

ドローンによる海岸の測量 —緑十字機の例—

静岡県立磐田南高等学校
地学部地質班 2年 妹尾 梨子 他2名

1. 動機

地形や地質の研究には、一般に航空写真や衛星写真が利用されているが、これらの撮影には高額な費用と膨大な時間が必要であった。このため、近年になって手軽に空中写真を撮影する方法としてドローンの活用が急速に普及し始めている。



図1 緑十字機の復元図

私たちはこれまで、遠州灘鮫島海岸について研究を行ってきた。昨年度は「鮫島海岸の海岸侵食」に着目し、遠州灘に設置された消波ブロックの効果について研究を行った。しかし、これらの研究に用いた資料は最近数年間のものであり、それ以前の変化を知ることはできない。このため、さらに古い記録を求めて探していると、終戦直後に、鮫島海岸に図1のような、「緑十字機」という、日本の戦後改革に大きく関わる大切な飛行機が不時着したことがわかった。この緑十字機に関する証言や資料は多数残っている。この「緑十字機」に着目すれば、当時の海岸線や沿岸流が復元でき、これを現在と比較すれば、過去70年間の鮫島海岸の変化が明らかになると考へて、研究を始めた。ところで、この研究を進めるためには現在の鮫島海岸の測量が必要であるが、前述したとおり、測量には高額な費用と膨大な時間が必要である。そこで、海岸侵食の経年変化を検証するために、容易に上空から離岸堤周辺の微地形を観察・記録する方法として、ドローンを用いた撮影を行うことにした。さらに、これらの画像をもとに3D画像解析ソフトウェアを用いて測量を行い、海岸微地形の立体構造の復元を行うことを計画した。もし、これが可能になれば、海岸の微地形の経年変化を追跡できる。また、この研究で得た手法は、今後の土木技術開発におけるドローンの活用例として生かすこともできる。さらに、高校生に対する航空科学技術の教育や普及の先駆けとして、教育的な側面からも貢献できる。

2. 方法

不時着当時の沿岸流を推定するために、不時着後に沖へ流された機体の目撃証言や発見回収された部品の位置を特定した。次に、機体が流され始める波の流速を模型実験と物理的な計算から求め、これを現在と比較した。最後に、緑十字機不時着当時の海岸地形を推定するために、図2のように緑十字機目撃者の証言を集め、地形図や航空写真を比較した。地形の水平面についても考へるために、オートレベル・ハンドレベルを用いた簡易水準測量、ドローンによる三次元測量を行った。



図2 目撃証言の聞き取り調査

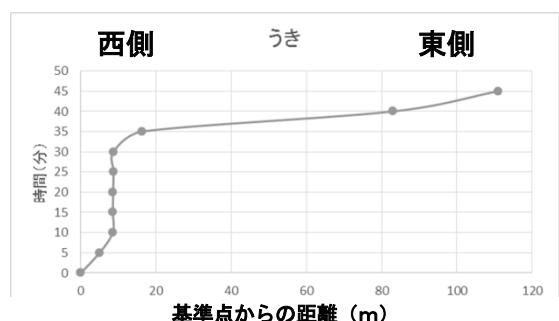


図3 海面に浮遊するうきの距離と時間の関係

3. 結果

(1) 沿岸流

目撃証言から、緑十字機は波打ち際に不時着し、その後機体が東へ流されていったことが分かった。また、2011年には、緑十字機の燃料タンクが鮫島海岸から東に約14kmの沖合200m付近の海底で発

見されたこともわかった。このことから当時の沿岸流は西から東に流动していたことがわかった。これを現在の沿岸流と比較するために、うきやボールを鮫島海岸の海面に投入してその移動方向を調べた。図3はその結果である。図3よりうきやボールが東へ流されたことから現在も当時と同様に沿岸流が西から東に流れていることがわかった。

(2) 波

目撃証言から、緑十字機は、当時の鮫島海岸の波打ち際に不時着したことがわかったが、気象庁が公開している資料によると不時着の40日後に枕崎台風が来襲しており、この台風の波浪により海に流され、その後次第に解体、埋没していったことがわかった。この事実を基に緑十字機が海岸から流され始めるときの水の流速を求めた。「砂の上に乗っかっているだけの機体は波の力で動かされて」の目撃証言から、波の力が砂と機体の摩擦力より大きくなれば機体は動き出すと考え、波の力を「抗力」で表して以下の式を立てて以下のように立式した。なお、式に用いた文字は後にある表1を参考にされたい。

