中国の双台河口湿地灌漑葦原における塩分変動及び水収支の考察

FIELD STUDY ON SALINITY AND WATER BALANCE OF THE IRRIGATED REED COLONY IN SHUANGTAI ESTUARINE WETLAND, CHINA

林倩¹・石川忠晴²・楊鳳林³・張樹深⁴

Qian LIN, Tadaharu ISHIKAWA, Fenglin YANG and Shushen ZHANG

¹学生会員 修(工) 東京工業大学 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

³非会員 大連理工大学教授 化工与環境生命学部 (〒116024 中国遼寧省大連市)

⁴非会員 大連理工大学教授 化工与環境生命学部 (〒116024 中国遼寧省大連市)

The effects of irrigation process on reed colony of Shuangtai Estuarine Wetland in Liaoning Province, China, are discussed with the field investigation (salinity distribution, reed growth of shoot height, density, and above biomass) and hydrological measurement (water levels inside and outside the reed colony). Reed production proves to have an optimum at 5‰ salinity. The salinity will decrease below 5‰ in growing season due to irrigation, and after drainage the salinity level will rise. The observation on water levels suggests that the ratio of interception to rainfall by reed body in the growing period is about 0.4. Evapotranspiration rate is estimated by surface water balance equation without inflow and outflow. The calculation result also indicates that the irrigation is required for keeping water balance before raining season in middle July.

Key Words: Reed colony, Salinity, evaporation, transpiration, rainfall interception, Liaohe Delta

1. はじめに

大河の河口デルタでは水路が複雑に分岐し、また有機性に富む細粒土砂が堆積することから、豊かな生態系を持つ広大な湿地(河口湿地)が出現しやすい。中国沿岸には総計面積が 1.2×10^6 haの河口湿地が分布している。その中で杭州湾より北方の河口湿地には約 5.7×10^5 haの葦群落があり、東南アジアからシベリアまでの区域で移動する渡り鳥の営巣地および中継地となっている。

しかし近年の沿岸地域における人口増加に伴って開発圧力が増大し、田畑や養殖池などへの転用が進められつつある。また上流域の取水量増加により湿地流入量が減少し、生態系が劣化しつつある。湿地環境保全が世界的課題であるといっても、経済発展の欲求を完全に止めることは難しい。そこで、自然環境保全と地域経済発展を両立する湿地利用の在り方が社会的課題となっている¹⁾。

本研究で対象とする双台河口湿地は、中国東北部から渤海湾に注ぐ遼河の河口デルタ上にあり、128,000haが国家自然保護区になっている。その中に世界最大の葦原

(83,000ha)が含まれており、丹頂など渡り鳥の中継地になっている。ただし国家自然保護区であっても生産活動が全く禁止されるわけではなく、葦原の一部を開墾して灌漑し水田や養殖池に利用することも行われている。

ところで中国では葦を原料とした製紙が伝統的に行われている。現在の製紙産業は木材パルプが主体になってきているが、今でも非木材パルプのシェアは20%を占め、植物種別では麦わら(62%)、葦(11.4%)、竹(10.6%)の順になっている²⁾。草本類は樹木や竹に比べて成長が早く、それらの利用は自然環境保全という点で優れている。また葦は麦に比べて繊維質が多いため紙質が良い。

ただし河口湿地の地下水に含まれる塩分は葦の成長を阻害する³⁾。また自然状態の葦原では成長が土壌の乾湿変動の影響を受ける⁴⁾。そこで葦の品質向上のために灌漑が実施されている。このような葦原の利用と管理は、湿地の自然環境と調和した地域発展の一つのモデルになると考えられる。ただし現在の灌漑方法は多分に経験的である。そこで本研究では、双台河口湿地の塩分状態と灌漑期における水量バランスについて、現地調査の結果に基づき考察した。

