

# インドネシアでの地震観測

大 滝 壽 樹<sup>1)</sup>

## 1. 事の始まり

今から5年ほど前、筆者のところに「沈み込み帯の深部構造探査をしてみない?」という話が持ち込まれました。海の底のプレートが日本・インドネシアなど島弧の沖合い、海溝と呼ばれるところで地球の中に沈み込んでいっている、という話は御存じでしょう。その沈み込み帯の下で沈み込んだプレートの行く末を調べるための観測をしないか、という話でした。

丸山ら(1993)は、地震波トモグラフィーを用いた3次元地震波速度分布の研究(Fukao *et al.*, 1992)をもとに地球のテクトニクスはマントル深部より上昇する火柱状の熱いブルームと沈みこんでいったん停留したプレートが崩落してできる冷たい塊状のブルームの二つを基本とする全マントルを巻き込んだ対流によって支配されていると考えました。このブルームテクトニクスを基本としてプレートテクトニクスでは果たせなかった全地球ダイナミクス構造を明らかにすることを目指し、科学技術庁振興調整費「全地球ダイナミクス:中心核にいたる地球システムの変動原理の解明に関する国際共同研究」(Ishida *et al.*, 1999)がスタートすることになりました。地質調査所でも海洋地質部を中心に、海底堆積物および火山岩を用いて過去の地球磁場変動を明らかにする研究、放射年代学的手法を用いて南大平洋地域のスーパーブルーム活動の時間空間分布を明らかにする研究、スーパーブルーム活動時の堆積物科学的性質からスーパーブルームによって影響される地球表層環境を明らかにする研究がこの計画の下で行われています。

地震学は現在の地球深部の姿を捉える上で非常に強力な道具です。そのため、この計画の中では

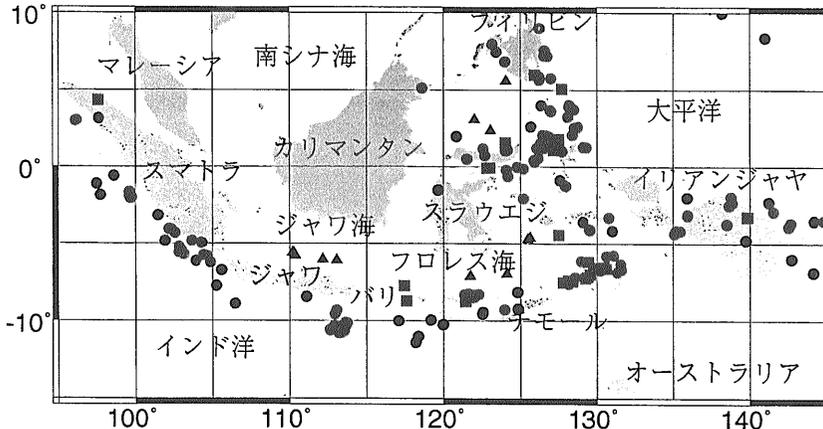
地震学を用いて熱いブルームや冷たいブルームをより詳しく調べるために、南大平洋や沈み込み帯における観測や、中国、インドネシアなどでの既存のデータをデジタル化し収集配布するシステムが企画されました。筆者は地震波による沈み込み帯の深部構造探査をしていたので、このうちの沈み込み帯での一つ、冷たいブルームの一観測を行うことになりました。最初に話が持ち込まれてから4年ほどたった、昨年末にようやく気象庁気象研究所と共同でインドネシアに23点の広帯域地震計からなる観測網が出来上がりました。このような海外における大規模で高密度な広帯域地震観測は日本では初めての試みとなります。本稿は筆者がこの観測網をどのように設計・設置し、データを得ることができたかの記録です。

