

水中光無線ネットワークの 最適設計に向けた構想と初期検討

井上 文彰[†]，小玉 崇宏^{††}，木村 共孝^{†††}

† 大阪大学 工学研究科

†† 香川大学 創造工学部

††† 同志社大学 理工学部

水中無線通信

- 水中通信は非常に幅広いアプリケーションを有する
 - ◆ 資源探査: 海洋資源探査
 - ◆ 環境モニタリング: 海底, 河川, 湖, 湾
 - ◆ 水産業: 養殖業, 漁業
 - ◆ エンターテインメント: 水族館, レジャーダイビング
- 水中無線通信は物理的制約の厳しい挑戦的課題
 - ◆ 陸上とは異なり, 電波伝搬特性が極めて劣悪
- 従来, 水中における無線データ伝送には **音響通信** を利用
 - ✓ 優れた伝搬特性: 数 km 先まで通信可能
 - ✗ 限定的な通信帯域: 伝送レートは高々数百 kbps

水中光無線通信

- 高精細かつリアルタイムな水中環境観測への需要の高まり
 - ◆ 高精細センサ群 (LIDAR, ビデオカメラ等) を水中に展開
 - ◆ 水中において大量のトラフィックが生成
 - ➔ 音響通信に基づくシステムでは収容が非現実的
- 近年, 水中光無線通信 技術に関する研究開発が進展
 - ✓ 広帯域通信: 数百 Mbps ~ 十 Gbps 程度に及ぶ伝送容量
 - ✗ 限定的な伝搬距離:
 - (i) 通信可能距離は高々数十メートル
 - (ii) 通信距離によって伝送容量は大幅に変化

水中光無線の伝送路特性

d : 送受信者間の距離

- 信号対雑音比 (SNR) は $d^{-\alpha} e^{-Kd}$ に比例して減衰[1,2]

- ◆ $d^{-\alpha}$: 光の空間的拡散によるエネルギー減衰

- しばしば, 球面状の拡散 $\alpha = 2$ を想定

- ◆ e^{-Kd} : 水中での光の吸収・散乱によるエネルギー減衰

- K は水質や光の波長に大きく依存
- 遠距離通信を困難にする主要因

[1] J. Giles and I. Bankman, in *Proc. IEEE MILCOM 2005*, pp. 1700–1705, 2005.

[2] M. Doniec, et al., in *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 743–757, 2013.

水中光無線の伝送路特性

d : 送受信者間の距離

- 信号対雑音比 (SNR) は $d^{-\alpha} e^{-Kd}$ に比例して減衰[1,2]

- ◆ $d^{-\alpha}$: 光の空間的拡散によるエネルギー減衰

- しばしば, 球面状の拡散 $\alpha = 2$ を想定

- ◆ e^{-Kd} : 水中での光の吸収・散乱によるエネルギー減衰

- K は水質や光の波長に大きく依存
- 遠距離通信を困難にする主要因

➡ 距離 d が大きくなるにつれて 伝送路容量は急激に減少

[1] J. Giles and I. Bankman, in *Proc. IEEE MILCOM 2005*, pp. 1700–1705, 2005.

[2] M. Doniec, et al., in *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 38, no. 4, pp. 743–757, 2013.

水中光無線の伝送路特性

d : 送受信者間の距離

- 信号対雑音比 (SNR) は $d^{-\alpha} e^{-Kd}$ に比例して減衰[1,2]

- ◆ $d^{-\alpha}$: 光の空間的拡散によるエネルギー減衰

- しばしば, 球面状の拡散 $\alpha = 2$ を想定

- ◆ e^{-Kd} : 水中での光の吸収・散乱によるエネルギー減衰

- K は水質や光の波長に大きく依存
- 遠距離通信を困難にする主要因

➡ 距離 d が大きくなるにつれて 伝送路容量は急激に減少

- 水中光無線の実用化に向けては,
リレー端末群からなるネットワークの構築が不可欠

本講演の概要

- 水中光無線ネットワークに関する研究は未だ萌芽期[3]
 - ◆ 物理層の技術自体が発展途上であり，その研究が主流
 - ◆ 限られた研究グループのみが水中光無線ネットワークを考察
- 特に，トラヒック工学的な観点での研究はほとんどない

本講演では，

- 初めに，水中光無線ネットワークの最適設計に向けた課題を俯瞰
 - ◆ トラヒック工学的な観点での一般論を概観
- 次に，著者らが最近行った最適リレー配置問題の初期検討を紹介

[3] N. Saeed et al., in *Ad Hoc Netw.*, vol. 94, 101935, 2019.