図-1 対象地域の位置と平面図

図-2 平均気温と降水量

2. 対象地域の概要

双台河口湿地草原の位置と平面図を図-1に示す。緑色の部分が草原、青色は河川と主要な灌漑水路である。調査地点を赤丸で示している。灌漑水は双台子河(遼河本川)と繞陽河(遼河支流)から取水されている。灌漑草原はいくつかの大区画に区分され、区画ごとに設置されたポンプで給水されている。大区画は低い堤防でさらに小区画に区分され、手動の取水門および排水門から個別に給水・排水される。個々の小区画への分水は手動で“適宜”行われている。

図-2に湿地近傍の盤錦市における過去20年間の平均的な年間気温(●)と降水量(◆)を示す。また、青線は図-1における観測点#1の灌漑区画の水位変化、黒線は同区画を含む大区画に通水するポンプの運転時間(台数×時間)である。

同地域の気温は11月中旬から3月中旬まで氷点下であり、表層土壌は4月まで凍結している。また降水量は7月、8月に集中するが、葦の成長期は5月下旬から7月下旬であり⁹⁾、前半の水量が不足気味となる。そこで4月に予備灌漑を行い、表層土壌を融解するとともに土壌塩分を低下させ、5月に本灌漑を開始する。それ以降は降雨と蒸発散により水位が適当に保たれていれば取水・排水を行わない。7月に入ると雨量が急増するので、管理水深を250mm程度として排水する。旧暦立秋(新暦の8月中旬)

の5日前に排水門を開き水位を低下させ、大きな降雨がなければ一週間ほどで排水を完了する。ただし8月～9月上旬は降雨が比較的多いので地面は湿潤・乾燥を繰り返す。葦の刈り取りは地表が凍結した12月に行われる。

3. 葦の生育と塩分環境

3.1. 葦の生育度と土壌塩分の相関

(1) 葦の塩分耐性

Lissner・Schierup⁶⁾はデンマークの海岸での調査結果から、根部付近の土壌水塩分が15‰以上の場所では葦が開花前に枯死すると報告している。また温室試験から地下水塩分が5‰までは葦の成長に影響がないと結論した。また Lissnerら⁷⁾は緯度の異なるデンマークとスペインで採取された葦の屋外生育実験を行い、塩分5‰程度までは葦の相対成長に対する影響はないとしている。Mauchamp・Mésleard⁸⁾は地中海周辺の9か所の湿地帯において地下水塩分と葦の高さおよび密度との相関を調べ、サイト条件にもよるとが、全体的には塩分と成長速度に負の相関があるとしている。Hartzendorf・Rolletschek⁹⁾は、ドイツの三か所で採取した葦を用いた室内実験から、塩分0～1.5‰で成長率が高く、10‰になると著しく低下し、35‰に死亡することを示した。

(2) 現地調査の概要

灌漑終了後に地面が露出した2013年8月30日～8月31日に、図-1に示す7地点で葦の生育状況と土壌塩分の関係性を調べた。北から順に、#1は灌漑区域、#6は非灌漑区域、#7は灌漑水路辺縁の灌漑水で冠水する地点、#4、#5は非灌漑区域、#2は草原のすぐ外の干潟区域である。まず1m×1m範囲を設定して葦の本数を調べ、続いて成長が平均的と思われる5本を選択して地面直上で刈り取り、重量、先端の穂を除いた茎高、地面直上の茎径を計測した。また乾燥重量を後日計測した。

(3) 土壌塩分の計測法

土壌中に含まれる可溶性塩類濃度の表示法は必ずしも定まっていないが、近年は、土壌を蒸留水で飽和させ、減圧濾過あるいは遠心分離で抽出した液体の電気伝導度(CE)が指標としてよく用いられる¹⁰⁾。しかしこの方法は時間とコストが比較的高い。そこで1:5希釈溶液の電気伝導度計測値($EC_{1:5}$)もよく用いられる。

