

静水圧によるスプリットビーム方式送受波器の 特性変化とその補正方法

澤田浩一

Change in split-beam transducer characteristics with hydrostatic pressure and its correction method

Kouichi SAWADA

Abstract: Acoustic-optical composite system, which is consisted of a quantitative echo sounder and a stereo TV camera system, was developed (J-QUEST; Sawada *et al.*; 2004, Takahashi *et al.*, 2004). It can be deployed from a research vessel and lowered to fish aggregation which was observed by vessel echo sounder. The durable depth of the system is 250m and its transducer is not a pressure-stabilized type. Since it was predicted that the sensitivity of the transducer might be affected by pressure, a calibration sphere was always suspended under the transducer in order to calibrate the transmitting and receiving factor at any depths. In this report, the author confirmed the change of transmitting and receiving factor and the other characteristics at depth and proposed a correction method which was modified one based on the report of Ona (1999).

Key words: J-QUEST, calibration, pressure, transmitting and receiving factor

1 はじめに

音響的手法により資源量を算出するために、対象魚種の代表的なターゲットストレンジス（以下、TSと略）が必要である（MacLennan and Simmonds, 1992）。自然状態でのTSを測定する場合に、密度の濃い魚群や送受波器から魚群までの距離が遠い場合、測定TSに偏りが生じることが知られている（Traynor and Williamson, 1984; Sawada *et al.*, 1993; Soule *et al.*, 1995）。

このため、水産工学研究所では、計量魚群探知機の送受波器を魚群まで近づけ、精度良くTSの測定を行うことができる音響光学複合生物観測システム（Fig. 1, 以下J-QUESTと略）の開発を行っている。このシステムは最大250m程度まで沈めて使用するため、システムが受ける静水圧は大気圧付近から1平方センチメートルあたり26kg重まで大きく変動する。このよう

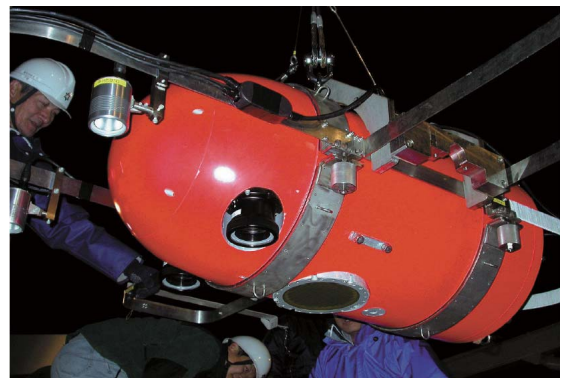


Fig. 1 Acoustic-optical composite system (J-QUEST).

な静水圧変化により、送受波器の構造によっては、送受波器の特性が変化する。例えば、送受波感度の変化（笹倉他, 1994）となって現れる。この対策としては、常に送受波感度などを較正可能としておくか、静水圧に対する送受波器の特性をあらかじめ知っておく必要がある。

そこで、J-QUEST運用時には必ず送受波器の下に標準球を吊し、常時、標準球による較正を可能としている (Foote et al., 1987; McLennan and Simmonds, 1992; 古澤ほか, 1992)。

本報告では、J-QUEST深度を変えたときの較正結果により、送受信係数や指向性に変化が起こることを示す。次に、これらの補正が可能であることを示す。その基本的なコンセプトは、Ona (1999) が他のシステムで行っているものと同じであり、これを本システムに合わせたものである。

2 材料と方法

調査概要

2004年7月12日～8月6日にかけて、水産総合研究センターの遠洋水産研究所と水産工学研究所により、調査船俊鷹丸 (887トン) を用い、「アカイカ資源および餌環境調査」を実施した。その調査項目の一つとして、水産工学研究所が開発中のJ-QUESTの運用試験を行った。

調査は北緯38度30分から47度30分までの30マイル毎に設定した定点で、音響・生物・海洋環境調査を行い、

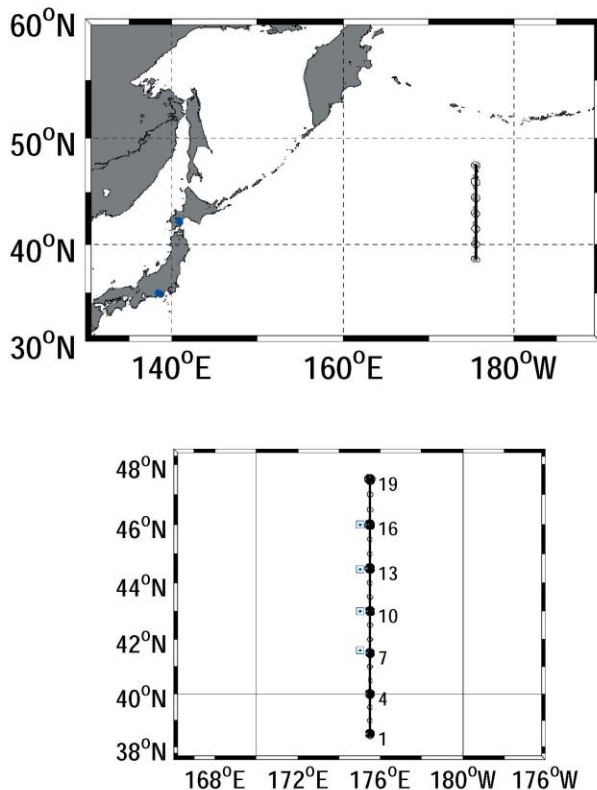


Fig. 2 Survey area and a transect line. Each circle shows observation station. Scale-up figure is shown in the lower figure. Each number shows observation station no. and squares show J-QUEST station.

次にほぼ同じライン上を90マイルずつ南下し、計4点でJ-QUESTによる観測を行った (Fig. 2)。

ソーナー方程式と較正方法

単体魚や標準球からのエコー電圧 E_r (V) は、送受信係数 TR (dB), 送受波器から標準球までの距離 r (m), 吸収減衰係数 (dB/m), 指向性 D (dB), 魚や標準球のターゲットストレングス TS (dB) を用いて、(1)式のように表される。

$$20 \log E_r = TR - 40 \log r - 2r + 2D + TS \quad (1)$$

較正を行う場合には、 TS が既知の標準球を用い、標準球が指向性軸上にあるときのエコー電圧 E_r と距離 r を測定する。吸収減衰係数は、周波数、測定した水温、塩分、深度を主なパラメータとする Francois and Garrison (1982) の式により求めることができる。これらの値を(1)式に代入し、送受信係数 TR を求めることができる。

スプリットビーム法による指向性補正方法

スプリットビーム方式では、前後と左右にそれぞれ2つの受波アレイを設け、それらへのエコーの到達時間差を位相差として検出して、ターゲットの方向を知ることができる (海洋音響学会編, 2004)。前後、左右方向で測定した位相差をそれぞれ、 x 、 y とする。また、位相差のオフセットを x_0 、 y_0 とする。波数 $k=2\pi/\lambda$ (; 波長), 各ビームの位相中心間距離 d を用いて、球座標で示した魚の位置 (θ, ϕ) は、

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}{kd} \right] \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{(y - y_0)}{(x - x_0)} \right] \quad (3)$$

となる。(設計値では $x_0=0$, $y_0=0$, Fig. 3 参照)

円形ピストン振動子の指向性 D は、半径 a , k , ベッセル関数 J_1 により、

$$D = 10 \log \left[\left(\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2 \right] \quad (4)$$

と表される。(海洋音響研究会, 1984)

J-QUESTの送受波器の指向性測定方法

水工研の水槽で、指向性と位相中心間距離を測定により求め、それぞれ、設計値通りになることを確認した (澤田ほか, 2003)。

静水圧により指向性がどのように変化するかを調べるためには、送受波器を海中の一定深度におき、その指向性を測定する必要がある。

(1)式より、 $TS+2D$ は、

$$TS_{UC} - TS + 2D = 20\log E_R + 40\log r + 2r - TR \quad (5)$$

と表される。これをTS補正前のTSという意味で TS_{UC} と表すことにする。標準球を用いた場合には、標準球のTSは既知であるため、

$$D = \frac{1}{2} (TS_{UC} - TS) \quad (6)$$

により指向性の測定が可能となる。

2004年7月27日に、このシステムを深度220mまで垂下した。このとき、標準球（タングステンカーバイド、直径38.1mm）を送受波器の直下で送受波器から7mの距離になるように、テグスの長さを調整し、3方から吊り下げた。J-QUESTの動揺や標準球が潮流で流されたりすることにより、音響ビーム内での標準球の位置は変化する。このため、一定深度に長時間おいておけば、制御された環境下ではないものの、指向性の測定が可能である。

