

海洋生物の衛星リアルタイム追跡と海洋牧場 解析書

近畿大学アカデミックシアター 宇宙マグロープロジェクト

高本 采実 近畿大学・農学部・水産学科 4年

日比野 良彦 近畿大学大学院・総合理工学研究科修士 1年

角至 悠希 理工学部電気電子工学科 4年

村上 友亮 理工学部電気電子工学科 4年

西川 裕介 理工学部電気電子工学科 4年

松岡 祐貴 理工学部電気電子工学科 4年

鵜飼 理央 理工学部情報学科 4年

新地 翔矢 理工学部電気電子工学科 2年

船井 遼太郎 理工学部電気電子工学科 1年

栗原 侑也 理工学部電気電子工学科 1年

低軌道周回人工衛星を用いたレーザ光追尾システムの動作条件、実現性能の見積もりを実施したので、下記に説明する。

1. 見積もり前提条件

見積もりにあたっての特に明記すべき前提条件は下記の通りである。

a) 環境条件

- ・晴天時の観測のみとする。
- ・快晴時における大気の大気可視光の透過率(天頂方向・片道)は60%とし、快晴時の大気中におけるレーザ光の減衰(大気中水分の吸収・Rayleigh散乱)はこの値に全て取り込まれている。
- ・雲・霧(水分吸収, Mie散乱)
- ・乱流(シンチレーション)による影響は考慮に入れない。

b) 人工衛星軌道

- ・上空300kmの低軌道(LEO)周回衛星とし、10 km/secで軌道上を移動する。

c) 送信器

- ・波長460 nm、Duty比 10^{-3} のパルスレーザ光源とする。
- ・ビーム広がり角 $\theta_e=0.33$ [mrad]とする。

d) 計測対象物

- ・計測対象物には再帰性反射ミラーを設置し、海中に存在するものとする。
- ・海水は汚濁が無く、大洋上の平均的な吸収率であるものとする。(屈折率 1.33, 減衰係 0.151 [1/m])
- ・GRRの面積は 0.01 [m²] (= 10 cm 四方)とする。
- ・GRRの反射光は入射光の10倍角で広がるものとする。($\theta_r=3.3$ [mrad])
- ・再帰性反射ミラにおいて、光振幅変調または光位相変調を実施する。
- ・変調帯域幅は100kHzとする。
- ・タグ情報は100bit長とする。

e) 受信器

- ・ 受信器は 0.07 [m²] の集光レンズで海中からの反射光を受信する。
- ・ フォトダイオードの光電変換量子効率 は 20% とする。

これらの前提条件を踏まえ、本提案のレーザー光追尾システムの実現性を評価する。

前述の条件において、計測対象物の検出性能を劣化させる要因を列挙する。

① (快晴時) ビーム損失

照射したレーザー光が、大気中の Rayleigh 散乱、海面反射、再帰ミラーの光損失、再帰ミラーに設置した変調器 (タグ情報を重畳) による

② ビーム拡散損失

照射したレーザー光ビームが広がり単位面積の光電力が小さくなる要因

③ 海水における光子吸収・散乱

海水の光吸収・散乱によりレーザー光が減衰する要因

④ 受信器雑音

受信器の雑音による性能劣化要因、このうち、レーザー光又は受信器の局発光 (コヒーレント検波方式の場合のみ) により発生する光量子雑音、背景光雑音、熱雑音、暗電流雑音がある

