

超音波により連続的に観測された洪水・ 潮汐等の流量変化の不定流としての挙動

木下武雄*

国立防災科学技術センター

Hydraulic Behaviours of Flood Flows and Tidal Waves in River Channels observed by Ultrasonic Methods

By

Takeo Kinoshita

National Research Center for Disaster Prevention

Abstract

A parabolic univalent curve of a relation between water stage and discharge, so-called an H-Q curve, is used for obtaining discharge for daily water management. But it is inadequate in the case of an unsteady flow, for instance a flood flow or a tidal wave. Because the H-Q curve of an unsteady flow is not a **univalent** function, but forms loops. Although a numerical analysis of an unsteady flow has been developed to make clear hydraulic behaviours of an unsteady flow, a classic H-Q curve is still being widely used for operational purposes.

The discharge observations by means of the ultrasonic method have been much improved in Japan. They are available to measure continuous discharges without using H-Q curves. The author analyzes the relation between the water stage and the discharge measured by the ultrasonic methods. Fig. 3 shows the H-Q curve at Tome Station in Kitakami River, which forms counterclockwise loops. Fig. 5 shows the H-Q curve at Fukawa Station in Tone River which forms clockwise loops. A flood flow which propagates downstream forms a counterclockwise loop, while a tidal wave which propagates upstream forms a clockwise loop. The direction of the loops is explained by combining the equations (16), (17) and (18). The amplitudes of H and Q can be calculated by this analysis as shown by the equation (19). The outlet discharge from a big lake can also be observed by the ultrasonic method as shown in Fig. 7. The H-Q curve in such a case, as illustrated in Fig. 8, is explained by the equation (21) and is similar to the upper part of Fig. 10.

The new information based on these facts provides us with better managements of

* 第1研究部

water resources, especially for flood control and water utilization in lower basins of big rivers.

1. ま え が き

河道内の洪水の流れや潮汐の運動はよく知られているように摩擦とエネルギー勾配とが釣合った形で流れる式で表わされ、それは、一般には開水路における不定流の運動の式と呼ばれている。慣性項もつけ加えれば

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

として表現される。これはNavier-Stoksの式を簡略化したものである。

ここに u : 平均流速で Q/A , H : 水位, Q : 流量, A : 流水断面積で水位の関数, R : 径深で水位の関数, n : マニングの粗度係数, x : 上流から下流への位置座標, t : 時刻である。さらに重要な式は, $\text{div} \vec{v} = 0$ から導かれる連続の式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

厳密にはこの A は貯留断面積であるが、単純な河道では(1)式の A と同一とみてよい。この2式を連立して時間的に変動する洪水などを表現するのであるが、非線形偏微分方程式であるため一般解は求めることが困難で、通常、数値解が求められる。その解法は著者らによって任意形状の断面の河川における手法が開発されている。安芸敬一他(1955)、伊藤剛(1971)、木下武雄(1955)、(1959)、(1969)。(1)、(2)両式によって表現される水位 H と流量 Q とには一義的な関係が存在しえないのは明らかであろう。4及び5に例を示す。

他方、洪水予報などの洪水防御のため、また水資源開発のための流量の観測では、通常、年36回の流量観測及び洪水時の高水流量観測を行い、それによる水位 H と流量 Q との関係を図線(通常 $H-Q$ 曲線と呼び、 H を縦軸に、 Q を横軸にとる。)

$$Q = a H^2 + b H + C \quad \dots\dots\dots (dQ/dH > 0 \text{ の部分のみを用いる}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

にあてはめて、任意時刻に観測された水位からその時刻の流量に換算するという手順がとられている。(国土調査法水位及び流量調査作業規程準則・総理府令第75号(1954)及び建設省河川砂防技術基準(案)(1976))。ここでは H と Q との間に H が増せば Q を増すという一価関数を想定している。

では(1)、(2)式の関数との矛盾はどう考えればよいか。これまでにも各方面で連続観測に基づいた調査が行われて来たが、一般にそのような調査は多大の労力があるため困難が多く、篤志の河川技術者が行って来ただけである。最近、超音波による河川流量の観測が普及して

超音波により連続的に観測された洪水・潮汐等の流量変化の不定流としての挙動 - 木下

来たため連続的にデータが集積されるようになった。それでこれらデータを並べて H と Q の関係进行を明らかにし、河道内の不定流の特性を解析して洪水予報・洪水計画・水資源開発等に役立っているのが本報告の目的である。

