

流水方向に振動する水門からの変動放水流に関する研究

(レーザー流速計を用いた流速の測定と変動流量係数)

A Study for Fluctuating Flow Rate from a Streamwise Vibrating Gate (Flow Velocity Measurement by Laser Doppler Velocimeter and Instantaneous Flow-Rate Coefficient)

石井徳章* 中田亮生** 丸山富美夫***

by Noriaki ISHII, Akinori NAKATA and Tomio MARUYAMA

This paper presents the model test results for variations in flow rate from a streamwise vibrating gate. A vertical gate was forced to vibrate in the streamwise direction, at various frequencies from 1.0 to 15.0 Hz, where the gate vibration amplitude was fixed at a small value of 0.5 mm and the gate opening height at 3 mm which is far smaller than the gate-opening water depth, 175 mm. The instantaneous discharge flow velocity induced by the streamwise gate vibration was measured along the gate opening just under the gate bottom, by a Laser Doppler velocimeter. The flow velocity amplitude and the phase-lag relative to the gate vibration were calculated from the measured data of flow velocity. Finally, the amplitude of flow-rate variations was calculated by integrating the data of flow velocity amplitude over the whole gate opening, and was divided by the flow-rate change induced by a quasistatic gate vibration, thus resulting in the instantaneous flow-rate coefficient.

1. 緒言

幅の広い河川をせき止める長径間ゲートは、ゲート高さに比べてスパンの長さがはるかに大きい。したがって、ゲートはそれ自身の曲げたわみ性のために、河川の上流方向にたわみ振動を起こしやすい。図1に示すように、ゲートがゲート真下の河床面と直交していない場合には、ゲートの振動に伴って放水流量が変化する。それゆえ、ある適当な条件下では、放水流とゲートのたわみ振動とが連成して、長径間ゲートは激しい自励振動を引き起こす。このような長径間ゲートの流体関連振動はPetrikatによって初めて紹介され⁽¹⁾、その後、石井らによってモデ

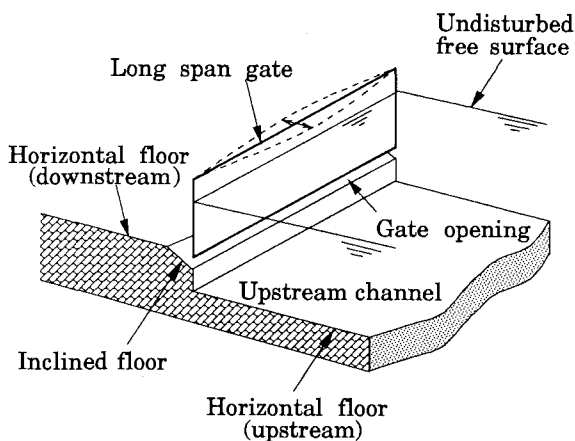


Fig.1 General view of streamwise vibrating long-span gate installed over an inclined floor

* 工博 大阪電気通信大学教授 工学部 精密工学科 (〒572 大阪府寝屋川市初町18-8)

** 大阪電気通信大学大学院 工学研究科 修士課程 (〒572 大阪府寝屋川市初町18-8)

*** 大阪電気通信大学大学院 工学研究科 修士課程 (〒572 大阪府寝屋川市初町18-8)

ル実験と理論解析が行なわれている⁽²⁾⁻⁽¹²⁾。石井らは、比較的背丈の低いシェル形長径間ゲート(水平と上下の2方向に曲げ振動を引起す)の振動問題⁽¹³⁾⁻⁽²⁰⁾や流出渦と関連した長径間ゲートの振動問題⁽²¹⁾⁻⁽²⁵⁾についても研究を行なっている。長径間ゲートの理論的な解析では、RayleighやLambらによって開発されたポテンシャル理論⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾を用いて、たわみ振動による貯水池内の圧力の変化を第1に解析し、続いてゲートの運動方程式を導いている^{(3)・(4)・(12)}。さらに、導かれた微・積分型の運動方程式を近似的な解法で解き、その結果、振動数や発振比などの自励振動の基本的な諸特性を明らかにしている^{(5)-(9)・(12)}。