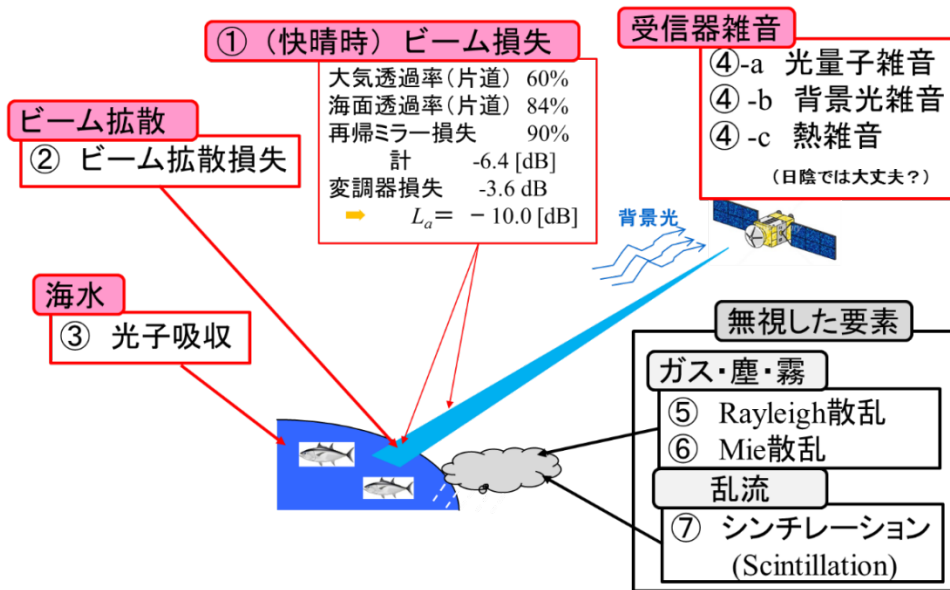


図 1-1 低軌道衛星レーザー追尾システムの性能劣化要因

■ 人工衛星の移動と光伝搬遅延

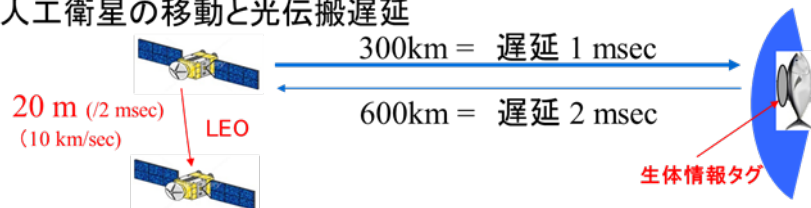


図 2-1 レーザ光遅延時間と低軌道衛星の移動距離の関係

■ 伝送タイムチャート

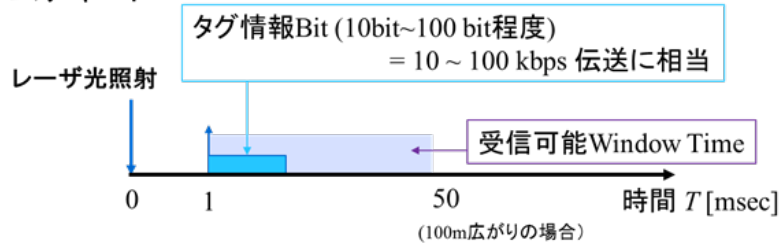


図 2—2 レーザ光遅延時間と低軌道衛星の移動距離の関係

2. 動作タイムチャート

図 2—1 に示すように、低軌道人工衛星の地表からの距離を 300km とすると、低軌道人工衛星から照射された光が海水中の CRR で反射し、再び当該衛星に到着するまで 2[msec] の遅延が発生する。

一方、人工衛星の移動速度 10 [km/sec] とすると、2 [msec] の間に人工衛星は 20 [m] 移動する。もし海水中の CRR で反射した光の広がり角を 3.3 [msec] とすると、低軌道周回衛星軌道上では 1000[m] の範囲で反射光が広がる。この領域を衛星が通過する時間は 50 [msec] であるので、

反射光の計測には十分な時間を確保できる。この 50[msec] の時間内に CRR からのタグ情報を検出する必要がある。図 2—2 は、これらの条件を勘案したタグ情報の伝送タイムチャートの一例である。この図では、人工衛星から照射されるレーザ光の照射開始時刻を 0 としている。反射ビームのスポット内部に人工衛星が存在する 50 [msec] を「受信可能 Window Time」とし、この Window Time 内で 100 ビットの情報を 1m [sec] で受信する。つまり 100 kbit/sec の通信速度を実現している例である。

