

4. 灌木水制に関する基礎的研究

1. はじめに
 2. カワヤナギの流水抵抗
 3. 単木としての生長則
 4. 生長の阻害と群落の形成
 5. 灌木林としての水理効果
- 謝 辞

東北大学工学部教授 石 川 忠 晴

1. はじめに

河道を自然のままに放置すると、ヤナギなどの灌木類が繁茂する。これらの灌木は5m程度の低木が多いが、なかには10mほどの大木もある。灌木の多くは数本から数十本の単位で群落をつくるので、河道の疎通能力に著しい影響を与えることがある。このため、近年、多くの河川で灌木の伐採が進められている。

しかし、灌木は、河岸疎通を軽減し土砂を沈積させることにより、河岸を安定化する作用（水制効果）も持っている。また、野鳥の休息所となったり、河川らしい景観を生み出したり、自然環境を構成する重要な要素のひとつである。

ところで、灌木は繁殖力が旺盛で成長速度も大きいため、一回伐採したとしても、まもなくもとの状態に戻ってしまう。どのみち完全に除去することができないのであれば、灌木の持っている上記の利点を認め、灌木の存在を考慮した河道計画のあり方を検討してはどうだろう。これが本研究の基本的考え方である。

本研究の表題は「灌木水制に関する基礎的研究」となっているが、その内容は、水制という構造物の研究ではなく、灌木の諸特性に関する研究である。諸特性の把握が水制効果の定式化の基礎になると考えられるからである。また、先に述べたように、灌木には種々の利点があり、水制効果のみで物事を決定できるものではないから、他の考察にも応用できるように、“生き物”としての検討も行った。

とはいっても、灌木という“生き物（またはその集団）”が、様々な自然的・人為的作用のもとで示す性質を網羅することは到底不可能である。そこで本研究では、我が国の河川の代表樹種であるカワヤナギを対象とし、その水理学的特性を軸にして、その他の特性の検討を進めた。

報告書の構成は以下のとおりである。

- 第1章 序論
- 第2章 流水抵抗特性
- 第3章 構造特性及び強度特性
- 第4章 生長特性
- 第5章 群落を横断する流れ
- 第6章 結論

以下に、第2章から第5章の内容を、ひとつの文脈の中で総括する。なお、記述の区分と順序は、説明の都合上、報告書の章立てと若干異なっている部分がある。

2. カワヤナギの流水抵抗

まずは実態にできるだけ近い条件で調べるために、鳴瀬川水系吉田川の河川敷にあるカワヤナギの群落からサンプルを切り出し、大型水路に水没させ、そこに加わる力を直接測定した。葉の数を徐々に減らしながら計測したところ、図2-1のように、葉の数と流水抵抗がきれいな比例関係を示した。これから、カワヤナギの流水抵抗が主に葉によって受け持たれていることが明らかとなった。また、全体の抵抗が葉一枚一枚の抵抗の和であることから、小型サンプルを小型水路に入れて精度の良

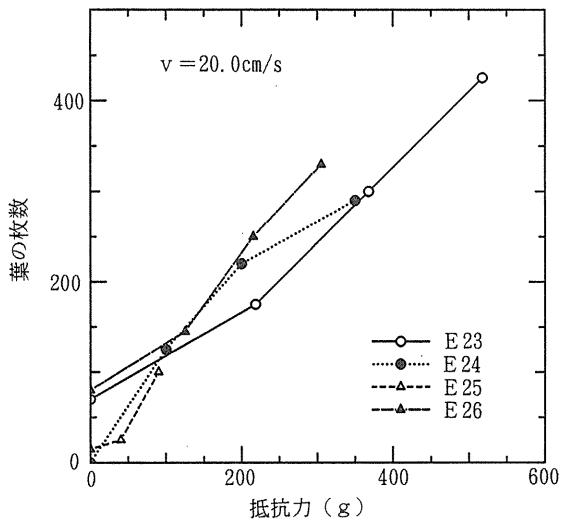


図 2-1 葉の枚数と抵抗力の関係

い実験が可能であることがわかった。

そこで、小型水路での実験と大型水路での実験を統一的に整理したところ、図 2-2 が得られた。この図によれば、流水抵抗は流速の 1.5 乗に比例している。この関係は平板上の層流境界層の抵抗則と同じである。したがって、カワヤナギの流水抵抗は、葉一枚一枚の上に発達する境界層内の剪断応力の合計であると理解することができる。図 2-3 は、摩擦係数 C_f について、葉の抵抗から逆算された値を、無限平行平板上の境界層のそれと比較したものである。この図によれば、葉の C_f は無限平板の値の 2 ~ 3 倍である。この原因是、恐らく、葉脈や葉面の有限性による二次流、及び、葉のねじれや動搖による付加応力であろうと思われる。

