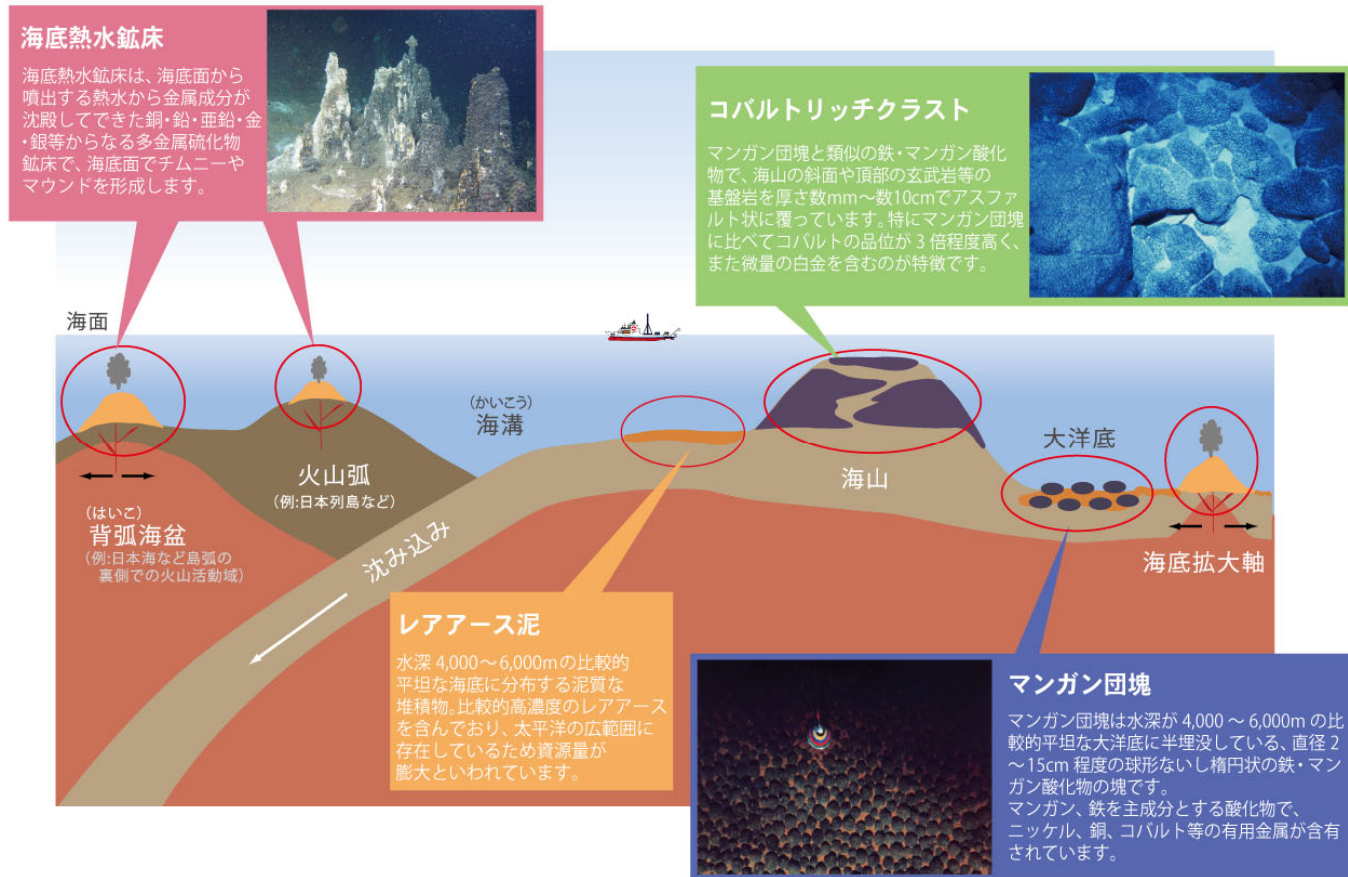


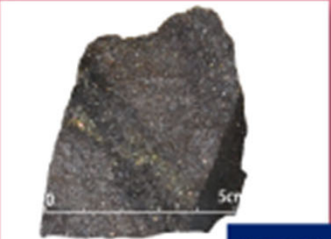
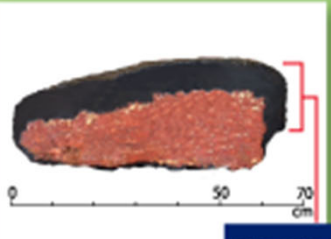
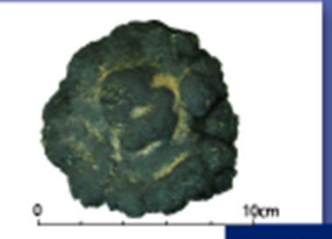
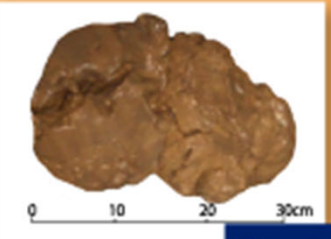
我が国の深海探査システムに求められること (鉱物資源関連科学)



<https://www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_000002.html>

石橋純一郎 (神戸大学海洋底探査センター)

これまでの主な研究対象海域・深度

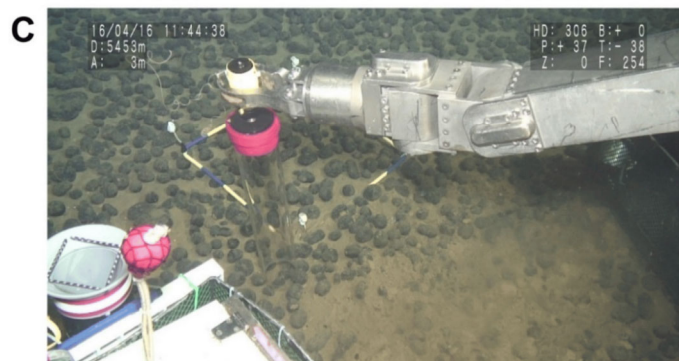
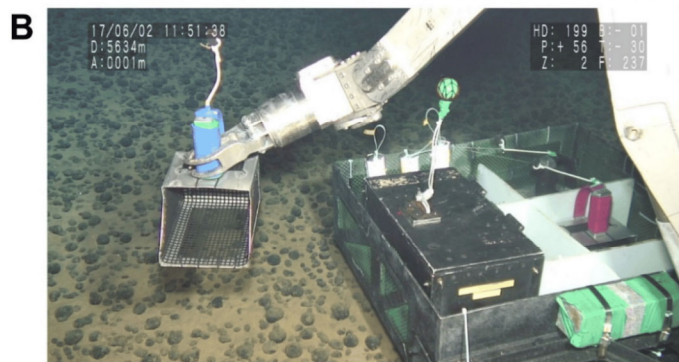
	海底熱水鉱床	コバルトリッチクラスト	マンガン団塊	レアアース泥
対象鉱物	 鉱石試料	 鉱石断面	 鉱石試料	 泥サンプル
水深	水深 500m - 3,000m	水深 1,000m - 2,500m	水深 4,000m - 6,000m	水深 4,000m - 6,000m
有用金属	Cu, Zn, Pb, Ag, Au	Ni, Co, Pt	Cu, Ni, Co	REEs
分布域（代表的海域）	火山弧・背弧海盆 （伊豆小笠原・沖縄トラフなど）	海山・海台（南鳥島, ウェーク島, マーシャル諸島）	平坦な深海底 （ハワイ南東沖等）	平坦な深海底 （北太平洋部）
地形・地質	熱水活動域	海山斜面・平頂部	遠洋性堆積物	粘土状堆積層

<https://www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_000002.html>

- 上表は、「鉱床の存在が期待できる」海域をまとめたものである
（鉱床＝採掘して採算が取れるほど、目的とする元素が濃集した地質体）
- 対象鉱物が豊富に存在する上表の海域がもちろん主な研究対象であるが、科学的な研究の立場からはそれ以外の海域も対象となる

