解説

特集　ライダー技術 I

水中 LiDAR への取り組み

島田 雄史，鈴木 謙一

株式会社トリマティス（〒272–0023 千葉県市川市南八幡 4–2–5 いちかわ情報プラザ 407）

Challenges to Realize Underwater LiDAR

Takeshi SHIMADA and Ken-Ichi SUZUKI

Trimatiz Limited, 407 Ichikawa Business Plaza, 4–2–5 Minamiyawata, Ichikawa, Chiba 272–0023

（Received February 15, 2021）

This paper describes our challenges to realize underwater LiDAR. We have provided a LiDAR kit suitable for developing prototype LiDAR's for various applications. Based on our developing experiences regarding these LiDAR's, we have started to challenge the research and development of an underwater LiDAR. In this paper, firstly we introduce ALAN consortium that promotes underwater optical wireless technologies including underwater LiDAR. Secondly, we explain loss characteristics of underwater optical propagation and optical devices usable in underwater, which are important issues for developing an underwater LiDAR. After that, we explain our developed prototyping underwater LiDAR and also show a 3D scan image of an object located in underwater, which were successfully obtained using that.

キーワード：ライダー，水中ライダー，タイムオブフライト，可視光レーザーダイオード

Key Words: LiDAR, Underwater LiDAR, Time of Flight, Visible light laser diode

1. はじめに

LIDAR（Light Detection and Ranging）は，レーザー光を用いて測距や環境測定を行う装置である．特に測距に用いる場合を LiDAR と略することが多く，レーザー光を対象物に照射することによって生じる反射光の戻ってくるまでの時間が，対象物との距離によって異なることを利用して距離を測定する[1]．また LiDAR は，空間分解能が数 cm 以下と高く，レーザー光を走査することにより多点測定を行い対象物の形状や動きを把握することが可能である．そのため，最近では，電波の損失の大きい水中や海中の探査，河川や電波を反射しにくい非金属物質が分布する地形の探査，人の動きを正確に計測するためのセンサー[2]や自動運転のセンサーなどに LiDAR が広く利用されはじめている．特に，最近の自動運転の機運の高まりにより，自動運転向けのセンサーとしての LiDAR の市場が立ち上がることで[3]，LiDAR の小型・低コスト化が進み，その普及にはずみがかかることが期待される．

一方，水中や海中向けの LIDAR については，ほとんどが学術研究分野での利用[4, 5]にとどまっていたが，水中に光無線技術などの水中光技術を適用した LAN（Local Area Network）の構築を目的とした ALAN（Aqua LAN）コンソーシアム[6]により，水中光技術の一つとして水中 LiDAR の産業化に向けた研究開発が推進されている．本稿では，これまでに開発してきた空間 LiDAR 及びこれからの市場拡大が期待される水中 LiDAR，特に測距に特化した LiDAR への取り組みについて紹介する．

2. 空間 LiDAR への取り組み

我々は，これまでにパルス状のレーザー光を対象物に照射することによって生じる反射光が戻ってくる時間が，対象物との距離によって異なることを利用した距離測定（ToF；Time of Flight），及びスキャナによる多点観測が可能な LiDAR の開発を行ってきた．開発した LiDAR は，様々な用途を想定した LiDAR の研究開発，実験に使えるように，測定距離レンジ，スキャン角度，測距精度，波長（光デバ

©2021 Laser Radar Society of Japan

イス選定による可視光～近赤外への対応），出力などのカスタマイズや，投光部，受光部，制御回路部のカスタマイズに対応可能となっている[7]．例えば人の目に害を与えにくい 1,500 nm 帯波長の光源を用いた「アイセーフ LiDAR」や，水中での損失の小さい可視光光源を用いた「可視光 LiDAR」等，様々な用途を見越した LiDAR のプロトタイプ開発に適用されている．

