

平成 15 年 度

土木研究所講演会
講演集

平成15年10月 8 日

独立行政法人 土木研究所

Copyright © (2003) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第3911号 2003年10月

平 成 15 年 度

土 木 研 究 所 講 演 会

講 演 集

企画部研究企画課

要 旨

本資料は「平成15年度土木研究所講演会」の講演内容をまとめたものである。この講演会は、土木研究所が実施している調査研究の成果や最近の土木技術に関する話題、動向などを各方面に紹介することを目的として毎年1回開催している。

目 次

【一般講演】

1. 環境に配慮した舗装技術の現状と今後の方向 1
基礎道路技術研究グループ上席研究員（舗装） 伊藤 正秀
2. トンネル建設工事における粉じん対策技術の開発 11
技術推進本部主席研究員（施工技術） 大下 武志
3. 天才技術者、広井勇工学博士の生涯 31
企画部客員研究員 高崎 哲郎

【研究成果報告】

4. 建設現場で遭遇するダイオキシン類汚染対策技術の開発 35
司会：材料地盤研究グループ長 萩原 良二
独立行政法人国立環境研究所 化学物質環境リスクセンター長 中杉 修身
材料地盤研究グループ主任研究員（リサイクル） 南山 瑞彦
水循環研究グループ主任研究員（水質） 小森 行也
水循環研究グループ主任研究員（河川生態） 天野 邦彦
材料地盤研究グループ上席研究員（新材料） 明嵐 政司
材料地盤研究グループ上席研究員（土質） 小橋 秀俊

【一般講演】

5. 豊かで多様な生態環境を創り出すための都市の河川と下水道の課題 91
水循環研究グループ主任研究員（水質） 宮島 潔
6. 火山噴火時の対応とその後の土砂災害防止手法 109
土砂管理研究グループ長 西本 晴男

[一般講演]

環境に配慮した舗装技術の現状と今後の方向

基礎道路技術研究グループ上席研究員（舗装） 伊藤正秀

目 次

1. はじめに	1
2. 舗装技術規準における位置づけ	1
3. 環境と舗装性能の体系化	1
3.1 環境のとらえ方ー「環境」の定義	1
3.2 対象範囲ー舗装としての責務	2
3.3 効果の評価	2
4. 個別技術の現状と評価	3
4.1 CO ₂ 排出量を削減する技術	3
4.2 リサイクル	3
4.3 雨水の流出抑制技術	4
4.4 路面ヒートを抑制する技術	5
4.5 窒素酸化物を吸収・分解する技術	7
4.6 振動発生、伝播を抑制する技術	7
4.7 路面騒音を低減・路面雨水を排除する技術	8
4.8 凍結抑制舗装	8
4.9 景観・アメニティ等の改善に寄与する技術	8
5. 普及に向けた課題	9
6. おわりに	10
参考文献	10

環境に配慮した舗装技術の現状と今後の方向

基礎道路技術研究グループ上席研究員（舗装） 伊藤正秀

1. はじめに

近年、環境への関心の高まり、ニーズの多様化等を背景として、道路舗装に対して環境負荷軽減を期待する声が高まっている。極めて高いリサイクル率を実現するなど、舗装は、従来から環境に対する取り組みを積極的に進めてきたところであるが、新たな環境要因への対応や舗装以外に起因する環境負荷軽減への寄与などが求められるようになり、それに対する技術開発が各方面で進められている。

一方で、これら技術に対する評価が定まっておらず、舗装としての性能も明確になっていない。このため、土木研究所では各種技術基準図書への位置づけを目指し、技術の体系整理、性能の評価方法の検討等を行っているところである。本稿では、土木研究所での研究成果を踏まえつつ、環境保全・改善に資する舗装技術の性能について整理・体系化した上で、今後の技術開発および普及に向けた課題等について述べることとする。

2. 舗装技術基準における位置づけ

平成13年に策定された「舗装の構造に関する技術基準」（国土交通省道路長局他通達、以下「技術基準」）において、「当該舗装の構造に起因する環境への負荷を軽減するよう努めるものとする。また、舗装発生材及び他産業再生資材の使用等リサイクルに努めるものとする。」と明記されている。一方で、「技術基準・同解説」¹⁾において、環境からみた性能指標として明確に規定されているものは「浸透水量」のみである。もっとも、「舗装の性能は交通の状況や沿道の状況を勘案して、道路管理者が舗装ごとに定めるべき」ものであり、他の環境性能指標の設定は任意に行うことができるようになってはいる。

3. 環境と舗装性能の体系化

図-1に、現在、各方面で開発が進められている技術を念頭において、舗装と環境との関わりを体系化、整理した。体系化の切り口には様々な考え方がある一方で、その整理の仕方によっては、今後の環境負荷軽減に対する舗装の役割の捉え方が大きく異なってくる可能性がある。そのため、まず、体系化の考え方について記しておきたい。なお、リサイクルについては、舗装性能としてそのようなものがある訳ではなく他とは異質であるが、「環境負荷の軽減」という大きな括りの下で体系の中に位置づけている。

3.1 環境のとらえ方ー「環境」の定義

一口に「環境」、仮に「道路環境」と限定しても、その概念は人によって異なる。大気、騒音といった一般的に道路から連想される環境の概念に加え、道路行政においては、安全性など道路利用者サービス面についても、しばしば「環境」という用語が使われる。ここでは、「技術基準」において「環境への負荷」と記されていることから、道路利用者サービス環境については対象外とした。近年、技術開発が進められている個別舗装技術の多くも、このような環境要因への対応を目的として開発が進められているものである。

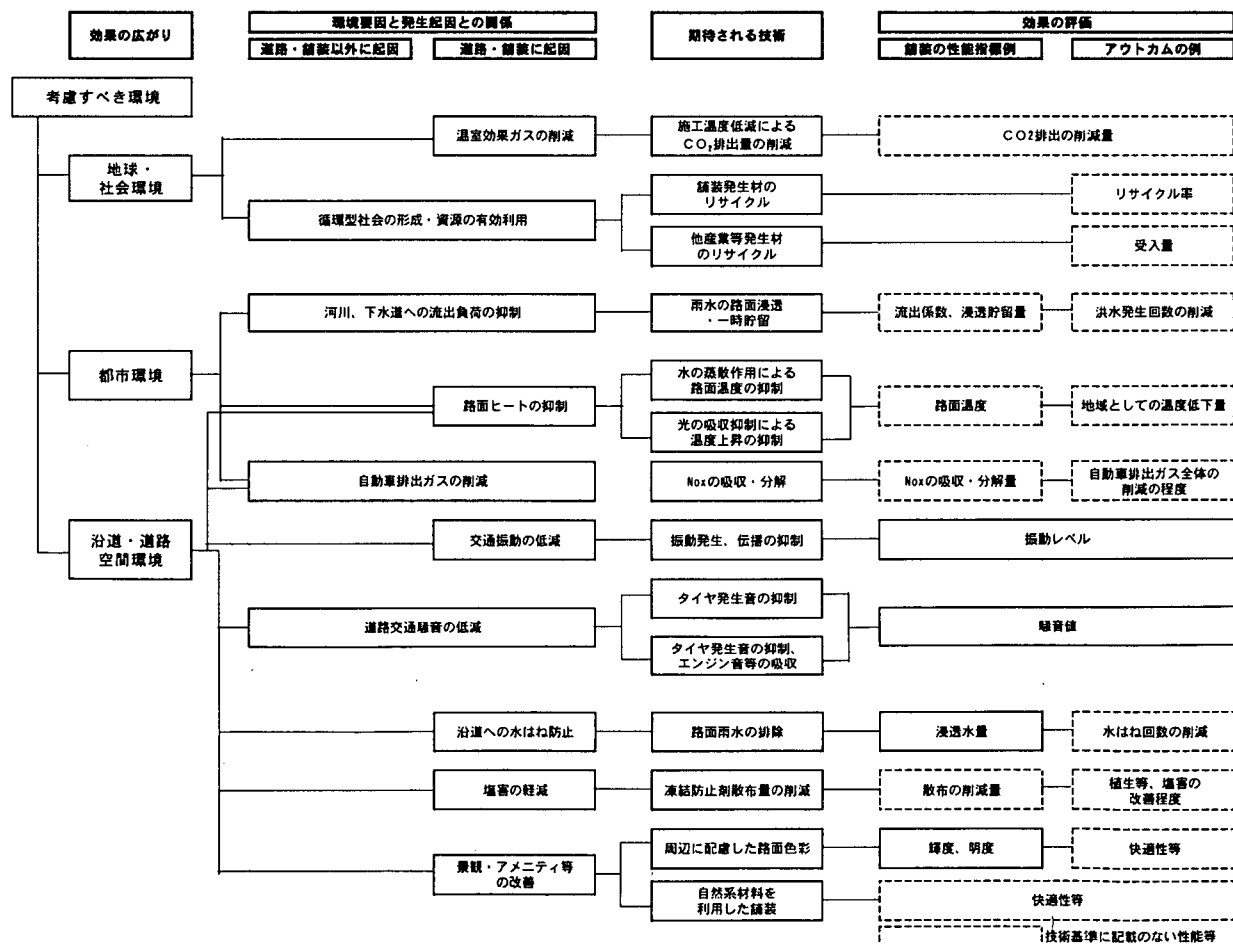
その上で、このように捉えた環境を、「効果の広がり」の観点から分類してみた。

3. 2 対象範囲－舗装としての責務

乱暴ないい方をすると、舗装として一体誰のお守りまでするのか、ということである。環境負荷には様々な発生源があり、一般常識としては発生者に第一義的な対応義務があることは疑いようがない。しかし、道路・舗装は公共空間であるが故に、様々な発生源由来の環境負荷について対応することを要請されることが少なくなく、責任の境界が曖昧になりがちである。誤解を避けるために付記すると、決して道路・舗装以外が発生源である環境負荷には対応しなくてよいと述べているのではない。仮にそれらへの対応まで含めた機能を舗装に期待するとしても、舗装としての責務、開発目標を定める上でも、発生源と環境要因の因果関係について冷静に捉える必要があるということである。

3. 3 効果の評価

ここでは、「舗装の性能指標」と「アウトカム」を例示した。「技術基準」は性能規定を原則としており、性能を満足すれば仕様は問わない内容となっている。このため、個々の「環境負荷の軽減」技術が、どのような計測可能な性能として捉えることができるのか、ということが実用段階では重要となる。これについては、計測の仕方、性能と環境全体としての効果の因果関係等、詳細な検討が必要であるが、ここでの整理はその第一歩となるものである。なお、近年、行政分野では、エンドユーザーにとっての具体的な効果を定量化した指標、いわゆるアウトカムとしての効果計測を政策目標・評価や事業採択の根拠とすることが大きな流れとなりつつある。そのような観点から、若干、先走り過ぎのきらいはあるが、ここでも考えられるアウトカムの例示も行ってみた。



図－1 環境と舗装性能の関わり（試案）

4. 個別技術の現状と評価

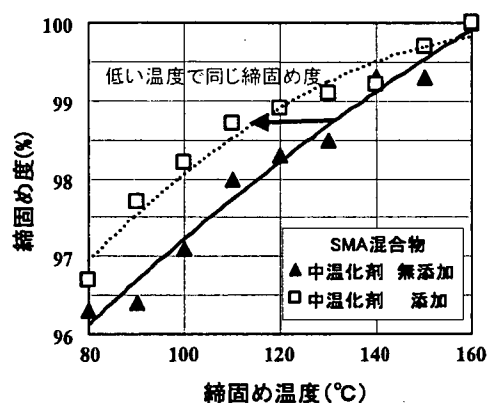
ここで、図－1に掲げた各技術について、どのような技術であるのか、現時点でそれらの評価はどの程度か、何が課題か、という点について、土木研究所における調査結果等も織り交ぜながら、整理・紹介したい。

4. 1 CO_2 排出量を削減する技術

地球温暖化対策全体からみた場合、舗装工事から発生する CO_2 は、運輸部門や民生部門全体として比較して大きいとは言えないが、アスファルトという石油精製品を使用していること、アスファルト混合プラントで加熱混合することなど、エネルギーをその過程で消費する形態の事業であることは否定できない。このため、舗装事業においても CO_2 発生抑制のための努力は求められる。これに該当する技術としては、①常温で混合、舗設を行う「常温型舗装」、② 100°C 以下で製造できる「セミホット型舗装」、③混合、舗設温度を 30°C 程度低下できる「中温化技術」がある。①は本来、別の目的で開発された技術がほとんどであるが、加熱が不要という点で、 CO_2 を削減する技術として認識されつつある。

図－2に、中温化技術を用いた場合の、締固め温度と締固め度の関係例を示す。 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 低い温度でも適切な締固め度が得られており、今後は CO_2 対策だけでなく、寒冷期の施工にも有効な技術と考えられる。

一方、これら技術は CO_2 を削減する効果は確認されているものの、地球温暖化対策全体との関わり、寄与の程度が明らかにされていないため、現場で一般的に使用すべきか判断しかねているのが現状である。これらを整理し、現場で使用する場合の費用対効果を明らかにしていくことが課題といえる。



図－2 締固め温度と締固め度の関係例

4. 2 リサイクル

実は舗装はリサイクルの優等生である。建設産業廃棄物が全産業廃棄物の約2割を占め、不法投棄の代表格であると世の中一般に認識されており、アスファルト・コンクリートは建設廃棄物の35%を占めていることも事実であるが、アスファルト・コンクリートのリサイクルは98%（平成12年度）に達しており³⁾、コンクリート塊とともに、高いリサイクル率を誇っている。そこで、近年は舗装発生材だけではなく、焼却灰や熔融スラグ、ガラスカレットなど他産業発生材に対するリサイクルの要請、排水性舗装など新しいタイプの舗装発生材リサイクルなどへの対応が必要となっている。

1) 舗装発生材のリサイクル

上述のように舗装のリサイクル率は高い。舗装リサイクルの課題を整理すると、①耐流動対策として改質アスファルトを用いた舗装のリサイクル、②都市部を中心に騒音低減対策・路面雨水対策として近年急速に施工量が増大している排水性舗装のリサイクル、③リサイクル率の向上に伴う、再リサイクルへの対応に大別される。

改質アスファルトはわだち割れ対策として重交通路線において一般的に使用されている材料であるが、アスファルトが高粘度のためアスファルトの針入度（固さ）に比較してじん性（耐ひび割れ性）が高い。現在の再生工法関連の技術指針³⁾では、針入度20以下のアスファルトは劣化により耐ひび割れ性が劣るため再生に適さないとされているが、改質アスファルトはその特性から、針入度20以下の

固いものでも再生できる可能性がある。これまでのところ、改質アスファルト混合物の混入率を変化させて確認した結果、このような改質アスファルト発生材を用いても、耐ひび割れの観点からは混入率が30%程度までなら、新規の材料とほぼ同等の性状が得られ、耐流動性にも影響ないと評価されており、今後、試験舗装での供用性等の状況も考慮した上で、改質アスファルト混合物の再生利用条件について、必要な技術基準の改訂を目指すことになる。

また、排水性アスファルト混合物については、通常の改質アスファルトに比較して、さらに高い粘度と骨材の把握力を有するアスファルトを用いているため、再生の際に旧骨材のまわりにアスファルトが付着したままで新規材料と十分に混合しない傾向が強く、混合物性状への影響が懸念されている。室内試験結果では、耐ひび割れ性は問題がないものの、混入率が高いと剥離抵抗性に劣る傾向を示している。混入率の上限がどの程度かということも含めて、数年後に訪れるであろう、排水性舗装の全面的な修繕の訪れに向けた対応方策について検討中である。

これら技術的課題の一方で、現場のプラントにおける発生材の品質管理の問題がある。実際の再生プラントでは、様々な現場からの改質アスファルト混合物、排水性アスファルト混合物が搬入されることが想定され、それらの性状を個々に把握することは困難である。また仮に把握できたとしても、各々の搬入量や混ざり方にバラツキが生じる可能性があり、この場合には個別の発生材について性状を把握することは無意味となる。実際に搬入される発生材の性状のバラツキを考慮した適切な品質管理手法（性状評価方法、サンプリング方法・頻度等）を確立することが必要である。

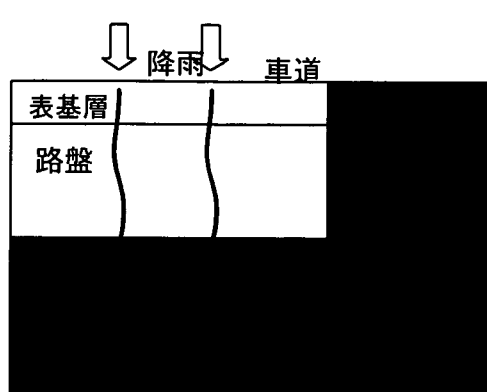
2) 他産業発生材のリサイクル

他産業発生材には、一般廃棄物焼却灰、下水汚泥やこれらの熔融スラグ、石炭灰、ガラスカレット、廃タイヤ等がある。それぞれの詳細について記すことは避けるが、これらはアスファルト混合物の骨材として使用されることが多い。したがって、当然、骨材として必要な性状と所要の舗装性能を有していることはもちろんのこと、有害物質が溶出しない、これら材料を使用した舗装についてもリサイクルが可能であり、その際にも有害物質の問題がないこと等が必要条件である。廃棄物処分場の逼迫等を背景として、これら他産業発生材の道路・舗装における積極的に活用に対して社会の要請は強いものがある。ただし、その活用のための技術開発、安全性の証明は、専ら発生者が自らの責務として行うべきものであり、舗装としては、必要な性能が満足された材料について適切な活用が図られる仕組みを確立することが社会の要請に依っていく方向であろう。なお、例えばガラスカレットを用いた舗装は夜間の視認性が向上するなど、一部には特別の性能を発揮する可能性のあるものもある。このような発生材は、舗装としても一定の技術開発に取り組む意義がある。なお、技術開発とは別の観点になるが、これら材料の利用は概してコスト増につながるが多く、誰がそのコストを負担するのか、また安定的な供給体制の確保ができるのか、といった整理も普及に向けて整理が必要である。

4. 3 雨水の流出抑制技術

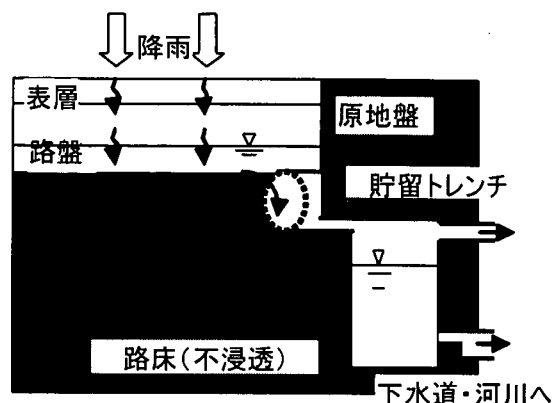
雨水の流出抑制対策としての舗装技術としては、透水性舗装がある。これは当初、街路樹育成の観点から東京都において歩道舗装に広く採用されたのが始まりであり、後に総合治水対策の一環としても位置づけられるようになった。そして、車道としても、旧近畿地方建設局、旧中部地方建設局、愛知県、新潟市等において試験舗装が実施されてきている。さらに、平成15年6月、特定都市河川浸水被害対策法が国会で成立し、「道路を含む一定規模以上の雨水浸透阻害行為については、流出雨水量の増加を抑制」することが義務づけられることになったため、その対策としての車道透水性舗装技術の確立が急務となってきた。

しかし、いくつかの試験舗装の実績はあるものの、一般的な車道用舗装として採用できるまでの知見には至っていないのが現状である。表層等の厚さが薄い場合、過去に土木研究所の試験走路で路盤の細粒分が表層より滲出して舗装が破壊した事例もあり、これらの経験も踏まえ土木研究所としても、本格的な検討に着手したところである。雨水流出抑制とは舗装体内に雨水を一時貯留することを意味しており、このことは舗装の耐久性と相反する。舗装の耐久性に影響を与えない範囲でどれだけの流出抑制機能が確保できるのか、耐久性を向上させるための技術開発、また目標とすべき流出抑制水準の解明等、今後、大きな課題があるといえる。なお、一口に流出抑制といっても、路床や現地盤の透水性や交通条件によって様々な処理方法が考えられる(図-3)。狭い意味においても透水性舗装と呼べるのは、路床等が砂質系で比較的短時間で地盤への雨水流入が期待できる場合であると考えられる。



雨水を路床から直接浸透させるタイプ

【原地盤が砂質系で透水が期待できる場所】



雨水を舗装体内に一時貯留し、トレンチ等を介して浸透、排出を行うタイプ

【原地盤が不透水であり透水が期待できない場所】

図-3 地盤の違いによる雨水浸透の基本的概念

4. 4 路面ヒートを抑制する技術

近年の都市部におけるヒートアイランド現象等に対して、舗装温度を下げることににより、その緩和への寄与を期待して民間での技術開発や自治体での試験施工の取り組みが進められつつある。そのメ

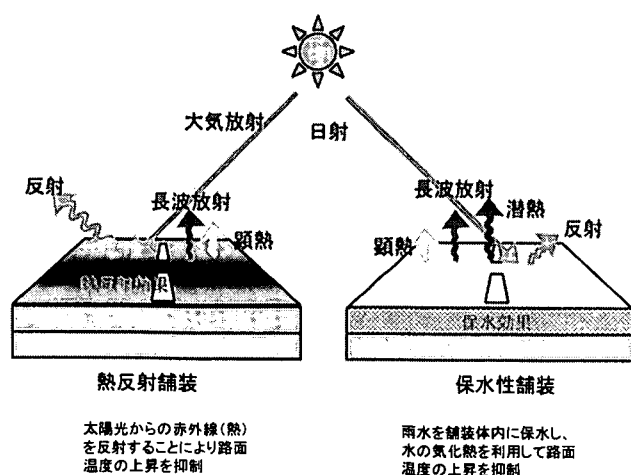


図-4 温度低減舗装の概念図

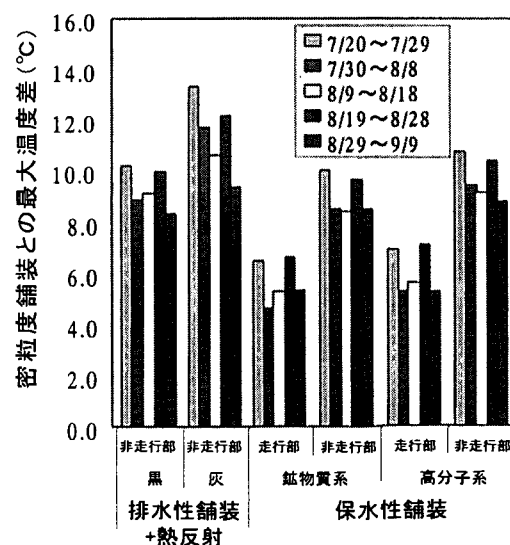
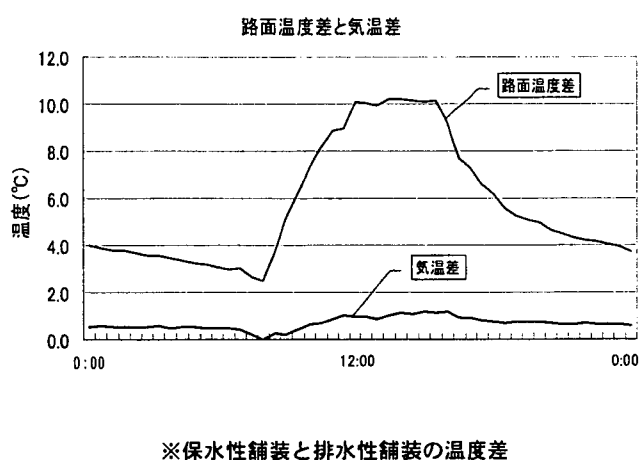


