

下水道の長期的技術開発 に関する基礎調査

— 地球温暖化ガスへの対応 —

1. はじめに

近年、「地球環境問題」は国際的に取り組むべき重要な課題の1つとして取り上げられており、1992年6月に「環境と開発に関する国連会議（通称、地球サミット）」が、ブラジルのリオデジャネイロにおいて開催された。

この地球サミットでは、「環境と開発に関するリオ宣言」により、先進国と途上国の責任、地球環境保全と国家主権との関係、持続可能な開発の実現などに関する27項目の諸原則が規定された。同時にこの持続可能な開発を実現するための具体的な行動計画である「アジェンダ21」が採択された。

さらに、地球環境問題の1つである「地球温暖化」の防止に関して、同年5月に「気候変動に関する枠組条約」が採択され、同サミットの開催期間においてわが国を含む155カ国が署名した。この条約により「1990年代末までに温暖化ガス排出量を1990年レベルまで戻す」という具体的な目標値が設定された。

このように地球温暖化問題は、地球環境問題の中でも国際的な取り組みが本格化してきており、すでに北欧諸国では、地球温暖化の原因物質であると考えられている二酸化炭素の排出防止策として、「炭素税」が導入されており、また、わが国においても同様に導入の方向で検討されている状況である。

また、下水道技術開発連絡会議は、今後、下水道で取り組むべき「長期的技術開発課題」の中で「地球環境保全型下水道」を最も重要な課題の1つとし

て位置づけており、これに関して提案されたテーマの中でも、人類に大きな影響を及ぼす「地球温暖化」に対して強い関心が示されている。

以上のような背景を受けて、本調査では「地球温暖化」の防止に向けて、今後、下水道が取り組むべき温暖化ガスの監視方法や対応策を中心として、調査を行うものとした。

2. 調査内容

平成4年度は次のような事項について調査を行った。

- ① 地球温暖化問題と原因物質
- ② 地球温暖化問題に対する各界の取り組み状況
- ③ 下水道施設からの原因物質排出量の推定

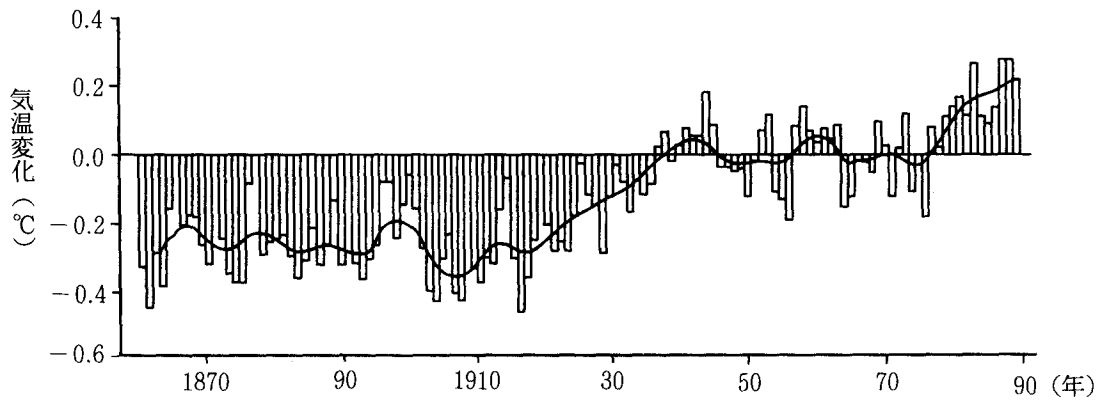
3. 調査結果

3-1 地球温暖化問題と原因物質

「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」(1990年)において報告された、1861年から1989年までの全地球の年平均気温は、図-1のとおりである。この気温上昇がさらに進行すると、地球の温暖化により海面上昇や異常気象の頻発など、地球全体に対して大きな影響を及ぼす恐れがあるとされている。

また、化石燃料から年間に発生した二酸化炭素量は図-2¹⁹⁾に、大気中のCO₂の濃度の変化は図-3に示すとおりであり、1800年に280ppmであったCO₂の濃度が、発生量に比例して1990年にはおよそ350ppmと急増している¹⁶⁾。

