河川管理におけるUAVの活用方策に関する現地実証試験

EVALUATION OF UAV TOOL IN RIVER MANAGEMENT

清水 隆博*・秋田 麗子*・野間口 芳希*・米倉 瑠里子*・佐藤 隆洋**・炭田 英俊*** Takahiro SHIMIZU, Reiko AKITA, Yoshiki NOMAGUCHI, Ruriko YONEKURA, Takahiro SATO and Hidetoshi SUMITA

When patrolling and inspecting a river, there are dangerous places that can't be approached, places where visibility is blocked, and the confusing documents that don't seem to match the topography. Therefore, the utilization of UAV is increasing as a promising river management tool. To evaluate utilization of UAV, a demonstration was performed actually at rivers in Tohoku and Hokuriku, Japan. As a result, we confirmed that measurement accuracy of photogrammetry by UAV is sufficient to grasp of a strange document of fixed scale, and thus it can be fully utilized to cover conventional patrol and inspection. We also confirmed that it is possible to grasp the topography under the trees by utilizing laser scanning by UAV, and to grasp the topography of underwater to a depth of about 2 m by image analysis. It was even possible to construct 3D model with high accuracy from diagonal aerial photographs for dealing with emergency after a flood and to use existing distance marks.

 $\textit{Keywords}: \ Unmanned \ Aerial \ Vehicle \ (\textit{UAV}), \ Laser \ scanning, \ Photogrammetry, \ River \\ management$

1. はじめに

これまでの河川管理では、定期横断測量成果による河道の変化状況の確認や、目視による変状確認が基本であるため、人が容易に近づくことができない箇所では船上巡視等により現地の状況の確認を行っている。

しかしながら、200mピッチの横断測線間で護岸の損傷や側方侵食が見られること、目視では河道全体を精度よく安全に監視することが困難となっており、面的な調査が求められている。

一方で、維持管理の予算の増大は難しく、点検を担う技術者の高齢化が進んでおり、今以上の費用や人手をかけて、これらの課題を解決していくことは難しい。よって、これからの河川管理においては、従来の経験的・アナログ的手法から、ロボット技術の発展著しい計測技術を取り込み、合理化・省力化・高度化に向けた転換が求められている。

ロボット技術の一例として、近年、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) については、機体が比較的安価で入手しやすく、また、操作も容易であることから急速に普及している。このため、現在では、測量、調査・設計、施工・施工管理、検査、維持管理に至るまで幅広く利用に向けた検討が行われるようになっている。

本稿は、この UAV を取り上げ、河川管理において UAV を活用していくための方策を現地実証試験を通して検討するものである。なお、UAV は無人航空機全般を指すが、ここでは、特に小型無人機を指して、この名称を用いる。

2. UAV を取り巻く現状

(1) 法規制

UAV については、技術の進歩により、小型化、高性能化、低価格化が進み急速に普及してきたが、2015 年 4 月に首相官邸屋上で UAV が発見された事例や、歴史的建造物への激突、落下事故などが多発したことを受け、安全面における課題が明確になった。

これを受け、政府として UAV の安全な運航ができるルール作りが進められ、2015 年 12 月には「航空法の一部を改正する法律」(以下、「改正航空法」という)が施行された。これにより、無人航空機の飛行に際しての基本的なルール(人口集中地区などの空域、150m 以上の高さの空域等、飛行に許可が必要となる空域等の制約条件)が定められた。具体なルールについては、参考文献1)を参照されたい。

(2) 技術動向

UAV については、カメラ搭載型が一般的であったが、近年の技術開発により、レーザスキャナーや赤外線カメラの搭載など、写真撮影だけでなく、直接的な地形データの取得やリモートセンシングなど、様々な調査が可能となっている。

また、写真測量についても、SfM (Structure from Motion)解析の技術開発などを背景に、水面下の地形の計測など、計測技術が高度化している^{2),3)}。ここで、SfM とは、画像解析技術の一つで、多くの視点から撮影した写真を基に、各写真のパターンマッチングを行い、写真撮影位置を推定し、推定した写真位置を基に3次元モデル形状を構築する手法である。

