

常時微動による建物の振動特性

著者	角田 寿喜, 池辺 伸一郎
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	14
ページ	33-42
別言語のタイトル	Natural Vibrations of Buildings Induced by Microtremors
URL	http://hdl.handle.net/10232/00012445

常時微動による建物の振動特性

角田 寿喜*・池辺伸一郎**

(1981年9月30日受理)

Natural Vibrations of Buildings Induced by Microtremors

Toshiki KAKUTA* and Shin-ichiro IKEBE**

Abstract

By using two horizontal components of seismographs ($f_0=1$ Hz), microtremors were observed at respective stories of four buildings in Kagoshima City: a steel reinforced concrete (S.R.C.) building of 14 stories, a reinforced concrete (R.C.) building of 6 stories and two mortared frame buildings of two stories. At a 5-storied building (R.C.), tremors induced by a windstorm of a typhoon were observed. One component of seismographs was fixed at the first floor and the other was moved to upstairs.

Power spectrum and coherence of tremors are analyzed as well as ratio in power spectrum at a story of a building relative to that at the first floor (abbreviated as power ratio).

Frequencies of predominant peaks are nearly equal with one another among power spectrum, coherence and power ratio at the 6- or 14-storied building. Thus excitations of natural vibrations are recognized at the frequencies for the two buildings. The natural frequency $f_0=2.57\pm 0.14$ Hz and the damping coefficient $h=0.12\pm 0.02$ are obtained for the first mode of the 6-storied building. At the 14-storied building, the second mode ($f_0=1.83\pm 0.06$ Hz, $h=0.12\pm 0.04$) and the third mode ($f_0=2.50\pm 0.07$ Hz, $h=0.06\pm 0.02$) are detected though the first mode is not.

For two mortared frame buildings of two stories, natural frequencies are estimated as 4.8 Hz and 5.0 Hz from amplitude spectra and amplitude ratios at upstairs by using an electric band-pass filter.

Excitations of natural vibrations are not detected at the 5-storied building because predominant peaks in power spectra, coherences and power ratios do not correspond with one another. At this building, natural vibrations are probably confused with direct forced vibrations at upstairs by a windstorm.

1. はじめに

建物の振動特性の測定には、起振機や人力加振などによりおこされた共振状態を利用する方法の他に、常時微動を振動源として利用する方法が使われる(金井, 1969, p. 109-111)。測定精度の点では、振動源の性質が与えられる起振機などを用いる方法には劣るが、金井(1969, p. 111)によれば、構造物上部の常時微動の平均周期は起振機による振動実験からもとめた固有周期と数 % 以下の誤差で一致するから、常時微動を利用する方法は十分実用に耐えるもの

* 鹿児島大学理学部地学教室 Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, Japan.

** 東建地質調査株式会社 Token Geotechnique Co., Ltd., Tokyo, Japan.

である。この方法の最大の利点は測定の簡便さということにあり、振動源の不確定性からくる誤差に関して十分な吟味さえほどこせば、大きな効力を発揮する。

この報告では、鹿児島市内のいくつかの建物において、その振動特性を測定するために観測された常時微動を解析する。特に、解析方法を変えたときの結果の安定性を検討するが、顕著な固有振動は解析方法を変えても安定して現われるはずであるから、解の安定性を調べることで精度の向上につながるであろう。

常時微動が白色雑音とみなせれば、構造物の上部での観測には、構造物の固有周期に該当する成分が増幅されて現われると考えられ、TANAKA *et al.* (1969) は、この仮定のもとに常時微動のパワースペクトルから実在する建物の固有周期と減衰定数をもとめている。しかし、現実の常時微動は、構造物が位置する地盤の構造に大きく依存する周波数成分から構成されており、したがって、構造物の固有振動に関する周波数成分を、地盤構造の影響から分離することが必要となる。そのひとつの方法は、建物の各階で観測された常時微動を比較して、どの周波数成分が建物の存在により増幅されているのかをみることである。田治米ほか (1977, p. 195-196) にこの例があるが、そこでは、地盤振動の卓越周波数が 1.2 Hz、建物の固有周波数が 2.8 Hz と顕著に分離されている。また、田治米ほか (1977, p. 227) には、2階建住宅について地盤に対する2階のパワースペクトルの比をとった例が示されている。建物下部に対する上部のスペクトル比は、建物の固有振動による増幅の定量的な検討を可能にするが、スペクトル比は安定性に欠けるため、結果の解釈には十分な注意が必要である。