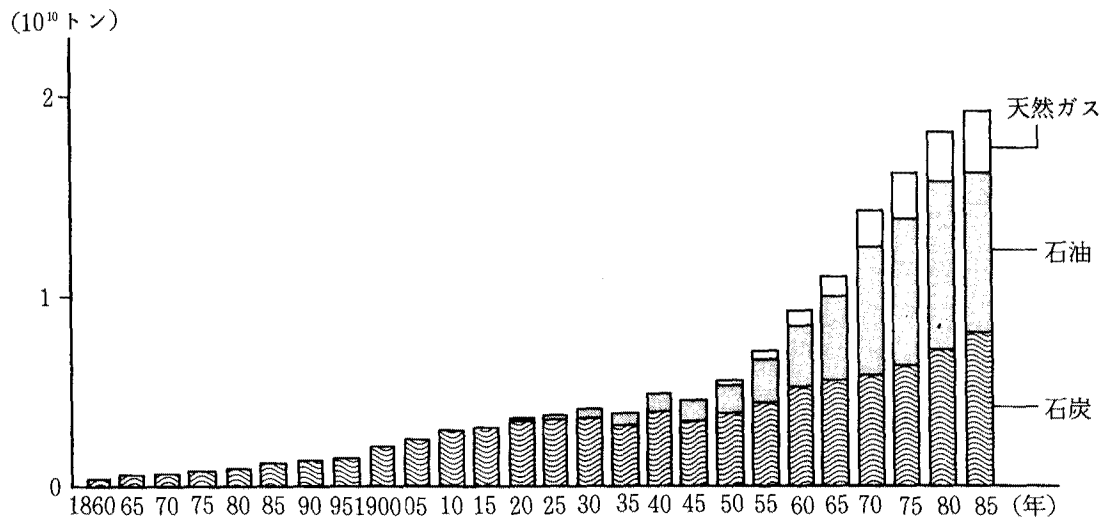
図-1 1861年～1989年の全地球平均気温の変化（平成4年度環境白書）



(資料) IPCC 報告書

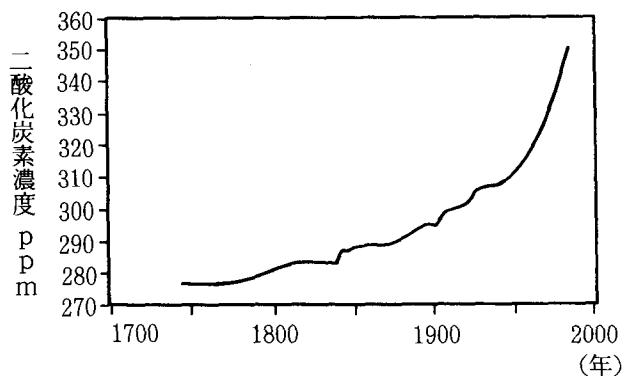
(注) 1861～1989年の陸上気温と海上気温を統合した全地球平均気温の変化。
1951～1980年の平均値に対する偏差で示す。

図-2 化石燃料から発生した二酸化炭素量



(備考) R. M. Rotty 「Distribution and Changes in Industrial Carbon Dioxide Production」 (1981) 等による。

図-3 大気中二酸化炭素濃度の経年変化



このように、化石燃料起源のCO₂発生量と大気中のCO₂濃度変化及び、平均気温との間には、明瞭な相関関係が見られ、CO₂は地球温暖化の主要な原因物質とされている。

この二酸化炭素(CO₂)の他に、地球温暖化の原因となっている主要な温室効果ガスには、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)、フロン(CFC)及び対流圏にあるオゾン(O₃)などが挙げられている。ただし、対流圏にあるオゾン(O₃)についての地球規模での実態はほとんど明らかにされていないのが

現状である。

また、これらの温室効果ガスの地球温暖化に対する寄与率や影響量は極めて複雑であるとともに、時間によっても重み変動すると言われている⁴⁾。

温室効果ガスの相対的温室効果(等価二酸化炭素効果)と、今後100年間の気候変化を考えた場合の寄与率についての報告例を表-1に示す。

この表より、最も放出量が多く、寄与率が高いのは二酸化炭素であるが、重量をベースとした相対的温室効果は、二酸化炭素の温室効果を1とした場合、メタンで63～21、一酸化二窒素で270～290となっている。このことは、一酸化二窒素やメタンは、微量であっても温暖化に大きな影響があることを意味している。

