

平成 15 年度調査結果概要 追加報告  
(海水流動シミュレーション)

## 1. 背景, 目的

石西礁湖は、琉球列島の南西端の、石垣島と西表島の上に位置する東西約 20km 南北約 15km に及ぶ海域の呼称で、日本最大のサンゴ礁海域である。

一般にサンゴ礁海域は造礁サンゴなどによる高い一次生産を有しており、生物種も豊富であるが、特に石西礁湖においては非常に高いイシサンゴ類（造礁サンゴの大部分を占める）の種多様性が認められており<sup>1)</sup>、従ってサンゴ礁生態系を構成するその他の生物の多様性も、高い値を有しているものと想定されている<sup>2)</sup>。このような石西礁湖におけるサンゴを基盤とした豊かな自然資源は人々に大きな恵みをもたらしている。しかし、近年石西礁湖を始めとする沖縄・琉球列島のサンゴ礁は、オニヒトデによる食害や赤土汚染、高水温によるサンゴの白化などによって生態系の劣化が著しく、その適切な保全のあり方を探ることが重要な課題になっている。

同海域に関しては、1983 年以降、八重山海中公園研究所等によって継続的なサンゴ礁モニタリング調査が精力的に行われているが、サンゴ被度などの生物調査が主で、サンゴ礁環境を知る上で重要となる流動場等の基本的な物理環境については不明な点が多い。そこで本研究では、後述する大規模な総合的現地観測および数値シミュレーションを行い、物質・熱輸送を支配する海水流動場の特性を明らかにするとともに、周辺の陸域から流入する濁質や淡水の動態や、石西礁湖内の水温環境特性、サンゴ幼生の輸送過程を解明することを試みた。

## 2. 方法

### (1) 現地観測概要

#### 観測期間

- ・ 2002 年 10 月上旬から 12 月上旬, 2003 年 5 月上旬から 7 月上旬  
自記式センサーによる連続観測
- ・ 2003 年 5 月 16 日から 19 日（サンゴ幼生の一斉産卵期間）  
GPS 搭載小型漂流ブイによる表層流動場のラグランジュ的観測  
プランクトンネットおよび水中ポンプを用いたサンゴ幼生の多点サンプリング

#### 観測項目

表層流速・水位・波浪・濁度・塩分・水温・雨量・風向風速・日射量に関する連続観測を行った。さらに、サンゴの一斉産卵後の 03 年 5 月 16 日から 19 日の 4 日間、GPS 搭載小型漂流ブイを用いた表層流動場のラグランジュ的観測を行い、サンゴ幼生や赤土粒子を想定した表層粒子の追跡を試みた。それと同時に、サンゴ幼生の多点サンプリングによりサンゴ幼生の個体数密度および形状の変化を調べ、サンゴ幼生の輸送過程の解明を試みた。

#### 観測地点

自記式センサーによる観測地点を図 - 1 に示す。石西礁湖内およびその周辺海域 25 地点、上述の 5 河川の河川内および河口 7 地点、雨量計を設置した 5 地点、風向風速計・日射計を設置した黒島の 1 地点を観測地点とした。

#### 観測方法

自記式センサーによる連続観測は、測器をブイ係留あるいは底面設置することで行った。

GPS 搭載小型漂流ブイによる表層流動場観測は、漂

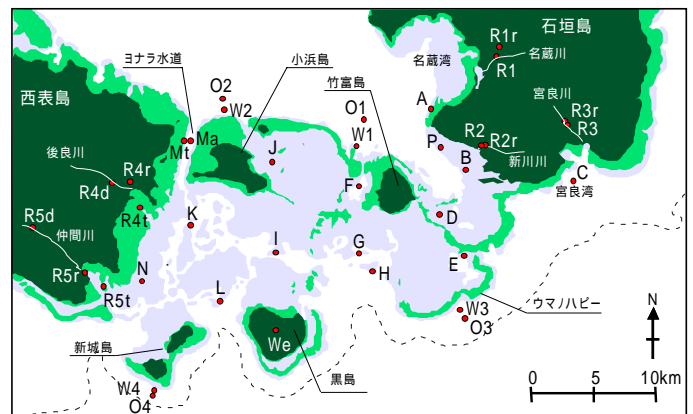


図 - 1 観測地点

流ブイのべ 16 個を、スリック（サンゴ卵・幼生の帯状集合体）上などに投入して、追跡した。サンゴ幼生採集は石西礁湖内および周辺外洋 18 地点で 1 日 2 回、漂流ブイ観測と同時期の 4 日間行った。また、生きたまま持ち帰るサンプル（「生サンプル」）も 6 地点で別途採集し、顕微鏡で拡大して幼生の形状を撮影した。

