

宮古島トライアスロン水泳競技海域の 波・流れ特性と予測

WAVES AND CURRENTS IN THE SWIME-AREA
OF MIYAKO-JIMA TRIASRON IN OKINAWA

仲座栄三¹・坂下泰和²・長浜幸男³・仲間利夫⁴・砂川一博⁵・武内鉄平⁶
Eizo NAKAZA, Yasukazu SAKASHITA, Yukio NAGAHAMA, Toshio NAKAMA,
Kazuhiro SUNSKAWA, Teppei TAKEUCHI

¹工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

²琉球大学 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地)

³第24回宮古島トライアスロン大会スーパーバイザー (〒906-0011 沖縄県宮古島市平良字東添1693-5)

⁴沖縄県宮古支庁 農林水産整備課 (〒906-0012 沖縄県宮古島市平良西里1125番地)

⁵株式会社地建 (〒906-0013 沖縄県宮古島市平良西里672-6)

⁶株式会社海岸環境調査研究所 (〒903-0064 沖縄県那覇市寄宮3丁目12番13号)

Miyako island of Okinawa in Japan is famous for having beautiful corals and is treated as the most beautiful beach in the East-Asia. The island is also well known around the world due to Miyako-jima triathlon that has been held for 24 times in this island. The triathlon possesses around 3.0 km track for swimming in addition to biking and running areas. But there has been no precise system to predict the wave and current in the swimming area of the triathlon. An empirical observation has mainly been conducted just 30 minutes before the swimming competition and there are no sufficient measures to predict the safety of swimmers. A swimmer even died during 22nd conference. A comprehensive survey was conducted to clarify the water current characteristics in the swimming area with the desire to establish a precise prediction system to sustain the biggest tourist resource (triathlon festival) of the island. The observation discloses an eddy current which is shedding from the toe of the coast and makes the current complex. The wave height is also found proportionate to the wind velocity.

Key Words : Miyako-jima triathlon, coral reef, current, wave, swimming, nearshore current

1. はじめに

宮古島トライアスロンは、沖縄県宮古島にて開催され、これまでに24回の実績を有する。トライアスロンは、3kmのスイム、155kmのバイク、42.195kmのランの競技種目で構成される。水泳競技は東洋一の美しさと称される宮古島前浜海岸で行われる。この海岸は、サンゴ礁海域に面するものの、地形的特性から流れの激しい箇所があり、流れが天候に大きく左右されると言われる。

そのようなことから、水泳競技にあたっては、細心の注意が払われ、前日の調査や大会当日の競技スタート直前における観測結果などの総合的判断に基づいて大会決行の決断が行われている。そのような細心の注意を払うものであっても、簡易的な観測による海域の状況判断は困難であり、事故の発生や数

多くの競技者のリタイヤを余儀なくされている。

サンゴ礁上の流れと波に係る研究としては、谷本ら¹⁾、仲座ら²⁾、Tsukayama and Nakaza³⁾、山本ら⁴⁾、前田ら⁵⁾などがある。しかしながら、サンゴ礁上の流れは地形的特性が強く、これらの成果を直接適用できないという問題がある。対象海域である宮古島前浜海岸の波と砂浜の侵食問題を取り扱った研究に仲座ら⁶⁾があるが、流れや波の観測データは示されていない。しかし、この研究からは、対象海域の保全に対する住民の意識の高さが示された上で、住民の多くが自然環境と調和する侵食対策を望んでいることなどが示されている。

本研究では、この海域の流れ特性を科学的に明らかにした上で、流れおよび波の簡便な予測法を提示し、大会の安全運営や水泳競技記録の評価に資する。当然ながら、得られるデータは、この海域の保全に

必要となる海岸工学的知見として活用されることも期待される。

2. 観測場所および観測方法

図-1 に、宮古島位置および島々を取り囲む等水深線の分布を示す。沖縄県宮古島は、沖縄本島の南西約300kmに位置し、図示のとおりサンゴ礁が隆起したフラットな地形からなる三角形の島である。