著者らは、最終的に得られた理論解析の結果を検証するために、小型の2次元モデルゲートを用いた流水実験を行なっている⁽¹⁰⁾。その結果、理論解析の結果が実験の結果とよく一致することを確認している。ただその際、変動放水流量係数を若干補正する必要があった。これまでの理論的な取り扱いでは、ゲートの振動に伴う放水口開度の変化に応じて、放水流量が1:1で変化するものと仮定していた。テンターゲートの流体関連振動⁽²⁹⁾⁻⁽⁴⁰⁾に関する理論解析では、ゲートが放水流に対して直角な方向に動くので、このような仮定を用いて現象を正確に表現することができた。しかしながら、長径間ゲートの場合には、放水流量の変化が放水口開度の変化に対して必ずしも1:1で対応しないことを、モデル実験の結果は示唆していた。

ゲートの動きが極端に速いと、放水流の変化がゲートの動きに追従できなくなる。これはもちろん放水流の慣性の効果に起因したものである。このような効果は、テンターゲートの場合にも当然現れる。しかし、テンターゲートの場合には、ゲートの動きと放水流が直交しているので、放水流の慣性効果が問題になる周波数は比較的高いようである^{(31)・(41)}。これに対して長径間ゲートの場合には、ゲートの動く方向が放水流の方向と直交していない、むしろ両者のなす角度は小さい $10\sim 20^\circ$ であるので、放水流の慣性効果が比較的低い周波数で表面化してきたものと考えられる。

上のような観点に立ち、本研究では、放水口開度の変化に伴う放水流の動的な特性、すなわち変動放水流量係数と位相遅れの周波数に依存した特性を調べた。ここでは、小形のモデルゲートをいろいろな周波数で強制的に振動させ、そのときの放水流の流速をレーザー流速計を用いて測定した。得られた流速の波形から、振幅と位相を解析し、それらの特性を図に示した。さらに、それらの結果から放水流量の変化を求め、変動放水流量係数を算出した。

2. 実験モデル

図2に長径間ゲートの実験モデルを示す。ゲートは、奥行40mm、高さ215mmの水路に垂直に設置し、上端を支点にして回転運動できるようにしている。ゲートの支点から先端までの距離は695mmである。この値は水深 $d_0(=175\text{mm})$ の約4倍である。したがって、ゲートの回転角を微量に限定すれば、ゲートは水路の上下流方向にほぼ平行に運動するとみなせる。

水槽の底面は水平に設定している。しかし、モデルゲートの真下の部分だけは、水平面から 30° 傾けている。垂直に設置されたゲートからの角度 θ は 60° である。このために、ゲートが水平方向に動くとゲート開度が変化する。平均的な放水口開度 B (ゲート下端と傾斜した水槽底面との距離)は放水口水深 $d_0(=175\text{mm})$ よりも十分に小さな3mm

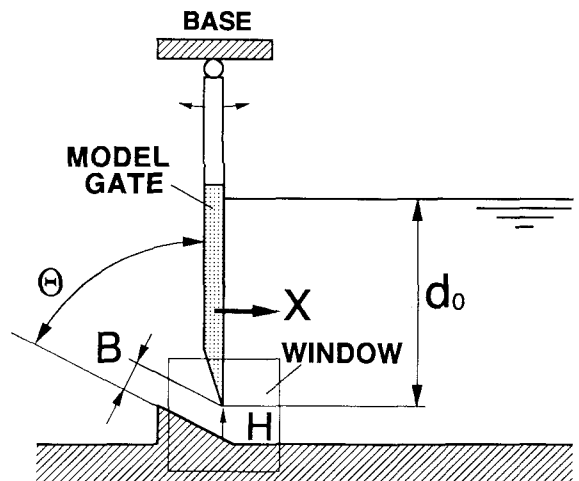


Fig.2 Two-dimensional model for measurements of fluctuating flow velocity associated with horizontal gate vibration

に設定している。ゲートは放水口開度が小さいほど自励振動を引起し易いといった結果^{(10)・(86)}が得られているので、特に放水口開度の設定には注意を払う必要があった。Bと d_o との比率(B/d_o)は約1.7%である。この小さな放水口から噴出する流れは直接大気に解放されている。したがって、水中にジェットが噴出する場合などによくみられる流出渦は、今の場合、無関係である。放水口付近の水路壁面には、レーザ光線の透過率が高く、かつ乱反射の少ない専用の光学ガラス窓を設けている。流速の測定にはレーザ流速計(日本カノマックス社製、He-Neレーザ)を用いた。