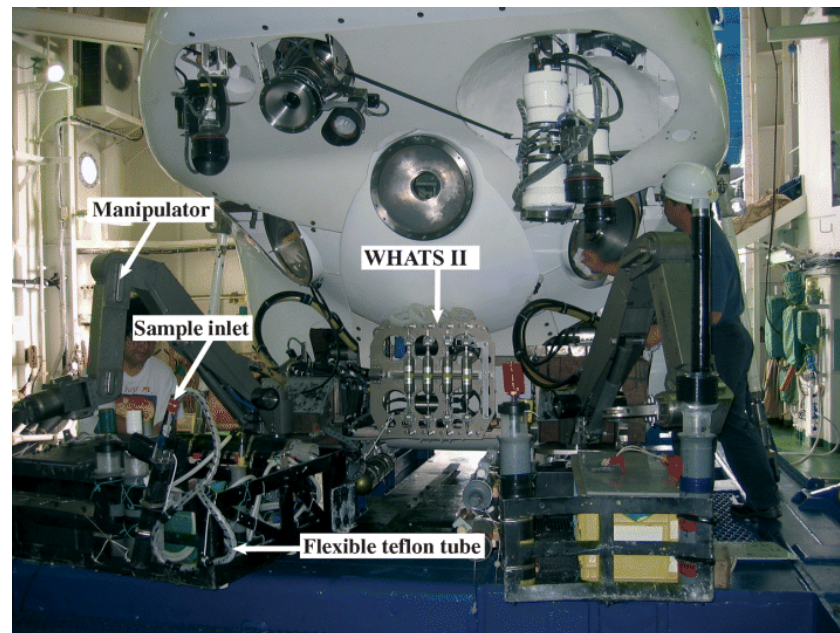
特徴的な試料採取、観測手法、実験方法

マンガン団塊の採取



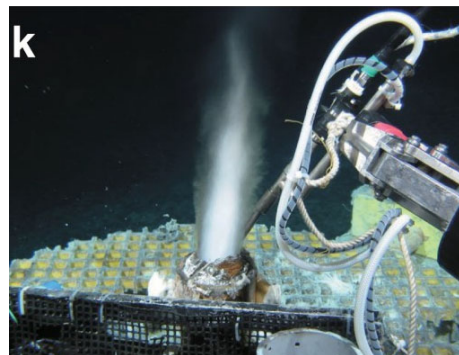
<<https://doi.org/10.3390/min11101100>>

熱水採取装置（無脱ガス型）



<<https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2006.00143.x>>

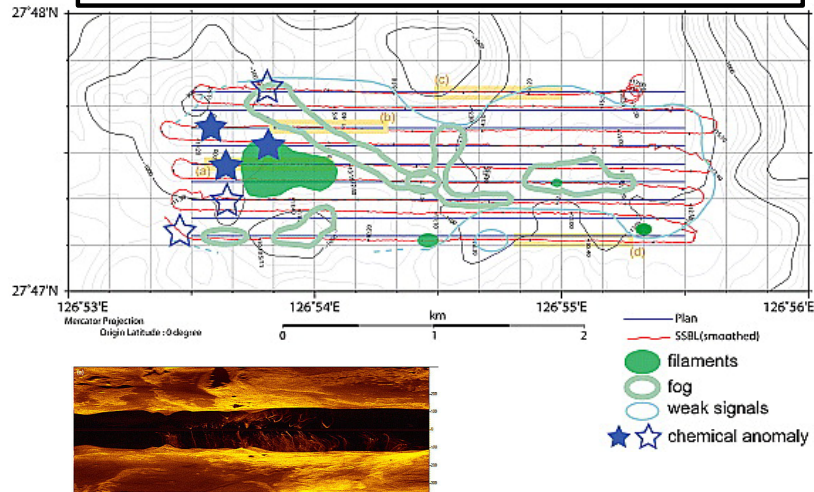
ちきゅう掘削孔からの熱水採取



<<https://doi.org/10.1002/2013GC004895>>

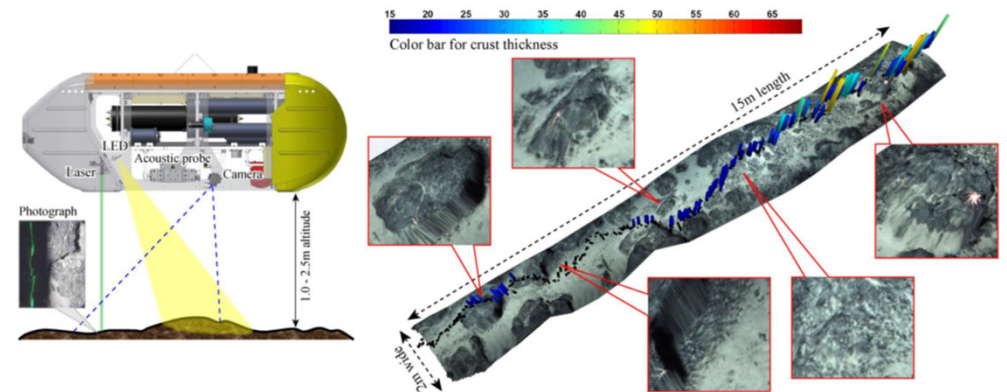
特徴的な試料採取、観測手法、実験方法

AUVによる熱水域マッピング



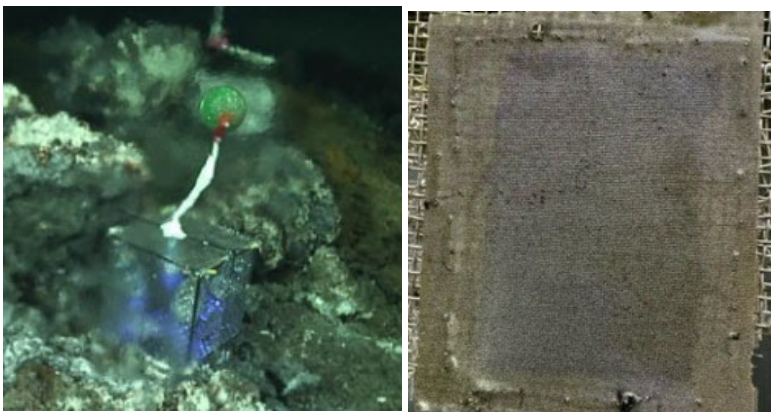
<<https://doi.org/10.1029/2010GC003337>>

AUVによるマンガンクラスト厚さ計測



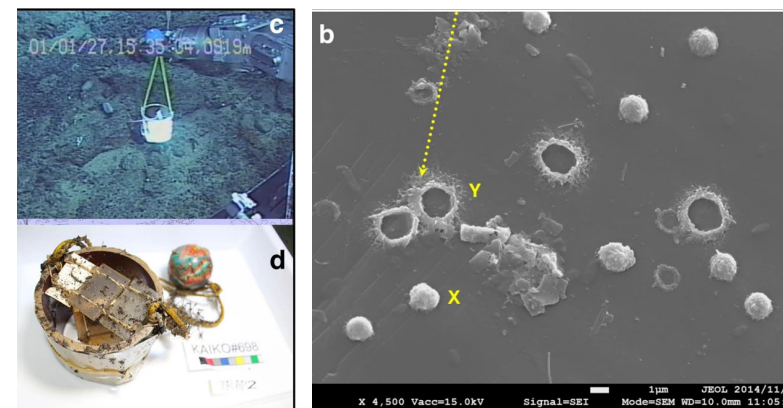
<<https://doi.org/10.1299/jsmermd.2016.1A2-17b2>>

ラン藻シートへの熱水金吸着実験



<https://www3.nhk.or.jp/news/special/sci_cul/2023/10/special/deep-sea-gold/>

Fe/Mn酸化物付着実験（15年間設置）



<<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60200-5>>

今後、研究開発が求められる海域・深度

科学的研究の主な動機として鉱床探査に資する科学的知見の獲得がある

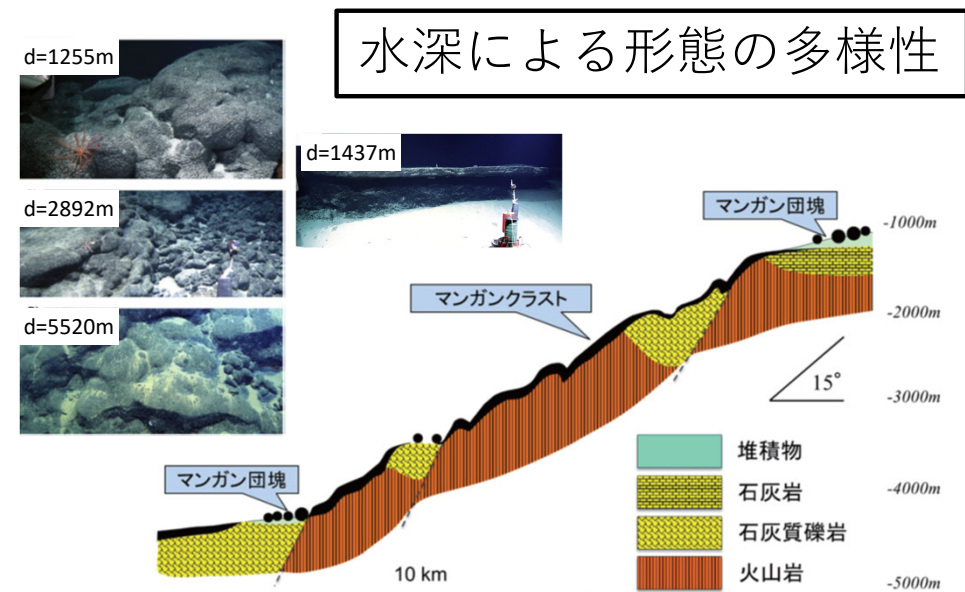
- 鉱床が存在する地域の地質学的・海洋学的環境を詳細に把握することを目的として、鉱物試料採取に限らず、広範囲にわたる多角的な地質調査・環境調査を合わせた研究の実施が求められる
- 鉱床の形成過程を議論することを目的として、鉱物があるが量的に少ない地域との比較、あるいは対照的な地質場（島弧vs中央海嶺）の海域、幅広い水深範囲（特にこれまで探査がまれな3000m以深）との比較などが、科学的研究として意味がある

