

ランドサット画像を用いた内湾のクロロフィル濃度の推定

青 木 伸 一*・谷 口 智 紀**

1. ま え が き

東京湾や三河湾など慢性的な富栄養状態にある内湾では、赤潮とそれに関連する青潮(苦潮)という、深刻な水質問題が発生している。これに対して、流入負荷の削減をはじめ、有機汚泥の浚渫、覆砂、干潟造成など、種々の水質改善策が講じられているが、富栄養化した内湾の水質の動態を明らかにし、このような種々の対策の効果を把握するためには、広範囲をカバーする継続的な水質のモニタリングが不可欠である。人工衛星を利用したリモートセンシングは広範囲の同時観測に適しており、海域においても、水温分布、クロロフィル濃度分布、濁度分布等の水質項目が衛星データから推定できることがわかってきている(例えば、杉森, 1982; 土屋, 1990)。内湾域の水質は植物プランクトンに支配されることが多いため、なかでもクロロフィル濃度の推定は重要な要素である。本論文は、富栄養化した内湾の代表例である三河湾において、ランドサットの飛来日にあわせて 1995 年から 6 年間にわたって調査した計 9 回の現地水質データを、ランドサット TM データと比較することにより、三河湾におけるクロロフィル濃度の予測式の構築を試みたものである。

クロロフィル濃度を衛星画像から推定する試みは、すでに外洋では盛んに行われており、CZCS や SeaWiFS などのセンサーを用いた推定法が確立されている(例えば、Gordon ら, 1983)。これらの多くはクロロフィルのもつ光学的反射特性(例えば Bukata ら, 1995)を利用して、波長の異なる 2 バンド間の輝度値の比とクロロフィル濃度を関係づけるものである。しかしながら、これらの推定法は、赤潮が発生するほど高濃度で、かつ海水中に植物プランクトン以外の懸濁物質が多く存在し、しかも都市に隣接して大気エアロゾル濃度の高い内湾海域には適用できないことが指摘されている(例えば、沖・安岡, 1996; 小林ら, 1996)。ただし、近年は環境監視の目的で内湾の水質リモートセンシングが注目され、わが国においても、霞ヶ浦(安岡・宮崎, 1982; 岡見ら, 1982)、宍

道湖(作野ら, 1999)、東京湾(村上ら, 1988; 横浜市環境科学研究所, 1995; 水尾ら, 1998; 宮崎・磯岡, 1999)などにおいてクロロフィル濃度の推定に関する基礎的および応用的な研究が行われている。しかしながら、これらの研究から得られる推定法や精度は対象とする水域によって様々であり、普遍的な推定法は確立されていないのが実状である。著者ら(青木ら, 1997; 青木・大林, 1999)も、1995 年から 1998 年までに三河湾で取得したデータをもとに、ランドサットデータを用いたクロロフィル濃度の推定について検討を行ってきた。この研究成果として、ランドサット TM センサーのバンド 1 と 3 の輝度値の差とクロロフィル濃度に比較的高い相関があることを見出していたが、取得したすべてのデータを統一的に表現できる推定式を見出せていなかった。その後さらに検討を続けていく中で、リモートセンシング技術センターから購入したいくつかの衛星データの中に、データ処理上の誤りがあったことがわかった。本論文では、新たに修正されたデータを用いるとともに 1999 年および 2000 年に取得した水質データを加えて再検討を行っている。また推定式の誘導過程を単純化するとともに、大気(エアロゾル)の影響を簡便に推定式に考慮する方法を提案している。

2. 水質調査および水質特性

水質調査を行った海域は、三河湾東部(渥美湾)で、

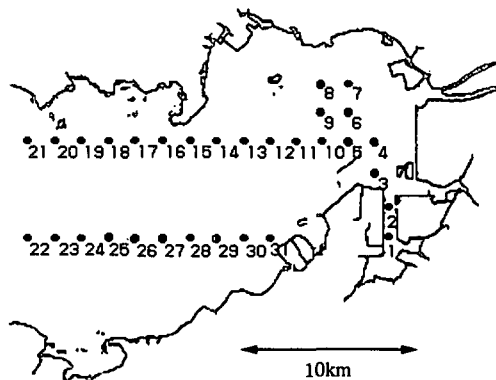


図-1 水質調査地点(三河湾)

* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系
** 工修 日特建設(株)

調査対象地点は図-1 に示す 31 点（東西方向の間隔は約 1.5 km）である。調査日ごとの観測ポイントおよび水質

表-1 水質調査の詳細

No.	調査日	調査地点 No.	調査項目
1	1995.10.16	1-31	Chl-a, 透明度, 水温
2	1996.4.25	1-31	Chl-a, 透明度, 水温
3	1996.10.18	1-31	Chl-a, 透明度, 水温
4	1997.9.3	1-31	Chl-a, 透明度, 水温, SS, DO
5	1997.10.21	1-31	Chl-a, 透明度, 水温, SS, DO
6	1998.8.21	1-31	Chl-a, 透明度, 水温, SS
7	1999.9.9	5, 7, 11, 14, 17, 20, 22, 25, 28, 30	Chl-a, 透明度, 水温, SS, DO
8	2000.9.27	5, 7, 9, 17, 20, 22, 25	Chl-a, 透明度, 水温, SS
9	2000.10.13	5, 7, 9, 11, 14, 17, 20, 22, 25, 28, 30	Chl-a, 透明度, 水温, SS

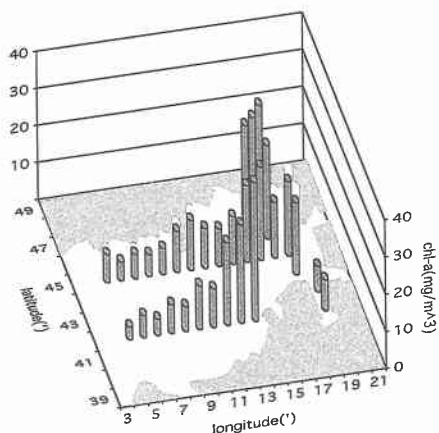


図-2 表層クロロフィル濃度の分布 (97.10.21)

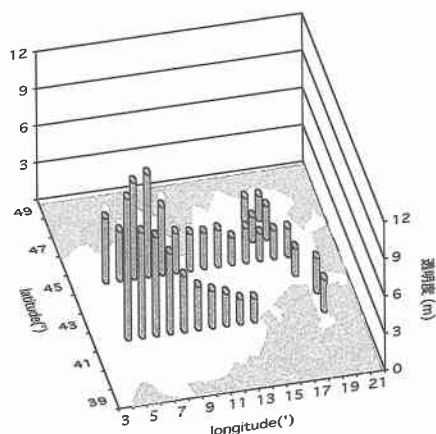


図-3 透明度の分布 (97.10.21)

項目を表-1 に示すが、クロロフィル濃度 (Chl-a) および DO については、表層から水底までの鉛直分布を測定している。1995 年～1998 年の 6 回の調査においては、午前 9 時頃湾奥から測定を開始し、午後 3 時頃には調査を終了していたが、同一地点を午前と午後回数回測定した結果、クロロフィル濃度の時間変化が無視できない程度であることがわかったので、1999 年と 2000 年はランドサットが三河湾上空に飛来する午前 10 時をはさむ 3 時間程度の間に、濃度の差が明確に現れる湾奥と湾口を調査するようにした。調査には高速の調査船が必要であるが、これは国土交通省三河港湾工事事務所に提供していただいた。なお、1995 年～1998 年の調査については、午前 11 時頃までのデータのみを衛星画像との比較に用いた。クロロフィル濃度の測定は、表層については採取した水を実験室に持ち帰り分光光度計により分析したが、鉛直分布については現場用水中蛍光光度計の出力を表層水の分析結果と比較することにより校正して使用した。

水質調査結果より、いずれの調査日においても、湾奥部でクロロフィル濃度が高く、湾口部で濃度が低い傾向が顕著に現れていた。図-2 および図-3 は、表層のクロロフィル濃度と透明度の分布の一例を、三河湾の上に立体的に棒グラフで示したものであるが、クロロフィル濃度と対照的に透明度は湾口部で高く湾奥部で低い傾向を示している。この傾向は、程度の差はあるものの、どの調査日においてもみられた。図-4 は、透明度とクロロフィル濃度の関係をみたものであるが、濃度が高い範囲では、透明度はクロロフィル濃度と高い負の相関があることがわかる。また、SS とクロロフィル濃度の関係については、透明度ほど明確ではないが、正の相関を示す場合が多かった。

