

LEDを用いた適応型 水中可視光無線通信システムの研究

Adaptive Control for LED-based Underwater Wireless
Communication Using Visible Light

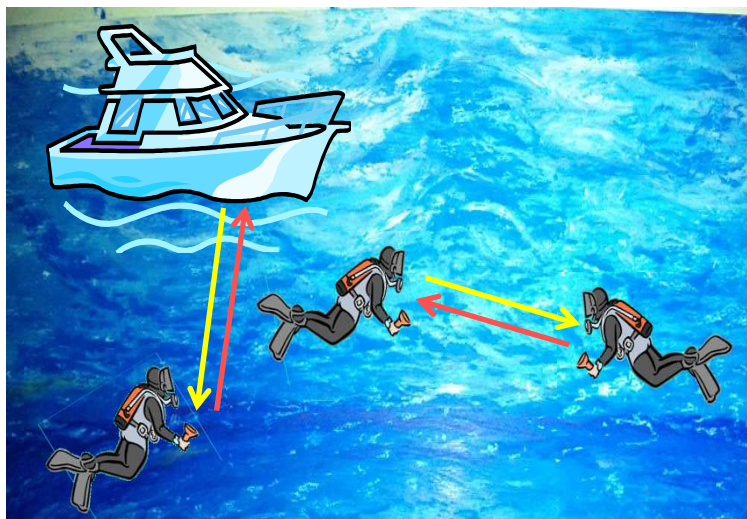
林 新 LIN Xin
(株)インターエナジー Inter Energy, Inc.

主な内容

- 水中可視光無線通信の研究背景
- 水中可視光無線通信方式
- 水中可視光無線通信装置の開発
- 水中可視光無線通信技術の応用分野

水中無線通信の研究方向

水中無線通信には二つの発展が求められている

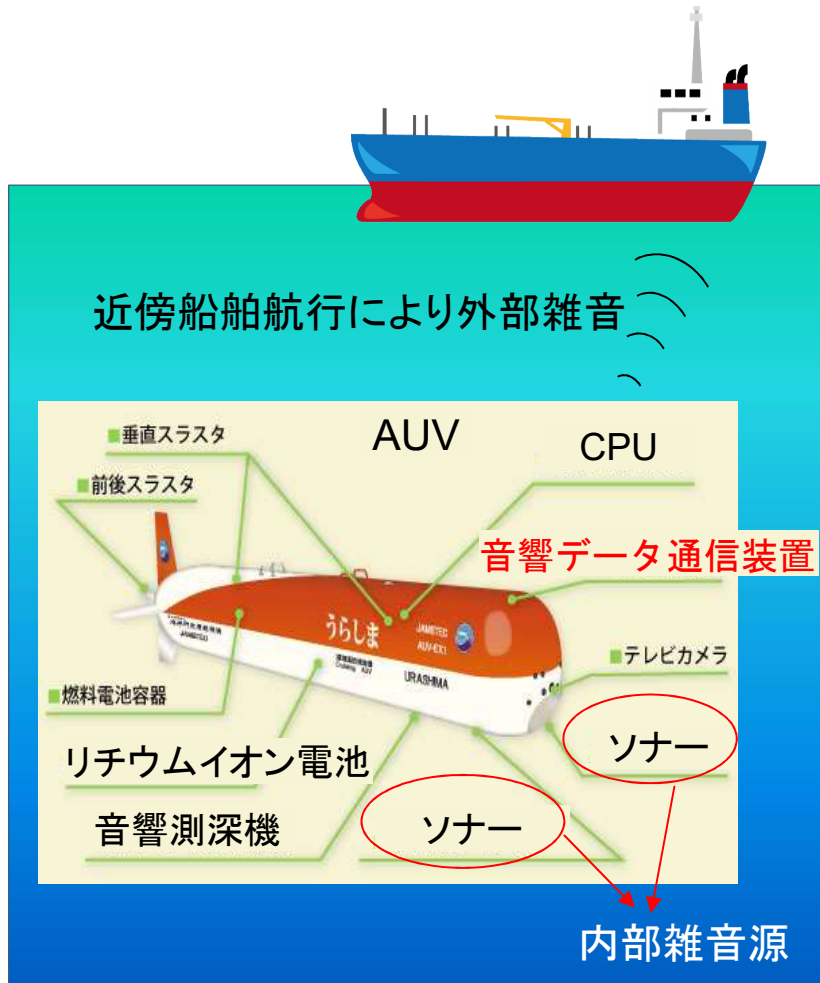


アナログ水中会話



デジタル水中データ通信

水中無線データ通信の現状



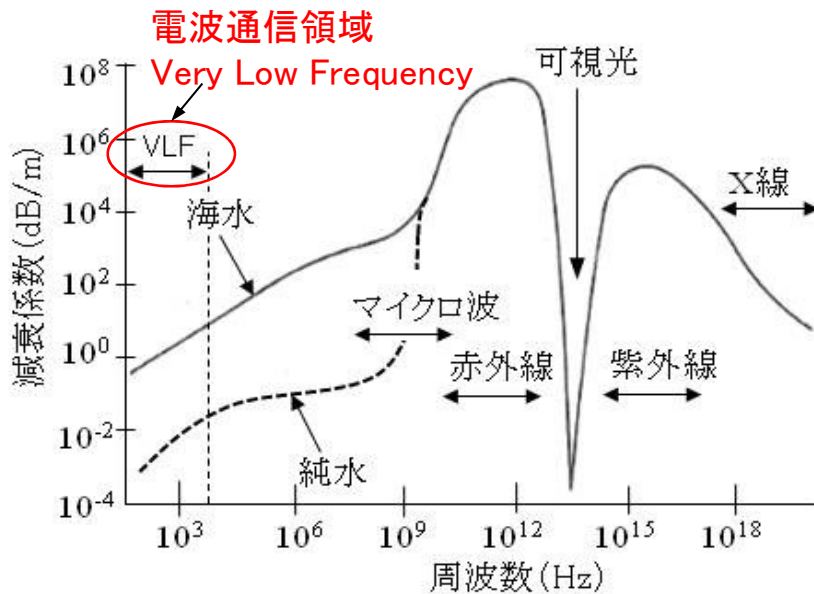
- 水中音響通信装置によってデータ伝送を行う
- 音響でデータ伝送の主な課題:
 - 通信装置以外の音響ソナー等からの内部雑音と船舶航行の外部雑音
⇒ 厳しい使用環境
 - 水中音速は最大約1500m/s
⇒ 低通信速度(画像伝送困難)
 - 航行中にはドップラ効果により周波数が不規則
⇒ 通信品質低下

