

平成 24 年 3 月 21 日

平成 23 年 9 月 2 日からの停滞前線による大雨災害
十勝川水系音更川の堤防の一部流出に関わる調査報告

北海道開発局 帯広開発建設部 治水課

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ

目 次

| | |
|----------------|----|
| 本資料について | 1 |
| 1. 河川概要 | 2 |
| 2. 出水時の流況 | 5 |
| 3. 堤防流出時の状況 | 7 |
| 4. 現地調査結果 | 16 |
| 5. 出水時の河道形状の変化 | 29 |
| 6. まとめ | 65 |

本資料について

平成 23 年 9 月 2 日から 7 日にかけて、台風や停滞前線の影響により降雨が続き、十勝管内をはじめ道内各地に記録的な大雨を降らせた。十勝川管内では、9 月 5 日正午から 7 日未明にかけて非常に強い降雨があり、降り始めからの総雨量は音更川上流のナイトイ雨量観測所では、平均年間降水量の約 40%にも相当する 383mm の雨量となった。そして、音更川下流の音更川水位流量観測所では、既往第 3 位（流量観測記録が残る昭和 42 年以降）となる流量が観測され、音更川の随所で河岸侵食や流路変動が発生し、KP18.2 左岸付近では堤防の一部が流出する事態となった。

その事態に対し、現地では応急復旧として流出箇所周辺に根固めブロックを投入して堤防流出の進行を防いだほか、仮堤防を建設してその後の洪水への備えを図ったところであるが、今回の出水では他の地点でも堤防のすぐ近くまでせまる河岸侵食が発生しており、音更川の堤防の防護対策は喫緊の課題である。

そのため、今回の出水における堤防の一部流出の現象を明らかにすることを目的に実施した現地調査およびその考察を本報告書にまとめ、今後の河川管理に資するものである。

1. 河川概要

音更川は流域面積 740km²、幹川流路延長 94km（内、直轄管理区間延長 30km）の十勝川の一次支川である。上流は石狩山地の山間渓谷の間を流れ、山地から土幌台地へ抜ける箇所には発電用の糠平ダム（流域面積 388 km²、昭和 31 年竣工）、元小屋ダム（流域面積^{*}21 km²、昭和 33 年竣工）が建設されている。その下流は畑作地帯の中を流れる有堤区間となっている。H23 年 9 月の出水で堤防の一部が流出した箇所は、有堤区間のほぼ中央にあたる KP18.2 の左岸地点である（図 1-1）。（※ 糠平ダムと重複する流域を除いた面積）

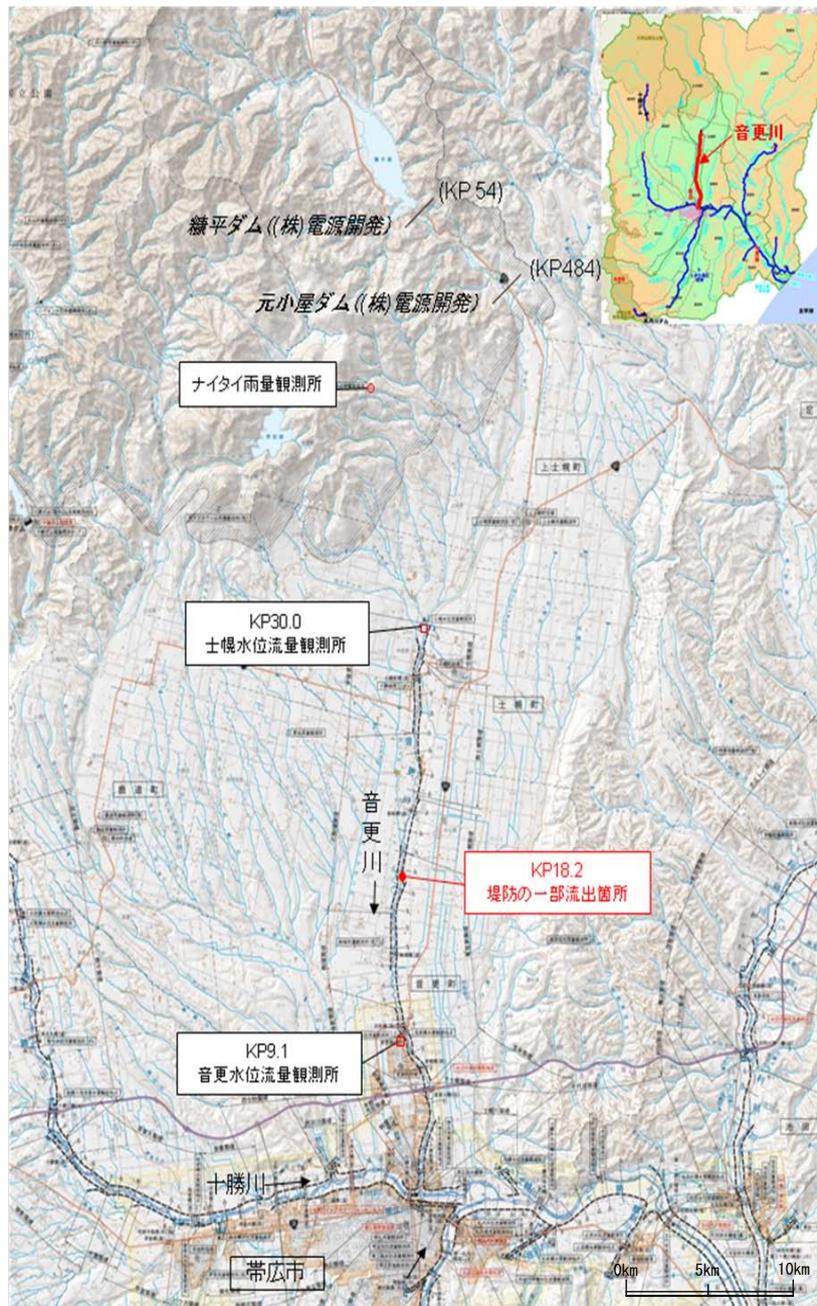


図 1-1 流域図

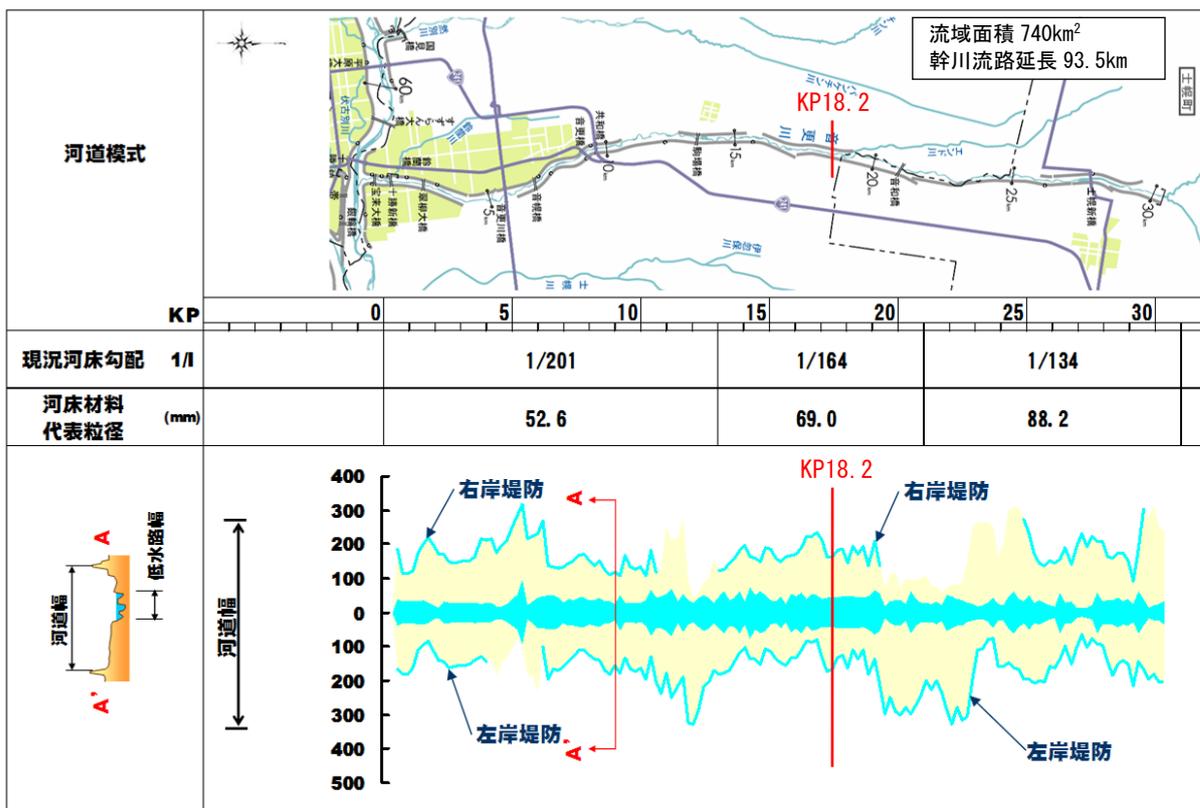


図 1-2 河道模式図



図 1-3 音更川治水地形分類図（抜粋）

(1) 河道のセグメント

図 1-2, 1-3 に示すとおり、堤防の一部流出地点 KP18.2 の平均的な河床勾配は約 1/164 と急な勾配であり、河床材料の代表粒径は 69.0mm である。また、平均的な河道幅（堤間）は約 300～350m、低水路幅は約 100～200m と比較的広く、セグメント 1 に分類される幅広河道の急流河川である。音更川の氾濫平野は、図 1-3 の治水地形分類図に示すように両岸の台地に挟まれるように細長く伸びており、ところどころで河岸段丘が河道にまで迫っている。氾濫平野には優良な農地が広がっており、度重なる氾濫被害を防ぐために連続堤防が設置されているほか、最下流部の音更町市街地では両岸に低水路護岸も整備されている。

(2) 調査地周辺（堤防流出箇所 KP18.2）の地形と地質

音更川の中下流域は、主に音更川と土幌川の削剥・堆積作用により形成された台地からなっており、段丘堆積物が丘状に分布する（図1-4）。

調査地周辺は下位の第5段丘に挟まれた地形を示しており、礫を主体とした現河床堆積物が5m~6mの層厚で分布している。

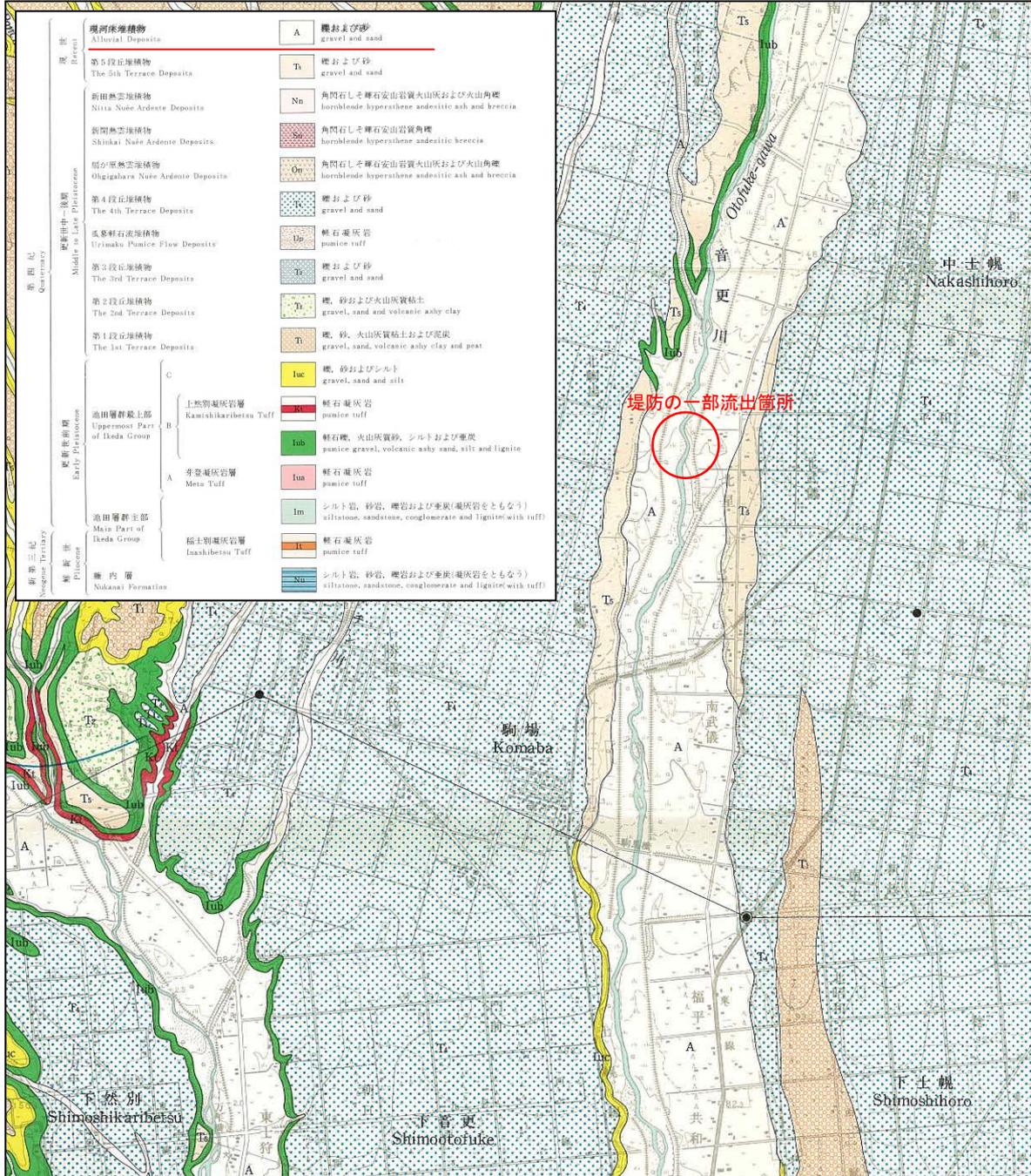


図 1-4 調査地周辺の地質図 (1 : 200,000)

出典 : 5 万分の 1 地質図幅「中土幌(釧路-第 30 号)」(1986、北海道立地下資源調査所)

2. 出水時の流況

(1) 降雨の状況

平成23年9月2日から7日にかけて台風や停滞前線の影響により降雨が続き、十勝管内をはじめ道内各地に記録的な大雨を降らせた(図2-1)。

これは、カムチャッカ半島南東の海上にあった太平洋高気圧が、日本の南方海上から北上した台風12号や熱帯低気圧周辺の暖湿気を北方へ輸送し、この暖湿気が北日本へ流入して大気的不安定を増大させ前線の活動を活発化させた結果、今回の大雨が発生したものである。

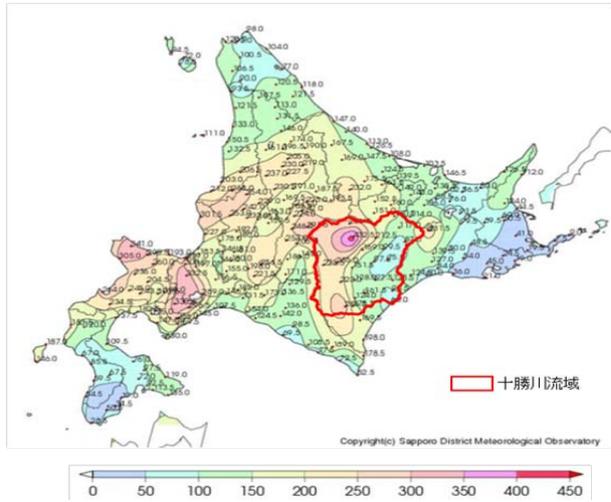


図2-1 H23/9/1日～7日までの総降水量(アメダス)

今回の大雨は、台風12号の動きが遅く前線も道北に停滞したために長期間にわたって暖湿気の流入が継続した結果、十勝地方において強い降雨が長時間続いて総雨量が大きくなった。(以上は「H23年9月1日から7日の台風12号と前線による降雨について」日本気象協会北海道支社より。)

音更川においても強い雨が長時間にわたって降り続き、中流部にあるナイタイ雨量観測所では、図2-2に示すように9月2日から9月7日にかけての総雨量は383mm、最大時間雨量は27mmに達した。

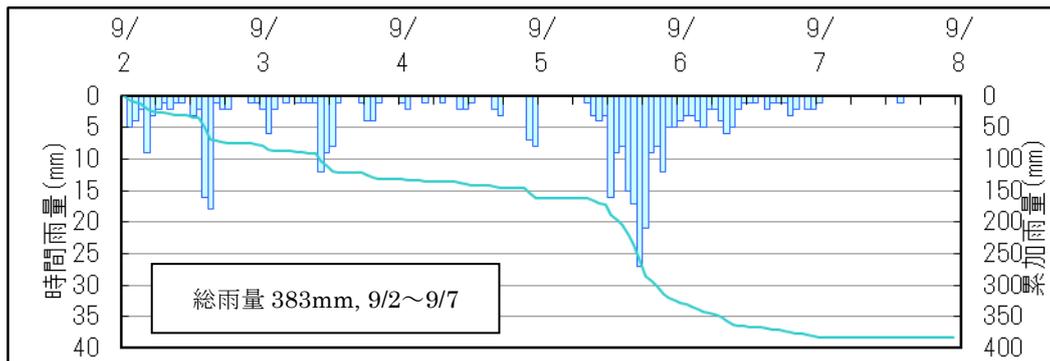


図2-2 ナイタイ雨量観測所の時間雨量・累加雨量

(2) 流況

今回の出水における音更水位流量観測所の洪水ピーク水位は、氾濫注意水位を 0.12m 上回る WL=73.22m であった (図 2-3)。また、ピーク流量は 548m³/s (暫定値) であり、流量記録が残る昭和 42 年以降の出水の中で、平成 15 年、昭和 56 年に次ぐ第 3 位規模となる大きな出水であった (図 2-4、図 2-5)。

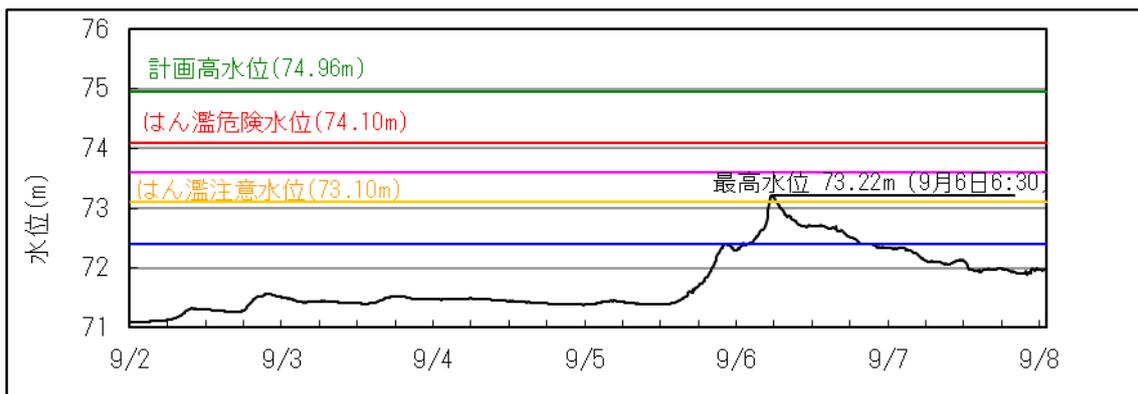


図 2-3 音更水位流量観測所における水位変化

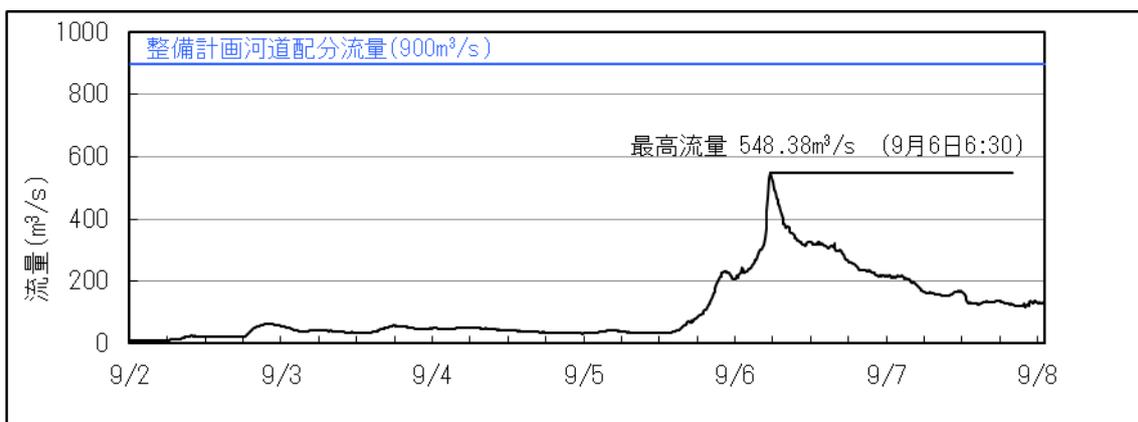


図 2-4 音更水位流量観測所における流量変化 (H23 年流量は暫定値)

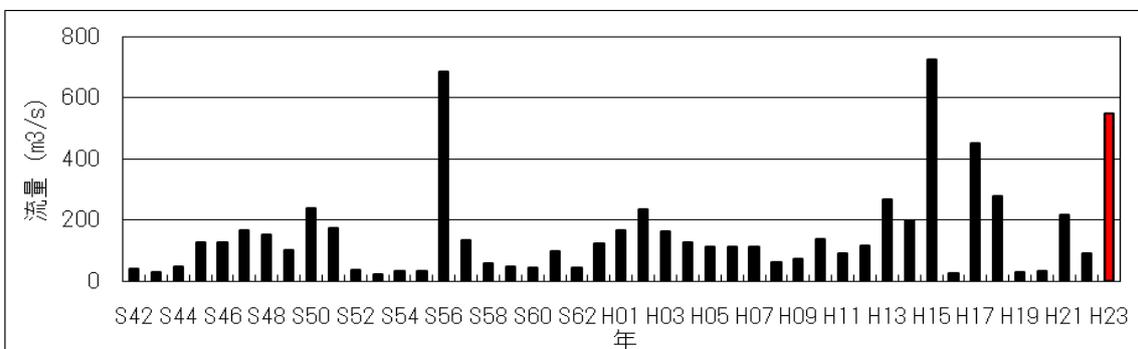


図 2-5 音更水位流量観測所における年最大流量 (S42~H23 H23 流量は暫定値)

3. 堤防の一部流出時の状況

(1) 堤防の一部流出の発見

平成23年9月7日7時39分、当部職員が音更川 KP18.2 左岸において流水の侵食を受けて堤防の一部が流出していることを発見した。前日の夕方に実施した河川巡視では異常が確認されていないことから、9月6日夜から9月7日未明の間に堤防の流出が始まったものと考えられる。

(2) 出水中の状況写真

写真3-1は、9月7日朝に撮影されたもので、水衝部となった堤防の一部が流出している様子が見てとれる。この箇所には低水護岸および高水護岸はもともと設置されておらず、洪水によって高水敷が侵食され、その侵食が堤防に達したことで堤防の一部流出が生じている。最も侵食を受けた箇所では、堤防天端上のアスファルト舗装が流出し、その侵食面は裏法の法肩にまで達している。この時点では、雨雲が去って降雨は止んでいるものの写真の状況のとおり依然として水位が高く、堤防流出は拡大し続けていた。

なお、出水後の痕跡調査結果によると、この地点のピーク水位は123.01mと堤内の周辺地盤高よりも高く、もしも堤防が完全に流出していたなら、破堤に伴う外水氾濫によって甚大な被害が生じていたと思われる。



写真3-1 堤防の一部流出箇所（下流側から撮影。H23.9.7 AM9:38 撮影）

また、写真 3-2 のように、水衝部およびその河岸侵食面は既に堤防まで達し、堤体の一部が流出している。出水中に行った測定結果から、写真が撮影された 7 日午前中では毎時 5m ほど堤防の流出延長が増大していることが明らかになっている。また、堤体の侵食面は写真 3-3 のように急角度で切り立っており、水面下の堤体基盤部の土砂が洗掘され、その結果、不安定化した堤体の土砂が土塊状に崩落することを繰り返しながら、堤体流出が生じていた。なお、写真 3-3 に見えるパイプは光ファイバーケーブルの鞘管である。



