

平成30年6月25日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04326

研究課題名(和文) サンゴ保全に向けての異分野連携によるサンゴ幼生分散距離の解明

研究課題名(英文) Estimating dispersal distance of coral larvae for conservation of corals by collaboration of different research field

研究代表者

酒井 一彦 (SAKAI, Kazuhiko)

琉球大学・熱帯生物圏研究センター・教授

研究者番号：50153838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：造礁サンゴ幼生の親からの分散距離を、生態学、海洋物理学、工学が連携した野外研究で明らかにすることを目的に、本研究を実施した。生態学的調査から、5~20 kmの空間的広がりの中で成熟したサンゴが増加すればそれら地域内で幼生定着量が増加するが、50 km以上離れた海域間ではある海域でのサンゴの増加が、他海域の幼生定着量の増加をもたらさないことが明らかとなった。これら結果と海水流動測定の結果から、沖縄島西岸および慶良間諸島では、サンゴのなかで幼生の親からの分散距離が比較的長い放卵放精型のミドリイシ属サンゴにおいて、多くの幼生の親からの分散距離が20 km以内であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present project was to estimate dispersal distance of scleractinian reef corals in Okinawa Islands, by ecological, physical oceanographic and measurement engineering approaches. The ecological study revealed that as matured Acropora colonies increased in areas whose spatial extent was 5 to 20 km, settlement of larvae of Acroporidae, almost all of which were considered to be Acropora, increased in each area. In contrast, abundance of the matured colonies in a given area was not correlated with the larval settlement in other areas which were more than 50 km apart. Together with measurement of seawater movement in physical oceanographic and measurement engineering studies, we suggest that dispersal distance of Acropora larvae is mostly shorter than 20 km in Okinawa Islands.

研究分野：サンゴ礁生態学

キーワード：造礁サンゴ 幼生分散 メタ個体群 海洋レーダ ソフトウェア無線 リーフドリフター 海流モデル

1. 研究開始当初の背景

造礁サンゴ(以下「サンゴ」)は、複雑な骨格構造による他の生物への生息場所の提供と、細胞内に共生する褐虫藻の光合成による一次生産によって、サンゴ礁生態系の生物群集成立にとって不可欠な存在である。サンゴの減少は、サンゴ礁生態系の機能とそれに基づく生態系サービスの大幅な低下を引き起こす。このためサンゴは、保全されるべき重要な生物資源のひとつである。

温暖化や水質悪化などの人為的環境変化に脆弱なサンゴは、世界的に減少傾向にある。沖縄諸島のサンゴ礁でも、サンゴは減少傾向にある。特に1998年の高水温によるサンゴの大規模白化によって、高水温ストレスに脆弱な枝状サンゴが激減し、沖縄本島周辺ではサンゴ群集の被度が80~90%減少した。サンゴのほとんどの種は底生となつてからは移動できず、配偶子および幼生期にのみ、海水中を浮遊して長距離分散する。強い攪乱を受けた場所でサンゴ群集が回復するためには、幼生による新規加入が不可欠である。我々はこれまでのサンゴ群集のモニタリング調査によって、沖縄本島でサンゴが激減した場所でも、2000年以降も幼生による新規加入があり、サンゴ群集の回復力が保持されていることを明らかにしてきた[1, 2]。本研究の目的は、サンゴ群集回復の源となるサンゴ幼生が、親からの程度分散するのかを明らかにすることである。

我々は、1998年の大規模白化によって沖縄本島で激減した、種数が多く量的にも卓越するミドリイシ属サンゴ(図1)幼生が、親サンゴからどれくらい分散するのかを明らかにするために、2003年から沖縄本島と慶良間諸島において、生態学および集団遺伝学的研究を継続している。

沖縄本島のある地域(広がり5 km未満)では2011年に親サンゴが増加し始め、その地域内の幼生定着量も増加し始めた(2003年から2010年までは親サンゴが全域的に少なく、幼生定着量も全域的に少なかった)。一方上記地域から20 km程度離れた沖縄本島の別の地域では2012年から親サンゴが増加しており、



