

プラズマ灯を用いた低消費電力型イカ釣り漁灯の開発

高橋 志郎、田谷 嘉浩、村田 政隆、松本 陽斗、高山 剛*、
世取山 重剛**、桜井泰憲***、井筒慶汰****、柏谷 和仁****

Development of a Power-saving Illumination Apparatus for the squid fishing using the Plasma Lamp

Shiro Takahashi, Yoshihiro Taya, Masataka Murata, Haruto Matsumoto,
Go Takayama*, Jugo Yotoriyama**, Yasunori Sakurai***,
Keita Izutsu**** and Kazuhito Kashiwaya****

要 旨

漁労経費に占める漁灯のエネルギー（燃油）消費の割合が特に高いイカ釣り漁灯の省エネルギー化を目的とした新しい漁灯の開発を行った。太陽光に近い波長域、高エネルギー変換効率で長寿命の無電極プラズマ灯の特性に注目し、このプラズマ灯の灯りを配光制御することで従来のメタルハライド灯と同等の漁獲を見込める低消費電力型イカ釣り漁灯の試作・開発、イカ釣り漁試験操業による集魚効果実証試験を行った。その結果、従来灯に比べて漁獲量の遜色がなく、約47%の省エネルギー効果（燃油消費量ベース）が認められたことから、ここに報告する。

1. はじめに

漁業では、航行や漁労等で消費される燃油の原価率が高く、特にイカ釣り漁業においては、経費に占める燃油費の割合が高く、これを改善するために、プラズマ漁灯など、新たな光源を用いた漁灯の開発が行なわれている。しかしながら、装置が大型であることや、費用対効果が十分でないことなどから普及が遅れている。

2008年及び2014年をピークとする燃油価格の上昇傾向は、経費に占める燃油費の割合が高いイカ釣り漁業の経営を圧迫し、省エネルギー型の代替光源を求める需要を顕在化させた。他方、陸上の照明分野において、光源の省エネルギー技術は近年目覚ましい発展を遂げている。近年実用化され

た光源の一つであるプラズマ灯は、発光部分が極めて小さく（図1）、高輝度、長寿命で、発光波長が広帯域にわたるといった特徴を持つ。このようなプラズマ灯の特徴のうち、高輝度で点光源に近い微少な光源であることに着目し、配光を制御することで効率的に海面を照射する、省エネルギー化を実現する新たな漁灯の開発を行った。

函館市えさん漁業協同組合に所属する「彰幸丸」（19トン）に、新たに開発したプラズマ漁灯32灯を導入し、既存のメタルハライド漁灯と併用して試験操業を行なった。これと平行して、漁灯の使用に伴う物理的・光学的な耐久性の調査も併せて行い、問題点を改善する対策についても検討した。

