

(16) 風力エネルギーを利用した廃水処理システム

BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEM USING OF WIND ENERGY AS SOURCE OF POWER

松重一夫* 田井慎吾* 土井賢二郎**

Kazuo MATSUSHIGE*, Shingo TAI*, Kenjiro TSUCHII**

ABSTRACT; It is the purpose of this paper to develop the biological wastewater treatment system using of the wind energy as a source of the power running the disk of rotating biological contactor. The experimental equipments are composed of a wind-driven generator plant (200 W of maximum electric power at 10 m/s of wind velocity) with a propeller (1.8 m of a revolution diameter) and a experimental scale rotating biological contactor that is operated by the electric power converted from wind energy. They are established in the site of Kasumigaura Water Research Station of National Institute for Environmental Studies on the lakeside of Lake Kasumigaura. The average wind velocity of a year was 3.9 m/s. The average electric power of a year which was converted from the wind energy was 0.54 kWh/day. The 0.4 m³/day of wastewater is treated by the wastewater treated by the wastewater treatment plant using the small scale treatment plant of wastewater, at the mountainous or seaboard where the strong wind is blowing throughout a year.

KEYWORDS; wind velocity, wind energy, rotating biological contactor, windmill

1 はじめに

自然エネルギーの利用は、ハードエネルギーシステムと呼ばれる巨大集中型エネルギーシステムを補完するローカルエネルギーシステムとして位置付けられている。自然エネルギーのうち太陽熱、太陽光、風力は文字通りお天気まかせであるため、大量のエネルギーをコンスタントに必要とする場合には、ハードエネルギーシステムの代表である商用電力などのバックアップを必要とする。しかし離島や山間部などで、商用電力が得られない所では自然エネルギーのみに頼らざるをえない。また、消費エネルギー量が少ない場合、利用目的によっては工夫次第で、自然エネルギーのみでも十分に目的を達することができる。

自然エネルギーの一利用面として廃水処理や自然浄化機能の促進技術への応用が考えられる。商用電力が得にくい離島や、山間部あるいは半島の先端などは観光地となりやすく、自然エネルギーを利用した廃水処理が考えられる。廃水処理や廃棄物処理には、本来質の高い商用電力を使用するよりも、自然エネルギーを利用した方が、環境側面から見て望ましいわけである。

2 研究目的

廃水処理装置や自然浄化促進技術のエネルギー源として、風のエネルギーに着目し、利用の可能性と問題点、年間を通しての風力およびそれから得られる電気エネルギー量、発生電力量と使用電力量との適正なバランス、などについての知見を得ることを目的とした。

すなわち図-1に示したように、風力発電装置から得られた電力と商用電力とで、それぞれ別系統で同一の小型の回転円板法の実験装置を運転するとともに、別に設置した風速計によって、

