

デジタルフィルターによる SMAC-B 2 加速度計
記録の補正について*CORRECTION OF SMAC-B 2 ACCELEROGRAPH RECORDS
BY DIGITAL FILTER

後藤尚男**・亀田弘行***・杉戸真太****・今西直人*****

By Hisao GOTO, Hiroyuki KAMEDA, Masata SUGITO and Naoto IMANISHI

1. 緒 言

わが国でこれまでに得られた強震加速度記録の数は膨大な量に及んでおり、それらの多くは数値データの形で公表され^{1),2)}、耐震工学に大きく貢献している。これらの強震記録を用いて構造物の地震応答解析を行う場合には、原記録に含まれる誤差をできるだけ取除いてから入力として用いるべきである。強震記録に含まれる誤差要因としては種々のものが指摘されているが³⁾、主として問題になるのは、原記録における基線の不安定性に起因する低振動数誤差、および高振動数域での強震計の感度低下による誤差の 2 種である。前者は、加速度を積分して得られる速度・変位波形や長周期構造物の応答解析の精度に大きく影響し、後者は加速度波形の強度に直接影響する。波形の数値化に際して混入する読取り誤差は全振動数域に及ぶであろうが、その影響が特に問題となるのは、上記の原因によって SN 比が悪化する低・高振動数域においてであると考えられる。以上より、ここでは低振動数誤差と高振動数誤差についての波形補正を扱う。

これらの誤差のうち、低振動数誤差の除去については早くから研究が行われてきた。Berg, Housner⁴⁾ は、2 次多項式の補正基線を用いて速度の最小自乗積分を得ることにより積分変位波の発散を防ぐことを提案し、この方法はその後多くの研究に用いられるとともに、より高次の多項式を用いたり⁵⁾、一定時間区分ごとに補正を行うことによって記録時間の影響を避ける⁶⁾ などの改良が行われてきた。また、吉田・岡山⁷⁾ は弾性床の上はり理

論との相似関係を用い、さらに久保・佐藤⁸⁾ は 1 次式による基線の修正と振幅値の修正を組合わせた独自の波形補正法を提案している。以上の方法はいずれも原記録を高域通過フィルター (high-pass filter) で処理することにより、低振動数成分を除去することと等価である。さらに、栗林・土岐・若林⁹⁾ は、SMAC-B 2 型強震計の長周期ドリフトを実験的に検討し、周期 10~15 sec の成分を除去すればよいという結果を得ている。

強震計の計器特性に関連する高振動数域の補正は、Hudson, Trifunac ら^{8),9)} によって行われ、低振動数域の補正を含む総合的な標準波形処理法に組込まれ、米国における強震記録の補正波形データセット¹⁰⁾ として実用に供されている。わが国の強震記録については、田中¹¹⁾ がデジタルフィルターを用いて SMAC-B 2 型強震計による八戸港湾での記録 (1968 年十勝沖地震) について、計器特性を含めた補正を行っている。わが国で標準的に用いられている SMAC-B 2 型強震計 (固有振動数 7.14 Hz) の場合には、Fig. 1 に示すように高振動数域での感度の低下が著しく、低振動数域の感度と比較して、5 Hz で 67%、10 Hz では 34% に低下する (公称減衰定数 $\zeta=1.0$ において) から、こうした計器特性に

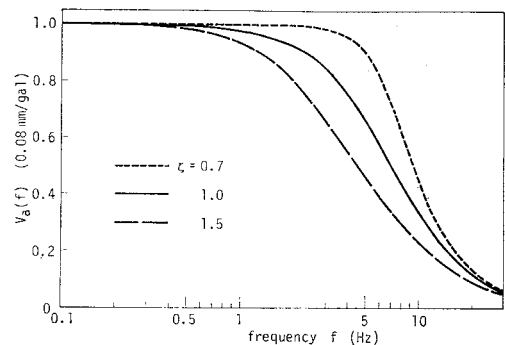


Fig. 1 Sensitivity curve for SMAC-B 2 accelerograph

* 土木学会第 32 回年次学術講演会 (I-172: 昭.52.10) において一部を発表

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

*** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学教室

**** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

***** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

関する補正は特に重要と考えられる。

以上のように、強震記録の波形処理については多くの研究が行われてきたが、計器特性その他わが国の実状に適した標準的な波形処理法を確立するためには、波形補正におけるフィルター定数の影響と、得られた補正波形の特性について、なお詳細な定量的検討を要すると考えられる。本研究は、このような観点から、デジタルフィルターを用いて低・高振動数域の誤差を除去し、あわせて計器特性に関する補正も行う場合に、フィルター定数、特に遮断振動数が補正結果に及ぼす影響をパラメトリックに検討し、これより耐震工学的に妥当な補正法を確立するための資料を得ようとしたものである。用いたデジタルフィルターは、田中¹¹⁾と同様に、両側に遮断振動数を有し、その間では強震計の感度の逆特性を示すものである。強震計としては、わが国でもっとも多くの強震記録を供給してきた SMAC-B 2 型加速度強震計（以下では SMAC-B 2 と略称する）を対象とした。

以下本文では、はじめに補正法を簡単に説明した後、数値計算結果に基づいて、変位および速度との関連で低域遮断振動数の妥当な値を検討し、さらに原記録と補正記録における加速度とそのフーリエスペクトルの特性を考察することにより高域遮断振動数の妥当な設定法を論ずる。

2. デジタルフィルターによる原記録の補正

(1) 補正法と補正フィルターの概略

原加速度記録に補正を行い、補正加速度記録および速

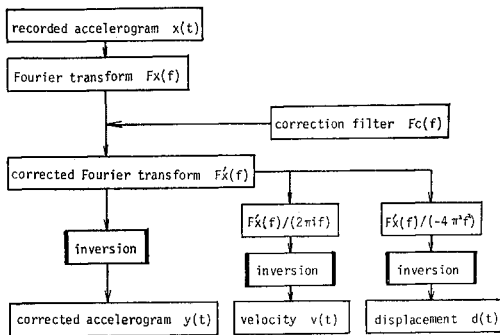


Fig. 2 Data processing procedure

度・変位波形を得る過程を Fig. 2 に示した。まず原加速度記録 $x(t)$ のフーリエ変換

$$F_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-2\pi i f t} dt \dots \dots \dots (1)$$

を計算する。これに補正フィルターの周波数応答関数 $F_c(f)$ を掛けることにより、補正加速度記録のフーリエ変換 $F_x'(f)$ が求まる。すなわち、

$$F_x'(f) = F_c(f) \cdot F_x(f) \dots \dots \dots (2)$$

この $F_x'(f)$ をフーリエ逆変換すれば、次式の補正加速度記録 $y(t)$ を得る。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F_x'(f) e^{2\pi i f t} df \dots \dots \dots (3)$$

また、補正加速度記録による速度波形 $v(t)$ および変位波形 $d(t)$ はそれぞれ次のようにして求めた。

$$v(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F_x'(f)}{2\pi i f} e^{2\pi i f t} df \dots \dots \dots (4)$$

$$d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F_x'(f)}{-4\pi^2 f^2} e^{2\pi i f t} df \dots \dots \dots (5)$$

本研究においては、SMAC-B 2 の感度特性を補正し、あわせて低・高振動数域の誤差を除去する補正フィルターを作成することが目標となるが、これら 2 種の補正結果は互いに関連しあうものである。したがって、まず低振動数域のみの補正を検討し、その後に高振動数域の補正を考える。

Fig. 3 に本研究で用いた補正フィルターの特性を示した。フィルター I は低振動数誤差の除去のみを行うものであり、フィルター II はそれに加えて計器特性による高振動数域の補正も同時に行うものである。これらの補

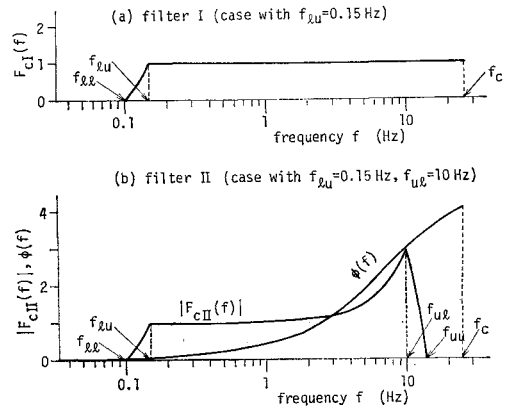


Fig. 3 Frequency characteristics of correction filters

Table 1 Cut-off frequencies for correction filter

f_{lu} (Hz)	0.03	0.037	0.045	0.06	0.08	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.25	0.3
f_{ll} (Hz)	0.01	0.014	0.02	0.03	0.045	0.06	0.08	0.1	0.125	0.15	0.2	0.25
f_{ul} (Hz)	7.143	8.5	10.0	12.0	14.0	15.5	17.0	18.5	20.0	21.0	22.0	
f_{uu} (Hz)	10.0	12.0	14.0	15.5	17.0	18.5	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	

* The value 7.143 Hz is equal to the natural frequency of the pendulum.

