

— 報告 —

可視光域分光測定用低消費電力LED 光源の開発

中野 善之^{1*}, 細江 雄三², 藤木 徹一³, 吉川 泰司⁴, 渡邊 修一⁴

外洋における中・長期の無人海洋観測では、観測期間中に使用できる電力が限られるため、消費電力の少ない機器を用いる必要がある。海洋研究開発機構むつ研究所が開発している海洋表層ブイ型二酸化炭素観測装置は海水とCO₂ガス平衡にあるpH指示薬溶液の可視光域の吸光度測定により二酸化炭素の測定を行っている。今までは、その光源として消費電力の大きいキセノンランプやタングステンハロゲンランプが主に用いられてきた。本研究では、従来のランプに代わり、発光ダイオード（LED）を用いて可視光域の分光測定に使用可能な低消費電力（最大1.0 W）の光源を開発した。開発したLED光源は7個（435 nm, 490 nm, 500 nm, 592 nm, 609 nm, 750 nm, 白色）のLEDを組み合わせて、それぞれの光を混合し光ファイバーへ出力する。開発した光源の安定性試験と温度依存性試験を行い、従来のランプよりも点灯直後から安定で単体のLEDよりも温度依存性の小さいことが確認できた。

キーワード：分光測定, 可視光, LED, 省電力

2010年4月16日受領；2010年7月30日受理

- 1 独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・先端技術研究プログラム
- 2 株式会社イマック
- 3 独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・物質循環研究プログラム
- 4 独立行政法人海洋研究開発機構・むつ研究所

*代表執筆者：

中野 善之

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・先端技術研究プログラム

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

046-867-9385

ynakano@jamstec.go.jp

著作権：独立行政法人海洋研究開発機構

— Report —

Development of low power consumption LED light source for visible light spectrophotometry

Yoshiyuki Nakano^{1*}, Yuzo Hosoe², Tetsuichi Fujiki³, Yasushi Yoshikawa⁴, and Shuichi Watanabe⁴

Autonomous systems in the open ocean for a long-term observation need components that consume low power. We have been developing a compact drifting buoy system for pCO₂ measurement. The measurement principle for the pCO₂ sensor is based on spectrophotometry. The pCO₂ is calculated from the absorbance of the pH indicator in the solution that is in equilibrium with respect to CO₂ exchange between seawater sample. In general, Xenon lamp or tungsten halogen lamp, which require large amount of power, have been widely used as a light source for a spectrometer. We developed a low power consumption (max: 1.0 W) light source for spectrometry within visible light range by using Light Emitting Diode (LED). The LED light source consists of seven LED lamps (435 nm, 490 nm, 500 nm, 592 nm, 609 nm, 750 nm, White) and output light flux to optical fiber. As the results of stability test and temperature dependency test, the LED light source was stable compared to conventional light sources.

Keywords: spectrometry, visual light range, LED, electric power saving

Received 16 April 2010 ; Accepted 30 July 2010

- 1 Advanced Marine Technology Research Program, Marine Technology Center (MARITEC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 2 IMAC Co., Ltd.
- 3 Environmental Biogeochemical Cycle Research Program, Research Institute for Global Change (RIGC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
- 4 Mutsu Institute of Oceanography, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

*Corresponding author:

Yoshiyuki Nakano

Advanced Marine Technology Research Program, Marine Technology Center (MARITEC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)

2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan

Tel. +81-46-867-9385

ynakano@jamstec.go.jp

Copyright by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

温室効果気体を代表する二酸化炭素について、大気・海洋間の吸収／放出量の分布を全球規模でより正確に把握するためには、海域や季節ごとの変動が大きい海洋において時空間的に密なデータを得ることが必要となる。しかし、陸域と比べて海洋は広く、電源の確保、厳しい気象など様々な条件から無人観測が困難なため、船舶による観測に頼らざるを得ず、データの蓄積が少ないのが現状である。海洋における二酸化炭素観測の空白域を少なくし、時空間的に高密度な観測を行うためには、船舶のみによる観測には限界があり、全球で継続的に観測可能な現場型の海洋表層二酸化炭素観測装置が必要となる。海洋研究開発機構むつ研究所では、国内で開発実績のある鉛直的に海水中の二酸化炭素を測定できるCO₂プロファイラー (Nakano et al., 2006) をもとに、pH指示薬溶液の色変化を分光学的に測定する方法 (色素法) (e.g. Clayton and Byrne, 1993; Zhang and Byrne, 1996) を応用した二酸化炭素センサーを開発し、これを搭載した全球規模で展開することが可能な小型海洋表層二酸化炭素観測装置 (漂流ブイ型) を開発している。

