

森林評価のための写真測量による河川流量推定

River flow estimation using photogrammetry for forest evaluation

高知工科大学大学院
工学研究科基盤工学専攻
社会システム工学コース
国土情報処理工学研究室
1275060 笹岡南斗

指導教員 高木方隆
副指導教員 佐藤慎司
論文副審査 赤塚慎

論文要旨

近年,河川流量の減少が社会生活や生態系に影響を与えており問題視されている.河川流量の減少による問題は,降水量の少ない渇水期に特に顕著であり,渇水期における河川流量の安定化が必要となっている.

河川流量には様々な要素が起因しており,その内の一つが森林である.森林は水源涵養機能によって洪水の緩和や安定した流量供給を担っている.一方で,森林は樹木の生命活動に大量の水を使用することでも知られており,樹木の伐採による河川流量の増加は多くの研究で確認されている.そのため,河川流量を適切に保つためには,適切な森林管理が必要である.

河川流量を安定させる森林状態に管理するためには,河川流量と森林の関係性評価が要求され,互いの観測が必要である.森林観測は非接触での観測が急速に発展しており,河川流量計測も同様に画像計測やレーザー計測など開発が進められているが,山間部の小規模な河川での適用が難しい.そこで,写真測量技術のひとつである SfM を用いて河川の三次元モデルである点群を作成し,より簡便に山間部小規模河川での河川流量計測が行えないか検討した.

SfM による河川流量の推定には,マンニングの公式を用いた.マンニングの公式は径深,動水勾配,マンニングの粗度係数で流速の算出が可能である.本研究では,データの検討を行なった上で問題ないと判断し,径深を平均水深,動水勾配は水面勾配と置き換えて用いた.これらの要素を SfM で作成された河川点群より計測し,マンニングの公式を用いることで流速を算出した.また,点群から作成した DEM より断面積を計測し,流速と乗じることで流量の推定を行なった.

その結果,推定された流量は実測値と比べ,過小評価のみであり,誤差のある結果となった.しかし,推定値と実測値の相関は 0.993 と非常に高く,相対的な値は高精度に取得できていることが分かった.誤差の要因としては,断面積の過小評価とマンニングの粗度係数の水位変化等による変動にあった.断面積の過小評価は,水面の影響による屈折率の変化から発生するもので,補正係数にて補正を行なった.また,マンニングの粗度係数は水位変化による変動が確認されたが,対象とする渇水期は水位の変化が少なく,マンニングの粗度係数も安定していたこと,また標準値の $0.1 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を用いたが相対的な河川流量は計測できており,河川流量の変化は高精度に捉えられる結果となった.

そこで,本研究手法が山間部小規模河川の流量変化を捉えられるとして,本手法の簡便性評価を,可搬式流速計による実測と比較して行なった.その結果,現地での計測時間が本研究手法では可搬式流速計を用いた実測と比べ半減できており,計測機器も大幅に軽減できた.地域特性のある森林と河川流量の関係性評価のためには,山間部小規模河川で多地点の計測が必要である.そのため,計測時間の短縮や計測機器の軽減は非常に重要であり,より簡便に,相対的ではあるが高精度に河川流量の変化を捉えられる本研究手法は山間部小規模河川での流量計測に適した手法ではないかと考える.

Abstract

The decrease in river flow in recent years has been impacting both societal life and ecosystems, and it is a growing concern. The problems caused by the reduction in river flow are particularly evident during dry periods with low rainfall, and stabilizing river flow during such dry periods has become necessary. River flow is influenced by various factors, one of which is forests. Forests contribute to the regulation of river flow by enhancing water retention, which helps mitigate floods and ensures a stable flow of water. On the other hand, forests are also known for using large amounts of water for the life activities of trees, and many studies have confirmed that deforestation leads to an increase in river flow. Therefore, proper forest management is crucial to maintaining appropriate river flow.

To manage forests in a way that stabilizes river flow, an evaluation of the relationship between river flow and forests is required, along with observations of both. Forest observation technologies have rapidly developed for non-contact measurement, and river flow measurement has similarly progressed with the development of imaging and laser measurement techniques. However, applying these methods to small rivers in mountainous areas remains challenging. Therefore, this study investigates whether a more convenient method for measuring river flow in small mountainous rivers can be developed by creating three-dimensional models of rivers using a photogrammetry technique called SfM.

To estimate river flow using SfM, Manning's equation was applied. Manning's equation allows the calculation of flow velocity based on variables such as hydraulic radius, slope, and Manning's roughness coefficient. In this study, after reviewing the data, it was determined that using the average water depth as the hydraulic radius and substituting water surface slope for the slope of the flow was acceptable. By measuring these variables from the point cloud created by SfM and applying Manning's equation, the flow velocity was calculated. Additionally, the cross-sectional area was measured from the DEM created from the point cloud, and the flow rate was estimated by multiplying the flow velocity by the cross-sectional area.

The result showed that the estimated flow rate was somewhat underestimated when compared with the measured values, indicating some error. However, the correlation between the estimated and measured values was very high 0.993, suggesting that relative values could be obtained with high accuracy. The sources of error were identified as underestimation of the cross-sectional area and fluctuations in Manning's roughness coefficient due to changes in water levels. The underestimation of the cross-sectional area was caused by changes in the refractive index due to the water surface, which was corrected using a correction factor. While fluctuations in Manning's roughness coefficient due to water level changes were observed, it was found that during the dry period, the water level remained relatively stable, and Manning's roughness coefficient also stabilized. Furthermore, using the standard value of $0.1 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ still allowed for accurate measurement of relative river flow, and the changes in river flow were captured with high precision.

Therefore, this research method, which can capture changes in flow in small mountainous rivers, was evaluated for its simplicity by comparing it with field measurements using a portable flow meter. The results showed that the measurement time using this research method was reduced by half compared to field measurements with a portable flow meter, and the measurement equipment was also significantly lighter. For evaluating the relationship between forest characteristics and river flow in specific regions, multiple measurements at different locations in small mountainous rivers are necessary. Thus, reducing measurement time and equipment weight is crucial. This research method, which can capture changes in river flow with relatively high accuracy in a more convenient way, appears to be a suitable approach for flow measurement in small mountainous rivers.

目次

論文要旨	i
Abstract	ii
1. 序論	1
1.1 河川流量と森林の関係性	1
1.2 水収支式による河川流量と森林の関係性評価	2
1.3 観測フィールド	3
1.4 研究目的と意義	4
2. 既存の河川流量計測手法	5
2.1 可搬式流速計による流速計測法	5
2.2 浮子測法	6
2.3 堰測法	6
2.4 ADCP	7
2.5 電波式流速計	7
2.6 STIV	8
2.7 既存手法の山間部小規模河川における適用性	8
3. 本研究における河川流量推定提案手法	9
3.1 マニングの公式	9
3.2 研究フロー	11
4. 写真測量による河川点群作成	12
4.1 SfM(Structure from Motion)	12
4.2 撮影機材	13
4.3 後入川点群作成	14
5. 河川点群を用いた河川流量推定手法	15
5.1 水位・水面勾配の計測	15
5.2 平均水深・断面積の計測	16
5.3 河川点群より計測したパラメータによる流量推定	17
5.4 本研究における精度検証手法	18

6. 河川流量推定結果と考察	19
6.1 推定流量と実測流量の比較	19
6.2 推定流量と実測流量における誤差要因の考察	20
6.3 マニングの粗度係数 n の考察	23
7. 結論	27
7.1 本研究手法における推定流量の精度	27
7.2 本研究手法の実用性評価	28
7.3 課題	29
7.4 まとめ	30

図目次

1.1	水収支式概略図	2
1.2	観測フィールド位置図	3
1.3	後入川の様子	3
2.1	可搬式流速計と実測風景	5
2.2	浮子と浮子測法様子	6
2.3	三角堰	6
2.4	矩形堰	6
2.5	ADCP	7
2.6	電波式流速計	7
2.7	STIV	8
3.1	径深と動水勾配	10
3.2	研究フロー	11
4.1	SfM 概略図	12
4.2	使用カメラと撮影風景	13
4.3	基準点と計測線位置	14
4.4	撮影ルート	14
5.1	点群からの水位・水面勾配計測方法	15
5.2	平均水深・断面積算出方法	16
5.3	グリッドごとの水深・断面積抽出方法	16
5.4	河川流量推定結果	17
5.5	区分求積法概要	18
6.1	推定値流量-実測値流量 相関図	19
6.2	点群断面積-実測断面積 相関図	20
6.3	屈折率の変化	21
6.4	水深の補正方法と補正後河床形状	21
6.5	水深補正前と補正後の推定値流量と実測値流量比較	22
6.6	マンニングの粗度係数-平均水深 相関図	24
6.7	マンニングの粗度係数別流量比較	26
6.8	水位流量曲線	28
6.9	点群から得られる河床変動の様子	29

表目次

3.1 マニングの粗度係数 ($m^{-1/3}s$)	10
4.1 撮影機材仕様	13
6.1 各観測日におけるマニングの粗度係数逆算結果	22
6.2 各観測日における回帰直線によって得られたマニングの粗度係数	24

1 序論

1.1 河川流量と森林の関係性

近年,河川流量の減少が問題視されている.高知県でも,一級河川である物部川や四万十川など様々な河川で渇水が頻発し,河川が干上がるなどの現象が発生している.河川流量減少による影響は様々であり,生活水供給の制限などから衛生問題や,農作物被害などの社会的影響,流量の減少により河川の希釈効果や溶存酸素量が低下することで発生する生態系への影響など,問題は計り知れない.河川流量減少の原因として,産業化や都市化,護岸整備による緑地,水地の減少なども挙げられるが,近年特に小雨傾向であることが原因とされている[1].日本は非常に年間降水量が多い地域ではあるが,降水量の大半が梅雨期や台風期に集中する傾向にある.また,国土が非常に急峻であり,降った雨は土中に貯留されず,河川からすぐに海へと流れ出てしまう.そのため,降水量の豊富な地域でありながら,水資源の利用は容易ではない.こういった,河川流量の減少による問題は,降水量の少ない渇水期に特に顕著であり,渇水期における河川流量の安定化が必要となっている.

