

ヨシ原河岸をもつ河道における 航走波のエネルギー分布特性

ENERGY FLUX CHARACTERISTICS OF SHIP GENERATED WAVES IN RIVER
WITH AND WITHOUT REED BANKS.

福岡捷二¹・仲本吉宏²・細川真也²・泊 宏³・京才俊則⁴

Shoji FUKUOKA, Yoshihiro NAKAMOTO, Shinya HOSOKAWA, Hiroshi TOMARI and Toshinori KYOUSAI

¹ 正会員 工博, Ph.D 広島大学大学院工学研究科教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

² 学生会員 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻

³ 正会員 工修 国土交通省荒川下流工事事務所所長

⁴ 正会員 工博 (財) リバーフロント整備センター研究所長

A river in which ships run frequently has serious riverbank erosion problem by ship waves. A riverbank with reed is one of effective measure to reduce ship wave energy oncoming to banks, but there are regions in the river where ship waves cause a reed erosion. So characteristics of energy flux of ships waves need to be investigated in a river having such erosion problems.

In the Arakawa river for this study, ship waves generated by tankers, and patrol ships were measured at five stations where situations of reed growth and river geometry differ. As a result, energy characteristics of ship wave at places having different water depths, bed gradients and reed growth were clarified.

Key words : ship-generated wave, reed, bank erosion, distribution of energy flux, Arakawa river

1. 序論

東京都, 埼玉県を流れる荒川のような舟運の多い河川では, タンカーなどが造る航走波による河岸侵食が問題となっている。このような問題に対して, 河岸に成育するヨシ原などの植生には, 航走波のエネルギーを吸収する減衰効果があり, 航走波の河岸侵食に対する保護工としての機能が注目されている¹⁾。

しかし, 航走波の影響を強く受ける水際にはヨシ原自身の根も著しく侵食され, ヨシ原群落の減退が見られる。このような侵食を受ける地域には, 離岸堤のような人工構造物による対策工が検討されているが, そのためには, 航走波が造る波のエネルギー分布特性について十分な理解が必要である。

そこで本研究では, 実際に航走波によるヨシ原河岸の侵食が問題となっている荒川で, 一般に航行しているタンカーによる航走波や国土交通省所有の大小 2 隻の巡視船を走らせ, それらの造る航走波を観測することで, 地形条件や船の条件によって変化する航走波エネルギーの大きさを明らかにし, さらにヨシ原内におけるエネルギー

減衰について検討する。

2. 実験条件と実験内容

(1) 各観測地点の形状と特徴

観測を行なった地点は, 荒川内の三日月ワンド(左岸), 四ツ木橋上流左右岸, 西新井左右岸の計 5 ケ所である。各観測点位置及びそれらの全景を図-1 に, 横断面を図-2 に示す。四ツ木橋上流の左・右岸, 西新井の左・右岸はほぼ同一横断面内にある。河口からの距離はそれぞれ 12.5 km, 9.25 km, 9.25 km, 14.25 km, 14.25 km であり, 足立三日月ワンド(左岸)が湾曲している位置にある他は 4 ケ所すべてがほぼ河道の直線部分である。横断面形状の特徴としては, 三日月ワンド(左岸)が急傾斜河岸, 四ツ木橋上流左岸と西新井左岸が緩傾斜河岸として四ツ木橋上流右岸と西新井右岸がステップ状河岸となっている²⁾。また, 各観測地点の最大水深・勾配の諸元は表-1 に示す。

