



Title	スペクトル解析からみた河川蛇行のモード : MEMによる解析の試み
Author(s)	田上, 龍一; TANOUÉ, Ryuichi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 49, 201-209
Issue Date	1987-03-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.49.201
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14168
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p201-209.pdf



スペクトル解析からみた河川蛇行のモード —— MEM による解析の試み ——

田 上 龍 一

旭川工業高等専門学校

(昭和 61 年 11 月 25 日受理)

Multiple Modes of River Meander Judging from Spectrum Analysis by MEM

By Ryuichi TANOUE

Asahikawa National College of Technology

(Received November 25, 1986)

The meandering patterns of some reaches of Rekifune river system in Hokkaido are analysed. The meandering patterns represented by the stream centerline are fitted in B-spline curve. The azimuths derived from the curve are dotted against the distances along the valley course defined as a B-spline curve generated with the inflection points of the axis of the meander belt.

The results of the spectrum analysis of the azimuth-series suggest that the multiple modes of river meander are common in this region. Two groups of the modes seem to correspond to the ancient valley meander and the present stream meander respectively.

I. は じ め に

河川蛇行の波長と川幅、流量等の間に経験式を定める試みは多く行なわれてきた。

又、屈曲部を円弧で近似し、その曲率半径についても論ぜられている。Speight (1965) は、流路に沿った蛇行の方位角の変化について、パワースペクトルを求め、蛇行波長に複数のモードが存在することを指摘した。これは、河川蛇行の従来の扱いに於ける単純化に対する批判となった。一方、Ferguson (1975) は、イギリスの河川について、同様の解析と自己相関解析から、複数の蛇行モードはそれほど顕著ではないことを指摘しながら、卓越波長と川幅の間に良い相関があることを確認している。ところで、河川蛇行に二つの卓越する波長があり、これと気候変動を結びつける議論は早くからあったが、系統的にその検証を試みたのは Dury (1964) であった。Dury は、無能河川における谷蛇行の波長と現河道の蛇行波長に著しい差があることに注目し、谷蛇行形成期には、現在よりはるかに大きな支配流量があったとし、その量を推定した。又、William (1984) は Brice (1973) の方法に依って、蛇行流路跡の曲率半径を調べ、過去の流量の推定を試みた。筆者も、北海道の河川について、低位段丘を下刻した河川が大きく谷蛇行し、現河道の蛇行がこれに重なっていることを指摘し、河道のスペクトル解析によって、現河道と谷蛇行の波長を求め、支配流量の縮少の可能性について述べた。これまで試みられたスペクトル解析は、解析を行う流路区間を長くとれないため、長波長成分の分解能は著しく悪かった。又、蛇行波長を流路に沿った距離で定義しているため、蛇行の発達の度合によって波長が異なることになり、蛇行規模を表わす指標としては、不適と思われる点があった。本報では、これ等の欠陥を補うため、流下距離を流路の変曲点を結ぶ曲線に沿った距離で定義し、又、スペクトル解析は MEM を適用して河道形状の解析を試みた。

II. B-spline 曲線による流路形状表現

蛇行流路の形状を関数表示出来れば、数量的扱いの可能性は広がる。筆者は、B-spline 曲線によって流路形状の表現を試みた。B-spline 曲線は、与えられた点列を通る連続な曲線を、各点で、一次導関数（接線の傾き）、二次導関数（従って曲率）まで連続になるように結んだ曲線である。点群の位置ベクトル P_1, P_2, \dots, P_n が与えられたとき、それに対応する $(n+2)$ 個の位置ベクトル V_0, V_1, \dots, V_{n+1} が存在し、点 P_i と P_{i+1} を結ぶ曲線を、連続した四個の位置ベクトル $V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, V_{i+2}$ の一次結合で示すと、

$$C_i(t) = E_0(t) V_{i-1} + E_1(t) V_i + E_2(t) V_{i+1} + E_3(t) V_{i+2}$$

但し、 t は任意の変数で、 $0 \leq t \leq 1$ である。隣り合う一次結合が二次の導関数ベクトルまで連続となるようにし、 $V_{i-1} = V_i = V_{i+1} = V_{i+2}$ なら $C_i(t) = V_i$ とする条件を付与すると、

$$E_0(t) = -\frac{1}{6}t^3 + \frac{1}{2}t^2 - \frac{1}{2}t + \frac{1}{6}, \quad E_1(t) = \frac{1}{2}t^3 - t^2 + \frac{2}{3}$$

$$E_2(t) = -\frac{1}{2}t^3 + \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}t + \frac{1}{6}, \quad E_3(t) = \frac{1}{6}t^3$$