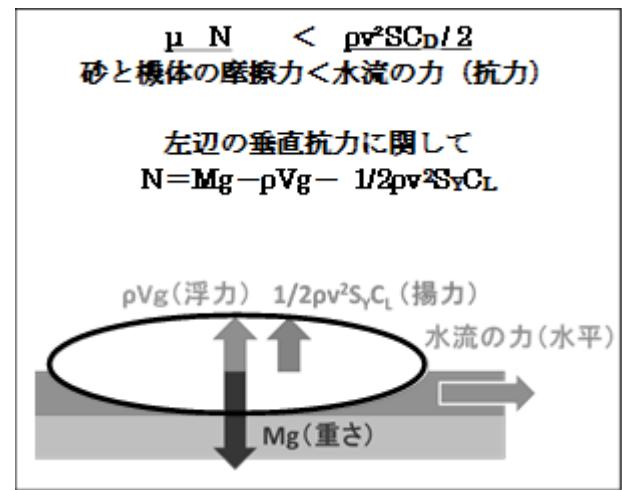


図4 砂と機体の摩擦力と水流の力の関係

$$\mu (Mg - \rho Vg - \rho v^2 S_y C_L / 2) < \rho v^2 S_C_D / 2$$

静止摩擦係数 × (重量 - 浮力 - 揚力) < 抗力

式が示すとおりを図4にまとめた。

次に、この計算に必要な数値は岡部（2017）、岡部（2015）より調べた。しかし、これらに記載のない緑十字機の静止摩擦係数、体積、代表面積は実験により求めた。これらの方針と結果は以下のとおりである。

① 機体と砂の静止摩擦係数

図5のように、鮫島海岸の砂をまんべんなく貼った板を用意し、その上に緑十字機の表面と近似するアルミニウム板を置き、板を傾けてアルミニウム板が滑り出す直前の板と床のなす角θの正接を求めた。この結果、静止摩擦係数は0.82となった。

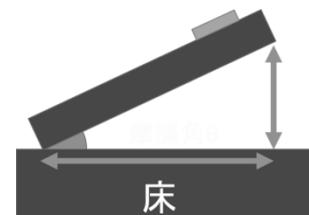


図5 摩擦角を求める実験
(左)と模式図(右)

② 機体の体積

図6のように、1/72スケールの緑十字機のプラモデルを水槽の水に浸け、アルキメデスの原理よりプラモデルを水から抜いたときに減った水の体積からプラモデルの体積を求めた。次に、プラモデルと本物の機体の縮尺からの緑十字機の体積を求めた。この結果



図6 プラモデルから機体の体積を求める実験

③ 機体の代表面積

図7のように、②と同じプラモデルの写真を撮影し、印刷した写真に沿って厚紙を切り取る。1cm

角の厚紙の重さと緑十字機型の厚紙の重さを比較し、写真の機体の代表面積を求めた。写真と実物の緑十字機の面積比より、本物の緑十字機の代表面積を求めた。この結果、揚力と抗力を求める代表面積はそれぞれ 140 m^2 , 27m^2 となった。

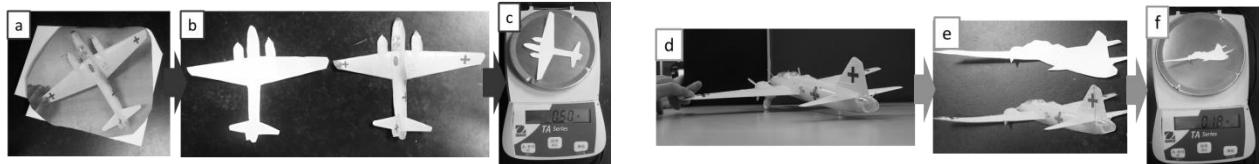


図7 揚力(左), 抗力(右)を求めるための代表面積の測定方法

文献と実験によって求めた計算に必要な数値を表1に示す。次にこれらの数値を用いて計算を行った。数値の有効数字は2桁とした。なお、証言から、機体が海面下に没していた部分は海水が流入していたことがわかつてるので、このことも考慮して計算した。考慮の内容は表1の下に示す。この結果、緑十字機が動き始めるために必要な最低限の流速は 1.5m/s となった。一般に通常時の波の流速は $0.1\sim0.2\text{m/s}$ であるのに対して、台風の時の波の流速は $1.0\sim2.0\text{m/s}$ であることが文献から分かった。従って、この 1.5m/s 以上の波速は台風の接近時の流速に相当する。このことからも、緑十字機は枕崎台風の波浪により流されたという証言内容を裏付ける結果となった。