* 国立研究開発法人 水産研究・教育機構

** 群馬県立産業技術センター

*** 函館国際水産・海洋都市推進機構

**** 株式会社 仁光電機

連絡責任者 高橋志郎 (Shiro Takahashi): s_takahashi@techakodate.or.jp

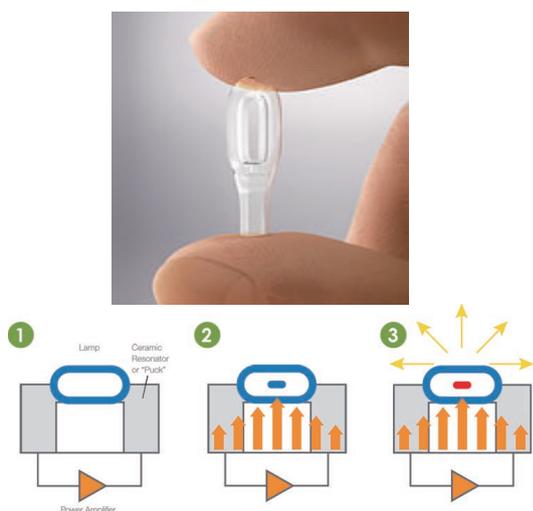


図1 プラズマランプの発光機構とプラズマランプの外観

2. 実験方法

2-1 プラズマ漁灯の開発指針

イカ釣り用プラズマ漁灯の開発は平成26年度から開始された。同年にはプラズマ灯光に対するスルメイカの行動応答が実験的に検証され、イカは受容する光刺激の強度が同等な場合、水銀灯光に対する場合と同様な反応を示すことが明らかとなった。このことから、光源の置き換えが可能であること、効率の高い光源によって省エネルギー化が可能であることが示唆され、プラズマ光源を用いた漁灯の開発を行うこととした。

従来のメタルハライド灯は列状に配置した場合、海面に到達せず無駄になる光束が多いことが判明したことから、半放物面を基調としたステップ付の形状を持つ反射板によって、光を舷外方向に向け、甲板および天空への照射を抑制した灯具の設計と試作を行った。小型船への艀装を想定し、水面上3.8mの位置に漁灯を設置した場合、灯具単体では約87%の光束が海面に到達するように設計したプラズマ漁灯の海面照射能力をシミュレーションしたところ、小型イカ釣り漁船のメタルハライド漁灯3kW×53本（159kW）をプラズマ漁灯で置き換えた場合、95台が必要となると試算された。

2-2 操業試験

操業試験は、2017年6月4日から12月10日の間に実施した。操業の方法は、夜間操業時にプラズマ漁灯とメタルハライド漁灯を併用し、既存漁灯と

同様に運用する方式とした。実証試験では、海面照射能力を既存漁灯と同様にする本試験モードの他、プラズマ漁灯の使用により漁獲量が低下する可能性も懸念されたため、漁灯システム全体の消費電力を既存漁灯と同等とする予備試験モードの2種類の運用モードを設定し、試験船の漁撈長の判断によりこれらを切り換えることとした。前述のシミュレーション結果から、53本の3kWメタルハライド漁灯と同等の海面照射能力をプラズマ漁灯で実現する場合、95台のプラズマ漁灯が必要であると試算されたことから、1台のプラズマ漁灯によって置き換えが可能な3kW型メタルハライド漁灯は、 $53/95=0.56$ 台と推定された。これに基づき、本試験モードでは、32台のプラズマ漁灯を点灯し、既存の3kWメタルハライド漁灯53本のうち18本を消灯して35本のメタルハライド漁灯を併用した。また、予備試験モードでは、0.5kWのプラズマ漁灯32台分の消費電力の増分16kWを相殺するため、ほぼ同等となる3kWメタルハライド漁灯5本、合計15kWを消灯した。各試験モードにおける漁灯の点消灯状態を図2に示す。

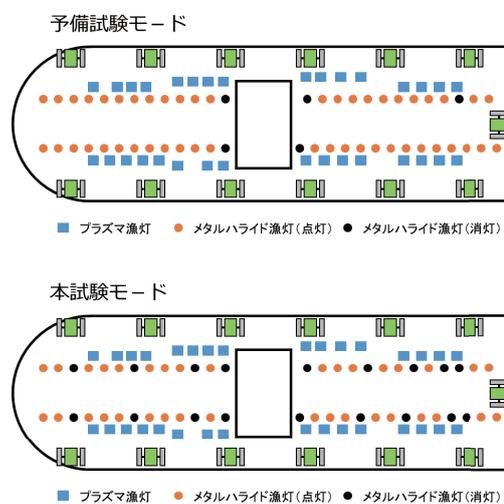


図2 各試験モードにおける漁灯の点消灯状態

操業試験時の漁獲量、操業位置および時間の概要については、試験船の漁撈長に野帳の記入を依頼して把握した。また、近隣で操業する一般当業船の漁獲量については、試験船が所属する船団の定時無線連絡の情報を収集した。