2. 観測システムと解析方法

建物のスパン（短辺）方向のみの振動特性を測定することにして、固有周波数 1 Hz の水平動換振器 2 台を検出部として用い、そのうち 1 台を 1 階に固定し、他の 1 台は各階を移動して、1 階と各階での同時観測をおこなった。換振器からの出力は、遮断周波数 8 Hz のローパスフィルターを通して直流増幅器で増幅され、4 チャンネルのデータレコーダーに記録される。各階毎の記録時間は約 10 分である。収録された記録のうちから、モニター記録により安定した適当な部分を選定し、AD 変換器を通して紙テープに穿孔した。サンプリング間隔は 0.1 秒で、個数は 512 または 1024 であった。このシステムの概要は Fig. 1 に示されている。

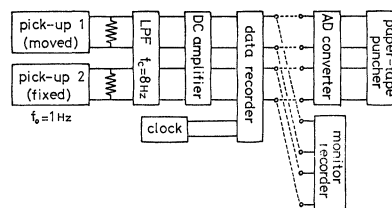


Fig. 1. Block diagram of the observed system.

常時微動の観測は、鴨池新町の鉄骨鉄筋コンクリート造 14 階建共同住宅鴨池ハイツ 5 号棟、鹿児島大学の鉄筋コンクリート造 6 階建法文学部研究棟、木造モルタル塗り 2 階建教育学部校舎、および上荒田町の木造モルタル塗り 2 階建アパートでおこなわれた。また、鉄筋コンクリート造 5 階建理理学部 2 号館においては、1980 年 10 月 13 日の台風 19 号の強風を利用した振動観測をおこなった。

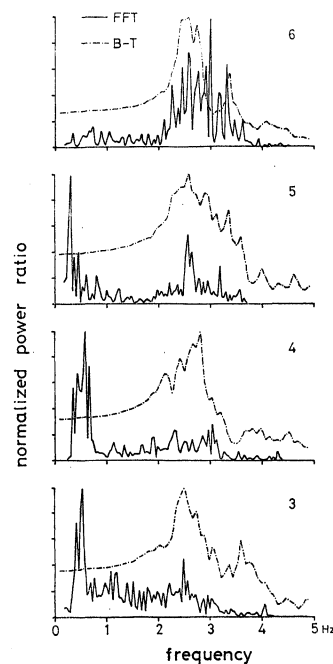
解析方法としては4通りの方法をとった。すなわち、各階毎のパワースペクトルを比較する方法、1階に対する各階のパワースペクトル比（パワー比と略称）をとる方法、クロススペクトルからコヒーレンスとフェイズを算出する方法（日野，1977，p.63-64），および電氣的なバンドパスフィルターを通したインク書き記録から1階に対する上階での振幅の増幅率をもとめる方法である。

パワースペクトルの計算では、高速フーリエ変換による振幅スペクトルの2乗をとる方法（FFT法）とBlackmann-Tukeyの方法（B-T法）の2通りを検討した。FFT法では、サンプル個数を1024とし、移動平均をとることにより結果が平滑化されている。また、B-T法では、サンプル個数を512、ラグを128として、Parzen ウィンドウをかけ、アルゴリズムにFFTを使っている。