## (2) 数値シミュレーション概要

石西礁湖内における流動場を面的に把握すること、海水流動のメカニズムをより詳細に把握すること、さらにサンゴ幼生などの粒子の追跡などを目的として、数値シミュレーションによる海水流動計算を行った。方法としては、主要 4 分潮の水位を観測値をもとに北・南・東側境界で与え、2 次元の海水流動計算を行い、この海域で卓越する潮流の再現を試みた。水深データは海図を元に作成し、水深 2 m 以下の浅い海域については、礁嶺による地形効果を正確に再現するために、Paringit・灘岡（2002）<sup>3)</sup>の方法により衛星画像から算出した水深を用いた。

## 3. 海水流動特性

最小二乗法を用いた調和解析によって求めた M2 分潮の潮流楕円を図 - 2 に示す。流速の主軸方向や変動幅が場所によって大きく異なり、複雑な地形により局所的な地形効果が顕著に現れていることがわかる。潮流の位相に着目すると、全体的にほぼ満潮・干潮時に流速最大となる進行波的特徴をもっており、満潮時に北向き、干潮時に南向きの流れとなっているが、場所によっては、潮流の位相が大きく異なることがわかった。

また、潮流成分を除いた平均流成分について、北北東風および南風が卓越していたときの平均流速ベクトルを図 - 6 に示す。平均流としては、風による流れである吹送流が卓越することがわかる。

## 4. 濁質輸送特性

### (1) 出水時の濁質輸送特性

石垣島と西表島の両方で大きな降水量があった 02 年 10 月 19 日前後の時期における、塩分低下量と濁度上昇量を図 - 3 に示す。出水時の顕著な濁度上昇は小浜島周辺を除くと比較的沿岸域に限られること、また、西表島に比べて、石垣島からの赤土流入の割合が大きいことがわかる。

### (2) 台風通過時の濁質輸送特性

図 - 4 は、2003 年の観測期間中に石西礁湖を直撃した台風 6 号通過時における、塩分低下量および濁度上昇量を示したものである。塩分低下はそれほど顕著ではないが、濁度については石西礁湖全域で非常に大きな上昇がみられる。このことは、このときの濁度上昇は河川から直接流入したのではなく、ほとんどは台風による底質の巻上

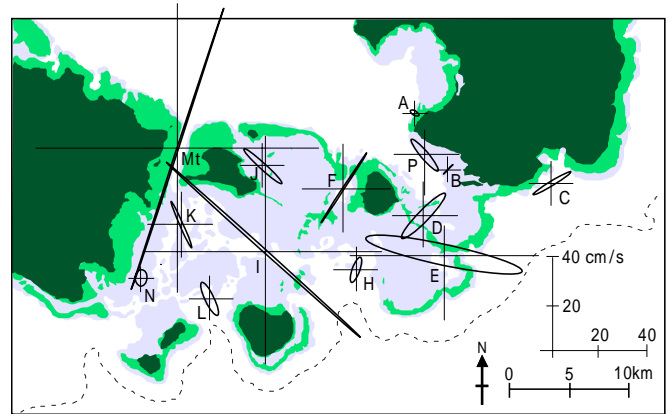


図 - 2 潮流楕円 (M2 分潮)