## 2. 観測網の設計を日本でする

最初に、冷たいブルームを確実にとらえようとするためにはどこでどのような観測をすればいいのかを考えました。研究対象領域は、沈み込んだプレートが上部下部マントル境界にぶつかっている場所およびその周辺としました。つまり沈み込み帯の下、深さ400kmぐらいから深さ1,000kmぐらいまでの領域となります。地球の内部を地震波を使って調べようとした時には、調べたい領域を通ってくる地震波を見つけることが肝心です。沈み込み帯の下のマントルを調べようとした時、その沈み込み帯の地震やより遠方の地震からの波を合わせて使うこととなります。しかし、その沈み込み帯の地震からの波が調べたい領域を通して地表に到達する場所に陸地がないことが多いため、観測に適した場所は意外と少ないのです。またマントルの深いとこ

1) 地質調査所 地殻物理学部地殻構造研究室

キーワード:地震学,地球内部構造,マントル,ブルーム,インドネシア,沈み込み帯



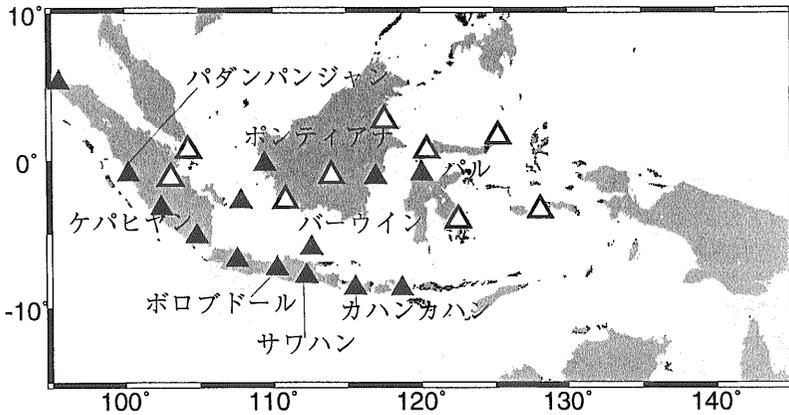
第1図  
インドネシア付近の1992-1994年に起こったマグニチュード5.5以上の地震分布。震源は国際地震センター(ISC)よりとった。100kmより浅いところで起こった地震を●で、深さ100-300kmの地震を■で、300kmより深い地震を▲で示してある。

ろまで地震が起こっていることが望ましいため、観測に適した場所は中国、南米、オーストラリアおよびインドネシアぐらいです。日本も沈み込み帯に位置しますがその真下で起こっている地震はおおよそ深さ400kmくらいまでで、もっと深い地震は日本列島下から離れてしまい、この目的には適さないのです。このうちインドネシアはその真下、深さおおよそ700-1,300kmに巨大な冷たい塊があるとされ(Fukao *et al.*, 1992)、また深発地震の数も多い(第1図)ため、本観測の目的には最適の条件を備えています。そのため観測候補地をインドネシアにしました。

さて、このように海外で観測をする場合、長期間にわたる観測を行うことは予算的にも人的にも難しいので、数年程度の期間だけの観測を考えました。また地震計は広帯域地震計を選びました。これは1980年代後半から広く使われるようになった地震計で従来の地震計に比べより広い周波数帯域(今回用いた地震計では50Hz.から360秒)で地面の振動を正確に捉えることができます。

次に観測点の配置を考えます。地震学で地球深部を調べようとした時、私達が使うのは地震の波です。この波が調べたい領域を通ったときに、予測された時間に比べて観測点に遅れて到着したり逆に早く到着したり、また振幅が大きくなったり小さくなったり、形が歪んだりしないかを調べていくのです。このことにより調べたい領域は回りに比べて温度が高いなどの性質が明らかになっていきます。今回調べようとしているのはインドネシア中部(カリマンタン島~フロレス海)の下、深さ400-1,000kmぐ