写真 3-2 堤防の一部流出箇所（下流側から撮影。H23.9.7 AM9:24 撮影）



写真 3-3 流出部の侵食面（上流側から撮影。H23.9.7 AM10:14 撮影）

今回の出水では、堤防の一部流出箇所を含めた前後の区間で新たな蛇行が発生している。上空から撮影した写真 3-4 からは、KP18.2 左岸地点が蛇行流路の外湾部が堤防まで達し、堤防の一部が流出している様子がわかる。写真 3-5 のように、蛇行流の外湾部となる KP18.2 右岸地点では、堤防前面の河岸や堤体が蛇行流によって大きく侵食されている。



写真 3-4 堤防の一部流出箇所全景（上流側から撮影。H23.9.7 PM1:49 撮影）



写真 3-5 堤防の一部流出箇所（上流側から撮影。H23.9.7 AM10:38 撮影）

写真 3-6 は、堤防の一部流出を発見した翌日の 9 月 8 日午前に撮影したものである。撮影時の当該箇所での河川水位は約 122.2m であり、洪水痕跡により想定されるピーク水位から約 0.8m 水位が低下した状態である。この時点では、堤防の流出は既に止まっているが、出水で生じた大きな蛇行流路、侵食痕が見てとれる。



写真 3-6 堤防の一部流出箇所全景（上流側から撮影。H23.9.8 AM10:29 撮影）

堤防の一部流出箇所の上流側の状況を写真3-7、3-8に示す。低水護岸が両岸に整備されている最下流部の市街地区間を除き、写真のとおり音更川の有堤区間全体で流路が大きく蛇行している。市街地区間を除くと、音更川では低水護岸の設置延長がそれほど多くなく、随所で河岸侵食が生じている。



写真3-7 上流側の状況（KP24～29。下流側から撮影。H23.9.7 PM1:53 撮影）



写真3-8 下流側の状況（KP10～15。下流側から撮影。H23.9.7 PM1:42 撮影）



出水中に撮影した航空写真を写真3-9に示す。この写真は洪水ピーク（9月6日AM6時）の翌日となる9月7日AM12時頃に撮影されたものであり、洪水ピーク水位より約0.5m水位が低下した状況のものである。なお、図中にて赤丸で囲んだ箇所が堤防の一部流出箇所である。

写真を見てみると、上流端の橋梁（音和橋）から下流の①の箇所まで流路の変動はそれほど大きくなく、その下流左岸側の高水敷②では広範囲で冠水していることがわかる。この高水敷上の水深は写真撮影時には既に浅くなっているが、出水ピーク時には0.5～1.0m程度の水深となっていた。また、③の箇所は出水前には高水敷であった場所だが、写真撮影時点では高水敷上を主流路が短絡し、新たな流路が形成されている。逆に、出水前には④の箇所が主流路となっていたが、この時点では、既にその流路が埋まっていたり流水が流れていない状況となっている。

⑤は左岸側に低水路護岸が連続的に設置されている箇所であるが、この場所の流路変動は大きくない。その下流からは⑥から⑪にかけて、流路が大きく蛇行して流れており、特に⑦の箇所では蛇行が堤防にまで達し、堤防の一部流出が発生している。

写真3-9 出水時の状況（KP17～21、赤丸部分が堤防の一部流出箇所、H23.9.7AM12頃撮影、航空写真の歪み補正は行っていない）



写真 3-10 出水前の状況 (KP19.2~19.6、H22 年 8 月撮影)



写真 3-11 出水中の状況 (KP19.2~19.6、H22 年 9 月 7 日 AM12 時頃撮影)

流路短絡が生じていた写真 3-9 の④付近は、出水前は写真 3-10 の①の箇所のように流路が右岸側に大きく蛇行するなど水位が上がりやすい河道形状となっていた。実際に、出水後に調査した痕跡水位を見ても①の箇所はその前後に比べて水位が高くなっており、②では 1m 程度の水深になっていた。③の高水敷に乗り上げた流水は下流側の主流路に再合流する際に大きな水面勾配を持つため、高水敷では大きな洗掘が生じる。そのような高水敷の洗掘が上流側へ伝播してくことで徐々に流路が形成され、最終的に写真 3-11 の②の箇所の主流路が短絡し、①が閉塞に至ったものと考えられる。

これは、主流路の短絡が起こったことによって、蛇曲しているため掃流力が小さくなっていた従来の流路に土砂が堆積し、その結果、流路が閉塞したものと考えられる。

(3) 堤防の一部流出箇所への緊急復旧について

堤防の一部流出箇所の緊急復旧として、水衝部である侵食箇所へ根固めブロック (2t 級) を投入し堤脚部の侵食の進行を防止したほか、侵食により流出した堤防と同程度の機能を有する仮締切堤を堤内側に設置し、今後の出水時における外水氾濫被害の防止を図った。

図 3-1 に示すとおり、水衝部となった堤脚部に設置した根固めブロックの設置延長は約 230m、仮締切堤の設置延長は約 260m である。また、仮締切堤は図 3-2 のとおり、天端幅 6.0m、表法および裏法を 1:2 の勾配で築造し、表法面はブルーシートで覆ったうえで HWL 以下の法面に侵食防止のために根固めブロック (2t 級) を設置した。

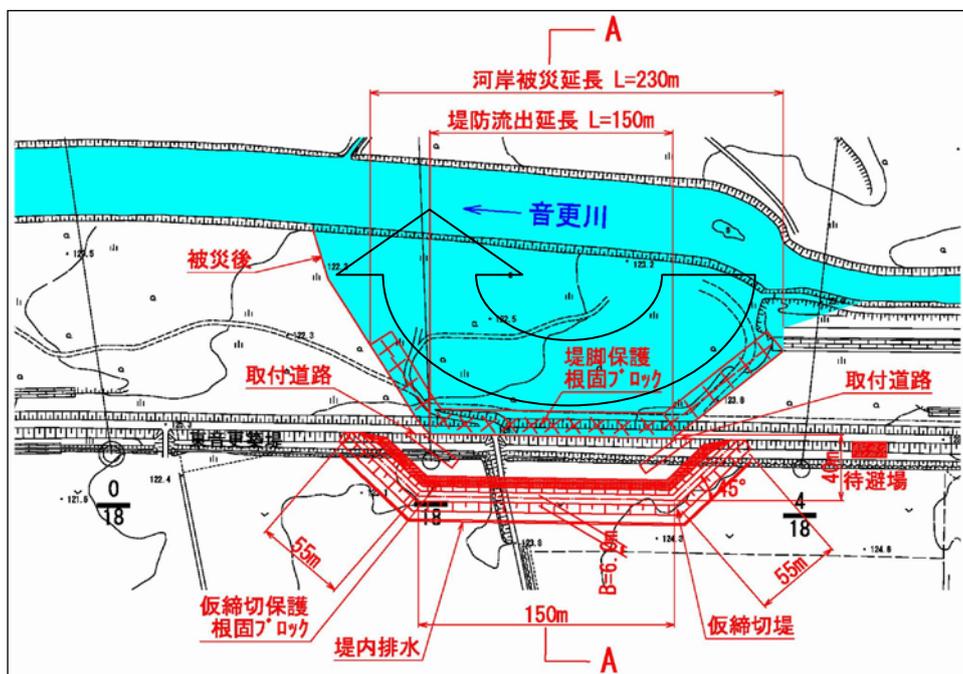


図 3-1 緊急復旧計画平面図

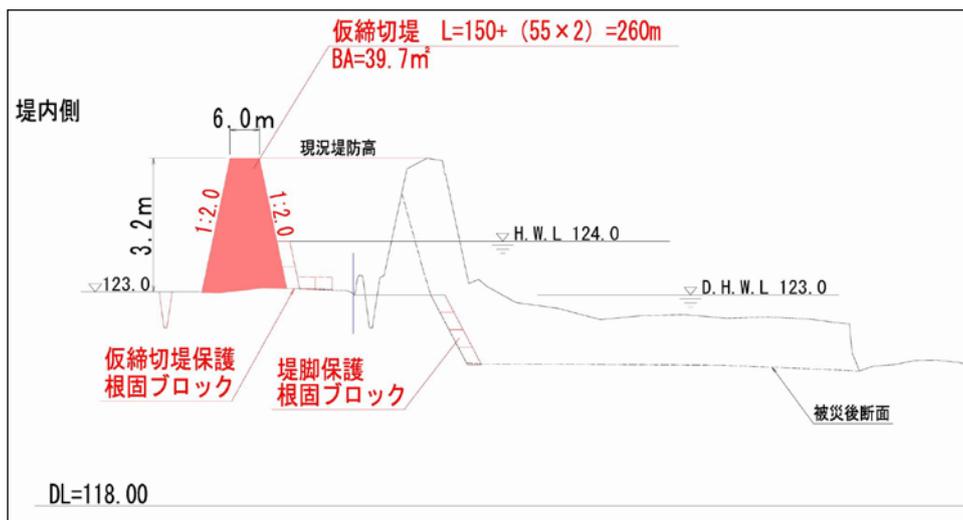


図 3-2 標準図

緊急復旧作業は9月7日AM11:15から開始しており、音更川の下士幌水防拠点に備蓄している根固めブロック(2t級)を被災箇所へ運搬し、水衝部の侵食の進行を防ぐため、侵食箇所の上流側から投入を行った(写真3-12)。根固めブロックの投入を継続しながら、9月7日PM3:00 士幌水防拠点に備蓄している土砂を運搬して仮堤防の盛土を開始した。照明車を現場に配置して24時間体制で作業を続け(写真3-13,14)、9月11日AM0:54根固めブロックの投入が完了(低水路部へ合計599個)9月12日PM5:00 仮堤防盛土V=10,300m³を完了し、9月13日PM7:00には天端敷砂利を敷設して仮堤防が完成した(写真3-15,16)。



写真3-12 根固めブロック投入状況



写真3-13 照明車を設置しての夜間作業状況



写真3-14 仮堤防盛土状況



写真3-15 仮堤防完成状況



写真3-16 仮堤防完成状況

4. 現地調査結果

4-1. 出水中の現地調査結果

(1) 堤防流出延長の時間的な変化

9月7日7:39に堤防流出を発見後、流出幅の変化を把握するため、7日9:50から7日17:30まで約1時間間隔で流出幅と河川水位を測定し、最終的に翌9月8日8:00に流出幅が拡大していないことを確認し終了した。なお、堤防流出延長とは、図4-1に示すように堤外側の堤防法尻部の延長である。9月7日の9:50から12:30までの観測では、表4-1のとおり1時間に5m程度の速度で下流側へ流出部の拡大が見られたが、その後の水位低下に伴い拡大速度が低下し、同13:30に堤防流出幅が144mに達し停止している。なお、横断方向の堤防流出量の計測は、作業の安全性上の理由から実施していない。

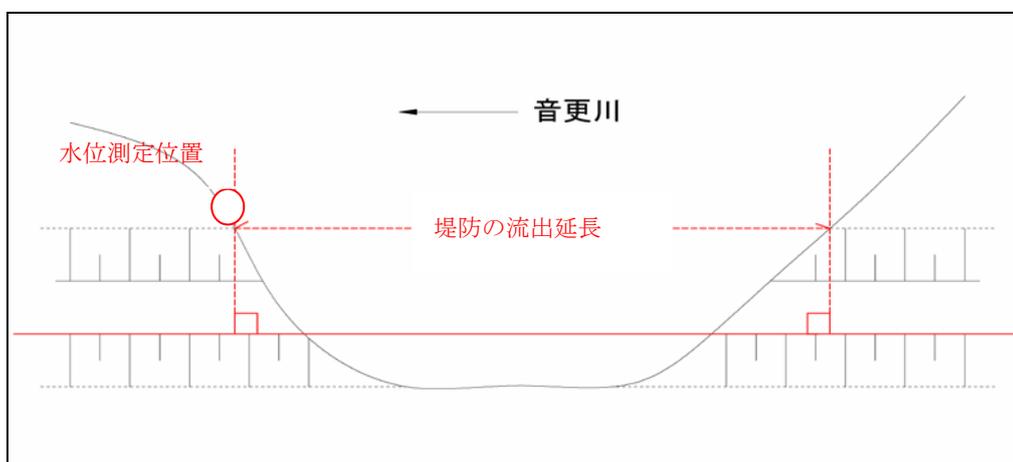


図4-1 堤防の流出延長の測定位置

表4-1 堤防の流出延長と水位の時間変化

| 年月日 | 時刻 | 流出延長 | 水位(標高) |
|-----------|-------|-------|----------|
| 2011年9月7日 | 9:50 | 129 M | 122.63 m |
| 2011年9月7日 | 10:30 | 134 M | - |
| 2011年9月7日 | 11:30 | 139 M | - |
| 2011年9月7日 | 12:30 | 143 M | 122.46 m |
| 2011年9月7日 | 13:30 | 144 M | 122.24 m |
| 2011年9月7日 | 14:30 | 144 M | 122.25 m |
| 2011年9月7日 | 15:30 | 144 M | 122.23 m |
| 2011年9月7日 | 16:30 | 144 M | 122.23 m |
| 2011年9月7日 | 17:30 | 144 M | 122.16 m |
| 2011年9月8日 | 8:00 | 144 M | 122.21 m |

(2) 堤防流出箇所の河岸侵食部の流速

9月7日14時頃に河岸侵食部の流速測定を行った。流速は写真4-1に示す3側線において、表面浮子を用いて表面流速を計測したものであり、その結果を表4-2に示す。最も流速が大きかったのは一番外側の①の側線ではなく、蛇行流路の中心に近い③の側線で発生しており、その表面流速は3.52m/sであった。なお、洪水ピーク時の水位はこの時点より0.7m程度高かったことを考慮すると、洪水ピーク時には更に大きな流速が発生していたと推察できる。



写真 4-1 流速調査実施状況（赤線は各測線の流下ラインを示している）

表 4-2 流速調査結果

| 測線番号 | 投下番号 | 浮子 m | 投下時刻 時 分 | 流下時間 sec | 平均 流下時間 sec | 平均 表面 流速 sec | 更正 係数 | 更正 流速 (m/sec) | 備考 |
|------|------|---------|-------------|-------------|-------------------|-----------------------|----------|---------------------|---------|
| 1 | 1 | 0.1 | 14:08 | 60.91 | 58.56 | 2.95 | 0.85 | 2.51 | 河岸から2m |
| | 2 | 0.1 | 14:10 | 56.20 | | | | | 〃 |
| 2 | 3 | 0.1 | 14:11 | 54.90 | 52.42 | 3.30 | 0.85 | 2.81 | 河岸から6m |
| | 4 | 0.1 | 14:12 | 49.94 | | | | | 〃 |
| 3 | 5 | 0.1 | 13:13 | 48.67 | 49.17 | 3.52 | 0.85 | 2.99 | 河岸から10m |
| | 6 | 0.1 | 14:14 | 49.67 | | | | | 〃 |

4-2. 出水後の現地調査結果

(1) 洪水痕跡調査

出水後に実施した、堤防の一部流出箇所付近(KP17~KP21)の洪水痕跡水位を図 4-2 に示す。調査により、ほとんどの区間において高水敷高と同等あるいはそれを上回る高さの痕跡水位が確認されている。特に、堤防の一部流出箇所(KP18.2)の上流で主流路が短絡した KP19.2 付近の水位が高くなっている。

また、堤防流出箇所 KP18.2 での痕跡水位 (WL=123.01m)、出水前の H21 年に測量された KP18.2 の横断面の平均河床高 (GL=120.99m) と痕跡水位から、今回の洪水ピーク時に平均 2m 程度の水深となっていたことになる。

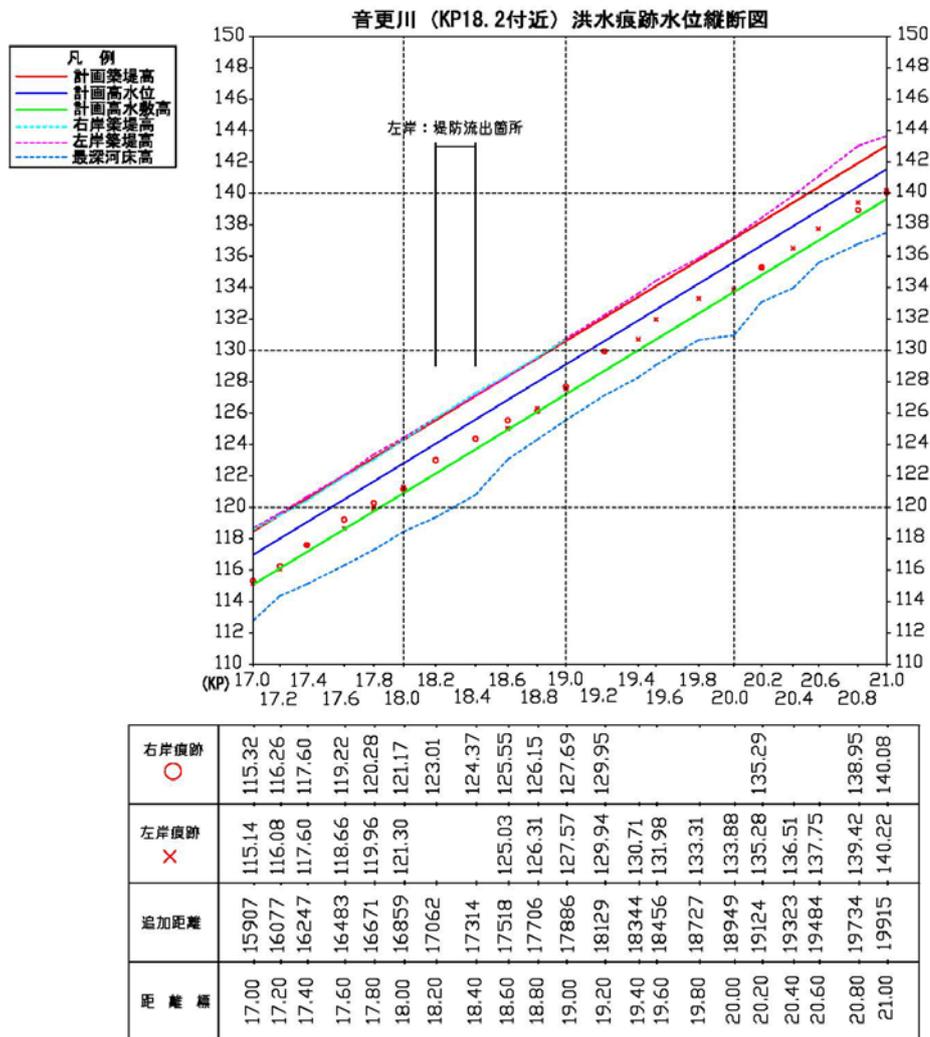


図 4-2 音更川 (KP18.2 付近) 洪水痕跡水位縦断面図

(2) 洪水時の流向

出水後の現地踏査により、砂礫堆上に残された植生や塵芥などが倒れている方向や河床に残る流路の痕などから出水中の流向の調査を行った。その調査結果から描いた詳細な流向図を図 4-4 に、それを基に描いた全体の流向の概略図を図 4-3 に示す。

現地に残っていた流向の痕跡は、出水中のどの時点で残されたものかは特定できないものの、水位が高い時に流下していたと思われる大きな流木が砂礫堆上に数多く取り残されていたことから、洪水ピーク時など水深が高い時期の流向を比較的表し得ているものと考えられる。

図 4-3 には、出水中に撮影された写真を基図に、出水中の大まかな流向を主流線は黄線で示し、既に頂上面が現れ始めている砂礫堆上の流向を水色で示している。図からは、黄線で示す主流路の蛇行とは異なり、砂礫堆上の流向は河道法線と並行するように直線的に流れていたと推察される。



図 4-3 主流線以外の水流の流れ (黄色：主流線の流向、水色：砂礫堆上の流向)

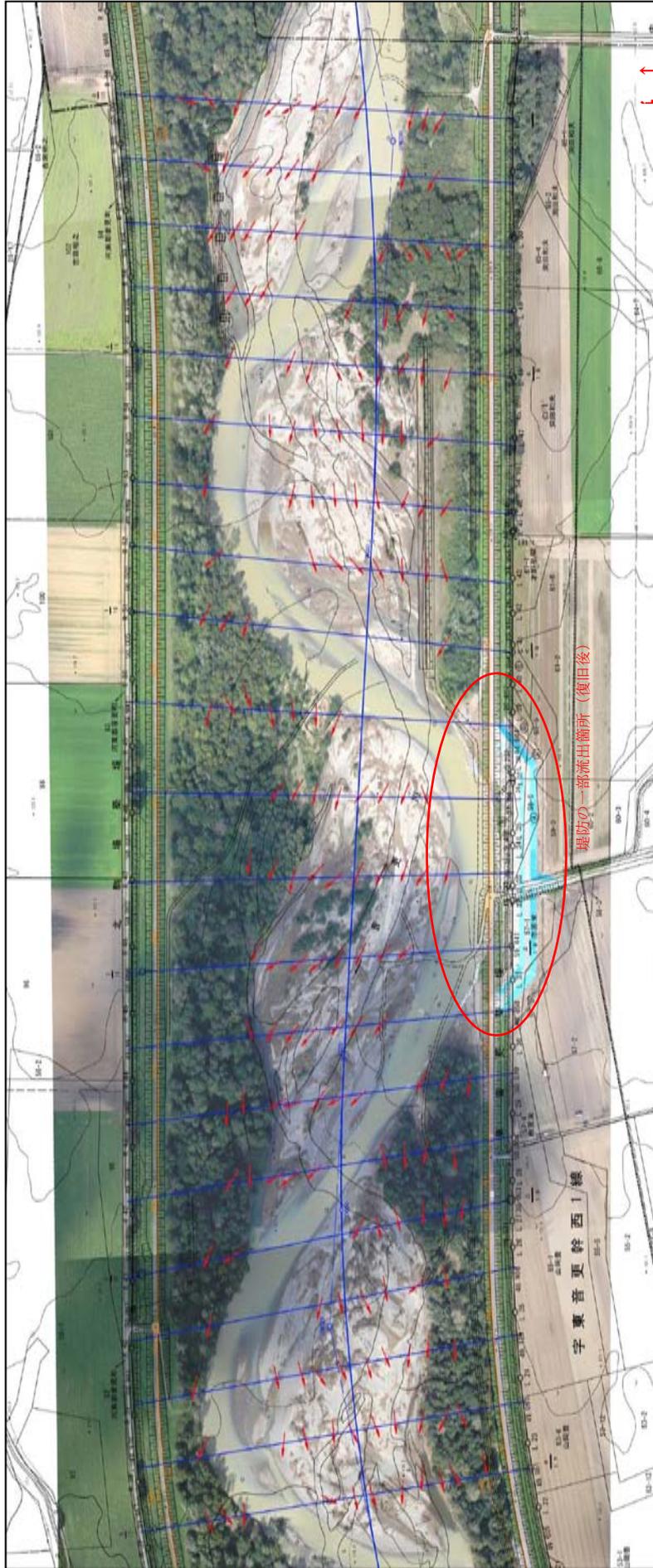


図 4-4 洪水時の流向想定図 (赤矢印が流向を示す。)

- ・ 基図に用いた垂直航空写真は、出水後の平成 23 年 9 月 16 日に撮影した写真を使用。
- ・ 基図に用いた改修計画図は、平成 22 年に作成した図を使用。
- ・ 調査範囲は横断方向 0.35km×縦断方向 1.00km (KP17.8~KP18.8) の 0.35km²
- ・ 各調査ポイントの間隔は、概ね横断方向 20m、縦断方向 50m で、調査内容は痕跡から推定された流れの方向のみである。