- (1): 年間を通しての風向、風速の状況、
- (2): 風速と風力エネルギーおよび発電電力との関係、
- (3): 発電電力と負荷(使用)電力の関係、

* 国立公害研究所 National Institute for Environmental Studies (NIES),

** 東京水処理管理㈱ Tokyo Water and Wastewater Treatment Plant Maintenance Co., Ltd.

(4)：風力発電電力と商用電力とによる回転円板法の処理特性の差違、

などを明かにするために、1985年5月から風向、風速データの収集を開始し、1984年10月から1985年4月までの7ヶ月間、回転円板法の実験装置を運転した。

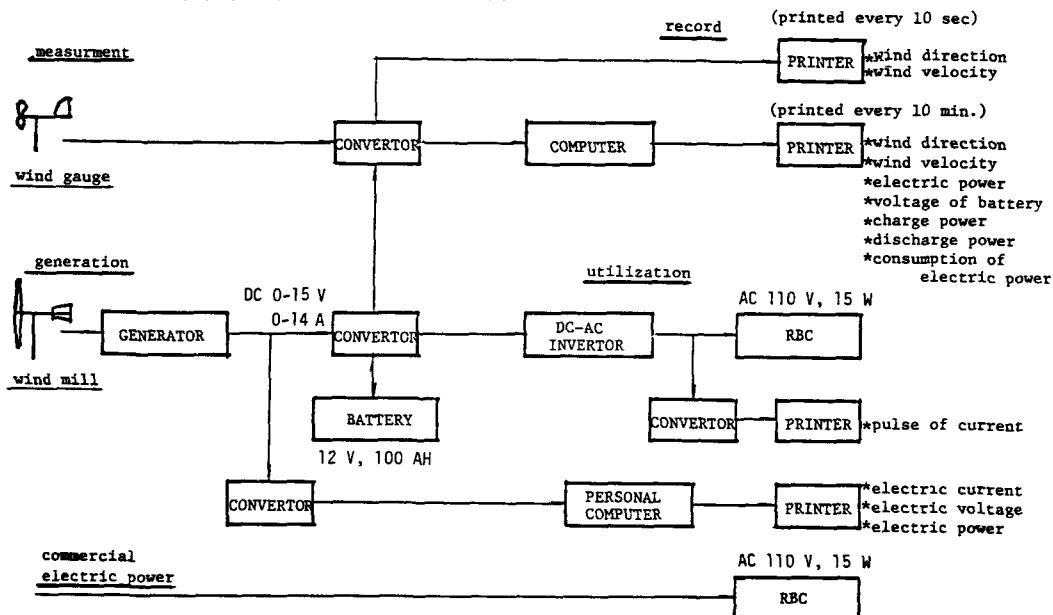


Fig. 1, Schematic diagram of biological wastewater treatment system using of wind energy as source of power.

3 実験装置

3.1 風力発電装置

実験に用いた風力発電装置は図-2のように、Winco-Division of Dyna Technology社製のプロペラ型 Wincharger 風車によって直流発電機の回転子を回し、直流電気を発生させる装置である。装置の仕様は表-1に示したように、最大発電電流は風速10 m/sのとき14 A (15 V、210 W)であり、風速がこれ以上になると遠心力によってガバナー・フラップが開いて風車に直結したブレーキ・ドラムを押さえ、強風による風車、発電機の破壊を防ぐようになっている。なお、このガバナー・フラップは風速が激しく変動する時に、変動を吸収する役目も果たしている。しかし逆に、停止した風車はガバナー・フラップの重さによって風速が3-4 m/sにならないと回転を始めない。

発生した直流電力は直接利用するとともに、残余は12 V、200 AHのバッテリー2台に蓄電し、発電電力が無いときに利用できるようにした。

3.2 データ収集装置

風力発電装置の近くに風向・風速計を設け、テータログに収録し、10分間平均値として風速、風向データをチャートに印字させるとともに、風力エネルギー、発電電力、バッテリーの充・放電電力、消費電力も同様に印字するようにした。

3.3 回転円板法装置

風力発電電力によって運転する廃水処理装置として表-2に示したような回転円板法装置を選んだ。円板の回転は15 Wの交流モータであるため、直流である発電電力とバッテリーからの放電電力をDC-ACインバータによって交流に変換した。回転円板法装置への原水は霞ヶ浦湖水を用い、給水ポンプは商用電力によって駆動した。

なお、同一の回転円板法装置を2台用意し、1台を商用電力によって円板を回転させ、風力発電電力による場合と比較できるようにした。

Table 1, Specifications of wind-driven generator plant.

propeller	type	2 blades
	size	diameter 1.8 m
	material	wood
	revolutions	270 - 900 rpm
generator	type	direct current, 4 poles
	max. current	14 A
	max. voltage	15 V
type of brake		governor system
range of wind velocity		3 - 10 m/s
relation between wind velocity and electric power		average wind velocity of month - electric power from converted wind energy,
		4.5 m/s - 20 kWh/m
		5.3 m/s - 26 kWh/m
		6.3 m/s - 30 kWh/m
relation between wind velocity and electric current		wind velocity - electric current,
		3 m/s - 0 A
		10 m/s - 14 A

