

光技術が支える海の道標 一灯台に見る光学系の歴史とその進化

海上保安庁
平野宏志



●平野 宏志（ヒラノ アツシ）
海上保安庁 交通部整備課 航路標識企画官

2019年4月 海上保安庁入庁
交通部整備課
航路標識企画官
第一管区海上保安本部工務課 / 第八管区海上保安本部工務課 / 第二管区海上保安本部浮標課 / 第四管区海上保安本部工務課 / 第七管区海上保安本部浮標課 / 第五管区海上保安本部整備課

岬の先端に屹立する灯台は、古くより海岸を往く船舶の水先案内人としてその役割を担う一方、間に燈めく閃光や碧い海を背景に際立つ白い構造物が、人々の心にロマンや旅情を掻き立ててきた。

ところで、灯台の目的が「光で遠方を照らす」ことである以上、我々の興味は、その光学技術がどのような変遷を経てきたのかに重きが置かれる。

今回、灯台を管轄する海上保安庁の平野氏に話を聞いた。古くより姿が変わらぬ様に見える灯台だが、そこでは常に最新の技術が採り入れられてきた。中でもLEDや太陽電池の進歩は、灯台の運用に革命とも言える影響を与えたという。

そして今、灯台はさらなる進化を遂げようとしている。それは灯台という歴史的建造物を守り、後世に伝えていくための試みでもある。身近なようで詳細を知る機会が少ない灯台。その新旧の技術が入り混じる歴史と現状、そしてこれからをご覧いただきたい。

一灯台の概要について教えてください

灯台というのは航路標識法に定められた航路標識の一つです。航路標識というのは光や形、音や電波などを使って船が沿岸を航行するときに使う指標で、例えば岬や防波堤の灯台、海上に浮かんでいるブイ（灯浮標）、電波で情報を伝えている無線などを言います。灯台はこの航路標識の一つということになります。

このうち、灯台などの視覚を利用した航路標識を光波標識と呼びます。現在、日本国内に海上保安庁が所管する光波標識は、防波堤の小さい灯台からブイまで入れると約5100基あります。このうち灯台等が約3900基、海上に浮かんでいるブイが約1200基です。

航路標識としての灯台の利用の方法ですが、船からは沿岸を航行しているときに常に何れかの灯台が見えてい

Interview



ファロス灯台（想像図） 出典：The World Historical and Actual

て、その位置から角度を出して自分の位置を決定します。歴史的には山や岬、樹木なども利用していましたが、いわゆる灯台ということでは紀元前のエジプトのファロス灯台が記録に残る世界最古の灯台になります。

日本では、煙とかがり火を使う燈明台が江戸時代までありましたが、今のような灯台になったのは明治からです。江戸時代に鎖国していたのを開港することになり、日本に大きな船が外国から入ってくるようになりました。イギリス、フランス、アメリカ、オランダといった列強と結んだ条約により「日本に入るために必要な位置に灯台を設置するよう」要請があって、今のような灯台の建設が始まります。こう言うと外国に言われてやった感じがありますが、明治政府としても近代化するためには貿易が必要だという認識があって、こうしたところに灯台を建てていこうという政策の下で始まっています。

最初に建てられたのは神奈川県にある観音崎灯台です。これが明治2年です。鉄道ができた明治4年よりも前です。この工事が始まったのが明治元年の8月30日、これは今で言うところの11月1日で、毎年この日は灯台記念日となっています。昨年度で148周年となり、まもなく150周年を迎えます。観音崎灯台は建設当初レンガ造りでしたが、2回ほど倒壊してしまっていて、今は鉄筋コンクリート造となっています。

その後、こうした外国からの要請に加えて、船の往来が頻繁になって船舶事故が増えたり、船が入って来てほしい地域、軍や海運業者からの要請があったりして、明治期に多くの灯台が建てられています。当初は124基ありましたが、そのうち観音崎灯台を含めた64基は今で



観音崎灯台 Photo: Tina Imano

も現役で残っています。

高知県の室戸岬灯台は、台風が来るとテレビ中継があったりするのでご覧になったことがあるかもしれません。あるいは高知県にある美保関灯台、それと中々目にできないですけど、四国と九州の間、豊後水道に水ノ子島灯台というのがあります。これらの灯台の近くには宿舎のような、人が住むような建物があります。こうした建物は灯台守が住んでいた宿舎や管理事務所です。職員が家族で住んでいたようなところもあって、今でも残っています。

