

(4) 木質系熱帯性草本ケナフの水質浄化能力と成育特性

Water purification ability and growth characteristics of the tropical wood-base herb kenaf

青井 透*、鈴木 学**
Toru AOI*, Manabu SUZUKI**

Abstract; Kenaf is a ligneous and annual tropical plant with the quick growth, and as the trunk is wood-base, the utility form is considered almost equal to the wood. Kenaf can grow actively either hydroponically or in soils. As the kenaf grows in the vertical direction, yield point per unit area is high. The hydroponic culture was carried out using the water from a farm pond which was polluted with household drainage. The removal characteristics of the nutrient salt and growth density were measured. As the density was able to be set from low to high easily in the hydroponic culture, the growth density in the place of the closely planted reached from 70 to 100t/ha. The nitrogen removal ratio per unit area was $0.56\text{g/m}^2/\text{D}$ in the average at summer, this value was higher than that of the general wetland system.

Next the open-field culture of the kenaf was carried out in various places, and the yield point per area was measured. At the same time, nutrient salts and EC, VS, etc. in the soil of the growth place were analyzed, and the relation between the yield and such indexes were examined.

Keywords; kenaf, *Hibiscus cannabinus.L.*, hydroponic, nutrient removal, wetland, yield point, openfield culture

1.はじめに

ケナフ(*Hibiscus cannabinus.L.*)は、アオイ科ハイビスカス属の熱帯性1年草で、原産地はインドあるいはアフリカといわれ、その靱皮に含まれる繊維が、黄麻(ジュート)の代替として南京袋・麻布・ロープ等の用途に用いられてきた¹⁾²⁾。成熟すれば下部の幹の部分は直径3～5cm、高さ3～4mに達する成長の早い植物である。靱皮に包まれた芯の部分は極めて多孔質の木質であり、一般的な草本とは異なる利用の可能性はある。また短日性植物で、花(Pic.1)はアオイやオクラに似ており、トゲを伴った種子部は5室に別れ各室に3～5個の種子があり、20%程度の油を含むと云われている。

現在は、東南アジア・中国・アフリカ・米国南部・ブラジル等が主な産地である³⁾が、近年日本国内でも学校や環境問題に関心のある個人・企業等で栽培されるなど注目されている。ケナフの名称が普及するにつれて、ケナフの種子が翌年発芽しセイタカアワダチソウのように環境を攪乱する



Pic.1 The flower of the kenaf in the autumn

*国立群馬工業高等専門学校 環境都市工学科
(Gunma national college of technology, Department of civil engineering)

**東京大学都市工学科(Department of urban engineering, The University of Tokyo)

のではないかと危惧する声も聞かれ、アンチケナフの会等がHPにぎわせている。ケナフの収穫量は10~20t/ha/yearに達すると報告されているが、この値はマツ等針葉樹の成長量の3~5倍に相当するとされ、成長速度に見合った二酸化炭素吸収を示すことから、地球温暖化防止に有効と云われている¹⁾²⁾³⁾。ケナフの栽培と利用は、新しい代替作物としてアメリカ南部で進められているようである⁴⁾が、資料によれば靱皮部の繊維長(2.6mm)は針葉樹よりも長く良質の紙や繊維原料となり、全重量の60%を占める芯部は多孔質でとても軽く、繊維長は広葉樹よりも短い(0.6mm)⁴⁾。

当研究室では、首都圏のみずがめである利根川の水質保全に向けて種々の検討を行っているが、群馬県は全国で5指にはいる養豚・乳牛・鶏など畜産業が盛んであり、畜産業からの排水・廃棄物による環境汚染は依然として進行中である。他方農業では休耕田率の急速な増加(40%)も進行しており、利根川の水質保全は容易ではなく、総合的な対策が要請されている。

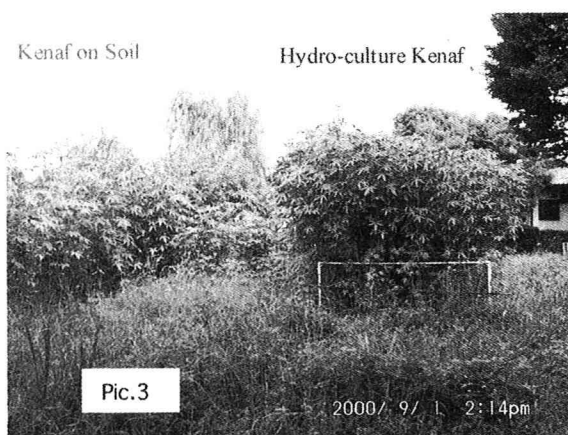
これらの群馬県の特性を考慮すると、ケナフは温暖化防止と環境浄化の両面で貢献できる可能性があると考え、水耕・露地の両方でケナフを生育させ、各種の検討を継続している。ケナフは1年生草本であるので、成長に伴う炭素の固定及び窒素(N)、リン(P)の固定が主たる環境浄化作用であり、秋以降の刈り取り後回収した植物体が有効利用されて初めて、環境改善効果が循環サイクルに組み込まれ効果を発揮することになる。このような視点でケナフに取り組み、各成果については逐次報告してきた⁵⁾⁻¹³⁾が、Table1に現在までの検討の経緯を時系列的に示した。本論文ではこれらの成果を整理し、定量化することで、ケナフの環境浄化能力と可能性についてまとめたので報告する。

2.ケナフの環境浄化に関する従来の研究

ケナフは地球温暖化防止と森林保護に貢献できる環境植物として、子供たちの環境教育にもてはやされてきた側面があり、インターネットで検索すると万のオーダーでヒットするが、環境浄化に関する具



Pic.2 A series of hydroponic culture basin and the seedling of kenaf in rockwool pot



Pic.3 The appearance of open-field culture and hydroponic culture of the kenaf



Pic.4 The kenaf cultivated in the fertile plowed field with the excessive nutrition

