

テレメータ観測点の GPS 時計に誤差が生じた時のデータ補正

羽 田 敏 夫*

Error Correction for the GPS Clock of Seismic Telemetry System

Toshio HANEDA*

はじめに

地震観測においては正確な時刻が必要であり、観測点にある刻時装置を長期間にわたって精度良く維持していくことが大変重要となっている。最近の刻時装置は、GPS 衛星からの時刻信号を受信して内部時計を毎秒自動較正する GPS 時計が主流となっている。しかし、観測が長期に及ぶと、観測点周辺の木が伸びてアンテナを覆ってしまったり、アンテナが倒れたり、ケーブルが風雪の影響で断線するなど環境の変化によって GPS 信号を受信できない状態になることがある。そのため、内部時計が較正されず徐々にずれてしまい、その状態を放置しておくとも誤差が大きくなって地震データに影響がでることになる。そのようなことのないように、GPS 信号の受信状態を知らせるステータス情報が e-mail で提供されていて、その情報から時刻の異常を判断することができる。テレメータ観測点の時計に異常が認められた場合は誤差が大きくなるうちの対処が必要となる。

2001 年 11 月に戸隠観測点, 2001 年 12 月に関谷観測点で時計の異常が判明し, 時刻補正処理を行ったので報告する。戸隠観測点, 関谷観測点の位置を図 1 に示す。

地震観測における刻時装置

昔の地震観測は現地収録が主で, アナログ記録に JJY (日本標準時) 信号や NHK 時報を各観測点ごとに直接記録して, それを読み取って時刻の較正をしたり, ラジオの NHK 時報を受信して自動較正する時計をレコーダーと組み合わせて使っていた。そのため, 各観測点ごとに時計がバラバラで震源決定精度が悪かった。その後, テレメータ観測が普及してくると波形データを観測所などに集めて,

2002 年 8 月 30 日受付, 2002 年 10 月 24 日受理。

* 東京大学地震研究所技術部総合観測室信越地震観測所。

* Sin'etsu Seismological Observatory, Technical Supporting Section for Observational Research, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

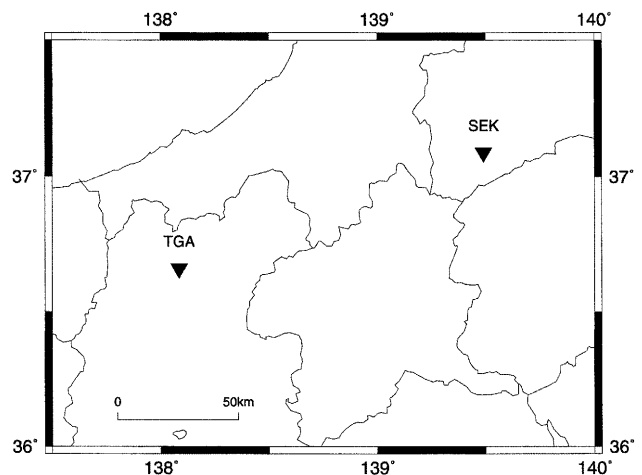


図 1. 戸隠観測点, 関谷観測点の位置図

1 台の刻時装置を基準として初動の読み取りを行っていた。従って, 観測点ごとの相対的な誤差が減少し震源決定精度は向上した。当時の時計精度は約 5×10^{-7} で, 1 日 1 回ほど JJY と時計の信号をオシロスコープの画面に同時に表示して, 位相差を目で確認しながら微調整を手動で行っていた。しかし, 伝送途中での遅れが必ずしも一定でないことや, 他大学や他機関とのデータ交換の時に絶対時刻が必要であることなどから, 各観測点での時刻は正確であることが望まれた。そこで現在は, GPS 信号を受信して毎秒自動較正する高精度 (1 秒パルス精度 $\pm 2 \mu\text{sec}$) の刻時装置が観測点ごとに配置されている。地震データは, この時刻を基にして 1 秒ごとにタイムスタンプされたパケットでテレメータ転送されており, 全国どこでも受信装置さえ備えれば記録を見ることができるようになっている。

