

金井微動とマイクロゾーニング

—小林啓美先生のご足跡を振り返りながら—

東京工業大学 瀬尾 和夫

1. はじめに

ここでは、小林啓美先生が常時微動についてどのようにお考えになり、微動研究にどのように取り組んで来られたかについてご紹介しながら、今後の微動研究の方向について考えてみることにしたい。まず最初に、平成 15 年秋に開催された小林先生のご叙勲をお祝いする会に際して、先生ご自身が準備された『私の工学地震学』から微動研究に関して触れておられる部分を以下に採録させていただく。

常時微動と強震観測

地盤探査が相当大掛かりな調査であるのに比して常時微動は場合によっては地震計 1 台でも出来る簡便な調査であり、金井清先生が 1960 年頃に一連の研究でその有用性を明らかにしておられる。とくに幾つかの地点で地震観測、あるいは精密な地盤調査の資料のある場合には、その地点を含む数多くの地点との比較観測で全般的な地盤の概要を把握するのに適した方法である。

私は、1962 年 Buyin 地震 (Iran) を手始めに 1962 年広尾沖地震の釧路、1968 年十勝沖地震の青森県下、1973 年 UNESCO Valkan Project の Skopje (Yugoslavia)、Thessaloniki (Greece) と Izmit - Eshkel (Turkey)、1975 年大分県中部地震、1976 年唐山地震 (中国)、1978 年宮城県沖地震、1978 年伊豆大島近海地震、1983 年日本海中部地震、1985 年 Michoacan 地震 (Mexico)、1988 年 Spitak 地震 (Armenia)、1989 年 Loma Prieta 地震、1993 年釧路沖地震、1994 年 Northridge 地震、1995 年兵庫県南部地震、1999 年 Kocaeli 地震 (Turkey)、2000 年鳥取県西部地震の諸調査に参加してきた。この中で釧路沖地震と兵庫県南部地震は合同調査の一部である。

またこれとは別に大阪はじめ各地の SMAC 設置位置、青森県、北海道太平洋岸、愛知・岐阜県、福井平野など科研による調査、埼玉県東部の地区で高密度の微動調査を行った。

これらの観測で最も印象に鮮明に残っているのは Mexico 市街地の調査である。この結果は被害を良く説明できたこと、常時微動の結果に否定的であった Cal. Tech グループに強い印象を与えたことである。

微動を用いた建築物の周期減衰性の測定

建築物の被害を地盤震動の立場から考慮するとき、一般的な建築物の震動性状を知る必要がある。この場合現場で簡便な方法で周期・減衰性を測定する必要がある。常時微動による建築物の振動からこの値を求めることは一応できるので、これによって健全な状態での建築物の定数を求める事にした。

東京、Mexico、Armenia および Granada (Spain) で夫々 10 数棟の建築物を比較的短時間で観測し、各種構造別に建物階数と周期の関係を求めることが出来た。これを比較すると夫々の国でその設計法の違いから平均的な建築物周期の特性の違いが見られ、地盤と地震被害の関係を見るのに都合がよい事が判った。

このように見てみると、小林先生は地震被害調査に赴かれる時は殆どの場合、微動測定を調査手段の一つとして考えておられたようである。また、福井や愛知・岐阜など昔の地震の被災地にも、後日愛車を駆って微動測定に赴かれている。これらの測定調査の全てが論文や報告書の形で残されている訳ではないが、恐らく先生は、地震被害を受けた各地の地盤条件についてご自身が納得されるために、常時微動を目的としてではなく、手段としてお使いになったのではないかと推察される。

2. 小林先生の微動計

先生が谷口忠先生から引き継がれた備品の中に『簡単微動計』と云うのがあって、厚い鉄板の上に機械式地震計 (テコで振幅を拡大する方式) と煤がきドラムの記録計を据え付けるもので、後日備品整理の時にこれがどうして簡単なのかと訝しく思った記憶がある。1960 年代に入って、先生が積極的に微動測定をお始めになった段階では、微動計は動コイル式に改善されており、保坂 (後の振動技研) の倒立振子と専用アンプの組み合わせ、記録計は SONY のオープンリール式のデータレコーダーになっていた。このデータレコーダーは電源が交直両用の大変な優れものであった。それ以前には三栄測器の電磁オシロ (ガルバノメーターで拡大された光信号を写真に焼き付けるもので、暗箱の中で手探りで現像・定着を行う必要があった) の時代があったはずであるが、微動測定にまで利用されたかどうかは定かでない。これに記録再生用の熱ペンオシロと消耗品を加えると、先生は大掛かりで嵩の大きい微動測定装置を持って歩かれたことになる。1973 年ユネスコのバルカンプロジェクトの時には、データレコーダーはより小型の TEAC-R70 (カセットレコーダー) に置き換わっていたが、それにしても大変な大荷物であったこと

には変わらない。

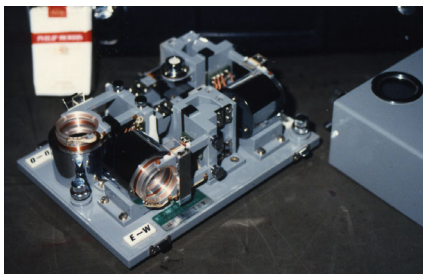
その後、先生は微動計の軽量小型化に尽力されている。振動技研の倒立振子3成分を一つの台座の上にもまとめられたのが手始めで、その時、アンプとレコーダーはまとめてジュラルミンのトランクに収納された(我々は白トランクと呼んでいた)。まだTA-400のアンプとTEAC-R70をそのまま使用していたので結構重く、一度このセットを夢の島発破観測のために江ノ島の上に背負子で持ち上げた経験があるので云わせて頂くと、非常な体力を必要とした。しかし3成分1組のセンサーとアンプを1本のケーブルで接続すれば準備完了で、電源はすべて単1の乾電池で賄うことができたので、携帯型微動計の1号機と呼んでも恥ずかしくないものではあった。その後の改良では、振動技研のご努力もあって、小型センサー(コイルを細く巻き数を多くすることで、感度を落とさずに軽量小型化することに成功した)・小型アンプ・オーディオ用レコーダー(信号をFM変調して4チャンネルを収録した)を組み合わせて一つの携帯トランク(黒トランク)に収納することができた。3成分のレンジ操作を共通にし現場での操作ミスを防いだこと、切り替えスイッチで速度・変位の切り替え(積分アンプを通すか否かの選択)やキャリブレーション機能はすでに装備されていたが、さらなる改良点は周期1秒のセンサーにシャントコンデンサーを咬ませて5秒計としても利用できるようにしたことにある。この微動計は1985年のメキシコ地震の調査で大活躍した。小林先生があまりにも得意げに自慢されたので、メキシコ大学のローゼンブルース教授に「ここに置いてゆけ」とかなり真剣に詰め寄られた逸品であった(小林先生の上記のご回顧の中にこの時の雰囲気が大変良く表現されている)。