^{*} コンサルタント国内事業本部 流域・都市事業部 河川・水工部

^{**} コンサルタント国内事業本部 社会システム事業部 CIM推進センター

^{***} コンサルタント国内事業本部 流域・都市事業部

3. 河川管理の課題と UAV のマッチング

先に示した通り、200m ピッチの測線間の護岸の損傷や側 方侵食、人が近づけない、確認することができない変状等に 対して、それを確認する必要性が生じている。

近年、UAV に限らず、計測技術は研究段階・発展途上の ものも含め、技術革新が著しい。そのため、UAV以外の計 測技術 (MMS、航空レーザ、音響測深等) も含め、変状把 握に対する UAV の適用性を整理した。

(1) 各種計測技術の特徴整理

1) 計測可能箇所に関する整理

各計測技術により変状計測が可能な箇所については、河道 全体、堤防周辺、植生域、水中に区分して整理すると表-1 のとおり整理でき、全てを網羅的に把握可能な技術はなく、特 に植生域における変状計測が可能な技術が限定されることが 確認できる。

			陸域		
	計測技術	河道 全体	堤防 周辺	植生域	水中
UAV 写真	UAV による空中写真測量	0	0	×	Δ
MMS	各種計測機器を搭載した移動計測車両 による測量	Δ	0	\triangle	
航空レーサ゛	航空機やヘリコプターによるレーザ測 量	0	0	Δ	_
UAV レーサ゛	UAV によるレーザ測量	0	0	0	
音響測深	マルチビーム等音波を利用して水深を計測		_		0
航空 ALB	近赤外レーザとグリーンレーザの同時 照射により陸域・水中をレーザ測量	0	0	\triangle	0
観測衛星(SAR)	電波照射し、反射波の強さから対象物の大きさや表面性質を把握	0	0	Δ	

表-1 変状計測が可能な箇所の整理

※○:可、×:不可、△:状況や追加技術により可能、一:対象外

2) 空間スケール、精度に関する整理

各計測技術について、1日あたりの計測範囲や計測の密度、 水平・鉛直方向の精度について、表-2に整理した。なお、 整理にあたり、公開資料の他、実際に各計測を行っている企 業等にヒアリングを行うことで情報の拡充を図った。

レーザ計測については、航空機と比べ、UAV では高度を 低く飛ぶことで、密度や精度を向上することができている。但し、 UAV ではその分計測範囲が狭くなるという結果にもなる。

表一 2	空間スケー	ルと精度の整理
------	-------	---------

計測技術	計測 範囲 (km²/日)	対象上の点 群間隔(**は 空間分解能) (cm)	水平方向 精度 (cm)	鉛直方向 精度 (cm)
UAV 写真	1~2	1~50**	1~5	1~5
MMS	10~20	10~50	1~10	1~10
航空レーサ゛	10~80	70~200	20~30	8~10
UAV レーサ゛	$1 \sim 2$	5~20	2~10	2~10
音響測深	1~2	10~200	2~10	5~50
航空 ALB	不明	不明	不明	不明
観測衛星(SAR)	$50 \sim 200$	100~300*	$1 \sim 5$	1~2

3) コスト等に関する整理

現地条件や計測条件によって大きく異なるものの、大まか に、河川延長 1km 当たりの計測にかかるコストから相対的な 優劣を概略的に整理した(表-3)。

一度に大量の計測を実施可能な航空レーザ測量などは、1 業務あたりの金額は大きいが、延長あたりで考えると比較的安 価となり、スケールメリットがある。 UAV 写真測量や UAV レー ザ測量は、現在の相場ではまだ安価とは言い難いが、数年以 内にコスト低減に向かうことが想定される。