(3) 侵食箇所周辺の土質調査

堤防の一部流出箇所周辺 (KP18.2) で、堤体、高水敷、河床の土質調査を実施した。試料採取箇所およびその調査結果を以下に示す。

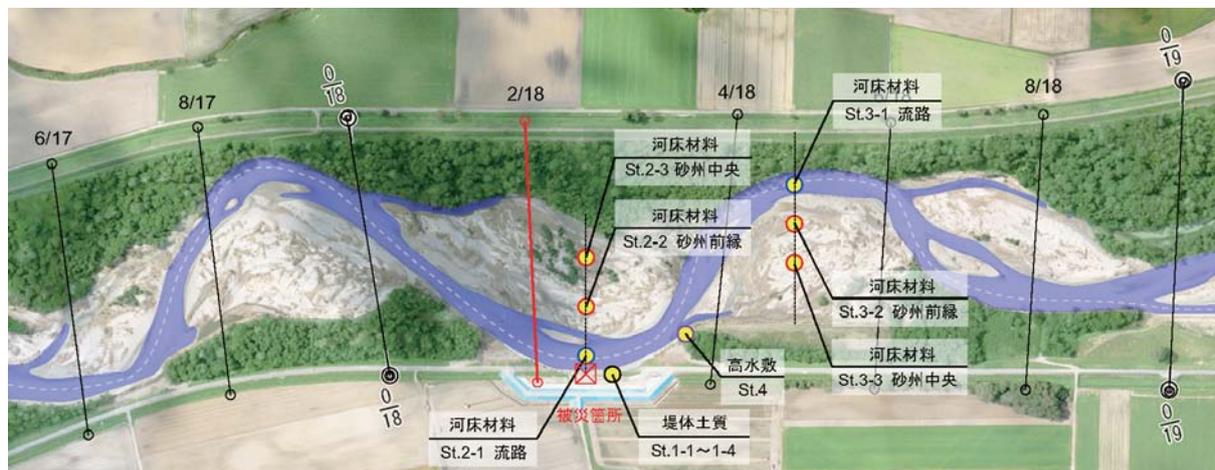


図 4-5 試料採取箇所

表 4-4 土質調査数量

| 土質試験項目 | | 試料採取 | 粗骨材の密度及び吸水率試験 (JIS A 1110) | 土粒子の密度試験 (JIS A 1202) | 土の粒度試験 (JIS A 1204) |
|--------|-------|------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|
| ① 土質調査 | 堤体材料 | 4 | - | 4 | 4 |
| | 高水敷材料 | 1 | 1 | - | 1 |
| | 河床材料 | 6 | 6 | - | 6 |
| 計 (試料) | | 11 | 7 | 4 | 11 |

表 4-5 土質試験結果一覧

| 項目 | 材料名 | 堤体 | | | | 高水敷 | 河床 | | | | | |
|------|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| | | 堤体材第1層 盛土層 Bc | 堤体材第2層 盛土層 Bg | 堤体材第3層 盛土層 Bs | 堤体材第4層 基盤層 Ag | 最優食高水敷 | 最優食流心部 | 最優食砂州部 前縁 | 最優食砂州部 中央 | 上流流心部 | 上流砂州部 前縁 | 上流砂州部 中央 |
| | | St. 1-1 | St. 1-2 | St. 1-3 | St. 1-4 | St. 4 | St. 2-1 | St. 2-2 | St. 2-3 | St. 3-1 | St. 3-2 | St. 3-3 |
| 一般 | 土粒子の密度 ρ_s g/cm ³ | 2.650 | 2.696 | 2.636 | 2.680 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 表乾密度 D_s g/cm ³ | - | - | - | - | 2.626 | 2.657 | 2.529 | 2.583 | 2.596 | 2.657 | 2.657 |
| | 吸水率 Q % | - | - | - | - | 2.084 | 1.982 | 3.263 | 2.462 | 2.202 | 2.326 | 2.326 |
| 粒度特性 | 石分 (75 mm以上) | - | 20.2 | - | 26.4 | - | 26.1 | - | - | 40.1 | 42.8 | - |
| | 礫分 (2 mm~75 mm) | 1.2 | 79.4 | 16.4 | 90.0 | 77.3 | 95.2 | 43.0 | 66.2 | 97.0 | 89.0 | 65.0 |
| | 砂分 (0.075 mm~2 mm) | 43.8 | 18.1 | 39.2 | 9.4 | 22.6 | 4.8 | 56.1 | 33.2 | 3.0 | 10.8 | 34.8 |
| | 細粒分 (0.075 mm未満) | 55.0 | 2.5 | 44.4 | 0.6 | 0.1 | 0.0 | 0.9 | 0.6 | 0.0 | 0.2 | 0.2 |
| | 最大粒径 mm | 19 | 200 | 75 | 150 | 75 | 106 | 75 | 75 | 150 | 150 | 75 |
| | 平均粒径 dm | 0.22 | 48.78 | 3.21 | 48.55 | 27.24 | 55.00 | 7.18 | 17.80 | 70.01 | 62.46 | 21.20 |
| | 60%粒径 D_{60} mm | 0.09 | 42.50 | 0.18 | 56.33 | 29.88 | 63.57 | 2.53 | 14.96 | 75.23 | 79.77 | 20.86 |
| | 50%粒径 D_{50} mm | 0.07 | 27.74 | 0.11 | 43.26 | 20.44 | 56.45 | 1.44 | 9.29 | 61.69 | 48.11 | 11.32 |
| 分類 | 分類名 | 砂質細粒土 | 粒径幅の広い砂質礫-R | 細粒分質礫質砂 | 粒径幅の広い砂まじり礫-R | 粒径幅の広い砂質礫 | 石分まじり分級された礫 | 分級された礫質砂 | 粒径幅の広い砂質礫 | 石分まじり分級された礫 | 粒径幅の広い砂まじり礫-R | 粒径幅の広い砂質礫 |
| | 分類記号 | FS | GWS-R | SFG | GW-SR | GWS | GP-R | SPG | GWS | GP-R | GW-SR | GWS |

1) 試料採取箇所の河道断面形状 (KP18.2)

最大侵食箇所の直下に相当する KP18.2 の河道断面形状の変化を図 4-6 示す。実線が出水後（平成 23 年 10 月）に計測された断面形状で、破線が出水前（平成 21 年 12 月）に計測されたものである。図から、前回調査時は流路となっていた箇所が大量の土砂が堆積して砂州となる一方（赤塗箇所）、高水敷であった箇所が洗掘・侵食を受けて新たに流路が形成されたことがわかる（青塗箇所）。河床材料調査は、この新たに形成された砂州と流路を対象に、横断方向に等間隔となるような調査ポイントを 3 点設けて実施することとした（St. 2-1～2-3）。また、侵食箇所直上流の砂州と流路についても同様とした（St. 3-1～3-3）。

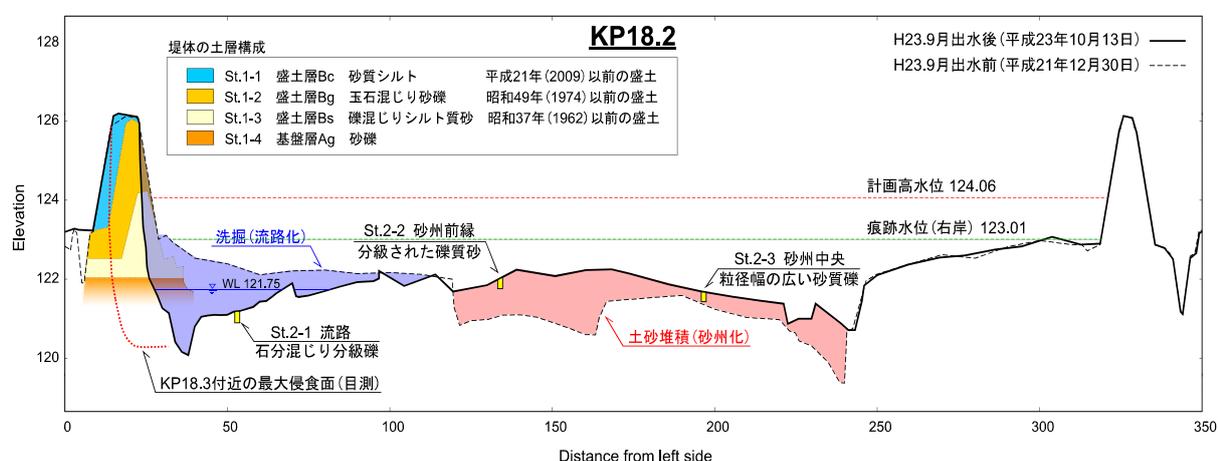


図 4-6 出水前後における試料採取箇所直下の河道断面形状

2) 河床材料調査結果 (St. 2-1~2-3, St. 3-1~3-3)

砂州と流路を対象とした河床材料調査の結果を図4-7に示す。まず、侵食箇所前面の調査箇所 (St. 2-1~2-3) についてみると、赤線が今回の出水で新たに砂州となった箇所の粒度分布で、実線が砂州前縁部、破線が砂州中央部を示している。同じく青線で示す流路内の粒度分布は、流水の分級作用によって細粒分はほとんど洗い出され、礫分が主体となっているのに比べ、出水時に砂州上に堆積した土砂は粒径の細かな成分を比較的多く含む礫質砂 (or 砂質礫) であったことがわかる。

次に、侵食箇所上流の調査箇所 (St. 3-1~3-3) についてみると、砂州前縁部の粒度分布だけが下流の St. 2 と比べてかなり粗粒化していることがわかる。これは、出水期、現在の砂州前縁付近が主流路に近い流況であったことを示しており、水面下で高流速となっていた期間に分級が進んだ結果であると考えられる。

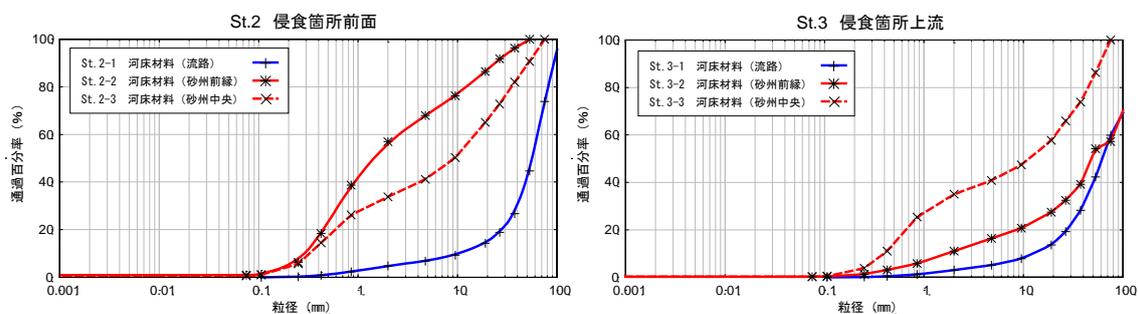


図 4-7 土質調査結果 (河床材料)



写真 4-2 河床材料採取状況

3) 堤体土質調査結果 (St. 1-1~1-4)

堤体土質調査の結果を図 4-8 に示す。調査箇所は試料採取の容易さを考慮し、KP18.2 直上流の最大侵食箇所を対象とした。現地における目視から、堤防および基盤部の土層構成は写真 4-3 のように第 1 層から第 4 層の 4 層で構成されていることを確認し、露出した侵食面から各層の試料を採取して粒度試験を実施した。

図 4-8 示すとおり各層の土質は 2 種類に大別され、第 2 層 (St. 1-2) と第 4 層 (St. 1-4) は流路内の河床材料 (St. 2-1) と非常に近い粒度分布を持った砂礫質土であることが確認され、第 1 層 (St. 1-1) と第 3 層 (St. 1-3) は細かな成分を多く含むシルト質砂で構成されていることがわかった。このように違う粒度分布の土質が交互に現れるのは、当該地点における築堤が数度にわたって施工されてきたことを表している。

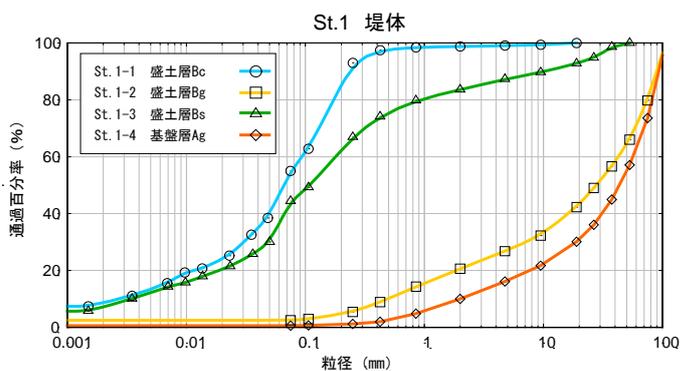


図 4-8 土質調査結果 (堤体)

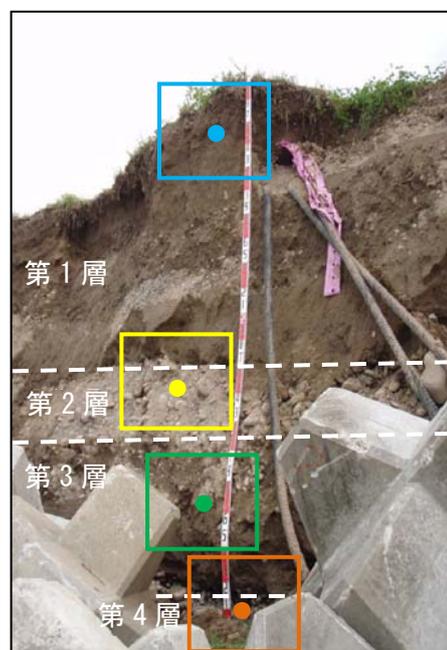
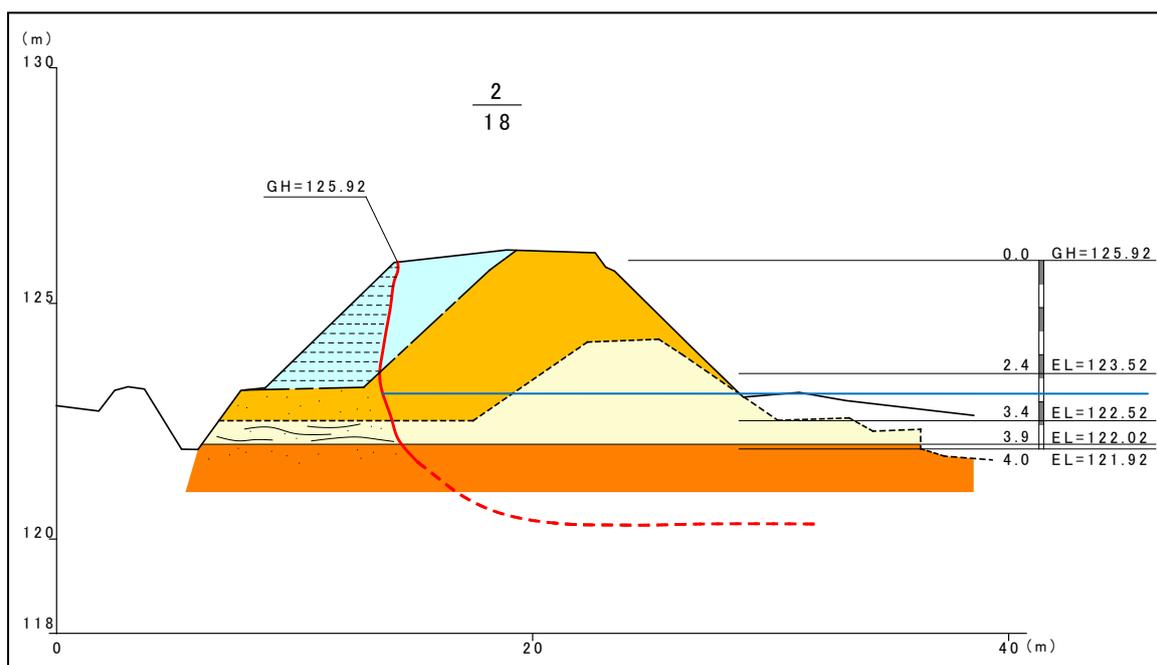


写真 4-3 河岸侵食面 (試料採取箇所)

今回の土質調査結果と過去の築堤履歴とを照らし合わせたものが図 4-9 の横断図であり、図中の堤体部に描かれた赤線は、KP18.2 の最大侵食面である。

この図から、現在の築堤は砂礫質の基盤層の上に昭和 30 年代に築造されたシルト質砂の堤防があり、この上に現在の堤防の基礎となる昭和 40 年代に施工された砂礫質の盛土がある。さらにその後、拡幅盛土として砂質シルトが腹付けされたことがわかる。

図中の青線で示す痕跡水位の状況から、出水期間中、当箇所（KP18.2）において主に流水にさらされていた土層は、第 4 層（砂礫質の基盤層）と第 3 層（昭和 30 年代に築造された盛土層のシルト質砂）である。それらの層は粘着力が小さく、流水による侵食に対しての耐力が低い。そのため、出水時には水衝部となっていた当該箇所が、容易に侵食が進行したものと考えられる。水衝部は横断面内の中で最も深く、出水ピークのみならず、水位低下期においても相当の水深を有するため、長時間、河岸侵食を継続させうると考えられる。また、侵食面は各層の境界で極端に大きな変化点を持たないことから、下層の侵食によって支持力を失った上層が自然崩落する形で徐々に垂直に近い侵食面が形成されていったものと考えられる。



凡 例

| | | | | | |
|---|----------------------|-------|-----------|-------|-------------|
|  | 第1層(盛土層Bc)・砂質シルト | ——— | 平成21年盛土 | ——— | 平成21年(2009) |
|  | 第2層(盛土層Bg)・玉石混じり砂礫 | ——— | 昭和45年盛土 | ——— | 昭和45年(1970) |
|  | 第3層(盛土層Bs)・礫混じりシルト質砂 | ——— | 昭和30年以前盛土 | ----- | 昭和37年(1962) |
|  | 第4層(基盤層Ag)・砂礫 | ----- | | ——— | 河岸侵食ライン |

図 4-9 築堤履歴 概略図

図4-10は、侵食面を拡大した図である。洪水痕跡調査により明らかになった洪水ピーク水位を水色の線で示している。図中のブロックは出水中に投入されたものであり、点線は河床面の推定線である。

出水中は第2層～第4層までが水面下となり、直接、流水による侵食作用を受けていたものであり、出水後の測量時点の第2層～第4層の斜面傾斜角は約30～50°であった。最上層となる第1層（砂質シルト層）は、流水にさらされることは無かったが、前述のとおり下層の侵食により崩落したが、粘性を持つ土質であったことからオーバーハングした形状となっている。

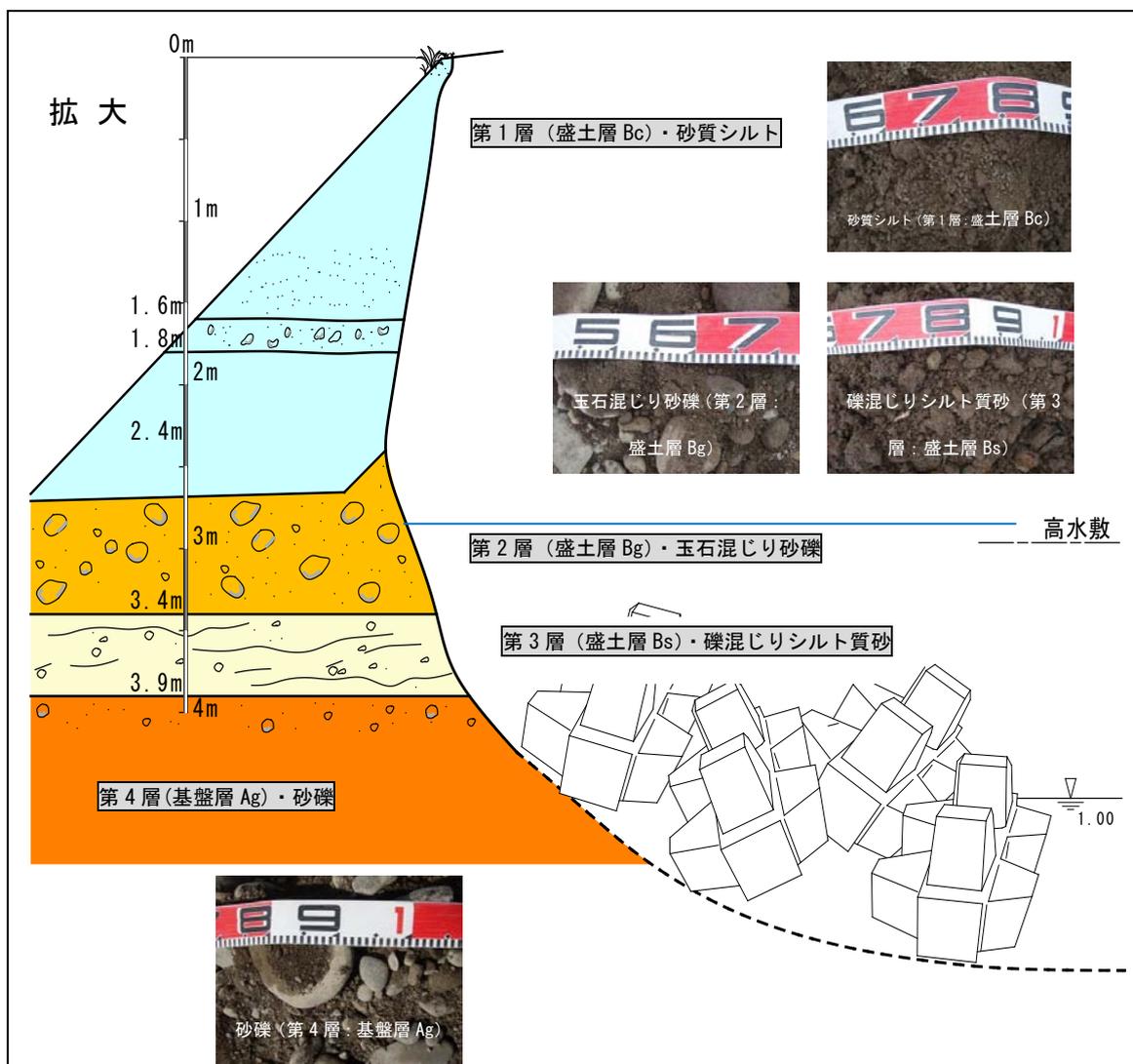


図4-10 土質構成断面図

4) 高水敷土質調査結果 (St. 4)

次に高水敷の土質調査結果を図4-11に示す。当試料は被災箇所の上流に位置する高水敷の侵食面中程から採取したもので、粒度分布は砂州中央部の河床材料と非常に近く、基盤層よりもやや細粒分を多く含んだ砂質礫であった。

当箇所周辺の高水敷は、出水前には40～50m幅の高水敷が存在していたが、今回の出水では容易に高水敷の河岸侵食が起きている。この理由の一つとして、高水敷の土質が粘性を有しない砂質礫であったことも大きな原因であったと考えられる。

以上、侵食箇所周辺の土質調査結果から、音更川流域の河道は一部堤防を除くその大半が砂質礫（砂礫質）の土砂によって構成されていて流水に対する耐力が弱く、河岸侵食やそれに伴う流路の蛇行が発達しやすい土質条件となっていたことが確認された。

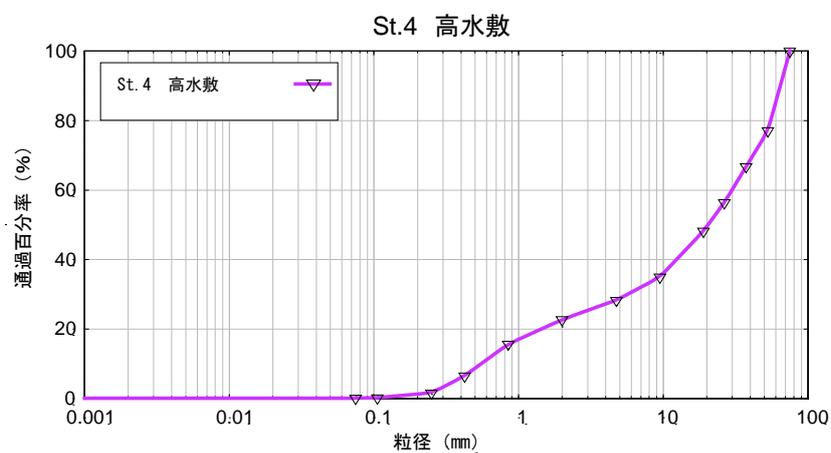


図 4-11 土質調査結果 (高水敷)

5. 出水時の河道形状の変化

堤防の一部流出の原因について考察を行う。今回の堤防の一部流出の原因は、その堤体部だけに着目した場合には、蛇行流の流水の作用によって堤体の基盤層が侵食されて堤体の支持力が失われた結果、上層の堤体が自然崩落したことが直接的な理由であると考えられる。しかし、急流河川の河川管理を考えていくうえでは、基盤層の侵食の主要因である流路の蛇行がどのように発生したのかを知ることがより重要であり、出水時の河道形状の変化について分析を行う。

5-1. 近年の河道形状の変化

河道が砂礫で構成されている急流河川では、出水時には容易に河岸侵食が発生し流路変動が生じやすいと言われている。今回の出水による河道形状の変化の原因分析の参考とするため、過去の音更川の河道形状（平面形状、横断形状、縦断形状）の変化について分析を行い、音更川の流路変動の特性を把握する。

