

水中ロボットの性能評価法の 確立とロボット性能評価工学

眞砂 英樹

(長岡技術科学大学・システム安全系)

講師略経

期間	所属等
2003.3	東京工業大（現・東京科学大）大学院 理工学研究科地球惑星科学専攻修了。博士（理学）取得。
2004.4 – 2009.3	独立行政法人（現・国立研究開発法人）海洋研究開発機構入所。研究航海に関わる研究マネジメント業務に従事。
2009.4 –	環境保安グループに異動。研究船・海中機器の運用・開発に関する安全・衛生・環境（HSE）マネジメント業務に従事。
2017.4 – 2019.3	社会人大学院生として、長岡技術科学大学 システム安全専攻に在学。専門職修士（システム安全）取得。
2024.7 –	長岡技術科学大学 システム安全系准教授着任。現在に至る。

ロボットイノベーション

国土強靭化・防災/減災

DX

エネルギーの安定供給

ロボットイノベーション

労働人口の減少

インフラ老朽化

高齢化

過疎・過密

GX

ロボットいろいろ



産業ロボット ©トヨタ自動車

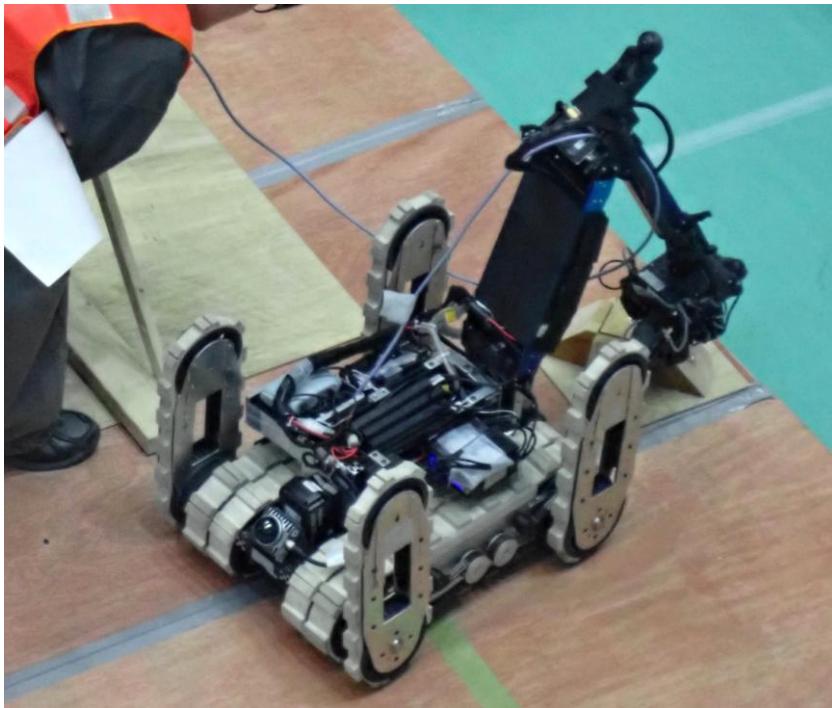


AGV ©トヨタL&F



サービスロボット
(配膳ロボット)
©elmo

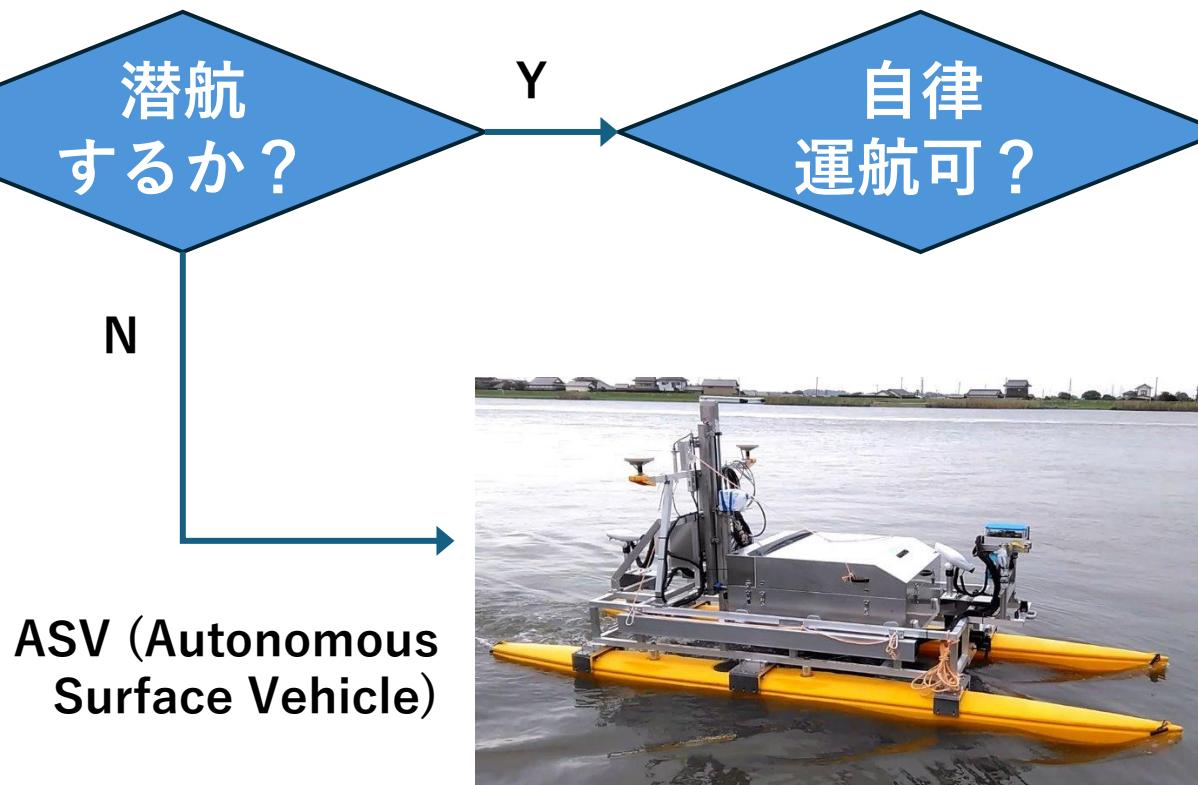
フィールドロボット



- 環境を規定することが難しい（外乱）
- 用途が多様

水中/水上ロボットの分類

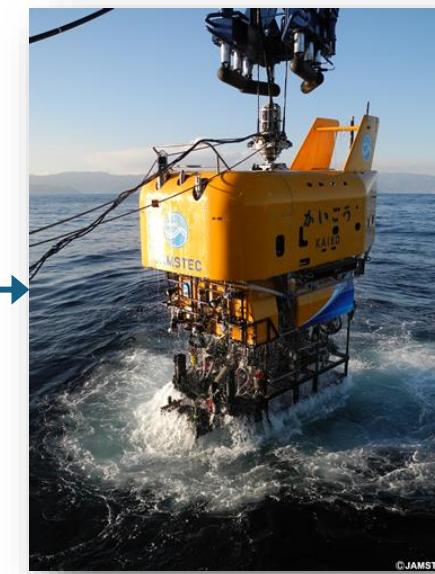
水中ロボット



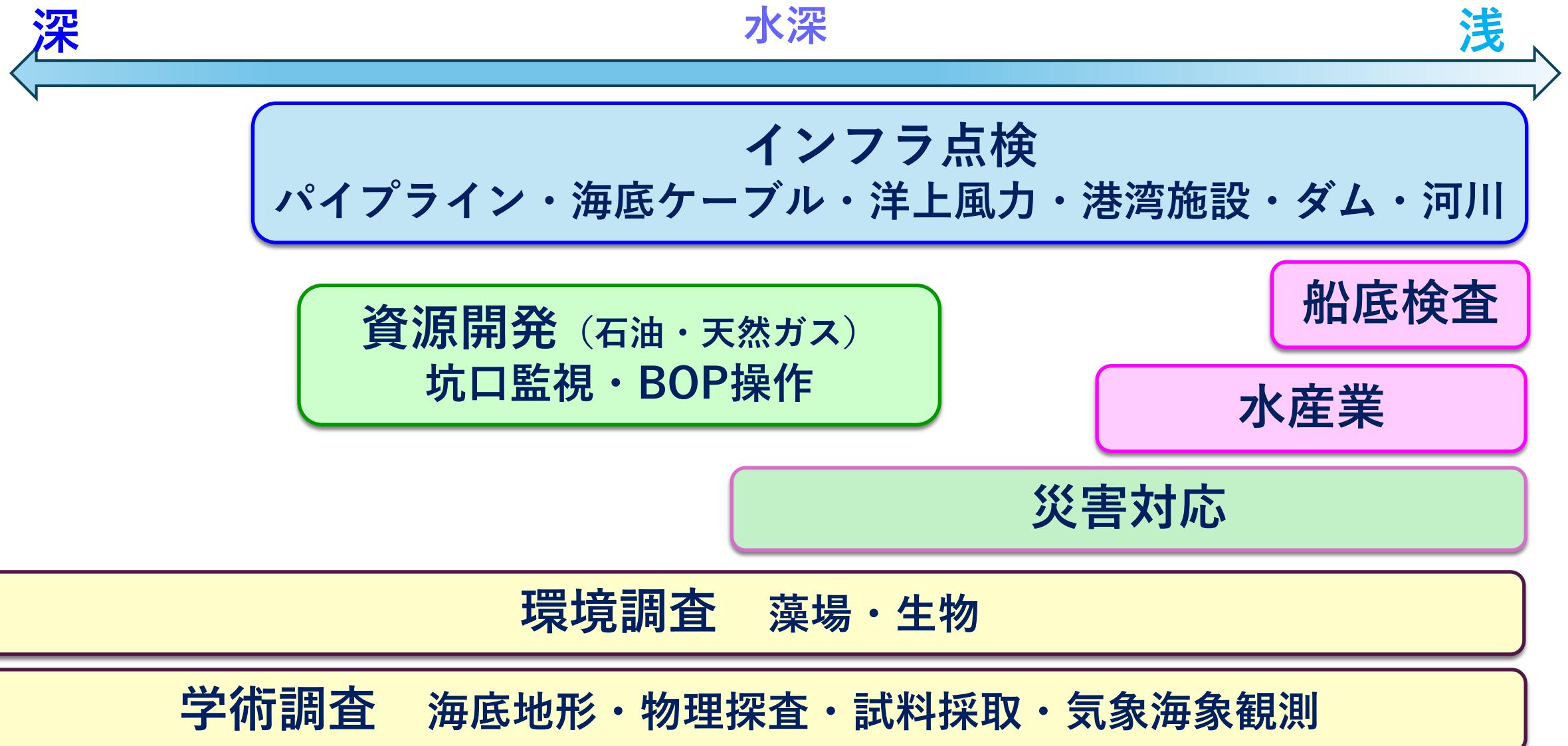
AUV (Autonomous Underwater Vehicle)



ROV (Remotely Operated Vehicle)