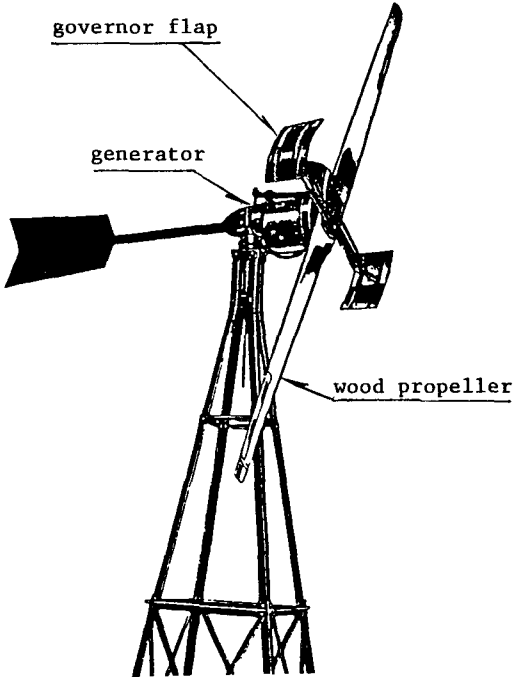


Fig. 2, Wind-driven generator plant.

Table 2, Specifications of experimental rotating biological contactor.

specifications	disk	dia. 17 cm, 24 disks
	total area	1.089 m ²
	motor	alternating current 14 W
	consumption of electric power	1.25 kWh/m ³
conditions of operation	feed water	lake water 200 mL/min, 0.288 m ³ /day
	load per unit disk area	0.264 m ³ /m ² ·day

Table 3, Average wind direction and wind velocity of a month on the lake side of Lake Kasumigaura.

date	momentary max. wind velocity (m/s)	ave. wind direction of month	ave. wind velocity of month (m/s)
1984, 5	16.6	NE	4.8
6	12.0	NE	4.2
7	19.7	E	3.5
8	9.8	E	2.8
9	10.7	ENE	4.0
10	12.8	NE	4.5
11	14.2	NE	3.4
12	12.8	NNE	3.2
1985, 1	11.2	NNE	3.1
2	13.3	NNE	4.0
3	13.7	NNE	4.5
4	17.4	NE	4.6
average	19.7	NNE	3.9

4 実験結果

4.1 風速

1984年5月から1985年4月までの1ヶ年間の、霞ヶ浦湖岸における10分間平均値の月間瞬間最大風速（m／s）および月平均

風向、月平均風速（m／s）を表－3に示した。風向・風速計は霞ヶ浦西岸の、岸から約10m、湖面から約7mの高さに設置した。この風向・風速計から得られた風向は、夏期においては太平洋からの東の、冬期においても北西の筑波おろしではなく、湖面を渡って来る北北東の風が卓越しており、年間を通しても北北東の風が卓越している。一方風速は、1984年8月は東海上に安定した太平洋高気圧のため異常に暑く、無風状態が続いたため、瞬間最大風速、月平均風速ともに他の月よりも小さい。この8月を除くと、月平均風速は3 m／s以上あり、一年間の平均風速は3.9 m／sであった。

4.2 発電電力

受風面積Aの理想的な風車を取り出すことが出来るエネルギーWは、

$$W = 1/2 \rho \cdot A \cdot V^3$$

で表わされるが、実際には風の持つエネルギーに対して、風車からの出力は小さい。両者の比を出力係数 (Power coefficient; C_p) といい、風車個々でその値が異なる。したがって、実際の風車における出力と風速との関係は、

$$W = 1/2 C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

となる。 C_p は、プロペラ型で 0.45、サボニウス型で 0.15 であり、理論的最大値は 0.593 である。なお、 ρ は空気密度 (1.2 kg/m^3) である。

実際に用いた風車の出力は、 $A = 2.5447 \text{ m}^2$ (回転直径 1.8 m) であるから、 C_p を 0.45 として、

$$W \text{ (ワット; } W) = 0.6125 V^3,$$

で、計算によって求めたものである。データロガーの印字は 10 分間の積分値を、

$$W \text{ (ワット; } W_h) = 0.6125 / 6 \cdot V^3,$$

で表示したものである。

さらに、この風力エネルギーが発電機によって電力へ変換される。図-3 に 1984 年 5 月 4 日における風速と発電電力 $E \text{ (Wh)}$ の関係を、図-4 に同じ日の風力エネルギーと発電電力量との関係を示した。