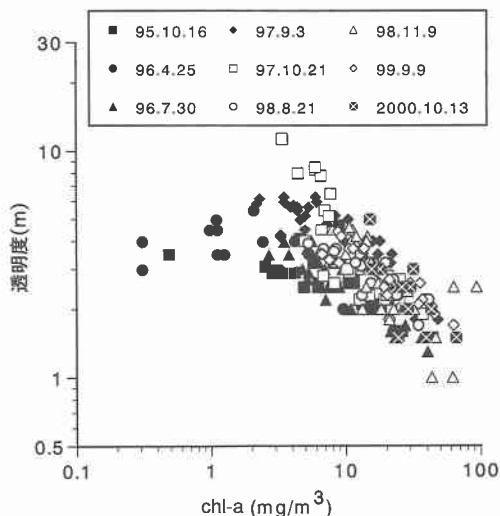


図-4 透明度とクロロフィル濃度の関係

本研究の対象は三河湾東部海域であるが、構築した推定式の三河湾全域および伊勢湾への適用性を調べた。これには、我々の観測と同日(1997.10.27)に愛知県環境部が行った伊勢湾・三河湾全域にわたる水質調査データを利用した。この調査は、伊勢湾内11点、三河湾内9点で、すべて午前中に行われている。

3. 推定アルゴリズムの検討

推定アルゴリズムの構築は、水質データと各バンドの輝度値の間の相関を調べる実証的な方法に基づいて行った。また、大気エアロゾルの影響を考慮するために、地上でのSPMの測定データを用いたが、これについては、愛知県環境部の調査データを提供していただいた。さらに、サンフォトメータによる大気混濁度の測定も補助的に行った。

(1) 衛星データの処理

測定したクロロフィル濃度と、ランドサットTMデータとの比較を行うために、まず市販のソフトウェア(DIMPLEおよびSPYGLASS)を用いて幾何補正およびノイズ処理のためにデータのスムージングを行った。スムージングは、画像データのうち7画素×7画素(1画素30m)で行った。その後、水質調査地点の緯度・経度情報をもとに、対応する画像データ(CCT値)を読み取った。次に、CCT値から変換式(宇宙開発事業団, 1988)を用いて絶対放射輝度値を求め、さらに、この絶対放射輝度値に $1/\sin(\theta)$ (θ は太陽高度角)を乗じることにより、日射量の規準化を行った。以後、この補正值を単に輝度値(radiance)と呼ぶことにする。

(2) TMデータとの比較

ランドサットTMデータは、可視域波長帯に4バンド、赤外域に3バンドを有するセンサーであるが、これまでの研究例をみると、短波長側(青)のバンド1(485nm)と長波長側(赤)のバンド3(660nm)あるいはバンド4(830nm)を組み合わせる推定式を構築するのが

有効であるとの指摘がなされている場合が多い。我々が取得した三河湾の水質データについても、各バンドの輝度値を用いて、単バンドとの相関、2バンド間の演算値との相関などを種々検討した結果、クロロフィル濃度と最も高い相関を示すのは、バンド1と3の輝度値の差であることを見出した。図-5は、縦軸に実測クロロフィル濃度(常用対数値)、横軸にバンド1と3の輝度値の差をとって各観測日ごとに示したものであるが、クロロフィル濃度の増加に伴って輝度値の差がほぼ線形的に減少する負の相関があり、しかも、クロロフィル濃度が極端に小さな1996年4月のデータを除いて、その傾きは概ね一定であることがわかる。図中の直線は、その傾きを、1996年4月を除く各調査日毎の回帰直線の傾きを平均した値に固定し、切片の値のみを変数としてデータにフィットさせたものである。

(3) 大気補正

図-5において、観測日毎の違いとして現れる切片の値の差が何によって決まるかを検討したところ、大気観測項目のうち、SPM濃度との相関が比較的高いことが明らかになった。すなわち、SPM濃度が大きいほど、切片値(同一クロロフィル濃度を想定するとバンド1と3の輝度値の差)が大きく現れることがわかった。図-6は、愛知県環境部の陸上大気測定局のうち、三河湾周辺に位置する14地点のSPM濃度の平均値と図-5から求まる切片値との関係を示したものである。ばらつきはあるものの、SPM濃度から切片値をある程度予測することが可能であることがわかる。