水中/水上ロボットの活躍フィールド



水中ロボットの技術的難しさ

- 耐圧性・水密性 : $10\text{ m} = 1\text{ 気圧}$
- 通信 (電波は使えない) → 音響 (1,500 m/s), レーザー
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20220126_2/ (JAMSTEC)
- 流れ
- 濁り
https://www.misago.co.jp/i2s_orphie.html (ミサゴ株式会社)
- 自己位置推定
DVL, 慣性航法, 目印 (ブイ)

水中・水上ロボット市場の現状

自社開発・自社運用（サービスの提供）

五洋建設



- 最大水深：150 m
- 画像撮影の他、打音検査、観察部の清掃（ケレン）機能あり

いであ



YOZAN

- 最大水深：2,000 m
- ホバリング型AUV
- 水中音響測位システム / DVL, 障害物自動回避機能

水中・水上ロボット市場の現状（市販モデル）

Chasing X



Deeptrekker Evolution



Blue Robotics
BlueROV2



QYSEA
Fifish V6-
expert



SAAB
Falcon



Use Case 1: インフラ点検

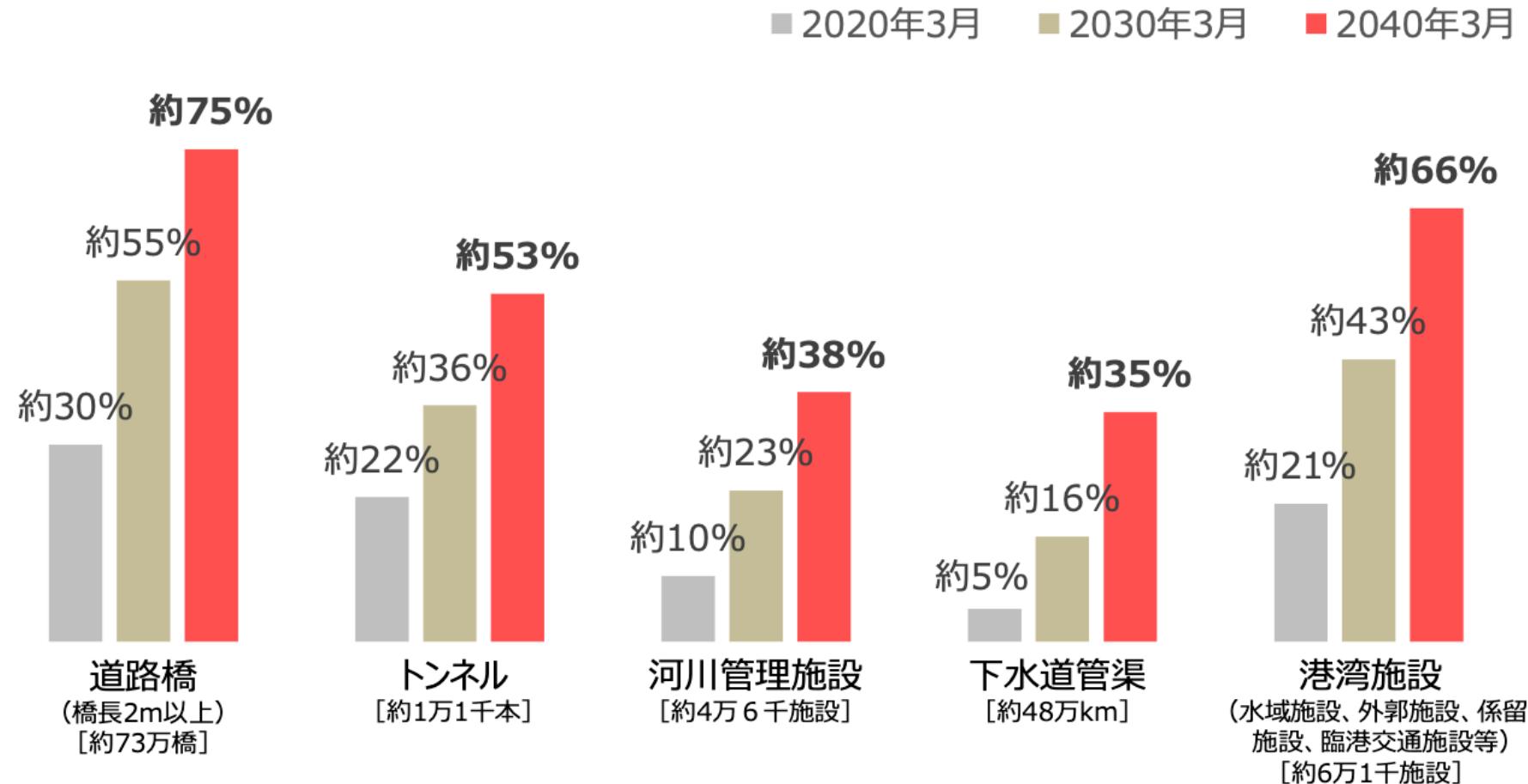
インフラ点検の重要性と課題

今なぜインフラ点検が重要か？

- ・多くの社会インフラは1950年代～高度経済成長期に建造。
- ・メンテナンス予算の減少。
- ・全面改修が難しいものも。

- ✓ 安全性及び機能の保持。
- ✓ メンテナンスコストの最小化・効率化。
- ✓ アカウンタビリティの確保。

インフラ老朽化



建設後50年以上経過する社会資本の割合

[国土交通省, 2025]

インフラ崩壊の事例

笛子トンネル崩落事故
(2012. 12)



©日本経済新聞

八潮道路陥没事故 (2025. 1)