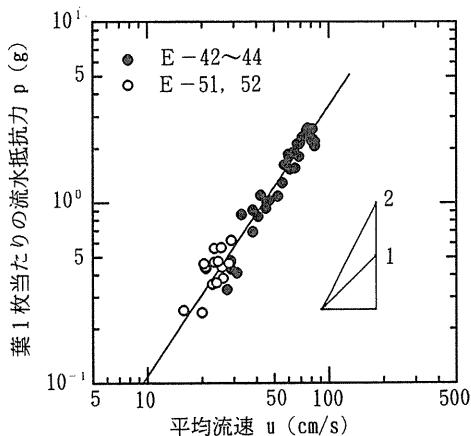


図 2-2 流速と 1 枚当たりの抵抗力の関係

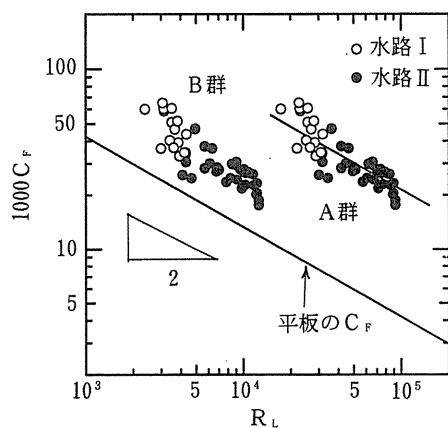


図 2-3 R_L と C_f の関係

ところで、従来の研究では、樹木の流体抵抗を表わすのに、“固体物”の抵抗と同様の表現を用いてきた。すなわち、

$$F = (\rho/2) C_D A v^2 \dots\dots\dots (2-1)$$

ここに、 C_D ：いわゆる抗力係数で1前後の値、 A ：物体の投影面積、 v ：流速、 ρ ：流体の密度、である。効力係数は経験的に定められる。

さて、先に求めた“葉の枚数に比例する”という抵抗則は、 C_F を経験的に求めたという意味で、一種の経験則である。従来の“固体物質と同様な抵抗則”も経験によって抗力係数を求めるから、同じ様に経験則である。しかも、後の生長則の項で述べるように、“葉群の深度”は初夏から秋にかけてほぼ一定であるから、“単木の”カワヤナギについては、両経験則とも同様の結果を与える。（単木であれば、流れ方向の投影面積と樹冠表面積がほぼ比例する。）

しかし、カワヤナギの多くは群落を形成するので、群落単位で見ると両者には大きな違いが現われる。河道方向に細長く発達した群落については、従来の抵抗則では効力が長さに無関係になるが、本研究の抵抗則では長さに比例する。後者の方が実態に即し合理的なことがわかるであろう。

流水抵抗の葉を一枚一枚に分解して理解する方法は、上記の他にも大きな利点を持っている。すなわち、灌木を透過体とみなしているので、樹冠中または群落中の流れの推算を可能とするからである。前項で述べたように、灌木の水理効果は、横断方向の変動や物質交換ならびに河岸の土砂沈積の現象に及んでいる。これらの現象は、灌木中の流水の運動に関係するのである。したがって灌木を“固体物”とみなした抵抗則でこれらの現象にアプローチすることはできないのである。

3. 単木としての生長則と構造則

さて、灌木は生き物であるから、季節的・経年的に姿を変えてゆく。それについて流水抵抗のような水理学的特性も変化していく。植生を考慮した河道計画を建てていく上で、その生長則を知ることが基本的に重要である。そこでまず、単木としてのカワヤナギの生長と形態変化をいくつかの方法で観察することとした。（以下の記述の順序は、説明の都合上、研究作業の時間的順序と異なっている。）

