

# 衛星画像を利用した別寒辺牛湿原の植生の 長期変遷と季節変化の解析

近藤昭彦

千葉大学環境リモートセンシング研究センター

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33

E-mail: kondoh@faculty.chiba-u.jp

## 概要

人工衛星による地球観測が始まってからすでに50年が経過しており、この間の地球表面の変化が世界各地で明らかにされてきた。空間分解能が30mに達したアメリカのランドサット衛星のTMセンサーによる画像は1984年から利用可能となったが、厚岸地方の画像も同時期から利用可能である。そこで、厚岸町管内の約20年間のTM画像を収集し、画像に記録された様々な事象の判読を行った。また、1992年から1998年は日本の資源探査衛星「ふよう1号」による合成開口レーダー(SAR)画像が取得されている。厚岸町管内を含むSAR画像も収集し、その画像について判読を行った。結果として都市域で見られるような大きな土地利用・土地被覆変化は認められなかったが、森林、湿原域と農地、都市域のモザイク構造を画像化して認識することができた。農地は自然に対する人間のインパクトであるが、それがもたらした影響について、河川水の硝酸性窒素濃度からの認識を試みた。その結果、別寒辺牛湿原では硝酸性窒素濃度は低かったが、河川の上流域で高濃度の地域が認められた。特に太田地域では硝酸性窒素濃度は高く、今回の調査の最高値である2.4mg/lを記録した。上流側で硝酸性窒素濃度が高いということは上流域において窒素のソースがあることを意味している。土地利用との対比から、硝酸性窒素は農業起源と考えられるが、今後継続してモニターしていく必要がある。ただし、高濃度地域でも環境基準である10mg/lよりは低く、直ちに何らかの影響が出るわけではないことを協調しておきたい。

## I. はじめに

湿原には様々な生態系サービス(自然の恵み)がある。昨今言及されることの多い持続可能社会とは自然の恵みを最大限に享受して、自然への負荷を減らしていける社会だと考えられる。この生態系サービスを評価するためにはまず湿原の変遷を明らかにし、生態系サービスに関わる指標との関係を解析しなければならない。著者は湿原の機能に関心を持ち、厚岸地域を含む大量の衛星データ(1984~2002年の約100シーン)を収集した。これらの画像情報を解析し、別寒辺牛湿原および周辺地域の土地被覆の変遷、および植生、作物の状況の季節変化を明らかにし、可視化することを試みた。また、河川水の硝酸性窒素濃度を指標として、自然に対する人間のインパクトを可視化することを本調査の目的と

する。

## II. データ

### 1. 衛星データ

#### (1) ランドサット衛星

アメリカの地球観測衛星ランドサット 5 号および 7 号の TM、ETM+センサーにより撮影された画像を長期間の植生・土地利用の変遷解析に利用した。

ランドサット 5 号は 1984 年に打ち上げられ、20 年以上にわたって TM センサーによる地球の画像が撮影された。ランドサット 6 号は打ち上げに失敗したが、1999 年に打ち上げられたランドサット 7 号に搭載された ETM+センサーが地球の画像撮影を続けている。

TM および ETM+は可視光（目に見える光、 $0.45 \mu\text{m} \sim 0.69 \mu\text{m}$ ）から近赤外線・短波長赤外線（可視光より波長が長く、目には見えない光、 $0.76 \mu\text{m} \sim 2.35 \mu\text{m}$ ）の範囲に 6 つの観測波長帯を持ち、地表を約 30m の分解能で撮影できる。また、熱赤外域（ $10.4 \mu\text{m} \sim 12.5 \mu\text{m}$ ）に観測波長帯を持ち、地表面温度を 120m の空間分解能で観測することができる。

ランドサット衛星は地球の昼間側を北極から南極方向に高度 707km で飛行しながら約 185km 幅で撮影を行う。軌道に沿った画像を進行方向に直角に区分した約 185km 四方の画像が一つのシーンとして提供されている。個々の画像はパス（飛行方向）とロー（パスと直角方向）の組み合わせで表すことができる。別寒辺牛湿原はパス 105、ロー 30 およびパス 106、ロー 30 の二つのシーンに含まれる。