らいの領域です。観測点はインドネシア東部で起きる深発地震(300kmより深いところで起こった地震のこと)からの波がちょうど観測対象を通ってくるように配置します。このような深いところで起きる地震を利用するのは、それらは一般にその割れ方が単純であることが多く、したがって出す波も単純となるからです。また地震の近くの構造も地表付近と比べると単純ですから、その結果、観測点に届いた時の波形も単純となるのです。この波の単純さが今回のような地球深部構造探査では重要で、それは複雑な波を使うとその複雑さがどこから来ているか分からなくなるからです。なお、ここでいう「構造」というのは「地震の波の伝わる速さの分布」のことで「地質構造」のことではありません。さてインドネシア東部の地震を使うとしたら、観測網は調べようとしている地域を挿んだインドネシア西部と、地域の真上の中部ということになります。地震と観測点の間の距離をできるだけ離れたほうが深いところまで調べられますから、観測網の西の端はインドネシアの西の端にしました。東の端はスラウエシ島とし、その他に深発地震の起きている東部にも置こうと思いました。南端は海溝に近いジャワ島やスマトラ島とし、北はできるだけ海溝から離れたかったのでカリマンタン島のマレーシアとの国境近くにしました。日本を例に考えると分かりませんが、島弧は海溝と平行に陸地が広がり直交方向にはそれほど奥行がなく(東北地方だと100-200km程度)、その点からもインドネシアは貴重なのです。観測網の広がりはおおよそ4,000km×1,500km程度となります。



第2図  
本観測 (JISNET) の観測点分布を三角で示してある。全23点。うち、▲は筆者が訪問した点。

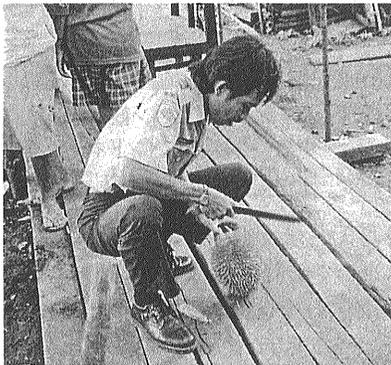


写真1 スマトラ島南部のカパヒヤンに行く途中、ドリアンを割ってくれるインドネシア気象庁職員。

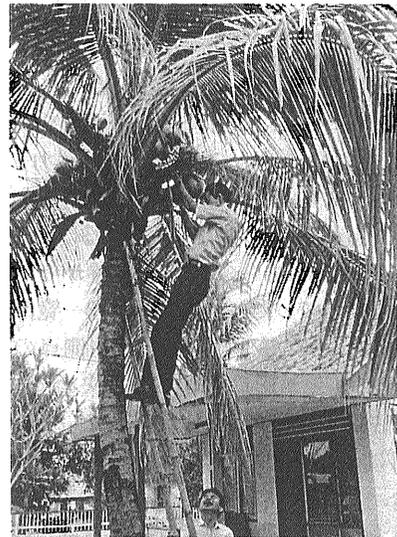


写真2 観測所内になっている椰子の実をしばしば出してくれた。写真はジャワ海に浮かぶバーウイン島の観測点で。

観測点数は20-30点ぐらいを考えていました。もちろん他の国にまで広げればもっと大きな観測網も可能ですが、そう観測点数も増やせませんし、これ以上手を広げることは困難でしたので観測地域はインドネシア1国に絞りました。

最後に名前を考えました。このような観測では名前も時として重要となります。“Japan-Indonesia Seismic Network”の略で“JISNET”としました。

### 3. 観測点の下見にインドネシアに行く

このような事を考えて、筆者は取りあえずジャカルタにあるインドネシア気象庁本庁に向かいました。1995年のことです。インドネシア気象庁を相手に選んだのは彼らがインドネシア全土に多くの観測点を持っているからです。地震計を観測所の敷地内に設置させていただけるならば借地交渉の必要

はありません。観測点でレコーダなどの調子を見てもらうことやデータのたまったハードディスクを交換してもらうこともあるでしょうから、そのためには現地に常駐している人の助けが必要なのです。このインドネシア各地に観測所があるというのはその時想像していたよりも大きな利点でした。観測点での作業が敷地内で済みますし、ほとんどの場合その土地に詳しい職員が空港で出迎え、ホテル外では常に同行してくれます(道すがら、あるいは観測所で果物も御馳走してくれます:写真1, 2)。その後のインドネシア情勢が不安定な時期に問題をかかえながらも出張計画をたてることができたのもこ