本研究では $EC_{1:5}$ を計測し、Caイオンが特に多くない silt loam 土壌について Khorsandi・Yazdi¹¹⁾が提案した次式により EC_e を求めた。

$$EC_e = kEC_{1:5} + b, \quad k = 5.28, b = 0.88 \quad (1)$$

なお、 k と b の値については種々の調査があるが¹²⁾、本湿地の土壌特性¹³⁾は Khorsandi・Yazdi の条件に近い。

地点#1～#6においてコアサンプラーで土壌を表層から

表-1 葦の成長度および土壌塩分調査の結果

場所	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
高さ [cm]	218.4	-	83.4	118.2	154.6	165.4	249.2
太さ [cm]	0.57	-	0.52	0.33	0.41	0.42	0.52
湿潤重量 [g/5本]	340	-	135	70	150	130	325
乾燥重量 [g/5本]	174.9	-	43.3	37.5	78.6	61.6	176.2
含水率 [%]	48.6	-	67.9	46.4	47.6	52.6	45.8
密度 [本/m ²]	46	-	13	110	23	16	35
EC _{1.5} [ms/cm] (10cm)	0.64	4.75	4.36	1.54	1.81	1.43	-
塩分[%] (10cm)	2.74	16.61	15.28	5.76	6.67	5.39	-

図-3 各地点の塩分鉛直分布

60cmまで10cm間隔で採取し、大連理工大学で $EC_{1.5}$ を測定した。なお地点#7はまだ冠水していたので土壌を採取できなかった。本研究では EC_e を浅層地下水の電気伝導度 EC_T とみなし¹⁴⁾、 EC_T から式(2)により25℃における電気伝導度 EC を求めた後、式(3)により塩分に換算した¹¹⁾。

$$EC = EC_T \left[1 + \frac{(298.2 - T)}{49.7} + \frac{(298.2 - T)^2}{3728} \right] \quad (2)$$

$$TDS = 0.64 \times EC \quad (3)$$

ここに TDS (Total Dissolved Solids)は総溶解性塩分で、単位は $g/L (=‰)$ である。なお EC の単位は ms/cm である。

(4) 調査結果

葦の成長度および土壌塩分調査の結果を表1に示す。なお地点#2では葦は生育せず、地点#7は冠水のため土壌塩分は計測できなかった。まず葦の生育状況を比較すると、灌漑地点(#1)と灌漑水路際(#7)で良いことがわかる。

図-3に各地点の塩分鉛直分布を示す。横軸には計測した $EC_{1.5}$ と、式(1)~(3)を用いて換算した塩分(TDS)を示している。内陸の非灌漑地点である#4、#5、#6の塩分は表層で若干低く、50cm深辺りで一定(約7.5‰)になる。一方海に近い#2と#3は表層塩分が高いが、深くなると他の地点の値に漸近する。双台湿地葦原は地盤が極めて平坦であることから、地下水塩分は7~8‰で一定であり、地点ごとの表層土壌塩分は表流水塩分に規定されているのではないかと考えられる。一方、灌漑葦原の表層塩分は3~4‰であり、前述した葦の塩分耐性の値から、灌漑が

図-4 塩分と単位面積当たりの葦乾燥重量及び高さの関係

葦の生育に良い効果をもたらしている可能性が大きい。

双台湿地の葦の毛細根は深度20cmまでの表層に集中している¹³⁾。そこで図-3の10cm~20cmの塩分平均値と単位面積当たりの葦乾燥重量および高さの関係を図-4に示す。土壌水の塩分が高くなると、高さの変化はわずかながら、乾燥重量は大幅に減少する。なお図中の点線は、Lissnerら^{6), 7)}が生育実験から求めた塩分影響の限界 (5‰)を表している。

3.2. 灌漑葦原における塩分変化

図-3に示した塩分鉛直分布は灌漑が終了して間もない時に計測された。そこで灌漑の影響の季節性を調べるために、地点#1で過去に計測した結果と比較する。計測時期は、灌漑前の状態(2012年4月21日)、灌漑直後で表層が湿潤した状態(2013年8月30日；図-3と同じ)、および灌漑終了後約3か月経過して地表が乾燥した状態(2012年11月3日)である。