平成18年までは五島列島の女島灯台に、最後の灯台守として海上保安官が交代で勤務していました。この灯台は光源に70 Wの小さいメタルハライドランプを使っていますが、太陽電池をたくさん並べることで電源を確保できたのに伴い無人化し、灯台守もいなくなったということです。

一灯台にはどのようなレンズが使われているのでしょうか

灯台の光源は光を全周に発散しますから、これを遠くに飛ばすためにレンズ、あるいは反射鏡で光を集めるような仕組みになっています。通常、光を集めるには凸レンズを使いますが、灯台ではフランスのフレネルという人が考えたフレネルレンズが使われています。これは照明器具にも使われているもので、レンズをできるだけ軽量化するために、プリズムを集めたような形のレンズになっています。日本最大級の犬吠埼灯台のフレネルレンズの場合、直径は2590 mm、焦点距離は920 mmです。



灯芯のフレネルレンズ

こうしたレンズは当初はイギリスやフランスから輸入していたようです。海上保安庁には海上保安試験研究センターという施設がありますが、その前身は灯台の工場のようなところで、国内ではそこで職人が手で作っていました。現在でも同センターには如や研磨する設備が残っていますが、現在はこれに代わる灯器が開発されたことからガラスのレンズは作っていません。

フレネルレンズは一方方向にしか光が出せないで、全周に光を出すためにぐるりと回してやる必要があります。レンズを回転させる回転装置は鐘が自動で巻き下がる力を利用したもので、動力源となる巨大な鐘を毎日巻き上げる必要がありました。そのため古い灯台には、回転機械から1階まで続く鐘の落下用の空洞が残っています。昔の時計も鐘で動かしていましたが、それと同じような機構になっていました。今もこうしたシステムが残っている灯台はあるのですが、さすがに鐘は使っていないで電動モーターで回転させています(笑)。

鐘を巻き上げる仕事もそうですが、光源も当初は今のような電球ではなくて石油やガスでしたので燃料の補給が必要でした。また、こうした光源はレンズやガラスが煤で汚れることもあって、すぐ近くに灯台守が住んでメンテナンスをする必要があったということです。

—光源はどのような変遷をたどってきたのでしょうか

灯台の最初の光源は油式でした。その後のガス式が登場し、この場合300 mm円筒レンズを使用した白色光の最大規模のもので光度1450 cd、光達距離は約18.5 kmでした。この光源を300 Wの白熱電球とした場合には光度

8500 cd、光達距離約25 kmとなり、現在使われている260 Wのハロゲンランプでは光度9100 cd、光達距離約26 kmとなります。

その後、光源はアーク灯、白熱電灯、キセノン灯、ナトリウム灯、ハロゲンランプ、メタルハライドランプを経て、今ではLEDになってきています。白熱電球やLEDが入った時期は結構早く、白熱電球は明治の初め頃からもう使われています。LEDも昭和の終わり頃からいろいろ開発が進められて、今でこそ信号機なんかでは珍しくなくなりましたが、灯台では平成に入ってから採用しています。

LEDの発展と一緒に最初は赤、それから緑、白を採用してきたという流れで、まずは防波堤にあるような小さな灯台とか、海上に浮かんでいるブイから使い始めて、最近はいよいよ効率が良くなってきたので大型の灯台にも使えるようになってきました。光力の少ないところから順番に採用していったという感じで、ブイは100%LEDに置き換えが進んでいます。灯台も86%で置き換えが終わっているのですが、大型の灯台だけは限界があり、残ったところではメタルハライドランプを使っています。

—LEDでは大型灯台に使うには光力が足りないということでしょうか

現在の灯台の光源が一番大きい電球は、メタルハライドランプの400 Wになります。大崎灯台の場合だと、1等と呼ぶ大型レンズとの組合せで、光度は110万cd、光達距離は約36 kmで、今のところLEDはこのクラスの光力には達していません。海上保安庁が現在採用しているLED灯器は最大規模のもので光度5600 cd、光達距離は約23 kmです。沿岸灯台には大型や中型があるのですが、中型まではLED化ができています。もちろん次は大型灯台をターゲットにしていますし、国際的にもLEDが主流になりつつあると思います。

LEDは灯台の無人化に大きな役割を果たしてきました。最初の頃、灯台の光源は燃料に油やガスを使っており、火も点けっぱなしだったので人が付いていないとどうしようもありませんでした。ブイも光源はガスなどでしたから、燃料をポンペに詰めて月に2~3回は行っていたようです。その後、灯台の無人化を進めるために、