正フィルターにおける f_{lu} と f_{ul} は、それぞれ低振動数側および高振動数側の遮断振動数であり、 f_{ll} と f_{uu} は Fig. 3 に示すようにそれぞれ f_{lu} および f_{ul} に対応して補正フィルターの倍率が 0 になる振動数である。また、 f_c はフィルター解析で意味を持つ振動数の上限で、用いる記録の時間間隔 Δt を用いて $f_c = 1/(2\Delta t)$ と表わされる。本解析で用いた f_{ll} と f_{lu} および f_{ul} と f_{uu} の各組の値を Table 1 に示した。フィルター I は、次のようにして与えられる。

$$F_{C1}(f) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq f \leq f_{ll} \\ \frac{f-f_{ll}}{f_{lu}-f_{ll}} & ; f_{ll} < f \leq f_{lu} \dots (6) \\ 1 & ; f_{lu} < f \end{cases}$$

フィルター II は、加速度型地震計の理論より、次式で与えられる SMAC-B2 の感度特性 $V_a(f)$ を用いて作成する。

$$\left. \begin{aligned} V_a(f) &= \frac{1}{\sqrt{\{1-(f/f_a)^2\}^2 + 4\zeta^2(f/f_a)^2}} \\ \phi(f) &= \tan^{-1} \frac{2\zeta(f/f_a)}{1-(f/f_a)^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 f は加振振動数、 f_a および ζ はそれぞれ SMAC-B2 の固有振動数 (7.14 Hz) と減衰定数 (公称値 1.0) である。すなわち、フィルター II の周波数特性を次式で与える。

$$F_{C2}(f) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq f \leq f_{ll} \\ \frac{f-f_{ll}}{f_{lu}-f_{ll}} \frac{e^{i\phi(f)}}{V_a(f_{lu})} & ; f_{ll} < f \leq f_{lu} \\ \frac{e^{i\phi(f)}}{V_a(f)} & ; f_{lu} < f < f_{ul} \\ \frac{f_{uu}-f}{f_{uu}-f_{ul}} \frac{e^{i\phi(f)}}{V_a(f_{ul})} & ; f_{ul} < f \leq f_{uu} \\ 0 & ; f_{uu} < f \end{cases} \dots \dots \dots (8)$$

Table 2 Accelerograms used for detailed analysis

record ID No.	site	event and magnitude	component	peak acc. (gal)	soil condition	epicentral distance (km)	spectrum shape	predominant frequency (Hz)
S 213	Hososhima	1968 Hyuganada $M=7.5$	EW	230	3	90	L-S	1.0
S 234	Muroran	1968 Tokachi-oki $M=7.8$	NS	204	2	290	M-S	2.5
S 235	Aomori		NS	208	3	250	L-F	—
S 236	Miyako		NS	112	1	180	H-S	5.2
S 252	Hachinohe		NS	233	2	170	F	—
S 733	Kushiro	1973 Nemuro-oki $M=7.4$	NS	166	2	140	M-D	—

Table 3 Examples of peak ground motions

record	acceleration a_{max} (gal)				velocity v_{max} (kine)		displacement d_{max} (cm)	
	recorded	corrected			filter I	filter II	filter I	filter II
		filter I	filter II	amplification (filter II/I)				
Hososhima EW	230	237	282	1.19	27.3	27.7	6.7	6.8
Muroran NS	204	198	216	1.09	29.8	30.3	7.8	7.8
Aomori NS	208	210	252	1.20	39.0	39.1	20.0	20.1
Miyako NS	112	112	167	1.49	5.6	6.8	1.8	1.9
Hachinohe NS	233	226	264	1.17	33.8	35.7	9.6	9.7
Kushiro NS	166	165	187	1.13	26.2	26.7	6.1	6.2

Cut-off frequencies are: $f_{lu} = 0.15\text{Hz}$ and $f_{ul} = 10\text{Hz}$ for all cases.

以後の数値計算では、まずフィルター I $F_{C1}(f)$ を用いた解析により、Table 1 の中から妥当と思われる f_{lu} の範囲を検討し、しかる後 f_{lu} と f_{ll} を固定したフィルター II $F_{C2}(f)$ の解析から f_{ul} の影響を考察する。

(2) 解析に用いた強震記録

本研究で用いた強震記録は SMAC-B2 によって記録された地盤上の記録¹¹⁾ 合計 70 成分で、いずれも水平成分を対象とした。原記録の最大加速度は 30~233 gal の範囲にある。また、記録開始直後、記録紙の送りが一定速度になるまでは、みかけ上記録の振動数が高くなり、その部分の加速度がフィルター II によって必要以上に増幅されるのを防ぐため、数値記録の最初の 0.5 秒を除いたものを原波形として用いた*。

これらの記録のうち、Table 2 に示した 6 成分について、補正フィルターの特性の影響を詳細に検討した。

Table 2 の記録は、波形の視察およびフーリエスペクトルの形状から、低・中・高振動数成分をそれぞれ多く含むもの (Table 2 で L, M, H と表示。同表中の卓越振動数参照)、スペクトルが単一の鋭いピークを持つもの (S と表示)、双頭の形状を示すもの (D と表示)、広い範囲の振動数成分を含むもの (F と表示) を適宜選んだものである。これらの分類は相対的であり、定量的基準を持つものではないが、本研究の対象としての記録の特徴の範囲を一応カバーするものと考えている。また、Table 2 の記録はすべて文献 1) によるものであり、

原記録の読み取り値にペンの円弧補正を施し、さらに必要に応じて視察により基線を修正してある。

解析にあたっては、記録の

* 井合・倉田・土田による測定結果¹²⁾ から換算すると、これによって起動後 1.1 秒間の波形を除去したことになり、この時点での紙送り速度は最終速度の約 80% である。

時間間隔を $\Delta t=0.02$ sec とした。したがって、Fig. 3 における f_c は、 $1/(2 \times 0.02)=25$ Hz となる。また、Table 2 の記録に対してフィルター I, II から得られる補正波形の最大値を Table 3 に一括して示した。ただし、同表では、フィルターの遮断振動数を $f_{lu}=0.15$ Hz, $f_{ul}=10$ Hz に固定してある。これらの振動数は、後述のように、本研究において妥当なフィルター定数として得られた範囲のうちもっとも内側の値を用いたものである。

3. 低域遮断振動数 f_{lu} の影響 (フィルター I による検討)

(1) 基線補正と加速度波形

Fig. 4 にフィルター I において $f_{lu}=0.15$ Hz とした場合の、八戸記録の原加速度波形と補正加速度波形を示した。フィルター I では計器特性による補正は行われないので、両波形の形状に大差はないが、原波形が全体として正の側に片寄っている傾向は補正波形では修正されており、いわゆる基線補正の効果が現れている。これにより、補正波形の最大加速度は 226 gal となり、原波形の 233 gal より小さくなっている。フィルター I による補正で最大補正加速度が原記録より小さくなるか大きくなるかは Table 3 に示したように記録によって異なる。また、Table 2 の 6 成分の記録について、Table 1

