

## 技術部会資料 2

### 第 3 回 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会

#### Ⅱ. 検討事項

平成 23 年 3 月 4 日

気 象 庁



## II. 検討事項

### 南関東周辺の基盤強震観測網（KiK-net）による大深度地震計データの緊急地震速報への活用に向けて

気象庁では、首都直下で発生する地震に対応する緊急地震速報の高度化を図るため、防災科学技術研究所と連携し、平成22年度から同研究所が所有する基盤強震観測網（KiK-net）による地中観測データの緊急地震速報への活用の実証実験を進めている（システムの整備状況については、報告事項5を参照）。

緊急地震速報への活用は、南関東周辺に存在する深さが500m程度以上深く設置されている同観測網地中観測点の観測データを、緊急地震速報の「多機能震源処理」に導入することを計画している。ここでは、導入を計画している地震計を「大深度地震計」と呼ぶこととする。また、基盤強震観測網（KiK-net）には、同じ観測点で、地表でも観測しており、ここでは地表で観測しているものを地表地震計、地中で観測しているものを地中地震計とする。

まず、地中地震計を活用した場合の効果を検討した。

検討項目1. 地中地震計を「多機能震源処理」に追加することによる早期検知の効果

次に、地中地震計を現在の処理手法である「多機能震源処理」として活用するにあたり、地中地震計の特性から考慮すべき点などを抽出するため、地表設置の地震計との差異に関する調査を行った。

検討項目2. 地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差、最大振幅の比、マグニチュードの差

検討項目3. B- $\Delta$ 法、主成分分析法の適用結果の差

この着信時間の差の調査を踏まえ、震源決定手法の一つである「テリトリー法」における修正事項を検討した。

検討項目4. 地中と地表の地震波着信時間差を考慮したテリトリー法

これらのことから、以下の検討課題が見えてきた。

#### 【地震波の着信時間差の考慮】

○検討項目2. から、地中地震計と地表地震計のP波の着信時間差は、地中地震計の深度3000mで1.2秒程度、500mで0.2秒程度である。また、地中地震計の震度3000mにおいて、入射角が大きい場合と小さい場合の着信時間化の違いはP波で最大0.2秒程度である。

対処案)

地中、地表間の着信時間差に比べ、入射角の違いによる差は小さいため、まずは、地中、地表間の着信時間差を考慮した震源決定を考える。入射角による違いの考慮は、主成分分析法による入射角の利用や B- $\Delta$ 法による震央距離を参考にした補正について、検討を続ける。(※補足)

=>観測点毎に補正する際の例として、検討項目4. に着信時間を考慮したテリトリー法を示す。

#### 【地震波の最大振幅の考慮】

○検討項目2. から、地中地震計と地表地震計の最大振幅の比は、多くの観測点で平均で2倍から10倍程度。マグニチュードでみると、各観測点の平均で0.2から1.3程度、地中地震計で決めたマグニチュードが小さい。

対処案)

各観測点毎の特徴はあることから、観測点毎にM補正を行うことを目指すが、まずは、地中地震計の特性として一律のM補正を検討する（南関東周辺の500m以深の観測網として一律）(※補足)

#### 【B- $\Delta$ 法の経験式】

○検討項目3. から、B- $\Delta$ 法で用いる経験式は、現在用いている地表地震計によるものを使うと震央距離を大きく見積もる（概ね2倍程度の距離に見積もる）ことになる。

対処案)

地中地震計データ用のB- $\Delta$ 式を求める（南関東周辺の500m以深の観測網として一律のB- $\Delta$ 式を作成）。

#### 【主成分分析法】

○検討項目3. から主成分分析法は、地中地震計によるものの方が、地表地震計によるものより推定精度が上がる。

対処案)

主成分分析の結果は、地中地震計を使う。

(※ 補足) マグニチュード推定や到着時について、観測点毎の補正を考える場合、地表観測点である気象庁多機能型観測点の特徴についても整理し、観測点毎の補正について検討を進める。

## 1. 基盤強震観測網（KiK-net）の地中地震計を追加することによる早期検知の効果

## この項の要点

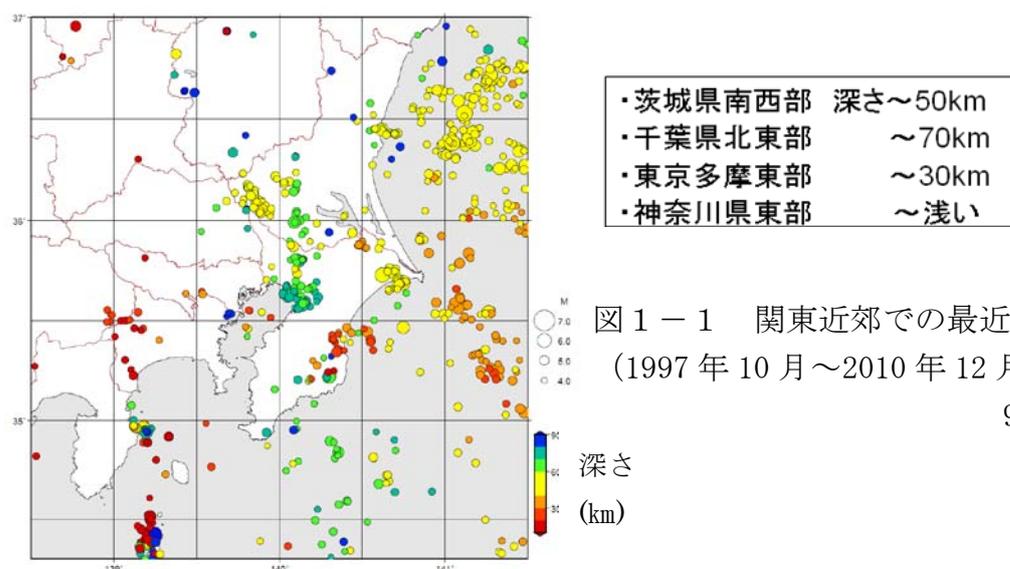
・ 関東近辺における防災科学技術研究所基盤強震観測網（KiK-net）の地中地震計データを追加することによる早期検知の効果を含め、さらに、観測点密度が上がる効果と、地中地震計で観測することの効果のどちらが大きいかを考察した。

・ 浅い地震では、観測点密度が上がる効果が卓越

・ 深い地震になるにつれて、地中地震計で観測することが比較的効果的になる  
首都圏では、比較的深い地震が多いので地中地震計で観測することの効果は大きい。

防災科学技術研究所の基盤強震観測網（KiK-net）の地中地震計を追加することにより、緊急地震速報の処理が何秒早くなるかを考察した。現在、気象庁の緊急地震速報には、気象庁多機能観測点網のデータによる処理（多機能処理）と、防災科研 Hi-net 網による処理（防災科研開発による着未着法、Horiuchi et. al, 2005）が並行して稼動しており、それらの処理結果に基づき緊急地震速報を発しているが、ここでは、それらうち、多機能処理に地中地震計データを加えた場合について試算する。観測点が増える（密になる）ことによる効果、および、地中地震計による効果、をそれぞれ求める。

なお、関東近郊の現在の地震活動を見てみると（図1-1）、神奈川県や東京都の西部で浅い地震も発生しているが、深さが30~70km程度のやや深い活動が多い。特に、東京湾北部沿岸付近では50km程度よりも深い地震活動が活発である。



## 1. 迅速化の程度の試算

緊急地震速報の警報の発表の基準の1つに「地震波を2点以上で検知」という条件がある。そこで、地震発生後、2番目に着信する観測点までの走時に注目する（地表地震計のみの観測点の場合は、震央から2番目に近い観測点までの走時に対応する）。この「震源から2番目に着信する観測点までの走時」が、観測点が増えること（密になること）や、地中地震計を用いることで、どれだけ早くなるかを見積もる。なお、走時計算に用いる走時表には、JMA2001を用いた。

### 1-1. 浅い地震の場合の迅速化

図1-2は、深さが10kmで地震が発生した場合、2番目に早く着信する観測点でのP波の走時を求めたものである。図1-2のAは、現在の多機能観測網での状況である。東京湾沿岸で発生した場合には、2番目の観測点におおよそ3秒程度で着信するが、

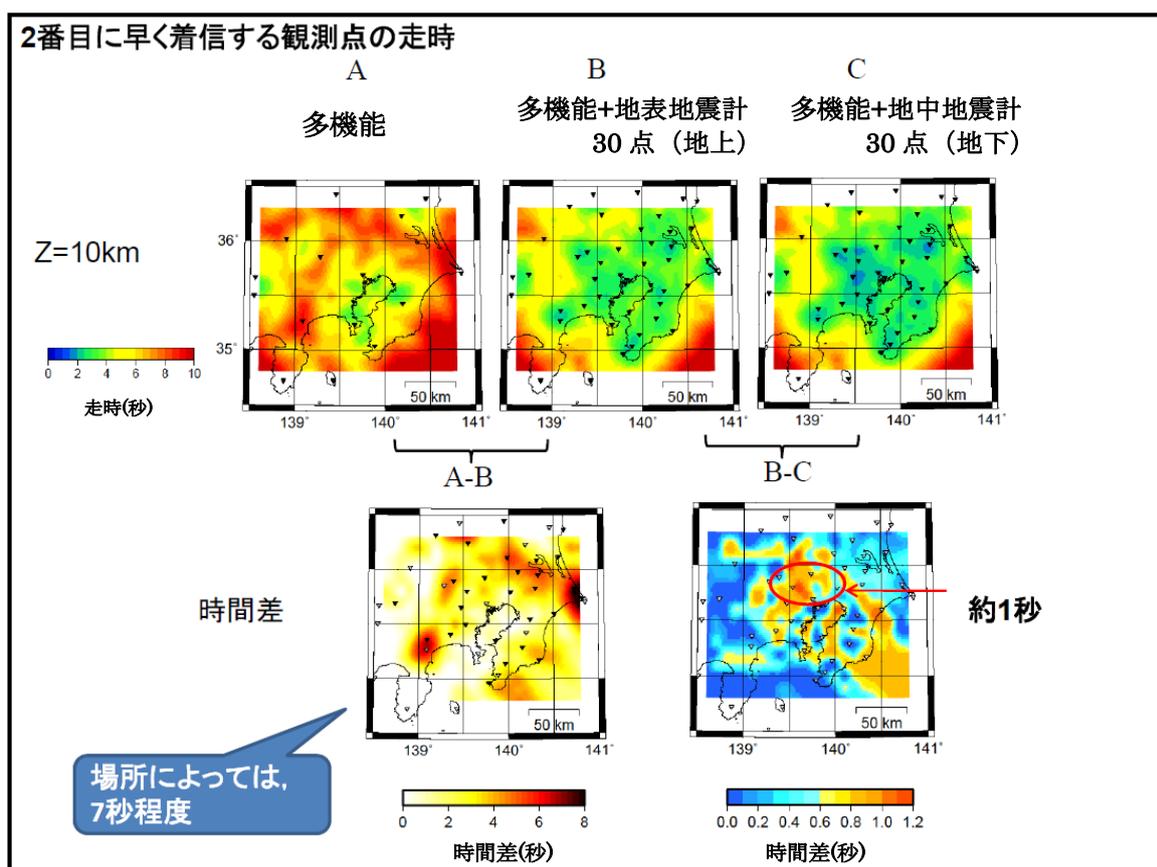


図1-2（上）震源から2番目の近い観測点までのP波走時（震源の深さが10kmの場合）。A：多機能観測点、B：Aに、地中地震計の位置に地表に観測点を追加した場合。C：地中地震計の位置に地下に観測点を追加した場合。（下）Aでの走時—Bでの走時、および、Bでの走時—Cでの走時。

神奈川県西部や茨城県南部で発生した地震には10秒近くかかる。Bは、大深度地震計観測点（ただし、地表に観測点があると仮定した場合）を追加した場合の状況である。南関東の広い領域で、およそ3秒程度で着信する。また、Cは、地中地震計観測点（深地中地震計によるP波が地表よりも早く着信することを考慮したもの）を追加した状況である。なお、地中地震計にP波が早く着信する時間差として、II-2での結果を用いた。

Aでの走時とBでの走時の差（A-B）が「観測網が増える（密になる）迅速化の効果」を示し、（B-C）が「地中地震計を用いることによる効果」を表わしていることに相当する。（A-B）を見てみると、神奈川県西部や茨城県南部では、6～7秒程度の差があり、観測網が密になる効果大きい。一方、（B-C）では、およそ1秒程度である。

震源の深さが10km程度の浅い地震の場合には、（地中地震計の効果よりも）観測点が密になる効果大きい。

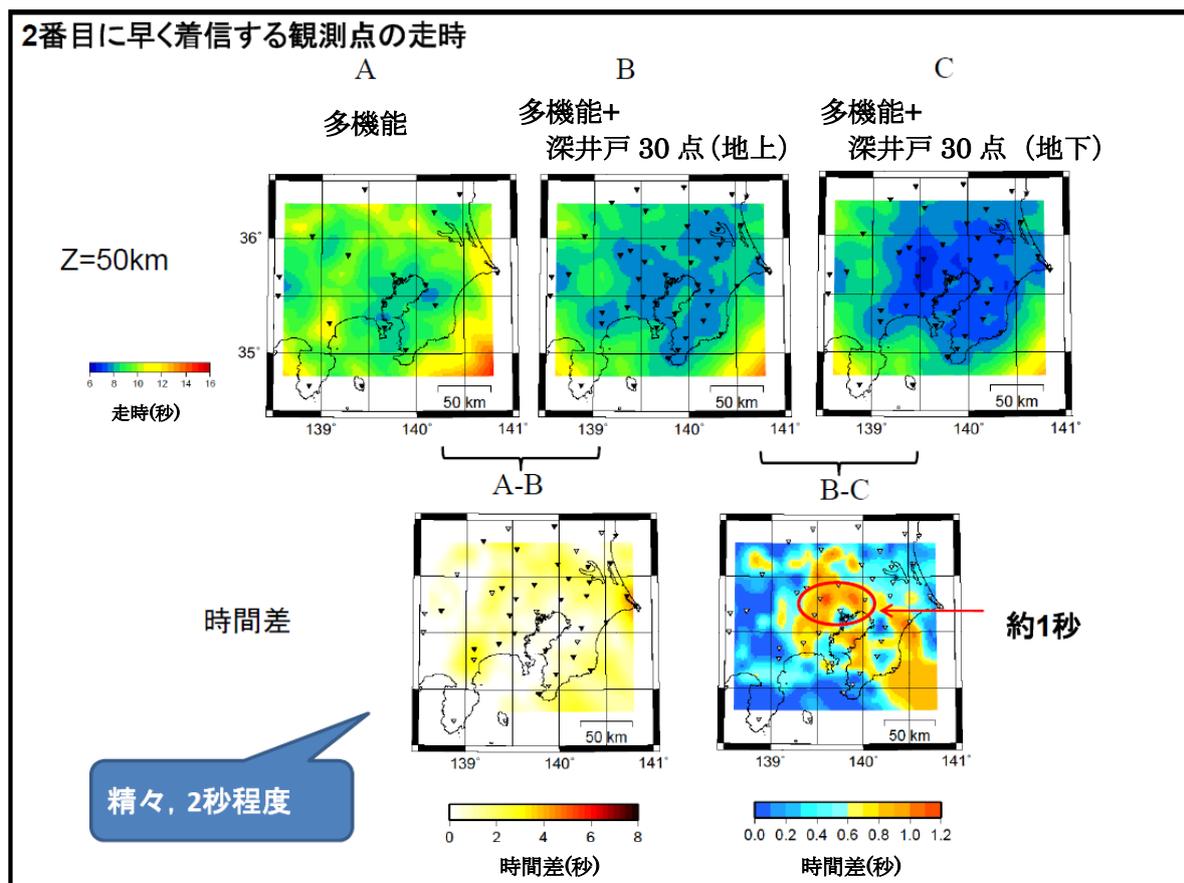


図1-3 図1-2と同じ。ただし、震源の深さが50kmの場合。

## 1-2. やや深い地震の場合の迅速化

図1-3は、深さが50kmで地震が発生した場合、2番目に早く着信する観測点でのP波の走時を求めたものである。

(A-B)を見てみると、走時の差は、大きくても2秒程度である。観測網を密にする効果は、浅い地震の場合よりも比較的少なくなる。一方、(B-C)は、おおよそ1秒程度であり、浅い地震の場合とあまり変わらない。

震源の深さが50km程度以上のやや深い地震の場合には、ボアホールを導入する効果が比較的大きくなる。

## 2. まとめ

緊急地震速報の多機能処理に防災科研基盤強震観測網(KiK-net)の地中地震計データを追加することにより、処理が何秒早くなるかを考察するため、2番目に着信する観測点の走時がどれだけ早まるか、を求めた。その結果、浅い地震では、観測点が増える(密になる)ことの効果は7秒程度とかなり大きいが、深い地震では、観測点が増える(密になる)ことの効果は相対的に弱まり(高々2秒程度)、地中地震計による効果(1秒程度)が相対的に大きくなる。

