

画像認識による劣化検出を用いた
通信用マンホールの点検手法に関する研究

2021年 3月

内堀 大輔

画像認識による劣化検出を用いた
通信用マンホールの点検手法に関する研究

内堀 大輔

システム情報工学研究群

筑波大学

2021年 3月

論文要旨

マンホールは通信インフラを支える重要な設備であるが、高度経済成長期に大部分が建設されたため、近年では設備の高齢化が進んでいる。これらの設備を安全に維持管理していくためには定期的な設備点検が重要である。しかしながら、点検を将来的にわたり継続していくためには、人的稼働や機材等のコストの削減、地下作業や車道作業における作業者の安全性確保といった課題への対応が必要となる。

そこで、本論文では、点検の効率性と安全性の向上を目的として、画像認識を用いてマンホールの鉄蓋部に発生した段差量を計測する手法、上蓋模様の摩耗量を推定する手法の提案を行う。また、マンホールの躯体部に発生した露筋および、躯体部に設置している金物設備の腐食を検出する手法の提案を行う。さらに、自律飛行 UAV により点検に用いる画像を撮影する手法を提案する。

鉄蓋部の凹み段差量の計測手法では、鉄蓋の段差部は画像中では黒い帯状に見えるため、この画像特徴である一定の陰影幅と連続する円弧形状の物体に対して強く反応するフィルタを提案し、提案フィルタを用いて段差箇所の検出が可能であることを確認した。現用設備を用いて、段差量のノギスによる計測と提案手法による計測の比較検証を行い、提案手法は 1.00 mm 未満の精度で段差量を計測できることを確認した。

鉄蓋部の上蓋模様の摩耗量の推定手法では、学習データベースを用いた手法を構築し、鉄蓋の模様高さを部分的に推定できることを確認した。現用設備を用いて、摩耗量のノギスによる計測と提案手法による推定の比較検証を行い、1.00 mm 未満の精度で推定できることを確認した。さらに、模様の摩耗状態の判定精度の向上するため、模様が一定以上摩耗し、鉄蓋の取り替えが必要なタイミングになると形状が変化する模様のデザインと、形状の認識手法の提案を行った。提案の形状を用いることによって、解像度が低いカメラで撮影した画像からでも取り替えが必要となる摩耗状態を認識できることを確認した。

躯体部の露筋と金物腐食の検出には、深層学習手法の U-Net をベースとした手法を提案し、劣化領域の検出が可能であることを確認した。検出精度は、露筋と金物腐食ともに 9 割を超えることを確認した。

UAV による画像撮影手法では、鉄蓋部と躯体部の点検用画像を取得するための撮影手法の提案を行った。さらに、非 GPS 環境下である躯体部において UAV を自律飛行させるために、UAV に搭載可能な複数のセンサを用いた自己位置推定システムを構築した。試作 UAV により現用マンホールにおいて検証を行った結果、一連の自律飛行動作と、搭載カメラによって躯体部に発生した露筋が撮影可能であることを確認した。さらに、UAV による撮影画像から深層学習手法によって露筋の検出が可能であることを確認した。

目次

目次.....	1
第1章 序論.....	4
1. 1 はじめに.....	4
1. 1. 1 日本のライフライン設備.....	4
1. 1. 2 ライフライン設備の維持管理の問題と取組み.....	4
1. 2 通信インフラにおける通信土木設備について.....	8
1. 2. 1 通信インフラの役割と通信土木設備の位置づけ.....	8
1. 2. 2 通信土木設備の役割と機能.....	9
1. 2. 3 通信土木設備の構成.....	10
1. 2. 4 設備量と高齢化.....	18
1. 2. 5 点検方法.....	21
1. 2. 6 点検の課題.....	24
1. 2. 7 点検課題の解決に向けた画像認識技術の有効性と要求精度.....	25
1. 3 本論文の目的と構成.....	27
参考文献.....	29
第2章 通信用マンホールの劣化事象と本論文の課題設定及び独自性.....	31
2. 1 点検内容と既往研究等に基づく劣化発生メカニズム.....	31
2. 1. 1 マンホールの構造と材料特性.....	31
2. 1. 2 マンホールに設置の金物の構造と材料特性.....	32
2. 1. 3 鉄蓋部に関して.....	34
2. 1. 4 首部・躯体部に関して.....	44
2. 1. 5 対象の劣化項目と劣化ランクの定義.....	47
2. 2 点検手法に関する既往研究.....	54
2. 2. 1 路面の点検に関する既往研究.....	54
2. 2. 2 躯体部劣化の点検に関する既往研究.....	56
2. 2. 3 UAVの制御手法および点検に関する既往研究.....	57
2. 3 本論文の課題設定および独自性.....	59
2. 3. 1 本論文の課題設定とそれに関わる画像認識手法の選択.....	59
2. 3. 2 本論文の独自性.....	60
参考文献.....	62
第3章 画像認識による鉄蓋部の段差量の計測と摩耗量の推定手法に関する提案..	66
3. 1 撮影画像条件と全体構成.....	66
3. 1. 1 撮影画像の条件.....	66

3. 1. 2	点検手法の全体構成.....	67
3. 2	段差量の計測手法.....	68
3. 3	段差の計測手法の検証および考察.....	74
3. 3. 1	検証方法.....	74
3. 3. 2	結果と考察.....	74
3. 4	模様の摩耗量の推定手法.....	79
3. 5	摩耗の推定手法の検証および考察.....	83
3. 5. 1	検証方法.....	83
3. 5. 2	結果と考察.....	83
3. 6	認識性を向上した鉄蓋模様と画像認識手法の提案.....	88
3. 6. 1	画像認識による摩耗量の推定手法の課題.....	88
3. 6. 2	模様のデザイン.....	88
3. 6. 3	画像認識を用いた模様の摩耗認識手法.....	92
3. 6. 4	摩耗認識手法の検証.....	96
3. 7	まとめ.....	101
	参考文献.....	103
第4章	画像認識による躯体部の劣化検出手法に関する提案.....	104
4. 1	劣化領域の定義.....	104
4. 2	深層学習を用いた劣化検出手法.....	108
4. 3	深層学習モデルのパラメータ設定と感度解析.....	110
4. 3. 1	パラメータ.....	110
4. 3. 2	検証環境.....	112
4. 3. 3	感度解析の方法と結果.....	113
4. 4	劣化検出手法の検証と考察.....	119
4. 4. 1	検証方法.....	119
4. 4. 2	結果と考察.....	119
4. 5	まとめ.....	126
	参考文献.....	128
第5章	UAVによる画像撮影手法の提案.....	129
5. 1	鉄蓋部の画像撮影手法の提案.....	130
5. 2	躯体部の画像撮影手法の提案.....	131
5. 2. 1	画像撮影手法.....	131
5. 2. 2	自己位置の計測手法.....	132
5. 2. 3	自己位置推定システムと自律制御方法.....	134
5. 3	躯体部の自律飛行検証.....	137
5. 3. 1	試作 UAV と模擬環境.....	137

5. 3. 2	検証結果.....	139
5. 4	現用マンホールを用いた躯体部の撮影と露筋の検出.....	145
5. 4. 1	検証方法.....	145
5. 4. 2	検証結果.....	146
5. 4. 3	露筋検出の結果.....	148
5. 5	まとめ.....	150
	参考文献.....	151
第6章	結論.....	152
6. 1	本研究で得られた知見.....	152
6. 2	今後の課題.....	155
付録1	模様のすべり抵抗性と耐久性に関する検討.....	156
付録2	通信用鉄蓋の現場調査データ.....	164
付録3	鉄蓋の段差の計測手法および摩耗の推定手法の検証データ詳細.....	172
付録4	躯体部の劣化検出の検証データ詳細.....	177
	謝辞.....	188
	業績リスト.....	189

第1章 序論

1. 1 はじめに

1. 1. 1 日本のライフライン設備

道路、鉄道、ダム、上下水道、学校、病院などの設備はインフラストラクチャ（以下、インフラ）と呼ばれ、国や地方経済の成長基盤であると共に、我々国民の生活を支える重要な役目を担っている。これらのインフラの中でも、都市機能を維持し人々が日常生活を送るうえで必要不可欠なものはライフライン設備と言われており、交通・電力・ガス・水道・通信の5種類に大別することができる。一つ目の交通インフラには、道路、橋梁、鉄道、空港、港湾等がある。これらは、居住地周辺の短距離から、都心部と地方の中距離、さらに国内と海外といった長距離の人流や物流を担う役割がある。二つ目の電力インフラには、火力、水力、原子力、風力等の発電設備から、電気を企業や一般家庭へと届ける電線や電柱といった送電設備等がある。この電力は、日常生活の照明から、冷蔵庫、エアコン、パソコン、スマートフォン、自動車、電車といったあらゆる機器を使う際に不可欠なエネルギーとなっている。三つ目のガスインフラには、都市ガスのように地中に埋設されているガス道管を通じて一般家庭や企業に供給される配管設備や、LPガスのように各家庭に事業者が設置するボンベがある。このガスは、コンロや給湯器や暖房といった設備に使用される。四つ目の水道インフラには、浄水施設や水を企業や一般家庭に届ける配管設備等がある。日本の水道は主に、上水、中水、下水の3つの種類があり、浄水は浄水施設から飲める水を運ぶ水道管であり、中水はお手洗いや工業用水として再利用される水を運ぶ水道管、下水は、生活排水、産業排水、雨水を浄水施設に運ぶ水道管であり、これらの水道管は生活や企業活動に重要な水の供給と排水を行う役割を担っている。五つ目の通信インフラには、通信ケーブルやこれらのケーブルを全国に張り巡らすための電柱やマンホール、また通信ケーブルを接続・収容する交換局、また無線基地局等がある。電話やパソコン、スマートフォン等のインターネットへの接続やメールのための情報の送受信を行うための通信ネットワークを形成している。

これらのライフライン設備は、安定した社会活動の維持に不可欠であることに加えて、一朝一夕での整備が不可能であることから、設備の整備や管理は、国や自治体あるいは政府の監督下にある企業によって長期的な視点で計画的に行われる必要がある。

1. 1. 2 ライフライン設備の維持管理の問題と取組み

ライフライン設備の建設は、高度経済成長期をきっかけとして急速に行われてきた。

そのため、高度経済成長期の初期段階で建設された設備は、建設から現在まで50年以上が経過しており設備の高齢化が進行している。図1-1-1はライフライン設備の一部である道路橋、トンネル河川管理施設、下水道管渠、港湾岸壁において建設後からの50年以上を経過する割合を示したものである¹⁻¹⁻¹⁾。ここからわかるように、2013年の時点では各設備とも50年以上経過する割合は30%未満であったが、2023年では道路橋、トンネル、河川管理施設が40%前後まで上昇し高齢化が拡大していることがわかる。さらに、現在から約10年後の2033年には、トンネルと港湾岸壁は全体の半数以上、道路橋と河川管理施設に至っては全体の6割以上の設備が建設後から50年を経過することとなり、一部のライフライン設備はその半数以上が高齢化となる時代に突入する。

このような状況の中、2012年12月、中央自動車道笹子トンネル上り線にて、天井版落下事故が発生した。トンネル内を通行していた9名の尊い命が犠牲となり、さらに長期にわたり車線は通行止めとなった。笹子トンネルは1977年12月に供用を開始しており、事故発生時までには35年の年月が経過していた。この不幸な事故は、高度経済成長期からの建設時代は過ぎ去り、現在我々が保有しているライフライン設備の老朽化に目を向けて、安全に活用していくためのメンテナンス時代に突入したことを世の中に示す出来事となった。この事故を契機に、国土交通省においては、2013年を「メンテナンス元年」と位置づけ、道路法や定期点検要領の改正等に取り組んだ^{1-1-2), 1-1-3)}。そして、2014年7月より道路管理者はすべての橋梁、トンネル等の設備について5年で1巡の定期点検を開始し、2018年までにはほぼ100%の設備の点検が完了した¹⁻¹⁻⁴⁾。

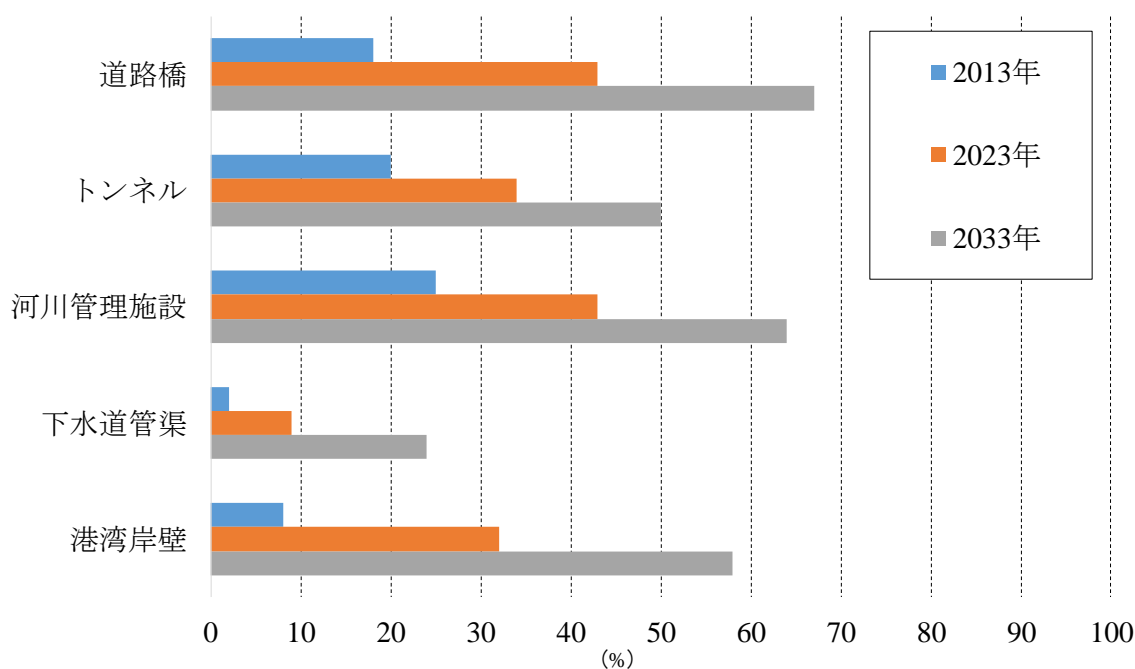


図1-1-1 建設後50年以上を経過するライフライン設備割合 (文献¹⁻¹⁻¹⁾を元に作成)

しかしながら、この5年で1巡の定期点検を継続していくためには、点検実施者の確保が問題となった。図1-1-2は市区町村における橋梁保全業務に関わる土木技術者の数である¹⁻¹⁻⁴。町では約3割、村では約6割もの割合で橋梁保全業務に携わっている土木技術者がいないことが分かる。さらに、図1-1-3は2019年における地方公共団体管理の橋梁点検において、点検実施者の保有資格や研修受講歴の割合を示した図である¹⁻¹⁻⁵。この図から、直営点検では約54%、委託点検においても約42%が研修未受講かつ民間資格未保有であることがわかる。設備点検において、点検知識の乏しい人員が実施しなくてはならない状況である。特に、市区と比べて町や村といった規模の小さい自治体では橋梁保全を実施できる技術者の不足が顕著であった。このように人材の不足に陥ってい

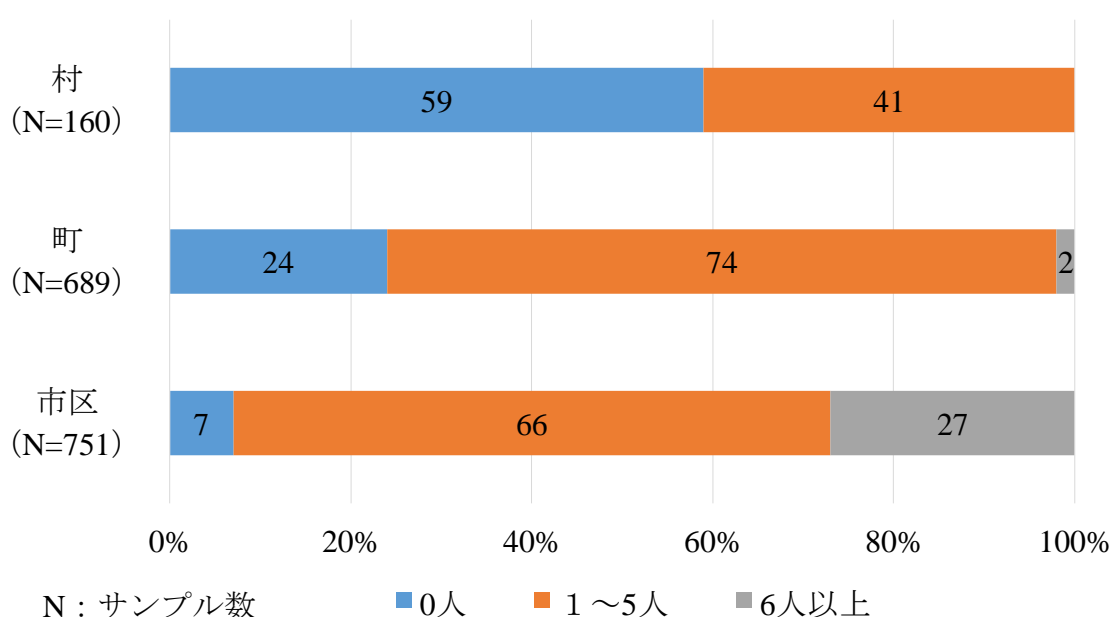


図1-1-2 市区町村における橋梁保全業務に関わる土木技術者（文献¹⁻¹⁻⁴）を元に作成

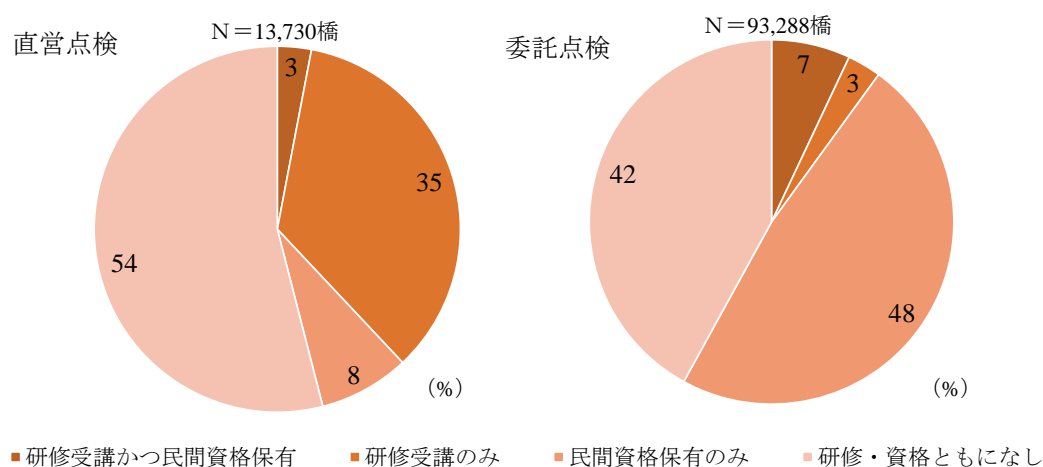


図1-1-3 点検実施者の保有資格や研修受講歴の割合（文献¹⁻¹⁻⁵）を元に作成

る要因のひとつは、ライフライン設備の量であると考えられる。ライフライン設備はその性質上我々の日常生活の基盤であることから、日本全国のあまねく場所に建設されており、設備量が膨大である。本データの橋梁を例にあげると、全国に点検対象となっている橋梁は717,391橋にもものぼる¹⁻¹⁻⁴⁾。これらの設備を5年1巡で点検しようとした場合、約143,000橋の設備を将来にわたり毎年点検することになる。さらに、これらの橋梁の管理者を国土交通省、高速道路会社、都道府県・政令市等、市区町村で区分した場合、市区町村の保有する点検対象設備は471,808橋であり、全国の約66%の橋梁設備を市区町村が点検を行うことになる。規模の小さい市区町村のような自治体において、半数以上の橋梁設備の点検を受け持つという事態となっており、十分な人材を確保することがさらに困難であると考えられる。今後、日本の労働者人口減少が進む中で、小さい自治体では点検体制を維持していくことが困難であると考えられる。

このような問題に対して国土交通省では、「新技術利用の際のガイドライン（案）」や「点検支援技術性能カタログ（案）」の作成を行い、現在技術者が行っている点検作業を、新技術を用いて効率的に行う施策を検討している^{1-1-6),1-1-7)}。これらのガイドラインやカタログの中では、デジタルカメラによる撮影画像を解析することによる画像計測技術、超音波等による非破壊検査技術、Unmanned Aerial Vehicle（以下、UAV）や専用車両を活用することによる計測・モニタリング技術の活用方法が示されている。現在、技術者が行っている判断を、画像解析等を用いて自動化することにより、技術者不足へ解消が期待されている。また、非破壊計測やUAV、専用車両による計測により現在よりも効率的かつ高精度に点検が可能になれば、点検を実施する人材を減らすことができる。

このように、労働人口が減少している中、高齢化が進むライフライン設備を安全に維持するためにも、新技術によるライフライン設備の点検の効率化が求められる。

1. 2 通信インフラにおける通信土木設備について

本論文では、複数あるライフライン設備の中でも、情報流通を支えている通信インフラに着眼し、通信インフラの中でも最も土台となる通信土木設備について取り上げる。通信土木設備は、他のライフライン設備と同様に高齢化が進んでおり、安全な維持管理のために定期的に点検を行う必要がある。本節では、通信土木設備の位置付け、役割、構成と機能、老朽化の現状、点検方法と課題、および課題解決に向けた画像認識技術について述べる。

1. 2. 1 通信インフラの役割と通信土木設備の位置づけ

通信インフラは、我々の情報流通を支えている存在である。人や物の物理的な移動を可能とするネットワークを形成する交通インフラに対して、通信インフラは電話、メール、インターネット等を通じて音声、テキスト、ファイル等の情報を即座にやり取りできるネットワークを形成している。これにより、日常生活において遠方の友達やビジネス相手と電話やメール等により瞬時かつ、低コストにやり取りが可能になることや、SNS やインターネットを通じて世界中の情報を簡単に入手できるため、生活品質の向上や活動圏の拡大による経済の発展に大きく貢献している。また、災害時や 2020 年当初から発生している COVID-19 のような世界的なパンデミックにより人流、物流という物理的な空間移動が長期間にわたり制限された際に、通信インフラは他者と情報交流ができる唯一の手段である。そのため、通信インフラには接続の安定性、信頼性の確保が求められる。

通信インフラにはネットワークを形成するための複数の設備レイヤがある。図 1-2-1 は通信ネットワークの構成を階層化した概念図である¹⁻²⁻¹。この概念図において、最下

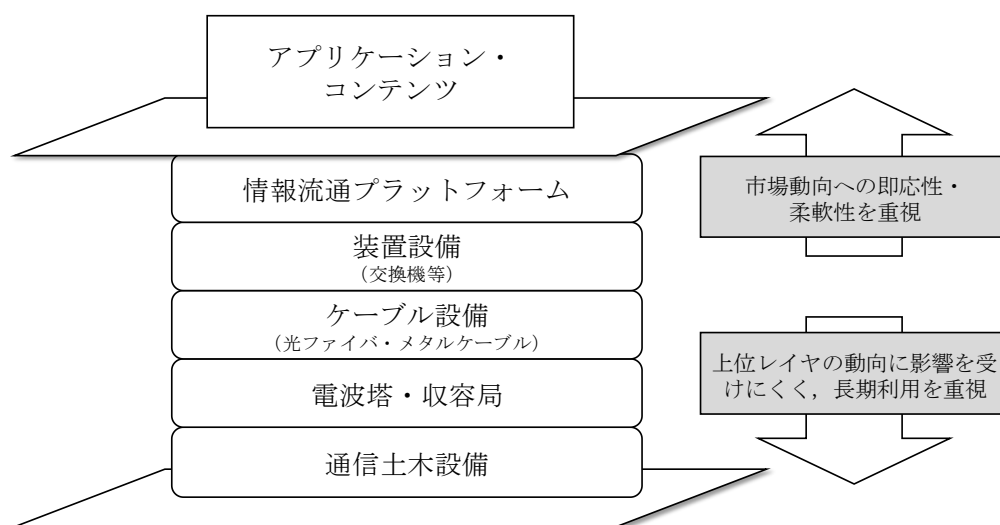


図 1-2-1 通信ネットワーク構成の階層化概念 (文献¹⁻²⁻¹) を元に作成)

層のレイヤに存在するのが通信土木設備である。通信土木設備とは例えば、ケーブルを収容するために地下に埋設された管路やマンホール、またとう道と呼ばれる地下空間である。この土木設備のレイヤの上に、無線に用いる電波塔や装置類を格納する収容局、そして光やメタルのケーブル設備、その上に伝送機能や交換機等の装置設備、最後に情報流通のプラットフォームがあり、我々は日常生活で使うアプリケーションが動作し、コンテンツが共有される。この階層構造において、上位レイヤほど市場動向や技術動向により影響を受けやすく方式の変更に柔軟性を求められる。一方、下位レイヤほど方式の即時変更は求められないが、長期的な利用を前提として構築されているため設備の長期信頼性が求められる。

この中でも最下層に位置する通信土木設備は、風や雨、さらに地震等の非日常の自然災害からケーブルや装置の物理的な破損を防ぎ、安定性と信頼性のある通信ネットワークを形成するための根幹となる設備として位置づけられている。

1. 2. 2 通信土木設備の役割と機能

通信ネットワークにおいて拠点間を接続しているケーブルの中には、収容局直下の何千ものユーザが利用しているケーブルや、ビジネスや国・自治体の保安上の観点から決して断絶させてはいけない重要回線等を外的要因から守る必要がある。外的な要因には、雨、風といった日常的な外力や地震等の非日常的な外力、人的な事故、もしくは作爲的に設備を破損させるような行為が想定させる。これらの外的要因からケーブルを守るために地下に安定した空間を提供することが通信土木設備の役割である。

このような役割を果たすために通信土木設備には以下のとおりの機能が求められる。

1. 「安全で長期耐久性を持っていること」

通信土木設備は、電気やガス等の他のライフライン設備と同様に道路等の公共施設の地下空間に設置されている。そのため、占有している空間や他の設備の機能や安全性に支障を及ぼさない構造や強度が前提として要求される。そのうえで、内包されるケーブル類を防護する必要があり、車両等の外力や地震等の自然災害への耐久性および作爲的な破損行為に対するセキュリティ面の担保が求められる。

2. 「ケーブルの増設・保守作業が容易な設備であること」

ケーブルは需要発生に応じて必要分を増設するため、施設作業や保守作業が容易に実施できる構造や作業空間を有していることが必要となる。

3. 「地域住民および地球環境に配慮した設備であること」

通信土木設備は建設時に掘削を伴う大規模な工事が発生する。そのため、騒音や長期の交通規制等の地域住民への配慮が必要となる。さらに掘削の際の建設発生土・建設廃材の軽減を行う必要がある。これらは、既設の公的設備利用を活用した工事回避や複数企業との共同施工を推進し、工事を減らす取組みを検

討することが求められる。また、地下に大規模な空間を構築していることから設備の老朽化に対して、維持管理を確実にを行い地上空間の日常生活に影響を与えるような設備事故を決して起こさない運用が必要となる。

これらの機能を考慮して、通信土木設備は設計仕様、工事方法、メンテナンス方法等が定められている。

1. 2. 3 通信土木設備の構成

通信土木設備の全体構成を図 1-2-2 に示す。通信土木設備はとう道、管路、マンホールの 3 種類に大別され、通信設備ビル間および通信設備ビルからユーザ間を結ぶケーブルを収容・保護する地下設備である。また、その他の設備として、河川の横断区間には、橋梁添架設備もしくは専用橋という橋梁通信設備がある。これは、地中を通過している管路が河川に差し掛かった際に河川を横断するための設備である。橋梁添架設備とは、道路橋等の他事業者の橋に通信管路を添架させてもらうための設備である。専用橋とは、管路が河川を横断するために設置した専用の橋梁である。各設備は、収容するケーブル量やケーブルを接続するための作業スペースの確保を考慮して、適切な位置に構築している。例えば、図 1-2-2 に示すように通信設備ビル直下では、とう道と呼ばれる人が内部を通行できるトンネル設備にケーブルを収容している。ここは各拠点をつないでいるケーブルが集約される地点であるため、ケーブル量が多くさらにケーブルの接続作業の頻度が高いため、ケーブル収容に通信土木設備の中でも一番大きな空間を用意している。通信設備ビルから一定の距離が離れると、まとまっていたケーブルを分割して管路に集約し、網羅的にネットワークを広げていく。また、広がっていく管路の一定の区切りで

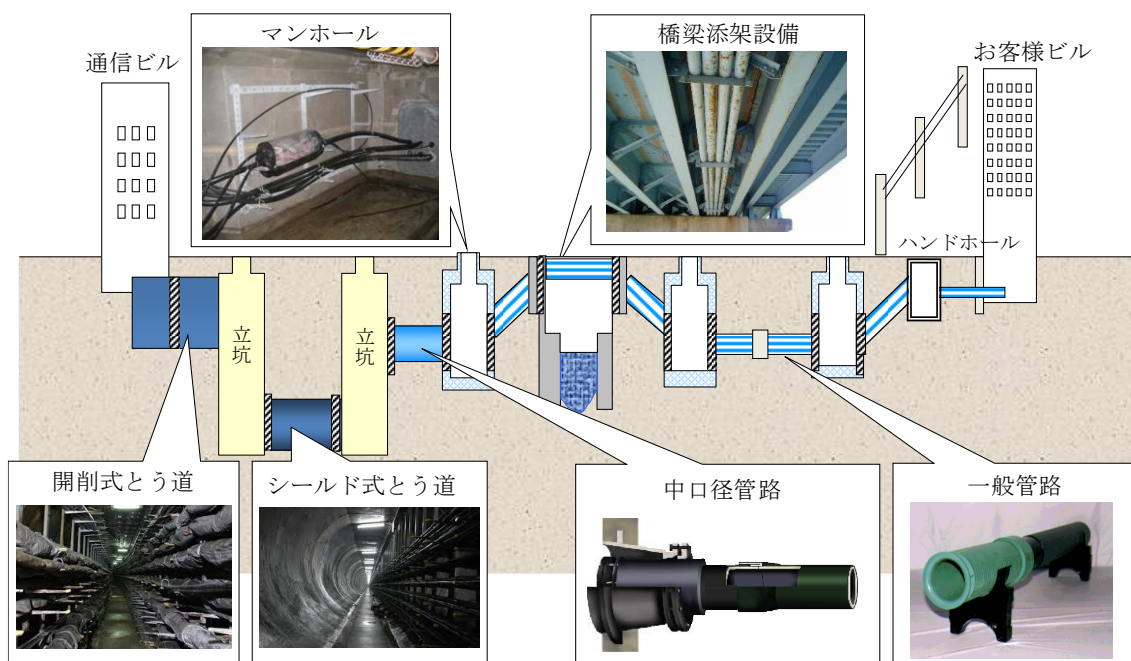


図 1-2-2 通信土木設備の全体構成

マンホールを設置する。マンホールはケーブルの接続を行う作業スペースであり、ルート
の切り替えや電柱への引き上げ等を行うために設置される。このように、適切な設備
を日本中の地下に構築し、通信ネットワークの形成を支えている。以下に、各種の構造
についてその詳細を記載していく。

(1) とう道

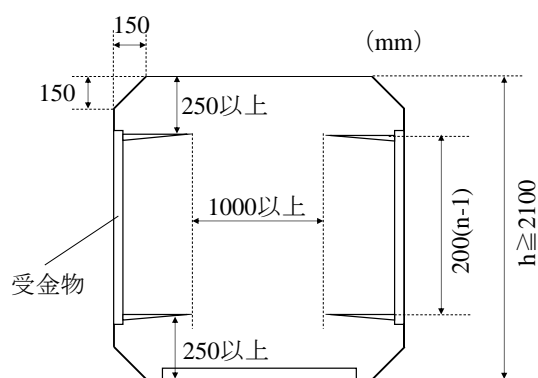
とう道とは、直径が2 m から5 m の通信ケーブル専用のトンネルであり、作業者が内
部に入ってケーブルの施設や保守作業が可能な地下空間である。主に通信設備ビル直下
の幹線ルートや都市部等のケーブル量が多い場所に適用される。また、通信ケーブルを
収容するトンネルには、通信事業者の単独のとう道以外に、道路管理者が設ける「法に



開削式とう道の様子

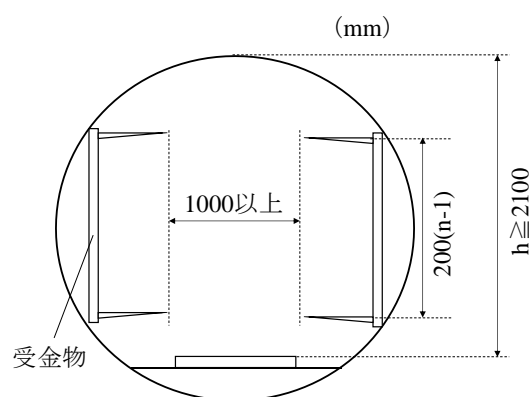


シールド式とう道の様子



n : ケーブル受金物段数
h : 内法高さ

開削式とう道の断面図



n : ケーブル受金物段数
h : 内法高さ

シールド式とう道の断面図

標準寸法

方式	呼称	内法寸法 (幅×高さ)
開削式とう道	小断面	1650 mm × 2100 mm
	1号	1850 mm × 2200 mm
	2号	2050 mm × 2300 mm
シールド式とう道	小断面	Φ 2200 mm
	1号	Φ 2550 mm
	2号	Φ 2950 mm

図 1-2-3 開削式とう道とシールド式とう道 (文献¹⁻²⁻²) を元に作成)

よる共同溝」，電力会社や他の事業者との「企業間共同溝」が存在する。

通信事業者の単独とう道には，開削式とう道とシールド式とう道の 2 種類が存在する。図 1-2-3 にその様子と断面および標準寸法を示し，以下に説明を行う¹⁻²⁻²⁾。

開削とう道は，通常土被り 3 m 程度以下の深さに建設する際に用いる種類である。躯体は鉄筋コンクリートの垂直矩形ラーメン構造であり，名称のとおり地面を掘削した後躯体を設置して埋め直すことによって構築を行う。

シールド式とう道は，他事業者の埋設物の関係からシールドマシンにより掘削し，地中深くに建設する際に用いる種類である。躯体は，シールドマシンの推進方向と断面方向により分割された鋼製セグメントを一次覆工とし，更にコンクリートによる二次覆工を行った断面方向がほぼ円形の形状である。一次覆工の断面方向の主桁により土圧荷重等に耐え，二次覆工で地下水圧に耐え，空間の強度および耐水性を確保する構造となっている。その他には，シールドの発進，開削式とう道との連結等の役割を果たす立坑と呼ばれる設備がとう道に含まれる。立坑の構造は施工方法により多種多様であるが，一般的には矩形梁の縦壁および上下床版の鉄筋コンクリート構造になっている。

また，これらのとう道にはケーブルの施設や保守作業ができる空間のみならず，人による作業が容易にできるように照明，送風機が設置されている。また，ネットワークの信頼性を確保するための火災感知器，浸水感知器およびそれらの感知器やとう道内への出入りを制御するとう道監視システム等が設置されている。万が一とう道内で火災が発生した場合でもとう道内に居る作業者が安全に避難できるような誘導装置や通信設備ビルへの延焼を防ぐための防火壁の設置，また，低地等により冠水が予想される地域では防水壁が設置されている。

とう道は，通信土木設備の中でも作業者の作業スペースが最も確保されている上，システム等により作業員やネットワークの信頼性を常時監視している設備である。

(2) 管路

管路は，中口径管路，一般管路，地下配線管路の 3 種類に大別される¹⁻²⁻³⁾。

中口径管路は，呼び径 250 mm～500 mm 程度の管路（外管）の中にケーブル収容用の管（内管）を多条数収容する形状の管路である。これらは，とう道から比較的近いマンホールまで，もしくはその後のマンホール間の接続に使われることが多くケーブル量が多い場所に設置される。また，ケーブル需要に対応するために，中口径管路におけるフリースペース方式と呼ばれる設計方法で，外管の内部を上下に分割し，太径の光ケーブルやメタルケーブル用の内管を下部に設置し，上部空間はケーブル需要に応じて随時施設するような形状のものもある。これらは，とう道と比べてコンパクトであるため，地中の空間を有効活用できると共に，コストの低減が可能である。

一般管路は，管路の中でも最も使用されている形状の管路である。呼び径 75 mm の管であり，多段多条に積んで地表面下 1 m～2 m 程度に埋設することが多い。管路 1 条ごとにケーブルを 1 本収容する設備であり，通信設備ビルからユーザ宅付近等の架空設

備（電柱への引き上げ）までの配線を行う土木設備である。現在、主に設置されている一般管路の管種は、硬質塩化ビニル管、鋼管、鋳鉄管があり、基本的には硬質塩化ビニル管を用いるが、強度の確保が必要な橋台際、液状化の危険性がある地域、電磁誘導対策の必要な箇所等、埋設する環境条件に応じて最適な管種を選ぶ。また、埋設している管路の一定間隔で作業者が入孔して作業が可能なマンホールを構築する。そのため、管路の中にはケーブルが1条施設されている状態になっており、管路内へのケーブルの施設やケーブルの接続切り替え等はすべてマンホールから実施する。マンホールの構造に関する記載は後述する。

最後に、地下配線管路は、呼び径 25 mm もしくは、50 mm の管路であり、最小の管路である。一般管路等の幹線ルートとなるケーブルから分岐し、ユーザ宅やマンションやビル等に地下設備によってケーブルを接続する際に用いる管路である。日本では、ユーザ宅には電柱等の架空設備から引き込むケースが多くみられるが、昨今の無電柱化の取組みによりユーザ宅でもこの地下配線管路を用いた接続が多くみられるようになってきている。また、無電柱化されている住宅エリアに一般管路から効率的にケーブルを引き込むために、1999 年には呼び径が 150 mm の管路にケーブルを多条収容するフリーアクセス単管方式が導入された。この方式を用いることで、設備量の削減、構築の効率化、環境負荷の低減を可能とした。

（3）橋梁通信設備

橋梁通信設備は、埋設した管路を河川等の区間を横断させるための設備の総称である。主に、橋梁添架設備、専用橋、管橋の3種類に大別される¹⁻²⁻³⁾。

橋梁添架設備とは、管路を他事業者の持ち物である道路橋等に据え付ける設計方法である。図 1-2-4 に橋梁添架設備を用いた管路の設置の様子を示す。据え付ける位置が道路橋等の側部の場合は側添方式、下部の場合は裏添方式と呼ばれており、添架する橋の形状により設計を行う。橋への添架時は、基本的に地中から埋設してある管路の本数を

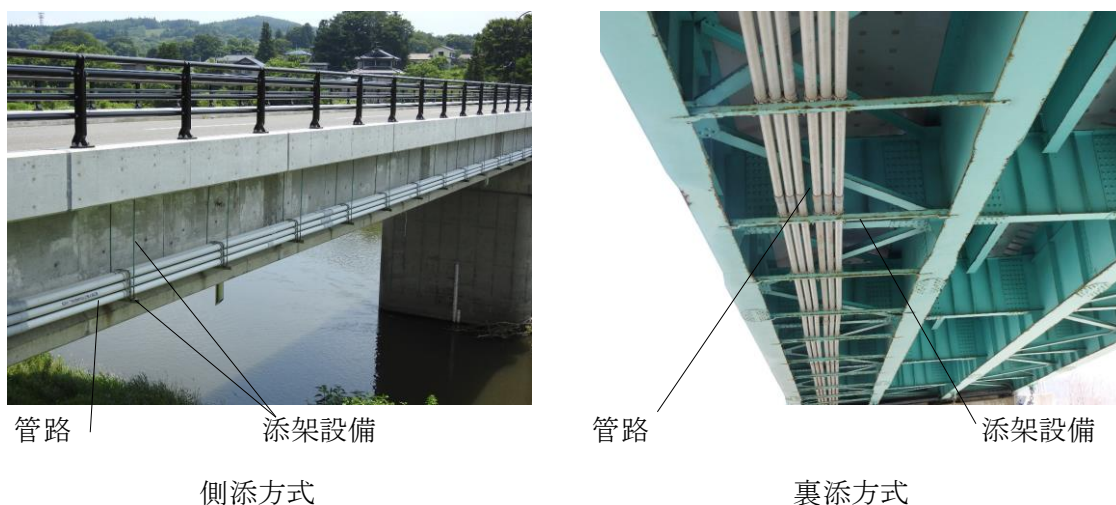


図 1-2-4 橋梁添架設備を用いた管路の設置の様子

そのまま継続するため、埋設時に多条多段であればそのまま橋に添架することとなる。

専用橋とは、河川等を横断する適当な道路橋等が確保できない場合に、管路専用の橋として架橋するもので、管路を支える橋台、橋脚基礎等の下部構造で構成される。図 1-2-5 に専用橋の例を示す。専用の形式には、トラス橋、パイプビーム橋、プレートガーダ橋等がある。道路管理者、河川管理者等の他事業者との協議および周辺の景観等を考慮して設計を行う。いずれの橋梁も作業者は橋梁上で作業や通行をすることはできない。

最後に、管橋とは小規模水路等において管路を管強度だけで横断させる方式である。図 1-2-6 に管橋の様子を示す。管橋は高い管強度が必要であるため管種は原則、鋼管のみとなる。



図 1-2-5 専用橋の例



図 1-2-6 管橋の例

(4) 通信用マンホール

マンホールとは、管路に施設したケーブルの接続部となるクロージャ等の収容や、作業者が内部に入孔し管路へのケーブル施設やケーブルの切り替え、保守等の作業を行うための地下空間を確保する設備である。図 1-2-7 に通信用マンホールの構造、表 1-2-1 にマンホールの規格を示す¹⁻²⁻⁴⁾。図に示す通り、マンホールの構造は大きく分けて矩形

の躯体部，円形の首部部，地上の路面と平坦に設置される鉄蓋部の3つとなる。

はじめに，躯体部の構造や大きさについて説明する．材質は鉄筋コンクリートもしくはレジンコンクリートである．躯体部には平鋼と言われる通信ケーブルを取り付ける金

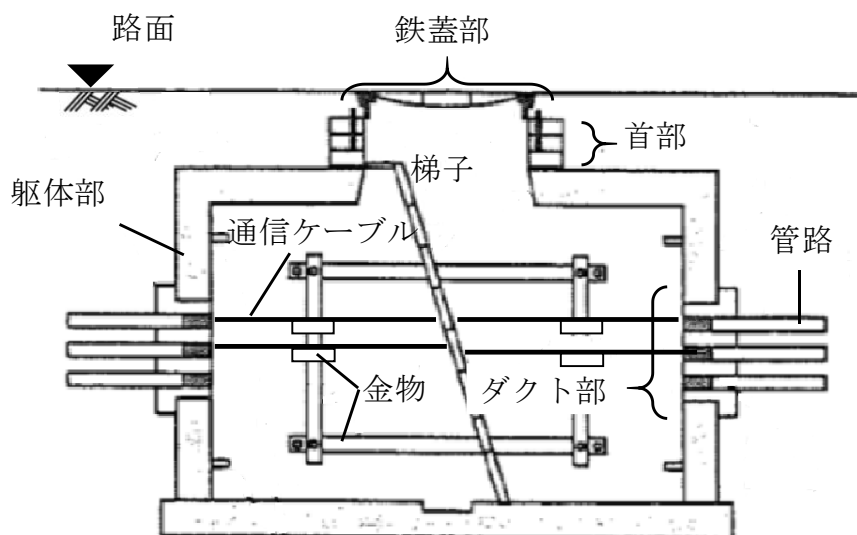


図 1-2-7 通信用マンホールの構造

表 1-2-1 マンホールの規格 (文献¹⁻¹¹) を元に作成)

マンホールの名称		内法寸法(単位: mm)		
形状	大きさ	長手方向長さ	短手方向長さ (分岐部長さ)	高さ
直線形	3号	2300	1300	1500
	4号	3000	1400	1700
	5号	3200	1400	2100
	6号	4000	1500	2200
	7号	5000	1700	2600
	8号	5000	1700	3000
分岐L型	3号	2500	1300 (1600)	1500
	4号	3400	1400 (1700)	1700
	5号	3600	1400 (1700)	2100
	6号	4000	1500 (1800)	2200
	7号	6200	1700 (2600)	2600
	8号	6200	1700 (2600)	3000
分岐T形	3号	2500	1300 (1900)	1800
	4号	3400	1400 (2000)	1800
	5号	3600	1400 (2000)	2300
	6号	4500	1500 (2100)	2400
分岐十字形	3号	2500	1300 (1900)	1800
	4号	3400	1400 (2000)	2100
	5号	3600	1400 (2000)	2600
	6号	4500	1500 (2100)	2600

物が設置されている。また、躯体部の短手方向の側面には、ダクト部と呼ばれる管路がマンホールに接続されるための場所があり、躯体部には管路は通過しておらず作業者が直接ケーブルに触れられる構造となっている。そのほかには、作業者が内部に降りるための梯子、躯体部の中心には排水ますと呼ばれるくぼみがある。排水ますの役割は、マンホールは雨水や地下水等が溜まっているケースが多く作業者が躯体部に入孔する際に水中ポンプにより排水を行うためである。また、表に示す通り、マンホールの大きさは様々であり現在製造されている最小のものは3号、最大のものは8号と呼ばれるサイズである。図1-2-8にマンホールの号数別の設置割合を示す。大部分のマンホールは3号、4号である。1号、2号のマンホールは現存するが規格は廃止されている。マンホールの多くは、とう道から出た管路を網状に細分化しながら広げていくためのケーブルの接続点であるため、地下空間の有効的な活用のため必要以上に大きなサイズを設置しない。そのため、3号、4号が比較的によく用いられるが、都心部では他事業者の埋設物等が多く3号マンホールのサイズが設置できない場合は、2号もしくは1号が用いられてきた。しかし、2号以下は作業者が内部に入って作業する十分なスペースを確保できない関係から現在では標準形となっていない。また、その形状は、躯体部が直方体である直線形、躯体の平面がL字の形をしている分岐L形、T字の形をしている分岐T形、十字の形をしている分岐十字形がある。これは、躯体部の側面の管路の接続方向によってどの形状を用いるのかを選ぶためである。基本的には管路は道路の進行方向に対して沿う形で埋設されるため、管路の接続点となるマンホールも直線形が多く用いられる。しかし、交差点等での直角に分岐させたいとき等は、L形、T字形、十字形等のマンホールを選択する。

次に首部の構造について説明する。首部は躯体部と地上をつなげて作業者が躯体部に

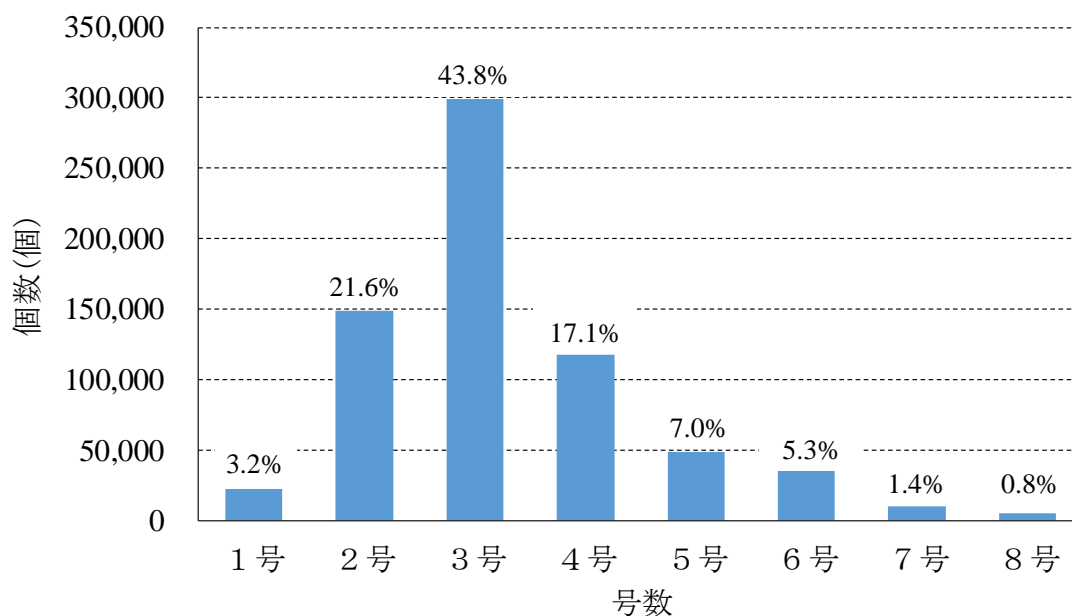


図 1-2-8 マンホール号数別の設置割合

出入りするための空間である。直径は 700 mm～750 mm であり厚さ 7 cm もしくは 10 cm の円形リングを積み上げていくことにより構築する。首部の深さは躯体部を設置する位置によってさまざまであるが、管路が地中 1 m～2 m のところに埋設されるため、おおむね 60 cm～80 cm が選択される。首部には、作業者が内部の梯子に足をかけるためのステップが一定間隔で設けられている。

最後に、鉄蓋について説明する。鉄蓋は、円形の形状で地上の路面と平坦になるように設置されている。鉄蓋は開閉可能な上蓋と受枠により構成されており、上蓋の表面には模様が施されている。これは直上を通行する車両や歩行者がスリップをしないように摩擦係数を確保するためである。設置している鉄蓋の例を図 1-2-9 に示す。



図 1-2-9 マンホール鉄蓋の例

(5) 通信用ハンドホール

通信用ハンドホールとは、マンホールと同様に管路に施設したケーブルの接続部をすくろージャ等の収容や、作業者が管路へのケーブル施設やケーブルの切り替え、保守等の作業を行うための地下空間を確保する設備である。マンホールと大きく異なる点は

表 1-2-2 ハンドホールの規格 (文献¹⁻²⁻⁴⁾ を元に作成)

大きさ	種類		内法寸法(mm)		
	形式	長さ	幅	深さ	
1号	60	800	200	730	
	80			930	
	100			1130	
	120			1330	
2号	60	800	400	630	
	80			830	
	100			1030	
	120			1230	
3号	90	1200	600	900	
	110			1100	
	130			1300	

作業者がハンドホール内部に入孔しないことと、ハンドホールは原則、車両が直上を通行するような場所には設置されないことである。表 1-2-2 にハンドホールの規格，図 1-2-10 にハンドホールの構造を示す¹⁻²⁻⁴。図に示す通り，マンホールと同様に構造は躯体部，円形のマンホール首部，地上の路面と平坦に設置される鉄蓋部の3つとなる。ハンドホールの躯体部の特徴は，形状が直方体しかない点である。大きさも作業者が入れるスペースはなく名称のとおり手を躯体部に入れることにより作業を行う。また，首部は路面との接続区間であるが躯体部と同様の大きさでありマンホールのような円形の形状ではない。鉄蓋は図 1-2-11 に示すように T 字が施されている四角い形状である。

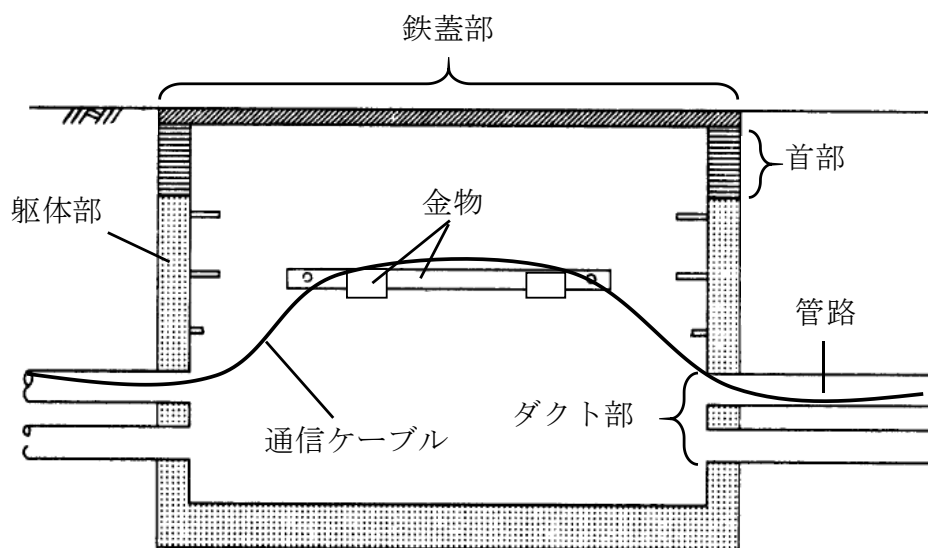


図 1-2-10 通信用ハンドホールの構造



図 1-2-11 ハンドホールの鉄蓋

1. 2. 4 設備量と高齢化

通信土木設備の設備量を表 1-2-3 に示す。とう道は全国に約 650 km，管路は約 62 万 km，橋梁通信設備は約 3.9 万箇所，マンホールは約 68 万個，ハンドホールは約 15 万個である¹⁻²⁻⁵。また，図 1-2-12，図 1-2-13，図 1-2-14 にこれらの設備内，とう道，管路，マンホールの年ごとの設備の建設量を示す。図 1-2-15 に現在の全体の設備量に対する

年ごとの建設割を示す。管路、マンホールは1965年頃より建設量が増えていき、とう道は、少し遅れた1970年代より建設量が増えている。そして、現在の設備量の90%の建設量に到達したのが、とう道では1995年、管路は1991年、マンホールは1987年である。また、図1-1-1にて示した建設後50年以上を経過する設備割合は2023年の時点では、とう道は約20%（1973年までに建設された設備）、管路は約42%（1973年までに建設された設備）、マンホールは約51%（1973年までに建設された設備）であり、2033年の時点では、とう道は約49%（1983年までに建設された設備）、管路は約81%（1983年までに建設された設備）、マンホールは約83%（1983年までに建設された設備）である。特に管路は2023年の時点では約半数以下であったが急速に高齢化が進行し、マンホールはこれらの設備の内、最も高齢化率が高い設備であることがわかる。このマンホール設備がおかれている状況は、1章1節1項の図1-1-1にて示した道路橋の約67%（2033年）よりも高い割合になっている。通信土木設備も他のライフライン設備と同様に、大規模な工事を伴うことによる社会影響や費用面等の問題から簡単に造り直すことができないため、定期的な点検と補修・補強による保全を行うとにより半永久的に用

表 1-2-3 通信土木設備の設備量（文献¹⁻²⁻⁵）を元に作成）

設備名称	設備量
とう道	約650km
管路	約62万km
橋梁通信設備	3.9万箇所
マンホール	約68万個
ハンドホール	約15万個

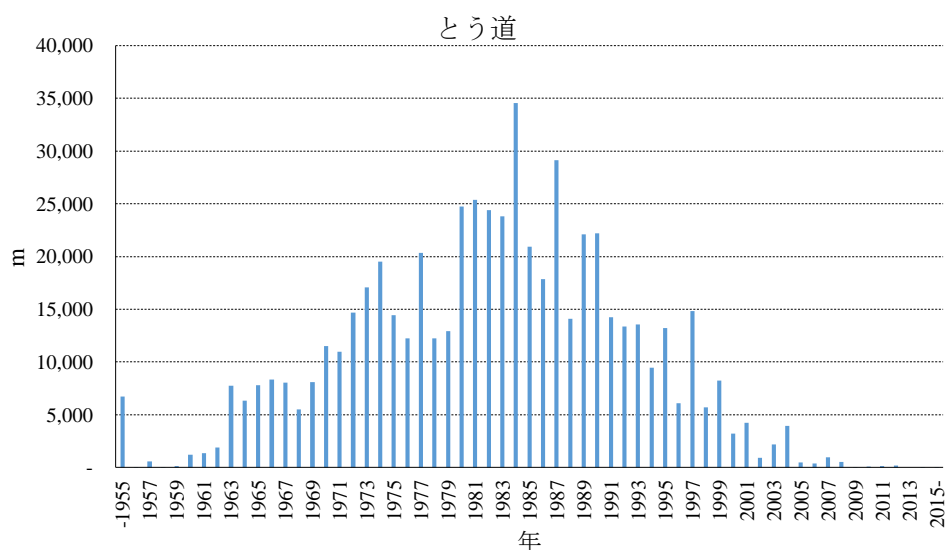


図 1-2-12 とう道設備の建設量

いることが求められる。

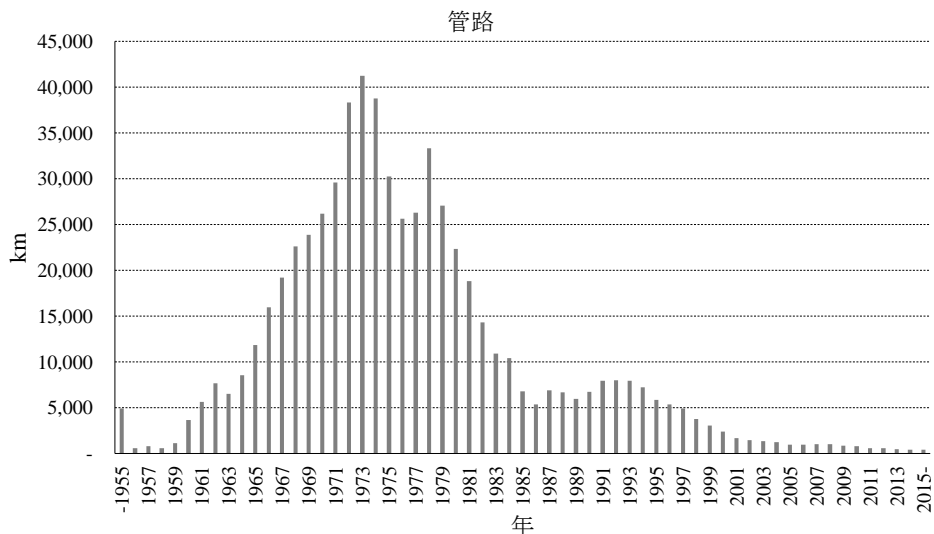


図 1-2-13 管路設備の建設量

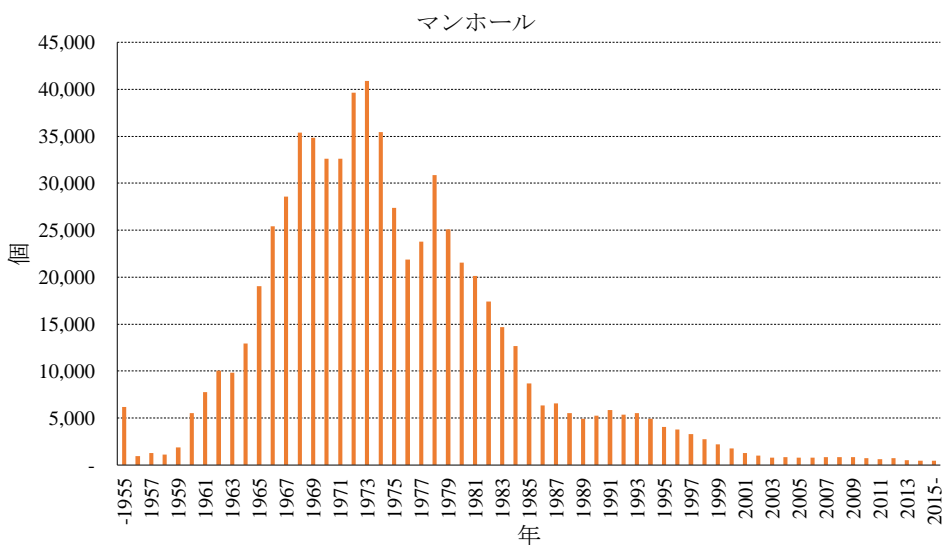


図 1-2-14 マンホール設備の建設量

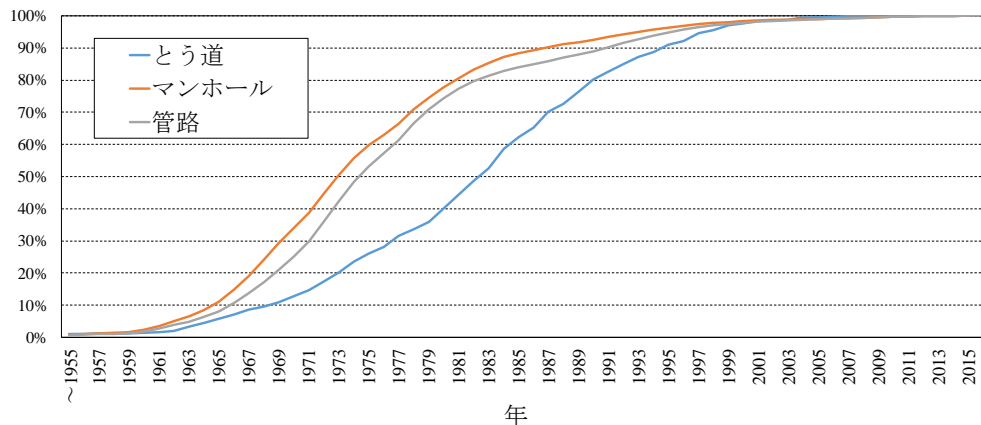


図 1-2-15 全体の設備量に対する建設割合

1. 2. 5 点検方法

通信土木設備の点検の主な目的は、通信土木設備の劣化に起因するケーブル故障等による通信サービスの低下の防止、定期的な点検とそれに基づく補修・補強による設備の長期的な使用、社会影響の大きいライフライン設備不備による日常生活への迷惑等の未然防止、および資産の管理である。

そのため、個々の通信土木設備の構造特性や設置環境を考慮したうえで、現用ケーブルの保護、良好で安全な作業者の作業空間、車両・歩行者・近隣の住民への迷惑を与えない状態の維持等されるように点検の周期を定めている。これらのとう道、管路、橋梁通信設備、マンホール・ハンドホールの点検周期と主な作業内容について表 1-2-4 に記載する^{1-2-6)~1-2-9)}。以下、各設備に関して説明する。