開発したアイセーフ LiDAR の外観と測定例を Fig. 1 に示す．光源として波長 1550 nm，平均パワー 20 mW，パルス幅 10 ns，繰り返し周波数 10 kHz，ビーム径約 2 mm のパルス光源を用いた．ここで 1550 nm 帯のレーザー光の最大許容露光量（MPE：Maximum permissible exposure）は，905 nm 帯に比べ単パルス領域において大きくなる[8]．例えば本装置に用いた光源のパルス幅 10 ns で MPE を比較すると，約 240 倍大きくなるため，1550 nm 帯ではピークパワーの高出力化が可能である．本装置では，光源を短パルス化し，低繰り返し周波数で動作させることにより，平均パワーを上げずにピークパワーの高出力化を実現している．なお平均パワー，パルス幅，及び繰り返し周波数から換算した光パルスのピークパワーは約 200 W である．また本装置は，受光部，TDC 回路でのパルスエッジ検出精度から 0.5 cm 程度の距離分解能，測定間隔から角度分解能 0.05° を有していると考えられる．Fig. 1（b）の測定例に示す通り，アイセーフ波長（1,550 nm）を使用することによりピークパワーを高出力化したことで，SN 比（Signal to Noise Ratio）の厳しい長距離でも正確な距離測定，3D スキャンによる街中の風景の 3D 画像化，電線の観測が可能な高い空間分解能（10 Gb/s 系高速デバイス適用によるミリ単位の高分解能）を実現している．なお，本レーザーシステムでは，低周波数で動作させるとパルスエネルギーが増加し，ピークパワーが高出力化することから，画像取得に微動ステージを用いた測定で約 4.5 時間，ガルバノミラーを用いた測定で約 1 時間程度要している．

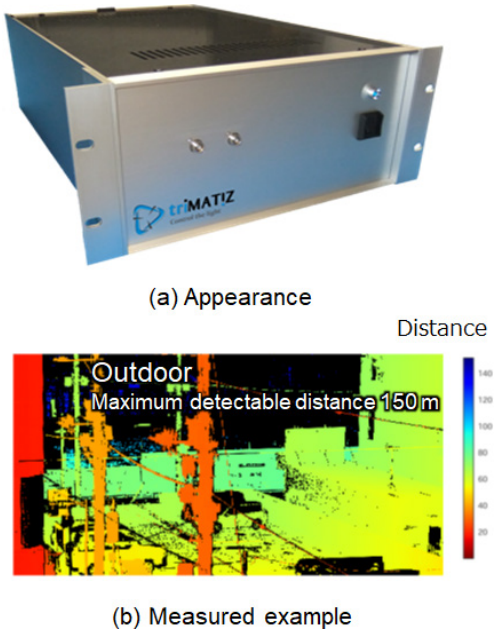

Fig. 1 （a）Appearance of eye safe LiDAR and（b）measured example.

3. ALAN コンソーシアム

日本を取り巻く広大な海洋及びその資源を活用する機運が高まっており[9, 10]，これらの海洋や資源を有効活用するためには，海中に情報インフラを整備する必要がある．そこで，海中や水中を一つの生活圏として捉え，それを支える情報インフラとして水中に Local Area Network（LAN）を構築する目的で，電子情報技術産業協会（JEITA；Japan Electronics and Information Technology Industries Association）「共創プログラム」として ALAN（Aqua LAN）コンソーシアムが設立された[6]．

しかしながら海中を代表する水中環境は，音波等限られた手段しか使えない「最後のデジタルデバイド領域」であり，音波のみの利用では，地上並みの通信ネットワークを構築することは困難である．そのため ALAN では，新たな可能性として水中光技術に着目し，水中ネットワークの構築を推進することとなった．

これらを踏まえた ALAN で検討を行う水中光技術について述べる．光は，特に通信において高速伝送が可能であること，伝送遅延が小さいという特長がある．また 100 m 程度であれば水中で数 100 Mbps 以上の伝送速度で通信が行える可能性を秘めている[11]．また数 m 程度であれば，1 Gbps を超える伝送速度での通信が可能であることが報告されている[12]．

距離測定や多点測定による 3D 探査では，自律型無人潜水機（AUV；Autonomous Underwater Vehicle）に搭載した水中 LiDAR（3D レーザースキャナー）による，海底地形の 3D 可視化が報告されている[3]．また音波が苦手な近距離の測定が可能であることから，両者を組み合わせた測定範囲の広い距離測定方式の実現が期待できる．給電については，光を使った非接触給電が可能になれば，遠隔操作型無人潜水機（ROV；Remotely Operated Vehicle）などの水中ロボットの活動時間の延伸が期待できる．