しかし、この時までには未だアナログの時代で、その後、記録計はラップトップコンピューターからノートパソコンへと急速にデジタルの時代に入ってゆくことになるが、当時のセンサーは今もなお現役を保っている。このデジタル化に際しては竹内雅人氏(当時は修士の学生)と佐間野隆憲氏(当時は助手)の功績が大きく、データ収録処理のプログラムにも幾多の改良が加えられている。また上記の微動計センサー(UP-255シリーズ)は海外でも好評で、地震計の製作を専門にしているスペインの研究者から「こんなに美しい地震計は初めて見た。良い記録が取れるに違いない」と褒められた時にはわがことのように嬉しかった。

小林先生がご退官の時に退職金でご自分専用の微動計を購入されたのは有名な話で、その後も改良を試みられながら、最後まで微動計から手をお放しになることはなかった。



伝統的な倒立振子の1秒計



軽量小型になった3成分1組のUP-255



携帯用微動計(黒トランク)

3. 小林先生の微動測定

先生は常時微動について確固とした哲学をお持ちだったはずであるが、それを面と向かって伝授していただく機会はなかったように思われる。その代わりに、先生と行動を共にさせて頂いた折に後ろ姿から学ばせて頂いたことは数多く、これは正に職人の世界だと感じ入ったことも度々であった。例えば、ケーブルの巻き方や結線の仕方では随分叱られた覚えがあるし、測定中にしっかりモニターしておかなければならないことも、先生は身をもってお手本を示しておられたように思われる。微動測定に何が正解ということはないはずであるが、ある種の流儀のようなものは確かに存在するに違いない。

常時微動が学界に広く知られるようになった契機は、まぎれもなく金井清・田中貞二・長田甲斐男の先生方が地震研究所彙報に一連の論文をご発表になった1954~1968年にあると考えられる。その頃から小林先生は、その常時微動を『金井微動』と意図的に名付けられ、金井微動の伝道師としての役割に徹せられることになる。その好例が次のバルカンプロジェクトではなかったかと推察される。

1973年ユネスコのバルカンプロジェクトのレポートを拝見すると、先生はギリシャ・ユーゴスラビア・ルーマニアなどバルカン諸国の研究者を相手に、わが国のマイクロゾーニングの考え方、および金井先生の常時微動の有用性について懇切丁寧に講義されており、特に、テサロニキ(ギリシャ)、スコピエ(ユーゴ)、イズミットとエシュケル(トルコ)では、現地で微動測定を行いながら指導された様子が伝わってくる。驚かされたのはそのレポートに熱ペンオシロで再生された微動記録とフーリエ・スペクト

ルとが共存し、すでにランニングスペクトルの概念もが考えられていることで、レポートをよく読むとその間に大変な作業が必要であったことが記されている。すなわち、データレコーダーで持ち帰られたアナログの原記録は、DATAC-1000 という A/D 変換機で紙テープに打ち出され、IBM のカード変換機で紙テープからカードに変換されたデータを用いてフーリエ解析を行っておられる。このデータ処理がいかにも大変であったかは、その当時研究室にいらした秦瑤子さん達の努力があったことをわざわざ文中に記しておられることから推察できる。

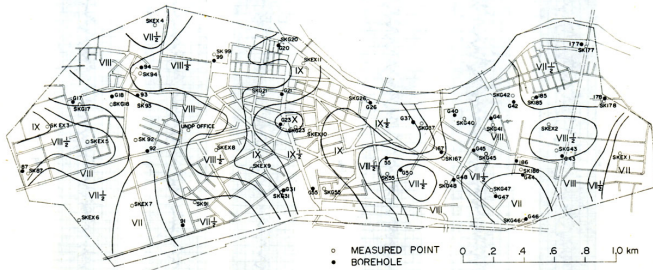


FIG 2-2 CENTRAL PART OF SKOPJE
1963年スコピエ地震の震度分布と微動測定点

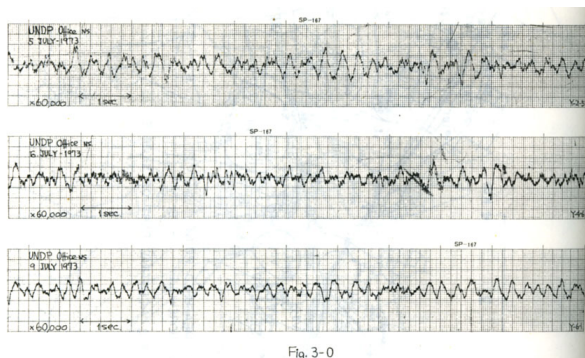


Fig. 3-0
熱ペンシロで再生された微動記録

微動のフーリエスペクトルとランニングスペクトル

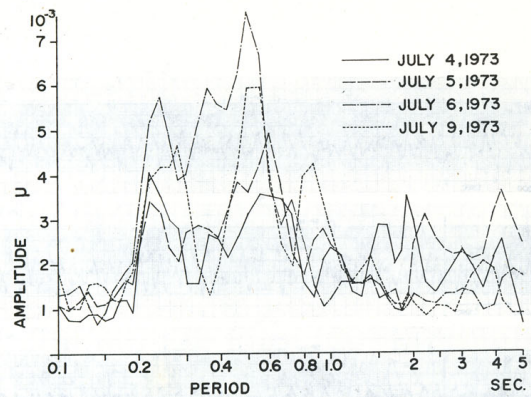


FIG. 4 FOURIER SPECTRUM SITE NO. UNDP OFFICE

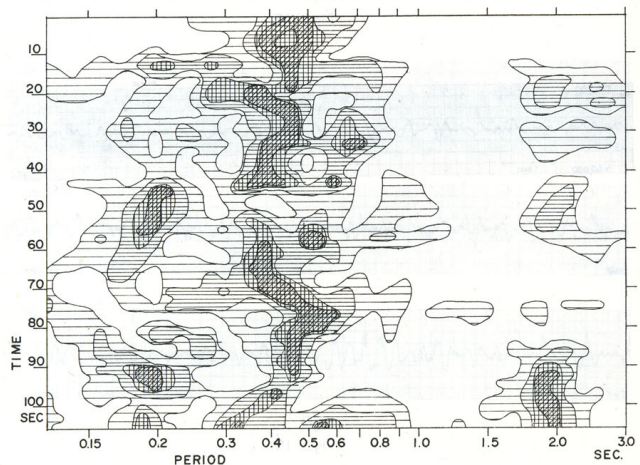


FIG. 5 RUNNING FOURIER SPECTRUM SITE NO. SK 83 NS

1970年代後半に入ると、研究室のテーマとして本格的な微動研究が始まり、微動の長時間連続観測による常時微動と脈動との識別についての研究(光用薫氏の修士論文 1978)や、長周期微動(脈動)の工学的利用についての研究(小林喜久二氏の博士論文 1981)が行われ、長周期微動と気象条件との間に強い相関が見られることや、長周期微動の上下成分と水平成分とのスペクトル比(V/H)を利用して深部地下構造の評価が可能なこと等の知見がその当時すでに得られている。

