

ヨシの成長が根圏土壌中の有機態炭素におよぼす影響

Influence of Growth of Reed to Behavior of TOC in Its Rhizospheric Soil.

(平成 16 年 9 月受理)

原田 正 光* (HARADA Masamitsu)

Abstract

Examination was performed about the influence of the growth of reed affecting to the behavior of the organic carbon in the rhizospheric soil. The seedlings of reed budded from the seed were planted in the experimental pot filled up with the eutrophicated lake sediments, and they were made to grow indoors.

Through the periodic disassembling the pot, the growth characteristics of a ground part and an underground part of reeds and the behavior of oxidation reduction potential, nutrients and organic carbon in the soil were observed. And it was discussed the possibility of decomposition and streamlining of organic matters in the soil planting the reeds.

Keywords: reed, rhizospheric soil, oxidation reduction potential, total organic carbon

1.はじめに

ヨシ原は、護岸の緊縛作用¹⁾、動植物の生息場²⁾、水質浄化作用³⁾⁴⁾⁵⁾、景観構成要素⁶⁾などの機能を備え、その保全の重要性が認識されるようになってきた。水質浄化機能についても、ヨシには窒素やリンなどの栄養塩類の吸収に加えて、根圏と呼ばれる根の近傍での硝化や脱窒を促進させる効果が備わっていることが報告されている⁷⁾。これは、ヨシが地上部から嫌気性土壌中に酸素を拡散供給し⁸⁾、根の近傍に微好気的な環境を形成するためである。一方、植物は光合成により生産された有機物を根から放出することが報告されており、その量は全光合成産物の 12~40%に達し、根に分配される物質の 70~80%に達することもあると言われている⁹⁾。そして、これら有機物は根圏における脱窒の炭素源として利用されることも指摘されている¹⁰⁾。

既報¹¹⁾における試験管や植栽カラムを用いて室内で生育させたヨシ根圏では、地下茎や根が土壌中を縦横に伸びて根圏を拡大し、やがて土壌と置き換わるルートマットという現象が観察されている。この過程では、土壌中の有機物が好気性微生物により分解されて土壌の減量化が進行するものと考えられ、この現象もヨシの機能の一つとして評価すべき点ではないかと考えられる。

そこで、本研究では、室内ポット植栽実験を行い、ヨシの成長過程における根圏の性状と植栽土壌中の有機態炭素量の変化を調べ、ヨシの成長が土壌中の有機物分解および減量化におよぼす影響について検討を行

った。

2.研究方法**2-1.ポット植栽実験装置****(1)実験装置**

実験ポットは、内径 20.5cm、高さ 21.8cm のポリプロピレン製容器に、福島県いわき市平沼の内にある賢沼の底質を深さ 15cm になるように充填したものを 4 槽 (PA 系、PB 系、PC 系、PD 系) 用意した。底質の乾燥重量は、あらかじめ湿潤重量と含水率を測定することにより求めた。また、間隙水の水質分析ができるように、土壌中には、深さ 5cm (上層)、10cm (中層)、15cm (下層) の位置に間隙水採取管を設置した。(Photo 1)

(2)植栽ヨシ苗

実験に用いたヨシ苗は、2000 年 10 月に福島県いわき市平沼の内地内の二級河川弁天川河口付近から採取し、冷凍保存しておいた種子を、2002 年 1 月に直径 92mm、高さ 18mm のシャーレ内の蒸留水で湿らせた脱脂綿上で発芽させた。これを茎高さ 2cm 程度になるまで生育させ、2002 年 2 月 9 日に各実験ポットに 30 本ずつ移植した。

(3)生育条件

ヨシ苗を植栽後、実験室内の窓際で太陽光が当たる場所に置き、土壌表面が乾かないように、水位 1cm 程度になるよう蒸留水で水遣りをしながら生育させた。実験期間中の室温は、空調により $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に調整した。

* 福島工業高等専門学校 建設環境工学科 (いわき市平上荒川字長尾 30)



Photo1 Experimental apparatus

2-2. 土壌中の水質測定

各実験ポットに設置した間隙水採取管から注射器を用いて、約10mLずつ土壌間隙水を定期的に採取した。このうち約2mLを試料として用いて、酸化還元電位(ORP)計(TOA-DDK HM30G)によりORPの測定を行った。残りの約8mLは0.45 μ mメンブレンフィルター過後、アンモニア態窒素(NH₄-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、リン酸態リン(PO₄-P)の各濃度の分析を行った。これら窒素、リンの分析には、ブラン・ルーベ社製 AACS-IIを用いた。