風速と発電電力の間には、

$$E \text{ (Wh)} = 0.038 V^3 - 1.03,$$

の関係が、風力エネルギーと発電電力の間には、

$$E \text{ (Wh)} = 0.32 W,$$

の関係が得られた。風速が 3 m/s 以上にならないと発電せず、発電電力は風力エネルギーの 30% 程度である。

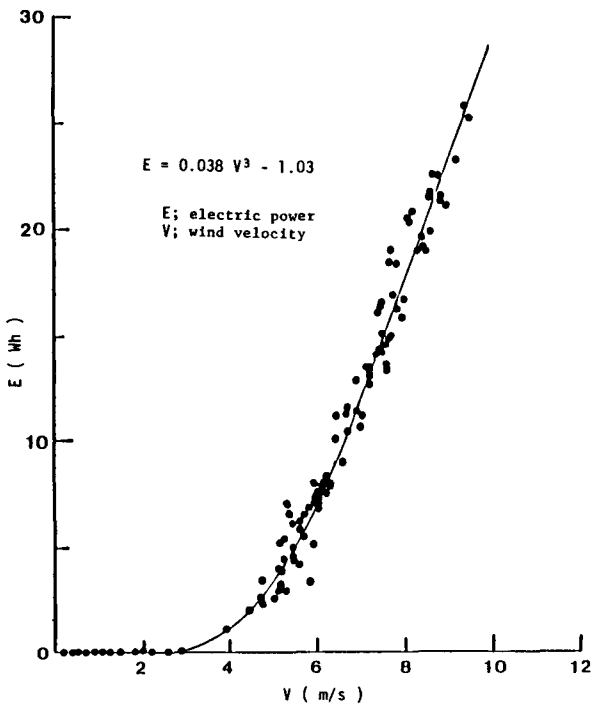


Fig. 3, Relationship between wind velocity and electric power converted from wind energy.

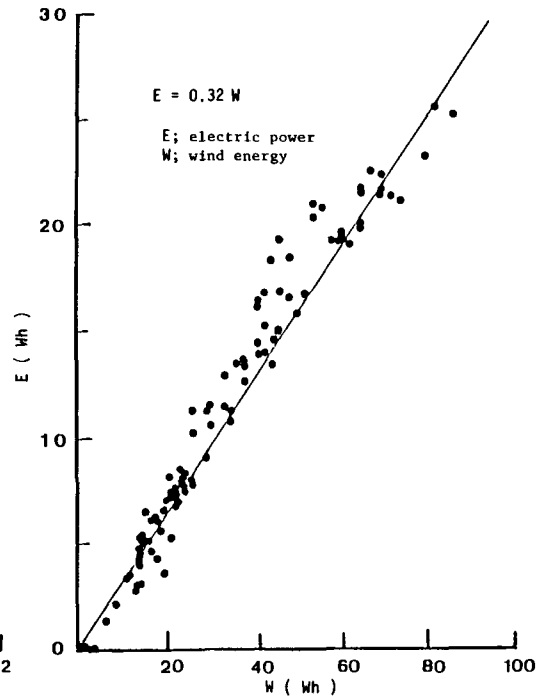


Fig. 4, Relationship between wind energy and electric power converted from wind energy.

4.3 回転円板法装置の消費電力

1984年10月から1985年4月までの7ヶ月間の風力エネルギー、発電電力、回転円板法装置における消費電力などの合計値を図-5に示した。また、表-4には発電電力によって回転円板を駆動した月別延時間、同じく発電電力と消費電力を示した。Table 4, Operation period and consumption of electric power on experimental rotating bio. contactor.

この風車の出力は7ヶ月間で412 kWhであるが、電力として取りだし得た電力は112kWhであり、発電効率は約27%であった。また、風力発電による電力で円板を回転させた延時間は、7ヶ月間で約125日であり、7ヶ月間(212日)の59%であった。

date	A (min)	B (min)	A/B (%)	C (Wh/month)	D (Wh/month)	D/A (Wh/10 min)
1984, 10	28,570	44,640	64.0	19,200	13,000	4.59
11	19,790	43,200	45.8	11,600	8,800	4.45
12	20,870	44,640	46.8	10,000	8,900	4.26
1985, 1	15,000	44,640	33.6	7,200	6,900	4.60
2	28,100	40,320	69.7	18,100	13,200	4.70
3	37,050	44,640	83.0	23,500	19,200	5.19
4	30,340	43,200	70.2	22,800	14,500	4.78
total(ave.)	179,720	305,280	(58.9)	122,400	84,600	(4.71)

A; operation period by electric power converted from wind energy,

B; operation period by commercial electric power,

C; electric power converted from wind energy,

D; consumption of electric power converted from wind energy.