二酸化炭素センサーは約1年にわたる無人の自動観測を可能とするため、海水と測定溶液の間の二酸化炭素分圧を等しくする液液平衡方式を用い、色素法で測定溶液のpHを高精度に測定することによって、海水の二酸化炭素を求める (Lefèvre et al., 1993; DeGrandpre et al., 1999; Zhongming et al., 2008)。この方法では、pH指示薬の吸収極大波長2波長における吸光度の比を測定することによってpHが求まるため、長期経時変化が少なく、頻繁に較正を必要としない特徴がある。吸光度を測定するには光源が必要となるが、pH指示薬溶液が吸収を持つ可視光域の光を出力する光源として、一般的にキセノンランプやタンゲステンハロゲンランプが用いられてきた。これらの光源は、可視光域において波長による強弱の差が少ない安定した光を出力することができるが、安定した出力を得るまでに30分から1時間以上の時間を必要とする。さらに、現場型無人観測装置に使用するには消費電力と発熱量が大きい。ブイなどを用いた中・長期の無人海洋観測では、電源供給を電池に頼らざるを得ないため、使用できる電力に制限がある。また、一般的に観測装置を小型にするため搭載機器の間隔は狭く防水のための密閉容器に格納するので、発熱量の大きな機器は熱を逃がしにくくなり容器内の温度を上昇させ、他の機器に大きな影響を与える可能性がある。このような無人海洋観測装置の特長からキセノンランプやタンゲステンハロゲンランプは、ブイ搭載型二酸化炭素センサーの光源として不向きであり、低消費電力で発熱量の少ない新たな光源が必要となった。

上記に参照した二酸化炭素測定機器に用いられるpH指示薬は主に3種類あり、それぞれ応答性や測定可能なpH範囲、温度特性に特徴を持っている。これらのpH指示薬溶液の吸収極大波長はそれぞれ異なるので、海域や用途によってpH指示薬の選択により汎用性を持たせるためには、新たな光源にも可視光域において波長による強弱の差が少ない光を出力することが求められる。

発光ダイオード (Light Emitting Diode (LED)) は消費電力が少なく、小型、寿命が長い等の特長から表示用を中心に幅広い分野で活用されるようになってきた。青色LEDの発明以降、高輝度のLEDが次々と発売され分析化学の分野においても光源としても使用され始めた。従来の分析用LED光源は主に単一波長か白色パワーLEDなどの高輝度光を利用する用途に用いられており、蛍光測定アプリケーション用の励起光源として用いられることが多く、キセノンランプやタンゲステンハロゲンランプのように可視光域において波長による強弱の差が少ない光を出力するLED光源はなかった。現場型センサーに利用された例としては、DeGrandpre et al. (1999) の最新型の装置において、LEDを2個のみ使用し低消費電力を達成しているが、それぞれ単一波長のLEDであるため、pH指示薬は1種類しか使用できず、受光器のドリフトの影響を受けやすい欠点がある。本研究では、小型海洋表層二酸化炭素観測装置に搭載するため、LEDを使用し様々なpH指示薬の測定が可能なように波長による光強度の強弱が少ない低消費電力の光源を開発したので報告する。

2. LED光源の開発

2.1. LEDの選択

pH指示薬溶液の色変化を精度よく測定するには、測定波長の光量が十分にあり、その波長周辺で光量の変化が小さいことが必要となる。光量が少なければ、光が吸収された後の測定値においてS/N比が悪くなる。光量の変化が大きければ、温度変化などによって受光素子の測定波長がずれた場合に、大きな誤差を生むことになる。可視光域での光吸収をもつpH指示薬溶液は430 nm～440 nmと580 nm～600 nmの2箇所に吸収極大波長を持ち、730 nm以上の波長では吸収を持たないものが多い。さらに指示薬溶液劣化等、異常の目安となる等吸収点 (pHが変化しても等しい吸収を示す点) の波長は490 nm前後にあるものが多い。実験室でのpH指示薬溶液の吸光度測定においては、2箇所の吸収極大波長と暗電流などのベースライン補正として、光の吸収をもたない730 nm以上の波長における3点の吸光度を測定する。無人の現場測定においては指示薬溶