深い地震をターゲットにする場合、観測点が増える(密になる)ことの効果に加えて、地中地震計のデータを用いることの効果も寄与する。

## 2. 地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差、最大振幅の比、Mの差

## この項の要点

防災科研 KiK-net の大深度地震計の地中地震計（深度 500m～3,510m）と地表地震計の観測データを、緊急地震速報の現在の処理に活用する際に、震源位置や M を推定する上で基礎となる、地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差、最大振幅の比、M の差について調査した。

- ▶ 地中地震計と地表地震計の P 波の着信時間差は、地中の深度 3000m で 1.2 秒程度、500m で 0.2 秒程度である。地中地震計の深度 3000m において、入射角が大きい場合と小さい場合の着信時間差の違いは P 波で最大 0.2 秒程度である。
- ▶ 最大振幅の比は、地中地震計の深度によらず、多くの観測点は平均で 2 倍から 10 倍程度である。地中地震計と地表地震計の最大振幅の関係は、今回用いたデータの範囲では概ね線形である。
- ▶ P 波 M<sup>\*</sup>、S 波 M<sup>\*\*</sup>ともに、地中地震計の深度依存性はみられず、各観測点毎に 0.2 から 1.3 程度地表地震計よりも地中地震計の M が小さい。

※ P 波 M : P 波部分から気象庁の緊急地震速報で用いている P 波 M 式により決定した M、

※※S 波 M : S 波部分から気象庁の緊急地震速報で用いている全相 M 式により決定した M

関東地方とその周辺の防災科研 KiK-net のうち、地表から深さ 500m 以深の深井戸の孔底に強震計が設置されている観測施設（大深度地震計）の強震観測データを、気象庁へリアルタイムで伝送し、緊急地震速報の処理（多機能処理）に取り入れる準備を進めている。これら地中地震計と地表地震計の観測データの活用により、震源位置の推定や規模の大きな地震の M の推定が、現行よりも迅速かつ高精度になると期待される。緊急地震速報の処理の際には、地中地震計と地表地震計の観測データを併合して震源位置を推定する場合、地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差が震源位置の精度に影響する。また、表層地盤の増幅特性により、地中地震計よりも地表地震計の方が地震波の振幅が大きくなるため、地表地震計の過去の振幅データで回帰された現行の M 推定式を用いて地中地震計の振幅データから M を推定すると、M を過小評価する恐れがある。そこで、ここでは、緊急地震速報の処理における震源位置や M を推定する上で基礎となる、地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差、地中地震計と地表地震計の最大振幅の比や M の差について、過去の観測データを基に調査する。

## 2. 1 データ及び解析

解析に用いたデータは、地表地震計からの深さ 500m 以深に強震計が設置されている関東地方とその周辺の KiK-net 観測施設の地中地震計と地表地震計の加速度波形データである。図 2-1 に、観測点の分布を示す。防災科研 WEB サイトから 2010 年 3 月までのデータを取得した。震源要素は、気象庁震源カタログ（一元化震源）を用いた。

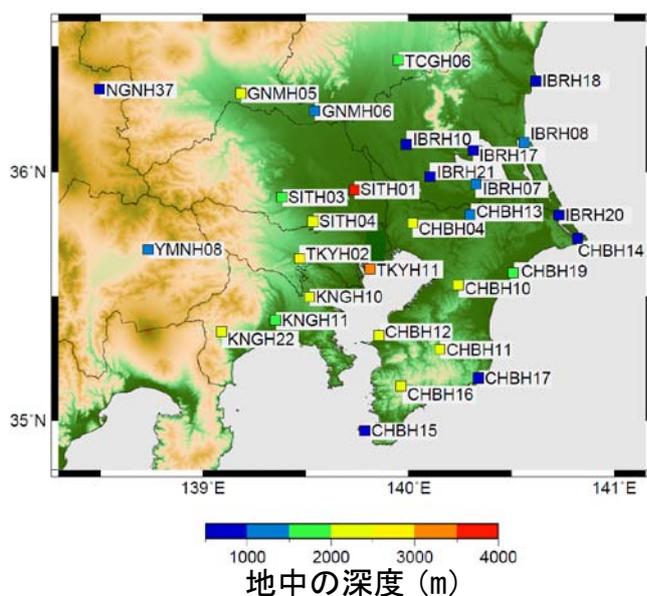


図 2-1 地表からの深さ 500m 以深に強震計が設置されている関東地方とその周辺の KiK-net 観測点の分布。標高データは国土地理院の数値地図 250m メッシュを使用。

地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差を得るため、位相の立ち上がりを明瞭に読みとることができる P 波と S 波の着信時を検測する。検測する地震は、震央距離 200km 以内で地中の 3 成分合成最大加速度が大きい 20 個を抽出し、さらに、震央距離 100km 以内で観測点からみた震央の方位の偏りが小さくなるように抽出した地震を追加した。地中と地表で共に検測された地震について、着信時間差を求める。図 2-2 に、着信時間差を求める地震の分布を、P 波と S 波それぞれについて示す。

緊急地震速報（予報）の発表条件の一つに、「気象庁の多機能型地震計設置のいずれかの観測点において、P 波または S 波の振幅が 100gal 以上となった場合」がある。ここで振幅とは、多機能型観測点に設置してある強震計の上下動成分の加速度である。この発表条件の判定に、KiK-net の地中地震計と地表地震計を活用することを想定する。地表地震計で 100gal 以上となる前に地中地震計でそれが分かれば、発表の迅速化が期待できる。そこで、地中地震計と地表地震計の加速度上下動の最大振幅の比を P 波部分（P 波着信時から S 波着信時までの間）、S 波部分（S 波着信から S-P 時間×3）のそれぞれで調べる。M 推定では、緊急地震速報の M 推定と同様に、1 倍強震計相当の変位波形の 3 成分合成最大振幅を用いる。地中地震計と地表地震計の M の差を P 波部分、S 波部分のそれぞれで調べる。P 波部分の M（以下、P 波 M）は P 波 M 式により、S 波部分の M（以下、S 波 M）は全相 M 式により推定する。着信時間差を得るために抽出された地震は、M6、7 クラスが少なく震央距離が比較的近いいため、長周期成分

のSN比が低い地震が多く、変位によるM推定に用いると正確なMが推定出来ない。そのため、長周期成分のノイズが大きな変位データをM推定から除いたが、データが少なくなった。そこで、震央距離500km以内のM5以上の地震を、着信時間差を求めするために検出した地震（図2-2）に追加して、位相の立ち上がりが不明瞭な場合にもP波とS波の着信時を検出し、最大振幅の比の算出及びM推定に用いる。震源の深さは150km以浅を対象とする。図2-3（a）は、加速度上下動の最大振幅の比を求める地震の分布を示す。図2-3（b）は、変位によるM推定に用いる地震の分布を示す。P波とS波の両方が地中地震計と地表地震計で共に検出された地震を対象としている。

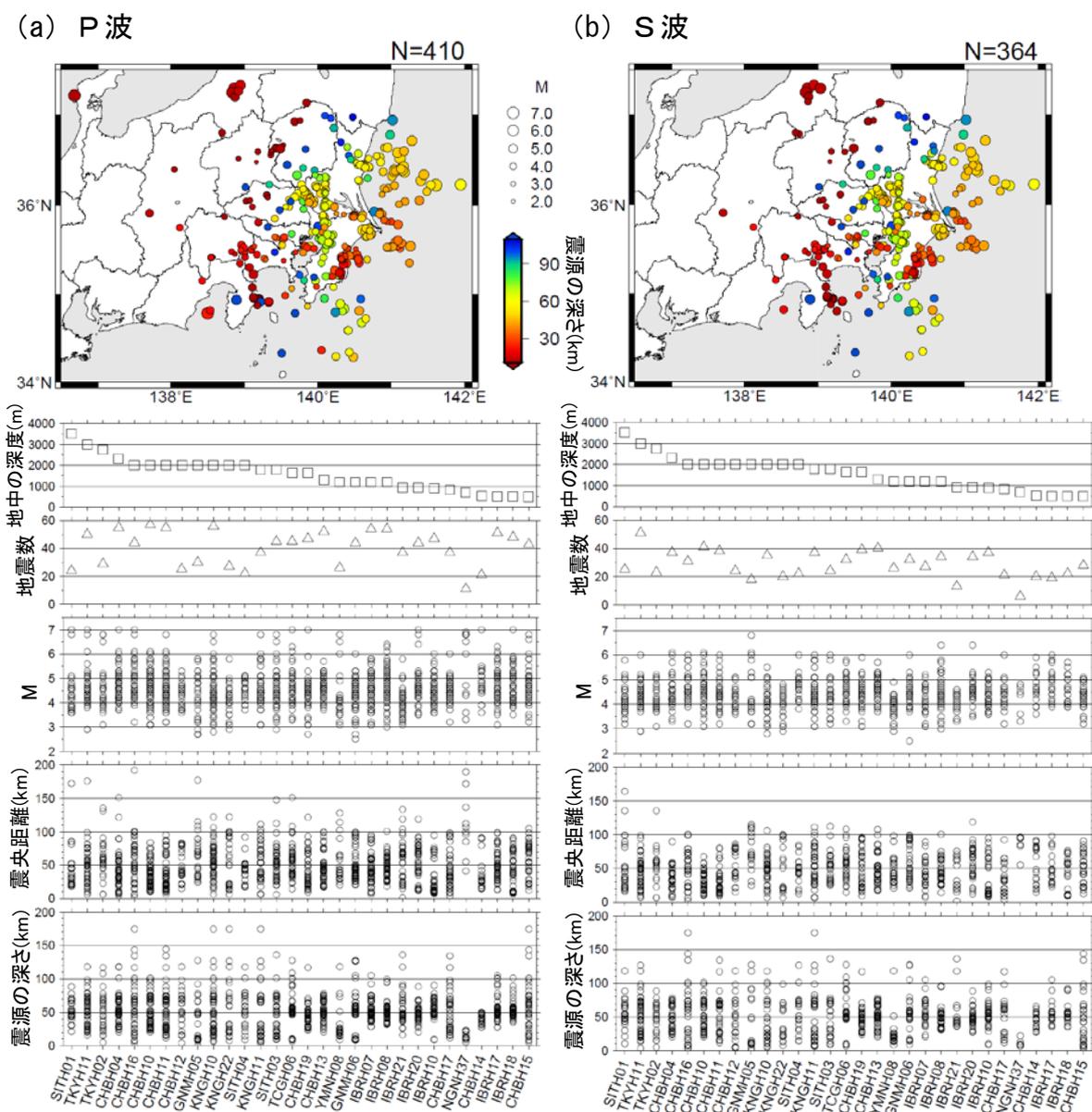


図2-2 P波(a)、S波(b)それぞれの着信時間差(地表地震計—地中地震計)を求める地震の分布。地中地震計と地表地震計で共に検出された地震が対象。上から震源分布、地中の深度、観測点毎の地震数、M、震央距離、震源の深さを示す。

(a) 加速度

(b) 変位

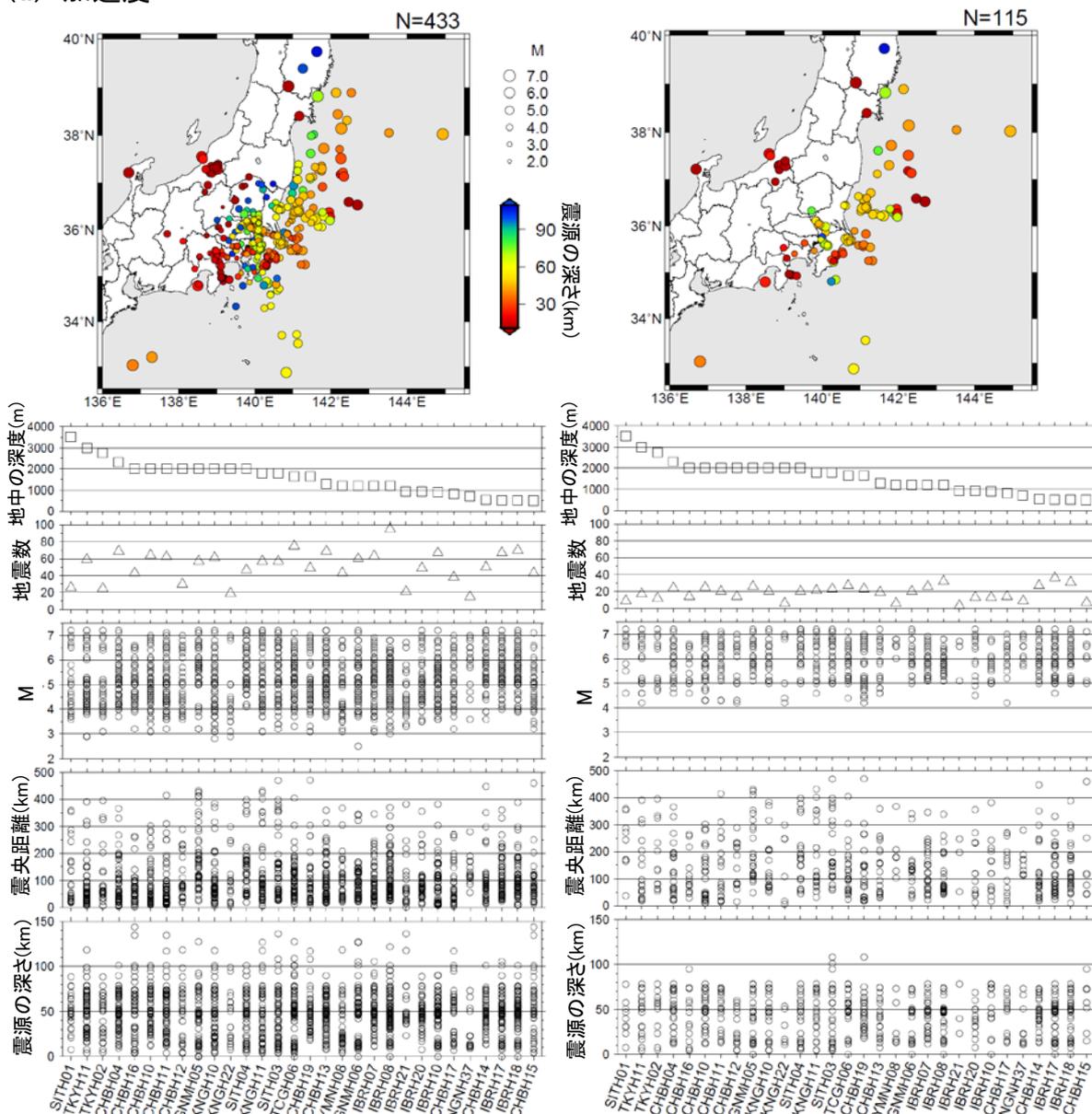


図2-3 (a) 加速度上下動の最大振幅の比（地表地震計／地中地震計）を求める地震の分布。(b) 変位の3成分合成最大振幅によるM推定に用いる地震の分布。P波とS波の両方が地中地震計と地表地震計で共に検測された地震が対象。上から震源分布、地中地震計の深度、観測点毎の地震数、M、震央距離、震源の深さを示す。

## 2. 2 地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差

地中地震計と地表地震計の地震波の着信時間差（図2-4）は、地中地震計の深度が深いほど、着信時間差が大きくなる傾向がみられる。P波の着信時間差の平均は、深度3000mで1.2秒程度、深度500mで0.2秒程度であり、地中地震計の深度が深いほど震源位置の推定精度への影響が大きいと考えられる。S波の着信時間差の平均は、深度3000mで3.0秒程度、深度500mで0.5秒程度である。地中地震計の深度が2000m～2003mでほぼ同じ8観測点間の着信時間差に違いがみられるが、これは地中地震計から地表地震計までの地震波速度構造が観測点間で異なるためと考えられる。着信時間差のばらつきは、地中深度が深い程大きい傾向がある。なお、地表のP波の着信時と理論走時の差について、補足1に記した。