3. レーザビーム損失

低軌道衛星から海中に向けて照射されたレーザ光は、オゾン層や大気で吸収または散乱される。レーザビーム波長を 460 [nm] (青色光) とすると、天頂方向の透過率は 60% (快晴時) である。大気の透過率は、可視光域においては、比較的高く、“大気の窓と呼ばれている。大気と海面の境界においては、スネルの法則による界面反射が発生するが、海水の屈折率を 1.33 とすると、84%の透過率が得られる。

また、再帰ミラーの反射率を 90% とすると、これらの要因で -6.4 [dB] 相当の光損失となる。

タグ情報をレーザ光に重畳する光変調器については、実現技術が不明確であるため、今回の解析では -3.6 [dB] の損失を与え、これら要因による合計光損失は -10 [dB] と仮定して提案システムの実現性評価を行う。

4. レーザビーム拡散損失

レーザビーム拡散損失は、下記の前提条件とする。

- a. 往路拡散損失
 - ・ 送信レーザ光源ビーム広がり角 $\theta_{laser}=0.33$ [mrad]
 - ・ ビーム拡散幅 $d_{laser}=100$ [m]
 - ・ 再帰ミラー幅 $d_{crr}=0.1$ [m]
 - ・ ビーム拡散光損失 $L_1=10 \log (d_{crr} / d_{laser})^2=-60$ [dB]

- b. 復路拡散損失
 - ・ CRR 反射ビーム広がり角=入射光広がり角の 10 倍 $\theta_{crr}=3.3$ [mrad]
 - ・ ビーム拡散幅 $d_{crrlaser}=1000$ [m]
 - ・ 集光レンズ幅 $d_{lens}=1.0$ [m]
 - ・ ビーム拡散光損失 $L_2=10 \log (d_{lens} / d_{crrlaser})^2=-60$ [dB]
 上記の前提条件では、往復損失は -120 [dB] となる。

5. 海中における光吸収・散乱損失

海中における可視光の減衰係数は、文献[1]において 0.151 [1/m]とされている。この条件は、水質汚濁の少ない大洋上の海水の減衰係数として提示されている。この知見より、水深とレーザ光損失（往復）の間には、 $L_w=-1.31 d_w$ [dB] の関係があるとする事ができる。

6. 全光損失

前節までの議論より、快晴時に水質汚濁の少ない大洋の海水中に存在する計測対象物を追尾する際の全光損失は、 $L=L_1+L_2+L_w=-130.0-1.31 d_w$ [dB] である。この関係式で得られる全光損失と水深の関係を表す数値例を表 6-1 に

表 5-1 海水の減衰係数(文献 [1])

Water Type	a (/m)	b (/m)	c (/m)
Pure sea water	0.0405	0.0025	0.043
Clean ocean	0.114	0.037	0.151
Coastal ocean	0.179	0.219	0.298
Turbid harbor	0.266	1.824	2.19

まとめる。水深 10 [m]以上になると急激に減衰することが分かる。

表 6-1 水深と全光損失[dB]の関係

水深 [m]	全光伝搬損失[dB]
0	-130.0
1	-131.31
10	-143.1
50	-195.5

7. 理想光受信器による計測限界

前節までの議論より、水深 10[m]前後に位置する海中の計測対象物を追尾するには、-145 [dB]前後の光損失に耐えうるだけの受信システムを構築する必要があることが分かった。

低軌道衛星に搭載する送信器システムについては、電力供給の観点から大きな制約が伴うものと考えられる。加えて、タグ情報ビット長は 100bit 程度と情報量としては少量であること、受信光信号の信号対雑音比を十分に確保する観点も併

せ、送信光を Duty 比 10^{-3} でパルス化し、その分瞬時光信号の光電力を確保できるようにする。受信器においては、雑音システム性能を決定づける。受信器の雑音は、受信光信号のショット雑音、熱雑音、背景光ショット雑音、暗電流ショット雑音が存在することがよく知られているが、限界性能を与える要素は、受信光信号のショット雑音である。

受信光信号のショット雑音の根源は、レーザ光の量子ゆらぎである。レーザ光源から出力された光は量子光学的には“コヒーレント状態”に近いとされ、時間当たり出力される光子数はポアソン分布、位相のゆらぎはガウス分布になることが知られている。