前述のように、金井微動の存在はヨーロッパの研究者にはすでに知られていたが、さらなる発展は1985年メキシコ地震直後の微動調査によるところが大きい。この時はご一緒させて頂いたのでよく覚えているが、メキシコ市街地では本当に面白いように微動の特性が場所によって変化し、強震観測点では(メキシコ地震の強震記録はすでに公開されていた)強震動と微動のスペクトル特性が驚くほどよく一致していた。それにはメキシコ市の軟弱地盤の性質に助けられた面もあったであろうが、微動計の改良点のごとく生かされた結果でもあった。

前にも少し触れさせて頂いたが、その時、小林先生がローゼンブルース教授に自慢されたかったのは実は微動計よりも『常時微動が有用であることを証明できた』ことであった。これについては裏話があって、1969年にチリで第4回世界地震工学会議が開催された時に地盤特性を論じた論文が全て没にされるという大事件があって、没にした張本人が Cal. Tech の面々であったようである。これとよく似た話は金井先生もなされたことがあって、ゲーテンベルグに地盤特性の影響を無視(拒絶)されたことが悔しくて、それで金井先生はカリフォルニアはじめ米国の強震観測点で常時微動を測定されたそうである。このお話を伺ったのは第17回地盤震動シンポジウム(1989)の時であったが、測定結果そのものは地震研究所彙報(Vol. 46, 1968)に発表され、Kanai(1983)にも収録されている。話を元に戻すと、1985年のメキシコ地震は常時微動と地盤特性の重要性を世に知らしめた(大げさに言えば)大事件であったと云え

る。メキシコ地震以降の地震被害調査には必ずと云って良いほど微動測定が調査項目に加えられたこと、地盤震動シンポジウム(1989)で微動研究がテーマとして取り上げられたこと、同じ頃 ESG 共同研究でも微動測定が重視されたこと、第4回サイスミック・ゾネーション国際会議(1991)で初めて微動研究だけのセッションが設けられたこと、などは上記のメキシコ地震に端を発した一連の出来事ではなかったかと考えられる。



← メキシコ地震による建物被害と建物用の振動測定装置 ↑

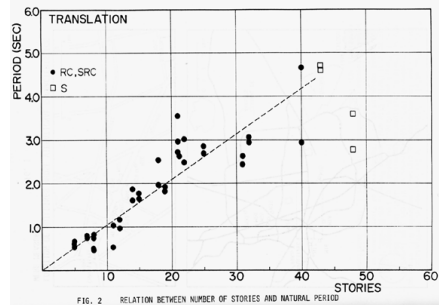


FIG. 2 RELATION BETWEEN NUMBER OF STORIES AND NATURAL PERIOD

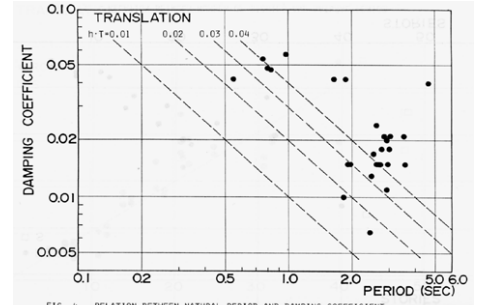


FIG. 4 RELATION BETWEEN NATURAL PERIOD AND DAMPING COEFFICIENT

メキシコ市における建物の固有振動周期と層数との関係

建物の固有周期と減衰定数との関係

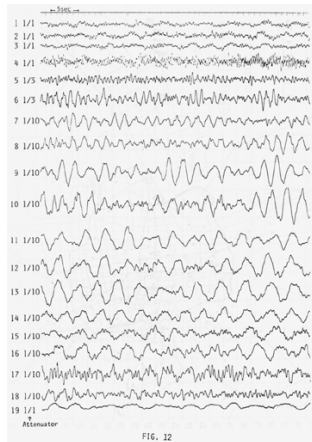


FIG. 12

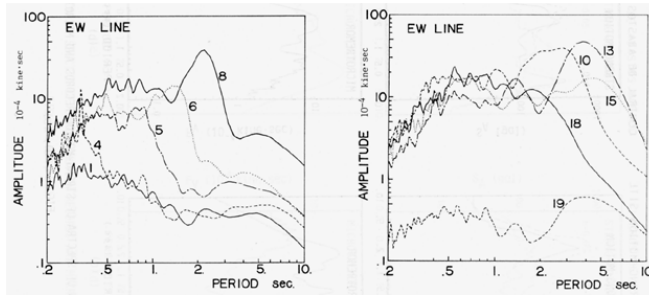
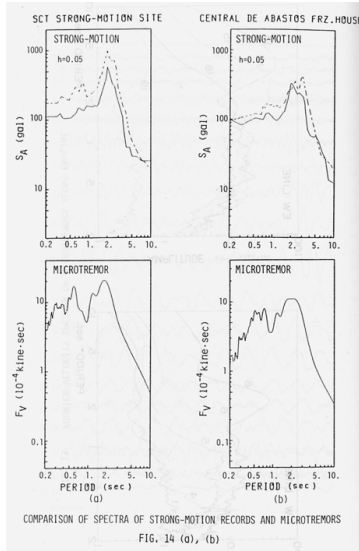


FIG. 13 FOURIER VELOCITY SPECTRA OF MICROTREMORS ALONG EW-LINE

メキシコ盆地の東西測線で測定された微動記録とそのフーリエスペクトル



強震記録と微動の特性比較

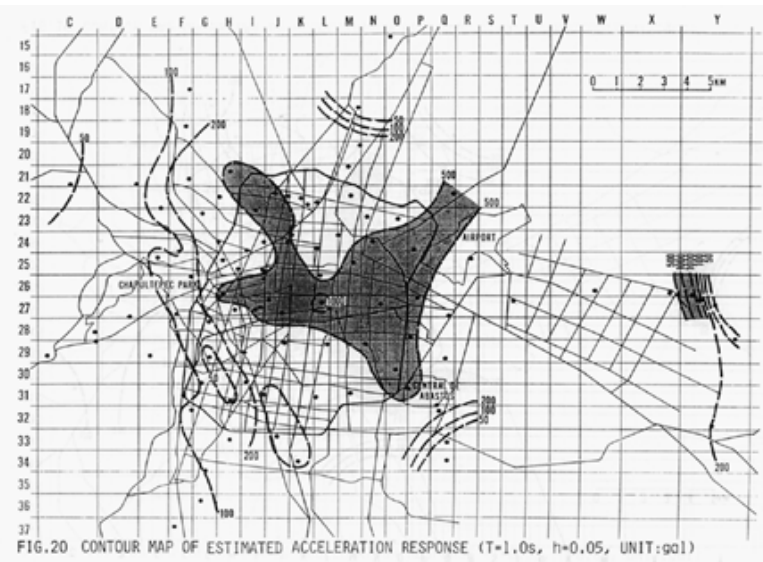


FIG.20 CONTOUR MAP OF ESTIMATED ACCELERATION RESPONSE (T=1.0s, h=0.05, UNIT:gal)
微動のスペクトル比によるマイクロゾーニング(本震時の応答量の推定)