2. 連続観測とその解析の必要性

河川の流量観測所の多くは、河状が整ってある程度の河床勾配のついている所である。河床勾配の零の所、合流点の直上流には流量観測所は設けない。なぜなら、(1)式において第1項の慣性項、第2項の速度水頭勾配がともに省略され、さらに水面勾配が河床勾配 i に等しいと仮定できるところでは、

$$i = \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}} = \frac{n^2 Q |Q|}{R^{4/3} A^2} \dots\dots\dots (4)$$

とおけてこの関数は水位 H と流量 Q との一価関数としての関数を示し、(3)式のように近似できるので流量観測所を設けられるという意味である。換言すれば、水位・流速の変動を無視できる場合には H と Q とは一義的に関係づけられるということで、大洪水といえども河床勾配があつて水位の上下変動がゆるやかなら(3)又は(4)式で実用上十分ということである。これらの仮定や省略を認める条件は最近、徐々に変化して来ている。例えば河状の長期的な変化でこれまで感潮河川ではないと思われていた所が潮位の影響をうけ、流量観測の精度が悪くなって来たこと、洪水波の伝播が速くなり洪水波の立ち上りが急になったこと、流量に対する社会的な要求精度が高くなったこと及びこれまでは半ばあきらめていた感潮河川で低水管理のため流量を測らねばならなくなったことなどによる。それで流量観測を自動化して、つまり不定流的な流れの要素を連続的に考慮した形で流量観測をして、変化する要求に答えようとするものである。

3. 観測手法

各観測所での水位は通常の自記水位計によって連続的に測られる。

以下に述べる連続流量については超音波によって測られている。超音波による方法はすでに著者らが発表しているが、その原理を述べると次の通りである。Kinosita (1967), 木下武雄 (1968), 本間仁 (1971)。

図1のように川の兩岸に斜めに1対の超音波送受波器 T_1, T_2 を水中に設置する。送受波器は一人二役で、ある微小時間には超音波パルスは T_1 から送波されて、水中を

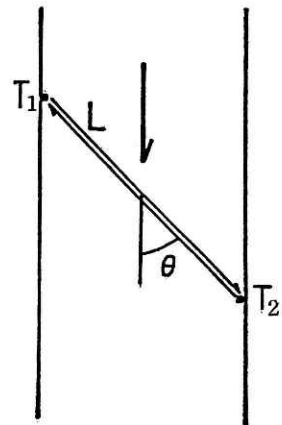


図1 超音波送受波器設置説明図

Fig.1 Basic installation of ultrasonic transducers.

下流へ伝わり、 T_2 に受波されその伝播時間 t_1 が測られる。次の微小時間には、超音波パルスは T_2 から送波されて、水中を上流へ伝わり、 T_1 に受波されその伝播時間 t_2 が測られる。

$$t_1 = L / (C + V \cos \theta) \dots\dots\dots (5)$$

$$t_2 = L / (C - V \cos \theta) \dots\dots\dots (6)$$

ここで L ： $T_1 T_2$ の距離、 C ：超音波の伝播速度で約1500m/s、 V ：超音波波線上の河川の平均流速、 θ ：流れと L とのなす角である。ここで時間差 Δt を作ると

$$\begin{aligned} \Delta t = t_2 - t_1 &= 2 L V \cos \theta / (C^2 - V^2 \cos^2 \theta) \\ &\div 2 L V \cos \theta / C^2 \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

となつて、 V を求めることが可能である。この方法には幾つかの改良が加えられ、それら改良型が実地に用いられている。例えば t_1, t_2 の逆数をとつてその差 $\Delta(1/t)$ を作ると、

$$\Delta(1/t) = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = 2 V \cos \theta / L \dots\dots\dots (8)$$

となる。この式は C を含まないため音速 C の補正を加える必要がない点がすぐれている。深町正雄他(1981)、奥島基良他(1977)。

超音波による流速測定については在来からの回転式流速計による流速との比較は数多く行われよい結果が得られていて、前掲報告に掲載されている。しかし、現在でもすべての洪水で観測可能とは言えない状態で、なお改良が必要である。例えば雑音の多い河川ではM系列信号を用いるとか、パルス第1波の立ち上りを鋭くするための送受波器における改良や、デ