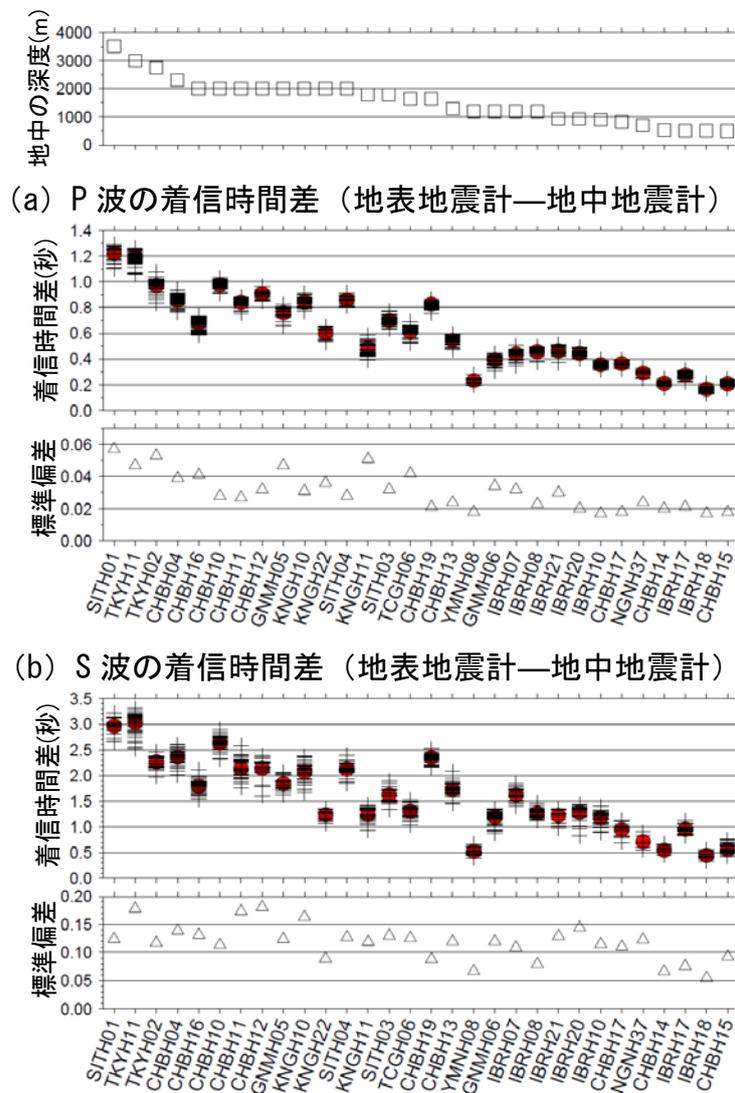


図2-4 P波 (a)、S波 (b) それぞれの、地中地震計と地表地震計の着信時間差（地表地震計—地中地震計）、観測点毎の平均（●）、標準偏差（△）。

各観測点の着信時間差のばらつきは、地震波の入射方位、入射角によって異なると考えられる。図2-5をみると、地中地震計の深度が深くなるにつれて、入射角の変化に伴う着信時間差の変化が大きくなる傾向がみられる。入射方位の変化による着信時間差の変化は、震源分布の偏りもあり、入射角の変化による場合ほどはつきりとはみられない。P波の着信時間差と入射角の関係（図2-6）をみると、地中地震計の深度が深くなるにつれて、着信時間差の入射角依存性が大きくなるのが分かる。地中地震計の深度3000mにおいて、入射角が大きい場合と小さい場合の着信時間差の違いはP波で最大0.2秒程度であるので、震源位置の推定の際には入射角の変化に伴う着信時間差を考慮しなくても、推定精度への影響は小さいと考えられる。

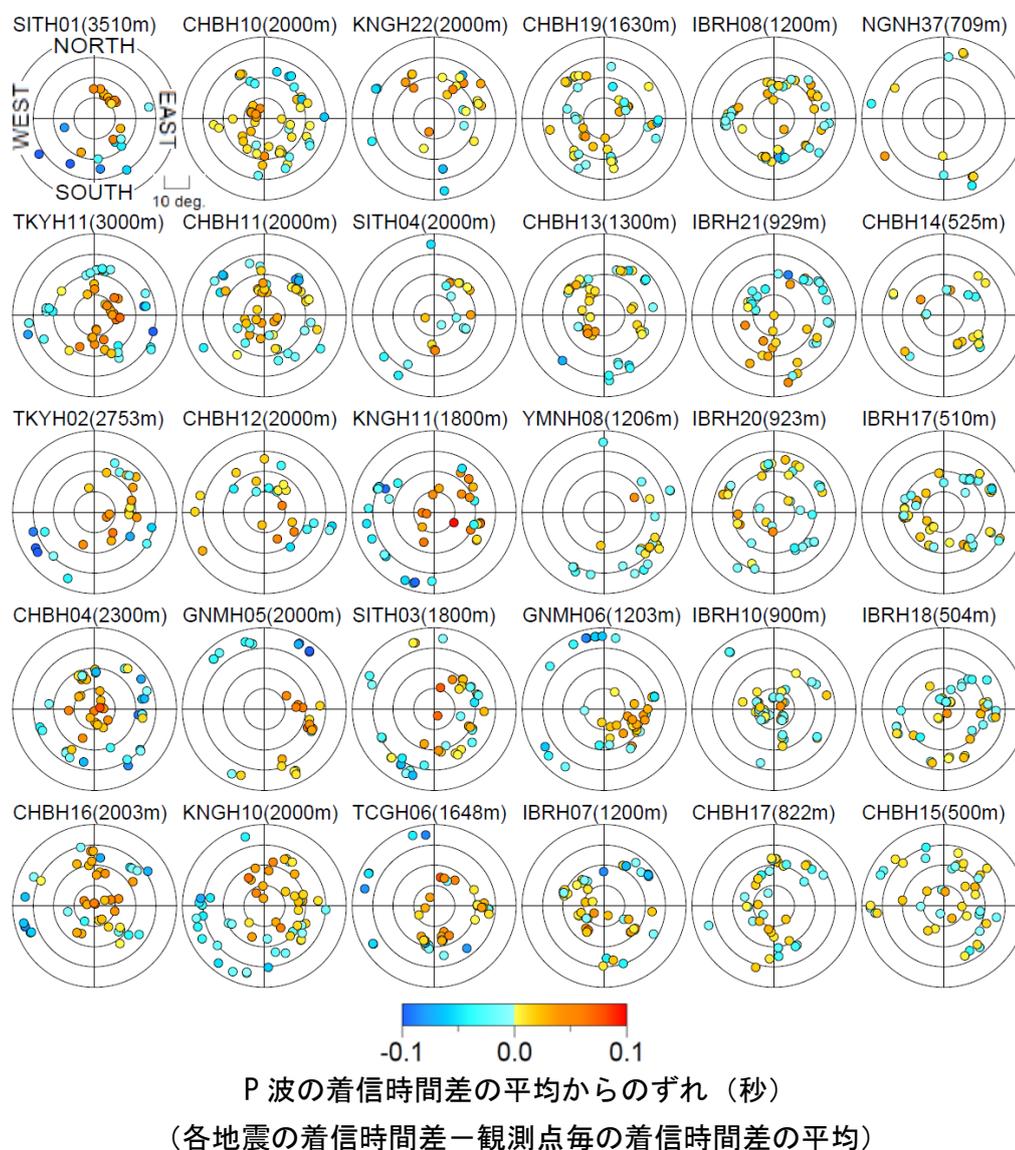


図2-5 観測点毎のP波の地中地震計と地表地震計の着信時間差に対する入射角、入射方位の関係。入射角が小さいほど円の中心に近くなり、観測点のより真下から地震波が入射することを示す。色分けは、観測点内における各地震の着信時間差から観測点毎の着信時間差の平均を差し引いた値を表す。

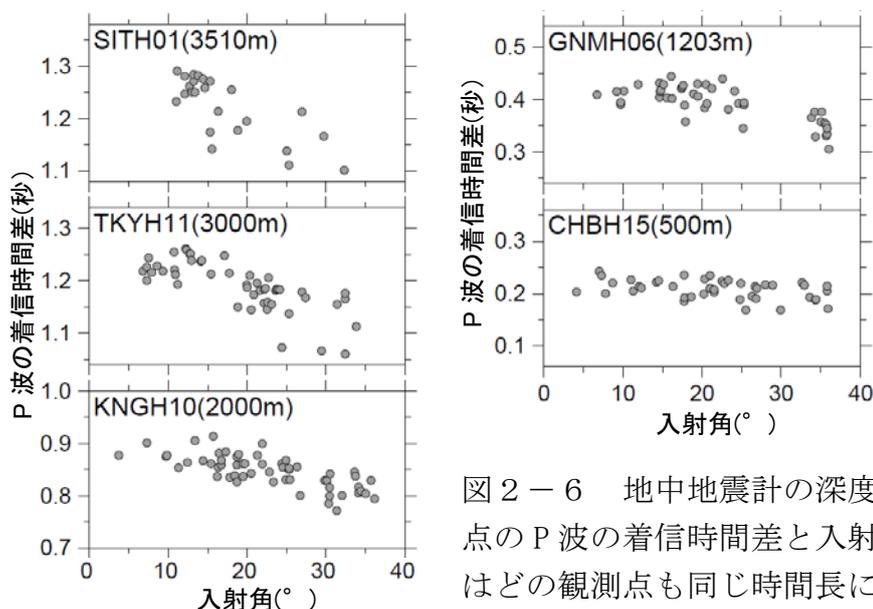


図2-6 地中地震計の深度が異なる5観測点のP波の着信時間差と入射角の関係。縦軸はどの観測点も同じ時間長にしてある。

### 2. 3 地中地震計と地表地震計の最大振幅の比

地中地震計と地表地震計の加速度上下動の最大振幅の比（図2-7）、変位の3成分合成最大振幅の比（図2-8）は、観測点間で比べると地中地震計の深度によらず、多くの観測点は平均で2倍から10倍程度である。観測点内のばらつきの程度は地中地震計の深度には依存していないが、観測点毎に違いがみられる。最大振幅の比のばらつきは、入射する地震波の周波数特性、入射角、入射方位などの違いが原因と考えられる。今回用いたデータの範囲では、加速度上下動で100gal以上を観測した例はないが、地中地震計と地表地震計の最大振幅の関係（図2-9、図2-10）は、概ね線形となっている。一般に100gal以上になると、表層地盤の非線形効果が現れる場合があるので、大振幅の際の地中地震計と地表地震計の振幅の関係を検討するには、データの蓄積を待つ必要がある。

緊急地震速報（予報）の発表条件の一つの判定に用いられる加速度上下動について、最大振幅の比のばらつきが大きい観測点（図2-7）や、P波部分とS波部分で最大振幅の比が大きく異なる観測点がある（図2-11）。地中地震計データから地表地震計の振幅を推定するために、今回得られた最大振幅の比を地中地震計のデータに掛けるとすると、P波とS波の完全な識別は現在のところ難しいため、最大振幅の比の平均値がP波部分とS波部分のどちらか大きい方か、または、両者の平均的な値などを用いることが考えられる。

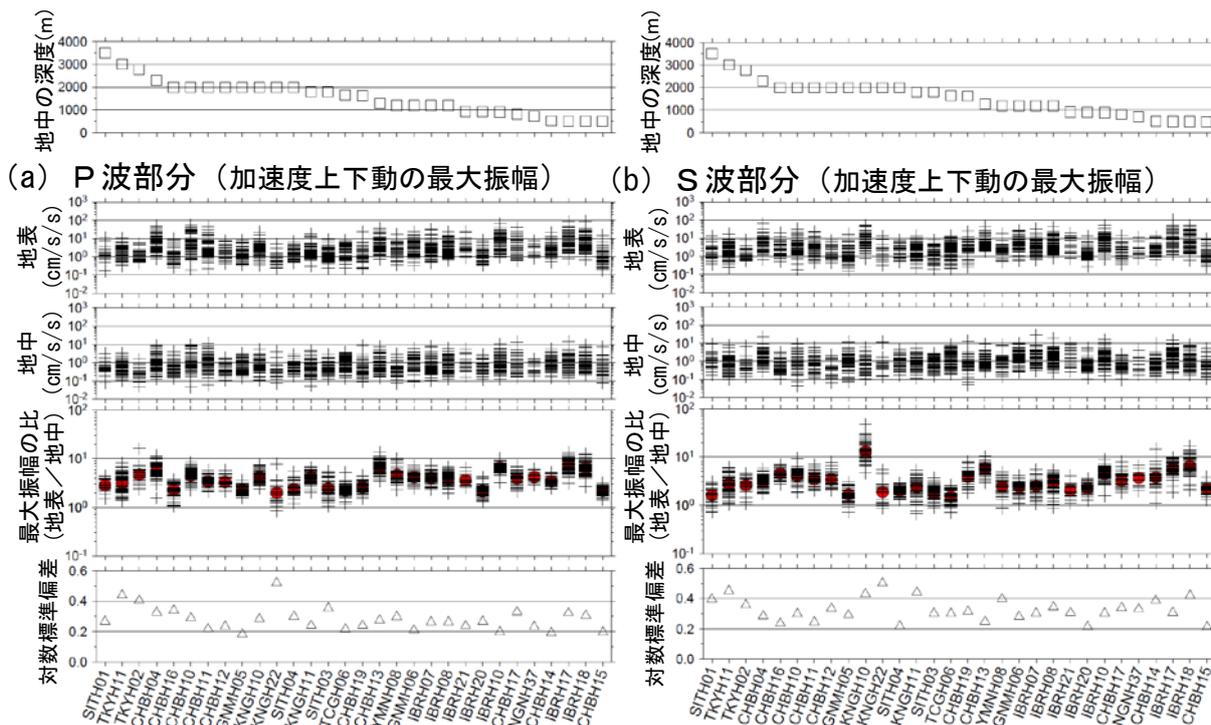


図2-7 加速度上下動の最大振幅について、P波部分 (a)、S波部分 (b) それぞれの、地表と地中の最大振幅、最大振幅の比（地表地震計／地中地震計）、観測点毎の幾何平均（●）、対数標準偏差（△）。

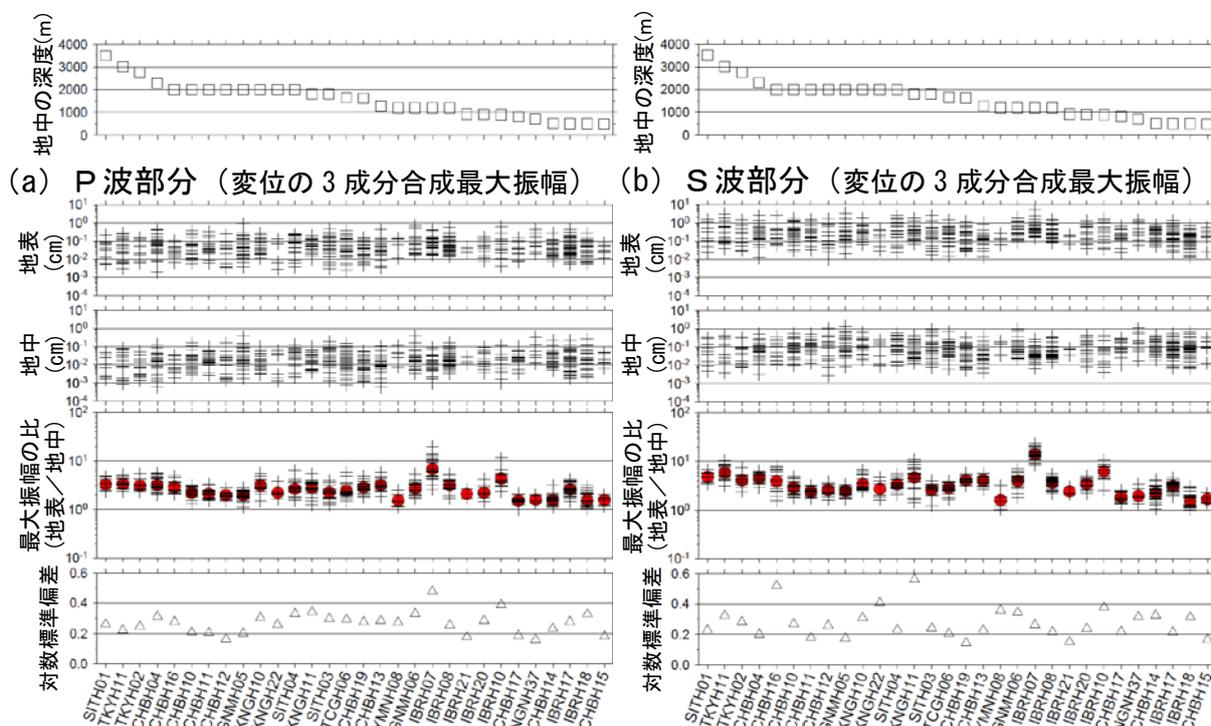


図2-8 変位の3成分合成最大振幅について、P波部分 (a)、S波部分 (b) それぞれの、地中と地表の最大振幅、最大振幅の比（地表地震計／地中地震計）、観測点毎の幾何平均（●）、対数標準偏差（△）。