時刻監視と時計の修正

時刻精度が保証されない波形データの利用価値はほとんどない。各観測点の時刻を日常的に監視し, 異常がないか点検することは大変重要である。GPS 時計のステータス

表 1. ステータス情報の例と内容の説明

関係者に e-mail で提供されているステータス情報の一部

Date: Thu, 29 Aug 2002 08:00:02 +0900 (JST)
 From: Auto Picker <auto@goemon.eri.u-tokyo.ac.jp>
 To: routine@senju.eri.u-tokyo.ac.jp
 Subject: meisei status

goemon GTA-45U last status report at 02/08/29 08:00

```
stn ch  date  time  report host:port      time stamp  ch ... status
SEK 0212 020829.053054 192.168.211.16:1582 12 020829 053050 0212 ... 00
DDR 0224 020829.042550 192.168.211.11:1125 24 020829 042550 0224 ... 00
NIK 0234 020829.072847 192.168.211.11:1125 34 020829 072847 0234 ... 00
HIT 0240 020829.075959 192.168.211.11:1125 40 020829 075959 0240 ... 00
INB 0246 020829.031553 192.168.211.11:1125 46 020829 031553 0246 ... 00
OYM 0268 020829.015509 192.168.211.11:1125 68 020829 015509 0268 ... 00
```

地震地殻変動観測センターの goemon:/dat/log/recvstatus.log に記録されている
 ステータス情報から、戸隠 (TGA 0446) の時刻較正された前後を抜粋した例

```
(1)      (2)      (3)      (4)      (5)      (6)      (7)
011112.101118 recvstatus 192.168.1.110:4443 46 011112 101114 0446 ... 00 ←自動較正
011112.101214 recvstatus 192.168.1.110:4443 46 011112 101210 0446 ... 04
011112.101215 recvstatus 192.168.1.110:4443 46 011112 101211 0446 ... 14
011112.101243 recvstatus 192.168.1.110:4443 46 011112 101239 0446 ... 10 ←INVALID
011112.130756 recvstatus 192.168.1.110:4443 46 011112 130752 0446 ... 30
011112.130757 recvstatus 192.168.1.110:4443 46 011112 130753 0446 ... 10
省略
011128.113957 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011128 113952 0446 ... 30
011128.113958 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011128 113953 0446 ... 10
011130.152417 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 700101 0000FC 0446 ... 02
011130.154537 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011130 154534 0446 ... 00 ←自動較正
011130.154539 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011130 154535 0446 ... 04
011130.154751 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011130 154747 0446 ... 00
011130.154806 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011130 154802 0446 ... 04
011130.154819 recvstatus 192.168.1.118:2266 46 011130 154815 0446 ... 00
```

- ログの内容
- (1) ログの年月日.時分秒
 - (2) プログラム名
 - (3) ステータスを送ってきたホストの IP アドレスとポート番号
 - (4) 観測点番号 (チャンネル番号の回バイト)
 - (5) ステータスのタイムスタンプ (YYMMDD. hhmmss)
 - (6) チャンネル番号
 - (7) ステータスバイト 00 正常 (自動較正)
 10 GPS INVALID

情報が e-mail で提供されている観測点は、その情報内容から異常を知ることができる。各観測点では、毎秒 GPS 時計に関する情報を波形データと共に送り出している。異常の有無だけでなくその内容もわかるようになっている。これらの情報は膨大なため、最新の情報だけを抜き出してまとめ、1日1回 e-mail で関係者に送るようにしている(表1)。この e-mail によって異常が検出された場合は、現地に行ってテレメータ装置やアンテナ及びその周辺の環境を点検して原因を調べる必要がある。原因が判明して処置が可能であれば、その時点で時計の誤差がどのくらいか読み取るための正確な時刻コードを記録上に取り込む。実際には図2のように、地震計信号入力端子の何れかのチャンネルに時刻コードを数分間入力して、テレメータされた1分ファイルに時刻コードが入っていることを記録上で確認する。その時点で時計のコードとのズレを読み取り誤差とする(図3)。時計とのズレを測定し、GPS 信号の受信できない原因が改善できたならば、時計の電源を一端切ってから再投入して時刻を合わせる。明星電気製 GPS 時計の場合は、GPS 衛星が3個以上捕捉できれば現在時刻が表示される。ただし、今日までの閏秒補正がされていないので2002年現在で実際より3秒進んでいる。閏秒の補正は受信局側で行っている。

