

時系列解析を用いた出水時における河川 橋梁の振動と水位の相関性に関する研究

A STUDY ABOUT CORRELATION BETWEEN CHARACTERISTICS OF
OSCILLATION OF BRIDGE AND WATER DEPTH DURING THE FLOOD
EXAMINED BY TIME SERIES ANALYSIS

松本健作¹・宋 東烈²・玉置晴朗³・青木隆行⁴・藤田智之⁵・菅 正信⁶
Kensaku MATSUMOTO, Dong-Yeul SONG, Haruo TAMAKI, Takayuki AOKI, Tomoyuki
FUJITA and Masanobu SUGA

¹正会員 博(工) 群馬大学助手 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

²非会員 工博 群馬産業技術センター 研究開発グループ独立研究員 (〒379-2147 群馬県前橋市亀里町
884-1)

³非会員 教学 株式会社数理設計研究所 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢太田リサーチパーク1街区)

⁴非会員 工学 群馬県立群馬産業技術センター 技術開発相談グループグループリーダー (〒379-2147
群馬県前橋市亀里町884-1)

⁵正会員 工修 鹿島建設株式会社 (〒171-0052 東京都豊島区南長崎6-3-9-2811)

⁶非会員 株式会社数理設計研究所 (〒373-0019 群馬県太田市吉沢太田リサーチパーク1街区)

Characteristics of the oscillation of the bridge during the flood were examined by the time series analysis. The measurement results showed that the acceleration on the flow direction was most sensible. ARMA(2,1) model was obtained by the time series analysis. And a physical model of the bridge during the flood was built. Correlation between a parameter of time series model and measured water level showed good agreement. It means that if we could obtain the output data as the measured acceleration, we could speculate the water depth during the flood. These results showed that the time series analysis was useful for examine the characteristics of the bridge during the flood. We need more data and examination for establishment a monitoring system of the river construction during the flood.

Key Words : flood, time series analysis, oscillation of the bridge

1. はじめに

昨今頻発する水災害によって、河川構造物の安全性に関する関心は極めて高い。国土交通省でも河川堤防質的整備技術ガイドライン案¹⁾が策定され、平成16年度よりそれに基づいた補修・強化およびモニタリング等の取り組みが始まっている。河川構造物が一たび被災すると、その周辺市民への影響は甚大なものとなるため、その維持・管理に際しては最大限の取り組みを行っているところである。しかしながら、出水という激烈な現象を相手にしているため想定を超えた出水に対しては河川構造物の破壊という最悪のシナリオも念頭においた検討が必須であり、現在のハザードマップによる浸水想定区域図の公開なども、そのための取り組みの一つである。住民意

識の啓蒙などソフト面での取り組みが盛んな一方で、ハード面での取り組みが前述した補修・強化やモニタリング技術向上への取り組みであろう。しかしながら技術向上を図るうえで不可欠である出水という現象自体の観測が極めて困難であり、木下²⁾による超音波魚群探知機を用いた洪水時の河床波の測定や、佐藤ら³⁾による高解像度超音波流速分布計(HR-ADCP)を用いた洪水時の流速分布の測定例などがあるものの、未だ充分な解明には至っていないのが現状である。この要因としては出水中は危険で人が立ち寄れないこと、混在する巨礫や流木によって計測装置が破壊されてしまうこと、および濁流によって非接触型の測定では水表面に関する情報しか得られないことなどが上げられる。このため種々の検討は出水期間を挟む前後で行われることが多いが、最大のインパクトを受ける出水中のデータが肝要あることは言うま