システム性能指標と基本設計要素

システム性能指標

- 物理層における性能指標

- ◆ 伝送速度, ビット誤り率 (BER), 処理遅延時間 など

★ 単一の送受信ペアで完結

- アプリケーション指向の性能指標

- ◆ End-to-End (E2E) 可用伝送容量

- ◆ E2E 遅延時間

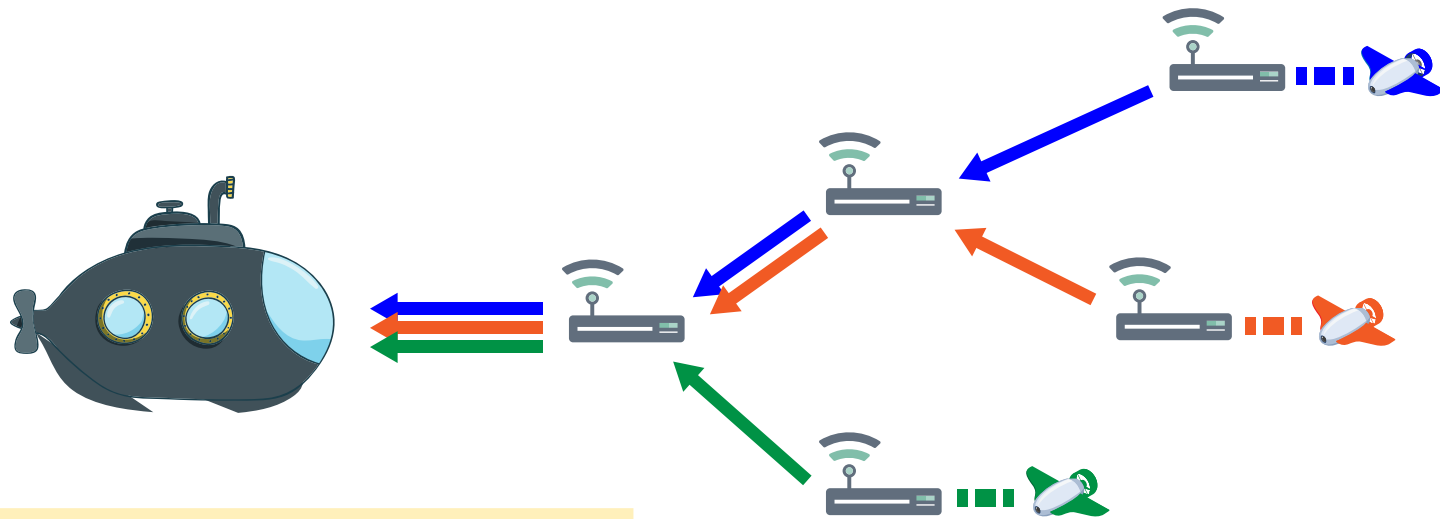
- ◆ リアルタイム情報鮮度

★ 主に, **複数端末間の競合** (干渉・待ち行列遅延) が支配的

E2E 可用伝送容量

- 各端末が利用可能な最大データレート
 - ◆ ボトルネックリンクの容量によって決まる

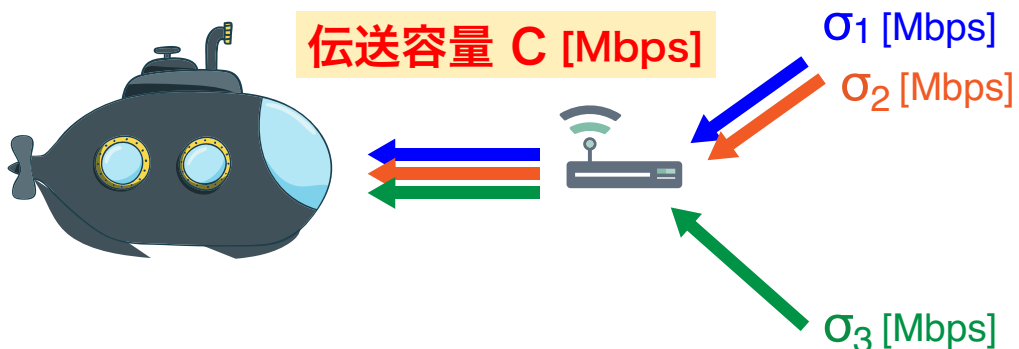
例) 各リンクの伝送容量を 100 Mbps とする



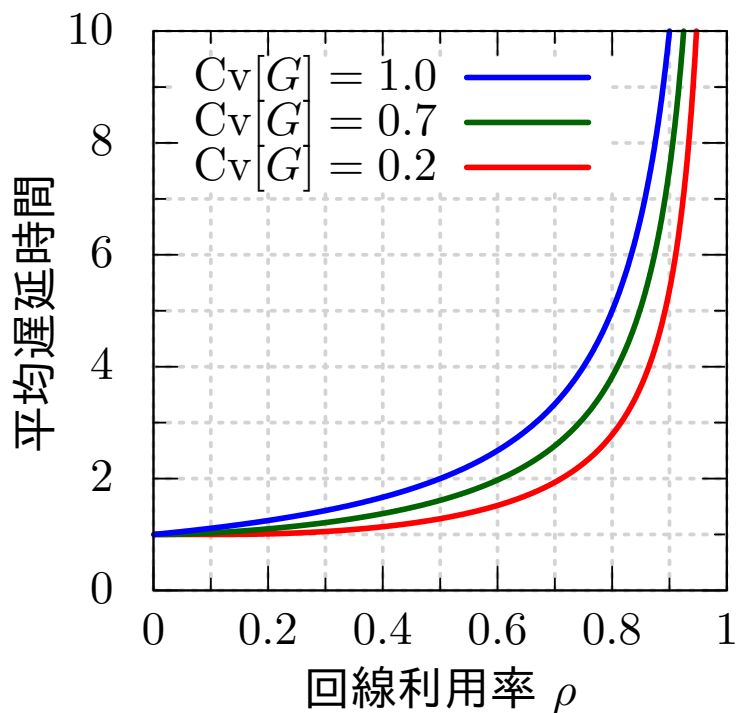
各端末からのトラヒックは
約 33 Mbps が限度

遅延時間

例) シンクノード直前のリンクに注目



$$\text{回線利用率 } \rho = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{C}$$



★ Gamma/M/1 待ち行列の理論曲線

- ◆ $C_v[G]$: パケット到着間隔 G の変動係数 (= 標準偏差/平均)
- 回線利用率 ρ が 1 に近づくと遅延時間は急激に増大
- 到着間隔の変動小 ➡ 遅延時間小

リアルタイム情報鮮度

情報鮮度 Age of Information (AoI) [4]

- 時刻 t における AoI $A(t) \triangleq t - \eta(t)$

$\eta(t)$: 時刻 t においてシンクが保持している最新情報が
センサ端末において生成された時刻

