

# ベトナムでの微動観測

長 郁夫<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

体には感じませんが、地面は常に小さく揺れています。この揺れは常時微動または微動と呼ばれています。微動は交通や工場などの産業活動、風や波浪などの自然現象など、不特定多数の震動源で励起されるラジオの雑音のようなランダム波です。振幅の小さな波ですが、1つ1つの波は震動源から周りに伝搬する弾性波(地震波)です。したがって、微動の伝搬特性を調べれば地盤の物性が分かります。これは微動探査と呼ばれ、地震災害軽減等の分野では低コストの地盤物性評価ツールとして広く利用されています。

私は現在、微動探査を地質調査に役立てることや微動探査法そのものの開発を主な研究テーマとしています。数年前からこの微動探査を介してベトナムの研究者と交流しています。しかし、新型コロナウイルス感染症の世界的流行で昨年からの交流がストップしてしまいました。そこで、この機会にこれまでの交流の顛末をまとめて報告しておきたいと思い立ちました。この報告は、以前、物理探査学会の広報誌にばらばらに寄稿した文章(長, 2020a, b, c)を1つに併せ、写真や文章の細部に修正を加えたものです。

## 2. ハノイの観測演習

### ベトナムからの手紙

ある時、ベトナムから1通のメールが届きました。私が公開している微動解析プログラム(<https://staff.aist.go.jp/ikuo-chou/BIDO/2.0/bidodl.html> 閲覧日: 2021年4月21日)で地盤を評価したい。AVS30(深さ30mまでの平均S波速度)は分かるか、どんな機材が要るかと質問が並びます。いかにも微動探査には詳しくない様子でした。東濃地震科学研究所の大久保慎人氏(現高知大学)からの紹介と書いてありました。

大久保氏に尋ねると、JICAプロジェクトで来日した元研修生でした。名古屋大学での地殻変動/地震活動の研究で学位をとり、帰国して地震ハザードを評価したいとのこと。彼の学位と地震ハザードは直結していませんが、こういう不一致は良くあることです。詳しくもないミッ

ションに苦労しているのかなと妙に親近感が湧きました。しかし、そもそもベトナムにも地震活動があるのでしょうか。

彼は Nguyen Anh Duong という好青年で、ベトナム科学技術アカデミー(Vietnam Academy of Science and Technology, VAST)の地球物理関連研究室のチーフリーダー(当時)です。ベトナム国フエ県フエ市は有名な古都ですが、彼によれば、近くに活断層があり、ダム関連の誘発地震があると言います。曰く、水力発電の安全な運行と文化遺産保護のために浅部地盤を評価しておきたい。自然地震は活発でないため、それを使った地盤の探査は難しい。そこで微動の利用を思いついた。ただし微動アレイは完璧な素人(!)とのことでした。

顔合わせを兼ねて大久保氏とともにハノイで開かれたカンファレンス VIET-GEOPHYS-2017 に参加しました。フィールドトリップは「天空の秘境」と呼ばれるラオカイ、サバでしたが「それに参加する代わりに微動観測はどう?」と提案しました。

実は、「せっかく現地に行くのだから」と急に思い立ち、普段使っている微動計(3成分型加速度計)2台を持参していたのです。彼らのことは良く知りませんが、どうせ観測を通じたお付き合いですから、記録がすべてを物語ってくれるはず。言うなれば、初顔合わせは「観測合コン」で盛り上がりとういう提案でした。大久保氏、Duong氏ともに大賛成してくれました。

### VAST での観測演習

1日目。VAST 敷地内で彼らの機材も持ち寄って微動の同時観測(ハドルテスト)を行いました。これはある意味、洗礼のようなものでした。まず、彼らの主力のサーボ型速度計はなかなか時刻の基準となるGPS信号が受け取れませんでした。1時間、2時間と過ぎ、ようやくGPS信号をキャッチしたかと思うと、今度は、記録したはずのデータが記録されていなかったりするのです。そして、ともかく記録にこぎ着けたと思えば、後で確認すると、GPS信号に同期されていませんでした。しかし彼らには焦燥感もなく、その晩は楽しく乾杯しました。私の場合は持参した微