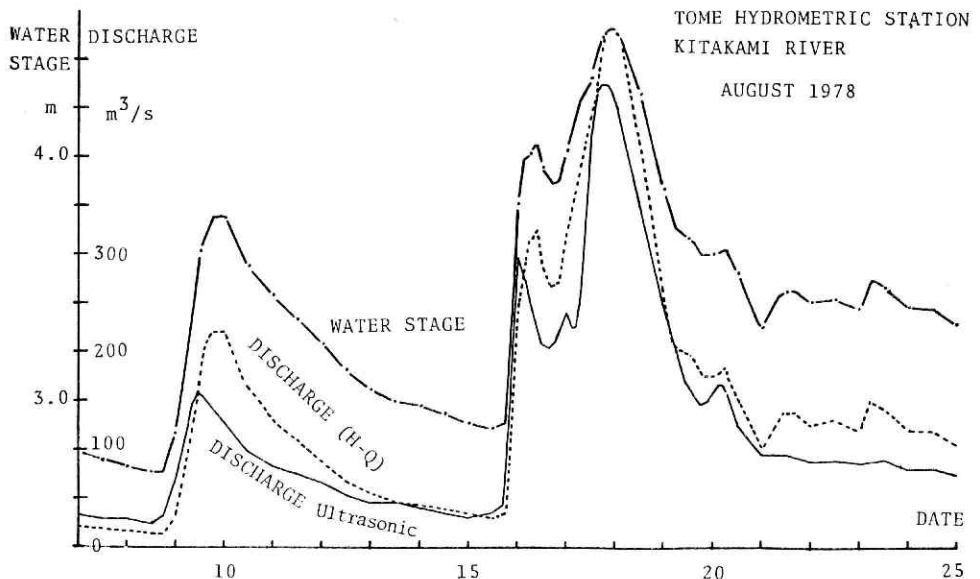


図 2 北上川登米における洪水ハイドログラフ
Fig.2 Hydrographs of the water stage and the discharge at Tome in Kitakami River.

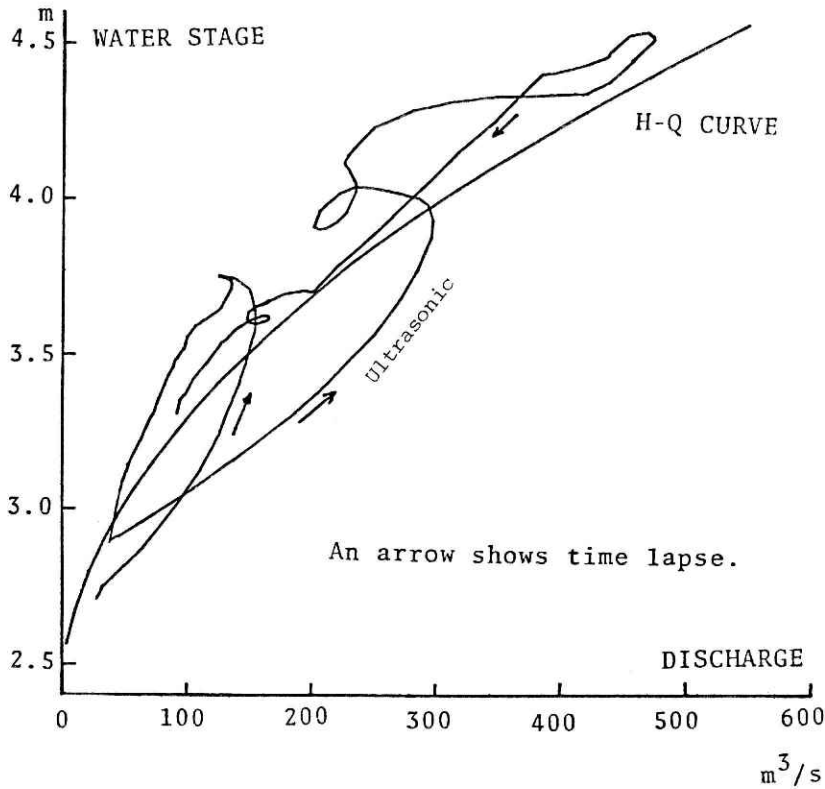


図 3 北上川登米におけるH-Q曲線 (1978年8月8日~25日)

Fig.3 Relation between the water stage and the discharge by the ultrasonic method at Tome in Kitakami River.