表 - 3 河川延長 1km 当たりのコストの整理

計測技術	数量	同左コスト	コ사評価	備考
横断測量	5 測線	30 万円	安	現地条件による
UAV 写真	8 時間	100 万円	並	現地条件による
MMS	1時間	60 万円	並	現地条件による
航空レーサ゛	1時間	100 万円	並	航路等による
UAV レーサ	8 時間	200 万円	高	現地条件による
音響測深	8 時間	80 万円	並	現地条件による
航空 ALB	不明	不明	不明	
観測衛星(SAR)	1 図郭	20 万円	安	行政購入価格

※コスト評価は今回対象とした計測技術の中での評価

(2) UAV とのマッチング

以上までで整理した通り、河道内の変状に対し、全てを網 羅的に把握可能な技術はなく、また、対象とするスケールや 必要な精度によっても適する計測技術が異なる。よって、現地 において最も重要視する要求事項や見たい事項を把握した上 で、必要な計測技術を選定し、場合によっては、複数の手法 の組合せでもって対応することが重要である。

そこで、典型的な河道の巡視など状況把握の要求事項とし て、堤防の変状も河道内の変状も合わせて確認することを想定 し、各計測技術について整理を行った。なお、ここでは、水 中部のみを対象とする音響測深や ALB については除外した。

表-4に示すとおり、単独の計測技術でも適用可能なもの として、横断測量と UAV 写真測量が挙げられる。変状が非常 に大スケールであれば横断測量で対応でき、安価に抑えられ るが、面的な変状の把握としては、UAV 写真測量では、変 状のスケールによらずほぼ適用可能である。

以上より、UAVを取り上げ、現地実証試験を行った。

表-4 河道全般の変状に対する適用性

	変状			計測技術				
場所	種類	要求精度 ※要領、実績による	横断 測量	UAV 写真	$_{ m S}^{ m MM}$	航空 レーサ	UAV レーサ゛	観測 衛星
堤防	はらみ出し ・寺勾配	H:50~500cm/ V:10~40cm	Δ	0	0	Δ	0	Δ
	陥没•不陸	H:30~500cm/ V:10~60cm	Δ	0	0	Δ	0	Δ
	沈下	H:100~1000cm /V:10~60cm	Δ	0	0	0	0	0
河	土砂堆積	H:2000~50000cm /V:50~300cm	\triangle	0	×	\triangle	\triangle	×
道	河岸侵食	H:2000~50000cm /V:50~500cm	Δ	0	X	Δ	Δ	×

※○:可、×:不可、△:変状規模により変化

4. 現地実証試験

(1) 使用機材

河川管理に UAV を活用していくためには、使用する機材は一般的に汎用性のある機体・搭載機器が望まれると考えられる。

そのため、本稿では、カメラ搭載型 UAV による写真撮影を 基本とし、各種河道の変動や変状に対する有用性を検討する。

UAV機体としては、一般に広く普及し汎用性の高いPhantom (DJI 社製、カメラー体型)を用いることとし、これに加えて必要性を満たす機器として、撮影効率の高い高性能カメラを搭載できるカメラ分離型のUAVとしてSpider (ルーチェサーチ社製)でも併せて試験を実施した。

また、写真撮影だけでは河道の変状が判断しにくいことが想定されるため、UAVによるレーザ計測も実施し、その有効性を検証することとした。

表-5に使用した機材を示す。

表-5 使用機材

		DJI Phantom	Luce Search Spider
	機体重量	1.3kg	7.5kg
1-61-6	外形寸法	0.35m×0.35m	1m×1m×0.4m
機体	耐風速	不明 (一般的に は 5m/s 以下)	15m/s 以下
	飛行時間	約 23 分	約 25 分
力	機材	一体型	ソニー α 7R
メ	画素数	1,240 万画素	3,640 万画素
クラ	撮影素子 サイズ	1/2.3	フルサイズ
外観			