図1. 沖縄の健全なサンゴ礁。テーブル状や枝状のサンゴは全てミドリイシ属。

幼生定着量も増加傾向にある。さらに慶良間諸島では親サンゴは増加中であるが、2014年でも親サンゴの量は沖縄本島よりも少ない。このように親サンゴの量に空間的偏りがあり、かつ量の変動する沖縄諸島の現状は、親サンゴの量を操作した「自然の実験」とみなすことができ(サンゴ被度は5~90%)、サンゴ幼生の親からの分散距離を生態学的に研究するのに適している。このような野外研究は、サンゴが連続して分布しているサンゴ礁で実施することは困難である。

サンゴ礁海域でのサンゴ幼生の流動を把握するためには、サンゴ礁が形成されている海岸近くの表層流動場を高い空間分解能で知る必要もある。本研究では生態学的調査に加え、ドリフター(海面近くの海中を浮遊するブイ)投入・追跡による線の観測と数学的モデルによって、海水によるサンゴ幼生の0~100 km以上の空間スケールでの輸送パターンを推定する。また、海洋表層流速を面的に連続観測するための測器としては、短波海洋レーダも存在する。短波海洋レーダは利用する周波数とその帯域幅から沿岸数km以遠を1~10km間隔で流速観測するものである。これに対して、本研究で対象とするサンゴ礁海域とその外縁の流動場を観測することを考えると、海岸から10 kmより近い海域を100 mより高い空間分解能で観測する必要がある。さらに高分解能を有する海水レーダによる海水流動の面的観測によって、サンゴ幼生の10 km以下のスケールでの輸送パターンも推定できる。

2. 研究の目的

沖縄諸島のサンゴ礁において、サンゴ幼生の親からの分散距離を、生態学、海洋物理学、工学が連携した野外研究で明らかにする。親サンゴの量が場所ごとに異なりかつ変動する状況を、親サンゴの量を操作した「自然の実験」とみなす。生態学的には、成熟した親サンゴの量と幼生定着量が対応する空間スケールを明らかにする。海洋物理学的にはドリフターと数学的モデルによって、海流による幼生輸送パターン(0~100 km以上)を明らかにする。工学的には海洋レーダを用いて、幼生輸送パターンを明らかにする(10 km以下)。

3. 研究の方法

(1) 親サンゴの量および幼生定着量調査

先行研究[3]によって確立した、親サンゴの量とサンゴ幼生定着量調査方法を、我々が2011年から調査を継続している沖縄本島3月地域11地点、慶良間諸島地域9地点の、合計20地点で実施した(図2)。沖縄本島ではミドリイシ属サンゴのほとんどの種が6月の満月前後数日の間に放卵放精するので、6月の満月の2週間前までに、サンゴ幼生定着基盤を各地点に設置した。先行研究によってミドリイシ属サンゴ幼生は、放卵放精1週間後から定着を始め、1ヶ月後までには生存率が低下することが分かっているので[4]、基盤は放卵

放精確認 1 ヶ月後から回収を始めた。サンゴ
個体群および群集を記録するために、基盤回
収時に各地点で同水深に 20 m のラインを引
き、1 ライン上にランダムに 5 の 1×1 m の方
形枠を置き、真上から 50×50 cm をひとつの
デジタル画像に撮影した。

基盤は乾燥後実体顕微鏡下で観察し、科レ
ベルで計数した。各地点で自然に見られるミ
ドリイシ科小群体のほとんどがミドリイシ属
であるため、基盤に定着したミドリイシ科サ
ンゴはミドリイシ属であるとみなした。また
デジタル画像の解析により、サンゴの被度や
群体サイズを測定した。

(2) ドリフターの投入・追跡と海流輸送モ デルによる海流輸送経路の推定

沖縄科学技術大学院大学が現有する位置情
報を発信できるドリフターを、親サンゴが多
く分布する沖縄本島西海岸の 5 地点、慶良間
諸島と久米島の各 3 地点でサンゴの放卵放精
時期（放卵放精は 2~3 日間のみであるが、海
況が類似した 6 月の他の日も含める）に投入・
追跡し、海流輸送経路を推定した。また現有
のドリフターはやや大きく、浅いサンゴ礁で
はサンゴなどに引っかかる可能性があるのだ
より小型のドリフターを本研究費で購入し、
より浅い場所での推定も行った。ドリフター
では 0~100 km 以上の空間スケールで、サン
ゴ幼生分散の可能性を検討する。