となる。そこで、 $t=0$ のときの連立方程式

$$P_i = \frac{1}{6} V_{i-1} + \frac{2}{3} V_i + \frac{1}{6} V_{i+1} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

を $V_0 = V_1, V_{n+1} = V_n$ という条件設定で解けば、 V_i ($i=0, 1, \dots, n+1$) が定まる。B-spline 曲線の表現力は極めてすぐれており、点列を適当に与えれば、河道の形状を忠実に表わす。又、特殊な場合を除けば、接線の傾きと曲率が河道に沿って連続であるという条件は自然である。河道の形状を与える座標点は、川幅の中心点の座標値を座標読み取り機で読み取り、入力した。曲率の大きいところでは、入力座標点の間隔を小さくする等の配慮を行えば、流路形状をほぼ完全に再現することが出来る (Fig. 1(a))。なお、座標値は航空写真から、北を y 軸正方向にして読み取った。

III. 流下方向の方位角の変化

上記のように V_i が定まると、

$$D_i(D_x, D_y) = \frac{dC_i(t)}{dt}$$

$$= \left(-\frac{1}{2}t^2 + t - \frac{1}{2}\right) V_{i-1} + \left(\frac{3}{2}t^2 - 2t\right) V_i + \left(-\frac{3}{2}t^2 + t - \frac{1}{2}\right) V_{i+1} + \frac{1}{2}t^2 V_{i+2}, \quad 0 \leq t \leq 1$$

とすれば、方位角は、

$\theta_i(t) = \tan^{-1}(D_y/D_x)$ として求めれば良い。但し、 $D_x = 0$ のとき、 θ が不連続となるので、 $D_x < 0, D_y < 0$ の区間で $\theta = \theta - \pi$ 、 $D_x < 0, D_y > 0$ の区間で $\theta = \theta + \pi$ とする。又、流路に沿った距離は、

$$S_i(t) = \sum_j \sum_k D_x^2 + D_y^2 \Delta t$$

として計算される。ところが、与えられた点群は任意であるので、 $S_i(t)$ は等間隔ではない。今、 S を等間隔にし、対応する方位角 θ を内挿して求め、距離 S を横軸に、方位角 θ を縦軸にプロットすると Fig. 1(b) になる。これをスペクトル解析すれば、卓越波数あるいは波長を知ることが出来るが (Fig. 1(d))、その波長は、流路に沿った距離で定義されている。このような定義では、木下 (1961) の云う蛇曲河道から迂曲河道へと蛇行が発達するにつれて、波長は著しく増大することになり、蛇行規模の指標としては適切ではない。そこで筆者は、流路の変曲点を B-spline 曲線で結んで蛇行帯中心線とし、これに沿った距離に対して方位角をサンプリングしなおして、スペクトル解析を行なった。Fig. 2 に示すように、変曲点と変曲点の間では、二点を結ぶ両曲線の長さで案分して方位角をサンプリングした。こうして得られた流下距離に