図-2 に、水泳競技海域を中心とする周辺海域の航空写真を示す。右手に見えるのが宮古島であり、海岸線の凸部より北側（写真奥側）が前浜海岸である。前浜海岸の砂浜の美しさは東洋一と言われる。写真左手に見える島は、来間島（Kurima Jima）である。宮古島と来間島間に白く線状に見えるのは、サンゴ礁縁の斜面上に波が砕波している様子である。最大干潮時にはその周りのサンゴ礁は部分的に干出する。

図-3 に、水泳競技海域周辺の拡大図を示す。図中のA、B及びCで示す位置は、水圧式波高計（WaveHunter、アイオーテック社製）による波および流れの観測位置である。また、これらの観測点をつなぐ実線は、トライアスロン水泳競技コースを表す。L1およびL2間を結ぶ矢印の線は、宮古島と来間島間の流れの曳航観測の際の観測ラインを示す。水泳競技コースに沿う流れおよび宮古島と来間島間の流れの観測は、ADCP（超音波ドップラー式流速計、1200kHz、Rd instruments社製）を用い、速さ約3ノットで曳航し観測を行った。

これらの観測は、2008年、大会日の4月20日をはじめ、4月6日から5月11日までの約1か月間行われた。波・流れの観測は、データサンプリング周波数を2Hzとし、20分おきの10分間連続観測とした。観測点Aにおける波・流れの観測データは、10分間測定の後、ただちに統計処理され、携帯電話通信（コバンザメ：アイオーテック社製）を介し、東京に設置したサーバーに転送した。データサーバーは、トライアスロン大会の公式サーバーとリンクされ、流れや波のデータがビジュアルな形で一般公開された（<http://same.iotechnic.co.jp/miyako/sm23h.htm>）。

曳航による流れの観測は、19日と20日の2日間に行われて行われた。大会前日に当たる19日の観測は、翌日の水泳競技開始時間を考慮し同潮位時間帯に行った。曳航速度はいずれの場合も約3ノットを基本とした。但し、大会当日の1回目の観測は、水泳競技者の先頭とほぼ同じ速度を保持、スタート地点からゴール地点まで先頭集団に並走して行った。同コースの2回目以降の観測は、曳航速度を約3ノットに統一した。観測では、さらに観測対象海域と気象台による潮位参照地点との潮位および時間差を把握するため、それらの2地点で1か月間に亘り潮位観測も実施した。