2-3. ヨシ地上部および地下部現存量の測定

(1) 地上部現存量

移植後は、定期的に茎高さの測定を行った。また、地下部現存量を測定するための実験ポットの解体に合わせて、水面上のヨシの刈り取りを行い、茎高さと茎太さを測定した。測定は1本ずつ行い、茎高さにはメジャー、茎太さにはノギスを用いて行った。

刈り取った茎や葉はすべて湿潤状態で重量測定を行い、その後110 $^{\circ}$ C、24時間後の乾燥重量の測定を行うことにより、含水率が算出できるようにした。

(2) 地下部現存量

地下部現存量を求めるためにPA~PD系の各実験ポットの解体を、2002年5月27日(移植後107日後)、7月8日(149日後)、9月9日(212日後)、11月12日(276日後)に順次行った。実験ポットの解体では、ヨシの根や根茎を植栽土壌と分離し、乾燥重量と有機態炭素含有率の測定を行った。その際、地下部と土壌の分離については、地下部に土壌が残留しないよう、洗浄を念入りに行った。

2-4. 植栽土壌の性状分析

実験ポットの解体の際、ヨシ地下部と分離した植栽土壌について、その乾燥重量と有機態炭素含有率を測定

した。地下部からの植栽土壌の分離は、地下部を実験ポットから引き上げたときにポットに残留した部分(ポット残泥)、根に付着している土壌を根から遠い部分から2段階にこそぎ取った部分(順次根付着泥1、2)、根を洗浄した懸濁水に含まれる部分(根近傍泥)に分けた。

地下部や土壌の乾燥重量測定の際の乾燥条件は、110 $^{\circ}$ C、48時間と地上部よりは長時間乾燥とした。また、有機物含有率の測定には、固体燃焼装置(SIMADZU SSM-5000A)を用いた。

3. 地上部の成長と根圏水質

3-1. ヨシ地上部の成長

Fig.1 は基本数の変化、Fig.2 は平均茎高さの変化

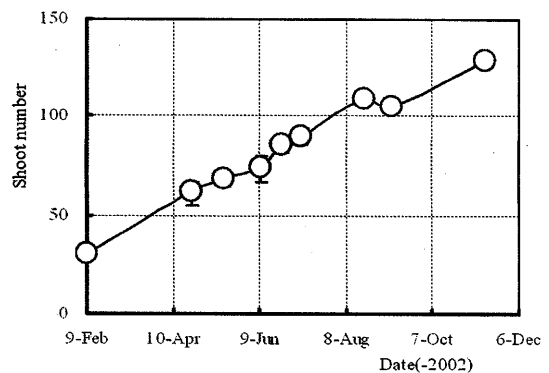


Fig.1 Change of shoot number

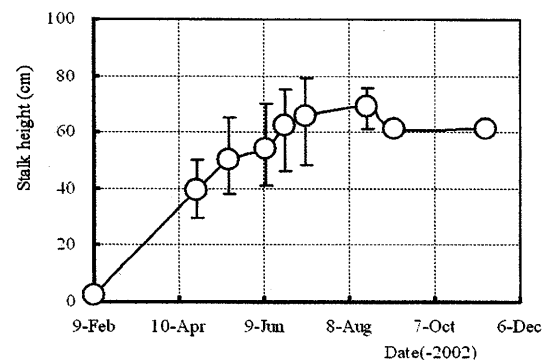


Fig.2 Change of height of stalk

を示す。ここで、基本数および平均茎高さは各実験ポットの平均値とし、最小値と最大値も図示した。茎高さは、移植から7月8日頃までは順調な伸びを示したが、その後以降8月21日から9月9日の期間で基本数および平均茎高さの減少が見られた。主茎の成長が緩やかになることから、主茎からの二次萌芽が起こり、主茎の枯死が顕著になった。平均茎高さの減少は主茎の枯死と二次萌芽した茎の高さを計測したためのものである。この時期は、主茎の高さの増加も起こっていたが、ほとんどの茎からの二次萌芽も生じており、基本数の増加となって現れた。二次萌