1) 産総研 地質調査総合センター 地質情報研究部門

キーワード: 微動, ベトナム, S波速度, AVS, 地盤, 物理探査, 表面波, 位相速度, 地震, スペクトル



写真1 VASTの正門付近。夕方、懇親会へ向かう道。このバイクの群れの中を歩いて行く。

動計で良い記録が取れていたのも、とにかく前向きになりました。彼らの観測機材の問題については、今後の付き合いの中で何かしら打開策が見つかるだろうと軽く考えたのでした。

こういう楽観的な気分になれたのは、何やらその場の雰囲気、熱気にほだされていたのかもしれません。近年の急激な経済成長でハノイは人で溢れ、とても活気がありました。現在のベトナムは20-30代が最も多く日本と比べるとだいぶ若いという印象です。コロナに対しても優秀で、執筆時で感染者2500名、死亡者35名と、対応力ランキングではニュージーランドについて世界第2位（日本は45位）、ベトナム国内は以前と同じように活気があるとのこと。日本もあやかりたいですね。

写真1（上）は著者らが訪れた時にVASTの正門を出るところですが、門の外は歩道なのにバイクでいっぱいでした。同写真（下）の右手には、バイクの進行方向が完全に直交しているグループがあるのが分かるでしょうか。私はこの熱気というか無秩序、底しれぬエントロピーに圧倒され、何とかなさ、或いは失敗するのも大いに結構ではないか！という気持ちになっていました。

### 郊外での観測演習

2日目。ハノイ郊外の3地点(HD1, HL7, HL8)で微



写真2 観測風景。手前から大久保氏、Duong氏。

動アレイ観測を実施しました。初ベトナムの初アレイですから始まる前はとてもワクワクしました。しかし現実には、最初の観測現場(HL8)に到着早々、頭を抱えました。そこには狭い農道が1本しかなかったのです(写真2)。これでは微動探査の標準的な三角形アレイが組めません。しばらく悩みましたが、彼らは何が問題なのかわかっていません。相談しても仕方がないので、割り切って、長さ5-30mの直線アレイで乗り切ろうと腹をくくりました。その代わりに、なるべく長時間のデータを取ろうと提案し、1時間半ほど観測しました。

微動観測の魅力(?)の一つは待ち時間がとても長いことです。牛をつれた人やバイク、豚が通過するのを横目で眺めつつ、のんびり過ごしました。昼食は近くのレストランでカエルや鶏脚(モモではない)を食べました(写真3)。効率は悪いけれど、こういうスローライフもけっこうな贅沢です。こうして3地点を回った頃に日が暮れました。天気も良く爽快に日焼けした一日でした。

### 解析結果

次の日、Duong氏に微動アレイ探査概論を講義し、持参した微動計で得られたデータと解析結果を見せました(第1図)。3地点ともきれいな分散曲線が得られています。嬉しいことに、結局全部うまくいったのでした。芝浦工業大学の紺野克之教授(例えば、紺野・片岡, 2000)に従って波長40mに対応するレーリー波位相速度(C40)をAVS30と解釈すると、3地点のAVS30は概ね200-400m/sの範囲となりました。彼らには、「今回の成果は5-10Hzの周波数帯域を利用できる観測機材で5-10mのアレイを組めばAVS30を同定できることが分かったこと



写真3 道すがら遊ぶ豚(上)とカエルの唐揚げ(下)。

です。ただし AVS10 や 20 (深さ 10, 20 m までの平均 S 波速度) も欲しいなら 1-3 m の小さなアレイで 25 Hz 程度までは見る必要があるでしょう。」とアドバイスしました。

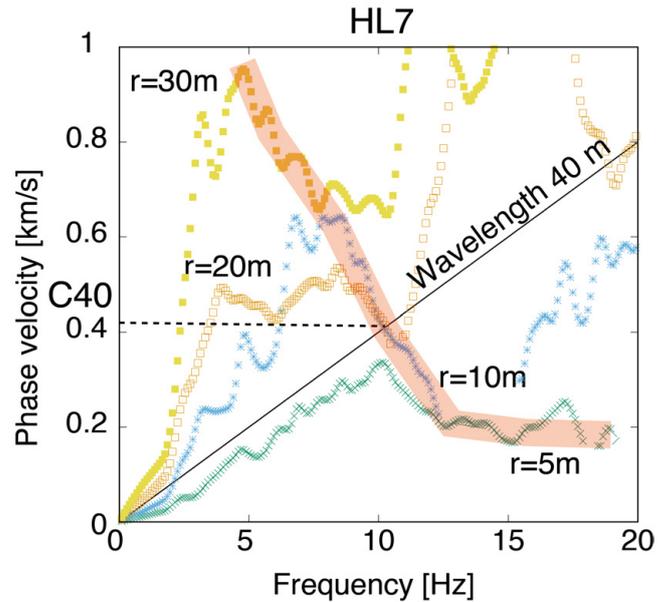
結果として、このプロジェクト、つかみはバッチリでした。しかし、これで一安心と思うのは少し早かったようです。というのも、Duong 氏は大胆にもフエの 140 地点でアレイ観測を実施すると計画して申請を通してしまっていたのです。