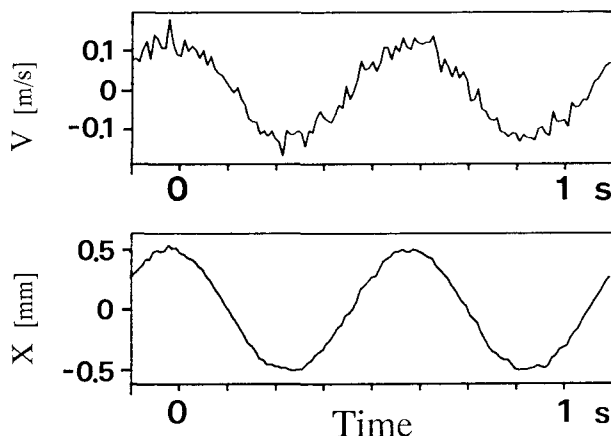


Fig.3 Waveforms of measured fluctuating flow velocity and horizontal gate vibration

3. 実験結果

ここでは、片振幅 $X_o=0.5\text{mm}$ でゲートを強制的に水平振動させた。そのときのゲートの水平振動 X を次式で表す。

$$X = X_o \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 X は上流側に向かう方向を正とする(図2を参照)。ゲートの振動数 f は1Hzから16Hzまで変化した。そのときの放水流の変動流速 V は、振幅を V_o 、ゲートの水平振動に対する位相遅れ角を ϕ_v とすると、

$$V = V_o \cos(2\pi ft - \phi_v) \quad (2)$$

で表すことができる。

変動流速 V を、ゲートの真下で計測した。計測した流速の方向は傾斜面に沿った方向である。レーザ流速計で検出した変動放水流速の一例を図3に示す。上が流速 V 、下がゲートの水平振動 X のそれぞれの実時間波形である。強制振動の周波数は2Hzである。ゲートの振動は非接触型振動計で計測したので比較的なめらかな波形である。しかし、流速の波形にはかなりの高周波成分が含まれている。これは流体中の反射粒子が連続的に流れていないために生じたものである。強制振動の周波数が高くなると、高周波成分は相対的にもっと大きなレベルで現れてくる。

変動流速の実時間波形から流速の振幅 V_o とゲートの水平動に対する位相遅れ角 ϕ_v を算出した。その際、高周波成分に起因した解析誤差をできる限り小さくするために、FFT(HP-5423A)を用いて計測波形の統計的な相関処理を行った。得られた結果を図4に示す。縦軸の H はゲート真下の傾斜面からゲート下端までの位置の座標を表す。パラメータは強制振動の周波数 f (Hz)である。ここでは、 $f=16\text{Hz}$ のときのデータも表示しているが、この程度の周波数になると水面に砕け波が発生していた。

流速の振幅 V_o は、いずれの振動数 f の場合にも、ゲート下端に近づくほど大きくなる傾向を示す。振動数 f が大きくなると、それに応じて流速の振幅 V_o は全体的に小さくなる。遅れ位相角 ϕ_v は、振動数 f が6Hz