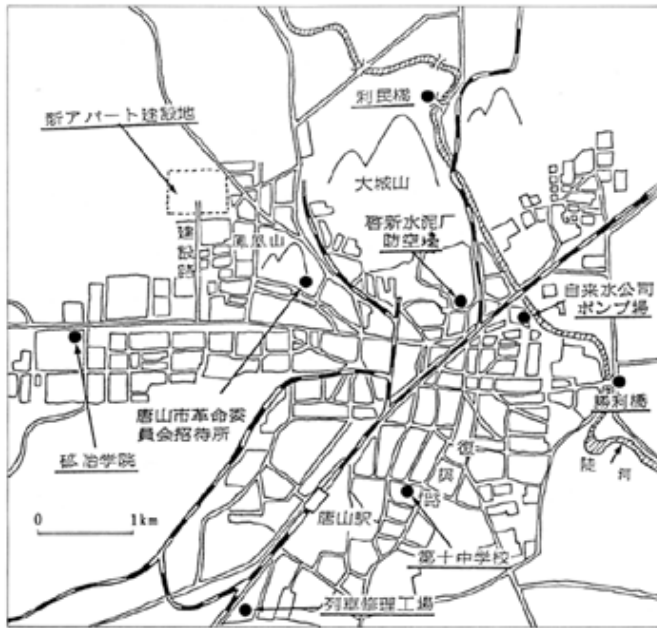
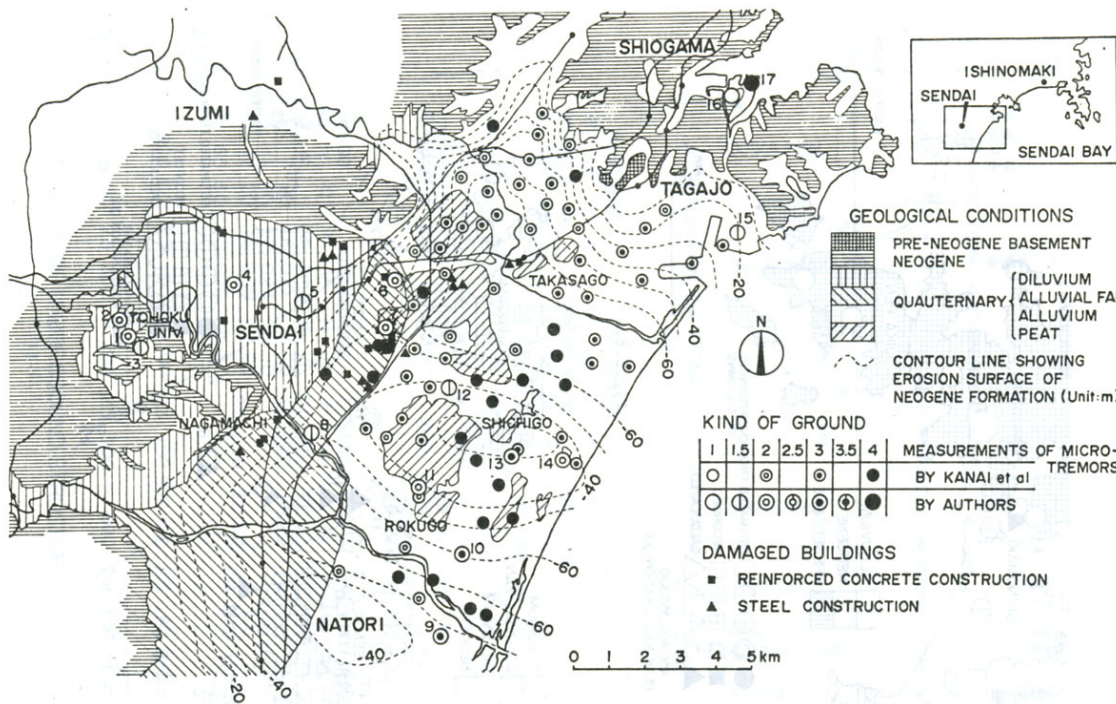
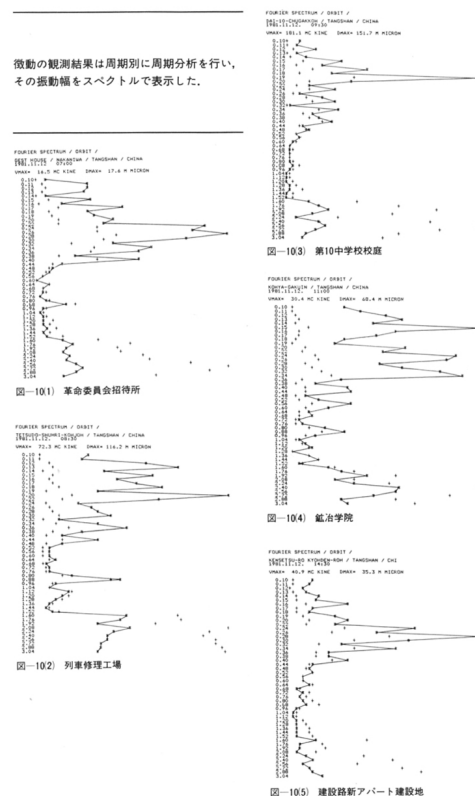


図-9 唐山市市街地図(片山博通による)

中国唐山地震後の常時微動測定地点(上)とそのフーリエスペクトル(右)スペクトル図は小林先生のミニコンによるラインプリンター出力を利用されている。



1978年宮城県沖地震直後の仙台では、金井先生のグループによる以前の微動測定結果との比較が行われている。

また以前から先生は「建物の減衰性は地盤条件に依存する」との考えをお持ちで、そのことを建物上での微動測定から説明されようとしておられた。以前は起振器による加振実験でしか確認できなかった建物の固有周期や減衰定数を、先生は微動測定結果のみから推定する調査方法を試みられ、そこから数々の重要な知見が得られている。建物のスウェイ振動とねじれ振動とが分離できること、高次振動においても固有振動周期と減衰定数の積が一定になること、そして、建物の減衰性は地盤条件に依存し、地盤が軟弱なほど建物の見かけ上の減衰定数は大きくなること、等々である。国内ではこのような測定は随分以前から手掛けておられたが、1980年代に入ると、建物の振動測定のために専用の測定器も研究室で製作され、現場で直ちに解析結果がプリント出力されるまでになった(丹沢広行氏の修士論文 1985)。その後、海外の調査ではメキシコ地震の時と次に述べるスピタク地震、スペインとの共同研究において顕著な成果が得られている。