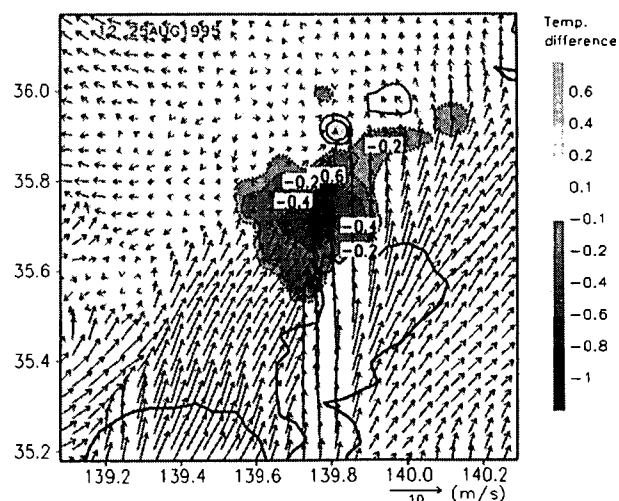
図-5 温度測定結果

カニズムは、①舗装体に水を蓄え、蒸発する際の気化熱で路面の温度を低下させるタイプ（保水性舗装）、②特殊な塗料等を舗装表面にコーティングし、太陽光を反射することにより舗装の温度上昇を抑制するタイプ（熱反射性舗装）に大別される（図－4）。図－5に土木研究所構内に設置した試験舗装における温度測定例を示す。時期や舗装の種類によって効果は異なるが、通常の舗装に比較して10℃以上、場合によっては10数℃温度が低くなる場合も認められ、舗装の温度自体はかなり低下することは明確である。一方で、この温度低下がどの程度、環境負荷の軽減に寄与するのかということについては、まだ一定の評価に至っていない。図－6は路面温度と路面上1mの高さにおける気温の推移を計測した例である。路面温度が10℃以上低下した場合でも、路面上1mでは1℃程度の温度低下である。図－7は東京23区内がすべて保水性舗装に置き換わったと仮定して、夏の正午における温度低下シミュレーションを行った例である（土木研究所水理水文チーム提供）。0.6℃程度気温が低下するエリアが都心部の一定エリアに見られるが、これは屋上緑化率を40%（現行23%）にした場合とほぼ同じ効果と推計している。これらの結果から効果が高いか低いか単純に結論づけることは適切ではないが、膨大な投資がなされたことを前提とした試算であることから、その費用と便益をよく検討する必要があるといえる。一方で、局所的な効果であれ、路面上1mで気温が1℃下がるということは、街区や歩行者空間レベルの広がり、その効果を享受する人の属性等によっては、一定の快適性向上に効果があるという評価もできないこともない。今後、政策判断を可能とする客観的データの積み重ねが重要である。



※保水性舗装と排水性舗装の温度差

図－6 路面温度と路面上1mの温度の推移



図－7 ヒートアイランド軽減シミュレーション結果

このような評価の課題とは別に、効果の持続性・長期の耐久性、都市部における騒音低減を併せた機能確保（保水性舗装は保水性材料を充填することにより、騒音低減効果が期待できない場合がある）、等、舗装材料として、今後、克服すべき技術的課題がある。なお、舗装温度の低下によるわだち掘れの減少という副次的効果が期待できる可能性を示す試算も得られており、現在、その実際の供用性についても確認中である。

4. 5 窒素酸化物を吸収・分解する技術

光触媒である酸化チタンを舗装の表面に固定して、大気中の窒素酸化物を酸化し硝酸イオンとして除去しようとするものである。閉鎖された空間においては高い除去率が得られたとの報告もあるが、一般の道路空間での効果、さらには大気汚染全体への寄与の程度は明らかになっていない。また、舗装に用いた場合の効果の耐久性も明らかになっていないのが現状であり、今後の研究開発によって明らかにする必要がある。さらに、最も重要な発生源対策の効果との比較した上での評価も必要と考えられる。

4. 6 振動発生、伝播を抑制する技術

振動を抑制するためには、路面の平坦性を確保することが第一であるが、その他に軟弱な路床、地盤を改良することにより、その伝播を防止する方法がある。これらの方策に対して、舗装構造の面から、比較的小規模な工事で、より高い効果の発現を狙った技術が、「振動低減型」舗装である。

土木研究所が民間と共同研究を行っているプロトタイプの様式図を図-8に示す。いずれも振動の伝播を抑制を目的としており、①表層・基層間にシート等を敷設、②重量骨材等による基層の重量化、③表層をスラブ構造としてゴム板を設置、するタイプがある。

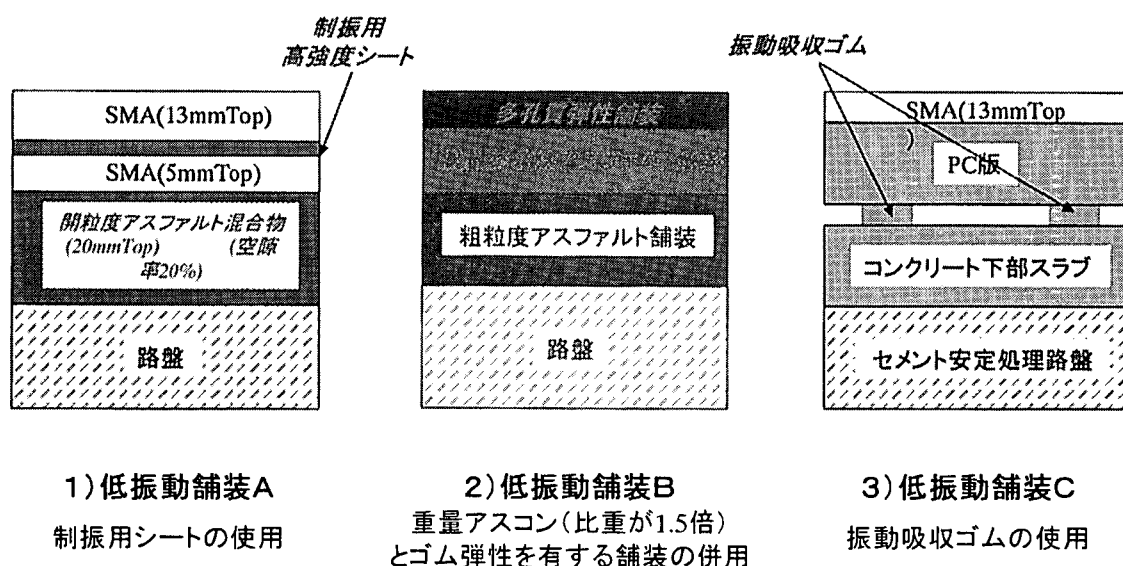


図-8 振動低減舗装の様式図

振動の測定結果を図-9に示す。比較的簡単な構造の通常のタイプでも一定の振動低減効果が現れているが、実際の沿道条件を考慮した場合に有意な効果が得られるか、また、現時点ではコストが最低でも通常舗装の2倍であるためコスト縮減に取り組むとともに、特に高い振動対策を要求される箇所等、適用条件の整理が必要といえる。

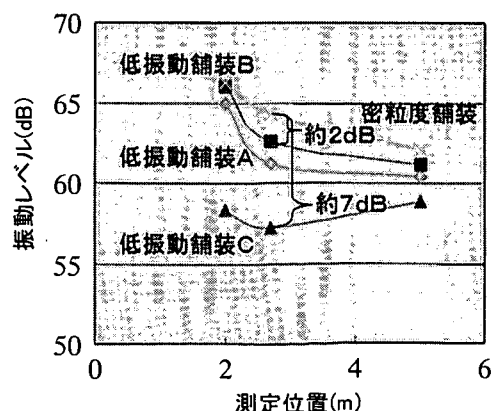


図-9 振動低減効果

4. 7 路面騒音を低減・路面雨水を排除する技術

路面騒音を低減する排水性舗装については、平成13年改訂の道路構造令において、一定の条件下では「雨水を道路の路面下に浸透させ、かつ、道路交通騒音の発生を減少させることができる構造とする」と規定されたこともあり、都市部の舗装としては一般的な舗装となりつつある。現在では、騒音低減効果の経年劣化対策（図-10、11）、より高い騒音低減効果等を目指した材料・構造の工夫（小粒径化、コーティング、2層構造の採用）が試みられている。

一方、これに対して、より高い騒音低減効果（通常の排水性舗装がパワーレベルで3dB程度であるのに対し、10dB程度の低減を期待）を期待して、ゴムチップをウレタン樹脂等で固めた多孔質弾性舗装の開発が土木研究所（新材料チーム）等で進められている。過去、表面がすべりやすい等の指摘があったものの、それらの性能はかなり改善されてきたところであり、現在は、表面ゴムの飛散、基盤面からの舗装材の剥離等が技術的課題となっている。

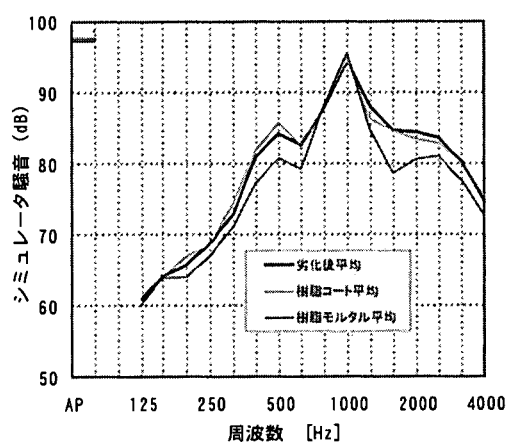
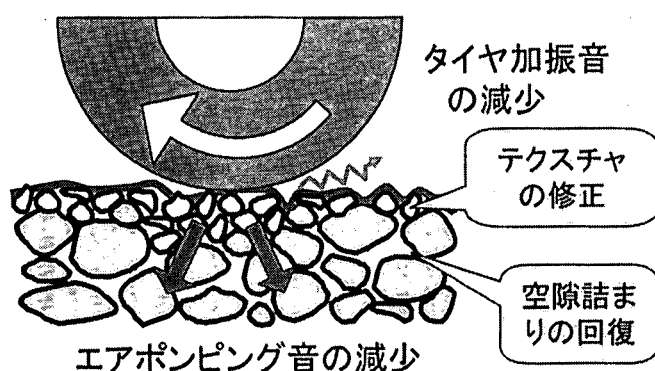


図-10 劣化した騒音低減機能回復の模式図

図-11 樹脂コートによる騒音低減機能の回復

4. 8 凍結抑制舗装

本来、環境の観点から開発された技術というよりも、冬季の合理的な路面管理、サービス提供の観点から開発された技術である。塩化カルシウム等の化学的作用、あるいはゴムの弾性を利用した氷盤の破碎という物理的作用を利用して、路面上への圧雪・氷盤の形成を防止するものであり、凍結防止材の散布量低減に繋がることから、沿道の塩化物濃度の低下という沿道環境改善に寄与するものである。技術としては比較的確立しており、今後、適切な適用箇所を考慮しつつ、普及が期待されるものといえる。

4. 9 景観・アメニティ等の改善に寄与する技術

冒頭の環境の定義からすると、「景観・アメニティ」としてここで取り上げることは適切ではないが、特に雨水の地下浸透、自然系材料の利用という観点から捉えると、植生を可能とした舗装、土を用いた舗装等を取り上げることができる。前者は孔を有するコンクリートブロック等の中に芝生等の植生を行うものであり、後者は土を若干のセメント等で固めて安定化を図りつつ、水の浸透等、自然地盤に近い感触を作り出す技術である。その性格上、一般の車道よりも駐車場や軽交通等に適した技術であり、場所に応じて普及が期待される技術である。

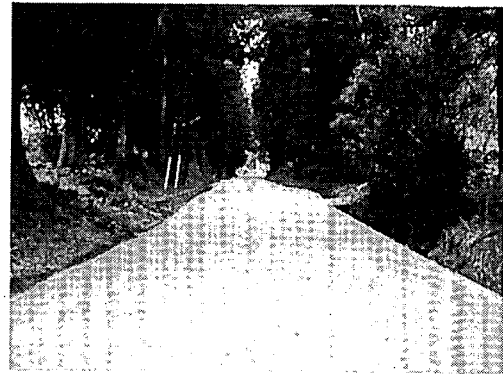
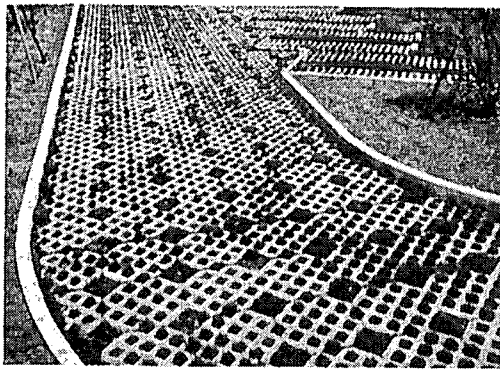


写真-1 植生が可能な舗装の例（株佐藤道路提供） 写真-2 土系の舗装の例（株日本舗道提供）

5. 普及に向けた課題

以上、環境に配慮した舗装技術の現状について紹介したが、最後に、今後これらの技術を普及・発展させていく上での課題について総括したい。課題を大別すると、

- 1) 舗装が果たすべき役割
- 2) 技術開発
- 3) 普及のための仕組みの整備

があげられる。以下、これらについて、私見を述べる。

1) 舗装が果たすべき役割

① 舗装で負担する範囲

技術開発の前提として、どのような環境要因に対して、どの程度、舗装が負荷軽減機能を担うべきか、ということについて整理が必要であろう。本稿冒頭にも述べたが、環境負荷の軽減は、本来、発生源が最も努力すべきところである。大気汚染等、道路から発生する環境負荷についても、車両等発生源対策等が第一であり、その上で、舗装としてもどれだけの寄与ができるのかということである。道路以外に起因する要因についていえば、道路から発生する環境負荷以上に発生源対策が重要である。このことは、舗装における環境面での技術開発を否定している訳ではない。発生源の努力、他の対策技術等の責務、費用対効果を踏まえた上で、舗装としての応分の役割分担と性能水準設定の整理を行っていくことなしに技術開発を進めていくことは、環境全体の改善にとって適切な対応につながらないということである。

② 舗装本来の性能とのバランス

舗装の本来の性能とは、「耐久性（耐疲労破壊）」、「耐塑性変形」等、健全な構造を有し、良好な路面性能を提供できることである。環境面の性能を追いかけるあまり、これら本来の性能を必要以上に低下させることがあってはならない。なお、供用とともに環境面での性能が低下しても、これら舗装本来の性能は良好な場合がある。その場合、環境の観点のみから修繕をすべきか、沿道や交通条件も考慮することも必要である。

2) 技術開発

① 個別の技術開発

これについては、個々の技術については課題を既に述べたので省略する。一ついずれの技術にも共通することとして、コスト縮減が挙げられる。

② 効果の定量的評価

効果の定量的評価とは、2つのステップに分かれると考えられる。第一に、騒音や温度といった舗装に関連が深い負荷軽減の程度を適切な方法で計測すること。次に、計測された舗装としての効果が、環境全体の改善にどの程度寄与するのか、適切に計測あるいは推計することである。前者は比較的容易であるが、後者は交通、沿道条件、気象や舗装以外の発生源の影響もあり、困難であることが多い。しかし、環境対策といっても公共事業の一環であることから、その効果を正しく評価して、効率的な対策をとることは避けて通れない。個別技術の開発と合わせて、舗装の環境性能と環境全体の関わり、その定量化手法について確立することが必要である。

③ 性能指標と性能目標水準の設定

技術基準の考えに照らせば、環境性能を期待して発注するならば、その指標と目標水準を明示することが必要である。このことは上記の定量的評価と密接に関連するが、路面性状と違って、環境性能は舗装性能自体が道路利用者等の利用感覚として明確に体现できる訳ではないので、まずは舗装単体としての性能目標水準を設定することになる。このため、まず適切な指標・評価方法の開発、次に舗装単体の性能と環境全体での改善効果の関係を把握することが求められよう。

3) 普及のための仕組みの整備－技術開発のインセンティブ

環境性能を有する舗装は技術開発にコストがかかるものの、その効果を金銭的に評価することが難しい。優れた技術の普及を図るためには、その効果に見合った適正な対価の算定、インセンティブの付与が必要であろう。そのためにも、試験施工等を通じた効果を把握する努力の継続、技術力を適切に反映する発注方式等への取り組みが必要である。

4) その他

その他には、特に道路・舗装以外から発生する環境負荷に対して整理が必要な事項として、コスト増をだれが負担するのか、仮に舗装で負担するとする場合の納税者に対する説明責任を誰が行うべきなのか、議論が必要である。また、材料としての品質の一定化、安定供給の仕組みなども整備が必要であろう。

6. おわりに

今回、試みとして環境面での舗装の機能を整理・体系化し、今後の技術の発展・普及に向けた課題について、主観を交えつつ述べさせて頂いた。ここで述べたことは、研究所の領域を超え、行政的側面まで踏み込んだものであり、反論を含めて様々な意見があるものと思われる。各方面での活発な議論を期待するところである。ここで、重要なのは、正確な技術的評価に基づいた冷静な議論ということである。「環境」というと、とかくイメージが先行しやすい。イメージがある種の牽引力としてその推進に有効な時もあることは否定しないが、着実に普及促進していく段階では、客観的かつ適切な評価と関係者ひいては社会全体としての共通認識を構築することが不可欠である。

【参考文献】

- 1) 舗装の構造に関する技術基準・同解説
- 2) 平成 15 年度版国土交通白書
- 3) プラント再生舗装技術指針等

[一般講演]

トンネル建設工事における粉じん対策技術の開発

技術推進本部 主席研究員（施工技術） 大下武志

目 次

1. はじめに	11
2. 粉じん対策技術の現況	11
2.1 じん肺を引き起こす粉じんとは	11
2.2 粉じん関連の法体系	12
2.3 ガイドラインで規定された粉じん対策	13
2.4 粉じん発生原因とその対処技術	14
2.5 トンネル建設工事における粉じん濃度の現状	16
2.6 粉じん対策技術の開発と普及・促進	18
3. 建設工事環境改善実験施設	19
3.1 実験施設建設の背景・目的	19
3.2 実験施設の諸元	21
4. 「ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術および局所集じんシステム の開発」に関する共同研究	23
4.1 共同研究の概要	23
4.2 共同研究の体制	24
4.3 共同研究の工程表	25
5. 平成 15 年の共同実験について	26
5.1 共同実験の概要	26
5.2 共同実験の実験状況	26
5.3 今後のスケジュール	29
6. おわりに	30

トンネル建設工事における粉じん対策技術の開発

技術推進本部 主席研究員（施工技術） 大下 武志

1. はじめに

トンネル建設工事に伴って発生する粉じんに起因するじん肺症等の粉じん障害は、重大な社会問題になっており、平成12年12月に作成された厚生労働省の「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」の粉じん濃度目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ を目標に、各現場の受注者・発注者は作業環境の改善に努力してきている。

このため土木研究所では、トンネル建設工事の中でも最も作業環境の厳しい吹き付け作業に着目し、14年度に建設工事環境改善実験施設（延長100m、断面積80 m^2 ）を建設するとともに、14年度から官民19機関で粉じん対策技術開発の共同研究を実施している。

本稿では最新の粉じん対策技術、本実験施設および共同研究の概要、並びに本年度実施した共同実験の速報を紹介する。

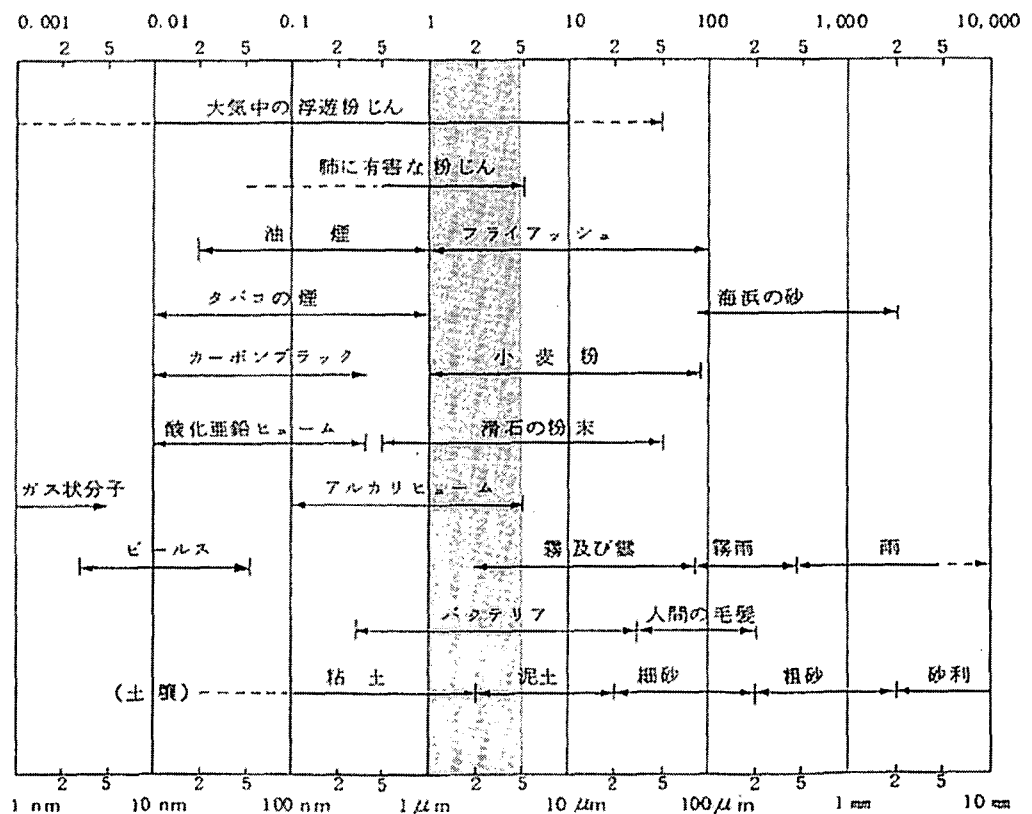
2. 粉じん対策技術の現況

2.1 じん肺を引き起こす粉じんとは

空気中に浮遊している粉じんの大きさは様々であり、図-1に示すようにその大きさには幅がある。

呼吸で吸い込まれた空気は、鼻、口から咽喉部、気管、気管支部を通り分岐を繰り返し、酸素と二酸化炭素を交換する肺細胞に至る（図-2）。

人間が吸い込む空気中の粉じんは、まず大きなものが鼻で引っかかって取り除かれ、次に、鼻を通過した粉



注・ [] はじん肺を引き起こすと考えられる粉じん範囲

「井伊谷鋼一：集塵技術マニュアル」より作成

図-1 粉じん粒子の大きさ

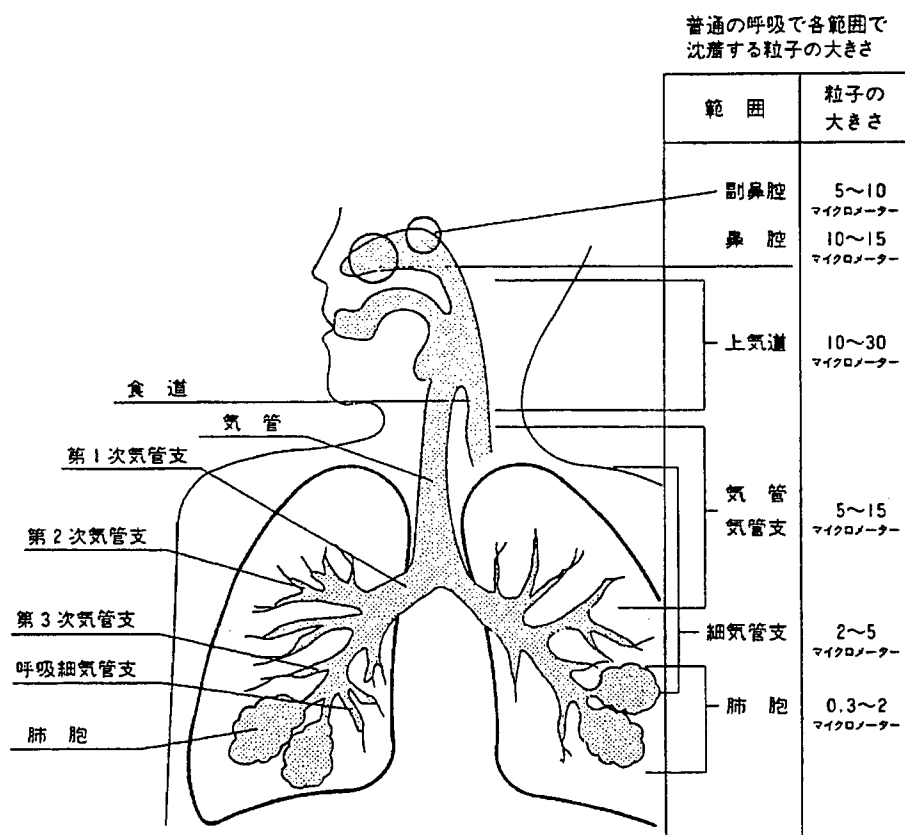
じんは、気管支に入ってくる。気管支には、鼻腔から気管支までの気道に細かい毛（せん毛）があり、せん毛運動によって気管支に入ったホコリを吐き出す機能を持っている。しかし、せん毛運動で気管支に入ってきた粉じんが全部吐き出されるわけではなく、気管支を通過した粉じんは、袋のような形をしている肺胞や細気管支にたまってじん肺の原因になる。