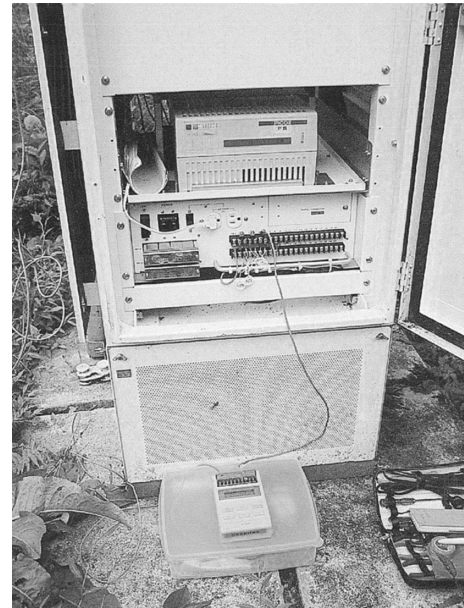


図 2. 時刻コードの入力(戸隠観測点)

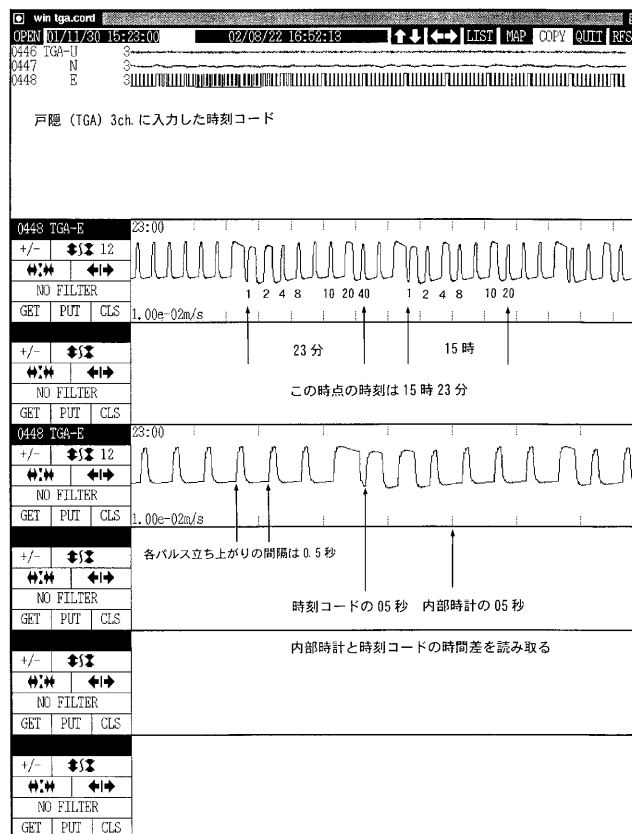


図 3. 入力した時刻コードの表示例

データの修正

データの修正は誤差が生じた時点までさかのぼって行う。いつから時計がズレ始めたか、時計を合わせる直前にどれだけズレていたかの2点が判るため、その間を線形に補間する(図4)。時計がズレていた期間のそれぞれの時刻において、補正値を計算して震源決定をやり直す。具体的には、補正値計算プログラム(change_st)を使って、補正の必要な地震ファイルの.chファイルに、計算して得られたそれぞれの時間の補正値を観測点補正値として書き込むことになる。補正値の計算は、時計が遅れ(進み)始めた時間から較正した時間まで比例して遅れ(進み)たものと仮定して計算している。実際には、温度変化などの影響があるので必ずしも直線的なずれとはいえないが、ゆらぎがどの程度あるのか不明なために直線で近似して計算している。補正値が決まったら再震源計算(win-x)を実行する。

