

開水路中における樹木振動と流体力に関する基礎的実験

Fundamental Experiment for the Flow Induced Vibration of a Tree in Open Channel

林建二郎*・赤木俊仁**・藤間功司***・重村利幸****

By Kenjirou HAYASHI, Toshihito AKAGI, Kouji FUJIMA, Toshiyuki SHIGEMURA

In order to study the effect of vibration of trees on the flow in river, the characteristics of flow-induced vibration of a circular cylinder and a twig of pine tree elastically mounted in open channel were investigated experimentally. The amplification of drag force and lift force acting on a cylinder in flow-induced vibration and that of a twig of pine tree were evaluated quantitatively. The locking-in phenomenon was also recognized in the flow induced vibration of pine tree.

Keywords : Flow Induced Vibration, Vegetation in Flow, Drag Force, Lift Force

1. はじめに

環境上の点から河道内樹木の積極的な利用育成が行われようになってきた。しかし、この河道内樹木が洪水時の流水抵抗や河床安定に与える影響は、治水問題上十分に検討される必要がある^{1), 2)}。

河道内樹木の流水抵抗問題においては、a) 樹木の群生・幹や枝の複雑な形状配置が流水抵抗に与える影響、b) 葉が流水抵抗に与える影響、ならびにc) 流水内における樹木の揺動や振動が流水抵抗に与える影響等を明らかにする必要があると多くの研究がなされてきた^{2), 3), 4), 5)}。しかし、現象の複雑さのためにその成果はまだ十分とは言えないようである。また、関連するものとして、樹木が風から受ける流体力に関する研究成果も報告されている⁶⁾。

本研究は、河道内樹木の振動が流水抵抗に与える影響を調べるための基礎的な研究として、開水路中に鉛直設置された円柱と小型実樹木（松の小枝）に作用する流体力特性、およびそれらの振動応答特性を調べたものである。

-
- | | | | | | |
|------|-----|----------|-----------------|--------------------|----------------------|
| * | 正会員 | Ph.D. | 防衛大学校助教授 | 土木工学教室 | (〒239 横須賀市走水1-10-20) |
| ** | 正会員 | 工修 | 海上自衛隊舞鶴地方総監部施設科 | (〒625 舞鶴市余部下1190) | |
| *** | 正会員 | 工博 | 防衛大学校講師 | 土木工学教室 | (〒239 横須賀市走水1-10-20) |
| **** | 正会員 | Dr. Eng. | 防衛大学校教授 | 土木工学教室 | (〒239 横須賀市走水1-10-20) |

2. 実験装置及び実験方法

(1) 開水路における円柱の振動および流体力

特性に関する実験

開水路における円柱の振動および流体力特性に関する実験には、還流装置付き2次元造波水槽（長さ=40m、幅=80cm、高さ=1m）を用いた。水槽の他端には、消波用斜面を利用した整流装置が取り付けられている。還流パイプ内に設けられたインペラをインバータ式可変電動器を用いて回転させることにより水槽内に還流が生じる。インバータ周波数を変化（最大周波数60Hz）させることにより還流量の調整が容易に可能である。

図-1に示すように三分力計（最大容量1kgf）に取り付けられたアクリル円柱（外径 $D=1\text{cm}$ 、内径 0.5cm 、長さ 85cm ）及び真鍮円柱（外径 $D=1\text{cm}$ 、長さ 85cm ）を水路中央に設置し、それぞれの円柱に作用する流れ方向の力 F_x とその直角方向の力 F_y を計測した。アクリル円柱は、流水中において振動が顕著に生じるものとして使用した（振動円柱）。真鍮円柱の剛性（ $EI=5.94 \times 10^4 \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ ）は、アクリル円柱の剛性（ $EI=1.47 \times 10^3 \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ ）に比べて十分大きく、流水中において振動が生じないもの（固定円柱）として使用した。円柱の下端と水槽の底面床部との間隔は $2 \sim 3\text{mm}$ とした。水深 d は 70cm とした。実験に先立ち、振動円柱の振動諸元を調べるために静水中における減衰自由振動実験を行ない、円柱の静水中における固有振動数 f_{nw} 及び減衰定数 ζ_w を算定した。減衰定数の算定には対数減衰法を用いた。 $f_{nw}=2.4\text{Hz}$ 、 $\zeta_w=0.13$ であった。

