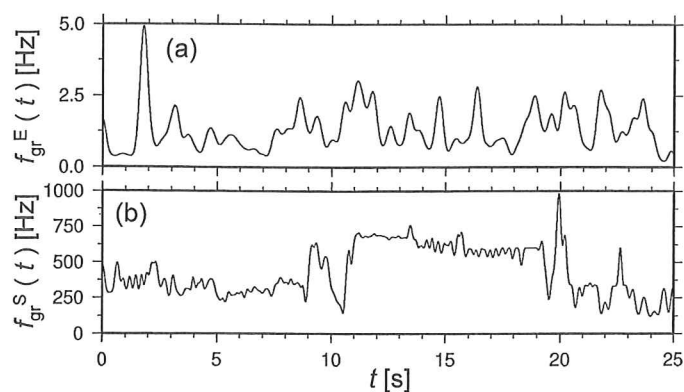


Fig. A2. (a) Instantaneous frequency $f_{gr}^E(t)$ of JMA Kobe seismogram. (b) Instantaneous frequency $f_{gr}^S(t)$ of synthesized sound using frequency-domain generating function.

昇倍率は $k=220$ とした. Fig. A1 に元の地震動波形と作成した音圧波形を示す. また, Fig. A2 にそれぞれの瞬間振動数の時間変化を示す. Fig. A1 および Fig. A2 より, 音圧波形の振幅と瞬間振動数は, 始めの 10 s 程

度までであれば地震動のそれらと類似した傾向を示していることが分かる. しかしながら周波数領域の母関数を用いる方法では, 10 s 以降の後続波の部分进行处理することが困難であることも見て取れる.