芽により現れた茎は太さおよび高さにおいて主茎を上回る傾向を示していた。

3-2.根圏の ORP の挙動

Fig.3は、植栽土壌中の ORP の変化を示す。これは、各実験ポットにおける表面から深さ 5cm、10cm、15cm の部分の ORP の平均値をプロットしたものである。移植後に土壌中の ORP の低下が見られたが、これは土壌表面を湛水状態にしたために嫌気化が進行したことによるものである。しかしながら、深さ 5cm では 4 月 22 日、深さ 10cm および 15cm では 5 月 15 日の測定値を境に ORP の増加が生じた。ORP の増加は、根からの酸素供給によって嫌気化の進行が止まり、さらに嫌気状態が緩和される方向に進んだためである。この傾向は、特に深さ 5cm 部分で顕著であり、ヨシ地下部の成長がこの時期に顕著に起こり始めたことを裏付けるものである。また、深さ 10cm 部分よりも 15cm 部分の方が ORP の増加が顕著に起きていたことは、深さ 15cm 部分の方が根の伸長の影響を大きく受けていたことを示している。これは、Photo 2 に示すように、根の伸長が外側へと進行し、ポット内壁に沿って下層、底部へと進行したことにより、下層部へより多くの酸素が供給されたためであると考えられた。実験期間の最後には、土壌中の ORP に大差はなく、+180~+140mV の値を示し、好気性細菌が生息できる+400~-200mV の範囲¹²⁾にあることが確かめられた。

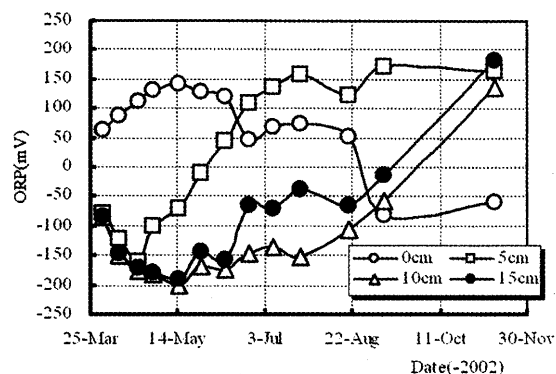


Fig.3 Change of ORP profile.



Photo 2 Growth of roots of reeds.

3-3.根圏の栄養塩類の挙動

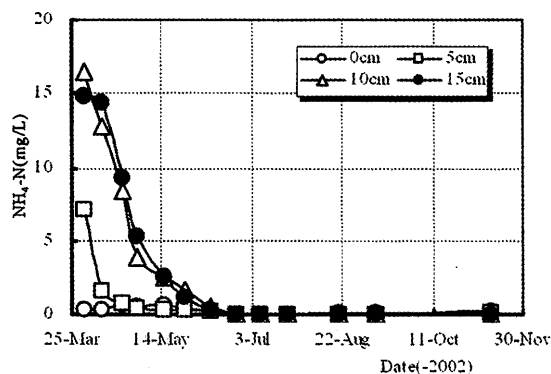


Fig.4 Change of $\text{NH}_4\text{-N}$ profile.

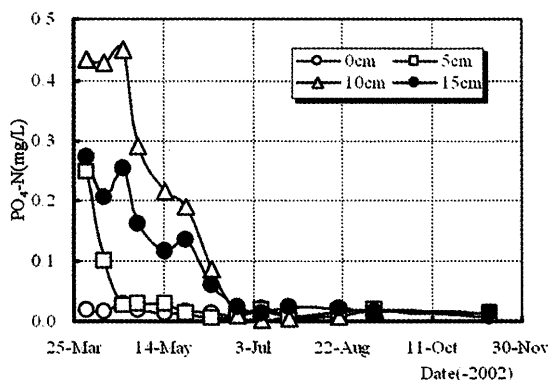


Fig.5 Change of $\text{PO}_4\text{-N}$ profile.

Fig.4 および Fig.5 は、それぞれ植栽土壌中の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変化を示す。ここでも、プロットは各実験ポットからの平均値である。土壌中からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出は、Fe 還元に伴って起こることが報告されており¹³⁾、Fe 還元の起こる-150~-200mV 程度の ORP で $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が顕著であったと考えられる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の溶出は、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出よりも ORP の高い領域で起こることから、4 月 22 日までの ORP が減少する期間は最初に $\text{NH}_4\text{-N}$ 、続いて $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が生じ、土壌深さ 5cm 部分では溶出された $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ の吸収が起きていたものと考えられる。それ以降は表層水中の栄養塩類濃度とあまり変わらずに推移しており、この期間の栄養塩類の摂取は、土壌下層からの拡散によりまかなわれるものと考えられる。しかし、6 月下旬ごろから土壌深さ 5cm および 10cm 部分においても栄養塩類の溶出が行われなくなり、土壌中は栄養塩類が枯渇した状態であった。7 月上旬以降の主茎の高さの増加が見られなくなったのは、根圏の栄養塩類濃度の枯渇の影響であり、二次萌芽のための栄養は主として植物体に蓄えられた栄養塩類を消費していたものと考えられる。

