

海底光無線ネットワークにおける リレー端末の最適配置

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

- 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
 - 高精細かつリアルタイムな海底環境観測への需要の高まり
 - ◆ **高精細センサ群** (水中 LIDAR, ビデオカメラ) を海底に展開
- 例) 海溝・海底火山活動のリアルタイムモニタリング
- 高精細センサ群は大量のトラフィックを生成
 - ➔ **音響通信に基づくシステムでは収容が非現実的**

水中光無線通信

- 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百メートル
 - (ii) 通信距離によって伝送容量は大幅に変化
- 通信の長距離化には, リレー端末を用いた中継が必要
- 水中光無線通信を用いた海底モニタリングシステム
 - ➡ 複数のリレー端末から成るネットワークの構築が不可欠

関連研究

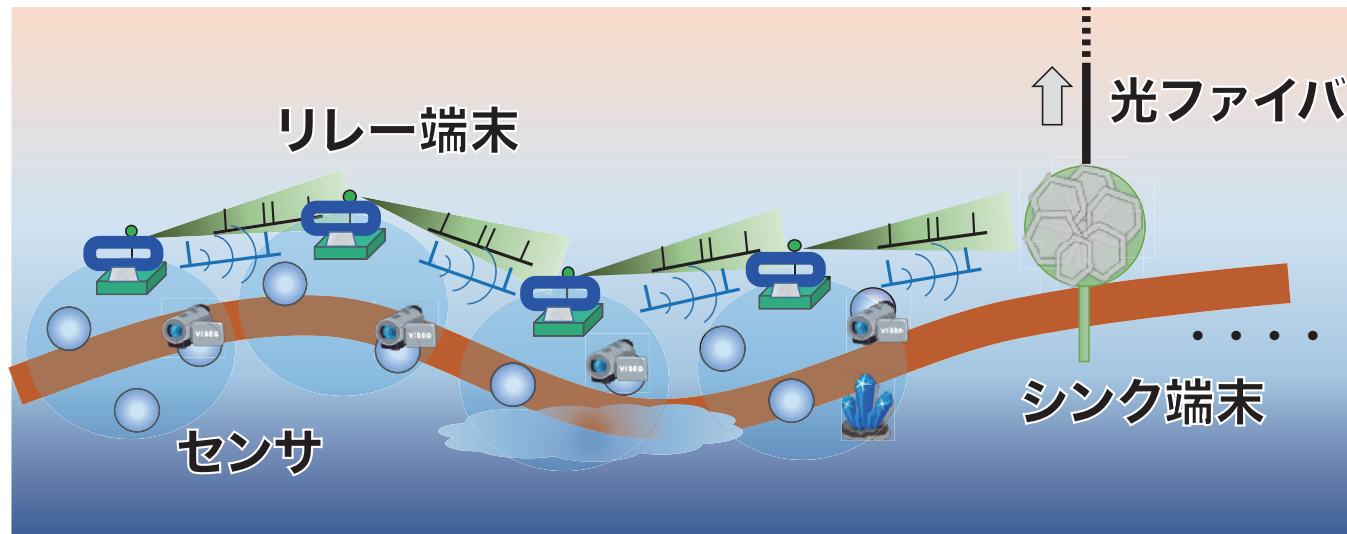
水中光無線ネットワークに関する先行研究

- 大半は、比較的浅い海洋環境 (水深 1,000 m 未満) を想定 [1]
 - ◆ 海底のセンサが生成した観測データを地上基地局へ配信
 - ◆ 二種類のリレー端末
 - 海底に固定されたリレー端末
 - 自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle)
 - ◆ 鉛直上向き にデータをマルチホップ転送

[1] Z. Zeng et al. "A Survey of Underwater Optical Wireless Communications," IEEE Commun. Surv. Tutor. vol. 19, no. 1, pp. 204–238, 2017.

