

水流をはさんで兩岸に超音波の送受波器を設置し、超音波パルスを送・受波して河川の平均流速を計測する超音波流速計が開発され使用されるようになってきたが、北利根川においては、夏季には日照の強い時間に、冬季には深夜冷え込みの強いときに、計測不能となることがあった。この原因について考察した結果、北利根川では下流の水門を長時間にわたって閉ぢることが多く、そのために水がよどんで垂直方向に大きい温度勾配が生じ、夏季日照の強いときには超音波が屈折して直接波が受波器に届かないために、冬季冷え込みの強いときには直接波は到達できるが、水面で反射した波の才が早く到達し、それが水面のやうぎのために不安定であるために、計測不能になると考えられた。

以上の考察により、垂直方向の水溫分布によって計測可能な距離の限界の決まることがほぼ明らかになったので、その関係を示す図表を作成した。これにより、送受波器を設置すべき深度や計測の可能な距離を知ることができる。

1.音線の計算式 媒質が超音波の波長に比べて十分大きいときには、音波の進路(音線)は幾何光学的に求められる。Fig.1において、 $y=0$ から y_2 までの深さの範囲では、音速は深さだけに依存するものとし、音速傾度は一定値 g [m/s/m] であるとする。座標原点 P_0 に θ_1 の角度で入射する音線は Snell の法則にしたがって屈折するので、 $P_2(x_2, y_2)$ の点では、($y=0$ における音速を c_1 とすれば)

$$\cos \theta_2 = \frac{c_2}{c_1} \cos \theta_1 = \left(1 + \frac{g y_2}{c_1}\right) \cos \theta_1 \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{\sin \theta_2 - \sin \theta_1}{-\frac{g}{c_1} \cos \theta_1} \quad (2)$$

となり、その軌跡は円弧となることが知られている。また、 P_0 から P_2 までの音波の伝搬時間 τ_{12} は次式で求められる。

$$\tau_{12} = \int_{P_0}^{P_2} \frac{ds}{c} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{g \cos \theta} \approx \left| \frac{1}{g} \left\{ \left(\theta_2 + \frac{\theta_2^3}{6} \right) - \left(\theta_1 + \frac{\theta_1^3}{6} \right) \right\} \right| \quad (3)$$

2.北利根川における夏季日照時の音線の計算例

北利根川は川幅約 250 m で、ほぼ一様な 4 m の深さになっており、川底はヘドロと推定される。超音波送受波器は約 200 m 隔たった兩岸近くの、深さ 1 m, 2 m, 3 m の水中に設置されている。

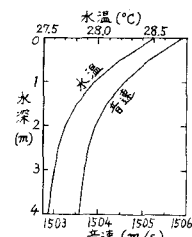


Fig. 2 水温・音速分布

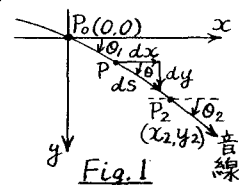


Fig. 1

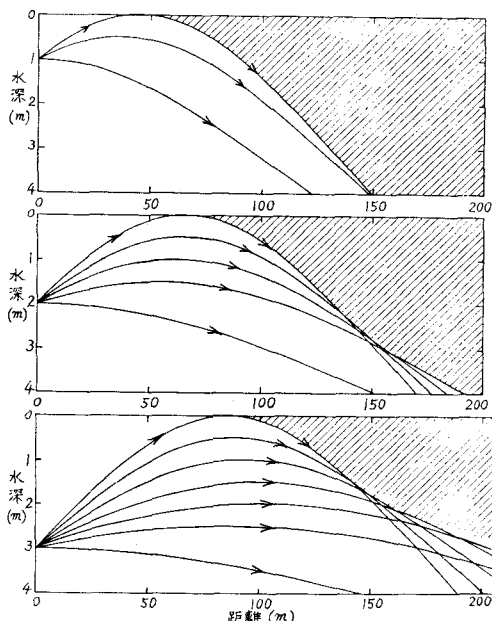


Fig. 3 夏季日照時における音線の計算例

東大海洋研究所本氏らによる昭和44年8月6日午前11時前後(天候・晴)の水温分布測定値を参考にして、Fig.2のような垂直温度分布をもつ水中の音線を、(1)、(2)式によって計算した結果をFig.3に示す。図中の斜線の範囲には直接波は届かない。水面・川底で反射した音波は到達するが、水面のゆらぎなどのために不安定と考えられる。