河川流量には様々な要素が起因しており,その内の一つは森林にある.森林は土壌を肥やし,大小様々な隙間を作ることによって雨水は地下へ浸透する.そのため,降った雨がすぐに河川へ流れ出ることを抑制し,洪水の緩和や無降水時の流量供給の役割を担っている.これを水源涵養機能という.一方で,森林の樹木は生命活動に大量の水を使用することでも知られている.樹木は光合成によりエネルギーを作り出すことで生命の維持を行っており,その過程で根から水分を吸収し,葉から蒸散を行う.また,雨が樹冠によって遮断され,そのまま蒸発する遮断蒸発など,様々な形で水が使用されている.樹木の伐採による河川流量の増加は多くの研究で確認されており[2][3],河川流量を適切に保つためには,適切な森林管理が必要である.近年は管理されず過剰に繁茂した放置林が増加傾向であり,特に適切な森林管理が求められる.河川流量に適した森林状態を保つため,河川流量と森林の関係性評価が必要である.

1.2 水収支式による河川流量と森林の関係性評価

河川流量と森林の関係は、式(1.1)で表される水収支式で示すことができる。水収支の概略を図1.1に示す。この時の流出量とは、降水量のうち蒸発散や貯留に使用されず河川へ流れ出た水量のことを指し、河川流量と同義である。河川流量計測によって得られた流出量と合わせて降水量も計測することで、水収支式より蒸発散量、貯留量の逆算が可能となる。そのため、森林の水使用量を計測するには河川流量の計測が必須である。また、河川流量と森林の関係は地域性が強く、様々な地域での計測が必要となるため、山地河川で適用可能である簡便な流量計測手法が必要である。

$$\text{降水量} = \text{流出量} + \text{蒸発散量} + \text{貯留量} \quad (1.1)$$

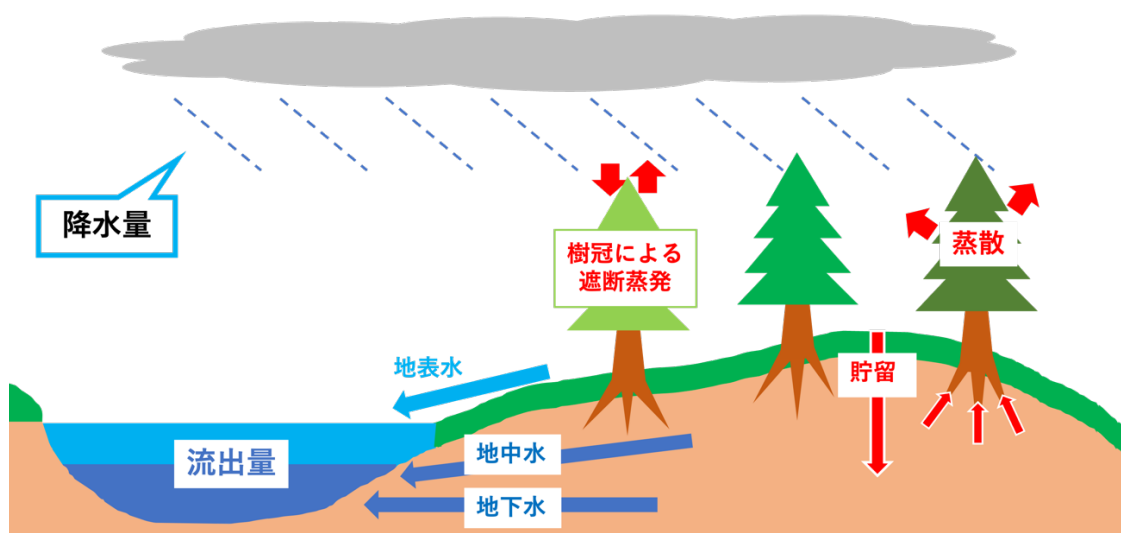


図 1.1 水収支式概略図

1.3 観測フィールド

水収支式による森林と河川流量との関係性を評価するためには、互いの計測が必要となる。そこで、本研究の観測フィールドとして選定したのが、図 1.2 に示した高知県香美市土佐山田町に位置する里山研究フィールドである。里山研究フィールドでは、毎月 UAV による森林観測を行っており、本研究の河川流量との関係性評価が行いやすいエリアとなっている。

対象河川は、里山研究フィールド内を流れ、一級河川である物部川の支流にあたる後入川とした(図 1.3)。後入川は川幅 3~6m ほどの小規模河川で、河道内には岩が点在しており、上空は樹木で覆われ閉鎖的な空間となっている。このような特徴から、山間部小規模河川での流量推定手法の構築という本研究の趣旨に適していると判断し選定した。

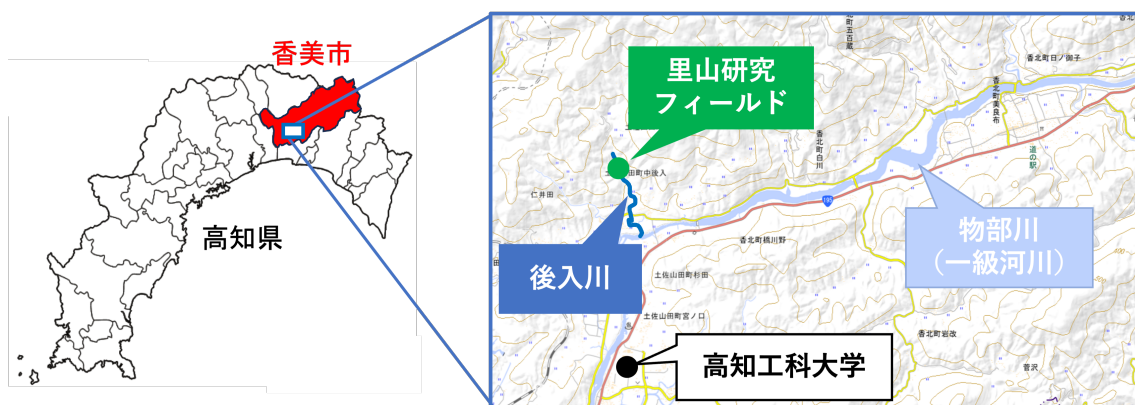


図 1.2 観測フィールド位置図



図 1.3 後入川の様子

1.4 研究目的と意義

渇水期における河川流量を安定させるためには、森林の特性が影響すると考えられている。河川流量を安定させる森林状態に管理するためには、河川流量と森林の関係性評価が要求され、両方の観測が必要である。森林観測は衛星リモートセンシングに加え、近年 UAV の台頭により非接触での観測が急速に発展している。河川流量計測も同様に、レーザー測量や画像解析などの研究開発が進められているが、依然として流速計や浮子による実測、堰を用いた観測が多い。また、山間部の小規模な河川ではレーザー等を用いた大掛かりな観測は不向きであり、山地河川で適用可能である簡便な流量計測手法が求められる。そこで着目したのが、写真測量技術の一つである SfM である。SfM は容易に三次元モデルを作成することが可能であり、河川の三次元モデルを作成することで流量計測を行えるのではないかと考えた。河川の三次元モデルを作成すると、河川形状を面的に記録することができるため、測線に縛られず断面形状や水位、河床形状など複数要素が取得可能となり、様々な解析に使用可能であると期待できる。また、河川の三次元モデルを作成する研究は多く行われているが、目的の多くが河川形状の把握であり、河川の維持管理に必要なデータ取得を目的としたものや[4]、流下能力の検討や防災的な観点からの河床形状取得[5]などが多く、三次元モデルを用いた河川流量計測の事例は少ない。

そこで本研究の目的を、写真測量を用いた山間部小規模河川における流量推定手法の構築と設定した。そして本研究の意義としては、写真測量によって河川の三次元モデルを作成することで、河川流量計測をより簡便に行うことができ、労力の削減に期待できること、また変化の多い山間部小規模河川の形状を随時記録でき、河川流量に影響を与える要素の検討を細かく行える点にあると考える。

2. 既存の河川流量計測手法

2.1 可搬式流速計による流速計測法

一般的に用いられる河川流量の式(2.1)は,流速(V)に断面積(A)を乗じることで流量(Q)の算出が可能である.そして低水時の流速計測手法として一般的に用いられるのが,可搬式流速計である.式(2.1)を用いて,可搬式流速計によって得られた流速に,断面積を乗じて流量の算出を行う.図 2.1 に可搬式流速計と実測風景を示す.

$$Q = V A \quad (2.1)$$

Q :流量(m^3/s) V :流速(m/s) A :断面積(m^2)



図 2.1 可搬式流速計と実測風景

2.2 浮子測法

浮子測法は可搬式流速計同様、河川流量算出のための流速を計測する手法である。浮子は洪水などの高水時に用いられるものであり、浮子を河川に投入し一定区間を流下する時間から流速を算出する手法である。



図 2.2 浮子と浮子測法様子

出典：国土交通省. 無人化・省力化に向けた「流量観測機器」の開発

<https://www.mlit.go.jp/common/001264771.pdf>

2.3 堰測法

堰測法は量水堰と呼ばれる堰を用いた河川流量計測手法で、高精度に計測が可能であり、一般的に用いられる手法である。越流部分の水位と流量に一对一の関係をつくり、水位から流量を算出する手法であり、越流部分の形状に応じた流量算出式が設定されている。



図 2.3 三角堰



図 2.4 矩形堰

出典：国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所. 森林と水の謎を解く

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/qa/moritomizu/documents/q4-1.pdf>

2.4 ADCP

近年では先述したような河川流量計測手法に加え、非接触で行う河川流量計測手法の開発が行われている。ADCP はその一つであり、水中に超音波を発射することで、浮遊物等に反射し返ってきた超音波の変化によって流速の算出を行う。また同時に河川断面積の取得も可能である。

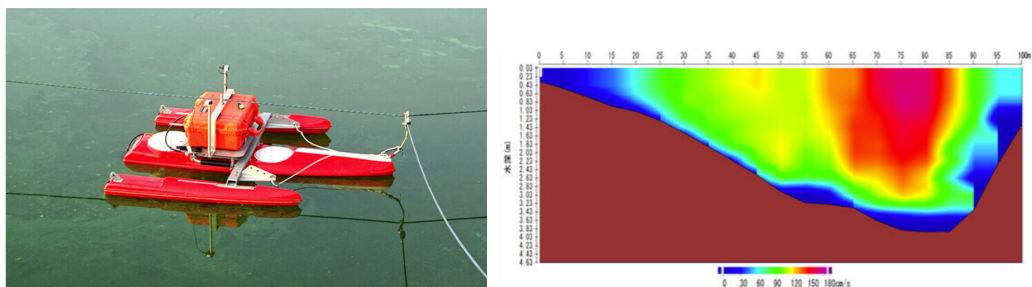


図 2.5 ADCP

出典：株式会社テイコク. 超音波ドップラー流速計 ADCP

<https://www.teikoku-eng.co.jp/technology/adcp/>

2.5 電波式流速計

電波式流速計はマイクロ波を水面の波に放射し、波に当たり反射して返ってきたマイクロ波の変化に応じて流速を算出する手法である。



図 2.6 電波式流速計

出典：国土交通省中部地方整備局. 従来の浮子観測の問題に対応できる新たな観測手法の確立

<https://www.cbr.mlit.go.jp/kikaku/2020kannai/pdf/wo08.pdf>

2.6 STIV

STIV とは画像処理型流速測定法とも呼ばれ、水面を撮影した画像から流れ要素を検出し、流れ要素が移動した距離と時間から流速を求める手法である。特に濁度の高い、高水時の流速計測に適した手法である。