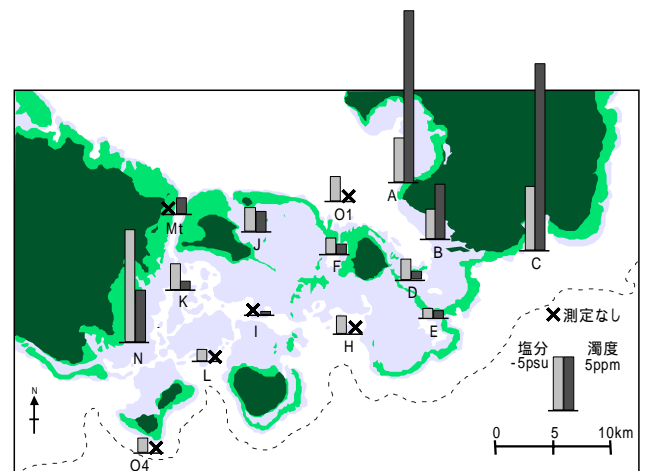


図 - 3 出水時の塩分低下量・濁度上昇量

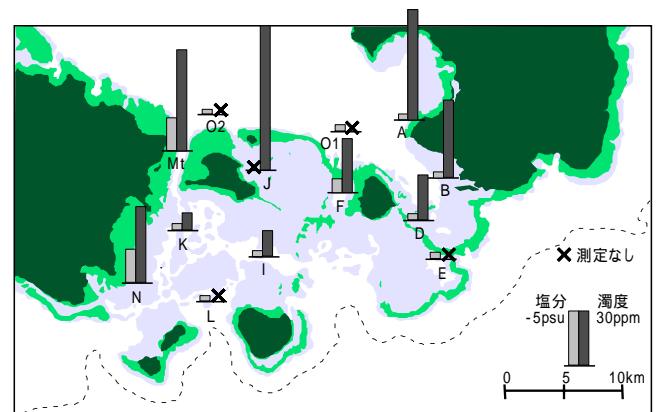


図 - 4 台風通過時の塩分低下量・濁度上昇量

げによるものであることを示している。

## 5. 水温特性

### (1) 地形効果による水温特性の局所性

冷却期の水温を時系列で見ると、その傾向はいくつかのグループに分けられた(図-5)。一つめは外洋 O1, O4 地点および C, H, L 地点等で、水温変動は比較的小さい。二つめは A, J, N 地点等で、これらの地点では数日スケールの水温変動が大きく、全体的に低水温であった。この数日スケールの水温変動は気温の変動と対応しており、このことから、水深が浅く、あるいは外洋との海水交換が少ないところでは、気象擾乱に対する低温化応答幅が大きく、平均水温はより低くなることが考えられる。三つめは、M, E, I 地点等で、約半日周期での水温変動がかなり大きく現れていた。これは、この時期に礁湖内と外洋との間で水温に明確なコントラストがあることから、両者の水塊をつなぐ水路部では、外部潮汐による周期的な水平移流効果が顕著に現れることによる。以上は冷却期における水温特性であり、加熱期である 03 年春期には、逆に礁湖内は外洋に比べて高水温となる傾向となっていた。

### (2) 外洋水塊の波及による水温変化

上で述べたように、外洋側の水温はなだらかに変動していたが、イベント的に急上昇している様子が何度かみられた。6月22日前後の水温時系列をみると、石西礁湖北側外洋の O2 地点では全水深帯で水温上昇がみられ、表層水温は約 27 から約 28 へと不連続に上昇している(図-6)。それに対して、南側外洋の O3 地点では水温上昇はみられない。この水温上昇は、石西礁湖の北部を流れる黒潮の分枝流によるものであると考えられる。

このような移流による熱輸送を定量的に把握するために、熱収支解析から各地点での水平移流熱フラックスを求めた。その結果 6月22日あるいは6月23日に移流熱フラックスは約 1 ~ 2 MJ/m<sup>3</sup>/day となり、ピークがみられた。このことは、これらの地点において外部からの熱の流入があったことを示しており、ピークの時期とその時の移流熱フラックスを地図上に示すと、図-7 のようになり、暖水塊が北西側外洋から波及している様子がわかる。また、水温の上昇は石西礁湖内ではなだらかであり、暖水塊は石西礁湖内では拡散しながら徐々に波及していたと考えられる。

## 6. サング幼生輸送特性

### (1) 2003 年サング産卵状況

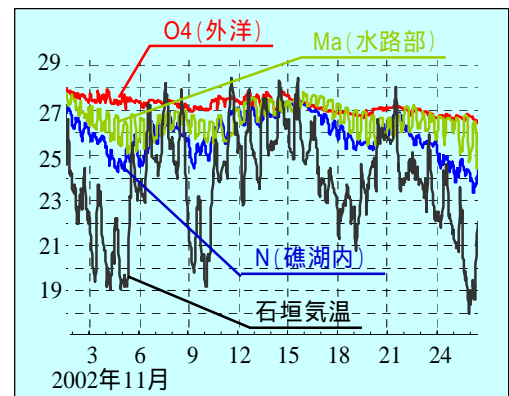
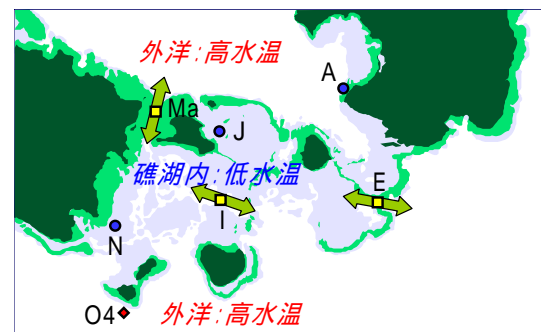


