

野島掩体壕の現況把握を目的とした視察、計測探査実験及び 継続的な観察プログラムの検討

眞部 広紀**1, 毛利 聡**2, 堀井 樹**3, 濱 侃**4, 大山 聖**5,
岡本 渉**6, 由良 富士雄**7, 久間 英樹**8, 岡崎 泰幸**9

**Inspection of Present Circumstances, Measurement Exploration Experiments
and
Study on Continuous Observation Programs
for**

Nojima Bunker, Kanazawahakkei, Yokohama, Japan

Hiroki MANABE**1, Satoshi MOHRI**2, Tatsuki HORII**3, Akira HAMA **4, Akira OHYAMA**5
Wataru OKAMOTO**6, Fujio YURA**7, Hideki KUMA**8, Yasuyuki OKAZAKI**9

Key words: Nojima Bunker, Measurement Exploration Experiment

Abstracts

In this paper, we discuss continuous preservation for Nojima bunker and utilization of exploration simulation experiments for Martian vertical holes with underground caverns.

1. はじめに

「野島掩体壕」は、神奈川県横浜市金沢区野島町に位置する野島公園内の隧道状遺構である(図1)。この掩体壕は、旧横須賀海軍航空基地(神奈川県横須賀市夏島町)の戦闘機を空襲から守るための格納庫として建設された。工事は昭和20年1月から始まり、第三〇〇設営隊長だった山本将雄によると、終戦前日の昭和20年8月14日に完成したようである¹⁾。同時期に工事が行われていた夏島掩体壕と合わせて小型機約100機を格納する計画であったが、実際に使用されることは無かった。

* 原稿受付 令和4年10月31日

**1 佐世保工業高等専門学校 基幹教育科

**2 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科

**3 先進的UAV研究事業Aero Flex

**4 千葉大学 園芸学部

**5 JAXA 宇宙科学研究所

**6 名古屋大学 全学技術センター

**7 防衛大学校 統率・戦史教育室

**8 松江工業高等専門学校 電子制御工学科

**9 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科

「野島掩体壕」の注目すべき点は、地下空間の規模の大きさである。横浜市設置の情報看板によると、全長約260mであり野島山の東西を貫通している。東西出入口の幅は約20m、高さ約7mで、東側は入口(図2)から約74m、西側(図3)は入口から約84.5mの区間でコンクリート覆工が成されている。中央部約100mの区間は、幅約10m、高さ約8mで素掘りの状態である。一方、『基地設営戦の全貌—太平洋戦争海軍築城の真相と反省—』²⁾によると、東西出入口の幅は20m、コンクリート覆工区間の延長は75mであり、中央部の幅は13m、素掘り区間の延長は100mとされている。また、覆工コンクリートは、立上りおよびアーチの始端(スプリングライン、起拱部)で2m厚、アーチ頂点(拱頂部)では0.7m厚で計画されたようである(図2)。出入口部と中央部とで寸法や構造が異なることについて、『第三〇〇設営隊戦時日誌』(昭和20年[1945]3月15日～6月30日分)^{3,4)}によると、出入口部は全長コンクリート巻立てとする第一期工事であり、中央部は第二期工事だったようである。すなわち、中央部は当初より素掘りのままとすることで計画されていた可能性がある。

素掘り区間を除いて、「野島掩体壕」のコンクリート覆工区間は立ち入り調査が可能である。一方、素掘り区間はリスクが未評価な状態であり、立ち入り行為が実施できず、リスク評価のための進入調査は実施されてこなかった。この状況を打破するには、無人機による素掘り区間の調査が必要になる。高専大学連携研究ネットワーク『旧軍港市学術調査研究会』は、同種のネットワークである『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』と協力して「野島掩体壕」の調査実験プロジェクトを継続中である。本稿ではその途中経過を報告し、素掘り区間を詳細に無人探査するための検討を行う。