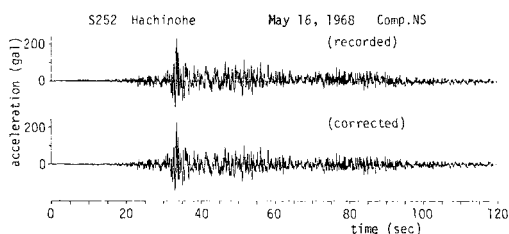
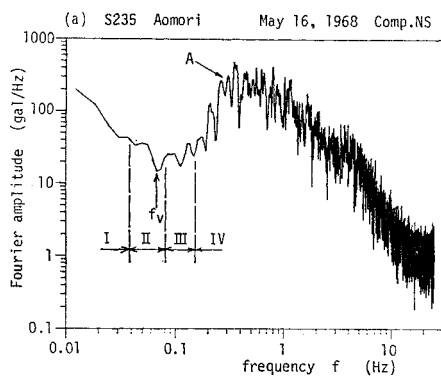


Fig. 4 Recorded and corrected accelerograms (filter I; $f_{lu}=0.15$ Hz)



の f_{lu} の各値を用いて同様の計算を行ったが、実用的に意義を有すると思われる $f_{lu} < 0.2$ Hz の範囲では f_{lu} の値による最大補正加速度の変動は 2~6 gal であった。基線補正が加速度波形そのものには大きい変化を与えないことは従来から明らかにされているが、本研究におけるフィルター I を用いた場合でも、加速度波形に関しては、 f_{lu} の値が大きい影響を持たないことを以上の結果から確認できる。

(2) 変位波形への影響

次に、フィルター I による補正から得られる最大変位 d_{max} と f_{lu} の関係を Fig. 5 に示した。また、Table 3 には $f_{lu}=0.15$ Hz の場合の d_{max} の値を示してあ

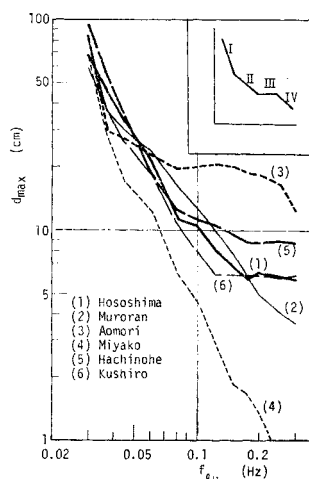


Fig. 5 Peak displacement vs. lower cut-off frequency (filter I)

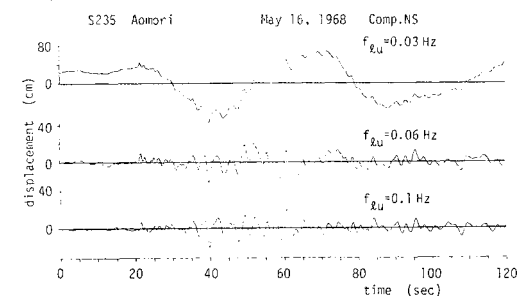


Fig. 6 Reduced displacement (filter I)

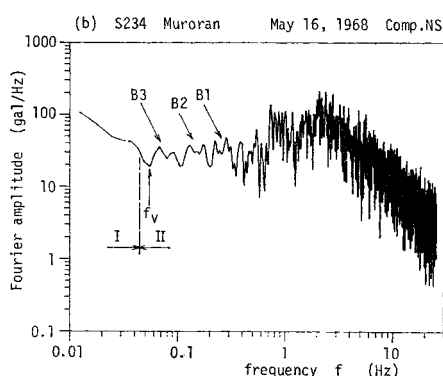


Fig. 7 Fourier spectra of recorded accelerograms

る。Fig. 5 において、 d_{max} は全体として f_{lu} とともに減少しており、低振動数成分の除去とともに変位波形の振幅が減少する傾向を表しているが、以下においては、その波形処理上の問題点を考察するとともに、 f_{lu} としてどのような値を採用するのが妥当かを検討する。

Fig. 5 における d_{max} は、 f_{lu} の領域によって変動の様子が異なる。典型的な例として、青森記録 (Fig. 5 の (3)) についてみると、 $f_{lu}=0.03\sim 0.037$ Hz においては、 d_{max} は f_{lu} とともに急激に減少するが、 $f_{lu}=0.037\sim 0.08$ Hz ではその減少率はかなりゆるやかになる。さらに $f_{lu}=0.08\sim 0.15$ Hz では d_{max} はほぼ一定値をとった後に、 $f_{lu}>0.15$ Hz で再び減少傾向を示す。これらの4つの状態を、Fig. 5 に模式的に示したように、それぞれ stage I, II, III, IV とする。他の記録では各 stage が明確に分離していないものもあるが、それらの考察は後に行うこととし、まず青森記録について各 stage の性状を検討する。そのため、Fig. 6 にフィルター I から得られた青森記録の変位波形を示した。図中に示した $f_{lu}=0.03, 0.06, 0.1$ Hz は、同記録に関する stage I, II, III にそれぞれ含まれるものである。また、Fig. 7 (a) に青森記録の原加速度波のフーリエスペクトルを示し、同時に、stage I~IV に対応する f_{lu} の領域をも示した。これらの計算結果からわかる各 stage の特徴は以下のとおりである。

① Fig. 6 (a) の $f_{lu}=0.03$ Hz に対する変位波形では、きわめて長周期の成分が優勢で、時刻 0~20 sec の初期微動においても直流的な変位が現れていることから、加速度の積分によって拡大された低振動数誤差が卓越していると考えられる。また、Fig. 5 において、 $f_{lu}=0.03\sim 0.037$ Hz では、各記録間で d_{max} の値に大差がないことから、この領域で得られる変位波には、地震動の特性より計器の特性が強く反映されていると考えてよからう。以上より、stage I に含まれる振動数成分は、基線の蛇行などによる誤差として除去すべきものと考えられる。

② 次に、Fig. 6 (b) の $f_{lu}=0.06$ Hz の場合をみると、0.06 Hz と約 0.3 Hz の成分が複合された波形となっている。式 (2), (5), (6) より、変位波形を算出することは、原加速度記録に対して、 $F_{CI}(f)/(-4\pi^2 f^2)$ なる、 $f=f_{lu}$ にピークを有する一種の帯域通過フィルターを作用させることと同等であるから、得られた変位波形に振動数 f_{lu} の成分が現れやすいことは当然であるが、Fig. 6 (b) においては、Fig. 7 (a) で A と記した 0.3 Hz 付近の顕著なピークを有する成分が優勢になりつつある。すなわち、stage II においては、フィルター I によって除去される境界の振動数 f_{lu} の成分と、より高振動数で卓越する変位成分が同じウエイトで混在

する。前者の f_{lu} 近傍の低振動数成分を stage I と同様に誤差成分とみなすべきかどうかは重要である。

Fig. 7 (a) において、誤差成分が卓越する stage I ではフーリエ振幅は振動数 f とともに単調に減少する傾向があるが、この傾向は、同図中の $f_v=0.068$ Hz まで続いているから、ここまでを誤差成分と考え、stage II の中でも、 f_{lu} が f_v より小さい間は誤差成分が介在しているとするべきであろう。

③ Fig. 6 (c) では $f_{lu}=0.1$ Hz に対応する成分は明らかではなく、上述の 0.3 Hz の成分のみが卓越する。すなわち、stage III においては、 f_{lu} より高い振動数の卓越成分のみが変位波形において優勢となるため、 d_{max} は f_{lu} に対して一定に近い値をとる。

④ stage IV では、Fig. 7 (a) の領域 IV に見られるピークの成分が次第に除去されるため、Fig. 5 の d_{max} は再び減少する。この範囲では、フィルター I により、明らかに意味のある成分が除去されている。

