3.2 活動的カルデラ火山の地下構造調査

3.2.1　阿蘇カルデラ

3.2.1.1　阿蘇カルデラの地下構造調査

【実施内容】

活動的カルデラ火山の地下構造を求めるため，阿蘇カルデラおよびその周辺においてMT法による電磁探査を行った．本年度は火山活動の活発化により測定を見合わせていた中岳第一火口周辺の10地点で観測を行い，当該地域の見かけ比抵抗，位相とインダクションベクトルの分布図を作成した．各測点のそれぞれのデータに対し，1次元インバージョンを施し，比抵抗構造の概要を把握した．また，昨年度実施した比抵抗構造解析に引き続き，深度方向への感度を高めつつより詳細な構造を求める目的で，平成27-28年度の合計101地点のデータを対象にした3次元インバージョンを実施し，約20kmの深さに至るカルデラの地下比抵抗構造を求めた．さらに，広帯域MT法では探査が困難な20km以深の比抵抗構造を明らかにすることを目的にし，ネットワークMT法の阿蘇カルデラでの適用可能性の検証を開始した．ネットワークMT法は電話回線設備を利用した長基線の電磁探査法である．1993～1998年の期間に観測・取得されたネットワークMT法データを使用した試みとして，阿蘇カルデラを中心に分布する50の電位差観測線を使用した3次元比抵抗インバージョン解析によって，予備的な約50kmまでの深度の地下比抵抗構造を求めた．

【研究内容】

(1) はじめに

阿蘇カルデラは南北約25 km，東西約18 kmの世界最大級のカルデラであるが，外側を含めた広い範囲が陸上にあるため物理探査を行うには適地である．カルデラの構造や成因，マグマ供給系のモデルを作成するための基礎データを構築するために，当該カルデラをモデルフィールドとしてMT法による電磁探査を行った．作業工程を表3.2.1.1-1に示す．平成27年度は，およそ30 km四方の領域において56点（うち6点は増設）の観測点を設け測定を行ったが，さらに詳細な構造を求めるため，平成28年度には範囲をおよそ50 km四方の領域に拡張し，観測点分布の疎な個所を埋めるように45点（うち4点は増設）設け測定を行った．いずれも，夜間18時～翌朝8時の時間帯に測定を行い，1点あたり最低2晩以上のデータを取得した．リモートリファレンス等のデータ処理を行い，300～0.001 Hzの良好なデータを取得した．本年度は，阿蘇火山のマグマ供給系を調べるためには重要であるが，これまでは噴火活動のために接近できなかった阿蘇中岳第一火口周辺の10観測点について測定を行ったので，その結果を報告する．一方で，平成27年度に取得した56点のデータを用いて3次元のインバージョンを行い，比抵抗構造を求め，その結果については前回の報告書に詳細に記載した．本年度までに取得したデータを用いた3次元インバージョンを行ったので，その結果を報告する．これまでの解析により，本手法による探査深度は20㎞程度であることが明らかになってきた．そこで，より深度の比抵抗構造を求める手法として，ネットワークMT法の阿蘇カルデラ地域への適用可能性の検討を開始した．

表 3.2.1.1-1　作業工程

	H27	H28	H29	H30
測定	56 地点（カルデラ内外）	45 地点（カルデラ内外）	10 地点（第一火口周辺）	
解析	予備的な 2 次元解析	56 地点のデータを用いた比抵抗構造	101 地点のデータを用いた比抵抗構造	全地点のデータを用いた比抵抗構造
予察			ネットワーク MT 法の適用可能性	ネットワーク MT 法の適用可能性

（2）中岳第一火口周辺での観測およびその結果

a）測定概要

いずれの測定においても，Phoenix 社製の MTU-5A を用いた MT 探査システムを使用した．測定周波数は，320 Hz～0.000343 Hz までの 80 周波数である．測点の位置を図 3.2.1.1-1 に示す．各測点の座標を表 3.2.1.1-2 に示す．測定は，それぞれ 1101～1103 については 2017 年 4 月 20～25 日，1104~1108 については同年 5 月 10～17 日，1109 と 1110 については 2018 年 2 月 19～26 日の期間について行った．昨年度行った 3 次元インバージョンの結果によると，噴火活動をもたらすマグマは火口原の北側に位置しているため，近年活発な噴火活動を行っている第一火口へのマグマ供給系を調べるためには，火口原北側のデータを取得しておくことが望ましい．1104 のデータの質が悪かったため，その近傍に 1109 および 1110 を設置し比較的長い期間データの取得を行った．

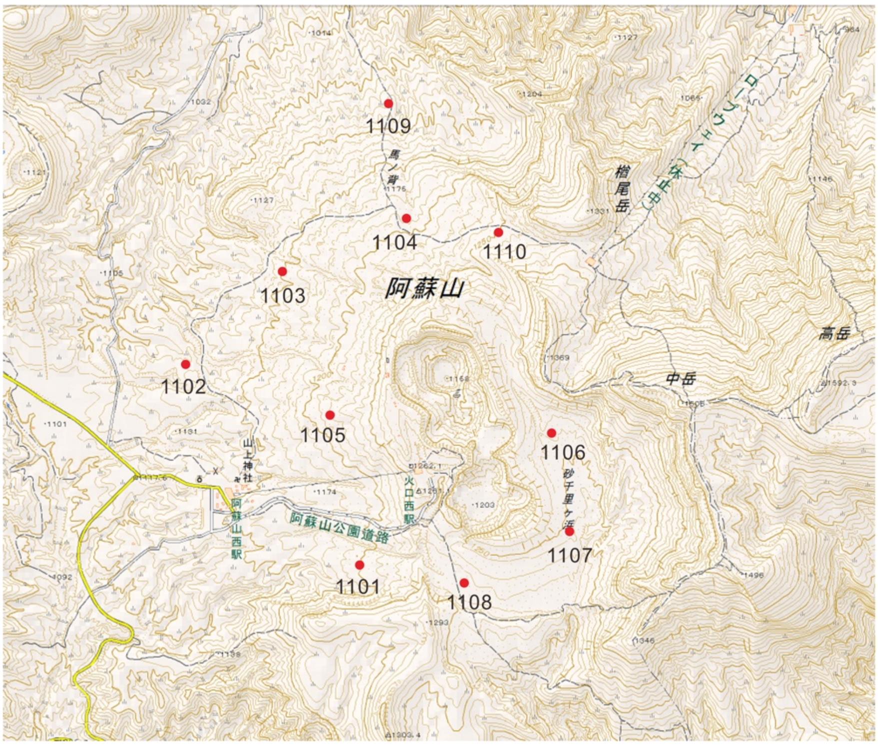


図 3.2.1.1-1 測点位置図．作図には国土地理院の地形図を用いた．

表 3.2.1.1-2　測点の座標

測点番号	緯度	経度
1101	32.87677	131.08095
1102	32.88503	131.07237
1103	32.88887	131.07722
1104	32.89117	131.08345
1105	32.88302	131.07970
1106	32.88227	131.09050
1107	32.87822	131.09138
1108	32.87603	131.08627
1109	32.89587	131.08252
1110	32.89053	131.08787

b) 測定結果

測定データの編集および処理方法については昨年度までと同様である．まず，各測点の 1 晩(14 時間)で取得された電磁場 5 成分の時系列データを等間隔に 20 個のセグメントに分割した．次に調査域から南方約 100 km の鹿児島県霧島市地内に位置する日鉄鉱コンサルタント株式会社の所有する常設点の水平磁場データを用いてリモートリファレンス処理を行い，各セグメントのインピーダンスを求めた．そして，S/N 比の高いセグメントのデータを編集して，データ品質の大幅な改善を図った．そのようにして得られたデータから，南北方向の電場と東西方向の磁場より得られる見掛け比抵抗と位相を XY モード，東西方向の電場と南北方向の磁場より得られる見掛け比抵抗と位相を YX モードとして，見掛け比抵抗および位相曲線を作成した．なお，真北（0°）を X 方向としてデータ処理を行っている．

図 3.2.1.1-2a～j に最終結果を示す．各測点の結果は，0.1 Hz(10 秒)周辺の周波数帯においてばらつきがあるものの，多くの測点で見掛け比抵抗および位相曲線の連続性を把握することができた．測点 1103，1104 については，それぞれ 100Hz，1Hz 以下で大きなばらつきを示し，自然信号強度の大小にかかわらず S/N 比が改善する傾向はみられなかった．

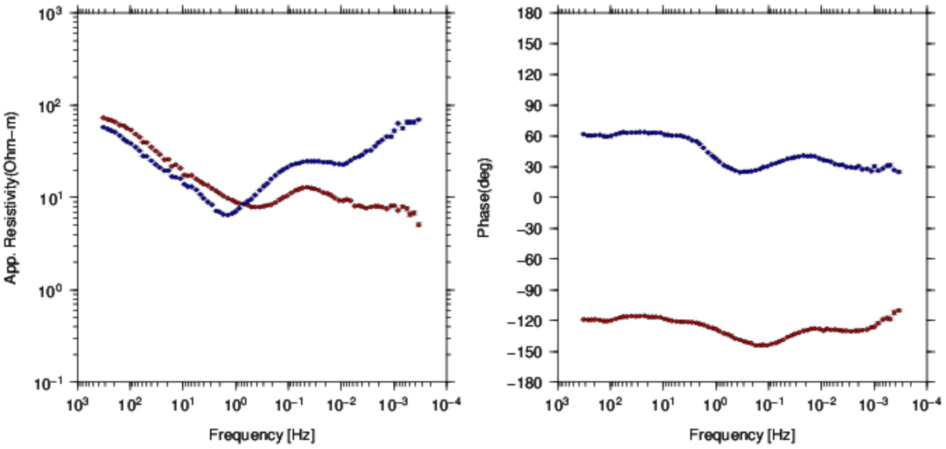


図 3.2.1.1-2a 測点 1101 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

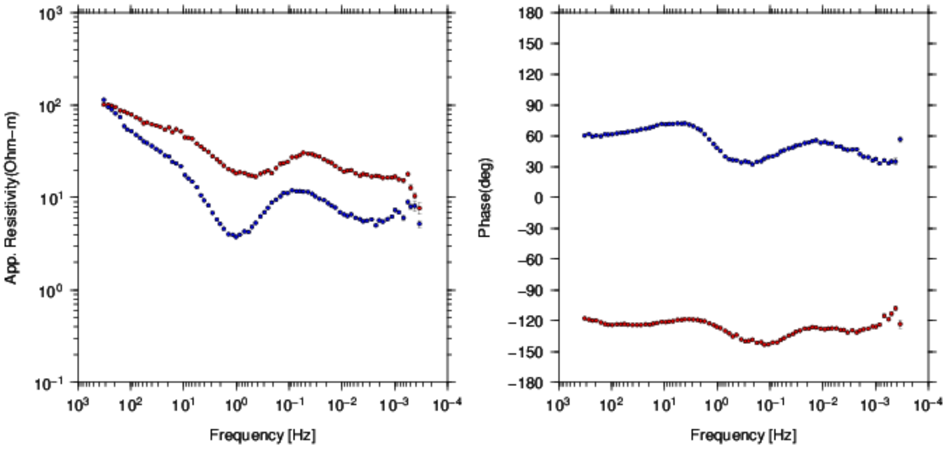


図 3.2.1.1-2b 測点 1102 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである

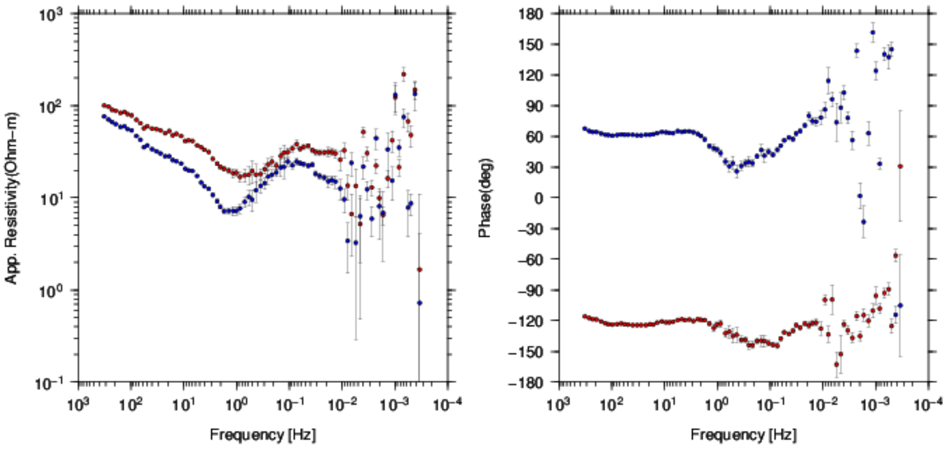


図 3.2.1.1-2c 測点 1103 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

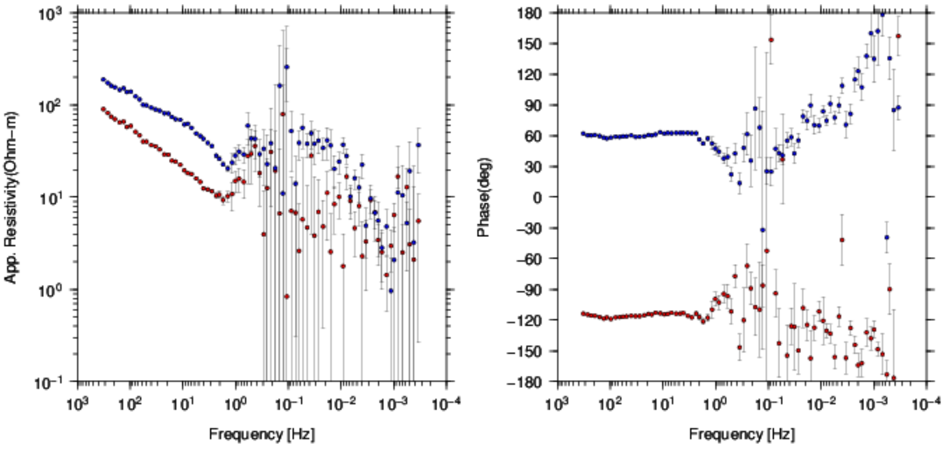


図 3.2.1.1-2d 測点 1104 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

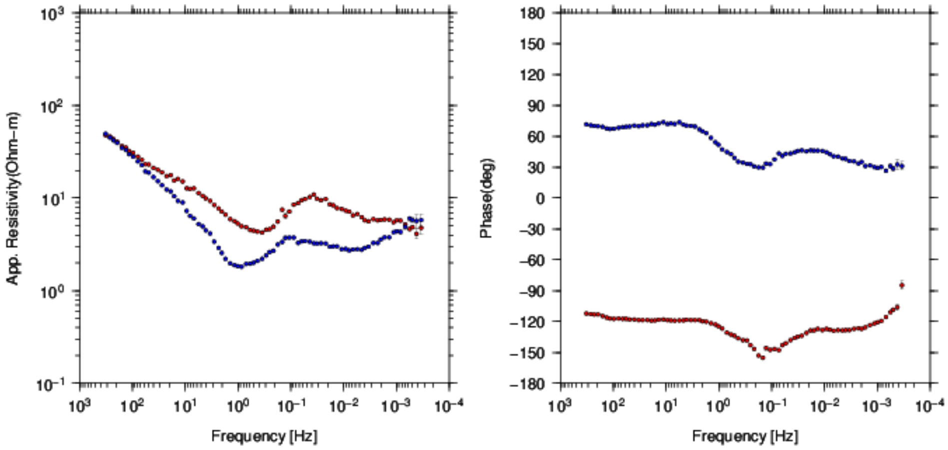


図 3.2.1.1-2e 測点 1105 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

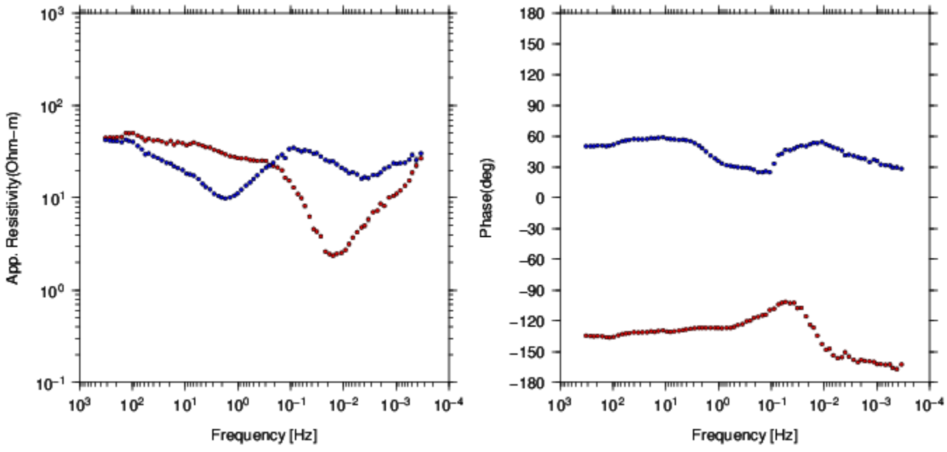


図 3.2.1.1-2f 測点 1106 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

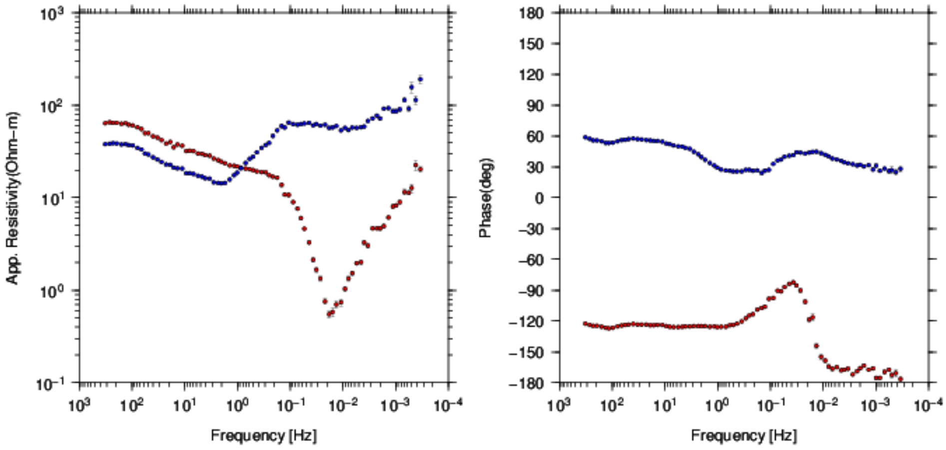


図 3.2.1.1-2g 測点 1107 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

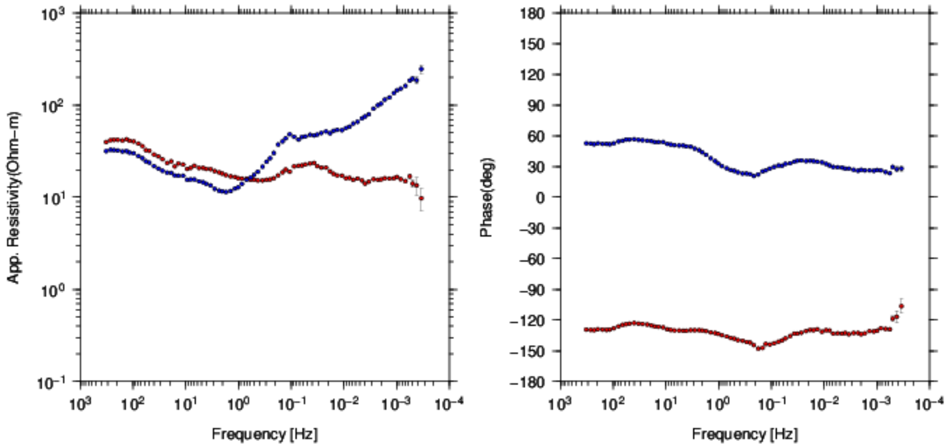


図 3.2.1.1-2h 測点 1108 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

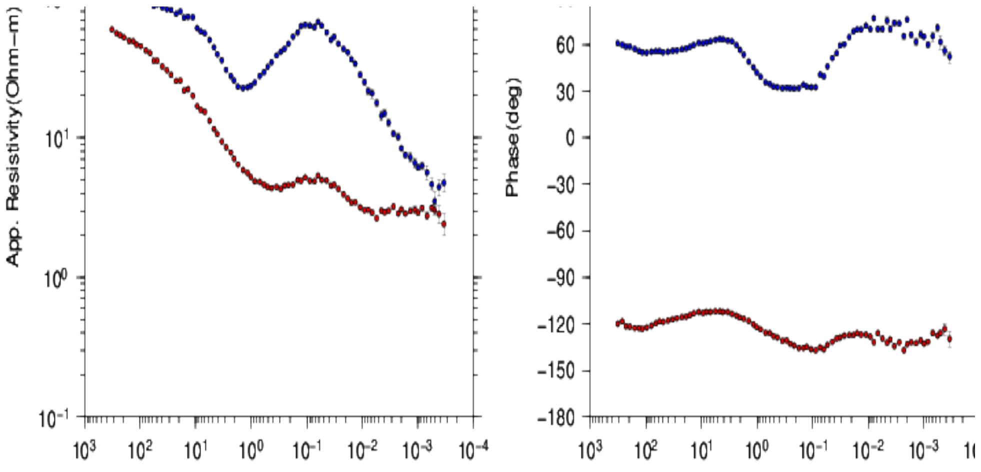


図 3.2.1.1-2i 測点 1109 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

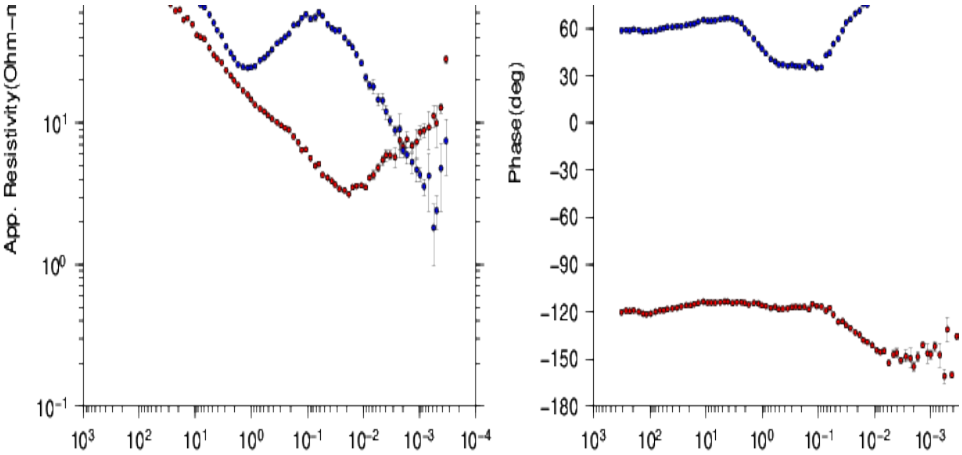


図 3.2.1.1-2j 測点 1110 における見掛け比抵抗（左図）と位相（右図）．青が XY モード，赤が YX モードである．

c）平面分布図

本年度取得したデータと昨年度までに取得したデータを統合し，インダクションベクトル，見掛け比抵抗，位相のそれぞれについて第一火口周辺の平面分布図を作成した．

c-1）インダクションベクトル

インダクションベクトルは磁場のデータのみを使っているので，各測点で，異常な磁場データを測定していないかをチェックすることができる．また，そのベクトルの向きは，良導体の方向を向くので大局的な構造を把握するのに適している．インダクションベクトルの分布を代表的な 12 周波数（265Hz, 97Hz, 27.5Hz, 9.4Hz, 2.8Hz, 1.02Hz, 0.293Hz, 0.107Hz, 0.032Hz, 0.0092 Hz, 0.00275Hz, 0.001Hz）について表示した（図 3.2.1.1-3a～b）．なお，以下の平面分布図においてデータの品質が悪い点は除外してある．2015 年度の測点 7，26，36，37，38，46 および 126，2016 年度の測点 201，207，214，215 および 218，2017 年度の測点 1104 を除外した．除外した測点のデータ品質が劣ることは測定時に明らかになっており，近くに別の測点を設けることによって測点の欠落に対処している．高周波数から順に見ていくと，265～9.4Hz では，現在活動している中岳第一火口の近傍の測点において，インダクションベクトルが第一火口に収斂している．それとは別に，より広域の測点が第一火口の北西部から西部を中心に収斂しており，2.8Hz からベクトルが大きくなりながら，その傾向は 0.107Hz まで確認できる． 0.032 Hz からベクトルは小さくなるが，0. 00275 Hz から再び大きくなる．そして一様に南西方向を向くようになる．インダクションベクトルが低周波数で一様に南西方向を向く傾向は，九州中部に現れる特徴であることが知られている（Handa et al.,1992）．

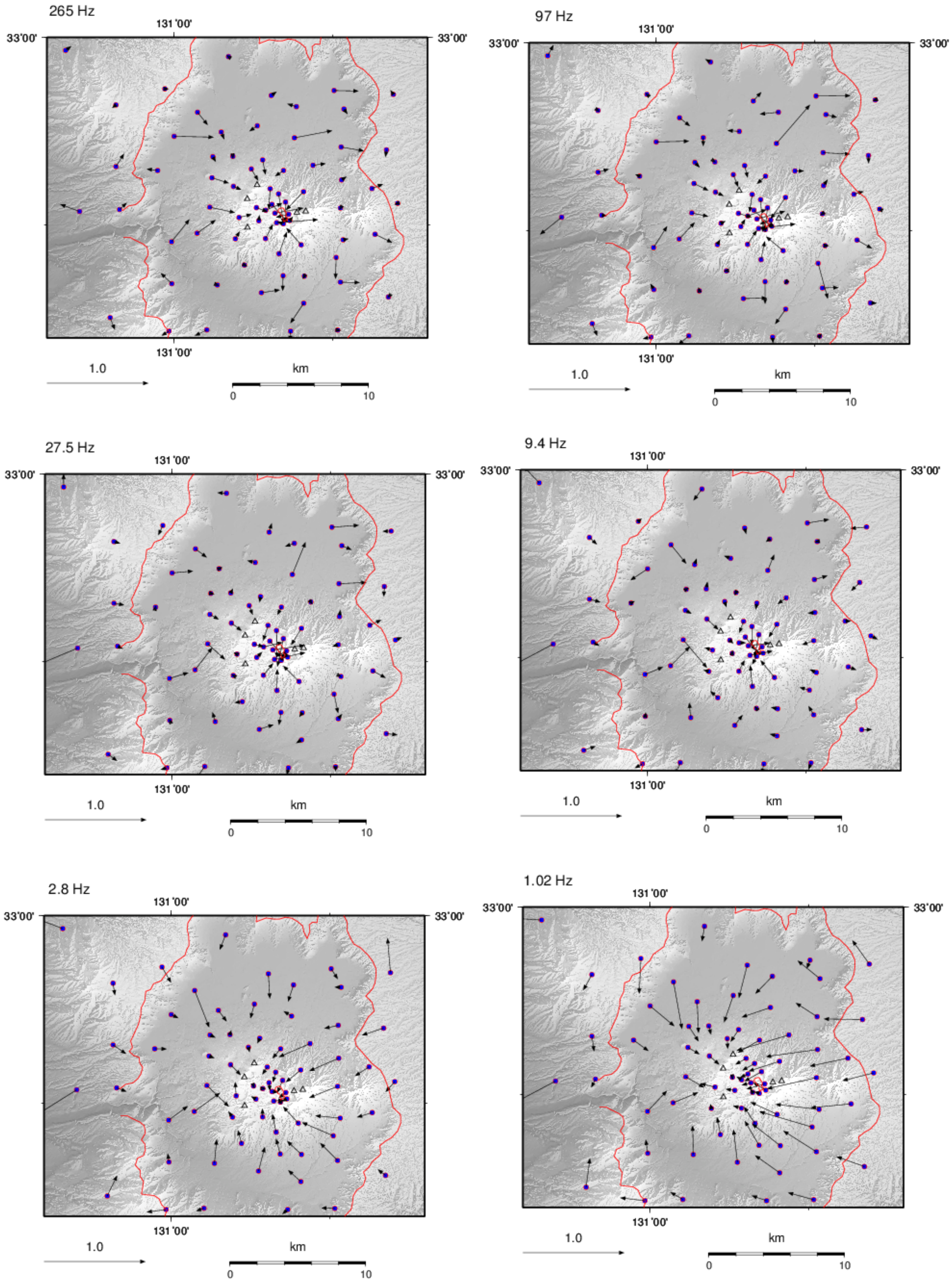


図 3.2.1.1-3a 265,97,27.5,9.4,2.8 および 1.02Hz におけるインダクションベクトルの平面分布図. 赤線はカルデラリムと中岳第一火口の縁を示す.

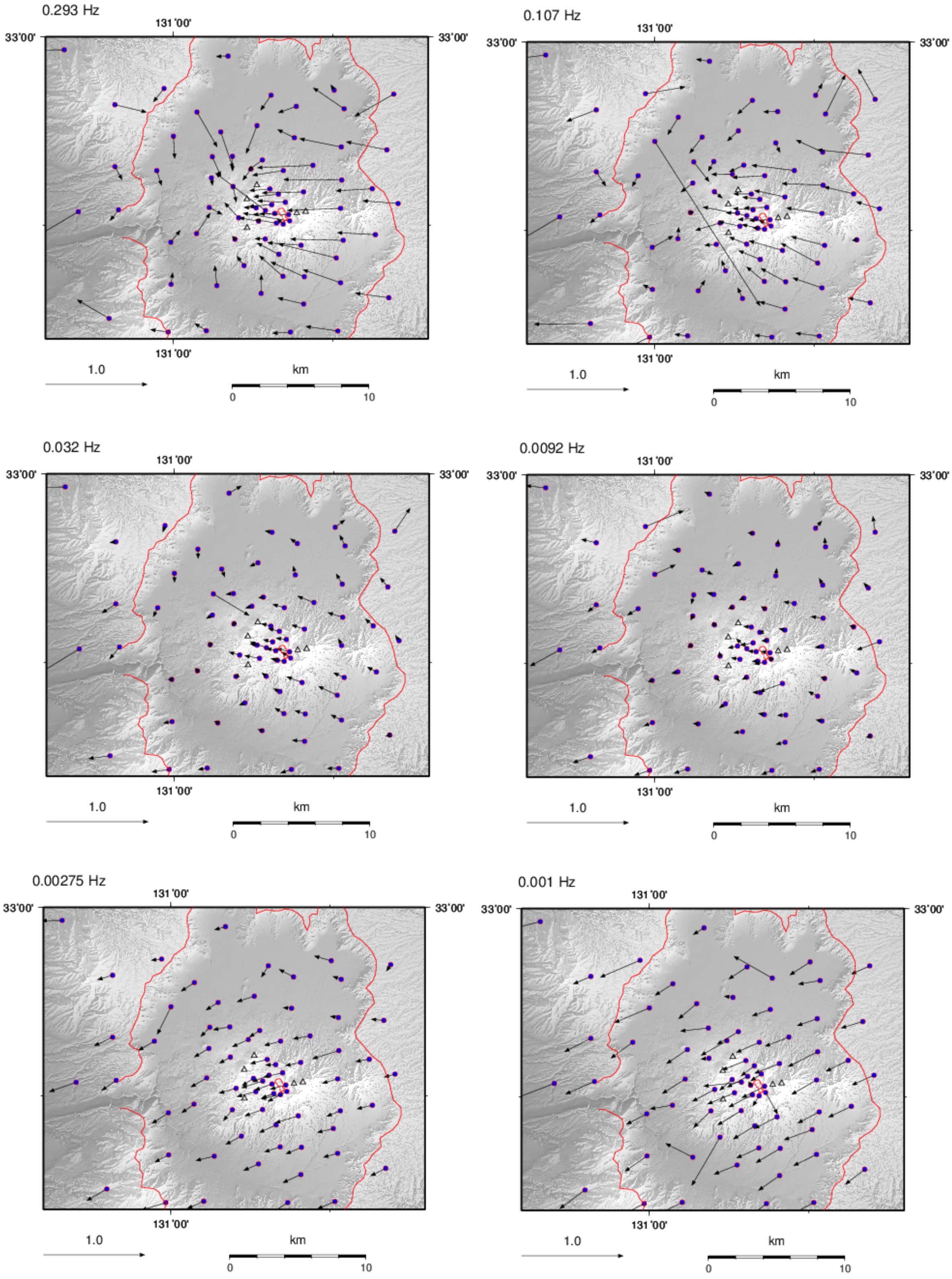


図 3.2.1.1-3b　0.293,0.107,0.032,0.0092,0.00275 および 0.001Hz におけるインダクションベクトルの平面分布図．赤線はカルデラリムと中岳第一火口の縁を示す．

c-2）見掛け比抵抗，位相，

比抵抗構造の傾向を把握するために，インバリアントモードでの見掛け比抵抗と位相の平面分布図を作成し，上記のインダクションベクトルと同じ 12 周波数について表示した（図 3.2.1.1-4a～e）．なお，インバリアントモードのインピーダンスを次式で定義している．

$$Z_d = \sqrt{Z_{xx}Z_{xy} - Z_{yx}Z_{yy}}$$

見掛け比抵抗は，265 Hz からカルデラ内の北部および南西部の平野部において表層堆積物を特徴づけるような 100 Ω·m 以下の低比抵抗のコントラストが現れている．一方で，9.4 Hz 以下になると中央火口丘を中心とした 10 Ω·m 以下の低比抵抗が顕著になる．0.107 Hz までは中岳第一火口の西側を南北に延びる低比抵抗域と，第一火口の南側で東西に延びる低比抵抗域が顕著である．東西に延びる低比抵抗域の西端には湯の谷温泉が位置する．0.032 Hz 以下になると，第一火口北部に低比抵抗域が現れ，0.001 Hz で大きなコントラストを示している．カルデラ内北部では，27.5 Hz 以下は一貫して 100 Ω·m 以上の高比抵抗になっている．該当する地域には地表下数百 m から花崗岩が存在することが坑井柱状からわかっている（NEDO, 1991）．

位相のコントラストとしては，265 Hz から中央火口丘を中心とした 45 度より大きい値を示す領域が明瞭に存在するが，1.02 Hz を境に，それより低い周波数では見られなくなる．これは前述の中央火口丘を中心とした低比抵抗域が 9.7 Hz 以下から現れることと対応しているようである．

