ENAA GEC2021-P1

2021 年度（2021M-032）

ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究

報　　告　　書

【 概　　要　　版 】

2022 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会

地下開発利用研究センター

KEIRIN

競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。

https://jka-cycle.jp

この報告書は「概要版」です。
「概要版」および「本編第Ⅰ部～第Ⅳ部」はエンジニアリング協会ホームページよりダウンロードできます。

以下のアドレスまたは QR コードから、当協会の JKA 補助事業調査研究報告書のページにアクセスして、2021 年度補助事業をクリックして下さい。

https://www.enaa.or.jp/information/jka-subsidy-business

序

本報告書は、公益財団法人 JKA より機械振興補助事業の補助を受け、一般財団法人エンジニアリング協会地下開発利用研究センターが実施した 2021 年度「ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究」の成果を報告書として取りまとめたものです。

コロナ禍が社会環境を変えた世界において、産業界にも新たな行動様式、社会変化に即応する戦略が求められています。地下開発利用研究センターでは、こうした社会や産業界のニーズを受けて、SDGs やニューノーマルへの対応といった社会の動向にも目を向けながら、先導的、基盤的な課題の解決に向けて幅広く産・学・官の英知を集めて調査研究を実施しています。社会的諸問題の解決や将来の望ましい社会システムの構築等に資するために、これまでの新技術・各種システムに関する調査研究成果の蓄積も踏まえながら、2021 年度は、「ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の提言」を目指して、調査研究を行いました。

ポストコロナ時代の地下インフラの再構築には、建設技術だけではなく DX（デジタルトランスフォーメーション）に対応した情報化技術を基盤に、自動運転など新たなモビリティの適用、効率的な物流システムの運用、感染症対策を施した災害避難基地機能等、多様なシステムや技術の組込みが必要となります。

調査研究の実施にあたっては、地下開発利用研究センターの研究企画委員会の下で、「地下利用推進部会」の中に「SDGs とニューノーマルに対応した多様な空間利用のあり方に関する調査研究」、「多様なハザードを想定した地下インフラの機能に関する調査研究」、「自動運転、MaaS 等に対応した地下のインフラシステムに関する調査研究」及び「社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究」をそれぞれ担当する 4 つの専門部会を設けて調査研究を行い、当協会の賛助会員の皆様をはじめ社会全体に役立ち、参考となるようにまとめました。

最後に、本報告書の成果がポストコロナの時代における地下インフラの再構築の検討に活用されることを切望しますとともに、この事業にご協力いただいた関係各位に対して心から謝意を表します。

2022 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会
理事長　　山東 理二

２０２１年度　地下利用推進部会
全体テーマ「ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究」

幹事会名簿

幹 事 長　金野　正一　大成建設㈱　土木本部 土木技術部 都市土木技術室 次長
（第１部会 部会長）

副幹事長　稲葉　薫　㈱竹中工務店　技術研究所 環境・社会研究部
都市気候グループ 主任研究員
（第３部会 部会長／2022 年１月 10 日まで）

幹　事　藤井　紀之　応用地質㈱　流域・砂防事業部 流域技術部
グループマネージャー
（第１部会 副部会長）

幹　事　大森　剛志　東電設計㈱　ジオフロント本部 バックエンド技術部
地盤技術マネージャー
（第２部会 部会長）

幹　事　会田　和義　佐藤工業㈱　土木事業本部 営業部 営業第二課長
（第２部会 副部会長）

幹　事　吉川　猛　基礎地盤コンサルタンツ㈱　技術本部 物理探査部 副部長
（第３部会 副部会長）

幹　事　安藤　拓　清水建設㈱　土木技術本部 地下空間統括部
トンネル設計グループ長
（第４部会 部会長）

幹　事　田島　新一　鹿島建設㈱　土木設計本部 地盤基礎設計部 部長
（第４部会 副部会長）

事務局　塩﨑　功　(一財) エンジニアリング協会　地下開発利用研究センター
副所長 兼 技術開発部長

事務局　斎藤　俊哉　(一財) エンジニアリング協会　地下開発利用研究センター
技術開発部 担当部長

事務局　松原　洋　(一財) エンジニアリング協会　地下開発利用研究センター
技術開発部 研究主幹

事務局　本多　伸弘　(一財) エンジニアリング協会　地下開発利用研究センター
技術開発部 研究主幹

事務局　髙山　秀樹　(一財) エンジニアリング協会　地下開発利用研究センター
技術開発部 研究主幹

事務局　大関　祐介　(一財) エンジニアリング協会　地下開発利用研究センター
技術開発部 主任研究員

SDGs とニューノーマルに対応した多様な空間利用のあり方に関する調査研究部会
（第１部会）

委員名簿

部 会 長	金野　正一	大成建設㈱	土木本部 土木技術部 都市土木技術室 次長
副部会長	藤井　紀之	応用地質㈱	流域・砂防事業部 流域技術部 グループマネージャー
委　　員	西村　毅	㈱安藤・間	建設本部 技術研究所 土木研究部 主席研究員
委　　員	窪島　光志	川崎地質㈱	事業企画部 放射性廃棄物処分技術室 課長代理
委　　員	森澤　哲也	㈱技研製作所	工法企画部 エンジニアリング課長
委　　員	菅沼　優巳	㈱竹中土木	技術・生産本部 技術開発部 部長
委　　員	王寺　秀介	中央開発㈱	技術センター センター長
委　　員	宇田川 湧人	東急建設㈱	土木事業本部 技術統括部 環境技術部 環境保全 G
委　　員	向井　孝徳	飛島建設㈱	土木事業本部 土木 DX 推進部 土木 ICT グループ 課長
事 務 局	松原　洋	(一財) エンジニアリング協会 地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹	

多様なハザードを想定した地下インフラの機能に関する調査研究部会
（第２部会）

委員名簿

部 会 長	大森　剛志	東電設計㈱	ジオフロント本部 バックエンド技術部 地盤技術グループマネージャー
副部会長	会田　和義	佐藤工業㈱	土木事業本部 営業部 営業第二課長
委　　員	松山　尚典	応用地質㈱	技術本部技師長室 技師長 （地震防災事業部駐在）
委　　員	丸山　祐司	川崎地質㈱	関東支社 技術第 2 部 広域プロジェクト グループリーダー
委　　員	萩原　協仁	基礎地盤コンサルタンツ㈱	北海道支社 技術統括部長
委　　員	岩竹　要	㈱ダイヤコンサルタント	ジオエンジニアリング事業本部 地圏環境事業部 地盤解析部 主任技師
委　　員	佐藤　茂美	鉄建建設㈱	建設技術総合センター 研究開発センター 開発企画部長 （2021 年 9 月 30 日まで）
委　　員	栗栖　基彰	鉄建建設㈱	建設技術総合センター 研究開発センター 所長 （2021 年 10 月 1 日より）
委　　員	土屋　光弘	西松建設㈱	土木事業本部 土木設計部 設計 1 課長
委　　員	館澤　宣義	日揮㈱	エンジニアリング本部 EX 推進室 室長
事 務 局	松原　洋	（一財）エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹
事 務 局	大関　祐介	（一財）エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 主任研究員

自動運転、MaaS 等に対応した地下のインフラシステムに関する調査研究部会
（第３部会）

委員名簿

部 会 長	稲葉　薫	㈱竹中工務店	技術研究所　主任研究員 （2022 年 1 月 10 日まで）
副部会長	吉川　猛	基礎地盤コンサルタンツ㈱	技術本部 物理探査部 副部長
委　員	笠　博義	㈱安藤・間	建設本部 技術研究所 副所長
委　員	三石　晋	応用地質㈱	情報企画本部 地下埋設物探査プロジェクト室
委　員	森田　晃司	㈱大林組	土木本部 生産技術本部 技術第二部 担当部長
委　員	荒木　義久	佐藤工業㈱	土木事業本部 営業部 部長
委　員	西家　翔	㈱竹中工務店	技術研究所 研究員 （2022 年 1 月 11 日より）
委　員	上田　正人	中央開発㈱	事業本部 顧問
委　員	柳　博文	鉄建建設㈱	土木本部 エンジニアリング企画部 担当部長
委　員	平野　孝行	西松建設㈱	土木事業本部 土木設計部 シニアマイスター
委　員	河田　浩史	三井住友建設㈱	土木本部 土木営業部 課長
事 務 局	髙山　秀樹	（一財）エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 研究主幹

社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究部会
（第４部会）

委員名簿

部 会 長	安藤 拓	清水建設㈱	土木技術本部 地下空間統括部 トンネル設計グループ長
副部会長	田島 新一	鹿島建設㈱	土木設計本部 地盤基礎設計部 部長
委 員	本多 伸弘	㈱アサノ大成基礎エンジニアリング	事業推進本部 担当部長
委 員	田中 義浩	応用地質㈱	エネルギー事業部 事業企画部 主任
委 員	浜田 元	㈱奥村組	技術研究所 土木研究グループ 上席課員
委 員	村下 富雄	㈱鴻池組	土木事業総轄本部 技術本部 土木技術部 技術２課 課長
委 員	田中 孝	戸田建設㈱	技術開発統括部 技術研究所 社会基盤構築部 部長
委 員	久慈 雅栄	前田建設工業㈱	土木事業本部 土木技術部 上級技師長
事 務 局	斎藤 俊哉	（一財）エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 担当部長

ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究
報 告 書
【概 要 版】

目　次

序
2021 年度地下利用推進部会 幹事会 各部会委員名簿

1. はじめに …… 1
1.1 部会活動の基本目的 …… 1
1.2 部会の構成と調査研究内容 …… 2
1.2.1 幹事会の活動 …… 2
1.2.2 各部会の活動 …… 3

2. SDGs とニューノーマルに対応した多様な空間利用のあり方に関する調査研究 …… 6
2.1 調査経緯・調査方法 …… 6
2.1.1 調査方針 …… 6
2.1.2 調査内容 …… 7
2.1.3 調査状況 …… 7
2.2 調査研究のまとめ …… 7
2.2.1 ニューノーマル …… 7
2.2.2 多様な空間利用 …… 13
2.3 今後の課題 …… 24
2.3.1 調査研究のまとめ …… 24
2.3.2 今後の課題 …… 24

3. 多様なハザードを想定した地下インフラの機能に関する調査研究 …… 26
3.1 調査経緯・調査方法 …… 26
3.1.1 調査方針 …… 26
3.1.2 調査内容 …… 26
3.1.3 調査状況 …… 27
3.2 調査研究のまとめ …… 27
3.2.1 都市が遭遇するハザード …… 27
3.2.2 地下インフラに求められる機能と課題 …… 29
3.3 今後の課題 …… 32

4. 自動運転、MaaS 等に対応した地下のインフラシステムに関する調査研究 …… 35
4.1 調査経緯・調査方法 …… 35
4.1.1 調査方針 …… 35
4.1.2 調査内容 …… 35
4.1.3 調査状況 …… 36
4.2 調査研究のまとめ …… 36
4.2.1 人流に関するまとめ …… 36
4.2.2 物流に関するまとめ …… 37
4.3 今後の課題 …… 38

5. 社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究 …… 40
5.1 調査経緯・調査方法 …… 40
5.1.1 調査方針 …… 40
5.1.2 調査内容 …… 40
5.1.3 調査状況 …… 41
5.2 調査研究のまとめ …… 41
5.2.1 想定される地下空間の新たな使い方 …… 41
5.2.2 地下インフラ再構築に利用される技術 …… 43
5.3 今後の課題 …… 55

6. 講演会の実施 …… 57
6.1 CCS / CCUS に関する研究開発の動向と今後の展開に関する講演会 …… 57
6.1.1 講演趣旨 …… 57
6.1.2 講演内容 …… 57
6.2 総合物流施策大綱とその周辺およびドローン物流に関する講演会 …… 58
6.2.1 講演趣旨 …… 58
6.2.2 講演内容 …… 58
6.3 地上および地下施設を対象にした３次元モデルの構築とその活用事例に関する講演会 …… 60
6.3.1 講演趣旨 …… 60
6.3.2 講演内容 …… 60

１．はじめに

1.1　部会活動の基本目的

新型コロナウイルスの感染拡大を契機として、感染症対策にとどまらず社会の様々な領域において、課題が顕在化してきている。

ニューノーマルという言葉に代表されるように、在宅勤務制度の急速な普及や人々の集まる機会を制限するといった、企業や市民を取り巻く社会システムや環境の変化は、産業や市民の活動を支える社会インフラに対しても、少なからず影響を与えると考えられる。

特に地下街やトンネル等の社会インフラは、ひとたび構築されれば、あとから機能改善や再構築を行うことは非常に困難であり、今から対応を考えることが必要である。

一方、2030 年までに持続可能でよりよい世界を目指す SDGs（持続可能な開発目標）は、今やすべての国家,産業においての共通目標であり、今後はクリーンなエネルギー（目標⑦）、産業と技術革新の基盤（⑨）、住み続けられるまちづくり（⑪）、気候変動対策（⑬）といった観点からの社会インフラ形成が求められる。

地下利用推進部会は、一般財団法人エンジニアリング協会地下開発利用研究センターの事業の一環として、以下の 5 項目を活動の基本目的として自主事業を行っている。

・新しい地下利用の形態やニーズを探索する。
・参加企業の技術ポテンシャルの向上を図る。
・調査研究活動により、参加企業間の一層の活性化を図る。
・地下開発利用の積極的な普及を図る。
・地下利用に関する技術開発テーマ、政策テーマの発掘と提案に努める。

この基本目的に沿って、本年度から 2 年間にわたり、全体テーマ「ポストコロナ時代の環境変化を考慮した地下インフラ再構築に関する調査研究」を掲げ、新型コロナウイルス対応によって社会変化が定着していく（ポストコロナ）時代の到来を契機に、多様な地下空間利用のあり方を前提とした社会インフラを追究し、既存のインフラを再構築していくことを目指す。

初年度となる 2021 年度は、コロナ禍においてインフラはどうあるべきか、そしてポストコロナに対応したインフラはどのようなものを想定し、その再構築はどのように行うか、という手法や技術を検討した。

1.2　部会の構成と調査研究内容

地下利用推進部会の活動推進にあたっては、全体テーマ「ポストコロナ時代の環境変化を考慮した地下インフラ再構築に関する調査研究」の中で、次の 4 つの調査研究対象をサブテーマとして設定し、それぞれ調査部会（第 1 部会~第 4 部会）を立ち上げた。

① SDGs の実現とニューノーマルへの移行に対応した、多様な空間利用のあり方
（SDGs とニューノーマルに対応した多様な空間利用のあり方に関する調査研究部会：第 1 部会）

② 多様なハザードを想定した、安全性とサスティナビリティを備えた地下インフラの機能
（多様なハザードを想定した地下インフラの機能に関する調査研究部会:第 2 部会）

③ 自動運転、MaaS 等、新たなモビリティの適用に対応した地下のインフラシステム
（自動運転、MaaS 等に対応した地下のインフラシステムに関する調査研究部会：第 3 部会）

④ 社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術
（社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究部会：第 4 部会）

1.2.1 幹事会の活動

各部会活動を支え、全体テーマ実現に向けて活動を集約させるために、各部会の部会長および副部会長により幹事会を構成し、各部会間の計画・実施・進捗状況等の情報交換および部会共通の事項に関して連携し、調査等を行った。

表 1.2.1-1 に示すとおり、2021 年度は 8 回の幹事会を開催した。

表 1.2.1-1　幹事会の活動状況

回	開催日	主要議事
第 1 回	2021 年 7 月 5 日	・幹事長、副幹事長の選任 ・2021 年度の活動テーマについての討議
第 2 回	2021 年 8 月 2 日	・各部会の現地調査、ヒアリング先の候補抽出
第 3 回	2021 年 9 月 6 日	・報告書の項目内容と目次（案）の検討
第 4 回	2021 年 10 月 11 日	・現地調査/講演/ヒアリング先の決定
第 5 回	2021 年 11 月 24 日	・報告書項目内容の追加、重複などの調整 ・成果報告書原稿作成要領の作成
第 6 回	2021 年 12 月 21 日	・講演会報告の取りまとめと今後の日程調整 ・各部会項目案の確認
第 7 回	2022 年 1 月 27 日	・報告書概要版の項目内容と目次作成 ・報告書作成の進捗確認
第 8 回	2022 年 2 月 24 日	・報告書および概要版原稿の最終確認、校正

1.2.2 各部会の活動

(1) SDGs とニューノーマルに対応した多様な空間利用のあり方に関する調査研究部会（第 1 部会）

1) 活動内容

SDGs のゴールを基本認識した上で、ポストコロナ時代の環境変化による、感染症対策やリモートワーク普及などニューノーマルへの移行を捉えた多様な空間の活用手法、利用方法についての調査研究を行った。

2) 活動状況

表 1.2.2-1 に示すとおり、2021 年度は 9 回の部会を開催した。

表 1.2.2-1　第 1 部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第 1 回	2021 年 6 月 10 日	・部会長、副部会長の選任 ・2021 年度の活動テーマについての討議
第 2 回	2021 年 7 月 13 日	・現地調査、ヒアリング先の検討 ・2021 年度の報告書項目内容についての討議
第 3 回	2021 年 8 月 26 日	・報告書項目内容と目次（案）の検討 ・各委員による研究課題の提示と説明
第 4 回	2021 年 9 月 27 日	・報告書の概要確認および執筆担当の決定
第 5 回	2021 年 10 月 28 日	・執筆内容の討議と確認 ・報告書の項目内容と目次の決定
第 6 回	2021 年 11 月 29 日	・各委員の報告書の執筆進捗状況確認 ・事例など記載内容細部の確認
第 7 回	2021 年 12 月 22 日	・各委員の執筆原稿報告および全体構成の確認 ・第 1 章、第 3 章の内容討議
第 8 回	2022 年 1 月 27 日	・参考資料の記載内容と出典の信頼性確認 ・原稿修正個所の確認
第 9 回	2022 年 2 月 21 日	・報告書および概要版原稿の最終確認、校正

(2) 多様なハザードを想定した地下インフラの機能に関する調査研究部会（第 2 部会）

1) 活動内容

自然災害やパンデミックを含めた都市が遭遇する様々なハザードに対して、環境制御が有利と考えられる、地下インフラ機能の高付加価値化を実現するための調査研究を行った。

2) 活動状況

表 1.2.2-2 に示すとおり、2021 年度は 8 回の部会を開催した。

表 1.2.2-2　第 2 部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第 1 回	2021 年 6 月 9 日	・部会長、副部会長の選任 ・2021 年度の活動テーマについての討議
第 2 回	2021 年 7 月 19 日	・活動テーマに関するブレーンストーミング
第 3 回	2021 年 8 月 23 日	・報告書項目と内容案の検討 ・執筆項目分担の決定 ・現地調査と講演会の候補検討
第 4 回	2021 年 9 月 28 日	・各委員調査結果の報告 ・報告書とりまとめ方針のディスカッション
第 5 回	2021 年 11 月 9 日	・報告書素案についてのディスカッション ・現地調査（ヒアリング・見学先）について コロナ影響下における実施可否の検討・決定
第 6 回	2021 年 12 月 13 日	・報告書の各委員進捗確認とディスカッション
第 7 回	2022 年 1 月 24 日	・報告書内容の確認および概要版の「まとめと課題」についてのディスカッション
第 8 回	2022 年 2 月 15 日	・報告書および概要版原稿の最終確認、校正

(3) 自動運転、MaaS 等に対応した地下のインフラシステムに関する調査研究部会(第 3 部会)

1) 活動内容

人流および物流に関する先進的な取り組み事例について調査を行った。自動運転、MaaS などの先進事例や、物流トラックの隊列走行、ドローン輸送の実証試験などの事例の他、物流 DX や物流施設を拠点としたまちづくりの事例など広範囲に調査を行い、それぞれの先進的な取り組みに対して、課題の抽出と問題解決の方向性を検討した。

2) 活動状況

表 1.2.2-3 に示すとおり、2021 年度は 7 回の部会を開催した。

また、部会とは別に、2021 年 11 月 2 日、講演会を企画し、東京海洋大学の兵藤教授を講師とする「総合物流施策大綱とその周辺およびドローン物流」講演会を実施した。また、この講演会の最後に稲葉部会長より「物流を対象としたカナート構想について」の話題提供を行い、講師と地下利用推進部会委員の間で、物流に関する意見交換を実施した。

表 1.2.2-3　第 3 部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第 1 回	2021 年 6 月 10 日	・部会長、副部会長の選任 ・2021 年度の活動テーマについての討議
第 2 回	2021 年 7 月 19 日	・本年度活動内容および文献調査の役割分担決定 ・視察・ヒアリング調査案の協議
第 3 回	2021 年 8 月 17 日	・各委員の文献調査結果の報告 ・報告書内容の検討
第 4 回	2021 年 10 月 4 日	・報告書作成の進捗状況報告と内容協議 ・講演会のテーマと日程調整
第 5 回	2021 年 11 月 15 日	・報告書記載項目の確認 ・報告書作成のスケジュール確認
第 6 回	2022 年 1 月 6 日	・報告書執筆の進捗状況確認と内容協議 ・報告書の各委員執筆内容の確認
第 7 回	2022 年 2 月 15 日	・報告書および概要版原稿の最終確認、校正

(4) 社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究部会(第 4 部会)

1) 活動内容

第 1 部会～第 3 部会で調査研究した各サブテーマの内容を実現するための具体的な地下インフラの再構築技術について調査研究を行った。

2) 活動状況

表 1.2.2-4 に示すとおり、2021 年度は 8 回の部会を開催した。

表 1.2.2-4　第 4 部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第 1 回	2021 年 6 月 8 日	・部会長、副部会長の選任 ・2021 年度の活動テーマについての討議
第 2 回	2021 年 7 月 28 日	・現地調査先、ヒアリング候補の検討 ・2021 年度の報告書作成内容についての討議
第 3 回	2021 年 9 月 1 日	・各委員による検討項目の提示と意見交換 ・講演会のテーマ検討
第 4 回	2021 年 10 月 7 日	・報告書項目内容および目次（案）の検討 ・各項目の執筆担当決定
第 5 回	2021 年 11 月 9 日	・前田建設工業 ICI 総合センター見学会実施 ・技術情報の収集状況・検討経過報告
第 6 回	2021 年 12 月 16 日	・技術情報の収集取りまとめ ・報告書記載事例の内容確認
第 7 回	2022 年 1 月 20 日	・各委員執筆内容報告と原稿全体の内容調整
第 8 回	2022 年 2 月 15 日	・報告書および概要版原稿の最終確認、校正

