

MMS 計測を活用した堤防管理について ～堤防排水集中区間の抽出～

筑後川河川事務所 調査課 ◎工藤 勝次
防災情報課 ○藤川 保則

1. はじめに

筑後川は、流域面積 2,860km²、幹川流路延長 143km で九州最大の一級河川である。筑後川の堤防は、長い年月をかけて築造され、古いものでは 50 年以上経過しているものもある。また、下流域の堤防は感潮区間となっていることから、粘性土を含んだ複雑な土質構造となっている。また、近年の降雨により平成 20 年 6 月の久留米市安武地区をはじめ、平成 27 年 8 月（台風 15 号の影響）には久留米市大善寺地区など、堤防が崩壊する被災が発生したことから、台風 15 号による筑後川左岸 18K310～18k360 区間（大善寺地区）の川表法面崩壊（2 箇所）の被災要因及びその調査方法・結果についてまとめた。特に今回の事象を踏まえ雨水集中区間の監視が重要であるといった視点により MMS 調査を活用した法面崩壊等が予想される箇所の抽出方法の検討を実施したので、その検討方法とその結果を報告する。



図 1-1 筑後川流域図

2. 被災の概要

2. 1, 台風 15 号の概要

台風 15 号は、25 日 6 時過ぎに熊本県荒尾市付近に上陸し、その後、九州北部を縦断した。雲仙岳では 60 分間に 134.5mm（アメダス観測値）と短時間に強雨が記録されている。

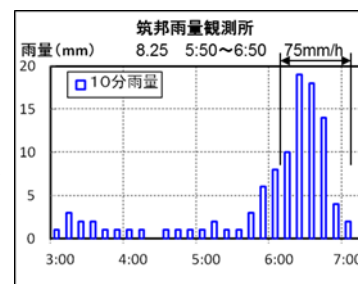


図 2-1 降雨の状況

大善寺地区近傍の筑邦雨量観測所における総雨量は約 140mm であったが、25 日 5:50～6:50 の 60 分間に 75mm を記録している。一方、瀬の下水位観測所の水位は、25 日 14 時に最高水位 3.69m を記録したが、平常時よりも 40cm 程度高い水位であった。

2. 2. 被災の概要

大善寺地区で発生した法面崩壊の延長は、上流部が約 11m（天端道路亀裂を含むと 15.2m）、下流部が約 10m であった。崩壊が生じた下面には多量の水がたまっていた。

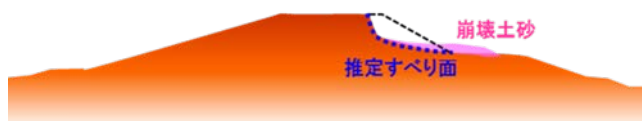


图 2-2 被災断面



図 2-3 被災状況

3, 被災箇所の調査

被災直後はテックドクター（当日）、国総研・土研（2日後）による現地調査が実施され、助言により被災直後の試料採取やコーン貫入試験等を実施した。被災要因検討にあたっては、被災箇所を中心に約 800m 区間において、堤防天端の面的な形状を把握するため、モービル・マッピング・システム（以下、「MMS」）調査を実施した。



図 3-1 テックドクター現地調査

また、法面表層の緩みや堤体内に砂層の介在など、複数の崩壊素因を想定して調査項目を設定し、被災箇所の上下流を含めた 6 断面（被災箇所 2 断面、上下流 4 断面）で地質調査を実施した。

表 3-1 地質調査の内容

調査の主たる目的	調査項目
法面表層の緩み域の把握	- コーン貫入試験 (CP-) - IR I - 三成分コーン貫入試験 (RC-) - マリ奥特サイフォン試験 (M-) - 高密度電気探査試験
堤防の土層構造の把握	- ボーリング調査及び現地土質試験 (B-) - 室内土質試験 - 透水層の現場透水試験 - スウェーデン式サウンディング (SW-) - R I - 三成分コーン貫入試験 (RC-)