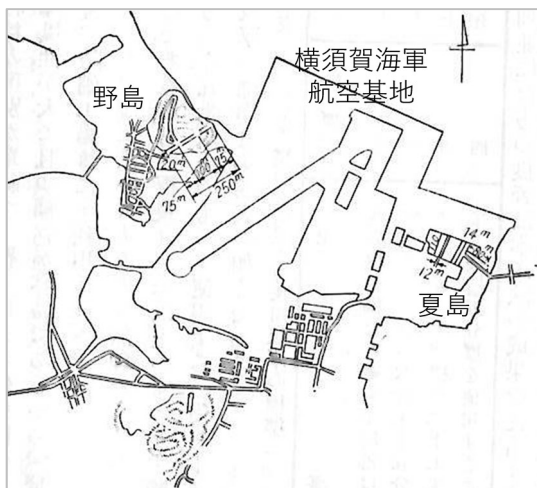


図1

上：現在の航空写真（国土地理院地図に加筆）
下：隧道式格納庫位置図（注2文献に加筆）



図2 東口坑門（上：外部、中上：内部、中下：奥部、下：素掘り区間）



図3 西口坑門（上：外部、中：内部、
下：奥部）

2. 視察調査

本節で報告する調査は、太平洋戦争末期に建設された「野島掩体壕」の隧道構造物の現状、特にコンクリート覆工部の状態を調べて、今後の健全度調査に資する知見を得ることを目的とした。

【文献調査】

第三〇〇設営隊は、横須賀海軍施設部第一部隊を改編し昭和20年3月15日に開隊した部隊である³⁾（注：『海軍施設系技術官の記録』⁹⁾によると昭和20年1月5日編

成とされている）。この部隊は、施設系技術官の精鋭で構成されており、野島および夏島掩体壕の他に、日吉台旧日本海軍連合艦隊総司令部地下壕や松代大本営地下壕など戦争末期の本土攻撃に備えた防空施設の建設に関わっている⁴⁾。

野島掩体壕の施工は、ドイツ式（側壁導坑式：両側の側壁部分に導坑を掘り、側壁を構築して側面の土圧を支えながら上部に掘り進め、アーチが完成した後、中央に残された部分を掘り出す）によるとされている²⁾が、図2に示すように側壁以外にも導坑を設けたようである。作業には削岩機、ボーリングマシン、自動車、機関車などの機械を使用し³⁾「海軍一の装備機械力」¹⁾のもと工事が進められていた。一方、岩盤の発破のためのダイナマイトがひっ迫するに伴い、液体酸素爆薬を使用したようである²⁾。人員については、前半期は昼夜2交代で熟練者各シフト160名が作業し、後半期には加えて400名の未熟練兵力を各シフトで増員したようである²⁾。

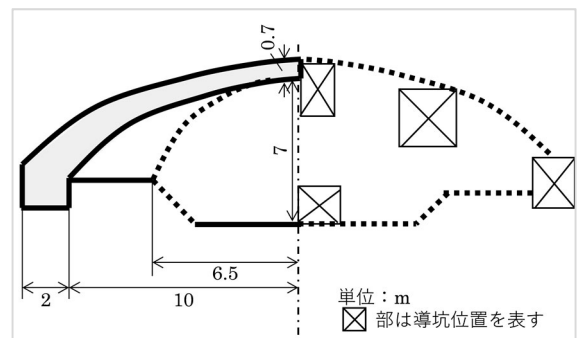


図4 掩体壕断面図²⁾

【現地調査】

第1回調査実験(2022年9月7日)において、UGV/UAVによる探査実験と合わせて実施した。

[調査内容]

- 1) 関連文献の調査（事前ならびに事後）
- 2) 掩体壕コンクリートの目視・一部打診調査
- 3) 掩体壕コンクリートの鉄筋探査（電磁波レーダーにより一部）
- 4) 掩体壕コンクリートの強度推定（テストハンマーにより一部）

[掩体壕の構造概要]

出入口部は、図2・3に示すように掩体壕の東西で坑門の形状が異なり、西側坑門にはコンクリートの垂れ壁が

取付けられている(図3上)。この壁は、攻撃に対して内部の機体を守る目的であり、壁面は機体の出し入れが行えるよう機体の形状に合わせた形となっている。一方、東側坑門には垂れ壁は無いが、坑門から約2mの範囲で覆工コンクリートが増し厚されている(写真2右)。増し厚は、アーチ始端から頂点にかけてされている。また写真3に示すように、増し厚されていない他のコンクリートと異なり表面に型枠セパレーター穴を埋めた跡が見られることから、時期不明ではあるが、覆工コンクリートアーチに対して後で打ち継ぎした可能性が考えられる。



