

동해 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도의 스펙클 오차 특성

채화정¹ · 박경애^{1,2}

¹서울대학교 과학교육과, 151-742, chae310@snu.ac.kr

²서울대학교 지구과학교육과/해양연구소, kapark@snu.ac.kr

Characteristics of Speckle Errors of SeaWiFS Chlorophyll-*a* in the East Sea

Hwa-Jeong Chae¹ and Kyung-Ae Park^{1,2}

요약: 1997년 9월부터 2007년 12월까지 인공위성 해색센서 SeaWiFS의 클로로필-*a* 농도가 가지는 오차 특성을 분석하고 그 원인을 조사하였다. 동해의 클로로필-*a* 월별 분포에는 비정상적으로 높은 농도값이 스펙클(speckle) 형태로 출현하였다. 스펙클들은 시공간적으로 연계성이 없이 산발적으로 분포하였으며 주변 평균에 대해 10 mg/m³ 이상의 편차를 보였다. 스펙클들은 주로 겨울철에 나타났으며 구름 분포와 관련이 있었다. 10년간 월별 운량 분석 결과 겨울철 운량은 다른 계절과 달리 남동해상에 집중적으로 분포하였으며, 운량이 클수록 스펙클의 농도가 크게 나타나는 통계적 특성을 보였다. 특히 스펙클이 나타나는 화소의 각 밴드별 정규화된 수출광량을 분석해 본 결과 짧은 파장 영역(443, 490, 510 nm)은 전체적으로 수출광량이 낮게 나타난 반면 555 nm 밴드는 정상 화소와 유사한 분포를 보였다. 짧은 파장 영역의 낮은 수출광량은 555 nm 밴드에 대한 비율로 구해지는 클로로필-*a* 농도값을 비정상적으로 증폭시켰으며 SeaWiFS 자료에 스펙클을 유발하였다. 본 연구는 동해의 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도자료가

지니는 스펙클 오차에 대한 문제점을 제기하고 오차 특성 분석을 통해 좀 더 신뢰도 있는 자료를 해양 응용 연구에 사용해야 함을 제시한다.

1. 서론

해색 원격탐사는 광범위한 공간 범위에서 일어나는 해색 변화를 동시에 파악할 수 있어서, 많은 연구자들에게 전 지구 규모나 지역 규모에 대한 해양 표층의 식물 플랑크톤 증식을 연구하는데 중요하다 (Banse and English, 1994). 1997년에 발사된 해색 센서 SeaWiFS는 National Aeronautics and Space Administration /Ocean Biology Processing Group (NASA/OBPG)를 통하여 사용자들에게 배포되고 있으며 이들 자료 중, 월별 합성 또는 주간 합성된 Level-3 자료가 널리 활용되고 있다.

식물성 플랑크톤은 주로 봄·가을에 번성하고 특히 육지의 영향을 받는 연안 주변에서 큰 농도로 나타난다. 그러나 SeaWiFS에서 관측된 클로로필-*a* 농도 Level-3 자료에서는 농도가 낮게 나타나

는 시기의 외해에서 비정상적으로 큰 값이 스펙클(speckle)로 나타난다. 이런 스펙클들은 매우 큰 값을 가져 클로로필-*a* 농도자료에 오차를 유발한다. 그럼에도 많은 연구자들이 클로로필-*a* 농도자료에 대한 오차 특성을 고려하지 않고 NASA/OBPG에서 처리되고 배포된 자료를 그대로 사용하고 있다. 따라서 본 연구는 해양 표층의 식물 플랑크톤 증식과 다양한 해양 현상을 이해하고 연구하는데 널리 활용되고 있는 SeaWiFS 해상 센서의 클로로필-*a* 농도 Level-3 합성장이 지니고 있는 오차 특성을 분석하고 그 원인을 조사하는데 목적이 있다.

2. 연구 자료

본 연구에서는 위도 34-52°N, 경도 127-143°E 범위의 동해 지역을 연구해역으로 설정하였으며, 클로로필-*a* 농도 특성 및 오차 특성을 분석하기 위해 1997년 9월에서 2007년 12월까지 약 10년간 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도 Level-3 월별 자료를 사용하였다. 오차 분석을 위하여 Level-2 자료도 활용하였다.