したがって、SPM濃度を補助的に用いればクロロフィル濃度を推定することが可能であるが、リモートセンシングとしては、なるべく補助的な観測値を用いない方が望ましい。図-7は、三河湾上全域での輝度値(バンド1および3)の平均値とSPM濃度との相関をみたものである。これより、両バンドとも輝度値の平均値はSPM濃度と線形な関係にあり、例えばバンド1の湾内

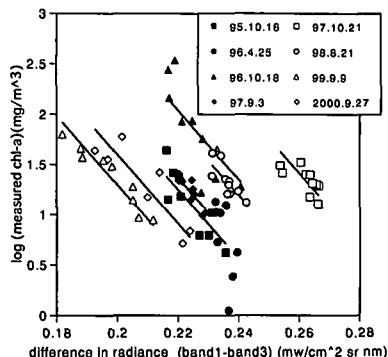


図-5 クロロフィル濃度と輝度値の差 (band1-band3) の関係

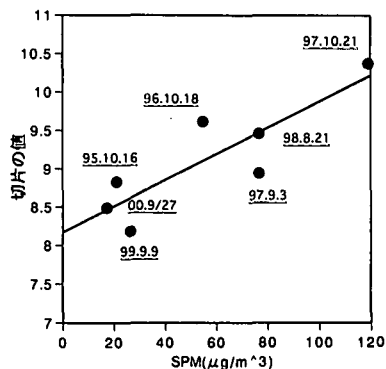


図-6 切片の値とSPM濃度の関係

平均輝度値から SPM 濃度を予測することができることがわかった。さらに、SPM 濃度が増大するとバンド 1 と 3 の輝度値の差が大きくなっており、図-5 でみられた傾向と一致している。一方、陸上で行ったサンフォトメーターによる大気混濁度の測定により、大気混濁度と SPM 濃度には高い相関があることがわかった。すなわち、図-5 の切片値の違いは大気中のエアロゾル量の違いによるものと結論づけられた。

(4) 推定アルゴリズム

以上の結果をもとに、SPM 等の補助的な観測なしに、衛星データのみからクロロフィル濃度を推定できる経験式を構築することができる。すなわち、バンド 1 および 3 の輝度値をそれぞれ L_1 および L_3 と表すと、クロロフィル濃度の予測式は次式で与えられる。

$$\log_{10}(Chl-a) = 34.4(L_3 - L_1) + 10.1\bar{L}_1 + 5.0 \quad \cdots (1)$$

ここに、 $\bar{L}_1$ はバンド 1 の輝度値の湾内での平均値を表している。この平均値を計算する領域については任意性があるが、平均的な大気特性を補正するのが目的であるので、ある程度広い領域にわたる平均値を求める方が望ましいと考えられる。ただし、三河湾について、湾奥部と湾口部に分けて検討を行ってみたが、予測精度に大き

な違いはみられなかった。

図-8 は、実測値を横軸に、推定値を縦軸にとって推定式の適用性をみたものである。図中の破線は ± 0.7 の誤差範囲を示している。1996 年 4 月の、クロロフィル濃度が非常に小さいデータを除けば、ある程度の誤差はあるものの、(1) 式でクロロフィル濃度の推定が可能であることがわかる。ただし、推定値は対数値として与えられるため、クロロフィル濃度は ± 0.7 に対して 0.2~5 倍の範囲で変動することになり、絶対値の予測精度としては決して高いとは言えない。しかしながら、クロロフィル濃度の分布状況を大まかにとらえるには十分であると考えられる。図中には、前述した愛知県環境部により行われた伊勢湾・三河湾全域での観測結果についても、推定値との比較として示してある。これより、今回提案した推定式は、伊勢湾全域にも適用できる可能性を示唆していることがわかる。また、図-4 より、クロロフィル濃度が高い場合には透明度の推定も可能であることがわかる。ただし、クロロフィル濃度は水深方向にかなり大きく変動している場合がみられ、衛星データで推定できる表層付近の濃度だけでは水質を評価できないことにも注意しておく必要がある。