- 平均 AoI $E[A] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt$

例) センサ端末が等間隔 τ で情報を生成する場合

$$E[A] = \frac{\tau}{2} + E[D] \quad E[D]: \text{平均遅延時間}$$

[4] S. Kaul et al., in *Proc. IEEE INFOCOM 2012*, 2012.

リアルタイム情報鮮度

情報鮮度 Age of Information (AoI)[4]

- 時刻 t における AoI $A(t) \triangleq t - \eta(t)$

$\eta(t)$: 時刻 t においてシンクが保持している最新情報が
センサ端末において生成された時刻

- 平均 AoI $E[A] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt$

例) センサ端末が等間隔 τ で情報を生成する場合

$$E[A] = \frac{\tau}{2} + E[D] \quad E[D]: \text{平均遅延時間}$$

★ τ と $E[D]$ のトレードオフが存在

τ 減少 ➡ 回線利用率 ρ 増加 ➡ $E[D]$ 増加

基本設計要素

- 水中光無線ネットワークにおける主要な設計要素

- ◆ リレー端末配置
- ◆ 経路制御 (ルーティング)
- ◆ 波長割り当て
- ◆ 送信タイミング制御

★ 前述の性能指標の観点から、
これら各要素を最適化

- 水中光無線に特有の性質

- ◆ 送受信距離が SNR に大きく影響
- ◆ 通信が必ずしも常時安定でない

★ 伝送容量は距離の関数

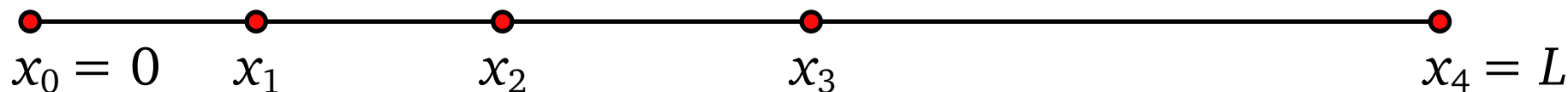
★ 断続的に導通する通信路

初期検討: 1次元の最適リレー配置

モデル (1)

