

水陸両用重運搬ロボットの実装仕様検討

研究開発委員会 開発成果活用WG

令和5年2月13日

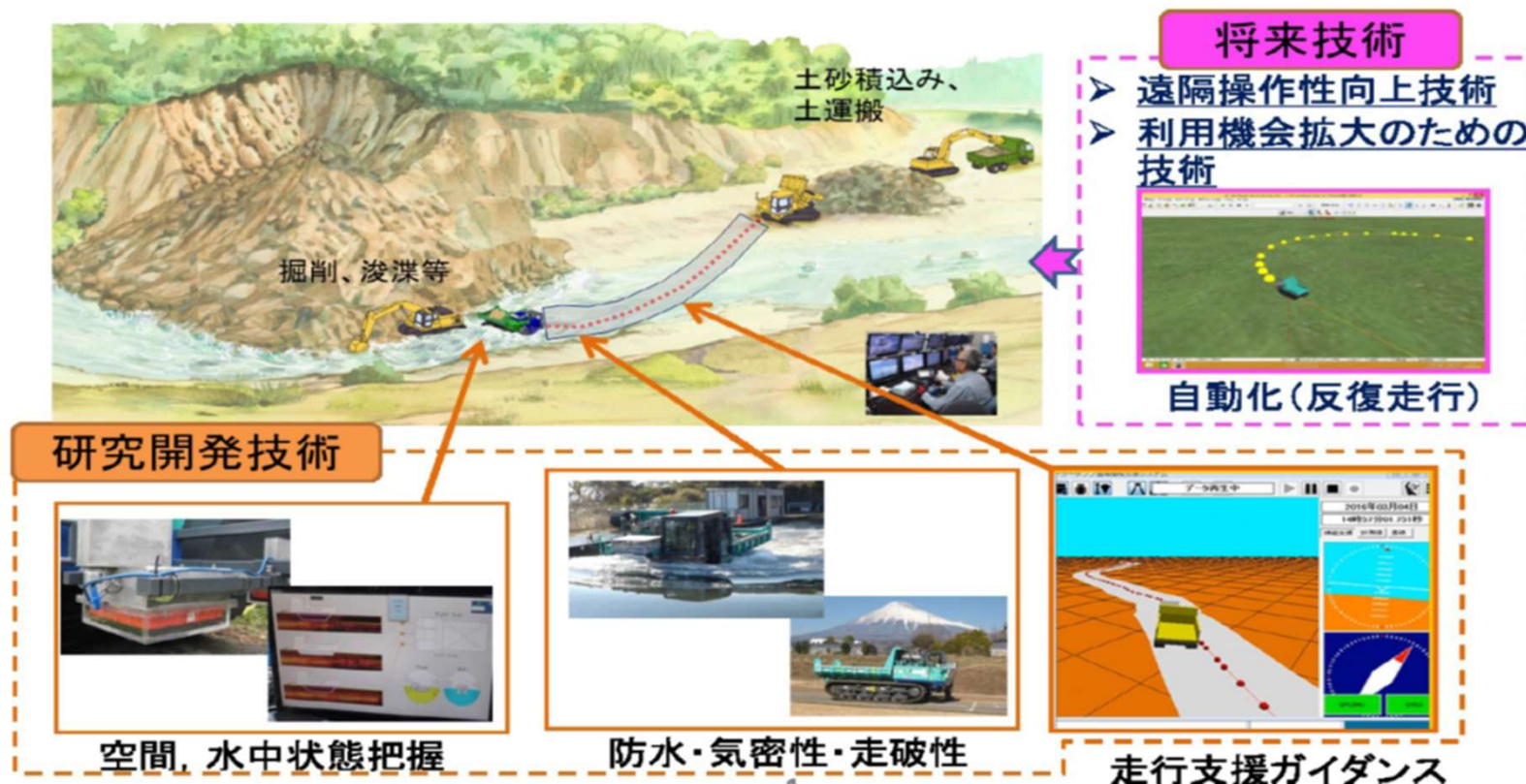
発表の内容

1. 遠隔操作型重運搬ロボットの開発経緯
2. 開発した遠隔操作型重運搬ロボットの仕様
3. 運用場面検討のための条件整理
4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理
5. 現場での実装仕様
6. まとめ