これら水中光無線技術などを活用した水中ネット

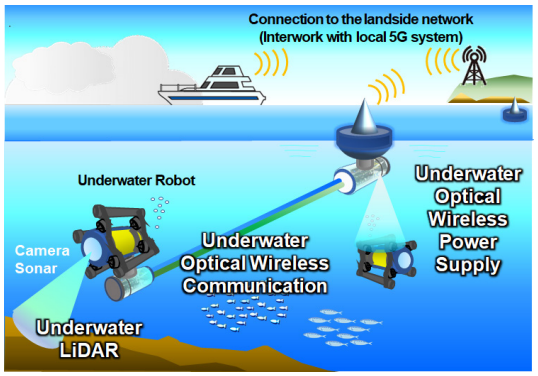

Fig. 2　Concept image of underwater network utilizing underwater optical wireless technologies in ALAN consortium.

ワークの概念図を Fig. 2 に示す．ここでは，水中ロボットが水中 LiDAR やカメラで取得した海中のデータを，水中光無線通信により海上に浮かぶ水中光無線中継装置を介して地上へ転送することを想定している．これが実現することにより，地上と水中でリアルタイムでのデータ共有が可能となることが期待される．

4. 水中での光の損失

比較のため，音波及び電波の周波数と水中（海中）での損失を Table 1 に示す[13, 14, 15]．なお音波の値は，文献 13 などを基にした文献 14 の計算ツール，電波の値は文献 15 式（2）より算出した．Table 1 に示すように，水中では電磁波の損失が大きく，通信や計測には音波がもっぱら用いられてきた．一方長波領域では，水中での電磁波の損失が小さくなることから，超長波領域（VLF 帯）の電磁波を用いた水中通信が行われている[15]．

電磁波は，高周波になるほど水中での損失が大きくなっていくが，可視光領域で損失が小さくなることが知られている[16]．可視光の波長と水域毎の損失を Table 2 に示す．なお表中の値は文献 16，Fig. 3（a）より算出した．

Table 2 に示すように，光の水中での損失はファイバ通信に比べ 3 桁ほど大きいが，ALAN で想定する数 m～100 m 程度の光伝搬では十分低損失である．また水域，水の透明度によって低損失波長が異なり，透明度の高い深海では青色の，透明度が若干低い近海や沿岸では緑色の，透明度が著しく低い浅海や湾内では黄色の損失が小さくなる．なおこれらの損失値は，季節ごとのにごりの変化などの水中環境条件により大きく変わる[17]．

Table 1　Underwater propagation loss of sound wave and radio wave in their frequencies.

Frequency [kHz]	Propagation loss[dB/m]	
	Sound wave	Radio wave
0.1	1.3×10^{-6}	0.386
1	7.0×10^{-5}	1.22
10	1.1×10^{-3}	3.86
100	2.8×10^{-2}	12.2
1000	0.44	38.6

Table 2　Propagation losses of visible lights as relationships between their colors and wavelengths in each sea area.

Color	Wave Length [nm]	Propagation loss[dB/m]		
		Deep sea	Inshore / Coastal water	Shallow sea / Bay water
Purple	430	0.23~	0.57~	1.2~
Blue	480	0.20 ~	0.44~	0.7~
Green	530	0.21~	0.41~	0.64~
Yellow	580	0.21~	0.44~	0.56~
Orange	605	0.41~	0.56~	0.76~

5. 水中で用いられる光デバイス

水中に適用できる可視光デバイスとその性能を Fig. 3 に示す．深海で損失の低い青色光源としては，変調帯域が GHz 程度以下と狭いが，高出力化，低コスト化の進展が著しく入手性の高い窒化ガリウム LD（GaN-LD）が普及している．また GaN 系 LD は，研究開発が進み緑色光源としても期待されている．また LD より扱いにくいが，ファイバーレーザー，固体レーザーや波長変換による緑色光源が入手可能である．黄色光源としては，固体レー