図5 東側坑門

上：増し厚部(破線丸印：セパレーター穴跡)
下：非増し厚部

掩体壕の東西いずれの側にも、時期不明で土砂や廃棄物(公園管理者が置いた物も含む)が積まれていた。特に、西側は図3下に示すように、奥に土砂が高く積まれており、完全には閉塞されていないが素掘り部を望むことはできなかった。一方、東側は図2に示すように、土砂が断面の両端に覆工コンクリート立上りの高さ近くまで積まれていたものの、素掘り部まで通じていた。

[目視調査]

掩体壕の覆工コンクリートは、東西いずれも坑門付近は乾燥しておりコンクリート表面も乾いていたが、奥に進

むと内部の湿度は高く、コンクリート表面にはコケやカビが生えている箇所があった。また、当日は表面に結露が付いている箇所もあった。このように掩体壕内部が高湿度になる原因として、掩体壕上部の山(野島山)に降り注いだ雨由来の地下水が覆工コンクリートの打ち継ぎ部やひび割れ部から漏水することや、掩体壕が西側に積まれた土砂により閉塞され空気が流れにくいことが考えられる。

上述のように、覆工コンクリート表面の所々にひび割れが見られ、図6・7に示すように、そのひび割れや打ち継ぎ部には漏水跡や遊離石灰が見られる箇所もあったが、覆工コンクリートアーチの異常な変形は見られなかった。

一部コンクリート表面が剥離している箇所を観察すると、図8に示すようにコンクリート内部に丸石が見られ、このことから粗骨材として川砂利を使用していたことが推察できる。また、図9に示すようにコンクリート内の金属に錆が生じたことによりコンクリートに剥落が生じている箇所が2、3か所あった。しかしながら、後述の内部鉄筋探査の結果、増し厚部以外の覆工コンクリートには内部鉄筋の存在を確認できなかったことから、写真9の腐食している金属は、型枠に使用された鉄線(番線)などの仮設の鉄材が埋まっている可能性が考えられる。

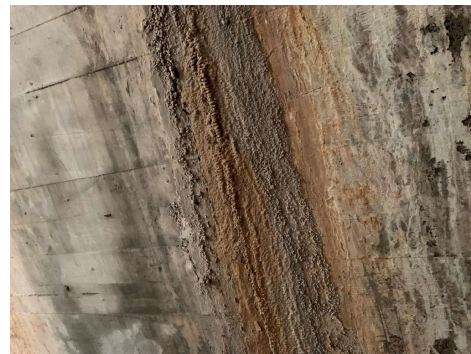


図6 遊離石灰(西側)

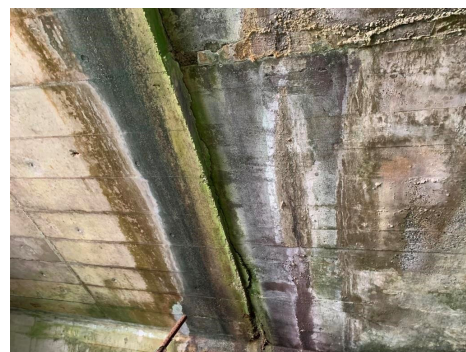


図7 漏水跡、コケ、遊離石灰(東側)



図8 骨材の様子（東側）

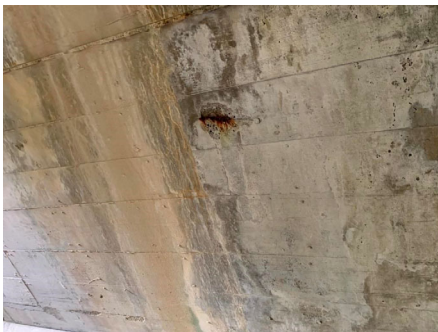


図9 金属の錆とコンクリート剥落（西側）

[掩体壕コンクリートの内部鉄筋探査]

掩体壕の覆工コンクリートを、手の届く範囲で電磁波レーダー方式の鉄筋探査機にて探査したところ、東側坑門付近の増し厚部に内部鉄筋の反応を確認することができた。一方、他の箇所（東西覆工コンクリート立上り部及びアーチ部）では、内部鉄筋の反応を確認することが出来なかった。『第三〇〇設営隊戦時日誌』³⁾内にも鉄筋材料自体や配筋のための資機材、配筋作業に関する記述が見られないことから、覆工コンクリートのほとんどは無筋コンクリート構造であると考えられる。