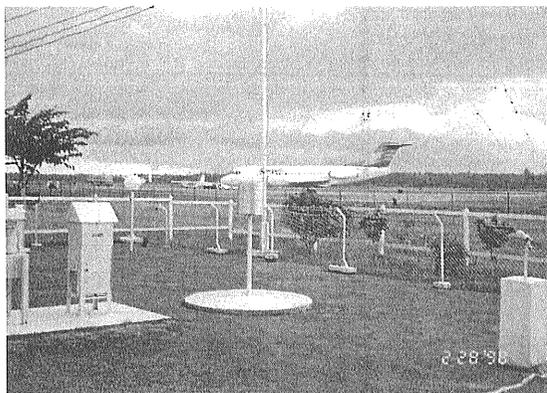


写真3 カリマンタン島西部、赤道直下の町、ポンティアナにあるインドネシア気象庁の気象観測所。空港に隣接しており、手前に気象庁露場；奥にメルパチ航空の飛行機が見える。

これらのサポートがあったからだと考えています。

幸いにしてインドネシア気象庁には協力していただけることになりました。“JISNET”という名前も喜んでいただけました。地震観測所だけではなく気象の観測所にもこちらの地震計を置かせていただけるとのことでした。早速、観測点一覧図を眺みながら現地への交通手段を聞き、観測点の候補地を決め、現地を下見して観測点を決めていきました。第2図に本観測の観測点(全23点)を示しますが、筆者は図に▲で示した14点を現在までに訪問しました。そのうちのいくつかの観測点の例を示しましょう。気象観測点は多くの場合空港に隣接して—滑走路から柵一つへだてた位置に—置かれてい

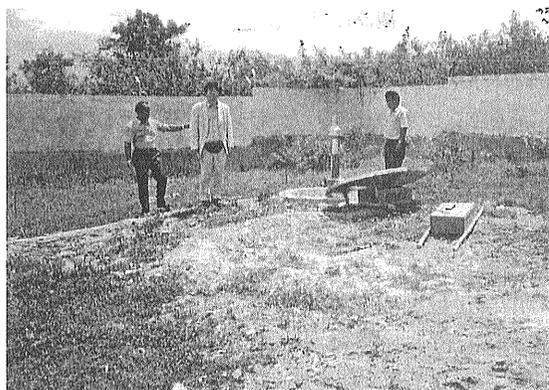


写真5 スラウエジ島パル観測点。写真中央にインドネシア気象庁の地震計用坑がある。右手に見えるのはその蓋。



写真4 バリ島カハンカハン観測点。写真中央の小屋内にインドネシア気象庁の地震計が設置されている。

ます(写真3)。飛行機の離発着時の振動が地震計にノイズとして記録されないかを心配したのですが、聞いた限りでは日に数回程度の離発着とのことでした。このような観測点では人工ノイズを避けるために建物から離し、気象観測をしている場所の中に置かせてもらうこととしました。一方、地震の観測点は気象観測点とは別個に街中から外れたところにあります。バリ島にあるカハンカハン観測点は山の斜面の岩盤上に地震計が設置されていました(写真4)。観測点の向いは水田で、周囲に人家は少なく、交通量も多くはありません。このような点は地震観測に適していますが、地震観測点の中には平地に深さ1mほどの坑を掘り周囲をコンクリで囲み、その中に地震計を設置してある点(写真5)もありました。

#### 4. 地震計を設置する

松代に大本営予定地跡の大防空壕があることは御存じでしょうか。現在その防空壕跡は地震観測に使用されています。日本国内ではこのように専用の坑を作る(あるいは既存の坑を利用する)などして、温度変化が小さく、人間活動のノイズも少ない地点を選び、広帯域地震計を設置することが多いのです。しかし今回の観測は外国で、しかも数年程