Fig. 2には、6階建の鹿児島大学法文学部研究棟の3～6階について、FFT法とB-T法で計算されたパワー比が規格化され、示されている。このふたつの方法によるスペクトルがほぼ一致することは当然であるが、パワー比においても、低周波部分を除けば大局的にみて一致する。しかし、6階での結果にみるように、解の安定性という点ではB-T法が適している。特に、FFT法の解に現われた低周波部分のピークは、スペクトルの比をとることによって生ずる解の不安定性に起因するものであり、このことは、データレコーダーの出力を直接電氣的にバンドパスフィルターで処理することによっても確かめられる。B-T法では、サンプリング数が少ない場合には分解能が悪くなり、近接した周波数の成分を分離する場合には欠陥を露呈するが、建物の低次の固有周波数を検出する場合には512もあれば十分である。したがって、以後のスペクトルの計算にはB-T法のみを用いることにする。

なお、電氣的なバンドパスフィルター処理には、減衰傾度 24 dB/octave、バンド幅 1/3 octave のアクティブフィルターを2段に重ね、-48 dB/octave のフィルターとして使った。中心周波数は 0.1～21.8 Hz の間を 0.1 Hz きざみで変えられるようになっている。

Fig. 2. Normalized power ratios of microtremors analyzed by two different methods: the fast Fourier transform (FFT) and the Blackmann-Tukey's method (B-T). Observations were made at the 6-storied building of Faculty of Law and Letters, Kagoshima University. The power ratio means the ratio in power spectrum at a respective story of a building relative to the first floor. Numerals in the figure refer to the respective stories.



3. 鹿児島市内の建物についての解析

建物における常時微動測定は原則として深夜を利用し、人工的なノイズが低い時間帯におこなった。測定の時期は、理学部2号館を除き、1980年12月である。

まず、解析方法の違いが結果に与える影響をみるために、パワースペクトル、パワー比、およびコヒーレンスを検討する。なお、フェイズについては、いずれの場合も系統的な結果を見出せなかったので省略するが、これは、さまざまな方向からさまざまな周波数の波が位相と振幅を違えて到来する常時微動特有の性質によるものと考えられる。

建物の固有振動によってある周波数の成分が増幅されるとすれば、当該周波数で、上階のパワーとパワー比が増大すると同時に、コヒーレンスも大きくなるはずである。Fig. 3および4は、法文学部研究棟と理学部2号館、鴨池ハイツについての、それぞれが規格化されたパワー、パワー比、コヒーレンスであるが、ピークの位置には多少の変動はあるものの、法文学部研究棟についての2.5 Hz付近のピーク (Fig. 3a) と、鴨池ハイツについての1.7 Hz付近および2.5 Hz付近のピーク (Fig. 4) はまさにその特徴を示している。したがって、それぞれのピークは建物の固有振動をあらわすものと推定される。これに対し、理学部2号館についての解析結果 (Fig. 3b) ではそのような傾向はみられない。しいて言えば、5階において、2.9 Hz付近にパワーとコヒーレンスのピークがみられるが、パワー比の増大は顕著といえず、4

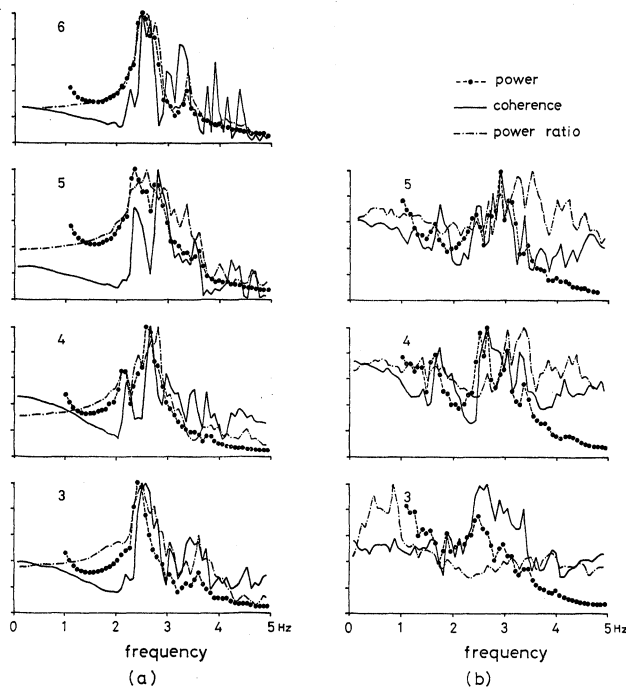


Fig. 3.