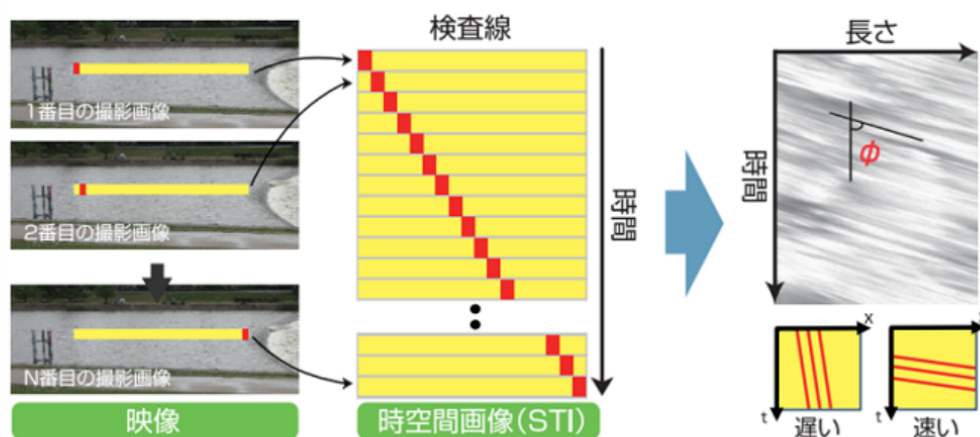


図 2.7 STIV

出典：株式会社ハイドロ総合技術研究所. Hydro-STIV - 流速・流量計測システム

<https://hydrosoken.co.jp/hydrostiv/>

2.7 既存手法の山間部小規模河川における適用性

本章では、ここまで既存の流量計測手法について述べてきた。どれも、高精度であり、一般的に普及している計測手法であるが、山間部小規模河川における適用性については問題がある。流速計や浮子を用いた計測方法は労力面や安全性の問題があり、非接触での計測へと移行している。堰を用いた測法については、非常に精度が高く、研究調査等よく用いられているが、観測点が限られることや、自然破壊などの問題点がある。また、近年研究が進められている非接触での河川流量計測手法は、国土交通省などで管理される中規模から大規模な河川での活用が前提であり、山間部小規模河川のような水深が非常に浅く、透明度の高い河川での適用は難しいことなどが挙げられる。そこで、地域性のある森林と河川流量の関係を明らかにするには、山間部小規模河川での適用が可能な、簡便な流量計測手法が必要である。

3. 本研究における河川流量推定提案手法

3.1 マニングの公式

河川流量は 2.1 の式(2.1)で述べたように流速に断面積を乗じることで求めることができる.流速を求める手段は様々であるが,河川計測等で一般的に使用されるマニングの公式がある.マニングの公式を式(3.1)に示す.マニングの公式は,マニングの粗度係数,径深,動水勾配の3つの変数で表すことができ,非常に簡単であることから広く用いられる式である.マニングの粗度係数は河川状況によって定義されているため,マニングの公式を用いれば径深と動水勾配のみ計測することで流速の算出が可能である.そこで写真測量技術のひとつである SfM を用いて河川の三次元モデルを作成すれば河川流量算出に必要な要素を計測できるのではないかと考えた.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

V :平均流速(m/s) n :マニングの粗度係数($\text{m}^{-1/3}\text{s}$) R :径深(m) I :動水勾配

径深 R とは、水理学的平均水深とも呼ばれ、流れの計算に用いられるものであり、断面積割る潤辺で求めることができる。潤辺とは水路の水に触れている辺の長さを指す。径深は広長方形断面の場合、平均水深とほぼ一致することが知られており、河川は水深に対して川幅が非常に長いため、図 3.1 左図のような式変形から径深は平均水深と置き換えることが可能である。動水勾配 I とは、ベルヌーイの定理により水が持つエネルギーを表した時、上流から下流に水が流れた際のエネルギー損失を距離で除したものである。動水勾配は水面勾配とほぼ同義であると知られている。このことから、本研究では径深、動水勾配ともに、より簡便である平均水深と水面勾配に置き換えて求めることとする。

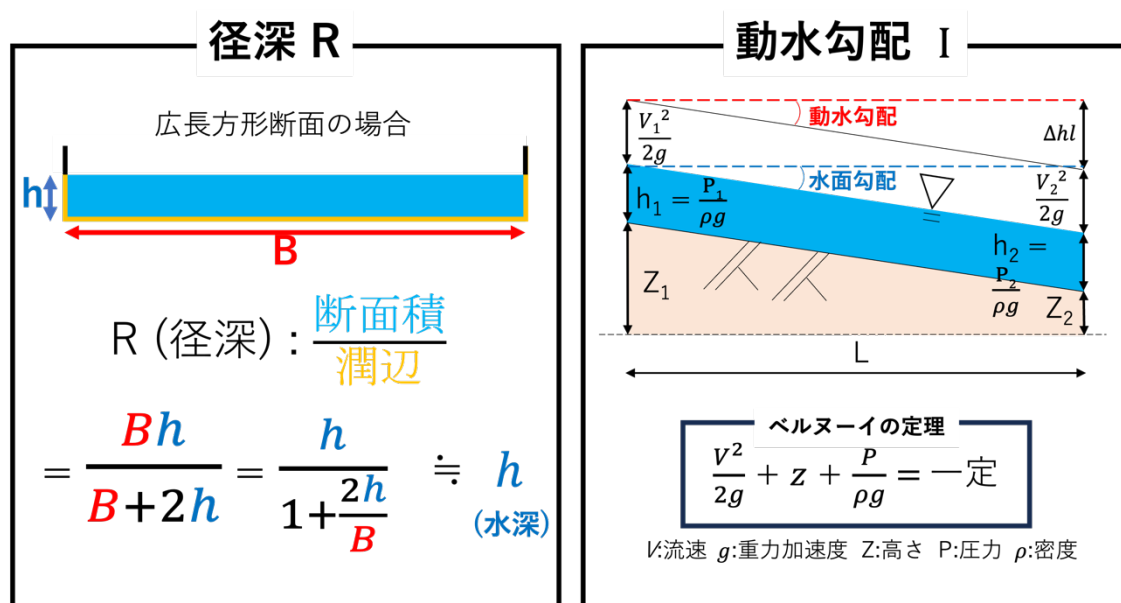


図 3.1 径深と動水勾配

マンニングの粗度係数は河川状況によって定義されているものである。本研究の対象河川である後入川は、非常に小さい水深に対して礫が大きいことや、河道内に岩が点在していることなどの状況を鑑みて標準値である $0.100 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ と設定した。

表 3.1 マンニングの粗度係数 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)

水路の状況	n の範囲	n の標準値
土、直線水路、雑草あり	0.022～0.033	0.027
砂利、直線水路	0.022～0.030	0.025
整正断面水路	0.025～0.033	0.030
非常に不整正な断面、雑草、立木多し	0.075～0.150	0.100

3.2 研究フロー

本研究の流れとしては,SfM によって後入川の点群を作成し流量の推定を行い,流速計を用いた実測値との比較によって本研究手法の精度検証を行うといった流れである.本研究手法のフローを以下に示す.

