

河川及び実験水路流水音のF F T解析による検討

The characteristics of sound from Flowing water in the river and the experiment of open channel by FFT analysis

長谷部正彦*・福村寿敬・上原哲一**・桑川高德***

By Masahiko HASEBE, Hisataka FUKUMURA, Norikazu UEHARA and Takanori KUMEKAWA

ABSTRACT: The purpose of this study is to find the characteristics of sound of flowing water in the river and in the channel of experiment from frequency analysis by FFT .

In the area of river improvement and river conservation works have tended to put importance to landscape from visual approach. But, in the future, it is necessary that the basic idea of acoustic approach called soundscape compared with visual approach is discussed in the river design.

Keywords; sound environment, frequency analysis, spectral analysis, flowing water

1 はじめに

河川計画における親水計画では、現在、視覚的景観すなわち「ランドスケープ」に主要な要素がおかれていて、河川周辺に常に存在する「音」については、ほとんど取り上げられていないのが現実である。そこでより親水性を高めるという点から考えても、これまでの「ランドスケープ」のみの研究に加え、水環境周辺での音を考慮した聴覚的な景観、つまり「ランドスケープ」の要素をも、今後取り上げる必要があるように思われる⁽¹⁾。これまでの著者らの研究^{(2)・(3)}では、河川での流水音の基礎的研究として、河川周辺での流水音から得られるスペクトルの周波数特性を検討し、その評価を行ってきたが、測定される音が河川音そのものではなく雑音をも含む音なので、その特性をつかむまでには至らなかった。そこで本研究では流水音の特性を知るという点から、実験水路を設け、いくつかのケースの実験を行なうことによって、その流水の水利諸量（特に、フルード数の影響が強いと考えられるが）と流水音の周波数特性を調べ、河川での流水音特性との比較を行い、流水音の音特性を検討することを目的とする。

* 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科（〒321 宇都宮市石井町2753）
（Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Utsunomiya）

** 宇都宮大学 工学部建設学科（同上）
（Ditto.）

*** 工修 宇都宮工業高校 土木科（〒320 宇都宮市京町9-25）
（Utsunomiya Technical High School）

2. ゆらぎ特性（スペクトルの周波数特性）と自己相関関数との関係

不規則現象を解析するためのFFT法(Fast Fourier Transform Method)によるスペクトル解析（周波数特性を求める方法）とゆらぎ特性との関係を示す。パワースペクトル（後に述べるが、周波数領域で示される）と式（1）で示される自己相関関数、つまり、ウィーナ・キンチンの関係よりゆらぎの時間的変化の様子を表現する。

$$\begin{aligned}
 C(\tau) &= \overline{x(t)x(t+\tau)} \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t+\tau) dt
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここに、 $\overline{\quad}$ は時間平均を意味し、 $x(t)$ は不規則変量、 τ は遅れ時間である。スペクトル解析により得られた結果のパワースペクトル $P(f)$ を縦軸に、横軸に周波数 f をとり、その勾配 $(1/f^n)$ からスペクトルの周波数特性が推測される。この周波数特性を自己相関関数 $C(\tau)$ とパワースペクトルの関係から概念的に見ると図-1のようになる。