ドリフターによる観測だけでは、長期的か
つ広域的に海流輸送パターンを推定すること
は不可能であるため、数学的モデルの開発が
不可欠である。そこで、カリフォルニア大学
ロサンゼルス校で開発された Regional Ocean
Modeling System (ROMS) を本研究に適応し、
外洋での海流輸送パターンを推定し、かつス
タンフォード大学で開発された SUNTANS や他
のモデルを ROMS の中に組み込んで、サンゴ礁
周辺沿岸域の解析を行った。ドリフターによ
る海流輸送パターンの観測および海洋レーダ
による表面流の観測結果をモデルによる推定
結果と比較し、モデルの総合的な検証を行っ
た。

(3) 海洋レーダによる海流輸送経路の推定

本課題については、次の 2 点に関して検討
する。

① 送信アンテナの指向性制御：

旧来の送受切替型のレーダでは切替時のマ
ージン確保のため、近距離観測が不可能であ
るため、連続送信しながら受信する FMCW 方式
を採用した。受信機のダイナミックレンジ確
保のため受信アンテナ方向への直達波電力を
極力低減しかつ観測すべき海面方向を広域に
照射するような、指向特性をもった送信アン
テナの実現が不可欠であった。

② SDR による送受信構成：

周波数変更等への柔軟な対応が可能な SDR
(Software Defined Radio: ソフトウェア無
線) にて送信部ならびに複数チャンネル受信で

構成するアレイ信号処理を確立する。ただ、
DDS (DDS: Direct Digital Synthesizer) で
の生成される信号に発生するスプリアスに対
処し、無線局免許基準を満足することが条件
となった。

4. 研究成果

(1) 親サンゴの量および幼生定着量の 時空的パターン

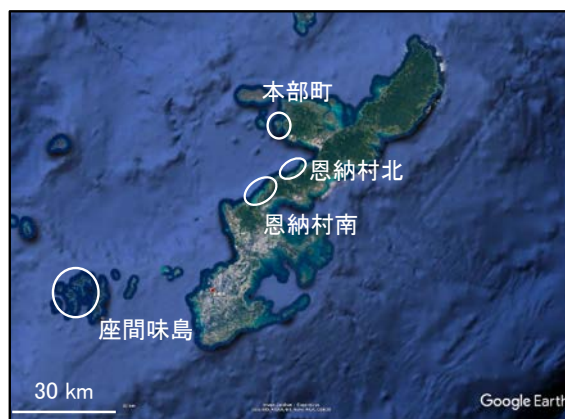


図 2. 親サンゴの量および幼生定着量を
比較検討した海域。

本研究期間に得たデータに 2003 年から同
じ海域で継続している調査データを加えるこ
とによって、本部町、恩納村北、恩納村南、座
間味村海域 (図 2) 内および海域間で親サンゴ
の量と幼生定着量を比較検討することによっ
て、本研究の目的としたミドリイシ属サンゴ
幼生の親からの分散距離を推定することがで
きた。本部町海域では 5 km の空間的広がり
の中に 4、恩納村北では 5 km に 3、恩納村南
では 10 km に 4、座間味村では 8 km に 9 の調
査地点を設置した。また海域間の距離は本部
町、恩納村北、恩納村南、座間味村間の順に、
13、4、50 km である。なお 2017 年のデータは現
在解析中であるため、本報告では 2016 年ま
でのデータを示す。

図 3 に、各海域における 2003 年から 16 年
のサンゴ被度の経時的変化を示す。恩納村海
域では 2009 年と 10 年、座間味村海域では 2012
年に調査を実施することができなかった。海
域によってサンゴ群集の攪乱の種類と攪乱の
起こった年が異なる。