発生した粉じんを吸入することによって生じる職業病にはじん肺症、中毒症、がん、アレルギー症などがある。

鉱物性粉じんによって引き起こされるじん肺症は吸入性の粉じんと言われる $7.07 \mu\text{m}$ 以下の粉じんが原因と言われている。これは、これより大きな粒子は消化管に移動して無害であるのに対して、肺胞内部でマクロファージに食べられた小さな粒子のみがじん肺を引き起こすからである。じん肺を引き起こすと考えられる粉じんは $1 \sim 5 \mu\text{m}$ の大きさの粉じんといわれている。

我が国では、じん肺法において、じん肺は、「粉じんを吸入することによって肺に生じた繊維増殖性変化を主体とする疾病」と定義されている。

作業者をこの職業病から守るための労働衛生の3管理、すなわち作業環境管理（作業環境測定法）、作業管理（粉じん障害防止規則）および健康管理（じん肺法）が広く進められている。



「建設業における粉じんによる疾病の防止」より作成

図-2 呼吸器系と各範囲で取り除くことのできる粒子の大きさ

2. 2 粉じん関連の法体系

建設業におけるずい道建設工事などの粉じん発生下での作業については、労働安全衛生法、じん肺法及び粉じん障害防止規則などに粉じん作業従事者の健康管理、粉じん発生源対策、呼吸用保護具の着用及び教育などが定められている。

上記法以外に粉じん障害防止規則で定められた事項や、粉じん障害防止総合対策を推進することについて、その具体的な実施事項が一体的に示されている「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン・平成12年度 厚生労働省（以下ガイドラインという。）」と上記じん肺防止関連法令や既存の文献を基に、NATM などによる山岳トンネ

ルの建設工事現場で粉じん発生作業に関係する者が粉じん障害防止対策を図るのにその手段をわかりやすく解説した「トンネル工事の粉じん発生作業に関する衛生管理マニュアル・平成12年度 国土交通省（以下衛生管理マニュアルという。）」がある。

これら粉じん関連の法、ガイドライン及びマニュアル等の関係を図-3に示す。また、それぞれの概要を表-1に示す。

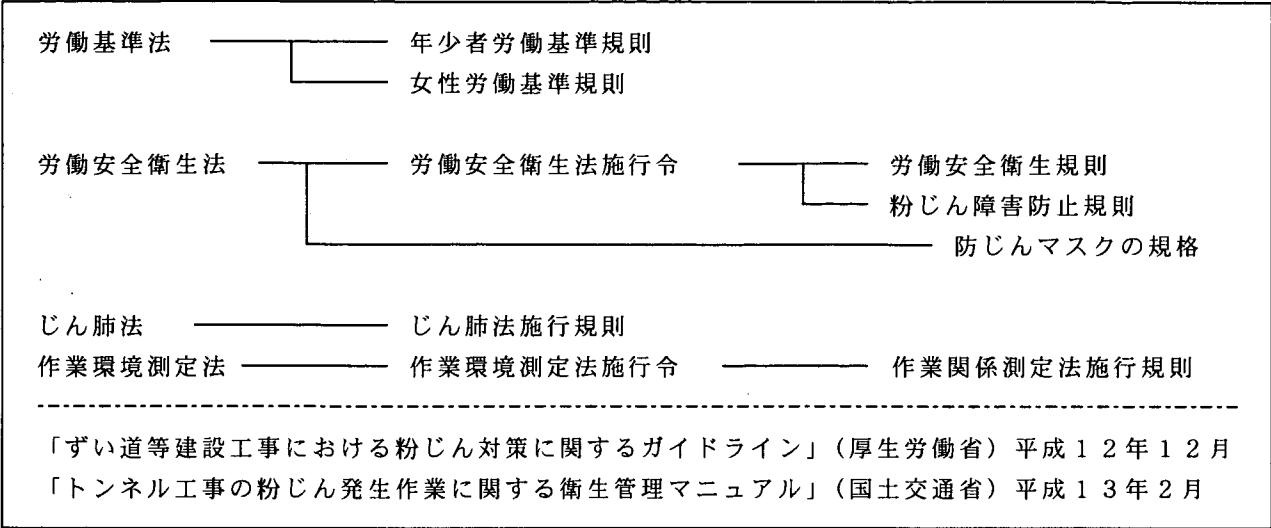


図-3 粉じん関連の法体系・ガイドライン・マニュアル

表-1 法令等の概要

法令及びマニュアル等	法令及びマニュアル等の内容
労働安全衛生法	労働災害防止のために、事業者（労働者を雇用しているもの）や労働者が守らなければならない措置・基準について定められた法律である。この中には、安全衛生管理体制や労働者の就業にあたっての措置などが定められている。
粉じん障害防止規則	「労働安全衛生法」を施行するにあたって、特に粉じん障害防止に関係する細かな規則が定められている。この中には、粉じん障害防止のための設備などの基準や呼吸用保護具（防じんマスクなど）の使用などが定められている。
じん肺法	じん肺の予防と健康管理について定めた法律である。じん肺健康診断などが定められている。
ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン	ずい道等建設工事における粉じん対策に関し、粉じん障害防止規則に規定された事項及び第5次粉じん障害防止総合対策において推進することとしている事項等について、その具体的実施事項を一体的に示している。この中には、粉じん濃度目標レベルの設定、定期的な坑内の粉じん濃度の測定、坑内での常時呼吸用保護具の着用が定められている。
トンネル工事の粉じん発生作業に関する衛生管理マニュアル	トンネル工事現場で働く元請業者の職員や関係下請業者の職長など第一線で作業を指導する人々が「ガイドライン」に従って作業を進めていくうえでの作業マニュアルである。

2.3 ガイドラインで規定された粉じん対策

粉じん障害防止対策については、昭和30年の珪肺等特別保護法の施行、昭和35年のじん肺法の施行、昭和54年の粉じん障害防止規則（以下、「粉じん則」という）の施行、さらに昭和56年以来5次にわたる粉じん障害防止総合対策の策定等によりその推進に取

り組んできている。この結果、じん肺の新規有所見者は、平成11年には414人であり、粉じん障害防止総合対策を初めて策定した昭和56年当時と比べてみても、10分の1以下となっている。

一方、ずい道等建設工事においては、関係団体及び事業上の自主的な取組みによる第5次粉じん障害防止総合対策推進運動の実施、施工技術や換気技術の進歩、防じんマスク等の呼吸用保護具の改良等の結果、じん肺の新規有所見者の発生数が大幅に減少してきているが、じん肺の新規有所見者の発生率が高いこと等から、第5次粉じん障害防止総合対策において、トンネル建設工事における粉じん障害防止対策の推進を重点事項の一つと定め、その対策の徹底を図っている。

また、近年、ずい道等建設工事では、NATM、TBM等の新たな工法の普及、機械の大型化等により粉じんの発生の態様等が多様化しており、このような状況に対応した的確な対策の推進が求められている。

このため、「ガイドライン」は、ずい道等建設工事における粉じん対策について、図-4のような具体的な内容を一体的に示すことにより粉じん障害防止対策の一層の充実を図ることを趣旨としている。

また⑦の粉じん濃度の測定については今まで濃度の目標値がなかったが、このガイドラインで初めて $3\text{mg}/\text{m}^3$ の目標値が示された。

また、測定方法についても具体的に示され、測定位置については、「切羽から坑口に向かって50m程度離れた位置における断面において、床上50cm以上、150cm以下の同じ高さで、それぞれの側壁から1m以上離れた点および中央の点の3点」とされた。

ただし、中小断面のずい道等のうち、 $3\text{mg}/\text{m}^3$ を達成することが困難と考えられるものについては、できるだけ低い値を目標レベルとすることになっている。

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">① 粉じん対策に係る計画の策定② 粉じんの発生源に係る措置③ 換気装置等による換気の実施等④ 換気の実施等の効果を確認するための粉じん濃度等の測定⑤ 防じんマスク等有効な呼吸用保護具の使用⑥ 労働衛生教育の実施⑦ 粉じん濃度目標レベル（$3\text{mg}/\text{m}^3$）の設定⑧ 空気清浄機能付き休憩室の設置 |
|---|

図-4 ガイドラインで規定された粉じん対策

2. 4 粉じん発生原因とその対処技術

NATM工法によるトンネル建設工事は表-2に示すように、切羽においては①削孔、②発破、③ずり積み・ずり出し、④機械掘削・こそく、⑤コンクリート吹き付け、⑥ロックボルトを繰り返しながら掘削を進める。また後方作業としては、二次覆工、インバート工、雑工がある。それぞれの作業の発生粉じん量の多少、粉じん発生の要因、対応方法を表-2に示す。

表-2 粉じん発生原因とその対応方法

作業内容	発生 粉じん量	粉じん発生の要因	対応方法	
削孔	地山状況による	地山表面・ボアホール内からのクリ粉の飛散	クリ粉の捕集	局所集じん機付き削岩機
発破	地山状況による	掘削地山の飛散	発破以外の方法	静的破碎剤
ずり積み ずり出し	多い	積込み（ずりのすくい・ダンプへの積載）に伴う掘削地山の飛散		散水
		積込みに伴う路盤粉じんの巻き上げ		散水
		ダンプ走行に伴う路盤粉じんの巻き上げ	車両以外による搬出	連続コンベアによるずり搬出
		ダンプ走行時落下ずりによる粉じん飛散		散水
機械掘削・こそく	地山状況による	機械掘削・こそくに伴う掘削地山粉じんの飛散		局所集じん機付き削岩機
コンクリート吹付け	多い	大量の搬送エアによるコンクリートの分散・飛散	使用エア量の削減	遠心力を用いた吹付け
			分離しにくいコンクリートの使用	粘性を高めたコンクリート
				粉じん抑制剤の使用
		未混合の粉体急結剤の飛散	粉体以外の急結剤の使用	アルカリフリー-液体急結剤
			急結剤混合方法の改良	吹付けノズルの改良
			急結剤添加量の管理	添加剤の自動調整
		粉体急結剤補充時の急結剤の飛散	粉体急結剤の梱包方法・補充方法の改良	
			粉体以外の急結剤の使用	
		「吹付ける」ことによる粉じん発生	吹付け以外の方法の採用	型枠等を用いたライニング手法
				ブレイニング工法
ロックボルト	地山状況による	クリ粉の飛散	クリ粉の捕集	局所集じん機付き削岩機
		ドライモルタル開封時の材料飛散	モルタル材料の梱包方法の改良	
覆工	少ない	生コン車の走行による粉じんの発生	排ガスの浄化	浄化装置付き重機の使用
雑工	少ない	圧縮空気などによる清掃時の粉じん巻き上げ		散水
		集じん機メンテナンス時の粉じん飛散		湿式又は吸引式清掃機
重機の使用	重機の状態による	重機による油煙・煤煙	排ガスの浄化	浄化装置付き重機の使用
			各種油圧装置の密閉化	自動化、ロボット化
全般		捕集できない浮遊粉じん	換気設備	小型大風量換気設備
			集じん	大容量小型集じん機
			注意の喚起	自動濃度表示装置
			粉じん暴露防止	操作室の密閉化
			人体の吸入防止	防じんマスク

2. 5 トンネル建設工事における粉じん濃度の現状

坑内の粉じん濃度の現状として、「ずい道工事における換気技術委員会報告書（平成12年3月）」（建設業労働災害防止協会）で検討の過程で提案された96カ所のトンネル工事現場の粉じん濃度実測結果を表-3に示す。

本調査は、ガイドラインの策定前であるが、吹付け時の粉じん量がずり積み・ずり出し時より高く、また断面積の小さいトンネルの方が高い値となっている。

表-3 粉じん濃度の平均値

単位：mg/m³

トンネル断面積 作業内容	16m ² 未満	60m ² 未満	60m ² 以上
ずり積み・ずり出し	1.6（矢板工法）		3.1
吹付け		5.1	4.2

また、平成13年度に国土交通省、日本道路公団、鉄建公団で当時施工中の山岳トンネル建設現場を対象にアンケート調査を行い、トンネル延長、断面、地質等の一般事項、各作業時（掘削、ずり搬出、吹付け、換気）の粉じん対策状況等のアンケート調査を行った。

国土交通省が68現場、日本道路公団が70現場、鉄建公団が35現場、その他1現場の合計174現場から回答が得られた（図-5）。

延長別では、500～2000mが多く（図-6）、断面積では60～100m²が多い（図-7）。

送風量は1000～2000m³/分が多く（図-8）、坑内風速では0.2～0.6m/secが多い（図-9）。また、集じん機については58%の現場で活用されている（図-10）。

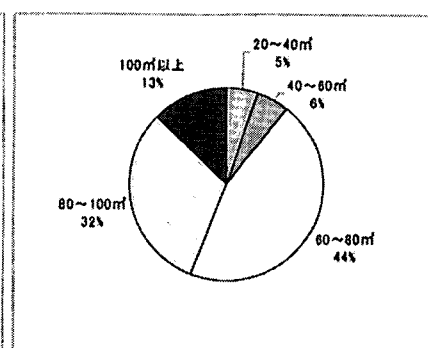
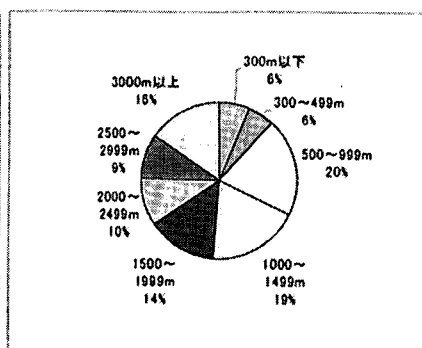
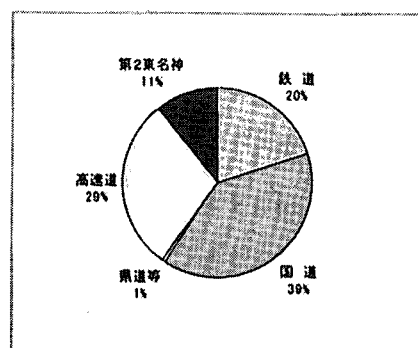


図-5 用途別構成比

図-6 延長別構成比

図-7 断面積別構成比

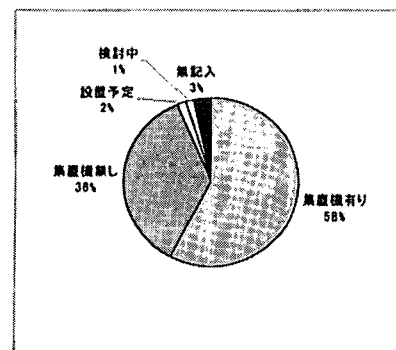
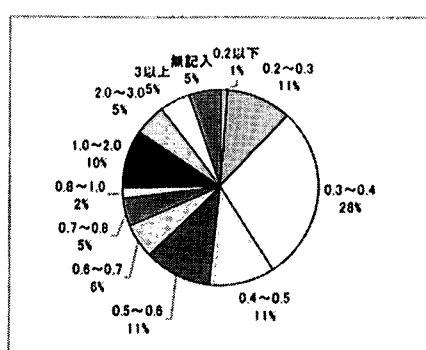
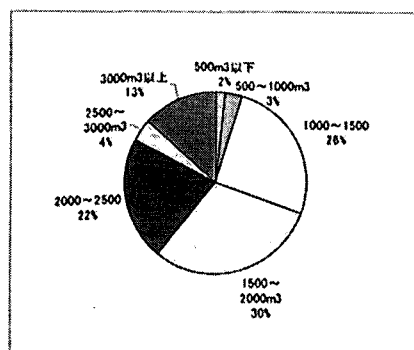


図-8 風量別構成比

図-9 坑内風速別構成比

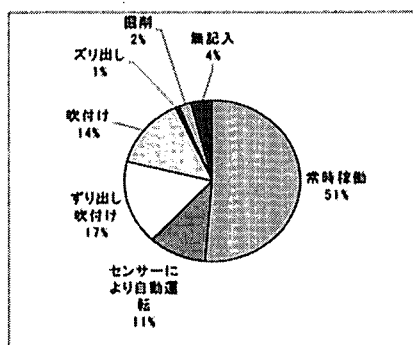
図-10 集じん機の利用状況

しかし、集じん機については、常時稼働しているのは 51 %にとどまり、粉じん量の多い作業だけに利用している現場も多い（図－1 1）。

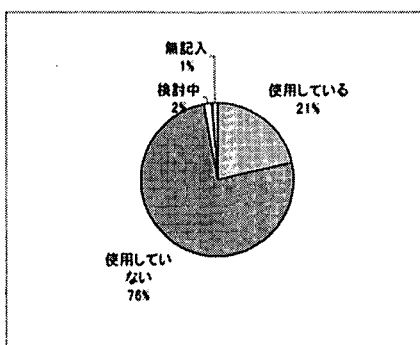
粉じん抑制剤は 21%（図－1 2）、高粘性・高品質吹き付けは 31%（図－1 3）の現場で採用されている。

排ガス浄化装置はほとんどの現場に普及している（図－1 4）。また、電動ファン付きマスクも 43%の現場で利用されている（図－1 5）が、一部の作業員だけに限られている現場も相当ある（図－1 6）。

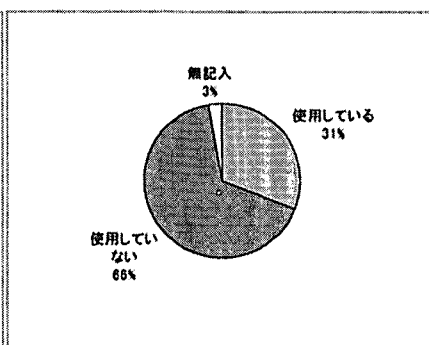
ずり積み作業時には 20%の現場で（図－1 7）、吹付け作業時には 36%の現場で（図－1 8）粉じん濃度が $3\text{mg}/\text{m}^3$ を超えている。



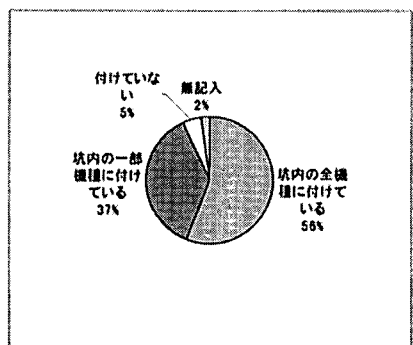
図－1 1
集じん機の稼働状況



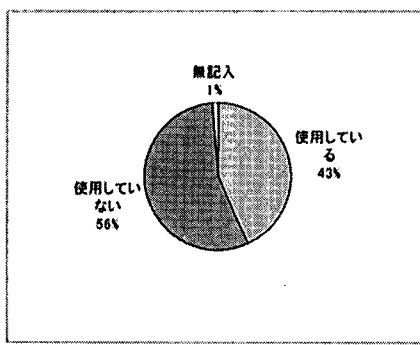
図－1 2
粉じん抑制剤の利用状況



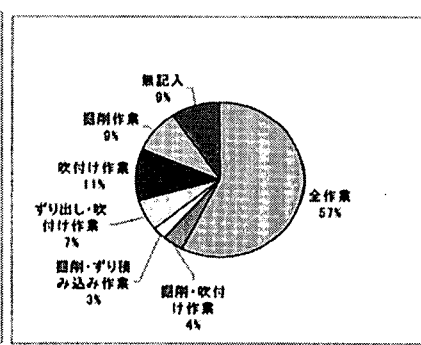
図－1 3
高粘性・高品質吹き付け



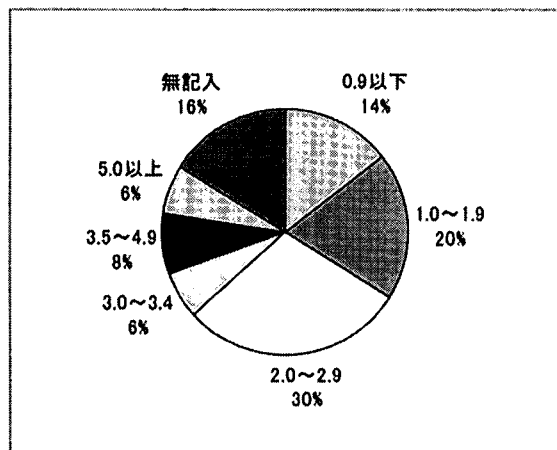
図－1 4
排ガス浄化装置の装備



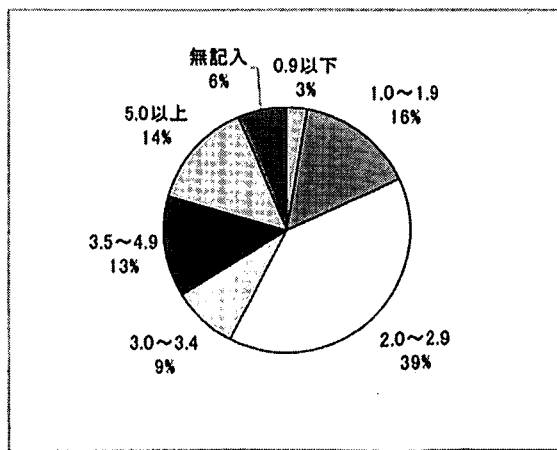
図－1 5
電動ファン付きマスク



図－1 6
電動ファン付きの使用作業



図－1 7 ずり積み作業時の粉じんレベル



図－1 8 吹付け作業時の粉じんレベル

2. 6 粉じん対策技術の開発と普及・促進

平成12年度に「建設工事における粉じん対策技術検討会」（委員長：水谷敏則（財）先端建設技術センター先端建設技術研究所長）で粉じん対策技術に関する、今後の開発技術と普及促進をテーマとする技術を表－4のとおりまとめた。

表－4 今後の技術開発と普及・促進技術

A. 今後の技術開発		
大分類	小分類	技術の名称
発生抑制技術	材料の改良・開発	①アルカリフリー液体急結剤 ②スラリー式急結剤
	吹付け方法・機械の改良	③ロータリー式トンネル吹付け機 ④エアレス吹付け機
	吹付け代替工法	⑤型枠等を用いたライニング工法 ⑥プレライニング工法
	機械改良・補助設備	⑦局所集じん装置搭載型自由断面掘削機 ⑧局所集じん装置搭載型削岩機
希釈・除去技術		⑨小型大風量換気設備 ⑩大容量小型集じん機
人体に対する吸入防止技術		⑪ずい道用防じんマスク
その他の技術		⑫無人自動トンネル施工機 ⑬自動坑内粉じん濃度表示・管理装置 ⑭空気清浄機能付き休憩施設
B. 普及・促進をテーマとする技術		
大分類	小分類	技術の名称
発生抑制技術	材料の改良・開発	①粉じん抑制剤 ②高粘性・高品質吹付けコンクリート
	吹付け方法・機械の改良	③ NATM・遠心力吹付け工法 ④吹付けコンクリートトータル管理システム ⑤低粉じん型吹付け工法
	機械改良・補助設備	⑥高圧散水設備
	代替工法	⑦連続ベルトコンベア
人体に対する吸入防止技術		⑧電動ファン付き呼吸用保護具

3. 建設工事環境改善実験施設

3. 1 実験施設建設の背景・目的

上記のようにトンネル建設工事に伴って発生する粉じん対策技術の開発を行うため、建設工事環境改善実験施設を平成13年度2次補正予算で建設し、平成15年2月に完成した。

粉じん濃度を低減させるために新しい材料やコンクリート吹付け工法、換気方法などの技術が共同研究において提案されており、これらの効果を確認し完成度を高めるためには実証実験が必要となる。実証実験の場としては実際のトンネル建設現場や小規模模擬トンネルなどが考えられるが、現場で実験を行うと工期に影響を及ぼすことや現場条件に即した粉じん濃度の計測が行えないといった問題がある。これらの問題を解消することが、本施設の目的の一つであり、実大規模でコンクリート吹付けや換気などの実証実験が行える実験用トンネルは、本施設の他に日本国内には無い。

また、社会資本の増加に伴いその維持・補修工事が増えてきている。このような工事では、塗装、塗装のケレン、劣化コンクリートのハツリ、コンクリート吹付けが行われることがあり、トンネル建設工事と同様に粉じんが発生する。本施設を利用してこれらの実験も可能である。