図-5 冷却期の水温特性

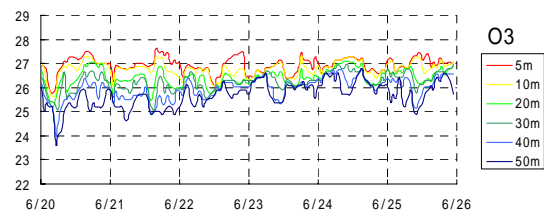
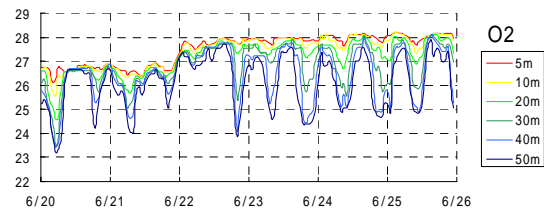


図-6 暖水塊波及時の外洋における水温

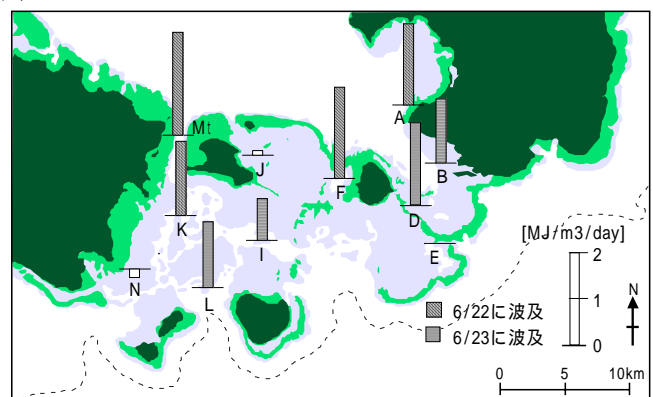


図-7 暖水塊波及時の移流熱フラックス

(6月22日, 23日の内でフラックスが大きい方を暖水塊波及時とした)

2003年のサンゴ産卵は、5月12日の夜から観察されている。スリック（サンゴ卵・幼生の帯状集合体）が5月13日から17日まで観察されていることから、産卵は5月12日（中潮）の夜から、その後数日間にわたって徐々に産卵していたようである。

### (2) サンゴ産卵期におけるラグランジュ的流動特性

サンゴ産卵期の後半にあたる5月16日から19日の期間におけるGPS搭載小型漂流ブイの軌跡を図-8に示す。石西礁湖内および周辺に投入されたのべ16個のブイの内、12個が南側へ流れた。サンゴ産卵期およびブイ追跡期間中の風をみると、ブイ追跡期間中は北東風が卓越しており、この北東風による南西方向の吹送流によって、ブイが平均的に南側に輸送されたと考えられる。

### (3) サンゴ幼生採集

1m<sup>3</sup>あたりの海水中に存在したサンゴ幼生の数を図-9に示す。5月16日の分布に比べて、5月19日午後の幼生数の分布をみると、外洋側で多く分布していることがわかり、礁湖内から外洋への幼生輸送過程の存在が示唆された。

次に、生サンプルの幼生画像から、幼生の形状の時空間変化を調べた。一般にサンゴ幼生は生まれた直後（卵の状態）は球体をしており、発生が進むとプラヌラと呼ばれる幼生に成長し、形状も細長くなっていく。つまり、幼生の形が細長くなるほど、受精後の期間が長く経っていると考えることができる。撮影した画像上で、幼生の周長と面積を測定し、周長と面積から次式によって幼生形状の指標（細長さの指標）となるような無次元数  $F$  を算出した。

$$F = \frac{(\text{周長})^2}{(\text{面積}) \times 4\pi} - 1$$

式からわかるように、完全な円形の場合、 $F=0$  となり、形状が細長くなるほど  $F$  の値は大きくなる。この  $F$  の値の分布を図-10に示す。16日から18日にかけて幼生が細長くなっていき、成長する様子が見られた。また、礁湖北側外洋では常に成長した幼生が多く存在していたことなどが示唆される。