海底光無線ネットワーク

- 鉛直方向のネットワーク構成は、**深海環境の観測には不向き**
 - ◆ 深海から地上基地局までの長距離ネットワークが必要
 - ◆ **極めて多数の中継 AUV** の配備が不可欠
- 本研究では、**深海環境** からのデータ収集 (下図) を想定



- 以降では、これを **海底光無線ネットワーク** と呼ぶ

本研究の動機

リレー端末配置 は海底光無線ネットワークの性能に大きく影響

- 光無線信号の信号対雑音比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio)

距離 d について, $d^{-\alpha} e^{-Kd}$ に比例して減衰
($K > 0, \alpha > 0$ はパラメータ)

➔ 距離 d が大きくなるにつれて 伝送路容量は急激に減少

- 一方, シンク端末付近のリンクには 中継トラヒックが集中
 - ◆ 各リンクの伝送路容量が等しい場合, ボトルネックとなる
- シンクに近いほどリレー端末間隔を短くするのが合理的

本研究の概要

1次元 海底光無線ネットワークにおけるリレー端末の最適配置を考察

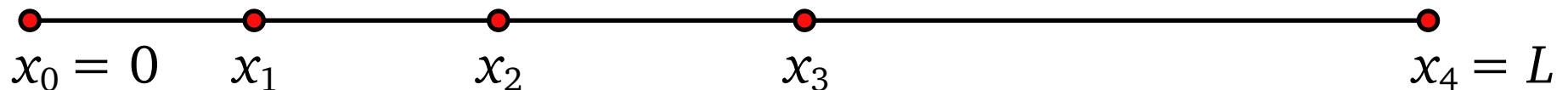
- リレー端末の 最適配置問題を定式化
 - ◆ システムを待ち行列ネットワークとしてモデル化
 - ◆ 安定領域の最大化を目的とする最適化問題を導入
- 最適配置問題に対する 大域的最適化法 を考察
 - ◆ 後述するように、この問題は 非凸制約 を有する
 - ➡ 大域的最適化は一般には容易でない
 - ◆ 1次元ネットワーク では大域的最適解が求まることを証明
- さらに、数値例を通じて最適解の有用性を示す

最適配置問題の定式化

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



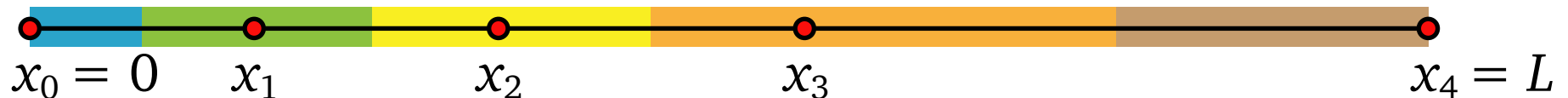
モデル (2)

- 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 $C_n := [a_n, b_n)$

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

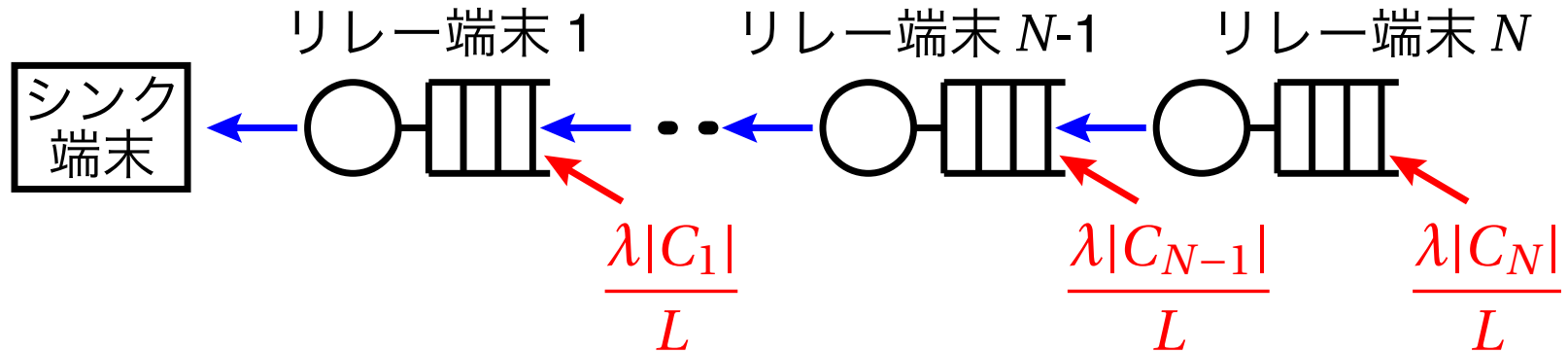
$$b_N = x_N, \quad b_n = a_{n+1}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

$N = 4$ の例



モデル (3)