Table 1 Progress and content list of kenaf experiment by this laboratory

RUN	実施時期	実施内容	備考
1	1997	プランター水耕試験と活性炭性能試験	浄化槽処理水/市販炭との比較
2	1998	プランター水耕による連続通水と物質収支	カラー、レタスと3種類で実施
3	1998	ケナフ活性炭の性能試験	市販炭との比較/1997の追試験
4	1998	浄化槽横でのケナフ水耕栽培	中規模のケナフ水耕/苗の供給
5	1998	渡良瀬貯水池での水耕栽培実験1	ヨシ原循環水、利根上
6	1999	林牧場での大規模生育、校内各所での露地栽培	肥沃な屋外露地大規模、収量計算
7	1999	校内ため池での水耕栽培+Wetlandでの浄化	水耕での収量計算/中規模成育
8	1999	渡良瀬貯水池での水耕栽培実験2	砂を用いた水耕連続試験/利根上
9	1999	ケナフコアからのキノコ製造試験	県立勢多農林高キノコ工場
10	2000	校内ため池での水耕栽培+Wetlandでの浄化	単位面積N,P除去量の算定
11	2000	林牧場での大規模生育	2箇所に限定/大規模肥沃な露地
12	2000	緑化基盤材試験、ボード作成試験	重金属分析、林業試験場

注記:利根上とは国土交通省利根川上流工事事務所の略、渡良瀬貯水池を管轄

体的な研究はごく僅かである。一例として川田ら¹⁴⁾は1992年に、圃場でケナフの栽培を実施し施肥量・栽植密度と収量の関係を検討したところ、収量は密植栽培で最大で12~42Dt(Dry ton)/haであったと報告している。水耕栽培の報告はさらにごく僅かであるが、尾崎、阿部ら^{15,16)}はゼオライトをろ材とした水路に植物を栽培し水質の浄化を検討した中で、ケナフ・パピルス・アシ等を使用し、ケナフやパピルスが高い水質浄化能を持つことを報告している。この中で、濃度レベルを数段階変えて、窒素・リンの除去速度と濃度の関係をMichaelis-Menten型の飽和曲線で近似し、飽和常数 K_s を求めているのは重要な知見である。ケナフについては、窒素濃度0.5mg/l以上では濃度依存性が低く浄化効率が高く、0.2mg/l以上であれば浄化可能としている。また加藤等¹⁷⁾は、ゼオライトを支持材に用いた植生カゴにケナフを植え、生活排水を含んだ池水を流して浄化効果を確認した。滞留時間は5時間が最適で、除去されたN,P量のうち植物体が吸収した割合は20%以下であり、残りは沈降や付着などの間接的な浄化能であるとしている。

本実験の水耕栽培では、ケナフをロックウールポットに栽植し、支持材を使用しないことにより、間接的な浄化能力を極力排除して、ケナフ植物体のN,P吸収能力を検討しているが、同様な実験は報告されていない。

3.実験方法

3-1 種々の条件でのケナフ

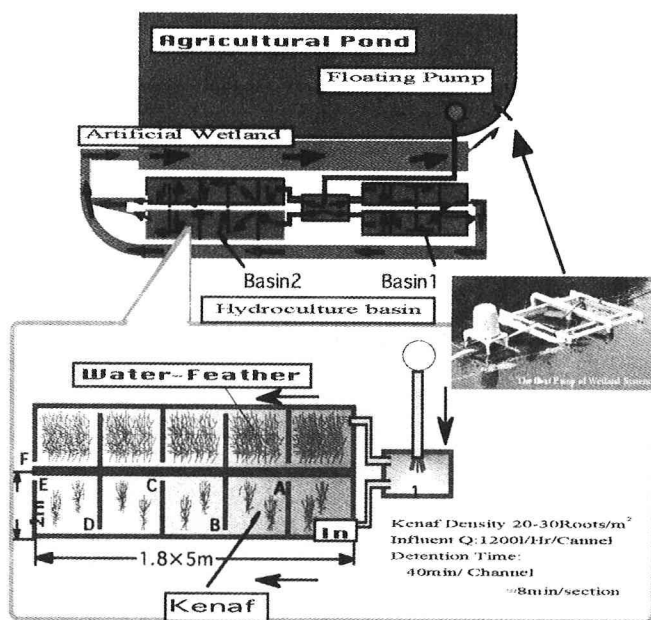


Fig.1 Ground plan of kenaf Hydroculture system

の生育試験

ケナフはごく最近知られるようになった外来種の植物であり、水耕で育つことも殆ど知ら

れていない状態から検討を開始したので、種々の環境条件での栽培を実施した。水耕栽培としては、高専内の生活雑排水で汚濁したため池水を用いた水耕ベッド(Pic.2, Pic3; 写真右、左は露地栽培)・高専の合併浄化槽処理水及び栄養塩濃度の低い渡良瀬貯水池¹⁸⁾で実施した。高専内で実施した水耕栽培では、ロックウールポット(ニチアス製、75mm×75mm×75mm)1個に4個の種を蒔き、そのままキャンパスシートの床に置いて育成させた。Pic.2の右上は発芽直後のケナフ苗である。

露地栽培は1999年に、高専内のやせ地から肥沃な土地までの3箇所と、赤城山麓に位置する林牧場(県内最大の養豚企業; Pic4)の栄養過多の農地から火山灰のやせ地までの4箇所の合計7箇所で行った。ケナフは熱帯性植物のために、発芽温度は20℃以上が必要であり、水耕栽培・露地栽培とも種まきは5月中旬から下旬に実施した。ケナフは直根であるので、露地栽培は基本的に直まきとしたが、苗が不足する場合にはロックウールポットの水耕苗を1株ずつ分離して移植した。水耕栽培の場合にはロックウールポットの移動で栽培密度が調節できるので、粗密の変化をつけたが密度は20～30本/m²であり、露地栽培の場合には10本/m²程度とした。

ケナフは、秋になると黄色い淡い花を咲かせる。花は一日花であるが、次々と上につぼみをつけてゆくので長期間開花することになる。花の形はオクラにそっくりであるが、別名ホワイトハイビスカスとも呼ばれており、景観作物としても有望である。栄養条件が良い場合には、開花は10月中旬、栄養条件が悪い条件では9月から開花した。

3-2 汚濁したため池水を用いた水耕栽培試験

高専内には約8000m²の農業用ため池があり、現在でも農業用の取水が行われている。上流部に県道が走っており、事務所・工場・店舗などが展開しているが、市街化調整区域のために下水道は整備されておらず、今後とも計画はない。そのために生活雑排水が流入するとともに、投げ捨てられたゴミが頻繁に流入し、台風や雷雨時などには水路に沈積した底泥が巻き上げられて流入し、本ため池で沈殿するために、池容積の1/2以上は底泥で埋まり、嫌気性発酵をしている劣悪な環境である。このため池の底