その後、東京工業大学をご退官になってからも、小林先生は多くの地震災害調査に赴かれている。その中でも印象深いのは 1988 年に発生したアルメニアのスピタク地震であるが、その時先生は例の黒トランクを担いで、政府調査団の一員としてモスクワ経由で被災地に入られた。スピタク・キロバカン・レニナカンといった被災地である。その調査結果について先生は「当地ではサイスミック・マイクロゾーニングと云う概念が欠如していたために建物の被害を大きくしている」とご報告になっている。また日本工業大学にいらした期間には、キャンパス周辺の埼玉宮代地区で常時微動の高密度観測を実施されており、土地利用形態への警告や防災都市計画への提言(すなわちマイクロゾーニング)を行う上で微動測定が有用であること、そのためには 250m~300m 間隔くらいの高密度で調査する必要があることを実例付きで強調されている。

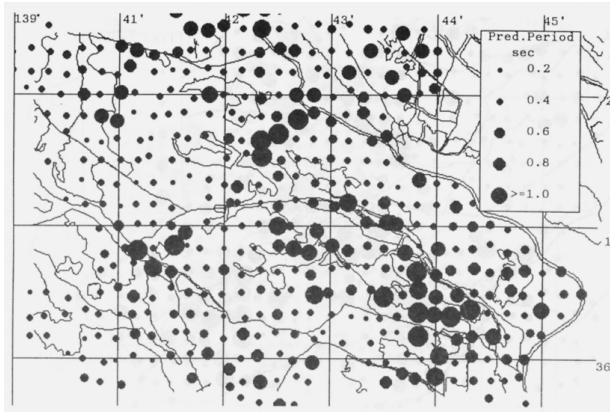


Fig. 6 Predominant Period

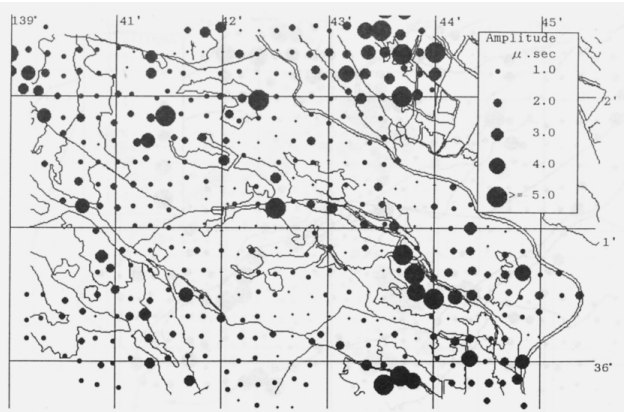
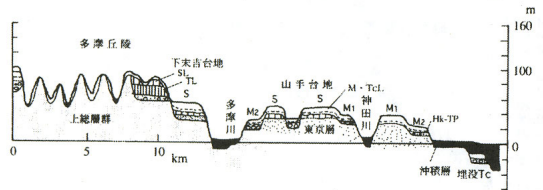


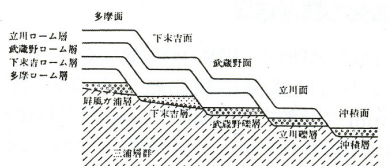
Fig. 7 Fourier Amplitude of Predominant Period

埼玉宮代地区における常時微動の高密度観測。左図は卓越周期の分布で、右図は卓越周期におけるフーリエ振幅値の分布を示している。下敷きの地形図は明治 16 年(1883 年)のものを意図的に使用しており、当時沼地であった所で卓越周期は長く、振幅は大きくなっていることから、今後の土地利用のあり方に対する警告を意味している。

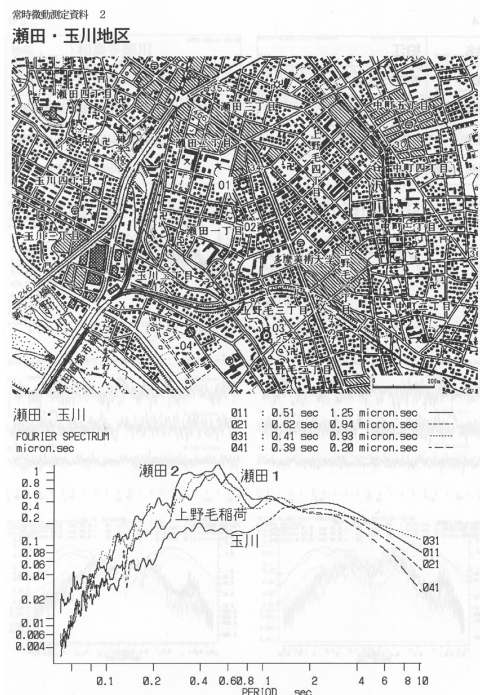
さらに晩年には、首都圏南西部の地域(川崎市高津区から世田谷区を経由して港区青山まで)において丹念な微動測定を実施しておられる。その頃は随分お身体にも差し障りがおありだったに違いないが、先生には常時微動に関してどうしても確認しておきたい課題が残されていた。通常は、丘陵上部よりも川筋の谷あいの方が地盤が悪いと考えられているが(例えば東京都の防災計画)、それは逆ではないかと云う大変大きな疑問であった。そのことを証明するために、先生はある時はタクシーで、またある時はご子息の車で、少しずつ測定を続けていらしたようである。その結果判明したことは、武蔵野丘陵が関東ローム層で形成されているために地盤による増幅効果が大きく、むしろ河川によって侵食された谷底の方が揺れにくいと云う、極めて合理的な結論であった。しかし、多摩川のような大きな河川になると形成される堆積物も複雑であるため一般化することは容易なことではなく、小林先生が最後に託された重要な課題として、我々は真摯に受け止めなければならないと考えている次第である。



第 1 図 a 多摩川を横切る地質断面の模式図¹⁾



第 1 図 b 多摩川河畔の段丘の生成の模式図(関東ローム研究グループ 1956) 段丘面がふるく高くなるにつれてローム層の数が累加していく



4. 今後に期待される微動研究

小林先生は、すでに記したように、金井微動の正統な継承者の立場に徹しておられたと考えられる。例えば文末に掲げさせて頂いた先生の『金井清の“On Microtremors VIII”について』は、金井微動を最も良く理解されていた先生ならではの一文であり、これまでご紹介の機会を逸していたものである。ここで先生は、金井先生がご自身の文献で記述されていなかった金井微動の詳細な定義を解説してくださっているので、掲載させて頂く次第である。同時に小林先生は、金井先生が当時アナログで試みられた常時微動による地盤種別分類のアルゴリズムを、そっくりデジタル計算機で処理するためのプログラムをお作りになっている。逆に云うと、そのプログラム作成の必要上、地盤種別を評価するための詳細を金井先生に確認されたのではないかと推察される。