主流速の計測にはレーザ流速計を使用した。実験に先立ち円柱設置場所より前方 10cm の位置における流速の鉛直分布をそれぞれ調べた。水深 $d=60\text{cm}$ の場合の一例を図-2に示す。図中の Δ 印および $\circ$ 印は、インバータ周波数が 30Hz 、 50Hz の場合である。実験においては、水面より水深の約 20% の位置の速度を代表主流速度 U とした。

円柱に作用する力 F_x および F_y を示す三分力計の出力信号は、代表主流速度 U を示すレーザードップラー流速計からの出力信号とともにサンプリング周波数 50Hz でAD変換し、フロッピーディスクに記録した。サンプリング数は 4096 個とした。水槽床部に設けられたガラス製観測窓を通して観測される円柱振動の挙動をビデオカメラに録画した。その再生画像より円柱下端部の振動量を測定した。

(2) 開水路における小型実樹木の振動および流体特性に関する実験

本実験には、上記の還流装置付き2次元造波水槽および本学機械工学教室の高速回流水槽を使用した。本高速回流水槽は垂直循環方式であり、長さ 5.0m 、幅 1.8m 、水深 1.0m の観測部を有する。観測部前方の吹き出し口の水面には固定式制波板と水面近傍の流速低下を防ぐために表面加速装置（ローター加速方式）を取り付けている。最大主流速度は 2.7m/s である。

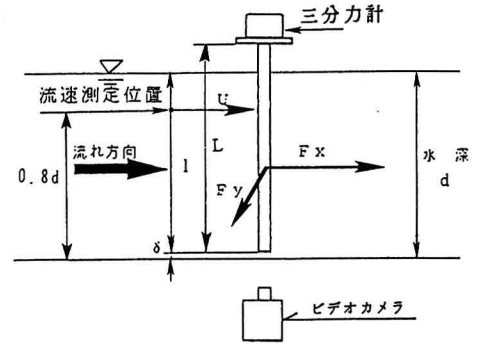


図-1 実験装置の概略および座標系

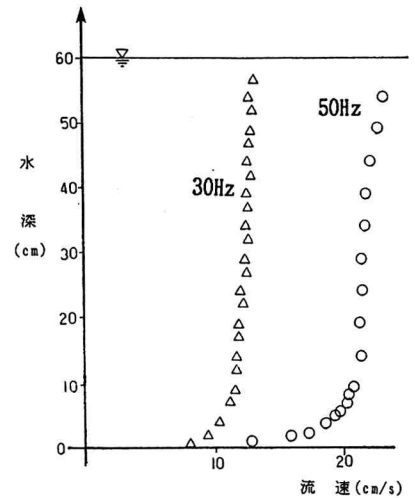


図-2 主流流速分布の計測例

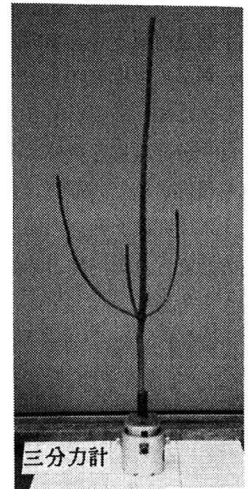


写真-1 実樹木（松の小枝）

幹と枝の組み合わせ構造が簡単な実樹木の一例として、学内に生育している松の小枝を使用した（写真-1 参照）。水表面の上部に設置された三分力計に松の小枝を鉛直設置し、流れ方向の流体力 F_x 及びその直角方向の力 F_y を計測した。

高速回流水槽での主流速度計測にはピトー管及び超音波流速計を使用した。水表面から水深の2割の点での流速を代表主流速度 U とした。水槽床部のガラス製観測窓を通して樹木の振動挙動をビデオカメラに録画した。

