釧路気象台における強震動と地盤・構造物の振動特性

STRONG GROUND MOTIONS AT KUSHIRO OBSERVATORY AND VIBRATION CHARACTERISTICS OF GROUND AND STRUCTURES

太田 外氣晴*
Tokiharu OHTA

This paper describes the microtremor measurements of ground, seismograph foundation and two storied building at Kushiro observatory. Also, non-linear characteristics of strong ground motion during the 1993 Kushiro-oki earthquake are analyzed. The results are summarized as follows:

- 1) Natural frequency of seismograph foundation is 10 Hz for transverse and longitudinal directions. Rocking motion of the foundation is appeared.
- 2) Natural frequency of the west side building is 4 Hz for transverse and longitudinal directions.
- 3) Peak frequency of low level earthquake motion is 10 Hz. But, the main-shock, peak frequencies decrease and the spectral level are not so high because of increased damping characteristics of soils around the foundation.
- 4) Many previous studies are reviewed and discussed, then, representative predominant frequency of ground and structures are pointed out.

Keywords: microtremor, strong motion, foundation, building, rocking motion, predominant frequency
常時微動、強震動、基礎、建物、ロッキング振動、卓越振動数

§1 まえがき

1993年1月15日の釧路沖地震(地震規模M7.8)において、釧路気象台の87型地震計で919Gal, SMAC-MD型強震計(建設省建築研究所)で711Galという大加速度が記録された。これらは加速度値の割に小被害であったことと、1962年広尾沖地震(M7)における大加速度記録の経緯とも関連して多大の関心を呼んだ。

このため、多くの研究者による測定や各種の研究が行われてきた。地震動や構造物も含めた研究として、例えば文献1)の地盤、地震計用基礎、電波塔などの常時微動測定、文献2)の気象台地表の強震記録、文献3)の地震計基礎と建物の常時微動測定、文献4)の気象台における強震動発生に関わる分析、文献5)の気象台敷地内の常時微動測定など、ESGグループによる文献6)に代表される多数の研究者による気象台敷地の詳細な常時微動測定、文献7)~9)の気象台建物と地震計用基礎、敷地の常時微動測定など、文献10)~12)の気象台建物と地震計基礎の振動特性に関わる研究、文献13)の気象台地盤の弾塑

性応答解析などがある。これらのうち、初期のものは記録の分析や測定が主であり、次の段階で議論がなされたが、主たる論点として次の事項があげられる。

- i) 87型用地震計基礎のピーク振動数 $f_p=10\text{Hz}$ は基礎固有のもの^{3) 10) 11)}か、建物の2次モードに刺激されたもの^{7) 12)}かの疑問、
- ii) 建物-地震計基礎-地盤の相互作用解析において、地震計基礎に対する建物の影響をどう評価するかの問題点^{7)~12)}、
- iii) 2Hzの成分はレーダー塔の影響を受けたものか否か^{1) 12)}。

これらについては1994年12月に開催された1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム(日本建築学会)においてかなり明確化された。しかし、議論の範囲は広く、内容的な掘り下げにも限界があった。即ち、この地震の地震動などに関する研究は過去に例を見ないほど多く、それらの内容を把握して相互に矛盾のない特性評価を行うことは容易でないからである。

* 足利工業大学建築学科 教授・工博

Professor, Architectural Dept., Ashikaga Institute of Technology, Dr. Eng.