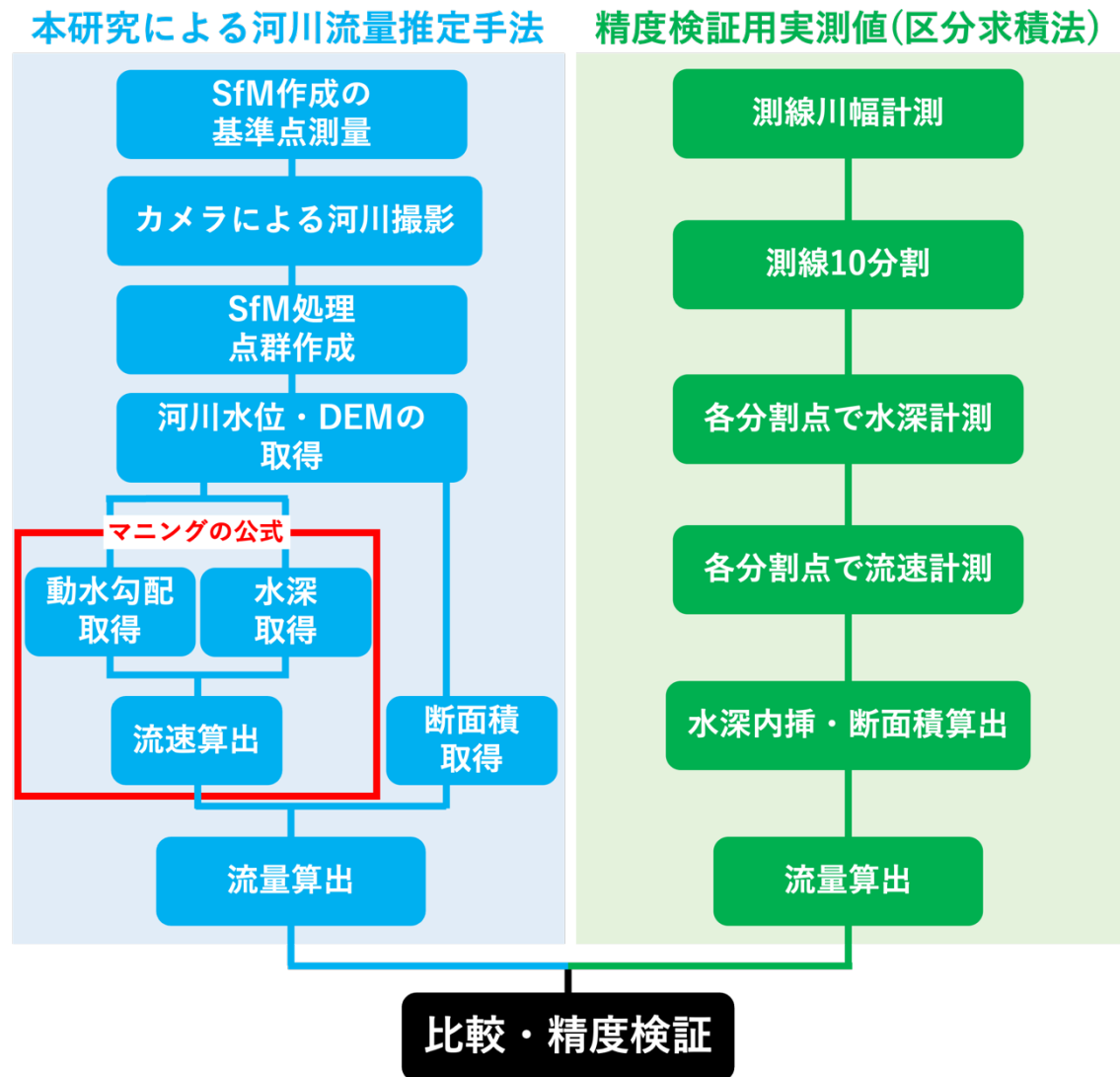


図 3.2 研究フロー

4. 写真測量による河川点群作成

4.1 SfM (Structure from Motion)

SfM とは Structure from Motion の略であり、写真測量技術の一つである。対象物を様々な角度から撮影し、撮影された複数枚の写真から対応する特徴点を抽出し、対象物の形状を三次元で形成していく手法である。特徴点で形状が形成されるため、モデルは点の集合である点群で表現される。全ての点に座標や色情報が付与されており様々な解析に用いられる。

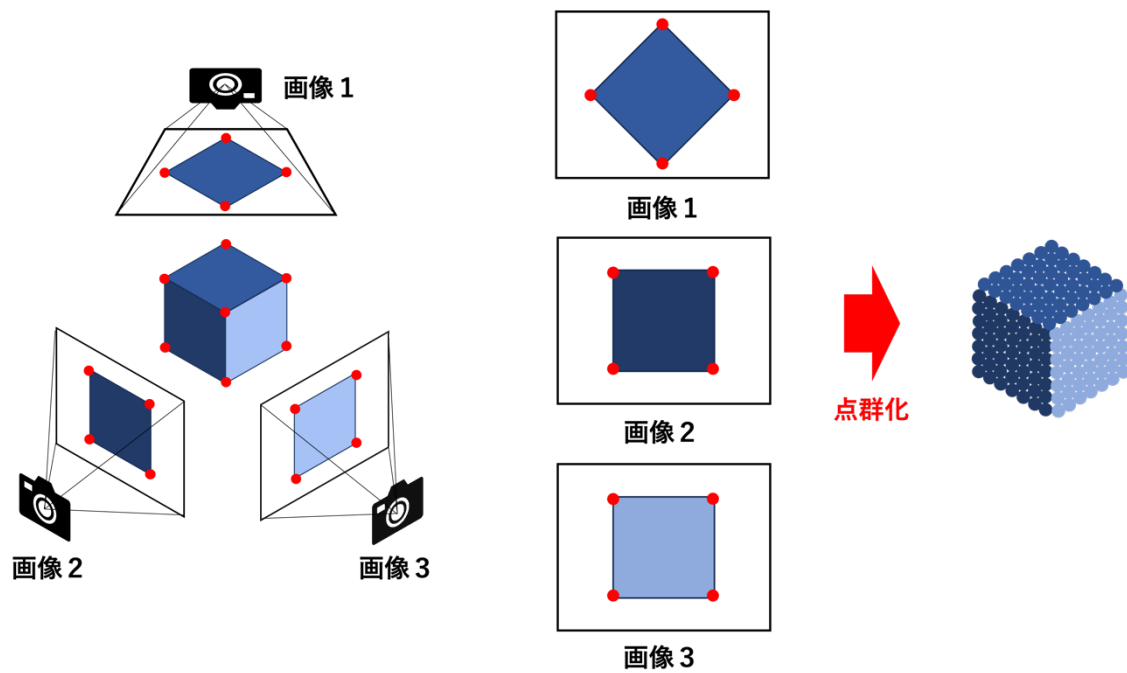


図 4.1 SfM 概略図

4.2 撮影機材

後入川は河道に樹木が覆い被さるように繁茂しており,UAVの飛行が困難であったため写真測量に用いる撮影機材は手持ちのアクションカメラを使用した.使用したカメラは DJI 社の DJI Pocket2 である.撮影は広範囲に行うため,アクションカメラを撮影棒先端に取り付け対象物から距離を取り撮影を行った. 撮影は動画で行い,一秒ごとに画像の切り出しを行うことで SfM の処理を行った.カメラの仕様は表 4.1 に示す.



図 4.2 使用カメラと撮影風景

表 4.1 撮影機材仕様

名称	DJI Pocket 2
サイズ	124.7×38.1×30 mm
重量	117g
カメラセンサー	1/1.7 インチ CMOS
	有効画素数：64MP
レンズ	FOV 93° ,F1.8
	焦点距離：20 mm (35mm 判換算)
動画解像度	4K Ultra HD: 3840×2160 @ 24/25/30/48/50/60fps
	2.7K: 2720×1530 @ 24/25/30/48/50/60fps
	FHD: 1920×1080 @ 24/25/30/48/50/60fps

4.3 後入川点群作成

点群作成は Agisoft 社の metashape という SfM ソフトウェアを使用した.SfM によって作成された後入川の点群を図 4.3 に示す.渾水期であれば高精度に河床形状まで作成が可能である.SfM によって点群を作成するためには,幾何補正に基準点が必要となる.幾何補正に用いた基準点は図 4.3 に示す.基準点は両岸に 3 点ずつ,また河道内に一点の計 7 点とした.基準点の幾何補正精度は,水位を高精度に取得するため $\pm 1\text{cm}$ 程度とすることが望ましい.本研究で用いた基準点の幾何補正精度は全て $\pm 1\text{cm}$ 程度である.

アクションカメラを用いた撮影のルートは(図 4.4),水際を高精度に取得するため両岸の水際を重点的に撮影した後,河道内を往復するように撮影を行った.SfM の特性上,画像枚数が多いほど点群数も増えるため,正確な形状や精度が必要な箇所は重点的に撮影することが望ましい.本研究で使用した画像枚数は,河川を動画で 10 分から 15 分程度撮影し,一秒ごとのフレームで切り出したため,600 から 900 枚前後の画像を使用している.

続いて計測線位置の選定であるが,今回流量の推定に用いるマンニングの公式が本来等流公式ということや,SfM が撮影された画像から点群を生成するため,比較的流程が穏やかで,水面の揺らぎや反射の少ない位置を選定した.

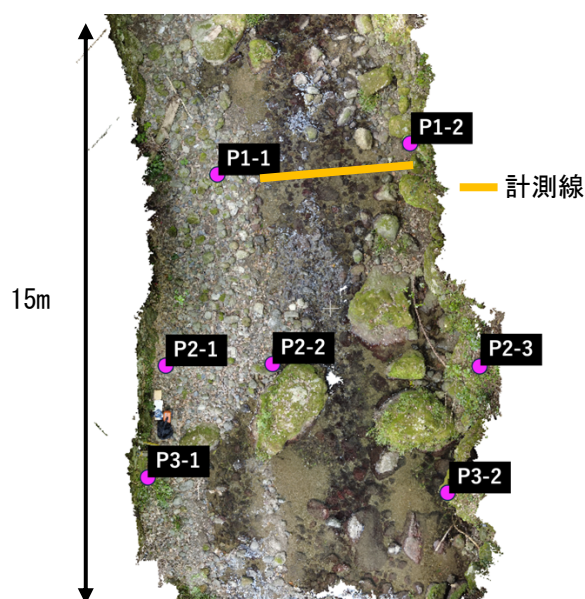


図 4.3 基準点と計測線位置

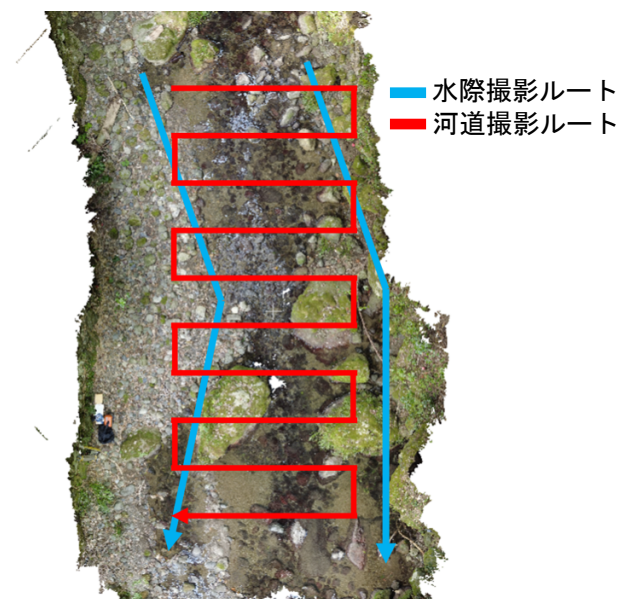


図 4.4 撮影ルート

5. 河川点群を用いた河川流量推定手法

5.1 水位・水面勾配の計測

点群からの水位,水面勾配の取得には水際を使用した.河川の点群を作成すると,陸地と水地で色が異なるため,目視で水際を判別することが可能である.そのため,水際の点から座標を取得することで水位とした.水面勾配は,測線を挟むように上流と下流の2点で水位を取得することで水位差を算出し,点群の座標値から距離を求め水面勾配の算出を行った.