２．SDGs とニューノーマルに対応した多様な空間利用のあり方に関する調査研究

2.1　調査経緯・調査方法

2.1.1 調査方針

SDGs の実現と新型コロナウイルス対応によって発生した社会変化（ニューノーマル）を多面的に研究調査した。その結果として変化した多様な空間利用を捉え、今後の空間利用のあり方について調査研究した。研究概要を図 2.1.1-1 に示す。

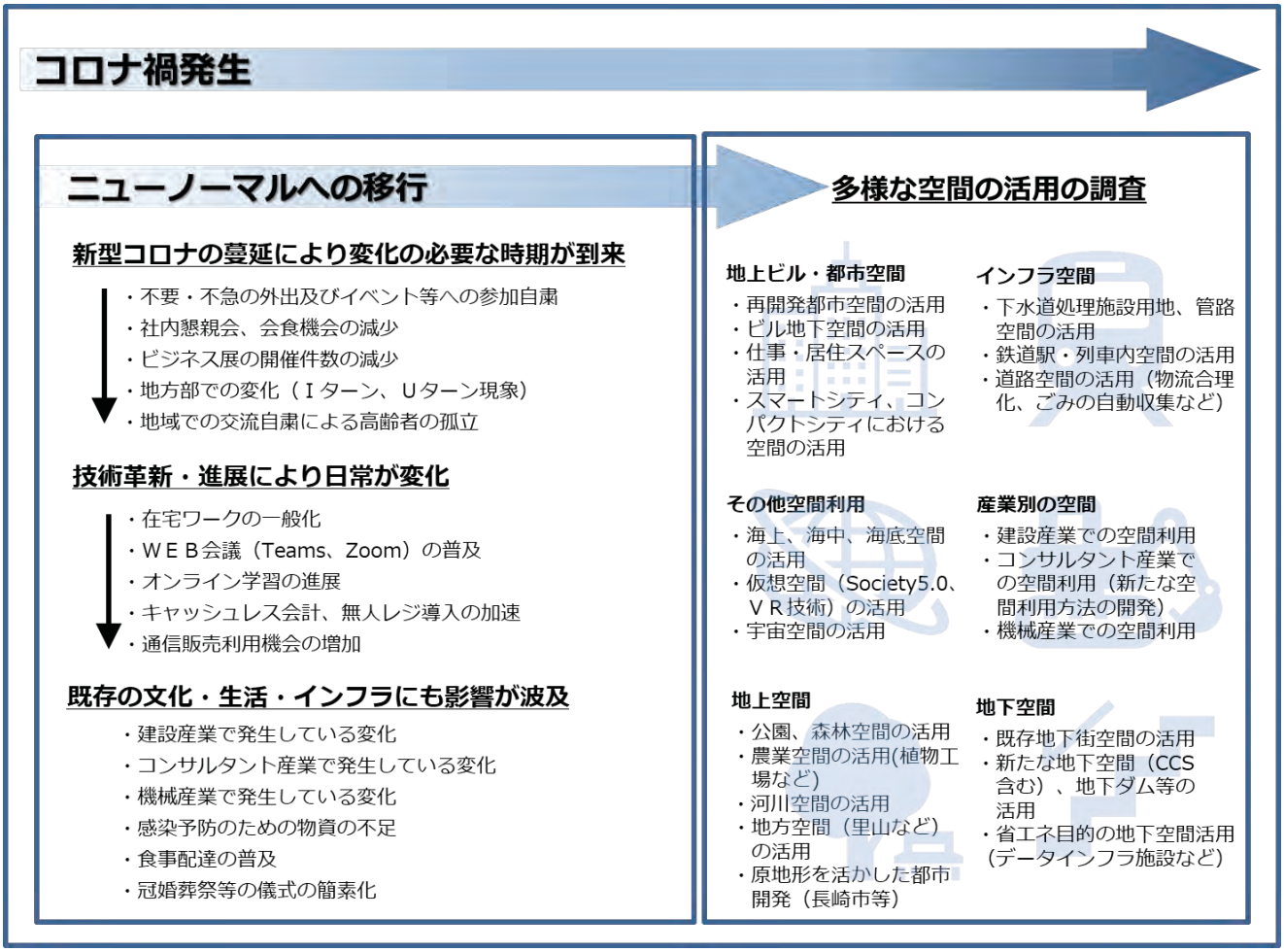

図 2.1.1-1　研究概要図

調査の方針としては、各種文献、インターネット情報を主体とし、SDGs の実現と新型コロナウイルス対策により変化した事象を収集した。

SDGs の実現、新型コロナウイルス対応、ニューノーマルへの変化においても、変化速度が著しく早いことが特徴である。今年度の調査研究成果が来年度では、過去の変化、過去の形態となっている可能性もあるが、今年度は、調査研究期間とし、来年度への資料提供を目的とした。本研究の 2 年度目には、SDGs の実現とニューノーマルへの移行に対応した、多様な空間利用のあり方について、提言を行うものとする。

2.1.2 調査内容

「社会変化（ニューノーマル）」をまず定義するために、実際に変化した事象をピックアップし、変化要因、変化した状況、課題などを調査した。その後、多様な空間利用のあり方について、空間の新たな利用方法、新空間の創造と再開発、利用上の課題、今後発生すると考えられる課題について調査した。

2.1.3 調査状況

2021 年度は、2021 年 6 月に部会を発足した後、おおむね 1 ヶ月に 1 回のペースで計 9 回の部会活動を実施した。現地調査、ヒアリングに関しては、緊急事態宣言の発令、コロナ禍による接触機会の減少を図るため、実施できなかった。今年度は、調査研究の初年度であるため、多様なニューノーマル、多様な空間利用の状況を調査した。調査内容の充実、来年度への資料収集に向けて、全委員の積極的参加のもと調査・研究を推進した。

2.2 調査研究のまとめ

2.2.1 ニューノーマル

コロナ禍で短期間に起こった社会システムや環境変化の要因として、(1)新型コロナウイルスの蔓延、(2)IoT 化・デジタル化の加速・進展、(3) 基準・需要の変化を挙げ、この 3 つの切り口で社会変化（ニューノーマル）を研究・調査した。

(1) 新型コロナウイルスの蔓延により発生した変化

1) 不要・不急の外出自粛

行政等から国民に対して行動の自粛を要請された。要請内容の例を次に示す。東京都では、①医療機関への通院、②食料・医薬品・生活必需品の買い出し、③必要な職場への出勤、④屋外での運動や散歩など、生活や健康の維持のために必要な場合を除き、原則として外出しないこと等を要請した [1)]。

2) 旅行・イベント等への参加自粛

新型コロナウイルス感染拡大防止に伴う、外出自粛、密集状態の回避、緊急事態宣言の発令により、どの業界よりも早く対応を求められ、影響を受けたのが観光業やイベント関連業界である（図 2.2.1-1）。対応や影響について、本編第 I 部 第 2 章に概要を記載した。

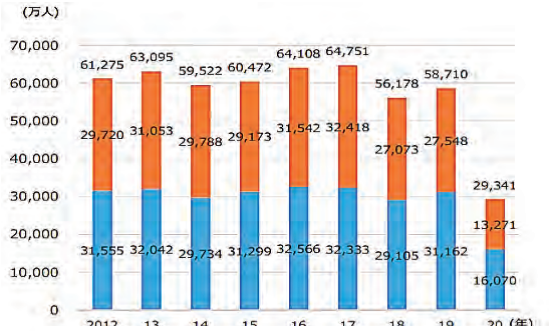

図 2.2.1-1 旅行延べ人数の推移

出典：令和 3 年度版観光白書 [2)]

3) 社内懇親会、会食機会の減少

社内での懇親会は、原則禁止している企業が多いが、勤務後のプライベートな時間における外出や飲食については、強制的に禁止することは法律上問題が生じる可能性があり、従業員に対する自粛要請という形で対策をとっている。

課題として、懇親会を通じて社員同士がコミュニケーションを取ること自体は、会社の業務にとってもプラスな側面が多いことも事実であり、貴重な機会が奪われているともいえる。

4) ビジネス展の開催件数の減少

コロナ禍において中止となった展示会があった一方、会場での展示会形式のビジネス展ではなく、オンラインによる展示会開催が急増した。With コロナ時代を見据えたオンラインによるビジネス展は、コストの削減や幅広い見込み顧客にアプローチができるなどのメリットがある。一方、PUSH 型の営業ができない、システムの導入にコストがかかるなどのデメリットもあり、自社に最適な選択がなされるものと考えられる。

5) 地方部での変化（I ターン、U ターン現象）

コロナ渦では都市への人・モノの集中による脆弱さがあらためて浮き彫りになり、都市部の過密リスクへの意識が高まった。地方への分散に対する課題として、人を惹きつける地域づくりを積極的に実施していくことが挙げられる。

6) 地域での交流自粛による高齢者の孤立

新型コロナウイルス感染症の間接的な影響として、長期間の自粛生活が挙げられる。具体的には、重篤化しやすい高齢者が感染を恐れ、外出を控え、地域で孤立するケースがある。課題として孤立し社会参画が減ると、**図 2.2.1-2** に示すように、もの忘れが多くなる現象も報告されている[3]。

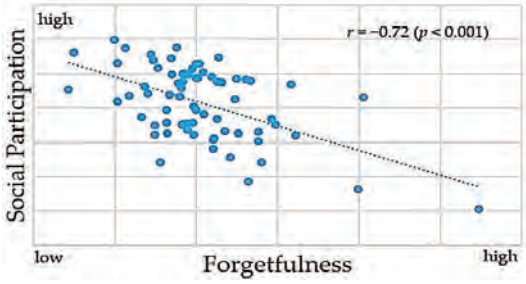

図 2.2.1-2 社会参加する人（縦軸）と、もの忘れのある人（横軸）の関係

出典：Seungwon Jeong et al.[3]

(2) IoT化の加速

1) 在宅ワークの一般化

テレワークは、ワーク・ライフ・バランスの向上や通勤による疲労の軽減、地方における就業機会の増加等に寄与する。移動に伴う CO_2 排出量の削減や、ペーパーレス化等の環境保全効果も期待されているため、今後は実施に伴う環境影響も考慮しつつ、多様な働き方の一つとしてテレワークを選択することが重要である。テレワークの普及については、個人・企業において、費用対効果等をよく考えて取組む必要がある[4]。

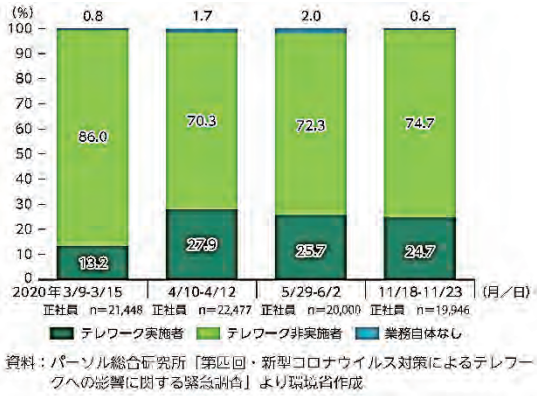

図 2.2.1-3 テレワーク実施率の推移

出典：令和 3 年度環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書[5]

2）WEB会議（Teams、Zoom）の普及

WEB 会議の普及は、コロナ禍における労働者の働き方に大きな変化をもたらした。これまでリアルな場で行われてきた会議や打ち合わせの多くが遠く離れた空間を結ぶ WEB 会議に置き換わり、多くの企業がコミュニケーションスタイルの変化を余儀なくされた。

「人の交流のあり方の進化」という考え方では、国境を越えたバーチャルな人の移動が可能となり、個人単位での「タスク」の分離が可能になる。

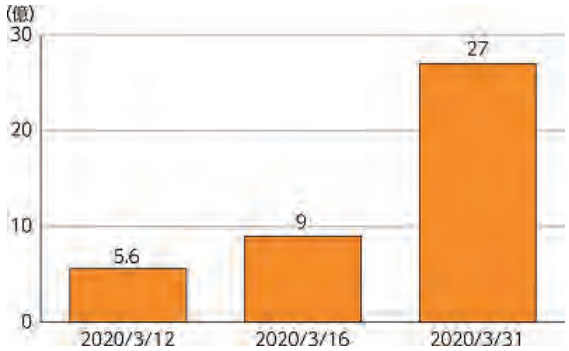

図 2.2.1-4　Teams での 1 日あたりの会議時間

出典：総務省令和 2 年度版　情報通信白書 6)

3）オンライン学習の進展

教育の分野でも文部科学省が中心となってオンライン授業等を推進しているが、全てをオンライン化で対応することに対する課題も出てきている。このため、アフターコロナにおいてもオンライン化の継続が予想されることを踏まえ、オンライン学習の実態の調査と現状の課題を整理した。課題として、コミュニケーションや教育の質に対する改善要望などがある。

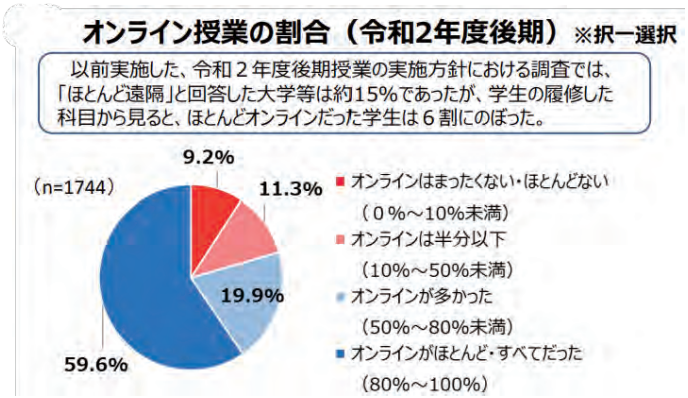

図 2.2.1-5　大学・高専を対象とした
オンライン授業の実施状況

出典：文部科学省ホームページ 7)

4）キャッシュレス会計、無人レジ導入の加速

新型コロナウイルスの影響は、接触機会を減らす目的で、キャッシュレス決済浸透の追い風となっているといえる。キャッシュレス決済の効果は、無人レジ(従業員と顧客接触機会が一切なくても精算)の進展、精算時間の短縮によるレジ待ちの行列・混雑の解消が挙げられる。

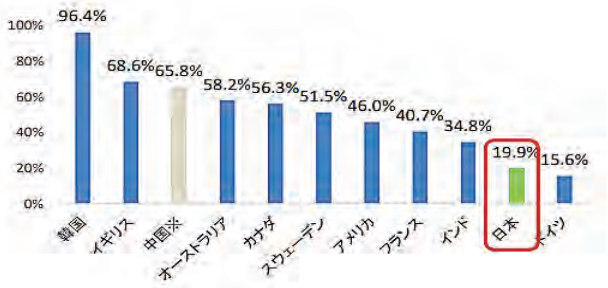

図 2.2.1-6　世界各国のキャッシュレス
比率比較(2016)

出典：(株)第一生命経済研究所ホームページ 8)

5) 通信販売利用機会の増加

物流サービスの需要は、コロナ禍によりネットショッピングが拡大した事も含め、年々増加している。その便利さゆえにネットショッピングの利用者が増加した結果、宅配便取扱個数も急増し、物流には大きな負荷がかかっていると考えられる(ラストワンマイル問題の発生)。課題として、従来の人の手に頼った高品質の物流サービスを維持することが難しくなり、これからの物流には有料でも選ばれる付加価値の創出と配送管理システムの効率化が求められている。

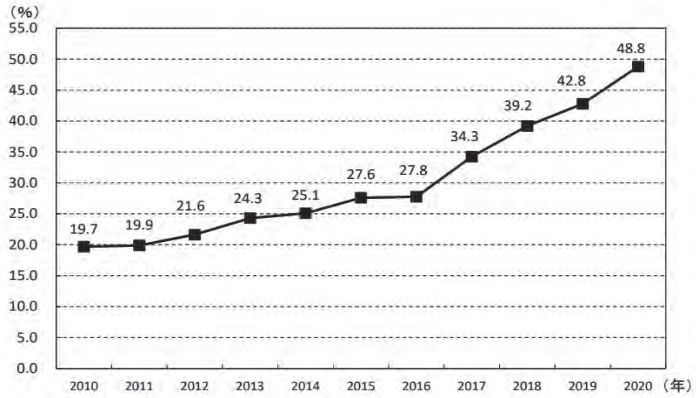

図2.2.1-7 ネットショッピング利用世帯の割合の推移（二人以上の世帯）

出典：総務省　家計消費状況調査2020年[9)]

(3) 基準・需要の変化

1) 建設産業で発生している変化

建設サイト(建設工事作業所)での変化は、発注者による遠隔臨場制度、新型コロナウイルス対応に要する経費増に係る設計変更、建設キャルス(建設業務のオンライン化・デジタル化)の進展である。これらを建設産業におけるニューノーマルと捉え、本編第Ⅰ部 第2章に記述した。課題として、コロナ禍においても遅延の許されない民間工事を中心に工事が中止になった件数は少なく、感染症予防の観点からは、今後検討する必要がある。

2) 建設コンサルタント産業で発生している変化

建設コンサルタントは、緊急事態宣言時に事業の継続が求められる業種の一つであるため、感染拡大を防ぐための措置を講じながらも、国土交通省などの発注者と連携して、WEB会議やテレワークなどの導入により、公共事業を推進している。

今後も、建設コンサルタントはワーク・ライフ・バランスを整えながらも、ポストコロナ社会に即した業務スタイルへの変革を速やかに成し遂げ、公共事業の上流側の役割をしっかり果たすことで、持続可能な社会の構築に貢献することが期待されている。

3) 機械産業で発生している変化

新型コロナウイルスの世界的な再拡大の問題が表面化しており、不安要素に

囲まれ、足元は盤石ではない。将来業績については、各社で意見が分かれている。

機械産業のうち、土木建設機械の分野における売上は、主力機種の油圧ショベルを中心に、国内は公共投資の下支えがあり、輸出は主要な需要先である北米、欧州、アジア向けのいずれも増加が見込まれており、コロナ禍による影響は現在あまり発生していない。

4）感染予防のための物資の不足

感染予防物資の不足、調達先の多様化、国産製品の製造等の観点から新生活様式、産業構造の変化ついて本編第Ⅰ部 第2章で考察した。

日常食品・感染防止用品・日用品の適正な備蓄（ストック）を平時から実践することが推奨され、ニューノーマルとなってきている。備蓄の方法としてローリングストック方式が推奨されている。地下空間（地下街）では、空き店舗を利用した、感染症対策に必要なマスクおよび消毒液の備蓄、避難困窮者等へ毛布等の備蓄利用について検討が必要である。

図 2.2.1-8　ローリングストック

出典：農林水産省 [10]

5）食事配達の普及

新型コロナウイルスの感染拡大は、外出自粛・在宅勤務等のテレワークを普及させ、外食産業の業態に変化を及ぼした。飲食店はテイクアウト販売に力を入れることとなり、フードデリバリーサービスが急拡大してきた。フードデリバリー業界が急激に伸長し、社会におけるインフラの一つとなりつつある一方で、急速な拡大に対する業界整備が行き届かず、交通トラブルを含め、配送における様々な課題が顕在化している。事業者は、安心・安全にフードデリバリーサービスを利用できる環境を整備し、業界発展を実現していく必要がある。

6）冠婚葬祭等の儀式の簡素化

コロナ禍で、披露宴や挙式の自粛・中止が相次いだ。披露宴や挙式は、少子高齢化や人口減少社会、結婚適正世代の減少により減少傾向にあったが、コロナ禍で、その落ち込みは最大となった[11]。

感染症対策[11]（図 2.2.1-9）と並行して、冠婚葬祭関連産業では、多角事業化やIT化などによる利益率向上など、様々な変化が発生した。

図 2.2.1-9　結婚式場における感染対策事例

出典：経済産業省第 4 回サービス産業×生産性研究会　事務局説明資料 [11)]

【参考文献】

1) 新型コロナウイルス感染拡大防止のための東京都における緊急事態措置等（2021 年 3 月 5 日発表）（参照 2022.1）
https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/1007617/1013192.html

2) 国土交通省：令和 3 年度版観光白書（参照 2021.12）
https://www.mlit.go.jp/statistics/file000008.html

3) Seungwon Jeong, Yusuke Inoue, Katsunori Kondo, Kazushige Ide, Yasuhiro Miyaguni, Eisaku Okada, Tokunori Takeda, Toshiyuki Ojima. : Correlations between Forgetfulness and Social Participation: Community Diagnosing Indicators. Int. J. Environ. Res. Public Health 16(13): 2426, 1-11, 2019.（参照 2021.12）https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6651557/

4) 在宅勤務のメリットとデメリットとは？コロナ対策として注目される新たな働き方（参照 2021.8）https://www.ashita-team.com/jinji-online/business/11253

5) 環境省　令和 3 年度環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書（参照 2021.10）
https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r03/pdf.html

6) 総務省　令和2年度版　情報通信白書（参照2022.1）
https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000089.html

7) 文部科学省ホームページ（参照2021.9）
https://www.mext.go.jp/content/20210525-mxt_kouhou01-000004520_1.pdf

8) (株)第一生命経済研究所　コロナ禍で浸透するキャッシュレス決済（参照2021.12）
https://www.dlri.co.jp/report/macro/155283.html