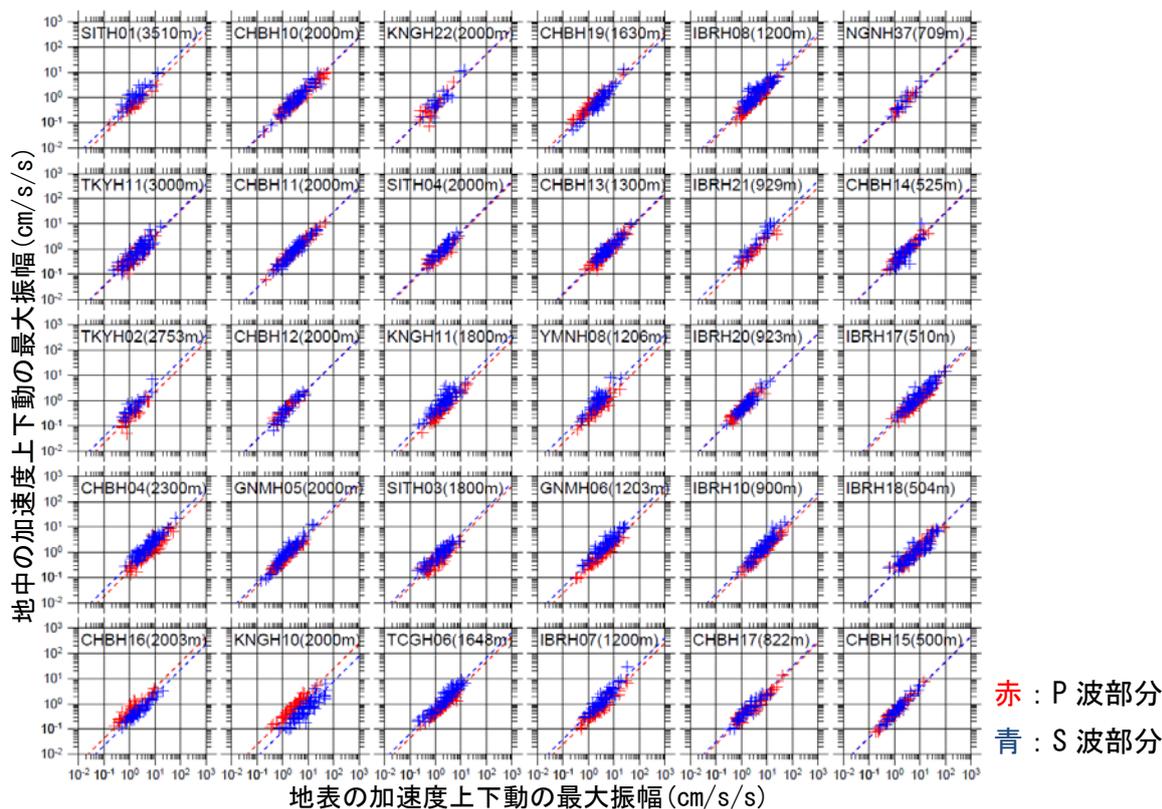


図2-9 地中と地表の加速度上下動の最大振幅の関係。P波部分を赤、S波部分を青で示す。観測点毎の最大振幅の幾何平均を表す直線を点線で示す。

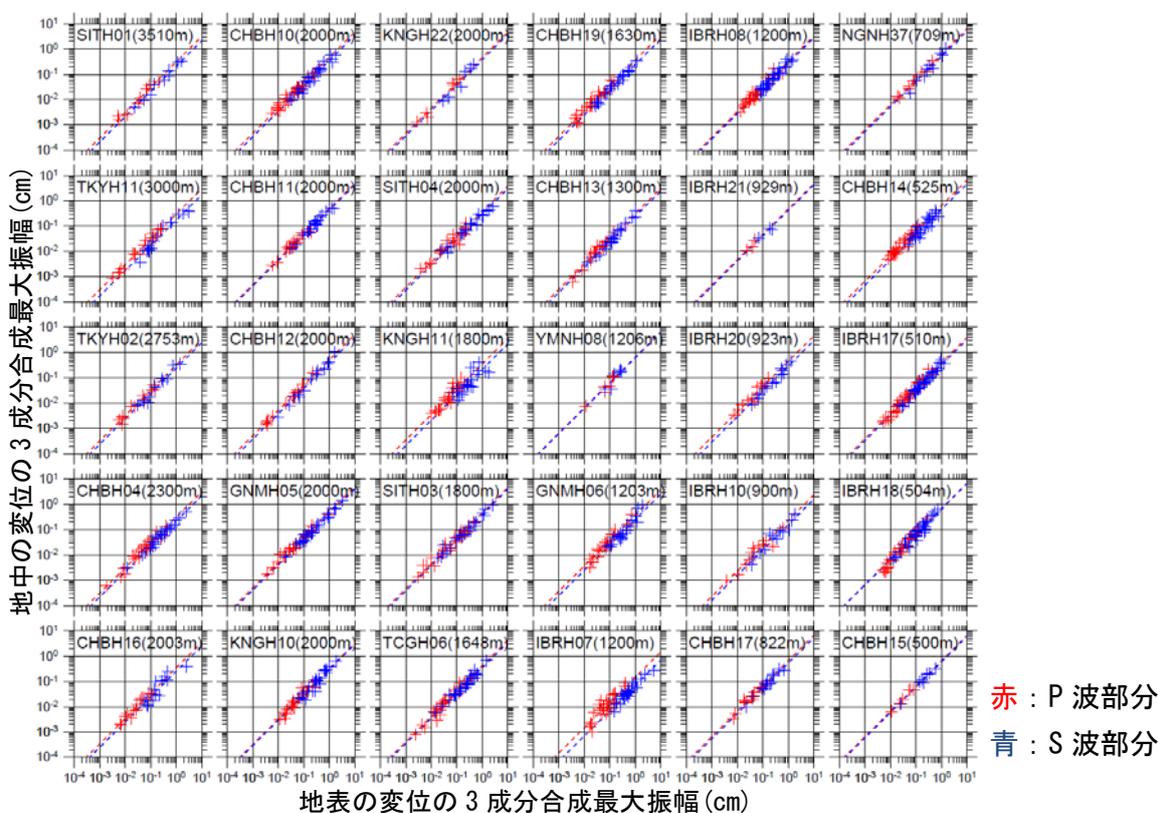


図2-10 地中と地表の変位の3成分合成最大振幅の関係。P波部分を赤、S波部分を青で示す。観測点毎の最大振幅の幾何平均を表す直線を点線で示す。

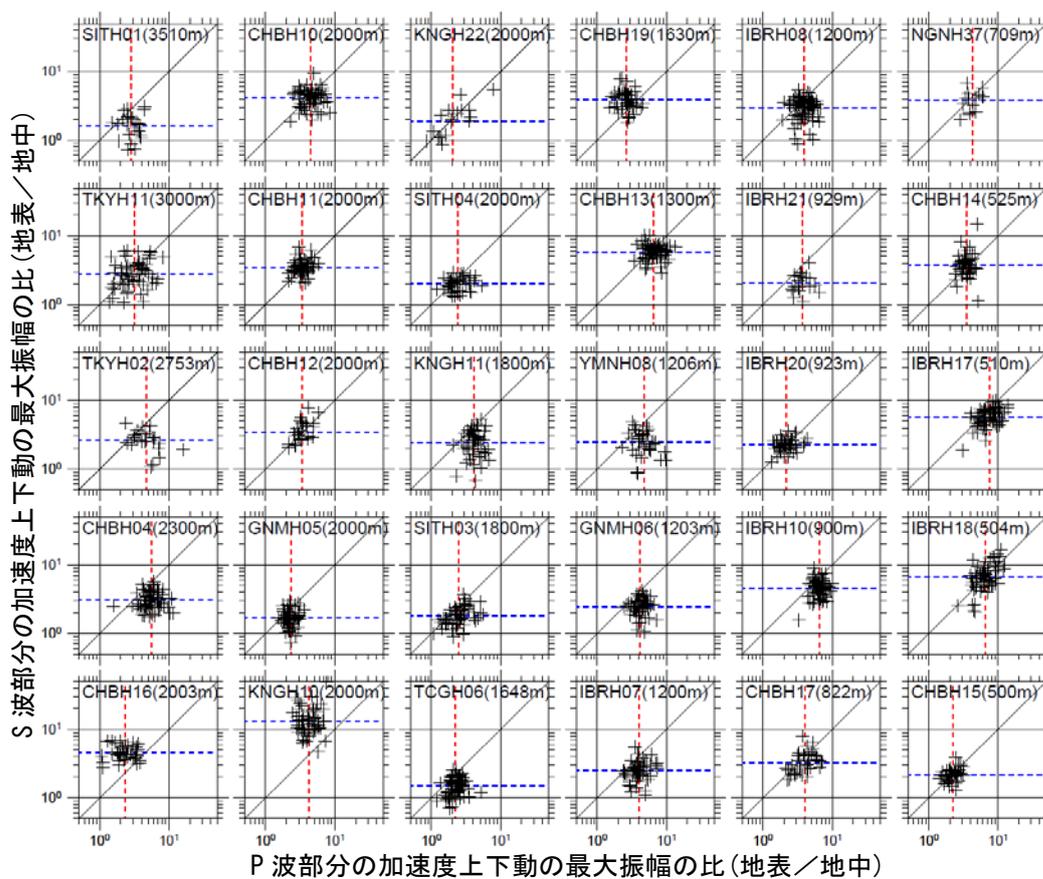


図2-11 P波部分とS波部分の加速度上下動の最大振幅の比（地表地震計／地中地震計）の関係。観測点毎の最大振幅の幾何平均を表す直線を点線（P波部分を赤、S波部分を青）で示す。

## 2. 4 地中地震計と地表地震計のMの差

変位の3成分合成最大振幅から推定したMの地中地震計と地表地震計の差を図2-12に示す。P波M、S波Mともに各観測点の平均で0.2から1.3程度、地表地震計よりも地中地震計のMが小さい。観測点内のばらつきは、地中地震計の深度に依らず概ね一定である。地中地震計と地表地震計のMの平均的な差には観測点間でばらつきがみられるため、Mを推定する際には、観測点毎のMの補正が有効と考えられる。なお、地表のMとM<sub>j</sub>（気象庁震源カタログのM）の差について、補足2に記した。

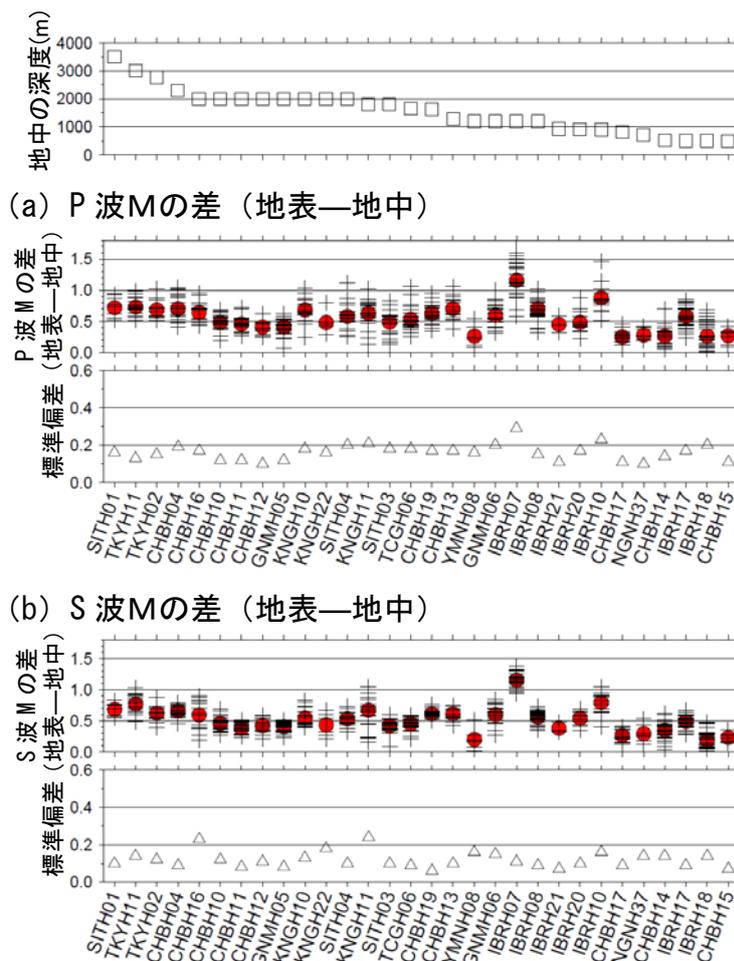
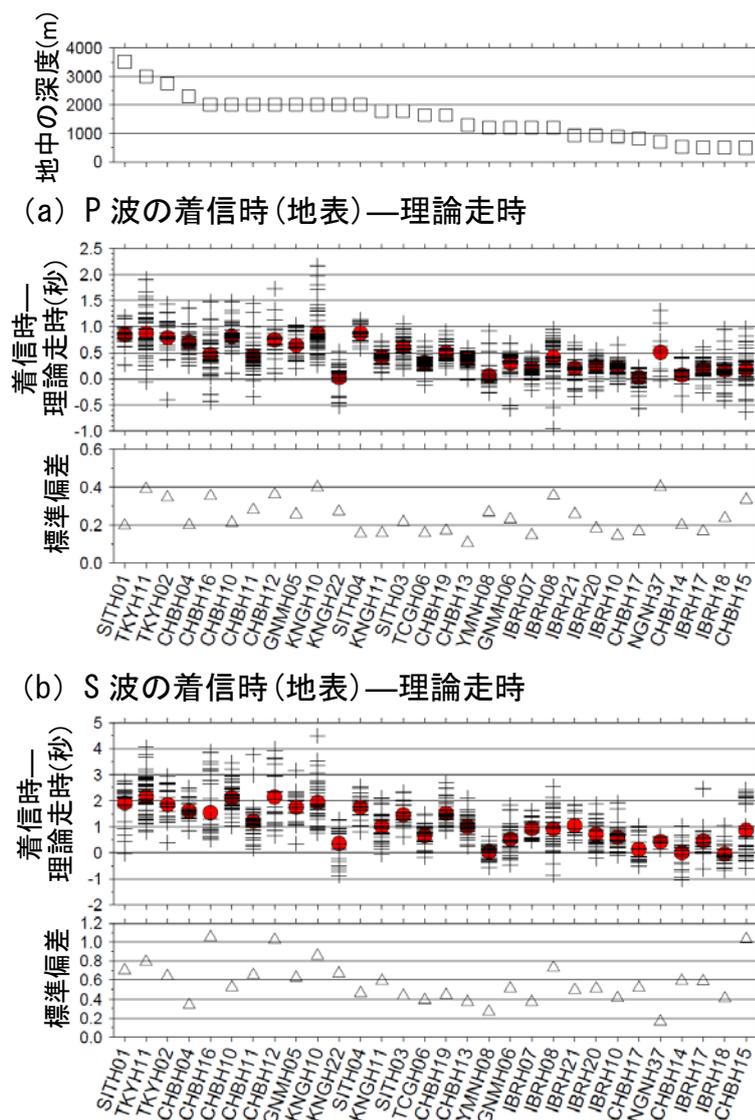


図2-12 P波M（P波部分のM）、S波M（S波部分のM）それぞれの、地表地震計と地中地震計のMの差（地表地震計—地中地震計）。●は、観測点毎の平均、△は標準偏差。

### （補足1）地表地震計のP波の着信時と理論走時の差について

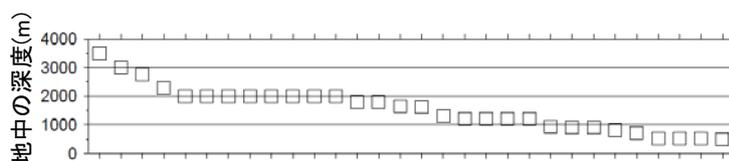
地表地震計のP波の着信時と理論走時（JMA2001）との差（図補1-1）は、平均0.1から0.9秒程度で、地中地震計の深度が深いほど大きい傾向があり、図2-4に示した地中と地表のP波の着信時間差と比べて同程度の観測点も多くみられる。標準偏差は0.2から0.4秒であり、図2-4にみられた地中と地表のP波の着信時間差のばらつき（標準偏差で0.02~0.06秒）に比べて1桁程度大きい。



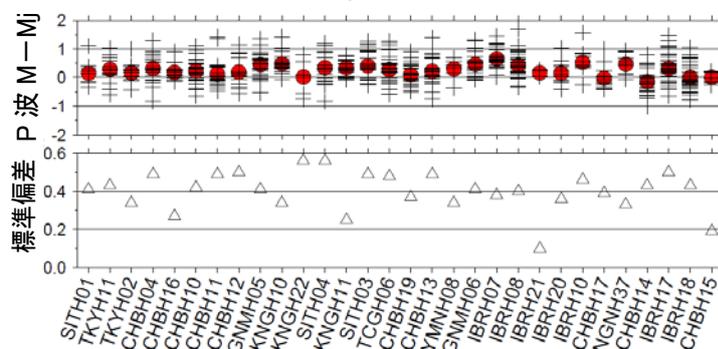
図補1-1 P波 (a)、S波 (b) それぞれの、「地表の着信時—理論走時」、観測点毎の平均 (●)、標準偏差 (△)。理論走時は JMA2001 による。