$$f' = f \times \frac{V - v_o}{V - v_s}$$

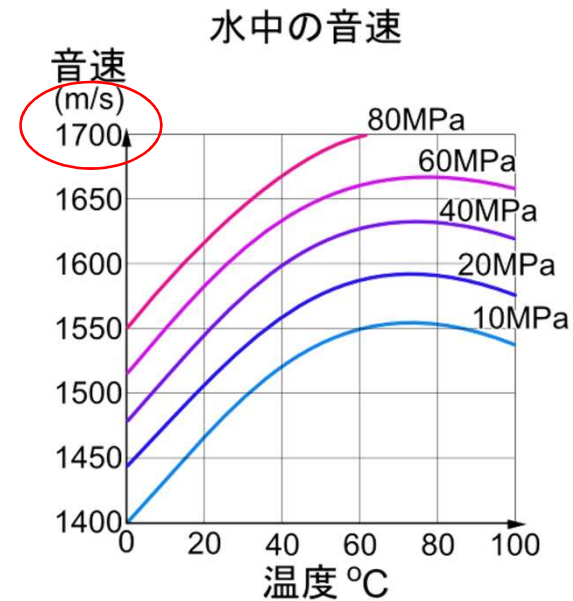
観測者速度
音源速度
音源振動周波数
音速

水中での電磁波の吸収と伝搬特性

項目	電波	音波	可視光波
距離	塩の電解液で急速減衰, 通常1m以下(VLF領域)	屈折によって伝搬経路が形成, 陸上より遠くまで届く (10km以上)	海水濁度により 15-100m
速度	超低速	低速(水圧により~1700m/s)	高速大容量可能
課題	低速で陸上技術利用困難	低速, ドップラシフト効果	散乱により分光減衰



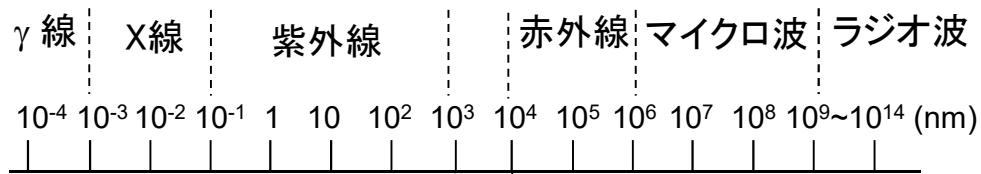
水中での電磁波の吸収減衰



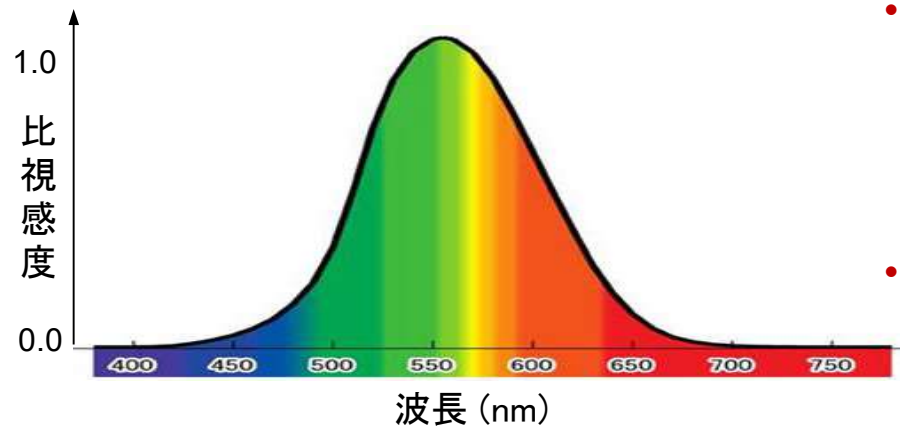
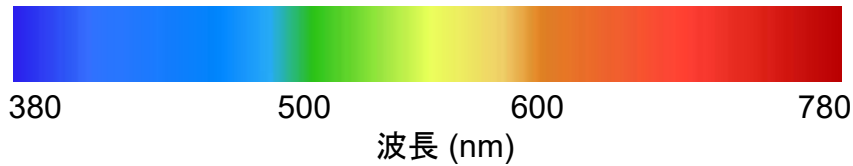
水中音波の速度が水圧や水温に依存

可視光波とは

電磁波スペクトル



可視光スペクトル



光波の数学記述

$$E_r = E_0 \cdot \cos 2\pi \left(\frac{r}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

光振幅/強度(明暗) 光位相(形状)

光波長(色)

- 可視光波の定義: 人間の目で見える波長 **380nm-780nm**の電磁波. この範囲の波長が人間の目に入って来た時に, 色として脳で認識され, 各色は各自の波長を持つ;
- 可視光波の構成: 7色の単色光から構成.

水中可視光無線通信のリンクタイプ

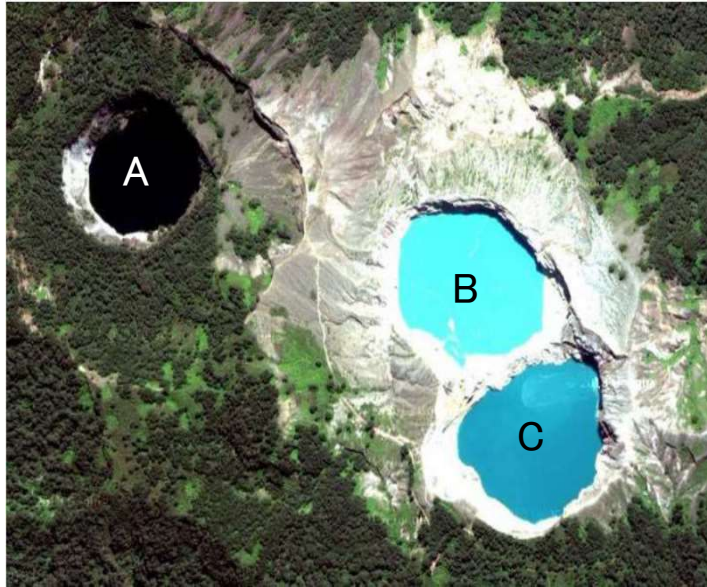
LOS拡散 (Line of Sight)	Non-LOS 反射拡散	反射率変調方式
		
<ul style="list-style-type: none">• 簡単• 高伝送効率	<ul style="list-style-type: none">• 障害物に回避可能• エネルギー損失有	<ul style="list-style-type: none">• 低消費電力双方向通信適用• 水中光センサーネットワーク最適