液劣化などによる濃度の変動を監視するために等吸収点の吸光度も必要となるので、少なくとも4つの波長域で安定した光の出力が必要となる。以上のpH指示薬溶液の特長を考慮し、従来のキセノンランプやタンゲステンハロゲンランプのように様々なpH指示薬溶液の測定に対応するためのLED光源を開発するため、LEDを選択する際は白色LEDで可視光域を全体的にカバーしつつ、光強度の足りない波長を補うように使用するLEDを決定した。この時LEDの種類が多ければ多いほど、様々な波長の光を使用できるので可視光域において光強度の増減が少ないスペクトルを得ることができるが、それによって消費電力が増えてしまうと従来の光源との差がない。従来の光源は10 Wから100 Wの消費電力のものが多く、本研究開発ではその20分の1から200分の1にあたる0.5 Wの消費電力を目標に設計を行った。さらに二酸化炭素観測装置が許容できる光源の大きさ（高さ70 mm、幅85 mm、奥行150 mm以内）を考慮し、7個の直径5 mm砲弾型LEDを使用することとした。LEDの種類は各波長における光量のバランスを考慮し、白・青・青緑・緑・黄・橙・赤の7種類のLEDを使用した（Table 1）。610 nmから750 nmまでは白色以外ではカバーするLEDが存在しないので大きな光の落ち込みが予想されるが、pH指示薬溶液の測定には使用しない波長域であり、今回はLED使用個数の制限もあることから対処しないこととし、光の吸収をもたない750 nmでドリフト補正のために吸光度を測定することとした。光源全体の消費電力は最大で1.0 W（7個のLED全ての輝度を最大にしたとき）となったが、通常の使用においては輝度のバランスがとれるように調節するため消費電力は0.5～

0.7 Wとなり、目標をほぼ達成することができた。

2.2. LEDの配置、光出力方法

7個のLEDから出る光を光源筐体の1箇所から均等に出力するようにそれぞれのLEDをアルミ製のLEDホルダー（直径22 mm×奥行16 mm）にバラボラ状に配置し、LEDの光が中心に集まるように角度を調節し固定した（Fig. 1 (A)）。LEDホルダーの中心にあるLEDの強度が出力光の中で一番強くなるため、ベースとなる白色LEDを中心に配置した。光束が集まる中心にはロッドレンズがあり、各LEDからロッドレンズに入射した光はレンズ角柱内で反射を繰り返し、射出端面で均一化されて出力する（Fig. 1 (B)）。出力口には光ファイバーを接続するためにSMA905コネクタを取り付けている。本研究では、受光部としての分光光度計にUSB4000（Ocean Optics Co., Ltd.）を使用した。

LEDは個体差が大きく明るさにばらつきがある場合が多い。さらにLEDホルダーへの固定角度のわずかな違いによってロッドレンズへの光の入射の仕方が容易に変わるので、そのままでは光源全体として出力光のスペクトルにばらつきが生ずる。このばらつきを抑えるため、7個のLEDは制御基板によって定電流回路で点灯し、制御基板上でそれぞれ単独に光強度の調節が可能となっている。白色LED以外は、それぞれのLEDがもつ極大輝度の波長における半値幅が狭く、他のLEDと出力光がほとんど重ならないため、白色LEDで低輝度の波長の光を補うように調整することで、出力光からはなだらかなスペクトル特性を得ることができ、光源としての個体差を少なくすることができた（Fig. 2 (A), (B)）。

Table 1. LEDs for LED light source in the present study.

表1. 本研究のLED光源に使用したLED.

Peak wavelength (nm)	Color	Products	Makers
435	Blue	L435-06	EPITEX Inc.
490	Blue green	L490-06	EPITEX Inc.
500	Green	NSPE510DS	Nichia Corp.
592	Yellow	FY5364X	STANLEY ELECTRIC CO., LTD.
609	Orange	FA5364X	STANLEY ELECTRIC CO., LTD.
750	Red	L750-06AU	EPITEX Inc.
White LED	White	NSPW500DS	Nichia Corp.