とう道の点検は5年一巡を基本としている。とう道では、とう道本体のひび割れ、露筋、漏水等の確認を行っている。これらは主に目視を主体としており、とう道内を歩行することより劣化を確認し、劣化の確認後は露筋やひび割れ等はメジャーにより大きさの計測を実施している。また、ネットワークの信頼性を確保するためのとう道内の火災感知器、浸水感知器、防火壁、防水壁等の設備、作業者の安全性を守るための送風機や避難誘導等の設備といった多種多様な設備の動作状態を確認している。さらに、作業者の作業空間を確保するための梯子やグレーチングの腐食状態等を点検している。とう道は地下空間で連続しているため、とう道内を歩行することによって点検を実施している。

管路の点検は定期的な点検周期を定めていない。ケーブルの通線時もしくは地震等の災害後に状況を鑑みて実施している。管路は、通信ケーブルの物理的な特性および伝送特性を損なわないことが重要であるため、点検時には管路の内空間が十分に確保されているのかを確認することとなっている。点検項目には、管路内空間の錆や災害による破

表 1-2-4 点検作業の内容（文献^{1-2-6)~1-2-9)}を元に作成）

設備	点検周期	点検方法	主な項目
とう道	5年	目視点検 (スケールによる劣化の計測)	ひび割れ、露筋、漏水、設備の状態異常
管路	定期的な周期なし※1	通過性試験/ パイプカメラによる点検	錆、破損、へこみ
橋梁通信設備	5年	目視点検/ UAVや橋梁専用点検車両による 画像点検	設備の腐食、ボルト 離脱やゆるみ、鋼材 破損
マンホール/ ハンドホール	5年または10年※2	目視点検 (ノギス等による劣化の計測)	鉄蓋部の段差や模様 の摩耗、ひび割れ、 露筋、設備の腐食

※1：ケーブル敷設時や地震等の災害後
 ※2：鉄蓋部が5年、首部と本体部は10年

損、通行車両荷重による凹み等による内空間への影響を確認している。点検時には一定間隔で設置しているマンホールから、マンドレルと呼ばれる直径約 70 mm、長さ 300～400 mm 程度の円柱を管路に挿入して他方のマンホールからマンドレルを引っ張ることにより、その通過性を確認している。また、マンドレルの不通過時やその他必要性が発生した場合には、パイプカメラとよばれる小型のケーブル式カメラを管路内に通し、映像により状態を確認している。

橋梁通信設備の点検は 5 年一巡を基本としている。先に述べたように、橋梁通信設備は、主に橋梁添架設備、専用橋、管橋の 3 つの形態がある。はじめに橋梁添架設備では、橋に添架している管路そのものや管路を橋に設置している添架設備を点検している。管路の点検では、管路の塗装の剥がれ、錆が進行することによる穴あきの状態の確認、さらに管路は一定間隔で連結しているが地震や車両振動により外れてしまうことがあるため、外れの有無を確認している。また、添架設備の錆や管路や他事業者の橋本体と接続しているボルトの外れ等の状態を点検している。次に、専用橋は管路の状態に加えて、橋本体および橋脚基礎等が点検対象となるため、これらの塗装の剥がれ、錆、鋼材の破損を確認している。管橋は原則鋼管のみであるため、塗装の剥がれ、錆、管の外れの有無を確認している。橋梁通信設備の点検は主に目視によって行うが、大規模なものから小さいものまで設備の大きさが様々である。特に、大規模設備において遠方目視となってしまうものでは、橋梁への足場の設置による点検や、目視に代わる UAV による映像撮影を用いた点検を行っている。

マンホール・ハンドホールの点検は鉄蓋と本体(首部含む)により点検周期が異なる。鉄蓋は 5 年一巡、本体は 10 年一巡で点検を行っている。鉄蓋の点検は主に上蓋の表面模様の摩耗量、上蓋と受枠や受枠と路面の段差をノギスによって 0.1 mm 単位で計測している。本体の点検は、主に壁面に発生している露筋の確認と計測、また、通信ケーブルやクロージャを支えているマンホール内部の金物の腐食の状態を確認している。これらの点検方法は、鉄蓋は路上に安全帯を設置しノギス等を用いた作業者の直接計測である。本体も同様に路上等に安全帯を設置し鉄蓋をあけて、中に作業者が入孔することによる点検と計測を行っている。

図 1-2-16 に各設備の点検作用の内容をコストと精度の軸で位置づけした図を示す。コストとは、点検の際に必要な人工や機材費であり、設備量と点検周期から人工、点検時に求められる機材から機材費を推定している。精度とは、点検時に求められる劣化の計測精度を示している。通過点検は、管路のマンドレルによる点検、パイプカメラ点検とは管路の中にカメラを挿入して、カメラの映像を目視で確認する点検、UAV 点検は UAV により撮影した画像を確認する点検、目視点検は作業者が直接目視により確認する点検のことである。メジャー計測、ノギス計測は作業者が劣化の大きさを計測する点検である。

はじめに、管路点検は先の述べたように定期点検を実施していないため、点検コスト

は低いと考えられる。また、通過点検ではマンドレルの通過やパイプカメラ点検によって管路の内部の凹みや、管路の腐食、さらに管路の劣化により砂等の異物が管路内に侵入していないかの確認等を行っている。管路の直径は 700 mm 程度であるため、点検時に必要な判断精度は cm 単位から mm 単位での判断となる。

次に、とう道点検は、定期点検を実施している設備の中では、最もコストは小さいと考えられる。これは、とう道は点検時に通信設備ビルから進入可能であり、通信専用のトンネル空間で点検作業を行うための現地業務の手間は他の土木設備と比較すると少ないためである。点検内容としては、鉄筋コンクリート構造物であるとう道本体のひび割れ、剥離、露筋、漏水の領域をメジャーで計測する作業やその他付帯設備の状態を確認する方法がある。メジャーによる劣化の領域の計測は概ね cm 単位で行われている。

とう道の次にコストかかるものは橋梁通信設備の点検作業である。橋梁通信設備は、設備量が多いことにより、点検人員の稼働が多く発生する。また、一部の設備においては河川を横断する大掛かりな足場が必要となるため、点検費が多く発生することが問題である。そこで、昨今では足場の設置の代わりに UAV による画像撮影による点検といった方法を取り入れていてコストの削減を行っている。また、橋梁に添架しているガスや水道や電気といった他事業者との合同点検によりコストを削減している。点検時は、目視や画像から橋梁設備に発生した錆の領域や、設備を橋梁本体に設置しているボルトのゆるみ等を点検している。概ね cm 単位での判断が必要とされる。

最後に、点検コストが最も大きい場所に位置するものが、マンホールとハンドホールの点検作業である。マンホールとハンドホールは設置個数が多い上に全国に点在する。また、路上に設備が設置されているため、点検するには道路使用許可の申請が必要となる。さらに、点検時には設備毎に安全帯を設置し地下作業が必要となる。このように他の設備と違って設備量が多い上に、移動や点検環境の構築に稼働を要するため、通信土木設備の中でもコストが大きい設備である。また、点検作業には、他の設備と同様に

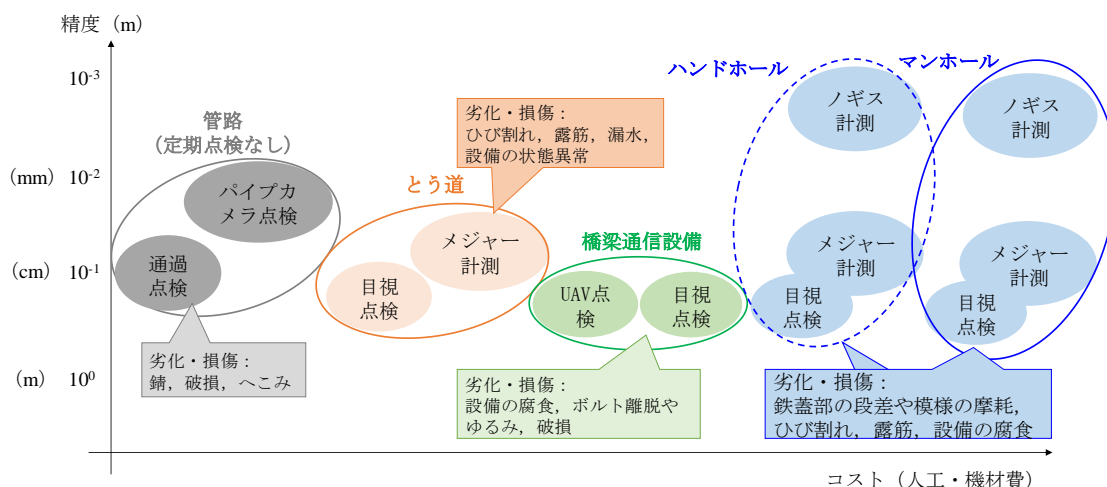


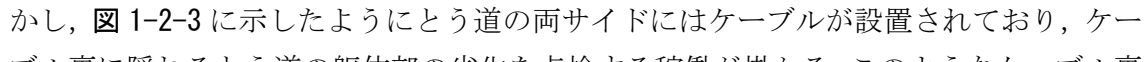
図 1-2-16 各設備の点検内容の位置づけ

鉄筋コンクリートである躯体部の露筋をメジャーにより cm 単位で計測することに加えて、鉄蓋部に発生した段差や表面模様の摩耗状態をノギス等により 0.1 mm 単位で計測するといった他の設備にはない精度が必要である。

これらのように、最もコストが大きい設備はマンホールであり、最もコストが小さい設備は管路である。そして、点検に求められる精度は cm 単位からマンホールとハンドホールのような 0.1 mm 単位で計測を行う項目もある。

1. 2. 6 点検の課題

はじめに、管路点検は前節で述べたように定期点検は実施していないため、常時必要なコストは小さい。しかしながら、管路は全国で 68 万 km 埋設されており、地震等の災害が発生した直後に、短期間で一斉に点検が必要となる。そのため、一か所あたりに必要な点検時間を短縮できる方法が課題である。

次に、とう道の点検であるが、とう道はメジャーにより劣化の計測が必要となる。しかし、に示したようにとう道の両サイドにはケーブルが設置されており、ケーブル裏に隠れるとう道の躯体部の劣化を点検する稼働が掛かる。このようなケーブル裏の点検を効率化する方法が求められている。さらに、とう道は点検対象が多岐にわたるため、広い知識を有した人材の確保・育成が課題となる。前節で述べたように、とう道の点検は本体やケーブルを支える金物のみならず、とう道内には様々な付帯設備が設置されている。これは、とう道が他の通信土木設備と比較して大規模で重要なケーブルが設置されていることから、設備として高機能になっているためである。そのため、点検作業者はとう道本体のひび割れや漏水等の劣化を点検できる土木構造物の知識や、付帯設備の異常を点検できる電気回路や機械構造に関する幅広い知識が必要となる。少子高齢化および人口減少が進む日本社会において、熟練者から若手へのノウハウ継承等を含めた人材の育成と確保が課題である。

次に、橋梁通信設備の点検だが、設備数が 3.9 万橋といった膨大な数量があるため、点検コストの削減に資する効率的に点検できる方法の導入が求められている。この方法の一つとして、昨今では長大橋に添架された設備に UAV による点検方法を導入しているが、規模の小さい橋等では UAV が離着陸できない環境であったり、街中の人口密集地のため UAV が飛行できない環境であったりといった適用範囲に課題が残っている。また、点検の精度面では、橋梁に接続しているボルトの緩みといった小さい設備の微小な変化を確認しなくてはならない。そのため、劣化を見落とさないように点検する方法が課題である。さらには、通信管路の腐食領域の割合を点検しているが、作業者毎によって腐食領域の判定にバラツキが生じる。そのため、作業者依存しない点検の品質の均一化も課題である。

最後に、マンホールとハンドホールについて述べる。マンホールは約 68 万個、ハンドホールは約 15 万個といった数量が膨大であり、多くは車道に設置されており、か

つ点在しているという特徴がある。1カ所の設備を点検するために、事前の道路使用の許可の申請から当日の安全帯設置、内部へ入孔するためのマンホール内部の換気作業といった膨大な時間がかかるため、効率的な点検方法の導入が課題である。さらには、車道に設置されているため、車道作業には近隣を通行する車両が車道に設置した安全帯に飛び込んでくる「飛び込まれ事故」のリスク、作業者が内部に入孔する際のマンホール内の梯子を昇降する際のスリップや地下作業を伴うことによる酸欠事故のリスクといった安全面の問題もあるため、作業者の安全を確保する点検方法の導入が課題である。また、点検精度に関して、鉄蓋の段差と表面模様の摩耗量をノギスにより0.1 mm単位で計測しており、他の設備と比べて高い精度が求められる。しかし、屋外に設置された設備のノギスによる計測では、作業者毎にバラツキが生じる。そのため、作業者に依存しない点検の品質の均一化も課題である。

これらのように各通信土木設備は特徴の違いから適切な点検方法が異なり、直面している課題も違う。各設備の課題に合わせた対策を行うことによって、いずれの設備も恒久的に点検を継続していく必要がある。

1. 2. 7 点検課題の解決に向けた画像認識技術の有効性と要求精度

各設備の点検において抱えている課題の対策として、画像認識技術を用いることの有効性に関して述べる。現行の通信土木設備の点検において共通する項目として、主に目視により劣化を確認し、劣化の大きさをスケール等により計測している。そのため、これらの点検を安全かつ効率化する方法として、遠隔から点検に必要な情報を取得できる画像に着眼して、画像認識を用いて劣化の有無や、大きさ等を計測できる画像点検は有効性が高いと考えられる。さらには、画像認識技術を構築すれば、一定の判定基準で点検を行うことができるため、点検品質の均一化も実現できる。

また、図 1-2-17 に現行の点検で必要としている精度から通信土木設備において必要

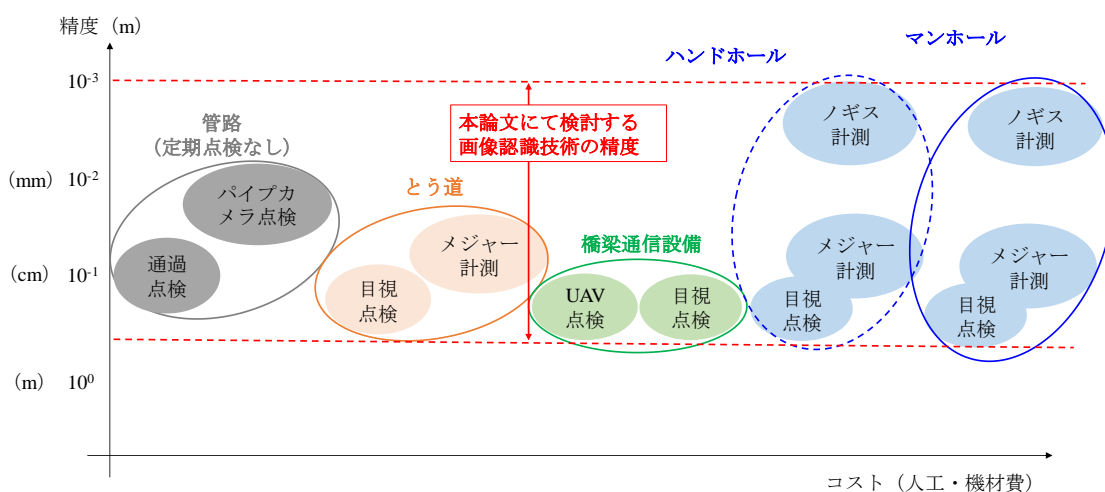


図 1-2-17 画像認識技術の要求精度

とされる画像認識技術の精度の位置づけを記載する。本論文では、画像認識技術により、目視点検で必要となる劣化の有無の検出からノギス計測で必要となる 1 mm 以下の単位での計測精度までが必要となることがわかる。また、本論文で扱う画像は、市販のデジタルカメラで撮影できる画像を対象とすることとする。これは、現在では超高解像度カメラを用いて画像データを取得することによって、詳細な分解能で計測できるものもあるが、土木設備は数が多いため、市販で流通しておりかつ安価に購入できる機材といった入手容易性も求められるためである。

1. 3 本論文の目的と構成

本論文では、複数ある通信土木設備の中でもマンホールを対象として、点検を安全かつ効率的に実施する技術の提案を行う。マンホールは、土木設備の中でも高齢化率の高さ(図 1-2-15)、コストの多さ(図 1-2-16)、点検時の作業者の安全確保の難しさから、点検の恒久的な継続には、早急な支援が必要不可欠であると考えられるためである。従って、点検の効率化や点検の品質の均一化のため、現在作業者が実施している点検内容を画像認識技術によって行う手法を検討する。また、併せて画像を安全かつ効率的に取得するための方法を検討する。マンホールの点検時には、作業者が車道に滞在するリスクや地下作業に伴うリスクがある。さらに、作業者がマンホールに入孔するために、マンホールの躯体部に溜まった水の排水や換気作業といった事前準備が必要となる。そこで、作業者の点検作業時のリスクを最小化し、入孔に伴う作業を削減するために、UAV を用いてマンホールの点検用の画像を取得する方法を検討する。UAV を選定した理由は、現在、作業者が行けない遠隔地やリスクの高い場所のインフラ設備の点検の効率化に UAV の導入が進んでおり、ロボット(機械)による映像の自動撮影という点において、有効性の高い手段であると考えたためである^{1-2-6), 1-2-7)}。

本論文では、マンホールを対象とした画像認識による劣化の検出手法および UAV による画像撮影手法の提案を目的とする。

図 1-3-1 に本論文の構成を示し、以下に概要を述べる。

第 1 章では、日本のライフライン設備の概要と、ライフライン設備の高齢化の状況、設備点検の重要性と問題について述べる。そして、ライフライン設備の中から通信インフラを取り上げ、通信インフラを根底から支えている通信土木設備における概要と役割、高齢化の状況、点検内容と現行点検が直面している課題に関して示す。そして点検を効率化かつ安全にする方法として、画像認識を用いた点検手法の有効性と要求精度について示し、本研究でマンホールを対象とした点検手法の研究に取り組むことを述べる。

第 2 章では、本論文にて対象とする通信用マンホールについて、点検内容、設備特徴、および劣化発生メカニズムについて下水道マンホールとの比較を行い、現場での調査結果や既往研究を取り上げながら通信用マンホール特有の劣化事象を述べる。さらに、通信用マンホールに発生する劣化の進行度で定義した独自の劣化ランクを説明する。そして、既往研究を踏まえて、本研究で取り組む研究課題と本研究の独自性について述べる。

第 3 章では、マンホールの鉄蓋部について取り上げ、劣化事象である鉄蓋部の段差と表面模様の摩耗を画像認識により計測する手法を提案する。長年の通行車両の影響により、鉄蓋部の受枠に対して上蓋が沈み込む凹み段差が発生し、この段差を画像により計測する手法を提案する。さらに、上蓋の表面には直上を通行する車両や歩行者等のスリップを防止するための模様が施されているが、模様が設置時の 4 mm から 2 mm 以下に

なると交換の対象となっているため、模様の変換量の推定を行う手法を提案する。最後に、画像認識を用いて模様の変換状態を判定しやすい模様形状の提案と、提案した模様形状を認識する手法の提案を行う。画像認識により 2 mm の変化量を捉えるためには高解像度のカメラを用いる必要がある。そこで、鉄蓋交換のタイミングまで模様が変換すると形状が変化する模様のデザインの提案と、模様形状を認識する画像認識手法を提案する。

第 4 章では、躯体部に発生する劣化事象である露筋と金物腐食を画像認識により検出する手法を提案する。躯体部は鉄筋コンクリート構造であるため、長期使用によって腐食した内部鉄筋がコンクリート表面に露出する露筋という劣化事象が発生する。この露筋の領域を検出する手法を提案する。また、躯体部に通信用ケーブル等を添架する金物を取り付けてある。これらの金物設備は腐食が進むと通信用ケーブル等が落下し、断線の恐れがあるため一定以上腐食した場合は取り替える。そこで、金物腐食の領域を検出する手法の提案を行う。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章にて画像認識による劣化検出を行うための画像を UAV により撮影する手法について提案する。地上の鉄蓋部と地下の本体部を UAV で撮影する手法を示す。さらに、躯体部の撮影において、非 GPS 空間を飛行するための UAV の制御方法を提案する。そして、現用のマンホールを用いた検証を行い、撮影した画像から第 4 章にて提案した手法により劣化を検出した結果を示す。

第 6 章では、画像認識による鉄蓋部の劣化検出手法および本体部の劣化検出手法と、画像認識を行うための UAV による画像取得手法についてまとめ、今後の課題について述べる。

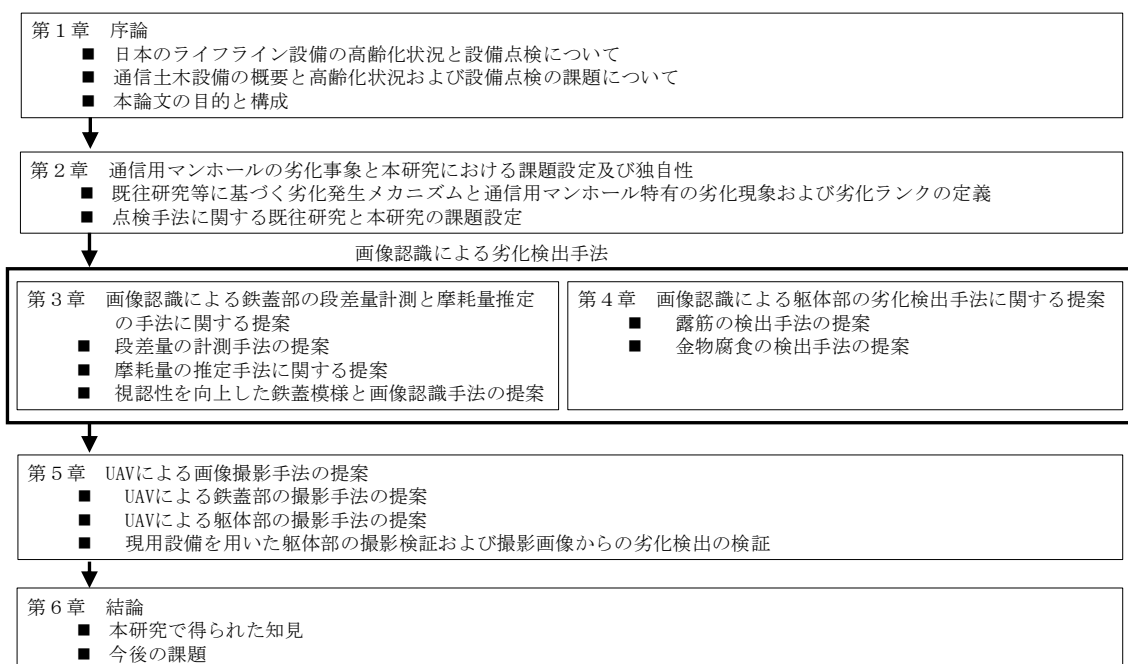


図 1-3-1 本論文の構成

参考文献

- 1-1-1) 国土交通省: 市町村における持続的な社会資本メンテナンス体制の確立を目指して, <https://www.mlit.go.jp/common/001080953.pdf> (2020年9月29日閲覧)
- 1-1-2) 国土交通省: 道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo9_1.pdf (2020年9月29日閲覧)
- 1-1-3) 国土交通省: 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo10.pdf> (2020年9月29日閲覧)
- 1-1-4) 国土交通省: 道路メンテナンス年報令和元年8月, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/pdf/h30/R1_03maint.pdf (2020年9月29日閲覧)
- 1-1-5) 国土交通省: 老朽化対策の取組み, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf> (2020年9月29日閲覧)
- 1-1-6) 国土交通省: 新技術利用の際のガイドライン(案) 平成31年2月, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo5_1.pdf (2020年9月29日閲覧)
- 1-1-7) 国土交通省: 点検支援技術性能カタログ(案) 令和2年6月, <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/> (2020年9月29日閲覧)
- 1-2-1) 情報流通インフラ研究会: 情報流通インフラ研究会, 第1章通信土木を取り巻く環境の変化, オーム社, pp. 2-21, 2000.
- 1-2-2) 情報流通インフラ研究会: 情報流通インフラ研究会, 第4章通信土木工事の施工, オーム社, pp. 83-131, 2000.
- 1-2-3) 天野博史: アクセスネットワークのすべて, 1章インフラストラクチャ技術, オーム社, pp. 25-30, 2017.
- 1-2-4) 情報流通インフラ研究会: 情報流通インフラ研究会, 第3章通信土木工事の設計, オーム社, pp. 45-82, 2000.
- 1-2-5) 杉野文秀, 政倉浩志: 通信基盤設備の安心・安全かつ経済的運用を実現する維持管理技術, NTT技術ジャーナル, Vol. 26, No. 8, pp. 8-11, 2014.
- 1-2-6) 土木学会: 都市ライフラインハンドブック, 第Ⅲ編ライフラインの保全と環境技術, 6章情報通信, pp. 551-581, 2010.
- 1-2-7) 川端一嘉, 森治郎, 勝木康博, 足利翔: 点検・補修タイミングを最適化する設備マネジメント技術, NTT技術ジャーナル, Vol. 26, No. 8, pp. 12-15, 2014.
- 1-2-8) 内堀大輔, 高橋宏行, 田中航, 望月章志, 川端一嘉: デジタルカメラ画像を用い

たマンホール鉄蓋の段差と摩耗の点検方法, 土木学会論文集 F3(土木情報学),
Vol. 72, No. 1, pp. 1-10, 2016.

- 1-2-9) 山口茂, 柴田健一郎, 奥村賢志, 森厚芳: 管路設備の点検診断および補修再生
技術, NTT 技術ジャーナル, Vol. 18, No. 3, pp. 47-50, 2006.

第2章 通信用マンホールの劣化事象と本論文における課題設定及び独自性

2. 1 点検内容と既往研究等に基づく劣化発生メカニズム

2. 1. 1 マンホールの構造と材料特性

図 2-1-1 にマンホールを構成する部位の断面図を示す。(a)はマンホールの全体図、(b)は鉄蓋の断面図、(c)は首部の断面図、(d)は躯体部の上床版と下床版の断面図であ

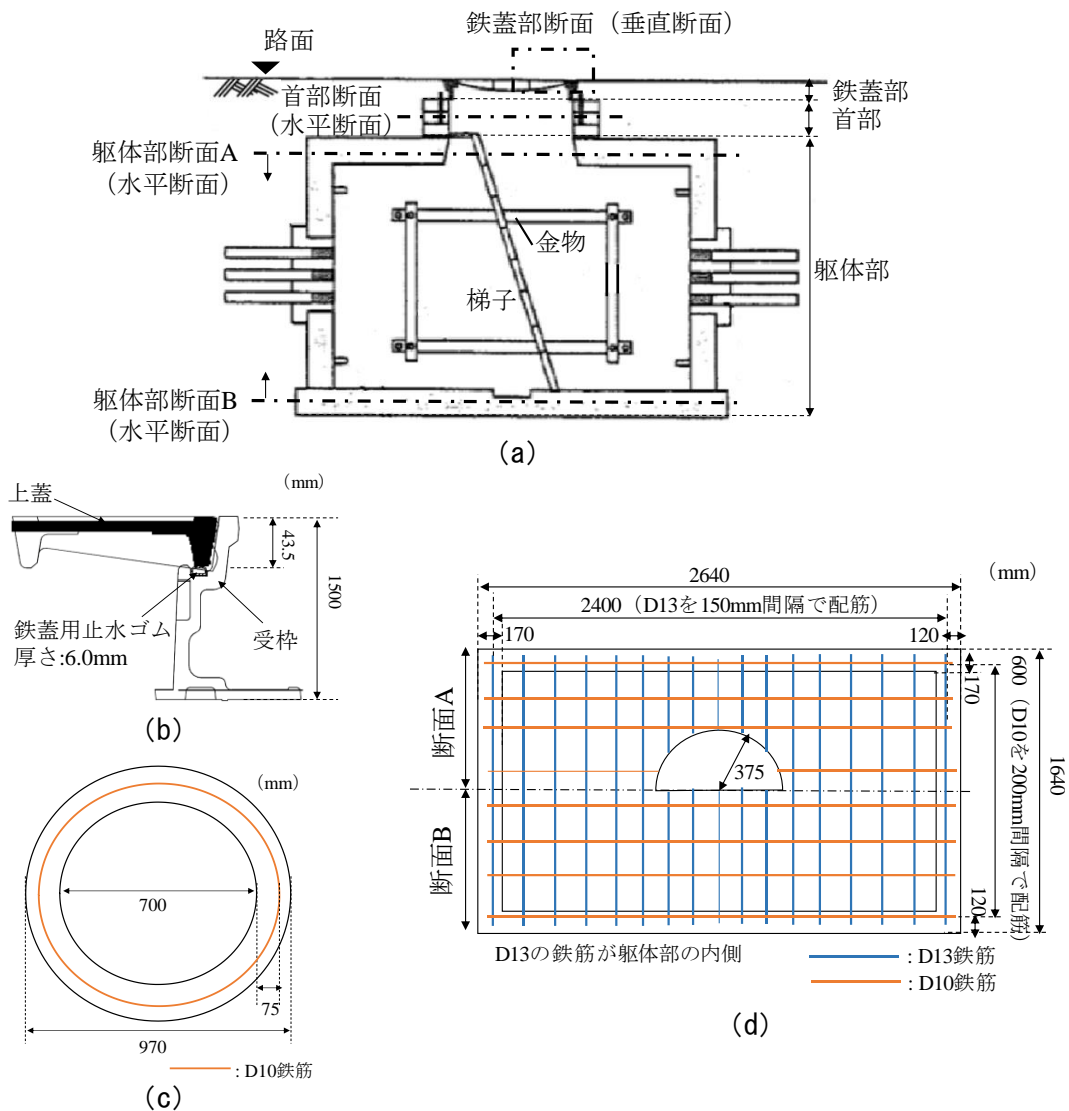


図 2-1-1 マンホールの各部位の断面図と配筋図：(a) 全体図，(b) 鉄蓋の断面図，(c) 首部の断面図，(d) 躯体部の上床版と下床版の断面図

る。(b)の鉄蓋は受枠と上蓋で構成されている。受枠は首部と連結しており、上蓋は開閉可能である。受枠には止水ゴムが設置されており、上蓋をはめ込んだ際に上蓋と受枠の隙間から進入する雨水がマンホールの躯体部に流れ込むのを防止する構造となっている。(c)の首部は、円筒形の厚さ7mmもしくは10mmの構造物である。躯体部の埋設する深さにより2種類の厚さの首部を用いて、上蓋が路面と水平になるように調整を行う。内部には円周方向にD10の鉄筋が配筋されている。(d)において、躯体部の天井部は上床版、床部は下床板と呼ばれており、これらの上床版と下床版にはD10の鉄筋とD13の鉄筋が交差するように配筋されており、躯体部の内側がD13鉄筋である。

図2-1-2に鉄蓋部の上蓋の断面図と上蓋の模様の図面を示す。上蓋の直径は706mmであり、上蓋の表面模様はT字である。上蓋の模様の高さは出荷時が4mmである。

表2-1-1にマンホールの各部位の材料特性を示す。鉄蓋部は、上蓋および受枠はダクタイル鋳鉄である。首部と躯体部は鉄筋コンクリートであり、圧縮強度は30N/mm²以上を規定値としている。首部に用いられている鉄筋は異形棒鋼D10、躯体部は異形棒鋼のD10とD13である。

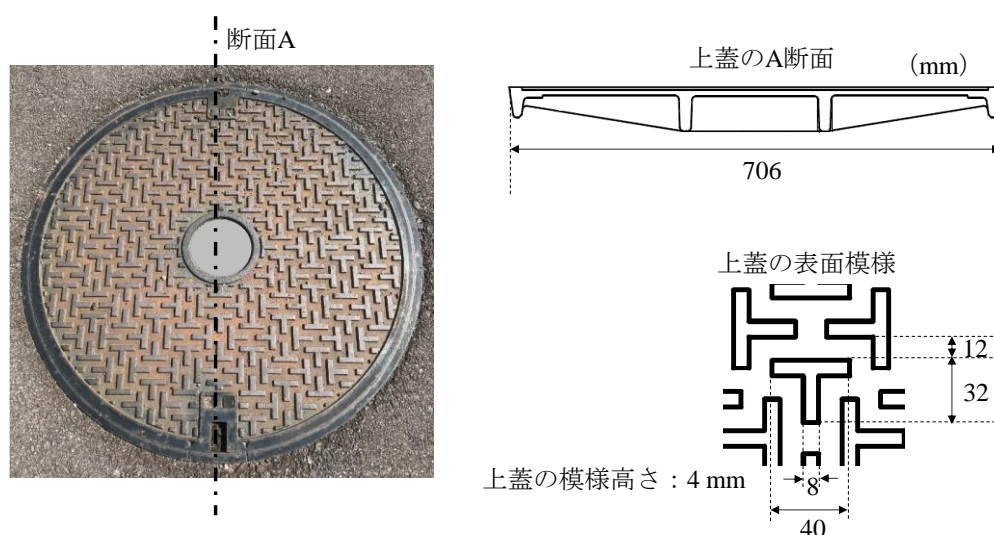


図2-1-2 上蓋の断面図と模様の図面

表2-1-1 マンホールの各部位の材料特性

部位	材料特性
鉄蓋部	材質：ダクタイル鋳鉄，材料記号FCD700/600
首部	材質：鉄筋コンクリート，鉄筋：異形棒鋼D10，圧縮強度：30N/mm ² 以上，かぶり厚さ:75mm
躯体部	材質：鉄筋コンクリート，鉄筋：異形棒鋼D10/D13，圧縮強度：30N/mm ² 以上，かぶり厚さ:25mm

2. 1. 2 マンホールに設置の金物の構造と材料特性

図2-1-3に躯体部に設置している金物と構造を示す。躯体部には、ケーブル等を添架するための金物が設置されている。金物は、平鋼と受金物と呼ばれる。平鋼は、厚さ12

mm の板状の鋼材で、受金物は厚さ 1.6 mm のコの字型の鋼材である。平鋼は、躯体部の側面にボルトで打ちこまれており、受金物は平鋼の穴にボルトで設置されている。また、図 2-1-4 に躯体部に設置している梯子の構造を示す。梯子は板状の鋼材と足をかけるステップの丸鋼によって構成されている。これらの平鋼と受金物と梯子は金物設備と呼び、金物設備は躯体部と同様に点検対象となっている。

表 2-1-2 に平鋼と受金物と梯子の材料特性を示す。材料記号は SS400 である。これら

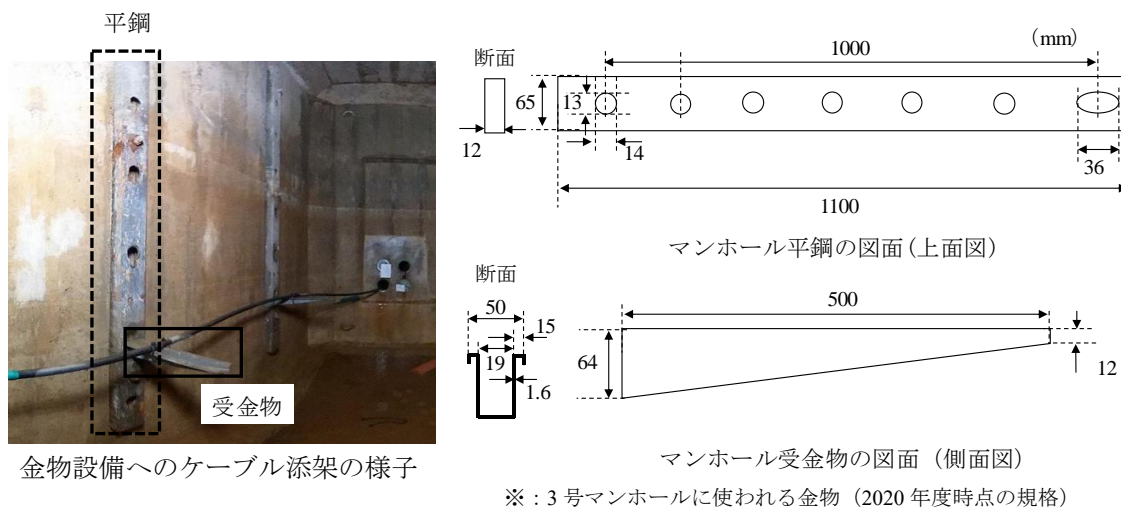


図 2-1-3 躯体部の金物設備の様子と構造

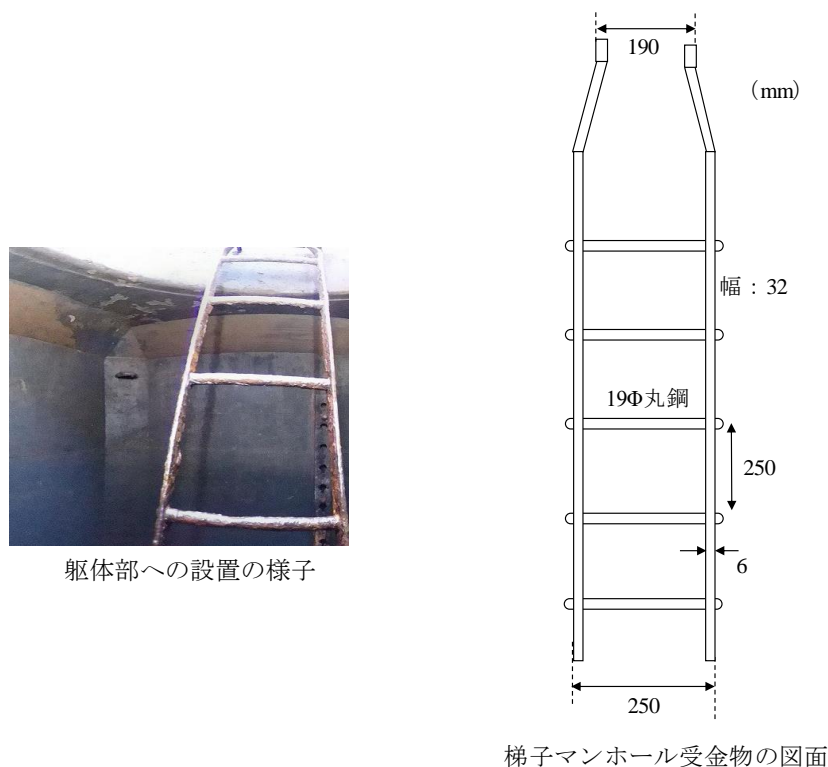


図 2-1-4 梯子の設置の様子と構造

の金物は亜鉛メッキが施された鋼材である。

次から、2章1節1項および2章1節2項に示した通信用マンホールの構造および設置金物の点検内容と劣化が発生するメカニズムについて考察を行う。マンホールは環境条件から、地上部に露出している鉄蓋部と、地下の首部と躯体部の2つに分けることができる。そのため、初めに地上部の鉄蓋部に関して、次に地下の首部と躯体部および躯体部に設置している金物設備に関して述べる。

表 2-1-2 躯体部の金物設備の材料特性

部位	材料特性
平鋼	材質：溶融亜鉛メッキ/一般構造用圧延鋼材，材料記号SS400
受金物	材質：溶融亜鉛メッキ/一般構造用圧延鋼材，材料記号SS400
梯子	材質：溶融亜鉛メッキ/鋼材，材料記号SS400

2. 1. 3 鉄蓋部に関して

(1) 通信と下水道の点検項目の比較

通信用マンホールの鉄蓋部と下水道のマンホールの鉄蓋部の主な点検内容の比較を表 2-1-3 に示す^{2-1-1)~2-1-3)}。表に示すように、通信と下水道の鉄蓋部の点検項目は類似している。受枠と上蓋の段差、表面模様の摩耗、蓋のがたつきといった鉄蓋の直上を通行する車両等の影響を受けて蓋が損傷していくことで発生する劣化項目は同様である。両者の違いは、蓋裏リブの腐食が下水道の鉄蓋のみの特徴的な項目となる。岩松らは、下水道は、マンホール内部の管渠を工場排水や汚水が流れるため、嫌気性硫酸塩還元バクテリアの活動により硫化水素が発生し、これらが蓋やコンクリート内部の鉄筋を腐食させることを述べている²⁻¹⁻⁴⁾。通信のマンホールは管路や鉄蓋の隙間からの雨水が侵入し、躯体部に水が溜まるケースは多いが、硫化水素が発生するような環境ではないため腐食が点検項目となっていない。また、補修判定基準を見ると、受枠と上蓋の段差に関して、

表 2-1-3 通信と下水道の鉄蓋の点検項目の比較（文献^{2-1-1)~2-1-3)}を元に作成）

種類	通信		下水道	
	項目	補修判定基準	項目	補修判定基準*
内容	受枠と上蓋との段差	4 mm以上のもの	受枠と上蓋との段差	A:大きな段差あり
	表面模様の摩耗	模様の摩耗量2 mm以上のもの	表面模様の摩耗	残存模様高さ (車道) E:3 mm以上, C:2-3 mm, A:2 mm未満 (歩道) E:3 mm以上, D:2-3 mm, A:2 mm未満
	蓋のがたつき	音が発生するもの	蓋のがたつき	A:音や動きがあるもの
	—	—	蓋裏リブの腐食	B: 鋳出し表示の消滅

*AからEの5段階で評価，A:緊急措置，B:早期措置，C:計画措置，D:経過観察，Eは問題なし

通信は基準値を設けている。この理由は、通信と下水道の鉄蓋の構造の違いが由来していると考えられる。詳細は、以下の「(2) 構造や既往研究に基づく劣化発生メカニズムの考察」において示す。また、表面摩耗に関しては、通信と下水道は同様である。通信用の鉄蓋は出荷時の模様高さが 4 mm であるため、2 mm 以上摩耗すると補修対象として定めている。下水道の鉄蓋も同様に車道、歩道共に、模様高さの残存が 2 mm 未満となると補修である。蓋のがたつきに関しては、通信と下水道の判定基準は同様と考えてよい。図 2-1-5 に通信用の鉄蓋に発生した劣化の一例を示す。段差には凹みと凸の二種類がある。また、摩耗は補修基準の摩耗量 2 mm に近づくと模様が消え始めているのが確認できる。

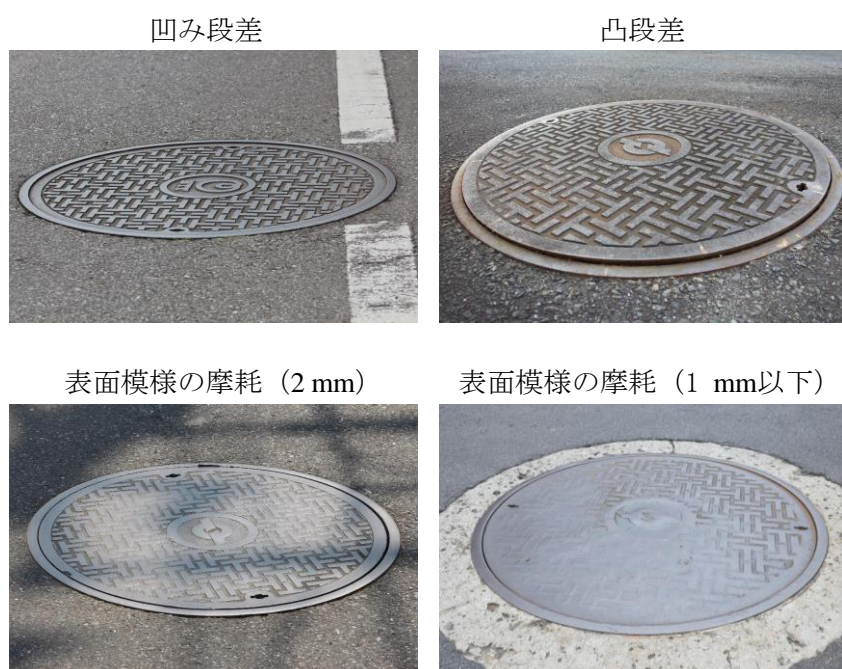


図 2-1-5 通信用鉄蓋部の劣化の一例

(2) 構造や既往研究に基づく劣化発生メカニズムの考察

通信の鉄蓋において、劣化が発生するメカニズムを構造および既往研究から考察する。また、下水道の鉄蓋と劣化発生メカニズムを比較することにより、通信鉄蓋特有の劣化事象および劣化事象に基づく補修判定基準について考察する。

はじめに、段差の発生メカニズムに関して考察を行う。段差の発生に関しては、段差やガタツキを抑制するための構造改良が過去から行われてきた。そのため、構造改良の経緯からメカニズムを考える。

図 2-1-6 に通信の鉄蓋の構造改良の歴史的経緯を示す。通信の鉄蓋は、1964 年に平型と呼ばれる鉄蓋が導入され、それ以前の鉄蓋は現在、設置されていない。平型鉄蓋は、上蓋を受枠の上に置く構造となっており、上蓋にはマンホール内部に雨水が進入しない

ように防水ゴムが受枠に設置されている。しかし、鉄蓋の直上を通行する車両の荷重によって、上蓋と受枠の設置面が摩耗し、上蓋が受枠に対して沈み込む凹み段差が発生する。この上蓋と受枠の摩耗量の合計が4mmになると、防水ゴム輪が完全に潰れて、防水ゴム輪の箇所の上蓋と受枠の接触が発生してしまうため、鉄蓋にがたつきが発生する。また、受枠に上蓋がのっているだけであるため、隙間に砂利等の異物が進入すると凸段差が発生する。これを防止するため、1980年からP型と呼ばれる鉄蓋を導入した。P型は、上蓋と受枠の隙間にゴム製の防振パッキングを挿入することによって、上蓋と受枠の摩耗および異物の挟まりを防止するように改良された。さらに、防振パッキングにより、上蓋と受枠が直接接触しないため、がたつきの防止や上蓋と受枠の摩耗の防止することが可能であった。しかしながら、長年の車両の荷重によりパッキングが傷んでしまい、パッキングが傷むと直接上蓋と受枠が接触するようになり、がたつきの発生やパッキングが無くなることによる凹み段差が発生することとなった。このような問題を受けて、2002年からは、テーパ型と呼ばれる鉄蓋が導入された。本鉄蓋は、上蓋と受枠の接触部を勾配式にしており、上蓋の開閉時には水平方向に蓋を回転させるようにして噛み合わせる。これにより、従来の平型とP型と比較して、車両が鉄蓋直上を通行しても上蓋と受枠が噛み合っているため、上蓋が動かずに、上蓋と受枠の摩耗が防止され凹み段差の発生が抑制されている。また、噛み合わせにより、異物の進入による凸段差を防いでいる。このように、通信用鉄蓋に関しては段差を抑制するように構造改良が進められている。しかしながら、現状では鉄蓋の取り換えは年間数千個程度であり、約68万個の鉄蓋のうち平型とP型が半数以上を占めていると考えられる。これらの構造特徴から、通信の鉄蓋の段差の点検基準が4mmの根拠は平型鉄蓋に基づくと考えられる。また、平型鉄蓋において防水ゴム輪が潰れてしまう凹み段差の4mmという点検基準は、平型以降の鉄蓋および凸段差にも適用している。

次に、上蓋模様に関して述べる。上蓋には道路と同等の動摩擦係数を確保するために、





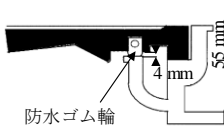
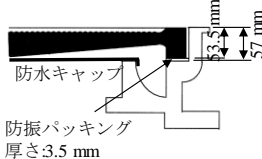
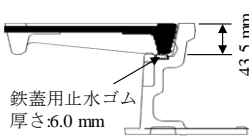
名称	平型	P型	テーパ型	テーパダイア型
年代	1964年～1980年	1980年～2002年	2002年～2017年	2018年～
図				
上蓋模様	T字	T字	T字	小突起
断面構造				
	防水ゴム輪	防水キャップ 防振パッキング 厚さ3.5mm	鉄蓋用止水ゴム 厚さ6.0mm	

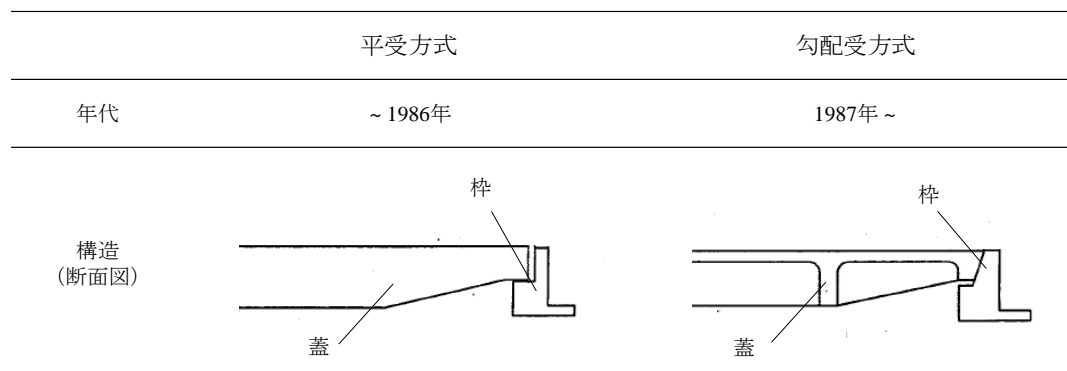
図 2-1-6 通信の鉄蓋の構造改良の歴史的経緯

模様が施されている。1964年からの平型からT字を用いていたが、上蓋模様の高さは4mmであり、点検時にはこの微小な模様高さの計測を行っていた。そこで、2018年からはT字模様を小突起に変更したテーパダイア型を導入した。このテーパダイア型で採用された小突起は、小突起が摩耗すると突起の最上面の形状が変化するため、視覚的に上蓋の模様が摩耗しているのか判断しやすい特徴がある。これにより、T字模様で実施していた模様高さの計測が不要となるため、点検の効率化が可能となる。さらに、従来のT字模様よりも摩耗に対する耐久性を向上させ、鉄蓋の長寿命化を図った。小突起の詳細については、3章6節にて詳細を述べる。

一方で、図2-1-7に下水道の鉄蓋の構造改良の歴史的経緯を示す²⁻¹⁻⁵⁾。下水道の鉄蓋は通信よりも早く、勾配受方式が規格化されている。そのため、凹み段差という点では発生が抑制されていると考えられる。しかしながら、小団扇らの調査によると鉄蓋が腐食し錆により受枠から飛び出る凸段差が発生する事例が多いことが示されている²⁻¹⁻³⁾。

以上のことから、段差に関する通信と下水道の鉄蓋の発生メカニズムの違いについてまとめる。通信の鉄蓋は平型鉄蓋の構造に基づいて防水ゴム輪部の隙間が4mmであったことが由来となり、凹み段差と凸段差の補修判定の基準を決めている。下水道の鉄蓋は明確な段差量の基準はないが、通行する車両や人に影響がでないと個々の判断で補修を行っていると考えられる。また、通信と比べて早期に上蓋と受枠の摩り減りによる段差の発生を抑制する構造を導入しているが、蓋の腐食という特有の劣化事象から凸段差が発生しやすい環境であると考えられる。

次に、鉄蓋の模様の摩耗の発生理由に関して考察を行う。下水道の鉄蓋の表面模様に関して複数の既往研究等により発生要因とその速度に関して報告されている。日本下水道協会は、摩耗の要因は直上の通行車両であり、交通量の多い道路における表面模様の摩耗速度は年間0.1mmから0.3mmと示している²⁻¹⁻⁶⁾。G&U技術研究センターは、直上を通行する車両により表面摩耗が発生し、摩耗速度は年間0.2mmと示している²⁻¹⁻⁷⁾。また、中根は、過去の点検データより30年間における鉄蓋の残存模様高さを推定しており、摩耗速度が速い箇所では30年で残存高さがなくなることを示している²⁻¹⁻⁸⁾こと



※断面の寸法は鉄蓋の直径やJISの改訂年毎に変更

図2-1-7 下水道の鉄蓋の構造改良の歴史的経緯（文献²⁻¹⁻⁵⁾を元に作成）

から、下水道の鉄蓋の表面模様は 6 mm であるため年間 0.2 mm で摩耗していると考えられる。このように、複数の文献において、鉄蓋の模様の摩耗は直上を通行する車両起因であり、摩耗の最大速度は、年間 0.2 mm であると考えられる。また、日本下水道協会は模様の残存高さに関して、3 mm 程度から摩擦係数が低下し始めて、2 mm 以下で著しく低下することを実験により検証している²⁻¹⁹⁾。この結果に基づき、下水道の鉄蓋における模様の補修判定基準は、3 mm 以下を要観察として、2 mm 以下を緊急措置としていと考えられる。一方で、通信の鉄蓋においては、模様の摩耗速度および模様の高さと摩擦係数の関係を示した文献はほとんどない。補修判定基準となる模様高さには、下水道の鉄蓋の基準や通信の鉄蓋における検証を行って同様の残存模様高さ 2 mm 以下に定めたと推測される。また、模様の摩耗速度に関しては詳細を示した文献がないことから本論文において現場の鉄蓋の調査を行った。その詳細は、以下に記載する「(3) 通信の鉄蓋における現場調査データ」にまとめる。

続いて、がたつきであるが、鉄蓋のがたつきは通信および下水道ともに受枠と上蓋の設置面の摩耗や、受枠と上蓋の隙間への異物の混入により据付が悪くなり発生すると考えられる。通信と下水道は両方とも現地での音を頼りに補修判定を行っている。

最後に、蓋裏の腐食であるが、通信の鉄蓋の主な点検項目にはない。これは通信のマンホールには通信用ケーブルのみしか敷設していないため、腐食の要因となる硫化水素の発生がないためである。

(3) 通信の鉄蓋における現場調査データ

通信の鉄蓋に関して、段差の発生メカニズムの推察や上蓋の表面模様の摩耗の速度に関して下水道の鉄蓋と比較することによる推測を踏まえて、実際の現場に設置している通信の鉄蓋に対する調査を行った。調査した通信の鉄蓋は 2019 年度の点検データから補修対象となった箇所において詳細調査を行った。この詳細結果から、前述した段差の発生メカニズムにより、上蓋と受枠が摩耗しているか、表面模様がどの程度の速度で摩耗しているか、その摩耗速度が下水道の鉄蓋にて報告されているデータと類似しているかを検証した。

調査対象とした鉄蓋と、調査方法に関して記載する。はじめに、調査対象は 2019 年度の鉄蓋部の点検結果において、段差、上蓋の模様の摩耗、ガタツキのいずれかもしくは複数の理由により補修対象として報告された鉄蓋設備から 37 箇所を抽出して詳細点検を行った。抽出した箇所は平型と P 型鉄蓋となった。この理由は、テーパ型鉄蓋は、設置年数が少ないことから補修対象として報告されることが少なく、本調査では選定できなかったためである。調査方法を図 2-1-8 に示す。調査対象の鉄蓋の段差量を 4 箇所計測し平均値を鉄蓋の段差量とする。段差量は地面から上蓋が凹んでいた場合は負として、上蓋が浮き上がっていた場合は正として記録した。次に、凹み段差が発生していた場合に限り、上蓋を開けて上蓋の厚さおよび受枠の深さを計測した。平型鉄蓋の場合は出荷時の上蓋の厚さは 55 mm、受枠深さも同様に 55 mm、P 型鉄蓋の場合は上蓋の厚さ

は 53.5 mm, 受枠深さは 57 mm であるため, 出荷時の上蓋厚さの値から計測した値を引いた数値が上蓋摩耗量として, 計測した値から出荷時の受枠深さの値を引いた数値を受枠摩耗量とした. この計測は上蓋を閉めて段差量を計測した箇所付近で実施しており, 段差と同様に 4 箇所計測し, 平均値を算出した. そして, 上蓋摩耗量と受枠摩耗量の合計値を凹み段差の要因から段差要因量として算出した. 最後に, 上蓋の表面の模様高さを 4 箇所計測して, 出荷時の 4 mm から引いた数値の平均値を模様摩耗量とした. また, 現地での目視により鉄蓋の直上を車両のタイヤが通過することが確認された場合はタイヤ通行あり, 車両のタイヤがほぼ通行する可能性がない場合はタイヤ通行なしとした.

表 2-1-4 に本詳細点検にて調査したデータと, 国土交通省が公開する「道路交通センサス」²⁻¹⁻¹⁰から日別の交通量を合わせたデータを示す. ただし, 日別の交通量は, 国道や県道といった交通量が把握できる箇所のみである.