詳細な操業位置及び漁灯の点消灯状態、燃油消費量については船上に設置したテレメータ装置によって把握した。

2-3 物理的・光学的耐久性の検証

(1) 物理的耐久性

実証試験後のプラズマ漁灯の耐久性を評価するため、目視による外観観察と腐蝕生成物の特定を行なった。また、各部の変形や毀損状況の確認も行った。

(2) 光学的耐久性

洋上における実証試験の前後において、使用したプラズマ漁灯の配光および光束の変化について評価を行なった。漁灯の光学的特性は、群馬県立東毛産業技術センターの大型配光測定装置を使用して測定した。大型配光測定装置は、照明器具を回転させるホルダーと回転ミラーを備えたミラーゴニオメーター（ドイツLMT社製GO-DS1600）と、ライトパストネルと呼ばれる暗室の端に固定された受光器で構成されている。照明器具からの光はミラーに反射して受光器に導かれるが、照明器具に対してミラーが常に対向する様に、照明器具とミラーの双方が光軸を中心に回転し、角度ごとの光の強さを測定する。

配光測定は、照明器具の基準軸に交差する面における角度 θ （水平角）と、その平面の傾き ϕ （鉛直角）として、ミラーゴニオメーターのA軸を鉛直角5度毎に回転させ、C軸を水平方向に連続回転しながら光度を測定する「Cone measurement」で行った。なお、無電極プラズマランプ漁灯はミラーゴニオメーターに対して水平な状態を点灯姿勢とし、供試品を安定させるための事前点灯時間は15分とした。

プラズマ漁灯の全光束値は、配光測定装置によって測定された光度を灯具中心から全ての水平角および鉛直角方向に積分して求めた。

また、反射鏡については、紫外線の影響による劣化状況を検証するため、超促進耐候性試験機（岩崎電気株式会社製 SUV-W151）による暴露試験を行った。紫外線の照射条件は、波長範囲295-450nm、放射照度 $1,000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、照射時間350時間とした。この条件は、屋外暴露3,500時間（1日あたり日照時間を9時間とした場合、389日間）に相当する。暴露試験の際には反射鏡の半分の領域を金属製のテープで遮光し、試験後に紫外線照射部と非照射部の外観を目視観察した。

3. 結果および考察

3-1 技術導入前後の比較

試験船において計測した漁灯電力と燃油消費量の関係を図3に示す。計測結果から得られた回帰式

$$y = 0.2280x + 17.2769 \quad \text{ただし } x: \text{電力負荷 (kW)}, y: \text{燃油消費量 (L/h)}$$

に基づき、技術導入による省エネルギー効果を推定して表1に示す。

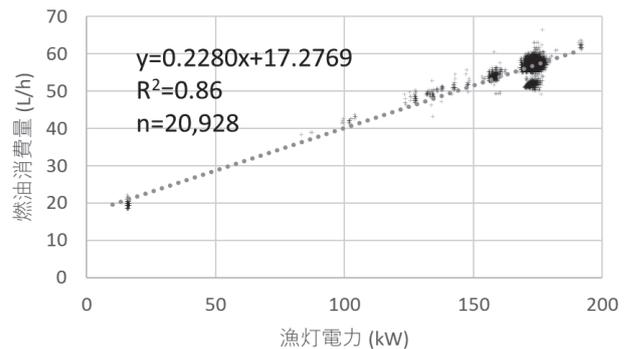


図3 漁灯電力と燃油消費量の関係

表1 省エネルギー効果

運用モード	メタハラ漁灯 電力	プラズマ漁灯 電力	漁灯全体 電力 (kW)	燃油消費量 (L/h)	導入前との 比較 (L/h)
既存漁灯 システム	3kW × 53 = 159kW	-	159	53.53	0.00
プラズマ併用 (本試験モード)	3kW × 35 = 105kW	0.5kW × 32 = 16kW	121	44.86	-8.66
プラズマ併用 (予備試験モード)	3kW × 48 = 144kW	0.5kW × 32 = 16kW	160	53.76	0.23
全灯プラズマ (予測)	-	0.5kW × 95 = 47.5kW	47.5	28.11	-25.42