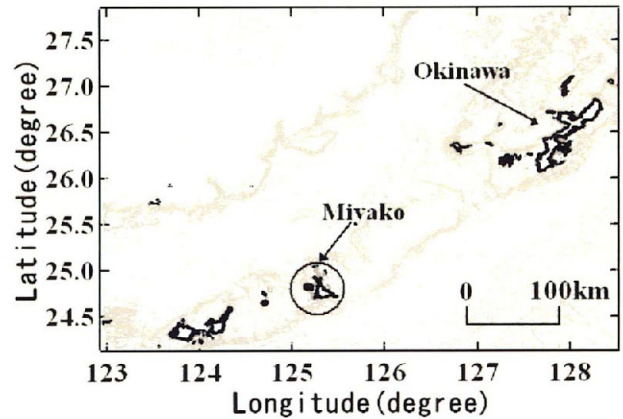


図-1 宮古島の位置



図-2 観測海域の概要

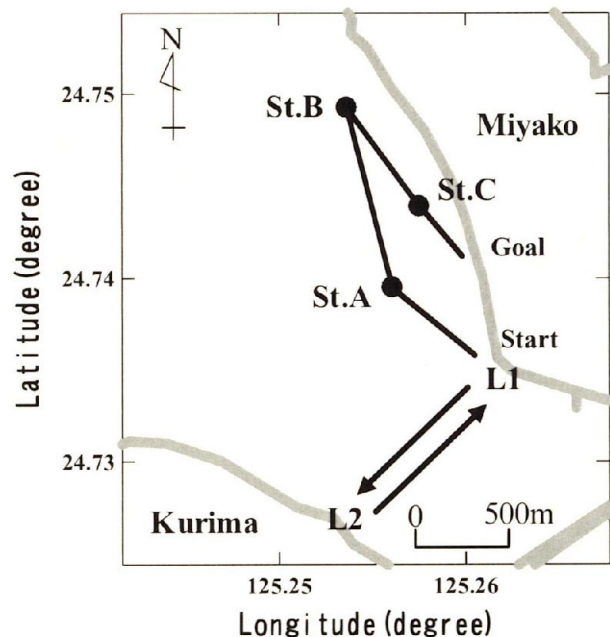


図-3 観測位置および水泳競技コース

3. 観測結果および考察

図-4 に、宮古島気象台で観測された風速の経時変化を、第24回大会開始時をはさみ前後3潮汐に亘り示す。図には潮位との関係を示すため、観測点Cで得られた実測水位変動も同時に示してある。また、水位変動波形上に付した○印は、次に説明する第1回曳航観測から第3回曳航観測までの観測開始時を示す。以下実測潮位については、対象としている海域が2km四方であることから、観測点Cの潮位で代表させる。図-4 に示すように、大会当日は、水泳競技開始7時間前から水泳競技終了後の12時ころまで南東の風で、風速3.0m/s以下の微風であった。

大会当日（4月20日、午前7時）、水泳競技のスタートと同時に観測を実施し、先頭選手に並走してゴール地点まで行った第1回観測による流れの様子を図-5 に表す。観測海域は、6m以浅と比較的浅い海域であることから、これらの図中に示す流れのベクトルは、水深方向に25cm間隔で得られたADCPのデータを水深方向に平均した平均流速で表示してある。以後、流れについては、すべて水深方向に平均した平均流速を以て表す。

第1回観測の後に引き続きコースを逆にゴール地点からスタート地点まで、約3ノットの曳航速度で測定した流れの様子を図-6 に示す。図-7 は、再度スタート地点からゴール地点まで行った第3回観測による流れの様子を示す。第3回観測は、水泳競技者の最後尾のゴールとほぼ同時に観測を終了している。

図-5 に示す宮古島と来間島間の流れは、水泳競技開始約30分前に観測されたものである。図示のとおり、水泳競技開始直前における流れは、宮古島と来間島間で北西方向にほぼ一樣な流れとなっている。平均的な流れの大きさは約30cm/sとなっており、平均水深が6m程度の浅海域で観測される潮流としては、比較的強い流れと言える。

先頭を泳ぐ選手と並走して測定した第1回観測結果によると、コースに沿う流れは全体的には前浜海岸の凸部からの剥離渦を伴う北流となっている。スタート地点から折り返し地点を過ぎたあたりまで、ほぼ北寄りの流れを示し、折り返し地点からゴール地点までのちょうど中間地点（流れの再付着地点）を境に流れが南向きに転じている。

先頭集団がゴールを切った後、コースを逆向きに測定した第2回観測結果（図-6）は、スタート地点とゴール地点を除いてほぼ全体的に流れが淀んだ状態となっていることを示している。さらに、測定方向を反転させ、スタート地点からゴール向きに測定した結果（図-7）の場合、流れは、全体的にほぼ南方向の流れとなっている。