1. 遠隔操作型重運搬ロボットの開発経緯

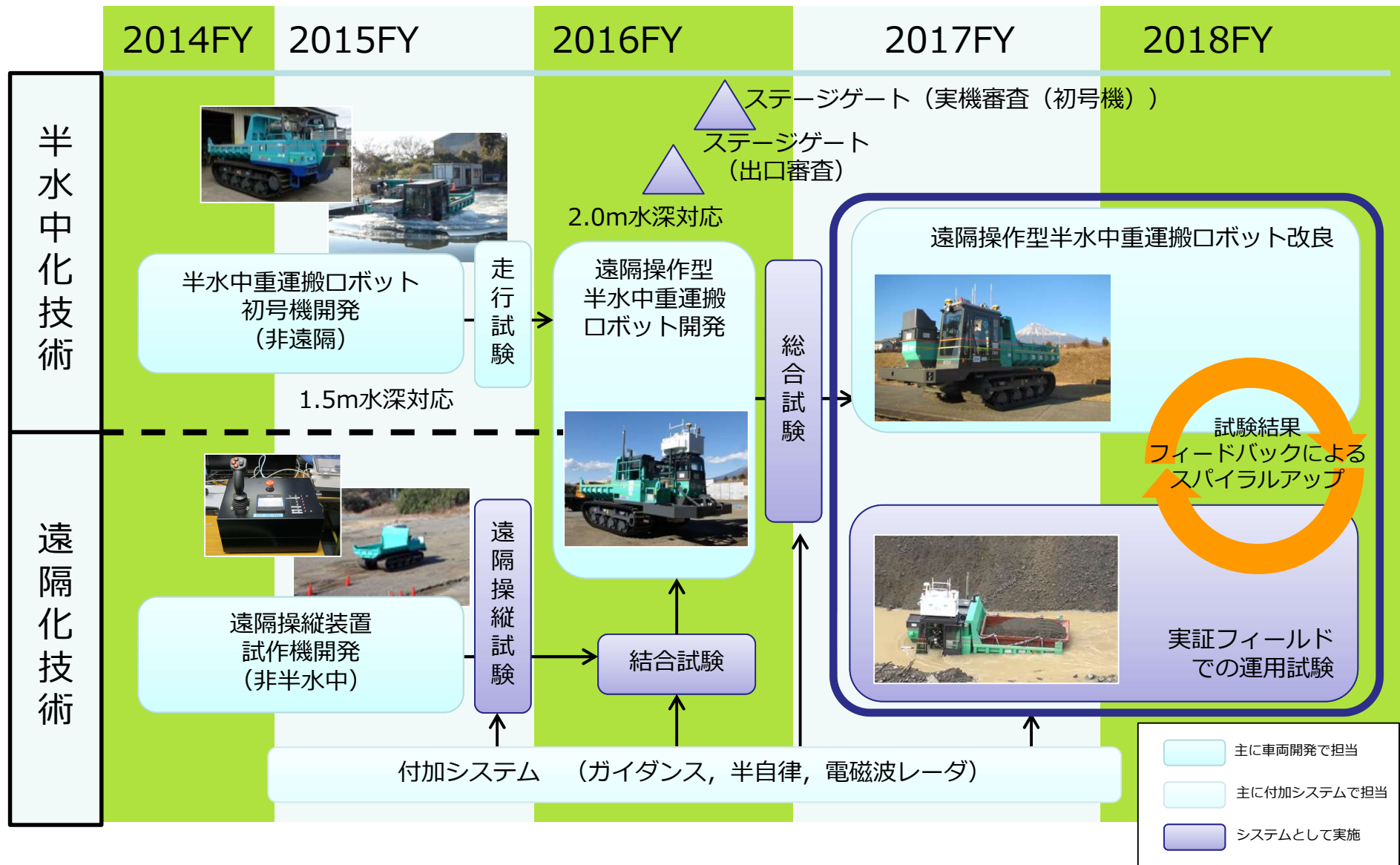
研究開発の目的と内容

- 近年、異常気象に伴う水害が頻発する中、**水際や半水中部での対応**が課題。
- 出水時や水際での災害への対処など、**水際等で活躍可能な遠隔操作型の運搬車**が求められる。
- そのため、半水中作業を遠隔操作により行うために遠隔操作型重機ロボットを開発して、半水中作業の遠隔施工を実現し災害被害の軽減、早期復旧、災害時の迅速な経済再生社会 インフラ再生への貢献を目指している。



**浅水域（水深2m程度）を含む作業領域での
重運搬作業可能な遠隔操作型ロボットの開発**

1. 遠隔操作型重運搬ロボットの開発経緯



2. 開発した遠隔操作型重運搬ロボットの仕様

災害対応の遠隔操作型重運搬ロボット「カストール」

開発仕様

- 積載荷重：10t
- 走行速度：3km/h
- 登坂能力：10% (5.71deg)
- 左右傾斜：3度
- 段差：20cm
- 連続走行区間：200m
- 水深：1.8m



- 車両寸法：
 - 全長7.3m
 - 全幅3.2m(ミラー含む)
 - 全高4.4m(アンテナ含む)
- 車両重量：17t



- 豪雨などによる大規模水害での水際や半水中部での災害対応
- 資材や撤去した瓦礫を無人で運搬する半水中遠隔操縦型運搬ロボットの開発

2. 開発した遠隔操作型重運搬ロボットの仕様

＜7つの機能と開発の目標達成状況＞

項目	指標 / 試験	目標	実績
1. 遠隔操縦機能	無線通信の中継を介した遠隔操縦可能な距離	100m以上	1km以上
2. 耐水構造	水深 (浅水域を含む試験)	水深2m程度（静水2.0m、走行1.8m程度）での走行	2.0mの静水、および最大水深約1.8mまでの走行を確認 ※水没部IPX7相当
