

近接分光反射スペクトル特性による湿原混在植生の分類：  
北海道厚岸湖・別寒辺牛湿原

宮本 みちる  
平成 11 年 1 月

# 論文目次

ページ

## 図表目次

### 第1章 研究の背景と目的

- 1.1 研究の目的 1
- 1.2 研究の背景
  - 分光反射特性による湿原植生分類の研究 1
  - 調査地域の植生に関する研究小良 4

### 第2章 調査対象地域の特徴と概要

- 2.1 調査対象地域 5
- 2.2 厚岸湖・別寒辺牛湿原、釧路湿原の概況 5
  - 厚岸湖・別寒辺牛湿原 5
  - 釧路湿原 8
  - 気象データ 9
- 2.3 一般的な湿原の種類と植生概況 9
- 2.4 厚岸湖・別寒辺牛湿原、釧路湿原の標徴植生概況 10
  - 厚岸湖・別寒辺牛湿原の標徴植生概況 10
  - 釧路湿原に特有の湿原植生の標徴植生概況 14

### 第3章 調査及び解析方法

- 3.1 植生調査 16
  - 調査方法 18
  - 解析方法 18
- 3.2 GPS 則位 18
- 3.3 バイオマス測定 18
  - 調査方法 19
  - 解析方法 19
    - 生産構造図 19
    - 葉面積指数 19
      - 1 調査方法 19
      - 2 解析方法 21
  - 単位葉面積あたりの乾燥質量 21
- 3.4 鉛直デジタル写真撮影 21
- 3.5 方向性分光反射率測定 21
  - 調査方法 21
  - 測定方法に関する課題及び注意点 23
  - 解析方法 23

	ページ
3.6 個集のスペクトル反射則定	27
調査方法	27
解析方法	27
<b>第4章 調査・解析の結果と考察</b>	
4.1 植生調査結果と現存植被率による湿原タイプ別植生区分結果	33
階層別	
湿原植生タイプ別冊	33
・ 低層湿原(調査区H, D)	33
・ 中層湿原(調査区A, B, C)	35
・ 高層湿原(調査区E, F, C)	35
4.2 投影植被率による植物区分の試み	36
4.3 層別バイオマスとLAD及びSLAの測定結果	36
生産構造図	40
層別LAD	40
層別SLA	44
層別SLAとLAD、生産構造図の関係	47
4.4 考察：バイオマスと光環境	49
4.5 分光反射率測定結果	49
個葉の分光反射率	51
・ 波長帯別の日射エネルギー	51
・ 健康な個葉と枯死寸前の個集の分光特性	52
・ 湿原タイプごとの混生植生からみた個集の分光反射特性	54
- 1 高層湿原	54
- 2 中層湿原	54
- 3 低層湿原	57
・ TMバンドの組み合わせによる種判別に可能な波長帯	57
・ 考察	
群落の方向性分光反射率の特性	65
・ 複数色方向性からの群落分光反射率の検討	66
・ 湿原植生タイプごとの群落分光反射率の検討	66
- 1 低層湿原	66
- 2 混生寒地性低木林	66
- 3 中層湿原	71
- 4 高層湿原	71

	ページ
考察・まとめ	71
- 1 低層湿原	78
- 2 高層湿原	78
- 3 低層湿原と高層湿原	78
- 4 中層湿原	78
- 5 混生寒地性低木林	78
<b>第5章 結論とまとめ</b>	
5.1 個集の分光反射率からみた混在植生の判別	79
5.2 群落内バイオマスと方向性分光反射メカニズムからみた混在植生判別のための混 生リモートセンシングへの有効波長帯	79
低層湿原	79
中層湿原	80
高層湿原	80
混生寒性低木林	80
5.3 今後の課題とその応用	81
謝辞	82
参考文献	83

## 図目次

ページ

図 - 1.

6

調査地地図 ( A ~ D 地点 : 厚岸湖・別寒辺牛湿原、 E ~ G 地点 : その他釧路湿原、  
H ~ J : 赤沼周辺 )

図 - 2.

7

厚岸湖・別寒辺牛湿原領域 : 衛星画像は Landsat TM 画像 ( DATA ,3. 110, 105-30,  
納沙布 1995 年 8 月 17 ) 植生解析画像。

図 - 3.

11

湿原の種類

図 - 4.

12

厚岸湖・別寒辺牛湿原領域 : Landsat TM 画像 ( DATA ,3. 110, 105-30, 納沙布 1995  
年 8 月 17 ) を使用し、各湿原における G P S 測値データに基づき、湿原植生タ  
イプ別に教師付き分類を行った。

図 - 5.

17

各調査区に設置した方形区の模式図

図 - 6.

20

層別刈り取り調査による生産構造図作成の模式図

図 - 7.1

24

方向性分光反射の模式図

図 - 7.2

25

群落分光測定 of 模式図

図 - 8.

30

対象物質の反射スペクトルと Landsat TM バンド波長帯との関係

図 - 9.

32

群落の方向性分光反射測定及び鉛直デジタル写真撮影

図 - 10.

37

植生区分 :

分光反射測定結果と対応させるために、調査区内の群落区分種は標徴種に属する  
ものとした。その結果、低・中層湿原植生のスゲ優先タイプの調査区 H、D、A、

E、低層湿原植生の調査区G、B、高層湿原植生の調査区C、Fに区分した模式図を示す。

図 - 11. 38

各調査区の鉛直デジタル写真：

調査区A～Gの調査区における草冠上2mの高さから鉛直真下向きに撮影されたデジタル写真、1998年6月29日～7月2日に撮影

図 - 12. 41

生産構造図の作成結果

図 - 13. 42

葉面積密度：LAD

縦軸は下からの高さ（cm）、横軸は乾燥質量（g）、バブルの大きさをLAD（ $g/50 \times 50$  / 深さ10cmごと）として示す。

図 - 14. 43

層別葉面積：

縦軸は下からの高さ（cm）、横軸は乾燥質量（g）、バブルの大きさを層別葉面積（ $g/50 \times 50$ ）として示す。

図 - 15. 45

図 - 14を優占種1とその他の種に内訳した層別葉面積密度：

青のバブルは優占種を、赤のバブルはその他の種または、第1優占種を示す。

図 - 16. 46

層別SLA：

縦軸に地面から10cm層ごとの高さ、横軸に層別SLA（ $g/50 \times 50$  / 深さ10cmごと）を示す。

図 - 17. 48

LADとSLA：

横軸がLAD（ $g/50 \times 50$  / 深さ10cmごと）の値、縦軸が地面からの高さ（cm）、バブルの大きさを層別SLA（ $g/50 \times 50$  / 深さ10cm層ごと）として示す。

図 - 18. 50

湿原植生タイプごとの光環境と層別LAD～SLAを解釈する模式図

図 - 19.	53
ヨシの個集の分光反射率： 実験室内で測定した紫外・可視分光光度計による葉身の分光反射率測定結果	
図 - 20.	55
高層湿原植生（イボミスゴケ、スギゴケ）の個集の分光反射率：ポット採取により、 実験室内での紫外・可視分光光度計による葉身の分光反射率測定結果	
図 - 21.	55
中層湿原植生（枯れたムジナスゲ、健康なムジナスゲ、ホロムイスゲ）の個集の 分光反射率：ポット採取により、実験室内での紫外・可視分光光度計による葉身の 分光反射率測定結果	
図 - 22.	56
中層湿原植生（ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシ）の葉身の分 光反射率：ポット採取により、実験室内で測定した紫外・可視分光光度計による 分光反射率測定結果	
図 - 23.	56
中層湿原植生（ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシ）の葉脚の分 光反射率：ポット採取により、実験室内で測定した紫外・可視分光光度計による 分光反射率測定結果	
図 - 24.	58
低層湿原植生（ハンノキ、ヤチヤナギ）の個集の分光反射率： ポット採取により、実験室内で測定した紫外・可視分光光度計による葉身の分光 反射率測定結果	
図 - 25.1	59
2つのバンドの組み合わせによる高層・中層・低層湿原植生の TMband 1～4 に 対応する波長帯の反射率	
図 - 25.2	62
TMband 1～4 の波長帯における各湿原植生の分光反射率	
図 - 25.3	63
3つのバンドの組み合わせによる高層・中層・低層湿原植生の TMband1～4 に 対応する波長帯の反射率	
図 - 26～32.	67

ポータブル可視・近赤外分光計 SD1000 (400~1000nm) による調査区 A ~ G までの分光反射率測定結果：地上 2 m の高さから捕らえた群落の分光反射率で、各々、紺色が鉛直方向から、ピンク色が斜め 15° から、オレンジ色が斜め 30° から、青色が斜め 45° からの分光反射率を捕らえた結果である。

図 - 33.1	75
低層湿原植生の群落方向性反射グラフ	
図 - 33.2	76
高層湿原植生の群落方向性反射グラフ	
図 - 34	77
図 D , G の群落方向性分光反射グラフを重ねたグラフ	
図 - 35	77
図 E , C , F の群落方向性分光反射グラフを重ねたグラフ	

表目次	ページ
表 - 1 . オーシャンオプティックス社製のポータブル可視近赤外スペクトロメータのSD1000 に関する諸元	22
表 - 2 . 島津製作所の紫外可視分光光度計 ( UV2500P C ) S ( P/N 206-82250-91 ) に関する諸元	28
表 - 3 . 対象物質反射スペクトルとランドサット TM 画像の波長バンドとの対応と、バンド波長との可視光波長域との関	29
表 - 4 . 植生調査結果	34
表 - 5 . 個集の分光反射率測定結果から検討した種判別に有効な波長域	61

# 第1章 研究の背景と目的

## 1.1 研究の目的

湿原植生リモートセンシングへの基礎的研究の1つとして、ヨシ・スゲ群落とミズゴケ群落の混在植生を主な調査対象地域とし、個集と群落の湿原植生タイプごとの分光反射特性と、植物生産構造・物質生産量の特性の関係を物理的に検証することを第1の目的とした。さらに、鉛直方向からのみ捉えたマルチスペクトル分光反射だけではなく、斜め方向からの分光反射特性を捉えることで、各湿原植生の群落層構造を明らかにし、群落種判別推定に有効な波長帯を抽出することを第2の目的として、研究対象地域を北海道厚岸湖・別寒辺牛(あつけしこ・べかんべうし)湿原に選定した。

1．各植物群落内での複数観測角による、群落・個集の分光反射率(強度)の特徴を捉えるためにはまず、各群落内の層構造パターンを明らかにする必要がある。すなわち、植物要素の空間的配置、群落の層構造 - 群落内の日射環境 - 群落の機能である。従って、各群落の植物生産構造の変化、葉の量、配列の調査、植被率など、光条件と植物生産量及び層内構造との関係を物理的に解明する。

2．光エネルギーの吸収は細胞内構造の光学的特性と植物葉により決定され、個々の葉が集合し、群落集団としての光学的システムを構築している。よって、上記の物理的条件に対応させた個集の構成あるいは群落全体としての分光反射率にどのような特性パターンをもつのかを検討する。

3．いくつかの混生植生タイプが混在する種判別に必要な有効波長帯を検討する。

## 1.2 研究の背景

### 分光反射特性による湿原植生分類の研究

湿原域は様々な湿原植生が相互に重なり合った層構造をなし、湿原タイプとその植生が非常に特異的である。そのため、湿原植生を対象として近接リモートセンシングを行なう場合、何を観測対象とするのか、そのためにどのような空間分解能や分光特性が必要になるのかを十分に検討することが肝要となる。湿原は、その複雑な物理的構成要素と広域性という観点から植生リモートセンシング技術の検証の場として大変有効であると考えられている。

国内では環境庁により、釧路湿原で1993年から航空写真による植生分類図の作成が開始された。しかしながら季節変動、大気と日射状態の変動が著しいため、植生タイプが示す特徴を、可視域のカラー写真では判別しきれず、1時期に撮れた空中写真からの詳細な湿原植生を分類するのが困難であった。そこで山形ら(1995)は航空機MSS(Multi Spectral Scanner)により取得された6月及び8月の2時期のデータで作成した画像を用いて、代表

的な植生群落 10 クラスを分類するための有効観測バンドの組み合わせの検討を行い、多時期データの有効性を示した。その後、山形ら(1996)は、6月、8月、11月の多時期 Landsat TM(Thematic Mapper)画像を用いた湿原植生分類を行った。スペクトル放射計で計測した植生タイプごとのスペクトル特性により、詳細な植生分類図が作成された。さらに小熊ら(1997a)は、Landsat / TM、ADEOS / AVNIR (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer)、SPOT / HRV (High Resolution Visible)の3タイプのセンサーを用いて、植生分類正解率を最大とする観測時期の組み合わせに有効なバンドから湿原植生分類図を作成した。また、1999年8月に打ち上げされる予定の ADEOS-2 に搭載されるセンサー、GIL(Global Imager)を用いた植生分類図作成へ有効なバンドの組み合わせに関する研究が小熊ら(1997b)により行われた。

これまでも湿原植生分類と分光特性に関する研究はいくつかなされてきた。しかしながら、観測に必要な多重分光センサにおける波長帯(バンド)は特に、観測対象により異なる分光特性を抽出するため重要なパラメータとなるが、それを選択する研究は十分ではないのが実状である。また、層構造をなす湿原植生領域を分光観測した画素の多くは複数の土地被覆クラスのスペクトル特性が混合したミクセルになっている。そのため、部分空間によるミクセル分解の有効性の検証(山形, 1995)、さらに詳細な波長幅で分光画像計測をする超多波長センサの有効性の検証(Kramer, 1992)など、既存の統計的手法にかわり、特徴軸抽出、次元圧縮をはじめとする研究(Harsanyi and Chang, 1994, 喜安・藤村, 1995)が盛んに行なわれている。また、既存の湿原植生リモートセンシング研究の多くは、衛星画像判読により植生分類を試みたものであり、植生タイプごとの層構造を判別するのに有効な各々の分光反射率を実際の各植生タイプに合わせた被度による対応はあっても、植物生産構造及び物質生産量と対応させた研究はなされていない。さらに、それら既存の研究は、鉛直方向のみからの分光反射率をとらえた植生リモートセンシングである。また、湿原植生分類対象地域に関しても、常に冠水状態にある沼沢地や、ヨシ・スゲにみられる、いわゆる湿原草原域に限定され、沼沢地や低層湿原における植生分類研究は存在するが(Christinsen et al., 1988; Ken and Les, 1994; John et al., 1995)、ミズゴケに代表されるような周囲の水の影響を受けない高層湿原域の植物分類は過去の研究からでは十分にされていない。特に高層湿原域を対象に、航空機 MSS 実験による湿原植生判別に有効な波長帯の選定と植生分類画像作成に関する研究が山形ら(1995)によって行われているが、地上数m範囲内の湿原植生における近接リモートセンシングによる詳細な地上データは現在に至り十分ではない。

そこで本研究は、草冠上からおよそ鉛直2mの高さからの近接リモートセンシングにより、群落及び個集の方向性分光反射率を測定することで湿原植生の分類を試みた。また、大陸スケールの土地被覆解析には NOAA / AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)を用いることが一般的であったが、地表空間分解能が1.1kmであるため詳細な湿原植生を把握するには限界があった。Landsat TMは、地表空間分解能が30mであり、他のセンサーに比べると植生判別に可能な可視光波長域から近赤外波長域のバンド数が多い。従って本研究は、分光反射率スペクトル解析には Landsat TM バンドを用いた。

キャノピーの反射スペクトルから物理的なバイオマス構成要素の推定には、今後の分光センサの開発によるといわれている。分光反射率曲線から、湖沼の水性植物の群落タイプ、

バイオマスと光合成色素量の推定も可能であることが Josepe(1993)により示された。後に述べる個集の反射スペクトルの特徴をみても分かるように、クロロフィルの吸収による凹部分と、スペクトル全体として高い反射率を示す近赤外領域の平らな部分は明確であるが、さらに広波長にわたり積分してしまうと、ノイズの頻度が増加し、情報は失われてしまう。既往の研究結果から、広波長域でのキャノピー反射率と植生パラメータとの間には強い関係が認められている。植生パラメータとしては、光合成有効波長域(およそ 380nm~710nm)における放射吸収量(A P A R)(Asrar, et al., 1984; Harfield et al., 1984)や、水分含量(Tucker, 1980; Hunt et al., 1988)と葉面積指数(L A I)(F. Baret and G. Guyot, 1991)などがあり、その相関もそれぞれ異なることが明らかにされている。小スケールでのキャノピーの物理的なバイオマスや構成要素を推定することができるのならば、将来的には、生化学的な変化、例えば炭素や養分のソースとシンクの空間的な広がりと変動の予測といった大スケールの生態学への応用も可能になると考えられる。すでに、生態系内の炭素循環と窒素循環における微量有機成分濃度を近赤外スペクトルから判別する研究(Weszel, 1983; Weyer, 1985)や集中成分の計測(Marten et al., 1985; Card et al., 1988; Wessman et al., 1988)、そして集中のリグニンに対する窒素比も分光スペクトル特性から判別するといった研究(Delwich et al., 1978; Vitousek, 1983; Goodroad and Keeney, 1984)も行われている。

高分解能のスペクトル測定値は、基礎的なキャノピー分光反射率曲線の研究には欠かせない。80年代以降になり、高度な分光測定機器の開発によって広範囲な波長帯で、より高いスペクトル分解能のデータを収集することが可能となった。生態系の機能、キャノピーの形態や葉の生化学的な性質に関連した分光特性の解明を行うために、小スケールの分光原理をリモートセンシングデータの解析に応用する研究が行われてきた。分光光度計によって測定した特定の波長帯のスペクトル計測値から、数学的に波長換算することで、任意の波長帯の分光反射強度を抽出することが可能となる。複数の反射成分が存在する波長帯で、スペクトル分離技術を適用するためにはまず、分光光度計により、個集の生化学的な構造から、キャノピー全体としての反射率曲線の特徴を捉える必要がある。David et al. (1993)は農作物を使って、群落全体としての分光反射率曲線が個集の透過率と反射率に大きく依存していることを明らかにした。また、このような基礎研究により、正規化差植生指数(N D V I)をはじめとする植生指数は、日射条件、バックグラウンドの反射率、太陽とセンサとの相対的な位置関係などによってなんらかの影響を受けていることも報告されている。

## 調査地域の植生に関する研究小史

厚岸湖・別寒辺牛湿原の植生に関する研究は、現時点まで釧路湿原ほどの研究はなされていない。本格的な現地調査が行われたのは、神田ら(1992)によってであり、それ以前までは湿原植生に関する実態は不明のままであった。土壌調査に関する報告文(北海道土壌資源調査)により別寒辺牛川とトライベツ川の合流する地点での高層湿原分布はおおよそ把握はされていた(飯塚・瀬尾, 1966; 富岡, 1985)。なお、衛星画像解析による調査及び研究は過去の研究では行われていない。

中層湿原、高層湿原を含む別寒辺牛川中部湿原系魚沢湿原についての簡単な記載がある程度ある(北海道, 1981)。下流部の厚岸湖岸植生については、古くは吉井(1919), 三好(1938), 館脇・中山(1939), 辻井(1954, 1956)の報告がある。また、別寒辺牛川上流域ではパイロットフォレストでの館脇・五十嵐(1975)の報告がある。

公的機関による報告関連では、文化庁(1971-81)が天然記念物調査の一貫として、20万分の1現存植生図を作成した。さらに環境庁が自然環境保護法に基づき、1973年から緑の国勢調査を行っているため、1976年に初版の全道にわたる20万分の1の現存植生図が完成させた。続いて第2回、3回目の緑の国勢調査において5万分の1の現存植生図(1981, 1987)が作成された。その他に、小縮尺の現存植生図として伊藤ら(1982)によるランドサットデータにもとづいて作成された60万分の1と、宮脇らによる50万分の1の現存植生図がある。

近年の植生調査報告に関して述べると、本格的な調査は、植生と植物相の概要(伊藤・橘, 1993)に関する報告により、最近にみる人為の影響の少ない貴重な湿原として注目されてきた。その後、北海道東部に発達する典型的な高層湿原として、湿原の形態的特徴とミズゴケ群落の種構成、地形、植生分布から明らかにされた(伊藤・橘, 1993)。特に、別寒辺中川とトライベツ川の合流する地点での高層湿原分布は、中心部のミズゴケ堆隆起地(ハンモック又はブルテ)が発達したドーム状泥炭地であり、この周辺にスゲやヨシの優占する低層湿原植生が分布し、さらにその外側にハンノキ低木林と高木林が分布する同心円状の植生の配列パターンがみられるという報告がだされた(伊藤・橘, 1993)。これは厚岸湖・別寒辺牛湿原植生調査の過去の小史からして、大変貴重な報告であると言える。これは後で述べる人工衛星解析画像からも把握できる。さらに、高層湿原と低層湿原、及びハンノキ林の本文特性と湿原の形成過程に関する詳細が明らかになった(井上, 1997)。

最後に最新の研究調査は、1997年に行われた。低層湿原とハンノキ林を含めた湿原全体の植生を把握し、同時にトライベツ川上流部から別寒辺牛川に至る南北断面における地形測量と泥炭層調査を行い、湿原の形状をより正確に把握することを試みた内容である(橘ら, 1998)。

いずれにおいても現存植生図作成に関した研究調査は、各自の地上調査と国土地理院撮影の航空写真、および環境庁作成の現存植生図をもとに対象地区の現存植生図は作成されている(神田ら, 1992; 橘ら, 1997)。ハンノキ分布率に関する調査研究に関しても、1992年の林野庁発行の最新版航空写真から手作業による面積変化の測定を行っているが、衛星画像解析を用いた調査研究はされていない。

## 第2章 調査対象地域の特徴と概要

### 2.1 調査及び測定対象地域

本研究の対象地域は、北海道道東、厚岸湖・別寒辺牛湿原と、釧路湿原である。厚岸・別寒辺牛湿原は、厚岸町市街地から北方約10kmの別寒辺牛中流域に広がり、標高10m前後に位置している。別寒辺牛川本流とその支流トライブツ川との合流部を頂点とする、逆三角形の湿原のほぼ中心に、楕円状をした長さ1.5km、幅400mの高層湿原がある。その高層湿原に隣接して低層湿原植生のヤチヤナギ - ムジナスゲ群落(経度緯度座標: N43°10'644", E144°50'967")が中央の高層湿原を取り囲むように存在している。それら高層湿原と低層湿原の境目いわば半中層湿原(経度緯度座標: N43°09'854", E144°50'633")を調査対象地に選定した。理由は、狭い範囲で混生遷移過程を見ることが出来、各湿原植生の方形区を設置するのに好都合であったからである。ここで3コドラートの設置を行った(調査地A~C)。そして低層湿原の標徴種を必要としたため、水鳥観察館周辺の大別川沿いに1コドラートを設置した(調査地D地点)。合計、厚岸・別寒辺牛湿原において4コドラートを設置した。

さらに、高層湿原の詳細なデータを得るために、厚岸湖・別寒辺牛湿原より西に約52kmに位置する釧路湿原でも調査区を選定した。釧路湿原東部、標高10m以下の平坦な湿原域を基点に、まず、北海道阿寒郡鶴居村温根内のビジターセンター付近、温根内木道沿いの中層湿原のヨシスゲ群落に1コドラート(H地点)、低層湿原のヨシ群落に1コドラート(I地点)を設置した。さらに、旧鉄道沿いの中層湿原と高層湿原の境に1コドラート(J地点)を設置した。

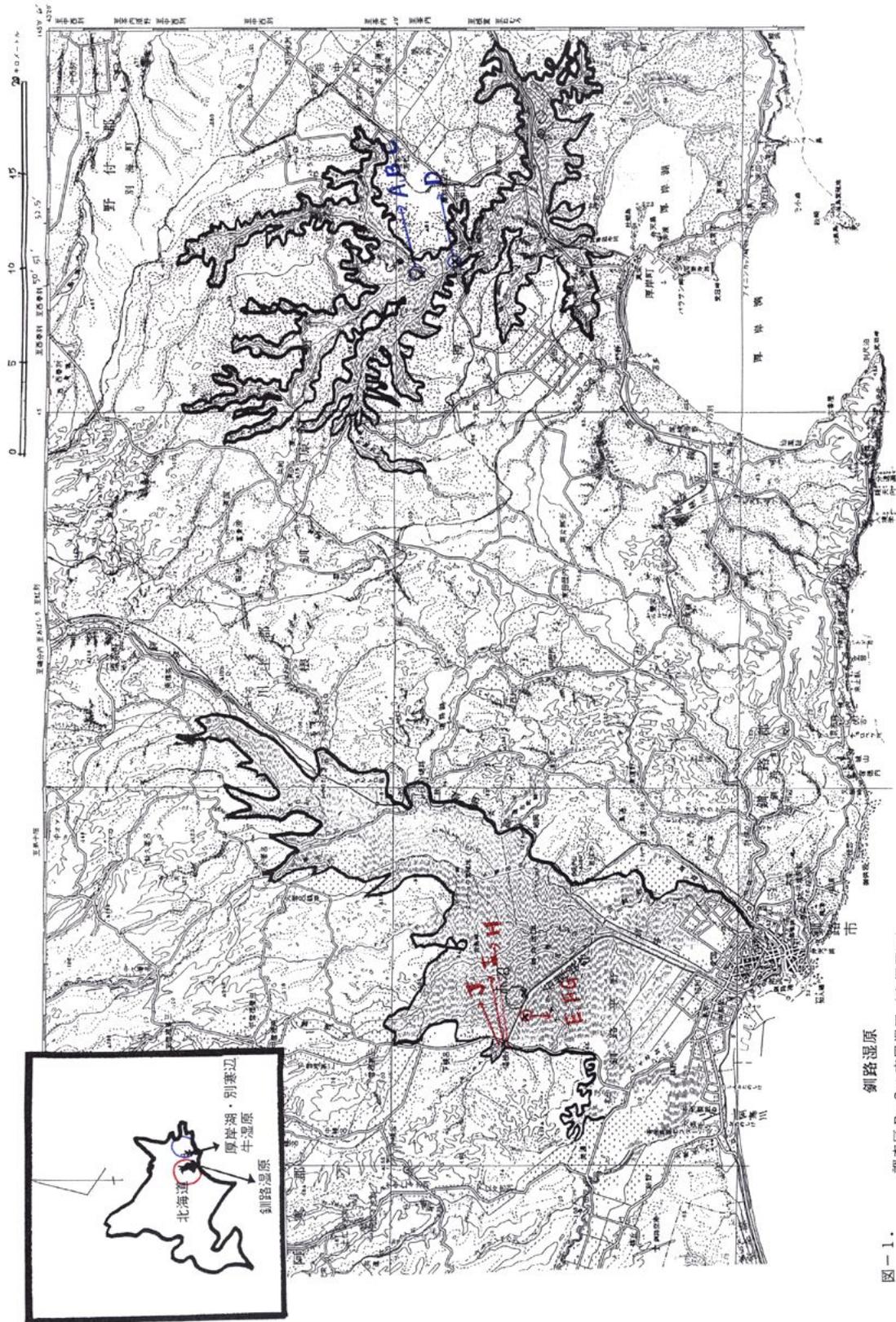
次に、温根内の東部、鶴居村ビジターセンターの北部から湿原を分断する釧路川右岸堤防沿いの高層湿原に、同じく3パターンのコドラート(E~G地点)を設置した。釧路湿原では合計6コドラートを設置した。厚さ1~3mほどの泥炭層に覆われ、最終氷河期以降に堆積した砂礫と泥層からなる沖積層の高層湿原である。

さらに北部に位置する赤沼に対して、北方に沿った木道(経度緯度座標: N43°06'27'486", E144°21'175")の両脇で26ヶ所の個集の分光測定のみを行った(図-1)。

### 2.2 厚岸湖・別寒辺牛湿原、釧路湿原の概況

#### 厚岸湖・別寒辺牛湿原

釧路の東部に位置する厚岸湖・別寒牛湿原は、総面積8,200haの広さで、厚岸町市街地の北方約10kmに位置している(図-2, 全体図)。1989年に別寒辺牛川の高層湿原が発見されて以来、4896haが1993年にラムサール条約に登録された。国内では、釧路湿原に次ぐ2番目の面積を誇る広大な湿原で、厚岸湖に流入する別寒辺牛川の流域に発達している。北海道の泥炭地の多くが河川流域の低平地に分布している。このことはすなわち、泥炭地が河川の影響下で形成されてきたことを示し、低位泥炭地が主体であることを意味してい



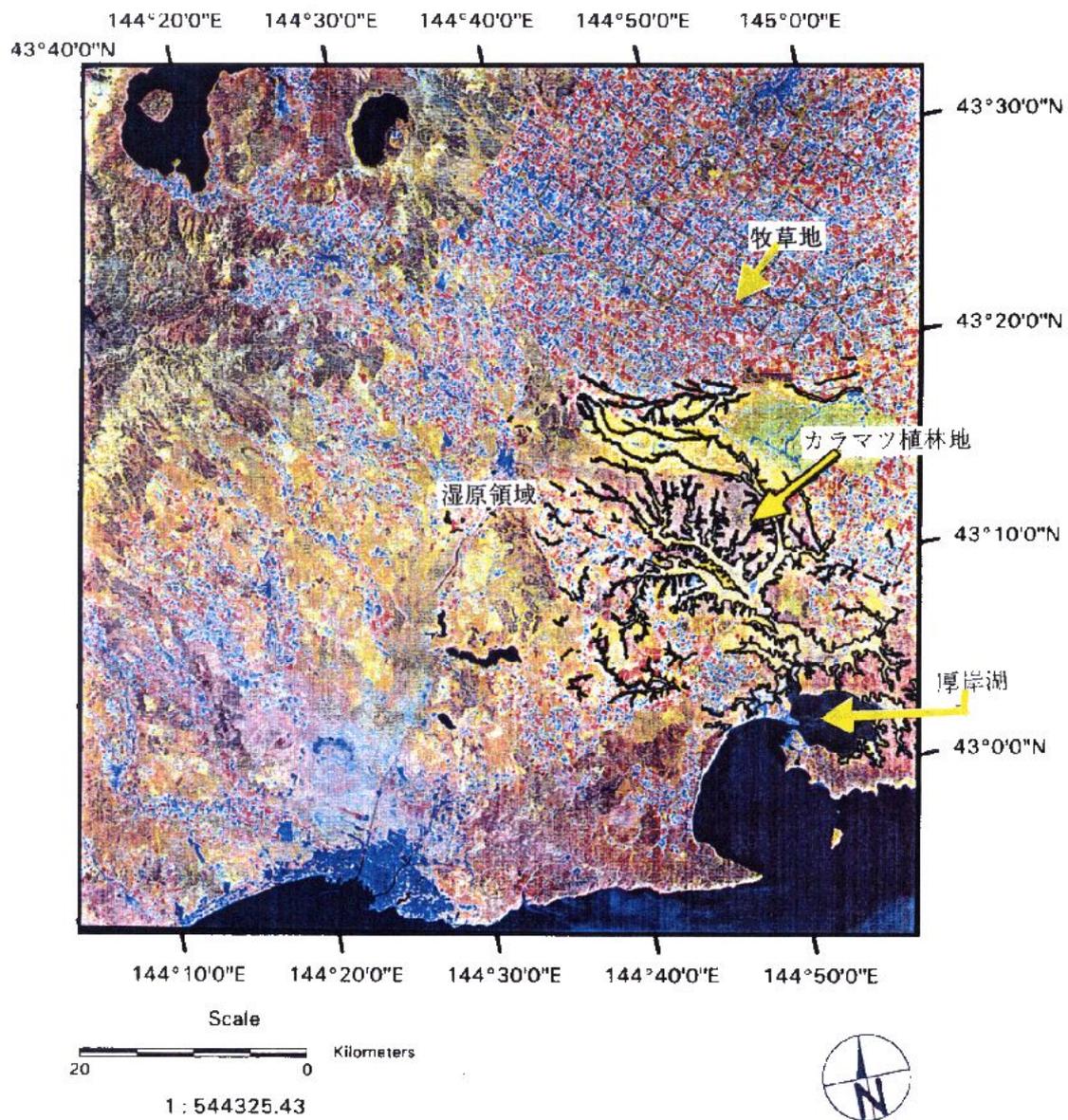
釧路湿原

- 調査区E-G：高層湿原（赤沼周辺）
- 調査区H：中層湿原（木道沿い）
- 調査区I：低層湿原（木道沿い）
- 調査区J：中層と高層湿原の境（木道沿い）

厚岸湖・別寒辺牛湿原

- 調査区A-C：中層湿原（別寒牛川とトライベツ川合流地点）
- 調査区D：低層湿原（大別川下流域）

図-1.  
調査地図



## 厚岸湖・別寒辺牛湿原

図一 2 厚岸湖・別寒辺牛湿原領域：Landsat TM 画像( DATA,3.110, 105-30,納沙布  
1995年8月17日, R.G.B=4.5.3)

る。一部の河川の影響を離れたところが、高位泥炭地へと発達した経過をたどっている。別寒辺牛泥炭地の一部に分布する高位泥炭地とその周辺はその特徴が明瞭である(井上, 1997)。別寒辺牛川は、釧路より東部の太平洋側で最大の河川であり、汽水湖である厚岸湖に流入して外洋に河口をもたない。厚岸湖は海岸段丘に囲まれ、水深が浅く、カキ、アサリなどの養殖漁業が盛んで潮が引くと干潟になるところが多く、水鳥やタンチョウの営巣地となる。

湿原は、別寒辺牛川とその支流が切刻した谷底平野に形成されたものであり(岡崎・伊藤, 1992)、泥炭層の厚さは中心部で約4 m、周辺部では約2 ~ 3 m以上にも達する(井上, 1997)。また、泥炭層の下は軟弱な泥や砂の沖積層からなっている(嵯峨山ら, 1985)。湿原をとりまく台地の地質は第四紀洪積世の釧路層群であり、表面には洪積世末の茶内火山灰や沖積世の魔周系火山灰が堆積していることが明らかにされた(岡崎・伊藤, 1992)。湿原全体の中でも、100ha に及ぶ高層湿原は外部からの接近が困難である。従って、自然状態は優良に保たれており、低層湿原への発達遷移過程をみることのできる学術的に大変貴重な湿原である(神田ら, 1992; 伊藤, 1992; 伊藤・橋, 1993; 橋ら, 1998)。なお、本研究で主な調査地としたこの高層湿原が発見されたのは、1989年である。また、湿原全域を囲む国有林のカラマツは、農業用排水が湿原へ流入するのを防ぐ役目を果たしている(辻井, 1992)。さらに厚岸湖の湖岸は、下流部から湖内への潮の入込みの影響を受けることもあり(辻井, 1992)、潮湿地が広がって多様な塩生植物群落が分布している(橋ら, 1998)。