一方、受信器における検波方式には、レーザ光の光子数を検波することに相当する直接検波方式とレーザ光の位相を検波することに相当するコヒーレント位相検波方式が存在する。厳密には、直接検波方式の雑音評価ではポアソン分布を、コヒーレント位相検波方式では、ガウス分布を前提に評価する必要があるが、本

評価ではいずれもガウス分布に従うものとして評価する。

上記の前提条件のもと、理想光受信器において確保される信号対雑音比（以下 SNR）を見積もったのが図 7-1 である。図 7-1 においては、縦軸を OSNR ではなく瞬時 OSNR (IOSNR) として記載している。これは送信器レーザのパルス化に伴うもので、パルスが存在する瞬間の OSNR で表現しており、一般的に用いられる平均光電力の OSNR と区別して表現している。

図 7-1 で示されているように、水深 10[m] の場合、送信器の平均光出力電力が 10[W] では 30 [dB]、1[W] では 20 [dB] の IOSNR を確保できる。

一方、IOSNR はタグ情報の検出誤り率と関連を有している。例えば、タグ情報の検出誤り率を 10^{-3} をすると、直接検波方式においては、17 [dB] の SNR を確保する必要がある。一方、コヒーレント位相検波方式の一種であるホモダイン位相検波方式では 11 [dB] の SNR で同一の検出誤り率を得ることが可能で高性能である。[2], [3]

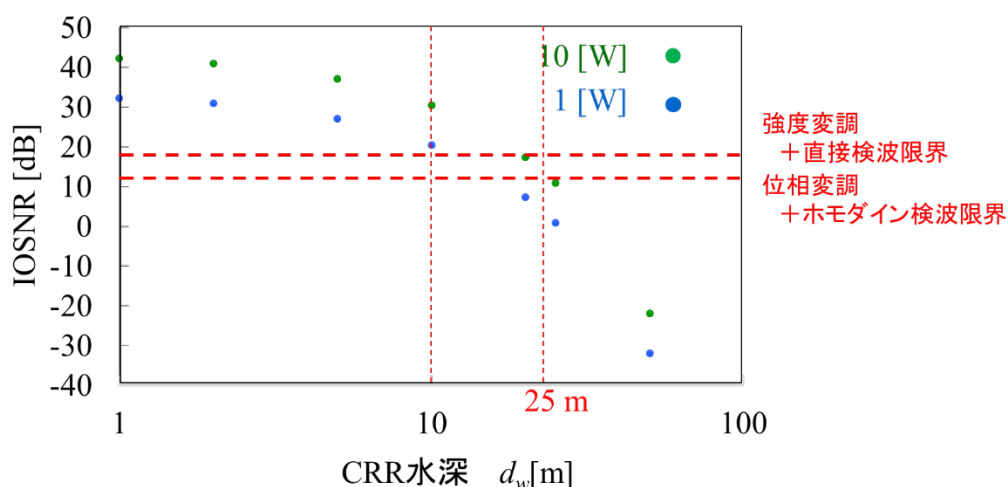


図 7—1 水中計測対象物の水深と IOSNR の関係

これらを勘案すると、送信器の平均光出力電力が 10[W] の場合、直接検波方式では水深 22[m]、ホモダイン位相検波方式では水深 29[m]、送信器の平均光出力電

力が 1 [W] の場合、直接検波方式では水深 11[m]、ホモダイン位相検波方式では水深 17[m] が検出限界となる。

8. 近大養殖池におけるフィールド実験

図 8 は、再帰性反射シート (10x10 cm) を魚 (イサキ) に装着した様子を示す。また、図 9 の近大養殖池の実験系において、航空レーザ測深機 (ALB) を用いた計測を行った。使用した航空レーザ測距儀 (Leica AHAB 社製 Chiroptera II) の仕様は、レーザ波長: 515nm、レーザパルス: 35,000 発/秒、測深距離: $D_{max} = 2.2 / k$ (k 値とは拡散消散係数、水中での光の減衰を示す指標)、最大測深距離: ~23m (最大実績) である。観測には航空デジタルカメラ (RCD30) を用い、測深精度 (基準) IH0 Order 1a (国際水路基準 IH0 Order1 は、平面精度 $\pm 2.5m$ 、高さ精度 $\pm 0.25m$) を実現している。