補正方法

指向性に変化があるときには、指向性Dに関するパラメータ、位相差、半径a、位相中心間距離dに何らかの原因で変化が生じた可能性が高い。

そこで、J-QUEST深度220mのときに得られた標準球エコーデータの位相差を用い、Fig. 3に示すを推定した。次にこのを用い、(4)式により計算した指向性（理論値）を求めた。さらに、(6)式により測定した指向性（測定値）を求め、方位角（）別に両者の比較を行った。方位角は、測定により得られたを使って、0°から170°まで10°おきにまとめたものを使用した。例えば、が355°から0°をはさんで5°まで、175°から185°までが=0-180°上の測定値としてまとめて表示した。

(6)式で-3dB以内となる指向性の測定値と理論値の残差2乗和（計算の都合からいずれもデシベル値の自乗和）を評価値とした。通常、自然状態でのTS測定は、TS推定誤差を最小とするため、半減半角内（-3dBとなる角度）のターゲットのみについてなされることが多い（Traynor, 1984）。そこで、-3dBを下限とした。

使用されるエクセルのソルバー機能により、評価値が最小となるように、位相差オフセット（ ϕ_x , ϕ_y ）、TRオフセット（TR）、直径（2a）、位相中心間距離（d）を変化させ、4通りの補正方法を試みた。

- (1) オフセットを考慮せず、設計値を利用する場合。（通常の較正ではこの方法を用いている。）
- (2) 位相差オフセットを与えた場合。
- (3) (2)に加えて、円形ピストンの直径を変更する場合。
- (4) (3)に加えて、位相中心間距離を変更する場合。

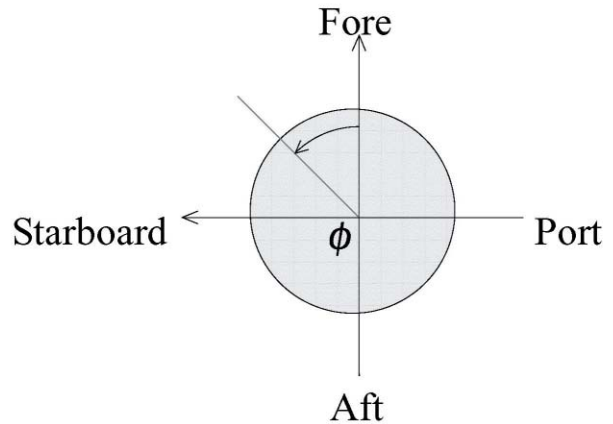
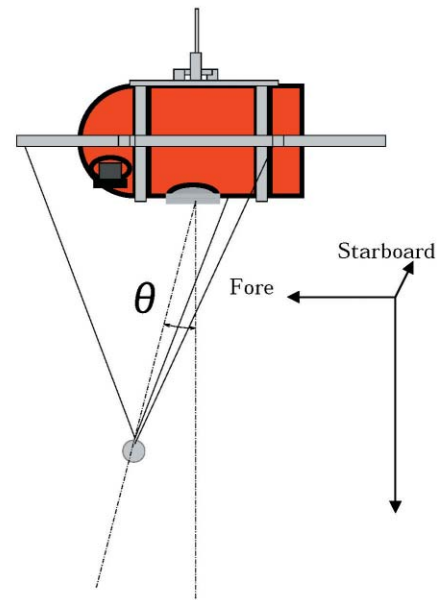


Fig. 3 Definition of and . Sphere position in the upper figure was exaggerated to show the definition of angle , .

位相差オフセットを与えたり、位相中心間距離を変化させたりすると、(2),(3)式より、 ϕ 、 θ が変化する。

θ が変化すると、(4)式により、指向性の計算値が変化する。直径を変化させると、(4)式により指向性の計算値が変化する。

3 結果と考察

2004年の調査で、異なる深度で得られた送受信係数の値をFig. 4に示す。また、参考として、2003年の調査で得られた送受信係数の測定値を同図にあわせて示す。深度100m程度までは送受信係数の値はほぼ一定であるが、深度100mから150mの間で送受信係数の低下が見られ、深度220mでは、深度100mまでの送受信係数に比べ約-2dBとなった。2003年、2004年両方の較

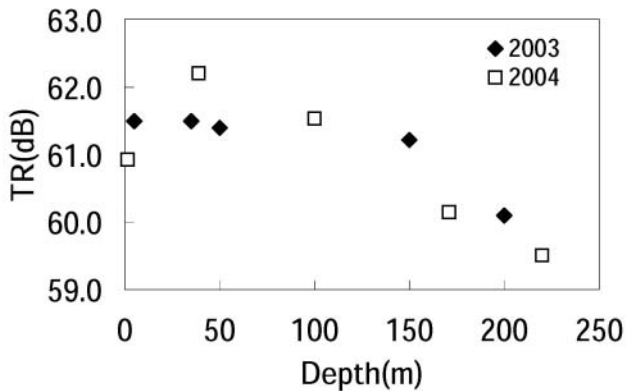


Fig. 4 Relationship between J-QUEST depth and measured TR factor.

Table 1 Variables and obtained values at each calibration method.

The symbol ' ' in the table shows wave length and it is equal to sound speed (1500m/s) divided by the acoustic frequency (70000Hz)

Case	dx offset (deg)	dy offset (deg)	TR offset (dB)	Diameter (λ)	d (λ)	Avg. Res. (dB)
1)	-	-	-	D	D	-
	-	-	-	5.00	2.00	0.20
2)	V	V	V	D	D	-
	2.01	-9.62	0.32	5.00	2.00	0.14
3)	V	V	V	V	D	-
	0.43	-9.29	0.21	4.72	2.00	0.04
4)	V	V	V	V	V	-
	0.43	-9.29	0.21	5.05	2.14	-0.03

正結果とも、送受信係数は深度とともに低くなる傾向にあることを示した。

補正方法(1), (2), (3), (4)の結果を表1にまとめた。表の左から、補正方法、補正で変数として使ったパラメータである、位相差オフセット (d_x , d_y), TR オフセット (TR), 直径 ($2a$, 単位:), 位相中心間距離 (d , 単位:), 残差平均 (dB) を表す。この残差平均は、残差の実数値について各方向での測定数で重みをつけて平均し、デシベル表示したものである。

表中でVはそのパラメータを変数としたことを示し、Dは設計値を使用したことを示す。なお補正方法(3)については、複数の試行により、同じ残差平均となる複数の解が得られた。そこで、その中で、位相中心間距離、直径が設計値(それぞれ、2, 5)に近いセットを選択した。

補正方法(1)では残差平均が0.20dB, 補正方法(2)では0.14dB, 補正方法(3)では0.04dB, (4)では、-0.03dBと、パラメータを増やすにつれて、残差が小さくなった。

補正方法(3)では、実効的な直径が4.72 になった。

これは、指向性が広がったことを意味している。また、補正方法(4)では、実効的な直径は5.05 となり、設計値5.00 からあまり変化はないが、位相中心間距離が設計値の2.00 から2.14 に広がったことを意味している。

指向性の測定値と補正方法(1)を用いて計算した、そのときの指向性計算値の比較結果を、方位角で10°ごとにまとめた結果をFig. 5に示す。図中の表記で $=0^\circ$ は $0^\circ \sim 180^\circ$ の方向での指向性を示し、マイナス表示の は、 が 180° の方向にあることを示す。

通常の補正方法である補正方法(1)ではFig. 5中の(1) $0 \sim 180^\circ$ 方向, (2) $10 \sim 190^\circ$ 方向の指向性は理論値とよく一致している。ところが、同図中で(6) $50 \sim 230^\circ$ 方向から(16) $150 \sim 330^\circ$ 方向まで、 がマイナスのときに測定値が理論値より大きくなり、 がプラスのときに小さくなった。これは、本来は対称であるはずの指向性が対称でなくなっていることを示す。

補正方法(2)について、Fig. 6より、補正方法(1)より対称性は良くなったが、ばらつきが大きくなった。

補正方法(3)について、Fig. 7より、対称性は良く、ばらつきも小さくなったが、同図中(10) $90 \sim 270^\circ$ 方向から(14) $90^\circ \sim 130^\circ$ 方向までは、 が 4° 以上で残差が大きくなっている。

補正方法(4)について、Fig. 8より、いずれの方位角においても対称性が良くなり、ばらつきが少なくなっている。

各補正方法の方位角別の残差平均(線形値)を比較した結果をFig. 9に示す。値が1であれば、指向性の補正誤差は0を意味する。補正方法(1), (2)より、補正方法(3), (4)の方が良い。補正方法(3), (4)を比較すると、 $=90^\circ$ から 130° の範囲を除き、補正方法(3)が良いことがわかる。

各補正方法の方位角別の測定数をFig. 10に示す。方向により、測定エコー数が異なり、補正方法(4)の場合で最小が $=30^\circ$ 方向で55個、最大が 130° 方向で716個となっている。これは、標準球が三方向からテグスで吊り下げられているため、可動な範囲が限られたためと思われる。また、補正方法の違いにより、同じデータでも(,)が変わるため、各別個数は若干変化している。