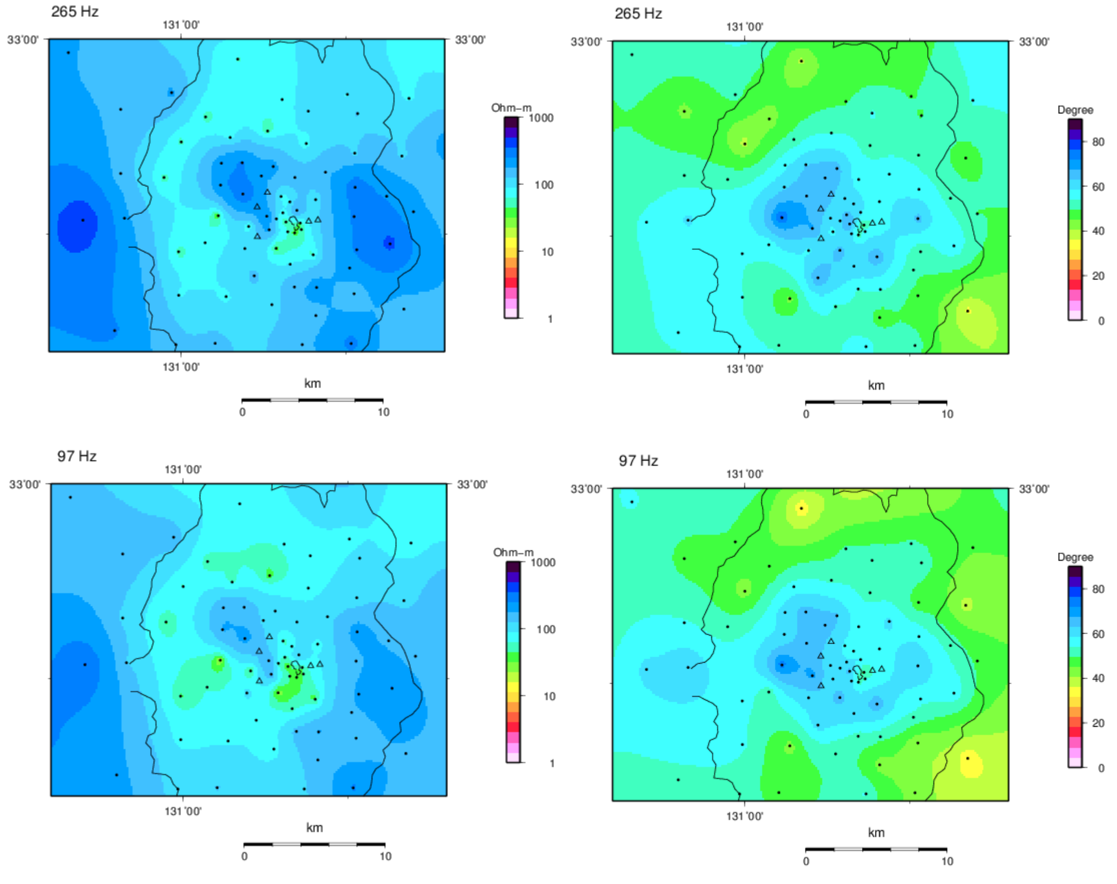


図 3.2.1.1-4a 周波数 265 および 97 Hz における見掛け比抵抗（左側）と位相（右側）の平面分布図．

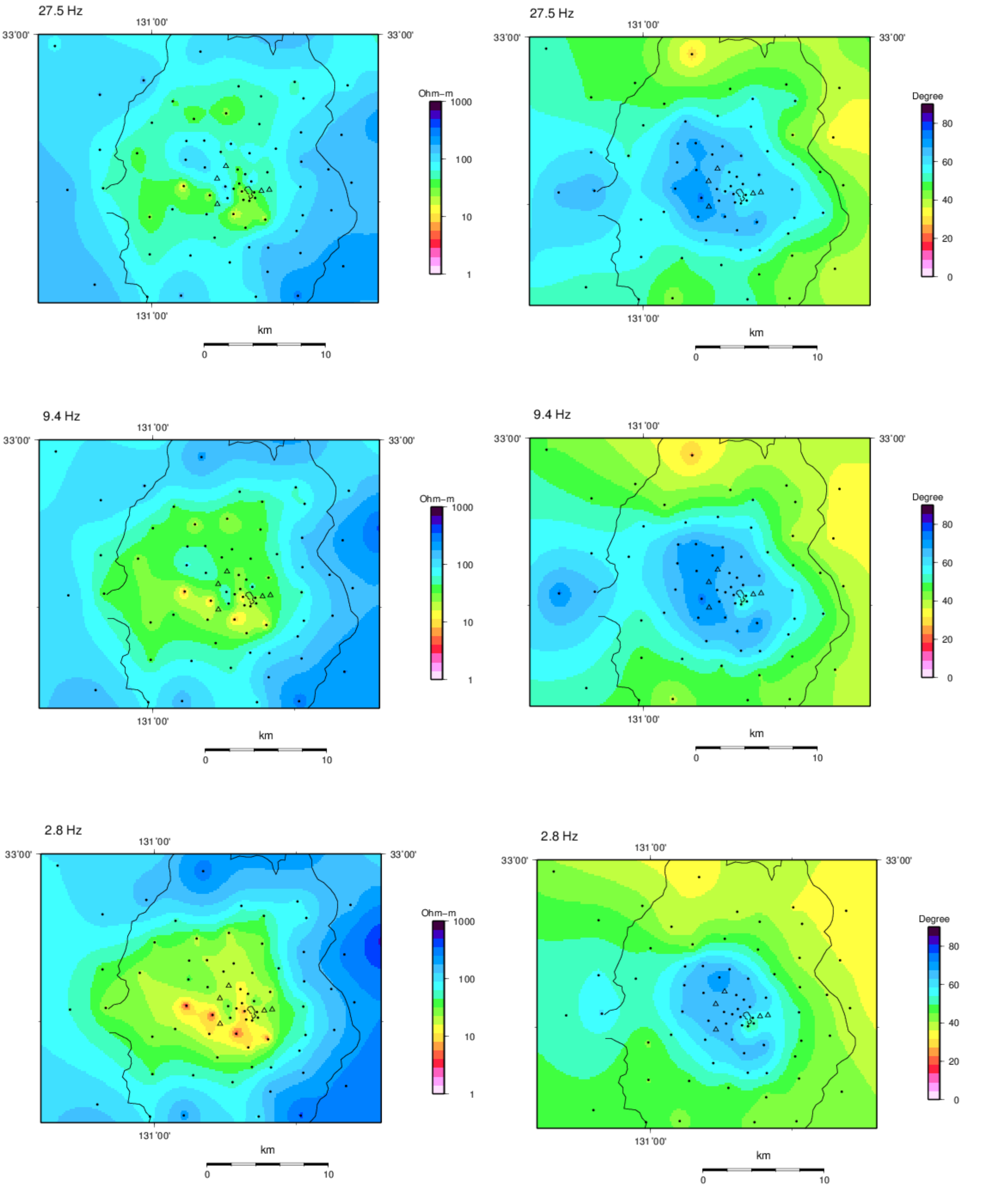


図 3.2.1.1-4b 周波数 27.5,9.4 および 2.8 Hz における見掛け比抵抗（左側）と位相（右側）の平面分布図

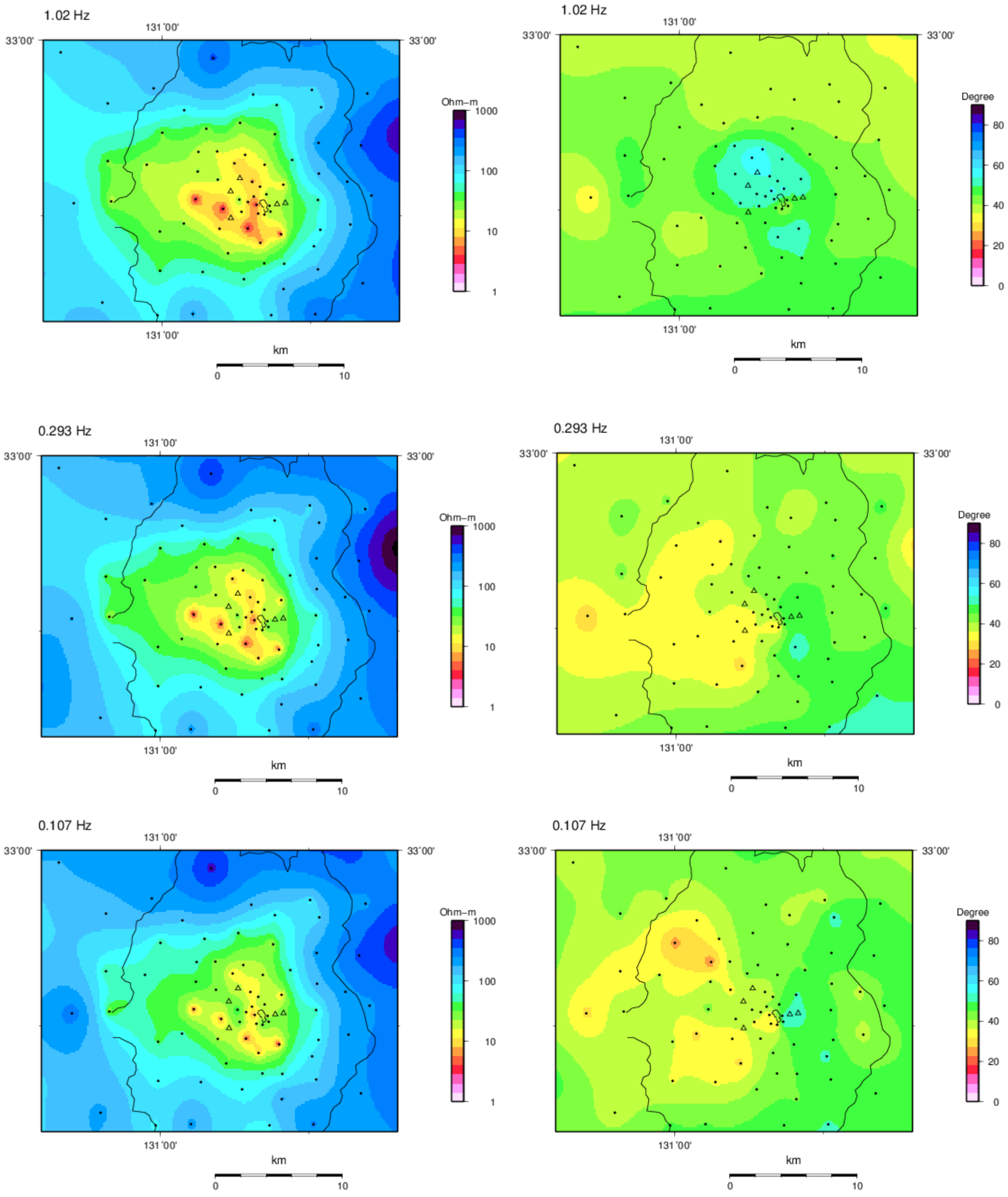


図 3.2.1.1-4c 周波数 1.02,0.293 および 0.107 Hz における見掛け比抵抗（左側）と位相（右側）の平面分布図.

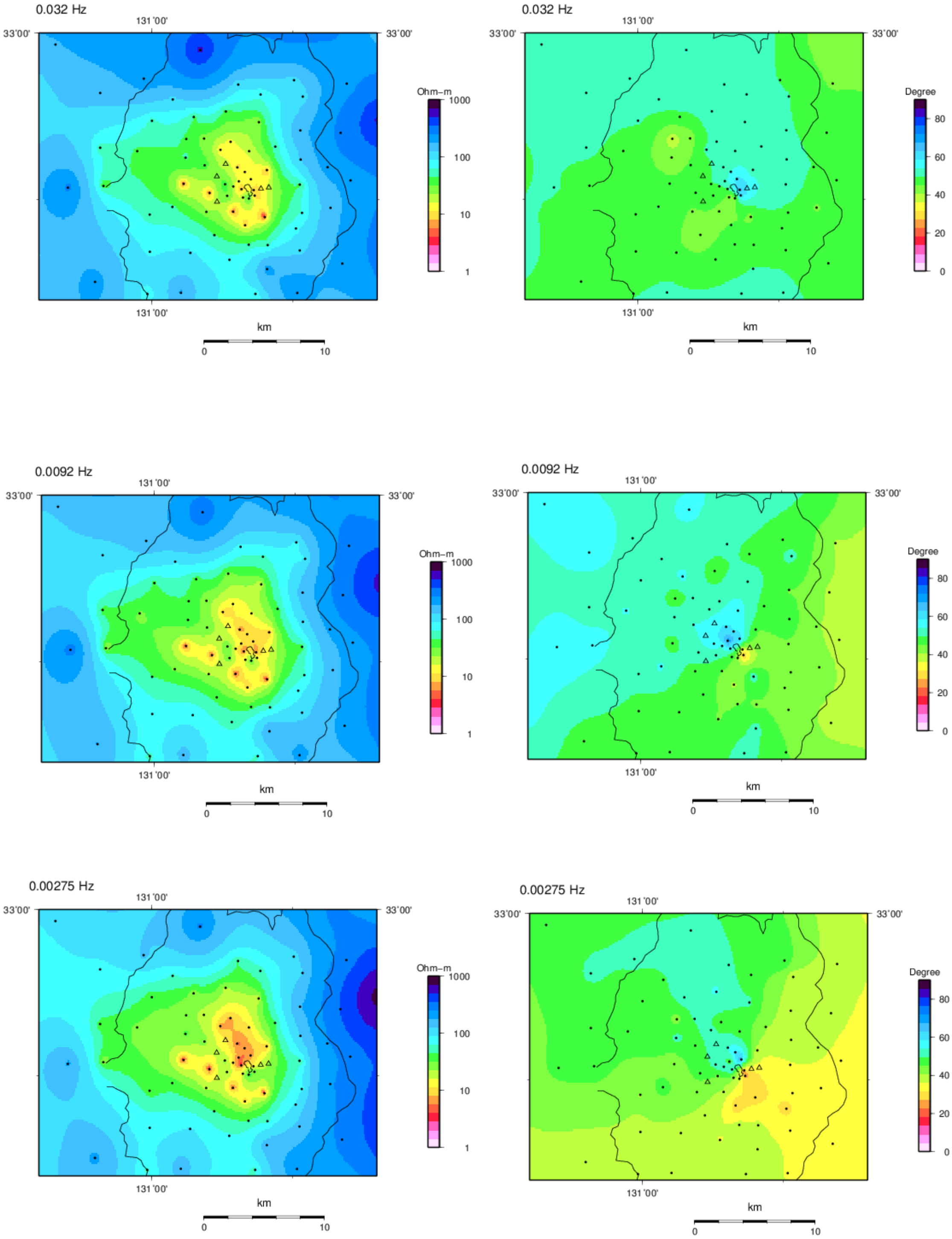
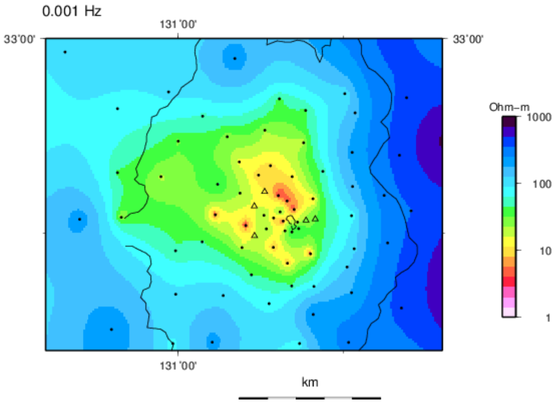


図 3.2.1.1-4d 周波数 0.032,0.0092 および 0.00275 Hz における見掛け比抵抗（左側）と位相（右側）の平面分布図.



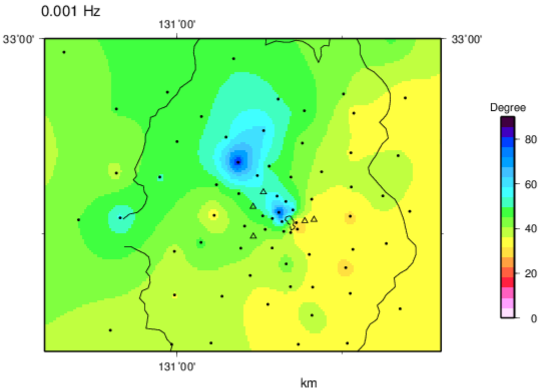


図 3.2.1.1-4e 周波数 0.001 Hz における見掛け比抵抗（左側）と位相（右側）の平面分布図.

d）1 次元インバージョン

インバリアントモードの見かけ比抵抗および位相曲線から大局的な構造を把握するために，水平清掃構造を仮定し，1次元のOccam's インバージョン（Constable et al., 1987)を行った．その結果を図3.2.1.1-5a~j に示す．全体的な傾向として，見かけ比抵抗は1 Hzまでは単調に低下する．その後上昇し，0.1 Hzあたりをピークとした小山を形成する．インバージョンの結果を見ると，この0.1 Hzあたりの小山が深度3km前後にある1000Ω・m程度の高比抵抗層に対応するようである．それより低周波側での様子は場所により3つに大別される．一つめは，第一火口南側の1101と1108で，0.01 Hzあたりで見かけ比抵抗は若干低下ないしは横ばいになるものの，その後は単調に上昇する場合である．インバージョンの結果と比較すると，0.01 Hz はおよそ5kmの深度に対応し，そこでの比抵抗は約10Ω・mであるがその後は深度とともに比抵抗値が増加し約100~1000Ω・mとなっている．二つめは第一火口西側の1102と1105，東側の1106と1107で，0.1 Hzより低周波側で見かけ比抵抗の変化が比較的小さい場合である．インバージョンの結果を見ると5km以深では，6~8kmを除き，比抵抗値は10Ω・m程度になっている．深度6~8kmでは1102，1106および1107では比較的高比抵抗となっているのに対し，1105では低比抵抗となっている．ついでながら，1105では1 Hzより高周波側で比抵抗値の周波数に対する勾配が他の地点より急になっている．そのためインバージョンの結果を見ると，深度1kmでの比抵抗値は1Ω・mとなり他の地点より低い．この辺りは長周期微動の発生源に対応し，火山性流体のクラック状の通路が存在すると解析されている（Yamamoto et al. 1999)．三つめは火口原北側の1103，1104，1109および1110である．1103と1104は，それぞれ0.01 Hz，0.1 Hzより低周波側のノイズが大きいのではっきりしないが，1109と1110に着目すると，0.1 Hzより低周波側で周波数が低くなるにつれて単調に見かけ比抵抗が低下していることがわかる．インバージョンの結果を見ると，深度6~8kmでいったん高くなるものの深度9kmの見かけ比抵抗値が1~10Ω・mと他の測点に比べて低くなっている．

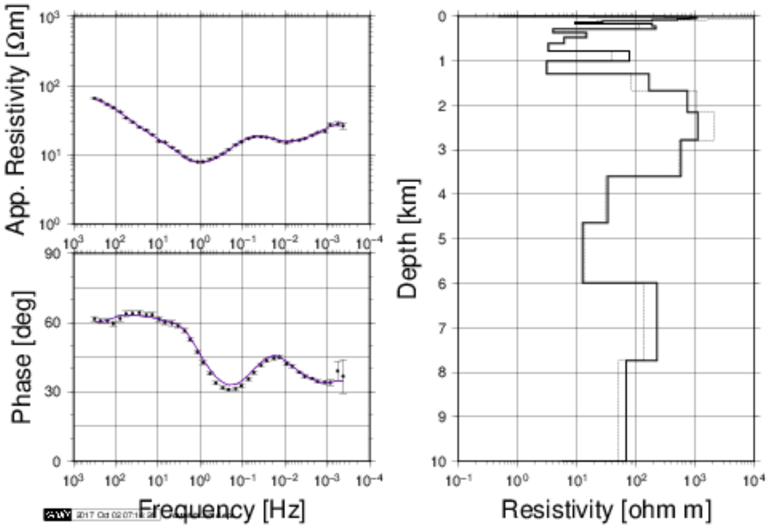


図 3.2.1.1-5a 測点 1101 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

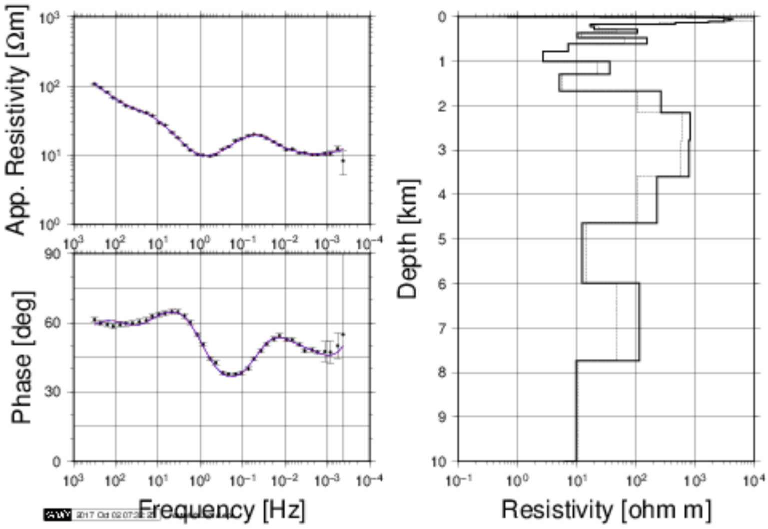


図 3.2.1.1-5b 測点 1102 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

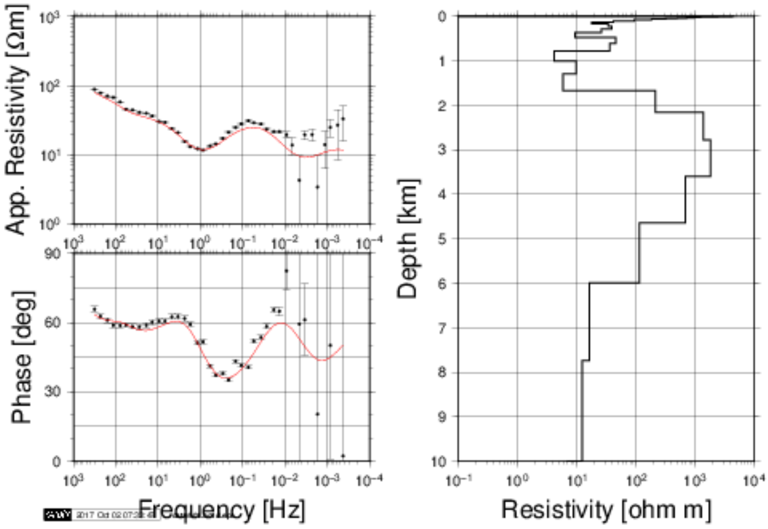


図 3.2.1.1-5c 測点 1103 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果

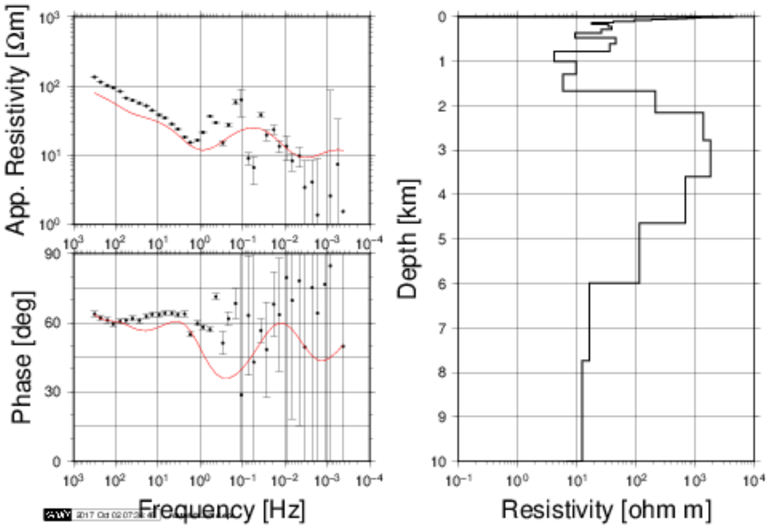


図 3.2.1.1-5d 測点 1104 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果

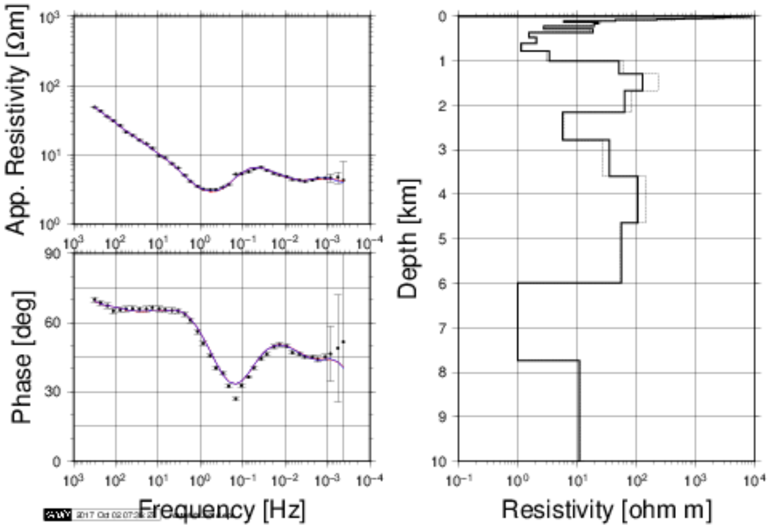


図 3.2.1.1-5c 測点 1105 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

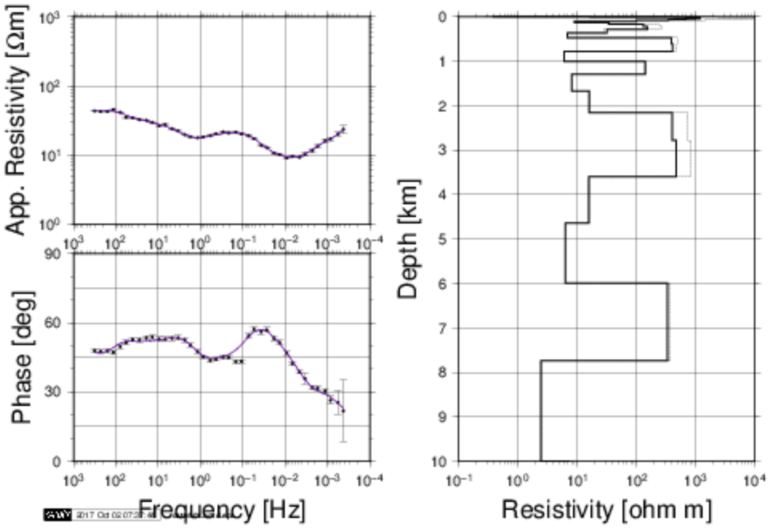


図 3.2.1.1-5f 測点 1106 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

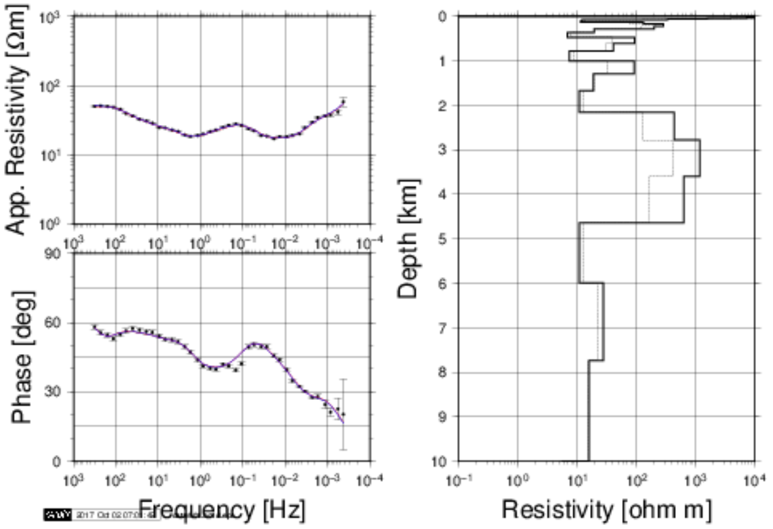


図 3.2.1.1-5g 測点 1107 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

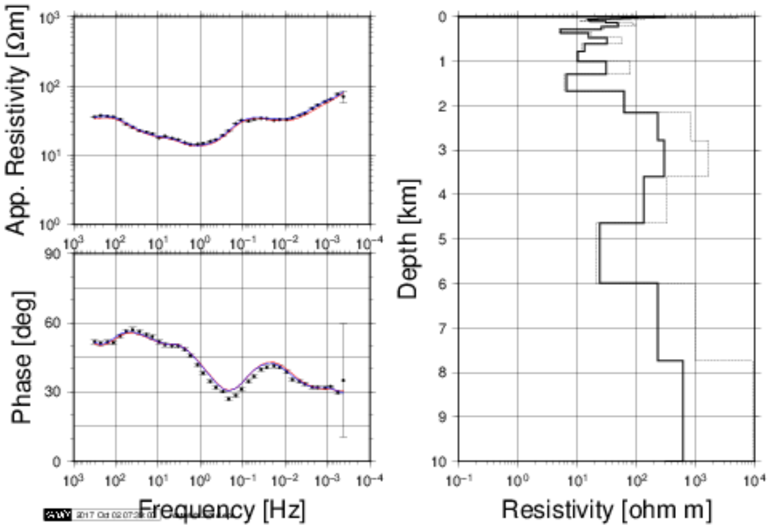


図 3.2.1.1-5h 測点 1108 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

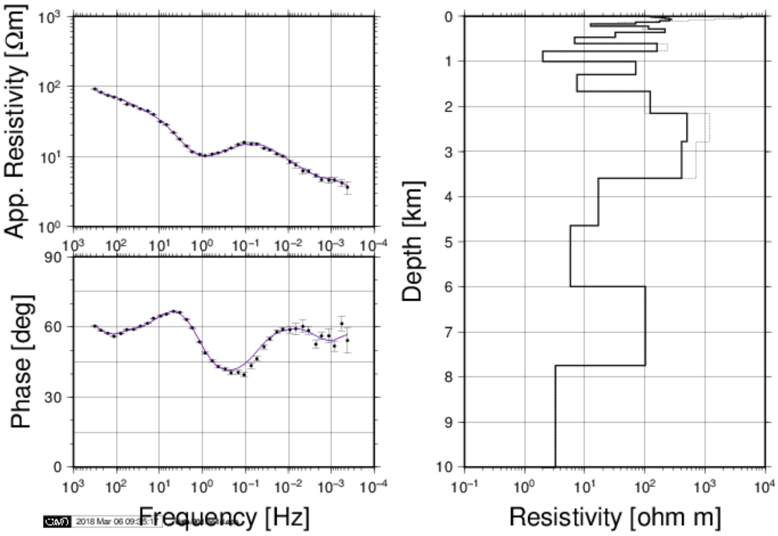


図 **3.2.1.1-5i** 測点 1109 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

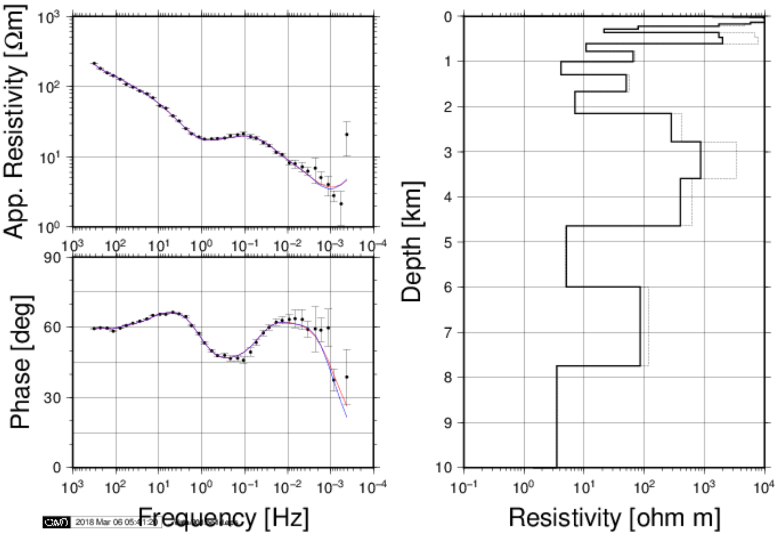


図 3.2.1.1-5j 測点 1110 におけるサウンディングカーブ（左図：黒丸がデータ，実線が計算値）とインバージョンにより求められた比抵抗構造（右図）．太実線は 1 次微分，細実線は 2 次微分を用いてスムージングした結果.

（3）3 次元比抵抗構造解析

a）解析手順

一連のデータ処理によって求めたMT法データの80周波数（320Hz～0.000343Hz）から16周波数（194Hz, 79Hz, 33Hz, 13.7Hz, 5.6Hz, 2.34Hz, 1.02Hz, 0.43Hz, 0.176Hz, 0.073Hz, 0.032Hz, 0.0134Hz, 0.0055Hz, 0.00229Hz, 0.00099Hz, 0.00042Hz）を選び出し，インピーダンス4成分とティッパー2成分を合わせたMT応答関数の6成分を入力データとした3次元比抵抗インバージョン解析（Siripunvaraporn and Egbert, 2009）を行った．入力データについては，エラーが大きく信頼度の低いと考えられるデータを使用しないこととし，全ての測点について周波数毎に全成分の取捨選択を行った．全体として，平成27年度に取得した55点と，平成28年度に取得した45点のデータを使用した．最終的な入力データのサイズは，100×16×12（測点数×周波数×応答関数の数）である．ここで，応答関数の数は，MT応答関数が複素数であることから6×2＝12となる．

本解析では，初期構造モデルに平成27年度に取得した55点のデータによって求めたモデル[2016解析モデル（Hata et al., 2016）]を使用し，南北1400 km，東西1400 km，鉛直1001.79 km（海水面より上の地形1.79kmを含む）の領域に，海水0.33Ωm，空気10^8Ωmの比抵抗値を与え，海水と空気以外のブロックの比抵抗値を変化させ最適な構造モデルを求めた．構造モデルは，南北106，東西100，鉛直74のセルで構成した．水平面のセルは，中央火口丘から離れるにしたがって大きくなっていくように設定しており，最小セルのサイズは，中央火口丘付近の0.3×0.3kmであり（図3.2.1.1-6），最大セルのサイズは，150×150kmである。また，鉛直方向のグリッドサイズは，地形効果の影響を出来る限り考慮する目的のため，海水面よりも上の領域については，0.01～0.06kmと細かくした。一方で、海水面よりも下の領域については，0.01～300kmで深度が増すにつれて大きくなるように設定した．

インバージョンでは，2016解析モデルと同様に，インピーダンスに5％，ティッパーに10％のエラーフロアーを与えてRMS残差1.82のモデルを得た．観測値と最適モデルの計算値のフィッティングを，図3.2.1.1-7a～yと図3.2.1.1-8a～yに，インピーダンスとティッパーに分けて全測点についてサウンディングカーブで示す．インピーダンスの対角成分（ZxxとZyy）とティッパー（TxとTy）については，フィッティングにばらつきがあるものの，インピーダンスの非対角成分（ZxyとZyx）については、かなり良い一致を示していることが確認できる．測点番号と測点位置の対応については，平成27・28年度の報告書を参照のこと．

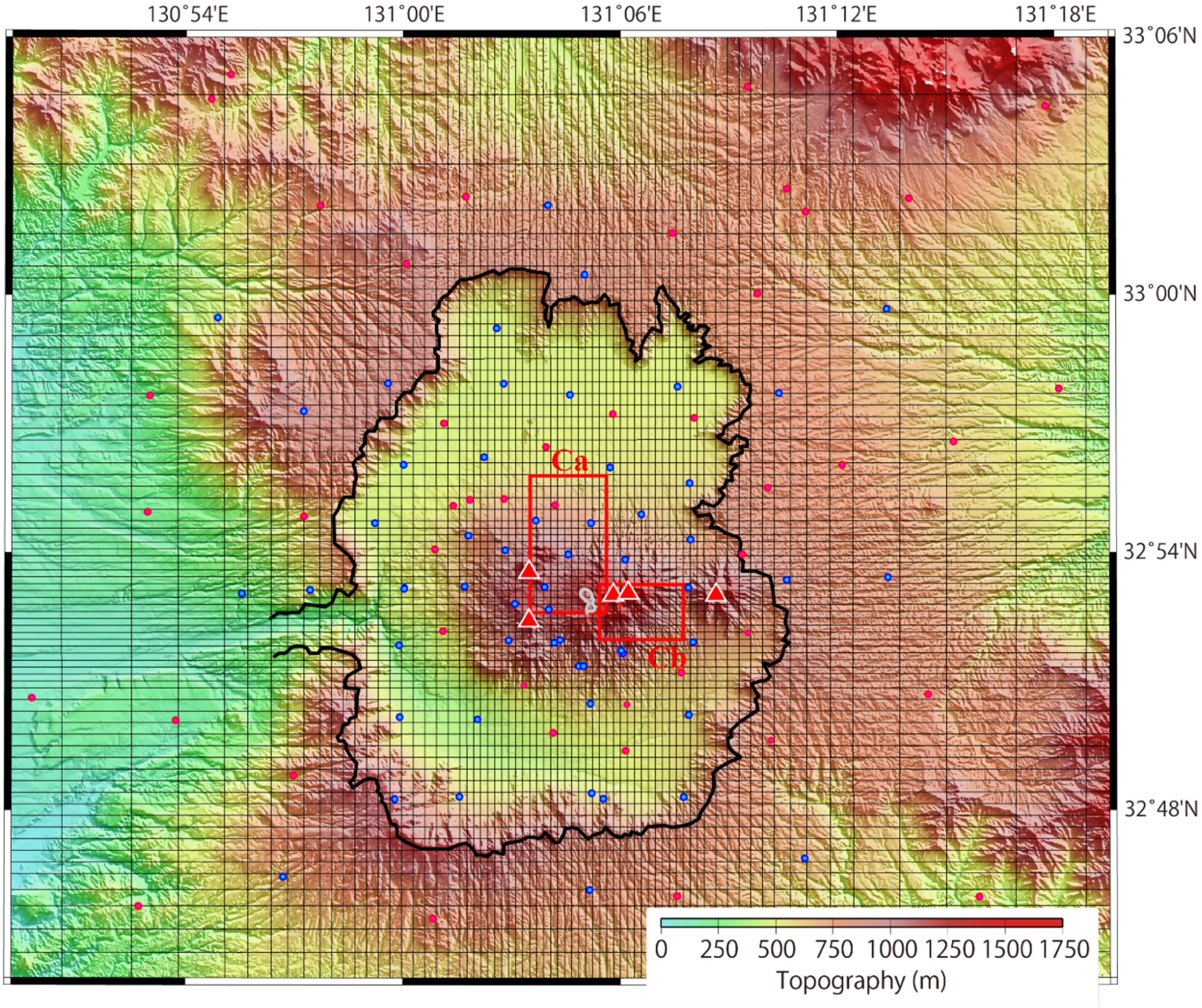


図 3.2.1.1-6　阿蘇カルデラ周辺の MT 観測点の位置図．●と●は，平成 27 年度の観測点，および，平成 28 年度の観測点．▲は中央火口丘の火山，灰色枠は中岳第一火口を表す．赤四角の領域（Ca と Cb）は，平成 27 年度の観測点のみを用いて求めた 3 次元比抵抗モデルの低比抵抗異常の位置．

