アジョイント法を用いた縦断水面形時間変化の同化解析に対する制御変数の影響

株式会社東京建設コンサルタント　正会員　渡邊　明英
朝日航洋株式会社　正会員　鈴田　裕三
株式会社東京建設コンサルタント　正会員　見上　哲章
株式会社東京建設コンサルタント　正会員　○松延　和彦

１．はじめに

近年，水災害が頻発化・激甚化している．これに対応するためにはハード対策だけでなく，ソフト対策も必要であり，住民に河川水の溢水，越水の危険度や堤防の決壊の切迫度を示し，避難を促す水位情報の提供が有効と考えられる．このため，現存の粗な間隔の観測水位を用いて，密な情報である縦断水面形の時間変化を精度良く推定する技術が求められる．本研究では，アジョイント法を用いて点情報である観測水位情報を基に平面二次元洪水流の同化解析を行うことで，左右岸の縦断水面形時間変化を推定する方法を示し，同化解析に対する制御変数の影響を検討した．

２．対象区間と水面形時間変化の同化解析手法

利根川 133km～153km の約 20km が検討区間である．水位観測が 4 地点, 流量観測が 1 地点実施されている(**図-1**)．同化解析にはこれらのデータを利用するが，水位に関しては下流端条件に 133km の観測値を利用するため 3 地点を用いる．洪水流の水面形時間変化は，上流からの流量波形や河道縦横断形状及び変化，植生等の抵抗等の河道内で生じる水理現象が時空間的に反映されている．このため，河道地形や植生の高さ情報を ALB(航空レーザー測量)により計測し，解析モデルに反映した(**図-1**). また, 対象区間の植生状況を**図-2** に示す.

アジョイント法による縦断水面形時間変化の同化解析の基本的な考え方は以下のとおりである．入力データとしての不確実性の大きい制御変数(上流端流量ハイドログラフ，粗度係数，樹木透過係数)について，式(1)に示す評価関数値が最小となるように，水理解析モデルとその従属変数に対応する随伴方程式を用いて，観測水位と計算水位のミスフィット情報を上流端やパラメータ等に伝え，ラグランジュの未定係数を介して評価関数の勾配を算定し，流量や粗度係数,透過係数を最適化する．この結果，観測縦断水位の時間変化に整合する計算水面形を得る．

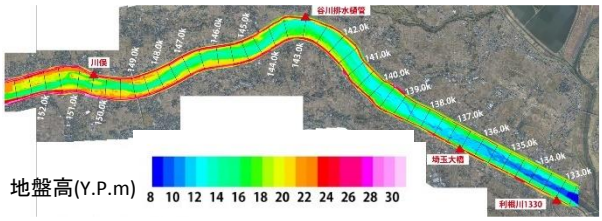

図-1 ALB 計測結果（地盤高）

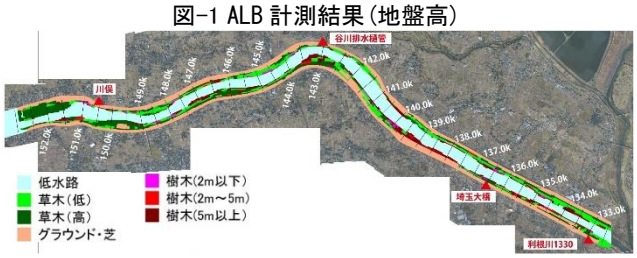

図-2 樹木及び草本の分布

$$
\begin{aligned}
&J(\mathbf{Q}_{bound},\mathbf{n},\mathbf{K})\\
&=J_H+J_Q+J_{n_init}+J_{K_init}\\
&=\int_{Ta}^{T}\int_{A}\sum_{mH}\sum_{k}\delta(x-x_{mH},y-y_{mH},t-t_k)\frac{\{H_c(x,y,t)-H_o(x,y,t)\}^2}{2\sigma_{Ho}^2}dAdt\\
&+\int_{Ta}^{T}\int_{A}\sum_{mQ}\sum_{k}\delta(x-x_{mQ},t-t_k)\frac{\{Q_c(x,t)-Q_o(x,t)\}^2}{2\sigma_{Qo}^2}dAdt\\
&+\sum_{id=1}^{num_an}\frac{\{n(id)-n_{init}(id)\}^2}{2\sigma_{n_init(id)}^2}+\sum_{id=1}^{num_ak}\frac{\{K(id)-K_{init}(id)\}^2}{2\sigma_{K_init(id)}^2}
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