一方、増し厚部における1000×1000mmの範囲での鉄筋探査の結果を表1に示す。一般に、トンネル覆工コンクリートは土被り荷重に対して横断方向を主筋、縦断方向を配力筋として配筋するため、覆工内側からのかぶり厚さとしては横断方向の鉄筋の方が大きくなる。

表1 増し厚部配筋推定

配筋方向	配筋間隔 (mm)	かぶり厚さ (mm)
縦断方向	200~300	120
横断方向	100~200	100

しかしながら、表1に示す通り本調査の結果は縦断方向の鉄筋のかぶり厚さの方が大きくなっている。その理由は、増し厚部の施工時期や経緯がはっきりしないこともあり、不明である。また、今回鉄筋探査が出来なかったが、坑門の面壁部分は一般的なトンネルの構造を踏まえると鉄筋コンクリート構造である可能性が高いと考えられる。

[掩体壕コンクリートの強度推定]

土木学会「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法 (JSCE-G504)」に準拠してテストハンマーにより反発度を測定した。そして反発度から、日本材料学会式 (式(1)) により推定強度を求めた。

$$\alpha_c = 18.0 + 1.27 R_o \quad (1)$$

ここに α_c : 推定圧縮強度 (N/mm²) ,

R_o : 試験面表面の湿潤状態および

テストハンマーの打撃角度より補正した平均反発度

各位置での推定強度を表2に示す。立ち上がり部、アーチ部とではほぼ同じ強度となっている一方で、増し厚部の強度が比較的低い。これは、増し厚部の配合が異なる可能性や、増し厚部が薄いことや元のアーチ部材との一体性が低い可能性も考えられる。

また、強度の大きさについて、旧日本海軍における築城及び一般施設の耐弾構造を規定したものである『耐弾構造規準』⁹⁾には、砲爆弾の直撃を受ける部分に使用されるコンクリート（「一級コンクリート」）の必要強度が150kgf/cm² (≒14.7N/mm²) と記載されている。このことを踏まえると、テストハンマーによる推定強度ではあるが、覆工コンクリートは必要な強度を有していると考えられる。

表2 テストハンマーによる推定強度

測定位置	湿潤状態	打撃角度 (度)	推定強度 (N/mm ²)
西側立上り①	乾燥	0	36.6
西側立上り②	濡れている	0	36.4
西側アーチ①	乾燥	45	43.1
西側アーチ②	濡れている	45	37.5
東側アーチ 増し厚部	乾燥	45	27.1

3. 実験 (UAV と UGV)

リスクが未評価・未知であるために立ち入り（進入）ができない素掘り区間において、調査作業者に替わって無人機が現況調査する必要性を第1節で述べた。無人機調査の実現を可能にする技術的な基盤を、本研究グループは持っている。本節ではドローン（UAV）とUGVを使用した壕内における予備実験を紹介する。

3.1 第1回調査実験（2022年9月7日）

東側/西側坑門から掩体壕奥部に向かって無人機を進入させて、内部の様子を観察した。UAVの使用機材は「AeroFlex Ibis」（図10上、小型カメラを用いた掩体壕内の撮影）、「DJI Mavic Air」（UAVが飛行可能な環境かどうかのチェック）、「DJI Mavic 2」（搭載カメラを用いた掩体壕内の撮影と測量）であり、UGVの使用機材は「AeroFlex Serval」（図10下、Insta360カメラを搭載して掩体壕内を隈なく走行し、全体を360°映像として記録）である。



図10 上：ドローン（UAV）、AeroFlex Ibis
下：UGV、AeroFlex Serval

UAVを用いて掩体壕内の空撮と天井の測量を行うために、ハロゲン灯光源によって掩体壕内部全体を照らしている。西側であればほぼ見通せる程度の環境を、準備することができた。Fig7より、UAV「Ibis」を壁面より2m付近まで接近させた結果、壁面の様子がよく捉えられていることがわかる（図11）。西口の調査では光源が十分に確保できたため、UAVの映像より天井部分の3次元モデル化を試みた（図12）。