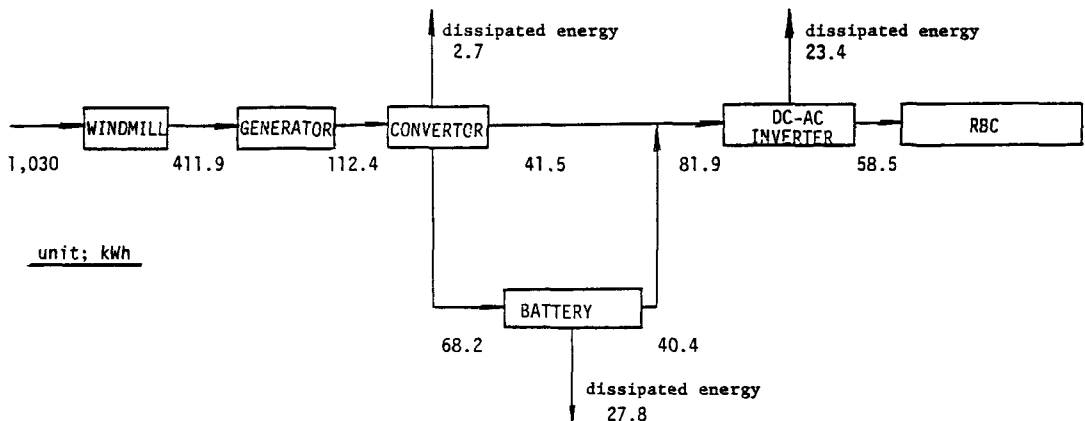


Fig. 5, Energy balance in biological wastewater treatment system using of wind energy.

5 考察

5.1 風速

一年間の平均風速 3.9 m/s が観測された霞ヶ浦臨湖実験施設は鹿島灘沿岸から約25kmの距離にあるが、間をさえぎる高い山も無く、海岸における年平均風速に近いと考えられる。図-6に1961年から1970年までの10ヶ年間の地上10mの地点における平均風速の分布(本間琢也, 1979)の内から、 3.5 m/s 以上の地点を抜粋して示した。この図からも明らかなように、平均風速が 3.5 m/s 以上の地点は海岸部と山間部に限られている。実際に風力エネルギーを利用するにあたっては事前に年間の風速変動を調査する必要があるが、風力発電装置を設けて風力エネルギーを利用できる地域は島や半島などの海岸に近い地域、あるいは山岳地域ということになる。

5.2 発電電力と消費電力

実験に用いた回転円板法装置の円板駆動モータは交流モータ(15W)であるから、直流発電機とバッテリーからの直流電気(11.5-13.5V)をDC-ACインバータによって交流電気(100-110V)に変換して利用している。このため、バッテリーでの電気エネルギーと化学エネルギーとの相互変換によって発電電力の一部が失われる。また、インバータと実験データ収集用変換器によっても発電電力の一部が失われる。

インバータでの消費電力は7.8Wであり、変換器での消費電力は0.9Wである。したがって、図-5において、発電電力の内、バッテリーで24.7%、インバータで20.8%、変換器で2.4%が失われている。実際に

円板の駆動のために利用されたのは発電電力の52%に過ぎない。回転円板の駆動に直流モーターを使用すれば、インバータでの消費は避けられるし、データの収集用変換器も使用しなければ、発電電力の75.3%を円板の駆動に利用することが可能となる。

