

B-16 地球温暖化抑制のための CH₄、N₂O の対策技術開発と評価に関する研究

(6) 東北アジア地域における CH₄、N₂O 抑制のための汚水・汚泥の適正処理技術開発に関する研究

- ① 土壌トレンチ、湿地帯、酸化池、水生植物植栽地等のエコエンジニアリングシステムを用いた CH₄、N₂O 発生抑制技術開発

研究代表者 地域環境研究グループ 稲森悠平

環境庁国立環境研究所

地域環境研究グループ 開発途上国環境改善（水質）研究チーム 稲森悠平
水落元之
桂 萍 (EFF)

平成 10 年～11 年度合計予算額 5,114 千円
(平成 11 年度予算額 2,609 千円)

[要旨] 中国では急速な経済発展に伴い、生活系、事業場系排水量も急増しているが、これらの多くの部分が上水源などの公共用水域に未処理放流され、深刻な水質汚濁問題が引き起こされている。これらの対策として排水処理技術は重要な位置づけとなっているが、経済状況等の社会状況を考慮すると中国に普及しうる技術としては「低コスト」、「低エネルギー消費」、「易メンテナンス」であることが非常に重要である。

人工湿地 (Constructed wetland) 処理システムは処理に必要な敷地面積は大きくなるものの、極めて「低コスト」、「低エネルギー消費」、「易メンテナンス」であり、中国では気候帯に関係なく比較的広範囲で用いられている排水処理手法であるとともに、エコエンジニアリングとして重要な手法でもある。しかし、処理手法の原理上、処理に伴う温室効果ガス (GHG) としてのメタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) の排出が考えられ、その排出ポテンシャルは比較的大きなものと予想されるものの、これらに関する知見は極めて乏しい。

本研究では人工湿地処理手法について、運転管理操作条件と CH₄、N₂O 排出の関係を明らかにし、それらの抑制手法と処理の効率化を図るために、既往文献から運転操作条件と処理性能の関係を整理し、現存する人工湿地処理システムの改善や新しい技術開発のための包括的な研究の枠組みを提案した。次に中国山東省膠南市 (ジャオナン市) の生活系、事業場系排水を処理する人工湿地を用いた処理現場で実態調査を行い、CH₄、N₂O 排出量と処理性能の関係の季節的变化について検討した。その結果、汚染物質の除去効率と CH₄、N₂O の発生が、季節的变化と緊密な関係にあることが明らかになった。BOD 除去量は人工湿地処理システムからの CH₄、N₂O 排出量と比較的明確な関係があり、これらの事実を基に処理施設の通常の運転指標である、流入水量、流入水質、処理水質等から CH₄、N₂O 排出量を予測することの可能性が示された。

これらの検討結果をもとに CH₄、N₂O 排出抑制と処理効率の向上を図るための運転手法開発のために人工湿地処理システムに代表的な自由水面方式および地下浸透水方式についてモデル装置を試作し、実証化試験を開始した。

[キーワード] エコエンジニアリング、人工湿地、CH₄、N₂O、自由水面方式、地下浸透水方式

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) によれば、21 世紀における温室効果ガス (GHG) 増加による温度上昇割合は年間 0.03℃と推測され、その結果として 21 世紀の末までに大気の色度は 3℃上昇すると考えられている。このような急激な温度上昇は人間生活に影響を与えるばかりでなく、地球のエコシステムにも多大なる影響を与えることとなる。したがって、GHG 排出抑制のための技術および社会システムの構築は焦眉の急となっている。

GHG のうち、亜酸化窒素 (N₂O)、メタン (CH₄) の一分子当たりの赤外線吸収量は二酸化炭素 (CO₂) に比べそれぞれ 200-250 倍、21 倍であり、一分子当たりの温度上昇への寄与が非常に大きいのが特徴である。1980 年以降の少なくとも 10 年間で N₂O、CH₄ の温度上昇への寄

与率は、1980年以前の約100年間の平均である18%から、24%へと急増している。したがって、温度上昇に対するCH₄、N₂Oの寄与は今後益々大きくなるものと考えられ、CH₄、N₂Oの抑制対策が極めて重要となることは論を待たない。

CH₄、N₂Oの全地球レベルでの排出量に占める排水処理プロセスからの排出量の割合はそれぞれ、7%および19%と概算されているが、その推計精度は極めて低いのが現状である。

大きな人口を抱える中国は、現在の推計で国として地球全体で排出されるGHGの約10%を排出している。一方、生活系、事業場排水の公共用水域等への未処理放流により深刻な水質汚濁問題にも直面しており、排水処理施設の整備が進められている。したがって、排水処理の普及に伴うCH₄、N₂O排出の増加が懸念され、これらの対策が重要となる可能性があり、GHGの排出抑制を考慮した排水処理技術の開発が望まれる。