## 釧路湿原

日本全国の湿原の83.6%が北海道道東地域に分布している(環境庁, 1982)。道東地域は、釧路湿原、霧多布湿原をはじめとする道内でも有数の湿原所有地であり、世界的にも貴重な生態系を持つ湿原として保護の必要性が高いことが明らかにされている。日本最大の湿原は釧路湿原(21,440ha)で、全国の湿原面積の59%を占めている。そのうち7,726haが1980年に日本で初めてラムサール条約に登録された。1998年現在で国内登録湿地は10箇所である。特にタンチョウヅルをはじめとする水鳥の生息地として国際的にも重要な湿地であると評価されて、1987年に国立公園に指定された。

釧路湿原は標高が3 ~ 数10mと低く、平坦な沖積平野となっている。湿原の東西幅は最大25km、南北は36kmで、手の指を広げたような型である。標高が20 ~ 140mになる平坦な台地が周囲を囲み、海岸段丘に深く食い込んでいる。太平洋に面した湿原の南側は市街地として広がり、東部には釧路川がゆるやかに東端を蛇行し、塘路湖(とうろこ)、シラト口湖、達古式湖(たっこぶこ)の3つの海跡湖が分布している。

泥炭層は深さ1 ~ 4mまで一面にあり、深いところでは6mに達している(中島, 1993)。さらに中6mの地層は河川や海岸からの泥や砂と貝(化石)を多く含んでいる。このことは、湿原が4 ~ 7千年前までは海であったことを示している。すなわち、湿原を形成した地層が、地表から30 ~ 50mの深さまでの沖積地であるということと、基底は2万年前の河川の砂礫層であると言われているが、この層の上からは、海で堆積した厚い泥層が貝層まで続いていることなどから、3千年前の海から、湿原へと混生遷移を遂げてきたことがわかる(NACS-J, 1996)。

## 気象データ

主な特徴は2つある。第一に、全国の気象観測点の中で、年平均が最も低いこと(釧路, 5.0~5.7 )である。そして第二に、生物が最も活発に活動する夏に霧の発生が多く、6月~8月の日照時間がわが国で最も短くなることである。北海道道東、釧路から根室にかけて夏季に多く発生する霧は、太平洋沖で南下する寒流の親潮が南風を伴い、その外側を北上する暖流の黒潮により暖められ、再び冷たい親潮の上で急激に冷却されて発生するのである。この霧が海側から進入して、釧路の6月~8月にかけて霧が最も多く、年平均では112日にもなる(NACS-J, 1990)。

釧路支庁管内茶内のアメダステータ(札幌管区气象台編, 1982)を参考にすると、年平均気温が5.0、最暖月(8月)の平均気温17.7、最寒月(1月)の平均気温-8.1である。植物の物質生産に関わる吉良(1948)の「暖かさの指数」は46.8・月、「寒さの指数」は-47.3・月となり、推定温度環境は寒冷帯上限に位置する。また、最深積雪は150cm以下と少ないのに対して、年降水量は1,201mm、6~8月の霧日数は18日前後(釧路)で、海霧の発生頻度が高く、夏季冷涼多湿、冬季寡雪寒冷の海洋性気候下にある。

### 2.3 一般的な湿原の種類と植生概況

本研究で後に湿原植生タイプと分光特性を述べるにあたり、以下一般的な湿原の種類とそれに対応した植生の概況を記述する。

湿原中の泥炭地層に対する相対的な地下水位の位置関係により、湿原は、低層湿原、中層湿原、高層湿原の3つのタイプに区分される。この表現は生物学用語であり、地理上の標高の高低とは全く関係がない。なお土壌学では、湿原を泥炭地と定義し、高位湿原、中間湿原、低位泥炭湿原と区分している。本論文では、生物学用語の定義に従って、区分することにする。湿原タイプにより植生も特異的である。低層湿原は、泥炭層に対して地下水位が高く、常に冠水状態にあるため富栄養立地である。ヨシにみられる高芝草原と大型スゲ、マコモを優占種とした混生草原からなり、ヨシ・スゲ群落、ハンノキ、ヤナギ群落を形成している。それに対して高層湿原は、泥炭層に対し地下水位が低く、周囲の水の影響を受けない降水のみによる貧栄養、弱酸性、多湿立地という極端な生態要因に支配されている。特に高層湿原は、ミズゴケ堆積地の凸状地(ハンモックまたはブルテ)とミズゴケ丘塊間の小凹地(シュレンケまたはホロー)により植生は異なる。前者は標徴種をツルコケモモ・ミズゴケクラス、後者はホロムイソウクラスにまとめられる。そのため、高山帯にみられるツツジ科をはじめとする優性低木、コケ植物がマット状に覆いつくしているコケ群落がみられる。そして中層湿原は低層湿原から高層湿原への遷移途上の湿原であり、高層湿原の周辺部に分布している。カヤツリグサ科、イネ科が優先するというのが一般的な特徴で、ヌマガヤ、ホロムイスゲが特徴種である。

すなわち、3タイプの湿原形成過程をまとめると、湿原形成初期段階は、泥炭堆積が地下水面以下のところから始まる。これが低層湿原であり、時間の経過と共に堆積中の泥炭の地表は周囲からの流れ込む養分や土砂の含む水に絶えず涵養される。従って、富栄養状態の地表が、ヨシやスゲの富栄養性の植物を促進させる。さらに時間が経つと、堆積した

泥炭層は、地下水の位置よりも高くなり、泥炭地表は外からの流入水によって涵養されなくなる。これにより、供給水は雨水のみからとなり、適応する植物は、ミズゴケをはじめとした貧栄養性の植物が繁茂するようになる。これが高層湿原となる(図 - 3)。

## 2.4 厚岸湖・別寒辺牛湿原、釧路湿原の標徴植生概況

### 厚岸湖・別寒辺牛湿原の標徴植生概況

厚岸湖に注ぐ別寒辺牛川の河口に広がる湿原は、中流部にかけて大部分がハンノキとヨシの優占する低層湿原が発達している。その別寒辺牛川本流中流域と支流のトライベツ川との合流地点に広がる逆三角形の高層湿原の中の中心部に、ミズゴケ丘塊と貴重な高山植物が非常に発達したところが 100ha ある(岡崎・伊藤, 1992; 伊藤・橋, 1993)。その規模は最大長 1.5km、最長幅約 400mであることが確認されており(岡崎・伊藤, 1992)、ほぼ楕円形をしている。

また、調査地区の植生調査及びグランドトゥルーステータにより作成した厚岸・別寒辺牛湿原植生の教師付き分類画像により、高層湿原は上記の場所以外にも、フッポウシ川上流に点在、イカリベツ川の両岸、オッポロツキ川上流周辺に存在することが明らかになった(図 - 4)。いくつかの既往の調査(神田ら, 1992; 橋ら, 1997)と本研究調査(1997, 1998)の一部から、高層・中層・低層湿原の植生概況を次のようにまとめることができる。

#### 1. 高層湿原植生

##### イソツツジ - チャミズゴケ群落

The *Ledum palustre* var. *diversipilosum* - *Sphagnum fuscum* community

(cf. The *Ledum palustre* var. *diversipilosum* - *Sphagnum fuscum* assoc. Tanaka, 1975)

イソツツジ - チャミズゴケ群落が中心部のブルテを構成する代表的な群落であり、直径 1 m以下、平均高 50cmである。このミズゴケのブルテが東西に約 320m、南北に約 1 km にわたり連続している。この群落は、チャミズゴケ、ヒメツルコケモモ、ガンコウラン、ヤチツツジ、イソツツジなどの常緑矮性低木と、スギゴケ、カタウロコゴケの一種を群落区分種とする高層湿原の極相群落で、北海道では低地から山地まで広く分布している。東道海岸低地でよくみられる湿原に発達する典型的なパターンである。特に、ヤチツツジ、ガンコウラン、ヒメツルコケモモの優出度が高いことが特徴としてあげられる。

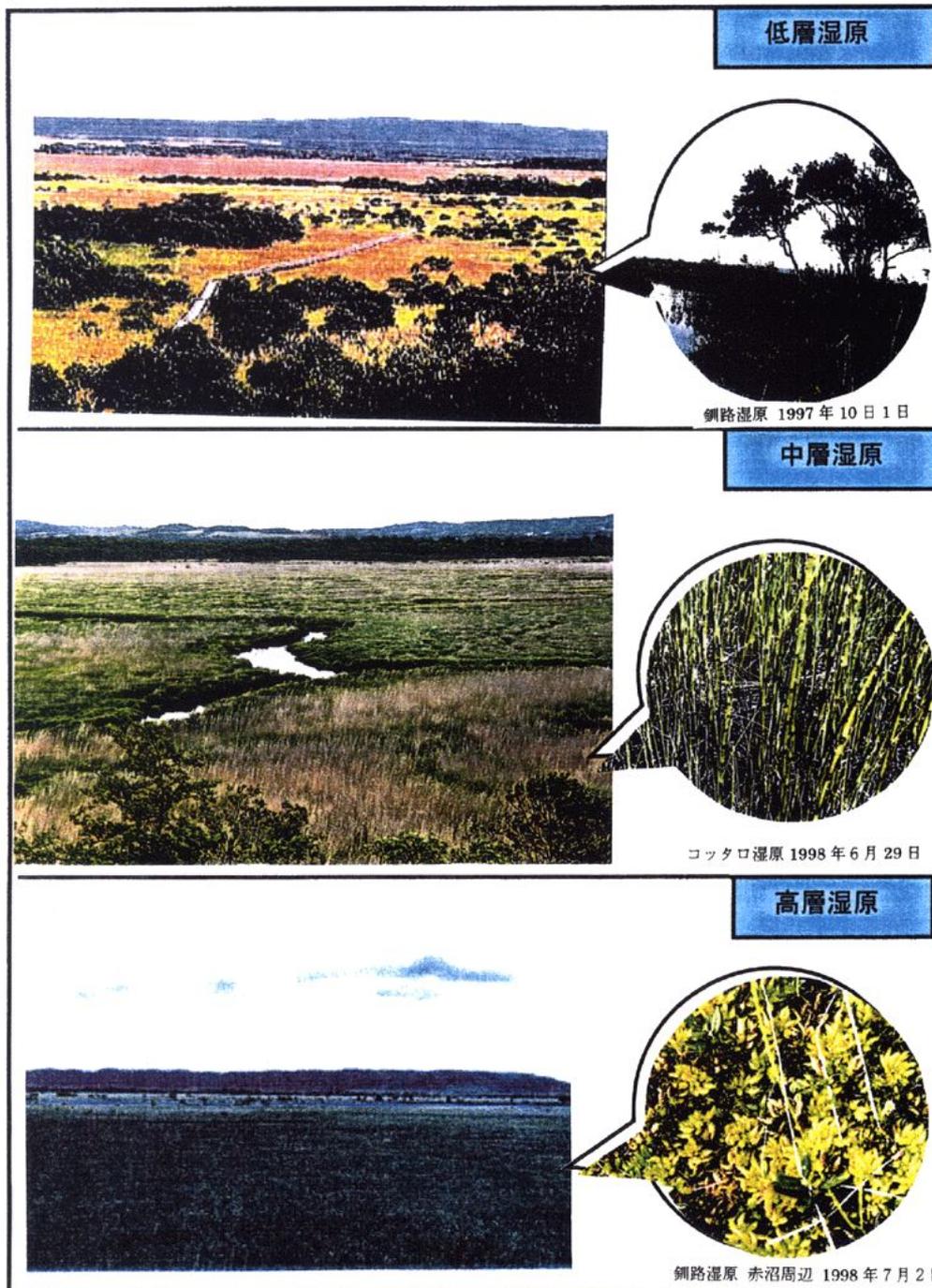
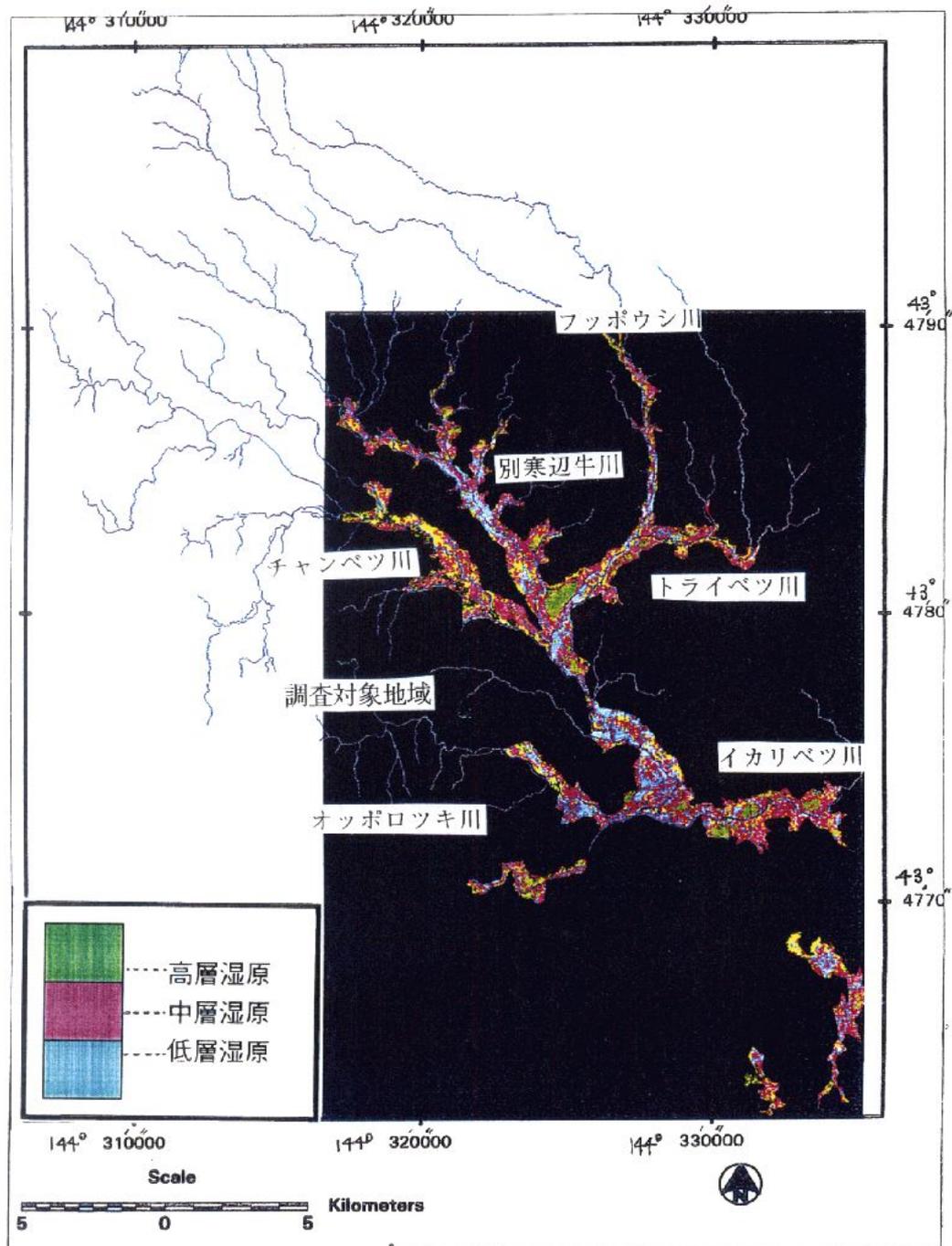


図-3 湿原の種類



図一 4 厚岸湖・別寒辺牛湿原領域：

LandsatTM 画像 (DATA,3.110,105-30,納沙布 1995 年 8 月 17 日)

別寒辺牛川主流とトライベツ川の合流地点に位置する高層湿原及び周辺の中・低層湿原植生のGPSデータによる教師付き分類画像

黄緑色…高層湿原，紫・ピンク色…中層湿原，水色…低層湿原

## イボミズゴケ群落

The *Sphagnum papillosum* community

上記のイソツツジ - チャミズゴケ群落領域の周囲に、特に南東側にかけての緩斜面の下部、平坦地にカーペット状に存在する。草本層の種構成は多様であり、高層湿原要素と低層湿原要素とが混生している。ここは南東部の一部に局在しているカンテスゲ - イボミズゴケ基群集と南東部緩斜面にあるタチギボウシ - イボミズゴケ基群集からなる。さらに、西側から南側の平坦地にかけて、ミカズキグサ - イボミズゴケ基群集とホロムイグサ - イボミズゴケ基群集が分布している。

## ホロムイソウ - ミカズキグサ群落

The *Scheuchzeria palustris*-*Rhynchospora alba* community

(cf. *Scheuchzeria*-*Rhynchospora* community, boreale Ko. Ito et Umezawa, 1970)

平均水深が 13~14cm の満水凹地に成立し、ホロムイソウ、ミカズキグサ、ヤチスゲ、コタヌキモの出現により特徴づけられ、シロミノハリイ - ヒメタヌキモ基群集と典型基群集とからなる。

## 2. 低層湿原

### ヤチヤナギ - ムジナスゲ群落

The *Myrica gale* var. *tomentosa*-*Carex lasiocarpa* var. *occultans* community

(cf. the *Myrica*-*Carex* community *lasiocarpae* var. *occultantis* Ko. Ito et Tachibana 1981; *Carex* community *occultantis* Miyawaki et Yasushi Sasaki 1980)

高層湿原の境界域に広く分布する群落であり、ムジナスゲ - サギスゲ基群集とムジナスゲ - ワラミズゴケ基群集の2タイプからなる。前者は、サギスゲ、ツルスゲ、カキツバタ、ヤナギトラノオ、ミツガシワ、エゾミキソウ、により区分され、後者はワラミズゴケもしくはオオミズゴケ群落により区分される。特に別寒辺牛湿原の特徴として、ツルコケモモ、ヤチツツジ、ホロムイグサの高層湿原要素とチシマノガリヤス、タチギボウシ、クロミノウグイスカグラなどが出現する点を上げることが出来る(橘・伊藤, 1981)。

### ヨシ - イワノガリヤス群落

The *Phragmites australis*-*Calamagrostis langsdorffii* community

(cf. *Calamagrostis*-*Phragmites* community *australis* Miyawaki, et al., 1976)

北海道の低層湿原植生を代表する群落であり、ヨシ、イワノガリヤス、アカネムグラ、ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウなどの群集標徴種・区分種を基本構成要素としている。特に別寒辺牛をはじめとする道東湿原では、ヤチヤナギ、ムジナスゲ、クロミノウグイスカラ、チシマノガリヤスが高常在度で加わり、ヨシ - ハンノキ基群集とヨシ - ツルスゲ基群集に細区分される。前者はハンノキとオオミズゴケの2種からなり、後者はツルスゲ、ヤナギトラノオ、サワギキョウ、エゾノレリンソウ、サギスゲ、エゾミナギク、アキノウナギツカミの出現により区分されている。

### ヤラメスゲ群落

The *Carex lyngbyei* community

(cf. *Caricetum lyngbyei* Okuda, 1988)

北海道の沼沢湿原や低層湿原の流水縁に普通に見られる大形スゲ群落である。特に別寒辺牛湿原に関しては分布域が狭く、トライベツ川支流旧流路に従って分布している。優占種は、ヤラメスゲ、ドクゼリ、ヨシ、サワギキョウ、ミズトクサなどが目立つ。

### 3.ハンノキ群落

The *Alnus japonica* community

(cf. the *Alnus japonica-Carex caespitosa* soc. Ko. Ito et Matsuda, 1992; the *Alnus japonica-Soraesaliafolia* soc. Tachibana et Ko. Ito, 1981)

低層湿原の上記のヨシ - イワノガリヤス群落やヤチヤナギ - ムジナスゲ群落との境界領域に分布している。一般には2 ~ 3 mといった低木で、3階層構造をなしている。つまり、高木層のハンノキまたはヤチダモの混生、低木層のノリウツギやホザキシモツケ、草本層のヨシ、ムジナスゲ、イワノガリヤス、イヌスギナ、ツルスゲ、ミズトクサ、ヤナギトラノオ、ヒメシダ、ニッコウシダなどの低層湿原要素が典型的なパターンである。特に別寒辺牛湿原に関して言えば、ハンノキ林の樹高が5 ~ 6 mと高く、ハンノキ - ノリウツギ - ヤマドリゼンマイ基群集とハンノキ - ホザキシモツケ - ミゾソバ基群集に区分されている。前者はノリウツギ、ヤマドリゼンマイの出現により区分されるが、上記のヤチヤナギ - ムジナスゲ群落に隣接する株分では、ハンノキが3 m程度のものとなり、その林床にはナガボノシロワレモコウ、ツルコケモモ、ミツガシワ、ワラミズゴケ、オオミズゴケ、タチハイゴケなどが多くなる特徴をもつ。一方後者は、河川の堤防沿いに普通にみられる群落タイプで、高木層にヤチダモ、低木層にホザキシモツケが優先する典型的なハンノキ林となる。また、草本層には、希少種といわれるクロハナシノブなどがみられ、コケ層ではヒメヤナギゴケ、オオヤマチョウチンゴケなどの出現により特徴づけられている。

## 釧路湿原に特有の湿原植生の標徴植生概況

本研究の調査対象地域の特徴を中心に述べると、温根内木道周辺の植生は大きく分けて西部丘陵地の森林と東部湿原域の2つに分けられる。この東部湿原域の7 ~ 9以上が低層湿原からなり、高層湿原は数パーセント、次いで中層湿原が高層湿原と低層湿原の境にわずかに存在している(中村, 1993; NACS-J, 1990)。

### 高層湿原

ミズゴケの分布は赤帽の南部周辺に集中している。エゾイソツツジ、ヒメシャクナゲ、ツルコケモモ、ガンコウランなどの寒地性・高山性の矮性低木、トキソウ、ホロムイソウ、ワタスゲ、モウセンゴケといった高山植物もみられる。また赤沼周辺は、池塘(ちとう)とよばれる小さな凹地がミズゴケ群落の中に繰り返し出現する。これは湿地丘と湿地凹地の植生変化が泥炭の成長速度を異ならせ、湿地凹地には定常的に水が存在するようになり、

池沼の泥炭堆積が止まって、岸の一方的な成長が促進して形成される。

#### 中層湿原

釧路湿原の中層湿原では、ミスゴケより富栄養性の植物であるヌマガヤ湿原がその代表である。高層湿原と低層湿原に隣接している。

#### 低層湿原

釧路湿原の低層湿原は、大部分がヨシとスゲであるためフェノロジーが顕著である。早春から5月にかけてスゲがヨシに先立ち繁茂する。初夏になりヨシがスゲを上回る頃、スゲは枯れはじめる。ヨシが新緑を増す8月中旬には、ハンノキの新緑が目立つ。密生したヨシ原は、主に道路や堤防沿い、河川の氾濫しやすい場所に分布している。従って、常に周囲の養分のある水で涵養下にあり、比較的乾燥した生育場所に良好に繁茂するという特徴がある。

## 第3章 調査及び解析方法

低層・中層・高層湿原の典型的な湿原植生を現地で選定し、コドラートを設定した。各調査区において、植生調査、GPS測値、バイオマス測定、葉傾き関数測定、立体写真撮影、方向性分光反射率測定を順に行った。なお、調査は、1997年9月27日から10月1日にかけて初秋に釧路湿原、ビジターセンター周辺木道沿い及び赤沼周辺で行った。また1998年は、1997年と同様の調査地点に加え、6月30日から7月5日の初夏に、温根内木道と釧路川右岸堤防に挟まれた特別保護地域内と、厚岸湖・別寒辺牛湿原で行った。

### 3.1 植生調査

#### 調査方法

湿原全体の相観から、いくつかの群落に分けることが出来るが、群落全体をくまなく調査することは不可能なので、群落内のある地点を抽出して、そこにコドラートを設置した。本研究は単純任意抽出法に基づき、植生調査に関して、0.5m×0.5mのコドラートを用いた。一般的に、高層湿原、高山植物群落の調査方形区は1m×1mとするが、次ぎに述べる層別刈り取り法を行うに際し、多大な労力を費やすため上記の大きさにした。コドラートの表面に10cm間隔の印をつけ、鉛直デジタル写真の目印とした(図-5)。

厚岸湖・別寒辺牛湿原で4コドラートを設置した。まず、別寒辺牛川の本流中流域とトライベツ川との合流部を頂点とする逆三角形の湿原の高層湿原と、それを取り囲む低層湿原の境界域(経緯度座標:43°10'46"N,144°50'56"E)に3コドラートを設置した。群落の定義で言うと半中層湿原のヤチヤナギ-ムジナスゲ群落になる。低層湿原から高層湿原への遷移過程がはっきりとし、典型的な中層湿原植生の標徴種が常在する地点をA地点より低層湿原に近い地点をB地点、高層湿原の群落区分種が常在する地点をC地点とした。さらに、典型的な低層湿原標徴種を必要としたため、別寒辺牛川支流の大別川下流の河川沿いにヨシ-ヤラメスゲ群落の常在する地点をD地点(経緯度座標:43°55'08"N,144°51'58"E)とした。この調査区の調査は1998年初夏に実施した。

次ぎに、厚岸湖・別寒辺牛湿原より西に約52kmに位置する釧路湿原で調査区の選定を行った。釧路湿原東部、北海道阿寒郡鶴居村温根内のビジターセンター付近、温根内木道沿いの中層湿原のヨシ-イワノカリヤス群落の常在する地点をH地点とした。なお、低層湿原のヨシ群落(I地点)とホロムイソウ-ミカズキグサ群落(J地点)の常在する地点は、特別保護地区に登録されており、刈り取り調査の許可がとれなかったため、方向性分光反射率測定のみを行った。この調査区域の調査は1997年の初秋に実施した。次ぎに、温根内の東部に位置するビジターセンターの北部から、湿原を分断する釧路川右岸堤防沿い周辺に同じく3パターンのコドラートを設置した。ここは厚さ1~3mほどの泥炭層に覆われ、最後の氷河期以降に堆積した砂礫と泥層からなる沖積層の高層湿原すなわち、ホロムイソウ-ヤチスゲ群落の常在する地点をE地点とし、同様にイソツツジ-チャミズゴケ群落をF地点、より堤防沿いで低層湿原に近いヨシ群落をG地点とした。堤防に対して北向き鉛直に沿った赤沼への木道(経緯度座標:N43°06'27",E144°21'55")両脇の典

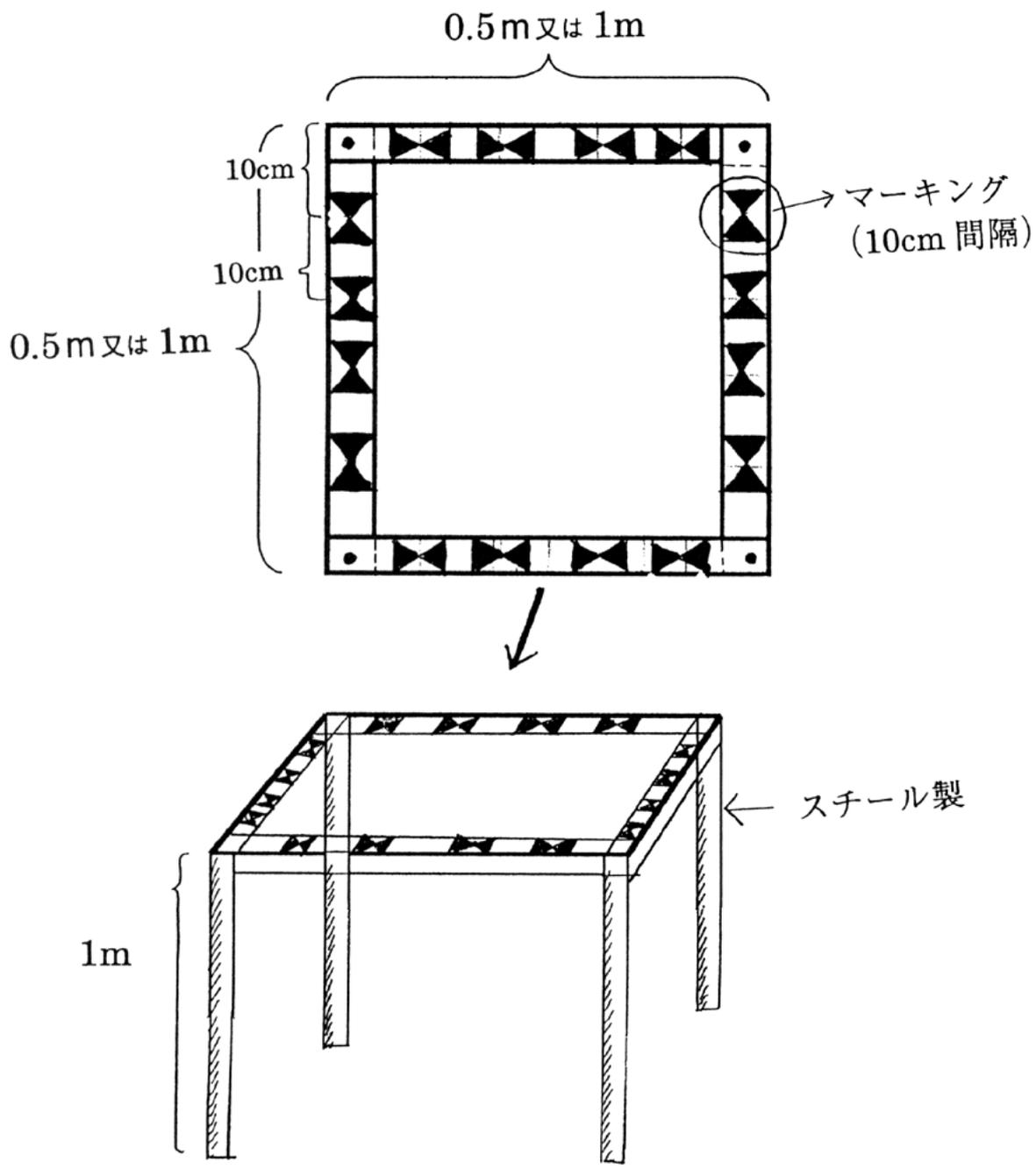


図 - 5 各調査区に設置した方形区 (マーキングは鉛直写真撮影に使用)  
 分光測定 : ( 1 m × 1 m )  
 鉛直写真撮影 : ( 1 m × 1 m )  
 刈り取り調査 : ( 50cm × 50cm )

型的な植生について、26ヶ所の個集の分光測定のみを行った。この調査区での調査は1998年初夏に実施した。

## 解析方法

各コドラート内の植生に対してまず、種の同定を行い、出現極数を求めた。次ぎに、優出度( $r \sim 5$ )と鮮度( $+ \sim 5$ )を求め、草本層、低木層の平均の背丈(cm)、草丈(cm)、を測定した。さらに、草本層、コケ層、低木層の植被率(%)を求め、同時に投影植被率(%)も求めた。この場合、前者はコドラート内の現存植被率そのものであり、必ずしも合計が100%になるとは限らないが、投影植被率は鉛直デジタル写真を用いて鉛直方向からの植被率を求めたもので合計100%とした。なお、デジタル写真はスキャナーで取り込み、Adobe Photoshop 4.0.P.J を用いることで投影植被率を求めた。

H, Dの調査区を低層湿原、A, B, Cの調査区を中層湿原、E, F, Gの調査区を高層湿原と選定したが、特に分光特性の性質を調べる上で、群落の標徴種ではなく、区分種について測定した分光反射率は、各湿原に特異的な標徴種に属するものとして区分した。すなわち各湿原タイプの典型的な優先種に従って植生区分をした。なお、調査区B, Fに関して国定保護植物を含み刈り取り調査ができなかったため、非破壊による分光測定のみを行った。

## 3.2 GPS 測値

GPS (Konica, Lens 28 HG, Land Master)カメラを用いて上記の調査地点、各々に対してコドラート設置した場所全体及び周辺植生を撮影した。なお、計測誤差は数m以内である。これは、後の画像解析において、教師付き分類を行うためのデータとした。

## 3.3 バイオマス測定

### 調査方法

Monji・Saeki(1953)の層別刈り取り法に基づいて行われた。ここで、本来ならば、内部各一定層の相対照度を測定すべきであるが、本研究においては、方向性分光反射率を求めたため、相対照度の測定は行わなかった。

群落内にコドラートを設置し、植物集団の先端から10cm間隔ごとに刈り取る。さらに、本来ならば地下茎も含めるが、湿原の種類により水深が様々であったため、水深10cm以下の地点に関しては地上部全てを、水深が数10cm以上の地点は泥層の見えるところまでを地上部とした。次の操作は現地で行うのが望ましいが、立地条件や天候等から、ポリエチレン袋に小分けにして実験室で行った。各10cm間隔ごとの刈り取った植物をまず種ごとに分け本数と草丈を確認後、光合成器官(同化器官;葉身)と非光合成器官(非同化器官;茎、穂、葉柄、花)に、各層ごと及び種別ごとにマーキングした紙袋に分別した。ここで、光合成器官に関して、各層ごとの葉面積を測定する。調査当日中に、各層ごとの光合成器

官(葉身)を複写し、スキャナーで読み込み、画像デジタル処理(Abobe, Photoshop 4.0.P.J)により、葉面積(?)に換算した。複写後の光合成器官は、乾燥炉にて 80 度で 48 時間、乾燥させ、層別、種別、器官ごとに各々、乾燥質量を測定した。(図 - 6)