結果を図-5に示す。計測が時間順になっていないため、季節変化を完全に捉えているとは言えないが、その特徴を以下のようにみることができる。灌漑期前(赤)には塩分が全層で高い状態にあり、灌漑期直後(青)には5‰以下になっている。その後の乾燥過程(緑)で塩分は上昇する。この結果と前述の図-4から、灌漑による塩分低下が葦の生産に有効であることがわかる。なお灌漑期間には地表が水没しているため、その間の土壌塩分変化は捉えられていない。

図-5 灌漑が塩分鉛直分布に及ぼす影響

図-6 岸外草原の水収支要素

4. 灌漑草原の水収支

4.1. 計算方法

(1) 水収支式

灌漑草原の水収支に関わる要素として本研究で考える要素を図-6に示す。ここでは日単位の鉛直一次元的水収支を考えている。左側は後述する草原外の水槽で、 P は日降雨量、 E_0 は水面からの蒸発量である。右側は草原の水分移動を表しており、 ΔH は一日の湿地水面変化量； P は降雨量； IP は草の葉等による遮断される降雨量で、降雨終了後に直接蒸発する(遮断蒸発量 E')と考える； E は草原内水面からの蒸発量； Q は草による地下水の吸水量、 ΔV は Q のうち草の体組織に貯留される水量、 T は草からの蒸散量、 Q_0 は深層への浸透量である。

草の葉に遮断された水量も含めて空中に回帰する蒸発散量を $ET1$ 、それを含まない水量(草原水面からの蒸発量と草の蒸散量だけの合計)を $ET2$ とすると、以下の式を得る。

$$ET1 = P - \Delta H - \Delta V - Q_0 = ET2 + IP \quad (4)$$

双台湿地における土質調査¹³⁾によれば、土壌は平均粒径0.005mmのsilt loamで、30cm以深の透水係数は6cm/dayであり、動水勾配が1の場合にこの速度で流れ得る。しかし双台湿地の地下水位は浅く、灌漑期には全層飽和状態にある。また灌漑区では広い範囲にわたって水位がほぼ等しい。このことから鉛直浸透量 Q_0 は無視できると考

図-7 草原内・外の水位記録と雨量

えられる。また前述したように灌漑期直後の調査では草の重量は 3128g/m^2 であり、草総重量の全部が水であったとしても雨量換算で3.1mmに過ぎず、検討期間内の他の項目の水量に比べて2オーダー小さい。そこで水収支式の中の草体内水分蓄積量 ΔV を無視する。

(2) 計算期間

2012年の灌漑期における水量関係の計測量を図-7に示す。細黒線は灌漑区ポンプ管理者から入手した「ポンプ台数×運転時間」である。5月10日に観測区域の大区画へのポンプ給水が開始され、5月31日に終了した。また草原内水位が5月20～25日下旬に上昇していることから、手動堰により当該小区画に給水がなされたと考えられる。その後は給排水がなく、草原内外の水位は降雨日に同時に上昇している。しかし7月10日の降雨で水位が管理水深(250mm)を超え、その後の水位逓減率が以前に比べてかなり大きいことから、排水が行われた可能性が大きい。7月22日の降雨の後も同様である。また7月29日には、その後の大雨に備えて事前排水を行っている。そこで、灌漑取水が終了した5月31日から、排水があったと思われる7月10日の直前までの水収支を検討した。

4.2. 計算結果と考察

(1) 草による降雨遮断

図-7の青棒は湿地観測点から30kmにある盤錦気象局の日降雨量である。草原外水槽水位(緑線)は盤錦でまとまった降雨のあった日には概ね対応した上昇を示している。そこで草原外水槽水位が20mm以上(図でハッチを付したの日)上昇した日を検討対象とした。まずそれらの日の水面蒸発量をPenman法¹⁵⁾により計算したところほぼ3mm/dayであったので、水位上昇量に3mmを加えて日降雨量とした。また草原内については(2)で述べる方法により0.46を乗じた1.4mmを草原内水位上昇量に加えた。それらの比から、降雨遮断率を求めた結果を、草の高さの変化とともに図-8に示す。草がまだ十分成長していない6月初旬に降雨遮断率は多少小さいが、概ね0.4で安定している。そこで $IP=0.4P$ とする。