ータ処理手法における改良など多くの改良が加えられている。奥島(1981), Kinosita (1982).

4. 洪水・潮汐の水位・流量の変動のループの解析

洪水のハイドログラフの例を図2に掲げる。北上川登米観測所(河口より3.2km)1978年8月7日~25日のもので、図中H-Qと示されている流量は在来のH-Q曲線による方法(図3にもH-Qとして示す)で、Ultrasonicと示されているのが超音波による連続観測である。この洪水は大きくはないが、幾つものピークから成り、この水位と流量とでH-Q曲線を作ると図3のようになって、幾つもの反時計廻りのループを描く。超音波によるループの広がりには $200\text{m}^3/\text{s}$ におよぶので、今後も調査をする必要があることを示している。ループの軸もピーク毎に異なっている。このような洪水のH-Qループ形成についての研究はすでに米田正文(1952)が実験的にも、(1)・(2)両式からも明らかにしている。すなわち、洪水波の伝播は $\Delta H/\Delta x$ のピークが最も早く到達し、V, Q, Hの順でそれぞれピークが到達

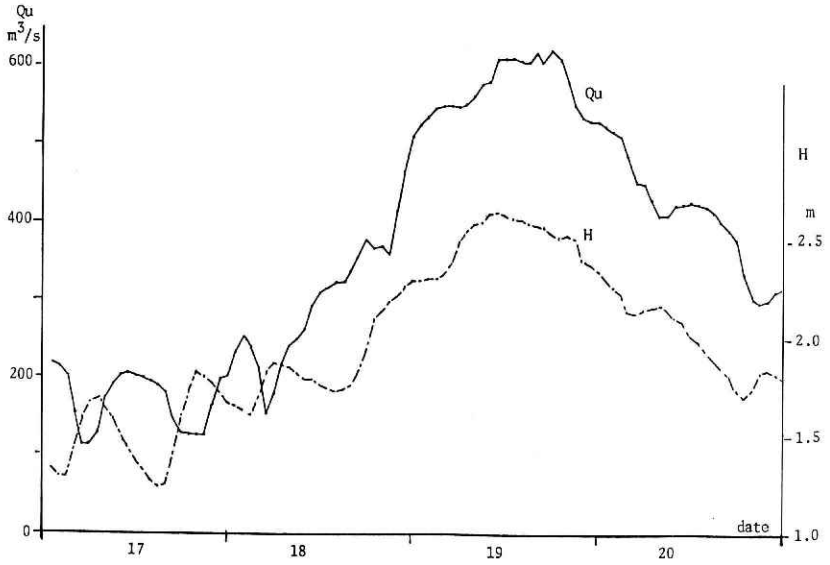


図 4 利根川布川における潮汐及び洪水ハイドログラフ (1981年5月17~20日)

Fig. 4 Hydrographs of the water stage H and the discharge Qu by the ultrasonic method at Fukawa in Tone River, 17-20 May 1981.

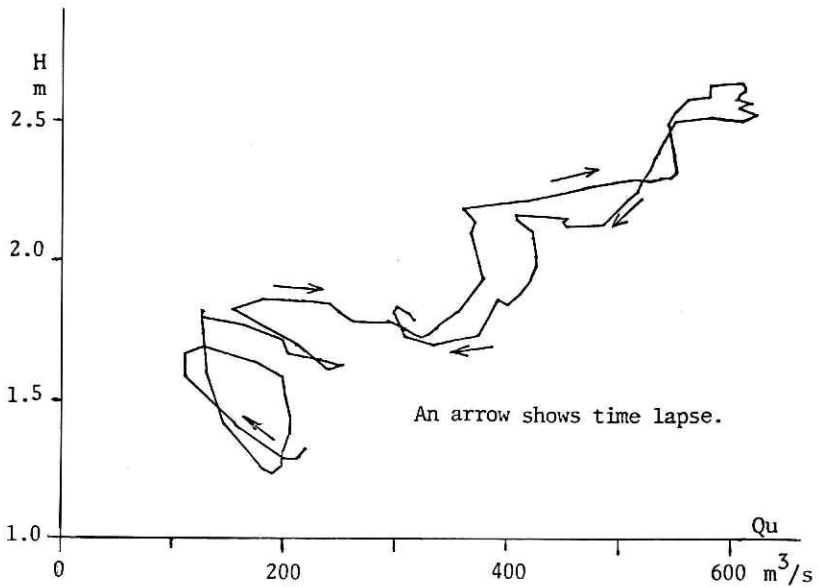


図 5 利根川布川におけるH-Q曲線 (1981年5月17日~20日)

Fig. 5 Relation between the stage H and the discharge Qu by the ultrasonic method at Fukawa in Tone River, 17-20 May 1981.