Fig. 11に方位角毎に3つに区分した残差範囲の割合を各補正方法別に示す。なお、残差を測定値 - 理論値で定義し、残差範囲は次の3通りとした。

- (i) ± 0.2 dB以内, 図中で青 ' '
- (ii) -0.2 dB以下, 図中で黒 ' + '
- (iii) $+0.2$ dB以上, 図中で赤 ' '

Fig. 11より、補正のパラメータを増やすとともに残

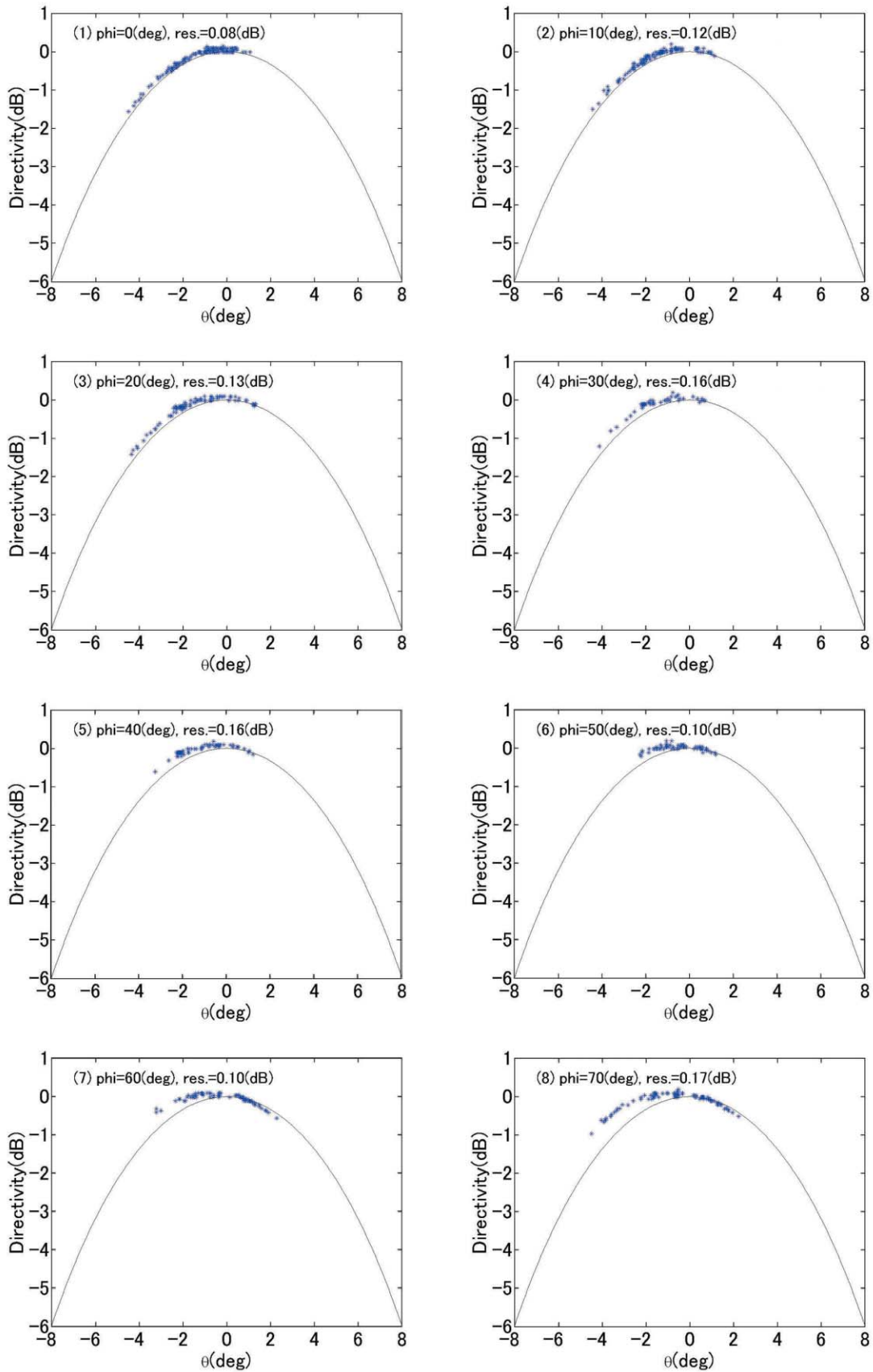


Fig. 5 Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 0-70° by the correction method 1.

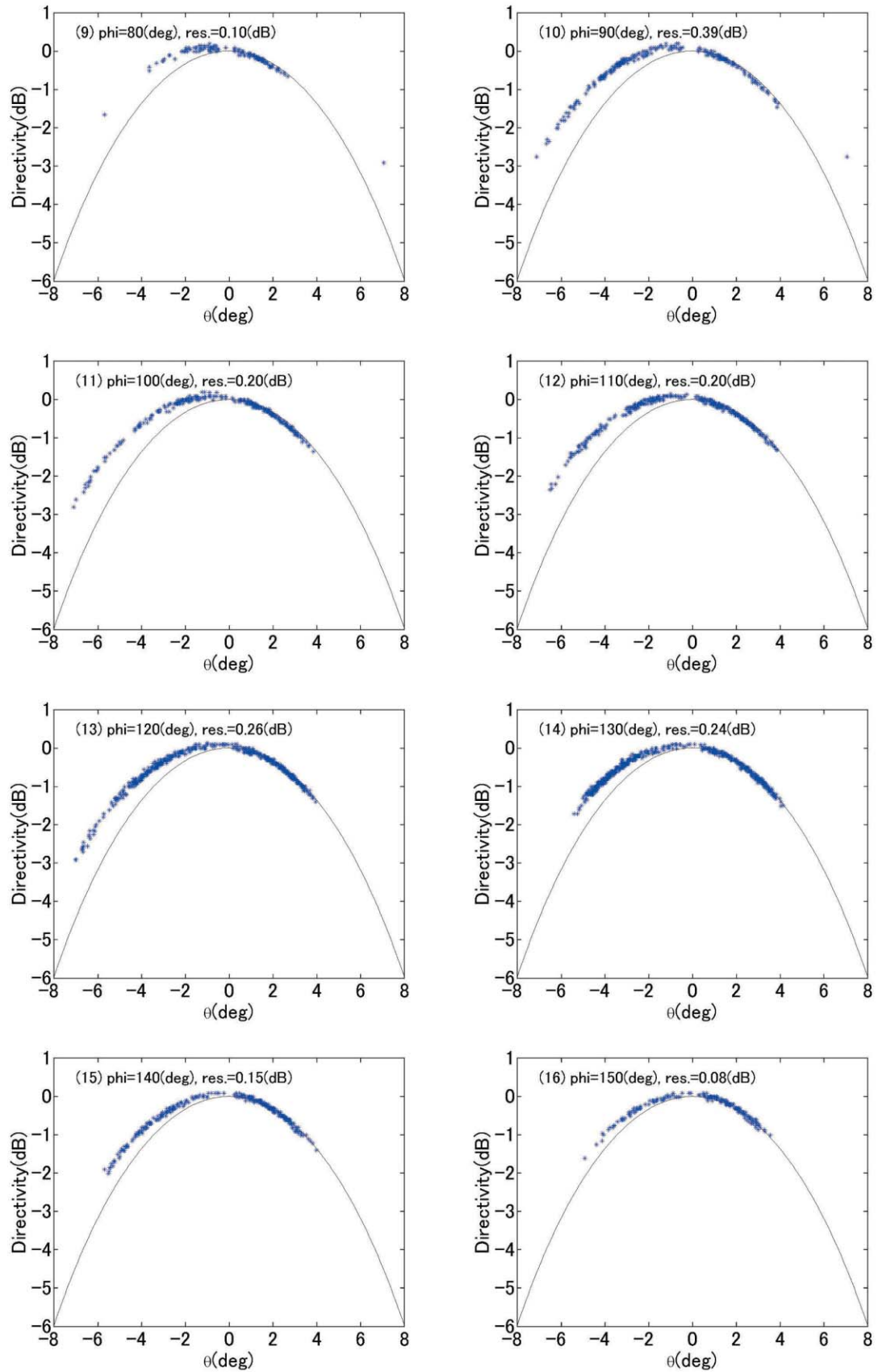


Fig. 5 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 80-150° by the correction method 1.