동해의 운량(cloudiness) 분석을 위해 National Oceanic and Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory(NOAA/ESRL)에서 제공하는 1°×1° 공간 해상도의 International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set(ICOADS) 자료 중 1998년 1월부터 2007년 5월까지 전체 약 10년간 월평균 운량 자료를 이용하였다. 연구 기간 동안의 고해상도 구름 영상 분석을 위하여 서울대학교 해양연구소에서 수신하고 처리된 NOAA-17 Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR) 자료를 활용하였다.

3. 연구 결과

3.1 스펙클의 분포 특성

Fig. 1은 SeaWiFS 센서에서 관측된 클로로필-*a* 농도 Level-3 월별 자료에서 스펙클이 나타나는 예시를 확대하여 나타낸 것이다. 붉은 점들이 비정상적으로 높은 농도를 가진 스펙클을 나타낸다. 이러한 비정상적으로 높은 클로로필-*a* 농도를 정량적으로 이해하기 위해 2002년 12월 Level-3 자료에서 스펙클이 나타나는 두 장소를 선택하고 주변 평균에 대한 스펙클 값의 비율과 편차를 구하여 Table 1에 나타냈다. 두 지역 모두 주변 평균값은 1 mg/m³ 이하였으나 스펙클 값은 주변 평균보다 약 25배의 값이 나타났으며 편차는 약 13 mg/m³ 이상을 보였다.

비정상적으로 높은 클로로필-*a* 농도의

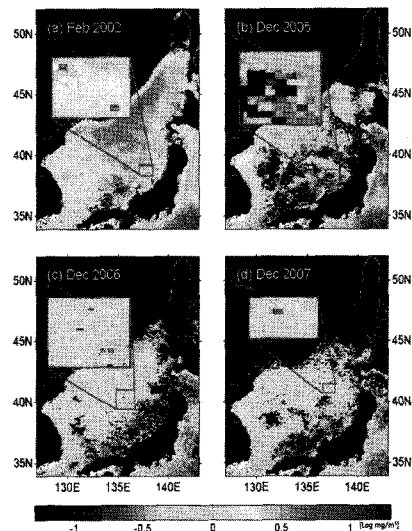


Fig. 1. Examples of anomalously high chlorophyll-*a* concentration (speckle) in (a) February 2002, (b) December 2005, (c) December 2006, and (d) December 2007.

Table 1. The ratio and deviation of the speckles from the mean values.

Site	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Ratio (Speckle/Normal)	Deviation (mg/m ³)
A	139.79	44.79	25.89	13.60
B	131.88	37.79	26.18	14.39

특성을 공간적으로 분석해 보기 위해 연구 지역의 각 화소에서 최대 농도가 나타날 때의 값을 Fig. 2a에 도시하였다. 최대 농도는 주로 연안에서 10-60 mg/m³까지 크게 나타나고 외해에서는 전체적으로 3 mg/m³ 이하의 작은 값이 주를 이루고 분포하였다. 연안과 멀리 떨어진 외해에서는 최대 농도값이 전반적으로 낮게 나타나 주변 화소에 비해 매우 큰 농도가 주변과 연계성 없이 스펙클로 나타났다. Fig. 2의 확대한 그림에서 붉은 점이 매우 큰 농도로 나타나는 스펙클들이다. 각 화소마다 10년 자료 중에서 클로로필-*a* 농도가 10 mg/m³ 이상 나타나는 확률을 분석하여 스펙클이 일어나는 현상을 시간적으로 분석해 보았다(Fig. 2b). Fig. 2a와 비교해 보면 최대 농도가 비정상적으로 큰 화소에서는 높은 농도가 나타나는 확률이 1% 이내로 낮게 나타났다. 즉, 각 화소에서 비정상적으로 큰 농도는 아주 드물게 나타나며 한번 나타날 때 매우 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 2002년 12월 한 달간의 Level-2 일별 자료에서 클로로필-*a* 농도가 10 mg/m³ 이상이 되는 값들의 확률을 분석해 본 결과 위에서 나타난 것처럼 1% 내외로 나타났다. 이는 Level-2 일별 자료가 시공간 합성된 Level-3 자료에서 나타나는 스펙클은 여러 번 클로로필이 번성하여 합성된 자료가 아니라 어느 한 시점에서 비정상적으로 높은 값을 가진 자료 때문에 나타난 현상이라고 해석할 수 있다. 물론 바다에서 만들어지는