4.地上部および地下部現存量

4-1.現存量

Fig.6は、ヨシ地上部および地下部の現存量の変化を示す。夏季から秋季にかけて平均茎高さの増加の停滞は見られたが、その間でも基本数は増えていたので、地上部現存量としてはおおむね直線的に増加していた。また、地下部現存量は、地上部よりも1ヶ月程度遅れて7月8日を過ぎた頃から顕著な増加が見られた。直線的に増加する期間の地上部および地下部現存量の増加率はそれぞれ0.243g/day、0.245 g/dayであり、ほとんど同程度であった。

4-2.有機態炭素含有率

Fig.7は、ヨシ地上部および地下部の有機態炭素含有率の変化を示す。地上部の方が地下部よりも有機態炭素含有率が高い値で推移していた。有機態炭素含有率は地上部および地下部ともに移植時が最も高く、それぞれ49.1%、42.3%であった。5月27日頃最も低くなったが、その後増加し、最終的には地上部と地下部の有機態炭素含有率は同程度であった。また、現存量が直線的に増加した時期の有機態炭素含有量の増加率は、地上部および地下部でそれぞれ0.103gC/day、0.106gC/dayであった。

4-3.地上部含水率

Fig.8は、地上部含水率の変化を示す。移植時点で地上部の含水率は83%であったが、ヨシの成長に伴い茎元から葉身や葉鞘が枯れてくる現象や茎が木質化する現象が見られ、その結果は含水率の低下となって現れた。このような傾向は野外のヨシでは特に顕著に見られ¹⁴⁾、冬季に含水率10%以下まで低下することが報告されている。しかし、今回の実験は室内恒温状態で行われたために、含水率は60%程度までしか低下せず、地上部の枯死はあまり見られなかった。

4-4.T/R比

Fig.9は、T/R比の経日変化を示す。T/R比は、ヨシ地上部と地下部の乾燥重量の比(Top/Root比)であり、この値の増加は地上部の成長が地下部の成長を上回ることを表しており、この比の減少は地下部の成長が卓越していることを表している。移植時には0.50であった値は、5月27日には最大値2.67を示した。移植時から5月27日頃までは地上部の成長が、その後9月9日頃までは地下部の成長がそれぞれ互いに卓越しており、その後は地上部も地下部も同じように成長していたと推察される。ヨシが地上にさかんに伸びようとする時期はT/R比が増加傾向を示し、光合成により生産された有機物がさかんに地下部に送られる時期はT/R比が減少

傾向を示しており、T/R比の変化は地上部や地下部の増加パターンを特徴づけるものであることが示された。

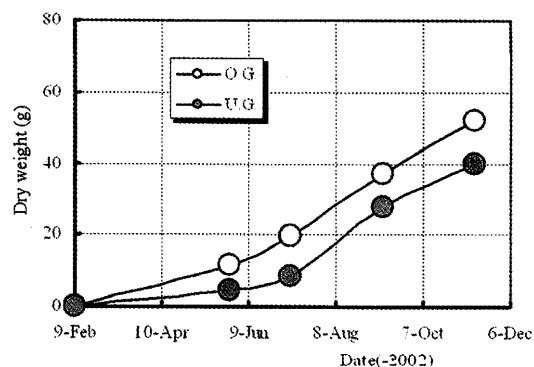


Fig.6 Change of ground and underground biomass.

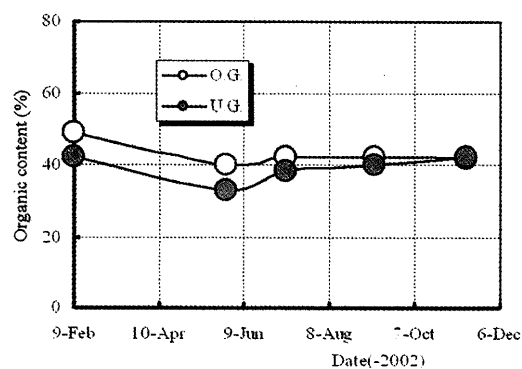


Fig.7 Change of organic content in biomass.