図 1 に二つのシーンの撮影範囲を示す。個々の画像が傾いているのはランドサット衛星の軌道が地軸に対して約  $10^\circ$  度傾いているためで、画像の幾何補正を行い北が上になるように修正しているためである。



図 1 研究で用いた二つのシーンの範囲

今回は JAXA (旧 NASDA) が受信した 1984 年～ 2002 年間の画像を利用した。一つのシーンの中で雲量が 10%以内であった画像は二つのシーンをあわせて 69 シーン存在した。表 1 に撮影日を示す。これらの画像を利用して別寒辺牛湿原周辺の植生・土地被覆の変化を解析した。

表 1 別寒辺牛湿原周辺のランドサットの撮影日

TM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1984								18		5		
1985		26			24		27			15		2
1986		13					30					
1987					7	24						1
1988									14			
1989					12,19							
1990	30	15	3,28					3		29	7	
1991						26		29			1,26	
1992	20	5,14										
1993			4	21								24
1994	25						13					
1995	12							17		11		
1996		25	28					26		22		
1997		11,18						6		16	10	
1998		5,21	25	3			15					22
1999		24		22,29	31	9			13		7	
2000	26							14	22	1,24		
2001		6	17									
2002		17	5				27					

## (2) ふよう 1 号 (JERS-1)

地球資源衛星「ふよう 1 号(JERS-1)」は NASDA (現 JAXA) が 1992 年に打ち上げた地球観測衛星で、合成開口レーダ (SAR) と光学センサ (OPS) を搭載し、1998 年まで運用された ([http://www.jaxa.jp/projects/sat/jers1/index\\_j.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/jers1/index_j.html))。

合成開口レーダ (SAR) は衛星からマイクロ波 (波長が cm オーダーの電磁波) を発射し、地表面から散乱されて衛星に帰ってくるマイクロ波の強さを画像化することができる。SAR 画像には土壌水分、積雪量、バイオマス等の情報が含まれており、その季節変化から別寒辺牛湿原および周辺地域の地表面の状態を推定することができる考えた。

図 3 に SAR 画像の一例を示す。マイクロ波が地表面で散乱されて衛星まで戻ってくる強さ (後方散乱係数  $\sigma^0$ ) が白黒の濃淡で表されている。画像の黒い部分は地表面が滑らかでマイクロ波が鏡面反射して衛星方向に戻ってこないことを表している。よって水面は黒く見えている。白い部分は地表面の粗度 (凹凸) が大きいことを表しており、都市域は建物により粗度が大きいことを表している。また、森林は地表面や幹でマイクロ波が散乱されるため明るく見えており、バイオマス (あるいは材積) と後方散乱係数の間には創刊があることがわかっている。

別寒辺牛湿原を含む SAR 画像のパス・ローは 59/228 であり、検索の結果 21 シーン存在することがわかった。表 2 に画像撮影日を示す。JERS-1 の運用期間が 6 年であったため、経年変化を解析するには十分ではないが、1997 年、1998 年では季節変化の解析が可能である。

表 2 SAR 画像の撮影日

JSAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1992												
1993		13	2					12				
1994		4							12			
1995			7				17					
1996	9	22			20							
1997		8			7	20				30		13
1998	26		11	24		7	21		3			

## 2. その他の地理情報

厚岸町管内図をスキャナーで画像化して、幾何補正し、基図として用いた。また、国土チリン 1:25,000 地形図地図画像を用いて、画像の幾何補正の GCP (地上基準点) の緯度経度情報の取得を行った。

## III. 研究の方法

### 1. 画像データ処理

## (1) 幾何補正

衛星データを地理情報システム (GIS:Geographic Information Sysytem) で様々な地図と重ね合わせて利用するために幾何補正を行う必要がある。基準画像は NASA が作成、公開している Geocover TM モザイク画像 (<https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>) の 2000 年画像を国土地理院の 1:25,000 地形図画像を用いてさらに精密幾何補正し、UTM55 帯、空間分解能 28.5m の画像を作成した。

図 4 に基準画像として用いた Geocover TM モザイク画像を示す。画像の範囲は北緯 42° 55 分～43° 51 分、東経 143° 55 分～145° 52 分であり、別寒辺牛湿原を含む東北海道の平野部を含むように設定した。