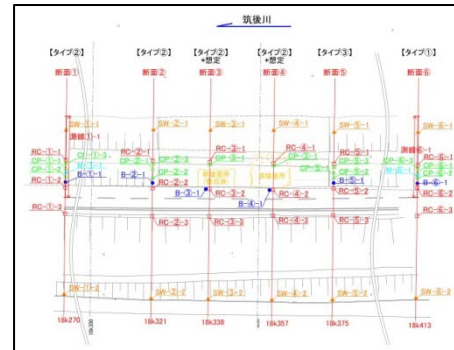


図 3-2 調査位置平面図

3. 1, 堤防の形状

MMS 調査による天端標高図では、暖色（赤、黄、緑）から寒色（青）の順で標高が低くなることを示している。被災箇所付近の堤防の標高は、上下流が高く、それに挟まれた低い区間となっている。断面④の横断形状は、川裏側の道路が低く、高い川表法肩と川裏側歩車道境界ブロックに挟まれた凹地状の地形になっていたことがうかがえる。

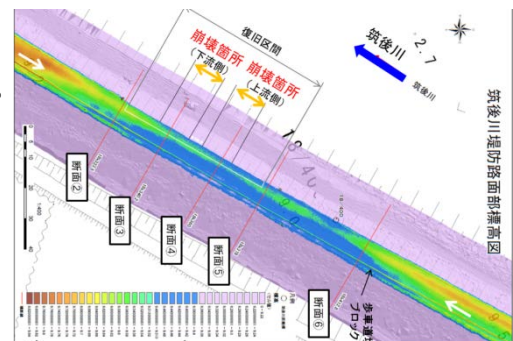


図 3-3 MMS 調査による天端標高図

3. 2, 堤防の土質

調査の結果、堤防の土質構造は次のとおりである。

〈堤体〉

- ・昭和 30 年以前に築堤された粘性土による旧堤（Bc1 層、Bsc1 層、Bcs1 層）に対して、細粒分のやや卓越したシルト層（Bc2）で 1.5m~2m 程度嵩上げされたのが元々の堤防と考えられる。

- ・昭和 44 年頃に概ね定規断面（Bsc3）となり、平成 20 年頃に天端の拡幅（Bk4）が行われている。

〈基礎地盤〉

- ・堤体の直下には、2~3m 程度の厚さで沖積粘性土層（Ac1 層、Ac2 層）が堆積しており、そこに積砂質土層（As1 層）がレンズ状に差し込む構造となっている。

- ・崩壊した土層に該当する Bc2 層は、粒度分析の結果、砂分を 10~30% 含むことが確認された。

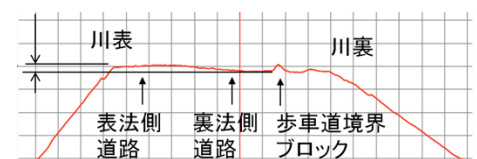


図 3-4 MMS 調査横断図（断面④）

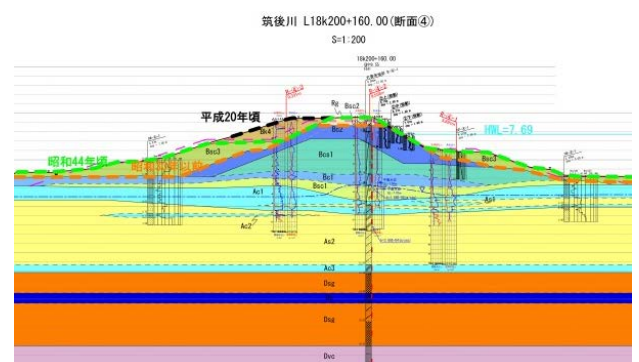


図 3-5 堤防土質構造（断面④）

全断面の法肩部で行った RI-三成分コーン貫入試験等の結果、概ね GL-1.50m の深度まで相対的に緩み領域が確認された。被災断面と無被災断面を比較しても、大差無くほぼ同様の状況あることが分かった。

堤体を構成する土層（Bsc1、Bc1、Bcs1、Bc2、Bsc3）と基礎地盤の表層（As2）について、現場透水試験と、室内透水試験を実施しており、特に崩壊を生じた Bc2 と Bsc3 に対しては、砂分が多いことからマリオットサイフォンによる透水試験を実施した。その結果、堤体については、低い透水係数で浸透しにくい土質で構成されている一方で、崩壊した土層に該当する表層付近の Bc2 層は土質から想定される透水係数よりも高い透水性をもつことが分かった。