表 2-1-4 の結果をもとに, 鉄蓋の凹凸段差と上蓋の模様の摩耗量に関して分析を行う. はじめに, 凹み段差に関して分析した結果を示す. 表 2-1-5 は表 2-1-4 において状態が「凹」(凹み段差)が発生している 10 か所の鉄蓋において, 段差量と段差要因量 (A+B) と模様の摩耗量の平均値を示したものである. これらの 10 箇所はすべて P 型鉄蓋であった. まず, これらの 10 箇所の鉄蓋はすべてタイヤ通過がありであったため, 車両の通過によって上蓋と受枠の設置面が凹み段差が発生したと考えられる. 表 2-1-5 から凹み段差量の平均は, 段差要因量 (A+B) の平均と 0.60 mm 以下の差分であることが確認された. このことから, 凹み段差の発生要因が上蓋と受枠の摩耗であると推測できる. また, P 型鉄蓋は, 上蓋と受枠の間にパッキングが挿入されているが, 長年の交通車両の影響により劣化し, 上蓋と受枠の設置面の摩耗が進んでいることがわかった. 今回は, 平型鉄蓋の凹み段差は調査することができなかったが, パッキングがない平型鉄蓋の方が上蓋と受枠の設置面の摩耗速度が速く段差が発生しやすいと考えられる. また, 上蓋の模様摩耗量と比較すると上蓋と受枠の設置面の摩耗量は約 7 倍速いことがわかり, 摩耗に対して鉄蓋の段差は発生しやすいと考えられる. さらに, 図 2-1-9 は段差

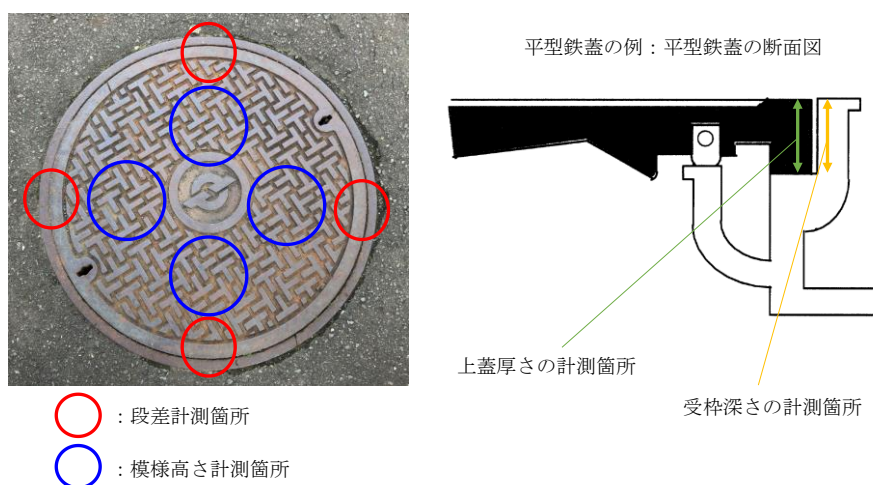


図 2-1-8 鉄蓋の詳細調査方法

要因量（A+B）と鉄蓋の設置後の経年もしくは日別交通量の関係を表したものである。ただし、日別交通量が調査できない市道は交通量を0台/日とした。段差要因量と設置からの年数（経年）は、交通量との関係と比べると相関性が小さいと考えられる。一方、交通量との関係は、交通量が最も多いNo.8の鉄蓋が2番目に段差要因量が多く、設置年数ではなく、鉄蓋を通過する交通量が多い方が段差の要因となる上蓋と受枠の摩耗が進行していることが示唆される。ただし、交通量が15,000台/日付近において10か所

表 2-1-4 詳細点検データ

通番	鉄蓋種	(年) 経年	交通量 (台/日)			合計	タイヤ 通過	状態	(mm)				
			道路種別	小型	大型				段差量	A:上蓋 摩耗量	B:受枠 摩耗量	段差要因量 (A+B)	模様 摩耗量
1	平型	45	市道	-	-	-	あり	凸	3.66				2.39
2	P型	26	県道	15,117	4,113	19,230	あり	凹	-4.04	1.36	1.75	3.11	0.40
3	P型	59	市道	-	-	-	なし	凸	6.10				0.53
4	P型	42	県道	6,057	1,099	7,156	あり	凹	-6.27	1.34	1.25	2.59	0.43
5	平型	58	市道	-	-	-	なし	凸	4.50				0.64
6	平型	51	市道	-	-	-	あり	凸	3.09				0.58
7	平型	45	市道	-	-	-	あり	凸	3.38				0.86
8	P型	39	国道	19,556	2,118	21,674	あり	凹	-0.08	3.29	1.75	5.04	0.33
9	P型	57	市道	-	-	-	あり	凸	1.98				2.60
10	P型	28	国道	17,390	1,568	18,958	あり	凹	-5.55	4.42	0.00	4.42	1.04
11	P型	40	県道	12,264	2,011	14,275	なし	凸	6.49				0.32
12	P型	49	市道	-	-	-	あり	凸	3.05				-0.27
13	P型	28	市道	-	-	-	あり	凸	2.33				0.14
14	P型	57	県道	5,505	364	5,869	あり	凸	1.90				0.53
15	平型	56	県道	5,505	364	5,869	なし	凸	5.41				0.50
16	P型	17	県道	12,763	1,173	13,936	あり	凹	-1.22	0.44	0.50	0.94	0.23
17	P型	51	県道	12,763	1,173	13,936	あり	凹	-1.90	3.51	1.50	5.01	1.03
18	平型	41	県道	12,763	1,173	13,936	なし	凸	2.32				0.34
19	P型	17	市道	-	-	-	あり	凸	4.23				0.63
20	P型	25	市道	-	-	-	あり	凸	1.68				0.41
21	P型	47	市道	-	-	-	あり	凹	-2.86	-0.17	0.75	0.58	0.70
22	P型	14	県道	13,241	1,517	14,758	あり	凹	-9.33	2.65	2.50	5.15	0.17
23	P型	17	県道	13,241	1,517	14,758	あり	凹	-4.28	1.78	1.50	3.28	0.34
24	P型	14	県道	13,241	1,517	14,758	あり	凹	-4.50	1.96	2.00	3.96	0.04
25	平型	46	市道	-	-	-	あり	凸	1.70				1.09
26	平型	43	県道	13,309	1,036	14,345	あり	凸	2.62				0.40
27	平型	43	県道	13,309	1,036	14,345	あり	凸	2.58				0.63
28	平型	51	市道	-	-	-	なし	凸	7.02				0.17
29	平型	50	市道	-	-	-	あり	凹凸	-0.40	0.87	-0.25	0.62	2.17
30	平型	42	県道	1,200	63	1,263	あり	凸	2.79				0.30
31	平型	45	市道	-	-	-	なし	凸	2.07				0.58
32	P型	32	市道	-	-	-	なし	凸	5.84				0.37
33	P型	46	国道	31,104	11,638	42,742	なし	凸	2.62				0.25
34	平型	41	県道	12,929	1,907	14,836	あり	凸	3.34				0.15
35	P型	29	国道	15,124	1,649	16,773	なし	凸	3.14				0.45
36	平型	51	市道	-	-	-	なし	凸	5.66				0.53
37	平型	51	国道	14,666	885	15,551	なし	凸	4.38				0.08

表 2-1-5 凹み段差箇所における段差量と段差要因量と模様摩耗量の平均値
鉄蓋種類：P型，10箇所の平均値 (mm)

項目	凹み段差量	段差要因量	段差量と段差要因量の差分	上蓋模様の摩耗量
平均値	3.99	3.41	0.58	0.47

の調査結果のうち、最も段差要因量が大きい No. 22 と 2 番目に小さい No. 16 がある。この両者と最も交通量の多い No. 8 と最も段差要因量が少ない No. 21 の現場の設置環境を図 2-1-10 に示す。No. 8 はタイヤが鉄蓋の直上を通行することがわかる。また、No. 22 も同様にタイヤが直上を通行する位置に設置されている。一方、No. 16 はタイヤ通過の可能性があるものの車道外側線上に設置されており、実際の交通量に対して鉄蓋の直上を通過した車両数が少ないと考えられる。No. 21 はタイヤの通過は確認されたものの住宅街の交通量が少ないため、上蓋と受枠の摩耗量が少なかったと考えられる。以上のことから、凹み段差の要因は上蓋と受枠の摩耗であり、これらの摩耗の進行は直上を通行する車両の頻度と比例すると考えられる。ただし、本調査サンプル数が少なかつたうえ、P 型鉄蓋は上蓋と受枠の間にパッキングがあるため、パッキングの取り換え時期を考慮した上で、調査を行うことにより交通量と上蓋と受枠の摩耗速度の関係性がより詳細に把握できると考えられる。

次に、凸段差に関して分析した結果を示す。本調査の 26 箇所が凸段差であった。し

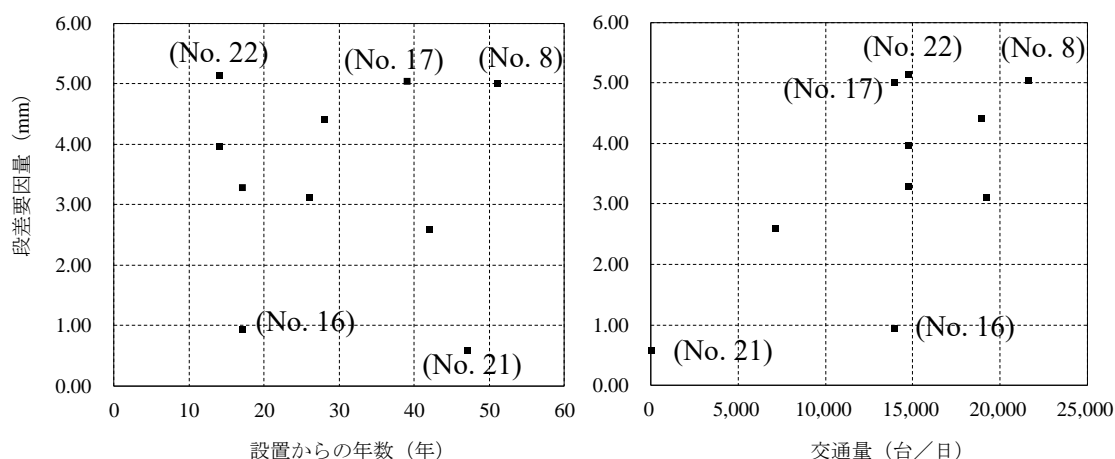


図 2-1-9 段差要因量と設置からの年数，または交通量との関係

通番	No. 8	No. 16	No. 22	No. 21
交通量	21,674台/日	13,936台/日	14,758台/日	データなし
段差要因量	5.04 mm	0.94 mm	5.15 mm	0.58 mm
鉄蓋画像				
全景				

図 2-1-10 鉄蓋と設置箇所の状況

かし、凸段差は上蓋を開けた後、上蓋と受枠の設置面が清掃や錆落とし、パッキングの取り換え等によって段差がもれなく解消された。図 2-1-11 に No. 11 の凸段差箇所における上蓋と受枠の清掃前と清掃後の様子を示す。清掃前は上蓋と受枠の間に砂等の異物が堆積していた。さらに、受枠が腐食しており錆により膨張している。上蓋や路面に露出している受枠の腐食はなかったが、上蓋と受枠の接触面は水分が溜まりやすく腐食が進行していたと考えられる。これらの砂等を清掃し、フレームの錆を落とすことによって凸段差が解消された。本調査で対象となった凸段差は 26 箇所であったが、すべての鉄蓋において清掃することにより、段差が解消された。このことから、凸段差の主要因は上蓋と受枠の間の異物であると考えられる。また、一部であるが上蓋と受枠の接触面での腐食も要因になると考えられる。

最後に、摩耗に関して分析した結果を示す。表 2-1-4 の結果をもとに鉄蓋の設置年数と摩耗量の関係について図 2-1-12 に示す。タイヤ通過ありの鉄蓋の方が、タイヤ通過なしの鉄蓋と比べて摩耗速度が早いことがわかった。また、本調査において、もっとも摩耗速度が速い鉄蓋は、表 2-1-4 における No. 1 の鉄蓋であり、摩耗の年間平均速度は 0.053 mm/年であることがわかった。本鉄蓋の場所は市道であったため、交通量のデータがなく、交通量に対する関係性はわからなかった。一方で、タイヤ通過ありの最も交通量が多い場所は、No. 8 の鉄蓋であるが、この鉄蓋の摩耗量は 39 年でわずか 0.33 mm であり、次に交通量が多い No. 2 においても 26 年で 0.40 mm となっており、鉄蓋の摩耗量と交通量の関係性についてはさらに調査が必要であることがわかった。また、本調査の鉄蓋の年平均摩耗は、既往文献において示されていた年平均 0.2 mm に対して四分の一程度であるため、通信の鉄蓋における摩耗速度についてはさらなる計測箇所の追加等の調査が必要であると考えられる。また、模様様の摩耗が多く、速度が速かった No. 1, No. 9, No. 29 に関しては市道であったため、交通量のデータがない。そこで、設置



図 2-1-11 凸段差鉄蓋の清掃前と後の様子

状況に関して更なる分析を行い摩耗速度が速い要因を考察する。図 2-1-13 に、No. 1, 9, 29 及び最も摩耗速度が遅かった No. 8 を示す。ここで、No. 8 は凹み段差で取り上げた本調査において最も交通量が多い鉄蓋であった。このことから模様の摩耗は、車両通過量と直接的に相関がない可能性が考えられる。No. 1, 9, 29 は市道であるため、交通量のデータがないが、No. 1 はカーブに設置されており、タイヤが鉄蓋上でこすれるように通過しているため表面摩耗が進んでいると思われる。No. 9 は停止線の前でタイヤがロックされた状態になるため鉄蓋の模様がこすれて摩耗が進んでいると思われる。No. 29 は非舗装部が鉄蓋の近くにある。高田らは、鉄蓋の摩耗は上蓋についた砂がヤス

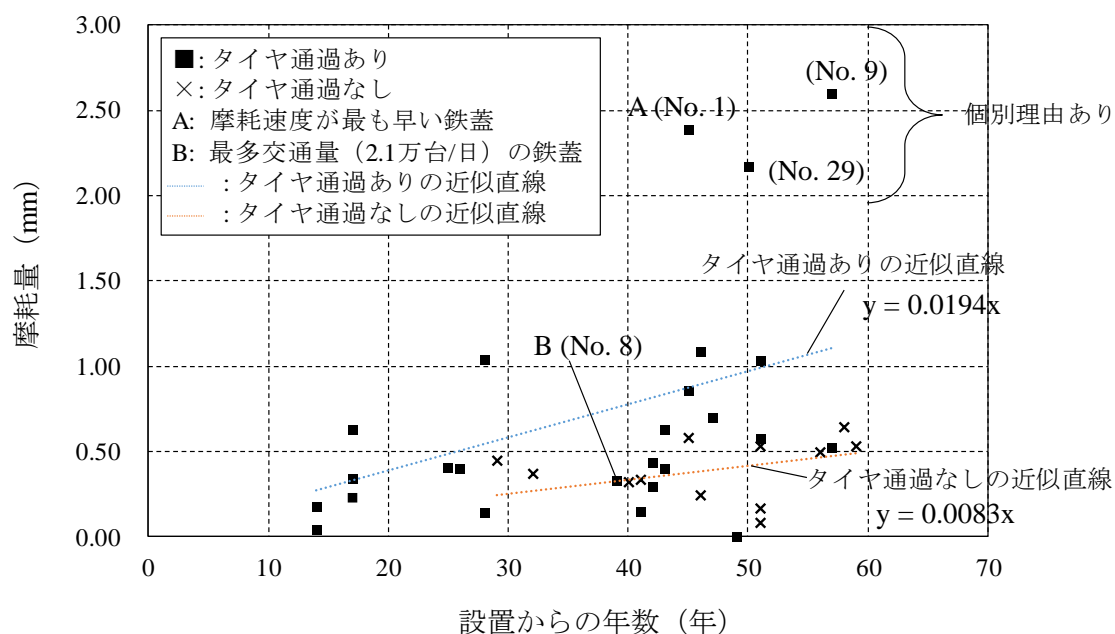


図 2-1-12 鉄蓋の模様の摩耗量と設置年数

	年間摩耗速度が速かった3箇所			最も遅かった箇所
通番	No. 1	No. 9	No. 29	No. 8
鉄蓋画像				
全景				
摩耗量	2.39 mm	2.60 mm	2.17 mm	0.33 mm
推定要因	カーブ箇所によるタイヤの摩擦	停止線手前によるタイヤの摩擦	非舗装部からの砂等の鉄蓋への付着	—

図 2-1-13 鉄蓋と設置箇所の状況

りの役割になり進むことを示している²⁻¹⁻¹¹⁾。このことから、非舗装部からの砂が上蓋に付着し摩耗が進行したと思われる。しかしながら、模様摩耗の進行に関しても、本調査ではサンプル数が少ないことからカーブや停止線前に設置された鉄蓋や砂等が上蓋に乗りやすい場所での追加調査により、劣化要因の特定が詳細に把握できると考えられる。

(4) まとめ

通信の鉄蓋における点検項目、劣化発生メカニズム、補修判定基準について下水道の鉄蓋と比較してわかったこと、さらに既往研究が少ない通信の鉄蓋において、現場の鉄蓋の詳細調査を経て得られた知見を以下に箇条書きでまとめる。

- 通信の鉄蓋と下水道の鉄蓋の構造には大きな違いはなく、段差、模様の摩耗、がたつきの3つは共通の点検項目である。
- 通信の鉄蓋の段差は4mmという数値を補修判定基準と定めており、これは平型鉄蓋の構造に由来しており、特に平型鉄蓋はがたつきによる騒音の防止から4mm以上の段差を正確に測定することが重要である。
- 通信の鉄蓋の詳細調査から凹み段差は、上蓋と受枠の設置面の摩耗が要因となり発生していること、凸段差は、上蓋と受枠の隙間に入った砂や受枠の錆が要因になっていることが確認できた。
- 通信の鉄蓋と下水道の鉄蓋の上蓋模様の摩耗は、ともに残存模様の高さが2mmを補修基準と定めているため、2mm以上の上蓋模様の摩耗を正確に計測することが重要である。
- 通信の鉄蓋の詳細調査から模様の摩耗速度は、下水道の既往研究で示されている速度より遅かったが、本調査のデータ量が少ないことから更なる調査が必要である。
- 鉄蓋の模様の摩耗速度は、交通量に加えて、カーブや停止手前といったタイヤが鉄蓋上をこすれるように通過する鉄蓋の設置や、砂等が鉄蓋の上に付着しやすい非舗装部付近の鉄蓋の設置といった条件が影響している可能性があることがわかった。

2. 1. 4 首部・躯体部に関して

(1) 通信と下水道のマンホールの構造と点検項目の比較

通信用マンホールの首部および躯体部の点検項目を下水道マンホールの地中部の構造と比較しながら示す。図 2-1-14 に通信用マンホールと下水道マンホールの構造の一例を示す^{2-1-12), 2-1-13)}。通信用と下水道のマンホールはともに鉄筋コンクリート構造物であるが、形状は大きく違うことがわかる。通信用は直方体の躯体部の上に円筒状の首部が乗っている構成であり躯体部は部屋のような構造である。これは前章で示した通り、ケーブルの接続や切り替えの作業スペースとしてマンホールを活用するため、人が作業を行える一定の空間を確保する必要が求められている。一方、下水道は管渠にアクセスするための立坑の役割として作られている。そのため、マンホールは、側壁と床のみである。内部の付属設備においては、通信用はケーブルやクロージャを支える金物や作業

者が地下に降りていくための梯子があるが、下水道はステップのみである。これらの設備の主な点検項目を表 2-1-6 に示す^{2-1-14), 2-1-15)}。通信用と下水道ともに、鉄筋コンクリートで構成されているため露筋や露筋発生前のき裂等の劣化や、金物設備の腐食状態の確認が共通する点検項目であることがわかる。通信用において金物設備と指しているのは、2章1節2項にて記載した平鋼と受金物と梯子が該当する。

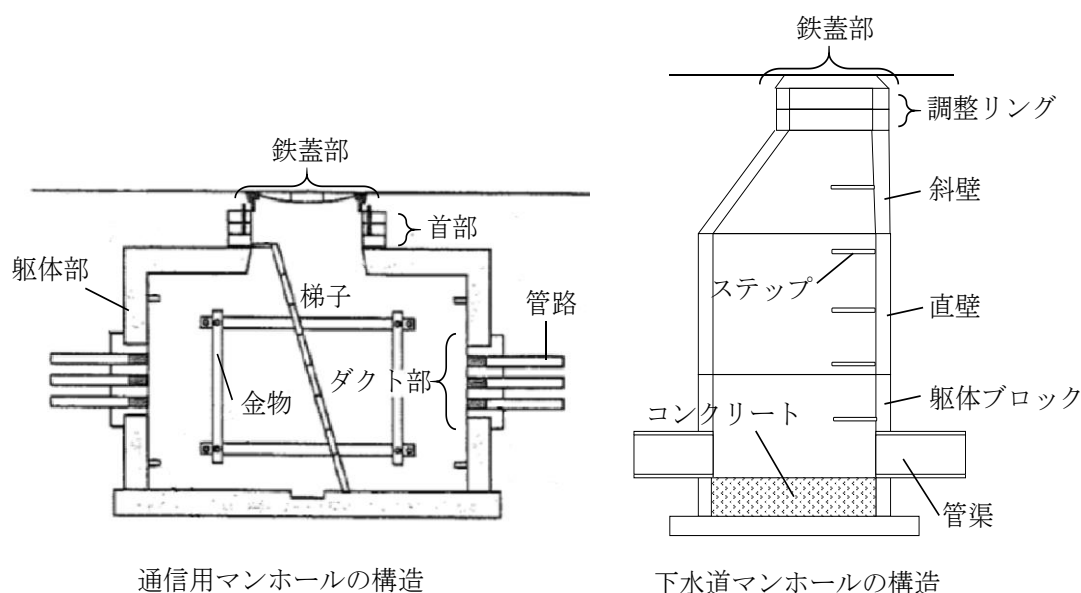


図 2-1-14 通信用と下水道マンホールの構造例 (図 1-2-7 再掲, 文献²⁻¹⁻¹²⁾を元に作成)

表 2-1-6 通信用と下水道のマンホールの点検項目 (文献^{2-1-14), 2-1-15)}を元に作

主な点検項目	通信	下水道
内容	(首部) き裂 (躯体部) 露筋、金物腐食	(マンホール内壁) 損傷、劣化、浸入水発生の確認、底部 の沈殿物の堆積、足掛け金物腐食

(2) 既往研究に基づく劣化発生メカニズム

通信用と下水道のマンホールに発生する劣化は、複数の既往研究においてメカニズムが示されている。

はじめに通信用マンホール躯体部に発生する劣化に関して述べる。丹羽らは、マンホールは直上を通行する車両による活荷重が躯体部と首部が接続する開口部周辺および上床版に最もかかり、これらの周辺ではひび割れが発生しやすく劣化が促進する可能性が高いことを示している²⁻¹⁻¹⁶⁾。川端らは、マンホール表面にひび割れ等の劣化事象が発生するタイミングからリスクが高まる管理水準までの時間を予測することによって、マンホールの点検周期を定める方法を提案している²⁻¹⁻¹⁷⁾。森らは、現用のマンホールを調査することにより、内部鉄筋の腐食速度 0.534%/年と推定した。また、マンホールの壁面に発生したき裂や露筋といった目視点検の結果と内部鉄筋の腐食率の関係性を調査し

て、鉄筋の腐食率が4~7%程度で露筋が発生することを明らかにした²⁻¹⁻¹⁸⁾。また、藤本らは、上床版の結露が鉄筋の腐食を加速させていることを示し、上床版はひび割れが発生しやすいため、劣化が最初に現れることを示唆した²⁻¹⁻¹⁹⁾。そして、マンホールのリスクが高まる管理水準は鉄筋腐食率が15%の到達時としており、川端らの提案よりマンホールの点検周期は10年で十分であることを示した。更に、少なくとも点検では露筋の有無を確認し、補修を施せば管理水準に到達することがないことを示した。これらの結果より通信のマンホールの躯体部の点検は、劣化が発生しやすい上床版において露筋の有無を確認することが最重要とされ、露筋の発生を点検で確認した後、直ちに補修を行うことが重要であることがわかる。

また、マンホール躯体部の金物腐食に関しては、Itoらは、通信用マンホールは鉄蓋の隙間からの雨水や管路から地下水等が侵入し、躯体部には水が溜まっており、これらの水には劣化を促進するほどの水準では硫化物や塩化物が含まれておらず、水分が腐食の要因であることを提示している²⁻¹⁻²⁰⁾。また、亜鉛メッキ鋼構造物研究会の報告から、水中の亜鉛メッキは空気中の10倍以上腐食が進むことを示しており、雨水等が溜まっている通信用マンホールの金物は亜鉛メッキが落ちやすく、通常の空気中より錆びやすいと考えられる²⁻¹⁻²¹⁾。そのため、金物設備の腐食は、マンホール内に溜まった水中かつ、溶存酸素が特に多い水面から始まると考えられる。また、ケーブル設備等を受金物に固定しているため、設備の設置時や補修時に亜鉛メッキが剥がれた場所から広がっていくと想定される。金物の腐食が一定以上進行すると、金物によって支えている通信ケーブルが落ちて断線する可能性がある。そのため、金物の腐食程度を点検時に確認し、金物全体が一定以上腐食していた場合には補修を行う必要がある。

一方で、下水道マンホールにおける劣化は、岩松らにより下水道内にて発生した硫化水素に起因することが示されている²⁻¹⁻⁴⁾。さらに、藤生により硫化水素の設備への浸食率から改修する施設数を算出する手法が提案されている²⁻¹⁻²²⁾。このように下水道マンホールは、硫化水素が鉄筋コンクリートの劣化の主要な要因であることが示されており、コンクリート表面のみならず内部の足掛け金物の腐食等の劣化要因になっていると推測できる。

(3) まとめ

通信用マンホールにおける点検項目、劣化発生メカニズム、補修判定基準について下水道マンホールと比較してわかった特徴等を以下に箇条書きでまとめる。

- 通信用マンホールの躯体部の点検において重要な項目は露筋であり、露筋は上床版に発生しやすいため上床版の状態を確認することが重要である。また、露筋は補修を必須とするタイミングであることから、露筋が発生したマンホールについて順次補修を実施して行くことが重要である。
- 通信用マンホールの劣化の発生要因は車両荷重によるひび割れの発生と、ひび割れから進入する水分が要因となる内部鉄筋の腐食である。一方で下水道マンホールは

硫化水素が要因となり内部鉄筋の腐食が発生する。

- 通信用マンホールにおける金物は躯体部に溜まった雨水により腐食し、下水道マンホールの金物は硫化水素により腐食すると考えられる。通信用マンホールはケーブル断線による通信障害の回避，そして通信用と下水道の両方において作業者の安全性確保のため梯子の腐食の点検は重要である。

2. 1. 5 対象の劣化項目と劣化ランクの定義

鉄蓋部，首部，躯体部で定めている点検項目において，点検対象となる劣化の発生メカニズムから本研究で対象とする劣化項目について以下にまとめる。劣化発生メカニズムより，設備の機能維持，通信の品質の確保の観点から重要な点検項目を選定した。

- 鉄蓋部
 - 上蓋と受枠の間に発生した凹み段差の段差量
 - 上蓋の模様の摩耗量
- 首部・躯体部
 - 上床版に発生した露筋
 - 金物設備の腐食

鉄蓋部の凸段差は，砂等の影響に発生しており，設備の構造そのものが劣化しているわけではない。また，がたつきは凹み段差が要因となり発生している点と，車両の通行時に発生する音であるため，鉄蓋が設置している周辺環境や音の発生頻度といった個々の判断になるため，本研究では対象としないこととした。

首部と躯体部に関しては，マンホールの構造耐力を維持するために重要な露筋と露筋が発生しやすい上床版を対象とした。また，通信の品質保証の観点から躯体部に設置している金物設備の腐食を対象とした。

次に，本研究で対象とする劣化に関して，劣化の進行程度によって劣化ランクを定義する。本研究における鉄蓋の凹み段差，上蓋の模様の摩耗，躯体部の上床版の露筋，躯体部に設置している金物腐食の進行度合いによって劣化ランクを定義する。

(1) 上蓋と受枠の間に発生した凹み段差

図 2-1-14 に凹み段差における劣化ランクの定義と対応する鉄蓋の段差箇所の画像を示す。劣化ランクは 4 段階とした。4 段階とした理由は以下の通りである。

はじめに，2 章 1 節 3 項で述べたように，平型鉄蓋において，上蓋と受枠の接触面が 4 mm 以上摩耗すると防水ゴム輪の箇所で上蓋と受枠が接触するようになるため補修基準を 4 mm と定めている。そのため，鉄蓋部の構造的な特徴から，劣化ランクは凹み段差の補修基準となる 4 mm 以上，4 mm 未満の 2 段階で分類することとする。次に，凹み段差量が 4mm 以上の鉄蓋において，これらの鉄蓋は補修が必要となるが，全国に設置している鉄蓋の数は膨大であることから劣化が特に進行しているものから優先順位をつけて補修工事を行う必要がある。そこで，補修基準である段差量 4 mm の 1.5 倍の

6 mm 以上まで凹み段差が進行したものは早急な対応が必要な箇所として分類することとした。最後に、4 mm 未満の劣化ランクに関しては、凹み段差量 0 mm 以上 2 mm 未満と 2 mm 以上 4 mm 未満の 2 段階で分類することとした。この理由は、近い将来補修基準に達することが見込まれる場合、安全性の理由から近隣の他の工事と合わせて補修を行った方が効率的であるためである。このことから、近い将来の補修候補の要観察としてランク付けを行うこととした。

以上のことから、劣化ランクは 4 段階として、劣化ランク 1 は 0 mm 以上 2 mm 未満の安全な状態、劣化ランク 2 は 2 mm 以上 4 mm 未満の要観察、劣化ランク 3 は 4 mm 以上 6 mm 未満の補修対象、劣化ランク 4 は 6 mm 以上の早急な対応を要する補修対象とした。実際の補修の対応が必要になるのは、劣化ランク 3 からである。また、劣化ランク 4 の 6 mm 以上を大きく上回る鉄蓋は、補修されており現存する数が少ないと考えられるため劣化ランクは 4 までとしている。

各劣化ランクにおける画像の特徴として、段差量が大きくなると、画像中では円弧かつ帯状の陰影の幅が太くなり目立つようになっていくことがわかる。劣化ランク 1 では、ほとんど陰影の幅を確認できないが、劣化ランク 2 から陰影の幅がわかるようになり、劣化ランク 3 からは明確に段差が発生していることがわかる。

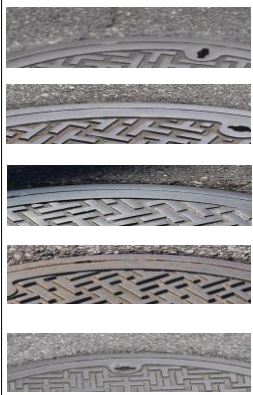

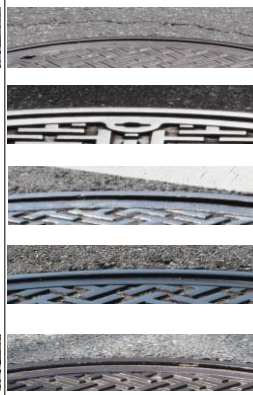
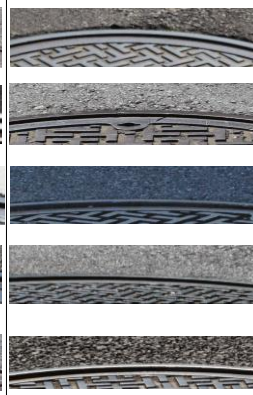
劣化 ランク	1	2	3	4
補修	—	—	対象	対象
段差量	0 mm以上2 mm未満	2 mm以上4 mm未満	4 mm以上6 mm未満	6 mm以上
画像				

図 2-1-14 凹み段差の劣化ランクの定義

(2) 上蓋の模様の摩耗

図 2-1-15 に上蓋の模様の摩耗の劣化ランクの定義と対応する鉄蓋模様の画像を示す。ここで定義付けを行う上蓋の模様は、2章1節3項で述べた上蓋模様の歴史的経緯においてテーパ型まで採用されていた T 字模様を対象としている。劣化ランクは 4 段階とした。4 段階とした理由は以下の通りである。

2章1節3項で述べたように、日本下水道協会は模様の残存高さに関して、3 mm 程度から動摩擦係数が低下し始めて、2 mm 以下で著しく低下することを実験により検証

している²⁻¹⁻⁹⁾。この結果に基づき、下水道の鉄蓋における模様の高さの補修判定基準は、3 mm 以下を要観察として、2 mm 以下を緊急措置としており、通信も同様の基準を採用して残存模様高さが 2 mm 以下を補修対象としたと推測される。そこで、劣化ランク 1 の残存模様高さが 3 mm より高いものは安全な状態、劣化ランク 2 は下水道と同様に模様高さが 3 mm 以下のものとして要観察、劣化ランク 3 の模様高さが 2 mm 以下のものは補修対象とした。さらに、劣化ランク 3 の中でも模様高さが 1 mm を下回ると図 2-1-15 に示すように、T 字の模様さえ確認できない状態となるため、早急に補修が必要であると考えられることから、劣化ランク 4 を定義した。

以上のことから、劣化ランク 1 は上蓋の模様高さが 4 mm 以下、劣化ランク 2 は 3 mm 以下の要観察、劣化ランク 3 は 2 mm 以下の補修対象、最後に劣化ランク 4 は 1 mm 以下の早急な補修対象とした。

各劣化ランクにおける画像の特徴として、劣化ランク 1 では、模様の T 字の表面の角のエッジがはっきりとわかる上、模様の側面に陰影があることが確認できる。劣化ランク 2 では 1 と比較すると、模様の側面の陰影が少なくなっているが、T 字の角のエッジは確認できる。劣化ランク 3 になると、T 字の側面の陰影がほとんどなくなり一部は、T 字の角のエッジの境界が画像中から判別できなくなってくる。劣化ランク 4 では側面の陰影はなく、T 字の模様そのものを認識できない場合もある。





劣化 ランク	1	2	3	4
補修	—	—	対象	対象
模様高さ (摩耗量)	3 mm より大きく 4 mm 以下 (0 mm 以上 1 mm 未満)	2 mm より大きく 3 mm 以下 (1 mm 以上 2 mm 未満)	1 mm より大きく 2 mm 以下 (2 mm 以上 3 mm 未満)	1 mm 以下 (3 mm 以上)
画像				

図 2-1-15 上蓋模様の摩耗の劣化ランクの定義

(3) 上床版に発生した露筋

図 2-1-16 に露筋の劣化ランクの定義と対応する画像を示す。劣化ランクは、劣化が経年に伴い進行し、露筋の状態に変化が生じるポイントを基準に 4 段階に定義した。4

段階とした理由は以下の通りである。

2章1節4項にて示したようにマンホールの露筋は、マンホールの直上を通行する車両の荷重によりマンホールの躯体部、特に上床版に面的にひび割れが発生し、ひび割れから水分が侵入することによって、内部鉄筋が腐食、膨張しコンクリートを剥離させて発現するメカニズムである^{2-1-16), 2-1-19)}。

そこで、劣化ランク1はひび割れにより内部鉄筋が腐食し、微小な露筋が初めてコンクリート表面に発生した初期状態と定義した。

次に、劣化ランク2は、面的に入ったびび割れが要因となり、複数箇所に劣化ランク1相当の微小な露筋が発生した状態である。

そして、劣化ランク3は、劣化ランク1もしくは劣化ランク2の微小な露筋が鉄筋の軸方向に進行して露筋が広がった状態とした。露筋周辺のコンクリートの剥離には至っていない状態である。

最後に、劣化ランク4は、劣化ランク3の状態が更に進行し、露筋と同時に鉄筋周辺






劣化ランク	1	2	3	4
補修	対象	対象	対象	対象
定義	微小な露筋が1, 2箇所発生した初期状態	劣化ランク1相当の微小な露筋が複数箇所に発生した状態	劣化ランク1もしくは2の微小な露筋が鉄筋の軸方向に進行した状態	3の状態が進行して、周辺のコンクリート剥離を伴い露筋が進行した最終状態
画像	    	    	    	    

図 2-1-16 露筋の劣化ランクの定義

のコンクリートが大規模に剥離した最終状態とした。

2章1節4項にて述べたように通信用のマンホールは、川端らの提案である露筋の有無を確認し、補修を施せば安全に維持管理できる方法を採用しているため²⁻¹⁻¹⁷、露筋は発生した時点で補修対象であり、本論文で定義したすべての劣化ランクが補修対象となる。しかし、マンホールは全国に数多くあることから、補修には優先順位が必要となり、劣化の進行度の分類が必要となる。

各劣化ランクにおける画像の特徴として、劣化ランク1は、内部鉄筋が腐食し表面に暴露した最初の状態であり露筋が微小であることから、黒や赤褐色の領域として見える。劣化ランク2は、劣化ランク1の領域が複数個所あることがわかる。劣化ランク3では露出した鉄筋の面積も大きく、露筋部には腐食した錆の凹凸形状が確認でき、さらに赤褐色等の錆汁が鉄筋の周辺に広がっている状況がわかる。最後に劣化ランク4では、劣化ランク3の状態に加えて、周辺のコンサートが大規模に剥離している状態がわかる。

(4) 金物設備の腐食

図 2-1-17 に躯体部に設置している平鋼と受金物と梯子といった金物設備の腐食の劣化ランクの定義と対応する画像を示す。劣化ランクは、腐食が経年に伴い進行し、設備の腐食状況が変わるポイントを基準に4段階に分類した。4段階とした理由は以下の通りである。

金物設備は、**2章1節2項**にて示したように鋼材に亜鉛メッキが施されている。亜鉛メッキが鋼材を腐食から守っているが、マンホールの溜まり水等の影響により、亜鉛メッキが腐食して剥がれ落ちると鋼材の腐食が始まる。鋼材の腐食は、マンホールの内部鉄筋の腐食のように赤褐色や黒色の腐食が見えるようになる。通信では金物設備の腐食が著しく進行した場合、金物設備へのケーブル等の添架状況を考慮して補修の可否を判断している。

劣化ランク1は、ケーブルの設置部において亜鉛メッキが剥がれた場所や、平鋼と受金物の接続部といった水分が付着して残存しやすい場所、マンホール内に溜まった水の水面といった溶存酸素が多い場所で、鋼材の表面に赤褐色や黒色の隆起した錆が付着している、腐食が発生し始めた初期段階として定義した。

次に、劣化ランク4は、鋼材の全体がほとんど腐食した最終状態とした。

さらに、劣化ランク1と4の間に、劣化ランク2と3を定義した。劣化ランク2は、**図 2-1-18** に示すように、平鋼の幅や厚さ方向に約1/2程度腐食が進行した状態、もしくは受金物の幅や深さ方向に約1/2程度腐食が進行した状態とした。

劣化ランク3は、劣化ランク2の腐食が更に進行して、平鋼の幅や長さ方向に腐食が進行した状態、かつ**図 2-1-18** の長さ方向に約1/2程度まで腐食が進行し、平鋼全体までは腐食が進行していない状態とした。

このように劣化ランク2と3の間を定義した理由は、前述したように金物設備の補修は、ケーブル等の添架状況と鋼材に進行している腐食の度合いを考慮して補修の可否を

判断している。補修対象となる腐食の度合いは、平鋼の幅や厚さ方向、受金物の幅や深さ方向に腐食が進行している劣化ランク3の状態からが多い。そのため、劣化ランク2を要観察、劣化ランク3からを補修の検討対象となるランクとして劣化ランク1と4の間を2段階とした。









劣化ランク	1	2	3	4
補修	—	—	ケーブル状況にて要否判断	
定義	腐食が発生し始めた初期状態	1の状態進行し、鋼材の垂直および水平方向に広がっている状態	2の状態が進行し、鋼材に広がっている状態	連結している鋼材のほぼ全域に腐食が広がった最終状態
画像				
				
				
				
				

図 2-1-17 金物腐食の劣化ランクの定義

各劣化ランクにおける画像の特徴として、劣化ランク 1 は微小な腐食が発生した状態であり、金物設備に赤褐色や黒色の領域が点在している。劣化ランク 2 は腐食が広がっているが、平鋼の幅や厚さ、受金物の深さ方向が完全に腐食しきっていない、赤褐色や黒色の領域が大きくなっている様子がわかる。劣化ランク 3 まで至ると鋼材に錆が大量に発生しており、鋼材の表面に錆びによる凹凸があることが画像からわかる。最終段階は、劣化ランク 4 も、劣化ランク 3 と同様に、錆の凹凸形状が画像からわかる。

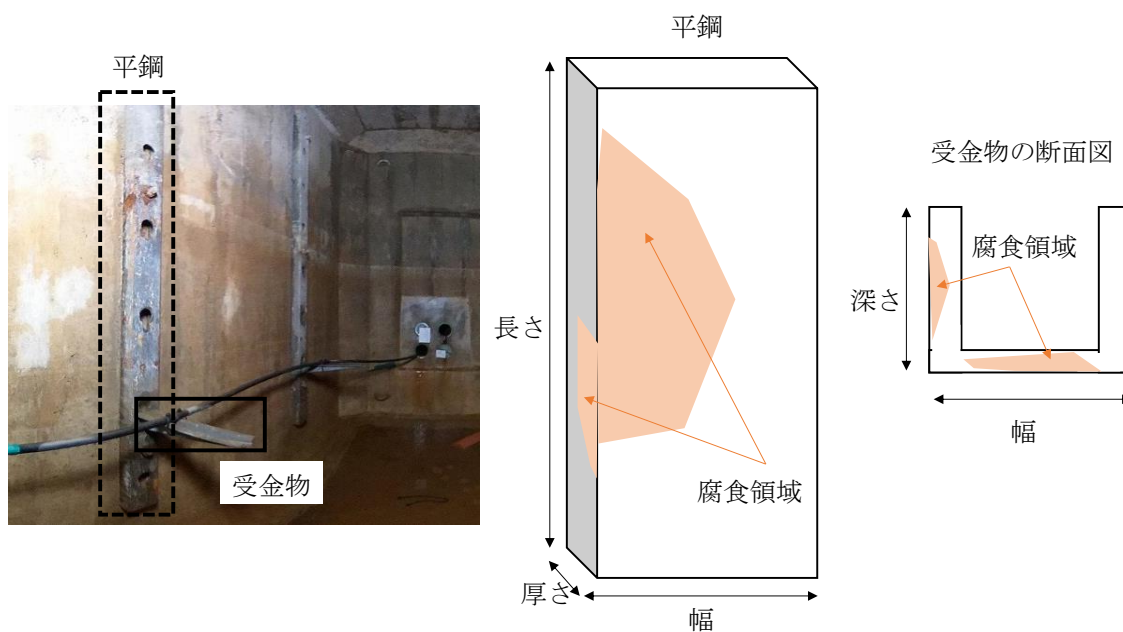


図 2-1-18 平鋼と受金物における腐食領域の進行状態の定義

2. 2 点検手法に関する既往研究

本節では、本研究で対象とした劣化項目に関連する既往研究についてまとめる。既往研究は、鉄蓋を設置している路面の状態を点検する手法、首部や躯体部の構成材料である鉄筋コンクリートの劣化を点検する手法、そして躯体部の内部に設置している金物設備の腐食に関して点検する手法を対象とした。

さらに、設備の状態を把握するため、本論文では UAV を用いた画像撮影に着眼した。躯体部の点検の安全性と効率性の向上のためには、現在、作業者が行っているマンホールへの入孔作業を失くすことが重要であると考えられる。作業者の代わりに対象設備の状態データを計測する手段のひとつにロボットの導入が提案されている^{1-1-6), 1-1-7), 2-2-1)}。そして、ロボット化には、昨今、空撮、屋外構造物の点検、測量、農薬散布、災害時の調査といった幅広いシーンで利用されるようになってきている UAV に注目が集まっている。UAV には移動経路の制約や経路上の障害物の影響を受けにくいといった長所があるため、マンホールのような孔から躯体部へ進入して孔から出てくるといった他のロボットにとって複雑な動作や障害物を想定しなくてはならない経路に対して、空中を飛行する UAV であれば考慮すべき障害を減らすことができると考えられる。そのため、UAV の制御手法および UAV による設備点検手法を対象に既往研究を取り上げ、マンホールへの適用性を検討することとした。

はじめに、鉄蓋の劣化を把握するために鉄蓋が設置している路面に関連する手法、次に首部や躯体部の鉄筋コンクリートや設備の腐食の点検に関連する手法、最後に UAV に関する手法について示す。

2. 2. 1 路面の点検に関する既往研究

本件で対象とする鉄蓋の点検項目は、鉄蓋の上蓋と受枠の間に発生した段差量と上蓋の表面模様の摩耗量である。そして、これらの段差量と摩耗量は 1 章 2 節 7 項で示したように 0.1 mm 単位での計測が求められる。そこで、路面の段差計測や路面の付帯物の損傷および状態把握に関連する既往研究を対象に広く取り上げ、路面やその付帯設備の点検する手法の計測精度に関しても言及することとした。

表 2-2-1 に既往研究をまとめる。ここからわかるように路面の凹凸、わだち掘れ、ポットホール等の路面状態の劣化や、道路区画線のような付帯物の劣化状態の点検手法に関する研究が広く行われている。

富澤らは、車両につけた加速度計から路面のラフネス (IRI: International Roughness Index) を評価できることを示し、かつ局所的な段差が 20 mm 程度であれば、定量的に推定できることを示している²⁻²⁻²⁾。朝川らは、安価な小型の計測システムの構築を目的として、車両につけた加速度計から路面のラフネスを推定する方法を提案している²⁻²⁻

3). 富山らは、車両につけた加速度計のデータより凍上により生じた損傷箇所が特定できることを示している²⁻²⁻⁴). これらのように車両につけた加速度計から路面の状態や凹凸を検出する点検手法が検討されている。

続いて、森石らは、Mobile Mapping System (MMS) に搭載される高密度レーザスキャナにより路面性状の把握手法の提案を行っている²⁻²⁻⁵). 橋爪らは、レーザによる光切断法により高精度で取得した路面の高さ情報から排水性舗装特有の局所沈下量という新しい指標を提案し、ポットホール発生予測手法を提案している²⁻²⁻⁶). これらは、レーザを用いて路面の高さ（凹凸）情報を mm 単位の精度で取得する手法が提案されている。

最後に、路面の点検に画像認識を用いている手法を取り上げる。浅田らは、デジタルカメラ画像から道路の区画線を検出して、区画線の塗り直しの診断する手法の提案を行っている²⁻²⁻⁷). 埴ら、浅田ら、全らは車両に搭載したカメラから路面のひび割れを検出する手法を提案している^{2-2-8)~2-2-10}). 区画線は概ね mm 単位から cm 単位の剥がれが検出できると考えられ、ひび割れは実際の幅までは言及されていないが、mm 単位であると推測できる。また、田中らは、デジタルカメラの画像から路面のすべり抵抗について推定している²⁻²⁻¹¹).

以上に挙げたように、路面の性状を点検する手法は様々検討されている。しかしながら、加速度計を用いた手法を鉄蓋の点検に用いようとする鉄蓋の直上を車両で通行する必要があるうえ、鉄蓋の段差量のような 0.1 mm 単位精度での計測は困難であると考えられる。次に、レーザスキャナや光切断法を用いる方法では、段差や模様を高精度に計測することが可能であると考えられるが、取得した路面データの中から特定の部位や領域を検出する方法が必要である。路面を一様に計測しているデータ群の中から路面の中央や路側帯等の様々な場所に設置している鉄蓋の段差や模様といった特定

表 2-2-1 路面や付帯物の点検に関する既往研究（文献^{2-2-2)~2-2-11}）を元に作成）

文献	対象劣化	データ取得方法	解析（検出）手法	研究の適用範囲	計測可能/対象範囲
富澤ら (2011)	路面の凹凸	加速度計	加速度の変化量からの推定	路面のラフネス評価および局所段差の定量推定	20 mm以上の段差
朝川ら (2012)	路面の凹凸	加速度計	加速度の変化量からの推定	IRI(International Roughness Index)の簡易計測	IRI: 1 mm/m~6 mm/m
富山ら (2013)	凍上による路面損傷	加速度計	ウェーブレット変換を用いた機械学習による検出	路面損傷箇所の特特定	IRI: 1 mm/m~6 mm/m
森石ら (2013)	わだち掘れ	高密度レーザスキャナ	三次元点群データからの推定	わだち掘れの検出	mm単位
橋爪ら (2014)	ポットホール	スリットレーザを用いた光切断法	レーザデータと損傷進行の成長モデルを用いた推定	局所沈下量から路面のポットホールの発生予測	mm単位
浅田ら (2011)	道路区間線	デジタルカメラ画像	テンプレートマッチングによる検出と特徴量による画像認識	塗直基準の定量化および診断	mm~cm単位 (推定)
埴ら (2012)	ひび割れ	デジタルカメラ画像	フィルタ処理と大津法による画像認識	車両に搭載した一般的なビデオカメラにより撮影されたひび割れの検出	数mm以上 (推定)
浅田ら (2014)	ひび割れ	デジタルカメラ画像	動的2値処理にガウシアンカーネルを組み合わせた画像認識	幅1 mm以上のひび割れを対象としたひび割れレベルの算出	幅1 mm以上
全ら (2017)	ひび割れ	デジタルカメラ画像	深層学習(CNN)による画像認識	白線やマンホールでの誤検知を低減した路面ひび割れの検出	数mm以上 (推定)
田中ら (2016)	湿潤・凍結路面	デジタルカメラ画像	テクスチャ解析による画像認識	路面のテクスチャ解析によるすべり抵抗の推定	—

の箇所を検出するのは難しいと考えられる。そこで、特定の物体の検出が可能な画像認識手法が有効だと考えられるが、鉄蓋の段差箇所や模様の摩耗量を計測する手法はない。また、段差量と摩耗量の計測のように 0.1mm 単位の精度で路面上の劣化を画像から計測できる方法はない。

2. 2. 2 躯体部劣化の点検に関する既往研究

本論文で対象とする躯体部の点検項目は、躯体部の天井にあたる上床版の露筋と躯体部に設置している金物の腐食である。これらの劣化項目に対して、画像認識を用いた点検手法を提案している既往研究を取り上げる。表 2-2-2 に画像認識による劣化検出手法を示す。

後藤らは橋梁の鋼材のさびの程度を判定する手法を提案している²⁻²⁻¹²⁾。しかし、提案手法は画像全体にさびが写っていることが前提となり、さびの程度を詳細に分類するため、本論文で対象とするようなマンホールの躯体部の全体が写っている画像から金物の腐食領域の検出には適用できない。西川ら、Dinh ら、Gopalakrishnan らは屋外のコンクリート構造物を対象に汚れや照度条件が異なる画像からひび割れを検出する手法を提案している^{2-2-13)~2-2-15)}。また、Guillanmon ら、青島らは橋梁のプレキャスト部材 (PC 桁) におけるひび割れ、剥離、露筋等の劣化に対して判定を行う手法を提案している^{2-2-16), 2-2-17)}。しかし、Guillanmon らは 734 枚の 4 クラスの損傷データの教師データに対して、511 枚が 1 クラスに偏っているため、実設備に対して十分なデータで検討されていない。青島らは、様々な深層学習モデルにより様々なコンクリートの損傷を検討しているが、こちらは画像を矩形に分割し実施しているため、劣化の領域の検出に対応できない。また、中島らは、同様に PC 桁における露筋のセグメンテーション検出手法

表 2-2-2 デジタルカメラ画像を用いたコンクリート劣化や腐食点検に関する既往研究
(文献^{2-2-12)~2-2-18)} を元に作成)

文献	対象劣化	解析 (検出) 手法	研究の適用範囲	対象設備
後藤ら (2006)	鋼材の錆	周波数エネルギー特性の学習によるパターン認識	さびの程度を判定 (画像全体から程度を判定)	無塗装耐候性橋梁の鋼材部
西川ら (2007)	ひび割れ	フィルタ処理を用いた画像認識	照明条件や汚れがある画像中からのひび割れ検出	屋外のコンクリート構造物
Dinhら (2016)	ひび割れ	濃淡ヒストグラムを用いた画像認識	照明条件等が違う画像からのひび割れ検出	コンクリート構造物
Gopalakrishnanら (2018)	ひび割れ	深層学習 (CNN) による画像認識	コンクリート壁面からのひび割れ検出 (画像全体で有無を判定)	屋外のコンクリート構造物
Guillanmonら (2018)	コンクリートの損傷	深層学習 (CNN) による画像認識	セマンティックセグメンテーションによる撮影画像から損傷領域の検出とクラス分類	橋梁の PC 桁における露筋、コンクリート剥離
青島ら (2019)	コンクリートの損傷	深層学習 (CNN) による画像認識	画像を矩形領域に区切り矩形領域単位における損傷状態のクラス分類	橋梁の PC 桁におけるひび割れ、露筋、漏水、コンクリート剥離等
中島ら (2019)	露筋	深層学習 (CNN) による画像認識	セマンティックセグメンテーションによる橋梁の撮影画像からの露筋領域の検出	橋梁の PC 桁における露筋

を提案しており高精度な検出結果を報告している²⁻²⁻¹⁸⁾。しかし、教師データが 208 枚での検討となっており、約 68 万個のマンホールに発生する様々なパターンの露筋や金物腐食の劣化に対して十分な検出が可能であるかの検討が必要であると考えられる。

また、露筋と金物等の腐食に関して、本研究で定義したように劣化の発生の初期状態から最終状態まで進行していく段階において、検出精度にどのような影響があるかに関して検討されているものはない。

2. 2. 3 UAV の制御手法および点検に関する既往研究

UAV を自律飛行させる際には、Global Positioning System (GPS) に代表される人工衛星による測位システムを用いて制御を行っている。しかし、マンホールの躯体部のような地下空間で飛行を行う際には GPS が使えない。このような非 GPS 環境における UAV の自律制御には複数の検討が行われている (表 2-2-3)。Mellinger らは、光学式モーションキャプチャによる自律飛行技術を提案している²⁻²⁻¹⁹⁾。これは、事前に設置した複数の高解像度の複数のカメラによって UAV の機体に取り付けた工学マーカの反射を観測することによって測位し、UAV を制御する方法である。しかしこの方法は事前にマンホール内へのカメラ設置が必要であるため、マンホール内での自律飛行への適用は難しい。Ito らは、Laser Detection and Ranging (LIDER)による Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を用いた自律飛行技術を提案している²⁻²⁻²⁰⁾。しかし、LIDER センサは重量があり、通信のマンホールへ進入できる機体へ搭載は難しいと考えられる。なぜならば、鉄蓋の直径は約 70 cm であるため、機体の直径サイズはそれより小さく、大まかに半分以下が望ましいと考えられる。LIDER センサの重量は数 kg であるため、機体の直径が 30 cm の UAV に搭載が難しい。そこで、小型 UAV の自律飛行において、Schauwecker ら、Mur-Artal らは、UAV に搭載したカメラにより得られた特徴点を用いた Visual SLAM による自律飛行技術を検討している^{2-2-21), 2-2-22)}。また、谷戸らは Visual SLAM を用いて下水道管渠における UAV の自律飛行を行っている²⁻²⁻²³⁾。しかしながら、これらの Visual SLAM による自律飛行は、飛行空間の環境条件に変化が少ない安定した

表 2-2-3 非 GPS 環境下における UAV の自律飛行に関する既往研究

(文献^{2-2-19)~2-2-23)} を元に作成)

文献	自律飛行方法	対象飛行領域	通信用マンホールでの一連飛行への適用性
Mellingerら (2011)	光学式モーションキャプチャを用いた自己位置推定	室内	不可：事前に光学式モーションキャプチャを行うためのビデオカメラ等の設備を配備できない
Itoら (2014)	LIDERによるSLAMを用いた自己位置推定	室内	不可：マンホール内部に進入することができる小型のUAVに重いLIDERを搭載できない
Schauweckerら (2013), Mur-Artalら (2015)	カメラにより得られた特徴点を用いたVisual SLAMを用いた自己位置推定	室内	不可：マンホールは暗所であり、カメラにより特徴点を十分に見つけられない
谷戸ら (2018)	照明付きカメラにより得られた特徴点を用いたVisual SLAMを用いた自己位置推定	下水道管渠	不可：屋外からマンホール内部への入孔といった極端に照度に変化する空間ではカメラだけでは対応できない

空間での検討にとどまっている。マンホールの点検動作である地上から地下まで一連の飛行動作において、照度条件や空間の大きさが極度に变化する複数の飛行環境をまたがって、自律飛行を実現している技術はない。

一方で、屋外の設備点検に関しては UAV による点検システムが提案されている。麻らは、UAV を用いて橋梁の点検を行う際に、設備の状態データを所望の精度で得るために、UAV の計測位置の決定方法の提案を行っている²⁻²⁻²⁴⁾。これは、画像データであれば劣化を撮影するために必要な 1 画素当たりの実サイズが十分に確保されるように橋梁構造体に沿って計測位置を設定するものであり、シミュレーションにより実現性を提示している。しかし、現用設備では風等の外乱の影響があるため、実設備での検証を課題としている。さらに、マンホール設備を対象とした UAV の点検システムに関して、検討されている既往研究はないため、マンホール設備用の点検システムの提案が課題である。

2. 3 本論文の課題設定および独自性

2. 3. 1 本論文の課題設定とそれに関わる画像認識手法の選択

(1) 課題設定

本論文の目的となる画像認識による劣化検出手法と UAV による点検用画像の取得手法に分けて設定する課題を述べる。

はじめに、画像認識による劣化検出手法に関して述べる。鉄蓋部に関して、画像認識を用いて鉄蓋の撮影画像から鉄蓋の凹み段差箇所と上蓋の模様箇所を検出し、段差量と摩耗量を計測する手法の提案を課題とする。さらに、計測の精度は、現行のノギスと同程度となるように 1 mm 未満の計測精度が求められる。また、通信の鉄蓋模様の摩耗量は 2 mm という微小な変化量を捉えることにより補修判断を行っている。そこで、画像認識による点検がより高精度かつ簡易になるような模様形状と形状変化を捉える手法の提案を課題とする。躯体部に関して、露筋領域と躯体部に設置している金物設備の腐食領域を検出する手法を提案し、提案手法が現用設備で発生する様々なパターンの露筋や金物腐食の劣化に対して十分な検出が可能であるか検討する。さらに上記、鉄蓋部の段差と摩耗の計測手法および躯体部の露筋と金物設備の腐食の検出手法において、劣化の初期状態から進行した最終状態までの劣化ランクに応じた検出精度を評価することを課題とする。

次に、UAV による画像の撮影手法について述べる。鉄蓋および躯体部において、点検が可能となる所望の画像データを撮影するために UAV に求められる飛行経路を検討する。鉄蓋においては、画像認識による劣化検出手法を適用できる画像データを取得する手法の提案を課題とする。躯体部に関しては画像認識による劣化検出手法を適用可能な画像データの撮影手法の提案を課題とする。さらに、躯体部は非 GPS 環境であることから、画像撮影手法を実現するための非 GPS 環境下の UAV の自律制御手法に関して提案し、実設備での検証を課題とする。

(2) 画像認識の手法の選択

前述した課題に取り組む画像認識手法の選択方法について述べる。

はじめに、鉄蓋部の凹み段差量の計測手法に関して、画像特徴を予め定義することによる物体認識を選択する。画像を用いた鉄蓋の点検時には、路面の鉄蓋を中心に撮影することとなり、画像中に鉄蓋部以外の物体が写り込む可能性は少ない。さらに、点検者が鉄蓋の段差箇所が写るように画像を撮影する。そのため、段差は 2 章 1 節 5 項に示したように、撮影画像から円弧かつ帯状の陰影を確認できるため、この特徴を捉えた物体認識により段差量を計測する方法が有効であると考えた。

次に、鉄蓋部の上蓋模様の摩耗量の計測手法に関して、画像特徴の抽出による機械学習による認識手法を選択することとする。これは、上蓋模様は上蓋に面的に広がってお

り、模様の摩耗が進むと模様の高さが小さくなるので、模様の高さをピンポイントで画像から計測することは難しいと考えた。そこで、ノギスによる模様高さを計測した鉄蓋を撮影して、模様高さの計測値と当該箇所の画像特徴を紐付けしたデータベースを用いる機械学習手法が有効であると考えた。

最後に、躯体部に発生した露筋と金物設備の腐食に関して、機械学習の中でも深層学習を用いることとした。この理由は、現在、躯体部の点検時に、露筋や金物腐食の画像の撮影を行っており、大量の画像が事前に用意できる。さらに、これらの画像は施設管理者が点検時に撮影したものであるため、一定の照度や撮影画角等といった均一性が保証されている。そのため、機械学習に用いる一定水準を満たした十分の画像データがある。また、露筋や金物腐食は劣化の領域を検出する必要があるが、マンホールは地下構造物であるため、撮影画像には露筋や金物腐食と色合いが似た泥汚れが多く、検出対象の画像特徴を予め設定しにくい。そのため、自動的に検出対象の画像特徴を抽出することができる深層学習手法を用いることとした。

以上より、凹み段差は段差箇所となる陰影部を検出する物体認識手法、上蓋模様の摩耗は、ノギスによる模様の計測値と撮影画像から抽出した特徴量を用いた機械学習手法、露筋と金物腐食は機械学習手法の中でも特徴量を自動的に定義する深層学習手法を選択することとした。

2. 3. 2 本論文の独自性

本研究で取り組む課題に対して、既往研究と比較した際の独自性を箇条書きにする。

- ・ 画像認識により路面のひび割れや白線の状態等を検出する研究は複数あるが、路面付帯物である鉄蓋に発生した段差量の計測と表面模様の摩耗量の計測を行う画像認識手法はない^(例えば, 2-2-7)~2-2-11)。さらに、本研究では、鉄蓋の段差箇所と模様領域を検出し、段差量と模様の摩耗量をノギスの計測精度と近い1 mm以下の単位での計測を実現している。
- ・ 鉄蓋模様の摩耗に関して、画像中から微小な2 mmという変化量を捉える必要があり、撮影画像の解像度に検出精度が依存するという問題がある。そこで、本研究では、低解像度な画像でも画像認識による摩耗状態の判定を可能とする模様形状と画像認識手法を提案する。撮影画像の解像度に依存しない摩耗状態の判定が可能になる点および、これまでの既往研究では、既存の設備の劣化を検出する研究が主となっていたが、今後の点検を考慮した設備の構築という観点で新しい。
- ・ 躯体部における露筋領域と金物腐食領域の検出において、既往研究では深層学習を用いてコンクリートの露筋領域の検出を高精度で実施する手法が提案されている²⁻²⁻¹⁸⁾。本研究では、既往研究と比較して約5倍の現場の露筋画像を学習データとして用いて手法の検出精度の影響を検証している。これにより、現用設備に発生する様々なパターンの劣化に対応した学習モデルの構築が完了している。

- 鉄蓋の段差量および模様 of 摩耗量の計測, 躯体部の露筋と金物腐食の検出において, 各劣化の進行度合いによって独自の劣化ランクの定義を行っている. 各劣化の初期状態から最終状態までの進行度で計測, 検出精度にどのような影響があるのかについて検証を行っている.
- UAV の自律飛行手法において, 下水道マンホールと接続する管渠における飛行手法が提案されているが²⁻²⁻²³⁾, 本手法で提案するような地上からマンホール内部までの様々な飛行環境条件下で一連の点検動作を自律飛行で実現した例はない. 本論文では, 非 GPS 環境下である通信用マンホールにおいて, 一連の点検動作を可能とするための UAV の自己位置の把握システムの提案を行い, 提案システムを搭載した UAV により, 自律飛行の有効性を確認した.
- UAV による画像撮影手法において, 既往研究では橋梁設備に対して所望の計測データを得るための UAV の経路計画の設定手法が提案されている. しかし, 既往手法では, 実環境において実機の UAV を用いた計測データの検討がなされていない²⁻²⁻²⁴⁾. 本論文では, 実機を用いたマンホール躯体部での劣化の撮影と撮影画像から劣化の検出精度の検討を行っている.

参考文献

- 2-1-1) 内堀大輔, 高橋宏行, 田中航, 望月章志, 川端一嘉: デジタルカメラ画像を用いたマンホール鉄蓋の段差と摩耗の点検方法, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 72, No. 1, pp. 1-10, 2016.
- 2-1-2) 日本下水道協会: 下水道用マンホールふたの維持管理マニュアル (案), 社団法人日本下水道協会, pp. 4-39, 2000.
- 2-1-3) 小団扇浩, 伊藤雄二, 井川理, 杉伸太郎, 佐藤公俊: 下水道マンホールふたの健全度評価に基づく維持管理方針に関する検討調査 (F 市), 下水道新技術研究所年報, 2013.
- 2-1-4) 岩松潤吉, 西崎耕造, 片野幸雄, 堀野賢一: 硫化水素による下水管路の侵についての一考察, Boshoku Gijutsu, Vol. 37, pp. 265-272, 1988.
- 2-1-5) 日本下水道協会: 下水道用マンホール安全対策の手引き (案), 社団法人日本下水道協会, 2000.
- 2-1-6) 日本下水道協会: 下水道用マンホールふたの維持管理マニュアル (案), 社団法人日本下水道協会, p. 43, 2000.
- 2-1-7) 株式会社 G&U 技術研究センター: マンホールの博物誌 水と道路と人々との交差点, 都市の安全を考える, ダイヤモンド社, pp. 108-125, 2005.
- 2-1-8) 中根: モデル化による残存模様高さを有するマンホールふた数の推定, 下水道協会誌論文集, 11 月号, pp. 1-6, 2012.
- 2-1-9) 日本下水道協会: 下水道用マンホールふたの維持管理マニュアル (案), 社団法人日本下水道協会, pp. 44-52, 2000.
- 2-1-10) 国土交通省: 平成 27 年度 全国道路・街路交通情勢調査一般交通量調査 集計表, <https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/index.html> (2020 年 9 月 29 日閲覧)
- 2-1-11) 高田洋吉, 和田順次, 佐原教三, 西谷敦, 寺田耕次: 地下構造物用蓋ならびにその蓋本体および受枠, 特許番号第 2758589 号, 日之出水道機器, 1998.
- 2-1-12) 秦野市上下水道局: 下水道工事標準構造図, 組立式楕円マンホール構造図, p. 2, 2017.
- 2-1-13) 日本下水道管路管理業協会: JASCOMA, 下水道マンホール, Vol. 16, No. 32, pp. 6-13, 2010.
- 2-1-14) 土木学会: 都市ライフラインハンドブック, 第Ⅲ編ライフラインの保全と環境技術, 6 章情報通信, pp. 551-581, 2010.
- 2-1-15) 小団扇浩, 伊藤雄二, 杉伸太郎, 浅野雅則: 下水道マンホール改築・修繕に関する共同研究, 下水道新技術研究所年報, pp. 113-118, 2014.
- 2-1-16) 丹羽正徳, 鈴木秀明, 城田正美, 外島義規: 通信用 RC 造マンホールの補強工法に関する実大検証実験, 構造工学論文集, Vol. 53A, pp. 686-695, 2006.