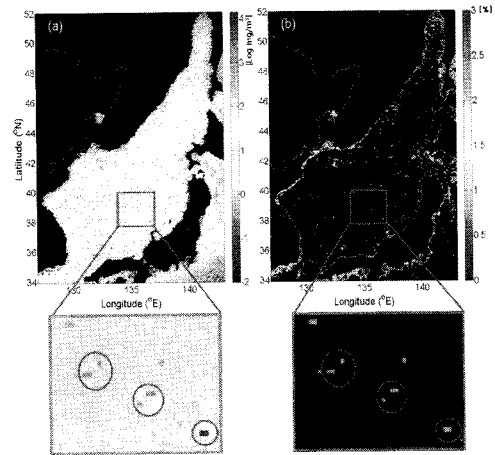


Fig. 2. (a) Maximum concentration of chlorophyll-*a* and (b) probability map of high chlorophyll-*a* concentration (>10 mg/m³) at each pixel for a decade (September 1997-December 2007).

소용돌이(eddy)에 의해서나 또는 생물학적인 조건이 충족되어 국지적으로 클로로필-*a* 번성이 일어날 수는 있지만, 비정상적으로 높은 클로로필 농도 값이 시공간적으로 연계성 없이 나타나는 현상은 실제 자연현상에서 일어나는 값이라고 보기 어렵다.

3.2 스펙클 출현 시기

동해의 10년간 클로로필-*a* 농도 분석 결과 클로로필은 3-5월까지 봄철에 한 번 크게 번성하고, 가을철 번성은 봄철 보다는 작게 번성하나 9월부터 증가하기 시작하여 11월까지 번성하다가 12월이 되면서 줄어든다. 연구 지역의 공간적인 번성 시기를 보기 위해 각 화소에서 최대 농도가 나타날 때의 시기를 Fig. 3에 도시하였다. 전반적인 바탕의 파란색은 대부분 최대 농도 값이 3-5월에 분포함을 의미한다. 봄철 번성이 동해 전체에 주를 이루고 가을 번성은 봄철 번성보다 대부분 값이 작기

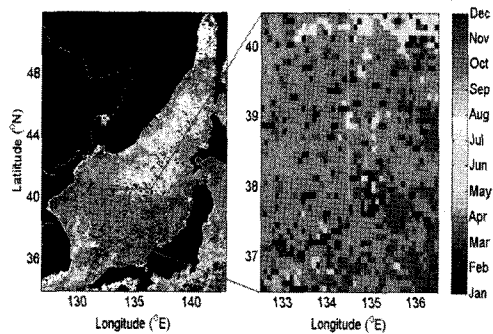


Fig. 3. Occurrence time of maximum chlorophyll-*a* concentration at each pixel for a decade (September 1997-December 2007).

때문에 그림에서 가을 번성은 잘 나타나지 않았지만 특징적으로 동해 남동쪽 넓은 지역에서 스펙클 형태로 11, 12, 1월에 최대 농도 값이 나타났다.

월별 최대 농도 값들의 도수분포표(Fig. 4)를 통해 각 월에 나타나는 최대 농도 값을 정량적으로 분석하였다. Fig. 4a는 최대 농도 값 중 10 mg/m³ 이상 되는 값을 모두 나타낸 것이다. 최대 농도 값은 3월에 가장 많이 분포하고 있어 클로로필-*a*의 봄철 번성이 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 15 mg/m³ 이상이 되는 최대 농도 값을 분석한 결과 Fig. 4b에서 보여주는 것처럼 오히려 봄철의 비율은 줄어들고 겨울철 비율이 증가하였다. Fig. 4d의 25 mg/m³ 이상 값을 보면 이런 현상이 더 심해져서 11, 12, 1월이 차지하는 비율이 더 크게 증가하였다. 즉, 12월의 최대 농도 값은 주변과 연속적이지 않게 스펙클로 나타나며 봄철 최대 농도 값은 10 mg/m³ 이하의 값이 대부분을 차지하는데 반하여 12월에 나타나는 최대 농도 값은 30-60 mg/m³까지 훨씬 큰 값을 가지고 있다. 이렇게 큰 값들은 겨울철 클로로필-*a* 농도 자료에서 스펙클로 나타났다.