最近でも、常時微動が実体波なのか表面波なのか様々な議論があって、その実態は判ったようで実は判然としないところがある。小林先生にお伺いしたことはないが、もし先生にその疑問についてお尋ねしたとしたら、恐らくそのお答えは「常時微動は常時微動であって実体波でも表面波でもない」と言うものではなかったかと想像しているが、いつぞや「常時微動の性質は実体波でも説明できる」と言うようなことを伺ったこともあり、その時は『でも』に随分と力を入れておられたように記憶している。

以上に記させて頂いたような小林先生の常時微動に関するご研究のもとで、筆者が微動特性についてどれほど理解できたかについては甚だ疑問があるが、以下に整理しておきたい。これに対して異なる考えも勿論存在する訳であるが、先生の背中から知り得た筆者の微動感としてご理解いただければ幸いである。最初の表1は、物理探査学会でハンドブックを編集した折りに、微動に関する基礎事項を整理するために作成したもので、微動(常時微動と脈動を含めて)が工学的目的のためにどのように利用されようとしているのかが判り易くなるのではないかと試みた次第である。

表1 地震工学的側面から見た微動研究についての分類の一例、物理探査ハンドブック 1998 より

測定法	評価量	常時微動 (周期1~2秒以下)	脈動 (周期数秒以上)
単点	スペクトル	地盤の卓越周期・地盤種別 (Kanai and Tanaka, 1961)	-----
単点	水平と上下のスペクトル比	擬似伝達スペクトル (中村・上野, 1986)	-----
基準点+単点	スペクトル比	相対的地盤特性に基づく地震動予測 (Kobayashi et al., 1986)	-----
基準点+多点	スペクトル比	上記の改良版 (神野・ほか, 1997)	大規模の堆積平野・盆地の地盤増幅特性 (Kagami et al., 1982)
微動アレー	位相速度	地下深部までの速度構造の推定 (岡田・ほか, 1990, Horike, 1985)	
建物上	スペクトル	建物の固有周期・減衰定数 (小林・ほか, 1987)	-----

(1) 微動の基本的性質について

- 微動は常時微動と脈動とに識別される。ただし、用途によっては、微動アレー観測のように、両者の識別を意識する必要のない利用法もある。
- 常時微動の主成分は地表で励起されるあらゆる振動源(主に自動車の走行による)から放出されるレリー波の合成されたものであるが、表層と基盤とのコントラストが明瞭な場合には、その卓越周期はSH波の伝達関数のそれとほぼ一致する。
- 上記のb)が許されるならば、常時微動の周期特性と地震動のそれとの間には良い対応関係が認められるはずである。ただし、微動にしても地震動にしても振動源の特性(あるいは震源特性)や途中の伝播経路の影響はできるだけ除去し、地盤特性のみを比較することが望ましい。
- 地震動のサイト特性を論じる場合、震源特性や伝播特性を除去するために、基準点に対するスペクトル比が用いられる。この場合、基準点を硬質地盤または基盤に置くことが多いのは、入射波の特性が共通であることを前提としている。
- 常時微動と定義される微動には、振動源や伝播経路の特性は白色と仮定でき、サイト特性が優勢に現れることが期待されている。直近の振動源や深夜の静寂な状態でのごく少数の交通車両による微動はこの条件を満たさない恐れがある。
- 2地点間における微動の水平動相互のスペクトル比(H/H)は、測定点間の相対的なサイト特性を示すものと考えられる。この場合、2地点間の許容範囲を一律に定義するのは難しいが、周囲の振動源と地盤条件を共有できる範囲が一つの目安となり得る。異種地盤間(例えば堆積地盤と露頭基盤)

のスペクトル比には特に注意が必要である。

- g) 微動の水平動と上下動のスペクトル比 (H/V) の有用性については、多くの研究者・技術者によって期待されているだけに慎重に議論する必要がある。
- g-1) 微動の主成分が、脈動のようにある特定の方向から伝播するレーリー波であると仮定できる場合には、H/V スペクトル比はレーリー波の特性そのものであり、その卓越周期は基盤のコントラストが明瞭であれば SH 波の重複反射による卓越周期とほぼ一致する。微動にはラブ波が混在しているとの報告もあるが主成分はやはりレーリー波であるらしい。
- g-2) 実際の微動は、無数の振動源から発生し伝播するレーリー波の集合体を考えることになるので、個々の振動源からの寄与による H/V スペクトル比の重合結果を見ていることになる。この重合結果としての H/V スペクトル比は昼夜を問わず安定していることが多い。
- g-3) 時として上下動成分のスペクトルに深い谷間が見られることがある。この時、H/V スペクトル比には偽のピークが現れ、卓越周期と誤る恐れがある。
- g-4) 中村の方法では、①基盤上の微動の水平動成分と上下動成分には違いが認められないこと、②上下動成分には表層地盤による増幅が無視できること、の2点から、地表における微動の H/V スペクトル比は微動水平動成分の地表と基盤のスペクトル比、すなわち表層地盤の伝達関数を近似的に与えているものと考えられている。この場合には、卓越周期だけでなくスペクトル比にも意味があることになる。

(2) 微動の適用限界について

- h) 微動の適用限界を明らかにすると云うことは、結局、前述のそれぞれの項目が成立するか否かを、具体的な地盤条件に当てはめることに他ならない。

(3) 微動の基本的性質と H/V スペクトル比について

H/V スペクトル比の意味？— 総合的に NO (Rayleigh 波の議論は YES, 増幅率は NO)

岩盤地点での微動は？ — $H_b/V_b \cong 1$ は成立するか？ — YES ← 脈動 (Rayleigh 波)

H_s/H_b は増幅特性？ — YES, 多分 $G(T)/(white\ noise) + 脈動消去$

— 表層地盤と基盤とのコントラストにも依存

微動の上下動成分は表層地盤で増幅されない？ — NO, 卓越周期は異なるが増幅される

V_s は H_b の代用品？ — NO

H/V は増幅特性？ — NO

常時微動 vs. 脈動 ——— 人間活動 vs. 気象条件, やや長周期微動は？ — メキシコのみ常時微動

軟弱地盤 vs. 岩盤 ——— 基準点をどのような地点に設定すべきか？

岩盤は基準点となり得るか？ — 地震動: YES, 脈動: YES, 常時微動: NO

微動の本質は地域によらず共通か？ ——— NO

微動の測定法・解析法は地域によらず共通で良いか？ ——— NO

微動は工学的目的のために有用か？ ——— YES

参考資料

金井 清: 地震工学; 共立出版, 1969

Kobayashi, H. (UNESCO Consultant): The Survey of the Seismicity of Balkan Region; Preliminary Report of Consultant on UNDP/UNESCO Project, Mar. 8 – Aug. 16, 1973