図11 UAVから撮影した壁面

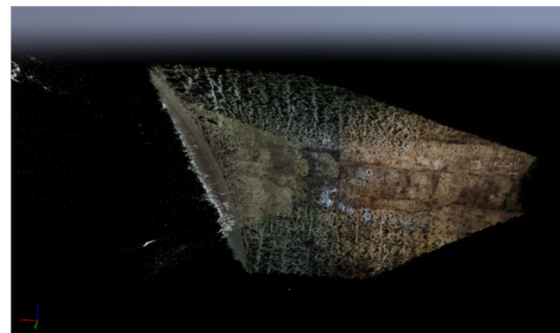


図12 UAV撮影画像による天井の3Dモデル

UGV「Serval」にInsta360を搭載し、掩体壕内を満遍なく走行させ、それを映像として記録した。1フレームで掩体壕内の様子を記録することに成功した（図13）。



図13 UGVが撮影した360°画像

東側坑門から74m程度奥に進むと、素掘り区間（コンクリートにより整えられておらず、トンネルを掘ったままの状態で壁面が露出している区間）に到達する。今回、短距離ではあるが、UAVを素掘り区間に進入させて撮影することができた。UGVを用いて素掘り区間の観測を試みたが、光源と走破性能の不足により進入を断念した。

3. 2 第2回調査実験（2022年10月27日）

計測機器としてLiDARセンサ内蔵の「iPhone13Pro」を搭載したUAV「AeroFlex Colibri」（図14）によって簡易写真レーザ測量を行い、掩体壕天井部分の3次元モデル化を試みた。より広範囲を計測するために、ロール方向とピッチ方向 $\pm 15^\circ$ のバンクをさせるように手動操縦し、掩体壕内を水平方向と垂直方向にランダムに飛行させた（図15）。アプリ「Scaniverse-3D」を使用して天井部分の3次元モデル化を行った（図16）。



図14 洞窟探査用実験ドローン（UAV）
AeroFlex Colibri



図15 UAVの揺動飛行

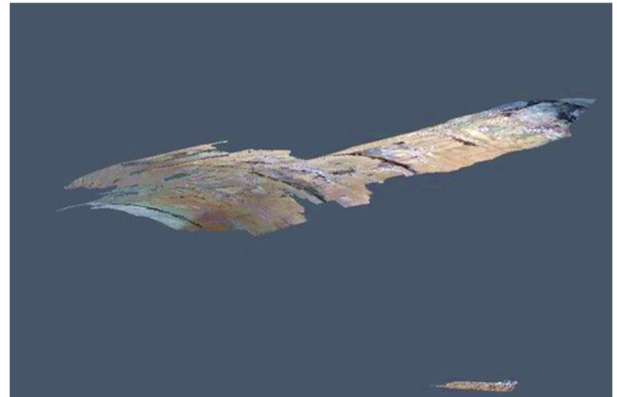


図16 コンクリート覆工区間天井部の3Dモデル

飛行中のUAVが壁面に接近すると、ロータが起こした気流が壁面に干渉・反射して、UAVの飛行安定性に影響を与える場合がある。影響の解析を行うために、UAVを壁面に接近させる実験を行い（図17）、その飛行データをもとに考察を行なった（別稿の『野島掩体壕における火星地下空洞計測探査UAVの予備実験』に詳細を掲載）。



図17 壁面接近飛行実験

第1回調査実験では、UGVは素掘り区間への十分な進入を果たせなかった。第2回調査実験では、同型のUGVを繋げて安定性と走破力を向上させた連結式UGV（図18）によって素掘り区間において進入走行実験を実施することができた（図19）。



図 18 連結式 UGV



図 20 小型 LiDAR の携行型装備



図 19 素掘り区間に進入する連結式 UGV

4. 実験 (携行型 LiDAR)

近年、LiDAR 装置の小型化と省電力化が進み、短時間で高密度な形状測定が可能になってきた。第 2 回調査実験では、小型 LiDAR を携行した調査作業者が徒歩で東側坑門から進入しつつ、約 5 分でコンクリート覆工区間のレーザー測定を完了させた。さらにコンクリート覆工区間と素掘り区間の境界点で約 5 分立ち止まり、素掘り区間のレーザー測定を完了させた。また、その場で処理を行い 3 次元点群データ (図 21) を得ることができた。