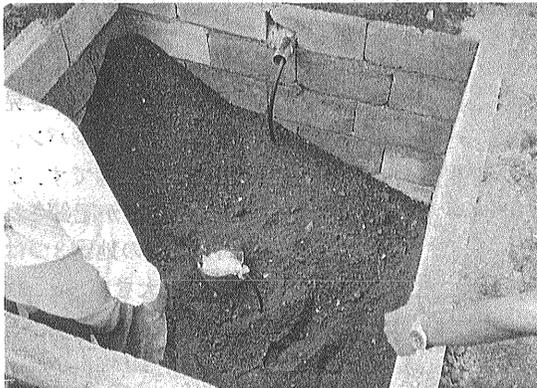
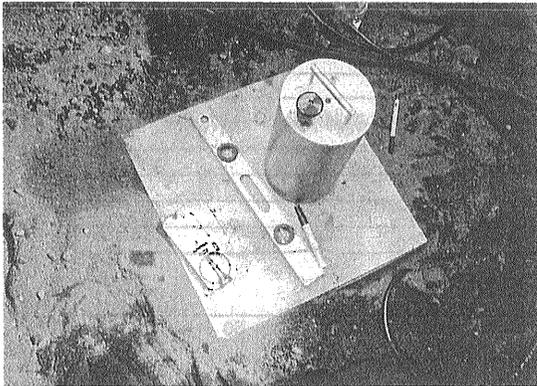
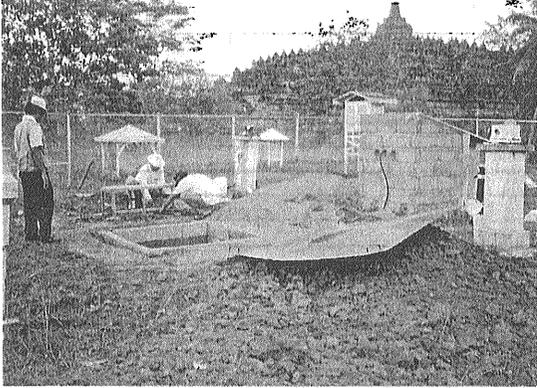


写真6 ジャワ島中部のボロブドール観測点での地震計設置の様子(気象研究所 原田氏, 横浜市立大学 石原氏撮影)。

度と短期間の観測であるため、わざわざ立派な壕を作ることは現実的ではないと考えました。そのため他の外国の同種の観測で行われている地震計を1mぐらい埋めるという方法を試してみることにして、地質調査所のお隣の気象研究所で実際に地震計を埋めてノイズレベルを計りました。その結果、地震計を地下1m程度埋めることでノイズレベルは