Fig. 3. Normalized power spectra, coherences and power ratios of tremors observed at (a) the 6-storied building of Faculty of Law and Letters and (b) the 5-storied building of Faculty of Science, Kagoshima University. Numerals in the figures refer to the stories of the buildings.

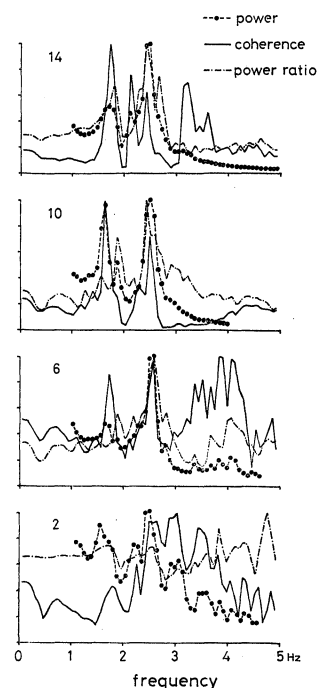


Fig. 4.

Fig. 4. Normalized power spectra, coherences and power ratios of microtremors observed at the 14-storied apartment building No. 5 of "Kamoike-haitsu". Numerals in the figure refer to the stories of the building.

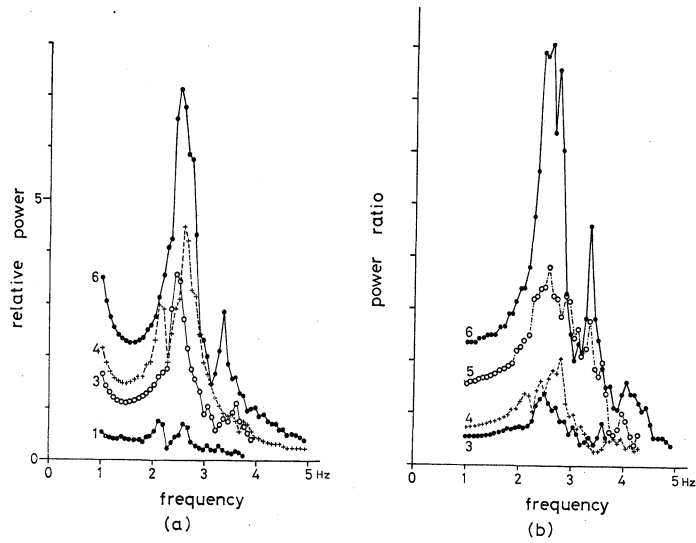


Fig. 5. (a) Relative power spectra and (b) relative power ratios of microtremors observed at the 6-storied building of Faculty of Law and Letters, Kagoshima University. Units in the ordinates are arbitrary. Numerals refer to the stories of the building.

階ではピークの位置も変わっている。このように、解析方法が変われば結果が異なる、あるいは測定階層が異なればピークの位置が変わるといった場合には、固有振動を検出できたとはいえない。

次に、固有振動による増幅の度合の階層分布を検討する。Fig. 5は、法文学部研究棟での各階のパワーとパワー比の大きさに関する相対的關係を示している。縦座標の単位は任意である。この建物では、上階へ進むにつれて 2.5 Hz 付近のパワーとパワー比が増大するから、この固有振動は 1 次振動である。鉄筋コンクリート（鉄骨鉄筋コンクリートを含む）造の建物の固有周期として、金井（1969, p. 113-114）によりコンパイルされた統計的な実験式のうちから