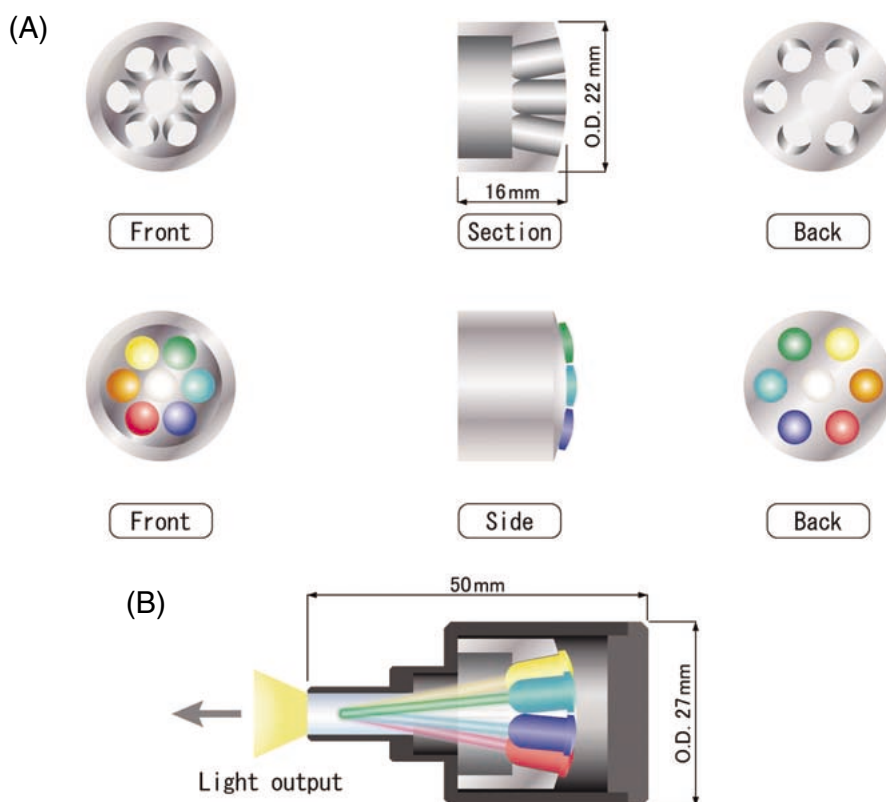


Fig. 1. (A) LED holder (upper) and LED layout (lower) (od. 22 mm $\times$ t 16 mm). (B) Section of LED light source (od. 27 mm $\times$ t 50 mm). Rod lens was set at center of light flux.

図1. (A) LEDホルダー（上段）とLEDの配置図（下段）（直径22mm $\times$ 奥行16mm）. (B) LED光源断面図（直径27mm $\times$ 奥行50mm）. 断面図左の光束が集まるにはロッドレンズがある.

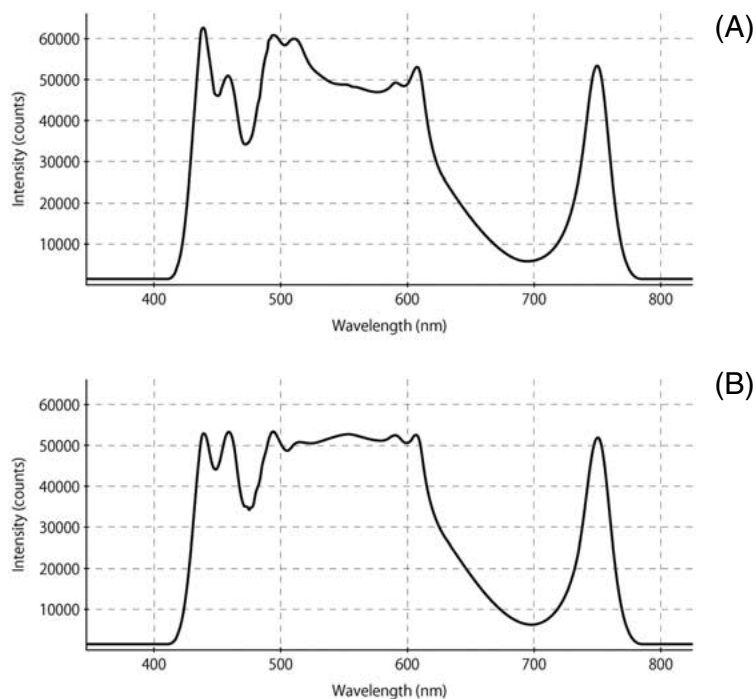


Fig. 2. Spectrum of LED light source in this study. (A) Before adjustments. (B) After adjustments.

図2. 本研究で開発したLED光源のスペクトル. (A)調整前, (B)調整後.

