

水位計測に使用される傾斜板水面境界部 特徴の幾何学的・光学的理論解析

The Geometrical and Optical Analyses concerning the Feature of the Water Surface Interface of an Inclined Plate which is used the Water Level Measuring

高木陽市*, 森英雄**, 辻川秋雄***, 齋藤健***, 軽部勝敏****

* 日立プロセスコンピュータエンジニアリング(株) / 茨城県日立市大みか町5丁目2-1

** 山梨大学教授 工学博士 / 山梨県甲府市武田4-3-11

*** (株)日立製作所 / 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地

**** (株) 拓和 / 東京都千代田区内神田1丁目4番地15

Yoichi TAKAGI*, Hideo MORI**, Akio TUJIKAWA***, Takeshi SAITO***, Katutoshi Karube****

*Hitachi Process Computer Engineering, Inc., / 5-2-1, Omika-cho, Hitachi-shi, 319-1293, Japan

**Yamanashi University of Science, / 4-3-11, Takeda, Kofu-shi, 400-8511, Japan

***Hitachi, Ltd. / 4-6, Kanda Surugadai, Chiyodaku, Tokyo, 101-8010, Japan

****Takuwa, Ltd. / 1-4-15, Uchi kanda, Chiyodaku, Tokyo, 101-0047, Japan

Abstract

This paper reports study results concerning a non-contact type water level measuring method using image processing. We have already reported that an inclined plate set in liquid was effective for recognizing the liquid surface using image processing. In this paper, we analyze geometrical and optical features of an image of the inclined plate near the water surface and prove that the inclined plate was effective for recognizing the liquid surface using image processing.

Key Words : Water Level Measuring, Image Processing, Slant Plate

1 はじめに

従来、河川・湖・海等の水位計測は、機械式・電気式の水位計 (Fig.1) が使用されていたが、計測機器が直接流水に接するために保守管理が容易でなく、非接触式の水位計測方法の開発が強く要請されていた。そこで、筆者等は、液体中に置いた傾斜板の画像 (Fig.2 参照) の輪郭が、液面境界部で屈曲するという原理を使用し、傾斜板を液中に設置して液面計測する方法^{1, 2, 7)}を提案した。傾斜板を使用した水位計測が、ダムや河川に適用され、大きな落差の水位を1台のカメラで対応しており、水位に合わせてカメラ設置角を変えながら画像を取り込む方法をとっている。カメラ向きにより傾斜板水面境界部の

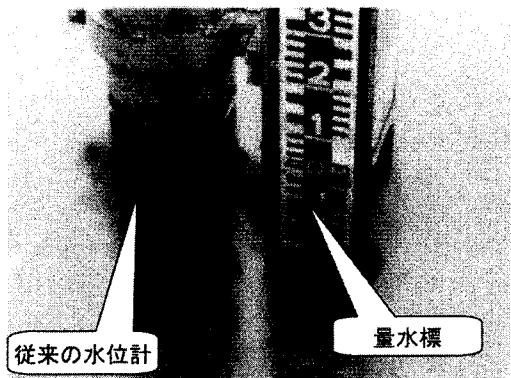


Fig.1 Image of a vertically water meter set

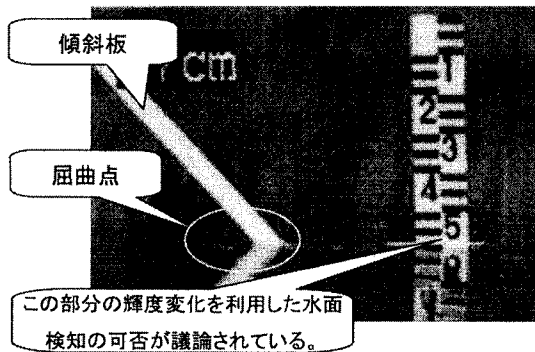


Fig.2 Image of an inclined plate (left) that is effective for detecting a water surface

見え方が異なり、傾斜板の水面境界部の幾何学的・光学的な特徴は、まだ、明らかにされておらず解決すべき課題であった。本稿では、傾斜板の水面境界部の幾何学的・光学的な特徴について理論解析を行ったので以下報告する。

2 傾斜板を用いた水位計測と水面境界

画像による水位計測では、①カメラ画像の画像処理装置への取込②入力画像の解析による水面検知③画像上の水面位置から水位計算④結果の出力、を繰り返すことによりリアルタイムに連続的に水位を計測する。水面検知のために傾斜板を使用するが、傾斜板の水面境界部の画像は、Fig.3 に示すように特徴ある構造をしている。その特徴を利用することにより画像による水面検知が可能になった。傾斜板の水面境界部の画像は、実像部 (A 部)、水表面の反射像部 (R 部)、水面下からの屈折像部 (D 部) 及び、反射像と屈折像の重なった部分 (R + D 部) の 4 種類の像からなる。これらの像の形状や輝度は、傾斜板やカメラの設置条件により変化する。これらの特性の検討は画像による水面検知の可否の検討や画像処理アルゴリズムの検討に必要である。