でもない。維持・管理を考える上でもこれと同じことがいえる。出水前後における強化・補修が重要であることは当然であるが、出水中にリアルタイムで河川構造物のモニタリングを行い、その破壊から災害発生に至るような兆候が発見された際には、いち早くそれを検出し、周辺住民に到達することが重要である。例えば河川堤防に関しては様々な取り組みが開始されており、多くの国土交通省河川事務所でカメラによる監視を行っており、堤防内に敷設した光ケーブルを用いてその挙動のモニタリングを行う試みなども始められている。しかし、夜間においては映像のみによる判断が難しく、実際には職員による見回りや周辺住民からの通報などが依然重要な役割を占めている。しかしながらこれも、真に危険が予想される場合には困難であり、外部から見て破壊が確認される前の段階において危険な兆候を早期検出するには至っていないことなど、現状ではまだ出水中の河川構造物に対してその安全性をリアルタイムで監視するシステムは十分確立されているとは言い難い。

著者らは数年前より河川構造物の出水中のリアルタイム監視システムを構築することを目標に検討を進めてきた。河川構造物である堤防などではその内部構造がはっきりしない場合が多く、ある程度ブラックボックスとして取り扱う必要があることが予想される。また出水に伴って時々刻々変化する堤防の状態を捉え、そこから工学上有意な情報を引き出しうる手法の考案が必要となる。そこで時系列解析⁴⁾を用いた検討を行うことを試みた。時系列解析とはシステムや物理現象の特性を解明するための1つの手法であり、時系列(時刻の変化とともに値が変化するデータの集まり)を統計的に解析する手法である。分散分析や相関分析などの統計解析との最大の相違は、時系列解析には時間の概念がある、という点である。ここが出水に伴って時々刻々変化する河川構造物の状態を捉えリアルタイム診断を行ううえで有効であると考えられるポイントである。時系列解析自体は現在、工学のみならず経済学・生物学など様々な分野で利用されており、水工学分野では日野・長谷部ら^{5),6)}などによる水文分野への適用例がある。本研究の最終目標は、出水中における河川構造物のリアルタイムでの異常兆候監視システムを構築することにある。実際、著者らのグループでは時系列解析を用いた構造物の異常兆候を早期検出することに成功してはいる⁷⁾。しかしながら拘束条件の制御が比較的容易な実験室などにおける取り組みが主であり、本研究で対象としている出水という大規模で複雑な現象に対して適用できる保障はない。よって本論では、その端緒としての基礎的段階として、出水現象の代表的な物理量として水位に着目し、対象とする河川構造物としては比較的取り扱い易いと思われる河川橋梁に着目した。入力信号としては河川橋梁が出水によって受ける加速度信号を用い、時系列解析によってその変動を十分な精度で捉えることが可能であるかを検討することとした。



写真-1 葉鹿橋の概観と計測ポイント

2. 計測方法

計測は渡良瀬川にかかる栃木県足利市の葉鹿橋(利根川合流点より約42km)を対象として行った。写真-1は葉鹿橋を右岸下流側から見たもので、①から④は計測ポイントである。測点①は左岸の袂であり、測点④が橋の中央付近である。測点の構造的差異を減ずるため、測点①を除く他の測点は全て橋脚の真上に設定した。計測する振動信号は速度、加速あるいは変位など、どのような形であっても問題ないが、本研究では写真-2に示す自作の加速度センサーを用いて加速度信号を計測した。サンプリング周波数は1190Hzで、2軸方向の同時計測が可能である。これを写真-3で示すように、測定ポイントの橋梁欄干に万力で固定して計測を行った。3軸方向の計測にあたっては、X-Y方向計測の後、Y-Z方向というように、同一ポイントの計測を、方向を変えて2度行うことで対処した。一度の計測は3秒間としたので、このため以後に示す計測結果のXおよびY方向の計測結果とZ方向の結果には数秒程度のタイムラグがある。同様に①から④の測定ポイントにおける計測結果にも数分程度のタイムラグがあるが、今回は各方向に関してのデータ間で厳密な同時性を必要とする検討は行っておらず、個々の考察を行うにあたって、出水による水位変化という現象の時間スケールに比して無視し得るものと考えた。表-1に計測を行った日時における水位を示し、備考欄にはそのときの気象概況を示した。2003年8月9日では台風10号による出水によって、また2003年11月30日では降雨によって若干の水位変動があった。その他は平常時におけるも