3. 3，排水状況

川裏側の歩車道境界ブロックには半円状の排水孔が 8m 間隔で設けられているが、これらの排水孔には土砂の堆積等により閉塞したものが確認された。また、前述したとおり被災箇所付近の天端は、上下流の堤防に比べ低く、川裏側が凹地状となっており、短時間の豪雨時には排水不良によって天端に水たまりができやすく、溜まった雨水が天端中央を超えて、川表側に排水される状況があった。



図 3-7 水たまりと排水孔目詰まりの状況

4. 被災メカニズムの検討

被災要因の推定にあたっては、解析を主体として行うこととした。解析は降雨を外力として与え、飽和一不飽和浸透流解析により、最も高い堤体内浸潤線時の円弧滑りによる安定解析により行った。降雨外力については被災時の実績降雨に加えて、天端の上下流から集中してきた雨水を天端排水として付加する必要がある。

4. 1，外力の設定

被災箇所周辺の MMS 調査結果を用いて、堤防天端高について整理する。川表法肩は仮復旧後の標高を捉えているため、被災前の写真を確認すると流水痕がみられ、図 4-1 の赤破線のように約 50m の区間が低かったと推定される。

集水区間に降った雨は最も低い区間（以下、排水区間）に集中することから、集水区間に振った降雨量を用いて崩壊区間に排水されたと考えられる降雨強度を算定した。

「集水区間の雨量①」と「排水区間の表法面の雨②」は、「排水区間の天端と法面の排水量③」に等しいため式 1 となり、降雨強度 r' は被災時降雨強度 r の 2.5 倍に相当したと推定される。

被災箇所の天端排水集中を考慮した解析においては、降雨を 2.5 倍（時間 75mm→187.5mm）

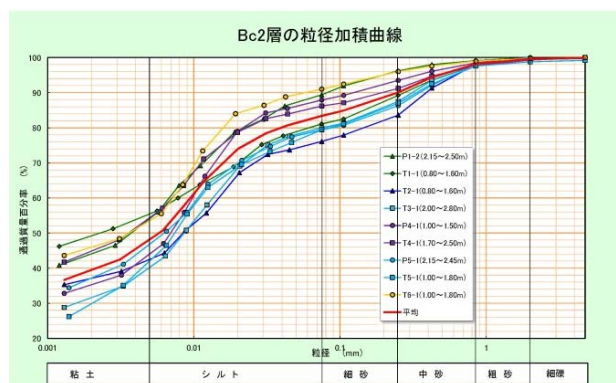


図 3-6 粒度分析結果

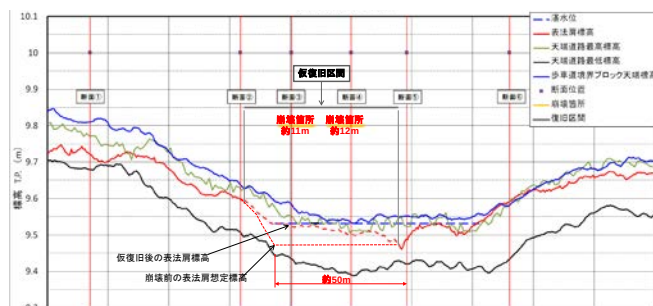


図 4-1 天端排水の集中状況の推定

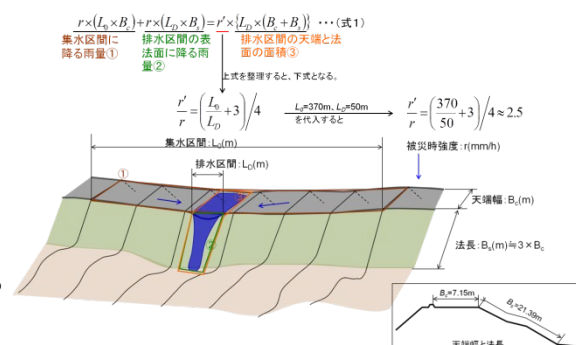


図 4-1 天端排水の集中状況の推定

に引き延ばして与えることとし、水位外力は平常時より 40cm 程度高い水位だったため、平水位相当を定常状態で与えるものとした。

4. 2, 解析結果

天端排水がすべりに与えた影響について把握するために、被災時降雨を被災した断面④と被災しなかった下流の断面①、上流の断面⑥に与えた場合と、

被災した断面④に 4.1 で設定した、被災時降雨外力に天端排水集中を考慮した外力を与えた場合の安定解析を実施した。その結果、

- ・被災時降雨の条件では、3 断面とも崩壊の目安となる $F_s=1.0$ を上回る結果となった。
- ・一方、天端排水の集中を考慮して断面④について解析を行った結果、 $F_s=0.96$ となり、 $F_s=1.0$ を下回る結果となった。