観測日の平均干潮位はおよそ A. P + 0.0 m であり, 平均満潮位は A. P + 2.0 m であった。

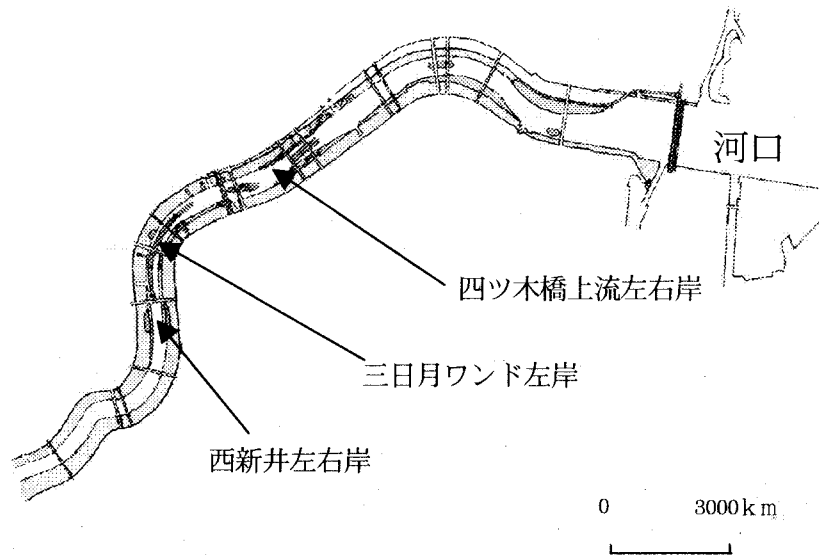


図-1 荒川の各観測地点

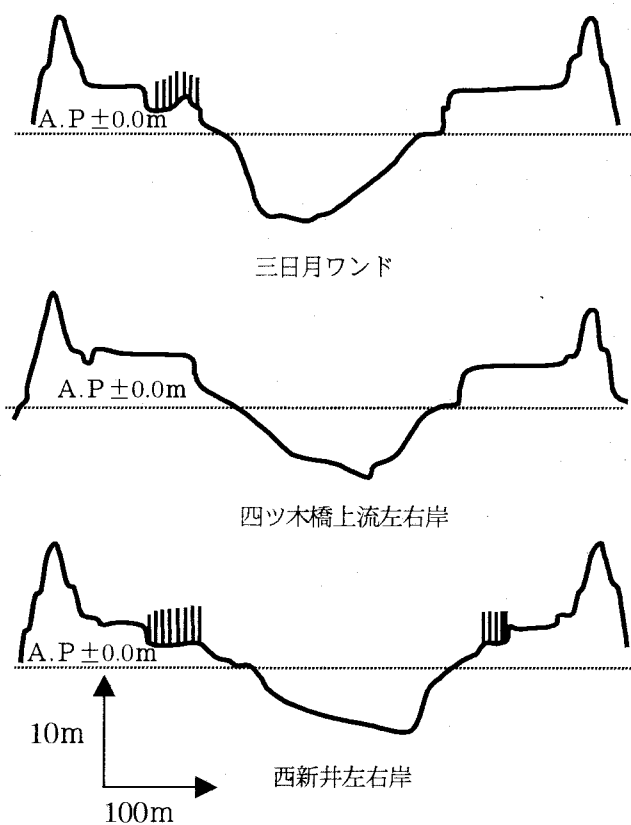


図-2 三日月ワンド，四ツ木橋上流，西新井の横断図

表-1 各観測地点の諸元

地点名	最低河床高さ	横断勾配
三日月ワンド(左岸)	A.P.-7.5m	1/5
四ツ木橋上流左岸	A.P.-5.9m	1/19
四ツ木橋上流右岸	A.P.-7.0m	1/6
西新井左岸	A.P.-5.4m	1/31
西新井右岸	A.P.-5.5m	1/6

(2) 観測内容

実験対象の船の種類はタンカーと国土交通省荒川下流工事事務所所有の2隻の巡視船である。2隻の巡視船はプレジャーボート型の船(あやせ号)と水上バス型の船(あらかわ号)である。タンカーは一般に航行する船であるため、船の形状や速度は多様であり、任意の条件で観測を行なう事ができなかった。しかし、2隻の巡視船は異なる形状であり、また、速度の条件も幅広く変化させる事が可能であったために広範囲の航走波データを得ることができた。