以上のうち、stage II, III, IV に対応する f_{lu} の下限値をそれぞれ f_{II}, f_{III}, f_{IV} として、それらの値を Table 4 左欄に示した。また、フーリエスペクトルにおいて誤差成分が終息すると考えられる振動数 f_v を同表右欄に示した。なお、後出の Fig. 13 のように、設定した f_v より低振動数側にかなり明確なピークがある場合には、その左端の振動数も f_v' として示した。以上の結果において、釧路記録では、stage I, II の境界が判然としなが、一応 $f_{II}=0.08$ Hz とした。室蘭・宮古記録では Fig. 5 の範囲では stage III も存在しない。室蘭記録では、後出の Fig. 14 (b) の変位波形*にみられる時刻 45 sec 付近の顕著なピークが、stage I のゆるやかな変動が卓越する $f_{lu}=0.045$ Hz ですでに現れ、 f_{lu} の増加とともにこのピーク値も減少する。Fig. 14 (b) における最大変位は、Fig. 7 (b) に示した室蘭記録のフーリエスペクトルにおいて B1 と示したピークに対応する成分と考えられるが、 f_{lu} の増加とともに、はじめは Fig. 7 (b) の I の領域、ついで II の領域の B3,

Table 4 Transition frequencies (low frequency region; in Hz)

reference parameter	peak displacement			peak velocity			Fourier spectrum	
	f_u	f_{lu}	f_v	f_u	f_{lu}	f_v	f_b	f_b'
Hososhima EW	0.08	0.175	—	—	0.125	—	0.15	0.1
Muroran NS	0.045	—	—	—	—	—	0.046	—
Aomori NS	0.037	0.08	0.15	—	0.045	0.25	0.068	—
Miyako NS	—	—	—	0.037	0.125	—	0.13	0.1
Hachinohe NS	0.08	0.175	—	—	0.08	0.2	0.09	0.054
Kushiro NS	0.08	0.125	—	—	0.1	—	0.16	0.097

* Fig. 14 (b) はフィルター II による補正結果であるが、後述のように、フィルター I, II から求めた変位はほとんど一致する。

B2 のピーク成分が順次除去され、B1 のみが次第に優勢になる過程が Fig. 5 の結果となっている。これより、室蘭記録では、 $f_{lu}=0.045\sim 0.3$ Hz の広い範囲が stage II に含まれ、さらに f_{lu} が増加すると、stage III が現れることなく stage IV に移行するであろうと考えられる。最後に、宮古記録では、Fig. 5 にみられるように、両対数紙上で d_{max} は f_{lu} の全領域で直線的に変化しており、stage I, II の境界も明確ではないが、これについては次項で速度とあわせて検討する。

(3) 速度波形への影響

原加速度からフィルター I によって速度を求めるフィルターは $F_{C1}(f)/(2\pi f)$ となるから、 $f=f_{lu}$ にピークを持つ帯域通過フィルターとなることは変位を求める場合と同様であるが、変位の場合ほどにはフィルターの

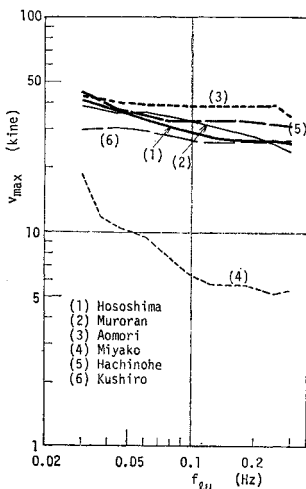


Fig. 8 Peak velocity vs. lower cut-off frequency (filter I)

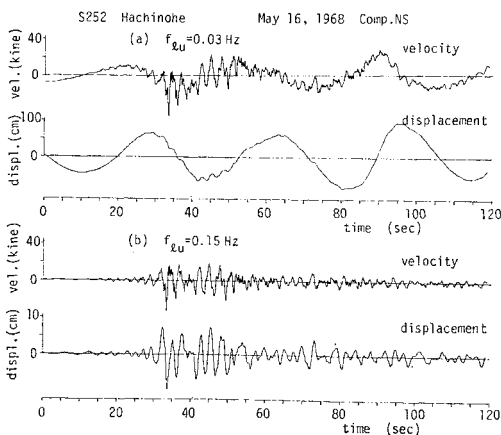


Fig. 9 Reduced velocity and displacement (filter I)

小さいことが明瞭であるが、やはり f_{lu} に依存する部分もある。この点を八戸記録 (Fig. 8 の (5)) について検討する。

Fig. 9 に、フィルター I から得られた八戸記録の速度および変位波形を示した。同図 (a) の $f_{lu}=0.03$ Hz の場合には、変位波形は Fig. 5 の stage I に属し、低振動数誤差が主成分と考えられるが、速度波形では、この低振動数成分と後出の Fig. 13 (b) のフーリエスペクトルにおいて C と表示した 0.37 Hz のピーク成分とが重ね合わされている。したがって、Fig. 5 と同様の定義で stage I ~ IV を用いると、Fig. 9 の速度波形においては、 $f_{lu}=0.03$ Hz の場合は stage II に属するといえる。Fig. 8 からわかるように、八戸記録について f_{lu} を増加させると v_{max} はゆるやかに減少し、 $f_{lu}=0.08\sim 0.2$ Hz においては、 v_{max} が一定値をとる stage III となり、この段階では Fig. 9 (b) に示したように、速度波形は 0.37 Hz の成分のみが卓越する。 $f_{lu} > 0.2$ Hz では v_{max} は再び f_{lu} とともに減少傾向をとる stage IV に入る。このように、速度波形については、後で論ずる宮古記録を除いて、低振動数誤差のみが卓越する stage I は現われにくい傾向にある。速度に関する各 stage の下限振動数も Table 4 に示した。室蘭記録に関しては v_{max} は全領域において f_{lu} とともに減少しており、すべて stage II に属するが、これは、Fig. 14 (b) の速度波形においても変位波形と同様に時刻 45 sec 付近に比較的低振動数のピーク波があり、その値が f_{lu} の増加とともに徐々に減少することによる。宮古記録のみは、速度においても波形から明確に識別できる stage I を有し、変位と同様他の記録より f_{lu} の影響を受けやすい。Fig. 10 に $f_{lu}=0.15$ Hz に対する宮古記録の速度および変位波形を示したが、速度波は、Fig. 13 (a) のフーリエスペクトルで D と表示した 5.2 Hz の卓越成分と f_{lu} に相当する 0.15 Hz の成分が混在するのに対し、変位波は 0.15 Hz の成分のみが優勢で stage I に近い特徴を示している。宮古記録は岩盤の上に薄い堆積層を有する堅い地盤で得られたものであり、Fig. 5 からわかるように、変位の値そのものが小さいと考えられる。これらより、変位波に現れた成分が

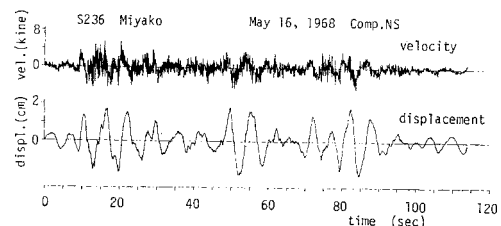


Fig. 10 Reduced velocity and displacement (filter I; $f_{lu}=0.15$ Hz)

どの程度誤差成分を含むかを判断するのは他の記録の場合より困難であり、この場合のように岩盤に近い地盤で得られた加速度記録から変位波形を算出することの可能性についてはさらに議論を要するものと考えられる。ここでは、宮古記録については速度に対する f_m の値、 f_v 、 f_v' の値などを参考にして意味のある振動数範囲を暫定的に推定することにする。

(4) 低域遮断振動数 f_{lu} の設定

フィルター I による補正結果に関するこれまでの検討から、低域遮断振動数 f_{lu} の妥当な設定法を検討する。 f_{lu} を設定するためのめやすとしては次のような項目が考えられよう。

- a. Fig. 5 の最大変位 d_{max} は stage II または stage III のいずれかに属すること。すなわち、低振動数誤差が卓越する stage I と、明らかに有意義な成分が除去される stage IV には属さないこと。
- b. d_{max} が stage II に属する場合には、誤差成分の介在を防ぐため、 f_{lu} は f_v (または f_v') より大きくとること。
- c. 速度波形は主として中振動数域を代表することから、最大速度は f_{lu} とは独立であること、すなわち、Fig. 8 の v_{max} は stage III に属することが望ましい。また、当然速度についても stage I と stage IV には属さないこと。

これらの条件を満足する f_{lu} の範囲を Table 5 に示した。ただし、条件 b について、 f_v を用いる場合と

f_v' を用いる場合をそれぞれ case I, case II として掲げてある。また、前述の議論から、室蘭記録については条件 a と b、宮古記録については条件 b と c のみから得られた結果である。さら