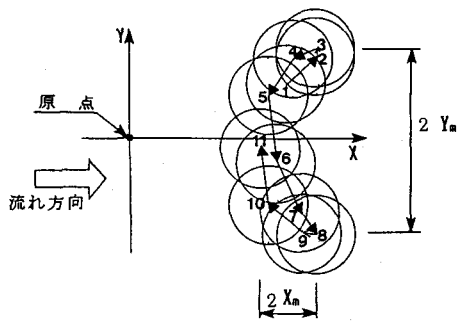


図-3 振動円柱（アクリル円柱）の振動状況

3. 実験結果及び考察

(1) 開水路における円柱の振動及び流体力特性に関する実験

(a) 円柱の振動量について

振動円柱として使用したアクリル円柱の振動状況を記録したビデオ録画面より、円柱下端部の振動量を読みとった。図-3に主流速 $U=19.5\text{cm/s}$ の場合の振動軌跡の一部を示す。図中の座標原点は、静水時($U=0\text{cm/s}$)における円柱下端部の位置を示す。図中の番号は一周期の振動変位経路を示す。主流速 U が存在する結果、円柱は流れ方向(X 方向)に一定量たわみ、かつ X 方向、 Y 方向（揚力方向）に振動していることが認められる。 X 方向の振動周波数は Y 方向の振動周波数の2倍になっている。この軌跡図より図中に示す X 方向、 Y 方向の振動振幅の最大値 X_m 、 Y_m をそれぞれ測定した。 X_m および Y_m の U に対する変化特性を図-4に示す。揚力方向の振動は流れ方向の振動に比べて顕著であることが認められる（ $Y_m/D > X_m/D$ ）。

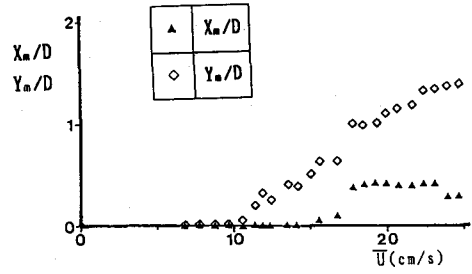
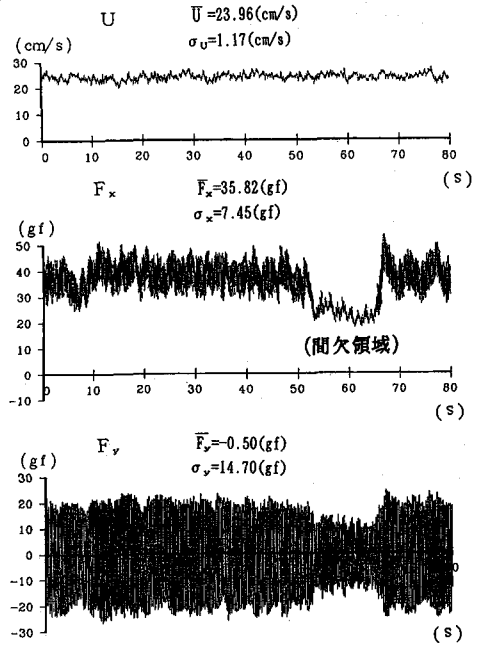


図-4 U と X_m/D 、 Y_m/D との関係

(b) 円柱に作用する流体力について

三分力計で検出された振動円柱に作用する流れ方向の力 F_x 、およびその直角方向の力 F_y の記録例を代表主流速度 U とともに図-5に示す。図中に示す U 、 F_x 、 F_y の値は、 U 、 F_x 、 F_y の時間平均値（サンプリング時間=82秒）である。 σ_U 、 σ_x 、 σ_y は、 U 、 F_x 、 F_y の標準偏差である。 σ_U は主流 U の乱れ速度の大きさを示す代表値である。 σ_x 、 σ_y は、 F_x 、 F_y の振動成分の大きさを示す代表値として用いる。図-5は、 $U=24.0\text{cm/s}$ の場合である。これら図より以下のことが認められる。