ここに，T_a, T:同化開始時刻,終了時刻，(x_{mH},y_{mH}):水位観測点位置，t_k:観測時刻, x_{mQ}:流量観測線の位置，H_o:観測水位, H_c:計算水位, Q_o:観測流量(HQ 換算流量), Q_c:計算流量, σ_{Ho}:観測水位の誤差標準偏差, σ_{Qo}:観測流量の誤差標準偏差，Q_{bound}:上流端流量ハイドログラフで 10 分間隔に推定する．num_an:最適化する粗度係数区分数，n_{init}:同化解析前に設定する粗度係数値，n:最適化する粗度係数値, σ_{n_init}, σ_{K_init}:粗度係数値及び透過係数値のバラツキ(標準偏差), num_ak:最適化する樹木透過係数の区分数, K_{init}:同化解析前に設定する樹木透過係数, K:最適化する樹木透過係数である．

３．水面形同化に与える流量ハイドログラフと粗度係数，透過係数の影響

平成 23 年 9 月洪水について，２．に示した同化解析法を用いて観測縦断水位の時間変化に合致する計算水面形を推定する．その際，同化解析に対する制御変数の影響を検討するため，制御変数を上流端流量ハイド

キーワード　縦断水面形の時間変化，水位情報，データ同化，アジョイント法，流量ハイドログラフ
連絡先　〒170-0004　東京都豊島区北大塚 1-15-6　(株)東京建設コンサルタント　環境防災事業本部　Tel:03-5980-2637

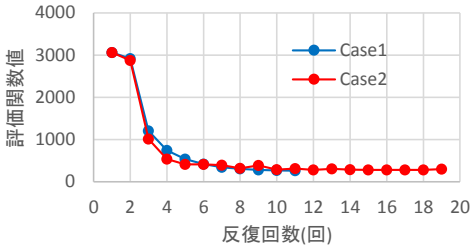

図-3 反復による評価関数の収束

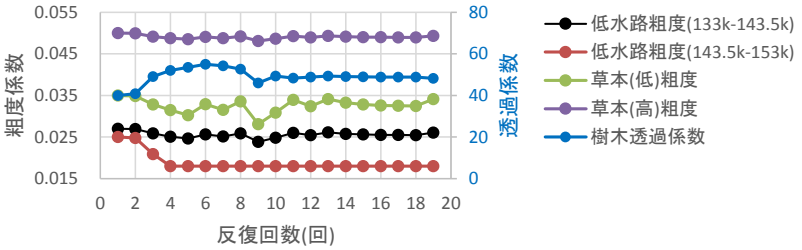

図-4 収束に伴う抵抗係数の変化(Case2)

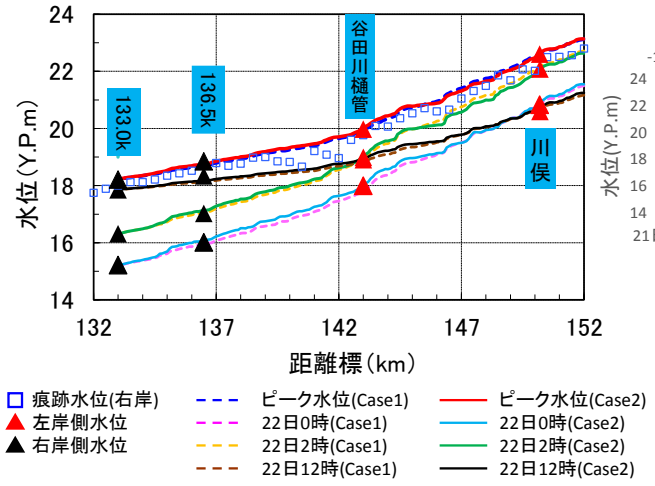

図-5 縦断水面形の比較(右岸)