## （補足2）地表地震計でのMとMjの差について

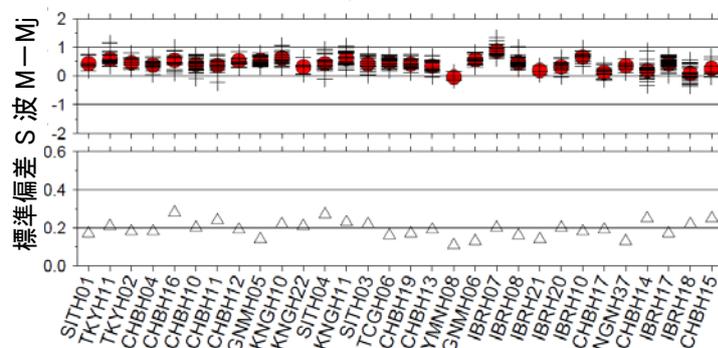
観測点毎の地表地震計でのMとMj（気象庁カタログのM）の差（図補2-1）をみると、地表地震計のMはMjに比べて同程度か大きい観測点が多くみられ、平均的な差は観測点間でばらつきがある。関東周辺の地震3例について、今回の解析対象ではない観測点を含めたKiK-netの地表地震計でのMとMjの差（図補2-2）をみると、今回解析対象とした観測点は、地表地震計のMが他の地域に比べて大きい観測点が多い。個々の観測点のMとMjとの系統的な差は、サイト増幅特性によるものと考えられる。緊急地震速報のM推定では、1点から数点の少数の観測点のMを用いるため、個々の観測点のMの精度が最終的な地震のMに大きく影響するが、今のところサイト増幅特性の影響は考慮されていない。観測点毎のM推定の際には、図補2-1にみられた個々の観測点のMとMjとの平均的な差をサイト増幅特性として補正することが有効と考えられる。全国の観測点のMについてもMjとの差を調べ、その差をサイト増幅特性として緊急地震速報のM推定の際に補正することも考察を続けていく。



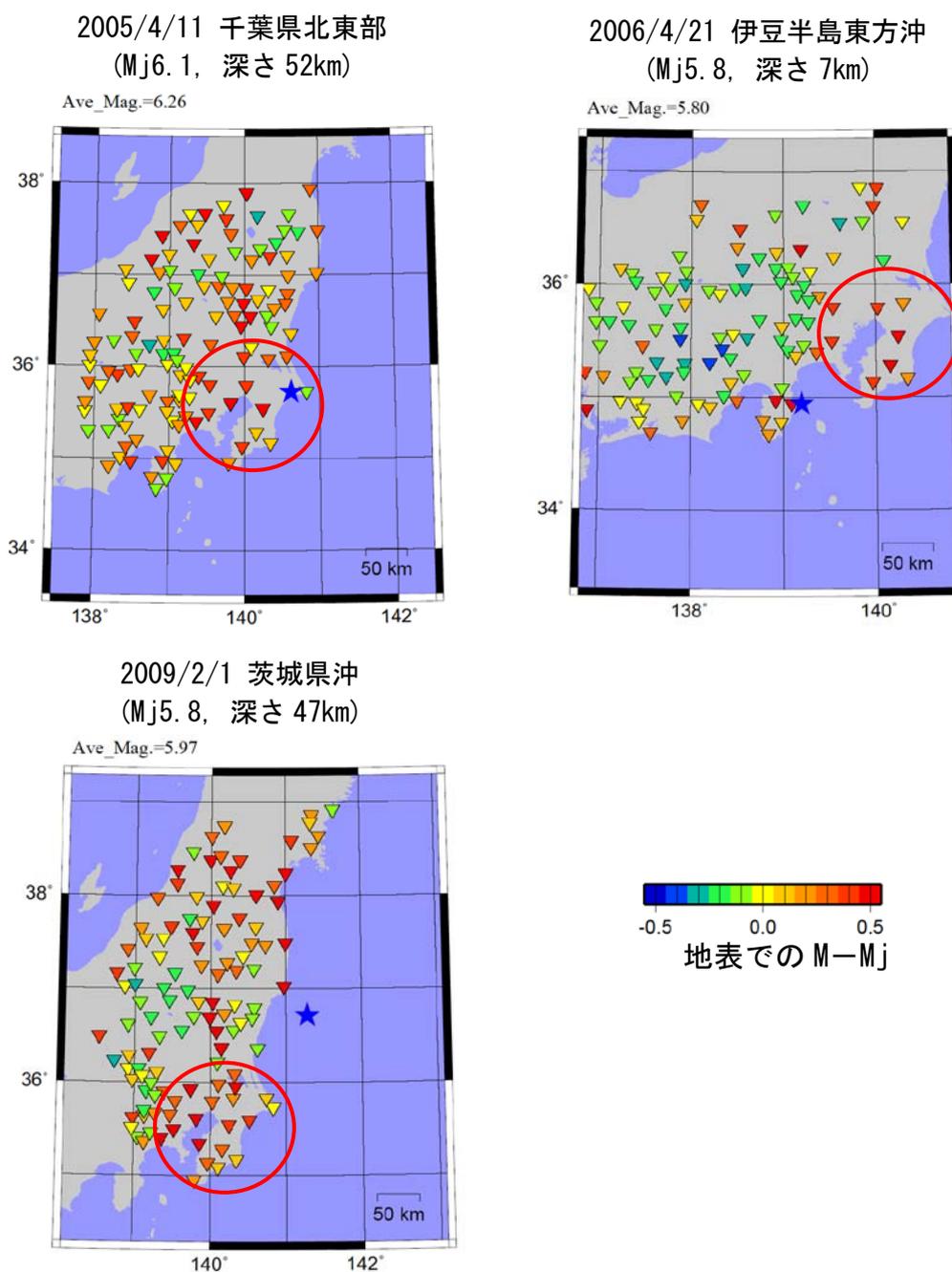
(a) P波M（地表） — Mj



(b) S波M（地表） — Mj



図補2-1 P波M（P波部分のM）、S波M（S波部分のM）それぞれの、地表のM-Mj、観測点毎の平均（●）、標準偏差（△）。Mjは気象庁カタログのマグニチュード。



図補2-2 関東周辺の地震3例について、KiK-netの地表地震計の全相MとMjとの差。全相Mの計算には、震央距離250km以内、3成分合成最大変位振幅10 $\mu$ m以上のデータを用いた。

## 3. B-△法、主成分分析法の適用結果の差

## この項の要点

- ・ 地中地震計による観測データに B-△法、主成分分析法を適用した。
  - B-△法で用いる経験式は、地表地震計用をそのまま使うと震央距離を大きく見積もることになる。実用化に向けて、地中地震計用の B-△関係式の導出が必要である。
  - 主成分分析法は、地中地震計によるものの方が、地表地震計によるものより推定精度が上がる。ただし、地中地震計を利用する場合、センサーの設置方位に注意が必要である。

防災科学技術研究所の基盤強震観測網（KiK-net）のうち、関東地方周辺で 500m 以深の観測を行っている観測地点（大深度地震計）のデータを用いた。期間 2007 年 7 月 1 日～2010 年 12 月 31 日、地点は図 3-1、対象となった地震は図 3-2 のとおり。

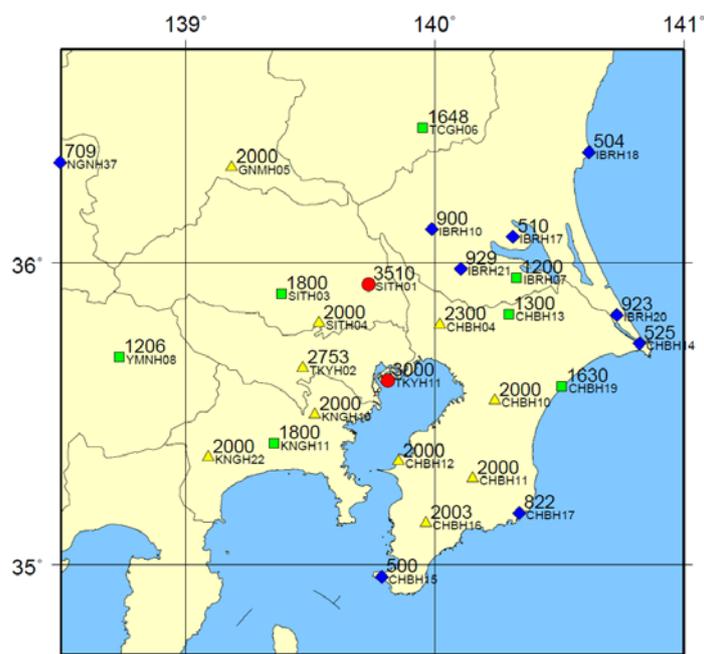


図 3-1 解析に用いた地点  
各観測点名の上にある数字は、地震計の設置深さ（単位m）

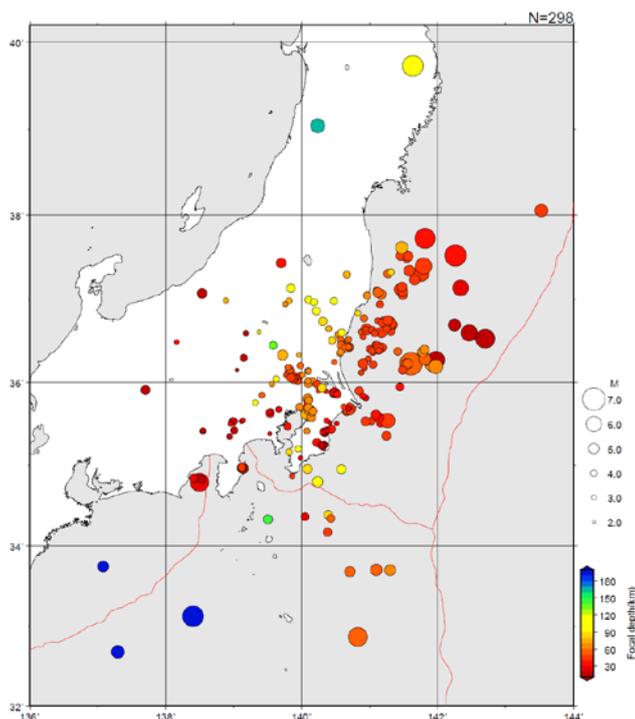


図3-2 解析に用いた地震  
(2007年7月～2010年12月)  
計298

対象とした地震で記録された波形に、気象庁の多機能型観測点で行っているトリガー検知方式による B- $\Delta$ 法、主成分分析法を適用し、得られた結果が図3-3である。地表に設置された地表地震計と地中地震計に分け示した。

### B- $\Delta$ グラフ

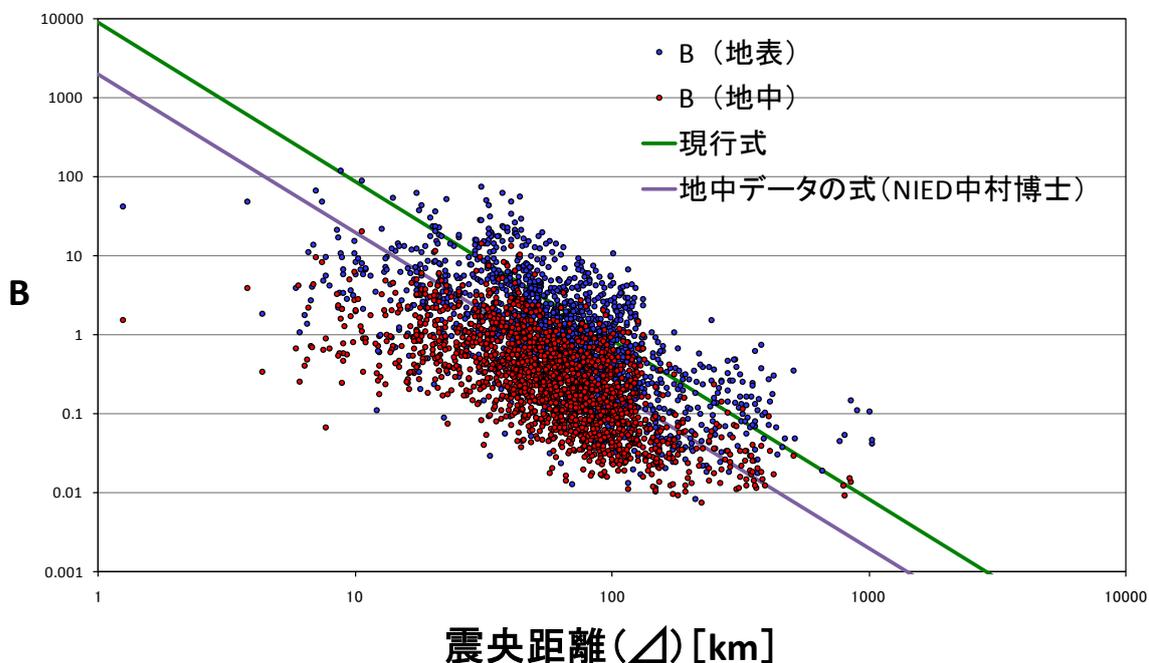


図3-3 B- $\Delta$ の結果（青丸：地表地震計、赤丸：地中地震計）

緑色の線は、現在緊急地震速報で用いている  $B-\Delta$  の関係式である。紫色の線は、防災科学技術研究所(NIED)の中村洋光博士が全国の KiK ネットの地中地震計のデータ（500m よりも浅い深さの観測点も含む）で導出した  $B-\Delta$  の関係式である。地表地震計は現行式と調和するが、地中地震計を用いる場合、現行式のまま用いると、 $\Delta$  が大きく求まることになる。実用化に向けて、地中地震計用の  $B-\Delta$  関係式の導出が必要である。

なお、 $B-\Delta$  の関係式は、エンベロープを

$$B \cdot t \cdot \exp(-At)$$

にフィッティングさせていることを考えると（ $t$  は、P波の着信時からの時間）、同じエンベロープは地中では、

$$1/C \cdot \{B \cdot t \cdot \exp(-At)\} = (B/C) \cdot t \cdot \exp(-At) = B' \cdot t \cdot \exp(-At)$$

で近似できる（ $C$  は、地中から地表への振幅の増幅度）。よって、

$$B' = (B/C)$$

である。これは、地中での  $B$  の値は、地表のおおよそ  $1/C$  になることを示している。

つまり、 $B$  は地盤の増幅率に依存する値である。

したがって、 $B$  と  $\Delta$  の関係を観測点毎に求めることで、推定精度が向上する可能性がある。

例えば、現行式  $\log \Delta = -0.498 \log B + 1.965$

中村地中式  $\log \Delta = -0.5 \log B' + 1.65$

であり、等しいと置くと

$$-0.498 \log B + 1.965 = 0.5 \log B' + 1.65$$

$\log B$ 、 $\log B'$  に係る係数はほぼ同じなので  $0.5$  で置き換えて、整理すると

$$\log B - \log B' = 0.315 \div 0.5 = 0.63$$

これから

$$B/B' = 10^{0.63} = 4.3$$

となり、地中からみた地表の増幅率を  $4.3$  倍とみていることになる。

観測点毎の  $B-\Delta$  結果を、図3-4～3-6に示す。各ページ左上から、地中観測の深さが深い順に並べている。各図タイトル上部に観測点名称と地中地震計の設置深さ（m）を示す。

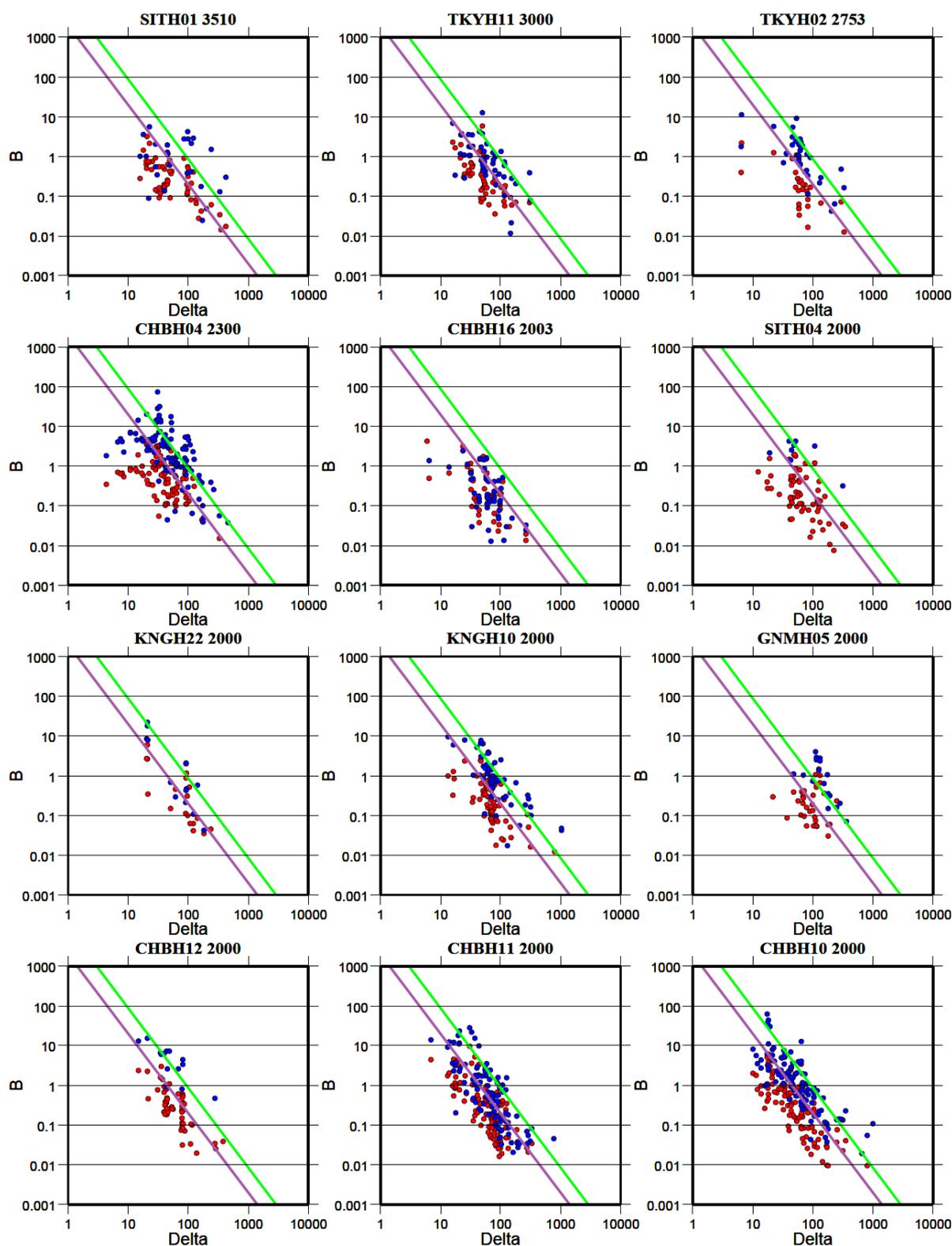


図3-4 観測点毎の B- $\Delta$ 結果 (1)