また、容易に明確な結論に到達しない理由は、大加速度による非線形応答の議論であることと、ある程度のバラツキを覚悟せざるを得ない常時微動に多く依存していることにもよる。

そこで、本論では、筆者らが行ってきた87型地震計基礎と表層地盤の振動特性、及び構造物の振動特性に関する追加分析と研究のまとめを行うと共に、関連する諸研究との比較検討を行い、これらを総合的に分析し、統一的に判断できる点と残る問題点を明らかにしようとするものである。

§ 2 測定・観測の位置

1993年1月15日の釧路沖地震本震の約2か月後と、1994年8月に常時微動(MT)の測定を実施した。これらの測定位置を図1に示す。気象庁釧路地方気象台(以下ではJMOと記す)での測定位置を図2に示す。MTの測定は87型地震計が設置されていたJMOのRC造の独立基礎上、2階建ての庁舎の屋上、敷地の地表面、及び庁舎北側の崖のすぐ下に位置する『つたや旅館(TYR)』である。気象台庁舎は建物中央近くにエキスパンション・ジョイントを有する。

図1 釧路気象台とその周辺における測定・観測位置

図2 釧路気象台庁舎の概要と測定点

図3はTYRの建物概要と主な測定点である。この建物は鉄骨造の3階建である。図4は地質断面¹⁾に両地点の位置を示したもので、TYRは古第三紀層の掘削面に位置し、市内では最も地盤の堅い地点の一つである。JMOのGLは標高31.3m, TYRは標高2.7mである。

なお、TYR南側の崖側の地表と建物内で多点のMTを測定したが、その結果、建物の影響は微小である事を確認している。

§ 3 地震計基礎の振動特性

3.1 87型地震計基礎の振動

JMOの地震計用基礎と庁舎の建物屋上、及び地表についてMTの測定をさせて頂いた。その屋上における測定点は地震計室のある西棟の東西で2点、東棟中央の1点である。この基礎は長さが2.6m, 幅が1.82m, 高さが2.78mで、1.64mが地中に埋め込まれている。また、その重量は約30tonである。

JMOの地震計用基礎上の測定を実施した時、建物は外装などの工事中であったため、工事に伴う物の落下によると思われる自由振動が発生する例が見られた。そこで、両手で基礎の頂部を加振する自由振動実験をさせて頂い

図3 崖下のつたや旅館(TYR)と測定・観測点

図4 釧路市の地質断面と測定・観測点

た。それらの短辺方向の加速度波形を図5、6に示す。これらは共に明瞭な自由振動が発生したと認められるので、基礎の固有振動数 f_p を読み取った。短辺方向の値は $f_p=10\text{Hz}$ で(図7)、減衰定数は $h=0.045$ と得られた。長辺方向と上下方向についても測定し、長辺の f_p が 10Hz 、 h が 0.07 、上下の f_p が 15Hz と得られた。これらの f_p と h をまとめて表1に示す。

3.2 地表と地震計基礎の振動

1994年8月に地表のMTを測定した。測定波形のスペクトル解析はFFTで行ったが、その時間刻みは $1/100$ 秒、解析時間は約 140 秒で、 100 のHammingWindowを標準とした。そのFFTを図8に示すが、NSの f_p は $3.5, 4.5, 5\pm, 10\text{Hz}$ で、EWが $5, 6, 10\pm\text{Hz}$ である。これと1993年3月に測定済みの基礎上の測定波形を用いて3成分のスペクトル比を求め、図9に示す。スペクトル比のピークは短辺、長辺が共に 10Hz であり、上下が 14Hz である。これらは自由振動の f_p と対応している。短辺、長辺における 5Hz 前後の鋭い谷は図8に示した地表におけるMTのスペクトルのピークに対応する。

図5 常時微動測定時の工事による基礎短辺の自由振動

図6 基礎の自由振動波形例(短辺方向)

図7 自由振動波形のフーリエスペクトル(短辺方向)

表1 気象台建物・基礎・地盤の f_p と h

		短 辺		長 辺		上 下
		$f_p(\text{Hz})$	$h(\%)$	$f_p(\text{Hz})$	$h(\%)$	$f_p(\text{Hz})$
基 礎	MT*1	10	4.8	10	-	14-15
	FV*2	10	4.4	10	7	15
建 物	西棟西	4/7	-	4/6-8	-	-
	西棟東	4	-	4	-	-
	東棟中	4	-	4	-	-
地 盤		4.5, 5, 6	-	5, 6, 10	-	-
崖	Sp比	3.5, 4.5	-	5, 6, 10	-	10, 13
		5 $\pm$, 10				