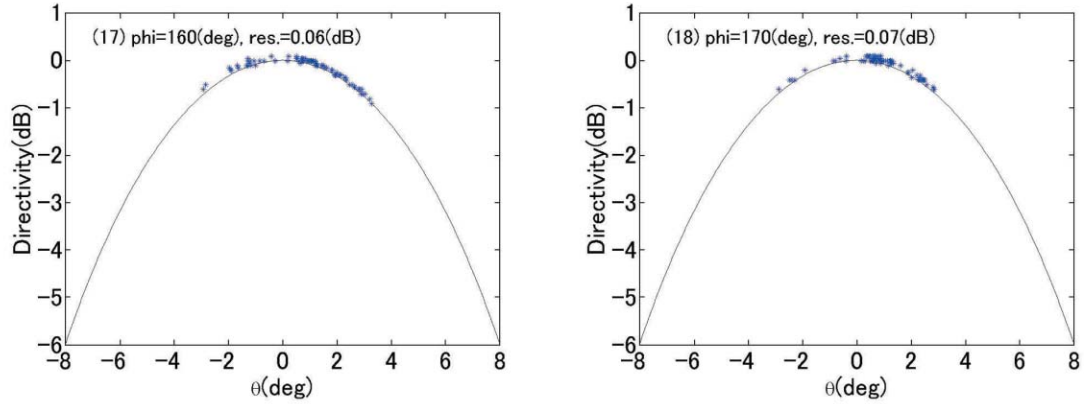


Fig. 5 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions at of 160 and 170 by the correction method 1.

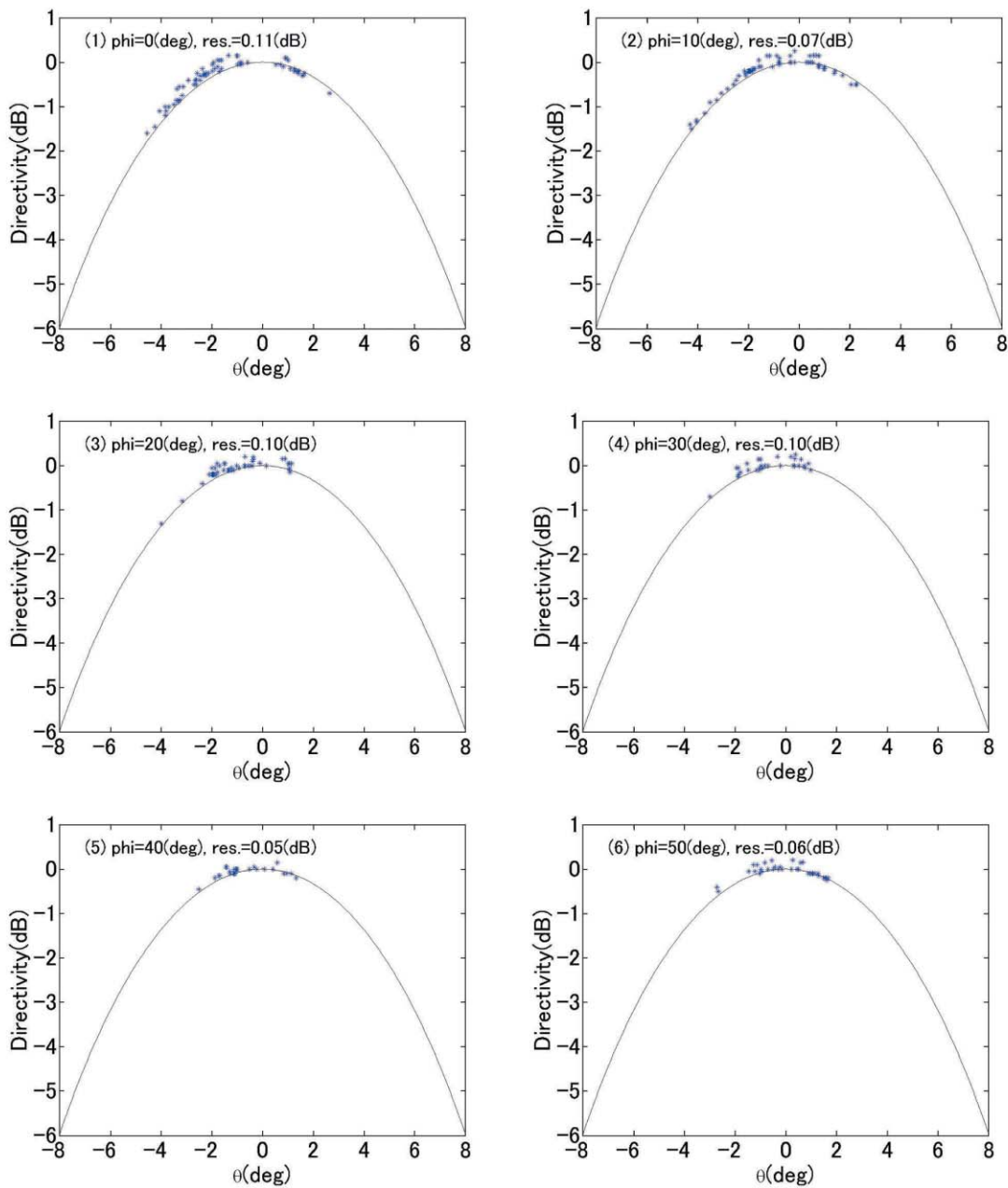


Fig. 6 Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 0-50 by the correction method 2.

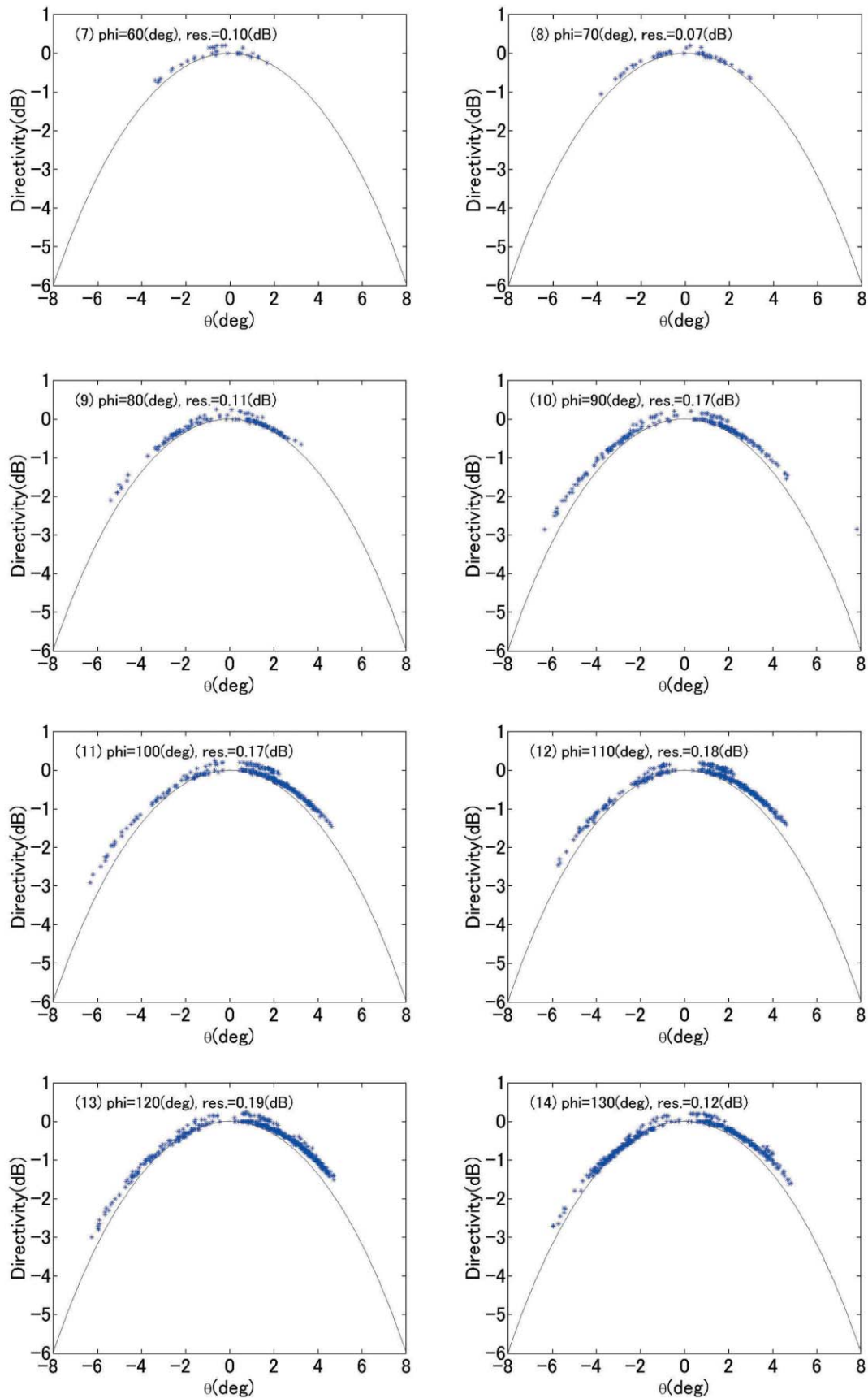


Fig. 6 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 60-130 ° by the correction method 2.