(2) 草原水面からの蒸発

図-8 降雨遮断率

草原外の蒸発量は次のように推定した、無降雨日の蒸発量は、盤錦で無降雨であった日の草原外水槽の水位減少量とした。また降雨日については式(5)、(6)に示すPenman式¹⁵⁾からの推定値の平均(3mm/d)とした。以上の値から期間内の草原外蒸発量の日平均値を計算したところ5.5mm/dとなり、Penman式を全期間に対して適用した E_p の期間平均値(5.1mm/d)とほぼ一致した。

$$\lambda E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) (e_s(T) - e_a) \quad (5)$$

$$f(u) = 0.26(1.0 + 0.537u) \quad (6)$$

ここに、 E_p は可能蒸発量； R_n は正味放射量($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$)、 $e_s(T)$ は飽和水蒸気圧(kPa)、 Δ は飽和水蒸気曲線の傾き($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 γ は乾湿定数($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)、 λ は蒸発潜熱(MJ kg^{-1})、 G は地中熱流量($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$)、 u は水平風速(ms^{-1})、 T は日平均気温($^\circ\text{C}$)である。なお、本研究のように長期の収支計算の場合には R_n に比較して G を無視ができると考えられている¹⁶⁾ので、本研究でも $G=0$ とする。

$ET1$ と $ET2$ は、草原内外水位変化から式(4)を用いて計算できる。その結果、計算期間の平均値は $ET1$ が3.9mm/d、 $ET2$ が2.3mm/dとなった。したがって草原からの蒸発散量 $ET1$ は開放水面蒸発量 E_0 の約0.7倍となった。

草原内の水面からの蒸発量 E と草からの蒸散量 T を分けて取り扱うために、 E と草原外部水槽から蒸発量 E_0 の関係を、式(5)、(6)に基づき検討した。式(5)は第1項が熱の授受の影響を表し、第2項が風の影響を表す。植生が密生しかつ湿潤条件である場合には水蒸気圧と風速に係わる第2項は十分小さいと唆されている¹⁷⁾。

風速の影響は線形なので、ここでは検討期間における平均風速を考える。盤錦気象局における同期間の平均風速は約3m/sであった。密生度の高い草原の場合、草原内風速を草原外の0.1倍と推定している例¹⁸⁾があるが、ここでは風速を0m/sから草原外風速の0.5倍(1.5m/s)までの範囲にあると仮定して草原内の蒸発量減少比を式(6)より求めたところ、0.38~0.69倍となった。

一方、草原内の熱の授受による変化についてRitchie¹⁷⁾が次式を提案している。

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \exp(-\alpha LAI) \quad (7)$$

ここに E は草原内水面からの蒸発量； α は経験定数

図-9 灌漑期における蒸発散量

(0.398)； LAI は葉面積指数である。なお前述したように本研究では G を0とする。Zhouら¹⁹⁾が双台湿地で6、7月に計測した LAI は平均3であり、それを用いると式(7)の値とPenman式第一項の比は0.3となる。またRoss²⁰⁾は、植生により地面に到達する正味放射量の減少率を次式で表せるとしている。

$$R_{ns} = R_n \cdot \exp\{-G(\theta) \sin(b) LAI\} \quad (8)$$

ここに R_{ns} は植生により地面に到達する正味放射量； θ は葉傾角、 $G(\theta)$ は植物群落内吸光係数で、Vanyarkho²¹⁾の計測結果によれば草の場合は $G(\theta)=0.5$ である²⁰⁾。 b は太陽高度角で、日照時間あるいは12時間の平均値が用いられることが多い^{16)、22)}。ここでは各日の6:00~18:00の $\sin(b)$ の平均値として0.7を用いる。これらを代入すると式(8)の値とPenman式第一項の比は0.35となる。