- 2-1-17) 川端一嘉, 森治郎, 勝木康博, 足利翔: 点検・補修タイミングを最適化する設備マネジメント技術, NTT 技術ジャーナル, Vol. 26, No. 8, pp. 12-15, 2014.
- 2-1-18) 森治郎, 川端一嘉, 勝木康博, 足利翔, 下村匠: 鉄筋腐食進行予測に基づく通信用マンホールの点検周期の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 617-624, 2014.
- 2-1-19) 藤本憲宏, 笠原久稔, 永井友康: 通信用マンホールの弱点部位とその劣化機構, 信学技報, Vol. 117, No. 387, OFT2017-67, pp. 51-56, 2018.
- 2-1-20) Ito, A., Tanaka, K., and Saito, H, “Electrochemical measurement to examine influence of ions, DO, and pH on corrosion of early-generation conduits,” *Corrosion Engineering, Science and Technology*, Vol. 53, pp. 16-20, 2018.
- 2-1-21) 亜鉛めっき鋼構造物研究会: 溶融亜鉛めっきの耐食性, pp. 3-10, <https://www.mlit.go.jp/common/001080953.pdf> (2021年1月3日閲覧)
- 2-1-22) 藤生和也: 下水道現場コンクリートの硫化水素腐食に対する耐用年数: 下水道協会誌, Vol. 45, No. 547, pp. 104-113, 2008.
- 2-1-23) 三沢俊平: 鉄さび生成の現状と未解明点, 防食技術, Vol.132, No. 11, pp. 657-667, 1983.
- 2-1-24) 増子昇: さびのおはなし増補版, 日本規格協会, pp. 47-93, 2008.
- 2-2-1) 蓮池里菜, 木下幸治, 羽田野英明, 森本博昭, 六郷恵哲: 鋼橋定期点検へロボット技術を活用するための要求性能の提案, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp. 629-638, 2020.
- 2-2-2) 富澤健, 遠藤哲雄, 大嶋智彦, 岡部俊幸, 金井利浩: 車軸に生じる加速度による路面凹凸評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 67, No. 3, I_51-I_58, 2011.
- 2-2-3) 朝川皓之, 長山智則, 藤野陽三, 西川貴文, 秋本隆, 和泉公比古: 一般車両の走行時動的応答を利用した舗装路面の簡易状態評価システムの開発, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 68, No. 1, pp. 20-31, 2012.
- 2-2-4) 富山和也, 川村彰, 大廣智則: 加速度計を用いた平坦性測定装置による凍上を受けた高速道路の路面損傷個所の特定, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 69, No. 3(舗装工学論文集第 18 巻), I_17-I_24, 2013.
- 2-2-5) 森石一志, 中村博康, 渡邊一弘: 三次元点群データを用いた新たな路面評価手法の検討, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 69, No. 3(舗装工学論文集第 18 巻), I_9-I_16, 2013.
- 2-2-6) 橋爪謙治, 橋本和明, 明石行雄, 全邦釘: 排水性舗装の基層以深の劣化を要因としたポットホール発生予測手法の一提案, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 70, No. 3(舗装工学論文集第 19 巻), I_17-I_24, 2014.
- 2-2-7) 浅田拓海, 本多誠司, 亀山修一: 画像特徴量を用いた道路区画線剥離率推定法

- の開発, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 67, No. 1, pp. 10-21, 2011.
- 2-2-8) 埜賢治, 西川貴文, 奥松俊博, 中村聖三: 低解像度画像を用いた路面の可視変状認識アルゴリズムの構築と実装化, 土木学会第 67 回年次学術講演会(平成 24 年 9 月)E1(舗装工学), Vol. 9, No. 1, pp. 62-66, 2012.
- 2-2-9) 浅田拓海, 本多誠司, 川端伸一郎, 佐々木克典: 走行車両から撮影した路面画像を用いた舗装のひび割れ評価手法の開発, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 70, No. 3(舗装工学論文集第 19 巻), I_9-I_16, 2014.
- 2-2-10) 全邦釘, 井後敦史, 南免羅裕治, 黒木航汰, 大窪和明: 車載カメラにより撮影された舗装画像からのディーププランニングによるひび割れ率評価, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 73, No. 3(舗装工学論文集第 22 巻), I_97-I_105, 2017.
- 2-2-11) 田中俊介, 安部隆二, 武市靖, 古田智大, 木村孝司: 路面テクスチャと湿潤・凍結路面における走行安全性との関係に関する研究, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 72, No. 3(舗装工学論文集第 21 巻), I_1-I_7, 2016.
- 2-2-12) 後藤悟史, 麻生稔彦, 宮本文穂: 画像処理とパターン認識手法を利用した耐候性鋼材のさび外観評価, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 4, pp. 674-683, 2006.
- 2-2-13) 西川貴文, 吉田純司, 杉山俊幸, 斉藤成彦: 木構造状フィルタを用いたコンクリートのクラック抽出のためのロバストな画像処理システム, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 4, pp. 599-616, 2007.
- 2-2-14) Tran Hiep Dinh, Q. P. Ha, and H. M. La, “Computer Vision-based Method for Concrete Crack Detection,” *14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, pp. 1-6, 2016.
- 2-2-15) Kasthurirangan Gopalakrishnan, and Hoda Gholami, “Crack Damage Detection In Unmanned Aerial Vehicle Images of Civil Infrastructure Using Pre-Trained Deep Learning Model,” *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, Vol. 1, pp. 1-14, 2018.
- 2-2-16) Juanjo Rubio Rubio Guillamon, and Sergio Escalera Guerrero, “Bridge Structural Damage Segmentation Using Fully Convolutional Networks,” *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2018.
- 2-2-17) 青島亘佐, 中野聡, 徳永皓平, 中村秀明: 深層学習による異常検知手法を用いたコンクリート表面の変状検出, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 75, No. 2(応用力学論文集 Vol. 22), I_599-I_570, 2019.
- 2-2-18) 中島通浩, 安野貴人, 富永大亮, 野田一弘, 青柳聖, 関口斉治: 目視点検の損傷画像による鉄筋露出セグメンテーションの転移学習, 第 32 回人工知能学会, 3Z1-04, 2018.
- 2-2-19) D. Mellinger, and V. Kumar, “Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and*

- Automation (ICRA)*, pp. 2520-2525, 2011.
- 2-2-20) Kohei Ito, Justin Han, and Akihisa Ohya, “Localization using uniaxial laser rangefinder and IMU for MAV,” *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 717-717, 2014.
- 2-2-21) Konstantin Schauwecker, and Andreas Zell, “On-Board Dual-Stereo-Vision for Autonomous Quadrotor Navigation,” *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 33-342, 2013.
- 2-2-22) R. Mur-Artal, J.M.M. Montiel, and J.D. Tardos, “ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System,” *IEEE Trans. Robotics*, Vol. 31, No. 5, pp. 1147-1163, 2015.
- 2-2-23) 谷戸善彦, 稲垣裕亮: 下水道管路等閉鎖性空間に対応可能な UAV の開発, 第 29 回非開削技術研究発表会論文集, pp. 25-32, 2018.
- 2-2-24) 麻晃太郎, 舟洞佑記, 道木慎二, 道木加絵: UAV によるインフラ設備外観の自動点検システムの実現に向けた三次元モデルに基づく状態データの精度を考慮した計測位置算出, 計測自動制御学会論文集, Vol. 53, No. 3, pp. 229-235, 2017.

第3章 画像認識による鉄蓋部の段差量の計測と摩耗量の推定手法に関する提案

本章は、大きく分けて3つのパートによって構成される。

1つ目のパートでは、画像認識による鉄蓋の凹み段差量を計測する手法の提案と現用設備を用いた検証結果を示す。2つ目のパートでは、鉄蓋の上蓋模様の摩耗量を推定する手法の提案と現用設備を用いた検証結果を示す。段差量の同定には、画像から段差が発生している箇所を検出して段差の画素数を計測しているため、計測手法と表現し、上蓋模様の摩耗量の同定には機械学習を用いて模様高さを推定したため、推定手法と表現している。3つ目のパートでは、鉄蓋の摩耗量の推定手法において、一定以上の精度で摩耗量を推定できるが、さらなる推定精度の向上には、市販で流通しているよりも高解像度のカメラで撮影を行う必要があると考えられる。そこで、高解像度の画像を用いなくても、補修基準に達した状態が判定しやすい模様形状と形状変化を捉える画像認識手法を提案することとした。1つ目と2つ目のパートでは、画像認識により現在の設備の点検手法の提案であり、3つ目のパートは、画像認識により摩耗状態を判定しやすい模様形状と模様形状を検出する手法の提案である。

3. 1 撮影画像条件と全体構成

3. 1. 1 撮影画像の条件

画像認識を用いた鉄蓋の段差量の計測と摩耗量の推定手法の構築にあたり、画像の撮影条件を決める。汎用性を高めるために、撮影に用いる機材は市販で購入可能なデジタルカメラを用いる。以下に撮影機材や撮影条件等を示す。

鉄蓋の画像を撮影する機材は、有効画素数が1800万画素以上の一眼レフデジタルカメラとした。一眼レフデジタルカメラを選定した理由は、ノギス計測と近い計測分解能を得るためである。鉄蓋の直径は700mm～900mm程度であり、直径は規格で定められていることから、1800万画素の撮影領域一杯に鉄蓋を収める場合、およそ0.2mm/画素の画素分解能が得られ、一般に用いられるノギスの計測分解能と近くなる。そのため、鉄蓋の画像内への写し方は、画像中に鉄蓋がなるべく最大かつ鉄蓋の外周が切れないように撮影することとする。鉄蓋の外周が切れないよう撮影する理由は、画像内の1画素当たりの実サイズ (mm/画素) は、鉄蓋の直径から算出を行うため画像内に鉄蓋が最

大で写すこととする。

鉄蓋の撮影可能距離は、最大で 6.5 m で検討を行うこととした。ここで、撮影時のレンズの高さは約 1.4 m という制約を設けた。理由は、撮影距離が 6.5 m 付近の遠方において、レンズの高さを 1.4 m 未満の低い位置から撮影すると画像中の鉄蓋の扁平率が大きくなり過ぎて鉄蓋の模様領域が十分に写らなくなるためである。脚立等を用いて、レンズ位置の高さを上げて撮影を行えば、6.5 m より遠方から鉄蓋を撮影することが可能であるが、作業者がデジタルカメラで撮影する場合を考慮して、成人がカメラを無理なく構えられる高さで撮影できる画像を対象とすることとした。また、撮影距離の最小は 3.0 m とした。これは、鉄蓋に近づきすぎ、鉄蓋とレンズの撮影仰角が大きくなると、計測したい段差量の垂直面や模様の垂直面が画像中に写らなくなるためである。

撮影時の条件は、一般的に鉄蓋点検が実施される日中の時間帯で撮影した画像から鉄蓋の点検ができるようにする。ただし照明条件は、順光と極度の逆光における鉄蓋撮影を除外する。画像中における段差量や模様の高さは、段差や模様の側面に生じる影との相関が高いと考えられる。そこで、正確な計測を実現するため、影が無くなるような順光環境を適用除外とすることにした。また、極度の逆光を除外した理由は、逆光での撮影はまれに金属性の鉄蓋からの反射光が強すぎて、撮影画像が白とびしてしまうからである。さらに、雨、雪、霧等、画像中で段差や模様高さに起因する影の形状を変化させる天候も適用除外とした。

3. 1. 2 点検手法の全体構成

提案する点検手法は下記の手順で段差量の計測と摩耗量の推定を行う。鉄蓋の撮影画像に対して、画像認識を行い、画像中の鉄蓋の外周を自動検知すると共に、段差部を検知し、その段差の最大値を計測する。そして、段差検知で用いた画像から、画像解析によって鉄蓋の上蓋模様の領域を自動的に検知し、模様領域を16エリアに分割した各エリアにおける模様高さの平均値を推定する。

3章2節より段差量の計測手法と摩耗量の推定手法の詳細を説明する。

3. 2 段差量の計測手法

画像から鉄蓋の段差を自動的に計測するためには、撮影画像の1画素当たりの実サイズ (mm/画素) である画素分解能の算出が必要となる。また、縁石、砂利、道路の白線が含まれる撮影画像からでも鉄蓋の領域を検出し、鉄蓋の段差のエッジのみを抽出して最大段差箇所の高さを計測することが求められる。これらの要求を満たすため、提案手法では、次に示す3ステップで段差の自動計測を行う。

- ステップ1: テクスチャ情報を用いて画像中における鉄蓋の領域を検出する。
- ステップ2: 段差の形状を考慮したフィルタを用いて段差のエッジを検出する。
- ステップ3: 画素分解能と検出した段差量の画素数から最大段差量を計測する。

なお本アルゴリズムでは画像の輝度情報のみを用いるため、デジタルカメラで撮影した画像を256階調のグレースケールイメージに変換する前処理を行っている。グレースケールイメージへの変換式は、High Definition Television (HDTV) 係数による加重平均と補正法を用いた³⁻²⁻¹⁾。ガンマ係数は2.2とした。この変換式を用いた理由は、本技術では、鉄蓋の段差や模様によって生じる影を利用しているため、グレースケール画像への変換時に明暗が中間値法やNational Television System Committee (NTSC) 係数による加重平均法よりも明確に現れるためである³⁻²⁻²⁾。

以下から、具体的な画像処理工程 (ステップ1, ステップ2) と段差の計測方法 (ステップ3) を説明する。

(1) ステップ1: 鉄蓋領域の検知

グレースケール画像からの鉄蓋領域の検知には、テクスチャ情報を用いている。一般的にアスファルト舗装では、細骨材等の影響を受けテクスチャが大きくなり、鉄蓋の受枠のような平坦な表面では、テクスチャは小さくなる。既往研究において、テクスチャ情報を用いて画像からコンクリート領域を検出する方法が提案されている。本研究では、既往研究の方法を応用して、画像から路面のアスファルト領域を除外することによって鉄蓋の領域を検出している³⁻²⁻³⁾。式(3-2-1)にテクスチャ量の計算方法を示す。テクスチャ量は、図3-2-1(a)に示すように中央の画素Aに対して近傍の8画素の輝度値を用いた標準偏差で計算を行っている。式(3-2-1)に示す S_{xy} は画素(x,y)のテクスチャ量、 δ は輝度値、 a は近傍の8画素の δ_k ($k=1, 2 \dots 8$)の輝度値の平均である。

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^8 (\delta_k - a)^2}{8}} \quad (3-2-1)$$

図3-2-1(b)は S_{xy} の二値化画像であり、一定値より小さなテクスチャ量を持つ画素が黒で表示されている。平坦性を有する受枠はアスファルト領域に比べて輝度変化が単調になるため、他の領域よりテクスチャ量が小さくなる。そのため、図3-2-1(b)に示す

ように、受枠の領域が黒くなる。二値化後の画像から、ノイズ等の影響で発生した微小な黒い領域を取り除けば、**図 3-2-1(c)**に示すようにエッジ検出を用いて鉄蓋の上下左右端を検知することができる。鉄蓋の領域を定義することができる。

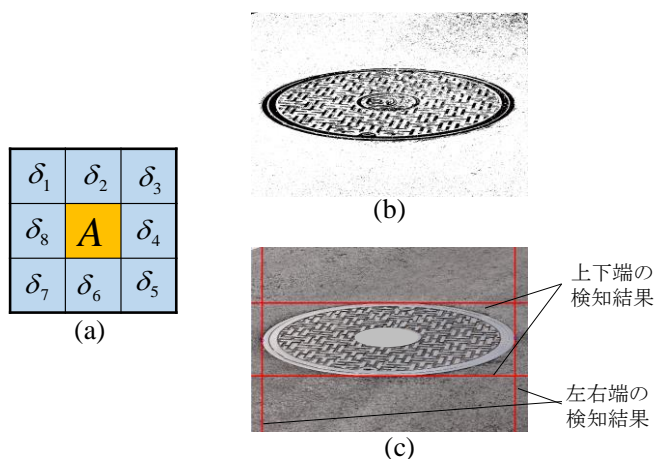


図 3-2-1 (a) 8近傍によるテクスチャ計算領域, (b) S_{xy} 算出後の二値化画像, (c) 鉄蓋領域の検知結果

(2) ステップ2：段差の検出

図3-2-2に本研究で提案する段差検出法の概要を示す。本研究では、上蓋に施されているT字の模様の中から段差箇所のエッジのみを検出するために、鉄蓋の形状を考慮したフィルタ F^S を用いてエッジ検出を行う。撮影画像において鉄蓋は楕円状に写るので、鉄蓋に発生した段差も楕円状のカーブを描く。さらに、段差は一定以上の厚みのある円弧状の黒縁であるため、フィルタ F^S は段差の特徴である円弧状のカーブと厚みを考慮して作成されており、フィルタ F^S を用いると**図3-2-2**のドットラインEに示すように鉄蓋の段差位置のエッジを検出することができる。

フィルタ F^S は垂直方向の一次微分フィルタの行数と列数を拡大して作成されたもので、 F^{-15} , F^{-10} , F^{-5} , F^0 , F^5 , F^{10} , F^{15} の7種類である。そのうちのひとつフィルタ F^0 を式(3-2-2)に示す。フィルタ F^0 は m_0 行 n_0 列の行列であり、 m_0 と n_0 は奇数とし画像の大きさによって調整する。 m_0 のうち、成分が-1のものが段差部の陰影領域に対応して、1のものが上蓋の明るい領域、0が陰影と上蓋の明るい領域が変化する中間領域に対応している。フィルタ F^S は-1, 0, 1で構成されており、 F^5 , F^{10} , F^{15} は F^0 を反時計回りに5度ずつ、 F^{-15} , F^{-10} , F^{-5} は F^0 を時計回りに5度ずつ回転させたものである。

$$F^0 = \begin{pmatrix} -1 & \cdots & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & \cdots & -1 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \tag{3-2-2}$$

これらの7種類のフィルタを画像に走査して各画素の値を計算する。その後、式(3-2-3)に示すように7種類のフィルタで各々計算した同一画素の値における最大値を、その画素のエッジ特徴量 γ として定義する。

$$\gamma_{xy} = \max \{ \text{filter}(I_{xy}, F^0), \text{filter}(I_{xy}, F^{-15}), \dots \} \quad (3-2-3)$$

ここで、 I はグレースケール画像であり、 M 行 N 列の画素の集合体である行列とする。各成分の値は、画素の輝度値であり、 M と N は正の整数である。 I_{xy} は行列 I の (x, y) 成分で、 $\text{filter}(I, F)$ は行列 I に対してフィルタ F^s でフィルタリング処理を行うことである。式(3-2-4)にフィルタ F^0 を用いた際の計算例を示す。

$$\text{filter}(I_{xy}, F^0) = \sum_{\alpha=1}^{m_0} \sum_{\beta=1}^{n_0} (I_{XY} \times F_{\alpha\beta}^0),$$

$$X = x - \frac{m_0 - 1}{2} + (\alpha - 1),$$

$$Y = y - \frac{n_0 - 1}{2} + (\beta - 1) \quad (3-2-4)$$

式(3-2-4)に記載のフィルタリング処理を実施することで、画像から15度から-15度傾いているエッジを抽出することができ、楕円状のカーブである段差の大部分を検出するこ

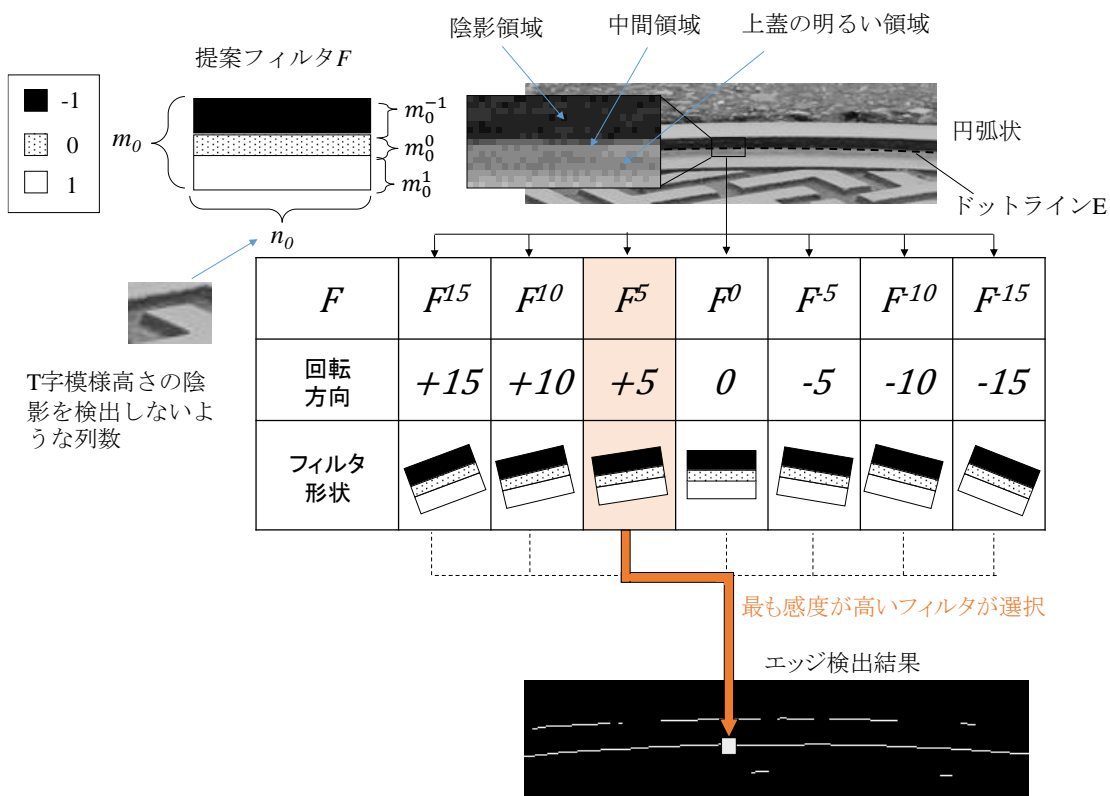


図 3-2-2 提案フィルタ F によるエッジ検出のイメージ

とができるようにした。提案フィルタ F において、 n_0 に相当する列方向を拡大することによって、列方向に伸びるエッジの検出を抑えることができるため、図3-2-2に示すように上蓋の表面のT字模様のような短い直線エッジの検出を抑えることが可能となる。また、同様に m_0 に相当する行方向を拡大することによって、一定以上の陰影幅を有する模様のエッジを検出できるようになる

各画素のエッジ特徴量 γ_{xy} が計算された後は、二値化を行い、細線化処理を行うことで、段差位置のエッジ候補を抽出することが可能となる。エッジ候補のうち、最も長いエッジを段差位置のエッジと定義することにより、図 3-2-2 のドットライン E のように段差位置を検出できる。本フィルタの特徴は、画像中のエッジ検出処理において段差部の陰影によって生じるエッジのみを検出する合成フィルタになっていることが特徴となる。フィルタサイズである m_0 は、画像中における段差部の垂直方向の陰影幅によって決定され、 n_0 は陰影部が円弧状に水平方向に伸びる長さによって決定することができる。そのため、フィルタサイズ m_0 を大きくすることによって、検出したい段差量より小さい垂直方向の陰影量は除外され、 n_0 を大きくすることによって、水平方向に連続的に繋がっているエッジのみが検出されるようになる。これらのことから、鉄蓋の T 字模様のように段差部と比べると短い模様は、エッジ検出がされにくくなる。砂利、泥、葉っぱ等の異物によって段差位置のエッジが鉄蓋模様より短くなった場合は、段差位置としてエッジ検出されない。

図 3-2-3 に、提案したエッジ検出法と他の代表的なエッジ検出法との比較を示す。図 3-2-3 において白で表示された画素はエッジが検出された画素であり、図 3-2-3 (a) はグレースケール変換された元画像である。図 3-2-3 (b) は、平滑化処理と同時に一次微分でエッジ検出を行う Sobel フィルタ³⁻²⁻⁴⁾を用いたエッジ検出の結果であり、図 3-2-3 (c)

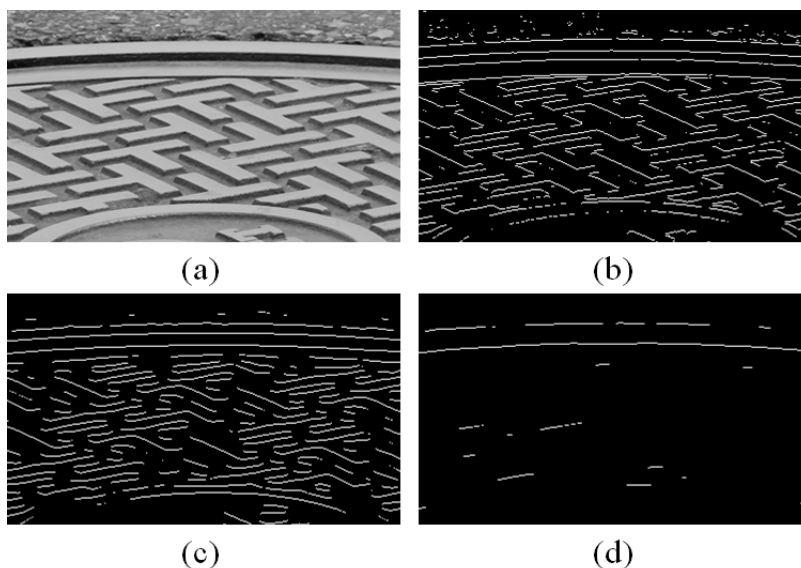


図 3-2-3 (a) グレースケール元画像, (b) Sobel フィルタ,
(c) Laplacian Of Gaussian (LOG) フィルタ, (d) 提案フィルタ

は、平滑化処理と同時に二次微分でエッジ検出を行う Laplacian of Gaussian (LOG)³⁻²⁻⁵⁾を用いたエッジ検出の結果である。図 3-2-3(d)は、提案フィルタにおいて、フィルタサイズの m_0 を 13 行、 n_0 を 25 列として計算した結果である。このフィルタサイズの大きさは、 m_0 は画像中における段差部の垂直方向の幅（段差量）であり値を大きくすると、T 字模様によって生じる陰影が反応しやすくなる。 n_0 は段差部の水平方向の連続性（繋がり）であるため、大きくすることによって T 字模様のエッジが検出されにくくなる。これらの値は、段差位置のエッジが完全に検出されるぎりぎりの値に設定しており、画像の解像度と画角内に占める鉄蓋の大きさによって調整を行う。Sobel フィルタと LOG フィルタを用いたエッジ検出では、鉄蓋の模様が強く検出されているため、検出結果から段差位置のエッジを特定するための処理が必要となる。提案したフィルタを用いたエッジ検出では、楕円状のカーブの特徴を持った位置のエッジを明確に検出しており、不要なエッジの検出数を抑えている。そのため、一定以上の長さのエッジを段差位置のエッジとして定義することができ、提案するような段差部に起因する濃淡特徴を考慮した合成フィルタを用いて効率的に段差部のエッジが検出できる。また、鉄蓋の上に多少の砂や泥等の付着物や表面に傷等があった場合でも、提案フィルタは楕円状のカーブの特徴を持った物体のエッジを検出するため、そのような多少のノイズはエッジ検出にはほとんど影響しない。ただし、段差の特徴に似た木の枝や段差箇所を覆い隠すような石や葉っぱが鉄蓋上に落ちていた場合、段差位置のエッジは検出できない。しかしながら、段差を覆い隠すような大きな支障物は撮影段階で作業者が遠方目視で判別可能であるため、撮影時点で適用除外と判断できる。

(3) ステップ3：段差の計測

このステップでは、画素分解能から実際の段差の大きさを計測し、最大段差の位置を自動検知する。画素分解能は、1画素当たりの実サイズ (mm/画素) として定義される。図3-2-4にステップ1において検出された鉄蓋領域の結果を示す。鉄蓋の形状は画像にほぼ楕円形で写るので、画素分解能 P は式(3-2-5)で近似することができる。

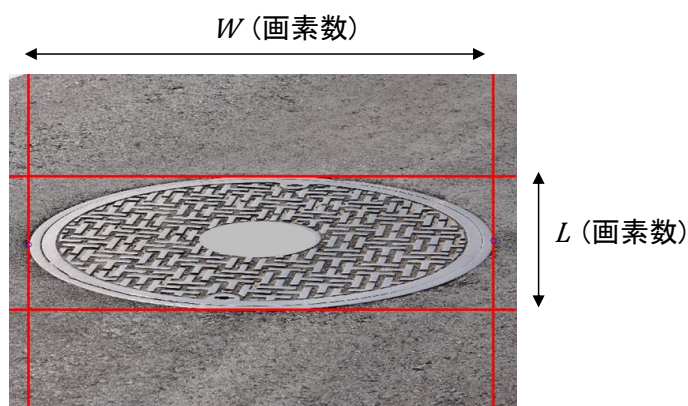


図 3-2-4 鉄蓋領域の検知結果

$$P = \frac{T}{W} \sqrt{1 - \left(\frac{L}{W}\right)^2} \quad (3-2-5)$$

ここで、 T は鉄蓋の実空間における直径 (mm)、 W と L は図3-2-4の撮影画像における鉄蓋の横幅の画素数と縦幅の画素数である。

画素分解能が算出されたあとは、段差の結果を用いて画像から段差の大きさを求める。図3-2-3(a)に示したグレースケール画像を輝度値によって二値化処理を行う。鉄蓋の段差の場所は影になるため、二値化処理を行うと段差の位置が黒い画素として塗りつぶされる。次に図3-2-5のように、ステップ2において検出された段差のエッジ(ドットラインE)を基準として、そのエッジ周辺から垂直方向に黒く連続した画素を数えた値 H が段差量と判定することができる。

最後に、画素分解能 P と画像における段差の大きさ H を乗じた値が実際の段差の大きさとなる。そのため、段差の大きさ H が最大となる位置が最大の段差位置となる。

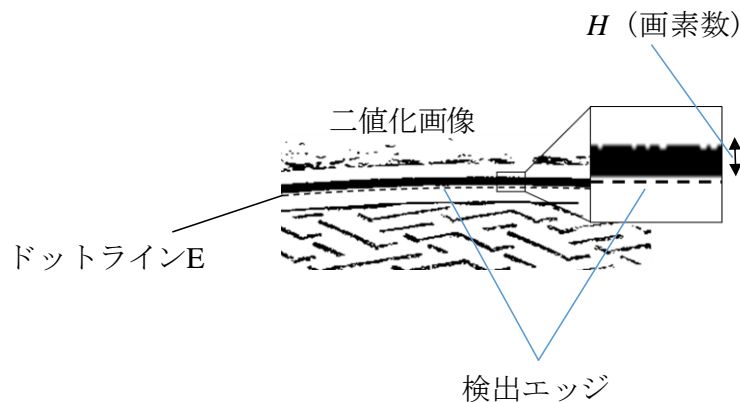


図 3-2-5 二値化画像を用いた段差画素数の計測

3. 3 段差の計測手法の検証および考察

3. 3. 1 検証方法

検証条件を表 3-3-1 に示す。検証内容は、提案手法による段差量の計測とノギスによる計測値の比較である。提案手法を用いて段差量を計測する鉄蓋は、現場に設置されている現用の 131 カ所であり、段差の発生が確認できるものとした。鉄蓋の撮影時の天候は、晴れ又は曇りとして、雨や雪等で濡れている鉄蓋は除外した。撮影後に、段差の計測手法で鉄蓋の最大の段差の位置を検知し、自動計測された位置と同一と思われる地点をノギスによって段差領を計測することとした。131 カ所中、自動計測アルゴリズムを用いて撮影画像から段差が検知もしくは計測できた鉄蓋は 123 カ所となった。本検証におけるノギスによる計測作業は 3 名の作業者が実施した。

図 3-3-1 に段差の検知もしくは計測ができなかった要因とその 8 カ所の内訳、代表的な事例を示す。図 3-3-1 に示すように段差位置のみが局所的に他の陰で覆われてしまい、段差位置が黒縁の連続線と撮影できなかった場合である。本検証における手法の検知率は約 93%であった。

表 3-3-1 検証条件

条件項目	仕様
検証対象	現場設置の131カ所
ノギスによる計測方法	作業者がノギスにより最大箇所の大きさを計測 (画像認識手法による計測が可能であった123カ所を3名の作業者に分擔して実施)
撮影距離	3~6.5 m
撮影高さ	約1.4 m
撮影機材	一眼レフデジタルカメラ
照明	斜光/逆光
天候	晴/曇


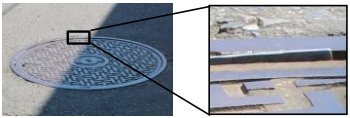
検知失敗の要因	代表例	割合
段差部が他の影で覆われてしまう		6/8 (枚)
段差部に異物が混入		2/8 (枚)

図 3-3-1 段差検知の失敗要因と割合

3. 3. 2 結果と考察

図 3-3-2 に段差量の提案手法による計測とノギスによる計測の散布図を示す。段差量を計測した鉄蓋は 123 カ所である。散布図において、ノギスによる計測値から 2 章 1 節

5項にて定義した劣化ランク（図 2-1-14）毎に分類を行っている。ここで、劣化ランク 1 に相当する鉄蓋は本検証では該当がなかった。提案手法による計測値を y (mm)、ノギスによる計測値を x (mm) とした場合、1 次の近似直線の勾配は 0.96 であり、両者の相関係数 R^2 は、0.79 であり、相関が確認できた。また、本手法を用いれば、補修の対象となる 4 mm という基準に対して、提案手法により計測された 3 mm 以上の鉄蓋を再確認するといった方法を用いれば、ノギスの代替方法として補修対象の段差が発生した鉄蓋の検出には有効であると考えられる。

表 3-3-2 に 4 段階の劣化ランク毎において提案手法による計測値からノギスの計測値を引いた値の平均値 \bar{x} と標準偏差の結果を示す。標準偏差は式(3-3-1)にて定義する。

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-3-1)$$

ここで、 n はデータの総数、 x_i は提案手法の計測からノギスの計測値を引いた値、 \bar{x} は x_i の平均値である。

図 3-3-2 において、123 カ所の鉄蓋の結果から 1 次の近似直線の勾配は 0.96 であり、両者の相関係数 R^2 は、0.79 であったことから、全体として提案手法による計測値とノギスによる計測値は相関があると考えられる。次に、表 3-3-2 において、全体における

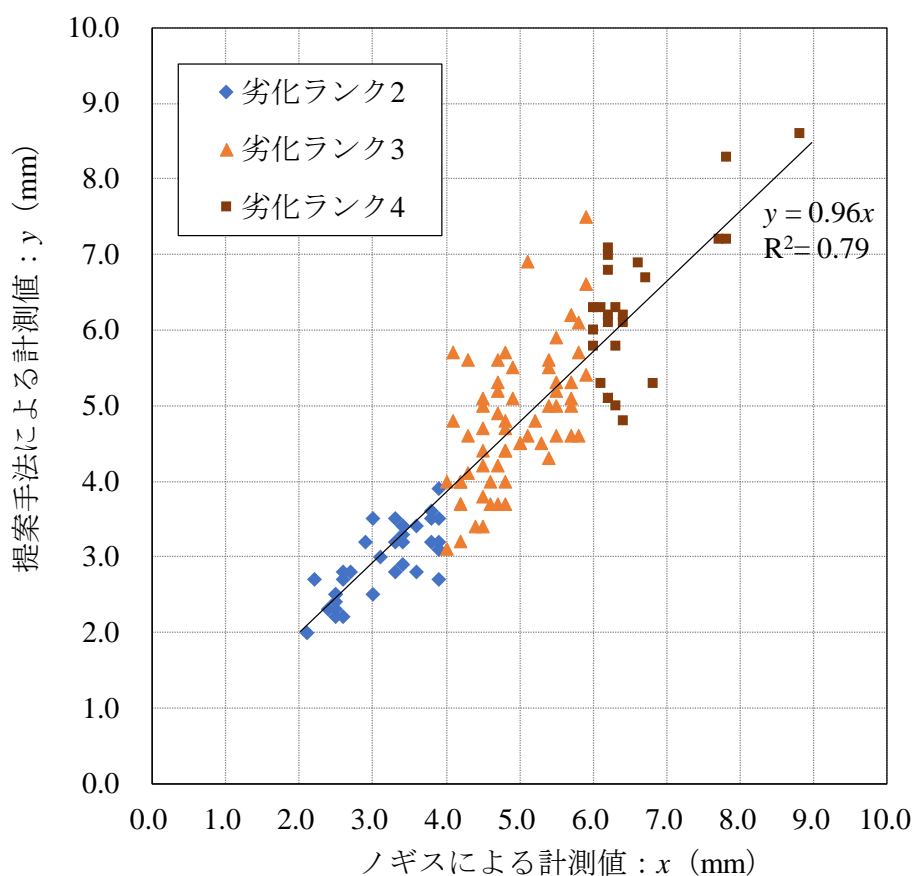


図 3-3-2 提案手法とノギスによる計測値の比較

差は-0.17 mm, 標準偏差は 0.63 mm となった. ノギス計測を基準とした際の提案手法のバラツキ (標準偏差) の範囲は-0.80 mm から 0.46mm となり, ノギス計測に対して最大 0.80 mm バラツキが発生することがわかった. この量は 1.00 mm 未満であり, ノギス計測とのバラツキの最大量が 1.00 mm 未満に収まっていることから, ノギスと同程度の計測精度があると考えられる. 劣化ランク別における提案手法のバラツキ (標準偏差) の範囲は, 劣化ランク 2 では-0.52 mm から 0.17 mm, 劣化ランク 3 では-0.84 mm から 0.58 mm, 劣化ランク 4 では-0.93 mm から 0.41 mm であり, いずれの劣化ランクにおいてもノギス計測との誤差は, 1.00 mm 未満であった. これらのことから, 劣化ランク毎でも提案手法はノギス計測に対して同等の精度があると考えられる. また, 各劣化ランクが進むと大きくなるが, ノギス計測に対する最大誤差は大きくなった.

本検証において, 計測アルゴリズムとノギス計測の間の最大誤差は 1.8 mm であった. 図 3-3-3 にこの誤差が生じた鉄蓋の撮影画像と段差計測箇所拡大図を示す. この鉄蓋の段差量は, 劣化ランク 3 でありノギスによる計測値 5.1 mm に対して提案手法による計測値が 6.9 mm であった. 誤差の主な要因は, 撮影の時間帯であると考えている. こ

表 3-3-2 劣化ランク毎のノギスによる計測と提案手法の方の比較

劣化ランク	1	2	3	4	Total
段差量	0 mm以上 2 mm未満	2 mm以上 4 mm未満	4 mm以上 6 mm未満	6 mm以上	—
画像枚数	0枚	34枚	64枚	25枚	123枚
提案手法ーノ ギス計測の差 (平均値)	-	-0.19 mm	-0.13 mm	-0.26 mm	-0.17 mm
標準偏差	-	0.36 mm	0.71 mm	0.67 mm	0.63 mm

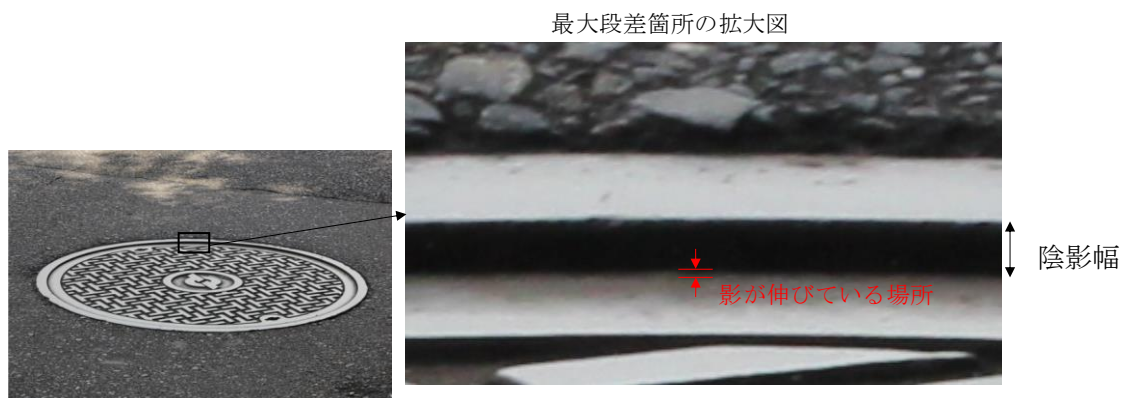










図 3-3-3 最大誤差が発生した鉄蓋

の鉄蓋は、夕刻に近い時間帯で撮影されたため、画像における段差部の陰影が伸びて、陰影幅が大きくなった状態で撮影されてしまったことから、提案手法において実際の段差より大きく計測されたと考えられる。さらに、**図 3-3-4** に各劣化ランクにおいて、ノギスによる計測値と提案手法による計測値の差が小さかった画像と大きかった画像を示す。計測差が大きい鉄蓋画像において**(b)**は提案手法の方が段差量は大きくなり、**(a)**、**(c)**は提案手法の方が小さくなった。しかしながら、画像における特徴としては、**(a)**、**(b)**、**(c)**における計測差が小さい画像との明確な差は見受けられなかった。これらの誤差が大きい撮影画像は、撮影時間帯が早朝か夕方であり、太陽が斜光のため画像中の段差部の陰影が伸びて陰影幅が大きくなってしまったり、太陽が鉄蓋の直上方向にくる正午において、段差部の陰影幅が短くなってしまったりと発生していると考えられる。そのため、鉄蓋の撮影の時間帯を考慮することによって誤差の発生を抑制できると考えられる。特に、劣化ランク 3, 4 で標準偏差が大きくなったのは、実際の鉄蓋の段差量が大きくなったことにより、太陽の影響による陰影変化が生じやすいためだと考えられる。以上のことから、提案手法についてまとめる。









本検証から、ノギス計測との差および標準偏差は 1.00 mm 未満、かつノギス計測を基準とした際のバラツキの最大量は 1.00 mm 未満であるため、高い精度で凹み段差を検出可能であり、実地で活用可能であると考えられる。

ただし、本検証を通じてノギスとの計測誤差が大きく発生してしまうケースがあったため、以下の項目を考慮して運用すれば、精度が担保できると考えられる。









- ・ 撮影時の照明条件：段差部の陰影幅の影が伸びてしまう早朝や夕刻の太陽が斜光になってしまう時間帯、また陰影幅が短くなってしまいう正午の時間帯を避ける。
- ・ 撮影画像の枚数：標準偏差におけるバラツキの精度評価であることから、計測値の信頼性を向上するために、鉄蓋 1 カ所において、複数枚の画像を撮影し段差量の計測を行う。

計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法値	3.9 mm	3.9 mm	2.5 mm	2.5 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法値	3.6 mm	2.8 mm	3.9 mm	3.1 mm
撮影画像					

(a) 劣化ランク 2

計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法値	4.0 mm	4.0 mm	4.8 mm	4.8 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法値	5.1 mm	6.9 mm	4.1 mm	5.7 mm
撮影画像					

(b) 劣化ランク 3

計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法値	6.3 mm	6.3 mm	6.2 mm	6.2 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法値	6.4 mm	4.8 mm	6.8 mm	5.3 mm
撮影画像					

(c) 劣化ランク 4

図 3-3-4 各劣化ランクにおける偏差値と撮影画像

3. 4 模様の高さの推定手法

鉄蓋の摩耗点検は、上蓋の模様の高さを面的に計測し、部分的な摩耗領域も把握できるようにする必要がある。そのため摩耗量の推定手法においては、画像中に写る模様のエリアを細かい領域に分割し、各領域の模様高さを推定することとした。図3-4-1(a)に本手法で推定を行う模様の領域を、図3-4-1(b)にこの領域内を細かい正方形の領域に分割する方法を示す。図3-4-1(c)に部分的に模様の摩耗が進行している鉄蓋の例を示す。このように模様の摩耗は車両のタイヤが通過する位置が重点的に摩耗する場合があるため、分割する正方形の大きさは、1つの分割領域の中に模様のT字がすくなくとも1つ入るような大きさに細かく設定した。段差計測と同じ写真を用いる場合、分割領域の1辺が50画素となる。

摩耗が進行した鉄蓋の模様は、T字模様の角が丸みを帯びる傾向があるため、段差のように模様の側面の影量の大きさが模様高さの大きさとは限らない。そこで、本手法では、模様角の丸みや影量の状況等の複合的な要因を考慮するために、画像の特徴抽出によるデータベースを作成し、そのデータベースを参照することで未知の模様高さである画像を推定する手法を選択した。

本推定手法における模様高さの推定手順を以下に示す。データベースを作成した後に、3ステップで模様高さの推定と部分的な摩耗領域の把握を行っている。

- 事前作業：摩耗の進行度が異なる鉄蓋の模様高さと、それらの模様のLBP (Local Binary Pattern) 特徴量をセットにし、データベースを作成する。
- ステップ1：摩耗推定の対象となる鉄蓋の領域検知結果から模様の領域を自動抽出し、模様領域を一辺が50画素の領域に分割する。
- ステップ2：各領域でLBP特徴量を算出し、学習データベースの中から近傍の特徴量を選び出し、各領域の模様高さを推定する。
- ステップ3：模様領域を中心から放射状に16エリアの領域に区切り、ステップ2で推定した結果から各エリアにおける平均模様高さを推定する。

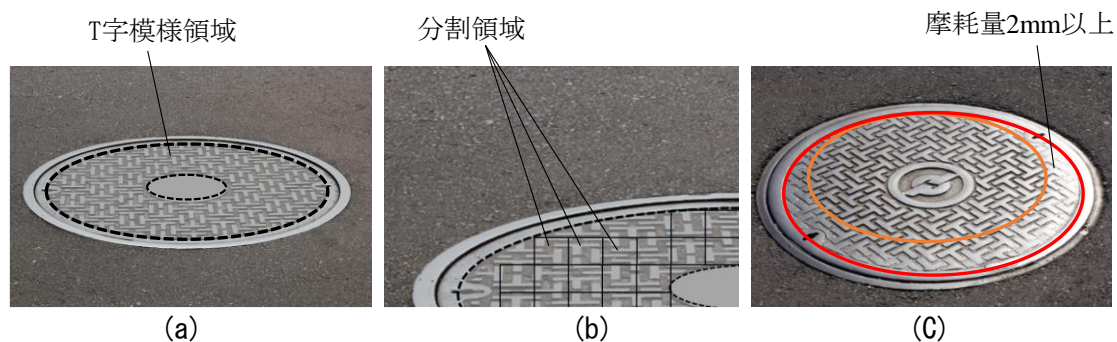


図 3-4-1 (a) 摩耗推定の対象となる模様領域, (b) 模様領域の分割, (c) 部分的に摩耗が進行している鉄蓋

なお、摩耗の推定手法で用いる撮影画像は、段差の計測手法と同一の撮影画像であり、256階調のグレースケールイメージである。摩耗の推定手法に用いる画像特徴の算出には、照明不変性を特徴とするLBPに対して、一定のパターンを持つ対象における回転不変性を付加したrotated LBPを用いている点であり、LBPと比較して様々な方向から撮影された鉄蓋画像に対しても頑健に画像特徴を抽出できる点である³⁻⁴⁻¹。また、局所領域の変化量を見るため、図3-4-1(b)に示したような分割領域における特徴量を捉えることが可能であると考えた。

(1) 事前作業：rotated LBP 特徴を用いたデータベース作成

ステップ2において、様々な摩耗進行度を推定できるようにするために、データベースは模様高さが新品の約4 mmに近いものから1 mm以下の著しく摩耗が進行したもので網羅しなければならない。そこでデータベースの作成では、はじめに174カ所の様々な模様高さの鉄蓋を距離3 m～6.5 mで撮影し、撮影した鉄蓋の模様高さ5カ所をノギスで計測した。つぎに、撮影画像を256階調のグレースケール画像に変換し、図3-4-1(b)のように、画像の模様領域を一辺が50画素の正方形領域に分割し、この分割画像の中からノギスによる計測地点の近傍のものを15～20個選択した。

最後に選択した各分割領域をrotated LBPで画像特徴を抽出し、抽出された画像特徴とその分割領域に対応する模様高さの値を合わせて、データベースに登録した。式(3-4-1)に、rotated LBPによる画像特徴の抽出方法を示す。

$$LBP_{N,R} = \min_{0 \leq d < N} \left(\sum_{l=0}^{N-1} s(g_l - g_c) \times 2^{[(l+d) \bmod N]} \right),$$

$$s(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (3-4-1)$$

ここで、 g_c は注目画素の輝度値、 g_l は参照画素の輝度値を示す。 N, R は参照点数と半径を示し、参照画素 g_l は半径 R の円周上を N 点に分割した画素として取得する。分割領域内の全画素についてrotated LBPを用いてラスタスキャンすることによって画像特徴を算出し、ヒストグラム化したものをLBP特徴ヒストグラムとする。図3-4-2に本

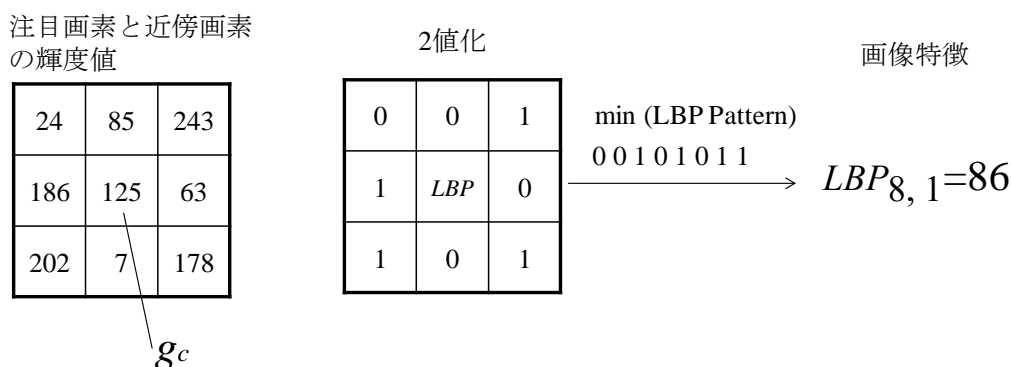


図 3-4-2 rotated LBP の計算例

研究で用いた半径 $R=1$ 、 $N=8$ とした際の1画素におけるrotated LBPの計算例を示す。

図 3-4-3 にデータベースへ登録したデータ数をノギスによる計測値別に分類したグラフを示す。ノギスによる平均模様高さが 0.5 mm 未満の鉄蓋が少ない理由は、模様高さが平均的に 0.5 mm 未満に摩耗している現存鉄蓋が少ないことから、データベースの量も少なくなっている。また、LBP 特徴抽出の結果、鉄蓋の撮影時の天候は、晴れや薄曇りなどの照度が十分確保できる天候とした。この理由としては、曇天や夕刻など、照度が十分確保できない天候で画像を撮影すると、LBP 特徴が十分に抽出できなかったためである。また、鉄蓋に雨や雪等が付着した場合、それらの水滴や氷がノイズとなって画像特徴が変化するため、雨や雪などで鉄蓋がぬれている場合も除外としている。データベースへ登録数は合計で 14,950 個となった。

(2) ステップ1及びステップ2：模様領域の分割と各分割領域における模様高さの推定

3章2節で示した鉄蓋の領域検知の結果を用いて、鉄蓋の模様領域を抽出する。鉄蓋表面の図柄は規格化されているため、鉄蓋の上下左右端が検知できれば、T字の模様領域を抽出することができる。模様領域が抽出されたのちは、図3-4-1(b)に示したように模様領域を分割する。分割領域の大きさは、データベースに登録した大きさと同じにするため、1枚の撮影画像の模様領域がおおよそ70~90分割される。各分割領域において、図3-4-2に示したrotated LBPを用いてLBP特徴ヒストグラムを算出する。その後、学習データベースの中から、各分割領域において算出された特徴ヒストグラムに最も近い特徴ヒストグラムを複数選び、それらの紐づけられている模様高さの平均を取って推定値とする。近傍の特徴ヒストグラムの選ぶ数については、データベースの規模によって最適値は異なるが、本手法では5個の近傍ヒストグラムを選定することとした。データベースから近傍のヒストグラムを選択する方法は、パターン認識において一般的に用いられるk近傍法³⁻²⁻¹⁾を用いた。

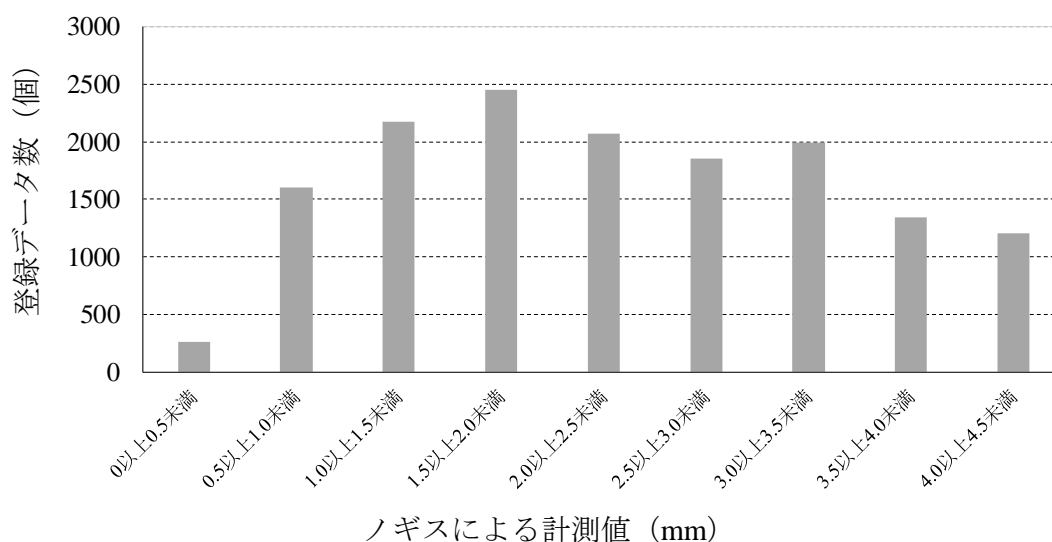


図 3-4-3 計測高さ別におけるデータベースへの登録数

(3) ステップ3：部分摩耗の推定

鉄蓋の摩耗点検には，部分的に摩耗が進行した領域の把握も必要となるため，**図 3-4-4** に示すように鉄蓋を中心から放射状に 16 エリアの領域に区切り，各エリアで摩耗の進行度を推定する．各エリアにおいて，ステップ 2 で算出した分割領域の模様高さの推定値を平均化することによって，その平均値を各エリアの平均模様高さとして定義する．

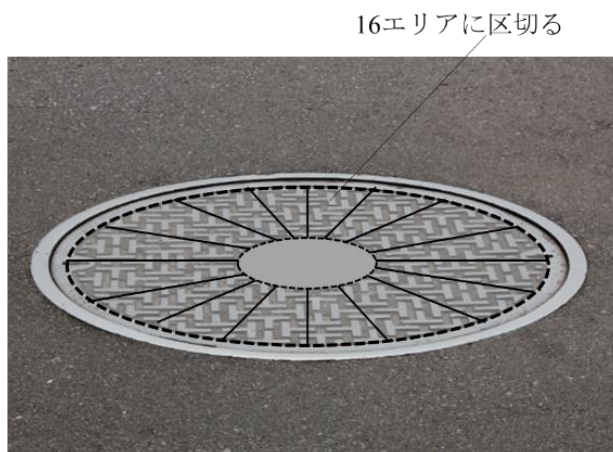


図 3-4-4 16 エリアへの模様領域分

3. 5 摩耗の推定手法の検証および考察

3. 5. 1 検証方法

現場に設置されている 18 カ所の鉄蓋を用いて、上蓋模様の摩耗の推定手法の検証を実施した。表 3-5-1 に検証方法を示す。撮影の条件は、鉄蓋から 3 m～6.5 m、高さ約 1.4 m の位置から鉄蓋の撮影を行った。撮影に用いたカメラは、約 1800 万画素の一眼レフのデジタルカメラである。撮影の天候条件は晴れや薄曇りのように十分に照度を確保し、曇天や雨や雪等は除外した。撮影後に、鉄蓋の模様領域を中心から放射線状に 16 エリアに区切り、ノギスを用いて模様高さを計測し、各エリアの平均模様高さを定めた。

表 3-5-1 検証方法

条件項目	仕様
検証対象	現場設置の18カ所
ノギスによる計測方法	鉄蓋の模様領域を16エリア/カ所に分割し、各エリアの模様の摩耗量を計測(3名の作業員にて実施)
撮影距離	3～6.5 m
撮影高さ	約1.4 m
撮影機材	一眼レフデジタルカメラ
照明	斜光/逆光
天候	晴/曇

3. 5. 2 結果と考察

図 3-5-1 に本手法で推定した 18 カ所の鉄蓋から取得した合計 280 エリアの平均模様高さの推定値と、その各エリアに対応するノギスによる平均模様高さの計測値の散布図を示す。散布図において、ノギスによる計測値から 2 章 1 節 5 項にて定義した劣化ランク(図 2-1-15)毎に分類を行っている。取得したエリア数が少なくなった理由は、鉄蓋の模様領域にセメント等が付着し、ノギスにより模様高さが計測できなかったエリアを除外したためである。ノギス計測による平均値を $x(\text{mm})$ 、提案手法による推定値 $y(\text{mm})$ とした場合、近似直線の勾配は 0.83 であり、両者の相関係数は 0.82 であり、相関が確認できた。また、本検証から、提案手法における 2.00 mm 以下の計測値は、補修対象となるノギスによる計測の 2.00 mm 以下を漏れなく含んでおり、補修対象となる鉄蓋を検出できることを確認した。

また、表 3-5-2 に 4 段階の劣化ランク毎の計測値の差の平均値 \bar{x} (提案手法の計測値からノギスの計測値を引いた値) と標準偏差の結果を示す。標準偏差は式(3-5-1)にて定義する。

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-5-1)$$

ここで、 n はデータの総数、 x_i は提案手法の計測値からノギスの計測値を引いた値、 \bar{x} は x_i の平均値である。表 3-5-2 において、280 エリアにおける提案手法の推定値とノギスの計測値の差は -0.44 mm であり、提案手法の方が、値が小さくなる傾向であることがわかった。標準偏差は 0.45 mm でありノギスの計測値を基準とした際の提案手法の推定値のバラツキ（標準偏差）の範囲は、 -0.89 mm から 0.01 mm であった。この結果から、提

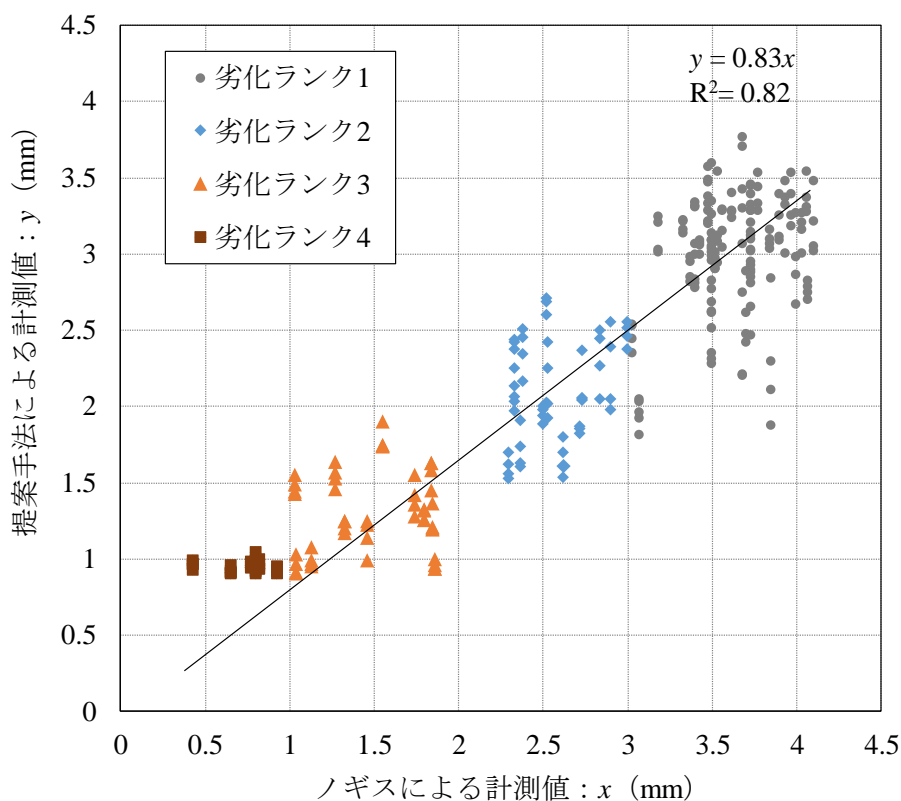


図 3-5-1 提案手法とノギスによる計測値の比較割の様子

表 3-5-2 劣化ランク毎のノギスにより計測した摩耗量と提案手法で推定した摩耗量の比較

劣化ランク	1	2	3	4	Total
模様高さ	3 mmより大きい 4 mm以下	2 mmより大きい 3 mm以下	1 mmより大きい 2 mm以下	1 mm以下	-
(摩耗量)	(0 mm以上 1 mm未満)	(1 mm以上 2 mm未満)	(2 mm以上 3 mm未満)	(3 mm以上)	
エリア数	153エリア	55エリア	48エリア	24エリア	280エリア
提案手法－ ノギス計測の差 (平均値)	-0.62 mm	-0.47 mm	-0.19 mm	0.22 mm	-0.44 mm
標準偏差	0.39 mm	0.33 mm	0.38 mm	0.17 mm	0.45 mm

案手法はノギス計測に対して最大 0.89 mm でバラツキが発生することがわかった。この値は 1.00 mm 未満であることから、ノギスと同程度の計測精度であると考えられる。劣化ランク別にみると、ノギスの計測値を基準とした際の提案手法のバラツキ(標準偏差)の範囲は、劣化ランク 1 では-1.01 mm から-0.23 mm, 劣化ランク 2 では-0.80 mm から-0.14 mm, 劣化ランク 3 では-0.57 mm から 0.19 mm, 劣化ランク 4 では 0.05mm から 0.39 mm となり、劣化ランク 1 ではノギス計測との誤差の最大量が 1.00 mm を超えることとなったが、劣化ランク 2, 3, 4 と進むと誤差の最大量は 1.00 mm 未満になることがわかった。また、劣化ランクが進むと誤差の最大量が小さくなり、精度が向上することが確認できた。





図 3-5-2 と図 3-5-3 に各劣化ランクにおいて、ノギスによる計測値と提案手法による計測値の差が小さかった画像と大きかった画像を示す。図 3-5-2 (a)劣化ランク 1 を見ると差が大きい上蓋模様の画像は、画像全体の照度が小さく模様の側面の陰影部が画像中に濃く写っていない、かつ画像全体のコントラストが小さい。同様の傾向は、図 3-5-2 (b)劣化ランク 2 でも確認でき、差が大きい画像は画像全体のコントラストが低い。これらの画像特徴は、図 3-5-3 (a)劣化ランク 3 に示す摩耗した模様に画像の見え方が近く、本手法では模様の側面の陰影のコントラストが重要であることがわかった。このことから、鉄蓋の撮影時には、曇天や早朝や夕刻といった屋外の照度が低い状態での撮影を避けることが重要である。図 3-5-3 (a)劣化ランク 3 まで摩耗が進むと、模様の側面がほとんど確認できないうえ、T 字の角が鈍っている。計測差が大きい画像と小さい画像において画像特徴の違いが撮影画像からはほとんどわからない。計測差が大きい画像においては、僅かに鉄蓋の受枠付近の模様が強く、この周辺の模様の高さをノギスで測ったため、ノギス計測の方が大きくなったと考えられる。図 3-5-3 (b)劣化ランク 4 では、T 字模様が画像から確認できないほど摩耗が進行し模様の側面がないため、照度の影響を受けにくくばらつきが最も小さくなったと考えられる。