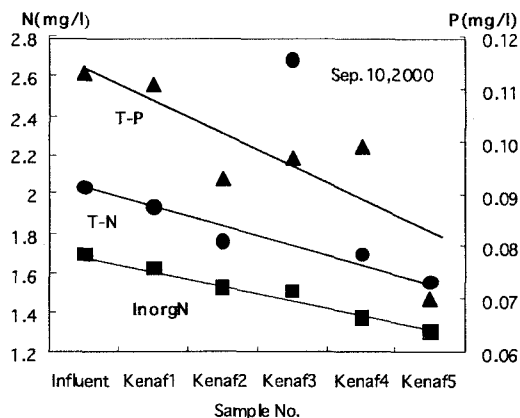


Fig 2 A trend of each nutrient in hydroculture basin2

Table3 A trend of nutrient salts on the kenaf hydroculture system

No. Sample	Tw ℃	DO mg/l	pH	EC mS/m	Cl- mg/l	NH4-N mg/l	NO2-N mg/l	Nox-N mg/l	InorgN mg/l	T-N mg/l	PO4-P mg/l	T-P mg/l
I Pond water	24.6	7.14	7.22	19.72	13	0.057	0.08	1.639	1.696	2.034	0.115	0.11
A Kenaf1 Eff.	24.7	4.61	7.04	19.94	23	0.074	0.071	1.546	1.62	1.932	0.109	0.11
B Kenaf2 Eff.	25	3.84	7.07	19.82	14	0.032	0.056	1.493	1.525	1.754	0.096	0.09
C Kenaf3 Eff.	25.2	2.14	6.99	19.84	13	0.032	0.052	1.471	1.503	2.686	0.1	0.10
D Kenaf4 Eff.	25.4	2.11	6.93	19.67	13	0.009	0.027	1.36	1.369	1.694	0.082	0.10
E Kenaf5 Eff.	25.5	1.43	6.94	19.4	13	0.006	0.018	1.292	1.298	1.55	0.071	0.07
Removal rate						89%	78%	21%	23%	24%	38%	38%

*Sampling date: 10 Sep 2000, InorgN=NH4-N+Nox-N(=NO2-N+NO3-N), Detention time: 50min from I to E

泥浚渫と水質浄化を目的として、可動式のフロートポンプと水耕ベッド及び人工湿地で構成される浄化システムを長期間運転している⁷⁾⁸⁾。フロートポンプで底泥を巻き上げ好気化するとともに、巻き上げた底泥の一部が移送ポンプで水耕ベッドに供給され、SSが除去され栄養塩が低減した水が、人工湿地を経由して再び池に戻るようになっている。Fig.1にその配置と概要を示し、Table2に各水槽の寸法と滞留時間を示したが、概ねの滞留時間は、水耕ベッドで40～50分、人工湿地で80分であり全滞留時間は約2時間、揚水量は3.6m³/H(=日量87m³、水耕ベッド1系列には0.9m³/H供給される)であった。

ケナフ是一年草ではあるが、秋には高さ3m以上に成長するので、水耕栽培では支柱が必要である。ロックウールで発芽した苗は、ロックウールの安定性により1mまでは自立できるが、それ以上では転倒してしまう。そのためにPic.3右に示すような1.1m高さのパイプフレームを製作し、パイプフレーム上面に格子状に支柱棒を配置して転倒防止対策とした。

3-3 浄化槽処理水を用いた水耕栽培試験

3-2の実験に先立って1998年、高専内の合併浄化槽処理水を原水として15l容積のプランター6個を直列に接続し、定量ポンプで原水を供給する連続通水試験を実施した⁵⁾。Pic.5に実験装置の外観を示した。各プランターには3本ずつのケナフを設置し、転倒防止のために支柱で固定した。実験の前後にケナフ湿重量を測定し、別途測定した含水率から乾燥重量を計算し、成長量とした。しばらく通水して安定した後の晴天の日(10月中旬;水温18℃)に、各水槽の採水を実施し各態窒素・リン濃度を測定して除去量を算出した。本実験に用いたケナフの成分組成を測定し、成長量と成分組成から植物への吸収量を算出した。滞留時間は3日に調整し、採水を2回実施した。

