

(10) 張糸式流速計に関する構造力学的かつ流体力学的考察

中川 武夫*

1. はじめに

一つの流速計をその他の流速計と区別するものは、速度検出の際に用いる物理原理であると考えよう。ところで、本論文で取り扱う張糸式流速計とは「流れの中に張り合わせてある糸は流下方向への流速に依じた大きさの抗力を受ける。」という簡単な物理原理に基づいて設計された流速計の総称である。すなわち、この糸に働く抗力を速度に校正すれば、糸が張り合わされている位置での流速が求められることになる。

張糸式流速計は既に、一様流(Sharp 1964)、振動境界層流(Sleath 1969)、規則波の水粒子速度、(中川 1980)、破壊の水粒子速度(中川ら 1981)等の測定に適用されている。その結果、張糸式流速計は比較的構造が簡単であるばかりでなく、既存の流速計では測定が不可能と考えられていたような複雑な流れを設計上の工夫により精度良く測定できることが明らかになった。ところが、この張糸式流速計の実際の成果ににもかかわらず、この流速計の速度検出機構に関する理論的考察はこれまでなおざりにされてきた。そこで、本研究では張糸式流速計の速度検出機構をより詳細に把握し将来の張糸式流速計に対してより良い設計指針をうるために、糸に抗力が働いたときの速度検知部の構造解析と糸の周辺の流れに関するいくつかの考察を行なった。

2. 張糸式流速計

(1) 構造

ここでは、破壊の水粒子速度の測定用にとくに設計した張糸式流速計(中川ら 1981)を例にとり、張糸式流速計の基本構造を紹介することにする。Fig.1 にその張糸式流速計の全容を示した。この流速計の速度検知部は本体底部に張り合わせた3本の綿糸1,2,3で3である。各綿糸の一端は剛性支持され、他端はFig.2 に示したような片持ち板、厚さ0.5mmの先端に弾性支持されている。片持ち板の両面には各1枚づつの半導体かすみゲージ、120Ωが張ってある。また、片持ち板の材質としてCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic、比重1.7、引張弾性率20,000 kg/mm²)を用いたこと及び片持ち板の平面形状を台形とした理由は板の自重による影響を極限するためである。各綿糸の長さ、太さはそれぞれ55mm, 0.1mmであり、綿糸1,2,3はそれぞれ互いに直交するx,y,z方向の速度成分を独立に検出する。綿糸1と3は同一水平面内に平行間隔20mmで張り合わせてあり、綿糸2は綿糸1と3を含む平面の下15mm

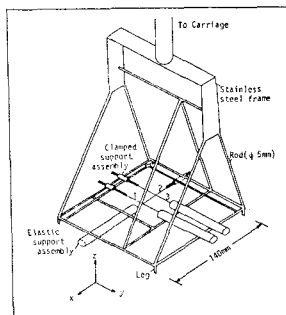


Fig.1 Tension-thread flow meter for measurement of water particle velocity of breaking-wave.

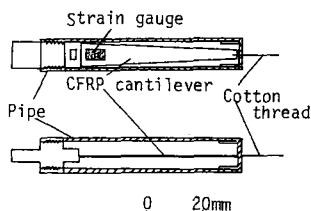


Fig.2 Elastic support assembly of a tension-thread flow meter.

* Ph.D 金沢工業大学助教授 工学部・土木工学科

の水平面内に綿糸 1,3 とは直交する方向に張り合わせてある。

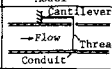
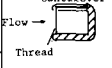
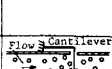
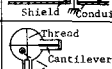
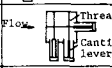
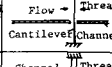
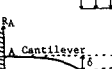
張糸式流速計の速度検出過程は流れから綿糸が受ける片持ち板の面に垂直方向の抗力をまず片持ち板自体のみずみに変換し、このみずみを半導体みずみゲージを用い電圧信号に変え、動みずみ測定器で増幅したり、データ・レコーダに記録するというものである。なお、各綿糸が片持ち板の面に垂直方向の速度成分を選択的に検出できるのは片持ち板の厚みに対する幅の比が十分大きくなるように設計されていることによる。

