

港湾分野における消波ブロックを対象とした UAV写真測量の標定点の配置方法に関する検討

小川 雅史¹

¹国土技術政策総合研究所 港湾研究部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

国土交通省港湾局では、「ICT機器を用いた測量マニュアル（ブロック据付工編）（令和2年4月版）」を公表した。しかし、消波ブロック（陸上部）を対象としたUAV写真測量について、同マニュアル内で準用できるとされた他の技術基準類では「計測対象範囲を囲むように外側標定点を配置する」ことを標準としており、消波ブロックを計測対象とした場合、計測対象を標定点で囲むためのコストや危険が大き過ぎた。このため、昨年度において実証実験を行い、外側標定点の外側50mまで±5cmの計測精度が確保される標定点の配置方法等を明らかにした。得られた知見は、消波ブロックを計測対象とした場合における防波堤上部工上への具体的な標定点の配置方法等として同マニュアル（令和3年4月版）に反映されている。

キーワード i-Construction, UAV写真測量, 標定点, 港湾, 消波ブロック

1. 背景と目的

国土交通省港湾局では、港湾工事において、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設現場の創出を目指す i-Construction を推進するための取組みを進めてきた。港湾におけるICT活用工事は、2017年よりICT浚渫工が先行する形で開始され、順次対象工種を拡大すると共に、国土交通省による要領の策定対象範囲も拡大されている。その中で、ブロック据付工（根固ブロック、被覆ブロック、消波ブロック（水中部、陸上部））の数量算出、出来形管理に係る要領については、主に以下の2点を理由に、その策定が見送られた¹⁾。すなわち、①既存の出来形管理基準の項目が天端延長のみでありICTを活用した精緻な管理を行うこと自体の必要性や、②ブロック据付工の出来形計測が一連の工事全体の工程の最後になることが多くデータ取得及び処理に要する時間がそのまま工期に影響を与えやすい、などの理由である。一方、戦後高度成長期の量的整備を経て、我が国の消波ブロックのストックは膨大であり、老朽化の進展も止まらない。消波ブロックの移動・散逸によるケーソン本体側壁への損傷等も指摘²⁾されており、供用時に期待された性能を発揮し得る状態が維持されているかを把握するための効率的な計測手法への潜在的ニーズは大きい。

このような中、出来形管理ではなく完成後の維持管理のための完成形状の把握に向けたデータ取得を目的に、「ICT機器を用いた測量マニュアル（ブロック据付工編）（令和2年4月版）」（以下、同マニュアル）³⁾が策定された。しかし、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）写真測量の活用を念頭にした消波ブロック（陸上部）のブロック据付形状の計測方法については、幾つかの留意

事項が記載される以外、国土交通省による『「ICTの全面的活用」を実施する上での技術基準類』（以下、他の技術基準類）を準用できる、とのみ記載された。ところが、同マニュアルにおいて準用できるとされた他の技術基準類は、陸上工事を前提としているため、港湾分野への単なる準用は現実的でない場合がある。公共測量の標準的な作業方法等を示した「作業規定の準則」（以下、準則）⁴⁾では、UAV写真測量において『計測対象範囲を囲むように外側標定点を配置する』ことを標準としているが、海に囲まれた防波堤のような港湾構造物を取囲む消波ブロックを計測対象とした場合、そもそも計測対象を標定点で囲むことは難しい。仮に外側標定点で取囲もうとするならば、海上に台船を複数設置した上で外側標定点を設置する必要が生じ、明らかに過大なコストと時間を要する。また、測量技術者が消波ブロック群の四隅等に登り標定点を人手で設置する方法も考えられるが、足場が悪く大きな手間と危険を伴う。

したがって、消波ブロックを対象としたUAV写真測量においては、所要の計測精度を確保しつつ、海上や消波ブロック上への標定点の設置を省略した、港湾に特化した効率的な計測方法の検討が必要となる。海上や消波ブロック上への標定点の省略により、標定点は自ずと防波堤上部工上へのみ設置されることになるが、計測対象である消波ブロックは外側標定点の囲いの外側に配置されることになる。このような消波ブロックが標定点の外側になることによる計測精度への懸念は、港湾独自の課題として既に指摘されていた⁵⁾ものでもある。近年になり、類似の課題認識を背景とした実証研究⁶⁾⁷⁾も見られたが、管見する限り、研究成果の社会実装に向けて、同マニュアルへの具体的な標定点の配置方法（設置数と設置間隔）に関する記載を目的に、標定点の配置方法の