以上のことから、提案手法についてまとめる。





本検証から、劣化ランク 2 以降ではノギス計測との差および標準偏差は 1.00 mm 未満、かつノギス計測を基準とした際のバラツキの最大量は 1.00 mm 未満であるため、高い精度で上蓋模様の模様高さを検出可能であり、実地で活用可能であると考えられる。

ただし、本検証を通じてノギスとの計測誤差が大きくなる発生してしまうケースがあったため、以下の項目を考慮して運用すれば、精度が担保できると考えられる。

- ・ 撮影時の照明条件：上蓋模様の側面の陰影が写りにくく、かつ画像のコントラストが低下する曇天や早朝や夕刻といった照度が低い時間帯を避ける。
- ・ 撮影画像の枚数：標準偏差におけるバラツキの精度評価であることから、計測値の信頼性を向上するために、鉄蓋 1 カ所において、複数枚の画像を撮影し上蓋模様の計測を行う。


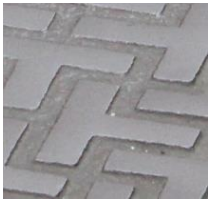


計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	3.53 mm	3.54 mm	3.48 mm	3.49 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	3.85 mm	1.88 mm	3.85 mm	2.31 mm
撮影画像					

(a) 劣化ランク 1

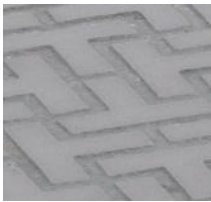



計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	2.52 mm	2.60 mm	2.33 mm	2.26 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	2.26 mm	1.64 mm	2.62 mm	1.60 mm
撮影画像					

(b) 劣化ランク 2

図 3-5-2 各劣化ランクにおける偏差値と撮影画像

計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	1.13 mm	1.08 mm	1.04 mm	1.03 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	1.86 mm	0.94 mm	1.86 mm	0.95 mm
撮影画像					

(a) 劣化ランク 3

計測差が小さい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	0.93 mm	0.93 mm	0.93 mm	0.93 mm
撮影画像					
計測差が大きい鉄蓋					
ノギス値	提案手法	0.43 mm	0.99 mm	0.43 mm	0.98 mm
撮影画像					

(b) 劣化ランク 4

図 3-5-3 各劣化ランクにおける偏差値と撮影画像

3. 6 認識性を向上した鉄蓋模様と画像認識手法の提案

3. 6. 1 画像認識による摩耗量の推定手法の課題

摩耗量の推定手法では、画像の撮影時における照度が重要であることがわかった。劣化ランクが進んでいない鉄蓋でも、照度が足りないと模様の側面の陰影が十分に画像中に現れず、劣化ランクが進んだ鉄蓋の画像と見え方が近くなり、推定値の誤差が大きくなることわかった。また、摩耗が進んだ鉄蓋はスリップの危険性が高いため、点検で見つかった場合には即撤去対象となる。すなわち、学習データベースの構築において、模様高さ 2 mm 未満の鉄蓋の学習画像を十分に集めることが難しい。

そこで、本節では照度に影響されず、さらに学習データベースを用いなくても、補修基準に達した状態が判定しやすい模様形状と形状変化を捉える画像認識手法を提案する。さらに、本論文における摩耗量の推定手法は画角一杯に鉄蓋を撮影する必要があるが、5章にて提案するような UAV を用いて鉄蓋を撮影する際にカメラ画角一杯に撮影しようとする、UAV 制御に制約を受けるため、画角一杯に鉄蓋が写らないような一画素当たりの実サイズが荒い（低分解能）画像からでも摩耗判定が可能な模様形状を目指す。

3. 6. 2 模様のデザイン

(1) デザインの設計方針

模様のデザインを行う際には、鉄蓋模様の機能として必要なすべり抵抗性の確保と経済的な維持管理のための耐摩耗性の向上が必須となる。その上で、画像認識による点検手法への有効性の向上を行う。よって、

- ・ すべり抵抗性の確保
- ・ 模様の摩耗耐久性向上
- ・ 学習データベースが不要、かつ低分解能の画像から摩耗判定が可能

という三つの観点からデザインを検討することとした。

はじめに、すべり抵抗性に関して、舗装路面の摩擦係数の条件はさまざま提案されているが、本論文では、下水道用マンホールふたの維持管理マニュアルにおいてマンホールふたの動的摩擦係数の目安とされている 0.40 以上を基準として用いることとした²⁻¹⁹⁾。そのため、鉄蓋は現場設置直後の新品状態から摩耗が進行した更改基準まで 0.40 以上の動的摩擦係数を維持するようなデザインが望まれる。このような条件を満たす模様は数多くデザインできるが、井上らは、すべり抵抗性を大きくするためには、模様の凸部を形成するデザインは、連なっていない独立した小突起を配置することが有効であることを示している³⁻⁶⁻¹⁾。各小突起の大きさは小さく、かつ配置間隔は密になるほどすべり抵抗係数は大きくなるが、極端に密になると小突起が一つの集合体としての連続した

デザインになってしまい動的摩擦係数が小さくなる可能性があるため、小突起の大きさや配置を調整することが重要であるとしている。しかし、デザイン数が無数に考えられることから、すべり抵抗に効果的な突起の大きさや配置間隔等のデザイン方法は示していない。そこで、我々は、新しい模様のデザインはすべり抵抗の観点から効果が望める独立した小突起を採用した上で、有効な突起の大きさや配置間隔を検討するために凹凸模様の配置密度を指標として、この密度がすべり抵抗値へ与える影響を検証することとした。

次に、模様の摩耗耐久性に関して、模様の摩耗は、鉄蓋上に付着した小石や砂利等の異物が鉄蓋表面上でヤスリのように働くことで進行するため、模様のデザインは入り組んだ構造ではなく、鉄蓋上から異物が排除されやすいように配置することが有効であるとされている³⁻⁶⁻²⁾。そこで、鉄蓋の表面形状は、中心から外側に向かって下り勾配を設け、突起は異物が鉄蓋上から外側に排除されるような動線が形成されるように一定の間隔をあけて配置することにした。また、異物の排出には、突起はできるだけ小さくかつ広い間隔をあけて配置すれば良い。しかし、各突起が小さく、設置間隔が広くなれば模様の表面における単位面積あたりの車両の積載荷重が大きくなるため、突起の摩耗速度が速くなるという課題が考えられる。そこで、砂が排出しやすいようなデザインの有効性の確認と模様の表面積の密度と摩耗速度の影響について検証することとした。

最後に、画像点検への有効性に関して、学習データベースを用いずに低分解能な画像でも判定できる模様について検討する。通信の鉄蓋は、残存する模様高さが2 mm未満の状態を更改の目安としている。そのため、点検ではmm単位以下の精度で模様高さを計測することが求められる。1 mm以下の精度担保するためには、サブミリメートルの分解能で計測を行う必要があるため、画像点検においても同様にサブミリメートルでの計測分解能を実現する必要がある。しかしながら、この分解能で計測するためには、1800万画素以上の高解像度の一眼レフデジタルカメラを用いて画角一杯に鉄蓋を収めなくてはならないため、撮影機材や撮影方法の簡略化を行うためには、模様高さの計測以外で摩耗量の状態を判断できる模様が必要となる。そこで、鉄蓋の模様には、健全状態と取り替えが必要な程度まで摩耗した状態とで画像特徴が大きく変化する突起形状が有効であると考えた。これにより、画像から微少な変化となる残存模様高さを捉える必要性がなくなるため荒い分解能の画像でも摩耗状態の判定が可能となると考えられる。さらに、画像から検知する形状をあらかじめ設定できるため学習データベースも不要と考えられる。これを実現する模様の形状として、突起の1段目を正六角柱、2段目を正四角柱とした2階建の構造を候補として、突起表面の多角形を画像解析で判定できるか検証を行うこととした。正六角柱と正四角柱を選択した理由として、一つ目に、鉄蓋は、表面上のどの位置でも一様なすべり抵抗性を求められるため、突起の表面形状は規則的なデザインが容易に可能となる点对称の図形を優先した。二つ目に、画像解析において特徴量を抽出しやすいように頂点を有する多角形を用いて、多角形の辺数を画像

から捕え易くするために、辺の長さが長くなる少ない辺数の図形とした。

また、低分解能で撮影した画像からでも突起形状を把握できるように突起の1辺を少なくとも10 mm程度の大きさとした。

(2) 検証用に作製した模様パターン

すべり抵抗性と耐久性に有効な突起の大きさや配置の検証を行うために、複数の模様パターンの鉄蓋を作製した。突起の基本構造を図3-6-1、突起の大きさや配置間隔を変更した模様パターンを表3-6-1、鉄蓋全体への模様配置の様子を図3-6-2に示す。図3-6-1に示すように、突起は正六角柱と正四角柱の中心を合わせて2階建に積み上げる構造である。突起の摩耗が進行すると2階建部の正四角柱が削れて、1階の正六角柱が模様の表面に現れるため、表面模様に正六角柱が現れたタイミングが取り替えを必要とするまで摩耗した状態のサインとなる。この取り替えが必要となる状態を本項では、摩耗状態と定義する。模様の高さは現在設置されている下水道マンホールの模様高さを参考として4 mmとした。取り替えの基準となる正六角柱の高さを2 mmとした理由は、摩耗の進行速度が速い0.3 mm/年の箇所でも、鉄蓋の点検周期である5年以上は凹凸の機能が持続できるようにするためである^{2-1-6, 2-1-7}。この突起を用いた模様パターンは表3-6-1に示すように、模様に用いている突起が単一の場合はSingle (S)型とし、複数の場合はMix (M)型とした。S型に用いている突起は、すべて図3-6-1に示した2階建構造となっており、M型は、図3-6-1に示した突起と2階建部に用いた正四角柱のみの突起を一定間隔で配置している。M型を作製した理由は、S型は摩耗状態時に表面積比が高くなってしまうため、四角柱を混ぜることによって表面積比の上昇を抑えることを目的としている。表面積比とは、突起が設置されている一定の面積における突起の最上面積の割合のことで、突起の大きさと配置間隔の密度を把握する指標として用いる。表面積比を指標とした理由は、突起の大きさと配置間隔の組み合わせでは膨大なパターンが発生するため、この二つから算出される一定面積における配置密度に着目して動的摩擦

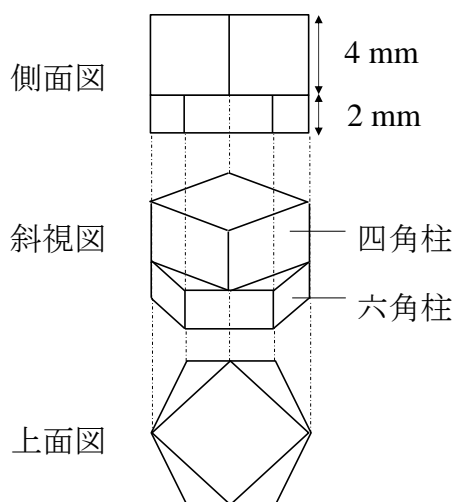


図 3-6-1 模様を用いる突起の基本構造

係数と模様の耐久性に有効なデザインを評価するためである。ここでは、凡例に示すとおり、一辺が突起5個分で形成する正三角形の面積を突起の最上面積で割った比率であり、初期時と2階建部が削れて1階建部のみとなる摩耗状態時の比率を記載している。S型とM型における1と2の違いは突起の大きさであり、2は1に比べて、一辺が大きい突起を用いている。M3型は、M2型の突起と同様の大きさであるが、突起の配置間

表 3-6-1 模様のパターン

名称	S1型		S2型		M1型		M2型		M3型	
突起構造	突起の形状：上面図 (mm)		突起の形状：上面図 (mm)		突起の形状：上面図 (mm)		突起の形状：上面図 (mm)		突起の形状：上面図 (mm)	
	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態
突起の表面積	289 mm ²	499 mm ²	400 mm ²	728 mm ²	169 mm ²	313 mm ²	256 mm ²	458 mm ²	256 mm ²	458 mm ²
突起配置	突起の配置図：上面図 (mm)		突起の配置図：上面図 (mm)		突起の配置図：上面図 (mm)		突起の配置図：上面図 (mm)		突起の配置図：上面図 (mm)	
配置間隔	35 mm		35 mm		35 mm		35 mm		39 mm	
表面積比	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態	新品状態	摩耗状態
	27.2%	47.0%	37.6%	68.7%	15.8%	21.5%	24.0%	31.8%	19.4%	25.6%

凡例：表面積比の算出方法

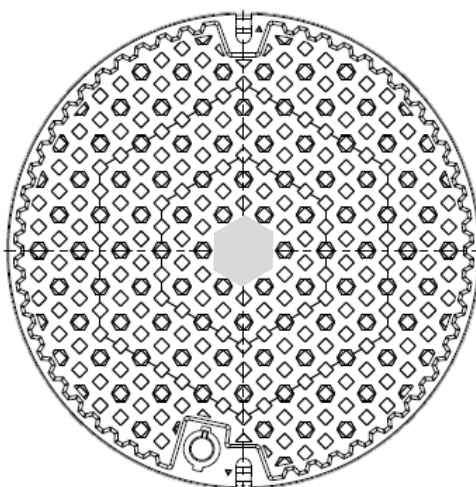
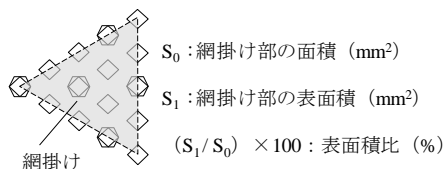


図 3-6-2 鉄蓋の全体図 (M3 型)

隔が広い特徴がある。配置間隔は、鉄蓋の直上を自転車等の細いタイヤが通過することを想定し、凹凸の隙間が 2 cm 以上空かないように設計した。この模様パターンに従った鉄蓋全体への配置の様子 (M3 型の例) は、**図 3-6-2** であり、各突起は全面に均一に設置し、鉄蓋の表面は中央から円周方向に微少な下り勾配を設ける。これは、耐久性の観点から摩耗の原因となる砂利等の異物が鉄蓋の外部に排出されやすいように設計することが有効であるとされているためである。これらの模様パターンの鉄蓋を用いて、すべり抵抗性の確保、摩耗耐久性の向上、画像解析の有効性の検証を行った。

本項では、画像解析の有効性に関して記載し、すべり抵抗性および摩耗耐久性の検証結果は、**付録 1** に記載する。

3. 6. 3 画像認識を用いた模様の摩耗認識手法

提案する S 型と M 型の模様は、低分解能の画像からでも模様の状態を判定できるように新品時には表面が正四角形で覆われており、模様高さが一定値を下回ると表面の突起形状に正六角形が現れるようにデザインした。そのため、表面模様の多角形状を認識する手法が必要となる。

突起形状の認識の際に重要なポイントとなる鉄蓋の撮影方法と照明条件は、本章にて提案した段差量の計測手法と摩耗量の推定手法の検証時と同様とし、鉄蓋から一定の仰角で撮影すること、および一定の照度が確保される晴れや曇りの天候下において、突起の側面等に一定量の影が発生するように逆光および斜光で撮影を行うこととする。雨、雪、霧等の影ができない環境下や、鉄蓋の一部に人や物等の他の影が入り込んでしまうといった模様の一部の明るさが極度に变化してしまう条件は適用除外とする。

これらの条件を踏まえ、以下に模様領域から摩耗を認識する手法についての手順を示す。

- ステップ 1：模様領域から突起の最上面となる画素を抽出する。
- ステップ 2：模様表面の多角形状を判定する。

なお、解析に用いる画像は事前処理として、鉄蓋の模様の領域を特定したのち、画像を 256 階調のグレースケールイメージへ変換しものとする³⁻²⁻¹⁾。

(1) ステップ 1：k-means クラスタリングを用いた模様の表面画素の抽出

撮影画像における鉄蓋模様の最上面に相当する画素の抽出は、輝度値を用いることが有効であると考えられる。**図 3-6-3(a)** は新品状態の突起、**図 3-6-3(b)** は模様高さ 2 mm 時の摩耗状態の突起であり、それぞれの撮影画像と輝度値ヒストグラムを示す。ヒストグラムの横軸は画素の輝度値の階調であり、数値が大きいほど画素は明るくなり、数値が小さいほど暗くなる。縦軸は画素の個数である。**図 3-6-3** の撮影画像に示すように、凸部になっている突起の表面にあたる最上面は光を最も反射しやすいうえ、鉄蓋直上を通行するタイヤによる研磨で光沢が生じて、輝度値が他の画素より高くなる。反対に模様の側面は、影が発生し画素が暗くなる。そして、模様の最低面にあたる凹部等は表面

と側面の中間の明るさとなる傾向がある．ヒストグラムにおいては，**図 3-6-3(a)**は階調の大きい方から最上面，底面，側面と思われる3つの山が生じており，**図 3-6-3(b)**は階調の高い方から表面，底面の2つの大きな山が生じたのち，階調の小さい場所では摩耗により模様高さの画素数が減少した側面の小さな山が生じていると考えられる．このことから，一定値より大きい階調の高い場所を二値化処理によって抽出することによって最上面を検出できると考えられるが，鉄蓋の設置位置は屋外であることから，撮影画像の輝度値が様々に変化するため，二値化処理の閾値を定めることが難しいという問題がある．そこで，本論文では，非階層型クラスタリング手法である **k-means** クラスタリングによる分類を検討する．非階層型クラスタリングは，事前に指定したクラス数に集合データを分類することから，鉄蓋の模様は凹凸構造となっていることから最上面，底面，側面毎に輝度値が集合としてまとまる特徴があるため，表面画素の抽出に有効に働くと考えられる．次の式(3-6-1)に **k-means** 法によるクラスタリング方法を示す．

$$\operatorname{argmin}_{V_1, \dots, V_k} \sum_j \min |x_i - V_j|^2 \quad (3-6-1)$$

ここで， x は撮影画像の各画素 i における輝度値を表しており， V_j はクラスタ j にお

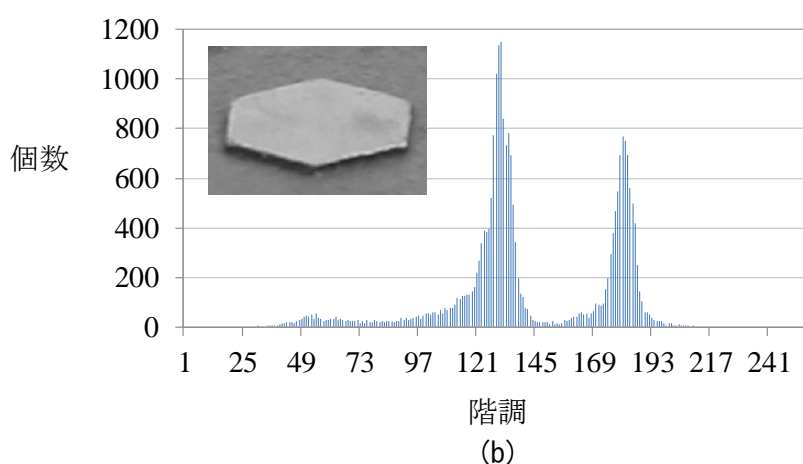
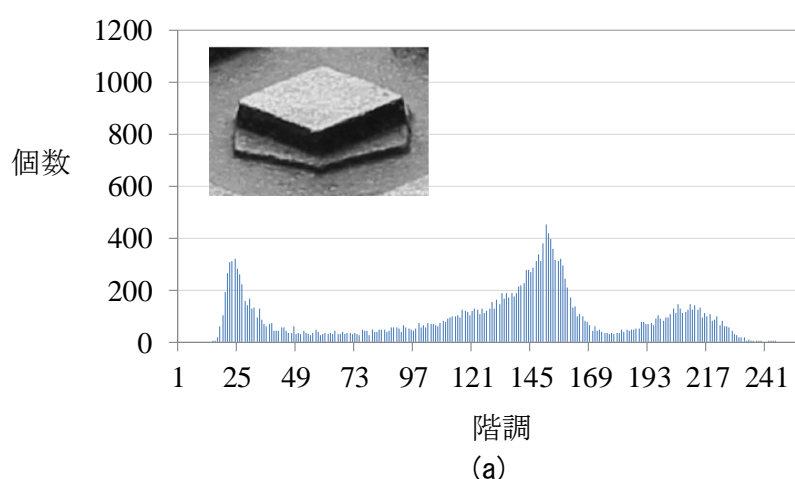
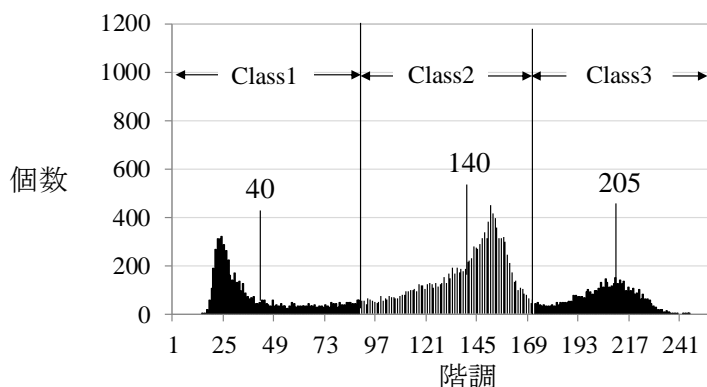


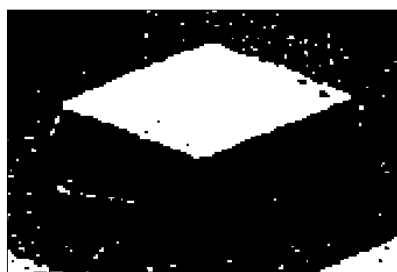
図 3-6-3 突起の撮影画像と輝度値ヒストグラム，(a) 新品状態，(b) 摩耗状態

る輝度値の重心値を示している。jは最上面，側面，底面の3つのクラスタに分類するため，1～3の値となる。

式(3-6-1)を用いて，図 3-6-3(a)の新品状態の突起画像の輝度値をクラスタリングした結果を図 3-6-4 に示す。図 3-6-4(a)は，輝度値ヒストグラムをクラスタリングした結果であり，各クラスの範囲と重心となる階調の数値を記載している。図 3-6-4(b)は，Class3 に該当する画素を白で，それ以外の Class を黒で塗りつぶした結果である。突起の最上面が大きな集合体の四角形として表れていることがわかる。小さな点や画像の下左右端にある他の突起の最上面を削除すれば，突起の最上部の画素の抽出が実施できる。



(a) 新品状態の突起の輝度値ヒストグラムのクラスタリング結果



(b) 新品状態の突起画像の表面抽出結果

図 3-6-4 新品状態の突起の画像のクラスタリングと表面抽出の結果

(2) ステップ 2 : Hough 変換を用いた多角形の辺数検出

模様表面の多角形を特定するためのパターン認識は，テンプレートマッチング法や画像特徴量抽出による認識の方法がある。認識を行いたい表面模様は，撮影角度により多角形が扁平して写るため，扁平，回転，スケール変化等の画像変形にロバストな画像特徴量を抽出する方法が効果的であると考えられる。特徴量抽出による認識には大きく分けて大局視覚的な認識と局所視覚的な認識がある。鉄蓋の表面模様は，直上を走行する車両により模様角の鈍りが発生する。また本ケースの場合には，鉄蓋上の異物や光の影響で表面形状の抽出が不完全なため，大局的な特徴を捉えて認識する手法が有効であると提案されている³⁻⁶⁻³⁾。そこで，本論文では大局的な認識手法のひとつである Hough 変換を用いた手法を採用した。Hough 変換は，一部の図形の隠蔽や特徴の不完全性があつ

たとしても大局的な情報からの補完が可能となる。表面模様では多角形の輪郭を形成するエッジ点群から Hough 変換による直線の認識を行い、辺数を数えることによって多角形状の認識を実施することとした。これは、幾何学的な形状となる直線の検知を行うため、画像特徴量を用いた認識における事前のデータベース構築作業が不要という大きなメリットがある。

図 3-6-5 は図 3-6-4 (b) に対して不要な画素の削除を行い、突起を一つだけ画像中に残した結果である。図 3-6-5 (b) は模様輪郭を抽出するために、エッジ検出処理を行った結果であり、白い画素がエッジとして検出されている。図 3-6-5 (b) において、画像の左下端を原点 O として、水平右方向へ正の x 軸、鉛直下方向へ正の y 軸と定義し画素 (x_0, y_0) を通過する直線と垂直に交わる直線の長さを ρ 、 x 軸と直線とのなす角を θ とすると、図 3-6-5 (b) における任意の画素 (x_0, y_0) を通過する直線は、式(3-6-2)のような Hough 曲線として表現することが可能となる。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (3-6-2)$$

ここで、 ρ は正の x 軸領域では正として、 θ は正の x 軸から時計回りに正とする。

この Hough 曲線を用いて、図中に存在する直線の本数の検知を行う。図 3-6-6 は、図 3-6-5 (b) のエッジが検出された各画素における Hough 曲線を (ρ, θ) 座標系に変換したヒストグラムである。図中が白くなるほど、重なっている Hough 曲線の個数が多くなることから、多くのエッジ検出画素を通過する直線が存在することになる。このことから、図 3-6-6 の Hough 曲線の一定以上重なっている集合体の個数が画像中に存在する多角形の辺数となるため、模様の形状が四角形か六角形か特定できる。また、本論文で提案する模様の形状は、正四角形と正六角形であり、必ず平行な辺のペアができる図形を選定していることが工夫点になっている。これは、平行な辺は (ρ, θ) 座標系において、ほぼ同一の θ に Hough 曲線の個数が多く重なる場所が発生することになる。図 3-6-6 より、突起が正四角形の例では、75 度付近と -75 度付近で直線が重なる場所がそれぞれ

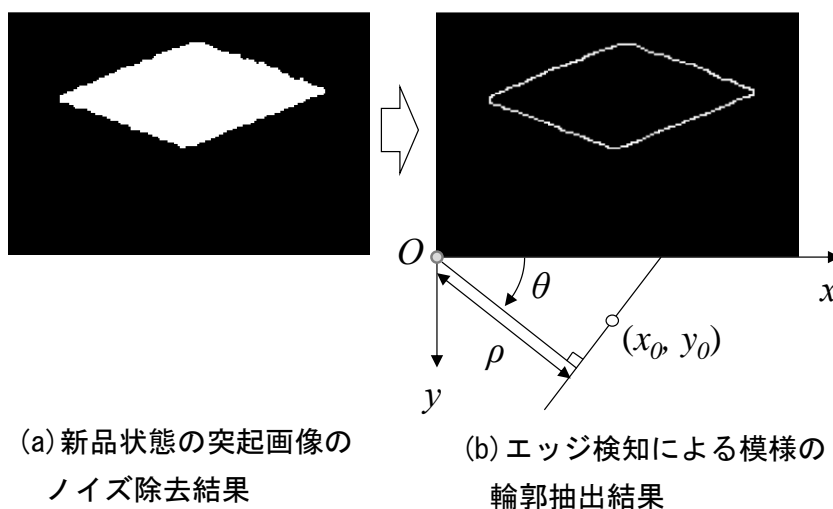


図 3-6-5 表面模様の輪郭検出

2箇所発生していることがわかる。よって、正四角形と正六角形を用いれば、 θ の値がほぼ同一の場所で Hough 曲線の重なりが 2箇所できることがわかっているため、直線の誤検知を低減することが可能となる。

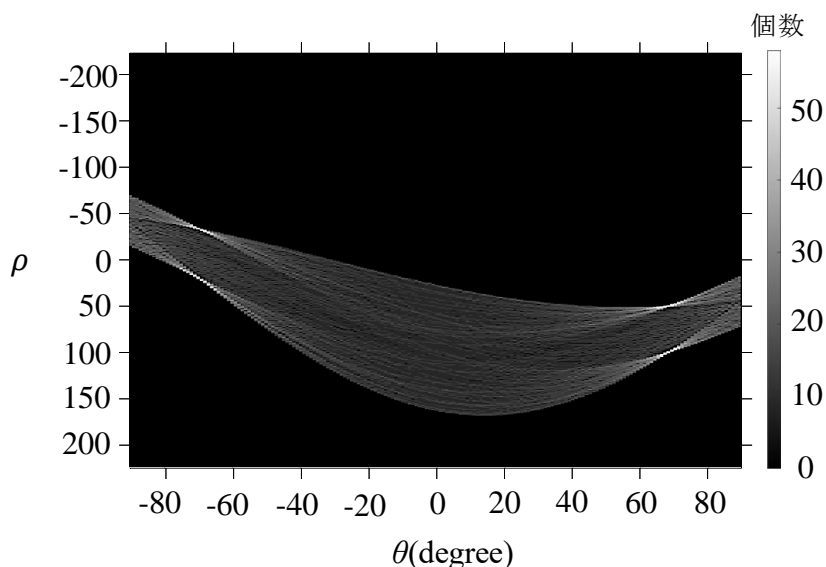


図 3-6-6 図 3-6-5 の画像から得られた Hough 曲線のヒストグラム

3. 6. 4 摩耗認識手法の検証

様々な分解能で撮影した画像から模様を認識できるかについて検証する。検証方法を表 3-6-2 に示す。模様のデザインは、M3 型を用いた。M2 型と M3 型は、すべり抵抗性が新品、摩耗状態で十分に高く、かつ耐久性も優れている。突起の大きさは同一であり、大きな違いは、M2 型の方が M3 型に比べて間隔が数ミリ狭くなっているという点である。画像処理における最上面の形状特定には、突起の辺の本数の検知を行うため、辺の長い大きい突起が有利であると考えられるが、M2 型と M3 型では、突起の大きさは同一であるため、同様の検証結果が期待される。そこで、本検証では、僅かに耐久性が良い M3 型を選択した。鉄蓋は、人工的に表面に正六角形が出現する模様高さ 2 mm まで削ったものを用意した。撮影機材は、約 1800 万画素の一眼レフデジタルカメラ、約 800 万画素のコンパクトデジタルカメラ、約 200 万画素の動画用のハイビジョンカメラの 3 種類を用意した。撮影方法は、いずれの撮影機材においても鉄蓋の外周が画角一杯に収まるように三脚に固定し、光学ズームで調整した。これは、撮影画像の画素当たりの実サイズ (mm/画素) が撮影機材の解像度に比例するようにするためである。例えば、約 1800 万画素の一眼レフデジタルカメラで鉄蓋を画像の中心に小さく撮影してしまふと低解像度のカメラで画角一杯に撮影した状態と変わらない状況となってしまうためである。また、3 種類のカメラにおいて鉄蓋の撮影方向や角度は極力変わらないように三脚は高さや設置位置を固定した。天候は、十分な照度が確保できる晴れ、照明は鉄蓋に対して斜光・逆光の条件とした。撮影した画像

は、模様判定のために表面模様部を均等に自動分割した。分割領域の大きさは、一つの領域に突起が5個以上10個未満になるように実施した。図3-6-7に撮影画像の分割の様子と模様の自動判定の検証に用いる分割領域の拡大図を示す。この分割領域には、合計8個の突起が欠けることなく収まっており、摩耗状態の表面模様は、正四角形が4個、正六角形が4個含まれる。3種類のカメラの画像において同じ位置の分割画像を用いて前項（3章6節3項）に記載した手順で画像処理を実施した。

図3-6-8は、解像度が異なる3種類のカメラで撮影した鉄蓋の模様領域の分割画像から表面画素を抽出するためのクラスタリング処理結果である。画像サイズの目安として、各画像の中央に位置する四角形の表面模様の対角線の画素数を記載している。クラスタリング結果は、最も輝度値が小さい画素をClass1として赤色、中間の輝度値のClass2は緑色、最も輝度値の高いClass3は青色で表示しており、輝度値が高いClass3に該当する模様の最上面の画素がすべてのカメラの画像から抽出されていることがわかる。これは、解像度の違いは最上面を構成する画素数に影響するが、各画素の輝度値を用いてク

表 3-6-2 検証方法

条件項目	仕様
模様デザイン	M3型
模様の状態	摩耗状態
撮影距離	3 m
撮影高さ	約1.4 m
撮影機材	約1800万画素の一眼レフデジタルカメラ、 約800万画素のコンパクトデジタルカメラ、 約200万画素のハイビジョンカメラ
天候	晴れ
照明	斜光/逆光

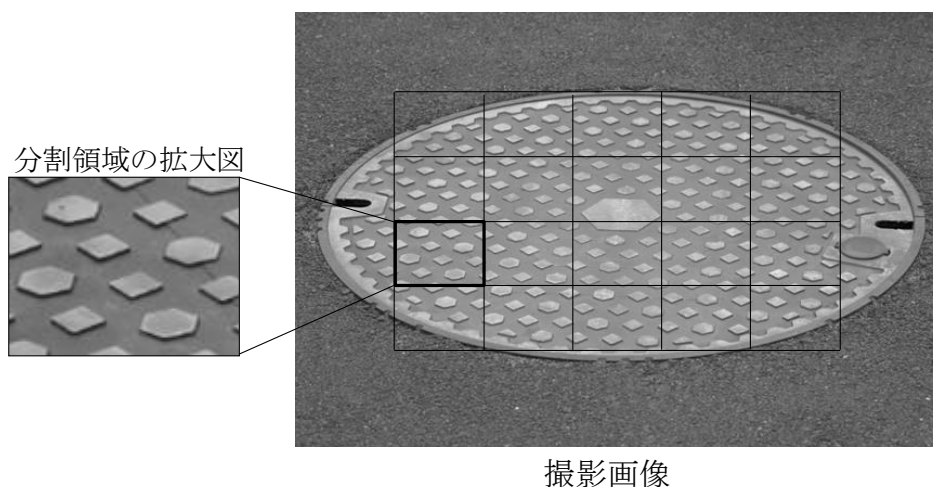


図 3-6-7 撮影画像の分割の様子と検証に用いる分割領域の拡大図

ラスタリング処理を行っているため、輝度値の大きい最上面の画素は問題なく抽出できるためと考えられる。このことから、形状検知のための最上面の画素の抽出は、カメラの解像度に影響を受けずに実施できることがわかった。クラスタリング後は、青色の画素とそれ以外の画素の二値化処理と小さなノイズや画像の外枠に接している連結画像の集合体の削除等を行い、エッジ処理により表面模様の特徴を検出する。図 3-6-9 は 1800 万画素のカメラで撮影した画像の処理結果であり、表面模様の特徴が欠けることなく検出できていることがわかる。

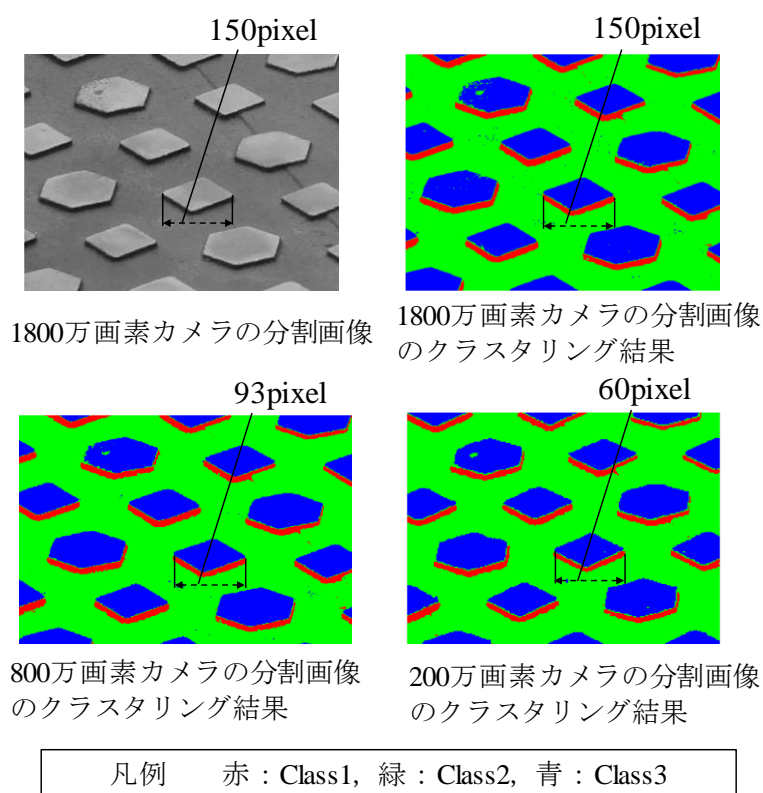
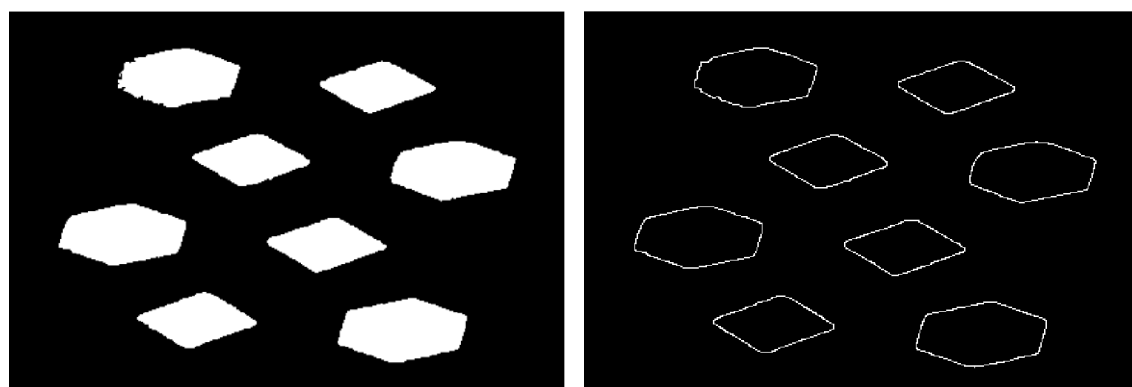


図 3-6-8 各種カメラの撮影画像のクラスタリング



(a) 表面画素の抽出

(b) エッジ処理での輪郭抽出

図 3-6-9 表面模様の特徴抽出結果

次に、エッジ処理により模様の特徴を検出した画像から各表面模様において、Hough変換を用いた辺数の検知を実施した。その検知結果とHough変換で辺数検知を行った際のパラメータ等を表3-6-3に示す。分割画像中には、四角形と六角形が4個ずつ含まれているが、3種類のすべてのカメラにおいて、全ての四角形と六角形を正しく認識することができた。辺数の検知において重要となるHough曲線ヒストグラムの閾値は、エッジ処理後の図形の1辺の長さのうち、最小値の約6割に設定した。これは、最上面模様の辺を抽出する際に、不純物や光の影響で辺のエッジが十分に抽出できないといった図形の隠蔽や特徴の不完全性を補完するためであり、閾値が大きいと直線が認識されず、小さいと図形の辺でない箇所に直線を検知してしまう。本検証では調整のうえ、約4割の余裕を閾値に持たせて処理を行った。この閾値を小さく設定した際に、間違っただころを辺として誤認識する検知例を図3-6-10に示す。本ケースは200万画素のハイビジョンカメラで撮影した六角形模様の画像において、Hough曲線のヒストグラムの閾値を5とした時に発生した。図3-6-10のように閾値を小さくすると、六角形の上下に辺を検知する誤検知が生じた。この理由は、模様の図形角が鈍り、辺とは異なる位置に直線的に画素が連続したためである。直線検知を実施するためのヒストグラムの閾値は、エッジ処理後の模様の1辺の長さを基準として設定するため、このような誤検知を防止

表 3-6-3 模様の検知結果

撮影機材	1800万画素 一眼レフデジタルカメラ	800万画素 コンパクトデジタルカメラ	200万画素 ハイビジョンカメラ
表面模様 検知結果			
四角形	4個検知	4個検知	4個検知
六角形	4個検知	4個検知	4個検知
Hough曲線の ヒストグラム閾値 (pixel)	25	13	8
エッジ処理後の四 角形1辺の長さ (pixel)	最小69-最大89	最小44-最大56	最小23-最大33
エッジ処理後の六 角形1辺の長さ (pixel)	最小41-最大79	最小21-最大50	最小12-最大28

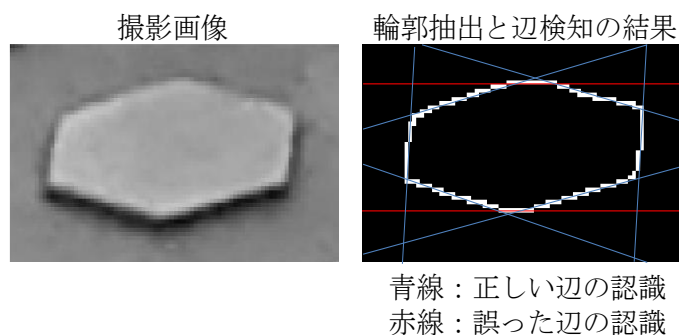


図 3-6-10 誤認識の例

するために、エッジ処理後に1辺の長さが最低でも10画素以上になるような大きさの突起を用いる必要がある。本検証時に用いた200万画素のハイビジョンカメラでは、M3型の大きさがあれば、十分に辺の検知は可能であった。

以上より、提案する模様と摩耗認識手法を用いれば、低分解能の撮影画像からでも模様形状を認識できることを確認した。本検証では、鉄蓋全体を撮影する際の画素数が200万画素程度あればデータベースを用いずに劣化判定可能であったため、従来の1800万画素の解像度のカメラを200万画素まで簡素化できることがわかった。簡素化する目安として、模様の1辺がエッジ処理後に少なくとも10画素以上確保できるように撮影すれば十分検知できことが確認され、その際の突起の大きさはM3型以上であれば確保できることがわかった。

本結果より、提案した模様は**2章1節3項**に述べたように2018年からテーパダイア型として通信用鉄蓋の上蓋模様として採用されている。

3. 7 まとめ

本章では、鉄蓋の段差量の計測手法、表面模様 of 摩耗量の推定手法、および視認性を向上した鉄蓋模様と模様の認識手法の提案を行った。

はじめに、段差量の計測手法において得られた知見を示す。

- 段差部の画像特徴である一定の陰影幅と連続する円弧形状の物体に対して強く反応するフィルタを用いれば、段差箇所以外の不要なエッジの検出を抑制し、段差箇所のエッジの検出が可能であることがわかった。
- 123カ所の鉄蓋において、段差量のノギスによる計測と提案手法による計測の比較検証を実施した。両者の相関係数は0.79となり相関が確認できた。提案手法による計測値からノギスの計測値を引いた差は-0.17 mmであり、標準偏差は0.63 mmであった。ノギス計測を基準とした際の提案手法の計測値のバラツキ（標準偏差）の範囲は、-0.80 mmから0.46 mmとなり、バラツキの最大量の値が1.00 mm未満であることから、提案手法がノギス計測に対して1.00 mm未満の高い精度で検出可能であることを確認した。
- 劣化ランク別では、ノギス計測を基準としたバラツキ（標準偏差）の範囲は、劣化ランク2では-0.52 mmから0.17 mm、劣化ランク3では-0.84 mmから0.58 mm、劣化ランク4では-0.93 mmから0.41 mmの範囲であり、いずれの劣化ランクにおいても1.00 mm未満に収まっていた。劣化ランクが高くなるとノギス計測との誤差の幅は大きくなる傾向であるが、各劣化ランクにおいて、バラツキの幅は1.00 mm未満に収まっており、各劣化ランクにおいて高い精度で検出可能であることを確認した。
- 提案手法において、ノギスとの誤差が大きくなるケースとして、照明条件により段差部の陰影が影響していることがわかった。提案手法を実地にて用いる場合には、段差部の陰影幅が太くなってしまいう早朝や夕刻、短くなってしまいう正午といった時間帯を避けて鉄蓋の撮影を行えば、精度の向上が可能であることがわかった。さらに、1カ所の鉄蓋において複数枚の画像の撮影を行い、段差量を検出すれば計測結果の信頼性が向上し、ノギスの代替手段として活用可能である考える。

次に、表面模様の摩耗量の推定手法において得られた知見を示す。

- rotated LBPを用いた画像特徴の抽出と学習データベースを用いた上蓋模様の高さの推定手法を用いることによって、上蓋の部分的な模様高さを推定することが可能であることがわかった。
- 模様領域から切り出した280エリアにおいて、模様高さのノギスによる計測と提案手法による推定値の比較検証を実施した。両者の相関係数は0.82となり相関が

確認できた。提案手法による推定値からノギスの計測値を引いた差は-0.44 mmであり、標準偏差は0.45 mmであった。ノギス計測を基準とした際の提案手法の計測値のバラツキ（標準偏差）の範囲は、-0.89 mmから0.01 mmとなり、バラツキの最大量の値が1.00 mm未満であることから、高い精度で検出可能であることを確認した。

- 劣化ランク別では、ノギス計測を基準とした際の提案手法の推定値のバラツキ（標準偏差）の範囲は、劣化ランク1では-1.01 mmから-0.23 mm、劣化ランク2では-0.80 mmから-0.14 mm、劣化ランク3では-0.57 mmから0.19 mm、劣化ランク4では0.05 mmから0.39 mmとなり、劣化ランク1ではノギス計測との差の最大量が1.00 mmを超えることとなったが、劣化ランク2、3、4と進むと誤差の最大量は1.00 mm未満となることから、劣化ランク2以降において高い精度で検出可能であることを確認した。
- 提案手法において、ノギスとの誤差が大きくなるケースとして、撮影時の照度が影響していることがわかった。照度が不十分な環境で撮影された画像は、模様高さが十分な鉄蓋でも摩耗が進行している鉄蓋のような画像の見え方となった。提案手法を実地にて用いる場合には、上蓋模様に十分な照明があたるように曇天や早朝や夕方といった時間帯を避けて鉄蓋の撮影を行えば、精度の向上が可能であることがわかった。さらに、1カ所の鉄蓋において複数枚の画像の撮影を行い、上蓋模様の高さを検出すれば計測結果の信頼性が向上し、ノギスの代替手段として活用可能である考える。

最後に、視認性を向上した鉄蓋模様と模様の認識手法の提案において得られた知見を示す。

- 模様の取り替えタイミングになると最表面の突起の形状が変化するデザインと、形状の認識手法を提案した。提案の突起を用いることによって、解像度が200万画素のカメラで撮影した画像からでも取り替えタイミングを検出可能であることを確認した。本結果より、提案した模様は2018年から通信用鉄蓋の上蓋模様として採用されている。

参考文献

- 3-2-1) 高木幹雄, 下田陽久(監修): 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2004.
- 3-2-2) 今西真佑奈, 仲村匡司: 様々なコントラストを有する木質フロアパターンの視覚効果, 木材学会誌, Vol. 65, No. 3, pp. 138-147, 2019.
- 3-2-3) 金子英, 岡宗一, 松宮直樹: デジタルカメラ画像を用いたコンクリート構造物のひび割れ検知技術, NTT 技術ジャーナル, pp. 21-24, 2011.
- 3-2-4) Wilhelm Burge, and Mark J. Burege, “Digital Image Processing,” Springer, pp. 124-130, 2008.
- 3-2-5) Wilhelm Burge, and Mark J. Burege, “Digital Image Processing,” Springer, p. 117, 2008.
- 3-4-1) Yimo G., Guoying Z., Matti Pietikainen, “Discriminative features for texture description,” *Pattern Recognition*, No. 45, pp. 3834-3843, 2012.
- 3-6-1) 井上崇, 松原雅昭: マンホール鉄ふた模様におけるすべり抵抗係数の影響因子の研究, 下水道協会誌論文集, Vol. 47, No. 568, 2010.
- 3-6-2) 高田洋吉, 和田順次, 佐原教三, 西谷敦, 寺田耕次: 地下構造物用蓋ならびにその蓋本体および受枠, 特許番号第 2758589 号, 日之出水道機器, 1998.
- 3-6-3) 加藤邦仁, 沼田宗敏, 輿水大和: 大局資格画像処理 Hough 変換技術, 精密工学会誌, Vol. 77, No. 12, 2011.

第4章 画像認識による躯体部の劣化検出手法に関する提案

4. 1 劣化領域の定義

露筋と金物腐食の領域検出にあたり、事前に検出対象として定義した領域の範囲を説明する。

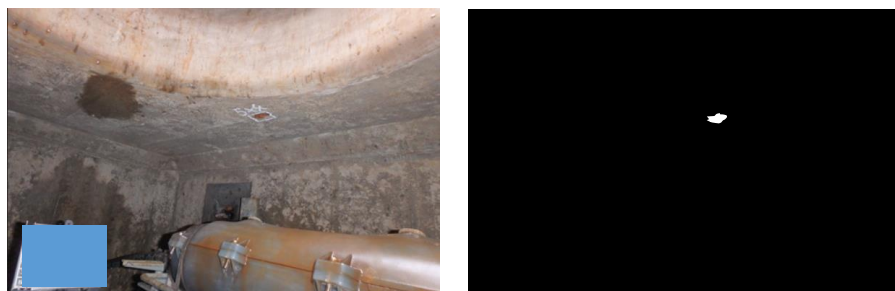
図 4-1-1 に露筋の撮影画像と検出対象とする画素をアノテーションした画像の例を示す。アノテーション画像とは、検出対象とする画素に 1、検出対象としない非劣化領域の画素に 0 の情報を付加したバイナリ画像であり、図 4-1-1 では 1 が白く、0 が黒く表示されている。露筋において、劣化と定義した領域は腐食した鉄筋そのものと、腐食に伴い鉄筋周辺のコンクリートが錆汁により変色した領域を露筋領域と定義した。これは、腐食した鉄筋と錆汁の領域を目視によって、画素単位で切り分けるのが困難であるためである。図 4-1-1 (a), (b), (c), (d) は劣化ランク 1, 2, 3, 4 における露筋の撮影画像およびアノテーション画像である。ここに示すように、画像中に複数露筋が発生している場合は、複数箇所においてアノテーション作業を行った。また、図 4-1-1 (d) は劣化ランク 4 の露筋であり、周辺のコンクリートが剥落した状態であるが、図のようにコンクリートが剥落した領域は検出領域としない。

次に、金物の撮影画像と検出対象とする金物腐食の説明を行う。図 4-1-2 (a), (b), (c), (d) は劣化ランク 1, 2, 3, 4 の金物腐食の撮影画像およびアノテーションを行った画像である。金物腐食は、鋼材が腐食した領域を検出対象の領域として定義した。図 4-1-2 (a) は劣化ランク 1 のものであるが、金物の下部に白い凹凸状の錆があるように見える。これらは、亜鉛メッキの腐食であり鋼材の劣化とは言えないことから本研究では対象外とした。金物腐食は、構造の腐食によって生じた赤褐色もしくは黒系の領域を腐食と定義した。ただし、腐食の錆汁により金物全体が赤茶色になっている領域も合わせて検出対象の腐食領域として定義している。これは、露筋領域と同様に画素単位での切り分けが困難であるためである。

露筋画像および金物腐食画像は、通信用マンホールに発生する劣化に対して、専門的な知識を有する作業者によってアノテーションを行った。露筋の画像は 1000 枚、金物腐食の画像は 1000 枚、合計 2000 枚の撮影画像と 2000 枚のアノテーション画像の画像セットを用意した。表 4-1-1 に露筋の画像 1000 枚において、検出対象の画素が占める領域の平均値、金物腐食の画像 1000 枚において、検出対象の画素が占める領域の平均値を示す。露筋の撮影画像の解像度は、153,600 画素（横 480 画素×縦 320 画素）に統

一されており、検出対象の画素は1枚当たり約2.6%といった全体の画素からみると微小な領域である。金物腐食の撮影画像の解像度は、262,144画素（横512画素×縦512画素）に統一しており、検出対象の画素は1枚当たり約5.3%である。露筋の撮影画像における検出対象領域が占める割合よりは大きいものの、画像中に占める領域としては

白：1，黒：0



(a) 劣化ランク 1 の露筋



(b) 劣化ランク 2 の露筋



(c) 劣化ランク 3 の露筋



(d) 劣化ランク 4 の露筋

図 4-1-1 露筋の撮影画像（左）と検出領域のアノテーション画像（右）

微小であることがわかる。図 4-1-3 に 1 枚あたりに占める劣化領域の割合のヒストグラムを示す。露筋は 2.0%以下に全体の半数以上が集まっており、金物腐食は約 3.5%以下に全体の半数以上が集まっている。露筋は、検出対象が画像中の 10%を超える画像数は 40 枚程度と全体の一割以下に対して、金物腐食は検出対象が 10%を超える画像が 2 割弱と金物腐食の方が、検出対象が大きい画像が多く含まれている。

白 : 1, 黒 : 0



(a) 劣化ランク 1 の金物腐



(b) 劣化ランク 2 の金物腐



(c) 劣化ランク 3 の金物腐



(d) 劣化ランク 4 の金物腐

図 4-1-2 金物腐食の撮影画像（左）と検出領域のアノテーション画像（右）

表 4-1-1 露筋画像 1000 枚, 金物腐食画像 1000 枚における
画像 1 枚に占める劣化領域の平均値

劣化	画像1枚当たりの解像度 (縦横比)	1枚当たりに占める 劣化領域の割合 (%)
露筋	153,600 (480画素×320画素)	2.64
金物腐食	262,144 (512画素×512画素)	5.32

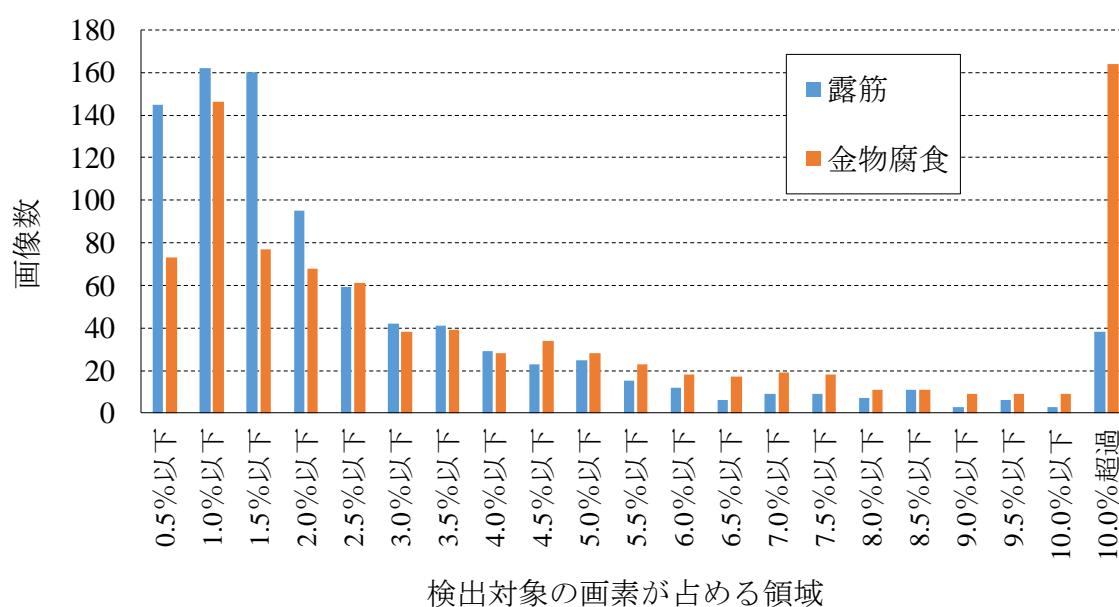


図 4-1-3 露筋と金物腐食の画像における検出対象領域のヒストグラム

4. 2 深層学習を用いた劣化検出手法

本論文では、露筋と金物腐食の領域を検出する手法として、深層学習を用いた画像セグメンテーション手法のひとつである U-Net を用いた⁴⁻²⁻¹。露筋や金物腐食の色は汚れと似ている上、特に金物腐食の腐食領域の形状は様々である。そのため、画像の中から金物の腐食だけを検出できる特徴量の定義が難しい。そこで、自動的に露筋や金属腐食の特徴量を探し出して検出を行う深層学習を用いることとした。深層学習による画像セグメンテーション手法は、数多く提案されている^{4-2-2)~4-2-5)}。これらの中でも U-Net は、生物医学分野で提案されたモデルであり、深層学習モデルを構築する際の学習データ数が少ない分野においても精度を確保できる特徴があることが述べられている。マンホールのようなインフラ設備は、設置量は膨大であるが、劣化が発生した設備は補修されるため少なく、深層学習モデルを構築する画像データを収集することが難しい。そこで、ある程度の画像枚数で精度を担保できる U-Net を選択することとした。

図 4-2-1 に本研究で用いる U-Net の構造を示す。本構造において、既往研究と大きく異なる点は、既往研究では入力画像をグレースケール画像としていたが、本論文では RGB 画像の 3 層の画像を入力画像とすることとした。これは、露筋や金物腐食は、形状のみではなく赤茶等の色情報も検出に用いることが有効であると考えたためである。図 4-2-1 において、テンソルの上部の数字はテンソルの層の数を示しており、畳み込み処理；Convolution (conv) は、3 行 3 列 (3×3) のカーネルを用いた。また、畳み込み処理を行う際の入力の特徴マップの周辺を 0 で補完するゼロパディング (padding='same') とした。各ニューロンの活性化関数 (Activation) は ReLU (Rectified Linear Unit) を用いた。プーリング処理は、2 行 2 列 (2×2) のカーネル領域における最大値を選択する Max pooling (max pooling 2×2) とした。up sampling 2×2 は 2 行 2 列 (2×2) のカーネルを用いてテンソルのサイズを拡大していく処理である。本モデルを用いると、入力画像は最終的にセグメンテーションマップとして出力される。セグメンテーションマップは、本モデルが劣化の領域と思われる画素に 1 に近い値、劣化の領域でないと思われる画素に 0 に近い値が入力されたものとなる。

また、本研究において劣化領域と非劣化領域の実際クラスと予測クラスの混合行列を表 4-2-1 に示す。劣化領域 (Positive) とは、露筋もしくは金物腐食である。非劣化領域 (Negative) とは、露筋領域もしくは金物腐食領域ではない領域であり、例えば、コンクリート、ケーブル、マンホールの内の溜まり水、正常な金物、汚れ等の画素領域のことである。

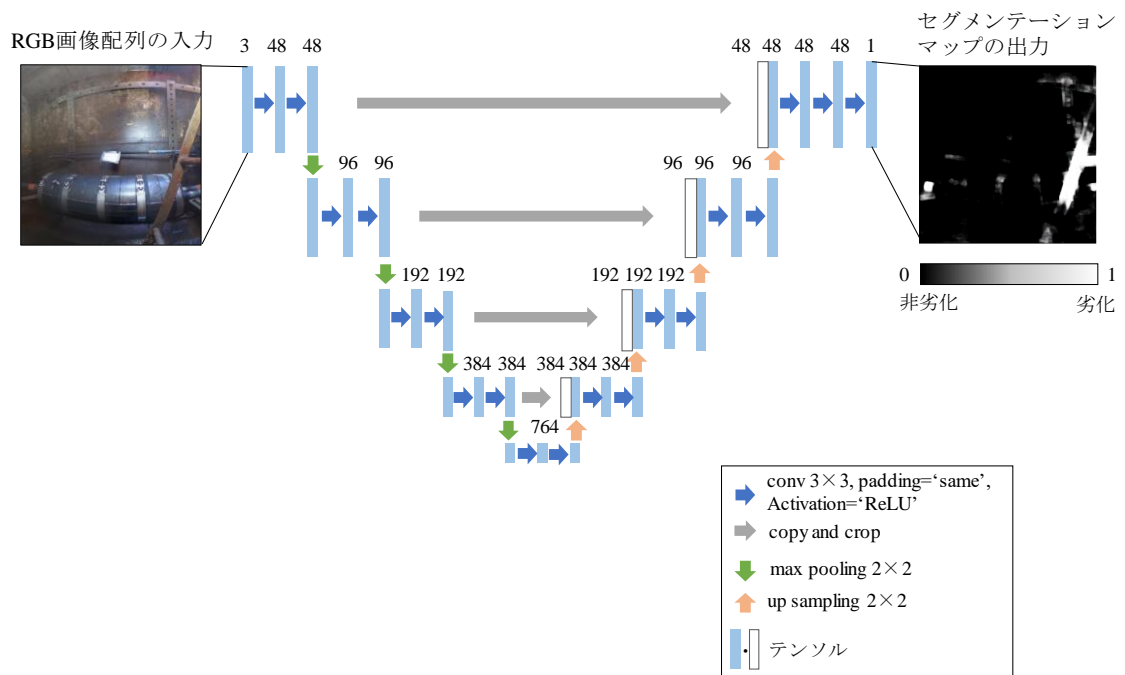


図 4-2-1 U-Net

表 4-2-1 混合行列

		モデルの予測したクラス	
		劣化領域 (Positive)	非劣化領域 (Negative)
実際のクラス	劣化領域 (Positive)	<i>TP</i>	<i>FN</i>
	非劣化領域 (Negative)	<i>FP</i>	<i>TN</i>

4. 3 深層学習モデルのパラメータ設定と感度解析

4. 3. 1 パラメータ

深層学習モデルの構築において、各種パラメータを最適化することによってモデルの性能を向上できる。検討するパラメータは、学習の指針となる損失関数、学習に用いるデータ数、入力画像の色空間配列⁴⁻³⁻¹⁾の3つを選定した。本論文では特に、検出したい対象が微小領域であることを考慮し損失関数の最適化を行ったことが特徴である。