【課題】

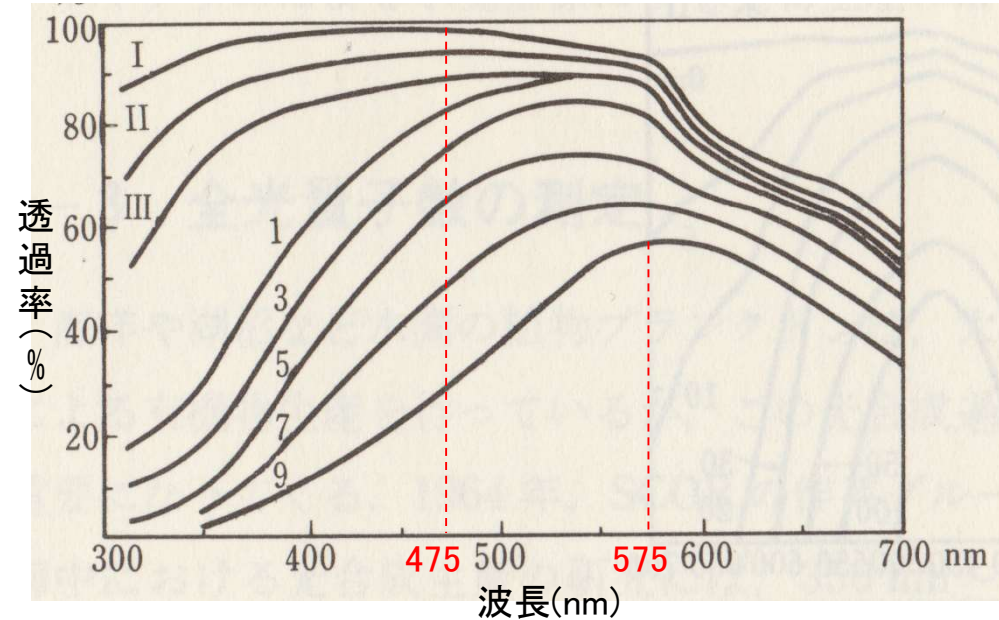
- 海中障害物の回避
- 低消費電力または高伝送効率で通信(光束分散により光エネルギー損失)

水中可視光無線通信方式

海中通信路 (光学的水型 optical water type)



自然水変化(A, B, C)の様子
(L. Johnson, The Univ. of Warwick)



各光学的水型の分光透過率 (Jerlov, 1964)

I ~ III : 外洋水 (清澄な海域); 1 ~ 9 : 沿岸水

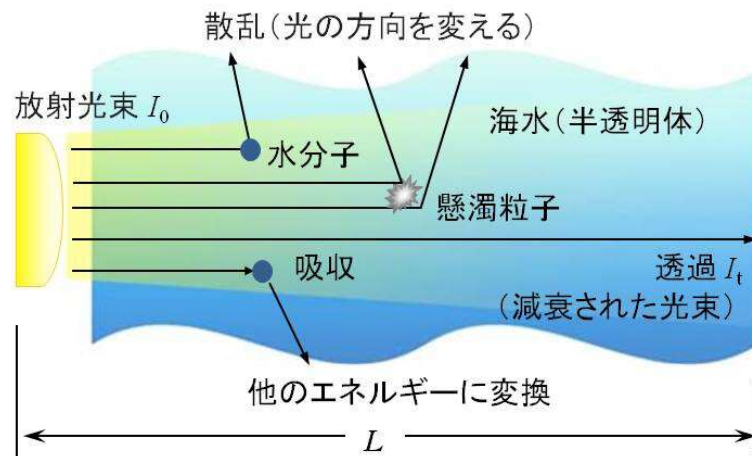
最大透過率: 外洋水タイプ I 型 475nm (青色光)
沿岸水タイプ 9 型 575nm (橙色光)

海水の濁度 (水型) により分光特性を示した

海中通信路 (光の海水放射伝達特性)

- 海面: 反射・屈折・偏光・透過がある複雑な物質やエネルギーの相互交換の境界
- 海中: 光は**吸収** $a(\lambda)$ と**散乱** $b(\lambda)$ を受けながら伝達/消散してゆく。

伝達の物理モデル



伝達の数学モデル

$$I_t(\lambda, L) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-K(\lambda) \cdot L)$$

$I_0(\lambda)$: 入射光強度;

λ : 光波長;

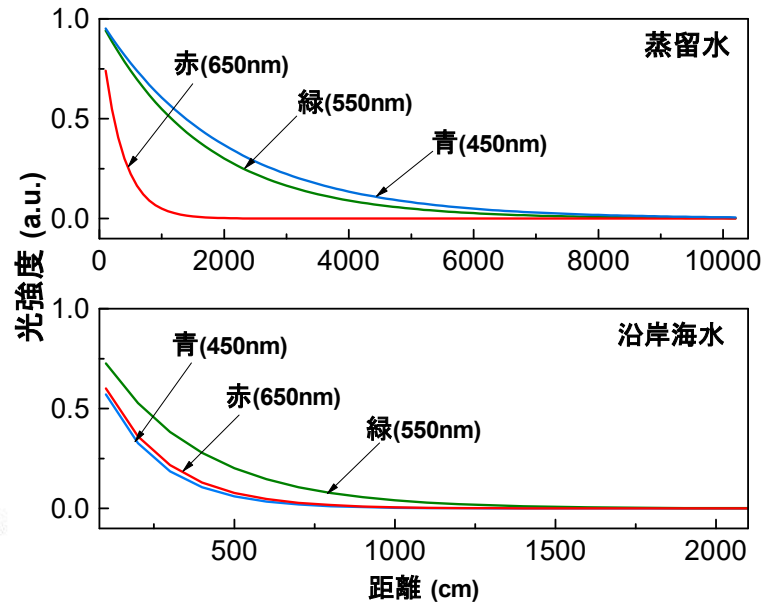
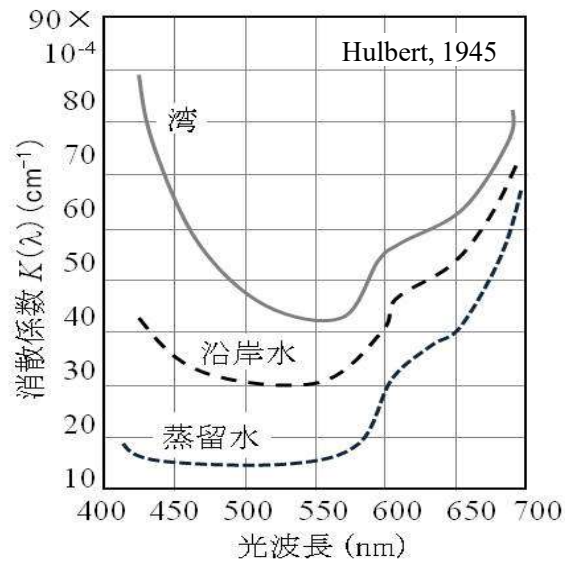
L : 伝達距離