(1) 近年の平面形状の変化

昭和53年から平成22年までの約30年間の河道の平面形状の変化を航空写真から読み取ると、その特徴は以下のようなものである。

I. 「本格的な河川改修による低水路の直線化 (S53)」

当該区間は、本格的な改修以前には網状の蛇行流路が形成されていたが、図5-1の河道変遷図のS53年航空写真に示すように、昭和50年代に全川的に低水路幅を50mとした河道掘削が行われており、複断面河道形状による低水路の直線化が行われている。この際、河道法線はKP21~19の①の区間は右岸側の段丘沿いに寄せられ、また、KP19から下流の区間④については河道中央に低水路法線を設定して、掘削を行っている。

II. 「低水路の再蛇行化 (S53~H3 への変化)」

この間、既往第2位の規模となる昭和56年出水が発生している。S56出水前後の航空写真が無いので、S53、H3の航空写真で河道の変化を分析してみると、段丘沿いの②の区間では、低水路内に水流の蛇行が発生し、その水衝部では小規模の河岸侵食の発生が認められる。また、⑤のKP20~18の区間では、S53年の流路④に比べて流路の蛇行が見られるなど、昭和50年代に直線化された低水路が徐々に再蛇行している。

III. 「低水路内への樹木の進入 (H3→H12 への変化)」

H3年からH12年の間は、大きな出水は発生していない。H3年以降、主流路の位置は大きく変化していない。また、H3と比較すると礫河原に樹木が広く進入している。この間、

大きな出水が発生していないことを踏まえると、河床攪乱を生じさせるような出水が発生しなかったことで、比高の大きい砂礫堆上に樹木が進入し、礫河原面積が減少した可能性が大きい。

IV. 「局所的な蛇行の発達 (H12→H17 への変化)」

この間、昭和 42 年以降の出水の中で既往最大となる H15 年出水が発生している。出水直後に撮影された写真が無いため詳細な分析はできないが、今回の H23 出水のように全川の流路が大きく変動した形跡は無い。ただし、⑥や⑦のように、蛇行の外湾部の一部で大きな河岸侵食が発生しており、H17 の写真には、それらの侵食箇所に設置された低水護岸、および工事に伴い直線化された低水路が確認できる。

V. 「小規模な河道変化 (H17→H22 への変化)」

この間、大きな出水は発生しておらず、⑧の箇所など一部で低水護岸が設置されたほかは、流路の変動はほとんど変化していない。H15 出水後に流路を一度直線化した箇所が、再び蛇行流路となっているほか、顕著な変化は生じていない。

◆音更川の河道変遷

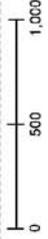


図5-1 河道変遷(S53～H22の航空写真比較)

(2) 近年の横断面の変化

H2年、H13年、H21年の河川横断測量成果を用い、H2年以降の河道形状の変化を読み取る。図5-2に堤防の一部流出箇所付近(KP18.2~20.0km)における最近の3年代の横断面の重ね合わせ図を示す。各断面の変化の特徴は以下のとおりである。

【KP18.2 (被災箇所)】

各年代間に低水路幅の大きな変化はないが、最新河床高から滯筋の位置を推定するとH2は中央部、H13は左岸側、H21は右岸側にそれぞれ位置しており、低水路内の流路が変動していることがわかる。

【KP19.0】

この区間はいずれの年代でも直線的な河道法線となっている。低水路の中はKP18.2と同様に各年代間で滯筋の位置が異なり、H2は左岸側、H13は右岸側、H21は左岸側と流路が変動している。

また、H2年以降、低水路右岸側で河床高が上昇しているのは、H2年以降、右岸側の砂州上に繁茂した河道内樹木によって小規模程度の出水時に細流土砂を補足していると考えられる。

【KP20.0】

この区間は右岸側の河岸段丘沿いに河道法線があり、H2年以降に段丘側に護岸が設置されたが、護岸沿いの深掘れ等も発生することなく、上記の断面同様に各年代間で流路の変動が見られる。

(3) 近年の縦断面の変化

上記のH2年、H13年、H21年横断図から作成した最深河床高の経年変化図を図5-3に示す。

この区間では、横断図で示すように経年的に滯筋位置が動いているため、最深河床高は若干の増減が見られる。全体的にはやや河床低下傾向にあるようにも見えるが、KP18.6~KP19.8の区間のようにH13年からH21年にかけて河床の上昇が認められる箇所もある。

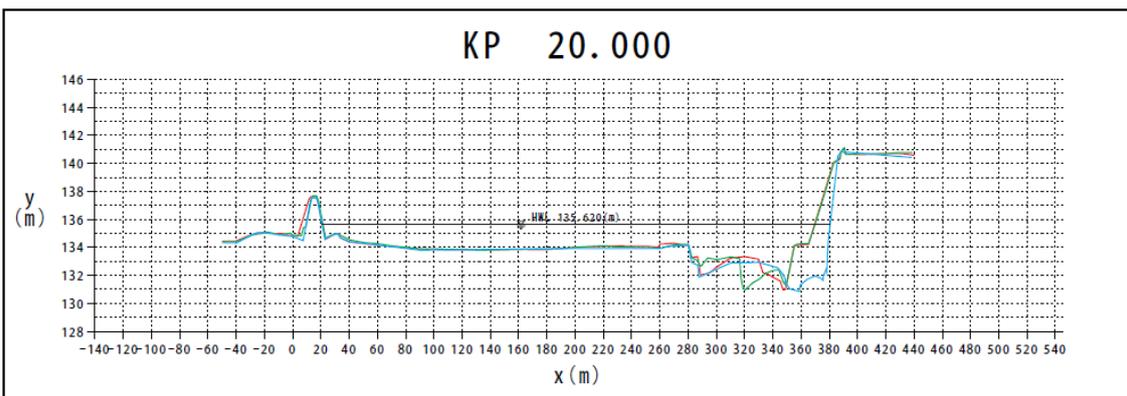
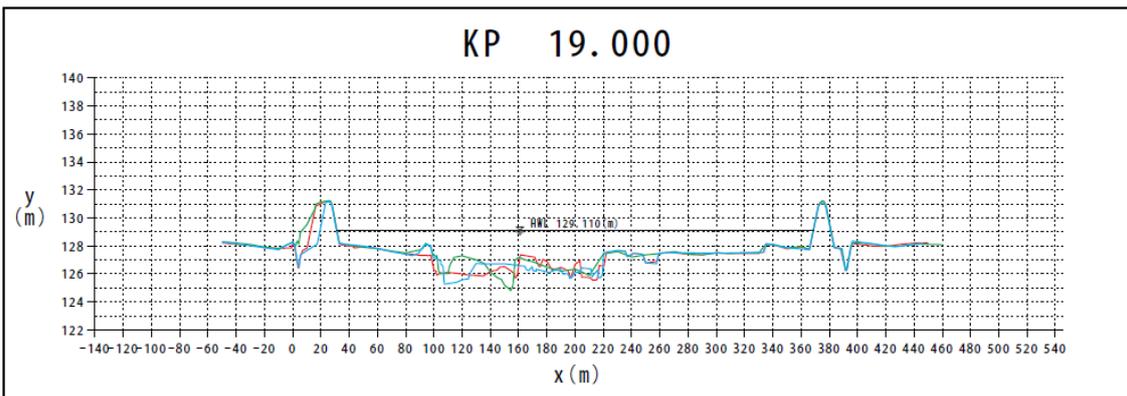
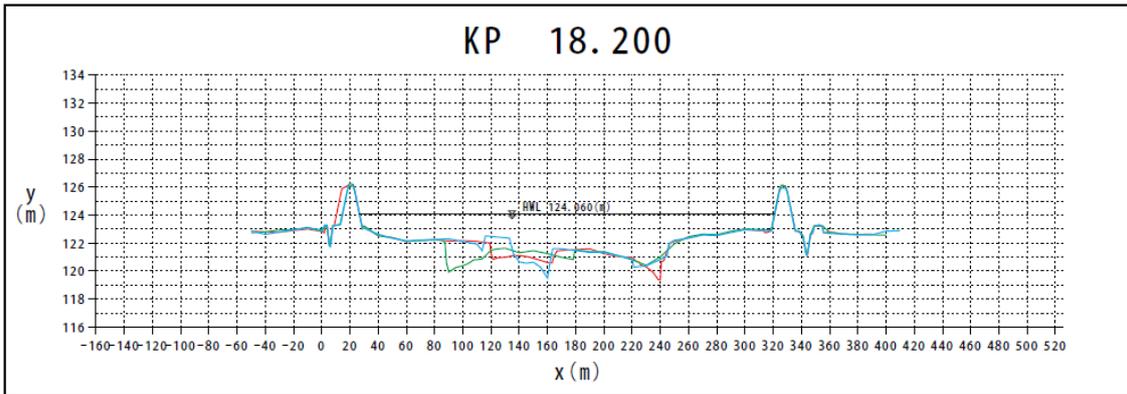


图 5-2 横断面(H2年,H13年,H21年測量)

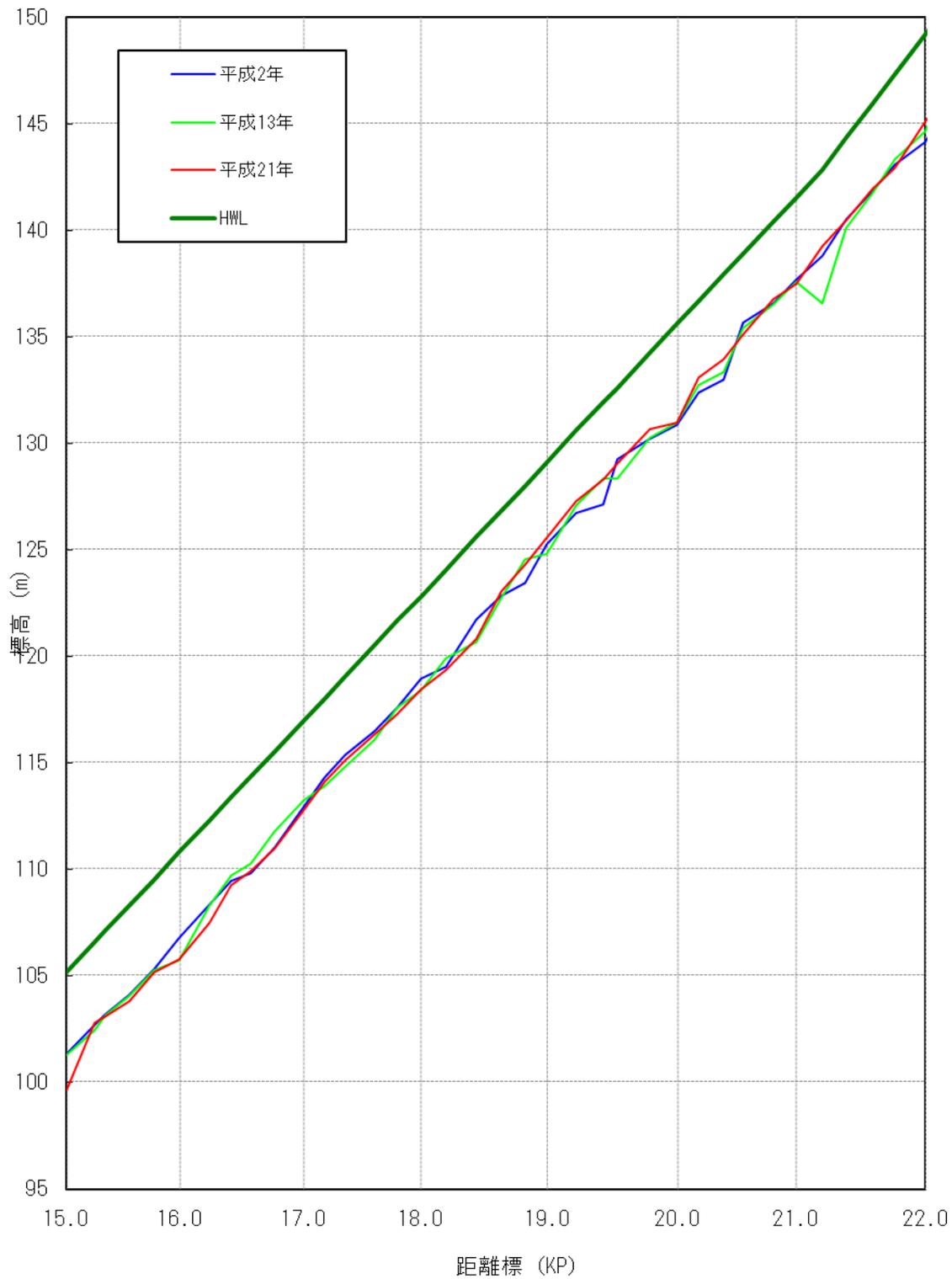


図 5-3 音更川最深河床高縦断面図 (KP15.0~KP22.0)

5-2 H23年9月出水前後の河道形状の変化

今回の出水における、河道形状（平面形状、横断形状、縦断形状）の変化について分析を行う。

（1）出水前後の平面形状の変化

出水前のH22年8月と出水後のH23年9月16日に撮影した航空写真を図5-4と図5-5に示す。図には、出水前の主流路を赤で、出水後の主流路を青で示し、それらを重ねあわせた平面図を図5-6に示す。図中には既設の低水護岸および水制工の位置を白線で示している。当該区間においては、堤防沿いに低水護岸が一部整備されているものの、高水敷と低水路を分けるような位置に設置された低水護岸はわずかである。

【KP15～18の区間（図5-4）】

出水前後では、それぞれ赤と青色で示す主流路の位置が大きくずれている。出水後の主流路は出水前と比べて、蛇行の振幅がより大きくなり、蛇行の位相が下流側へ移動している。

KP16.4～KP17.0の区間では、他の区間に比べると出水前後の流路変動が比較的小さい。この区間には左岸側に白線で示す位置に連続した低水護岸が設置され、出水前後を通して主流路はその低水護岸沿いに流れており、護岸の影響を受けていると考えられる。

KP15.8、KP17.6の左岸部では、出水前に50m程度幅があった高水敷が侵食によって失われて堤防沿いの護岸まで河岸侵食が達している。

また、出水によって主流路沿いの樹木が流出して礫河原が大きく拡大している。それらの樹木は植生基盤が侵食されたことによって樹木が流出したものと考えられる。今回の出水では高水敷もある程度冠水していたものの、後述のとおり高水敷ではそれほど大きな掃流力は発生しておらず、主流路沿い以外の部分で流出した樹木はほとんど認められない。

【KP18～21の区間（図5-5）】

音和橋（KP21.0）からKP19.6付近までは比較的流路の変動は小さいが、KP19.2～19.6のあたりでは、出水前には主流路が右岸側に大きく蛇行していたが、出水後には直線的に短絡し、その下流では新たな蛇行流路が形成されている。特に、堤防の一部流出が生じたKP18.2の前後の区間では、出水後の主流路の振幅が大きくなっている。

また、上記のKP15～18の区間同様に全体的に礫河原が大きく拡大し、主流路沿いの樹木が流出している。

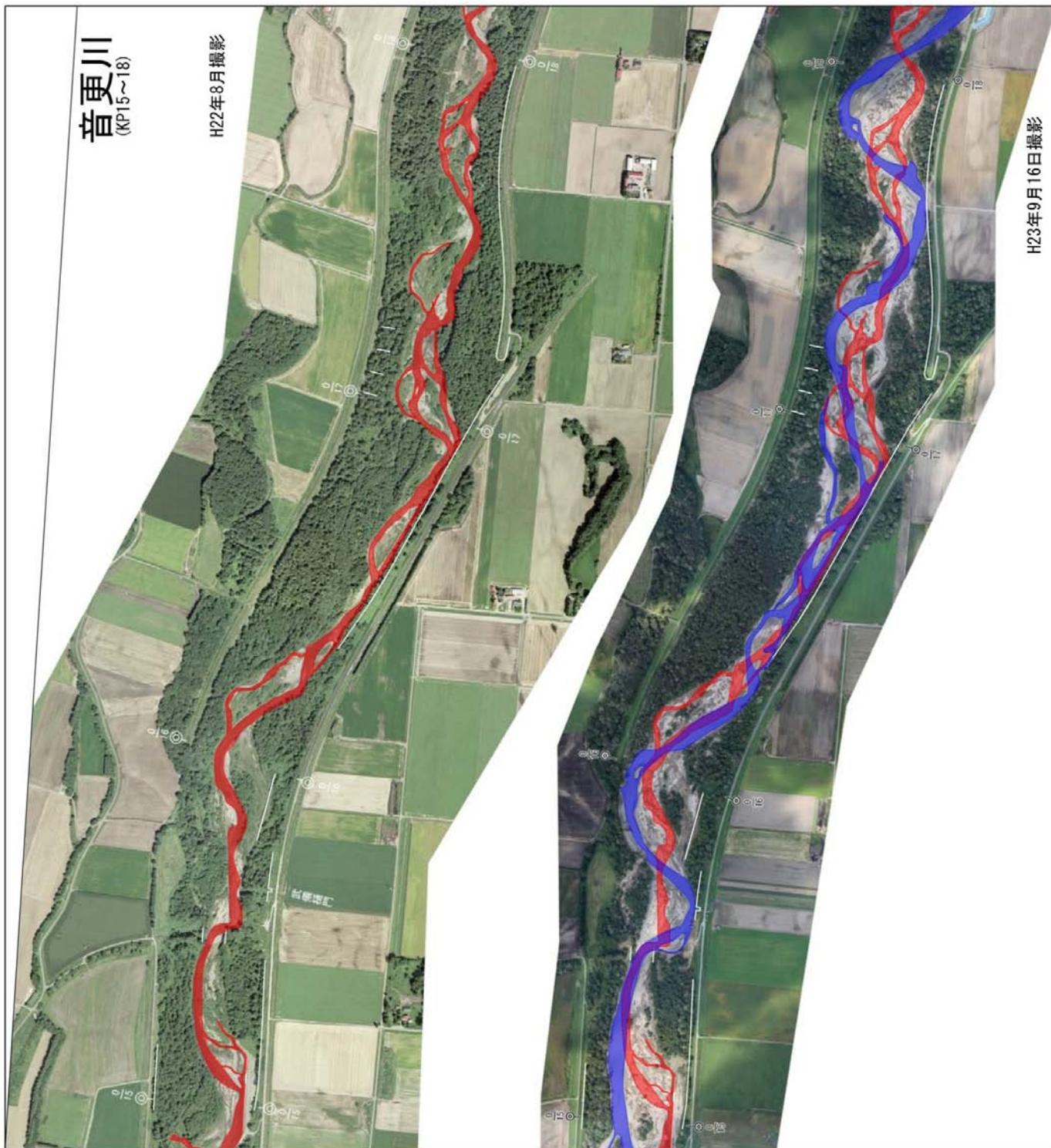


図 5-4 KP15~KP18 出水前後の平面形状の比較（左図：H22年8月撮影、右図：H23年9月撮影）

- は出水前（H22年8月時点）の主流路
- は出水後（H23年9月時点）の主流路

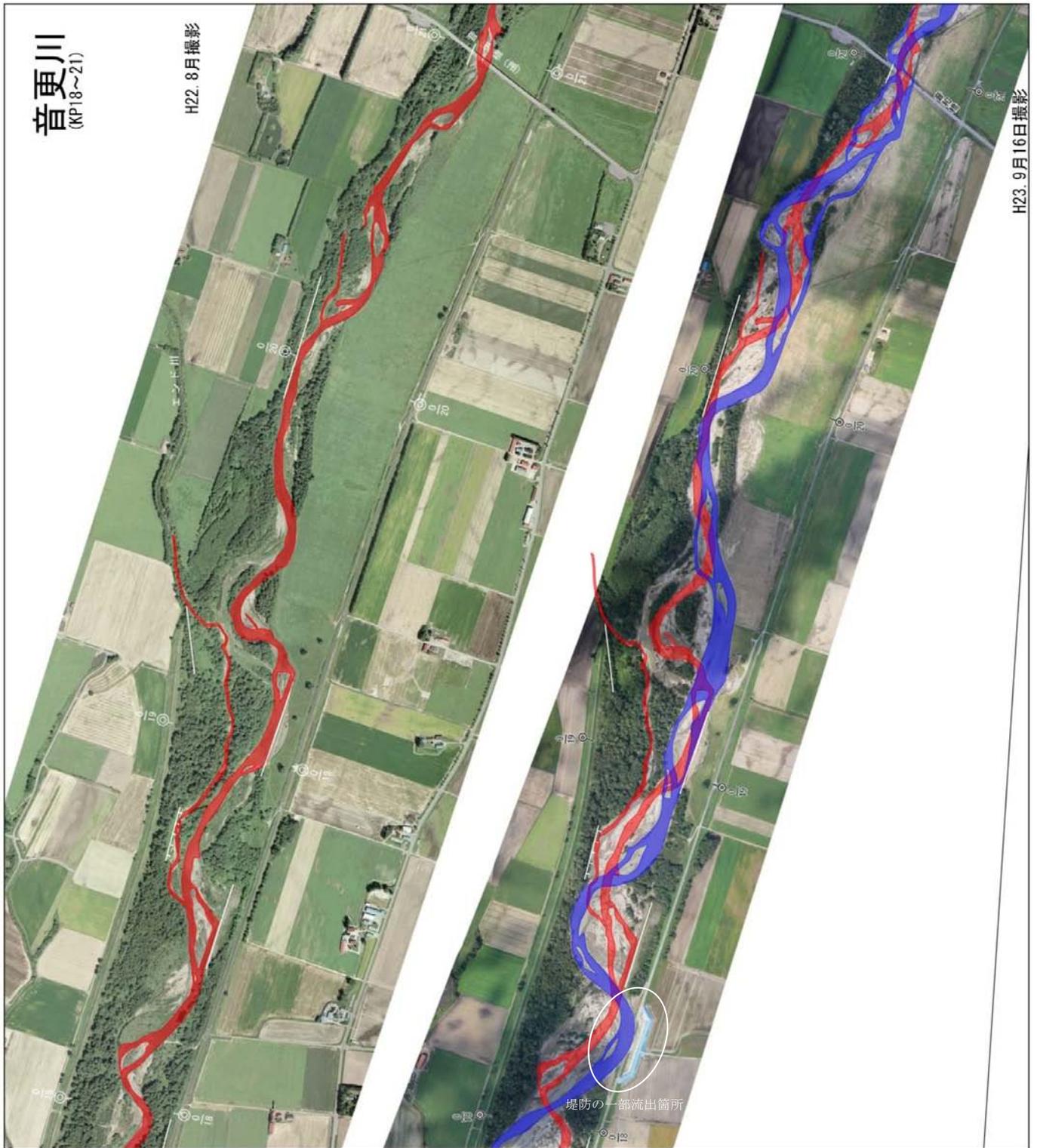


図 5-5 KP18~KP21 出水前後の平面形状の比較（左図：H22 年 8 月撮影、右図：H23 年 9 月撮影）

- は出水前（H22 年 8 月時点）の主流路
- は出水後（H23 年 9 月時点）の主流路

【出水前後の蛇行流路の変化】

H22年8月と出水後のH23年9月16日に撮影した航空写真の主流路を重ねあわせた平面図を図5-6に示す。

河岸段丘沿いの①の区間(KP19~21)では、図5-6に示すとおり長さ2kmの間で蛇行が2周期($\lambda 1, \lambda 2$)しており、平均蛇行波長は約1000m程度である。KP20から上流の区間では出水後の流路は出水前に比べて下流方向に1/5波長程度、蛇行の位相がずれている。KP19.2~19.6の区間では、右岸側に大きく蛇行していた流路が出水時に直線状に短絡している。その下流では、主流線が下流の護岸(KP19.0~19.2、左岸側)沿いに直進し、護岸下流側の河岸を削り取りながら緩やかに右岸側へ蛇行している。

両岸が堤防に挟まれている②の区間(KP17~19)では、長さ2kmの間で図5-6に示すとおり蛇行が3周期($\lambda 3, \lambda 4, \lambda 5$)しており、平均蛇行波長は約600m程度と短くなっているが、横断方向への振幅幅は上流に比べて大きくなっている。この区間では、平均して約1/4波長ほど蛇行の位相が下流方向にずれている。

