



Title	眼高差について(IV)
Author(s)	日向, 政明; HYUGA, Masaaki; 坂本, 有隣 他
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 25(2), 147-153
Issue Date	1974-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/23521
Type	departmental bulletin paper
File Information	25(2)_P147-153.pdf



眼高差について (IV)

日向 政明* 坂本 有隣*

Investigation into the Dip of the Sea Horizon (IV)

Masaaki HYUGA* and Yurin SAKAMOTO*

Abstract

The dip of the sea horizon is a function of variables, height of eye, air temperature, air pressure, vapour pressure, vertical temperature and vapour pressure differences between the observer's eye and the horizon. The purpose of this study is to clarify how the respective variables contribute to the dip.

Theoretically and empirically based on the observations made during the cruises of the T.V. Oshoro-Maru of Hokkaido University in the years of 1965, 1968, 1970, 1972, 1973, the authors made an analysis as to what extent the whole variables of meteorological factors, except for the height of eye (H), occupy the amount of the dip; and they have found that the effect of T and p are predominant, the former being about 54% and the latter about 30% respectively. The effect of e is almost negligible. Hereupon, T , p , e , ΔT , Δe denote air temperature, air pressure, vapour pressure, temperature difference, vapour pressure difference, respectively. The figures above are given for the whole data covering both northern and southern sea areas including the Japan Sea. Comparing both sea areas, northern and southern, there is a clear difference between them as shown below.

Variables	Northern Sea Area	Southern Sea Area
T	55.8%	41.01%
p	29.12	31.33
ΔT	12.7	6.37
Δe	0.23	20.95

Furthermore, the authors have clarified as to what extent the observational variances of meteorological variables as factors affecting the dip of the sea horizon contribute to the varying amount of the dip. Thus, they have found that the variance of ΔT is most predominant occupying 72% of all the others; then succeed Δe 22.5%, T 4.2%, p 0.8%, averages of the whole data including both northern and southern sea areas.

But there is likewise, as in the above, a clear difference between both areas as shown below.

Variables	Northern Sea Area	Southern Sea Area
T	6.89%	2.20%
p	1.75	0.57
ΔT	75.87	67.04
Δe	15.26	29.93

* 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)

As can be seen in this table, the dip varies most with ΔT and secondly with Δe . Therefore, we must keep in mind that though the effect of vapour pressure has hitherto been neglected as being small, it would rather be expedient to take it into account to estimate the dip.

緒 言

眼高差は視水平より測点にいたる空気の光学的濃度によりて生ずる屈折率の鉛直傾度により変動するものであるが、古くより気温と水温の差によって起こることが経験的に知られている。オーストリアの Karl Koss は 1897~1898 年に紅海において、また 1899 年に Verudella の観測によりこのことを示した。しかし、眼高差の変動の理論的根拠を示していない。著者らは眼高差に及ぼす各変数がそれぞれ眼高差に寄与する度合、またそれらの変数の変動量が眼高差の変化に寄与する度合について、北大練習船おしよ丸の北洋航海、南方航海および日本海の航海に乗船して得た観測資料に基づき理論的解析を実験的に検証することを試みた。

眼高差理論式

空気中における光の屈折は密度を異にする気層を通過するとき起こる。屈折率の均一な曲面が地球と同心球面をなすとすれば $n r \sin z = k$ で k は一つの光路については一定の常数である。 n は屈折率、 r は同心球面の半径、 z は光路の各点における天頂距離で、光線が海面に接する点においては $z = 90^\circ$ 、 r は地球半径 r_0 となり視水平と測点との間における光線の屈折に関してつぎの式がなりたつ。

$$n_0 r_0 = n r \sin z \tag{1}$$

$z = 90^\circ - \delta$ 、 δ は測点における眼高差で、つぎの式で表わせる。

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{n r}{n_0 r_0}\right)^2 - 1} \tag{2}$$