青丸：地表地震計、赤丸：地中地震計

緑線：現行式、紫線：地中データ式 (NIED 中村博士)

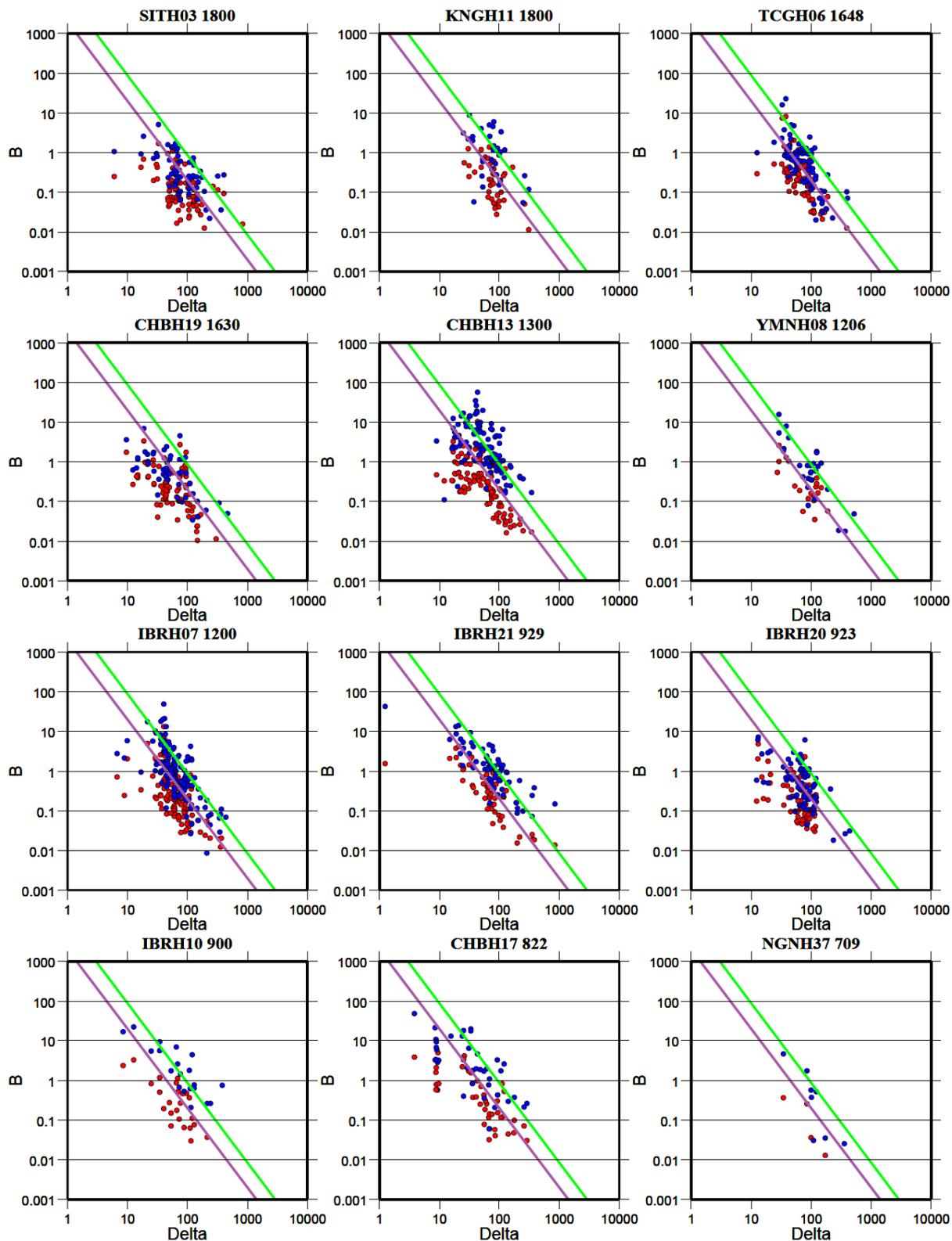


図3-5 観測点毎の B- $\Delta$ 結果 (2)

青丸：地表地震計、赤丸：地中地震計

緑線：現行式、紫線：地中データ式 (NIED 中村博士)

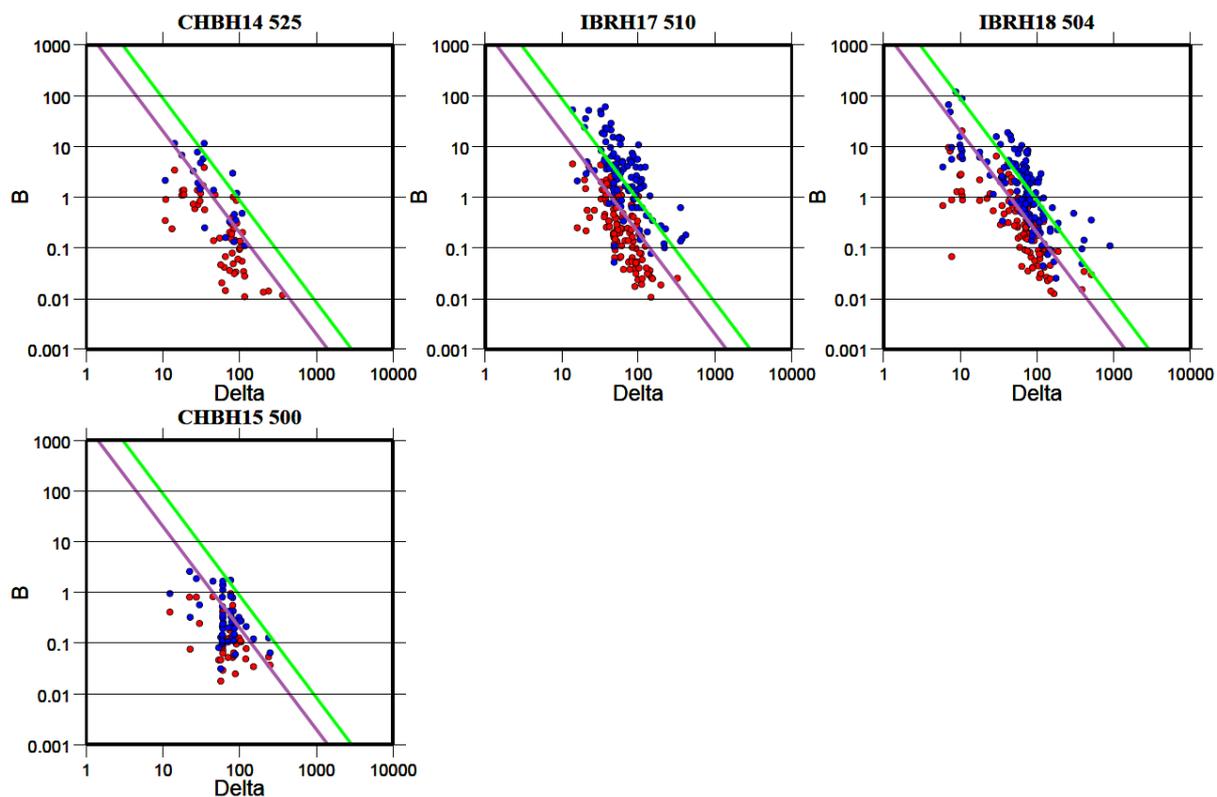


図3-6 観測点毎のB- $\Delta$ 結果(3)

青丸：地表地震計、赤丸：地中地震計

緑線：現行式、紫線：地中データ式（NIED 中村博士）

次に、主成分分析法による方位角推定の結果を整理する。観測点から気象庁カタログ震源の方位と、主成分分析による方位の差をとり、度数分布を作成した。図3-7は地表地震計によるもの、図3-8は地中地震計によるものである。地中地震計によるものは、センサーの設置方位の補正をしている。地表地震計による主成分分析結果より地中地震計による結果の方が、精度よく方位を決定しているものが多い。

図3-9～図3-15に観測点毎に、地表、地中、地中でセンサー設置方位を補正したものを並べて示す。

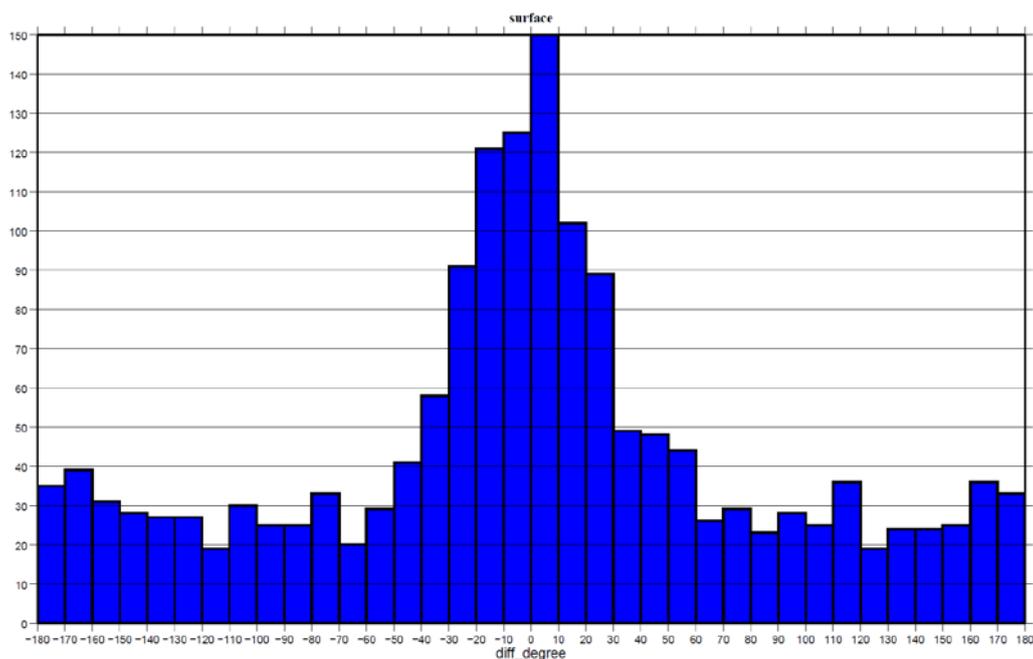


図3-7 推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（地表地震計データ）  
（観測点から気象庁カタログ震源の方位と、主成分分析による方位の差をとった）

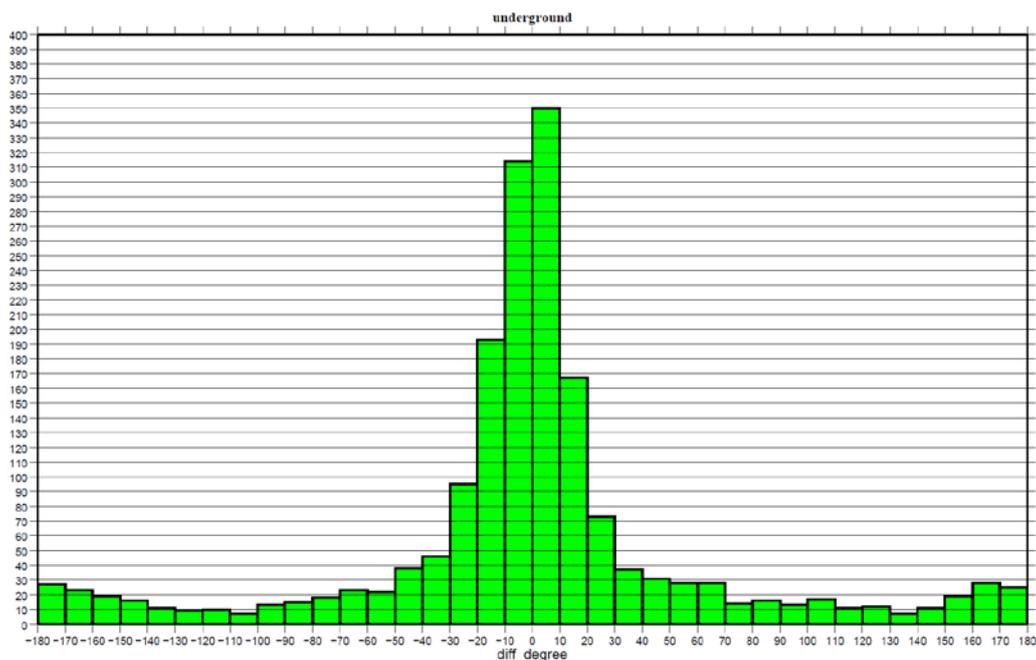


図3-8 推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（地中地震計データ）  
（観測点から気象庁カタログ震源の方位と、主成分分析による方位の差をとった）

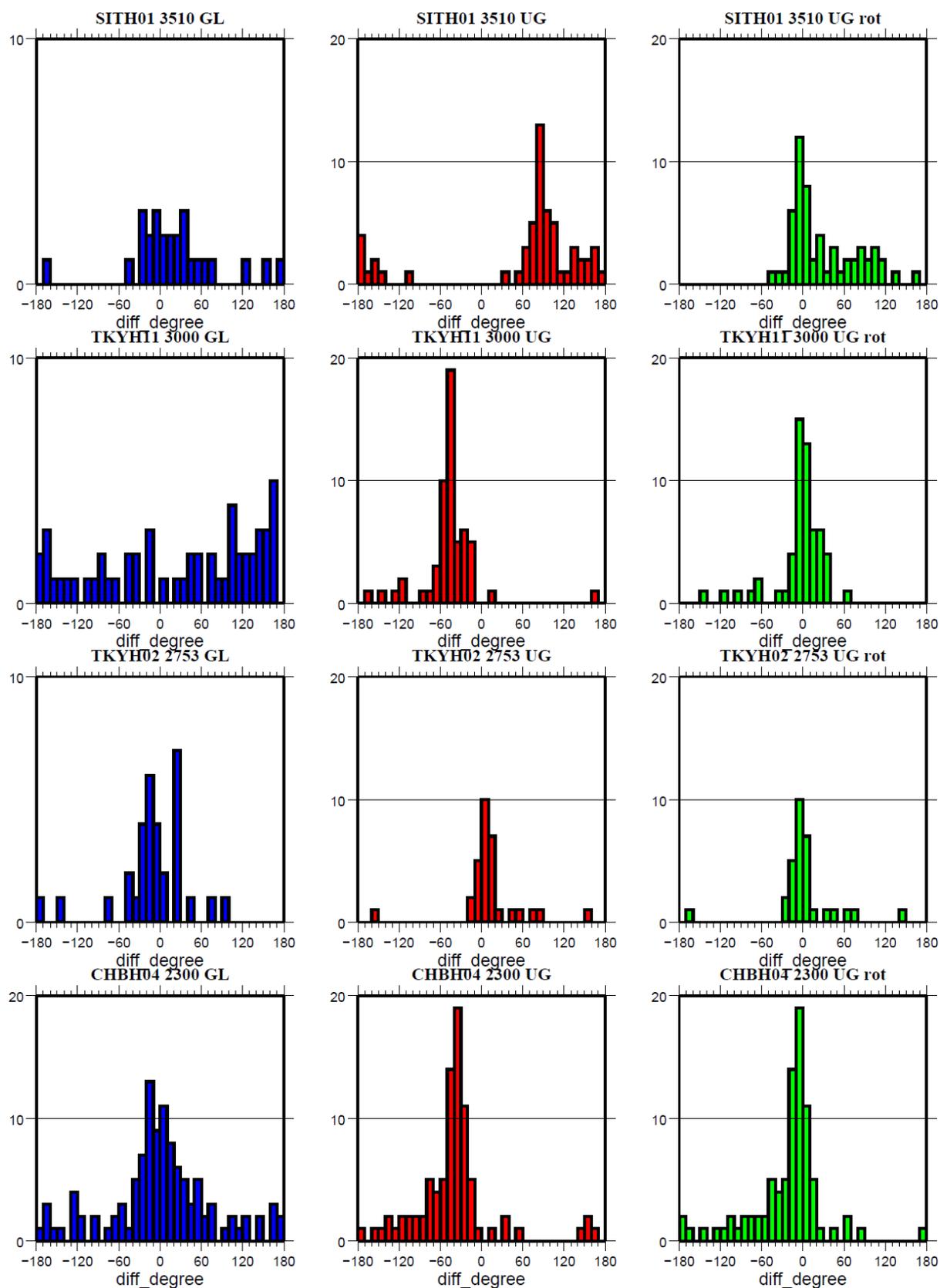


図3-9 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その1）  
 左コラム：地表地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）  
 右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