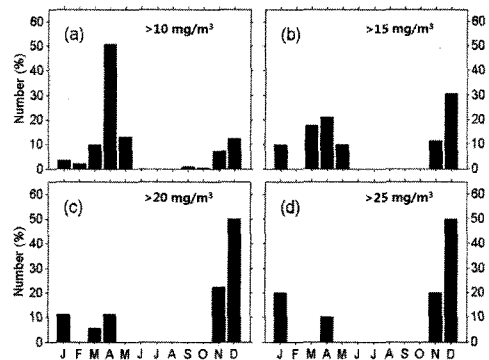


Fig. 4. Histograms of monthly maximum values for each pixel according to range of greater than (a) 10 mg/m³, (b) 15 mg/m³, (c) 20 mg/m³, and (d) 25 mg/m³.

3.3 구름에 의한 영향

동해의 SeaWiFS 클로로필-*a* 농도 Level-3 월별 자료에서는 주로 겨울철에 스펙클이 많이 나타난다. 겨울철은 전반적으로 클로로필 농도가 낮은 시기인데 높은 클로로필-*a* 농도가 스펙클로 나타나는 것은 실제적인 자연현상이 아니다. 이는 측정과정이나 처리과정의 오류라고 추론할 수 있다. 본 논문에서는 여러 원인이운데 대기 보정의 오류보다는 대기 보정 전 단계의 구름탐지과정의 실패로 추정하고 연구지역인 동해의 운량을 분석하였다. 대체적으로 6, 7월과 12, 1월에 운량이 크게 나타난다. 6, 7월에는 동해 전체에 6 이상의 구름이 넓고 균일하게 분포하는 반면 12, 1월의 겨울철에는 연해주 연안 부근의 운량은 3 이하로 적는데 반하여 아마도 분지 부근을 중심으로 동해 남동쪽에는 운량이 6 이상으로 동해 북서쪽과 분리되어 나타난다.

운량 뿐 아니라 위성자료로 본 구름의 종류도 매우 다르게 나타난다(Fig. 5). 여름에 동해 전체에 나타나는 구름은 주로 많은 강수를 동반하는 적운형 구름이고

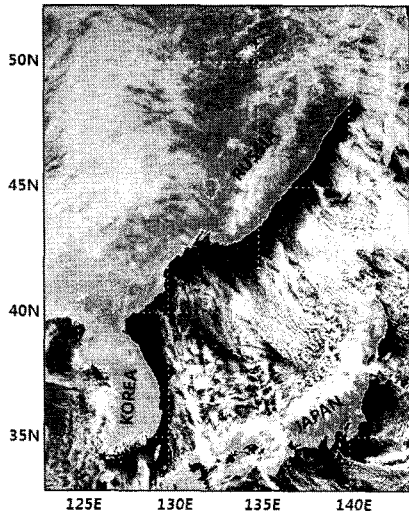


Fig. 5. Typical cloud distribution over the East Sea in winter from SNU/RIO.

간헐적으로 태풍이 지나가기도 하면서 운량이 커지게 되어 주로 두꺼운 구름이기 때문에 여름철 클로로필-*a* 농도의 일별 자료를 보면 자료의 양이 현저하게 적다. 겨울에 나타나는 구름의 형태는 여름철의 것과 매우 다르다. 겨울철 동해의 수온은 남북차이가 최대 15°C 정도로 매우 크다. 차갑고 강한 시베리아 바람은 러시아 연해주 남단의 블라디보스토크 부근의 해수면온도를 낮게 떨어뜨려 북서쪽의 해수면온도가 매우 낮는데 반하여 남동쪽 해수면온도는 대마난류의 유입으로 상대적으로 높아 큰 해수면온도 경사가 형성된다 (Park et al., 2004). 이때 찬 북서풍이 동해를 지나면서 동해 남동쪽의 따뜻한 수온과 만나면서 구름을 형성하는데 이때 생기는 구름(Fig. 5)은 강한 바람방향에 따라 긴 구름이 열을 지어 분포하는 특징을 지니고 있으며 겨울철에 동해 남동쪽에서 자주 발생한다(Dorman et al., 2004). 또한 구름줄에서 형성되는 구름은 작은 적운형태의 구름이 산재되어있는 특성을

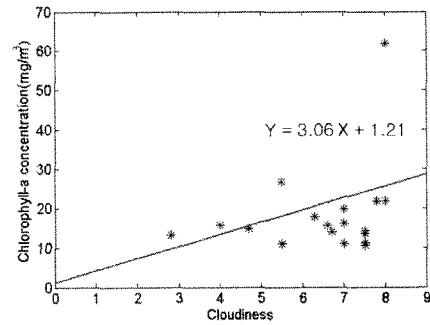


Fig. 6. Distribution of anomalous chlorophyll-*a* concentration as a function of cloudiness.