プラズマ漁灯32灯とメタルハライド漁灯35灯を併用する本試験モードでは、1時間あたりの燃油消費量は44.86Lとなり、メタルハライド漁灯を全灯点灯する場合と比べて8.66L減少した。他方、プラズマ漁灯16灯とメタルハライド漁灯48灯を併用する予備試験モードでは、漁灯システム全体の消費電力はメタルハライド前灯点灯時と比較してわずかに増加し、1時間あたりの燃油消費量も0.23L上回った。全灯をプラズマ漁灯に換装した場合の予測では、1時間あたりの燃油消費量は28.11L/hであった。以上のことから、海面照射能力を従来型漁灯と同等とした部分換装の場合でも省エネルギー効果が生じることが確認された。一方、漁灯システム全体の消費電力を従来型漁灯と同等とした場合には、省エネルギー効果はほとんど認められなかった。

年間の運転コストの試算として、ランプ交換費

を表2に、燃油費とランプ交換費を含む合計の運転コストを燃油単価別に表3に示す。条件として、操業1回あたりの漁灯点灯時間を10時間、年間の操業回数を150回、年間のメタルハイドランプ交換回数を1回とした。燃油単価は、北海道における2017年1～12月の平均値（石油情報センター調べ）である69.4円/L、将来的な上昇を想定した80円/L、100円/Lの3通りとした。試算の対象としては、コスト削減効果が期待できる本試験モードと全灯換装の場合を採用した。

既存漁灯システムと比較した場合の年間運転費の削減額は、燃油単価69.4円/Lの場合、本試験モードでは約153万円、全灯プラズマ換装の場合、約450万円と試算された。燃油単価80円/Lの場合、年間運転費の削減額は、本試験モードでは約167万円、全灯プラズマ換装の場合、約491万円と試算された。燃油単価100円/Lの場合、年間運転費の削減額は、本試験モードでは約193万円、全灯プラズマ換装の場合、約567万円と試算された。

表2 ランプ交換費

	メタハラ灯 単価(円)	年間交 換本数	ランプ 交換費(円)	A ランプ交換費 削減額(円/年)
現状	35,000	53	1,855,000	-
プラズマ併用(本試験)	35,000	35	1,225,000	630,000
全灯プラズマ	-	-	-	1,855,000

表3 年間の運転コスト

燃油単価(円/L)		69.4					
	燃油消費量 (L/h)	操業時間 (h/日)	年間操業 日数	燃油消費量 (L/年)	年間燃油費 (円)	B 燃油費削減額 (円/年)	A+B 漁灯運転費 削減額(円/年)
現状	53.5	10	150	80,293	5,571,022	-	-
プラズマ併用(本試験)	44.9	10	150	67,297	4,669,317	901,706	1,531,706
全灯プラズマ	28.1	10	150	42,160	2,925,228	2,645,795	4,500,795

燃油単価(円/L)		80					
	燃油消費量 (L/h)	操業時間 (h/日)	年間操業 日数	燃油消費量 (L/年)	年間燃油費 (円)	C 燃油費削減額 (円/年)	A+C 漁灯運転費 削減額(円/年)
現状	53.5	10	150	80,293	6,423,470	-	-
プラズマ併用(本試験)	44.9	10	150	67,297	5,383,790	1,039,680	1,669,680
全灯プラズマ	28.1	10	150	42,160	3,372,830	3,050,640	4,905,640

燃油単価(円/L)		100					
	燃油消費量 (L/h)	操業時間 (h/日)	年間操業 日数	燃油消費量 (L/年)	年間燃油費 (円)	D 燃油費削減額 (円/年)	A+D 漁灯運転費 削減額(円/年)
現状	53.5	10	150	80,293	8,029,338	-	-
プラズマ併用(本試験)	44.9	10	150	67,297	6,729,738	1,299,600	1,929,600
全灯プラズマ	28.1	10	150	42,160	4,216,038	3,813,300	5,668,300