*1: 常時微動

*2: 自由振動

図8 地表における常時微動のフーリエスペクトル

図9 基礎上/地表のスペクトル比

3.3 地表と建物屋上の振動

測定の日時は異なるが、地表と建物屋上の常時微動測定記録からスペクトル比を求め、西棟について図10a)b)に示す。短辺、長辺の f_p は共に4Hzにピークがある。西棟西は6-8Hzに中程度のピークがある。図10c)も巨視的には類似の傾向である。西棟短辺方向の約4Hzは文献7)~9)とも整合性があり、2階建て建物の1次固有振動数と考えられる(表1)。共通的に見られる4.5-5Hzの鋭い谷は地表のピーク振動数にほぼ対応する。これは基礎上のスペクトル比とも共通するものである。しかし、長辺方向は5.6Hz⁷⁾となっているので、この点は一致しない。そこで、別の時間帯について分析したところ、傾向はほぼ同一であった。

更に、その他の時間帯を調べたところ、微小地震かと思われる記録部分があったので、そのスペクトル比を図11に示す。同図は屋上のみ比較的振幅が大きな波形である。この図によれば、約4Hz-6Hzのピークは図10と変わらないが、8Hz-12Hzの成分が大きくなっており、低振動数

成分が大である。特に、東棟の短、長辺は9Hzと12Hzの成分が大きく、西棟西の短辺は12Hzが大である。このことから、10Hzに近い振動数領域の振動特性は複雑であることが分る。

§4 強震記録の振動数特性

4.1 ピーク振動数の変化

87型地震計とSMAC強震計の本震と余震の各記録につきスペクトルのピーク振動数 f_p の性状を調べた。それらの結果と他の測定・解析の結果につき、とりあえず容易に比較検討できる範囲について以下に示す。

1) 87型地震計

87型地震計の記録の中からMが発表されているものについてFFTを求め、N153Eのスペクトルを図12に示す。同図によれば、加速度レベルの小さい1月19日の余震(M4.8)では最大加速度 A_{max} が15Galで、8-9Hzのスペクトル振幅が最大である。これはMTの10Hzと対応している。2月4日の余震(M5.2)では A_{max} が87Galで、 f_p は約7Hz

図10 屋上/地表のスペクトル比

図11 屋上における大振幅微動のスペクトル比

図12 87型地震計による本震、余震のFFTとfpの変化

であり、その他にある3-4Hzのスペクトル振幅が幾分大となる。本震では約2Hz弱のスペクトル振幅が最大で、小・中加速度の余震で目立つ10Hzに近いスペクトル振幅はそれほど目立たず、約5または6Hzの並のピークに変化している。

この事実を別の形でいえば、小加速度の地震では基礎のスウェイ・ロッキングに起因する約10Hzの成分が大きく影響するが、加速度レベルが大となるとその成分の影響は相対的に小さくなる。この傾向は文献15)16)からも読み取れる。

このfpの変化についてAmaxとの関係を求め、図13に示す。この図で振動数に幅を与えたのは、スペクトルのどのピークにつながるか不明確な場合があるので、ある幅をもったfpを求めたことによる。図中の左側はMTによるfpの値である。この図を全体的にみると、明らかにAmaxに対してfpが小さくなる傾向を示す。

文献15)は87型の既往強震記録について水平2次元の合成スペクトルを求めたものであるが、そのピークも同様に作図して図14に示す。図中の星印はMTによるfpの例で、4.5～5.0 Hzが各種の測定で得られている。同図によれば、基礎のfpは疑似速度応答スペクトルPSVのレベルが低い範囲内では10Hzに近づく。また、本震では5 Hzとなる。MTによる基礎のfpは共に10Hzであるが、その減衰定数は短辺が4.5%、長辺が7%なので、その影響が2次元合成スペクトルに反映されて図13と幾分異なる可能性が考えられる。しかし、結果的には図13と一致する傾向である。これらの事から、大加速度によって基礎周りの土の塑性的な挙動が発生したであろうと想像される。