まず、継年的な高さの変化を調べることにし、以下のふたつの方法を採用した。

ひとつは、主たる幹と枝の系列を選定し、分岐の前後で切断して年輪を調べる方法である。これら図3-1のような年輪分布図が得られる。ここで「年輪が2以上の幹・枝は長さが変化しない」と仮定すると、各年輪の輪郭線が昔の灌木の形状を示していることになるので、経年的な生長速度が算定できる。（この仮定の妥当性については後で述べる。）その結果、図3-2に示すように、成木については年間50cm、若木については年間1mということになった。

ふたつめは、過去と現在の写真から成木の高さの変化を求める方法である。建設省北上川下流工事事務所が、築堤のために3年前（当時）に撮影した写真を借り、同じ場所同じアングルで河道の写真を撮り、両方に写った灌木の高さの差から生長速度を求めた。その結果を図3-3に示す。これによれば、成木の年間平均の高さ変化は約50cmであり、先の結果と一致した。

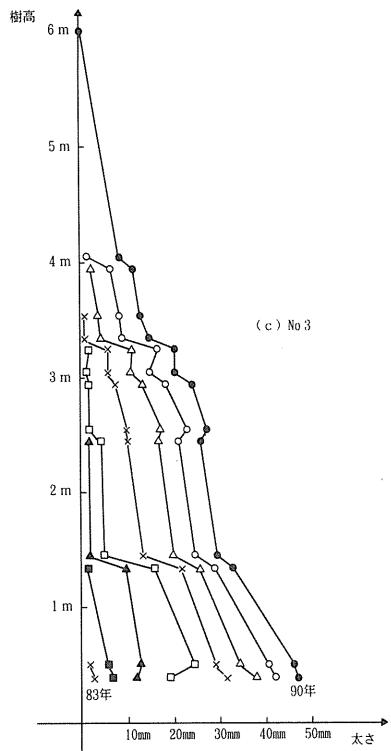


図 3-1 年齢分布図の一例

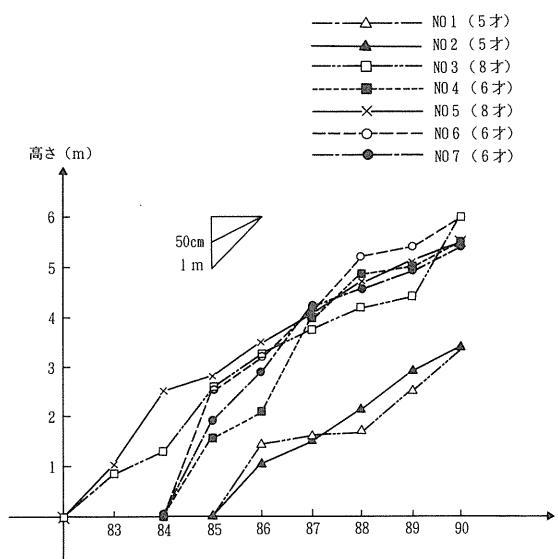


図 3-2 年輪から推定した樹高の経年変化

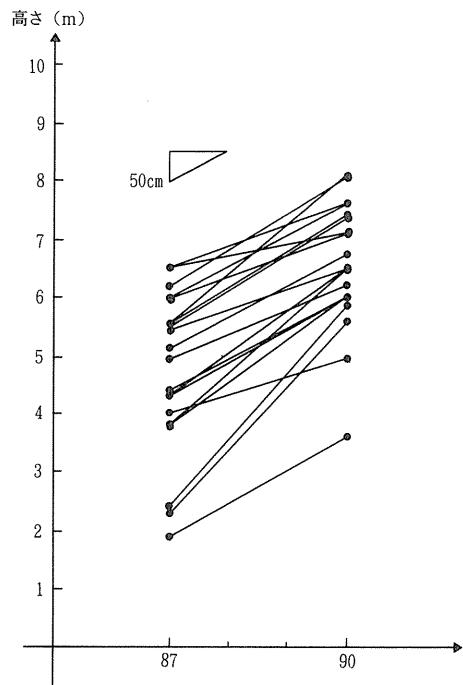


図 3-3 写真から推定した樹高の経年変化

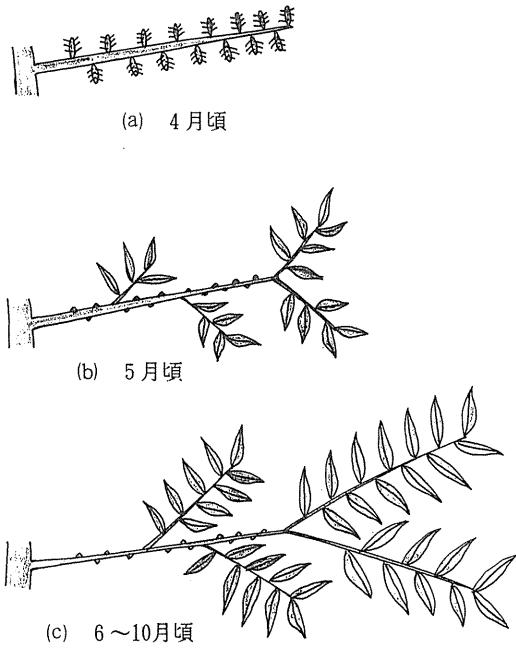


図 3-4 小枝の生長の様子

次に、季節的な形態変化の様子を観察した。観察結果の概要は以下のとおりである。4月上旬には、昨年に葉を付けていた先端の枝（これを、ここでは小枝と呼び、他の枝部と区別する。）に3cm間隔で花が付いていた。この花部は、そのうち綿状の種子となって飛散する。5月上旬には花が付いていた場所のうち先端に近いところから小さい葉が出て、その年の“小枝”になり、先端に葉を蓄えるようになる。なお、新しい小枝以外には葉が付かない。