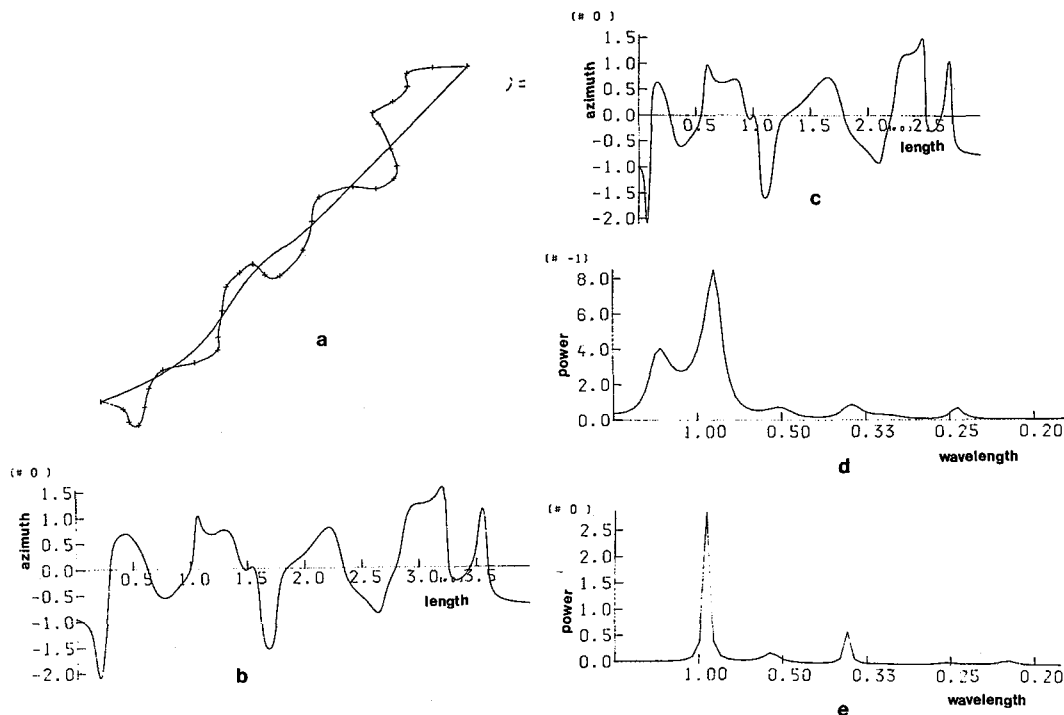


Fig. 1. Example of B-spline fairing and spectral analysis for a reach.

対する方位角の変化のパワースペクトルから卓越波長を知れば、それは、現河道に関して従来の定義に近い波長を与えることになる。谷蛇行に注目したい場合には、蛇行帯中心線を表わす曲線について、さらに変曲点を求めて B-spline 曲線で結んだ曲線を谷方向線とし、同様の方法で方位角を再サンプリングする (Fig. 2)。こうして Fig. 1(c)の波形が得られ、そのパワースペクトル (Fig. 1(e)) より、卓越波長が知れる。ここで得られた現河道蛇行波長に対応する成分は、従来の定義によるものより短かく評価されることが予想されるが、谷蛇行波長には良い定義を与える。

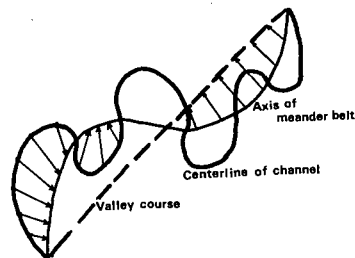


Fig. 2. Illustration on the sampling method for azimuth along axis of meander belt or valley course.

IV. MEM によるスペクトル解析結果と検討

MEM (最大エントロピー法) は、短いデータからもスペクトル推定が可能であり、分解能が高いことなどから、近年非常に注目を浴びている。河川蛇行の規模は下流ほど大きくなるので、長い流路区間をとって卓越波長を論ずるのは適切ではない。この制約のため、長波長成分の分解は困難であったが、MEM を採用することで、事情は大きく改善される。

1. Sine generated curve への適用

Sine generated curve は、曲線の接線方位角が、

$$\theta = \omega \sin 2\pi \frac{S}{M} \quad (\omega \text{ は定数, } \frac{S}{M} \text{ は曲線に沿った相対長さ})$$