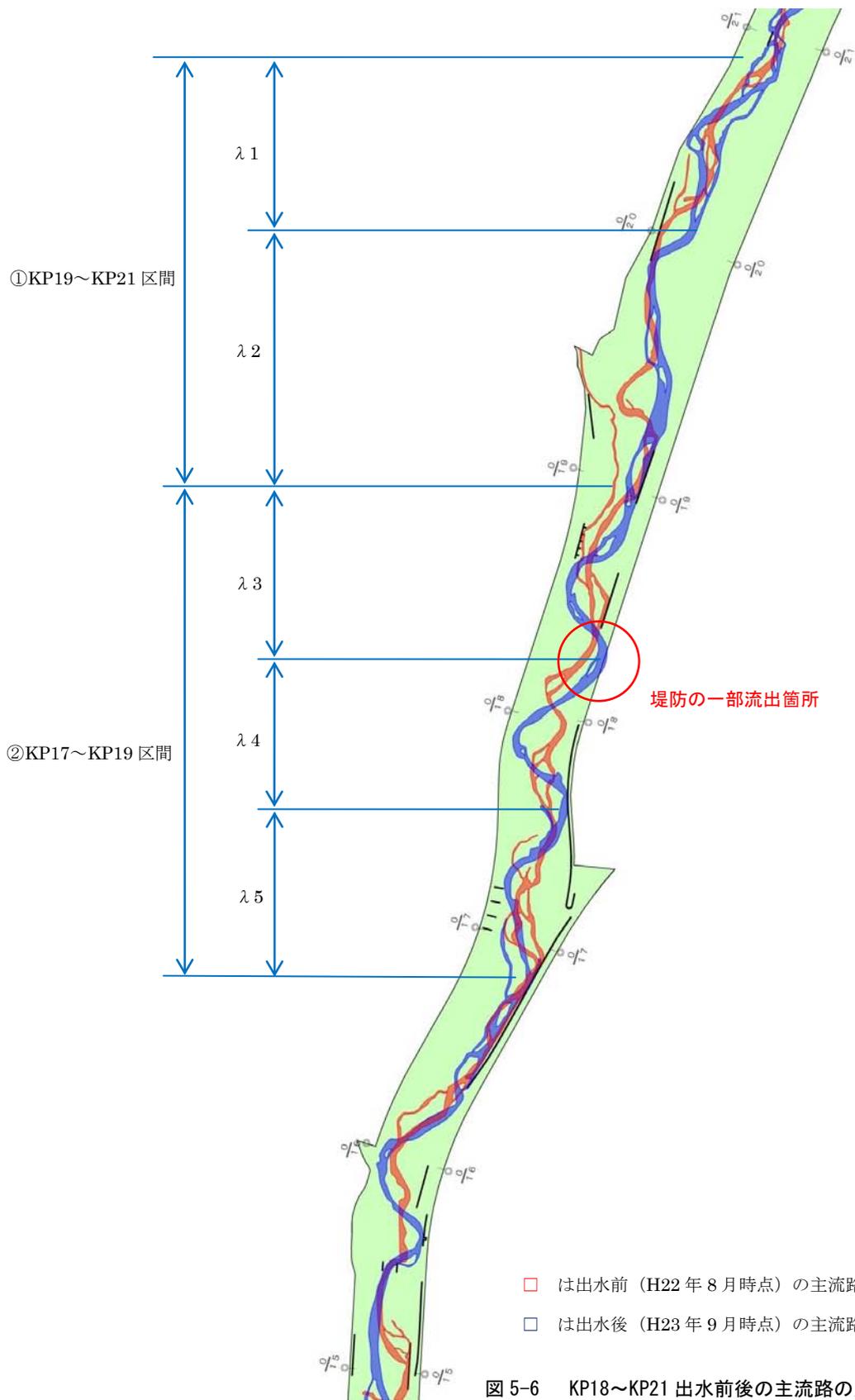


図 5-6 KP18~KP21 出水前後の主流路の重ね合わせ図

(2) 流路の蛇行特性の分析

出水前後を含めた河道変遷状況を端的に捉えるため、過去の航空写真などから流路・河畔林・高水敷・砂州・低水護岸の位置と範囲を判読し模式図として整理する。さらに主流路・低水河岸の位置を平面的に捉え、上記模式図と併せて年代ごとの比較を行い、音更川の蛇行特性や河道状況の変化について考察を行う。比較を行った年代は、本格的な河川整備が行われる前に相当する昭和 38 年とその約 40 年後の平成 12 年、さらに当該出水前後の平成 22・23 年の計 4 箇年分とし、範囲は今回の被災箇所を含む KP14.0～21.0 の河道内を対象とした。

(2) - 1 河道平面形状の変化

写真判読により模式化した河道状況を図 5-7 に示す。図中の塗色・線種の区分は凡例に示す通りである。なお、写真判読の精度は撮影された季節や天候のほか、データ自体の品質にも大きく左右され、特に戦後米軍によって撮影された昭和 38 年の航空写真には判読精度上の問題が多く含まれているため、ここでは参考程度に示すものとし、以下では比較的精度の高い結果が得られた出水前後の期間を中心にその変化をみることにする。

図 5-7 に示す平成 22・23 年の流路線形を比較すると、今回の出水で蛇行が大きく発達し、振幅・波長がともに増大した様子が見てとれる。中でも被災箇所の上下流 1km 区間 (KP17.0～19.0) の変化が特に顕著で、出水前後で流路の位置が全く異なっていることがわかる。

音更川が本来持つ蛇行特性 (ここでは低水路内を蛇行する流路を指す) を評価するには、護岸や水制工など、蛇行発達を阻害・抑制するような人為的な要素は極力排除して考えることが望ましい。図中黒太線は低水・高水護岸の位置を示しているが、護岸の設置状況は時期や場所によって大きく異なっており、流路形成に及ぼす影響の度合いも異なるため、区間全体を一律に評価することはできない。特に、蛇行頂部がコの字形に潰れるような変化を見せる KP14.0～15.0 付近などは、護岸の影響が強く現れており、自然状態の蛇行特性を見るには適さない区間である。一方、被災箇所の上下流 1km 区間 (KP17.0～19.0) は、出水後の波形が比較的きれいに揃っており、護岸の影響もほとんど受けておらず、自然状態に近い蛇行発達過程を示していたものと考えられる。よって、次はこの 2km 区間の流路変化に着目する。

被災箇所上流では、出水前の時点で、低水護岸が千鳥状に 3 列配置されていたのが確認できる。この護岸配置と出水前後の流路変化から、今回の出水では、蛇行波形の位相が下流側にずれるような変化と、横断方向に振幅が増大する変化とが複合的に進行したことで、この既設護岸の切れ間を縫うような形の蛇行流路が形成されたものと考えられる。一般的に、低水護岸は現出した蛇行湾曲部外岸側の水衝部を中心に敷設されることが多いため、今回のように一洪水で蛇行波形の位相や波長が大きく変化するような場合、想定外の箇所では蛇行流路の振幅が増大する可能性があると言える。

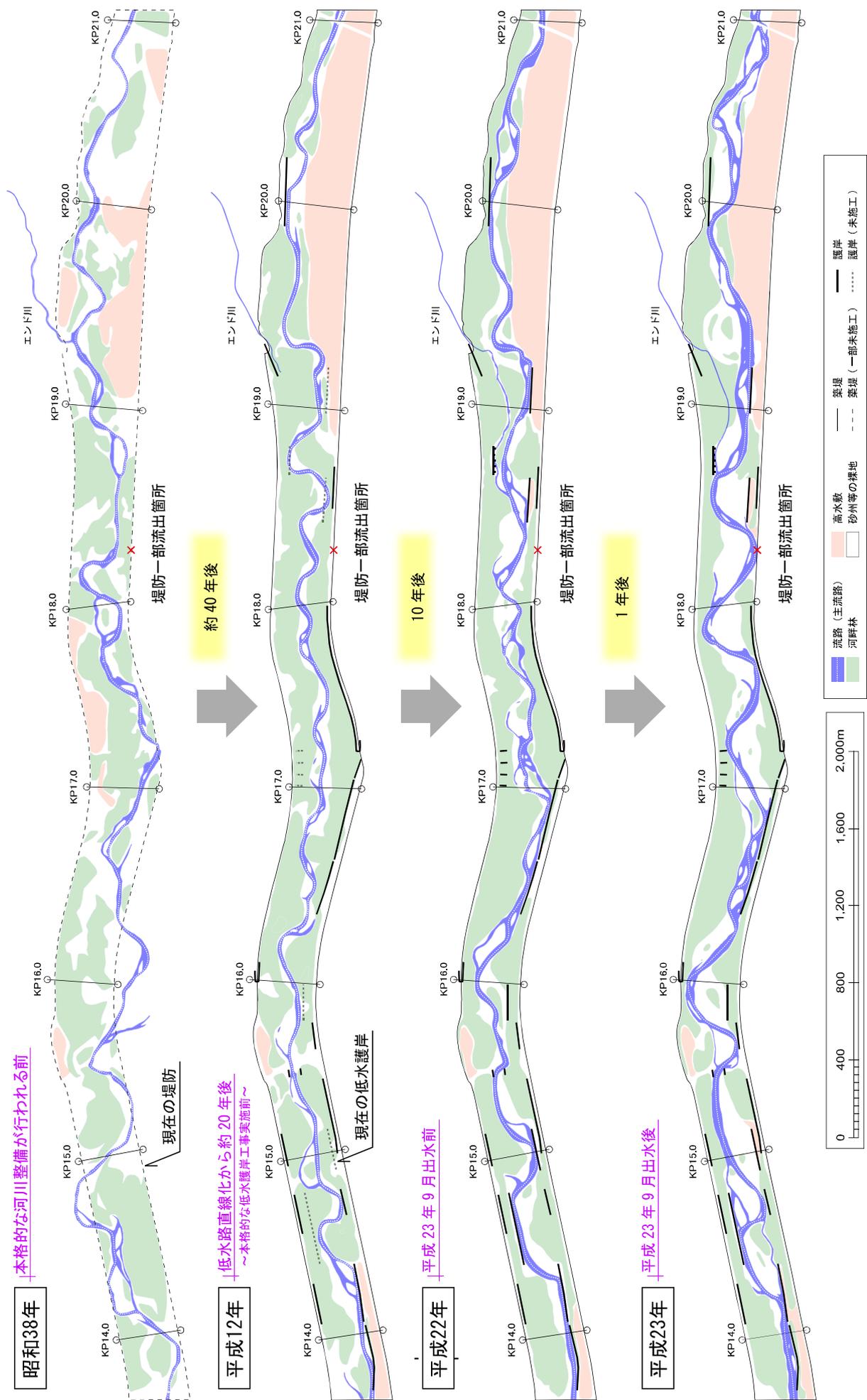


図 5-7 河道状況の変遷 (KP14.0～21.0)

(2) - 2 河畔林等面積と主流路延長の変化

図 5-7 をもとに算出した各要素の面積と主流路延長の変化を図 5-8 に示す。なお、これらの値は、洪水や河川改修などの影響を受けて数年間隔で大きな変動を繰り返していたものと考えられるが、今回の解析で得られるのは 4 箇年分の点データのみであるため、昭和 38 年から平成 22 年までの変化を詳細に追うことはできない。また、既に述べたように、航空写真の判読結果には撮影時期やデータの品質などの影響も内含されているため、ここでは、特に大きな変化が見られた部分について述べる。

図から当該出水前後を比較すると、河畔林の面積は約 20%減少し、主流路延長は約 4.5% (7km 区間全体で 360m) 増加したことがわかった。図 5-7 を見ると、河畔林が消失した箇所は、流路の位置が大きく変化した区間の低水路内に集中していることがわかる。これは、蛇行流路の位相 (波長) や振幅が変化する過程で、砂州や高水敷上に繁茂していた河畔林の多くが流出又は埋没したことに起因するものと考えられる。

また、蛇行流路が正弦波で近似できるものと仮定すると、蛇行波形は、波長 λ (波数 f) ・振幅 ω ・位相 ϕ の 3 つの要素の組合せとして説明できる。この 3 つの要素のうち主流路延長が増加するような変化は、波長の減少 (波数の増加) か振幅の増加のみである。今回の出水では、波長は逆に増加しているため (波数は減少)、主流路延長が増加した理由は蛇行振幅が増加したためであると言える。この主流路延長の増加もまた、今回の蛇行発達の大きな特徴の一つである。

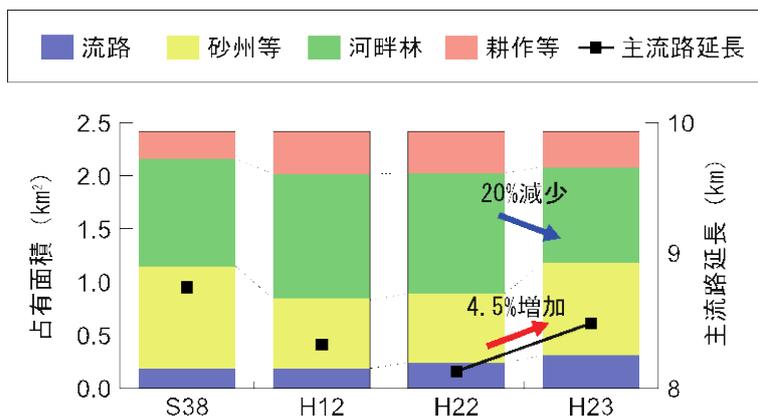


図 5-8 河畔林等面積と主流路延長の変化 (KP14.0~21.0)

(2) - 3 低水路河岸と蛇行流路線形の変化

今回の被災は、低水路内を蛇行する流路がその振幅を増大させる過程で発生した可能性が高いことから、過去の流路が低水路内をどのような線形で流れていたかを把握することとした。主流路の位置は先の航空写真判読から得られたものを用い (H23, H22, H12, S38)、低水路河岸の位置は各年直近の横断測量データから推定した (H23, H21, H13, S49)。

また、両データは低水路の中心を基準とした左右岸への距離として整理を行った。その理由を以下に述べる。音更川の河床形態は、概ね 1 波長内に 2 つの砂州を有する単列交互砂州の状態にある。一般的に、単列交互砂州上を蛇行して流れる流路の平面形状は周期波で近似できる場合が多い。流路の線形が周期波であれば、ある基準軸を河道内に設定することで、蛇行特性はその軸を中心とした周期振動で表されるはずである。さらに、今回の出水は、ピーク時を除けば、ほぼ低水路内で収まる流量規模で流れていたことから、低水路法線が流れ場に対して支配的であったものと考えられる。以上の 2 点から、本解析では低水路の中心を基準軸と定め、蛇行特性の把握を試みた。また、このような処理を経ることで、副次的に河道や低水路自体が湾曲している影響も取り除くことができるため、流路本来の蛇行特性をより正確に評価することが可能になる。上記処理過程の一部を図 5-9 に、低水路河岸の位置と流路線形を年代ごとに重ね合わせた結果を図 5-10 に示す。

なお、昭和 38 年の流路線形は、現存する横断データの中でも最も古い昭和 49 年の低水路河岸の位置と重ね合わせてはいるが、それでも年代のずれは大きく、KP14.0~17.0 の区間では、流路の位置が低水路から大きくはずれるような結果となった。これは、昭和 40 年代後半から行われた大規模な河川改修工事により、両年代を挟んで河道状況が大きく変化していたことに起因している。昭和 38 年当時の河道状況は、米軍写真から推定する以外に方法が無いのが現状であるが、少なくとも自然状態に近い当時の蛇行流路は、KP14.0~17.0 の区間で、現在の蛇行帯とは大きく異なる位置を流れていたことがわかる。

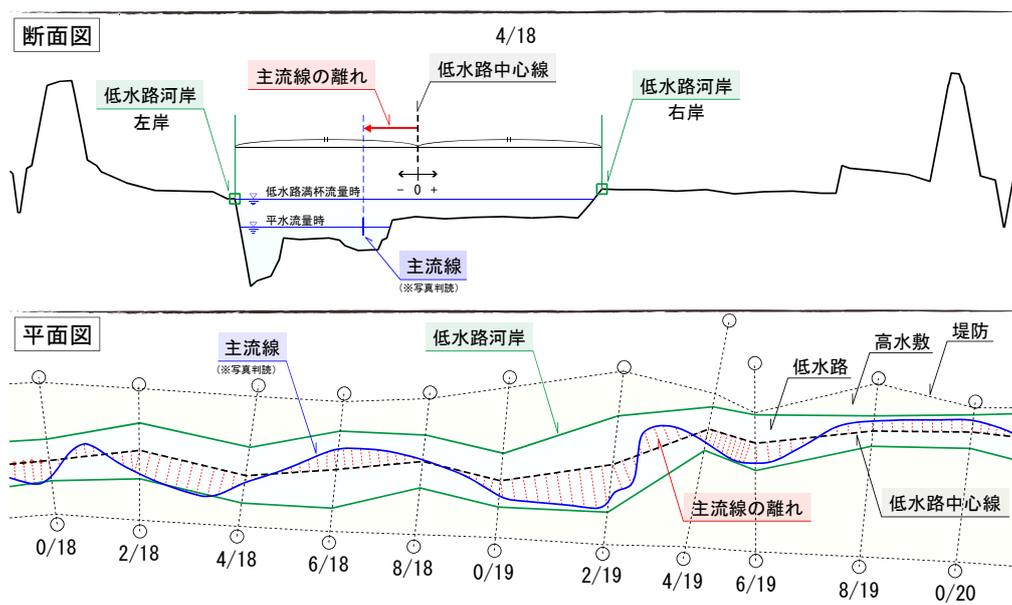
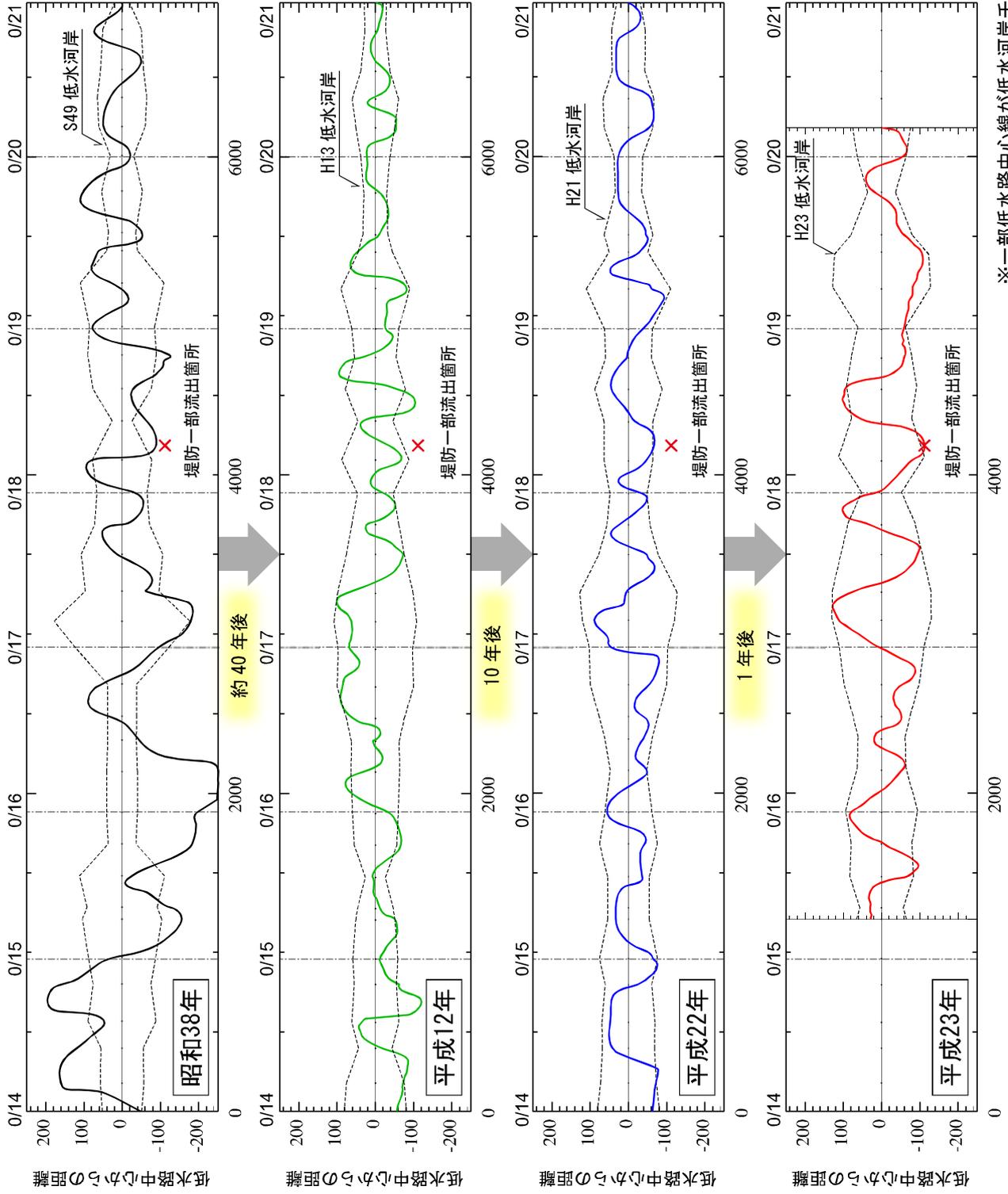


図 5-9 低水路中心線を基準とした整理手法



※一部低水路中心線が低水路岸干を越えているのは、編集方法の違いによる。

図 5-10 低水路中心線を基準とした低水路岸と蛇行流路線形

1) 低水路河岸と蛇行流路線形について考察 (図 5-10)

図 5-10 に示す平成 12 年から平成 22 年までの蛇行波形の変化を見ると、全体的に波長が伸び、波数が減少したことがわかる。このような波形の変化は、過去の洪水履歴と深く関わっているものと考えられ、実際この 10 年間では、昭和 42 年以降の出水の中で既往最大となる平成 15 年出水をはじめ、数度に亘る大規模な洪水を受けていた。波長の伸び(波数の減少)は、当該洪水でも確認された現象であることから、大規模洪水に共通した流路変化パターンの一つであると推察される。

平成 22 年の KP14.0~16.0 を見ると、蛇行頂部がコの字形に潰れたような変化を示している。これは護岸や高水敷などの外的要因により、蛇行振幅の自然発達を抑制された結果であると考えられる。図 5-7 の太破線で示す低水護岸は、この 10 年間に発生した河岸侵食箇所を対象に敷設されてきたもので、このような低水護岸等の人為的影響が、近年になって蛇行波形にも強く現れるようになってきている。

蛇行振幅の変化を見ると、この期間ではそれほど大きな変化は見受けられない。平成 15 年の洪水は、今回のピーク流量を大きく越える値を観測したにも関わらず、蛇行振幅にそれほど大きな変化が現れなかったことは、注目すべき点である。

以上のことから、当該出水前までは、音更川本来の蛇行特性(蛇行振幅)は護岸等によってかなり抑制された状態にあったと考えられる。また、そのような状態が維持されていたのは、一洪水で起きる蛇行振幅の増大が比較的小さく、侵食が進む過程で復旧(水衝部の保護)が行える時間的余裕があったためと推察される。

次に、低水路河岸の変遷を図 5-11 に、出水前後の蛇行波形を重ね合わせたものを図 5-12 に示す。

2) 低水路幅の変化と、出水前後の蛇行流路線形について考察 (図 5-11、図 5-12)

図 5-11 より低水路幅の変化を見ると、平成 13 年から平成 22 年までの 9 年間では、護岸の敷設や砂州の高水敷化などにより一部縮小した箇所も見られるが、全体的にはやや広がる傾向にあったように見受けられる。

出水前後の変化を図 5-12 と併せて見ると、蛇行振幅の増大が顕著に現れた箇所を中心に低水路幅が大きく拡大した様子が見てとれる。ただし、KP19.4 付近が拡幅しているのは、自然短絡によって新たな流路が形成されたことによるものである。また、河岸線の位置に全く変化が無い箇所は、護岸が敷設されているか、山付きとなっている場合が多い。

出水前後の蛇行波形の変化について図 5-12 を見ると、被災箇所周辺(KP17.0~19.0 区間)における蛇行振幅の増大が特に顕著で、出水前後で比較すると、約 2 倍程度にも増幅していたことがわかる(115m→215m)。一洪水でこれほど大きな蛇行発達を遂げるような場合、復旧の手が回る間もなく侵食が堤体に及ぶ可能性があり、堤防保護を含め防災上の観点からは看過できない問題である。

以上の考察結果をまとめると以下のとおりである。

【今回の出水前の状況（S38～H22）】

- ・本格的な河川整備が行われる前の流路は、現在の流路とは異なる位置を流れていた。
- ・平成 15 年に代表される洪水の影響により、蛇行波長と振幅は増大傾向にあった。
 - 蛇行波長の伸びは、洪水の際に生じる流路変化の一つの特徴と考えられる。

【今回の出水後の状況（H23）】

- ・蛇行波長と振幅の増大が複合的に進行し、被災箇所付近での振幅は 2 倍程度に増幅した。
 - 波長が伸びることで水衝部が変化し、想定外の箇所で振幅が増大する可能性がある。
- ・蛇行波長や振幅が変化する過程で、砂州・高水敷上の河畔林が約 20%流出又は埋没した。
- ・蛇行振幅の増大に伴って、主流路延長が 4.5%増加した（KP14.0～21.0）。