## 解析方法

### 生産構造図

植物群落において、葉の光合成に実際に有効な光は群落内部の充分布により支配されている。その充分布は葉の分布により支配されている(Monji・Saeki,1953)。従って、光合成系の分布と非光合成系の空間的配置を、光合成器官である葉群と非光合成器官としての茎の垂直配列に充分布が示された生産構造図を作成することにより、層別による群落内バイオマスの空間配置と充分布との関係が明らかになる。また、これは群落の階層構造は物質生産の機能面とも対応している。この層別刈り取り法による生産構造図は、グラフの中央縦軸を基準とし、これから x 軸の左側に光合成系(F)、右側に非光合成系(C)の乾燥質量(g)をとり、y 軸に各層ごとの地上からの高さ(c m)を表す。また、本来ならば各層のバイオマスと充分布を対応させるために相対照度を同時に示すが、本研究では別のグラフに分光反射率を表示した。なお、湿原は層構造が複雑で、複数の種が混在するため、優占種とその他の種、及び優占種 1 と優占種 2 とその他の種という組み合わせの表示で各地点の生産構造図を作成した。後述する層別の LAD、SLA に対しても同様である。

### 葉面積指数 (LAI)

#### - 1 調査方法

一般に葉面積指数(Leaf Area Index : LAI)は次式で求める。

層別 LAI=(方形区内の各層ごとの全植物が付けている葉の全葉面積)/(方形区の面積)

しかし本研究の目的から、各層内の葉面積分布の詳細を明らかにするため、

各 10cm 層単位の葉面積密度(Leaf Area Density : LAD)を求めた。

層別 LAD=(方形区内の各層ごとの全植物が付けている葉の全葉面積)/(方形区の面積)

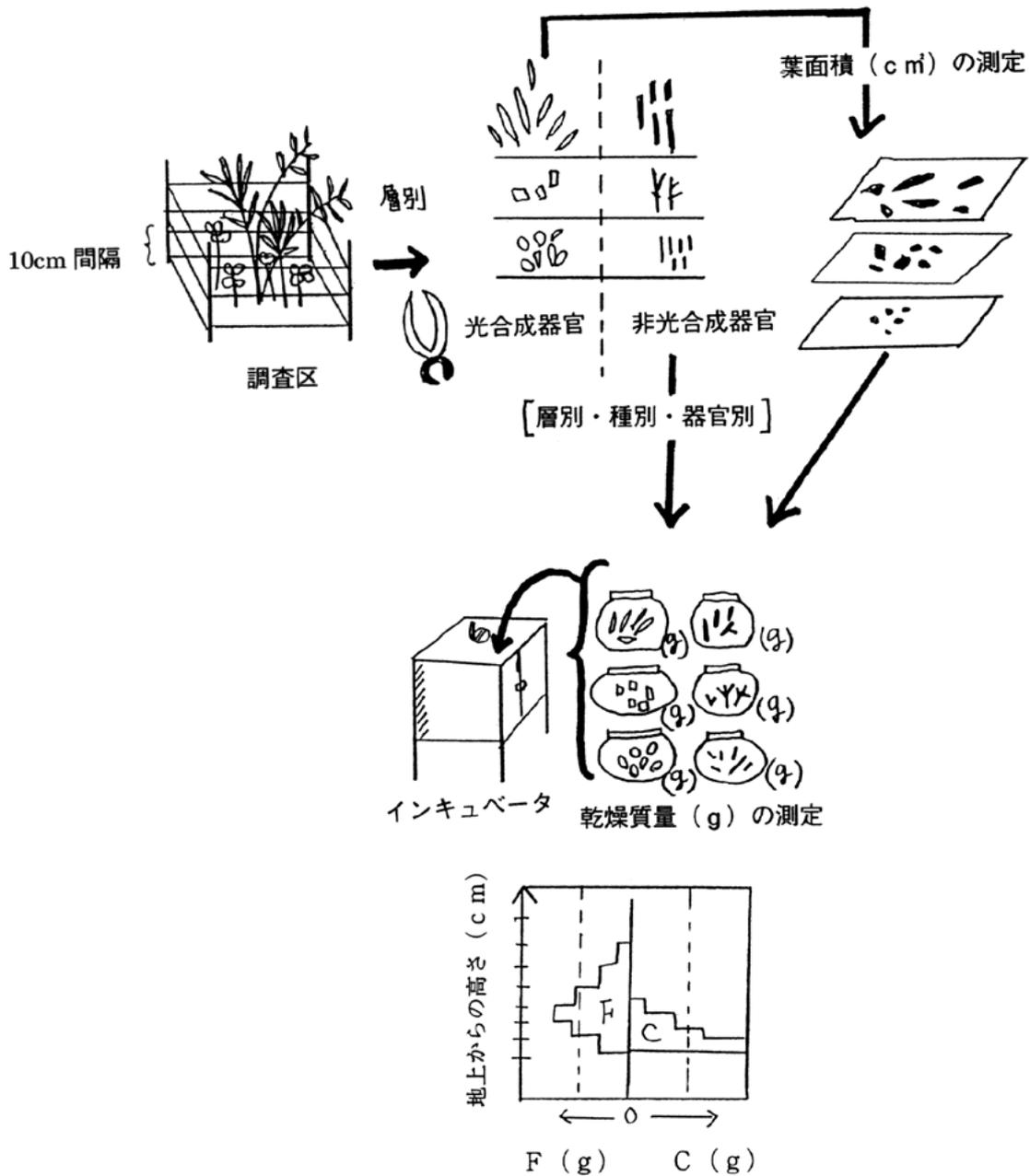


図 - 6

Monji・Saeki(1953)の層別刈り取り調査による生産構造図作成方法：光合成系の分布と非光合成系の空間的配置(光合成器官の葉群と非光合成器官としての茎の垂直配列)が分かる。グラフの中央縦軸を基準とし、これからx軸の左側に光合成系(F)、右側に非光合成系(C)の乾燥質量(g)をとり、y軸に各層ごとの地上からの高さ(cm)をあらわす。さらに、本来ならば充分布(相対照度)を同時に示すが、本研究では別のグラフに分光反射率として置き換えた。

## ． - 2 解析方法

一般に、群落の種類によって異なったL A Iを持ち、生産構造図のパターンと連動することが知られている。例えば、ある群落が上層部の葉に集中する場合、群落内の光の供給源は上層部で吸収されてしまい、下層部の葉群には十分な光が届かない。そのため、群落全体としての光合成量は結果的に低下する。一方、全体的に葉の量が少ない群落は前者に比べて利用できる光の量の絶対量は減る。これは、裏を返せば群落パターンによって、最も効率のよい光合成を行うのに必要な葉の量が存在するよう植物は適応していると考えられる。つまり、最適葉面積指数が存在する(Monji・Saeki, 1953)。それでは、どのような群落パターンの時には、どこの層がもっとも光合成が効率よく行えるような構造形態をとっているのだろうか。これを解明するために上記の生産構造図を作成し、以下の測定を行った。

### 単位葉面積あたりの乾燥質量(S L A)の測定

ここで大切なことは、葉の厚さについて考慮することである。葉面積と葉の乾燥質量は、必ずしも比例関係にあるとは限らないことが明らかにされているつまり、葉面積が大きいからといって、必ずしも乾燥質量が大きいとは限らないし、葉面積が小さくても乾燥質量の大きいものもある。従って、ここで考慮にいれなくてはならないのは、葉の厚さであり、これを表す指標を以下のようにした。層別S L A(Specific Leaf Area) = 層別の葉の単位乾燥質量あたりの葉面積とする。

### 3.4 鉛直デジタル写真撮影

コドラートを地面に対して水平に、太陽方位に対して直角に設置する。固定用三脚にデジタルカメラ2台搭載マウント用ポールを乗せ、鉛直およそ2mの高さからコドラート内植生写真撮影を行う。地上から、コドラート枠の高さ、固定用三脚の高さも測定しておく。なお、後述の方向性反射率測定と同時に、複数色からの写真撮影を行ったが、本研究では立体写真測量を目的にしたものではないので、各コドラート内の鉛直植被率を求める(Abobe, photoshop 4.0 PJ.)ために鉛直写真のみを用いた。

### 3.5 方向性分光反射率測定

#### 測定方法

現地での群落及び個集の方向性分光反射率の測定は、設定した各方形区内植生に対して以下の操作で行った。本研究では、オーシャンオプティックス社製のポータブル可視近赤外スペクトロメータのSD1000を用いた。なお、諸兄については表-1に示す。センサーは、主センサーが対象物からの分光反射エネルギー強度を測定し、副センサーは拡散板、バライタ紙又は標準白色板からの分光反射エネルギー強度測定した。なお、標準白色板は、

表 1 . ポータブル可視・赤外スペクトロメータ SD1000 オーシャンオプティクス社製の諸元

---

測定波長	400 ~ 1000nm ( 性能保証 : 400 ~ 800 )
波長分解能	2 ~ 3 nm
サンプリング間隔	1 nm
視野角	60度
測定時間	10秒
検知素子数	1100個 ( シリコン光素子 )

---

硫酸バリウムをアルミニウム板に塗布したもので、測定時の太陽光をほぼ完全反射する。分光反射率測定前に開始時状態として、太陽高度、太陽方位、測定時刻、センサーのバックグラウンド値を測定した。鉛直写真撮影時と同様のマウント用ポールに、センサを搭載した。センサを群落草冠上、鉛直 2m 真上の高さから、方形区内の植生群落をそれぞれ同一地点において、主センサーを鉛直下向きに向けて、次ぎの順に対象物からのスペクトル反射量を測定した。鉛直方向、観測天頂角に対して前方反射方向(角度; 15°, 30°, 45°)(図 - 7.1)に対して、主センサーで測定後、ほぼ同時に、副センサーによる測定をおこなった。主センサー、副センサーの順に、同地点、同方向、同角度に対して、繰り返し 3 回ずつの測定を行った。なお、現地での個集測定に関しては、対象物から鉛直 20cm 真上の高さから鉛直下向きに向けて測定をした。(図 - 7.2)。

### 測定方法に関する課題及び注意点

調査 1 年目の 1997 年は天候不順なため、ただでさえ霧が多い湿原では、霧や薄雲により植生群落の分光強度の測定時と白色板又はバライタ紙の分光反射強度の測定時とで、日照の強度が短時間、わずか数秒のうちに大きく変動してしまい、植生群落の草冠からの分光反射率がうまく測定できずに終わった。

調査 2 年目の 1997 年は天候に若干恵まれたものの、秒単位で雲や霧がかかるデータは入射光が弱く、500nm 以下の波長で副センサー側のデータがほぼダークに近い値となってしまった。また、700nm 以上の副センサー側のカウント値が低いため、反射率のノイズが増えたと考えられる。

また、ダークカウント値においても、早朝と夕方では大きく異なっていた。これは、スペクトルメータ内部の熱発生源がセンサーに影響を強く与えたと考えられる。すなわち、少なくとも 10 分間隔でダーク値の測定を行わなくてはならないことが明らかになった。なお、本研究は、太陽高度が 60 度前後の時に分光反射の測定を行った。

### 解析方法

主センサーの測定直後に副センサーで測定した。主センサーの測定値も副センサーのそれも、光源が全くないときの状態の測定値でバックグラウンド値の強度を差し引き、副センサーに対する主センサー値の比により分光反射率を算出した。そしてこれに校正係数を掛けた。現場では入射光を測定する副センサー側が、対象物を測定する主センサー側に比べて数倍強いエネルギーを受けざるを得ない。そのため、マスター側と同じ強い強度のエネルギーを受けるとセンサーが飽和し、それ以上の強いエネルギーには応答しなくなる。従って、通常のセンサーの積分時間を短くしたり、減光フィルターの装着を副センサーに施し、スリットを狭めることで副センサーに入射するエネルギー量を減らした。拡散器のすりガラスによる減光を考慮に入れると、校正係数はおおよそ、0.04 から 0.05 の値になった。

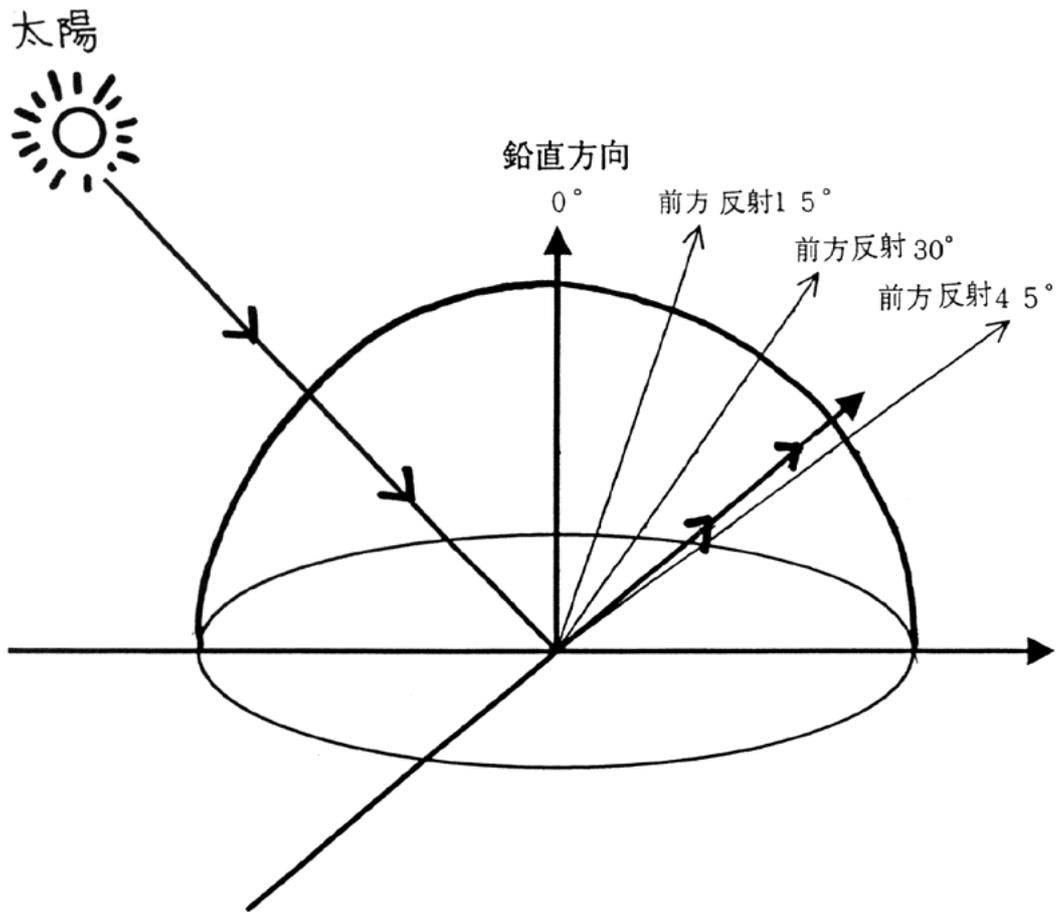


図 - 7.1 方向性分光反射の模式図

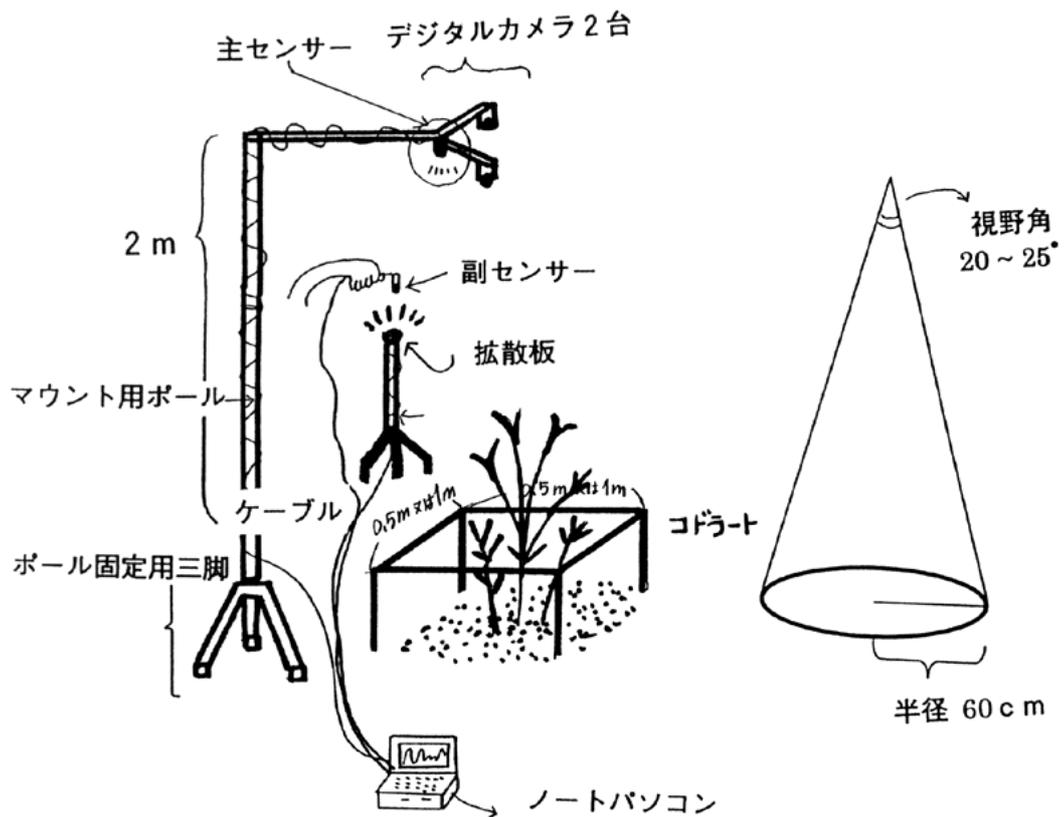


図 - 7.2 群落分光測定の様式図

測定波長範囲は、400～1000nm とした。理由は第 1 に、湿原植生パターンによって波長の分布する域が異なり、おおよそ 400～1000nm をとるとうまくカバーできるからである。第 2 に、SD1000 の信頼できる精度の高い測定波長範囲が、実測値で約 500～1000nm、理想値で 400～800nm であるためである。また、ノイズについては、特に非常に多かった 500～700nm と 800～1000nm に関して、スペックル状のノイズを 10nm 福間隔で除去を行った。分光反射率を求める方程式を次に示す。

分光反射率  $R(\lambda)$  (%)

$$= \{ V_m(\lambda) - V_{m\_dark}(\lambda) \} / \{ V_s(\lambda) - V_{s\_dark}(\lambda) \} \times K(\lambda) \times 100$$

$$K(\lambda) = \{ V_{s\_拡散板}(\lambda) - V_{s\_dark}'(\lambda) \} / \{ V_{m\_バライタ紙}(\lambda) - V_{m\_dark}'(\lambda) \}$$

= 波長 (nm)

$V$  = 分光反射エネルギー強度 ( $\mu W/cm^2$ )

$V_m(\lambda)$  = 主センサーの対象物の分光反射エネルギー強度

$V_s(\lambda)$  = 副センサーの対象物の分光反射エネルギー強度

$V_{m\_dark}(\lambda)$  = 主センサーの対象物測定時のバックグラウンドの分光反射エネルギー強度

$V_{s\_dark}(\lambda)$  = 副センサーの対象物測定時のバックグラウンドの分光反射エネルギー強度

$V_{s\_拡散板}(\lambda)$  = 副センサーの拡散板の分光反射エネルギー強度

$V_{m\_バライタ紙}(\lambda)$  = 主センサーのバライタ紙の分光反射エネルギー強度

$V_{s\_dark}'(\lambda)$  = 副センサーの拡散板測定時のバックグラウンドの分光反射エネルギー強度

$V_{m\_dark}'(\lambda)$  = 主センサーのバライタ紙測定時のバックグラウンドの分光反射エネルギー強度

$K(\lambda)$  = 補正係数：1 サンプルに対して、検知素子 1099 個に対して計算

この補正係数を掛けることで、拡散板に対する、対象物の分光反射強度の値、つまり分光反射率が求まる。

本研究で拡散板を使用した。理由は、標準白色板を利用したのでは、視野角と測定角度の影響を受けるため、全入射光強度を正確に測定できない。従って、標準白色板の上にスリガラスを被せた拡散板を使うことで、測定角度の影響を除去できるからである。MSR-7000 を使った測定では、標準白色板に対して、ほぼ同程度の反射率を持っていることが明らかにされている。なお、1998 年 6 月 30 日の厚岸データは、バライタ紙のデータから補正係数を求めた。それ以降の測定データは、拡散板のデータから求めた。これにより、分光反射率は、対象物の分光反射エネルギー強度/バライタ紙(標準白色板)の分光反射強度の割合を示す。また、主センサー、副センサーのデータの各々の反射強度に対する波長換算は、以下の式により求める。

マスター側： $m = 1.21094981 \times N - 0.00013906 \times N^2 + 157.99043$

スレーブ側： $s = 1.18914265 \times N - 0.00007998 \times N^2 + 159.70104987$

ただし  $N$  は 1～1099 までの検知素子を示す。

### 3.6 個葉のスペクトル反射測定：室内実験による湿原植物のスペクトル反射測定

#### 測定方法

ポット採取法により、方形区内の代表的な混生植物を半径 15cm のビニールポットに採取し、実験室内に持ち帰った。島津製作所の紫外可視分光光度計 (UV2500PC, SP/N 206-82250-91) を用いて個葉の分光測定を行った。なお諸元については表 - 2 に示す。

測定波長は、400nm から 800nm とした。これは、第 1 に、本分光測定器の精度上の問題から、第 2 に、光合成の有効波長域が 395 ~ 700nm であるということ、第 3 に、一般的な緑色植物の分光スペクトル特性から、反射率は、680nm からの急激な上昇後、1400nm 付近まではそのまま平坦な値が続くという 3 つの理由からである。まず、個葉の測定部位に関して、複葉の植物に対しては上部、中部、下部の葉身を測定し、それ以外の単子葉、双子葉に対しては、葉身自体の先端、中部、基部に分けて測定を行った。また湿原は、スゲが枯れる時期と、ヨシが枯れる時期が交互に著しいため、クロロフィルは回収されているが、両者の枯れたサンプルについても同様の測定を行った。全入射光が全て反射するのではなく、種に特異的な吸収率である程度吸収され、一部は透過し、それ以外の残りの入射光が反射光となる。すなわち、 $\text{反射率} = 1 - \text{透過率} - \text{吸収率}$  が成り立つ。葉の内部により、太陽光の入り口となる葉の表は裏よりも水分の蒸散を押さえる適応として、クチクラ層が発達しているが、気孔の数が多い葉の裏面は、棚状組織よりも海面状組織のほうが発達が良い。そのため、一般には同一の葉でも、葉の表と裏とでは各々の値は多少異なる値を示す。本研究の目的に従うために分光反射率測定は、葉の表面側からのデータのみで統一した。

#### 解析方法

ランドサット TM 画像のバンド波長帯と可視光域波長帯の関係と、対象物質反射スペクトルとランドサット TM 画像のバンド波長帯の関係は、それぞれ表 - 3、図 - 8 に示した。測定波長スペクトルから、TM バンドと対応可能な波長データを抽出した。測定波長範囲が 400nm ~ 800nm であるため、バンド 1 からバンド 4 までの対応となった。なおこの 2 軸によるバンドの組み合わせで考えると、6 通りである。さらに、3 軸によるバンドの組み合わせで 4 通り考え、湿原タイプ特有の植生スペクトルの各種による違いが顕著に反映される最もよく分散されたバンドの組み合わせを調べた。山形ら (1995) は、MSR-7000 の分光ジオスペクトロメータを使用し、ランドサット MSS 画像で植物の現存量に対して近赤外、表面水分含量に対して中間赤外の 2 軸を用いるだけでも、本研究とおおよそ似た凡例を持つハンノキ、ヨシ、スゲ、ミズゴケといった代表的な植生については、スペクトル的に分離が可能であることを明らかにしている。しかしながら、高層湿原であるミズゴケやチトウ、イソツツジ科の植生混在域に関しては分類が不可能であったという結果になっている。

本研究の分光測定は、実験室内の安定した所で測定したため、現地で測定したポータブル分光測定器 SD1000 より、はるかにノイズは生じなかった。なお、調査風景を図

表. 2 . 紫外・可視分光光度計UVPC2500, 島津製作所の諸元

---

測定範囲	190 ~ 1100nm ( 性能保証 : 190 ~ 900 )
波長分解能	1 nm
サンプリング間隔	0.5nm
測定時間	2分30秒
検知素子数	800個

---

表 - 3

Landsat T M画像のバンド波長帯と可視光波長帯の関係

波長(μ m)	色	LandsatTM band波長帯(μ m)	観測項目	
0.4-0.48	紫、藍、青	0.45-0.52	band1	沿岸水・大気・針葉樹、広葉樹
0.48-0.50	青緑			
0.50-0.55	緑	0.52-0.60	band2	水陸の区別、植物活性
0.55-0.60	黄	0.63-0.69	band3	クロロフィル吸収、水陸の境界
0.60-0.65	橙			
0.65-0.75	赤、深紅			
		0.76-0.90	band4	海陸の区別、バイオマス、水塊
		1.55-1.75	band5	土壌・植物水分
		10.4-12.5	band6	地表の熱分布
		2.80-2.35	band7	地質、熱水変性岩

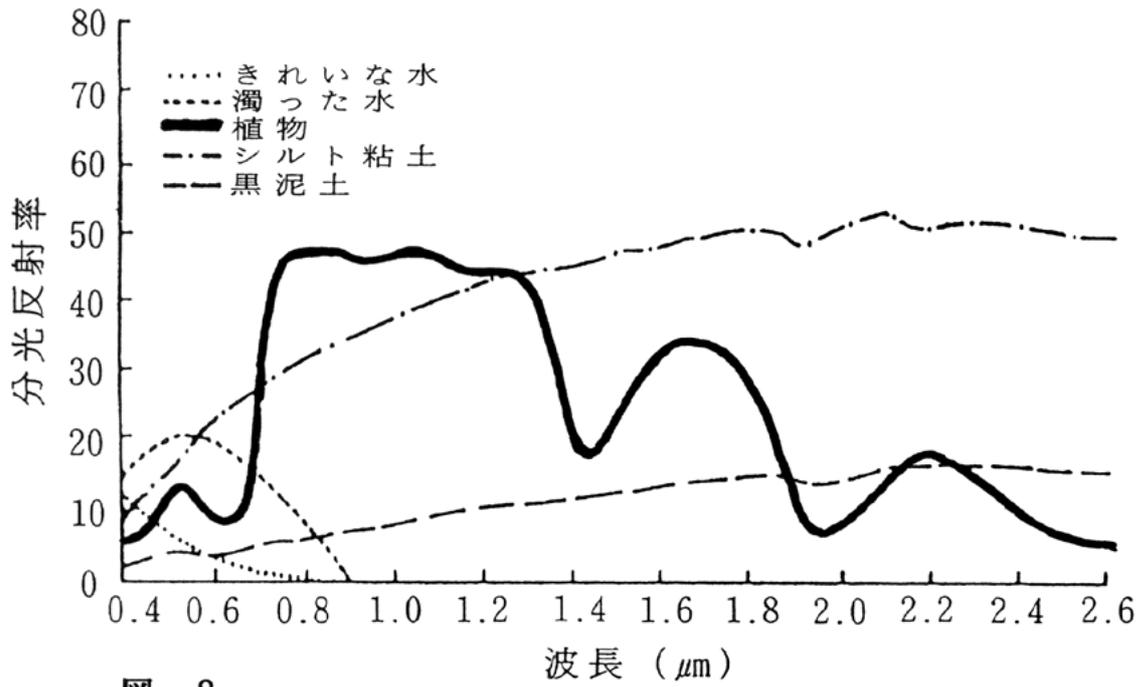


図-8  
対象物の反射スペクトルと Landsat TM band の関係, 日本測量協会 (1992)

- 10 に示す。植生把握のための衛星画像は Landsat TM 画像の DATA,3.110,105-30, 1995 年 8 月 17 日に撮影されたデータを使用し、GPS カメラにより撮影した植生写真と記録された経緯度座標から、高層・低層・中層湿原植生の教師付き分類を行った。

立体写真測量  
 ポータブル分光ロメーターによる分光反射測定  
 GPSによる観測座標点の測定



## 第4章 調査・解析の結果と考察

### 4.1 植生調査結果と現存植被率による湿原タイプ別植生区分結果

植生調査結果を表 - 4 に示す。植物社会学的方法によって調査区の植生を類型化した結果、調査区 A ~ H を通して、大きく 6 タイプの階層に区別することができた。これを、各湿原植生タイプでみると、低層湿原 1 タイプ、中層湿原 3 タイプ、高層湿原 3 タイプという結果になった。

#### 階層別

大別して低木層、草本層、コケ層の 3 層であるが、詳細にみると、高い順に、(1). カバノキ科のヤチハンノキ、ヤナギ科のヤチヤナギで代表される落葉・常緑寒冷湿原低木林、(2). 単子葉植物の数種のスゲに代表されるカヤツリグサ科とヨシやイワノガリヤスに代表されるイネ科の多年草、(3). 同じく被子植物、双子葉植物のバラ科、オトギソウ科、ヤマゴボウ科、マメ科、ユリ科、シソ科の多年草と、シダ数種でみるトクサ科をはじめとするその他数種の草本、(4). 常緑・落葉矮性低木のツツジ科数種と、常緑矮性低木のガンコウラン、(5). コケ植物部門を代表とするミズゴケ科、スギゴケ科、シノブゴケ科である。

#### 湿原植生タイプ別

##### ・ 低層湿原植生(調査区 H , D)

H と D 地点では異なる地域の低層湿原を調査した(表 - 4)。ヨシ - ヤラメスゲ群落 (H)、ヨシ - イワノガリヤス群落(D)の両者とも草本層の現存植被率は 100%を占めている。平均草丈は 110cm ~ 130cm であり、出現極数は 10 以下であるが、優出度・鮮度でみると、サギスゲ、ホロムイスゲ、ツルスゲ、オオカワズスゲといったカヤツリグサ科が圧倒的な割合を占め、次いでヨシ、イワノガリヤスにみるイネ科が 1/5 ~ 1/3 占める割合となっている。このように、調査区 H , D とともにスゲ > ヨシの割合であるが、D 地点にはほとんど見られなかった草本層として、調査区 H にはオトギソウ、アキノキリンソウ、エゾヒメシダ、コシオガマ、ミヤマセンキュウ、ヤマゴボウがあった。このようにして、H , D 地点は、ほぼ同じ分類として低層湿原 1 パターンに分けられた。投影植被率の[ S (shrub)・H (herb)・M (moss) ] (%)をみると両者とも(0・100・0)(%)となり、鉛直方向からみても、草本層がすべてを占めていることが分かる。

表-4 厚岸湖・別寒辺牛湿原(A, B, C, D)、釧路湿原(E, F, G) 植生調査結果

Quadrat size (cm <sup>2</sup> )	調査面積50(cm <sup>2</sup> )	Fen		Transitional			Bog		
Floristic composition of each site	調査区組成表	低層		中層			高層		
Number of site area	調査地	St.4	St.2	St.1	St.1	St.1	St.3	St.3	St.3
Number of quadrat	コードラート	H	D	A	B	C	E	F	G
date (year/month/day)	調査年月日	97.9.29	98.7.1	98.6.30	98.6.30	98.6.30	98.7.3	98.7.4	98.7.4
mean herb layer height (cm)	草本層(H)の平均草丈(cm)	110.4	130	26.5	31.5	-	24	32	110
mean shrub layer height (cm)	低木層(S)の平均草丈(cm)	-	-	-	105	-	15	16	5
mean degree of vegetation cover (%)	植被率(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Herb layer (H)	草本層(H)	100	100	90	70	95	90	40	100
Moss layer (M)	コケ層(M)	-	-	15	-	95	100	100	-
Shrub layer (S)	低木層(S)	-	-	-	95	-	40	90	-
	投影植被率(S+H+M) (%)	0.100.0	0.100.0	0.90.10	90.10.0	0.40.60	30.60.10	50.45.5	100.0.0
Leaf Area Index	SLA	3.68	3.68	1.98	1.98	2.33	2.04	2.04	1.48
species/mean number of species	種ノ出現種数	7	7	7	4	7	12	10	6
dominance・sociability	優先度・群度(本数)	d・V	d・V	d・V	d・V	d・V	d・V	d・V	d・V
<i>Carex brunnescens</i>	ヒメカワズスゲ	H	.	.	.	5.4 (136)	.	.	.
<i>S. tabernaemontani</i>	フトイ	H	.	.	.	.	.	.	.
<i>Carex tenuiflora</i> Wahlenb	イッポンスゲ	H	.	1.+(8)	.	.	.	.	.
<i>Carex lasiocarpa</i>	ムジナスゲ	H	.	.	3.5 (120)	.	5.5	5.5 (58)	4.4
<i>Carex pseudo-curaica</i>	ツルスゲ	H	.	.	.	.	.	2.2	.
<i>Carex middendoffii</i>	ホロムイスゲ	H	.	4.4 (42)	.	3.3 (44)	.	2.2 (16)	3.3
<i>Eriophorum gracile</i>	サグスゲ	H	5.5 (504)	5.5 (240)	.	.	.	2.2	4.4 (24)
<i>C. rhynchophyssa</i>	オオカサスゲ	H	.	.	3.3 (38)	2.2 (3)	.	.	.
<i>Carex stipata</i> Muhlenberg	オオカワズスゲ	H	.	3.3 (26)	.	.	.	.	2.2 (53)
<i>Eriophorum vaginatum</i>	ワタスゲ	H	.	.	.	.	1.1 (4)	.	.
<i>C. lyngbyei</i>	ヤラメスゲ	H	.	3.3 (20)	.	.	.	.	.
<i>Calamagrostis canadensis</i>	イワノガリヤス	H	4.4 (30)	.	.	.	.	.	.
<i>Calamagrostis hakonensis</i>	ヒメノガリヤス	H	.	.	.	.	.	.	.
<i>Calamagrostis arundinacea</i>	ノガリヤス	H	.	4.5 (45)	.	.	.	.	.
<i>Phleum pratense</i>	ヨシ	H	4.4 (40)	5.5 (51)	.	.	.	.	5.5 (19)
<i>phlaris arundinacea</i>	クサヨシ	H	.	.	.	.	.	.	.
<i>Vicia amoena</i> Fisch	ツルフジバカマ	H	.	.	r.+(13)	.	.	.	.
<i>Scutellaria strigillosa</i> Hemsl.	エゾナミキソウ	H	.	.	.	.	.	.	.
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	ミズトクサ	H	.	.	r.+(5)	.	r.+(3)	.	.
<i>Equisetum hyemale</i> L.var.hyemale	ヒメトクサ	H	.	.	.	.	.	.	.
<i>Thelypteris palustris</i>	ヒメシダ	H	.	.	2.2 (14)	4.3 (6)	2.2 (23)	.	.
<i>Athyrium breuifrons</i>	エゾヒメシダ	H	r.+(3)	.	.	.	.	.	.
<i>Sanguisorba tenuifolia</i> Fisch.alba	ナガボシロワレモコウ	H	.	.	r.+(1)	.	1.2 (2)	.	2.2
<i>Sanquisorba tenuifolia</i> Fisch.var.garandoi	チシマワレモコウ	H	.	.	.	.	.	r.+	.
<i>Hypericum erectum</i>	オトギソウ	H	3.4 (9)	.	.	.	.	.	.
<i>Phytolacca esculenta</i>	ヤマゴボウ	H	.	r.+(2)	.	.	.	.	.
<i>Hosta rectifolia</i>	タチギボウシ	H	.	.	.	.	r.+(3)	r.r (2)	2.2
<i>S. virga -aurea</i> v.asiatica	アキノキリンソウ	H	3.4 (10)	.	.	.	.	.	.
<i>Phtheirospermum japonicum</i>	コシオガマ	H	r.+(2)	.	.	.	.	.	.
<i>Conioselinum filicinum</i>	ミヤマセンキュウ	H	r.+(1)	.	.	.	.	.	.
<i>B. ovalifolia</i> Rupr.	ヤチカバノキ	S	.	.	.	.	.	.	.
<i>B. ovalifolia</i> Rupr.	(ヒメオノオレ)	S	.	.	.	.	.	.	.
<i>Alnus hirsuta</i>	ケヤマハンノキ	S	.	.	.	.	.	.	.
<i>Alnus japonica</i>	ハンノキ	S	.	.	.	.	.	.	.
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	ヤチヤナギ	S	.	.	.	5.5 (1)	.	.	.
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	(ヤチツツジ)	S	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ladum palustre</i> U.	イソツツジ	S	.	.	.	.	.	2.2	.
<i>Ledum palustre</i> L.	ヒメイソツツジ	S	.	.	.	.	.	4.4 (26)	.
<i>Ledum palustre</i> v. diversipilosum	エゾイソツツジ	S	.	.	.	.	.	4.4	2.2 (4)
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	ホロムイソツツジ	S	.	.	.	.	.	4.5 (17)	3.4
<i>V. oxycoccus</i>	ツルコケモモ	S	.	.	.	.	.	4.5	.
<i>V. uliginosum</i>	コケモモ	S	.	.	.	.	.	3.3	.
<i>Empetrum nigrum</i> v. japonicum	ガンコウラン	S	.	.	.	.	.	5.5	5.5
<i>Bryonoguchia molkenboreni</i>	ホンシノブゴケ	M	.	.	.	.	.	.	.
<i>Shagnum magellanicum</i>	ムラサキミズゴケ	M	.	.	.	.	.	.	.
<i>Shagnum fuscum</i>	チャミスゴケ	M	.	.	r.+	.	.	4.4	4.4
<i>Sphagnum papillosum</i>	イボミスゴケ	M	.	.	r.+	.	5.4	.	4.4
<i>Polytrichum juniperinum</i> Will.	スギゴケ	M	.	.	.	.	.	5.5	5.5