$$T = \beta N \quad (N \text{ 層数}) \quad (1)$$

を採用し、 β として 0.07~0.1 をとれば、法文学部研究棟の 1 次振動の固有周波数は少し高めとはいえ、まずは妥当である。

鴨池ハイツに対する同様の図は Fig. 6 および 7 である。縦座標の単位は、やはり任意であるが、図の (a) と (b) では同一単位になっており、Fig. 6(a) は (b) に較べ拡大されて図示されている。これらの図は、5 階以上での固有振動の励起を明瞭に示しているが、4 階以下ではそれが認められない（例えば、Fig. 4 の 2 階、および Fig. 6a と Fig. 7b の 3 階での結果）。パワーあるいはパワー比の階層分布をみると振動の節 (node) は 9 階か 10 階の付近にあり、1.7 Hz 付近および 2.5 Hz 付近のピークは 2 次あるいは 3 次の固有振動に対応することが推定される。しかし、6 階でもパワーの極小が観測されており、パワーやパワー比の階層分布から固有振動の次数をおさえることはできなかった。以下では、1.7 Hz 付近を 2 次、2.5 Hz 付近を 3 次の固有振動として扱うことにする。

Fig. 8 には、-48 dB/octave の電氣的なバンドパスフィルターを通して測定された鴨池ハイツの 14 階での、1 階に対する振幅の比の 2 乗が、B-T 法によるパワー比とともに示されている。ただし、振幅比はフィルターを通したインク書きレコーダーの記録において取上げられたいく

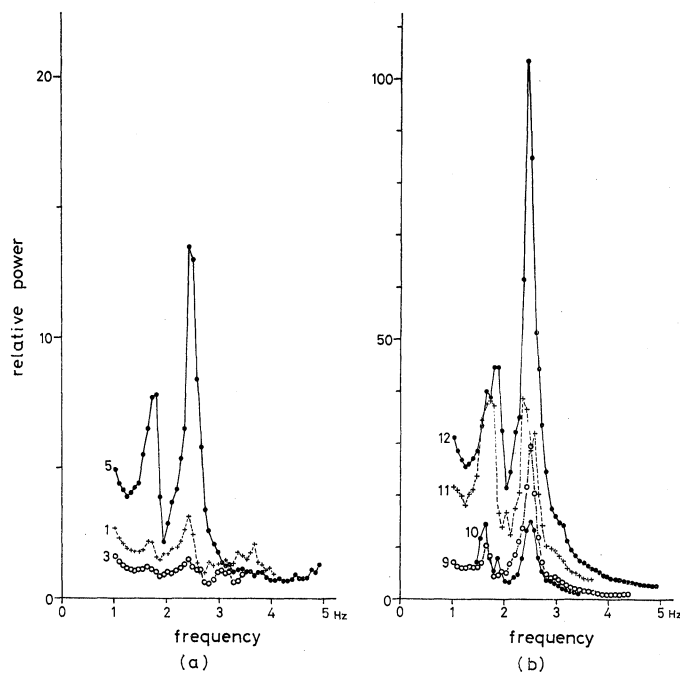


Fig. 6. Relative power spectra of microtremors observed at the 14-storied apartment building No. 5 of "Kamoike-haitsu". Numerals refer to the stories of the building. The figure (a) is enlarged though the unit in the ordinate is the same as that in (b).

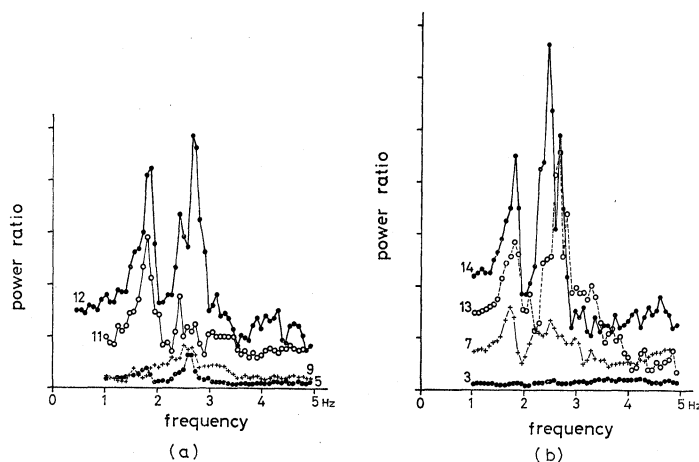


Fig. 7. Relative power ratios of microtremors observed at the 14-storied apartment building No. 5 of "Kamoike-haitsu". Units in the ordinates in (a) and (b) are arbitrary but the same.