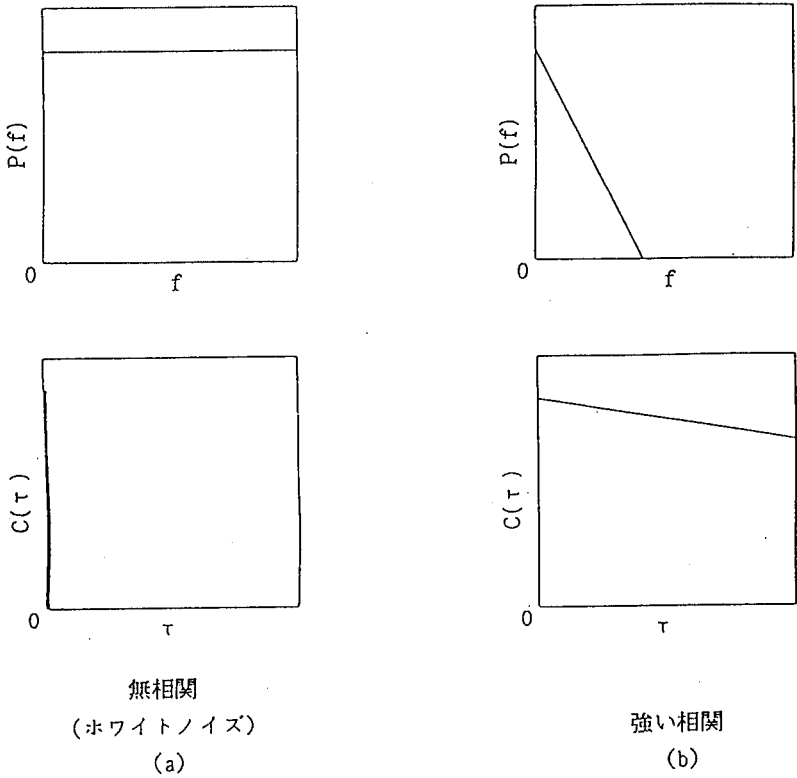


図-1 自己相関関数とパワースペクトル

図-1(a)は、パワースペクトルは周波数にかかわらず一定であり、自己相関関数は δ -関数となり、もとの時系列の波は白色雑音と呼ばれる。図-1(b)は、自己相関関数の減少の仕方が緩く、逆にパワースペクトルの勾配の減少の仕方は急である。この場合は、相関が強く前の信号の記憶がその後も長く続いていることを意味している。

3. 実河川の流水音の周波数特性

先にも述べたように、実河川での流水音の周波数特性を示す。河川で測定した流水音の周波数特性の結果を図-2、3に示す。

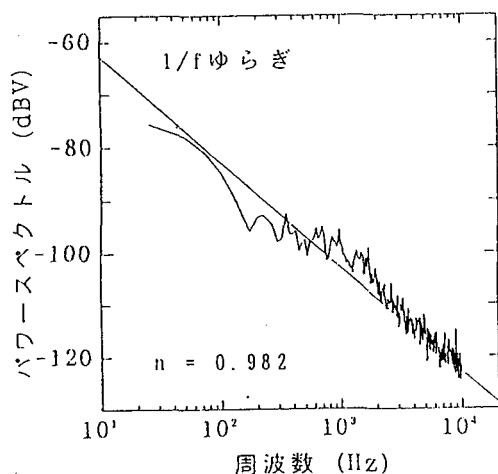


図-2 鬼怒川早瀬

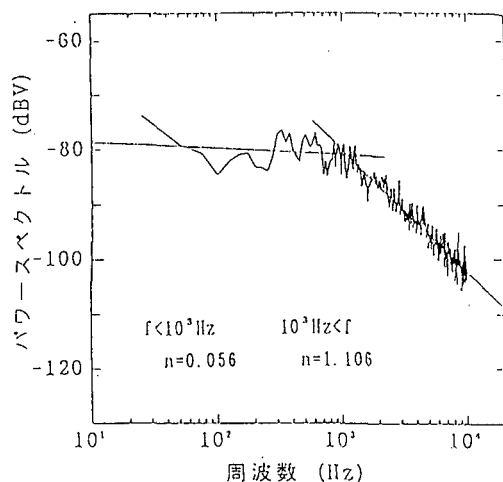


図-3 釜川垂直落下流

図-2は鬼怒川流域の早瀬での測定結果であり、図から見てもわかるとおりこの周波数特性は2つの成分からなっている。つまり、 10^3 Hz程度を境にして、それより高周波領域では $n=1.106$ (n :周波数 f のべき乗)であり、ある程度の相関関係にあることがわかる。しかし、低周波領域では $n=0.056$ となり、周波数特性はホワイトノイズに近い。この測定時の河川の河床材料は、径40 cm程度の岩敷きである。ほとんどの河川流水音の周波数特性がこのような2成分から成るという結果もでている^{(2)、(3)}。また、図-3は釜川における垂直落下流(約1.5 m)で、河床材料は、コンクリートで護岸もコンクリートでの測定結果である。この場合は測定領域内では $n=0.291$ となり、やはり特性は、ホワイトノイズに近い値となった。しかし、文献(3)に示しているが、宇都宮市内の田川のせせらぎの例で、河床材料が手の拳程度の玉砂利では、 $n=0.982$ となりゆらぎの性質とほぼ同じ結果が得られた。つまり、これらの測定結果のみからでは、河川のマクロな立場の音環境を検討したのみで、音特性の原因を十分に把握するまでには至らなかった。そこで流水音の水理学的特性をつかみながら、基本的な流水音を発生させその特性を検討するために、以下の実験を行った。