$$K(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda):$$

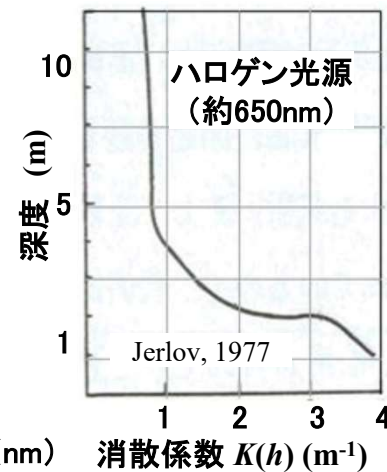
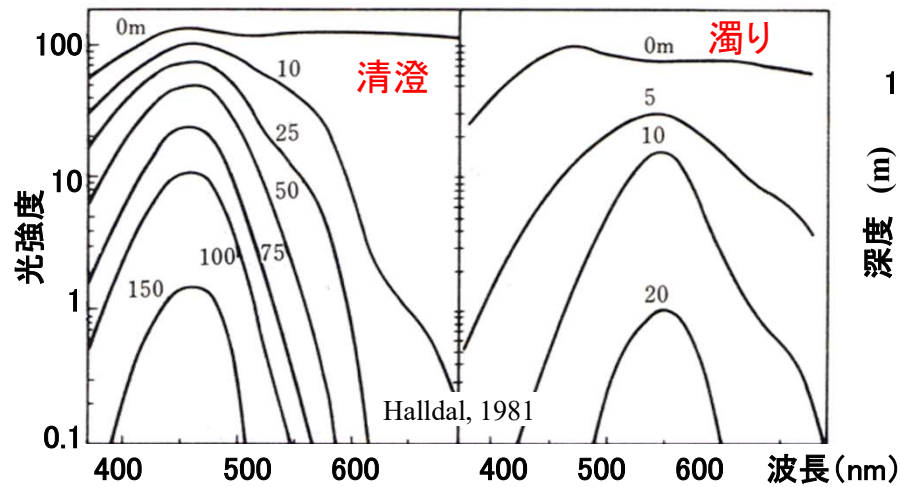
減衰率 (消散係数: 海水固有の物理光学性質)

消散係数 $K(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$		吸収係数 $a(\lambda) = a_m(\lambda) + a_p(\lambda)$		散乱係数 $b(\lambda) = b_m(\lambda) + b_p(\lambda)$	
		水分子 $a_m(\lambda)$	懸濁粒 $a_p(\lambda)$	水分子 $b_m(\lambda)$	懸濁粒子 $b_p(\lambda)$
清澄海水		○	—	<ul style="list-style-type: none"> • 光波長の依存性が小さい • 光の方向を変える • 他のエネルギーに変換 	
濁り海水	長波長	○	△		
	短波長	△	○		

海中通信路 (光減衰の波長と深度依存性)



異なる海域において光消散係数の光波長依存性



波長だけではなく、深度にも依存

- 深さとともに急速に減衰;
- 減衰の速さは光波長に依存;
- 透過波長帯は海域によって異なる

海中通信路（深海のマリンスノー現象）

➤ マリンスノーとは

肉眼で観察可能な海中懸濁物、ある沈降速度で海底まで降り注ぎ堆積するものである



マリンスノー現象



相模湾深海のマリンスノー

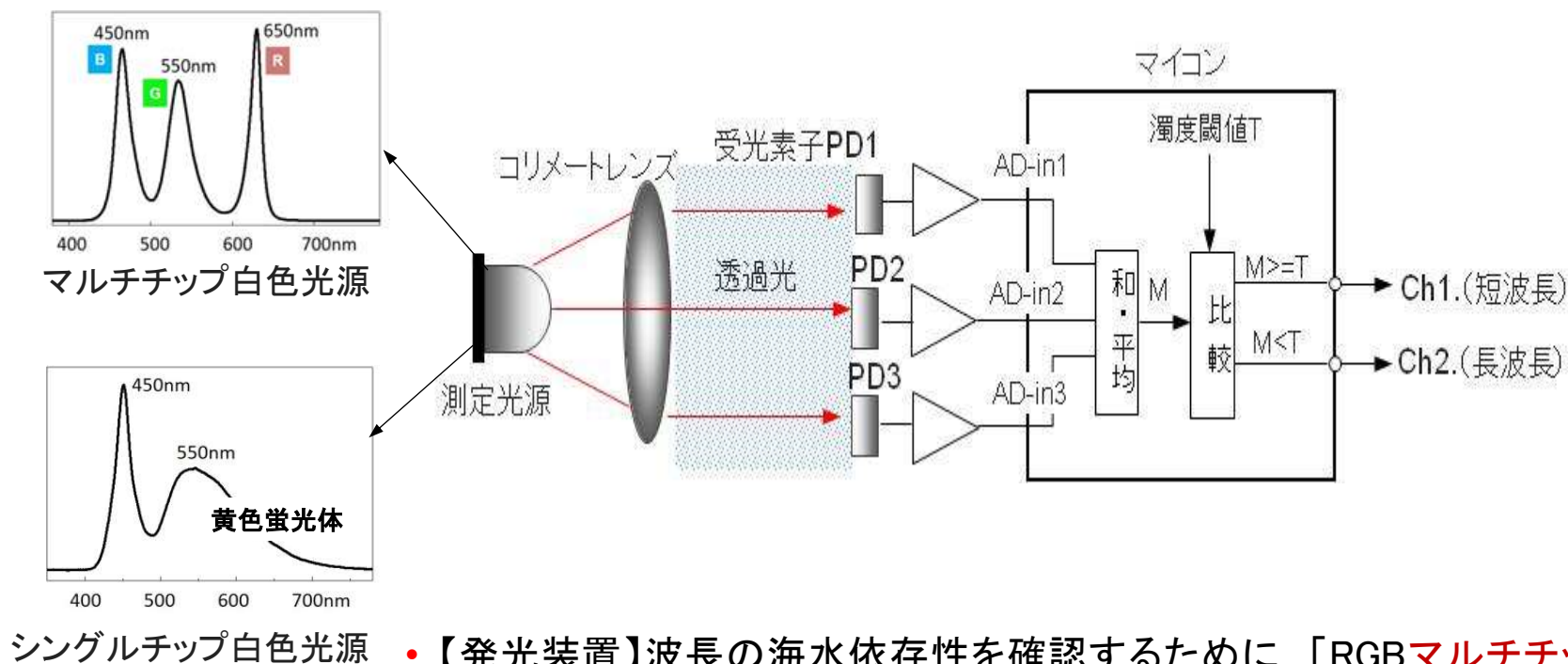
➤ 海中光伝送への影響

「スノー」粒子のサイズが大きいので遮光効果があり、伝送路の光束を妨害、伝送距離が低下

➤ 駿河湾や相模湾のマリンスノー

沿岸部で急激に深くなっている海域では、川や都市から流れてくる有機物によってプランクトンが多く発生し、沢山のマリンスノーを見ることができる。

海中通信路 (LED光源の水中透過実験)