波の観測は深水域・浅水域・極浅水域の3つの領域で行なった。具体的な各観測内容と観測方法は以下に示す。

(a) 深水域における観測

深水域における観測では、河床高がA.P.-4.0mの川底に波高計を設置して航走波を0.2s刻みに観測している。観測時の水深は4.0m~6.0m程度であり航走波の大きさによっては微小振幅波理論の深水域に分類されない場合も起こり得る。しかし、ここでは便宜上、この観測地点は深水域と定義する。

(b) 浅水域における観測

浅水域の観測はA.P.±0.0m地点近傍で行なった。観測方法は、最大波高を観測するための1本のメインポールを含む3本のポールを設置しておき、船の上り下りによって3本の内の2本を使い分けて波速を観測する。

(c) 極浅水域・ヨシ原内における観測

水際近くやヨシ原内における最大波高の観測は、2m間隔に箱尺を設置し、10m区間にわたって波高を目読した。

(d) 船の速度

船には正確な速度計器がついていないため、船の速度は、50m区間を通過する時間を堤防上で計測し求めた。

(e) 航行ライン

各観測点の近くに橋梁が存在する。これらの橋梁上から写真やビデオによる撮影を行ない船の航行ラインを割り出した。また、この方法により撮影したビデオより、航走波の発生機構や波長など特性の違いなども確認する事が可能となった。

3. 実験結果と考察

(1) 深水域における航走波の波高と周期

観測の結果を図-3と図-4に示す。この2つの図の横軸は、船の速度を長波の波速で除したフルード数である。

$$Fr = \frac{V_s}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

ここで、 V_s : 船速度、 g : 重力加速度、 h : 深水域観測点における水深である。

図-3の波高について、水上バス型の場合はフルード数の上昇に伴って大きく上昇しているが、プレジャーボート型の場合はフルード数にあまり依存せずほぼ一定の値を取っている事が分かる。図-4の周期も同様に、水上バス型の場合はフルード数の上昇に伴って直線的に増加しているが、プレジャーボート型の場合はほとんど一定値を取っている事が分かる。

プレジャーボート型の場合、フルード数にあまり依存せず波高も周期もほぼ一定値を取るの、船体が軽い、速度を上げてさほど推進力を要しないためであると考えられる。一方、水上バス型に関しては、波高・周期とフルード数の関係が倉田ら⁹⁾の模型実験による結果とほぼ同様な結果となっている。

(2) 深水域におけるエネルギー分布特性

深水域における航走波のエネルギーの変化を評価する方法には、最大エネルギーフラックスに着目する方法と1つの波群の持つエネルギーに着目して行なう方法の2通りがある。航走波に分散性がない場合は前者も後者もほぼ同義となるが、分散性をもっている場合は前者の方法では航走波のエネルギー減衰を評価する事はできない。ここでは上記の2通りの方法で解析を行ない、評価方法を考察する。