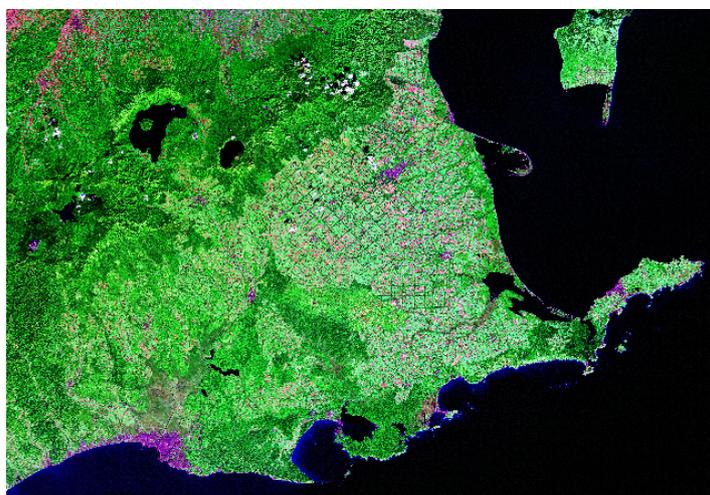


図 4 基準画像として用いた Geocover TM モザイク画像

この基準画像にあわせて、TM および JSAR 画像の幾何補正を行った。

## (2) 地理情報の処理

### 2. 景観調査と試料採水

2010 年 9 月 14 日と 15 日に別寒辺牛湿原および周辺地域で河川水の採水を行った。現地で水温、pH、EC (電気伝導度) を測定し、試水は千葉大学においてアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、および硝酸性窒素の濃度分析を行った。

現地測定はポータブル EC メータ、pH メータを用い、無機態窒素の分析はデジタルパックテストを利用した。デジタルパックテストはパックテストの試薬を用いて、分光光度法で試水の分析を行うことができる。アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の検出可能濃度範囲はそれぞれ、0.2、0.010、0.2mg/l である。

## IV 画像判読

## 1. 経年変化

図5に同じ季節、かつ雲がなく、最も撮影間隔が長い1984年10月5日と2000年10月24日の画像を示す。両者の比較から厚岸町管内の土地被覆変化を判読することができる。



図5 1984年10月5日(左)と2000年10月24日(右)のTM画像

緑の葉を持つ植生は光合成を行うため赤の光を吸収するが、近赤外の光は反射・散乱しようとする。植生域がなくなり、乾燥した土地になると近赤外の反射率は下がり、赤の反射率は上がる。そこで、赤の波長域の反射率(R)と近赤外の領域の反射率(NIR)を用いて正規化植生指標(NDVI)を定義することができる。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

NDVIは-1～+1の範囲の値をとり、植生域ではおおむね0.1以上の値をとる。NDVIの値が大きいほど、植生の植被率が高い、あるいは活性が高いことがわかっており、植生のシグナルの強さの指標として用いることができる。

図6に1984年と2000年の厚岸町管内のNDVI画像を示す。両者の比較から植生域の大きな変化は認められなかったが、植生の状態の空間的分布を知ることができる。別寒辺牛湿原の植生はすでに枯れており、NDVIは小さく(暗く)なっている。最も明るい部分は