## 7. 数値シミュレーションによる海水流動計算

まず、計算結果の妥当性の検証として、水位と流速の時系列について、実測値と計算値を比較したものを図-11に示す。ここでの実測値のデータは、調和解析によって潮汐の主要4分潮成分を取り出したものを用いている。水位については、かなり正確に実測値を再現できているといえる。流速については、場所によっては位相がずれていたりして

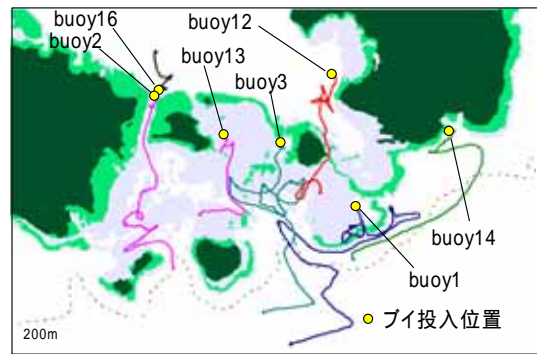


図-8 漂流ブイの軌跡

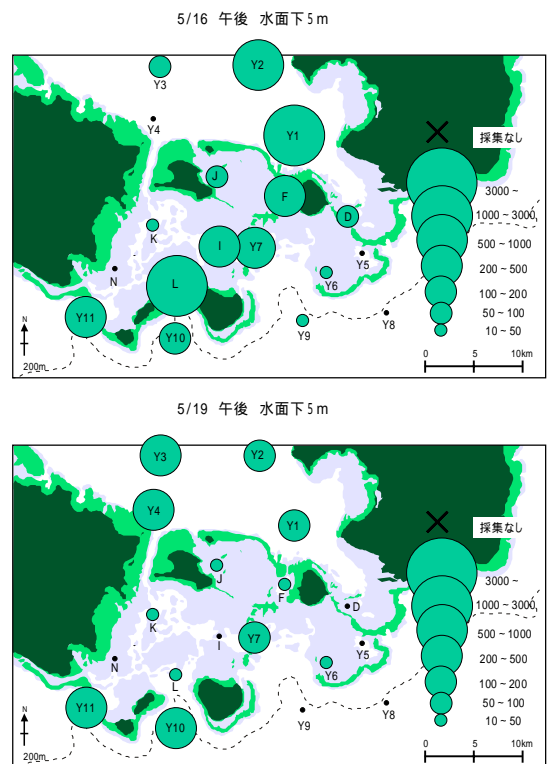


図-9 1立方メートルあたりのサンゴ幼生の個体数

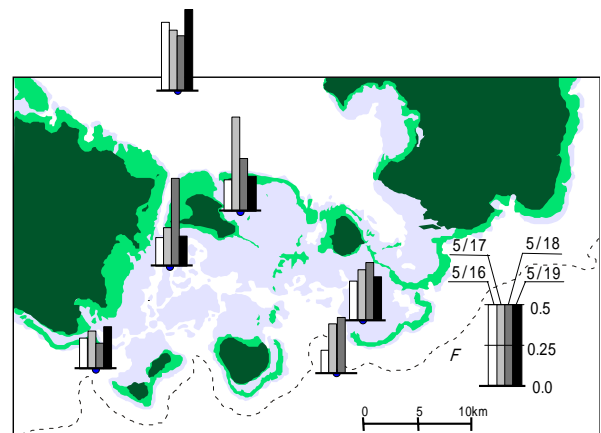


図-10 サンゴ幼生の形状（表層での値）

いるが,大まかな傾向としては再現できているといえる.

次に,各観測地点における流速の u-v プロットを図 - 12 に示す.観測値と比較して,地形効果による局所性の大きな潮流の特徴を概ね再現できていることがわかる.

## 8. 結論と今後の課題

本研究では,石西礁湖の適切な保全策を立てる上で基本的な情報を得ることを目的として,総合的現地観測および海水流動シミュレーションを行った.その結果,海水流動特性および周辺の陸域から流入する濁質や淡水の動態,石西礁湖内の水温環境特性,サンゴ幼生の輸送特性の概要を明らかにすることができた.

今後の課題としては,以下に示す項目が挙げられる.