(2)式は眼高差を表わす理論式で、 δ を分 (minute of angle) で表わすとき

$$\delta = 3437.8 \sqrt{\frac{2H}{r_0} - 2(n - n_0)} \tag{3}$$

眼高差は同じ鉛直面上の測点および海面直上の屈折率の差 $n - n_0$ によって変化する。 n は気圧 p 、気温 T 、水蒸気圧 e を変数とする関数で $n - n_0$ はつぎの式で求められる。

$$n - n_0 = a_1 \frac{p}{T^2} \frac{g}{R} \left(1 - 0.377 \frac{e}{p}\right) H + \frac{a_1 p - a_2 e}{T^2} \Delta T + a_2 \frac{\Delta e}{T} \tag{4}$$

(4)と(3)式より

$$\delta = 3437.8 \sqrt{2 \left[\frac{H}{r_0} - a_1 \frac{p}{T^2} \frac{g}{R} \left(1 - 0.377 \frac{e}{p}\right) H - \frac{a_1 p - a_2 e}{T^2} \Delta T - \frac{a_2 \Delta e}{T} \right]} \tag{5}$$

(5)式は眼高 H (m)、気圧 p (mb)、気温 T (°K)、水蒸気圧 e (mb) を知り、 δ を与える式で r_0 は地球半径 (6.371×10^6 m)、 g は地球重力加速度、 R は乾燥空気の気体常数で $g/R = 0.03416 \text{ }^\circ\text{K m}^{-1}$ 、 $\Delta T = T - T_0$ (T, T_0 : 眼高及び海面直上の気温)、 $\Delta e = e - e_0$ (e, e_0 : 眼高および海面直上の水蒸気圧)、 $a_1 = 79 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K mb}^{-1}$ 、 $a_2 = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{K mb}^{-1}$ である。

実 験

観測の季節及び海域，観測方法については本誌 Vol. 24, No. 4 (1974) に詳細を記した。

結 果

眼高差に寄与する変数とそれぞれの寄与の割合

変数 $H, p, T, \Delta T, Ae$ のうち ΔT については T_0 は観測により求めることは不可能のため，眼高差の観測値 δ_0 より推算する方法を採り，計算方法はつぎのようにした。 e_0 は Sverdrup *et al* の公式により，また e は Sprung の公式により求めて Ae を求めた。眼高差 δ ，気圧 p ，気温 T は観測値を，眼高 H は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求めた。上記の変数 H, p, T, e, Ae と眼高差の観測値 δ_0 を (5) 式に代入して T_0 を計算し，さらに，その計算値 T_0 より水上飽和蒸気圧 e_0 を求め，あらためて Ae を求め他の変数 $H, p, T, e, \Delta T$ と共に再び (5) 式に代入して眼高差の計算値 δ_e を求め δ_0 と δ_e の差が $0.0001'$ 以下になるまで同じ方法を繰り返すことによって T_0 を決定した。このようにして求めた $\Delta T, Ae$ に対して δ_e はただ一つ定まる。

$H, p, T, e, \Delta T, Ae$ をそれぞれ独立変数として眼高差 δ に対して各変数が寄与する割合をみるためにつぎの方法をとった。(5) 式において， δ に関する各変数の偏微分係数と各変数の観測値の平均との積について比較した。計算には 1965, 1968, 1970, 1972, 1973 年にわたる 186 回の観測のうち D deck の資料を用いた。