4. 実験方法と実験結果

実験は図-4のような装置を用いて行った。実験は水路床勾配を2パターン設定し（ケース1～ケース3の水路床勾配 $I = 0.214$ 、ケース4～ケース6の水路床勾配 $I = 0.148$ ）、それぞれの水路床勾配で流量は3パターン設定して（ケース1とケース4の流量 $Q = 783.9$ 、ケース2とケース5の流量 $Q = 1276.6$ 、ケース3とケース6の流量 $Q = 1518.2$ 、単位： cm^3/s ）合計6つのケースで実験を行った。全てのケースを通して、水路床の状態と水路幅は変えずに実験を行った。また、流水音の測定にはFFTアナライザー（CF-120）を用い、音圧レベル（音の物理的強さ）、パワースペクトル（音圧の時間軸波形から周波数軸波形に変換したもの）を共に10回ずつ測定した。実験は深夜、外部の騒音が比較的静かなる時間帯で行った。音の集音は、水路中央部で水面上1cmの位置にマイクロフォンを設置し、音の取込に関してはマイクロフォンから直接FFTアナライザに入力し、ハニングウィンド関数を用いて処理し、結果はデータローガに記録した。各ケース毎の水理量と流水音の水理条件を表-1に示す。音圧レベルは10回を平均し、その値をそのケースでの音圧レベルとした。パワースペクトルは各周波数毎に10回の平均を取りその平均値をグラフにした。その結果の1例を図-5、6、7、8に示す。

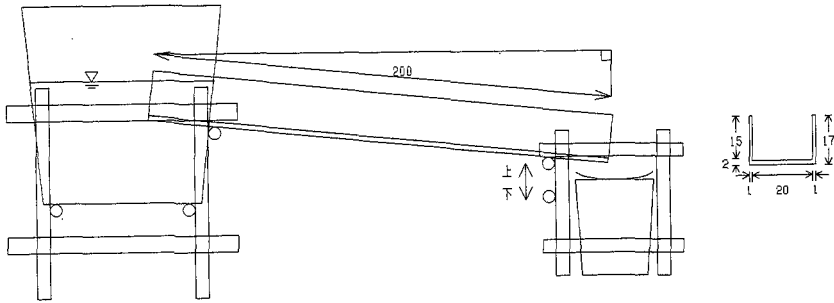


図-4 実験装置

表-1 実験水路での水理条件

	平均流速 V (cm/s)	摩擦速度 U^* (cm/s)	摩擦損失 係数 f'	摩擦損失 h_f (cm)	レイノルズ 数 Re	フルード数 Fr	音圧レベル (dBspl)
ケース 1	50.90	17.98	0.249	56.03	5934	1.310	110.6
ケース 2	78.80	18.44	0.110	56.71	9546	1.978	112.8
ケース 3	90.37	18.78	0.086	57.23	11251	2.227	113.5
ケース 4	52.97	14.66	0.153	38.41	5989	1.391	106.1
ケース 5	77.84	15.43	0.079	39.36	9518	1.942	108.1
ケース 6	86.76	15.49	0.068	40.01	11135	2.095	110.3

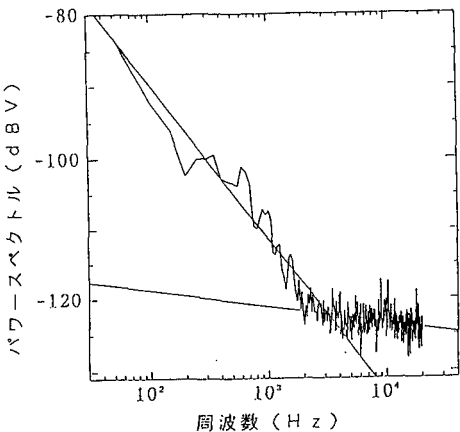


図-5 パワースペクトル
($n = 1.083$ 、勾配 $i = 0.214$)