さすがに、素人の彼らがやるには、観測点数がちょっと多過ぎる様に思われました。スローライフどころではありません。今後はフエでも同様にうまくいくことを検証するだけでなく、いかにして観測効率を上げるかも考えなければなりません。限られた機材で、彼らだけで、ミスがないように、期限に間に合う工程を練る必要があります。

### 3. フエのパイロット観測

#### 観測機材

素人に限ったことではないかもしれませんが、観測で一



第1図 分散曲線の解析結果 (HL7)。アレイ長によって色を変えている。薄赤は全アレイを合わせた分散曲線を示す。直線は波長 40 m に対応する。この直線と分散曲線の交点の位相速度 (C40) は深さ 30 m までの平均 S 波速度の推定値を与える。

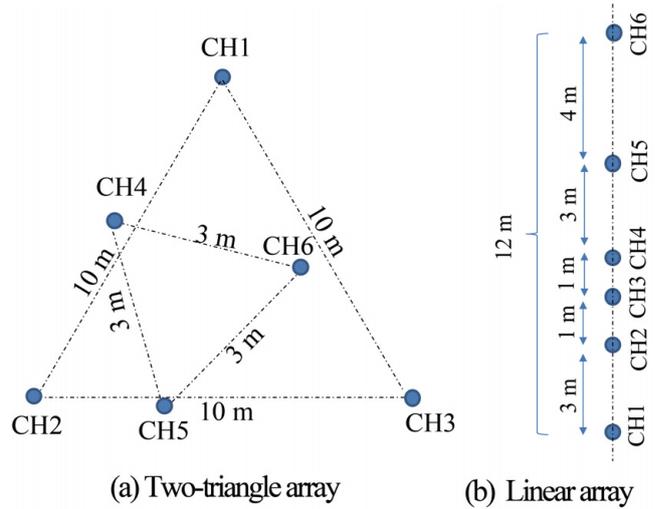
番こわいのは設定ミスやボタンの押し忘れ、コネクタの緩み等のヒューマンエラーです。熟練者は一人一人が「あの時の失敗」みたいなタイ経験を持っていて、それを積み重ねることでいつしか失敗しなくなるのだろうと思います。しかし言い方を変えれば、そういう職人的なワザにもロマンがあるものの、単にワンタッチの機材を使えば素人でも最初から失敗なしにできるように思われます。小さな子でも iPad を使いこなしてしまうのと同じですね。

前回、顔合わせを兼ねた微動観測演習では、Duong 氏は Guralp 製 CMG-6T を使っていました。これはふつう地震観測に用いられる機材です。また、センサーだけでなく、ロガー、バッテリー、GPS アンテナ等の各部品も大きくて重かった上、彼らは観測点を移動する都度これらを野外で結線していました。観測後は再びばらばらにして箱に納めるわけです。しかしこのやり方で長期間の観測を実施するのはたいへん疲れます。特に雨季はミスや湿気による不具合が出るでしょう。

実際、前回の演習後、Duong 氏はこの機材を一カ月に渡って繰り返しテストしたのですが、その都度トラブルに見舞われていたようです。あとで基盤の不具合が原因だと分かりました。しかし驚いたことに彼はそれを修理しようとしませんでした。試行錯誤的に「不具合を起こしにくい手順」を発見したのです。研究費が少ない中で執念には頭が下がりましたが、大量観測では間違いなく失敗するで



写真4 ジオフォン。



第2図 微動アレイ。

しょう。

だからといって、私が常用する微動計を貸し出すわけにもいきません。手で遊んでいる小型データロガーと4.5 Hz ジオフォン(写真4)を利用できないかと考えました。日本では微動アレイにジオフォンを用いることは少ないのですが、AVS10, 20, 30の取得程度ならば耐えられるはずです。前回の演習で利用周波数帯域は5-25 Hz程度と分かっていたからです。