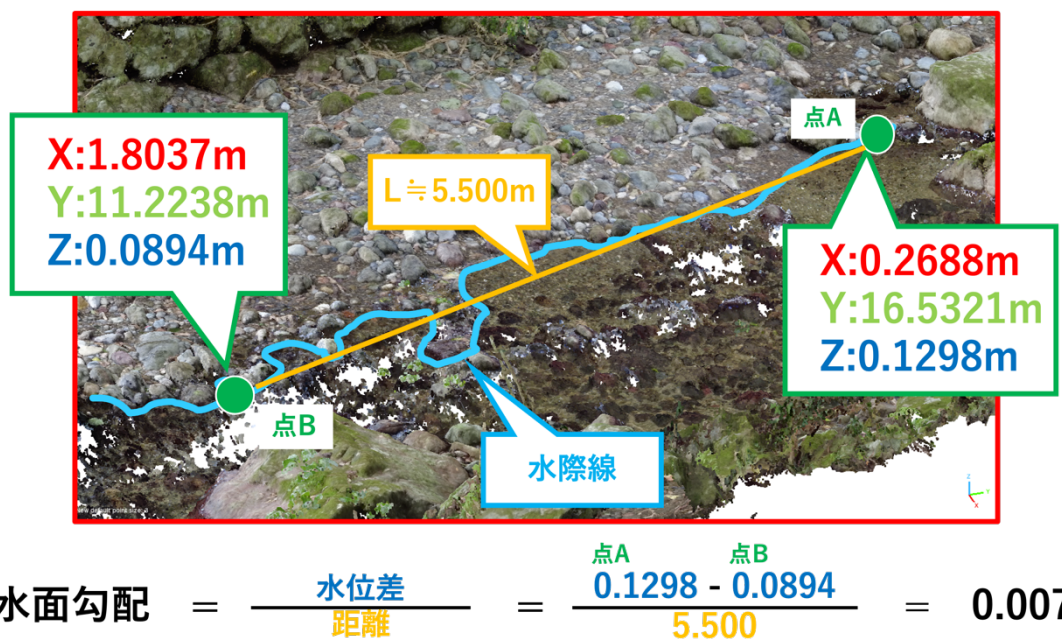


図 5.1 点群からの水位・水面勾配計測方法

5.2 平均水深・断面積の計測

平均水深と断面積の取得は,河川点群から DEM を作成して行う(図 5.2).DEM とは数値標高モデルとも呼ばれ,地物を除外した地表面を表したものである.DEM を作成することで河床が取得できる.DEM を作成するために点群を 1cm 間隔でグリッド化しているため,各グリッドで 5.1 より取得した水面と河床高さの差分から水深を取得し,平均値を求め平均水深とした(図 5.3).断面積も同様に,各グリッドで求めた水深にグリッドに応じた幅を持たせ合計することで断面積とした.

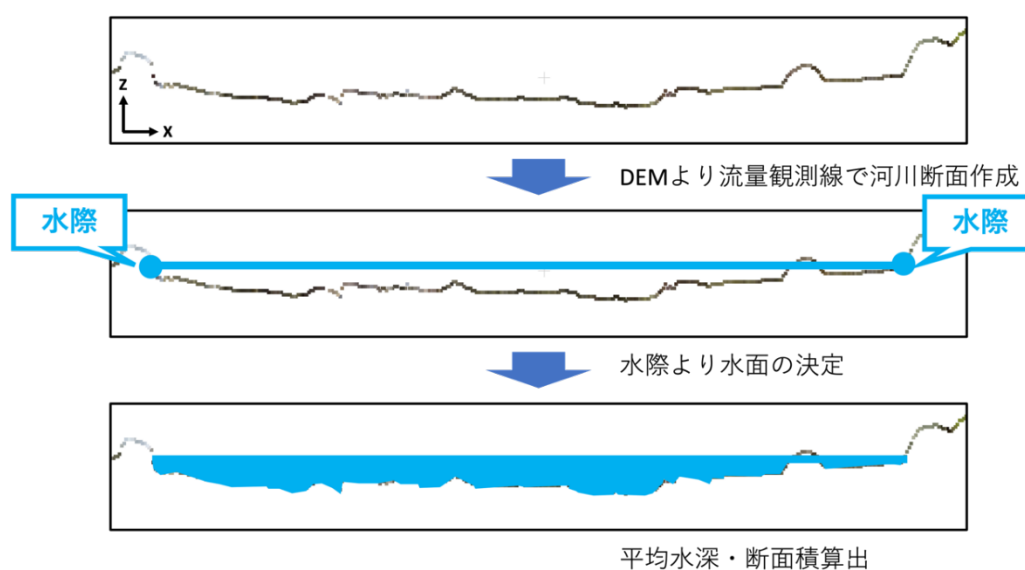


図 5.2 平均水深・断面積算出方法

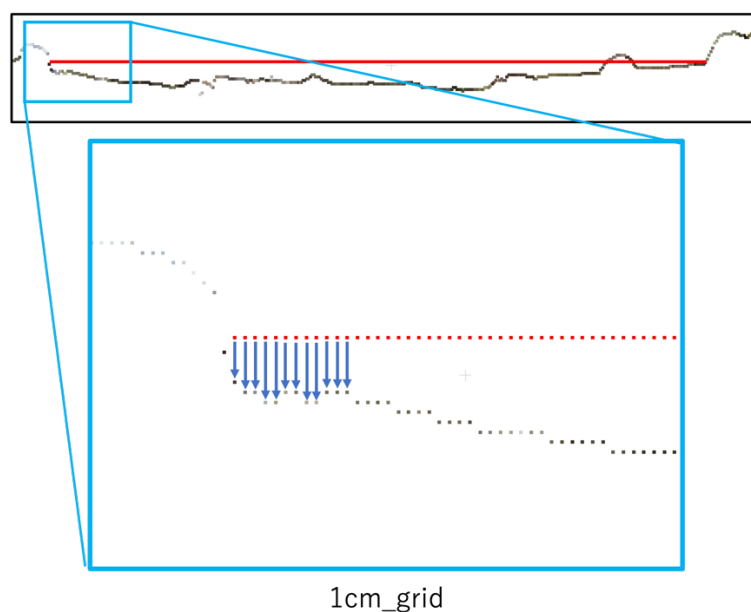


図 5.3 グリッドごとの水深・断面積抽出方法

5.3 河川点群より計測したパラメータによる流量推定

上記の手法によって得られたパラメータより,マンシングの公式を用いて流速を算出し,後入川での河川流量の推定を行った.以下に示すのは,2024 年 7 月 23 日の推定値である.河川流量の推定は計測線を固定し,2024 年 7 月から,2024 年 11 月にかけて計 9 回行っている.



図 5.4 河川流量推定結果

5.4 本研究における精度検証手法

本研究における精度検証手法は、2.1 で先述した可搬式流速計を用いた計測法を採用した。可搬式流速計による河川流量計測手法には区分求積法が用いられる。区分求積法は河川規模に応じて測線を区分し、各区分点にて水深、流速を計測後、区分断面積を乗じて流量に変換するといった手法である。後入川での区分求積法は河川規模から川幅に応じて 10 分割し、水面から水深の 6 割の位置で流速を計測する 1 点法を用いた。複数回の計測の結果、同程度の水深同士で比較した場合、誤差は $1\text{cm}^3/\text{s}$ 程度かそれ以下であり計測精度も問題ないと判断したため、本研究の精度検証に可搬式流速計によって得られた河川流量を用いることとした。

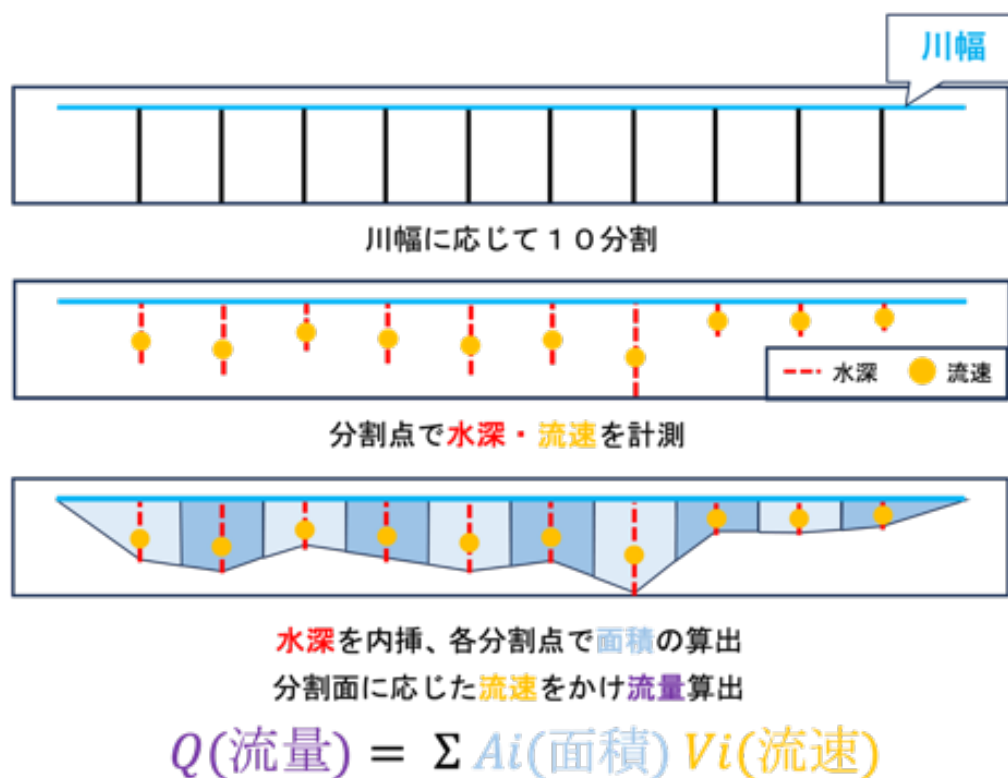


図 5.5 区分求積法概要

6. 河川流量推定結果と考察

6.1 推定流量と実測流量の比較

本研究手法にて後入川における河川流量を推定した値と,流速計によって得られた河川流量の実測値を比較したグラフを図 6.1 に示す.推定値を Y 軸に,実測値を X 軸にプロットした.本来,推定値と実測値は一对一の関係を示し, $Y=X$ の黒い直線上にプロットされるはずが,誤差が見られ直線上からは外れる結果となった.しかし,赤色で示す推定値と実測値の回帰直線から見て取れるように,相関は非常に高く,相関係数は 0.993 と高い値を示した.このことから,本研究手法による河川流量の推定は,相対的な値を高精度に取得できていることが分かった.