図からわかるように、深さ1mおよび2mの位置の送波器から放射された超音波は、距離200mの位置の同じ深さのところにある受波器には直接には届かない。深さ3mの位置からはやっと届くようである。

なお、この時刻には超音波流速計は計測不能の状態になっていた。

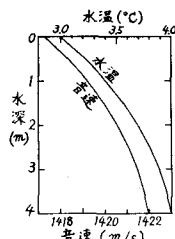


Fig.4 水温・音速分布

3. 冬季における音線の計算例 水温が4℃以下になると上層の方が低温となり、音速が小さくなる。水温分布をFig.4のように仮定した場合の音線の計算例をFig.5に示す。超音波は深さ1mの位置から放射し、深さ1mの位置で受波するものとする。

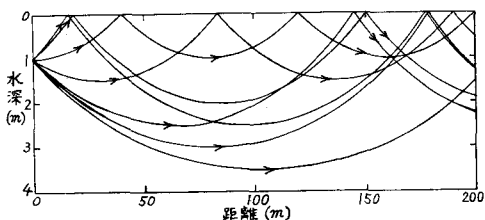


Fig.5 冬季厳寒時における音線の計算例

図からわかるように、この場合には直接波以外に、水面で1回ないし2回反射した音波も受波器に届くことがわかる。そこで、163.663mの点までの音波伝搬時間を(3)式によって計算するとTable1のようになり、水面1回反射波が最も早く到達することがわかる。しかし、水面は風や流れなどのために絶えずゆらいでいるので、水面で反射してきた音波は振幅・到達時刻ともに不安定と考えられ、そのために計測値が乱れたり、計測不能になると考えられる。

Table1 冬季厳寒時における音波の伝搬時間

伝搬経路	到達順	伝搬時間, 時間差
③ 水面1回反射波	1	114.960 ms
① 直接波	2	115.186 ms
④ 水面2回反射波	3	115.367 ms
② 水面1回反射波	4	115.635 ms

のために計測値が乱れたり、計測不能になると考えられる。

4. 計測可能距離の推定 冬季で冷え込みが強く、水温が4℃以下になる場合を除くと、一般には上層の方が水温が高いため、音線は上に凸の形で屈折し、Fig.6のように水面に接する音線が最も遠くまで届く。音速傾度が

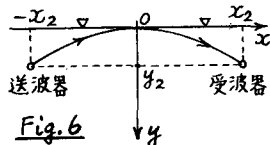


Fig.6

深さにかかわらず一定とすれば、直接波の到達距離

$$2x_2 \text{ は, } 2x_2 = 2\sqrt{-2\frac{C_0}{g}y_2 - y_2^2} \quad (C_0 \text{ は水面に} \text{ おける音速})$$

となり、この距離以内であれば安定に計測できるものと考えられる。

Fig.7は、水面温度・温度勾配・送受波器の深度の値から直接波の到達距離を求めるための図である。たとえば、温度勾配 $0.4^\circ\text{C}/\text{m}$ 、水面温度 30°C のとき $-g/C_0$ は $6 \times 10^{-4} [\text{m}^{-1}]$ であり、送受波器の深さを2mにすれば、直接波が到達できるのは160mまでの距離である。

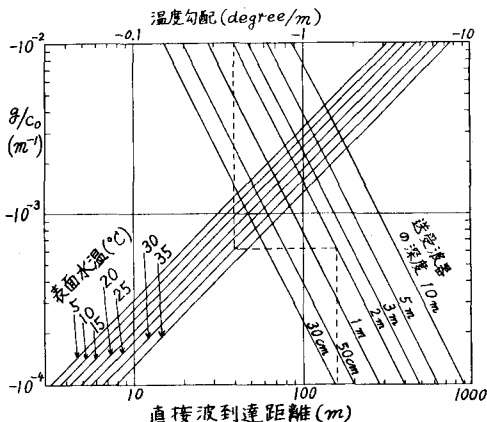


Fig.7 表面水温・垂直温度勾配・送受波器の深度と直接波到達距離との関係