に、 f_{lu} の上限が示されていないものは stage IV が現われなかったもので、本研究で用いた最大値 0.3 Hz をこの段階での上限と考えるべきである。

Table 5 によると、 f_{lu} の範囲は記録によってかなり異なるが、多数の記録について補正処理を行う場合には一定の f_{lu} を定めておくのが便利である。そのため、これら 6 記録について共通の f_{lu} の範囲を求めると、Table 5 に示したように、case I では $f_{lu} \cong 0.15$ Hz, case II では $f_{lu} = 0.125 \sim 0.15$ Hz となり、両者間に大

差はない。他の多くの記録については、これらと異なる結果が得られることも当然考えられるが、それらについては今後の検討課題とし、現段階では、ここで得られた値を SMAC-B2 記録の波形補正上有意義な数値と考える。この値は、栗林・土岐・若林⁹⁾が実物の SMAC-B2 を用いて実験的に得た 0.07~0.1 Hz (周期 10~15 sec) より大きい値となっている。両者の詳細な比較は現段階ではできないが、栗林らの実験は単弦的加振によって行われているのに対し、実強震記録では多くの振動数成分が混在するため、誤差の評価について、平均的には実強震記録の方がより厳しい基準を要するであろう。このような観点からみれば、実強震記録に関する波形分析から得られた本研究の結果は、 f_{lu} のめやすとして妥当なものであろうと考えている。本研究における以後の解析では、条件として厳しい方の case I をとり、 $f_{lu} = 0.15$ Hz を標準値として用いることにする。また、本節で得られた f_{lu} の値は、後述のように次節で扱うフィルター II の低域遮断振動数として用いて差支えないものである。

4. 計器特性の補正および高域遮断振動数 f_{ul} について (フィルター II による検討)

(1) 加速度波に対する補正効果

本節では、フィルター II により、全振動数領域での補正を行う方法を検討する。変位および速度に関する検討は前節で終わっているので、ここでは主としてフィルター II の高域遮断振動数 f_{ul} が加速度波形に及ぼす影響が問題となる。フィルター II を用いた場合でも、低域遮断振動数 f_{lu} が加速度波形に与える影響は小さく、 f_{ul} を固定して f_{lu} を 0.03~0.2 Hz の範囲で変化させた場合の最大補正加速度の変動はフィルター I の場合と同

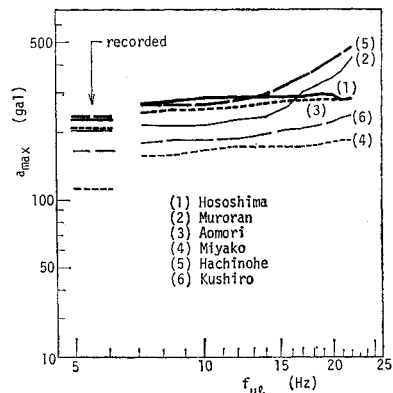


Fig. 11 Peak acceleration vs. higher cut-off frequency (filter II; $f_{lu} = 0.15$ Hz)

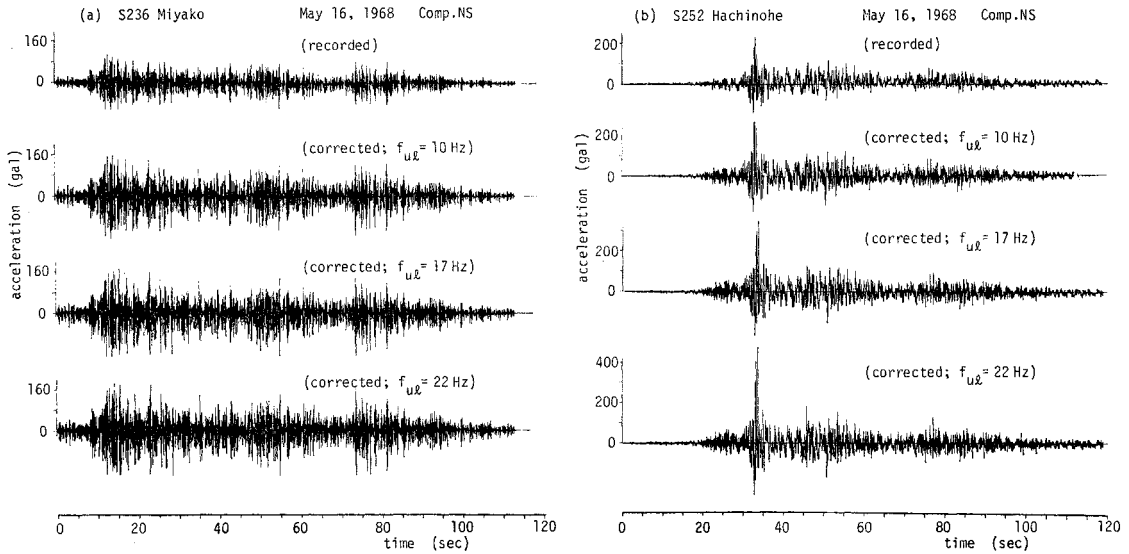


Fig. 12 Corrected accelerograms for various values of f_{ul} (filter II ; $f_{lu}=0.15$ Hz)

様に 2~6 gal であった。また、 f_{lu} を固定して f_{ul} を変化した場合の最大速度の変動は 0.3 kine 以内であり、最大変位は Table 3 の有効数字の範囲ではまったく変化しない。したがって、ここでは f_{lu} の値を前節で求めた 0.15 Hz に固定して、 f_{ul} の値が補正加速度に及ぼす影響を検討する。

Fig. 11 に、フィルター II による補正から得られる最大加速度と f_{ul} の関係を示した。同図中には原記録の最大加速度も示してあるが、これらの結果からわかるように、最大加速度は、どの記録においても原加速度より大きな値を示している。これはフィルター II によって計器特性の補正を行ったことの著しい効果である。また、同図において、細島・青森・宮古記録では f_{ul} に対する a_{max} の変化が比較的小さいのに対し、室蘭・八戸・釧路記録では a_{max} は f_{ul} とともに増加し、 $f_{ul} > 14$ Hz で特にこの傾向が著しい。これらの結果をさらに吟味し、 f_{ul} の妥当な値を設定するために、以下、補正波

形とそのフーリエスペクトルも参考にして検討を行う。

Fig. 12 に宮古記録と八戸記録の原波形とフィルター II による補正加速度波形を示した。また、Fig. 13 には、これら両波形のフーリエスペクトル ($f_{lu}=0.15$ Hz, $f_{ul}=22$ Hz の場合) を示した。はじめに Fig. 12 (a) の宮古記録について検討する。宮古記録は 5.2 Hz に明確な卓越振動数を有するが、一方、式 (8) のフィルター II の $f=5.2$ Hz (固有振動数 f_a に対して $f/f_a=5.2/7.14=0.728$) における補正倍率は 1.53 である。

Table 3 に示したように、 $f_{ul}=10$ Hz に対する最大補正加速度は 167 gal で原記録およびフィルター I による補正波形における 112 gal の 1.49 倍となっており、上記の補正倍率にほぼ対応している。また、Fig. 12 (a) において、3種の f_{ul} に対する補正波形はほとんど同様の形状を示しており、さらに Fig. 11 において、宮古記録の最大補正加速度 a_{max} の f_{ul} による変化も比較的小さい。以上より、宮古記録では、5.2 Hz の卓