3. 結果と考察

3.1. LED光源の安定性

LEDは一般的にキセノンやタングステンハロゲンランプなどの従来光源に比べて温度による出力変化が少ないとされ、LED自体の発熱の少なさから点灯直後から安定した光を得ることができるとされている。開発したLED光源の連続使用時における安定性を確認するため、LED光源と分光光度計を20℃の恒温槽（空気浴）に入れ10分間隔で530回の連続測定を行った。400 nmから800 nmまでの各波長における光強度の変動係数をFig. 3に示す。Fig. 2(B)のスペクトル特性において、光強度が急激に変化している波長と低輝度の波長においては変動係数が0.5 %を越えるところもあるが、pHを算出する際に計算に用いる波長域では0.5 %以下になり平均は0.1 %であった。市販のキセノン光源では安定後0.2 %程度である。本実験の結果は光源の安定性と共に分光光度計の性能によって影響を受けることが考えられる。使用した分光光度計であるUSB4000のノイズレベルを実測したところ、400 nmから800 nmまでのシグナルに対するノイズの割合は十分に小さく、その平均値が0.004 %となったことから、分光光度計が変動係数に与えた影響は無視することができ、本実験により開発した光源が分光分析用の光源として安定であることが証明された。

さらに光源の立ち上がり時の安定性を確認するため、実験開始直後から60分間のみの変動係数を求めたところ、pHを算出する際に計算に用いる波長域である440 nmから600 nmの範囲では0.4 %以内におさまリ、平均は0.2 %となった。以上の結果から、開発した光源は点灯直後から安定した出力を得られることが示された。

3.2. 光源の温度特性

3.1.においてLEDが従来の光源よりも点灯直後から高い安定性をもつことが明らかになったが、その発光効率（光源の全放射束（ ϕ_e ）に占める全光束（ ϕ_v ）の割合、単位はlm/W）は温度によって変化し、温度が高いほど効率が悪くなる性質を持っている。外洋における現場観測機器は全球での展開を考慮すると、使用される温度範囲は表面水温から少なくとも-1℃から35℃と想定される。開発した光源の温度特性を調査するため、想定される温度域において、スペクトル強度を測定した。ただし本実験では、恒温槽に用いているペルチェ素子の冷却性能限界のため、最低温度は5℃となった。

実験はLED光源を恒温槽（空気浴）に入れて5℃、10℃、20℃、30℃、36℃の順に温度を上げていき、それぞれの温度におけるスペクトル強度を測定した（Fig. 4 (A)）。本実験ではLED光源の温度特性のみを測定するため分光光度計は

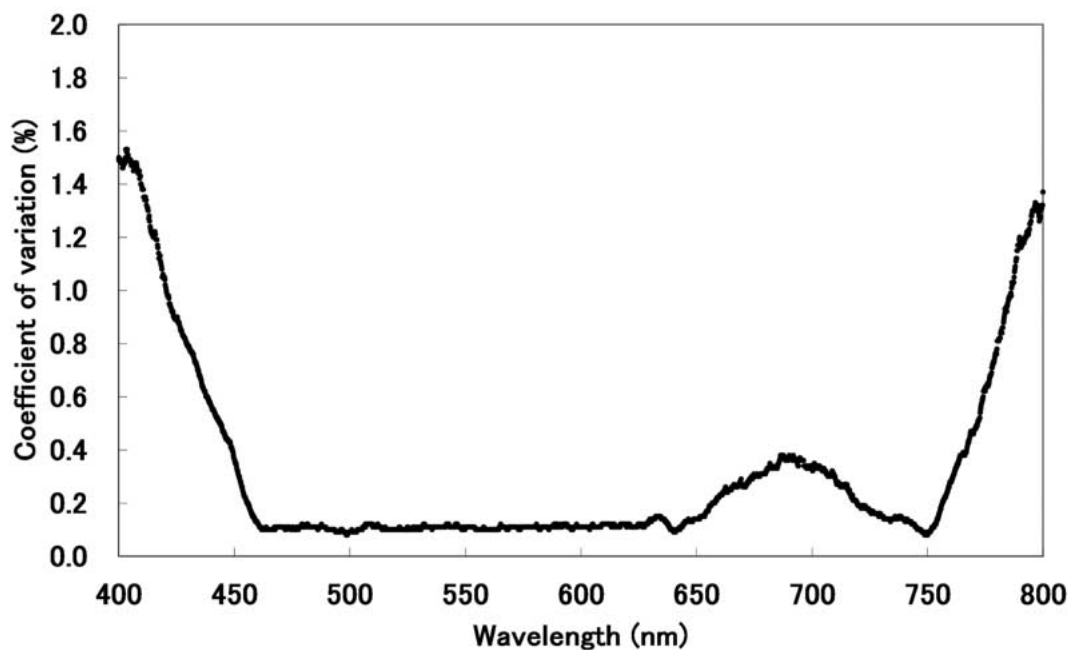


Fig. 3. LED light intensity coefficient of variation (n=530).