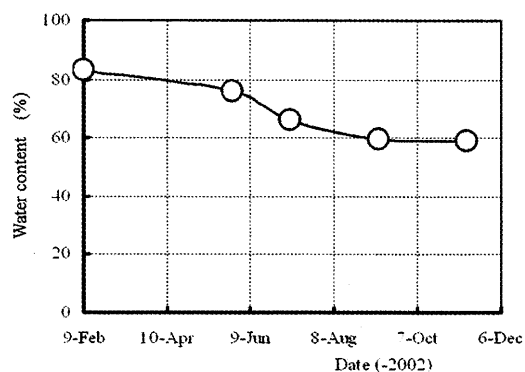


Fig.8 Change of water content in ground part of biomass

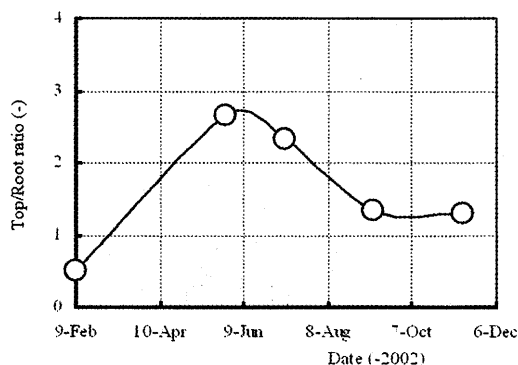


Fig.9 Change of Top Root ratio

5. 植栽土壌の性状

5-1. 土壌乾燥重量

Table 1 は、各実験系の解体時の土壌乾燥重量を示す。PA 系の解体では、地下部の成長があまり大きくなかったため根が土壌を捕捉する量が小さく、ポットから根を引き上げたときかなりの量がポットに残った。ポット残泥は、PB 系の解体ではごくわずかになり、PC 系および PD 系ではほとんど無くなっていた。それに対して、植栽期間が長いポットほど根付着泥や根近傍泥が多くなる傾向を示しており、根の成長に伴い土壌が根に捕捉されることが示された。

Fig.10 は、各実験ポットにおける移植時からの土壌乾燥重量の減少量をプロットしたものであり、ヨシ植栽による土壌減量を示す。土壌の減少は、必ずしも一定の割合で起こるわけではなく、減量が起こりやすい時期、起こりにくい時期、あるいは逆に増加してしまう時期などヨシの成長の影響を受けて土壌重量が変化することが示された。

5-2. 土壌中の有機物量

Fig.11 は、実験ポット解体時の植栽土壌中の有機態炭素含有率を示す。同一ポットでは根に近い部分ほど有機態炭素含有率が高くなり、ヨシ植栽期間の長いポットほど根に近い部分の値が高くなる傾向を示しており、根からの有機物分泌が根近傍の土壌中の有機物濃度を高めていることが示された。Fig.12 は、ヨシ植栽土壌中の有機態炭素減少量の変化を示す。土壌中の有機態炭素の減少は、土壌乾燥重量の減少と類似したパターンを示しており、植栽期間中、必ずしも一定の割合で有機態炭素の減少が起こるわけではないことが示された。

移植時から 5 月 27 日の期間は、T/R 比の変化が示すように、地下部よりも地上部が大きく成長する時期であった。光合成が盛んな時期は、根からの水分や養分の吸い上げが活発な時期でもあり、そのためのエネルギーを獲得するための根における呼吸が活発な時期でもある。従って、地上部から土壌中への酸素の拡散が起こりやすく、根圏における呼吸に伴う酸素消費が活発に起こりやすい時期でもあったと考えられる。この時期は、土壌中の有機態炭素は、成長し始めた根からの酸素供給による分解とヨシの植栽が無くても形成されている好気的な土壌表層における分解が、光合成による土壌中への有機物の供給を上回っていたもの推察される。

5 月 27 日から 9 月 9 日の期間は、地上部よりも地下部の成長が盛んな時期であり、地上部から地下部への光合成産物の転流・貯蔵が活発に起きていたため、根

に輸送された有機物の土壌中への滲出が多くなり、土壌中への有機物供給量が土壌中での分解量を上回っていたものと考えられた。

9 月 9 日から 11 月 12 日の期間は、地上部も地下部も同じようにその現存量を増加させた時期であった。7 月 8 日以降のヨシの成長は二次あるいは三次萌芽による成長であり、平均茎高さの増加ではなく、基本数や平均茎太さ

Table 1 Dry weight of the soil for the planting of the reeds.