## ・ 中層湿原植生（調査区 A , B , C）

ヤチヤナギ - ムジナスゲ群落にあたるが、タイプはそれぞれ異なる。草本層の平均背丈は 25 ~ 30cm で、低木層でも 1 m 弱であった。全体的に、低層湿原植生のおよそ 1/4 の背丈草冠である。特に A ~ C の調査区は混生遷移過程がはっきりとしていた。そこで、典型的な標徴種が常在する調査区を A、より低層湿原要素をもつ調査区を B、そしてより高層湿原要素をもつ調査区を C として選定した。A 地点はムジナスゲ、ヒメカワズスゲ、サギスゲといったスゲが主に優占し、その他の草本としてミズトクサ、ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、ツルプジバカマが常在した。そしてわずかなチャミズゴケとイボミズゴケからなる。B 地点は、ヤチヤナギが優占している。その他の草本としてホロムイソゲ、サギスゲが常在し、ヒメシダが常在し、ヒメシダが点在した。C 地点は高層湿原要素のイボミズゴケとムジナスゲが優占し、その他の草本としてミズトクサ、ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシ、アキノキリンソウから成る。現存植被率は A , B , C 地点とも、草本層の値がそれぞれ 90(%)、70(%)、95(%)と高くなり、加えて A 地点でコケ層が 15%、B 地点で低木層が 95%、C 地点でコケ層が 95%となった。しかし、投影植被率 ( S · H · M ) (%) で見てみると、A 地点は ( 0 · 90 · 10 ) (%)、B 地点はヤチヤナギが上層を占めるため、( 90 · 10 · 0 ) (%) となり、C 地点はコケと草本が同比率で混在していたため、( 0 · 40 · 60 ) (%) となった。すなわち、B 地点のように、実際のヤチヤナギの現存植被率が 95% でスゲが 70% でも、鉛直真上方向から見下ろすと、階層の差が大きい植生は、一方の階層の大きな層にカバーされ、見えなくなることがわかった。

## ・ 高層湿原植生（調査区 E , F , G）

ホロムイソウ - ヤチスゲ群落の常在する地点を調査区 E とし、イソツツジ - チャミズゴケ群落の常在するいわば、純粋な高山植物が群集している高層湿原ブルテ植生を調査区 F、湿原要素の強いヨシ群落の優占している調査区を G とした。草本層の平均背丈は G 地点を除いて 20 ~ 30cm であり、低木層では平均 10 ~ 15cm であった。現存植被率でみると、G 地点以外はコケ層が 100% を占め、その他の草本層が E 地点で 90%、F 地点で 40% となり、低木層が E 地点で 40%、90% と逆のタイプの植生であることが判明した。つまり、E 地点は高層湿原でも比較的に中層湿原要素の強いタイプ、F 地点は典型的な高層湿原のタイプである。G 地点に関して、高層湿原でも右岸堤防沿いに隣接していたため低層湿原要素が強く、植被率は 100%、草本層のヨシが占めていた。投影植被率 ( S · H · M ) (%) で見てみると、E 地点は ( 30 · 60 · 10 ) (%)、F 地点は ( 50 · 45 · 5 ) (%)、そして G 地点が ( 100 · 0 · 0 ) (%) になった。すなわち、鉛直方向から見ると、草本層とコケ層の混合植生ではあるが、コケ層が、草本層にカバーされて見えなくなるに等しいことがわかった。

このようにして見てみると、過去の植生リモートセンシングの研究において、現存植被率のみで議論されているため、投影植被率を考慮していない。低層 - 高層タイプ、中層湿原 - 高層タイプのように階層構造に大きな差をもつような湿原タイプに対しては、投影植被率を適用すべきであろうし、バイオマス全てを扱う植生リモートセンシングの場合は、やはり現存植被率と合わせて考慮しなくてはならないと考えられる。特に、後に記述する方向性分光反射率を議論する場合には、分光反射率測定方向からのデジタル写真から求めた投影植被率と現存植被率を目的に応じて使い分けるべきである。これらを目的に合わせてうまく使い分け、場合によっては組み合わせて植被率を調査することが望ましいと考えられる。

## 4.2 投影植被率による植物区分の試み

上記の結果を踏まえ、後に述べるバイオマス量と分光反射率解析に対応させるべく、本研究では投影植被率から以下のような植生区分を行った。まず、低層湿原のHとD地点、中層湿原のA地点、そして高層湿原のF地点は典型的なパターンであるため、変更は行わなかった。なお、B、F地点は国定保護植物のため刈り取り調査は行えなかったが、分光測定はおこなった。投影植被率からみて高層湿原の低層湿原要素の強いG地点と、中層湿原の低層湿原要素の強いBを新たに低層湿原植生の区分とした。さらに、中層湿原のA地点と高層湿原のE地点は、優占種がスゲであり、その他の草本、その他の低木から成るといふ共通点から、スゲを第一優占種とするH、D、A、E地点を新たに低・中層湿原として区分をした。最後に、中層湿原の高層湿原要素の強いCを高層湿原 Fに加えた。以上、低層湿原をG、B地点とし、低・中層湿原をH、D、A、E地点に、高層湿原をC、F地点として植生区分を試みた。図 - 10 に植生区分、図 - 11 に鉛直撮影写真を示す。

## 4.3 層別バイオマスとLAD及びSLAの解析結果

地表に到達する太陽光(全短波放射)のうち、光合成に有効な日射エネルギーは、45%を占めると言われている。重要なのは、葉群が太陽放射光の吸収単位であるということである。従って植物にとっては、光合成や物質生産をおこなうにあたり、より多くの太陽光を吸収するだけでなく、より高い利用効率であることが望まれると考えられる。太陽光を効率よく吸収するために結果として、葉群は様々な空間配置をとっている。従って、バイオマスの空間的分布を調べるのが重要となる。すでに、群落を構成する個々の葉がどのような空間配分関係を取り、太陽光を受光しているのか、群落の構造と光環境、群落の生理的機能を1つの系とみなして、数理的モデルを用いて植物生態系の機能や構造を明らかにしようとした研究は、初期において Monji・Saeki(1953)により、光環境と物質生産機能の関係が解明されている。本研究は、門司・佐伯の解析方法に従い、以下のように特徴づけることで、湿原タイプごとのバイオマスと光環境との関係を明らかにしようとした。

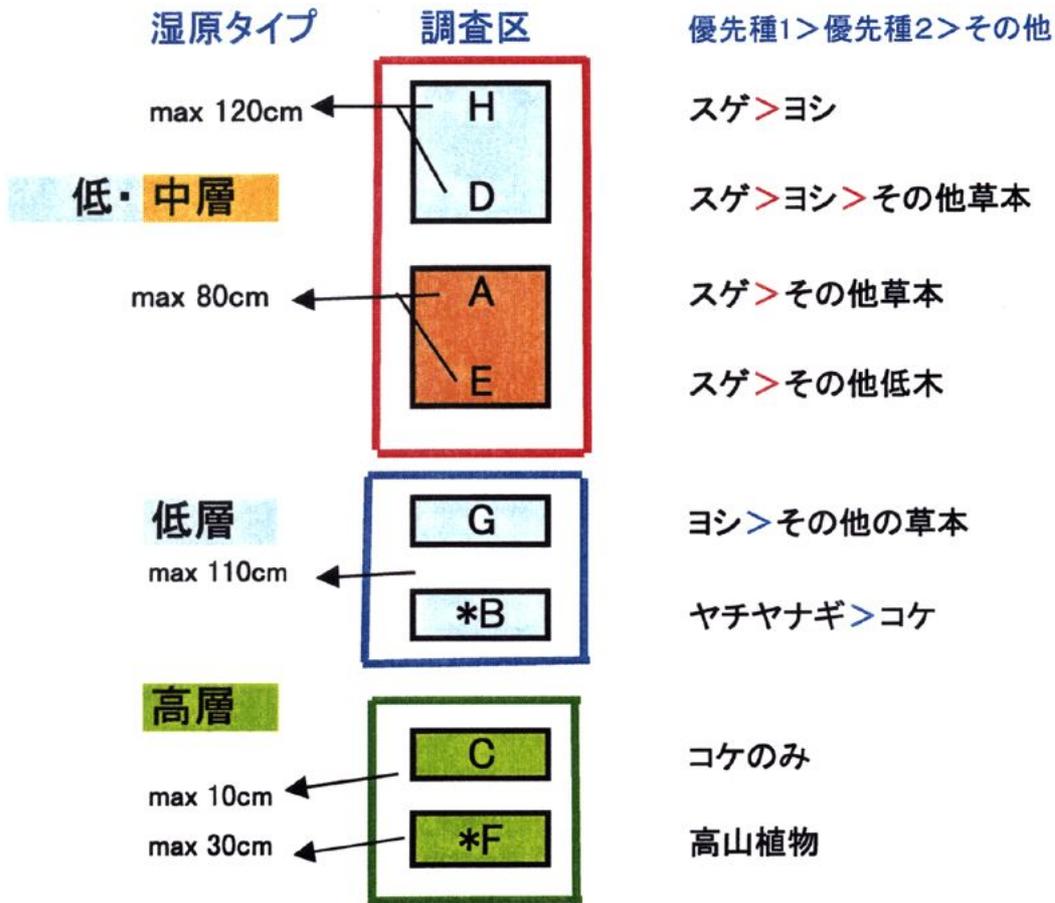
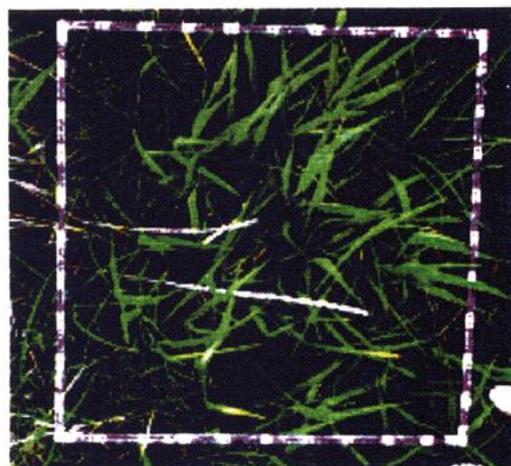


図-10 植生区分：分光反射測定結果と対応させるために、調査区内の植生に関して、群落区分種は標徴種に属するものとした。  
その結果、低・中層湿原植生のスゲ優先タイプの調査区H, D, A, E、  
低層湿原植生の調査区G, B、高層湿原植生の調査区C, Fに区分した模試図を示す。



**D**  
低層湿原植生  
(スゲ>ヨシ)  
1998年7月1日撮影



**G**  
低層湿原植生  
(ヨシ)  
1998年7月4日撮影



**E**  
中層湿原植生  
(スゲ>矮性低木林)  
1998年7月3日撮影

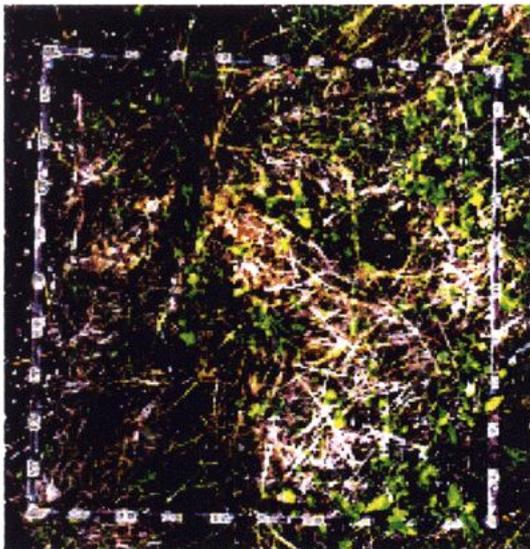


**A**  
中層湿原  
(スゲ)  
1998年6月30日撮影

図-11. 調査区A~Gにおいて草冠2 mの高さから撮影した鉛直写真



**B**  
低層湿原植生  
(湿生低木林：ヤチヤナギ)  
1998年6月30日撮影



**C**  
高層湿原植生  
(コケ>その他草本)  
1998年6月30日撮影



**F**  
高層湿原植生  
(コケ>高山植物)  
1998年7月4日撮影

1. 群落の各層内の相対照度測定は行わず、ポータブル可視赤外スペクトルメータにより、草冠の分光反射率を測定した後で、刈り取り調査により生産構造図を作成した。

2. バイオマスの種別および層別の空間的な分布の特徴を把握するために、単位群落占有土地面積当たりの全葉面積すなわち LAI に関しては、群落葉層の任意の深さまでの個集全部の葉合計値を群落占有土地面積で割った値（積算葉面積指数）を求めずに、各 10cm 層ごとに個葉全部の集合計値を群落占有土地面積で割った値（層別の葉面積密度）を求め、層別乾重量とを対応させた。

3. 葉の厚さの指標として層別の SLA、すなわち各層 10cm ごとの 1 方形区内における全葉面積を同じ層の全乾燥質量で割った値を求めた。

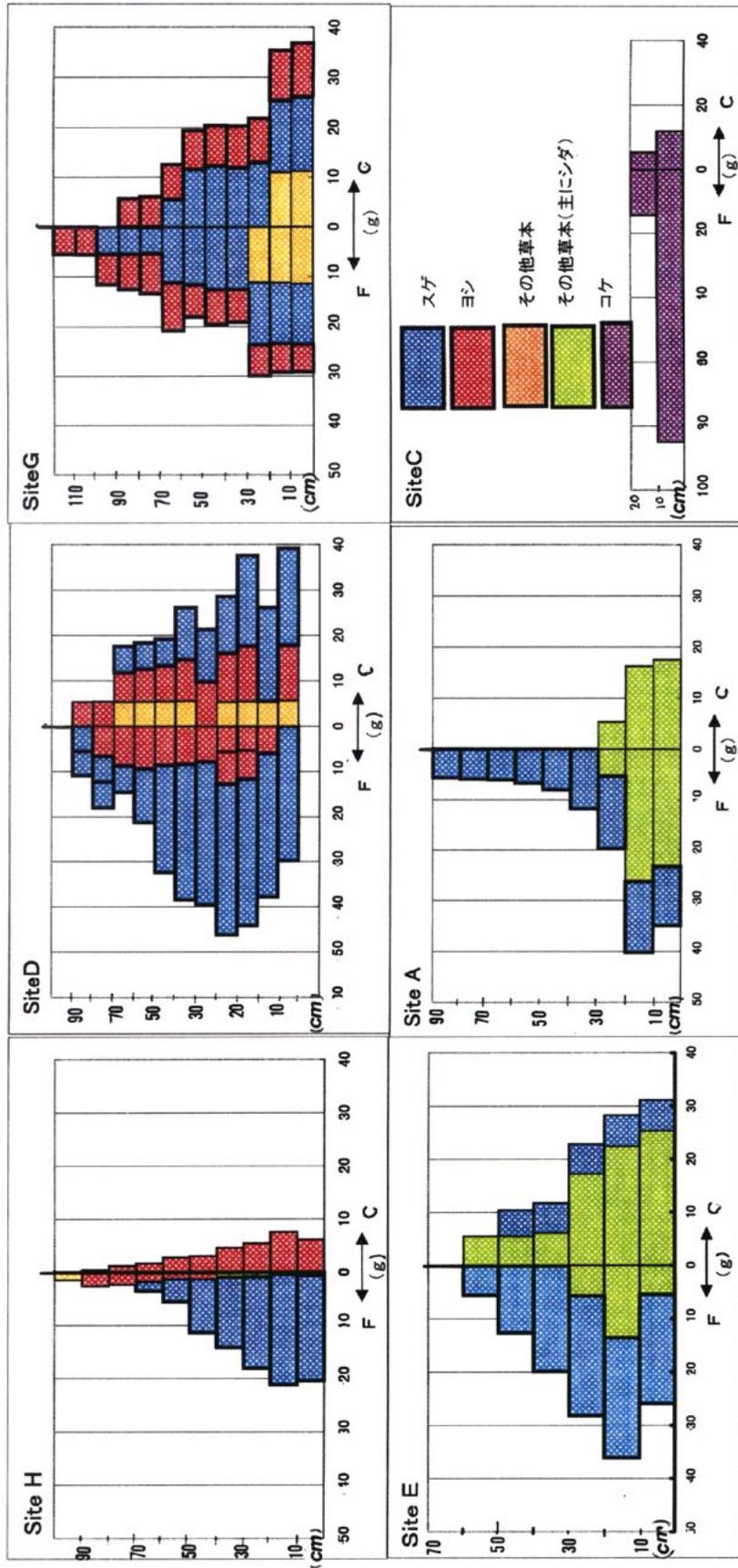
## 生産構造図

植物群落内の充分布は、各層層内の葉の分布により支配されていることが明らかにされている。門司・佐伯による生産構造図を作成することにより、光合成系に注目した群落断面積と光鉛直分布図を理解することができる。生産構造図の結果は図 - 12 に示す。この図は、横軸には主部の F が光合成器官、右部には非光合成器官の乾燥質量 (g) を示し、縦軸には地上からの高さ (cm) を表す。生産構造図のみから判断すると、D と G 地点、H と A 地点が似たような傾向を示す。すなわち、下層ほど、D と G が徐々に増加するタイプ、H と A が急に増加するタイプ、E が中間の層で増加するタイプを示している。ミズゴケ群落の C 地点に関しては背丈が 20cm 以下なので層別にみるほどの高さはないが、下層の乾燥質量の方が大きな値を示した。生産構造図は乾燥質量のバイオマスと地面からの高さを反映しているが、光環境とバイオマスを明らかにする上で重要な葉の重なり具合と葉の厚さを反映させるために以下の解析結果を示す。

## 層別 LAI

光合成器官のバイオマス測定単位として、現在では生重または乾燥質量、葉面積、などが用いられているが、光要因との関係では葉面積の解析が有効であると考えられている。後に述べる層別刈り取り調査法による生産構造図と照らし合わせるため、まず下から 10cm 間隔の層別の葉面積密度を求めた。その結果を図 - 13 に示す。縦軸は下からの高さ (cm)、横軸は乾燥質量 (g)、このバブルの大きさを、層別の葉面積密度として示した。なお、参考までに層別の葉面積の結果は図 - 14 に示すが、8 コドラート金での面積を 50cm × 50cm に揃えているので、グラフのバブルの傾向は、層別の葉面積、層別の葉面積密度ともに同じ傾向を示す。この表示により、各植物タイプごとの一定層ごとのバイオマスと面積的な広がり空間的に把握する事ができる。

まず、スゲに見る単子葉タイプ:調査区 H, D, E, A、つまり優占種がイネ科やカヤツリグサ科タイプの草本層に共通して、全体層のおよそ 1/3 ~ 1/4 のところに LAI の値が最大となっていることである。これを先ほどの植生区分と比べてみると、確かに、同じ低・



図一12 層別刈り取り法による生産構造図は、グラフの中央軸を基準とし、これからX軸の左側に光合成系(F)、右側に非光合成系(C)の乾燥質量(g)をとり、Y軸に各層ごとの地上からの高さ(cm)を著す。また、本来ならば光分布として相対照度を同時に示すが、本研究では別のグラフに分光反射率を表示した。低・中層湿原植生の調査区H、D、E、Aのスゲ優占タイプ、低層湿原植生の調査区Cのコケ優占タイプを示す。

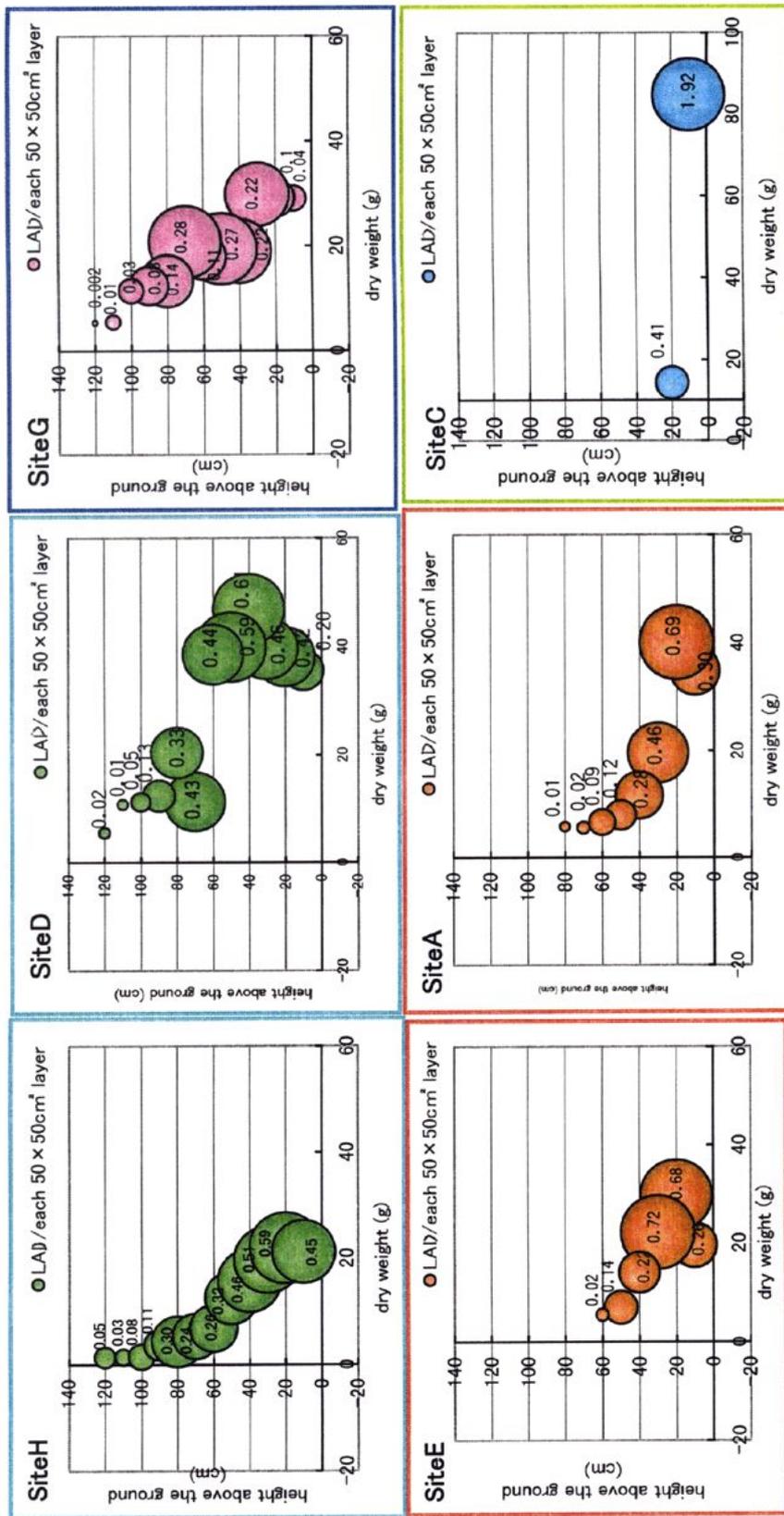
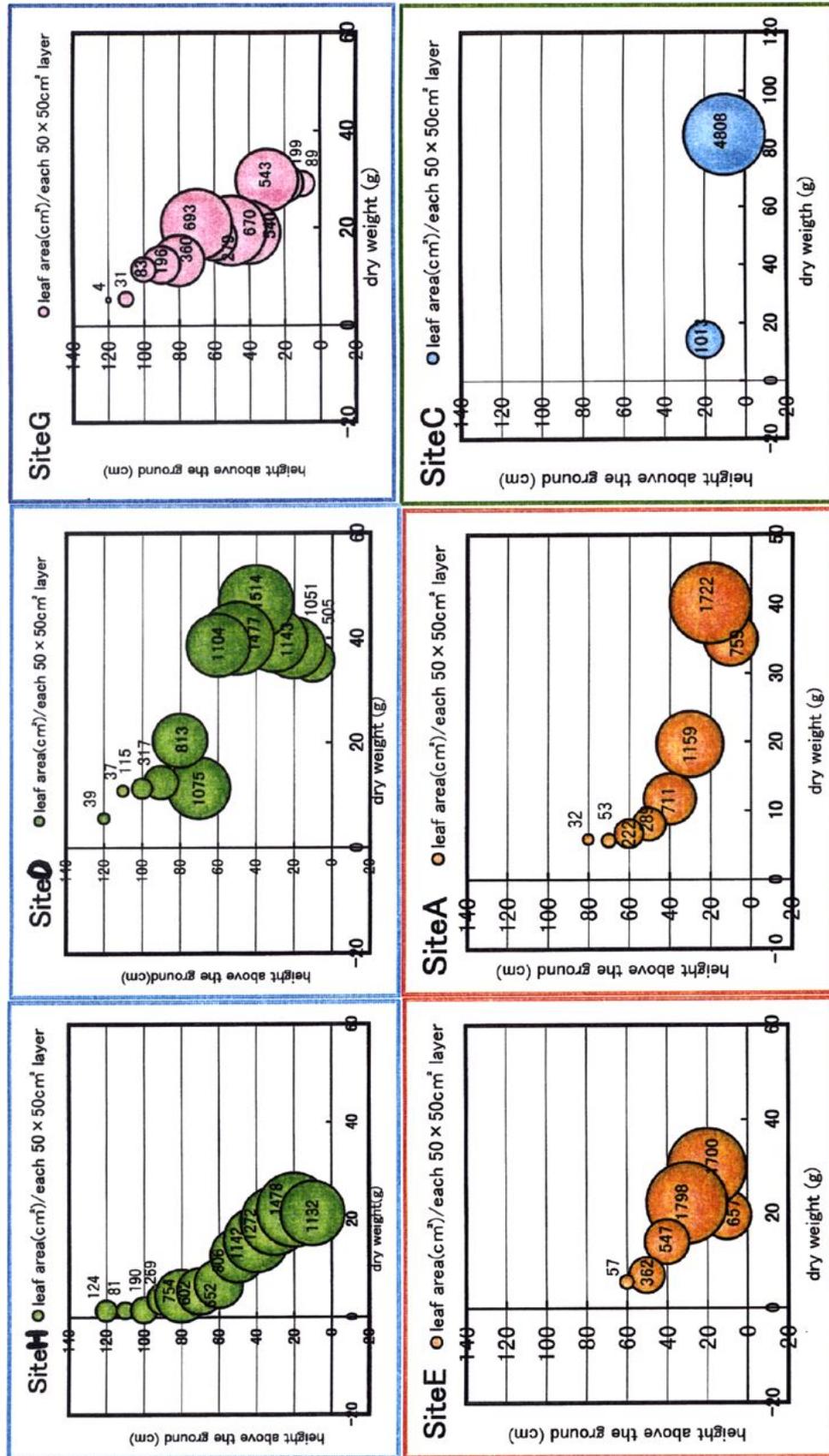


図-13

層別の葉面積密度 (LAD) : 縦軸は下からの高さ (cm)、横軸は乾燥質量 (g)、バブルの大きさがLAD ( $\text{cm}^2/\text{m}^3$  / 深さ 10cm ごと) を示す。



図一14. 層別葉面積の結果: 縦軸は下からの高さ(cm)、横軸は乾燥質量(g)、バブルの大きさを層別葉面積(cm<sup>2</sup>)として示した。

中層湿原のスゲ優占種でも、H, D地点は背丈が最高 120cm 近くあり、E, A 地点に関しては最高が 80cm 前後の群落であるが、絶対量は違っても、相対的な最大値はおおよそ 1/2 のところにあることがわかる。一方、同じ単子葉タイプでも、イネ科のヨシによるやや広葉タイプ(調査区 G)に関してのそれは、全体層の 1/2 のところにその最大値があるということである。ただ、ここで注意をして考えなくてはならないのは、(1)各調査区内で、優占種とその他の種というように、種別ごとの比較が必要であるということ。(2)葉面積が大きいからといって必ずしも、乾燥質量が大きいとは限らないということ。つまり、中には乾燥質量が大きいわりに葉面積が小さい層があるということである。従って以下の解析を試みた。

まず、上記の注意点 1 に対して、図 - 14 を優占種 1 とその他の種に区分して内訳をみてみた。これを図 - 15 に示す。同様に、バブルの大きさは、層別 LAI を表し、縦軸は地面からの高さ(cm)、横軸は乾燥質量(g)を示している。青色のバブルが第 1 優占種のそれを示し、赤色が第 2 優占種又はその他の種のそれを示している。さらに、地面からの高さとの相関をとり、回帰直線を求めると次きのことが分かった。単子葉タイプ、つまり調査区 H, D, E, A 地点の第 1 優占種(青のバブル)と、第 2 優占種の E, A, G 地点(赤のバブル)では、地面からの高さとの相関は負の相関があるのに対し、やや広葉タイプ、つまりその他の種に広葉タイプを多く含む H, D 地点(赤のバブル)と、単子葉タイプのヨシを第 1 優占種として第 2 優占種に広葉型タイプの草本を含む調査区 G(青のバブル)では、前者とは逆に地面からの高さとの相関は正の相関がある。つまり、単子葉タイプは、下層ほど葉面積と乾重量は増加傾向にあるのに対して、逆に、同じ単子葉タイプでもヨシ優占タイプと、やや広葉タイプは、上層ほど葉面積は大きくなるということである。

## 層別 SLA

次に、上記の注意点(2)から、葉の厚さを考慮に入れる必要がある。そこで、それを表す指標となる層別 SLA を求めた。各層の葉面積を各層の乾燥質量で割った値、すなわち単位乾燥質量当たりの葉面積を求めることにより、各層全体を一枚の葉とみなし、その厚さを求めると各層別で比較が可能となる。つまり、仮想の各 10cm 層ごとのコドラートの大きさ分を 1 枚の葉の厚さとみなし、層別でみた葉の厚さを示す指数になる。通常は、SLA は、葉一枚あたりで見えるが、本研究の目的は鉛直 2 m の高さからの近接リモートセンシングなので、層別 SLA、すなわち方形区内 50cm × 50cm における各層 10cm ごとの全葉面積を、各層別乾重量で割った値で算出した。そこで、図 - 16 に着目してみる。これは、今度は横軸に地面からの 10cm ごとの層の高さ、縦軸に SLA を棒グラフで表した図である。この図から次の事が分かった。層別 SLA が大きいほど層別葉の厚さは薄く、小さいほど層別葉の厚さは大きいことである。