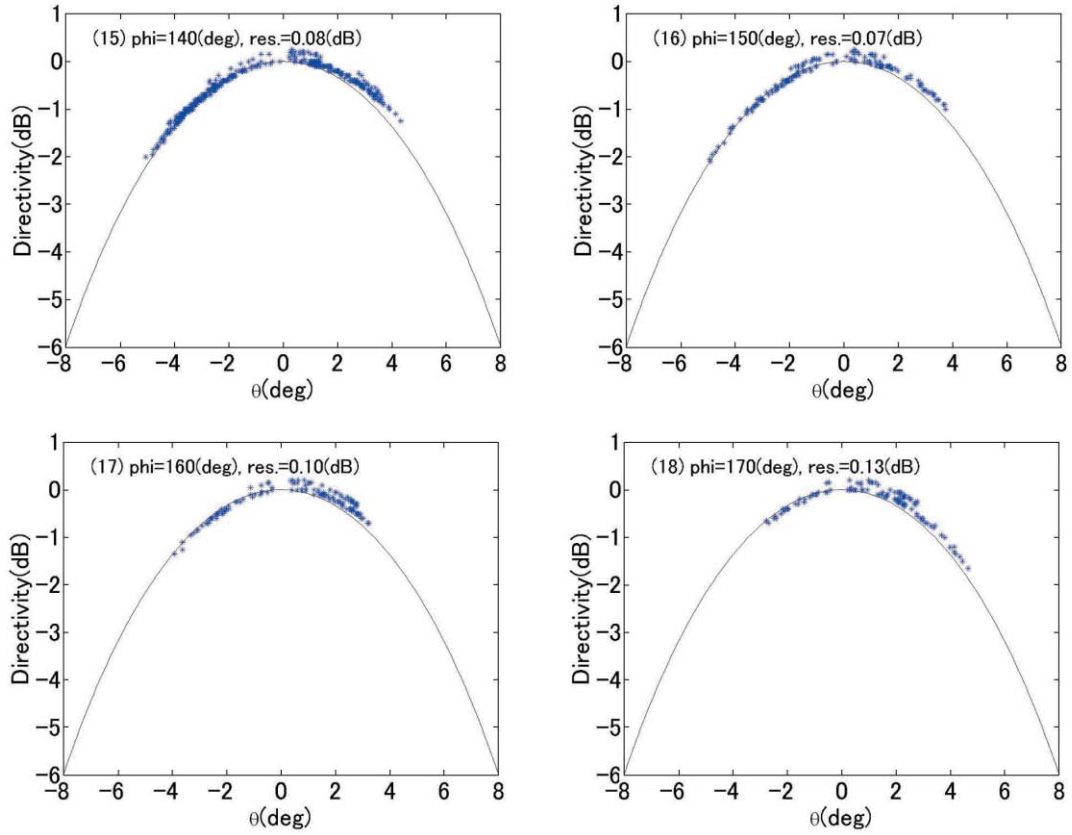


Fig. 6 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 140-170 degrees by the correction method 2.

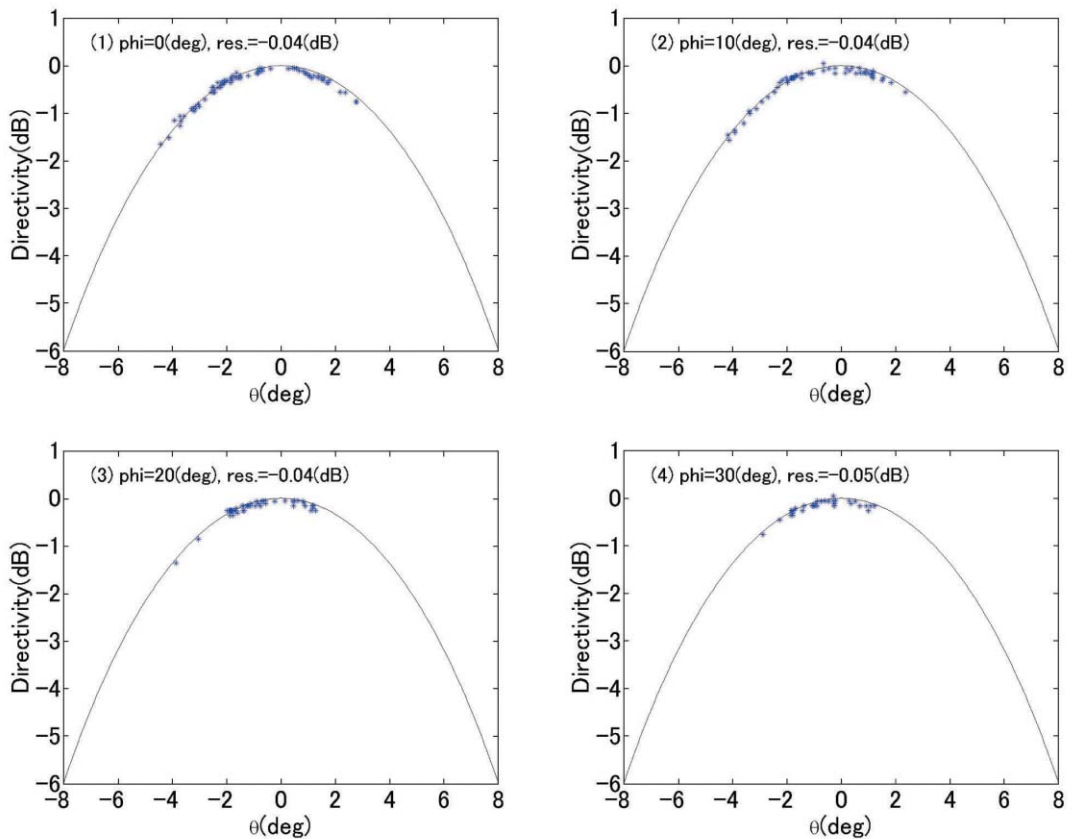


Fig. 7 Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 0-30 degrees by the correction method 3.

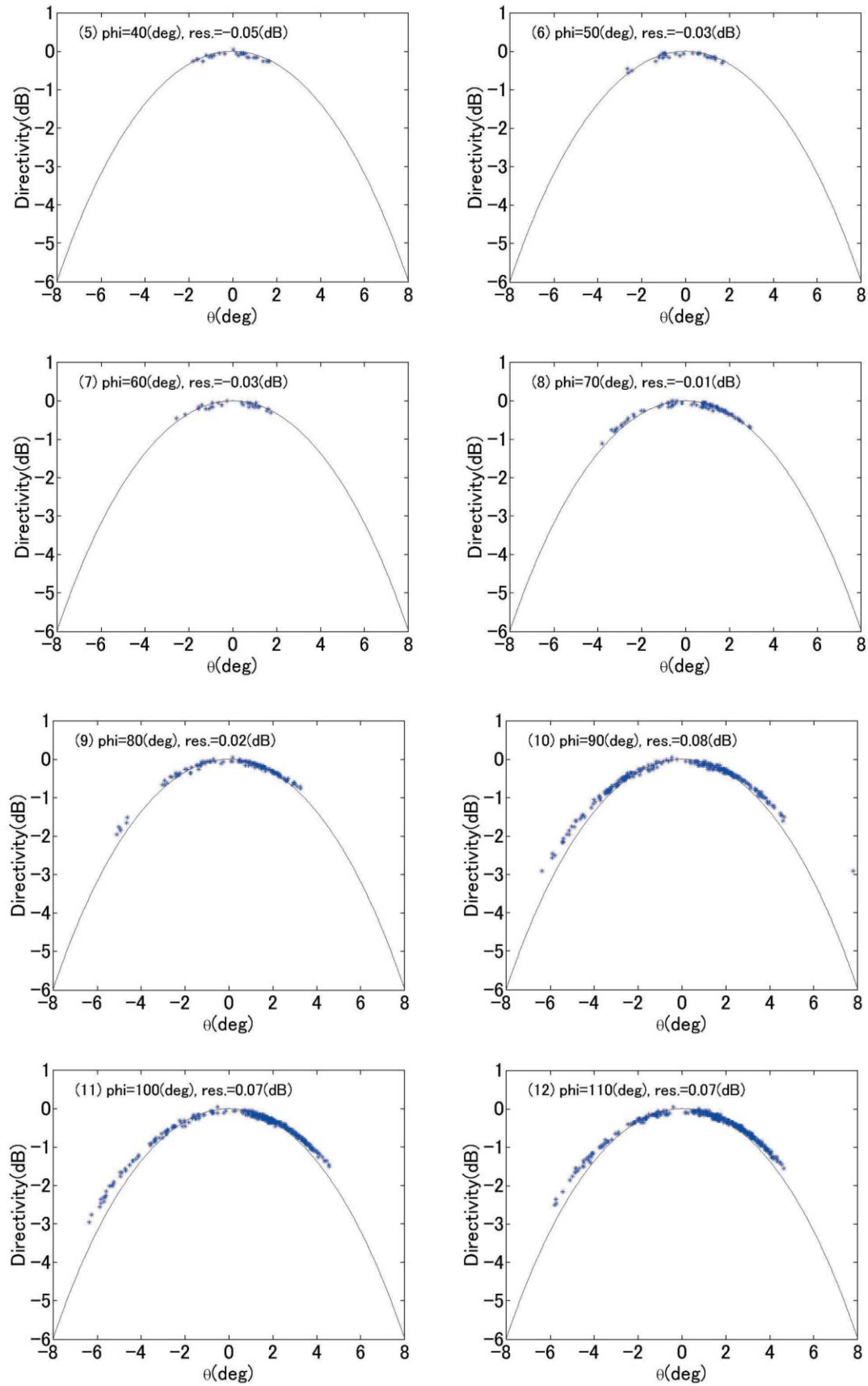


Fig. 7 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 40-110° by the correction method 3.