以上の説明から明らかなように、張糸式流速計で測定される流速は綿糸を張った小型槽における平均的な流速ということになる。

(2) 応用例

Table 1 に主な張糸式流速計の設計者、原理図及び測定の対象とした流れを要約した。この表から、80 年代以前に設計された張糸式流速計は速度の一方向成分を測定することができのみであった。ところが、80 年代に入ると張糸式流速計が規則的な水粒子速度のような二次元振動流や、破壊的な水粒子速度のように三次元振動性乱流の測定にも適用されるようになった。さらには、従来の流速計ではその測定が困難と考えられている乱流境界層流あるいは振動境界層流のような複雑な流れの測定に張糸式流速計がとくに有用であることが明らかとなっている。

Table 1 Models and Applications of Tension-thread Flow Meter.

Designer	Model	Application
Sharp(1964)		Velocity measurement in conduit.
Sharp(1964)		Velocity measurement in open channel.
Sleath(1969)		Velocity measurement in oscillatory boundary layer.
Sharp & O'Neill(1971)		Distribution of suspended particles in conduit.
Nakagawa(1980)		Water particle velocity measurement of regular wave.
Nakagawa, Iwata & Koyama(1981)		Water particle velocity measurement of breaking wave.
To be designed by author		Velocity measurement in turbulent and oscillatory boundary layer.
To be designed by author.		Velocity measurement in turbulent boundary layer.

3. 理論解析

(1) 糸及び片持ち板のためみ

解析の詳細は付録に示すこととし、ここでは解析の方向、仮定、境界条件及び結果のみを示すことにする。

Fig.3(a) は、ここでの解析の対象である張糸式流速計の検知部を示した図である。片持ち板の左端は固定支点であり、一方、糸の右端はこの固定支点と同一の高さにあるヒンジ支点である。また、片持ち板の右端と糸の左端は B 点において結び合わされている。Fig.1 及び Fig.2 に示したように張糸式流速計の片持ち板の部分は円筒の中に収められているために、この部分には抗力は働かないので、糸及び片持ち板のためみは糸の部分に働く抗力によってのみ引き起こされると考えられる。そこで、本解析においてはこの糸に働く流下方向への抗力を Fig.3(a) のように糸の水平長 l にわたって単位長さ当たり w の等分布荷重と仮定する。このような等分布荷重が糸に加わった結果として Fig.3(a) に示したように糸及び片持ち板がたわんで釣合ったとして解析をする。

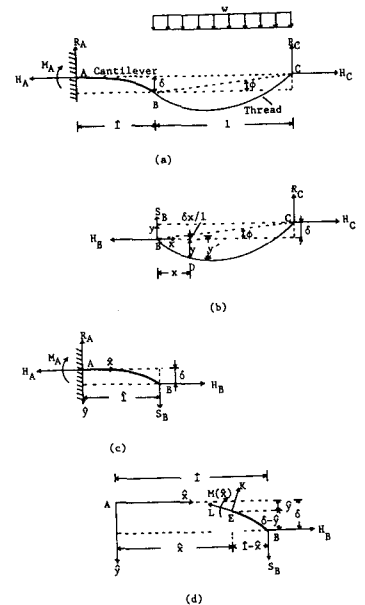


Fig.3 Definition sketch for structural analyses of tension-thread flow meter.