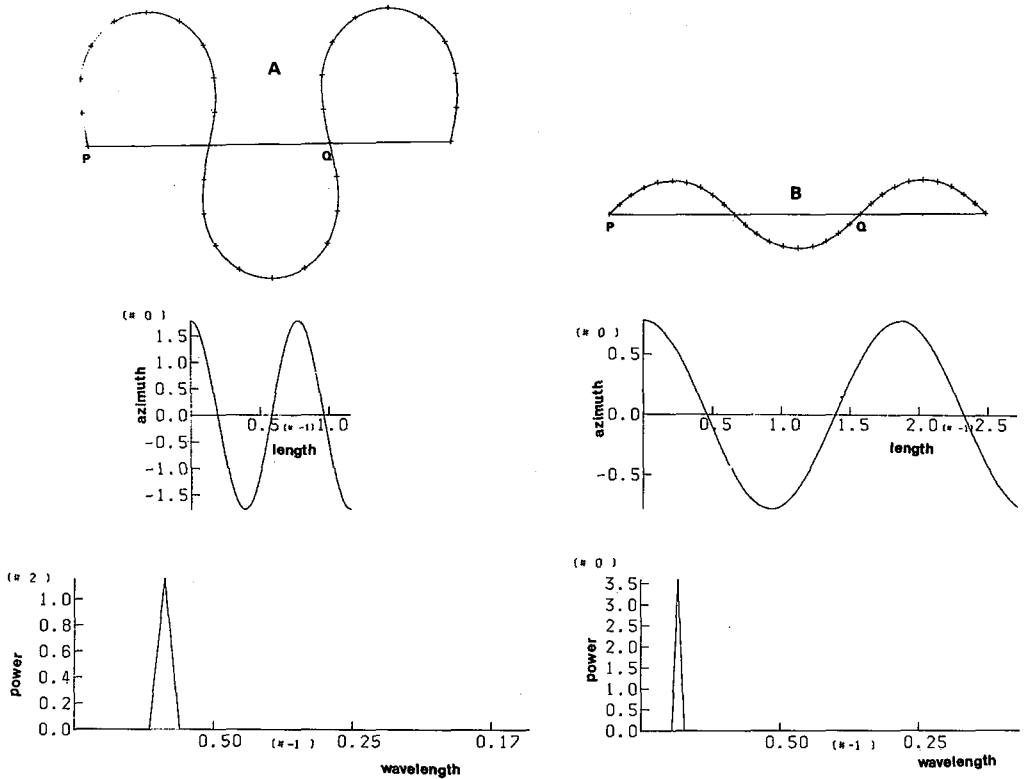


Fig. 3. Example of analysis for sine generated curve.
 A : $w=1.78$ B : $w=0.78$

で表わされる曲線であり, Leopold, et al. (1957) 等は蛇行形状をよく表わす曲線として導出した。Fig. 3 の A, B, は, それぞれ, $\omega=1.78$, $\omega=0.78$ のときの Sine generated curve 上の座標点を入力データとして解析した例である。入力点数は 31 であるが, 点群を結ぶ B-spline 曲線が Sine generated curve をよく表現していることは, 接線方位角の変化が, 正確に正弦波を示すことから分る。谷方向線に沿った距離に対する接線方位角の変化のパワースペクトルは, それぞれの曲線で, 波長が, 0.187, 0.077 に鋭いピークを持つ。これは, 視覚的に決められる波長 (Fig. 3 では, PQ 間の距離) と正確に一致している。なお, 両曲線は, その曲線長が等しくなるように計算されているので, 屈曲の小さい曲線の方の波長が長くなる。Fig. 4 に示されるように, 波数の異なる Sine generated curve を合成した曲線についても, そのパワースペクトルは, それぞれの対応する波長のとこ

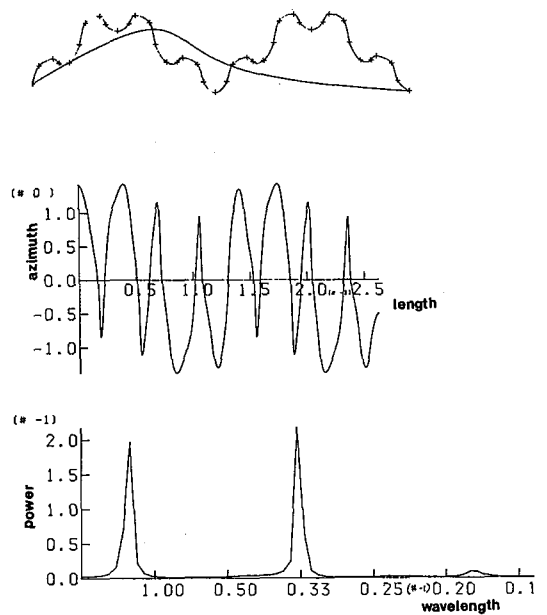


Fig. 4. Example of analysis for composite sine generated curve.

ろに鋭いピークを持っている。短いデータでも、MEMのすぐれた特性によって、良い解析結果を得ている。ところで、Fig. 4に描かれた谷方向線は歪んでいる。この原因としては、次の二点が考えられる。(a) 谷方向線、あるいは蛇行帯中心線は、必ず、解析区間の両端点を通るように定義しているため、区間のとり方の影響をうける。(b) 変曲点は、接線方位角の変化曲線のピークを探索して求めているが、複雑に屈曲している場合、細かい屈曲を無視した方が良い結果を得ることが出来る。このため、一定の基準を設けて、接線方位角変化曲線において、尖ったピークを無視するようにしてあるが、この基準は、どんな場合にも通用するというわけではない。以上のことから、実際の解析にあたっては、出力結果をみながら、データ読取り区間を移動したり、基準を修正したりして、可能な限り、現実の地形を忠実に反映させるようにする必要がある。なお、入力データの配置が不適當であれば、河道形状を正しく反映しないので、入力点の配置を変えるか、入力点数を増やす等の修正が必要となる。曲率の大きな区間は、入力点の密度を高くしておかなければならない。