©読売新聞オンライン

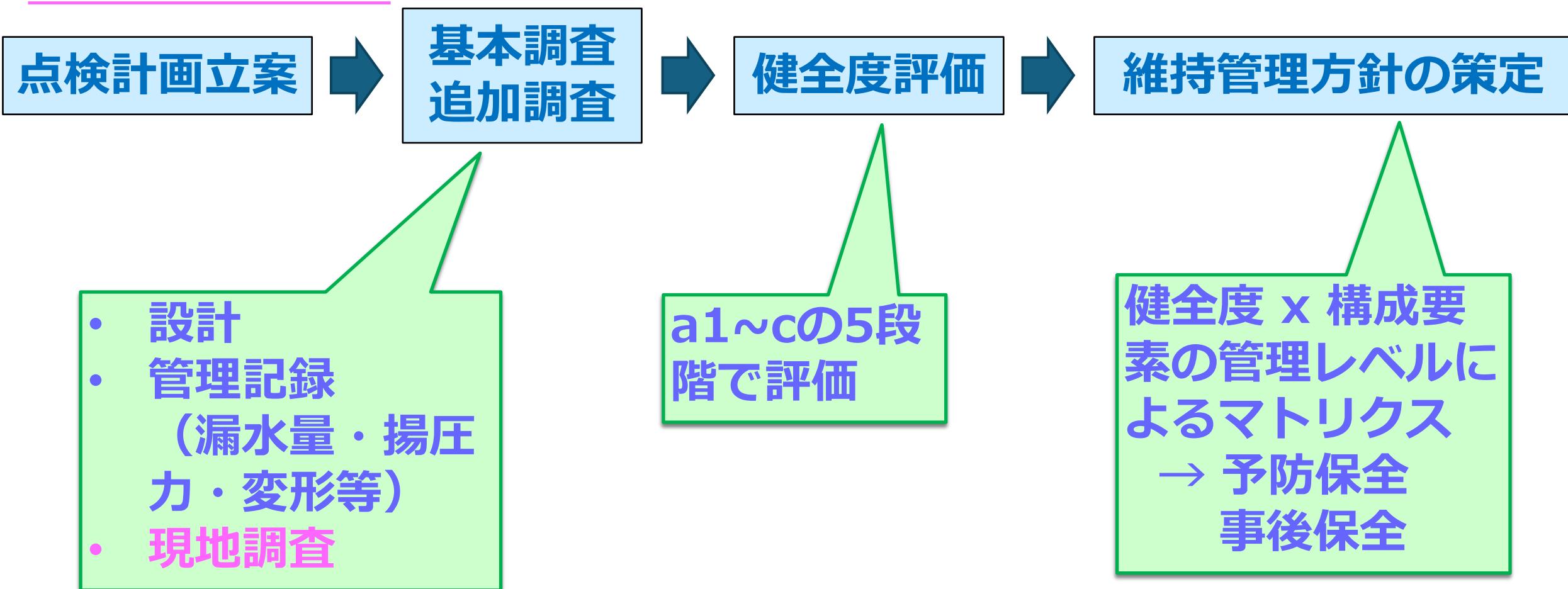
ダム総合点検

いつ？

- 管理開始後30年後までに着手、以後30年に1回。
- 但し、経年劣化が著しい場合や大きな外力を受けた場合等、ダムの機能が損なわれる恐れがある場合はこれにこだわらず実施。

ダム総合点検

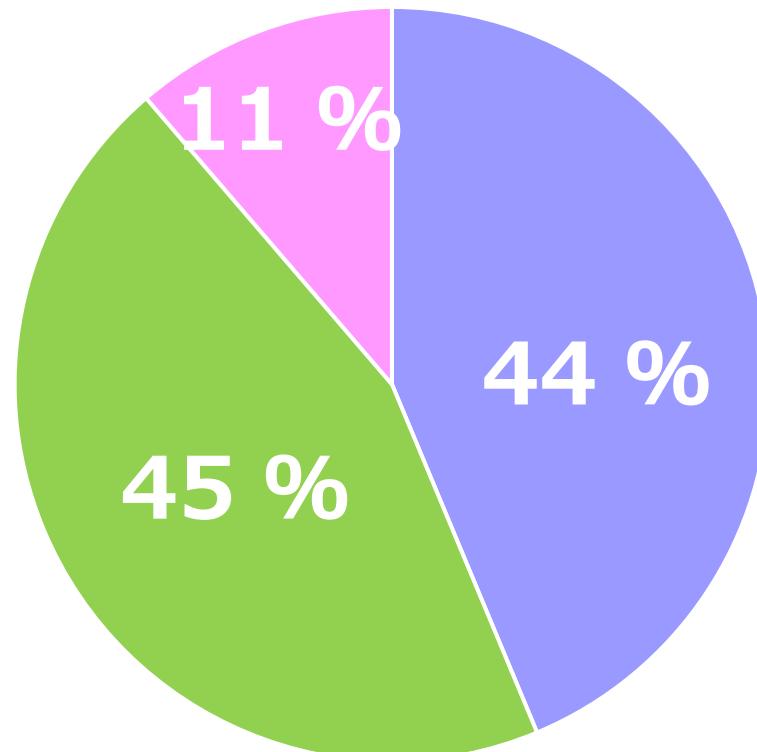
どのように？



ダム健全度評価 (H30年3月時点・国交省)

b1: 現状では機能維持されているが、劣化・損傷が認められ、近い将来機能に影響。

b2: 現状では機能維持されているが、劣化・損傷が認められ、中長期的には機能に影響。



c: 軽微な劣化・損傷あるも将来的にも機能に影響無し／劣化・損傷無し。

a1: 機能低下により、緊急措置が必要。

a2: 劣化・損傷により機能への影響あり、何らかの措置が必要。

今回は認められず

ダムの点検項目

箇所	点検項目
ゲート設備	腐食, 損傷, 変形
堤体等のコンクリート構造物	損傷等
洪水吐き水叩き部	洗掘等
堆砂等	堆積物の状況
河床	洗掘等

河川管理施設・河道点検

いつ？

- 出水期前と出水期後に実施.
- 中小規模の出水後に必要に応じて追加実施.
- 設備の劣化具合に応じて追加実施.