さらに、表-2は、稲森らがHansenらのデータに基づき、温室効果気体の寄与率を整理したものである⁶⁾。この報告によれば、寄与率は過去100年間においては、二酸化炭素の寄与率は66%を占めているが、最近の10年間ではこの割合が49%になり、今後はメタンや一酸化二窒素の寄与率はさらに増大すると予測されている。

これらのことから、地球温暖化問題においては、放出量の多い二酸化炭素のみではなく、絶対量が微量なメタンや一酸化二窒素にも注目していく必要が

あると言える。

3-2 地球温暖化問題に対する各界の取り組み状況

(1) 国際的取り組み

地球温暖化への具体的な活動は1988年の国連環境計画(UNEP)と世界気象機関(WMO)の共催で「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の設置によってスタートし、地球温暖化の科学的知見、環境的・社会経済的影響、対応戦略について検討が行われ、1990年の第4回会合で第1次報告書がまとめられた。1992年の「国連環境開発会議(通称、地球サミット)」において「気候変動に関する枠組条約」が締結され、急速に方向付けがなされた²⁾。この条約により、わが国を含む先進国には次のような責務が規定された。

- ① 温暖化ガスの排出と吸収の目録作り
- ② 温暖化対策の国別計画の策定と実施
- ③ エネルギー分野等での技術の開発・普及
- ④ 森林等の吸収源の保護・増大対策推進
- ⑤ 科学・調査研究・観測等の国際協力
- ⑥ 情報交換・教育・訓練等の国際協力
- ⑦ 条約の実施に関する情報の通報等
- ⑧ 温暖化ガス排出量の1990年代末までの

表-1 各温室効果ガスの相対効果と今後100年間の気候変化を考えた場合の寄与率(IPCC・レポートにもとづく)⁴⁾

温室効果ガス	相対的温室効果*		1990年の放出量 (Tg)	今後100年間の寄与率 (%)
	(20年スパン)	(100年スパン)		
二酸化炭素	1	1	26,000	61
メタン	63	21	500	15
一酸化二窒素	270	290	6	4
C F C	4,100～7,100	1,500～3,500	0.9	11
その他				9

*重量をベースとし、二酸化炭素の温室効果を1とした値である。Tg(テラグラム)=10¹²g

表-2 地球温暖化の原因となる温室効果気体の割合

年 代	地球温暖化への寄与率(%)				
	二酸化炭素	メタン	一酸化二窒素	フロン	その他
1880-1980	66	15	3	8	8
1990	49	18	6	14	13

従前レベルへの回帰

⑨ 温暖化ガス排出量の1990年レベルへの回帰を目指した政策・措置の情報提供

⑩ 途上国への資金・技術の支援

(2) わが国における技術的対応策

二酸化炭素は、温室効果ガスのなかで地球温暖化に対して最も影響が大きいことから、この増加を抑制する方策を中心として対応策が考えられている。

図-4は、地球温暖化への技術的対応策の一般的な例を示したものであり、防止技術、防除技術、適応技術などに分けて、対策技術の研究開発が進められている。

(3) 主な省庁関係での技術的対応策の開発状況

1) 通産省

通産省では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を中心に、表-3に示すように、各種の二酸化炭素の回収・利用技術のほか、地球温暖化防止技術に関する多様なテーマを取り上げ、長期にわたる研究・開発計画を推進している⁴⁰⁾。

2) 厚生省

厚生省による技術的対応策の主な研究・開発テーマを挙げると、つぎに示すとおりである⁷⁾。

- ① ごみ焼却に伴う二酸化炭素排出の削減化技術開発
- ② ごみ焼却エネルギーの広域回収利用技術・システム開発に関する調査
- ③ 廃棄物最終処分場における温暖化ガスの処理及び地盤の早期安定化技術開発

図-4 地球温暖化への対応策 (東京都資料「地球の温暖化」より)