1) 各変数の平均値はつぎのとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{北方海域: } \bar{\delta}_0 = 4.9776 \text{ min. (angle), } \bar{H} = 10.464 \text{ m, } \bar{p} = 1016.457 \text{ mb, } \bar{T} = 9.0287^\circ \text{C} \\ \quad \bar{e} = 10.117 \text{ mb, } \overline{\Delta T} = 0.2777^\circ \text{C, } \overline{Ae} = -1.434 \text{ mb} \\ \text{南方海域: } \bar{\delta}_0 = 6.0779 \text{ min. (angle), } \bar{H} = 10.511 \text{ m, } \bar{p} = 1011.496 \text{ mb, } \bar{T} = 24.230^\circ \text{C} \\ \quad \bar{e} = 26.111 \text{ mb, } \overline{\Delta T} = -0.0608^\circ \text{C, } \overline{Ae} = -5.36 \text{ mb} \\ \text{日本海域: } \bar{\delta}_0 = 5.6765 \text{ min. (angle), } \bar{H} = 10.693 \text{ m, } \bar{p} = 1021.163 \text{ mb, } \bar{T} = 10.525^\circ \text{C} \\ \quad \bar{e} = 7.483 \text{ mb, } \overline{\Delta T} = 0.127^\circ \text{C, } \overline{Ae} = -5.173 \text{ mb} \\ \text{南北両海域: } \bar{\delta}_0 = 5.4217 \text{ min. (angle), } \bar{H} = 10.492 \text{ m, } \bar{p} = 1014.792 \text{ mb, } \bar{T} = 14.813^\circ \text{C} \\ \text{および日本海 } \bar{e} = 16.023 \text{ mb, } \overline{\Delta T} = 0.1444^\circ \text{C, } \overline{Ae} = -3.073 \text{ mb} \end{array} \right\} (6)$$

2) 海域別各変数の偏微分係数の値はつぎのとおりである。

ただし，偏微分係数の計算はつぎの式により変数は前掲の平均値を用いた。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \delta}{\partial H} = 3437.8^2 \left[\frac{1}{r_0} - a_1 \frac{p}{T^2} \frac{g}{R} \left(1 - 0.377 \frac{e}{p} \right) \right] / \delta_0, \quad \frac{\partial \delta}{\partial p} = -3437.8^2 a_1 \left(\frac{g}{R} H + \Delta T \right) / \delta_0 T^2, \\ \frac{\partial \delta}{\partial T} = 3437.8^2 \left[2a_1 p \frac{g}{R} \left(1 - 0.377 \frac{e}{p} \right) H + 2(a_1 p - a_2 e) \Delta T + a_2 Ae T \right] / \delta_0 T^2, \\ \frac{\partial \delta}{\partial e} = 3437.8^2 \left(0.377 a_1 \frac{g}{R} H + a_2 \Delta T \right) / \delta_0 T^2, \quad \frac{\partial \delta}{\partial \Delta T} = -3437.8^2 (a_1 p - a_2 e) / \delta_0 T^2, \\ \frac{\partial \delta}{\partial Ae} = -3437.8^2 a_2 / \delta_0 T \end{array} \right\} (7)$$

(7)式によって計算した偏微分係数の値を表1に示した。

Table 1. Differential coefficients of variables.

Variable	Northern Sea Area	Southern Sea Area	Japan Sea Area	Whole Sea Area
H	0.29120	0.24578	0.25570	0.27059
p	-0.00149	-0.00052	-0.00101	-0.00104
T	0.01032	0.00231	0.00589	0.00651
e	0.00040	0.00022	0.00031	0.00032
ΔT	-2.39128	-1.75116	-2.08510	-2.10309
Δe	-0.08414	-0.06539	-0.07339	-0.07570

各変数の偏微分係数と変数の平均値との積によってそれぞれの変数が眼高差へ寄与する度合の比を表2に示した。

Table 2. Contribution ratio of variables to the dip.