3. 半水中でのエンジン冷却機構	運用可能な連続運転時間 (浅水域を含む試験)	吸排気に問題なく運用可能	最大積載量で90分間の連続運転を確認
4. 地盤に依らない走破性能	土、砂利、礫など複数の路面での運用試験	不整地路面での走行	複数の異なる不整地路面での走行を確認 ※ゴムクローラの採用
5. 走行安定化機能	傾斜路面での走行試験	転倒防止	転倒防止機能を確認（フェールセーフ機能） ※流速1.4m/sの試験
6. 積荷の安定性維持機構	水深 (浅水域を含む試験)	積荷の流れ出し防止	最大水深約1.8mでも積荷が流れ出さないことを確認
7. 走行不能状態からの脱出機構	外部車両を用いた牽引試験	走行不能時の救出手段の確保	外部車両より牽引救出できることを確認 ※ブレーキ解除機能
重運搬ロボット性能	積載荷重、連続走行時間	積載荷重10t	10 t の積載状態で90分連続走行を確認
	走行速度	走行速度3km/h	3km/hでの運用（有視界状態では8km/hでの運用）を確認
	登坂走行試験	登坂能力10%（5.71deg）	20度までの走行を確認
	左右傾斜走行試験 段差踏み越え走行試験	左右傾斜3度 段差20cm	5.7度までの走行を確認 20cm角の乗り越え
	連続走行区間	連続走行区間200m	周回521mの走行路での連続走行を確認

3. 運用場面検討のための条件整理

＜運用条件と留意点＞

【仕様による運用条件】

1) 重運搬ロボット性能面から、
下記仕様を考慮した運用場面に限定

- 積載荷重 : 10t
- 走行速度 : 3km/h
- 登坂能力 : 10% (5.7度)
- 左右傾斜 : 3度
- 段差 : 20cm
- 連続走行区間 : 200m
- 水深 : 1.8m 水没部 IPX7、
水上部 IPX4