なお、糸及び片持ち板の自重はこれらの値が抗力に比べて小さいとして無視した。

実際の解析に際しては、Fig.3(a)のような静的に釣合っている力學系をこれと等価な Fig.3(b)と(c)のような二つの力學系に分けて取り扱った。なお、Fig.3(b)と(c) はそれぞれ糸と片持ち板の切断部を示し、解析の際に用いた記号は Fig.3 に示したように定義する。

まず、糸のたねみ曲線は Fig.3(b)のような力學系の釣合いかゝ次のように求められる。

$$y = x \left(\frac{w}{2H} x + \frac{\delta}{\ell} - \frac{w\ell}{2H} \right) \quad \dots (1)$$

一方、片持ちばりのたねみ曲線は、Fig.3(c)及び(d)を参照して、はりの微分方程式とはりの左端における固定支点、Aの境界条件が次のように求められる。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \left[\frac{1}{2H} \left(\frac{EI}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) + \frac{1}{2H} \left(\frac{w\ell\hat{\ell}}{2} - \frac{H\delta\hat{\ell}}{\ell} - H\delta \right) \right) \text{Exp} \left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x} \right) + \right. \\ & \left. + \left[\frac{1}{2H} \left(\frac{w\ell\hat{\ell}}{2} - \frac{H\delta\hat{\ell}}{\ell} - H\delta \right) - \frac{1}{2H} \left(\frac{EI}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) \right) \right] \text{Exp} \left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x} \right) + \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) \hat{x} - \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell\hat{\ell}}{2} - \frac{H\delta\hat{\ell}}{\ell} - H\delta \right) \right] \quad (2) \end{aligned}$$

以上のように、糸及び片持ちばりのたねみ曲線が形式的には求まったわけであるが、未だこれらの式の中のとねみ δ は未知量である。そこで、Fig.3(c)を参照して片持ちばりの右端、Bにおけるとねみが0に等しいという条件を上式に適用することにより、求めたいたねみ δ が次のように求められる。

$$\delta = \frac{w\ell}{2H} \frac{\left[\left(\hat{\ell} + \sqrt{\frac{EI}{H}} \right) \text{Exp} \left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{\ell} \right) + \left(\hat{\ell} - \sqrt{\frac{EI}{H}} \right) \text{Exp} \left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{\ell} \right) \right]}{\left[\left(\frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{EI}{H}} + \frac{\hat{\ell}}{\ell} + 1 \right) \text{Exp} \left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{\ell} \right) - \left(\frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{EI}{H}} - \frac{\hat{\ell}}{\ell} - 1 \right) \text{Exp} \left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{\ell} \right) \right]} \quad (3)$$

(2) 糸に働く抗力

本章、第(1)項においては糸の単位長さ当たりに働く抗力を w と仮定して張糸式流連計・速度検知部の解析を行なったが実際に糸及び片持ち板のたねみ曲線を計算するためにはこの抗力の大きさを評価することが必要となる。

ところで、一般に糸の単位長さ当たりに働く抗力は次のように表わすことができる。

$$w = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 S \quad ,$$

ここで、 C_D は抗力係数、 ρ は流体の密度、 U は流速として S は糸の単位長さ当たりの流れ方向への投影面積である。ところで、抗力係数 C_D はレイノルズ数 $Re = UD/\nu$ 、ここで D は糸の直径として ν は流体の動粘性係数、に依存するので抗力 w を全てのレイノルズ数範囲にわたり正確に評価することは現段階では無理である。しかしながら、Lamb(1932 p.616) はレイノルズ数が1に比較して十分小さい場合の糸の単位長さ当たりに働く抗力を理論的に次のように求めている。

$$w = \frac{4\pi\mu U}{\frac{1}{2} - \gamma - \ln(Ua/\nu)} \quad , \quad (4)$$

ここで、 μ は流体の粘性係数、 $\gamma = 0.577$ はEulerの定数として a は糸の半径である。

張糸式流連計の速度検知部の糸のまわりの流れのレイノルズ数のオーダーは、通常1程度になるよ

うに設計されるので、次章に示す理論計算においては糸に働く抗力の評価のために上に示した Lamb の理論値を採用することにする。

4. 計算結果

(1) 糸に働く抗力及び片持ち板先端部のたわみ

計算の予題は、まず流速 U 及び Table 2 に示した諸量のうち、 μ , α として ν の値を Lamb の理論結果である (4) 式に代入して糸の単位長さ当たり働く抗力 w の値を求める。次に片持ち板先端部のたわみは、この抗力 w 、Table 2 の該諸量の値及び水平張力 H の値を (3) 式へ代入することにより求めることができる。