1. Northern Sea Area				2. Southern Sea Area			
Variable x_i	$\partial\delta/\partial x_i \times \bar{x}_i$	Ratio		Variable x_i	$\partial\delta/\partial x_i \times \bar{x}_i$	Ratio	
H	3.04719	0.3685	*	H	2.58336	0.6070	*
p	-1.52077	0.1839	0.2912	p	-0.5240	0.1231	0.3133
T	2.91279	0.3522	0.5578	T	0.68591	0.1612	0.4101
e	0.00405	0.0005	0.0008	e	0.00579	0.0014	0.0034
ΔT	-0.66404	0.0803	0.1271	ΔT	0.10647	0.0250	0.0637
Δe	0.12066	0.0146	0.0231	Δe	0.35047	0.0823	0.2095

3. Japan Sea Area				4. Whole Sea Areas			
Variable x_i	$\partial\delta/\partial x_i \times \bar{x}_i$	Ratio		Variable x_i	$\partial\delta/\partial x_i \times \bar{x}_i$	Ratio	
H	2.73404	0.4495	*	H	2.8390	0.4497	*
p	-1.02814	0.1691	0.3071	p	-1.05870	0.1677	0.3048
T	1.67196	0.2749	0.4995	T	1.87458	0.2970	0.5396
e	0.00235	0.0004	0.0007	e	0.00510	0.0008	0.0015
ΔT	-0.26559	0.0437	0.0793	ΔT	-0.30284	0.0480	0.0872
Δe	0.37962	0.0624	0.1134	Δe	0.23261	0.0368	0.0669

* Asterisk shows the ratio of variables except for H.

各変数の変動が眼高差に与える変化の度合

186回の観測によって得られた変数 H, p, T, e, ΔT , Δe の資料について海域別にそれぞれの最大値および最小値より変数の実際の変動範囲を求めてこれに前掲の海域別の各偏微分係数を乗じその積について各変数の変動がそれぞれ眼高差に与える寄与の比を表3に示した。

ΔT と ΔT_w との関係

海面直上の気温 T_0 は太陽からの放射、水から空気へ出て行く顕熱、潜熱による分子熱伝導また風の影響等によるが、いま測点における気温 T との差 $\Delta T = T - T_0$ と気温 T と水温との差 $\Delta T = T - T_w$ との関係を D deck について 186 回の観測資料より求めて図1に示し回帰直線および相関係数ならびに信頼区間を求めた。

Table 3. *Varying ratios of the dip due to the variance of variables.*

1. Northern Sea Area

Variable	Max. value	Min. value	Range of value	Varying amount of dip	Ratio	
H	10.63	10.20	0.43	0.12521	0.0413	*
p	1033.5	999.5	34.0	-0.05087	0.0168	0.0175
T	22.0	2.6	19.4	0.20025	0.0661	0.0689
e	22.88	6.61	16.27	0.00651	0.0021	0.0023
ΔT	0.736	-0.186	0.922	-2.20476	0.7274	0.7587
Δe	0.12	-5.15	5.27	-0.44342	0.1463	0.1526

2. Southern Sea Area

Variable	Max. value	Min. value	Range of value	Varying amount of dip	Ratio	
H	10.80	10.29	0.51	0.12535	0.0483	*
p	1028.5	1001.5	27.0	-0.0140	0.0054	0.0057
T	30.1	6.5	23.6	0.05444	0.0210	0.0220
e	37.77	9.02	28.75	0.00638	0.0025	0.0026
ΔT	0.224	-0.721	0.945	-1.65484	0.6380	0.6704
Δe	-1.14	-12.44	11.3	-0.73886	0.2848	0.2993

3. Japan Sea Area

Variable	Max. value	Min. value	Range of value	Varying amount of dip	Ratio	
H	10.74	10.64	0.1	0.02557	0.0138	*
p	1025.3	1017.9	7.4	-0.00745	0.004	0.0041
T	13.7	8.3	5.4	0.03183	0.0172	0.0174
e	11.48	6.03	5.45	0.00171	0.0009	0.0009
ΔT	0.365	-0.167	0.532	-1.10927	0.5998	0.6082
Δe	-0.10	-9.28	9.18	-0.67373	0.3643	0.3694

4. Whole Sea Areas

Variable	Max. value	Min. value	Range of value	Varying amount of dip	Ratio	
H	10.80	10.20	0.6	0.16235	0.0369	*
p	1033.5	999.5	34.0	-0.03547	0.0081	0.0084
T	30.1	2.6	27.5	0.17901	0.0407	0.0423
e	22.88	6.03	16.85	0.00537	0.0012	0.0013
ΔT	0.736	-0.721	1.457	-3.06420	0.6969	0.7235
Δe	0.12	-12.44	12.56	-0.95079	0.2162	0.2245

* Asterisk shows the ratio of variables except for H.