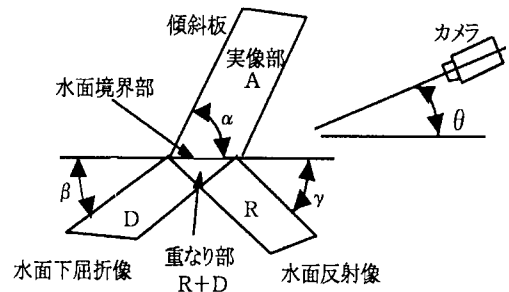


Fig.3 Structure of a water surface boundary image of the inclined plate

3 水面境界部画像の理論解析

3.1 目的と前提条件

画像による水位計測において、傾斜板やカメラ設置条件、画像処理アルゴリズム等の最適化を目的として、水面境界部画像の幾何学的・光学的特徴を下記条件で解析した。

- (1) 水面は、波浪がないものとする (一般に、波浪がない場合の水面認識の可否が議論となる)
- (2) 水及び空気の屈折率をそれぞれ、 $n_w = 1.33$ 、 $n_a = 1.0$ とした
- (3) 水面下の明るさは、太陽の高度等により変わり想定しにくいので、水表面からの水中経路長による減衰のみを考慮した

3.2 傾斜板画像の幾何学的特徴の解析

3.2.1 水面表面での傾斜板の反射像 (R 部) と特徴

傾斜板の反射像 (R 部) は、画像を取り込んだ時、実像 (A 部) と組み合わせて、「く」の字形、または、逆「く」の字形に見えることは、経験的にすぐ判る。Fig.4 は、傾斜板の反射像の光路を図解したものである。垂直な壁面に傾斜板 BADC が貼り付けられているものとし、実像部の 4 辺形 BADC の反射像の虚像が壁面上の 4 辺形 CDKL とすると、反射像虚像の 4 辺形 CDKL は、実像部の 4 辺形 CDAB と水面を対称軸とした対称形である ($\because \angle GEM = \angle AEJ = \angle JEK$ から $\triangle ADJ \equiv \triangle JDK$)。カメラは

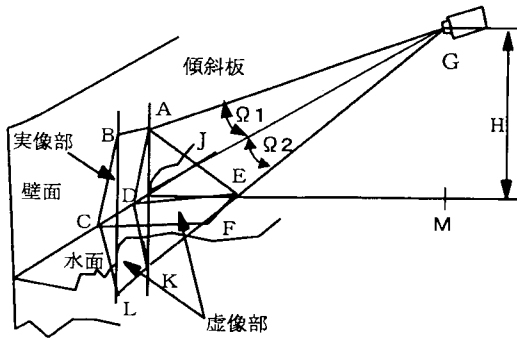


Fig.4 Geometrical analysis of the reflected image

水面の上方 (Fig.4における水面からHの所) に設置するので、カメラ画像上では、 $\Omega 1 \neq \Omega 2$ であるから、上下非対称に見える点に注目すべきである。この特徴は、高低差の大きな水位を計測する場合、カメラ取付角 θ の変化に伴い見え方が変わることの意味し、画像認識アルゴリズムの設計の際に考慮する必要がある。

3.2.2 水面下傾斜板からの屈折像

水面下傾斜板の屈折像は、Snellの法則により浮上がって見える。そのために、水面付近で傾斜板が屈曲して見える。傾斜板の屈折像を画像解析して水面を検知する場合には、この屈曲の度合いは大変重要であり、計測精度に影響するのである。以下、傾斜板の屈曲具合がカメラや傾斜板の設置条件によりどのように変化するかを解析する。屈折像の傾斜角 β は、傾斜板の設置角 α 、カメラの取付角 θ の関数として以下のようにして求める。Fig.5は傾斜板を真正面からみた図である。傾斜板の水面との交点をC、交点Cから取付面上水平に距離aだけ離れたところの水面境界線上の点をDとする。点Dから垂線を下ろして傾斜板との交点をBとする。水面下の傾斜板の浮上がって見える虚像をCKの方向にとる。CKとDBの交点をB'とする。Fig.5の幾何学的な関係から次式が得られる。