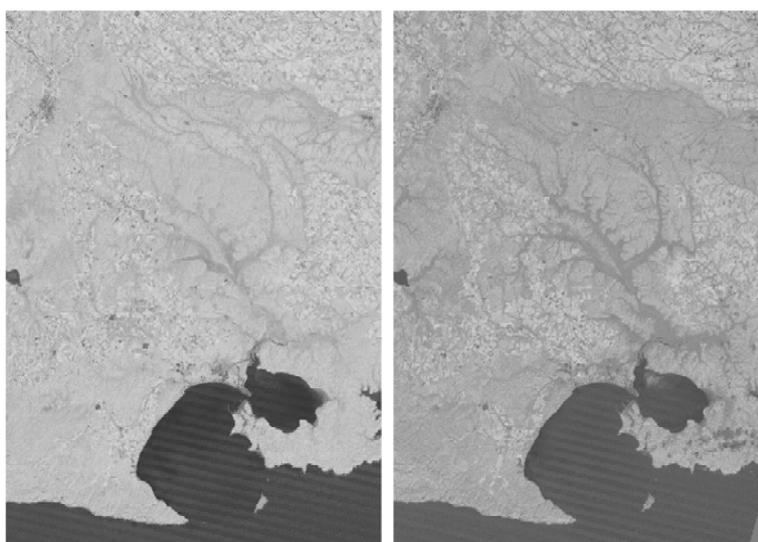


図6 1984年10月5日(左)と2000年10月24日(右)のNDVI画像

農地である。この地域の典型的な作物の収穫期は10月であるため、畑に緑が残っている可能性も考えられる。また、森林では落葉樹がすでに落葉し、NDVIは低く(暗く)描かれている。

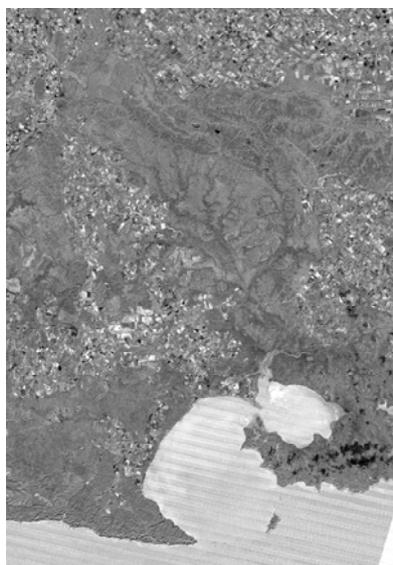


図7 2000年と1984年のNDVIの差画像

図7に2000年と1984年のNDVIの差画像を示す。この間に植生が減少した画素は暗く、また、増加した画素は明るく表現される。黒白のコントラストの大きな地域は図5の画像および地形図を参照すると農業地域である、両年の作付けの差が現れていると考えられる。なお、厚岸湖南岸の半島にある黒いスポットは雲である。

## 2. 季節変化

### (1) ランドサット TM でみた厚岸町管内の季節変化

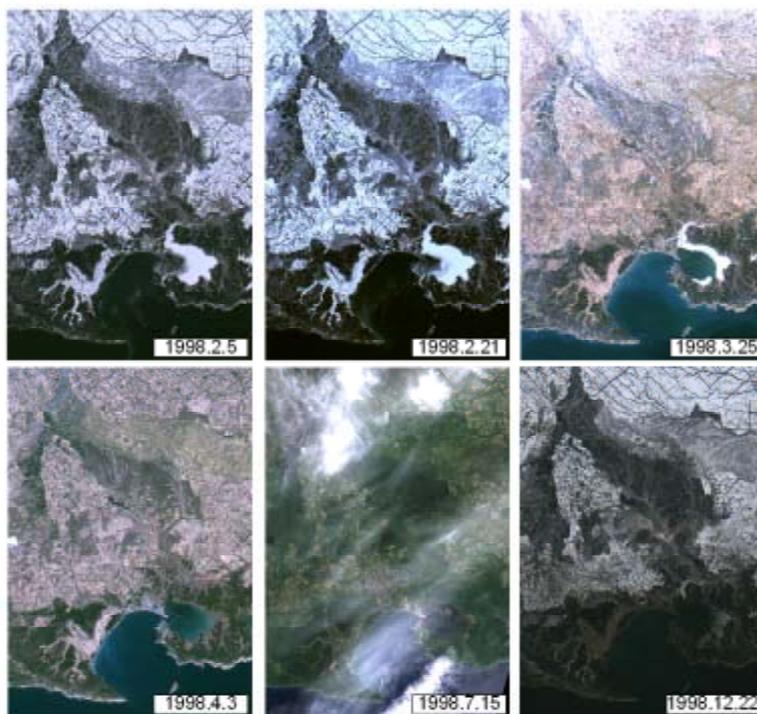


図8 ランドサット TM で見た厚岸町管内の 1998 年の季節変化

1998 年は年間で 6 シーンの TM 画像が得られた。2 月から 4 月の画像は消雪の過程、厚岸湖の氷の融解の過程を判読することができる。融雪は南部から始まり、3 月には厚岸町で雪は消えるが、自衛隊矢白別演習場の北側にはまだ積雪が残っていることがわかる。厚岸湖では 2 月から 3 月にかけて融氷が急速に進み、4 月に入ると氷は消滅している。夏の画像は雲が多いが、その後 12 月になると北側では積雪が認められるが、厚岸湖周辺ではまだ積雪がないこともわかる。