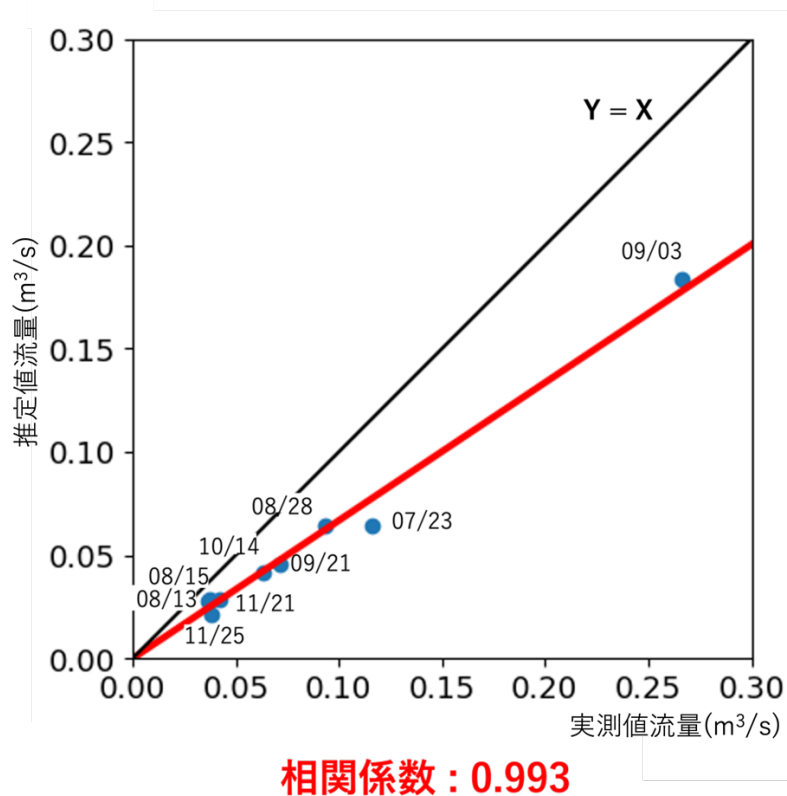


図 6.1 推定値流量-実測値流量 相関図

6.2 推定流量と実測流量における誤差要因の考察

6.1 より本研究手法による河川流量推定は相対的な値を高精度に取得できることが分かったが,誤差が生じていることから誤差要因の検討が必要である.そこで,SfM によって作成した後入川の点群と実際の形状に差異があるのではないかと考え,点群から得られた断面積と実測で得られた断面積で比較を行った.その結果を図 6.2 に示す.

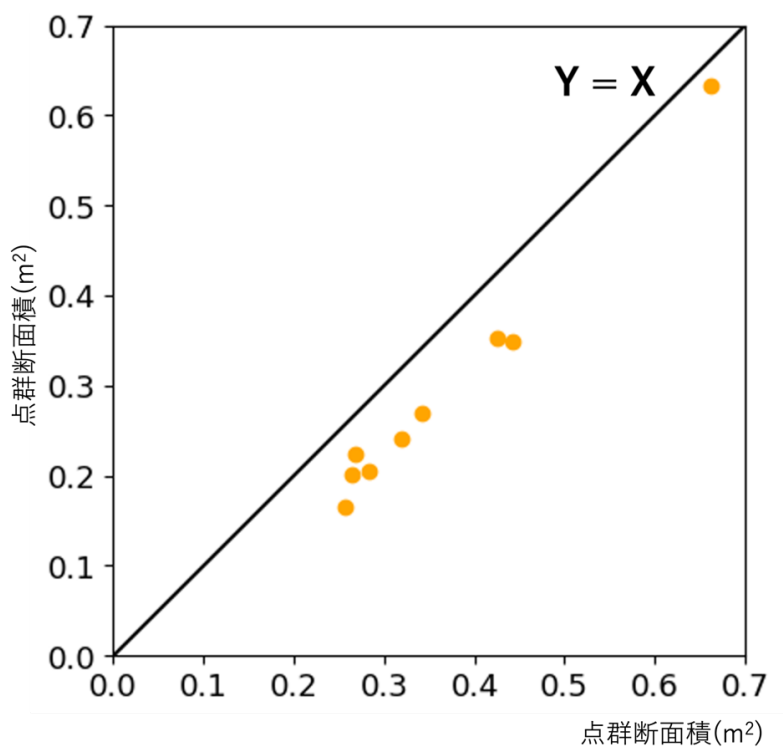


図 6.2 点群断面積-実測断面積 相関図

実測で得られた断面積に比べ、点群から得られた断面積は過小に評価されていることが分かった。これは、水面の影響によっておこる光の屈折などから河床部の点群が浮き上がって作成され、水深が浅く復元される箇所があるためであった。

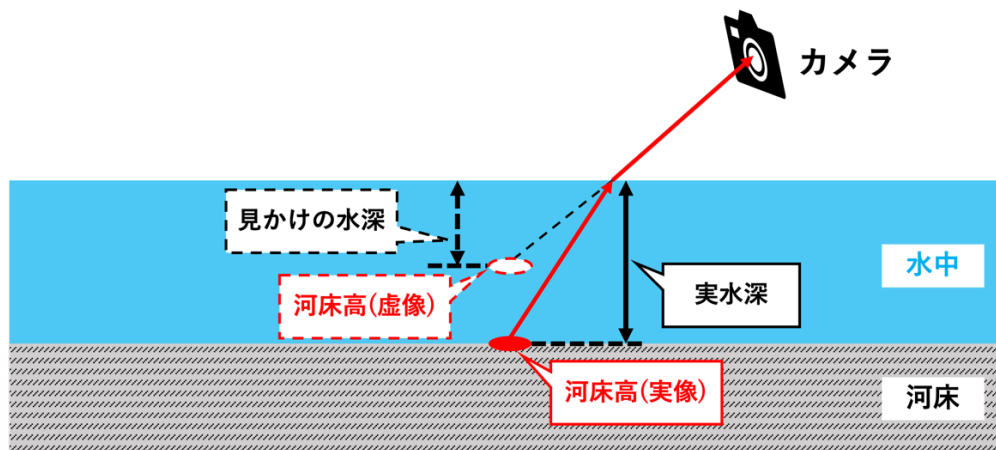


図 6.3 屈折率の変化

水面の影響による光の屈折の変化は補正係数を用いることで補正することができると知られている[6].補正係数には一般的に 1.33 が用いられ,SfM で作成される見かけの水深に補正係数を乗じることで、水深の過小評価を補正する。この補正係数を用いて、5.2 より得られる水深に 1.33 を乗じて水深の補正を行なった。補正方法を図 6.4 に、補正前の推定値流量と実測値流量の比較を図 6.5 左に、補正後の比較を図 6.5 右に示す。

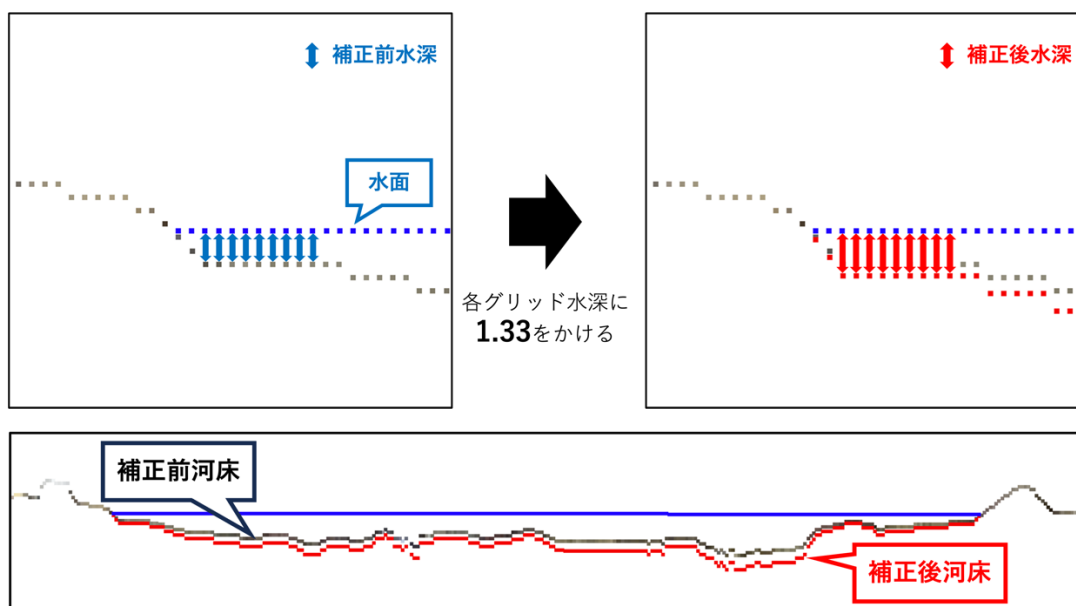


図 6.4 水深の補正方法と補正後河床形状

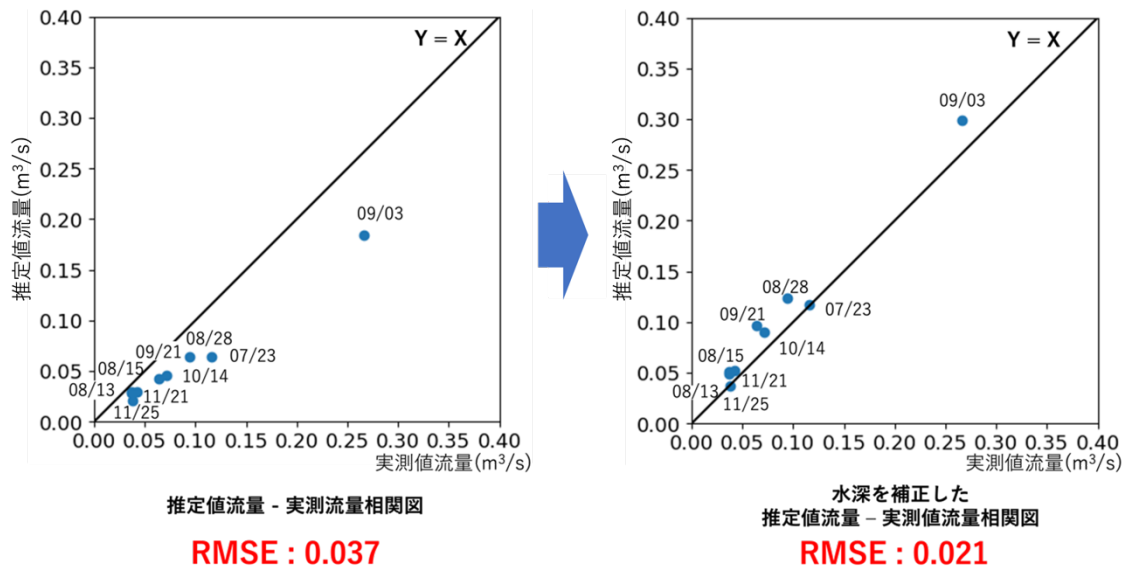


図 6.5 水深補正前と補正後の推定値流量と実測値流量比較

補正を行った結果、誤差の指標である RMSE は多少小さくなり、特に渇水期の流量は推定値が実測値に近い値を示す結果となった。しかし、全体的に過剰な補正となっており、補正係数で単純に補正を行えない原因としては、水面の揺らぎ方によって河床の見かけの高さが変わってくることや、SfM を作成する際のカメラ位置などによっても屈折率が変化するため、一様の屈折率を示さないことが原因であると考えられる。しかし、補正係数を用いることで推定した値が実測値に近づいたことから、断面積による誤差への影響は大きく、屈折率を考慮したデータを用いる必要がある。