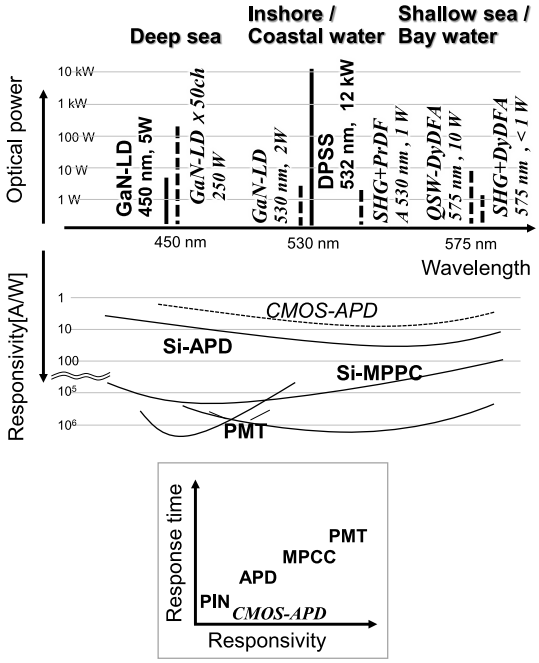

Fig. 3　Visible light devices and their performances.

ザーや波長変換による研究開発が行われている[6]．受光素子としては，可視光に感度があり高速な Si-APD や，さらに高感度な MPPC（Multi-pixel Photon Counter），光電子増倍管（PMT；Photo Multiplier Tube）の利用が期待されている．

6. 水中 LiDAR

波長 450 nm，ピークパワー 1.6 W，パルス幅 6 ns，ビーム径約 4 mm×1 mm（距離 1 m で測定）の青色 LD を用いたパルス光源と MPPC 受光器，及び TDC（Time-to digital converter）回路，スキャナを組み合わせた可視光 LiDAR を用い，水道水を満たしたアクリル水槽内のコンクリート片を水槽外部から測定した[18]．観測結果を Fig. 4 に示す．比較のため，同程度のピークパワー，パルス幅，ビーム径を持った波長 905 nm の近赤外 LD パルス光源を用いた LiDAR（NIR LiDAR：Near Infra-Red LiDAR）の測定結果も示す．NIR LiDAR は水中の対象物を計測できなかったのに対して，可視光 LiDAR は対象物の計測が可能である．またコンクリート片の表面形状（Fig. 4（b）の矢印上）を Fig. 5 に示す．

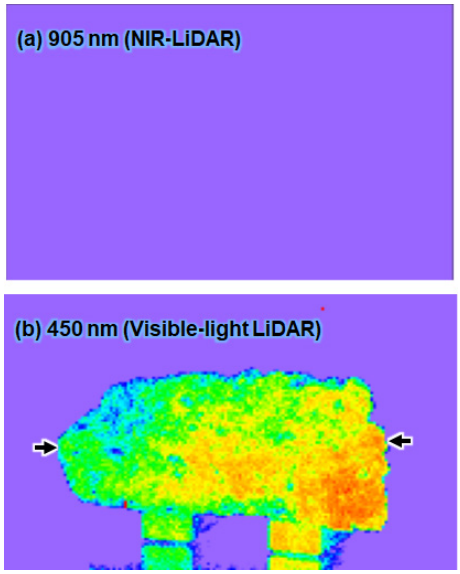

Fig. 4　Measured 3D scan images of (a) NIR LiDAR and (b) visible-light LiDAR.

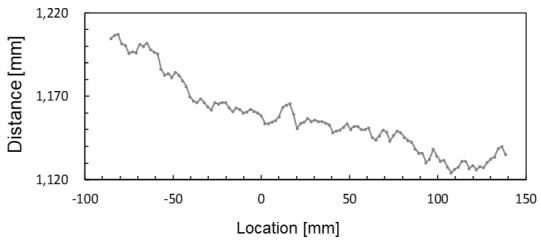

Fig. 5　Surface shape of a concrete piece.

本装置は，パルスエッジ検出精度から距離分解能 0.5 cm 程度，測定対象物距離の 1.3 m で測定したビーム径が，距離 1 m で測定したビーム径とほぼ変わらなかったことから空間分解能としてビーム径程度の数 mm を有していることが期待される．推定した精度については，今後精度が明らかな計測機器との比較を行うことで確認を行いたい．

また可視光 LiDAR を耐圧容器に収容することで ROV（Remotely Operated Vehicle）に搭載可能な水中 LiDAR を開発した．開発した水中 LiDAR を Fig. 6 に示す．耐圧容器は，内径 205 mm，厚さ 10 mm，全長 440 mm の円筒型容器で，投受光器の他，内部に可視光 LiDAR の主要部品であるスキャナ，スキャナドライバ，TDC 回路を収容している．水中 LiDAR への電源供給，外部からの制御，及び測距データの転送は，水中コネクタ及びケーブルを介して行われている．