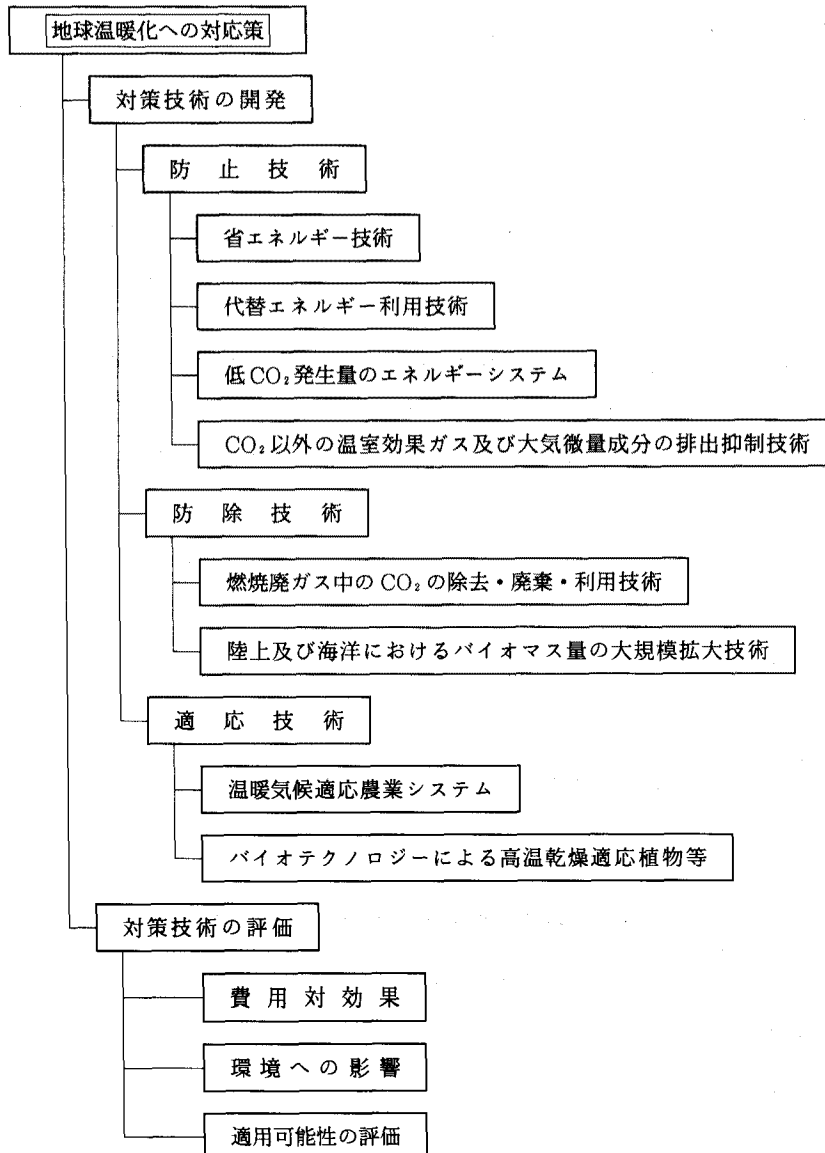


表-3 環境技術開発事業計画

項目	年度													
	H2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
地球環境産業技術研究開発 環境調和型生産技術	1. 高機能化学合成バイオリクター					▼	中間評価							
	2. 環境調和型水素製造技術開発					▼								
	3. 環境調和型金属系素材回生利用基盤技術開発					▼								
	4. 非鉄金属系素材リサイクル促進技術開発								▼					
二酸化炭素の固定化・有効利用技術	5. 細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用					▼								
	6. 接触水素化反応利用二酸化炭素固定化・有効利用					▼								
	7. 二酸化炭素高温分離・回収再利用技術開発								▼					
	8. 環境調和型触媒技術開発								▼					
	9. 海洋中の炭素循環メカニズムの調査研究													
環境低減技術	10. 圧縮式ヒートポンプ用新規冷媒													
	11. 生分解性プラスチック					▼								

④ 焼却処理施設におけるエネルギー転換推進計画

3) 運輸省

運輸省による技術的対応策の主な研究・開発テーマを挙げると、つぎに示すとおりである⁷⁾。

- ① 地球環境対策のための自動車に係る二酸化炭素排出量の低減対策及び新燃費目標値設定に関する調査
- ② 地球温暖化防止等に資する運輸部門のエネルギー対策推進方策の検討調査
- ③ 臨海部における未利用エネルギーの活用に関する調査研究