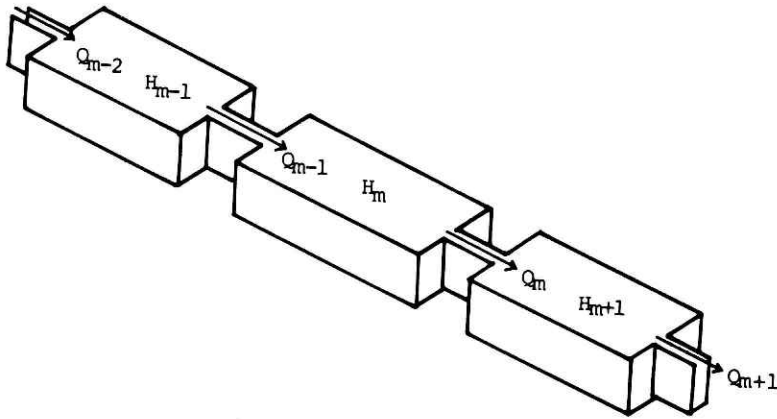


図 6 河道モデル説明図

Fig. 6 Schematical picture of a river channel.

すること、従って $H-Q$ 曲線が反時計廻りとなることである。1.で述べた「一義的な関係がない」という例である。

同じ洪水のハイドログラフでも図4は感潮河川であるため若干ちがう。利根川布川観測所（河口より76 km）1981年5月17日～20日の水位と超音波による流量である。ピーク付近は単純であるが、裾のあたりの凹凸は潮汐の影響である。これの $H-Q$ 曲線を作ると図5のようになって時計廻りのループを描く。感潮湖の水位・流量等の概算法については木下武雄（1964）が解説したが、この点をもうすこし一般的に時計廻り、反時計廻りを解析する。差分を求めるときのように河道を必要な所で区切って上流から下流へ向け番号をつけ m 番目の区間の水位を H_m 、その区間から $(m+1)$ 番目の区間への流量を Q_m とおく。図-6参照。(1)式で慣性項・速度水頭勾配の項を省略すると

$$\frac{H_m - H_{m+1}}{\Delta x} = \frac{n^2 |Q_m| |Q_m|}{R^{4/3} A^2} \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{従って、} H_m - H_{m+1} = r_m Q_m \dots\dots\dots (11)$$

ここに $r_m = \Delta x \cdot n^2 |Q_m| / R^{4/3} A^2$ とおいて、定数と仮定する。

(2)式については

$$\Delta x \frac{\partial A}{\partial t} = -\Delta Q$$

$$\text{と考えると } C_m \frac{dH_m}{dt} = Q_{m-1} - Q_m \dots\dots\dots (12)$$

同様に

$$C_{m+1} \frac{dH_{m+1}}{dt} = Q_m - Q_{m+1} \dots\dots\dots (13)$$

ここで C_m は m 番目の区間の $\Delta x \times$ 水面幅で貯留水面積である。

上流から洪水波が浸入する場合には(11)式の H_m を与えて H_{m+1} の変化の動向をみるのであ

るから(13)式を用いる。定性的に解の性質を明らかにするために $Q_{m+1}=0$ とおく。

(11)(13)式を連立して

$$C_{m+1} r_m \frac{dH_{m+1}}{dt} + H_{m+1} = H_m \dots\dots\dots (14)$$

下流から潮汐波が侵入する場合には(11)式の H_{m+1} を与えて H_m の変化の動向をみるのであるから(12)式を用いる。定性的に解の性質を明らかにするために $Q_{m-1}=0$ とおく(11),(12)式を連立して

$$C_m r_m \frac{dH_m}{dt} + H_m = H_{m+1} \dots\dots\dots (15)$$

(14),(15)両式において右辺に $a \sin \omega t$ の振動を与える。両式は同じ形式なので H_{m+1}, H_m を H で代表させて書くと、

$$H = \frac{a}{(Cr\omega)^2+1} \sin \omega t + \frac{-Cr\omega a}{(Cr\omega)^2+1} \cos \omega t \dots\dots\dots (16)$$