6.3 マニングの粗度係数 n の考察

本研究手法にて河川流量を推定する場合,推定値に大きく影響を与えると考えられるものとして,マニングの粗度係数がある.マニングの粗度係数は表 3.1 から,河川の状態によって定義されており,本研究における後入川のマニングの粗度係数は標準値である $0.100 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を使用している.しかし,マニングの粗度係数は山地河川という同じ括りでも広い幅を持つことで知られており[7],適した値を得るためには実測を行う必要がある.そこで,流速計を用いた実測流量からマニングの粗度係数を逆算して求めることにした.マニングの粗度係数逆算に用いる式は,マニングの公式を n について求めるよう式変形を行った式(6.1)を用いる.式で用いる h, I, V はそれぞれ実測から得られた値を使用した.

$$n = \frac{h^{2/3} I^{1/2}}{V} \quad (6.1)$$

n :マニングの粗度係数($\text{m}^{-1/3}\text{s}$) h :平均水深(m) I :水面勾配 V :流速(m/s)

各観測日ごとでマニングの粗度係数を逆算した結果が表 6.1 である.値はそれぞれ $0.100 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 付近を示すものの,0.074 から $0.111 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ の範囲で観測日ごとに違う値を示した.

表 6.1 各観測日におけるマニングの粗度係数逆算結果

日付	マニングの粗度係数($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)
2024/07/23	0.075
2024/08/13	0.105
2024/08/15	0.105
2024/08/28	0.086
2024/09/03	0.074
2024/09/21	0.092
2024/10/14	0.089
2024/11/21	0.111
2024/11/25	0.108

このようにマンニングの粗度係数がばらつきを示した原因の考察を行った.平均水深とマンニングの粗度係数の関係を表したグラフを図 6.6 に示す.

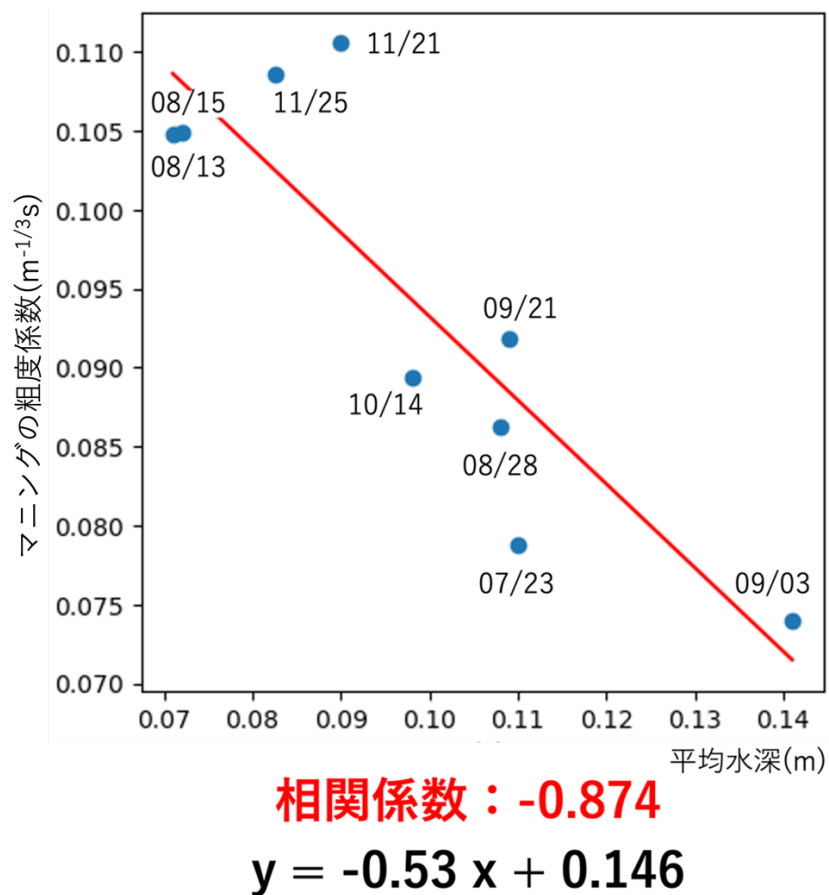


図 6.6 マンニングの粗度係数-平均水深 相関図

その結果,平均水深とマンニングの粗度係数は負の相関を示し,平均水深が大きくなるほどマンニングの粗度係数は小さくなることが分かった.これは,河床の礫の大きさに対して水深が大きい場合,水の流れが礫からの抵抗を受けにくくなるからであると考察できる.このような結果は流量や平均流速とマンニングの粗度係数を比較した場合でも同じような結果を示した.このことから,水深や流量が変化することでマンニングの粗度係数も同様に変化することが分かった.

マンシングの粗度係数と平均水深は高い相関を示し,互いの関係が確認できたため,回帰直線式を用いて河川点群から得られた平均水深より粗度係数を逆算した.その結果を表 6.2 に示す.

表 6.2 各観測日における回帰直線によって得られたマンシングの粗度係数

日付	マンシングの粗度係数($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)
2024/07/23	0.088
2024/08/13	0.109
2024/08/15	0.108
2024/08/28	0.089
2024/09/03	0.071
2024/09/21	0.088
2024/10/14	0.094
2024/11/21	0.099
2024/11/25	0.103

表 6.2 に示す回帰直線からの逆算によって得られた各観測日のマンニングの粗度係数を用いて、本研究手法にて再度河川流量の推定を行った結果を図 6.7 右に示す。図 6.7 左は図 6.1 で示した粗度係数を補正する前のグラフである。図 6.7 右の結果はマンニングの粗度係数以外は点群より取得された値を用いている。結果、 $Y=X$ の直線に近づき、誤差の大きさを表す指標である RMSE も小さくなった。このことから、河川状況に適したマンニングの粗度係数を取得する必要があることが分かった。しかし、本研究の趣旨である渇水期における河川流量の解析を行うという観点から見ると水位にあまり変化は見られず、マンニングの粗度係数も 0.105 から $0.110 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 付近で安定していることから、適したマンニングの粗度係数を取得できれば固定値での推定を行うことが可能であると考察できる。

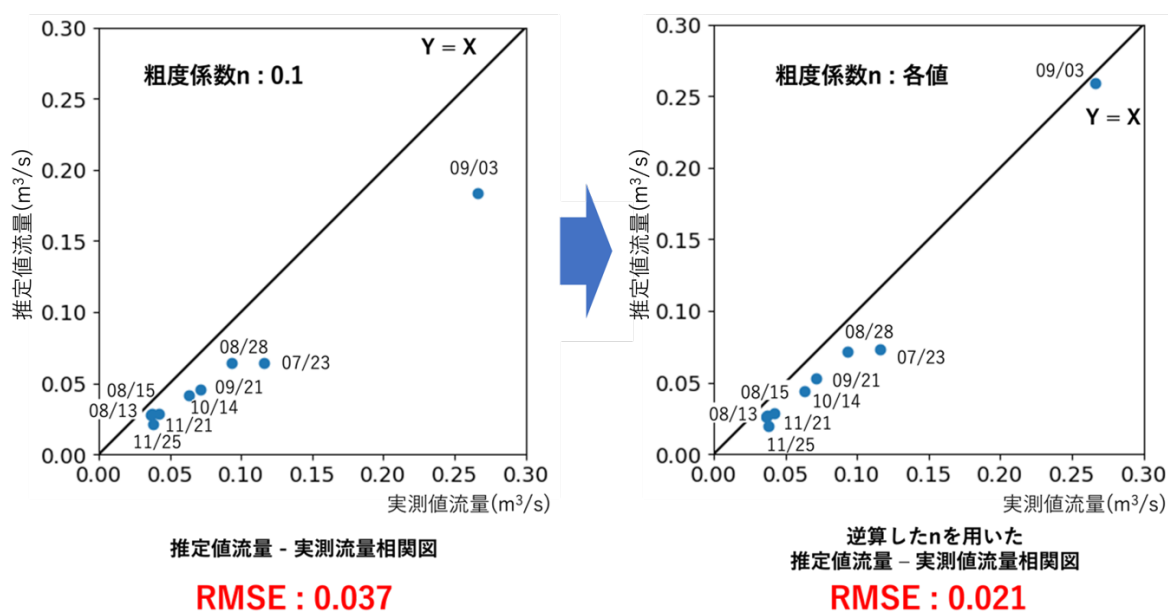


図 6.7 マニングの粗度係数別流量比較

7. 結論

7.1 本研究手法における推定流量の精度

本研究では山間部小規模河川である後入川にて, SfM を用いて河川点群を作成し, 点群から要素を取得することによって河川流量推定を試みた. その結果, 推定値と実測値には差異が見られ, 絶対値として扱うことは難しい結果となった. しかし, 推定値と実測値は非常に高い相関を示し, 相対的な値は高精度に取得できていることが分かった. この結果から, SfM によって作成した点群より取得された要素は, 課題がありつつも高い精度を有しており, 河川流量推定にも使用可能であると分かった.

・ マニングの粗度係数

マンニングの粗度係数は 6 章より, 水位や流量によって変化することが確認でき, 河川状態によって定義されているものの, 各河川で適した値を取得する必要があることが分かった. しかし, 標準値である $0.100 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ を使用した場合でも相対的な値は高精度に取得可能である. また, 渇水期を対象とする本研究においては, マニングの粗度係数は水位の低い場合, 変動が少ないことが確認できたため, 適した値を取得できれば固定値として使用することも可能であると分かった.

・ 平均水深

今回の研究では, マニングの公式で用いる径深を平均水深と置き換えて計算を行なった. 水深に対して川幅の非常に大きい河川では, 径深と平均水深がほぼ一致することも確認でき, より簡便に取得可能な平均水深で計算が可能であると分かった.

・ 動水勾配

動水勾配は SfM より作成された点群にて, 水際から水位を取得し水位差を求めることで算出を行なった. 結果, 実測の値をよく捉えており, 点群から十分に取得可能であると分かった.