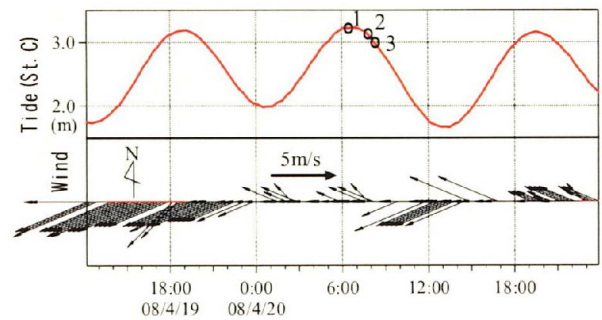


図-4 風速ベクトル（宮古島気象台観測データ）と水位変動（観測点C）

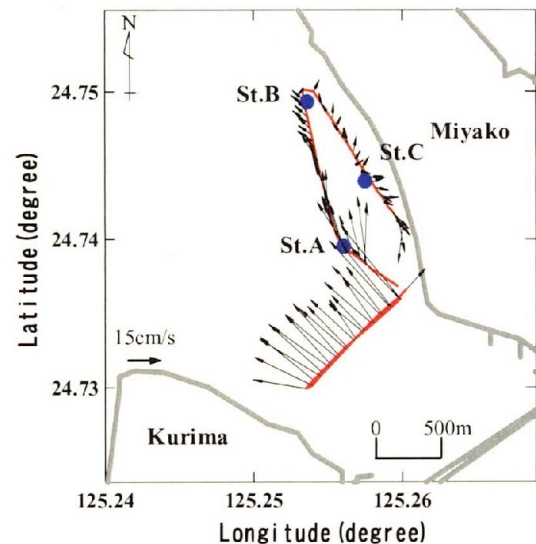


図-5 第1回観測結果（AM 7:00-7:33）

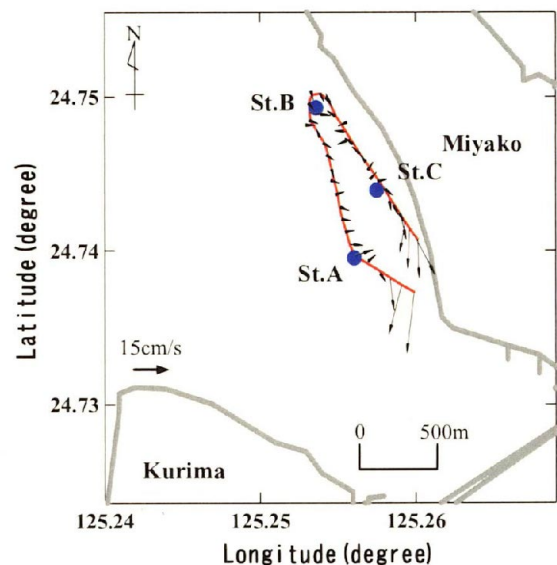


図-6 第2回観測結果（AM 7:34-7:58）

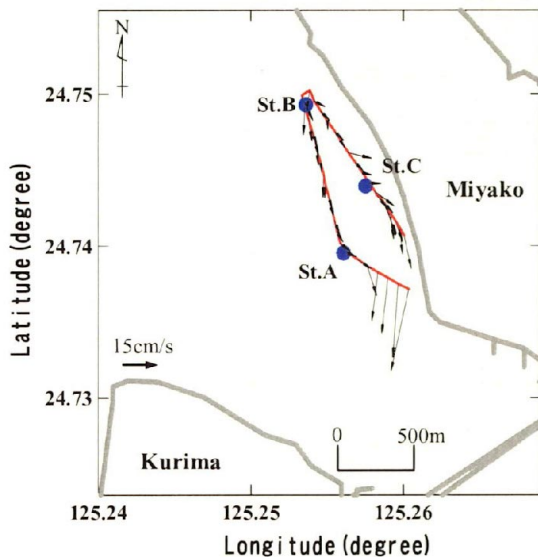


図-7 第3回観測結果 (AM 8:00-8:23)

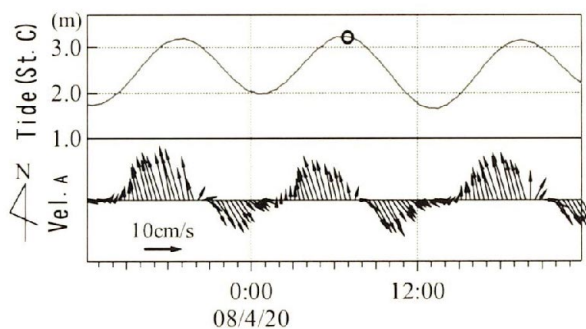


図-8 水位 (C点) と流速ベクトル (A点)
(○印はスタート時を示す)