各論

熱水硫化物鉱床：潜頭鉱床が期待される海域（九州・パラオ海嶺）

コバルトリッチクラスト：海底年齢が古い北西太平洋の海山

マンガン団塊・レアアース泥：海底年齢が古い北西太平洋の大水深海域

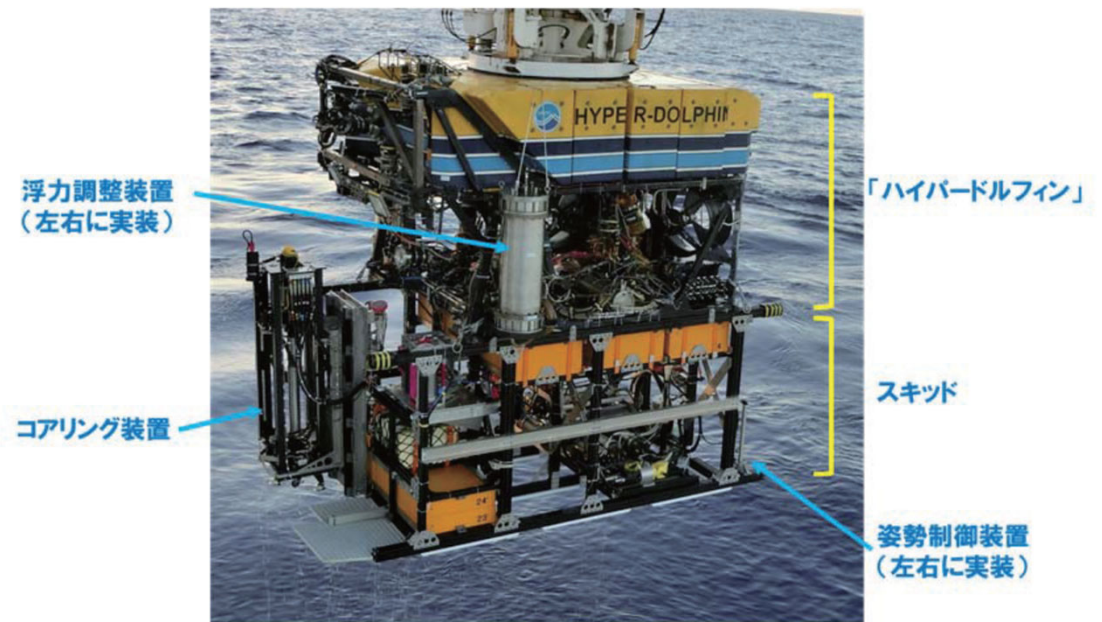


維持・強化が望まれる探査機の技術

- 資源科学は、一つの目的に向かって多用な手法（地球物理・地球化学・鉱物学・地質学）を駆使して多角的に取り組む点に特色がある
- 幅広い空間スケール・空間分解能の視点を組み合わせることが必要で、AUV, ROV, HOV各種の探査機を**バランス良く**揃えて活用することが重要である

各論

- 簡便な掘削装置付きのROV
（海底下への対応）
- 一定間隔での試料採取に特化
（迅速な位置決めを含む）



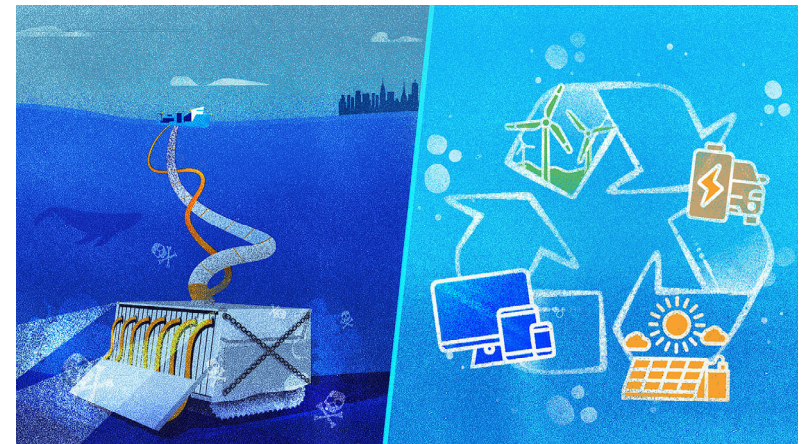
<https://www.jamstec.go.jp/sip/pdf/resultList2018_c.pdf>

海底資源探査等の促進のために、現状不足している深海域の試料・データ

- 海底資源の開発を促進しようという立場からは、人類が有する深海域のデータは様々な面で不足している
- 資源開発に向けての課題（探査手法、環境影響評価、採掘技術など）を解決する上での知見不足につながっている
- 「深海域の科学データが不足していること」は、海底資源開発に保留を表明する上での重要な根拠となっている上に、一般市民が反対に回る心理的背景（良くわからないものは怖い）ともなっている



Leading Scientists Urge **Moratorium on Deep-Sea Mining**: Explore Recycling and Terrestrial Resources First (2023 June)



<https://easac.eu/news/details/deep-sea-mining-press-release>

海底資源探査等の促進のために、現状不足している深海域の試料・データ

この現状を少しでも改善するために、効率的なデータ取得・活用方法を考えることが重要であると考え

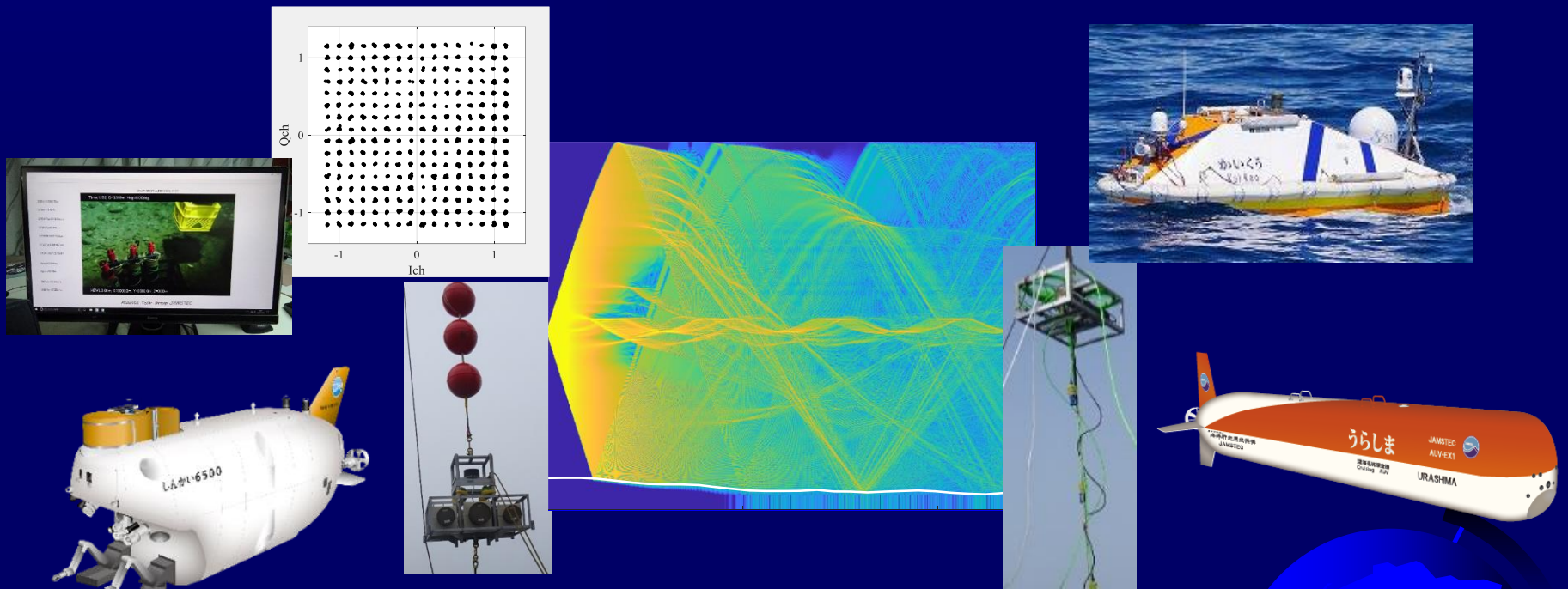
共有化を前提とした深海データのデータベースの構築

- 国際海底機構(ISA)の探査規則で多項目にわたる海洋環境ベースライン調査が義務付けられ、これから大量の深海域データが生み出される
- 宇宙・惑星・大気などを対象とした観測データは原則公開されており、それを解析する研究が大学(院)で行われ、研究分野の裾野を広げている