なお、わが国の運輸部門における二酸化炭素排出量の約90%は自動車によるものであることから、電気自動車、天然ガス(CNG)自動車、ハイブリッド自動車、ソーラーカーなどの低公害車の開発・導入を対応策の1つとしてあげ、これによる二酸化炭素排出量の削減効果は、1990年に比べ2000年では3.8%、2010年では8.6%になると見積もっている。

4) 建設省

建設省による技術的対応策の主な研究・開発テーマを挙げると、つぎに示すとおりである。

- ① 緑化景観創出のための基礎技術の開発
- ② 下水道資源、エネルギーの活用に関する

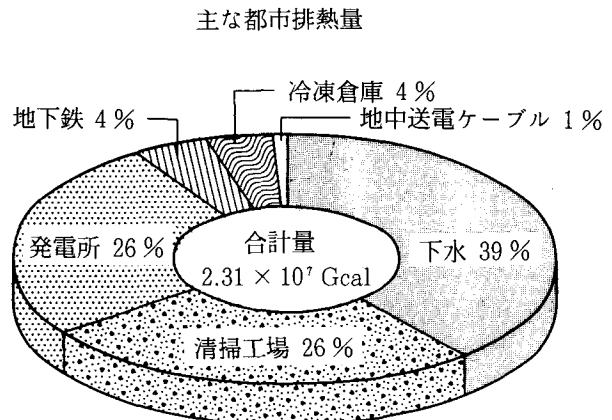
調査研究

- ③ 未利用エネルギーの活用に関する調査研究
- ④ 住宅水準向上に伴うエネルギー消費抑制技術研究開発
- ⑤ 省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発

(4) 下水の未利用エネルギーの回収

東京都下水道局の試算³⁷⁾によれば、都市活動に伴う排熱の未利用エネルギーの中で下水の占める割合は図-5に示されているように39%と最も多く、

図-5 都市の未利用エネルギー³⁷⁾



その量は、現在ある10処理場で年間9兆キロカロリーであるとされている。

これは37億kwhの発電量に相当する。

この下水の未利用エネルギーをヒートポンプシステムにより有効利用する計画³⁸⁾があり、東京都下水道エネルギー株式会社により平成5年度から事業が実施される予定である。現在の計画区域内において、発電事業からの二酸化炭素排出量まで考慮した場合のCO₂削減率は52.4%の効果があるとされている。

3-3 下水道施設運転時における地球温暖化原因物質の推定

前で示した地球温暖化の主要な温室効果ガス5種のうち、下水道に関連のある原因物質としては、①二酸化炭素、②メタン、③一酸化二窒素の3物質であると考えられている^{1), 4), 6)}。ここでは、これら3種の温室効果ガス(以下、温暖化ガスという)の発生量を推定することとした。

(1) 二酸化炭素

下水道施設における二酸化炭素は、下水処理の反応過程から直接発生するものと、下水道施設を運転するために使用する電力量を二酸化炭素量に換算したものとがある。

① 下水処理によって発生する二酸化炭素

下水処理によって発生する二酸化炭素について、水落及び京才がまとめている⁸⁾。これらは大鳴らの報告を受けたものであるが、平成3年度下水道年鑑をもとに、同様に推定した昭和63年度の値を表-4に示す。

昭和63年度には、

$$3,145 \sim 3,912 \times 10^3 \text{ (t-CO}_2\text{/年)} \rightarrow \underbrace{3.1 \sim 3.9 \text{ (MtCO}_2\text{/年)}}_{\text{中間値 3.5}}$$

程度の二酸化炭素が発生していると考えられる。

② 下水道に用いる電力を得るために発生する二酸化炭素

平成2年度版下水道統計によれば、全国の下水道施設の年間使用電力量は4,127,462.3(千kWh/年)であった。一方、平成2年の全国の電気事業者による発電量は759,000(百万kwh)であり、二酸化炭素の発生量は285.9(MtCO₂/年)であった⁷⁾。