4. 3, 被災メカニズムの推定

分析結果を踏まえると、被災メカニズムは以下の通りと考えられた。

- ・堤防天端の延長 370m 区間に降った降雨が、樋状となった天端を通じて、縦断的に低い区間に集中した。
- ・天端道路の川裏側に設置されていた歩車道境界ブロックブロックの排水孔も目詰まりしていたことから、集中した雨水川表側に流出した。
- ・崩壊区間では雨水に天端排水が加わり、降雨量の約 2.5 倍の雨水が法面を流下していた。
- ・細粒分の含有率から法面表層の土層 Bc2 は完全な粘土ではなく透水係数も 10^{-3}cm/s オーダーと高いことから、法面には雨水が浸透しやすく、浸透時の強度が低下しやすい土層であった。
- ・解析の結果、天端排水集中を考慮した場合、 $F_s=1.0$ を下回ることが確認された。

したがって、降雨に加えて天端排水が堤防表法面に浸透し、法面表層の間隙水圧が上昇した結果土質強度が低下し、法面の崩壊に至ったと考えられた。

5, 筑後川における雨水集中箇所の抽出

5. 1, MMS 調査の概要

今回の法面崩壊は、天端排水が集中して法面に浸透したことが原因である。筑後川の間において、天端排水が集中している箇所を把握することを目的として、本川の築堤区間（高潮区間除く）の両岸約 94km で MMS 調査を行った。

調査結果については、縦断的な集水地形を把握するため概ね 0.5m ピッチで天端中央、川表・川裏法肩の天端縦断図と、面的な集水地形（片勾配・凹地地形）を把握するため、堤防天端の標高コンター図を作成した。

5. 2, 排水集中区間の堤防の形状的な特徴

MMS 調査結果に基づき、排水集中区間を抽出する際の目安を把握するため、(i)集水延長、

(ii)上下流標高差、(iii)上下流縦断勾配に着目し、以下の検討を行った。

5. 2. 1, 現地調査による排水集中区間の把握

排水集中区間の条件を「集水延長が概ね 100m 程度以上、かつ同区間の高低差が 0.1m 以上の区間」「定期横断図より、天端の凹みや歩車道境界ブロック等が確認できる区間」と仮定し、

表 4-1 解析結果

降雨外力	断面①	断面④	断面⑥
	(下流側) 安全率	(被災断面) 安全率	(上流側) 安全率
被災時降雨	1.39	1.38	1.42
被災時降雨+天端排水集中	—	0.96	—

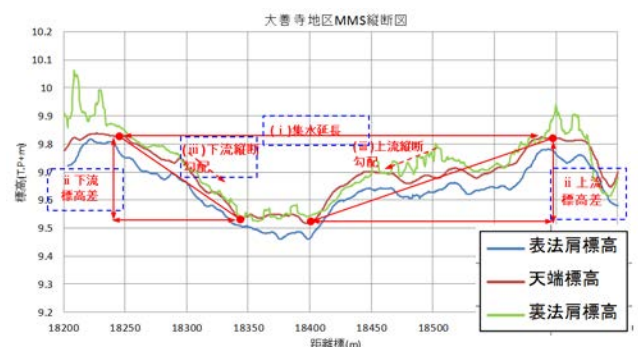


図 5-1 形状的な特徴（着目点）

この条件により抽出された 50 区間について、法面のガリ侵食・流水痕跡の有無を確認するため現地調査を行った。その結果、24 区間で流水痕跡等が確認され、特徴としては下記のとおりであった。