Table 3 に、これらの計算結果を示した。この計算結果から、水平張力 H を一定とすれば流速 U が増すにつれて糸に働く抗力が増し、片持ち板先端部のたわみ δ が増加することがわかる。

一方、流速 U を一定に保ち張力 H を増した時には片持ち板先端部のたわみ δ は徐々に減少する。

(2) 糸及び片持ち板のたわみ曲線

Fig.4 は Table 3 に示した計算例のうち (g), (h), (i) のそれぞれに対応する糸と片持ち板のたわみ曲線を (1) 式と (2) 式から計算し、プロットしたものである。Fig.4 から、水平張力 H の増加に伴ない糸のたわみが小さくなることがわかった。なお、この図からは片持ち板のたわみ曲線はたわみが小さいために明らかではないが、計算の結果片持ち板のたわみも糸のたわみと同様に水平張力 H の増加に伴ない小さくなることも明らかになっている。

5. 議論

レイノルズ数 Re が 60 程度になると流れの中に置かれた円柱の後流中へカルマン渦の放射がはじまることがわかっている (Schlichting 1968)。また、このカルマン渦の放射周波数が $f=SU/D$ 、ここで S はストローハル数、で求められることが実験的に証明されている。当然のことながら、張糸式流速計の糸の後流中にレイノルズ数が限界値 60 以上となればカルマン渦が発生することになるが、もしもカルマン渦が流速計測中に糸の後流中に発生すればこの交差渦が逆に糸を強制的に振動させることになるためにこの流速計の測定精度が著しく片になる。

過去にも、流速と物体に働く抗力との関係から流れの速度を求めようという試みはいくつもある。たとえば、流れの中に突き出した円柱に働く抗力から流速を測定したものの (Beardsley et al. 1963)、流れの中の円板に働く抗力から流速を測定したものの (Nakagawa & Hinwood 1978)、流れの中の有孔球に働く抗力から流速を測定しようとした試み (Nakagawa 1978) 等があるが、いずれも流れの中にやうに入れた円柱、円板、有孔球の後流中におけるカルマン渦の発生を抑えることに失敗している。とくに、カルマン渦の放射周波数と流れの中の物体の固有振動数とが一致した時には、この物体は共振現象に

Table 2 some physical constants.

Nomenclature	Symbol	
Thread radius	a	0.05[cm]
Young modulus	E	1.96×10^{12} [dyne/cm ²]
Moment of inertia	I	5.73×10^{-8} [cm ⁴]
Horizontal distance between A and B	l	5.50[cm]
Horizontal distance between B and C	l	5.50[cm]
Dynamic viscosity of water	μ	1.00×10^{-2} [g/cm.s]
Kinematic viscosity of water	ν	1.00×10^{-2} [cm ² /s]

Table 3 Some calculated results

Case	U [cm/s]	H [dyne]	w [dyne/cm]	δ [cm]
(a)	5	30	1.59	1.56×10^{-1}
(b)		50		1.17×10^{-1}
(c)		100		8.28×10^{-2}
(d)	6	30	3.52	3.45×10^{-1}
(e)		50		2.60×10^{-1}
(f)		100		1.84×10^{-1}
(g)	6.5	30	6.08	5.97×10^{-1}
(h)		50		4.48×10^{-1}
(i)		100		3.17×10^{-1}
(j)	7.0	30	14.56	1.43×10^{-1}
(k)		50		1.07×10^{-1}
(l)		100		7.60×10^{-2}

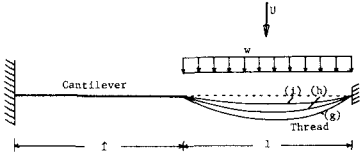


Fig.4 Deflection curves of thread and cantilever.