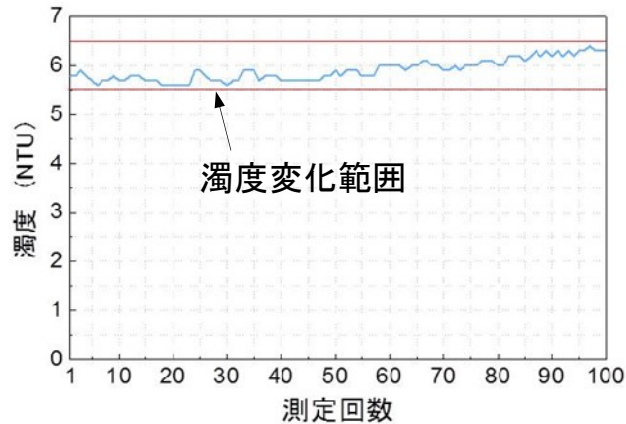


- 【発光装置】波長の海水依存性を確認するために、「RGBマルチチップ」と「青色シングルチップ+黄色蛍光体」2種類の白色LED光源を試作.
- 【受光装置】3つのPDを設置し、多点測定によって安定性を確保.

海中通信路 (LED光源の水中透過実験)

水中可視光透過・減衰の波長依存性実験

【光の水中減衰3要素】光波長, 濁度, 濁水粒子粒径

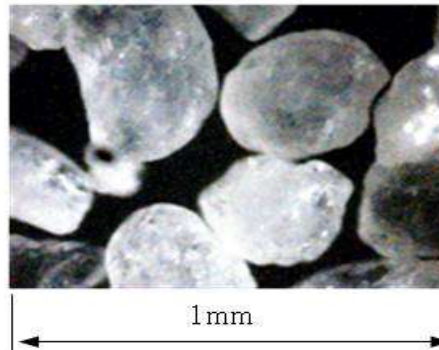


【実験環境構築】

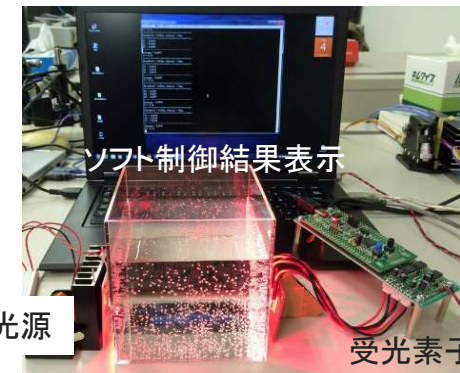
- 10cm×10cmアクリル小型水槽
- 濁水を発生させるために散乱体として白砂粉末を使用
電子顕微鏡で粒径平均約0.25mmを確認(ミー散乱理論に適用)
- 濁度約5.5NTU~6.5NTUの間に変化(大粒径の砂が水槽底への沈み)
濁度計により20秒間隔で100回を測定



(a) 電子顕微鏡測定システム



(b) 粒径大きさ

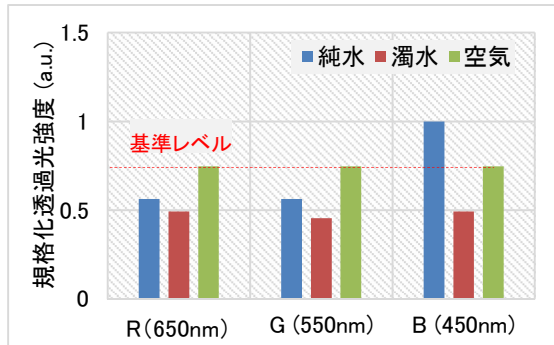


LED測定光源

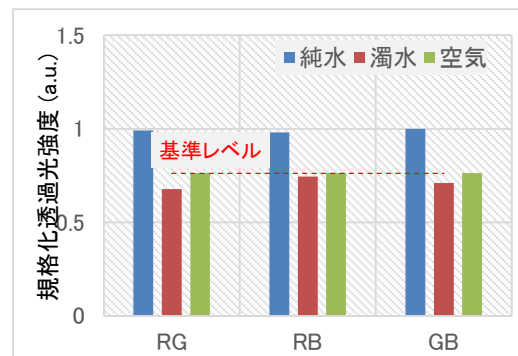
受光素子

純水中光透過の波長依存性の実測様子

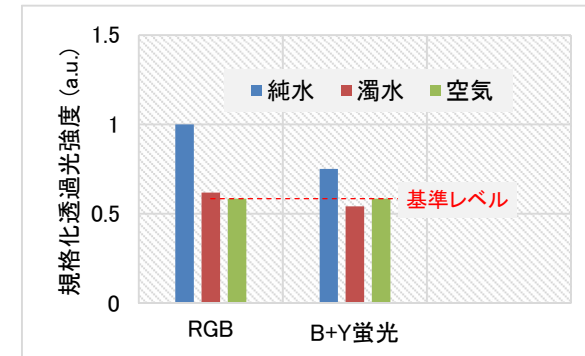
海中通信路 (LED光源の水中透過実験)



単色光



2波長複色光



多波長混色白色光

今回実験用の光学的水タイプにおいて以下のことがわかった。

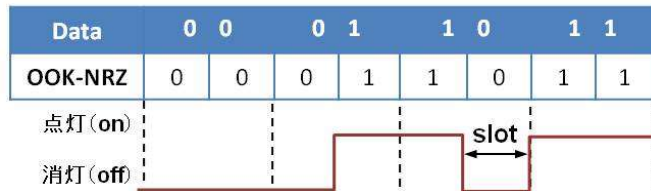
- LED光の水中伝搬は**波長に依存する** → 通信ための波長適応制御が必要；
- B単色光, 2波長複色光, 白色光ともに, **空気より純水分子に透過しやすい**；
- 短波長側は純水分子に透過しやすい。
濁水の透過率は波長の依存性が弱く, 短波長光の減衰率大きい；
- 白色光の場合, 蛍光体は純水濁水ともに水中伝搬への悪影響がある；
- 各色光の純水と濁水の最大透過波長を次の表に示す。

	単色	2波長	白色
純水	短波長 B光	短波長 水色 (BG光)	RGBマルチチップ
濁水	B光, R光 (水分子と砂粒子の割合による)	RB光	RGBマルチチップ

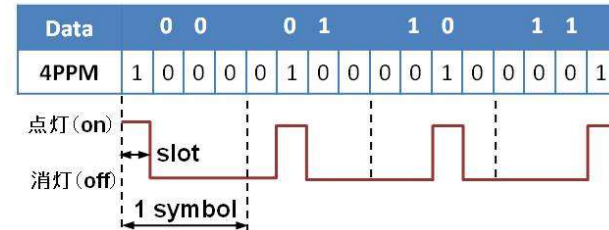
ベースバンド光強度変調方式

- 光強度を伝送データで直接変調するベースバンド変調方式
- キャリア電気信号で光強度を変調してからそのキャリアに強度変調を印加するサブキャリア変調方式.