9) 総務省　家計消費状況調査2020年インターネットを利用した支出の状況（参照2021.12）
https://www.stat.go.jp/data/joukyou/2020ar/gaikyou/index.html

10) 農林水産省　災害時に備えた食品ストックガイド, 2019年3月, 発行(参照2021.9)
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/foodstock/attach/pdf/guidebook-3.pdf

11) 経済産業省　第4回サービス産業×生産性研究会　事務局説明資料（参照2021.12）
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/service_sangyo/pdf/004_03_00.pdf

2.2.2　多様な空間利用

コロナ禍で短期間に起こった社会システムや環境の変化の結果、生じた多様な空間利用のあり方について、地下利用、地下空間に拘ることなく、空間利用が変更、活用された項目、今後の活用方法について調査研究した結果を報告する。

(1) 地下空間

1) 既存地下街空間の活用

地下街は地上に比べると密閉された空間であるため、新型コロナウイルスの感染リスクは高くなると考えられる。このため、地下空間でロボットの活用を気軽に選択できるようになることで、ポストコロナ時代においても、より便利で快適な都市空間になることが期待され、また、地上と地下の融合にも欠かせない存在になっていくものと考えられる。

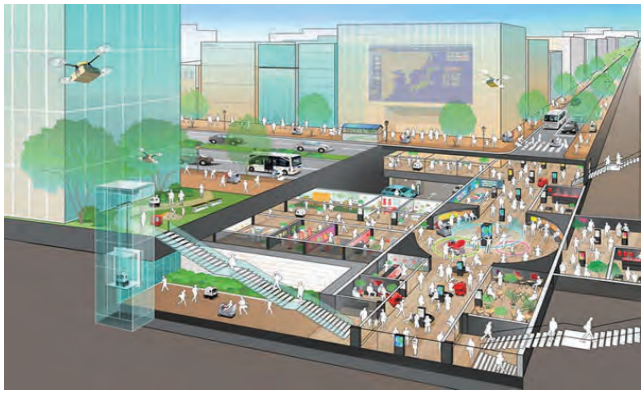

図 2.2.2-1　ライフロボット活用イメージ

出典：株式会社 ZMP　HP[1)]

2) 新たな地下空間（CCS 含む）、地下ダム等の活用

a)「CCS」「CCUS」

二酸化炭素（CO_2）は地球温暖化の一因となっており、その削減は、世界的にも重要な課題であれる。火力発電の CO_2 排出量をおさえる、さまざまな取り組みがなされており、「CCS」「CCUS」はその取り組みのひとつである。

地下空間利用として、地中深くに CO_2 を貯留、圧入するというものである。

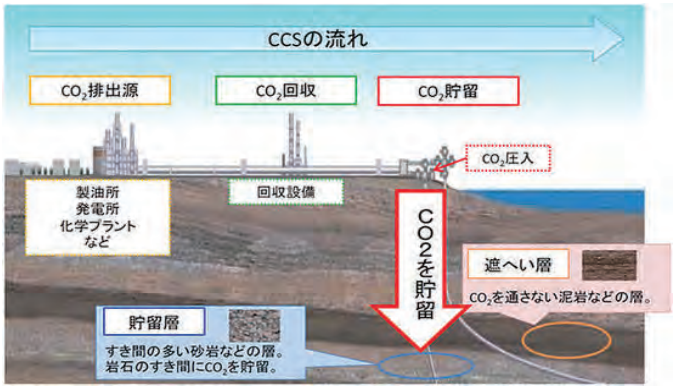

図 2.2.2-2　CCS の流れ

出典：資源エネルギー庁 HP[2)]

b) 地下ダム

地下ダムとは、水を通さない壁を地下に作って、地下水の流れをせき止め、地下水を貯める施設のことである。国内では、奄美大島や沖縄諸島などの南西諸島において実施例がみられる。

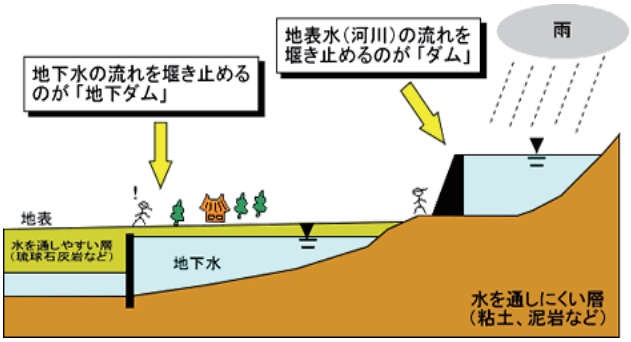

図 2.2.2-3　地下ダムの概念

出典：内閣府沖縄総合事務局 [3)]

3) 省エネ目的の地下空間活用（データインフラ施設など）

データインフラ（IT インフラストラクチャ）施設を地下に設置する理由は「消費電力の低減」である。水冷装置によってコンテナ内の温度を少ない電力でコントロールできるのが特徴である。この水冷に地下水を利用し、地底は地上に比べると気温が低く安定しているので、「空調のための電力消費ゼロ」というエコなデータセンターを目指している[4]。

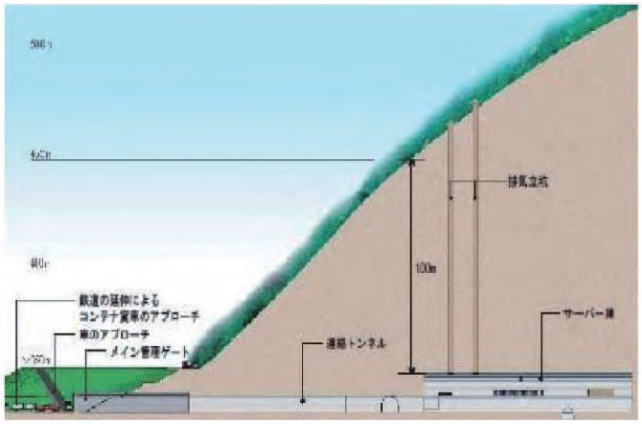

図2.2.2-4　地底空間トラステッド・エコ・データセンター・プロジェクト

出典：環境省HP[4]

(2) 地上空間

1) 公園

「新しい生活様式」の定着が求められる中、公園などを利用するためのポイントが、国土交通省より提示されている。併せて、公園の積極利用を呼びかけるキャンペーン「New Normal Park Life」が行われている[5]（図2.2.2-5）。この社会動向は、既存施設の有効活用や、身近なものに目を向ける SDGs の理念にリンクするものである。

図 2.2.2-5　New Normal Park Life ポスター

出典：国土交通省　「新しい生活様式」[5]

2) 街路空間

世界の都市は、街路空間を「車中心」から「人間中心」へ再構築し始めている。具体的な取り組み内容は、街路空間を人々が集い、多様な活動を繰り広げられる場へ変化させるものである。

図 2.2.2-6 「居心地が良く歩きたくなるまちなか」

出典：国土交通省 中間とりまとめ報告書（概要版）[6]

3) 森林空間

森林空間は、多くの自然災害に対して、ECO-DRR（生態系を利用した防災・減災）の機能を発揮してきた。例として、桂離宮の桂垣などがある[7]（**図 2.2.2-7**）。桂垣は、桂川の氾濫によって洪水が生じても、土砂をフィルタリングすることで、水だけを流入させる仕組みである。

図 2.2.2-7　桂離宮の桂垣

出典：釜井俊孝
「宅地崩壊　なぜ都市で土砂災害が起こるのか」[7]

4) 農業空間の活用（植物工場など）

地下植物工場(ベチカ)は、1995 年に建設されて以来、長年遊休化していた千葉県保有の地下共同溝（全長 3.1km、内部の幅 6～8m、高さ 4m）のうち、未使用部分を借用して開設された。人と人との接触機会が少ない状況下での栽培を可能とし、電力消費量の大幅削減も実現しており、SDGs への貢献、ニューノーマル、感染予防を兼ね備えた地下空間利用の事例の一つである。

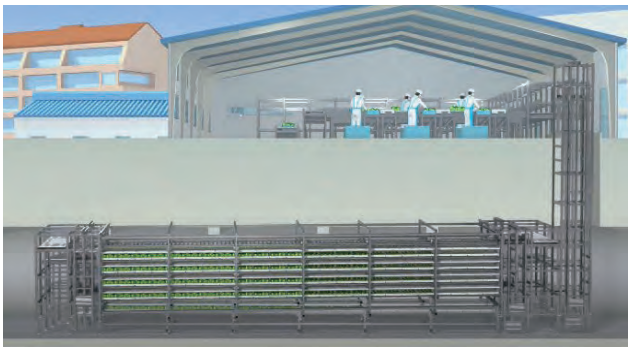

図 2.2.2-8　セル式モジュール工場の概要

出典：伊東電機株式会社ホームページ[8]

5) 河川空間の活用

自然豊かで貴重な公共空間である河川敷地について、治水上、利水上又は河川環境上の支障が生じないように配慮しつつ、快適でにぎわいのある水辺空間の創出が推進されている。沼津市の中心市街地を流れる狩野川における利用例を**図 2.2.2-9** に示す。

図 2.2.2-9　かのがわ風のテラス

出典：河川空間のオープン化活用事例集[9]

6）地方空間（里山など）

里地里山や里海などを含む地方空間は、地方移住や多拠点住居等の新しい暮らし方や、地産地消型で感染症のリスクを軽減させる社会構造への転換において、大きな役割を果たす可能性がある。

図 2.2.2-10 地域循環共生圏を目指す取組み

出典：令和 3 年度環境白書･循環型社会白書･生物多様性白書 [10)]

7）原地形を活かした都市開発（長崎市等）

ニューノーマルおよび SDGs の観点において、地域の空間を最大限に利活用することは益々重要となってくる。我が国の代表的な斜面都市である長崎市などは、早期に乗合タクシー路線などを整備するなど、超高齢化社会における都市の新たな空間利用や活動を先駆的に実施している。

図 2.2.2-11　長崎市での空間利用例

出典：金　ドン均：斜面市街地における居住環境の改善に関する研究 [11)]

(3) 地上ビル・都市空間

1）再開発都市空間の活用

PLATEAU は、3D 都市空間情報プラットフォームを指す。様々な都市活動データがこの 3D 都市モデルに統合され、現実空間とサイバー空間の高度な融合が実現することにより、都市計画立案の高度化や、都市活動のシミュレーション、分析等を行うことが可能となる。

図 2.2.2-12　国土交通省 PLATEAU

出典：PLATEAU HP[12)]

2) ビル地下空間の活用

図 2.2.2-13 は、東京駅八重洲 2 丁目北地区（東京ミッドタウン八重洲）再開発計画の概要図である[13]。ここでは、東京駅の交通結節点機能の強化として、大規模地下バスターミナルの整備および地上・地下の歩行者ネットワークの整備が計画されている。また、エネルギーネットワークの構築による環境負荷低減を目的として、地下 3、4 階にはコージェネレーションシステムと DHC（地域冷暖房）が計画されている[13]。

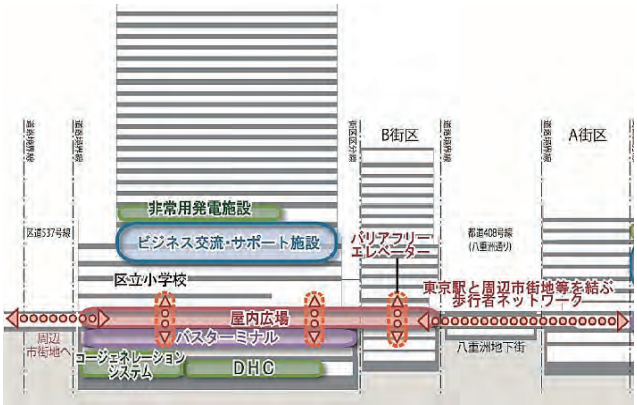

図 2.2.2-13　八重洲 2 丁目再開発計画

出典：内閣府国家戦略特区 HP[13]

3) 仕事・居住スペースの活用

2019 年の日本全体の最終エネルギー消費は家庭・業務部門のいわゆる民生部門が約 7 割を占めており、2050 年カーボンニュートラルの実現や 2030 年度の温室効果ガス削減目標の実現に向けて、住宅・建築物の省エネルギー化は必要不可欠である。

4) スマートシティ、コンパクトシティにおける空間の活用

a) スマートシティ

スマートシティとは、IoT の先端技術を用いて、社会インフラサービスを効率的に管理・運営し、環境に配慮しながら、人々の生活の質を高め、継続的な経済発展を目的とした新しい都市のことである。

スマートシティは、大都市都心部における国際競争力の強化を目的としたとしたものから、地域循環共生圏にもつながる里山里海などを有する地域の豊かな自然と共生した地域づくりを目的としたものまで、全国全ての地方公共団体において取組可能な政策である。

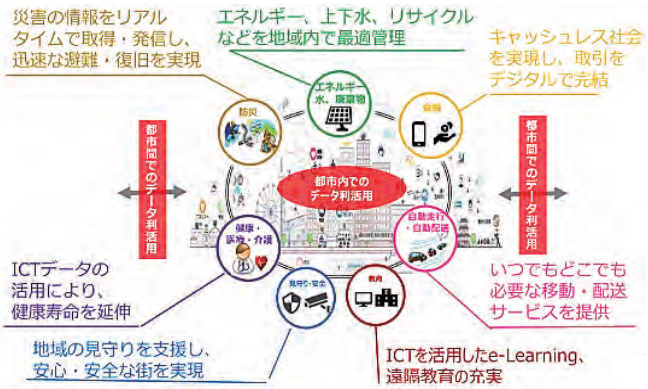

図 2.2.2-14　スマートシティ

出典：スマートシティガイドブック[14]

b) コンパクトシティ

地方部では一定地域に人口を集中させることで行政サービスを効率よく提供する、集積の利益という概念をコンパクトシティ化によって実現しようとしている。

コンパクトシティ形成に向けては、都市全体の観点から、居住機能や都市機能の立地、公共交通の充実等に関し、公共施設の再編、国公有財産の最適利用、医療・福祉、中心市街地活性化、空き家対策の推進等のまちづくりに関わる様々な関係施策と連携を図り、総合的に検討することが必要である。

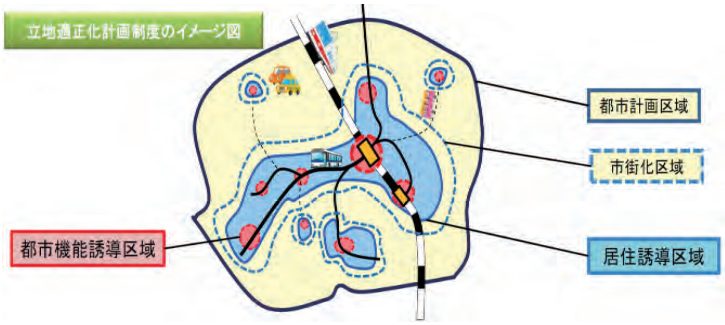

図 2.2.2-15　立地適正化計画のイメージ

出典：立地適正化計画作成の手引き [15]

(4) インフラ空間

1) 下水道処理施設用地の活用

下水道用地の活用による再エネ設備の導入について記載する。

下水道用地の活用事例は、2018年1月時点で全国53件[16]、2020年4月時点[17]では全国75件となり、そのうち9割が再生可能エネルギー事業である。下水道事業を運営する自治体は、再生エネルギー施設を運営する民間事業者から賃料収入を得ている。

図 2.2.2-16　下水道用地の活用事例

出典：2050年カーボンニュートラル実現に向けた最近の動向と下水道事業における取組（国土交通省下水道部）[17]

2）下水道管路空間の活用

下水熱利用とは、都市内に豊富に存在する未利用エネルギーである下水の持つ熱を、ビルの冷暖房や給湯、道路の融雪などに活用し、都市の省エネ化・省CO_2化等を図るものである。

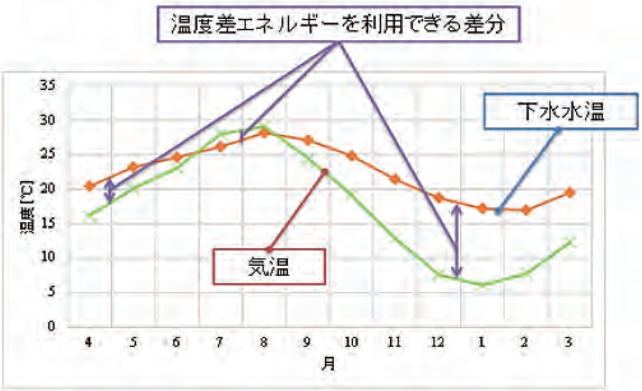

図 2.2.2-17　下水水温と気温との比較

出典：国土交通省：下水熱利用マニュアル（案）（2021 年 4 月）[18]

3）鉄道駅・列車内空間の活用

鉄道空間を単なる移動空間としてではなく、別の付加価値のある空間として利用する取り組みが進んでいる。新幹線に通話や WEB 会議も可能な「新幹線オフィス車両」を設置し、オフィスや在宅ワークに加え、ワーケーションなどの移動中の時間も有効利用できる空間を創出している。

図 2.2.2-18　実証実験の様子

出典：JR 東日本 [19]

4）道路空間の活用（物流の合理化、歩車道分離、低速モビリティ）

社会・経済情勢の変化に応じて自動車の安全かつ円滑な通行が主目的であった道路空間の利活用へのニーズも変化してきている。今後、道路空間においても、その利活用の更なる高度化や多様なニーズに対応した道路空間の再構築を進める必要がある。具体例では、道路と民間所有地との一体的利用、低速モビリティなど交通手段の多様化への対応が上げられる。課題として、民間団体等と連携・協働がさらに必要となる。

図 2.2.2-19　人中心の賑わい空間の創出

出典：国土交通省 HP[20]

5）道路下空間の活用（ごみの自動収集など）

道路下に管路を埋設しゴミを搬送するシステムは、収集車作業員不足への対応、感染対策、衛生・美観にも優れることから、「未来都市の象徴」、「夢のシステム」ともいわれてきた。しかしながら、分別・リサイクルへの意識が進んだことにより、管路による収集量は徐々に減少し、管路の老朽化に伴う設備更新に多額の投資が必要なことから、廃止する事例が増加している。今後は道路下に車両が通行できる空間を作り、無人のゴミ収集車が運行するシステムが検討されている。

(5) 産業別の空間

1）建設産業での空間利用

建設業界の自社ビル（本支店ビル、技術研究所）等における、ビル全体での SDGs を実現しながら執務空間を活用する方法について調査研究した。その結果として、国土交通省、建設産業が中心となって進めている多様な空間利用（スマートシティ）構想についての概要、建設産業の地下空間利用のあり方についての概要を本編第Ⅰ部 第 2 章に記載した。

技術研究所本館研究棟　外観

図 2.2.2-20　鹿島建設（株）技術研究所

出典：鹿島建設　PRESS RELEASE[21]

2）コンサルタントでの空間利用（新たな空間利用方法の開発）

建設コンサルタントとしては、「ニューノーマル」への移行が求められている今こそ「よりよい社会」へ変えていくチャンスと捉えている。

「新しい社会」の在り方、さらにはその社会を支えるべき「社会インフラ」の在り方について、その地域社会がおかれている自然や、医療福祉、文化教育、地場産業、地域の歴史・伝統や地域コミュニティ等を含めた地域の価値観・特性等を「社会インフラ」と捉え直し、広い視点からそのあり方を、地域全体を視野に、それぞれの地域ごとに公共と民間の役割分担を含めて総合的に検討すべきである。

図 2.2.2-21 ユニバーサルデザインの実施例

出典：美しい日本、私たちのまちの環境を守る [22]

3）機械産業での空間利用

「建設機械の自動化・自律化」、「人間拡張」、「AI 開発支援」、「ICT 施工に係る人材育成およびテレワーク環境整備」を推進している。

今後、新型コロナウイルスの影響を受け、こういった革新的技術を用いたイノベーション・生産性向上が、ますます推進されていくものと考えられる。

図 2.2.2-22 建設施工分野における推進事項

出典：国土交通省
ICT 施工の普及拡大に向けた取組 [23]

(6) その他空間利用

1）海上・海中・海底空間の活用

海洋空間が、持続可能な発展を遂げていくためには、港湾の開発・利用と環境の保全・再生・創出を車の両輪としてとらえた「港湾行政のグリーン化」が必要であり、今後の再生可能エネルギーの主体と期待される洋上風力発電の導入にあたっては、環境保全・社会受容性の確保や、維持管理や使用後の廃棄などの多様な観点からの検討が不可欠である。

図 2.2.2-23 港湾行政のグリーン化

出典：国土交通省白書 [24]

2）宇宙空間の活用

新型コロナウイルスが流行した前後で地球環境や社会活動などにさまざまな変化が起きている中で、それを地球観測衛星で捉えた結果、その情報をさらにさまざまな分野で活用する方法など、本編第 I 部 第 2 章に記載する。**図 2.2.2-24** は過去から現在および未来の地盤沈下や斜面変動などの地表面の変位をミリメートルオーダーで計測する技術である。

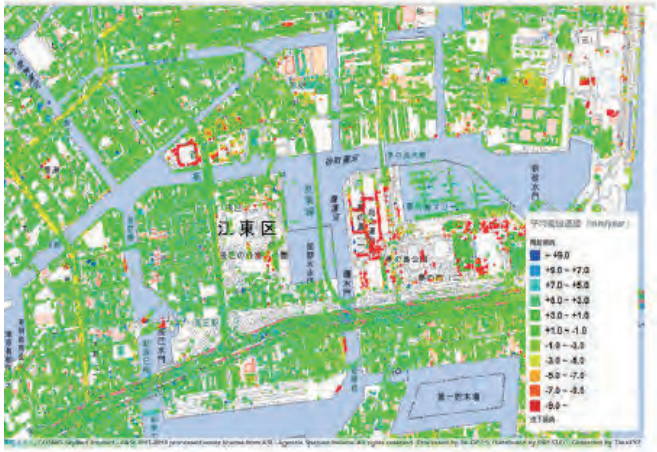

図 2.2.2-24　江東区湾岸部の平均変位速度

出典：リモート・センシング技術センター [25]