ROV に搭載した水中 LiDAR を用いて，海洋研究開発機構（JAMSTEC）横須賀本部の多目的水槽（全長 40 m，全幅 4 m，水深 2 m（最深部））で行った 3D スキャンの測定風景及び測定結果を Fig. 7 に示す．また参考として測定対象の写真も示す．多目的水槽内に設置した測定対象物に対し，測定距離 1 m の範囲で 3D スキャンを実施することで，水中での 3D 測距画像の取得に成功した[7]．なお画像取得に 10 分程度要している．

しかしながら，本計測においては近端反射による影響の抑圧，測定距離の拡大やスキャンスピードの向上などの問題点が顕在化した．現在，社内の水中実験環境を整備するとともに，上記の問題点への対策を実施して再実験を行っている．再実験の結果については，データがまとまったところで紹介の機会を設けたいと考えている．

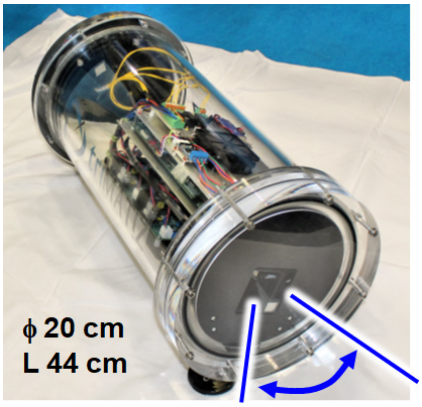

Fig. 6　Developed underwater LiDAR.

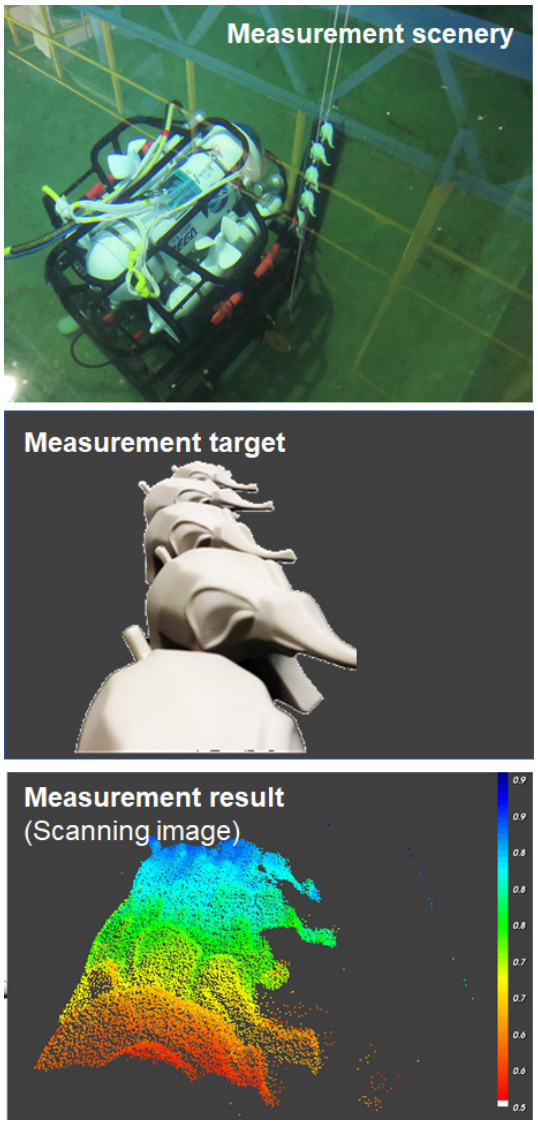

Fig. 7　Scenery and result of 3D scan measurement utilizing underwater LiDAR.