より激しく振動することは良く知られていることである。

以上のことから、流れの中にやう入された物体に働く抵抗力の大きさから流速を知ろうという試みの成否が、この物体後流中に発生するであろうカルマン渦をいかに制御するかにかかっていることを理解することができよう。言うまでもなく、この制御対策のうえで最上のものは問題の発生源であるカルマン渦の発生を完全に抑えることである。すなわち、張糸式流速計の設計においてクリティカルな点はやうの速度検知部である糸の直径の正しい選択を通して、糸の直径 D 、測定速度範囲内最大速度 U_{max} 、及び流体の動粘性係数 ν によって定義したレイノルズ数 $Re = U_{max} \cdot D / \nu$ の値が常にカルマン渦発生限界値 60 以下とすることである。こうした設計の結果、張糸式流速計の速度検知部の糸がそのまわりの流れに忠実に応答し、流速と抵抗力の一对一の対応がとくことになるわけである。

最後に、Fig.1 に示したような構造の張糸式流速計の固有振動数は 100 Hz 程度とかなり高いことを、この流速計の利点であることを付記しておく。

6. 結論

張糸式流速計の速度検知部の構造解析から、この速度検知部の構成要素である糸及び支持板のためには、流速が大きいわば、糸に働く抵抗力が小さいほど大きくなることが明らかになった。

一方、張糸式流速計の速度検知部の糸のまわりの流れに関する考察から、一般に流れの中にやう入された物体に働く抵抗力の大きさから流速を求める場合には、この物体の後流にカルマン渦が発生しないようにすることが重要であることがわかった。

7. 参考文献

- 中川武夫、テンション・スレッド流速計を用いた氷粒子速度の測定、土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集、第 2 部、79-80(1980)。
- 中川武夫、岩田好一郎、小山裕久、テンション・スレッド流速計による碎波の氷粒子速度の計測、第 28 回海岸工学講演会講演論文集、20-23(1981)。
- Beardsley, Jr, Knollman, G.C., Hamamoto, A.S. & Eisler, J.D., Device for measuring orbital velocities of particles in an under water wave field. The Review of Scientific Instruments, 34, 516-519(1963).
- Schlichting, H., Boundary-layer Theory, McGraw-Hill Book Company, New York, 32(1968).
- Sharp, B.B., Flow measurement with a suspension wire. Proc. A.S.C.E., HY2, 90, 37-53(1964).
- Sleath, J.F.A., A device for measurement in oscillatory boundary layers in water. J. Sci. Inst. (J. Physics E), Series 2, 2, 446-448(1969).
- Nakagawa, T. & Hinwood, J.B., On measurements of turbulence in tidal currents-a review-, MMEL34, Department of Mechanical Engineering, Monash University, Clayton, Victoria 3168(1978).
- Nakagawa, T. Unpublished manuscript.(1978).
- Lamb, H., Hydrodynamics, Cambridge University Press, Sixth Edition, 616(1932).

8. 付録

ここでは、張糸式流達計の速度検知部の構造解析の詳細を述べることにする。

まずはじめに、Fig.3(b) を参照して糸の部分の解析を行なうことにする。糸の部分の全体のつり合いを考えると、まず水平方向の力の和が零という条件から次式をうる。

$$\sum H_i = H_c - H_b = 0.$$

したがって、

$$H_c = H_b = H. \quad (A.1)$$

次に、垂直方向の力の和が零という条件から、

$$\sum V_i = S_b + R_c - w\ell = 0, \quad (A.2)$$

が、C点まわりのモーメントが零という条件から、

$$\sum (M_i)_c = H \cdot \delta + S_b \cdot \ell - \frac{w\ell^2}{2},$$

あるいは、

$$S_b = \frac{w\ell}{2} - \frac{H \cdot \delta}{\ell} \quad (A.3)$$

(A.2) と (A.3) から

$$R_c = \frac{w\ell}{2} + \frac{H \cdot \delta}{\ell} \quad (A.4)$$

また、糸の各断面には抵抗モーメントは働かないことに注意して、D点から左の糸の切断要素に働く外力モーメントが零という条件から次式をうる。

$$S_b \cdot x - H(y' - \frac{\delta \cdot x}{\ell}) - \frac{wx^2}{2} = 0. \quad (A.5)$$