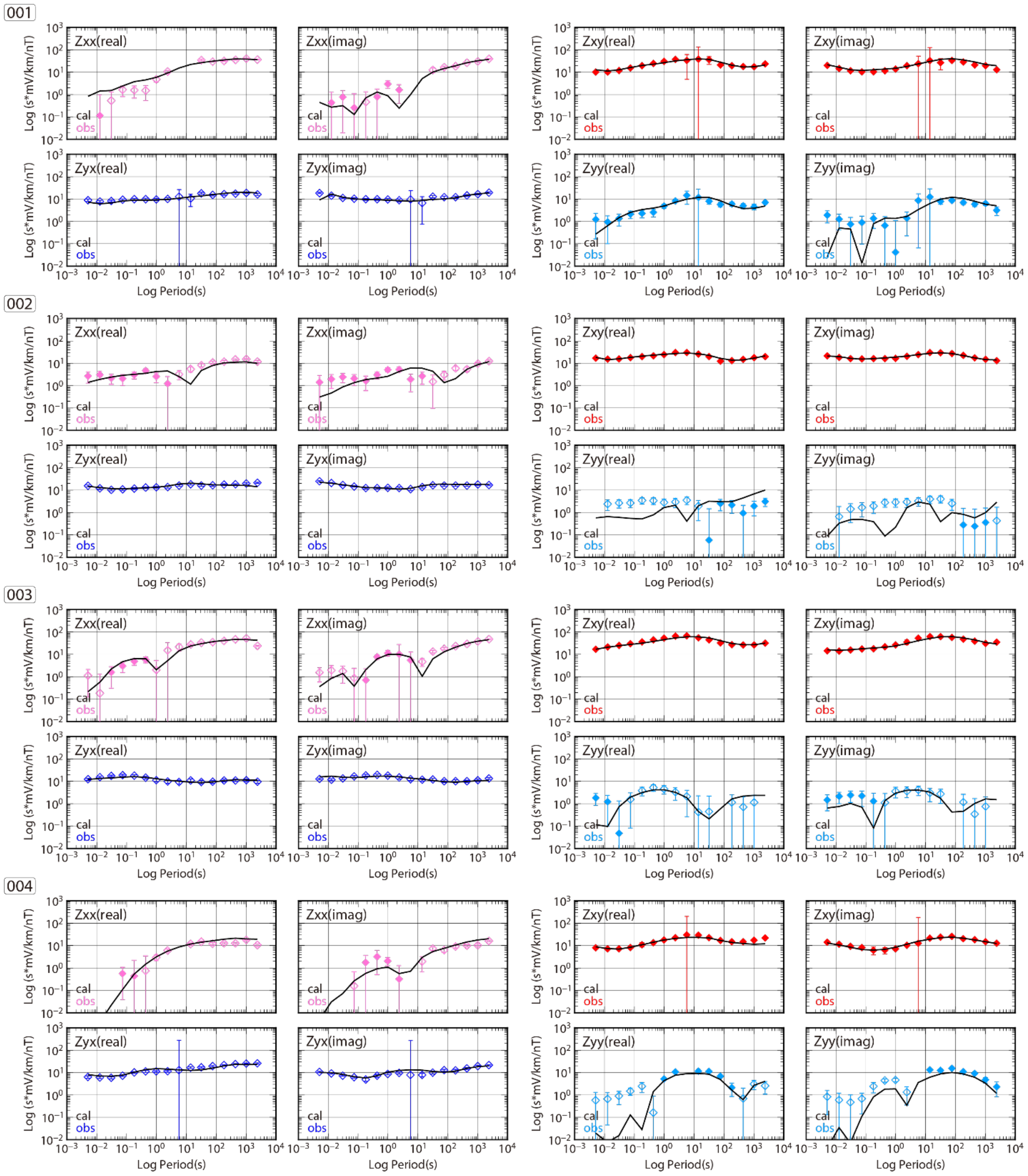


図 3.2.1.1-7a　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

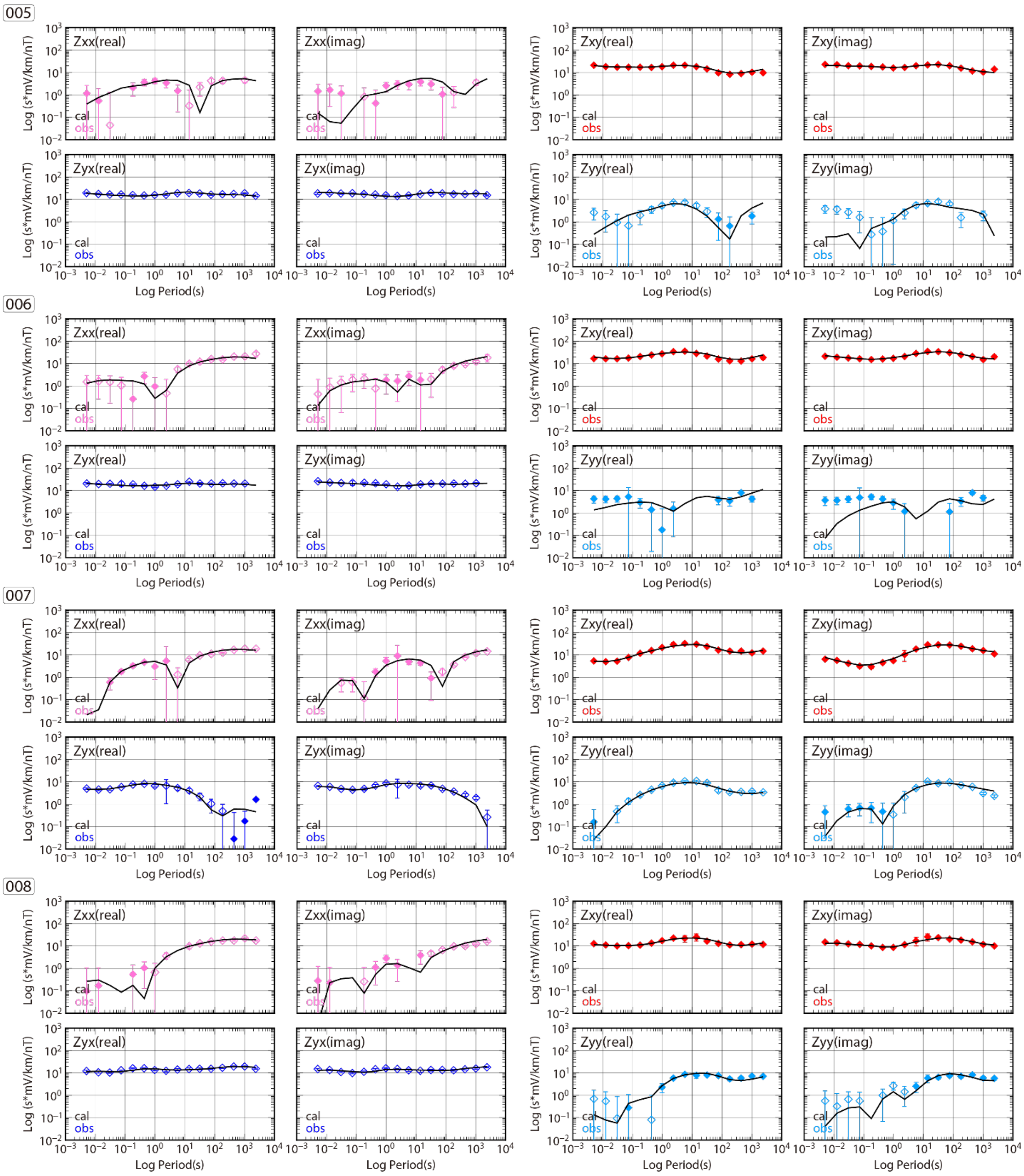


図 3.2.1.1-7b　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

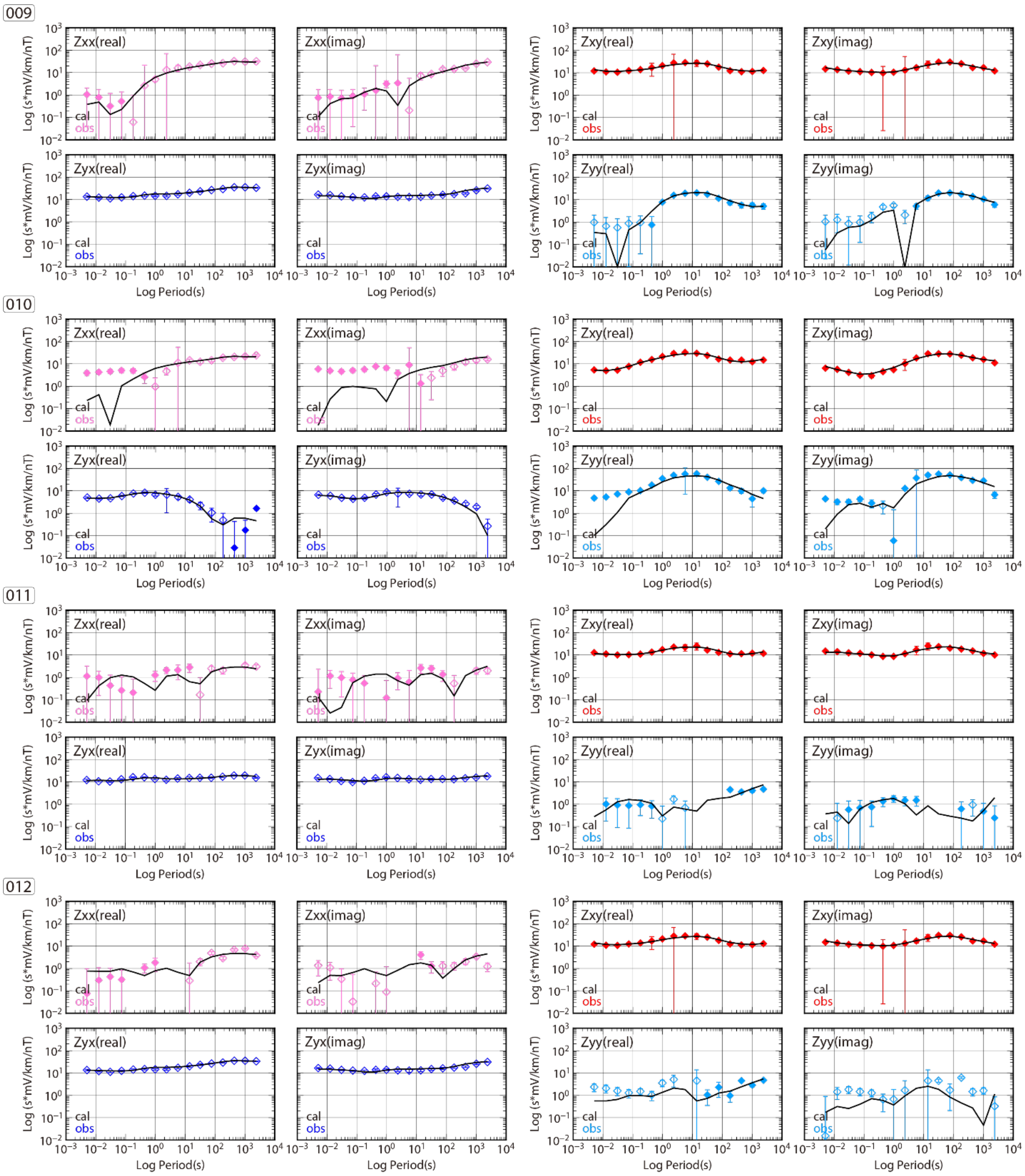


図 3.2.1.1-7c　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

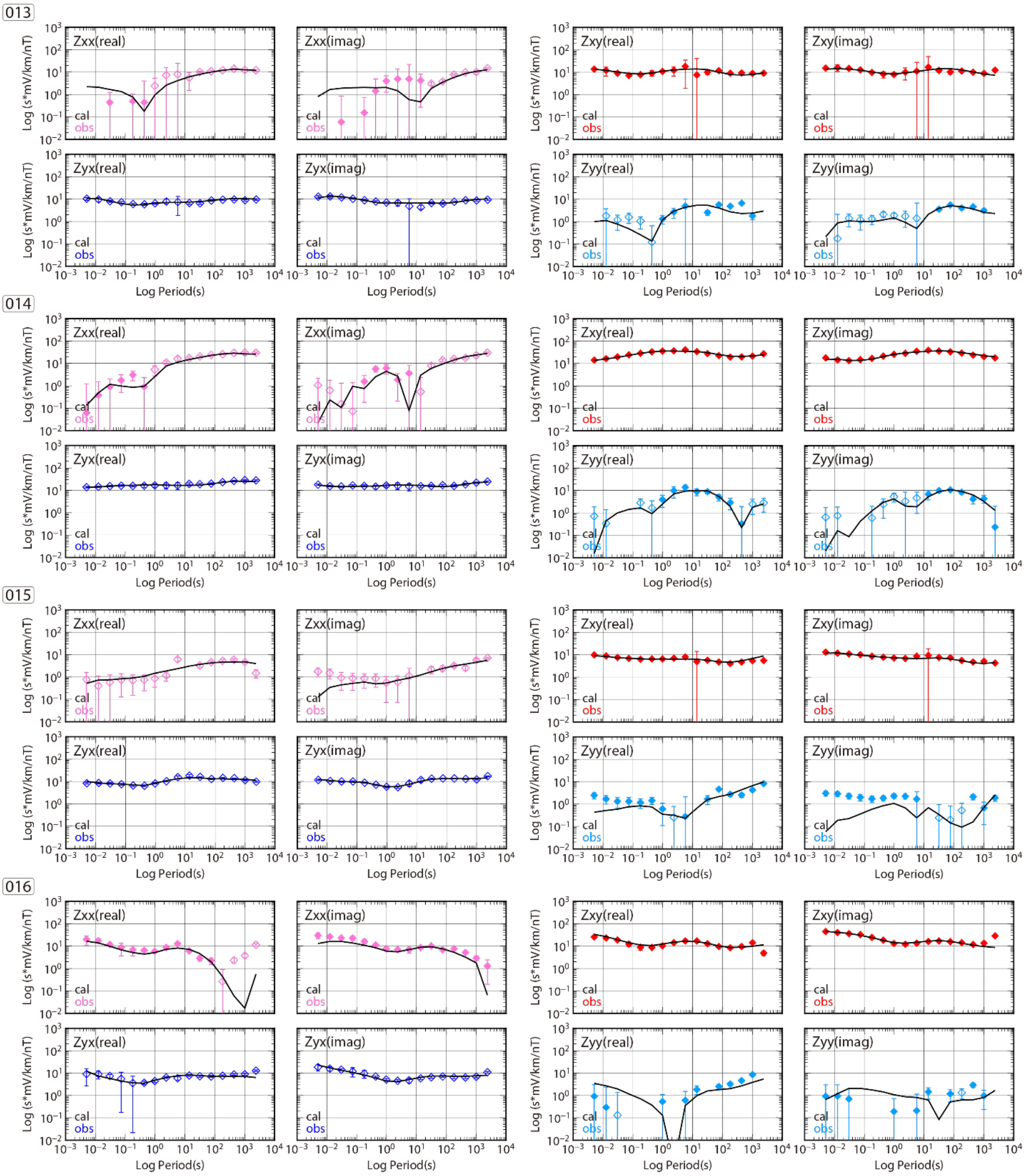


図 3.2.1.1-7d　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

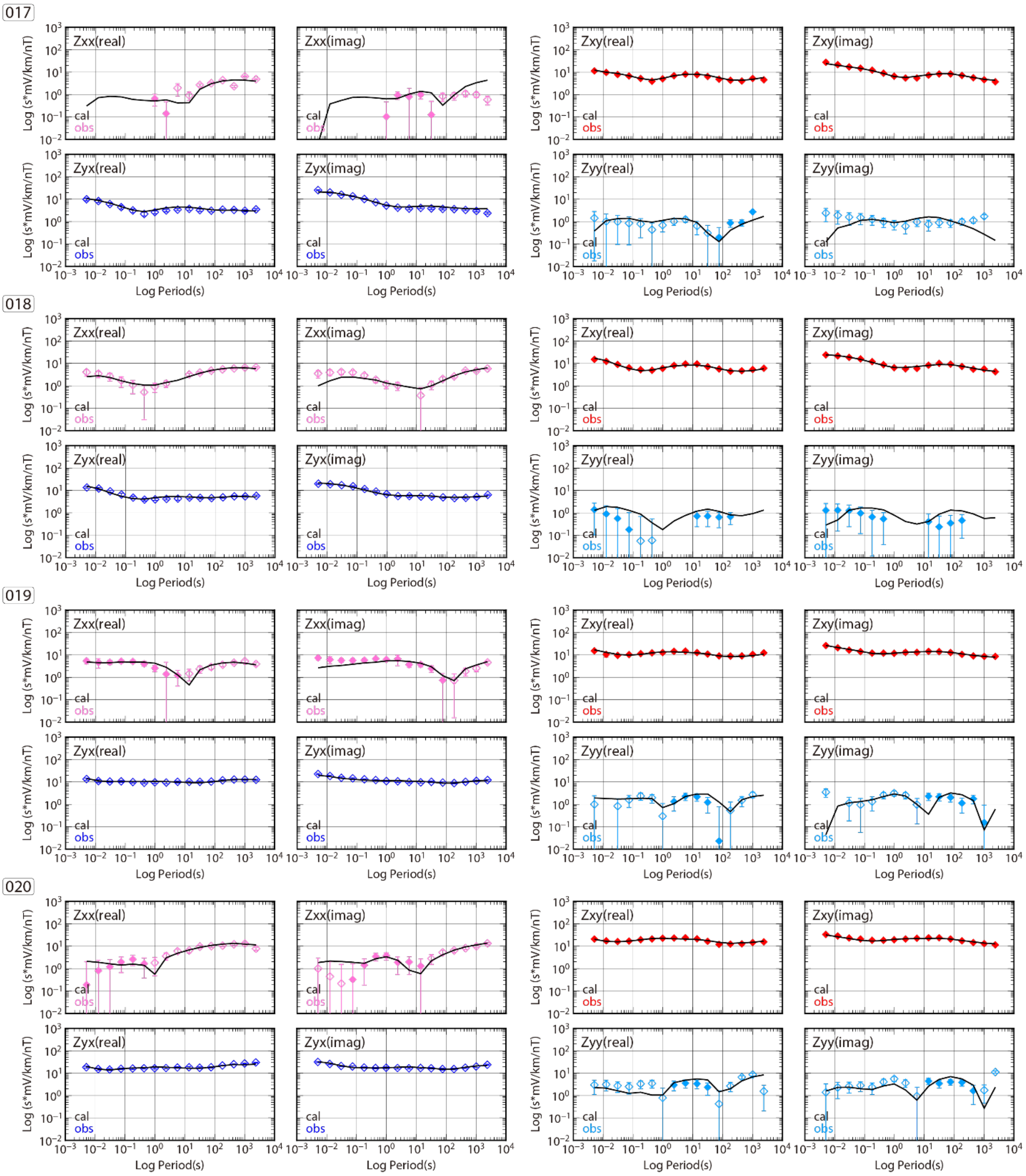


図 3.2.1.1-7e　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

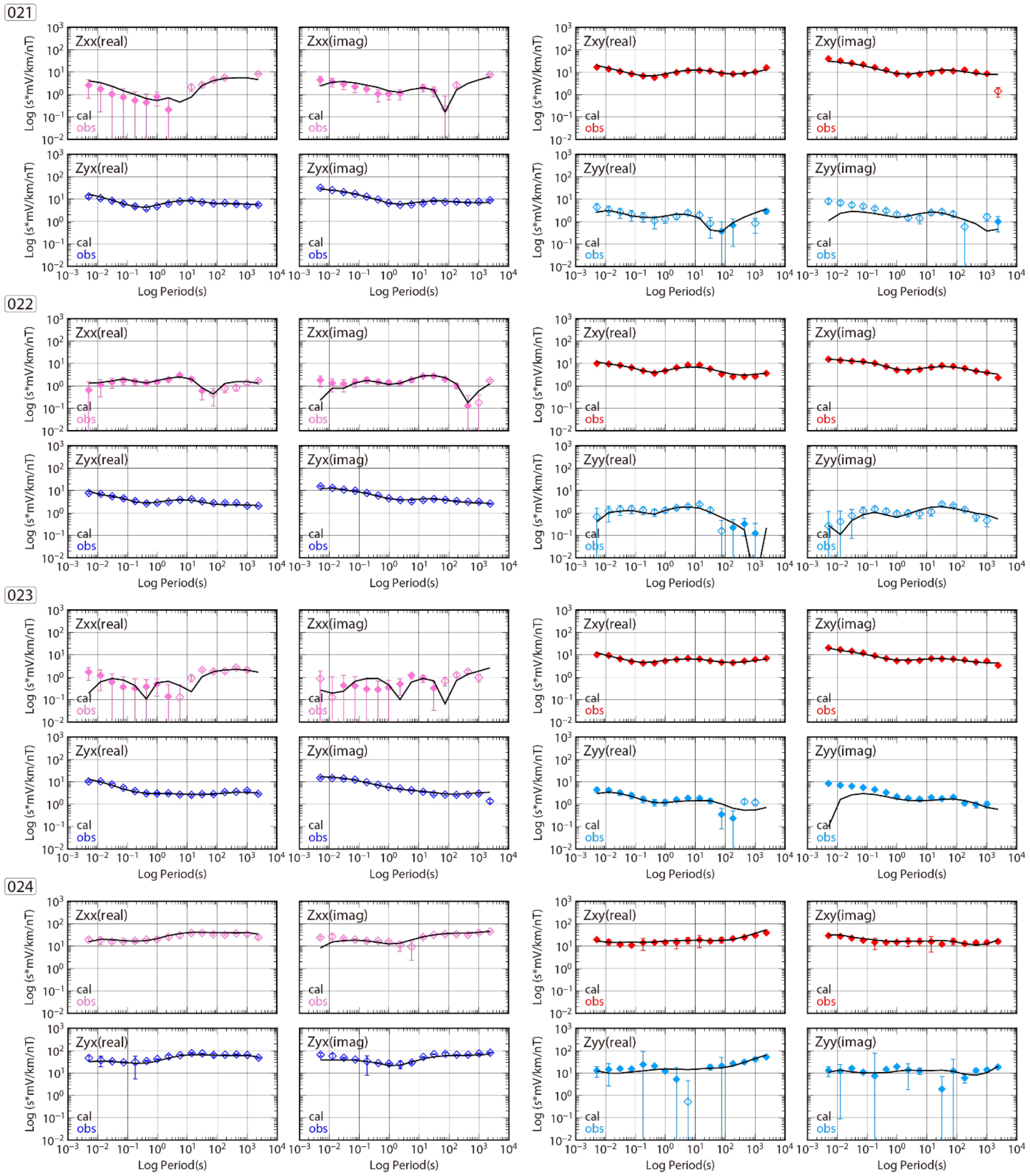


図 3.2.1.1-7f　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

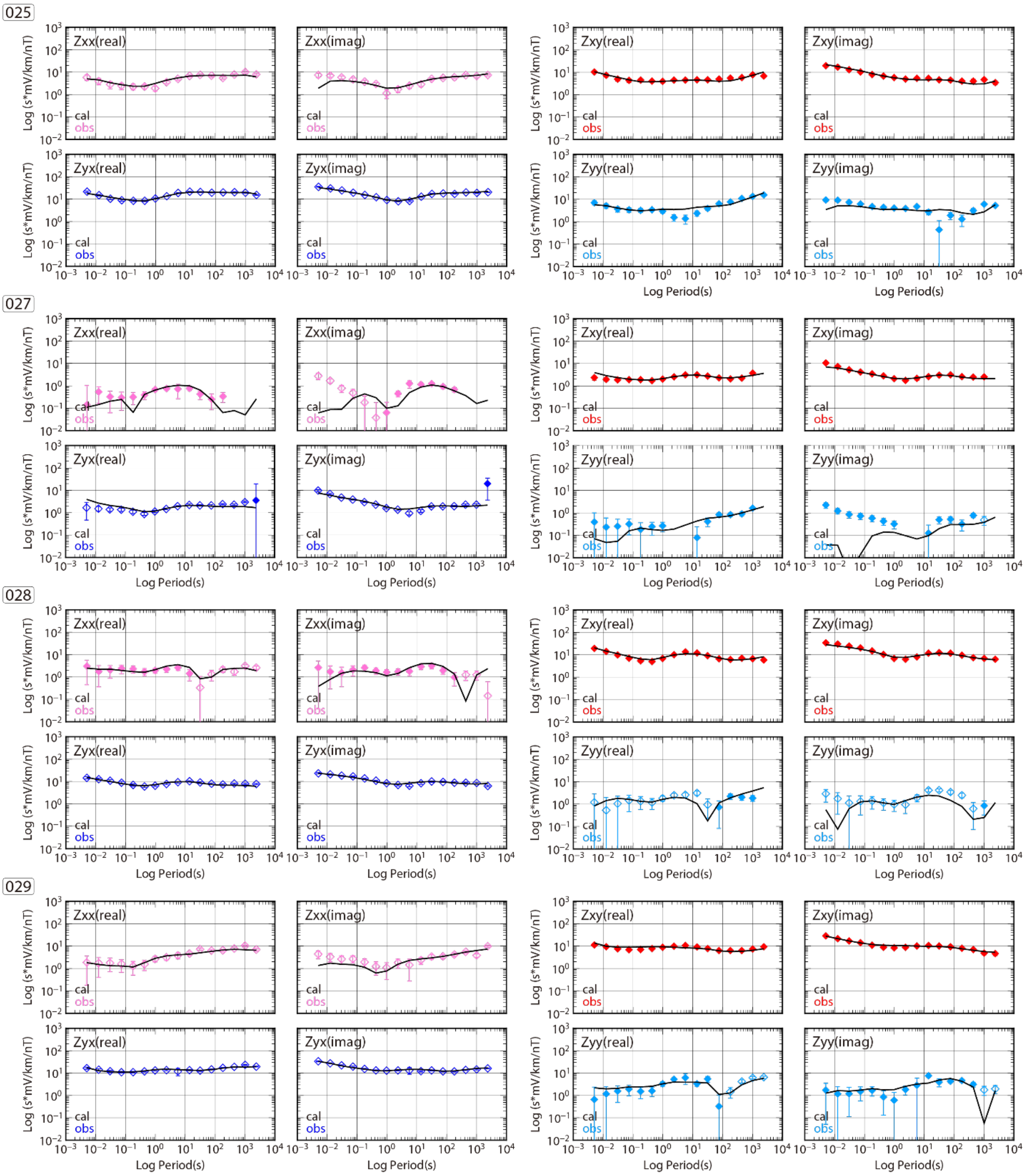


図 3.2.1.1-7g　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

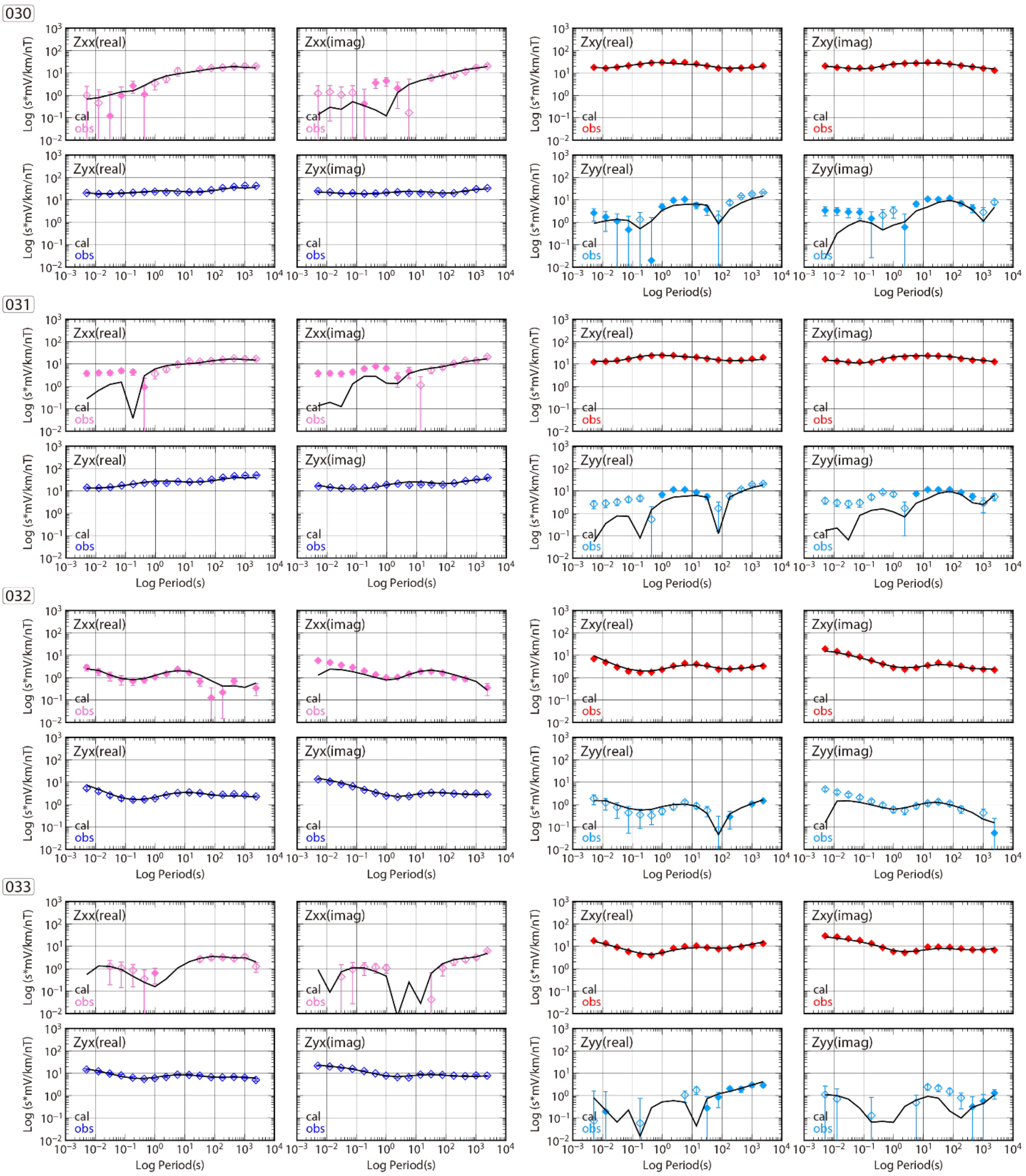


図 3.2.1.1-7h　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

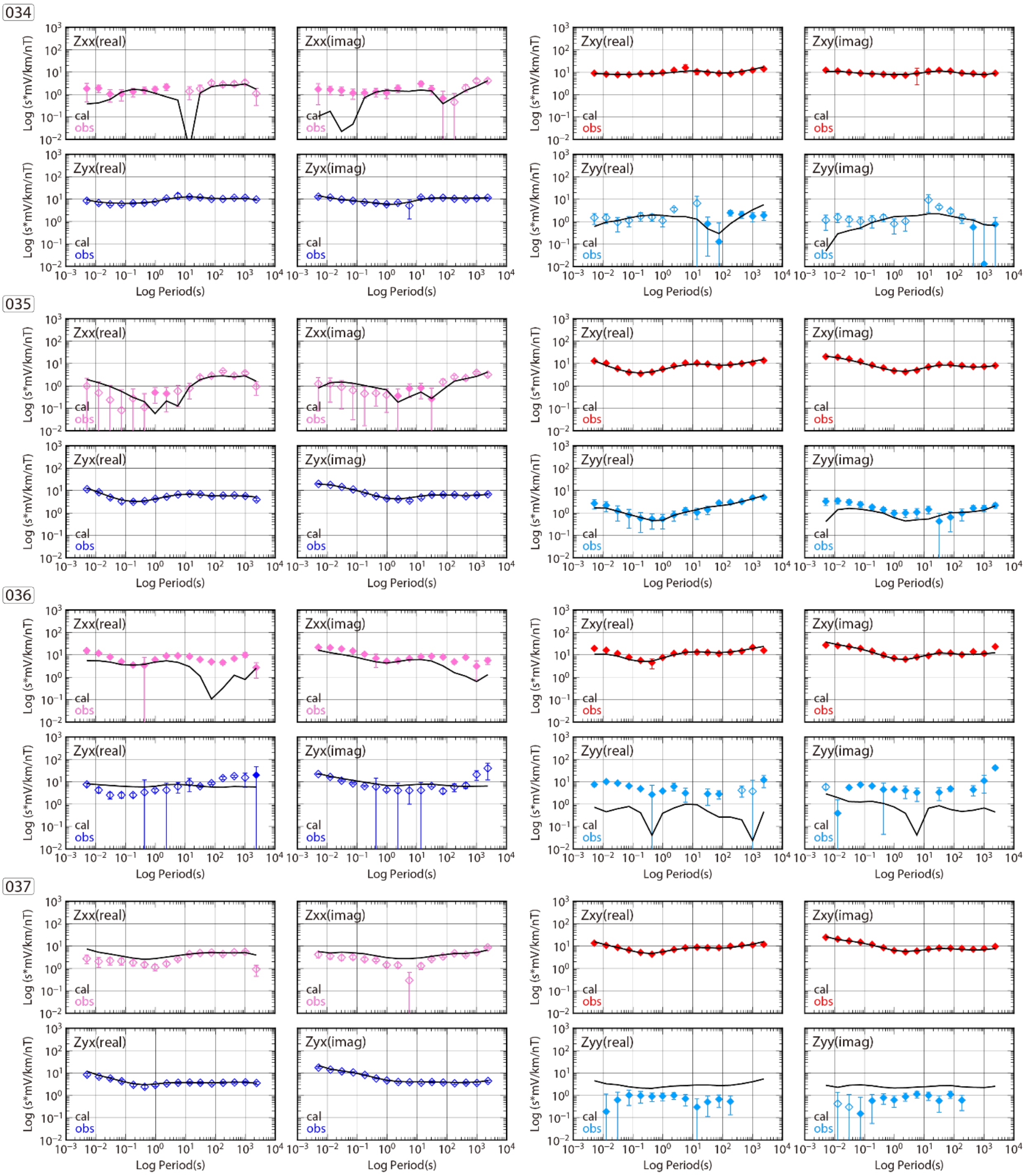


図 3.2.1.1-7i　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

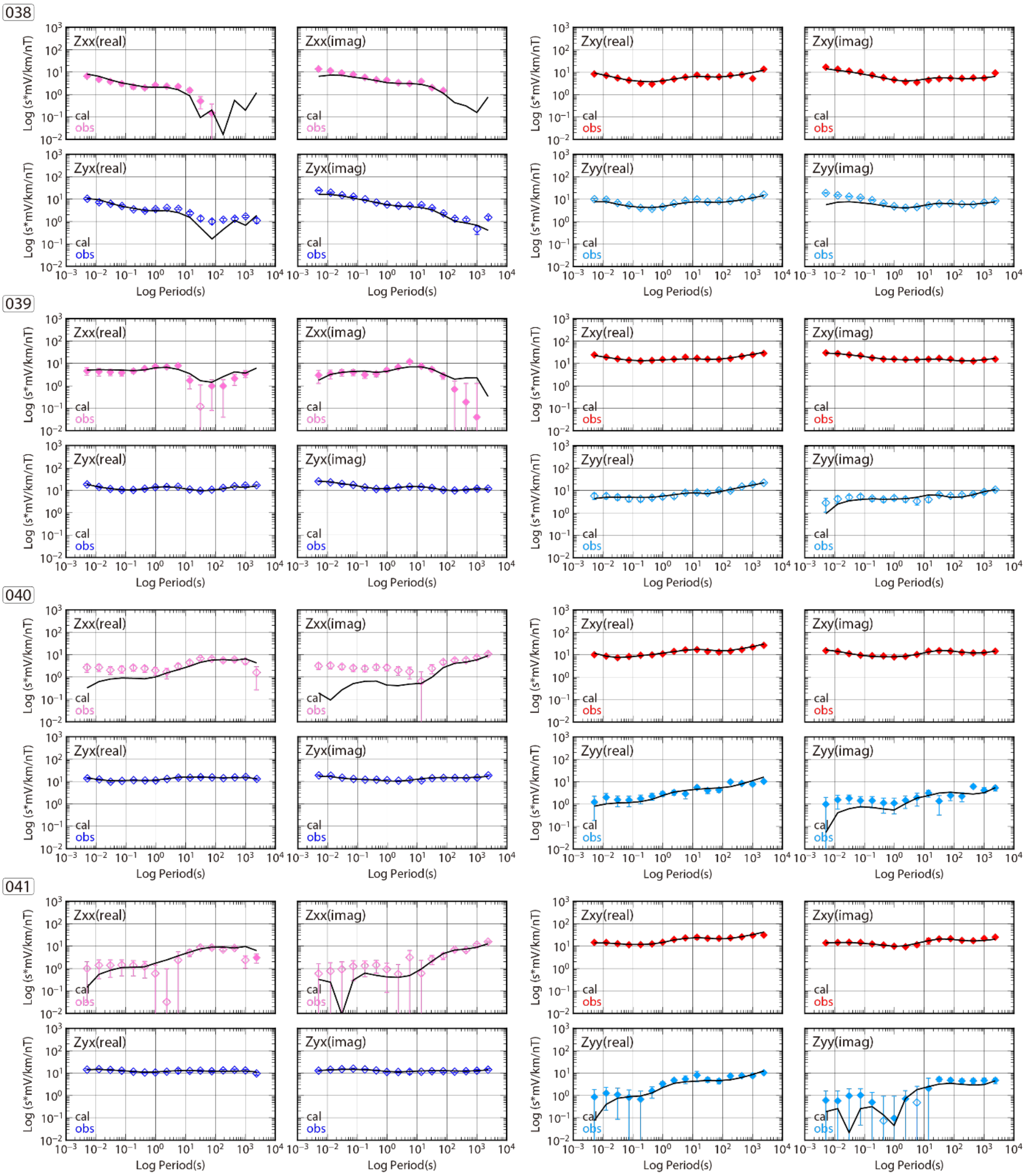


図 3.2.1.1-7j　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

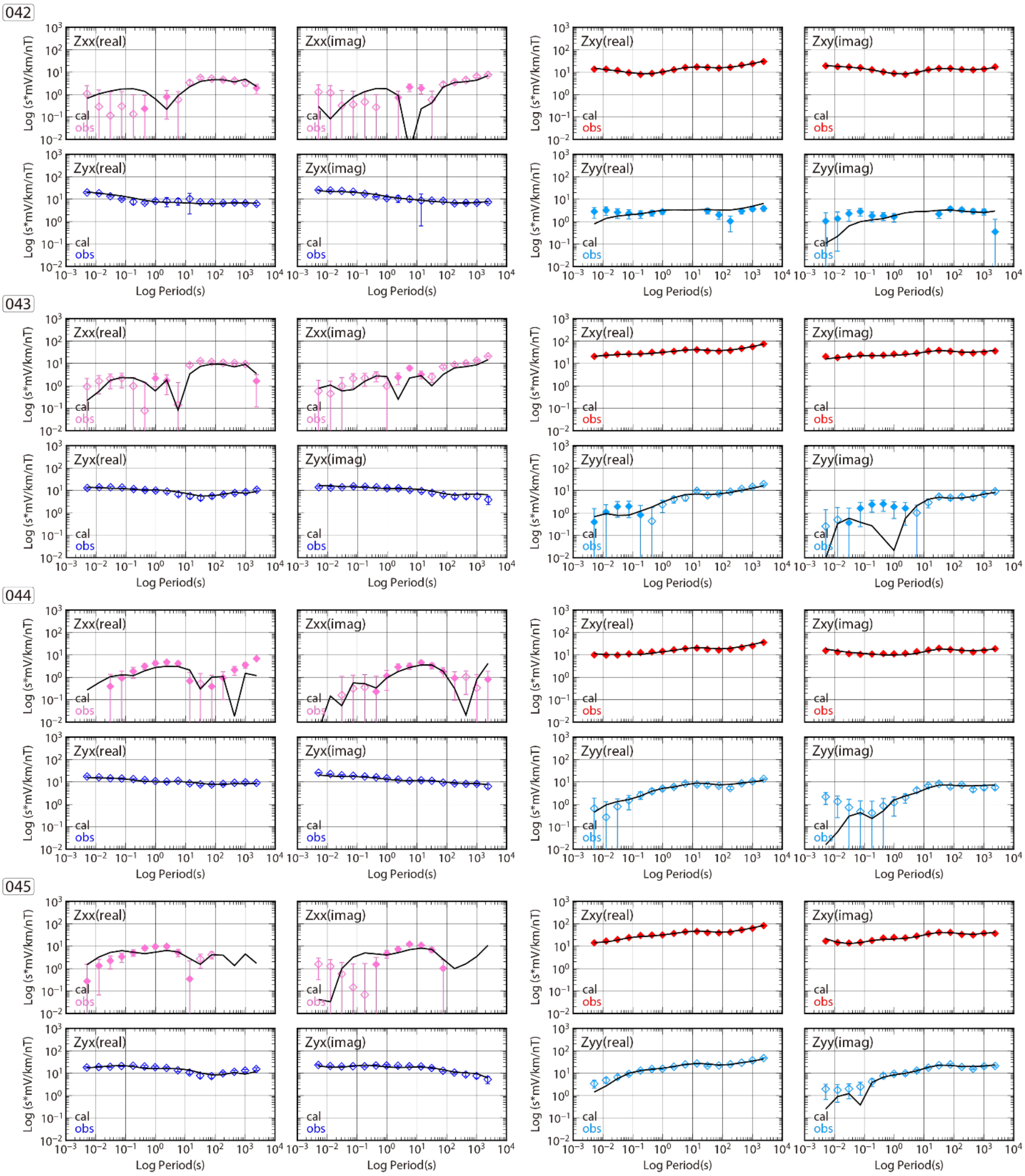


図 3.2.1.1-7k　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

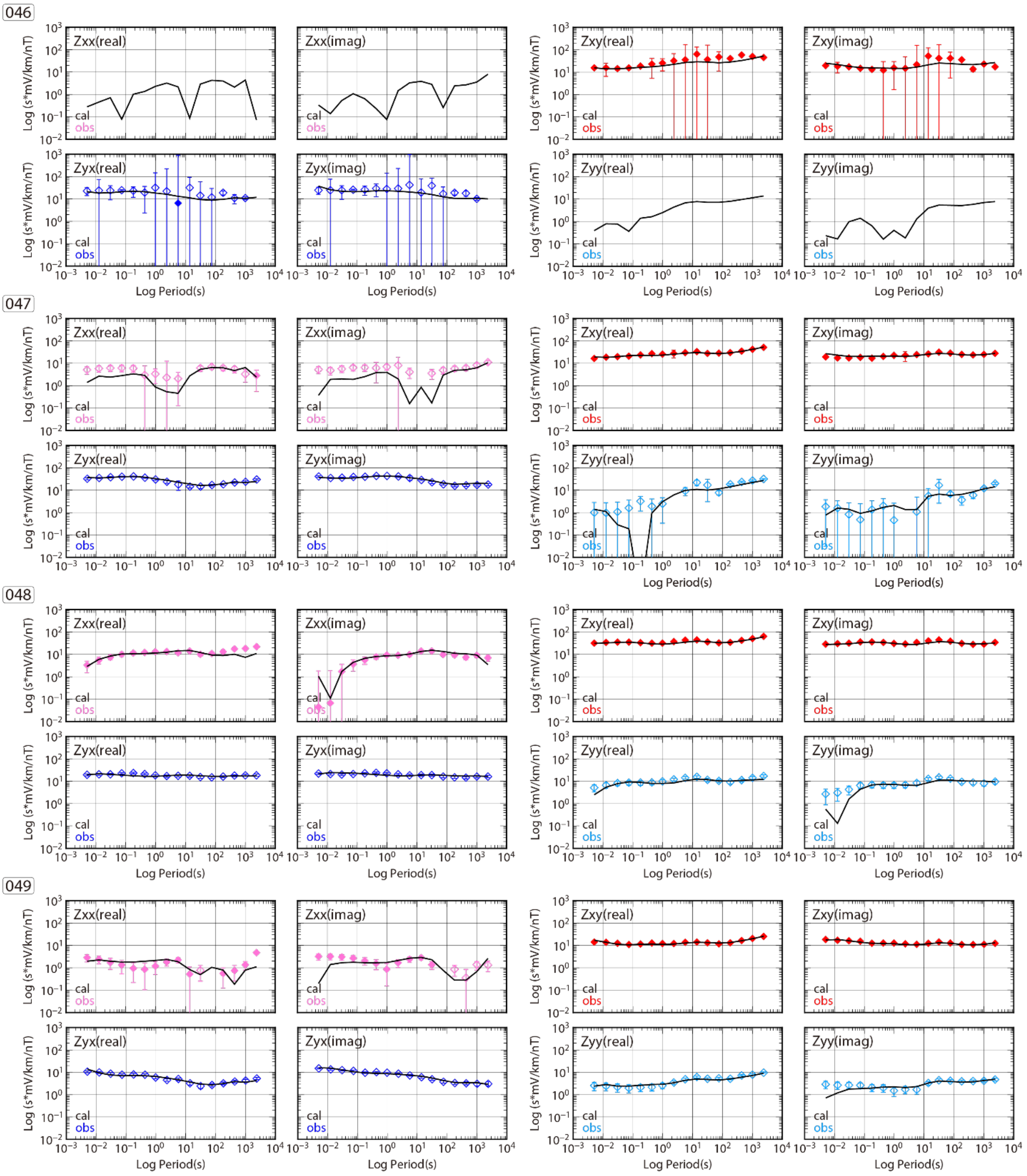


図 3.2.1.1-7l　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

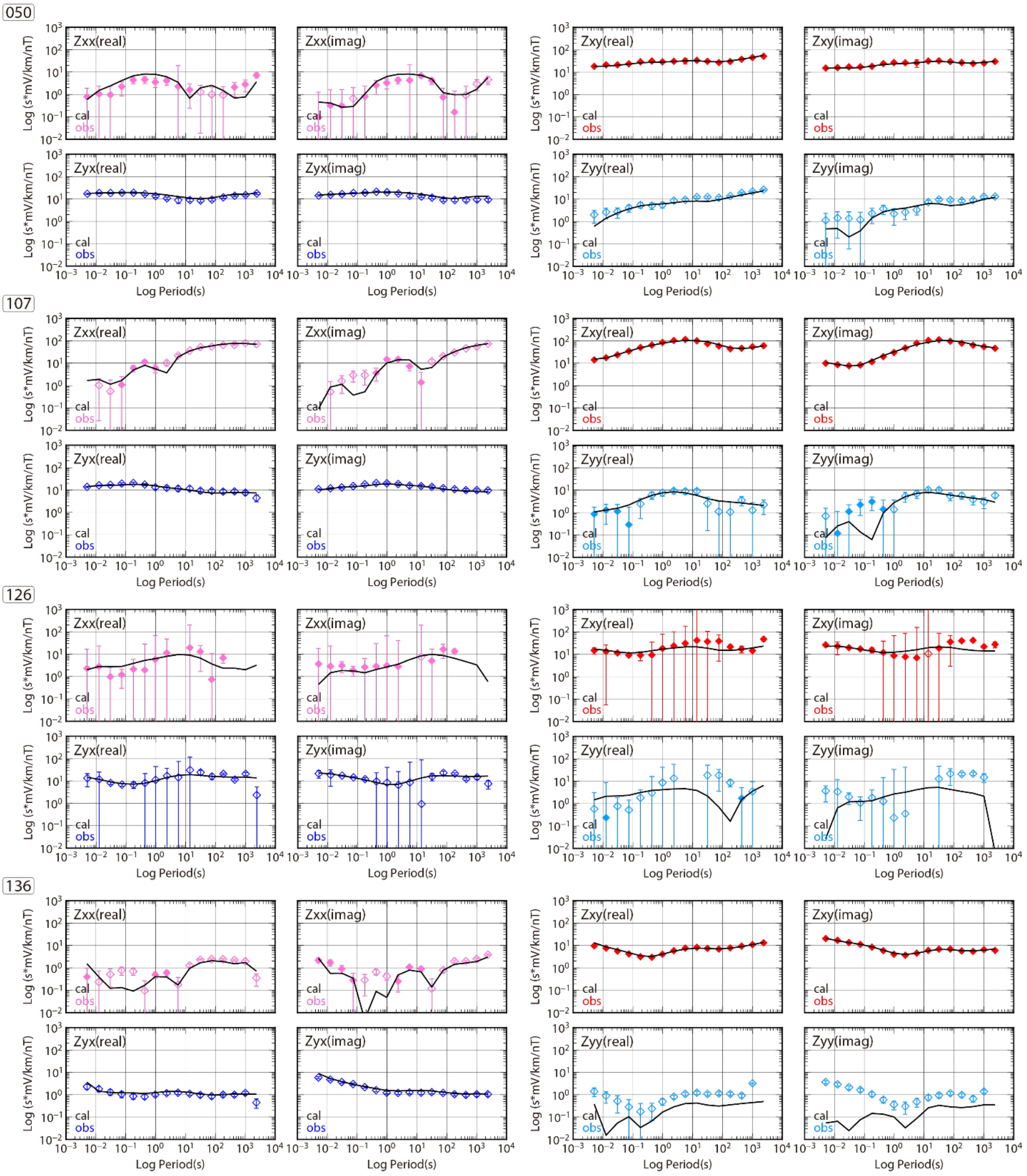


図 3.2.1.1-7m　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