○集水延長 80m 以上 ○上下流標高差 0.2m 以上

○上下流縦断勾配 0.3% 以上

また、橋梁等の取付部が約半数を占め、片勾配区間（曲線部）でも流水痕跡等が確認されたため、このような箇所については、注視する必要があることが分かってきた。



図 5-2 ガリ侵食・流水痕跡の事例

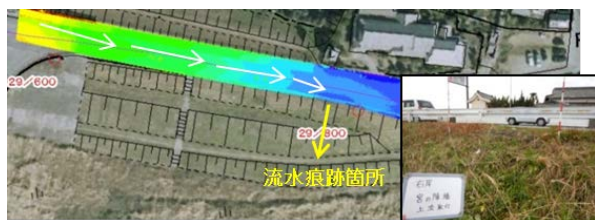


図 5-3 橋梁取付部のコンター図



図 5-4 片勾配（曲線部）のコンター図

5. 2. 2, 変状箇所による排水集中区間の把握

平成 24 年 7 月の九州北部豪雨により法面侵食等が発生した箇所のうち、天端排水が要因と思われる 7 箇所を抽出し、今回実施した MMS 調査結果を整理した。その結果、7 箇所の内、3 箇所（約 4 割）が片勾配区間（曲線部等）であった。また、天端の上下流の縦断勾配が大きくなりやすい橋梁取付部や曲線部かつ片勾配区間を除けば、以下の形状特性を持つ区間で法面侵食を受けていることが明らかとなった。

○集水延長 50m 以上

○縦断標高差 0.2m 以上

○上下流の縦断勾配 0.3% 以上

表 5-1 変状箇所の特性

	区間	位置	(i)集水延長(m)	横断形状	(ii)上下流標高差 (最大)	(iii)上下縦断勾配 (最大)	
右岸	42.932 ~ 43.005	42.950	川底	80m	坪み勾配	0.3m	0.6%
	22.574 ~ 22.619	22.600	川底	50m	表→裏	0.17m	0.5%
	39.940 ~ 40.056	40.000	川底	120m	坪み勾配	0.27m	0.4%
	49.601 ~ 49.809	49.800	川底	210m	表→裏	2.65m	1.3%
左岸	50.450 ~ 50.501	50.450	川底	60m	裏→表	0.23m	0.5%
	55.697 ~ 55.769	55.750	川底	80m	表→裏	1.94m	4.4%
	56.007 ~ 56.062	56.020	川底	50m	坪み勾配	0.2m	0.9%
	18.22 ~ 18.60	18.350	川底	370m	裏→表	0.3m	0.3%

5. 5. 3, 排水集中区間の抽出フロー

これまでの検討結果に基づき、排水集中区間（要注意区間）の抽出フローを作成した。

橋梁取付部及び片勾配区間（曲線部）については、流水痕跡が多数確認されたため、要注意区間として設定した。

上下流縦断標高差及び上下流の縦断勾配の目安の値については、現地調査及び過去変状発生箇所とも同じ値であるため、標高差 0.2m 以上、縦断勾配 0.3% 以上と設定した。

集水延長については、過去変状が発生した箇所の中で 50m が一番短い区間長であるため、目安を 50m 以上と設定した。

5. 2. 4, 抽出フローの妥当性の確認

今回検討した抽出フローが妥当であるか、過去 3 年間の巡視点検により、天端排水集中が原因と考えられる小規模なガリ侵食等が発見された箇所が、フローにより抽出されるか整合性の確認を行った。巡視点検により発見された 34 箇所のうち 33 箇所が一致する結果であった。合致しなかった箇所の特性としては、交通量が多く轍やクラックが多数生じており、ポケット的な水たまりが生じ車両通行時の水はね等が流水痕跡の要因と考えられる。

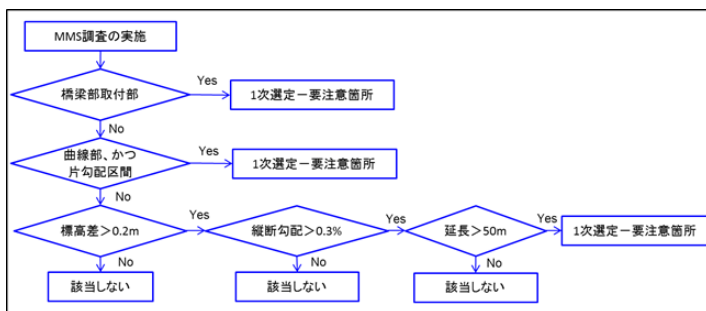


図 5-5 要注意箇所の設定フロー

5. 3, MMS による天端排水要注意箇所抽出

MMS 調査結果と今回作成したフローにより天端排水要注意区間を抽出すると、202 箇所となった。

この 202 箇所を現地調査にて目視点検を行った結果、天端排水が集中したことによる法面侵食が約半数の 104 箇所を確認された。

5. 4, MMS 調査の総括

今回実施した MMS 調査により、堤防天端の形状を面的に把握し、閾値（筑後川では、集水延長・標高差・縦断勾配）を設定することで、通常の定期縦横断測量だけでは把握できない、天端排水集中区間を概ね抽出できるものと考えられる。