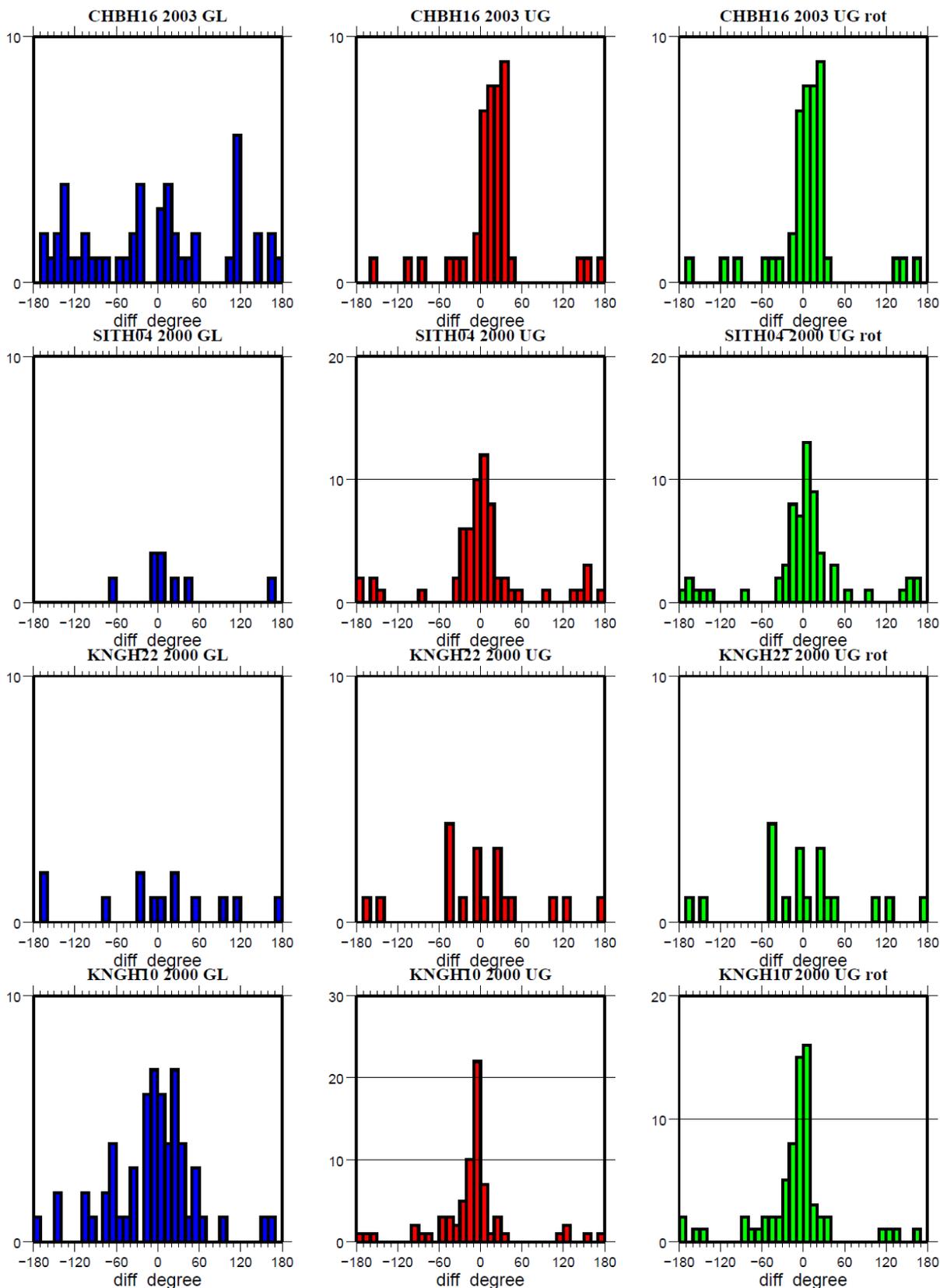


図3-10 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その2）  
 左コラム：地表地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）  
 右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

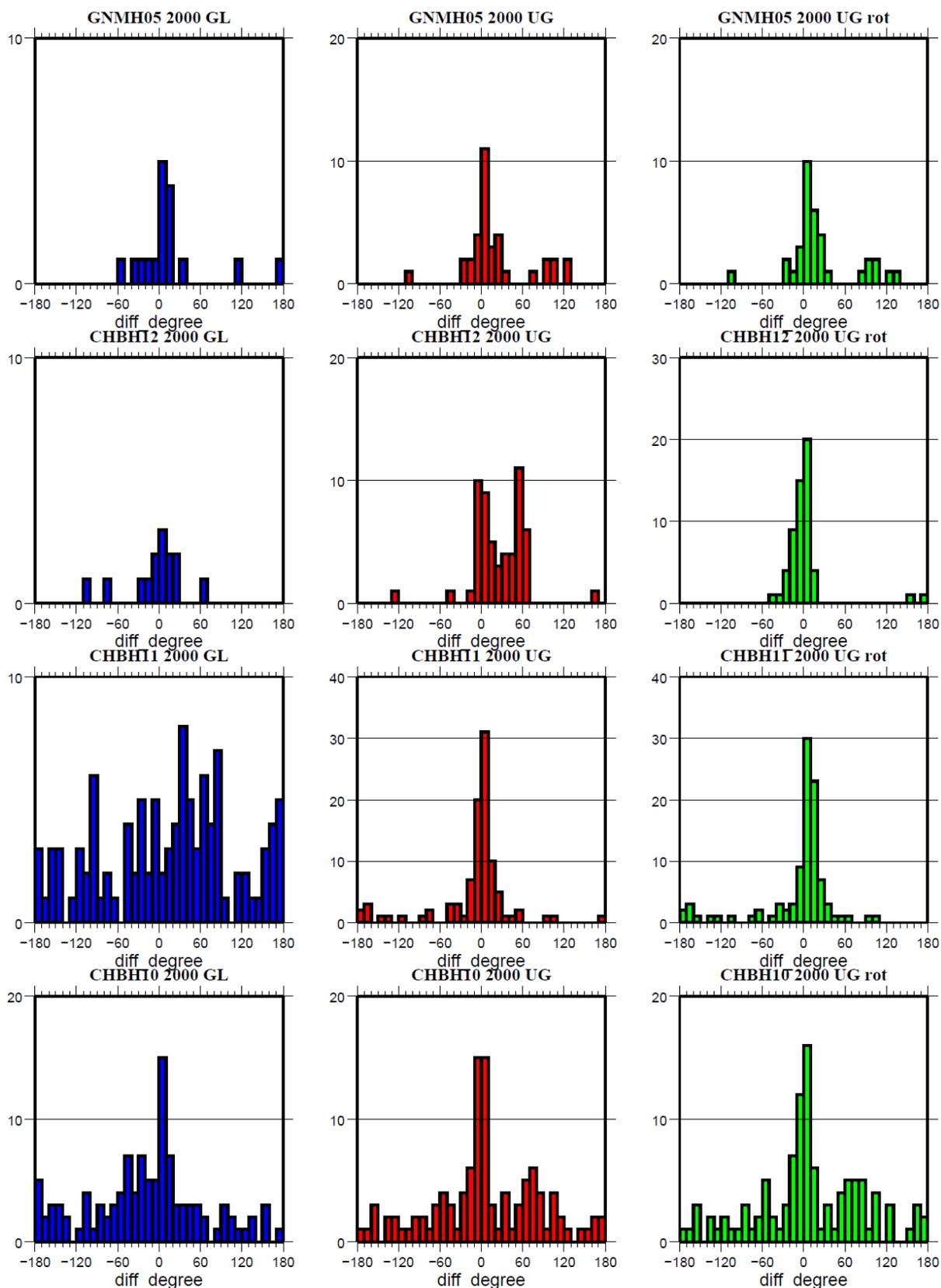


図3-11 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その3）  
 左コラム：地表地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）  
 右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