- 1) F_x の振動成分 σ_x は、 F_y の振動成分 σ_y より小さい。
- 2) F_x の振動成分 σ_x が、突如小さくなる時間領域が認められる（間欠領域）。
- 3) 間欠領域では、 F_x の時間平均値（ $\bar{F}_x$ ）および F_y の変動成分（ σ_y ）はともに小さくなっている。
- 4) 主流 U の乱れ特性と間欠性の出現には、相関性が認められない。

$\bar{F}_x$ 、 σ_x 、 σ_y の主流速度 U に対する変化特性を図-6、

図-5 記録例の一例（ $U=24.0\text{cm/s}$ ）

図-7に示す。図-6は振動円柱の場合、図-7は固定円柱の場合である。振動円柱の $\bar{F}_x$ は、 $\bar{U}>15\text{cm/s}$ の範囲で固定円柱の $\bar{F}_x$ より増加している。振動円柱の σ_x 、 σ_y は、固定円柱の σ_x 、 σ_y より $\bar{U}>14\text{cm/s}$ 、 $\bar{U}>10\text{cm/s}$ の範囲でそれぞれ増加している。これら $\bar{F}_x$ 、 σ_x 、 σ_y の増加現象は、円柱の流れ方向および揚力方向の振動が、 $\bar{U}>16\text{cm/s}$ および $\bar{U}>10\text{cm/s}$ の範囲でそれぞれ顕著となること（図-4参照）に起因すると考えられる。

振動円柱の場合の σ_x 、 σ_y は、作用流体力 F_x 、 F_y の振動成分と、円柱のX、Y方向振動に伴い生じる慣性力の和である。従って、これらは見かけの流体力である。

固定円柱および振動円柱に作用する揚力 F_y の卓越周波数 f_y をスペクトル解析により求めた。無次元周波数 f_y/f_{nw} と相対速度 $\bar{U}/(f_{nw}\cdot D)$ との関係を図-8に示す。相対速度 $\bar{U}/(f_{nw}\cdot D)$ は主流速度 U を振動円柱の固有振動数 f_{nw} と円柱径 D で無次元化したものである。図中には、ストローハル数 $S_t=0.2$ とした場合の関係式（ $f_y/f_{nw}=S_t\cdot\bar{U}/(D\cdot f_{nw})$ ）を直線で示す。固定円柱の場合における f_y と $\bar{U}$ との関係は、この直線と良く一致している。一方、振動円柱の場合には、相対速度が5以上になると、 $\bar{U}$ の増加にともなう f_y の増加を生じず、 $5<\bar{U}/(f_{nw}\cdot D)<7$ の範囲で f_y は f_{nw} と等しくなっている（locking-in現象）。

次式で定義される抗力係数 C_D および揚力係数 C_L とRe数（ $=U\cdot D/\nu$ 、 ν ：動粘性係数）の関係を図-9、図-10にそれぞれ示す。

$$C_D = \bar{F}_x / (1/2 \cdot \rho \cdot D \cdot d \cdot U^2) \quad \cdots (1)$$