中国には479以上の都市と、2,000を越える市町村がある。これらの都市や町から排出される都市排水の大部分が厳しい予算上の制約のため、効果的な処理をなされていない。人工湿地処理システムは建設コストが安く、エネルギー消費が少なく、メンテナンスが容易なため、中国にとって極めて有望なエコエンジニアリングシステムと言え、中国で多くみられる広大な田園地帯での有効な選択肢となる。さらに、人工湿地処理システムは多種の動物や植物の生活空間を供給する自然湿地の回復のための補的手段となりうる。

中国における最初の人口湿地処理システムは、遼寧省瀋陽の南西郊外で1982年に建設された。第7次五カ年計画の間に、幾つかの試験段階の人工湿地を含む自然活用型処理システムが、中国国家環境保護局が主導する研究プロジェクトとして実施された。現在、様々なタイプの人工湿地・混合湿地処理システム、その他の土地処理システムが、中国の様々な気候帯域で運転中か建設中である。Table 1には中国において稼働中の代表的な人工湿地処理システムのリストと概要を示した。これらのプロジェクトのうち多くは人工湿地が、湿地帯として相当程度の高い緩衝能力をもち、広範の水と汚染物質を蓄え込むことができるという優れた性能をもち、将来的にも極めて有望なシステムであることを示している。

人工湿地処理システムの継続的な運転はシステム内へ固形物を滞留させないという意味で流入する有機物や窒素の効率的なCH₄、N₂Oを含むガス状物質への転換に依存しており、原理的にGHGであるCH₄、N₂Oは排出する。しかし、人工湿地処理システムにおけるCH₄、N₂O排出に関する知見は極めて少なく、また、抑制手法に関する研究もなく、人工湿地処理システムにおけるCH₄、N₂O排出量および排出メカニズムと排出抑制技術の開発は非常に重要な課題である。

2. GHG排出抑制型人工湿地処理システムの構築に関する研究の最適化

2.1 人工湿地処理システムにおける既往研究の整理

現在用いられている人工湿地処理システムはシステム内の水面高により大きく自由水面方式(FWS)と地下浸透水方式(SF)に大別される。流入する排水は嫌気・好気それぞれの条件化で処理される。人工湿地処理システムでは負荷条件等により湿地内の嫌気および好気の状態は変化するものの、汚濁物質の処理には植栽された植物の根圏部への酸素供給が重要な役割を果たす。湿地内の嫌気ゾーンは排水流入部に形成されやすいが、この部分ではCH₄の生成、排出が起こる。好気ゾーンあるいは根圏部では硝化反応が進行し、隣接する嫌気ゾーンで脱窒反応が進行し、いずれの反応過程においてもN₂Oの生成、排出が起きる。湿地のようなエコシステム内ではN₂Oの生成は脱窒反応より硝化反応に起因すると考えられている。また、好気条件化においても土壌粒子内部では微視的に微好気あるいは嫌気ゾーンが形成され、好気ゾーンにおいても脱窒反応が進行していく可能性がある。

既往研究による自然湿地および水田からのCH₄、N₂O排出の検討結果から、人工湿地処理システムにおいても土壌水分、土壌空隙率、土壌の酸化還元電位、溶解性炭素量、溶解性窒素量、pHと土壌温度といった要素がCH₄、N₂Oの生成、排出に大きく影響するものと考えられた。これらの要素の中では、酸化還元電位がもっとも重要である。CH₄は嫌気条件で生成するため、排出抑制のためには酸化還元電位を高く設定すれば良いが、そのような条件下では硝化反応が促進されN₂Oの生成、排出の増加が予想される。更に酸化還元電位を高くし、

Table 1 Constructed Wetland Systems Completed in China

Site	Feed	Capacity (m ³ d ⁻¹)	Area (m ²)	Comments/ Special Feature	Ref.
Tianjin City	Settled domestic wastewater	1,800	200,000	Consists of natural wetland, FWS Wetland, reed bed SF wetland and stabilization pond	5,7,8
Dagang Oil Field in Tianjin	Settled domestic wastewater	2,000	-	Infiltration type wetland using salty sea sandy soil	5
Qinghe District of Beijing	Effluent of stabilization pond (domestic wastewater)	120	-	Consists of reed bed SF wetland and fish pond	5
Changping County of Beijing	Settled Domestic wastewater	2,000	10,000	Consists of reed bed SF wetland and fish pond	5
Yanshan, Beijing	Effluent from oxidation ditch (Petrochemical Wastewater)	4,000	270,000	Consists of reed bed SF wetland and stabilization pond, using mountain land	5
Weifang City, Shandong Province	Settled Domestic Wastewater	180,000	3,000,000	Using Coastal Saline-alkali Soil	5
Zhucheng City, Shandong Province	Settled Domestic Wastewater	30,000	43,000	Consists of stabilization Pond and reed bed SF wetland	5
Jiaonan City, Shandong Province	Settled Domestic Wastewater	60,000	495,000	Consists of 11 FWS wetlands and a sluice pond, using coastal tide zone	-
Jiaozhou City, Shandong Province	Mixed wastewater (1/3 domestic + 2/3 industrial)	30,000	1,000,000	Consist of stabilization pond and FWS wetland	10
Baimikeng of Shenzhen City, Guangdong province	Screened domestic wastewater	3,000	8,400	Consists of gravel bed wetland and fish pond	9
Leping of Shanshui City	Effluent from anaerobic hydrolysis pond (Pig raising farm wastewater)	80	500	Consists of gravel bed wetland and fish pond	9
Yantian Industry Area of Shenzhen City	Effluent from hydrolysis or aquatic pond (Industrial wastewater)	1,000	1,200	Consists of up-flow anaerobic hydrolysis pond, aquatic plant pond and gravel wetland	9
Conghua County of Guangzhou	Effluent form hydrolysis pond (Domestic wastewater)	500	200	Consists of upflow anaerobic hydrolysis pond and gravel wetland	9
Baiyan coal mine of Sichuan Province	Mixed wastewater of acidic pit and domestic wastewater	1,000	-	Consists of stabilization pond and gravel bed wetland	11