- 1 台のシンク端末 と, N 台のリレー端末 が存在
 - ◆ $\mathcal{N} := \{1, 2, \dots, N\}$: リレー端末の集合
 - ◆ シンク端末を 0 番目の端末 と呼ぶ
- x_n ($n = 0, 1, \dots, N$): n 番目の端末の位置
 - ◆ $0 \leq x_n \leq x_{n+1}$
 - ◆ シンク端末の位置を $x_0 = 0$ とする
- 長さ L の領域 $\mathcal{L} := [0, L)$ をリレー端末が被覆 $\Rightarrow x_N = L$ とする

$N = 4$ の例



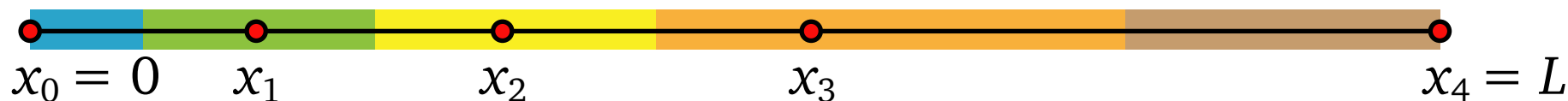
モデル (2)

- データパケットの発生時点は 一般の定常点過程 に従う
 - ◆ 発生位置は $\mathcal{L} = [0, L)$ 上で一様に分布
- 各パケットは 発生位置から最も近い端末 に伝送される
 - ◆ n 番目の端末の被覆範囲 $C_n := [a_n, b_n)$

$$a_0 = 0, \quad a_n = \frac{x_{n-1} + x_n}{2}, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

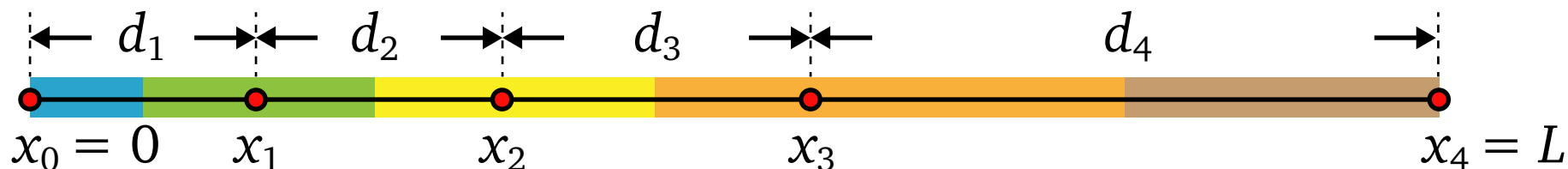
$$b_N = x_N, \quad b_n = a_{n+1}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

$N = 4$ の例



モデル (3)

- リレー端末の配置によって被覆範囲が変化



- リレー端末 i が単位時間あたりに中継するデータ量

$$q \left(\frac{d_i}{2} + \sum_{n=i+1}^N d_n \right)$$

- ◆ q : 領域長で正規化された, 単位時間あたり発生データ量

- システムの安定条件 ($R(d)$: 距離 d における伝送路容量)

$$q \left(\frac{d_i}{2} + \sum_{n=i+1}^N d_n \right) < R(d_i), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

最適配置問題

- 安定領域の最大化を目的とするリレー端末配置問題

$$\text{maximize } q$$
$$q \in \mathbb{R}, \mathbf{d} \in \mathbb{R}^N$$

$$\text{s.t. } R(d_i) - \frac{qd_i}{2} - \sum_{n=i+1}^N qd_n \geq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$q \geq 0, \quad \sum_{i=1}^N d_i = L, \quad d_i \geq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