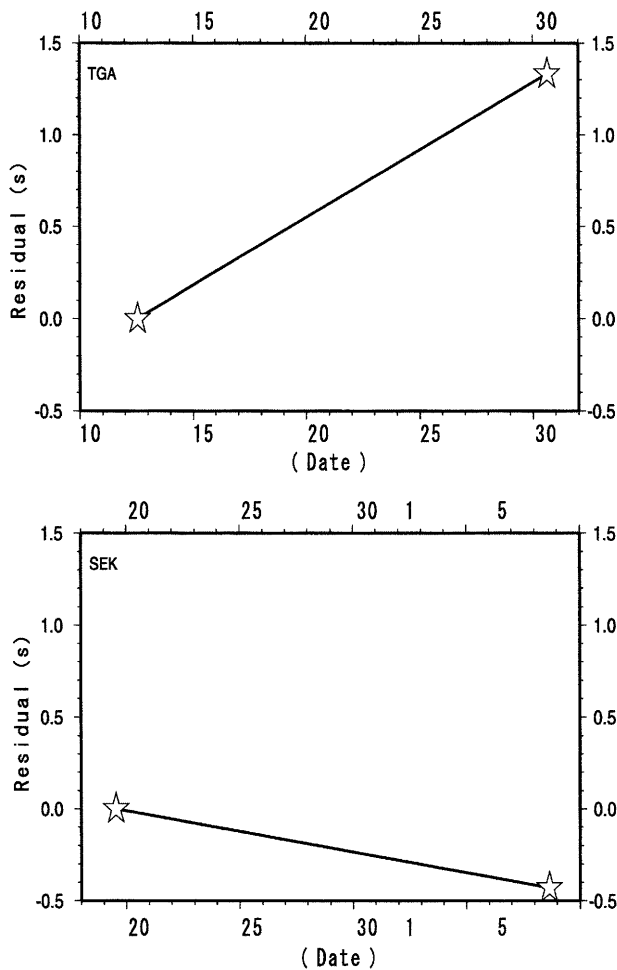


図4. クロノグラフ、ズレ始めと計測時点のズレを直線で近似し補間した(横軸が時間、縦軸がズレ)

観測点状況と補正データ

戸隠、関谷観測点ともに、ステータス情報によりGPSが数日間受信不良となっていることが判明したため、現地に行き確認した。戸隠観測点では特別な要因は見当たらなかったが、テレメータ装置の内部時計表示はINVALID ACQUISITIONとなっていて、GPSを受信しての時刻較正ができない状態であった。電源を切り再投入することで正常に受信できるようになった。関谷観測点は雪の重みでアンテナが倒れたのが原因で、やはり、GPS信号を受信できない状態にあったが、アンテナを立てることによって受信できるようになった。

戸隠、関谷観測点の補正したファイル期間と時刻較正直前の誤差は表2の通りである。

表2. 戸隠、関谷観測点の補正ファイル期間と時刻較正直前の誤差

観測点	補正ファイル期間	時刻のズレ	時計精度
戸隠(TGA)	011112.130757~011130.152300	+1.333 秒	0.85×10^{-6}
関谷(SEK)	011219.125400~020107.153000	-0.429 秒	0.2×10^{-6}

誤差の大きかった戸隠観測点の場合、地震51個についての残差を見ると、時間の経過とともに約+0.3秒から約-0.5秒へと徐々に変化しており時計の遅れと対応していた。これらの期間の時刻補正値を、各地震ファイルごとの観測点補正値として代入し再震源計算を実行した。その結果、戸隠観測点の残差は約+0.4秒でほぼ一定となり、震央のばらつきが減って狭い範囲に集中ようになった。震源の深さは鉛直方向に長く分布しているが、これは深さの決定精度が悪いためと判断される(図5,6)。

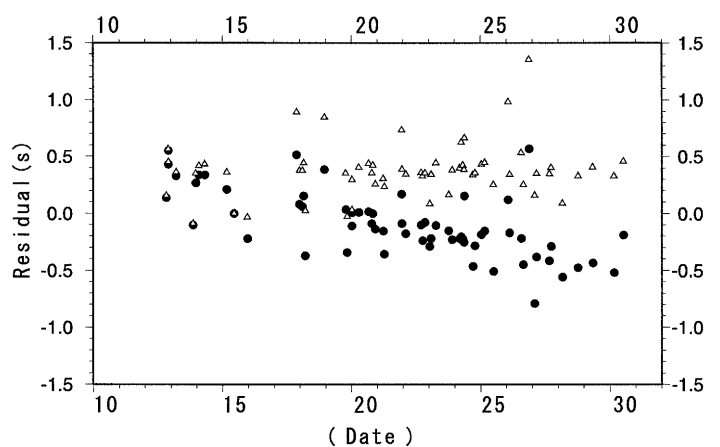


図5. 震源計算結果における走時残差の変化、●は補正前、△は補正後。補正後の値はほぼ一定になった(横軸が時間、縦軸が走時残差)