### (2) 合成開口レーダ (J-SAR) で見た厚岸町管内の季節変化

合成開口レーダ (SAR) 画像は地表面で散乱されて衛星に返ってくるマイクロ波の散乱強度を計測する。光学センサーと異なり、同じ地表面の状態であれば同じ値 (デシベル表紙、 $\sigma^{\circ}$  で表す) になる。そこで、地表面の物理的な性状の変化を時系列画像から判読することができる。

図 9 に最も短周期で画像の取得ができた 1998 年の画像を示す。年頭の冬から秋の 9 月までの変化を判読することができる。

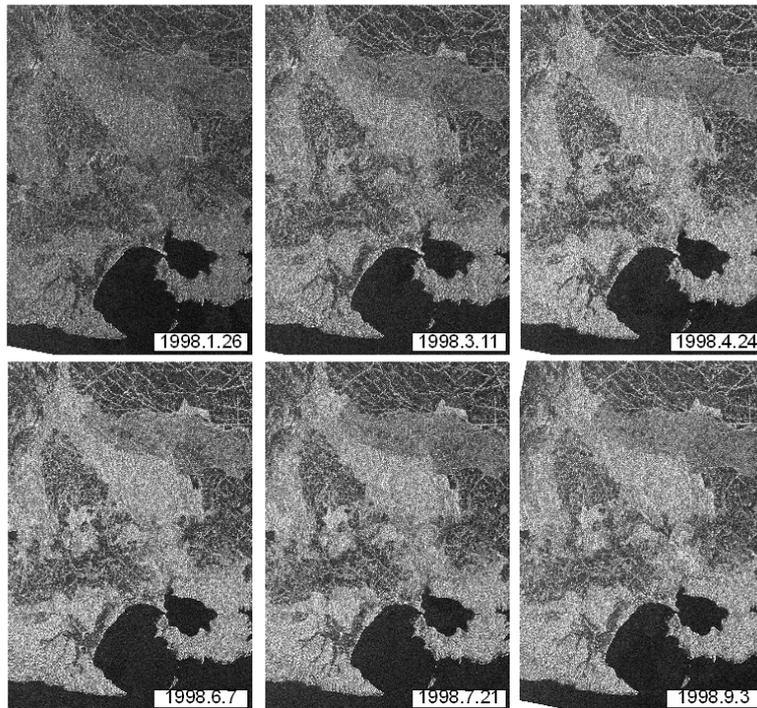


図9 合成開口レーダ (J-SAR) 画像で見た 1998 年の季節変化

1 月の画像は全体的に暗いが、これは地表面がマイクロ波の波長に対して滑らかで、大きな散乱が起きていないことを意味している。おそらく、収穫後の平らな農地、落葉した森林で散乱が少なくなっていると思われる。乾いた積雪域はマイクロ波の体積散乱により  $\sigma^0$  が大きくなる場合もあるが、積雪深が小さく、散乱の効果が大きく現れていないと考えられる。

森林域は 6 月になると急激に  $\sigma^0$  が大きくなっている（明るくなっている）が、葉がつき、森林の樹冠における散乱が大きくなっていると考えられる。農地も夏の作付けによりマイクロ波の散乱が大きくなっている。別寒辺牛湿原の植生も同様で、夏期の植生が繁茂する時期に  $\sigma^0$  が大きくなっている。

このように、 $\sigma^0$  の値と湿原の植生の状態の対応付けを行えば、衛星リモートセンシングにより湿原の状態をモニタリングすることが可能となり、湿原に依存する渡り鳥の生息調査等への応用が考えられる。