より好気条件を強くすれば、更に CH_4 の排出は抑制され、 N_2O の排出自体は減少する可能性はあるものの脱窒反応が阻害され、排水からの窒素除去効率が低くなるものと予想される。このように CH_4 、 N_2O の生成と排出抑制の運転条件は相反したり、相反しないとしても排水処理としての本来目的である、窒素除去等に影響が出る可能性があり、このような現象は通常のエコシステム内でも観測される。

植物は、 CH_4 、 N_2O 生成、排出に影響する重要なファクターのひとつである。水生植物は根圏を通じて酸素を土壌へと運び、同時に、 N_2O の生成、排出のための極めて重要な場を提供する。また、植物によっては窒素固定を行う。したがって、植物の種類の違いがガス発生に大きく影響するものと考えられる。また、人工湿地の土壌構成、植物の根の構造とその酸素運搬能力もまたガス発生に係る微生物活動に大きな影響を与えるものと考えられる。

このような背景から本研究では既存の代表的な 2 種類の人工湿地の運転方法に注目して、これらからの CH_4 、 N_2O 排出量と生成、排出メカニズムを明らかにし、これらの結果をもとに人工湿地処理システムにおける CH_4 、 N_2O 排出抑制手法の最適化を図ることを目的とする。

2. 2 研究構成の最適化

本研究の構成はおおきく 2 つに大別される。一つはモデル人工湿地処理システムを用いたシミュレーション実験であり、研究の流れは Fig.1 に示したように 3 段階に分けられる。第 1 段階として、代表的な 2 方式の人工湿地処理システムについて水質汚濁物質の処理特性および CH_4 、 N_2O 排出特性を運転操作条件との関係で比較検討する。第 2 段階ではこれらの成果を基にシステムにおける CH_4 、 N_2O 生成、排出メカニズムを運転操作条件との関係で明らかにし、システムで変更可能な操作条件を抽出するとともにシステムに最適な植物の選定を行い、それらをモデルシステムにより検証する。これらの段階に沿って検討を行うことによって、最終的に上記の成果を基に CH_4 、 N_2O 排出抑制型人工湿地処理システムの実施設計に資する提案が可能となる。

2 番目の研究構成として中国における実際の人工湿地処理システムで処理性能と CH_4 、 N_2O 排出の関係をシステムの運転に関わる種々のパラメーターとともに調査する。本研究においては実験サイトとして中国山東省の膠南市（ジャオナン市）の人工湿地処理システムを選定した。

2. 3 モデル人工湿地処理システムの設計、構築

モデルシステムの設計、構築にあたり、実際のシステムへのフィードバックを考慮し、中国における人工湿地処理システムの設計指針を参考にした。Table 1 に示したように中国における人工湿地処理システムの方式は SF と FWS の基本的な二種からなり、その大部分が葦を植生とした SF である。設計に当たっては中国における設計指針および文献等からの情報を取り入れ、これらの典型的な変数を用いて、Fig.2 に示す設計フローおよび手順にしたがって SF、FWS のそれぞれの方式についてモデルシステムを設計、構築した。

人工湿地処理システム設計に関して最も重要なポイントは、最も厳しい条件を仮定するということである。まず、湿地処理は有機汚染物質、窒素、リンの除去が達成される必要がある。すべての人工湿地処理システムは付着生物反応システムと考えることが可能で処理特性は BOD および窒素の除去に対する押し出し流れの一次反応式で表すことが可能である。

処理に関わる生物学的反応は温度に依存しているため、装置設計に当たっては水温の変化を考慮する必要があり、冬期の非常に寒い極限状態で処理水質が確保されるような設計でなくてはならない。本設計では植物の選択、流入負荷、そして流入パターンなどの設計諸元は主として文献から引用した。