2. 歴舟川流域の解析

今回解析を試みた歴舟川流域の概観は、Fig. 5に示した。この地域には、中～後期洪積世から沖積世に至る見事な河成段丘が発達している。図には、沖積段丘と最終氷期に形成されたとみられる段丘を一括した低位段丘を示してある。藤木(1974)は、北海道主部の河谷地形を論じ、低位河成主段丘の形成後、大きな侵蝕期とそれに引続く堆積期を経て、再び現河床付近まで下刻が起っていることを指摘し、その主たる原因を気候変動に求めている。一般に河谷地形には、特に最終氷期以降の気候変動の歴史が投影されていると考えて良いだろう。こうした目で改めて河谷地形を観ると、歴舟川流域の低位段丘である尾田面、石坂面以降の河谷地形は興味深い。筆者は、特に中の川に於て顕著であるように、尾田面、石坂面を下刻して出来た谷の蛇行は、現河道の蛇行としては規模が大きすぎる点に注目している。大きな谷蛇行の滑走斜面には、石坂面や、沖積段丘とされる大樹面が残されており、石坂面形成期から、大樹面形成期の川は現

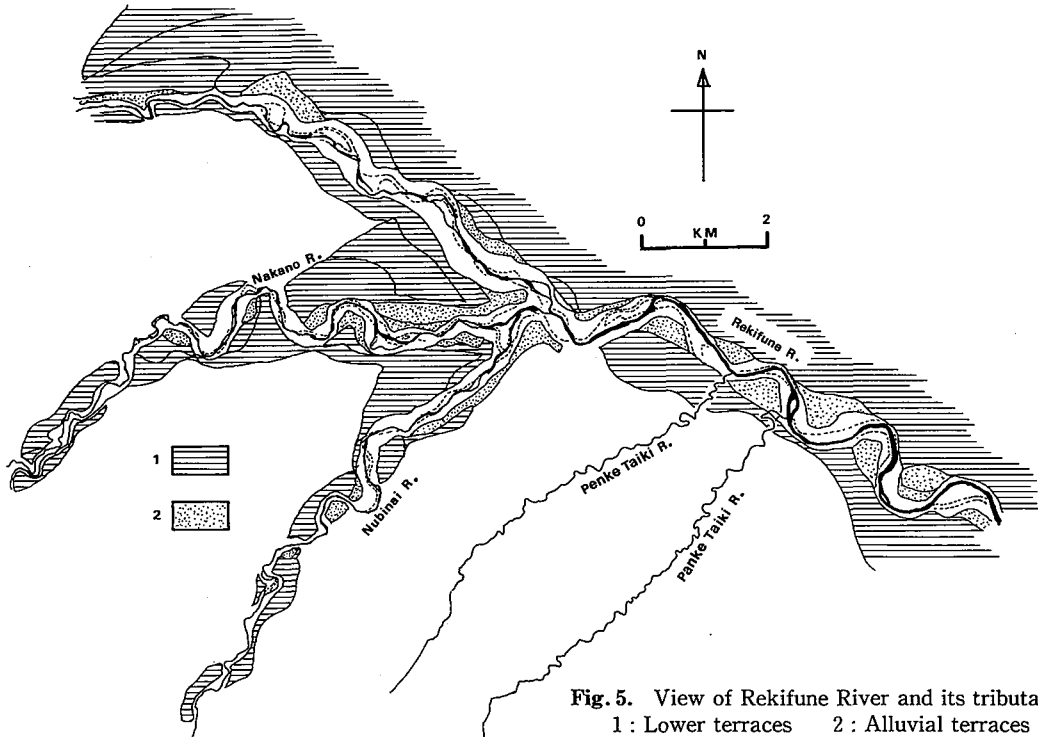


Fig. 5. View of Rekifune River and its tributaries.
1 : Lower terraces 2 : Alluvial terraces