$$C_L = \sigma_y / (1/2 \cdot \rho \cdot D \cdot d \cdot U^2) \quad \cdots (2)$$

式中、 ρ は水の密度、 D は円柱径、 d は水深である。

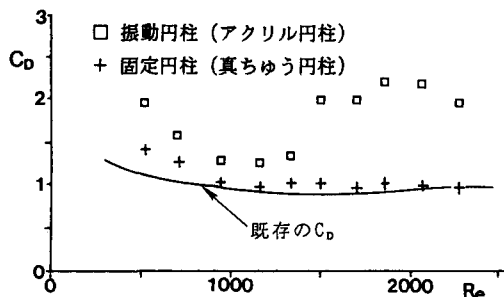


図-9 C_D とRe数の関係

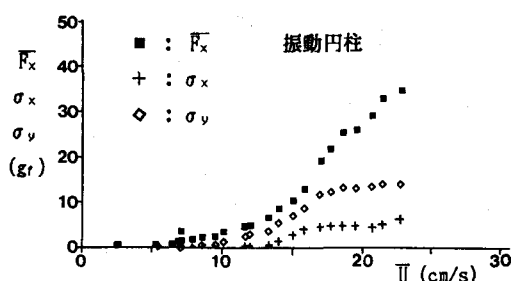


図-6 $\bar{F}_x$ 、 σ_x 、 σ_y と $\bar{U}$ の関係（振動円柱）

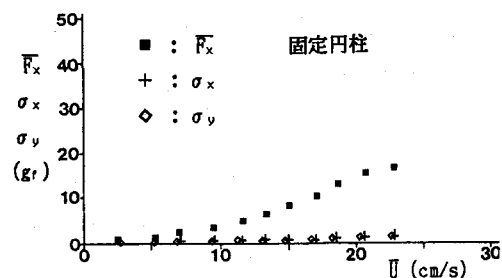


図-7 $\bar{F}_x$ 、 σ_x 、 σ_y と $\bar{U}$ の関係（固定円柱）

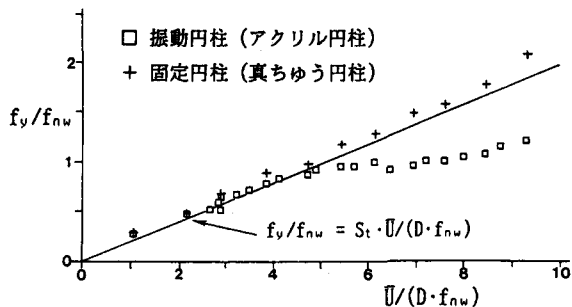


図-8 f_y/f_{nw} と $\bar{U}/(f_{nw}\cdot D)$ の関係

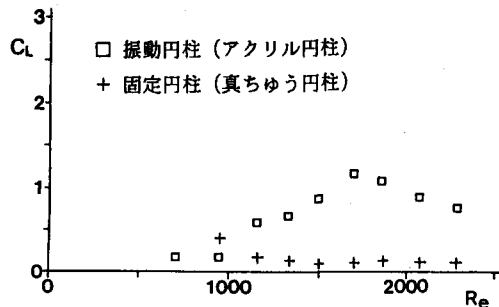


図-10 C_L とRe数の関係

固定円柱の C_D は、定常流中における固定円柱の既存値($C_D \approx 1$)とほぼ一致している。振動円柱の C_D は、 $Re > 1000$ ($\bar{U} > 10 \text{ cm/s}$)の範囲では固定円柱の場合の約1.5～2倍に増加している。 $Re > 1000$ ($\bar{U} > 10 \text{ cm/s}$)の範囲では、振動円柱の揚力方向(Y方向)の振動が顕著になる(図-4参照)。従って、この C_D の増加は、流れと揚力方向の円柱振動との相互作用により円柱に作用する流れ方向の流体力($\bar{F}_x$)が増幅されていることを示す($\bar{F}_x$ には、揚力方向の円柱振動にともなう慣性力の影響は含まれないので、正味の流体力増加である)。

振動円柱の C_L も、同様に $Re > 1000$ の範囲では固定円柱の場合より増加し、最大約10倍も増加している。この増大は、三分力計で検出される変動揚力の増大を示すものであり、上記相互作用による揚力の増大の他に、円柱振動にともなう慣性力の影響も含まれている⁷⁾。従って、作用揚力の正味の増加を示すものではない。

本実験で得られた固定円柱の C_L 値と、既存値⁸⁾との比較を図-11に示す。本 C_L 値は、変動揚力の標準偏差から求めたものであり、図中の (root mean square値) に相当する。本実験結果は既存結果の範囲内である。