$$\tan \alpha = h/a, \tan \beta = c/a \quad (1)$$

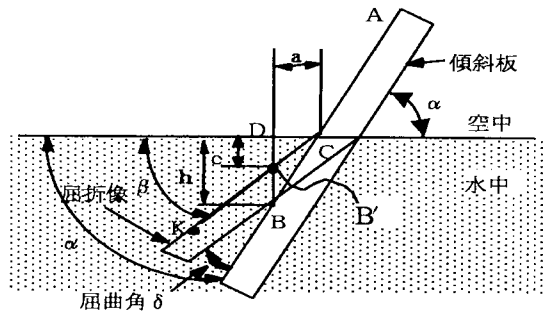


Fig.5 Front view of the inclined plate

Fig. 6は、点B, D, 及びカメラG点を含む垂直断面とする。水中の傾斜板の1点Bの光波は水面上

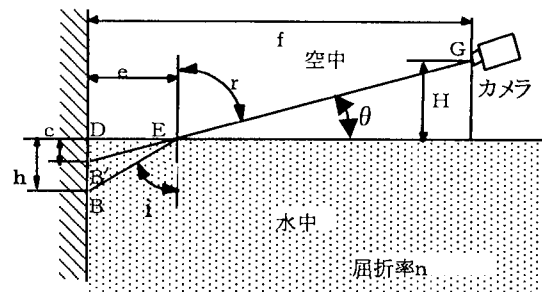


Fig.6 Vertical side including a camera and important point B of the inclined plate

の1点Eで屈折してカメラに届くものとする。点Eでの光波の入射角をi、屈折角をrとする。カメラは、水平面に対して θ だけ下向きに設置されているものとする。屈折角rとカメラ角 θ は、カメラ距離が十分大きい時には、概略以下の関係が成り立つ。

$$r = \pi/2 - \theta \quad (2)$$

水の空気に対する屈折率をnとすると、Snellの法則から入射角iと屈折角rの間には、以下の関係がある。

$$n \sin i = \sin r \quad (3)$$

$$i = \sin^{-1}(\sin r/n) \quad (4)$$

$$= \sin^{-1}(\sin(\pi/2 - \theta)/n)$$

Fig. 6 の幾何学的な関係から、

$$\tan i = e/h, \quad \tan \theta = c/e \quad (5)$$

傾斜板の屈折像の傾角 β は次のように表示できる。

$$\beta = \tan^{-1}(c/a) = \tan^{-1} \tan \theta \tan \alpha \tan i \quad (6)$$

屈折像の傾斜角 β は (4) 式と (6) 式から、傾斜板の取付角 α 、カメラ取付角 θ 、水の屈折率 n の関数として表示できる。

$$\beta = \tan^{-1}(\tan \theta \tan \alpha \tan(\sin^{-1}(\sin(\pi/2 - \theta)/n))) \quad (7)$$

傾斜板の取付角 α と上記傾斜板の屈折像の傾角 β の差が、傾斜板のカメラ画像上の屈曲角である。以後、屈曲角を δ で表示するものとする。すなわち、

$$\delta = \alpha - \beta \quad (8)$$

画像認識で水面検知する場合、傾斜板の屈曲を利用する時は、当然ながら、屈曲角 δ が大なるほど水面を認識しやすい。傾斜板取付角 α 、カメラ取付角 θ 、及び屈曲角 δ の関係は式 (7)、式 (8) から得られグラフ化すると Fig. 7 及び Fig. 8 のようになる。カメラ角度 θ を変えて、水槽中に設置した

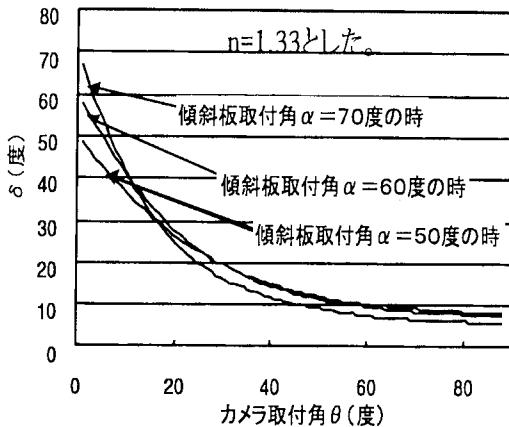


Fig.7 Relationship between θ and δ

傾斜板を撮影した写真を Fig. 21 に示す。写真撮影条件は、3.4 項で後述する。Fig. 9 のように写真を使用して屈曲角 δ をそれぞれ分度器で計測した。

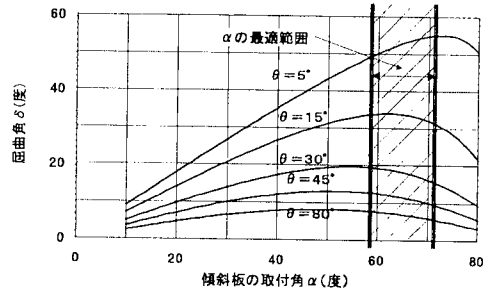
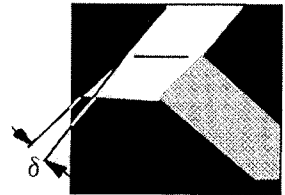


Fig.8 Relationship between α and δ

Table 1 Experiment result of bending angle δ

カメラ取付角 θ (度)	10	20	30	40	60	
δ (度)	計算値	41.4	27.8	19.3	14.3	9.4
	(実測)	約 40	約 27	約 20	約 14	約 10