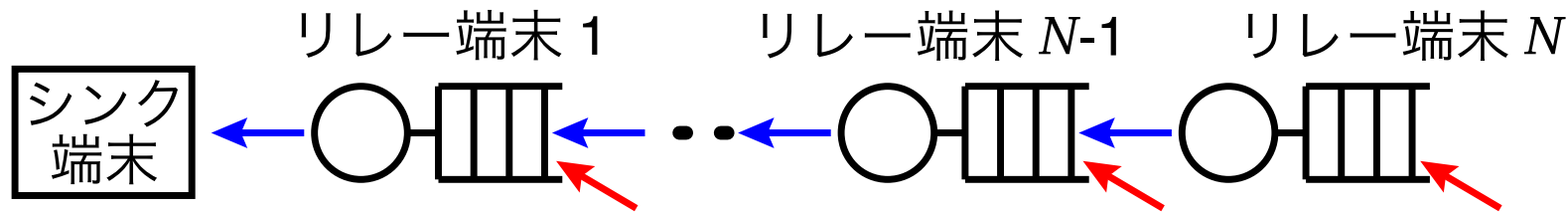
- このとき、システムは G/G/1 待ち行列ネットワークで表現される



- ◆ λ : 単位時間当たりのパケットの発生数
 - ◆ $|C_n|$: 端末 n の被覆領域長 ($= b_n - a_n$)
- B : パケットの平均データサイズ
 - ρ_n : リレー 端末 n への外部到着のトラヒック強度

$$\rho_n := \frac{\lambda |C_n|}{L} \cdot B$$

安定条件



- ρ_n : リレー 端末 n への外部到着のトラヒック強度

$$\rho_n := \frac{\lambda |C_n|}{L} \cdot B = \frac{\lambda B}{L} \cdot |C_n| = q \cdot |C_n|$$

- q : 領域長で正規化された, 単位時間当たり発生データ量
- このシステムの安定条件は次式で与えられる

$$\sum_{n=i}^N \rho_n < R(x_i - x_{i-1}), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$R(d)$: 端末間距離 d における伝送路容量

伝送路容量 $R(d)$

- SNR(d): 端末間距離 d における SNR

$$\text{SNR}(d) = \frac{Ae^{-Kd}}{(\epsilon + d)^\alpha} \quad K > 0, \alpha > 0, \epsilon > 0 \text{ はパラメータ}$$

- このとき、伝送路容量 $R(d)$ は次式で与えられる

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

- しかし、以下では $R(d)$ に具体的な関数形を仮定しない

◆ 代わりに、 $R(d)$ の性質として次の仮定のみを置く

- (i) 狭義単調減少
- (ii) 連続的微分可能かつ凸関数
- (iii) $\lim_{d \rightarrow \infty} R(d) = 0$

システムの安定領域

q : 領域長で正規化された, 単位時間当たり発生データ量

d_i : 端末 i と $i+1$ の間隔 ($= x_{i+1} - x_i$)

- システムの安定条件

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

- 上式を満たす q の上限値 が安定領域の大きさを決める

$$q_{\text{sup}}(\mathbf{d}) := \max \left\{ q \in \mathbb{R}^+ \mid \sum_{n=i}^N \frac{qd_i}{2} + q \sum_{n=i+1}^N d_n \leq R(d_i), i \in \mathcal{N} \right\}$$

- ➡ 本研究では, $q_{\text{sup}}(\mathbf{d})$ を最大化 する問題を考える

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

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

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

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

- 各 q で実行可能領域は 凸集合の補集合 となる

➡ この問題は 逆凸計画問題 に属する

- 逆凸計画問題の大域的最適化は一般には容易でない
- この問題特有の構造を利用すると、大域的最適解が求まる

大域的最適化法

部分問題の導入

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

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

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

- $q > 0$ に対し, 下記の部分問題 (S_q) を導入

$$\text{maximize } \sum_{n=1}^N d_n$$
$$\mathbf{d} \in \mathbb{R}^N$$

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

- ◆ 固定された q に対し, 被覆領域長を最大化

部分問題と原問題の関係

\mathbf{d}_q^* : 部分問題 (S_q) の最適解, x_q^* : (S_q) の最適値 (= \mathbf{d}_q^* の要素和)

- 元の最適配置問題の最適値を q_{sup}^* とすると, 以下が成立

(a) x_q^* は q に関して連続かつ狭義単調減少であり,

$$\lim_{q \rightarrow 0^+} x_{q,N} = \infty, \quad \lim_{q \rightarrow \infty} x_{q,N} = 0$$

(b) 原問題の最適値 q_{sup}^* は次式で特徴付けられる.

