

スペクトル解析による融雪期の流出解析

Runoff analysis for the period of snow-melting by spectral method

長谷部 正彦*、桑 川 高德**

By Masahiko HASEBE and Takanori KUMEKAWA

In snow areas, spring runoff, comprising mostly snowmelt, is the supply source of hydroelectric power and public water. The authors has been made a fundamental experiment to investigate the role for melting process of snow by atmospheric factors.

In this study, spectral analysis according to the above experimental, is applied to the hydrologic daily data of the real basin of the Okutadami dam. As a result of this analysis, daily total runoff component for the period of snow melting are separated into three runoff ones and it is understood that the correlation between heat flux and the amount of snowmelt is high in the low-frequency domain.

Keywords:spectral analysis,coherence,power-spectral,heat flux

1. はじめに

積雪地河川での融雪期の流量は、発電、灌漑用水および公共用水の供給源として重要であるとともに水利施設の規模、その管理を規定する因子の一つでもある。さらに防災の見地からの融雪洪水の予測などにより、より正確に融雪流出量を把握することが求められている。

本論文は、著者らが融雪（氷）流出過程の素過程に与える因子である気象要素（日射、気温、風速等）の役割を実験的に検討してきたが、本研究では、その結果に基づいて実流域の水文資料から統計的な手法であるスペクトル解析により融雪期の流出解析を行い、融雪の流出構造、流域特性を検討してみる。

2. 融雪（融氷）の実験的研究の成果

融雪（氷）水と気象要素との実験的研究の結果、融雪（氷）水の流出の素過程を研究するために、気象要素、すなわち日射・風速・及び気温を各々制御して融雪水との関係を調べ、さらに熱収支による理論計算と

* 正会員 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)

** 正会員 工修 宇都宮工業高校 土木科

(〒320 宇都宮市京町9-25)

実験による融雪水との関係を検討した結果を図-1に示す。熱収支の計算には実験で用いた日射と風速による顕熱、蒸発による潜熱を考慮した。また、実験に用いた氷はシャーベット状のものである。この実験から、図-1の結果が得られた。この図から熱収支法によって得られた計算値は実験によって得られた実測値とがおおむね良い一致を示している。

実験では、融雪量は日射が小さいために融雪量はほとんどが気温と風速によるものと考えられる。また、実験での融雪量は日射を一定の条件のもとで流出量が風速と気温との積すなわち熱フラックスとの関係が強く、また蒸発に関しては概ね10%以下なのでそれほど大きな影響はないと言える。

以上の実験に基づいて、実流域の水文資料を用いて流出解析を行うことにした。

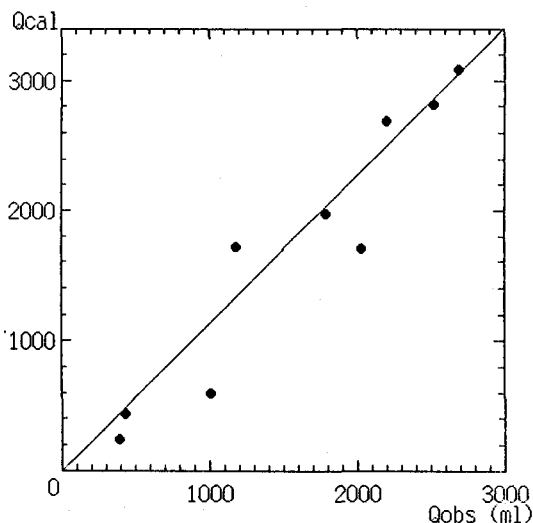


図-1 融雪水の実験値と理論値の比較

3. 対象流域および水文資料

対象流域としては奥只見ダムの集水域である只見川上流域（流域面積 $A = 425.4 \text{ K m}^2$ ）である。解析年は最近6ヶ年の1986年～1991年までの降雪が始まる11月から融雪流出が終了すると考えられる6月末の日単位の期間データである。採用する水文資料は流出量、気温、風速及び降水量である。ここでは、降雨量と降雪量とを区別せずに降雪量として扱う。その理由として、融雪期における流出は、降雪に比べると降雨の流出寄与が小さいと考えられるからである。

4. スペクトル解析

ここではFFT法（高速フーリエ変換）によりパワースペクトル、クロススペクトル、コヒーレンスおよびフェイズを計算する。

4.1 パワースペクトル

N 個（ $= 2^P$ ； P ：正の整数）のデータ $x(j)$ （ $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ）が与えられたとき、この有限離散化フーリエ変数を $X(k)$ とすると、パワースペクトルは次式で与えられる。

$$P(f) = P(k/T) = E[|X(k)|^2] / T \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 E はアンサンブル平均、 T は期間である。