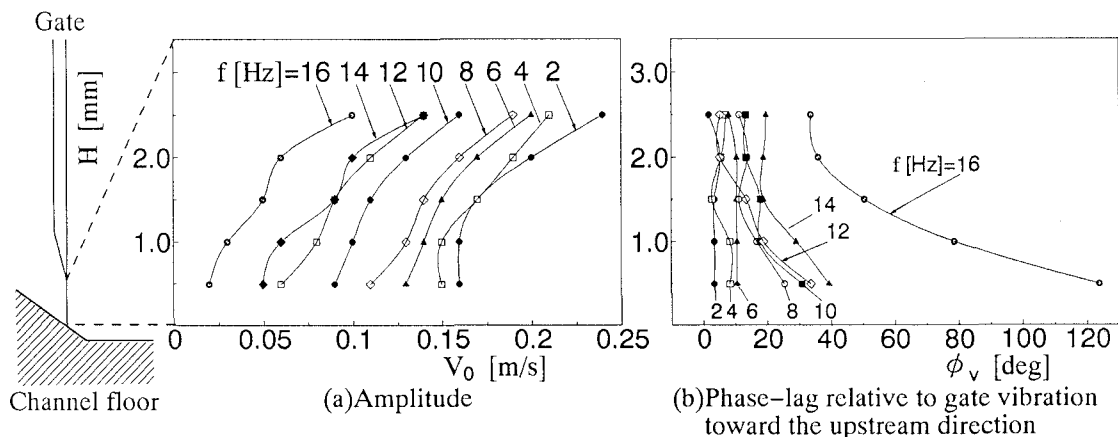


Fig.4 Fluctuating flow velocity along the gate opening just under the gate bottom, associated with horizontal gate vibration

以下の比較的小さい場合には、放水口全域にわたってほぼ一定の小さな値（ 10° 以下）である。しかし、振動数が6Hzを越えると、全体的に位相の遅れが大きくなる。その傾向はゲート下端から離れた傾斜面側で特に顕著に現れる。振動数が14Hzを越えると、位相の遅れ ϕ_v が極端に大きくなる。

図4に得られた結果は、放水流の慣性による効果をよく表している。振動数 f が大きくなるほど、流速の振幅が小さくなり、ゲートの動きに対する応答も悪くなって遅れ角度が大きくなる。いずれも慣性効果による結果と考えると、合理的である。放水流に変動を与えているのはゲートの水平動そのものである。当然、その加振源の近くほど流速の振幅が大きく、応答の遅れも小さい。しかし、加振源から遠ざかるほど、応答振幅が小さくなり、応答の遅れも大きくなる。これも放水流の慣性効果の現れである。

4. 変動放水流量係数と位相遅れの特性

式(1)の形でゲートが振動すると、放水口開度の増加分 Δb は

$$\Delta b = X_o \cos \Theta \cdot \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

与えられる。この開度の増加に応じて、当然、放水流量は増加する。これまでの理論的な解析では、ゲートが準静的に動く場合を想定して、放水流量の増加分 ΔQ が、ヘッド d_o による理論流速 $\sqrt{2gd_o}$ に開度の変化量 Δb を掛けた形で与えられるものと仮定している。

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta C_f \sqrt{2gd_o} \cdot \Delta b \\ &= \Delta C_f \cdot q \cos(2\pi ft) \quad \text{ただし、} q = \sqrt{2gd_o} \cdot X_o \cos \Theta \end{aligned} \quad (4)$$

ΔC_f が変動放水流量係数を表す。上式はきわめて簡単な、大胆な仮定ではあるが、これによって比較的小さい流れ場の解析が可能になり、さらにテナゲートや長径間ゲートのいずれにおいても、実験結果によく一致する結果が導いている〔6〕、〔7〕、〔10〕、〔31〕、〔32〕、〔34〕、〔41〕。

式(4)では、放水流量の変化はゲートの水平振動に対して全く位相遅れがないと仮定している。しかしながら、流速 V の位相遅れ角 ϕ_v を図3bに示したように、放水流量の変化はゲートの水平振動に対してある程

度遅れていることが分かった。位相遅れ角の平均値を $\overline{\phi_v}$ とすると、実際の流量増加分 ΔQ_{ex} は、流速の水平方向成分 $V \sin \theta$ を放水口全体にわたって積分した次の形：

$$\begin{aligned} \Delta Q_{ex} &= \int_{\text{放水口}} V \cdot \sin \theta dH \\ &\approx \left(\int_{\text{放水口}} V_0 \cdot \sin \theta dH \right) \cos(2 \pi f t - \overline{\phi_v}) \end{aligned} \tag{5}$$

で与えられるべきである。

式(4)の ΔQ と式(5)の ΔQ_{ex} のそれぞれの振幅が等しいと置くと、変動放水流量係数 ΔC_f が

$$\Delta C_f = \frac{\tan \theta}{\sqrt{2gd_0} \cdot X_0} \int_{\text{放水口}} V_0 dH \tag{6}$$