表 5-2 天端排水要注意区間の抽出

①橋梁取付部の点検箇所数	67	箇所
②橋梁取付部の流水痕跡確認箇所	34	箇所
橋梁取付部の流水痕跡確認率	51%	
③片勾配区間(曲線部等)の点検箇所数	25	箇所
④片勾配区間(曲線部等)の流水痕跡確認箇所	12	箇所
片勾配区間(曲線部等)の流水痕跡確認率	48%	
⑤その他天端排水集中箇所の点検箇所数	110	箇所
⑥その他天端排水集中箇所の流水痕跡確認箇所	58	箇所
その他天端排水集中箇所の流水痕跡確認率	53%	
⑦総点検箇所(①+③+⑤)	202	箇所
⑧流水痕跡確認箇所(②+④+⑥)	104	箇所
流水痕跡確認率	51%	

※⑦その他天端排水集中箇所は橋梁取付部、片勾配区間(曲線部等)以外の前頁フローの抽出箇所

6. 筑後川における堤防管理のあり方

6. 1, 大規模な法面崩壊が予想される箇所の抽出

天端排水要注意区間の対策必要性の判断としては、図 6-1 に示すとおりである。特に、法面勾配が 2 割よりも急勾配で、集水区間延長が 300m（過去の被災箇所の集水延長は概ね 300m 以上）を超える箇所については、抜本的な対策が必要である「大規模な法面崩壊等が予想される箇所」と位置づけ、該当する 6 箇所については、法面の緩勾配化（一枚法化）に合わせて、

天端排水対策を実施している。集水区間延長が 300m 未満の箇所については、法面侵食の状況により、必要に応じて補修を行い、変状を経過観察することとした。

6. 2, 天端排水要注意箇所の巡視点検

天端排水要注意区間については、定期的実施している巡視を雨天時に行う場合は、雨水排水が集中しているか、天端の排水不良が確認できるか等、重点的に確認するとともに、年 2 回実施する堤防点検においては、下記の視点で確認することとしている。

○法肩付近に侵食痕や肩落ちを確認できるか ○法面勾配が 2 割よりも急であるか

○法面の緩みを確認できるか ○天端排水機能を低下させる要因は無いかな

なお、MMS 調査については、定期縦横断測量に合わせて実施し、データの更新していく予定である。

7. おわりに

今回の堤防被災は、天端排水が主要因となって発生したものであるが、これまで天端排水は堤防管理において重要視されていない項目である。本局河川部では、今回の事象を踏まえ、巡視点検の基準となる各種マニュアルに堤防天端の排水状況を確認項目として追加するとともに、今後は堤防道路の管理者に対し、路面排水の適切な管理を行うよう指導していく方向で検討が行われているところである。本検討では、MMS を活用した調査によって、堤防の雨水集中区間における法面崩壊等が予想される箇所の抽出方法を示し、併せて雨水集中区間の監視の重要性を鑑みて、巡視や点検における対応方針を示したことが成果であると考えている。

今後、これらの成果を活用して、筑後川の堤防管理を高度化し、さらなる安全性の確保を図ることが重要であると考えます。

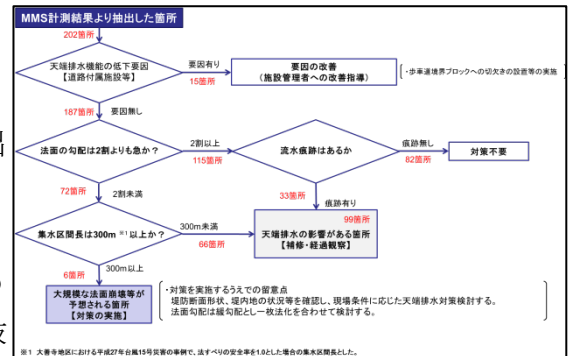


図 6-1 要対策区間の抽出フロー