小枝は緑色で柔らかく、完全な木質ではない。小枝は8月中旬まで伸び続けるが、その際には先端に新しい葉を生み、根元の葉を落とす。その結果、葉の付いている部分の長さと葉の総量には大きな変化がない。11月頃には葉が落ちて、小枝は木質化する。以上の結果を図3-4に示した。この間の小枝の伸び量は50cmから1mで、先に述べた灌木高さの変化量に一致する。また、小枝以外の部分の伸びはゼロであった。

以上の観察結果から、カワヤナギの生長は小枝の部分に集約されていることがわかった。したがって、先に述べた「年輪が2以上の幹・枝は長さが変化しない」という仮定は妥当であった。また、初夏から秋にかけての葉の総量はほぼ一定していることから、流水抵抗には大きな季節変化がない（つまり初夏の洪水と秋の洪水で大きな差がない）ものと考えられる。

さて、カワヤナギの生長が先端の小枝に集中しているということは、それ以外の部分が昔の姿を残しているということを意味している。すなわち、カワヤナギの構造がそのまま生長の記録なのである。そこで、カワヤナギの構造調査の結果と、以上に述べた短期の観察結果の整合性を調べた。

構造調査では、図3-5に示すように、根元から順に分岐する点でひとつ増える数を“次数”として定義し、次数毎の枝の特性（年輪、長さ、太さ、接合数など）を記録した。調査の様子を写真3-1に示す。その結果、幹・枝の分岐構造及び年輪の分布・連続性は、大部分において生長特性と一致していることが明らかとなった。例えば、枝が分岐するごとに、年輪は概ねひとつづつ減ることや、樹齢の大きいほど先端の分岐個数が減るといった構造特性は、上記の生長特性と整合している。第2の点は次のような意味である。

カワヤナギの長さスケールを L とすれば、樹冠の表面積は、概ね L^2 に比例するであろう。したがって新しい（葉を付けた）小枝の総量は L^2 に比例する。一方、カワヤナギの生長速度は、若木の時期を除けばほぼ一定であるから、 L は樹齢 T に比例する。すなわち樹齢 T のカワヤナギの小枝の本数