## V. 水域の硝酸性窒素濃度

衛星観測からは地表面の広域的な状態と、その変化を抽出することができる。しかし、この変化が環境に及ぼす効果は様々である。今回の衛星解析では東京大都市圏で見られる

表3 河川水の水質調査結果

採水地点名	採水日	採水時刻	総硬度	経度	pH	EC	T	NH3-N	NO2-N	NO3-N
1 野鳥沼脇	9/14	9:12	43.096	144.862	7.0	1220	16.5	—	—	—
2 糸魚沢	9/14	9:44	43.130	144.936	7.9	166	11.4	—	—	0.4
3 三号川 つるはし	9/14	10:20	43.180	144.921	8.0	173	10.8	—	—	0.5
4 トライベツ川 第一鶴橋	9/14	10:43	43.219	144.913	8.0	101	10.3	—	—	—
5 釣り人の皆様1	9/14	11:25	43.204	144.870	7.7	68	12.0	—	—	—
6 チャンベツ川上流	9/14	14:40	43.233	144.655	7.8	128	14.6	—	—	0.6
7 タツカルウシ川	9/14	15:01	43.281	144.719	7.9	86	13.4	—	—	—
8 別寒辺牛川 礪橋	9/14	15:32	43.222	144.755	7.7	52	13.2	—	—	—
9 栗橋	9/14	16:00	43.196	144.802	7.3	68	13.9	—	—	—
10 別寒辺牛川 カマ	9/14	16:48	43.133	144.854	7.5	83	14.6	—	—	—
11 尾幌川しろはま橋	9/15	10:11	43.075	144.817	7.2	1450	17.9	—	—	0.3
12 太田東	9/15	10:37	43.097	144.805	7.2	126	13.8	—	—	0.4
13 太田北	9/15	10:51	43.103	144.796	7.2	185	12.4	—	—	0.9
14 太田西	9/15	11:06	43.093	144.782	7.2	104	14.4	—	—	0.5
15 町宮牧場大別橋	9/15	11:24	43.123	144.772	7.9	164	13.4	—	—	0.9
16 ホマカイ橋	9/15	11:56	43.118	144.672	7.2	95	13.5	—	—	0.2
17 井上耕介碑	9/15	12:17	43.120	144.693	7.5	195	11.9	—	0.050	—
18 片野橋	9/15	13:46	43.044	144.738	7.1	140	17.3	—	0.050	—
19 緑映橋 オッポロ橋	9/15	14:15	43.060	144.701	7.9	125	15.2	—	—	0.5
20 鳥居橋 ホマカイ下川	9/15	14:43	43.100	144.685	7.4	180	11.3	—	—	1.0
21 片黒去橋 ホマカイ川	9/15	14:58	43.097	144.735	7.9	173	12.8	—	—	0.6
22 草原橋 太田	9/15	15:14	43.107	144.777	7.5	177	14.0	—	0.145	2.4

ような大規模な変化は生じていないことが明らかとなったが、年々の営農あるいは畜産経営の様子を画像上の変化として捉えることができた。

表3に水質分析結果を示す。全22カ所の採水点でアンモニア性窒素は検出されなかった。家庭排水の影響はないものと考えられる。また、亜硝酸性窒素および硝酸性窒素の総量の環境基準は10mg/lであるが、この基準を超えた地点はなかった。しかし、環境基準未満とはいえ、太田、草原橋(No.22)で硝酸性窒素が2.4mg/lを記録している。また、太田地区内のNo.12、No.13、No.14はそれぞれ0.4、0.9、0.5mg/lと比較的高濃度の地点が集まっており、人為起源の窒素負荷を予想させる。

別寒辺牛湿原内の水流は上流側に農地のあるNo.3、No.4を除いてすべて硝酸性窒素は検出限界以下であった。流域別では尾幌川と上流域のホマカイ川、ホマカイ下川で硝酸性窒素が比較的高かった。