表-1 計測日時における水位

計測日	時刻	水位(m)	備考
2003/7/11	16:08	1.25	曇
2003/8/5	16:29	1.65	小雨/曇
2003/8/9	15:14	3.85	台風10号
2003/11/30	14:29	1.83	雨/曇
2004/1/8	13:00	0.78	強風



写真-2 計測に使用した加速度センサー



写真-3 計測状況

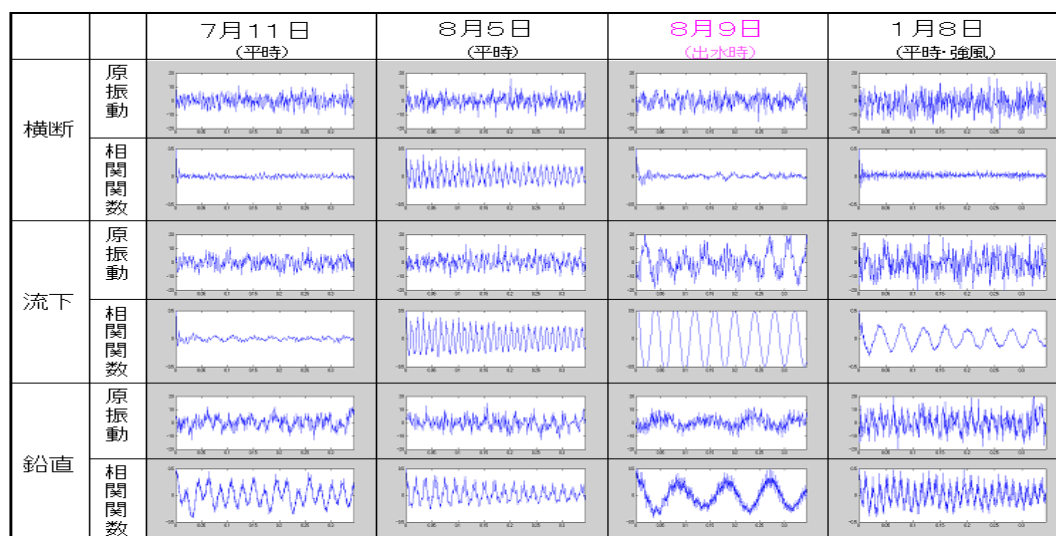


図-1 測点④における横断、流下および鉛直の各方向に関する計測結果

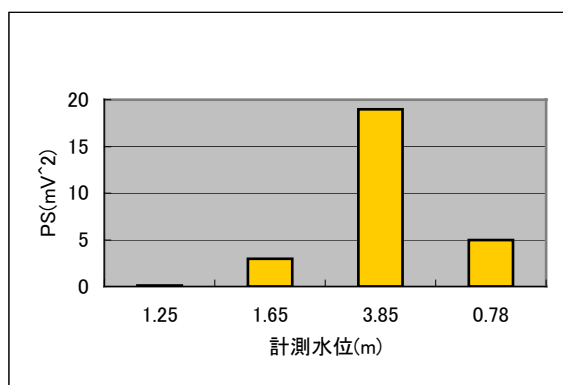


図-2 各計測日の固有振動数のパワースペクトル値

のであるが、2004年1月8日には平均風速10m/s程度の比較的強い風が吹いていた。図-1に計測結果の一例を示す。紙面の都合上2003年11月30日の結果は省略してある。橋梁中央付近の測点④における横断、流下および鉛直の各方向の計測結果であり、それらを計測日毎に横に並べたものである。それぞれ原振動とその自己相