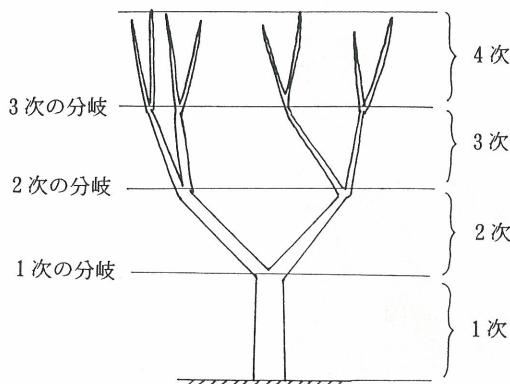


図3-5 次数の決め方



写真3-1 構造調査の様子

N_T は T^2 に比例する。そこで、T年からT+1年に移行する際の平均分岐数を n_T とすれば、次式が成立する。

$$n_T = \left(1 + \frac{1}{T}\right)^2$$

すなわち、平均分岐回数は、年とともに減少する。

4. 生長の阻害と群落の形成

単木の生長と構造の特徴は前項に述べたとおりである。しかし、これは平均的な話であって、そうでない場合もある。例えば、たくさんの年輪を持った幹・枝から若い枝が生えていることもある。また、異常にたくさんの枝に分岐していることもある。カワヤナギは生き物だから、当然固体差を持っているはずで、データのバラツキを固体差として理解をしてもよさそうである。しかし、他に原因はないのだろうか。

高水敷の景色を眺めていると、面白いことに気付く。樹木的な形のカワヤナギと灌木的な形のカワヤナギがある。前者は低水路から離れた所に多く、後者は河岸に近い所に多い。念のため葉の形態を調べると、どちらも同じカワヤナギなのである。このことと、上記の構造のバラツキとは、何か関係があるのでないか。

ところで、カワヤナギの幹を切断し、半分水に付けて寝かせておくと、日の当たる側に芽が出て葉を付ける。また、逆さまにしておくと、下であった方から小枝が伸びてくる。つまり、カワヤナギは切り刻んでも“死ぬ”ということではなく、日照条件によって形態を変化しながら生長する。

そこで、以下のような推測が成り立つ。洪水のような“異変”によってカワヤナギが変形または倒伏したとすると日射の当たり方が変化する。すると枝の分岐に異変が起こり、平均的な生長則が崩れるのではないか。河岸に近い所と遠い所では“異変”的生じる率が異なるから、樹木的な形態と灌木的な形態に分かれるのでないか。

このことを確認するために、出水後に変形しているカワヤナギを観察したところ、“幹に日射が当たるようになった”部分から芽が出ていたのである。その例を写真4-1に示す。そこから生じる自然な推測は、倒伏などの大変形を生じたカワヤナギが根元あるいは幹から分岐を生じて灌木的になる、さらに根元でつながった“群落”を形成する、ということである。



写真4-1 古い幹から小枝がのびている。

それでは、カワヤナギはどれほどの外力で倒伏するのであろうか。このことを検討するために、アスファルト試験機を用いて幹・枝の曲げ試験を行った。ヤング率と終局強度についての結果を図4-1、図4-2に示す。ヤング率は幹・枝の直系の1.5乗に逆比例する。一方、終局強度は直系と無関係である。これらの値と、流水抵抗則を組み合せて計算すると、カワヤナギが倒伏する流速を計算できる。図4-3はその結果で、横軸は倒伏しやすさで表わすパラメータ、縦軸が推定倒伏流速、図中の黒丸が吉田川で構造調査を行った木の諸元を代入した結果である。これから、カワヤナギは（葉が全部水没したとすれば）、0.6～1.2 m/s程度の流速で倒伏してしまうと考えられる。また、成木より若木の倒伏率が大きいということになる。これなら河岸や高水敷で十分起こり得ることではないか。