沖縄本島に位置する本部町、恩納村北およ
び南海域では、1998 年に起こった高水温によ
るサンゴの大規模白化現象による死亡で、ミ
ドリイシ属サンゴを含む枝状やテーブル状の
サンゴが激減した [5]。このため、これら海域
では調査を開始した 2003 年にはサンゴ全体
の被度が低く、特にミドリイシ属サンゴの被
度が極めて低かった。沖縄本島では本部町海
域でサンゴ群集の回復が早く起こり、2010 年
までにはサンゴ被度は 1998 年の大規模白化現
象以前のレベルまで回復し [1]、その後も増加
を続け 2015 年にはサンゴ全体およびミドリ

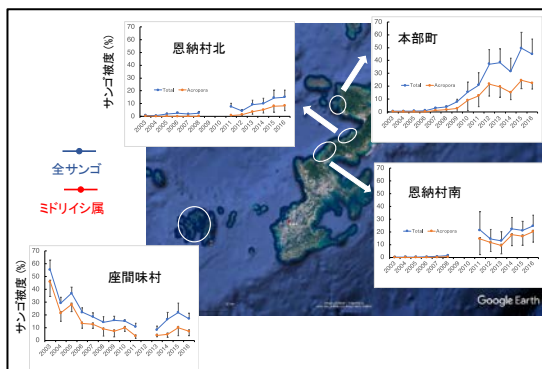


図 3. 各海域における平均サンゴ被度の経時的変化。全サンゴとミドリイシ属サンゴの平均被度を示す。エラーバーは標準誤差。

イシ属サンゴの被度がそれぞれ 50 および 20% を超えた。恩納村北ではサンゴ群集の回復は遅く、2016 年でもサンゴ全およびミドリイシ属サンゴの被度はそれぞれ 20% および 10% 未満であった。恩納村南ではサンゴ被度は 2011 年に増加したが、2016 年におけるサンゴ全体の被度が 30% 程度と、本部町よりサンゴ群集の回復が緩やかであった。しかしこの海域では、サンゴ全体に占めるミドリイシ属サンゴの被度が高かった。

慶良間諸島に位置する座間味村海域では、1998 年の高水温でサンゴの白化現象が起こったものの白化によるサンゴ死亡率は低く、調査を開始した 2003 年にはサンゴ全およびミドリイシ属サンゴの被度はそれぞれ 60% および 50% 程度と高かった。しかし座間味村海域では 2002 年ごろからサンゴを捕食するオニヒトデの大量発生が起こり、地元ダイビング協会の熱心な駆除作業にも関わらずサンゴ被度は減少し、2008 年以降はサンゴ全体の被度が 20% 未満となり、特にオニヒトデが好んで捕食するミドリイシ属サンゴの被度が減少した。2015 年頃からミドリイシ属サンゴの被度が増加し始め 10% を超え、サンゴ全体の被度も 20% 程度となったが、2016 年時点でもサンゴ被度は低い状態が続いていた。

図 4 に、本部町、恩納村北および恩納村南におけるサンゴ幼生の、定着基盤 1 組への平均定着数の 2003 年から 16 年の経時的変化を示す。恩納村北および南では 2009 年と 10 年に基盤設置ができなかったため、データが欠落している。基盤上の幼生定着直後の小群体は、形態では科レベルでしか同定できないが、調査地点で自然に見られる 5 cm 以下のミドリイシ科群体のほとんどがミドリイシ属サンゴであったので、基盤上に見られたミドリイシ科サンゴは全てミドリイシ属サンゴであるとみなした。

本部町海域では 2010 年以降サンゴ幼生定着数が増加し始め、2011 年には大きな増加がみられた。2012 年以降は年による変動は大きいものの、2015 年および 16 年に多くのサンゴ幼生が基盤に定着した。2011 年以降は、定

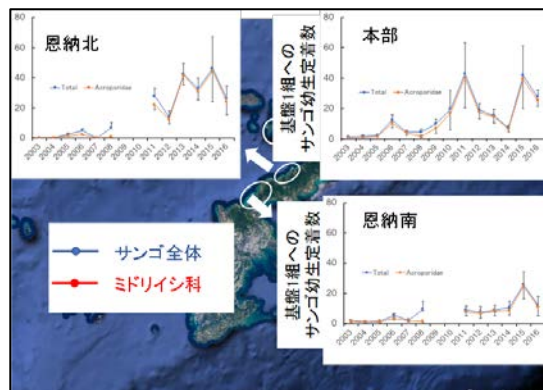


図 4. 各海域におけるサンゴ幼生定着基盤 1 組へのサンゴ幼生定着数の経時的変化 (200 cm² 当たり)。全サンゴとミドリイシ科サンゴの平均定着数を示す。エラーバーは標準誤差。