(2) 堤防、護岸等の点検

1) クラックの把握に関する実証試験

堤防や護岸の変状については、数 mm 単位の亀裂から数 + cm 単位の破損まで様々な変状の把握が要求される。ここでは、現地スケールで 5mm 程度のクラックに対し、撮影離隔を変えて、検証を行った。

表 **- 6**、表 **- 7**に示す通り、汎用機の Phantom について は離隔 10m 程度、高性能機の Spider については離隔 30m 程度でクラックを確認できた。

クラックのように撮影した写真から判読する変状については、 多少の日照条件の影響を受けるものの、殆どは撮影するカメラ の性能によるところが大きいため、表 8 に示すように、カメラ の性能に合わせて、目標とする変状スケール(クラックの幅な ど)を満たす精度となる離隔により撮影を行うことで、変状の 把握が可能である。

表 - 6 クラックに対する現地試験結果 (Phantom による)

	離隔 40m	離隔 10m
撮影 写真		
遠景	L. C.	
撮影	The state of the last	- NOTE:
写真		1/2/0-
拡大		了。主
同上	The state of the s	1 - X - 1
クラッ		1/22/0-
ク位		1 + \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \
置明	A CONTRACTOR	
示	EXA SI	1000
結果	クラックの認識は不可。	クラックが認識可能。

表-7 クラックに対する現地試験結果 (Spiderによる)

	離隔 100m	離隔 30m
撮影		
写真		31.
遠景		13-40-2
撮影		
写真		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
	国的	A C 00
拡大		
同上		
クラック		200 1
位 置	国的	A CO
明示	10-1	
結果	クラックの認識は不可。	クラックが認識可能。

表-8 要求精度に合わせた離隔の設定

機体	精度	離隔	撮影範囲
Phantom	5mm	10m	15m×11m
	1cm	25m	$37\text{m} \times 27\text{m}$
	2cm	55m	81m×60m
	5cm	135m	199m×148m
	5.5cm	150m(最大高度)	221m×165m
Spider	5mm	30m	$38\mathrm{m}\! imes\!25\mathrm{m}$
ソニー α 7R	1cm	55m	$70\text{m} \times 47\text{m}$
	2cm	115m	147m×98m
	2.6cm	150m(最大高度)	192m×128m

※カメラの画素数、撮影素子サイズ、焦点距離より、必要精度を満足する離隔を逆算し、またその時の撮影範囲を算出した。

2) 不陸の形状認識に関する実証試験

図-1に示すように、見た目からのみでは判断し難い不陸 などの変状については、取得した写真データを用いて画像解 析を行うなどにより、地形データの取得が必要となる。

写真測量における画像解析の手法の1つとしてSfMがあり、本稿においても、前述のSpiderにより撮影した画像を用いてSfM解析により取得した地形データを用い、変状の把握を行うものとするが、地形データの取得にあたっては、写真測量による方法の他、レーザ等による直接測深による方法があるため、その1つとしてUAVによるレーザ計測(表-9)により得られた地形データについても検証を行うものとした。



表-9 使用機材(レーザ)

		Luce Search Spider-eX
機	機体重量	24.5kg
体	外形寸法	1.1m×1.1m
	耐風速	15m/s以下
	飛行時間	約15分
V	有効測定レート	50万発/秒
#	視野角	330°
	レーザ゛クラス	アイセーフクラス1

図-1 写真撮影 (Spider、離隔20m) による不陸箇所の状況把握

表-10 不陸の変状把握結果 (写真撮影とレーザ計測)

	写真撮影、SfM	レーザ計測
段彩図	コンターの歪み	コンターの歪み
傾斜図	変化がみられる	変化がみ られる

表 - 10 より、取得した地形データから段彩図とコンター線を作成することで、不陸箇所ではコンターが歪み、周辺と変化があることが見て取れる。また、傾斜図では、不陸箇所では周辺より若干の変化がみられ、何かしらの変異が生じていることが確認できる。