4. 実験結果と考察

4-1 水耕ケナフによるため池水の水質浄化除去特性

ケナフ水耕栽培は、Fig. 1に示すBasin2で実施したが、この水耕ベッドは2m幅・1.8m長さの浅い水槽



Pic.5 The continuous flow experiment using domestic sewage treated water

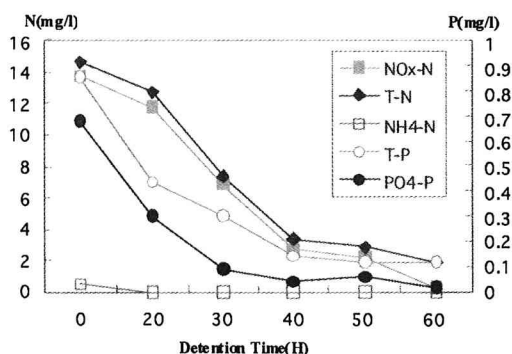


Fig. 3 A time trend of each nutrient in the continuous flow experiment

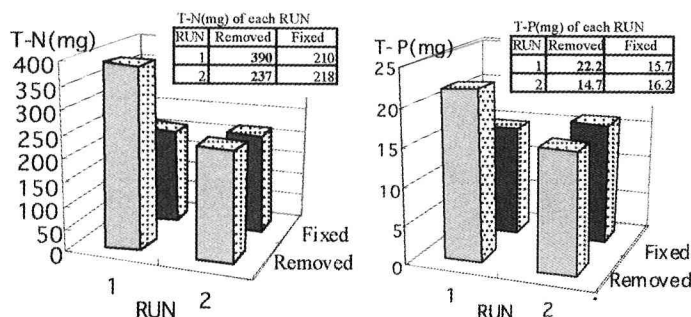


Fig. 4 A material balance of each nutrient in the continuous flow experiment

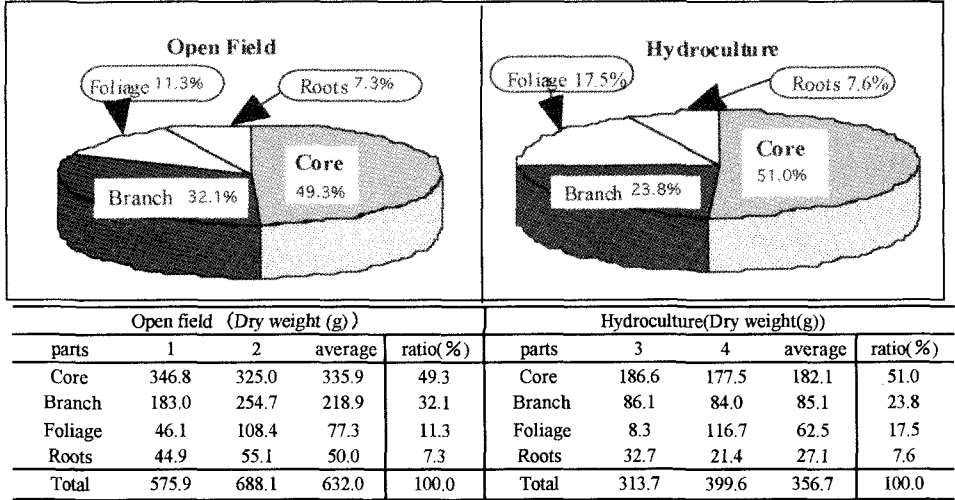
を12%勾配で5槽接続したもので滞留時間は50分であった。2000年の夏季周期的に6回の調査を実施したが、一例として9月10日測定時の流下方向各態窒素・リン濃度の変化をFig.2に、また各水質データをTable3に示した。水温から塩素イオン濃度までは携帯用測定器を用いて測定し、各態窒素・リン濃度はブランルーベ社製オートアナライザー(AACCS-II)で測定した。T-N,T-Pは予めオートクレープを用いてペルオキシ二硫酸カリウム分解処理をしたのちに、オートアナライザーで測定した。テスト期間(2000年夏季)の平均流入水質は、EC22.5mS/m, Cl⁻11.4mg/l,無機態N2.65mg/l(殆どはNO₃-N)、PO₄-P0.31mg/lであった。この流入窒素・リン濃度は、ケナフの生長律速になる濃度より十分に高い濃度である¹⁶⁾。Fig.2でわかるように窒素・リンともほぼ直線的に低減しており、T-N,T-Pの除去率はそれぞれ24%,38%であった。なお隣の水耕ベッドではオオフサモを成育させて実験しているが、面積・流量ともほぼ同一にもかかわらず窒素・リンの低減はケナフ水耕ベッドより低かった。

4-2 浄化槽処理水を用いた水耕ケナフでの栄養塩物質収支

高専の合併処理浄化槽は、1000人槽の接触曝気方式であり、この方式の特徴として処理水には濁度が残存し透視度が低めである。植物による浄化は、このような処理水の濁度除去には効果が大い。原水中にNH₄-NとNO₃-Nの両方が存在する場合には、植物はNH₄-Nから先に除去することを本研究室では明らかにしているが、本試験では無機態窒素の殆どはNO₃-Nの形態でありNH₄-Nはごく僅かであった。Fig.3に流下方向(滞留時間表示)の各態窒素・リン濃度の低減を示した。秋の深まる10月中旬ではあるが、無機態窒素・リンの殆どは除去されることがわかる。2回実施した水質データとケナフの重量増加および成分組成から、植物へ吸収固定された窒素・リン量と水系から除去された窒素・リン量を計算し、対比した物質収支をFig.4に示した。水系からの除去量と植物の固定量は概ね一致し、物質収支が取れることがわかった。窒素は一部根圏(泥が付着して嫌気的環境となる)での脱窒素でも除去されるとみられ、除去窒素量が固定窒素量よりやや多かった。

4-3 ケナフ各器官の重量配分

1999年に各場所・条件で栽培したケナフのうち、大きく成長した露地ケナフ(林牧場)と水耕ケナフを各2本根を含めて採取し、各部分に分離した後、105℃24時間乾燥し重量を測定した¹⁹⁾。その結果をFig.5に示した。密植して育てたケナフは、あまり枝を出さず幹はテーバー状にまっすぐ育つが、先端1mには種がつきトゲだらけとなるので、この部分は利用価値が少ない。そこでこの部分を種(Foliage)としている。幹の2/3を占める太い部分を幹(Core)としており、葉のついた枝をまとめて枝(Branch)としている。水耕・露地栽培とも利用の可能性の高い幹部分の重量は約50%であった。枝部分の多少は、独立・密植などの栽培条件で変化するとと思われる。このようなデータは、回収植物体



The harvest time was December from November. By digging the roots up, weight was measured.

Fig. 5 A weight distribution of each organ of the kenaf grown under each condition

Table4 Nutrient removal efficiency on the kenaf hydroculture basin2 on 2000

RUN	Date	Time	Weather	Surface load	Δ T-N	Δ T-P	Removed		Removal Efficiency	
				(m · d-l)	(mg/l)	(mg/l)	N(g/D)	P(g/D)	N(g/m ² · D)	P(g/m ² · D)
1	7.4	9:05	fine	1.6	0.487	0.024	14.0	0.69	0.779	0.038
2	7.10	15:35	fine	1.6	0.21	0.041	6.1	1.18	0.336	0.066
3	7.19	16:55	fair	1.6	0.428	0.069	12.3	1.99	0.685	0.11
4	8.4	9:28	fine	1.6	0.224	0.03	6.5	0.86	0.358	0.048
5	8.14	10:25	fine	1.6	0.388	0.034	11.2	0.98	0.621	0.054
6	9.10	17:02	fair	1.21	0.484	0.028	10.6	0.61	0.59	0.034
Average					0.370	0.038	10.1	1.05	0.562	0.058

の利用を検討する場合に重要である。さらに幹(Core)部の皮と芯の比率を実測した結果、重量比で皮32%, 芯68%であった。

次に灰分(Ash)についての検討を行った。ケナフ幹は木質系の草本であるが、一般に草本の灰分は木本に対して高めであると云われている。灰分は、600℃2.5時間マッフル炉で加熱し、乾燥重量との比較で求めた結果、皮の灰分の平均は5.3%, 芯では2.4%であった。皮と芯との重量比から幹全体の灰分を求めると3.5%となった。この灰分の高さは、ケナフ芯から活性炭を製造し、比表面積を測定するときに低めの値となるので注意を要する。