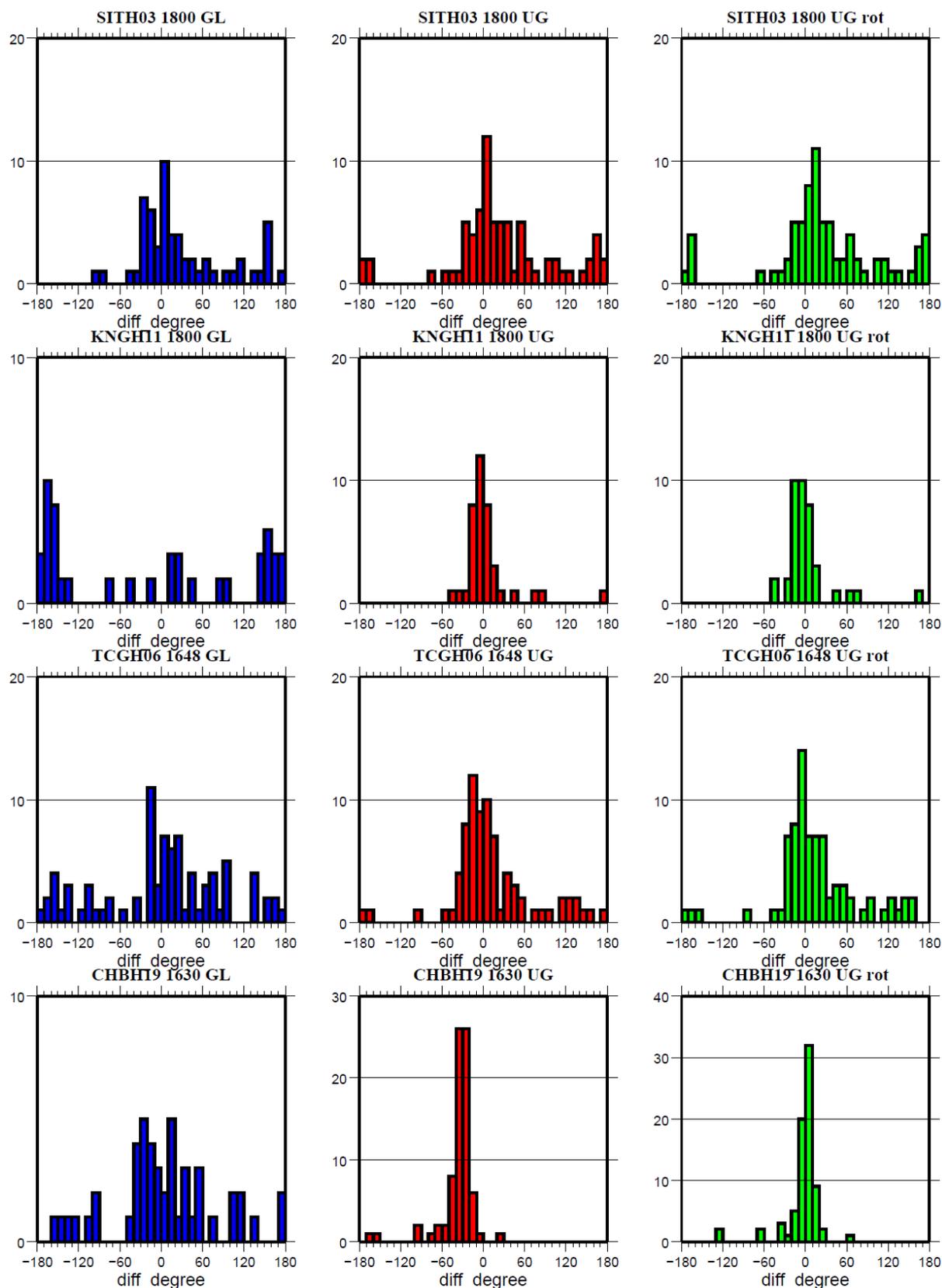


図3-12 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その4）

左コラム：地表面地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）

右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

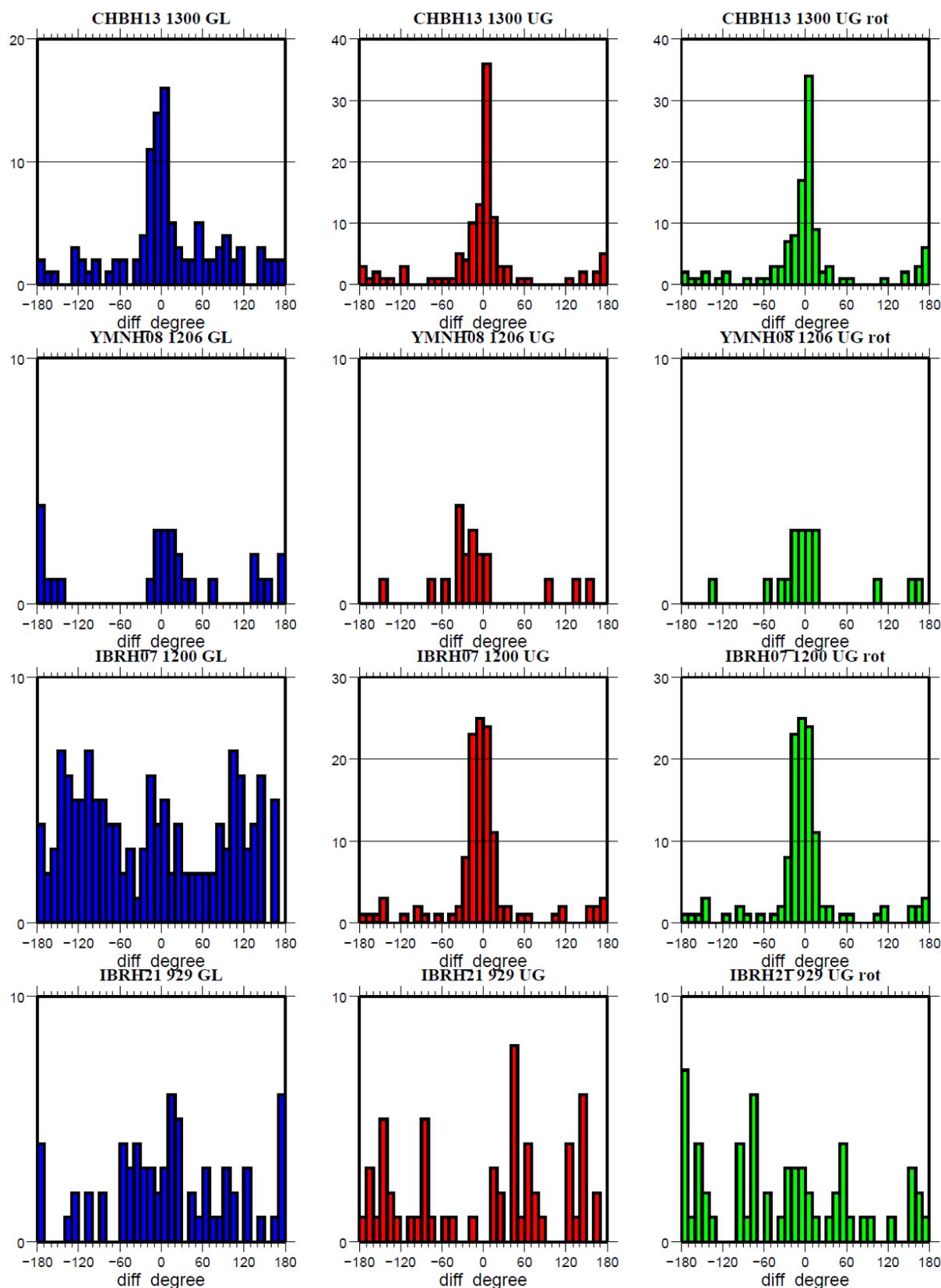


図3-13 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その5）

左コラム：地表面地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）

右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

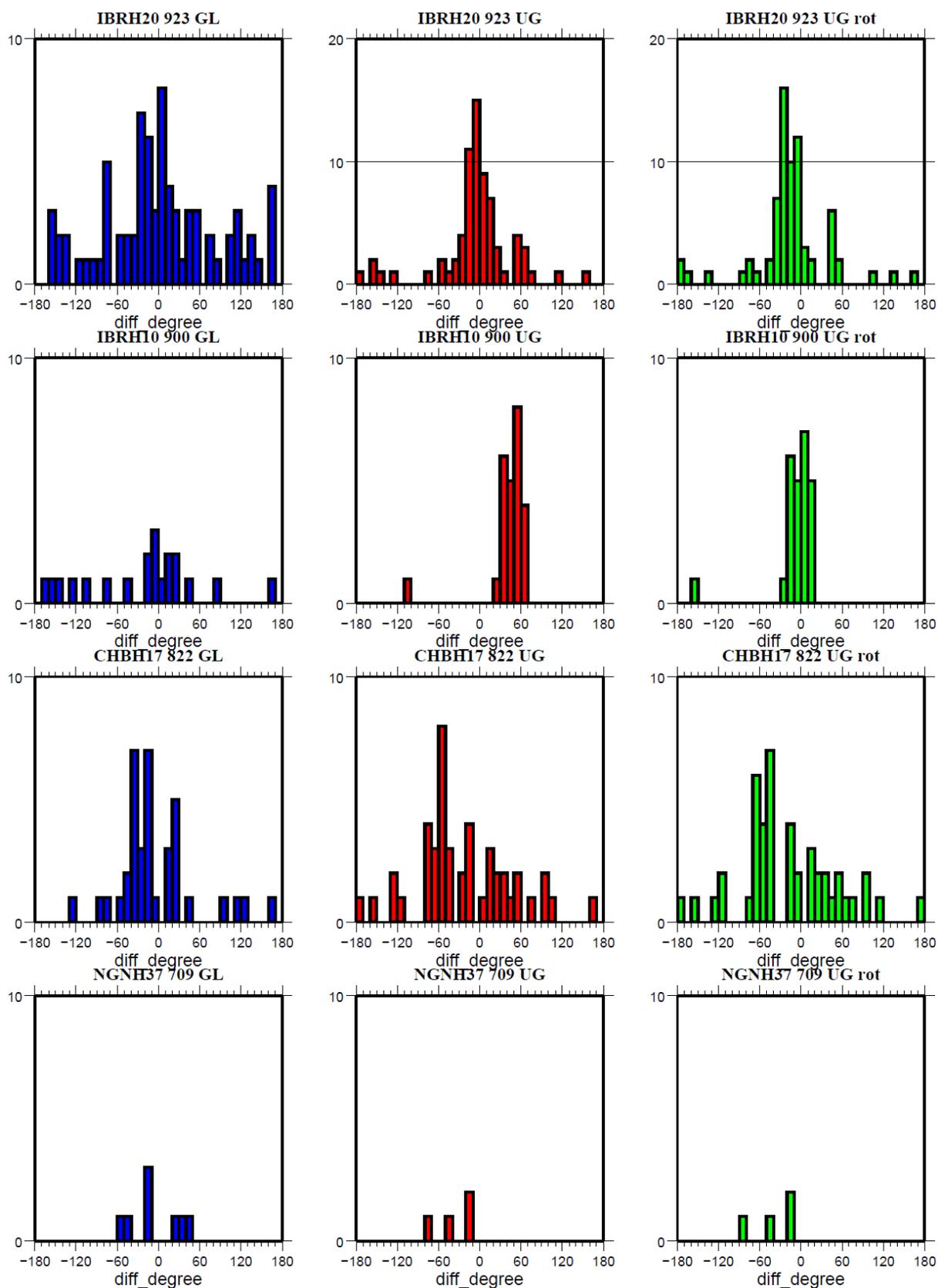


図3-14 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その6）

左コラム：地表地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）

右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

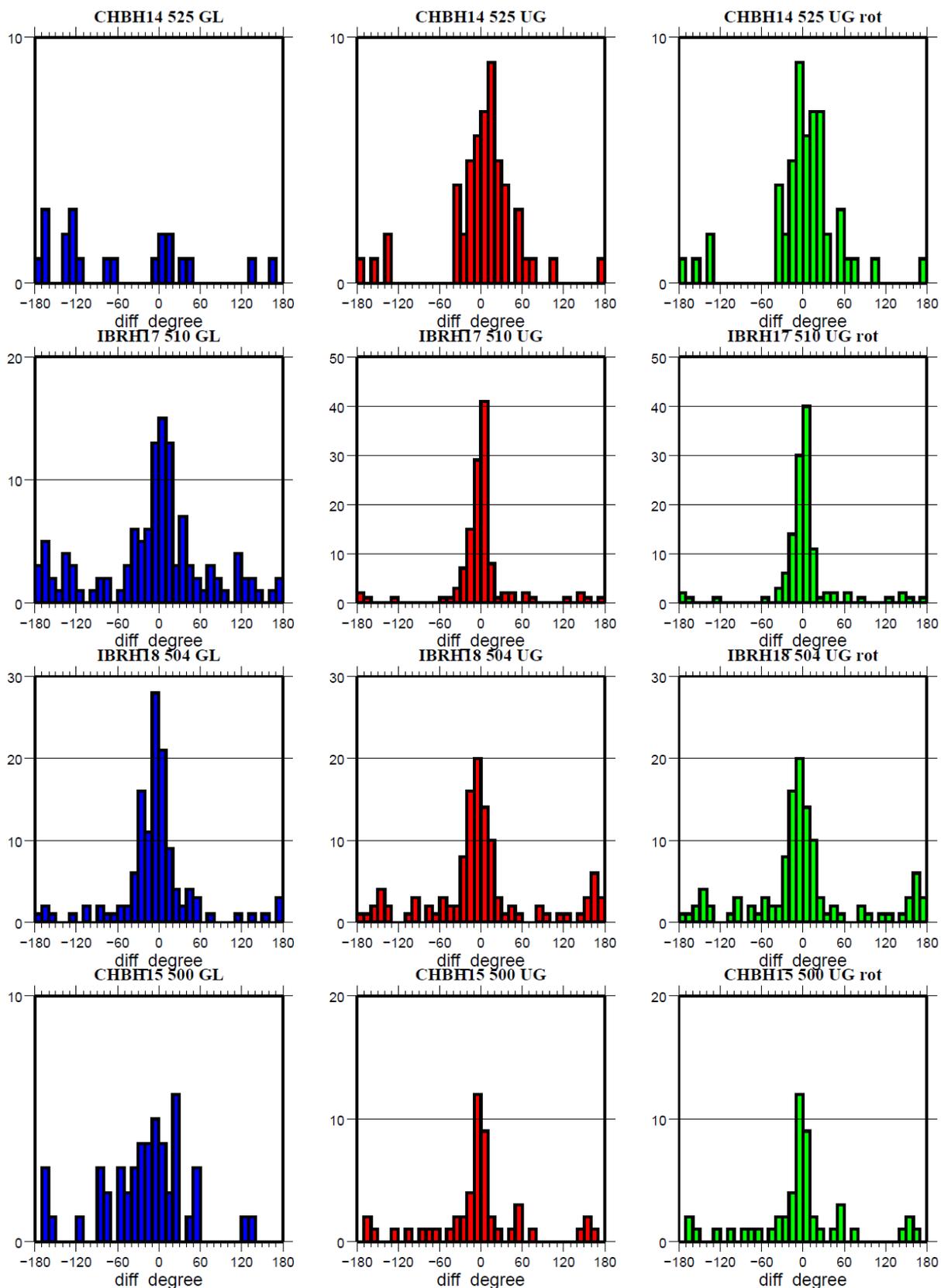


図3-15 観測点毎の推定震央と気象庁カタログ震央との方位角差分布（その7）  
 左コラム：地表地震計、中コラム：地中地震計（設置方位補正なし）  
 右コラム：地中地震計（設置方位補正後）

#### 4 地表と地中の到着時差を考慮したテリトリ法

##### この項の要点

- ・ 深井戸による観測データにテリトリ法を適用した。テリトリ法に深井戸用の変更が必要かどうか検討する。到着時差を考慮することによって、深い観測点の周囲を中心に50グリッド程度が異なるテリトリへと振り分けられることが分かった。

現在緊急地震速報において地震を検知した観測点が1～2点のときに用いられているテリトリ法は、観測点からの着順をもとにテリトリマップを作成するため、どの観測点からの遅延も一定であることが仮定されている。テリトリ法では震源の深さは10kmと仮定しているため、深い観測点は負の遅延を与えたことに相当する。これがテリトリマップに与える影響について調査した。

テリトリ法はボロノイ分割と呼ばれる数学理論によって平面を分割することによって担当領域「テリトリマップ」を作成する。具体的には2点間に垂直二等分線を引き、平面を分割する。これらの線によって囲まれた領域はその観測点に一番近い領域であり、この観測点での最初の着信はこの領域内で地震が発生したことを意味する。

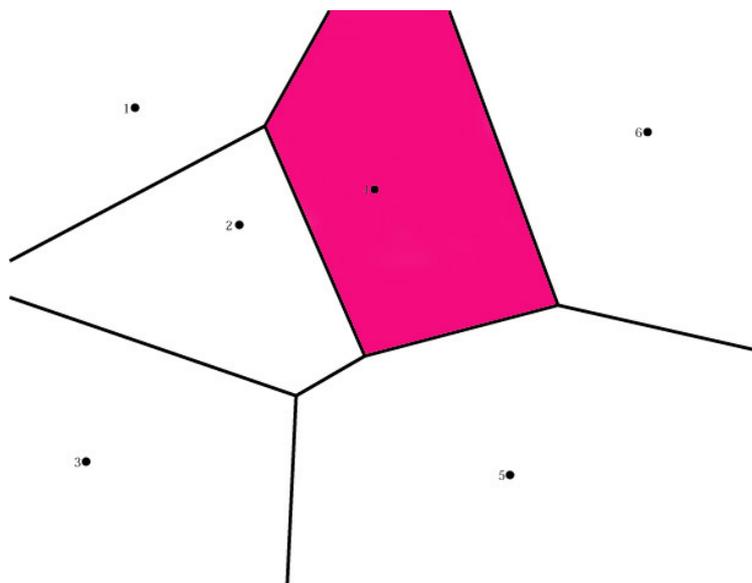


図4-1 ボロノイ分割の例 (South and Boots 1999 に加筆)  
各観測点間に引いた垂直二等分線で平面を分割する

現行の気象庁多機能型観測点に加え、防災科学技術研究所の基盤強震観測網 (KiK-net) のうち、関東地方周辺で500m以深の観測を行っている観測地点を加えた場合のテリトリ法の担当領域(「テリトリマップ」)を求めた。対象となった地点は2. 1に示したものと同一である。実際のテリトリ法では、0.1度単位のグリッドポイントに対して、いずれの観測点のテリトリに入るのかを計算している。以下ではこの方式に従って計算したテリトリマップを示す。

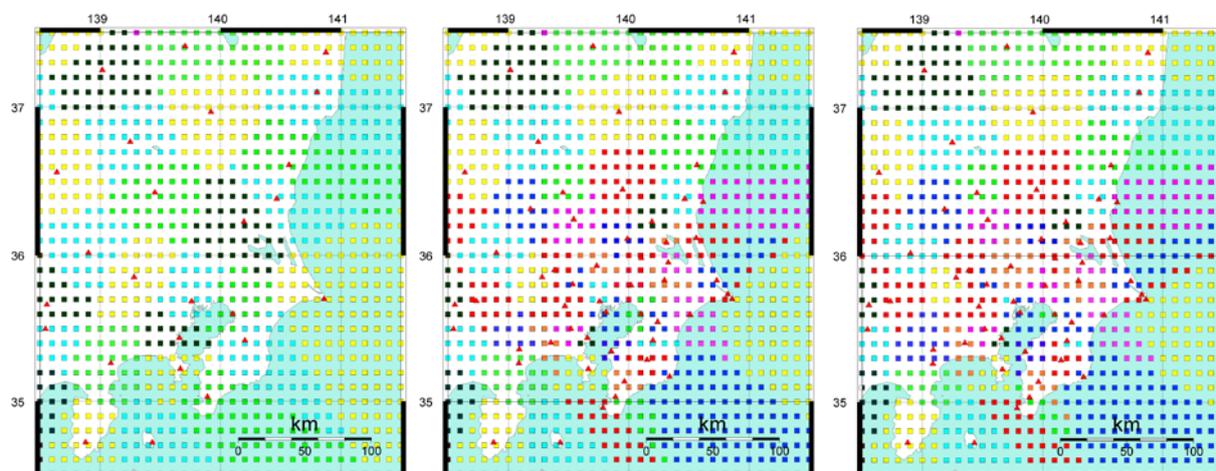


図4-2 現行のテリトリマップ 図4-3 KiK-net 観測点を取り入れたテリトリマップ 図4-4 KiK-net に到着時差を取り入れたテリトリマップ

図4-2は現行のテリトリマップ、図4-3はKiK-netの観測点を導入(ただし地表地震計を仮定)した場合のテリトリマップである。図4-2と図4-3の違いは純粹に観測点数の増加に対応したものである。図4-4はKiK-net観測点に深井戸の効果としての地震波の到着時差(地上地震計の到着時-地中地震計の到着時)を導入したものである。到着時差の方位や入射角の影響は小さく、地表に対して一定値であるとして考える。到着時差は2で求められた値を用いた。

到着時差の効果をはっきりとさせるために図4-5では図4-3と図4-4で違いのあるグリッドに印をつけた。深い観測点の周囲を中心に50グリッド程度が異なるテリトリへと振り分けられた。

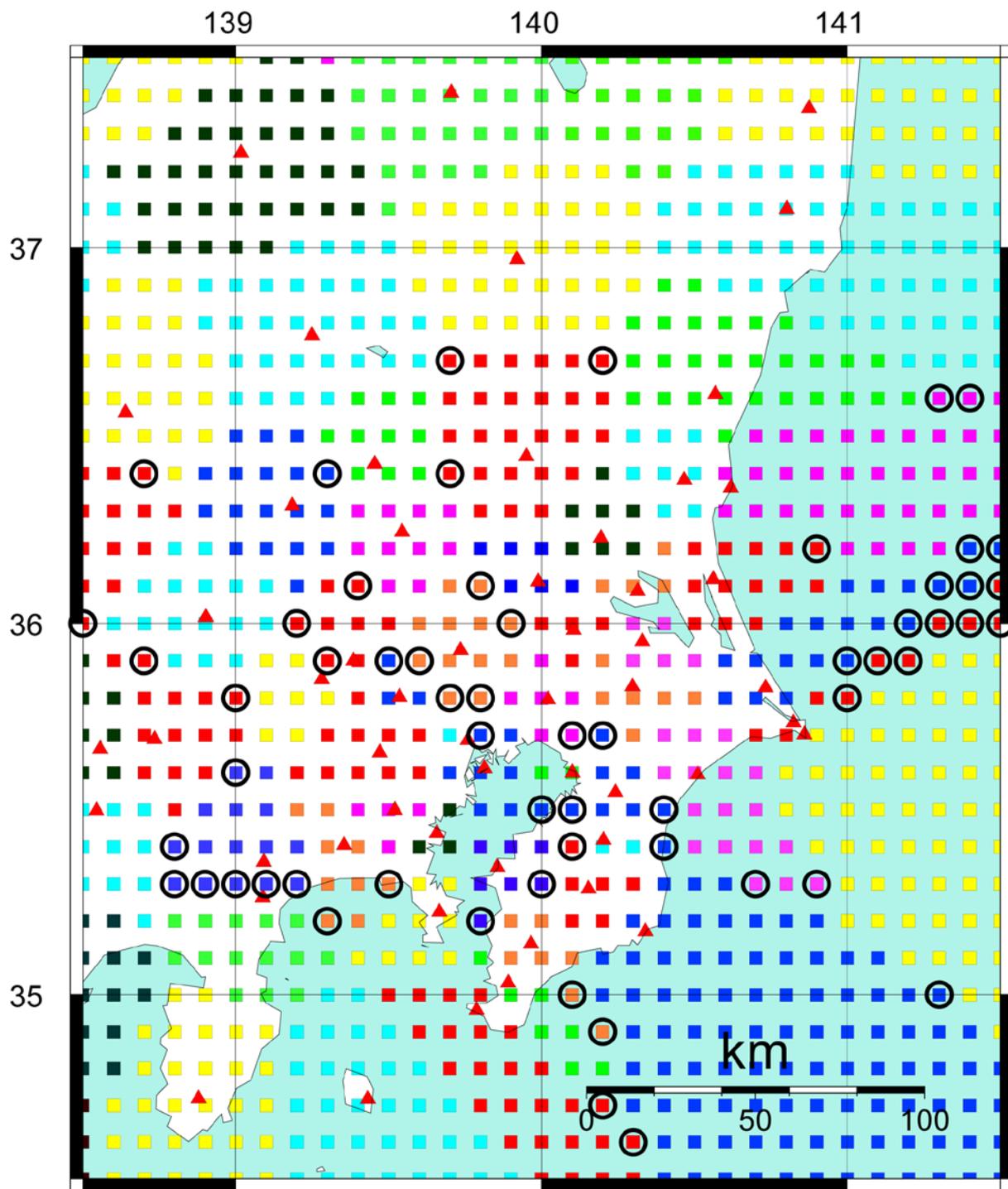


図4-5 KiK-net 観測点に到着時差を導入した事例  
丸で囲んだグリッドポイントが異なるテリトリへと振り分けられた