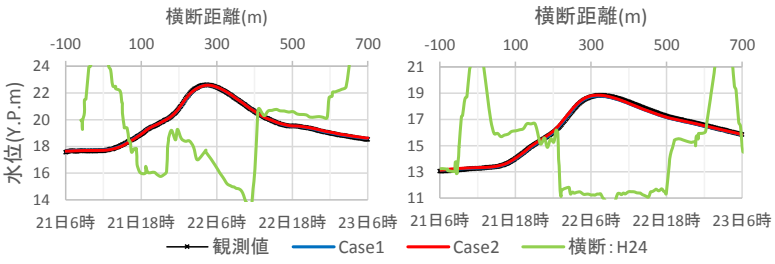

図-6 水位ハイドログラフの比較(左:川俣, 右:136.5km)

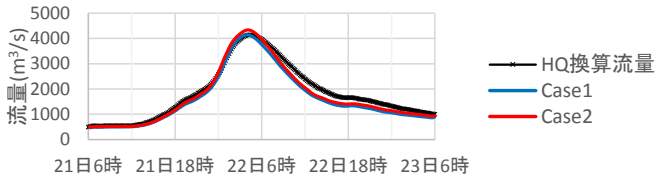

図-7 流量ハイドログラフの比較(川俣観測所)

ログラフとした場合(Case1)と，それに加え粗度係数及び樹木透過係数とした場合(Case2)について解析し，同化後の縦断水位や川俣流量ハイドログラフを比較した．

なお，紙面の都合上記載しないが同化前の初期設定値は，上流端流量は川俣地点の水位流量関係式から算出したものを与え，粗度係数や透過係数は既往文献値等を基に設定した．

図-3 にアジョイント法による評価関数の収束状況を示す．Case1 及び Case2 ともに概ね 10 回程度繰り返せば変化は小さいことがわかる．**図-4** は Case2 の同化収束計算時の抵抗係数の変化を示している．特徴的なものとして，粗度係数は低水路上流区間が変化しており，樹木透過係数は 40m/s から 50m/s 程度に変化している．事前設定値の与え方にもよるが，これらは洪水抵抗を受ける時間や面積割合が大きいものであり，対象区間の縦断水面形の時間変化に影響を与える主な抵抗要素と考えられる．

図-5 に制御変数ケース毎について右岸側の縦断水面形時間変化の再現結果を示す．同化解析結果は Case1 と Case2 ともに増水期，ピーク時，減衰期の観測縦断水位を再現している．これは**図-6** に示す同化後の水位観測所のハイドログラフ結果からも観測値と合致しており両者に大きな違いはない．この結果から，観測縦断水面形の時間変化を解とする同化解析では，解析水面形の再現性に及ぼす制御変数の選定に対する影響は小さいことが分かる．一方，**図-7** に示す同化後の川俣地点の流量ハイドログラフに着目すると，Case1 と Case2 の流量波形はほぼ同じであるが，ピーク等の大きさに違いが見られる．この結果と上述の考察から，複数の粗度係数や透過係数を流量と同時に同定した場合，観測水位を満足する組み合わせが複数存在するが，これについても今後の検討課題である．

4．おわりに

アジョイント法に基づく 10 回程度の反復計算により，観測縦断水面形の時間変化を自動的に再現した．複数の粗度係数や透過係数を流量と同時に同定した場合，それらの組み合わせは複数存在するが，縦断水面形時間変化への影響は小さく再現される．

謝辞：本研究は平成 28 年度河川砂防技術研究開発公募河川分野の補助を受けて行われた．本研究で用いた ALB 計測以外のデータは，国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所より提供していただいた．ここに記して深く感謝の意を表す．

参考文献

1) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，第12巻, pp.1-6,2006

2) 吉田圭介・石川忠晴：Adjoint法による流量ハイドログラフ推定法に関する研究，土木学会論文集 B1(水工学)Vol.68,No.4 I_1264-I_1266,2012