3）仮想空間（Society5.0、VR 技術）の活用

建設産業に関しては、建設前の段階で、サイバー空間上で建設工事のシミュレーションを行い最適な施工法を検証するデジタルツイン(Digital Twin)の活用や、工事完成後に、構造物の状況を各種センサーで計測し、変状が顕在化する前に保全が行える予防保全的な維持管理で構造物の長寿命化を図るなど、多方面での活用が期待されている。社会データを活用した防災・減災、災害時の BCP や物流の確保など、災害に対する社会像を提示することが今後の課題となっている。

また、VR 技術は建設業では、バーチャル内でのインフラ整備や建築家といった職業が誕生し、その制作物に資産価値が生まれる可能性もある。

【参考文献】

1）(株)ZMP　HP（参照 2021.1）
https://www.zmp.co.jp/news/pressrelease_20200818-3

2）資源エネルギー庁　HP（参照 2022.1）
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccus.html

3）内閣府沖縄総合事務局 HP（参照 2022.1）
http://www.ogb.go.jp/nousui/nns/c2/tikadamu

4）環境省HP（参照2022.1）
https://www.env.go.jp/air/tech/model/heat_itg21_02/ref01.pdf

5）国土交通省：「新しい生活様式」を公園や緑の力で健康に（参照 2021.12）
https://www.mlit.go.jp/toshi/park/toshi_parkgreen_tk_000100.html

6）国土交通省 都市の多様性とイノベーションの創出に関する懇談会:中間とりまとめ報告書（概要版）

7）釜井俊孝：宅地崩壊 なぜ都市で土砂災害が起こるのか Kindle 版（2019), 2019年4月10日発行

8）伊東電機株式会社 HP（参照 2021.10）
http://www.itohdenki.co.jp/plant/cell.html

9）国土交通省水管理・国土保全局：河川空間のオープン化活用事例集、2016 年 3 月（参照 2022.1）
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shigenkentou/pdf/jirei_kasenkukan_1602.pdf

10)令和3年度環境白書・環循環型社会白書・生物多様性白書（参照2021.10）

11)金 ドン均（2017）：斜面市街地における居住環境の改善に関する研究：長崎市の事例を対象として（参照 2021.12）
https://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/opac_detail_md/?lang=0&amode=MD823&bibid=1866245

12)PLATEAU HP（参照 2022.1）
https://www.mlit.go.jp/plateau/

13)内閣府：都市再生特別地区（八重洲一丁目 6 地区・八重洲二丁目 1 地区）都市計画の概要（参照 2022.1）
https://www.chisou.go.jp/tiiki/kokusentoc/tokyoken/tokyotoshisaisei/dai5/shiryou1.pdf

14)スマートシティガイドブック、内閣府・総務省・経済産業省・国土交通省
スマートシティ官民連携プラットフォーム事務局,2021.04
15)立地適正化計画作成の手引き、国土交通省都市局 都市計画課、2021 年 7 月
16)国土交通省：第 16 回下水道における新たな PPP/PFI 事業の促進に向けた検討会資料 5
下水道用地の活用について（国土交通省）（参照 2022.1）
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000382.html
17)国土交通省：第 25 回下水道における新たな PPP/PFI 事業の促進に向けた検討会
2050 年カーボンニュートラル実現に向けた最近の動向と下水道事業における取組
（国土交通省下水道部）（参照 2022.1）
https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000382.html
18)国土交通省 水管理・国土保全局 下水道部：下水熱利用マニュアル（案）, p4,
2021 年 4 月
19)JR 東日本ニュース：新幹線オフィス車両、東北・北陸・上越新幹線 全方面で実施
（参照 2022.1）https://www.jreast.co.jp/press/2021/20211005_ho02.pdf
20)国土交通省：「多様なニーズに応える道路空間」の あり方に関する検討会について,
2020 年 5 月（参照 2022.1）
https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/diverse_needs/pdf01/04.pdf
21)鹿島建設（株）PRESS RELEASE 2021 年 7 月 12 日
22)（一社）建設コンサルタンツ協会：美しい日本、私たちのまちの環境を守る, シリーズ
社会資本整備のあり方を考える, 環境を守るための取り組み, vol.3, 2009 年 4 月 1 日,
発行
23)国土交通省：ICT 施工の普及拡大に向けた取組（参照 2021.12）
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001388979.pdf
24)令和 3 年度国土交通白書（参照 2021.10）
25)（一財）リモート・センシング技術センター
https://www.restec.or.jp/solution/rise.html

2.3 今後の課題

2.3.1 調査研究のまとめ

本編 I 第 2 章に詳述した多様な空間利用の各事例に対してキーワードを抽出した。さらにキーワードとして挙げた項目に対して、現状考えられる課題を整理した。この結果を**表 2.3.1-1** に示す。

現状は、これらの課題を踏まえて、技術的動向も見据えた上で新たな地下空間利用について検討を進める必要がある。

2.3.2 今後の課題

今後の課題として、新たな地下空間利用の検討に資するために、前項 2.3.1 で整理した事例とキーワードを空間利用方法の観点から以下の二つに分類した。その結果を**表 2.3.1-1** に加筆した。

・これまでとは異なる新たな視点での空間利用

・現状の空間利用の快適性を向上させる技術

分類例を参考に、新たな技術の導入による空間利用のさらなる深化、地上や地下の空間利用の入れ替えや融合などによる空間利用再編などによって、SDGs の実現とニューノーマルへの移行を踏まえた新たな地下空間利用が見出せる可能性があると考える。

今後は、本検討で整理した事例に対して、**表 2.3.1-1** に示した課題、ニューノーマル（主にポストコロナ）への寄与といった観点と併せて、新たな地下空間利用に関する具体的な提案についての研究を進める。

表 2.3.1-1　多様な空間を対象とした各事例に対するキーワード、課題、空間の利用方法分類

本編第Ⅰ部の項目番号と項目名	キーワード		考えられる課題	空間の利用方法	
				新たな視点での空間利用	空間の快適性向上
2.2.2 地下空間	(1)	ライフロボット	・活用機会のさらなる飛躍		○
	(2)	CCS	・CO_2を他の気体から分離させて回収する際のコスト	○	
			・CO_2貯留に適した地層の把握	○	
		地下ダム	・地下ダムの適用場所の検討	○	
	(3)	地下データセンター	・地震(活断層)の影響を受けにくい場所の選定など	○	
2.2.3 地上空間	(1)	街路空間	・まちなかウォーカブル推進事業との連携		○
	(2)	スマート農業技術	・適正な最大稼働面積、機械費の削減方法などの検討	○	
		地下農場	・利用可能な地下空間の確保	○	
	(3)	河川空間のオープン化	・地域との合意形成	○	
	(4)	地域循環共生圏	・環境・経済・社会の統合的向上を実現する事業の継続的創出	○	
			・地域の核となるステークホルダーの組織化	○	
	(5)	坂道、狭隘地の利活用	・斜面地の課題に関する様々な研究・事業の継続的実施	○	
2.2.4 ビル・都市空間	(1)	Project PLATEAU (プラトー)	・3 次元化で目指す LOD（Levels of detail）やデータの更新方法の確立など		
	(2)	スマート空調	・実証実験結果を経ての早期導入		○
	(3)	ZEB、ZEH	・技術レベルの向上、コストの縮減、ノウハウの共有・標準化		○
	(4)	スマートシティ、コンパクトシティ	・導入メリットや効果の明確化、資金的持続性の確保、意義やメリットの普及促進など		○
2.2.5 インフラ空間	(1)	下水汚泥活用、下水道用地の活用	・一層の排出削減と創エネ・再エネの活用、その他必要なあらゆる手段とその実現のためのイノベーション	○	
	(2)	下水熱利用		○	
	(3)	駅ナカシェアオフィス事業	・現状は特になし	○	
	(4)	道路空間の快適性の向上	・制約条件や交通環境、さらに混在状況などを踏まえた道路空間の再構築		○
	(5)	無電柱化	・電線共同溝建設時のコスト縮減の促進、多様な整備手法の活用促進などの技術開発		○
2.2.6 産業別利用	(1)	WELL 認証	・評価制度の導入の促進	○	
		ダイバーストリート	・モビリティとインフラが融合した道路のあり方の研究開発の継続、短工期、コスト低減など経済性に配慮した新たな道路施工法の開発	○	
	(2)	都市空間のコーディネーター	・防災・減災、人口減少・少子高齢化、地域活性化などの課題を総合的に捉えた都市・地域づくりとしての全体最適化		
	(3)	ICT 建機	・DX 技術の促進		
2.2.7 その他空間	(1)	浮体式洋上風力	・環境保全・社会受容性の確保、維持管理や使用後の廃棄などの多様な観点からの検討、理解醸成	○	
	(2)	リモート・センシング	・測定精度や測定頻度の劣勢性		
	(3)	Digital Twin、NFT、メタバース	・実現性の遅れ、導入メリットや効果の明確化など	○	

３．多様なハザードを想定した地下インフラの機能に関する調査研究

3.1　調査経緯・調査方法

3.1.1 調査方針

大気中の二酸化炭素濃度の増加が一因と考えられる地球温暖化により、台風、豪雨、大雪などの災害の激甚化、夏季における猛暑など、生活環境に悪影響をおよぼしている。また、我が国は、地震災害も多く、近い将来に発生が予想されている南海トラフ巨大地震や首都直下型地震、そして地震発生に伴う火災や津波など、連鎖して発生する自然災害への対応も必要である。さらに、これらの自然災害に加えて、2019 年からの新型コロナウイルス感染症の世界的流行（COVID-19 pandemic）を契機とした生物学的災害への対応も求められている。一方、地下空間は**表 3.1.1-1** に示すような特性があり、有利な点を活かしつつ不利な点を改善することで、多様なハザードに対応した安全性の高い地下空間として活用できると考えられる。

表 3.1.1-1 地下空間の特性

有利な点	環境制御（温度一定、気象の影響、騒音）、耐震性、安定した通信環境、公共交通手段への円滑な移動、歩車分離による安全性と快適性、気密性
不利な点	浸水、閉塞感、高額な建設費・リニューアル費、火災、停電時の換気、自然光の確保、オープンスペース不足

そこで、本調査研究では、ポストコロナにおける多様なハザードに対応した地下空間のインフラについて提言を行うことを目的として、都市が遭遇する様々なハザードの調査、災害時における地下インフラに求められる機能と課題の抽出、地下インフラの改善や高付加価値化に向けた検討を行うこととした。さらに、災害の激甚化の一因となっている地球温暖化対策に向けたカーボンニュートラルに関する地下施設も調査研究の対象に加えた。なお、本調査研究は 2021 年度と 2022 年度の 2 年間で行うことから、1 年目はハザードと地下インフラの調査を、2 年目は地下インフラ再構築の提言に向けた検討を行うこととした。

3.1.2 調査内容

災害および都市が遭遇する様々なハザードを想定するために、自然災害と生物学的災害の現状、複数の災害が同時期に発生するマルチハザードの事例と、複数の災害発生時のシナリオと影響について調査した。次に、地下インフラに求められる機能と課題を抽出するために、災害時における政府・自治体の機能、BCP（事業継続計画）関連施設、医療関連施設、交通施設と CN（カーボンニュートラル）関連施設を調査した。

なお、「マルチハザード」と同様の概念として「複合災害」が使用されているが、様々な考え方が混在している現状において両者を明確に区分することが困難であることから、本報告書は、複数の災害に関するものを「マルチハザード」として記述した。

3.1.3 調査状況

2021 年度は、2021 年 6 月に部会を発足した後、おおむね 1 ヶ月に 1 回のペースで計 8 回の部会活動を実施した。現地調査、ヒアリングに関しては、緊急事態宣言の発令、コロナ禍による接触機会の減少を図るため、実施できなかった。

3.2 調査研究のまとめ

3.2.1 都市が遭遇するハザード

(1) 自然災害と生物学的災害の現状

都市部の水害、地震災害および生物学的災害の現状を以下に示す。

1) 都市部の水害

都市部の水害は気候変動や降雨の激甚化により毎年のように発生している [1)]。特に近年の短時間豪雨の頻度は増加傾向にあり、これまで水害がなかった地域で発生する可能性がある。

2) 都市部の地震災害

地震災害として 2021 年 10 月 7 日の千葉県北西部を震源とする地震を調査した結果、大規模停電により交通機関が機能不全に陥り、多くの帰宅困難者が発生する事態となった。地震災害対策が継続的に必要である。

3) 生物学的災害

生物学的災害として高病原性鳥インフルエンザと新型コロナウイルス感染症について調査した。高病原性鳥インフルエンザは、野鳥を介し国境を越えて発生するため、国際的な連携によって対策を共有化し被害を抑えることが重要である。新型コロナウイルス感染症は、対策としてワクチン接種や緊急事態宣言などが行われているが、病床・宿泊療養施設の拡充など医療提供体制の強化が課題となっている。

(2) マルチハザード

地震災害を主体としたマルチハザードの事例を以下に示す。

1) 地震と火災

大地震の後には大規模火災が発生する事例が多数報告されている。特に 1923 年の大正関東地震（関東大震災）は、地震による倒壊 1.4 万棟、火災による焼失 22 万棟で火災による被害の方が多く、地震後の火災の影響は大きなものである。

2) 地震と水害

1948 年の福井地震により損傷した堤防が約 1 ヶ月後の豪雨で決壊して福井市内約 1,900ha が浸水した。この事例から地震と水害のマルチハザードは想定されるべきであると考えられる。また、東京都江戸川区は、首都直下型地震により堤防や水門などの機能が低下している中で、巨大台風による高潮襲来の被害想定を行っている [2)]。

3) 地震と津波

マグニチュード 8 クラスの海溝型巨大地震は津波を引き起こすとされている。2011 年の東北地方太平洋地震（東日本大震災）による津波被害は、沿岸部の町などに壊滅的な被害を与えた。また、南海トラフや相模トラフで地震は震源と陸地が近いため、1946 年の南海地震の津波は 5 分で四国南岸に到達し、短い時間での避難確保の対応

が必要である。

4) 地震と雪害

2004 年の新潟県中越地震では、豪雨や地震にて損傷した斜面や家屋に豪雪が加わり被害を拡大させた。また、2011 年の長野県北部地震は、200cm を超える積雪が地震によって雪崩となり家屋や道路に被害を与えたものである。

5) 自然災害と感染症

2010 年のハイチ共和国の地震災害は、政府機能が完全に麻痺するほどの被害に加えて、保険医療施設が機能していない中、海外からの支援の際にコレラが持ち込まれ、地震とコレラ感染の複合的な災害に発展した[3)]。また、2020 年 7 月豪雨では、コロナ感染拡大が心配される中での豪雨災害となり、避難所での対応としてアルコール消毒やスペースの確保が実施された[4)]。このように、感染症については衛生管理が重要である。

(3) マルチハザード発生時のシナリオと影響度評価

マルチハザードの特性と評価方法についての調査と、地下空間への影響シナリオについて検討を行った。

1) マルチハザードの特性

マルチハザードの特性において重要なのは、複数の災害の連鎖的発生により、災害事象の複雑化と被害の拡大につながるため、単独災害の足し算ではなく、時系列的、空間的な災害事象の多様性を考慮することである。

2) マルチハザードの評価方法

マルチハザードの評価は、個別の災害事象に比べて格段に難しく、防災科学研究所や東北大学災害科学国際研究所などで研究が進められているが、マルチハザードの評価手法の実用化に至っていないのが実情である。以下に有効と考えられる代表的な評価手法を示す。

① ハザードマトリクス（1次災害と2次災害発生確率の相互関連）
② ネットワークダイアグラム（ハザード間の潜在的な関連を可視化）
③ ハザードマップ（ハザードの影響の大きい地域の可視化）
④ 物理モデル（地震、津波、洪水、高潮、火災延焼などのシミュレーション）
⑤ 確率論的・統計的手法（モンテカルロ法、マルコフ連鎖、ベイズ統計など）

3) マルチハザードの地下空間への影響についての検討

地下空間へのマルチハザードの定量的評価は難しいが、ハザードマトリクスとネットワークダイアグラムの評価方法の考え方を参照して、**図 3.2.1-1** に示す地震と台風のマルチハザードが地下空間に与える影響を評価するシナリオを検討した。この様に、地下空間に影響するマルチハザードのシナリオを想定することは、想定される災害の脆弱性の抽出が可能となり、災害への対策を検討するうえで有効であると考えられる。

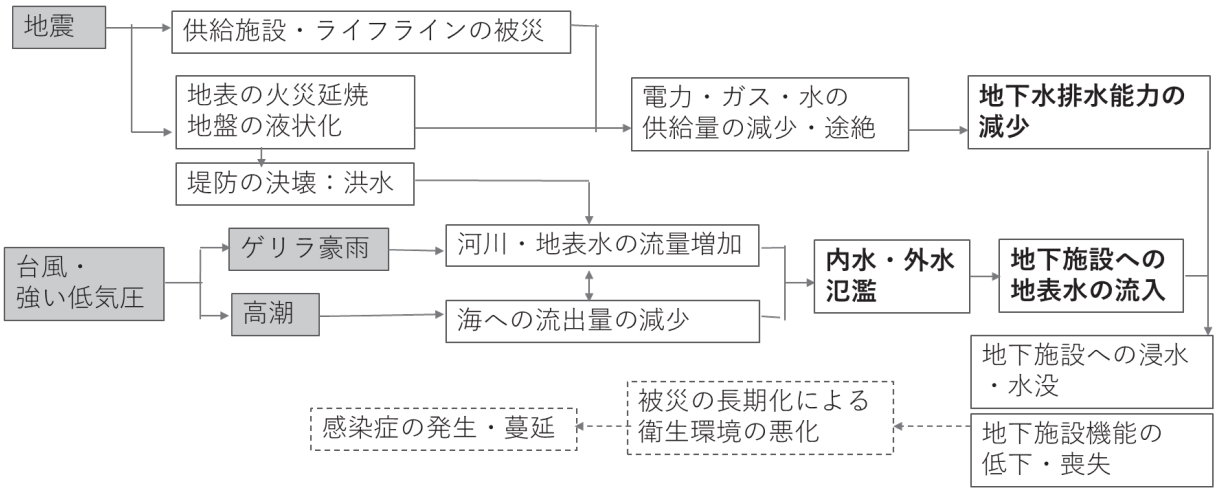

図 3.2.1-1　地震と台風のマルチハザードが地下空間に与える影響を評価するシナリオ例

（第 2 部会作成）

3.2.2 地下インフラに求められる機能と課題

(1) 災害時の政府・自治体機能

災害時の対策や機能として、政府と内閣府および自治体として、東京都、愛知県、福岡市の調査結果を以下に示す。

・政府は災害対策基本法に基づき、災害の未然防止、被害の軽減および災害復旧のための諸施策等の防災基本計画を定めている。そして、2021 年 5 月に防災基本計画が災害基本法改正と新型コロナウイルス感染症対策およびその他最近の施策の進展を踏まえた修正が行われている [5)]。

・内閣府は「防災・減災、国土強靭化 WG」を設置し、地震後の水害、地震災害の復旧・復興のシナリオ検討や感染症を考慮したマルチハザード対応の強化を示している [6)]。

・東京都は「東京防災プラン 2021」を公表して、地震、風水害、火山などの防災対策を推進するための事業計画が記載している [7)]。

・愛知県は 2021 年 7 月に愛知県地域防災計画を修正し、地下インフラと関係性の高い風水害対策として地下空間の浸水対策、地下街等への保安対策と都市ガス対策を示している [8)]。

・福岡市は「天神ビックバン」や「博多コネクティッド」の再開発事業において、新型コロナウイルス感染症対策機能としてデジタル技術の活用、換気装置や通信環境の充実などの導入促進を促している。

(2) BCP 関連施設

BCP とは災害などの緊急時に事業資産の損害を最小限にとどめつつ、事業継続や早期復旧を可能ための方法や手段を取り決めておく計画である。また、BCP は取引先や顧客の事業停止への影響の連鎖を断ち切るためだけでなく、企業としてのコンプライアンス確保や社会的責任の観点からも必要である。特に災害時における事業継続が特に求められると考えられる業種を以下に示す。

① 医療機関（傷病者への対応）
② 建設業（ライフラインの復旧・確保）
③ ITサービス（通信設備、データセンター）
④ 物流業（物資、食料の輸送）
⑤ 自治体（安否確認、災害対応）

BCP の策定は重要であるため、各省庁や自治体では BCP 策定のガイドラインを提示している。しかし、帝国データバンク景気動向調査 2021 年 5 月の調査結果 [9]は、BCP を策定している企業の割合は 17.6%と低位にとどまっており、BCP 策定率の向上が課題である。また、BCP 策定にあたり、各種インフラの確保・代替および物資の備蓄などを考慮する必要がある。これらの事項に対する地下空間の有効利用として、非常用発電機の設置、避難場所の確保、燃料備蓄、食料備蓄庫の設置などが考えられる。

(3) 医療関連施設

地下空間は閉塞感や圧迫感などの負の特性があるものの、都市部での土地や空間の有効利用の観点で優位性がある。そこで、地下空間の負の特性の改善として、新型コロナウイルス感染防止で重要とされる密閉空間の換気対策と、人工光の精神的な悪影響への対策として自然光の採光について調査した。また、避難場所や病院の地下空間の利用ついて事例調査を行った。

地下空間の主な換気技術は、屋内外の温度や気圧差を利用した自然換気方式と換気扇などを用いた機械換気方式がある。必要換気量はビル管理法により 1 人当たり毎時 30m^3 である [10]。また、換気能力が不十分な場合の補助として HEPA フィルター(High Efficiency Particulate Air Filter)付きの空気清浄機の使用も効果的である。