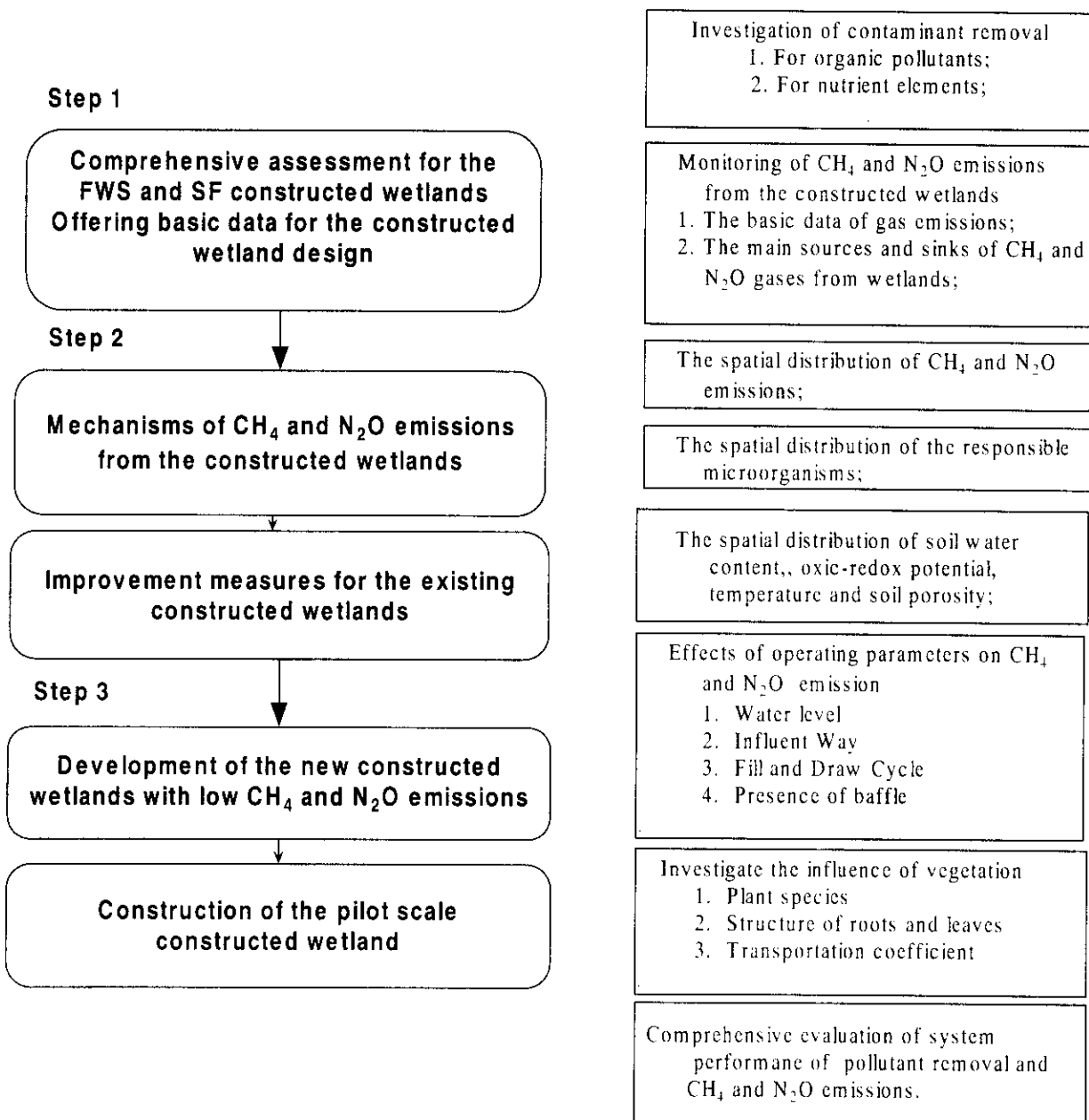
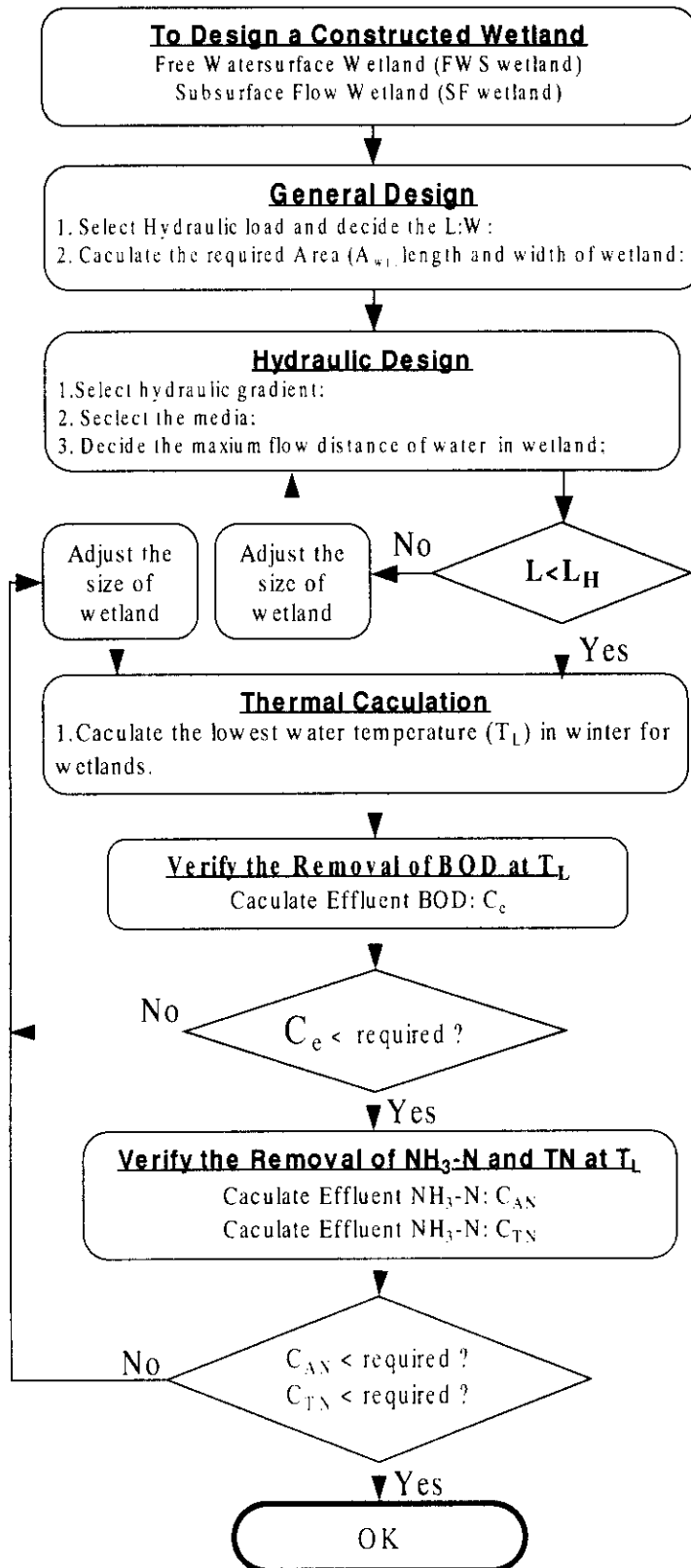