- ・衛星画像データを用いた石西礁湖海底被覆状態の経年変化の評価
- ・衛星画像データならびに GIS データを用いた周辺陸域環境の変遷の評価と将来シナリオ予測

- ・石西礁湖を対象とした 3 次元海水流動モデルならびに物質・熱輸送モデルの開発と応用
- ・石西礁湖海域における水深データの高精度マッピングとその検証
- ・サンゴ幼生供給過程から見た石西礁湖内重点保護海域の同定
- ・広域的なサンゴ幼生輸送過程解明に基づくサンゴ幼生供給源としての石西礁湖の役割の把握
- ・幼生採取調査と遺伝子解析に基づくオニヒトデの広域的供給過程の解明

### 参考文献

- 1)西平孝・J.E.N.Veron (1995),「日本の造礁サンゴ類」, pp.30, 海游舎.
- 2)御前洋・入江正巳 (1980),「第 1 回石西礁湖調査,竹富島周辺域」.海中公園情報,49, pp.15-18.
- 3)Enrico Paringit・瀬岡和夫 (2002),「多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの逆解析手法への応用」.海岸工学論文集,49, pp.1191-1195.

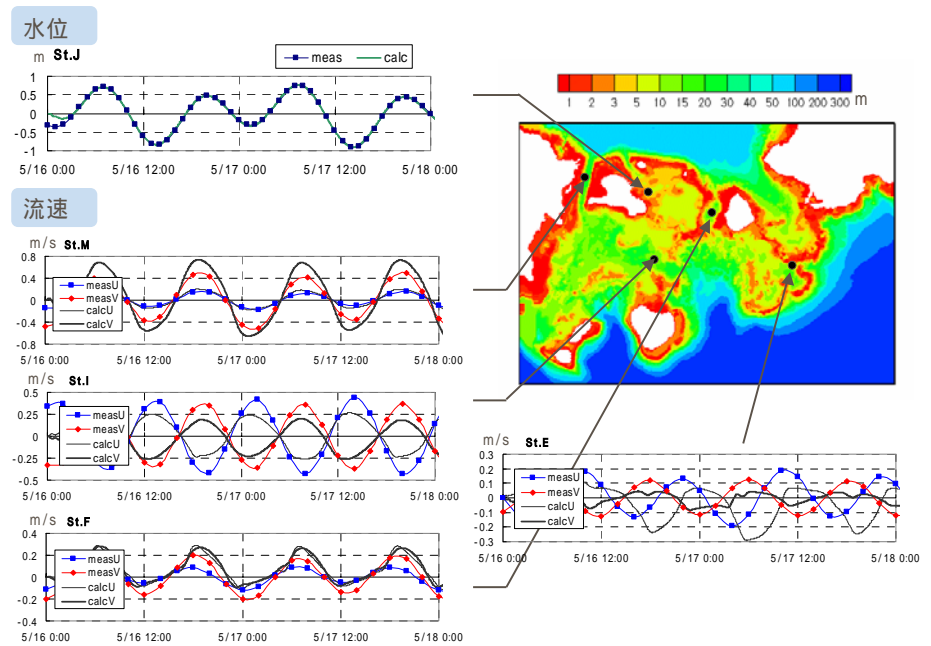


図 - 11 計算結果と観測値との比較

(流速については,計算値:水深平均流速,実測値:表層流速)

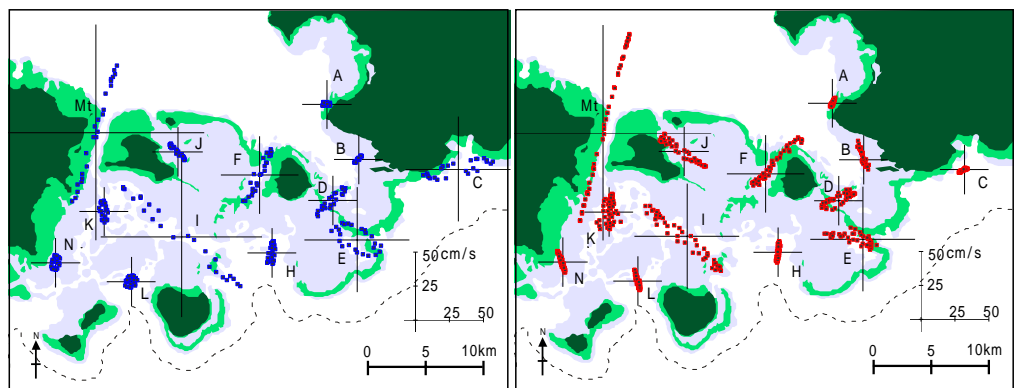


図 - 12 表層流速 (実測値, 左) と水深平均流速 (計算値, 右) の u-v プロット