OOK-NRZ: On-Off Keying with No Return to Zero



PPM: Pulse-Position Modulation



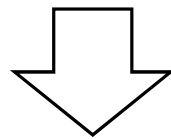
	デューティー比 (発光効率)	信号占有帯域幅	SN比
L-PPM		<p>10Mbps 伝送に必要な帯域幅</p> <p>OOK-NRZ: 5MHz $R_b/2$</p> <p>4PPM: 10MHz $(R_b/2)(L/\log_2 L)$</p>	
OOK-NRZ			$BER_{OOK-NRZ} = Q(\sqrt{SNR})$ $BER_{L-PPM} = \frac{L}{2} Q\left(\sqrt{\frac{L \log_2 L}{2}} \sqrt{SNR}\right)$ $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (x \geq 0)$

水中光伝搬減衰の対策手段

➤ 誤り訂正符号の活用によりSN比向上

- 低密度パリティ検査符号 (LDPC)
- ターボ符号 (Turbo-codes)
- リード・ソロモン符号 (Reed-Solomon Coding RS-codes)

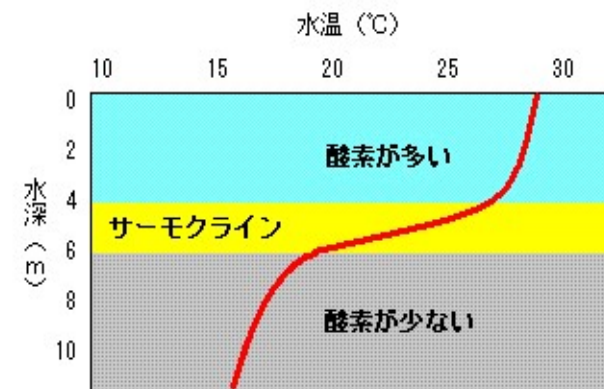
課題: 復号アルゴリズムは複雑な処理, 実時間的な高速通信が困難



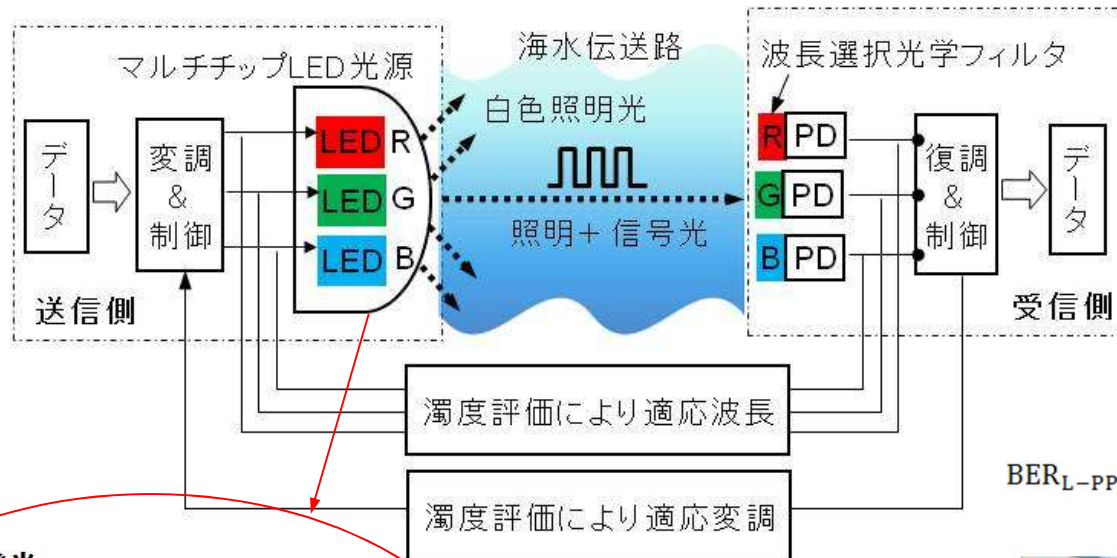
➤ 適応制御 (adaptive control) により分光減衰に対策

(※ 制御対象の動特性が環境変化などにより大きく変動しても、変動情報に基づいて所要の条件を満たすように自動調整を行う)

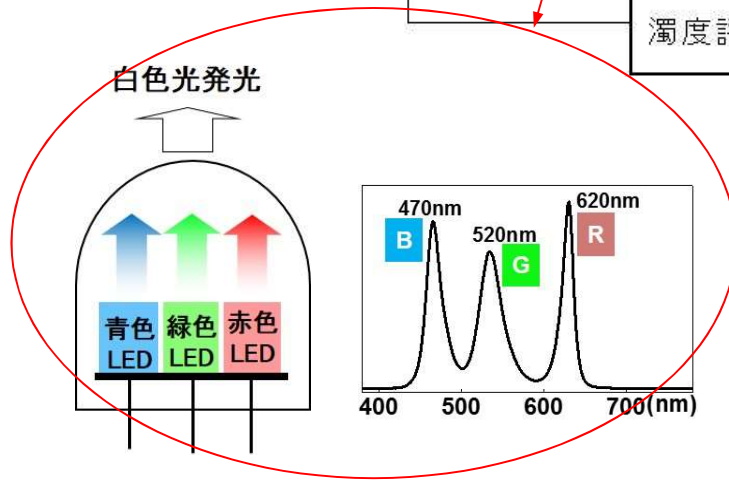
- 適応波長 (Adaptation Wavelength)
- 適応変調 (Adaptation Modulation)
- 適応温度 (Adaptation Temperature)
- その他 (海水の塩分勾配 salinity gradients や 海底/海面反射など)



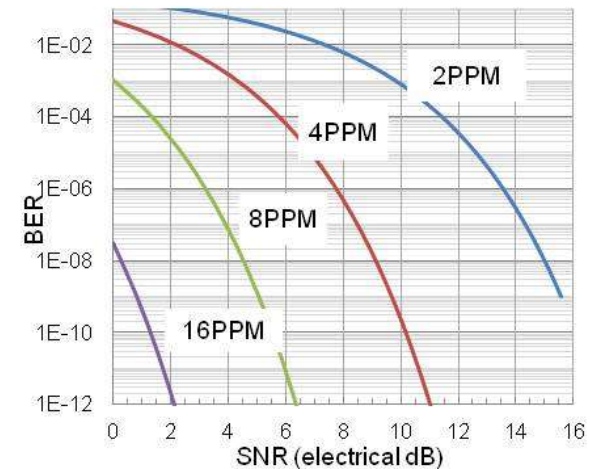
LEDを用いた適応型水中可視光無線通信システム



$$BER_{L-PPM} = \frac{L}{2} Q \left(\sqrt{\frac{L \log_2 L}{2}} \sqrt{SNR} \right)$$