違いと外側標定点の外側の計測対象までの距離が計測精度に与える影響に関する明示的な比較評価がされているとは言えなかった。

以上より、本研究では、昨年度、研究成果の社会実装を目的として同マニュアル改訂への反映に向けた実証実験による検証を行った。検証結果は、既に同マニュアル（令和3年4月版）に反映されており、本稿は、改訂の裏付けとなった実証実験の方法と検証結果の一部を述べるものである。

2. 測量会社へのヒアリング

はじめに、測量会社へのヒアリングを通じて、消波ブロックを対象としたUAV写真測量における課題等の確認を行った。ICTブロック据付工の試行工事の開始と同マニュアルの公表は、共に2020年度からであり、測量会社においても、消波ブロックを対象としたUAV写真測量の業務実績は非常に少ないことが懸念された。ヒアリング対象事業数を確保するため、海洋調査業務を営む企業等を会員とする一般社団法人海洋調査協会を通じ、同協会会員企業において特に港湾分野のICTを活用した測量業務に精通した企業の中から6社を選定し、同6社による消波ブロックを対象としたUAV写真測量の実績の全件を対象としている。ヒアリング方法は、各社に対し、事前にヒアリングシートを送付し、2020年12月4日～12月24日の間に、電話又はWeb会議により実施した。

ヒアリングの結果、様々な意見の中でも、外側標定点の外側の精度評価や標定点の配置方法の基準化に関する意見が5件と一番多く、次いで、斜め撮影の追加による効果と基準化に関する意見が4件と多かった。近年、斜め撮影を追加することによる高さ方向の計測精度の向上を実証した試験結果⁸⁾や精度向上の理論的背景に関する考察⁹⁾なども公表されるようになり、実業界において広く認知されていることが伺える。

本稿では、上記2件の課題への対応を対象とし、防波堤上部工上の標定点における設置方法（設置数と設置間隔）の違い、及び、当該標定点と計測対象である消波ブロックまでの距離が計測精度に与える影響について、それぞれ斜め写真の有無を加味したケースに関する実証実験の概要と検証結果を示す。

3. 消波ブロックを対象としたUAV写真測量に関する現地試験

(1) 対象施設と計測諸元等

消波ブロックを含む防波堤を対象とした実証実験を行うため、東北地方整備局釜石港湾事務所の協力を得て、2021年1月15日に岩手県宮古市宮古港内の竜神崎地区防波堤の約150m範囲をUAV写真測量の計測対象とした。現地試験に使用した機器と計測諸元等を表-1に示す。

表-1 計測諸元等

UAV諸元	機種	Phantom4Pro
	重量	1.388kg
	寸法	350mm
	最大風圧抵抗	10m/s
	測位	GNSS単独測位
カメラ諸元	計測機材	UAV備え付けカメラ
		ピクセル数: 5472 × 3648
		焦点距離8.8mm
撮影方法	地上画素寸法	0.8cm
	撮影方向	垂直 3コース 高度29m
		斜め 4方向 高度21m
	重複率	オーバーラップ80%、サイドラップ75%
実施日		2021/1/15

UAV機種は、Phantom4Pro（GNSS単独測位）を用いた。なお、3.(2)及び3.(3)において配置方法が検討される標定点と検証点の設置の準備として、はじめに基準点測量としてGNSSスタティック観測を行い、2級基準点を2点設置している。この2点を与点とし、標定点及び検証点の位置に対空標識を設置し、標定点や検証点自体の座標は、予め中心座標をトータルステーション（以下TS）による放射法により観測している。対空標識は、30cm四方の十字模様を用いた。