以上の結果から、草原内水面からの蒸発量 E は次のように推定された。検討期間における式(5)の第一項の平均値が4.7mm/dで、第二項が0.4mm/dとなる。そこでRitchieの式から求められた比率を用いれば、重み付き平均値は $E=4.7 \times 0.3 + 0.4 \times (0.38 \sim 0.69) = 1.56 \sim 1.69 \text{ mm/d}$ となり、Rossが提案した式から求めた重み付き平均値は $E=4.7 \times 0.35 + 0.4 \times (0.38 \sim 0.69) = 1.78 \sim 1.92 \text{ mm/d}$ となる。そこで代表値として $E=1.7 \text{ mm/d}$ とした。

以上の検討に基づき、各項の期間平均値が図-9のように求められた。赤の数字が5月31日~7月10日までの期間の平均値である。なお2012年の灌漑期における蒸発に関わる気象項目(温度、日照、風速、湿度)はほぼ平均的であった。そこで6月1日から7月上旬までの $ET2$ (2.3mm/d)を平均必要灌漑水量とすると、6月一か月の総量は約70mmとなる。一方、盤錦気象局における過去20年間の6月平均降雨量は74.5mmで、降雨遮断を考慮して0.6を乗じると、草原水面に達する雨量は約45mm程度となり、蒸発散量を下回る。したがって、7月の雨期になるまでは、水深換算で30mm程度の灌漑が必要であるといえる。

5. おわりに

丹頂など大型の水鳥の営巣地である河口湿地葦原の保全と地域経済発展を両立する一つの方法として、葦を用いた製紙業の育成が考えられるし葦の品質を維持には、塩分低下と土壤水分維持のために灌漑を行う必要があるが、葦原灌漑については今のところ研究がほとんどされていない。そこで本研究では、双台河口湿地において、灌漑が葦原に及ぼす効果を、現地調査に基づき検討した。主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 土壤塩分と葦の収量には明確な負の相関があり、土壤塩分(TDS)が 5‰以上になると収量は減少した。このことは、Lissner ら が実験的に求めた結果と一致している。
- 2) 土壤塩分は、灌漑期前に高く、灌漑終了直後に低く、その後増大した。灌漑直後の塩分(3‰)は前述の塩分影響レベル(5‰)より明らかに下がっていた。したがって、葦原灌漑は、塩分低下による葦の収量増加に貢献していると考えられる。
- 3) 雨量が不足する 5 月末～7 月初旬における葦原の蒸発散は平均で約 3.9mm/d であったが、葦の葉などで遮断された雨滴が直接蒸発する分が 1.6mm あるため、必要灌漑量は 2.3mm/day (70mm/month)のオーダーであった。
- 4) 葦の成長期である 6 月の降雨量は 75mm/month 程度だが、その 40%は葦の葉に遮断され大気に直接蒸発するので、有効雨量は 45mm/month である。有効降雨と蒸発散の比較から、6 月には平均的な降雨量の年でも灌漑が必要であるといえる。