マルチチップLEDモジュールにより波長適応



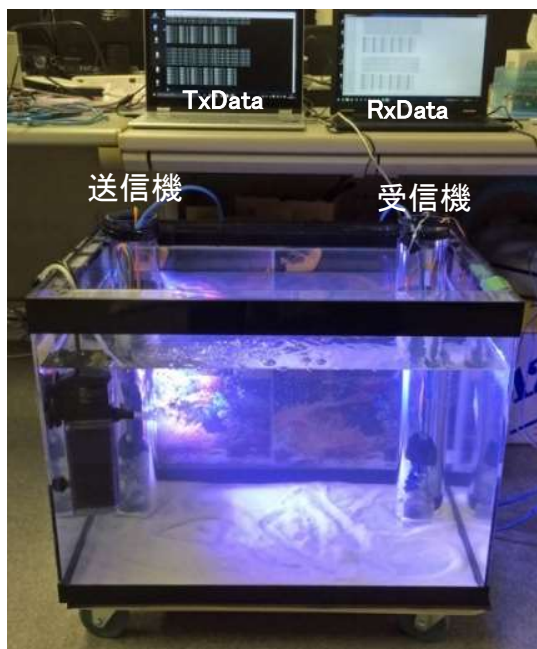
適応のL-PPM変調方式によりSN比向上

水槽中の各色光データ通信

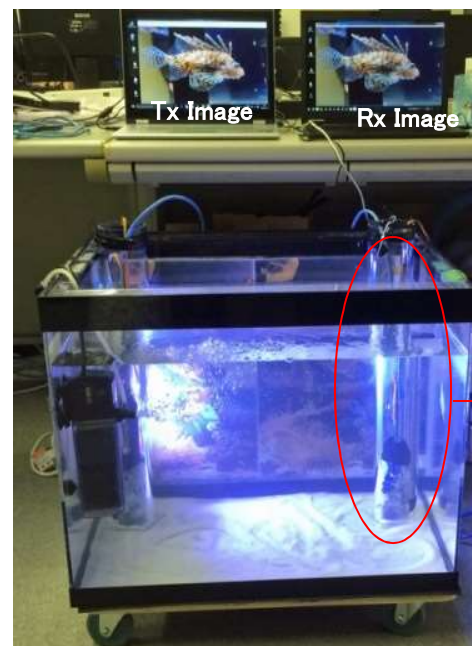
水槽の中において、試作された可視光トランシーバを防水パイプの中に設置し、標準LANケーブルを経由して2台コンピュータの間にデータ伝送

① 白色光による水中データ伝送

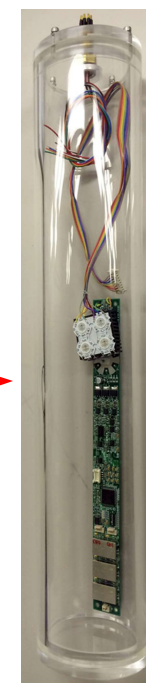
⇒ 一般の水中照明器は照明と通信を併用できるようになる



テキストファイル伝送



640 × 480pixe画像データ

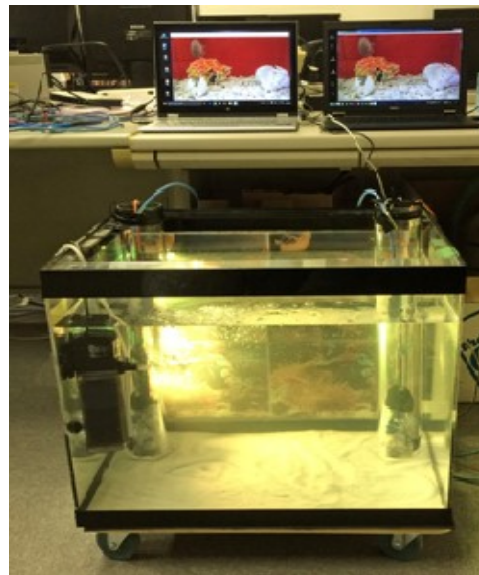
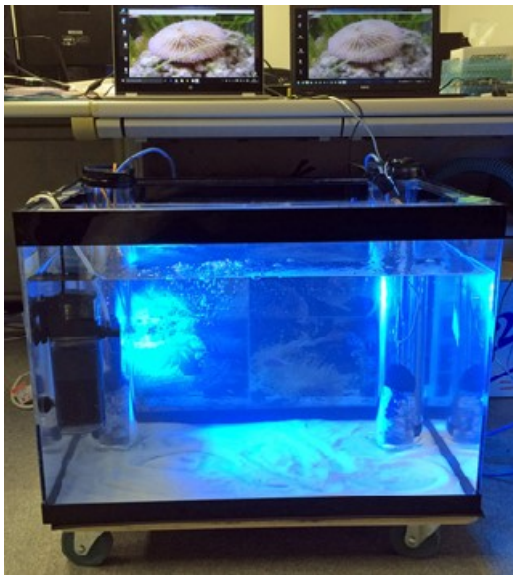