3-2 操業試験

実証試験は、2017年6月4日から12月10日の間に、本試験モード54回、予備試験モード39回の合計93回実施した。操業位置を図4に示す。

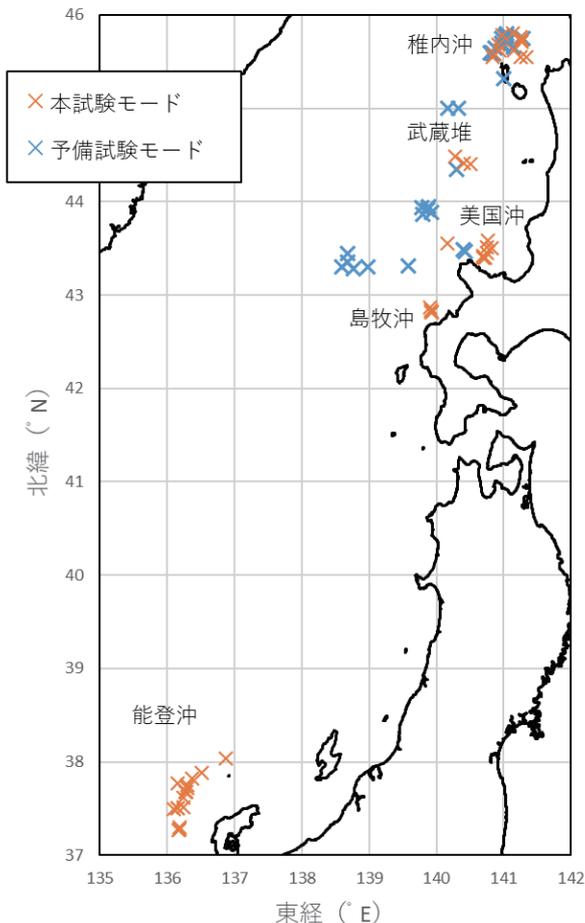


図4 操業位置

実証試験では、漁期開始直後の6月以降、能登沖漁場から本試験モードで操業を行った。7月上・中旬は檜山・後志沿岸の漁場にて操業し、7月下旬以降は稚内沖で操業を行った。稚内沖の漁場は約40日程度持続し、前半は主に本試験モードで操業を行ったが、後半以降は繁忙期への対応や他船との競合への懸念から、予備試験モードに切り替えた。9月以降、主な漁場は武蔵堆や積丹半島西方沖合域に移動し、10月中旬まで持続した。沖合域での操業では、発泡スチロール箱換算で一晩あたり900ケースを超える漁獲量も記録された。10月下旬から11月中旬にかけては、メタルハライド漁灯による操業や、時化による休漁が続き、漁灯併用操業時の漁獲データは得られなかった。11月中旬からは積丹半島沿岸の石狩湾口付近の海域において、冬季における漁獲特性を検証するため、再び本試験モードに切り替え、12月10日まで操業を行った。

試験期間中の実証試験船および一般当業船の漁獲量の推移を図5に示す。試験船の漁獲量は、期間を通じて概ね他船の平均値と同様の傾向で変動しており、他船と比較して漁獲量が一貫して著しく高い、もしくは低い傾向は認められなかった。本試験モードにおける近隣当業船と実証試験船の漁獲量を操業日毎に比較した結果を図6に示す。