ROV潜航調査の24時間化

- 毎日の潜航時間に制限をつけないことは、単純なミッションの潜航を可能にし、大きな効率化につながる（実際の潜航調査航海においては調査項目の調整にかなりの労力が割かれている）

深海探査における水中音響通信の動向



海洋研究開発機構 技術開発部長
志村 拓也



水中音響通信における課題

- ①伝搬速度が空中の電波と比べて非常に遅く、移動や時間変動の影響（ドップラーシフト）が桁違いに大きい。
- ②水平、長距離通信の場合は、反射や屈折によるマルチパス波が多数受信され、強い干渉（シンボル間干渉）を生じる。
- ③伝搬速度が遅いため、自動再送要求（ARQ）のような方法は採れない。
- ④使用可能な周波数帯域幅が非常に狭い。

水中の音波の伝搬速度：1,500 m/s

電波の伝搬速度： 3×10^8 m/s

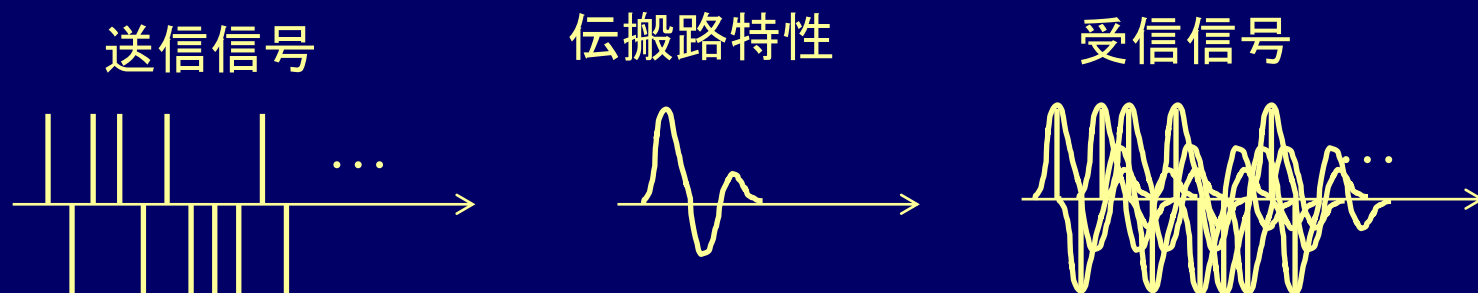


チャンネル等化(伝搬ひずみの補償)