(2) 標定点の配置方法の検討

準則では、要求する位置精度を実現するための「地上画素寸法」及び標定点の配置方法となる「隣接する外側標定点間の距離」「内側標定点と取囲む標定点との距離」について規定があり、作成する三次元点群の位置精度は、0.05m 以内、0.10m 以内又は 0.20m 以内のいずれかを標準としている。また、UAV活用が進んでいるICT土工分野では、「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）」¹⁰⁾において、位置精度 0.05m 以内の三次元点群は出来形管理に、位置精度 0.10m 以内は起工測量又は岩線計測に、位置精度 0.20m 以内は部分払い出来高計測にと、その用途毎に、作成する三次元点群の位置精度を設定している。以上の関係を整理したものと表-2を示す。

また、港湾分野へのUAV写真測量の活用における留意点として、写真画像内の海面が占める割合が多い場合、SfM（Structure from Motion）ソフトによる特徴点の自動抽出を困難とし¹¹⁾、三次元点群データの生成に支障をきたすことが知られている。防波堤のように四面を海に囲まれた細長い構造物が計測対象の場合、撮影される写真画像に占める海面の比率を下げるために、UAVの撮影高度は自ずと低高度となる。結果的に、地上画素寸法も

表-2 準則等における位置精度と標定点の配置方法等

	位置精度	地上画素寸法	隣接する外側標定点間の距離	任意の内側標定点とその点を囲む各標定点との距離	(参考) 空中写真測量(無人航空機)を用いた 出来形管理要領(土工編)
パターンⅠ	0.05m以内	0.01m以内	100m以内	200m以内	出来形管理
パターンⅡ	0.10m以内	0.02m以内	100m以内	400m以内	起工測量、岩線計測
パターンⅢ	0.20m以内	0.03m以内	200m以内	600m以内	部分払い出来高計測

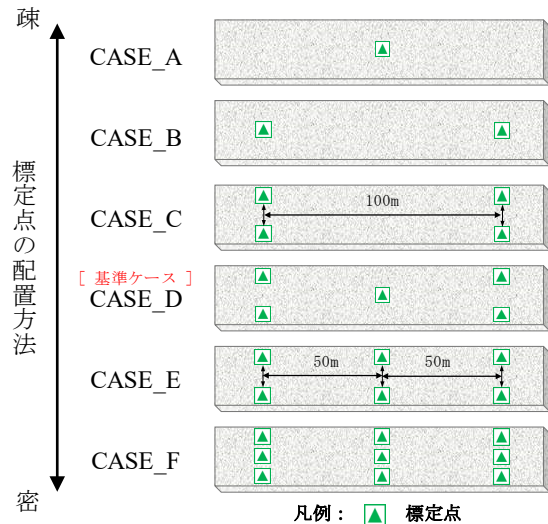


図-1 防波堤上部工上への標定点の配置方法(6 ケース)

小さくなり、本実証実験では一枚の画像に占める海面の比率を低減するために地上画素寸法0.8cmと設定した。これは、最も高い位置精度±5cmを要求する際の地上画素寸法であり、準則との関係では表-2中のパターンⅠに対応する。したがって、本実証実験における位置精度の検証は、標定点の配置を変えてSfM処理の結果得られた検証点中心座標における較差が±5cm以内であるかを確認することで行う。

以上を踏まえ、現地試験における防波堤上部工上の標定点の配置方法においては、CASE_A～CASE_Fの計6 ケー

スを設定した。準則に則る表-2中のパターンⅠに基づき、標定点を5点(外側標定点4点+内側標定点1点)かつ隣接する外側標定点間の距離は100m以内に設定した配置方法を基準ケースとしてCASE_Dを設定した。細長い防波堤上部工では、天端2列に100m間隔で計4点を外側標定点とし、その中央に1点を内側標定点として配置していることになる。

また、生産性向上に向けた標定点の設置作業削減の観点からCASE_Dから標定点を減じ、標定点を4点、2点、1点としたケースを、それぞれCASE_C、CASE_B、CASE_Aと設定した。なお、CASE_CはCASE_Dにおける内側標定点を除いたものである。他方、外側標定点の外側では計測精度が下がることが予想されるが、標定点を密に配置することで、計測精度の低下を防止できるかを確認するために、6点、9点と標定点を増やしたケースをそれぞれCASE_E、CASE_Fと設定した。以上、計6 ケースの標定点の配置方法について図-1に模式図を示す。