보인다. 얇은 구름이나 산재되어 있는 구름, 특히 화소 크기보다 작은 구름의 경우 구름탐지가 잘 되지 않는다(Darzi, 1992). 구름탐지가 제대로 이루어 지지 않으면 화소는 구름에 의해 오염되게 되고 결과적으로 비정상적인 관측값으로 클로로필-*a* 농도를 산출하게 되므로 이때 오차를 유발할 수 있다고 판단된다.

겨울철 클로로필-*a* 농도자료에서 스펙클이 나타나는 화소를 찾고 스펙클이 나타날 때의 운량과의 관계를 분석한 결과 Fig. 6에서처럼 운량이 클수록 스펙클의 수가 증가하는 경향성이 있었다. 운량과 클로로필-*a* 농도의 단순 회귀 분석 결과 운량이 1단계 늘어남에 따라 스펙클로 나타나는 클로로필 농도가 3.06 mg/m³ 증가하는 통계적 특성을 보였다. 이는 겨울철 동해에 상주하는 특징적인 구름이 오차 유발 가능성을 크게 한다는 것을 의미한다. Fig. 3을 보면 연해주 부근의 북서쪽 해안에는 겨울철에 나타나는 스펙클들이 나타나지 않는 것이 보인다. 이는 겨울철 운량 분포와 일치한다. 즉, 겨울철의 특징적인 구름이 형성되는 곳에 스펙클이 많이 발생함을 알 수 있다.

클로로필-*a* 농도는 각 밴드간의 비율로

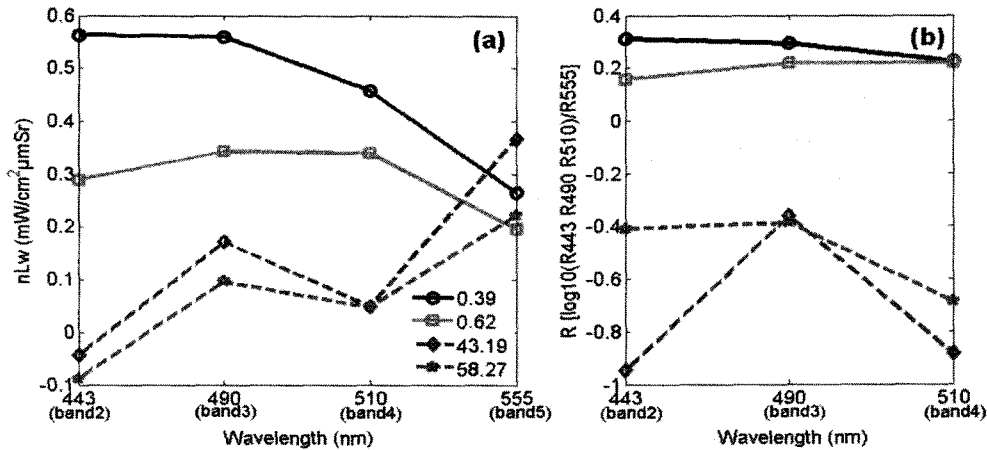


Fig. 7. Comparison of (a) normalized water-leaving radiance as a function of wavelength of each SeaWiFS band for the two cases of normal (blue, green) and abnormal (red, pink) and (b) spectral ratios of each band with respect to reflectance at 555 nm. The numbers in the legend are chlorophyll-*a* concentration (mg/m^3).