Name of apparatus	Dry weight in transplanting (g)	Dry weight in cutting off the ground parts (g)					Depleted weight (g)
		Residue	Outside	Inside	Nearest	Total	
PA	911	474	346	53	8	881	30
PB	840	21	744	23	39	827	13
PC	888	0	645	188	58	891	-3
PD	954	0	781	78	50	909	45

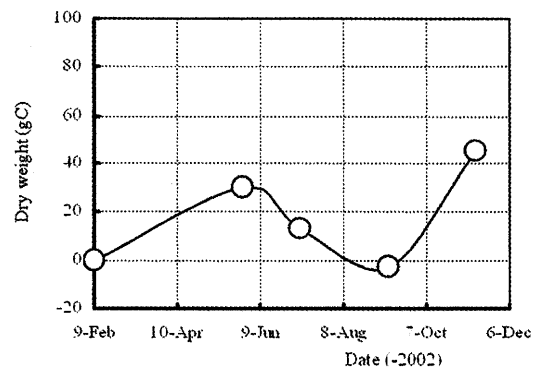


Fig. 10 Change of depleted dry weight in the soil

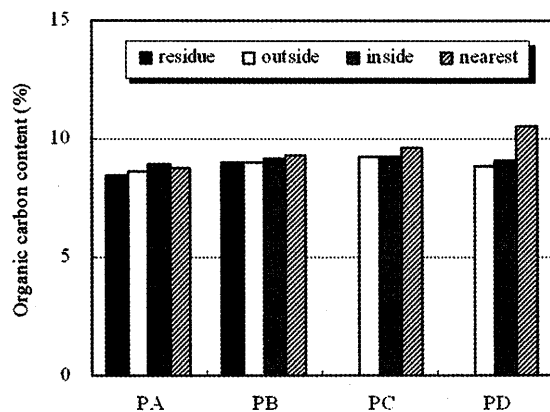


Fig. 11 Organic carbon content in the planting soil.

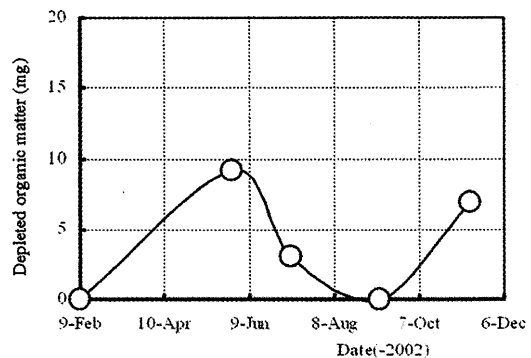


Fig. 12 Change of organic matters depleted in the soil

の増加となって現れる成長であった。また、地下部は、上層部分を中心に根圏を緊密にして、徐々に下層へと拡大していた。7月8日から9月9日の期間、土壌深さ10cm以深ではORPが50~150mVであったが、9月9日から11月12日の期間ではプラスに転じて最終的に150mV程度まで増加していたことから推察されるように、根茎や根の発達が下層にも大きく影響をおよぼしていた。従って、これまで根を伸ばしていなかった下層部分への酸素供給とこれによる有機物分解が進行し、地上部からの有機物供給量をさらに上回ったものと考えられた。

6. 土壌中の有機物収支

6-1. 物質収支式

植栽土壌中の有機物量は、土壌微生物による分解により減少し、植物の根からの供給により増加が起こる。これら分解と供給のバランスにより、土壌中の有機物量の推移が起こる。根圏における土壌分解は、地上部からの酸素供給とこれによって活性化された好気性従属栄養細菌の働きによるところが大きく、ヨシ地下部現存量が深く関係する。一方、土壌中への有機物の供給は、地上部の光合成で作られた有機物の転流・滲出によるものと地下部の枯死分解・溶出によるものがあるので、地上部と地下部を合わせたヨシ現存量が関係すると仮定した。

これらを踏まえて、土壌中の有機物の収支について物質収支モデルを適用した。ここでは、ブランクによる土壌有機態炭素分解は、ヨシ植栽が無い状態でも土壌表層で起こる好気性微生物による分解とし、土壌性状や土壌が置かれている環境などによって影響を受けるものと仮定した。