(a) 最大エネルギーフラックスによる評価

最大エネルギーフラックスとは、1つの波群中の最大波高が持つエネルギーフラックスのことである。

エネルギーフラックスの算出方法は微小振幅波理論に基づき、次の式で求めた。

$$W = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (2)$$

ただし、 ρ : 水密度、 H : 波高、 C_g : 群速度である。

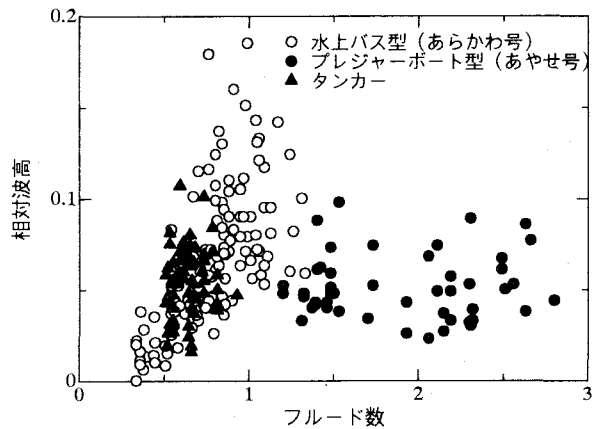


図-3 フルード数-相対波高

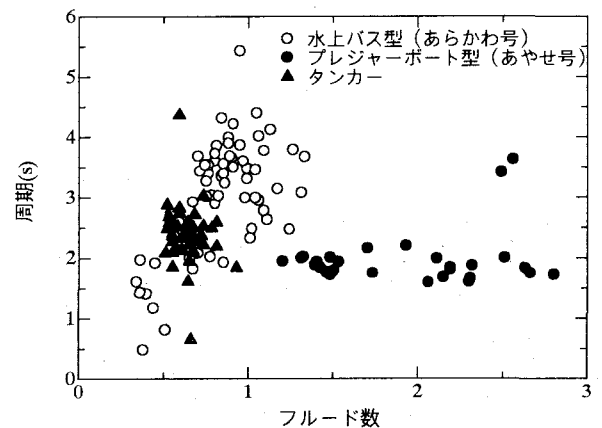


図-4 フルード数-周期

フルード数と最大エネルギーフラックスの関係を図-5に示す。フルード数と最大エネルギーフラックスの関係は前述の波高や周期の性質から予想されるものとなっている。

水上バス型の場合は、波高・周期の関係と同じようにフルード数の増加に伴って最大エネルギーフラックスも増加している。また、プレジャーボート型の場合、最大エネルギーフラックスはフルード数にあまり依存していない。

次に、プレジャーボート型のフルード数-最大エネルギーフラックスを航行ライン別にプロットした図を図-6に示す。これを見ると、航行ラインが深水域の観測点から離れるに従って最大エネルギーフラックスは小さな値をとっていつていることがわかる。これは、深水域内での航走波の進行に伴いエネルギー減衰を起こしたためであるか、波の分散性のためであるかのいずれかであると考えられる。この点については、後でさらに検討する。

(b) 波別解析により算出したエネルギーによる評価

本研究における波別解析法とは、船が1回航行することによって発生した波群を抽出してその1つ1つの波について仮定のエネルギーを算出する解析法である。このエネルギーの算出方法は(3)式で求められ、計算の簡略