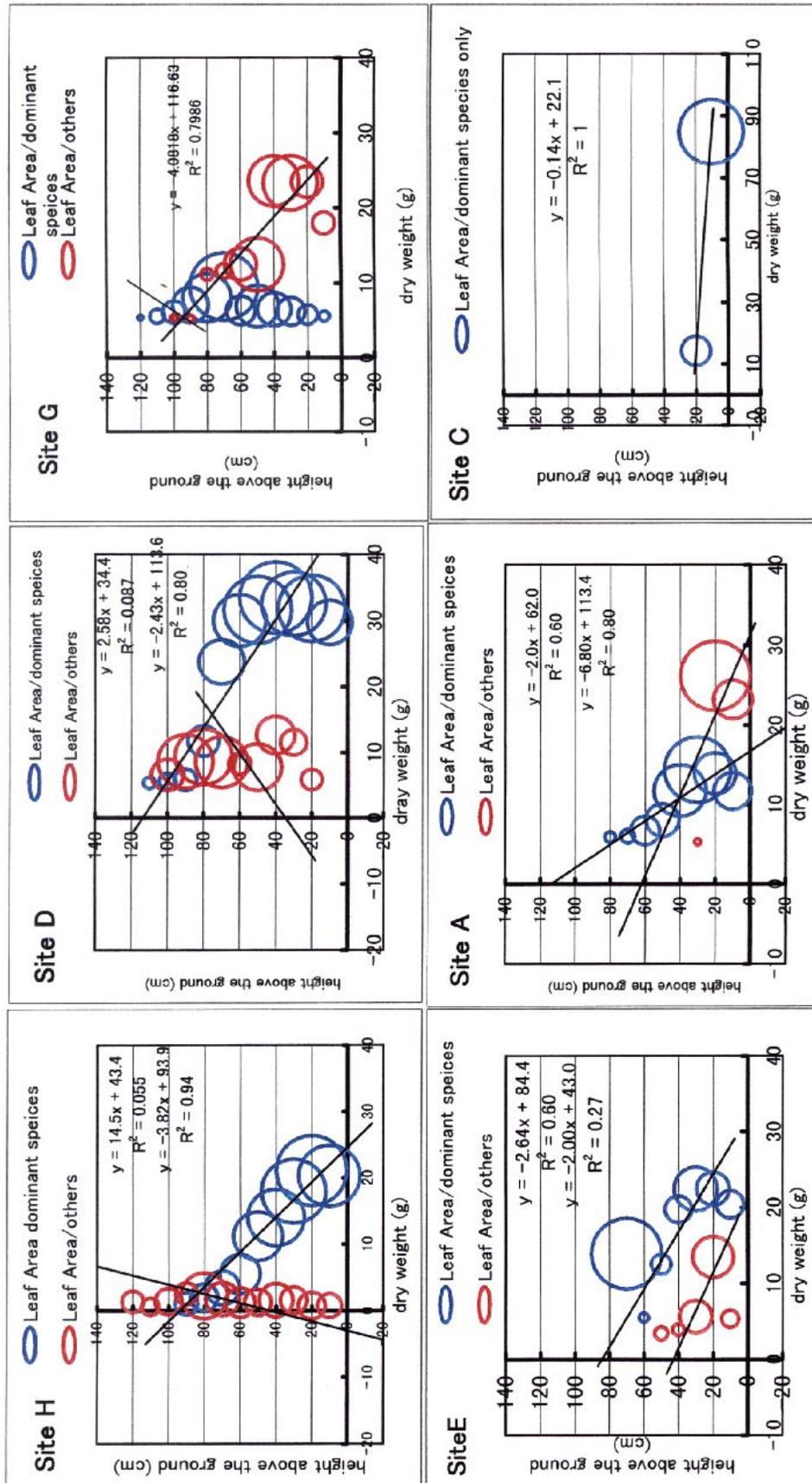


図-15. 図-4を 優占種1とその他の種に区分して内訳した葉面積指数：青のバブルは優占種、赤のバブルはその他の種または第2優占種を示す。

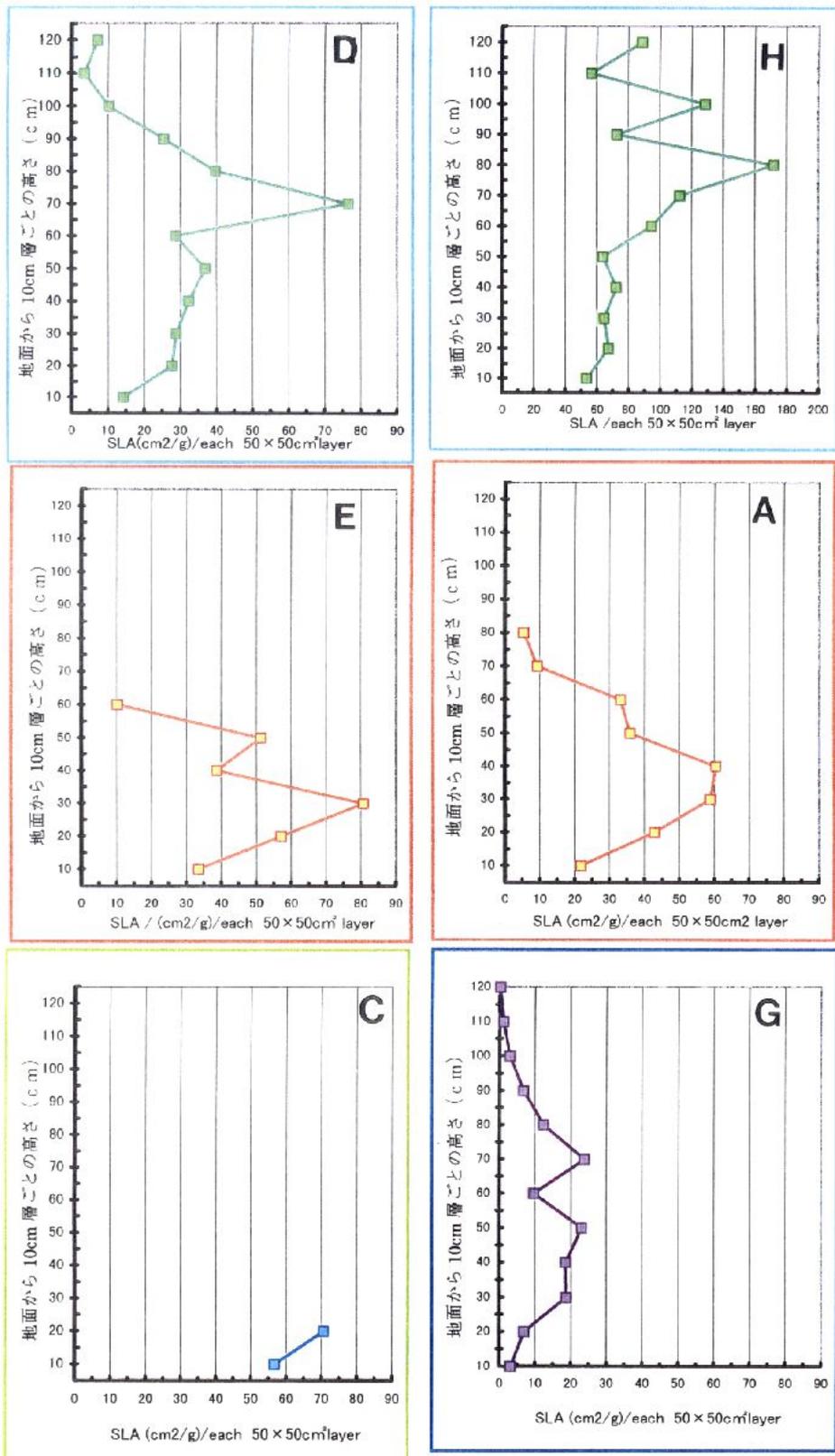


図-16.

層別SLA：縦軸は地面から10cm層ごとの高さ（cm）、横軸は層別SLA（ $\text{cm}^2/\text{g}/50 \times 50 \text{cm}^2/\text{深さ} 10\text{cm}$ 層ごと）を示す棒グラフ

1. 層別 SLA の最大値は、単子葉タイプのスゲ優凸型の調査区 H, D, E, A 地点で、層のおよそ 1/2 前後のところ急上昇するのに対し、その一方で広葉型タイプの調査区 G では、やはり 1/2 前後のところであるにもかかわらず、あまり伸びの変化は見られず、むしろちょうど 1/2 の地点では、やや減少する。

2. また、第 2 優占種にシダ類などの草本が混在すると、調査区 D と A に見るように上層部の層の SLA はなだらかに減少する。つまり徐々に、層単位でみた葉の厚さは下層ほど増加する傾向にある。

3. 相対的に広葉型タイプの方が、単子葉タイプに比べて層別 SLA の値は小さい。SLA が大きいほど葉の厚さは薄く、小さいほど葉の厚さは大きいことを示す。すなわち層単位でみた場合、単子葉タイプでは、層の中間地点において葉の厚さは最も薄く（実際は、葉の重なり合いが薄い）逆に広葉型タイプでは、層の中間地点においては、葉の厚さは前者よりも厚くなっている（実際は葉の重なり具合が厚い）ことが分かった。また単子葉タイプよりも広葉型タイプの方が、層単位でみた葉の重なり具合は厚いということが明らかになった。

### LAD と層別 SLA、生産構造図の関係

LAD と層別 SLA を同時に示したグラフが図 - 17 である。横軸が LAD の値、縦軸が地面からの高さ (cm)、バブルの大きさを層別 SLA ( $g/50 \times 50$  / 深さ 10cm ごと) であらわした。の注意点 2 で示したことは、図 - 14 によっても明らかなように、各層が占める葉面積の割合が大きくても、または層別の葉面積密度 (LAD) が大きくても、層別 SLA が大きいことから、葉面積が大きくても、各層別の葉の厚さで見ると必ずしも大きくならないことが分かる。LAD が同じ値でも、葉の厚さ (SLA) は様々に異なるが、共通して、LAD と層別 SLA は相補的な関係にあるということが言える。つまり、葉面積を増やせば、葉の厚さを薄くさせ、葉面積減らせば、葉の厚さは増える、という形態をとっているということが分かった。さらに、その変化の仕方で以下のパターンに分けられる。

図 - 17 からみると、タイプの的には調査区 D と G、調査区 H と A、調査区 E と C が似たような傾向を示していることが分かった。すなわち、D と G をみると、上層で LAI は小さいのに、または各層別葉面積は最小なのに層別 SLA も小さくなっている。言い換えれば層別葉の厚さは最大になっている。そして逆に中間層において、およそ葉面積が最大になるのに、または LAD は最大になるのに、SLA も最大になっている。言い換えれば、各層別葉の厚さは最小になっている。分布はコの字型になる。それに対して、調査区 H, A は、地面から上層になるにつれて層別 LAD の大きさは直線的に減っていくが、層別 SLA の大きさは増えていく。すなわち葉の層の厚みは増加する。分布は直線型になる。そして調査区 E と C は、LAD-層別 SLA は相補的な関係にあるが、分布は分離型となった。結果から、調査区 D と G のコの字型分布、調査区 H と A の直線型分布、調査区 E と C の分離型分布の組み合わせにより、湿原タイプ別の植生に分かれた。すなわち、D と G 地点は河川沿いの低層湿原で、ヨシやスゲを優占種とする湿原タイプ、H と A 地点は高層湿原に隣接

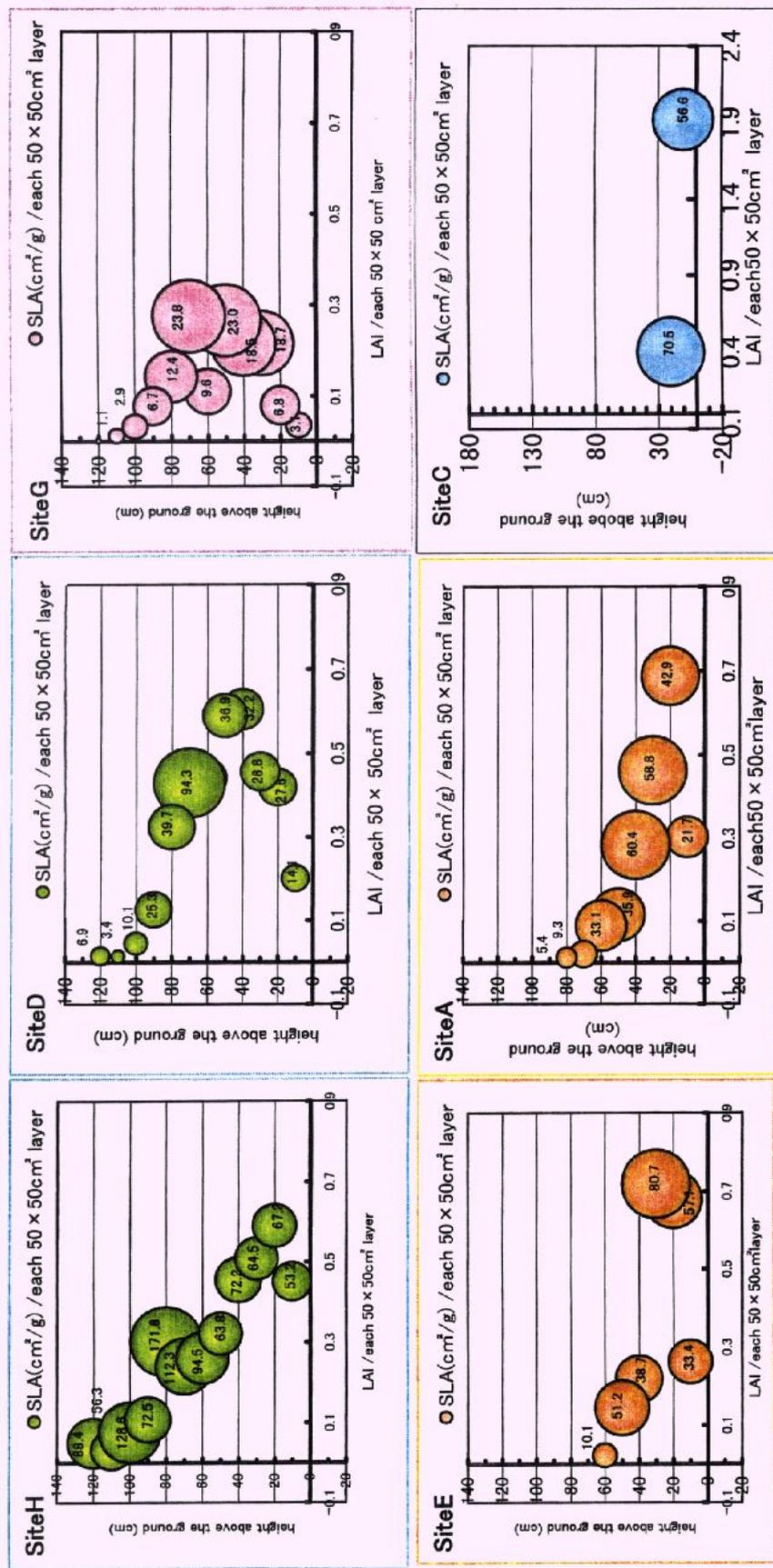


図-17 LADと層別SLA：横軸がLAD (cm<sup>2</sup>/50 × 50 cm<sup>2</sup>/深さ10cmごと)、縦軸が地面からの高さ (cm)、バブルの大きさが層別SLA (cm<sup>2</sup>/g/50 × 50 cm<sup>2</sup>) を示す。

する中層湿原でスゲを優占種とする湿原タイプ、EとC地点は高層湿原タイプである。生産構造図からだけで見ると、D、G地点は下層ほど乾燥質量が増えているが、光の受光部である層別葉面積は中間層が最大となり、その厚さは中間層で最も薄くなる。逆に、上層は層別葉面積は小さく、厚みを増すことが分かる。一方、HとA地点について、生産構造図からは、下層ほど乾燥質量が中間層から急激に増加するが、層別のLAD-層別SLAの図と照らし合わせてみると、葉面積も下層ほど増加しているが、その厚さも下層ほど厚くなっていることが分かった。EとC地点に関して、生産構造図からは下層ほど一定間隔で乾燥質量は増しているが、葉面積は、下層が極端に大きく、上層で極端に小さいが、葉の厚さにつて大きな差は出ていない。

#### 4.4 考察：バイオマスと光環境

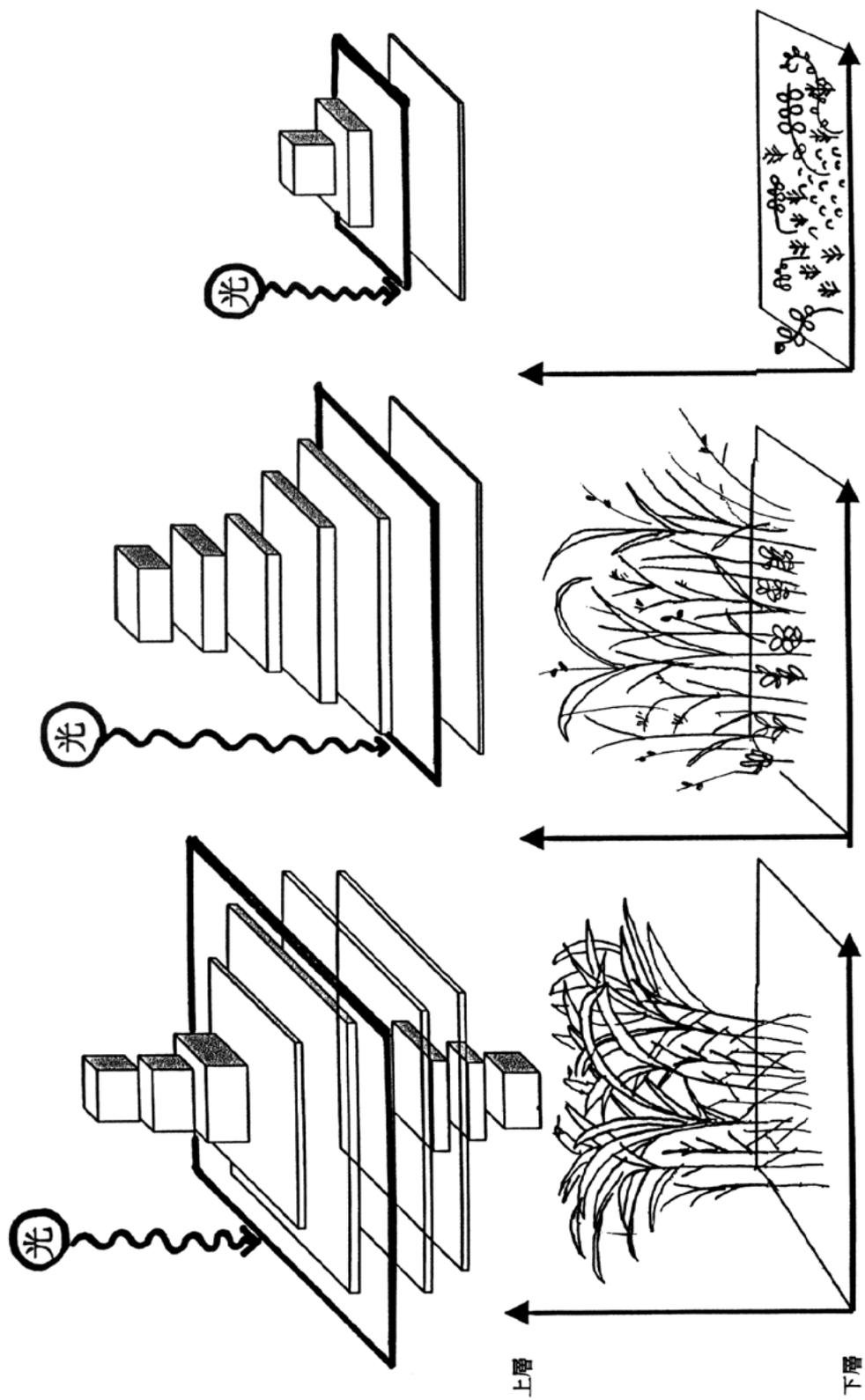
SLA-LAIと生産構造図の結果から分かったこと、またこの生産構造を裏付ける次のような光環境とバイオマスとの関係で何が推測できるのかを以下に述べる。

図-18の模式図が示すように、中・低層湿原の典型的な単子葉タイプ(H, A)は、内部下層まで光が届く環境にあり、特に光に対して好環境にある上層部の葉の厚さは薄く適応しており、下層でも光を効率よく受けとめる肉厚の葉が集中している。第2優占種に広葉型が多い単子葉の低層湿原タイプ(D, G)は、中間層部に葉面積が集中し、下層まで光がよく通らない。そこで、光をよく受光できる上層部で葉を厚くし、光が少ないやや中間層周辺には、葉は薄いタイプが集中し、効率良く受光できるよう適応している光環境の関係にあると考えられる。

そして高層湿原に見られるE, Cは、コケタイプのCでは層が低いいため差はあまりないが、このようなタイプは下層の葉面積は下層で極端に大きく、上層の面積は極端に小さい。つまり、高層湿原は、15cm~30cmほどの背丈の低い層が連続しているため、下層と上層光環境に差はない。従って下層部で層別葉面積を大きくするが、葉の厚さに変化をもたらすほど適応したバイオマス変化がないことが明らかになった。

#### 4.5 分光反射率測定結果

分光解像度の高い計測機器が開発されるようになった近年、より広い波長帯領域で高分解能のスペクトルデータを収集することが可能になった。現在、生態系の機能に関連した分光特性の解明を行うために、様々な分光原理をリモートセンシングデータの解析に応用する試みが研究の焦点となりつつある。群落内の光環境は、植物要素の空間的配置や構造によって決定され、その内部の光環境が、どのようになっているのかを調べるために、群落のバイオマス測定や、植生パターンと充分布を調査した。次は実際に各植生パターンにおける空間的配置が明らかになっている群落の特異的な分光スペクトル特性を特定することが必要となる。それが明らかになれば、不特定の植生パターンも分光スペクトル特性を特定することにより逆に、群落の空間的配置及びおよその植生が推定できるようになると考えられる。植生リモートセンシングの基礎的研究の1つとして、群落および個集の分光反射特性とバイオマス調査といった物理的関係を明らかにすることが望まれている。



調査区 D, G コの字型 ヨシ>スゲ>その他の草本  
 直線型 H, A スゲ>ヨシ>その他の草本  
 分離型 E, C コケ>スゲ

図一18. 湿原植生タイプごとの光環境とLAI-SLAを解釈する模式図

## 個集の分光反射率

典型的な一例を挙げ、個葉の分光反射・透過スペクトル測定結果とスペクトル特性について記述し、後に、実際の各湿原植生のスペクトル測定結果を述べる。なお、実際のフィールドでは、7月上旬は、枯死したヨシにスゲが繁茂している景観であり、7月後半から8月上旬にスゲが枯れてヨシが繁茂する。8月下旬に再び枯死したヨシが目立つため、ヨシとスゲに関しては、枯れたサンプルも紫外・可視分光光度計により室内実験測定を行った。

### 波長帯別日射エネルギー

個集の分光反射率結果について記述する前に、波長帯別にみた太陽放射エネルギーの特徴について既往の研究から特徴を簡単に述べる。

全短波長放射に対する光合成有効波長帯は 380 ~ 715nm であり、これはほぼ、可視光域に相当し、地表に到達する太陽放射（全短波放射）の約 45% を占める（Kirk, 1983）。さらに、地表に到達する日射エネルギーの波長分布は太陽高度や大気混濁度、天候条件の影響を受け、反射スペクトルは大きく変化する。しかし、光学的システムとしての葉の性質は、1日を通じて大体一定なので、任意の太陽高度で見た場合、植物の葉の吸収率は、太陽エネルギーのスペクトル分布とはおよそ無関係に一定となる（Shulgin, 1963）ことが分かっている。特に、低高度になるほど、光合成波長域は増大し、遠赤外領域では減少する傾向にあるということである。そして平均的な全短波放射に対する葉の吸収率は 79.5% である（Shulgin, 1967）。その内訳は各葉の光学的性質によるが、一般的に、紫外線放射（3 ~ 5%）、可視域放射（35 ~ 48%）、近赤外線放射（47 ~ 62%）に対する葉の吸収からなっている。こうしてみると、全エネルギーの吸収率は、可視光と近赤外領域の吸収率で決まり、紫外線放射の影響をほとんど受けないことが明らかである。

ここで、波長別日射エネルギーの年変化をみてみると、特に明瞭な季節変化がみられるのは、光合成有効波長帯（380 ~ 715nm）であり、夏季に大きく、冬に小さいこともわかっている（内嶋, 1985）。また、後で述べる群落の分光反射率を考える上でも重要となるのが、直達光と散乱光での波長帯の組成が、太陽高度が 40 度を境に異なることが明らかにされている（Shulgin, 1970；岸田, 1973）。すなわち、彼等の研究によると、植物育成に最も関連の深い光合成有効波長を、紫青（VB：400 ~ 500nm）、緑黄（GY：500 ~ 600nm）、橙赤（OR：600 ~ 700nm）に分けた各波長の相対的比率でみてみると、以下のようになることがわかった。

直達光...太陽高度が 40° 以上では VB > OR、

太陽高度が 40° 以下では VB < OR, GY は一定

散乱光...太陽高度によらず、常に VB > OR, GY は一定

いずれにしても、GYは一定であることから、植物の光形態形成反応の制御情報として、組成比率の日変化が明瞭となるVBとORが選択され、日変化の少ないGYは選択されなかったという興味深い気象学的根拠も示されている(Shulgin, 1970)。

それでは、群落内における全短波日射を地面からの高さからみた垂直分布でみる。全天日射量に対する相対値は、群落下層に従い、指数関数的に減少するが、全体を占める割合は、近赤外>緑色部>赤色部>青色部である。ただ、減少の割合は、光合成有効波長領域で激減し、近赤外領域で緩減する(玖村, 1968)。すなわち、群落下層ほど、全天日射に占める近赤外放射の割合は高く、これについて緑色部となるということである。

### 健康な個集と枯死寸前の個集の分光特性

図-19はヨシの葉身の一部を切り取り、実験室内で紫外・可視分光光度計で、分光反射・透過率を測定した結果である。

測定波長は400~800nmである。これは、光合成有効波長が380~715nmであること、700~1400nmの値は、反射率・透過率ともに大きく、665nm付近で赤色素光のピークの立ち上がり以降、グラフは1400nm付近まで平らになるということ、そして計測機器の精度の信頼性から、400~1000nmが有効であるという理由からである。

この図-19の例のように、個集の反射率と透過率のスペクトルは、健康な葉でみると、可視光域で小さく、近赤外で大きいことが分かる。このことは多数の緑色植物で一般的に共通の特徴となっている。可視域(400~700nm)のピークの反射率は13%、透過率6%となり、吸収率が81%となる。一方、近赤外領域(720~1500nm、図-19では800nmであるが)の範囲では、反射率も透過率も大変大きく、共に40%以上になっていて、吸収率は20%前後しかない。このことから分かるように、植物群落内を想定すると、近赤外と可視光域の緑色部(520~580nm)の反射が著しいが、可視域全体で、緑色部はわずかであることが考えられる。

この特徴は、光合成色素が波長に対して強い選択性があるためだと考えられる。例えば、クロロフィルの吸収ピークがaで430nmと660nm、bが455nmと640nmである。ただし、aとbで20nmのずれが生じるのは、in vivoで抽出溶媒と葉水分の屈折率がことなるため(Mackinney, 1938; Setak et al., 1971)である。これは、図-19の500nm前後と600nm前後付近で反射率・透過率が減少していることから分かる。一般的に他の光合成色素(キサントフィル、カロチン)から考えても、各々の吸収率は300~500nmで最大となっている。いずれの色素で考えても、可視光域では、480~500nm(青色部)付近で吸収率は最大となり、550nm付近(青~黄緑色部)で個集の反射率は最大となる。それよりも長波長域を含めて考えると、近赤外領域で最大の反射率となり、680~700nm付近(赤色部)で光合成色素の吸収率は最大となる特徴がある。また、枯死寸前のヨシについて個葉の分光反射についてみてみると、健康な個葉に比べて、枯死寸前の個集の方が相対的に反射率は大きく透過率は小さく、一般的に、全体的なスペクトルの傾向は変わらないが、その差は、

ヨシR  
 枯ヨシR  
 枯ヨシT  
 ヨシT

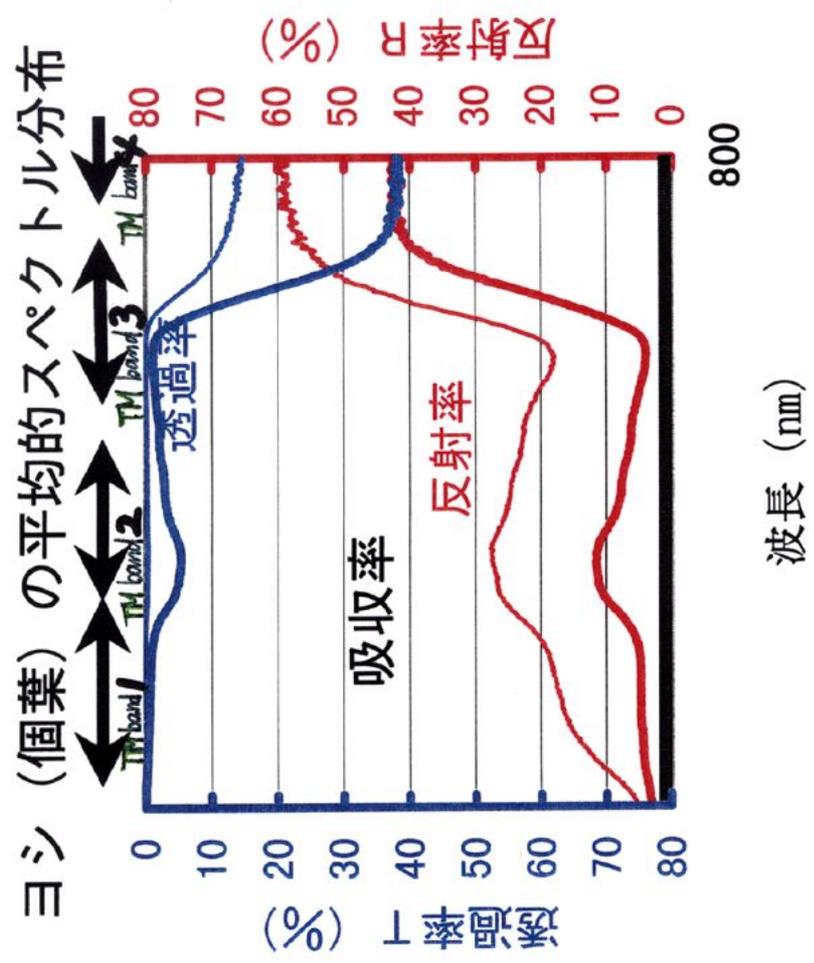


図-19. 実験室内で紫外・可視分光光度計により測定したヨシの個葉(葉身)の分光反射率(R%)と透過率(T%)

短波長側よりも長波長側に大きな差が現れる。つまり、活力度の違いで区別するのであれば、短波長側では反射率には影響しないが、長波長側の赤色部、又は近赤外部で著しくなり、可視光域では 500～580nm の領域(緑色、黄緑領域)でその差は最も大きい値となる特徴がある。すなわち、Landsat の TM バンドでいうならば、バンド 2 , 3 , 4 に相当する。また、葉の黄化が進むと、600～700nm(黄赤色部)の反射率が増加して光合成有効波長域への透過・吸収が低下することも明らかになっている。これは、LandsatTM バンド 2 とバンド 3 に相当する。

## ・ 湿原タイプごとの混生植生からみた個集の分光反射率特性

低層・中層・高層湿原から代表的な植生を選択し、各々個集の分光反射率(400～800nm)を、ポット採取により、実験室内で測定した。結果を図 20 - 24 に示す。

### - 1 高層湿原

まず、図 - 20 の高層湿原からみてみると、スギゴケ、イボミズゴケの両者とも、反射率は最高で 20%前後と低く、光合成色素による顕著な吸収波長帯の選択性は、低層・高層湿原植生ほどみられなかった。400～600nm の領域では全く差は出ていないが、710 付近を除く 630～800nm の領域で、差が見られた。680nm 付近、すなわち LandsatTM の 3 バンドに相当するが、この波長帯で、イボミズゴケとスギゴケの差が最も良くあらわれ、イボミズゴケの方が高く、18.6%であった。また、710～800nm に対して、両者の反射率は逆転した。すなわち、スギゴケの方がイボミズゴケよりも反射率は 3.5%高い値となった。高層湿原のように、コケだけが、マット状に繁茂している領域に対して、少なくともイボミズゴケとスギゴケを判別する場合には、個集の分光反射から見た場合、バンド 3 が有効であると推定した。

### - 2 中層湿原

中層湿原で最も良くみられるスゲタイプとしてムジナスゲ、ホロムイスゲを採取し、スゲ以外の草本としてはよくみられるヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシを選んだ。そして、ムジナスゲに対しては、枯れたものが多く見られたので、枯死またはその寸前のものについても測定を行なった。また、その他の草本については、葉身、葉脚について測定を行った。

まずスゲタイプについて見ると(図 - 21)、枯れたスゲについては光合成色素による吸収特性がみられず、右上がりの直線に近い曲線を示した。健康なムジナスゲ及びホロムイスゲに対しては一般の緑色植物に見られるスペクトル曲線を示した。枯れたムシナスゲはホロムイスゲよりも全体的に反射率は高い値を示した。3 種に対して差が顕著であったのは、差が大きい順に、700～800nm(バンド 4 に相当)(ホロムイスゲ > 枯ムジナスゲ > ムジナス