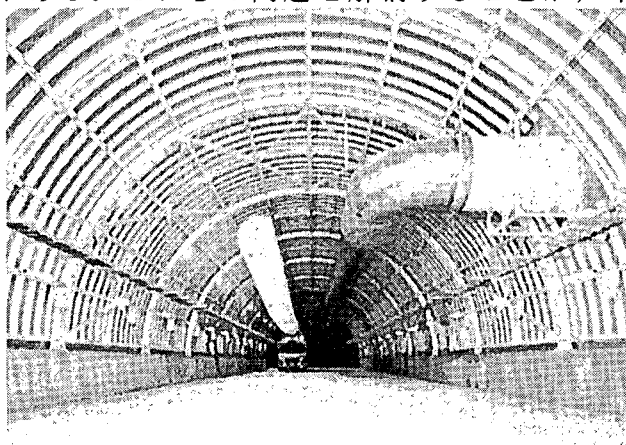


写真-1 実験棟内部

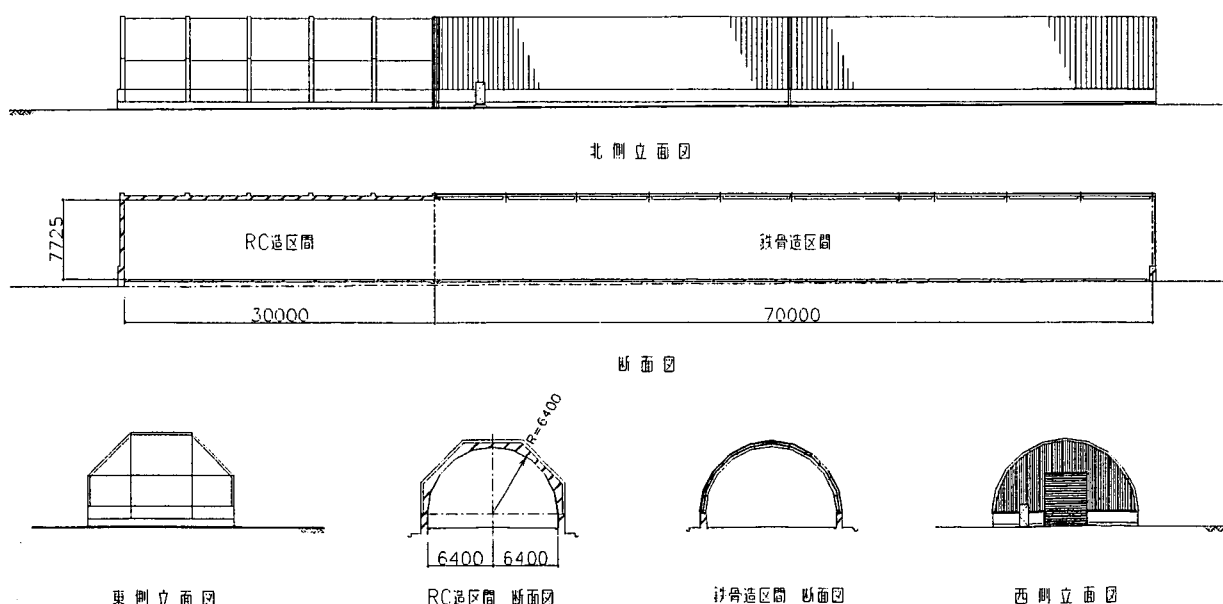


図-19 建設工事環境改善実験施設 実験棟

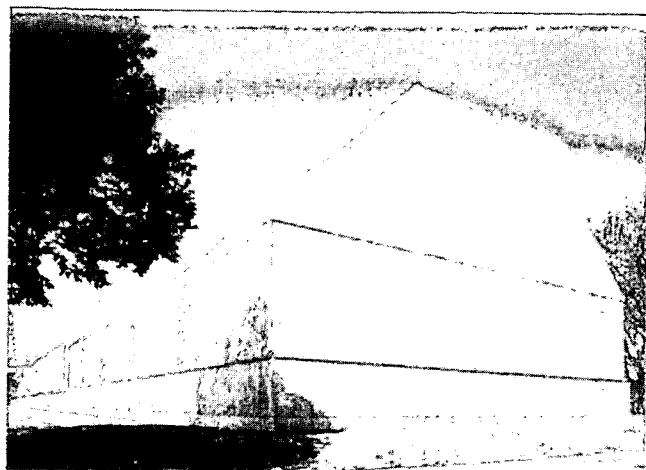


写真-2 実験棟 RC 造区間概観

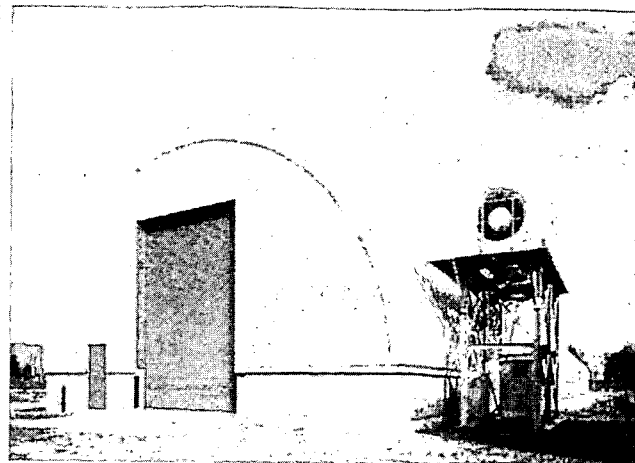


写真-3 実験棟鉄骨造区間概観と送風機

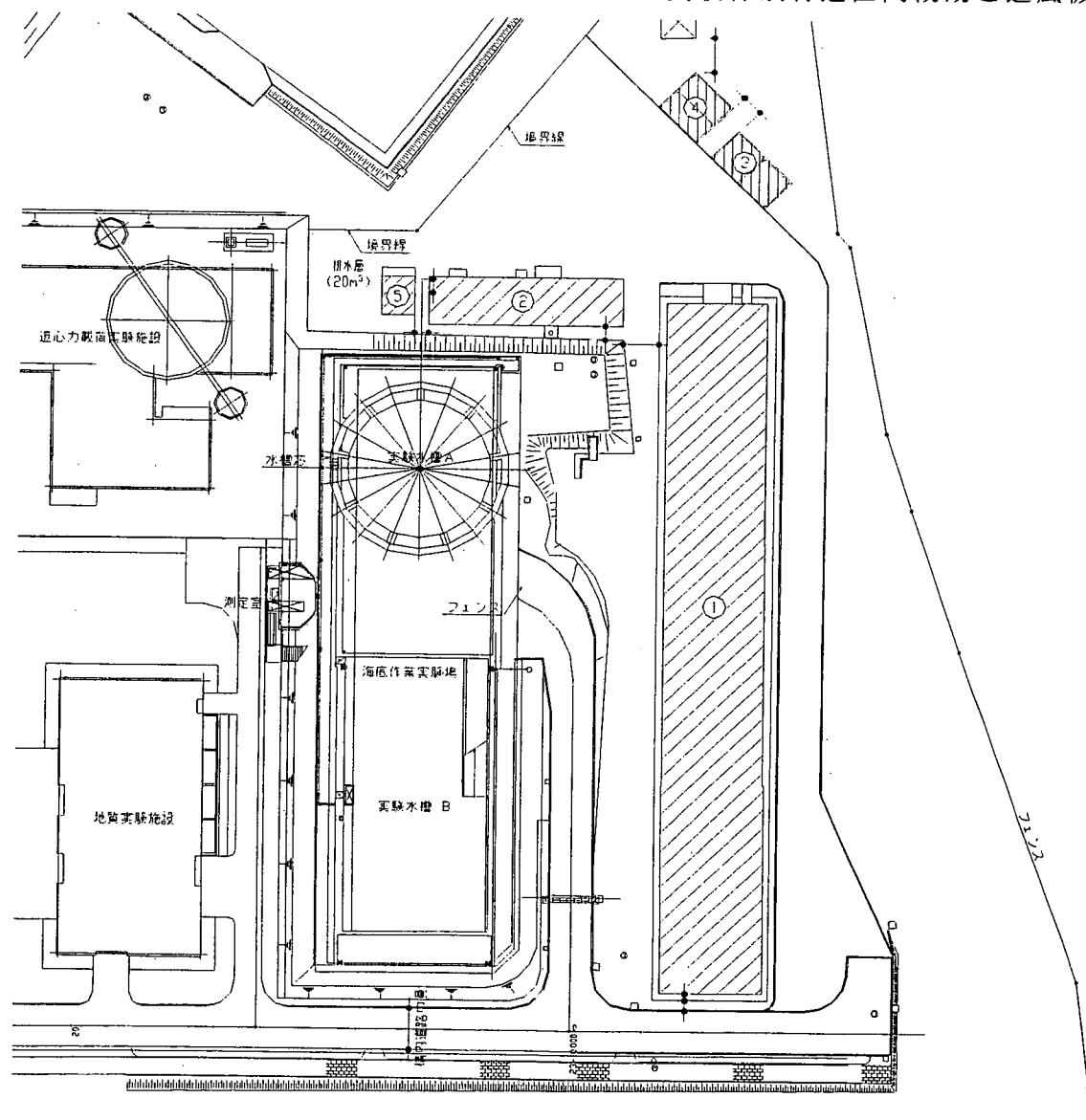


図-20 実験施設の全体図

①実験棟, ②計測棟, ③④ストックヤード, ⑤排水槽

3. 2 実験施設の諸元

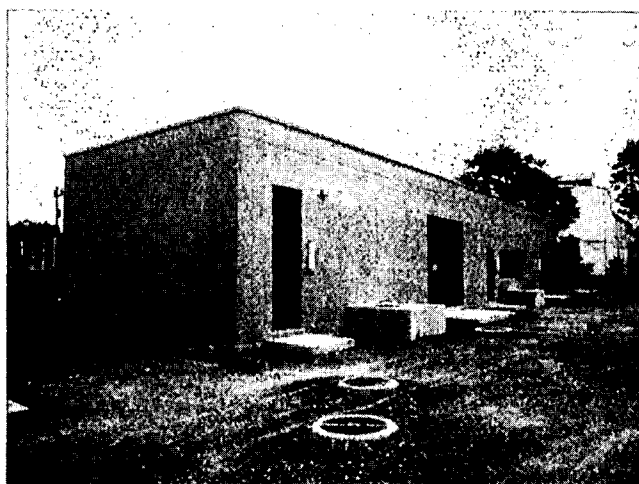
建設工事環境改善実験施設は、土木研究所の中で最も北側に位置しており、5棟の建物から構成されている（図－20）。主要な建物と設備の諸元を表－5に示す。

表－5 主要諸元

実験棟	構造	RC造(30m), 鉄骨造(70m)
	RC造内側鉄板厚	25mm
	内空断面積	81.7m ²
	寸法(内空)	7.9m(H)×12.8m(B)×100m(L)
その他建物	計測棟	172.9m ² (計測室43.7m ² , 屋内ストックヤード51.1m ²)
	屋外ストックヤード	79.3m ² (2棟合計)
送風機	処理風量	最大1500m ³ /分
	全圧	130mmAq
	風量制御	インバータにより無段階に可変
	設置位置	実験棟南側(風管のみ実験棟内に導入)
	風管	スパイラル風管(導入部), ビニル風管(実験棟内)
	風管径	1500mm
集じん機	集じん形式	バグフィルター
	処理風量	最大1800m ³ /分
	設置位置	実験棟内
	移動	平ボディトラックに常時積載



写真－4 屋外ストックヤード



写真－5 計測棟

建物のうち最も大きなものがトンネルを模擬した実験棟である。内空断面は、図－5に示すように一般的な2車線道路のトンネル断面形状となっており、高さが約8m、幅が約13m、断面積は約80m²である。全長は100mあり、鉄筋コンクリート(RC)造の東側30m区間と鉄骨造の西側70m区間の2つの部分に分かれている。RC造の区間は、内側に鉄筋コンクリートと一体化させた厚さ25mmの鉄板が配置されており、コンクリートの吹付け、その後のハツリ作業にも耐えられる構造となっている。鉄骨造70mの区間では、主に粉じん濃度の計測を行う。その他の建物として、計測棟(写真－4)、屋外ストックヤード(写真－5)などがある。

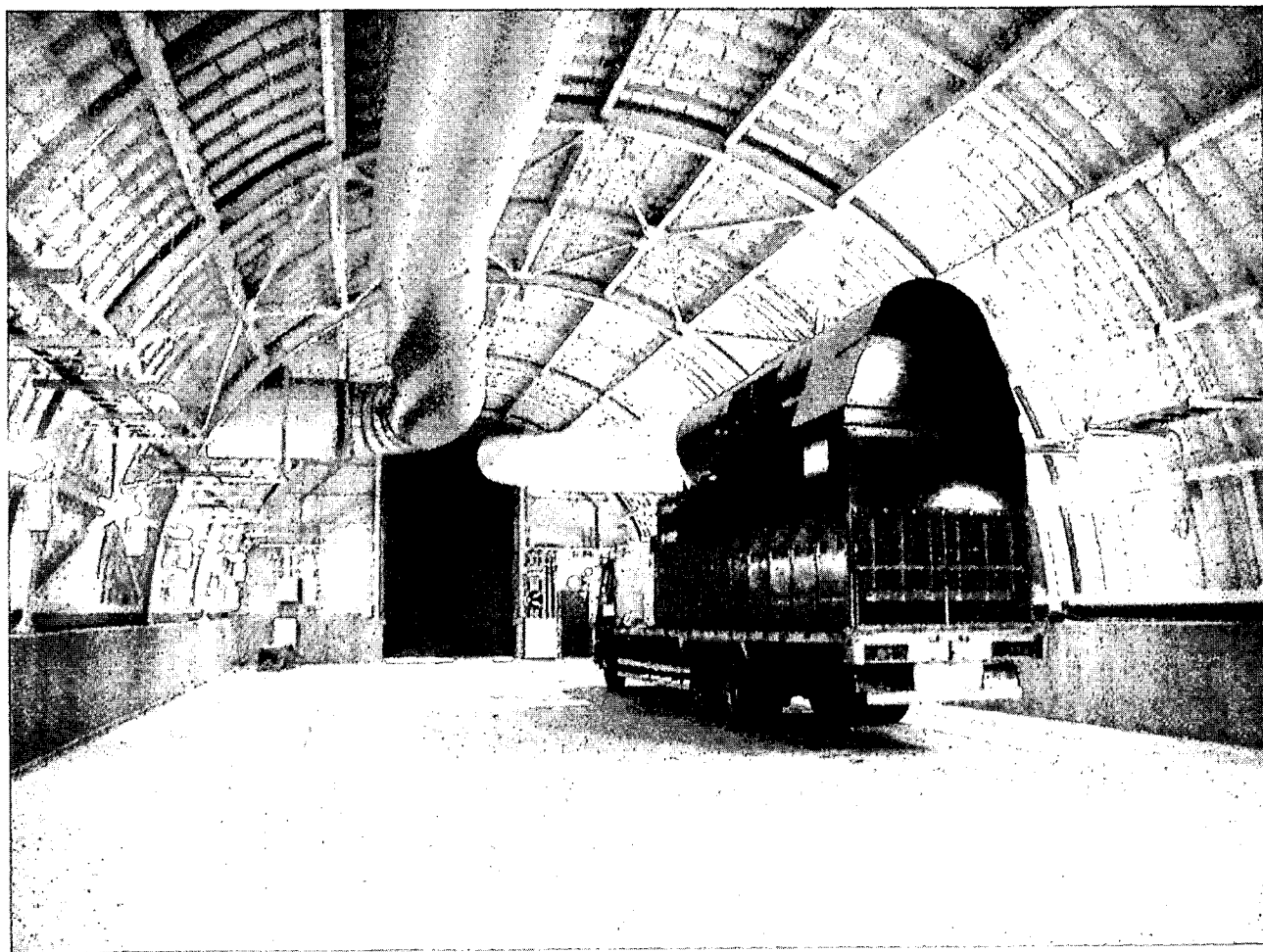
設備としては、送風機と集じん機がある。

送風機の最大風量は $1500\text{m}^3/\text{分}$ であり、一般的なトンネル建設工事現場の坑内平均風速 $0.3\text{m}/\text{秒}$ を再現することができる。風管の長さは 1m 、 2m 、 5m の 3 種類があり、これらの風管を組み合わせることで、 1m 単位で長さの調整が可能である。また、実験棟天井に張った 5 条のメッセンジャーワイヤーを利用することで、風管の吹出し位置を調整することもできる。

集じん機（写真－6）はフィルター形式で、最大処理風量は $1800\text{m}^3/\text{分}$ である。集じん機はトラックの荷台に常時積載された状態にあり、実験条件に合わせて移動することができる。

送風機と集じん機はともにインバータ制御により風量を変えることができる。送風機と集じん機の風量の組み合わせにより、様々な換気状況を再現することができる。

本施設は、平成 15 年度および 16 年度に、土木研究所を始めとする 19 機関が参加する共同研究「ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術および局所集じんシステムの開発」で使用するになっている。



写真－6 集じん機と送風管

4. 「ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術および局所集じんシステムの開発」に関する共同研究

4. 1 共同研究の概要

2章の背景から、3章で述べた建設工事環境改善実験施設を用いて、ずい道工事における吹付け作業時の発生粉じん量の低減および局所集じんシステムの開発を目指して共同研究を平成14年6月から平成16年度までの予定で実施している。

本共同研究の実施にあたっては、平成13年11月に「建設工事における工事環境改善技術に関する研究」を、まず民提案型共同研究で公募し、エアレス吹付け工法、局所集じん工法について総合建設業・機械メーカーから申請があった。

その後、共同研究の成果をより高めるため材料メーカー、集じん機メーカー等に追加公募を平成14年1月に行い、共同研究を行うこととなった。共同研究参加会社は表-6のとおり19機関である。

表-6 共同研究参加機関

■公的機関（2機関） 独立行政法人土木研究所 （財）先端建設技術センター ■総合建設業（6社） 鹿島建設（株） （株）鴻池組 西松建設（株） （株）フジタ 前田建設工業（株） 三井住友建設（株）	■材料メーカー（5社） （株）エヌエムビー （株）カテックス 信越化学工業（株） 太平洋マテリアル（株） 電気化学工業（株） ■機械メーカー（4社） 石川島播磨重工業（株） リブコンエンジニアリング（株） 小林エンジニアリング（株） （上記3社を以下 IHI グループという） ケービーシーマシナリ（株） ■集じん機メーカー（2社） 日鉄鉱業（株） （株）三井三池製作所
---	--

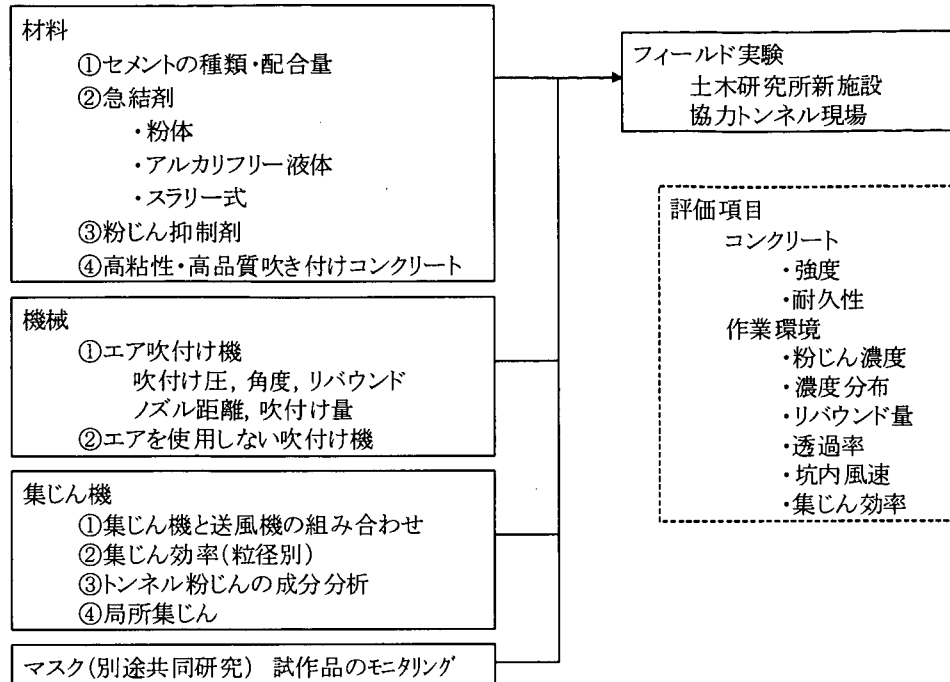
共同研究の実施にあたっては、表-4に示したように、

- ①発生抑制技術（材料・吹付け機械の改良により粉じん発生量を低減する）
 - ②希釈除去技術（やむなく発生した粉じんを効率的に希釈除去する）
 - ③人体に対する吸入防止技術（防じんマスク・電動ファン付マスク等の呼吸用保護具を作業員の作業形態を勘案して常時着用が行いやすいものに改善する）
- の観点から、短期間で効果があがる技術開発を行うこととした。

共同研究では、図-21に示すように材料（急結剤（粉体・液体）、粉じん抑制剤）、吹付け機械（エア（圧縮空気）を使用、エアを使用しない）、局所集じんについて研究開発を行うこととし、まず土木研究所の建設工事環境改善実験施設で吹付けコンクリートの強度、粉じん濃度、リバウンド量等の評価を行い、技術の改良を経た後、実現場での試験施工・評価を行うこととしている。

また、電動ファン付呼吸用保護具の改善については、（株）重松製作所、（株）谷沢製作所、山本光学（株）、（財）先端建設技術センターと別途、平成13年度～平成15年度の予定で上記と同様に民提案型の共同研究を行っている。

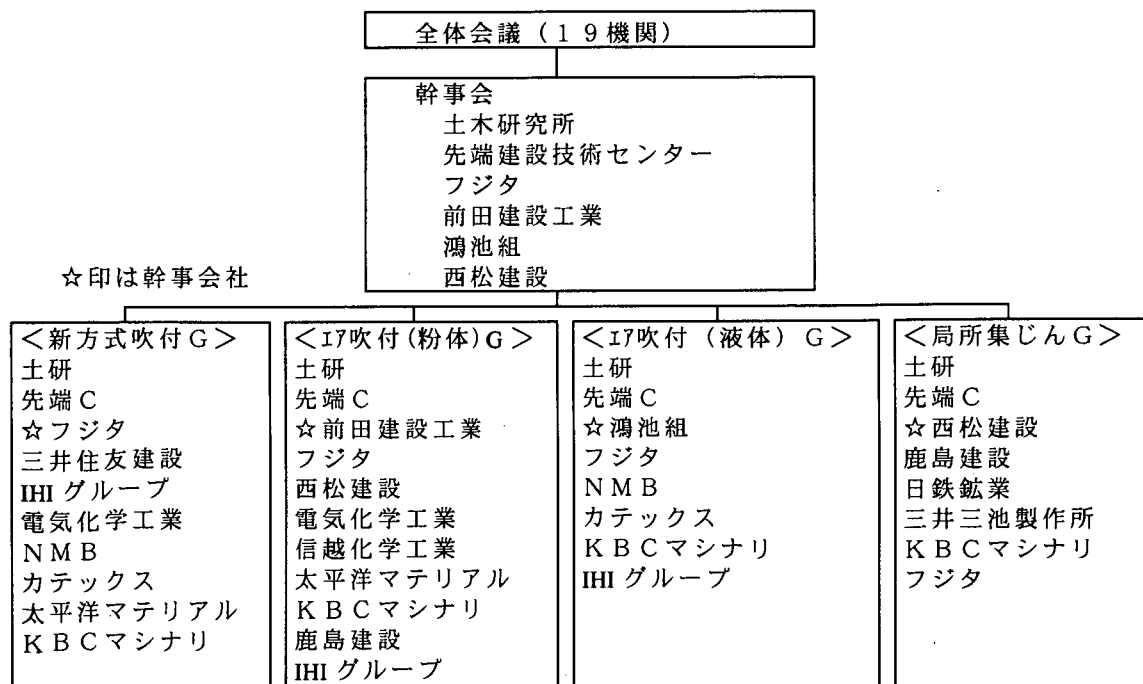
吹付けに関する共同研究（案）



図－２１ 共同研究の全体概要

４．２ 共同研究の体制

共同研究では、短期間で効率的・効果的に研究開発を行うため、図－２２に示すように工法別にグループを設け分科会形式として活動している。



図－２２ 共同研究の体制

各グループでは以下の研究開発を行っている。

①新方式吹付グループ

エア（圧縮空気）を使用せず，遠心力等を用いた吹付けシステムにより粉じん量の低減を図る

②エア吹付（粉体急結剤）グループ

粉体急結剤を用いて，粉じん抑制剤，粉じん低減剤，低粉じん型急結剤，SEC練り，スラリーショットにより粉じん量の低減を図る

③エア吹付（液体急結剤）グループ

アルカリフリー液体急結剤を用いたエア吹付けにより粉じん量の低減を図る

④局所集じんグループ

切羽での局所集じんシステムにより，発生した粉じんの希釈・除去を図る

なお，平成14年度は，建設工事環境改善施設が建設中であったため，共同研究での実験が行いやすくするために，実験用トンネルの仕様，構造，実験環境を検討し変更するため，模擬トンネルWG（幹事：鹿島建設）を別途設置し，実験用トンネルの完成とともに終了した。