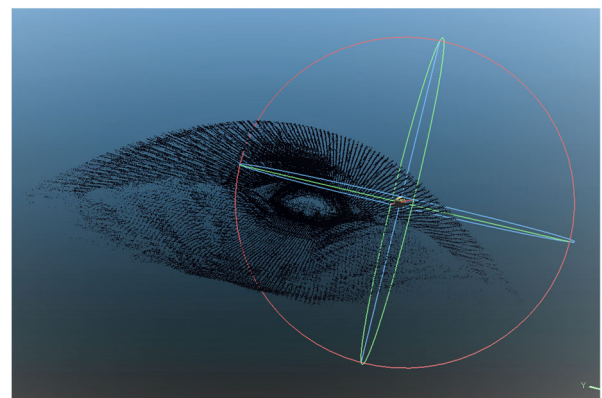
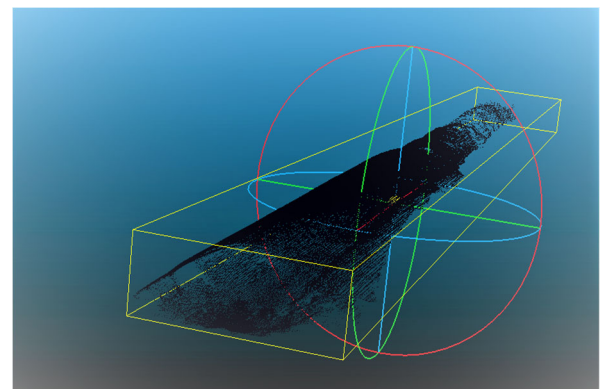
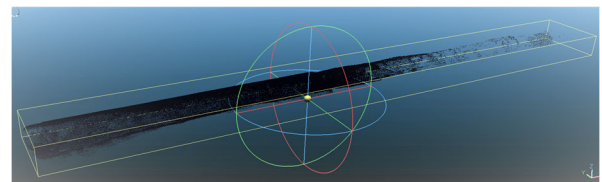


図 21 「野島掩体壕」東側 (坑門～素掘り区間最奥部) 3 次元点群モデル (Cloud Compare 表示)

5. まとめ

「野島掩体壕」の覆工コンクリートについて、簡便な現地調査を行った。調査内容としては不十分であるが、目視の限りでは、全体として直ちに崩落の危険が迫っていると判断できる顕著な箇所は確認できなかった。掩体壕の内部環境は漏水や土砂による閉塞のため湿潤であるが、覆工コンクリートが無筋となれば、鉄筋腐食とそれによるコンクリートの剥離・剥落の危険性は無い。また、コンクリートのひび割れ、漏水、浮きは様々な箇所を確認されたが、覆工の崩壊などを招く構造物の機能低下を表すような変状（外力による覆工の変形や大きなひび割れなど）は本調査の範囲では確認できなかった。

以上の様に、本調査の結果からは構造物の機能低下を表すような変状は見られなかった。また、覆工上の地山の深さ（土被り）もそれほど大きくないことから、掩体壕の平時の構造安定性に対して緊急に対策を講じる必要がある状態とは考えにくい。しかし、地震や降雨による地山の崩壊などの災害に対する構造安定性は評価できていない。また、コンクリート自体や遊離石灰の剥落の危険性は高いため、掩体壕への進入の際には安全対策が必要である。そして、覆工と地山との間に空洞（覆工背面空洞）の存在やその状態の確認も含めた詳細な調査を実施することによって、平時および非常時の構造安定性をより詳細に評価できると考えられる。

最後になるが、文献史料が少ない戦争遺跡の中でも、「野島掩体壕」は比較的当時の建設の状況が分かる史料が現存する遺構である点においても史料価値が高い。遺構ならびに関連史料の更なる調査から、「野島掩体壕」と旧日本海軍の土木・建築の実状をより一層明らかにできる可能性がある。

6. 課題と解決法

現在のところ、「野島掩体壕」の調査実験プロジェクトは第1回、第2回ともに無事に完了して成果を出している。今後も野島山全体を含めて定期的に調査実験を行う予定であるが、中心的な課題として残り続けるのは立入ができない素掘り区間であろう。

