HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	眼高差について(Ⅱ)
Author(s)	日向, 政明; 坂本, 有隣
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 24(4), 150-156
Issue Date	1974-06
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23500
Type	departmental bulletin paper
File Information	24(4)_P150-156.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大水産彙報
24(4), 150-156. 1974.

眼高差について (II)

日向政明*・坂本有隣*

Investigation into the Dip of the Sea Horizon (II)

Masaaki HYUGA* and Yurin SAKAMOTO*

Abstract

One of the main purposes of this study is to derive an empirical formula to estimate the dip of the sea horizon to be duly applied covering whole sea areas. The authors grouped the cruises of the T.V. Oshoro Maru of Hokkaido University, to the Arctic Sea, the Bering Sea, the northern and southern North Pacific, the Gulf of Alaska and seas adjacent to Japan, from 1965 to 1973. The dip varies with terrestrial refraction, i.e. the vertical gradient of refractive index. The new formula as a function of variables p/T^2, Δ/H (where p: air pressure, T: air temperature, Δ: air-sea temperature difference, H: height of observer's eye) derived on the data gained in the years of (1965, 1968, 1970) is as follows:

$$\Delta a = \frac{p}{T^2}\left[1435.55\frac{p}{T^2}\left(\frac{\Delta}{H}\right)+\left(36968.7\frac{p}{T^2}-402.312\right)\frac{\Delta}{H}+15051.3\frac{p}{T^2}-163.792\right]$$

Thus, the dip can be estimated as $(1.926-\Delta a)\sqrt{H}$. Here, the effect of vapour pressure was neglected as being small, but to estimate the dip correctly it might be necessary to allow for water vapour on the dip. In our study, an appreciable effect on the dip was found. On this point, together with effects of other elements on the dip e.g. wind etc., a paper of further study will be published in the near future.

緒　　言

眼高差 δ は地球曲率のために起る部分 d_G と光線の屈折のために起る部分 d_p とよりなりたつ。d_p は地上気差による光線の屈折のために海面が浮き上り，あるいは沈下して見える物理的量である。$\delta=d_G-d_p=d_G(1-K)$ で与えられ係数 K を平均値として，Bessel による 10°C, 760 mm における値 $K=0.0784$ を採用すれば，いわゆる基本式として，$\delta=1.776\sqrt{H}$〔H: 眼高 (m)〕が得られる。これがわが国で用いられている眼高差の式である。これは気温と水温の温度差 (Δ) のないときに適合するもので，一般に眼高差は温度差によって変化するものとされ，実用上眼高差の改正量を Δ に正比例するものとして温度差の係数を求めている。従来旧海軍水路部でドイツ海軍の 0.33 を用いていたが，1927 年 2 月の潮岬で，また 1929 年 6 月神子元島での実験結果からその平均値 0.2 に改められた。眼高差実験式 $\delta=a\sqrt{H}-b\Delta$ における係数 a, b の値は各国においてそれぞれ異なる。これらは限られた実験の場所，時季においては適合すると思われるが，あらゆる海域，時季に対しては不適当である。著者らは北大練習船おしょろ丸に乗船 1965, 1968, 1970, 1972, 1973 年の第 16, 28, 37, 45, 48 次航

* 北海道大学水産学部漁業航海学講座
(*Laboratory of Fishery Navigation, Faculty of Fisheries, Hokkaido University*)

海に参加し眼高差を測定，同時に海象，気象の状況を記録してそれらの観測資料に基づき眼高差についての解析を試み実験式を得た。本研究を成すにあたり観測に御協力を戴いたおしょろ丸船長はじめ士官各位に対し深甚の謝意を表する。データーの処理および計算は北海道大学大型計算機センターおよび北海道大学水産学部計算機センターを利用した。

実　　験

眼高差測定器

1965年の南方航海においては，海上保安庁水路部よりCarl Zeiss製の眼高差測定器を借用して眼高差の測定を行った。1968年これとほぼ同型のものを株式会社測機舎に試作させ以後これを使用している。読取値の精度はCarl Zeiss製のものは目盛0′.5で読取は0′.1まで目視による内挿法により測定した。また測機舎製作のものはVernierにより0′.05まで測定した。