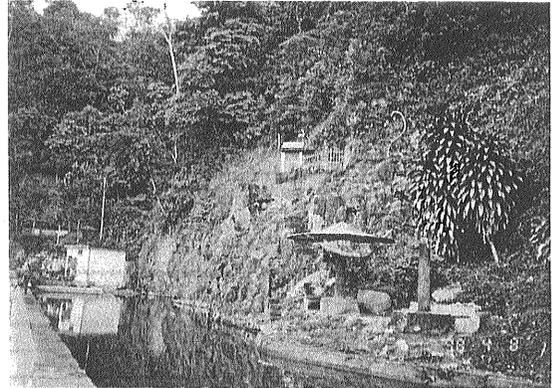
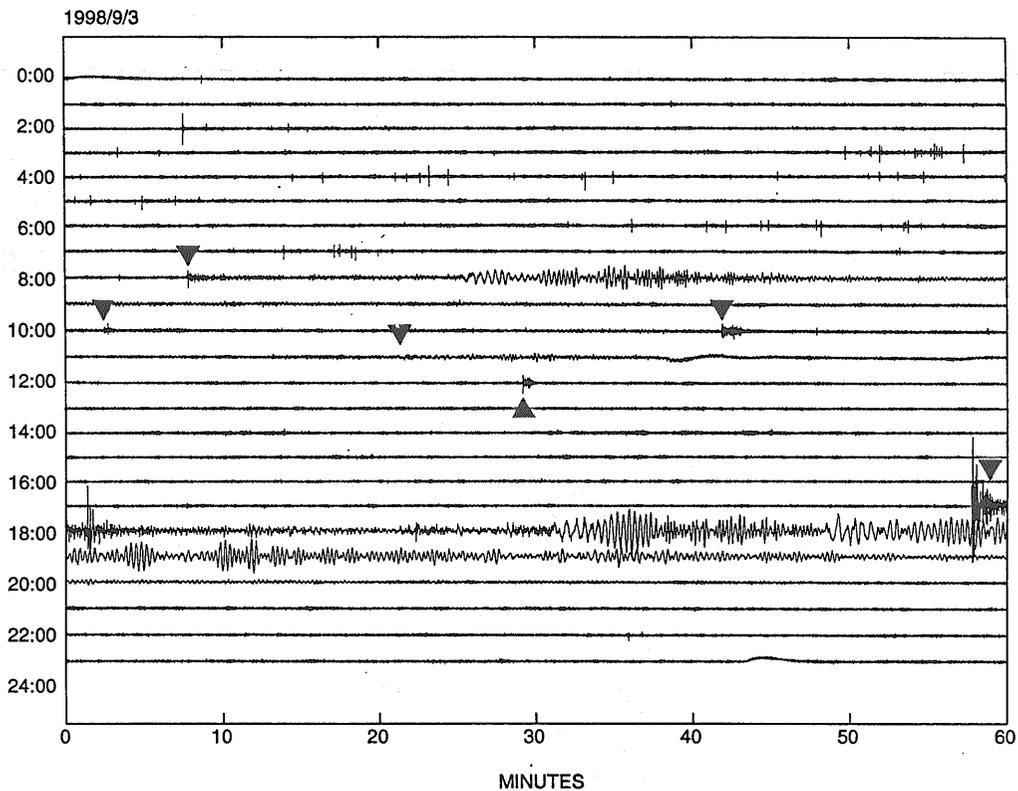


写真7 スマトラ島中部のパダンパンジャン観測点(気象研究所 神定氏撮影)。

大きく低減され、10秒以上の周期であれば日本国内の設置条件のよい点とそれほど遜色ないことが分かりました。今回観測に使った地震計は直径17cm、高さ29cmの円筒形であり、このサイズなら1m程度ならば十分人力で掘ることができ、作成にそれほどの費用・日数がかからず、インドネシアでも実施可能です。

写真6に実際のインドネシアでの設置の例を示します。これはジャワ島ボロブドール遺跡内の気象観測施設内に設置させていただいている観測点です。奥に見えるのがその遺跡です。上の写真の中左に見える穴が我々の地震計設置坑で、穴の手前に鉄板の穴の蓋が見えます。中右に見えるのがレコーダなどを収納しているブロック製小屋です。左手で作業しているのは太陽電池を設置している人達で、地震計、レコーダの動作に必要な電源はこの太陽電池から供給されます。時計はGPSを使っています。中の写真は坑の中央の台上に地震計(まん中に見えている円筒上の物体)を設置したと



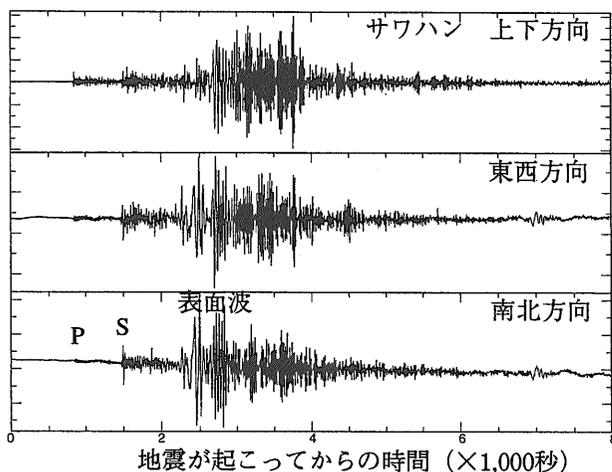
第3図 パダンパンジャン観測点の上下方向の地面の振動の1日分の記録。1ラインが1時間であり、図の左上が世界標準時の0時0分、右下が24時0分である。