$$r(t) = h(\tau, t) \otimes s(t) + n(t)$$

受信信号 伝搬路特性 送信信号 ノイズ

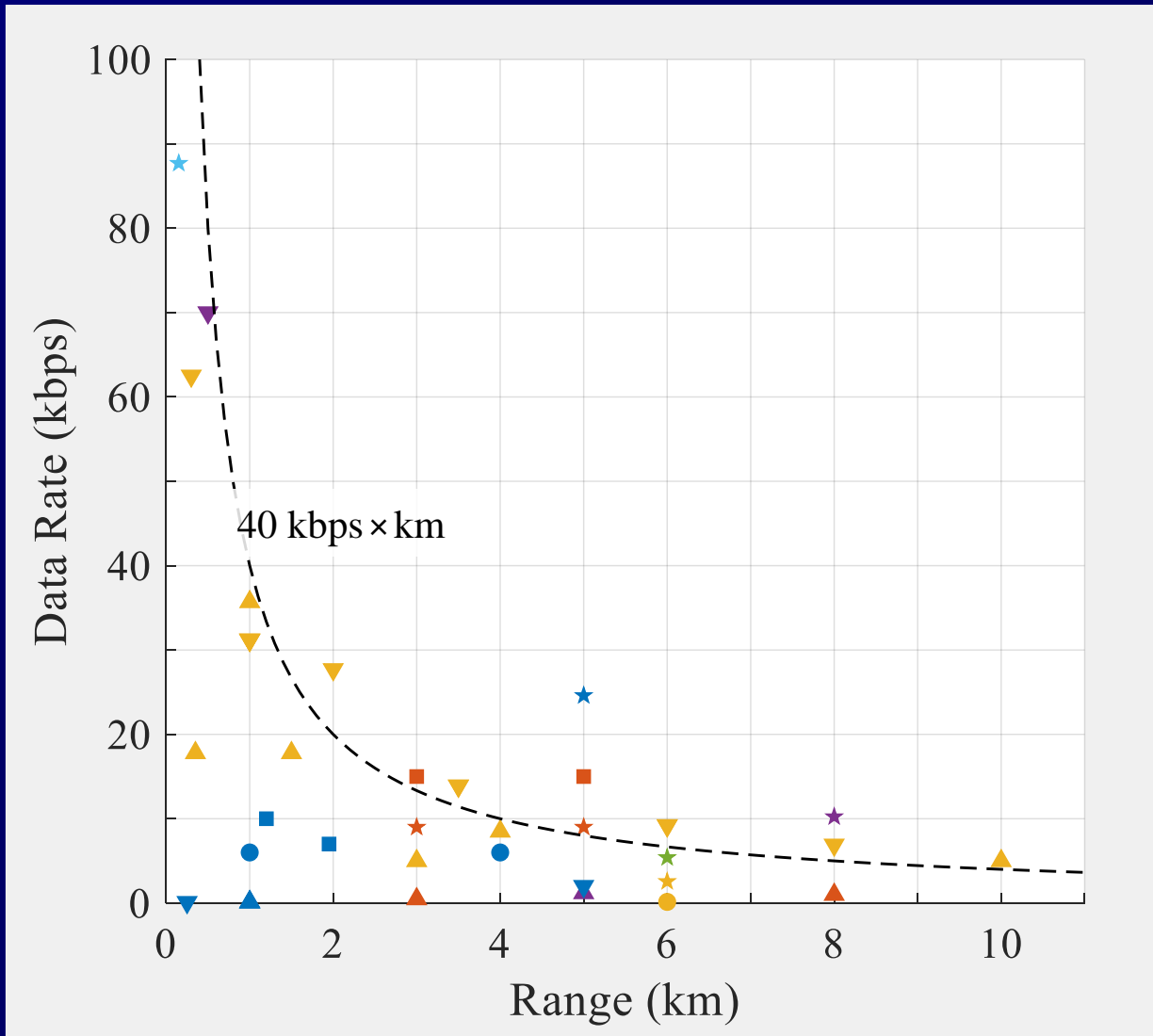
伝搬路特性 $h(\tau, t)$ を如何に補償するか



1. 周波数領域で等化する方法
2. 時間領域で等化する方法
3. 等化をしない方法

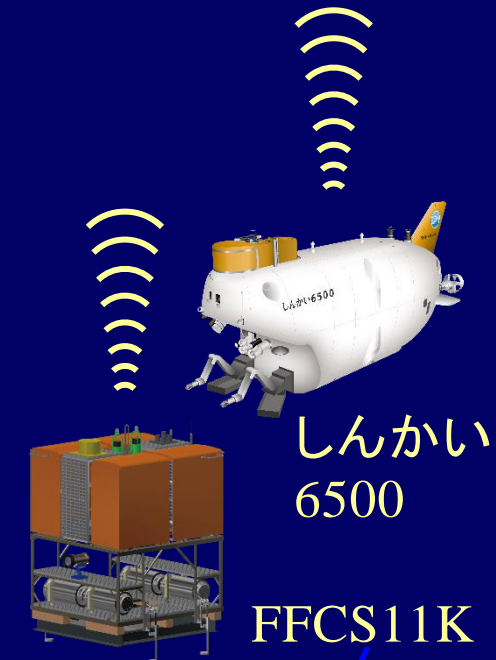
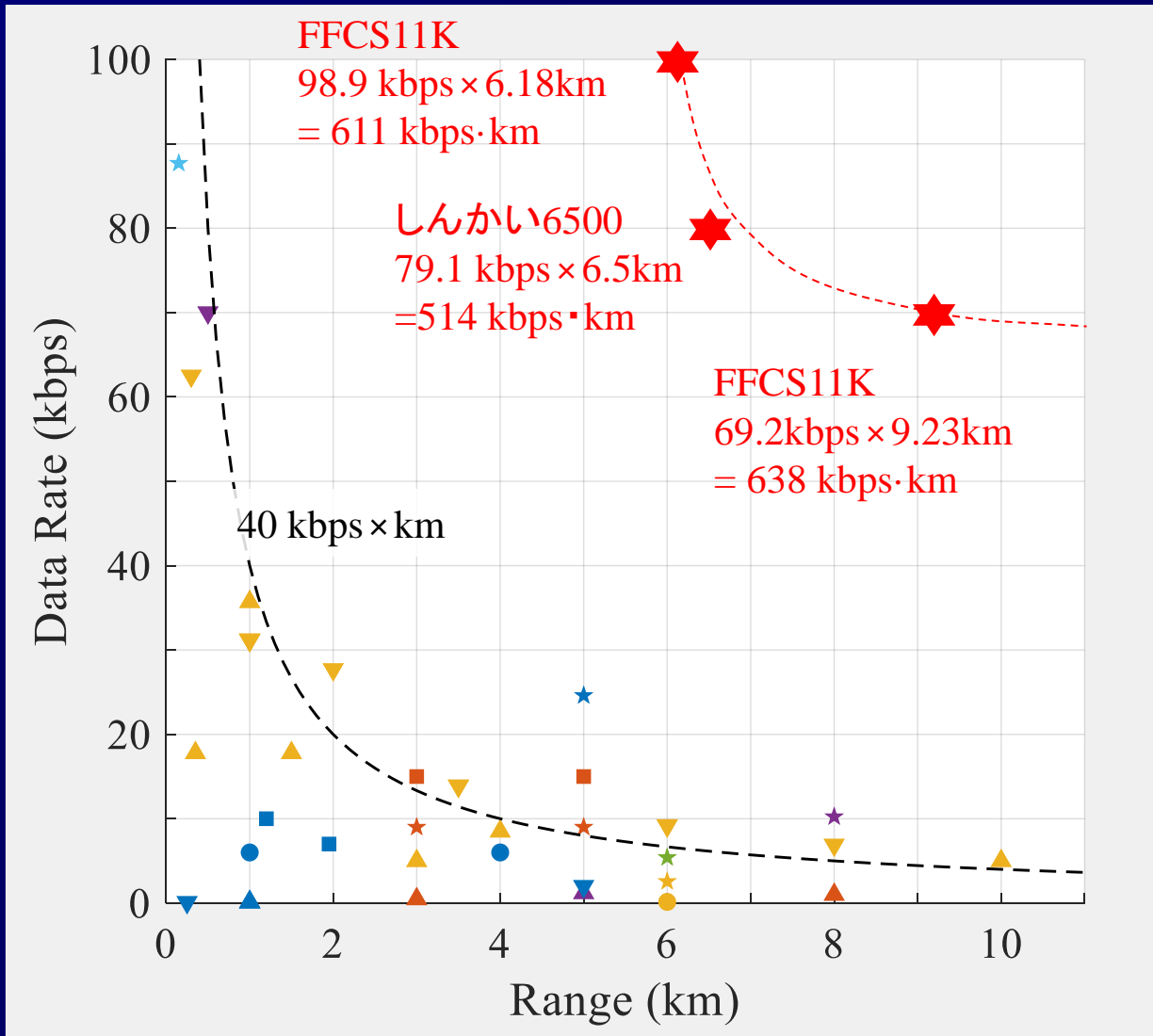


水中音響通信装置の性能



- KongsBerg
- Sercel
- Teledyne benthos
- ▲ Blueprint Subsea
- ▲ DSPComm
- ▲ LinkQuest
- ▲ L3Hariss
- Develogics
- Subnero
- ★ Sercel
- ★ Sonardyne
- ★ Teledyne benthos
- ★ Popoto Modem
- ★ WHOI
- ★ FAU
- ▼ Aquatec
- ▼ Develogics
- ▼ Evologics
- ▼ KongsBerg
- 40kbps·km limit

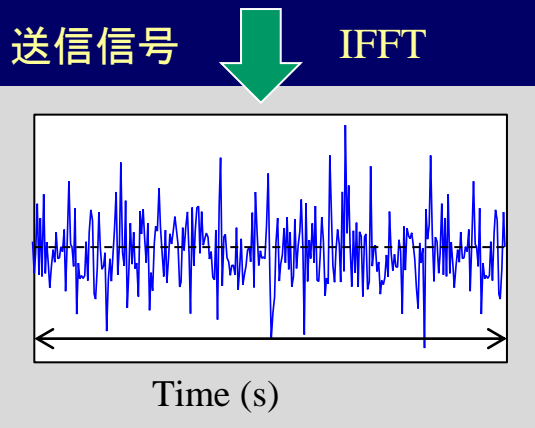
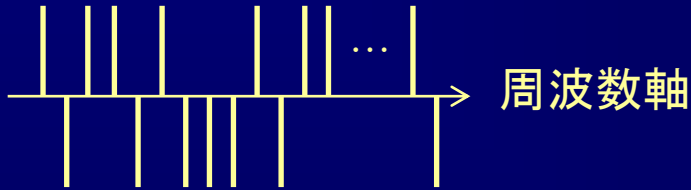
水中音響通信装置の性能