(A.3) と (A.5) から

$$y' = \frac{wx}{2H}(\ell - x). \quad (A.6)$$

とここで、座標の原点をB点に選べば、

$$y = -(y' - \frac{\delta \cdot x}{\ell}) \quad (A.7)$$

の関係があるので (A.6) を (A.7) に代入すれば、次式をうる。

$$y = x \left(\frac{wx}{2H} + \frac{\delta}{\ell} - \frac{wx}{2H} \right). \quad (A.8)$$

次に、Fig.3(c) を参照して片持す板の部分の解析を行なうことにする。片持す板の部分の全体のつり合いを考えると、まず水平方向の力の和が零という条件から次式をうる。

$$\sum H_i = H_b - H_a = 0.$$

したがって、

$$H_b = H_a = H \quad (A.9)$$

次に、垂直方向の力の和が零という条件から、

$$\sum V_i = R_a - S_b = 0,$$

あるいは、上式と (A.3) を使って次式をうる。

$$R_a = S_b = \frac{w\ell}{2} - \frac{H \cdot \delta}{\ell} \quad (A.10)$$

また、A点まわりのモーメントが零という条件から

$$\sum (M_i)_a = M_a + S_b \cdot \ell - H \cdot \delta = 0,$$

あるいは、上式と (A.3) から次式をうる。

$$M_a = H \cdot \delta - \frac{w\ell^2}{2} + \frac{H \cdot \delta \cdot \ell}{\ell} \quad (A.11)$$

さらに、Fig.3(d) のように座標の原点A及び交点Gの正方向を選んだら、片持す板部の先端Bを含む切断要素のつり合いを考える。

この切断要素の左端、E点まわりのモーメントが零という条件から、

$$\sum (M_i)_E = M(x) + S_b(\ell - x) - H(\delta - y),$$

あるいは、

$$M(x) = -S_b(\ell - x) + H(\delta - y). \quad (A.12)$$

はりの微分方程式は一般に次のように表わされる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI}, \quad (A.13)$$

ここで、Eははりの材料のヤング率、Iははりの断面二次モーメントである。

(A.12)を(A.13)に代入し(A.3)を使って整理すると、次式をうる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{H}{EI} \cdot y &= -\frac{1}{EI} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H \cdot \delta}{\ell} \right) x + \\ &+ \frac{1}{EI} \left(\frac{w\ell^2}{2} - \frac{H \cdot \delta \cdot \ell}{\ell} - H \cdot \delta \right) \end{aligned} \quad (A.14)$$

(A.14)が片持す板部の方程式であり、この方程式の補解は(A.14)の右辺を零と置いて与えられる微分方程式の解であるが、次のように与え

れる。

$$\hat{y}_c = C_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x}\right) + C_2 \exp\left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x}\right) \quad (\text{A.15})$$

一方、(A.14)の特解は次のように求められた。

$$\hat{y}_p = \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) \hat{x} - \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell^2}{2} - \frac{H\delta\ell}{\ell} - H\delta \right) \quad (\text{A.16})$$

微分方程式の一般解は、補解と特解とを加え合せたものであるから、(A.14) の一般解は (A.15) と (A.16) とを加え合わせることにより次のようになる。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & C_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x}\right) + C_2 \exp\left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x}\right) + \\ & + \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) \hat{x} - \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell^2}{2} - \frac{H\delta\ell}{\ell} - H\delta \right) \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

次に、(A.17)の積分定数 C_1 、及び C_2 は片持ち板左端における固定変位 A の境界条件、すなわち

$$\hat{x} = 0 \text{ において}$$

$$\hat{y} = 0 \quad \text{及び} \quad \frac{d\hat{y}}{d\hat{x}} = 0 \quad , \quad (\text{A.18})$$