在より大きな支配流量を持ち、下刻しながら蛇行幅を増大させ、その過程で段丘を残したと解釈できないであろうか。大樹面形成後、川は縮小し、現在の河道の蛇行が、大きな谷蛇行に重なっていると考えられるケースは少なくない。この観察が正統であれば、当然、河道の蛇行は、複数のモードを持つはずである。次に河道のスペクトル解析の例を示そう。Fig. 6は、歴舟川について、ペンケタイキ川合流点付近から下流約4.5 kmまでの区間を解析した例である。蛇行波長にして、2.35 kmと1.34 kmにパワースペクトルのピークが顕著であるが、2.35 kmの波長は、端点のとり方によって影響をうけたもので、ここでの卓越波長は1.34 kmとして良い。この波長は、視覚的に決めた波長より、約0.2 km短く、最も短く見積った場合の波長に一致する。蛇行が屈曲部と直線部の交互の繰り返しによってできている場合、視覚的には、波長を長く見積ってしまうためと思われる。このようにして求めた卓越波長は、前述の視点からみて、谷蛇行の波長であろうか。あるいは、現河道の蛇行波長と考えるべきであろうか。この付近には、尾田面、石坂面の基盤の第三紀層が露出して急崖を作っている所もあり、一見して、攻撃斜面を現河道が削りながら、蛇行を発達させているように見える。ところが、滑走斜面には、沖積世初頭の形成とされる安定な段丘（大樹面）を残しており、この付近の河道は、沖積世初頭からほとんどその形状を変えていないことになる。河谷の地形配置からいえば、この付近の蛇行は谷蛇行であり、現河道は、これに若干の修正を加えているにすぎないと考えられる。図には表現されていないが、0.72 km付近にも明瞭なピークが認められる。その地形的意味は読みとれないが、現河道の活動に関連したピークかも知れない。Fig. 7は、中の川について、本流との合流点から約4.5 km上流までの解析例である。谷蛇行の波長に対応する1.21 kmの波長に鋭いパワースペクトルのピークがみられる。又、0.47 kmの波長の卓越も認められる。谷蛇行の波長は、この例でも、視覚的に求めた波長より小さい。Fig. 8に、(A) ペンケタイキ川の合流点から、上流約600 mの区間について、(B) パンケタイキ川合流点から上流約650 mの区間について解析した結果を示してあ

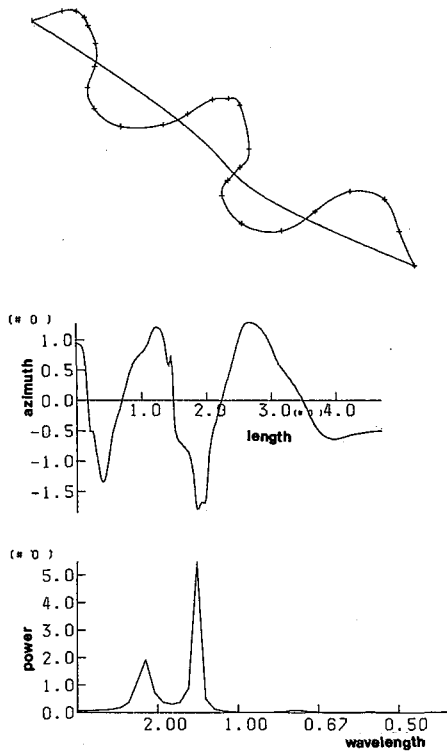


Fig. 6. Example of analysis for a reach of Rekiyune River.

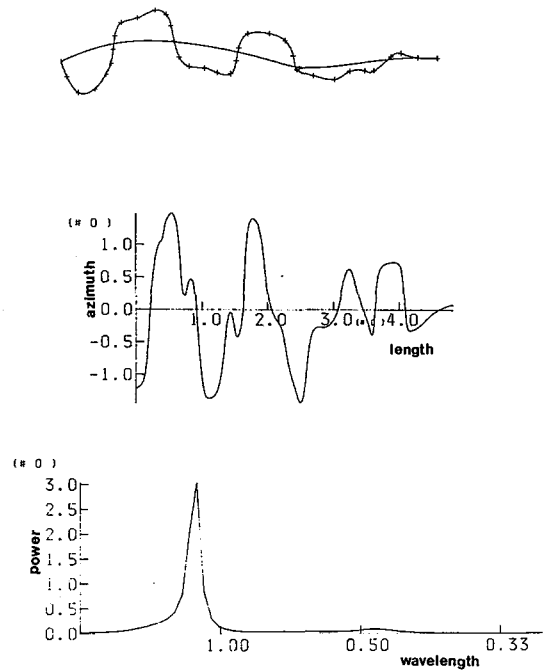


Fig. 7. Example of analysis for a reach of Nakano River.

る。パワーを対数軸にとってあり、蛇行の複数のモードが強調されている。長波長成分については、前述のように、区間のとり方に影響される場合もあり、又、地質構造等に支配された大きな河道の曲がりにより左右されるので、評価に当って注意を要する。又、短波長成分が、それぞれ独自に地形的意義を持ち得るかどうかが検討の要がある。例えば、(A)では、42 m, 51 m, 66 m にピークがあるが、これ等の値は接近しており、同一グループのものとして扱うべきかも知れない。こうした評価の基準は本報では明確に出来なかった。Fig. 9は、ペンケタイキ川とパンケタイキ川の上流から下流に、解析区間をずらして、パワースペクトルを求め、卓越波長のモードの変化を示したものである(図では、波長の代わりに、その逆数の波数をとってある)。前述した点について留意し、モードを評価すると、上流から下流にかけて、3~4群のモード群をグループ化して追跡出来る。各モード群の地形的意味の詳細は読みとれていないが、第一グループは谷蛇行に対応し、第二又は第三のグループが現河道蛇行に対応する。Fig. 10は、中の川とヌピナイ川について、同様の整理を行なったものである。河川の規模が大きいため、パワーのピークが低