Figure1 Framework for the lab-scale research



Hydraulic Load

FWS: 200 m³/ha d; SF: 600 m³/ha d

L:W

Usually 10:1

1% ~8%

$$L_H = \left(\frac{A_s \cdot y^{2.667} m^{0.5} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right)^{0.6667}$$

FWS: Under the condition of before ice foramation, after ice formation;

SF: Don't need to consider ice formation;

Caculate Effluent BOD

$$\frac{C_e}{C_0} = A \cdot \exp\left(-\frac{0.7 \cdot K_T \cdot A_s^{1.75} \cdot L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q}\right)$$

K_T is decided by T and type of wetland

A_s is decided by the type of wetland

Caculate Effluent $\text{NH}_3\text{-N}$

$$\frac{C_{AN}}{C_0} = \exp\left(-\frac{K_T \cdot A_s \cdot y \cdot n}{Q}\right)$$

K_T is decided by T and type of wetland

A_s is decided by the type of wetland

Caculate Effluent T-N

$$C_{TN} = (C_{0-N} - C_{AN}) + C_{AN} \cdot \exp\left(-\frac{K_T \cdot A_s \cdot y \cdot n}{Q}\right)$$

K_T is decided by T and type of wetland

A_s is decided by the type of wetland

Figure 2. Procedure for wetland design

3. 湿地処理システムからの CH₄、N₂O 排出に関する現場調査

3. 1 方法

中国山東省膠南市（ジャオナン市）の生活系、事業場系排水を合わせて処理する SF 方式の人工湿地処理システムで調査を行った。本システムは内湾の干拓地を利用して、1998 年夏に建設された。本システムは将来的な農地利用を考え、干拓地の涵養という側面を有している。処理水は直接、黄海へ放流されている。150×30 m²のユニットが 11 あり、標準的な HRT は 6 日であり、60,000 m³/d の処理能力有する。アシ、フトイ、アオウキクサが植生として用いられており、カエル、ジュズバト、サンカノゴイのような動物も生息し、ビオトープとしても重要である。Fig.3 に調査を行った人工湿地処理システムの概略を示す。Table 2 に流入水の水質を示した。現在は食品加工を中心とする事業場系排水と生活系排水が混合して流入しているが、将来的には事業場系排水への規制が強まることから生活系排水が主となる予定である。