考 察

眼高差に変化を及ぼす要因である H , p , T , e , ΔT , Δe の各変数についてそれぞれが眼高差に寄与する割合について表 2, 3 に示した。表 2 は観測したすべての年における D deck に対し各変数が眼高差に寄与する割合を示したもので変数 H は全体の約 45% を占めている。いま p , T , e , Δe の気象要素についての各変数が占める眼高差への寄与の割合をみると、気温 T が約 54%, 気圧 p が約

30%, 気温, 水温差 $\Delta T = T - T_w$ が約 9%, 水蒸気圧差 $\Delta e = e - e_0$ が約 7%, 水蒸気圧が約 1.5% を占めている。これらの大きさは、それぞれの要素の絶対値の大きさに比例し気温 T のべき数に反比例する。いまこれを海域別に比較すると、北方, 南方の海域においては、気圧についていづれも約 30% で海域別による差はわずかである。気温 T は北方海域においては平均気温 9.03°C , 南方海域においては 24.23°C で屈折常数への影響も前者は後者よりもはるかに大である。したがって、北方海域は約 56% で南方海域よりも 15% も高く気象要素として眼高差への寄与の度合は最も大きい。水蒸気圧による影響は小さくほとんど無視してさしつかえない。

水蒸気圧差 $\Delta e = e - e_0$ については前掲の通り南方海域においては北方海域よりも 3 倍も大きく影響も大で前者においては約 21%, 後者においては 2.3% に過ぎない。つきに、眼高差へ影響を及ぼす $H, p, T, e, \Delta T, \Delta e$ の変動がそれぞれ眼高差へ及ぼす影響の比を求め、緯度の変化に伴う気象, 海象による眼高差の変化について考察した。表 3 についてみれば、眼高差の変化に影響するものは $\Delta T = T - T_0$ で最も大きい。これは主として北方海域と南方海域の気温の相違によるものであり、また (6) 式においてみられるように ΔT の絶対値は南方海域, 日本海においては小さく北方の海域では大

きい。これは大気の安定度によるもので、南方海域の気層の不安定な海域においては水と空気の熱交換が大であって対流および乱流による空気の混合が行われるため T と T_0 の差は小さく大気の温度傾斜は小さくなり光線の屈折は小さい。北方海域では、最下層の空気は水温により冷却され、 T と T_0 の差は大となる。したがって、北方海域では大気の温度傾斜が大となり光線の屈折が大きくなる。日本海を含めた全海域表 3 の (4) についてみると、大気の状態は前掲に示すように $T 14.8^\circ\text{C}$, $p 1014.8 \text{ mb}$ で大体標準大気の状態に近く ΔT の影響が 72.35% であることよりみれば一般に ΔT による眼高差への影響は平均的には 70% 程度とみてさしつかえないものと思われる。水蒸気圧による影響も従来一般には僅小として無視されてきたが、表 3 に示すように決して無視できる値ではなく、殊に南方海域においては水蒸気圧の変動による眼高差への影響は大きく 30% に及ぶ。眼高差の推定に必要な ΔT は観測によってこれを正確に求めることはまことに困難で、まして洋上における航海者にとっては不可能といわざるを得ない。よって海面直上の気温 T_0 と密接な関係をもつ海の表面水温を測定している。表面水温の測定には採水バケツ法の場合は水面から数 10 cm までの水の混合したものの値になっているし、インテイク法で海面下数メートルの水温をとっていることがありうる。眼高差推定の問題と