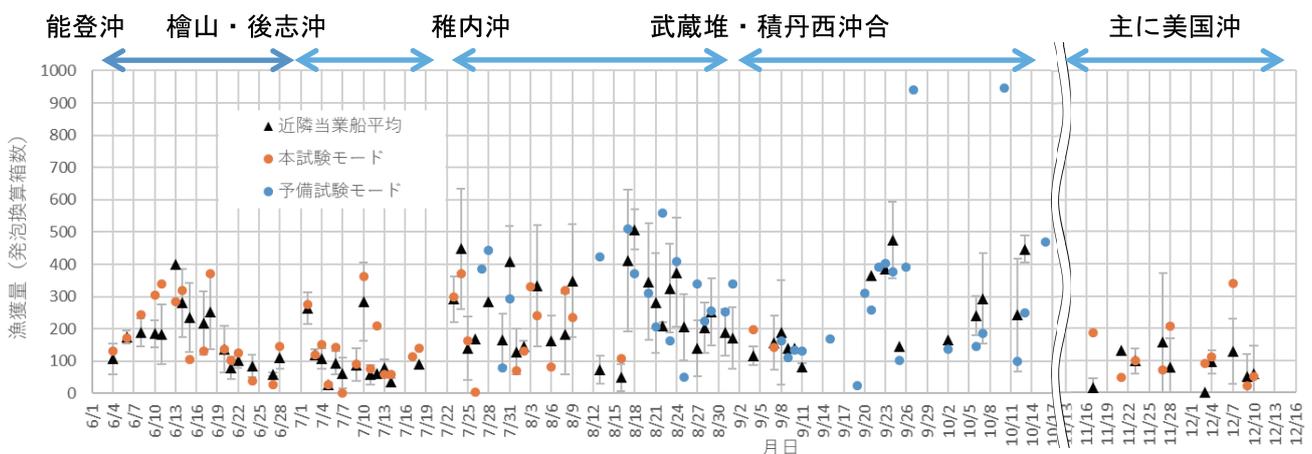


図5 試験船および一般当業船の漁獲量の推移

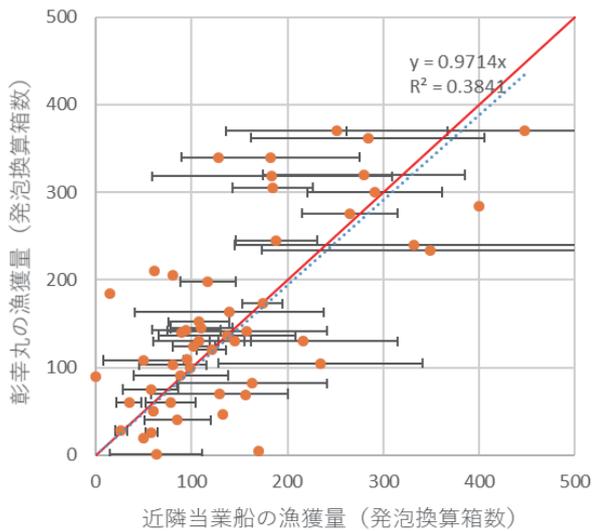


図6 本試験モード時における操業日毎の近隣当業船と実証試験船の漁獲量の比較

図では、近隣当業船の漁獲量を横軸、実証試験船の漁獲量を縦軸とし、各操業日の近隣操業船の漁獲量の平均値に対して、該当する実証試験船の漁獲量をプロットした。複数の近隣当業船の漁獲量の分布については、標準偏差をエラーバーとして表現した。図中、 $y=x$ の値を傾向線として赤色で示しており、傾向船より右下にプロットされる操業日は近隣船の漁獲量平均値が実証試験船の漁獲量を上回っていた場合、右上にプロットされる操業日はその逆の場合であることを示す。本試験モードの操業54回中、近隣当業船との比較が可能だったのは51回で、うち29回は実証試験船の漁獲量が近隣当業船の平均値を上回った。切片を0とする前提でプロットの回帰式を求めたところ、相関係数は0.39と高くないものの、傾きは0.97となり、全体的な傾向として、近隣船の平均値とほぼ同等の漁獲水準であることが明らかとなった。