(1) 損失関数

深層学習モデルにおける損失関数とは、実際の値と予測の値のズレの大きさである損失値を計算する関数であり、この損失値が小さくなるようにモデルの学習が進んでいく。本論文において、ベースとした既往研究における U-Net モデルで用いられている損失関数である *Binary Cross Entropy* を以下に示す⁴⁻²⁻¹⁾。

$$\text{Binary Cross Entropy} = - \sum_n^N d_n \log y_n \quad (4-3-1)$$

ここで、 d_n は学習データにおける実際のクラス（本論文では 0,1 のバイナリ画像の画素の値）であり、 y_n はモデルの予測値である。 n は画像における画素、 N は学習データの総数である。しかしながら、この損失関数は実際のクラスと予測値から損失値を求めるため、本論文で取り扱う表 4-1-1 に示したように劣化領域 (*Positive*) が非劣化領域 (*Negative*) に比べて圧倒的に少ないといったデータが不均衡な場合には適切でない可能性がある。実際のクラスに劣化領域 (*Positive*) が少ない場合、モデルがすべて非劣化領域 (*Negative*) と予測しても損失値が低下し、学習が進みモデルが劣化領域 (*Positive*) を検出しないように学習が進む。そこで、本論文では、このようなデータの不均衡問題に対応するために、損失関数に AUC (Area Under the Curve) maximization を用いることとした。Hanley らは、AUC は、式(4-3-2)として示せることを提示している⁴⁻³⁻²⁾。AUC とは、ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線における曲線より下の部分の面積である。ROC 曲線とは、モデルが予測した値に対して *Positive* もしくは *Negative* に振り分けるカットオフポイントを変更した際に算出される *Recall* と *FPR* の割合率を 2 次元のグラフに表した曲線である。この AUC の面積が大きくなればなるほど、モデルの性能が高いこととなる。露筋の点検では、見落としを極力無くすることが求められる。そのため、*TP* と *FP* の割合に着目してモデルを学習する損失関数が最適であると考えた。以上より、本研究で用いる損失関数 *AUC maximization* には、式(4-3-3)を設定した。

$$\text{AUC} = 1 - \mathbf{E}_{x \in \mathcal{X}_P} \left[\mathbf{E}_{x' \in \mathcal{X}_N} \left[l(f(x) - f(x')) \right] \right],$$
$$l(z) = (1-z)^2 \quad (4-3-2)$$

$$AUC \text{ maximization} = E_{x \in x_P} \left[E_{x' \in x_N} \left[l(f(x) - f(x')) \right] \right] \quad (4-3-3)$$

ここで、 x_P は実際のクラスが *Positive* のもの、 x_N は実際のクラスが *Negative* のもの、 $f(x)$ は実際のクラスが *Positive* に属するものに対する予測値、 $f(x')$ は実際のクラスが *Negative* に属するものに対する予測値である。

(2) 学習データ数

深層学習モデルの構築にあたり、どの程度の学習データを用意すれば十分かについてはあらかじめ知ることができない。既往研究における露筋の検出では、構築モデルが十分な学習データ数に基づいているかに関して未検証であった。そこで、本研究では学習データ数をパラメータとして設定し、データ数とモデルの検出精度を検証する。露筋や金物腐食の検出モデルにおいて、どの程度の学習データセットがあれば現用設備で発生する様々な劣化のパターンに対して十分か否かについて言及する。

(3) 色空間

U-Net のモデルの構築において、RGB 画像の 3 層の画像を入力データとして扱うことを 4 章 2 節にて示したが、本研究では、HSV 色空間での評価を行うこととした。これは、HSV 色空間は RGB 色空間よりも人がイメージした通りの色を作りやすいという特徴があり、画像認識でも色検出を実施する場合などに多く利用されている色空間のためである。RGB 色空間から HSV 色空間の変換式を以下に示す。

$$\begin{cases} R' = \frac{R}{255} \\ G' = \frac{G}{255} \\ B' = \frac{B}{255} \end{cases},$$

$$C_{max} = \max(R', G', B'), \quad C_{min} = \min(R', G', B'), \quad \Delta = C_{max} - C_{min} \quad (4-3-4)$$

$$H(\text{Hue}) = \begin{cases} 0^\circ, & \Delta=0 \\ 60^\circ \times \left(\frac{B' - G'}{\Delta} + 120 \right), & C_{max}=R' \\ 60^\circ \times \left(\frac{R' - B'}{\Delta} + 240 \right), & C_{max}=G' \\ 60^\circ \times \left(\frac{G' - R'}{\Delta} + 60 \right), & C_{max}=B' \end{cases} \quad (4-3-5)$$

$$S(\text{Saturation}) = \begin{cases} 0, & C_{max}=0 \\ \frac{\Delta}{C_{max}}, & C_{max} \neq 0 \end{cases} \quad (4-3-6)$$

$$V(\text{Value}) = C_{max} \quad (4-3-7)$$

ここで、 R, G, B は RGB 色空間、 H, S, V は HSV 色空間における画素の要素である。

4. 3. 2 検証環境

(1) 実行環境とハイパーパラメータ

表 4-3-1 に深層学習モデルの検証を行う実行環境とモデル構築時のハイパーパラメータを記載する。ライブラリは, TensorFlow と Keras を用いた。ハイパーパラメータは, 最大学習回数を 500 Epochs とした。入力画像サイズは, 露筋画像のサイズは, 横 480 pixel×縦 320 pixel とした。金物腐食画像のサイズは, 横 512 pixel×縦 512 pixel に統一している。ミニバッチサイズは, 露筋画像のデータセットの場合は 8, 金物腐食画像のデータセットの場合は 4 である。これは, GPU メモリに依存するため, メモリにのせられる最大値とした。損失関数の最適化手法は Adam を用いた⁴⁻³⁻³⁾。学習率は既往研究にて提案されている Learning Rate (LR) range test を用いた⁴⁻³⁻⁴⁾。この手法は効率的に損失関数の値を低下させるための学習率の範囲を決定する手法である。学習率は大きすぎると損失値が発散し学習が進まず, 学習率が小さすぎると損失値が低下しない, つまり学習が進まないといった問題が発生するため, 最適な学習率の設定が必要である。LR range test の実行方法は, 小さい学習率から学習処理を実施し, 損失値を記録する。さらに, 学習率を増加させ, 損失値を記録するを繰り返す。本論文では適用した画像データは, 露筋と金物腐食のそれぞれ 1000 枚の撮影画像とアノテーション画像のセットを用いており, 損失関数は *AUC maximization* を用いた。図 4-3-1 は LR range test を用いた際の結果である。横軸が学習率, 縦軸が損失値 (Loss) である。学習率が低い領域において Loss の値が落ちはじめるときから最小値付近に到達する前までの範囲が最適であるとしており, この結果から露筋および金物腐食の学習率は, 初期値を 10^{-3} から学習を開始して下限値を 10^{-6} とした。Loss の値が 50 Epochs 更新されない場合には, 学習率を 10^1 倍することにより学習を継続させることとした。学習率の下限値は 10^{-6} である。

(2) 学習用データセットとテスト用データセット

深層学習モデルを構築する際の学習に用いる画像データとモデルの性能評価に用いるテスト用データのセットの作成手順を示す。はじめに, 4章1節にて示した露筋の撮影画像 1000 枚とアノテーション作業を行った画像 1000 枚のセットと, 金物腐食の撮影画像 1000 枚とアノテーション作業を行った画像 1000 枚のセットに対して, それぞれのデータセットを学習用とテスト用に 9:1 に振り分ける。次に, 学習用データセットにおける撮影画像とアノテーション画像を左右反転, 上下反転, 180 度回転を行うことによりデータの枚数を 4 倍まで増強した。また, テスト用データセットも同様に 4 倍まで増強した。最後に, 学習用データセットの 2 割を検証用データセットと定義した。検証用データセットは学習用データセットを用いて深層学習モデルの学習を行う際に, モデルの学習に過学習が発生していないか確認するためのデータセットである。過学習とは, 学習が進んで行く際に, 学習データセットのみにモデルの適合するようになり, テスト用データセットでの精度が低下する現象であり, この現象が発生する前に学習を停止する必要がある。これらの手順に従い作成したデータセットを図 4-3-2 に示す。

表 4-3-1 実行環境とハイパーパラメータ

実行環境	使用機器	CPU: Core i7-8700 GPU: GeForce RTX 2080Ti RAM: 128 GB OS: Ubuntu 16.04 LTS
	ライブラリ	Keras 2.3.1 TensorFlow 1.14.0
ハイパーパラメータ	最大学習回数	500 Epochs
	入力画像サイズ	露筋 : 480×320, 金物腐食 : 512×512
	ミニバッチサイズ	露筋 : 8, 金物腐食 : 4
	最適化手法	Adam
	学習率	10 ⁻³ から始め、50 Epochs損失値が最小値を更新しない場合、学習率に0.1倍を実施し、最小値を10 ⁻⁶ と設定 (Learning Rate range testにより最大値と最小値の上限と下限を設定)

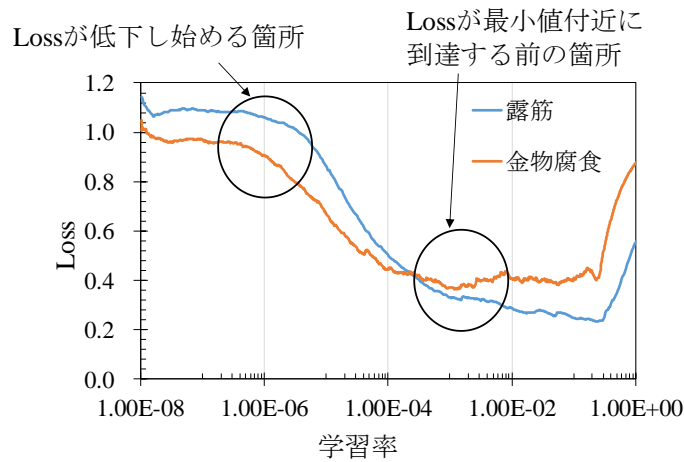


図 4-3-1 LR range test の結果

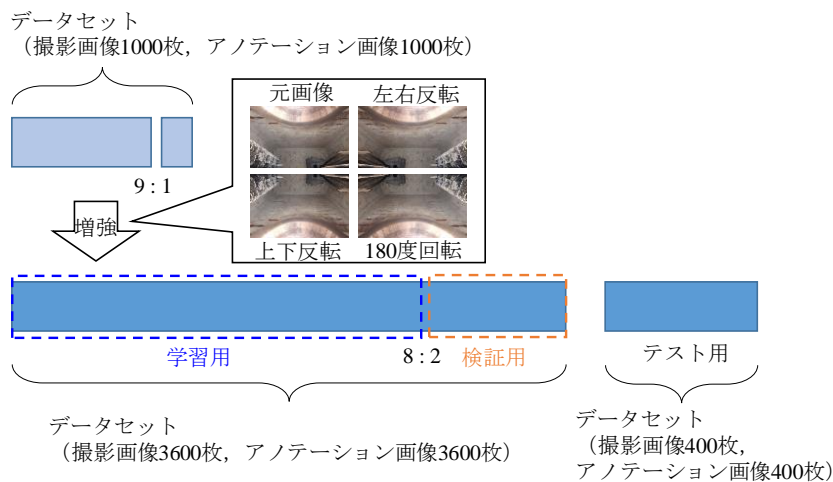


図 4-3-2 データセット

4. 3. 3 感度解析の方法と結果

(1) 損失関数

露筋と金物腐食の検出において, 損失関数を *Binary Cross Entropy* と *AUC maximization* を用いてモデルを構築した際の精度に与える影響を比較する. 深層学習モデルは, 図 4-2-1 に示したモデルを用いる. 増強した学習用 (検証用含む) データセット 3600 セットにてモデルを構築し, テスト用データセット 400 セットにて精度を検証する. また, 以下に精度評価に用いる指標を記載する.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN} \quad (4-3-1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4-3-2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (4-3-3)$$

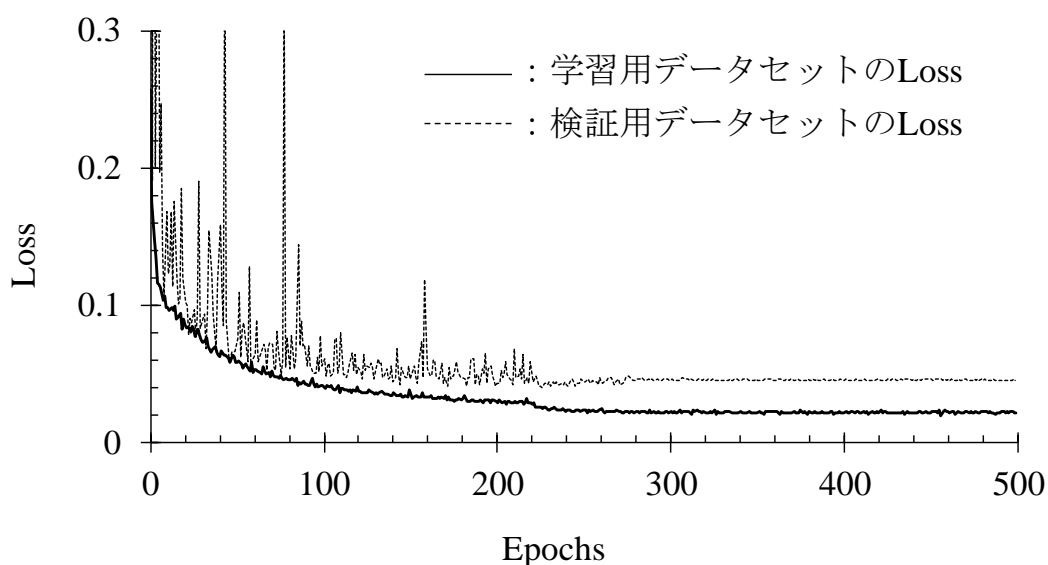
$$F\text{-measure} = \frac{2 \times \frac{TP}{TP+FN} \times \frac{TP}{TP+FP}}{\frac{TP}{TP+FN} + \frac{TP}{TP+FP}} \quad (4-3-4)$$

式(4-3-1)に示す *Accuracy* は, 予測が正しかった全体の正解率を表す. 式(4-3-2)に示す *Recall* はモデルがどれだけ取りこぼしなく予測することができたかを表す指標であり, 本論文では, 露筋もしくは金物腐食の領域 (画素) をどれだけ取りこぼさずに検出できたかという指標になる. 式(4-3-3)に示す *Precision* はモデルが予測したものがどれだけ正しかったかを示す. 本論文では, モデルが露筋もしくは金物腐食の領域 (画素) であると予測した領域に対して, どの程度正解の領域が含まれているかを示す. 式(4-3-4)に示す *F-measure* は *Recall* と *Precision* の調和平均である. 本論文では, これらの中でも, 特に *Recall* の値に着眼する. なぜならば, 点検時において, 劣化は見落とすことなく検出されることが望まれており, 画像中に占める割合が数パーセントしかない劣化がどの程度検出されたかが重要であるためである.

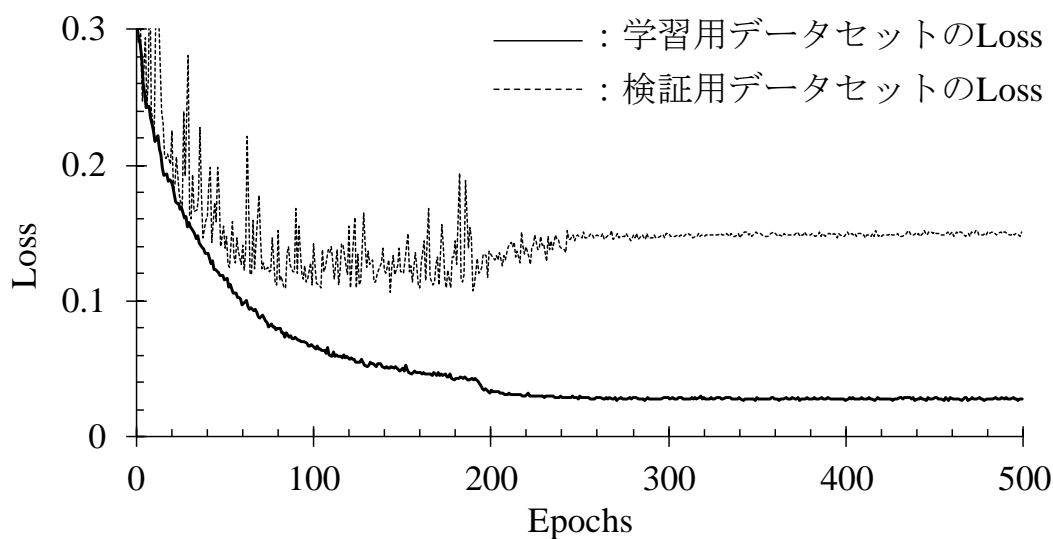
図 4-3-3(a) に露筋, 図 4-3-3(b) に金物腐食のそれぞれの学習用データセット 3600 セットを用いてモデルを学習させた際の損失値の変化を示す. 両方とも損失関数に *AUC maximization* を用いた際の例である. 学習用データセットにおいて, 学習回数毎 (Epoch 毎) に学習用と検証用のデータセットの振り分けをシャッフルしている. 検証用データセットにおける *Loss* が最も低い値を示した学習回数時において深層学習モデルの重みを保存している. 露筋では 154 Epoch 目, 金物腐食では 143 Epoch 目でモデルの重みが保存された. また, 保存された重みの学習モデルを用いてテスト用データセットにて出力した ROC 曲線を図 4-3-4 に示す. 学習モデルが劣化の領域かどうかを最終判定するカットオフポイントは, 図 4-3-4 における(0,1)と ROC 曲線のユークリッド距離が最小になる点とした. また, *Binary Cross Entropy* においても, 学習モデルの重みの保存方法

は同様とした。

表 4-3-2 に精度の結果を示す。露筋および金物腐食の両方において、損失関数を *AUC maximization* に変更することによって、*Recall* の値は上昇した。一方で、*Precision* については低下がみられた。これは、*AUC maximization* は *Recall* が向上し、と *FPR* が低下するようにモデルが学習するため、劣化の領域を取りこぼさないように学習が進んだ結果だと考えられる。露筋と金物腐食の両方において *Precision* は *Binary Cross Entropy* の方が高い値となったが、*AUC maximization* では、*Recall* は9割を超えた結果となり、ほとんど落とすことなく劣化を検出していると判断できる。



(a) 露筋のデータセット



(b) 金物腐食のデータセット

図 4-3-3 学習モデル構築時における損失値の変化

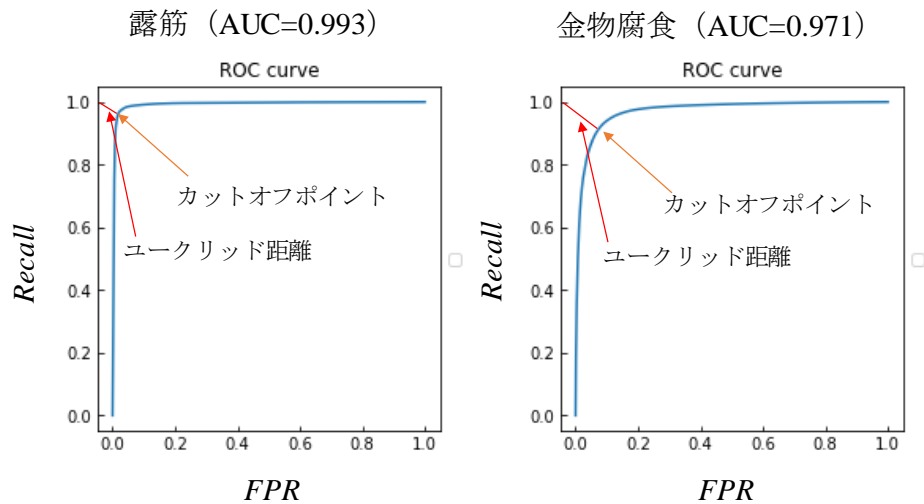


図 4-3-4 ROC 曲線とカットオフポイント

表 4-3-2 損失関数の違いによる露筋と金物腐食における検出精度の結果

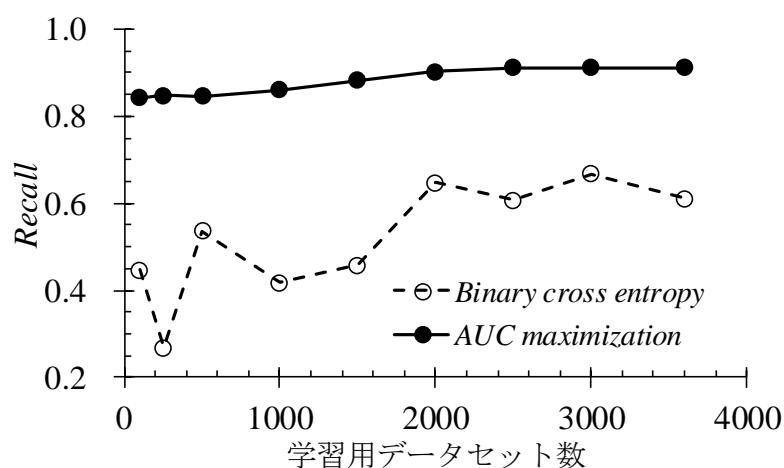
劣化	指標	損失関数	
		<i>Binary cross entropy</i>	<i>AUC maximization</i>
露筋	<i>Accuracy</i>	0.9951	0.9749
	<i>Recall</i>	0.8676	0.9746
	<i>Precision</i>	0.9102	0.4575
	<i>F-measure</i>	0.8884	0.6227
金物腐食	<i>Accuracy</i>	0.9789	0.9172
	<i>Recall</i>	0.6114	0.9060
	<i>Precision</i>	0.6547	0.2883
	<i>F-measure</i>	0.6323	0.4374

(2) 学習データ数

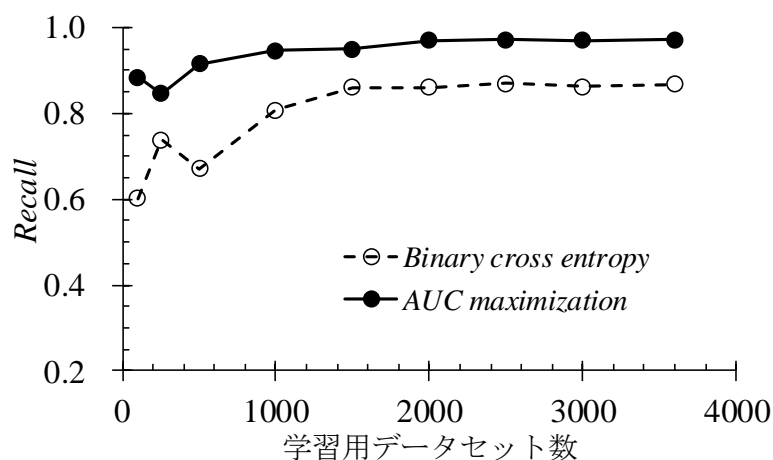
学習データセット数が、検出精度にどの程度影響するのか検証を行う。露筋と金物腐食のそれぞれにおいて、学習用データセットのセット数を 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3600 にした際のモデルを構築して、テスト用データセットにて精度の評価を行った。学習用データセットは最大 3600 セットの中からランダムに抽出した。モデルの評価を行うテスト用データセットは 400 セットで統一した。損失関数は、*Binary Cross Entropy* と *AUC maximization* の両方で行った。精度の評価は、*Recall* を用いた。

図 4-3-5 に結果を示す。(a) の露筋においては、*Binary Cross Entropy* と *AUC maximization* とともに 2000 セットを超えたあたりから、*Recall* の値の上昇が緩やかになっ

た. このことから, 現状の学習用データ 3600 セットがあれば, 数量は十分であると考えられる. (b)の金物腐食においては, *AUC maximization* は 2000 セットで飽和していると考えられる. *Binary Cross Entropy* は 2000 セット以降でばらついてはいるが, 学習データ数を増やすことによる精度の大幅な向上の可能性は小さいと考えられる.



(a) 露筋



(b) 金物腐食

図 4-3-5 学習用データセット数が検出精度に与える影響

(3) 色空間

学習モデルに入力する際の色空間の変更による精度への影響を検証する. ここでは, RGB 色空間と HSV 色空間との比較を行う. 学習用データセットは 3600 セット, テスト用データセットは 400 セットとして, 損失関数は *AUC maximization* を用いた. 評価指標は, *Recall*, *Presicion*, *F-measure* の 3 種類である.

表 4-3-3 に結果を示す. 露筋と金物腐食の両方において, 色空間による検出精度の影響はほとんどないことがわかった. 本検証では, *Recall* において RGB 色空間の方が,

露筋, 金物腐食ともに値が高いことが確認できた.

表 4-3-3 色空間の違いによる露筋と金物腐食における検出精度の結果

劣化 色空間	露筋		金物腐食	
	RGB	HSV	RGB	HSV
<i>Accuracy</i>	0.9749	0.9751	0.9172	0.9127
<i>Recall</i>	0.9746	0.9682	0.9060	0.9053
<i>Precision</i>	0.4575	0.4671	0.2883	0.2562
<i>F-measure</i>	0.6227	0.6326	0.4374	0.3994

(4) まとめ

損失関数に *AUC maximization* を用いることにより, *Recall* の精度を向上することが確認できた. 一方で, *Precision* の値が低下することがわかった. 本研究では, 露筋を見落とすことなく検出したいため *AUC maximization* を用いることとする.

学習用データセットの数が検出精度に大きく影響していることがわかった. 本研究で構築した露筋, 金物腐食のモデルでは, 学習用データセットが 2000 セットから検出精度が緩やかになったため, 最大の 3600 セットあれば十分であることが確認された.

モデルに入力する色空間の違いでは露筋, 金物腐食の両方とも検出精度に大きな影響は見られなかった. RGB 色空間で学習モデルを構築した方が, 露筋, 金物腐食の両方ともわずかに *Recall* の精度が高い結果となった.

4. 4 劣化検出手法の検証と考察

4. 4. 1 検証方法

本項では、深層学習モデルによる劣化検出手法の検証を行う。検証方法を表 4-4-1 に示す。露筋および金物腐食のそれぞれにおいて、深層学習モデルの構築を行った。損失関数は4章3節3項の結果より、*AUC maximization* とした。モデルの重みは、学習回数最大 500 Epochs において、検証用データセットの Loss が最も低かった際の重みとした。学習するデータセット数は、学習用データセット 3600 セットである。モデルを用いた検出精度の検証には、テスト用データセットの中から、データ増強を行っていない元の撮影画像と対応するアノテーション画像の 100 セットを評価用データセットとして作成して検出精度を検証した。これらの評価用データセットには、モデルに学習したデータは含まれていない。評価指標は、*Accuracy*, *Recall*, *Precision*, *F-measure* とした。

表 4-4-1 検証方法

	損失関数	<i>AUC maximization</i>
学習モデル	重みの保存	学習回数最大500 Epochsにおいて、検証用データセットのLossが最も低かった際の重み
	学習データセット	3600セット
評価用のデータセット	テスト用データセット100セット (データ増強を行っていない元の撮影画像を使用)	
評価指標	<i>Accuracy</i> , <i>Recall</i> , <i>Precision</i> , <i>F-measure</i>	

4. 4. 2 結果と考察

(1) 露筋

表 4-4-2 に学習モデルによる露筋の検出結果を示す。評価用のデータセットは、2章1節5項にて定義した劣化ランク (図 2-1-16) ごとに分類を行っており、各劣化ランクにおける数値を算出している。劣化ランク 1, 2, 3, 4 においてそれぞれ 17 枚, 29 枚, 30 枚, 24 枚であった。合計 100 枚の画像での *Accuracy* は 0.9774, *Recall* は 0.9710 であり、露筋の領域を高い精度で検出できていると考えられる。また、*Precision* に着眼すると、劣化ランクが 1 から 4 まで進行すると共に値が向上し、劣化ランクが高いものほど *FP* の領域を抑えて劣化の領域を同定できていることがわかる。劣化ランク 1 と 2 と 3 と 4 では、小数点 2 桁目の約 0.02 で値が着実に向上しており、劣化ランク毎に識別の精度が向上することがわかった。*Recall* が最も高かったのは劣化ランク 3 の 0.991 であり、最も低かったのは劣化ランク 2 の 0.9415 であり、高い精度で検出できていることがわかった。図 4-4-1 (a), 図 4-4-2 (b), (c), (d) に各劣化ランクにおいて、*Recall* が高

かった画像と低かった画像の上位2つと下位2つを示す。図4-4-1、図4-4-2は、作業がアノテーションした劣化領域とモデルが予測した劣化領域が一致した画素を緑 (TP)、モデルのみが予測した画素を赤 (FP)、作業者が劣化と定義して、モデルが予測できなかった画素を青 (FN) で表示している。





劣化ランク1と2の画像では露筋が進行していないため、腐食の赤褐色や黒い錆の色が見えにくく、さらに領域が小さいことから照明が当たりにくいことからFNが発生したと考えられる。劣化ランク2は微小な露筋が複数箇所に点在する状態であるため、劣化ランク1よりFNの発生確率が上がり Recall が低下したと考えられる。劣化ランク4が3と比べて、Recall が低下した理由は、周辺のコンクリートに付着した錆汁が検出されていなかった点と、劣化の領域が大きく十分に照明が当たっていない露筋領域があった点が要因であると考えられる。

以上のことから、提案手法を用いた露筋の検出についてまとめる。

表 4-4-2 露筋検出の結果

劣化ランク	1	2	3	4	Total
定義	微小な露筋が1, 2箇所発生した初期状態	劣化ランク1相当の微小な露筋が複数箇所に発生した状態	劣化ランク1もしくは2の微小な露筋が鉄筋の軸方向に進行した状態	3の状態が進行して、周辺のコンクリート剝離を伴い露筋が進行した最終状態	-
画像枚数	17枚	29枚	30枚	24枚	100枚
Accuracy	0.9903	0.9849	0.9784	0.9579	0.9774
Recall	0.9832	0.9415	0.9917	0.9722	0.9710
Precision	0.3976	0.4187	0.4397	0.4631	0.4321
F-measure	0.5477	0.5495	0.5996	0.6115	0.5791




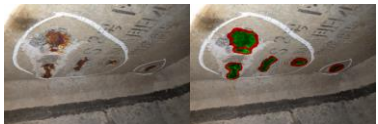
緑 : TP 赤 : FP 青 : FN

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9935	0.7305	0.9951	0.9885
Precision	F-measure	0.2980	0.4233	0.5600	0.7150
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9956	1.000	0.9777	1.000
Precision	F-measure	0.6123	0.7595	0.6463	0.7852
撮影画像					

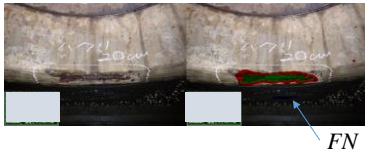
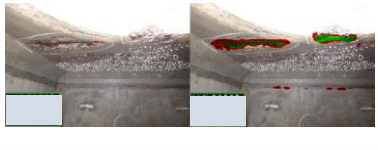
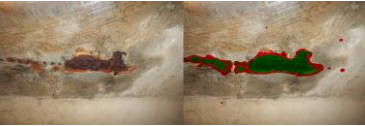

(a) 劣化ランク1における撮影画像

図 4-4-1 各劣化ランクにおける Recall の高い画像と低い画像

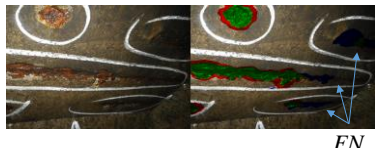
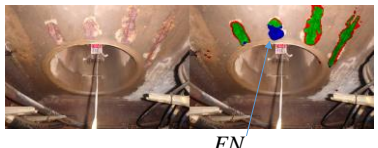


緑：TP 赤：FP 青：FN

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9976	0.2810	0.9935	0.5719
Precision	F-measure	0.7216	0.4450	0.2966	0.3906
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9808	1.000	0.9749	1.000
Precision	F-measure	0.6176	0.7636	0.5222	0.6861
撮影画像					

(b) 劣化ランク 2 における撮影画像

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9759	0.8870	0.9736	0.9888
Precision	F-measure	0.4631	0.6085	0.4123	0.5819
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9627	1.000	0.9866	1.000
Precision	F-measure	0.5965	0.7473	0.4564	0.6268
撮影画像					

(c) 劣化ランク 3 における撮影画像

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9258	0.7091	0.9697	0.8293
Precision	F-measure	0.6654	0.6866	0.6598	0.7349
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9823	1.000	0.9603	1.000
Precision	F-measure	0.4924	0.660	0.6707	0.803
撮影画像					

(d) 劣化ランク 4 における撮影画像

図 4-4-2 各劣化ランクにおける Recall の高い画像と低い画像

本検証から、露筋の領域の検出精度は最大で劣化ランク 3 の 0.991、最も低い劣化ランク 2 で 0.9415 と十分な精度で検出できることがわかった。実地で活用する際には、一定のスキルがある点検者が本検証と同等の画像撮影を行うため本検証での精度を担保でき、十分に活用可能であると考えられる。

さらに、以下の項目を考慮して運用すれば、精度がより向上すると考えられる。

- ・ 撮影時の照明条件：露筋の領域が小さい劣化ランク 1 および 2 では、露筋領域に十分な照明が当たらずに検出できないケースがあるため、微小な露筋に対して照明を当ててできる限り、接写するように撮影する。

(2) 金物腐食

表 4-4-3 に学習モデルによる金物腐食の検出結果を示す。評価用のデータセットは、2章1節5項にて定義した劣化ランク (図 2-1-17) ごとに分類を行っており、各劣化ランクにおける数値を算出している。劣化ランク 1, 2, 3, 4 の撮影画像の枚数はそれぞれ 34 枚, 34 枚, 23 枚, 9 枚であった。補修判断となる劣化ランク 3, 4 では *Recall* は 93%以上であり、高い検出精度を確認した。

4つの指標において、劣化ランクが進むと指標の値も向上し、高い劣化ランクほど高い精度で同定されることがわかった。図 4-4-3 (a), (b), 図 4-4-4 (c), (d) に各劣化ランクにおいて、*Recall* が高かった画像と低かった画像の上位 2 つと下位 2 つを示す。図 4-4-3, 図 4-4-4 は、作業がアノテーションした劣化領域とモデルが予測した劣化領域が一致した画素を緑 (*TP*)、モデルのみが予測した画素を赤 (*FP*)、作業者が劣化と定義して、モデルが予測できなかった画素を青 (*FN*) で塗色している。劣化ランク 1 を見ると、金物の鋼材の腐食が始まった初期の段階であるため、腐食の領域が他の劣化ランクと比べて小さいことがわかる。この小さな領域の検出が難しく、*Recall* が低下していると考えられる。劣化ランク 2 では、腐食が広がっていった際に、亜鉛メッキによる白色系の腐食と鋼材の赤褐色系や黒系の腐食が混ざり合う境界線部における同定が難しく、検出精度が 9 割未満であったと考えられる (図 4-4-5)。 (b) の右上の画像では、左下の画像と比べて、垂直方向の鋼材が全体的に黒くなり、劣化領域の境界部の特定が難しい。劣化ランク 3 に進むと、鋼材の幅と深さ方向に半分以上まで広く腐食が進行しているた

表 4-4-3 金物腐食検出の結果

劣化ランク	1	2	3	4	Total
定義	腐食が発生し始めた初期状態	1の状態進行し、鋼材の垂直および水平方向に広がっている状態	2の状態が進行し、鋼材に広がっている状態	連結している鋼材のほぼ全域に腐食が広がった最終状態	-
画像枚数	34枚	34枚	23枚	9枚	100枚
<i>Accuracy</i>	0.9354	0.9148	0.9305	0.9172	0.9256
<i>Recall</i>	0.8763	0.8903	0.9378	0.9430	0.9012
<i>Precision</i>	0.1444	0.2288	0.3794	0.5115	0.2602
<i>F-measure</i>	0.2208	0.2288	0.5239	0.6542	0.3697

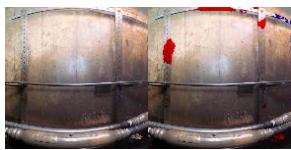



め、精度が向上したと考えられる。(c)において、検出率が低い画像は、マンホールの溜まり水の中に金物が浸かっている、逆光での撮影といった撮影条件に依存して精度が低下していた。劣化ランク 4 では、金物全体に腐食が進行して、赤褐色や黒色の錆汁や錆こぶが画像中から確認できるため、精度が一番よいと考えられる。

以上のことから、提案手法を用いた金物腐食の検出についてまとめる。

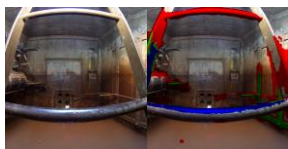

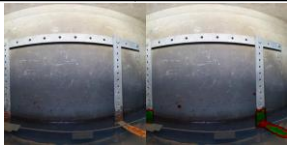

本検証から、金物の腐食領域は補修の可否判断が必要となる劣化ランク 3 以降において、93%以上の精度で検出できることがわかった。腐食の初期状態である劣化ランク 1 においても 87%以上の精度であることがわかった。実地で活用する際には、一定のスキルがある点検者が本検証と同等の画像撮影を行うため本検証での精度を担保でき、十分に活用可能であると考えられる。

さらに、以下の項目を考慮して運用すれば、精度がより向上すると考えられる。

緑：TP 赤：FP 青：FN

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9432	0.1385	0.9810	0.3143
Precision	F-measure	0.0060	0.0115	0.0811	0.1289
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9899	1.000	0.9618	1.0000
Precision	F-measure	0.1895	0.3186	0.0765	0.1421
撮影画像					

(a) 劣化ランク 1 における撮影画像




Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.8457	0.3379	0.9417	0.4057
Precision	F-measure	0.1783	0.2334	0.1040	0.1656
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9836	1.000	0.9686	1.0000
Precision	F-measure	0.4334	0.6047	0.3438	0.5117
撮影画像					

(b) 劣化ランク 2 における撮影画像




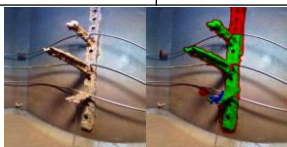
図 4-4-3 各劣化ランクにおける Recall の高い画像と低い画像

- ・ 撮影時の照明条件：マンホールの孔から入り込む太陽光が逆行になり，検出精度が低下することがわかったため，照明の方向を考慮した撮影や，撮影時にマンホールの孔から直接照明が入らないように覆うといった条件で撮影する．
- ・ 撮影時の溜まり水の排水：躯体部に溜まった水に浸かった金物腐食の領域の検出ができないことから，金物設備が水に浸からない程度まで排水して撮影する．

緑：TP 赤：FP 青：FN

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9111	0.6393	0.9619	0.7141
Precision	F-measure	0.1637	0.2607	0.5078	0.5935
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9778	1.000	0.9141	1.0000
Precision	F-measure	0.4699	0.6393	0.3636	0.5333
撮影画像					

(c) 劣化ランク 3 における撮影画像

Recallが小さい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9465	0.7964	0.8049	0.8385
Precision	F-measure	0.4568	0.5806	0.2806	0.4205
撮影画像					
Recallが大きい露筋画像					
Accuracy	Recall	0.9408	1.000	0.9405	0.9996
Precision	F-measure	0.5965	0.7473	0.6097	0.7574
撮影画像					

(d) 劣化ランク 4 における撮影画像

図 4-4-4 各劣化ランクにおける Recall の高い画像と低い画像



亜鉛メッキによる白色系の腐食と鋼材の赤褐色系
や黒系の腐食が混ざりあった状態

図 4-4-5 各劣化ランク 2 における金物腐食の撮影画像（左）
と劣化検出結果（右）の例

4. 5 まとめ

本章では、深層学習を用いて露筋と金物腐食の検出手法の提案を行った。得られ知見を以下に示す。

- 露筋と金物腐食の検出には、深層学習手法のうちのセグメンテーションでの検出を可能とする U-Net を用いた。U-Net モデルの損失関数を *AUC maximization* にすることによって、従来の損失関数 *Binary Cross Entropy* と比べて、*Recall* の値が向上し、劣化領域の検出精度が向上したことを確認した。さらに、現用設備に発生する様々な劣化のパターンに検出モデルが対応できることを確認するために、学習枚数による精度向上の評価を行い、露筋と金物腐食ともに 2000 データ程度の学習データセットがあれば、学習データ数は十分であることがわかった。
- 露筋の検出では、全体で *Accuracy* は 0.9774、*Recall* は 0.9710 であり、*Recall* に着眼すると最も低い劣化ランク 2 でも 94%以上を達成、劣化ランク 3 では約 99%と高い精度を確認した。また、*Precision* に着眼すると、劣化ランクが 1 から 4 まで進行すると共に値が向上し、劣化ランクが高いものほど *FP* の領域を抑えて劣化の領域を同定できていることがわかる。劣化ランク 1 と 2 と 3 と 4 では、約 0.02 ずつ値が向上しており、劣化ランクが上がる毎に精度が向上することがわかった。
- 露筋の検出において、劣化ランク 1 と 2 では露筋が進行していないため、撮影画像における腐食の赤褐色や黒い錆の色が画像では見えにくく、加えて、劣化の領域が小さいことから影になりやすく黒い領域として写ってしまい *FN* が発生したと考えられる。劣化ランク 2 は微小な露筋が複数箇所に点在する状態であるため、劣化ランク 1 より *FN* の発生確率が上がり *Recall* が低下したと考えられる。劣化ランク 4 が 3 と比べて、*Recall* が低下した理由は、露筋の領域が大きすぎて周辺のコンクリートに錆汁が広く付着しており、この領域が検出されていないことと、露筋領域が広すぎて、照度が足りていない領域を含む画像があったためであり、露筋の色や錆こぶのような凹凸形状が画像から確認できることが重要であることがわかった。
- 提案手法における露筋の検出精度は最も低い劣化ランク 2 で 94%以上であること、本検証データは現行の点検において撮影された画像を用いており、同等の撮影画像が点検により撮影可能なことから、実地において十分活用可能であると考えられる。劣化ランク 2 において精度が低下する理由として、微小な露筋に対する照明不足による錆の色や凹凸形状画像中では見えにくくなってしまうことが要因であった。露筋の撮影時には、十分な照度を露筋領域に当てて錆の色や凹凸形状が画像中に写るように可能な限り接写して撮影すれば、さらなる精度向上が見込める。
- 金物腐食の検出では、全体で *Accuracy* および *Recall* は 9 割を超えた。また、*Accuracy*,

Recall, Precision, F-measure において、劣化ランクが進むと指標の値の向上が確認でき、補修の要否判定が必要な劣化ランク 3 以降では *Recall* が 93%以上を達成、最も低い劣化ランク 1 でも 87%以上を達成し、高い精度で腐食領域を検出できることがわかった。

- 金物腐食の劣化ランク 1 を見ると、亜鉛メッキが剥がれて金物の鋼材の腐食が始まった初期の段階であるため、腐食の領域が他の劣化ランクと比べて小さくことがわかる。この小さい領域の検出が難しく、*Recall* が低下していると考えられる。劣化ランク 2 では、腐食が広がっていった際に、亜鉛メッキによる白色系の腐食と鋼材の赤褐色系や黒系の腐食が混ざり合う境界線部における同定が難しい結果となった。劣化ランクが 3 に進むと、鋼材の幅や深さ方向に半分以上まで広く腐食が進行していたため、精度が向上したと考えられるが、本検証において逆光での撮影や水に浸かった金物設備の腐食は検出が困難であった。劣化ランク 4 では、金物全体に腐食が進行して、赤褐色や黒色の錆汁や錆こぶが画像中から確認できるため、精度が一番よいと考えられる。これらのことから、腐食の色や錆こぶのような凹凸形状が画像中にはっきり見える劣化ランク 3 や 4 の領域は検出精度が高いことがわかった。
- 提案手法における金物腐食の検出精度は補修の要否判断が必要となる劣化ランク 3 以降で 93%以上であること、本検証データは現行の点検において撮影された画像を用いており、同等の撮影画像が点検により撮影可能なことから、実地において十分活用可能であると考えられる。さらに、逆光での撮影画像や躯体部の水に浸かった金物腐食は検出が難しいことから、撮影時の照明方向の考慮や排水後の撮影を行えば、さらなる精度向上が見込める。

参考文献

- 4-2-1) O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation,” *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9351, pp. 234-241, 2015.
- 4-2-2) J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, “Fully convolutional networks for semantic segmentation,” *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 3431-3440, 2015.
- 4-2-3) V. Badrinarayanan, A. Kendall, and R. Cipolla, “SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation,” *arXiv preprint arXiv:1511.00561*, 2015.
- 4-2-4) A. Kendall, V. Badrinarayanan, and R. Cipolla, “Bayesian SegNet: Model Uncertainty in Deep Convolutional Encoder-Decoder Architectures for Scene Understanding,” *arXivpreprint arXiv:1511.02680*, 2015.
- 4-2-5) H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang and J. Jia, “Pyramid Scene Parsing Network,” *arXiv preprint arXiv:1612.01105*, 2016.
- 4-3-1) 蛭田興明, 梁木俊冨, 高屋英知, 伊藤千輝, 荒牧大樹, 稲垣隆雄, 山岸典生, 栗原聡: 多変量時系列変数マルチチャンネル変換画像分類における深層学習の適用, 2019年度人工知能学会全国大会, 1C4-J-3-02, pp. 1-3, 2019.
- 4-3-2) Hanley, J. A., and McNeil, B. J., “The Meaning and Use of the Area Under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve,” *Radiology*. Vol. 143, pp. 29-36, 1982.
- 4-3-3) Diederik P. Kingma, and Jimmy Ba, “Adam: A Method for Stochastic Optimization,” *International Conference on Learning Representations (ICLR)*, pp. 1-15, 2015.
- 4-3-4) Leslie N. Smith, “Cyclical Learning Rates for Training Neural Networks,” *2017 IEEE Winter Conference on Application of Computer Vision*, *arXiv:1506.01186*, 2017.

第5章 UAVによる画像撮影手法の提案

各マンホールにおいて、地上の鉄蓋部と地下の首部および躯体部によって点検周期が異なる上、設備の設置環境が違うため、点検用の画像撮影に UAV を用いる場合、UAV 導入による運用方法と合わせて検討することが望ましい。図 5-1 は、現行の点検において UAV を用いる対象を提案するものである。本研究では、5 年周期で点検が必要な鉄蓋部の単独での点検時と、10 年周期で点検が必要な首部と躯体部の点検の際に UAV による画像撮影手法の導入を提案する。鉄蓋部のみ単独点検では、UAV により遠隔から撮影することによって作業者のリスクのある車道上での作業を無くすることができる。また、10 年周期の首部と躯体部の点検時に導入することによって地下作業を無くすることができる。

本章では、鉄蓋部に導入する際の画像撮影手法と躯体部に導入する際の画像撮影手法の 2 つを提案する。

点検周期	鉄蓋部		首部・躯体部
5年*	現行点検	UAV手法 車道作業なし (画像撮影) UAV	点検対象外
	ノギス計測		
10年	現行点検	現行方法/UAV 手法のいずれ も可	現行点検
	ノギス計測		UAV手法 地下作業なし UAV

※10年周期と重ならない場合

図 5-1 UAVによる画像撮影手法の導入を提案する対象

5. 1 鉄蓋部の画像撮影手法の提案

UAV を用いて躯体部の点検用画像の撮影手法を提案する。本節では、第3章にて提案した段差の計測と摩耗の推定手法を適用できる条件を前提に、UAV が撮影することとする。第3章における鉄蓋の撮影条件は垂直高さ約 1.4 m、水平距離 3 m～6.5 m の範囲において鉄蓋の受枠の両端が画角内にできる限り一杯になるように光学ズームを行うことによって、撮影を実施することとした。6.5 m を限界値としたのは作業者のカメラのレンズと鉄蓋の撮影の仰角が小さくなり、鉄蓋の表面模様の領域が撮影画像中に十分に写らなくなるためである。反対に、3 m 未満の距離まで近づくと鉄蓋の段差や模様の側面部が画像中に十分に写らないため、段差量や模様の高さを計測できなくなる。図 5-1-1 に UAV にて撮影を行うための飛行範囲を示す。UAV は、作業者と異なり鉄蓋から 6.5 m 以上離れても高度を上昇することにより一定の仰角を確保することが可能となる。そのため、鉄蓋との仰角 13 度以上かつ 25 度以下で飛行する範囲で鉄蓋を撮影することを条件とした。ただし、鉄蓋から一定以上離れる限界値は、カメラの画角一杯に受枠の両端を光学ズームできない場所とする。カメラの画角内に鉄蓋が小さく写り込むと画素当たりの分解能が荒くなり、mm 単位以下の計測が難しくなるためである。

この条件を満たす範囲において、UAV を飛行させて鉄蓋を撮影することにより点検用画像の取得が可能となる。

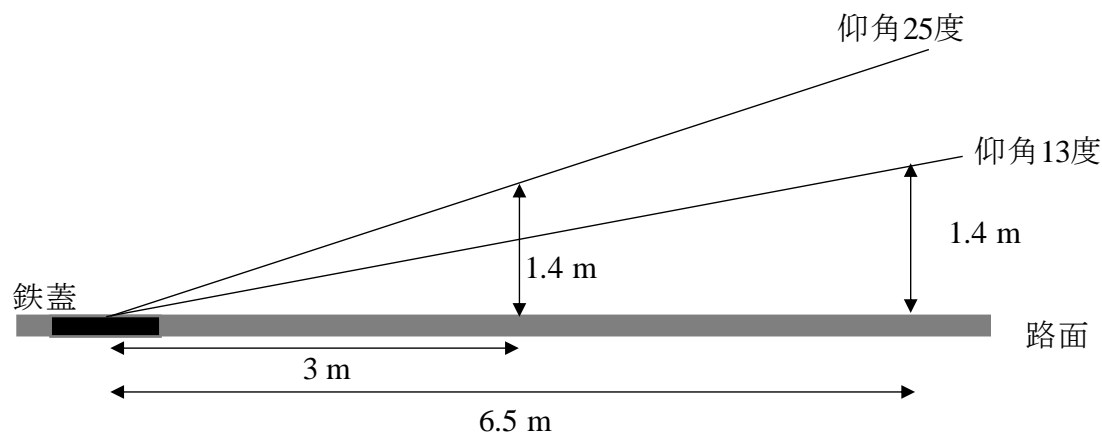


図 5-1-1 UAV による画像撮影の飛行範囲

5. 2 躯体部の画像撮影手法の提案

5. 2. 1 画像撮影手法

点検では、マンホールの上床版の状態を把握するための画像と、躯体部に設置している金物の状態を把握するための画像の取得が求められる。また、上床版の露筋は、露筋の面積が大きいものから補修を実施するため、画像から露筋の大きさを cm 単位で把握できる必要がある。これらの点検に必要な画像の条件を満たした撮影手順を図 5-2-1 に示す。撮影手法における UAV の動作は、5つのフェーズによって構成した。そして、各フェーズにおいて UAV の飛行動作は、垂直、水平移動によって構成される。通信用マンホールは、躯体部は直方体であり、首部は垂直な円柱であるため、UAV の飛行経路を水平垂直のシンプルな移動とすることができる。フェーズ 1 は離陸であり、このフェーズでは、UAV は垂直に離陸した後、路上と平行に移動しマンホールの孔の中心まで移動する。フェーズ 2 は入孔である。このフェーズでは、垂直な円柱である首部の内部を垂直移動し躯体部に進入する。フェーズ 3 は点検である。このフェーズでは躯体内部の画像を撮影した後、マンホールの孔の直下に戻る。通信用マンホールは、直方体の構造であるため、天井と平行に躯体内部を移動する。この際に、UAV の上部に付けた上向きのカメラによって天井部の撮影、UAV の横向きにつけたカメラによって壁面の撮影を行う。上向きのカメラによって撮影された天井の画像は、UAV と天井の距離が常に一定で撮影しているため、撮影画像に写っている劣化の大きさを画像から計測することが可能となる。フェーズ 4 は出孔である。フェーズ 3 でマンホールの孔の直下に戻ってきたのち、垂直移動によりマンホールから地上へ移動する。フェーズ 5 は着陸である。孔の領域外に水平移動した後に、垂直方向に着陸する。

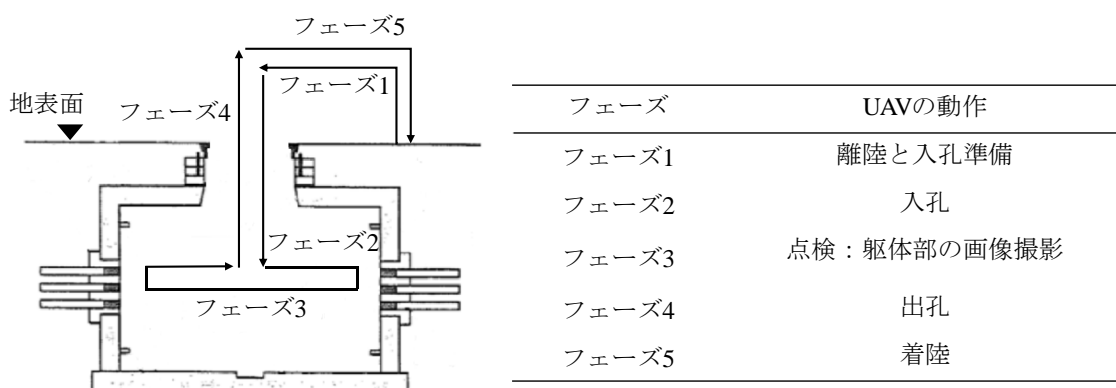


図 5-2-1 UAV による画像撮影手順

5. 2. 2 自己位置の計測手法

UAV が自律飛行を行う上で必要な自己位置の計測手法について述べる。地上とマンホール内部は、照明や狭小な空間といった飛行環境が大きく変化する。これらの異なる飛行環境では、2章2節3項で示した既往研究のような単一のセンサでは自己位置の計測が難しいと考えられる。さらに、UAV は小型な設計が求められるため、UAV に搭載できるセンサは軽量である必要がある。これらの条件から、本研究では、数十グラムである超音波による測距センサ、レーザによる測距センサ、カメラセンサの3種類を選定し、UAV の飛行位置において、これらの3種類のセンサを切り替えて自己位置を計測することとした^{5-2-1)~5-2-3)}。自己位置の計測方法は、水平方向で2軸、垂直方向は1軸で計測することとした。図5-2-2にUAV の飛行位置毎における自己位置の計測に用いるセンサの組み合わせを示す。

ポジション1は、路面の直上である。ここでは水平方向はカメラセンサ、垂直方向は超音波センサを用いる。図5-2-3にカメラセンサによるマンホール孔の認識による自己位置の把握の様子を示す。これは、鉛直下向き方向のカメラによって撮影したマンホール孔を画像処理により検出する。マンホール孔の検出には、Hough変換による円検出を用いた⁵⁻²⁻⁴⁾。円の検出結果から円の中心座標を算出する。この円の中心座標と画像の中心座標の距離を把握することによって、孔の中心とカメラの中心がどの程度離れているか、即ち水平方向の自己位置の計測を行う。また、撮影画像における自己位置は、図5-2-3に示す撮影画像の左上端から水平方向を x 軸、垂直方向を y 軸として2軸で把握することとする。さらに、図5-2-2のポジション1では屋外のため、太陽光があり、レーザによる測距センサが使えないことから、超音波による測距センサを用いて路面からの高さを計測することとした。

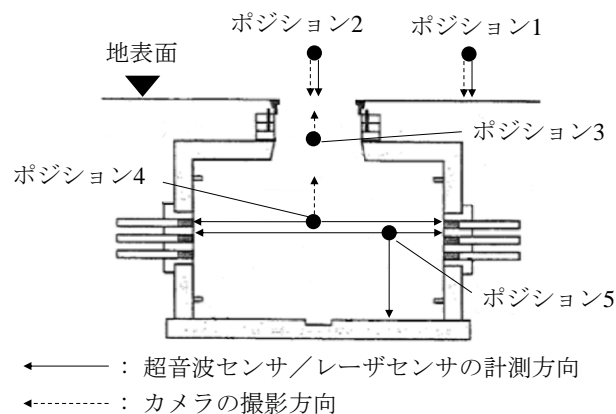
ポジション2では、ポジション1と同様に水平方向はカメラによるマンホール孔の認識による自己位置の計測を行う。また、垂直方向は、マンホール孔を検出して円の直径から垂直方向の自己位置の把握を行う。孔の直上では、鉛直下向きの超音波による測距センサが使えないためである。マンホール孔の直径は規格にて決まっているため、マンホール孔の検出から検出した円の直径を算出して、その直径から垂直方向の自己位置を計測することとした(図5-2-3)。UAV が孔から遠ざかれば、画像中における孔の直径は小さくなり、孔に近づけば直径は大きくなる。

ポジション3は首部の内部である。水平方向は、レーザによる測距センサにより距離計測を行うこととした。直行する2つのレーザセンサを用いて水平方向の距離を計測することにより、躯体部におけるUAV の位置が把握できる。垂直方向の位置把握は、上向きカメラによりマンホールの孔の円検出を行い、円の直径から位置が把握できることを確認した。

ポジション4はマンホール孔の直下である。ここでは、水平方向は上向きカメラによるマンホール孔の認識により自己位置を把握できることを確認した。垂直方向は超音波

センサを用いた。これは、マンホールの内部には水が溜まっている場合があり、レーザによる測距センサが使えないためである。

ポジション5では水平方向はレーザによる測距センサを用いた。躯体部は四方が壁面のため、直行する二つのレーザを用いて水平方向の距離を計測することにより躯体部における UAV の位置が把握できる。また、ポジション3と同様に閉所空間であるため、超音波センサは内部で多重反射が発生して値がばらついたため位置の特定のために用いることは困難であると判断した。躯体部は暗所空間であるため、レーザセンサに水平方向の計測が可能であった。垂直方向は超音波による測距センサを用いた。



番号	センサの位置	自己位置推定に用いるセンサ	
		水平方向	垂直方向
ポジション1	地表面上	下向きカメラ	超音波センサ
ポジション2	孔の直上	下向きカメラ	下向きカメラ
ポジション3	首部内	レーザセンサ	上向きカメラ
ポジション4	孔の直下	上向きカメラ	超音波センサ
ポジション5	躯体部内	レーザセンサ	超音波センサ

図 5-2-2 飛行位置毎における使用センサの組み合わせ

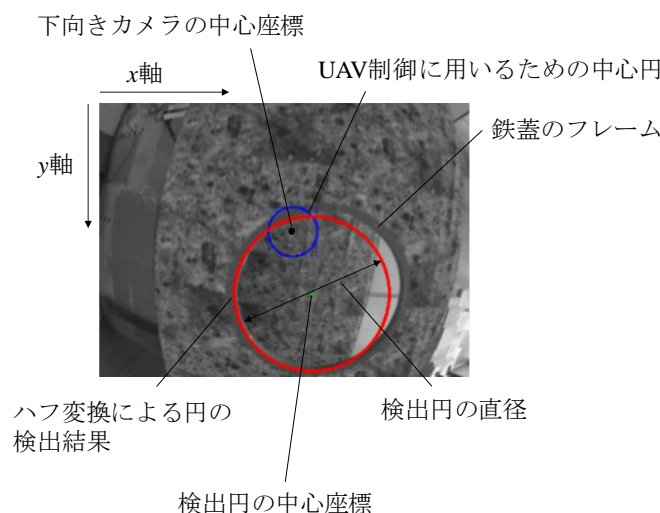


図 5-2-3 カメラセンサによる円の検出と自己位置推定方法

5. 2. 3 自己位置推定システムと自律制御方法

図 5-2-4 および図 5-2-5 にマンホールの画像を撮影するための UAV の動作と、この動作を自動的に飛行するためのセンサによる空間中の自己位置推定システムのフローを示す。図 5-2-4 はフェーズ 1 からフェーズ 3 まで、UAV の離陸から点検の動作までの推定システムのフローである。図 5-2-5 はフェーズ 4 以降の躯体部からの脱出から着陸までの飛行動作と推定システムのフローである。UAV の離陸後から、水平方向の位置を推定するセンサと垂直方向の位置を推定するセンサを切り替えながら、UAV の位置情報を推定する、本システムにより推定した UAV の位置と目標地点までの到達するための UAV の制御は、式(5-2-1)で示す PID 制御を用いた⁵⁻²⁻⁵⁾。

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5-2-1)$$

ここで、 $u(t)$ は操作量であり UAV を移動させる時のスロットル、ピッチ、ロールに相当する。 $e(t)$ は UAV 自身の位置と目標地点との距離の偏差である。 K_p , K_i , K_d は比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインと呼ばれる定数、 t は時間である。 $e(t)$ である UAV と目標物までの距離は、測距センサの場合は路面やボックスの壁面までの計測値を用いる。カメラの場合は、孔を検出した円の中心座標と撮影画像の中心座標までの画素距離 (pixel) や円の直径を用いる。これらの測距センサやカメラセンサから得られる情報を組み合わせて垂直方向と水平方向の移動を制御する。