7. おわりに

これからの市場拡大が期待される可視光 LD を用いた水中 LiDAR への取り組みについて紹介した．また水中 LiDAR を含む水中光無線技術を用いた水中ネットワークの構築を標榜する ALAN コンソーシアムについて簡単に紹介した．

水中 LiDAR への取り組みについては，まず基礎となる空間 LiDAR 開発状況について述べると共に，水中 LiDAR を開発する上で重要となる水中での光損失特性及び水中で用いる光デバイスについて言及した上で，水中 LiDAR の開発状況について紹介した．

水中計測実験では，青色 LD 光源を用いた水中 LiDAR を用いることにより水中での 3D 測距画像を取得できることを示した．今後，実験で明らかになった問題点への対策及び再実験を行い開発した水中 LiDAR の完成度を向上させる予定である．

参考文献

1）P. F. McManamon: “Review of lidar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology,” Opt. Eng., **51**（2012）060901.
2）桝井昇一，手塚耕一，矢吹彰彦，佐々木和雄，「3D センシング・技認識技術による体操採点支援」，「電子情報通信学会誌」**103**（2020）[1] 5–14.
3）OPTRONICS ONLINE,「自動運転向け LiDAR 市場，2030 年に 4,959 億円へ」（2018 年 6 月 29 日付ニュース）http://www.optronics-media.com/news/20180629/51823/
4）石橋正二郎，「“海中探査機が視る” 海底の姿―海中 3D レーザースキャナーの開発」，月刊オプトロニクス 2016 年 12 月号，**35**（2016）[12] 58–64.
5）T. Somekawa, S. Kurahashi, J. Kawanaka, and M. Fujita, “Development of the marine Raman lidar system”, Proc. SPIE 10791, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XIV, 1079104（2018）.
6）鈴木謙一，島田雄史，安達文幸：「水中ネットワークを実現する ALAN コンソーシアム」，信ソ大 ABS-1–16（2019）.
7）島田雄史，鈴木謙一：「青色 LD を用いた水中 LiDAR」，O plus E, **42**（2020）[1] 40.
8）「レーザ製品の安全基準」，JISC6802（2014）.
9）内閣府　海洋資源の開発及び利用（2019 年 7 月 3 日閲覧）https://www8.cao.go.jp/ocean/kokkyouritou/yakuwari/yakuwari03.html
10）吉田 弘，「海中電磁気の産業応用」，信ソ大 2019 ABS-1–11（2019–9）.
11）T. Sawa, N. Nishimura, K. Tojo, and S. Ito: “Practical Performance and Prospect of Underwater Optical Wireless Communication”, IEICE Trans. Fundamentals, E102.A（2019）156.
12）B. S. Ooi, X. Sun, O. Alkhazragi, Y. Guo, T. K. Ng, and M-S. Alouini: “Visible diode lasers for high bitrate underwater wireless optical communications”, OFC2019, paper M3I. 1（2019）.
13）Ainslie M. A., McColm J. G., “A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water”, Journal of the Acoustical Society of America, **103**（1998）[3] 1671–1672.
14）土屋利雄，「海水中の吸収損失（a）と伝搬損失（TL）の計算」，オンラインサイト「海洋音響/水中音響研究」http://www.tsuchiya2.org/
15）藤井直道，佐藤弘康，陳 強，石井 望，高橋応明，吉田 弘，菅良太郎：「海中無線通信用アンテナと伝搬モデルに関する研究」，信学技報 A-P2018–5（2018–04）.
16）林 新：「LED を用いた適応型水中可視光無線通信システムの研究」，信総大 2016 AS-3–2（2016）.
17）高橋成五，武藤弘樹，奥澤宏輝，西川直希，高山佳久：「東京湾表層海水の可視光透過率の通年測定」，信総大 2019 B-10–18（2019）.
18）高橋成五，山田 直：「水中 LiDAR によるコンクリート片による 3D 測定」，信ソ大 2019 ABS-1–19（2019）.

島　田　雄　史　1994 年成蹊大学法学部法律学科卒業．証券会社勤務を経て，1995 年株式会社応用光電研究室に入社，その後，株式会社オプトクエスト，富士通東日本ディジタル・テクノロジ株式会社において主に光ファイバネットワーク向け機器の技術営業に従事．2004 年に有限会社トリマティス（現 株式会社トリマティス）設立，代表取締役 CEO に就任．2018 年 ALAN コンソーシアム代表に就任．

鈴　木　謙　一　1990 年宇都宮大学大学院工学研究科修了，2009 年北海道大学大学院博士後期課程修了，博士（情報科学）．1990 年より NTT 研究所において超高速光伝送方式や光アクセスシステムの研究開発，IEEE802.3WG，1904WG において PON の標準化に従事後 2019 年より現職．水中 LiDAR や水中光無線通信技術の研究開発に従事．OSA，IEEE，信学会会員．