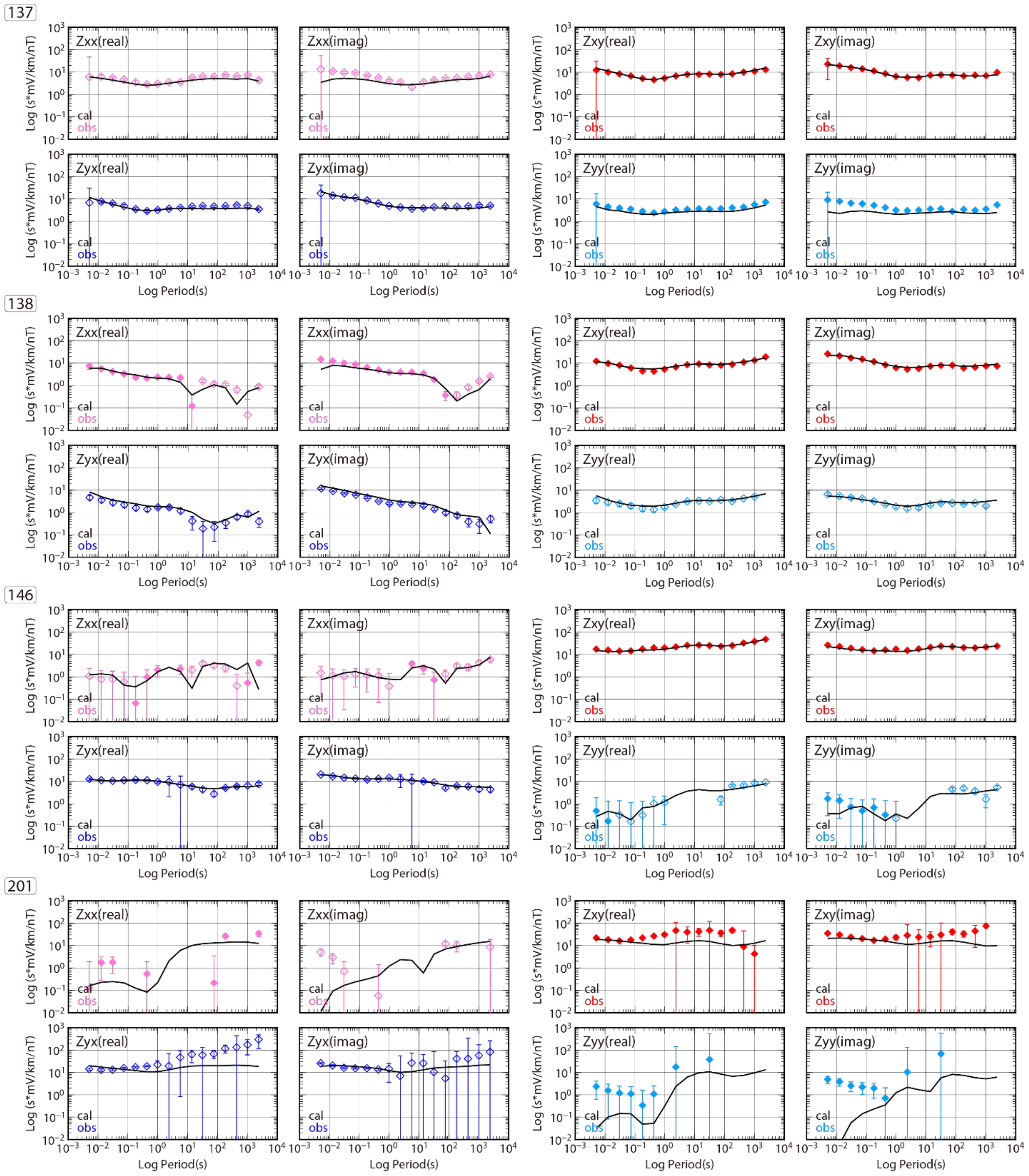


図 3.2.1.1-7n　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

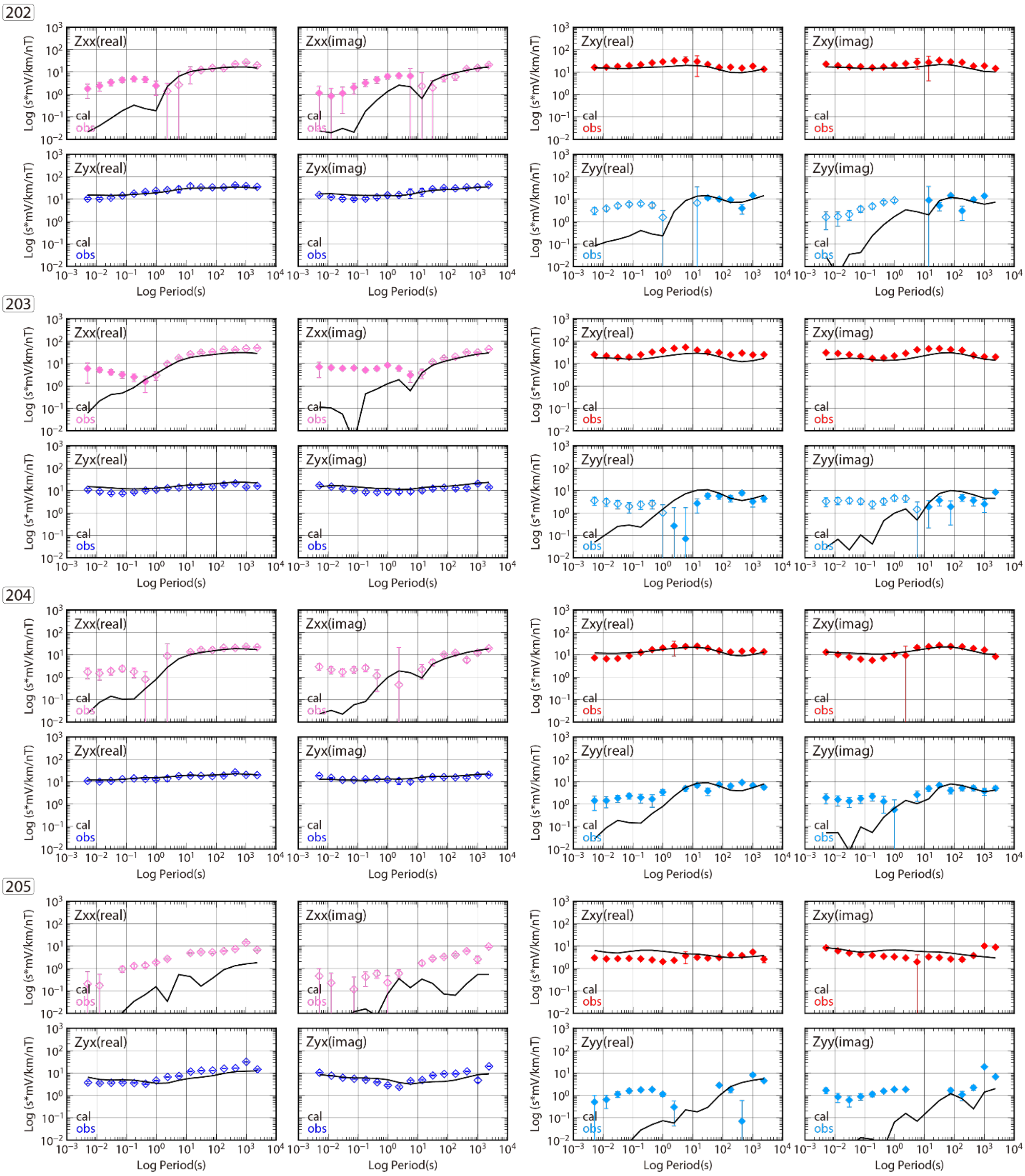


図 3.2.1.1-7o　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

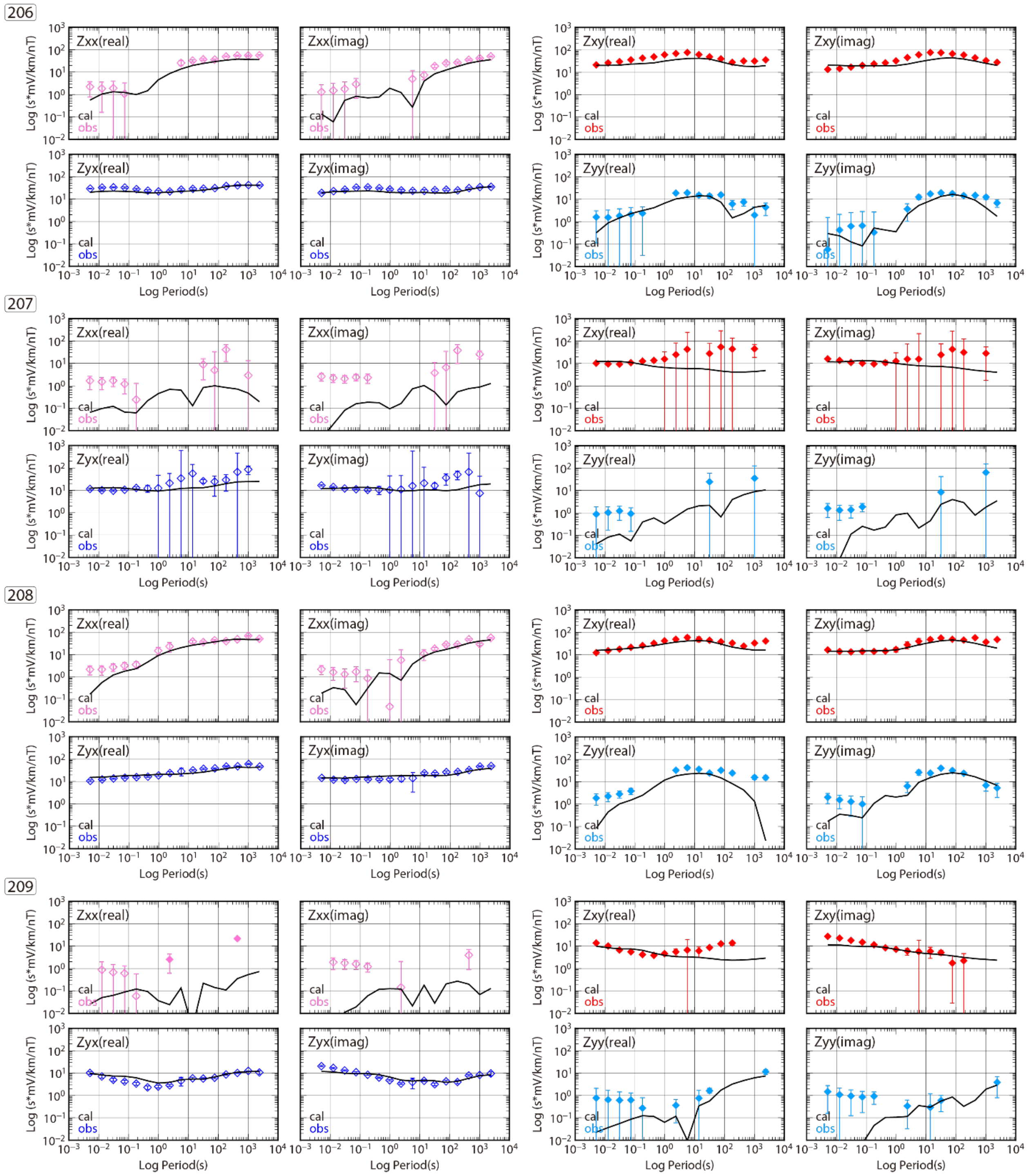


図 3.2.1.1-7p インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

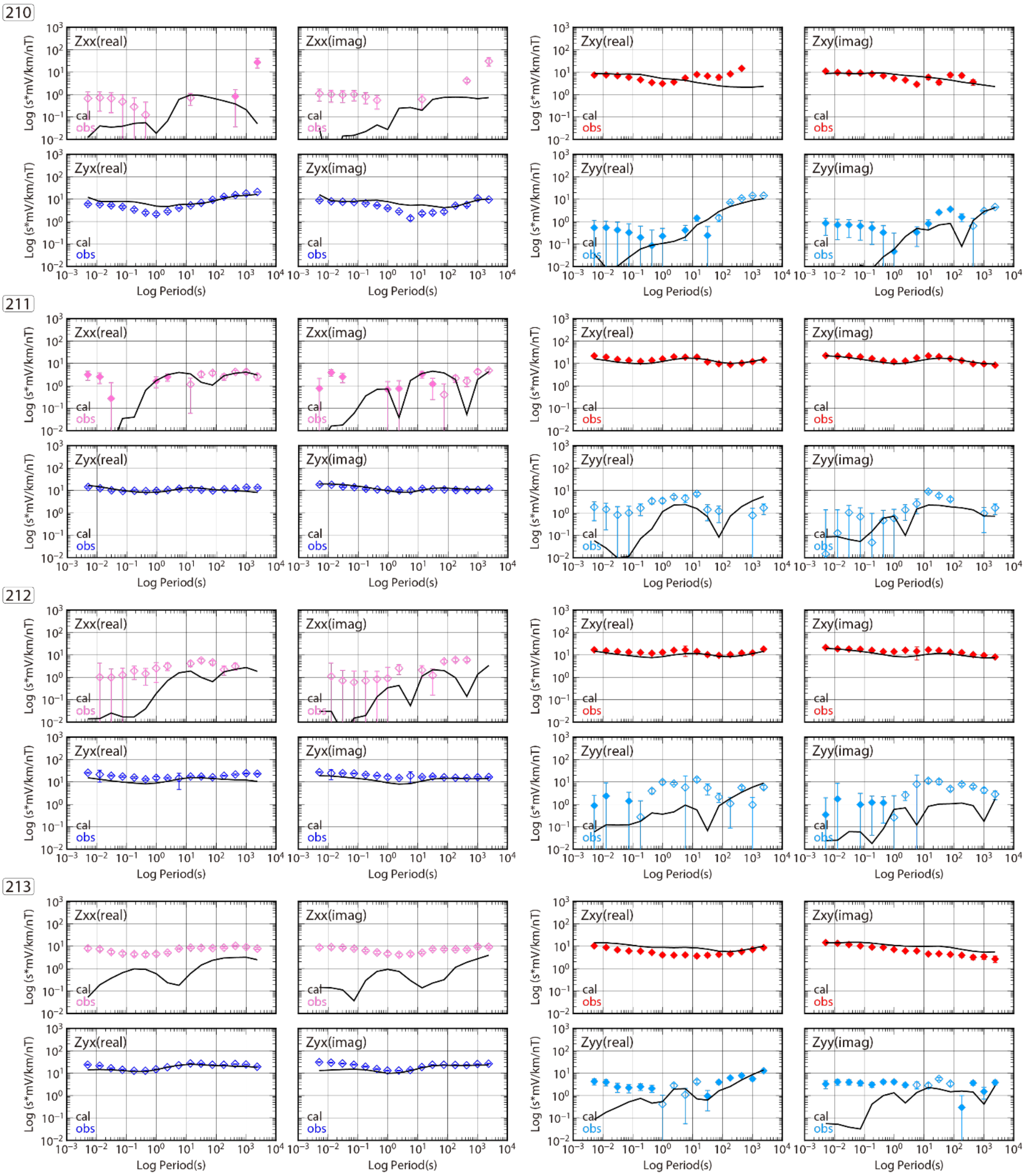


図 3.2.1.1-7q　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

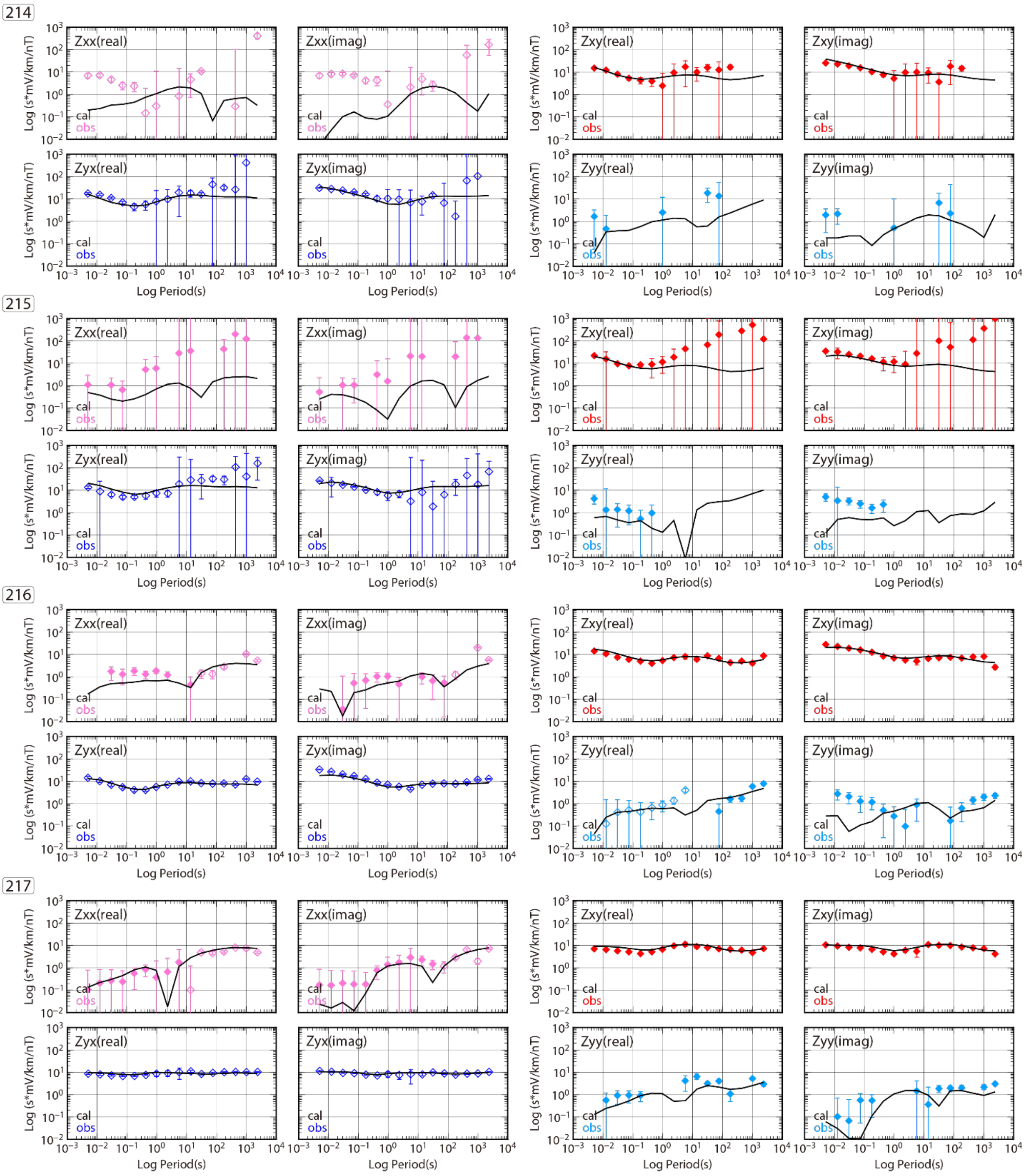


図 3.2.1.1-7r　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

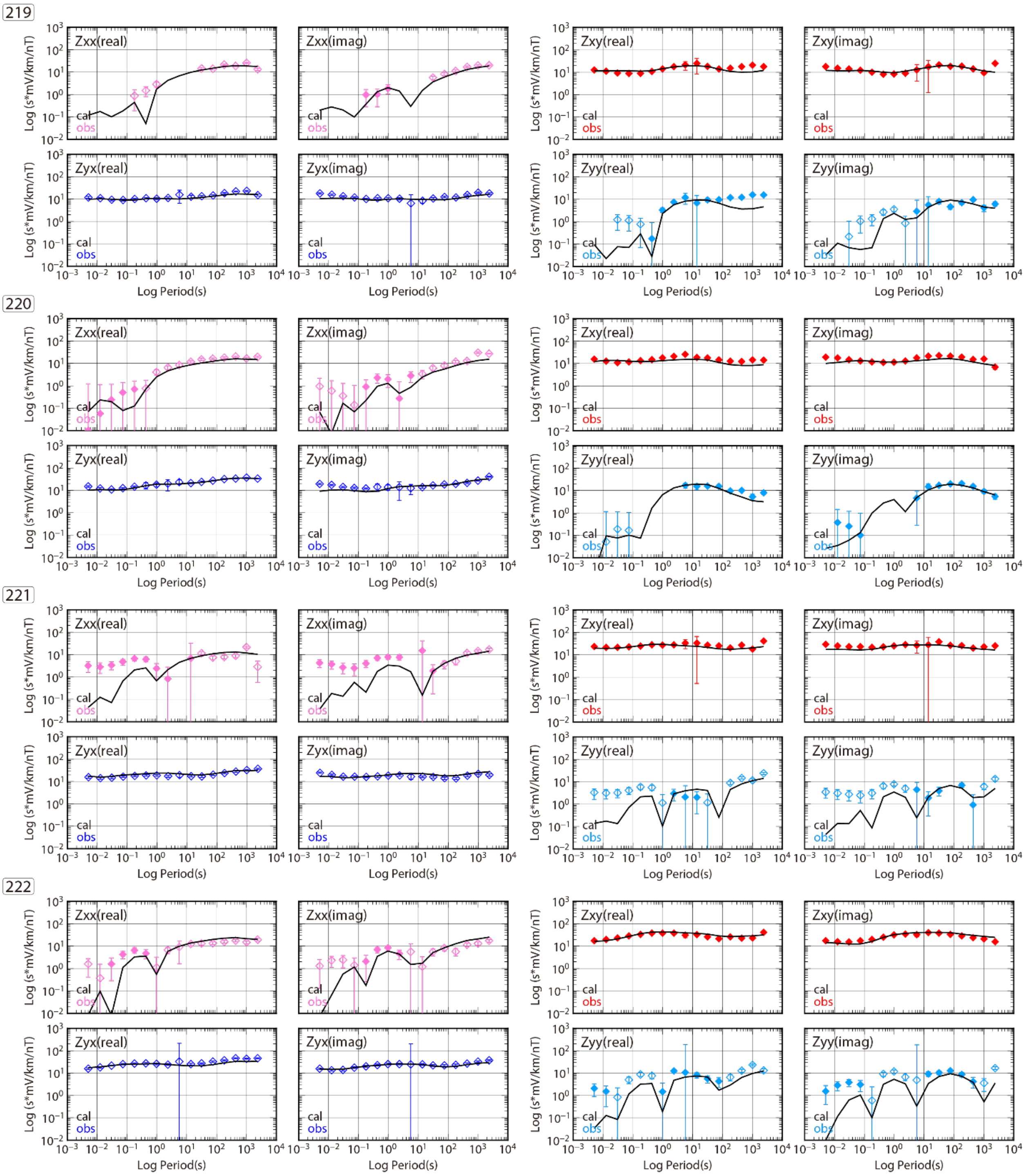


図 3.2.1.1-7s　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

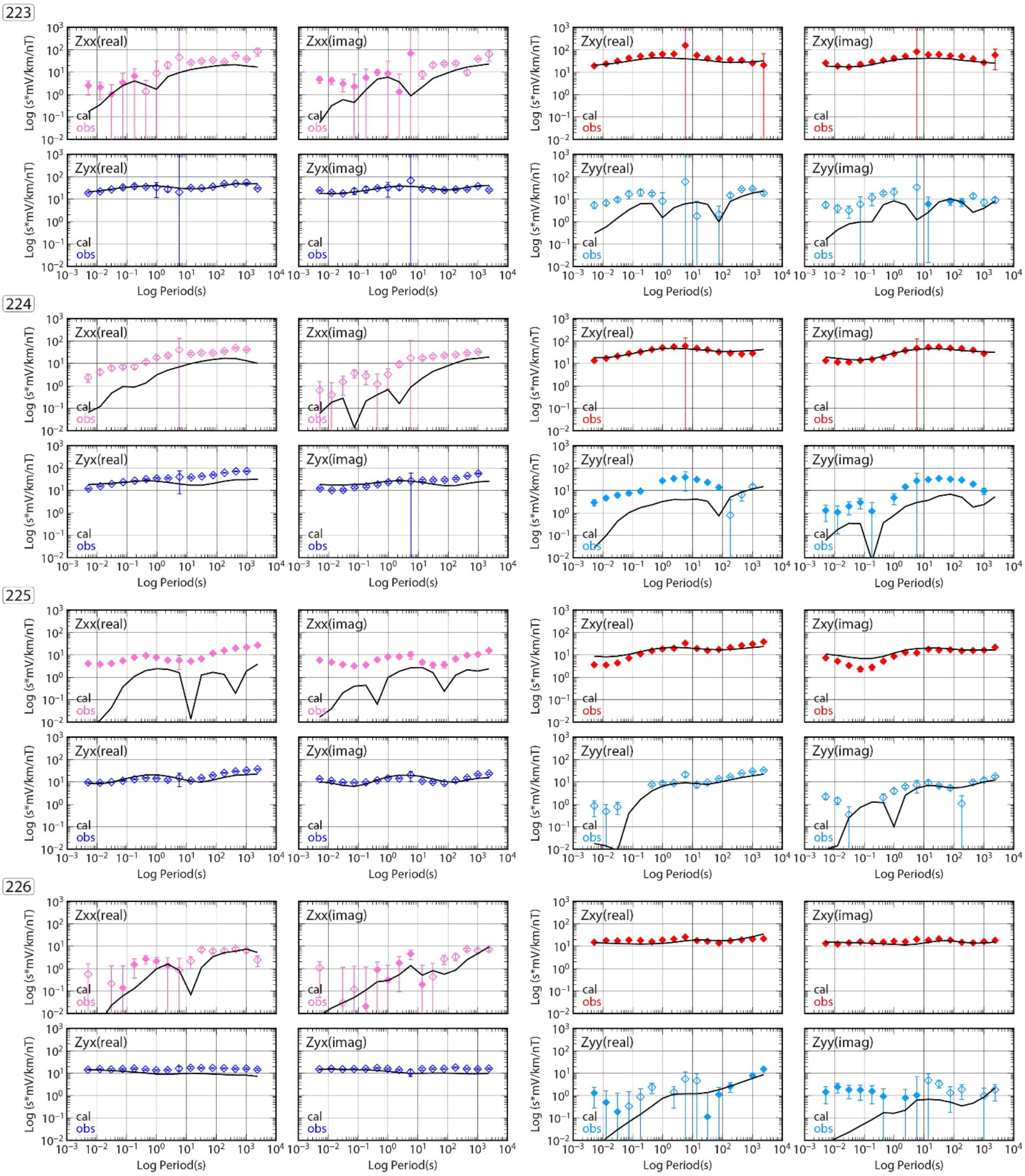


図 3.2.1.1-7t　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

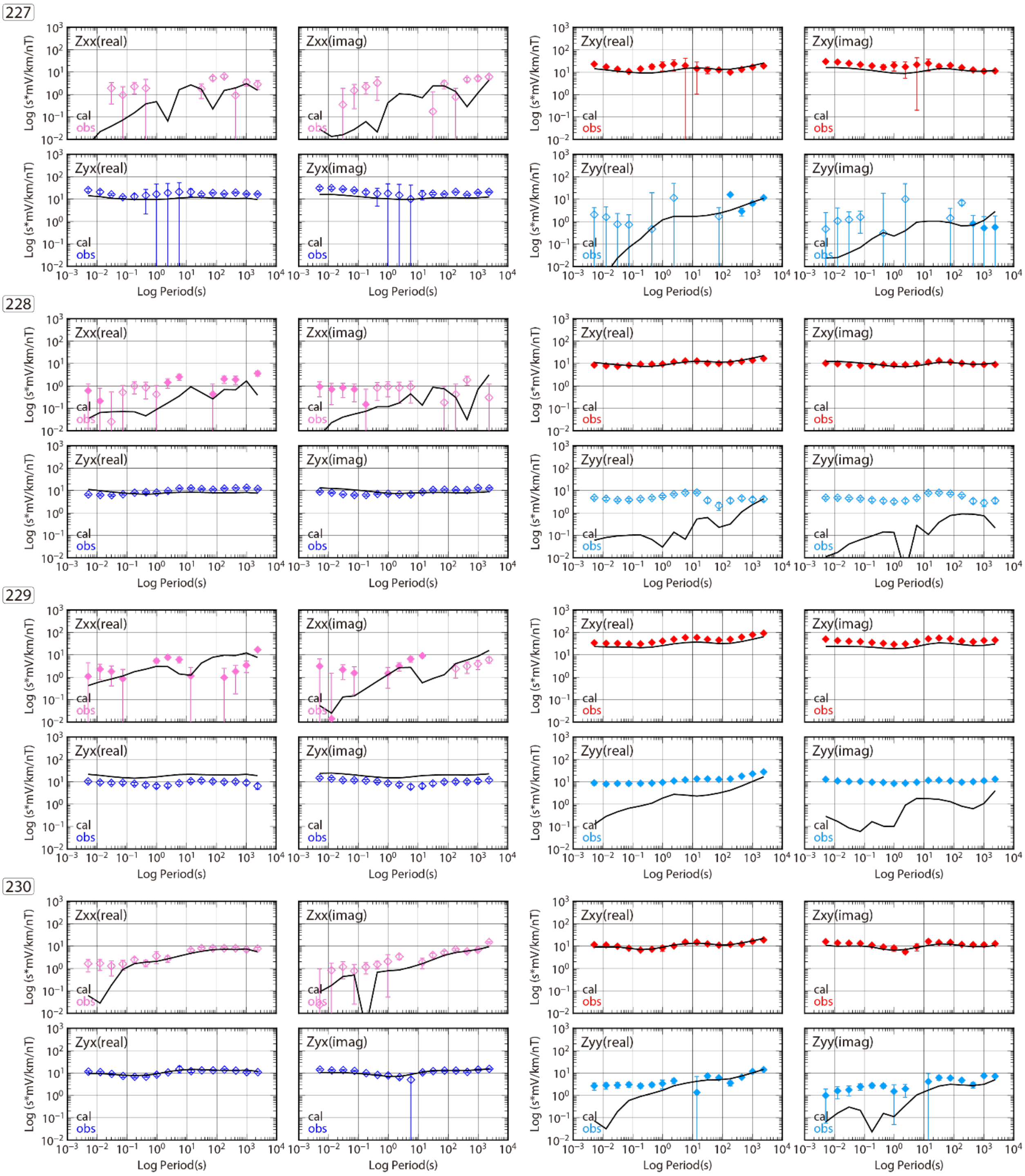


図 3.2.1.1-7u　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

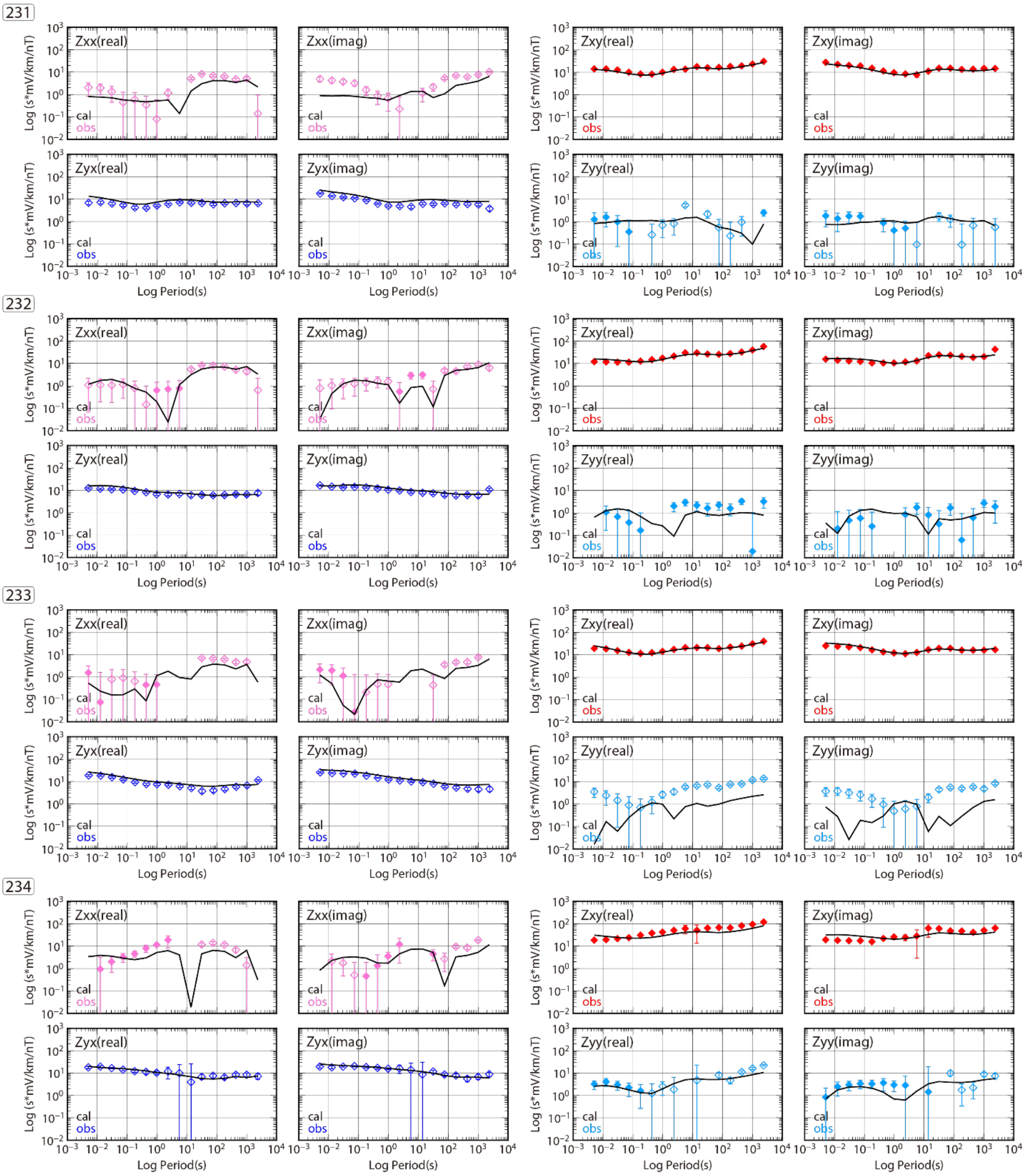


図 3.2.1.1-7v　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

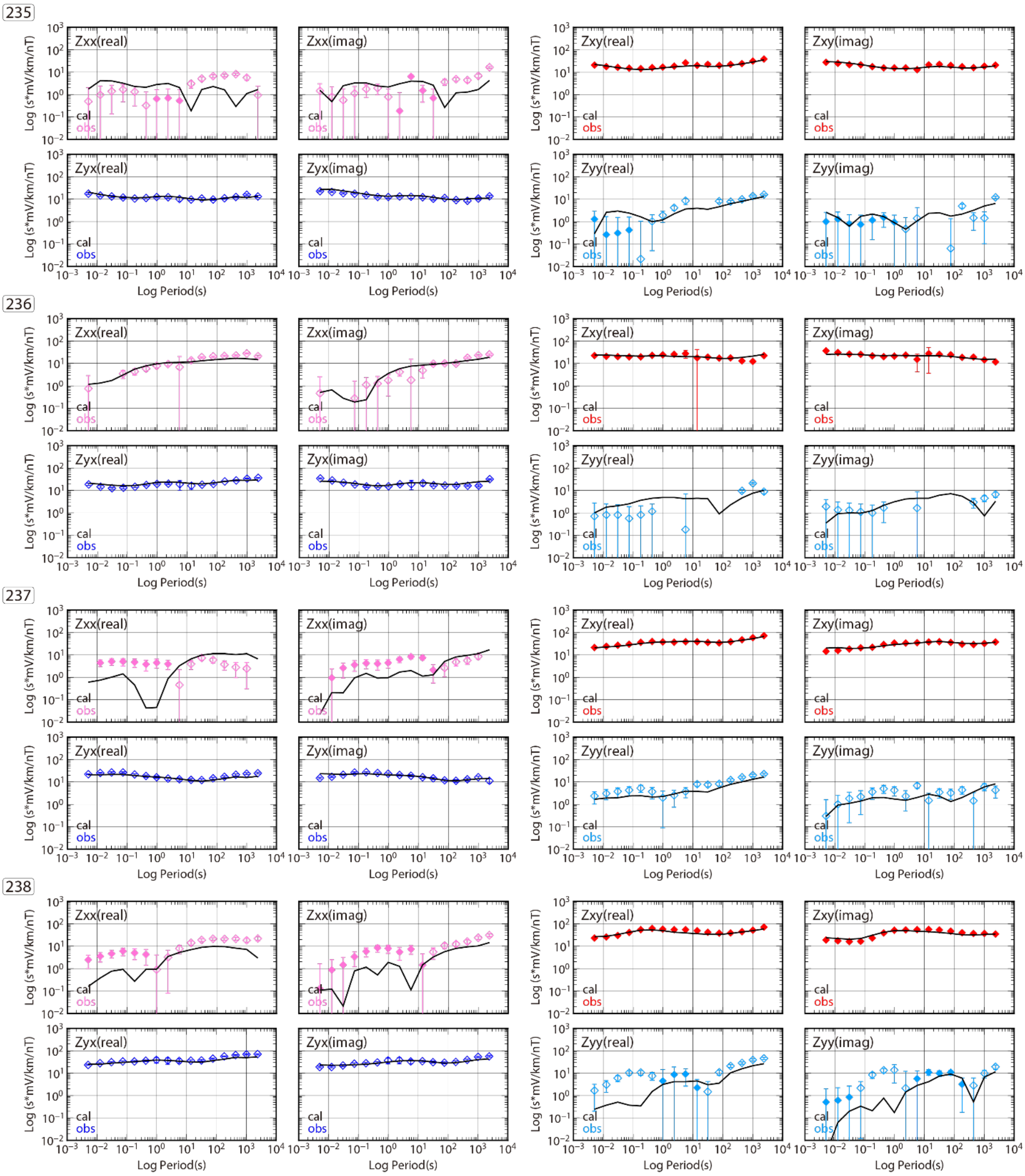


図 3.2.1.1-7w インピーダンス 4 成分（Z_{xx}，Z_{xy}，Z_{yx}，Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

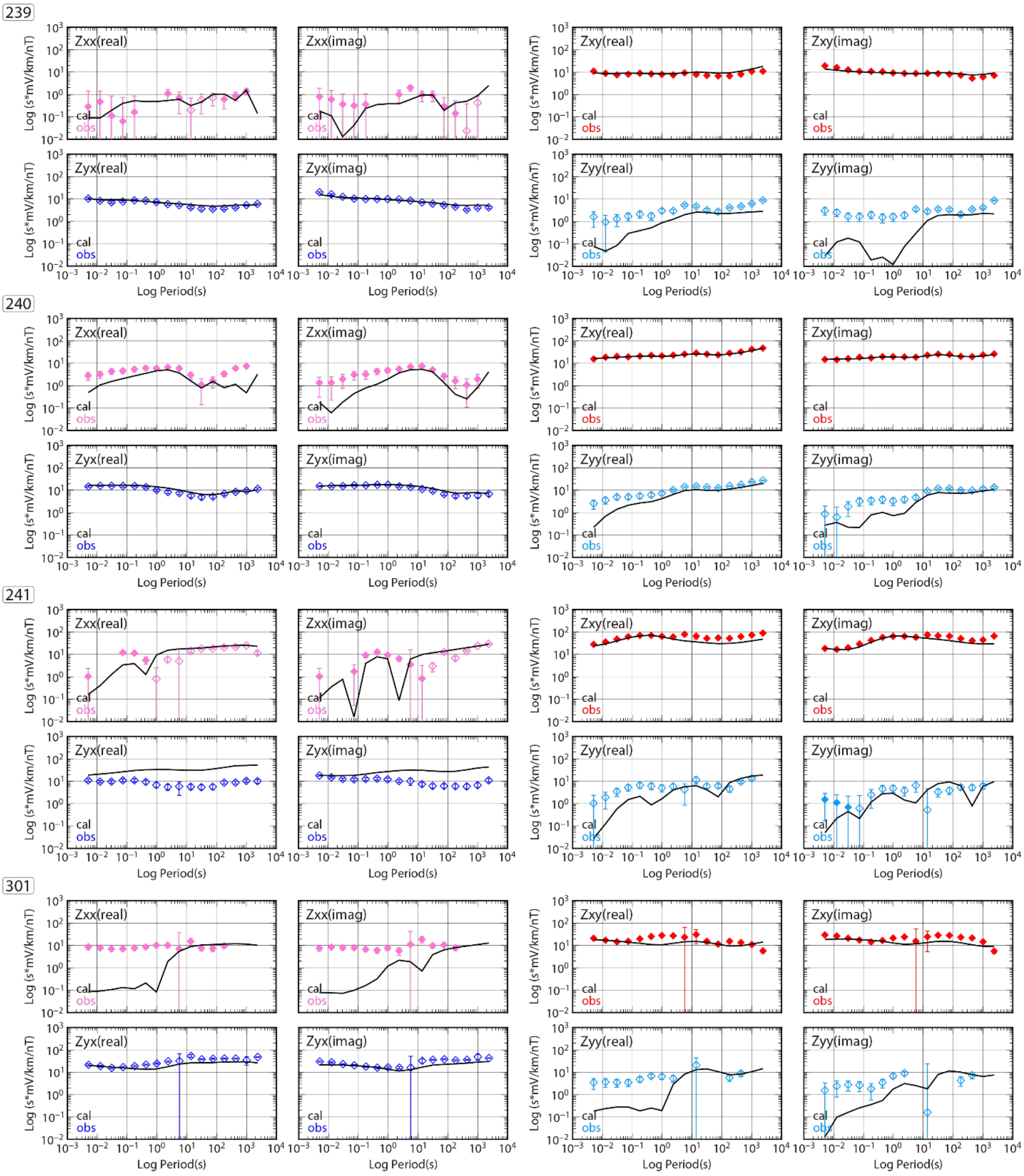


図 3.2.1.1-7x　インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

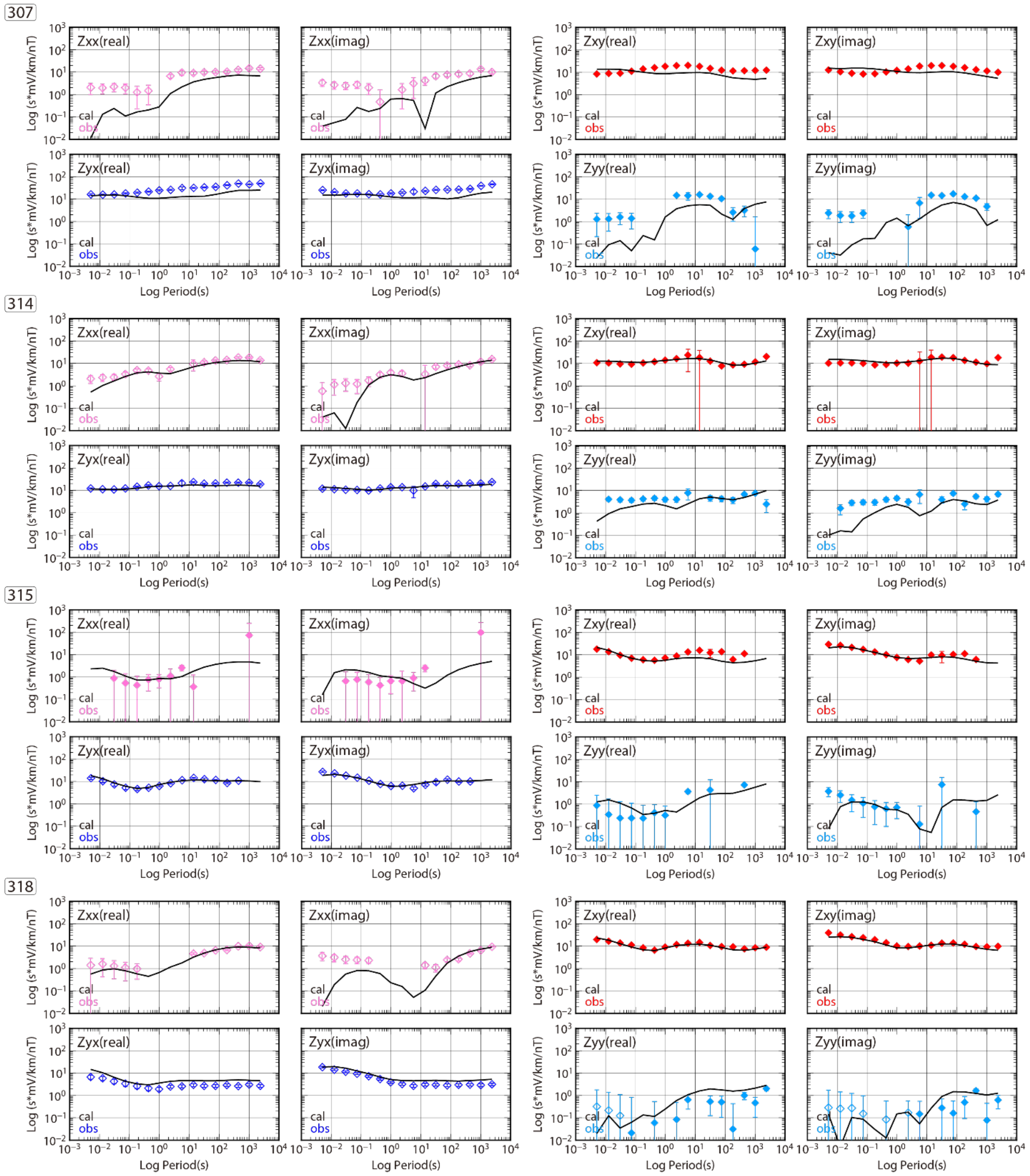


図 3.2.1.1-7y インピーダンス 4 成分（Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．観測値◇については，その正負を表すため負の値を白抜きシンボルで示す．