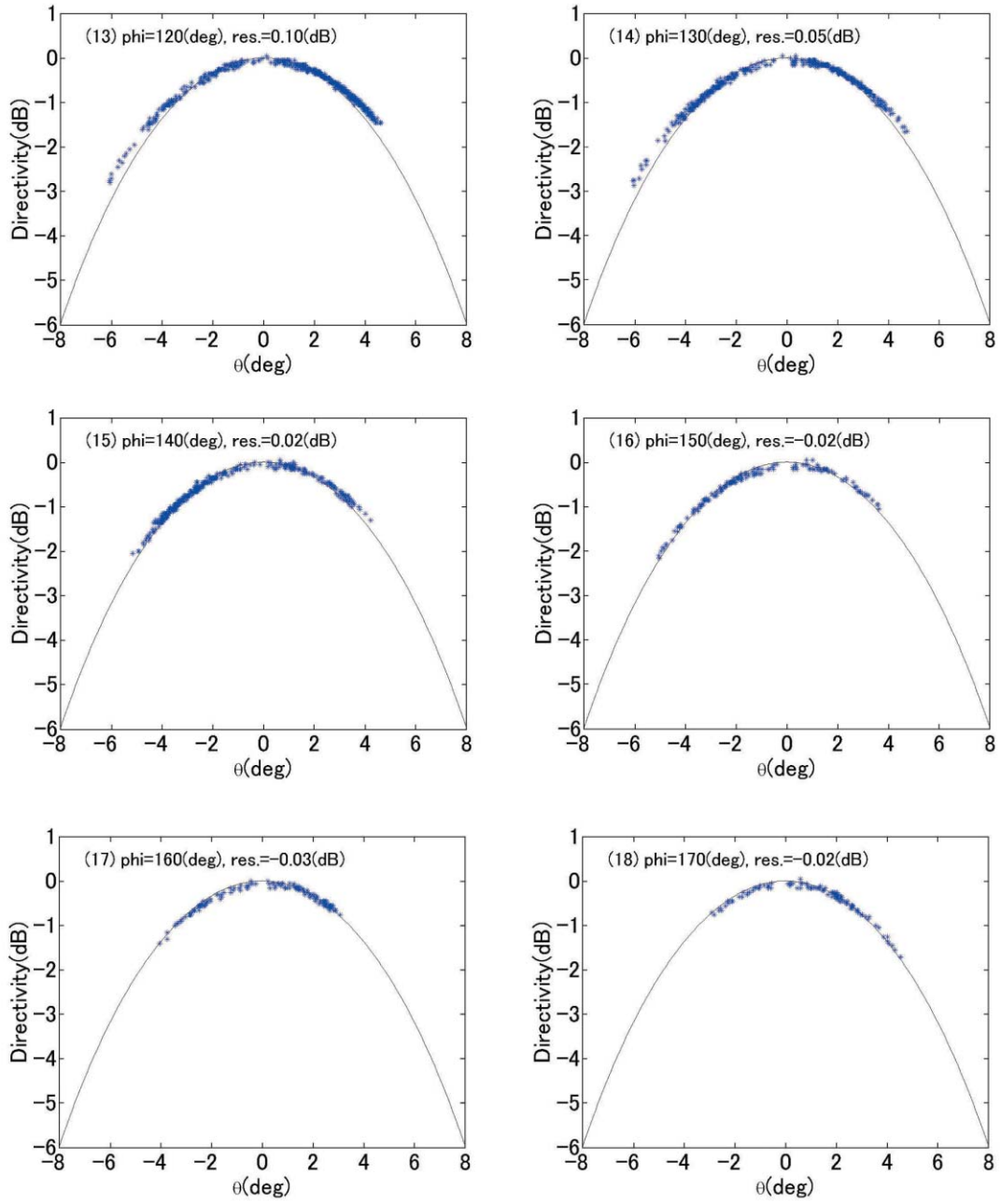


Fig. 7 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 120-170° by the correction method 3.

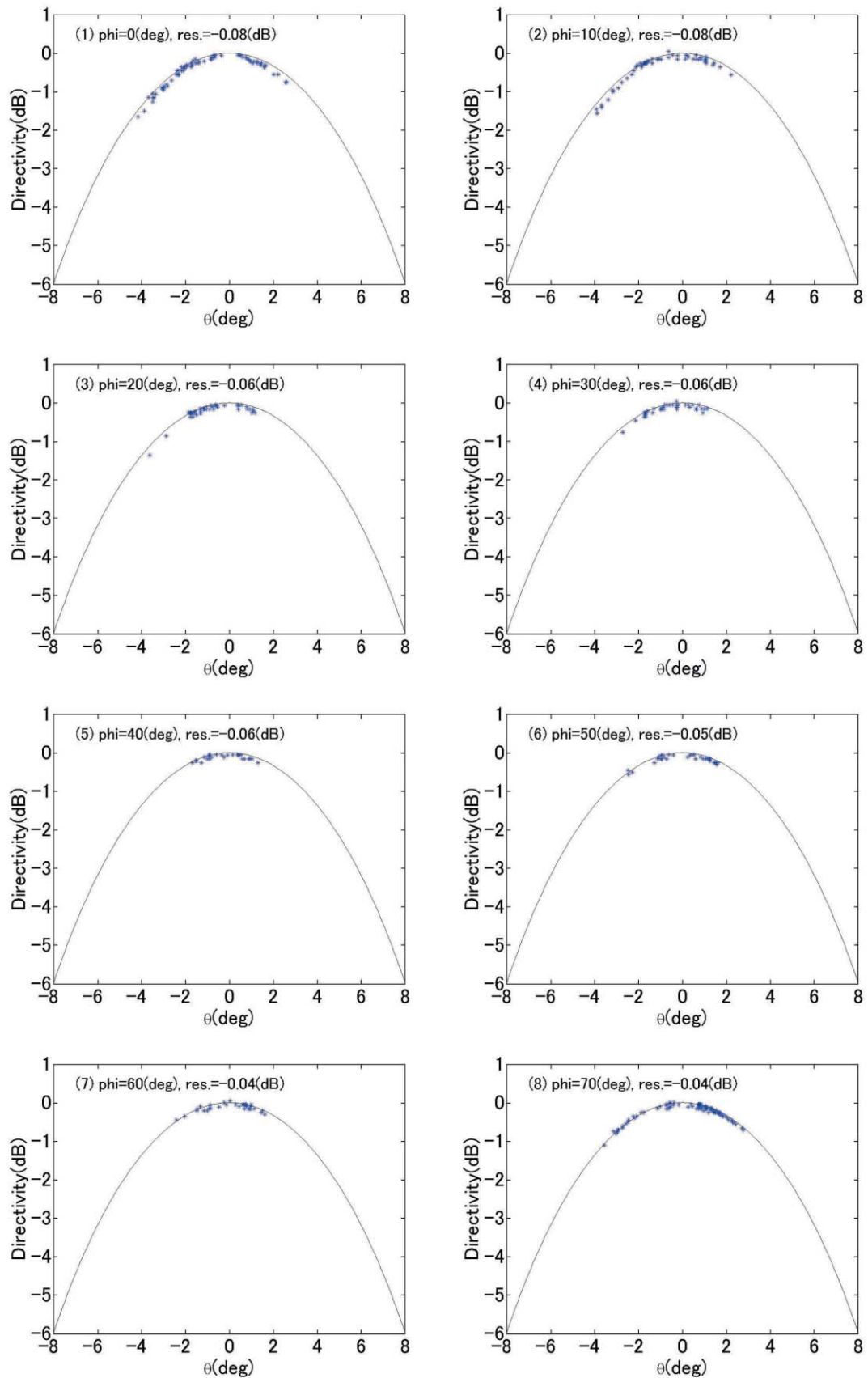


Fig. 8 Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 0-70 degrees by the correction method 4.