カメラ取付角と計測値及び式 (7) 及び式 (8) による計算値を Table 1 に示す。但し、計算時の条件は、 $n=1.33$ 、 $\alpha=60^\circ$ とした。Table 1 に示すように、



計算値と写真から読み取った屈曲角 δ の誤差は、最大 1.4 度 ($\theta = 10$ 度の時) である。装置のセット誤差 $\Delta \theta$ とすると、計測誤差 $\Delta \delta$ との間には、 $\Delta \delta / \Delta \theta = \partial \delta / \partial \theta$ が成り立ち、右辺は、 $\alpha = 60$ 度、 $\theta = 10$ 度の時、 $\partial \delta / \partial \theta = -1.623$ と計算される。したがって、計測誤差 $\Delta \delta = 1.4$ 度は、 $\Delta \theta = 0.86$ 度に相当し、装置の設置精度から妥当なものであると考える。カメラ取付角と屈曲角 δ は、Fig.7 のような右下がりの傾向を示す。カメラ取付角 θ が、45~80 度で $\delta \approx 10$ 度であり、このような小さな屈曲角では、水面検知に役立たない。カメラ取付角 θ は 40 度以下で実用することが望ましい。傾斜板取付角 α と屈曲角 δ は、Fig.8 のような傾向を示す。傾斜板取付角 α の実用範囲は屈曲角 δ が比較的大きな値を示す 60~70 度とすべきである。

3.3 光学的特徴の解析

3.3.1 傾斜板表面部 (A 部) と反射部 (R 部) の輝度比 Ψ_1 の算出

Fig. 10 に傾斜板上の 1 点 A の実像と、その反射像の光伝達経路を示す。傾斜板表面 A の実像は経路

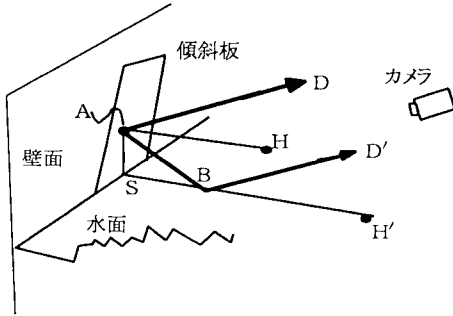


Fig.10 Optical transmission pass of reflected images on the water surface

AD を通ってカメラに取り込まれる。一方、傾斜板表面 A の水面での反射像は、水面 B で反射されて経路 ABD' を通ってカメラに取り込まれるものとする。この場合、面 DABD' はカメラを含む垂直面である。最も単純なケースとして、面 DABD' が壁面に垂直な場合を想定する。面 DABD' と水面境界線との交点を S とする。SB の延長線上の 1 点を H' とし、点 A からの法線上の 1 点を H とすると、AH//SH' である。B 点の入射角と反射角の関係で、 $\angle SBA = \angle H'BD'$ である。河川の水位計測の場合、カメラ距離が 60~100m であり、カメラ視野が 2~4m 程度であることを考慮すると、 $AD//BD'$ 、且つ $\angle HAD = \angle H'BD'$ であると概略いえる。AH//SH' であるから $\angle BAH = \angle SBA$ である。従って、 $\angle HAD = \angle BAH$ と概略いえる。従って、傾斜板の A 点の表面特性が、乱反射と仮定すると AD 方向の輝度 ζ_{ad} と AB 方向の輝度 ζ_{ab} は等しい。すなわち、

$$\zeta_{ad} = \zeta_{ab} \quad (9)$$

である。BD' 方向の輝度 ζ_{bd} は、B 点での反射率を ξ_b とすると

$$\zeta_{bd} = \xi_b \zeta_{ab} \quad (10)$$

である。光が 2 つの媒体の境界面に入射する時の反射率・透過率については、次のような関係式がある³⁾。

$$\text{反射率 (エネルギー)} = ((RE)_p + (RE)_s)/2 \quad (11)$$

ここで

$(RE)_p$: 入射面に平行な光波の反射率

$(RE)_s$: 入射面に垂直な光波の反射率

$$\text{透過率 (エネルギー)} = ((TE)_p + (TE)_s)/2 \quad (12)$$

ここで、

$(TE)_p$: 入射面に平行な光波の透過率

$(TE)_s$: 入射面に垂直な光波の透過率

$(RE)_p$ 、 $(RE)_s$ 、 $(TE)_p$ 、 $(TE)_s$ は、それぞれ次式のように計算される⁴⁾。

$$(RE)_p = \tan^2(\phi - \chi) / \tan^2(\phi + \chi) \quad (13)$$

$$(RE)_s = \sin^2(\phi - \chi) / \sin^2(\phi + \chi) \quad (14)$$

$$(TE)_p = \sin 2\phi \sin 2\chi / (\sin^2(\phi + \chi) \cos^2(\phi - \chi)) \quad (15)$$