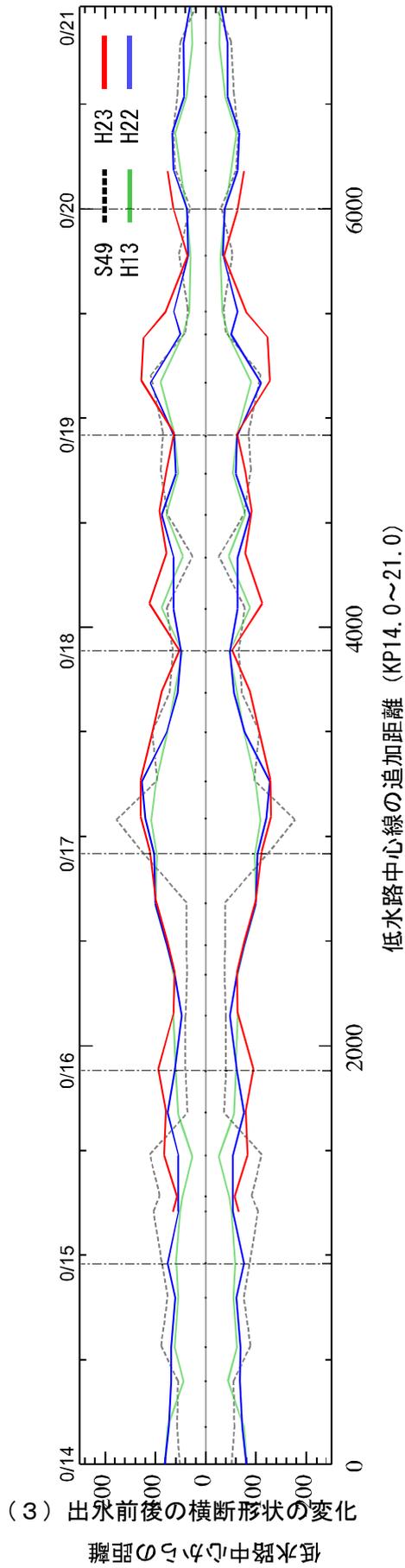


図 5-11 低水路幅の変化

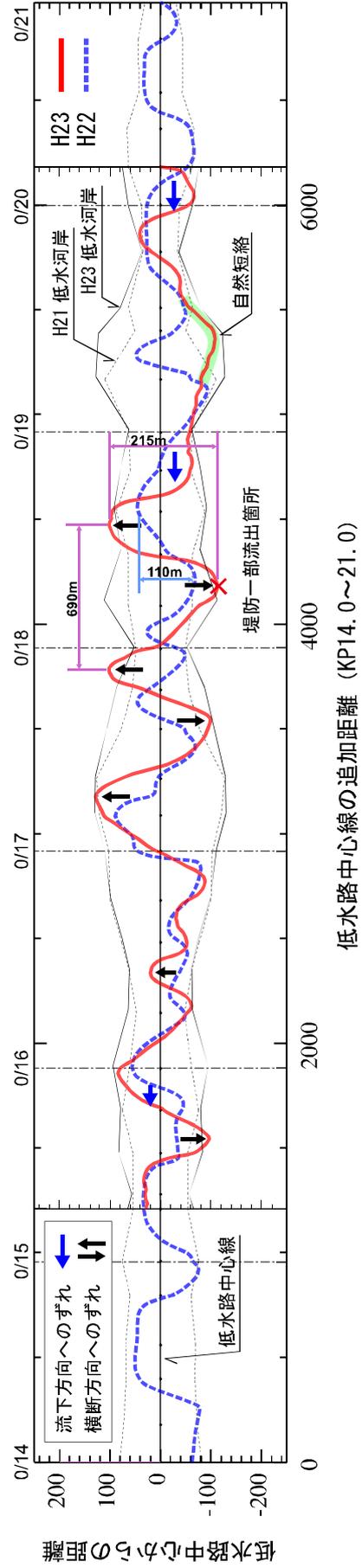


図 5-12 出水前後の蛇行流路線形の比較

H21年測量の横断面と、出水後のH23年9～11月に測量された横断面を用いて出水前後の横断面形状の変化について分析を行う。それら二つの重ね合わせ横断面を図5-7～図5-12に示す。なお、図には出水前の横断面形状を赤で、出水後の横断面形状を青で示している。

横断面からは、多くの断面で新たな場所に流路が形成されていることが確認できる。図5-6の平面図とあわせて横断面を見てみると、主流路が蛇行したことで河岸浸食が生じ、高水敷が大きく失われていることが確認できる（KP16.2(L), KP17.0(R), KP17.2(R), KP17.6(L), KP17.8(R), KP18.0(R), KP18.2(L), KP18.6(R), KP18.8(L)の各断面。）

これらのほとんどの断面では、出水前後で最深河床高をより深くするような局所洗掘は生じていない。これは、蛇行振幅が発達する過程では、側岸侵食によって削られた土砂は河床面（下流側）へと供給されるため、結果として、深さ方向の侵食が抑制され、横断方向への侵食が卓越するためであると考えられる。しかし、KP16.2(L)の断面では、出水後の断面の最深河床高が深くなっている。この地点では左岸側に低水護岸が設置されていたため横侵食が抑えられた結果、縦侵食が生じたものと考えられる。

また、出水後の主流路部以外の礫河原の部分は、土砂が堆積している箇所も多く見受けられる。

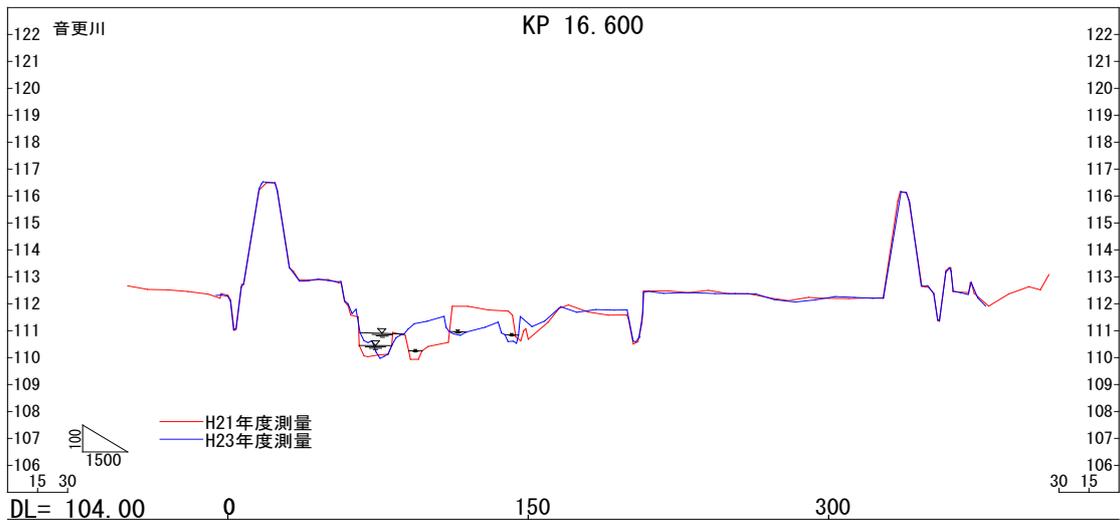
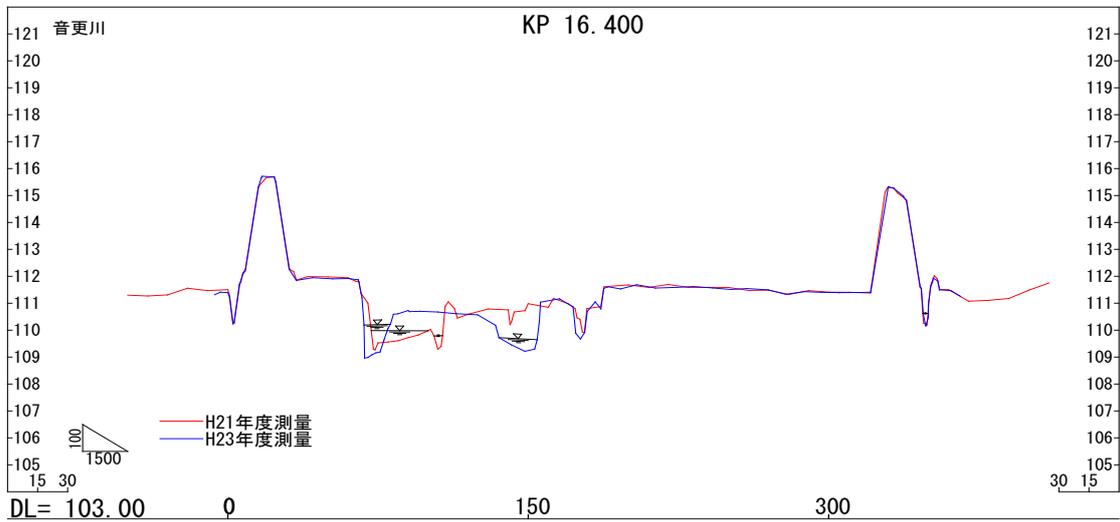
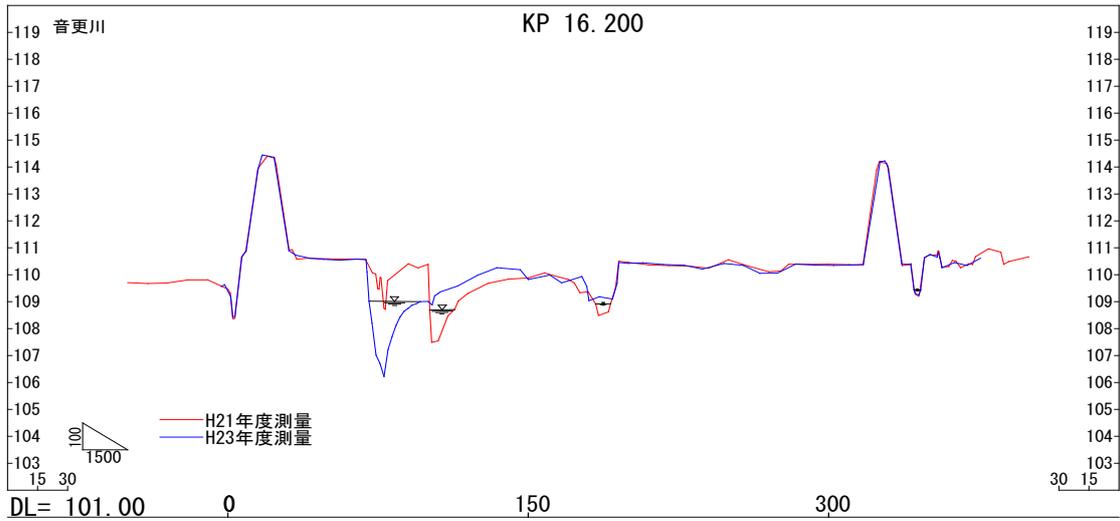


図 5-13 横断面図 (1) (出水前 (赤線) H21 年測量、出水後 (青線) H23 年測量)

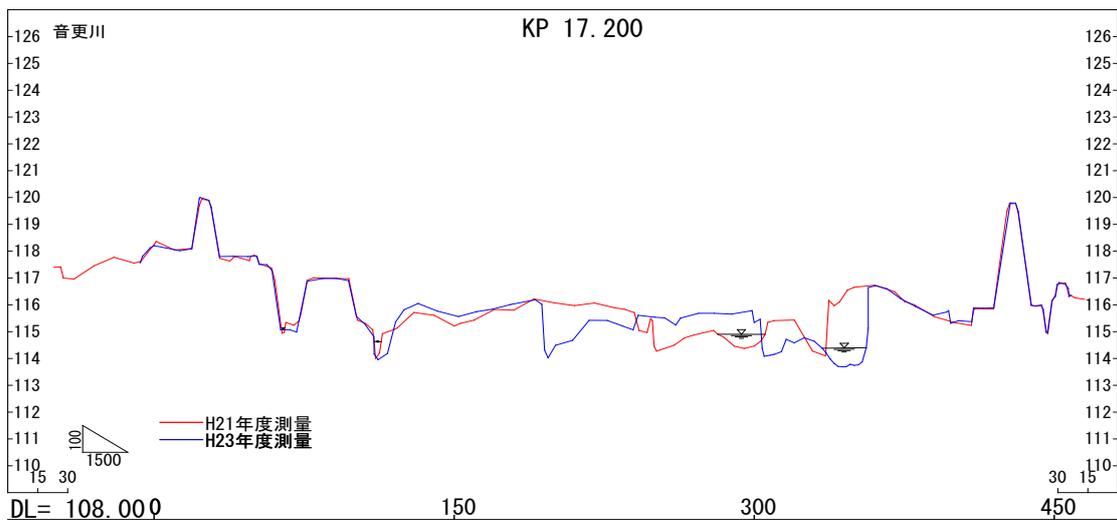
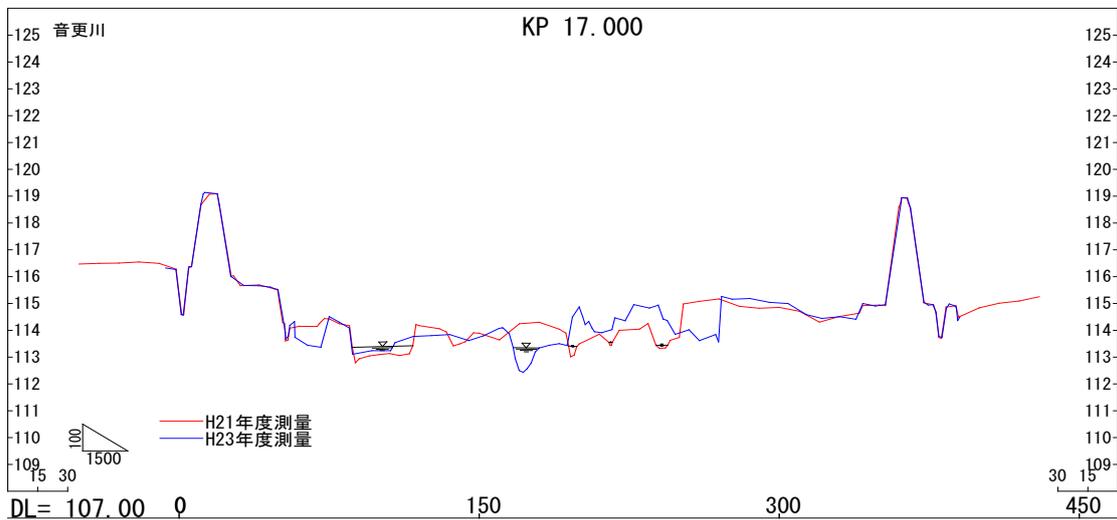
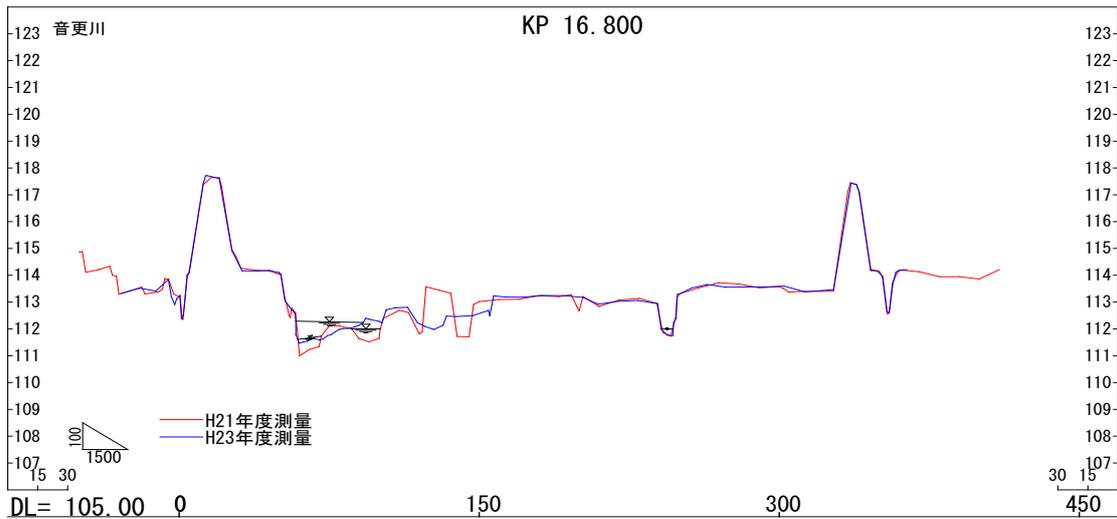


図 5-14 横断面図 (2) (出水前 (赤線) H21 年測量、出水後 (青線) H23 年測量)

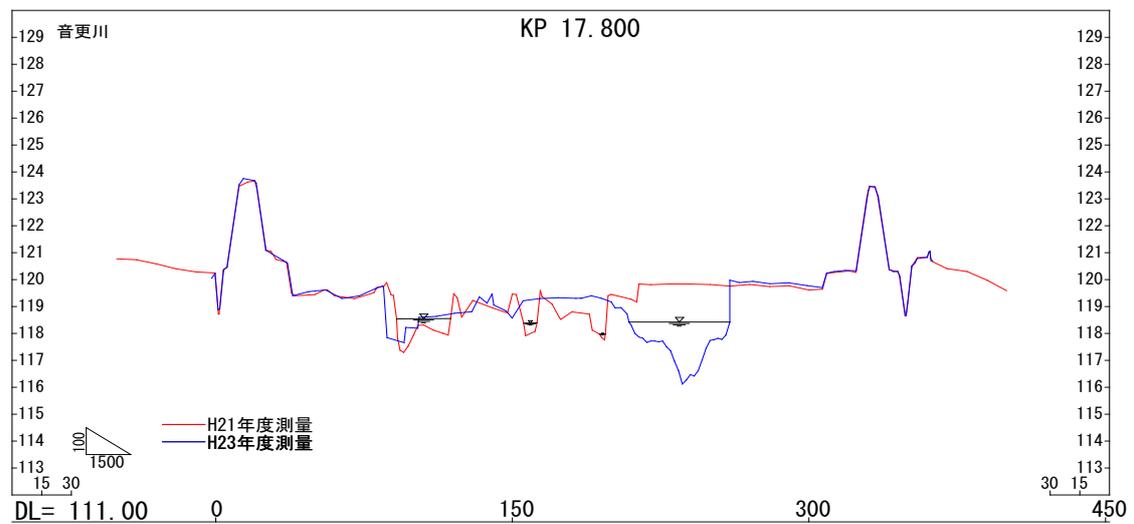
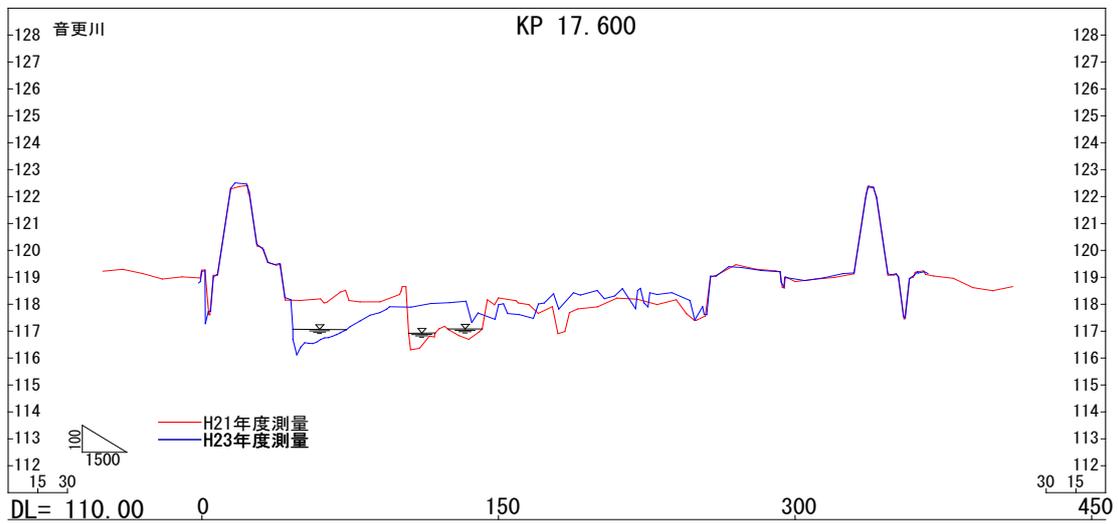
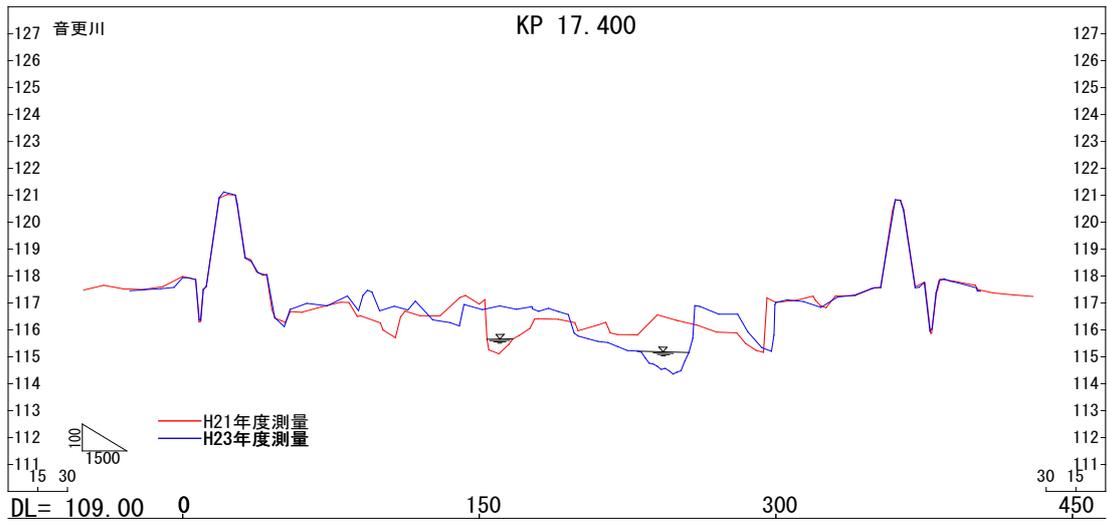


図 5-15 横断面図 (3) (出水前 (赤線) H21 年測量、出水後 (青線) H23 年測量)