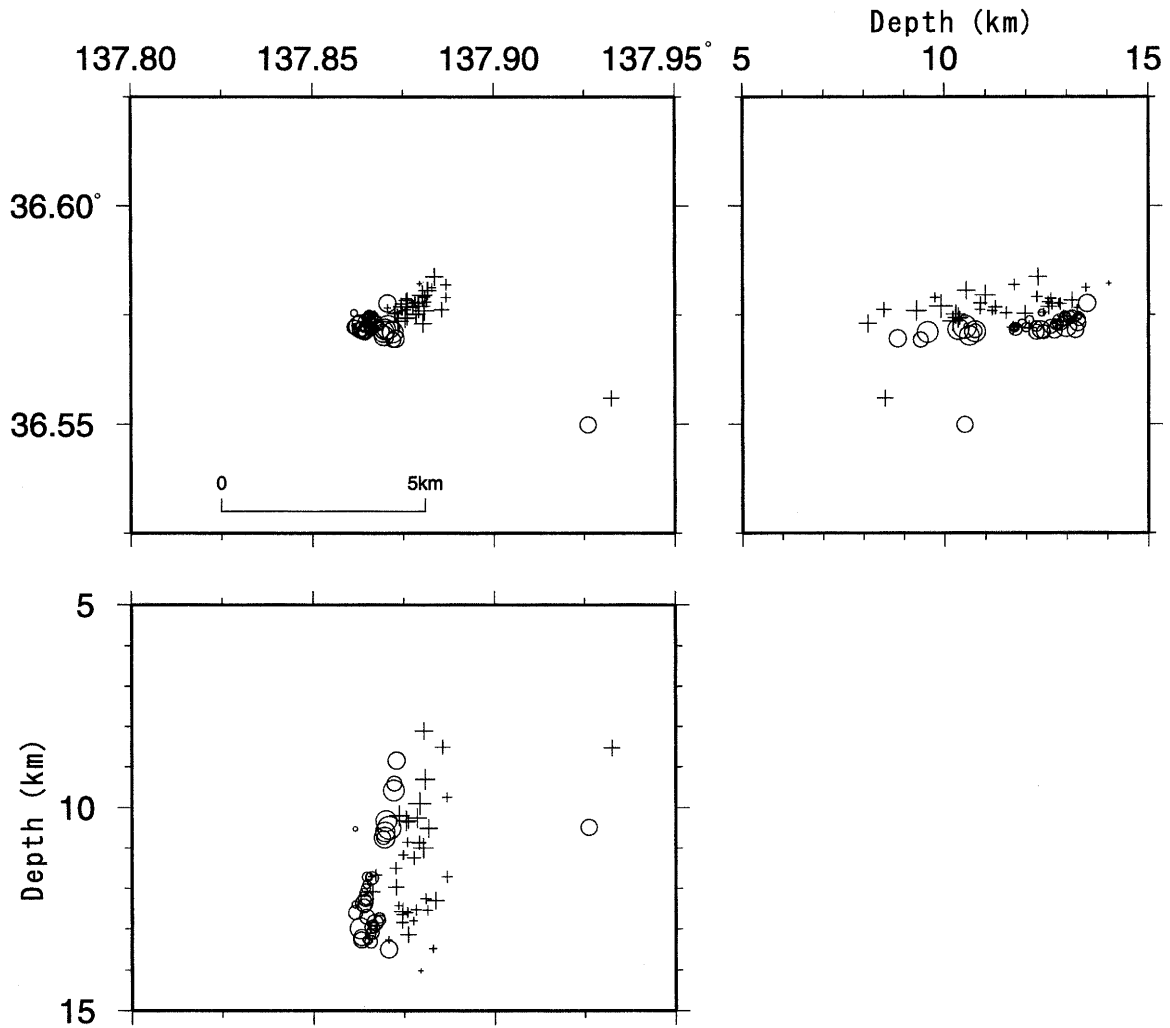


図 6. 震源図の変化, 補正後は震央域が集中するようになった (+補正前, O補正後).
 上図: 震央分布図. 下図: 東西断面図. 右図: 南北断面図

おわりに

地震観測では精度の高い時刻を確保し維持することが大変重要である。高精度な水晶時計でも、較正しないと、季節変化や1日の気温変動の影響を受けて誤差はどんどん大きくなってしまふ。日常的な地震データの監視で、波形に異常がないか調べることも大事ではあるが、時計が正確に刻まれているかを監視することも大事である。今回の戸隠、関谷観測点は、ステータス情報から時計の異常を知ることになった。しかし、このステータス情報が届けられないテレメータ装置を利用している観測点では、震源計算して走時残差や震源決定精度が悪くなってから初めて時刻の異常に気付くこともある。読み取った地震の震源計算結果から誤差が異常に大きくなったり、近隣観測点との到着時間の差などから時計の異常に気付くこともあるので、読み取りには細心の注意が必要である。ステータス情報が発信