地下空間への自然光の採光は、ボイドやドライエリアなどの余剰スペースを利用して直接行うものと、反射（反射材を取り付けたダクトを通じて太陽光を伝える）や集光（集光機で集めた太陽光を光ファイバーで届ける）にて間接的に行うものがある。

地下街、地下広場を避難場所とした例として、東京ミッドタウンの「日比谷アーケード」、歌舞伎座の「木挽町広場」、札幌駅前地下歩行空間「チ・カ・ホ」を、病院の例として、イスラエルのランバン・ヘルス病院の地下駐車場病棟（平時は地下駐車場だが緊急時に病棟とする）を調査した。本編第Ⅱ部 2.3.3 に記述したこれらの事例調査の結果、避難場所や医療施設として地下空間の利用が有効であることを確認できた。

(4) 交通施設

災害時の移動手段となる地下交通インフラに関する機能、先進事例および政府の取組みの状況について調査した。なお、地下交通インフラに求められる機能として、以下の項目が考えられる。

① 地上交通（自動者・鉄道など）との上下分離による安全性確保
② 地下空間の環境制御の優位性による快適性
③ 地下空間の連結による上下移動解消による回遊性向上
④ 災害時における避難施設としての機能
⑤ 自動運転・無人運転時代の到来を見越した専用区間の確保

その他、コロナ禍において求められる地下鉄の換気機能は、実証実験の結果から、車速・窓分け面積に比例して換気回数が増加し、地上区間よりも地下区間の換気回数が多いなど、十分であることが示されている[11)]。

次に、地下交通インフラ整備に関する先進事例として、リニア中央新幹線、東京外郭環状道路・阪神高速淀川左岸線、札幌駅前通地下歩行空間・上野中央通り地下歩道を調査した。調査結果を以下に示す。

・リニア中央新幹線の品川・名古屋ターミナルは、交通機関相互のシームレスな乗り継ぎや自動車・歩行者移動の円滑化、防災拠点（退避施設）としての利用できる空間形成計画が進められている。
・東京外郭環状道路や阪神高速淀川左岸線の整備は、渋滞緩和対策以外に災害時の避難・救援活動におけるインフラとして期待できる。
・札幌駅前通地下歩行空間は、歩行者専用の地下通路の環境制御として、設置した温度と CO_2 濃度のセンサー情報をもとに換気量を調整している。

また、政府は「統合イノベーション戦略 2019」以降において、Society5.0 の総合的ショーケースとして「スマートシティ」の取組みを推進している。このスマートシティプロジェクトには、地下と地上の回遊性・一本化を向上させる取組みや、地下鉄駅から次のモビリティ（パーソナルモビリティや自動運転モビリティ）へのシームレスな乗換えやパーソナルモビリティを用いた地上・地下移動を可能とする取組みが盛り込まれている。

(5) CN（カーボンニュートラル）関連施設

2020 年の 10 月 26 日に菅総理（当時）より「2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言され、我が国は国内の温暖化ガスの排出を 2050 年までに「実質ゼロ」とする方針を表明した。カーボンニュートラルに向けた施策の中でも、地下インフラ施設と関連性が高い施策として、パークアンドライド、コージェネレーション、CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）が挙げられ、これらの施策についての地下インフラ施設例の施設概要、機能について整理した。

パークアンドライドを考慮した地下施設例としては、福岡市博多地区、天神地区の大規模開発事業の「福岡市天神ビックバン」、「博多コネクティッド」が挙げられる。開発事業と併せた地下通路や地下駐輪場の整備、駅近隣駐車場にパークアンドライド駐車場の配置、都心循環 BRT、ICT の活用等による公共機関交通の利用促進、利便性向上により、パークアンドライド促進に取組んでいる。また、2020 年 8 月に「感染症対策」をまちづくり取組評価の対象に追加し、換気、非接触、身体的距離の確保、通信機器の確保、抗菌素材の利用等を開発事業の計画に追加している[12)]。

コージェネレーションについては、札幌駅南口エネルギーセンターにおける、自然エネルギーと深夜電力を利用した、省資源省エネルギーシステムが例として挙げられる。コージェネレーションは、停電時でも継続的、安定的に電力や熱を供給することができるため、地域ごとのエネルギーレジリエンス強化が期待できる。最近では国内開発事業にも多く取り入れられている。

CCS については、苫小牧における CCS 大規模実証試験事業が例として挙げられる。経済産業省、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、日本 CCS 調査株式会社（JCCS）が実施した実証実験によりシステムの有効性、安全性が確認された。また、実証実験中に北海道胆振東部地震が発生し、実証試験センターが停電したことで施設の災害時における課題も明確となった[13)]。

3.3　今後の課題

本年度の調査研究より得られた課題を以下に示す。次年度はこれらの課題を踏まえて、地下インフラの高い付加価値化の提案に向けて検討を行う予定である。

① 都市が遭遇するハザード

- 気候変動や線状降水帯の発生などにより豪雨の規模が巨大し災害リスクが高まっている現状において、電源設備の浸水によるインフラ機能停止、停電による交通機関の機能不全など、災害に対する備えの強化が必要である。
- 生物学的災害に対する課題として、感染拡大防止に向けた国際的な連携や医療提供体制の強化が必要である。
- 災害の激甚化、頻発化、多様化に対し、災害規模・頻度の想定や防災対策の優先順位付けが困難。既存施設能力を上回る規模の災害の発生が想定される。
- マルチハザードの評価手法が確立されていないため、組み合わされる災害により被害程度が大きく異なるなど定量的な被害想定が難しい（激甚化、広域化、多様化、長期化など）。特に都市部では、自然災害に伴うライフライン災害等によっても災害規模が拡大することが考えられ、想定が困難である。また、マルチハザードに関する想定事例も少ない。
- 防災対策は過去の災害事例を基に作成されていることが多く、想定外の災害への対応が遅れている。
- 自然災害と生物学的災害の組合せでは被災者避難生活（在宅・縁故、避難所）が多様化、また、感染症医療と災害医療の中核となる医療機関の被災による医療体制の逼迫が懸念される。
- 一般的に災害想定は不確実性や誤差を含む。そのため、想定外や想定を上回る災害時の対応を可能な限り拡大できるように、平時から災害時対応の優先順位を明確にするなどの取組みが必要である。

② 政府・自治体

- 新型コロナウイルス感染症対策を踏まえた避難訓練や BCP 計画など、ソフト面での対策強化が望まれる。
- ソフト面での対策として、避難所開設や運営のデジタル化の推進が必要である。
- 震後の水害や地震後の感染症対策など、複合災害シナリオや復旧・復興シナリオの早期作成が望まれる。
- ハード面での整備は継続されているものの、一部の地下街のように、ハード整備が遅れている地下インフラが存在する。

③ BCP 関連施設

・地下施設の災害時活用に関する安全性確保として、自然災害（台風、大雨、洪水、津波等の水害）への対策、人災としての火災発生時やテロ災害発生時の避難誘導対策、生物学的災害として地下施設の感染症への対策を強化する必要がある。
・BCP 策定率が低いため、今後の策定率の向上を図る必要がある。

④ 医療関連施設

・換気口や採光部から直接空気や光を取り入れる空間においては、浸水の恐れがない高さに設けるか、または水密性を向上するなど水害対策が必要と考える。
・集塵、脱硝酸技術（地上環境への影響低減技術）について検討する必要がある。
・避難場所とする上での、バリアフリーの充実が課題となる。
・地上との開口部が多いと断熱性や防音性などが低くなり、避難者の体調悪化につながる可能性があるため検討する必要がある。

⑤ 交通施設

・地下空間の整備や相互接続・ネットワーク化は、利用者の観点からは利便性・快適性が向上する一方で、その規模や複雑さによっては、火害・水害・停電・換気システムを含む感染症対策などの防災設備整備上の観点や、バリアフリー施設整備の観点で、施設管理者・所有者や所轄官庁など各関係者との連携・調整がなければ適切に機能せず、安全性・利便性・快適性が損なわれる恐れがある。新型コロナウイルス感染症対策を踏まえた避難訓練や BCP 計画など、ソフト面での対策強化が望まれる。
・地下空間を活用した交通インフラの整備は、主に大都市圏の都心部で進められており、地方都市や大都市近郊では、公共交通網の規模が小さく、費用対効果の観点からも整備事例は少ない。しかし、少子高齢化社会を迎え、地方都市ではコンパクトシティーの推進が望まれており、様々なモビリティとのシームレスな乗換拠点の整備や歩車分離、将来的な自動運転システム導入などを行い、公共交通網の維持・活性化と歩行空間の安全性確保を図る必要がある。
・今後も生じることが想定される新たな感染症災害において、地下交通空間の安全性を確保するには、換気システムやフィルターの性能向上を図ることが重要であると考えられる。換気状況は視覚的に分かりづらいことから、人目につきやすい箇所などに空気清浄状況をモニタリングできる情報掲示板などを整備することも望ましい。
・コロナ禍において人流抑制が図られ、公共交通利用者の大幅な減少と交通機関の経営難が見込まれるほか、今後、公共交通機関の担い手が不足することも予想されることから、MaaS を含め、誰もが公共交通サービスや安全な地下空間へのアクセスしやすくなるようなターミナル整備と情報提供サービスの構築を行い、公共交通の利用促進を図ることが望まれる。

⑥ CN（カーボンニュートラル）施設

・国土交通省にて制定している地下街防災推進事業制度要綱に感染症対策を含めた法的整備の更新が求められる。

・災害時の避難経路案内、誘導等においては、ICT を活用したソフト面の拡充、通信環境の向上、電気設備の維持が課題と考えられる。

・特に防災拠点施設の機能を有する施設においては、発電機器を含む電気通信設備の災害時に対する安全優度向上と感染症を含めたマルチハザードに対するレジリエンスの向上が求められる。

・災害時 CN 関連施設では、設備不良等による環境汚染が生じないように十分な対策を講じる必要がある。

【参考文献】

1) 国土交通白書2020 第 1 節我が国を取り巻く環境変化（参照2021.12）
https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/html/n1115000.html

2) 江戸川区 HP：複合災害対策（参照 2021.11）
https://www.city.edogawa.tokyo.jp/e007/bosaianzen/bosai/kojo/kekaku/hukugosaigai.html

3) 日本赤十字社：ハイチ大地震　救援・復興事業報告書、2020.11

4) 内閣府：「令和2年7月豪雨による被害状況等について」（参照2021.11）
http://www.bousai.go.jp/updates/r2_07ooame/index.html

5) 内閣府 防災基本計画（参照2021.12）
http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_gaiyou.pdf

6) 内閣府 防災・減災、国土強靭化新時代の実現のための提言（参照2021.12）
http://www.bousai.go.jp/kaigirep/teigen/pdf/teigen_01.pdf

7) 東京都 東京都防災プラン2021（参照2021.12）
https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/torikumi/1000061/1013021.html

8) 愛知県 愛知県地域防災計画（参照2021.12）
https://www.pref.aichi.jp/bousai/boukei/boukei.htm

9) 事業継続計画（BCP）に対する企業の意識調査（2021 年）、（株）帝国データバンク（参照 2021.12）
https://www.tdb.co.jp/report/watching/press/pdf/p210604.pdf

10)厚生労働省；感染拡大防止と医療提供体制の整備（参照 2021.9）
https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/kansenkakudaiboushi-iryouteikyou.html

11)地下鉄車両の窓開けなどの換気の効果：産業技術総合研究所 HP（参照 2020.12）
https://www.aist.go.jp/aist_j/new_research/2020/nr20201203/nr20201203.html

12)ニューノーマルに対応した新しいまちづくりに関する調査結果、 国土交通省都市局、2021 年 3 月 31 日（参照 2021.10）
https://www.mlit.go.jp/toshi/machi/content/001398792.pdf

13)日本 CCS 調査株式会社、北海道胆振東部地震の CO2 貯留層への影響等に関する検討報告書、 2018 年 11 月

４．自動運転、MaaS 等に対応した地下のインフラシステムに関する調査研究

4.1　調査経緯・調査方法

4.1.1 調査方針

我が国の産業競争力の強化、豊かな国民生活の実現と地方創成を支えるために、物流は途切れさせてはならない社会インフラである [1)]。また、人々の経済活動の指標として人の流れ（人流）に着目し、人流データを活用した様々な取組みが行われている [2)]。すなわち物流、人流は経済を支える基盤の根幹ともいえる部分であり、都市再開発においてはより効率的、効果的な物流あるいは人流ネットワークを考慮した計画が立案されている。

一方で、電子商取引（EC）の増大により、爆発的に増えた荷物を捌ききれず、2017 年ごろに宅配業界は機能不全に近い状況に陥った [3)]。以降、物流ネットワークにおいて慢性的な人手不足となっており、コロナ禍による巣籠もり需要がさらに拍車をかけた状態となっている。さらに人流の観点からは、特に地方における少子高齢化、財政難に伴う貧弱な移動インフラによる弊害が問題となっており、このような状況から、ICT を活用したより効率的で無駄のない物流ネットワークシステム構築や、MaaS、CASE（カーシェアリングなど自動車業界が進める次世代のトレンド）等の取組みが検討されている。

経済発展や技術開発により人間の生活は物質的に豊かで便利なものとなり、ICT の普及により我々は物質的に豊かで便利な生活を享受しているが、一方で、人類が豊かに生存し続けるための基盤となる地球環境の悪化をもたらしている [4)]。こうした諸問題を喫緊の課題とし、2015 年 9 月に「持続可能な開発のための 2030 アジェンダ」が国連で採択された。このアジェンダの中核をなすものが「持続可能な開発目標（SDGs）」である。SDGs 達成のためには経済活動と環境問題の両立が重要であり、特に地上空間に余裕のない都市部においては地上空間と地下空間を立体的かつ効率的に活用した物流・人流ネットワークを構築することが課題となる。

本研究では、こうした現状を踏まえ、自動運転や MaaS 等の ICT を活用した地上空間、地下空間の活用事例や関連する取組事例について調査を行った。また、各事例について課題を整理し、課題解決の方向性についても調査を行った。

4.1.2 調査内容

本調査では、自動運転、MaaS 等に対応した地上・地下空間活用型インフラシステムの取組事例の調査をテーマとして、次の①～③の項目に関して調査を行う。

① 新たな取組事例の調査

人流および物流に関する先進的な取組事例について調査を行った。自動運転・MaaS などの先進事例、物流トラックの隊列走行、ドローン輸送の実証試験などの事例の他、物流 DX や物流施設を拠点としたまちづくりの事例など広範囲に調査を行った。

② 課題の抽出と解決の方向性の検討

各事例についてそれぞれ課題を抽出し、問題点を整理して解決の方向性について検討を加えた。

③ とりまとめと今後の課題の整理

課題解決の実現可能性や今後の見通しについて整理を行うとともに、次年度以降の本調査の調査内容について検討を行った。

4.1.3 調査状況

2021 年度は、2021 年 6 月に部会を発足した後、おおむね 1 ヶ月に 1 回のペースで計 7 回の部会活動を実施した。現地調査、ヒアリングに関しては、緊急事態宣言の発令、コロナ禍による接触機会の減少を図るため、実施できなかった。

また、部会とは別に、2021 年 11 月 2 日、講演会を企画し、東京海洋大学の兵藤教授を講師とする「総合物流施策大綱とその周辺及びドローン物流」の講演会を実施した。

4.2 調査研究のまとめ

4.2.1 人流に関するまとめ

人流に関しては、「連接バス」「既存ネットワーク強化」「自動運転 MaaS や CASE・地域活性化の事例」について新たな取組事例を調査した。

連接バスは全国で 13 のグループで運用が行われ、神戸市の 11 日間のプレ運行期間中の合計では連接バス 1 台で 2,125 名（普通バス 2 台分に対して 2.8 倍の輸送力）の実績が出ており、普通バスと比べて輸送力増強の効果が認められている。また、ハイブリッド仕様車や高度な排ガス対応車を用いるため、低炭素社会や環境負荷低減へ大きく貢献していることがわかった。一方、連接バスは鉄道と比べて定時性の確保や、乗客が増えることによる乗降時間の長時間化、停留所周辺の利便性向上などが課題として挙げられ、専用レーンなどのインフラ整備、乗降時間短縮のための効率的な料金収受システム、ICT を活用した予約決済アプリの整備など、さらなる改善が必要であることがわかった。

既存ネットワークの強化については、点在するバス停の集約、歩行者・自動車の分離の取組みが、ビルの再開発とセットで進められている。従来は、バス停が点在し利便性が悪いうえ、待合空間が少なく、バスの路上停車による交通阻害が発生していた。また、駅前など人が集まる空間における災害時の退避空間が少なく、帰宅困難者の一時滞在場所も不足していた。そのような中、バスターミナルの整備をビルの再開発とセットで行うことにより、歩行者デッキ、待合空間、災害時の一時滞在場所を確保することができる。これにより、移動・乗り換え時間の短縮、歩車分離による安全性の確保などの効果が期待されている。

自動運転 MaaS や CASE・地域活性化の事例に対しては、地方では複数の自治体の広域連携による観光目的の取組みが目立ち、都市部では狭い範囲を対象とした特定課題解決のための取組みが目立った。このうち、地方では人口減少により公共交通機関の利用者が減少し、地方路線の廃止につながっており、これは高齢者などの交通弱者への影響が大きく、高齢ドライバーが減らない一因にもなっている。こうした側面においても MaaS への期待は大きい。都市部においても、高齢化地区におけるファースト・ラストワンマイル問題（鉄道駅、バス停などから居住地への移動が困難）への対応として MaaS への期待は大きく、災害時の避難支援など防災目的での活用も期待されている。なお、MaaS の活用にはアプリが必須であり、フリーWi-Fi など通信設備を整備することで利便性が向上すると思われ

る。また、複数地域の MaaS が相互利用できる仕組みが構築されれば、さらなる利便性向上が期待できる。

4.2.2 物流に関するまとめ

物流に関しては、「物流ネットワークの効率化」「倉庫内作業の効率化」「ドローンによる輸送」「ダブル連結トラックと隊列走行」「物流トンネル構想」「3PL（荷主企業が第三者に物流業務を委託する仕組み）」「物流施設を拠点とした街づくり」について新たな取組事例を調査した。

物流ネットワークの効率化に関しては、人口減少・労働力不足・インフラの老朽化という課題に対し、物流 DX（デジタルトランスフォーメーション：デジタル技術の浸透による変革）による生産性向上で課題解決に取り組む動きがあり、国も「改正物流総合効率化法」の施行でそれらの取組みを支援している。また、官民 ITS 構想により全国で自動運転や MaaS の実証試験が行なわれ、一部の地域では社会実装へと進んでいる。一方、物流総合効率化法は物流業界・運送業者に対する施策であり、EC（電子商取引）運営企業との関係性構築や改善に関する施策としては最適とは言えない。また、自動運転の実現にあたっては、技術開発、法令等の整備、インフラ整備が必要である。よって、生産性向上のため引き続き課題解決に向けた努力が必要である。

倉庫内作業の効率化に関しては、労働人口減少による人手不足、小口配送の急増、要求される配送スピードといった課題に対し、各企業は AI 技術や DPS（デジタルピッキングシステム）、マテハン機器の改良など、倉庫内作業の自動化を進める取組みがある。今後も、AI、ロボティクス・テクノロジーでの省人化・自動化による効率化は避けられない流れとなっている。

ドローンによる輸送は、物流のラストワンマイルを担う輸送手段の一つとして取り組まれている。例えば、長野県伊那市では買い物が困難な住民を支援する目的でドローンによる配送事業を行っており、自治体が運営するドローン物流事業として全国から注目を集めている。ドローン輸送には制度面の課題と機体に関する技術的課題があり、制度面については、政府が飛行の安全を厳格に担保するために航空安全三原則（機体の安全・操縦の安全・運用体制の安全）に基づく制度を創設すべく検討を行っている。機体に関する技術的課題については、輸送能力向上のための機体開発やドローン運行管理システムの構築が必要である。

ダブル連結トラックと隊列走行は、トラック運送業界で取り組まれている取組みである。トラック運送業界はドライバー不足や高年齢化が進み、今後、一部の貨物が運べない状況が予想されている。国は「道路の物流イノベーション」としてトラック輸送の生産性向上施策として 3 項目を掲げており、その中の一つにダブル連結トラックによる省人化がある。ダブル連結トラック走行実験では、通常の大型トラックに比べてドライバー数 5 割削減の省人化効果が認められ、燃料消費量や CO_2 排出量も約 4 割削減となった。今後は、ドライバーの育成・教育、高速道路本線への合流、休憩場所確保等のインフラ整備、MaaS を利用した車両位置確認やドライバー配置計画、物流 DX によるサプライチェーンの最適化、サスティナブルな物流ネットワークの構築といった対応が必要である。

物流トンネル構想は、物流に地下空間（トンネル、鉄道）を活用することで、地上の渋

滞緩和や CO_2 削減、ドライバー不足の解消を狙う取組みである。スイスでは 2030 年の営業開始を目指して貨物用の地下トンネル構想が進んでいる。これは自動制御の貨車が連なって地下を走る構想であり、現在のトラック輸送と比べると、渋滞による遅延がなく、再生可能エネルギーを用いることで CO_2 排出量 8 割減、騒音量 5 割減、交通量 4 割減が予想され、環境面での高い効果が期待される。また、エンジニアリング協会では、都市域の地下空間を物流に利用するカナート構想が検討されている。この構想は、都市域の地下に都市型水害対策として整備された地下貯留管や地下河川など、平時には未利用の空間に着目したものである。すなわち、この空間において、都市部地上空間で制約の大きいドローンによる無人搬送を行うことを目指すもので、これにより、地上部の物流輸送による渋滞緩和、少子高齢化による人手不足に対応する効果が期待される。