4.2 クロススペクトル

入力 $x(t)$ ，出力 $y(t)$ のクロススペクトルは次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 P_{xy}(f) &= E[X(f) * Y(f)] / T = K_{xy}(f) - i Q_{xy}(f) \\
 &= E[(A_x(k) + i B_x(k)) * (A_y(k) - i B_y(k))] \dots (2)
 \end{aligned}$$

ここに

$K_{xy}(f)$: コスペクトル, Q_{xy} : クオドスペクトル, $A_x(k)$, $B_x(k)$, $A_y(k)$, $B_y(k)$: $x(t)$, $y(t)$ の実数部と虚数部をアンサンブル平均またはスペクトルウィンドーにより平滑化したもの。

4. 3 コヒーレンスおよびフェイズ

2つの変動量の間の統計的性質を表すのに、クロススペクトルでは一般に複素関数であり、現象の把握・記述に不便であるので、ここではコヒーレンスとフェイズを次式で与える。

$$\begin{aligned}
 Coh^2(f) &= \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_x(f) P_y(f)} \dots (3) \\
 Phase(f) &= \tan^{-1} \frac{Q_{xy}(f)}{K_{xy}(f)} \dots (4)
 \end{aligned}$$

コヒーレンスは、二信号のフーリエ周波数成分の相互相関係数であり、入力 x 、出力 y の間の各周波数成分ごとの線形性の程度を表すものである。

5. 実流域への適用

5. 1 降水量と流出量

融雪期間の降水量 $x(t)$ と流出量 $y(t)$ の各々のパワースペクトルを計算したものを図-2に示す。

降水量のパワースペクトルをみると振動しながら少しづつ減衰してきているものの白色雑音的な性質を示している。

一方、流出量は低周波部分で急激に減少している。

次に、降水量 x と流出量 y とのコヒーレンスとフェイズを求め、その結果を図-3、4に示す。

これらの図から周波数が低周波部分の $f \approx 0.05$ と高周波部分の $f \approx 0.45$ の所でコヒーレンスの値が下っており、このことは流出成分が2日位までの速い成分と20日位までの成分とそれ以降の遅い流出成分の三成分に流出分離されることが推定される。