小林啓美: 唐山地震 1976 建物被害に関連ある地震動について; 日中建築友好協会誌, 1982

Kanai, K.: Engineering Seismology, University of Tokyo Press, 1983

小林啓美: サイスマックマイクロゾーネーションの立場から; メキシコ地震を探る—日本の事例と比較して—, 日本建築学会第 14 回地盤震動シンポジウム, 1986. 7

小林啓美先生退官記念文集; 小林啓美先生退官記念会発行, 1986. 10

金井 清: 特別講演: 微動の工学的利用について—その現状と可能性—, 日本建築学会第 17 回地盤震動シンポジウム, 1989. 7 [お話の内容は武村によって翌年の資料集に収録されている]

小林啓美: アルメニアスピタク地震の地震動の強さについて; アルメニアスピタク地震による建築物の被害に関する報告会, 日本建築センター・日本建築学会主催, 1989

小林啓美: 常時微動の高密度移動観測—埼玉県宮代地区—; 第 53 回工学地震学・地震工学談話会, 東京工業大学, 1995. 2

アルメニア・スピタク地震の被害に学ぶ; 日本建築センター出版部, 1990

物理探査ハンドブック; 手法編 第 4 章 微動・振動, 物理探査学会, 1998

小林啓美・瀬尾和大・衣笠善博: 多摩川河畔の段丘で観測される常時微動; 東京工業大学地震工学研究レポート, No. 83, 2002. 9

小林啓美: 私の工学地震学; 2003. 12

金井清の“On Microtremors VIII”について

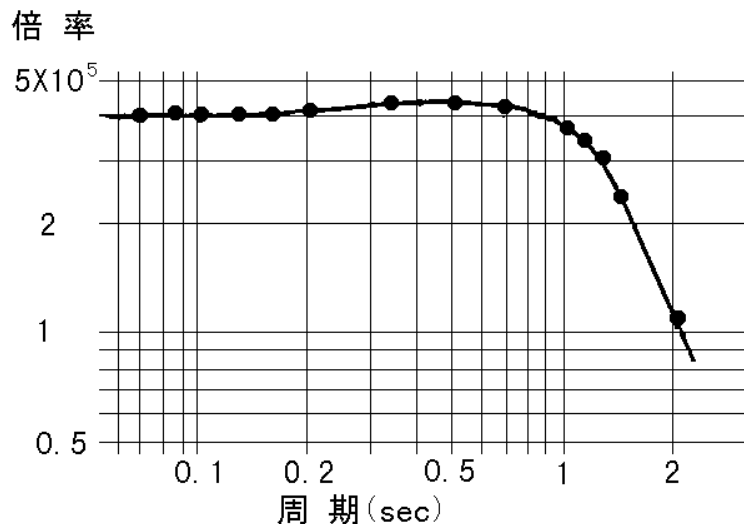
小林 啓 美

東京工業大学名誉教授 工学博士

東京大学地震研究所彙報に常時微動について金井清先生の一連の論文がある。これらの論文は常時微動研究について集大成されたもので、特に“On Microtremors. VIII” (1961 K. Kanai, T. Tanaka) は全体について纏めて記されている。その後「地震工学」(1969 共立出版) 5.2 地盤振動の観測 F. 常時微動 pp. 99-107 に略同じ趣旨のものが記載されている。ただ、用語の定義等について難解なものもあるので、誤解のないようにするため、あえて本稿で紹介し説明する。説明は筆者が、著者あるいは共著者の田中貞二氏より口頭で教示されたことである。またこの論文およびこの測定法に関連して出された Data の自動処理の論文(1962 T. Tanaka)は一般に電子計算機が使用される以前の時期であることを申し添えておく。

1. 使用する地震計の特性について

使用する地震計については、一般に製造販売されている高倍率微動計と比較して第1図(金井清, 1969)に示すように周期 0.7sec より長い領域、特に 1.2-1.3 sec より長い周期領域で急激に増幅率の低下する特性を持たしたものが使用されている。これは電子計算機およびA/D変換機がまだ自由に安易に使えなかった時代に大量の観測記録を処理するために、0-Crossing 法を用いて解析する目的で、周期 2-3 sec 以上の脈動の混入をできるだけ排除して、周期頻度曲線を作成して、地震観測から決めていた各地点の地盤の卓越周期を常時微動の観測のみで求めようとするもので、特に試作改良された高感度地震計である。なおここでいう倍率とは微動計の出力を記録紙上でみた総合倍率で実際の動きに対する記録の倍率をいう。



第1図 常時微動計の周期特性

2. 用語の定義について

用語の定義は以下による。

周期 (Period)

0-crossing で決められた常時微動の地動の半周期の2倍の周期

周期頻度 (Period Distribution Curve)

周期帯を等比間隔で区切ったとき 0-Crossing で求めた周期の出現する頻度(頻度分布曲線)。

卓越周期 (Predominant Period)

周期頻度が最大となる周期。もともこの卓越周期をもって、地震観測特に短周期地震計(加速度地震計)で得られた地震動の卓越周期が表現出来ることを目的として研究が始められたものである。

最大振幅 (Largest Amplitude)

卓越周期の波だけについての振幅が最大値を示した場合の振幅。周期が卓越周期でない場合はその振幅がいかにも大きくとも、最大振幅には関与しない。

最大周期 (Largest Period)

周期頻度で最大の周期、実際に観測して決める時には2番目に大きい周期(周期区分で複数個観測される周期)をとる。地震計の増幅特性に注意が必要である。

平均周期 (Mean Period)

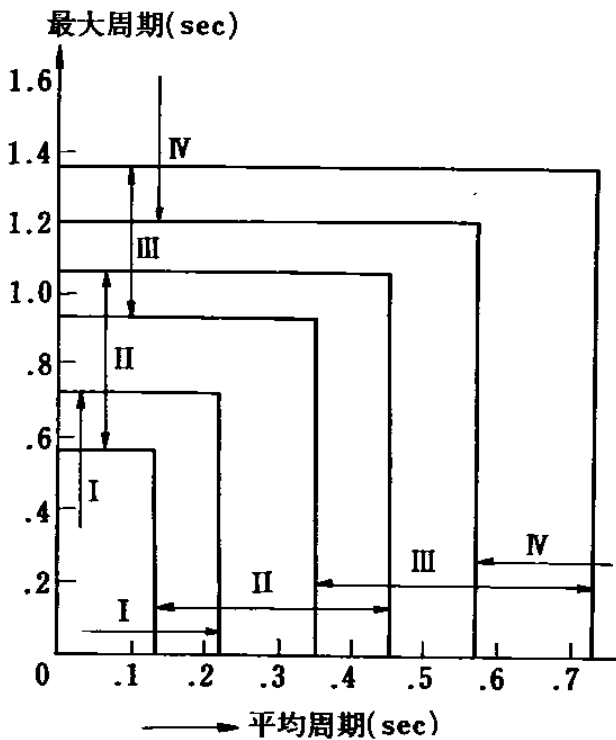
測定全区間の平均周期

地盤種別 (Kind of Ground)