図-5 ～ 図-7 に示すように、この大会の場合、先頭集団の選手は、スタート地点から折り返し地点まで追い流れを受け、折り返し地点から幾分向かい

流れを受けるものの、ゴール地点付近で再び強い追い流れを受けていたことが分る。

これに対し、中位から最後尾当たりを泳ぐ選手は、スタート時点からしばらく追い流れを受け、折り返し地点までの後半ではほとんど淀んだ場を泳ぎ、折り返し地点を過ぎコース終盤では約500mにも亘り流れに乗る条件になっていたと判断される。

図-8 に、水位変動と観測点Aで得られた流速ベクトルの経時変化を示す。図に示すように、満潮時を過ぎスタート時には流れの向きは北流である。スタート後、40分を過ぎたあたりで流れは南流に転じている。すなわち、当海域の流れは、満潮時過ぎを境に北流から南流に急変するものであることが分る。

これまでの経験的な観測結果は；①満潮後に潮が淀む、②場所によって流れは北流と南流を示し、非常に複雑で予測が困難な流れ場である；というものであった。これらの経験的な判断に対し、観測結果は以下のように説明するものである。①満潮時を幾分過ぎたあたりを境に流れは北流から南流に急変する、②複雑な流れは剥離渦の存在にある。

図-9 に、観測点Aで観測された水位変動、有義波高、水温、平均流速、流向の経時変化を示す。図示のとおり、波高、流れ共に潮位に伴い変動している。5月8日6時以降に見られる波高の増大は、北西からの風の風速が6mに増したことによる風波の発生によるものである。

図-9 に示すとおり、有義波高の大きさは風速のみでなく水位によっても変動するため、観測点Cの水位が $3\text{m} \pm 50\text{cm}$ 以内となるような範囲の条件下で、有義波高と風速の関係を求めた。その結果を図-10 に示す。なお、当海域が宮古島の西海岸に面することから(図-1 参照)、相関を求めるに当たっては、風向が西系の場合のみを対象とした。さらに、デー