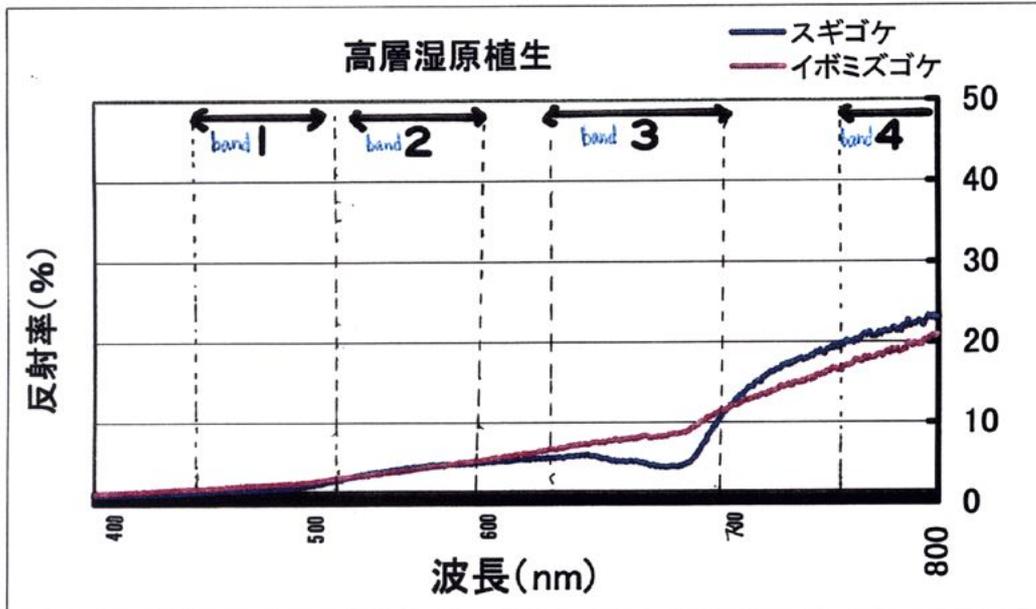


図-20.  
高層湿原植生(イボミズゴケ、スギゴケ)の個葉の分光反射率:  
ポット採取により、実験室内での紫外・可視分光光度計による葉身の測定結果

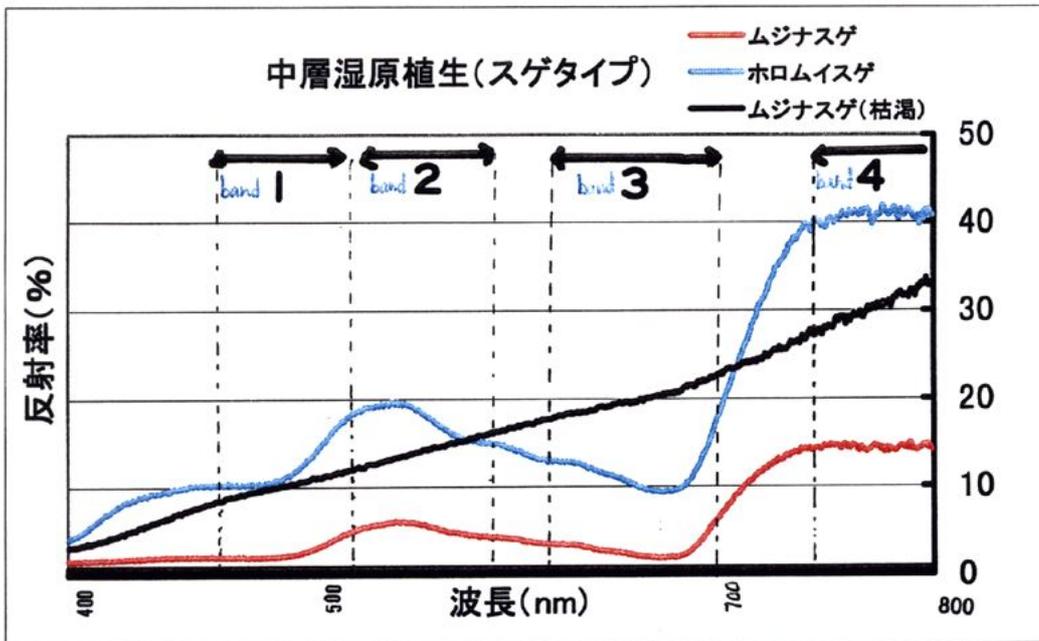


図-21.  
中層湿原植生(枯れたムジナスゲ、健康なムジナスゲ、ホロムイスゲ)の個葉の分光反射率:  
ポット採取により、実験室内での紫外・可視分光光度計による葉身の測定結果

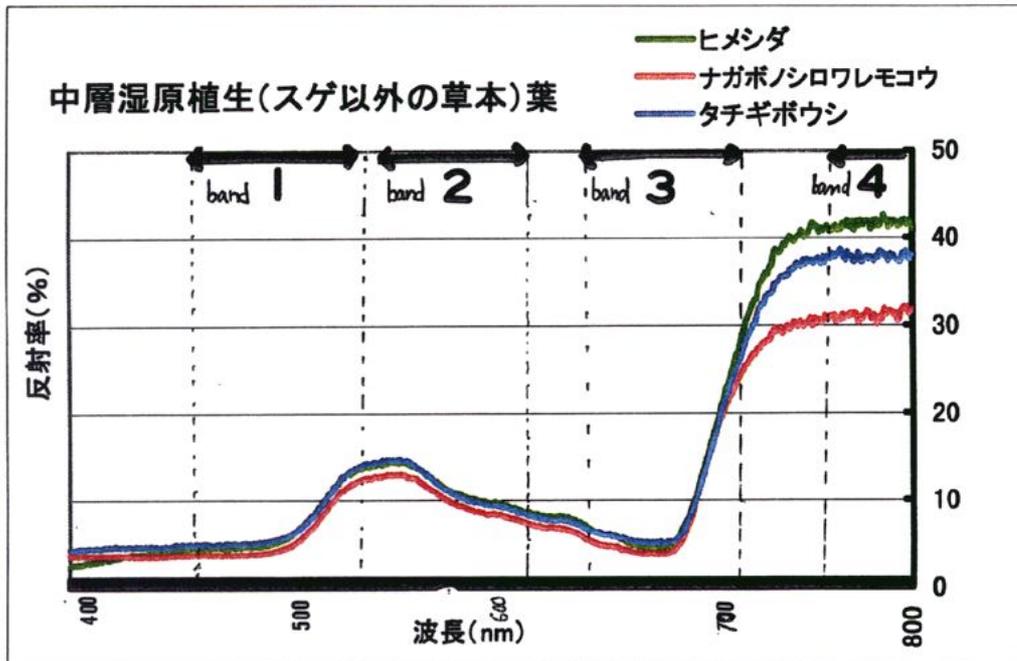


図-22.

中層湿原植生(ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシ)の葉身の分光反射率:  
ポット採取により、実験室内での紫外・可視分光光度計による測定結果

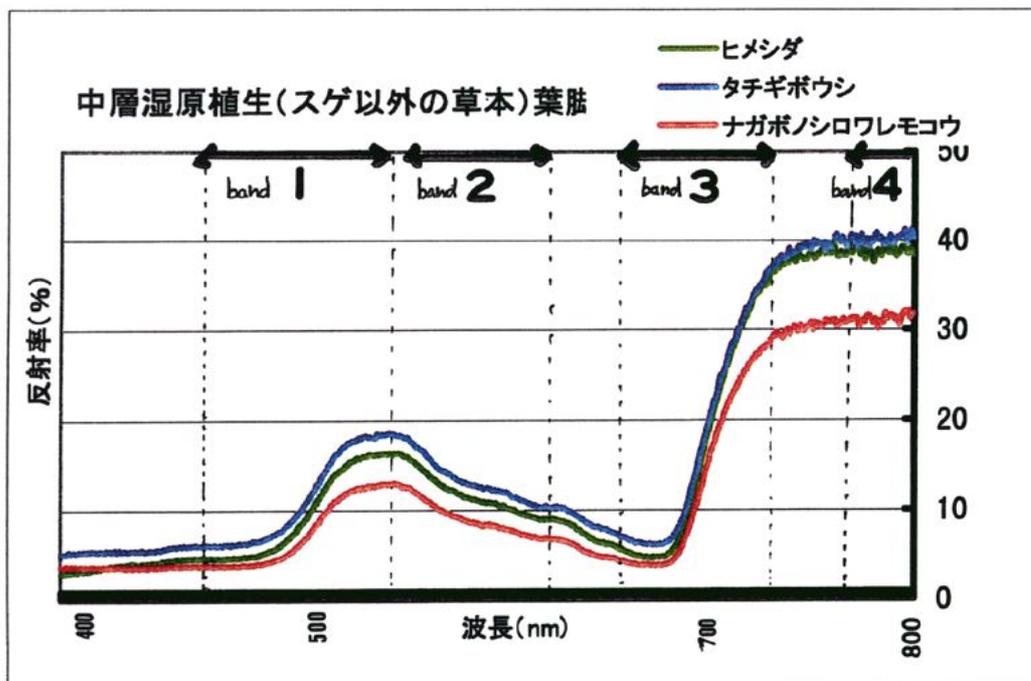


図-23.

中層湿原植生(ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシ)の葉脚の分光反射率:  
ポット採取により、実験室内での紫外・可視分光光度計による測定結果

ゲ)と 640~672nm(バンド3に相当)(枯れムジナスゲ>ホロムイスゲ>ムジナスゲ)と 520~552nm(バンド2に相当)(ホロムイスゲ>枯れムジナスゲ>ムジナスゲ)となった。この結果から中層湿原に限り、枯れたスゲを判別するには、バンド3が有効であり、ホロムイスゲ、ムジナスゲを判別するのであれば、バンド2または4が有効であることが明らかとなった。

次に、スゲ以外の草本タイプ(ヒメシダ、ナガボノシロワレモコウ、タチギボウシ)に関して、図-22の葉身について見た場合と、図-23の葉脚について見た場合、両者とも光合成色素に対する選択性が見られた。ただし葉身に対しては、400~700nm領域で差はほとんどみられなかったが、750~800nm(バンド4)にかけて3種の判別は顕著となった。一方、葉脚について見てみると、700~800nm領域は、タチギボウシとヒメシダの区別がつかない。528~564nm(バンド2)で3種の判別は可能である。すなわち、判別において部位でこだわるのなら、葉身について判断するのならバンド4が、葉脚で判断するのならバンド2において3種の判別が可能になる結果となった。

### - 3 低層湿原

ヨシ、ヤチヤナギを選択して測定した(図-24)。ヨシに関して、葉の傾斜が様々であるため、先端部、葉身中部、葉脚にたいして測定をおこなったが、大きな差はでなかった。やはり、相対的に、枯れたヨシの方が反射率は高い値となった。枯れたヨシと健康なヨシの判別であれば、500nm~660nm(バンド2,3)と750~800nm(バンド4)で有効であると考えられ、後者のほうが、葉の部位による違いが顕著である。ヤチヤナギ、枯れヨシ、ヨシを判別するのであれば、560~660nm(バンド2,3)の領域が最も有効と考えられた。

以上の結果は、各湿原タイプのみで考えた場合であり、複数のタイプが重ならない場合を想定している。まとめてみると、以下のバンドが判別に有効となることが明らかにされた。(1)高層湿原では、コケの判別にバンド3、(2)中層湿原では、枯れたスゲと健康なスゲの判別にバンド3、スゲの種別にはバンド2または4、その他の草本について各部位で判断すると、葉身での判別にはバンド4、葉脚での判別にはバンド2、(3)低層湿原では、枯れたヨシと健康なヨシの判別にバンド2,3,4、ヨシと低木林にはバンド2,3が有効と考えられる。

#### ・ TMバンドの組み合わせによる種判別に可能な波長帯

で検討した有効なバンドは、各湿原タイプだけから考えた場合であり、実際のフィールドでは、独立してその湿原タイプの植生が繁茂しているケースは一部であり、ほとんどが、いくつかの湿原タイプの植生が連続して存在しているところが多い。また1シーンの中に複数の植生タイプが混合することもある。したがって、図-25.1のように、高層・中層・低層湿原のすべてにたいする散布図を考えて、400~800nmに相当するTMバンド1~4まで、まず2軸の組み合わせで検討した。その結果、可視光域では、右上がりの直線

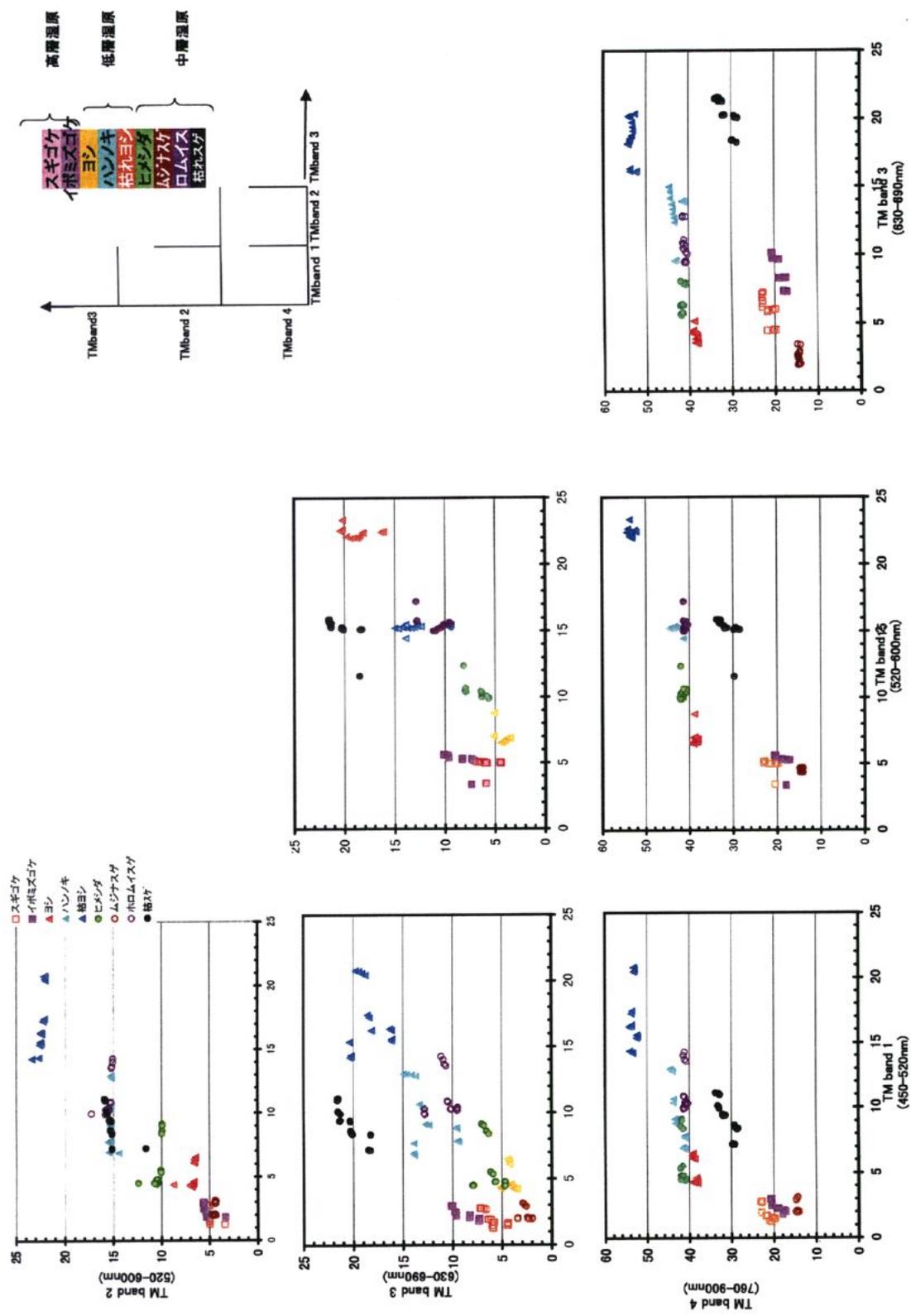


図-25.1 高層、中層、低層湿原全種類のTM band 1-4に対応する反射率の2つのバンド組み合わせ

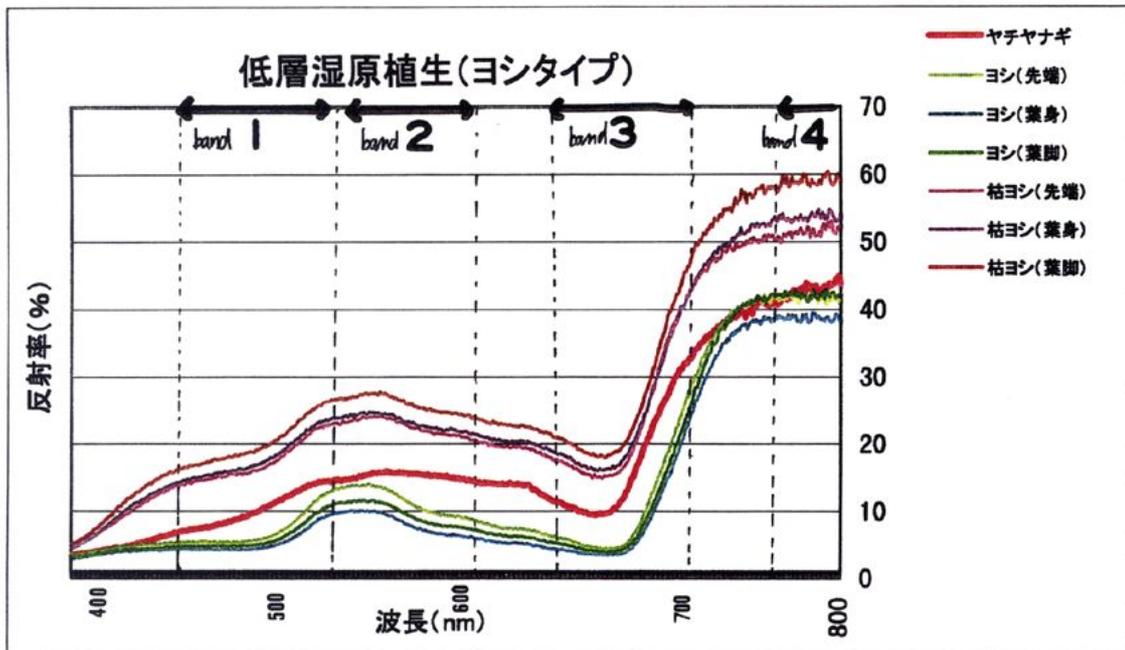


図-24

低層湿原植生(ハンノキ、ヤチヤナギ)の個葉の分光反射率:  
 ポット採取により、実験室内での紫外・可視分光光度計による葉身の測定結果

になることが明らかとなった。また、各種の判別でみると、活力度、すなわち枯れた植生と健康な植生の判別をするには、バンド1と3、バンド2と3、またはバンド3と4の組み合わせが有効であると考えられる。また、全ての種を判別するにはバンド1と3の組み合わせが最もよく分散されていることが明らかである。また、高層、中層、低層湿原の判別であれば、バンド3と4の組み合わせ、またはバンド2と3の組み合わせが望ましい結果となった(表 - 5)。また、1～4バンドにおける各湿原植生に対する反射率をみると、バンド4が圧倒的に高い値をしていることが分かる(図 - 25.2)。特に枯れた植物に対しては高い反射率を示しているが、これは他のバンドについても同様である。1～4バンドを3軸によるバンドの組み合わせで考えてみた(図 - 25.3)。その結果、湿原植生の個々の種判別には、バンド2、3、4の組み合わせが最も有効であることが分かった。また、湿原タイプ別植生の判別にはバンド1、2、4が、活力度の判別には1、3、4と2、3、4が可能な組み合わせになった。ここで、バンドの組み合わせが2軸の場合と3軸の場合を比較すると(表 - 5)、例えば2軸によるバンドで考え場合、湿原植生タイプを判別するのに最も有効なバンドの組み合わせは、バンド1と4である。バンド1と2の組み合わせは、判別には最も適さしていない組み合わせである。しかし3軸のバンドの組み合わせで考えた場合、バンド4を組み合わせることで判別に有効な波長となる。すなわち、2軸で考えた場合には有効でない組み合わせでも、3軸のバンドの組み合わせで考えると有効になることが分かった。また逆に、2軸では個々の種の判別に有効であったバンド1と3の組み合わせはでも、バンド4を加えれば、判別が可能となるが、バンド2を加えることで、判別には有効でなくなることも明らかとなった。

## 考察

少なくとも個集で考えた場合、活力度で判別するには組み合わせが2軸の場合には、バンド1と3、バンド2と3、バンド3と4の順で有効であり、金種の判別及び湿原タイプ別の判別にはバンド1と3、バンド3と4の組み合わせの順で有効であった。また、3軸のバンドの組み合わせで考えた場合、湿原植生の全種類の判別には、バンド2、3、4の組み合わせが最も有効であり、湿原タイプごとの植生判別にはバンド1、2、4が、活力度で判別する場合1、3、4と2、3、4が有効な組み合わせになった。

バンド1は450～520nmで、短い青から緑色に見える可視波長帯で、水分状態や落葉樹と針葉樹の判別などに応用が可能なバンドである。本研究でデータを取得した時期が、湿原植生の生育初期シーズンであったために、生育時期の早い新緑の植生とその他の枯れたヨシ植生の違いが青から線バンドによる判別の効果をもたらしたと考えられる。従って、サンプルデータをとる季節的な時期を十分に考慮しなければならない。そして、どの項目にも含まれるバンド3、630～690nmの波長帯は、赤色の波長帯でクロロフィルの吸収波長帯である。枯死した植生はクロロフィルが分解され、光合成色素による特定波長の吸収はなくなる。またバンド4は、760～900nmで近赤外域の波長帯として観測され、植物からの放射を良く捉え、葉面積指数やバイオマスに対して高い感度を持ち、植生量が多いほ

表-5 個葉の分光反射率測定結果による各判別に有効な波長帯TMバンド(nm).  
\*が有効、×が非有効を示す。

個葉の活力度を判別(健康な個葉と枯死寸前の個葉)する場合

band2(520-600)	× × ×		
band3(630-690)	***	**	
band4(760-900)	×	× ×	*
landsat TMband	band 1(450-520)	band2(520-600)	band3(630-690)

3軸… band 1, 4, 3 2, 3, 4

湿原植生タイプを判別する場合

band2(520-600)	× × ×		
band3(630-690)	*	**	
band4(760-900)	×	× ×	***
landsat TMband	band 1(450-520)	band2(520-600)	band3(630-690)

3軸… band 1, 2, 4

個々の種を判別する場合

band2(520-600)	× × ×		
band3(630-690)	***	*	
band4(760-900)	× ×	× ×	**
landsat TMband	band 1(450-520)	band2(520-600)	band3(630-690)

3軸… band 2, 3, 4

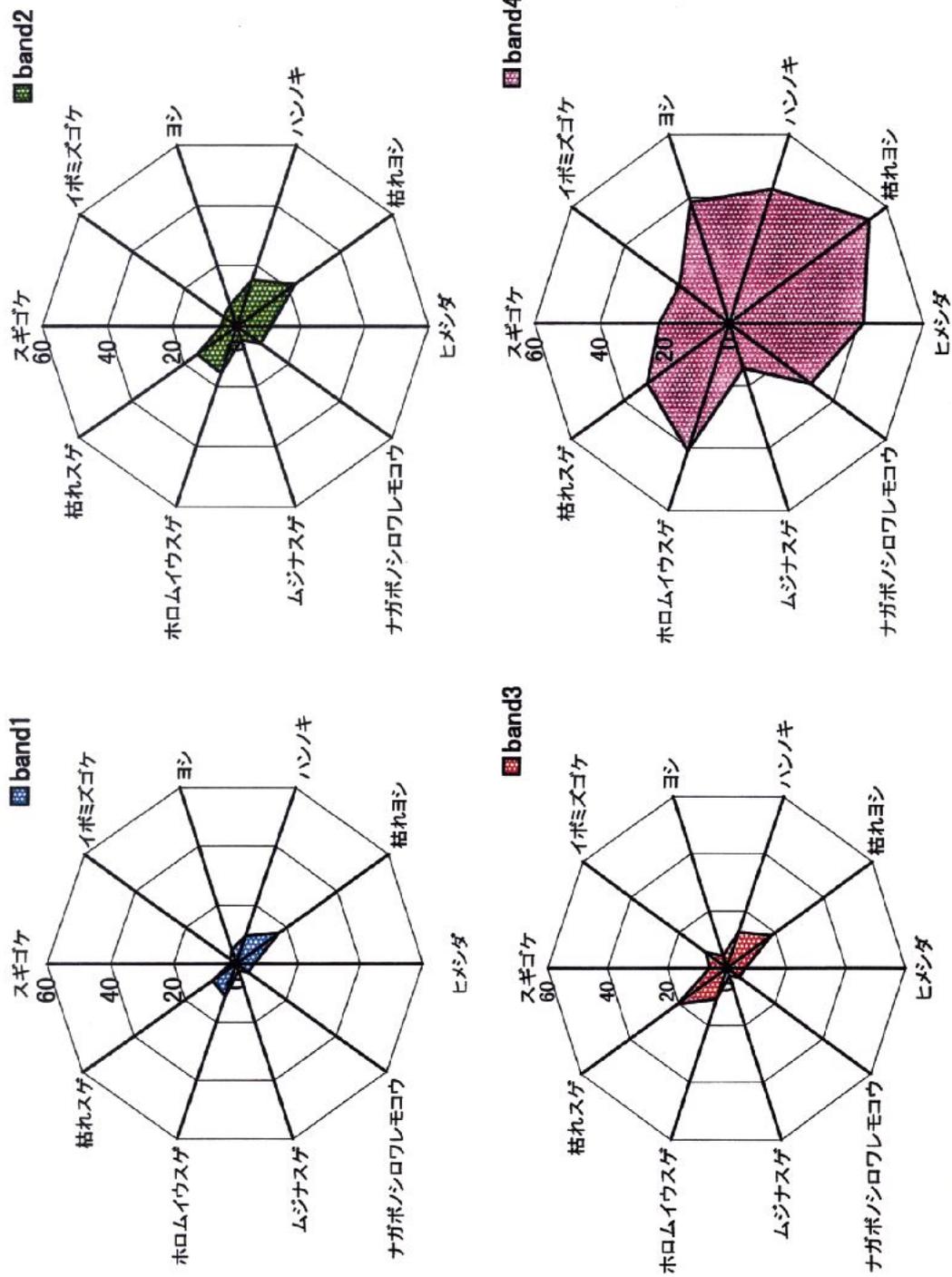


図-25. 2  
TM band 1~4 の波長帯における各湿原植生の分光反射率

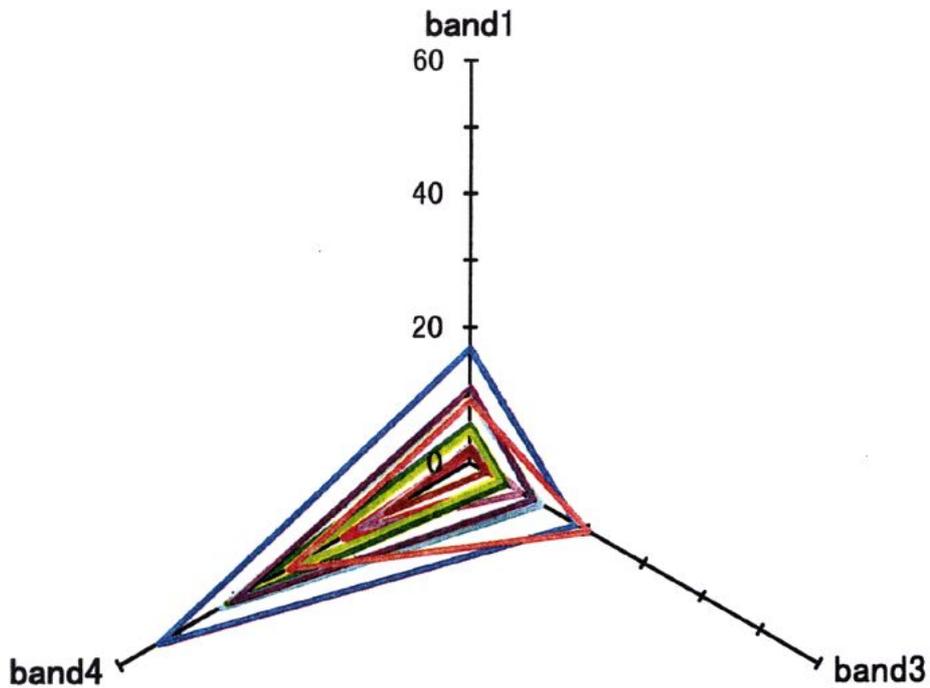
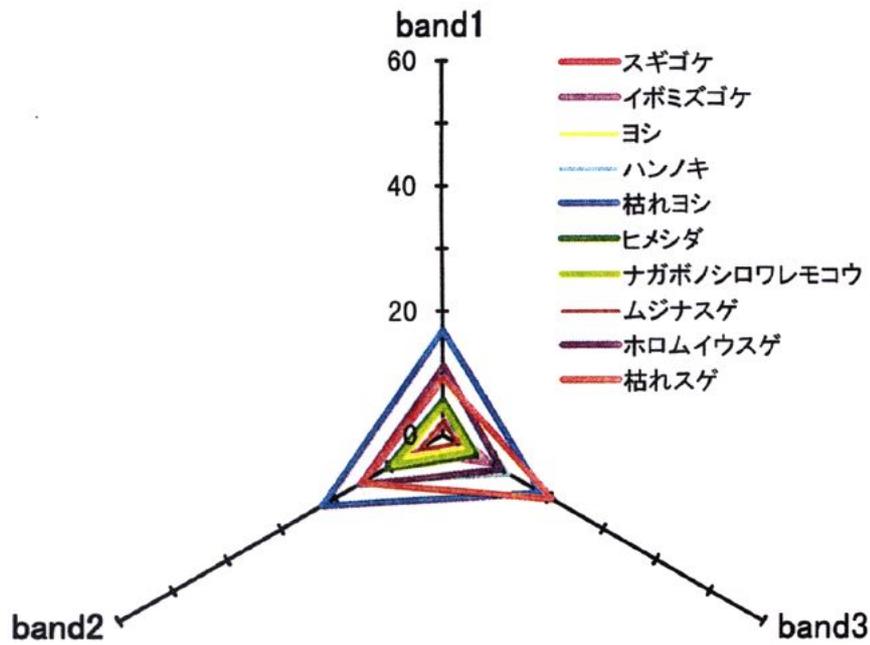
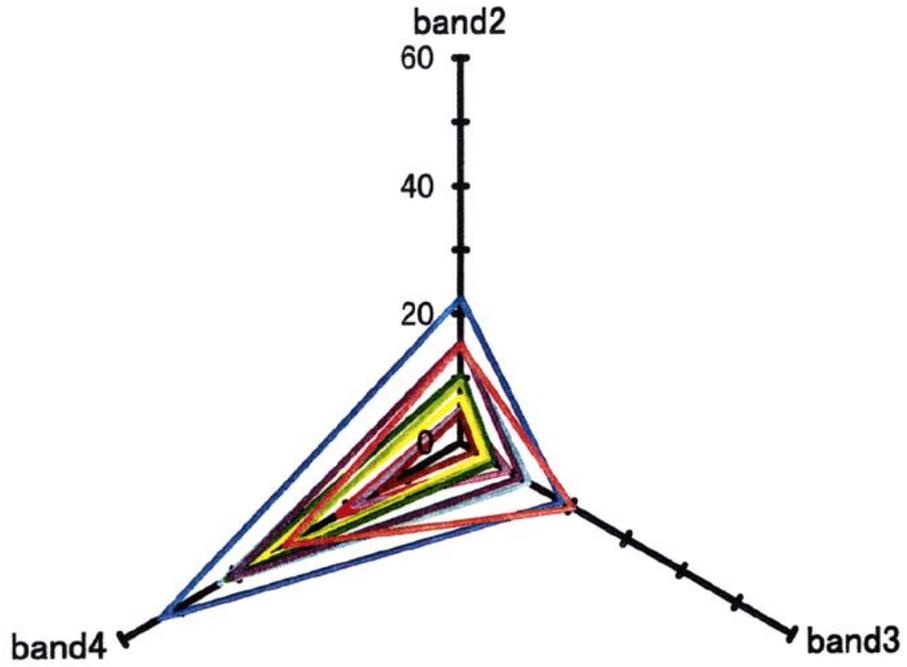
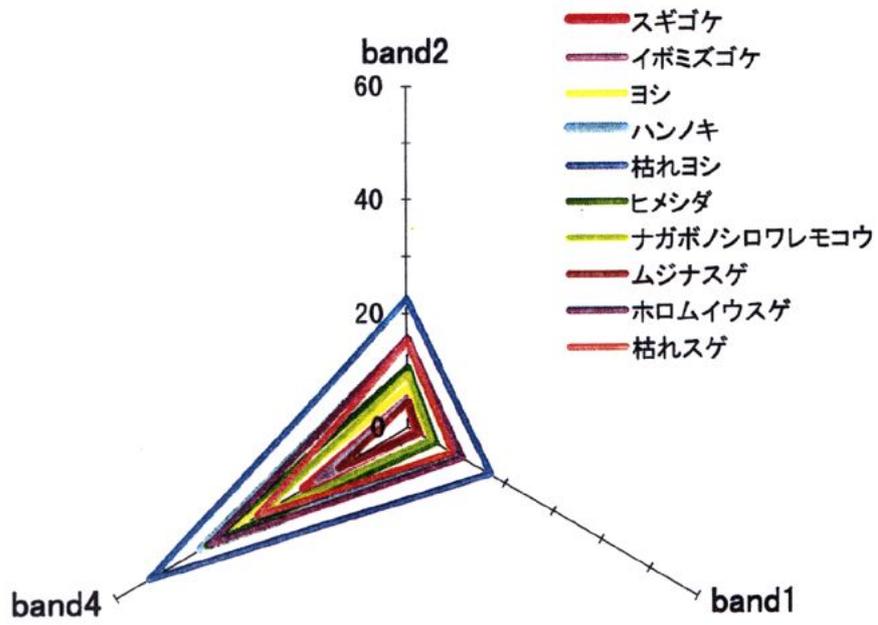


図-25.3 3つのバンドの組み合わせによる 高層・中層・低層湿原植生の TMband 1~4 に対応する波長帯の反射率



ど反射が強くなることが知られている。本研究の調査時期が初夏であったため、ヨシの水含量の違いが良く効いたと考えられる。なお、個集の反射率測定は、実験室内でおこなったため、フィールドでの測定とは異なり他の植物、土壌、大気からの反射率の影響はない。