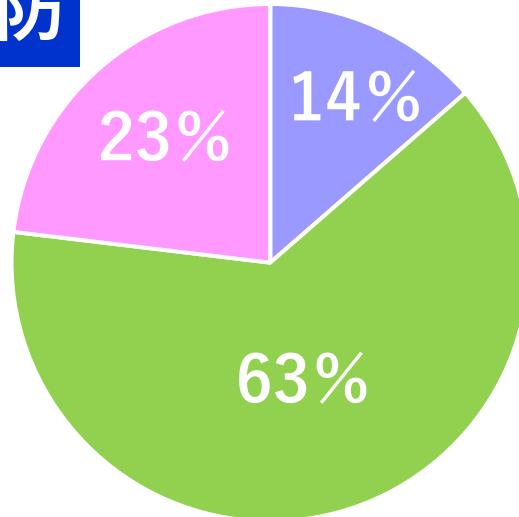
どのように？



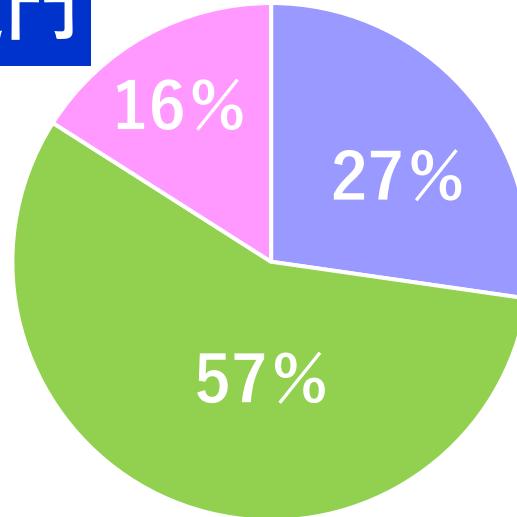
堤防等河川管理施設及び河道の点検要領（国交省, 2012）

河川施設健全度評価 (H29年8月時点・国交省)

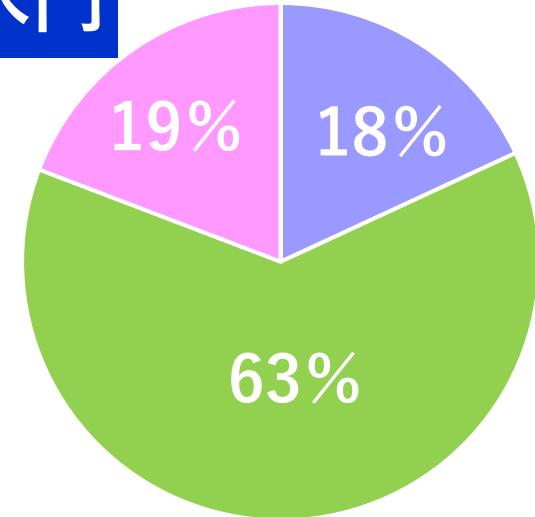
堤防



樋門



水門



異状無し

健全（軽微な変状を含む）

要監視段階

機能に支障は無いが、進行の可能性のある変状があり経過観察が必要。

予防保全段階

機能に支障は無いが、進行性があり予防保全の観点から対策が望ましい。

措置段階

機能に支障、補修または更新の必要あり。

河川の点検項目

箇所	点検項目
河道	流下能力を低下させる形状変動・樹木繁茂等
河川管理施設	コンクリート部, 豆板やコールドジョイント部の損傷, 鋼矢板部の劣化・損傷等

ダム・河川点検の現状と問題点

基本は潜水士による目視点検

- 潜水士の確保
- 潜水士の労働安全衛生
 - 潜水に関わる労働衛生側面
 - 溺れ, 水中拘束
- 深度限界
- 見落とし (個人の能力に依存)
- 網羅性

潜水士の労働衛生問題

減圧症

急激な減圧（浮上等）により、体組織に溶け込んだ窒素ガスの排出が追いつかず、血管内に窒素ガスの気泡が発生して血液の流れを止め、皮膚のかゆみ、関節痛、息切れ・呼吸困難、下半身の運動麻痺、聴覚障害、等の症状を発症する。

窒素酔い

窒素ガスの麻酔作用により、思考力・運動機能が低下する。水深30～40 m以深で現れる。

肺破裂

急激な減圧により、肺内部の空気が膨張し、肺が破裂する。

法令*で作業方法等について細かく規制

- 潜水時間
- 2回以上の潜水を行う場合のインターバル
- 浮上速度
- 再圧室の設置（水深>10 mの場合義務）

*高気圧作業安全衛生規則（高圧則）

- 作業時間に制約。
- 水深40 m以深は、通常の方法では潜れない。

ロボットによるダム・河川の点検

	箇所	点検項目	程度
ダム	ゲート設備	腐食, 損傷, 変形	潜水士による目視点検の代替（精査）または支援（概査）
	堤体等のコンクリート構造物	損傷等	
	洪水吐き水叩き部	洗掘等	
	堆砂等	堆積物の状況	
	河床	洗掘等	
河川	河道	流下能力を低下させる形状変動・樹木繁茂等	目視点検の代替（精査）または支援（概査）
	河川管理施設	コンクリート部, 豆板やコーラルジョイント部の損傷, 鋼矢板部の劣化・損傷等	