2) ベース車両の運用条件

- 傾斜9度以上では左右旋回無し、
最大速度の50%以下で走行すること

【運用上の留意点】

- 1) 流水中の安定性
最大流速1.4m/sの河川で走行確認されたのみで、流速に対する安定性に懸念
- 2) 悪天候時の使用制限
暴風雨等の悪天候時は使用しない前提
水流による水かぶりや入水時の傾きによる浸水可能性
- 3) 無線の通信設備構成
山間部では無線中継の制約から利用場面が限定される可能性
- 4) 公道の移動
移動には特殊車両による運搬が必要
- 5) 人員輸送時の安全性・安定性
人員輸送時の安全性や安定性、
乗り心地は検証していない

3. 運用場面検討のための条件整理

運用上の課題点等の抽出・整理

<利用場面に関する課題>

- カストールのいくつかの活用事例はあるが、**もともと存在しない新しい重機**であるため、建設工事の計画段階で利用が検討されていない。
- カストールの様々な活用シーンを建設工事や災害対応など分類分けを行ったうえでの**具体的な検討**が行われていない。
- カストールが現場で利用されているのは**1台のみ**のため、土砂等の運搬時にピストン輸送ができない。

<必要機能と価格に関する課題>

- カストールに搭載されている様々な機能のうち、**どの機能がどの場面で有効活用されるか**の十分な検討が行われていない。
- 必要な機能が絞られていないため、現状のカストールは**非常に高価**である。

<その他の課題>

- カストールの各地整への導入などが検討されていないため、**計画的な生産体制が組めず**、完全受注生産のため価格が高い。
- 浅海域の現場ではカストールが塩水にさらされ、1シーズンで鉄板が錆びて穴が開く可能性がある。

洗い出した課題は、概ね以下の2つに分類

- ① **具体的な活用シーンが定まっていないこと**
- ② **必要機能が定まっていないこと、高価であること**

課題に対する改善策の方針

- ①カストールの現状の仕様で有効利用が期待できる**活用シーン**を検討。
具体には、活用できる場面を、通常利用としての建設工事別と災害時利用として、浅水域に係る災害時の対応事例を基に整理し、想定しうる活用シーンを検討。
- ②検討した活用シーンを前提に、**それぞれの場面ごとに必要な機能を整理**する。
また、活用シーンに応じて必要機能を絞り込むことで、**標準仕様での価格を抑える**ことに留意。

4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理

検討の進め方

(1) 活用シーンの検討

- ・ 浅水域での**物資等の運搬作業を前提**に活用シーンを検討
- ・ 様々な切り口ごとに場面の構成要素を列挙してカストールの**現実的な活用場面**を想定

(2) 必要機能の検討

- ・ 要否判断のための機能の単位を設定
- ・ 活用シーンごとの機能の要否を検討

(3) 現行仕様と必要機能の比較

- ・ 現行仕様と比較することで標準仕様に具備する**機能の実装可能性**を検討

4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理

(1) 活用シーンの検討

場面の構成要素

切り口	構成要素	備考
使用場所 where	市街地、都市河川、山地河川、海岸・湖岸、港湾、貯水池	浅水域
状況 when	平常時、災害発生前、災害発生直後、災害復旧段階、危険作業環境(水流、悪路等)、劣悪作業環境(非衛生、有毒、温度等)	
運搬内容 what	土砂、建設資材、土嚢、機材・器材、廃棄物、障害物、支援物資、作業員、被救助者	
目的 why	除去、搬入、搬出、移動、救出	運搬
利用者 who	建設業者、国土交通省、自治体、調査業者、レスキュー	所有者は別
工事種別	河川、ダム、砂防、海岸、港湾	

1) 建設業法上の工事種類

- ・ 27種類の専門工事のうち、主に浅水域で行われるのは浚渫工事のみであり、河川、港湾等の水底を浚渫する工事とされている。ヒアリング結果より、土砂運搬が有効との意見があった。