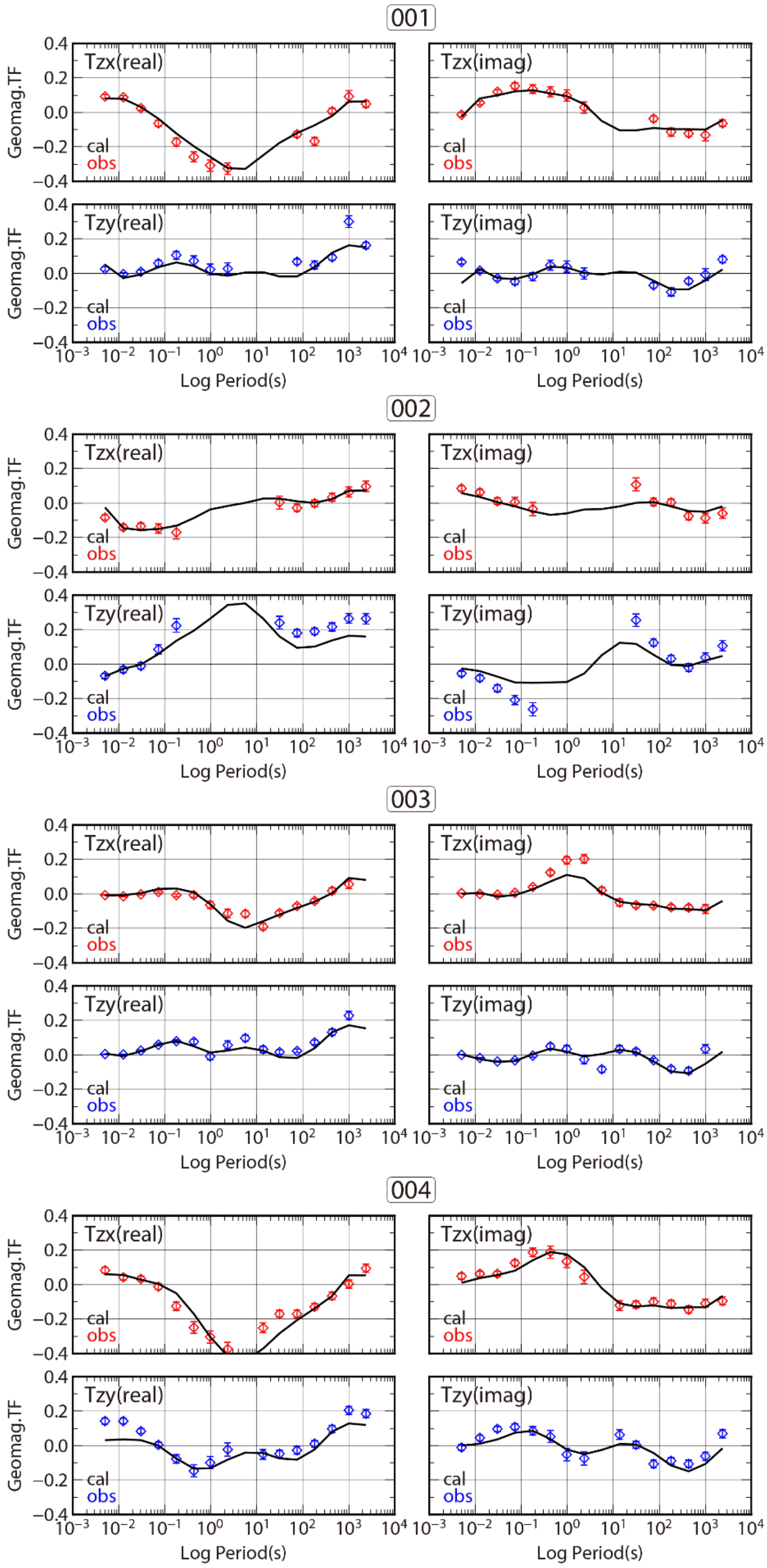


図 3.2.1.1-8a　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

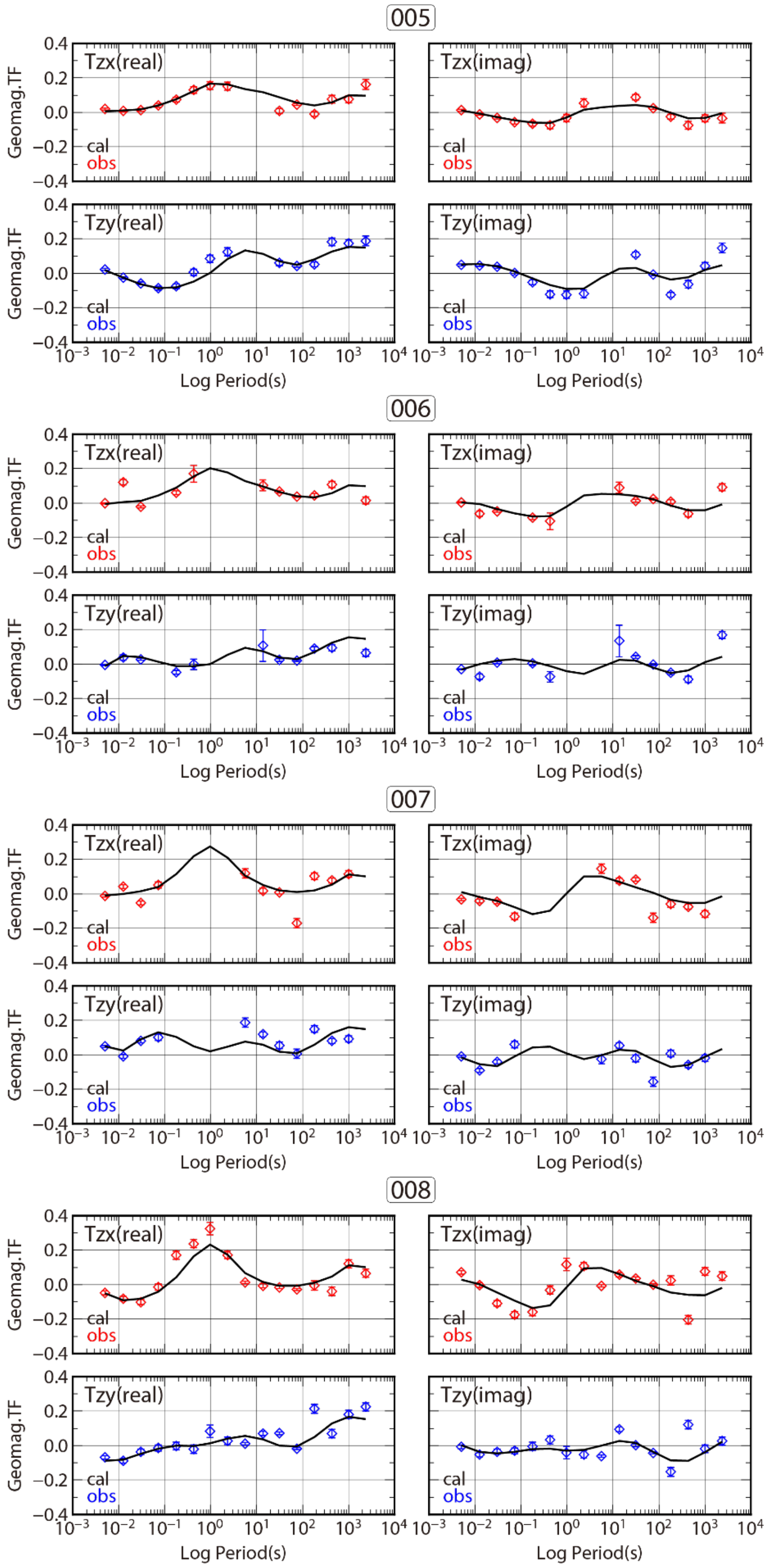


図 3.2.1.1-8b　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

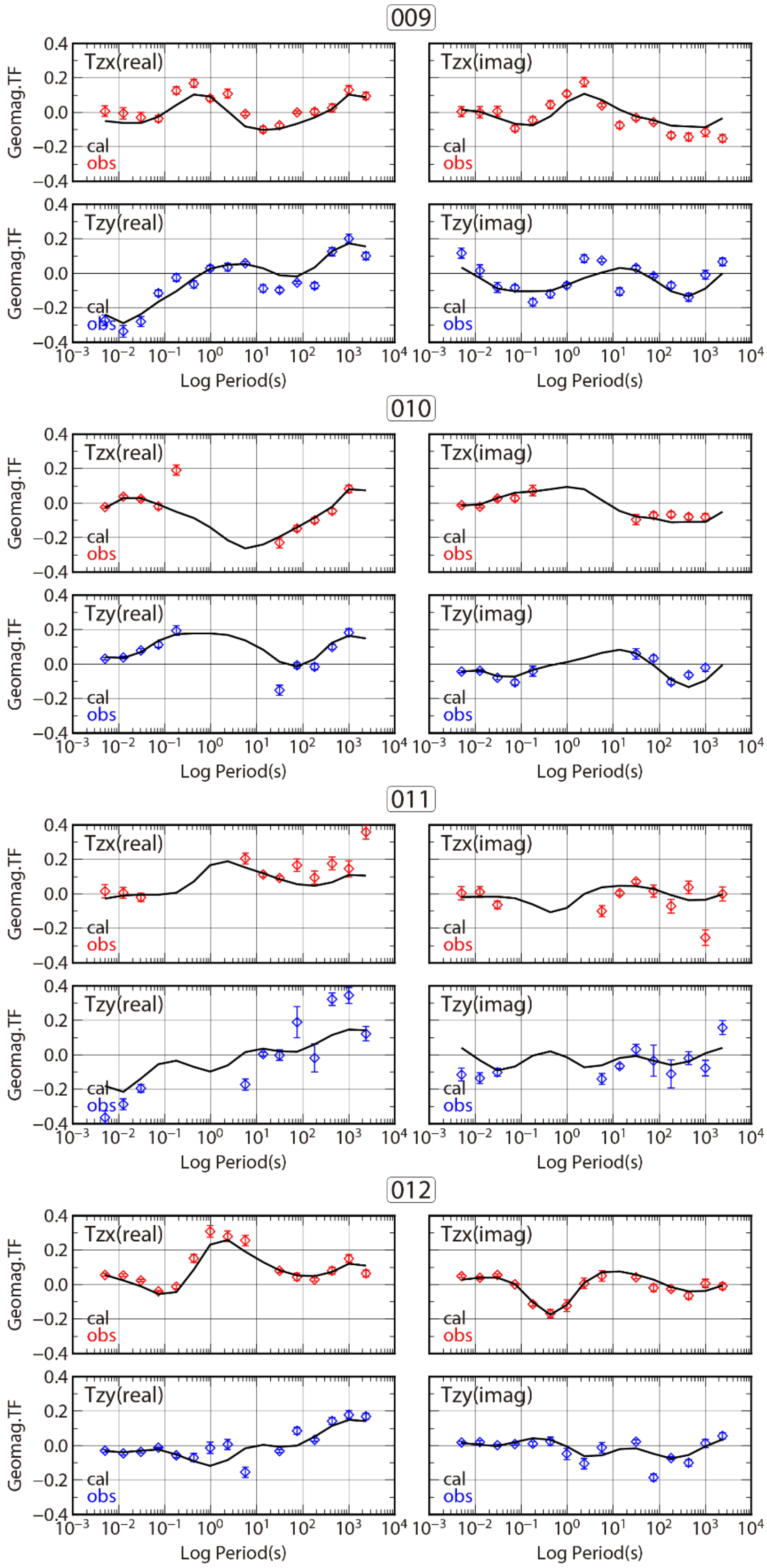


図 3.2.1.1-8c　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

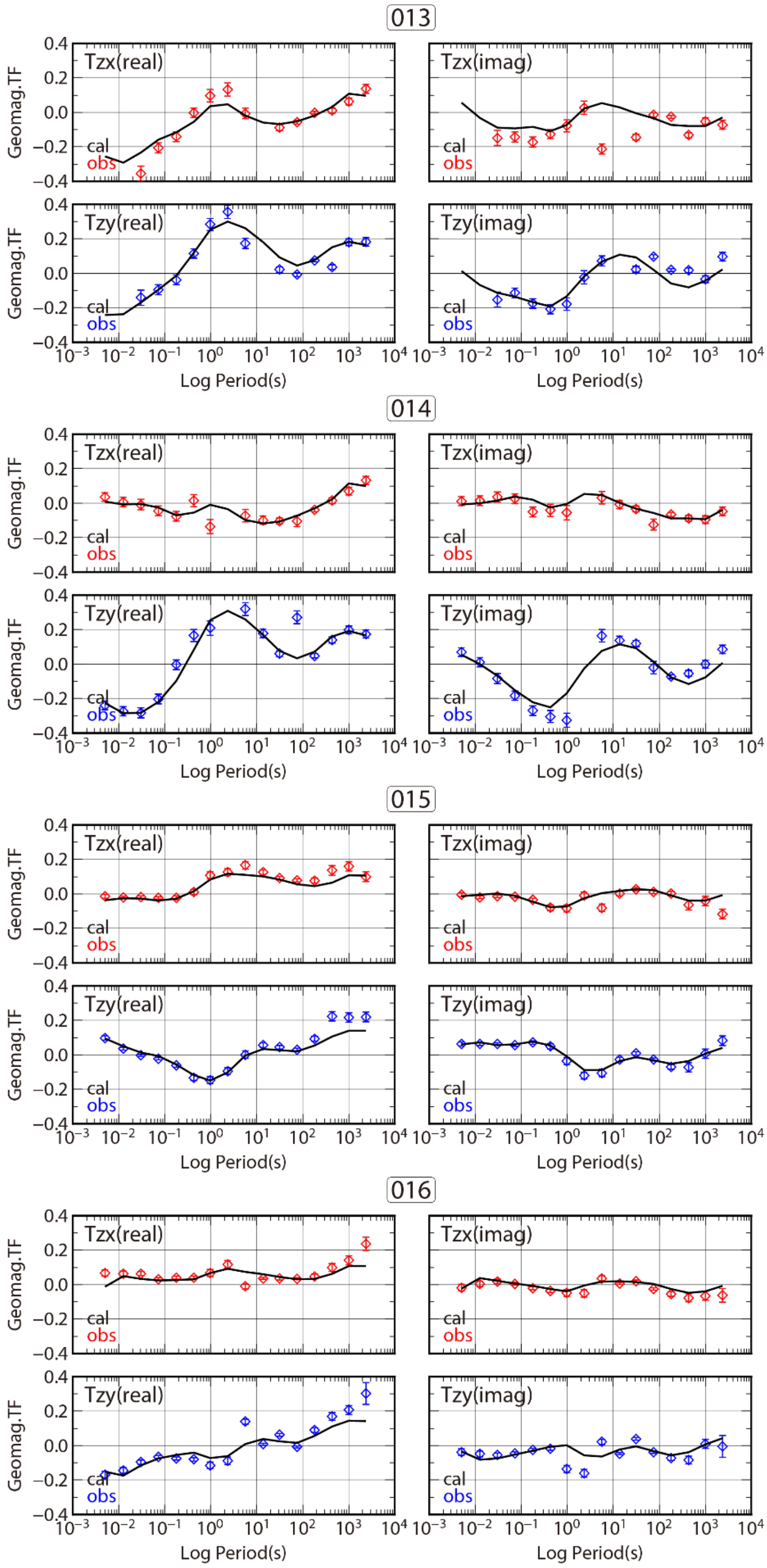


図 3.2.1.1-8d　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

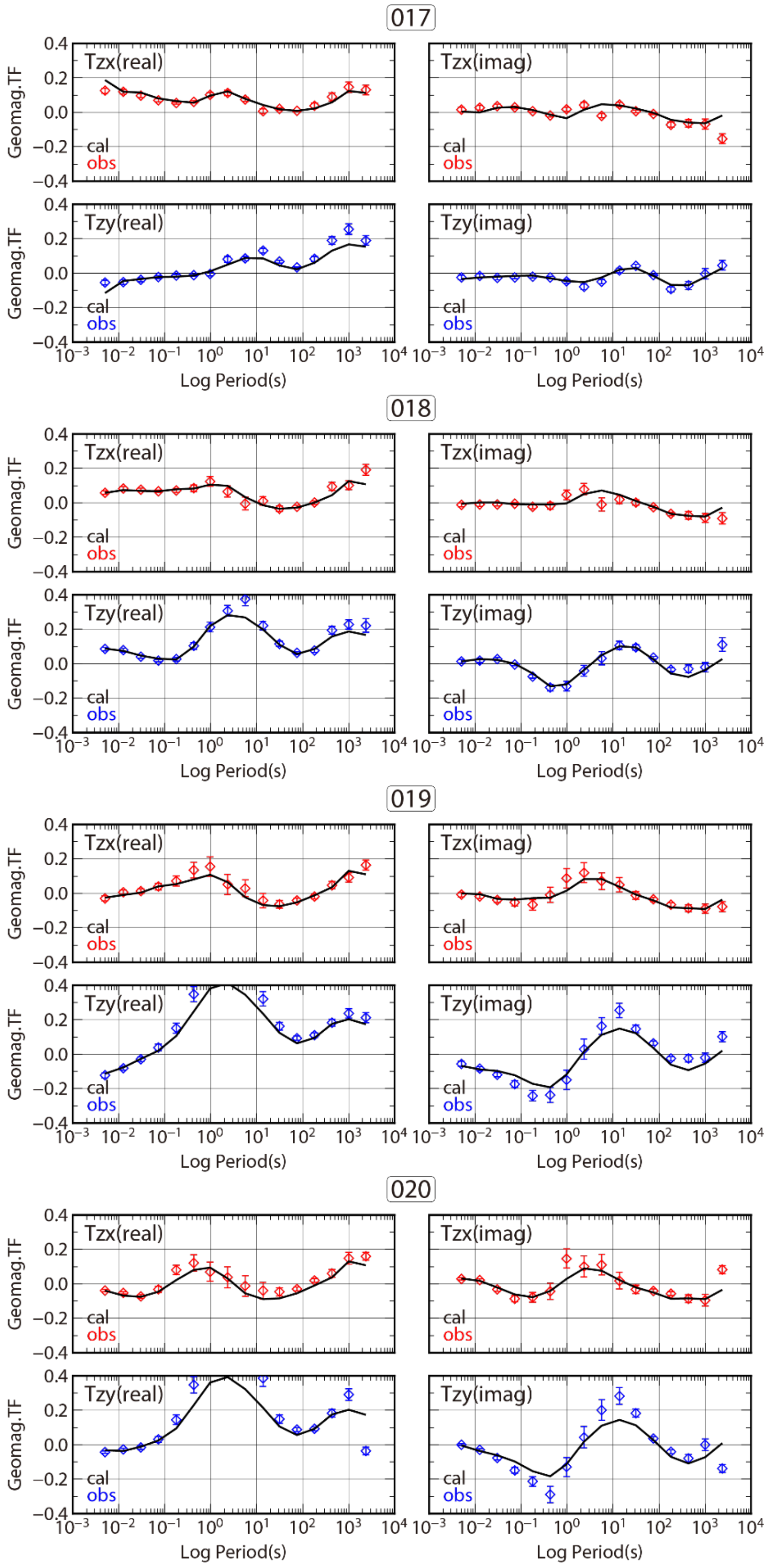


図 3.2.1.1-8e　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

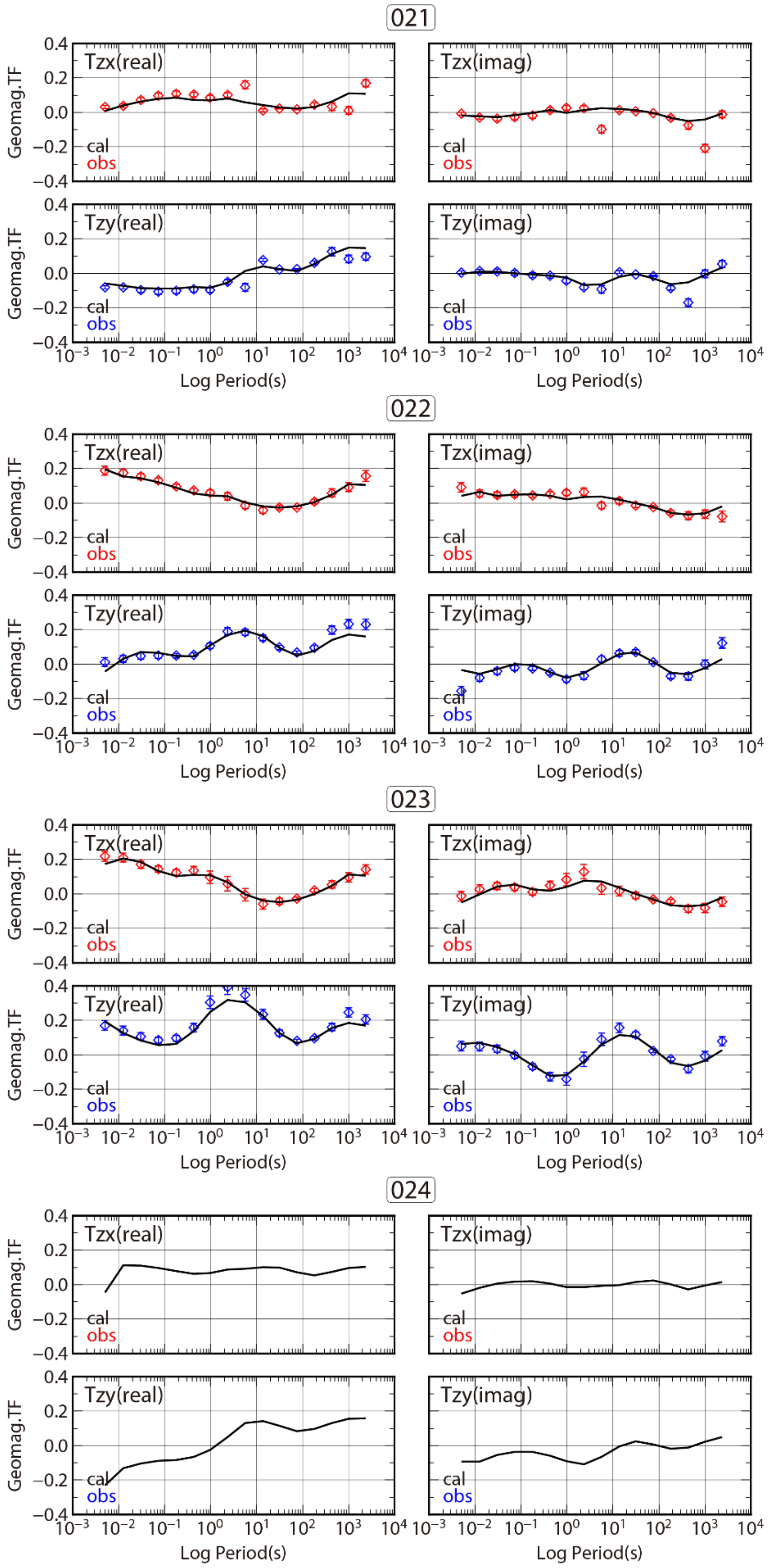


図 3.2.1.1-8f　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

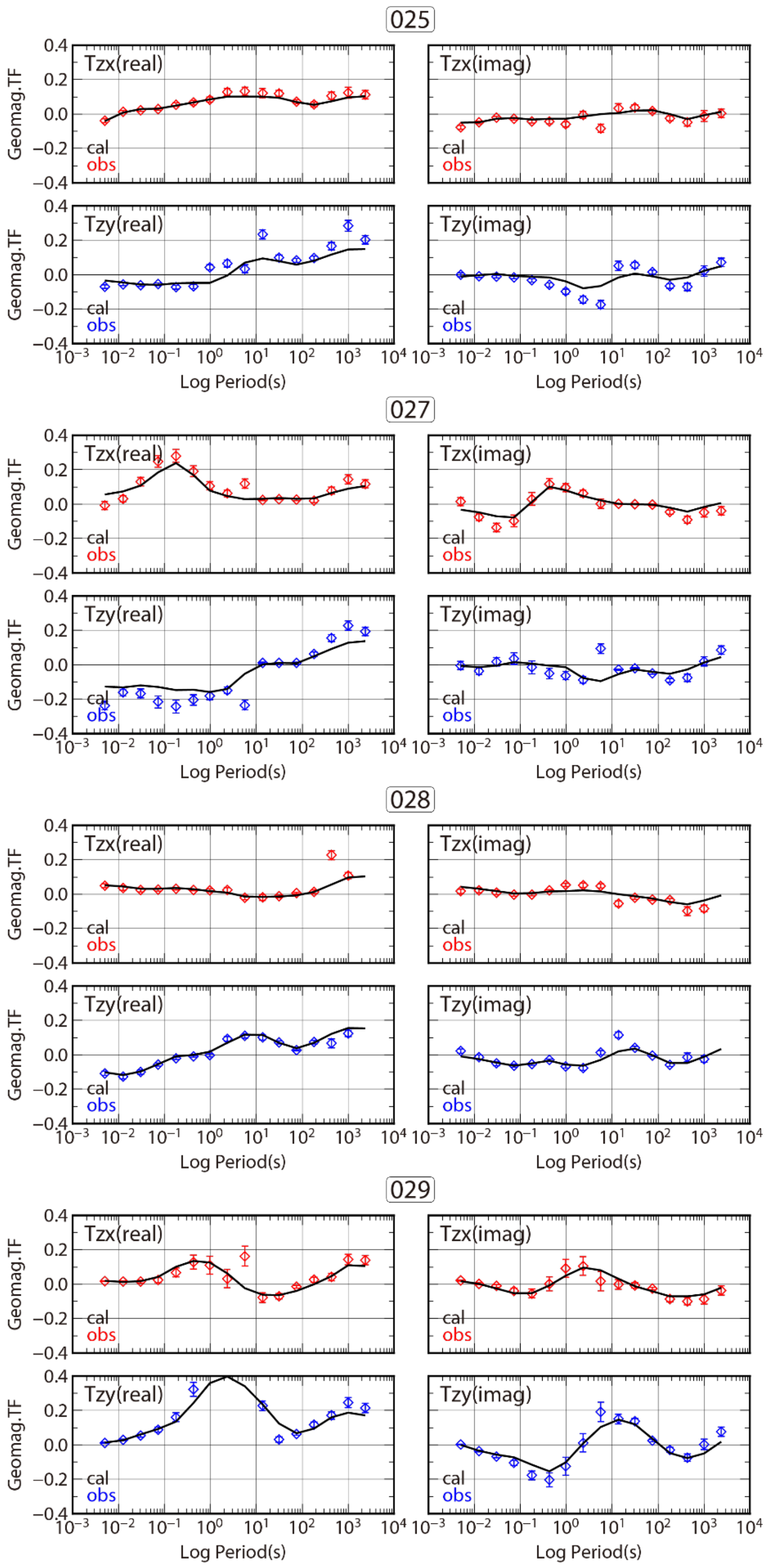


図 3.2.1.1-8g　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

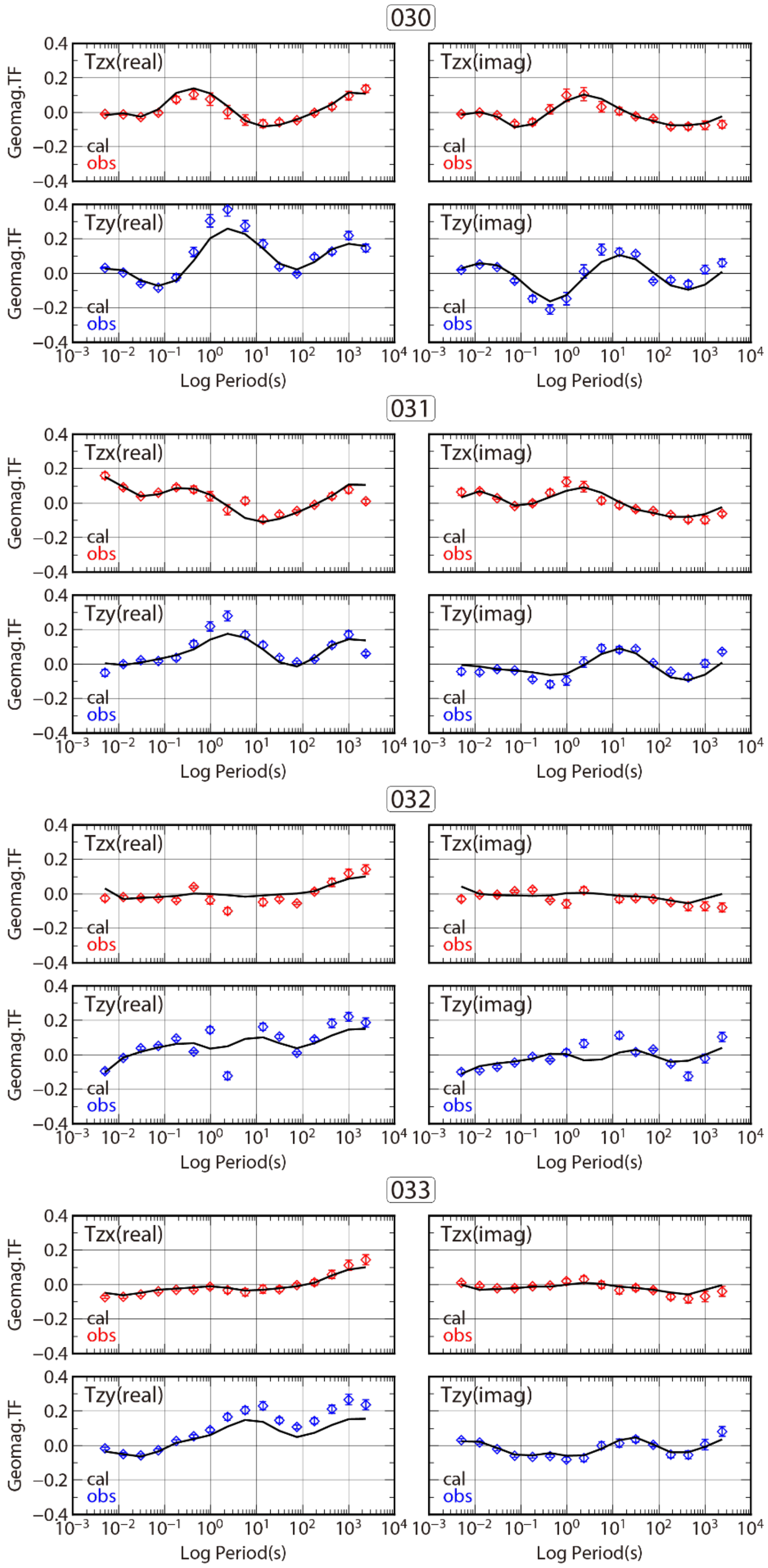


図 3.2.1.1-8h　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

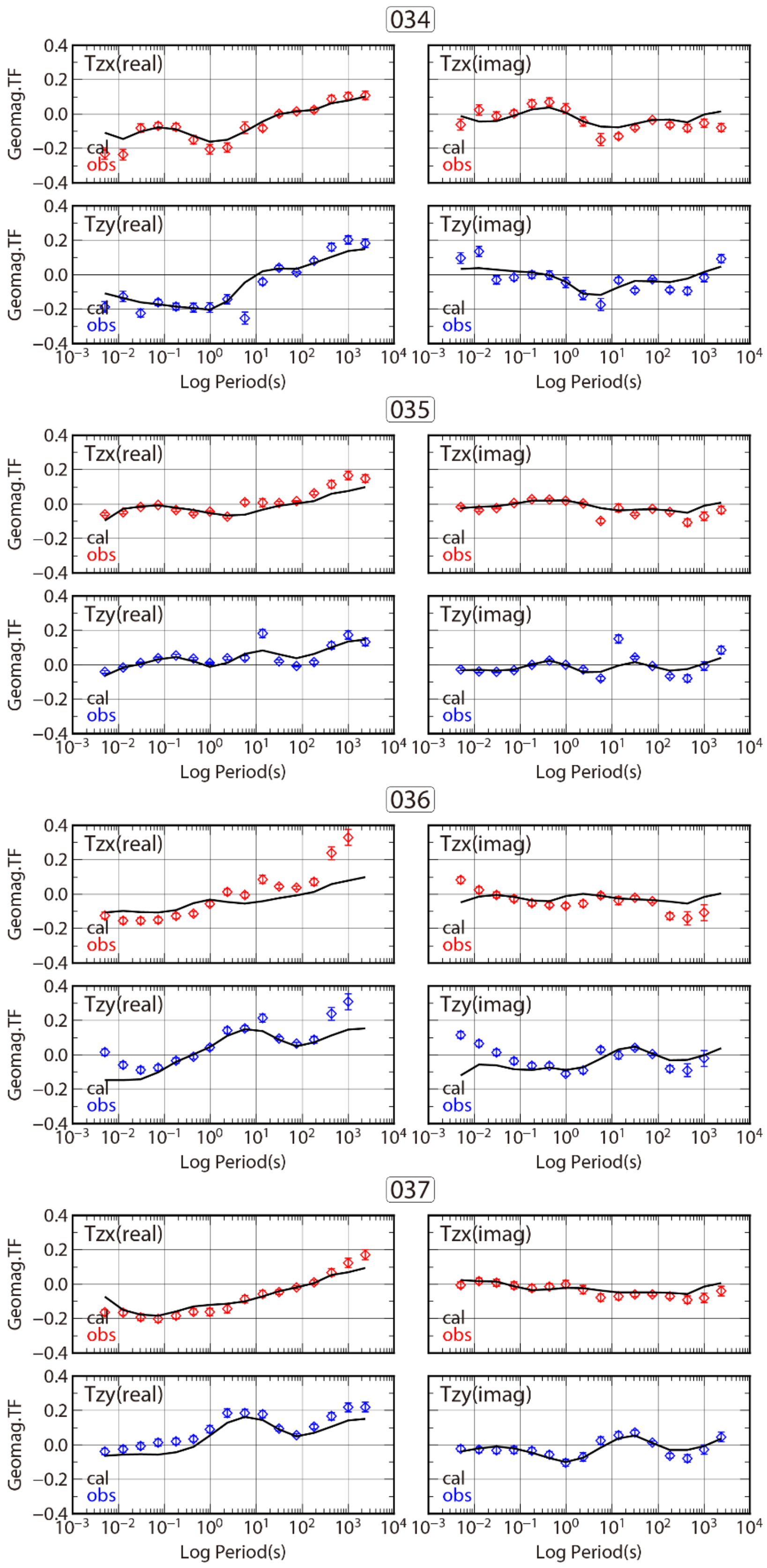


図 3.2.1.1-8i　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

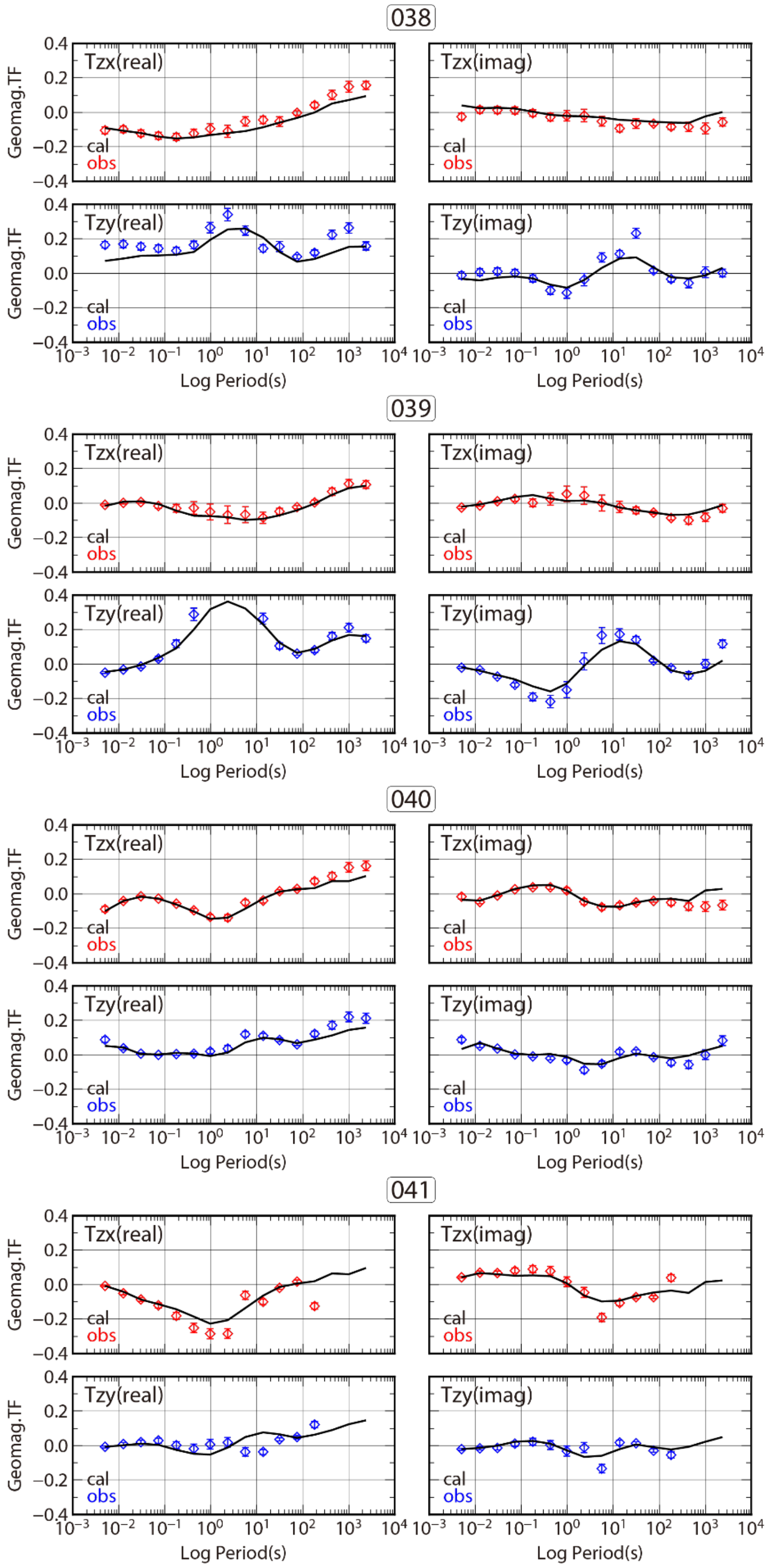


図 3.2.1.1-8j　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

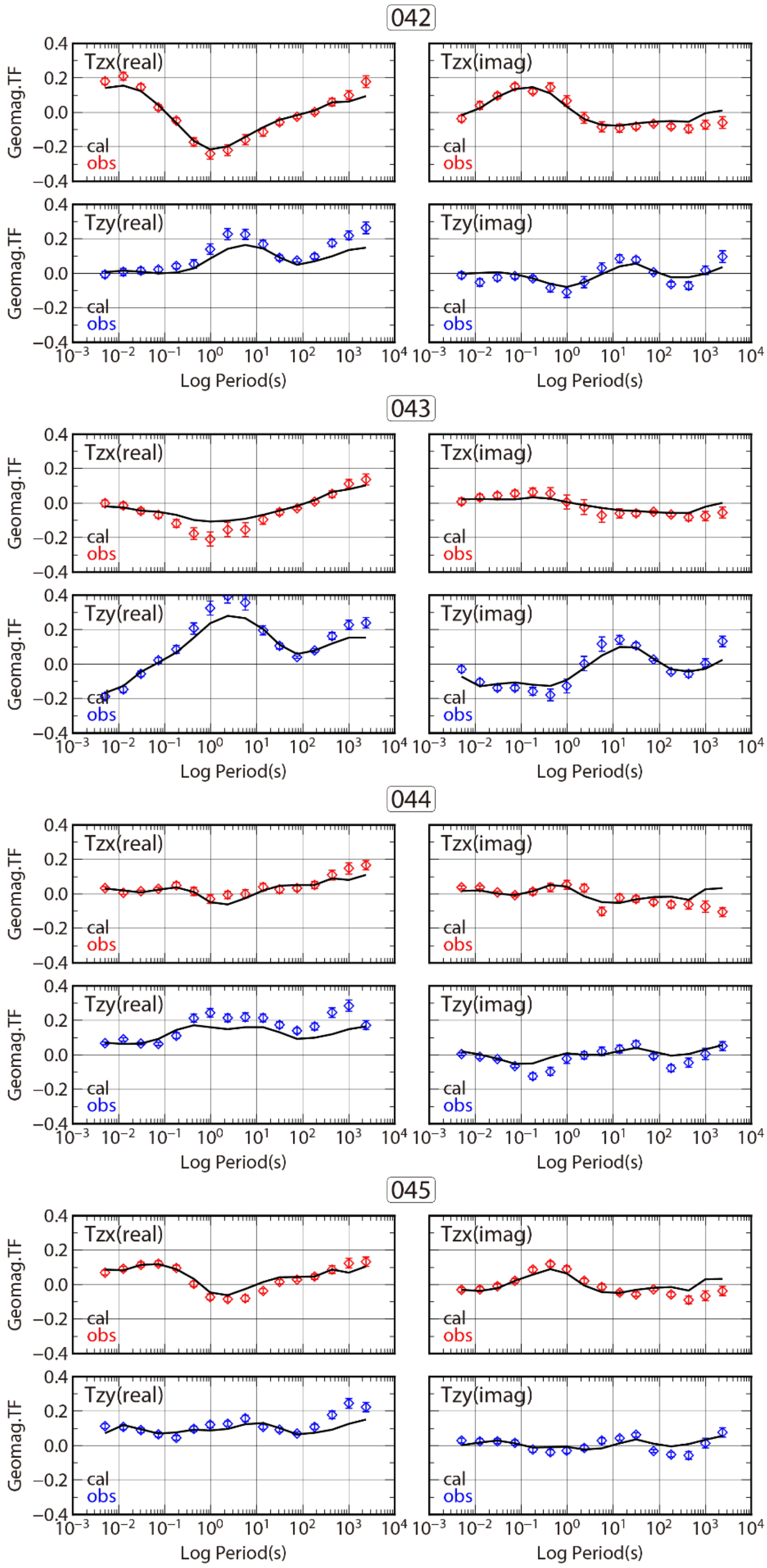