したがって、全国電力使用量に占める下水道による電力使用量の割合は、

$$4,127,462.3 \times 10^{-3} \div 759,300 = 0.54 \%$$

であり、CO₂の発生量では全国電力使用量によるCO₂発生量285.9(MtCO₂/年)⁷⁾をベースにして求めると、

$$285.9 \times 0.54 \% = 1.6 \text{ (MtCO}_2\text{/年)}$$

相当となる。

(2) メタン

土木研究所の京才、水落が下水処理場からのメタンの発生量についてまとめている^{8), 9)}。この結果をみると図-6及び表-5にあるようにエアレーションタンク及び汚泥濃縮タンクからの放出量が卓越している。

これらの調査結果より、下水道施設からのメタン発生量は、下水の収集方式、水処理方式、汚泥処理方式等多くの因子によって異なるが、全国の下水道施設からの年間発生量はおよそ6.0千t程度と推定されている。

(3) 一酸化二窒素

一酸化二窒素についても、土木研究所の京才、水落が実地の処理場を対象として調査を行ったが、分析手法やサンプル中のN₂O濃度の低さのため、定量的把握をできなかった。一酸化二窒素の大部分は焼却炉から出ると考えられるが、焼却炉のタイプや焼却温度でかなり変動するといわれており、今後の調査が望まれる。

図-6 流入水1m³当たりのCH₄放出量

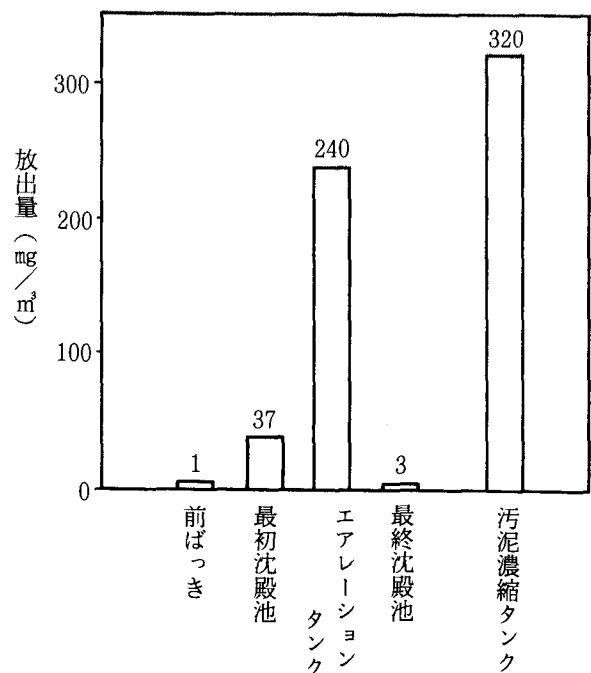


表-4 昭和63年度における全国の下水処理場から発生するCO₂の推定

汚水 (9,485 × 10 ⁶ m ³ /年)	水処理系	処理量 (× 10 ⁶ m ³ /年)	設定条件	適用式	CO ₂ 発生量 (× 10 ³ t-CO ₂ /年)		
					最大値	最小値	
汚泥処理系 (1,364.1 × 10 ³ t-DS/年)	簡易処理	486.5					
	中・高級処理	8,998.7	汚水のBOD: 200,180 mg/l (BOD _N) 最初沈殿池BOD除去率: 30.40% (α)	(イ)	1,733	1,336	
	<CO ₂ 発生主要プロセス>	<最終処分形態>	(10 ³ t-DS/年)				
	嫌気性消化	液状汚泥 脱水汚泥 乾燥汚泥	275.5	VS/TS: 70.80% 消化率: 50.60% (β)	(ロ)	257 (215)	188 (150)
	好気性消化	液状汚泥 脱水汚泥 乾燥汚泥	4.0	VS/TS: 70.80% 消化率: 50% (β)	(ロ)	4 (4)	2 (2)
	コンポスト化	コンポスト	109.7	VS/TS: 70.80% 下水汚泥は、その嫌気性消化汚泥を コンポスト化した場合と同程度まで 酸化分解される	(ロ)+(イ)	130 (52)	104 (39)
焼却	灰	789.5	VS/TS: 70.80%	(ニ)	1,229	1,076	
その他	液状汚泥 脱水汚泥 乾燥汚泥 熱処理汚泥 その他	185.4	VS/TS: 70.80%	(ニ)	(288)	(252)	
汚泥処理系 小計					1,620 (559)	1,370 (443)	
1,364.1 × 10 ³ t-DSに相当するCO ₂ 量					2,237	1,957	
下水処理場での発生量					3,353	2,706	
下水処理場外での潜在的な発生量					(559)	(439)	
合計					3,912	3,145	
水処理分					最大値 1,733/3,912 = 0.44		
					最小値 1,336/3,145 = 0.42		