つかの対応する部分について、それぞれに振幅比をとり、それを平均化したものとして表わされている。B-T法では検出できた明瞭なふたつのピークが、電気的なフィルター処理では分離できないことにみられるように、分解能は劣るが、ふたつの方法による結果は大局的にみれば一致しており、1次振動はやはり検出できていない。これは、短周期の換振器 ($f_0=1\text{Hz}$) を用いたシステムの欠陥に由来するものか、該当する周波数成分のエネルギーが常時微動に不足していたことによるものである。

大沢 (1968) によれば、一様なせん断振動体の固有振動数の比は、 $\omega_2/\omega_1=3$, $\omega_3/\omega_1=5$ であり、一般には上層ほど部材の断面が小さくなっているために、実際には、1次と2次の振動数比はもっと接近し、2.5前後になるとされている。先に示した固有周期の実験式によれば、14階建の鉄骨鉄筋コンクリート造の建物の1次振動数は0.7~1.0 Hz となるから、2次の振動数が約1.7 Hz, 3次の振動数が約2.5 Hz となることは、大沢 (1968) の結果と矛盾はしない。

木造2階建家屋の固有周期は、金井 (1969, p.111-113) によれば、統計的には0.4秒で、

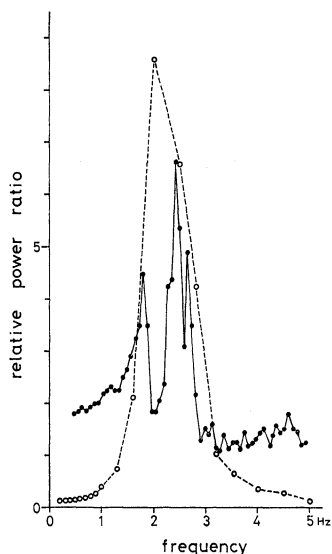


Fig. 8.

Fig. 8. Squared amplitude ratios and power ratios of microtremors observed at the 14-th story of the apartment building No. 5 of "Kamoike-haitsu". The amplitude ratios are obtained by using of an electric band-pass filter.

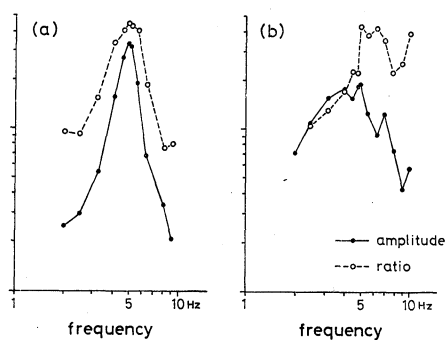


Fig. 9.

Fig. 9. Amplitude spectra and amplitude ratios of band-pass filtered microtremors observed at the second story of (a) a mortared frame apartment in Ue-arata-cho and (b) a mortared frame building of Faculty of Education, Kagoshima University. Amplitudes are not compensated for instrumental response.

近年建てられたものでは0.2~0.3秒とされている。今回測定された上荒田町のアパートにしても教育学部の木造校舎にしても、建築後数十年を経た建物であるが、その固有周波数は4.5 Hz 以下にはみられない。AD変換の際のサンプリング間隔が0.1秒であるために、固有周波数が5 Hz 付近、あるいはそれ以上である場合には、他の建物と同様な方法でパワー等は計算できないから、これらの木造建築物については、-48 dB/octave のバンドパスフィルターによる処理をおこなうことにする。Fig. 9には、上荒田町のアパートと教育学部の木造校舎について、この方法で得られた2階での振幅スペクトルと1階に対する2階の振幅比が示されている。ただし、振幅スペクトルは、いくつかの部分について測定された中から選ばれた代表例であり、振幅比は、それら全体の平均である。Fig. 9(a)によれば、上荒田町のアパートでは、振幅スペクトルも振幅比も4.8 Hz で最大となり、固有周波数が精度良く決まる。それに較べると、教育学部木造校舎では、振幅スペクトルと振幅比の関係は若干複雑になるが、やはり、5.0 Hz で振幅も振幅比も最大となっている。