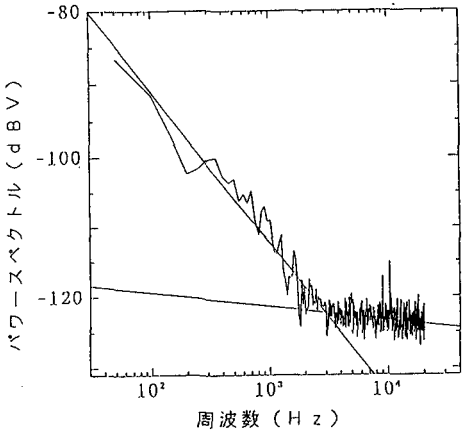


図-6 パワースペクトル
($n = 1.059$ 、 $i = 0.214$)

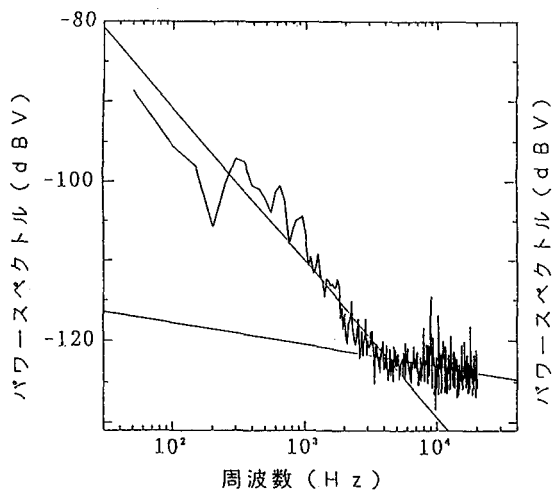


図-7 パワースペクトル
($n=0.964, i=0.181$)

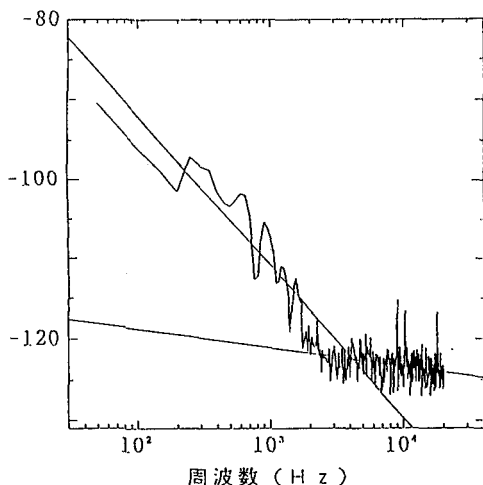


図-8 パワースペクトル
($n=0.941, i=0.148$)