という条件から求められる、片持ち板部のたわみ曲線は最終的に次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \left[\frac{1}{2H} \left(\frac{EI}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) + \frac{1}{2H} \left(\frac{w\ell^2}{2} - \frac{H\delta\ell}{\ell} - H\delta \right) \right) \exp\left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x}\right) + \right. \\ & + \left[\frac{1}{2H} \left(\frac{w\ell^2}{2} - \frac{H\delta\ell}{\ell} - H\delta \right) - \frac{1}{2H} \left(\frac{EI}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) \right) \right] \exp\left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \hat{x}\right) + \\ & + \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell}{2} - \frac{H\delta}{\ell} \right) \hat{x} - \frac{1}{H} \left(\frac{w\ell^2}{2} - \frac{H\delta\ell}{\ell} - H\delta \right) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

ところで、梁と片持ち板との接合点 B におけるたわみ δ を既知として解析を進めてきたが、実際にはこのたわみは

$$\hat{x} = \ell \text{ において}$$

$$\hat{y} = \delta \quad (\text{A.20})$$

という条件を (A.19) に適用し、次のように求められる量である。

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{w\ell}{2H} \frac{\left[\left(\ell + \sqrt{\frac{EI}{H}} \right) \exp\left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \ell\right) + \left(\ell - \sqrt{\frac{EI}{H}} \right) \exp\left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \ell\right) \right]}{\left[\left(\frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{EI}{H}} + \frac{\ell}{\ell} + 1 \right) \exp\left(-\sqrt{\frac{H}{EI}} \ell\right) - \left(\frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{EI}{H}} - \frac{\ell}{\ell} + 1 \right) \exp\left(\sqrt{\frac{H}{EI}} \ell\right) \right]} \\ & \dots (\text{A.21}) \end{aligned}$$

最後に、(A.1) 及び (A.9) において点 A 、 B 及び C における水平張力を H と単純においたが、この水平張力は初期張力 H_0 と糸に流れによる抗力が働いた結果生じた水平張力の増加分 H_1 との和であり、厳密には後者の張力の増加分 H_1 は理論的に求められるべき量である。事実、抗力が糸になした仕事は糸及び片持ち板の内部におけるひずみエネルギーの増加分と等しいという条件から、この水平張力の増加分 H_1 が求まることが理論的に明らかになっているが、この解析は本論文の範囲外であるのでこれを割愛する。

STRUCTURAL ANALYSES AND FLUID DYNAMICAL CONSIDERATIONS
ON TENSION-THREAD FLOW METER

Takeo NAKAGAWA*

For measuring the flow velocity, 'tension-thread flow meter' uses a physical principle that the drag force on a thread extended in a flow depends on the flow velocity around it.

It has been recognized that 'tension-thread flow meter' is relatively simple in the structure and is a potential device for measurement of complex flows such as turbulent and oscillatory boundary layer flows. Indeed, the high performance of 'tension-thread flow meter' has been already demonstrated by the measurements of uniform flow(Sharp 1964), oscillatory boundary layer flow(Sleath 1969), water particle velocity of breaking-wave(Nakagawa et al. 1981) and so forth. Whereas, it seems that theoretical understandings for the dynamics of 'tension-thread flow meter' are rather shallow.

For that reason, in the present paper, structural analyses and fluid dynamical considerations on 'tension-thread flow meter' have been done in order to understand how the flow velocity is sensed by the thread and also to provide design criteria for future 'tension-thread flow meter', to be designed.

The present structural analyses show that the deflection of the thread and cantilever in the downstream direction is increased as the flow velocity is increased and/or tension in the thread is decreased, and *vice versa*.

The fluid dynamical considerations on the flow around the thread have suggested that for a successful design of 'tension-thread flow meter', shedding of the Kármán vortices into the wake of thread must be suppressed by a proper choice of the thread diameter.

* Ph.D, Associate professor of Civil Engineering Department,
Kanazawa Institute of Technology.