人による調査とロボットによる調査の対比 (堆積状況調査の例)

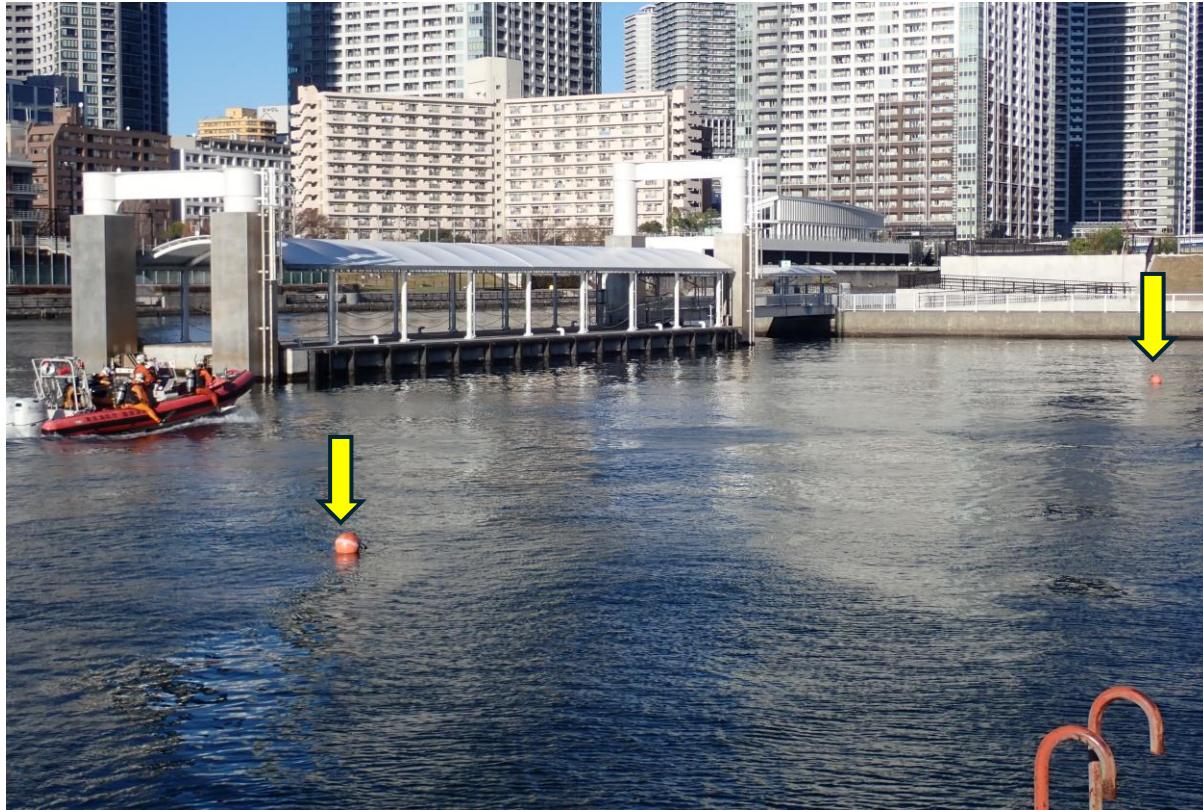
比較項目	潜水調査	水中ロボット
計測範囲	スポット	30,000 m ² /h
堆積物の把握	種類まで特定可	カメラにより特定
安全性	作業者に危険あり	作業者不在
調査日数	調査日+1日	調査日+0.5日
費用	約80万 (3人 × 2日)	約200万 (データ処理込み)
成果物	写真	測量データ
その他	少量の堆積物であれば その場で除去可能	

ロボット活用の現状

- 現状では潜水士による作業が主流.
- メーカーのパッケージサービス, もしくは点検業者の自社開発が多い.
- 中小の点検業者が自由にロボットを選定して活用するのは容易ではない.
- 導入コストが課題.

Use Case 2：災害対応

水難救助（消防）



東京消防庁 臨港消防署



- 目撃証言などをもとに捜索範囲を設定 (50m x 20m)
- 視界ほぼゼロ
- 2 kt以上では移動は不可

搜索・サルベージ

知床沖遊覧船沈没事故



<https://crane1000.com/sightseeing-boat-kazu-i/>

より沖合、広域の場合にはAUVの利用も考えられる。

災害対応における注意点

- ・ 対応のフェイズによるニーズの違い
- ・ 現場までの運搬手段（車輛, 船舶, ヘリ）
- ・ 日常的な災害と大規模災害
- ・ 水中 / 水上以外のロボットや隊員との連携



十分な実態調査に基づいたニーズの抽出が重要

場合によっては求められる性能が相反することもあり得る → 優先度

性能評価の意義と重要性

工業標準化とは？

自由に放置すれば、多様化、複雑化、無秩序化してしまう「もの」や「事柄」について、経済・社会活動の利便性の確保（互換性の確保等）、生産の効率化（品種削減を通じての量産化等）、公正性を確保（消費者の利益の確保、取引の単純化等）、技術進歩の促進（新しい知識の創造や新技術の開発・普及の支援等）、安全や健康の保持、環境の保全等のそれぞれの観点から、技術文書として国レベルの「規格」を制定し、これを全国的に「統一」又は「単純化」すること。

仕様規定 vs. 性能規定

	仕様規定	性能規定
規定内容	材質, 形状, 寸法, 加工法などについて規定	発揮すべき性能について規定
検査・検証	仕様通りに作成されていることを確認	要求性能を満たしていることを確認
難点	新技术の発展を阻害する可能性がある	検証が難しい