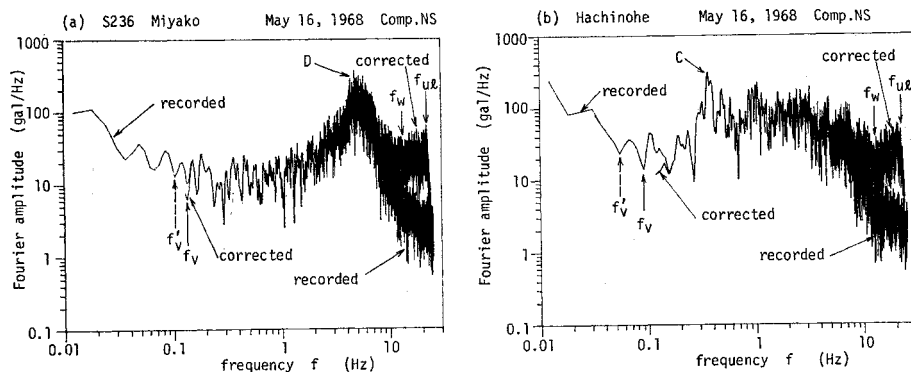


Fig. 13 Fourier spectra of recorded and corrected accelerograms (filter II ; $f_{lu}=0.15$ Hz, $f_{ul}=22$ Hz)

越成分に対する補正効果のみが特に顕著であり、 f_{ul} の影響は小さい。しかし、 f_{ul} の値を無制限に大きくすると計器の感度が極端に低下する領域 (SMAC-B 2 では $f > 20$ Hz で低振動数域の 1/10 以下) の成分を拡大し、SN 比が低

下する危険が高いから、 f_{ul} には上限値を設定するべきである。Fig. 13 (a) において、宮古記録の補正加速度のフーリエスペクトルは $f > 13$ Hz で f とともにゆるやかに増加している。一様性が高い岩盤性の地盤で得られ、5.2 Hz のみに単一の鋭いピークを有する宮古記録において、 $f_{ul} = 22$ Hz より高い振動数に別のピークが存在するとは考えにくいから、Fig. 13 (a) の $f > 13$ Hz の部分は誤差成分として除去するのが妥当と考えられる。このような境界の振動数を同図中に示したように f_w とする。

次に、Fig. 12 (b) の八戸記録の補正結果を検討する。Fig. 11 において、八戸記録の補正最大加速度 a_{max} に対する f_{ul} の影響が大きいことをみたが、Fig. 12 (b) においても f_{ul} の値が同記録の補正波形にかなり影響を持つことがうかがえる。また、 $f_{ul} = 17, 22$ Hz の場合には時刻 30 sec 前後のピーク値のみが極端に増幅される傾向にあることも、波形全体が一様に増幅された宮古記録と異なる。一方、Fig. 13 (b) から、八戸記録に関する f_w として 13 Hz を得る。八戸の強震観測地点については、1968 年十勝沖地震の後に余震観測を含む入念な調査が田中・大沢らによって行われており¹³⁾、多数の余震記録について 15 Hz まで（用いられた地震計の感度特性はこの振動数領域でも十分に平坦である）のスペクトル特性と深さ 50 m 以内の地盤の増幅特性が検討されている。それによると、Fig. 13 (b) の補正波形のスペクトルが谷となる 13 Hz 付近では地盤の増幅特性はむしろピーク値を示し、さらに 13 Hz 以上でスペクトル振幅が振動数とともに上昇するべき観測結果はみられない。したがって、Fig. 13 (b) において補正波形のフーリエスペクトルのうち 13 Hz 以上の部分は高振動数誤差と考えるべきであろう。八戸記録の場合には、この高振動数成分が補正結果に影響するために、Fig. 11 および Fig. 12 (b) のように f_{ul} とともに補正加速度が増加する結果となるものと考えられる。Fig. 12 (b) において、時刻 30 sec 前後のみが極端に増幅される原因としては、ペンによって円弧状に描かれた原波形からの等間隔読取りと円弧補正のための読取り時刻の調整の結果、振幅が減少する部分の波形の読取り間隔が粗くなるため、特に波形のピーク付近で高振動数ノイズが入りやすく、再度等間隔にするための補間を行ってもこのノイズは完全には除去されないこと、八戸記録の最強部では波形がいわゆるオーバーハングに近い形状を示すため特にこのような状況になりやすいことがあげられる。以上より、八戸記録の場合には、適当な f_{ul} を定めて積極的に高振動数成分を除去することが必要となる。

Fig. 11 において、室蘭記録の a_{max} と f_{ul} の関係が八戸記録とよく似ているが、室蘭記録は、記録紙上で円

弧の中央からかなりはずれた位置に描かれているため、読取り時に八戸記録の最強部と同様の問題が生じたものと考えられる。また、釧路記録の a_{max} も f_{ul} とともに増加するが、その割合は室蘭・八戸記録ほど急激ではない。

以上の検討において、 a_{max} が f_{ul} とともに一方的に増加する室蘭・八戸・釧路記録については、 a_{max} が増加し始める f_{ul} の値 f_v および増加の割合が特に大きくなる f_{ul} の値 f_v' を Fig. 11 から求めて Table 6 に示した。また、フーリエスペクトルにおいて高振動数誤差の境界振動数とみなせる f_w も 6 個の記録すべてについて同表に示した。いずれの記録でも f_w の値は 12 または 13 Hz となっている。

(2) 高域遮断振動数 f_{ul} の設定

フィルター II による補正加速度に関するこれまでの結果から、高域遮断振動数 f_{ul} の適当な値を検討する。ここでは、加速度における高振動数誤差の除去が問題となるが、上記の議論から、 f_{ul} 設定の基準としては次のような項目が考えられよう。

- d. 最大補正加速度 a_{max} が f_{ul} とともに急激に増加する領域にないこと、すなわち、 f_{ul} は Table 6 の f_v または f_v' を越えないこと。
- e. 高振動数域において、補正加速度のフーリエスペクトルは振動数とともに一方的に増加する部分を持たないこと。すなわち、 f_{ul} は Table 6 の f_w を越えないこと。

これらの条件を満たす f_{ul} の上限値を Table 7 に示した。ただし、case III, IV は条件 d について f_v, f_v' をそれぞれ用いた結果であり、 f_v, f_v' を持たない記録については条件 e のみを用いた。

同表によれば、case IV では f_{ul} の値はすべて条件 e のみで決まっており、 f_w より高振動数の成分を除去すれば十分であることを主張している。これに対して case III では、 f_v が

Table 6 Transition frequencies (high frequency region; in Hz)

	f_v	f_v'	f_w
Hososhima EW	—	—	12
Muroran NS	10	14	12
Aomori NS	—	—	12
Miyako NS	—	—	13
Hachinohe NS	10	14	13
Kushiro NS	12	17	13

Table 7 Upper limit on f_{ul}

	f_{ul} (Hz)	
	case III	case IV
Hososhima EW	12	
Muroran NS	10	12
Aomori NS	12	
Miyako NS	13	
Hachinohe NS	10	13
Kushiro NS	12	13
common limit	10	12

存在する記録についてはすべて f_v によって f_{ul} の上限が決まっている。これは、たとえば八戸記録のように高振動数誤差を含みやすい場合には、 f_w より小さい振動数の成分にも誤差がかなり含まれており、それが Fig. 11 の $f_{ul}=10\sim 12$ Hz における a_{max} に影響を与えているとするものである。多くの強震記録を処理する場合に用いる共通の f_{ul} として、各記録に対する値の最小値をとると、case III で $f_{ul}=10$ Hz, case IV で $f_{ul}=12$ Hz となる。

以上より、計器特性の補正を含むフィルターIIの高域遮断振動数の標準的な値としては $10\sim 12$ Hz 程度とするのが適当と考えられる。前項の議論より、読取り段階での円弧ひずみの取扱いを改善すれば、case IV から求められた 12 Hz を f_{ul} として用いるのであろうと予想できるが、本研究で対象とした記録の範囲では条件を厳しくした 10 Hz をとる方が妥当であろう。また、本研究で扱った以外の記録の補正にも用いる場合も考えると、 f_{ul} の値として case IV から求められた値よりいくぶん小さくするのが望ましいと考えられる。以上より、本研究における以後の計算では $f_{ul}=10$ Hz を高域遮断振

動数の標準値として用いることにする。

このようにして、SMAC-B2による加速度記録を計器特性を含めて補正するために、本研究では補正フィルター(フィルターII)の遮断振動数として、本節で得られた $f_{ul}=10$ Hz, 前節で得られた $f_{lw}=0.15$ Hz を用いるが、Table 2, 3 の6成分の記録のうち宮古・八戸記録については、これらの遮断振動数に対する補正加速度・速度・変位波形が Fig. 9, 10, 12 に示されている*ので、残りの4成分に関する結果を Fig. 14 に示した。