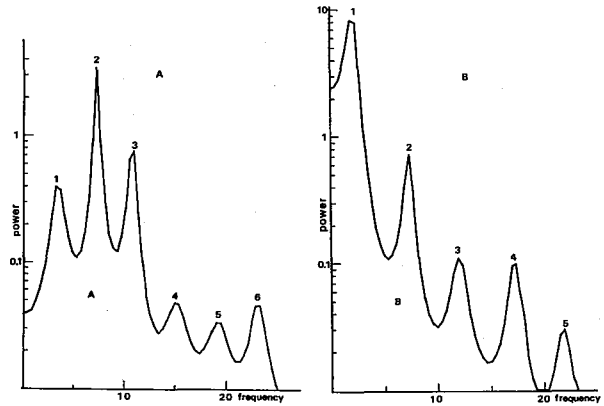


Fig. 8. Power spectrum in log scale for the azimuths.
 A : Penke Taiki River.
 1 : 310 m 2 : 140 m 3 : 91 m 4 : 66 m 5 : 51 m
 6 : 42 m
 B : Panke Taiki River
 1 : 520 m 2 : 140 m 3 : 84 m 4 : 58 m 5 : 46 m

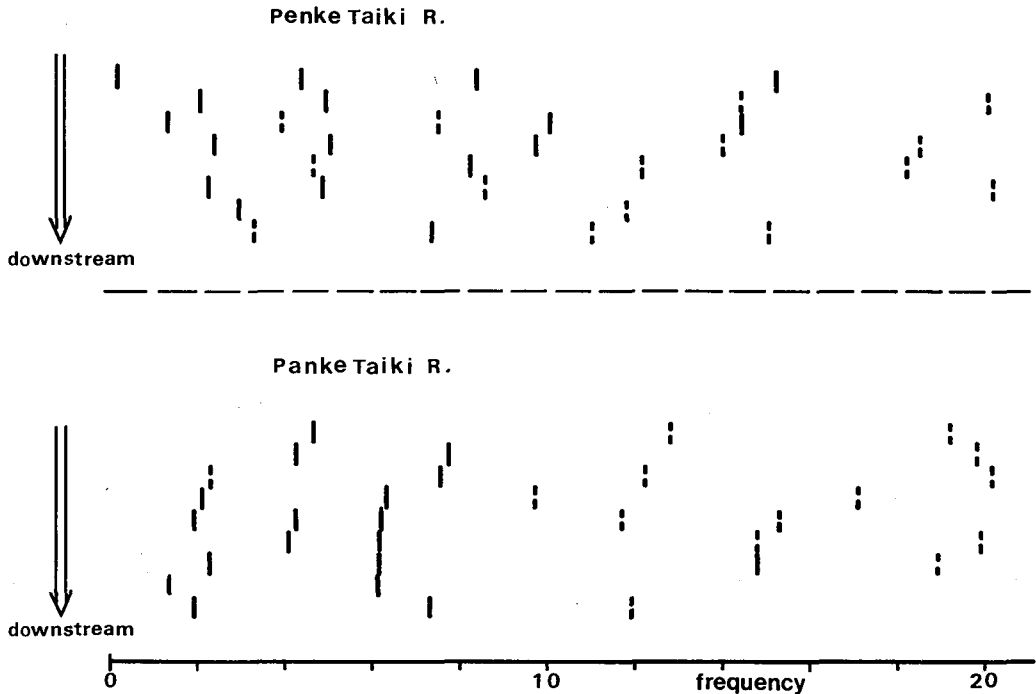


Fig. 9. Multiple modes of river meander.
 | : Dominant peak of power.
 | : Secondary peak of power.