## 群落の方向性分光反射率の特性

### .1 複色方向性からの群落分光反射率の検討

一般に、群落の反射スペクトルは個集と群落で類似点は多いといわれているが、群落層内の反射メカニズムが複雑であるために、定量的には異なった値を示すことが明らかにされている(玖村, 1969)。群落層内での個集の反射は、様々な傾斜角度と方位角度をしている。さらに日射の垂直及び水平分布があり、その結果として草冠としての分光反射強度になっている(玖村, 1968)。したがって群落の草冠の分光反射率は、個集の分光反射率とは必ずしも一致しない。

明らかに、複色から測定した分光反射率は、鉛直方向からの分光反射とは異なったスペクトル曲線が得られたが、角度の大小順にスペクトル曲線が平行移動する結果にはならなかった。すなわち角度の大きさと反射率には必ずしも相関があるとは限らないことが分かった。またどの程度の角度からの分光反射が種判別のために有効であるかは、湿原植生タイプにより異なることが分かった。

共通に言えることは、A、C、G地点を除けば、15°と45°のスペクトル曲線は似たような傾向を示している。さらに、A、E、G地点を除けば15°のスペクトルは45°のスペクトルを40nmほど長波長側にシフトしたスペクトル曲線となっている。また全ての複色角度の中で、他の分光反射曲線と外れて大きく異なる分光反射曲線を持つのが30°のスペクトル曲線であることが分かった。

分光反射の測定角度によっては、鉛直方向からの反射率とは別ところにピークを持つ分光反射曲線を示すことが分かった。

## ・ 湿原植生タイプごとの群落分光反射率の検討

全体をみて、E、C、G地点では波長域が400~1000nmの範囲で反射がみられるが、A地点では500nm以降、B、D地点では700nm以降、F地点では760nm以降の波長帯で反射が見られた。まず、図-6の植生区分図から湿原タイプ別に検討してみる。

### - 1 低層湿原要素の強いヨシ>その他草本の調査区Dと、スゲ>ヨシ>その他草本の調査区G地点(図-26、27)

共通することは、優出度はヨシ>その他の草本の関係にあることである。相違点は、Dの方がGよりもスゲの優出率が高いことである。両者とも15°と45°で似たスペクトル曲線を示した。G地点では、780~800nmにおいて45°の分光反射率が高い値を示した。また、30°のスペクトル曲線は、850nmより反射率が90%を超える高い値を示した。一方、D地点において、鉛直方向と30°からは、はっきりとした反射強度が見られなかったが、45°と15°で、780~890nmの領域で顕著な反射率を示したが、15°のスペクトル曲線は長波長側に40nmにシフトしていた。

### - 2 ヤチヤナギ,ハンノキ林、混生寒地性低木林のB地点(図-28)

Dと同様に、45°と15°のスペクトル曲線は似たような曲線を示したが、15°の曲線は、長波長側に40nmほどシフトしたかたちをしていた。反射強度を示す波長域は、鉛直の方が、複数角の時よりもスペクトルの分布域が広がっていることが分かった。すなわち、鉛直方向が700nm~930nmであるのに対して、複数角を持つ反射スペクトルは800nm~900nmである。

### - 3 中層湿原、スゲ優占タイプのA地点(図-29)

このスペクトル曲線は、30°以外のスペクトルで個集のパターンと似たかたちを示しているが(図-21参照)、反射率ピークは個集の20%増加した値となっている。また、700nm以降の波長域において、鉛直方向(40%前後の値のピークを示す)との差がでた。15°と45°がほぼ同じ曲線で、80%近い高い反射率を示した。30°のスペクトルが可視光域では650nmで他に比べて高い反射率を示しているという特徴がある。

# D地点

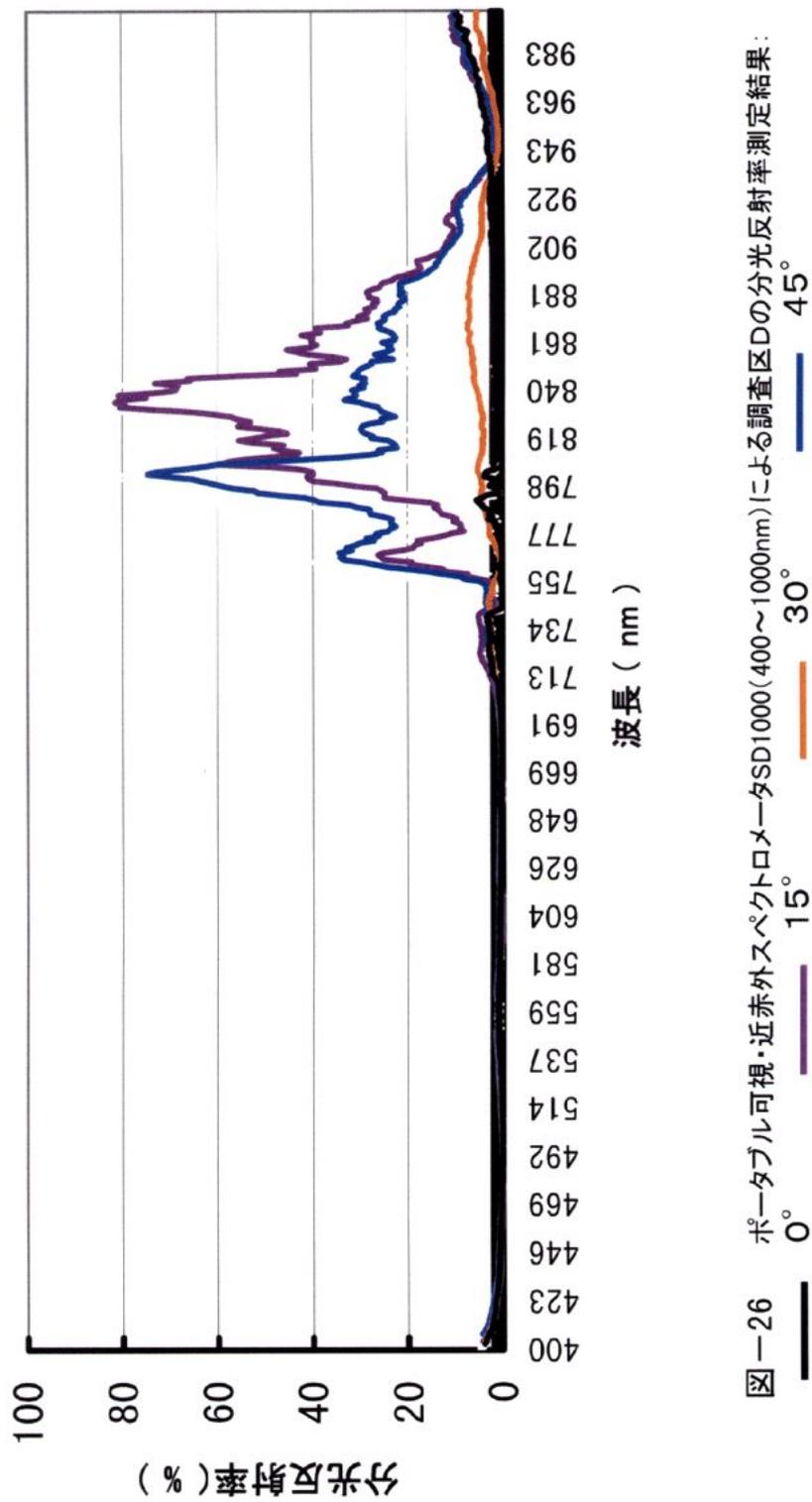


図-26 ポータブル可視・近赤外スペクトロメータSD1000(400~1000nm)による調査区Dの分光反射率測定結果:

— 0°    15°    45°

# G地点

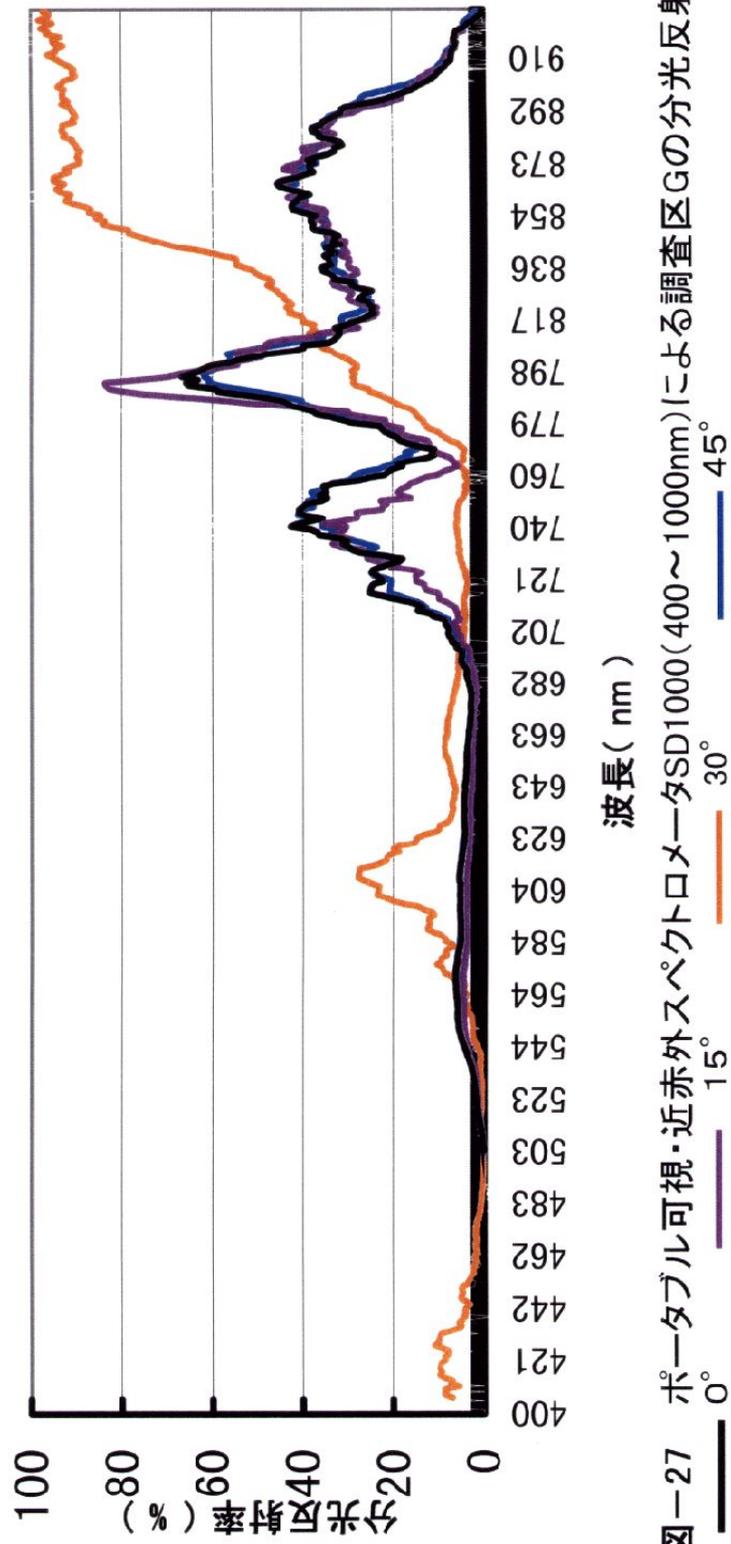
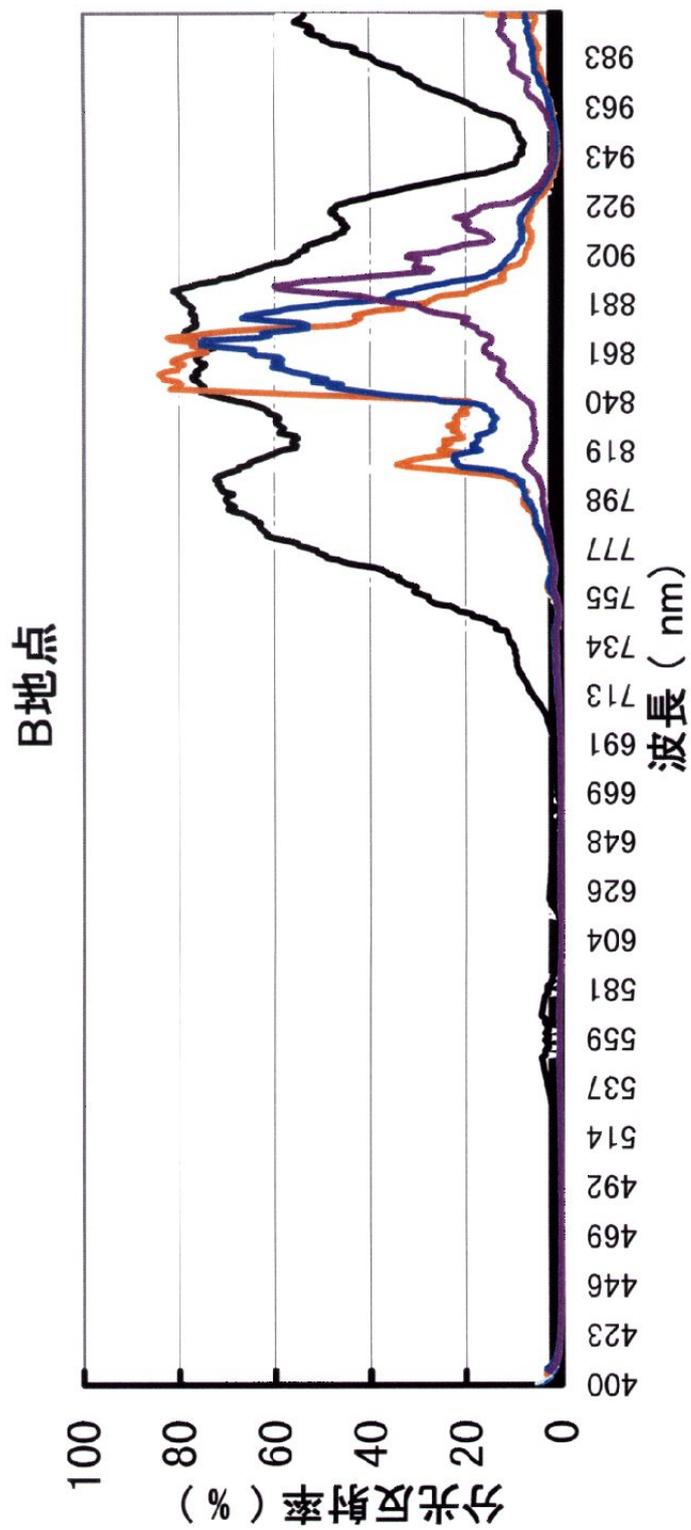


図-27 ポータブル可視・近赤外分光スペクトロメータSD1000(400~1000nm)による調査区Gの分光反射率測定



図一28 ポータブル可視・近赤外分光計SD1000(400~1000nm)による調査区Bの分光反射率測定結果:

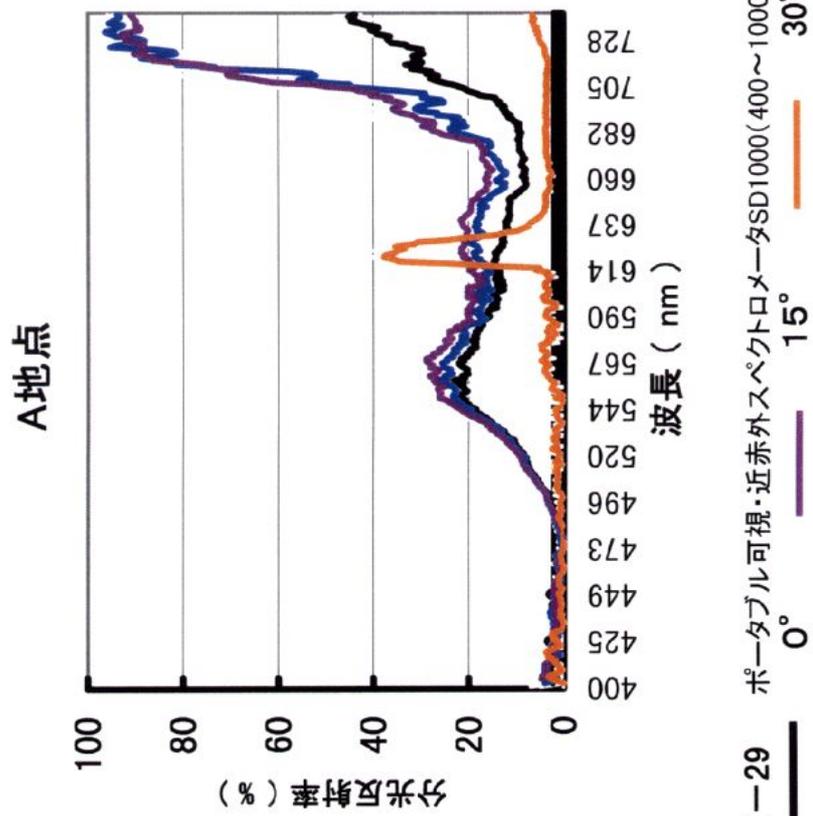


図-29 ポータブル可視・近赤外分光反射率測定結果:

#### - 4 コケのみ優占の高層湿原の調査区C、コケ>スゲまたは優性低木の調査区E、コケが優占するが、スゲに上層部を覆われる調査区F (図 - 30、31、32)

コケのみ優占するC地点では、鉛直方向からのスペクトル曲線が580nm付近であり60%であるのに対して、30°のスペクトルが最大のピークで550nm付近にあり80%、最も高い反射率を示した。一方、E地点は、コケとスゲからなる。E地点は反射強度のピークが2つに分かれた。すなわち、500~680nmと780~900nmである。やはり、前半のピークは30°の反射率が最大で、60%近い値となり、後半は鉛直の反射率が最も高く、次いで45°、30°の順となっている。最後にF地点を見ると、反射強度は800~950nmに集中している。そして、その強度の順も、E地点の後半部のピークと同様の傾向を示している。

#### . 考察・まとめ

##### 群落分光反射率測定結果

特に草冠の似た種の混在する低・中湿原植生は、測定した金種に対して反射スペクトル分布域が近赤外領域に重なったため、例えば同じバンド4でも、D地点は45度、G地点は15度、B地点は鉛直方向を選択すれば、少なくとも低層湿原内の植生判別には方向性分光測定が有効になることが明らかになった。また、高層湿原植生は、コケ群落が可視域の短波長側に、コケにスゲが混在した調査区では近赤外域にスペクトルの分布が別れた。そのため、少なくとも、高層湿原内の植生を判別するには、特に斜め方向からの分光測定をしなくても、バンドの選択によりおよその植生の判別が可能になることが明らかになった(図 - 33.1, 2)。

#### - 1 低層湿原(G, D地点)

低層湿原を代表するGとD地点の2つグラフを重ねた(図 - 34)。これからも分かるように、反射率の最大値はD、G地点に共通して、760~900nmにある。さらに、最大値は780~800nmで、D地点の45°とG地点の45°で重なった。すなわち、少なくとも、地上2mの高さから、スペクトル観測をしたデータを用いる場合、低層湿原の判別には15°の分光反射を捉えることが有効であると予測される。

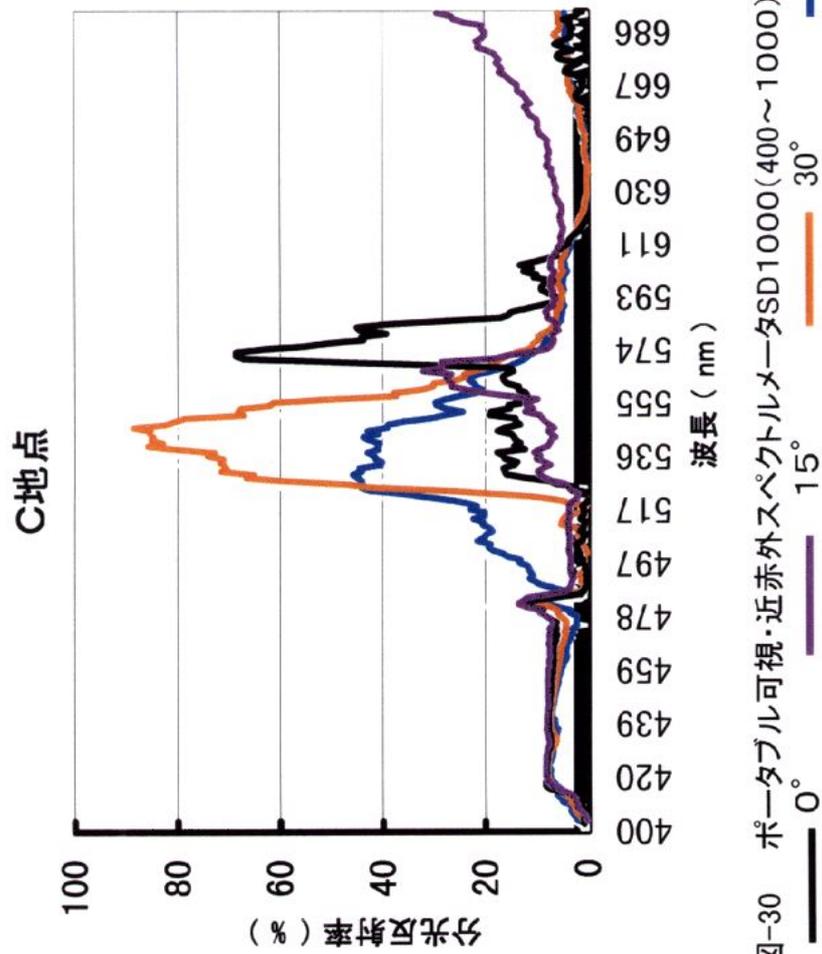
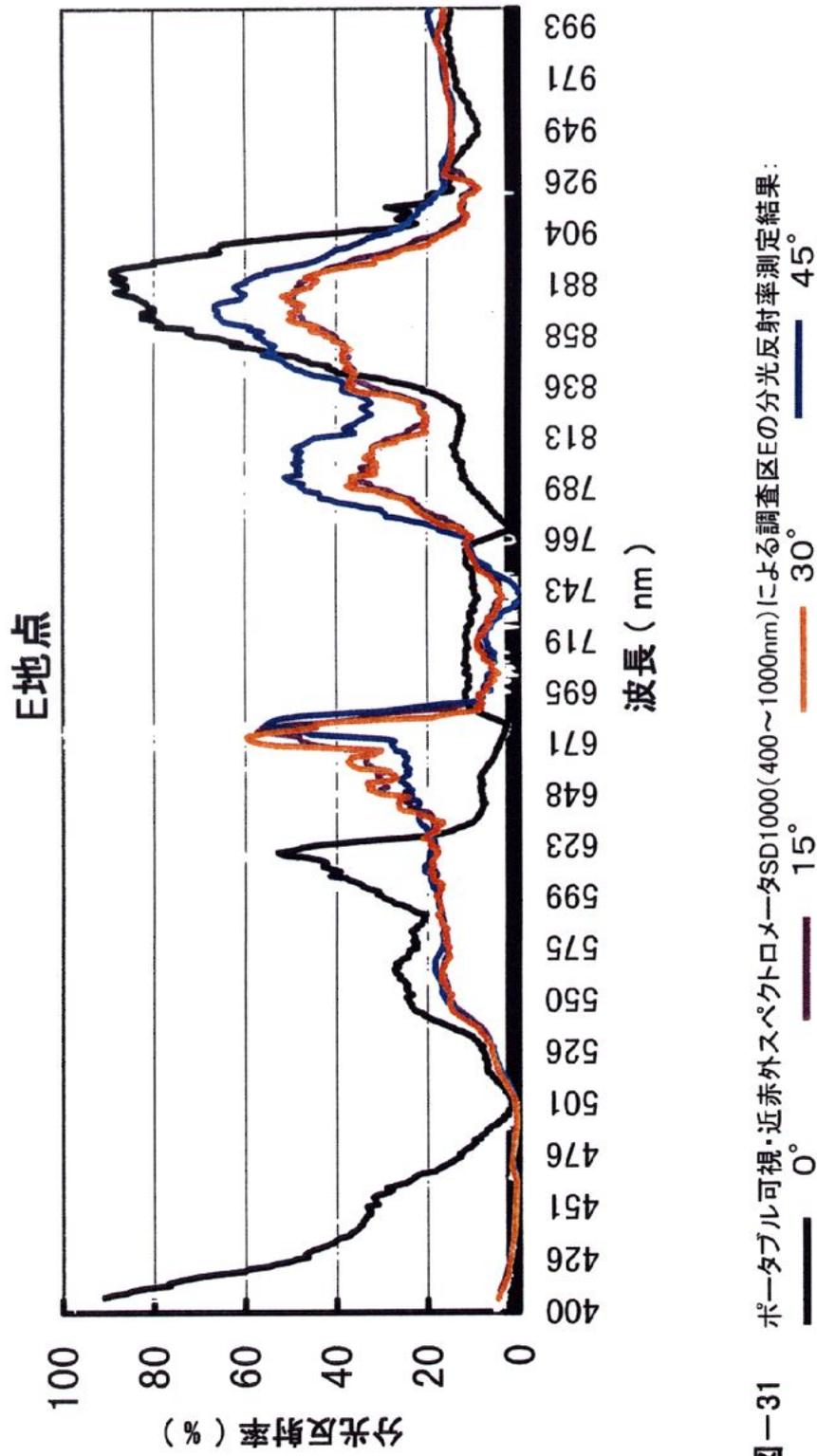


図-30 ポータブル可視・近赤外分光反射率測定結果(400~1000nm)による調査区Cの分光反射率測定結果



図一31 ポータブル可視・近赤外分光反射率測定結果 (400~1000nm) による調査区Eの分光反射率測定結果:

# F地点

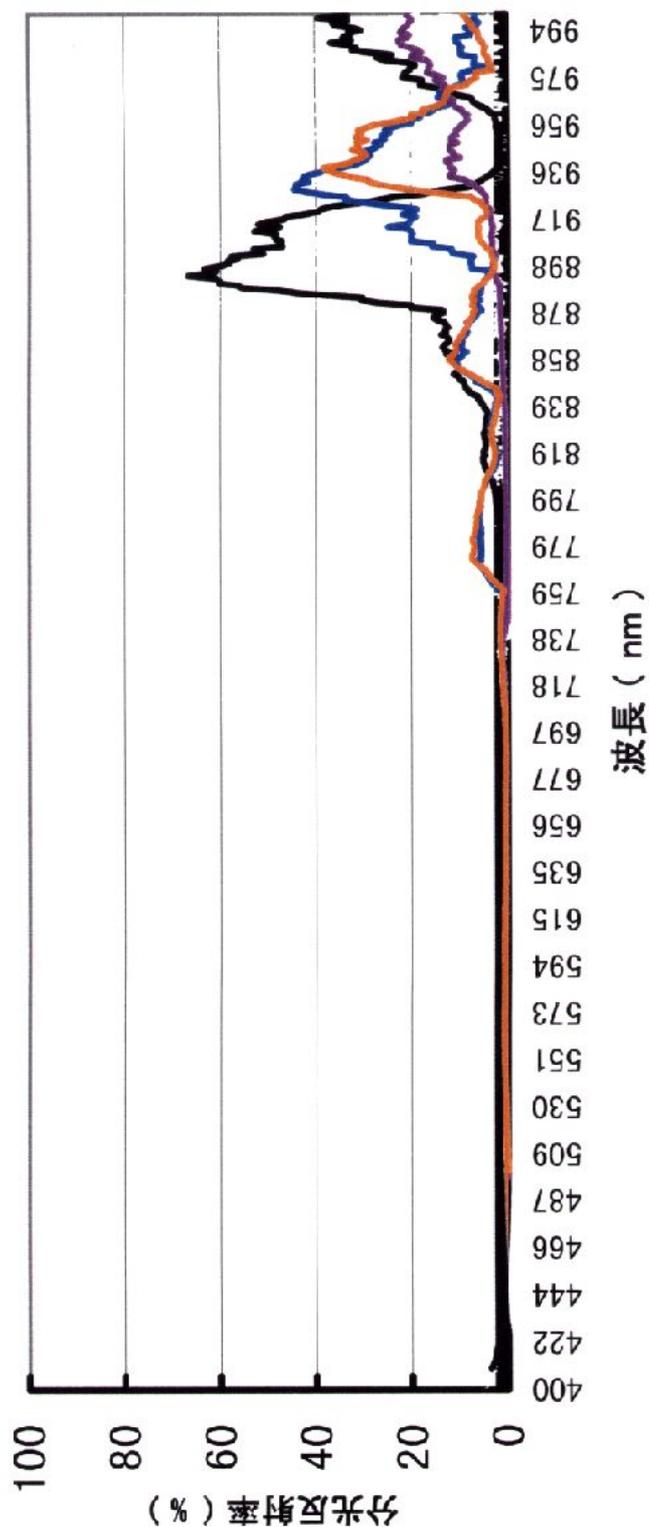
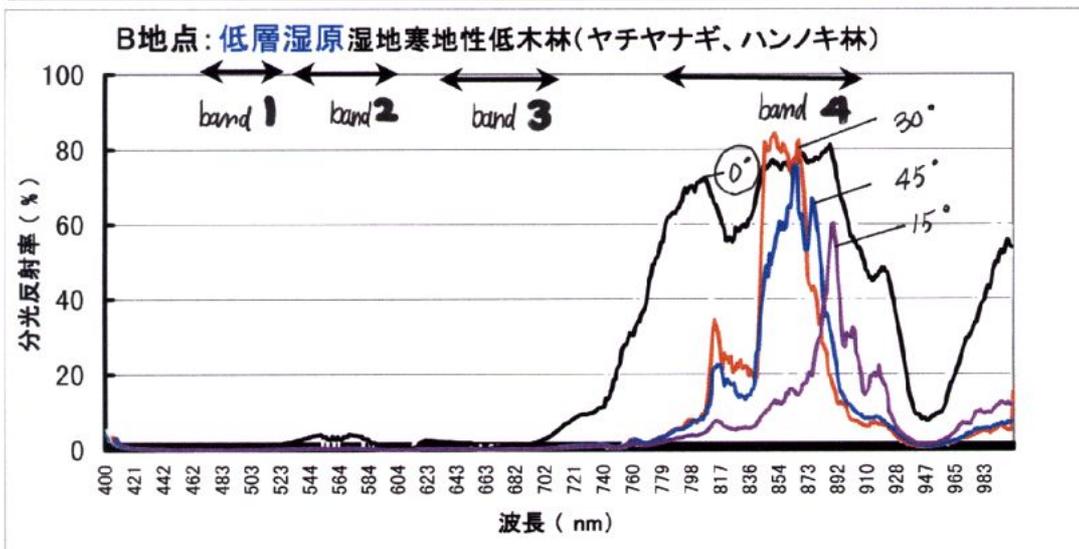
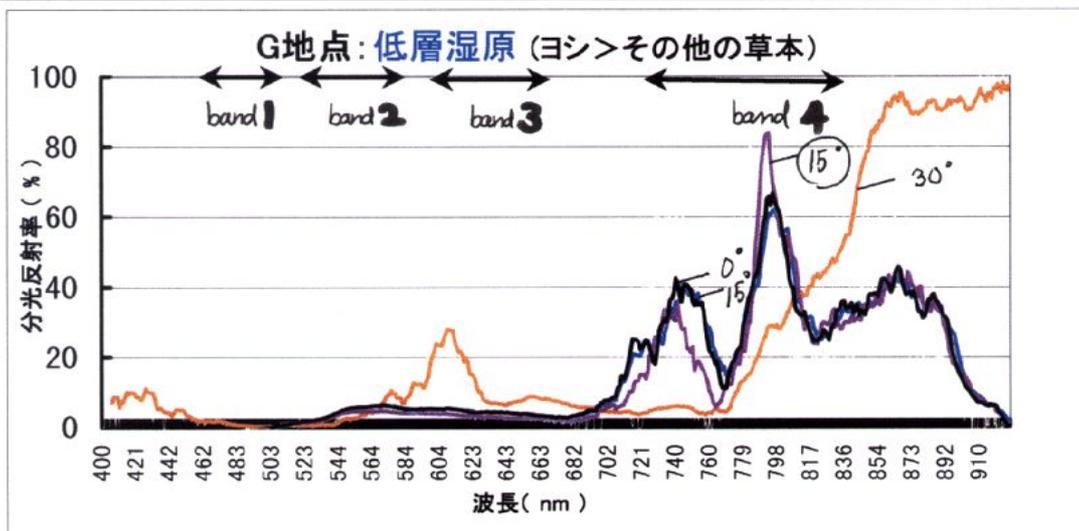
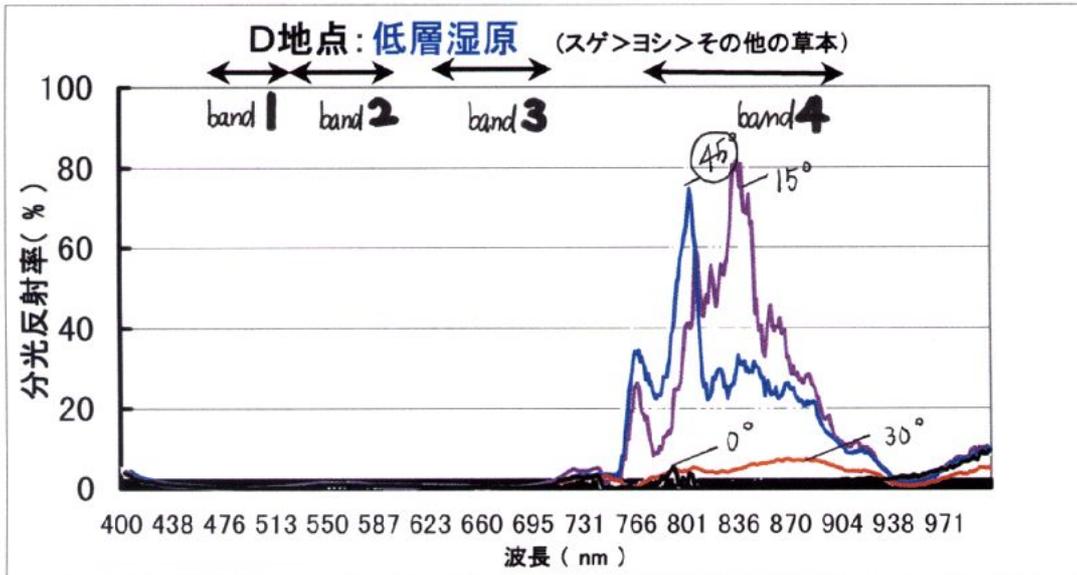
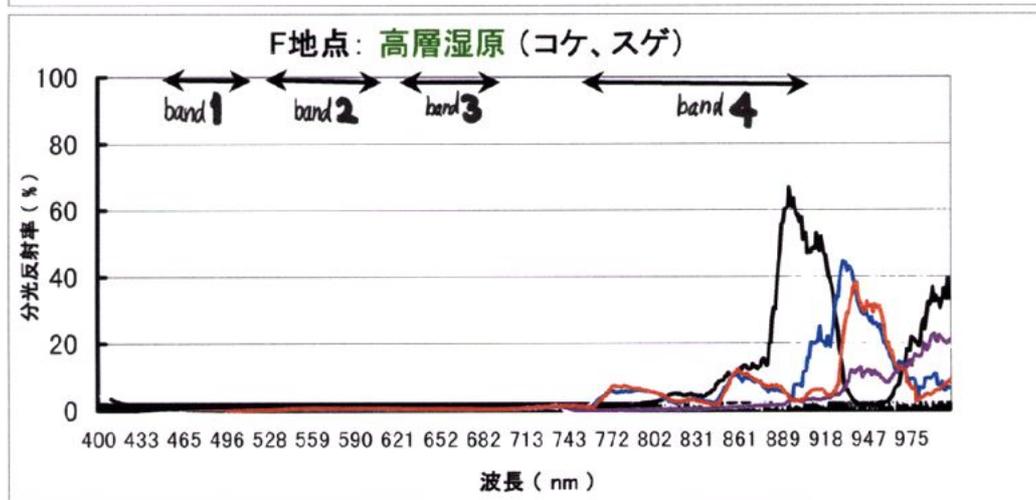
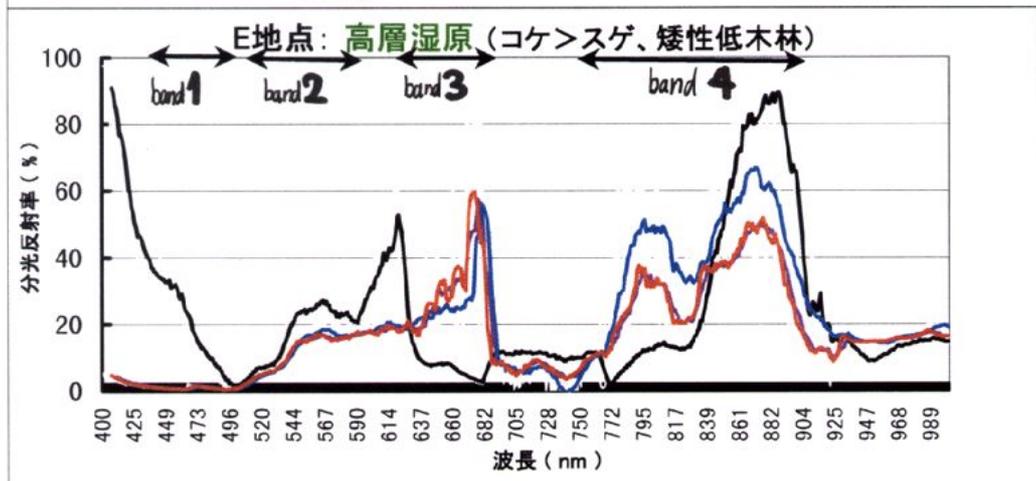
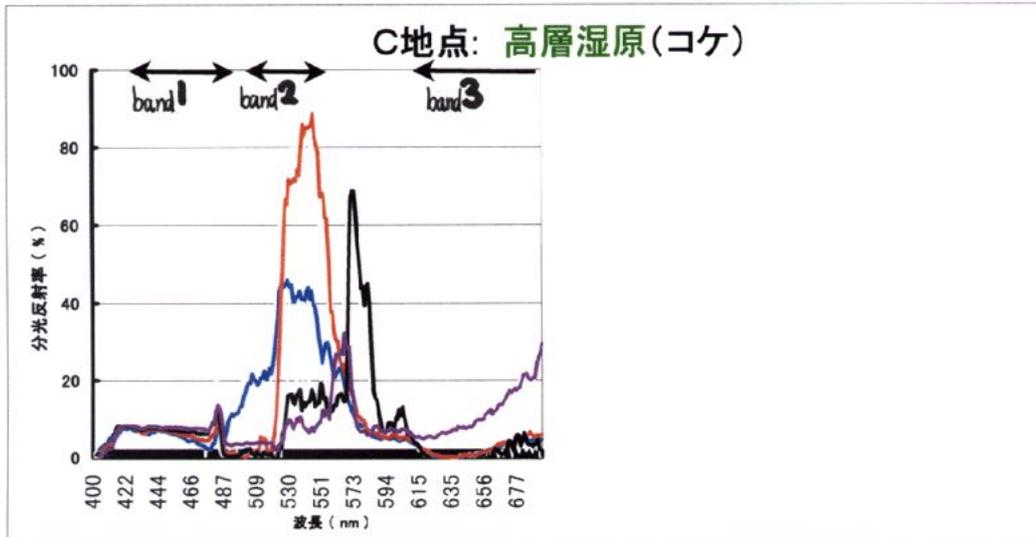