図 3.2.1.1-8k　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

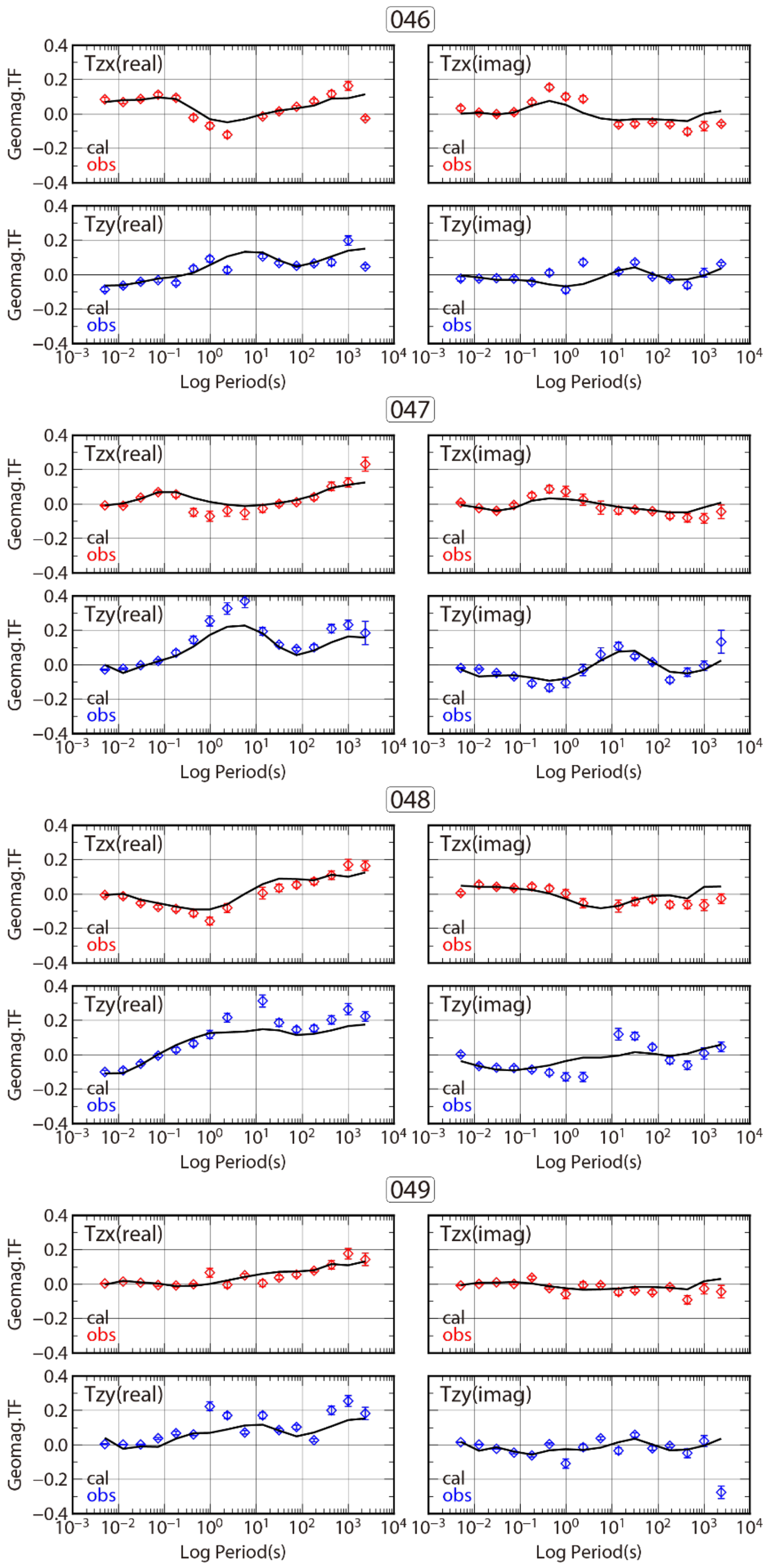


図 3.2.1.1-8l　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

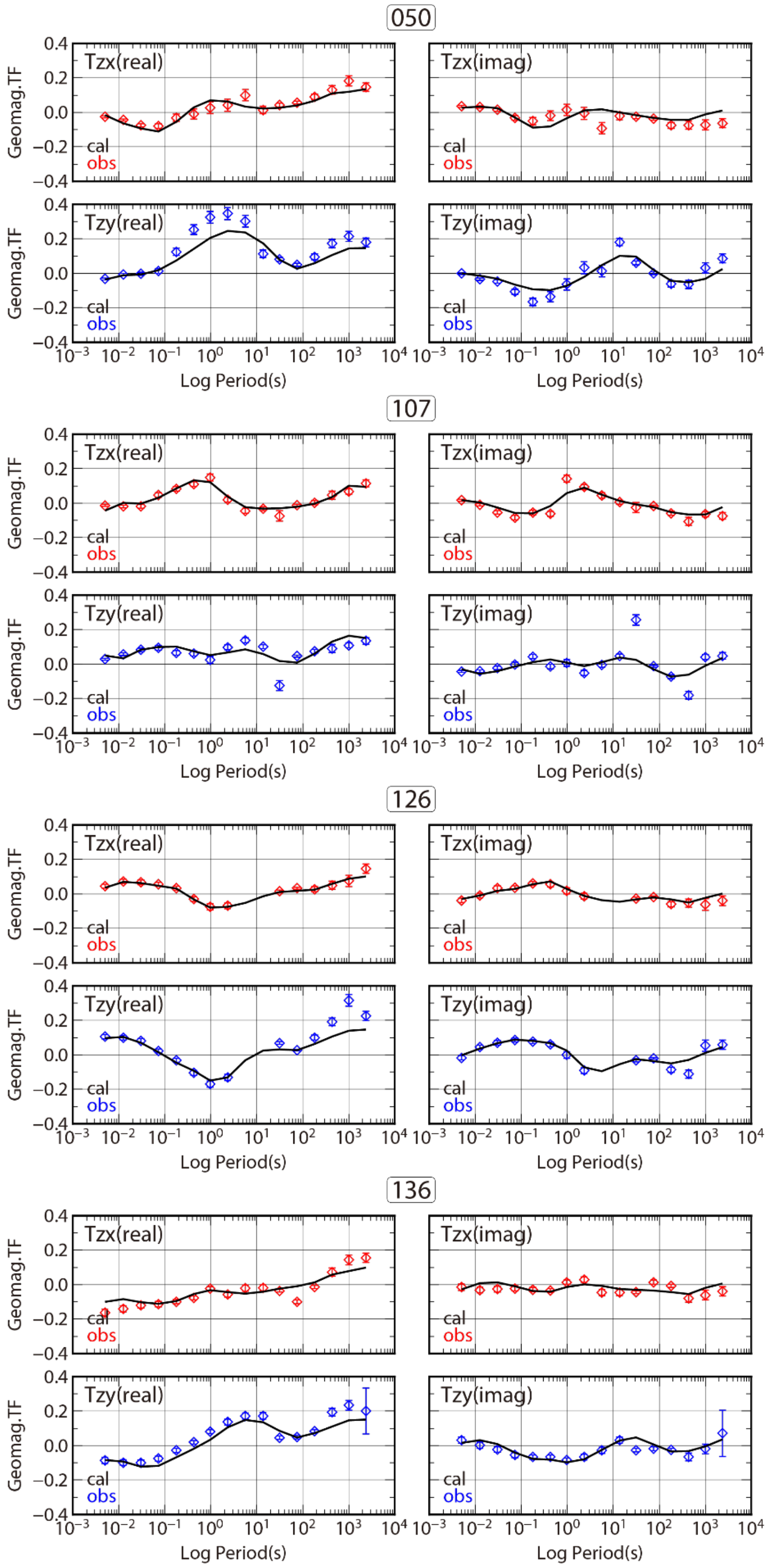


図 3.2.1.1-8m　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

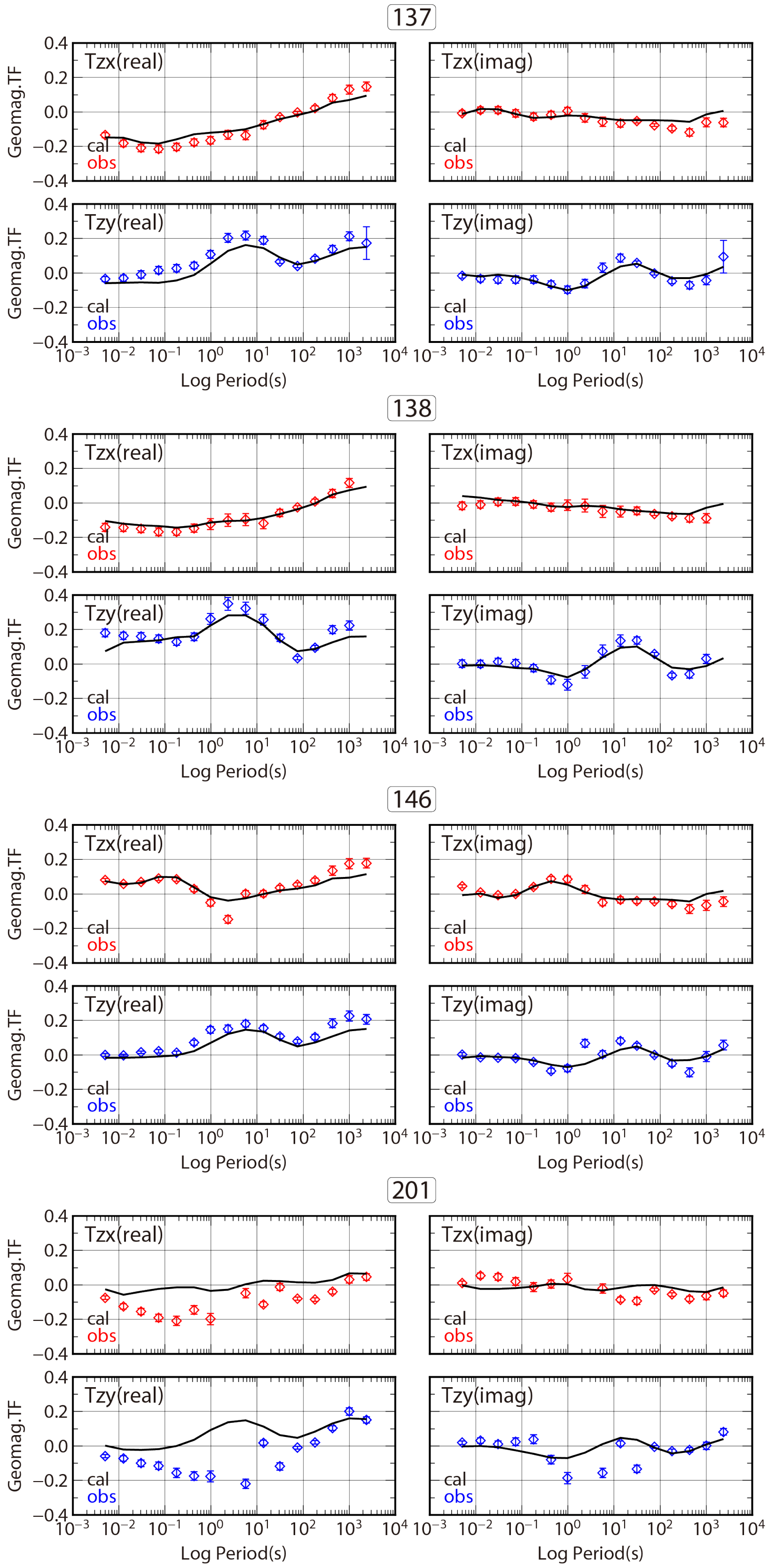


図 3.2.1.1-8n　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

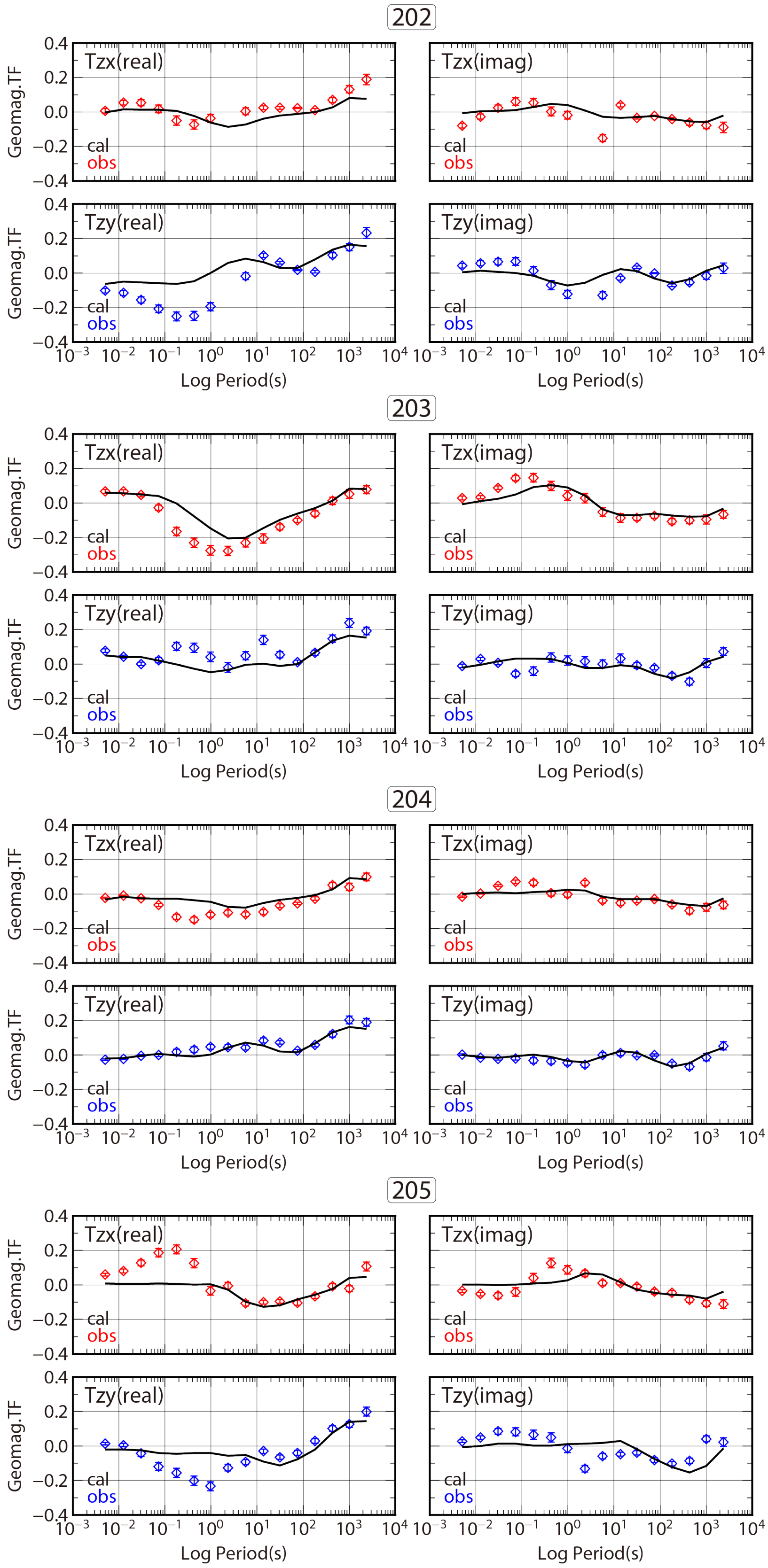


図 3.2.1.1-8o ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

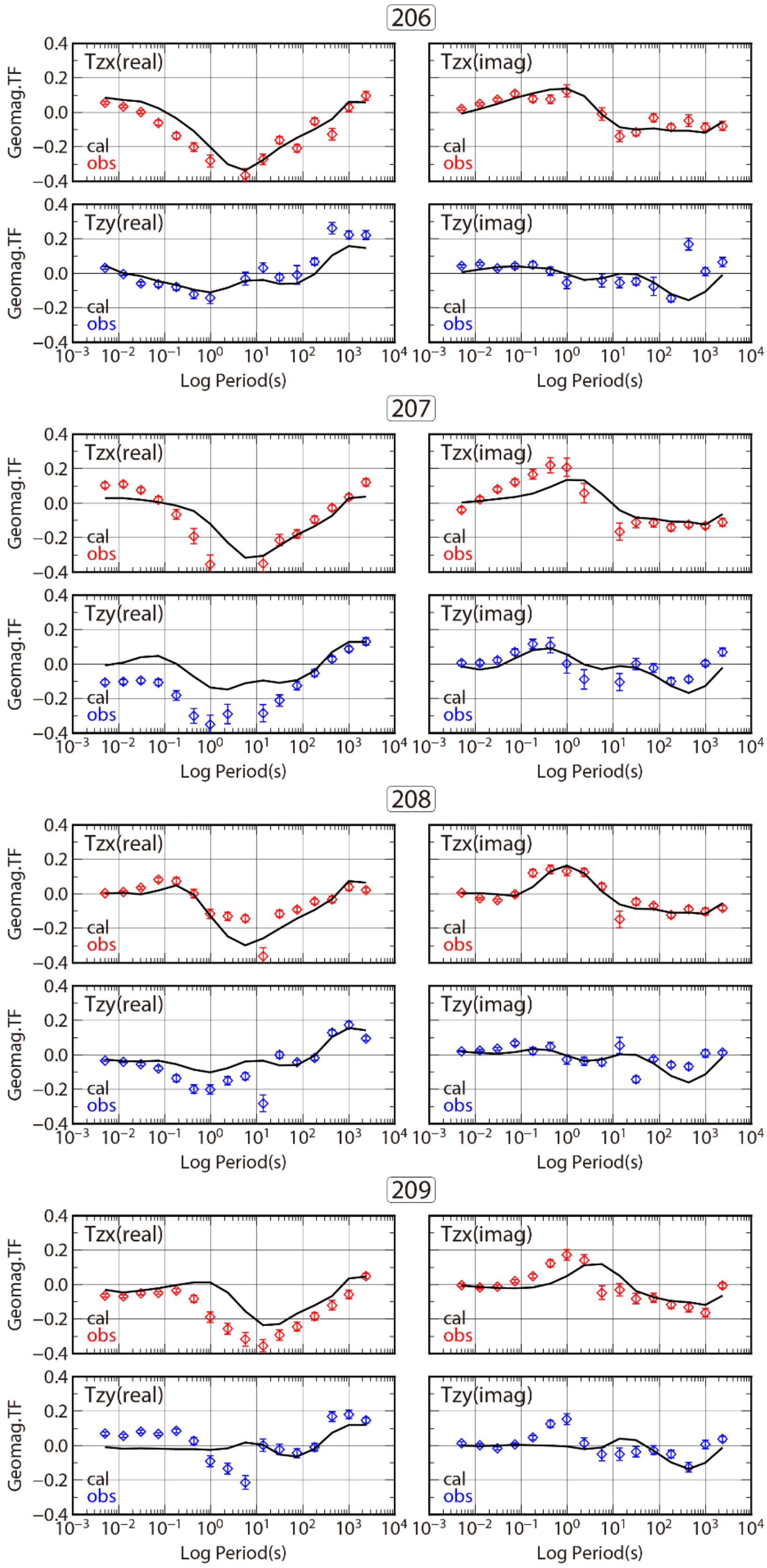


図 3.2.1.1-8p　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

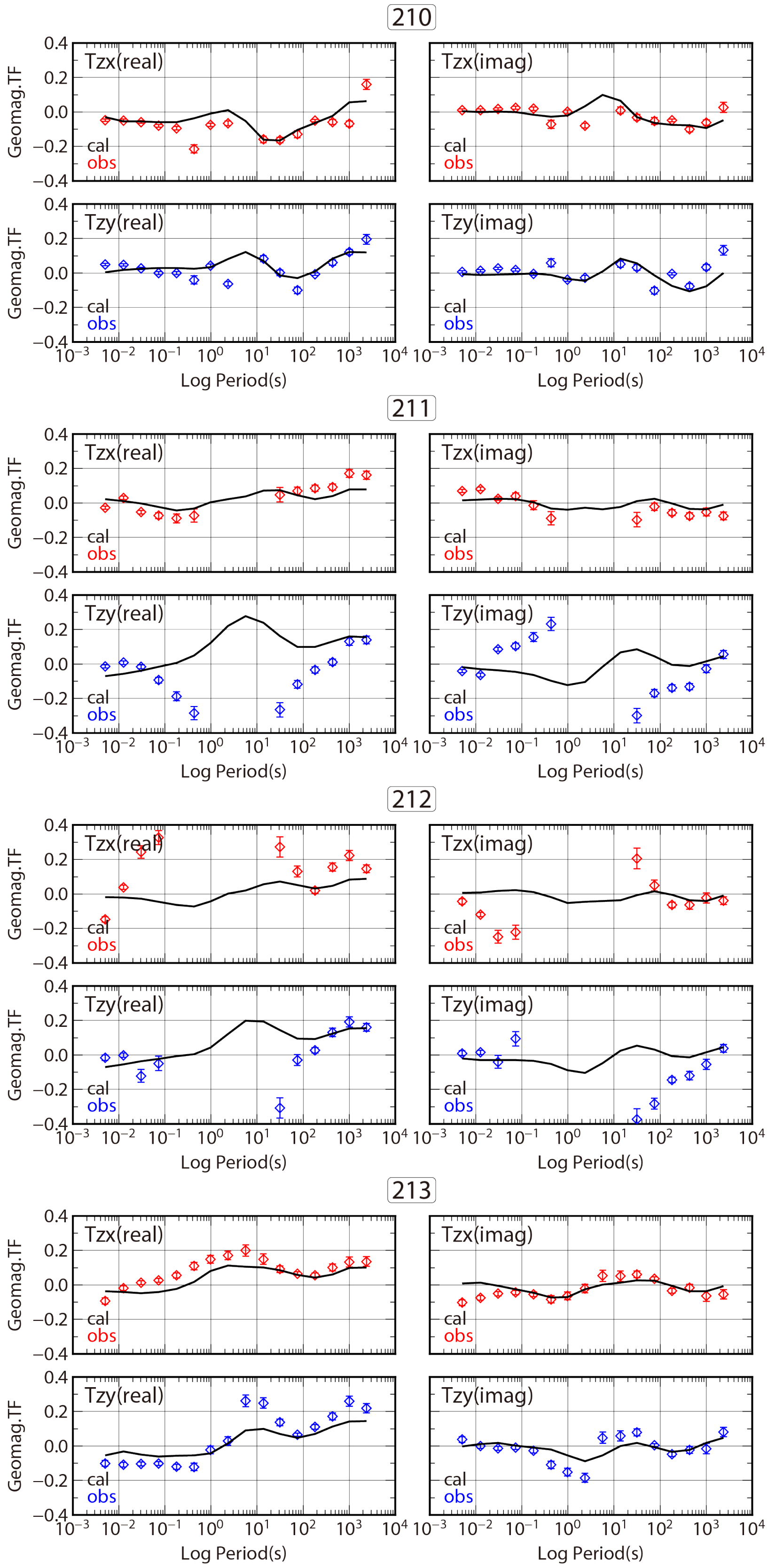


図 3.2.1.1-8q　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

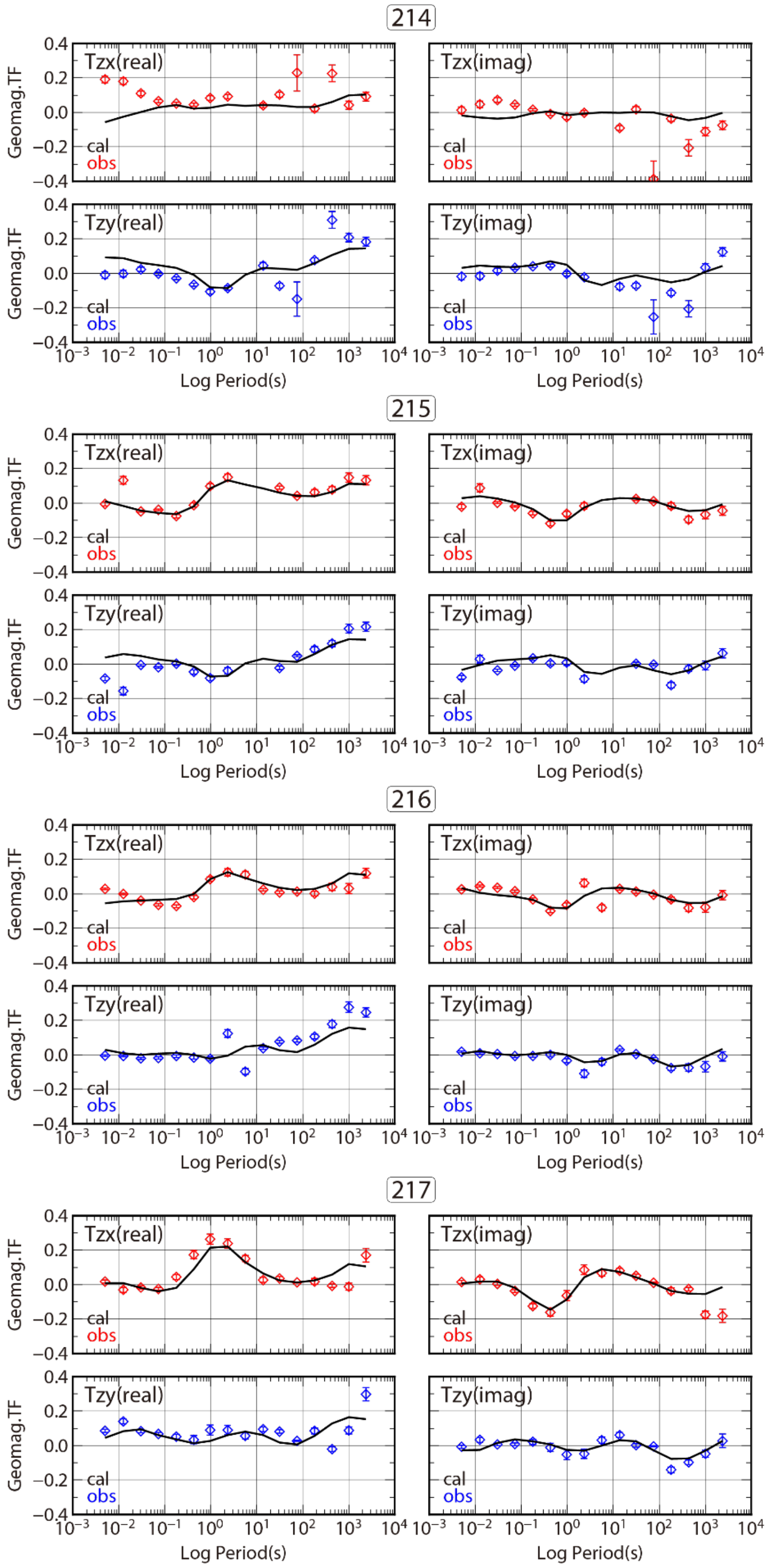


図 3.2.1.1-8r　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

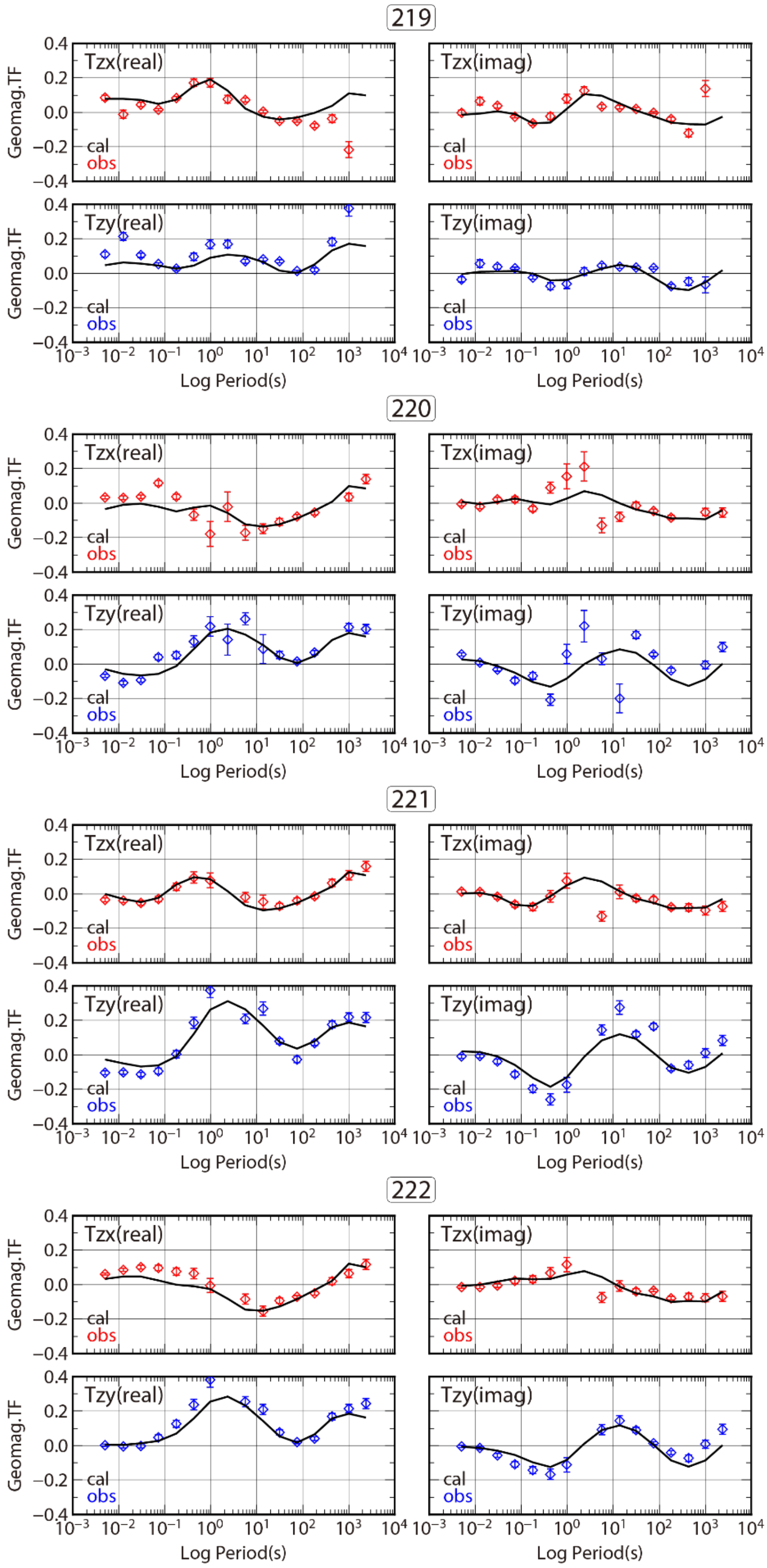


図 3.2.1.1-8s　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

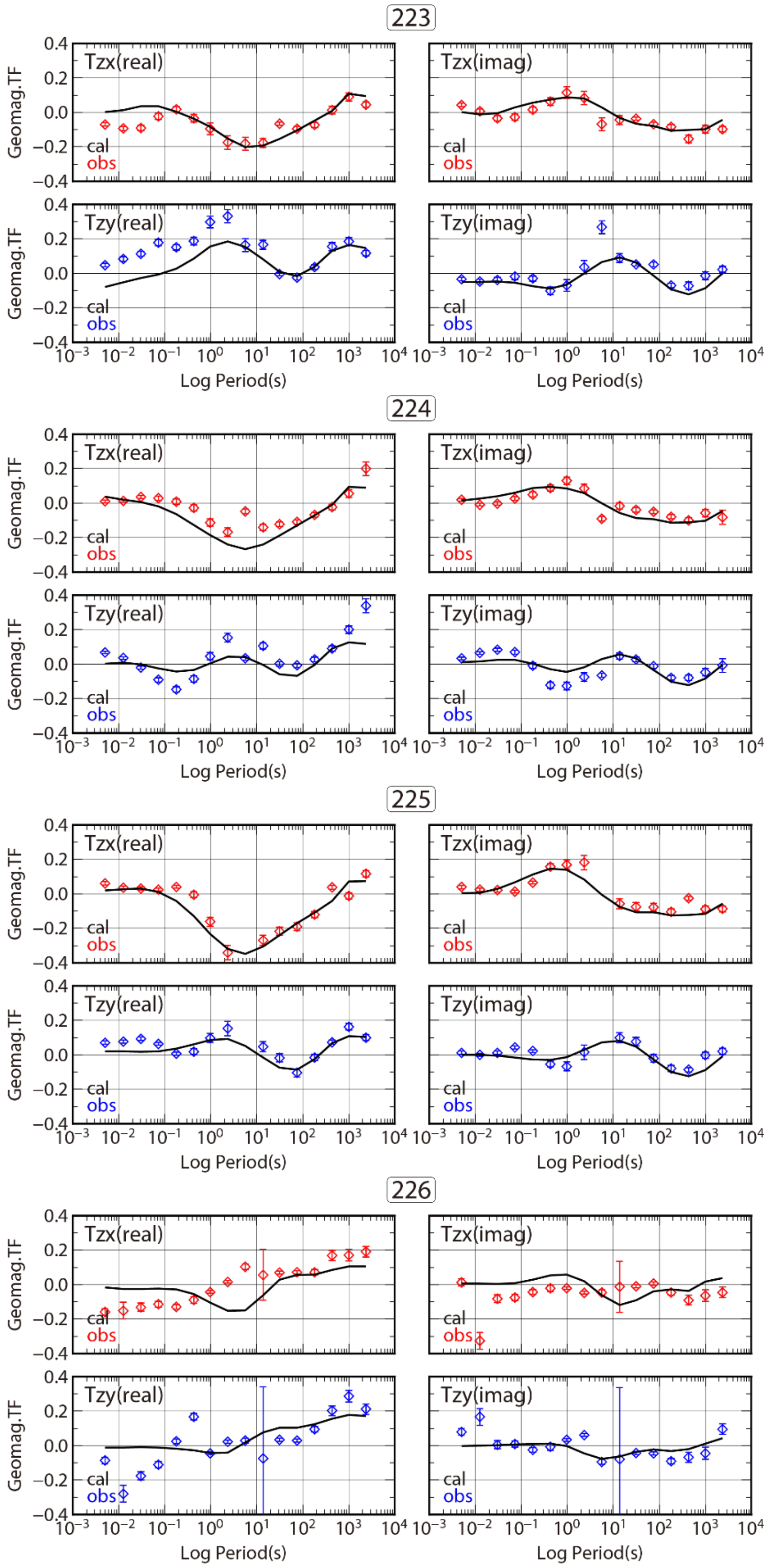


図 3.2.1.1-8t　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

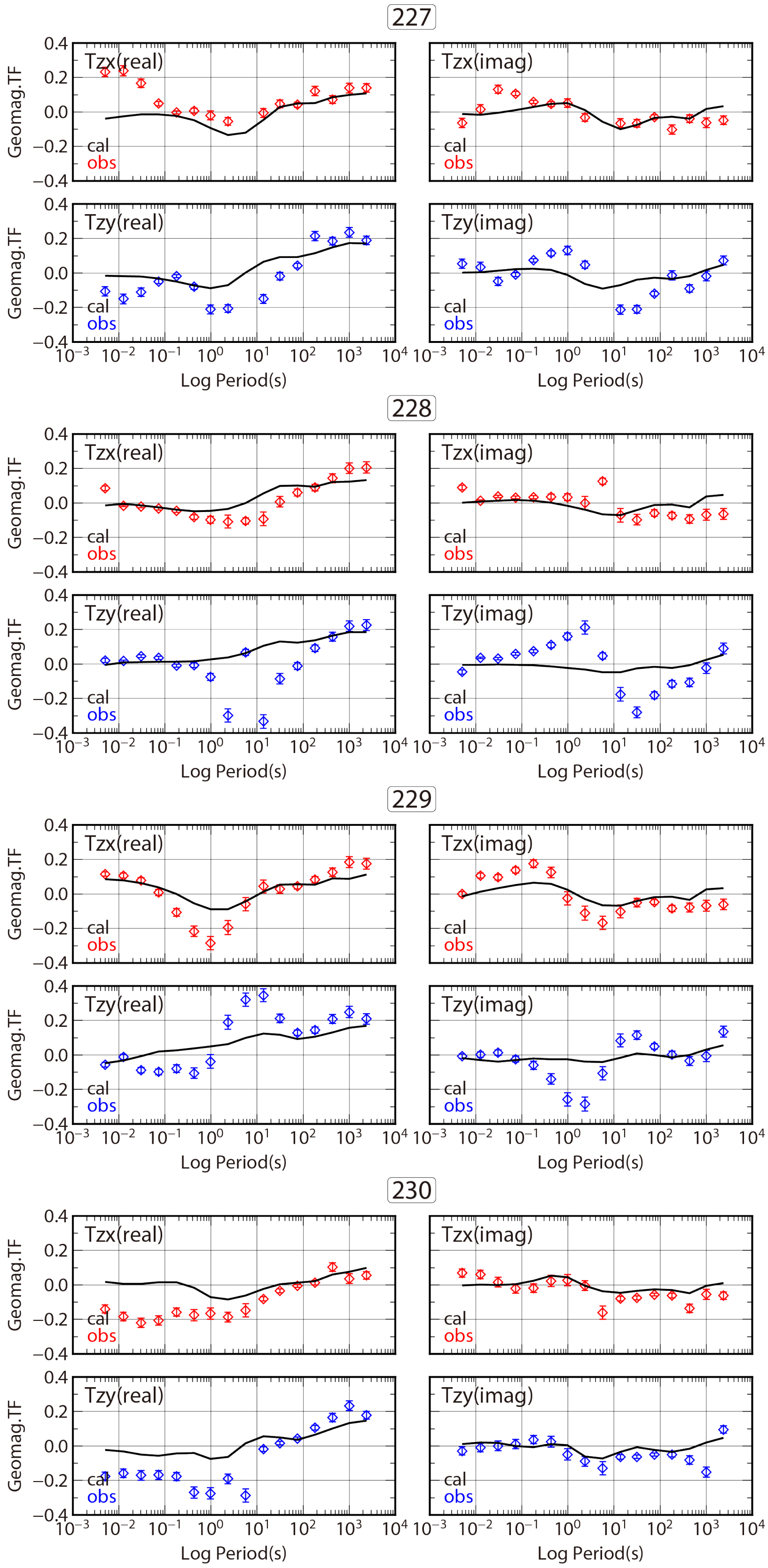


図 3.2.1.1-8u　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