CO₂発生量 = (1 - α) × BOD_N × [CO₂] / [O₂] (イ)
 = DS × VS/TS × β × γ × [CO₂] / [C] (ロ)
 = 0.38 × (1 - β) × DS × VS/TS × γ × [CO₂] / [C] (ハ)
 = DS × VS/TS × γ × [CO₂] / [C] (ニ)
 [CO₂] / [O₂] ≈ 1.375 [CO₂] / [C] ≈ 3.667 γ ≈ 0.531

注 CO₂発生量の()内の値は、有機物を含んだ下水汚泥を下水処理場外で有効利用あるいは処分した量に相当するものであり、その値は下水処理場外における潜在的なCO₂発生量を表す(ただし、これがすべてCO₂になるとは限らない)。

表-5 流入下水1m³当たりのCH₄放出量

施設 処理場	CH ₄ 放出量 mg · CH ₄ / m ³ 流入下水						
	水処理プロセス				汚泥処理プロセス		
	沈砂池	最初沈殿池	エアレーションタンク	最終沈殿池	濃縮タンク	脱水機室	焼却炉
K処理場	...	37	240	3	320	...	0
Y処理場	...	8	145	0.1	48	...	0
S処理場	38	250	89	...	51	190	0

4. まとめと今後の予定

平成4年度調査結果より、次のようなことがわかった。

- ① IPCCレポートによると、今後100年間で地球温暖化への寄与率は、二酸化炭素61%、メタン15%、一酸化二窒素4%、フロン類11%、その他9%となっている。
- ② 日本では関係省庁や民間レベルにおいて、

地球温暖化の防止に関する調査・研究・開発が推進されつつあるが、技術的な対応策については現在のところ検討・研究段階である。

- ③ 下水道分野では、下水や汚泥が潜在的に持つ未利用のエネルギーを利用するシステム、たとえばヒートポンプによる下水の廃熱利用や汚泥消化ガス発電の効率化利用などにより化石燃料の使用量削減すなわち二酸化炭素発生量の削減に大きな効果が期待できる。

- ④ わが国の人為的温暖化ガス発生量が地球規模の発生量に占める割合は、調査データにより若干違いがあるが、二酸化炭素 6.4 %、メタン 0.31 %、一酸化二窒素 2.6 %である。
- ⑤ いくつかの調査事例によれば、地球温暖化の原因となっている主要な温暖化ガスのうち下水に関連のあるものとしては、①二酸化炭素、②メタン、③一酸化二窒素の3つが挙げられている。
- ⑥ 下水道施設からの温暖化ガス発生量が日本全国の発生量に占める割合は、二酸化炭素 0.44 %、メタン 0.56 %と推定された。一酸化二窒素についてはさらに不確実な部分が多く不明であったが、いくつかの調査事例によれば汚泥の焼却炉からの一酸化二窒素は高濃度で検出されている。
- ⑦ 下水道施設の温暖化への影響は、一酸化二窒素によるウエイトが高そうであると予想されるが(特に汚泥焼却施設において)、この一酸化二窒素についての実態把握は充分になされていない。