波数部に偏っているが、同様のグループ化が可能である。今後、他の蛇行河川についても本報に述べた方法を適用し、スペクトル解析で得られる蛇行の複数モードの河川地形に於ける意味をより明らかにしていきたい。

V. ま と め

河道の蛇行波形を B-spline 曲線で表現し、これを微分して、接線方位角の変化を求めた。又、河道を表わす曲線の変曲点を探索して、B-spline 曲線で結び、蛇行帯中心線を定義した。さらに、蛇行帯中心線の変曲点を B-spline 曲線で結び、谷方向線を定義した。河道の接線方位角の変化を谷方向線、あるいは、蛇行帯中心線に対して等間隔にサンプリングし、MEM によってパワースペクトルを求めた。MEM の利用によって、短い河道区間毎のスペクトル解析が可能となり、全流路区間に蛇行の複数モードが存在することが示された。この複数モードの河川地形に於ける具体的な意味を充分明らかにすることは出来ていない。しかし、第一モードは、谷蛇行に対応し、第二又は第三モードが現河道の蛇行に対応しており、谷蛇行に現河道の蛇行が重なっているという観察に量的な根拠を与えることが出来た。

謝辞 気候変動と河川地形との関係を量的に扱える可能性の示唆を与えられたのは、北海道大学理学部地球物理学教室、藤木忠美教授であった。筆者の河川地形への興味は先生によって刺激され導かれて来た。永年に恒る御指導に心からの謝意を表したい。

文 献

- LEOPOLD, L. B. and M. G. WOLMAN, 1957. River channel patterns-braided, meandering and straight. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 282-B, 1-85.
- 堀田報誠, 1980. 沖積河道の蛇行と挙動. 八戸工業高等専門学校紀要, 15号, 1-55.
- SPEIGHT, J. G., 1965. Meander spectra of the Angabunga river. *Journal of Hydrology*, 3, 1-15.
- BRICE, J., 1973. Meandering pattern of the White river in Indiana. 178-200, *In an Analysis of Fluvial Geomorphology* (ed. M. MORISAWA).
- FERGUSON, R. I., 1975. Meander irregularity and wavelength estimation. *Journal of Hydrology*, 26,
- HEULSTRM, H., 1949. Climatic changes and river patterns. *Geografiska Annaler*, 31, 83-89.
- DURY, G. H., 1964. Principles of underfit streams, *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 452-A.
- WILLIAMS, G. P., 1984. Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments, II-River meander. *Geografiska Annaler*, 66A, 89-102.
- 田上龍一, 1981. 河川蛇行流路の曲線形状の研究—スプラインの利用とスペクトル解析—. 旭川工業高等専門学校報文, 18号, 77-91.
- 山口富士夫, 1977. コンピュータディスプレイによる自由曲面の一設計方式—B-spline 曲線に基づくカーブフィッティング—. 精密機械, 43, 168-172.
- 木下良作, 1961. 石狩川河道変遷調査. 科学技術庁資源局資料, 36号.

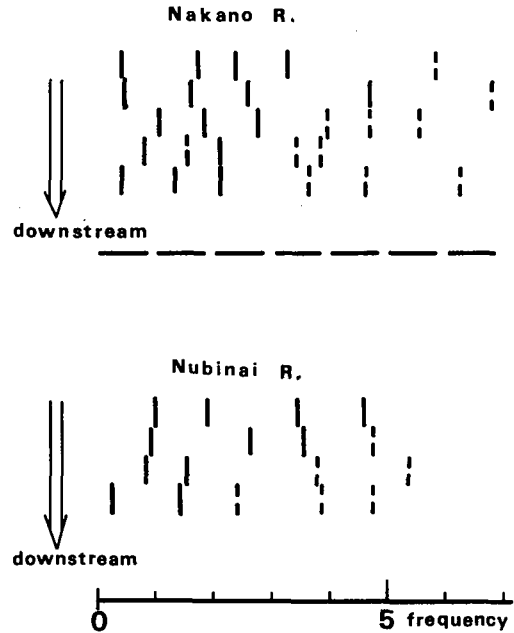


Fig. 10. Multiple modes of river meander.

- ┃ : Dominant peak of power.
┃ : Secondary peak of power.

日野幹雄, 1977. スペクトル解析. 朝倉書店.

RADOSKI, H. R., P. F. FOUGERE and E. J. ZAWALIK, 1975. A comparison of power spectral estimates and application of the maximum entropy method. *Journal of Geophysical Research*, **80**, 619-625.

LANGBEIN, W. B. and L. B. LEOPOLD, 1966. River meander and the theory of minimum variance. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, **422-H**.

松井愈他, 1973. 5万分の1図幅 大樹地域の地質. 地質調査所.

松下勝秀他, 1979. 5万分の1図幅 上札内. 北海道地下資源調査所.

春日井明他, 1975. 5万分の1図幅 上豊似. 北海道地下資源調査所.

平川一臣・小野有五, 1974. 十勝平野の地形発達史. 地理学評論, **47**, 607-632.

藤木忠美, 1974. 北海道主部における最終永期の河川地形変動. 第4紀研究, **12**, 211-221.