時期及び海域

1. 1965年12月2日より1966年1月31日までのNorth Pacific Ocean, Molucca Sea, Banda Sea, Sawa Sea, Indian Ocean, Great Australian Bight, Tasman SeaおよびCoral Seaの海域。
2. 1968年6月4日より8月14日までのnorthern North Pacific Ocean, Bering SeaおよびGulf of Alaskaの海域。
3. 1970年6月7日より8月16日までのnorthern North Pacific Ocean, Bering SeaおよびGulf of Alaskaの海域。
4. 1972年6月6日より8月15日までのnorthern North Pacific Ocean, Bering Sea, Arctic SeaおよびGulf of Alaskaの海域。
5. 1973年4月5日より4月13日までの日本海および東支那海の海域。

観測方法

5回のいずれの航海においても同様の方法により眼高差の測定は船上5個所で行った。upper deck (A), boat deck (B), wheel house deck (C), compass bridge (D), および radar mast top (E) (ただし第16次航海は除く) で毎回の測定において下層甲板より順次上層へ連続して行った。毎回の測定時間は大体20～30分であった。眼高は船の出入港時および漂流中の喫水から逆算推定して観測日の喫水を算出した。各年次の喫水の最大，最小，平均及び各甲板A, B, C, D, Eの平均眼高はTables 1, 2の通りであった。

各甲板の測点においてアスマン通風乾湿計で乾湿球の両温度を，眼高差測定後アネロイド気圧計で気圧を，ゴム製二重採水バケツで海水を汲み棒状水銀温度計で海水の温度を測定した。またジャイロ・レピーターで風向を，風力，うねり，波浪は目視により観測した。ただし，1965年南方航海においては，乾湿球の測温はcompass bridgeに設けてある百葉箱内のアスマン通風乾湿計で毎回の連続観

Table 1. *Ship drafts at observations.*

Year	Draft (m)		
	Max.	Min.	Ave.
1965	3.96	3.45	3.74
1968	3.94	3.70	3.84
1970	4.05	3.67	3.85
1972	3.79	3.62	3.70
1973	3.61	3.51	3.56

Table 2. *Heights of eye at observations.*

Year	Height of Eye (m)				
	A	B	C	D	E
1965	3.81	6.01	8.21	10.51	
1968	3.72	5.92	8.12	10.42	15.67
1970	3.70	5.90	8.10	10.40	15.60
1972	3.88	6.08	8.28	10.58	15.83
1973	3.99	6.19	8.39	10.69	15.94

測につき1回のみ行った。眼高差測定は同一個所で正逆それぞれ5回測定し器差修正を行った後その平均値をもってその個所の測定値とした。水平線不良のとき，また眼高差測定器の取扱い不慣れと思われる観測初期のもの，荒天のため船体の動揺烈しく眼高の変化著しいとき（うねり階級3以上），また，北洋における，さけ・ます流し網監視のための漂流中のものを除き，1965年は 70×4，1968年は 27×5，1970年は 37×5，1972年は 44×5，1973年は 8×5（うち2を除く）計 858 を観測資料とした。

観 測 結 果

1965, 1968, 1970 年に測定した各測点における眼高差 δ_0 より $\Delta a_0 = 1.926 - \delta_0/\sqrt{H}$ によって Δa を求め毎観測のこれらの各測点の平均値 $\overline{\Delta a_0}$ を求めた。$\overline{\Delta a_0}$ の値134を三つの群に分けて Figs. 1, 2 に示した。

$\overline{\Delta a_0} < 0.18$ +

$0.18 < \overline{\Delta a_0} < 0.38$ ●

$0.38 < \overline{\Delta a_0}$ △

眼 高 差 の 計 算

眼高差は光の屈折の法則よりつぎの式で表わせる[1,2]。

$$tg\,\delta = \sqrt{\frac{2H}{r_0} + 2(n - n_0)} \qquad (1)$$

H： 眼　高

r_0： 地球の半径

n, n_0： 眼高および海面直上における空気の屈折率

眼高差の測定値は7分 (minute of arc)，すなわち 2×10^{-3} rad. 以下であるから $tg\,\delta \fallingdotseq \delta$ とおける。屈折率 n と気圧 p，水蒸気圧 e，気温 T との間の関係は Brocks (1954)[2] によればつぎの式で表わせる。

$$(n-1)\times10^6 = a_1\frac{p}{T} - a_2\frac{e}{T} \qquad (2)$$

係数の a_1, a_2 は光の波長の関数である。値は研究者によって若干の相違があるが，気温を °k で，気圧を mb で表わすとき Na-D line (λ 5893Å) に対しそれぞれ 78.8～79.5 および 8.7～12.4 である。本稿においては一般に気象学において用いられている $a_1=79$, $a_2=10$ を採用した。重力加速度を一定とするとき静力学の式および大気の状態方程式を用いてつぎの式で表わせる。