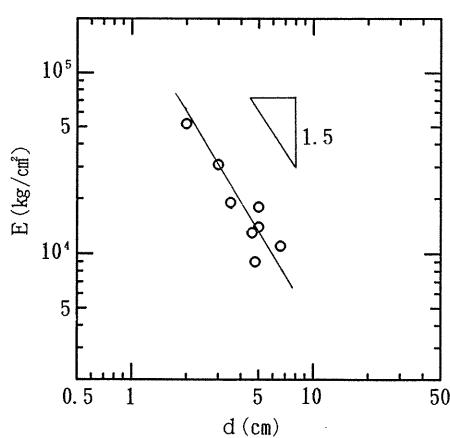


図4-1 直径とヤング率の関係

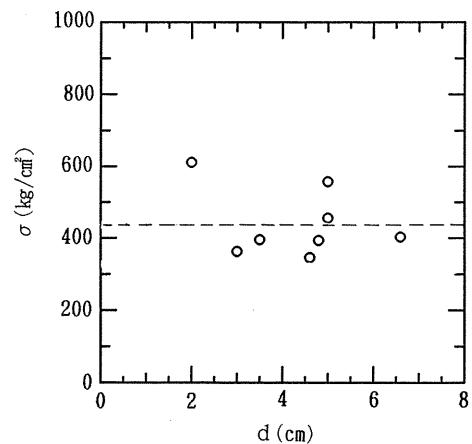


図4-2 直径と終局強度の関係

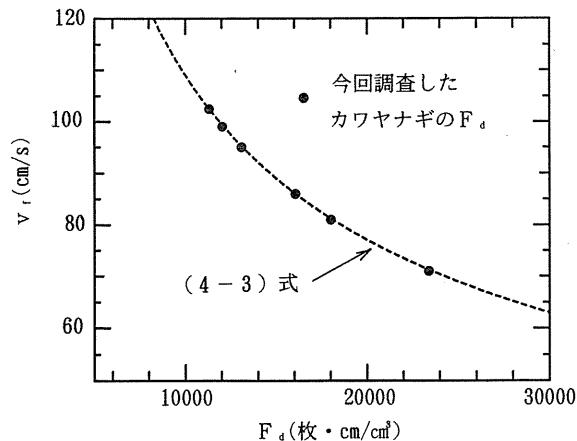


図4-3 F_d と倒伏する流速 v_f の関係

5. 灌木林としての水理効果

灌木の倒伏状況を調査していくと、もうひとつ面白いことに気付いた。それは、河岸の近くと遠くで倒れ方に違いの見られることである。河岸から離れた所では、比較的若いカワヤナギが流れ方向に倒

れている。一方、河岸近くでは流れに斜めに（場合によっては横断方向に）倒れており、しかも比較的大きなカワヤナギも含まれている。両者の例を、写真5-1、写真5-2に示す。ごく自然に考えれば、木が倒れた方向に流れが存在したはずである。しかし平均的な流向は河道に沿っているから、河岸では時間的に変動する斜めの流れが生じてカワヤナギを倒したと考えられる。



写真5-2 横に倒れたもの

写真5-1 流下方向に倒れたもの

①で述べたように、灌木林が存在すると河道横断方向に周期的な運動の生じる応力項（第⑥項）より遙に大きい点が重要である。つまり、横断的な変動流速がもたらす外力は、主流方向の平均的な力を超えることがあり得る。この水理実験は必ずしも現地と相似ではないが、しかし、先に述べたカワヤナギの斜め倒伏の原因を推測する資料となるであろう。