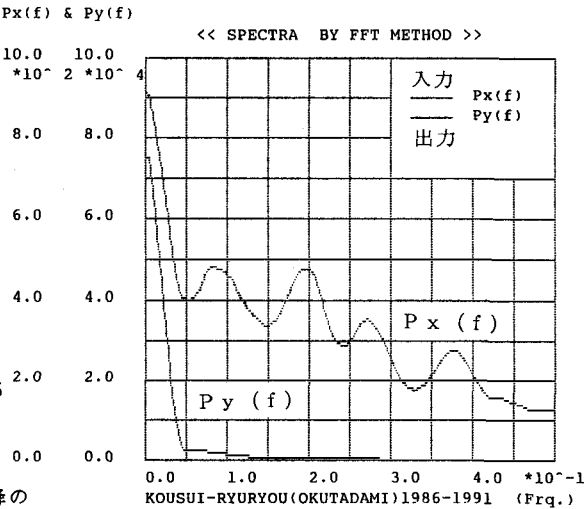


図-2 降水量と流出量のパワースペクトル

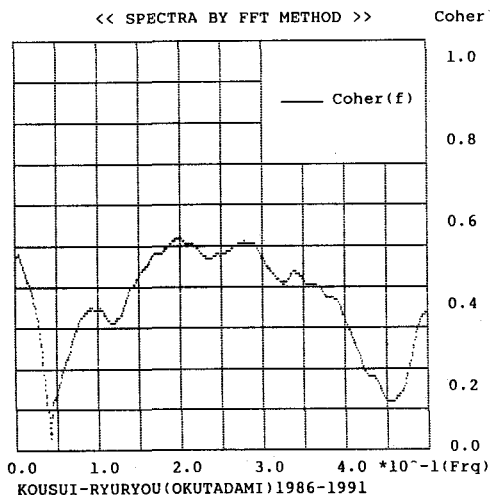


図-3 降水量と流出量のコヒーレンス

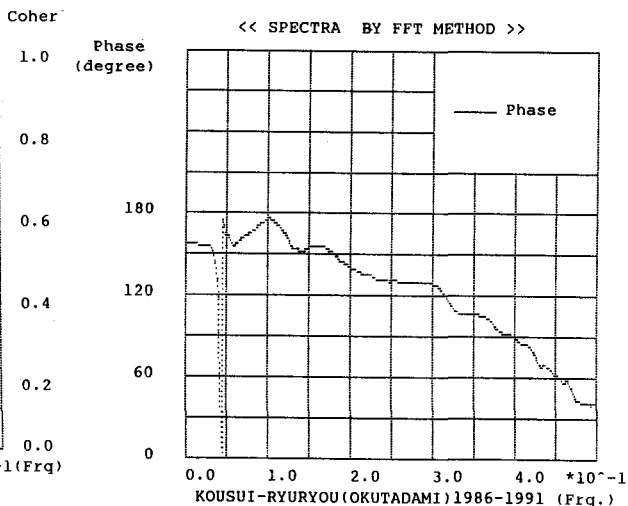


図-4 降水量と流出量のフェイズ

5. 2 気温と流出量の関係

次に、一般的にデグリティ法では、融雪量は積算気温の関数となっているので、ここでは入力として気温（但し平均気温）と出力として流出量との間の統計的性質を検討する。図-5に気温と流出量のコヒーレンスの計算結果を示す。この図からも周波数 $f \approx 0.05$ と $f \approx 0.45$ でコヒーレンスの値が小さくて、降水量の関係と同様、三成分に分離されているように思われる。しかも $f \approx 0.05$ （20日）位までの低周波部分で気温と流出量とのコヒーレンスの値が高く平均的には両者は線形の関係にあるように思われる。

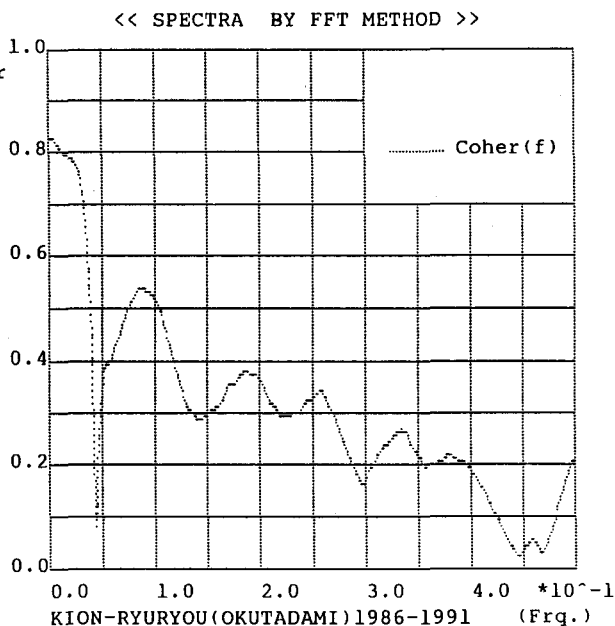


図-5 気温と流出量のコヒーレンス

5. 3 風速と流出量の関係

図-6に風速と流出量のコヒーレンスを示す。このように融雪までの遅れ時間を考慮せずに、直接的にコヒーレンスを求めると両者のあいだでは線形の関係は弱く、むしろ非線形性のほうが強くでている。しかし実験的には、図-7に示すように風速と融雪量との間にはニアの関係が得られている。このように実験結果と実流域の流出解析との相違は、今後検討していく必要がある。

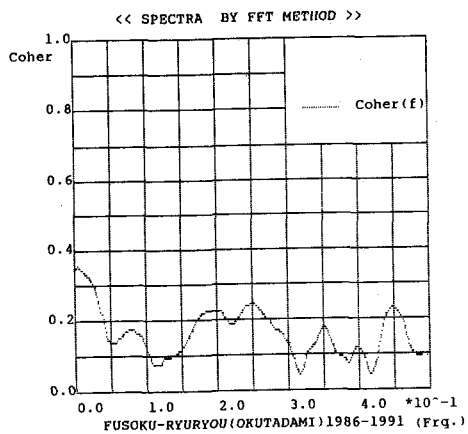


図-6 風速と流出量のコヒーレンス

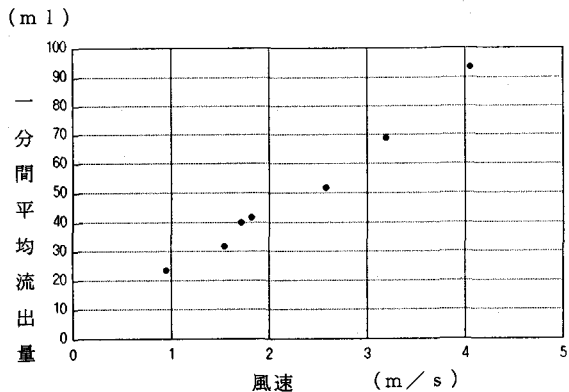


図-7 風速と融雪水の関係 (実験)