Preliminary Report

**STATEMENT OF REQUIREMENTS FOR URBAN
SEARCH AND RESCUE ROBOT PERFORMANCE
STANDARDS**



PRELIMINARY VERSION
MAY 13, 2005

**Department of Homeland Security
Science and Technology Directorate**

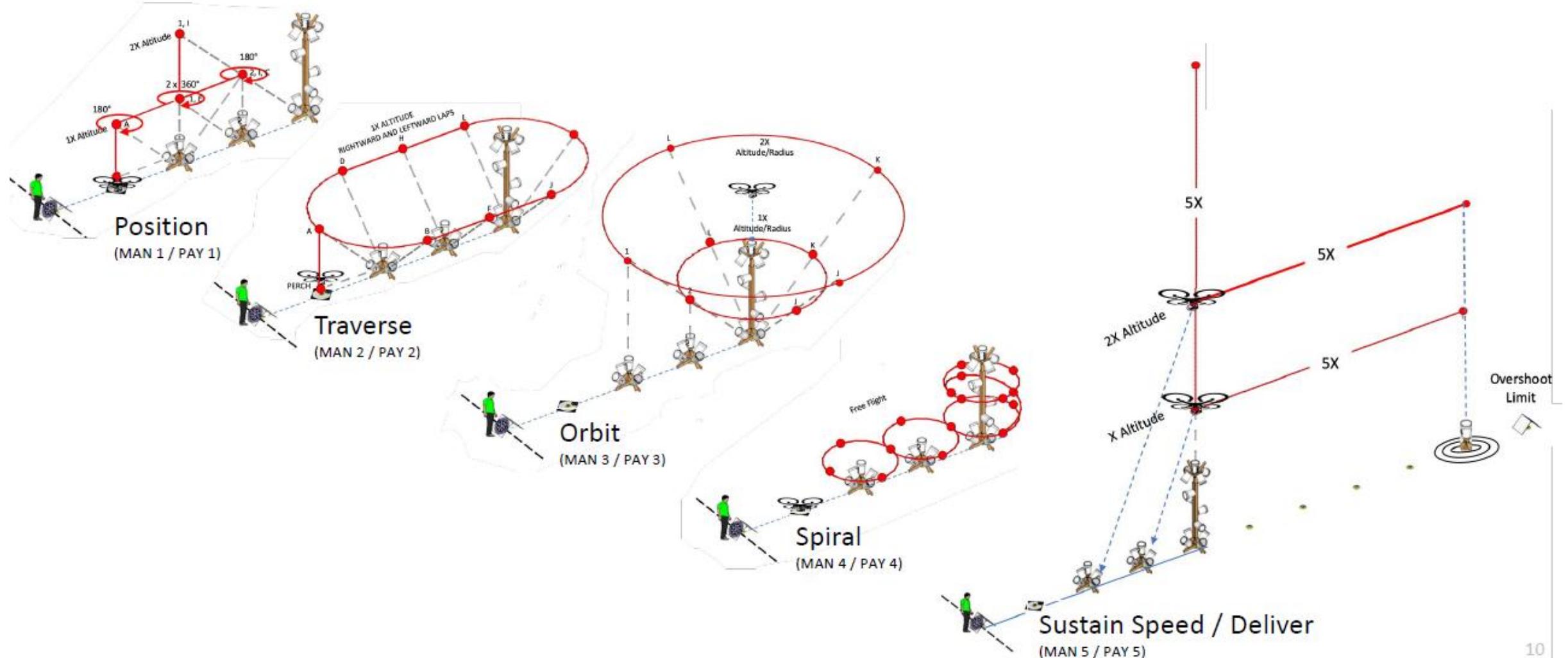
and

National Institute of Standards and Technology

NISTの性能評価

- 9・11テロ（2000）をきっかけに調査研究を開始
- S&Rフィールドロボットに求められる性能を類型化
- 自然災害よりも人為災害が主

NIST性能評価手法：飛行パターン



NIST性能評価手法：ターゲット



Aligned



Not Aligned



要素性能とトータルパフォーマンス

野球選手を例に

良い外野手
とは？

- ・俊足
- ・強肩
- ・落下点予測
- ・ポジショニング
- ・.....

要素性能

試合形式のミニゲームに
おけるパフォーマンス

トータルパ
フォーマンス

MSTモデル

ミッション定義

シナリオ作成

タスク抽出

タスク試験
手順接続

ミッション型
性能評価手順

Mission

倒壊家屋における要救助者の搜索と救助隊進入のための情報収集

Scenario

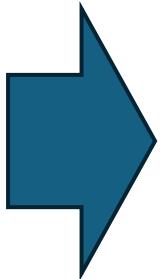
- ・ 2階窓よりドローン進入
- ・ 建屋の健全性を確認しつつ1階に移動。要救助者を搜索し、その状態を把握。