関関数で示してある。原振動を見るだけではその特徴が見取れないが、自己相関関数を見るといくつかの興味深い特徴が見られることが分かる。8月9日の出水時における計測結果に注目すると、流下および鉛直方向に関しては自己相関関数が明瞭な周期性を示すようになる。平常時にはこれらの特徴が見られないため、出水による水位変化が橋梁の振動モードに変化をもたらしている様子を計測できていることが窺える。出水時の横断方向に関する結果を見ると振動モードの変化が見られず、また流下方向と鉛直方向の結果を比較すると、比較的流下方向の方が自己相関関数の周期性が明瞭であるように見える。そこで以下では流下方向の計測結果に注目する。流下方向の各測定日における自己相関関数の周期は、若干の水位上昇が見られた8月5日、出水時のあった8月9日および強風時の計測結果全てにおいて、どれも約0.05(sec)つまり約20Hzであった。この20Hz付近の振動がこの橋梁の固有振動数であろうと推察される。図-2に流下方向の計測結果から得られた固有振動数におけるパワースペクトル値を示す。計測日順に並べたパワースペクトル値であり、縦軸はパ

ワースペクトル(mV^2)であり、横軸上に付した数値がその際の水位(m)である。パワースペクトルの値は最も自己相関関数の周期性が明瞭になる出水時において最大となっている。1月8日強風時の結果をみると、その特徴から出水による特徴と類似しており、結果だけからその振動の原因が出水によるものなのか風によるものなのか判別できていない。よって強風の影響による振動については今後の課題とし、以後の考察では強風時の結果は用いず、出水によるものに限定して考察を行うこととする。

3. 時系列モデルの構築

(1) 時系列解析の概要

以下に解析手順の概要を述べる。まず、得られた出力信号を表現する時系列モデルの伝達関数の導出を行う。これはモデルの最適な次数を求め、そのモデルパラメータを同定する作業となる。これに関しては標準的な手法をそのまま踏襲する。この時点ではまだ出力信号を表現しただけの段階であるので、この時系列モデルパラメータと物理的に意味を持つパラメータとの相関性を検討する必要がある。そこで時系列モデルの導出と平行して、河川橋梁の振動を表現する物理モデルの導出も行う。これに関しては前例が無いためモデル導出の過程を詳細に示す。そして時系列モデルと物理モデルの各パラメータ間の相関性を導く。これによって、以後出力信号の計測結果から「出力」→「時系列モデルパラメータ」→「物理モデルパラメータ」→「種々物理量の特性」という手順で対象とする物理量の特性の考察が可能となる。

(2) 時系列モデルの構築

出力信号をARMA(AutoRegressive Moving Average : 自己回帰移動平均)モデルによって表現することを試みる。ARMAモデルとは、ある時点における出力が過去の出力の線形結合と、現在および過去の入力に対するインパルス応答の線形結合の和として得られるシステムを表すモデルであり、時系列解析を行う際に一般的に用いられている。ARモデルをp次、MAモデルをq次とすると、その一般式は

$$H(z) = \frac{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2} - \dots - b_q z^{-q}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - a_3 z^{-3} - \dots - a_p z^{-p}} \quad (1)$$

となる。次数pおよびqの決定のためにAIC(赤池情報基準)を算出し図-3に示した。AICはARMAモデルの次数決定の為の指標の1つであり、最小なものが最適となる。図-3の横軸はMAモデルの次数であり、縦軸はAICの値である。図中の3つのラインがARモデルの次数を2~4まで