(3) 検証点の配置方法の検討

計測対象(検証点)が、外側標定点の外側にある場合の距離の影響を検証するため、検証点の配置方法を検討した。当初、外側標定点の外側にある消波ブロック上への検証点の設置作業は、梯子に立方体の対空標識(ミラーシール付き)を置き、TSで観測する方法によって行った。この方法により、外側標定点の外側1.5m、3m、17.5mに3点の検証点を設置したが、設置作業に手間を要するなど課題があった。そこで、実際に消波ブロック

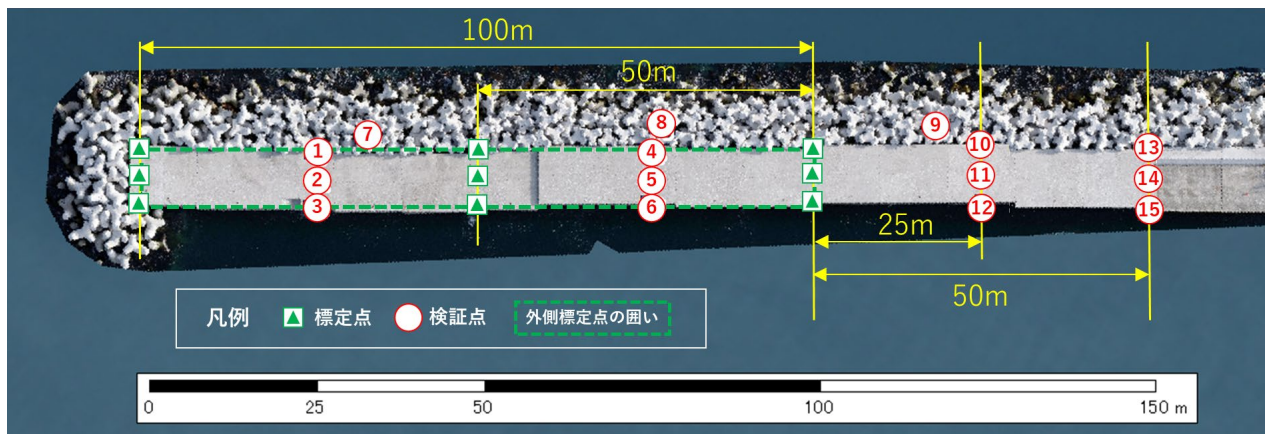


図-2 検証点等の配置状況

上へ検証点を設置せずとも、足場の良い防波堤上部工上に外側標定点の外側へ検証点を設置することで、外側標定点の外側にある検証点までの距離が計測精度へ与える影響は検証可能であるという発想に転換することにより、防波堤上部工上の延長方向に外側標定点の外側25mに3点、50mに3点の検証点をそれぞれ設置した。これらに加え、外側標定点の内側に6点の検証点を配置している。以上より、本現地試験における検証点は計15点となった。現地における検証点の配置方法を図-2に示す。図-2における検証点の番号(①～⑮)の内、①～⑥は、外側標定点の内側であり、準則の標準における計測対象範囲と考えられる。⑦～⑨は、外側標定点の外側(近距離:⑦1.5m, ⑧3m, ⑨17.5m)であり、⑩～⑫は外側標定点の外側(中距離:25m), ⑬～⑮は外側標定点の外側(遠距離:50m)となっている。これにより、外側標定点の内側から、外側は1.5mから50mまでの距離における計測精度を比較検証することができるようにした。

4. 検証結果

標定点の配置方法(設置数と設置間隔)と外側標定点の外側方向への距離が計測精度に与える影響について比較検証を行う。

外側標定点の外側方向への距離が計測精度に与える影響は、検証点①～⑮における計測精度の差異として評価され、標定点の配置方法の影響は、CASE_A～CASE_Fによ

る差異として評価される。また、斜め方向の撮影を加えることによる計測精度への影響は、撮影方向が垂直方向のみの場合との計測精度の差異として評価される。なお、計測誤差は、高さ方向の誤差が水平方向の誤差に卓越していたため、本稿では、高さ方向の計測誤差を対象とした検証結果を述べる。