土壌中の有機態炭素に関する物質収支式は以下のように表される。

$$W \cdot r = W_0 \cdot r_0 + \alpha (B_g + B_u) \cdot \Delta t - (\beta B_u + \gamma) \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

ここに、

- W: Δt 日後の土壌乾燥重量(g)
- W_0 : 初期の土壌乾燥重量(g)
- r: Δt 日後の土壌中の有機態炭素含有率(%)
- r_0 : 初期の土壌中の有機態炭素含有率(%)
- B_g : ヨシ地上部現存量(g)
- B_u : ヨシ地下部現存量(g)
- α : 土壌中への有機態炭素供給速度(gC/g/day)

β : ヨシ地下部による土壌有機態炭素分解速度 (gC/g/day)

γ : ブランクによる土壌有機態炭素分解速度 (gC/g/day)

Δt : 経過日数(day)

である。

式(3-1)について、土壌中の有機物量が地上部現存量と地下部現存量の影響、および土壌本来の分解によって決定されるとして、次のような形に整理した。

$$W \cdot r = W_0 \cdot r_0 + \alpha B_g \cdot \Delta t - (\beta \cdot \alpha) B_u \cdot \Delta t - \gamma \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots (3-2)$$

6-2. 供給速度定数および分解速度定数の推定

今回のポット実験から得られたデータを用いて、係数 α 、 β 、 γ の推定を行うことにした。実験では Δt をあまり短く設定することができなかつたので、地上部現存量 B_g と地下部現存量 B_u は各測定期間の平均値を用いて解析した。式(3-2)は、

$$\frac{W_0 \cdot r_0 - W \cdot r}{\Delta t} = -\alpha B_g + (\beta \cdot \alpha) B_u + \gamma \quad \dots \dots \dots (3-3)$$

と変形することができ、左辺は有機態炭素の減少速度を表すことになる。従って、実験から得られた解体時の土壌中有機態炭素量の変化と地上部および地下部現存量から、係数 α 、 β 、 γ の推定を行った。推定では、目的変数である有機態炭素減少速度を、地上部および地下部現存量をそれぞれ説明変数として重回帰分析¹⁵⁾により関係式を導いた。

重回帰分析から、ヨシ体からの供給速度定数は0.048 (gC/g/day)、ヨシ地下部による分解速度定数は0.059 (gC/g/day)、ブランクによる分解速度定数は0.23 (gC/day)と求めることができた。これらの速度定数を用いて、地上部現存量と地下部現存量から計算された有機態炭素の減

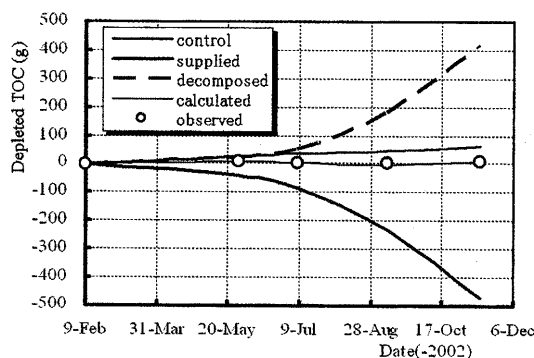


Fig.13 Calculated TOC depletion in the planting soil

少量を示すと Fig.13 のようになる。図中に実測値のプロットも示したが、計算値はほとんどこれらの実測値を反映していることが示された。

6-3.ヨシ植栽による土壌の分解・減量化の可能性

ヨシの根茎や根は、自らが分解により土壌中への有機物供給に寄与する一方、酸素供給源として土壌微生物の有機物分解に寄与する。今回得られた速度定数 α と β を用いると、見かけの分解速度定数は 0.011gC/g/day と見積もることができた。これは、地下部現存量が土壌中の有機物分解におよぼす効果と考えることができ、光合成により 1 日あたり地上部現存量の 4.8% の有機態炭素が土壌中に供給されるのに対して、地下部現存量の見かけ上 1.1% に相当する有機態炭素が土壌中で分解されることになる。

今回の実験では、種子から発芽した 1 年目のヨシを用いており、地上部および地下部の発達はあまり大きくはなかった。年数を経過したヨシでは地下部現存量も大きく、一般的に春季萌芽直前の時期が最も T/R 比が小さくなる。その後に急激な T/R 比の増加が起こる時期には根圏への酸素供給が活発になり、土壌微生物の有機物分解が起こりやすくなるものと考えられる。従って、ヨシ植生地では春季から夏季にかけて土壌中の有機物分解が進行することで土壌の減量化が促進されるのではないかと推察される。