5. 4 熱フラックス (気温 * 風速) と流出量の関係

2. の実験的検討で得られた結果との整合性を調べるために、気温と風速の積つまり熱フラックスと流出量との関係を実流域の水文資料を用いて調べた。図-8 に熱フラックスと流出量のコヒーレンスを示す。この図から、低周波の部分 (20 日位) では、コヒーレンスの値が高く、平均的には熱フラックスと融雪量とは線形性が強い。しかし、高周波の部分では、非線形性が強い。また、この図からではあるが、融雪の成分には三つの成分に分けられていることが推定される。

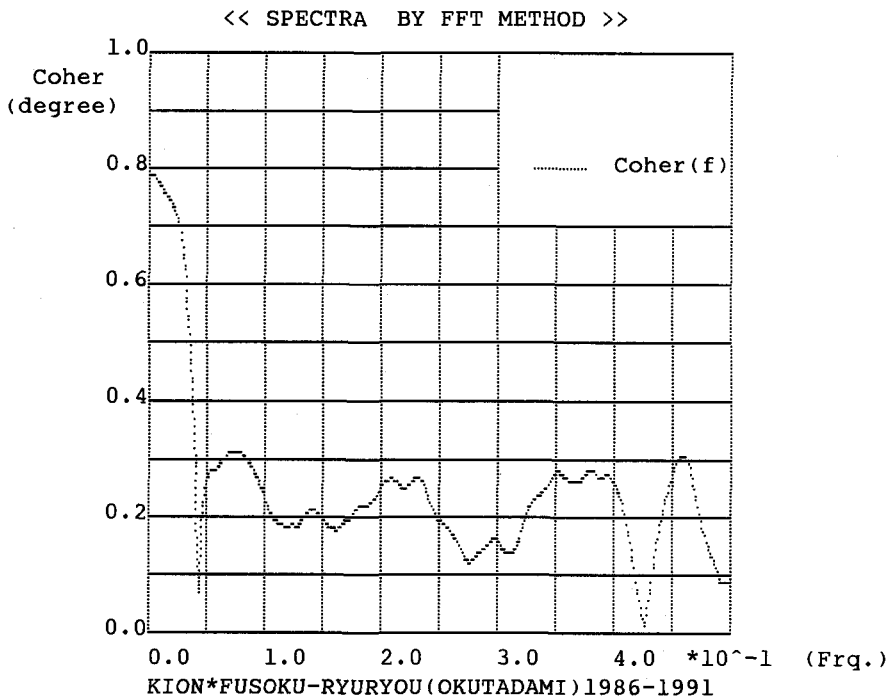


図-8 熱フラックス (気温 * 風速) と流出量のコヒーレンス

あとがき

融雪水の流出機構をスペクトル解析により定性的に推察した。その結果、融雪水が流出してくるのに三成分つまり2日位で流出する成分、20日位までに流出してくる成分、それ以降に流出してくる遅い成分から成り立っていることが推定された。次に、融雪には、平均的には熱フラックスとの相関が低周波部分で強く、風速と融雪量の関係では、実験結果と実流域での水文解析とは異なり、自然状態での融雪機構の複雑さが理解でき、この点についてはもう少し基礎的研究を行う必要があると思われる。本解析では、日射の資料が利用できなかったが今後日射の資料をも含めて解析を行いたい。

最後に、貴重な水文資料を提供していただいた電源開発の皆様と特に、貴重なご助言をしてくれました電源開発関東支社小出電力所の皆様に心から感謝致します。

参考文献

- (1) 日野幹雄；スペクトル解析、朝倉出版
- (2) 糸川高德、長谷部正彦、田村文直、日野幹雄；気象要素が融雪及び融水流出過程に及ぼす役割の実験的研究、水工論文集、第35巻、1991
- (3) 糸川高德、長谷部正彦、日野幹雄；気温・日射・風速が融雪（融氷）流出に与える影響の実験的研究、水文・水資源学会、1991年研究発表会要旨集
- (4) 小島賢治、小林大二、藤野和夫；気象ノート、第136号、1979
- (5) 倉島栄一、佐藤晃三；積雪の熱収支と融雪モデル、農業土木学会論文集第154号、1991、11月
- (6) 長谷部正彦、糸川高德、日野幹雄；融雪流出に影響を与える気象要素についての予備実験、東工大土木工学科研究報告、No. 41、1989
- (7) 日野幹雄、長谷部正彦；融雪時期の流出解析、水理講演会論文集、1982、2月