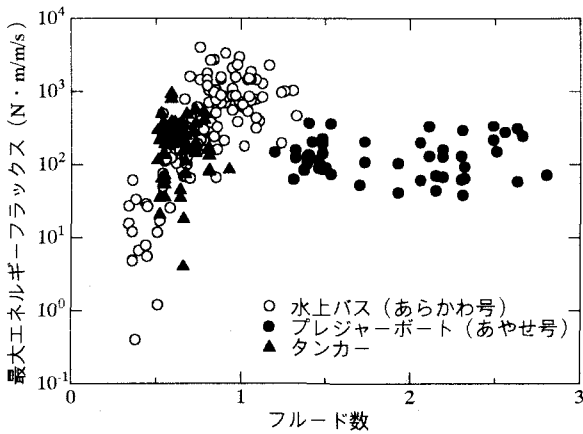


図-5 水深フルード数-最大エネルギーフラックス

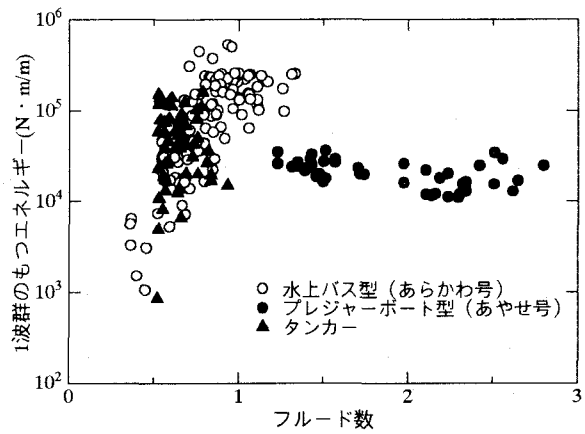


図-7 一波群の持つエネルギー

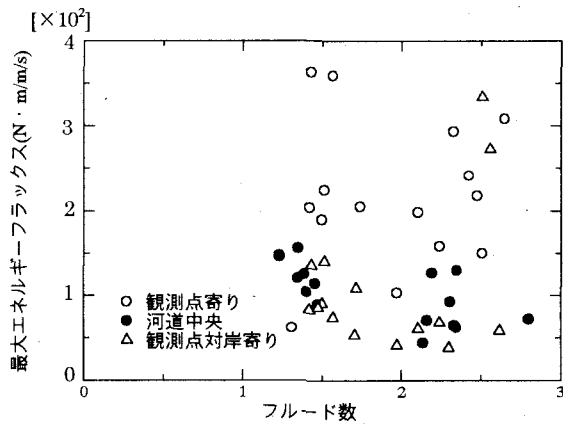


図-6 航行ライン別最大エネルギーフラックス (プレジャーボート型)

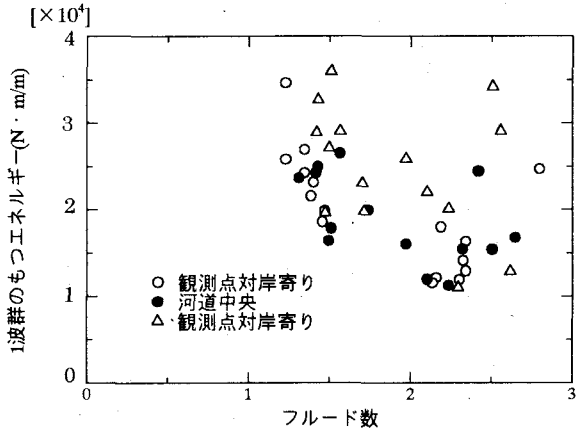


図-8 航行ライン別エネルギー (プレジャーボート型)

上、波速は最大波高の波が持つ波速 \bar{C} で代表させている。この式では厳密な意味の波のエネルギーを計算できない。しかし、最大エネルギーフラックスを評価した時に含まれていたと考えられる分散による最大エネルギーフラックスの減少を考慮する事が可能であると考えられる。

$$E = \frac{1}{8} \rho g \bar{C} \sum (H^2 T) \quad (3)$$

図-7はフルード数と(3)式より算出した1波群のもつエネルギーの関係を示す。これより、フルード数-エネルギーの関係は概ねフルード数-最大エネルギーフラックスと差がないことがわかる。

次に、図-8はプレジャーボート型のフルード数-エネルギーの関係を航行ライン別に示したものである。この図は、図-6に示したフルード数-最大エネルギーフラックスの場合とは異なり、航行ラインの違いによってさほど違いが現れていない。この結果より、プレジャーボート型の船の造る航走波は、深水域内では分散を起こすことにより最大エネルギーフラックスは減少するが、エネルギーの減少はほとんどない事がわかる。

(c) 深水域における航走波のエネルギー分布特性の評価方法

プレジャーボート型の船の造る航走波は分散性を持っている事が明らかとなった。しかし図-6と図-8を比較した場合、どの程度の分散が起こっているのかわかりにくい。そこで水上バス型、プレジャーボート型そしてタンカーの船種別に分類し、最大エネルギーフラックス-1波群のエネルギーの関係を航行ライン別に分けて比較する。この結果を図-9~図-11に示す。

プレジャーボート型ではプロットされる範囲が航行ラインによって明らかに違っており、特に「観測点寄り」のデータは他の航行ラインに比して最大エネルギーフラックスに対する1波群のエネルギーが小さいことがわかる。これはプレジャーボート型の船が造る航走波は分散性が大きいためであると考えられる。一方、タンカーの場合は航行ラインにあまり関係なくプロット範囲はほとんど同じであり、タンカーが造る航走波は分散性が小さいと言える。

以上より、船の種類によって、造られる航走波の分散性に違いがある事が分かった。水上バスとプレジャーボートの航走波には分散性があり、特にプレジャーボートの航走波は分散性が大きい。一方、タンカーの航走波には分散性が小さい。この理由は、造波の機構が前者がスクリューによるものであり、後者は船体による流体の揺