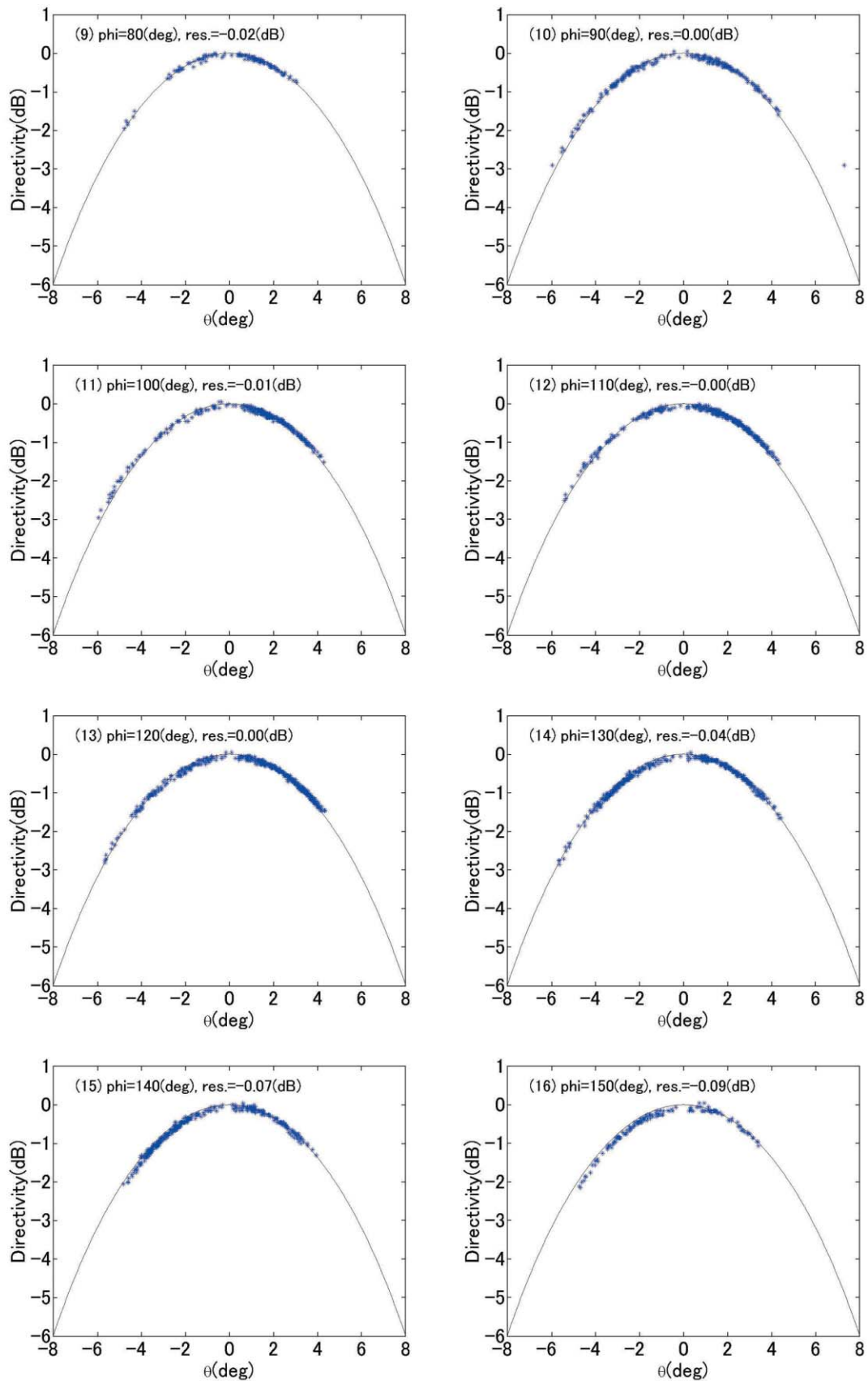


Fig. 8 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions in the range of 80-150 degrees by the correction method 4.

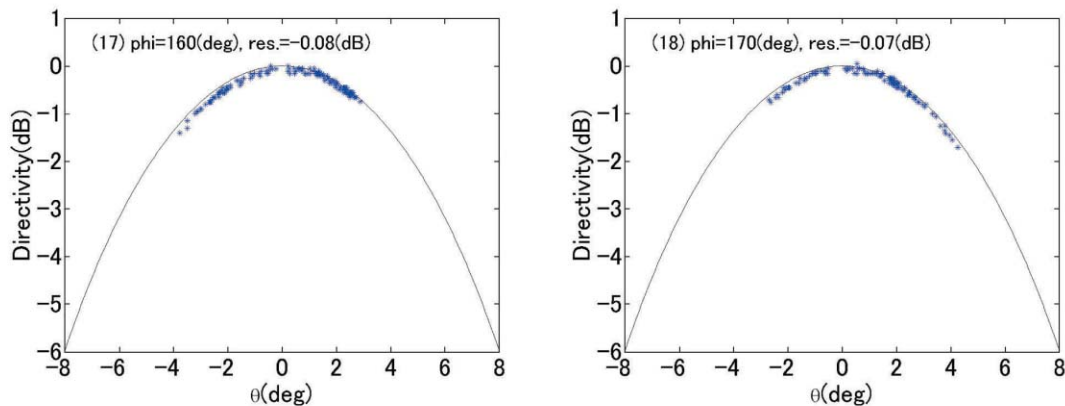


Fig. 8 (continued) Comparison between measurements and theoretical predictions at ϕ of 160 and 170 by the correction method 4.

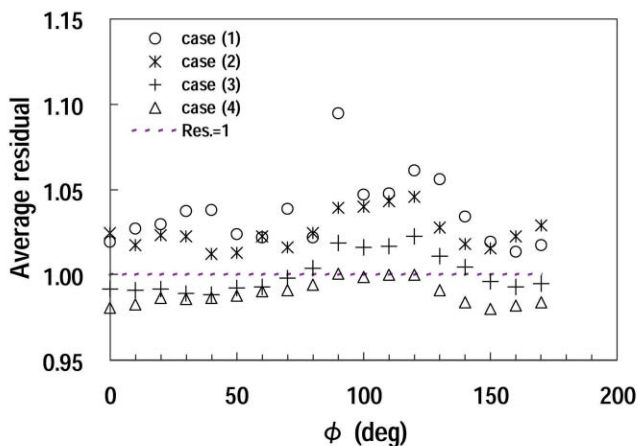


Fig. 9 Average linear residuals at different transverse plane of the acoustic beam.

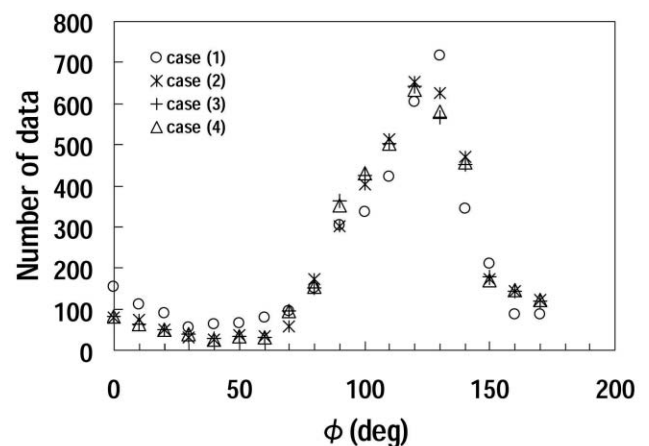


Fig. 10 Number of echoes at different transverse plane of the acoustic beam.

差が小さくなっていくことがわかる。

Fig. 12は、残差を()、()方向別に示したものである。補正により、残差が減ること、最初にビームの片側に偏っていた残差が外側に広がり、最終的にほとんどすべての残差が $\pm 0.2\text{dB}$ 以内に収まることがわかる。

補正方法(3),(4)が同じような結果を示すことについては、(2)式から説明ができる。指向性が広がるということは、指向性は変わらず、(2)式で d が長くなることと等価である。つまり、 d が長くなれば、 x 、 y から計算した θ が小さくなり、指向性補正值も小さくなる。これは指向性が広がったのと同じ効果を持つ。

以上の結果より、 $\pm 0.2\text{dB}$ 以内の残差で指向性補正を行うためには、方法(3),(4)のいずれでも問題がないことになる。

補正方法(4)では、位相中心間距離が設計値と大きく変わるため、魚の推定位置は補正方法(4)とは異なることになる。これは、エコートレース解析などにより、

魚の速度推定を行う際には誤差の原因となるため、圧力下の送受波器がどのようなになっているか調査する必要がある。

指向性に变化があった場合には、送受波器の直径が 107.1mm (5)から 101.1mm (4.72)に縮まったということになる。位相中心間距離に変化があった場合には、 43.9mm (2)から 45.9mm (2.14)に変わったということになる。圧力の影響で、送受波面の一部がつぶれ、一部が押し出されるなどの変化があれば位相中心間距離が 2mm 程度長くなる可能性はある。一方、圧力により、直径が 6mm 縮みながら、位相中心間距離は変わらないということは考えにくい。そこで、現時点では、補正方法(4)に示したように、位相中心間距離が若干のび、直径は設計値とほとんど変わらないという可能性が高いと考えている。