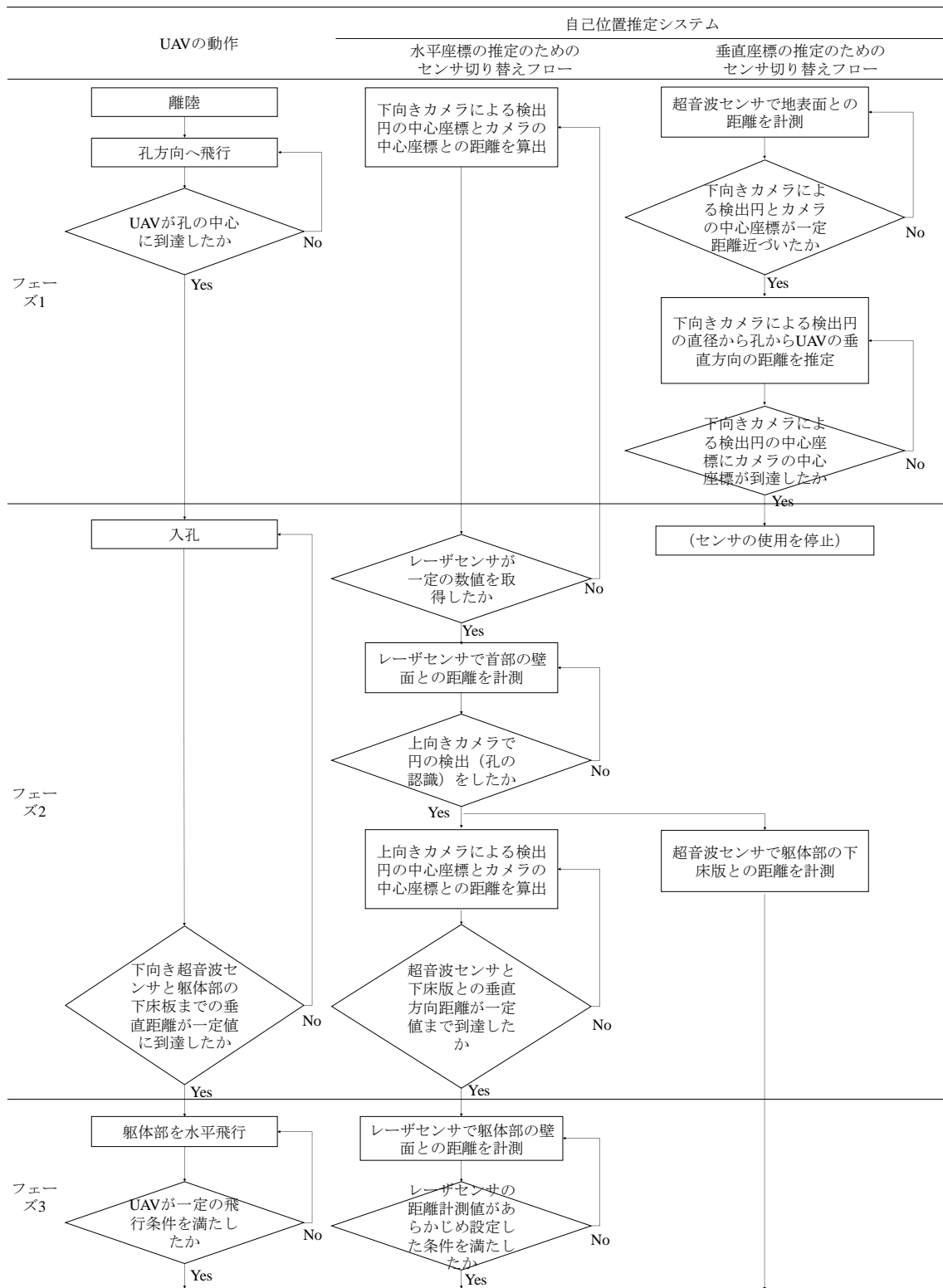


図 5-2-4 フェーズ1 からフェーズ3 までの UAV の動作と自己位置推定システム

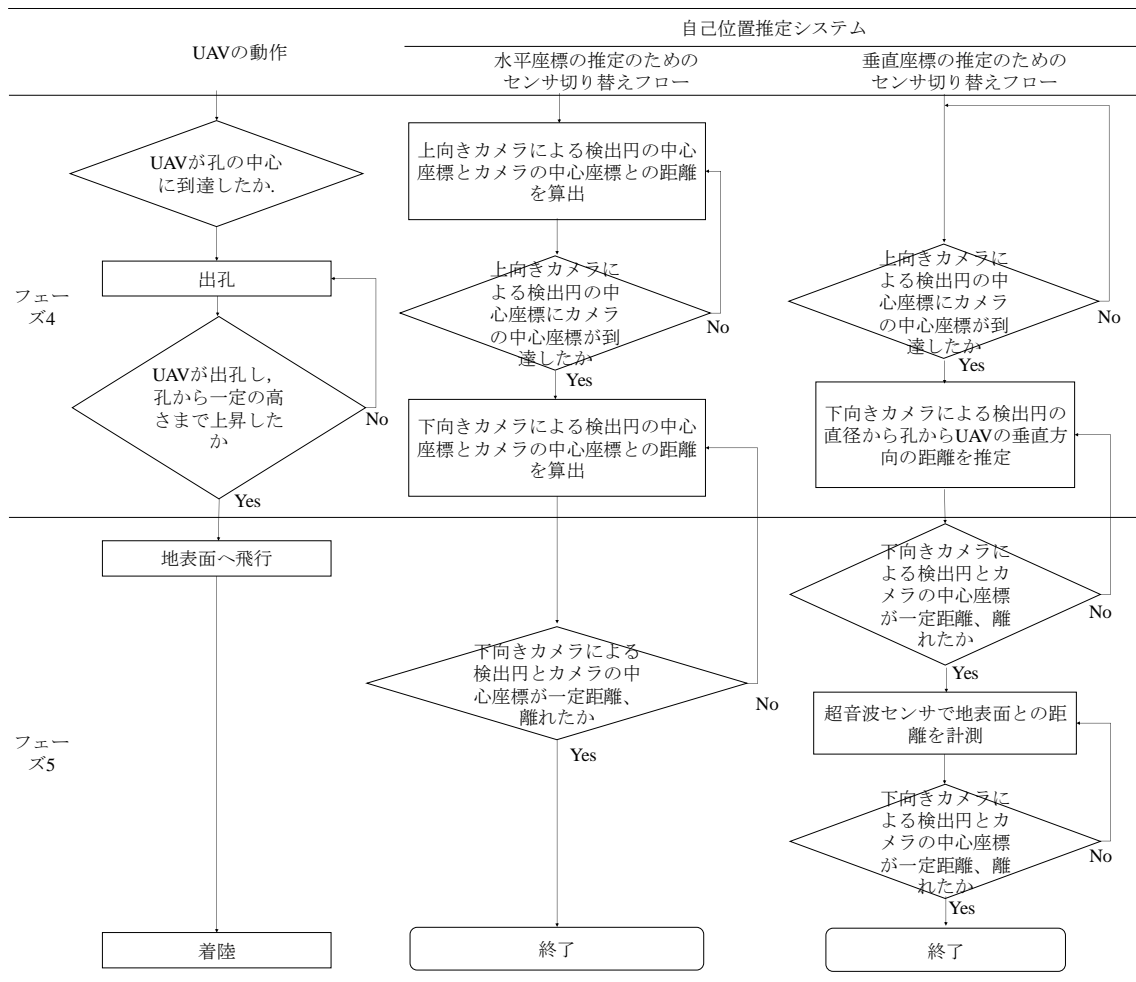


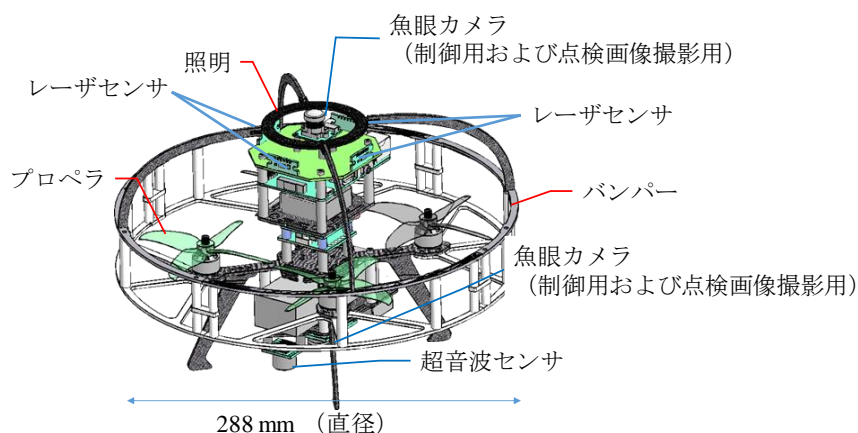
図 5-2-5 フェーズ 4 からフェーズ 5 までの UAV の動作と自己位置推定システム

5. 3 躯体部の自律飛行検証

5. 3. 1 試作 UAV と模擬環境

自己位置推定システムを用いた UAV の自律飛行検証を行う。図 5-3-1 は試作した UAV の概要図と諸元である。試作 UAV は、前方と後方、左右の水平方向 4 方向にレーザーによる測距センサを搭載している。鉛直下向きに超音波による測距センサと魚眼カメラ、鉛直上向きに魚眼カメラを搭載している。魚眼カメラは躯体部の点検画像の撮影用を兼ねる。UAV は 4 枚羽のプロペラ 4 つ、直径は 288 mm、高さは 200 mm である。

図 5-3-2 に検証を行うために作製した実寸大のマンホールと図 5-3-3 に UAV が飛行する経路の設定値を示す。UAV は予め設定した飛行経路の数値を目標に飛行する。マンホールの躯体部の形状は、UAV の水平方向の移動を検証するため 8 号 L 型という形状を選択した。UAV は地点 A から離陸し、躯体部に進入した後は、前方のカベまで 1.5 m まで近づき、その後、L 型の短い方向へ動く、この躯体部での飛行が点検のための画像撮影動作となる。動作終了後は出孔し、地点 A に着陸する。また、模擬マンホールの躯体部は、内部の様子を確認できるように片面をアクリル板とした。水平方向は UAV の前後のレーザーセンサと UAV の左型のレーザーセンサにより自己位置の計測を行う。



項目	内容	
形状	直径：288 mm (外周バンパーの直径) 高さ：200 mm 形状：4枚羽のプロペラ4つ、円形バンパー搭載	
機体重量	約780 g (バッテリー非搭載時)	
飛行時間	約5分 (2200 mAのバッテリー搭載時)	
搭載センサ	水平方向	レーザーセンサ (4個)
	鉛直上方向	魚眼カメラ (1個)
	鉛直下方向	超音波センサ (1個)、魚眼カメラ (1個)
照明	直径：600 mm, 光量：230 lm	

図 5-3-1 試作 UAV の概要図と諸元



模擬マンホールの写真

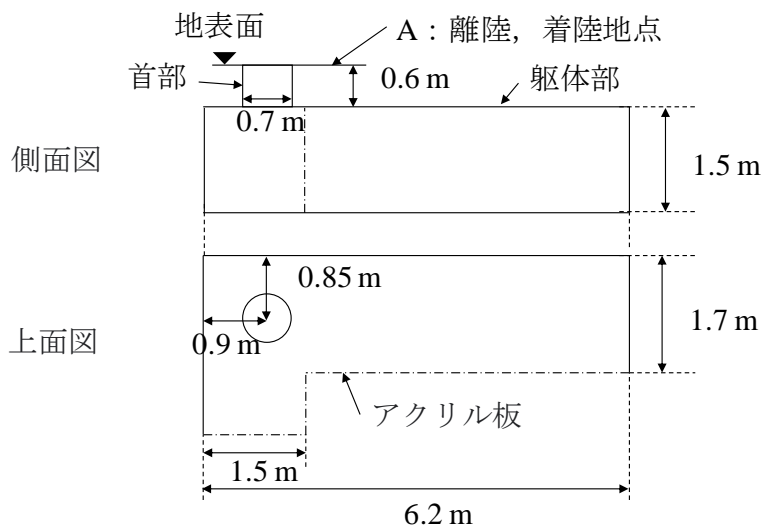


図 5-3-2 作製した模擬マンホールの写真と図面

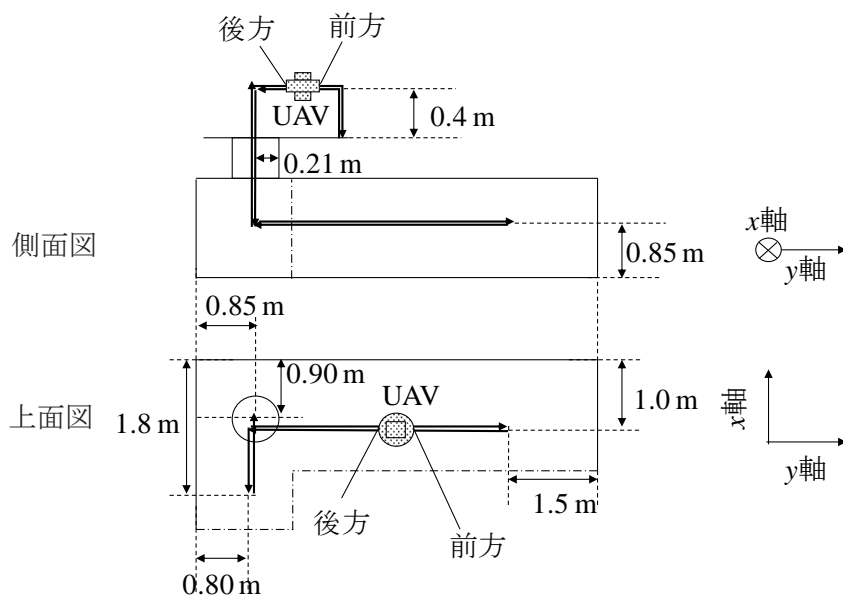


図 5-3-3 UAV の飛行経路

5. 3. 2 検証結果

(1) フェーズ1からフェーズ5までの一連動作について

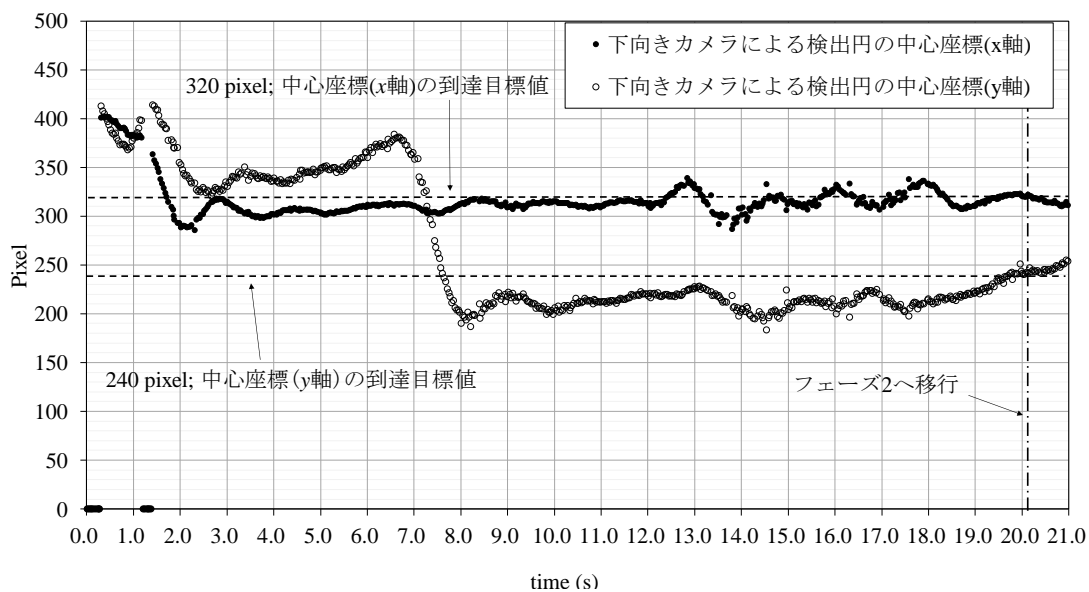
図5-3-4にUAVの自律飛行の様子を示す。フェーズ1では、UAVは離陸後に下向きカメラによる撮影画像からマンホールの孔の円検出を行い、円の中心とUAVの中心が一致するように飛行を行う。UAVの中心と下向きカメラの中心は一致しており、撮影画像の中心座標と検出した円の中心座標が一致するように制御を行う。図中における入孔準備は、孔の中心とUAVの中心を合わせている様子であり、孔の上でホバリングを行いながら、位置の微調整を行っている。この際の高度は、検出した円の直径から推定を行っている。UAVの中心と検出した円の中心が一致すると下降を行い、図中のフェーズ2における入孔後が示すように、躯体部の一定の高さまで下降を行う。躯体部内部での高度の維持は、下向きの超音波センサによって飛行高さを制御している。躯体部に入った後は、水平方向のレーザセンサにより躯体部の点検飛行を行う。この際に、UAVの上部についた照明を点灯させて、上床版の映像の撮影を行う。点検飛行が完了後は、フェーズ4として出孔動作に移る。図に示すように、上向きカメラによりマンホール孔の円検出による中心座標とUAVの中心を一致するように制御を行い、一致後に上昇し、躯体部から出孔する。UAVは離陸から着陸まで、一連の自律飛行を実現することができた。飛行時間は約146秒であった。本項で構築した自己位置推定システムとその推定位置を用いたUAVの飛行制御によって、非GPS環境下において自律制御を実現することが実証された。以降から、提案した自己位置推定システムによる飛行位置と制御内容の詳細を説明する。



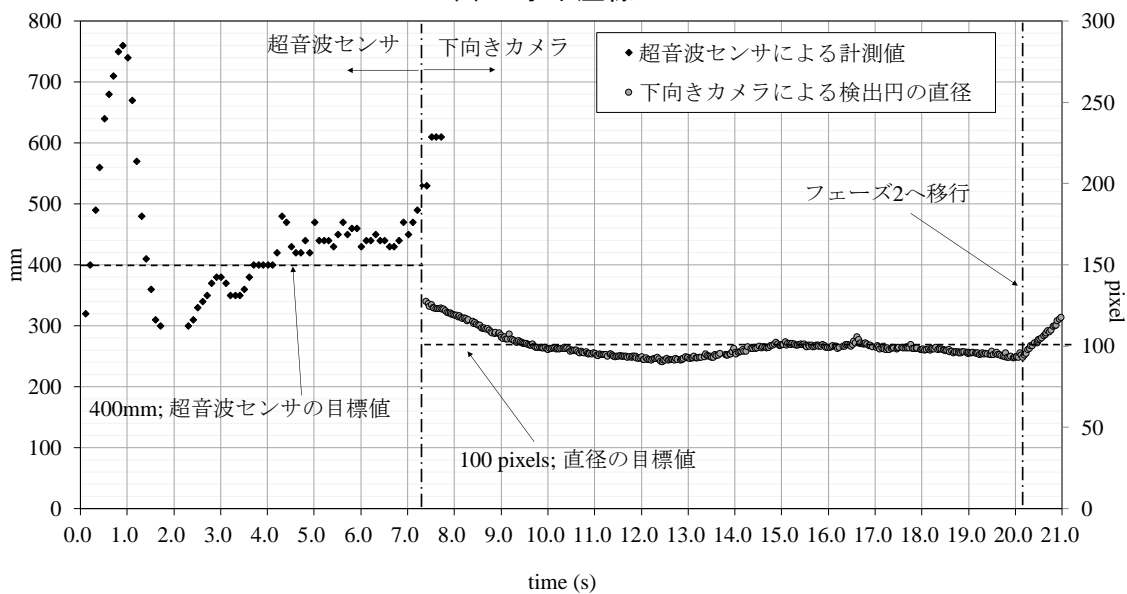
図5-3-4 UAVの自律飛行の様子

(2) フェーズ 1 における飛行動作の検証

図 5-3-5 にフェーズ 1 において自己位置推定システムにより取得した位置情報を示す。図 5-3-5 (a) が水平座標、(b) が垂直座標の情報である。(a) では、下向きカメラにより検出した円の中心座標 (x 軸と y 軸) が記載されている (図 5-2-3)。検出円の中心座標が撮影画像の中心座標 (320 pixel, 240 pixel) と一致するように UAV の制御を行う。(b) では、離陸直後は超音波センサにより高さが 400 mm になるように制御を行った後、孔の直上では検出円の直径から高さを推定する。検出円の直径が 100 pixel を目標値とすると超音波センサによる 400 mm と同等の飛行高さとなる。UAV は検出円の中心と撮影画像の中心座標 (320 pixel, 240 pixel) が一致するとフェーズ 2 に移行する。



(a) 水平座標

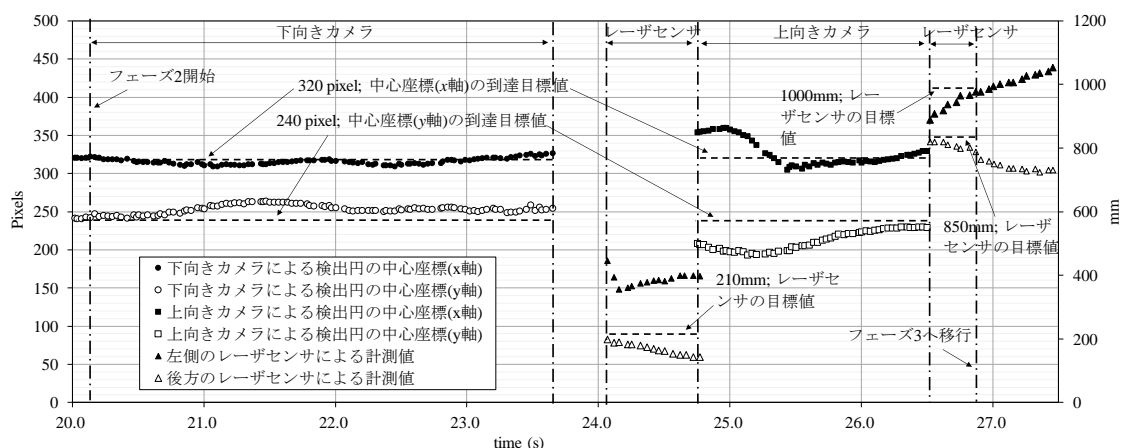


(b) 垂直座標

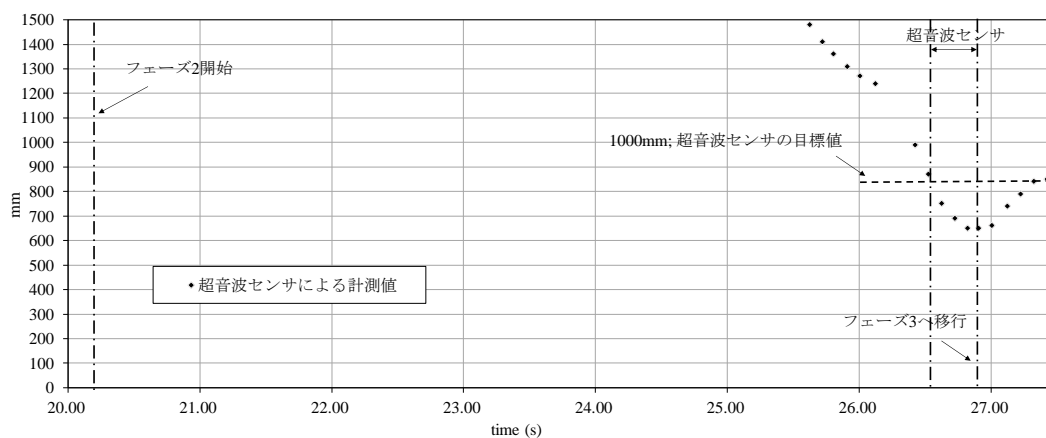
図 5-3-5 フェーズ 1 における飛行位置情報

(3) フェーズ 2 における飛行動作の検証

図 5-3-6 にフェーズ 2 における取得した位置情報を示す。図 5-3-6(a) が水平座標、(b) が垂直座標の情報である。(a) では、入孔動作において UAV が下降中は下向きカメラによる検出円の中心座標が撮影画像の中心と一致するように飛行を行う。しかし、首部に入る直前に撮影画像に孔が写らなくなり、円検出ができなくなる飛行空間がある。図中の 24 秒付近では首部に入る直前と考えられ下向きカメラで円検出ができず、また、首部に入る前であるため水平方向のレーザセンサの値も取得できない瞬間があり惰性により飛行する。首部内ではレーザセンサは、210 mm の値を維持するように UAV を制御しているが、本検証では左側と後方のレーザセンサは 210 mm から大きく離れていた。首部通過後は上向きカメラにより地表面の孔の円検出を行い、撮影画像の中心に検出円の中心が一致するように制御を行う。その後、躯体部において一定の高度に到達したら左側と後方のレーザセンサにより、躯体部内の水平座標を取得する。(b) では、下降中は高さの位置情報の取得は行わない。躯体部に入ると、上向きカメラが円を検出したら超音波センサを動作させて、センサの値が 1000 mm を取得するように制御を行う。



(a) 水平座標

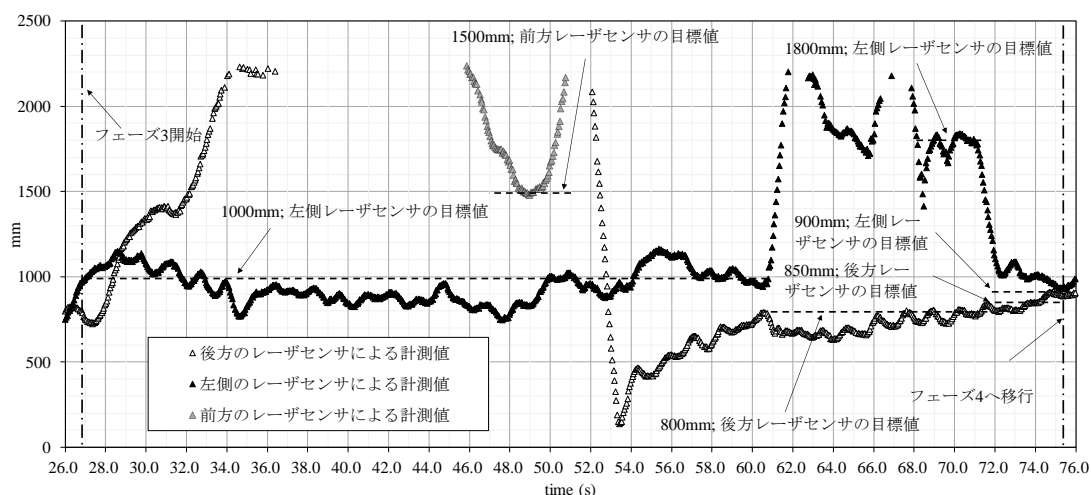


(b) 垂直座標

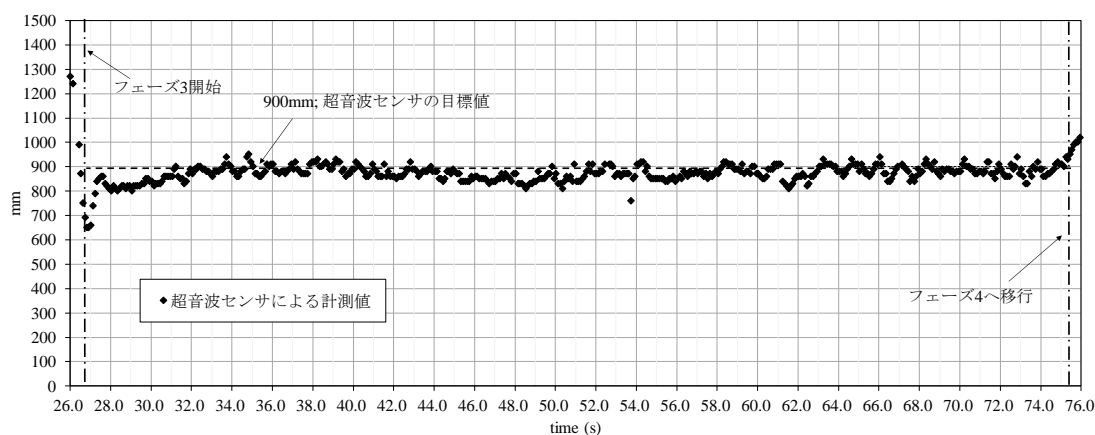
図 5-3-6 フェーズ 2 における飛行位置情報

(4) フェーズ3における飛行動作の検証

図5-3-7にフェーズ3における取得した位置情報を示す。図5-3-7(a)が水平座標、(b)が垂直座標の情報である。(a)では、水平座標の制御を、後方と前方のレーザセンサと左側のレーザセンサを用いて行う。フェーズ3開始後、前方のレーザセンサの値が1500mmになるまでUAVは前方方向に飛行する。これは、レーザセンサの計測の限界値が約2.2mであったためである。UAVが前方に移動中、左側のレーザセンサは常に1000mmを維持するように制御を行う。前方のレーザセンサが1500mmに到達したら、今度は後方のレーザセンサが800mmを取得するまで後方に飛行を行う。この往復の動きが完了すると、躯体部のL字の長手方向の飛行が完了する。その後は、左側のレーザセンサが1800mmを取得するまで飛行する。これは、L字の短手方向への飛行である。左側のレーザセンサが1800mmを取得した後は、フェーズ4に移行する。孔の直下に戻るため、後方のレーザセンサが850mm、左側のレーザセンサが900mmを取得するように飛行する。(b)では、超音波センサはフェーズ3では常に900mmを維持するように飛行する。



(a) 水平座標

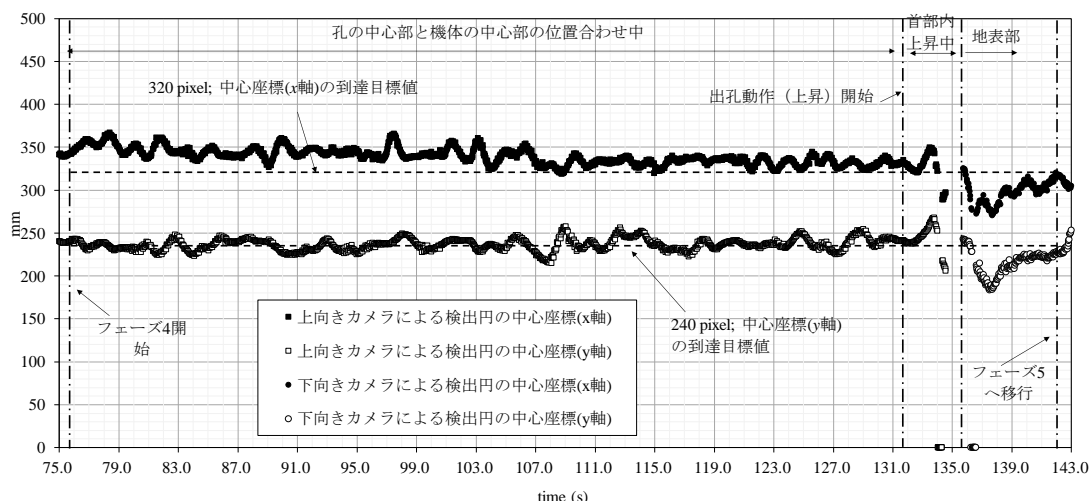


(b) 垂直座標

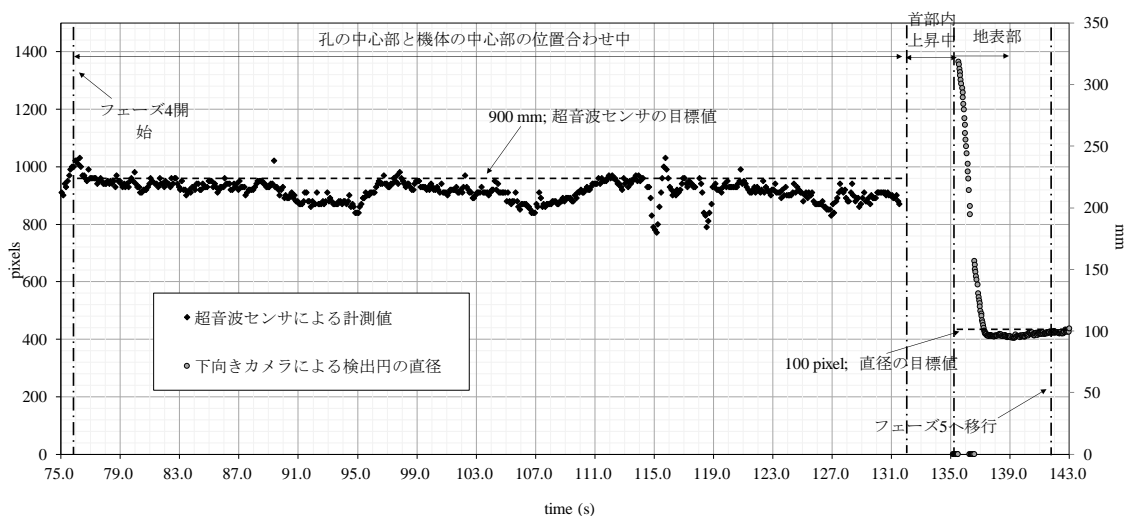
図5-3-7 フェーズ3における飛行位置情報

(5) フェーズ 4 における飛行動作の検証

図 5-3-8 にフェーズ 4 における取得した位置情報を示す。図 5-3-8(a) が水平座標、(b) が垂直座標の情報である。(a) では、上向きカメラによる円検出を行い、UAV を孔の中心に移動するように制御を行う。検出する円は、地上面との孔である。本検証では、この際に約 56 秒の時間を要した。これは、躯体部内部の狭小空間において UAV が自身で起こした風に煽られて、飛行位置が安定しなかったためである。検出円の中心座標と撮影画像の中心座標が一致すると出孔（上昇）動作を開始する。フェーズ 4 では、首部内でレーザセンサを用いず、上向きカメラの円検出にて制御を行った。地表部に出た後は、下向きカメラにより円検出を行い、水平座標が孔の中心から外れないように制御を行った。(b) では、出孔動作開始までは超音波センサを用いた。超音波センサの値がフェーズ 3 と比較してばらついている。これは、UAV が自身の風に煽られていたためである。首部内は一定の速度で上昇し、地上部では検出円の直径を用いて高さを制御した。



(a) 水平座標

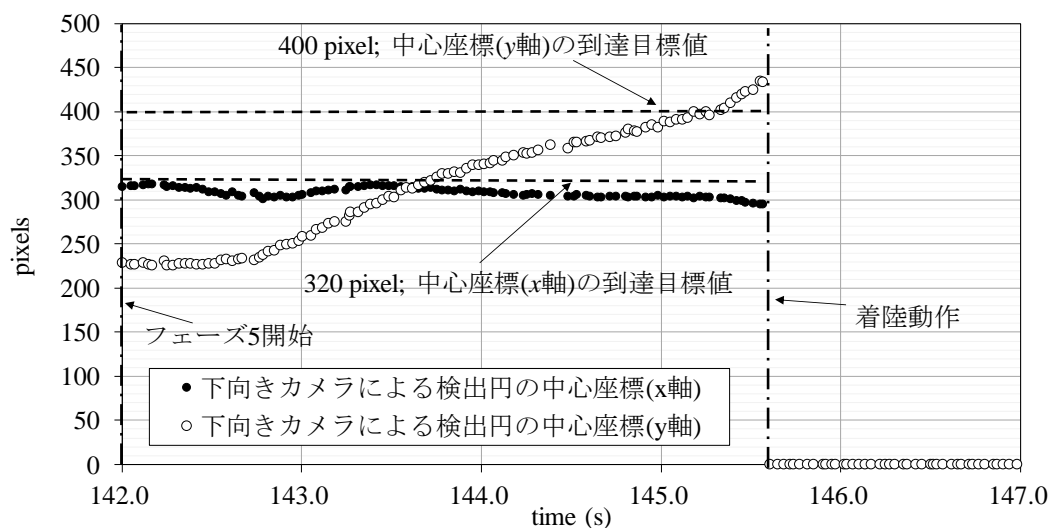


(b) 垂直座標

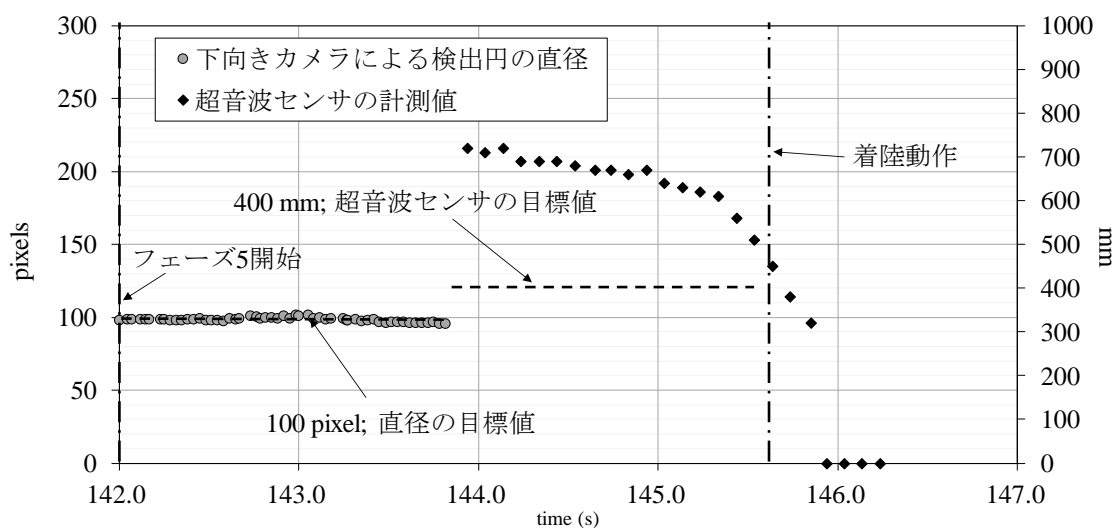
図 5-3-8 フェーズ 4 における飛行位置情報

(6) フェーズ5における飛行動作の検証

図 5-3-9 にフェーズ3 における取得した位置情報を示す. 図 5-3-7(a) が水平座標, (b) が垂直座標の情報である. (a) では, 下向きカメラの円検出によって, 撮影画像の中心と検出円の中心が離れた場所まで飛行するように制御を行った. 検出円の x 軸座標は 320 pixel を維持したまま, y 軸座標が 400 pixel になるように UAV を前方に移動させている. 400 pixel に到達したら, 着陸動作に移り, UAV を下降させた. (b) では, 下向きカメラによる円検出の直径から高さを維持しながら, 孔の直上から離れた位置から超音波センサを用いた.



(a) 水平座標



(b) 垂直座標

図 5-3-9 フェーズ5 における飛行位置情報

5. 4 現用マンホールを用いた躯体部の撮影と露筋の検出

5. 4. 1 検証方法

現用マンホールを用いた上床版の露筋の撮影と撮影画像からの劣化の検出を行う。表 5-4-1 に撮影の検証方法を示す。検証を行うマンホールは、直線形の 6 号マンホールであり、躯体部の天井に相当する上床版に 3 カ所の露筋が発生している。このマンホールに対し、自律飛行する試作 UAV により、上床版の画像の撮影を行う。撮影画像を 4 章 4 節 1 項にて構築した U-Net の深層学習モデルを用いて露筋を検出する。図 5-4-1 に対象マンホールの寸法、露筋の寸法、露筋の画像を示す。図のように、露筋は 3 カ所あり、それぞれ、大きさが(1)は 330 mm、(2)は 90 mm、(3)は 80 mm であった。劣化ランクでは、ランク 2 相当だと考えられる。図 5-4-2 に UAV の躯体部の飛行経路を示す。躯体部に進入後は、躯体部の長手方向に直線飛行して、壁から 0.8 m のところで、反対のカベ

表 5-4-1 検証方法

条件項目	内容
対象マンホール	現場設置の直線形6号マンホール
劣化	マンホールの上床版に3カ所の露筋
撮影方法	試作UAVによる自律飛行による撮影（約1秒に2回の撮影）
撮影対象	試作UAVの上向きカメラによるマンホールの上床版
照明	230ルーメン（上向きカメラの撮影方向へ照射）
劣化検出	4章4節1項にて構築した学習モデルにより露筋を検出

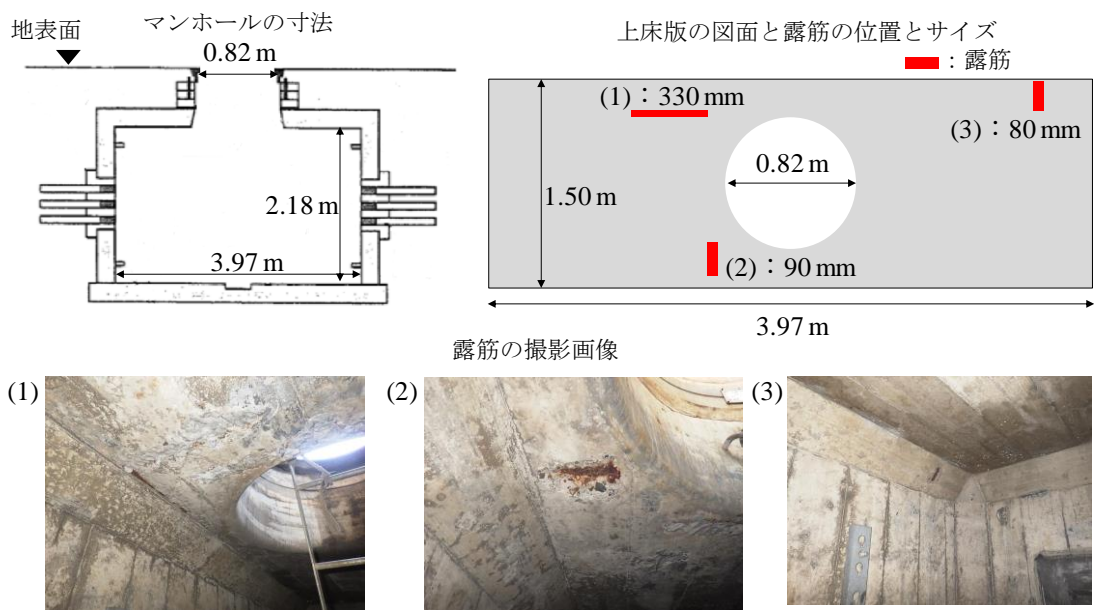


図 5-4-1 マンホールの寸法および劣化の様子

まで同じ距離を移動する。躯体部の床からは、飛行高さ 1.5 m を維持するように設定した。上床版までのカメラレンズの距離は 1.5 m の飛行高さ と UAV の高さ 0.2 m を足して、約 0.5 m である。躯体部で撮影を行う際には、UAV の上部に搭載している照明にて上床版を照らして撮影をおこなった。照明を点灯した際の上床版の照度の結果を図 5-4-3 に示す。照明がない場合、上床版の照度は孔に最も近い(a)において 8 lux 程度であった。また、UAV を(a)の位置で上床版から距離 50 cm に設置した場合は、(a)の位置で 130 lux、(b)で 110 lux、0.8 m 先の(c)では 35 lux であった。

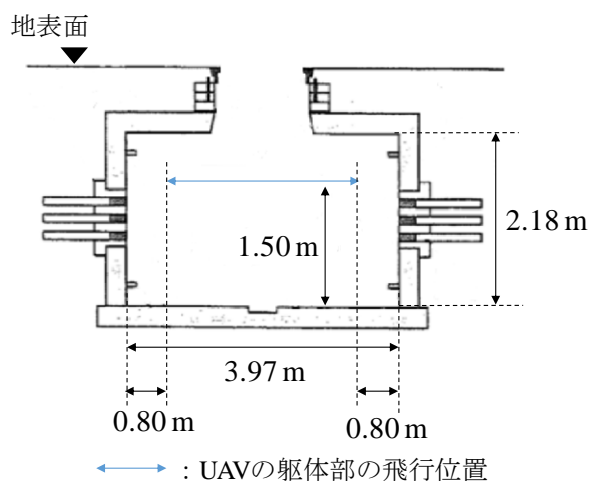


図 5-4-2 UAV の飛行位置

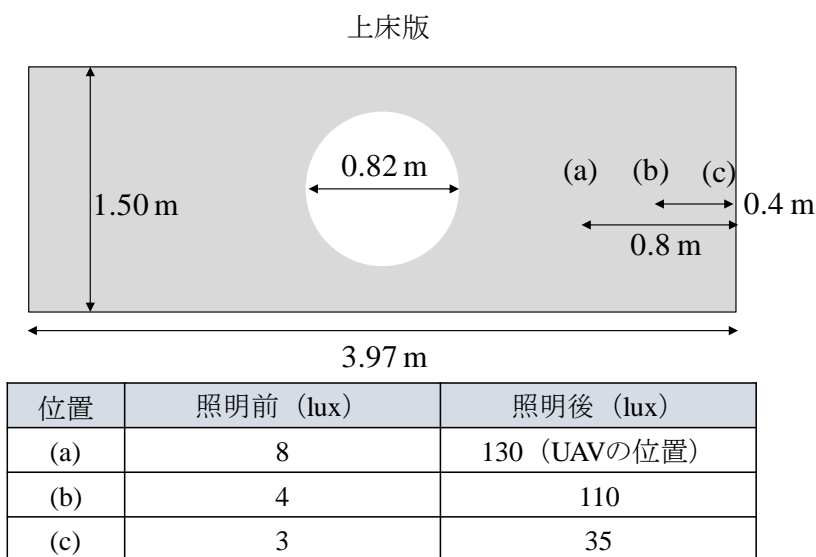


図 5-4-3 照度の変化

5. 4. 2 検証結果

図 5-4-4 に自律飛行中の UAV の写真を示す。本マンホールは車道上に設置されているため、安全のために地上部にネットを設置した。また、マンホール孔の周辺には、UAV が不時着しても破損しないように白い緩衝材を敷いている。UAV は、現用マンホール

において、離陸から入孔、躯体部での移動、出孔し着陸までの一連の自律飛行動作を完了することができた。また、図 5-4-5 に UAV により撮影した画像を示す。一連の自律飛行にて 88 枚の画像が撮影できた。55 枚は UAV が揺れることによって、画像がブレていたが、33 枚は上床版の様子が鮮明に写っており、上床版の全体を漏れなく撮影でき、点検画像としては十分な枚数を UAV により撮影できることがわかった。

以上の結果より、提案する UAV による点検画像の撮影手法は、実地において活用できることがわかった。

しかながら、マンホールの地上部における緩衝材の設置や、UAV の躯体部への不時着時の回収方法、UAV の防水防塵試験といった運用時の課題への対応が必要である。

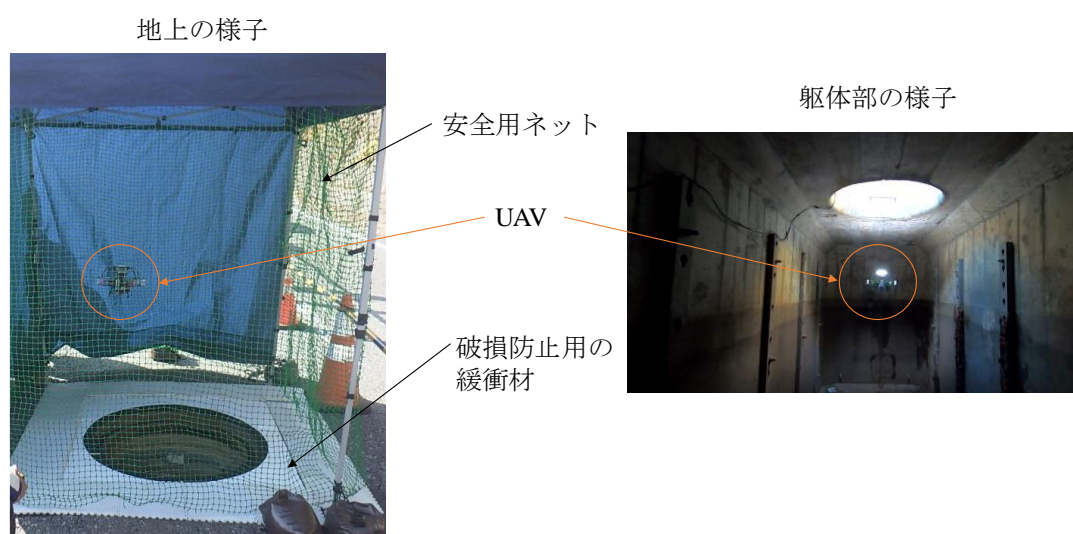


図 5-4-4 UAV の飛行の様子

項目	内容	撮影画像
撮影画像	88枚	—
ピントがあった画像	33枚 (38%)	
ブレた画像	55枚 (62%)	

図 5-4-5 UAV による撮影画像の結果

5. 4. 3 露筋検出の結果

UAV で撮影した画像に対して 4 章 4 節 1 項の検証に用いた U-Net による深層学習モデルにより、露筋の検出を行った結果を表 5-4-2 に、図 5-4-6 に検出画像を示す。対象とした画像は、33 枚のピントが合った画像のうち、撮影画像の中央付近に露筋が写っている画像を 10 枚選定した。この結果、*Recall* が 1.000 となり、すべての画像における露筋の領域が検出された。この結果より、UAV で撮影した画像から露筋を漏れなく検出できることを確認した。一方で、*Precision* が低く、露筋以外の場所も多く検出されることとなった。この結果は、4 章 4 節 2 項で検証した結果と比べると、*Precision* が 4 分の 1 程度であることから、露筋領域以外が 4 章 4 節 2 項の結果に対して 4 倍程度多く検出されることがわかった。この要因は、UAV での撮影画像は照度が足りないことから壁面の汚れが黒く写っており、これらを検出しているためであると考えられる。また、露筋周辺のコンクリート領域を過剰に検出していた。この要因は、照度不足により露筋の赤錆や凹凸の領域が明確でないためであると考えられる。これらから、照度が不足すると、

表 5-4-2 露筋検出の結果

画像	露筋	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>
1	(1)	0.9789	1.0000	0.0482	0.0919
2	(1)	0.9875	1.0000	0.0837	0.1543
3	(2)	0.9942	1.0000	0.1692	0.2892
4	(2)	0.9764	1.0000	0.0438	0.0838
5	(2)	0.9939	1.0000	0.2610	0.4134
6	(2)	0.9946	1.0000	0.2156	0.3544
7	(2)	0.9922	1.0000	0.1225	0.2181
8	(3)	0.9958	1.0000	0.0925	0.1693
9	(3)	0.9973	1.0000	0.0727	0.1355
10	(3)	0.9941	1.0000	0.1765	0.2998
平均		0.9905	1.0000	0.1286	0.2276

表 4-4-2 露筋検出の結果（再掲）

劣化ランク	1	2	3	4	Total
定義	微小な露筋が1, 2箇所発生した初期状態	劣化ランク1相当の微小な露筋が複数個所に発生した状態	劣化ランク1もしくは2の微小な露筋が鉄筋の軸方向に進行した状態	3の状態が進行して、周辺のコンクリート剥離を伴い露筋が進行した最終状態	-
画像枚数	17枚	29枚	30枚	24枚	100枚
<i>Accuracy</i>	0.9903	0.9849	0.9784	0.9579	0.9774
<i>Recall</i>	0.9832	0.9415	0.9917	0.9722	0.9710
<i>Precision</i>	0.3976	0.4187	0.4397	0.4631	0.4321
<i>F-measure</i>	0.5477	0.5495	0.5996	0.6115	0.5791

露筋領域以外の誤った領域の検出 (FP) が増えるため、一定以上の照度が必要であることがわかった。

以上の結果より、撮影画像に写った露筋領域を漏れなく検出できていることから、実地で活用できる可能性は高いと考えられる。

しかしながら、露筋撮影時の照度不足による劣化領域以外の検出箇所が多く発生したため、UAV による照明条件の検討が必要となる。さらに、本検証に用いた深層学習モデルは、UAV により撮影した画像を学習させていない。そのため、UAV での撮影画像を用いて深層学習モデルを作製することにより、さらに精度が向上すると考えられる。

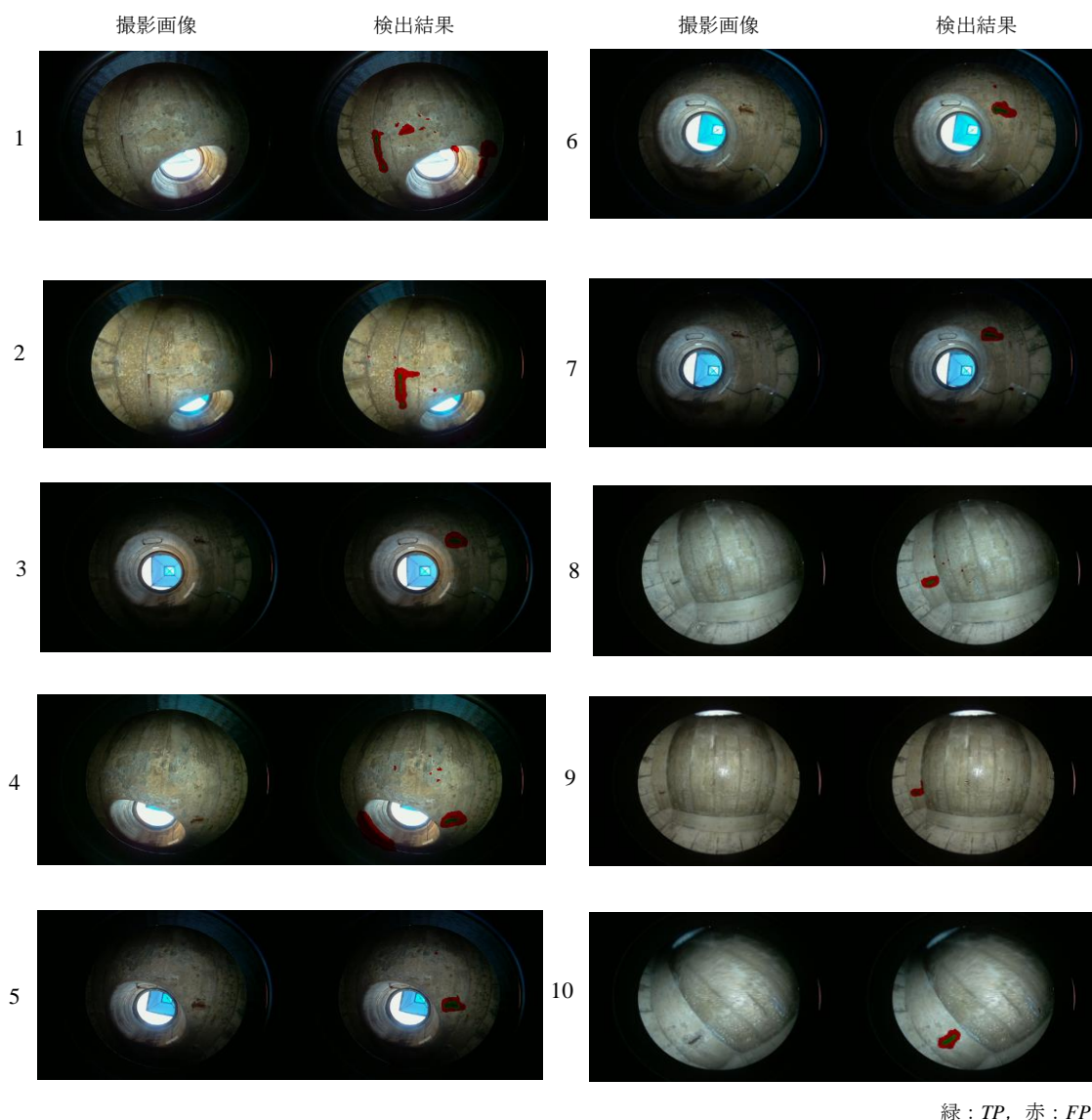


図 5-4-6 UAV による撮影画像の露筋検出結果

5. 5 まとめ

本章では、UAVによる画像撮影手法、非GPS環境下の躯体部において自律飛行を行うための自己位置推定システムと、本システムによるUAVの制御方法の提案、試作UAVによる現用マンホールでの点検用画像の撮影、劣化検出の検証を行った。

以下に、得られた知見を示す。

- 鉄蓋部では、3章にて提案した鉄蓋の劣化検出手法が適用できる条件から、UAVによる撮影手法を提案した。鉄蓋とUAVのカメラの仰角が一定範囲内になるように飛行すれば、点検用の画像を撮影できることがわかった。躯体部では、躯体部の点検画像を撮影するための手法とUAVの飛行手順を提案した。
- 非GPS環境下となる躯体部の自律飛行において、レーザセンサ、超音波センサ、カメラセンサの3種類のセンサによる自律飛行のための自己位置推定システムを構築した。3種類のセンサと本システムを搭載したUAVを試作し、模擬マンホールで検証した結果、地上からのマンホールへの入孔、躯体部の飛行、出孔から着陸までの一連の飛行動作を実現できた。
- 現用マンホールにおいてUAVの自律飛行を実現させ、UAVに搭載したカメラを用いて、上床版の露筋を漏れなく撮影できることを確認したことから、実地で十分に適用できると考えられる。しかしながら、マンホールの地上部における緩衝材の設置や、UAVの躯体部への不時着時の回収方法、UAVの防水防塵試験といった運用時の課題への対応が必要である。
- UAVの撮影画像から4章4節1項の検証に用いたU-Netによる深層学習モデルにより露筋を検出することが可能であることを確認した。検出結果は、*Recall*が1.000となり、画像のすべての露筋の領域は検出され、露筋の検出手法はUAVの撮影画像でも適用できることがわかった。一方で、露筋領域以外の領域が多く検出されることとなった。この結果は、4章4節2項で検証した結果と比べると、4倍近くになっていた。UAVで撮影した画像は照度不足のため壁面の汚れが黒く写っている領域を検出していた場合や、露筋と周辺のコンクリートとの境界部が不明瞭で露筋領域の周辺を多く検出していた場合が多かった。
- UAVの撮影画像を用いた露筋領域の検出において、露筋領域を漏れなく検出できていることから、実地で活用できる可能性は高いと考えられる。しかしながら、露筋撮影時の照度不足による劣化領域以外の検出箇所が多く発生したため、UAVによる照明条件の検討、さらに、本検証に用いた深層学習モデルは、UAVにより撮影した画像を学習させていないため、UAVでの撮影画像を用いた深層学習モデルを作製することにより、さらなる精度向上が可能になる。

参考文献

- 5-2-1) SRF02 Ultrasonic sensor:
<https://www.robot-electronics.co.uk/htm/srf02tech.htm> (2020年12月15日閲覧).
- 5-2-2) A new generation, long distance ranging Time-of-Flight sensor based on ST's FlightSense technology: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vl5311x.pdf>,
(2020年12月15日閲覧).
- 5-2-3) RaspberryPi VR220: <https://products.entaniya.co.jp/ja/2018/01/09/raspberrypi-vr220-camera-is-on-sale/>, (2020年12月15日閲覧).
- 5-2-4) Burger, W., and Burge, M., "Digital Image Processing An Algorithmic Introduction Using Java," *Texts in Computer Science*. London, pp. 176-178, 2016.
- 5-2-5) 須田信英: PID 制御則について, システム／制御／情報, Vol. 42, No. 1, pp. 2-6, 1998.