また、実験で得た値が妥当であるかの検証を行った。実験で得た「静止摩擦係数」、「緑十字機の体積」、「代表面積」の値を変えて流速を計算していく、どの範囲の数値で同じ流速となるかを確認した。計算は表計算ソフトExcelを用いて行った。その結果、静止摩擦係数は 0.2 から 1.0 までの範囲、揚力の代表面積は 130m^2 から 147 m^2 までの範囲、抗力の代表面積は 10 m^2 から 50 m^2 までの範囲、機体内部の水を考慮した時に用いた $M - \rho V$ では 9100kg から 10000kg までの範囲で計算しても、いずれも 1.5m/s という結果になった。これらのことから、今回の実験で得た値は妥当であると考えることが出来る。

(3) 地形

国土地理院公開の1946年と2016年の海岸周辺の航空写真を比較した。この結果、当時の海岸線は現在よりも約 100m 海側にあり、現在よりも当時の方が海浜の幅が広いことがわかつた。次に1915年と2017年の国土地理院発行の25,000分の1地形図と比較した。この結果、現在は消失してしまった砂丘が当時は存在していたことが確認できた。これは目撃者の当時の海

表1 波の速度を求める計算に用いた物理量

物理量	値
M : 緑十字機の重量	9500kg
g : 重力加速度	9.8m/s^2
ρ : 海水の密度	$1.0 \times 10^3\text{kg/m}^3$
C_L : 揚力係数	0.6
C_D : 抗力係数	0.03
μ : 静止摩擦係数	0.82
V : 緑十字機の体積	110m^3
S_Y : 揚力を求める代表面積	140 m^2
S : 抗力を求める代表面積	27m^2

【機体に浸入した海水を考慮した式】

$(M - \rho V)$ について、「機体の中には機体が浸かっている辺りまで海水が入っていた」という複数の証言より

$$\begin{aligned} M &= \text{機体の重量} + \text{海水} (\rho V) \\ \text{よって} \\ (M - \rho V) &= (\text{機体の重量} + \rho V - \rho V) \\ &= \text{機体の重量} \\ &\quad \text{と考えられる} \end{aligned}$$