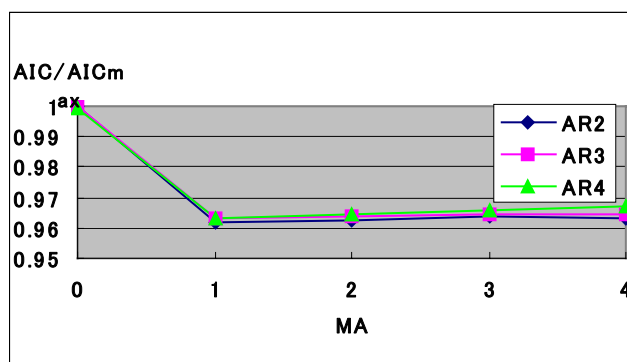


図-3 AICの比較図

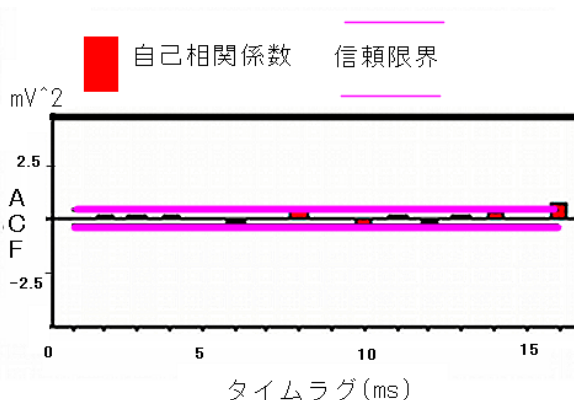


図-4 計測信号とARMA(2, 1)モデルの残差のACF値

変化させたものである。結果としてMAモデルの次数としては1, ARモデルの次数としては僅かではあるが2である場合にAICが最小となることが分かる。ARおよびMAの次数が(2, 1)となる場合、得られる伝達関数は

$$H(z) = \frac{1 - b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} \quad (2)$$

となる。この(2)式で表される伝達関数と実際に計測された信号の残差の自己相関関数(ACF)を示したものが図-4である。このときACF値にピークがなく完全な雑音に近いほどモデルの精度が良いことを意味する。図-4の横軸はタイムラグ値、縦軸はACF値である。図-4を見ると、ほぼ信頼限界内に収まっており、得られたモデルが十分な精度を有していることが分かる。ARパラメータである a_1 , a_2 を同定するにあたっては、ARモデルをYule-Walker方程式に変形し、Levinsonアルゴリズムで逐次解を求め、その値からMAパラメータである b_1 を同定する。これらは一般的な方法で、ここに著者ら独自の手法は取り入れていないので詳細は割愛する。

(3) 物理モデルの構築

時系列パラメータの値が物理的に何を意味するのかを検討する必要があるため、次に物理モデルの構築を

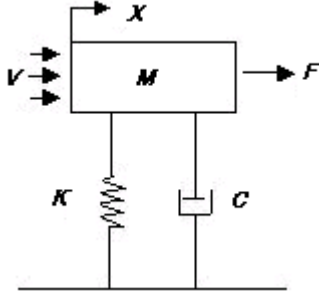


図-5 流体力を受ける橋梁の1自由度系モデル

試みた。図-5は出水による流下方向の流体力を受ける河川橋梁を質量・バネ・ダンパシステムを用いて1自由度系表現でモデル化したものである。このとき、運動方程式は

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + K x = F \quad (3)$$

ここで、 M ：質量、 x ：振動応答、 C ：粘性減衰係数、 K ：バネ定数、 F ：流体力、 V ：流速。また、式(3)は以下のように表せる。

$$\ddot{x} + \alpha_1 \dot{x} + \alpha_2 x = \frac{F}{M} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha_1 = 2\zeta\omega_n$ 、 $\alpha_2 = \omega_n^2$ 、 $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$ ：固有振動数、 $\zeta = \frac{C}{2\sqrt{MK}}$ ：減衰比である。

次に、式(4)の離散モデルを導出する。式(4)の特性根を μ_1 、 μ_2 とする。すなわち

$$s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2 = (s - \mu_1)(s - \mu_2) = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\mu_1 = -2\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ 、

$\mu_2 = -2\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ とするとインパルス応答は

$$g(t) = \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} (e^{\mu_1 t} - e^{\mu_2 t}) \quad (6)$$

であり、また $x(t)$ の相関関数は

$$R(\tau) = \frac{\sigma_F^2}{2\mu_1\mu_2(\mu_1^2 - \mu_2^2)} (\mu_2 e^{\mu_1 \tau} - \mu_1 e^{\mu_2 \tau}) \quad (7)$$