구해진다. 스펙클이 나타나는 지점과 그렇지 않은 인접한 화소의 각 밴드의 정규화된 수출 광량(Normalized Water-leaving Radiance)을 비교해 보았다(Fig. 7). 정상적으로 낮은 클로로필-*a* 농도가 나타나는 화소와 달리 스펙클이 나타나는 곳은 443 nm 밴드에서 오히려 값이 나타났고 490, 510 nm 밴드 모두 낮은 수치를 보였다. 반면 555 nm 밴드 수치는 정상적인 농도가 나타나는 화소와 같거나 오히려 높게 나타나기도 했다. 클로로필-*a* 농도식에 들어가는 R 값은 555 nm 밴드와의 비율로 구해지는데 이 과정에서 스펙클이 나타나는 지점의 R 값은 Fig. 7b와 같이 더 작아지게 된다. 이런 차이는 클로로필-*a* 농도를 구하는 과정에서 증폭되어 비정상적으로 높은 농도의 스펙클로 나타나게 되는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

SeaWiFS 해석 센서의 클로로필-*a* 농도

Level-3 자료에서는 비정상적으로 큰 농도 값이 스펙클로 나타난다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 제기하고 오차 값들의 특성을 분석하였다. 클로로필-*a* 농도는 주로 연안에서 크게 분포하는데 연안과 멀리 떨어진 외해에서도 비정상적으로 큰 값들이 산발적으로 분포했다. 외해에서 비정상적으로 큰 값들을 분석해 본 결과 주변 평균에 비해 편차가 $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이상의 큰 차이를 보였으며 특히 이러한 현상은 시공간적으로 인접한 화소와 연계성이 전혀 없었다.

비정상적으로 높은 농도의 스펙클은 주로 겨울철에 나타났다. 스펙클 현상이 나타나는 것은 겨울철 구름 분포와 주된 관련이 있었다. 10년간 월별 운량을 분석한 결과 겨울철 운량은 다른 계절과 달리 동해 남동쪽에 집중적으로 분포하였으며 이 지역에 스펙클이 집중되어 있었다. 겨울철 동해에서 운량이 클수록 큰 농도의 스펙클이 나타나는 경향성을 보였다.

특히 스펙클이 나타나는 곳의 각 밴드별

수출광량을 비교해본 결과 짧은 파장 영역(443, 490, 510 nm)은 전체적으로 수출광량이 낮게 나타난 반면 555 nm 밴드는 정상 화소와 유사한 분포를 보여 클로로필-a 농도값을 비정상적으로 증폭시켰다.

해색 센서가 발전되고 자료 처리능력이 진보함에 따라 해색 자료가 가지는 오차가 많이 줄어들었지만 여전히 남아있는 클로로필-a 농도 자료의 스펙클에 관한 오차처리 없이 연구에 이용하게 된다면 부정확한 오차가 포함된 결과를 가져오게 할 수도 있을 것이다. 따라서 클로로필-a 농도 자료에 포함된 오차 값에 대해 정확한 이해가 선행되어야 하며 오차 특성을 고려하여 자료를 사용해야 해야 좀 더 정확도 높은 클로로필-a 농도 자료를 연구에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 사사

본 연구는 정지궤도 해색위성(GOCI)활용 연구 지원사업에 의하여 연구되었습니다.

6. 참고문헌

Banse, K., and English, D.C., 1994, Seasonality of coastal zone color scanner phytoplankton pigment in the offshore oceans. *Journal of Oceanography*, 99, 7323-7345.

Darzi, M., 1992, Cloud screening for polar orbiting visible and Infrared (IR) satellites. SeaWiFS Technical Report Series, NASA Technical Memorandum, 104566, 7, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 7 p.

Dorman, C.E., Beardsley, R.C., Dashko,

N.A., Friehe, C.A., Kheif, D., Cho, K., Limeburner, R., and Varlamov, S.M., 2004, Winter marine atmospheric conditions over the Japan Sea. *Journal of Geophysical Research*, 109, C12011, 26 p.

Gohin, F., Druon, J.N., and Lampert, L., 2002, A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 1639-1661.

Hu, C., Carder, K.L., and Muller-Karger, F.E., 2000a, Atmospheric correction of SeaWiFS imagery: assessment of the use of alternative bands. *Applied Optics*, 39, 3573-3581.

Hu, C., Carder, K.L., and Muller-Karger, F.E., 2000b, How precise are SeaWiFS ocean color estimates? Implications of digitization-noise errors. *Remote Sensing of Environment*, 76, 239-249.

Park, K.A., Chung, J.Y., and Kim, K., 2004, Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations. *Geophysical Research Letters*, 31, L07304, 4 p.