2) 国土交通省土木工事の工種区分

- ・ 国土交通省の共通仮設費を算定する際の工種区分として、19種の工事名が挙げられている。このうち、浅水域に関連する6工種とその内容を整理した。

4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理

想定し得る災害関連の活用シーン

No.	時期	災害・被害の状況	想定作業(目的・場所・運搬内容)
1	発生前～発生中	河川水位上昇により越水・溢水が懸念される状況	主に都市河川において、水防工法実施のための土嚢等の資材搬入
2	発生中	河川水位上昇による中洲での孤立者発生	河岸から中洲まで走行し、孤立者の救出作業
3	発生中	主に外水氾濫開始直後、住宅での 孤立者発生	住宅地において、 逃げ遅れた孤立者の救出作業
4	発生中～発生直後	洪水の越水、堤防の決壊、高潮・津波等による広範囲の浸水	浸水した市街地や公共インフラ周辺において、排水作業のための排水ポンプの運搬
5	発生中～発生直後	堤防の決壊(次の洪水に備えて復旧対策が必要な状況)	堤防応急復旧工事のための資機材運搬、作業員輸送
6	発生直後	河川水位低下後、 河積阻害物が橋脚付近に堆積 した状況	橋梁周辺における流木・土砂等の障害物撤去
7	発生直後	洪水による市街地の浸水、浮遊物の漂着・堆積	市街地に残留した堆積物・流木等の撤去
8	発生直後	掘込河道河岸・海岸沿い道路の崩落	水域側から崩壊コンクリート・アスファルトの撤去・運搬
9	発生後～復旧段階	河川沿い地すべりによる 河道閉塞(土砂ダム形成)	排水ポンプ等の資機材運搬、 土砂撤去作業 、作業員輸送
10	発生後～復旧段階	洪水による橋梁流失・流出	河川内の落下構造物の回収・撤去
11	発生後～復旧段階	橋脚基礎の洗掘、護岸・横断構造物等の損傷	河川内浅水域における構造物復旧工事実施時の資機材運搬

想定し得る災害以外の活用シーン

No.	工事	想定される主な工事内容	備考
1	河川工事	掘削工、 浚渫工 、護岸工、根固工、水制工、水路工、光ケーブル配管工等	湖沼・貯水池の 浚渫 を含む
2	河川構造物工事	1. 樋門(管)工、水(閘)門工、サイフォン工、床止(固)工、堰、揚排水機場 2. 橋梁下部工、床版工 3. 旧橋撤去工	橋脚の基礎工事を含む
3	河川維持工事	1. 管理を目的とした維持的工事 5. 河川の水面清掃等の作業	
4	海岸工事	堤防工、突堤工、離岸堤工、消波根固工、海岸擁壁工、護岸工、樋門(管)工、河口浚渫、水(閘)門工、養浜工、堤防地盤処理工	
5	砂防工事	堰堤工、流路工、床固工	河川内の工事のみ
6	橋梁保全工事	橋梁(主に下部工)に関する保全、補修、補強工事及び既設橋梁附属物工の修繕工事	
7	その他	危険作業環境(水流、悪路等)、劣悪作業環境(非衛生、有毒、温度等)における無人運搬作業	無人運搬作業(遠隔操作)

4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理

要否判断のための機能の単位

No.	機能名	細分化機能名	機能の内容
1	遠隔操縦機能	目視遠隔操作機能: ・可搬型操作卓 ・車載制御ボックス	目視による300m程度の遠隔操縦(特定小電力無線による通信)
2		無線遠隔操作機能: ・遠隔操作器 ・25GHz NT-LINK	無線通信の中継を介した1km程度の遠隔操縦(2.4GHzまたは5GHz無線LANによる通信)
3		緊急停止機能: ・非常時操作卓	非常時の緊急停止用操作卓(特定小電力無線による通信)
4		重機情報表示機能: ・重機情報画面	無線LANを介した機械の各種情報の表示
5		操作支援ガイダンス機能: ・GNSS基準局 ・操作支援ガイダンス画面	GNSS/IMU情報を元にした機械の位置や動きの画面上表示によるオペレータへの操作支援
6		半自動運転機能: ・半自動運転画面	オペレータ負荷軽減対策のための半自動運転システムの各種設定画面
7		カメラ映像表示機能: ・搭載カメラ映像画面	機械に搭載した固定カメラによる周辺動画をオペレータへ伝送
8	耐水機能		2.0mの静水、および最大水深約1.8mまでの走行
9	半水中でのエンジン冷却機能		最大積載量で吸排気に問題なく90分間の連続運転
10	地盤に依らない走破機能		土、砂利、礫など複数の異なる不整地路面での走行
11	走行安定化機能	傾斜転倒防止機能	転倒防止のため傾斜に応じた動作の制限(旋回、速度、走行)
12		流水中の車両安定化機能	最大流速1.4m/sの河川での運搬作業
13	積荷の安定性維持機能		最大水深約1.8mでも積荷の流れ出し防止
14	走行不能状態からの脱出機能		走行不能時に外部車両より牽引救出