着した幼生の 90% 以上がミドリイシ科であった。恩納村北海域では 2013 年以降サンゴ幼生定着数が増加し、その後も 2016 年まで多くの幼生定着が見られた。一方恩納村南では 2015 年にやや多くのサンゴ幼生定着が見られたが、本部町や恩納村北海域に比較すれば定着量は少なかった。また恩納村北および南海域でも、2011 年以降はミドリイシ科の全サンゴに占める割合が 90% 以上であった。座間味村では 2016 年時点でもサンゴ幼生定着数は平均 20 以下と、2010 年以降少ないレベルで推移している。

2003 年と 04 年には、座間味村海域ではミドリイシ属サンゴ被度は高かったが、本部町、恩納村北および恩納村南海域ともに、ミドリイシ科サンゴの幼生定着数は極めて少なく、50 km 以上離れた座間味村を含む慶良間諸島から沖縄本島の調査海域への、ミドリイシ属サンゴ幼生分散は極めて少なかったと考えられる。本部町海域では 5 km の広がり内のミドリイシ属サンゴの平均被度が増加すれば、被度の低い地点でもミドリイシ科サンゴ幼生の定着数が増加した。このことから、本部町海域内で生産されたミドリイシ属サンゴ幼生は、同海域内に多くが定着したと考えられる。一方恩納村北海域ではミドリイシ属サンゴ被度が低くても、恩納村南海域でミドリイシ属サンゴ被度が増加すれば、ミドリイシ科サンゴの幼生定着数が増え、幼生定着数は恩納村南海域よりも多かった。このことから恩納村南海域で生産されたミドリイシ属サンゴの幼生は、恩納村北海域に分散して定着したと考えられる。恩納村北と南海域を合わせた空間的広がり約 20 km である。これらのミドリイシ属サンゴ被度とミドリイシ科サンゴ幼生定着量の時空間的關係から、ミドリイシ属サンゴ幼生の親からの分散距離は 20 km 以内であることが示唆された。

(2) ドリフターの投入・追跡と海流輸送モデルによる海流輸送経路の推定

漂流ブイによる海水輸送観測に関しては、これまでに投入したマイクロスタードリフターの解析を行うとともに、浅海域サンゴ礁内に特化した新型リーフドリフターの検証実験を行なった。前者については、恩納村、座間味島、久米島、石垣島、南大東島からの漂流パターンを定量化し、サンゴの集団遺伝解析結果との比較検証を進めた。既存のサンゴ幼生の生活史と組み合わせることで、平均的な分散距離などの定量化も行った。潮流が卓越したところ、海流成分の海域など島による違いがある一方で、分散距離には共通した特徴が見られた。また、高解像度海洋モデルについては、特徴的な沿岸流を捉えるには限界があることも確認できた。

(3) 海洋レーダによる海流輸送経路の推定

①送信アンテナの指向制御：

送信中も同時に受信する方式とするため、送信アンテナと受信アンテナは分離し、また直達波の受信電力をなるべく小さくして受信機が飽和することなく微弱な海面での散乱信号を受信できるようにダイナミックレンジを確保しなければならない。送受信機を同一所に設置するモノスタティックレーダでは、送受信アンテナ間の距離を離すことで直達波の電力を小さくするには限度があるため、受信アンテナ方向にヌル方向を形成するとともに、観測対象の海面に対してなるべく広い角度範囲に同一電力で照射できる指向特性の形成が目標となった。具体的な条件として、電波照射方向は半値幅 100° の範囲を確保し、照射方向とはほぼ 90° の方向（受信アンテナの方向）にヌル点をもつパターンとした。