4. 固有周波数と減衰定数の推定

6階建鉄筋コンクリート造の法文学部研究棟においては3階以上で、14階建鉄骨鉄筋コンクリート造の鴨池ハイツにおいては5階以上で、パワースペクトル、パワー比、およびコヒーレンスに固有振動の励起を示す明瞭なピークがあらわれる (Figs. 3~7)。それぞれの振動ごとにピーク的位置から決められた固有周波数は、解析方法の違いによって僅かに異なる (Table 1)。ただし、Table 1の結果は、固有振動の励起が認められる階層にわたって平均化された値であり、誤差は標準偏差の不偏推定値である。F検定により、解析方法の違いをテストしてみると、法文学部研究棟についての結果および鴨池ハイツの3次振動についての結果では解析方法の違いによる差は認められないが、鴨池ハイツの2次振動については、有意水準1%で差がないとした仮説は棄却される。すなわち、パワー比による結果と他の方法による結果との差は有意である。

解析方法の違いによる結果の差が有意と認められない法文学部研究棟の1次振動と鴨池ハイツの3次振動については、3つの方法による結果を平均することにより、それぞれ、 2.57 ± 0.14 Hz および 2.50 ± 0.07 Hz と固有周波数が定まる。

鴨池ハイツの2次振動に関して、パワーとコヒーレンスから平均として推定される固有周波数は 1.72 ± 0.05 Hz となるが、建物の存在によって増幅される振動が固有振動であるという見方をすれば、パワー比が適当な方法と考えられる。この方法の欠陥は結果が安定性に欠けることであるが、今回の結果は5~14階までの広い範囲において小さな誤差で推定されており、安定度は十分高い。したがって、ここではパワー比によって得られる 1.83 ± 0.06 Hz を固有周波数として採用する。

上荒田町の木造モルタル塗り2階建アパートの固有周波数は、先にも述べたように精度良く 4.8 Hz と決まる (Fig. 9a)。2階建の教育学部木造校舎については、Fig. 9(b) から一見して明らかという訳にはいかないが、平均をとる前の原資料に立ち返って振幅比をみれば、安定して現われるピークは 5.0 Hz である。Fig. 9(b) においても最大は 5.0 Hz にあるから、この周波数を固有周波数と考えて間違いはないであろう。

Table 1. Natural frequencies of free vibrations of two buildings, the 6-storied building of Faculty of Law and Letters, Kagoshima University and the 14-storied apartment building, No. 5 of "Kamoike-haitsu". Natural frequencies, which are obtained by three different analyses (peaks in power spectra, power ratio and coherence), are averaged over the several stories of the respective buildings; 3 to 6 stories for the building of Faculty of Law and Letters and 5 to 14 stories for the apartment building.

	6-storied building (Fac. Law and Letters)	14-storied apartment building (Kamoike-haitsu)	
	first mode	second mode	third mode
power spectra	2.46 ± 0.10 Hz	1.70 ± 0.06 Hz	2.49 ± 0.06 Hz
power ratio	2.62 ± 0.13	1.83 ± 0.06	2.54 ± 0.09
coherence	2.64 ± 0.13	1.73 ± 0.05	2.48 ± 0.05
total average	2.57 ± 0.14	—	2.50 ± 0.07

Table 2. Natural frequencies and damping coefficients of buildings in Kagoshima City.