参考文献

- 1) Cui, B.S, Tang, N, Zhao, X.S. and Bai, J.: A management-oriented valuation method to determine ecological water requirement for wetland in the Yellow River Delta of China, *J. Nat. Conserv.*, Vol.17(3), pp.129-141, 2009.
- 2) 詹懷宇：我国製紙用非木材纖維、古紙原料の供給及び利用、日中紙パルプ技術交流シンポジウム論文集、第3回、紙パルプ技術協会、2010.
- 3) Burdick, D.M, Buchsbaus, R. and Holt, E.: Variation in soil salinity associated with expansion of *Phragmites australis* in salt marshes, *Environ. Exp. Bot.*, Vol.46, pp.247-261, 2001.
- 4) Chambers, R.M, Osgood, D.T, Bart, D.J. and Montalto, F.: *Phragmites australis* invasion and expansion in tidal wetlands: interactions among salinity, sulfide, and hydrology, *Estuaries.*, Vol.26(2B), pp.398-406, 2003.
- 5) Zhou, L. and Zhou, G.S.: Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China, *J. Hydrol.*, Vol.372, pp.41-47, 2009.
- 6) Lissner, J. and Schierup, H.H.: Effects of salinity on the growth of *Phragmites australis*, *Aquat. Bot.*, Vol.55, pp.247-260, 1997.
- 7) Lissner, J, Schierup, H.H, Comín, F.A. and Astorga, V.: Effect of climate on the salt tolerance of two *Phragmites australis*. I.

Growth, inorganic solutes, nitrogen relations and osmoregulation, *Aquat. Bot.*, Vol.64, pp.317-333, 1999.

- 8) Mauchamp, A. and Mésleard, F.: Salt tolerance in *Phragmites australis* populations from coastal Mediterranean marshes, *Aquat. Bot.*, Vol.70, pp.39-52, 2001.
- 9) Hartzendorf, T. and Rolletschek, H.: Effects of NaCl-salinity on amino acid and carbohydrate contents of *Phragmites australis*, *Aquat. Bot.*, Vol.69, pp.195-208, 2001.
- 10) Rhoades, J.D, Chenduvu, F. and Lesch, S.: Soil salinity assessment-Methods and interpretation of electrical conductivity measurements, *FAO Irrigation and Drainage Paper*.57, pp.5-14, 1999.
- 11) Khorsandi, F. and Yazdi, F.A.: Estimation of saturated paste extracts' electrical conductivity from 1:5 soil/water suspension and gypsum, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Vol.42, pp.315-321, 2011.
- 12) Sonmez, S, Buyuktas, D, Okturen, F. and Citak, S.: Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies, *Geoderma.*, Vol.144, pp.361-369, 2008.
- 13) 林倩, 石川忠晴, 赤穂良輔, 楊鳳林, 張樹深：中国の双台湿地葦原における灌漑期後の土壤水分変化, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, I_529-I_534, 2013.
- 14) 米田茂男, 河内知道：干拓地土壤に関する研究, 岡山大学農業部学術報告, Vol.11, pp.1-14, 1958.
- 15) Penman, H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London. A.*, Vol.193, pp.120-146, 1948.
- 16) Burba, G.G, Verma, S.B. and Kim, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland, *Agric. For. Meteorol.*, Vol.94, pp.31-51, 1999.
- 17) Ritchie, J.T.: Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover, *Water Resour. Res.*, Vol.8, pp.1204-1213, 1972.
- 18) Lövestedt, C.B. and Bengtsson, L.: Density-driven current between reed belts and open water in a shallow lake. *Water Resour. Res.*, Vol.44, W10413, doi: 10.1029/2008WR006949, 2008.
- 19) Zhou, L, Zhou, G.S, Liu, S. and Sui, X.H.: Seasonal contribution and interannual variation of evapotranspiration over a reed marsh (*Phragmites australis*) in Northeast China from 3-year eddy covariance data, *Hydrol. Process.*, Vol.24, pp.1039-1047, 2010.
- 20) Ross, J.: Mathematical models of photosynthesis in a plant stand. In Predictions and measurement of photosynthetic productivity, Wageningen, pp.29-45, 1970.
- 21) Vanyarkho, O.: Seasonal changes in vegetative characteristics and gas exchange of *phragmites australis* and *Scirpus acutus* in mid-latitude prairie wetland ecosystem. M.S. Thesis. University of Nebraska-Lincoln, NE, pp.85, 1996.
- 22) Norman, J.M. et al.: Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperature-difference method to minimize measurement errors. *Water Resour. Res.*, Vol.36(8), pp. 2263-2274, 2000.

(2013. 9. 30 受付)