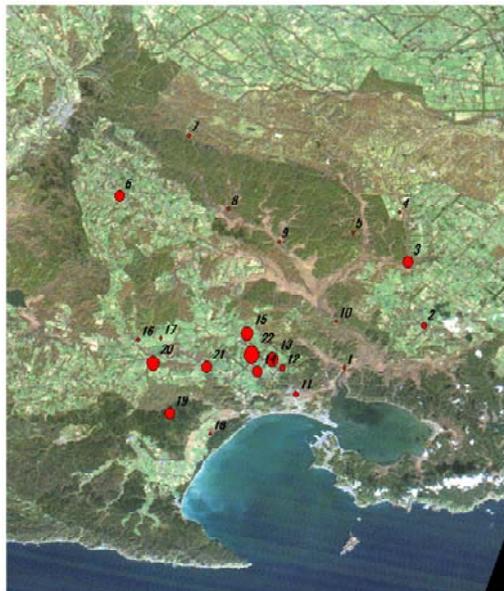


図10 硝酸性窒素濃度の分布。赤丸が大きさが濃度と対応する。

図 10 に硝酸性窒素濃度の空間分布を示す。濃度分布の全体的な傾向としては農地が近隣にある領域で硝酸性窒素濃度は高いといえる。しかし、流量を計測していないので負荷量は不明である。太田地区から流入が考えられる大別川下流の野鳥館脇では硝酸性窒素は検出されなかったが、流量が増加しているため希釈されているが、負荷量は高い可能性がある。また、チャンベツ川上流の No.6 や、茶内原野に接した No.3 でも硝酸性窒素は検出されており、ここでも人為起源の硝酸の可能性が示唆される。

これまでの研究では Hayakawa *et al.* (2006) が厚岸湖の流域の硝酸性窒素濃度を計測しているが、その最大値は 2.73mg/l で上流で高く、下流で低い傾向は今回の結果と同様であった。下流で硝酸性窒素濃度が低下する現象は千葉県の下総台地でも認められており (Kondoh *et al.*, 2010)、河川流量の増加による希釈効果で説明され、流量観測により負荷量を求めた結果、負荷量は下流に向かって増加することが明らかになっている。よって総量としての別寒辺牛湿原への硝酸性窒素負荷量を明らかにするとともに、湿原生態系に及ぼす効果についても検討を行う必要がある。

## VI. おわりに

すでに 30 年以上にわたって地表面を撮影し続けている地球観測衛星は地表面の変化も同時に記録し続けている。しかし、その変化は人が判読しなければ明らかにすることは困難である。そこで、過去に蓄積された衛星画像を用いて厚岸町館内の土地利用・土地被覆の現況と変化について判読を行った。その結果は画像として提供する予定である。

地表面の変化は主に人間活動によるものであるが、その変化が何をもたらしたのかを次に考える必要がある。本研究では人間活動の指標として河川水の硝酸性窒素濃度に注目し、その空間分布を求めた。その結果、農業地域において比較的高い硝酸性窒素濃度の分布を得た。人為起源と考えられる窒素は別寒辺牛湿原に入るとほとんど検出されなくなる。その理由は流量増加による希釈と脱窒反応、植生による吸収などが考えられるが、すべて自然の恵み、生態系サービス機能と考えることができる。我々は自然の恵みを損なわないような暮らしを選択し、人と自然の関係を良好に保つ必要がある。

## 謝辞

研究の実施にあたり、厚岸水鳥観察館の澁谷辰生氏に大変お世話になりました。北海道大学北方生物圏フィールド科学センター水圏ステーション厚岸臨海実験所の渡辺健太郎氏、北海道大学環境科学院の鍵和田玄氏には採水調査でお世話になった。厚岸臨海実験所の鎌内宏光氏には硝酸汚染について貴重なご意見を頂いた。厚岸臨海実験所、厚岸町環境政策課の皆様には研究遂行にご尽力頂きました。記して感謝の意を表します。

## 引用文献

Hayakawa, A., Shimizu, M., Woli, K. P., Kuramochi, K., and Hatano, R. (2006): Evaluating

stream water quality through land use analysis in two grassland catchments: impact of wetlands on stream nitrogen concentration. *Journal of Environmental Quality*, 35 (2), 617-627.

Akihiko Kondoh, Yusuke Kori, Lin Huang (2010): Nitrate Contamination of Environmental Water in the Upland with High Population Pressure. *Proceedings of 5th APHW in Hanoi, Vietnam*, 73-78.