高さ方向の計測精度を、図-3及び図-4に示す。なお、図-3は撮影方向が垂直方向のみ、図-4は斜め方向の撮影を加えた場合であり、誤差の値は絶対値を用いている。

CASE_A～CASE_Fにおいて、標定点の数が少ない程、外側標定点の外側への距離が計測精度に与える影響が大きいことが分かる。斜め方向の撮影を加えてもCASE_Aでは、外側25m(検証点⑩～⑫)で1m以上、外側50m(検証点⑬～⑮)では1.5m以上の誤差を生じている。CASE_Bでは、撮影方向が垂直方向のみの場合は、外側50mで±10cm以上の誤差が生じるが、斜め方向の撮影を加えることで、全ての検証点において±10cmを達成している。また、CASE_Cでは、撮影方向が垂直方向のみでは、外側50mで±5cm以上の誤差を生じるが、斜め方向の撮影を加えることで、全ての検証点において±5cmを達成しており、CASE_D～CASE_Fでは、斜め方向の撮影を加えるか否かに関わらず、全ての検証点において±5cmを達成している。なお、基準ケースであるCASE_Dよりも標定点の配置を密にしたCASE_EとCASE_Fによる外側標定点の外側における精度向上の効果は微小であり、CASE_Dより標定点を密に配置する明瞭な意義は認められなかった。

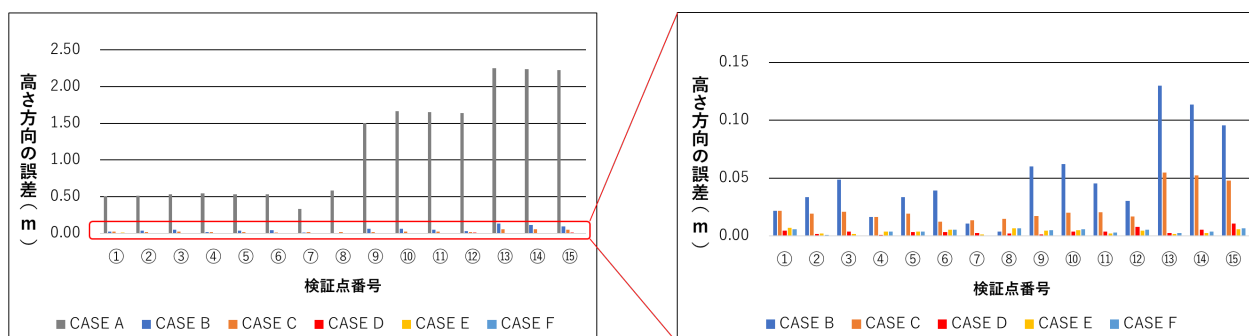


図-3 検証点における高さ方向誤差(撮影方向:垂直のみ)

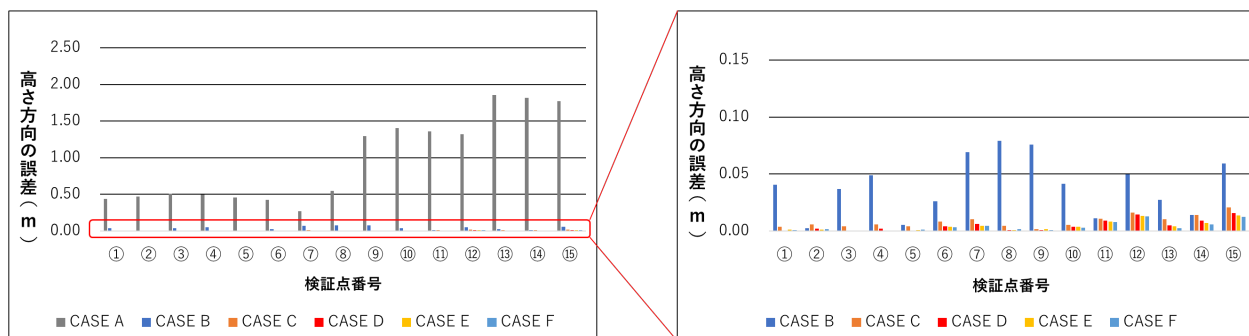


図-4 検証点における高さ方向誤差(撮影方向:垂直+斜め)