ただ、この場合はジオフォンとデータロガーを結ぶケーブルがむき出しになってしまい、ヒューマンエラーの誘発が懸念されました。そこで「トラブル防止のための決まり」をつくりました。微動観測中はバイク用小型バッテリーを使って一日中記録を取り続け、移動時も含めてデータロガーに触らないこと。一度結線したターミナルは強化ナイロン袋をかぶせて防水し、二度といじらないこと。すべてのケーブル、ターミナルにラベルを貼って組み合わせを変更せず、不具合の際、原因を特定しやすくすること等です。

### アレイ設計

次に、全観測点で通用するアレイのサイズと形状を決める必要がありました。彼らの現場判断でアレイ設計を変えるようなスキルを養う時間もなかったからです。そもそも、観測点ごとに仕様がばらばらだと後の処理や解釈がたいへんで、どこかで設置ミスや解釈の齟齬が生じることでしょう。「データ自体は取れているのになぜか結果がおかしく成果の絵を見せられない」という最悪のケースが懸念されます。そこで、コンビニみたいで味気ないものの、「画一的なやり方」がシンプルで良いだろうと判断しました。

データロガーの制約から、アレイを構成するジオフォンは6個です。また前回の演習によれば、AVS10, 20, 30を得るには数mから10m程度のサイズのアレイが必要と思われました。そこで、ジオフォン3個ずつで辺長3mと辺長10mの三角アレイを作ることになりました(第2図a)。設置が煩雑になるのを避けるため、これらの2つの三角形の相対的な位置にはこだわらないことにしました。

ただし、少しだけ欲が出て、「せっかくだから、たまに6個のジオフォンで長さ12mの直線アレイも組んで三角アレイと比較して見てはどう?」と提案しました(第2図b)。前回の演習で敷地上の制約からたまたま実施した直線アレイが予想以上にうまくいったのが動機です。それ以降、私は直線アレイに凝ってしまい、帰国後もノイズや波動場の偏りの補正を考えたりして実験を続けました。フエの本番でも一部をその実証に使い、このプロジェクトに手法開発の色を添えようと思ったのです。

### 再びベトナムへ

こうして前回の訪越から5ヶ月後の2018年3月、大久保氏と連れ立って再びDuong氏を訪ねました。貸与するかもしれないデータロガーとジオフォンに加え、もちろん今回も愛用の微動計(3成分加速度計)2台を持参しました。3人でフエに向かい、現地で先発隊のスタッフと合流しました。3日かけて7地点のパイロット観測を実施しました。これらの地点では屈折法探査も実施されているので、微動の結果を検証できます。

各地点で、第2図a, bのジオフォンアレイを組みました。また、持参の微動計でも検証用に2点アレイを実施しま



写真5 リニアアレイと2点アレイの観測風景(牛を背にメモをとる Duong 氏).



写真6 鶏脚の料理.

した(写真5)。毎日データと処理結果をチェックして問題を洗い出しました。観測の最中、思いつく限りの諸注意を述べました。「ナンテウルサイ日本人ダ」と思われたに違いありません。しかし、運転免許の合宿みたいなものですから仕方ありません。彼らはまだ「仮免」で、この「合宿」後は「本免」保持者として彼らだけで140地点のアレイ観測を成功させなければならないのです。

ハノイでの演習に続き、このパイロット観測でも良い感じの結果が得られました。微動アレイは既存探査と整合的でしたし、ジオフォンと持参の微動計が同等の結果を出せることも確認できました。みんなハッピーで「合宿」終了。鶏脚や美味しい料理にありつきました(写真6)。

彼らの速度計(CMG-6T)も全地点で比較したのですが、それらはやはり頻繁にトラブルを起こしました。実際、大きなノイズや欠測等が頻発し、あまり使えるデータにはなりません。迷うことなく持参のジオフォンを貸与することにしました。

あとは、雨季(5-10月)に入る前にフエの観測を終了できれば、プロジェクトの期限に間に合いそうです。安堵して最終日はフエ観光を満喫しました。ところ変わればベトナムの定番料理フォーの味も変わるので(写真7)、いろいろな場所で食べてみました。もちろんプロジェクトの目的である王宮等の遺跡は特に念入りに歩き回りました(写真8)。

#### 4. フエの本観測

##### 古都フエとは

ベトナムは日本のように南北に細長い国で、北部、南部



写真7 ベトナムの定番フォー.