第6章 結論

6. 1 本研究で得られた知見

通信土木設備は通信インフラを支える重要な設備であるが、高度経済成長期やその直後に大部分が建設されたため、近年では設備の高齢化が進んでいる。これらの設備を安全に維持管理していくためには定期的な点検が必要である。しかしながら、点検を将来的にわたって継続していくためには、膨大な設備に対する人や機材等のコストの削減、地下作業や車道作業が必要なことによる作業者の安全性確保、さらに点検技術者の確保といった課題への対策が必要となる。

そこで、本論文では、通信土木設備の中でも特に高齢化の割合が高く、かつ点検時のコストが大きいマンホールを対象として、点検を効率的かつ安全に実施するための手法の提案を行った。提案手法は、画像認識を用いてマンホールに発生した劣化を検出する手法、および UAV により点検用画像を撮影する手法の提案である。

画像認識による劣化検出では、3章にてマンホールの鉄蓋部に発生した凹み段差量の計測手法と上蓋の表面模様の摩耗量の推定手法を提案した。また、4章にてマンホールの躯体部のコンクリートの露筋と躯体部に設置している金物設備の腐食の検出手法を提案した。各劣化の進行度合いによって劣化ランクを定義し、劣化ランクごとの計測や検出精度について検証を行った。UAV による画像撮影手法では、5章にて非 GPS 環境下であるマンホールの躯体部を自律飛行する手法の提案と現用マンホールを用いた劣化の撮影および劣化検出の検証を行った。

以上、各章から得られた知見を6項目に大きく分類し、本論文の結論を示すと以下の通りとなる。

(1) 3章の鉄蓋部の段差量の計測手法において得られた知見

- 段差部の画像特徴である一定の陰影幅と連続する円弧形状の物体に対して強く反応するフィルタを用いれば、段差箇所以外の不要なエッジの検出を抑制し、段差箇所のエッジの検出が可能である。
- 段差量のノギスによる計測と提案手法による計測の比較検証を実施した結果、提案手法のノギス計測から差は -0.17 mm、標準偏差は 0.63 mmとなり、ノギスとの差が標準偏差で、 1.00 mm未満であることを確認した。また、劣化ランク毎ではランクが高くなると、ノギス計測との差が大きくなる傾向となったが、劣化ランク2, 3, 4においては差(標準偏差)が 1.00 mm未満に収まっており、ノギス計測に対して 1.00 mm未満での計測精度であった。提案手法を実地にて用いる場合には、段差部の陰影幅が太くなってしまいう早朝や夕方、短くなってしまいう正午とい

った時間帯を避けた鉄蓋の撮影や、計測結果の信頼性向上のために1カ所の鉄蓋において複数枚の画像撮影による計測を行えば、十分に活用可能である。

(2) 3章の鉄蓋部の表面模様の摩耗量の推定手法において得られた知見

- rotated LBPを用いた画像特徴の抽出と学習データベースを用いた模様高さの推定手法を用いることによって、鉄蓋の部分的な模様高さを推定することが可能である。
- 模様高さのノギスによる計測と提案手法による推定値の比較検証を実施した結果、提案手法の推定値のノギス計測値からの差は-0.44 mm、標準偏差は0.45 mmとなり、ノギス計測との差が標準偏差で、1.00 mm未満であることを確認した。また、劣化ランク毎では劣化ランクが高くなると、ノギスとの差は小さくなり精度が向上していた。ランク2, 3, 4では差（標準偏差）が1.00 mm未満に収まっており、ノギス計測に対して1.00 mm未満の計測精度であった。提案手法を実地にて用いる場合には、曇天や早朝や夕方といった照度が小さい時間帯を避けた鉄蓋の撮影や、計測結果の信頼性向上のために1カ所の鉄蓋において複数枚の画像撮影による計測を行えば、十分に活用可能である。

(3) 3章の視認性を向上した鉄蓋模様と模様の認識手法の提案において得られた知見

- 模様の取り替えタイミングになると最表面の突起の形状が変化するデザインと、形状の認識手法を提案した。提案の突起を用いることによって、解像度が200万画素のカメラで撮影した画像からでも取り替えタイミングとなる摩耗した模様形状の認識を可能とした。本検証結果より、提案模様は2018年より実地において適用されている。

(4) 4章の露筋と金物腐食の検出手法によって得られた知見

- 露筋と金物腐食の検出には、深層学習手法のU-Netを用いた。U-Netの損失関数を*AUC maximization*にすることによって、既往の損失関数*Binary Cross Entropy*と比べて、*Accuracy*と*Recall*の値の精度の向上を確認した。さらに、学習枚数と精度の影響評価を行い、露筋と金物腐食ともに2000データほどの学習データセットで妥当であることを確認した。
- 露筋の検出では、全劣化ランクの平均で*Accuracy*は0.9774、*Recall*は0.9710であり、高い精度で露筋を検出できることを確認した。劣化ランクごとにおいては、劣化ランク3において露筋領域を約99%、最も低い劣化ランク2でも約94%といった高い精度で検出可能である。
- 露筋の検出において、劣化ランクが低い1と2では照度不足により、露筋領域の色合いや凹凸形状が撮影画像では見えづらく精度が低下したと考えられる。一方、劣化ランクが最も高い4は3と比べて、露筋の領域が広すぎて、一部の露筋領域に照度が足りない画像があった。検出には、露筋の色や錆こぶのような凹凸形状

が画像から確認できることが重要である。実地において十分活用可能であるが、十分な照度による撮影を行うことで、さらに高い精度で運用できる。

- 金物腐食の検出では、全劣化ランクの平均で *Accuracy* および *Recall* は 9 割を超えた。劣化ランク 1, 2 では、金物腐食領域を 87%以上で検出可能、劣化ランク 3 以降では 93%以上の高い精度で検出可能である。
- 金物腐食において、劣化ランク 1 は腐食の領域が小さく、検出精度が低下していた。劣化ランク 2 では、腐食が広がっている境界線部における同定が難しい結果となった。劣化ランク 3 以降では、金物の大部分に腐食が進行して、赤褐色や黒色の錆汁や錆こぶが画像中から確認できるため、精度がよいと考えられる。これらのことから、劣化ランク 1 のような初期の小さい領域と劣化ランク 2 の鋼材に対して進行している腐食の境界部の検出が難しく、腐食の色や錆こぶのような凹凸形状が画像中に見える領域は検出精度が高い。補修の可否判定が必要となる劣化ランク 3 以降で 93%以上の検出精度のため、実地において十分活用可能である。

(5) 5章の UAV による画像撮影手法について得られ知見

- 躯体部の自律飛行において、レーザセンサ、超音波センサ、カメラセンサの 3 種類のセンサによって非 GPS 環境下で自己位置を計測できることを確認し、自己位置推定システムを構築した。
- 自己位置推定システムを搭載した UAV を試作し、現用マンホールで検証を行った結果、地上からマンホールへの入孔、躯体部の飛行、出孔から着陸までの一連の飛行動作を実現した。また、上床版に発生した露筋を漏れなく撮影できることを確認した。これらの技術は実地において活用可能である。

(6) 5章の UAV による撮影画像からの劣化検出について得られ知見

- 露筋領域検出の結果、*Recall* が 1.000 となり、UAV の撮影画像から露筋領域を漏れなく検出可能である。
- 4章での露筋検出の検証結果と比較して、露筋以外の領域を検出するケースが多く発生した。UAV で撮影した画像の照度が足りなく、黒く写った壁面の汚れを検出しているケース、露筋領域の周辺のコングリートの領域を多く検出しているケースへの対応が必要であった。さらに、本検証に用いた深層学習モデルは、UAV により撮影した画像を学習させていないため、精度が低下した。これらの課題を踏まえても、露筋領域を漏れなく検出できているため、実地で活用できる可能性は高いと考えられる。

6. 2 今後の課題

画像認識による劣化検出手法と UAV による画像撮影手法において今後の課題を示す。

- 鉄蓋部の凹み段差の計測手法において、撮影時の日照条件がノギス計測とのバラツキを大きくしている。撮影時の照明の位置を考慮した検討を行うことによって、さらに精度が向上する。
- 鉄蓋部の上蓋模様の摩耗の推定手法において、データベースに登録されている 0.5 mm 未満の鉄蓋画像を増やすことによって劣化ランク 4 の推定精度を向上できると考えられる。また、撮影時の照度によって、劣化ランク 1 および 2 の鉄蓋が影響を受けやすい。撮影時の照度影響を適正化することによって、ランクが低い劣化の同定精度が向上する。
- 視認性を向上した鉄蓋模様と模様の認識手法の提案において、現場の様々な照明条件で撮影した画像から上蓋模様の認識の検証を行うことによって、撮影時の照明条件を設定することができる。
- 躯体部の UAV による撮影画像を用いた露筋検出において、撮影時の照度によって露筋の検出精度が低下する可能性があることがわかったため、画像撮影時の照度による劣化の検出精度の影響検討が必要である。
- 躯体部の UAV による撮影画像を用いた露筋検出において、UAV での撮影画像を用いた深層学習モデルを作製することによって、露筋の検出精度が向上できる可能性がある。

付録 1 模様すべり抵抗性と耐久性に関する検討

3章6節2項において提案した模様形状のすべり抵抗性と摩耗耐久性の検証内容と結果に関して記載する。

1. 1 模様すべり抵抗性に関して

1. 1. 1 検証方法

すべり抵抗は鉄蓋の直上を通過する物体と鉄蓋が接触する面の状態により決まるため、模様を構成する小突起の大きさや配置間隔により変化する表面積比がすべり抵抗性に影響があると想定し検証を行った。検証条件を表付録 1-1-1 に示す。実験装置には、DF テスターR85 という舗装路面などの動摩擦係数を計測できる装置を用いて、マンホール蓋表面の動的摩擦係数を測定した^{付録 1-1-1}。表付録 1-1-2 (表 3-6-1 の再掲) で示す 5 種類の模様の鉄蓋を対象として、新品状態と摩耗状態の動的摩擦係数の計測を行った。摩耗状態とは残存模様高さが 2 mm の状態のことである。ここで、表付録 1-1-2 (表 3-6-1 の再掲) に用いている突起の基本構造を図付録 1-1-1 (図 3-6-1 の再掲)、鉄蓋全体への配置の様子 (M3 型の例) を図付録 1-1-2 (図 3-6-2 の再掲) に示す。ただし、本検証における摩耗状態の鉄蓋は、新品状態の鉄蓋から残存する模様高さが 2 mm になるように人工的に削り加工を施して作製したものをを用いた。図付録 1-1-2 のように鉄蓋の中央部は、突起とは異なるデザインとなるため、鉄蓋の中央部を避けた異なる 3 箇所を選び、各箇所ですべり抵抗性を 3 回測定し、各 3 箇所の平均値を結果とした。

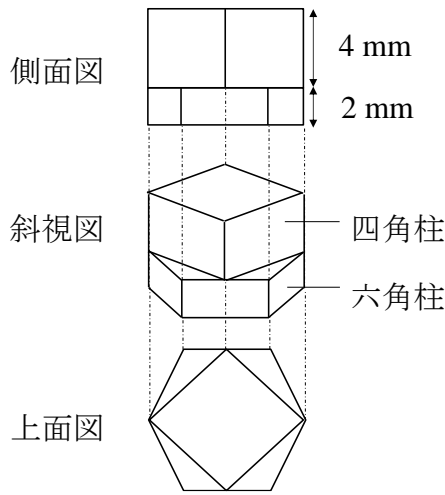
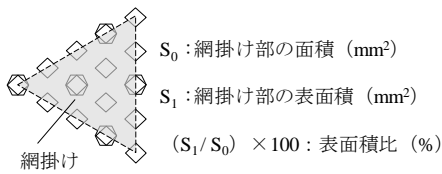
表付録 1-1-1 検証条件

項目	仕様
実験装置	DFテスターR85
測定項目	時速60 km/hにおける動的摩擦係数
測定方法	模様上の異なる3箇所ですべり抵抗性を、各箇所3回計測した平均値
模様デザイン	S1型, S2型, M1型, M2型, M3型
模様の状態	新品状態, 摩耗状態 (模様高さ2 mmの状態)

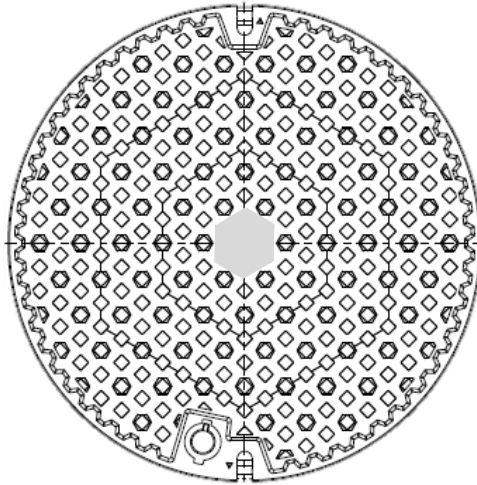
表付録 1-1-2 模様のパターン (表 3-6-1 の再掲)

名称	S1型		S2型		M1型		M2型		M3型	
突起の形状 : 上面図 (mm)										
突起の 表面積	新品状態 289 mm ²	摩耗状態 499 mm ²	新品状態 400 mm ²	摩耗状態 728 mm ²	新品状態 169 mm ²	摩耗状態 313 mm ²	新品状態 256 mm ²	摩耗状態 458 mm ²	新品状態 256 mm ²	摩耗状態 458 mm ²
突起の 配置図 : 上面図 (mm)										
配置間隔	35 mm		35 mm		35 mm		35 mm		39 mm	
表面積比	新品状態 27.2%	摩耗状態 47.0%	新品状態 37.6%	摩耗状態 68.7%	新品状態 15.8%	摩耗状態 21.5%	新品状態 24.0%	摩耗状態 31.8%	新品状態 19.4%	摩耗状態 25.6%

凡例: 表面積比の算出方法



図付録 1-1-2 模様を用いる突起の基本構造 (図 3-6-1 の再掲)



図付録 1-1-2 鉄蓋の全体図（図 3-6-2 の再掲）

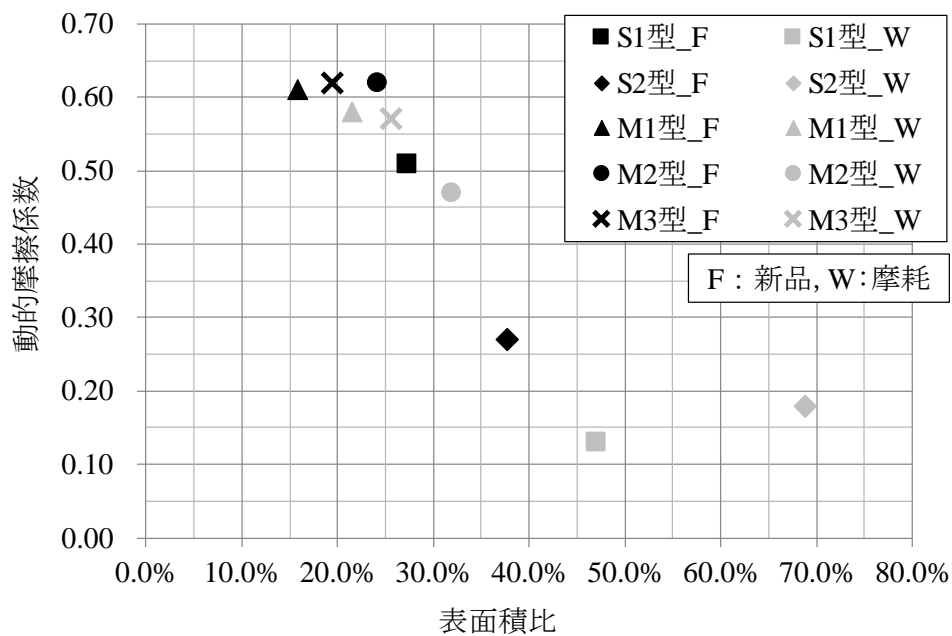
1. 1. 2 結果と考察

図付録 1-1-3 に模様のパターン毎の動的摩擦係数の測定結果を示す。表面積比が約 20%~40%の区間では、表面積比が小さくなれば、動的摩擦係数が増加傾向となる負の比例相関の傾向となった。

20%~40%の区間に分布する S1 型新品, S2 型新品, M1 型摩耗に着目すると、この 3 つのパターンは突起の配置間隔は同一で突起の大きさが異なることにより表面積比が変化し、表面積比が小さい方が摩擦係数は大きくなっている。これより、突起の大きさを小さくすることによって表面積比を減少させることは、摩擦係数の増加に有効であることがわかる。また、突起の大きさが同一で配置間隔を変更した M2 型摩耗と M3 型摩耗を比較すると、配置間隔を広げることにより表面積比を小さくした M3 型摩耗の方が、摩擦係数が大きい結果となった。これより、配置間隔を広げることによる表面積比の減少は摩擦係数の増加に有効であることがわかった。このことから、摩擦係数を調整する上で表面積比を指標とすることは可能であり、表面積比は突起の配置間隔と大きさのどちらを変更させても良いことがわかった。これは、模様における摩擦は突起間の凹部に物体が沈み込み、突起の角に引っかかることによって発生するため、凹部の割合が摩擦係数に影響があると考えられるためである。ただし、本検証では、表面積比が 20%以下では表面積比により向上できる摩擦力が最高値に達するため値は増加しなかったと考えられる。また、40%以上では凹部が少なくなることにより、独立した突起が一つの集合体のように連結し摩擦係数が最低値に達し下げ止まったと考えられる。これらのことから、表面積比で調整できる範囲は限定されることがわかった。

以上より、表面積比を用いて動的摩擦係数を調整することは可能であり、提案する多角形の突起を用いて道路に推奨される動的摩擦係数の 0.40 以上を確保するためには、

新品, 摩耗時の両方において表面積比が 35%以下になるようにデザインすれば十分であり, 試作した表付録 1-1-2 (表 3-6-1 の再掲) の模様のパターンの中では M 型が有効であることがわかった。



図付録 1-1-3 模様デザインにおける動的摩擦係数の測定値結果

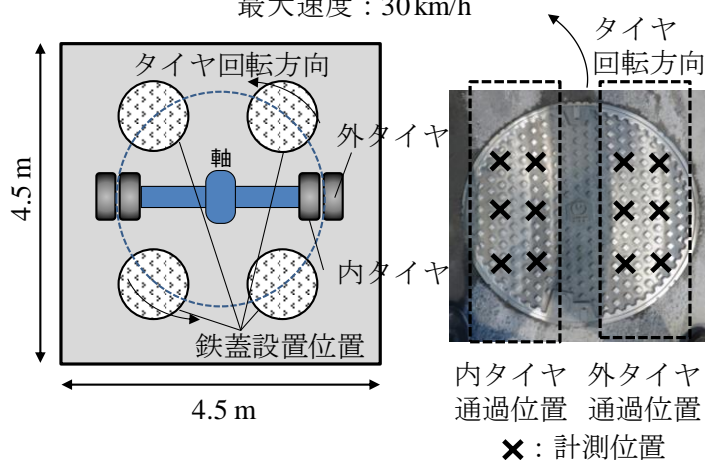
1. 2 模様様の摩耗耐久性に関して

1. 2. 1 検証方法

輪荷重試験機を用いて、模様様の摩耗に対する耐久性の検証を行った。模様様の耐久性を向上させるためには、砂等の異物が鉄蓋上から除去されやすい構造が有効とされているが、異物が排出されやすいように模様様の表面積比を小さくする（突起の設置間隔を広げる）と突起にかかる単位面積あたりの荷重が大きくなり、耐久性が低下すると考えられる。そこで、砂が排出しやすいようなデザインの有効性の確認と模様様の表面積比と摩耗速度の関係性について検証する。図付録 1-2-1 に輪荷重試験機と鉄蓋の設置の方法を示す。輪荷重試験機は、大型トラックに使用されているタイヤを片側 2 輪ずつ設置しており、荷重を垂直方向へかけながら軸を中心に円回転する構造となっている。1 輪の荷重は 80 kN であり、最大回転速度は時速 30 km である。鉄蓋は、輪荷重試験機の軸を中心に 4 個設置できる構造になっており、鉄蓋の模様上を内側タイヤと外側タイヤの 2 輪が走行する。この装置を用いた模様様の耐久性検証の条件を表付録 1-2-1 に示す。試験機の回転速度は、時速 30 km として、1 枚の鉄蓋につき 150 万輪のタイヤが通過した。



輪荷重：80kN/一輪
最大速度：30km/h



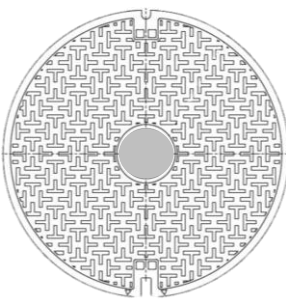
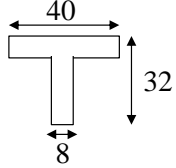
図付録 1-2-1 輪荷重試験機と鉄蓋の設置方法

設置した鉄蓋の模様デザインは、M1型、M2型、M3型（表付録1-1-2）と表付録1-2-2に示す現行の通信用マンホール鉄蓋の4種類を選んだ。この理由は、砂が排出されにくいと思われる現行型と砂が排出されやすくデザインしたM型を比較し、現行型に比べて耐摩耗性がどの程度向上したかを検証するためである。また、比較対象をM型の3種類にした理由は、表面積比と摩耗速度の関係性を検証する際に、配置間隔が同一で突起の大きさが違うM1型とM2型、突起の大きさが同一で配置間隔が違うM2型とM3型の比較が可能であるためである。各模様デザインの鉄蓋は新品の状態を設置し、20万輪経過したのち、10万輪毎に鉄蓋上の砂を清掃して、突起の摩耗量の計測を行った。計測箇所は、図付録1-2-1に示すように1枚の鉄蓋において内側タイヤと外側タイヤの通過位置のそれぞれ6箇所の合計12箇所で行い、各計測箇所において、突起の最上面と凹部の最下面との高さを計測し、新品状態の模様高さである6mmとの差分を記

表付録1-2-1 模様の耐久性の検証条件

項目	仕様
実験装置	輪荷重試験機
回転速度	30.0 km/h
試験輪数	150万輪
模様デザイン	M1型、M2型、M3型、現行の通信用鉄蓋
模様の状態	新品の状態を設置
測定時期	10万輪毎
測定方法	内タイヤと外タイヤの通過位置のそれぞれで異なる6箇所を計測した値の平均値
砂、水の散布方法	鉄蓋1枚につき、1500輪毎に粒径1～3 mmの砂500 gと水2.5 Lを散布

表付録1-2-2 現行の通信用鉄蓋の全体図と特徴

全体図	突起の大きさ（上面図）				
	(mm)  新品状態の 高さ：4				
	突起の表面積				
	<table border="1"> <tr> <td>新品状態</td> <td>摩耗状態</td> </tr> <tr> <td>512 mm²</td> <td>512 mm²</td> </tr> </table>	新品状態	摩耗状態	512 mm ²	512 mm ²
	新品状態	摩耗状態			
	512 mm ²	512 mm ²			
表面積比					
<table border="1"> <tr> <td>新品状態</td> <td>摩耗状態</td> </tr> <tr> <td>38.25%</td> <td>38.25%</td> </tr> </table>	新品状態	摩耗状態	38.25%	38.25%	
新品状態	摩耗状態				
38.25%	38.25%				

録した。これら 12 箇所における突起の摩耗量の平均値を鉄蓋全体の模様の摩耗量とした。また、摩耗の発生とその促進を早めるために、鉄蓋 1 枚につき、1500 輪毎に粒径 1～3 mm の川砂 500 g を撒き、川砂がタイヤの風圧によって鉄蓋から直ぐに飛ばないように水約 2.5 リットルを合わせて散布した。

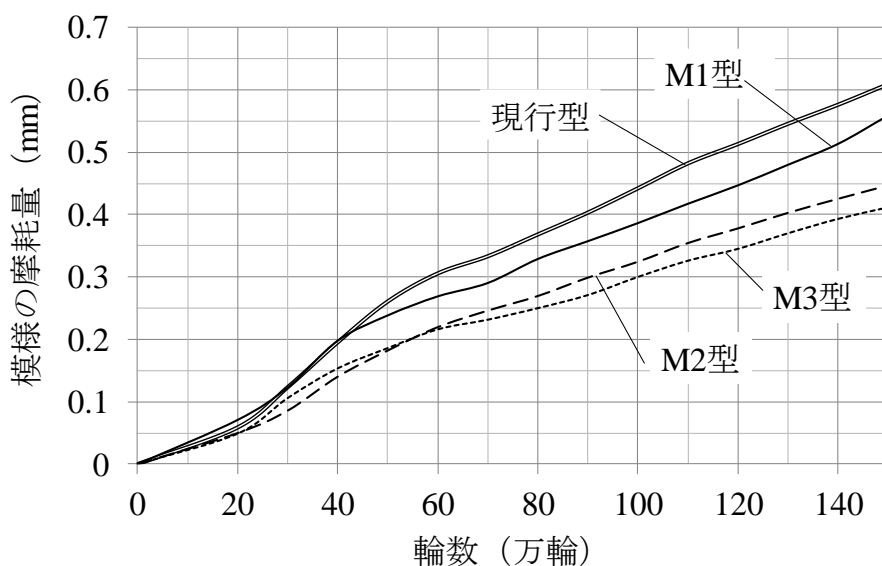
1. 2. 2 結果と考察

図付録 1-2-2 に輪荷重試験による模様の摩耗量の結果を示す。横軸が鉄蓋を通過したタイヤの輪数、縦軸が模様の摩耗量である。すべての鉄蓋において、模様高さが 2 mm 以下とならなかったため、M 型は表面に正六角形が現れる突起形状の変化まで至らなかった。150 万輪の時に最も平均摩耗量が大きかった鉄蓋は現行型の 0.60 mm であり、次いで M1 型の 0.56 mm、M2 型の 0.45 mm、M3 型の 0.42 mm の順で摩耗量が大きかった。

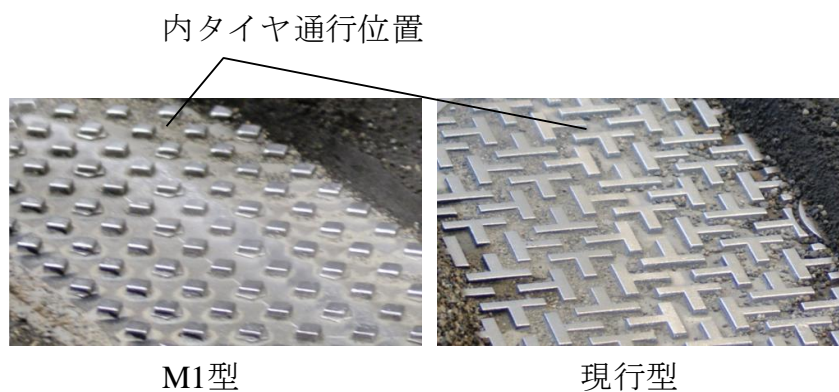
現行型が最大であった理由は、散布した砂が鉄蓋の凹部に残留し、この残留した砂がタイヤの通過時の振動や風等により模様の最上に舞い上がり、ヤスリのような働きをして模様を削ったと考えられる。図付録 1-2-3 は最初の計測を行った 20 万輪時の M1 型と現行型の鉄蓋の表面状態の様子であるが、M1 型のタイヤ通行位置に残留している砂は、現行型と比較して少ない。他の M 型も同様の傾向であり、タイヤの通過による振動で徐々に砂が鉄蓋の表面からなくなり、1500 輪毎の散布時にはタイヤの通行位置に砂は少なくなっていたが、現行型は前回の砂の残留が見られた。これは、現行型の模様は T の字が入り組んでいるため、砂の排出効果が低いと考えられる。現行型の表面積比は M 型に比べて大きいため、単位面積あたりの積載荷重は最小であるが摩耗量は最大となる。このように、砂を排出しやすい構造は摩耗速度に大きく影響することが確認された。一方、砂が排出しやすい M 型においては、M1 型の摩耗量が現行型程度に大きく、M2 型と M3 型が 60 万輪までほぼ同一の結果となった後、最終的に、M3 型の方が 0.03 mm ほど摩耗の進行は遅かった。M1 型の摩耗量が大きかった理由は、砂の排出効果ではなく表面積比であると推測される。なぜならば、砂の排出においては、M 型の中で M1 型が最も表面積比が小さいため凹部の間隔が広く M2 型と M3 型と比較して、砂の排出機能が劣るとは考えにくい。そのため、表面積比の小ささが摩耗の進行を早めた要因であると考えられる。一方で、M2 型と M3 型は、単位面積あたりの積載荷重が小さい M2 型の方が摩耗の進行が遅いと考えられたが、本試験時間内では M3 型の方が僅かながら進行が遅くなった。これは、M2 型と M3 型は突起の大きさは同一であり配置間隔が M3 型の方が広いため、M3 型の方が突起の摩耗に影響が大きい砂が早く排出されたためであると推測される。砂の排出速度と単位面積あたりの積載荷重が摩耗の進行に与える影響について更なる検証が必要となる。

これらのことから、現行型より表面積比が小さい M 型の方が耐摩耗性に優れており、砂の排出しやすいような模様のデザインは、模様の摩耗抑制に最も効果的であることが

わかった。M型の3点のみの比較ではあるが、表面積比を一定以上に小さくすると摩耗速度が加速的に進んでしまうことが示唆されるため、表面積比は一定以上を確保することが重要である。以上より、提案する模様では、表面積比が19.4%以上のM2型、M3型のデザインが有効であり、摩耗の進行速度を現行型と比較して約25%以上抑えることが確認できた。



図付録 1-2-2 輪荷重試験機による模様の摩耗量の推移



図付録 1-2-3 10万輪時における鉄蓋上の砂の残留状況

参考文献













付録1-1-1) 株式会社 G&U 技術協力センター: DF テスターR85,
<https://www.gucenter.co.jp/equipment/DF.html> (2020年9月29日閲覧)

付録 2 通信用鉄蓋の現場調査データ













2章1節3項において調査した現場の通信用鉄蓋の画像を掲載する。表付録 2-1（表 2-1-4 の再掲）は、本調査の結果の一覧である（調査方法は、を 2章1節3項参照）。本調査箇所の通番の鉄蓋と全景の画像を掲載する。図付録 2-1 に通番 1 から 6，図付録 2-2 に通番 7 から 12，図付録 2-3 に通番 13 から 18，図付録 2-4 に通番 19 から 24，図付録 2-5 に通番 25 から 30，図付録 2-6 に通番 31 から 36，図付録 2-7 に通番 37 を示す。

表付録 2-1 詳細点検データ











通番	鉄蓋種	(年)	交通量 (台/日)			合計	タイヤ通過	状態	段差量	(mm)			
			道路種別	小型	大型					A:上蓋摩耗量	B:受枠摩耗量	段差要因量 (A+B)	模様摩耗量
1	平型	45	市道	-	-	-	あり	凸	3.66				2.39
2	P型	26	県道	15,117	4,113	19,230	あり	凹	-4.04	1.36	1.75	3.11	0.40
3	P型	59	市道	-	-	-	なし	凸	6.10				0.53
4	P型	42	県道	6,057	1,099	7,156	あり	凹	-6.27	1.34	1.25	2.59	0.43
5	平型	58	市道	-	-	-	なし	凸	4.50				0.64
6	平型	51	市道	-	-	-	あり	凸	3.09				0.58
7	平型	45	市道	-	-	-	あり	凸	3.38				0.86
8	P型	39	国道	19,556	2,118	21,674	あり	凹	-0.08	3.29	1.75	5.04	0.33
9	P型	57	市道	-	-	-	あり	凸	1.98				2.60
10	P型	28	国道	17,390	1,568	18,958	あり	凹	-5.55	4.42	0.00	4.42	1.04
11	P型	40	県道	12,264	2,011	14,275	なし	凸	6.49				0.32
12	P型	49	市道	-	-	-	あり	凸	3.05				-0.27
13	P型	28	市道	-	-	-	あり	凸	2.33				0.14
14	P型	57	県道	5,505	364	5,869	あり	凸	1.90				0.53
15	平型	56	県道	5,505	364	5,869	なし	凸	5.41				0.50
16	P型	17	県道	12,763	1,173	13,936	あり	凹	-1.22	0.44	0.50	0.94	0.23
17	P型	51	県道	12,763	1,173	13,936	あり	凹	-1.90	3.51	1.50	5.01	1.03
18	平型	41	県道	12,763	1,173	13,936	なし	凸	2.32				0.34
19	P型	17	市道	-	-	-	あり	凸	4.23				0.63
20	P型	25	市道	-	-	-	あり	凸	1.68				0.41
21	P型	47	市道	-	-	-	あり	凹	-2.86	-0.17	0.75	0.58	0.70
22	P型	14	県道	13,241	1,517	14,758	あり	凹	-9.33	2.65	2.50	5.15	0.17
23	P型	17	県道	13,241	1,517	14,758	あり	凹	-4.28	1.78	1.50	3.28	0.34
24	P型	14	県道	13,241	1,517	14,758	あり	凹	-4.50	1.96	2.00	3.96	0.04
25	平型	46	市道	-	-	-	あり	凸	1.70				1.09
26	平型	43	県道	13,309	1,036	14,345	あり	凸	2.62				0.40
27	平型	43	県道	13,309	1,036	14,345	あり	凸	2.58				0.63
28	平型	51	市道	-	-	-	なし	凸	7.02				0.17
29	平型	50	市道	-	-	-	あり	凹/凸	-0.40	0.87	-0.25	0.62	2.17
30	平型	42	県道	1,200	63	1,263	あり	凸	2.79				0.30
31	平型	45	市道	-	-	-	なし	凸	2.07				0.58
32	P型	32	市道	-	-	-	なし	凸	5.84				0.37
33	P型	46	国道	31,104	11,638	42,742	なし	凸	2.62				0.25
34	平型	41	県道	12,929	1,907	14,836	あり	凸	3.34				0.15
35	P型	29	国道	15,124	1,649	16,773	なし	凸	3.14				0.45
36	平型	51	市道	-	-	-	なし	凸	5.66				0.53
37	平型	51	国道	14,666	885	15,551	なし	凸	4.38				0.08

通番	全景	鉄蓋
1		
2		
3		
4		
5		
6		



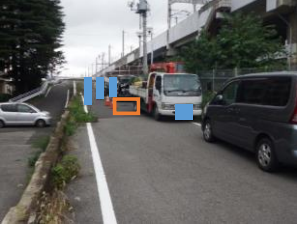









図付録 2-1 通番 1 から 6 の撮影画像

通番	全景	鉄蓋
7		
8		
9		
10		
11		
12		













図付録 2-2 通番 7 から 12 の撮影画像

通番	全景	鉄蓋
13		
14		
15		
16		
17		
18		













図付録 2-3 通番 13 から 18 の撮影画像

通番	全景	鉄蓋
19		
20		
21		
22		
23		
24		

図付録 2-4 通番 19 から 24 の撮影画像

通番	全景	鉄蓋
25	 A street view showing a residential area with houses and utility poles. A white line is visible on the road surface.	 A close-up view of a circular manhole cover with a square grid pattern and a central circular logo.
26	 A street view showing a road with a fence on the left and buildings in the background. An orange box highlights a manhole cover on the road.	 A close-up view of a circular manhole cover with a square grid pattern and a central circular logo.
27	 A street view showing a road with a white line and a car in the distance. An orange box highlights a manhole cover on the road.	 A close-up view of a circular manhole cover with a square grid pattern and a central circular logo.
28	 A street view showing a road with a blue barrier and orange traffic cones. An orange box highlights a manhole cover on the road.	 A close-up view of a circular manhole cover with a square grid pattern and a central circular logo.
29	 A street view showing a road with a white line and a fence on the left. An orange box highlights a manhole cover on the road.	 A close-up view of a circular manhole cover with a square grid pattern and a central circular logo.
30	 A street view showing a road with a blue barrier and a car in the distance. An orange box highlights a manhole cover on the road.	 A close-up view of a circular manhole cover with a square grid pattern and a central circular logo.

図付録 2-5 通番 25 から 30 の撮影画像

通番	全景	鉄蓋
31		
32		
33		
34		
35		
36		

図付録 2-6 通番 31 から 36 の撮影画像

通番	全景	鉄蓋
37		

図付録 2-7 通番 37 の撮影画像

付録3 鉄蓋の段差の計測手法および摩耗の推定手法の検証データ詳細









3. 1 段差の計測手法の検証データ詳細

3章3節2項において、ノギスによる計測値と提案手法の計測値の比較検証を行った









表付録3-1-1 ノギスによる計測値と提案手法による計測値

(mm)											
通番	実測値	解析値	劣化ランク	通番	実測値	解析値	劣化ランク	通番	実測値	解析値	劣化ランク
1	2.1	2	劣化ランク2	42	4.2	3.7	劣化ランク3	83	5.5	5.3	劣化ランク3
2	2.2	2.7	劣化ランク2	43	4.2	3.7	劣化ランク3	84	5.5	5.2	劣化ランク3
3	2.4	2.3	劣化ランク2	44	4.3	4.1	劣化ランク3	85	5.5	4.6	劣化ランク3
4	2.5	2.2	劣化ランク2	45	4.3	5.6	劣化ランク3	86	5.5	5.9	劣化ランク3
5	2.5	2.5	劣化ランク2	46	4.3	4.6	劣化ランク3	87	5.7	5.1	劣化ランク3
6	2.5	2.3	劣化ランク2	47	4.4	3.4	劣化ランク3	88	5.7	6.2	劣化ランク3
7	2.5	2.5	劣化ランク2	48	4.5	4.4	劣化ランク3	89	5.7	6.2	劣化ランク3
8	2.5	2.4	劣化ランク2	49	4.5	3.4	劣化ランク3	90	5.7	5.0	劣化ランク3
9	2.6	2.8	劣化ランク2	50	4.5	4.7	劣化ランク3	91	5.7	5.3	劣化ランク3
10	2.6	2.2	劣化ランク2	51	4.5	4.2	劣化ランク3	92	5.7	4.6	劣化ランク3
11	2.6	2.7	劣化ランク2	52	4.5	3.8	劣化ランク3	93	5.8	4.6	劣化ランク3
12	2.7	2.8	劣化ランク2	53	4.5	5.0	劣化ランク3	94	5.8	6.1	劣化ランク3
13	2.9	3.2	劣化ランク2	54	4.5	5.1	劣化ランク3	95	5.8	5.7	劣化ランク3
14	3.0	2.5	劣化ランク2	55	4.6	4.0	劣化ランク3	96	5.9	5.4	劣化ランク3
15	3.0	3.5	劣化ランク2	56	4.6	3.7	劣化ランク3	97	5.9	7.5	劣化ランク3
16	3.1	3	劣化ランク2	57	4.7	4.9	劣化ランク3	98	5.9	6.6	劣化ランク3
17	3.3	3.5	劣化ランク2	58	4.7	5.3	劣化ランク3	99	6.0	5.8	劣化ランク4
18	3.3	3.2	劣化ランク2	59	4.7	5.6	劣化ランク3	100	6.0	6.3	劣化ランク4
19	3.3	2.8	劣化ランク2	60	4.7	5.2	劣化ランク3	101	6.0	6.0	劣化ランク4
20	3.4	3.4	劣化ランク2	61	4.7	4.2	劣化ランク3	102	6.1	5.3	劣化ランク4
21	3.4	3.2	劣化ランク2	62	4.7	3.7	劣化ランク3	103	6.1	6.3	劣化ランク4
22	3.4	2.9	劣化ランク2	63	4.8	5.7	劣化ランク3	104	6.2	6.8	劣化ランク4
23	3.4	3.3	劣化ランク2	64	4.8	4.7	劣化ランク3	105	6.2	7.0	劣化ランク4
24	3.4	3.4	劣化ランク2	65	4.8	4.0	劣化ランク3	106	6.2	7.1	劣化ランク4
25	3.6	3.4	劣化ランク2	66	4.8	4.8	劣化ランク3	107	6.2	5.1	劣化ランク4
26	3.6	2.8	劣化ランク2	67	4.8	3.7	劣化ランク3	108	6.2	6.2	劣化ランク4
27	3.8	3.2	劣化ランク2	68	4.8	4.4	劣化ランク3	109	6.2	6.1	劣化ランク4
28	3.8	3.5	劣化ランク2	69	4.8	4.4	劣化ランク3	110	6.2	5.1	劣化ランク4
29	3.8	3.6	劣化ランク2	70	4.9	5.5	劣化ランク3	111	6.3	6.3	劣化ランク4
30	3.9	3.9	劣化ランク2	71	4.9	5.1	劣化ランク3	112	6.3	5.8	劣化ランク4
31	3.9	3.5	劣化ランク2	72	5.0	4.5	劣化ランク3	113	6.3	5.0	劣化ランク4
32	3.9	3.2	劣化ランク2	73	5.0	4.5	劣化ランク3	114	6.4	6.2	劣化ランク4
33	3.9	3.1	劣化ランク2	74	5.1	6.9	劣化ランク3	115	6.4	6.1	劣化ランク4
34	3.9	2.7	劣化ランク2	75	5.1	4.6	劣化ランク3	116	6.4	4.8	劣化ランク4
35	4	4	劣化ランク3	76	5.2	4.8	劣化ランク3	117	6.6	6.9	劣化ランク4
36	4	3.1	劣化ランク3	77	5.3	4.5	劣化ランク3	118	6.7	6.7	劣化ランク4
37	4.1	4.8	劣化ランク3	78	5.4	5.5	劣化ランク3	119	6.8	5.3	劣化ランク4
38	4.1	5.7	劣化ランク3	79	5.4	5.6	劣化ランク3	120	7.7	7.2	劣化ランク4
39	4.2	3.2	劣化ランク3	80	5.4	5.0	劣化ランク3	121	7.8	8.3	劣化ランク4
40	4.2	4	劣化ランク3	81	5.4	4.3	劣化ランク3	122	7.8	7.2	劣化ランク4
41	4.2	4	劣化ランク3	82	5.5	5.0	劣化ランク3	123	8.8	8.6	劣化ランク4









際の結果を表付録 3-1-1 に示す。また、各劣化ランクにおける撮影画像を 4 カ所ずつ（表付録 3-1-1 のオレンジの網掛けの箇所）図付録 3-1-1、図付録 3-1-2、図付録 3-1-3 に示す。これらの箇所はノギスによる計測値が概ね 0.5 mm おきになるように選定した。

通番	撮影画像	段差部の拡大
1		
8		
15		
25		

図付録 3-1-1 劣化ランク 2 の撮影画像

通番	撮影画像	段差部の拡大
35		
51		
72		
82		









図付録 3-1-2 劣化ランク 3 の撮影画像

通番	撮影画像	段差部の拡大
99		
117		
120		
123		

図付録 3-1-3 劣化ランク 4 の撮影画像

3. 2 摩耗の推定手法の検証データ詳細

3章5節2項において、ノギスによる計測値と提案手法による推定値の比較検証を行った際の各劣化ランクにおける撮影画像の例を図付録3-2-1に示す。

劣化 ランク	撮影画像	
	模様高さのノギス計測値（提案手法による推定値）	
1		
	最小3.40 mm – 最大3.73 mm (最小3.07 mm – 最大3.40 mm)	最小3.70 mm – 最大4.00 mm (最小2.42 mm – 最大3.26 mm)
2		
	最小2.33 mm – 最大2.38 mm (最小2.00 mm – 最大2.69 mm)	最小2.30 mm – 最大2.62 mm (最小1.53 mm – 最大2.00 mm)
3		
	最小1.03 mm – 最大1.84 mm (最小1.43 mm – 最大1.90 mm)	最小1.33 mm – 最大1.85 mm (最小1.20 mm – 最大1.56 mm)
4		
	最小0.43 mm – 最大0.93 mm (最小0.91 mm – 最大1.00 mm)	最小0.77 mm – 最大1.00 mm (最小0.91 mm – 最大1.05 mm)

図付録 3-2-1 模様高さの検証用の撮影画像

付録 4 躯体部の劣化検出の検証データ詳細

4. 1 露筋の検出手法の検証データ詳細

4章4節4項(1)において示した露筋の検出結果の一覧を表付録4-1-1から表付録4-1-4に示す。各表は、劣化ランク毎のデータとしている。

また、図付録4-1-1から図付録4-1-4に、本編に示していない撮影画像の中から、*F-measure*の値が小さい画像と、大きい画像を2つずつ示す。

表付録 4-1-1 劣化ランク 1 における露筋検出の結果

通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
1	0.9935	0.7305	0.2980	0.4233	図4-4-1(a)を参照
2	0.9956	0.9972	0.3495	0.5176	
3	0.9935	1.0000	0.0640	0.1203	
4	0.9974	1.0000	0.3736	0.5440	
5	0.9828	1.0000	0.2988	0.4601	
6	0.9951	0.9885	0.5600	0.7150	図4-4-1(a)を参照
7	0.9956	1.0000	0.6123	0.7595	図4-4-1(a)を参照
8	0.9890	1.0000	0.1862	0.3139	
9	0.9924	1.0000	0.5570	0.7155	
10	0.9855	1.0000	0.3861	0.5571	
11	0.9879	1.0000	0.2592	0.4117	
12	0.9914	1.0000	0.3612	0.5307	
13	0.9815	0.9990	0.2702	0.4254	
14	0.9882	1.0000	0.5044	0.6706	
15	0.9953	1.0000	0.4886	0.6565	
16	0.9926	1.0000	0.5444	0.7050	
17	0.9777	1.0000	0.6463	0.7852	図4-4-1(a)を参照
Totall	0.9903	0.9832	0.3976	0.5477	

表付録 4-1-2 劣化ランク 2 における露筋検出の結果

通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
18	0.9934	1.0000	0.2011	0.3349	
19	0.9903	0.8943	0.8032	0.8463	
20	0.9828	0.8942	0.3835	0.5368	
21	0.9956	1.0000	0.3794	0.5501	
22	0.9760	1.0000	0.2146	0.3534	
23	0.9930	0.9947	0.5530	0.7108	
24	0.9818	0.8962	0.2073	0.3367	
25	0.9888	1.0000	0.2549	0.4062	
26	0.9950	1.0000	0.3408	0.5084	
27	0.9976	0.2810	0.7216	0.4045	図4-4-2 (b) を参照
28	0.9905	1.0000	0.4108	0.5824	
29	0.9905	0.9349	0.6121	0.7398	
30	0.9878	0.9973	0.5459	0.7056	
31	0.9925	0.9992	0.5354	0.6972	
32	0.9935	0.5719	0.2966	0.3906	図4-4-2 (b) を参照
33	0.9633	0.9887	0.2189	0.3584	
34	0.9808	1.0000	0.6176	0.7636	図4-4-2 (b) を参照
35	0.9895	0.9987	0.4829	0.6510	
36	0.9858	1.0000	0.4421	0.6131	
37	0.9870	0.9364	0.6054	0.7354	
38	0.9876	0.9916	0.4673	0.6352	
39	0.9823	0.9981	0.4934	0.6604	
40	0.9878	0.9926	0.3332	0.4989	
41	0.9837	0.9965	0.3117	0.4749	
42	0.9824	0.9473	0.3575	0.5191	
43	0.9881	0.9983	0.4974	0.6640	
44	0.9810	1.0000	0.1881	0.3166	
45	0.9377	0.9921	0.1458	0.2542	
46	0.9749	1.0000	0.5222	0.6861	図4-4-2 (b) を参照
Totall	0.9849	0.9415	0.4187	0.5495	


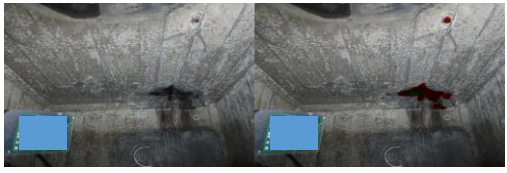
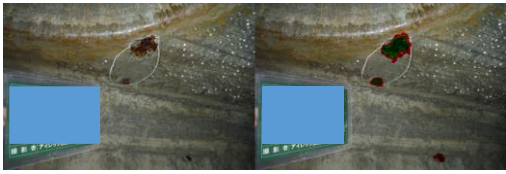

表付録 4-1-3 劣化ランク 3 における露筋検出の結果

通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
47	0.9666	0.9494	0.5836	0.7229	
48	0.9737	1.0000	0.3315	0.4979	
49	0.9882	1.0000	0.4654	0.6352	
50	0.9804	1.0000	0.2061	0.3418	
51	0.9777	1.0000	0.4441	0.6151	
52	0.9929	0.9962	0.4232	0.5940	
53	0.9948	0.9977	0.3590	0.5280	
54	0.9944	1.0000	0.5556	0.7143	
55	0.9813	1.0000	0.5309	0.6936	
56	0.9627	1.0000	0.5965	0.7473	図4-4-2(c)を参照
57	0.9803	1.0000	0.2169	0.3565	
58	0.9859	1.0000	0.4096	0.5812	
59	0.9931	0.9931	0.2925	0.4519	
60	0.9705	0.9981	0.5889	0.7407	
61	0.9863	0.9410	0.4377	0.5975	
62	0.9803	1.0000	0.5102	0.6757	
63	0.9855	1.0000	0.5649	0.7220	
64	0.9893	1.0000	0.4314	0.6028	
65	0.9773	1.0000	0.3506	0.5192	
66	0.9909	1.0000	0.2626	0.4160	
67	0.9767	1.0000	0.4320	0.6034	
68	0.9907	1.0000	0.3401	0.5076	
69	0.9677	0.9999	0.7036	0.8260	
70	0.9517	1.0000	0.3526	0.5214	
71	0.9778	1.0000	0.4947	0.6619	
72	0.9345	0.9999	0.5932	0.7446	
73	0.9736	0.9888	0.4123	0.5819	図4-4-2(c)を参照
74	0.9759	0.8870	0.4631	0.6085	図4-4-2(c)を参照
75	0.9866	1.0000	0.4564	0.6268	図4-4-2(c)を参照
76	0.9640	1.0000	0.3823	0.5531	
Totall	0.9784	0.9917	0.4397	0.5996	

表付録 4-1-4 劣化ランク 4 における露筋検出の結果




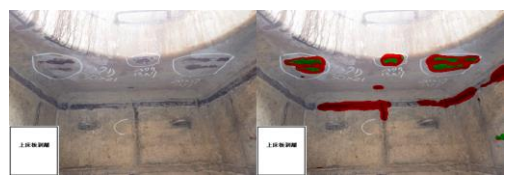
通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
77	0.9739	0.9927	0.6061	0.7527	
78	0.9645	0.9900	0.4775	0.6443	
79	0.9751	0.9262	0.3208	0.4765	
80	0.9884	0.9977	0.3284	0.4941	
81	0.9938	0.9958	0.3324	0.4984	
82	0.9611	0.9833	0.6983	0.8166	
83	0.9546	1.0000	0.3877	0.5588	
84	0.9618	0.9975	0.2905	0.4500	
85	0.9448	0.9881	0.4313	0.6005	
86	0.9505	1.0000	0.4331	0.6044	
87	0.9603	1.0000	0.6707	0.8029	図4-4-2(d)を参照
88	0.9735	0.9673	0.4058	0.5717	
89	0.9697	0.8293	0.6598	0.7349	図4-4-2(d)を参照
90	0.9740	0.9974	0.5130	0.6775	
91	0.9823	1.0000	0.4924	0.6599	図4-4-2(d)を参照
92	0.9732	1.0000	0.4285	0.5999	
93	0.9550	0.9973	0.5025	0.6683	
94	0.9541	1.0000	0.4009	0.5723	
95	0.9258	0.7091	0.6654	0.6866	図4-4-2(d)を参照
96	0.8926	0.9925	0.2141	0.3522	
97	0.9015	0.9679	0.6478	0.7761	
98	0.9832	1.0000	0.2772	0.4341	
99	0.9483	1.0000	0.3257	0.4914	
100	0.9271	0.9998	0.6037	0.7528	
Totall	0.9579	0.9722	0.4631	0.6115	

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	3	8
画像		
通番	10	16
画像		



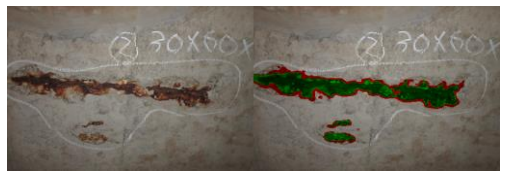
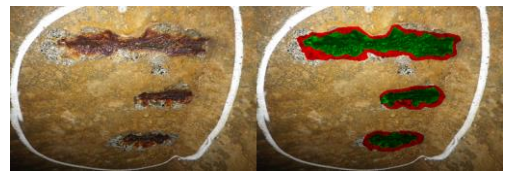
図付録 4-1-1 劣化ランク 1 の撮影画像

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	19	29
画像		
通番	44	45
画像		


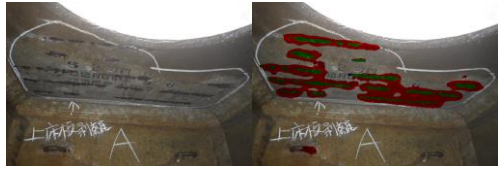
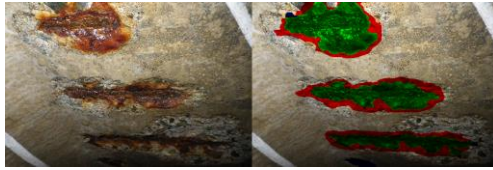

図付録 4-1-2 劣化ランク 2 の撮影画像

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	50	57
画像		
通番	81	88
画像		

図付録 4-1-3 劣化ランク 3 の撮影画像

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	82	96
画像		
通番	97	98
画像		

図付録 4-1-4 劣化ランク 4 の撮影画像

4. 2 金物腐食の検出手法の検証データ詳細

4章4節4項(2)において示した露筋の検出結果の一覧を表付録4-2-1から表付録

表付録4-2-1 劣化ランク1における露筋検出の結果

通番	Accuracy	Recall	Precision	F-measure	備考
1	0.9815	0.9433	0.2075	0.3402	
2	0.9899	1.0000	0.1895	0.3186	図4-4-3(a)を参照
3	0.9644	0.8188	0.4756	0.6017	
4	0.9743	0.8957	0.4254	0.5768	
5	0.8293	0.9850	0.2584	0.4094	
6	0.9379	0.9464	0.0536	0.1015	
7	0.9385	0.9413	0.0663	0.1239	
8	0.9733	0.9230	0.1775	0.2977	
9	0.9810	0.3143	0.0811	0.1289	図4-4-3(a)を参照
10	0.9717	0.9797	0.0997	0.1810	
11	0.9113	0.9964	0.1780	0.3020	
12	0.9618	1.0000	0.0765	0.1421	図4-4-3(a)を参照
13	0.9674	0.8082	0.0638	0.1183	
14	0.9023	1.0000	0.0511	0.0972	
15	0.9144	0.9361	0.0255	0.0496	
16	0.9432	0.1385	0.0060	0.0115	図4-4-3(a)を参照
17	0.9254	0.9507	0.1031	0.1860	
18	0.8748	0.9222	0.0457	0.0871	
19	0.9461	0.9502	0.0611	0.1148	
20	0.9600	0.7388	0.0415	0.0786	
21	0.8899	0.8882	0.0187	0.0366	
22	0.9041	1.0000	0.0402	0.0773	
23	0.9476	0.9997	0.2203	0.3610	
24	0.9090	0.9981	0.0624	0.1175	
25	0.7953	0.9620	0.0121	0.0239	
26	0.9340	1.0000	0.1574	0.2720	
27	0.9290	1.0000	0.0891	0.1636	
28	0.9846	0.6252	0.3101	0.4146	
29	0.9685	0.7113	0.2121	0.3268	
30	0.8242	1.0000	0.0160	0.0315	
31	0.9655	0.9742	0.2445	0.3909	
32	0.9452	0.9501	0.0505	0.0959	
33	0.9659	0.9785	0.2531	0.4022	
34	0.9927	0.5176	0.5378	0.5275	
Totall	0.9354	0.8763	0.1444	0.2208	

4-2-4 に示す。各表は、劣化ランク毎のデータとしている。

また、図付録 4-2-1 から図付録 4-2-4 に、本編に示していない撮影画像の中から、*F-measure* の値が大きい画像と、小さい画像を 2 つずつ示す。

表付録 4-2-2 劣化ランク 2 における露筋検出の結果

通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
35	0.8874	0.7638	0.2430	0.3687	
36	0.8689	0.8964	0.2176	0.3502	
37	0.9693	0.7608	0.3658	0.4941	
38	0.9240	0.9965	0.2392	0.3858	
39	0.8535	0.9994	0.1115	0.2006	
40	0.9004	0.7364	0.2863	0.4123	
41	0.8573	0.8870	0.0802	0.1471	
42	0.9551	0.9949	0.5945	0.7443	
43	0.9417	0.4057	0.1040	0.1656	図4-4-3 (b) を参照
44	0.8471	0.9813	0.0873	0.1603	
45	0.9686	1.0000	0.3438	0.5117	図4-4-3 (b) を参照
46	0.9218	0.9930	0.4898	0.6560	
47	0.9185	0.9907	0.0781	0.1448	
48	0.8917	0.8338	0.0801	0.1462	
49	0.8102	1.0000	0.0912	0.1672	
50	0.8457	0.3379	0.1783	0.2334	図4-4-3 (b) を参照
51	0.9488	0.9860	0.1079	0.1945	
52	0.9572	0.9958	0.5742	0.7284	
53	0.9434	0.9055	0.5109	0.6532	
54	0.8723	1.0000	0.0261	0.0509	
55	0.9378	0.9944	0.1944	0.3252	
56	0.8251	1.0000	0.1557	0.2694	
57	0.8665	1.0000	0.1336	0.2357	
58	0.9836	1.0000	0.4334	0.6047	図4-4-3 (b) を参照
59	0.9608	0.9500	0.0928	0.1691	
60	0.9709	1.0000	0.2836	0.4419	
61	0.9620	0.9710	0.3181	0.4792	
62	0.7979	0.5921	0.0407	0.0762	
63	0.9541	1.0000	0.1445	0.2525	
64	0.9496	0.9822	0.4947	0.6580	
65	0.9694	0.4622	0.1994	0.2786	
66	0.9486	0.8525	0.0961	0.1727	
67	0.9241	1.0000	0.1722	0.2938	
68	0.9707	1.0000	0.2105	0.3478	
Totall	0.9148	0.8903	0.2288	0.3388	

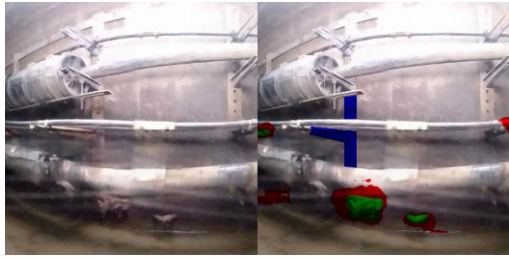



表付録 4-2-3 劣化ランク 3 における露筋検出の結果

通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
69	0.9683	0.9701	0.4154	0.5817	
70	0.9274	0.8950	0.4482	0.5973	
71	0.9039	0.9193	0.7181	0.8063	
72	0.9379	0.9936	0.4340	0.6041	
73	0.9619	0.7141	0.5078	0.5935	図4-4-3 (c) を参照
74	0.8907	0.9432	0.3161	0.4735	
75	0.9778	1.0000	0.4699	0.6394	図4-4-3 (c) を参照
76	0.7706	0.9869	0.1282	0.2269	
77	0.8630	0.9493	0.2835	0.4366	
78	0.9453	1.0000	0.2515	0.4019	
79	0.9525	0.9943	0.5958	0.7451	
80	0.9400	0.9681	0.2578	0.4072	
81	0.9595	1.0000	0.2407	0.3880	
82	0.9613	1.0000	0.1578	0.2726	
83	0.9591	0.9455	0.4355	0.5963	
84	0.9762	0.9660	0.4557	0.6193	
85	0.9671	1.0000	0.3465	0.5147	
86	0.9426	0.9724	0.4794	0.6422	
87	0.9090	0.8875	0.4602	0.6061	
88	0.9367	0.8780	0.3202	0.4693	
89	0.9254	0.9457	0.4775	0.6346	
90	0.9141	1.0000	0.3636	0.5333	図4-4-3 (c) を参照
91	0.9111	0.6393	0.1637	0.2607	図4-4-3 (c) を参照
Totall	0.9305	0.8903	0.2288	0.3388	

表付録 4-2-4 劣化ランク 4 における露筋検出の結果


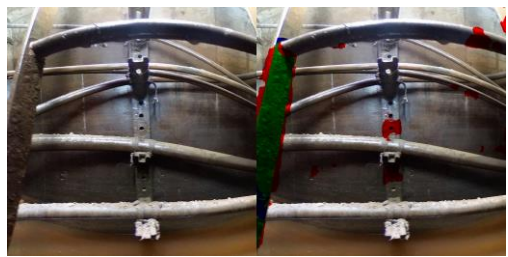


通番	<i>Accuracy</i>	<i>Recall</i>	<i>Precision</i>	<i>F-measure</i>	備考
92	0.8842	0.9995	0.4836	0.6518	
93	0.9819	0.9917	0.3241	0.4885	
94	0.8049	0.8385	0.2806	0.4205	図4-4-4 (d) を参照
95	0.8705	0.9046	0.4895	0.6353	
96	0.9405	0.9996	0.6097	0.7574	図4-4-4 (d) を参照
97	0.9504	0.9898	0.6987	0.8192	
98	0.9353	0.9665	0.6703	0.7916	
99	0.9465	0.7964	0.4568	0.5806	図4-4-4 (d) を参照
100	0.9408	1.0000	0.5906	0.7426	図4-4-4 (d) を参照
Totall	0.9172	0.8903	0.2288	0.3388	

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	3		4	
画像				
通番	21		30	
画像				





図付録 4-2-1 劣化ランク 1 の撮影画像

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	42		52	
画像				
通番	54		62	
画像				


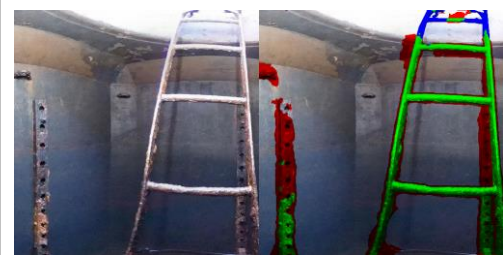

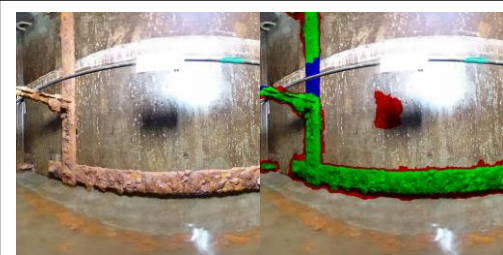
図付録 4-2-2 劣化ランク 2 の撮影画像

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	71	76
画像		
通番	79	82
画像		

図付録 4-2-3 劣化ランク 3 の撮影画像

緑：TP 赤：FP 青：FN

通番	93	95
画像		
通番	97	98
画像		

図付録 4-2-4 劣化ランク 4 の撮影画像

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援いただきました。

本論文は、日本電信電話株式会社（以下、NTT）アクセスサービスシステム研究所における研究成果に加えて、筑波大学システム情報系 庄司学教授のご指導とご助言のもと、学術的な視点を加えて取りまとめたものです。主指導教員である庄司学教授には、研究の構成から分析方法まで、多くのご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

筑波大学システム情報系 松島亘志教授、西尾真由子准教授には、副指導教員として入学審査、中間審査、予備審査において様々な観点からご助言、ご指導を頂き誠にありがとうございました。

筑波大学システム情報系 金久保利之教授、筑波大学計算科学研究センター 北原格教授には、予備審査において構造物や画像認識の観点からご助言、ご指導を頂き誠にありがとうございました。

庄司学教授および西尾真由子准教授の研究室に所属するゼミの皆様には、様々な観点からのご質問やご助言を頂きました。

NTT アクセスサービスシステム研究所 押田博之プロジェクトマネージャー、荒武淳グループリーダ、櫻田洋介主任研究員、濱野勇臣研究員、渡邊一旭社員、NTT インフラネット株式会社 田中実部長、NTT 先端集積デバイス研究所 柳秀一部長、望月章志主任研究員、高橋宏行主任研究員、東日本電信電話株式会社 中川雅史課長、風戸千紘様、アイレック技建株式会社 川端一嘉部長には、本論文の基となる研究データの取得や分析方法等でご指導、ご助言、ご協力を頂きました。

株式会社エクシオテック 小淵貴仁様、NDS 株式会社 廣濱佑麻様、株式会社ミライト・テクノロジーズ 結城壮平様には、実験やデータ解析等の支援を頂き誠にありがとうございました。

皆様より、今日に至るまで多くのご指導、ご助言、ご協力、ご支援を頂き、研究を進めることができました。改めて感謝申し上げます。

誠にありがとうございました。

業績リスト

【査読付き原著論文】

- 内堀大輔, 足利翔, 出口大志, 西本和弘, 高橋宏行, 中川雅史, 後藤和彦, 柳秀一: 耐久性と摩耗度視認性を向上したマンホール鉄蓋の模様の開発, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 75, No. 1, pp. 1-12, 2019.
- 内堀大輔, 高橋宏行, 田中航, 望月章志, 川端一嘉: デジタルカメラ画像を用いたマンホール鉄蓋の段差と摩耗の点検方法, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol. 72, No. 1, 1-10, 2016.

【査読付き国際会議論文】

- D. Uchibori, K. Watanabe, M. Nakagawa, and A. Aratake: Fully Automatic Inspection Method for Communication Manhole Using Non-GPS UAV and Image Processing, *The 13th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR 2021)*, 2021. (投稿中)
- Daisuke Uchibori, Hiroyuki Takahashi, Shoji Mochizuki, and Kazuyoshi Kawabata: Inspection Method Based on Image Processing for Measuring Level Difference of Manhole Covers, *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil and Building Engineering Informatics*, 6 pages, 2015.

【学会発表】

- 内堀大輔, 渡邊一旭, 中川雅史, 荒武淳: 自律飛行 UAV による通信用マンホール点検技術の開発ー実寸大マンホールにおける自律飛行検証ー, 令和2年度土木学会全国大会 第75回年次学術講演会, VI-287, 2020.
- 内堀大輔, 中川雅史, 柳秀一: 自律飛行 UAV による通信用マンホール点検技術の開発, 令和元年度土木学会全国大会 第74回年次学術講演会, VI-477, 2019.
- 内堀大輔, 濱野勇臣, 風戸千紘, 中川雅史, 柳秀一: UAV による通信用マンホールの自動点検技術の開発, 第19回建設ロボットシンポジウム, 建設ロボット研究連絡協議会, O2-02, 2019.
- 内堀大輔, 田中航, 川端一嘉, 高橋宏行: 学習データベースを用いたマンホール鉄蓋の摩耗推定に関する基礎検討, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-164, pp. 327-328, 2015.
- 内堀大輔, 川端一嘉, 望月章志, 山門亮: デジタルカメラ画像を用いたマンホール鉄蓋の段差計測方法, 土木学会第69回年次学術講演会(平成26年9月), VI-499, pp. 997-998, 2014.

【受賞】

- 第75回年次学術講演会優秀論文賞 令和2年度土木学会全国大会 2020年
論文題目: 自律飛行 UAV による通信用マンホール点検技術の開発ー実寸大マンホールにおける自律飛行検証ー
- 土木情報学論文賞 土木学会論文集 F3 (土木情報学) 2020年
論文題目: 耐久性と摩耗度視認性を向上したマンホール鉄蓋の模様の開発.
- 第74回年次学術講演会優秀講演者 令和元年土木学会全国大会 2019年
講演題目: 自律飛行 UAV による通信用マンホール点検技術の開発
- 土木情報学論文賞 土木学会論文集 F3 (土木情報学) 2017年
論文題目: デジタルカメラ画像を用いたマンホール鉄蓋の段差と摩耗の点検方法