4. 3 共同研究の工程表

共同研究は，表－7の工程で技術・開発を行っている。

表－7 共同研究工程表

	14年度	15年度	16年度
実験用トンネルの構築 模擬トンネルWG 実験施設のスペックの変更等	—		
各WGで ・実験計画立案 ・条件設定・評価方法の検討 ・実験結果の整理・分析 ・技術改良	—	—	—
各社単独で ・技術開発・基礎実験等			
共同研究・共同実験 ・基礎実験 ・評価実験		— —	— —
可能であれば ・モデル現場での試験施工・評価		—	—
まとめ・報告書作成			—

5. 平成15年の共同実験について

5. 1 共同実験の概要

建設工事環境実験施設が本年2月末に完成後、4月から共同実験を開始した。工程は以下のとおりである。

■事前実験

- ・ 4月7日～11日 局所集じん事前実験（5日間）
発煙筒を用いての坑内風速・エアカーテン実験
- ・ 4月16日 生コンプラントでの試験練り実験
配合量，スランプ，エア量，強度の確認

■本実験

- ・ 5月6日～9日 実験準備
- ・ 5月12日～15日 キャリブレーション実験（4日間）
吹付け基盤作成
送風量・集じん量と粉じん濃度の相関把握
- ・ 5月16日～23日 局所集じんG実験（7日間）
- ・ 5月26日～6月2日 粉体急結剤G実験（7日間）
- ・ 6月3日～10日 液体急結剤G実験（7日間）
- ・ 6月11日～19日 新方式吹付けG実験（7日間）
- ・ 6月20日～21日 追加実験・後片付け

5. 2 共同実験の実験状況

5. 2. 1 局所集じん事前実験

局所集じんGでは、切羽で発生した粉じんをエアカーテンで封じ込めて拡散を防止した上で、小型集じん機で効率的に回収するシステムを開発するための3方式のエアカーテン方式を実験した。事前実験においては以下を確認した。

- ①送風機風量，風管位置による風速分布を調べ，切羽のエアカーテンを壊さない風量・風管位置を求めた。
- ②局集じんシステムを据え付け，エアカーテン発生時の周辺の風速分布を測定するとともに，発煙筒により，模擬的に粉じんを発生させ，風の流れ，効果を確認した。



写真-7 風速測定状況

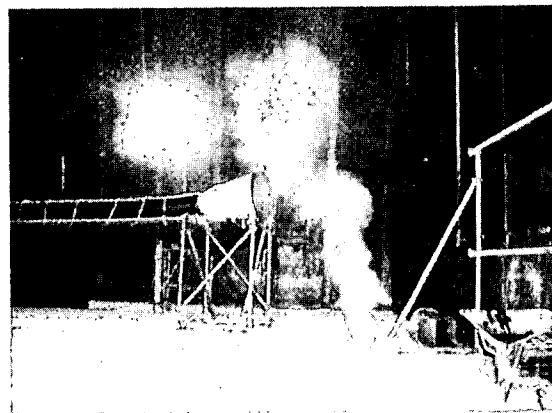


写真-8 発煙筒による実験状況

5. 2. 2 キャリブレーション実験

実験トンネルの下地が 25mm の鋼板で、そのままでは吹付け時にリバウンドが大量に発生することが予想され、また吹付けコンクリートの付着を良くするため、下地吹付けと兼ねてキャリブレーション実験を行った。

この時、一般的な配合条件・施工機械での標準工法による粉じん量の基本データを求めた。なお、換気条件と粉じん濃度の相関を取り、送風量については $1000\text{m}^3/\text{分}$ 、集じん量 $1260\text{m}^3/\text{分}$ とした。 80m^2 クラスのトンネルでは、坑内平均風速 $0.3\text{m}/\text{sec}$ を確保するためには $1500\text{m}^3/\text{分}$ の送風量が必要であるが、今回使用した生コンプラントの骨材や品質、また実験トンネルの作業環境（床はコンクリート舗装等）が良く、吹付け時に発生する粉じん量が比較的少ないことがわかったため、標準工法で粉じん量を $5 \sim 6\text{mg}/\text{m}^3$ 程度確保するため送風量・集じん量を意図的に下げた。また、送風機の風管の位置は切羽から 50m 地点とした。

さらに吹付けコンクリートの吐出量については実際の現場での作業条件に合わせるため $12\text{m}^3/\text{h}$ 程度とした。

また、翌週からの本格実験の予行演習として、粉じん計・ローボリュームサンプラーの計測、スランプ・空気量・温度のコンクリートのフレッシュ実験、ピン貫入・プルアウトの初期強度試験、リバウンド実験を行った。

5. 2. 3 局所集じん

吹付け機、生コン車が実験用トンネルにあるときの吹付け作業時の作業形態での風速分布を送風機の風量を変えて行った。

また、①横方向エアカーテン（横方向ブロー（ $15\text{m}^3/\text{分} \times 2$ 台）、②排気エアカーテン（局所集じん機 $250\text{m}^3/\text{分}$ の排気を横方向に出しエアカーテンを作る）、③コーン状エアカーテン（吹付けノズルの回りにコーン状に圧縮空気を送り、粉じんを封じ込め局所集じん機で粉じんを捕集）について実験を行った。

さらに、別途数値シミュレーションによる解析を行っており、効率的に研究を進めたい。

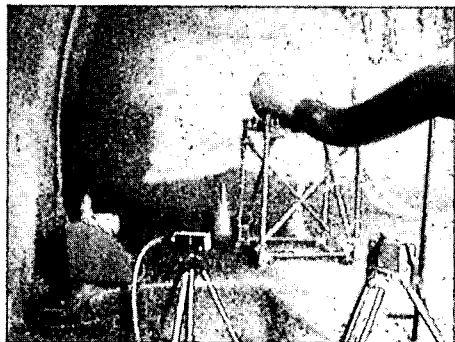


写真-9 横方向エアカーテン（左下）



写真-10 排気エアカーテン

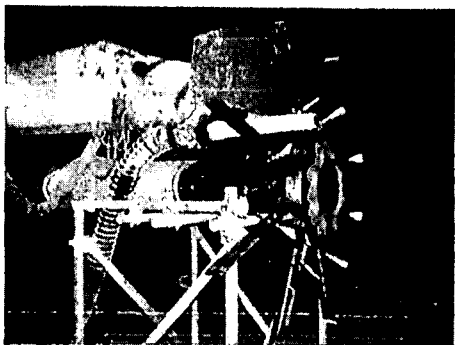


写真-11 コーン状エアカーテン



写真-12 粉じん計、ローボリュームサンプラー

5. 2. 4 エア吹付（粉体急結剤）グループ

標準工法，粉じん低減剤（ナトムクリーン，クリアパック），低粉じん急結剤（ショットマスターR），SEC練り，スラリーショットについて強度試験，粉じん濃度，粉じん粒径，リバウンドの実験を行った。



写真－13 プルアウト試験



写真－14 ピン貫入試験



写真－15 リバウンド実験



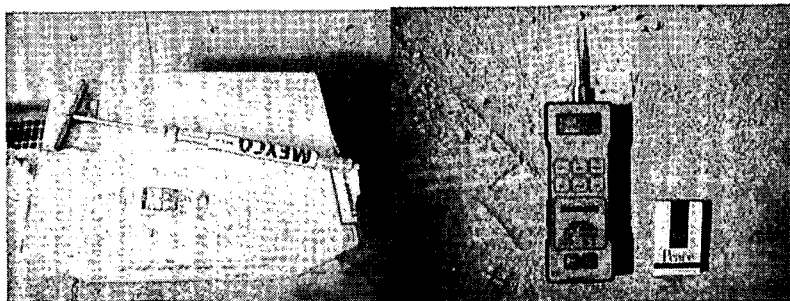
写真－16 スラリーショットの配管

5. 2. 5 エア吹付（液体急結剤）グループ

カテックス，NMBの液体急結剤について，単位セメント量を変えて強度試験，粉じん濃度，粉じん粒径，リバウンドの実験を行った。液体急結剤については，初期強度が粉体急結剤より低いため，超初期強度試験（針貫入）も行った



写真－17 液体急結剤実験状況



写真－18 超初期強度試験機器

5. 2. 6 新方式吹付グループ

エアレス吹付け方式（IHI グループ）については液体急結剤（カテックス・NMB）およびスラリー（粉体と水を直前で混合しスラリー化したものをコンクリート吐き出し口の先でコンクリートに混合）で、ダストレスショットクリート（三井住友建設）は粉体急結剤の種類を変えて強度試験，粉じん濃度，粉じん粒径，リバウンドの実験を行った。

なお，これらは圧縮空気を使用しないため，それぞれの吹き付け機械で実験を行った。

また，最後に急結剤を添加しないで，生コンクリートだけをエア吹付け機とエアレス吹付け機で吹付けて粉じん濃度を計測した。

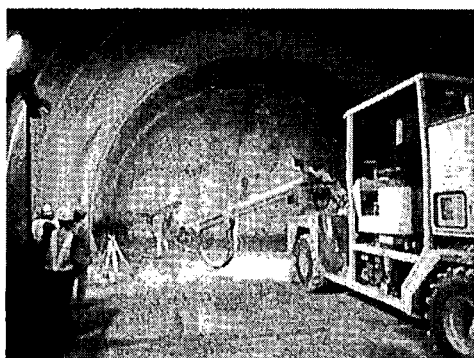


写真-19 エアレス吹付け機

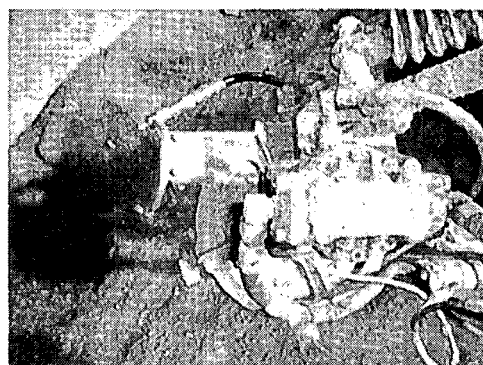


写真-20 同左インペラヘッド



写真-21 ダストレスの吹付け機

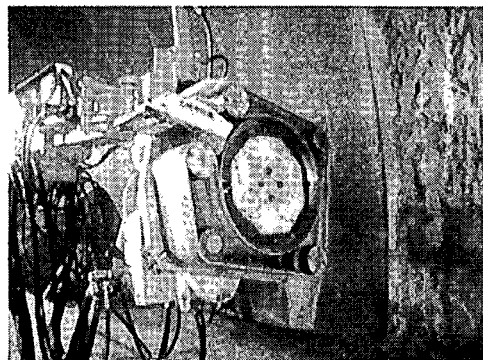


写真-22 同左インペラヘッド

5. 3 今後のスケジュール

4月から6月の実験で，図-23に示すような結果が明らかになった。新方式，液体急結剤では通常の吹付け方法に比較し大きく粉じん濃度が低減でき，粉じん低減剤，低粉じん型急結剤，スラリーショット，局所集じんでも相当量の粉じんが低減できることがわかった。

現在，ローボリュームエアサンプラーの粉じん濃度(mg/m^3)とデジタル粉じん計による粉じん量を変換するK値の取扱いについて整理中である。なお図-24のように厚生労働省のガイドラインでは今回使用したデジタル粉じん計 LD-3K のK値は 0.003 となっているが，かなり安全側の係数であることがわかった。

今後は，今回の実験で効果が確認された技術について，技術の改良，追加実験を行い，来年度の共同実験の企画を立てて行く予定である。また，すでに現場で活用できそうな技術もあり，それらの技術については地方整備局等の試験フィールド等によって，現場での確認実験を行っていきたいと考えている。

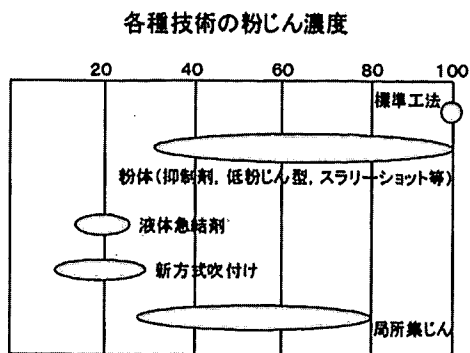


図-23 今回の実験結果(速報)

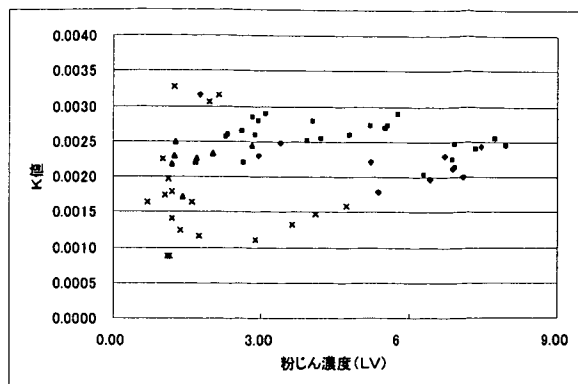


図-24 K値のバラツキ

6. おわりに

粉じん対策については、労働省からガイドラインが出た平成12年度に着手し「建設工事における粉じん対策技術検討会」で検討し、現在の共同研究に至っている。関係各位の御尽力・御協力に感謝するとともに、この共同研究の成果が早急に現場に普及し、トンネル工事の環境の改善に寄与するよう努力したい。

[一般講演]

天才技術者、広井勇工学博士の生涯

企画部研究企画課 客員研究員 高崎哲郎

目 次

1. 広井博士 75 回忌	31
2. 開拓精神（パイオニア・スピリット）	31
3. 新大陸での試練	32
4. 「広井山脈」の人材たち	32

天才技術者、広井勇工学博士の生涯

企画部研究企画課 客員研究員 高崎 哲郎

1. 広井博士 75 回忌

私はこのほど『評伝 山に向かい目を見上げる 工学博士・広井勇の生涯』（鹿島出版会）を刊行した。広井勇（1862～1928）は、日本近代・黎明期の土木界を代表するクリスチャンの土木技術者であり、東京帝大土木工学科教授（橋梁工学、構造力学）であり、かつ第6代土木学会会長であった。私の評伝は、博士の67年間の生涯を新たに見つけた資料を盛り込んで表現した初めての「広井伝」といえる。私個人では初の「決定版」と考えている。

今年10月1日は博士の75回目の命日にあたる。氏の出身校札幌農学校の後身に当たる北海道大学土木工学科の関係者や卒業生らが75回忌記念事業として私に強く執筆を要請されたこともあって、私はこの天才技術者の評伝作成に挑戦してみたのだ。ささやかではあるが、没後75回忌にはなを添えることになったことは、博士を敬愛する私にとっても何よりの喜びである。

私はこの2年間博士の足跡確認の取材を続け、資料収集や末裔の方々へのインタビューなどを行ってきた。東京、札幌、高知、千葉などで資料収集を続け、同時に氏の技術者精神に決定的な影響を与えたアメリカ国内にも二度足を運んで、氏の足跡確認を時間の許す限り行った。幕末から昭和初期まで生き抜いた先駆的工学博士広井勇の「刻苦勉励」を続けた孤高の生涯がはっきりと見えてきたと考える。

2. 開拓精神(パイオニア・スピリット)

広井勇は幕末・1862年（文久2）9月2日、土佐藩佐川村（現高知県佐川町）に下級藩士広井喜十郎・寅子の長男として生まれた。7歳年上の姉春子と2人姉弟だった。彼女は才女として知られ同郷の医師山崎家に嫁ぐ。広井家は学問を愛する家系で、江戸期には著名な和算や漢学の学者が出ている。父の早死にのため一家は赤貧の生活を強いられた。勇少年は年少にして自ら切り開くしかない人生の入り口に立たされたのである。

聡明な少年は1872年（明治5）に単身上京した。11歳であり、今日で言えば小学校6年生である。母方の叔父の片岡家で書生として暮らしながら私塾に通った後、最難関校の東京外語学校（旧制）や工部大学校（東大前身）に学んだ。そして16歳の時、全額官費で生活費も支給されることを知りクラーク博士が初代教頭とつとめる札幌農学校に入学し直した。同校2期生中では最年少だった。

将来が約束されたも同然の工部大学校予科を中退してなぜ札幌農学校に再入学したのか。疑問点だったが、工部大学校が官費を一部の優秀な学生に限って支給する方針を打ち出したため、学費の確保が難しい学生は北の果ての学校へ向かわざるを得なかった。クラーク博士は前年「少年よ、大志を抱け」の名句を残してアメリカに帰国しており、その教えを受けることはなかった。氏は同級生とともにキリスト教徒の洗礼を受ける。同期10人は内村鑑三、新渡戸（旧姓太田）稲造、宮部金吾ら俊才ぞろいであったことはよく知られている。授業はアメリカ人教師により農学、植物学、物理学、土木工学などが英語で行われた。英語・英文学や雄弁術も教授され、軍事教練の科目もあった。クラークの後を継いで教頭となったウィリアム・ホィーラーは土木工学を専門とする20歳代後半の青年教師だったが、広井の技術者人生を決定づけた恩師のひとりである。氏はホィーラーのクリスチャンとし

ての潔癖な人格と卓越した才能に感化されて土木技術の道を選ぶのである。(ホイーラーは札幌時計台の設計者として知られているが、札幌での科学的気象観測の創始者であることも忘れてはならない)。

氏はもとより同期10人の大半が江戸期の知識階級である士族(サムライ)か豪農の子弟で、英語に堪能であり、キリスト教徒の信仰を生涯堅持したことに注目したい。内村は「サムライ・クリスチャン」と呼ばれたのである。

20歳で卒業した後は、技術官僚見習いとして北海道や関東地方で鉄道敷設工事や橋梁工事に携わった後、1883年(明治16年)12月単身横浜港から蒸気船で太平洋を渡ってアメリカ大陸に向かった。同期中最初の渡米であり、渡航費は自前である。恩師ホイーラーは帰国しており、恩師を頼って新世界に向かったのである。氏の人生はパイオニア・スピリット、自力で切り開く人生である。

3. 新大陸での試練

氏のアメリカ滞在は3年余りであり今から120年ほど前になるが、まず北米大陸最大の大河ミシシッピ川改修工事に携わった。「水害大国の土木技術者はまず河川工学を学びなさい」とのホイーラーの助言による。氏のアメリカ滞在を記した論文や評論には「青年広井は現場作業員から始めた」との表現が目立つが、これは誤りである。幹部技術者の末端に配属されたが、「現場作業員」ではもたない。

アメリカ政府のミシシッピ川大改修工事は始まったばかりだったが、氏は中西部の港湾都市セントルイスの陸軍工兵隊本部に見習士官技師として臨時採用され、ミシシッピ川とミズーリ川の合流点という難所で、河川改修工事に従事した。本部事務所から完成間もないイーズ橋(初めてミシシッピ川を跨いだ巨大橋)が近いため、よく見学に出向いてはスケッチを描いた。次いで同市内のチャールズ・シェラー・スミス設計事務所で橋梁設計に携わった。彼は官費留学生といった恵まれた生活環境にない。生活費や図書購入費を確保しなければならないのである。働きながら学ぶのである。教会には出向かなかったが、聖書は常に身近においた。

スミスの病没により、寒波の続く北部を去って、南部のノーフォーク・エンド・ウエスタン鉄道会社の技術者に採用された。同社本社のあるバージニア州ローノークに滞在した。氏はその勤勉さと才能を評価され、北部デラウェア州の橋梁大会社エッジモア・ブリッジに勤務する。この頃氏は英文の処女作で名著とされる『プレート・ガーダー・コンストラクション』(橋梁建設の解説書)をニューヨークの科学専門図書出版社ヴァン・ノストランド社から刊行した。アメリカで刊行された初の日本人土木技術者による専門図書である。

氏は20歳代後半であった。恩師ホイーラーやコロンビア大学土木工学科主任教授ウィリアム・H・バエラの支援があったが、それにしても20歳代後半で英文専門図書を刊行し、しかもそれがアメリカ国内で高い評価を受けるという才能に驚かざるを得ない。

氏は母校札幌農学校の助教授に就任することになり、アメリカからドイツに渡って研鑽を続ける。当時理工科系の学問はドイツに学べとの風潮が高まっていた。

4. 「広井山脈」の人材たち

帰国後、氏は最年少の教授となり、後輩学生の指導に当たると共に第二の故郷である北海道の大規模事業に指導的役割を果たす。講義は英語中心だったが、講義だけの知識教育に留まらず、現場を経験させることを重視した。同校が工学部廃止に踏み切ると、北海道庁主任技師となり、北海道の港湾整備を幅広く手がけ、「北海道に広井あり」の名声を不動のものにした。中でも工事事務所長を務めた

小樽築港は今日でも「模範工事」として高く評価されている。ひなびた漁村にすぎなかった小樽は一大防波堤工事と運河の完成により北の国際港に発展する。彼はどの工事現場でも率先垂範で仕事を指揮したが、多忙の中にあっても論文は書き続けた。

工学博士となった氏は東京帝大土木工学科に教授として迎えられ、橋梁工学と構造力学の講座を受け持った。土木界の重鎮古市公威の推挙によるとされるが、帝大卒業生ではない博士は学閥の逆風に耐えたようである。氏は帝大の権威主義や立身出世主義には終始批判的だったが、学生の指導にあたっては厳しい反面で懇切に対応した。優れた門下生を毎年のように官界や学界それに実業界に送り出した。その数は50人を超える。海外、中でもアメリカで活躍した門下生も少なくない。その門下生を総称して私はたおやかな峰をなす「広井山脈」と呼ぶ。

氏は大学当局が文部省の指示に盲従して定年制を導入することに強く反対して、定年を待たずに退職してしまう。学問や研究はいかなる圧力からも自由であるべきだ、との主義からである。クリスチャンの良心に従ったと言うべきだろう。

広井勇は築港技術・橋梁技術の世界的権威として、優秀な門下生を数多く育てた教育者として（氏の土木界に対する最大の貢献はこの事実だと確信する）、さらには自らに厳しい「清きエンジニア」（内村鑑三）のキリスト教徒として1928年（昭和3）10月1日夜、67歳の生涯を閉じた。「ヒロキサクヤ シンダ」。内村が朝になって札幌の旧友宮部に送った電報である。

今年は、没後75年。氏の生涯を支えたものは「サムライ・クリスチャン」の清廉で、真理を追究する「博愛主義（ヒューマニズム）」の精神であった。了。

[研究成果報告]

建設現場で遭遇するダイオキシン類汚染対策技術の開発

司会：材料地盤研究グループ長 萩原 良二

【 個 別 課 題 】

1. ダイオキシン類汚染に関する現状と課題..... 35
独立行政法人国立環境研究所 化学物質環境リスクセンター長 中杉 修身
2. 水域におけるダイオキシン類汚染対策技術
底質中のダイオキシン類の簡易分析手法の開発Ⅰ（乾燥・抽出手法）..... 39
材料地盤研究グループ主任研究員（リサイクル） 南山 瑞彦
底質中のダイオキシン類の簡易分析手法の開発Ⅱ（測定手法）..... 45
水循環研究グループ主任研究員（水質） 小森 行也
水域におけるダイオキシン類汚染対策のための調査と手法..... 57
水循環研究グループ主任研究員（河川生態） 天野 邦彦
3. 陸域におけるダイオキシン類汚染対策技術
土壌中のダイオキシン類の簡易分析手法の開発..... 67
材料地盤研究グループ上席研究員（新材料） 明嵐 政司
陸域におけるダイオキシン類の汚染対策手法の開発..... 83
材料地盤研究グループ上席研究員（土質） 小橋 秀俊