図-32 ポータブル可視・近赤外スペクトロメータSD1000(400~1000nm)による調査区Fの分光反射率測定結果：  
— 0° — 15° — 30° — 45°



ポータブル可視・近赤外スペクトロメータSD1000(400~1000nm)による調査区Gの分光反射率測定結果

— 0° — 15° — 30° — 45°



ポータブル可視・近赤外スペクトロメータSD1000(400~1000nm)による調査区Aの分光反射率測定結果:  
 — 0° — 15° — 30° — 45°

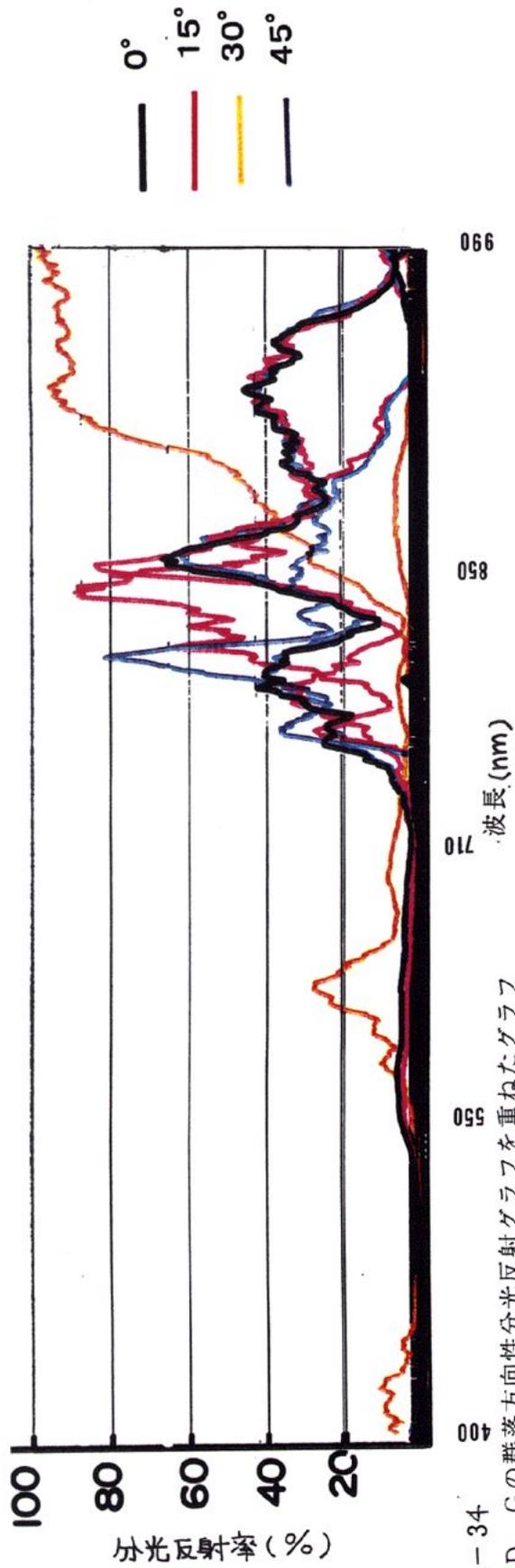


図-34 図D, Gの群落方向性分光反射グラフを重ねたグラフ

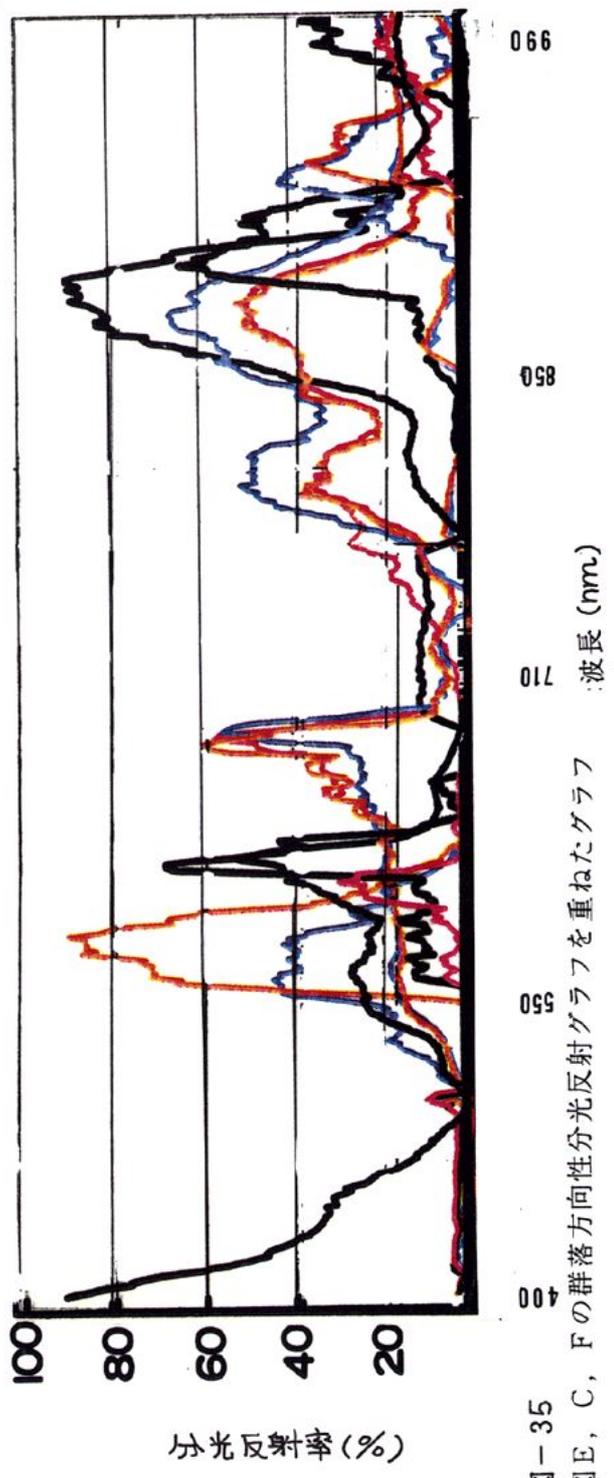


図-35 図E, C, Fの群落方向性分光反射グラフを重ねたグラフ

## - 2 高層湿原(C, E, F 地点)

高層湿原を代表するC、E、F地点のグラフ3つを重ねた(図 - 35)。これからも分かるように、反射率の最大値は2つに分かれる。前半 520~680nm、後半 830~900nm である。すなわち、これは、CとEが前半オーバーラップしていることから、前半の反射強度は、主に、コケ群落に対する反射強度の特徴であることが分かる。そして、これにはCとEが共通するように、30°のスペクトル反射曲線が有効であると考えられる。後半は、EとFがオーバーラップしていることから、コケがマット状にある植生にスゲが繁茂している植生タイプであることが推測される。これには、鉛直方向からのスペクトルが有効であることが分かった。さらに、3つ重ねてわかることは、680~780nmにおいて、反射強度がほとんど見られないことである。

## - 3 低層湿原と高層湿原(D, G 地点)

上記の .3- と、すなわち低層湿原D、G、高層湿原のE、F、Cを重ねてみると、3種のピークに分光スペクトルが分布していることが分かる。すなわち、上記の 680~780nmの波長領域に、の低層湿原のヨシの分光反射率が集中することが分かった。前半部の520~680nm(コケ群落)と中間部の680~780nm(ヨシ群落)、後半部の830~900nm(スゲ群落)である。そして、前半部は30°、中間部は15°、後半部は鉛直方向がそれぞれの判別に有効であることが明らかになった。

## - 4 中層湿原(A 地点)

上記のと、すなわち低層湿原のヨシタイプと高層湿原のコケ・スゲタイプとは違って、個集で測定したスペクトルに近い曲線を示したので、判別しやすいことが分かる。特に650nm付近の30°のスペクトルは有効である。

## - 5 混生寒地性低木林(B 地点)

ヤチヤナギ、ハンノキ低木林タイプのB地点は、.3-、とも重ならないが、種判別のためには、の後半部のスゲ群落にオーバーラップしない鉛直方向が有効であることが分かった。すなわち、反射強度分布は700~900nmに分布するが、角度が分布していない740~800nmを選択するのが有効であると考えられる。

以上、の低層湿原を代表するGとD地点の2つのグラフを重ねたグラフ、の高層湿原を代表するC、E、F地点のグラフ3つを重ねたグラフ、の中層湿原のヨシタイプA地点、の低層湿原のヤチヤナギ、ハンノキ低木林タイプB地点の、をまとめて考えてみると、湿原タイプ別植生によって、分光反射強度が分布する波長帯が特異的であり、判別に有効な方向性反射角度もそれぞれ異なることがわかった。

## 第5章 結論・まとめ

### 5.1 個集の分光反射からみた混在植生の判別

個集の測定は群落の反射強度の要素であり、個集の分光反射率と群落の分光反射率では測定対象物の複雑さが異なるので、必ずしも似たようなスペクトル曲線になるとは限らない。少なくとも、個葉測定で測定時期を初夏として考えた場合、活力度で判別するには、2つのバンドの組み合わせで考えた場合、バンド1・3、バンド2・3、バンド3・4の順で有効であり、金種の判別及び湿原タイプ別の判別にはバンド1・3、バンド3・4の組み合わせの順で有効である。さらに3つのバンドで考えた場合、活力度の判別にはバンド1、3、4と2、3、4、湿原タイプ別植生を判別するには、バンド1、2、4、そして金種を個々に判別するにはバンド2、3、4が有効となる。また、2つのバンドの組み合わせでは種判別には有効でない組み合わせでも、3つのバンドの組み合わせを考えることで、種判別には有効なバンドになることが明らかとなったが、逆に、2つのバンドの組み合わせで有効でも、3軸にすることで判別には有効ではなくなる場合もあった。

### 5.2 群落のバイオマスと方向性分光反射メカニズムからみた混在植生判別のための湿原植生リモートセンシングへの有効波長帯

鉛直方向からのみの測定では、ヨシとコケのように、明らかに草冠の違う植生に対する分光反射曲線からの判別が可能であるが、低層湿原のヨシ群落と中層湿原のスゲのように草冠が似た湿原植生に対して、種判別は難しいことが分かった。代表的な湿原植生タイプを地上2mの高さから分光測定した限り大別すると、各湿原パターンの植生タイプによって、反射強度が分布する波長帯が特異的であり、植生タイプが多少オーバーラップしても、判別した有効なスペクトルのピークと有効な方向性分光反射角度を選択すれば、湿原タイプごとの植生の判別が可能となることが明らかになった。湿原植生タイプ別にスペクトルの分布に特徴があり、判別に有効な方向性反射角をもつことがわかった。従って、植生タイプによっては、鉛直方向よりもむしろ特定の方向性分光反射が種判別に有効になり、湿原のように複数の植生がオーバーラップしている場合、種判別に、斜め方向から捉える分光反射測定は有効であると考えられる。

#### 低層湿原(ヨシ>スゲ>その他の草本タイプ)

生産構造が地上からの高さ、LAD、層別 SLA の関係がコの字タイプである。上層と下層は層単位でみた葉の重なり具合が大きい、層別でみた葉面積は小さく、中間層は層単位でみた葉の重なり具合は小さいが、層別でみた葉面積は大きい。下部まで光が届きにくいバイオマスと光環境にある。

反射スペクトルの分布は、測定した金種の植生に対して 760nm ~ 900nm に分布した。判別に有効な反射ピークは 780nm ~ 800nm で全て同じバンドの近赤外域のバンド 4 にあたる。従って、スゲ>ヨシ>その他の草本は 45 度を、ヨシ>その他の草本は 15 度を、ヤチヤナギ、ハンノキ林は鉛直方向を選択すれば、判別が可能になる。

### 高層湿原 (コケ>スゲタイプ)

生産構造が地上からの高さ、LAD、層別 SLA の関係が分離型タイプで、層が他の湿原植生に比べて少ない。反射スペクトルには 2 つのピークがあり、前半の 520nm ~ 680nm で可視光の緑に相当するバンド 2 がコケ群落と後半の 830nm ~ 900nm で近赤外域のバンド 4 にあたるスゲ群落である。従って、コケとコケにスゲが混在した植生のように、明らかに草冠の点となる地点では、特に方向性測定を行わなくても、バンドを選択することで種判別が可能となることが分かった。また、680nm ~ 780nm には反射強度がないことが特徴として挙げることができる。なお、この波長領域には、低層湿原の反射スペクトルが分布することが分かった。

### 中層湿原 (スゲ優占タイプ)

低層湿原広葉に、スペクトル分布域が重なるため、方向性分光反射測定が有効となることが明らかになった。特に 650nm 付近で可視光域のバンド 3 に相当する 30° のスペクトルは有効であることが分かった。

### ハンノキ・ヤチヤナギ 混生寒性低木林タイプ

高層湿原のスゲ群落に重なっていない鉛直方向が有効であることが分かった。すなわち、反射強度分布は 700 ~ 900nm に集中するが、複角度が分布していない 740 ~ 800nm のバンド 4 の鉛直方向の波長帯が有効であることが分かった。

植生相観は、個々の植生構造が集合した結果であり、それらは葉の形態、生育型、空間的配置といった物理面と、フェノロジーや日射量など、生物学的季節や光環境に依存している。その特徴を捉える上で特に、湿原植生のように湿原タイプごとで混生植生が複雑に混在するフィールドにおいて、数メートルスケールでの近接方向性リモートセンシングは、少なくとも植生タイプ判別には有効な手段であることが明らかになった。また、群落内の層構造を明らかにすることで、群落の分光反射特性は、湿原植生タイプ、特に草冠の形状や構造に大きく依存していることも分かった。

### 5.3 今後の課題とその応用

21 世紀を目前に、様々な目的に応じたリモートセンシングセンサーの開発により、高空間解像度、超多重分光センサーなど、広域波長帯でバンド数もさらに増加すると予測される。特定のスペクトル領域での反射率から得られる情報は、陸上生態系の機能や構造の基礎的評価の 1 つとなる。そして生物学的なプロセス、例えば、L A I、植被率、光合成活性量や、リグニンや窒素、炭素含有量、あるいは生化学的なプロセスといった個々の環境要因の測定にも現在、赤外・近赤外スペクトル情報は使われている。近接分光反射スペクトル情報は、葉の構造特性といった小スケールレベルの情報に依存しているため、植物の生産力やストレス情報に関する植生の構造的、機能的特性と関連づけて予測することも可能であると考えられる。また今後、超多重分光センサーの開発などにより、少なくとも湿地帯のような草冠の類似した草本あるいは地衣類が植生の大部分を占めるような地域に対して、方向性分光反射特性は種判別に有効であることが考えられる。また、現在いくつかの衛星センサーが斜め方向からの衛星画像を捉えている。1992 年に打ち上げられた日本の衛星ふよう 1 号(JERS-1)のセンサー、VNIR (Visible and Near Infrared Radiometer:可視近赤外放射計)は直下視と 15.3° 前方向によるステレオ観測が行われ、短波長赤外では岩石や鉱物の判別に効果を示している。さらに、1996 年に打ち上げられた地球観測プラットフォーム技術衛星(ADEOS)に搭載されている ANIR (Advanced Visible and Near Infrared)は、同一地点の立体画像取得のために-40° から+40° までのオフナディア視機能を持っている。また、搭載されたフランスの地表反射観測装置 POLDER (POLarization and Direction of the Earth Reflectance) には、地球表面で反射される太陽光の偏光と方向性の測定をおこなっている。国内では釧路湿原で、航空機やバルーンにスペクトルセンサーを搭載し、複数色からの分光測定を行っている研究もみられる。今後はこれらのデータとの比較により、植生リモートセンシングデータ利用への有効性の検証となる基礎研究の 1 つとして、さらには既存の植物生態学の知識と融合させた近接分光反射研究として今後期待されるであろう。また、本研究の調査時期は初夏であり、太陽高度を 60° 前後と統一し、生物学的な季節変化を考慮にいれていない。そのため、今後は測定時の太陽高度、多時期によるスペクトルの変動も捉える必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究の遂行ならびにフィールド調査にあたり、終始熱心なご指導をして頂いた筑波大学社会工学系の指導教官の吉野邦彦教官に心よりお礼申し上げます。さらに、2年間を通して、ゼミや発表、論文の懇切丁寧なご指導、そして貴重なアドバイスをして下さった同大学の地球科学系に所属する研究指導担当教官の安仁屋政武教授に心底厚く御礼申し上げます。また、本修士論文の副審査を担当し、本論文を完成させるにあたり、丁寧に論文のご指摘、指導をして下さった同大学の生物科学系に所属する及川氏久教授と、同様に釧路湿原のフィールドまで足を運ばれた同大学の農林工学系に所属する塩沢昌助教授に心から感謝の意を述べたいと思います。また、湿地・水生植物に関して植生表をみて下さった筑波実験植物園の研究者、田中法主氏にお礼を申し上げます。また、調査・解析方法に関する技術および様々な情報提供をして下さった北海道大学低温科学研究所の中田圭司助手に厚く御礼申し上げます。現地で複写機その他実験施設等、種々の御便宜をはかられた北海道教育大学釧路校の東海林明雄教授に深く感謝いたします。そして衛星画像を提供して頂いた農業環境研究所の研究者小川吉雄氏と、論文の提供及び釧路湿原の調査アドバイスを下さった国立環境研究所の研究者、山形与志樹氏に感謝の意を述べます。

最後に、本研究に平成 10 年度学術研究奨励補助金を授けて下さった厚岸町役場の企画課を代表とする関係課職員の皆様に大変感謝いたします。特にフィールド調査にあたり、資料提供及び現地概況の丁寧なご教示をしてくださった厚岸町水鳥観察館研究員の渋谷辰生氏、水鳥観察館の宿泊施設を提供してくださった厚岸町役場企画課、水鳥観察館長の福田美樹雄氏、その他職員の方々に心から感謝いたしたいと思います。皆様のご協力のもと本修士論文を完成することが出来ました。本当にありがとうございました。

1999 年 1 月 25 日 宮本みちる

## 参考文献

ア・イ・シュルギン著、内嶋善兵衛訳（1967）：「太陽と植物」，東京大学出版会

飯塚仁四郎・瀬尾春雄（1996）：釧路国泥炭土地性調査報告，その二 厚岸原野を主体とする釧路国東部.北海道農業試験場土地性調査報告第十七編，北海道試験場，札幌，125.

伊藤浩司（1992）：厚岸町別寒辺牛川湿原視察報告，北海道教育委員会，4

伊藤浩司・橘ヒサ子（1993）：厚岸町別寒辺牛川高層湿原調査報告書，19，北海道報告委員会，厚岸町教育委員会

井上京（1997）：別寒辺牛泥炭にみる低地泥炭湿原の水文環境と形成過程，（財）自然保護助成基金 1994・1995 年度研究報告書，41-47

岩城英夫（1973）：「陸上生物群落の物質生産 - 草原 - 」，生態学講座 6，共立出版株式会社

牛島忠弘・古川照雄・米山忠克（1981）：「植物の生産過程測定法」，生態学講座 7，共立出版株式会社

内嶋善兵衛（1985）：太陽放射エネルギーの季節的・地理的变化，グリーンエネルギー計画シリーズ 系 No. 4，農林水産技術会議事務局

岡崎由美・伊藤俊彦（1992）：第 2 節 地形・地質「すぐれた自然地域」自然環境調査報告書，別寒辺牛川，別当賀川下流域，北海道保健環境部自然保護課，札幌，8-14

小熊宏之・山形与志樹（1997a）：湿原植生分類に有効となる観測時期選択，写真測量とリモートセンシング，VOL.36，NO.4，5-16

小熊宏之・山形与志樹（1997b）：湿原植生分類図作成に有効となる GLI 観測バンドの選定，写真測量とリモートセンシング，VOL.36，NO.1，27-38

小熊宏之・山形与志樹（1996）：二時期航空機 MSS データを用いた湿原植生分類に有効な観測波長帯の研究，写真測量とリモートセンシング，VOL.35，NO.1，36-44

小倉紀雄（1991）：「地球環境と自然保護」，東京農工大学農学部，生物圏環境科学科学専修，培風館

神田房行・高橋英樹・富士田裕子・長谷川栄・辻井達一(1992):第3節 植物「すぐれた自然地域」別寒辺牛湿原,別当賀川下流地域,自然環境調査報告書,15-33

玖村敦彦(1969):ダイズ群落内における日射波長成分の垂直分布,日作紀,38,408

玖村敦彦(1968):ダイズ群落における散乱光比率と葉面積照度,日作紀,570

菊地邦雄・環境庁野生生物研究会監修(1990):「湿地への招待 - 湖・沼・池・干潟の楽しみ方」,ダイヤモンド社

工藤恵栄(1985):「分光の基礎と方法」,オーム社

黒岩澄雄(1989):「物質生産の生態学」,東京大学出版会

嵯峨山積・松下勝利・山岸宏光(1985):地質調査報告書,茶内原野地域の地質,地質調査所

佐々木好之(1974):「植物社会学」,生態学講座4,共立出版

鮫島淳一郎・辻井達一・梅沢俊(1997):「北海道の花」,北海道大学図書館刊行

柴田和雄・内嶋善兵衛(1982):「太陽エネルギーの分布と測定」,学会出版センター日本分光学会,測定シリーズ15

嶋田暁(1973):「草地の生態学」,生態学研究シリーズ,築地書館

鈴木静夫監修(1974):「湿原の生態学」,内田老鶴圃新社

鈴木兵二・伊藤秀三・豊原源太郎(1985):「植生調査法 - 植物社会学的研究法」,生態学講座3,共立出版株式会社

生態学実習懇談会編(1979):「生態学実習」,朝倉書店

田川日出夫,沖野外揮夫(1976):「生態遷移研究法」,生態学研究法講座10,共立出版

竹原明秀(1995):宮床湿原とその周辺地域の植生,国立科学研究所報告書,第134号,45-81

橋ヒサ子・新庄久志・佐藤雅敏(1998):別寒辺牛高層湿原の植生,1-30

舘脇 操・五十嵐恒夫(1975):パイロットフォレスト造成に伴う環境の変遷,帯広営林署,pp75-105

舘脇 操・辻井達一(1956):北海道牧野の植物学的研究-東部北海道を中心とした、北海道総合開発計画調査釧路原野開発調査資料

舘脇 操・山中敏夫(1939):牡蠣島の植物群落研究,生態学研究,7:14

辻井達一(1954):釧路厚岸湖畔アッケシソウの生態(第一報)北海道塩湿地植物群落の研究(1).植物生態学会報,3:236-240

辻井達一(1956):牡蠣島の植物群落北海道塩湿地群落の研究(2),日本生態学会誌,6:pp120-124

辻井達一(1956):釧路厚岸湖畔アッケシソウの生態(第一報)北海道塩湿地植物群落の研究(1),植物生態学報,3:236-240

辻井達一(1992):すぐれた自然神域-別寒辺牛湿原・別当川流域・自然環境調査報告書,5-22

戸塚績・木村允(1972):「植物の生産過程」,生態学講座9,共立出版株式会社

富岡悦郎(1985):北海道の土壌.北海道土壌図,北海道農業試験場,札幌.

中島照雄(1993):「釧路湿原ガイド」 釧路支部,(財)日本鳥類保護連盟

中原勝巖(1994):「分光測定入門」,学術出版センター

(財)日本環境保護協会(1996):「釧路湿原の自然観察」,自然観察ガイドブック-41

(財)日本鳥類保護連盟釧路支部(1996):「温根内遊歩道の自然観察」,釧路湿原自然ガイド

沼田裏編(1969):「図説植物生態学」,朝倉書店

沼田真(1976):「生態の辞典」,東京堂出版

藤井宏一(1994):「生態学」,日本放送協会出版

北海道生活環境部自然保護課 (1981): 北海道の特定環境の概要 湿原・河川・草 「北海道自然保護計画」策定資料.No4.

本多勝一編 (1993): 「釧路湿原」, 朝日新聞社

宮地重遠・村田吉男 (1980): 「光合成と物質生産 - 植物による太陽エネルギーの利用」, 理工学社

三好学 (1938): 厚岸湖牡蠣島植物群落天然記念物調査報告書植物之部, 18: 74

村井俊治 (1997): 「リモートセンシングハンドブック」日本リモートセンシング研究会, 宇宙開発事業団発行

村井俊治 (1996): 「わかりやすいリモートセンシングと地理情報システム」, 日本リモートセンシング研究会, 宇宙開発事業団発行

村山精一 (1991): 「光源の特性と使い方」, 学術出版センター

山形与志樹・小熊宏之・富士田裕子 (1996): 多時期のランドサットTM画像を用いた湿原植生分類, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.35, No.4: 9-17

山形与志樹・安同義父・宮崎恵国・小熊宏之・森山陵・中谷幸広 (1995): 航空機MSS実験による湿原植生判別に有効な波長帯の選定と植生分類画像, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.15, No.3: 26-35

吉井義次 (1919): 厚岸牡蠣島の植物群落 天然記念物報告書植物之部, 1: 37-43

Asrar, G., Kanemasu, E.T., Miller, G.P., and weiser, R.L. (1986): Light interception and leaf area estimates from measurements of grass canopy reflectance. *IEEE Trans. Geosci.remote Sens.* GE-24: 76-82

Chapin, F.S., Bloom, A. J., Field, C. B., and Waring, R. H. (1987): Plant response to multiple environmental factors. *Bioscience* 37: 49-57

Chapin, F. S., McKendric J. D., and johnson, D. A. (1986): Seasonal shnages in carbon fractions in Alaskan tundra plnats of differing growth from: implications for herbivory. *J. Ecol.* 74: 707-731

Christensen, S., and Goudriaan, J., (1993) : Deriving Light Interception and Biomass from Spectral Reflectance Ratio, *Remote Sens. Environ.* 43: 87-95.

David J. Major and M. McGinn et al., (1993) : A Technique for Determination of Single Leaf Reflectance and Transmittance in Field Studies, *Remote Sens. Environ.* 43: pp209-215

Delwiche, C. C., Bissell, S., Virginia, R. (1987) : Soil and other sources of nitrogen oxide. In D. R. Nielsen and J. G. Macdonald (eds.), *Nitrogen in the Environment*. Academic Press, NY.

Hatfield, J., Asrar, G., and Kanemasu, E. T. (1984) : Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote sens. Envir.* 14:65-75.

John L. Monteith 著 , 佐伯敏郎監訳 , 及川氏久訳 ( 1975 ) : 「生物環境物理学 - 生態学とフラックス - 」 , 共立出版株式会社

Kalitin H. H ( 1947 ) : 波長の長い太陽放射について. *CCCP*, No.7

Kleshnin A. F. ( 1954 ) : 植物と光 , *CCCP*, No.54

L. O. ビヨルン著 ・ 宮地重遠監訳 ( 1988 ) : 「光と生命 - 光生物学入門」 , 理工学社

Monji Saeki (1953) : Der Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, *Japanese Journal of Botany*, 14, No. 1 : 22-52

Marten, G. C., Shenk, J. S., and Barton, F. E. (eds.) (1985) : Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) : Analysis of Forage Quality, Agric. Handbk. no. 643, U. S. Dep. Agric., Washington, DC.

Pfeifer, J., Gamon, J. A., Griffin, K. L., and Field C. B., (1993) : Assessing Community Type, Plant Biomass, Pigment Composition, and Photosynthetic Efficiency of Aquatic Vegetation from Spectral Reflectance, *Remote Sens. Environ.* 46 : 110-118.

R. J. ポップス , H. A. ムーニー編 , 大政談次 ・ 常用篤史 ・ 福原道一監訳 ( 1990 ) : 「生物圏のリモートセンシング」 . シュプリンガー ・ フェアラーク東京

Sidorin M. I. ( 1952 ) : 農作物の葉による散乱太陽放射の吸収 , CCCP, NO.6, 37

Starks, P. j., Walter-Shea, E. A., Schiebe, F. R., and Markham, B. L., (1995): Temperature Sensitivity Characterization of a Silicon Diode Array Spectrometer, *Remote, Sens. Environ.* 51: 385-889.

Shulin I. A. Khazanov V. S. (1961 ) : 植物群落内の光状態に関する諸問題について, *CCCP*, 6: 141-146

Tucker, C. J., Justice. C. O., and Prince,S. D. (1986) : Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *Int J. Remote Sens.* 7 : 1571-1582

Wessman, C. A., Aber , J. D., Peterson, D. L., and Melillo, J. M. (1988) : Foliar analysis using near infrared reflectance spectrscopy. *Canada. J. Forest Res.* 18 : 6-11

Wetzel, D. L. (1983) : Near-infrared reflectance analysis : sleeper among spectroscopic techniques. *Ansl. Chem*, 55 : 1165A-1171A.

Weyer, L. G. (1985) : Near-infrared spectroscopy of organic substances. *Appl. Specte. Rev.* 21(1&2) : 1-43