BOD、COD、各イオン態窒素および CH₄、N₂O のサンプリングは排水処理システムの 1 ユニット内の流下方向に沿って数カ所で月 1 回行った。なお、ガスのサンプリングは湿地表面にチャンバーを設置するクローズドチャンバー法で行った。水質項目の分析は Standard Method に準拠して行い、CH₄、N₂O はそれぞれ FID および ECD 付きガスクロマトグラフで分析した。

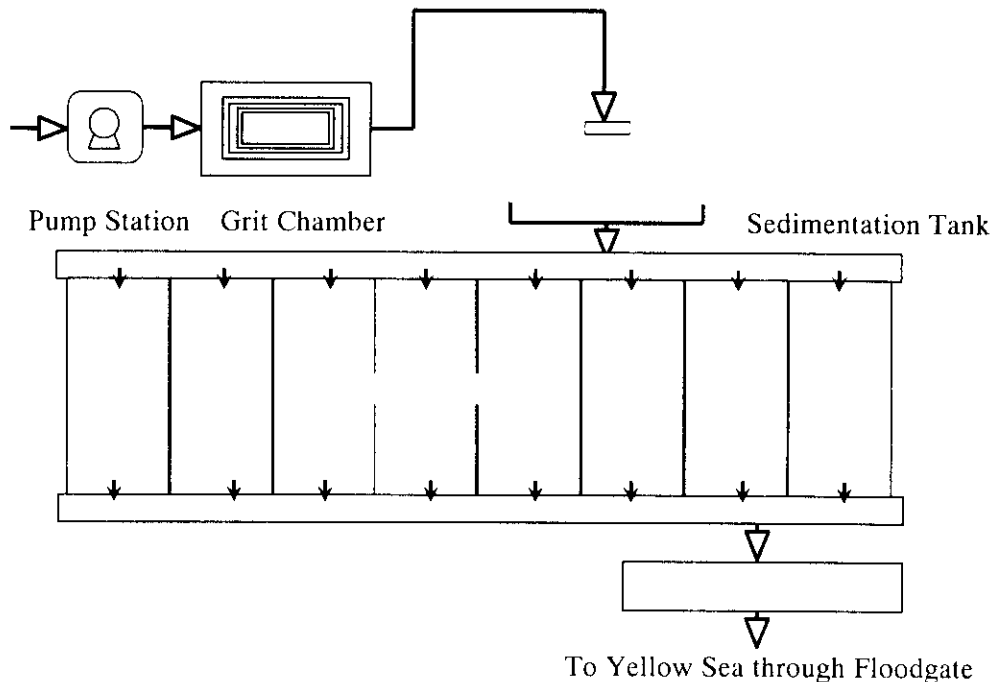


Figure 3. Schematic diagram of constructed wetland in Jiaonan City of China

Table 2 Quality of wastewater used in the experiment

Items	T	BOD ₅ (mg·L ⁻¹)	COD (mg·L ⁻¹)	T-N (mg·L ⁻¹)	NH ₃ -N (mg·L ⁻¹)	T-P (mg·L ⁻¹)
Conc.	5 28.5	355~ 477	628~ 851	23.22~ 28.78	12.21~ 18.21	3.37~ 4.75

3. 2 結果および考察

3. 2. 1 処理特性の季節的变化

Fig.4 に示したように、秋期と冬期にかけて水温が 23.5℃から 0.6℃に低下し、BOD₅、NH₃-N 除去効率はそれに対応して低下した。水温の低下による処理効率の低下は微生物と緊密な関係があり、低温で活動が不活発になったことが、BOD₅ と NH₃-N 除去率の低下の原因となっている。T-N、T-P 除去率には水温低下による影響が認められなかったが、これらの除去に土壌表面等への物理的な吸着が影響しているためと考えられた。

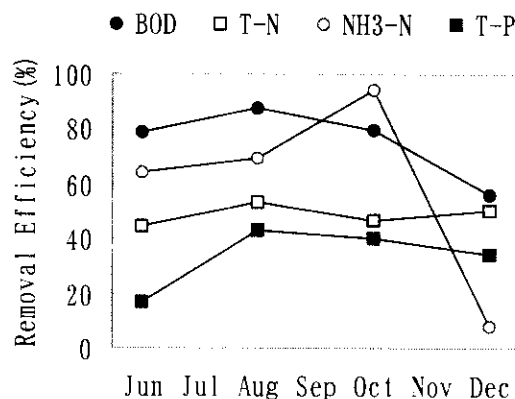


Fig. 4 Seasonal change of pollutant removal

3. 2. 2 CH₄、N₂O 排出特性の季節的变化

Fig.5 に示されているように、夏の CH₄ 排出量は秋や冬に比べて高い。しかし、N₂O 発生は正反対の傾向を示しており、夏にはマイナス、つまり吸収源として機能している。これは、通常的人工湿地処理システムでは CH₄ と N₂O の排出抑制の両立が非常に困難であることを示している。この CH₄ と N₂O のトレードオフの関係は、水田、畑地等の土壌システムにおいて観測されている。湿地には好気と嫌気条件が存在するが、土壌酸化還元電位値が 150mv 以下の嫌気性条件が CH₄ の生成にとって重要であるが、400mv 以上、もしくは 200~300mv の間で N₂O の生成が大きくなるとされている。また、0mv 以下の嫌気性条件下では N₂O の生成は減少する事が知られている。