信号処理部を
インハウスで製作 4

時間変動への対応

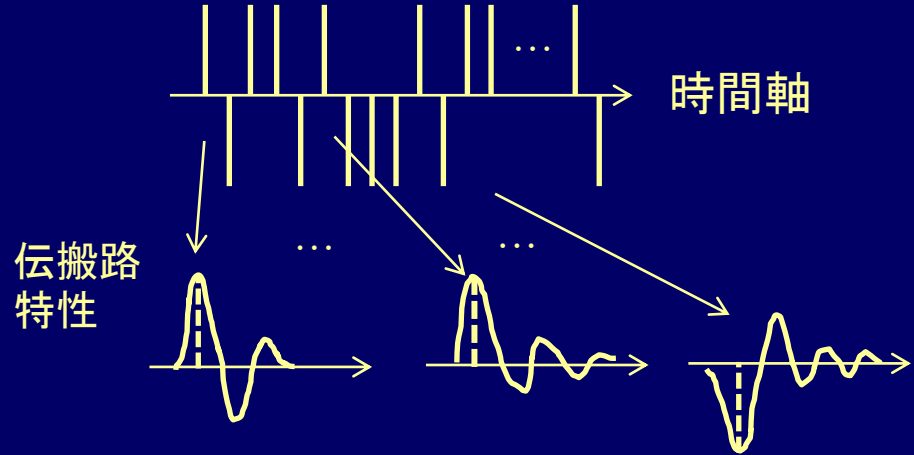
OFDM: 周波数領域等化



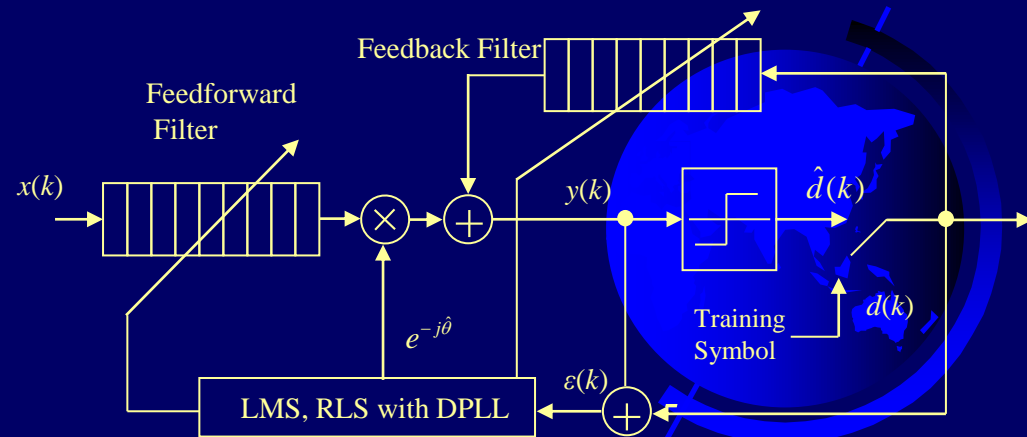
OFDMの“シンボル”=FFTの時間窓

FFTの時間窓よりも短い周期の時間変動が加わると、IFFT/FFTが崩れる。
=> 計算負荷は非常に軽いが、時間変動に弱い

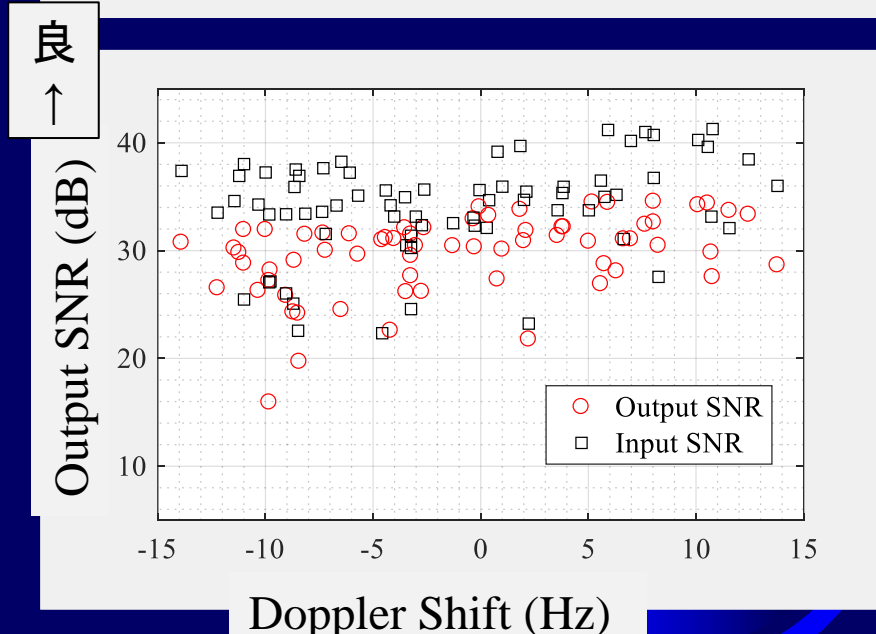
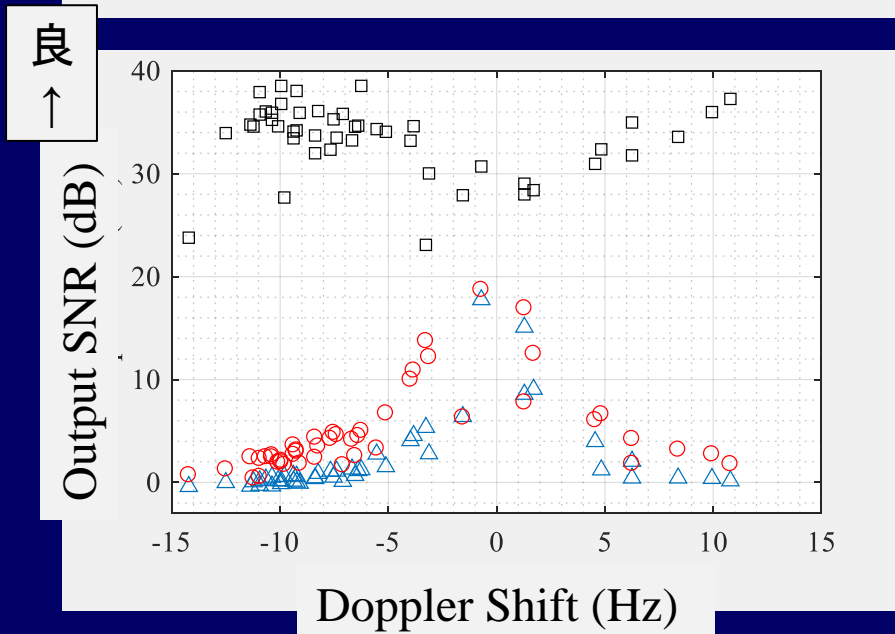
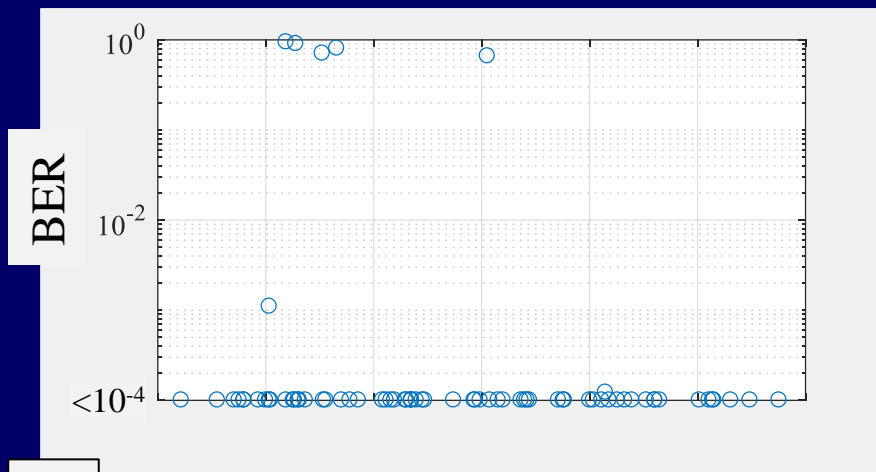
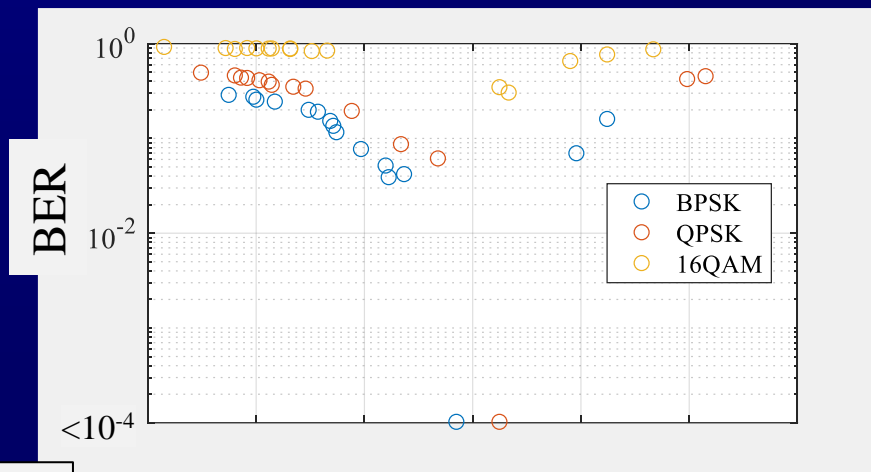
DFE: 時間領域等化



1シンボル毎に処理するので、時間変動にも対応できる。



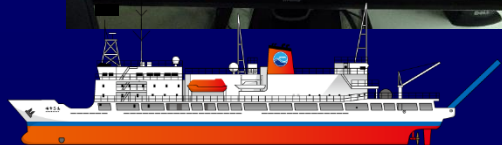
実証試験での比較検証



OFDM

DFE

しんかい6500、FFCS11K 音響通信



しんかい6500



320 × 240画素の静止画を約2.5秒に1枚で転送

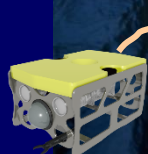
- ・水中通話機で音声での会話できるが、6,000mだと往復8秒かかってしまう。
- ・口頭で状況や作業の詳細を説明するのは難しい。映像で見ることができれば、調査やオペレーションが大幅に効率化できる。