ダイオキシン類汚染に関する現状と課題

(独) 国立環境研究所 化学物質環境リスク研究センター長 中杉修身

1. はじめに

ダイオキシン類による環境汚染は、微量の曝露による発がんを始めとする多様な健康影響が懸念され、1999年3月に「ダイオキシン対策推進基本指針」が策定された。この中では、政策目標として4年以内に排出総量の約9割の削減が設定され、排出インベントリーの作成、測定分析体制の整備、廃棄物処理及びリサイクル対策の推進が定められた。引き続き7月には議員立法によりダイオキシン対策法が制定され、2000年1月15日から施行された。この中では、施策の基本とすべき基準(耐容一日摂取量 TDI 及び環境基準)の設定、排出ガス及び排水に関する規制、廃棄物処理に関する規制、汚染状況の調査、汚染土壌に係る措置、国の削減計画の策定などが定められた。これらに基づき、大気、水質、土壌及び底質に係る環境基準が設定され、排出ガス、排水及び廃棄物に係る規制措置が定められ、ダイオキシン類の排出量の大幅な削減が進められている。これにより、環境汚染の状況は一部では改善されているが、一方では蓄積性汚染の解消など、課題も残されている。蓄積性汚染については、昨年締結された POPs 条約の中で、POPs を含むストックパイルや廃棄物の適正処理が求められている。

2. ダイオキシン類汚染の現状

2. 1 環境への排出量

基本方針とダイオキシン法に基づき、ダイオキシン類の環境排出量は1997年から体系的に推計されている。毎年、新たな知見が得られたものについては、過去の排出量も推計し直している。1997年の排出量は毒性等価換算量で7,348~7,602 g-TEQ/年と推計されたが、廃棄物焼却施設を中心とした排出削減によって2001年には1,743~1,762 g-TEQ/年に減少している(表1)。基本指針の政策目標には届かなかったが、1/4以下にまで大幅な削減が図られた。

とくに、排出削減が著しいのが一般廃棄物焼却施設であり、1/6以下にまで減少している。産業廃棄

表1 ダイオキシン類の排出インベントリー

発生源		1997年	1998年	1999年	2000年	2001年
大気	一般廃棄物焼却	5,000	1,550	1,350	1,019	812
	産業廃棄物焼却	1,500	1,100	690	555	533
	小型廃棄物焼却	368~619	368~619	307~509	353~370	185~202
	製鋼用電気炉	228.5	139.9	141.5	131.1	95.3
	鉄鋼業焼結工程	135.0	113.8	101.3	69.8	65.0
	亜鉛回収施設	47.4	25.4	21.8	26.5	9.2
	アルミニウム合金製造	21.3	19.4	13.6	12.8	15.0
	合計	7,335~7,589	3,351~3,605	2,652~2,857	2,194~2,214	1,738~1,757
水		12.75	12.28	12.39	8.56	4.59
合計		7,348~7,602	3,363~3,617	2,664~2,869	2,203~2,223	1,743~1,762

物焼却施設も約 1/3 まで減少し、対応の遅れていた小型廃棄物焼却炉も 2001 年には 1/2 以下に減少している。他の主要発生源も、鉄鋼関係や亜鉛回収施設では 1/2 あるいはそれ以上の削減が図られているが、アルミニウム合金製造施設からの排出削減は約 30%にとどまっており、2001 年には増加に転じている。一方、水への排出は大気に比べて取り組みが遅れ、2001 年にようやく 1/3 に近づいた。

過去には、PCP、CNP など、不純物としてダイオキシン類を含んだ農薬が使用されてきたが、このような農薬の製造は現在は停止されている。また、過去には紙パルプ製造の際の塩素漂白がダイオキシン類の発生源の 1 つと考えられてきたが、漂白方法の改良に伴い、排出量が大幅に削減されている。

ダイオキシン類の構成成分であるコプラナーPCB (Co-PCB) は、過去に様々な用途で用いられていた PCB に構成成分として含まれていた。PCB を含む製品は使用後、回収・保管されているが、一部が行方不明になっており、それらの一部は環境中に排出されたものと考えられる。その量と構成比率から等価換算量で 2～5kg・TEQ/年の Co-PCB が環境中に排出されていたと推定される。

2. 2 環境汚染の状況

ダイオキシン類の環境汚染の状況については、1985 年度から大気、底質と生物のモニタリングが続けられてきたが、社会的な関心の高まりを受けて 1998 年度に全国的な汚染実態を把握するための緊急調査が実施された。この調査では、大気、降下ばいじん、公共用水域（河川、湖沼及び海域）の水質と底質、地下水、土壌と生物について多くの地点でダイオキシン類の存在状況が調査された（表 2）。

その後に設定された環境基準との比較で見ると、大気、公共用水域水質、底質及び地下水質では環境基準を超える地点が見られるが、土壌は環境基準超過地点はなかった。この調査では Co-PCB を測定した地点と測定しない地点が混在している。多くの環境媒体ではいずれのデータもほぼ同じ値を示しており、毒性等価換算濃度に Co-PCB の占める割合は小さいが、水生生物だけは Co-PCB を加えた場合に等

表 2 ダイオキシン類緊急全国一斉調査結果（1998 年）

環境媒体	地点数	単位	平均値	中央値	検出範囲
大気 (4 季平均)	387	pg-TEQ/m ³	0.22	0.15	0～1.8
	100		0.23	0.17	0.0017～0.70
降下ばいじん (2 季平均)	205	pg-TEQ/m ² /日	21	17	0.20～170
	103		21	18	0.34～66
公共用水域 水質	204	pg-TEQ/L	0.36	0.089	0～12
	204		0.40	0.11	0.0014～13
地下水質	243	pg-TEQ/L	0.086	0.0073	0～5.3
	188		0.081	0.011	0～5.4
公共用水域 底質	205	pg-TEQ/g-乾重	6.8	0.23	0～230
	205		7.7	0.41	0～260
土壌	344	pg-TEQ/g	6.2	2.3	0.00067～10
	286		6.5	2.7	0.0015～61
水生生物	368	pg-TEQ/g-湿重	0.64	0.32	0～11
	368		2.1	1.1	0.0022～30

上段：PCDD+PCDF、下段：ダイオキシン類 (PCDD+PCDF+Co-PCB)

価換算濃度が数倍になる。このことは、水生生物に移行する際に PCDD や PCDF と比べて Co-PCB が高い濃縮性を示すことを意味している。わが国では魚介類を通じての曝露割合が高いことを考えると、Co-PCB の割合が高いほど、人への曝露量が高くなる可能性があることに留意する必要がある。

環境基準が設定された環境媒体中の濃度は継続的にモニタリングされている（表 3）。大気濃度は排出量の削減に応じて低下し、継続調査地点の平均濃度は 2001 年度には 1997 年度の約 1/3 になっているが、約 1% の地点では環境基準を超過する汚染が続いている。

公共用水域の水質濃度はいくらか低下しているが、2001 年度でも約 2% の調査地点で環境基準を超えている。水中のダイオキシン類は主に懸濁粒子に吸着しており、これらをどれだけ取り込むかで測定結果が大きく変化し、この点を考慮するようになったことが測定結果の低下につながった可能性もある。このことがより顕著に現れているのが地下水質である。1998 年度の調査では環境基準超過が見られたが、その後は環境基準を超える汚染は見られていない。仮に、通常でも見られる 10pg-TEQ/g のダイオキシン類を含む土壌粒子でも、100mg/L 以上混入すると地下水環境基準を超過してしまうことになる。

一方、底質や土壌の濃度変化はほとんど見られない。底質の調査では毎年、環境基準超過地点が新たに見いだされている。また、土壌も 1998 年度の調査では超過地点はなかったが、その後は発生源周辺から環境基準を超過する土壌が見いだされている。また、一般土壌に比べて農用地土壌で濃度が高い傾向にあり、底質環境基準を超える地点も見られる。これは過去に施用された農薬中の不純物であるダイオキシン類が残存しているものと考えられる。

表 3 ダイオキシン類年度別調査結果（平均濃度）

環境媒体		単位	1997 年度	1998 年度	1999 年度	2000 年度	2001 年度
大気	全体	pg-TEQ/m ³	0.55	0.23	0.18	0.15	0.13
	一般環境		0.55	0.23	0.18	0.14	0.14
	発生源周辺		0.58	0.20	0.18	0.15	0.13
	沿道		0.47	0.19	0.23	0.17	0.16
公共用水域 水質	全体	Pg-TEQ/L	—	0.50	0.24	0.31	0.25
	河川		—	—	0.40	0.36	0.28
	湖沼		—	—	0.25	0.22	0.21
	海域		—	—	0.14	0.13	0.13
公共用水域 底質	全体	Pg-TEQ/g	—	8.3	5.4	9.6	8.5
	河川		—	—	5.0	9.2	7.3
	湖沼		—	—	9.8	11	18
	海域		—	—	4.9	11	11
地下水質		pg-TEQ/L	—	0.17	0.096	0.092	0.074
土壌	全体	pg-TEQ/g	—	6.5	—	6.9	6.2
	一般環境		—	—	—	4.6	3.2
	発生源周辺		—	—	—	11	11

2. 3 曝露の状況

環境調査結果や食材中の濃度を測定したトータルダイエット調査の結果からダイオキシン類の曝露

量が推定されている。2000年度の平均曝露量は約1.5 pg-TEQ/kg/日とTDIを下回っている。しかし、保存試料の分析からは1977年には8.18 pg-TEQ/kg/日とTDIの2倍を超えるダイオキシン類を摂取していたと推察される。母乳中のダイオキシン類濃度の推移からも、過去の高い曝露が推察される。また、1998年度に環境省が行った陰膳調査や1999年度のトータルダイエット調査からはTDIを超える曝露の可能性を示唆する結果が得られている。

わが国では主に魚介類からダイオキシン類を摂取しており、肉・卵や乳製品からの曝露が大きい欧米諸国とは異なる特徴を示している。1998年度の環境省の調査では発生源周辺と対照地域で曝露量に差が見られなかったのは、市場を通じて流通する魚介類からの曝露が大きいためと考えられる。ダイオキシン類の曝露量は汚染源からの距離よりも、食品の摂取内容に大きく左右されるものと考えられる。

3. 今後の課題

ダイオキシン類の排出量は大幅に削減されている。排出ガスや排出水の規制も猶予期間を過ぎて厳しい基準が適用され、基準に適合できない施設は廃止されている。一方、PCB廃棄物の適正保管と処理もPCB特別措置法の下で進められており、今後も環境排出は抑制されていくと考えられる。しかし、ダイオキシン対策法では、環境基準を超える土壌や底質汚染の浄化対策の実施が求められ、またPOPs条約でもストックパイルの処理が求められており、環境中に残存しているダイオキシン類の処理が今後の対応の中心となると考えられる。通常の土壌汚染の調査で発見されるものに加え、各種土木工事に伴って汚染土壌や底質に遭遇する事例が多くなっている。廃棄物処分跡地などでは掘り出したものの法的な扱いも問題となるが、これらも適正な対応が必要となる。

汚染土壌については、高濃度汚染が見いだされた廃棄物焼却施設周辺で浄化技術の実証試験が行われ、一部で本格的な浄化作業に取りかかっている。底質についても調査・対策のマニュアルが策定されるなど、土壌・底質の浄化への取り組みは開始されている。しかし、大きなネックとなっているのがコストである。ダイオキシン類は多成分について微量の測定が必要なため、調査に多くの時間とコストを要する。土壌や底質汚染は空間的なばらつきが大きい、高密度の調査を行うには迅速かつ効率的な調査技術の確立が必要となる。

一方、ダイオキシン類汚染土壌や底質の浄化にも多様な技術が提案されているが、高温で熱分解するもの、化学的に脱塩素して分解するものと微生物等を利用して分解するものに大別できる。浄化技術でもコストが大きなネックとなっており、微生物分解技術が注目されているが、実用化に近いのは熱分解と化学分解である。今後、微生物分解をも含め、低コスト、高効率技術の開発を進める必要があるが、曝露可能性を考慮して長い時間をかけて徐々に分解する技術も選択肢の1つになると考えられる。

現行の環境基準は、土壌と底質の間など、必ずしも整合がとれていない場合が見られる。ダイオキシン類については未解明の部分が残されており、今後も新たな知見が見いだされるものと考えられる。こうしたことは基準値の見直しにつながり、それに対応するために新たな対策が必要となることも予想される。WHOではTDIを見直すための検討を行っている。ダイオキシン対策法でもTDIは4pg-TEQ/kg/日以下とされており、WHOの見直しの状況によってはわが国のTDIも見直され、それに伴い各種環境基準の見直しが行われることも考えられる。一方、POPs条約ではダイオキシン類とともにヘキサクロロベンゼンの非意図的生成が対応の対象とされており、わが国でも発生源の解明などの対応が始められている。また、次のPOPsの候補としてPAHが取りざたされている。これらの毒性評価をどのようにするかは今後の課題であるが、ダイオキシン類に合わせて扱うことも考えられる。蓄積性汚染への対応にあたって将来の基準等の見直しをどうするかが難しい課題である。

底質中のダイオキシン類の簡易分析手法の開発 I (乾燥・抽出手法)

材料地盤研究グループ (リサイクルチーム) 主任研究員 南山 瑞彦

1. はじめに

近年、極微量でも高い毒性を持つとされているダイオキシン類による汚染が全国的に大きな問題となっている。平成 13 年度の公共用水域の底質調査の結果¹⁾では、1,813 の調査地点について平均値は 8.5pg-TEQ/g、最大値は 540pg-TEQ/g と報告されている。また、国土交通省の全国一級河川等を対象とした調査結果²⁾によると、平成 13 年の調査では、平均値 3.1pg-TEQ/g-dry、最大値 63pg-TEQ/g-dry と報告されている。このように底質の汚染状況が明らかとなりつつあり、今後、本格的に底質対策事業が推進される段階に入るものと思われる。

底質のダイオキシン類の濃度は位置により大きく変化する可能性がある。この傾向は国土交通省の水平分布調査²⁾でも示唆されている。そのため、万ーダイオキシン類による汚染が発見された場合には、低コストで迅速にダイオキシン類の分布状況を推定し、施工管理や対策評価をより適切に行う必要がある。一方、環境庁 (現、環境省) の「ダイオキシン類に係る底質調査測定マニュアル³⁾」

(以下、環境庁マニュアル)に記載されている底質中のダイオキシン類測定に係る公定法では、試料採取から分析結果の解析までに長時間を必要としており、施工管理等の建設事業に対応したより簡易で迅速に結果が得られる分析手法の検討、開発が必要である。

本研究は、底質中に含まれる可能性のあるダイオキシン類の分析にあたり、建設事業に対応するため、より迅速に結果が得られる分析手法の検討、開発を目的としている。底質試料を対象とした公定法では、乾燥、抽出、精製の各工程に長時間を要する手法が採用されている。これは、底質試料は含水率が高く、有機質が多く含まれる場合が多いことが一因であろうと推察される。本研究では、これらの工程の内、乾燥、抽出工程の迅速化に関する比較検討を行った。

2. 底質からのダイオキシン類の迅速な乾燥・抽出手法の検討

2. 1 底質のダイオキシン類分析の迅速化

環境試料中のダイオキシン類の一般的な分析フローの概略を図-1に示す。ダイオキシン類の分

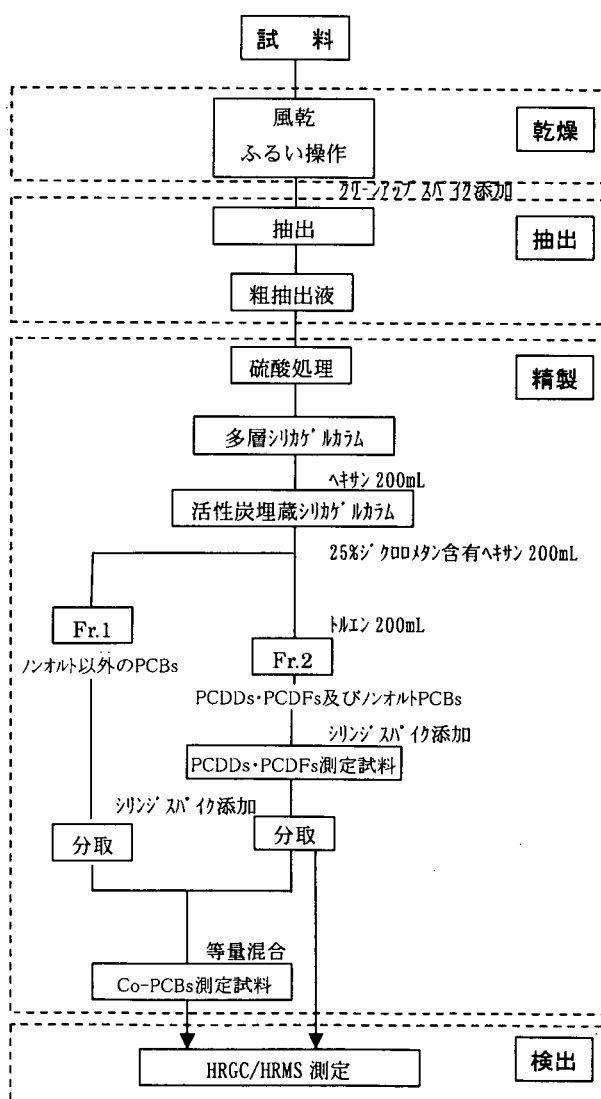


図-1 一般的なダイオキシン類分析フロー

析操作は、乾燥工程、抽出工程、精製工程、検出工程に分けられる。

底質試料は含水率が高く、有機質を多く含む場合も多い。そのため、分析を行うにあたって、乾燥工程、抽出工程、精製工程に長時間を要する操作を必要としており、水質や土壌といった他の環境媒体を対象とした分析より、長時間を要する傾向にある。公定法では、乾燥工程には数日を要する風乾、抽出工程には 16 時間以上を要するソックスレー抽出法を採用している。このため、乾燥および抽出工程を迅速に行うことで分析の迅速化をはかると考えられることから、本検討では、乾燥および抽出手法の比較検討を行った。

2. 2 検討方法

河川底質試料を用い、乾燥・抽出手法の違いが分析結果に及ぼす影響を検討した。

一般に、固体試料からの抽出には、振とう抽出法³⁾、ソックスレー抽出法³⁾、高速溶媒抽出法⁴⁾ (Pressurized Fluid Extraction 法、以下、PFE 法)、マイクロウェーブ抽出法⁵⁾、超音波抽出法⁶⁾、超臨界流体抽出法⁷⁾、加熱流下抽出法⁸⁾ 等が用いられる。これらの抽出手法を用いた、固体試料からのダイオキシン類等の抽出に関する検討も多くなされているが、これらの検討の多くは、飛灰や土壌を検討対象としているものであり、底質を対象としている場合でも、乾燥工程を含めた迅速化の検討を行っている例は少ない。本検討では、乾燥方法としては風乾、凍結乾燥、加熱乾燥、溶媒脱水、抽出方法としてはソックスレー抽出法、湿泥－ヘキサン抽出法³⁾、PFE 法、超音波抽出法を用いた乾燥・抽出条件の比較検討を行った。検討した各手法の主な操作と所要時間を表－1 に示す。

公定法（風乾＋ソックスレー抽出法）は前述の通り、環境庁マニュアルに用いられている方法である。ソックスレー抽出装置の概略を図－2 に示す。本法は、試料を風乾した後、トルエンを抽出溶媒として用いて 16 時間以上の抽出を行う方法である。

湿泥－ソックスレー抽出法は、環境庁マニュアルで公定法の代替法として注記されている方法の一つである。本法は、試料にアセトンまたはメタノールを加えて乾燥させた後、トルエンで 24 時間以

表－1 公定法と各乾燥・抽出手法での分析の比較

名称	風乾＋ソックスレー抽出法	湿泥－ソックスレー抽出法	凍結乾燥＋ソックスレー抽出法	加熱乾燥＋ソックスレー抽出法	風乾＋高速溶媒抽出法	湿泥－ヘキサン抽出法	超音波抽出法
乾燥	風乾(数日～十日)	アセトンろ過＋風乾(1日)	凍結乾燥	加熱乾燥(50℃)	風乾(数日～十日)	水酸化カリウムエタノール溶液を入れ、室温放置(1夜)	アセトンで抽出(30分)
抽出	トルエンでソックスレー抽出(16時間以上)	トルエンでソックスレー抽出(16時間以上)	トルエンでソックスレー抽出(16時間以上)	トルエンでソックスレー抽出(16時間以上)	トルエンで高速溶媒抽出(20分2回)	＋ヘキサンで振とう抽出(10分3回)	＋トルエンで抽出(30分)
備考	公定法					公定法(注9A)	

名称	高速溶媒抽出法(PFE法)						
	条件①	条件②	条件③	条件④	条件⑤	条件⑥	条件⑦
乾燥・抽出	トルエンで抽出(20分2回)	20%アセトン含有トルエンで抽出(20分2回)	アセトンで抽出(20分)＋トルエンで抽出(20分)	アセトンで抽出(20分、120℃)＋トルエンで抽出(20分)	アセトンで抽出(10分)＋トルエンで抽出(10分)	アセトンで抽出(10分)＋トルエンで抽出(10分)＋ヘキサンで抽出(10分)	エタノールで抽出(20分)＋トルエンで抽出(20分)

上ソックスレー抽出を行う方法である。公定法より所要時間が短く、省力化が可能である。なお、本検討では抽出時間を公定法にそろえている。

湿泥－ヘキサン抽出法は湿泥－ソックスレー抽出法とともに環境庁マニュアルで公定法の代替法として注記されている方法である。本法は、試料に水酸化カリウムエタノール溶液を加え、1夜室温で放置した後、ヘキサンで振とう抽出を行う方法である。

PFE 法は、試料と抽出溶媒を高温、高圧条件下で接触させ、目的物質を比較的短時間で抽出する方法である⁴⁾。装置の例を写真－1に示す。PFE 法での抽出条件は、公定法の抽出条件を参考としつつ、底質からの迅速なダイオキシン類抽出を目指して本検討の中で設定したものである。風乾＋PFE 法は、公定法における抽出操作のみを PFE 法に置きかえた操作条件である。これは、16 時間以上とされているソックスレー抽出法による抽出時間を 40 分程度に短縮することを期待して設定した。PFE 法条件①～⑦は、一般に数日を要する風乾を行わないことによる迅速化を期待して設定した。PFE 法条件①は、風乾＋PFE 法から乾燥工程を省いた操作条件である。PFE 法条件②～⑥はアセトン、条件⑦はエタノールによる脱水を期待して設定した。

超音波抽出法は、試料と抽出溶媒の接触をより効率的に行うために超音波を用いる方法である⁶⁾。超音波抽出法での抽出条件は、アセトンによる脱水に期待した条件設定とした。

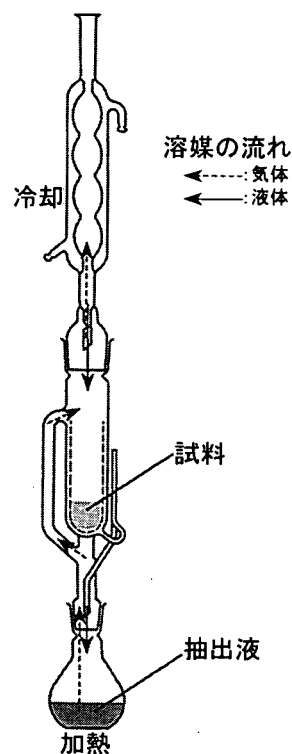
試料の採取および抽出工程より後の分析操作は、環境庁マニュアルに従って行った。分析対象物質はポリ塩化ジベンゾ・パラ・ジオキシン (PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs) およびコプラナーポリ塩化ビフェニル (Co-PCBs) とした。

2. 3 検討結果

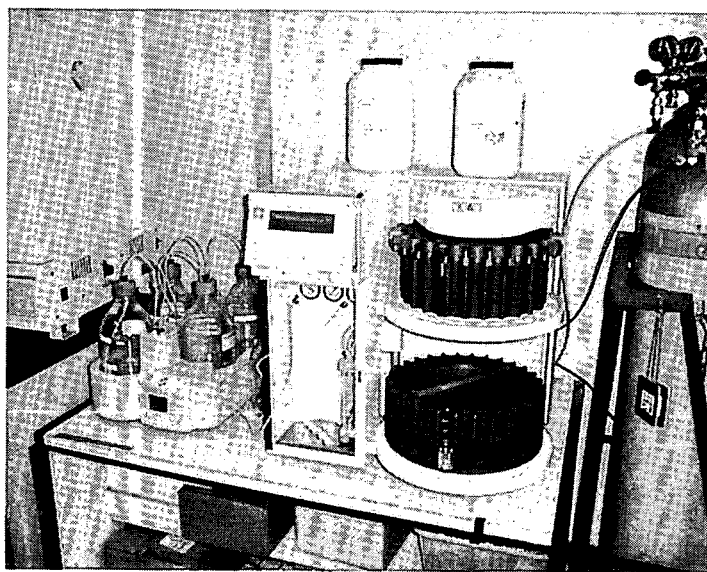
各乾燥・抽出手法で得られた分析結果(毒性等量)を、公定法である風乾＋ソックスレー抽出法での結果と比較し、図－3に示す。公定法より高い分析結果となったのは、凍結乾燥＋ソックスレー抽出法、風乾＋PFE 法、PFE 法の条件③④⑦であった。