4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理

- **災害11場面、災害以外7場面の想定される活用シーン**で必要とされる機能を整理
- 遠隔操作機能の一部機能については、場面によっては有用であるものの、その機能を備える必要がない場面も多い

想定される活用シーンを考慮した必要機能

機能	想定場面のうち機能を必要とする場面数		必要性
	災害関連 11場面	災害以外 7場面	
①目視遠隔操作機能	11/11	7/7	必要
②無線遠隔操作機能	1/11	4/7	活用場面によっては有用
③緊急停止機能	1/11	4/7	必要
④重機情報表示機能	1/11	4/7	活用場面によっては有用
⑤操作支援ガイダンス機能	1/11	4/7	活用場面によっては有用
⑥半自動運転機能	0/11	2/7	活用場面によっては有用
⑦カメラ映像表示機能	1/11	4/7	活用場面によっては有用
⑧耐水機能	11/11	7/7	必要
⑨半水中でのエンジン冷却機能	9/11	7/7	必要
⑩地盤に依らない走破機能	8/11	7/7	必要
⑪傾斜転倒防止機能	8/11	7/7	必要
⑫流水中の車両安定化機能	10/11	6/7	必要
⑬積荷の安定性維持機能	11/11	7/7	必要
⑭走行不能状態からの脱出機能	11/11	7/7	必要

4. 活用シーンの提案及び必要機能の整理

・活用場面のうち有効考えられる災害3場面/災害以外1場面

- 外水氾濫開始直後、住宅での**孤立者発生** 逃げ遅れた孤立者の救出作業
- 河積阻害物が橋脚付近に堆積した状況 橋梁周辺における流木・土砂等の障害物撤去
- 河道閉塞(土砂ダム形成) 資機材運搬、土砂撤去作業、作業員輸送
- 河川工事 湖沼・貯水池の浚渫を含む浚渫工

主に浅水域での活用を想定して必要機能を整理

機能	想定場面のうち機能を必要とする場面数		必要性
	災害関連 3場面	災害以外 1場面	
①目視遠隔操作機能	3/3	○	必要
②無線遠隔操作機能	1/3	○	活用場面によっては有用
③緊急停止機能	1/3	○	必要
④重機情報表示機能	1/3	○	活用場面によっては有用
⑤操作支援ガイダンス機能	1/3	○	活用場面によっては有用
⑥半自動運転機能	-	○	活用場面によっては有用
⑦カメラ映像表示機能	1/3	○	活用場面によっては有用
⑧耐水機能	3/3	○	必要
⑨半水中でのエンジン冷却機能	3/3	○	必要
⑩地盤に依らない走破機能	2/3	○	必要
⑪傾斜転倒防止機能	2/3	○	必要
⑫流水中の車両安定化機能	3/3	○	必要
⑬積荷の安定性維持機能	3/3	○	必要
⑭走行不能状態からの脱出機能	3/3	○	必要

- ・半水中での利用に係る機能と、走行に係る機能はどのような活用場面でも必要
- ・災害対応時など離れた場所からでも安全に機械操作できるよう目視遠隔操作機能は必要機能