$$(TE)_s = \sin 2\phi \sin 2\chi / \sin^2(\phi + \chi) \quad (16)$$

ここで、

ϕ は入射角、 χ は屈折角であり、両媒体の真空に対する屈折率を n_1 、 n_2 とすると次の関係がある (Fig.11 参照)。

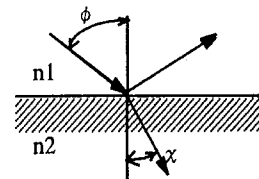


Fig.11 Optical reflection and refraction

$$n_1 \sin \phi = n_2 \sin \chi \quad (17)$$

B 点での、反射率 ξ_b は、式 (10)、式 (12)、式 (13) から得られる。

$$\begin{aligned} \xi_b &= ((RE)_p + (RE)_s)/2 \\ &= (\tan^2(\phi - \chi) / \tan^2(\phi + \chi) \\ &\quad + \sin^2(\phi - \chi) / \sin^2(\phi + \chi))/2 \quad (18) \end{aligned}$$

この場合、光は、空中から水中への投射であるから

$n_1 = n_a, n_2 = n_w$ であり、

$$\phi = \sin^{-1}(1.33 \sin \chi), \chi = \sin^{-1}(\sin \phi / 1.33) \quad (19)$$

の関係式が得られる。傾斜板の表面の輝度 ζ_{ad} と反射像の輝度 ζ_{bd} の比率を Ψ_1 とすると

$$\Psi_1 = \zeta_{bd} / \zeta_{ad} = \xi_b \zeta_{ab} / \zeta_{ad} \quad (20)$$

$\zeta_{ab} = \zeta_{ad}$ であるから

$$\Psi_1 = \xi_b = (\tan^2(\phi - \chi) / \tan^2(\phi + \chi) + \sin^2(\phi - \chi) / \sin^2(\phi + \chi)) / 2 \quad (21)$$

ここで、式 (20) は、式 (18) を代入して ϕ のみの関数として表現できる。さらに、入射角 ϕ とカメラ取付角 θ は、次の関係があり、

$$\phi = \pi/2 - \theta \quad (\text{カメラ角度}) \quad (22)$$

結局、 Ψ_1 は、カメラ取付角 θ のみの関数として表現できる。Fig.12 にカメラ角度 θ に対する Ψ_1 のグラフを示す。

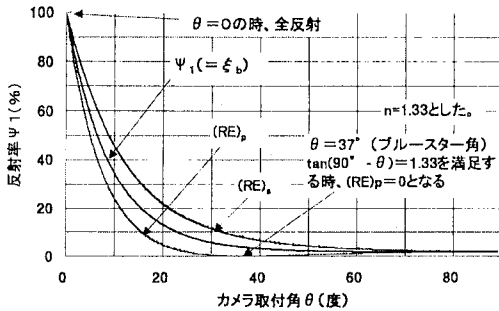


Fig.12 comparison of brightness of the inclined plate surface and the reflected image

3.3.2 傾斜板表面 (A 部) と屈折像 D 部の輝度比 Ψ_2 の算出

以下、水面下からの屈折像と傾斜板表面の輝度比を算出する。Fig. 13 で傾斜板の表面 A の輝度を ζ_{ad} と仮定する。水面下 C 点からの光は、光路 CBD を通過してカメラまで到達する。これが水面下からの屈折像である。屈折像のカメラ画像中での輝度を

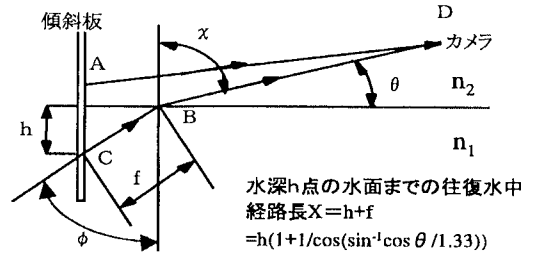


Fig.13 Optical transmission pass of the refracted image

ζ_{bd} とし、水面 B での透過率を Ψ_{21} 、水中での透過率を Ψ_{22} とすると、傾斜板の輝度を基準として、実像部と屈折像の輝度の関係を次式で表せる。

$$\zeta_{bd} = \Psi_{21} \Psi_{22} \zeta_{ad} \quad (23)$$

ここで、水中から空中への反射屈折の際の透過率 Ψ_{21} は式 (11)、式 (14)、式 (15) から得られる。

$$\begin{aligned} \Psi_{21} &= TE \\ &= ((TE)_p + (TE)_s) / 2 \\ &= (\sin 2\phi \sin^2 \chi / (\sin^2(\phi + \chi) \cos^2(\phi - \chi)) + \sin 2\phi \sin^2 \chi / \sin^2(\phi + \chi)) / 2 \end{aligned} \quad (24)$$