図13 87型地震計記録によるfpのAmax依存性

図14 87型地震計記録の水平2次元PSVのfp依存性

図15 SMAC-MD型の記録によるPSVのVmax依存性

次に、地盤のfpについて調べる。図14によれば、PSVのレベルが低い範囲ではMTの4.5 Hzに近づく。そして、図14によれば、本震におけるfpは2 Hzまたは3 Hzである。文献13)によれば本震で2.9 Hzとあり、図12からは2.6 Hzが得られる。これらの事から、2.6～3 Hzは表層地盤の塑性化によるものと考えられる。従って、2 Hzの成分の性質が問題点として残るが、文献12)による建物の弾塑性応答の結果が2 Hzに近づくところがあるが、その影響もあると考えられる。この文献12)は87型とSMACのスペクトル比を求め、それを目標として地盤と構造物の非線形解析の結果を一致させようとしたものである。但し、2 Hz近く以上の高い振動成分についてはスペクトル比のレベルを説明できないとされている。

2) SMAC強震計

気象台構内の地表で記録されたSMAC強震計の本震と余震の記録について得られているPSV⁽¹⁶⁾のレベルとそのfpの関係を求め、図15に示す。この図は地表の比較的軟

弱な地層の f_p と考えられる4～6Hzの成分について調べたものである。更に地中地震計による強震記録の f_p は文献17)よりN153Eが4.5Hz、N63Eが4.3Hzと得られている。これは文献18)のMTの測定結果による4.5Hzとも対応する。そこで、ここでは図15に実線で示した f_p の延長線はMTの $f_p=4.5$ Hzに到達するものと判断する。また、文献19)によれば、JM0のMTによる水平と上下のスペクトル比 H/V は3.3Hzと5Hzに同程度のピークをもつ。ここに、 H :水平、 V :上下の各スペクトルであり、文献20)によれば、 H/V のピークは表層地盤の水平成分の振動特性をよく表すとある。

一般に、 M が大となるか、または大加速度になると、軟弱な表層の塑性化のみならず、長周期成分が伝播したり、更にその下の地層も刺激される。しかし、文献21)で示されている様に、ごく表層の地盤の非線形性が主因との考え方がこの本震の様な大加速度記録について考慮すべきであろう。この f_p の低下に関わる分析は、地中の強震観測を含めて明確化されつつある^{13) 17) 22)}。4.1の1)項でふれたように、文献13)では小地震の $f_p=4$ Hzが、本震では2.9Hzになったと推定されている。この2.9Hzは図15に示した3本の線の中央の点線に近く、MTの5Hzに結びつく傾向である。図15の下段の実線は、MTで4.5Hzであったものが本震では2Hzとなっている。この値については後で吟味する。

3) 地盤剛性の低下

地盤のみの塑性化に止まらず、地震計基礎はその応答による応力が加わって基礎周辺の地盤がより多く塑性化し、 f_p が低下したものと判断できよう。一方、建物の重量による地盤剛性の増加も文献12)で分析されているように、建物直下の V_s が増加する要因もある。

図13、14から分かる様に、本震時の基礎の f_p は約半分の5Hzに低下している。この主たる原因が地盤の塑性化にあるとすれば、基礎周辺の地盤の剪断波速度 V_s もこれに近く低下したことになる。これは図15から推定される低下より更に低い V_s をもたらす可能性をもつ。