	6-storied building (Fac. Law and Letters) R.C.		14-storied building (Kamoike-haitsu) S.R.C.		2-storied apartment M.F.		2-storied building (Fac. Education) M.F.	
	f (Hz)	h	f (Hz)	h	f (Hz)	h	f (Hz)	h
first mode	2.57±0.14	0.12±0.02	—	—	4.8	—	5.0	—
second mode	—	—	1.83±0.06	0.12±0.04	—	—	—	—
third mode	—	—	2.50±0.07	0.06±0.02	—	—	—	—

R.C.: reinforced concrete, S.R.C.: steel reinforced concrete, M.F.: mortared frame

台風を利用した5階建鉄筋コンクリート造の理学部2号館における観測では、顕著な固有振動の励起は認められなかった (Fig. 3b)。これは、常時微動の入力が建物の下部に限定されるのに対し、台風では、強風によって上階が直接揺られることにより、固有振動が乱されてしまうことが原因と考えられる。

減衰定数 h の推定は、田治米ほか (1977, p.196) にある次式によった。

$$h = 4f/2f_0 \quad (2)$$

ここで

f_0 : 共振周波数

$4f$: パワーの最大値の 1/2 を与える周波数の差

各建物の固有振動ごとに、各階のパワーおよびパワー比から、可能なものについて減衰定数を計算し、その平均をとると、法文学部研究棟の1次振動に対しては $h=0.12\pm0.02$ 、鴨池ハイイツの2次振動では $h=0.12\pm0.04$ 、3次振動では $h=0.06\pm0.02$ となる。法文学部研究棟についての結果を、同様の方法で測定された TANAKA *et al.* (1969) と比較すると、彼らの測定値の上限に近い値となっている。また、一般には高次の振動ほど減衰定数は大きいはずであるが、鴨池ハイイツの結果は逆になっている。パワースペクトル (Fig. 6) やパワー比 (Fig. 7) をみてもわかるように、2次振動に比べて3次振動がより顕著であることが、減衰定数にも反映しているといえよう。

上荒田町の2階建アパートについては、パワーからもとめた結果は 0.10、パワー比からの値は 0.19 となる。違いが大きいため、この結果は採用しない。

以上の結果は Table 2 にまとめられている。

5. おわりに

完全にランダムな入力ともみなすことができない常時微動を利用して建物の振動特性を測定するには、建物の上部と下部で同時に同一システムによる観測をおこなうとともに、解析方法もいくつかを組み合わせ、結果を比較検討することが必要である。同一建物で繰返し測定をおこなう場合には、2度目からの測定ではすべての階での測定は必要ないであろうが、少なくとも最初の測定では必要であろう。鴨池ハイイツにおける今回の観測では、全階層で測定をおこなったにもかかわらず、パワーあるいはパワー比の階層分布から振動次数を決定することができなかった。これは増幅器の calibration が不十分であったことによると考えられるが、中高層の建物において各階を移動して測定する場合にはかなりの時間を要するから、各階の測定毎に増幅器の calibration をおこなっておくことが必要である。

今回の解析では、パワーとパワー比の他にコヒーレンスを計算した。Fig. 3 および 4, Table 1 の結果にみられるように、コヒーレンスのピークはほぼパワーのピークと一致する。しかし、完全に一致するというわけにはいかないから、パワーをチェックする意味でつけ加えた方が良い。特に、観測システムとの関連もあって低周波領域でのパワーは不当に増大するが、その妥当性はコヒーレンスによってチェックできる。

鹿大理学部佐藤泰夫教授には貴重な助言をいただき、また、四年目学生（当時）鈴木康二君には観測を手伝っていただいた。鹿大工学部海洋土木開発工学科佐藤道郎助教授と中村和夫技官には AD 変換の便宜をはかっていただいた。計算は鹿大電子計算機室のお世話になった。

関係者各位に厚くお礼申上げる。

参 考 文 献

- 日野幹雄, 1977, スペクトル解析, 統計ライブラリー, 朝倉書店.
金井 清, 1969, 地震工学, 大学講座土木工学 18, 共立出版.
大沢 胖, 1968, 建物の動的特性, 建築構造学大系 1, 地震工学, 金井清・田治見宏・大沢胖・小林啓美共著, 彰国社, 107-156.
TANAKA, T., S. YOSHIKAWA, Y. OSAWA and T. MORISHITA, 1969, Period and damping of vibration in actual buildings during earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., 47, 1073-1092.
田治米辰雄・望月利男・松田磐余, 1977, 地盤と震害—地域防災研究からのアプローチ—, 槇書店.