5. 現場での実装仕様

検討の進め方

(1) 実装仕様の構成

- ・ 実装仕様の構成を検討して、想定した活用シーンに応じた必要機能より、実装仕様を提案

<構成案>

- 1) カストールの概要
- 2) 実装仕様
- 3) 配備計画案
- 4) 製作工程
- 5) 導入にあたっての留意点
- 6) ベース車両 クローラキャリアのカタログ (報告書 巻末資料)

(2) 開発コストの算出

- ・ 開発メーカーヒアリング等を踏まえて、開発コストを算出

5. 現場での実装仕様

実装仕様の構成

<標準仕様>

- ・必要機能について、カストールに搭載する上で改造されたベース車両の仕様を、以下の通り設定した。

1. 防水に係る機能

(ア) 耐水機能

- ・走行時の耐水深を1.8 m確保することができること
- ・エンジンの吸排気口を上部に設置できること

(イ) 半水中でのエンジンの冷却機能

- ・吸排気に問題なく運用可能であること
- ・最大積載量で最低90分間連続運転できること

2. 遠隔操作に係る機能

(ア) 目視遠隔操作機能

- ・300 m程度の遠隔操作ができる通信設備を設置できること
- ・カストールを遠隔操作する操作卓があること

3. 走行全般に係る機能

(ア) 地盤によらない走破機能

：クローラによる走行ができること

(イ) 傾斜転倒防止機能

：一定の傾斜ではカストールの操作を制限し、さらに厳しい条件では、動作を停止させられる機能を付けられること

(ウ) 流水中の車両安定化機能

：一定の流水中でも安全に動作が行えること

(エ) 積荷の安定性維持機能

：積荷を安定させて運搬できること

(オ) 緊急停止機能

：緊急時に停止させられること

(カ) 走行不能状態からの脱出機能

：カストールをけん引できること

5. 現場での実装仕様

実装仕様の構成

<災害対応仕様>

- ・災害時に、カストールを利用することのメリットを最大限享受できる活用シーンは、**水害時の初期対応で、水深1.8 m以下の時に下記の様なシーンで有効活用が期待できる。**
 - 集中豪雨に伴う大雨による**道路等の冠水・堤防決壊**
 - 高潮による**浸水被害**
 - 地すべりによる**河道閉塞**
- ・これらの水害時には、二次災害の危険性を排除した上での検討になるが、カストールを用いることで、**防水仕様ではない、一般的なクローラキャリアでは対応できなかった、水が完全に引く前の対応を開始できる。**さらに、**遠隔操作によって、作業員の安全も確保される。**
- ・標準仕様に、オプションとして機能を追加する形で災害時対応仕様とした。

●走行全般に係る機能

(ア) カメラ映像表示機能

- ・カストールに**カメラを設置**でき、**周囲状況を映像や画像で把握**できること

5. 現場での実装仕様

実装仕様の構成

<平常時利用仕様>

- ・平常時では、水深1.8 mの浅水域に限るが、主に河川縦断を想定する河川関係の工事（浚渫工等）及び、沿岸域の工事の利用で、カストールを利用することのメリットを最大限享受できる。
- ・標準仕様に、オプションとして機能を追加する形で平時対応仕様とした。

●遠隔操作に係る機能

(ア) 無線遠隔操作機能

- ・特定小電力無線を用いた通信による操作ができること

(イ) 半自動運転機能

- ・あらかじめ決められた動作を繰り返し行えること

(ウ) 操作支援ガイダンス機能

- ・位置情報や取得した地形情報などをオペレータに送信できること

(エ) 重機情報表示機能

- ・カストールの無線LANの接続状況など、機器の情報を表示できること

5. 現場での実装仕様

実装仕様の構成

●カストール配備計画案

- ・カストールが運搬重機であることを踏まえ、実際の現場ではピストン輸送を前提として、**分解組み立て式バックホウ1台とカストール2台が必要**。なお、資機材運搬のみを想定した場合は1台。
- ・地方整備局への**配備台数は2台を基本**、地方整備局で**ユースケースを考慮した配備計画検討必要**。