4. 三河湾のクロロフィル濃度分布特性

構築した推定式を用いて、伊勢湾・三河湾内の推定クロロフィル濃度分布図を作成した。図-9 は比較的クロロフィル濃度が高い日の分布図であるが、三河湾では湾奥部に極端に高濃度となっており、局所的に高濃度化した赤潮状態であることがわかる。また、伊勢湾内でも比較的是っきりした濃度分布が現れている。図-10 は、夏場ではあるが表層のクロロフィル濃度が低い場合の分布図である。この日のクロロフィル濃度の鉛直分布は、表層が最も低く、-4 m から -6 m 付近に高濃度水塊 (60-80 mg/m³) がみられた。この日も、三河湾は伊勢湾に比べて全体的に濃度が高く、特に湾奥部は高濃度となっていることがわかる。

5. あとがき

本研究では、三河湾を対象に、数年間にわたる水質同期調査結果をもとに、ランドサット TM データから表層のクロロフィル濃度を予測する推定式を提案した。推定精度およびデータの取得頻度からみて、本手法をもって水質調査に代えることはできないが、表層の濃度分布を大まかにとらえることは可能である。他の水域で開発された推定法との相違点の検討、他の水質項目の影響やクロロフィル濃度の鉛直分布などを考慮して推定精度を向上させることなど、実用に供するにはまだ解決すべき点を残しているが、クロロフィル濃度の分布状況を解析す

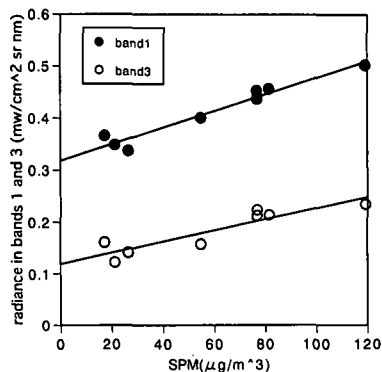


図-7 湾内での輝度値の平均値と平均 SPM 濃度の関係

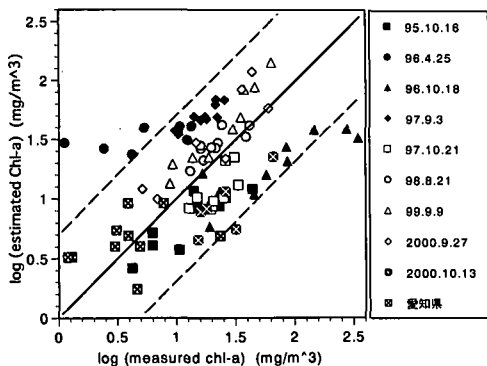


図-8 クロロフィル濃度の推定値と実測値の比較

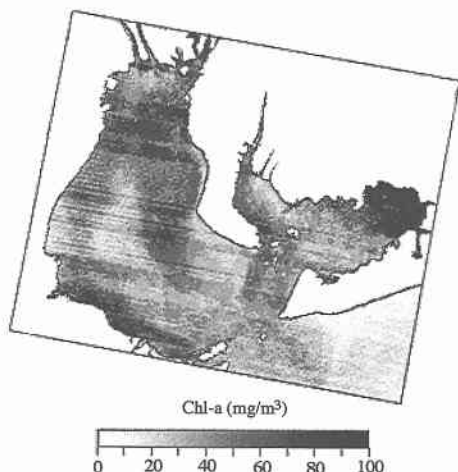


図-9 伊勢湾・三河湾における推定クロロフィル濃度分布 (99.9.9)

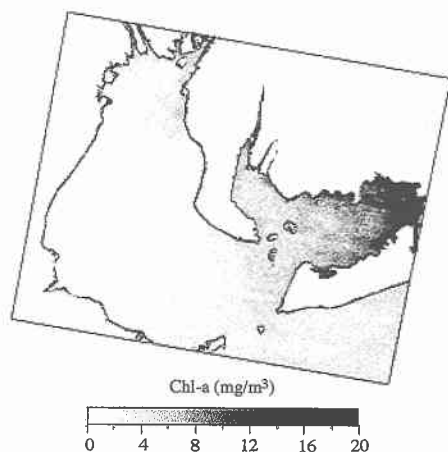


図-10 伊勢湾・三河湾における推定クロロフィル濃度分布 (98.8.21)