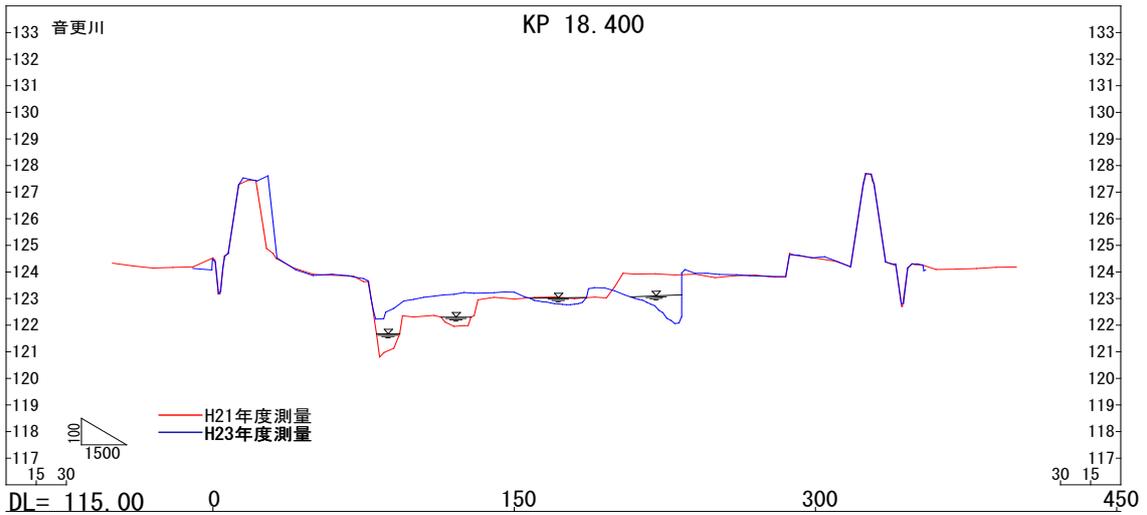
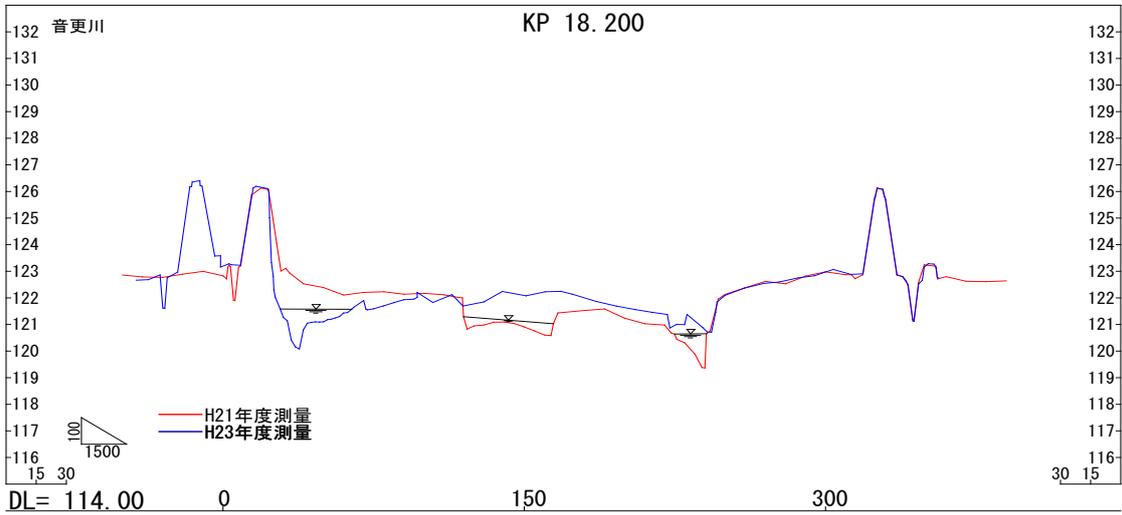
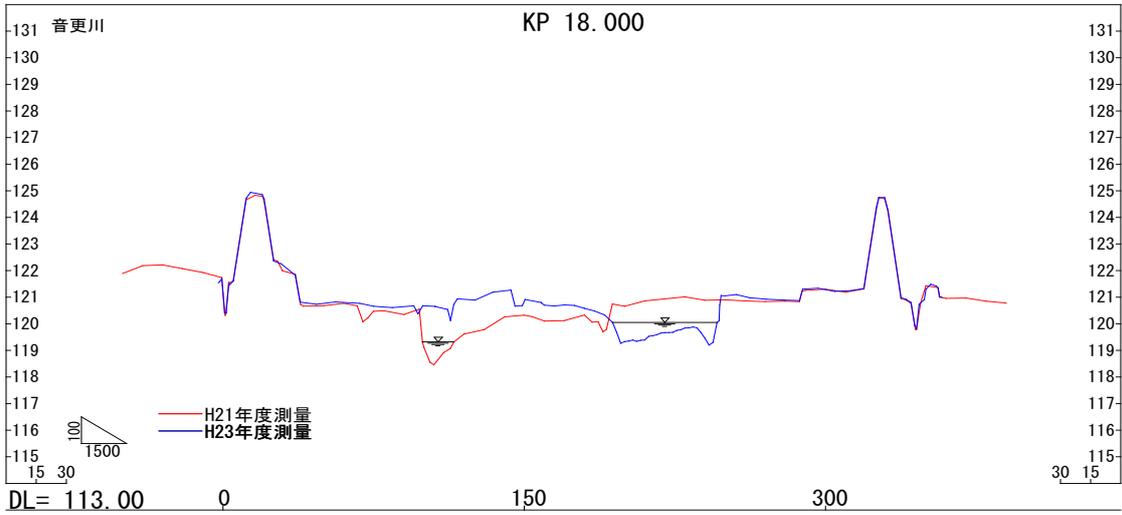


図 5-16 横断図 (4) (出水前 (赤線) H21 年測量、出水後 (青線) H23 年測量)

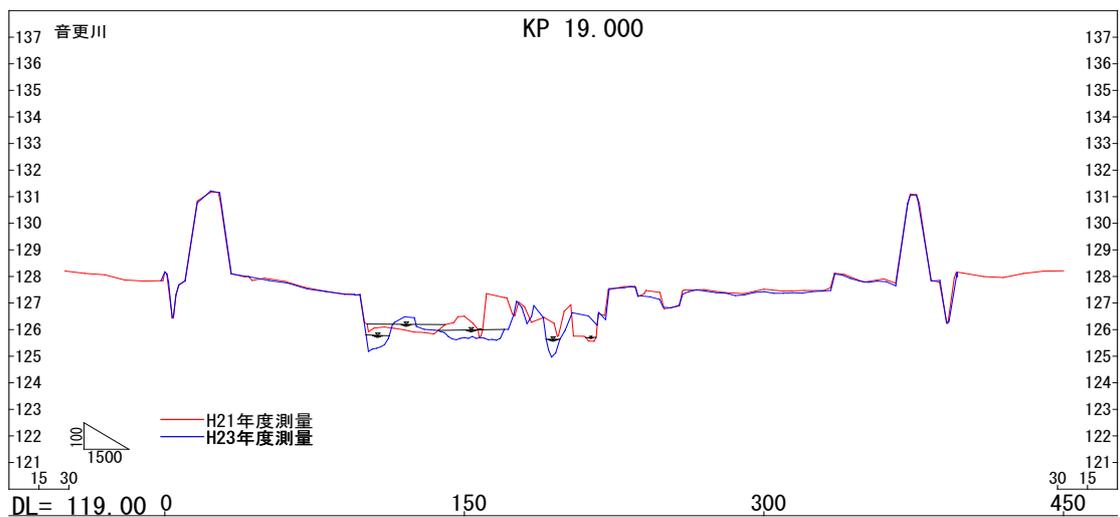
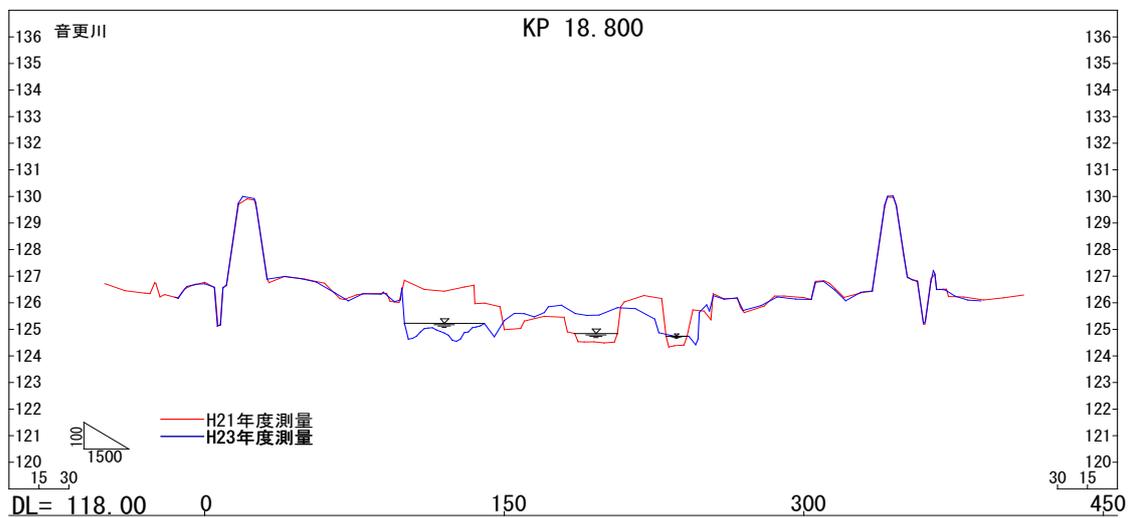
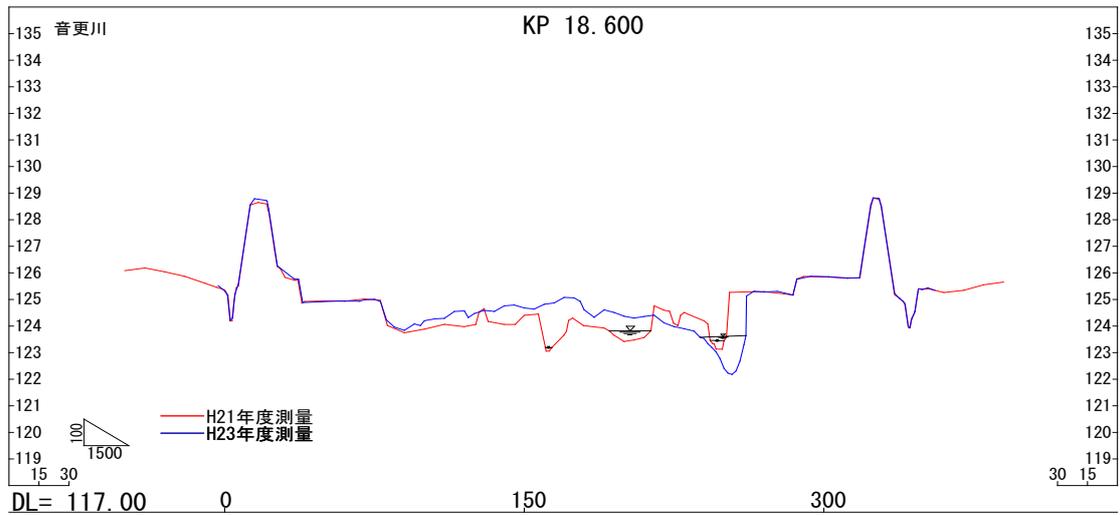


図5-17 横断面図(5) (出水前(赤線)H21年測量、出水後(青線)H23年測量)

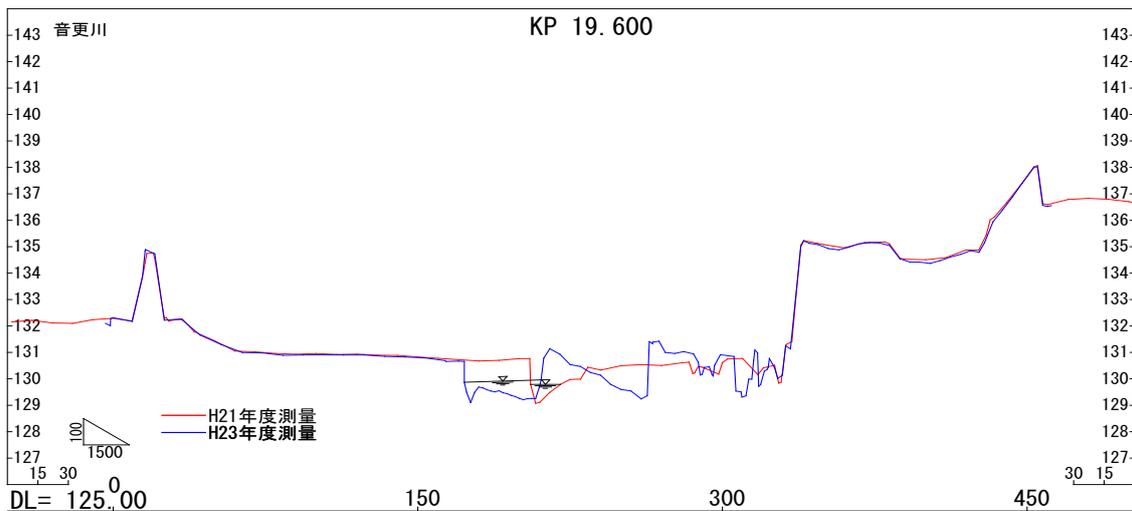
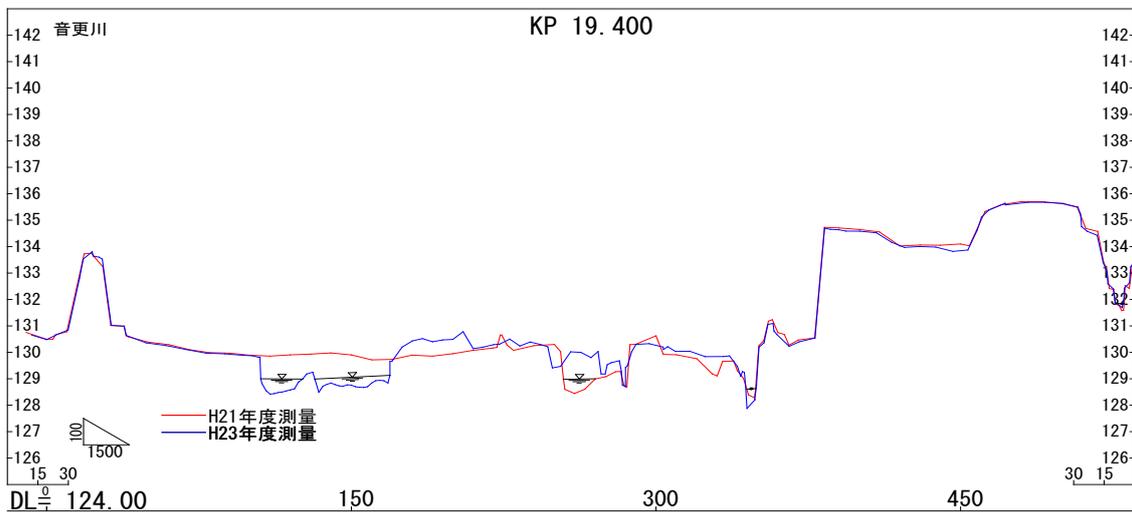
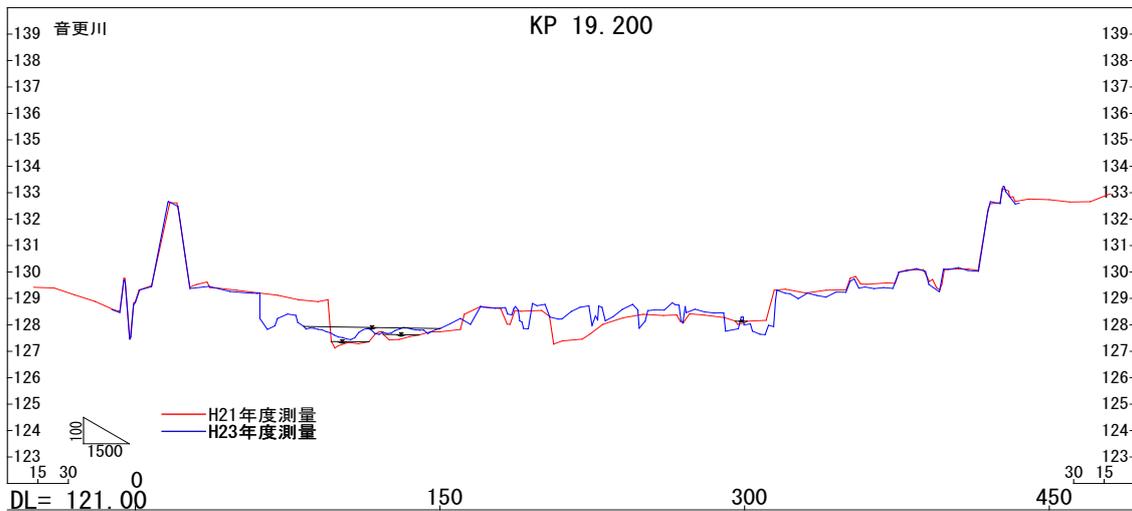


図 5-18 横断図 (6) (出水前 (赤線) H21 年測量、出水後 (青線) H23 年測量)

(3) 出水前後の縦断形状の変化

H21年測量の横断面と、出水後のH23年9～11月に測量された横断面の最深河床高および平均河床高から縦断図を作成し、出水前後の縦断形状の分析を行う。なお、平均河床高は、H23年出水時のピーク水位以下の河積をそのときの水面幅で除して算出した値を用いている。

図5-19の最深河床高縦断図、出水前後の最深河床高の変化量を表した図5-20を見ると、KP16.2、KP17.8で約1mの低下、KP18.0～18.4で約1m程度の上昇が見られる。

KP16.2の河床低下は、前述のとおり護岸による縦侵食の発生が原因と見られ、KP17.8の河床低下は、最も河床が深くなる蛇行流路の湾曲部が出水中のこの断面に現れたことによる。また、KP18.0～18.4の区間では出水後に最深河床高が上昇している。この区間では、主流路の滞筋の位置が出水前後で左右逆側に移動していて、出水前後で位置が異なる流路上での高さの比較となっており、出水を通して深掘れが進行したということではない。

図5-21の平均河床高縦断図を見ると、出水前後の最深河床高の変化量を表した図5-22を見ると、ほぼ全断面で河床高が低下しているが平均河床高の低下量の平均は約0.1m程度と小さい。

音更川上流に設置されている発電ダムによって、ダム上流で生産される土砂の河道への供給はほとんど途絶されているにも関わらず、今回の出水による河床低下が約0.1m程度にとどまった理由としては、前述のとおり発電ダム下流から合流する支川から一定量の土砂供給があること、高水敷の侵食によって土砂が河道内生産されたことによるものと考えられる。

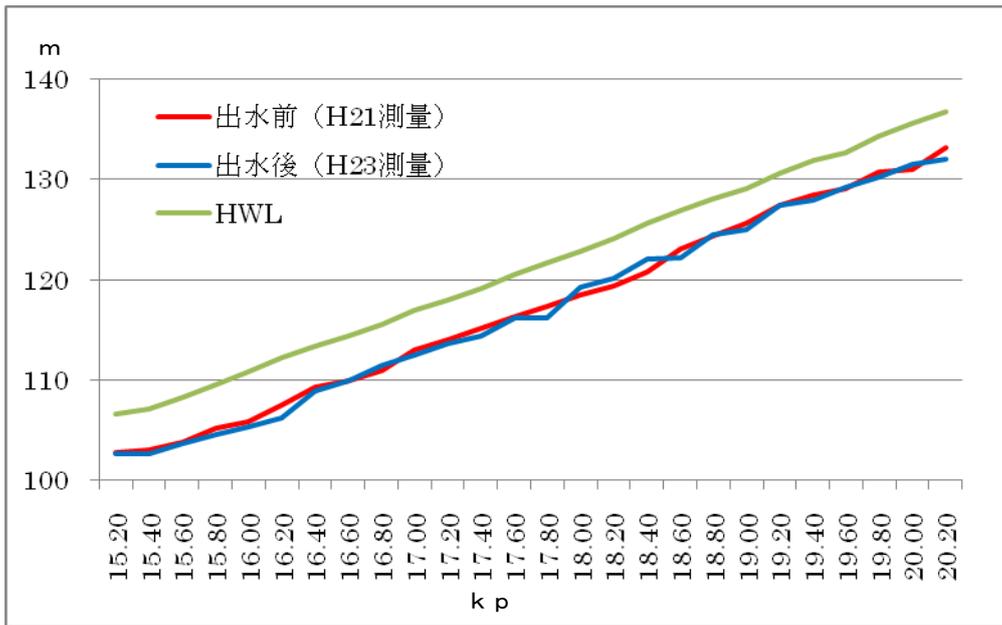


图 5-19 最深河床高縦断図 (H21 年測量値、H23 年測量値)

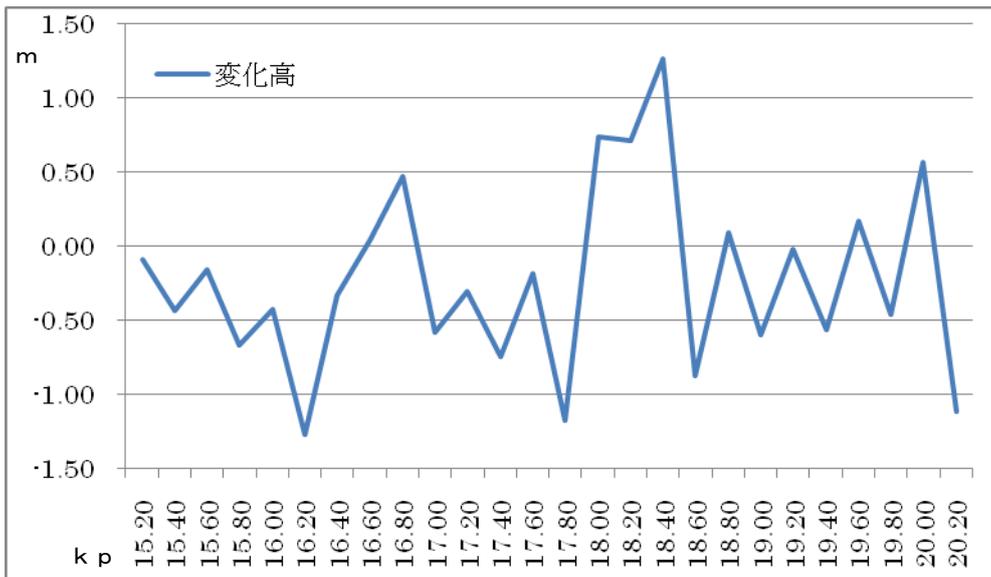


图 5-20 最深河床高変化量縦断図 (変化量=H23 河床高-H21 河床高)

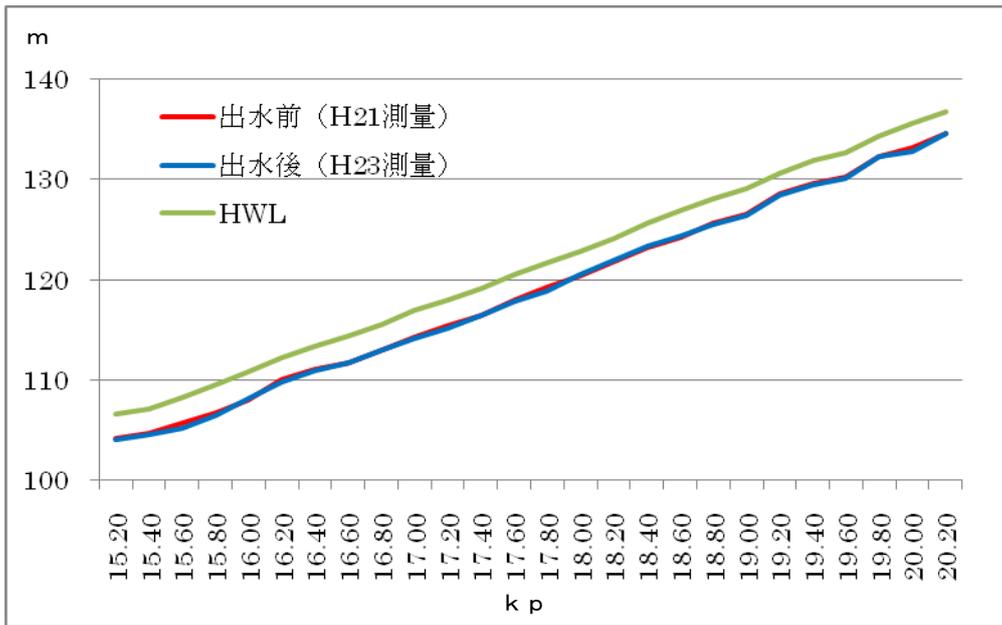


図 5-21 平均河床高縦断面図 (H21 年測量値、H23 年測量値)

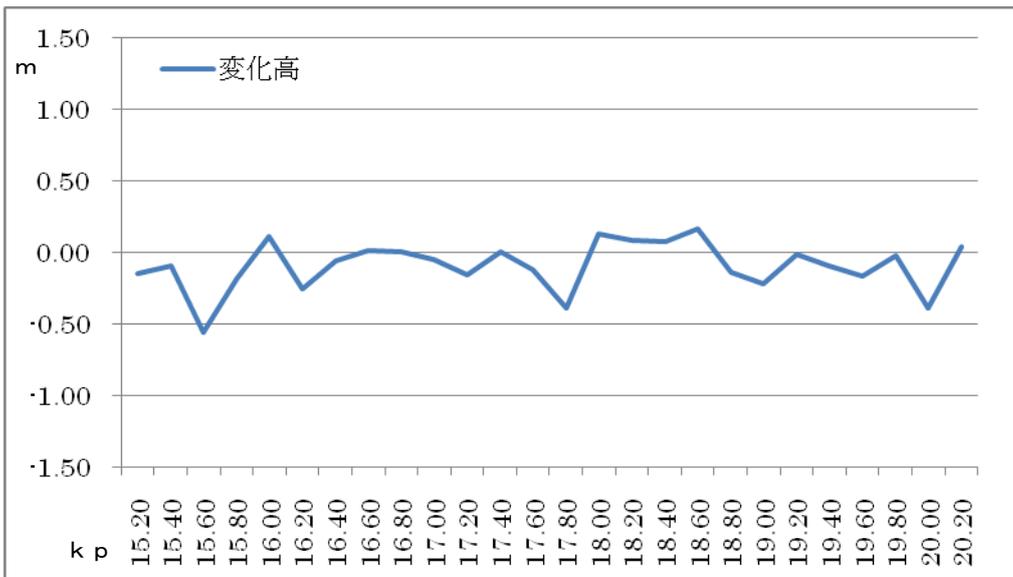


図 5-22 平均河床高変化量縦断面図 (変化量=H23 河床高-H21 河床高)