3PL は荷主企業が第三者に物流業務全体もしくは一部を委託する仕組みであり、日立物流グループなどいくつかの企業で取組みがなされている。国土交通省の報告によると、3PL 事業の課題として、物流事業者からは「3PL 事業による利益が出ない」などの課題が挙がり、荷主企業からは「3PL サービスによる十分なコスト削減ができない」などの課題が挙がっている。これらの課題解決には、「物流事業者の利益捻出と荷主企業の物流コストの低減が両立できること」と「物流事業者が業務におけるプロフェッショナルな人材を育成し、荷主企業の納得する物流サービスを提供できること」が重要なポイントであると考える。

物流施設を拠点とした街づくりでは、物流施設の複合型まちづくり事例を調査した。近年の物流施設は、地域社会との共生、環境配慮が意識されており、オフィスや公園、商業施設やスポーツ施設と併設される事例や、CO_2 排出量を実質ゼロあるいは施設の使用電力を 100%再生可能エネルギーで賄う事例がある。コロナ禍で EC による即日配達の需要が高まり、物流施設の都市部回帰の機運が高まる中、物流は「まち」を変える機能を持っていると言える。一方、中心市街地では貨物車交通の集中や路上駐車により、地区へのアクセスの低下、回遊性の低下など、端末物流の課題が生じている。従来、市民や商業者は端末物流に対する意識が低かったが、こうした課題に対しても、今後は「まちづくり」の一環として捉え、荷捌きスペースの確保など物流問題に取り組む必要がある。

4.3　今後の課題

人流に関する共通課題として、都市間並びに都市内（地域内）移動に関する利用者、特に少子高齢化の進む中で交通弱者に対する利便性・安全性の提供が挙げられている。この改善に向けては、バスターミナル整備とビルや地域の再開発による拠点整備、拠点間を結ぶ交通インフラの整備、ラストワンマイル問題と言われる都市内（地域内）交通インフラ整備に合わせ、災害時の避難支援など防災目的での活用も期待される ICT や MaaS を活用した利便性向上策が求められている。

物流に関しても、人流と同じように都市間並びに都市内（地域内）物流に関する共通課題が挙げられている。これらの改善に向けては、物流 DX による生産性向上、倉庫内作業の効率化、拠点間大量輸送、ラストワンマイル輸送、都市回帰する物流施設の地域共生化などに取組みが進んでいるが、自動運転化に向けた法整備、物流 MaaS へのさらなる取組み、平常時未利用空間の物流空間への活用、荷主側・物流側双方の観点からの 3PL 再検証などが求められている。

2022 年度は、今年度得られた成果を参考に、現在の人流・物流が抱える課題解決に向け自動運転、MaaS などを活用した新たな人流・物流空間としての地下空間インフラシステムの創出について検討したい。

【参考文献】

1) 国土交通省：総合物流施策大綱 2017 年度～2020 年度、2017.7.
2) 国土交通省：人流データを活用したモデル事業の実施対象を決定しました、プレスリリース、2021.6（参照 2021.12）
https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001410250.pdf
3) 読売新聞：経済転換　物流<2>2021.7.21 朝刊
4) 環境省：地球環境の限界と持続可能な開発目標（SDGs）（参照 2021.12）
https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h29/pdf/1_1.pdf

５．社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究

5.1　調査経緯・調査方法

5.1.1 調査方針

地下インフラの再構築は、地下インフラの維持、管理のみならず、インフラに新たな機能・価値を付与し、利活用することを目的として行われる。

地下インフラの維持・管理においては、インフラ規模の拡大、機能の維持・強化・追加、複数の地下インフラの結合などが挙げられる。特に維持管理については高度成長期に整備された社会インフラが建設されて50年以上が経過し、老朽化が進んで一斉に更新が必要な時期を迎えており、リニューアルに関する技術が今まで以上に必要とされている。

また新規の地下インフラ構築においては、ポストコロナ時代における換気やソーシャルディスタンスの確保などの新たな機能の要求、阪神淡路大震災や東日本大震災等を契機とした地下インフラの防災性能への関心の高まりなど、これまではあまり考慮されることの無かった要素に対する検討、技術が必要となっている。

以上のことを踏まえ、「再構築」とは狭義には既存のインフラを補修、増改築することと考えられるが、本報告ではこれを幅広く地下インフラの機能を維持、増進する手法であると考え、

・既存地下インフラの維持、活用
・新規地下インフラの構築

の２つを共に調査対象とした。

対象とする地下インフラとしては、トンネル（道路、鉄道など）、管路・共同溝（上下水道、電力、通信、ガス）、地下構造物（地下街、公共通路、地下駐車場など）を想定した。

5.1.2 調査内容

5.1.1 に示した方針に従い、地下インフラを構築するにあたって既設、新設を問わず活用できる施工技術について、現在利用されているものを中心として調査を行った。調査においては構造物の施工方法や特性に着目し、以下のカテゴリに分類した。

・拡幅
・接続
・近接
・小土被り
・大断面
・特殊断面
・急曲線
・急速施工
・その他

上記の分野ごとに技術の内容、設計・施工事例などを調査、整理した。また基本的に地下インフラが多く構築されている都市部において使用される技術を対象とした。

5.1.3 調査状況

2021年度は6月に部会を発足した後、8月を除き毎月部会活動を実施し、2022年2月までに計8回の部会を開催した。コロナ禍という社会状況を鑑み、主に文献、インターネットによる調査を行い、現地調査、ヒアリングなどの実施は控えた。今年度はまず調査対象となる地下インフラの特性とその課題について整理し、具体的な施工技術についての調査・研究を推進した。

5.2 調査研究のまとめ

5.2.1 想定される地下空間の新たな使い方

独立した地下空間を構築する場合には、従来技術を用いれば特別な問題が発生するケースは少ない。しかし連続して繋がっていないとその機能が十全に発揮できない長い地下空間が必要とされる際には、条件に応じて特殊な施工技術を要するケースが多くなる。

(1) 移動手段

地下交通としては都市部の地下鉄道が1930年頃から使われている[1)]が、路線が増えるにつれて大深度化が進んでおり、東京では深いもので地下約50mにまで至っている[2)]。また鉄道関係においては、新交通システムなどで無人運行のものも出てきている。

次に多い地下交通施設は都市部の自動車専用道路である。地下は建設費が高いこともあり、一般道は一部のアンダーパス交差などを除き地上に設けられることがほとんどである。自動車は様々なサイズが存在し、速度も制限範囲内で自由なこともあり、幅員にある程度の余裕が必要となる。しかし自動運転化が進めばその余裕代を少なくすることができ、トンネル断面縮小によるコストダウンが可能となる。またコスト面のみならず都市部での土地確保の困難さもあり、近年整備が進められている東京外環自動車道では地下部分が非常に長くなっている。

(2) 電力などエネルギー

SDGsやカーボンニュートラルの観点から、自然エネルギーの割合の増加が望まれるところであり、地下空間を利用する発電形式としては水力発電が多く用いられてきた。近年では地熱を利用した発電所もあり、2022年時点では出力11万kWの八丁原発電所が国内最大のものである。地熱は自然エネルギーの一種であり、CO_2や有害ガスを発生しない、季節や天候の変化による影響を受けにくい、枯渇の心配がない、輸入資源に依存しないなどのメリットがある。一方、コスト高、地下水くみ上げによる周辺への影響、建設時の掘削に伴う有害物質発生のおそれ、適地に温泉などの観光地が多く存在することによる景観への影響の懸念などのデメリットもある。また地熱は省エネタイプの効率的な空調設備にも用いられている。

(3) 上下水道

上下水道は、歴史的にその大半が地下埋設物である。上水道は圧力方式、下水道は自然流下方式がほとんどである。

地球温暖化の影響による異常気象で、ここ最近もゲリラ豪雨が増えており、都市部における洪水対策として2002年完成の東京都神田川・環状七号線地下調節池を始めとする地下式の調節池が造られている[3)]。このような地下調節池は通常は満水状態ではないため、この空間を利用する新たなカナート構想も提案されている[4)]。

(4) 通信

コロナ禍においてテレワークやWEB会議が増加した。ポストコロナ時代においてもある程度こうした状況を引き継ぐものと考えられ、さらなる通信容量拡大や通信速度の高速化が望まれるところである。

従来の通信ケーブルには固定電話線などがあり、電柱に沿わせていたが、景観の関係から地下空間を這わせるケースが増えており、また通信速度の関係から現在の幹線では光ケーブルが多くなっている。しかし光ケーブル専用の地下空間を構築するのはコスト的にメリットが小さく、共同溝など多目的に構築した地下空間にケーブルを敷設するケースが多い。

(5) 物流・輸送

コロナ禍においては対面接触を避けるためにネット販売の利用が多くなった。ポストコロナ時代においても物流・輸送の能力増強が望まれるところである。

物流・輸送でネックとなるのは、渋滞による時間ロスである。これに対して地下空間が占用できれば渋滞を避けることが可能となり、物流面において魅力ある空間となる。また、地上はゲリラ豪雨や地震など自然環境による影響を大きく受ける。これに対して地下は周りを囲われた防護された空間であり、予定どおりのスケジュールで物流を行うことが可能である。

(6) 人流

人流のための地下空間としては、地下街、地下通路、地下広場などが挙げられる。人流のための地下空間の最大のメリットは、雪や風雨等の気象条件による影響や自動車交通等に対する危険が少なく、ショッピングや歩行において快適に安心して利用できる空間であることである。一方、後から既設の施設と接続されることが多いため、接続部として新たに設けられる開口部の補強や止水が課題となる。また、最大のデメリットは常に照明と換気が必要であるため、電力の継続的な供給が必要不可欠なことである。

(7) その他（防災シェルター、パンデミック時隔離施設など）

地下は地上と隔離することが可能であり、戦争やテロ、災害時のシェルターとしての役割を果たすことができる。また備蓄施設を備えることより、一定期間の避難所としても利用できる。また備蓄において水を池として蓄えておくことにより、災害時の飲料水やトイレ､風呂などの生活用水として活用でき､火災時の消火にも用いることができる。

さらにパンデミック時に感染者を一時的に隔離する施設としても地下空間を用いることが可能である。地上と隔離して排気を清浄化するなどのコントロールを行うことで、完全な隔離空間を創出することができる。

5.2.2 地下インフラ再構築に利用される技術

(1) 拡幅

地下空間の拡幅施工は、既設地下構造物の側壁の一部を撤去して開口を設置し、開削工法や非開削工法を用いて構築した新たな躯体を接続することによって行われる。その拡幅範囲はポンプ室や換気ダクトのようなスポット的な事例から、地下鉄の駅など連続的で広範囲な拡幅事例まである。

また、近年は周辺の諸条件から非開削での施工が求められることが多く、山岳工法やパイプルーフ工法等の各種非開削工法を融合した技術や、シールドトンネル工法との組合せによる新しい技術が求められている。

土木学会発行の「シールドトンネルにおける切拡げ技術」では、鉄道工事、道路工事、共同溝および下水道工事におけるシールドトンネルの切拡げ事例を35事例調査し、その施工事例の工事概要、構造概要、施工概要、設計概要等について掲載している[5)]。

「東京外かく環状道路（関越～東名）」における本線シールドトンネルとランプシールドトンネルをつなぐ地中拡幅部（東名JCT部、中央JCT（南）部、中央JCT（北）部、青梅街道IC部の計4箇所）は、市街化された地域の地下部における前例のない非開削による大規模な切拡げ工事となるため、国土交通省が地中拡幅部における技術開発業務を発注した。その技術開発成果として公表された地中拡幅工法と概要および受注者の一覧を以下に示す。

表 5.2.2-1　地中拡幅技術開発業務の工法一覧（その 1）

工法名	工法概要	受注者
円周シールド連結工法	本線シールド下部や横に構築した発進基地から円周シールド機でリング状の構造物を順次構築し、それらを連結して、本線トンネルを包括した大断面トンネルを構築する。	大林組
ビッグ K アーチ工法	トンネル上部を多数の鋼製パイプを地中に挿入することでアーチ上部の地盤を支える「曲線パイプルーフ支保構造」または「注入式長尺鋼管先受け工」と、極めて強度の高い鋼製のアーチで構築する「高剛性ビッグアーチ支保構造」の二重の支保構造を設置し、トンネル部を掘削して、本設覆工構造を構築する。	鹿島建設
まがるーふ工法	4 本の導坑トンネルから曲線函体推進により、地山に鋼製の外殻を連続的に構築後、函体内部にコンクリートを充填し、本体覆工構造を構築する。	熊谷組
K パイプリング工法	導坑シールドから地中に向かって多数の曲線の鋼製パイプを推進（曲線パイプルーフ工法）させ、導坑内で接続して円環状のパイプの壁を構築して地盤の安定性を確保しながら、周辺の土を凍らせる「凍結工法」にて止水を行い、本体覆工構造を構築する。	鹿島建設
CS-SC 工法 (Circular Shell structure system with Shield tunnels by Cuttable segments)	ランプシールド側部から円周シールドで発進基地を構築し、その後発進基地から先行シールド（φ4.05m×18 本、切削セグメント＋鋼製セグメント）および先行シールドを切削しながら掘進する後行シールド（φ4.05m×18 本、鋼製セグメント）を施工し、それらを組み合わせて、大断面の外殻部を構築する。	前田建設工業

出典：国土交通省関東地方整備局 記者発表資料[6)]

表 5.2.2-1　地中拡幅技術開発業務の工法一覧（その 2）

工法名	工法概要	受注者
SR-JP工法 (Shield Roof Pre-supporting System for Junction as Permanent Structure)	構築する空間を包むように複数の小口径シールド（外殻シールド）を掘進し、この間を凍結工法等の地盤防護によって切り開いて外周の本設覆工構造を構築する。	清水建設
WJ(Wing Joint segment)セグメント＋シールドルーフ工法	ランプシールドトンネルを延伸させ、小口径シールド（シールドルーフ）を先受けとして拡幅部を掘削し、本線・ランプシールドのセグメントを拡幅セグメント（WJセグメント）と接続することで、断面の一部として利用し、大断面を構築する。	安藤・間
地下水対応型継手による覆工の外殻先行構築工法	ランプシールド側部から構築した発進基地より、継手により相互に連結された角型鋼管を推進工法にて縦断方向に施工（全28エレメント）することで地中拡幅断面を構築する。	戸田建設
円周シールドと大口径密閉型パイプルーフを組合わせた地中拡幅工法	円周シールドにより構築された発進基地から、仮設支保工として大口径パイプルーフを施工し、内部を掘削しながら、本設覆工構造であるSRC覆工を構築する。	奥村組
3C（Cut and Connect in a Circle）先行覆工地中拡幅工法	本線シールドトンネルより構築した発進基地より、小口径シールドを先行と後行の2段階に分けてラップ施工し、シールド内部を鉄筋コンクリートにより連結することで、円形の大口径先行覆工を構築する。	西松建設・日本シビックコンサルタント

出典：国土交通省関東地方整備局　記者発表資料 [6)]

(2) 接続

新たな地下構造物と既設地下構造物との接続では、既設構造物の側壁の一部を撤去する開口はスポット的となる場合が多く、拡幅施工に比較すると一般的に開口面積は小さくなる。施工方法は地下空間の拡幅施工と同様に非開削での施工が求められる場合が増えてきており、山岳工法やパイプルーフ工法等の各種非開削工法を融合した技術やシールドトンネル工法との組合せによる新しい技術が求められている。

大手ゼネコン各社では非開削の施工方法として小土被りで施工可能な矩形推進工法や矩形シールド工法を開発している。矩形シールド工法の例として、地下鉄銀座駅と商業施設「GINZA SIX」を接続する地下通路工事で採用された EX-MAC 工法を図 5.2.2-1 に示す。

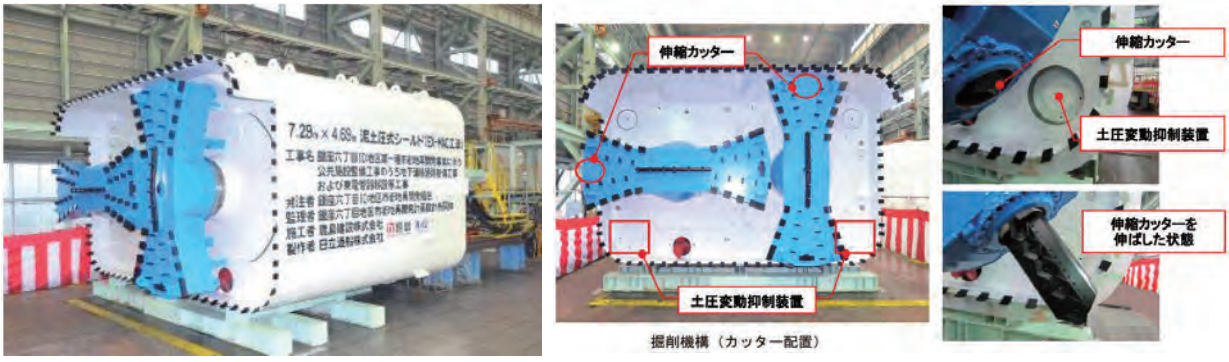

図 5.2.2-1　密閉型矩形シールド「EX-MAC 工法」

出典：鹿島建設 HP[7)]

最近では安全面やコスト面からシールド機で直接接合する工法も開発・実用化されている。例としては、シールド機に格納装備した切削ビット付きの鋼製リング（切削リング）を回転させ、既設管を直接切削・貫入し、新設トンネルをT字形に機械接合する「機械式T字接合シールド工法(T-BOSS工法)」[8)]がある。

シールド機で直接接合する工法は直角・管芯接合が基本であり、斜め方向からの接合や非管芯接合では大規模な地盤改良などを併用する必要がある。これに対し大規模な補助工法が不要な新たな工法として「分割フード式シールド接合工法」[9)]がある。

(3) 近接

1) 代表的な周辺地盤の地盤改良や耐震補強工法

近接施工時の影響軽減策としては、地盤改良や周辺地盤を補強する耐震補強工法が考えられる。周辺地盤を補強する耐震補強工法には、周辺地盤を高剛性化することで地中構造物に作用する地震時土圧を低減する工法と周辺地盤の液状化を防止する工法がある。既設構造物への影響が少ない代表的な耐震補強工法は以下のとおりである。

表 5.2.2-2　代表的な周辺地盤を補強する耐震補強工法

原　理	代表的な工法	構造物への適用性		備　考
		高剛性化	液状化	
密度増大	ｻﾝﾄﾞｺﾝﾊﾟｸｼｮﾝﾊﾟｲﾙ工法（静的）	×	△	大型機械で広い用地必要
置　換	置換工法	△	△	対象が浅い場合に適用
固　結	深層混合処理工法（機械撹拌）	△	△	大型機械で広い用地必要
	深層混合処理工法（噴射撹拌）	○	○	
	薬液注入工法	×	○	
遮　断	遮断壁工法	×	○	液状化砂の回り込みを防ぐ
地下水低下	ディープウェル工法	×	○	継続稼働が必要
排水促進	グラベルドレーン工法	×	△	大型機械で広い用地必要

出典：ENAA(2021)[10)]

2) アンダーピニング工法

既設構造物に影響を与えないために受替えを行い、地下構造物を構築する工法をアンダーピニング工法という。代表的なものに地下鉄銀座線の直下に地下歩道と駐車場を建設した「上野地下歩行者専用道及び上野広小路駐車場建設一工区土木工事」[11)]がある。

3) 3次元常時微動トモグラフィ

3次元常時微動トモグラフィとは、交通や経済活動によって生じる微弱な振動を測定し、地盤内部の伝播特性から地質構造を推定する物理探査手法である。ケーブルレス/GPS機能付きの収録器を地表に多数配置することで、3次元での地質構造把握が可能になる。実測値に基づく3次元地質モデルは、地質リスクの抽出や最適な地質調査地点の選定に活用が可能なほか、BIM/CIMに統合することでその後の施工プロセスにお

けるリスクコミュニケーションの円滑化や地域住民への説明資料としても有効なツールとなる。

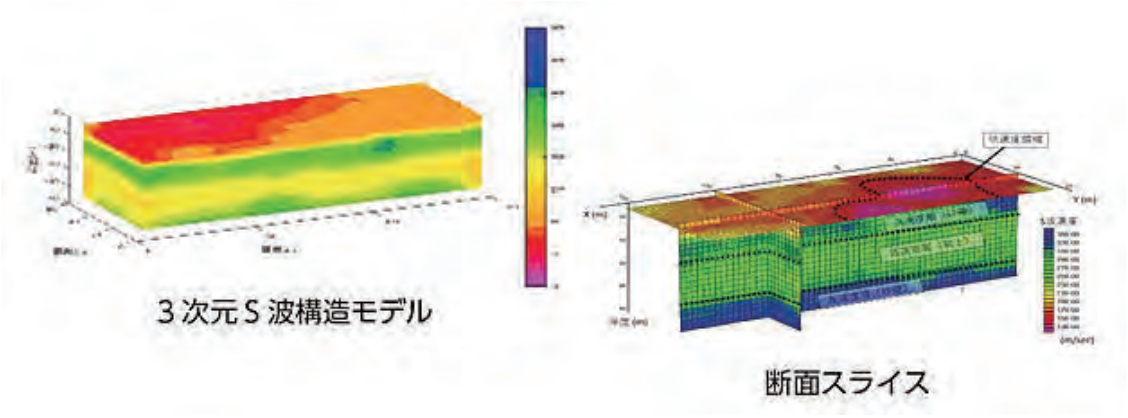

図5.2.2-2　3次元常時微動トモグラフィ　出典：応用地質HP[12)]

(4) 小土被り

ここでは小土被りの定義を1.0～1.5D（D：掘進機外径）以下とし、小土被り条件下の非開削工法による施工技術について述べる。

小土被り条件下に対する代表的な推進工法として、泥土加圧シールド工法が挙げられる。シールド工法技術協会 HP[13)]より、泥土加圧シールド工法の特長を以下に示す。