き分けによるものの違いであると考えられる。しかし、スクリューによる造波でなぜ分散性が現れるのかは不明であり、今後の課題である。

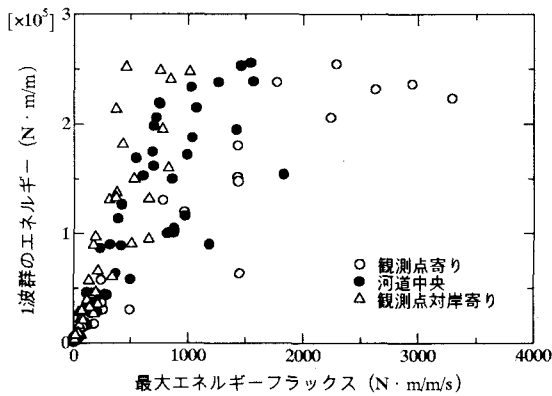


図-9 最大エネルギーフラックスと一波群のエネルギー (水上バス型)

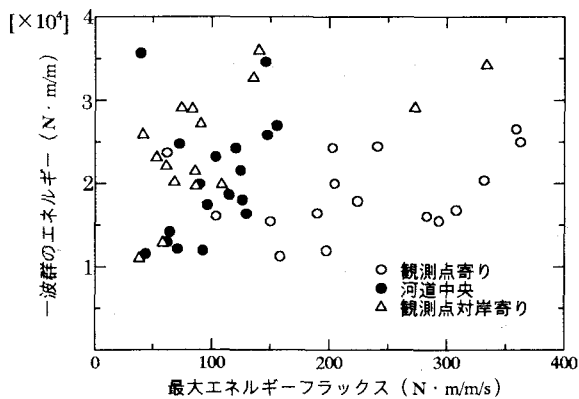


図-10 最大エネルギーフラックスと一波群のエネルギー (プレジャーボート型)

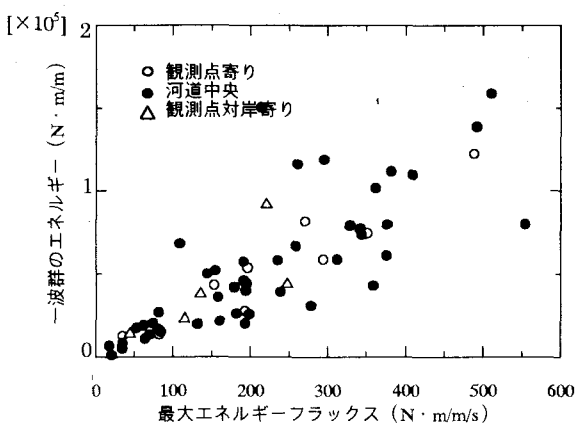


図-11 最大エネルギーフラックスと一波群のエネルギー (タンカー)

(3) 遷移域におけるエネルギー分布特性

重力波の理論において、深海域や浅海域など各領域の波を相対水深により分類がなされているが、本論文では波の大きさによって領域を分類せず、2. (2) でも示したように、波高計の設置場所の波の特性は深水域の波と仮

定している。ここで、深水域の観測点1と浅水域の観測点2に挟まれた領域を遷移域と定義する。

遷移域でのエネルギー分布を評価するにあたって、以下の注意が必要である。プレジャーボート型の船が「観測点寄り」に航行した場合、航走波は分散性が強いために深水域から浅水域に伝播する過程で分散を起こし、最大値が減少する。このため、プレジャーボート型の「観測点寄り」の深水域における最大値と浅水域における最大値の差にはエネルギー減衰によるものと分散性によるものを含んでいることになる。このように、分散性の強い航走波に関しては遷移域ではエネルギー減衰のみを見積もることは困難である。