で求められることになる。図 3 a)に示した V_0 を用いれば、上式から ΔC_f が算出できる。その結果を図 5 に示す。横軸はゲートの振動数 f である。振動数が約 3Hz までの範囲では、変動放水流量係数 (ΔC_f) はほとんど 1.0 である。しかし、振動数が大きくなるにしたがって、放水流の慣性効果のために、変動放水流量係数は徐々に小さくなる。振動数が 11Hz のときには、変動放水流量係数は約 0.6 になる。流速の位相遅れ角 ($\overline{\phi_v}$) は、振動数が大きくなるにしたがって、徐々に、ほとんど直線的に大きくなる（これも、すでに説明したように、放水流の慣性効果に起因している）。ただし、振動数が大体 14Hz 以下であれば、位相遅れ角の値は約 20° よりも小さな値である。振動数が約 14Hz よりも大きな範囲では、位相遅れ角が急に大きくなり、変動放水流量係数も急に減少している。これは、振動数が高いと水面に砕け波が発生する傾向にあり、それが悪い影響をもたらしたと考えられる。

5. 結論

本研究では、放水口水深を 175mm、放水口開度を 3mm、ゲート真下の傾斜面角度を 60° に設定して長径間ゲートの小形モデルを強制的に振幅 0.5mm で微小振動させ、そのときの放水流の流速を測定し、放水口開度の変化に伴う放水流の変動流量係数とゲートの動きに対する位相遅れ角を求めた。計測自体が比較的むづかしいので、変動する放水流の流量係数等に関するデータがあまり報告されていない。今回、レーザー流速計を用いれば、比較的正確に変動流量係数と位相遅れ角を検出できることが分かった。結果は次のように要約できる。

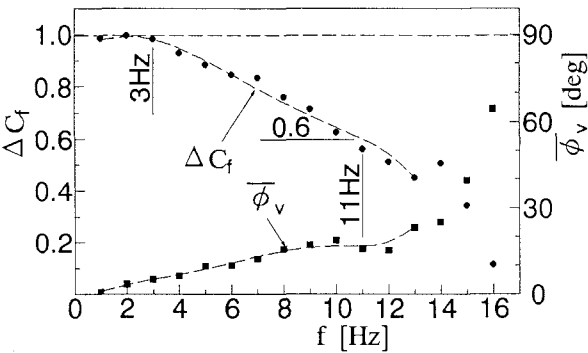


Fig.5 Instantaneous flow-rate coefficient and phase-lag relative to horizontal gate vibration toward the upstream direction

- (1)変動流量係数は、ゲートの振動数が3 Hzよりも小さい場合には約1.0である。しかし、振動数が3 Hzよりも大きくなると、放水流の慣性効果のために変動流量係数は徐々に減少する。振動数が11Hzになると変動流量係数は約0.6になる。
- (2)ゲートの水平動に対する放水流の位相遅れ角も放水流の慣性効果のために、徐々に大きくなるが、振動数が14Hzよりも小さい場合には約 20° 以下の比較的小さい値である。

ここで得られた知見は、放水口水深、放水口開度、傾斜面角度、ゲートの振動振幅などの主要なパラメータを特定の値に設定した場合の結果である。したがって、上の結論がすべての場合に当てはまるわけでは決していない。特に、放水口水深と傾斜面角度が変われば、ゲートの水平動と放水流とのなす角度が大幅に変わるので、変動流量係数や位相遅れ角も上の知見とは異なる結果になるものと考えられる。ただ、今回の研究によって、レーザー流速計を用いれば変動放水流の主要な特性を計測できることが明らかになったので、今後は上の主要なパラメータを変えた詳しい実験を行ない、それによって初めて変動放水流に関する一般的な知見が得られるものとする。