4-4 水耕ケナフ試験のウェットランドシステムとしての評価

浮遊物を含まない原水の水耕栽培における栄養塩除去は、4-2で示したように植物体への吸収固定と根圏での脱窒素で決定されるので、その植物の栽培密度と成長速度に影響される。浮遊物を多く含む場合には浮遊物の抑留効果が加算されることになるが、本研究では浮遊物をあまり含まない(<SS20mg/l)状態が殆どであった。このような水耕ベッドの効率を表す方法に定まったものはないが、湿地浄化法(ウェットランド

システム)の評価方法²⁰⁾が利用できると思われたので、各測定データから面積当日日除去窒素・リン量を算定し、Table4にその結果を示した。Fig.2に示したような栄養塩の低減グラフから除去速度を決定して日除去量を算出し、面積当りの値に換算した。2000年夏季のケナフ水耕ベッドの除去効率はT-Nで0.562g/m² · 日、T-Pで0.058g/m² · 日となった。湿地浄化法の除去性能評価として報告されている数値は、表面流でT-N 0.07~1.19gN/m² · 日、T-P 0.01~0.15gP/m² · 日、浸透流でT-N 0.27~2.2gN/m² · 日、T-P 0.09~0.13gP/m² · 日であり²⁰⁾、表面流で比較するとケナフ水耕ベッドの除去効率は湿地浄化法として中位以上の良好な値であった。

Table5 Kenaf yields on the hydroculture basin2 on 1999

Sampling Place unit	L*W m	Density roots/m ²	Yield Dt	Specific Yield Dt/ha
Kenaf Section1	2.0 × 1.77	21.2	0.027	75.4
Kenaf Section2	2.0 × 1.74	25.9	0.032	92.0
Kenaf Section3	2.0 × 1.77	20.1	0.025	71.4
Kenaf Section4	2.0 × 1.72	31.4	0.038	111.7
Kenaf Section5	2.0 × 1.78	20.5	0.026	72.9
Kenaf Hydro-all	2.0 × 8.78	23.7	0.148	84.5

*The kenaf stock was cultivated consciously high density.

Table6 Kenaf yields on soil(Gunma College of Tech. & Hayashi farm) on 1999

Sampling Place unit	L*W m	Density roots/m ²	Yield Dt	Specific Yield Dt/ha
East bank of the pond	2.5 × 1.7	11.1	0.012	28.0
South bank of the pond	2.7 × 2.0	11.5	0.016	30.3
West bank of the pond	2.3 × 3.0	10.9	0.010	14.5
Average of bank				23.1
Hayashi Farm1	55 × 4	10	0.88	40
Hayashi Farm2-1	60 × 8	8	1.152	24.0
Hayashi Farm2-2	15 × 8	4	0.144	12.0
Hayashi Farm3	20 × 10	8	0.64	32.0
Hayashi Farm4	28 × 24	4	0.188	2.8

4-5 各環境で育成したケナフの単位面積当り収量

1999年には3.1で述べたように、各環境でケナフを育成したので、それぞれの単位面積収量を測定した。まず対象とするケナフ栽培地の敷地寸法を実測し、ケナフを大中小に分類してそれぞれの本数(広い所では一部分で代表)を計測した。次に大中小各段階のケナフを実験室に持ち帰り、逐次裁断して全量を乾燥炉で105℃24時間乾燥し、1本当りの乾燥重量を測定した¹⁹⁾。これらのデータから、各栽培地の単位面積収量をまとめた。Table5は水耕栽培の面積収量、Table6には露地栽培での面積収量を示した。水耕栽培では、面積収量はケナフの栽培密度に大きく影響されるので、隣接する露地ケナフに比べて個体はやや小振りであるが、最大112t/ha、平均84.5t/haと極めて高い面積収量となった。これはロックウールポットを密植して配置し、そのまま育成させたことによると思われる(Table5より栽培密度は平均で24本/m²)。一方露地ケナフでは、面積収量は肥沃な畑地で栽培した40t/haから火山灰のやせ地の2.8t/haまで大きな幅で変動した。一般的にケナフ収量は10~20t/ha/year程度とされ、この値はマツなどの針葉樹成長量の3~5倍にあたるために、温暖化防止効果が大きいとされているが、本測定結果からケナフ収量10~20t/haは無理のない数値であることを確認したことになる。

特に肥沃な農地(豚糞堆肥を大量に投入;林牧場 Pic4参照)では、10本/m²の密植であるにもかかわらず、地表面での幹の太さが4~5cmに達する大きな個体が収穫されたが、このような大きな幹は利用可能性も高い。

4-6 露地で育成したケナフの土壌中栄養素と収量の関係

露地でのケナフの単位面積収量を測定する一方、収穫時に栽培地の土壌を採取し分析した。その結果をTable7に示したが、pH・EC(電気伝導度)・VS(揮発性物質)については校内で、また窒素(N)・リン(P₂O₅)・カリ(K₂O)については外部の環境計量事務所に依頼した。表中で5のCollege ground2は校内プレハブ校舎撤去後の砕石交じりの堅い貧栄養の土壌であり、8,9は前述したとても肥沃な(真っ黒でふかふか、ケナフを支えきれずに風が吹くと倒伏する)畑地である。VSは17.5~21.1%と

Table7 The relationship between kenaf yield and nutrient salts in each culture ground

No.	Sampling Site	Yield(Dt/ha)	N(%)	P2O5(%)	K2O(%)	VS(%)	EC(mS/m)	pH
1	Farm Pond Site1	28.0	0.15	0.25	0.20	5.7	11.25	7.1
2	Farm Pond Site2	30.3	0.15	0.29	0.25	6.3	11.46	7.0
3	Farm Pond Site3	14.5	0.12	0.32	0.27	6.5	12.64	7.1
4	College ground1	14.0	0.28	0.34	0.26	6.6	13.57	6.5
5	College ground2	3.1	0.07	0.17	0.17	1.8	3.11	6.5
6	College ground3	13.6	0.15	0.23	0.32	3.8	15.81	7.6
7	College ground4	13.6	0.10	0.27	0.23	5.0	13.05	8.2
8	Hayashi Farm 1-1	40.0	0.65	2.45	0.10	17.5	35.50	5.9
9	Hayashi Farm 1-2	40.0	0.79	3.22	0.15	21.1	38.40	5.7
10	Hayashi Farm 2-1	24.0	0.46	0.98	0.07	17.1	24.50	4.8
11	Hayashi Farm 2-2	12.0	0.39	0.78	0.11	15.3	17.50	5.0
12	Hayashi Farm 3-1	32.0	0.42	0.73	0.09	17.7	18.01	5.3
13	Hayashi Farm 3-2	32.0	0.42	1.07	0.07	16.6	17.30	5.3
14	Hayashi Farm 4-1	2.8	0.07	0.24	0.10	7.9	6.57	5.2
15	Hayashi Farm 4-2	2.8	0.02	0.20	0.14	6.0	5.43	5.0

・ Farm pond is located in the site of Gunma College of Technology. The surface area is almost 8000m².