$$x_{q,N}^* > L \Leftrightarrow q < q_{\text{sup}}^*, \quad x_{q,N}^* < L \Leftrightarrow q > q_{\text{sup}}^*, \quad x_{q,N}^* = L \Leftrightarrow q = q_{\text{sup}}^*$$

さらに $(q_{\text{sup}}^*, \mathbf{d}_{q_{\text{sup}}^*}^*)$ は原問題の大域的最適解 となる

➡ 原問題の最適解は, 部分問題を繰り返し解くことで求まる

部分問題の最適解

部分問題 S_q の最適解は下記で陽に求められる

● $g_q(x) := \frac{R(x)}{q} - \frac{x}{2}$ とおく

(i) $g_q^{-1}(0) \geq g_q(0)$ のとき,

$\mathbf{d} = (0, 0, \dots, 0, g_q^{-1}(0))^{\top}$ は (S_q) の大域的最適解

(ii) $g_q^{-1}(0) < g_q(0)$ とき,

$\mathbf{d} = (d_1^*, d_2^*, \dots, d_N^*)^{\top}$ は (S_q) の大域的最適解

ただし, $d_N^* = g_q^{-1}(0)$, $d_i^* = g_q^{-1}\left(\sum_{n=i+1}^N d_n^*\right)$, $i = 1, 2, \dots, N-1$

数值評価

モデルパラメータ

- 伝送容量関数 $R(d)$

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

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

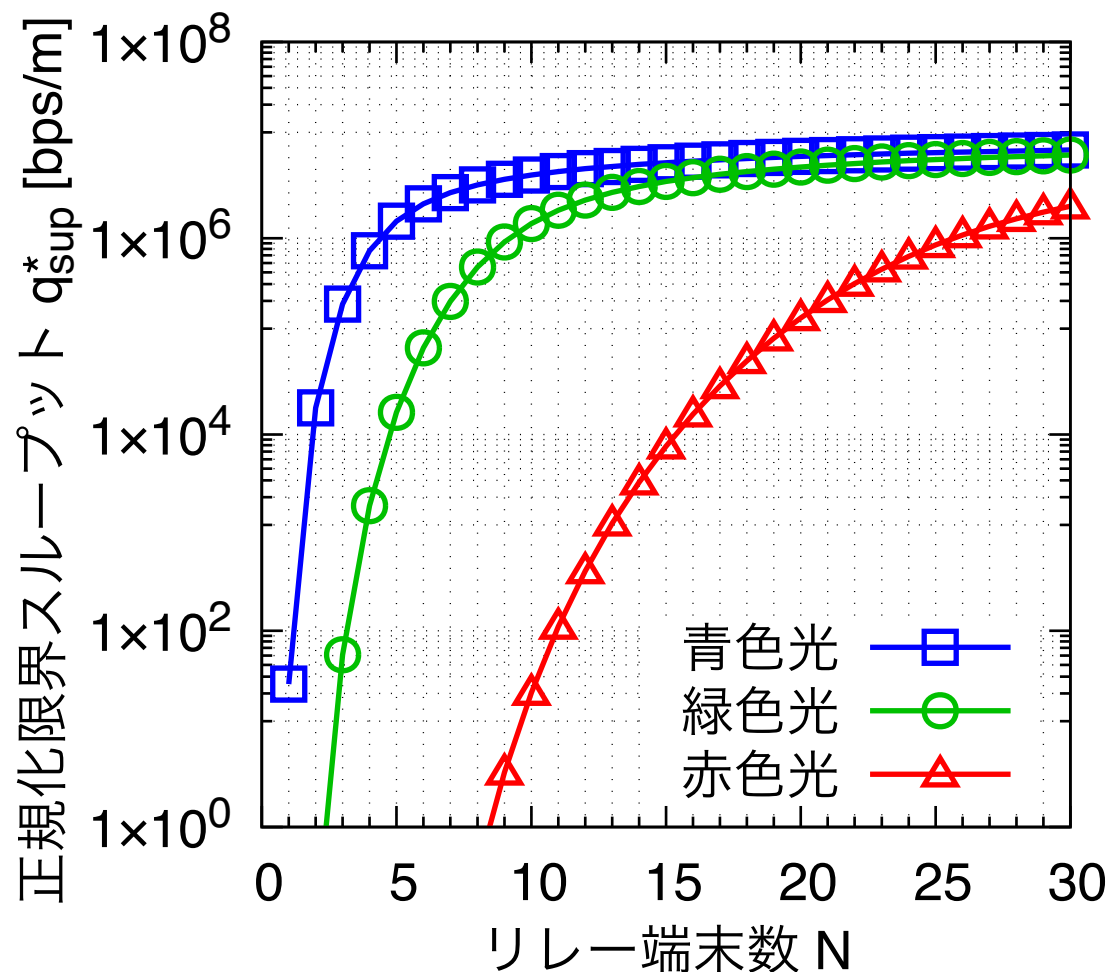
- 波長による減衰係数 K の違いを考慮

- ◆ 純水に近い水質における
赤色光, 緑色光, 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	赤色光: 3×10^{-1} 緑色光: 7×10^{-2} 青色光: 2×10^{-2}
ϵ	m	1