・広範囲の土質に適応性がある：砂層、砂礫層、シルト粘土層、シラス層およびこれらの互層に対しても作泥土材を用いることにより、塑性流動性と不透水性を有する泥土に変換できるので多種多様な土質に広く適用できる。
・沈下を最小限に抑えられる：切羽を泥土によって保持するため地山の変化はほとんどなく、地表面の沈下を最小限に抑えることができる。
・同時裏込注入が可能である：シールド外周および作泥土室内は泥土で止水されているため裏込注入材の切羽への回り込みがなく、確実な同時裏込注入が可能である。
・大深度・高水圧下にも適応できる：最大水圧7kgf/cm^{2}を作用させた実験により、高水圧下での掘進性能を確認しており、深度50m以上の大深度地下にも適応できる。

また泥土加圧シールド工法以外の沈下対策として、沈下の伝達を防止するために縁切りを行うアール・アンド・シー（R&C）工法[14)]がある。これは供用中の鉄道や道路の路線下に、列車や車の流れを阻害することなくボックスカルバート構造物を非開削で築造するアンダーパス技術である。矩形断面のパイプルーフ(箱形ルーフ)で軌道荷重や道路荷重を受けた後、敷設するボックスカルバートの上面を箱形ルーフの上面に一致させ、箱形ルーフを押し抜きながらボックスカルバートを推進(又は牽引)する。箱形ルーフの上面にはフリクションカット用の鋼板(FCプレート)を載置しておき、ボックスカルバート推進時には、これを地中に残置することによって地山との縁を切り、上部地盤の変状を防止する。

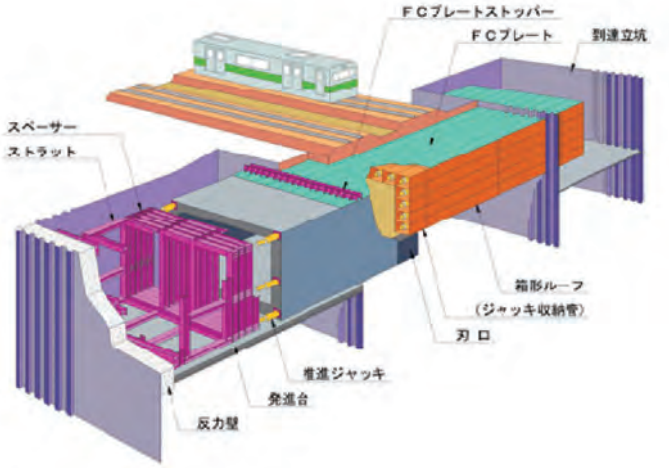

図 5.2.2-3　アール・アンド・シー工法概要図　出典：奥村組 [14]

(5) 大断面

都市域において、地下空間を構築する際には、立地や地形・地質などの制約条件から、シールド工法や推進工法などの掘進機を用いた非開削工法、ならびに開削工法を採用する場合が多い。ここでは採用事例の増加とともに著しい技術進展がみられるシールド工法や推進工法などの掘進機を用いた非開削工法に着目し、大断面の地下空間を構築する建設技術について述べる。

1) 大口径円形シールド工法

シールド工法による施工断面は、従来外径8～10m程度までであったが、昨今の掘進技術の発展とともに、地下貯留管施設や道路トンネルなどとして、次第に大型化した。図5.2.2-4から大口径円形シールドの主な施工実績をみると、1990年代の神田川地下調整池では外径13.94m、その後の東京湾横断道路では14.14m、2020年頃の東京外環道路（東京外かく環状道路）では外径16.1mのシールドマシンが用いられている。この東京外環道路シールドではカッターヘッドが外周部と内周部でそれぞれ独立して稼働する二重カッター方式が採用されている。またビットも強い衝撃がかかる両端の刃にはじん性が高いタイプ、掘削量の多い中心部には摩耗に強いタイプの超硬合金チップが使われており、長距離掘進に耐える長寿命なものとなっている。

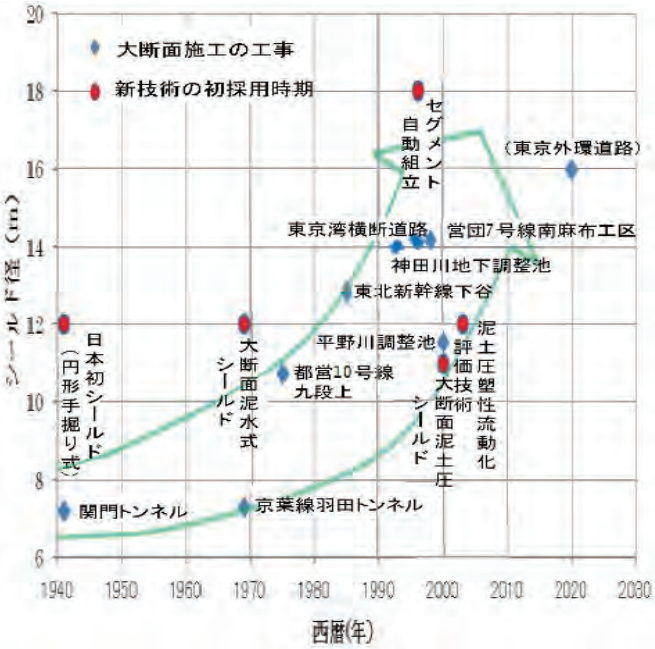

図 5.2.2-4　シールド施工の大断面化

出典：日本建設業連合会 [15]

2) 外殻先行工法

外殻先行工法は、地下空間の外殻部を推進工法やシールド工法により小口径のトンネルを並列して先行構築し、内部を後から一括して掘削することで非円形の大断面地下空間を構築するものである。具体的にはURT工法、PCR工法、URUP工法、MMST工法など数多くの工法があり[16]、既存施設のアンダーパスへの適用のみならず、地中拡幅施工（リボルバー工法[17]など）へも適用が拡大されている。例としてMMST工法の施工手順を以下に示す。

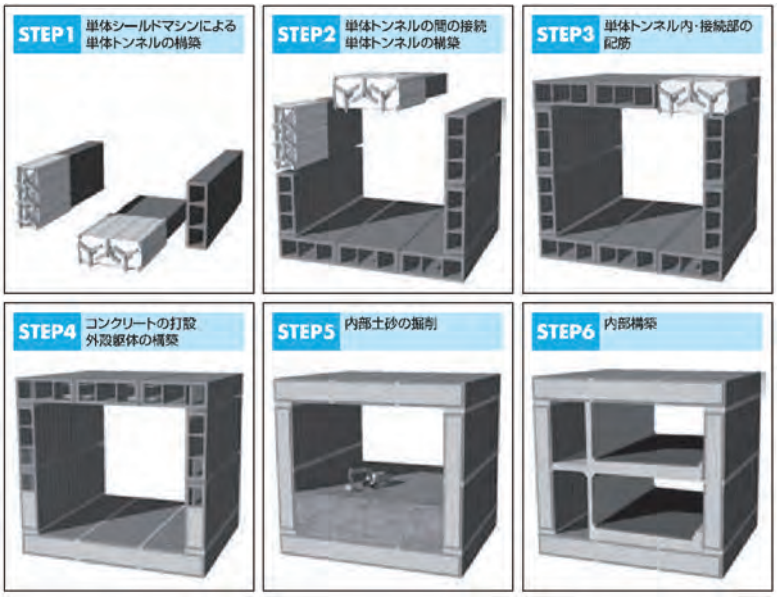

図 5.2.2-5　MMST 工法 施工手順図　出典：水野克彦 [18]

3) 断面分割工法

断面分割工法は、アンダーパスなどの大断面トンネルを小断面に等分割し、小型の矩形掘削機を用いて隣接する鋼殻同士を接触させた状態で掘削し、内部に躯体を構築することで小断面トンネルを一体化して大断面の地下空間を構築するものである。具体的な技術としてハーモニカ工法が挙げられる。

図 5.2.2-6　ハーモニカ工法 施工手順図　出典：土木学会 [19]

(6) 特殊断面

ここでは特殊断面シールドにより地下空間を構築する技術について述べる。以下に示すシールドの分類から、「複円形シールド」、「矩形シールド」による特殊断面の地下空間構築技術を取り上げる。

- 特殊断面シールド
  - 複円形シールド
    - 2連円形シールド
    - 3連円形シールド
    - 2連並列円形シールド
  - 非円形シールド
    - 矩形シールド
    - その他（楕円形シールド，馬蹄形シールド）

図 5.2.2-7　特殊断面シールド工法の分類

出典：土木学会 [20]

1) 楕円形シールド工法

複円形シールド工法は、二つ以上の円を組み合わせた形状のシールドマシンを用いて掘削する工法である。複円形シールド工法では、構築物に適した形状に近い断面のトンネルを構築できるため、合理性や経済性の面で、大断面の円形シールド工法に比べ有利である。一方で、補強のための中柱が必要であったり、円形シールド工法に比べ掘進時のローリングに対し厳しい管理が必要となる。代表的な工法として、MFシールド工法、DOT工法があり、これらは主に掘削機構の相違によって分類される。

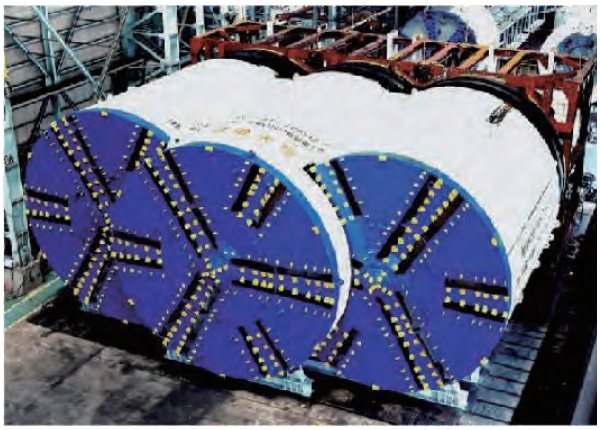

図 5.2.2-8　MF シールド工法

出典：シールド工法技術協会 [21]

図 5.2.2-9　DOT 工法

出典：シールド工法技術協会 [22]

2) 矩形シールド工法

矩形シールド工法は断面を矩形（四角形）に掘削する工法であり、施設の用途に応じた合理的な断面の地下空間が構築できる。一方、円形シールドに比べ、掘削の複雑化、ライニングに作用する曲げモーメント増大に伴うセグメントの大断面化、掘進時のローリングに対する厳しい管理の必要性など、技術的な課題は多い。主に掘削機構の相違によって、偏心多軸方式、回転軸偏心方式、複合円形方式、揺動カッター方式、オーバーカット方式、ドラムカッター方式などに分けられる。

(7) 急曲線

1) 急曲線シールド工法

急曲線施工が可能なシールド工法の主なものを以下に示す。

表5.2.2-3　急曲線施工可能な主なシールド工法

工法名	工法概要	協会名
コンパクトシールド工法	4分割3ヒンジ構造の溝付き二次覆工一体型セグメント、後方設備を内包した3分割シールド、ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システムからなる。	コンパクトシールド工法研究会
ミニシールド工法	小口径を対象に開発された工法である。種類として、泥土圧式ミニシールド、TBM式ミニシールド、ロードヘッダー式ミニシールド、手掘り式ミニシールドなどがある。 1500m以上の長距離施工、曲線半径10mの急曲線施工、ボルトレス三等分割セグメント、二次覆工不要などが特長である。	ミニシールド工法研究会
ECO SPEED SHIELD工法	工法として、推進・シールド併用タイプ（特殊推進工法）、推進タイプ（巨礫破砕型・既設構造物到達型）、シールドタイプ（小口径シールド工法）がある。 このうちシールドタイプでは、1000m以上の長距離施工、曲線半径10mの急曲線施工に対応可能である。	ECO SPEED SHIELD工法協会
デュアルシールド工法	推進工法とシールド工法のそれぞれの利点を取り入れたものであり、緩やかな曲線・直線区間を推進で、急曲線や連続した曲線区間をシールドで施工する。 曲線半径10mの急曲線施工が可能、推進工法サイズのコンパクトな立坑で施工可能、泥濃式工法を採用することで同一掘進機で多様な土質に対応可能などの特長がある。	デュアルシールド工法協会
Wagging Cutter Shield工法	カッターヘッドを一定の角度内で往復運動（揺動）させながら掘進するシールド工法で、円形はもちろんのこと、伸縮自在のオーバーカッターを併用して、様々な形状のシールドトンネルの施工が可能である。 R=8mの急曲線での施工実績（マシン外径φ5.24m、土圧式シールド）がある。	シールド工法技術協会

2) 急曲線における管更生工法

急曲線施工が可能な管更生工法の主なものを以下に示す。

表5.2.2-4　急曲線施工が可能な主な管更生工法

工法名	工法概要	協会名
SPR工法	既設管の内側に硬質塩化ビニル製プロファイルの更生管を製管し、既設管と更生管の間隙に特殊裏込め材を充填する。古くなった管渠を既設管・更生管・裏込め材が一体となった強固な複合管として蘇らせる。	日本SPR工法協会
パルテム・フローリング工法	既設の管渠内で組み立てた鋼製リングに高密度ポリエチレン製のかん合部材と表面部材を組み付け、既設管と表面部材との間に充填材を注入することで、既設管を更生する製管工法である。 更生管は既設管と更生材が一体になった複合管となる。	パルテム技術協会

(8) 急速施工

急速施工技術の開発は、山岳、シールド、開削トンネル、立坑などの地下空間構築、交差点立体化や鉄道の連続立体交差、高速道路等の床版架替え、舗装、盛土、プレキャスト部材を用いた構築、既存構造物の補修・補強、解体など他分野にわたる。

ここでは、これらの急速施工技術の中で、都市部での地下空間構築、再生に関連するアンダーパス、シールドトンネル、開削トンネル、立坑の4つの分野の急速施工技術について述べる。

1) アンダーパス

アンダーパス工法には、箱形ルーフ（防護材）と本体構造物のボックスカルバートを置き換えるタイプやPC鋼線を連結した函体をジャッキにて牽引するタイプ、トンネル外殻部を小断面の函体で先行して構築するタイプなど多くの工法があるが、ここでは、立坑の省略、掘進機や施工法の工夫などにより、大幅な工期短縮が期待できる3つの工法（URUP工法、R-SWING工法、トロンボーン工法）を**表5.2.2-5**に示す。

表5.2.2-5　アンダーパス急速施工技術

工法名	工法概要	会社名
URUP工法 (Ultra Rapid Under Pass)	立坑を構築することなくシールド機を地上から発進し、そのまま掘進して再び地上に到達させることで、交差部のアンダーパスや地上からのアプローチトンネルを非開削で構築できる工法である。開削工法やトンネル両端に立坑が必要な従来の工法と比較して、大幅に後期を短縮できるとともに、騒音・振動の低減、建設発生土・排出ガスの抑制など環境にも優しい工法である。	大林組
R-SWING工法	非開削矩形アンダーパス工事に特化した掘削機を使用し、掘削機上部に可動式の屋根（ルーフ）を持つユニークな機構で、そのルーフが地山を先行掘削することにより、地盤沈下の防止や不測の埋設物などの先進探査を行いながら掘削する。掘削機は幅2.3mの基本ユニットを組合せたマシンで構成され、組立・解体時間の短縮が可能なほか、地上発進・到達技術との組合せにより工期短縮が可能である。	鹿島建設
トロンボーン工法	U型の堀割部と土被りの小さいトンネルはアプローチ区間用シールドで施工し、交差点区間はトンネル区間用シールドに改造して1台のシールドマシンで一体化施工する。トンネル断面は上下2段、幅方向に3または5列に分割施工することで作業帯幅を小さくし、かつ開削施工部分は両脇のトンネル函体を山留代わりとして杭打ち作業を省略して後期を短縮する。	石川島播磨重工業

2) シールドトンネル

ここでは、シールド掘削とセグメント組立を同時に行う掘進組立同時施工シールドおよびセグメント自動組立、資材搬送設備、内部構築に関する急速施工についての代表的な技術を示す。

①掘削組立同時施工シールド

シールドの掘進とセグメントの組立を同時に行うことで、掘進・組立のサイクルが短縮され、日施工量が増大して工期短縮が可能になる。掘進組立同時施工シールドはロングジャッキ方式とダブルジャッキ方式に大別される。

表5.2.2-6　掘進組立同時施工シールド技術

工法名	工法概要	会社名
ラチス式同時施工シールド工法	シールド機の前胴と後胴を掘進・方向制御・トルク伝達の機能を持つラチスジャッキで連結し、カッターヘッドの位置・姿勢を任意に制御する。前胴と後胴のスライド機構により、セグメント組立時に前胴のみ前進でき、さらに前後揺動可能なエレクタヘッドによりセグメント組立作業の高速化を図り、サイクルタイムを短縮する。	鴻池組
ハニカムセグメントを用いた同時施工法	六角形のハニカムセグメントの特長を生かして掘進とセグメント組立を同時に行う工法である。掘進に伴うエレクタと既設セグメントの相対位置の変化に対応する掘進同調機構がエレクタに内蔵されている。また自動ボルト締結装置により継手ボルトを自動締結する。	奥村組
F-NAVIシールド工法	シールド本体部と前胴部をつなぐテンションジャッキと姿勢制御（前胴部の首振り）を行う球面アーティキュレートジャッキ、そして同時組立が可能な追従エレクタとロングストロークジャッキから構成される。前胴部は従来のシールドジャッキのパターン選択に関係なく方向制御可能なため、掘削とセグメント組立を同時に行うことが可能である。	清水建設
ASC-OMによる同時掘進システム	設定した力点に対して、ジャッキごとの圧力を自動で調整し、最適なジャッキ圧分布に制御するシステム(ASC-OM)により、掘削面にかかる圧力を調整し、正確な掘進方向を確保することで、掘進とセグメントの同時施工を可能とする。	大林組
ダブルジャッキ式同時掘進工法	掘進専用とセグメント組立専用の２種類のジャッキを装備し、シールド機本体の内部に装備した内胴を前後にスライドさせることで、掘進とセグメント組立を同時に行う。掘進ジャッキとセグメント組立ジャッキを同一円周上に交互に装備し、内胴を反力に掘進を行いながら、内胴の後方でセグメント組立を行う。	鹿島建設

②セグメント自動組立

セグメント自動組立は、高速、高精度、効率的な組立を目的に開発された技術である。セグメント供給装置、位置決め機構、高速組立機構などから構成され、全自動組立の他、一部手動も組み合わせた半自動組立がある。高速施工に伴うヒューマンエラーを防止し、セグメント組立の品質向上も期待できる。

表5.2.2-7　セグメント自動組立技術

工法名	工法概要	会社名
セグメント自動組立システム	セグメント搬送・供給・把持・位置決め・締結の一連の作業を自動化したシステムで、多様なセグメント継手形式（短ボルト、長ボルト、コッターなど）に対応可能である。組立品質、安全性が向上し、大口径シールドでは特に高速化が可能となる。	地中空間開発
セグメント自動組立および半自動組立システム	セグメントの搬送から把持、位置決め、継手結合までの一連の作業を自動で安全に精度良く施工するシステムである。また半自動組立システムは、セグメントの粗位置決めまでを自動化したもので、精位置決めと締結は手動で行う。	JIMテクノロジー

③資材搬送設備の自動化

掘進、組立サイクルの高速化を実現するためにはセグメントをはじめとする資機材の供給サイクルを高める必要がある。ここでは立坑上から立坑下および坑内のセグメント搬送に関する技術を**表** 5.2.2-8 に示す。

表5.2.2-8　セグメント自動搬送技術

工法名	工法概要	会社名
セグメント自動搬送システム	立坑上からの荷下ろし、坑内および切羽搬送までの自動搬送システムで、セグメントドーリー、セグメントリフト、セグメントセッター、バッテリーロコ、セグメント供給装置から構成される。	鹿島建設
セグメント立坑自動搬送システム	地上のセグメントヤードからセグメントを受取り、立坑下で待機する台車に積込むまでの作業を自動化したシステムである。	フジタ

④内部構築の同時施工

トンネル坑内での構築が必要なインバート・中壁・床版をプレキャスト化することで、躯体構築作業の省力化が図れる。また、これらの部材を床版の上下で分離搬送することで、シールド掘進と内部構築の同時施工が可能となり、トンネル工事全体の工期を大幅に短縮できる。

3) 開削トンネル

従来の開削工法では仮設土留めを施工後、土留め支保工を設置しながら掘削し、床付後躯体を構築することになる。これに対し、土留めの本体利用による省力化や土留め支保工の省略、躯体構築の効率化を行うことで工期短縮が可能となる。

表5.2.2-9　開削工法急速施工技術

工法名	工法概要	会社名
さくさくSLIT工法	プレキャスト部材を用いた逆巻き工法を基本とし、仮設土留め機能を兼ねる側壁部材を構築後にプレキャスト頂板を架設し、早期に地上部を完成させた後、内部を掘削・構築する急速構築技術である。仮設土留め工の省略などによる工期短縮、頂板部材の先行構築により、地上部を早期開放する。	戸田建設
斜め土留め工法	土留め壁を背面側に傾斜させることで、地下を掘削する際に作用する土圧を低減させ支保工を省略するとともに、掘削内部をオープンな空間とすることで、支保工架設・撤去の工程が短縮され、躯体構築の施工性も向上することから工程が短縮される。	大林組
スーパーリング工法	大型リングセグメントを地上で組立て、土留め掘削した空間に吊り下ろして所定の位置までスライドさせた後、複数のセグメントのリング間をプレストレスによって一体化させる工法である。リング構造により軽量化が図られ、コンクリート打設などの作業も不要となることから、施工性が向上し工程が短縮される。	鹿島建設