各乾燥・抽出手法で得られた分析結果(毒性等量)の変動係数を比較したところ、公定法と同程度以下の変動係数となったのは、風乾＋PFE 法と PFE 法条件④、超音波抽出法であった。

PFE 法は抽出時間が比較的短かい抽出方法である。特に、条件①～⑦では乾燥に要する時間が短縮される。これらのうち、条件③④⑦では毒性等量が公定法より高い値を示しただけでなく、ほとんどの化合物で分析結果が公定法での分析結果より高くなっており、安全側の値を示す傾向にあった。これらのうち、条件④での変動係数が比較的小さいこと、他の操作条件に比べて操作条件が穏やかであることから、底質中のダイオキシン類含有量の迅速・簡易な乾燥・抽出手法としては、PFE 法条件④



図－2 ソックスレー抽出装置の概略



写真－1 PFE法の装置の例

が有望な手法の一つであると考えられる。

ここまでの検討に使用した底質とは性状の異なる底質についても、同等の抽出傾向を示すことを確認するため、表-2に示す4種の底質について、公定法とPFE法条件④で得られた分析結果（毒性等量）を比較した。今回用い

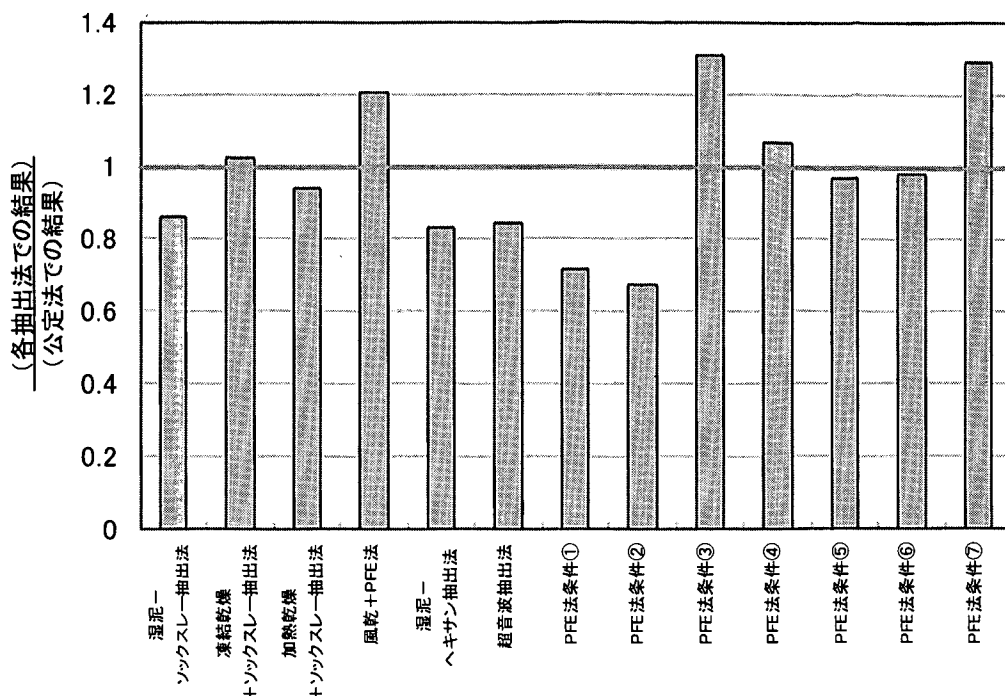


図-3 公定法と各乾燥・抽出手法の分析値の比較

た4種の底質試料に関しては、PFE法条件④で得られた分析結果が公定法での結果と同等以上の値を示し、安全側の値を示す傾向にあることが明らかとなった。このため、性状の異なる底質試料に対しても、乾燥・抽出工程へのPFE法条件④の適用が可能であることが明らかとなった。

3. 迅速乾燥・抽出手法と簡易検出法との組み合わせに関する検討

3.1 検討方法

複数の河川底質試料を用い、簡易分析技術に関する比較検討を、本研究と協調して研究を実施している水質チームと共同で実施した。乾燥・抽出、精製、検出

工程の簡易化・迅速化を目指し、複数の手法の組み合わせによる比較検討を行った。この検討の中で、迅速乾燥・抽出手法と簡易検出法との組み合わせに関する検討を行った。

比較検討した乾燥・抽出手法は、公定法とPFE法条件④である。各乾燥・抽出手法により得られた抽出液を公定法で精製した後、高分解能ガスクロマトグラフ質量分析計（HRGC/HRMS）を用いる公定法、水質チームで検討したELISA法（ELISA_{ECO}法、ELISA_{DT2}法）、Ahレセプターバインディングアッセイ法（AhR法）の各検出法で測定し、その結果を比較した。

本検討に用いた底質試料は、関東地方の河川底質試料である。これらの試料は、環境省または国土交通省の調査で、ダイオキシン類の濃度が比較的高いとの報告がある地点を含むように選定して採取

表-2 公定法とPFE法の分析値の比較

	底質A	底質B	底質C	底質D
泥質	シルト	砂混じりシルト	シルト混じり砂	砂
泥色	黒	オリーブ黒	黒	オリーブ黒
臭気	微硫化水素臭	微硫化水素臭	微硫化水素臭	無臭
混入物	木葉、ビニール	植物片	植物片	なし
含水率(%)	62.8	63.4	45.5	25.7
強熱減量(%)	12.4	10.8	8.2	1.6
公定法結果(pg-TEQ/g-dry)	92	42	17	0.89
PFE法結果(pg-TEQ/g-dry)	98	49	20	1.8

した。同一汚染地域の複数地点で 20 検体以上の試料を採取し、四重極 GC/MS による簡易法で高濃度試料から低濃度試料までを含むように 5 試料を選定して使用した。

3. 2 検討結果

各乾燥・抽出手法で得られた抽出液を公定法の精製・検出方法で分析した。得られた分析結果（毒性等量）を表-3に示す。本検討で用いた5種の底質試料のうち、4種の試料についてはPFE法の結果が公定法と同等以上の値を示した。また、残る1種（底質1090）についても、7%程度の差であった。分析実測値の例を図-4に示す。図中の各化合物の略語等は公定法または日本工業規格⁹⁾に従った。底質1020については、

個々の化合物の分析値についてもPFE法の方が公定法と同等以上の値を示していた。一方、PFE法での毒性等量が低めに出た底質1090にはCo-PCBsが高濃度で混入しており、これらの化合物のPFE法での値が低かった。Co-PCBsの毒性等価係数が小さいため、毒性等量への影響が小さかったものである。本検討では、精製工程において全試料を統一した操作で処理したため、予想外に負荷が大きかった底質1090の精製に不具合が生じたことが、値の解離の一因であると思われる。実際の調査でPFE法の抽出液に公定法による検出を適用する場合は、分析の結果得られる各化合物の濃度分布により、予想外の化合物構成の変化、高濃度化合物の存在の有無を確認し、試料量の変更、公定法での測定等を行う必要が生じる場合もあると思われるが、迅速乾燥・抽出手法としてのPFE法の適用は可能であると考えられる。

簡易検出法で得られた実測値と、公定法での各化合物の分析値と交差率の積から算出

表-3 各乾燥・抽出手法での抽出試料のHRGC/HRMSでの分析結果

		底質1020	底質1030	底質1060	底質1080	底質1090
強熱減量(%)		17.1	14.3	12.0	12.1	9.6
HRGC/HRMS (pg-TEQ/g-dry)	公定法	65	76	64	77	2.8×10^2
	PFE法	75	88	82	1.0×10^2	2.6×10^2

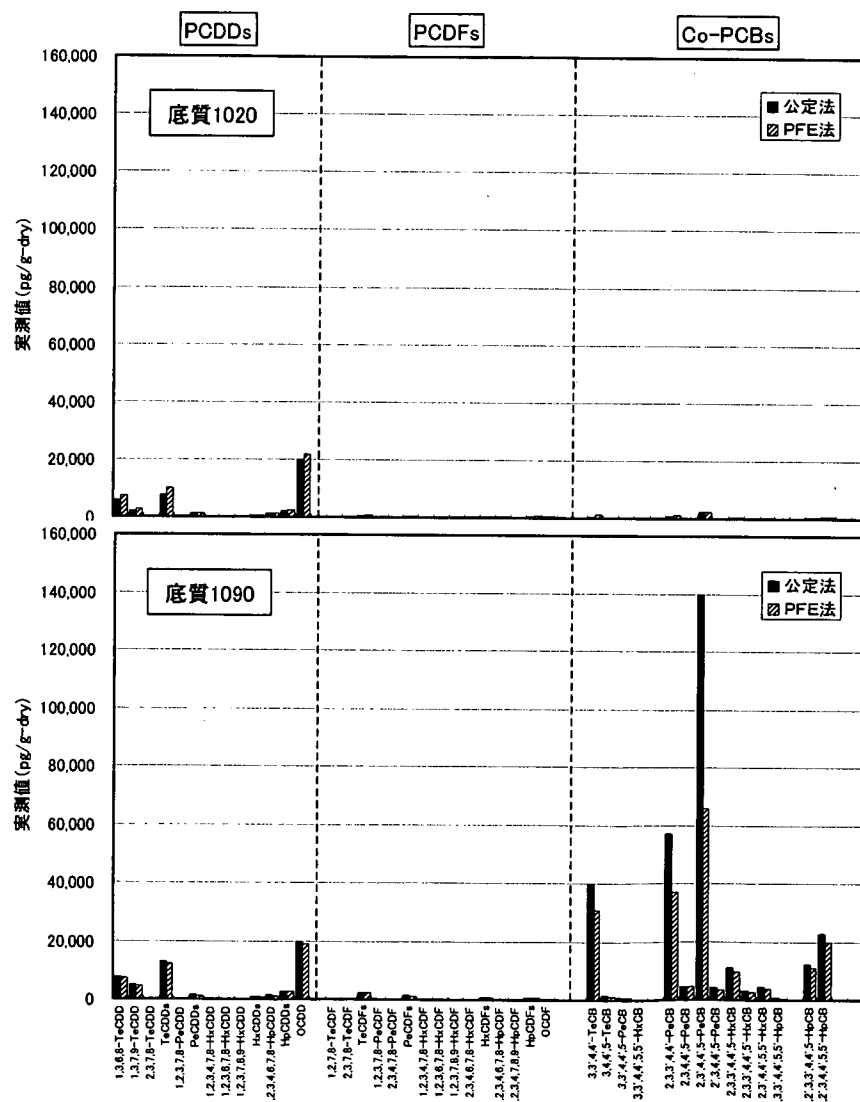


図-4 各乾燥・抽出手法での抽出試料の実測値の例

される計算値を比較した。その結果、PFE 法を用いることにより概ね ELISA_{ECO} 法、AhR 法では公定法での値に近づき、ELISA_{DT2} 法では離れる傾向にあり、それぞれの機構を明確には把握できなかった。PFE 法と簡易検出法との組み合わせに関しては、より多くの試料を用いた検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

底質中のダイオキシン類の汚染調査にあたっては、調査結果の使用目的に応じ、操作に要する時間、回収率、検出方法との適合性等を踏まえて適切な調査方法を選択すべきであると考えられる。

本研究では、短時間で底質のダイオキシン類汚染状況の概略を把握する目的で、公定法での試験結果を要さない場合を想定し、底質中のダイオキシン類分析のための各分析工程の内、乾燥及び抽出工程の迅速化に関する検討を行った。その結果、以下が明らかとなった。

- 1) PFE 法の適用により、公定法では数日を要する乾燥・抽出工程を 40 分程度に短縮することが可能であった。
- 2) PFE 法の乾燥・抽出条件の検討により、測定値が公定法と同等以上の値を示し、変動係数も比較的小さくなる条件が見いだされた。
- 3) 以上により、PFE 法は底質中のダイオキシン類分析の迅速乾燥・抽出手法として適用可能であることが明らかとなった。

なお、予想外の化合物構成の変化や高濃度化合物の存在する場合には、試料量の変更等が必要となる場合がある。また、迅速乾燥・抽出手法と、ELISA 法等の簡易検出法との組み合わせに関しては、より多くの試料を用いた検討がさらに必要である。

【参考文献】

- 1) 環境省：平成 13 年度ダイオキシン類に係る環境調査結果, 2002.11.
- 2) 国土交通省河川局：平成 13 年河川におけるダイオキシン類に関する実態調査等の結果について, 2002.12.
- 3) 環境庁水質保全局水質管理課：ダイオキシン類に係る底質調査測定マニュアル, 2000.
- 4) U.S.EPA：Pressurized Fluid Extraction, Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods, Method 3545A, 2000.
- 5) U.S.EPA：Microwave Extraction, Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods, Method 3546, 2000.
- 6) U.S.EPA：Ultrasonic Extraction, Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods, Method 3550C, 2000.
- 7) U.S.EPA：Supercritical Fluid Extraction of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Organochlorine Pesticides, Test Methods for Evaluating Solid Waste Physical/Chemical Methods, Method 3562, 1998.
- 8) 浦野紘平, 加藤みか：高沸点有機ハロゲン化合物汚染の効率的な調査・監視・対策のための測定方法, 廃棄物学会誌, Vol.12, No.6, pp.376-385, 2001.
- 9) 日本工業標準調査会：工業用水・工場排水中のダイオキシン類及びコプラナーPCB の測定方法, 日本工業規格 JIS K 0312, pp.2-4, 1999.9.

水域におけるダイオキシン類汚染対策技術

－底質中のダイオキシン類の簡易分析手法の開発（測定手法）－

水循環研究グループ（水質）小森 行也

1. はじめに

河川底質のダイオキシン類汚染対策を実施するために、まず、どこが最も汚染されていて優先的に対策を講じる必要があるのか見極める必要がある。そのためには、汚染区域を詳細に調査することが重要であるが、既存の分析方法（公定法）では、高価な分析機器が必要、分析費用が高額、前処理が煩雑で分析に時間を要する等課題も多い。そのため、公定法と比較して簡易に、迅速に、一般的な実験室、現場にて試料の前処理から測定までできる新たな技術の開発が望まれている。

本研究では、抗原抗体法（ELISA 法）や Ah レセプターバインディングアッセイ法などを用いた簡易な分析技術の開発と分析精度管理手法の簡易化について検討を行った。

2. 研究方法

2. 1 簡易分析技術の開発

河川底質のダイオキシン類対策を実施することを想定した場合、公定法での監視の他に①調査段階では汚染範囲の確認調査、②工事段階では工事境界での底質の巻き上げ状況把握、上下流への輸送状況の監視、工事区域外の水質、底質への影響、中間処理・処分施設等の監視を行う必要がある。また、③工事終了後においては汚染現場の改善効果の把握、底質処分場の環境影響を監視する目的でモニタリングを実施する必要がある¹⁾。

これらのモニタリングでは多数の試料の測定、連続的モニタリングが対象となることから、分析時間が短い、あるいは低コストの方法について検討を行うことが必要である。また、簡易分析法であっても分析信頼性の確認は重要であり、その分析方法の特徴を十分把握した上で目的にあった利用が望まれる。

簡易分析技術に関する既往の報告^{2)～10)}から底質への応用の可能性のある技術をまとめ表-1に示した。

①の方法は、比較的安価な四重極 GC/MS によりダイオキシン類の一部を測定するものであり、公定法で用いる高分解能 GC/MS（HRGC/HRMS）に比べ感度が劣るが、この問題を緩和するため GC に注入する試料濃縮液を従来より数十倍多くし、溶媒を先に揮発放出させてからダイオキシン類を分離カラムに導入するプログラム昇温気化（Programmed Temperature Vaporizer：PTV）法を用いる場合が多い。

②の方法は、四重極イオントラップ型 GC/MS/MS によりダイオキシン類の一部を測定する方法であり、対象化合物が持つ特有の 2 次イオンを選択することにより選択性の高い分析を行うことができる。この装置も比較的安価である。

③の方法は、抗原と、抗原に対してきわめて高い特異性を持つ抗体との結合能力を利用した測定方法であり、ダイオキシン類の一部を抗原として取得したモノまたはポリクロナール抗体を用いている。

④の方法は、ダイオキシン類の識別に Ah レセプターバインディング法を、そしてその検出過程に免疫測定法を利用した方法であり、Ah レセプターに反応する物質を測定する。

⑤の方法は、ダイオキシン類の生物への毒性発現メカニズムを用いた方法である。Ah レセプターに結合する物質があるとルシフェラーゼを誘導する遺

表－1 簡易分析技術

簡易分析技術	文献
① 四重極GC/MSによる方法	2) 3)
② 四重極イオントラップ型GC/MS/MSによる方法	4) 5)
③ 免疫測定（ELISA）による方法	6)
④ Ahレセプターバインディングアッセイによる方法	7)
⑤ 生物検定による方法	8) 9)
⑥ 半・難揮発性有機ハロゲン化合物（SNVOX）を測定する方法	10)

伝子を組み込んだヒト肝細胞を用いている。

⑥の方法は、半・難揮発性有機ハロゲン化合物 (SNVOX) を測定するものである。ダイオキシン類は、難揮発性有機ハロゲン化合物であることからダイオキシン類の代替指標として検討されている。測定に用いる全有機ハロゲン (TOX) 計は比較的安価で操作も簡便なことから容易に結果を得ることができる。

以上、これらの方法は、分析精度に課題はあるものの、公定法に比べ前処理の簡易化も行っていることから分析結果を得るまでの時間も短縮でき、また、分析費用も安価となる可能性のある技術である。

2. 2 免疫抗体による簡易分析法の河川底質の測定利用性の検討

本研究では、平成 12 年度より積水化学工業 (株)・(株) 矢内原研究所・大塚製薬 (株)・東洋建設 (株) と、また、平成 13 年度より (株) クボタ、第一ファインケミカル (株) と簡易分析技術に関する共同研究を実施した。

積水化学工業 (株)・(株) 矢内原研究所・大塚製薬 (株)・東洋建設 (株) は、ウサギ抗ダイオキシンポリクロナール抗体を用いた ELISA 法 (以下、ELISA_{ECO} 法)、(株) クボタは、ダイオキシン類の識別にアリアル炭化水素 (Ah) レセプターバインディング法、そしてその検出過程に免疫測定法を利用した方法 (以下、Ah-IR 法)、第一ファインケミカル (株) は、マウス抗ダイオキシンモノクロナール抗体を用いた ELISA 法 (以下、ELISA_{DT2} 法) による簡易分析手法である。

以下の手順でこれらの簡易分析法の検討を行った。

1) ダイオキシン類標準物質に対する交差性と検出下限値

2) 国土交通省ダイオキシン類実態調査における河川底質試料を用いた適用性の比較

ここで、測定前処理の底質からの抽出については、風乾した試料を高速溶媒抽出法により行い、精製については、硫酸処理と多層シリカゲルカラムクロマトグラフあるいは多層クロマトグラフィーとアルミナカラムによる精製方法を適用した。抽出条件はトルエンを抽出溶媒として、抽出時間 10 ないし 15 分、圧力 2000psi、オープン温度 150℃、サイクル数は 1 ないし 2 回である。抽出溶媒は揮散させ、最終的にジメチルスルフォキシド (DMSO) に溶解させた。また、検討に使用した河川底質は平成 12 年度および 13 年度の国土交通省が実施した全国一級河川ダイオキシン類調査において同一地点で採取され、保存されていた底質試料を用いた。

2. 3 同一試料を用いたダイオキシン類簡易検出手法の比較検討

簡易分析手法の検討・評価にあたり、乾燥法、抽出法、精製法、測定法を組み合わせた分析手法で行うことは重要である。このため、図-1 に示すように、抽出条件としてソックスレー抽出、高速溶媒抽出、加熱流下法を増やし、精製方法として多層シリカと三層シリカ、さらに活性アルミナと活性炭吸着を適宜組み合わせた場合を検討した。また、簡易分析は、前述した免疫測定法の他、四重極 GC/MS、SNVOX を用いた場合と HRGC/HRMS を用いる場合とを比較した。本研究では、比較的汚染濃度が高い地域で採取した同一試料を用いて乾燥・抽出・精製と種々の検出手法との組み合わせ技術について、リサイクルチームと連携して研究を進めた。

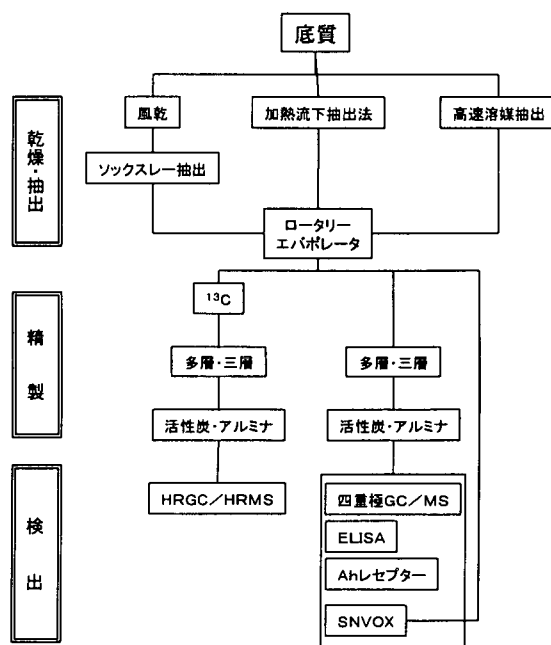


図-1 ダイオキシン類簡易分析技術の比較検討

2. 4 ダイオキシン類簡易分析技術の適用性の評価方法

ダイオキシン類簡易分析技術の現場への適用性の評価方法について検討するため具体的な現場での活用方法についてイメージし、模擬的な適用を試みた。一例として、汚染範囲の推定に当たり汚染区域をメッシュ状に切り調査する場合を想定し、公定法の値を推定するために必要となる公定法と簡易法の関係(回帰式)を求める時の試料検体数の検討を行った。

2. 5 精度管理手法の検討

河川水、底質のダイオキシン類の分析において、データの信頼性を確保する手法の提案を目的とし、既存マニュアルの精度管理手法を整理し検討するとともに、現在、専門家が実施している精度管理手法をパターン化、システム化し、比較的簡単に判定できる手法に関する検討を行った。

3. 研究結果

3. 1 簡易分析技術の開発要件の整理

河川底質のダイオキシン類対策にあたって必要となる簡易モニタリング技術の要件を、表-2 に示し、整理した。対策実施前の調査(調査段階)では、汚染範囲確認調査と工事の影響範囲調査がある。特に底質対策の範囲を確定するためには、公定法に基づかねばならないが、最終的に公定法で測定する範囲に絞り込むために時間がかからず、費用が安い方法が期待される。また、対策実施中の調査(工事段階)や中間処理・処分施設では、水中のダイオキシン類の工事境界と工事区域外での濃度が短時間で得られる方法が望まれる。連続モニタリングが可能或いは短時間に結果が得られる方法が望まれる。施工中、底質処分場からの漏出の有無を監視する目的で行うモニタリングは、水中のダイオキシン類が短時間で結果が得られる方法が望まれる。対策実施後の調査(工事終了後)については、汚染現場の改善効果を確認するため、公定法を用いるための補助手段として低コストの底質分析方法が望まれる。また、底質処分場は、工事終了後に底質処分場の環境影響を把握するため短時間で結果が得られる水質分析方法が望まれる。本研究では、主に汚染範囲を確定の補助として用いる底質の簡易測定法を検討する。水中のダイオキシン類の連続的モニタリングについては、河川生態チームの濁質による方法を主に用いることになる。

表-2 河川底質のダイオキシン類対策にあたって必要となる簡易モニタリング技術の要件

	調査段階		工事段階				工事終了後	
	汚染範囲確認調査	工事の影響範囲調査	工事境界における底質の巻き上げ、上下流への輸送の監視	工事区域外の水質、底質への影響の監視	中間処理・処理施設での固液分離液、仮置きヤードのモニタリング	底質処分場からの漏出の有無の監視	汚染現場の改善効果の把握	底質処分場の環境影響の監視
分析時間短縮	○	○	○	◎	○	◎	○	◎
連続モニタリング			◎		◎	○		
低コスト化	◎	◎		○			◎	○
分析信頼性	○	○	○	○	○	○	○	○