一方、エネルギーの原単位からみると、図-5において58.5 kWhの電力で、表-4のように円板を179,720 分間駆動し、湖水35.9㎡を処理したわけであるから、単位処理当たりの消費電力は1.62 kWh/㎡となる。表-5に回転円板法による都市下水処理プラントのエネルギー原単位を示したが（日本下水道協会、1985）、平均的なエネルギー原単位は0.32 kWh/㎡（円板駆動と給水ポンプ駆動の両者）である。実験の場合のエネルギー原単位は都市下水処理の場合の約5倍である。また実験用回転円板法装置の水量負荷は264 L/㎡・min であり、都市下水処理の場合の2倍以上である。しかし、廃水処理の規模が小さくなればなるほどエネルギー原単位が大きくなる。いまかりに、エネルギー原単位を1 kWh/㎡ とすると、図-5の例では、7ヶ月間で利用

できる電力量84.6 kWh であるから、これによって約85 ㎡の廃水を処理できることになる。7ヶ月は212日であるから、平均的に1日約0.4 ㎡の廃水量となり、ほぼ1日1人分の廃水を処理するための動力をまかなうことが出来ることになる。こ

れはあくまでも月間あるいは年間を通しての平均値についてである。表-3に示したように、風速は年間を通じて変動しており、月間においても変動があるため、実際に風力発電電力を利用にあたってはバッテリーに貯留して使用する電力量の平均化を図るとともに商用電力によるバックアップも必要である。

5.3 回転円板法装置の運転状況

風力発電電力によって円板を駆動した時間は7ヶ月間の内の60%であったため、円板の回転停止時に円板

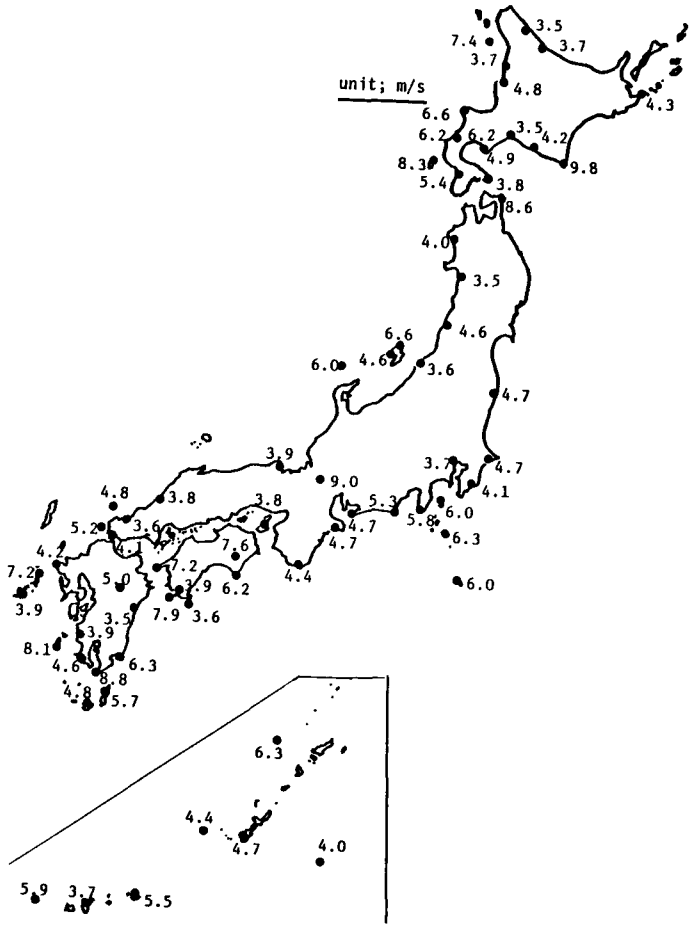


Fig. 6, Regions above 3.5 m/s of average wind velocity of ten years (Takuya HONMA, 1979).