この式を(11)又は(13)に代入して Q を求めると、

$$Q_m = \frac{C^2 r \omega^2 a}{(Cr\omega)^2+1} \sin \omega t + \frac{C\omega a}{(Cr\omega)^2+1} \cos \omega t \dots\dots\dots (17)$$

(16)と(17)で $H-Q$ 関係を描くと反時計廻りの楕円になる。すなわち、上流からサイン曲線の洪水波が侵入すると $H-Q$ 関係は反時計廻りの楕円となる。勿論洪水波はサイン曲線ではないし多くの仮定が介在するので実測値の形は図3のように崩れて、反時計廻りのループと言った方がいいであろう。

(11)又は(13)に(16)式を代入して Q を求めると

$$Q_m = \frac{-C^2 r \omega^2 a}{(Cr\omega)^2+1} \sin \omega t + \frac{-C\omega a}{(Cr\omega)^2+1} \cos \omega t \dots\dots\dots (18)$$

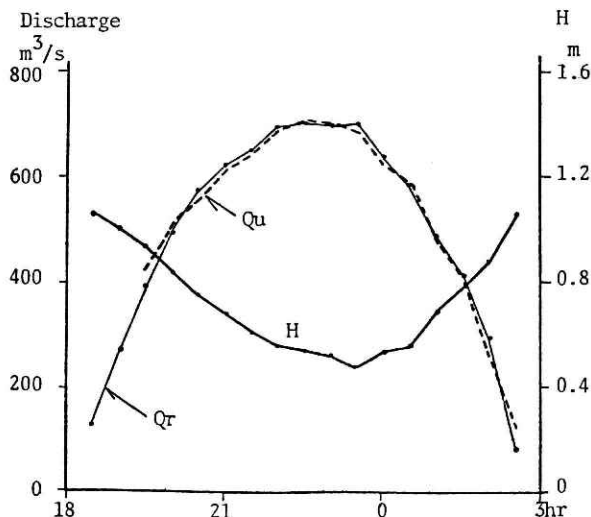


図7 常陸利根川日川におけるハイドログラフ(1978年1月23日~24日)
 Fig.7 Hydrographs of the water stage H and the discharge at Nikkawa in Hitachi-Tone River, 23-24 Jan. 1978.
 Qu : Discharge by the ultrasonic method.
 Qr : Discharge by rotating current meters.

超音波により連続的に観測された洪水・潮汐等の流量変化の不定流としての挙動 - 木下

(16)と(18)とで $H-Q$ 関係を描くと時計廻りの楕円になる。すなわち下流からサイン曲線の潮汐波が侵入すると $H-Q$ 関係は時計廻りの楕円となる。振幅だけについて比をとると

$$Q : H = C \omega : 1 \quad \dots\dots\dots (19)$$

布川における概数を代入しよう。

図5の左下部のループから Q の全振幅 $100 \text{ m}^3/\text{s}$, H の全振幅 0.5 m , 川幅 200 m 布川より上流に広がる感潮域 5000 m , 潮汐周期 12.5 時間として(19)式に代入すると $200 \text{ m}^3/\text{s} : 1 \text{ m} \doteq 140 \text{ m}^3/\text{s} : 1$ となつてほぼ合致していることが示される。

図5において布川の $H-Q$ 曲線が洪水波の侵入で次第に引きのばされながらも反時計廻りの傾向を崩さないのは洪水波の侵入がゆるやかな(洪水の ω が小さい)ためと思われるが、ピーク(右上端)付近では若干時計廻りの傾向も見せている点が微妙である。このように水位及び流量調査作業規程準則によらず、時々刻々の流量を連続的に(この場合は超音波で)測ることにより河川の洪水波などの不定流の特性が正確にわかり、洪水予報などに極めて有効であることがわかった。