- $R(d)$ について以下を仮定し，大域的最適解を求解

(i) 狭義単調減少

(ii) 連続的微分可能かつ凸関数

(iii) $\lim_{d \rightarrow \infty} R(d) = 0$

数値評価 モデルパラメータ

- 伝送容量関数 $R(d)$

$$R(d) = W \log(1 + \text{SNR}(d))$$

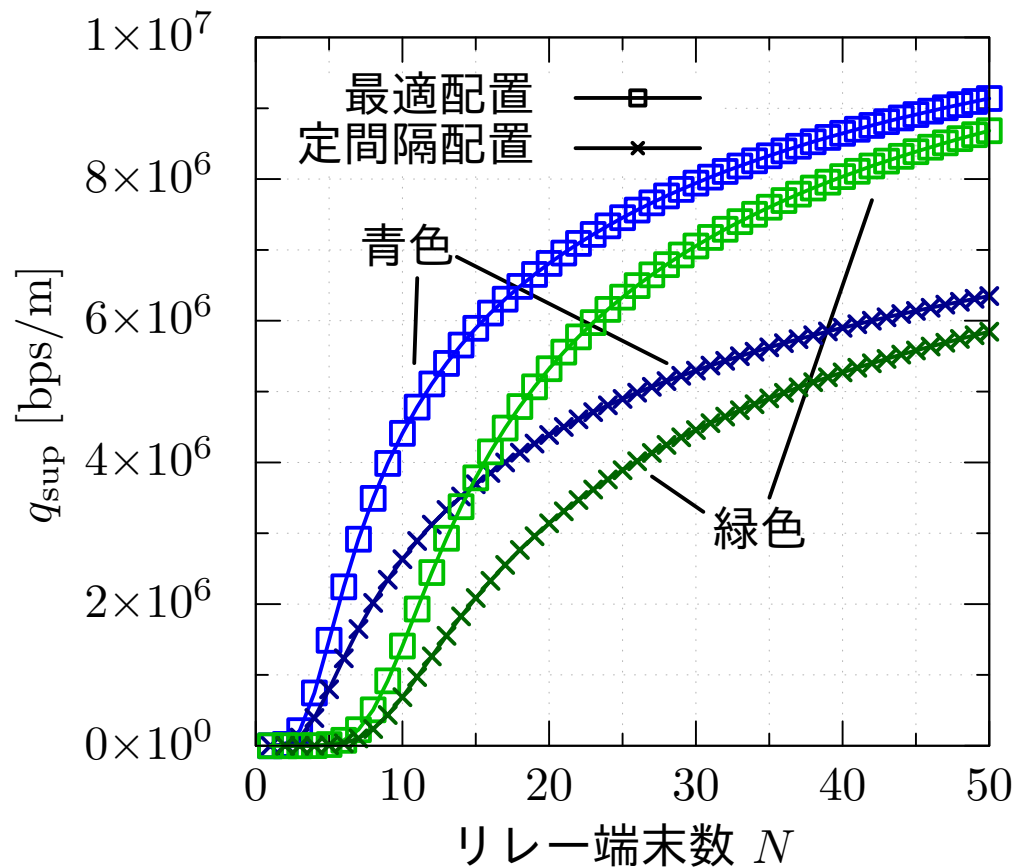
$$\text{SNR}(d) = \frac{P_t D^2 \cos \varphi}{4(\tan^2 \theta) P_n} \cdot \frac{e^{-Kr}}{(\epsilon + r)^2}$$

- 波長による減衰係数 K の違いを考慮
 - ◆ 純水に近い水質における
緑色光と青色光の値を使用

記号	単位	値
P_t	W	0.5
P_n	W	2×10^{-6}
D	m	0.2
φ	度	10
θ	度	10
W	Hz	5×10^8
K	1/m	緑色光: 7×10^{-2} 青色光: 2×10^{-2}
ϵ	m	1
L	m	500

数値評価 定間隔配置との比較

q_{sup} : 正規化限界スループット
(単位長さ当たりの収容可能トラフィック量)



- 最適配置を用いることでシステム性能は大きく向上
- リレー端末数が過剰な領域
 - ◆ 定間隔との差は減少
 - ◆ 最適配置での性能が飽和することによる

まとめ

- 海底光無線ネットワークの最適設計に向けた構想を紹介

主要な設計要素

- ◆ リレー端末配置
- ◆ 経路制御
- ◆ 波長割り当て
- ◆ 送信タイミング制御



性能指標

- ◆ E2E 可用伝送容量
- ◆ E2E 遅延時間
- ◆ 情報鮮度

- 初期検討: 1次元のリレー端末配置問題

- ◆ 最適な不等間隔配置により性能が大幅に向上
- ◆ 詳細は以下の論文において報告

Y. Inoue, T. Kodama, and T. Kimura,

“Global Optimization of Relay Placement for Seafloor Optical Wireless Networks,”
IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 20, no. 3, pp. 1801-1815, 2021.