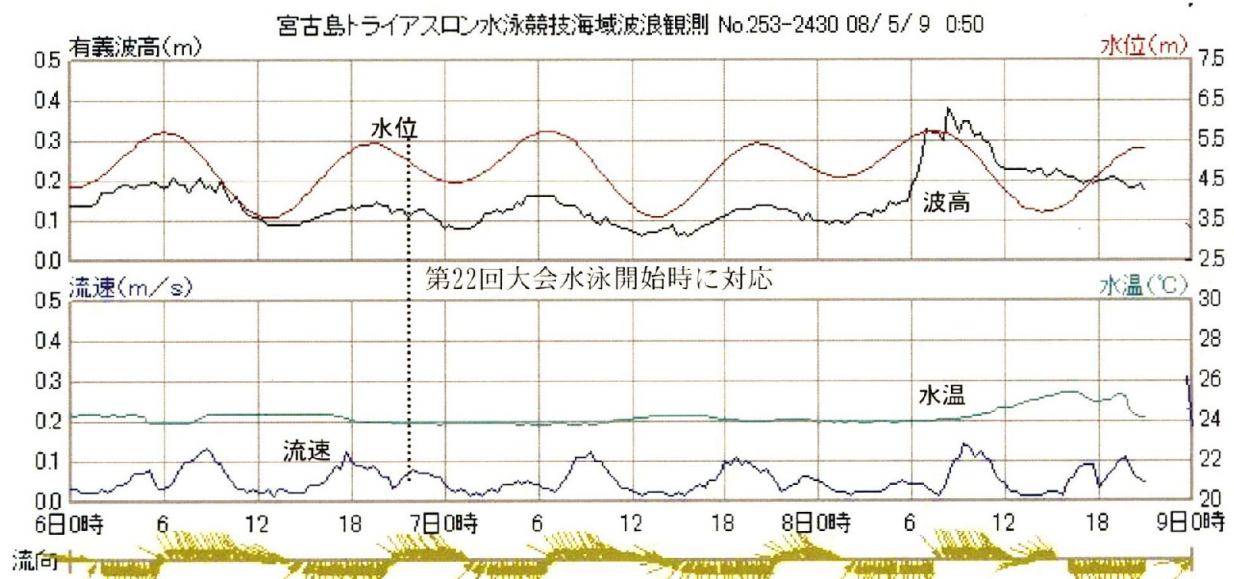


図-9 観測点Aで得られた波高、水位、水温、流速 (実際にインターネット上で公開されたグラフ)

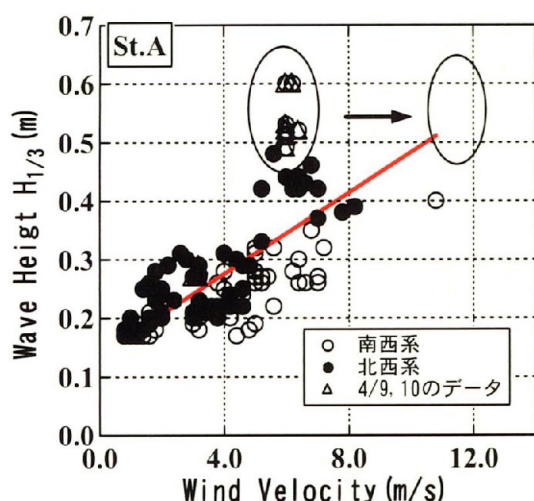


図-10 A点の波高と風速の関係

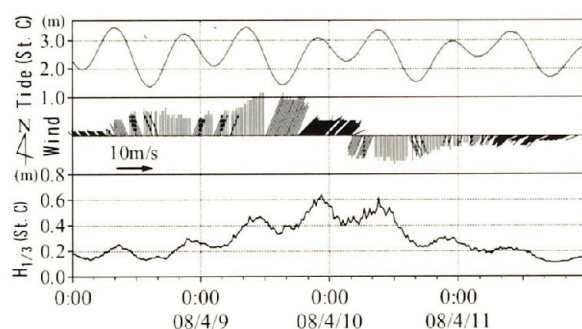


図-11 4月8日から12日かけての水位、風速および波高

データの整理は、北西系と南西系とに分類してある。

図示のとおり、有義波高と風速との関係は、多少のばらつきがあるものの、ほぼ比例関係にある。また、図に示す関係は、南寄りの風（○印）よりも北寄りの風（●印）で若干大きめの波高となることを示している。図-1 や図-2 に示すように、南からの風波は、宮古島と来間島間の狭い隙間から侵入すること、さらにその間に発達するサンゴ礁が顕著であることなどが、南よりの波の侵入を防いでいるものと判断される。

ところで、図中に△印で示すデータは、4月9日から10日にかけて宮古島を前線が通過した際に得られたデータである。これらのデータは、平均的な傾向を示す実線から大きく離れている。

図-11 に4月8日から12日までに得られた水位、風速、A点の有義波高の経時変化を示す。前線の通過に伴い風に急激な変化があるものの（4月10日4時前後）、有義波高の大きさの時間変化にはさほど大きな変化が見られない。観測される波が広い海域で発生する風波の到達波を観測する可能性があるのに対し、風はある瞬間の値が観測される。すなわち、風は急激に変化するものであっても、観測される波の高さの変化には時間遅れが存在する。