この実現のために、図 5(a)に示すように、垂直ダイポール 2 素子に位相差給電を行い、電波照射方向に導波器と受信アンテナ方向に反射器を持つ 4 素子構成の形状を考案し、計算機シミュレーションと実測により特性を検証した。図 5(b) に実際に製作したアンテナを示す。輻射器、導波器、反射器のエレメントには直径 3mm のピアノ線を用い、2 輻射器間の位相差は 90° になるように給電することで最大照射方向に対し 90° 方向（受信アンテナ方向）にヌル形成を形成し、電波照射方向の

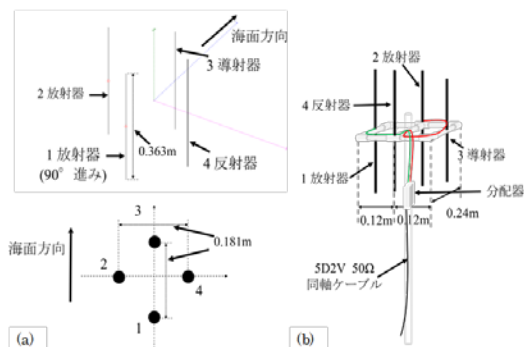


図 5. 送信アンテナの構造 (a)各素子の配置、(b)製作したアンテナ。

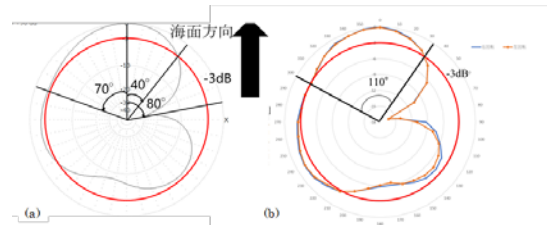


図 6. 送信アンテナの構造 (a)各素子の配置、(b)製作したアンテナ。

広角化と受信アンテナ方向の電力抑制のために導波器と反射器を配置した。

図 6(a)にモーメント法を用いて計算機シミュレーションで求めたアンテナパターンを示す。この結果は要求仕様に合致している。これに対し、製作したアンテナの実測パターンを図 6(b)に示す。実測でも、照射方向の半値幅は 100° 以上確保でき、最大照射方向から右側 80° 方向に -15dB 以下のヌル点が形成できていることが確認できた。また、このときの VSWR は 1.22 となっており、反射は小さく送信アンテナとして効率良好と判断できる。

②SDR による送受信構成：

送信信号形状（変調方式）や周波数の変更等への対応が容易な SDR にて送受信機を構成した。送信部については、信号波形を DDS で生成する場合、所望周波数帯域外のスプリアスが大きくなるため、DDS で生成する変調波を周波数変換して高い周波数の搬送信号を得るアップコンバータ構成とした。その過程ならびに終段電力増幅段に適切なフィルタを挿入し、無線局免許に必要なスプリアス規定を満たすようにした。

また、受信部はアレイアンテナでの受信を構成するため、8 つの受信アンテナにそれぞれ受信部を設ける方式とし、各チャンネルとも、送信信号の局部発信信号ならびに送信信号を用いて 0-IF 方式で受信信号を AD 変換し

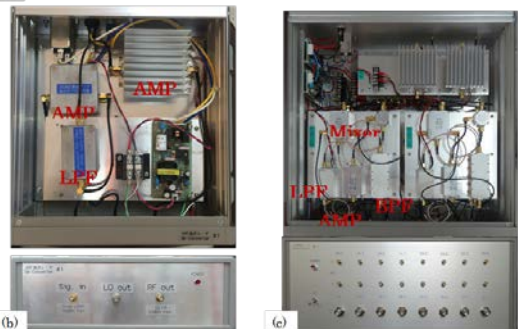
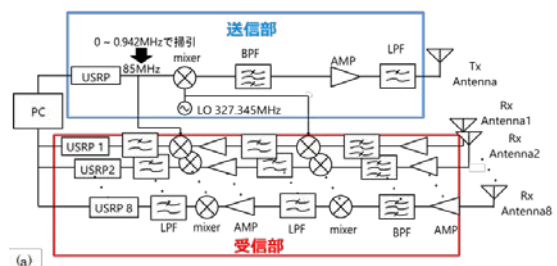