同様にレーザ計測により得られた地形データについて、段

彩図や傾斜図を作成した結果、より鮮明に不陸の状況を確認 することができた。

通常、植生等がある場合には、写真測量では植生の表面のデータを取得してしまうため、地盤の状況が不鮮明になってしまう。しかし、レーザ計測については、特に UAV レーザでは航空機よりも飛行高度が低くレーザの照射密度が高いため、地盤面に到達する点群が多く生じることで、植生とともに地盤の形状も詳細に取得できる。そのため、今回の結果については、レーザ計測ではより鮮明な結果が得られたものである。

以上より、不陸のような見た目からのみでは判断し難い変位を持った変状については、解析処理により視覚的に整理することが、その変状の把握によって有効である。また、植生がある場合には、レーザ計測による直接的な計測を行うことでより詳細な状況把握が可能である。

(3) 水門、堰等構造物の点検への活用に関する実証試験

水門や堰など河道内の大規模な構造物については、これまで船や点検車により実施していた各部材の確認を代替できることが要求される。

構造物に対して UAV を飛行させる場合、特に管理橋の下部や、ゲート部分の変状を確認するに際し、構造物や水面に非常に近接することになるため、UAV の安定性など安全面での配慮が最も重要になる。

施設が大規模になれば、操作するポイントから UAV が離れることになり、施設の陰など死角にもなりやすくなる。

よって、現地においては、まずは安全に飛行することが可能か、また、撮影した写真により、通常の点検時と同様に施設の劣化(今回は、管理橋支障部の錆の確認を対象とした)が確認できるか検証を行った。但し、ゲートや管理橋下部に潜り込んでの飛行は、操作において死角となるため、ゲートや管理橋の外側からの撮影のみとした。

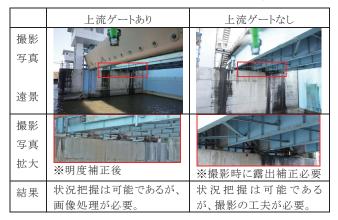
なお、現地の気象条件(風速 5m/s 以上)や構造物周辺では風の変化が大きいことから、汎用機である Phantom については飛行が困難であると判断したため、Spider のみで検証を行った。

また、検証を行った施設については、上下流にそれぞれゲートがある構造であったため、ゲート内部の管理橋の下部の把握については、それぞれ検証を行うものとした。

結果として、表 - 11 に示す通り、検証に用いた機体は耐風速が 15m/s であるため、ゲート付近においても安定した飛行が可能であり、また、それにより撮影した写真では、画像処理や露出補正等が必要になるものの、通常の点検時と同様な状況把握は可能であることが確認できる。

以上の通り、水門や堰等の構造物に対して、船や点検車により行っていた点検は、UAVにより多少の工夫は必要になるものの可能であることが確認できた。特に、流れがあるゲートの確認など、非出水期等にゲート操作をして確認しているようなものに対しては、より効果的であると考えられる。

表-11 大規模構造物に対する現地試験結果(Spiderによる)



(4) 河道地形等の面的把握に関する実証試験

河道内の砂州の変化などの土砂動態の把握や、樹林化の 状態把握、河岸部の変状など、河道の動態把握の要求として は、スケールの大きな変動が対象となる。

そのため、河道全体を俯瞰的に把握し、かつ、砂州など動 的な変化を把握するためには、高高度から撮影を行い、河道 全体を効率よく計測する必要がある。

また、動態把握という点では、撮影した写真だけでは大まかには変化の状況は把握できるものの、定量的にそれを把握することは難しいため、先に示したような SfM 等により地形データを取得することが望ましい。ここでは、高高度でもより精度よく撮影を行うことができる Spider を用いて検証を行うとともに、UAV レーザ計測も実施し、検証を行った。

表-12 に結果を示すが、検証箇所においては、砂州や河岸に広く樹木が密生しているため、図-2 に示すように、樹木下の地盤高を取得できるレーザ計測が、より再現性のある地盤高データを取得することができている。なお、写真撮影による地盤高については、取得したデータより突起状に高い地物についてフィルタ処理を行うことで取得した。