すなわち、図-9より水上バス型の場合は「観測点寄り」のものは分散性の影響を強く受けていること、また、プレジャーボート型の場合は、今回は紙面の都合上評価の対象に含んでいないが、同様の考えで「観測点寄り」と「河道中央」では、遷移域でのエネルギー減衰は評価できないと考える。

そこで、この遷移域におけるエネルギーの減衰については、タンカーと「観測点寄り」以外の航行ラインでの水上バス型の船に着目して検討を行なう。対象とするデータは上述の航行ラインについて議論する。

解析方法は、倉田ら⁴⁾にならい横軸に $\Delta X/Ls$ を、縦軸に2つの領域のそれぞれの最大エネルギーフラックス W_1 と W_2 の比である W_2/W_1 を用いる。 ΔX は深水域観測点と浅水域観測点の間の距離、 Ls は航走波の特性波長であり次のように定義される。

$$Ls = \frac{2\pi V_s^2}{g} \quad (4)$$

ここで、 V_s は船の速度である。

図-12、図-13に水上バス型とタンカーによる遷移域における最大エネルギーフラックスの減少を示す。水上バス型の場合、 $\Delta X/Ls$ が2.0でエネルギーの透過率 W_2/W_1 は40%程度であることが分かるが、タンカーの場合は水上バス型に比してデータがバラついている。

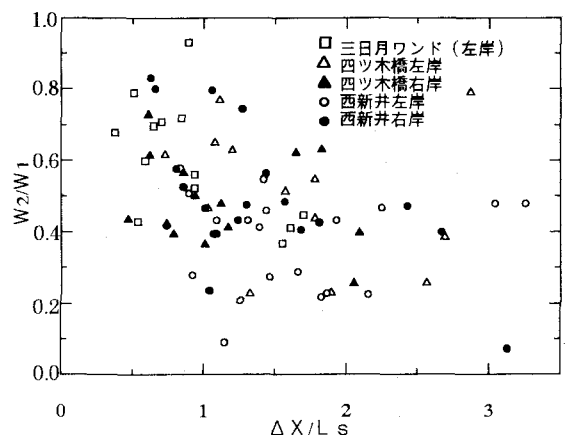


図-12 遷移域における最大エネルギーフラックスの減少 (水上バス型)

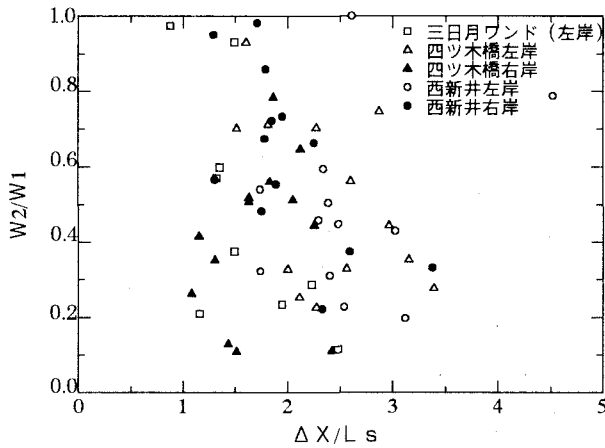


図-13 遷移域における最大エネルギーフラックスの減少 (タンカー)