なお(16)式を導くに当って、正式には初期条件を与えて解かねばならない。 $t=0$ で $H=H_i$ とすれば(16)式の代りに

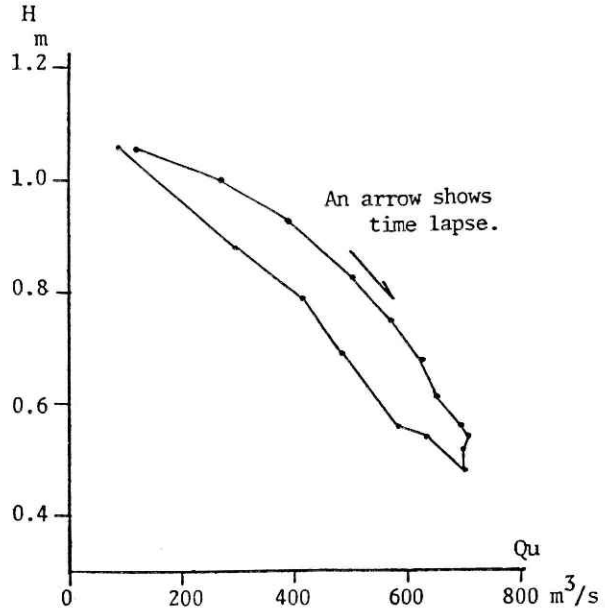


図8 常陸利根川日川における $H-Q$ 曲線 (1978年1月23日~24日)

Fig. 8 Relation between the water stage and the discharge by the ultrasonic method at Nikkawa in Hitachi-Tone River, 23-24 Jan. 1978

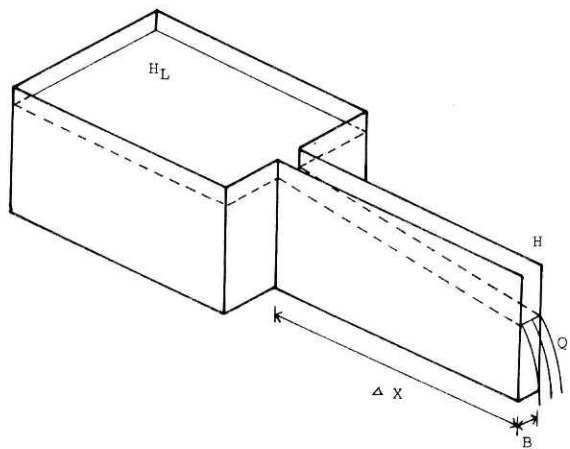


図9 湖と流出河道とのモデルの説明図

Fig. 9 Schematical picture of a big lake and an outlet.

$$H = \left(H_i + \frac{Cr\omega a}{(Cr\omega)^2 + 1} \right) e^{-t/cr} + \frac{a}{(Cr\omega)^2 + 1} \sin \omega t + \frac{-Cr\omega a}{(Cr\omega)^2 + 1} \cos \omega t \dots\dots (20)$$

とせねばならないが、第1項は時間と共に減衰するので、(16)式ではこれを無視した。また(12)又は(13)で Q_{m-1} 又は Q_{m+1} を0ではなく一定流量と仮定した方がより一般的である。その場合定数項を加えるのみで(14)又は(15)と同一形式の式になるので、簡単のために省略した。

5. 大きい湖から流れ出す河川の水位流量の解析

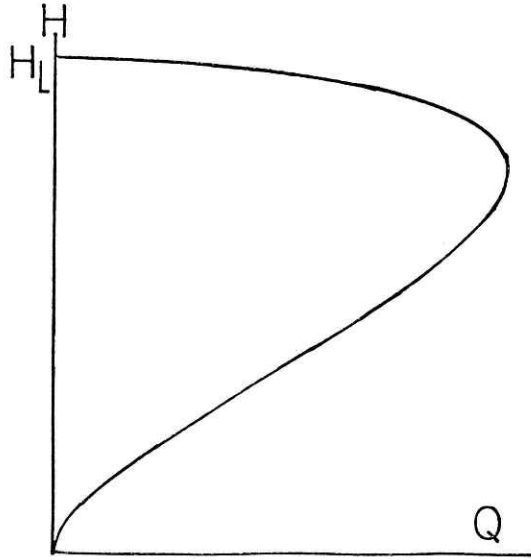


図 10 (21)式におけるH-Q曲線説明図

Fig. 10 Schematic stage-discharge relation expressed by Eq. 21. the units are arbitrary.