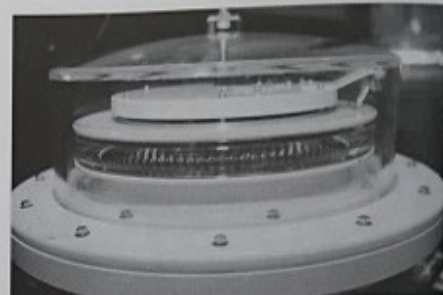
反射鏡を使った初期のLED灯器

自動に点滅する装置が開発されたり、エンジンで電気を送ったり、風力発電に挑戦したり、太陽光発電とか波力発電とかにも挑戦しました。灯台というのは光源の負荷を落とすのと、電源の容量を上げていく戦いが続いてきたようなものです。

電源も一部では商用電源を引いていますが、主電源は太陽電池になりつつあります。太陽電池は昭和34年から採用していて、当時はS社などの太陽電池を使って宇宙開発と同じようなレベルで始めていたようです。光源がLEDになったことと、太陽電池の効率が良くなってきたことで、ブイは全て電源の太陽電池化と光源のLED化が進んでいます。どちらも技術が進化した時代に採用も急速に進んだ感じがですね。

LED灯器も進化していて、反射鏡からレンズ式に変わっています。初期のタイプはLEDの効率が悪かったのと価格も高かったので、光をできるだけ反射鏡で集めていました。今ではだいぶLEDの性能が良くなったので光学系も小さくなり、LEDの前に小さなレンズで光を集めて出すレンズ式になりました。LEDを点滅させているのでレンズを回転させる機構も必要ありません。LEDの性能と価格が変わってきたおかげで灯器も小型化できたということです。高さが低くなったので波などに対して丈夫にもなりました。

当初使っていたLEDはT社製、緑色はN社製だったようです。ただ、こちらでLEDメーカーを指定するわけではなくて、スペックだけ指定してあとは灯器メーカーさんに作ってもらいます。大事なのは消費電力、光達距離、寿命ですね。



レンズ式となり薄型になったLED灯器

—なぜLEDがそんなに早く導入されたのでしょうか

まず、LEDを採用してから光源を交換する必要がなくなったことがあります。電球の頃は切れるたびに点検に行っていたのですが、今では年に1回か2回しか点検に行くことはありませんし、LEDを交換することもほぼありません。

当時、灯台やブイの電球の寿命は500時間というスペックがありました。夜間に13時間点灯するのですが、あとは点滅する時間を計算して標識ごとに電球を交換していました。もちろん、交換前に切れてはいけないので早めには行きますが、万一切れたときのために予備の電球が入っていて、切れると自動的に交換するようになっていました。

大型灯台も予備のメタルハライドランプの電球を持っています。寿命は6000時間ですが、点滅ができませんので約1年間で交換します。灯台はそれぞれ光り方が異なっていて、それによってどの灯台が分かるようになっています。例えばレンズが両面にある形であったり、場合によっては3面であったり4面であったり、それぞれレンズが違います。それが回転することによって光る周期が変わるのですが、電球はこうしたレンズの形に合わせてフィラメントを組んだ特殊なものになっています。また、レンズを回して周期を作る電球に対して、円筒レンズに入っている電球もあります。真ん中にフィラメントがあって光が全周に出るタイプで、点滅のリズムによってキャラクターを作っています。

電球もこのように種類がいろいろあったり、光力が落ちないように煤が上にたまるような工夫もされていたり



電球を用いていた灯器の内部 予備の電球が見える

するものですから、どうしても手作りになってしまっていました。今となつては昔の技術ですが、レンズの形に合わせて職人がガラスを吹いたりフィラメントを巻いたりするところから全部手作りでやっていたということです。今ではこうした電球を作っていた東芝も手を引いてしまい、機械で作れるような小さな電球を一部作っているだけのようです。LED灯器が入ったのが平成になってからなので、平成10年頃には大型灯台を除いて、電球は殆ど終わりかけていたように思います。

つまり、光源がLEDになって保守が極端に少なくなったので、まず人件費がからなくなり、高価な電球も必要なくなりました。灯器自体も安く、LED灯器だと周辺機器含めて100万円単位のものが、電球だと3倍くらいしていたと思います。世間一般ではLEDは高いものというイメージもありますが、灯台の場合は電球そのものが高価だったので、最初からコストメリットがあったということです。