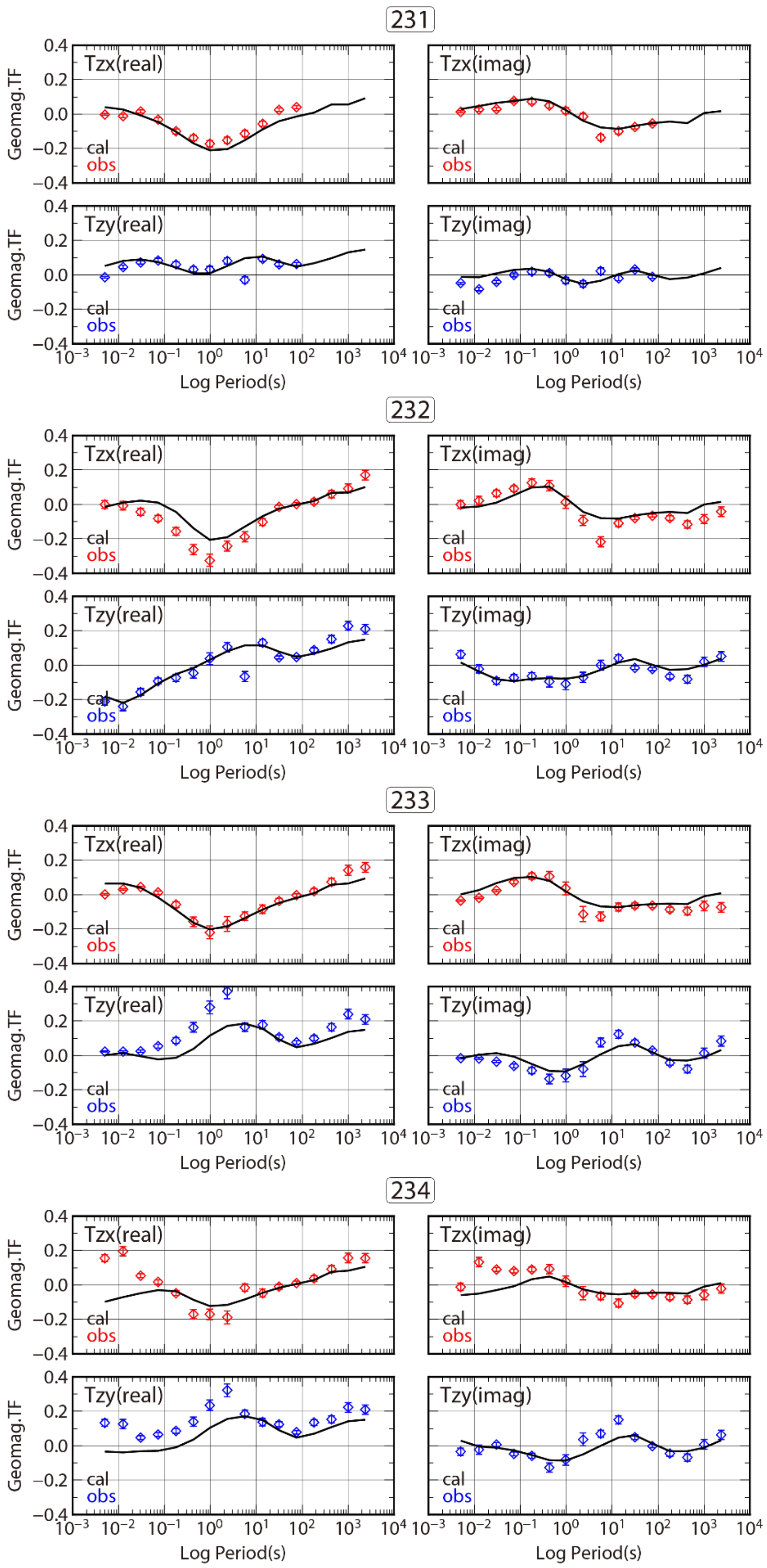


図 3.2.1.1-8v ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

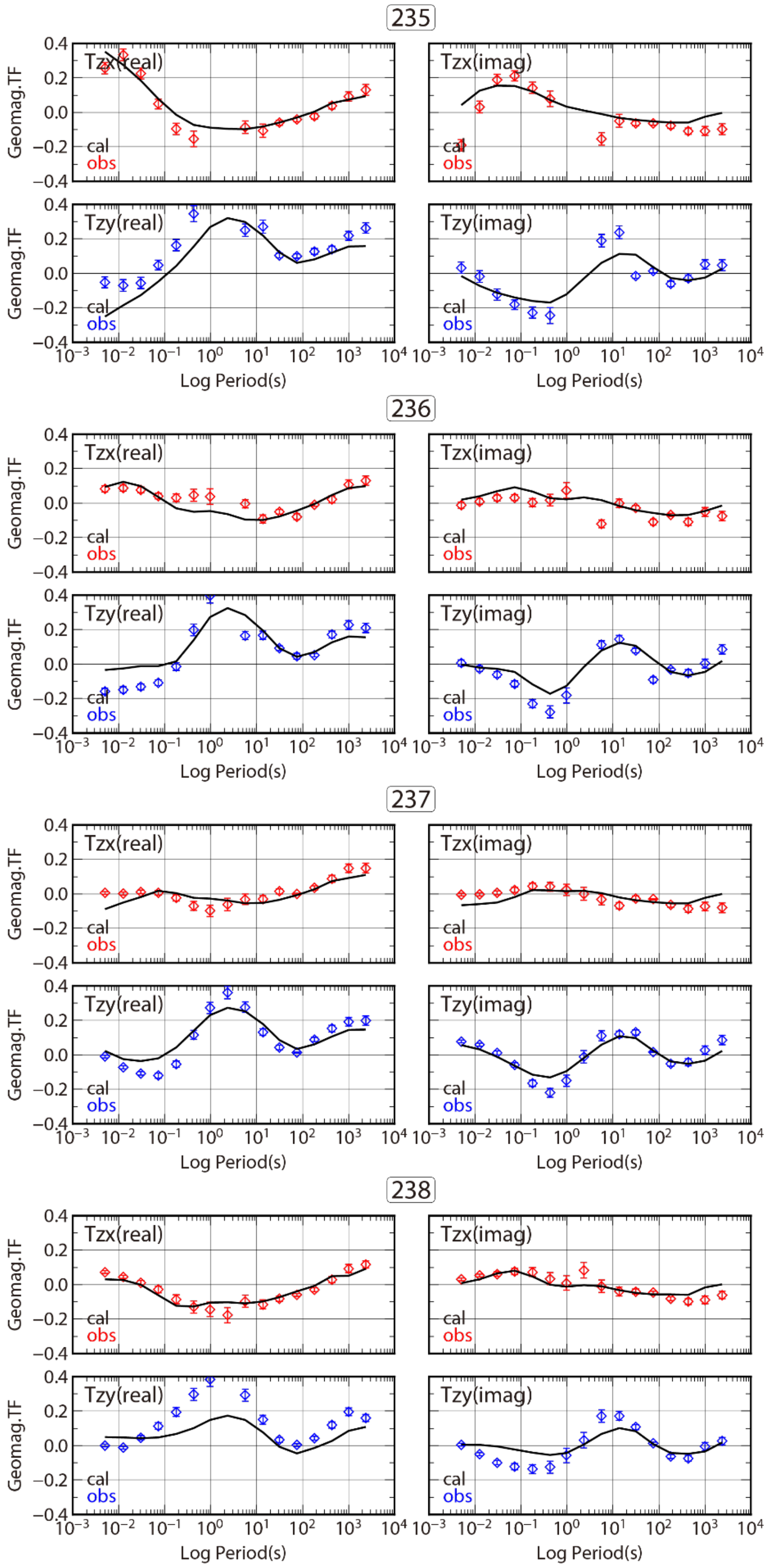


図 3.2.1.1-8w　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

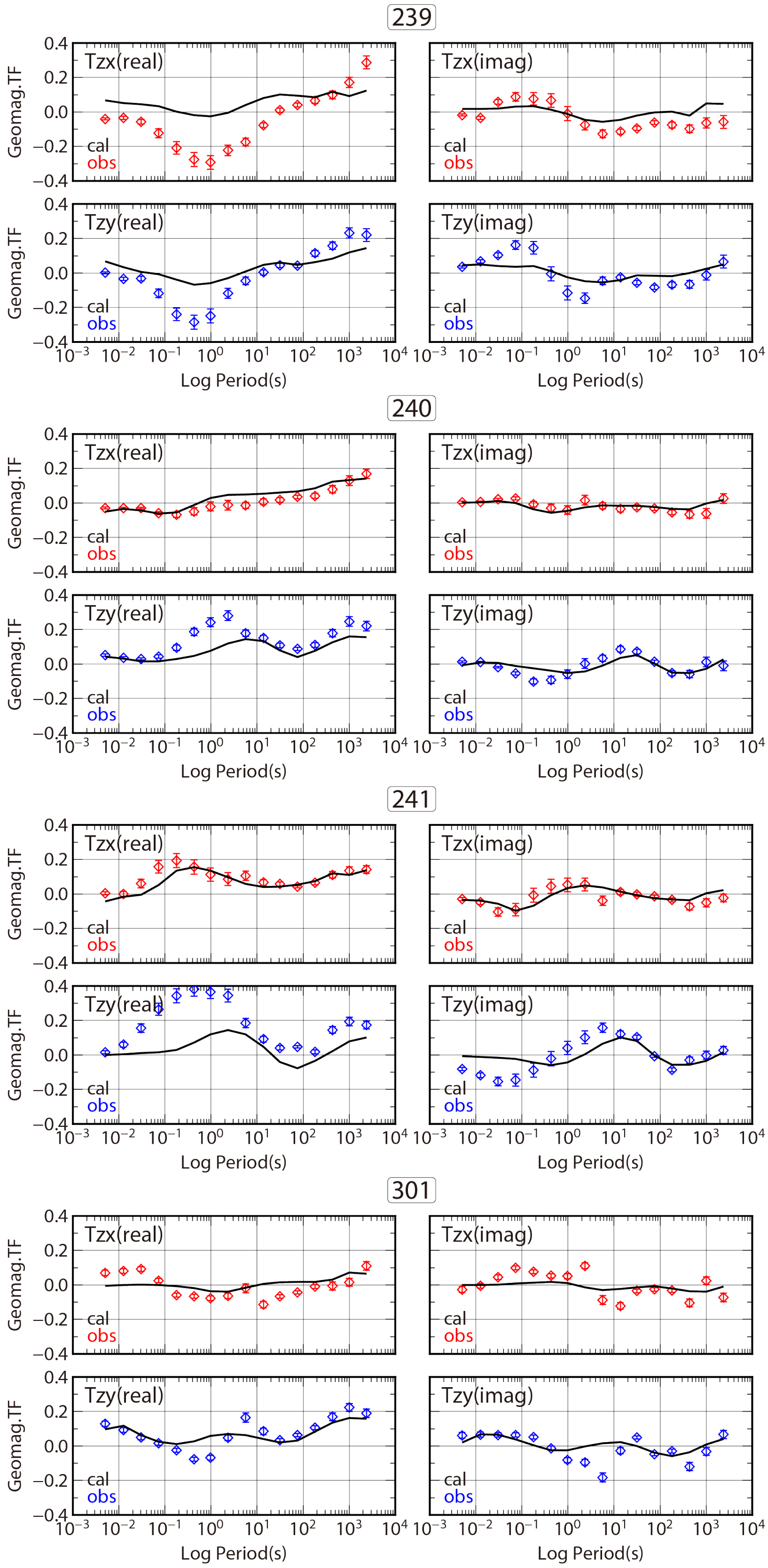


図 3.2.1.1-8x　ティッパー2 成分（T_xと T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

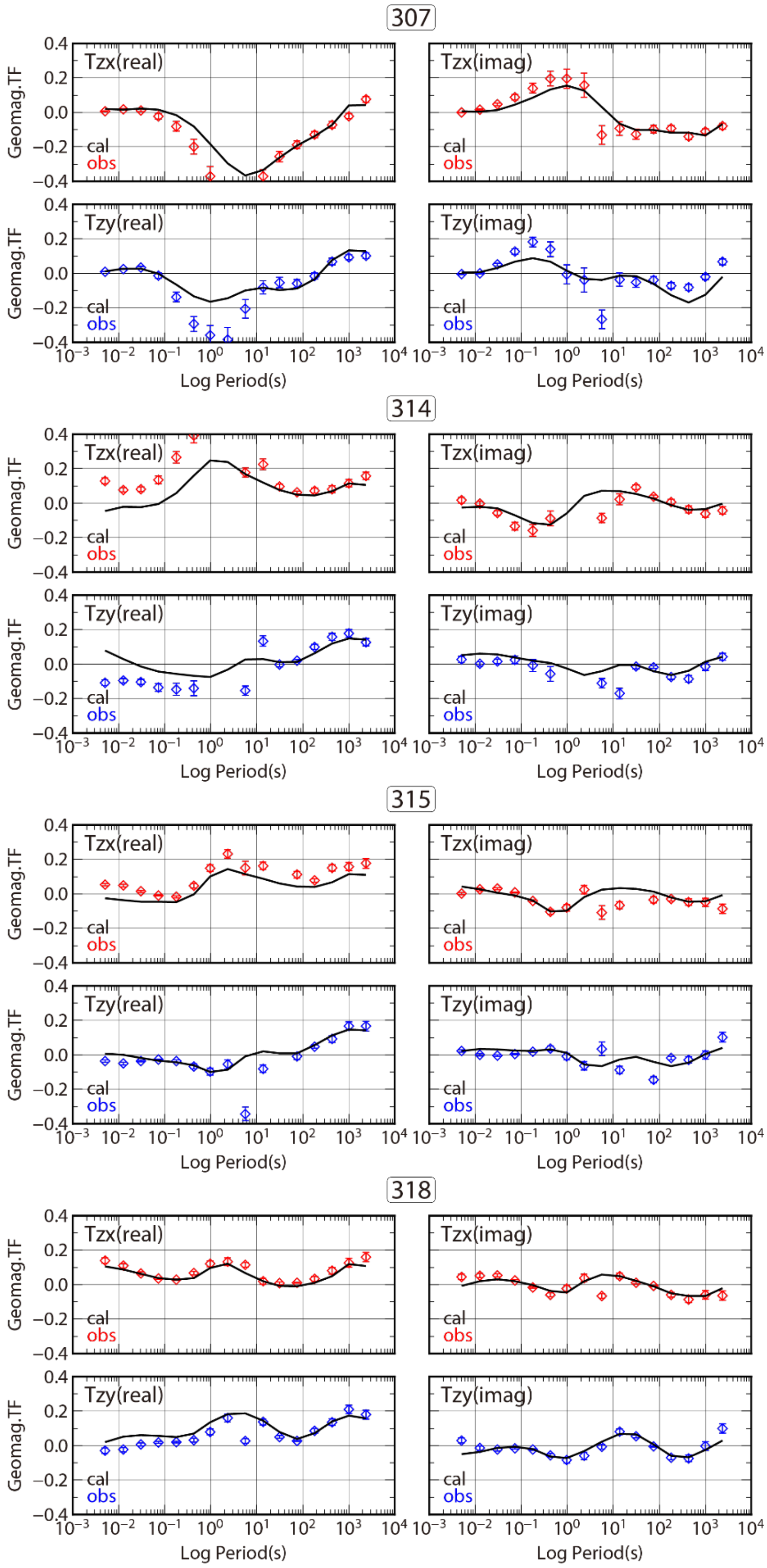


図 3.2.1.1-8y　ティッパー2 成分（T_x と T_y）のサウンディングカーブ．エラーバー付き◇が観測値，実線が最適モデルに対する計算値を表す．

b）3 次元比抵抗構造モデル

3次元インバージョン解析により得られた比抵抗構造モデルの水平断面を代表的な深度2–2.5km, 6–7km, 9–10km, 11.5–13km, 15–17km, 20–24kmについて図3.2.1.1-9に，中央火口丘を横断する6測線の深度20kmまでの鉛直断面を図3.2.1.1-10に示す．鉛直断面のprofile A1, A2, A3は，N60°W–S60°E方向の断面であり，profile B1, B2, B3は，それらと直交する断面である．また，profile A2, B1は，中岳第一火口を横断している．さらに，全ての断面には，地震の震源（黒丸：2003年1月～2013年12月の期間の気象庁一元化震源，赤丸：2014年1月～2016年12月の期間の気象庁一元化震源）をプロットしている．

図3.2.1.1-9の水平断面を見ると，阿蘇カルデラ内には，中岳の周辺に顕著な低比抵抗異常のブロックC1が，深さ約20 kmから地表面に向かうにしたがって北から南へと移動するように存在する．この低比抵抗異常C1は，2016解析モデルでも得られていた異常であるが，その形状がよりシャープに捉えられている．また，図3.2.1.1-10の鉛直断面（profile A2，B1）を見ると，低比抵抗異常ブロックC1は，中岳第一火口の下へと伸びていることが分かる．従って，低比抵抗異常C1は，中岳第一火口の現在の活動に関連したマグマに起因した異常である可能性が示唆される．