文献13)によれば、GL-1.9mから-8.15mにあるシルト質火山灰層の剪断歪度 γ は0.3%に及ぶもので、これが f_p の低下の主因をなしていると理解される。また、地震計基礎が接している地層の γ は約0.05%とある。しかし、一般に、基礎周辺の土は工事の際に攪乱されるし、 V_s は70-80m程度となる例が多いので、ここでも基礎側面の V_s が100m/sを超えることは少ないと考えられる。文献3)によれば、MTによる f_p から基礎の側面がなく、基礎底面の応力は剛板分布と仮定して得られた値は $V_s=72$ m/sとされている。実際には埋土と松杭の効果を含むので、強震時における V_s はこれより更に小さくなるはずである。文献13)を参照すると、 $\gamma=0.05\%$ で現地の土質資料試験から得られた G/G_0 は約70%に低下しているの、これ

だけでも $V_s=36$ m/sとなる。これに加えて、本震時における基礎周りの応力集中部分の V_s は部分的に更に小さくなった可能性がある。

4.2 ピーク振動数の低下に伴う減衰性

上述のような87型の記録のスペクトル分析から、加速度レベルの増大に伴う f_p の低振動数への移行と鋭さが消失するのは、地盤の非線形性、特に基礎周りの歪みの増大によるものと考えられる。

これに対して、減衰定数 h も地盤の歪み γ に依存する増大が当然ある。近年における土の動的室内試験で明らかにされた結果によれば、大歪み領域における h は20～30%の例が多く、この様な h の増加により図12の本震のスペクトルにおいてピークの鋭さが消失する結果をもたらしていると考えられる。

§ 5 気象台の位置する丘の増幅特性

気象台(JM0)の地表面は標高約31.3mで、北側崖の下部道路面と約28.6mの高低差がある。崖下の道路脇に位置するつたや旅館(TYR)のGLにおけるMTの測定を行い、JM0のGLの測定値と比較する。TYRとJM0のスペクトル比を求め、図16に示す。

この図によれば、水平と上下とも約10Hz以上でなければ大きなピークをもち、スペクトル比の最大値は50前後である。10Hz以上の高い振動数の議論には限度があるので除くと、NSが5-6Hz、4.5Hz前後、3.5Hz、EWが5、6Hz等に水平成分のピークが目立つ(表1)。JM0のMTも考慮すれば、地表の f_p として4.5Hzと5Hzが注目される。なお、この測定時刻は一日のずれがあるので、低振動数のスペクトルのレベルに関してはこれを認識しておく必要がある。

図16 崖下と気象台の常時微動スペクトル比

TYRの1階における建物基礎に設置した地震計により、1994年8月25日10時25分の地震(M5.2)の加速度記録が得られた。その記録を図17に示し、水平2成分のFFTを図18に示す。AmaxはNSが6.6Gal, EWが9.3Galである。

一方、同一の地震についてJMOの表層地盤で観測された強震記録¹⁷⁾によれば、GL-22mではN153Eが9.2Gal, N63Eが7.5Galである。TYRにおける第三紀(浦幌層群)は同一地層ながら、レベルは6m余り低く、かつ自由地表面であるが、Amaxはかなり近い値である。fpはTYRのNSが6Hzであるのに対して、JMOのN153Eは前述した様に4.5Hzで、EWが同じく4.5Hzと4.3Hzである。JMOのGL-1.95mにおけるAmaxはGL-22mの6.3-9.0倍であるが、これは4.5Hz~6Hzといった比較的高い振動数をもつ入力に刺激されてJMOの丘が応答し、増幅率が大となったものと理解される。地中からのスペクトル比や崖下からの増幅に関する詳細な議論は今後期待される。

8.6 他の測定、解析を含めた総合的評価

前章までに筆者らが行ってきた気象台の敷地地盤、地震計基礎、建物の振動特性を中心に述べてきた。他にも多数の測定、研究がなされているので、これらと比較検討して、前項までの結果を分析する。この試みは、文献23)である程度なされているが、ここでは地盤、地震計基礎、建物を中心にその他の諸研究も含めて総合的に評価する。

現時点までの各種研究による振動数を一覧して表2に示す。なお、研究者によって複数の論文を出されているもののうち、一部を省略したものもある。また、上下と水平のスペクトル比のH/Vが求められているので、これらを一部活用させて頂いた¹⁹⁾²⁴⁾。以下、表2を中心に