今後は、

- ① 下水道施設からの温暖化ガスの実測調査
- ② 下水道としての監視、測定技術の確立
- ③ 省資源、省エネルギーによる化石燃料の減小

等を行う予定である。

< 参考文献 >

- 1) 地球温暖化問題からみた下水道の課題、松尾友矩、下水道協会誌 Vol. 29, No. 344, 1992/8
- 2) 大気環境への土壌のかかわり、陽捷行、科学、Vol. 58, No. 10, 1988/10
- 3) 地球温暖化の対策技術、公害資源研究所・地球環境特別研究室編、オーム社、1990年4月
- 4) 地球温暖化問題にどう取り組むか、花木啓祐、月刊下水道、Vol. 15, No. 1, 1992年1月
- 5) IPCC(気候変動に関する政府パネル): 第1ワーキンググループレポート、1990年
- 6) 稲森ら: 地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出処理施設からの発生抑制対策、用水と廃水、Vol. 33, No. 1, p.28-34 (1991)
- 7) 地球温暖化防止問題対策ハンドブック、環境庁企画調整局地球環境部編、第一法規、平成4年8月
- 8) 温室効果気体の下水処理プロセスからの放出、水落元之&京才俊則、月刊下水道、Vol. 15, No. 1
- 9) 下水処理場からのメタン・亜酸化窒素の放出量の解明に関する研究、京才俊則&水落元之、平成2年度・平成3年度、下水道関係調査研究年次報告書集
- 10) 衛生試験法・注解、1980、日本薬学会編
- 11) 大島吉雄他、下水汚泥による有用植物の栽培に関する調査、土木研究所資料、2906、207-220 (1990)
- 12) 下水試験方法、1984年版、(社)日本下水道協会
- 13) 地球温暖化経済システム検討会中間報告書、平成4年9月、環境庁、地球温暖化経済システム検討会
- 14) 平成2年度版、下水道統計(財政編)第47号の2、(社)日本下水道協会
- 15) 地球環境にやさしいライフスタイルへの提言: 地球環境と暮らしに関する研究会、1991 第一出版
- 16) 環境白書平成4年版: 環境庁編、1992、大蔵省印刷局
- 17) 地球温暖化がわかる本: 北野ほか編著、1990、星雲社
- 18) 地球温暖化による社会影響: 米国EPAレポート抄訳、1990、技報堂
- 19) 環境白書昭和63年版: 環境庁編、1989、大蔵省印刷局
- 20) 環境白書平成3年版: 環境庁編、1991、大蔵省印刷局
- 21) 地球環境キーワード事典: 環境庁編集、1990、中央法規
- 22) 地球サミットハンドグラフ: 朝日新聞「地球サミット」取材班、1992、朝日新聞社
- 23) 異常気象レポート: 気象庁編、1989、大蔵省印刷局
- 24) 地球汚染II: NHK取材班、1989、日本放送出版協会
- 25) 第7回エネルギーシステム経済コンファレンス講演編文集: 1991、エネルギー資源学会
- 26) 第8回エネルギーシステム経済コンファレンス講演編文集: 1992、エネルギー資源学会
- 27) 炭酸ガス問題解決への展望: 掘込編集、1990、工業技術会
- 28) これからの廃棄物の処理と地球環境: 石川著、1992、中央法規
- 29) 感染症廃棄物処理マニュアル: 1992、社会保険研究所
- 30) 産業廃棄物の処分過程: 1992、日本産業廃棄物処理振興センター
- 31) 特別管理産業廃棄物の処分過程: 1992、日本産業廃棄物処理振興センター
- 32) 水のリサイクル(基礎編、応用編): 和田著、1992、地人書籍
- 33) 第3回研究発表講演編文集: 1992、廃棄物学会
- 34) 第2回地球環境研究者交流会議予稿集: 1991、国立環境研究所
- 35) 改訂地球環境キーワード事典: 環境庁地球環境部、

中央法規出版

- 36) 人間活動にともなって生成する一酸化二窒素の地域スケールでの評価：花木啓祐ら，第1回地球環境シンポジウム講演集，1993，土木学会
- 37) 第二世代下水道マスタープラン：平成4年7月，東京都
- 38) 下水道での地球環境への影響度：福田寛允，下水道協会誌，Vol.29，No.344，1992/8
- 39) とうきょう広報：1992増刊号，地球環境特集
- 40) NEDO_{NEWS}：新エネルギー・産業技術総合開発機構，Vol.13，No.133，1993
- 41) 下水熱利用の現状と課題：江藤 隆，月刊下水道，Vol.16，No.9
- 42) 原子力発電の動向と地球環境問題をめぐる原子力土木の課題：鹿島遼一，第1回地球環境シンポジウム講演集，1993，土木学会
- 43) 電気事業の地球環境問題への対応策：小林 料，エネルギー，1992年4月

● この調査に関する問い合わせは

研究第二部長	藤田 昌一
研究第二部主任研究員	阿久津 忠
研究第一部主任研究員	鈴木 茂
研究第一部研究員	森 正治
研究第二部研究員	細洞 克己