$$\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial H} = -\frac{g}{RT} \qquad (3)$$

g： 重力加速度　　R： 乾燥空気の気体常数

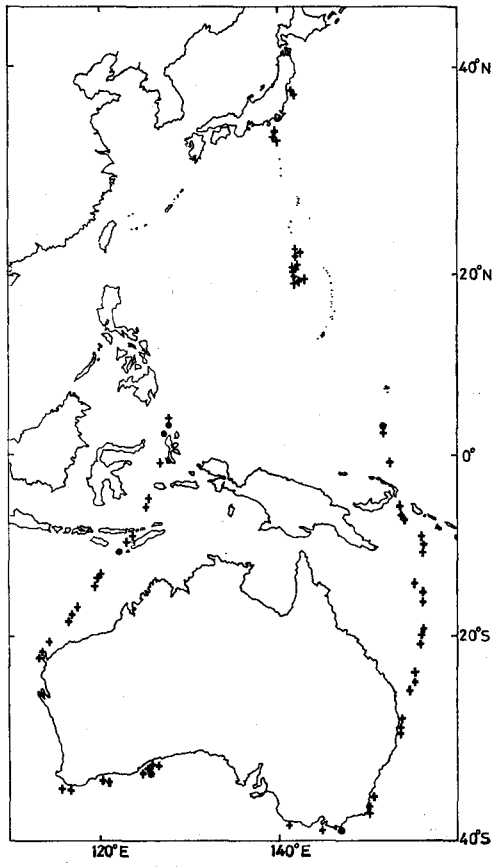

Fig. 1. Distribution of Δa, on cruise 16 of the Oshoro Maru.

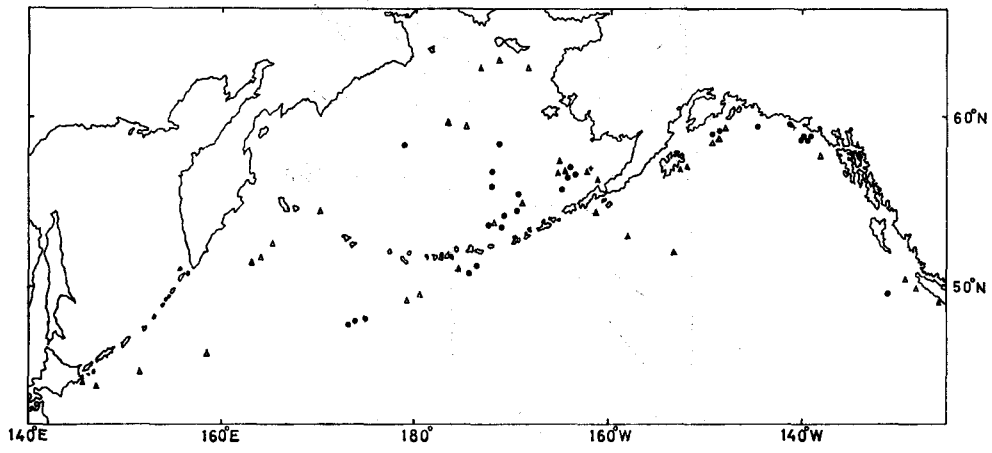

Fig. 2. Distribution of Δa, on cruises 28 and 37 of the Oshoro Maru.

眼高および海面直上の屈折率の差 $n-n_0$ は (2), (3) 式より[4]

$$n-n_0 \fallingdotseq -a_1 \frac{p}{T^2}\left(\frac{g}{R}+\frac{dT}{dH}\right)\cdot H\times 10^{-6} \tag{4}$$

(4) 式を (1) 式に代入すれば

$$\delta = \sqrt{\frac{2H}{r_0}\left[1-r_0 a_1 \frac{p}{T^2}\left(\frac{g}{R}+\frac{dT}{dH}\right)\times 10^{-6}\right]} \tag{5}$$

$a_1=79°\mathrm{Kmb}^{-1}$, $r_0=6.37\times 10^6\mathrm{m}$, $g/R=0.0342°\mathrm{km}^{-1}$ を代入し δ を分 (minute of arc) で表わせば

$$\delta = 1.926\sqrt{H\left[1-503.23\frac{p}{T^2}\left(0.0342+\frac{dT}{dH}\right)\right]} \tag{6}$$