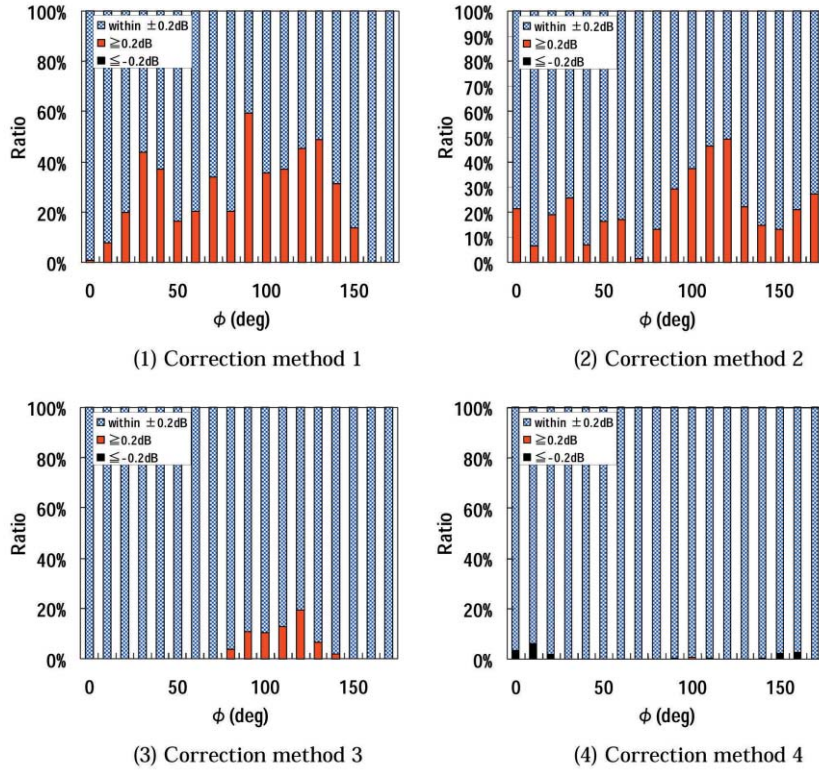


Fig. 11 Distribution of residuals at different transverse plane in each case.

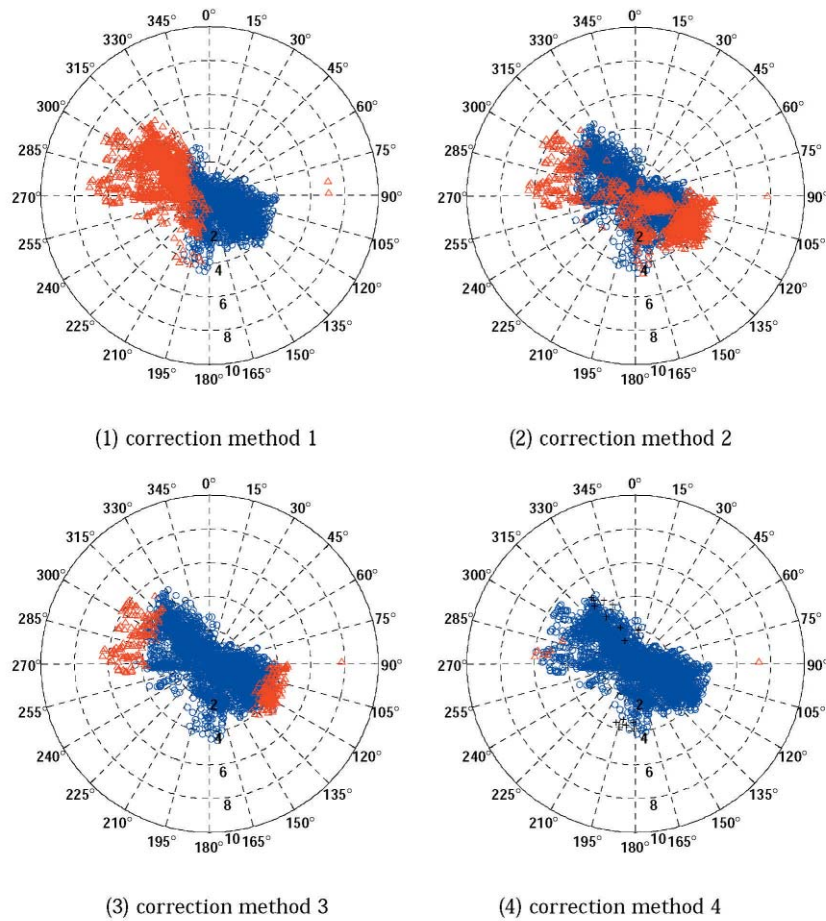


Fig. 12 Display of three residual classes in (ϕ, θ) direction. Blue '+' : within $\pm 0.2\text{dB}$. Black '+' : less than -0.2dB . Red '+' : larger than 0.2dB .

4 おわりに

深度250mまでであれば、現システムを使用し、補正方法⁽⁴⁾で補正を行うのが現実的であろう。問題点としては、標準球の位置を任意に制御できないため、特定深度で、常に指向性を測定できるほどのエコーデータが集められない可能性もあげられる。

TS測定誤差を少なくするためには、静水圧による特性変化の少ない送受波器の開発が不可欠である。ノルウエーのSIMRAD社では、送受波器内部に油を入れて均圧化した送受波器の開発を用い、1500mまでの測定を可能にしている(Ona and Pedersen, 2006)。今後、日本でも水産調査向け深海送受波器の開発が望まれる。

俊鷹丸では、J-QUESTを使用した初めての本格調査にあたり、様々な工夫を行い調査を円滑に進めていただいた。俊鷹丸小野田船長以下、乗組員の方々に謝意を表す。

参考文献

- 海洋音響研究会, 1984: 海洋音響研究会 - 基礎と応用 -, pp.45 .
- 海洋音響学会編, 2004: 海洋音響の基礎と応用, p.254.
- 笹倉豊喜・青山 繁・村上英司・三上宏幸・河端康司・竹野明哲, 1994: 送受波器の圧力特性について, 海洋音響学会平成6年度研究発表会講演論文集, 25-28 .
- 澤田浩一・高尾芳三・高橋秀行・安部幸樹・奥村都誉司, 2004: 水産調査のための音響・光学複合システムJ-QUESTの開発 - 音響システムの開発 -, 水産工学研究所技報, 26, 23-33.
- 古澤昌彦・宮野鼻洋一・澤田浩一・高尾芳三, 1995: 計量魚群探知機の較正方法, 水産工学研究所技報(漁船工学), 15, 9-37 .
- Footo K.G., H.P. Kunudsen, G.Vestnes, D.N. MacLennan, and E.J.Simmonds, 1987: Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: A practical guide, *Int. Coun. Explor. Sea. Coop. Res. Rep.*, 144, 1-69.
- Francois R.E. and R.G.Garrison, 1982: Sound absorption based on ocean measurements. Part : Boric acid contribution and equation for total absorption, *J. Acoust. Soc. Am.*, 72, 1879-1890.
- MacLennan D.N., and E.J. Simmonds, 1992: Fisheries Acoustics, Chapman & Hall (London), pp.325.
- Ona E.(ed), 1999: Methodology for target-strength measurements, International Council for the Exploration of the Sea, *ICES Cooperative Research Report*, 235, 59p.
- Ona E. and G. Pedersen, 2006: Calibrating split beam transducers at depth, Program: 4th Joint Meeting of ASA/ASJ, 120 (5), Pt.2, 3017.
- Sawada, K., Furusawa, M. and Williamson, N.J., 1993: Conditions for the precise measurement of fish target strength *in situ*. *J. Mar. Acoust. Soc. Jpn.*, 20, 73-79.
- Sawada K., H. Takahashi, Y. Takao, K. Watanabe, J.K.Horne, S. McClatchie, and K. Abe, 2004: Development of Acoustic-Optical System to estimate Target-Strengths and Tilt Angles from Fish Aggregations, OCEANS'04 MTS/IEEE /TECHNO-OCEAN'04 CD-Rom Proceedings, 395-400, 2004. 11.
- Soule, M., M. Barange, and I. Hampton, 1995: Evidence of bias in estimates of target strength obtained with a split-beam echo-sounder, *ICES. Mar. Sci.*, 52, 139-144.
- Takahashi H, K.Sawada, K.Watanabe, J.K. Horne, S. McClatchie, and K. Abe, 2004: Development of Stereo TV Camera System to Complement Fish School Measurements by a Quantitative Echo Sounder, OCEANS'04 MTS/IEEE /TECHNO-OCEAN'04 CD-Rom Proceedings, 409-414, 2004. 11.
- Traynor J.J. and N.J.Williamson, 1984: *In situ* target-strength estimation of Pacific whiting (*Merluccius productus*) and a simulation study of the using dual-beam method. FAO Fisheries Report, 300, 112-124.
- Traynor, J.J., 1996: Target-strength measurements of walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) and Pacific whiting (*Merluccius productus*), *ICES. Mar. Sci.*, 53, 253-258.