予備試験モードにおける近隣当業船と実証試験船の漁獲量を操業日毎に比較した結果を図7に示す。図の表現は図6と同様である。39回の操業中、比較可能だったのは30回で、うち12回の操業において実証試験船の漁獲量が近隣当業船の漁獲量の平均値を上回っていた。回帰直線の傾きは0.89と、全体的な傾向としては漁獲水準が本試験モードの場合よりも低かったが、操業日毎のばらつきが多く、相関係数は-0.0009と極めて小さかった。

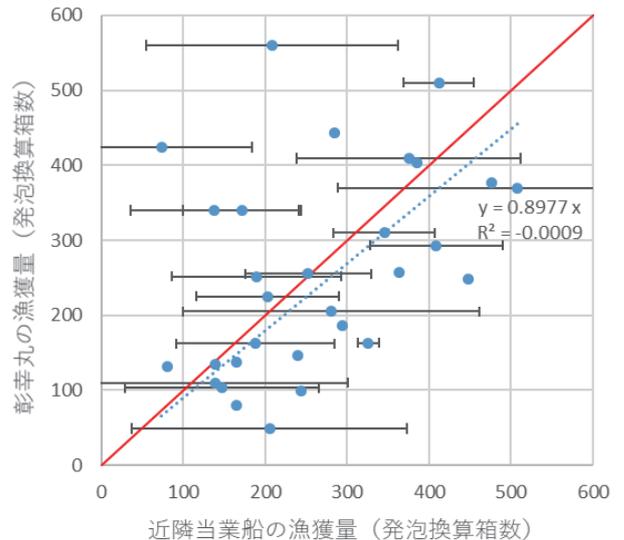


図7 予備試験モード時における操業日毎の近隣当業船と実証試験船の漁獲量の比較

3-3 光学的特性の評価

大型配光測定装置によって計測された実証試験供試前後のプラズマ漁灯の配光曲線を図8に示す。配光曲線は、光源の中心から各方向に放射する光の強さ、すなわち光度（単位cd：カンデラ）の分布を示すものである。実証試験前の配光は図8中の青線で示されており、水平から下向き8度に光度の極大値：42,380 cdが存在した。一方、実証試験後の配光は橙線で示すもので、水平から下向き7度に光度の極大値：37,520 cdが存在した。両者を比較した結果、実証試験前後で配光曲線の形状はほぼ一致していた。

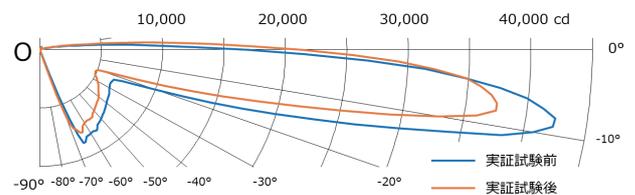


図8 実証試験前後のプラズマ漁灯の配光曲線

球帯係数法によって求めたプラズマ漁灯の全光束については、実証試験前後で比較して実証試験後の全光束は、試験前の92.5%まで低下していた。超促進耐候性試験機による紫外線暴露試験を行った結果、目視観察では光沢や色味において、紫外線照射部分と非照射部分の間に違いは認識できず、紫外線照射による劣化はないと判断された。

3-4 灯具の腐蝕状況等の評価

洗浄後の供試体正面外観は、筐体塗装、コーキング、防水気密シートのいずれにも腐蝕等はほとんど発生していなかった。レンズとなるガラスカバー内部に白色の粉体状の付着物が認められた。この付着物については後述する。また、正面上部にはコーティング剤の剥離が認められるが、下の金属部分には腐蝕が認められないことから、船体からの撤去時あるいは輸送中に受けた打撃等の外力による剥離と推察された。