上式において $503.23p/T^2$ $(0.0342+dT/dH)$ は測地学において定義される光線の屈折常数 $k=\frac{r}{n}\left(\frac{dn}{dH}\right)$ [r: r_0+H, n: 空気の屈折率] に他ならない。したがって眼高差は

$$\delta = 1.926\sqrt{H(1-k)} \tag{7}$$

によって表わせる。いま眼高差を $\delta=a\sqrt{H}$ として表わせば，光による屈折のないときの眼高差 $\delta=1.926\sqrt{H}$ との差は地上気差であって $1.926-a=\Delta a$ はその係数でつぎの式で表わせる。

$$\Delta a = 1.926(1-\sqrt{1-k}) \tag{8}$$

Δa は p/T^2, dT/dH の関数であるから，これを p/T^2 について展開すれば $\Delta a=A(p/T^2)^2+B(p/T^2)$ とおける。第三次以降を無視することによって生ずる誤差は眼高差読取精度 $0.1/\sqrt{n}=0'.032$, $0.05/\sqrt{n}=0'.016$ $(n=10)$ 以下である。海面近くの大気の温度分布が対数法則に従うとき，温度傾斜は $dT/dH=\Gamma\Delta/H$ で表わせる。ここで Γ は混合係数。dT/dH が Δ/H と一次関係にあれば係数 A, B は $A=\alpha(\Delta/H)^2+\beta(\Delta/H)+\phi$, $B=\beta'(\Delta/H)+\phi'$ となる。1965, 1968, 1970 年の観測資料 600 より最小二乗法により係数 $\alpha, \beta, \beta', \phi, \phi'$ を求めつぎの実験式を得た。

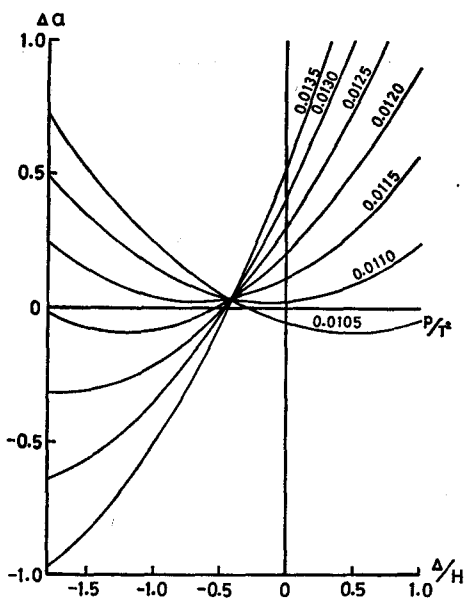

Fig. 3. Curves of Δa against p/T^2 and Δ/H.

$$\Delta a = \frac{p}{T^2}\left[1435.55\frac{p}{T^2}\left(\frac{\Delta}{H}\right)^2+\left(36968.7\frac{p}{T^2}-402.312\right)\frac{\Delta}{H}+15051.3\frac{p}{T^2}-163.792\right] \quad (9)$$

Δa と p/T^2, Δ/H の関係を Fig. 3 に示した。(9) 式により 600 の資料より計算値 δ_c を求め観測眼高差 δ_0 との残差の平均値 0.011 および標準偏差 0.324 を求めた。

(9) 式と $\delta = 1.776\sqrt{H} - 0.2\Delta$ (水路部常用式) との比較

(9) 式と $\delta = 1.776\sqrt{H} - 0.2\Delta$ 式より 1972 年の北洋および 1973 年の日本海の観測資料より計算眼高差 δ_c と観測眼高差 δ_0 との差 $\delta_0 - \delta_c = \Delta\delta$ を求めてその平均値 $\overline{\Delta\delta}$ 及び分散 σ を求め Tables 3, 4 に示した。

Table 3. *Comparison of the results of estimation of the dips by two formulas* H *and* S (*in the year 1972*).

Formula	$\overline{\Delta\delta}$	σ	$\overline{p/T^2}$	$\overline{\Delta e}$	$\overline{\Delta}$	$\overline{\Delta/H}$	Nos of Data
H	−0.175	0.439	0.0128	0.909	0.286	0.0423	220
S	−0.875	0.363					

Table 4. *Comparison of the results of estimation of the dips by two formulas* H *and* S (*in the year 1973*).