で与えられる。ただし、 σ_F^2 は入力 F の分散であり、 $\mu_1 \neq \mu_2$ とする。サンプリング間隔を T として $\tau = kT$ とおくと、式(7)から

$$R_k = R(kT) = d_1 \lambda_1^k + d_2 \lambda_2^k \quad (8)$$

のように表される。ただし

$$d_1 = \frac{\sigma_F^2}{2\mu_1(\mu_1^2 - \mu_2^2)}, \quad d_2 = \frac{-\sigma_F^2}{2\mu_2(\mu_1^2 - \mu_2^2)},$$

$$\lambda_1 = e^{\mu_1 T}, \quad \lambda_2 = e^{\mu_2 T} \quad (9)$$

である。さて、式(4)の解は

$$x(t) = \int_{-\infty}^t g(t - \tau) F(\tau) d\tau \quad (10)$$

となるので時刻 $t = nT$ で

$$x(nT) = \int_{-\infty}^{(n-1)T} g(nT - \tau) F(\tau) d\tau + \int_{(n-1)T}^{nT} g(nT - \tau) F(\tau) d\tau \quad (11)$$

と書ける。ここに $g(t)$ は式(6)で与えられる。ところで、上式右辺第1項は式(6)を代入して次のように書き換えることができる。

右辺第1項

$$\begin{aligned} &= \int_{-\infty}^{(n-1)T} \frac{(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - \tau)} - (\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{(n-1)T} \frac{\lambda_1(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - T - \tau)} - \lambda_2(\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - T - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \\ &= (\lambda_1 + \lambda_2) \int_{-\infty}^{(n-1)T} \frac{(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - T - \tau)} - (\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - T - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \\ &\quad - \lambda_1 \lambda_2 \int_{-\infty}^{(n-1)T} \frac{(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - 2T - \tau)} - (\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - 2T - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \\ &= (\lambda_1 + \lambda_2) x(nT - T) - \lambda_1 \lambda_2 x(nT - 2T) \\ &\quad - \int_{(n-2)T}^{(n-1)T} \frac{\lambda_2(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - T - \tau)} - \lambda_1(\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - T - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (12)$$

したがって、

$$\begin{aligned} a_1 &= -(\lambda_1 + \lambda_2) = -(e^{\mu_1 T} + e^{\mu_2 T}) \\ a_2 &= \lambda_1 \lambda_2 = e^{(\mu_1 + \mu_2)T} \end{aligned} \quad (13)$$

とおくと式(11)は

$$x(nT) + a_1 x(nT - T) + a_2 x(nT - 2T) = G_n \quad (14)$$

と書ける。ここで

$$\begin{aligned} G_n &= \int_{(n-1)T}^{nT} \frac{(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - \tau)} - (\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \\ &\quad - \int_{(n-2)T}^{(n-1)T} \frac{(\beta_2 - \beta_1 \mu_1) e^{\mu_1(nT - T - \tau)} - (\beta_2 - \beta_1 \mu_2) e^{\mu_2(nT - T - \tau)}}{\mu_1 - \mu_2} F(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (15)$$

したがって、 G_n は1次のMA過程で置き換えることができる。

$$G_n = b_0 F(nT) + b_1 F(nT - T) \quad (16)$$

いま、 $x(kT) = x_k$ 、 $F(kT) = F_k$ のように表すと、式(14)は

$$x_n + a_1 x_{n-1} + a_2 x_{n-2} = b_0 F_n + b_1 F_{n-1} \quad (17)$$

のように表される．これが式(4)の離散モデルである．すなわち，(2,1)次のARMAモデルに帰着する．したがって，式(5)を用いると，離散ARMAモデルの係数 a_1 ， a_2 は橋梁の曲げ振動と関連した力学パラメータ ω_n と ζ の項として以下のように表すことができる．

$$a_1 = -2e^{-\zeta\omega_n T} \cos(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} T)$$