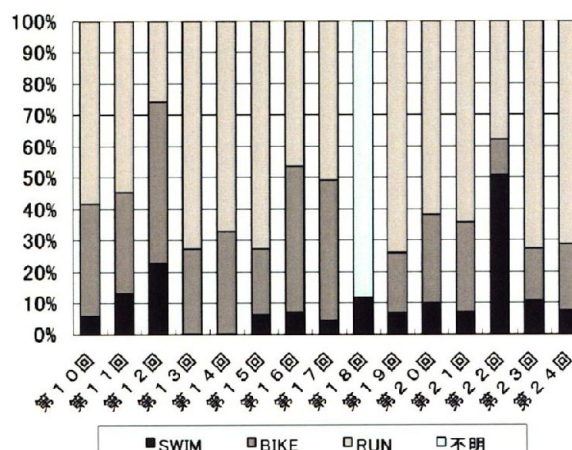
そのことを考慮し、4月9～10日の風の急変時に観

測された波高のデータを3時間ほど前の風と関連づけると、それらのデータは、図-10 に楕円で囲む範囲に移動し、実線で示す平均的な傾向に近づく。この結果から、風が急激に変化する場合の波の予測は、予測すべき時間よりも幾分前に吹いた風との相関をも考慮する必要があると判断される。

4. スイムリタイア数と流れの関係

図-12 に、第10回大会から24回大会までの大会参加選手数に対する競技リタイア数の割合を示す。グラフでは、リタイアの割合を競技種目別に示してある。全体的に見ると、リタイア率は最終種目のマラソンで最も高く、ついで、バイク、スイムの順になっている。中でも、第22回大会の場合、群を抜いて、スイムにおけるリタイアの割合が目立っている。これに対し、現地観測の対象年であった第24回大会では、スイムの占める割合がかなり低くなっているのが注目される。

第22回大会は、2006年4月23日午前7時30分にスイムのスタートを行っている。当時の潮位と風速の経時変化を大会当日前後3日間に亘り図-13 に示す。図中の潮位に○印で示す時間がスイムスタート時である。スタート直前まで吹いていた強い南風が、まさにスタート時に、前線の通過で風ぐと共に風向を逆転させている。



平均出場選手数：10～13回 1200名、14回以降 1400名

図-12 大会出場選手数に対する競技別リタイア数の割合

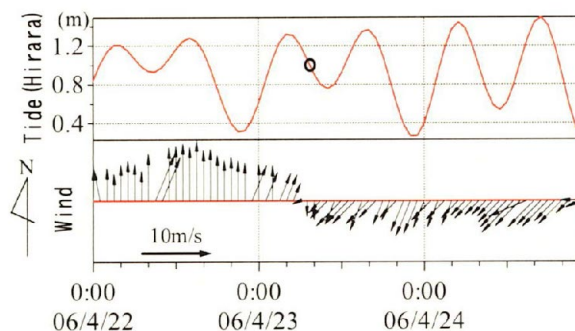


図-13 第22回大会の際の潮位および風速

スイムスタート時の波の高さを図-10 に示す相関から予測すると、観測値の最高値当たりに予測され、約30cmの波と推測される。次に、図-13 に示す潮汐を図-9 に対応させると、ほぼ図-9 に破線バーで示す潮汐時と対応させられる。

図-9 に示す観測水位と流れに対応させると、第22回大会時の潮位に対する流れは南向き最強時に当たる。したがって、水泳選手は、スタート時から折り返し地点までの約1.7km もの距離を強い向かい流れと高波を受けて泳ぐ必要があったと判断される。

以上の結果から、第22回大会でスイムのリタイヤ数が例年になく極端に高くなった要因は、高波とスイム開始の時間設定の問題にあったと推定される。この場合、高波の要因を除いたとしても、スイム開始時を満潮時に設定することの日程調整が望まれるものであったと判断される。

観測当日に行われた第24回大会が波もなく鏡のような海水面を、追い流れを受けながら行われたのに対し、第22回の状況は極めて過酷な条件化でのスイムであったことが推定される。

図-9 は、観測期間中、実際にインターネットで流れや波高のデータを公開した時のデータである。この公開データは、大会公式ホームページにリンクされ、選手や大会関係者に広く公開された。インターネット上で公開されたデータは、第24回大会当日のスイム競技開始の判断時にも実際に利用された。