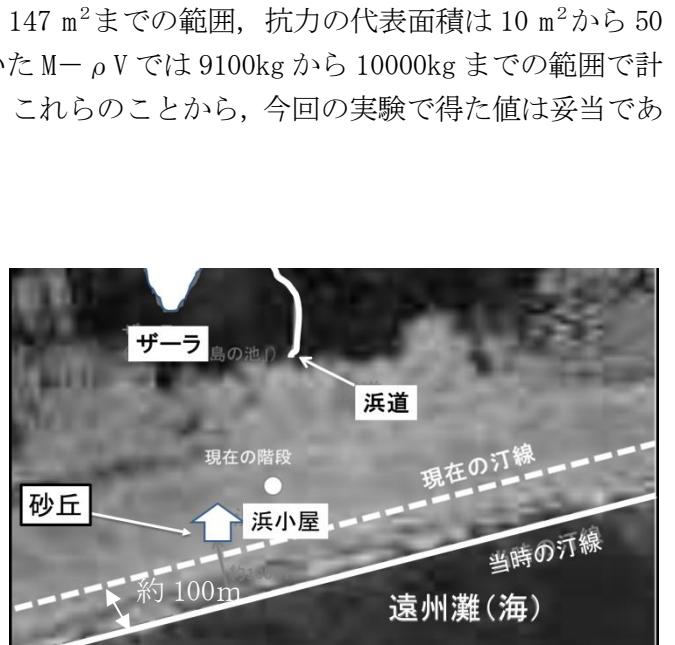


図8 1945年当時の鮫島海岸の復元地図

岸には、「小高い砂丘」があり、その上に「浜小屋」が立っていたという証言と一致する。さらに「切れ所、ザーラ」と呼ばれる潟湖があったこと、「浜道」が現在とは異なる位置であったことなどがわかった。図8は上記の内容を1946年に撮影された航空写真を拡大して加筆した復元地図である。また、オートレベル・ハンドレベルによる簡易水準測量を行い、図9で示した現在の地形断面図を作成した。さらに、この地形断面図に、証言等からわかった当時の地形を加筆して、図10で示した当時の海岸の地形断面図を復元した。

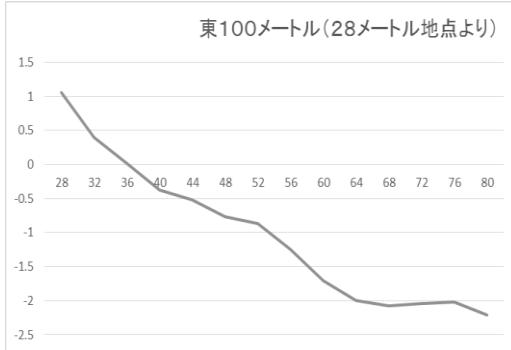


図9 現在の鮫島海岸の地形断面図

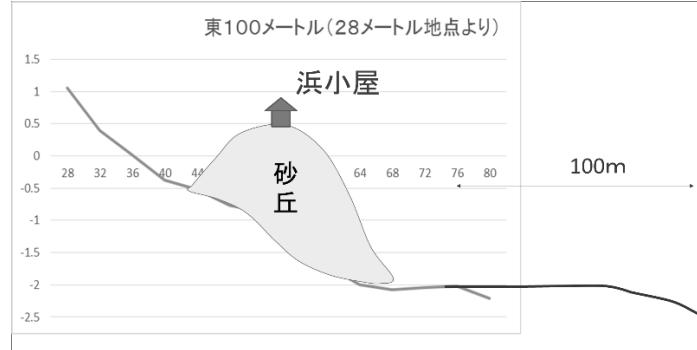


図10 1945年当時の鮫島海岸の地形断面図

(4) ドローンによる三次元測量

最後に、ドローンを用いた測量について詳しく述べる。現在の鮫島海岸の地形を調べる方法として、ドローンによる測量を行った。これまでの研究ではオートレベルとハンドレベルを用いた水準測量を行ってきた。しかし、水準測量をするためには大変な時間と労力がかかっていた。そこで現在の地形を、水準測量以外の方法を考えていたところ、私たちが部活で所持しているドローンを利用すれば、簡単に、しかも三次元で測量ができることがわかった。そこで、ドローンによる測量を行った。ドローンによる測量の手順を以下に示す。

① 鮫島海岸をドローンにより空中から写真撮影

鮫島海岸の地形を測量する目的で、ドローン (DJI Phantom 3 Advanced) による空撮を行った。方法は、より明瞭な画像を得るためにドローンの撮影では HDR モードによる撮影を行い、上空最大 150 m まで上昇して鮫島海岸を撮影した。

② PhotoScan により、被写体をできるだけ多方向から撮影したものを点群で示し、モデル化

PhotoScan は航空写真から高解像度の DEM データおよびテクスチャ付きのポリゴンモデルと GCP を含む 5cm 以内の精度を持ったオルソフォト出力(歪みの無い正投影写真)を生成する事ができる非常に強力なソフトウェアである。3D データを生成す

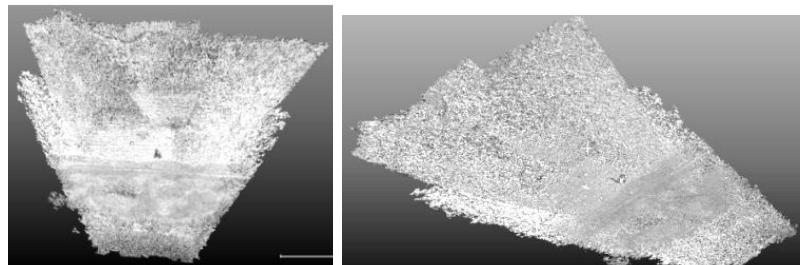


図11 点群としてモデル化された鮫島海岸の地形

る為に特別なスキヤニングシステムは必要ではなく、一般的なデスクトップコンピューターで数千枚の航空写真を処理し、高品質の地形計測データを生成する事が可能である。今回は、ドローンで上空からできるだけ多くの方向を撮影した動画を使用して、PhotoScan に動画を解析させ、点群としてモデル化した。図11は、PhotoScan を用いて点群としてモデル化した鮫島海岸の地形である。