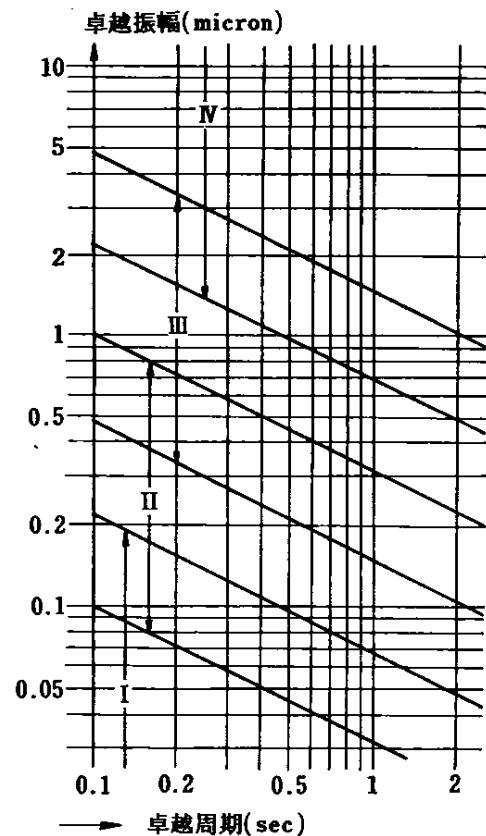
建築基準法で定められた地盤種別で当時は第1種から第4種までに区分されていた。後に第2種と第3種を纏めて第2種、第4種を第3種にしている。

3. 常時微動観測結果による地盤種別判定

金井は多くの観測例から一般には地盤の卓越周期は平均周期と一致するが幾つかの例外のあることを指摘して、最終的に、地盤種別の判定にA案、B案の2案(夫々第2図、第3図に示す。)を提示して次のように説明している。(1961 K.Kanai, T.Tanaka) (1969 金井 清)



第2図 常時微動による地盤種別判定のA案



第3図 常時微動による地盤種別判定のB案

「常時微動による地盤種別の判定方法としては、作業能率のよいA案でまず行い、疑問のあるものについては、B案で調整するのが、もっとも安易であるが、多少、手数はかかっても、すべての観測点についてA案、B案をつくり、両者による判定がちがうものについては、他の調査資料を参考にしながら、総合的に判定をくだすことが望ましい。」

文献

Kiyoshi KANAI, Teiji TANAKA; "On Microtremors. VIII", Bull. Earthq. Research Inst., Tokyo Univ., Vol. 39, pp.97-114, 1961

Teiji TANAKA, "Period Distribution Analyzer for Irregular Motions", Bull. Earthq. Research Inst., Tokyo Univ., Vol. 40, pp.861-871, 1962

金井 清; "地震工学", 共立出版(株)大学講座土木工学 18, pp.99-107, 昭和 44 年 5 月 (初版)

Kiyoshi KANAI; "Engineering Seismology", University of Tokyo Press, pp.128-139, 1983 (地震工学の英訳版)



小林啓美先生と金井清先生

小林先生によれば、金井先生とのご縁は 1948 年福井地震の調査でお世話になってからで、その後小林先生は地震研究所に足しげく通われるようになり、金井先生のみならず、6 部の先生方との交流も始められたようです。

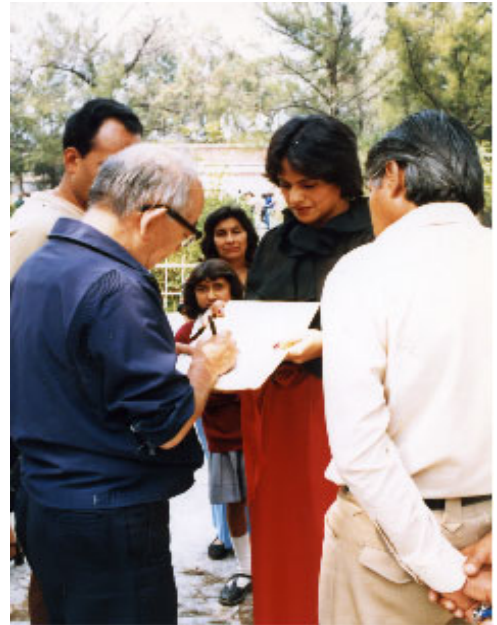
このような経緯もあって、小林先生は金井微動のよき理解者でもありました。金井微動の普及成果はメキシコにおいて最も顕著に現れるところとなりました。



1985 年メキシコ地震の直後にメキシコ国立自治大学の工学研究所にて (後列左から、小林先生、ローゼンブルース教授、プリンス教授、ロムニッツ教授、瀬尾、前列左から、マリオ・オルダス、サンチェス・セスマ、翠川の各氏)



メキシコ地震直後のメキシコ市での微動測定



測定中にサインを求められる



メキシコ市のスラム街では気さくに子供たちの相手をされる (いずれも 1985. 10)



ロマプリエタ地震後のサンフランシスコでも微動測定



微動計はご自身で設計された特注品



サンフランシスコ湾ダンバートン橋の振動測定
(服部定育先生・鏡味洋史先生と)



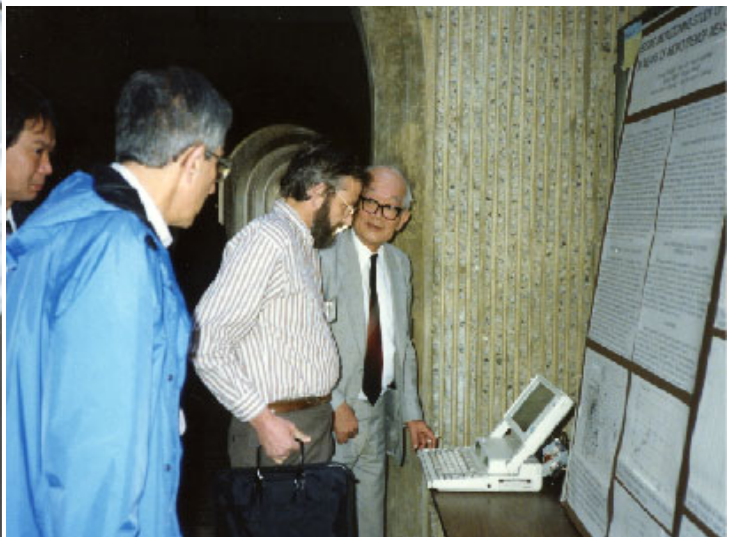
微動測定につい熱が入る



グラナダ(スペイン)で建物の振動測定中



グラナダ大学ではマイクロゾーニングの講演も



第4回サイスミック・ゾネーションミック国際会議(スタンフォード大学)では微動測定の実演付きでメキシコでの微動測定結果をポスター発表される(1991.8)