図17 1994年8月25日の地震によるTYRの加速度波形

図18 1994年8月25日の地震によるTYRのFFT

表2 各種の研究結果による気象台の振動数一覧

研究者	①川瀬1993②翠川他1993.94 ③太田他1993.94 ④A1 Gr. 1994⑤A2 Gr. 1994⑥A3 Gr. 1994 ⑦安井他1994⑧北川他1994⑨飛田他1994⑩佐々木他1994(11)増1994														
fp (Hz)	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	代表値	
地盤 敷地				① ④⑥ ②⑥⑥ ②	⑥⑧④ ②⑥⑥ ②									4.5 5	
丘					⑤ ⑤③③③③									5	
解析 地中観測				⑪⑩ ⑨④										4+	
地震計基礎				JMA/BRI ①						⑧⑪ ③	87 Type			10	
建物				⑧Tr ② ③⑦		⑧L ② ③				⑧ f _z ⑦				約4(T)	
レーダー塔		⑧ ②												2	
fp (Hz)	0	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	(Hz)	

その内容について述べる。

1) 気象台の敷地地盤

表2において、JM0敷地の表層地盤のfpは約3Hzから6Hz弱に亘って分布する。また、敷地内のMTのスペクトルと、敷地外の岩盤における測定値とのスペクトル比は4Hz強と5Hz前後に多く集まっている。敷地内の地中地震観測と支持岩盤からの地震応答解析によれば、弾性的には4-4.5Hzにわたるfpである。これらを総合して、本論では4.5Hzと5.0HzをJM0敷地の代表的な弾性範囲のfpと考え、表2に示す。

2) 87型地震計基礎

87型地震計基礎について、MTによる水平方向のfp=10Hzは文献7)~9)、文献12)において、建物の2次固有振動数に刺激された可能性が述べられているが、これは文献10)11)21)で否定的であり、10Hzとみてよいと判断される。本震時にはこのfpは低下するが、その程度は図13、図14より約半分の5Hzとなる。これを解析的に評価しようとする、14.5Hzないし16.5Hzとなり、文献3)の10Hzに至らしめるには埋土の効果を無視する必要があるとしている¹¹⁾。従って、この解析的評価に関しては基礎側面の土と、強度が低下したであろう杭の効果を改めて調べ直す必要がある。

3) 気象台の建物等

建物は地震計室のある西棟(旧棟)のみにについて述べると、短辺の1次は約4Hzと判断して良いであろう(表2)。一般に、低層建物の短辺2次はスウェイ・ロッキングが刺激されるモードであるが、10Hz¹¹⁾と12Hz⁷⁾の結果が報告されている。図10で約10Hzのスペクトル比をみると、約4Hzの1次に対して数分の1であり、スペクトル比の値は1に近いので、前述した様な地震計基礎を刺激する勢力はないかと考えられる。更に、図10と図9の10Hzの値を比較すれば、屋上/地表のスペクトル比は基礎上/地表の約20分の1である。また、文献11)によれば、建物の基礎が地震計基礎を拘束するという条件の解析を通じて、地震計基礎は建物とは独立的事実であることが明らかにされている。これらが「地震計基礎の10Hzは建物2次の影響か?」の考え方を否定する直接的な論拠といえる。なお、微小地震かとも考えられる記録のスペクトル比によれば、前述のように12Hzの成分が西棟西に見られるが、西棟東では大きくないので、全体を支配するほどではないようである。

これらは常時微動測定や微小振幅の記録であることから、ある程度のバラツキは覚悟せざるを得ず、正確にはより詳細なMTの測定や、起振機による振動実験の結果を期待せざるを得ない。