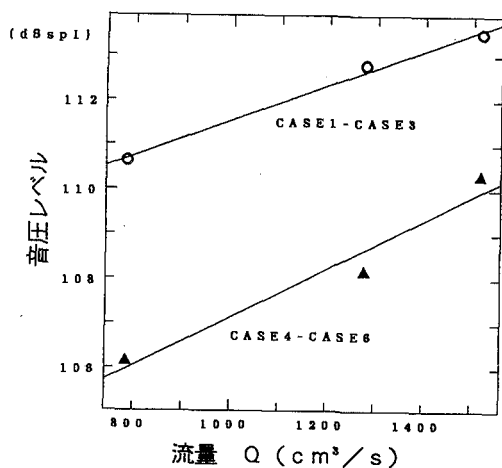


図-9 流量と音圧レベルの関係

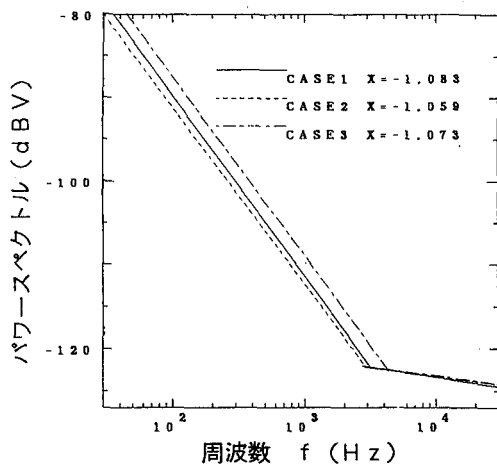


図-10 ケース1-ケース3

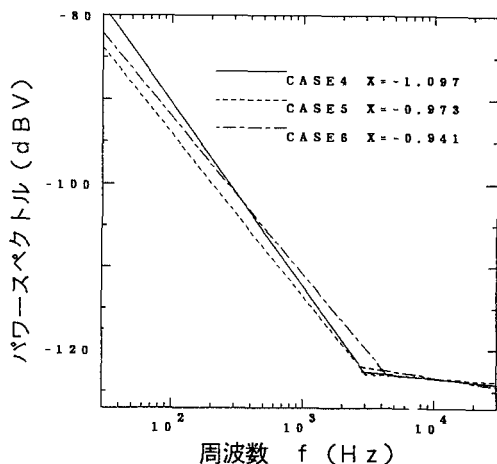


図-11 ケース4-ケース6

まず、音圧レベルと水理量との関係であるが、水路床勾配を2パターンに変え、流量も変えたが、いずれの場合も流量が増加するにつれて音圧レベルが増加する傾向にあった。また、その増加の仕方は、図-9に示すようにほぼ比例関係にあった。周波数とパワースペクトルの関係は全てのケースにおいて、図-5（ケース1のパワースペクトルの波形）のように、周波数3 kHzから5 kHz付近を境界として波形の傾向が変わった。境界より低い周波数領域では $1/f$ 型のパワースペクトルで、高い周波数領域では $1/f^0$ 型（白色雑音に近い）のパワースペクトルとなった。ケース1～ケース3のパワースペクトルのグラフを図-11にそれぞれ示す。

今後は、水路床の状態や水路幅等を変えた場合、さらに、

流量を増やした場合の流水音の音圧レベル、パワースペクトルはどのように変化するか、そして、多くの実験を通して、実河川の音圧レベル、パワースペクトルとの比較、検討を行っていく必要があると考えられる。

5. 結論

実河川の流水音では、低周波成分と高周波成分の二成分が存在している測定結果が多くみられた^{(2)、(3)}。流量と音圧レベルとの関係では、今回の実験の場合には、どの水路床勾配においても流量が増加すれば、音量レベルが増加し、その増加傾向はほぼ比例関係にあった。周波数とパワースペクトルの関係では、3 kHzから5 kHz付近を境界として、境界よりも低い方の周波数領域で $1/f$ 型の傾きを、境界よりも高い方の周波数領域では $1/f^0$ 型（すなわちホワイトノイズに近い）の傾きを示す傾向にある。但し、今回の実験での水理条件は、水路床の状態や水路幅が全ケースで同一条件とした。実河川の流水音と実験水路の開水路での流水音とを比較すると、周波数領域でのスペクトル特性に大きな違いがみられた。すなわち、実河川では、低周波領域で白色雑音に近いノイズであり、逆に実験水路では、高周波領域でホワイトノイズ的な傾向が示されている。この理由としては、実河川においては、低周波成分に流水音の他に、何らかの音が含まれていると考えられる。逆に、実験水路の場合は（夜中に注意深く実験を行ったが、通水していないときの雑音、暗騒音の測定がなされていなかった等の問題があると考えられるので、今後の実験では暗騒音等についても考慮して行きたいと思う。）、大部分が流水音のみのスペクトルを表していると考えられる。なお、本研究では、著者らは、 $n=1$ のゆらぎが聴覚の与える生理的な欲求が良いという観点からではなく、流水音がどのような周波数特性を持つのかということと、流水音の発生の機構を検討することを目的にしたものである。また、水の音とは、水中の泡が振動したり、壊れるときの衝撃が空気を振動させることが原因として、さらに音波として伝播して知覚されるものとなる。したがって、流水の中の音波発生機構と水理条件との検討も今後必要である^{(5)、(6)}。

参考文献

- (1) R. Murry Schafer (鳥越けいこ他訳) ; 世界の調律、平凡社、1985
- (2) 長谷部正彦、福村寿敬、桑川高德 ; サンドスケープの視点からみた河川流水音のゆらぎ特性について、環境システム研究、Vol. 23 : pp. 548~553、1995
- (3) 福村寿敬、長谷部正彦、桑川高德 ; 河川流水の音環境特性について、第50回土木学会年次学術公演概要集(2-A) : pp. 206~207、1995
- (4) 武者利光 ; ゆらぎの世界、講談社、1980
- (5) 土屋十國・中村良夫 ; 親水水路にみる流水形態と音環境の特性、造園雑誌、56 pp. 229~234、1993
- (6) 望月修、丸田芳幸 ; 流体音工学入門、朝倉書店、1996