この場合、光は、水中から空中への投射であるから $n_1 = n_w$ (水の屈折率)、 $n_2 = n_a$ (空気の屈折率) であり、式 (16) から

$$\sin \chi = 1.33 \sin \phi \quad (25)$$

の関係式が得られる。この場合には、屈折角 χ とカメラ取付角 θ の間には、次の関係式が成立する。

$$\chi = \pi/2 - \theta \quad (\text{カメラ角度}) \quad (26)$$

結局、 Ψ_{21} はカメラ取付角 θ のみの関数として表現できるのである。Fig. 14 にカメラ角度 θ に対する Ψ_{21} のグラフを示す。

水中を通過する際の透過率 Ψ_{22} は、水の吸光率を σ 、水中での光路長を X とすれば次式で表現できる⁵⁾。

$$\Psi_{22}(X, \sigma) = \text{EXP}(-\sigma \cdot X) \quad (27)$$

水の吸光率は、水の濁度または透明度にかかわる数値であり代表的な国内の湖の一例を Table 2 に示す。

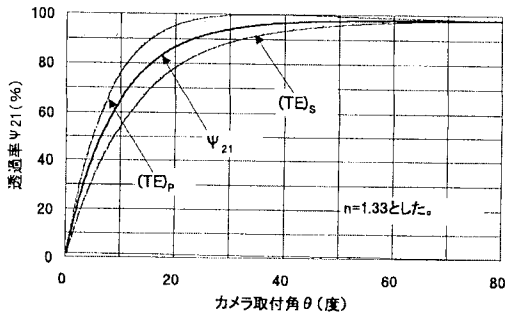


Fig.14 Transmittance of lights when they are irradiated from water to air

Table 2 Transparency at several lakes in Japan⁶⁾

湖名称	十和田湖	琵琶湖	穴道湖	霞ヶ浦
透明度 (m)	9.0	6.0	1.0	0.6
吸光率 σ	0.316	0.5	3	5

表の中で吸光率 σ(単位 : /m) は、透明度から下記方法で推定したものである。

$$\sigma = \text{Log}0.05/L \quad (28)$$

ここに、L は、表中の透明度 (m) である。数値 0.05 は、視程距離換算に使用している定数である。光通過距離と Ψ₂₂ の関係を Fig.15 にグラフで示す。河川の水位計測精度は、1cm であるこ

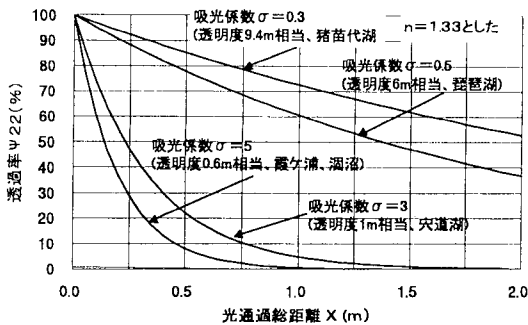


Fig.15 Transmissivity of lights with light extinction in water taken into consideration

とを考慮すると水深 1cm における透過率が興味あ

る。水深 0.01m における水面までの水中往復経路長 h+f(Fig.13) を計算すると、Ψ₂₂ は、カメラ取付角 θ と σ だけで表現できる。

$$\Psi_{22}(\theta, \sigma) = \text{EXP}(-0.01\sigma(1 + 1/\cos(\sin^{-1}(\cos\theta/1.33)))) \quad (29)$$

Ψ₂₁ と Ψ₂₂ とを合わせると屈折像の輝度比率が得られる。

$$\Psi_2 = \Psi_{21}(\theta) \cdot \Psi_{22}(\theta, \sigma) \quad (30)$$

グラフ化すると Fig.16 のようになる (水深下 1cm における透過率を示す)。

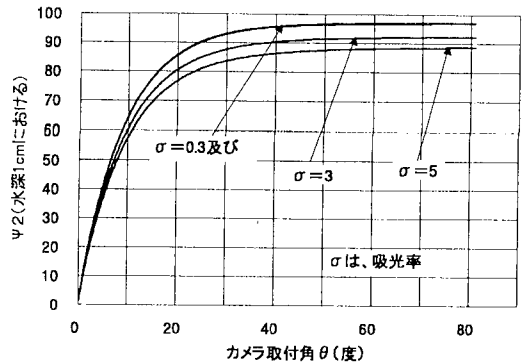


Fig.16 Comparison of brightness of the inclined plate surface and the refracted image