以上の結果から、外側標定点の外側50mまでを計測対象範囲と想定した場合、基準ケースであるCASE_Dであれば、斜め方向の撮影を加えずとも外側50mまで±5cmの計測精度を達成するとともに、斜め方向の撮影を加えるのであれば、CASE_Cであっても外側50mまで±5cm精度を達成することが確認された。

5. まとめ

本稿が対象とする実証実験による検証結果は、既に同マニュアル改訂の根拠として採用され、同マニュアル（令和3年4月版）¹²⁾において、p13「標定点は、100m以内毎に防波堤幅の両端2列に外側標定点とその内側に1点の内側標定点を配置することを標準とする。また、検証点は200m間隔以内で最低2点以上設けることを標準とする。なお、検証点は標定点とは別に設置する必要がある。これらの標定点及び検証点は消波ブロック上には配置しないことも可とする。」，p12「位置精度向上が期待されることから、斜め写真の撮影を加えて実施することを推奨する。」ことが明記された。

本検証が対象としたような既存の基準類とは異なる基準を示すにあたっては、根拠となる様々な条件下での検証結果を蓄積していくことが重要であり、継続的な検証及び情報収集が求められる。

謝辞：ヒアリングでは、一般社団法人海洋調査協会会員企業の皆様に、現地試験では、東北地方整備局港湾空港部港湾空港整備・補償課及び釜石港湾事務所の皆様にご協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1)国土交通省港湾局：第1回 港湾における i-Construction 推進委員会配布資料，2020.11.
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/Shiryō.pdf>，2021.4.16閲覧
- 2)坂田憲治・井山繁・藤井敦・宮田正史：点検診断の劣化度判定結果による消波ブロック被覆堤本体工側壁の変状傾向に関する一考察，国土技術政策総合研究所資料，Vol. 918，2016.
- 3)国土交通省港湾局：ICT機器を用いた測量マニュアル（ブロック据付工編）（令和2年4月版）
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11520294/www1.mlit.go.jp/kowan/content/001335216.pdf>，2021.7.30最終閲覧
- 4)国土交通省国土地理院：作業規定の準則（令和2年国土交通省告示第461号）
https://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/jyunsoku/pdf/r2/r2_junsoku.pdf，2021.4.16最終閲覧
- 5)吉田英治・井山繁・鈴木啓介：港湾分野における i-Construction 推進のための3次元データ等の活用に関する検討，国土技術政策総合研究所資料，Vol. 1024，2018.
- 6)川口真吾・鶴田修己・高阪雄一・岡崎裕・朝比翔太・酒井和也・鈴木高二朗：UAVを用いた港湾構造物の計測技術に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 75，No. 2，pp.I_121-I_126，2019.
- 7)西広人・琴浦毅・堺浩一・今野洋幸：UAVを用いた消波ブロックの測量手法に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 76，No. 2，pp.I_690-I_695，2020.
- 8)菅井秀翔・宮地邦英・中村孝之・南秀和・橘克巳：UAVを活用した写真測量の精度検証，国土地理院時報，No.129，pp.147-157，2017.
- 9)神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福元和真：UAV写真測量のSfMにおける斜め撮影の導入に関する基礎的シミュレーション，日本写真測量学会平成30年度秋季学術講演会発表スライド，2018．
http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~kanno/pdf/7-1.slide_JSPRS_181108.pdf，2021.8.29最終閲覧
- 10)国土交通省：空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）（令和2年3月）
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11547459/www1.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001336357.pdf>，2021.7.30，最終閲覧
- 11)国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル（案）（平成28年3月），pp32.
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9969171/psgs2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/doc/uav_manual_160330.pdf，2021.7.30最終閲覧
- 12)国土交通省港湾局：ICT機器を用いた測量マニュアル（ブロック据付工編）（令和3年4月版），
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001397878.pdf>，2021.7.30最終閲覧