また、地上部が枯死する前に刈り取りが行われる場合は、その後に新たな萌芽に備えた地下部への酸素供給が起こる¹⁶⁾。春季以外に人為的に土壌中の有機物分解を促進する方法として、微生物活性が極端に低下する低温期に入る前に刈り取りを行う等、刈り取り時期を制御することで、地上部からの有機物供給を抑えつつ根圏土壌微生物の活性を高めることができ、土壌の有機物分解・減量化が起こりやすくなると考えられる。

7.結論

富栄養化した湖沼底質を充填した実験ポットに、種子から発芽させたヨシ苗を植栽して室内で生育させた。定期的に実験ポットを解体して、ヨシ地上部および地下部の成長特性、土壌中の酸化還元状態および間隙水中の栄養塩類の挙動、土壌中の有機態炭素の挙動を通して、ヨシ植栽による土壌中の有機物分解および減量化の可能性について検討を行い、以下の結論が得られた。

(1)ヨシ植栽後、基本数や茎高さの増加に伴い、植栽土壌中で顕著な ORP の増加が生じた。この傾向は下層にまでおよぶことが明らかとなり、地上部からの根

を通しての酸素供給が顕著に起きていたことが確かめられた。

(2)ヨシの地上部と地下部の現存量比(T/R 比)から、春季には地上部の著しい増加があり、その後に地下部の顕著な増加が起こることなど、地上部と地下部の増加パターンを特徴づけることができた。

(3)土壌中の有機態炭素含有率は、根に近い部分ほど、また植栽期間の長いほど、その値が高くなることが示された。

(4)今回の実験では、光合成により 1 日あたり地上部現存量の 4.8% の有機態炭素が土壌中に供給されるのに対して、土壌中で見かけ上地下部現存量の 1.1% に相当する有機態炭素が分解された。

謝辞

本研究は、平成 13 年度～14 年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)No.13680663)の研究の一部として行われたものであり、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 福岡捷二、渡辺明英、新井田浩、佐藤健二(1994)オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価、土木学会論文集、Vol.503, pp.59-68.
- 2) 財団法人リバーフロント整備センター編著(2001)河川植生の基礎知識、リバーフロント整備センター
- 3) Toth L. (1972) Reeds control eutrophication of Balaton lake., Water research, Vol.6, pp.1533-1539.
- 4) Gersberg R. M., Elkins B. V., Lyon S. R. and Goldman C. R. (1986) Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands., Water research, Vol.20, pp.363-368.
- 5) 細見正明、須藤隆一(1991)湿地による生活排水の浄化、水質汚濁研究、Vol.14, pp.674-681.
- 6) 土木学会編(1988)水辺の景観設計、第 2 章河川の景観設計の基礎、技報堂出版、pp.7-32.
- 7) 原田正光(2001)ヨシ根圏に形成された微好気環境における無機態窒素除去、福島工業高等専門学校研究紀要、No.41, pp.45-52.
- 8) Armstrong W. (1964) Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants., Nature, Vol.204, pp.801-802.
- 9) Whipps J. M. and Lynch J. M. (1986) The influence of the rhizosphere in crop productivity., Advances in microbial ecology., Vol.9, pp.187-244.
- 10) Gersberg R. M., Elkins B. V. and Goldman C. R. (1983) Nitrogen removal in artificial wetlands., Water research, Vol.17, pp.1009-1014.

- 11) 原田正光(2002)種子から発芽したヨシの成長過程における地上部および地下部現存量の変化、福島工業高等専門学校研究紀要、No.43、33-39.
- 12) 日本微生物生態学会編(1996)微生物の生態 19、水田の物質循環と微生物の生態、pp.91-118.
- 13) 栗原 康編著(1996)河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー、2.化学環境、東海大学出版会 pp.26-42.
- 14) 原田正光(2003)ヨシ地上部現存量の推定方法、福島工業高等専門学校研究紀要、No.44、pp.31-37.
- 15) 岩井重久編(1982)水質データの統計的解析、森北出版、pp.72-94.
- 16) 湯谷賢太郎、浅枝 隆、シロミ・カルナラツヌ(2002)夏季の刈取りがヨシの成長に及ぼす影響、水環境学会誌、Vol.25、pp.157-162.