大型灯台のLED化の見通しはどのようにか

今、フレネルレンズを残したまま光源だけをLEDにしようという研究をしています。そのためのCOB (Chip On Board)の開発を海上保安試験研究センターが中心とあって進んでいて、COBをレンズの真ん中に置いて点灯する実験をしています。LEDにしてもレンズは必要ですが、フレネルレンズだと光源が1つで済んで省エネにもなります。光源を大型化するにはCOBを使うのが一番良いと思いますが、問題として熱を持つというのと安定した電源が必要になるので、その辺を中心に試験をして



様々な種類がある灯台用電球

います。灯台の大型レンズはガラス工芸品の意味でも価値があるものですから、こうしたものを残していきたいという意味の研究でもあります。いったん撤去してしまうと二度と戻せませんし、これくらいの大きさのLED灯器を一から作ろうと思うと、それこそコストは高くなると思います。

これが実現すると電球交換の周期が無くなるので1年に一回点検に行けば済みます。ただ、COBは板状のため一方にしか光が出ないのでレンズと一緒に回す必要があります。そのため回転部が残るので、もう少し短い周期で点検する必要はあるかもしれません。この研究はまだ試験段階ですが、もうそろそろ実際の灯器に入れて試験を行いたいなということまでできています。あとはレンズとの相性がどうかですね。

LEDによって光源の省電力化が図れると、将来的には大型灯台の電源も太陽電池化することが可能になってきます。さらに太陽電池化のメリットとして防災対策にもなります。以前は地震による停電で灯台も消えてしまうことがあったのですが、今は太陽電池によって地震や津波が来ても灯台だけは点灯していたという話を聞きます。規模にもよりますが、防波堤の灯台なんかは殆ど太陽電池になっています。大型の灯台でも一部太陽電池化できていて、6000Wの太陽電池を設置しているところもあります。灯台にとって光源の省エネ化と電源の確保をどう行なうかが明治期からの課題でしたが、LEDと太陽電池がそれに大きく貢献してくれました。

それと、光源のLED化によって可視光通信が可能にな



りますので、海上保安試験研究センターやメーカー、大学と研究をしています。これは信号と車を通信させようというのと同じ原理で光源のLED化によって実現できます。ただ、実際に灯台と船の間での通信が可能だということは分かったのですが、実際に使うとなると難しそうです。

やはり船だと揺れがあるのと、GPSなど他の航海計器もあるのでそこまで必要性を見いだせなかったことや、受信側の装置がどうしても必要なこともあります。灯台のメリットというのは人さえいればそれで充分使えるということなんですけど、それに機械を加えると最後の野にはなりません。機械が壊れたら使えないということになると、他の航海計器に比べてメリットが無いということです。

船舶はGPSと灯台を併用しながら航行していますが、最後は目で確かめるのが航海士の基本だと思います。車がカーナビだけでは目的地に着けないように、灯台の必要性に変わりはありません。今後は無線系とかGPSとかAIS (船舶自動識別装置)などが技術的には発達していくと思いますが、五感で感じる標識の重要性は変わらないと思っています。



大穴塔に展示されている1等レンズ レンズの直径:3.03m、重量:2.65t

今後、灯台の新設はあるのでしょうか

現在、灯台の整備は殆ど終わっていて、大型の沿岸灯台に関してはおそらく完成形です。明治期に建てた灯台は重要な拠点にありますので、だいたい必要なところには建てています。港の場合は形が変わることがあるので、それによって船の出入りが変わったりすると、灯台の配置を替えたりすることはありますが、基本的には既存の灯台の保守管理や改修をしていくこととなります。予算の問題もありますので、不要になった標識は減らして、必要な灯台にお金をかけていかないといけません。

一平野さんにとって魅力的な灯台とはどのようなものでしょうか

灯台の姿が一番魅力的なのは回転している大型のレンズですね。先ほどの室戸岬灯台とか丹後半島にある経ヶ岬灯台は屋外から目前にレンズを見ることができ、とてもきれいです。皆さんにもご覧いただくことをお勧めします。レンズは大穴塔の展示室でも見ることができます。沖ノ島灯台で使っていたもので、1922年から約100年間使われてきた歴史的なものです。現在、沖ノ島灯台は太陽電池を電源として光力を落とした新型の機械に変わっています。今では作っていない灯台用の大型レンズは国民の財産ですので海上保安庁が勝手に廃棄してはいけないと思います。そういうことも理解していただき予算が付いてくれるとありがたいですね(笑)。