参考文献

- (1) Petrikat, K., : Seal Vibration, In: Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations (ed. Naudascher, E. & Rockwell, D.), pp. 476-497, 1980, Berlin, Springer-Verlag.
- (2) 石井・今市: 長径間ゲートの流体関連振動、土木学会第36回年次学術講演会講演概要集(第2部)、pp. 337-338、1981-10.
- (3) Ishii, N., Naudascher, E. and Thang, N.: A Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates, Proc. of Int. Conf. on Flow-Induced Vib., Bowness-on-Windermere, pp. 293-304, 1987-5.
- (4) 石井・ほか2名: 長径間ゲートの流体関連振動(第1報、運動方程式の導出)、日本機械学会論文集B編、第53巻495号、pp. 3267-3273、1987-11.
- (5) 石井・ほか3名: 長径間ゲートの流体関連振動(第2報、付加質量と流体減衰係数)、日本機械学会論文集B編、第54巻504号、pp. 1977-1984、1988-8.
- (6) 石井・ほか4名: 長径間ゲートの流体関連振動(第3報、付加質量と流体減衰係数の検証)、日本機械学会論文集B編、第54巻507号、pp. 3151-3156、1988-11.
- (7) Ishii, N.: Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates (Verification of Added Mass and Fluid Damping), JSME Int. J., Ser. II, vol. 33, No. 4, pp. 642-648, 1990: Proc. IAHR & AIRH Symp. (Belgrade, Yugoslavia), p. N-1-1-9, 1990-7.
- (8) 石井: 長径間ゲートの流体関連振動(第4報、振動数比と流体減衰比)、日本機械学会論文集B編、第56巻531号、pp. 2887-2892、1990-11.
- (9) 石井・中田: 長径間ゲートの流体関連振動(第5報、運動方程式の解と安定基準)、日本機械学会主催・流体工学部門講演会論文集、pp. 51-53、1991-8.
- (10) 石井・中田・川邊: 長径間ゲートの流体関連振動「(第7報、自励振動特性のモデル実験による検証)」、日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集、No. 920-55, Vol. b, 1992-7.
- (11) 石井: たわみゲートの流体関連振動、原子力分野における流体関連振動研究会(Ⅲ)報告書、東京大学工学部附属原子力研究施設、pp. 53-88、1992-8.

- (12) Ishii, N. : Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates (Part I : Model Development)
Journal of Fluids and Structures, Vol. 6, No. 5, pp. 539-562, 1992.
- (13) 石井・ほか2名：シェル型長径間ゲートの流体関連振動（第1報、アンダーフロータイプの基本的な
自励振動特性）、日本機械学会論文集C編、第56巻531号、pp. 2880-2892、1990-11.
- (14) 石井：シェル型長径間ゲートの流体関連振動（第2報、アンダーフロータイプの基本的な自励振動特
性に関する検討）、日本機械学会論文集C編、第57巻533号、pp. 35-41、1991-1.
- (15) 石井・中田・野島：シェル形長径間ゲートの流体関連振動、構造工学論文集、第38A巻、pp837-850、
1992-4.
- (16) 石井・中田：シェル形長径間ゲートの流体関連振動（第3報、アンダーフロータイプの運動方程式の
導出と仮定の検証）、日本機械学会主催・第69期全国大会（平成3年10月16日、名古屋大学）
にて講演.
- (17) 石井：シェル形長径間ゲートの流体関連振動、日本機械学会 振動・騒音問題の改善と事例「v-BASE」
フォーラム特別企画資料集No. 920-65、1992-8.
- (18) Ishii, N and Knisely, C. W. : Flow-Induced Vibration of Shell-Type Long-Span Gates, Journal of
Fluids and Structures, Vol. 6, pp. 681-703, 1992.
- (19) Ishii, N., Knisely, C. W. and Nakata, A. : Coupled-Mode Vibration of Gates with Simultaneous Over
-and Underflow, Proceedings of the ASME Winter Annual Symposium on Flow-Induced Vibration
and Noise, Vol. 6, pp. 193-205, 1992-11.
- (20) Ishii, N., Knisely, C. W. and Nakata, A. : Field Studies of A Full-Scale Long-Span Shell-Type
Gate Undergoing Flow-Induced Vibrations, to be presented at the 1993 ASME Pressure Vessels
and Piping Division Conference at Denver, July 25-29, 1993.
- (21) Ishii, N. and Knisely, C. W. : Shear Layer Dynamics and Unsteady Discharge Beneath A Long Span
Gate Undergoing Streamwise Vibrations (ed. Maksimovic, C. and Radjkovic, M.),
Computational Modelling and Experimental Methods in Hydraulics (HYDROCOMP'89, Dubrovnik,
Yugoslavia), pp. 500-509, 1989-6. Elsevier Applied Science.
- (22) 石井・ほか2名：流出渦と連成した長径間ゲートの流体関連振動（第1報、振動発生条件と流体励
振力の強さおよび流体付加質量）、日本機械学会論文集C編、第55巻519号、pp. 2724-2730、1989.
- (23) Ishii, N. and Knisely, C. W. : Shear Layer Behaviour Under A Streamwise Vibrating Gate and Its
Significance to Gate Vibration, JSME Int. J., Series III, vol. 33, No. 2, pp. 131-138, 1990.
- (24) Ishii, N. and Knisely, C. W. : Flow-Induced Vibration of Long-Span Gates due to Shed Vortices
(Vibration Criteria, Level of Fluid Excitation and Added Mass), JSME Int. J., Ser. III,
Vol. 35, No. 321, 1992-3.
- (25) Ishii, N. and Knisely, C. W. : Flow-Induced Vibration of Long Span Gates Due to Shed Vortices
(Vibration Criteria, Level of Fluid Excitation and Added Mass), JSME Int. J., Series III,
Vol. 35, No. 4, pp. 1-8, 1992.
- (26) Rayleigh, J. W. S. : The Theory of Sound, Dover Publication, 1945.
- (27) Rayleigh, J. W. S. : The Form of Standing Waves on the Surface of Running Water, Proceedings of
London Mathematical Society, 15-69, p. 1883, 1883.
- (28) Lamb, H., Hydrodynamics, Cambridge University Press, 1932.
- (29) Lamb, H., : On Deep-Water Waves, Proceedings of London Mathematical Society, Series 2, 2-388,
1904.