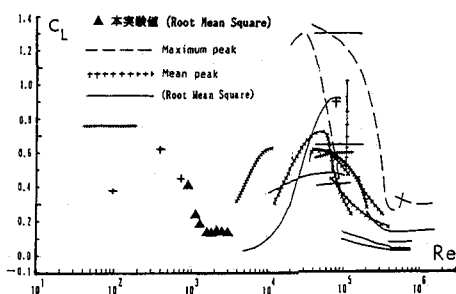


図-11 C_L と Re 数の関係 (after Sarpkaya⁸⁾)

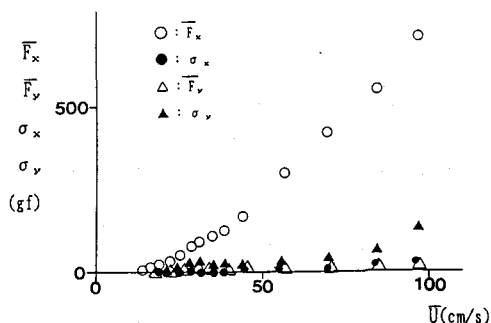


図-12 流速 $\bar{U}$ と $\bar{F}_x, \bar{F}_y, \sigma_x, \sigma_y$ の関係 (実樹木)

(2) 閉水路における小型実樹木の振動および

流体力の特性に関する実験

松の枝に作用する流体力 $\bar{F}_x, \sigma_x, \bar{F}_y, \sigma_y$ の $\bar{U}$ に対する変化特性を図-12に示す。 $\bar{F}_y, \sigma_x, \sigma_y$ の $\bar{U}$ に対するより詳細な変化特性を図-13に示す。図-12より、 $\bar{F}_x$ に比べて $\bar{F}_y, \sigma_x, \sigma_y$ は小さいことが分かる。図-13より、 $\bar{U}$ の増加に対する σ_y の増加は、 $20 \text{ cm/s} < \bar{U} < 45 \text{ cm/s}$ の範囲で著しいことが認められる。同様の現象は σ_x の場合においても認められるが、 σ_y の場合ほど顕著ではない。 $\bar{U}$ の増加にともない明らかになる $\bar{F}_y$ の存在は、松の枝の配置の非対称性等によるものと思われる。

揚力方向の振動周波数 f_y および樹木先端部の揚力方向振動振幅の最大値 Y_m の $\bar{U}$ に対する変化特性を図-14に示す。 f_y は $12 \text{ cm/s} < \bar{U} < 30 \text{ cm/s}$ の範囲で、本樹木の水中固有振動数 $f_{nw} (=5 \text{ Hz})$ 近傍値に固定されていることが認められる。これは、本樹木においては、自励(渦励)振動によるLocking-in現象が生じることを示している。振動変位 Y_m は、Locking-in現象が生じ始めると急激に増加し $\bar{U} \approx 27 \text{ cm/s}$ で最大を示している。

抗力係数 C_D と揚力係数 C_L を、円柱の場合と同様に、次式を用いてそれぞれ算定した(1)、2)式参照)。

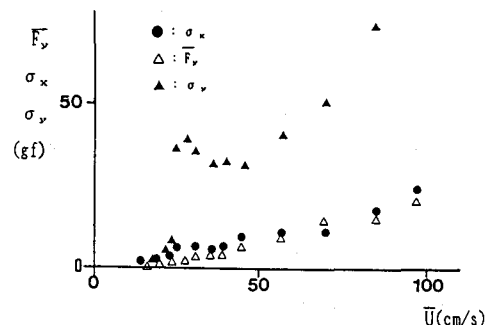


図-13 流速 $\bar{U}$ と $\bar{F}_y, \sigma_x, \sigma_y$ の関係 (実樹木)

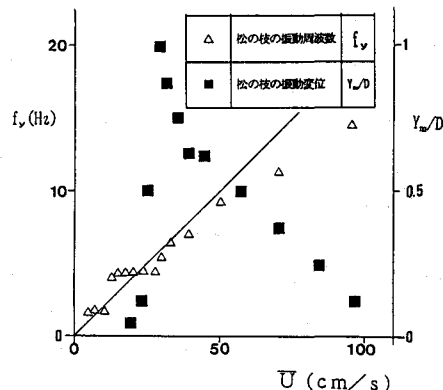


図-14 流速 $\bar{U}$ と $f_y, Y_m/D$ の関係 (実樹木)

$$C_D = F_x / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2) \quad \dots (3)$$

$$C_L = \sigma_y / (1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot U^2) \quad \dots (4)$$