5. おわりに

宮古島トライアスロン水泳競技海域の波および流れの観測を実施し、これまで経験的な観測に頼ってきた競技開始判定条件に科学的な予測と根拠を与えることが可能となった。

「スイム海域の流れは、非常に複雑で、予測が困難である」とした経験的な予測の困難さは、沿岸部に発生する剥離渦の実態把握で克服されたといえる。また、波や流れの簡易的な予測もここで得られたデータを用いることである程度可能であることが示された。

第18回大会では、スイムで死亡者の発生を伴うという非常に厳しい経験をしている。「世界一美しい海で世界一安全な大会」が大会関係者の希望するところである。

宮古島トライアスロンは、宮古島の経済振興に極めて大きな貢献をもたらしていると言われる。今後とも島の持続的発展に宮古島トライアスロンが果たす役割は大きいと判断される。

大会参加選手は、観測期間中全国に向けて公開されたデータを参考に、スイムに対する作戦を立て、いろいろと想いを馳せたに違いない。さらに、自らが体験した流れの様子や流体抵抗の感覚を観測データと比較することで、スイムの記録を伸ばすための

秘かな作戦も可能と考える。

この観測例から得られる成果から、他の地域で行われるトライアスロン等においても、水泳競技海域全体の流れ特性を把握できるようなシステムの構築が、安全管理や競技の記録管理において大いに求められることを提言できよう。また、こうして、海岸工学が地域の持続的発展に寄与できるという新たな可能性も見出せる。

海岸保全におけるデータの活用法も含め、より詳細な流れの予測手法については、別の機会に紹介する予定である。

謝辞：本観測は、第24回大会スーパーバイザー長浜幸男による「過去のスイム競技の教訓を生かし、安全なスイムのための海象予測に力を貸してほしい」という琉球大学への要請に応える形で開始された。協力依頼に、有限会社アイオーテック社長大谷明、株式会社地建社長砂川博昭、株式会社海岸環境調査研究所社長田紀晃、株式会社SEAが完全ボランティアとしての参加を引き受けて下さった。

観測に当たっては、宮古島トライアスロン大会事務局、沖縄県宮古支庁農林水産整備課、宮古島海洋調査研究会、西原工業楚南聡代表の多大な協力を頂いた。また、実際の観測作業や解析に当たっては、琉球大学大学院宮国敏明、久高隆太郎、Lilian Kolter、環境建設工学科学生小林寛美、海岸環境調査研究所竹内理佳、有限会社アイオーテック洞達道氏の協力を得た。ここに記し、感謝の意を表す。

最後に、持てる力を宮古島トライアスロンの海域予測に役立てたいと誰よりも夢に描き努力されたのは、志半ばで他界した砂川恵輝氏および井戸輝彦氏であった。本調査は、両氏の名を冠し「宮古島恵み輝けプロジェクト」として実施されたことを付記し、両氏に心から感謝の念を捧げる。

参考文献

- 1) 谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇田高明・小俣篤：沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測，海岸工学講演論文集，第35回，pp.207-211，1988.
- 2) 仲座栄三・津嘉山正光・玉城重則・川満康智・吉田繁・田中聡：湾状リーフ海岸における波・サーフピーク，海岸工学論文集，第45巻，pp.281-285，1998.
- 3) Tsukayama S. and Nakaza E.: Wave transformations on coral reef, Coastal Engineering 2000, ASCE, pp.3482-3492, 2000.
- 4) 山本幸次・佐藤慎司・仲座栄三・大谷靖郎・堀口敬洋，海岸工学論文集，第47巻，pp.1101-11050，2000.
- 5) 前田勇司・他10名：干潟連成型および内湾連成型サンゴ礁域における海水流動ならびに赤土輸送特性，海岸工学論文集，第55巻，pp.1101-11050，2008.
- 6) 仲座栄三・津嘉山正光・川満康智・比嘉真弓・大石根光茂・西園公彦：侵食対策としての海岸整備に関する住民意識調査，海岸工学論文集，第47巻，pp.1306-1310，2000.