図7には霞ヶ浦から流れ出す常陸利根川・日川観測所におけ

る水位・流量関係で、図中には超音波による流量の他に回転式流速計による流量も記載したので参考になるであろう。水位が下ると流量が増すという具合に、通常の全く逆になっていて、これをH-Q曲線にすると図8の通りになる。これは上流に霞ヶ浦があり、下流に常陸川水門があつてその開閉に応じて水位の上下がおこるので、このように変動する。水位が下ると流量が増すというモデルは図9のように考えれば説明がつくので、(1)式の省略形である長方形断面水路のマニングの式により

$$Q = \frac{1}{n} B H^{5/3} \left(\frac{H_L - H}{\Delta x} \right)^{1/2} \dots\dots (21)$$

とおける。ここにB:川幅, H:水深, H_L :湖の水位(Hと同じ原点による), Δx :Hと H_L との観測所の間隔である。Hが浅くなりすぎれば(21)式は成立しないが、QをHの関数として描くと図10のようになり、下部は通常のH-Q曲線と似ているが、上部は右下りすなわち図8のようになる。つまりこの観測所のH-Q関数を定性的に説明している。図8は僅かながらループを描いていて、これは時計廻りなので第4章で述べた通り下流からの影響が効いていることを示している。ここでも超音波などで連続的に流量を観測すれば適正な水管理ができるという大きな長所を示している。

6. まとめ

以前から河道内の洪水の流れの伝わり方については多く研究されて来たが、洪水防御や洪水予報などに関してより高い精度が、しかもこれまで十分流量観測がなされなかつた河川下流域で要求されるようになり、そのような所の潮汐も含めた不定流の挙動についての解明が迫られていた。他方著者が強い期待を寄せていた超音波による河川流量連続観測も徐々に普及して来たのでそれらのデータを基に上記の興味に従って稿を起こしたのがこの小文である。

超音波による流量観測でわかつた $H-Q$ 曲線の反時計廻り又は時計廻りのループの解説もついたし、右下りの $H-Q$ 曲線の解説もついた。超音波流量観測でさらに不定流が日夜記録されており、後日、さらに解析をすすめたいと考えている。

謝 辞

本報告を作成するに当り、超音波の流量観測のテストをした建設省北上川下流工事事務所、長年実施している霞ヶ浦工事事務所・利根川下流工事事務所にその資料提供に関して厚く感謝したい。また観測に協力している沖電気工業(株)及び超音波流量観測の改良に尽力された東京工業大学奥島基良教授・東京大学寺本俊彦教授にお礼を述べる次第である。

参 考 文 献

- 1) 安芸敬一、木下武雄 (1955) : 洪水追跡に用いられる非線型偏微分方程式の数値解法, 資源調査会事務局, 水 113, 洪水 3.
- 2) 深町正雄・大垣正勝 (1981) : 超音波式流速計と流量観測, 沖電気研究開発 112, vol 47, No. 3 pp. 15~22.
- 3) 本間仁 (1971) : 応用水理学下II, 丸善 pp.229~233.
- 4) 伊藤剛 (1971) : 数値計算の応用と基礎, アテネ出版.
- 5) 木下武雄 (1955) : 洪水流についての一考察, 資源調査会事務局, 水 144, 河川 7.
- 6) Kinoshita, T. (1959) : On the motion of the Flood Flow running down through the River, 土木学会論文集第 63 号, pp.57~65, 及び第 64 号 pp.101~111.
- 7) 木下武雄 (1964) : 締切堤開口部の流量等の概算法, 土木技術資料 Vol. 6, No.3, pp.96~99.
- 8) Kinoshita, T. (1967) : Ultrasonic Flowmeter, ICID 7th Congress, Question 24, pp. 24-307~24-318.
- 9) 木下武雄 (1968) : 超音波による河川流量の測定, 土木技術資料 Vol. 10, No. 6, pp. 17-22.
- 10) 木下武雄 (1969) : 差分法による不定流計算の時間間隔のとり方, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部 pp. 59~60.
- 11) Kinoshita, T. (1982) : Improvement of Ultrasonic Flowmeter in Rivers in Japan, IAHS Symposium on Hydrometry, Exeter (投稿中)
- 12) 奥島基良, 寺本俊彦, 木下武雄, 宮沢久 (1977) : 河川用超音波流速計, 電子通信学会, pp. 15~26.
- 13) 奥島基良, 大槻茂雄, 佐藤高根 (1981) : 水中超音波M系列相関法による広域平均流速測定の試み, 電子通信学会 pp. 21~27.
- 14) 米田正文 (1952) : 淀川計画高水論. 第 3 編洪水特性論. (学位論文)

(1981年11月18日 原稿受理)