供試体背面外観は、放熱フィンの全体に白色の腐蝕生成物が認められ、フィンの防錆処理であるNiメッキの剥離あるいは脱落が多数認められる。欠損は認められないものの、ピッチングや浮腫様（水ぶくれのような状態：浮き）の剥離に至らない腐蝕も見られ、耐食性は損なわれていた。供試体上部については、船体に灯具を固定するためのステンレス鋼製の取付金具に鉄錆と思われる赤褐色の腐蝕が認められるが、灯具自体に腐蝕は認められない。側面の放熱ヒートパイプおよびフィンを覆うカバーに作業中についたと考えられる擦過傷があり、この部分は黒変しているがアルミの腐蝕である白色の生成物が認められないことから塗膜が機能しており、問題はないと認められた。以上のことから、フィン以外の部分には全体的に大きな腐蝕状況は確認できなかった。

筐体およびガラスレンズカバー結合部のコーキング部分には詳細観察でもほとんど腐蝕や劣化は認められず良好な耐食性を示していた。

ガラスレンズカバー内部にある発光ランプおよびRFドライバ金属（配線）部分は、詳細観察でもほとんど腐蝕や劣化は認められず良好な耐食性を示したことから、灯具の水密性・気密性とも問題がないと判断された。

ガラスレンズカバー内部にある反射鏡は、ランプからの熱を最も近くで受けるため、熱による変形と腐蝕にさらされるが、外観上大きな変形や腐蝕、表面の著しい反射率低下に繋がるような損傷は認められなかった。反射鏡の変形による配光の変化が問題と考えられたことから、反射鏡の両側に対策部品として補強用リブを設置した。このような剛性向上の効果により、反射鏡の著しい変形

が起らず、前述のとおり、実証試験前後で配光がほとんど変化しなかったと推察される。

ガラスレンズカバー内部には白色の粉体状の物質が付着していた。ランプ発光部石英ガラス表面の白濁はこの粉体物質である。この粉体状物質を特定するためEDS分析を行った結果、この粉体状物質の主たる成分はアルミニウム、シリコン、リンの酸化物であり、発光ランプをモールドするために用いているモルダーとほぼ同様の組成であることが判明した。このことから、付着物は、ライト点灯時のランプの熱により気化（vaporize）したモルダーが低温のガラスレンズカバーで冷却され、白色粉体状物質として凝集・付着したものと考えられる。この物質が光量低下の一因であると推定されるため、製品化にあたっては対策を講じる必要がある。

体側面の放熱ヒートパイプとフィンには、白色の液だれ痕が認められる。ヒートパイプ自体およびフィン自体には腐蝕がほとんど認められないものの、両者を接合するろう付け溶接部分において、溶接金属が腐蝕している様子が確認できることから、溶接金属を高耐蝕性のものに変更する必要があると考えられる。側面フィンの保護カバーには、腐蝕がほとんど認められない。しかしながら、筐体および保護カバーに施されている防錆塗料は、全体観察の項で説明したとおり、作業中に発生する物理的な毀損に対して剥離が発生しており、本灯具の外装防錆処理としてある十分とはいえない。

無電解Niメッキ（メッキ厚 $30\mu\text{m}$ ）を施した筐体背面の放熱フィンには、白色の腐蝕生成物が付着している。その付着量は設置状態で下側（重力による腐蝕生成物懸濁液の降下による）のエッジ部分に多く、色、付着箇所及び昨年度に実施したEDS分析の結果からフィンの基材であるアルミニウムの腐蝕生成物と推察された。無電解Niメッキを施したフィンを詳細に観察すると、基材であるAl合金の腐蝕による浮きを起因とする多数の剥離を生じており、背面フィンの防錆あるいはメンテナンス時の交換を基本とする対策が必要であると考えられた。ただし、フィン基材の損傷は多くないため、数年程度の使用であれば問題にならないと考えられる。

4. まとめ

プラズマ灯を用いた低消費電力型イカ釣り漁灯の試作・開発を行い実操業による実証試験を行った結果、漁獲、光学的耐久性能にはほとんど問題

がなく、省エネ効果にも大いに期待が持てる結果となった。今後、物理的耐久性能や灯具の軽量化など、いくつかの設計変更や改善を行うことで実用化段階へと展開可能になると考えている。