3.4 反射像と屈折像の重なる部分 (R + D 部) の輝度

反射像 (R 部) と屈折像 (D 部) の重なる部分については、反射像と屈折像のエネルギーを加算すればよい。よって、次式から得られ、グラフ化すると Fig.17 のようになる。

$$\Psi_3 = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (31)$$

以上は、対象物の輝度について記述してきたが、次に、デジタル画像として取り込まれた場合の画像の濃度値 Ψ₃' について考える。次式により変換

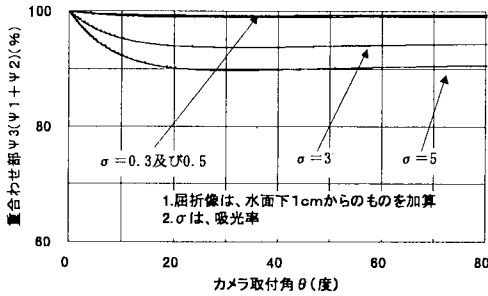


Fig.17 Comparison of brightness of the inclined plate surface and the refracted image+reflected image

する。

$$\Psi_3' = 127(\Psi_3^{0.7} - 0.1^{0.7}) / (100^{0.7} - 0.1^{0.7}) \quad (32)$$

ここで、デジタル画像への変換は下記条件で行った。

- 1) デジタル画像の解像度 8 ビット (正負 127 階調)
- 2) 傾斜板の表面濃度を最大濃度 (= 127) と一致させた。
- 3) カメラ入力時のガンマ補正を行った。
補正後 = 入力値^{0.7}
- 4) カメラの S N 比を 1/1000 (60dB) とした。

Ψ₃ をデジタル画像に変換後の濃度値 Ψ₃' を Fig. 18 に示す。傾斜板の実像部は、最大濃度 127 であり、

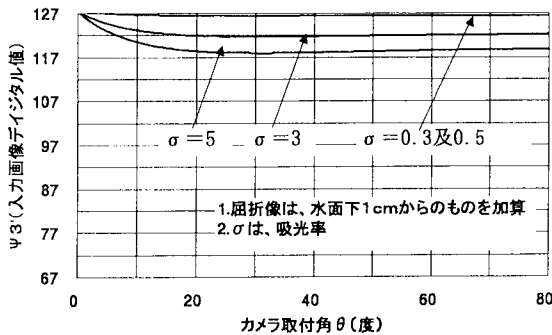


Fig.18 Input image Level of Ψ₃'

反射像と屈折像の重なる部分の濃度 Ψ₃' は、傾斜板の実像部分の濃度 127 に極めて近い。量水標の表面の汚れ等の SN 比を考えると画像の識別には階調差 10 が目安であり、実像部 (A 部) と重なり部 (R + D 部) を画像処理により識別することは極めて困難といえる。カメラ取付角を一定 (θ = 10 度) にした時の水深に対する量水標表面の入力デジタル画像濃度 Ψ₃'' を計算する。

$$\Psi_3'' = \Psi_{1(\theta=10^\circ)} \cdot \Psi_{21(\theta=10^\circ)} \cdot \Psi_{22(\theta=10^\circ, \text{水深を変化})} \quad (33)$$

Ψ₃'' をグラフで示すと Fig.19 のようになる。水面検知位置での濃度変化は、吸光率が小さいほど平坦であり、濃度変化による水面位置の認識はより困難となる。

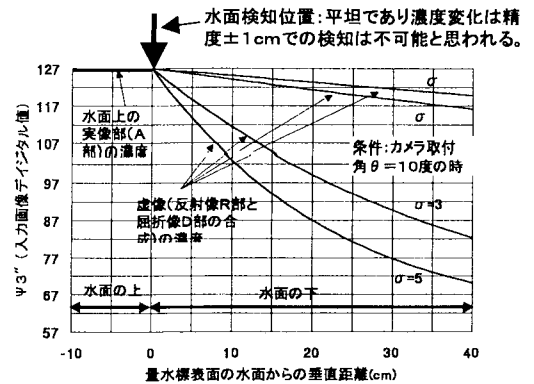


Fig.19 量水標の表面垂直方向の画像濃度の変化

3.5 水中の傾斜板画像の目視観察 (写真による)

傾斜板水面境界の特徴を目視にて確認するために、水中に設置した傾斜板をカメラ角度を種々変化させてカメラ画像を撮影した。撮影時の機器構成と配置を Fig.20 に示す。計測時の仕様は概略つぎのとおりである。

- (1) 水槽 内部を黒色に塗装
- (2) 使用水 水道水を使用した (透明度 9m 以上)

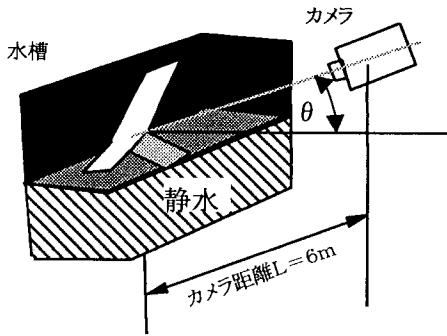


Fig.20 Geometrical condition capturing slant plate images

- (3) カメラ 距離：6m、取付角 θ 10~60度
- (4) 傾斜板 地：白、目盛：黒、取付角 α ：60°
- (5) 撮影条件 屋外、晴、撮影時刻午前11時頃
- (6) 写真機 家庭用の写真機