一方、SMACと87型の本震記録について、スペクトル比を求めた文献1)25)によれば、約2Hzにピークがある。これは建物の塑性的応答の影響を地震計基礎も受けたと

いう文献12)の考え方が有力視される。この点については今後の確認的研究が望まれる。

4) レーダー塔

レーダー塔はMTによる2つの測定とも約2Hzとなっているので、その点については特に問題はない。これに関連して文献12)15)では、レーダー塔の渡り廊下が本震時に衝突した可能性を述べている。本論では、この可能性は無いものとする。その理由は、表層地盤、地震計基礎、及び建物の塑性応答が共通的に認識されている現状で、レーダー塔のみMTの2Hzが非線形性を示さないことは常識的に考えられないからである。また、文献23)でも87型/SMACの非定常スペクトル比の結果から、レーダー塔の関与を否定している。

そして、本震で2Hzの大きなパワーが発生した原因は、文献13)においてN63Eでは支持岩盤に約2Hzの成分が含まれている様であることと、87型では前項3)で述べた様に、建物の塑性的応答の影響が加わった可能性がある。

以上の諸点を考慮して、現時点で考えられる代表的な弾性領域のfpを表2の右側に示す。

8.7 結び

釧路気象台で記録された87型地震計とSMAC強震計の記録について、地震計用基礎の固有振動、気象台建物と表層地盤の振動特性、並びに北側崖下からの増幅について分析した結果をまとめた。また、他の関連研究と比較検討し、現時点で言及できる範囲の卓越振動数を明確化した。その要点は次の通りである。

- 1) 常時微動による地表と地震計用基礎とのスペクトル比は、水平2成分が共に10Hzの鋭いピークをもち、そのレベルは約20である。また、上下成分は14~15Hzのピークをもつ。
- 2) 87型の強震記録では、Amaxの小さい記録で10Hzに近いfpで鋭いピークを持つものの、Amaxのレベルが大きくなるとfpは低下し、本震では約5Hzとなる傾向が見られ、スペクトルのピークの鋭さが低下する。
- 3) 気象台の地表における常時微動のfpは主として4.5Hzと、5Hzにも刺激される成分がある。但し、常時微動特有のバラツキをもつものである。
- 4) 気象台の地表と西棟屋上における常時微動のスペクトル比によれば、短辺は約4Hzのピークが認められる。長辺のfpもそれに近いが、測定によって幾分ばらつく。地表に対するスペクトル比のレベルは約4Hzが4~6で、地震計基礎のその数分の1である。また、約10Hz付近のスペクトル比のレベルは1前後で、1)項に示した20倍のレベルとは隔たりが大きいことから、地震計基礎を大きく刺激している可能性は少ない。
- 5) 気象台北側の崖下に位置する古第三紀層の地表と、気象台地表の常時微動のスペクトル比によれば、fpは3.

5, 4.5, 5, 6 Hzが目立つ。これらは気象台の表層地盤におけるfpと概ね対応している。また、10Hz程度の倍率も大きい。

- 6) 多数の研究結果を整理して筆者らの結果と比較検討し、気象台の地盤、地震計基礎、庁舎建物、レーダー塔のfpの値について代表的な値を示した。

以上が他の研究も参照した上で本論において明確化した諸点である。これらを踏まえて、今後、87型地震計基礎の非線形性を詳細に分析したい。

また、残る問題点として次の事項が指摘でき、これらは今後の研究に期待される。

- 1) 地盤-建物-地震計基礎の弾塑性応答に関するより詳細なつめが必要で、内容的には全体系と87型地震計基礎の2つに分けられるであろう。建物は記録によって10Hz前後の振動が刺激されることもある。