・ Hayashi Farm is located on the southern skirts of Mt.Akagi in Gunma Pref.

とても高く、窒素・リン・ECとも高い値である。栽培に協力頂いた畑地所有者の話では、過栄養のためにどんな野菜を植えても腐ってしまい困っていた土地とのことである。ケナフは土壤浄化植物(Cleanup crop)としても有効であることがわかった。

Table7の結果から、収量と各測定項目には高い相関がありそうに思われたので、それぞれの相関係数を求め、その結果をTable8に示した。上部の組み合わせは収率と各項目の相関係数を示し、下部は相関の強い各項目間の組み合わせを示している。この結果から、収率と高い相関がある項目は、N・EC・P₂O₅・VSであり、各項目間の相関はこれら4項目の組み合わせに限定されている。収率と最も高い相関を示したのはNであったので、Nと収率の散布図をFig.6に示した。ケナフは栄養塩多消費型(収奪型)植物であることがわかる。このような特性を土地が荒れるとされることもあるが、群馬県の赤城山南麓のような畜産の盛んな地域では、畜糞尿及び堆肥の農地還元により、過栄養の農地が多く、ケナフの栽培は畑地の浄化のみならず地下水の硝酸汚染の軽減につながるので好都合である。Fig.7は土壤各試料採取点の収量とN・P₂O₅・VS・ECの関係を示しているが、収量はこれらの指標と強い関連があることが判る。

さて収量と高い相関を示す4個の指標のうち、N・P₂O₅は分析費用が高く時間もかかるので、迅速簡単に測定でき測定費用の安いECとVSの二個を説明変数として収量の予測式を重回帰分析で導いた結果、次の収量予測式が得られた¹⁹⁾。

$$\text{収量(t/ha)} = 2.87(\text{t/ha}) + 0.36\text{VS}(\%) + 0.84\text{EC}(\text{mS/m})$$

本式と比較するために、N・P₂O₅の二つを説明変数に加えた説明変数4個の予測式も求め、両式の重相関係数を求めたところ、2個の説明変数では0.629、4個の説明変数では0.641の数値が得られ、2個の説明変数でも実用上は問題ないと思われる。

4-7 回収ケナフ有効利用のための調査

植物を用いた環境浄化は、回収した植物体が有効利用できることが基本的な条件である。古くからいろいろな植物が水質浄化によいとして検討されてきたが、殆ど植物による浄化が定着していないのは、この条件を満たすことができないからである。その代表的な例はホテイアオイであり、水面からの回収の困難さと植物体の有効利用技術の二つの面でいきづまっていることになる。

ケナフの場合は、草本としては唯一

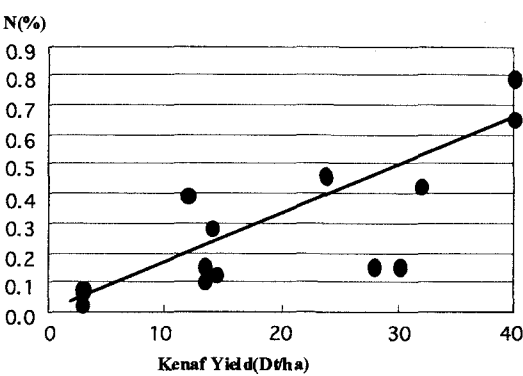


Fig.6 The relationship of N content in soil between Kenaf Yield

Table8 The relationship between yield point and soil component

Combination	r
Yield vs N	0.784
Yield vs EC	0.787
Yield vs P ₂ O ₅	0.721
Yield vs K ₂ O	-0.238
Yield vs VS	0.702
Yield vs pH	-0.076
N vs EC	0.946
N vs P ₂ O ₅	0.926
N vs VS	0.915
EC vs P ₂ O ₅	0.931
EC vs VS	0.817

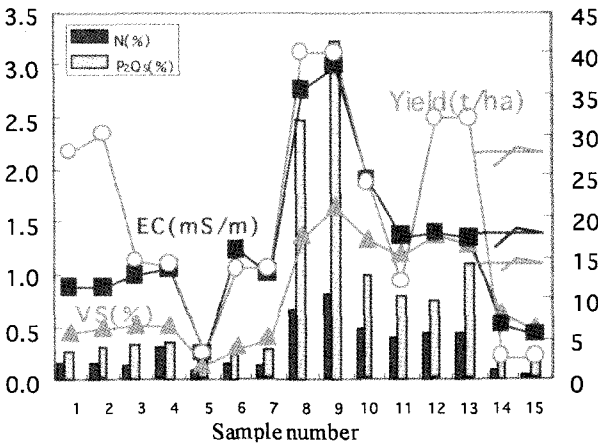


Fig.7 The relationship between yield point and soil component on the open-field culture

といってもよい木質系の幹になるという点が、利用技術の突破口を開くことができる可能性として残っている。利用技術としてよくあげられるのは製紙原料である(もともとケナフは日本では温暖化防止と紙作り、森林保護のキャッチフレーズで広まっている)が、本研究室では紙以外の利用可能性を検討している。群馬県はキノコの生産量も日本有数(シイタケの種駒は群馬県桐生の森産業が開発した)であるので、広葉樹に替わるキノコ培地利用が一つの可能性である¹⁰⁾。またケナフの皮の破砕物と下水汚泥で堆肥を作り、ケナフのもつ発芽性の良さ(発芽阻害がない)と繊維質の付着性を生かした緑化基盤材の検討もすすめている。またケナフチップは木材と異なり、加熱時に自己融着性をもつので、ホルムアルデヒド(シックハウス症候群)を出さない安全で快適なボードの原料としても検討の余地がある。またケナフを原料とした活性炭は、市販の水処理用活性炭(カルゴン炭等)とほぼ同等のフミン酸吸着能力やカビ臭の吸着能力があることは、当研究室で既に発表済である⁶⁾⁸⁾。