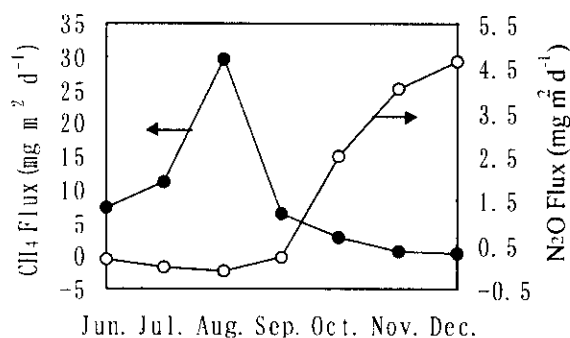


Fig. 5 Seasonal change of N₂O and CH₄

Fig.6 に示されているように、BOD 除去量が増加するとともに、CH₄ 排出量は増加するが、反対に N₂O 排出量は減少する。水面や植物を通じての酸素供給と有機体分解を通じての酸素消費が、土壌の好気性条件を決定することから図中の CH₄ 排出がゼロになるポイントが酸素の供給と消費のバランスするポイントと見なせる。Fig.6 から BOD 除去量として 220mgL⁻¹ がバランスポイントとして得られる。ここで BOD 除去量は BOD 負荷量と考えられることから負荷量の増加に伴い、土壌の嫌気化が進むこ

3. 2. 3 BOD 除去量のガス発生への影響

Fig.6 に示されているように、BOD 除去量が増加するとともに、CH₄ 排出量は増加するが、反対に N₂O 排出量は減少する。水面や植物を通じての酸素供給と有機体分解を通じての酸素消費が、土壌の好気性条件を決定することから図中の CH₄ 排出がゼロになるポイントが酸素の供給と消費のバランスするポイントと見なせる。Fig.6 から BOD 除去量として 220mgL⁻¹ がバランスポイントとして得られる。ここで BOD 除去量は BOD 負荷量と考えられることから負荷量の増加に伴い、土壌の嫌気化が進むこ

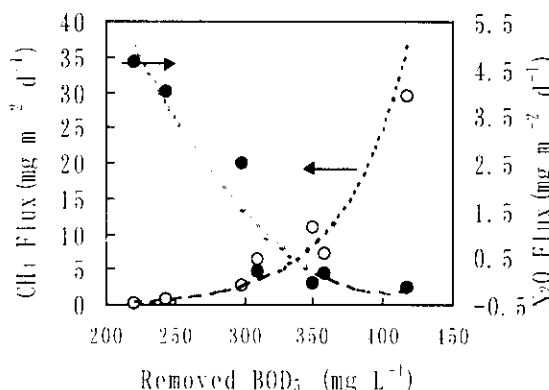


Fig 6 Influence of removed BOD₅ on N₂O and CH₄ emissions

ととなり、CH₄ 排出量が増加し、反対に N₂O 排出量は減少する。これらの結果から通常の運転条件下では、BOD 除去量が CH₄、N₂O 排出量推計の指標となりうる可能性が示唆された。

4. まとめ

人工湿地処理システムは建設コストが低廉で、エネルギー消費が極めて少なくかつ、メンテナンスが容易であるために、中国ばかりでなく多くの開発途上国で現在は勿論のこと将来にわたって採用されていく処理システムであると考えられる。しかしながら汚濁物質の分解除去に関する反応が非常に緩慢に進行するために、主要な GHG である CH₄、N₂O の排出が原理的に考えら、その排出ポテンシャルも大きなものと予想される。しかし、人工湿地処理における GHG の排出に関する報告は極めて少ない。したがって本研究では、CH₄、N₂O 排出抑制型の人工湿地処理システムを開発することを目的として湿地処理に関する既往研究、自然湿地、土壌あるいは水田からの CH₄、N₂O 排出に関する既往研究の解析を行い、研究開発手法の最適化を図ると共に、中国の設計指針を基にモデルシステムを設計、構築したが、中国の指針では環境条件の与え方が不十分で合ったために、既往研究等を基に設計手法の開発、提案を行った。さらに、中国山東省膠南市（ジャオナン市）の生活系、事業場系排水を合わせて処理する SF 方式の人工湿地処理システムで調査を行った。その結果、BOD 除去量（BOD 負荷量とすることも可能）と CH₄、N₂O 排出の季節変化の間に緊密な関係が認められ、BOD 除去量を指標とした CH₄、N₂O 排出量推計の可能性が示された。