Table 5, Consumption of electric power per unit flow of sewage treated by rotating biological contactor (JSWA, 1985).

sewage treatment plant	design sewage flow (m ³ /day)	design sewage flow per unit area of rotating disk (L/m ² ·day)	treated sewage flow (m ³ /day)	consumption of electric power per unit sewage flow (kWh/m ³)
Bachijyo	28,000	138	20,100	0.314
Koyasan	4,000	62	3,795	0.248
Cyuo	31,000	99	30,041	0.159
Yunishigawa	800	40	500	0.660
Shihi	1,150	32	848	0.156
Miyahara	850	34	634	0.378
Average	-	68	-	0.319

表面に付着した微生物が乾燥し、乾燥した側は軽くなるため次の停止時においても同じ側が乾燥する。これが繰り返されるため、表-6のように付着微生物量は商用電力による駆動の場合の2/5でいどとなった。このため、表-7のように処理水の水質も、商用電力による場合よりも悪くなっている。このことから、風力発電電力のみで廃水処理をする場合には回転円板法装置は不向きであり、無風状態でも付着生物が水中に浸っている上向流式の浸漬ろ床法などの方が望ましい。

なお、表-8に示めたような運転条件によって回転円板法と浸漬ろ床法のパイロットプラントを運転して霞ヶ浦の湖水の浄化実験を行なった。1985年3月から1985年6月までの実験で得られた処理水のSS、COD、TODとその除去率の平均値を表-9に示した。表-9において、SSは50%前後の除去率を示しているが、CODとTODの除去率は20%程度以下であり、とくに溶解性のCODはほとんど除去されていない。この結果は表-7の結果とほぼ同様であり、富栄養化湖水の生物処理法は溶解性の有機物質の除去にはあまり有効でないようである。

6 おわりに

風力発電電力による廃水処理システムの可能性を実験用の小型回転円板法装置を用いて検討した。発電電力と負荷電力をうまくバランスさせれば、風速が年間平均4 m/s での所では、風力発電電力のみでも、浄化槽などの必要エネルギーを十分まかなえることが示唆された。しかし、付着膜法の動力として利用する場合、付着微生物が常に水中に浸っている処理法を選択する必要がある。

Table 6, Characteristics of sludge on surface of rotating disk of experimental rotating biological contactor.

		SS (g/m ²)	VSS	TOD	VSS/SS (%)
operation by electric power (wind energy)	1st disk from input	11.8	3.8	1.3	31.0
	1st disk from output	3.3	1.4	0.8	42.4
	average	7.5	2.6	1.1	34.7
	settled sludge in 7 month (g)	(27.1)	(5.4)	(3.4)	(-)
operation by electric power (commercial)	1st disk from input	37.1	9.7	6.3	26.2
	1st disk from output	13.5	4.0	3.3	29.8
	average	25.3	6.9	4.8	27.3
	settled sludge in 7 month (g)	(39.8)	(6.9)	(5.6)	(-)

Table 7, Qualities of lake water and effluent of experimental rotating biological contactor.

date	influent		effluent			
	TOD	COD	wind energy		commercial	
			TOD	COD	TOD	COD
1985, 4, 5	10.5	4.5	7.0	4.2	7.0	3.5
4, 9	12.5	4.8	10.5	4.8	10.0	4.6
4, 15	15.5	5.4	12.0	4.5	10.0	4.3
4, 23	15.0	5.5	13.5	4.8	11.0	4.6
4, 30	15.0	5.0	14.5	4.8	12.0	4.0

Table 8, Conditions of operation of wastewater treatment pilot plant.

pilot plant	conditions of operation
rotating biological contactor	
influent flow	5 m ³ /day
flow per unit area of disk	100 L/m ² ·day
settling time	2.4 hr
subaqueous filter with honeycomb	
influent flow	5 m ³ /day
flow per unit area of disk	100 L/m ² ·day
settling time	2.4 hr

Table 9, SS, COD and TOD of lake water and effluent on wastewater treatment pilot plant.

pilot plant	SS			COD			TOD		
	concentration		removal (%)	concentration		removal (%)	concentration		removal (%)
	infl.	effl.		infl.	effl.		infl.	effl.	
rotating biological contactor									
total	13.7	8.2	40.1	6.0	5.3	11.7	11.1	9.2	17.1
soluble	-	-	-	4.2	4.1	2.4	9.2	8.1	12.0
subaqueous filter									
total	13.7	4.6	66.4	6.0	4.7	21.7	11.1	8.4	24.3
soluble	-	-	-	4.2	4.0	4.8	9.2	6.8	26.1

(引用文献)

- (1). 本間琢也編；風力エネルギー読本、オーム社、1979.
- (2). 日本下水道協会編；下水道統計、日本下水道協会、1985.