- 2) 建物長辺方向のfpの測定、解析は短辺に比して少なく、値の幅もあるので、より明確化される事が望ましい。

このため、より詳細な実験研究を実施できる機会を生かせることが出来れば幸いと考える。

気象台の常時微動測定につき、関係者に種々ご配慮を賜った。また、有用な87型地震計の記録を広くご提供下さっている気象庁に敬意を表します。スペクトル解析等については足利工業大学の石橋直樹君に、原稿作成には同飛田恭彦君に協力頂いた。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 翠川三郎、松岡昌志：1993年釧路沖地震における釧路市内の地震動強さ、その3、日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 5-6, 1993. 9
- 2) 鹿島俊英、北川良和：釧路気象台の強震記録の特性、日本建築学会大会講演梗概集, B, pp. 11-12, 1993. 9
- 3) 太田外氣晴、友野章、山中智裕：釧路気象台87型地震計基礎の振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 13-14, 1993. 9
- 4) 川瀬博：北海道内の各地気象台における強震動特性、日本建築学会構造系論文報告集, No. 459, pp. 57-64, 1994. 5
- 5) 片岡俊一：釧路気象台周辺の常時微動特性と建物被害、第21回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、pp. 43-48, 1993. 11
- 6) 瀬尾和大（研究代表者）：地震時の地盤震動特性評価のための微動の活用に関する研究、平成5年度科研成果報告、平成6年3月
- 7) 北川良和、大川出、鹿島俊英、小山信、横田崇：釧路地方気象台建物と敷地地盤の振動特性、その1、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 437-438, 1994. 9
- 8) 北川良和、大川出、鹿島俊英、小山信、横田崇：釧路地方気象台建物と敷地地盤の振動特性、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 439-440, 1994. 9
- 9) 北川良和、大川出、鹿島俊英、小山信、横田崇：釧路地方気象台建物と敷地地盤の振動特性、その3、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 441-442, 1994. 9
- 10) 太田外氣晴：釧路気象台における強震動と地盤・構造物の振動特性、1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、pp. 127-132, 1994. 12
- 11) 安井譲、高野真一郎：釧路気象台建物・強震計基礎の相互作用の影響、1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、pp. 127-132, 1994. 12
- 12) 壇一男：釧路地方気象台建物の非線形相互作用解析 1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、pp. 85-92, 1994. 12
- 13) 飛田潤、杉村義広：釧路地方気象台および釧路市内の地震動特性における表層地盤の影響、1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、pp. 59-64, 1994. 12
- 14) 北海道建築士会釧路市支部：釧路市の地盤、1982年
- 15) 翠川三郎、松岡昌志：釧路気象台構内で観測された強震記録のスペクトル特性、日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 433-434, 1994. 9
- 16) 建設省建築研究所：釧路気象台敷地内地盤調査結果、地震工学新興会ニュース、No. 136, pp. 56-60, 平成6年5月
- 17) 佐々木透、丹羽正徳：釧路気象台における強震観測、日本地震学会講演予稿集、No. 2, p. 236, 1994. 10
- 18) 松岡昌志、翠川三郎：1993年釧路沖地震における釧路市内の地震動強さ、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp. 3-4, 1993. 9
- 19) 山中浩明(A-1長周期グループ)：釧路市内の広域を対象とした長周期微動の同時観測、平成5年度科学研究費補助金〔試験研究(B1)(1)〕, pp. 33-54, 平成6年3月
- 20) 中村豊、上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム、pp. 265-270, 1986年12月
- 21) 翠川三郎：強震時にみられる地盤特性の非線形性、地震学会、地震、第2輯、第46巻、pp. 207-216, 1993.
- 22) 鹿島俊英、小山信：釧路気象台庁舎の振動特性、1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、pp. 139-142, 1994. 12
- 23) 福和伸夫：相互作用をどのように理解するか、1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、日本建築学会、pp. 139-142, 1994. 12
- 24) 片岡俊一(A-3グループ)：釧路気象台構内での高密度の微動同時観測、平成5年度科学研究費補助金〔試験研究(B)(1)〕, pp. 33-54, 平成6年3月
- 25) 川瀬博：1993年釧路沖地震における釧路気象台の非線形応答特性、地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集、pp. 332, 1994. 3

(1995年2月10日原稿受理、1995年4月25日採用決定)