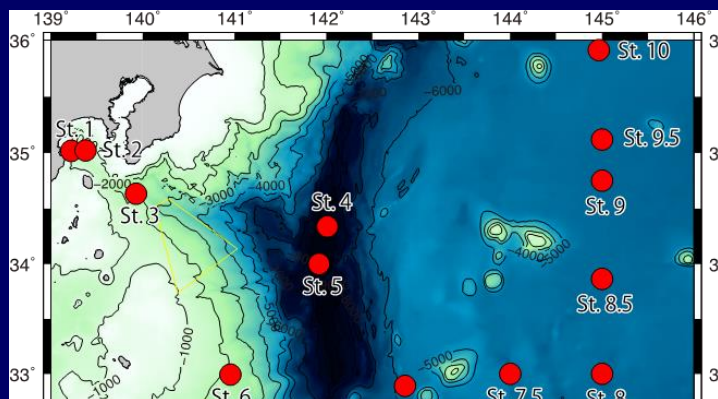
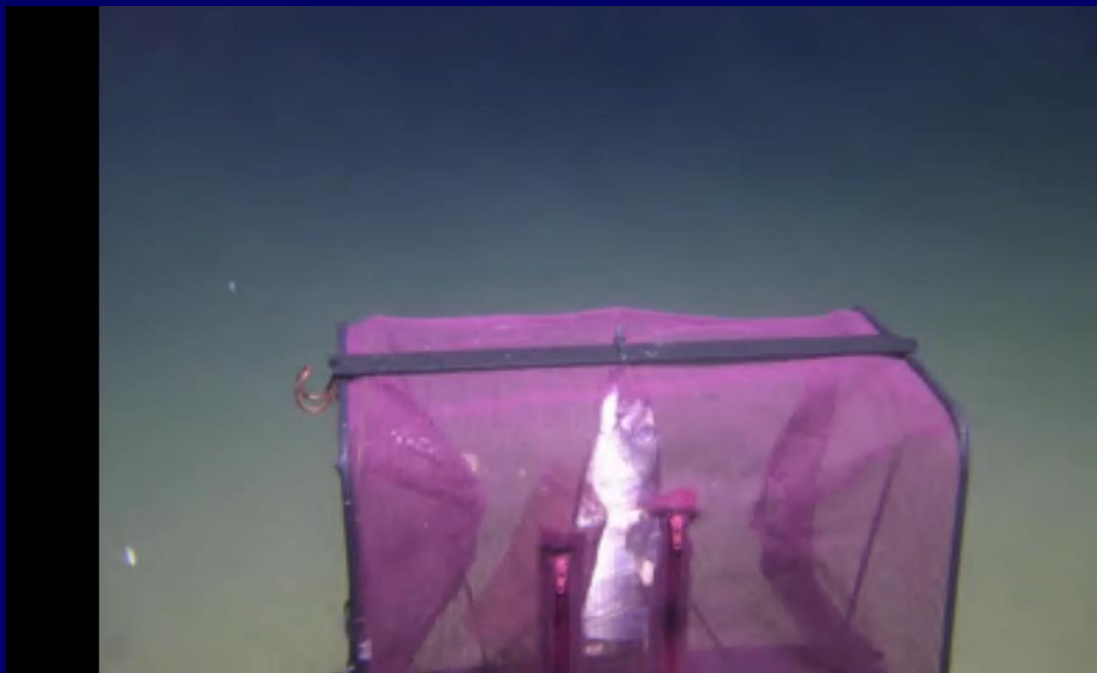
しんかい6500、FFCS11K 音響通信



FFCS11K
FeeFall Camera System 11K
フルデプスまで
探査可能なランダー



11,000m



日本海溝
9,000mからの
伝送

Bakuwana (Limiting Factor)の音響通信



Dagon



Bakuwana



Lander

L3 Harris (旧Oceania製) GMP300 LF

Digital Communication

方式 : DSSS

Power : 160-190.5 dB

通信速度 : Up to 1000baud(raw), 800baud(effective)

Doppler : ± 15 kt

Max.Range : 10baud with 45 km, 100baud with 25 km
1000 baud with 5 km

Min. SNR : -9 dB

Bandwidth : 6.3-12.7 kHz

VoiceComm.