図 8 再帰性反射シートを装着した魚

実験は曇天の下、生簀から対地高度 500m を約 200km/h の航空機を用いて、照射時のレーザ強度: 5W, 500 μJ 、地上フットプリント: 直径約 2.25m の条件で行

った。航空レーザ測深機を用いた計測は、約 10 分の間隔で 2 フライト (Course 1 & 2) の実験を行った。



図 9 近大の養殖池の航空写真

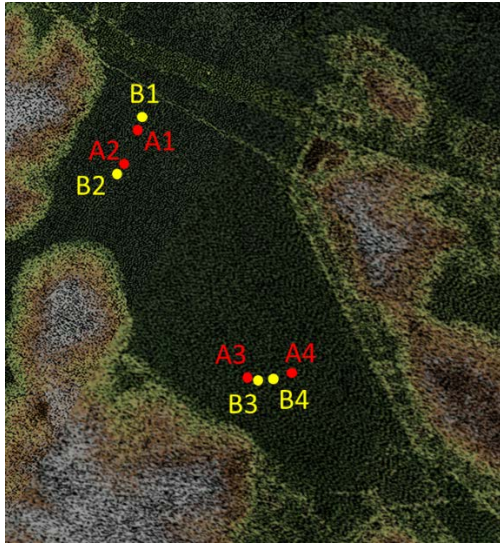


図 10 LAS データのマッピング図

図 10 は、計測結果（LAS データ）をマッピングしたもので、反射光強度の大きさを色分けしている（白：高、緑：低）。養殖池はほとんどが低反射の強度でマッピングされているが、橋の横の海中に設置されていると考えられる配管などがくっきりと表示されている。LAS データは、X, Y 位置、水深および反射強度が測定される。A1-4 と B1-4 は養殖池内で反射強度が強い点を示した。養殖池には 4 匹の魚を入れていたことから、それぞれの点を表していると考えられる。また、それぞれの点は固定点ではなく、約 10 分間の間

に移動しており、その方向もまちまちである。よって、再帰性反射シートを装着した水深 1~4m の魚の位置を検出できることが検証された。

9. まとめ

低軌道周回人工衛星を用いたレーザ光追尾システムの動作条件、実現性能の見積もりを行った。波長 460 nm、Duty 比 10^{-3} のパルスレーザ光源をビーム広がり角 $\theta_e=0.33$ [mrad] で照射した場合、送信器の平均光出力電力が 10[W] の場合、直接検波方式では水深 22[m]、ホモダイン位相検波方式では水深 29[m]、送信器の平均光出力電力が 1 [W] の場合、直接検波方式では水深 11[m]、ホモダイン位相検波方式では水深 17[m] が検出限界となることがわかった。対地高度 500m を約 200km/h の航空機を用いて、近大の養殖池のフィールド実験を行った。照射時の緑色（515nm）レーザ強度：5W, 500 μ J の場合、再帰性反射シート（10x10 cm）を装着した 4 匹の魚（イサキ）の追尾が可能であることが実証されている。

参考文献

[1] Brandon M. Cochenour, Member, IEEE, Linda J. Mullen, Senior Member, IEEE, and Alan E., "Laux Characterization of the Beam-Spread Function for Underwater Wireless Optical Communications Links," IEEE JOURNAL OF

OCEANIC ENGINEERING, vol. 33, No. 4, pp. 513-521, Oct. (2008).

[2] N. Ekanayake and H.M.V.R. Herath, "Performance of QAM signals in Optical Fiber Links in the Presence of Nonlinear Phase noise," Proc. of ICIIS 2013, pp.

224-227, Aug. (2013).

学」, オーム社 (1989)

[3] 大越, 菊池, 「コヒーレント光通信工