リレー端末数が q_{sup}^* に与える影響

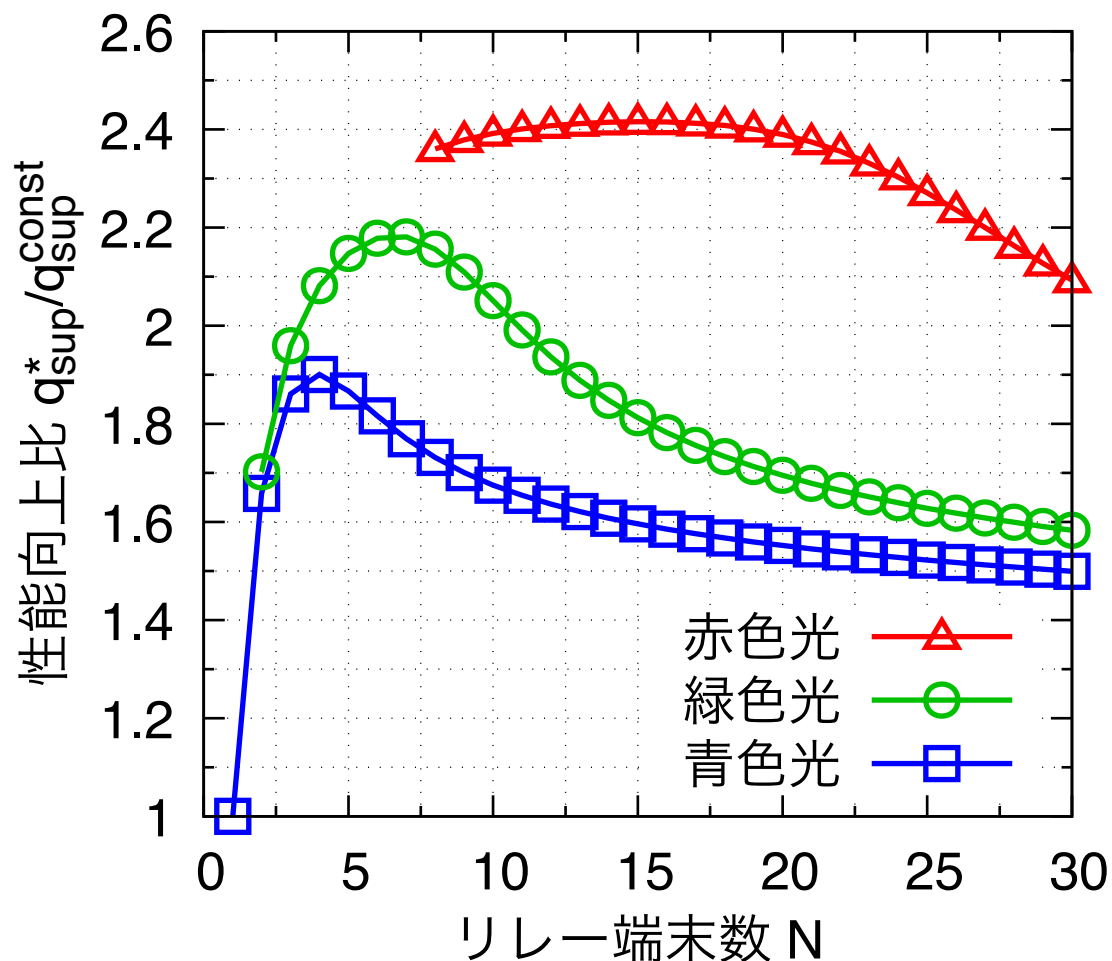
q_{sup}^* : 最大スループットを領域長で正規化した量



- リレー端末の追加により、安定領域は大幅に増大
- リレー端末数が増えるにつれて性能改善幅は減少

固定配置と最適配置の性能比較

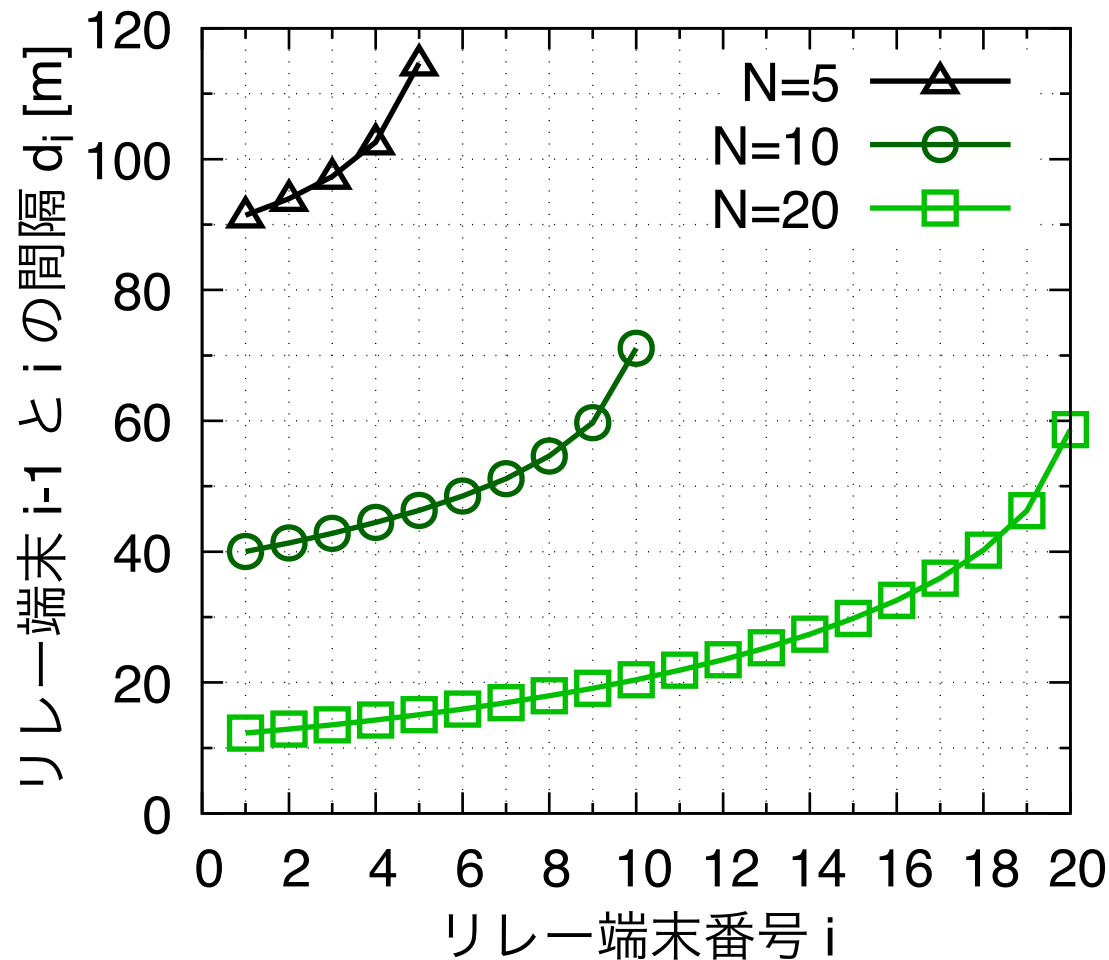
$q_{\text{sup}}^{\text{const}}$: 固定間隔配置における q_{sup}



- 最適配置を用いることでシステム性能は大きく向上
- リレー端末数が多い領域
- ◆ 最適配置は性能が飽和

最適配置間隔 (緑色光)

緑色光の場合における最適配置間隔



- シンク端末から離れるに従って配置間隔が増加
- シンクに最も近い端末と遠い端末とでは大きな差

まとめ

- 海底光無線ネットワークにおけるリレー端末配置を考察
- 1次元のリレー端末配置問題を定式化して解析
 - ◆ 待ち行列ネットワークとしてモデル化
 - ◆ 安定領域の最大化を目的とする最適化問題を考察
 - ◆ 大域的最適解を得る手法を導出
- 論文中ではさらに、大域的最適解の性質を議論
 - ◆ 最適配置間隔では、末端からシンク端末に向けて指数関数よりも急激に配置間隔が減衰
- 2次元ネットワークへの拡張は今後の課題