利用技術を検討する場合には、ケナフの素材としての特性を把握する必要があるので、有機物の組成と重金属の含有量を調査した。Table9には、ケナフ芯のセルロース、ヘミセルロース、リグニンの含有率を木材(柳)を対照として分析した(東大生産研鈴木研究室による)結果を示した。ケナフ芯は柳に比べて、セルロースが約10%少なくリグニンも少なく、ヘミセルロースが多い。ヘミセルロースの主成分は糖類(ペントサン;加水分解して五単糖になる)であるといわれており、この成分の違いがケナフボードが自己融着性を示す理由と考えられる。

ケナフの皮および芯に含まれる重金属類を分析し、その結果をTable10に示した。キノコ培地のように食品原料として使用する場合には、安全性の面で検討する必要があるが、重金属は一部(As_3)を除いて芯よりも皮に蓄積する傾向がわかった。また芯部重金属は水耕栽培と露地栽培であまり違いがみられなかった。

4-8 ケナフの温暖化防止効果

ケナフは4-5に示したように、木材と比べてセルロース、リグニン含有量が少なくヘミセルロースが多い。一般に地球温暖化防止の計算を行う場合、木材では乾燥重量の50%を炭素として計算をする²¹⁾が、ケナフの炭素含有率については前記の組成の違いと灰分が多いことを勘案して45%と仮定し、群馬県を例にして基本的な計算を試みてみる。

Table9 Organic content of each kenaf part(%)

Sample	cellulose	hemicellulose	lignin
Kenaf Core	50.4	12.2	11.4
Kenaf Bast	58.9	2.3	10.6
Willow trunk	60.5	8.5	15.4

Analyzed by the Suzuki lab. in the Institute of Industrial Science/University of Tokyo



Pic.6 The kenaf withered on soil in spring which seed was used to germination test

Table10 The mean value of metal content in each kenaf part from different cultivation (mg/kg)

Part	n	Cultivation	Hg	Cd	Pb	As	Cu	Zn	Fe	Mn
Core	7		0.000	0.146	0.84	0.044	3.8	17.2	13.6	6.1
Bastfiber	7		0.010	0.314	1.27	0.002	4.6	28.0	69.5	28.1
Core	5	soil	0.000	0.164	0.74	0.048	4.1	16.2	13.3	5.7
	2	water	0.000	0.100	1.10	0.035	2.9	19.6	14.2	7.2
Bastfiber	5	soil	0.009	0.392	1.26	0.003	5.1	27.4	66.5	23.9
	2	water	0.012	0.120	1.30	0.000	3.3	29.5	76.8	38.7

群馬県の統計資料によれば、県内の減反目標面積は水田総面積の40.9%なので12,341ha(全耕地面積の14%)である。仮にこの面積に全てケナフを植えるとして、ケナフ収

量を20t/ha・ケナフの炭素率を45%とすれば、ケナフによる炭素固定量は111,069tC/年となる。群馬県の二酸化炭素排出量(炭素換算)は、3,850,000tC/年であり²¹⁾、県内排出量に対するケナフ固定量の割合は約3%弱となる。

この計算は、収穫したケナフが利用できるか、または燃料として使用し石油消費量の削減になるときはじめて成り立つ計算ではあるが、COP3で決めた削減目標に対して乖離がどんどん進んでいる現状を考えると、実現可能な方法の一つとして留意する必要がある。

4-9 ケナフの生態系攪乱の可能性

播種し成長したケナフの種が、翌年発芽し自生することにより、周辺の自然生態系を破壊する危険性が議論されているので、本高専で成長したケナフを立ち枯れさせ(Pic.6)、翌年春に採種して発芽試験を実施した。ケナフの種は、未熟なうちは茶色で熟すと黒くになると思われるので、採種した種を黒と茶に分別し、黒くて重量のあるものを外観検査合格とした。採種した種のうち、外観検査に合格した割合は、露地ケナフで46%、水耕では26%であった。外観検査に合格した露地ケナフの黒い種を次に水に入れて、沈んだもののみを発芽試験に供した。Pic.7に水による沈降分離と発芽試験状況を示した。Table11に発芽試験結果をまとめたが、発芽率は外観検査ベースで15%(購入したケナフ種の発芽率は82%)であったので、採種全体では7%程度と低い数値であった。ケナフ種が完熟するためには、結実後霜のない日が60日程度継続する必要があると云われているが⁴⁾、栽培地の群馬県ではこの条件を満たすのは困難であり、このことが発芽率が低かった理由と思われる。また熱帯種であるケナフの発芽温度は20℃以上(関東地方では5月中旬以降)とされているので、自然の条件下では仮に発芽したとしても、既に成育している雑草(温帯性)との競合に競り勝たないと成育できない。温帯種の雑草は5月中旬には既に広く繁茂しているので、発芽力のあるケナフの種であっても成育することは極めて困難である。実際に高専内では学生が数千粒の購入種をばらまいたが、成育したものは皆無であった。露地でケナフを育てるためには、除草作業は大変な作業である。ケナフは栽培植物であり人為的な保護の元で初めて成育するものであり、少なくとも我国本州においては生態系攪乱の可能性はないといえる。

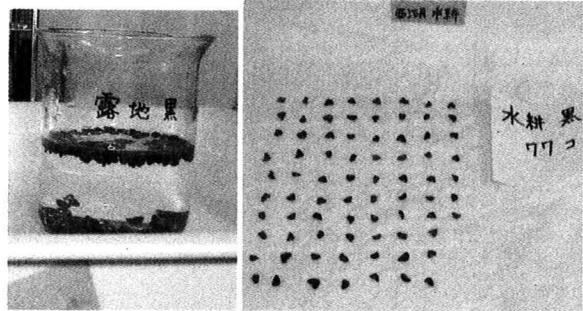
5.まとめ

本研究室でのケナフの研究は今年で5年目となるが、播種から収穫までを何度も繰り返し、水質浄化能力を確認した。また収穫したケナフの利用技術開発のために、破碎・篩分け・磨砕・炭化や堆肥

Table11 The result of the germination experiment of kenaf harvested on soil in Gunma college of technology