4) 立坑

立坑の急速施工に関する技術を**表 5.2.2-10** に示す。

表5.2.2-10　立坑急速施工技術

工法名	工法概要	会社名
アーバン・メカ・シャフト工法	鋼製のリング躯体を地上で組立ながら順次地中に圧入するアーバンリング工法をベースとし、そのリング圧入システムとバケット揚土システムに新規開発した水中駆動掘削システムを組合せた工法である。回転式カッタを使用するため掘削速度が速く、さらに鋼製リング組立と掘削を同時に行うため急速施工が可能である。	清水建設
ハイパーシャフト工法	大口径深礎の機械化工法として実績のある「スーパーRD工法」をベースに、径2～3mが標準であるケーシング回転掘削機の先端に拡径装置を取付け、ケーシングを動力軸としてその3倍程度の径の全断面機械掘削を行う工法である。ケーシング回転掘削機のトルクが大きいため掘削能力が高く、急速施工が図れる。	鹿島建設

(9) その他

1) 大深度施工

大深度立坑の構築には地中連続壁工法とニューマチックケーソン工法が主に採用されている。このうち地中連続壁工法は水平多軸回転カッターを用いて鉄筋コンクリートで坑壁を構築するもので、地質等の条件によっては深度150m程度まで施工が可能[23]とされている。一方、ニューマチックケーソン工法は作業空間内の気圧を高めて地下水を排除して掘削する方法であるが、点検時やトラブル時に作業員の作業空間内への入坑が必要であることから、最大作業気圧は従来0.4MPa程度とされていた。しかし無人化施工とヘリウム混合ガス呼吸システムを組み合わせることで0.7Mpa（地下水面下70m）までの施工が可能[24]となっている。

シールド工法の深度限界については明確な基準は無いが、東京湾アクアラインでは海面下60m[25]、また東京ガス扇島工場LNG受入配管用海底トンネル工事では海面下70m[26]の実績も報告されている。大深度施工においては、カッター面の圧力保持・調整、セグメントの止水シールなどが課題になると考えられる。

2) 無人施工、自動施工

シールドトンネルでは、カッター面に作用する土圧・水圧の管理をはじめ、掘進管理、セグメント組立などの様々な管理項目があるが、これまでも運転室での遠隔操作化が進められてきた。さらに、AI 技術が一般化し始めたことにより、これを運転制御等に取り入れる動きが加速しており、ゼネコン各社ともにシールド工事の完全自動化を見据えて、技術開発を進めている。

山岳トンネルでは、切羽近傍での事故が多いこともあり、切羽作業を中心に無人施工技術の開発が進められている。このうち、コンピュータジャンボを用いた削孔、鋼製支保工の建込、吹付コンクリートなどの個々の工種は、既に自動施工の取組みがかなり進んでいる。さらに、ずり出しではベルトコンベアを利用したホイールローダの自動運転システムの開発を含め、一連の自動施工技術の開発が進められている。

3) 新素材

世界的な課題であるカーボンニュートラル達成のため、建設業では製造時に大量のCO_2を排出するセメントの削減がクローズアップされている。そこで高炉スラグなどを混入したECMセメント(高炉スラグ60～70%混入、CO_2削減60%以上)やサスティンクリート(高炉スラグ＋シリカフューム73%、CO_2削減率70%)、ジオポリマー(フライアッシュ＋高炉スラグ100%)などの製品の開発が進められている。

さらにコンクリートが固まる過程でCO_2を吸い込み貯留することで、コンクリートのCO_2排出量を実質ゼロとする技術の開発も進められている。CO_2-SUICOM(シーオーツースイコム)ではセメントの半分以上を特殊な混和剤(γ-C_2S)や産業副産物に置き換えること、および火力発電所の排気ガスに含まれるCO_2をコンクリートに固定することにより、CO_2排出量をネットでゼロ以下とする。試算ではコンクリート1m^{3}当たりのCO_2排出量は普通セメントの288kg/m^{3}に対し、CO_2-SUICOMではマイナス18kg/m^{3}となり、コンクリートを施工することによりCO_2が削減できる結果となっている。

5.3　今後の課題

本年度の報告では地下インフラの再構築技術について、近年の施工、研究事例から主要なものを取りまとめた。次年度は他部会の報告内容を踏まえて、地下インフラ構築に必要となる技術を洗い出し内容の充実を図るとともに、今後必要とされる技術についても考察を行う。

また純粋な施工技術のみならず、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」など地下インフラの再構築において関連する法規や探査技術などについても、調査研究の対象とする。

【参考文献】

1) 東京メトロ HP：企業情報>会社情報>沿革　(参照 2022.1)
https://www.tokyometro.jp/corporate/profile/history/index.html

2) 国土交通省パンフレット：新たな都市づくり空間 大深度地下、p.3 (参照 2022.1)
https://www.mlit.go.jp/crd/daisindo/panhu_1.pdf

3) 東京都 HP：東京都の調節池・分水路　整備済の調節池一覧（参照 2022.1)
https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/river/chusho_seibi/ike.html

4) 吉川猛ほか：国土強靱化に資する地下空間利用に関する調査（その 2)、
第 71 回土木学会年次学術講演会 CS4-002、pp.3-4、2016

5) (公社)土木学会：シールドトンネルにおける切拡げ技術、丸善出版、2015

6) 国土交通省関東地方整備局：記者発表 『東京外環トンネル地中拡幅部における技術開発業務』、2015 年 12 月 22 日（参照 2021.12）
https://www.ktr.mlit.go.jp/gaikan/pdf/press_pdf/2015/h27_1222_press.pdf

7) 鹿島建設(株)HP：プレスリリース、矩形シールド「EX-MAC」で歩行者専用の地下連絡通路を構築（参照 2021.12）
https://www.kajima.co.jp/news/press/201712/21c1-j.htm

8) 東京都下水道サービス(株)HP：技術開発事業 機械式T字接合シールド工法（T-BOSS 工法）（参照2021.12）
https://www.tgs-sw.co.jp/business/technical/c01/c07/

9) (株)奥村組 HP：奥村組の技術、分割フード式シールド接合方法（参照 2021.12）
https://www.okumuragumi.co.jp/technology/engineering/pdf/s06.pdf

10)(一財)エンジニアリング協会：(2020M-035)2020 年度 都市域地下空間の立体的利用に関する調査研究 報告書(2021 年 3 月)

11)鹿島建設(株)HP：column 都市部の地下構造物建設で活躍する…アンダーピニング工法(参照 2021.12)
https://www.kajima.co.jp/news/digest/may_2007/tokushu/toku04.html

12)応用地質(株)HP：建設事業における地質リスクを可視化～3 次元常時微動 トモグラフィ～(参照 2021.12)
https://www.oyo.co.jp/services/infrastructure-maintenance/3d-tremor-tomography/

13)シールド工法技術協会 HP：工法概要 泥土加圧シールド工法(参照 2021.12)
http://shield-method.gr.jp/construction-method/cm_ol_dk/
14)(株)奥村組パンフレット：アール・アンド・シー（R&C）工法～鉄道・道路の立体交差工法～(2014) (参照 2021 12)
https://www.okumuragumi.co.jp/technology/engineering/pdf/s12.pdf
15)(一社)日本建設業連合会:建設イノベーション～建設現場における省力化・省人化～、2015.4 （参照 2021.12）
https://www.nikkenren.com/sougou/10thaniv/pdf/06-05-01.pdf
16)(公社)土木学会：特殊トンネル工法、pp.Ⅱ-53～Ⅱ-62、丸善出版、2019
17)(一財)国土技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法） リボルバー工法［概要書］、2015
18)水野克彦：首都高速川崎縦貫線のMMST工法、DOBOKU技士会東京 第46号、pp.8-17、東京土木施工管理技士会、2010
19)山田亮ほか：ハーモニカ工法マルチタイプの施工実績、土木学会第 71 回年次学術講演会、Ⅵ-363, pp.725-726、2016
20)(公社)土木学会：トンネル標準示方書［シールド工法編］・同解説、2016
21)シールド工法技術協会：MF シールド工法 詳細パンフレット（参照 2021.11）
http://shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/doc_dt_mf.pdf
22)シールド工法技術協会：DOT 工法 詳細パンフレット（参照 2021.11）
http://shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/doc_dt_dot.pdf
23)(公社)土木学会:第 11 回新しい材料・工法・機械講習会テキスト、2011(参照 2021.12)
https://committees.jsce.or.jp/sekou05/system/files/11-4%20 土留め工法.pdf
24)日本圧気技術協会 HP（参照 2021.12）
http://www.pneumatic.gr.jp/pneumaticmethod/pneumaticmethod01/
25)千葉県 HP（参照 2021.12）
https://www.pref.chiba.lg.jp/doukei/aqualine/aqualinegaiyou/
26)鹿島建設(株)HP（参照 2021.12）
https://www.kajima.co.jp/news/digest/may_1995/kajima_today/saidai.html

６．講演会の実施

今年度の地下利用推進部会の活動では、現地における調査やヒアリングを予定していたものの、新型コロナウイルス感染予防の観点から、その実施は多くが困難であった。

その中で、識者の講演は、感染対策とオンライン参加を併用することで、3 件が実現できた。以下、講演会の実施を報告する。

講演に際しては、当協会地下センターの研究企画ＷＧの意見も参考にしながら、今年度の活動内容に新たな視点と最新の情報を提供し、さらに来年度以降の活動に向けての方向を定められる内容となるよう、講師の方との打合せを十分に行い、準備を進めた。

6.1　CCS / CCUS に関する研究開発の動向と今後の展開に関する講演会

6.1.1 講演趣旨

カーボンニュートラル等の政府目標に関して、CCS/CCUS は地下利用の観点から社会的、国家的ニーズに応えられると考えられる。CCS/CCUS に関する最新の研究開発の動向と今後の展開について、苫小牧 CCS 実証試験をはじめ、この分野で先駆的な調査研究を進めている ENAA プロジェクトの担当者に講演をお願いした。

6.1.2 講演内容

(1) 日時

2021 年 10 月 27 日(水)　10:00～11:30

(2) 場所

（一財）エンジニアリング協会 A、B 会議室およびオンライン（併用）

(3) 講師

（一財）エンジニアリング協会 技術部 研究主幹　乾 悦郎

(4) 聴講

研究企画 WG、地下利用推進部会、放射性廃棄物研究会より 32 名参加

(5) 概要

2020 年 10 月末に「2050 年カーボンニュートラル宣言」が出され、政府目標に対して、地下利用の観点から CCS / CCUS が社会的、国家的ニーズに応えられると注目されている。

CCS は、発電所や化学工場などから排出された CO_2 を、ほかの気体から分離して集め、地中深くに貯留・圧入するものである。一方、CCUS は、分離・貯留した CO_2 を利用するもので、米国等では CO_2 を古い油田に注入し、油田に残った原油を圧力で押し出しつつ、CO_2 を地中に貯留するビジネスが進められている。

当協会では、2000 年度より CCS の研究開発を手掛けており、2003 年からは新潟県の南長岡ガス田で実証試験を行うなど、長期にわたり先駆的な事業に参加している。さらに、本年 6 月には、NEDO 公募事業「CCUS 研究開発・実証関連事業／苫小牧における CCUS 大規模実証試験／CO_2 輸送に関する実証試験」に日本 CCS 調査(株)、伊藤忠商事(株)、日本製鉄(株)と共に採択され、CCS の実用化、事業化に向けて、一歩を踏み出したところである。

エンジニアリング協会技術部 乾研究主幹は、CCS に関する分離・回収、輸送、圧入・貯留技術から、市場性、歴史的背景にまで及ぶ幅広い見識と豊富な経験があり、CCS に関する今後の見通しも含め、**図 6.1.2-1** に示す世界の CO_2 排出削減貢献量など多くの最新情報を提供していただいた。

講演は、CCS についての概要と技術の説明から始まり、世界の温室効果ガスと国内外の CCS の動向、苫小牧における CCS 大規模実証試験、CO_2 船舶輸送技術の研究開発および実証試験事業といった具体的なプロジェクトの内容についても触れた。

その後の質疑では、CO_2 の単位重量当たりのコストや事業性、貯留設備大規模化の問題点、国内の適地選択の条件（地層の特性、CO_2 排出源からの輸送距離）等、具体的な質問や意見交換があり、今後は実用化を視野に入れた動きが、産業界でも活発になるのではないかとの期待感があった。

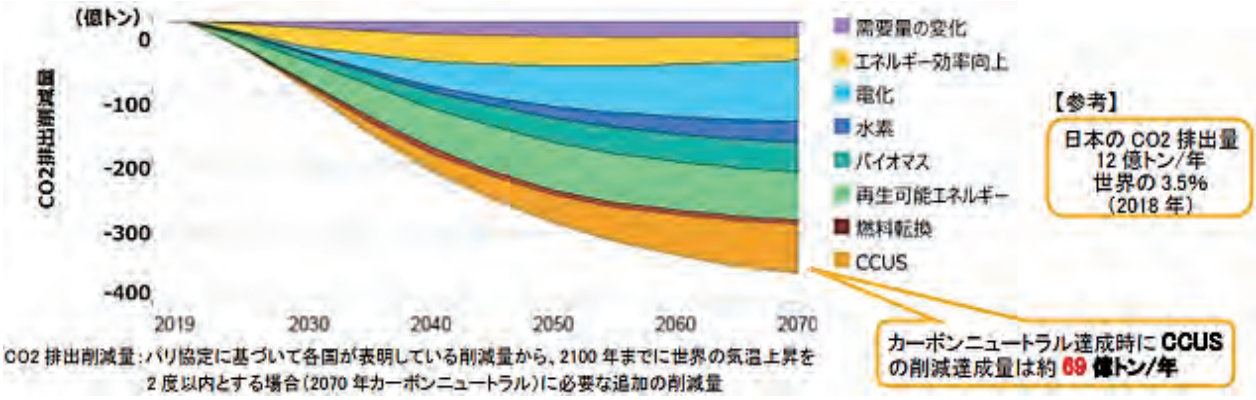

図 6.1.2-1　世界のエネルギー起源 CO_2 排出削減貢献量

出典：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 2021.1.27

6.2　総合物流施策大綱とその周辺およびドローン物流に関する講演会

6.2.1 講演趣旨

我が国の物流をめぐる環境には、人口減少・少子高齢化に伴う労働力不足の深刻化、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴う社会・経済環境の変化、AI・IoT 等の最新技術の進化等、様々な変化が生じている。新しい法整備や、国の方針、最新の実証実験の動向と今後の展開について、先駆的な調査研究を行っている東京海洋大学の兵藤哲朗教授に講演をお願いした。

6.2.2 講演内容

(1) 日時

2021 年 12 月 7 日(木)　10:00～11:40

(2) 場所

（一財）エンジニアリング協会 D、E 会議室およびオンライン（併用）

(3) 講師

（国立大学法人）東京海洋大学　流通情報工学科　兵藤 哲朗　教授

(4) 聴講

研究企画 WG、地下利用推進部会より 30 名参加

(5) 概要

物流においても、コロナ禍における宅配需要の増加、人口減少・少子高齢化に伴う労働力不足の深刻化、AI・IoT や自動運転等の新技術の導入の進展などの変化が生じてきている。これらの物流業界における環境変化に対して、地下利用の観点から調査研究を進めることが、社会的、国家的ニーズに応えられると考えられる。

そこで、物流に関する、最近の動向、政府の方針、最新の実証実験の動向と今後の展開についての知見を深めるため、総合物流施策大綱に関する検討会の委員を務められている東京海洋大学の兵藤教授に、総合物流施策大綱が目指す将来像とドローン物流について講演いただいた。

講演前半は、総合物流施策大綱と物流を取り巻く環境変化の現状について触れ、政府が目指す 3 つの方向性（簡素で滑らかな物流、担い手にやさしい物流、強くてしなやかな物流）と、これを実現するためのそれぞれの方策についてのお話を伺った。

また講演後半はドローン物流に関して、2018 年度に 5 ヶ所で実施したドローン物流実験について紹介いただいた。ドローン物流は中山間地、過疎集落や離島などへの物資の配送に非常に有効である。一方、ドローン物流の課題としては採算性が挙げられ、高付加価値の商品を配送すること、復路便を活用することで、課題を解決することが期待されている。

最後に、当協会地下利用推進部会第 3 部会長の(株)竹中工務店 稲葉 薫 氏から、「物流を対象としたカナート構想について」の話題を提供いただいた。地下利用推進部会で提案しているカナート構想は、雨水貯留施設等の地下空間ネットワークと地上河川により広域的・立体的な水路ネットワーク「水の回廊」を形成し、平常時に物流ルートにする構想である。兵藤教授より「水の回廊」は震災時の物流ルートとしての活用等に期待できるとの意見を頂いた。

図 6.2.2-1　意見交換の様子

6.3　地上および地下施設を対象にした３次元モデルの構築とその活用事例に関する講演会

6.3.1 講演趣旨

都市域の地下空間では、地下鉄、地下街、地下道、地下埋設物、共同溝などが縦横に入り組んで建設、設置されており、位置情報を含む構造物のデータは、ほとんど公開されていない。そのため地方自治体や地下街の管理会社などは、地下埋設物や構造物の設計、施工を実施する際に、現地調査を行わざるを得ない状況である。

こうした現状の改善が期待できる、地下施設を対象とした 3 次元モデル構築の実績を豊富に有している(株)日建設計シビルの大森高樹様に、最新の取り組み状況と活用事例についてご講演をお願いした。

6.3.2 講演内容

(1) 日時

2022 年 1 月 26 日(水)　15:30～17:30

(2) 場所

（一財）エンジニアリング協会 A 会議室およびオンライン（併用）

(3) 講師

株式会社 日建設計シビル　CM・防災部 参与　大森 高樹 氏

(4) 聴講

研究企画 WG、地下利用推進部会より 20 名参加

(5) 概要

国土交通省では、まちづくりの DX（デジタル・トランスフォーメーション）を推進するために 2020 年度より「Project PLATEAU(プラトー)」に着手し、現実の都市を仮想的空間に再現する３次元都市モデルの整備・活用・オープンデータ化を進めている。

一方、都市域の地下は、容易に可視化できない空間となっており、地下鉄、地下街、地下埋設物、共同溝などが縦横に入り組んだ複雑なネットワークが形成されていて、位置情報を含む地下施設や地下埋設物のデータは、ほとんど公開されていない。そのため地方自治体や地下街の管理会社などは、地下構造物の設計、施工、維持管理に際して、現地調査を行わざるを得ない状況である。

こうした都市域の地下における課題を解決するための第一歩として、当協会では、2019～2020 年度の 2 年間、JKA 補助事業として「3 次元データプラットホームによる地下構造物維持管理の調査研究」を実施した。この調査研究に委員として参加され、地下街や地下鉄駅などを対象とした 3 次元モデル構築の経験と実績を有している(株)日建設計シビルの大森高樹様より、最新の取り組み

図 6.3.2-1　講演会の様子

状況と活用事例についてお話を伺い、意見交換を行った。

実物とのミリ単位の整合性が求められる施設の 3 次元モデルの構築には、3 次元計測の技術、ノウハウが欠かせない。同社は、2016 年に東京メトロ銀座駅改修設計業務で本格的に 3 次元計測を実施し、既存図との整合性のある駅施設全体の 3 次元モデルを構築した。さらにこの時の課題解決の蓄積を礎に、地上の道路やビル群もまとめて点群データとして取得し、福岡市天神地下街や博多駅、名古屋駅や名古屋栄駅に直結している地下街など名だたる地上・地下一体施設の改修計画・設計に 3 次元モデルを適用し活用する実績を拡大してきた。**図 6.3-2-2** に地上・地下の 3 次元点群データの例を示す。

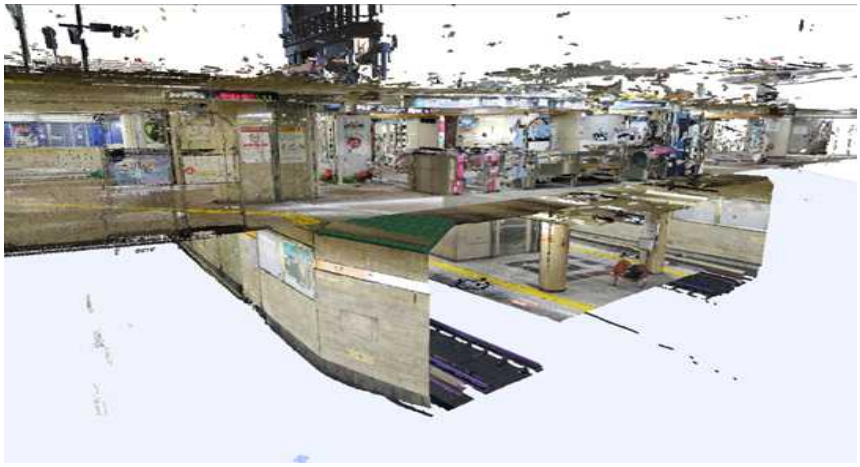

図 6.3.2-2　地上・地下の点群データの 3 次元点群データ

現在、移動式計測機（SLAM）や、3 次元計測機能を搭載した新型スマートフォンの登場により、計測や検査の効率化、生産性は飛躍的に向上している。また、我々が利用する空間のなかで 3 次元データを利用した自動走行車も多くなってくる。今後は、道路交通法改正により、3 次元データを取り込んだロボット単独での歩道走行が可能になるなど諸規制も緩和される。

我々が利用している空間の中で、多様な技術を駆使して人間とロボットが協働する、共創する場面を想像すれば、解決しないといけない様々なテーマが出てくる。例えば、既存道路空間での移動位置や止まる位置、地下施設（通路や広場、エレベータ）における移動、配送、広告宣伝、警備、災害時でも利用できる非常用電源としての利用などその活用の可能性はますます広がると考えられる。異業種の集まるエンジニアリング協会でこうした先端技術の活用・社会実装テーマに取り組むことには大きな意義があるとのことで、意見交換は締め括られた。

以　上

書名　2021 年度（2021M-032）
ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の
調査研究報告書（概要版）

発行　2022 年（令和 4 年）3 月
一般財団法人　エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター
〒106-0041
東京都港区麻布台 1-11-9（BPR プレイス神谷町 9 階）
TEL 03-6441-2910（代表）
FAX 03-6441-2942

印刷　服部プロセス株式会社