されない観測点の時計情報はどのように監視したらよいか、最近の情報通信技術の進歩によって、観測機器の状況を遠隔地でも把握できる可能性は高い。観測点ごとに異なった装置であっても時刻精度を集中的に監視できるシステムの確立が急がれる。いずれにしても、人によるデータの監視は日常的に欠かすことなく注意深く続ける必要はある。

謝辞: 補正值計算プログラム change_st は白山工業(株)石田康直氏が作成した。補正作業の実行及び本原稿の執筆にあたっては、地震地殻変動観測センター酒井慎一助手から適切なアドバイスをいただいた。お二人には貴重な時間を割いていただき深く感謝申し上げたい。

<資料 1>

補正值の計算からファイル修正までの手順

1. 観測点で入力した時刻コードの入った 1 分ファイルを、win の画面で拡大し誤差を読み取る。時計が遅れであるか進みであるかを見極めと、時刻コードに記録されている時分を読んで間違っていないか確認する。wch で切り出して保存してから測定するのが良い。
2. 補正值計算プログラム (change_st) の実行には以下のデータを必要とする。
 - ・時計がズレ始めた時刻 (YYMMDD.hhmmss)
 - ・時計のズレを測定した時刻 (YYMMDD.hhmmss)
 - ・記録上から読み取ったズレ (±秒)
 - ・観測点のチャンネル番号 (観測点のアドレス)
 注意: テレメータの内部時計が遅れていた場合の観測点補正值はプラスとなる。
3. 誤差が生じて補正の対象となる期間全ての地震ファイルを “LIST” に書き出す。

```
# ls /dat/trg > file1
補正対象期間のファイルをリストアップ
# grep -v .ch file1 > file2
.ch ファイルはリストから除く
# mv file2 LIST
ファイル名を変更
```

<実行例>

```
# HOSEL.sh 011112.130757 011130.152300 +1.333 0446
(HOSEL.sh [ズレ始めた時刻] [ズレを測定した時刻]
[±誤差] [チャンネル番号])
```

5. hoseifile にできた .ch ファイルの補正值が、ファイルごとに違う補正值となっているか確認する。問題なければ、/dat/trg の .ch ファイルを書き換える。
6. 補正対象期間の pick ファイルを /ryu/dat/picks/man/YYMM から適当なディレクトリ (picks.org) にコピーして上書きを防ぐ。
 - ・ win.prm1 行目を、.ch ファイルを書き換えた /dat/trg とする。
 - ・ 4 行目をディレクトリ picks.org にして、再検測結果は picks.new にも書き込む。
 win.prm4 行目の記載 (例) picks.org/: picks.new
7. picks.org の中から、補正対象の観測点を使って震源計算されている pick ファイルを検索してファイル (pick.list) に書き出す。
 (例) grep -l "#f TGA" * > pick.list
8. win -x (再震源計算) を実行するシェルスクリプト REWIN.sh を実行 (資料 3)。

<実行例>

- ```
REWIN.sh
```
9. win.prm の 4 行目で指定した picks.new に再震源計算結果の検測情報 (pick) ファイルができるので、補正対象となった観測点の P 波到着時刻や残差値を、補正前の pick ファイルと比較して正しく補正されているか確認する。問題なければ、/ryu/dat/picks/man/YYMM の pick ファイルを書き換える。
  10. .ch ファイルや pick ファイルを更新したら、補正した観測点、ファイル名、期間、実施日などを地震データ利用者がわかるよう速やかにメールや web 等で公表する。

<資料 2>

HOSEL.sh の内容

```
#!/bin/sh
#
usage () {echo Usage : HOSEL.sh first-time delay-time
diff. ch. ;}
#
if [# -ne 4]; then
usage
exit
fi
#
cat LIST | while read hosei
do
echo "$hosei"
change_st ${1} ${2} ${3} /dat/trg/$hosei ${4} >
$hosei.new
mv $hosei.ch $hosei.old
mv $hosei.new $hosei.ch
rm $hosei.old
mkdir hoseifile
mv 0* hoseifile/
echo "done"
done
```

<資料 3>

REWIN.sh の内容

```
#!/bin/sh
mkdir picks.new
cat picks.list | while read PICK
do
echo "$PICK"
win -x $PICK
echo "done"
done
```