ころです。下の写真はその地震計を砂で埋めたところで、地震計の頂部がなんとかまん中に見えています。また写真7はスマトラ島中部のパダンパンジャン観測点の写真です。写真7上中央の小屋が本観測のレコーダ小屋であり、本観測の地震計はその脇に埋められています。手前の池は洗い場兼水泳場となっていて、写真には写っていませんが更に左手にはプールがあります。この池やプールは子供達の遊び場となっており、地震計坑の前の岩から我々が作業している間にも次々と飛び込んでいきます。レコーダ小屋は写真7下の左手にも写っています。写真7下中央の蓋の下に我々の地震計は埋められています。

### 5. データが取れた

地震計の設置を始めたのは1997年、最終的に全ての観測点の設置が終了したのは1998年末でした。いままでに多くの地震の記録が取れています。

そのことは例えば1日分の地面の振動の記録を見ていただくと分かるでしょう。第3図はパダンパンジャン観測点の1日分の上下動成分の記録です。この中に少なくとも▲で示した6つの地震が記録されています。このうち10時台、12時台の地震3つは長周期に比べ短周期の波の振幅が大きいこと、揺れの続く時間が短いことから観測点の近くで起こった小さい地震だと考えられます。10時3分頃の地震にはひげのように見える振幅の大きい部分が2つ見えますが、これはP波とS波だと考えられます。また8、11、17時台の地震は揺れが長く続いていること、10時台、12時台の地震と比べ長周期の波の振幅が大きいこと、波の振幅が時間がたってもそれほど小さくならないことから遠方の地震でしょう。調べてみますと8時台の地震は東北で起きたマグニチュード約6の地震で地震が起きてから波が届くまで約10分かかっています。17時台の地震は南米のチリのマグニチュード約6.5の地震で、こちらは波が届くまで約20分かかっています。なお地震と観



第4図

ジャワ島中部のサワハン観測点で取れたトルコ地震(1999年8月17日, 29.86°E, 40.75°N, 深さ17km, マグニチュード7.8, 震源はPDEによる)の記録。地震と観測点間の距離は88°ほどである。図上より, 上下方向, 東西方向, 南北方向の地面のゆれる速さを示す。地震が起こった時刻から8,000秒後までの地面のゆれを示してある。800秒あたりに見えるのがP波, 1,400秒がS波, その後に見える周期の長い大きな波が表面波である。

測点の距離はP波の到着時刻と表面波(図の周期の長い波)の到着時刻との差からも大体分かります。

データが取れてから日本にくるまで2ヶ月ほどかかるので最近の記録はあまりないのですが, 1999年8月17日に起きたトルコの大地震の記録をお目にかきましょう(第4図)。P波, S波および表面波がはっきりと見て取れます。

さて本稿はここで終わります。今後, この観測網のデータが溜り, 解析が進んだ折に再度報告ができることを期待して。

謝辞:当初, 無謀と言われた本計画ですが, それでも参加しインドネシアに出張していただいた皆様

と, 本計画のメンバーがお世話になった全てのインドネシア気象庁スタッフに深く感謝します。皆さまのおかげで観測網は作れ, 記録が溜りつつあります。また原稿を読んでくださり, 有益な御助言をいただきました地殻物理部の田中氏に感謝します。

## 文 献

- Fukao, Y., Obayashi, M., Inoue, H. and Nenbai, M. (1992): Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone, *J. Geophys. Res.*, 97, p.4809-4822.
- Ishida, M., Maruyama, S., Suetsugu, D., Matsuzaka, S. and Eguchi, T. (1999): Superplume Project: Towards a new view of whole Earth dynamics, *Earth Planets Space*, 51, i-v.
- 丸山茂徳, 深尾良夫, 大林政行(1993): プリュームテクトニクス, *科学*, 63, p.373-386.

OHTAKI Toshiki (1999): Broadband Seismic Observation in Indonesia.

<受付: 1999年11月15日>