素掘り区間の調査手段として、無人機(UAV、UGV)をプラットフォームとした撮影(現況把握、写真測量)やレーザーセンシング(レーザースキャナ測量)は有効である。『旧軍港市学術調査研究会』に協力している『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』は、

洞窟のフィールドで無人機による調査方法を研究してきた⁶⁾。素掘り区間の調査項目の一つは壁面(天井～側面)の詳細観察、とくに肌落ちに関係する変状(表面の凹凸、割れ目、ひび割れ、断層の位置と変化)の追跡と検出である。これらは上述の無人機調査の手法で対応することが可能である。もう一つは地下空間としての壕の安定性である。立入り調査などを安全に行うためには、野島掩体壕の空洞安定性を数値解析等により検討する必要がある。まずは、過去の図面や周辺の地盤調査結果等をもとに数値解析を実施し、将来的には凹凸などの形状も考慮した数値解析も行い、より詳細に空洞安定性を評価する予定である。現在、山岳トンネル工事の切羽面に対する写真測量の応用手法⁷⁾をもとに、素掘り区間の解析手法の研究を進めている。

7. 展開

「野島掩体壕」の東には陸軍が横須賀軍港を直接防衛するために作った「夏島砲台」がある。その地下には、「野島掩体壕」のような海軍による大規模な航空機格納施設が残っている。その南の貝山緑地には「貝山砲台跡」があり、その地下には「貝山地下壕」(ボランティアガイドによる一般公開中)がある。また、横須賀軍港から追浜の海軍航空技術廠にかけて、海軍の手により大規模な防空施設(高角砲台や、対空機関銃砲台)が設けられている。

「野島掩体壕」は、追浜海軍航空台(追浜にあった海軍航空技術廠と海軍航空の戦術等の研究機関)の施設の一部と考えられる。これらの史跡は横浜市金沢区に隣接する横須賀市にも点在している。神奈川県は陸軍の高射砲台の発掘調査を行い、その詳細な調査報告をネット上で公開している。「野島掩体壕」単体ではなく、海軍航空技術廠、追浜海軍航空隊として、市の境界を跨いだ県単位、もしくは組織横断的な調査・管理・活用の必要性がある。「野島掩体壕」の地下文化遺産(UBH、Underground Built Heritage)としての価値と意義は大きい。

洞窟を探査するUAVやUGVの実験サイトとして、「野島掩体壕」は好適なフィールドの側面を持っている。現在、JAXAの『UZUME』計画や火星航空機探査の研究グループが、月・火星の縦孔地下空洞直接探査の実現に向けて『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』と連携した探査シミュレーション実験を進めている。その中で、縦孔-地下空洞の類似地形・類似環境となる実験サイトの

一つとして「野島掩体壕」は重要な位置にある。

注

- 1) 海軍施設系技術官の記録刊行委員会：
海軍施設系技術官の記録，1972.5
- 2) 佐用泰司，森茂：
基地設営戦の全貌－太平洋戦争海軍築城の真相と
反省－，鹿島建設技術研究所出版部，1953.12
- 3) 第三〇〇設営隊戦時日誌
(昭和20年3月15日－昭和20年4月30日)，
防衛研究所所蔵，アジア歴史資料センター
Ref. C08030297100，1945.5
- 4) 第三〇〇設営隊戦時日誌
(昭和20年5月1日－昭和20年6月30日)，
防衛研究所所蔵，アジア歴史資料センター
Ref. C08030297200，1945.7
- 5) 海軍施設本部：
耐弾構造規準，防衛研究所所蔵，1944.10
- 6) 眞部広紀，久間英樹，稲川直裕，前田貴信，
堀江潔，大浦龍二，岡本渉 他：
月と火星の縦孔-地下空洞を目指すための
地球における洞窟計測探査シミュレーション，
佐世保工業高等専門学校研究報告，第56号，
pp.77-93，2020.
- 7) 岡崎泰幸，林久資，津田愉大，田村大智，
青木宏一，進士正人，
切羽面の凹凸に起因する肌落ちリスク評価のための
解析方法の提案
土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 77 卷 1 号，
pp. 92-97，2021

謝辞

本調査の一部は、JSPS 科研費 22K18490 の助成を受けて実施した。