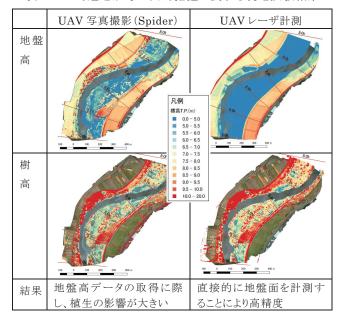
また、樹木など植生を含む地物表面のデータについては、 写真とレーザ計測で差はなく、このようなデータ取得において は、より安価な写真撮影で十分現象把握が可能である。

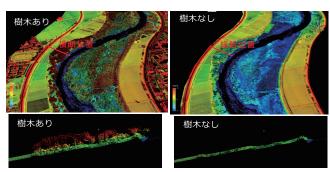
(5) 水面下の河床形状の把握に関する実証試験

水面下の河床形状の把握は、河道内の変状を把握する上で重要な要素の1つになる。前述の通り、水中部については、音響測深やALBなど、UAVではない計測技術が必要となるが、冒頭に示した通り、SfM解析技術の進展や、SfM解析技術を用いた研究の発展により、水面下の地形把握なども可能となってきた。

ここでは試行的に SfM 解析による水面下の河床形状の把握を行った。具体には、Spider で高度 70m から撮影した写真を用いて SfM 解析により取得した地形データより水面下部を水深のデータとして取り出し、これに水面屈折補正係数 1.34 を乗じる方法である (詳細は参考文献 2),3) を参照されたい。)。

表-12 河道地形等の面的把握に関する現地試験結果





図ー2 レーザ計測により取得した地形データ(樹木有無)

この方法により、右岸の陸域から水深 2m 程度までは高い精度で地形データが得られたが、左岸については水面反射の影響が大きく、再現精度が低下している(図-3)。従って、撮影した写真において河床が問題なく見通せる環境であれば、UAV 写真測量により水深 2m 程度までは精度よく地形を再現できると考えられる。

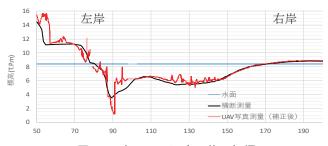


図-3 水面下の河床形状の把握

(6) 出水時等における河川の状況把握に関する実証試験

出水時において河道内の被災状況や痕跡水位の調査などを行うことは重要であり、UAVの技術の発展により、出水時に河道の状況を迅速に把握することが求められている。なお、本来であれば出水時において河道の状況が把握できることが望ましいが、出水時には降雨や風の影響があり、UAVが墜

落する可能性が高いため、出水後に状況を把握することを目的とした。

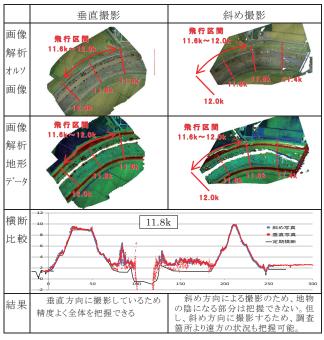
河道の状況を広く把握するために、先に示した河道の面的 把握と同様に、高高度から撮影を行い、河道全体を効率よく 計測する必要がある。そのため、飛行方法として、高度を規 制の限界値 150m まで上げて垂直に撮影した場合と、斜め方 向に撮影した場合 (高度は対象河川全体が入る 100m とした) を比較した。

表-13に示すように、垂直方向と斜め方向からの撮影より得られたデータについては、11.8k地点において定期横断と比較した結果、植生の影響により高水敷部の再現性は低いものの、堤防等の形状の再現性の精度は高いことが確認できる。