水中可視光無線通信装置の開発

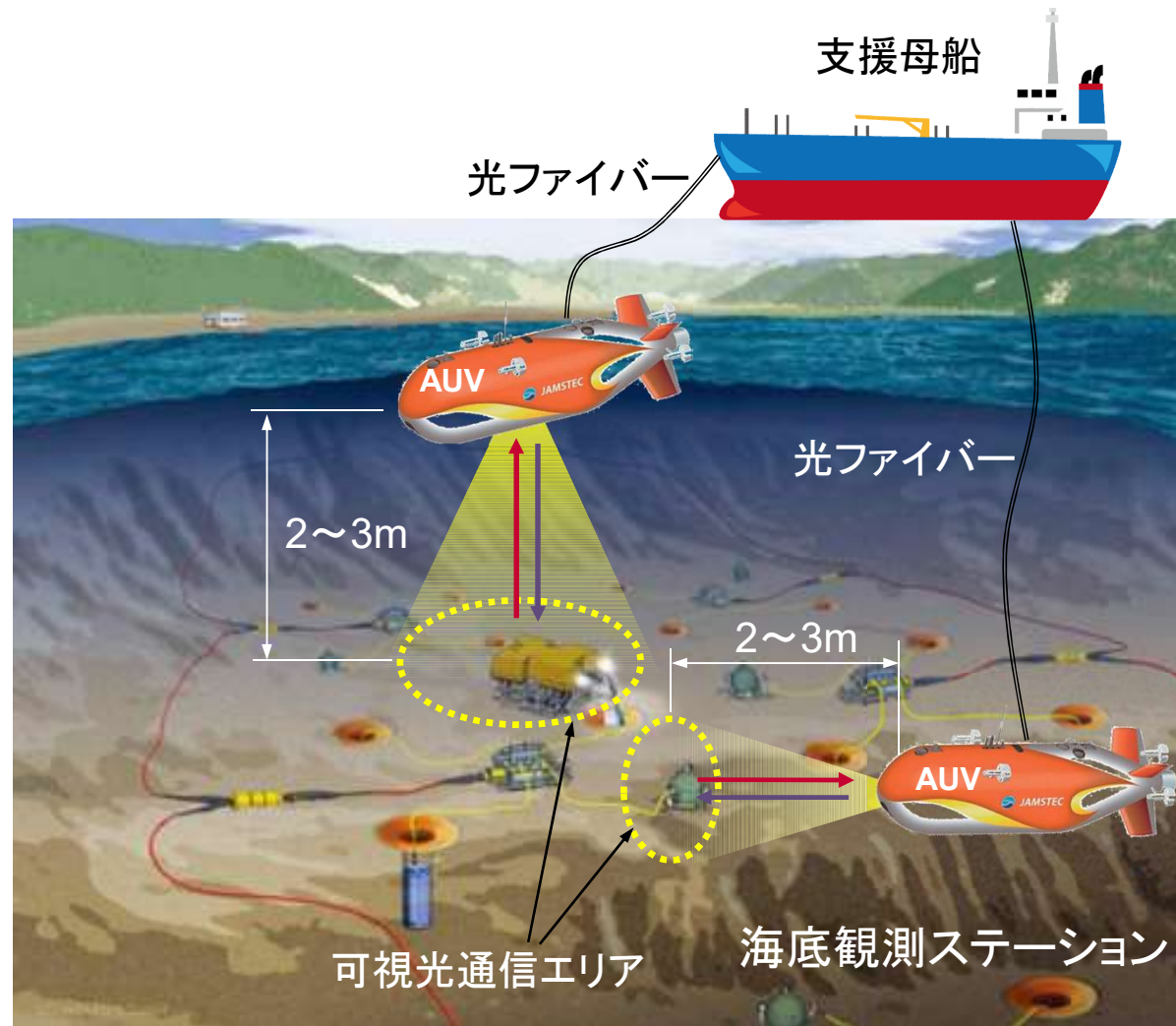
水槽中の各色光データ通信

② 2波長混色光による水中データ伝送

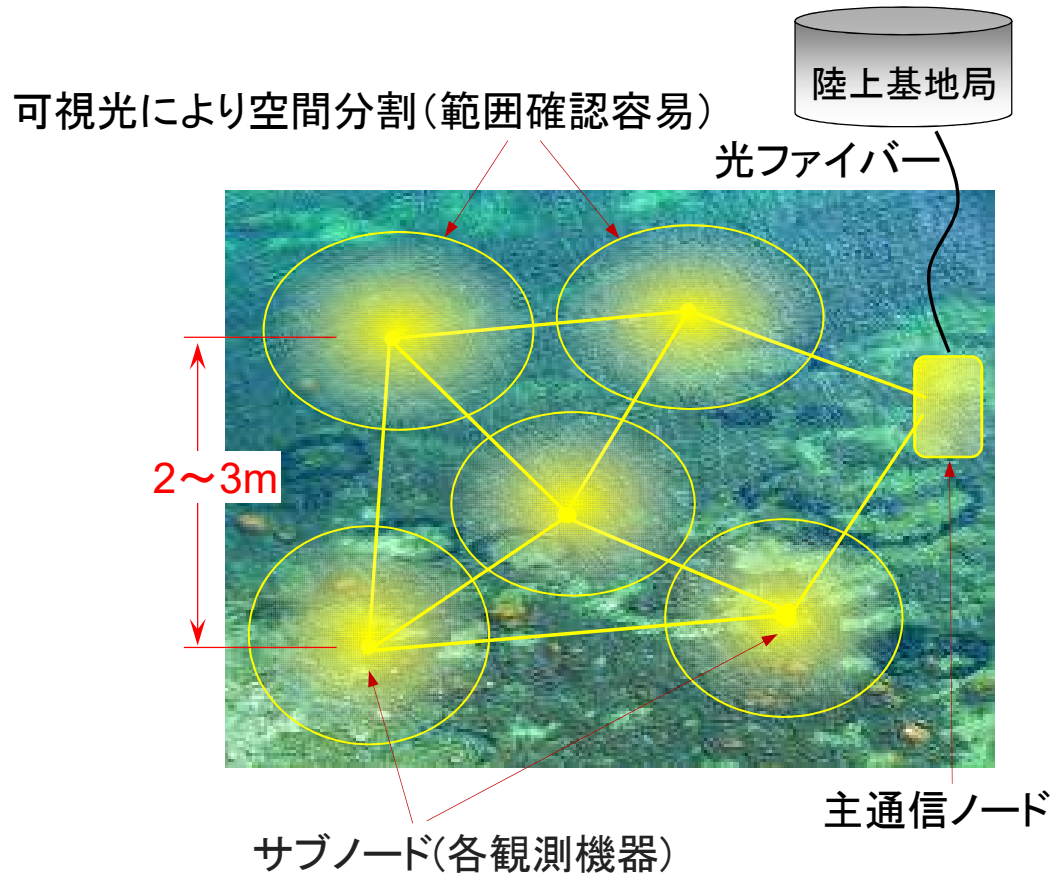
⇒ 水中波長適応・波長多重通信できるようになる



水中移動体と海底観測装置のデータ伝送



水中光センサーネットワークの構築



水中光波WSN

* UOWSN: Underwater Optical Wireless Sensor Network

なぜ？

LED光源を用いた水中無線通信

- 人間の視覚で通信範囲や相手が確認できる → **制御が容易**
- 海底の照明装置との併用可能 → **省エネ・低コスト**
- 海中動物への影響は小さく安全 → **環境にやさしい**
- 光の高速性と音響の長距離性の補い → **多分野の技術融合**

いかに最大限に「光の力」を発揮させるかは、我々「光」技術研究者の課題の一つだ。

謝辞

本研究は、国土交通省の「海洋資源開発関連技術開発支援事業」の支援対象事業として採択されています。

ご静聴ありがとうございました