ることにより、広範囲での水質の動態を把握することが可能になるものと考え。また、本手法を用いて、伊勢湾全域のクロロフィル濃度分布を調べると、三河湾湾奥は常に高濃度域となっており、湾央部での濃度勾配が特に大きいことがわかった。

最後に、本研究を行うに当たり、長年にわたって辛抱強く水質調査にご協力いただいた国土交通省三河湾港湾工事事務所の方々に深甚の謝意を表します。また、貴重な資料や計測機器をご提供いただいた、愛知県水産試験場および愛知県環境部の方々、研究を進める上でご助言・ご協力いただいた、東信行先生（弘前大）、小林拓先生（山梨大）、太田幸雄先生（北大）、水尾寛己様（横浜

市環境科学研究所）、現地調査およびデータ整理にご尽力いただいた大林栄正君をはじめとする当時豊橋技科大海岸工学研究室の学生諸君に改めて謝意を表します。なお、本研究に使用したランドサットデータは、米国政府所有のデータを宇宙開発事業団から（財）リモートセンシング技術センターを通して研究目的配布していただいたものであります。また、本研究は文部省科学研究費（基盤研究C, No. 10650503, 代表者：青木伸一）の援助を受けました。ここに併せて謝意を表します。

参考文献

- 青木伸一・東 信行・大林栄正・戸田敏行・中塚和嘉 (1997): ランドサット画像を用いた内湾のクロロフィル分布予測について, 海洋開発論文集, vol. 13, pp. 237-241.
- 青木伸一・大林栄正 (1999): ランドサットデータを用いた内湾のクロロフィル濃度分布の予測法とその適用性, 第7回地球環境シンポジウム講演論文集, pp. 77-83.
- 宇宙開発事業団 (1988): 地球観測データ利用ハンドブック, ランドサット編, リモート・センシング技術センター.
- 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1982): 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 2, No. 1, pp. 21-31.
- 沖 一雄・安岡善文 (1996): 高濃度水域における近赤外波長帯を含む二波長によるクロロフィルa推定モデルの作成, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 16, No. 4, pp. 1-9.
- 小林 拓・太田幸雄・村尾直人・橘 治国・山形 定 (1996): リモートセンシングによる赤潮プランクトン濃度推定のための基礎的研究, 環境工学研究論文集, 第33巻, pp. 85-93.
- 作野裕司・松永恒雄・中山大介・六川修一・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1999): SPOT/HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィルa濃度分布の推定, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 19, No. 2, pp. 20-36.
- 杉森康宏 (1982): 海洋のリモートセンシング, 共立出版, 275 p.
- 土屋 清 (1990): リモートセンシング概論, 朝倉書店, 328 p.
- 水尾寛己・岡 敬一・小倉久子・二宮勝幸・大道章一・飯村 晃・安藤晴夫・三嶋義人・安岡善文 (1998): 人工衛星データによる水質モニタリング—関連自治体による環東京湾プロジェクトの紹介—, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 18, No. 3, pp. 62-66.
- 宮崎早苗・灘岡和夫 (1999): 光学理論に基づく海域内複数物質濃度の逆推定法, 日本リモートセンシング学会誌, vol. 19, No. 2, pp. 50-63.
- 村上和男・菅沼典典・佐藤英治・宮原祐二 (1988): リモートセンシング手法の水質調査への適用, 港湾技術研究所資料, No. 626, 運輸省港湾技術研究所.
- 安岡善文・宮崎忠国 (1982): リモートセンシングによる湖水域の水質分布計測—回帰分析を用いた大気補正と水質推定—, 日本リモートセンシング学会誌, pp. 51-62.
- 横浜市環境科学研究所 (1995): 東京湾の富栄養化に関する調査報告書, 環境研資料, No. 117, pp. 101-127.
- Bukata, R. P. et al. (1995): Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters, CRC Press, p 362 p.
- Gordon, H. R. et al. (1983): Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates, Applied Optics, 22(1), pp. 20-36.