方式 : NATO STANAG 1074

ELAC UT3000 compatible

Max.Range : 25 km

その他

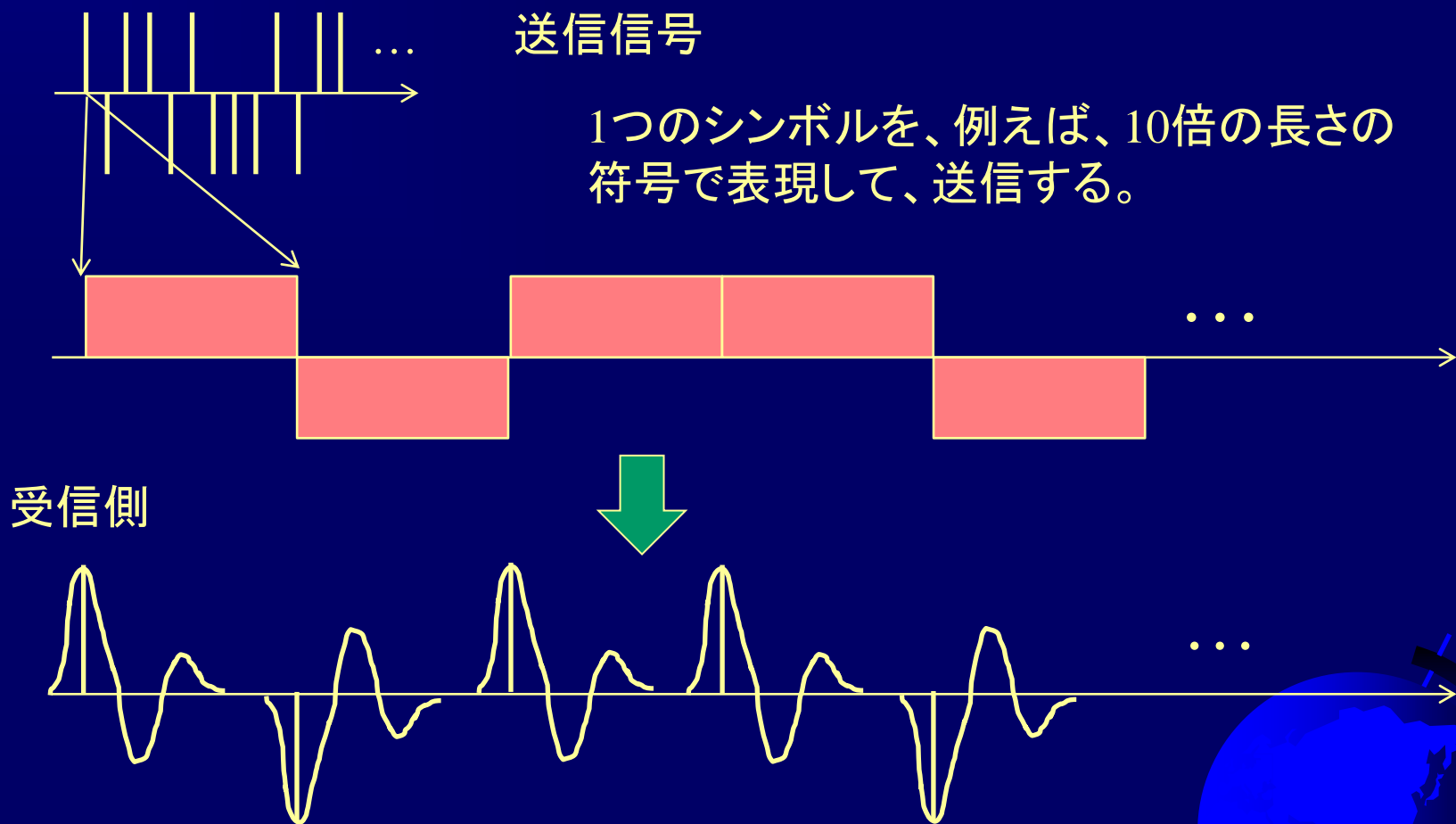
Transponder mode/距離計測モード 有

⇒ 測位に利用, 2系統のモデムを搭載

High Power Option : Up to 194 dB



スペクトラム拡散 DSSS : Direct-sequence spread spectrum



受信した後に相関を取って
ピークを検知する

「チャネル等化」の処理は必要ない
確実さは増すが、通信速度は犠牲になる。

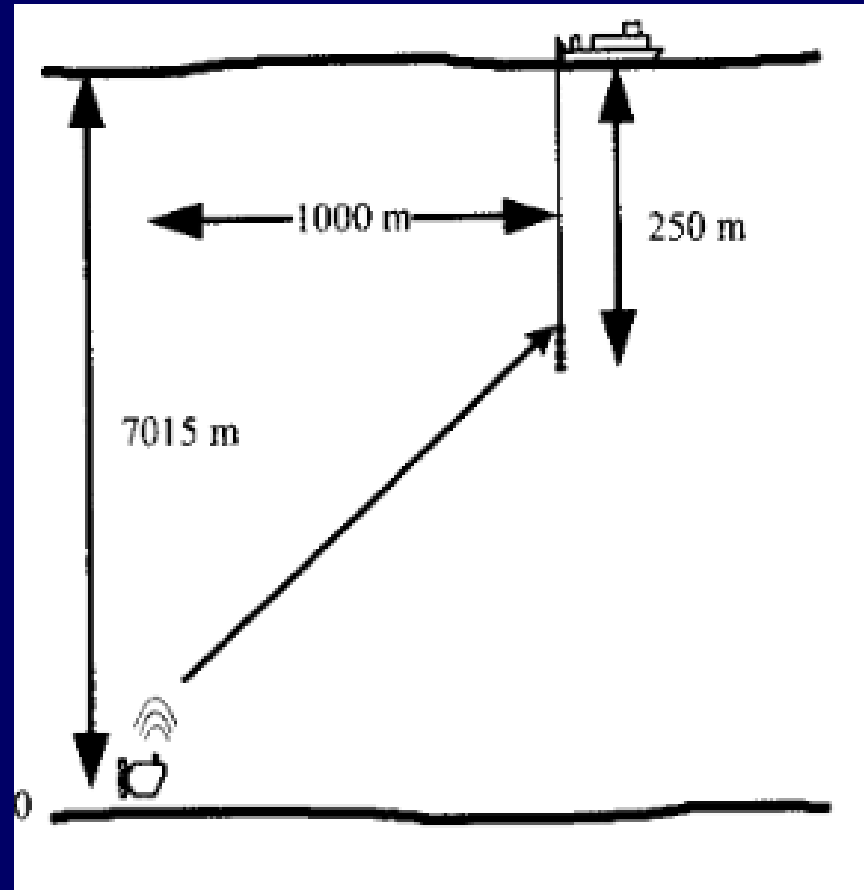
Jiaolong (蛟竜)、Fendouzhe (奮闘者) の音響通信



Jiaolong (蛟竜)



Fendouzhe (奮闘者)

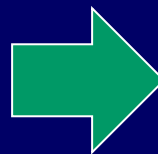


Jiaolong (蛟竜) DFEを採用 通信速度は15kbps
Fendouzhe (奮闘者) は最速で10kbps
カバーエリアが広い

マルチユーザ通信測位統合装置の開発

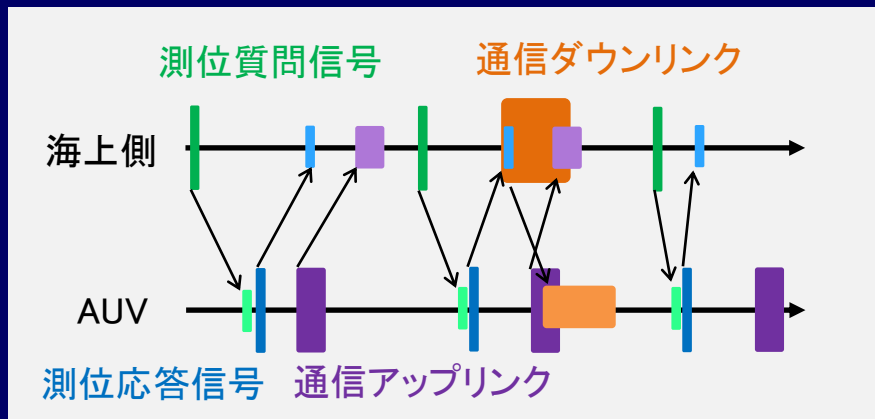


通信装置と測位装置が別々に装備



送受波器の共通化と信号処理の統合

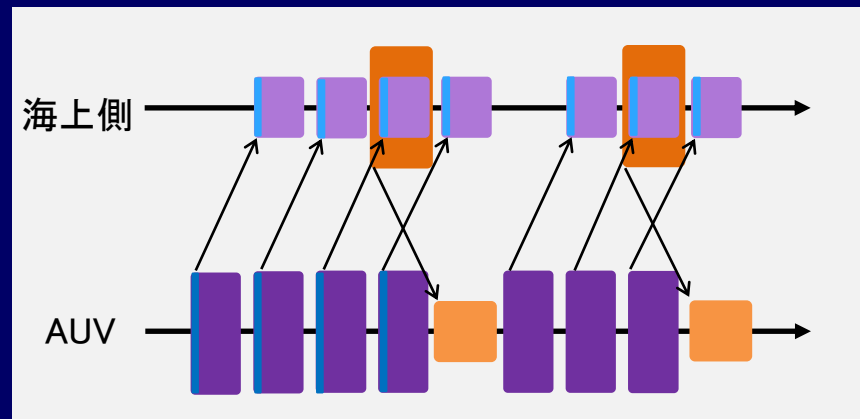
時間・周波数帯域の効率的な利用



通信と測位が重ならないようにするため
頻度が低い。

インターバルを狙って発信しても
位置関係が変わると重なってしまう。

AUVの複数機運用(マルチユーザ)の場合、
さらに頻度が低下し、複雑になる。



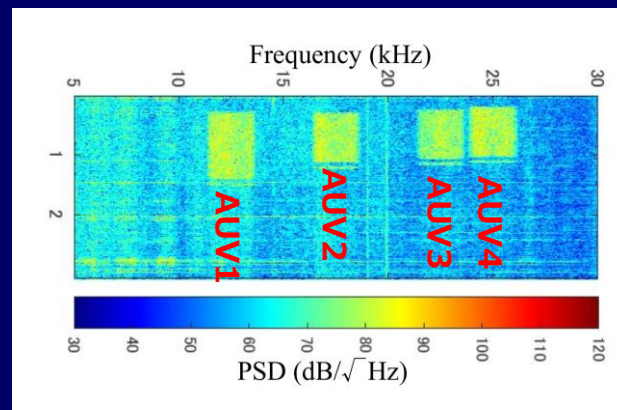
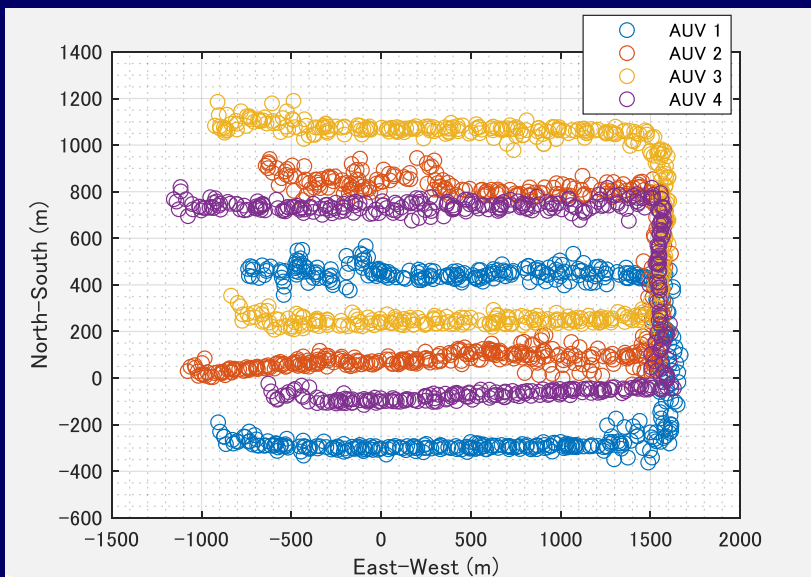
通信の信号を使って測位も行うため
通信と測位の頻度が上がる。

測位によって通信のタイミングが
制御されているため、重ならない。

小型の原子時計により時刻が制御されており、
測位の質問信号も不要。

複数AUVとのマルチユーザ通信測位 実海域試験

2022年9月7~9日 駿河湾1,000~1,400m海域



	AUV 1	AUV 2	AUV 3	AUV 4
Number of UL	1314	1195	1184	1086
Success	98.25 %	99.67 %	94.68 %	99.17 %
CRC error	1.37 %	0.33 %	5.24 %	0.08 %
Not detected	0.38 %	0 %	0.84 %	0 %

ご清聴ありがとうございました.

謝辞

本稿の成果の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「次世代海洋資源調査技術」(管理法人: JAMSTEC)の助成を受けたものです.

主な参考文献のリスト

<https://www.jamstec.go.jp/engd/j/members/shimura.html>

その他の参考文献

Hadal manned submersible five deeps expedition explores deepest point in every ocean, A. J. Jamieson, et al., Sea Technology, 60(9), 22-24.

Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible “Jiaolong”, Min Zhu, Yanbu Wu, et al., Chinese Journal of Acoustics, Vol.32, No.1.

The Acoustic System of the Fendouzhe HOV, Yeyao Liu, Jingfeng, Xue, et al., Sensors, 21, 7478.

Development of Integrated Acoustic Communication and Positioning System for Operation of Autonomous Underwater Vehicles and a Sea Trial, Y. Watanabe, et al., Proc. of OMAE 2023.