図3. 各波長における光強度の変動係数（n=530）。

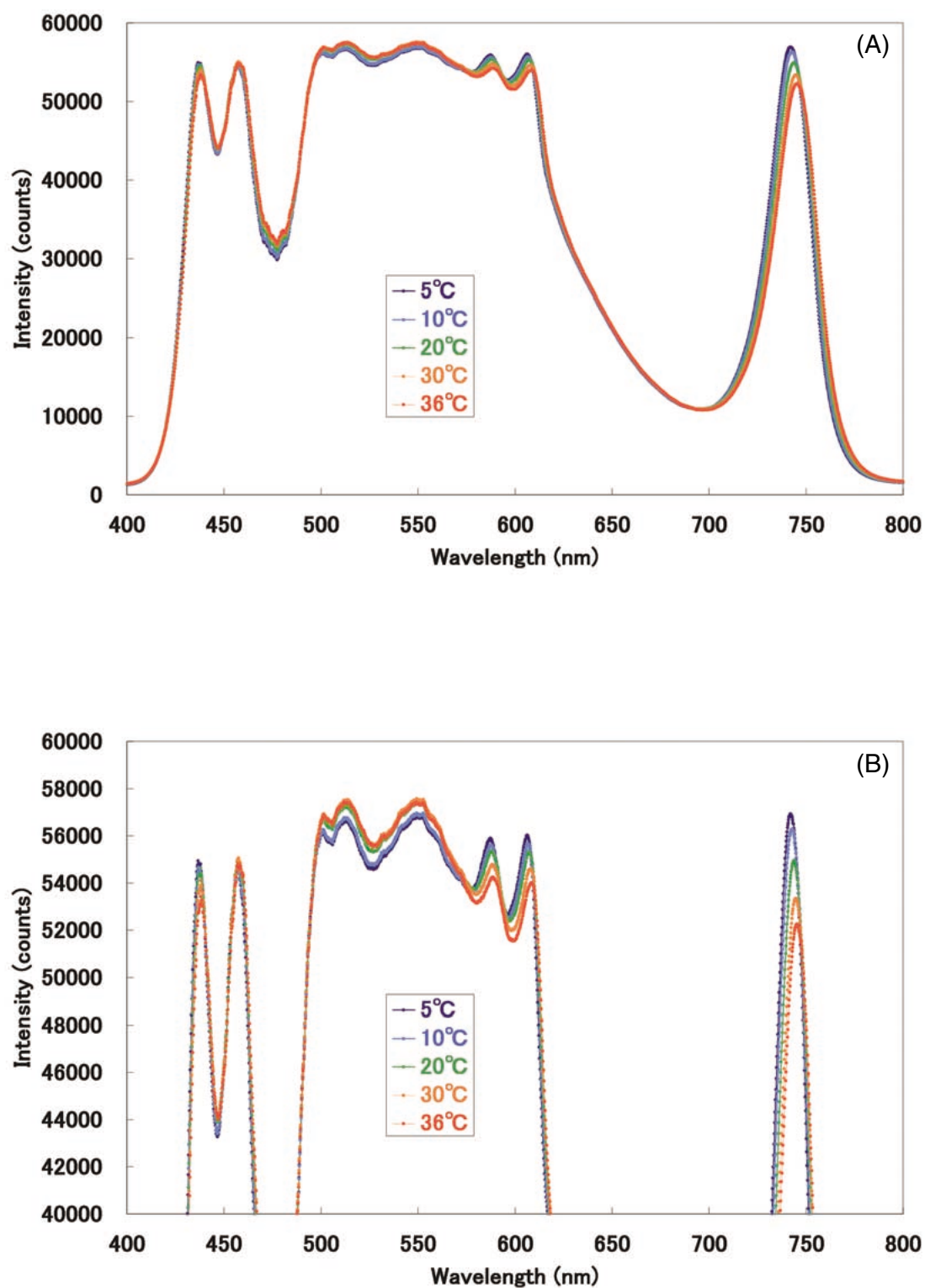


Fig. 4. Spectra of LED light source at various temperatures (5°C-36°C). (A) Whole of the spectra. (B) Expanded figure of A (Intensity > 40,000).