(3) 補正最大加速度に対する地盤条件の影響

本節におけるこれまでの検討結果から、フィルターIIによって計器特性を含めた補正を行うと、SMAC-B2による原加速度記録はかなり増幅されることが確かめられたが、細島・室蘭・宮古記録について Table 2 の卓越振動数と Table 3 の a_{max} の増幅度を比較すると、計器の感度低下が著しい高振動数域 ($f > 4$ Hz 程度) に卓越振動数を有する宮古記録のみがフィルターIIによる増幅効果が高いことがわかる。高振動数成分を多く含む記録ほど補正によって加速度が増幅されることは SMA

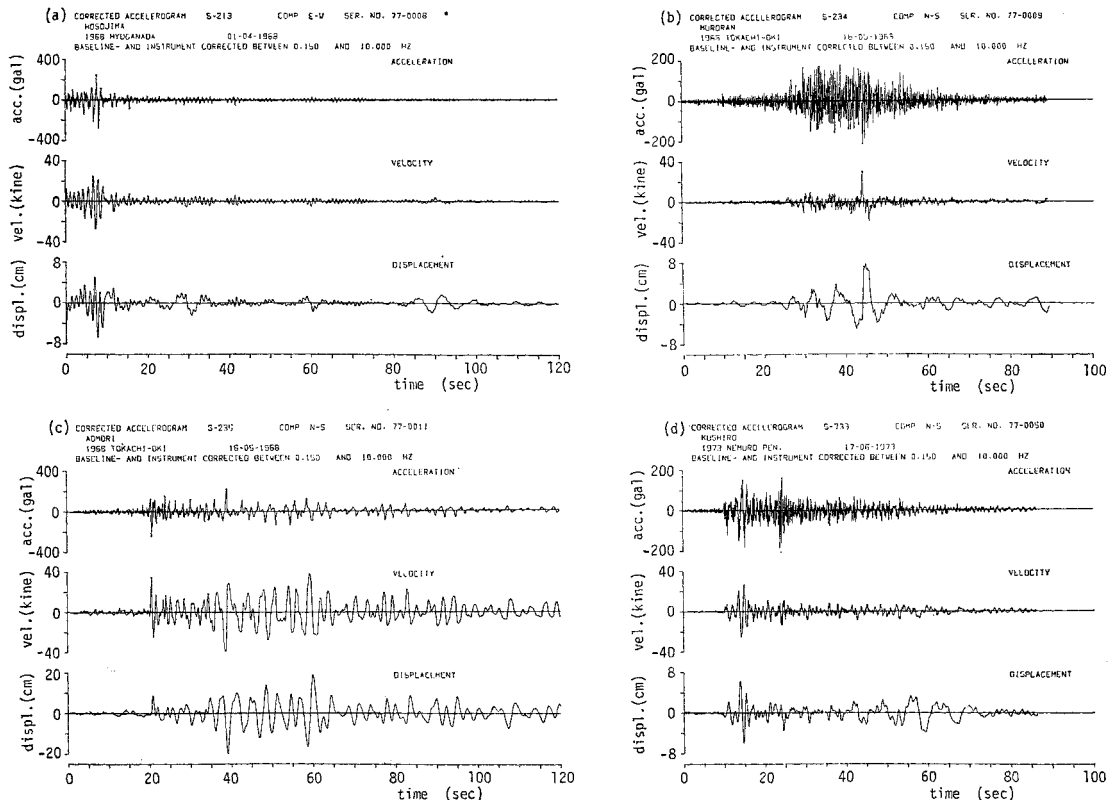


Fig. 14 Corrected accelerogram, and reduced velocity and displacement
(filter II; $f_{lw}=0.15$ Hz, $f_{ul}=10$ Hz)

* Fig. 9, 10 の波形はフィルターIによるものであるが、速度および変位波形はフィルターI・IIでほとんど差がない。

Table 8 Effect of soil condition on correction of accelerograms

soil condition ⁽⁶⁾	number of sites	number of records	peak acceleration (gal)		amplification*	
			recorded	corrected	range	mean
class 1	2	8	75~112	118~164	1.29~1.81	1.63
class 2	5	18	33~233	41~244	1.06~1.99	1.34
class 3	9	27	43~230	59~282	1.07~1.72	1.31
class 4	7	17	64~230	70~266	0.91~1.36	1.10

* amplification = $\frac{\text{corrected peak acceleration}}{\text{recorded peak acceleration}}$

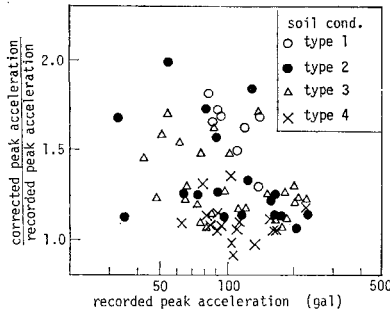


Fig. 15 Amplification of peak acceleration by correction filter II ($f_{lu}=0.15$ Hz, $f_{ul}=10$ Hz : soil conditions are specified after ref (14))

C-B 2 の計器特性から当然のことであるが、ここでは、地震動の振動数特性に影響を持つとされる地盤条件および地震動強度によって増幅効果がどのように変化するかを検討する。地盤条件は道路橋耐震設計指針⁽¹⁴⁾における分類（1種～4種）で表示し、地震動強度は原記録の最大加速度で表わす。Table 8 に、地盤条件ごとの観測地点数、記録成分数、最大加速度の範囲、最大加速度の補正倍率の範囲と平均値を示した。また、Fig. 15 には、個々の記録に関する補正倍率を示した。これらの結果において、補正倍率は 1.9 を越えるものがあり、計器特性に関する補正が加速度に及ぼす影響がかなり大きいことがわかる。地盤条件の影響としては、補正倍率の平均値が 1種～4種の順に小さくなっており、地盤が軟らかいほど地震動の振動数が低くなり、フィルター II の影響を受けにくくなる傾向を示している。ただし、地盤種別ごとの補正倍率のばらつきは大きく、その範囲は重複しており、ここで用いた地盤種別によって補正倍率の範囲を分離することはできない。

(4) 最大補正加速度に及ぼす位相補正の影響

Table 8 と Fig. 15 において、4種地盤で得られた記録の最大加速度に関する補正倍率が 1 に満たない場合があるが、これは記録の卓越振動数が低いため振幅補正の効果 (Fig. 3 の $|F_{CII}(f)|$ と比較) が低く、位相補正の影響 (Fig. 3 $\phi(f)$) のみが現れたものと考えられ

る。式 (9) で $\phi(f) \equiv 0$ において、振幅についての補正のみを行って得られた最大加速度を a'_{max} とし、ここで用いた 70 成分について位相補正を含めた補正から得られた a_{max} と比較すると、 a_{max}/a'_{max} は 0.78~1.11 の範囲でばらついており、その平均値は 0.992、標準偏差は 0.064 であった。また、地盤条件や最大加速度が a_{max}/a'_{max} に与える影響は明らかではない。この結果は、高振動数域における位相補正の影響がランダムに加速度波形のピーク値に現れたことによるといえるが、このことは逆に、SMAC-B2 による加速度記録では、計器の位相特性によって、実際に発生したと考えられる最大加速度との間に上述した程度の差異がランダムに現れると解すべきであろう。

(5) 計器の減衰定数の影響

これまでの数値計算では、SMAC-B2 の振子の減衰定数 ζ はすべて公称値の 1.0 に正しく調整されているものとしてフィルター II を構成してきた。振子の特性のうち、固有振動数は安定的と考えてよいであろうが、これと比較して、SMAC-B2 で用いられている空気ダンパーによる減衰特性は温度変化その他周囲の条件の影響を受けることもありうると考えられる。実際の観測態勢下において、SMAC-B2 の減衰特性がどのように変動するかは、今後解明されねばならない問題であるが、ここでは、減衰定数 ζ の変動によって補正最大加速度が受ける影響を簡単に検討しておく。