・ 断面積

河川の点群を作成する際, SfM の性質上, 水面の影響により光の屈折率が変化し, 河床が浮き上がって検出されるため, 断面積が過小評価されると分かった. 断面積は河川流量に与える影響が大きいため, 屈折率を考慮した補正を行い, データを扱う必要がある.

7.2 本研究手法の実用性評価

ここまでは、本手法の計測精度について述べてきた。一方で、山間部の複数地点で河川流量計測を行うことを目的としている上で、労力の削減や計測時間の短縮などの実用的な利点が求められる。そこで本節では、本研究手法の精度検証として用いた可搬式流速計による計測と比較し、本研究手法の実用的な観点からの優位性について考察した。

・計測時間

可搬式流速計を用いた実測と本研究手法における、現地での計測時間について比較を行う。可搬式流速計を用いて実測を行うと、所要時間は 20 分から 30 分程度である。一方で、本研究手法での現地計測は、河川をカメラによって撮影するのみであり、撮影時間は 10 分から 15 分程度である。そのため、データ処理などの内業はあるものの、現地での計測時間を半減することが可能である。また、様々な工程を踏まえる必要がある実測に対し、本研究手法はカメラ撮影のみと、労力も削減できていると言える。

・計測機材の軽減

山間部の河川で計測を行う上で重要なのが、安全性の確保である。山間部の河川は陰しい環境下のものが多く、移動時の安全性などの観点から、計測機材はできるだけ少ないことが望ましい。可搬式流速計による実測では、測線幅を計測するメジャー、水深を計測する標尺、流速計、記録用紙など様々である。対して、本研究手法では撮影するカメラ、撮影棒のみであり、計測機材の軽減を行うことができる。

・河川形状の計測

連続的な流量データの計測には、水位流量曲線が一般的に用いられる。水位流量曲線とは、水位と流量の間で近似できる二次曲線であり、水位計にて水位を計測することで、対応する流量の推定が可能となる。

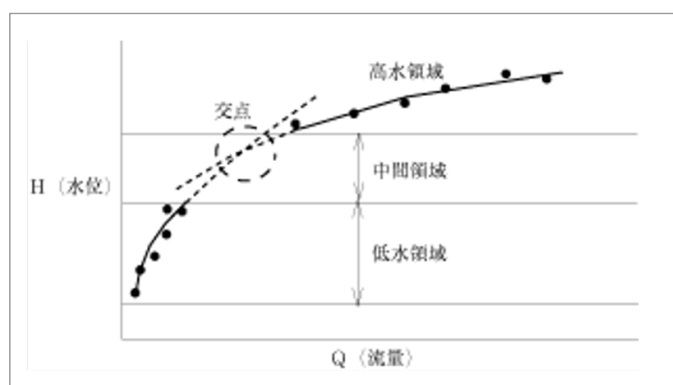


図 6.8 水位流量曲線

出典：四国地方整備局. H-Q 曲線

<https://www.skr.mlit.go.jp/kasen/mizu/yougo/sect07.htm>

しかし,山間部小規模河川では河床変動が多く断面積が変化するため,水位流量曲線を用いた水位データからの流量推定が困難である.本研究手法では図 6.9 のように河床形状の変遷を高精度に捉えることが可能であり,河床変動が流量に及ぼす影響を考慮することができる.

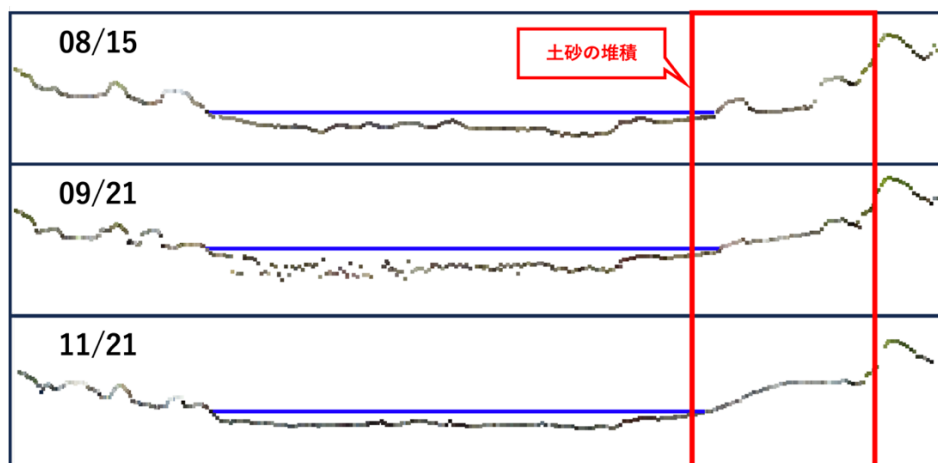


図 6.9 点群から得られる河床変動の様子

7.3 課題

今回,本研究手法は相対的な河川流量を高精度に取得できており,現地での計測時間も短縮することができた.しかし,現地でのデータを取得後,点群作成と解析に時間を要する.点群作成は Agisoft 社の metshape という SfM ソフトを使用し,解析は Python を用いたプログラムによって処理を行っている.そのため,処理はほぼ自動化できているが,点群からの水位取得は目視での取得となる.点群からの水位取得は,陸地と水地の色の違いから水際を判別し抽出を行っている(図 5.1).陸地と水地は画像情報から反射率の違いにより判別できることが期待でき,今後は水位取得の精度向上と自動化に向け検討が必要である.

また,今回の研究では SfM に用いる画像データの撮影をアクションカメラによって人の手で行っている.さらに労力の削減を行うためには,小型の UAV 等を用いて非接触での撮影を行うことが望ましい.その際の撮影ルートや飛行時間,撮影方法の違いによる点群精度などの検討も今後は必要である.

7.4 まとめ

本研究では、山間部の小規模河川において SfM を用いた流量推定手法の構築を行なった。その結果、推定された河川流量は実測値と比べ、誤差を含む結果となった。しかし、推定値と実測値の相関は高く、相対的な値は高精度に取得できていると分かった。このことから、SfM によって計測された各要素は、河川流量推定において十分使用可能であると考察できる。しかし、各要素が推定値流量の誤差に起因していることも確かである。誤差の原因の一つであると分かった断面積は、水面の影響により屈折率が変化し、河床の浮き上がりが発生していた。これは、水の屈折率における補正係数を乗じることで補正を行うことが可能であり、屈折率を考慮したデータとして今後使用する必要があると分かった。また、マンニングの粗度係数は河川の状態から設定されている標準値を使用した。水深などの変化によって異なることも確認され、適した値の検討は必要であると考えられる。しかし、標準値を用いても相対的な河川流量は高精度に取得できること、水位変動の少ない渇水期においてはマンニングの粗度係数の変化も小さく、適した値を取得できれば固定値として使用可能であるとも分かった。

また、本研究手法と可搬式流速計を用いた実測方法を比較した結果、現地での計測時間は実測が 20 分から 30 分程度、本研究手法は撮影に 10 分から 15 分程度と、所要時間が半減した。また、可搬式流速計を用いた実測は計測機器を多く必要とするのに対し、本研究手法は撮影機材のみで計測可能であり、計測時間や労力の削減を行うことができたと言える。

さらに、河川形状の変化が大きい山間部小規模河川では、河床形状の把握が非常に重要である。本研究手法では河床形状の変遷を高精度に捉えることが可能で、山間部小規模河川における流量推定では非常に有用であると考ええる。

山間部の河川を複数地点計測するにあたり、観測箇所を変更することによる時間的なデータの誤差を少なくする必要がある。時間短縮や労力の削減は非常に重要である。本研究手法は、相対的ではあるが河川流量の変化を高精度に捉えており、また従来の実測方法と比べ労力や計測時間の削減を行えた。このことから、山間部小規模河川での簡便な流量計測手法の提案ができたのではないかと考える。

しかし、今回の研究で対象とした河川は後入川の一河川のみで、測線も固定して解析を行った。本研究の大目的である、河川流量と森林状態の関係性評価を行うためには、本手法が様々な山間部小規模河川で適用可能である必要がある。そのためにも、現在の誤差の影響を排除し、複数の河川で実験的に本手法を用いて活用が可能であるか検討を行なっていき、河川流量にとって適切な森林状態の把握に繋げていく必要がある。

引用文献

- [1]国土交通省. 河川審議会について 2.河川整備の現状と課題,
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/past_shinngikai/shinngikai/shingi/to-2.html
- [2] 独立行政法人森林総合研究所. 森林と水の謎を解く(2)間伐と水流出
- [3]小松 光. 森林と水資源, 水利科学, 2010 年, 54 巻 3 号, p.1-29
- [4] 渡辺 豊, 河原 能久. UAV を利用した空中写真の河川地形計測への適用性,
水工学論文集第 60 巻, 2016 年, 72 巻 4 号
- [5] 原田 守啓, 荒川 貴都, 大井 照, 鈴木 英夫, 沢田 和秀.
UAV と水域可視化処理による河川地形計測手法の検討, 河川技術論文集, 2016 年, 22 巻,
p.67-72
- [6] 神野 有生, 米原 千絵, I GD Yudha Partama, 小室 隆, 乾 隆帝, 後藤 益滋,
赤松 良久. UAV と SfM-MVS を用いた河床冠水部の写真測量のための水面屈折補正係数に
関する検討, 河川技術論文集, 2018 年, 24 巻, p.19-24
- [7] 浅野 友子, 星野 晋一郎, 内田 太郎, 秋山 浩一.
山地河道における水の流れとマニングの粗度係数の実測, 砂防学会誌, 2012 年, 65 巻 1 号,
p.62-68

参考文献

- [8]国土交通省. 第 V 章 異常時の水質調査
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/suishitsu/youryou_ref5.pdf
- [9]国土交通省. 第 2 章 水文・水理観測 第 4 節流量観測
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/chousa_02_04.pdf
- [10]四国地方整備局-国土交通省. 水文観測の用語集 6.低水流量観測
<https://www.skr.mlit.go.jp/kasen/mizu/yougo/sect06.htm>
- [11]森林総合研究所企画部藤枝基. 森林と水の謎を解く-水源かん養機能の理解にむけて-
<https://www.rinya.maff.go.jp/kanto/gizyutu/attach/pdf/sinrinringyoukoukaikouza1-3.pdf>
- [12]太田 猛彦. 森林と水循環, 森林科学, 1996 年, 18 巻, p.26-31
- [13]中津川 誠, 清水 康行. 現場のための水理学(1)-単断面における不等流計算-,
北海道開発局土木試験所月報技術資料, 1987 年, 411 号, p.54-74