Formula	$\overline{\Delta\delta}$	σ	$\overline{p/T^2}$	$\overline{\Delta e}$	$\overline{\Delta}$	$\overline{\Delta/H}$	Nos of Data
H	0.271	0.295	0.0120	−5.517	−0.737	−0.1022	38
S	−0.230	0.280					

上表において H は (8) 式, S は $\delta = 1.776\sqrt{H} - 0.2\Delta$ を示す。

考　　察

Tables 3, 4 の $\overline{\Delta\delta}$ の値よりみて北洋においては H 式の精度は S 式よりも格段に良好で, 日本海においては H 式と S 式とは同程度と考える。S 式における温度差係数 0.2 は北洋においては, はるかに小さく, 日本海においては大きいことを示すものである。著者らの行った実験によれば, 温度差係数は北洋に対しては 0.66 (Δ の平均 0.29°C), 日本海に対しては 0.15 (Δ の平均 −0.74°C) であった。従来使われている幾多の実験式の $\delta = a\sqrt{H} - b\Delta$ においては大気が標準状態にあるときの係数 a を定め, δ の変化は Δ に正比例するものとして Δ に対する補正項を加えているが, 係数 b の各国の値は大小まことにさまざまである。δ は $\sqrt{1-k}$ に比例するので, これを展開するとき k の値が大きいときは二次以降を無視することができなくなり, δ と Δ が一次関係にあるとして温度差係数を与える実験式は誤差が大きくなり使えなくなる。k の値は著者らが測定した眼高差の測定値より推算すれば, 南方海域では平均 0.05, 北方海域では 0.38 となった。H 式においては, 1973 年の $\overline{\Delta\delta}$ の値は 1972 年より大きい。これは実験式の誘導にあたり, 一般に水蒸気圧の影響は僅かであるとして無視したことに因ると思われ, Δd と $\Delta e (= e - e_0)$ (e, e_0: 眼高及び海面直上における水蒸気圧) についてその関係を求め Fig. 4 に示した。Δe を求めるのに, e_0 の測定は不可能のため Sverdrup *et al* (1946)[3] の式によった。Δd と Δe の相関係数を求め $\gamma = -0.259$ を得た。γ の検定にあたり, 帰無仮説を設け t 検定を行い 0.01 の危険率をもって帰無仮説は棄却され相関は有意であった。したがって Δd と Δe

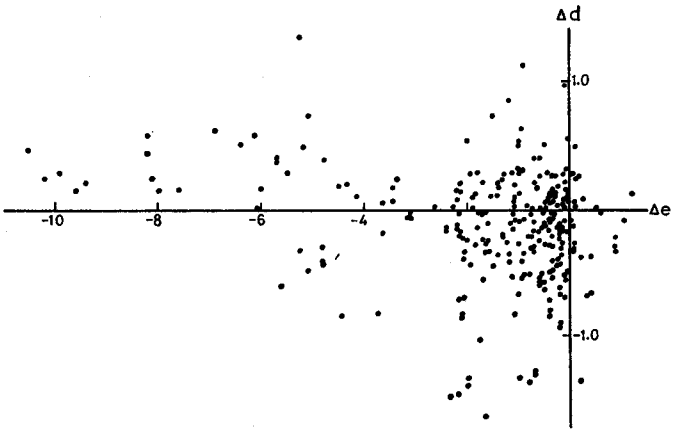

Fig. 4. Relation between Δd and Δe.

の両者の間には弱い相関が認められた。$-\Delta e$ の絶対値の大きい海域は小さい海域よりも水蒸気圧による影響は大きいことを示すもので，このことは理論的にも合致する。眼高差を推定するにあたり，その正確を期するためには水蒸気圧の影響を考慮に入れるべきであって，これらの点を含めその他の要因についてもなお研究を要すると思われるのでさらに稿をあらためて近く発表したい。

文　　献

1) Hasse, L. (1960). Über den Zusammenhang der Kimmtiefe mit Meteorologischen Größen. *Dtsch. Hydrogr. Z.* **13**, 183–184.
2) Takenouti, Y., Hyuga, M. and Sakamoto, Y. (1970). Measurement of vertical air temperature gradients with dipmeter. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, **26**, 226–232.
3) Roll, H.U. (1965). *Physics of the Marine Atmosphere*. Academic Press, New York and London, 426 p.
4) Freiesleben, H.C. (1951). Die Strahlenbrechung in geringer Höhe über Wasserflächen. *Dtsch. Hydrogr. Z.* **4**, 121–123.