式中のAは、幹部と枝部からなる本樹木の流れ方向に垂直な平面への投影面積である。 C_D 、 C_L と主流速 U との関係を図-17に示す。揚力方向の振動変位がピーク値を示す流速値 ($U=27\text{cm/s}$ 、図-14参照) の近傍においては、 C_D 、 C_L はともに増幅している。 C_L 値の増幅は、円柱の場合と同様に作用揚力の真の増大を示すものではない。

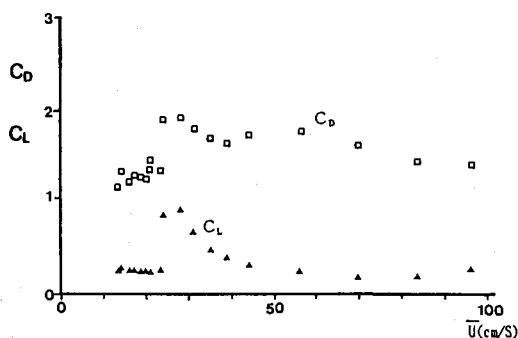


図-15 流速 U と C_D 、 C_L の関係 (実樹木)

4. おわりに

本研究で得られた主要な結果として、以下のことが挙げられる。

- (1) 開水路における円柱の揚力方向の振動量は流れ方向の振動量に比べて顕著であることを確認した。
- (2) 抗力の振動成分には間欠性があることが分かった。抗力の振動成分が小さい時間領域 (間欠領域) では、抗力の定常成分および揚力の変動成分がともに小さくなっていることが認められた。
- (3) 開水路における円柱の振動周波数は、流速に比例して増加するが、ある流速の範囲では、流速の増加にもかかわらず円柱の固有振動数と等しくなり、その結果共振領域が広がるLocking-inが現象が開水路中においても生じることを確認した。
- (4) 共振時の円柱に作用する抗力の定常成分値及び抗力、揚力の振動成分値はともに、振動を許さないように設置された円柱の場合より増加している現象を確認した。
- (5) 松の枝のような簡単な形状配置をした樹木においては、Locking-in現象が生じることを確認した。

最後に、高速水槽の使用にあたり多大な御配慮と御指導を頂いた機械工学教室の鈴木勝雄教授、藪下和樹助手、ならびに本実験を行うにあたり多くの御助力を頂いた土木工学教室前川勇孝技官に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 河川植生の水理研究, Circular No.1, 土木学会水理委員会基礎水理部会「河川の植生の水理」研究分科会, 15p, 1992.
- 2) 福岡捷二・藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響, 土木研究所報告第180号, pp.133-192, 1990.
- 3) 岩崎敏夫・上岡充男: 水中における紐状物体の抵抗に関する研究, 足利工業大学研究集録, 第13号, pp.189-196, 1987.
- 4) 石川忠晴・田中昌宏: 開水路流中の灌木の抵抗特性に関する研究, 第31回水理講演会論文集, pp.329-333, 1987.
- 5) 石川忠晴: 水制と灌木が一体となった半自然的河川構造物に関する基礎的研究, 平成4年度科学研究費 (一般研究C) 研究成果報告書, 103p., 1993.
- 6) 椎貝博美: 樹木の流水抵抗について, ながれ 12, pp.11-19, 1993.
- 7) 赤木俊仁・林建二郎・藤間功司・重村利幸: 開水路中における直円柱の渦励振動および作用流体力について, 第20回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.112-113, 1993.
- 8) Sarpkaya, T. and M.Q. Isaacson: Mechanics of wave forces on offshore structures, Von Nostrand, 646p., 1981.