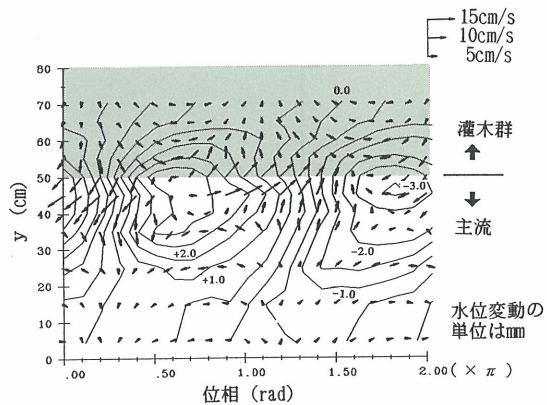


図5-1 灌木模型をおいた水路での流速変動
及び水位変動（その1）

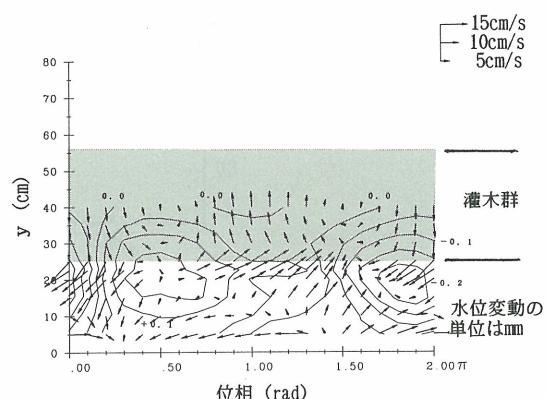


図5-2 灌木模型をおいた水路での流速変動
及び水位変動（その2）

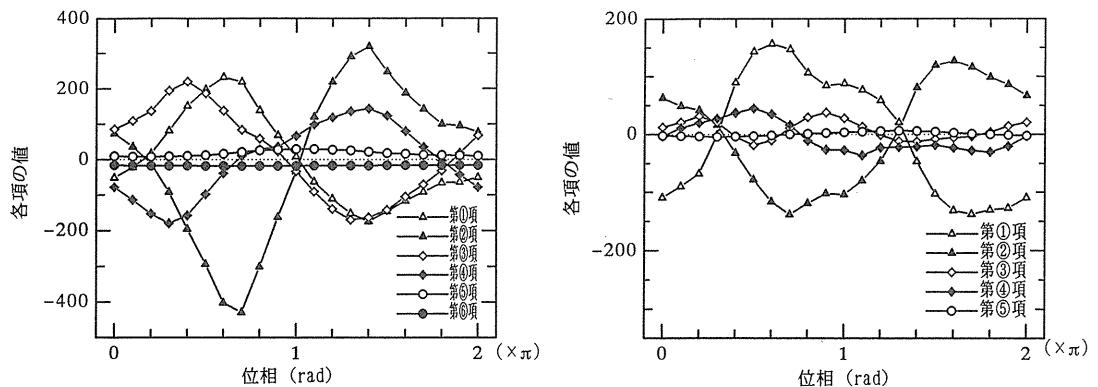


図 5-3 主流部 ($y = 45\text{cm}$) での各項の値

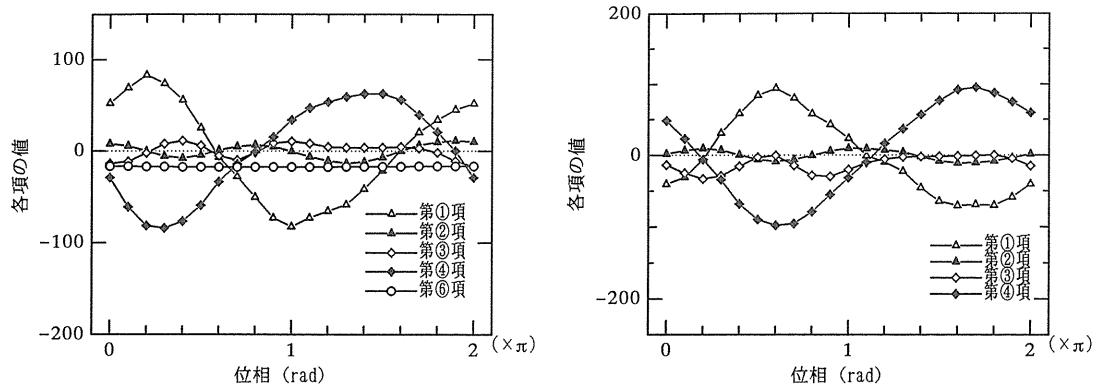


図 5-4 灌木内 ($y = 60\text{cm}$) での各項の値

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方にお世話になった。

まず、東北大学理学部の廣瀬教授（植物生態学）とその研究室の方々には、カワヤナギの植物生態学的特徴について、文献を紹介していただきとともに様々な御教示を頂戴した。高槻助手には現地踏査に御同行いただき、樹種の鑑定をしていただいた。筆者は植物についての知識が乏しく、廣瀬研究室の方々の助力は大きな力となった。

本研究では、鳴瀬川と吉田川を調査フィールドとした。そこを所管する建設省東北地方建設局北上川下流工事事務所には、現地の条件に関する資料を提供していただくとともに、調査に対して種々の便宜をはかっていただいた。

また、調査にあたっては、東北大学工学部土木工学科河川水理学研究室の学生諸君の助力をいただいた。特に高橋和明君、中田成俊君、中村匡宏君の貢献が大きかった。また、水理実験では、細井俊一君、山浦勝明君に助力をいただいた。

以上の方々に心より謝意を表する。