カメラ画像をカメラ取付角順に並べたものが Fig.21 である。カメラ画像を目視により確認した光学的な特徴を以下に列記する。

(1) 反射像 (R 部) の特徴

カメラ取付角 θ が、小さいときには、非常に高い輝度レベルを示し、 θ の増加に伴い急激にその輝度を減じている。 Fig.12 の Ψ_1 で、 $\theta = 10\sim 40$ 度によく似た傾向を示している。

(2) 屈折像 (D 部) の特徴

水面直下1cm付近に注目すると、全体に高い輝度を示している。 Fig. 16 の $\sigma = 0.3$ 、 $\theta = 10\sim 40$ 度によく似た傾向を示している。

(3) 重なり部分 (R + D 部) の特徴

重なり部分 (R + D 部) の輝度又は画像の濃度は、解析結果 (Fig17~Fig.19) に示す傾向を示している。この部分 (R + D 部) の輝度は、カメラ取付角 θ 及び水深により変化するが、水面検知に重要な水深の浅い部分では、実像部 (A 部) とほぼ同レベルであることを目視でも確認できた。

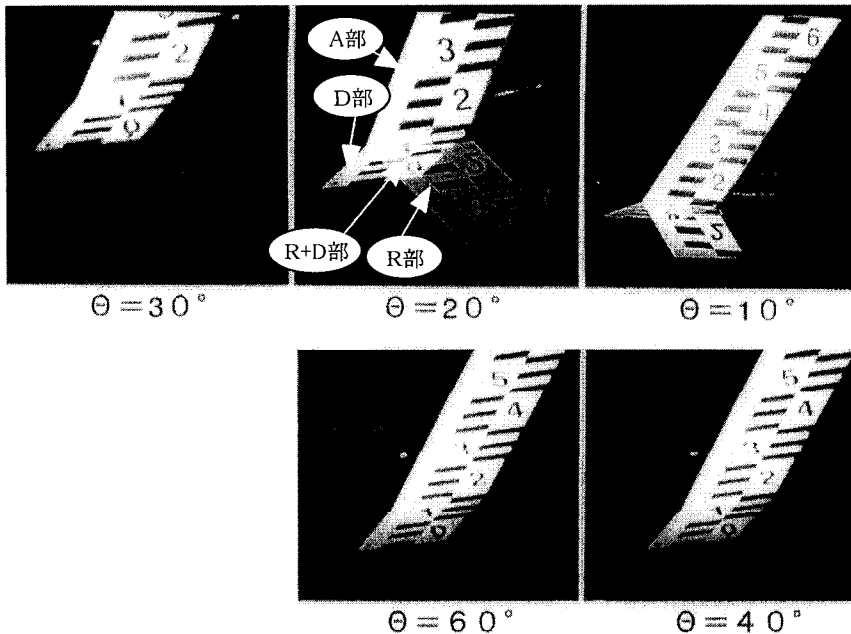


Fig.21 Various images of an inclined plate when camera installation angles are changed

4 結論

傾斜板の水面境界部の幾何学的・光学的解析により以下の知見を得た。

- (1) 傾斜板を使用しない垂直式の量水標の画像のみによる水位計測が議論されているが、今回の検討結果によると濃度変化による水面検知非常に困難であり、傾斜板の使用が必須であるといえる。
- (2) カメラ設置角 θ は、40 度以下が望ましい。
- (3) 傾斜板の取付角 α は、60~70 度が最適である。
- (4) 傾斜板の実像部 (A 部) と反射像 (R 部) の「く」の字、又は、逆「く」の字に見える部分は、上下非対称であり、落差の大きな水位を計測する場合には、画像処理アルゴリズム作成時配慮すべき点であろう。

参考文献

- 1) Takagi, etc : Development of a noncontact liquid level measuring system using image processing, 7th international workshop (IAWQ specialist group on instrumentation, control and automation), 1997, Brighton, UK, Session 8 Mathmodeling(2), preprint book pp409-415
- 2) 高木, 他 : 画像処理を用いた非接触式の液面高さ計測装置の開発、学会誌 EICA、第 1 巻第 2 号、1996、pp190-193
- 3) 吉原邦夫 : 物理光学、pp176
- 4) 吉原邦夫 : 物理光学、pp177
- 5) World Meteorological Organization : Instruments and observing methods, Report No.41, UK, 1988/1989
- 6) 国立天文台、理科年表、1997、pp680(地 54)
- 7) Takagi, etc : Development of a noncontact liquid level measuring system using image processing, Wat. Sci. Tech. Vol.37, No.12, pp.381-387, 1998. IAWQ

(受付 1999. 11. 18)

(受理 1999. 12. 16)