●製作工程

- ・現行のカストールは、完全受注生産になっており、ベース車両の調達からカストールの製作まで、体系的に生産体制が整っているわけではない。（製作には約8カ月かかる）
- ・今後、カストールの配備計画が整い、**ある程度計画的な受注を見込むことができれば**、製作工程の詳細な設定が可能となってくる。

検討項目	初年度												2年度												
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
契約(見積含む)	■																								
設計				■																					
製作							■																		
テスト																■									
納品																							■		

●導入にあたっての留意点

- ・現行のカストールは完全受注生産であり、エンジンも海外製であることから、日本国内に予備部品の在庫が潤沢にあるわけではない。カストールの配備計画が整い、ある程度計画的な受注を見込むことができれば、**予備品の確保等も検討が必要**である。
- ・各地方整備局へのカストールの配備計画や、それに基づく発注計画など、**配備する地域や目的に応じた発注計画を各地方整備局で検討する必要**がある。
- ・施工ノウハウを有する民間会社（極東建設等を想定）に導入する場合は、**実機利用を通じて最新技術のアップグレードが図られるなどメリット**がある。これまでに存在しない建設機械であるため一概に費用対効果で評価できないが、**実施困難であった半水中作業の実現**が図られる。
また、**レンタル会社での保有、運用**についても今後検討が必要である。

5. 現場での実装仕様

開発コストの算出

●開発コスト

- ・実機の製作として工場のラインに乗せた場合の本体の製作費は、およそ1億円程度とした。

さらに、改造費を合わせると1億2,000万円～1億3,000万円となった。

1. 想定される概算製作費

- 1) 本体の概算製作費 1億円程度
(内、ベース車両5,000万円とした)
- 2) 概算の改造費 2,000万円～3,000万円程度

合 計 1億2,000万円～1億3,000万円程度

2. 実機導入時に想定される検討項目（参考）

- 1) 実機導入方法の検討
(全国地整への配備や施工体制、相談窓口、オペレータ支援など)
- 2) 実機の詳細スペック検討 (改造等への拡張性をもったユニット検討など)
- 3) 実機仕様書とりまとめ (メーカーへの見積を通じて、機器発注可能なもの)

5. 現場での実装仕様

●カストールの機能の価値

1. 時間短縮のSIP検討事例

SIPでの検討事例として、カストールを関東・東北豪雨の鬼怒川堤防緊急対策工事へ導入した場合の期待される効果の既往整理結果

- 効果その1 **工用道路整備が不十分な状態でも資機材の搬出入が可能** (2~3日程度短縮)
- 効果その2 **粗整備で進入可、大型クレーンの振り回し不要**

2. 工事費用の軽減

従来の浅水域工事では、仮排水路または転流工構築、重機進入路用高盛土の造成、重機作業用仮設棧橋の構築を行っており、これらの仮設工事には期間を要する。

これらに対して、半水中を走行できるカストールを用いることで**仮設構造が不要**となり、**水害等に対処する浅水域作業を短期間・遠隔操作で実現することで、工事費用を抑えられる可能性がある。**

3. 災害時の安全確保など

水害などの災害復旧工事、災害時の物資輸送において、**遠隔でのカストールの操作により、作業員に及ぶ危険を軽減**することができる。

6. まとめ

●カストールの機能の価値

- ・カストールは、マーケット性を追求した建設機械とは目的が異なり、単純な経済的視点による計画は難しい
水害など災害復旧工事等への活用によって、上記の**機能の価値やその可能性から有効性の発揮が期待**できる
国等により災害時に導入・利用し、活用しながら継続的に技術開発も行い、**実用性を高めていくことで高い価値が生み出せる。**
- ・また、水害等の災害頻度がそれ程多くない地域でも、
平常時は遠隔用の機械を使用せずに、**搭乗操作の有人機械として使用することも可能であるため、カストールの2台利用による浅水域の土砂運搬作業の効率化の実現が期待**される。
- ・引き続き、カストールの実機導入にあたっては、標準装備を基本としてオプションを付加できる**発展性も考慮した装備、実機の配備や運用体制といった導入方法やスペックの詳細に関して、今後も検討が必要**である。