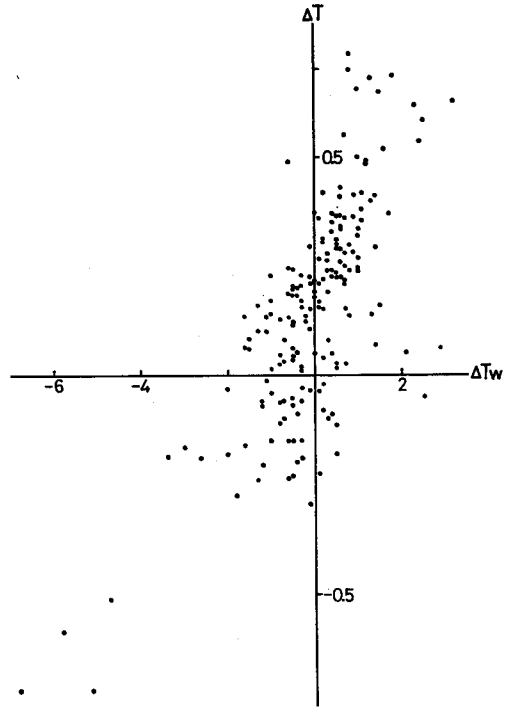


Fig. 1. Showing the relation ΔT and the temperature-difference of air and sea ΔT_w .

回帰直線 : $\Delta T = 0.09884 \Delta T_w + 0.14214$
 相関係数 : $r = 0.5688$
 信頼区間 : 95% 0.4628 ~ 0.6588
 99% 0.4263 ~ 0.6838

して最も厄介なことは、表皮水温の推定である。Saunders, P. M. によれば、表皮水温と表面水温では 0.2°C から 1°C までの温度差が生じうるとしている。著者らが行なった実験によれば、つぎの結果を得た。

	Northern Sea Area	Southern Sea Area	Japan Sea Area
T_0	8.751°C	24.291°C	10.652°C
T_w	8.702	24.747	11.338
$T_0 - T_w$	0.049	-0.456	-0.686

上掲においてみられるように、 T_0 が表皮水温を代表すると考えれば、亜寒帯の北洋海域においては表皮水温 T_0 はバケツ採水法による水温 T_w より高くその差は 0.049°C であり、亜熱帯、熱帯を含む豪州一周の南方航海においては T_0 は T_w より低くその差は 0.456°C で、さらに日本海においては同様に表皮水温は表面水温より低くその差は 0.686°C に達した。三者おのおの観測の時期が異なるので同一の論とはなりえないとしても、亜寒帯の北洋のごとき $dt/dH > 0$ の海域においては表皮水温と表面水温の差は小さく、南方海域、日本海のごとき $dt/dH < 0$ の海域においては表皮水温は表面水温よりも大であった。しかし、海面における境界層には幾多の困難な問題があり、大気の最下層、海面の層流境界層の構造についてはなお将来共研究を要する課題である。

文 献

- 1) Brocks, K. (1954). Eine räumlich integrierende optische Methode für die Messung vertikaler Temperatur- und Wasserdampfgradienten in der untersten Atmosphäre. *Arch. Meteorol. Geophys. u. Biokl. A* 6, 370-402.
- 2) Roll, H.U. (1965). *Physics of the Marine Atmosphere*. 426p. Academic Press, New York and London.
- 3) Takenouti, Y., Hyuga, M. and Sakamoto, Y. (1970). Measurements of Vertical Air Temperature Gradients with Dipmeter. *Jour. Oceanogr. Soc. Japan* 26, 226-232.
- 4) 淵 秀隆他 (1970). 海洋物理 I. 389p. 東海大学出版会, 東京.
- 5) 日向政明・坂本有隣 (1974). 眼高差について(II). 北大水産彙報 24, 150-159.