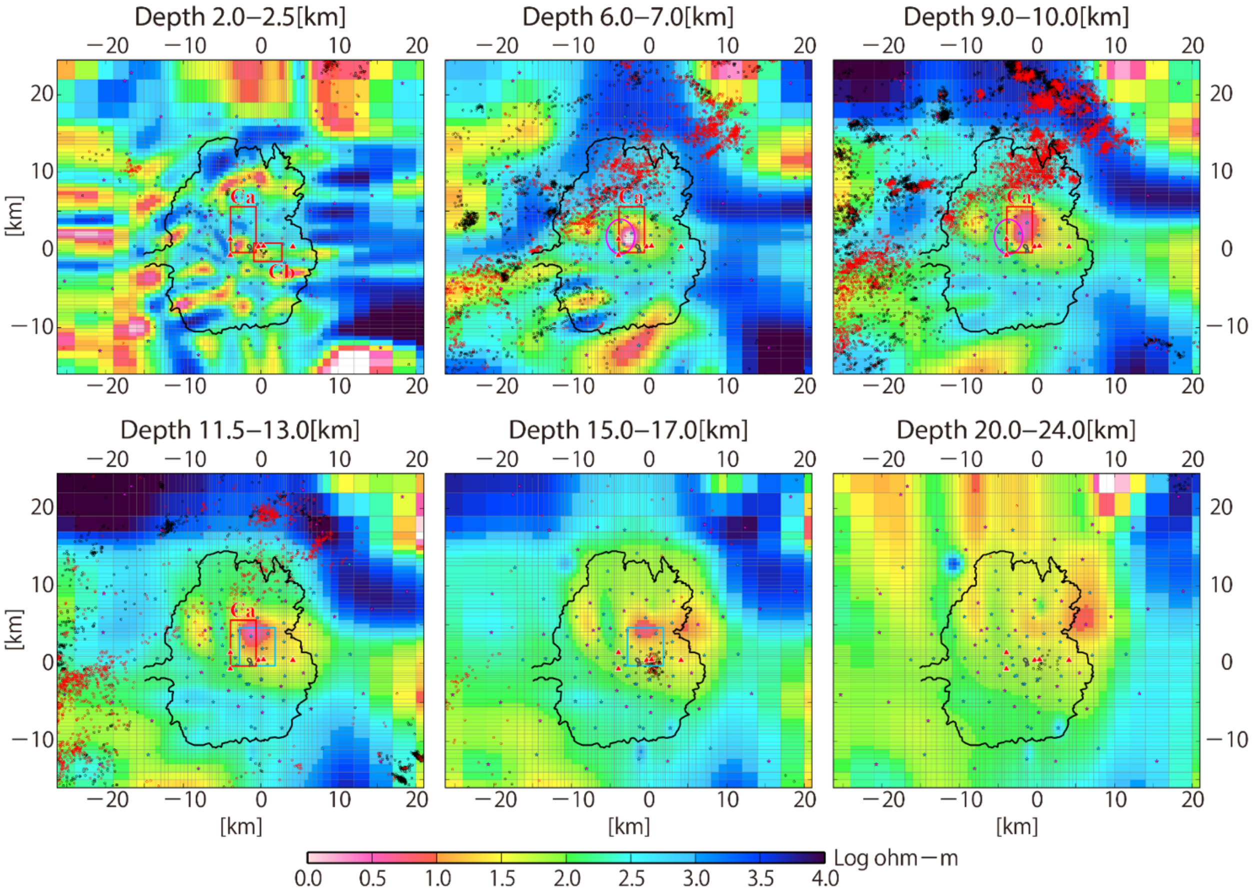


図 3.2.1.1-9　3 次元比抵抗構造モデルの阿蘇カルデラ周辺の水平断面．★と★は MT 観測点，▲は中央火口丘，灰色枠は中岳第一火口，○と○は，2003 年 1 月～2013 年 12 月の期間，2013 年 1 月～2016 年 12 月の期間の気象庁一元化震源の震源分布を表す．赤色枠，水色枠，ピンク色枠は，それぞれ，低比抵抗異常の領域（Hata et al., 2016），低速度異常の領域（Sudo and Kong, 2001），シル状の変動源（国土地理院, 2004）の位置を示す．

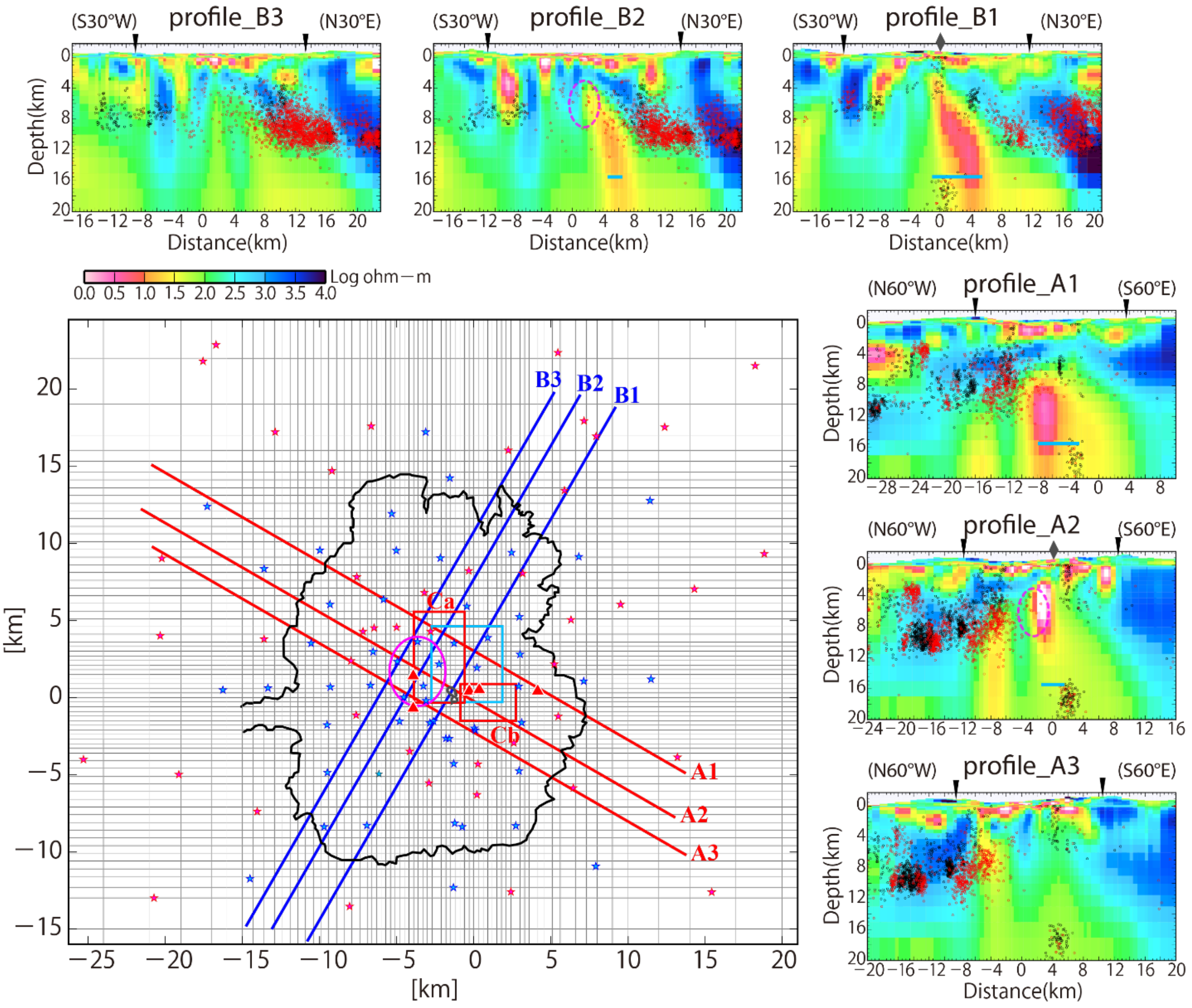


図 3.2.1.1-10　3 次元比抵抗構造モデルの阿蘇カルデラを横断する鉛直断面．断面上の▼はカルデラ壁の位置，◆は中岳第一火口の位置，○と○は，2003 年 1 月～2013 年 12 月の期間，2013 年 1 月～2016 年 12 月の期間の気象庁一元化震源の震源分布を表す．それぞれのカルデラ横断測線は，地図上の赤線と青線に対応する．★と★は MT 観測点，▲は中央火口丘，灰色枠は中岳第一火口を表す．赤色枠，水色枠，ピンク色枠は，それぞれ，低比抵抗異常の領域（Hata et al., 2016），低速度異常の領域（Sudo and Kong, 2001），シル状の変動源（国土地理院, 2004）の位置を示す．

次節では，低比抵抗異常C1についての解釈を行う前に，その信頼性を検証するために行った感度検定について説明する．

b）感度検定

最適モデルにおいて，マグマ供給系との関連が示唆される顕著な低比抵抗異常C1に対して実施した感度検定について，以下に述べる．今回の感度検定では，2016構造モデルの感度検定と同様の方法を用いて，低比抵抗異常を含む領域の40Ωm以下のブロックを40Ωmのブロックに置き換えた構造モデル（感度検定モデル）を作成し，その感度検定モデルに対してフォワード計算を行った．置き換えに指定した領域は，南北方向6.9km，東西方向5.7km，深さ方

向 1.5–24 kmである（図3.2.1.1-11）．感度検定モデルに対して計算されたRMS残差は，1.95となり最適モデルに対するRMS残差1.82から増加し，観測値と一致しない方向にずれることを示した．このRMS残差の変化が，モデル間の有意な差を示す値であるかを検定するため，自由度100×12×16－1（測点数×成分数×周波数－1）で95%信頼区間のF分布検定を行った．その結果，RMS残差の値が1.84を超えるモデルは，最適モデルとは有意な差をもつモデルとして判定できることが分かった．感度検定モデルのRMS残差は1.95であることから，低比抵抗異常C1は，得られた最適モデルにとって必須であり，高い信頼度を有する構造であると結論付けられる．

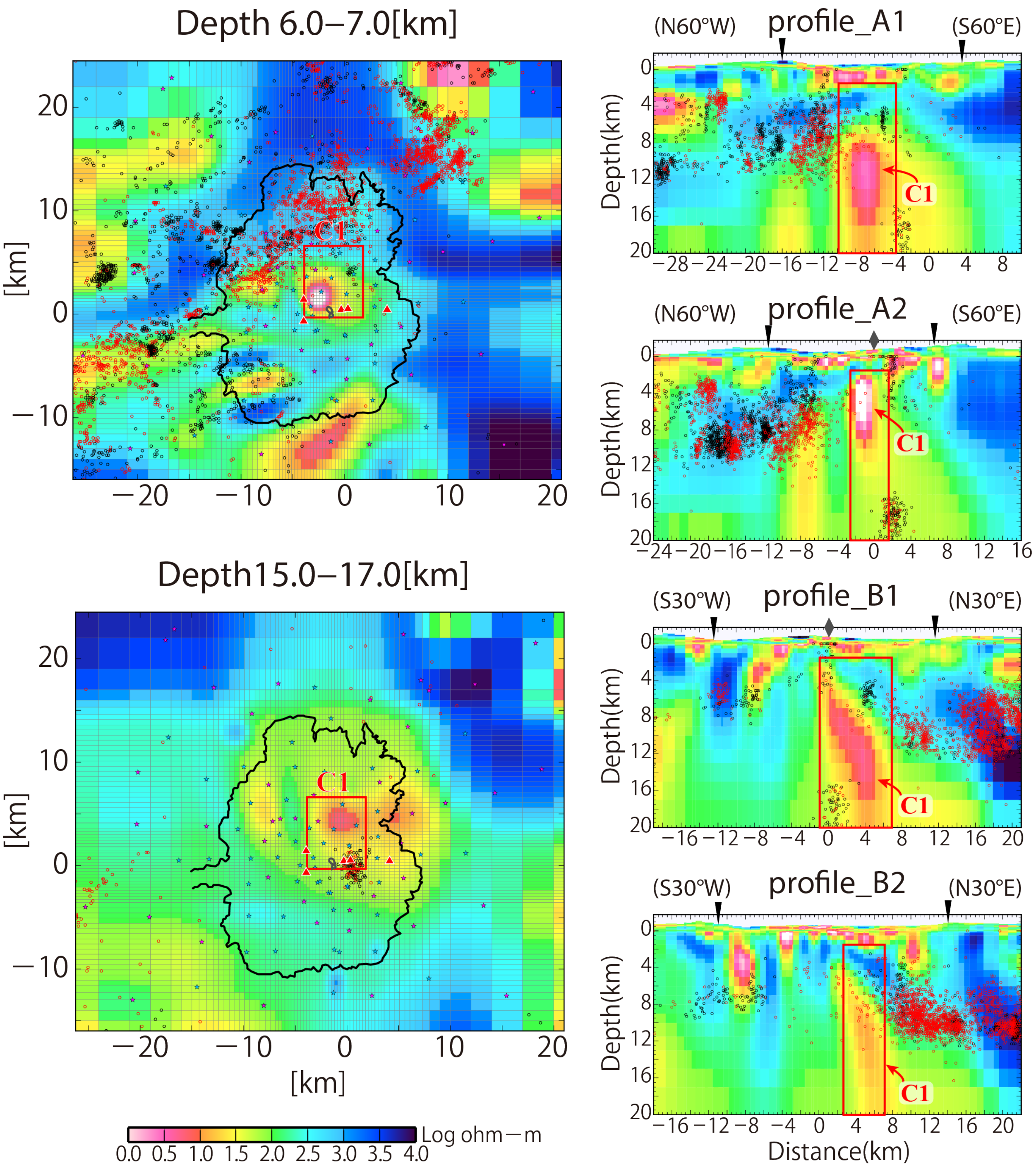


図 3.2.1.1-11 感度検定モデル C1 で置き換えに指定した領域（赤枠）．その他のシンボルについては，前記の図と同様．

c）比抵抗構造の解釈

阿蘇カルデラ内の上部地殻には，中岳の北側から中岳第一火口に向かって延びる北傾斜の低比抵抗異常のブロックC1が存在する．2016構造モデル(Hata et al., 2016)では，この異常に対応する低比抵抗異常ブロックの底を，深度15km程度と推定したが，さらに20km程度まで低比抵抗を示す領域が延長される可能性が示された．この低比抵抗異常は，阿蘇カルデラにおけるGPS連続観測データの解析から報告されているシル状の変動源の深度15.5km（国土地理院, 2004），および，地震波トモグラフィーによって報告されている深度6kmに中心をもつ球状の低速度異常領域（Sudo and Kong, 2001）を通過しながら上昇するような経路をたどる．つまり，低比抵抗異常C1は，阿蘇カルデラの上部地殻に存在するマグマ供給系（マグマの移動経路）に起因した異常であると考えられ，そのトップ部分が中岳第一火口下にあることから，中岳第一火口の現在の活動との関連が示唆される．また，阿蘇カルデラの上部地殻におけるマグマ供給系は，定常的に同じ経路が使用されていると推察される．

そこで，この低比抵抗異常ブロックC1の上層部分（深度2–6km）の約27km^{3}の体積の平均比抵抗値をバルクの値として，C1の上層部分のメルト分率の見積もりを行った．この見積もり計算では，先ず，2014年11月26～27日に中岳第一火口で噴出したスコリアの化学分析結果(斎藤 他, 2017)からNa_2O 3.21 wt%, SiO_2 57.68 wt%, 1113℃≈1386K, 含水量0.6～0.8 wt%を使用してケイ酸塩メルトの比抵抗値をSIGMELTS（Pommier et al., 2011）で求めた．そして，Hashin–Shtrikmanのメルト完全連結の式（Hashin and Shtrikman, 1962）を用いてメルトの割合を計算した．最終的に，低比抵抗異常C1の上層部分には，平均4～5%のメルトが存在するという結果が得られた．また，比抵抗構造モデルと地震の震源（図4-5，○：2003年1月～2013年12月の期間，○：2013年1月～2016年12月の期間の気象庁一元化震源）との対応関係を見てみると，震源は，高比抵抗領域側に分布することが分かる．このことから，低比抵抗異常領域で表現されるマグマが，阿蘇カルデラ下の地殻の応力分布に何らかの影響を及ぼしている可能性が推察される．

（4）ネットワーク MT 法データの適用可能性の検証

a）ネットワーク MT 法の概要

ネットワーク MT 法は，MT 法に基礎をおき、日本においては，Uyeshima（1990）によって応用発展された．基礎理論は MT 法と同様であるが，測定において次に述べるような違いがある．一般的に MT 法の測定では，互いに数kmほど離れた各々の観測点において，直交する水平電場（実際には電位差）2 成分と水平磁場 2 成分を同時に測定する．この時，電位差測定は，非分極性電極を用いて 10～100m程度の基線で行い，磁場測定は，インダクションコイルやフラックスゲートセンサーなどを使用して行う．一方，ネットワーク MT 法の測定では，電極に NTT（NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION）の通信局舎アースや自作の非分極性電極，さらに，電極をつなぐケーブルとして NTT のメタリック通信回線を利用し，数km～数 10 kmという長基線で電位差の測定を行う．電位差データは，通信回線が集められた中心観測点で収録し，日々，公衆回線やネットワーク回線を介して研究室へと転送する（図 3.2.1.1-12）．また，磁場には、観測領域（観測網）内・付近にある磁場観測所などで恒久的（長期間かつ連続的）に取得されているデータを使用する．そして，電位差-磁場間の周波数応答関数 TX(ω)，TY(ω)から広域的な比抵抗構造を推定する．ここで，ある測線で測定された電位差 V(ω)および磁場観測所で測定された水平磁場 2 成分 HX(ω), HY(ω)の間には以下に示すような関係が成立する: V(ω)=T_X (ω) H_X (ω)+T_Y (ω) H_Y (ω). 応答関数は，複素数で表現される値である．

ネットワーク MT 法が有する利点には，以下の 4 つが挙げられる．基線長が稼げるので，①高い S/N 比のデータが得やすいこと，②スタティックシフトの影響を受けにくいこと，また，NTT の通信回線をケーブルとして利用するので，③安定した電位差測定を長期間実施できること，④観測域の拡大が行いやすいこと（NTT のメタリック通信回線が分布していることが前提条件），である．

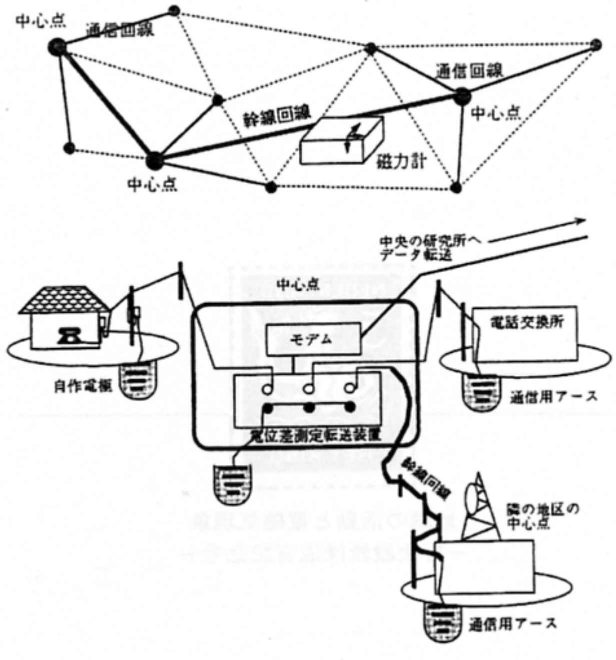


図 3.2.1.1-12　ネットワーク MT 法観測の概念図，および，測定機器配置の概念図（上嶋，1995）．

b）阿蘇カルデラ地域におけるネットワーク MT 法観測の概要

九州地方では，1993～1995 の期間と 1997～1998 の期間に，ほぼ全域に及ぶネットワーク MT 法観測が実施されており，その電位差観測網（ネット）は九州全域に分布する．図 3.2.1.1-13 は，九州におけるネットワーク MT 法の電位差観測網を示している．図中の赤丸と青丸は，観測ネットの中心点と支点を表し，通常は中心点-支点間の電位差が測定されるよう設定する．図 3.2.1.1-13 で確認できるように，阿蘇地域では，稠密な観測が実施されていたことが分かる．ここでは，主に阿蘇地域で行われたネットワーク MT 法観測で使用された装置とデータ解析について簡潔に述べる．

先ず，この時期のネットワーク MT 法観測では，NTT の通信用アースの他に，度々，自作の非分極電極 Pb-PbCl2 を埋設して電位差測定を実施していた．電位差データの収録には，SES87・SES93・TNK90 の 3 種類のデータロガーが用いられている．SES87 と SES93 は，多チャンネルの電位差測定入力を持つ地電位差測定転送装置で，測定した時系列データを電話回線で研究室のパソコンへ直接転送することができる．一方で，TNK90 は，多チャンネルの入力を持つオフラインのデータロガーである．設定できる収録データのサンプリング間隔は，ロガー毎に異なっているが，今回の解析には 1 分間隔にリサンプリングしたデータを使用している．また，前述したようにネットワーク MT 法では，観測領域内・付近の地磁気観測所などで取得されている磁場（地磁気）データを解析に用いるが，本解析では，気象庁柿

岡地磁気観測所の支所である鹿屋（北緯 31°25′14″，東経 130°52′56″）で取得されたデータを使用した．リモート・リファレンス処理（Gamble et al., 1979）には，気象庁柿岡地磁気観測所（北緯 36°13′45″，東経 140°11′23″）で観測されたデータを用いている．応答関数の算出には，地磁気水平 2 成分のサンプリング間隔 1 秒のデータを，電位差データと同様の 1 分間隔にリサンプリングしたデータを使用している．

次に，リサンプリング後から応答関数算出までのデータ解析の流れを記す．ネットワーク MT 法観測では，基本的に，NTT の通信回線を集めた中心点での電位を基準として電位差データの収録を行うので，中心点周辺のノイズ環境が悪い場合，すべてのチャンネルにノイズの影響が入ってしまうことになる．これは，最終的に算出する応答関数の推定精度を下げることになる．そこで，中心点からの混入ノイズが原因となり応答関数の精度が低くなっていると考えられる場合は，その影響を取り除くため，支点 - 支点間の電位差データに算出し直している．その後，さらに時系列データの S/N 比向上を図るため，潮汐の影響を取り除く de-tide 処理（藤井, 2004）を，電位差データと磁場データの両方に行っている．そして，応答関数の算出の際には、Chave and Thomason（1989）が開発した Robust Remote Reference Magnetotelluric Data Processing（RRRMT 処理法）を用いている．RRRMT 処理法は，ロバスト処理とリモート・リファレンス処理の両方で電磁場データからノイズ除去の処理を行う方法であり，算出される応答関数の精度向上が期待できる．最後に，個々の収録装置の周波数特性の補正，および，リサンプリング時にかけたアンチエリアシングフィルターの補正を行い，0.0000244～0.00208Hz（480～40,960 秒）の 14 周波数について応答関数を算出した．次に述べる 3 次元比抵抗インバージョン解析では，0.0000977～0.00156Hz（640～10,240 秒）の 9 周期を使用している．

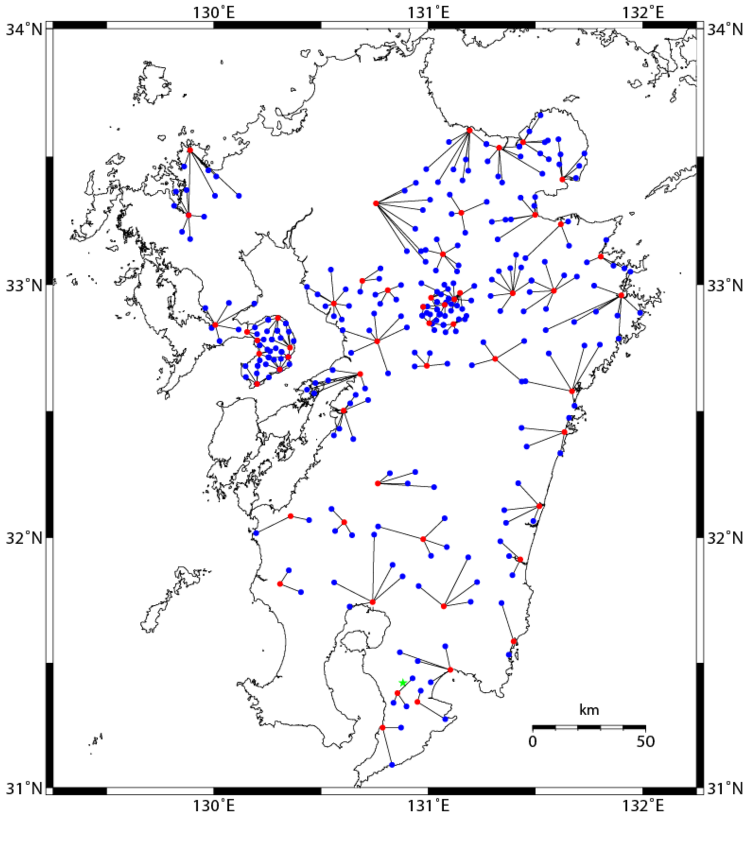


図 3.2.1.1-13　九州における Network-MT 法観測の電位差観測網の分布
（●：観測ネットの中心点，●：支点，★：参照磁場点）.

c）予備的に実施した 3 次元比抵抗インバージョン解析

上記のようにして求めた 50 測線（図 3.2.1.1-13）の応答関数 2 成分を入力データとし，予備的な 3 次元比抵抗インバージョン解析を行った．インバージョンコードは，通常版の WSINV3DMT コード(e.g., Siripunvaraporn et al., 2005)をネットワーク MT 法データの基線長を考慮できるように改変したコードである（Siripunvaraporn et al., 2004）．本インバージョン解析においても，入力データについては，エラーが大きく信頼度の低いと考えられるデータを使用しないこととし，全ての測点について周波数毎に全成分の取捨選択を行った．入力データのサイズは，50×9×4（測線数×周波数×応答関数の数）である．ここで，応答関数の数の 4 は，応答関数が複素数であることから 2×2＝4 となる．

初期構造モデルには，南北 580 km，東西 580 km，鉛直 500 km（海水面より上の地形を含まず）の領域で陸地 100Ωm，海水 0.33Ωm の比抵抗値を与え，海水以外のブロックの比抵抗値を変化させ最適な構造モデルを求めた．構造モデルは，南北 61，東西 57，鉛直 34 のセルで構成した．水平面のセルは，阿蘇カルデラから離れるにしたがって大きくなっていくように設定しており，最小セルのサイズは，阿蘇カルデラ付近の 1×1km であり（図 3.2.1.1-14），最大セルのサイズは，60×60km である．また，鉛直方向のグリッドサイズは，0.01～150km で深度が増すにつれて大きくなるように設定した．

インバージョンは，２段階で実施した．先ず，１段階目のインバージョンでは，比較的大きなエラーフロアー20%を与えて計算を行わせることで大局的な構造を求めている．そして，２段階目のインバージョンで，１段階目のインバージョン結果を初期構造モデルとし，より小さなエラーフロアー5%を与えた計算を行わせ，RMS 残差 1.45 の最適モデルを得た．

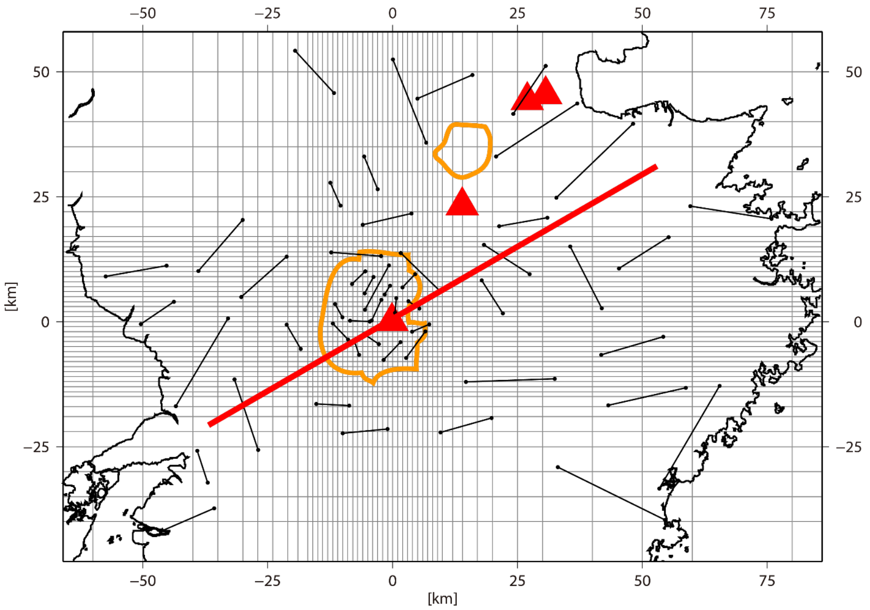


図 3.2.1.1-14 阿蘇カルデラを中心とした領域におけるネットワーク MT 法の電位差観測線の分布図．端点に黒丸をもつ黒線が，電位差観測線．▲は第四紀の活動的火山，オレンジ色枠は，阿蘇カルデラと獅子牟田カルデラ．赤線は，図 10 の鉛直断面の通過する位置．

d）3 次元比抵抗構造モデルとその解釈

得られた 3 次元比抵抗構造モデルの水平断面を，上述の MT 法データによる比抵抗構造モデルと同じ深度 2–2.5km, 6–7km, 9–10km, 11.5–13km, 15–17km, 20–24km について図 3.2.1.1-15 に示す．また，図 3.2.1.1-15 には，阿蘇カルデラ内の中岳を横断する測線の深度 50km までの鉛直断面も示す．鉛直断面には，地震の震源（○：1993 年 1 月–1998 年 12 月の期間の気象庁一元化震源）をプロットしている．

水平断面と鉛直断面から，阿蘇カルデラ内の中岳付近には，深度 20km 程度に底をもつ顕著な低比抵抗異常のブロックが存在することが示唆される．これまでの MT 法データによる比抵抗構造解析によって得られていたモデルにも，同様の異常が捉えられていることから，この低比抵抗異常は，中岳第一火口の現在の活動に関連したマグマに起因した異常であると考えられる．一方で，本モデル中の阿蘇カルデラ下の 20km 以深には，顕著な低比抵抗異常を示すブロックは確認できない．このことから，阿蘇カルデラの深度 20km 以深には，少なくとも，数 km を超える厚みを持つ顕著な低比抵抗異常ブロックは存在しない可能性が示唆される．しかしながら，本モデルの深度 20km 付近の鉛直方向のセルサイズは，数 km サイズで構成されているので，それ以下の厚みをもつ構造の抽出は困難になっていることには留意しなければならない．

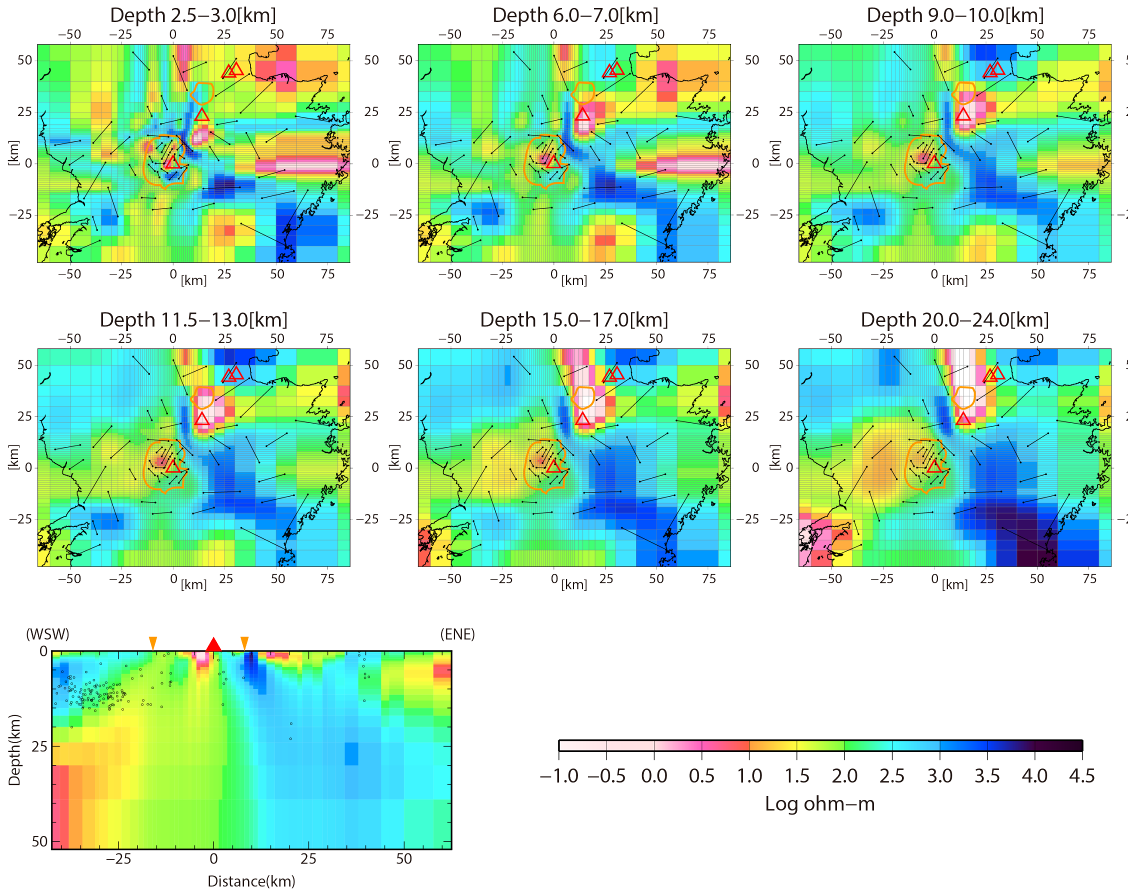


図 **3.2.1.1-15**　ネットワーク MT 法データを使用した 3 次元比抵抗構造モデルの水平断面，および，中岳を横断する鉛直断面．水平断面上のシンボルは，図 9 と同じ．鉛直断面上の○は震源分布，▲は中岳，▼はカルデラ壁の位置を表す．

（5）まとめと今後の展開

これまで火山活動のため接近できなかった中岳第一火口周辺で広帯域 MT 法のデータを 10 観測点で取得した．一方，平成 27 年度と平成 28 年度に取得した全 100 観測点における MT 法データを用いて 3 次元比抵抗インバージョン解析を行い，比抵抗構造モデルを得た．得られた結果は，平成 27 年度の 55 観測点のデータのみを用いたインバージョンモデルで示されたマグマ溜まりと考えられる低比抵抗異常ブロックの拡がりを明確にし，底部が深度 20km 付近に及ぶことを示している．今後は，中岳第一火口周辺のデータも加えたインバージョンを行い，現在の火山活動を反映したマグマ供給系の詳細を明らかにしていく予定である．また，他の観測結果や研究結果を参照しつつ，カルデラ構造を含めた阿蘇火山全体の地下構造を比抵抗構造から推定する．深度 20 ㎞より深部の構造を把握するための手法としてネットワーク MT 法に着目した．阿蘇火山への適用可能性を検討するために過去のデータ用いて予備的な 3 次元比抵抗構造モデルを求めた．その結果は，主に今回使用したネットワーク MT 法データの周波数帯域とモデルの鉛直方向セルサイズの制約上，数 km 以下の厚みの構造の抽出には不適であったことを示している．そこで今後は，20km 以深の構造抽出についての精度向上を目指して，データの帯域をより低い周波数にまで拡張するとともに，3 次元インバージョンの鉛直方向セルサイズの吟味を行いながら，その適用可能性をさらに検証していくことを予定している．

引用文献

Chave, A.D., and Thomason, D.J., (1989), Some comments on magnetotelluric response function estimation, J. Geophys. Res., 94, 14215-14225.

藤井郁子（2004），確率差分法を用いた火山性全磁力変動の抽出手法，地磁気観測所テクニカルレポート，2-1，1-17.

Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J., (1979), Magnetotellurics with a remote magnetic reference, Geophysics, 44, No.1, 53-68.

Handa, S., Y. Tanaka and A. Suzuki (1992) The electrical high conductivity beneath the northern Okinawa trough, inferred from geomagnetic depth sounding in northern and central Kyushu, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, **44**, 505-520.

Hata, M., Takakura, S., Matsushima, N., Hashimoto, T., and Utsugi, M., (2016), Crustal magma pathway beneath Aso caldera inferred from three-dimensional electrical resistivity structure, Geophys. Res. Lett., 43, doi:10.1002/2016GRL070315, 2016.

国土地理院（2004），阿蘇火山周辺の地殻変動，噴火予知連絡会会報, 88, 106-110.

NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）（1991）平成 2 年度全国地熱資源総合調査（第 3 次）広域熱水流動系調査 阿蘇地域火山地質図及び阿蘇地域地熱地質編図.

Constable S. C. and R. L. Parker (1987) Occam's Inversion : A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data, *Geophysics*, 289-300.

Pommier, A., and Le-Trong, E., (2011), “SIGMELTS”: A web portal for electrical conductivity calculations in geosciences, Computers & Geosciences, 37, 1450-1459.

斎藤元治，石塚 治，石塚吉浩，星住英夫（2017），メルト包有物分析による阿蘇火山中岳 2014，1989，1979 年噴火マグマの揮発性成分濃度．日本地球惑星科学連合 2017 年大会, SVC47-P20.

Siripunvaraporn, W., & Egbert, G., (2009), WSINV3DMT: Vertical Magnetic Field Transfer Function Inversion and Parallel Implementation, Phys. Earth Planet. Inter., 173(3-4), 317–329.

Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., & Uyeshima, M., (2005), Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method, Phys. Earth Planet. Inter., 150, 3–14.

Siripunvaraporn, W., Uyeshima, M., & Egbert, G. (2004), Three-dimensional inversion for Network-Magnetotelluric data. Earth Planets Space, 56, 893–902.

Sudo, Y. & Kong, L.S.L., (2001), Three-dimensional seismic velocity structure beneathAso Volcano, Kyushu, Japan, Bull. Volcanol., 63, 326-344.

Uyeshima, M., (1990), Application of Network MT Method to the Study of Electrical Conductivity Structure in the Central and Eastern Part of Hokkaido, Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 332pp.

上嶋 誠（1995），通信回線網を用いて地球内部をのぞく試み-ネットワーク MT 法-，電子情報通信学会誌，78-6, 584-588.

Yamamoto, M., H. Kawakatsu, S. Kaneshima, T. Mori, T. Tsutsui, Y. Sudo, Y. Morita (1999) Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3677-3680.