Task

- ・ 狹隘空間の飛行
- ・ 天井、階段などの健全性の観察
- ・ 救助隊の障害になり得るもののが見つかる
- ・ 要救助者の発見と状態確認

これらを組み合
わせた試験手順

タスクの抽象化



再現性, 容易さ, 安全性

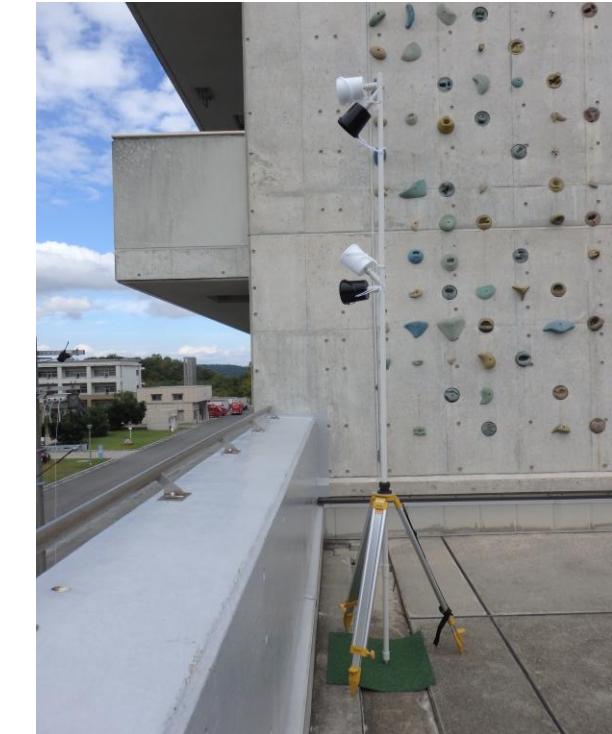


リアリティ

タスクからシナリオへ



UAVのミッション型試験例 (高層住宅火災)



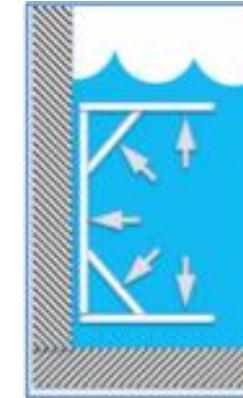
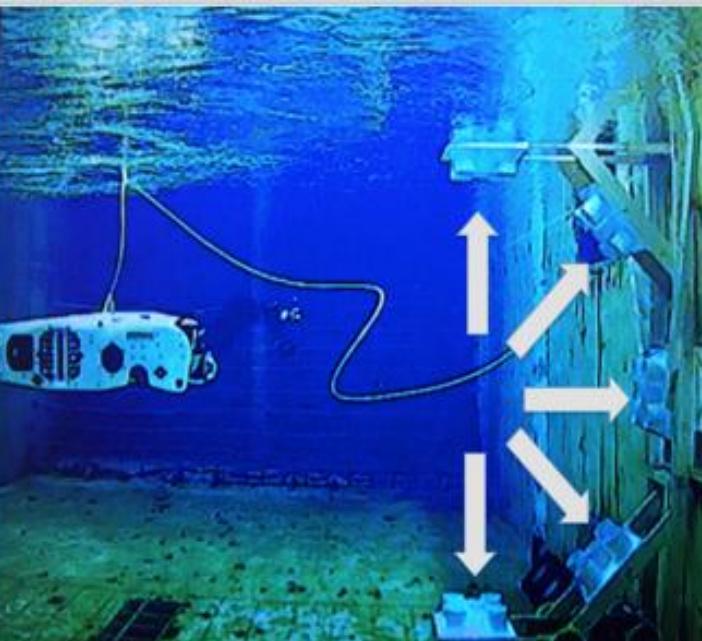
UAVのミッション型試験例 (鉄道車輌内の不審物)



NIST STM 水中ロボット用の例

Aquatic Systems: Development of Standard Test Methods for UROV

15の試験項目を設定。



- 基本的にROVを対象
- タスクレベルのみで、環境要因は含まれていない → ミッション型試験へ

試験環境の構築



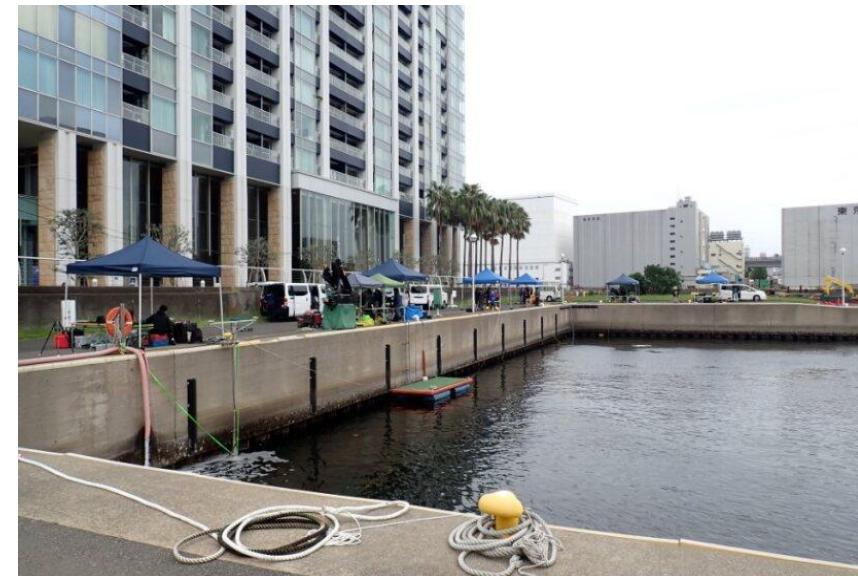
福島河口ボットテストフィールド 屋内大水槽



Frac tank (©Innovact Consulting)



福島河口ボットテストフィールド 水没市街地フィールド



東京海洋大学ポンド

終わりに

- ・ 水中ロボットの利用範囲は拡大しており、今後も様々なロボットの出現が予想される。
- ・ 「現場で使える」ロボットの開発・選定には、適切な性能評価試験が不可欠である。
- ・ 性能評価試験では、実際の運用シナリオに沿って必要となるタスクを抽出し、それらを適切に組み合わせた「ミッション型試験」が有効である。
- ・ 試験では実環境の全てを再現できない。試験項目の優先順位に応じた試験シナリオ・環境の選定が重要である。