③ CloudCompare による点群データの読み込み、編集

CloudCompare とは PhotoScan でモデル化された点群データを再計算し、メッシュ化することでより精度の高いものを作成するフリーのソフトウェアである。この CloudCompare は PointCloud データ（点群データ）を読み、編集することができる。機能としては MeshLab と同じような印象であるが、操作性（インターフェイス）は MeshLab よりもわかりやすく扱いやすいソフトなので、点群編集を行う導入ソフトとして適している。図 12 は CloudCompare により PhotoScan でモデル化された点群データを再計算し、メッシュ化することでより精度の高い鮫島海岸の地形を再現したものである。これにより視点の移動や回転が可能になり、様々な位置から見た鮫島海岸の地形を再現できるようになった。今回は、鮫島海岸を三次元化することには成功したが、水準測量と同様の地形断面図を作成するまでには至らなかった。しかし、各点の三次元の座標は分かっているので、これらをつなぐことができれば、容易に地形断面図やさらに地形平面図や等高線を作成することは可能である。今後この点群データの点群を海岸の標高ごとに色分けをすることで測量ができると考えている。また、海岸を撮影する方向を増やすことでより精度の高い点群データを作成し、色分けをより正確に行えると考えている。

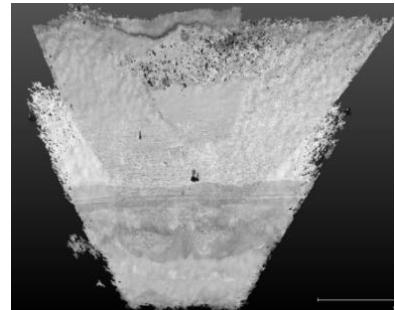


図 12 点群データを再計算して
メッシュ化した鮫島海岸の地形

4. 結論

地形については、当時の海岸には小高い砂丘があり、その上に浜小屋が建っていた。しかし、約 70 年間の海岸侵食により海岸線は約 100m 後退し、砂丘、浜小屋は消失した。沿岸流については、当時も現在も変わらず流れる方向は西から東向きである。波について、緑十字機が流されだした時、不時着の 40 日後に襲来した枕崎台風によって海は荒れており、機体を流し出す 1.5m/s 以上の波があった。

5. 今後の展望

現在も海底に眠っている緑十字機の部品の位置を、今回の研究でわかった波の流速等を利用することによって推定し、これを発見することにより日本の戦後史に貢献したい。また、ドローンによる撮影画像を用いた海岸微地形の解析では、3D 表示まで成功したので、今後は点群データを用いて地形断面図や地形平面図、等高線の作成を行う予定である。

6. 謝辞

この研究をすすめるにあたり、公益財団法人山崎科学教育振興会より研究助成をして頂きました。また、静岡大学未来の科学者養成スクールの支援を受けました。ドローンによる測量については静岡大学工学部教授三浦憲二郎先生、波の計算については静岡大学防災総合センター准教授原田賢治先生に適切なアドバイスをしていただきました。「緑十字機決死の飛行」の著者である岡部英一氏、磐田市鮫島自治会長の三浦晴男氏には、緑十字機に関する情報を教えて頂きました。また鮫島地区の緑十字機を目撃した方々には、当時の貴重な証言を提供して頂きました。改めて感謝を申しあげます。

7. 参考文献

- 川井ほか, 2016, 遠州灘鮫島海岸における消波ブロックの海岸侵食に対する影響, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会講演要旨, 002-P48
- 岡部英一. 2015, 緑十字機の記録. 自費出版, pp357
- 岡部英一, 2017, 緑十字機決死の飛行, 静岡新聞社, pp427
- 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/sokkou-kaiyou/77/vol77s141.pdf>