種の履歴	外観検査合格 (黒いもの) 粒	水に沈むもの (発芽試験に 使用)粒	発芽したもの 粒	発芽率(%)	
				外観検査 ベース	水に沈むもの ベース
高専露地栽培 ケナフ種	200	123	30	15	24
対照:購入種 (鹿 児島ケナフの会)	110	100	90	82	90

・高専露地ケナフ種には未熟の白い種と熟している黒い種があり、採取した種の中で黒い種の比率は46%であった
・ケナフは立ち枯れしたまま4月に種を採取し、発芽試験は4月17日から明るい室内で実施し24日に発芽数を調べた
・発芽試験は、プラスチックトレーにティッシュを敷き、その上に蒔いてさらにティッシュで覆って水やりした



Pic.7 The germination test of kenaf seed and primary settling separation test

化等、さまざまな作業を実施してきた。

これらの検討で得られた主な結果は以下のとおりである。

1. ケナフは水耕でも露地でも栽培可能であり、成長が著しく早いために、二酸化炭素の固定と水からの栄養塩除去による環境改善が可能である。また美しい花が連続して咲くために景観作物としても有効である。
2. 水耕栽培のケナフを密植して栽培した場合、栄養塩除去効率は窒素で $0.56\text{g}/\text{m}^2\text{D}$ 、リンで $0.058\text{g}/\text{m}^2\text{D}$ であり湿地浄化法の評価としても中位以上の良好な数値であった。
3. ケナフの栽培密度は、水耕の場合には密植できるために平均で $85\text{t}/\text{ha}$ 、露地栽培の場合には土壌の栄養条件に大きく影響され、 $2.8\text{t}/\text{ha}\sim 40\text{t}/\text{ha}$ の幅が観察された。ケナフは肥料収奪型であるので、豊かな土壌ではより大きく成長する。また過栄養の農地では土壌浄化作物(Clean-up crop)としても有効である。また土壌での単位面積収量は、その土壌のECおよびVSを測定すれば概ね推定できることがわかった。
4. ケナフは草本では唯一木質系の幹になる点が特徴的であり、回収植物体の有効利用には種々の可能性が残っている。引き続き検討を続けて行きたい。

謝辞

ここに示した調査検討結果は、多くの本研究室及び学科の学生諸君や教職員の皆様と、発足して間もないぐんまケナフ研究会会員の協力の賜物である。林牧場の大規模栽培では、林会長・社長に多大な協力を頂いた。また本研究の一部は、(財)廃棄物研究財団、(財)昭和シェル石油環境研究助成財団および(財)クリタ水・環境科学振興財団の助成を受けた。協力頂いた全ての方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 木崎秀樹(2000)広島発ケナフ事典、創森社
- 2) 鶴留俊明(1998)夢・ケナフ、南方新社
- 3) 小林良生(1991)環境保全に役立つ紙資源-ケナフ、ユニ出版
- 4) Vision Paper(1998)インターネットホームページによる www.visionpaper.com/
- 5) 青井 透(1997)ケナフによる水質浄化の可能性、第5回北海道大学衛生工学シンポジウム論文集, pp166-170
- 6) 大森美香子、青井透、大島秀則(1998)水質浄化に利用したケナフから製造した活性炭の色度・カビ異除去性能の評価、土木学会環境工学研究フォーラム講演集, pp4-6
- 7) Aoi.T(1999)Phytoremediation by Kenaf and production of Activated Carbon from harvested core, Proceedings of International symposium of Bio-Recycle/Composting in Sapporo, ppV-3-1-11
- 8) 青井 透、大森美香子(1999)水耕ケナフ栽培による水中からの栄養塩除去と回収植物体の有効利用、(財)地球・人間環境フォーラム(ケナフ協議会)、第4回ケナフ等植物資源利用研究会と第7回特別講演会予稿集, pp10-1~2
- 9) 青井 透(2000)Studies of water pollution control by kenaf planting(ケナフによる水質浄化)、Proceedings of International KENAF Forum, A.D.2000, pp77-80
- 10) 横田和人、青木勇太郎、青井 透(2000)1年生草本ケナフ幹からのキノコ製造試験報告書、財団法人クリタ水・環境科学振興財団助成報告書, p3
- 11) 青井 透(2000)環境浄化に対するケナフの役割、広島ケナフの会Kenaf 2days in やすうら、同資料集pp7-9
- 12) 青井 透(2000)複数のアフリカ原産植物を用いた汚濁湖沼の浄化と回収植物体の有効利用、財団法人昭和シェル石油環境研究助成財団、第4回助成研究成果報告書, pp44-45
- 13) 青井 透(2001)未利用植物によるC,N,P回収と余剰植物体からの有価物生産、(財)廃棄物研究財団、循環型社会に対応した有機性廃棄物の資源化処理システムの開発研究要旨集, pp204-211
- 14) 川田訓平、金森正雄、河合文雄、中村幸員(1993)ケナフ(*Hibiscus cannabinus* L.)の成育に及ぼす栽培密度と施肥量の影響について、(財)環境科学総合研究所年報, Vol.12, pp17-21
- 15) 尾崎保夫、阿部 薫(1993)植物を利用した資源循環型水質浄化技術の課題と展望、用水と廃水, Vol.35, No.9, pp5-17
- 16) Abe, K., Ozaki, Y. and Mizuta, K. (1999) Evaluation of Useful Plants for the Treatment of Polluted Pond Water with Low N and P Concentration, Soil Sci. Plant Nutr., 45(9), pp409-417
- 17) 加藤雅広、中村敏昭、室田高志、山内昌之(1999)植生(ケナフ)を用いた水質浄化実験について、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, pp78-79
- 18) 大島秀則、唐沢 潔、坂之井和之、青井 透、大森美香子、平野景子(2001)渡良瀬貯水池池水を用いたケナフの栄養塩除去特性と回収茎から製造した活性炭能力の評価、土木学会環境工学論文集, Vol.38, 投稿中
- 19) 鈴木 学(2000)群馬県におけるケナフの環境改善効果の検討、群馬高専土木工学科卒業論文, pp30-31
- 20) 中村圭吾、三木 理、島谷幸宏(2001)大規模の浸透流方式湿地浄化法の開発とその評価、土木学会論文集 VII-19, pp81-92
- 21) 群馬県(1998)群馬県地球温暖化対策推進計画、群馬県生活環境部環境政策課