写真8 王宮にて.



写真9 王宮付近(上)とナイトスポット付近(下)。

の中心地はそれぞれハノイ、ホーチミンとなります。フエはちょうどその中間に位置する、ベトナム最後の王朝がおかれた都市です。フエ市を南北に2分するフォン川を挟み北半分が旧市街(古都)、南半分が新市街(生活圏)となっています。旧市街には世界遺産にも登録される王宮があり、国内外から多くの観光客が訪れます。一方、新市街は夜には歩行者天国になるナイトスポットもあり華やかです(写真9)。

Duong氏は、「フエ市周辺では北方のダムに関連する誘発地震があり活断層もある」と言います。詳しい検討は私の範囲外なので深入りできませんが、とにかくこうして、この観光地の安全確保と文化遺産保護のために、無事本番、微動アレイで140点観測を実施するぞと言う所までこぎつけたのでした。

### 本観測敢行

しかし、国の中心的な研究機関(VAST)でチーフリーダー(当時)を務めるDuong氏にとって微動観測のためにまとまった時間を取るのなかなか難しいようでした。尋ねると「ベトナムでは全ての予定は未定」と笑います。そのうち4月、5月が過ぎ、雨季に突入してしまいました。7月末、体調不良も重なってそんなことをすっかり忘れていた頃、Duong氏から連絡がありました。「今、フエで微動観測中。地震観測が忙しくてフエが後回しになった。それにしても今年は雨が多い。」そして8月後半に「微動観測完了」の吉報が入りました。

結局、Duong氏の研究チームは、2018年の6-8月に

かけて雨天を避けつつ間欠的に微動観測を実施したようです。実質的にのべ19日の観測でフエ市とその周辺を含む約11 km × 13 kmの89地点で辺長3 mおよび10 mの三角アレイ、37地点で長さ12 mの直線アレイを実施しました。センサーは4.5 Hz ジオフォンです。各地点で30分間観測しました。

アレイ形状や観測時間等の仕様はこちらが提案したガイドラインを完全に踏襲してくれたようでした。彼らは観測手順やケーブル結線部の扱い等の本当に細部まで完全にフォローしてくれて、その結果(と信じたい)、彼らだけで、限られた機材で、彼らの職場のあるハノイから500 kmも離れたフエで、合計126地点ものアレイ観測を完了したのです。感無量でした。

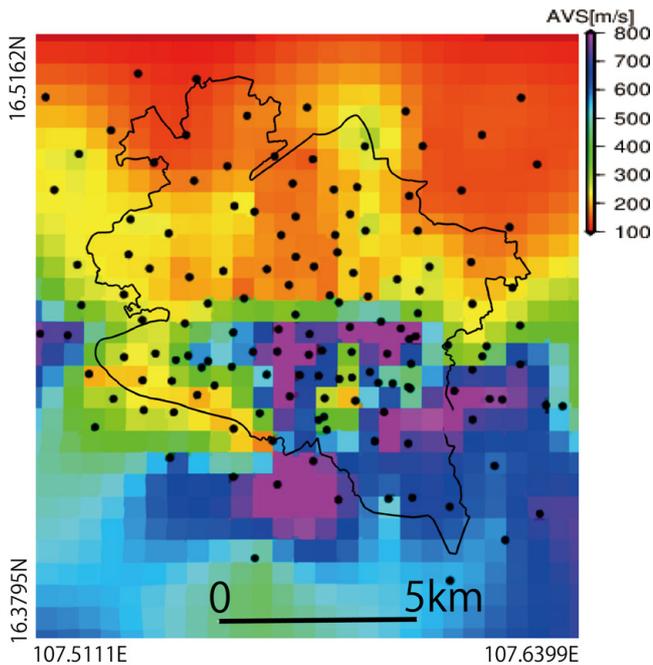
ただし、失敗もありました。日本から貸与したジオフォン以外にもDuong氏は地元の研究機関と機材をバスターして別途ジオフォンを手に入れ、それを使って全観測点で直線アレイも実施してくれていたのです。これは、私が技術開発的な色気で「たまに直線アレイも組んだらどうか」と提案したのに対し、忖度して全観測点で応えてくれたのでした。良いか悪いかは別として、忖度は日本の専売特許ではないのだなとしみじみ感じた瞬間でした。