図 7. 送受信部 (a)ブロック構成 (b)アップコンバータ（送信部） (c)ダウンコンバータ（受信部）

PCに取り込むこととした。8チャンネルの受信信号は、PC内で距離特性とドップラスペクトルを求める2回のフーリエ変換により、距離ごとの流速特性を求めた。その後、各チャンネル間の位相合成を行い、方向分離をすることで各方位の視線方向を得るという一連の処理を行った。

送受信機のアップコンバータとダウンコンバータの構成を図7に示す。は送受信とも計算機とのアナログインタフェースとしてUSRPN210(Ettus Research社製)を用いているが、送信機1台受信機8台の計9台はすべてGPS受信機で得られる10MHzを基準周波数として同期されている。そのため、受信8チャンネル間は0.1μ秒以下の位相差を確保している。また、送信機の終段出力で見たスペクトルを図8に示す。これから、無線局免許に必要なスプリアス抑制基準を満たしていることが分かる。

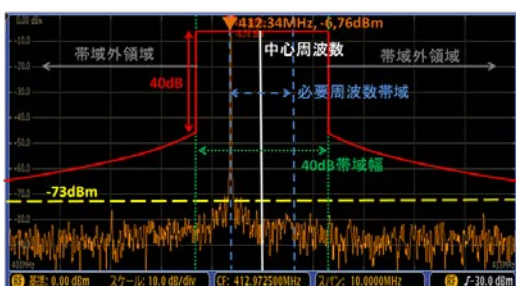


図8. 送信スペクトルと無線局免許基準の範囲。

<引用文献>

- [1] van Woesik R et al. (2011) Mar.Ecol.Prog.Ser. 434:67-76;
- [2] Cabaitan P et al. (2012) Galaxea JCRS 14:27-40;
- [3] Nakamura M & Sakai K (2010) Mar.Biol. 157:801-810;
- [4] Nishikawa A & Sakai K (2005) Zool.Sci. 22:659-664;
- [5] Loya Y et al. (2001) Ecology Letters 4:122-131

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 藤井智史 (2016) “海洋レーダの研究開発と取り巻く状況”, 沿岸海洋研究, 第53巻, 第2号, p.141-150

[学会発表] (計6件)

- ① Sakai K, Nakamura M, Mitarai S. (2018) Dispersal range of Acropora larvae in Okinawa: estimate by ecological method. 4th Asia Pacific Coral Reef Symposium, June 4-8, 2018, Cebu City, Philippines.
- ② Wepfer PH, Nakajima Y, Economo EP,

Mikheyev A., Mitarai S. (2018) Dispersal patterns of the coral *Galaxea fascicularis* across the northwestern Pacific Ocean. 2018 Ocean Sciences Meeting, February 11-16, Portland, OR, USA.

- ③ Lee H, 藤井智史 (2017) RTL-SDRを用いたレーダのターゲット検出, 電気学会沖縄支所講演会, 2017/12/11, 琉球大学.
- ④ Mitarai S, Nakajima Y, Nakamura M. (2016) Nearshore currents and population connectivity around Okinawan fringing reefs - a drifter study” 13th International Coral Reef Symposium, June 22, 2016, Honolulu, HI, USA.
- ⑤ Fujii S. (2015) Oceanographic radar for coastal ocean observation. International Workshop for Holography (IWH2015), 2015/12/1-3, 沖縄コンベンションセンター
- ⑥ Fujii S. (2015) Development and observation of oceanographic radar in Japan. Ocean Observations Panel for climate (OOPC-18), 2015/4/14-17, 東北大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 一彦 (SAKAI, Kazuhiko)
琉球大学・熱帯生物圏研究センター・教授
研究者番号: 50153838

(2) 研究分担者

御手洗 哲司 (MITARAI, Satoshi)
沖縄科学技術大学院大学・准教授
研究者番号: 80567769

藤井 智史 (FUJII, Satoshi)

琉球大学・工学部・教授
研究者番号: 30359004

(3) 連携研究者

向(竹垣) 草世香 (MUKO-TAKEGAKI, Soyoka)
長崎大学・水産環境科学総合研究科・客員研究員
研究者番号: 30546106

中村 雅子 (NAKAMURA, Masako)

東海大学・海洋学部・講師
研究者番号: 50580156