5. 参考文献

- 1 J.T. Houghton, Climate change: The IPCC Scientific Assessment, Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- 2 P.J. Crutzen, 1994, Global budget for non-CO₂ greenhouse gases, *Environ. Monitor. Assess.*, 31:313
- 3 J.T. Houghton, L.G. Meira Filho et al., Climate change 1995, The science of climate change: The second assessment report of IPCC on climate change, Cambridge, Cambridge University Press, 1996
- 4 Zhiping Zhang, 1998, Introduction of global emissions of greenhouse gases, *Chinese Journal of Ecology*, 17(1):73 (In Chinese)
- 5 Xianfa Li, Chuncai Jiang et al., 1994, The constructed wetland systems for water pollution control in North China, IN: ICWS's 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 121-128, Guangzhou, China
- 6 Tieheng Sun and Ziqing Qu, 1994, Strategy for continuous development of ecological engineering land treatment systems in China, IN: ICWS's 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 48-57, Guangzhou, China
- 7 NEPA of China, Systemic study on constructed wetland for municipal wastewater treatment, Beijing: Science Press, 1992 (In Chinese)

- 8 Zhenmin Gao et al., Handbook on land treatment system design for wastewater treatment, Beijing, Standard Press, 1990 (In Chinese)
- 9 Junshan Wang, Xinde Cai, Huhua Chen et al., 1994, Analysis of the configuration and treatment effect of constructed wetland for different wastewater in south China, IN: ICWS's 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Guangzhou, China
- 10 Baozhen Wang, Ailin Dai, Derong Wang et al., 1994, Performance of a full scale Pond-land treatment system, IN: ICWS's 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Guangzhou, China
- 11 Shida Huang, Youqi Yang, Quan Long et al., 1994, Design and construction of constructed wetland from Baiyan coal-mine, IN: ICWS's 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Guangzhou, China
- 12 H.U.Neue, R.Wassmann, R.S. Lantin et al., 1996, Factors affecting methane emissions from rice fields, *Atmospheric Environment*, 30(10/11), 1751-1754
- 13 Hiroki Itokawa, Keisuke Hanaki and Tomonori Matsuo, 1996, Nitrous oxide emission during nitrification and denitrification in a full-scale night soil treatment plant, *Wat.Sci. Tech.*, 34(1-2):277-284
- 14 H. Zheng, K. Hanaki and T. Matsuo, 1994, Production of nitrous oxide gas during nitrification of wastewater, *Was. Sci.Tech.* 30(6):133-141
- 15 Naohiro Yoshida, 1988, ¹⁵N-depleted N₂O as a product of nitrification, *Nature*, 335(6), 528-529
- 16 U.Skiba, K.J. Hargreaves et al., 1992, Fluxes of Nitric and Nitrous oxide from agricultural soils in a cool temperature climate, *Atmos. Environ.*, 26A(14):2477-2488
- 17 Frank C. Thornton and Ralph J. Valente, 1996, Soil Emissions of Nitric oxide and nitrous oxide from no-till corn, *Soil. Sci.Am.J.*, 60:1127-1133
- 18 Kerstin Robertson, 1994, Nitrous Oxide emissions in relation to soil factors at low to intermediate moisture levels, *J. Environ. Qual.*, 23:805-809
- 19 G. Philip and James M. Tiedje, 1983, Denitrification and nitrous oxide production in successional and old growth Michigan forests, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 48:383-389
- 20 Patrick H. Masscheleyn, Ronald D. DeLaune et al., Methane and nitrous oxide emissions from laboratory measurements of rice soil suspension: Effect of soil oxidation-reduction status, *Chemosphere*, 26(1-4), 251-260
- 21 K.Haider, A. Mosier et al., 1987, The effect of growing plants on denitrification at high soil nitrate concentrations, *Soil. Sci.Soc.Am.J.*, 51:97-102
- 22 M.S.Coyne, a.Villalba et al., 1995, Nitrous oxide loss from poultry manure-amended soil after rain, *J. Environ. Qual.*, 24:1091-1096
- 23 W. Seiler, A.Holzappel et al., 1984, Methane emissions from Rice Paddies, *J. Atmos.*

Chem., 1:241-268

- 24 S.C. Reed, R.W. Crites and E.J. Middelrooks, Natural Systems for Waste Management and Treatment, New York: McGraw-Hill, Inc.,1995
- 25 D.A. Hammer, Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Chelsea: Lewis Publishers, Inc., 1989
- 26 H. Flessa, P. Dorsch et al., 1996, Influence of Cattle wastes on nitrous oxide and methane fluxes in pasture land, J. Environ. Qual., 25:1366-1370

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ① Ping Gui, Xia Huang, Yi Qian et al., Effect of sludge retention time on operating characteristics of submerged membrane bioreactor, The 7th Symposium on novel biological technology, 2000.1, Japan
- ② Yuhei Inamori, Ping Gui, Motoyuki Mizuochi and Hainan Kong, The emission of greenhouse gas in eco-engineering systems for Wastewater Treatment, 34th conference of Japanese Society of Water Environment, 2000.3, Japan