Fig. 16 に、青森・宮古・八戸記録について、減衰定数 ζ に種々の値を仮定した場合のフィルター II による補正最大加速度を示した。同図には、基線補正のみを目的とするフィルター I による補正結果も示した。

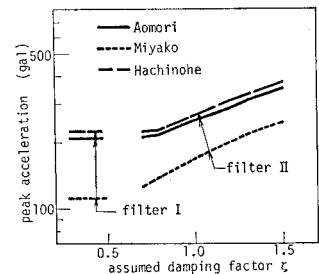


Fig. 16 Effect of assumed damping factor on corrected peak acceleration ($f_{lu}=0.15$ Hz, $f_{ul}=10$ Hz)

同図によると、フィルター II による補正加速度は ζ の増大とともに増加しており、その割合は、宮古記録では ζ の値 0.1 ごとに 7~8% である。青森・八戸記録では $\zeta=0.7$ においてほぼフィルター I の結果に漸近するが、 $\zeta>0.8$ では、宮古記録と同様の傾向を示している。これらの結果から、SMAC-B2 では振子の減衰特性が原記録にかなり影響を持つものと考えられ、補正フィルターを構成する際には、記録が得られた時点での減衰定数を用いるのが望ましい。現状ではさらに進んだ議論は

できないが、今後検討すべき問題であろう。

5. 結 語

本研究では、SMAC-B2 強震記録によって得られた加速度波形をデジタルフィルターを用いて補正し、さらに速度・変位波形を得るための方法を数値的に検討した。得られた成果を列挙すると以下のとおりである。

(1) 基線補正を行うためのフィルターⅠおよび基線補正と計器特性の補正を行うフィルターⅡ (Fig. 3) を用いて、種々のフィルター定数による補正結果を明らかにし、得られた補正加速度・速度・変位およびフーリエスペクトルを詳細に検討した結果、SMAC-B2 加速度記録に対してフィルターⅡによって強震計の振幅・位相特性をも考慮した補正を行うべきことを示した。

(2) フィルターⅡによる補正において用いるべき低・高域遮断振動数 f_{lu} , f_{ul} の値は当然記録によって異なるが、本研究で解析した記録の範囲で得られる標準的な値として、SMAC-B2 について $f_{lu}=0.125\sim 0.15$ Hz, $f_{ul}=10\sim 12$ Hz を用いることを提案した。これらの f_{lu} , f_{ul} の値は、補正により得られる加速度・速度・変位波形中に含まれる有意義な振動数の下限および上限をそれぞれ表す。

(3) フィルターⅡによって計器特性に関する補正を行うと、加速度振幅は原記録より増幅され、SMAC-B2 の特性から、高振動数が卓越する記録ほどその倍率が高い。同じ理由から、堅い地盤で得られた記録ほど加速度の補正倍率が高く、70 成分の記録を補正した結果では、1種～4種地盤¹⁴⁾に対して、最大加速度の平均補正倍率は 1.63～1.10 の範囲で変化した。

(4) 強震計振子の減衰定数が加速度の値にかなり影響を持つことを指摘し、補正フィルターの構成との関連を論じた。

本研究は、SMAC-B2 加速度記録の補正法について、波形分析的な手法で可能な範囲での検討を行い、有効な補正法に関する定量的なめやすを得ようとしたものであり、一応基本的な目標は達成されたと考えている。しかし、本文中にも指摘したように、いくつかの記録における地盤震動、特に得られた変位波の意味づけ、計器の減衰特性の変動に関する検証など、物理的な資料を用いて検討すべき問題も取り残されている。これらの点については今後の研究課題としたい。

また、本研究では、これまでわが国の強震記録の大部分を供給してきた SMAC-B2 を対象としたが、今後はより周波数特性が優れた強震計が順次設置されるさう勢にあるようであるから、それらについては別途に最適の補正法が検討されるべきである。種々の強震計が併用さ

れる状態下で、データの一様性を保持するために、このことは重要であろう。

謝 辞：本研究で用いた強震記録は、すべて建設省土木研究所および運輸省港湾技術研究所のご厚意により提供されたものである。本論文をまとめるにあたり運輸省港湾技術研究所 林 聡所長、建設省土木研究所 岩崎敏男振動研究室長、運輸省港湾技術研究所 土田肇耐震構造研究室長および同研究室の方々から、種々有益なご議論をいただき、研究の遂行に際しては、われわれの研究室諸氏に終始協力をいただいた。また、本研究は文部省科学研究費補助金(総合研究(A)、自然災害特別研究(分担))に負うところが大きい。ここに記して深謝の意を表する次第である。さらに、本研究における数値計算は、京都大学大型計算機センターの FACOM M-190 によったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾技術研究所：港湾技研資料，80号，98号，100号，116号，136号，160号，181号，202号，236号，250号，昭.44.6～昭.51.12.
- 2) 建設省土木研究所：土木研究所資料，317号，318号，461号，876号，877号，1072号，昭.43.3～昭.50.12.
- 3) 久保慶三郎・佐藤暢彦：地震観測記録から変位波に変換する方法，第4回日本地震工学シンポジウム(1975)講演集，pp. 249-256，昭.50.11.
- 4) Berg, G.V. and Housner, G.W. : Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 51, No. 2, pp. 175-189, April 1961.
- 5) 栗林栄一・土岐憲三・若林 進：SMAC 型強震計による地動の再現性について，第4回日本地震工学シンポジウム(1975)講演集，pp. 153-160，昭.50.11.
- 6) Mohraz, B., Hall, W.J. and Newmark, N.M. : A Study of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra, Nathan M. Newmark Consulting Engineering Services, Dec., 1972.
- 7) 吉田 裕・岡山和生：地震加速度記録の積分における濾波計算のアルゴリズム，土木学会論文報告集，221号，pp. 25-38，昭49.1.
- 8) Trifunac, M.D., Udawadia, F.E. and Brady, A.G. : Recent Developments in Data Processing and Accuracy Evaluations of Strong Motion Acceleration Measurements, Proceedings, 5 WCEE (1973), Vol. 1, pp. 1214-1223, 1974.
- 9) Brady, A.G. and Hudson, D.E. : Standard Data Processing of Strong Motion Accelerograms, Proceedings, 5 WCEE (1973), Vol. 1, pp. 1248-1251, 1974.
- 10) Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology : Strong Motion Earthquake Accelerograms, —Digitized and Plotted Data, Part A-Y, Sep., 1975, April 1971.
- 11) 田中貞二：八戸港湾における強震記録(1968年十勝沖地震)の補正波形，建築雑誌，91巻，1107号，昭.51.5.
- 12) 井合 進・倉田栄一・土田 肇：強震記録のデジタル化と補正，港湾技研資料，運輸省港湾技術研究所に発表される予定。
- 13) 田中貞二・大沢 胖：八戸市における地中地震動の観測，大沢 胖編：1968年十勝沖地震における八戸港湾の強震

記録と地盤特性, pp. 38-67, 昭.47.6.

14) 日本道路協会: 道路橋耐震設計針指・同解説, 昭.47.4.

追記: 最近, 井合・倉田・土田による文献¹²⁾が刊行された(港湾技研資料 286 号, 1978.3). 同論文では, デジタルフィルターによる計器補正と低・高振動数誤差の除去以外にも, 種々の誤差要因とその補正法が詳細に検討されており, それらの補正を一次補正と二次補正に分けて行っている. 本研究における補正は, これらのうち二次補正に相当するものであり, 用いた原記録については, 一次補正に相当する処理はすでに終わっているものとして扱っている. ただし, 同論文で行われて

いる一次補正は, 本研究で利用した原記録¹⁾に施されている処理をさらに高度化したものとなっている. 同論文と本研究では, 補正用デジタルフィルターの遮断振動数は異なる考察から得られているが, 両者の値がほぼ一致していることは興味深い. 遮断振動数の外側でのフィルター倍率の減少のさせ方は両者で異なるが, これについては別の機会に述べることにしたい. 同論文は, 本論文の登載決定と時を同じくして刊行されたため, 本文中で言及する時間的余裕がなかったが, 本研究の内容と関連が深いため, 追記を加えさせていただいた.

(1977.12.26・受付)