なのに、このデータが全滅だったのです。問題はジオフォンのコネクタの緩みでした。実際、このバスター・ジオフォンは私もノーチェックでした。そこに絵に書いたようなヒューマンエラーが発生したという。この部分についてのコミュニケーション不足が心底悔やまれました。

ともかく、適切に得られたデータからレーリー波位相速度を同定し、各地点の結果から波長13 m、25 m、40 mに対応する位相速度を読み取りました。それぞれ深さ10 m、20 m、30 mまでの平均S波速度と解釈してマッピングすると、北半分は軟弱、南半分は硬質な地盤という明瞭な差が現れました。既存の地質分布とも調和的なようです。フエ王宮がある旧市街に特に軟弱な地盤が分布すること、新市街も北東部は軟弱なので注意が必要なことが定量的に示されたのです。この結果は、フエ市の安全のため、今後有効に活用されることでしょう。

### 追加観測の実施

その年の暮れ、再びDuong氏から連絡が入りました。年が明けたら追加観測を実施するとのこと。フエ市の境界付近が外挿となっているため「フエ市の境界線の外側でもアレイをやる」と言います。バイタリティに感服して「がんばりますね」と返しました。しかし、「単点観測(H/Vスペクトル)もやる」とも言います。確かにそれには多く



第3図 AVS30の分布。黒線はフエ市境界、黒丸は微動アレイ観測点を表す。



写真10 議論するNam(元)教授(左)とDuong氏(右)。観測後、フエのレストランにて。

の効果が期待できますが、「まずはこの結果で満足してはどう?」と言うと、「計画申請書に500地点でH/Vスペクトルをやると書いてしまったから」とのこと。なんと!初めて聞きました。それじゃ仕方ありませんが、そんなにやれるでしょうか。バーター・ジオフォンのイタイ記憶が蘇りました。同年はプロジェクトの最終年度でしたので、失敗は許されません。

心配になって大急ぎで私もフエに同行しました。機材検証と現場確認等に付き添いました。詳細は省略しますが、結局、アレイデータは165地点分に達し、Duong氏が必

要としたフエ市境界付近のマッピングが完成しました(第3図)。また、H/Vスペクトルのピーク周波数も地質分布やAVSと調和的でした。

この成果は、ベトナムではまだ数少ない「微動アレイに基づく」地盤のモデル化の例であり、これほど大規模な例は初めてでした。観測後につけてくれた地元フエ大学Nam(元)教授(地質学者。当時はフエ省科学技術局局長)も「これまでフエには物性値データがなかった。0が1になったのだ!」と感嘆してくれました(写真10)。ですから、「あとは論文化だね」と現在は副所長になって更に多忙を極めるDuong氏の背中を押しているところです。

## 5. おわりに

実を言うと、私はベトナムでの研究を通じて「素人でもできる微動アレイ・ガイドライン」作りの出発点にしようという密かな目標を持っていました。誇大妄想的ですが「素人でもOK」は「完全自動化」つまり「客観化」と表裏一体ですから、「微動利用の科学」に辿り着くように感じられたからです。実際、終わってみるとちょっと掴みが得られたような、そうでないような、面白いライフワークを得たような楽しい気分になりました。

一方、素人ガイドラインよりも技術者育成が大事という視点も必要です。そのためには指導側と参加側に共通する具体的な目標とコミュニケーション環境、そして向上心や忍耐力(メンタル)が不可欠です。これを肌で感じる事ができてたいへん貴重な経験でした。この場をお借りして共同研究者の大久保慎人氏とDuong氏及びそのスタッフに感謝申し上げます。

## 文 献

- 長 郁夫(2020a) ベトナム微動観測記(その1)。物理探査ニュース, No. 45, 6-7.
- 長 郁夫(2020b) ベトナム微動観測記(その2)。物理探査ニュース, No. 47, 6-7.
- 長 郁夫(2020c) ベトナム微動観測記(その3)。物理探査ニュース, No. 48, 10-11.
- 紺野克昭・片岡俊一(2000) レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案。土木学会論文集, 647/I-51, 415-423.

CHO Ikuo (2021) Microtremor measurements in Vietnam.

(受付: 2021年3月11日)