図4. 温度を5℃から36℃まで変化させたときのLED光源のスペクトル。(A) スペクトル全体。(B) 光強度40,000以上の拡大図。

一定温度下においた。

全体のスペクトル特性は各LEDの極大輝度に顕著に見られるように、高温になると長波長側にシフトする傾向が見られた（例としてFig. 4 (B) 600 nm近辺）。温度上昇による波長シフトはLEDの性質として知られているところであるが、開発した光源では複数LEDの光の重なりが少なくなる長波長域で顕著に見られ、複数LEDの光が重なる波長域では影響が小さかった。また、温度が高いほど発光効率が悪くなるLEDの性質を反映して、低温の方で光強度が強くなる傾向が見られるが、波長シフトの影響の時と同様にLEDの光が重なる波長域ではその差が小さくなり、440 nmから570 nm付近では逆に高温の方で光強度が強かった（Fig. 4 (B)）。しかしながら、その差は長波長側と比べて小さかった。このことから、開発した光源は7種類のLEDを組み合わせることにより、結果的に単体のLEDと比べて温度影響による波長シフトと光強度変化の影響が小さくなったと考えられる。これは様々な温度環境下において、より安定した現場観測に貢献する効果となる。温度影響が顕著に見られる波長域においても波長シフトと光強度変化の影響は光強度の強さの変化として測定することができるので、実際の観測では試料を通らない参照光を測定することで、温度影響を補正することができる。

以上の結果から今回開発したLED光源は、可視光域に吸収をもつpH指示薬溶液の測定に最適化され、従来の光源に比べて発熱と消費電力が小さい安定な光源であり、参照光を測定することで温度影響を除去できる現場測定に適した光源であることが明らかになった。上記の特性から本光源は現場測定のみならず、点灯直後から安定な室内実験用の光源としても使用できる。さらに本光源は使用するLEDを容易に交換することができるので、測定対象に適した波長の光を出力する光源に変更することができ、栄養塩の分析など複数の波長を測定する必要がある分光分析に応用可能である。本研究では可視光域用のLED光源として開発したが、強力な紫外光や赤外光を出力するLEDが増えてきており、これらの光を必要とする励起用の光源としても応用することが可能で、LEDの進化と共にその応用範囲はさらに広がっていくと考えられる。

謝辞

LED光源の開発に協力いただきました株式会社イマック LED照明機器グループの皆様に感謝申し上げます。制御基板の開発に協力いただきましたワイケー電子株式会社の菊地吉隆氏に感謝申し上げます。LED光源の作図に協力いただきました宇津木裕美氏に感謝申し上げます。本研究は、文部科学省海洋開発及地球科学技術調査研究推進費によるプロジェクト研究「海洋二酸化炭素センサー開発と観測基盤構築」の一部として実施した。

引用文献

- Clayton, T. D. and R. H. Byrne (1993), Spectrophotometric seawater pH measurements: total hydrogen ion concentration scale calibration of *m*-cresol purple and at-sea results, *Deep-Sea Res. I*, 40, 2115-2129.
- Degrandpre, M. D., M. B. Matthew and T. R. Hammar (1999), Calibration-free optical chemical sensors, *Anal. Chem.*, 71, 1152-1159.
- Lefèvre, N., J.P. Ciabrini, G. Michard, B. Brient, M. Duchaffaut, and L. Merlivat (1993), A new optical sensor for pCO₂ measurement, *Mar. Chem.*, 42, 189-198.
- Nakano, Y., H. Kimoto, S. Watanabe, K. Harada and Y. W. Watanabe (2006), Simultaneous measurements of in situ pH and CO₂ in the sea using spectrophotometric profilers, *J. Oceanogr.*, 62, 71-81.
- Zhang, H., and R. H. Byrne (1996), Spectrophotometric pH measurements of surface seawater at in-situ conditions: absorbance and protonation behavior of thymol blue, *Mar. Chem.*, 52, 17-25.
- Zhongming, L., D. Minhan, X. Kunming, C. Jinshun, and L. Yinhao (2008), A high precision, fast response, and low power consumption in situ optical fiber chemical pCO₂ sensor, *Talanta*, 76, 353-359.