$$a_2 = -2e^{-\zeta\omega_n T} \quad (18)$$

式(18)が得られると，計測信号から a_1 ， a_2 を同定し，そこから ω_n と ζ という物理パラメータの挙動を調べることができることになる． ω_n と ζ から式(3)を通じて種々物理量の検討を行うことができるが，本論ではそこまでは触れず，時系列解析自体が出水現象にどの程度対応できるかを検証する為に，得られた時系列パラメータ値を用いて，実測された水位をどの程度再現できるかの検討を行う．しかしながら，計測結果の考察から得られた最適な時系列モデルと，それとは平行して導出した物理モデルからの展開によって得られた伝達関数がともにARMA(2,1)モデルに帰着した，という事実は，本研究で行った時系列モデルの選定や物理モデルの構築の有意性を裏付ける一つの結果であると考えている．図-6に時系列パラメータと実測水位との相関性を示す．横軸に水位をとり，縦軸にはARパラメータを用いて $|a_1 \cdot a_2| = \chi$ としたパラメータを，平常時である7/11の値パラメータ値 χ_0 で無次元化したものとする．この縦軸の値は，水位変動に最も敏感に反応する時系列パラメータの組み合わせであり，この値自体に物理的意味はない．図-6を見ると水位の変動に連動してパラメータ値が良好に対応しており，その近似曲線を得ることによって，物理的意味が不明である出力信号を計測すれば，水位という物理量を推定することができることになる．

4. おわりに

本研究では出水時の水位変動を時系列モデルおよび物理モデルを構築して推定することを試みた．結果，風と出水の影響を分離するという点，また，物理モデルを用いた考察に至っていない点などに課題が残る結果となった．しかし時系列パラメータと水位の対応関係を示すことはできた．これによって，強風時には対応できていないが，無風状態においては橋梁の加速度

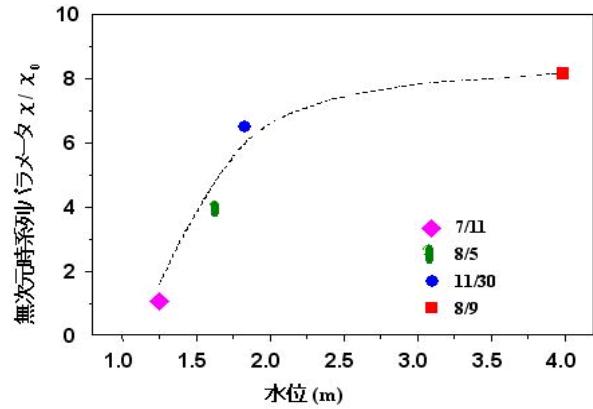


図-6 時系列パラメータと水位の関係

振動の計測結果から水位を推定する事が出来ることを示した．しかしながら更なるデータの蓄積と精度検証は不可欠である．また，今回は時系列解析という手法自体が出水という現象にどの程度適用可能かを検証することが目的であったため，物理量として比較的取り扱いが容易な水位のみに着目したが，現在，時系列パラメータと物理パラメータの関係式から種々物理量を対象として，本研究の最終的な目標である河川構造物の監視システムの構築に向けた考察を行っている．

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課ホームページ(http://www.mli.t.go.jp/kisha/kisha04/05/050609_.html)
- 2) 木下良作：洪水時の砂床形態の変化，第33回水理講演会論文集，pp.439-444, 1989.
- 3) 佐藤慶太，二瓶泰雄，木水 啓，飯田裕介：洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用～江戸川を例にして～，水工学論文集，第48号，pp7631-768, 2004.
- 4) P. J. ブロックウェル，R. A. デービス著：入門時系列解析と予測：シーエーピー出版，2004.
- 5) 日野幹雄，長谷部正彦：流量時系列のみによる流出解析について，土木学会論文報告集，No. 300，pp. 43-56, 1980.
- 6) 日野幹雄，長谷部正彦著：水文流出解析，1985.
- 7) N.Takeda, D-Y Song and Y. Okabe, "Recent Advances in Structural Health Monitoring of Smart Composite Systems in Japan", Materials Science Research International Special Technical Publication No2, pp.72-77, 2001.

(2005. 9. 30受付)