また、斜め方向からの撮影については、地物(樹木や樋管等の構造物など)の陰になる部分は、取得される写真に写りこまないため、抜けた状況となるものの、その分遠方までの撮影を行うことができている。11.4k 地点で定期横断と比較した結果、右岸側堤防では樋管や植生の影響により差異が見られるものの、左岸側では堤防形状を表現できていることが確認できる(図-4)。なお、斜め撮影写真の画像解析では、遠方の対空標識として既存の距離標を用いているが、前述の通り堤防形状の再現性が確認でき、既存距離標を対空標識として活用できることが確認できた。

以上より、出水時には、UAVにより斜め方向からの写真撮影を行うことにより、ある程度の精度で効率よく状況を把握することが可能である。

表 - 13 飛行方法による取得データの比較結果



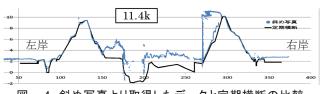


図-4 斜め写真より取得したデータと定期横断の比較

5. 現地適用にあたっての課題

(1) 気象条件

UAV については、特に使用する機体の耐風速性能に留意する必要がある。先にも示した通り、汎用機である Phantomでは 5m/s 以下、高性能機である Spiderでは 15m/s 以下という目安はあるものの、これらは一般値で、かつ、地上風速によるものであり、上空では風が異なると考えられる。

また、降雨については、ある程度の防水機能を持っている 機体が多く、多少の降雨では影響がないことが多いが、万が 一に備え、降雨時における飛行は避けるべきである。

以上より、気象条件により、必ずしも UAV による計測調査 が行うことができないため、実際に河川管理に使用していく場合には留意が必要である。

(2) 要領、マニュアル等の整備

今後、実際に UAV を河川管理に活用していくためには、 その具体な方法を記したマニュアルの作成や、UAV の墜落等 の事故を避けるため、UAV の知識や操作に関する操縦者の 育成など、技術的な部分以外の要素の拡充も必要である。

本稿の成果等を踏まえ、これら河川管理に使用する際のマニュアルや要領等の整備が重要である。なお、現在、各地方整備局において、マニュアル等、UAVの利用方法を検討している段階である(東北地整では既に手引きとしてHPで公開済み)。

6. おわりに

UAV については技術開発が目覚ましく、これまでにも橋梁 やダムなどの構造物点検 (例えば参考文献 4)、5))や測量 (例えば参考文献 6)、7))など個別事例による適用結果や検証に関する論文等はあるものの、「UAV で何がどの程度できるのか」という全体をとりまとめたものはなかった。そのような中で、本稿において、河川管理への UAV 活用の有用性を対象ごとに示した。UAV については、機体や搭載機器、周辺技術を含め、日進月歩で技術開発が進んでいる状況であるため、今後更に技術的に可能となることが増えると考えられる。今後、本稿における成果が、効率的な河川管理につながることを祈念する。

謝辞: 北陸技術事務所および東北技術事務所の方々には、データ提供等の面で多大な協力をいただきました。また、現地試験にあたり、ルーチェサーチ(株)の方々には多大にご尽力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 国土交通省:無人航空機 (ドローン・ラジコン機等) の飛行ルール、http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html

- 2) 掛波優作・神野有生・赤松良久ほか: UAV-SfM 手法を用いた高解像度かつ簡便な河道測量技術の検証、河川技術論文集、第22巻、2016
- 3) 神野有生・赤松良久ほか: UAVとSfM-MVSを用いた河道水 面下測量技術における水面屈折補正の高度化、河川技術論文 集、第23巻、2017
- 4) 辻野和彦・阿部孝弘ほか: UAV を用いた橋梁点検に関する基礎的検討、土木学会中部支部研究発表会、2015
- 5) 竹澤祥太・中村哲ほか:無人航空機 (UAV) を活用したロックフィルダム洪水吐きの健全度調査、土木学会年次学術講演会、第71回、2016
- 6) 高橋要・江田正敏ほか: UAV (ドローン) を使った写真測量精度の検証、土木学会年次学術講演会、第71回、2016
- 7) 市川健・那須野新ほか: UAV 測量による簡易な河川地形把握 手法を活用した河道管理の検討、土木学会年次学術講演会、第 72回、2017