- (30) 石井・今市：表面波の発生と連成したテンタゲート系の自励振動、日本機械学会論文集、第42巻364号、pp.3853-3861、1975.
- (31) 今市・石井：放水量の変化によるダムのせき止め水面に生じる波、日本機械学会論文集、第42巻364号、pp.3929-3941、1975.
- (32) Ishii,N. and Imaichi,K. : Water Waves and Structural Loads Caused by a Periodic Change of Discharge from a Sluice-Gate、Bull. JSME, Vol.20, No.146, pp.988-1008, 1977.
- (33) Imaichi,K. and Ishii,N. : Instability of an Idealized Tainter-Gate System without Damping Caused by Surface Waves on the Back Water of Dam、Bull. JSME, Vol.20, No.146, pp.963-970, 1977.
- (34) Ishii,N. and Imaichi,K. : Instability of Elastically Suspended Tainter-Gate System Caused by Surface Waves on the Reservoir of a Dam, Trans. ASME, J. Fluid Engineering, Ser.I, Vol.99, No.4, pp.699-709, 1977.
- (35) 今市・石井：テンタ・ゲートにおける自励振動、水門鉄管、No.113、pp.1-11、1977.
- (36) Ishii,N. and Imaichi,K. : Dynamic Instability of Tainter-Gates, In: Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations (ed. Naudascher,E. & Rockwell,D.), pp.452-460, 1980, Berlin, Springer-Verlag.
- (37) 石井・今市：表面波の発生と連成したテンタゲートの自励振動（近似解）、日本機械学会論文集B編、第48巻428号、pp.640-647、1982.
- (38) Ishii,N., Imaichi,K. and Yamasaki,M. : Flow-Induced Structural Vibration of Single-Arm Tainter-Gates, Proc. of 20th IAHR Congr., Moscow, pp.317-324, 1983-9.
- (39) Ishii,N. and Naudascher,E. : Field Tests on Natural Vibration Modes of A Tainter Gates, Proc. of 1st Int. Conf., Southampton, pp.209-222, 1984, Springer-Verlag.
- (40) 石井・今市：貯水池が比較的浅い場合のテンタゲートの自励振動（第1報、運動方程式の導出）、日本機械学会論文集B編、第54巻508号、pp.3444-3448、1988.
- (41) Ishii,N. and Naudascher,E. : A Design Criterion for Dynamic Stability of Tainter Gates, Journal of Fluids and Structures, Vol.6, No.1, pp.67-84, 1992.

(1993年1月16日受付)