5-5 河道内の無次元掃流力の分布

今回の出水において流路が大きく変動した箇所が、どのような水理条件にあったのかを把握するため分析を行った。分析は、H19年に計測されたレーザープロファイラー（LP）による詳細地形データを用いて、今回の出水のピーク水位（洪水痕跡水位を使用）のときの無次元掃流力を算出し、その値を図5-23、図5-24のコンター図に表した。なお、LP測量が行われたH19年から3年経過しているが、H19年以降今回の出水まで目立った出水はなく、蛇行流路が下流側へ若干移動しているものの、出水前の地形を概ね表せていると判断した。

図中には、H22年8月とH23年9月16日に撮影された航空写真から主流路の河岸線をそれぞれ読み取り、洪水前（青）と洪水後（赤）の河岸の位置を示している。二つの線で囲まれた領域は出水による侵食・攪乱範囲を示している。図は堤防の一部流出箇所を挟みKP16.4からKP21.6の区間を対象としているが、この区間内で大きく流路が変動した箇所は、ID番号1から14までの14箇所である。

各領域の無次元掃流力の平均値を表5-1に示した。結果的に、各領域の無次元掃流力は総じて小さめであり、移動限界($\tau^*_{c} = 0.05$)に満たない領域は半数を超える8箇所であった。このことから考えると、今回の出水では水位がピーク時においても高水敷化した河岸では土砂が十分に動くような水理量には達しておらず、それらの領域で侵食・攪乱が生じたのは、大きな掃流力を持つ主流路沿いの河岸侵食が進行したことによると考えられる。

表5-1 各領域における無次元掃流力の平均値

| 領域ID | 無次元掃流力 |
|------|--------|
| 1 | 0.095 |
| 2 | 0.097 |
| 3 | 0.028 |
| 4 | 0.059 |
| 5 | 0.038 |
| 6 | 0.049 |
| 7 | 0.040 |
| 8 | 0.026 |
| 9 | 0.079 |
| 10 | 0.081 |
| 11 | 0.032 |
| 12 | 0.060 |
| 13 | 0.005 |
| 14 | 0.026 |

※表中の色は図5-23、図5-24の凡例にあわせた。

図 5-23

十勝川水系音更川 H23.9洪水無次元掃流力平面図

S = 1:20,000

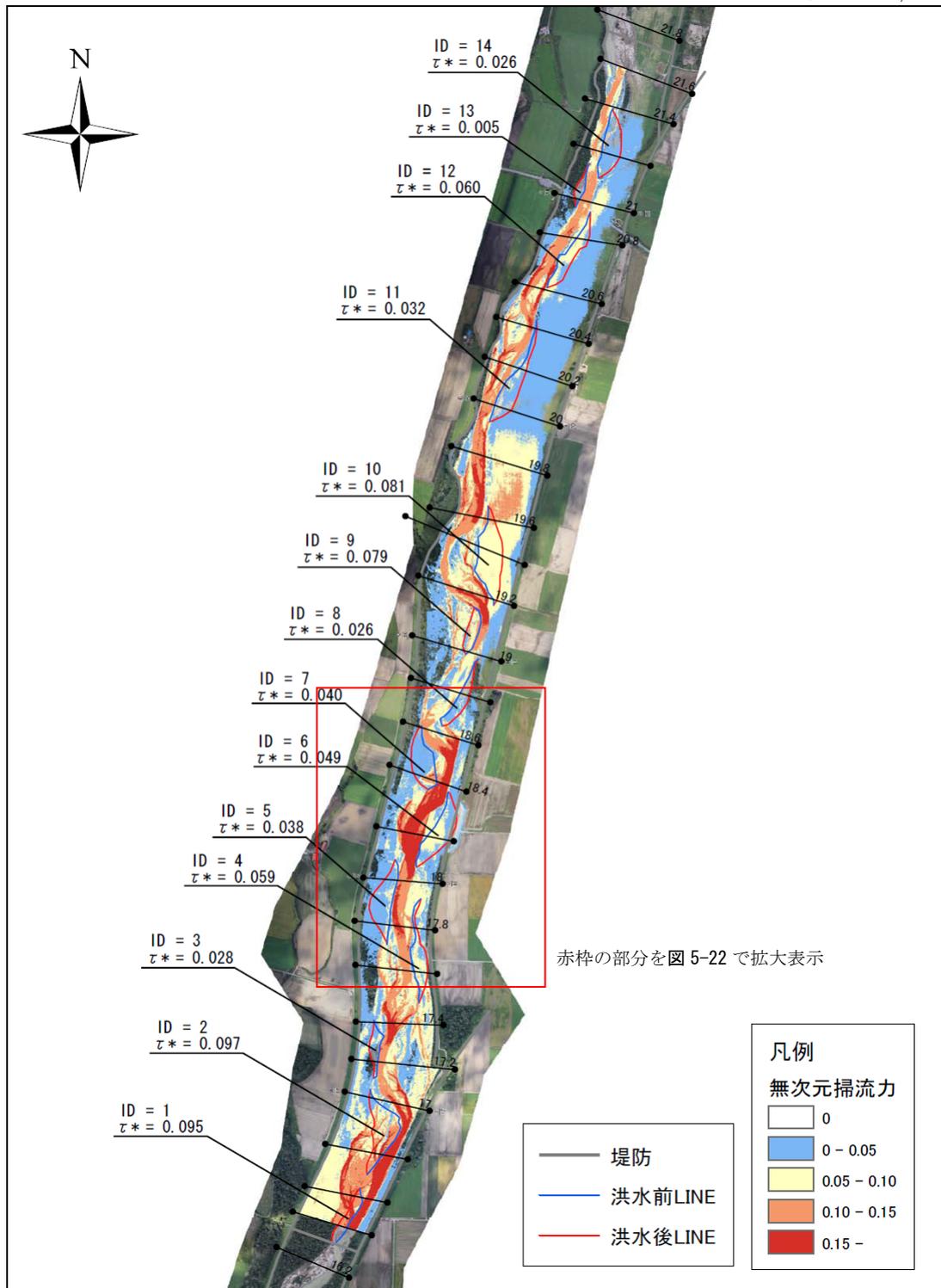


図 5-24

十勝川水系音更川 H23. 9洪水無次元掃流力平面図(2) $S = 1:5,000$

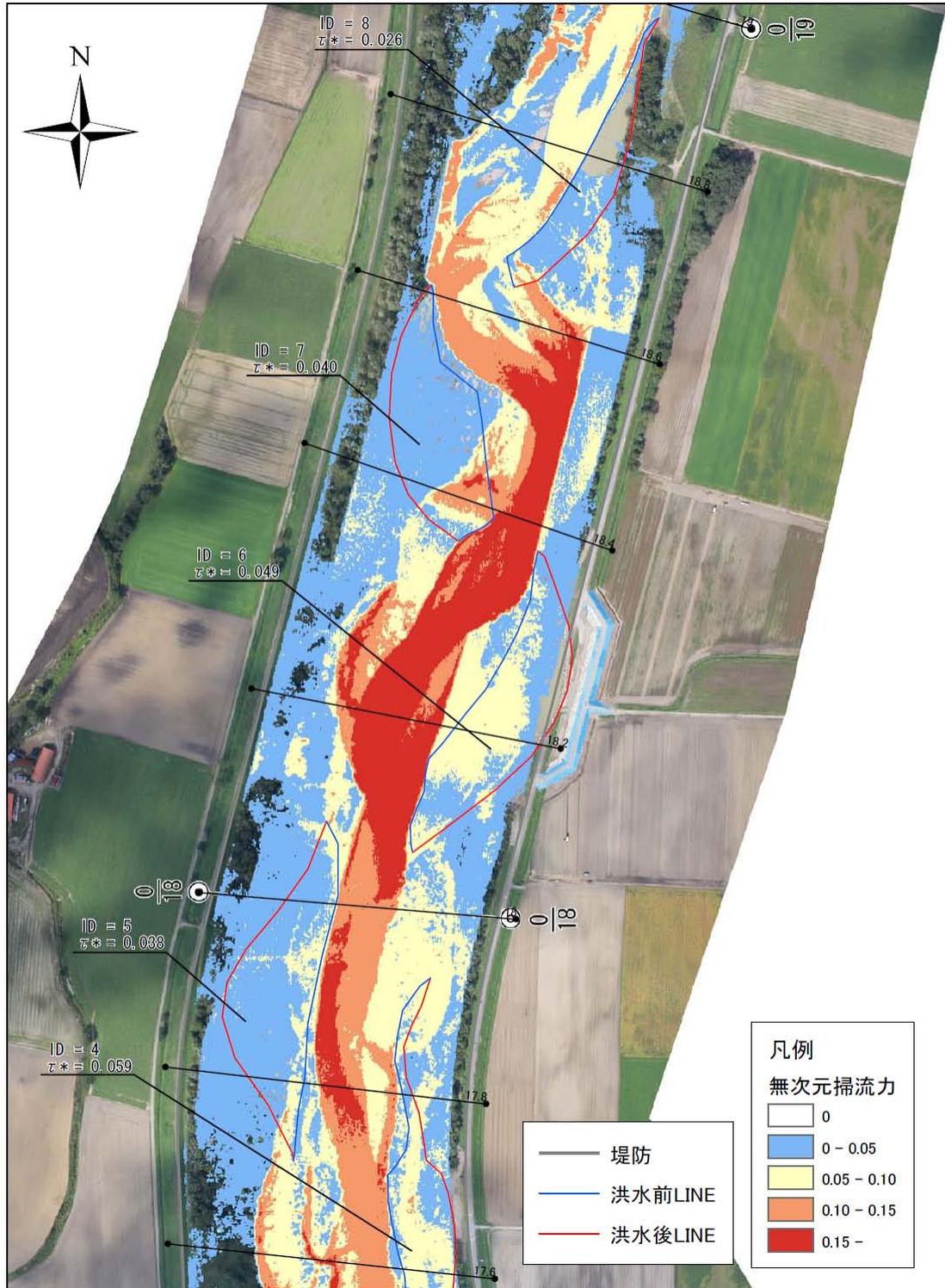




図 5-25 S56 出水時の状況 (S56 年 8 月 6 日 PM2:38 撮影、KP18~KP20)



図 5-26 H15 出水前の状況 (H12 年撮影、KP18~KP20)



図 5-27 H15 出水後の状況 (H17 年撮影、KP18~KP20)

5-6 河道内の流路変動の要因について

H23 年出水は、河道内の流路変動が非常に大きかったことが特徴である。音更観測所地点における昭和 42 年以降の年最大流量の最大値は H15 年出水の $725\text{m}^3/\text{s}$ 、第 2 位は S56 年出水の $687\text{m}^3/\text{s}$ 、そして H23 年出水は第 3 位の $548\text{m}^3/\text{s}$ である。しかし、H15 年出水の前後の H12 年と H17 年に撮影された垂直写真 (図 5-26, 図 5-27) から、その間の変化を見てみると出水時の流路変動はそれほど大きくなく、また、S56 年出水のほぼピーク水位時に撮影された図 5-25 を見ても大きな流路変動を生じさせるような河岸侵食の発生は認められない。

H23 年出水は既往最大であった H15 年出水よりピーク流量が小さいにも関わらず、より大きな流路変動が生じている。H23 年出水と既往最大の H15 年出水の二つの出水が発生した時点の状況を比較してみると、ダムや河道掘削・護岸等の整備状況、河道への土砂供給に影響を与える山地斜面の崩壊状況、などに違いはほとんどなく、大きく条件としては出水時の流況 (水位流量ハイドロ) があげられる。そのため、出水時の流況の違いが流路変動にどのような影響を与えているか考察を行った。

(1) H15 年出水と H23 年出水の水位・流量ハイドロ

音更川には、直轄区間上流端に位置する土幌地点と下流の音更市街地に位置する音更地点の二箇所直轄の水位観測所がある。今回の出水では、特に直轄区間の上流区間で大きな河岸侵食が生じていることから、分析にあたっては土幌地点の水位・流量が重要である。しかし、流路変動が激しい土幌水位観測所では、精度の良い流量データを得ることができないため、今回の分析では流出解析により求めた土幌地点の水位・流量ハイドロを用いることとした。

流出解析は、それぞれの出水の実績降雨量、実績のダム放流量を条件として与えており、得られた流量ハイドロは図 5-28 に示すとおりである。H15 年出水は H23 年出水に比べてシャープな形状をしている。H23 年出水はピーク流量はそれほど大きくないものの、総流出量は H15 年出水よりも大きい。また、土幌地点の現行の H-Q 式を用いて流量から水位に変換し、図 5-29 の水位ハイドロを得た。

图 5-28 土幌観測所 QT図

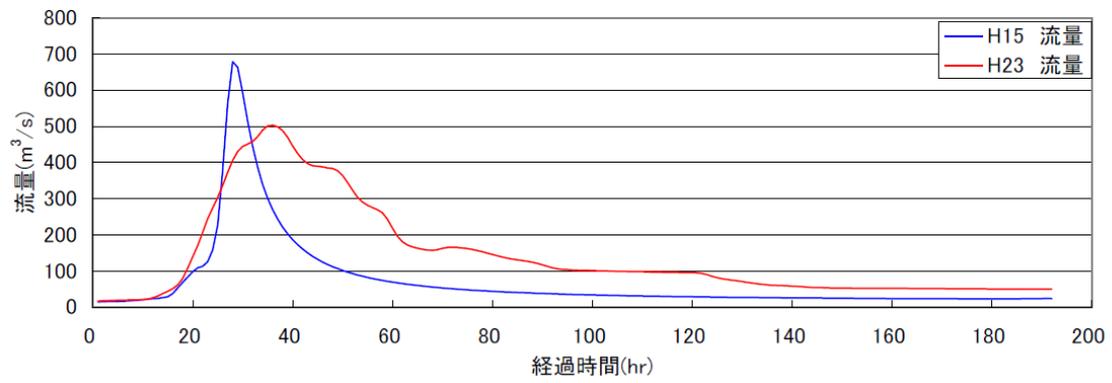
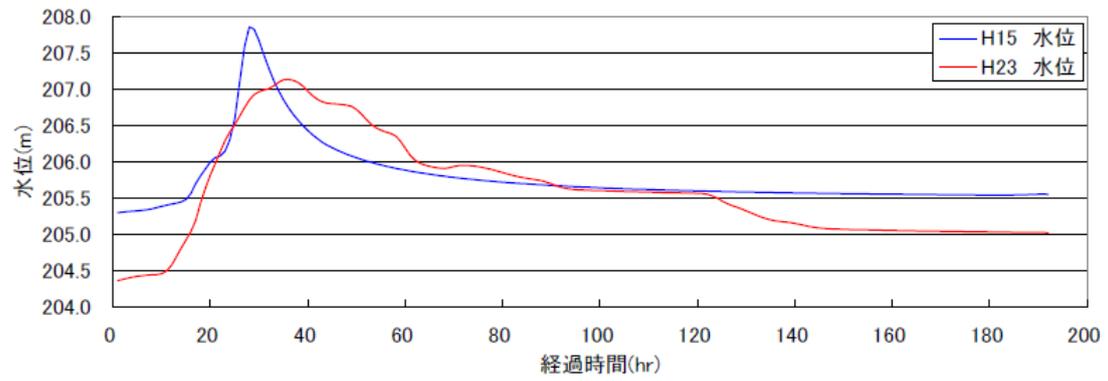


图 5-29 土幌観測所 HT図



(2) 河道内の移動土砂量

流路変動は、河道内の土砂が移動することで引き起こされる。蛇行流路の水衝部の侵食の進行や砂州形状の変化など、流路変動には様々な要因が考えられるが、最も大きな要因の一つは河道内の移動土砂量である。そのため、流出解析から得た水位ハイドロをもとに下記の計算条件により H15 年出水と H23 年出水の掃流砂量を求めた。

【計算条件】

- ・河床勾配・・・1/134 (H21 測量横断によるセグメント平均値)
- ・代表粒径・・・44.89mm (H21 河床材料によるセグメント平均値)
- ・限界掃流力・・・岩垣公式
- ・掃流砂量式・・・芦田・道上の式
- ・低水路幅・・・100m (H23 洪水前後の観測所横断より 100m と設定)

計算結果を図5-30、図5-31に示す。それらの図の無次元掃流力、掃流砂量の時系列図を見ると、無次元掃流力と掃流砂量のピーク値は H15 出水が大きく上回るが、一出水を通した掃流砂の総量では H15 出水に対して H23 出水が約 1.7 倍大きい。このことは、H23 出水が H15 出水よりもピーク流量が小さかったにも関わらず流路変動が大きかったということについて、大きな要因となっていると考えられる。

図 5-30 土幌観測所 無次元掃流力時系列

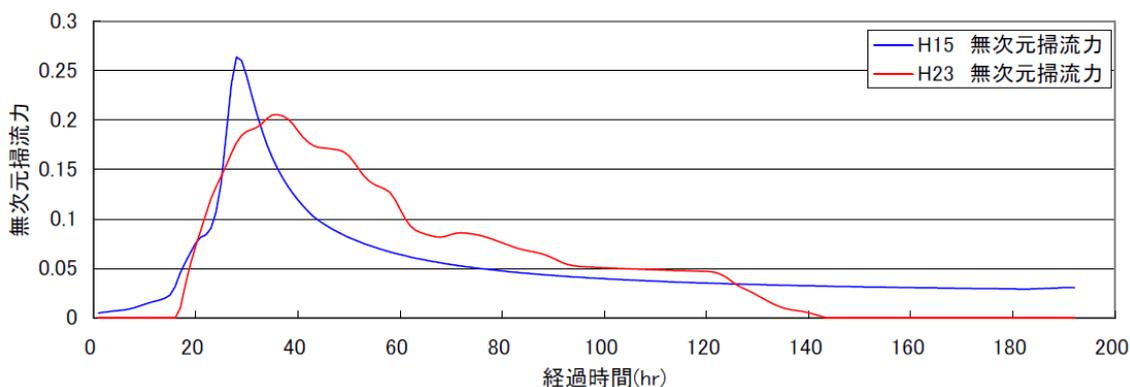
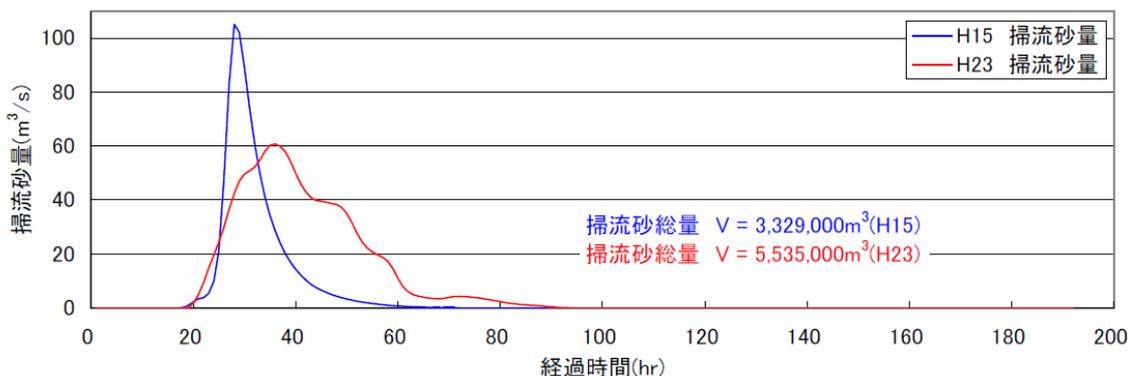


図 5-31 土幌観測所 掃流砂量時系列



6. まとめ

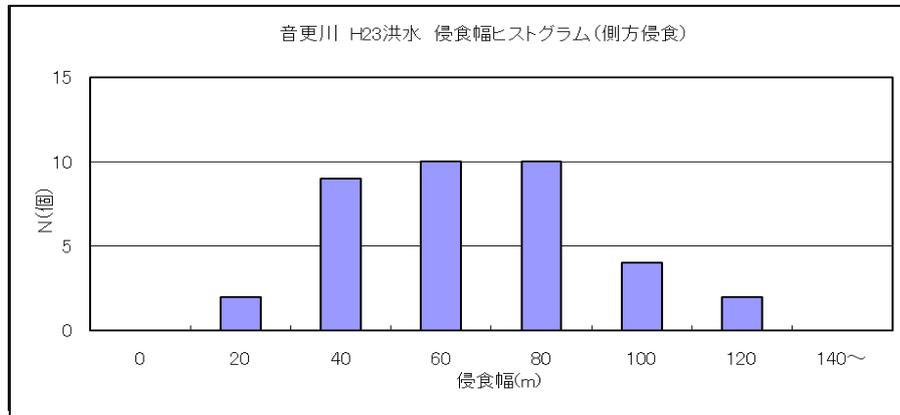


図 6-1 音更川（直轄管理区間） H23 洪水 浸食幅ヒストグラム（側方侵食）

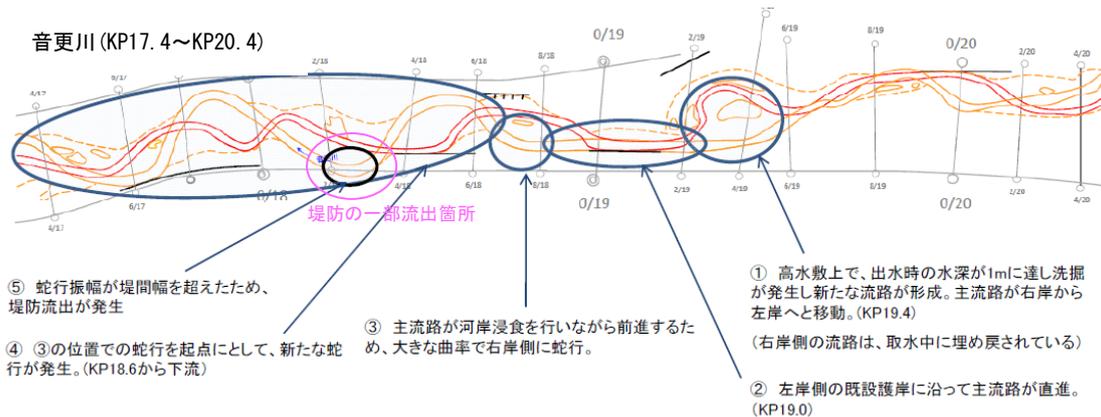


図 6-2 堤防の一部箇所付近の河道変動

今回の出水は長時間降雨が続き、全川にわたって大きな流路変動が発生した。音更川の河道や河岸は砂礫や砂など粘着性が無い材料で構成されており、水位が上昇して一定の流体力を越えると容易に河岸侵食がおこる。今回の出水のピーク水位は高水敷を若干超える程度であったが、主流路が蛇行する外湾部では激しい河岸侵食が起こり、蛇行振幅の増大を招いている。

図 6-1 に示すとおり、今回の出水では音更川の直轄管理区間において 20m 以上の河岸侵食だけでも 40 箇所以上も発生している。直轄管理区間全体に共通する条件を整理すると、次の 4 つの事項があげられる。

- ・当該区間は、急な河床勾配を持つ川幅の広い河道となっている。
- ・高水敷の河岸沿いに護岸は少なく、流路が堤々間を移動しやすい条件にある。
- ・低水路および高水敷は主に砂礫で構成されており、容易に流水による侵食を受ける。
- ・長時間の洪水流出によって大量の土砂が流送される。

このように、今回の出水では急流河川において流路変動を生じさせる基本的な条件を満たしていた。これらの条件は堤防の一部流出が生じた前後区間のみならず、音更川の上中流区間全体にあてはまる状況であり、実際に図 6-1 に示す侵食幅のヒストグラムのとおり上中流部の至る所で河岸侵食が発生している。堤防の一部流出区間を含め広範囲で河岸侵食が発生したのは、これらの要因が揃ったことにより、蛇行外湾部の河岸侵食が堤防に達し、その結果、支持力を失った堤体が自然崩落することで堤防の一部流出が進行したものと考えられる。

また、堤防が一部流出した KP18.2 地点では、その上流の高水敷上の洗掘によって新たな流路が生じており、この現象が KP18.2 周辺の流路蛇行の波長や振幅の増幅に影響を与えている可能性もある。

今回の堤防の一部流出に至る被害を踏まえ、今後新たな河道防護ラインの設定を含む、河岸侵食対策を検討し実施していく必要がある。また、このような急流河川の管理においては、出水時の河川水位だけではなく、河岸侵食量に影響を与える洪水継続時間などにも留意した、河川監視を行っていく必要がある。