このように船種によって遷移域におけるエネルギー分布が異なる理由はまだ明らかになっていないため、今後数値解析を行ない、検討する必要がある。

(4) ヨシ原内におけるエネルギー分布特性

最後に、ヨシ原内の航走波エネルギーの減衰特性について検討する。4観測箇所うちの、ヨシ原内の勾配がほぼ水平である西新井左岸について解析を行なう。

現地ヨシ原の形状は図-14に示す通りである。観測場所のヨシ原形状は複雑であるため、図中の黒丸の観測点における航走波の透過距離は太線の矢印のように図解で求めた。

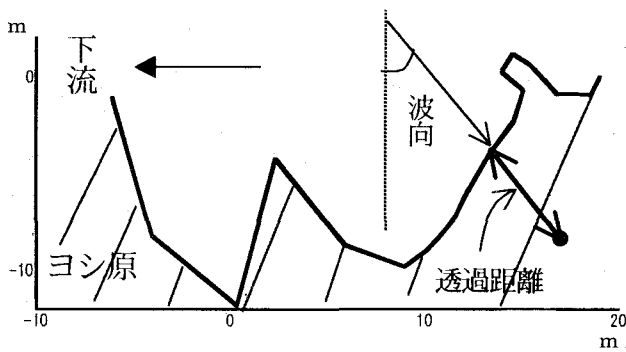


図-14 西新井左岸のヨシ原平面図

図-15は、補正後の透過距離と透過率の関係を示す。透過率とはヨシ原前面で観測した最大エネルギーフラックスに対するヨシ原内の透過距離地点における最大エネルギーフラックスの比である。データの分類は波の粒子速度を最も左右するH/Tで行なっている。

この図を見ると、ヨシ原内におけるエネルギー透過率は透過距離を経るに従って減少している。透過距離が12mで透過率が10%前後にまで減少していることがわかる。この結果は福岡ら¹⁾の結果とほとんど同じである。また、透過距離が小さい範囲ではH/Tが大きい場合、透過率が

小さくなっている。これより粒子速度の大きな波ほどヨシ原内では短い距離でエネルギー透過率が小さくなると言える。しかし、透過距離が大きくなると、もはや、H/Tにはほとんど関係しない。

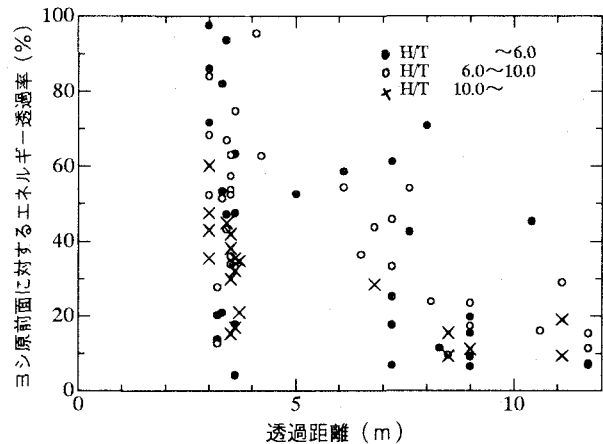


図-15 西新井左岸ヨシ原内のエネルギー透過率

4. 結論

荒川における航走波の観測の結果、明らかとなった主要な点は次の通りである。

- 1) 航走波の特性は船の種類や速度によって大きく変化する。プレジャーボート型の船は速度を上げるに従って、喫水が小さくなるため、波高と周期はあまり速度に依存しない。
- 2) 水上バス型やプレジャーボート型のようなスクルーを動力としている船種の航走波は分散性を持っている。
- 3) 遷移域におけるエネルギー減衰は $\Delta X/Ls$ に大きく左右されるが勾配の影響は強く受けない。また、水上バス型の造る航走波の場合、遷移域では $\Delta X/Ls$ が2.0でエネルギーの透過率は40%程度である。
- 4) ヨシ原内では航走波のエネルギーは効果的に透過率が減衰し、透過距離が12mで透過率が10%程度にまで減少する。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 甲村謙友, 渡邊明英, 三浦央晴: 船が造る波のエネルギーを減衰させる河岸ヨシ原の効果, 水工学論文集, 第36巻, pp713-716, 1992
- 2) 田畑和寛, 大手俊治, 江上和也, 平田真二, 福岡捷二: 荒川下流域におけるヨシ原の形成と保全のプロセス, 河川技術論文集, 第7巻, 2001
- 3) 福岡捷二, 渡邊明英, 新井田浩, 佐藤健二: オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価, 土木学会論文集, No.503/II-29, pp59-68, 1994.11
- 4) 倉田克彦, 小田一紀, 平井住夫: 浅海水路中の航走波の特性および繋留船に及ぼすその影響, 第30回海岸工学論文集, pp598-602, 1983.

(2001. 4. 16 受付)