注：簡易モニタリングの検討において考慮すべき事項 ◎：最も優先すべき事項 ○：優先すべき事項

3. 2 免疫抗体による簡易分析法の河川底質の測定利用性の検討

3. 2. 1 ダイオキシン類標準物質に対する交差性と検出下限値

共同研究で用いた簡易測定キット(ELISA_{ECO}、Ah-IR、ELISA_{DT2})の特徴の一つにダイオキシン類に対する交差反応性が挙げられる。特に、Ah-IRは、多くの多環芳香族炭化水素に対しても交差反応性を有している。ここでは、ダイオキシン類に対する交差反応性のうち毒性等価係数(TEF)を有するダイオキシン類に

対する交差反応性を表-3に示した。ダイオキシン類は、その濃度を表す際に各異性体にそれぞれ固有の TEF を乗じた後、総量を毒性等量 (TEQ) として表す。一方、ダイオキシン類の異性体 (以下、異性体) 毎に交差率の異なる簡易測定キットで検出した値 (濃度) は、2,3,7,8-TCDD 相当量 (DEQ) として表している。TEF と交差率が全く同じ異性体に対して公定法と簡易測定キットによる測定値 (以下、測定値) は TEQ と DEQ が同じ数値となる。TEF に比べ交差率が小さい場合、公定法より測定値が小さく、逆に TEF に比べ交差率が大きい場合、公定法より測定値が大きくなる。このように TEF に対する交差率の値はキットの特徴を表す重要なファクターである。ELISA_{ECO} の交差率は、TEF を有する 29 異性体のうち 15 異性体は 1 以上、14 異性体は 1 より小さくなっている。Ah-IR の交差率は、26 異性体が 1 以上、3 異性体は 1 より小さい。ELISA_{DT2} の交差率は、3 異性体は 1 以上、26 異性体は 1 より小さい。

ELISA_{ECO} は、ほとんどのポリ塩化ジベンゾ-パラジオキシン(PCDD)、ポリ塩化ジベンゾフラン(PCDF)に対して TEF より交差率の方が小さく、Co-PCB に対しては逆に交差率の方が大きい。PCDD、PCDF の存在量の少ない試料に対しては、公定法より測定値が小さくなり、コプラナーポリ塩化ビフェニル(Co-PCB)の存在量が多い試料に対しては、公定法より測定値が大きくなる特徴を有している。

ELISA_{DT2} は、2,3,7,8-TCDD、2,3,7,8-TCDF、2,3,4,7,8-PCDF、Co-PCB の#77 にのみ交差率を持つキットであるが、2,3,4,7,8-PCDF の交差率は TEF より小さい値であり、2,3,4,7,8-PCDF の存在量が多い試料では公定法より測定値が小さくなる。また、2,3,7,8-TCDF、Co-PCB の#77 の交差率は TEF より大きな値となっており、これらの存在量が多い試料では公定法より測定値が大きくなるという特徴を持っている。しかし、実試料の測定においては前処理により 2,3,7,8-TCDD 以外の異性体を除去する方法を採用している。

Ah-IR は、1,2,3,7,8-PCDD、2,3,7,8-TCDF、1,2,3,4,7,8-HCDF の交差率は TEF より小さいが、この他はすべて大きい。これら 3 化合物の存在量が多い試料では公定法より測定値は小さくなるが、これら 3 異性体以外の異性体の存在量が多い試料では公定法より測定値が大きくなるという特徴を有している。

表-3 異性体のTEFと測定キットの交差反応性及び実測濃度(中央値)に占める各異性体の割合

異性体	TEF	交差反応性			実測濃度に占める割合(%)
		ELISA _{ECO}	ELISA _{DT2}	Ah-IR	
P C D D	2,3,7,8-TCDD	1	1	1	0
	1,2,3,7,8-PCDD	1	0.1	<0.001	0.023
	1,2,3,4,7,8-HCDD	0.1	0.003	<0.001	0
	1,2,3,6,7,8-HCDD	0.1	0.001	<0.001	0.11
	1,2,3,7,8,9-HCDD	0.1	0.003	<0.001	0.13
	1,2,3,4,6,7,8-HCDD	0.01	0.002	<0.001	3.3
	OCDD	0.0001	<0.001	<0.001	58
P C D F	2,3,7,8-TCDF	0.1	0.1	0.33	0.028
	1,2,3,7,8-PCDF	0.05	0.006	<0.001	0.07
	2,3,4,7,8-PCDF	0.5	0.6	0.002	0.9
	1,2,3,4,7,8-HCDF	0.1	0.005	<0.001	0.08
	1,2,3,6,7,8-HCDF	0.1	0.004	<0.001	0.6
	1,2,3,7,8,9-HCDF	0.1	0.002	<0.001	0.6
	2,3,4,6,7,8-HCDF	0.1	0.002	<0.001	0.5
	1,2,3,4,6,7,8-HCDF	0.01	<0.001	<0.001	0.06
	1,2,3,4,7,8,9-HCDF	0.01	<0.001	<0.001	0.07
	OCDF	0.0001	<0.001	<0.001	0.008
C o - P C B	3,4,4',5'-TeCB (#81)	0.0001	0.01	<0.001	0.03
	3,3',4,4'-TeCB (#77)	0.0001	0.02	0.05	0.01
	3,3',4,4',5'-PeCB (#126)	0.1	0.01	<0.001	0.3
	3,3',4,4',5',5'-HxCB (#169)	0.01	<0.001	<0.001	0.06
	2',3,4,4',5'-PeCB (#123)	0.0001	<0.001	<0.001	0.002
	2,3',4,4',5'-PeCB (#118)	0.0001	0.01	<0.001	0.0002
	2,3,3',4,4'-PeCB (#105)	0.0001	0.007	<0.001	0.0003
	2,3,4,4',5'-PeCB (#114)	0.0005	0.004	<0.001	0.001
	2,3',4,4',5',5'-HxCB (#167)	0.00001	0.002	<0.001	0.0001
	2,3,3',4,4',5'-HxCB (#156)	0.0005	0.005	<0.001	0.001
	2,3,3',4,4',5',5'-HxCB (#157)	0.0005	<0.001	<0.001	0.002
	2,3,3',4,4',5',5'-HpCB (#189)	0.0001	0.002	<0.001	0.0002
					0

各測定キットが、各異性体に対して表-3の交差反応性を示し、相互の異性体が相加的に反応を示すと仮定すると、与えられた複数の異性体構成によって予想されるDEQを理論換算DEQと呼ぶことにする。

次に、底質の異性体構成の概略を知る目的で平成13年度、国土交通省が実施した河川底質ダイオキシン類実態調査のデータを用い、底質のダイオキシン類異性体構成比を整理し図-2に示した。なお、整理に用いたデータ数は238、ダイオキシン類濃度は0.24~63 pg-TEQ/g（中央値0.57 pg-TEQ/g）である。TEQ換算する前の実測濃度で計算すると全体濃度に対する各異性体の割合は、1,2,3,4,6,7,8-H7CDDが3.3%、O8CDDが58%、O8CDFが1.4%、Co-PCBの#77が1.9%、#118が19%、#105が8%、#156が2.3%であった。しかし、各異性体の実測濃度にTEFを乗じ、TEQ濃度で示すと実測濃度で整理した異性体構成パターンと大きく異なっており、1,2,3,7,8-P5CDD、1,2,3,6,7,8-H6CDD、1,2,3,7,8,9-H6CDD、1,2,3,4,6,7,8-H7CDD、O8CDD、2,3,7,8-T4CDF、2,3,4,7,8-P5CDF、1,2,3,4,7,8-H6CDF、1,2,3,6,7,8-H6CDF、2,3,4,6,7,8-H6CDF、1,2,3,4,6,7,8-H7CDFが全体の1%以上で存在している。

図-2に示す代表的なダイオキシン類異性体構成比のダイオキシン類からなる底質に対して、理論換算DEQは、ELISA_{ECO}、Ah-IR、ELISA_{DT2}を用いて測定すると、その値は公定法のTEQに比べ3倍、8倍、0.7倍となる。従って、全国平均的な底質に対しては理論的には、公定法によるTEQに比べ、理論換算DEQは、ELISA_{ECO}、Ah-IRが過大、ELISA_{DT2}が過小となることが予想される。ダイオキシン類の底質対策としてもっとも利用性が高いと考えられる汚染範囲の確定の補助としての利用では、すでに代表的なダイオキシン類の異性体の構成がわかっているため、各キットの交差反応性を考慮した理論的DEQを算定し、もっともTEQに近いものを選択することが考えられる。ただ、現実的底質には、TEFを持たないダイオキシン類が存在すると考えられるが、キットの中には、TEFを持たない異性体との交差率を持つ場合があり、さらにダイオキシン類以外にも交差反応性を持つ物質が存在している可能性がある。現在のところ測定を妨害する主要な物質との交差反応性は十分にはわかっていない。従って、妨害性のある物質のクリーンアップによる精製を行うなどの方法を経験的に組み合わせることが重要と考えられる。

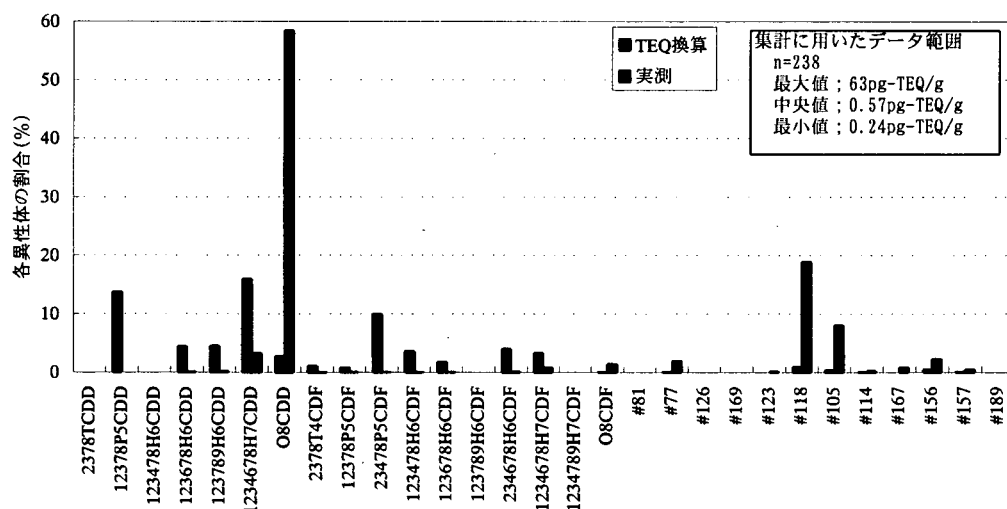


図-2 total TEQ/総実測濃度に占める各異性体の割合

また、各キットの検出下限値、定量下限値を表-4に示した。キットごとに検出性や定量性の定義が異なるため、本研究では各キットとも定量下限値付近の濃度で標準液を繰り返し測定した結果から標準偏差(σ)を求め、その3倍を検出下限値、10倍を定量下限値として比較した。

定量に必要な2,3,7,8-TCDDの絶対量は、ELISA_{ECO}法が265pg、Ah-IRが0.4pg、ELISA_{DT2}法が140pgであり、Ah-IRの感度が高い。

それぞれの測定法で推奨されている乾燥底質の量が5~100gまでと大きく異なるので、結果的には底質の定量下限は2,3,7,8-TCDD換算で、ELISA_{ECO}法が26.5pg/g、Ah-IRが0.08pg/g、ELISA_{DT2}法が1.4pg/gとなる。

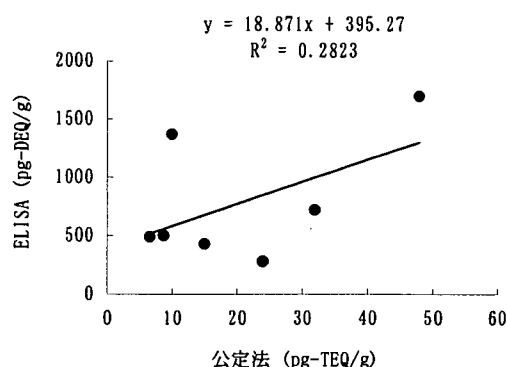
表-4 各キットの検出下限値と定量下限値

キット名	検出下限値			定量下限値		
	下限濃度 (pg/g)	試料使用量 (g)	絶対必要量 (pg)	下限濃度 (pg/g)	試料使用量 (g)	絶対必要量 (pg)
ELISA _{Eco}	8	10	80	26.5	10	265
ELISA _{DT2}	0.43	100	43	1.4	100	140
Ah-IR	0.024	5	0.12	0.08	5	0.4

3. 2. 2 国土交通省ダイオキシン類実態調査における河川底質試料を用いた比較

ELISA_{Eco}

底質 7 サンプルについて公定法及び ELISA 法でそれぞれ測定した結果を図-3 に示した。ELISA 法の測定値は公定法と比較して高値を示し、公定法と ELISA 法の間には良好な相関は認められなかった。また、回帰式の傾きが 18.87 で公定法に比べ ELISA_{Eco} は 20 倍程度大きな値を示し、また切片も 400pg/g と大きい。

図-3 7地点の河川底質を用いた公定法とELISA_{Eco}の比較

Ah-IR

底質 75 サンプルについて公定法及び ELISA 法でそれぞれ測定した結果を図-4 に示した。Ah-IR 法の測定値は、公定法との間にやや低いながら相関が認められたが、多くの試料で十数倍高い値を示した。これは、前述したように Ah-IR の交差率は多くの異性体について TEF より大きな値となっており公定法より測定値が大きくなる特徴を有していることが原因と考えられる。

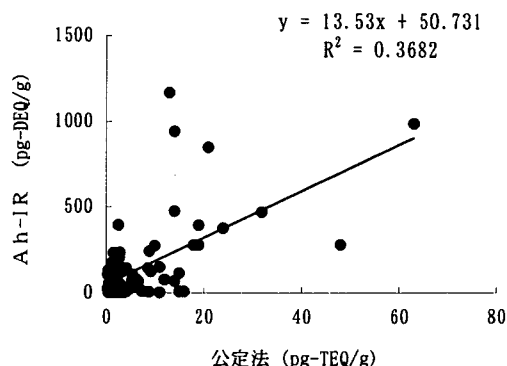
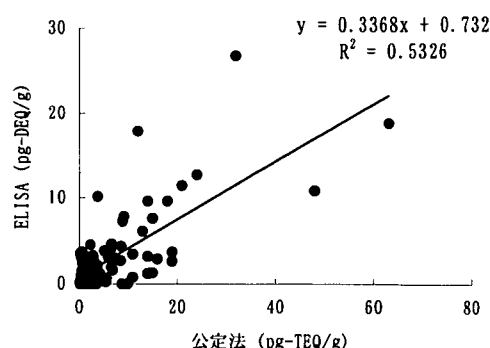


図-4 75地点の河川底質を用いた公定法とAh-IRの比較

ELISA_{DT2}

底質 101 サンプルについて公定法及び ELISA 法でそれぞれ測定した結果を図-5 に示した。両者の相関はやや低いながら認められ、傾きが 0.3368 と公定法より ELISA 法の測定値の方が 0.3 倍と小さくなっている。これは、交差率が限られた異性体にしか存在しないことが原因と考えられる。

図-5 101地点の河川底質を用いた公定法とELISA_{DT2}の比較

次に、これらのデータについてダイオキシン類異性体実測濃度に交差率を乗じた理論換算 DEQ 濃度 (pg-DEQ/g) と実測濃度 (pg-DEQ/g) を比較検討した。その関係を図-6、図-7、図-8 に示した。

ELISA_{Eco} は、理論換算 DEQ に対し実測 DEQ が大きいものが多いが、小さくなる場合もある。精製過程での交差反応物質の除去等、前処理の改良が必要である。

Ah-IR は、ほとんどの試料において理論換算 DEQ に対し実測 DEQ が数倍大きな値となっており、多くの TEF をもつ異性体や TEF を持たない多くの物質との反応が示唆される。

ELISA_{DT2}は、Ah-IR 同様、ほとんどの試料において理論換算 DEQ に対し実測 DEQ が大きい。精製過程での交差反応物質の除去等、前処理の改良が必要である。

ただし、これらの比較に当たって、注意すべきことは、ここで使用した試料数は同じではなく、環境基準を下回る低濃度の試料であること、異なる河川、地点での試料を基にしていること、使用した試料量は同じでなく、抽出と精製の方法もなどの前処理法が少し異なっていることである。このため、次に述べる同一の試料での比較を行う必要があり、免疫抗体による方法以外の方法も検討対象とする必要がある。

これまでの結果から、対象とした免疫測定系はきわめて高感度のものが含まれるが、各キットとも TEF と交差率が同じではなく、また TEF を持たない多くの物質に交差するため、測定値が過小となる場合、逆に過大となる場合が生じる。

3.3 同一試料を用いたダイオキシン類簡易分析技術の比較検討

ダイオキシン類の簡易分析は乾燥、抽出、精製の前処理との組み合わせにより可能となる。ここでは、リサイクルチームと連携し、前処理と測定との組み合わせ技術による検討を行った結果のなかから、前処理が同じ試料を用いて検出法の比較検討を行った結果を報告する。

本検討は、出来るだけ類似の底質を用いて行うため同一河川で採取した試料を用いることとした。本検討に用いた底質試料は、関西地方の K 河川で採取した。13 検体の採取試料から、強熱減量、四重極 GC/MS による OCDD、TOX の測定結果からダイオキシン類が比較的高濃度で存在すると思われる 9 試料を選定した。更に、選定した 9 試料の公定法による測定結果から異性体構成がほぼ同じ 8 試料を検討試料とした。選定した 8 試料のダイオキシン類濃度は、140~330pg-TEQ/g である。Total TEQ に占める各異性体の割合を図-9 に示した。

2,3,7,8-TCDD、1,2,3,7,8-PCDD、2,3,4,7,8-PCDF、

2,3,4,6,7,8-HCDF、3,3',4,4',5-PeCB(#126)の割合が比較的

大きい試料である。ここでは、公定法による乾燥・抽出・精製を行った試料を用い、前述した ELISA_{ECO}、Ah-IR、ELISA_{DT2} に四重極 GC/MS による方法を加えた 4 検出法について比較検討を行った結果を述べる。

四重極 GC/MS 法は多くの異性体の中から特定の異性体だけを選択し、その異性体の存在濃度を測定し、公定法によって測定された TEQ との相関をとって、四重極 GC/MS で測定された特定の異性体の濃度をもとに未知試料の TEQ を推定する方法である。本検討では PCDD、PCDF の各異性体のうち TEF を有する 17 異性体の測定を試みた。

公定法で求めたダイオキシン類濃度 (pg-TEQ/g) とそれぞれの簡易検出法で求めた値との関係を図-10、図-11、図-12、図-13 に示した。四重極 GC/MS による方法では 2,3,7,8-TCDD を一例とした。

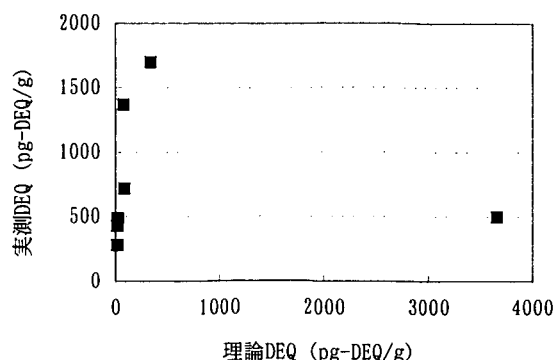


図-6 ELISA_{ECO}の理論換算DEQ濃度と実測DEQ濃度の比較

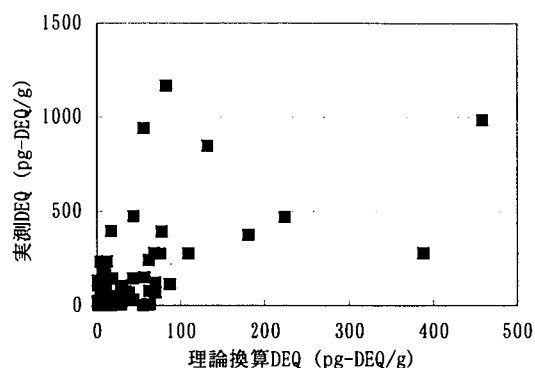


図-7 Ah-IRの理論換算DEQ濃度と実測DEQ濃度の比較

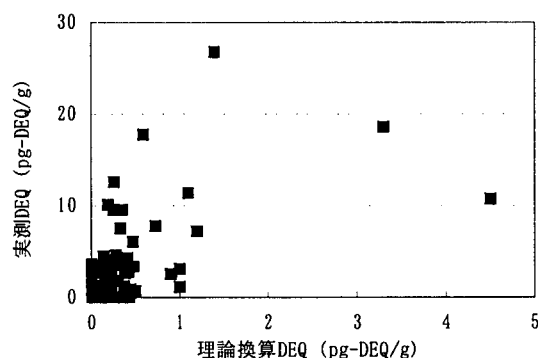


図-8 ELISA_{DT2}の理論換算DEQ濃度と実測DEQ濃度の比較

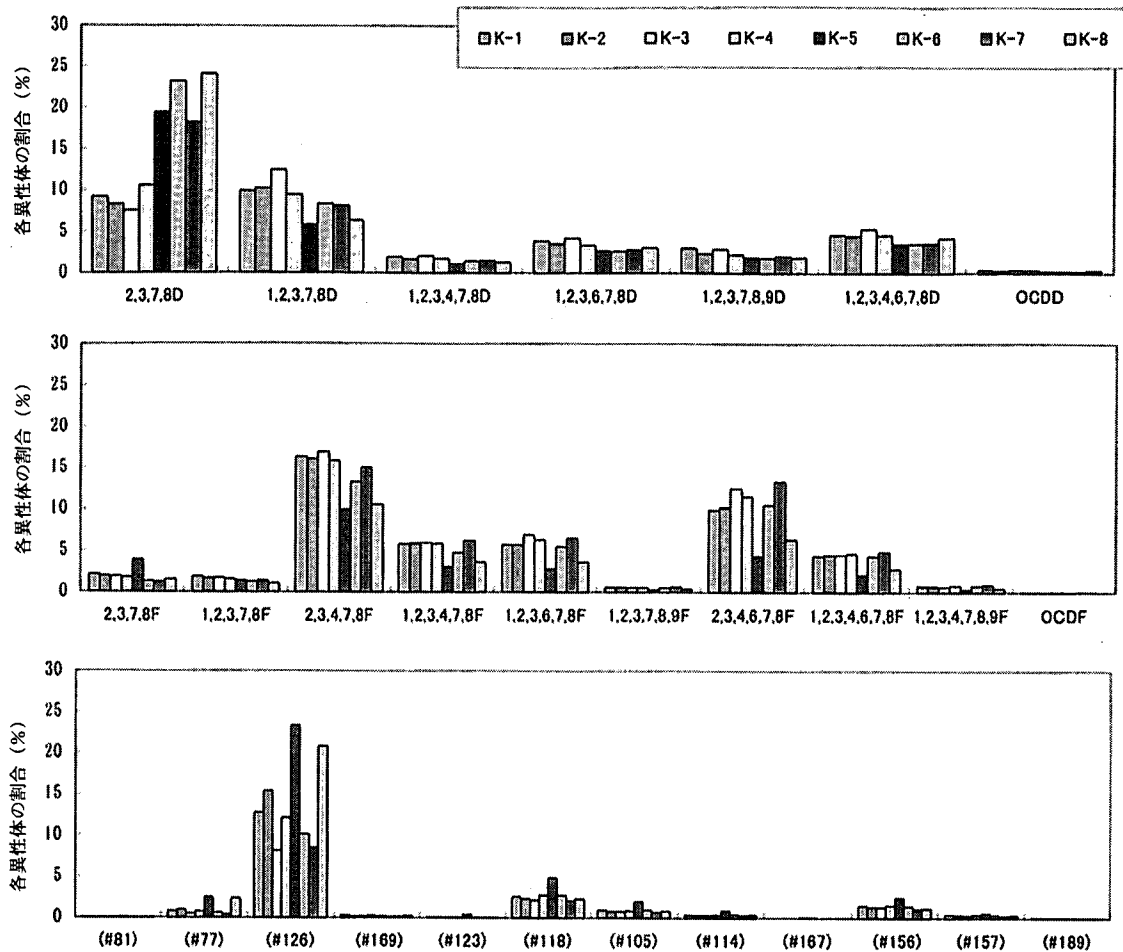


図-9 total TEQに占める各異性体の割合

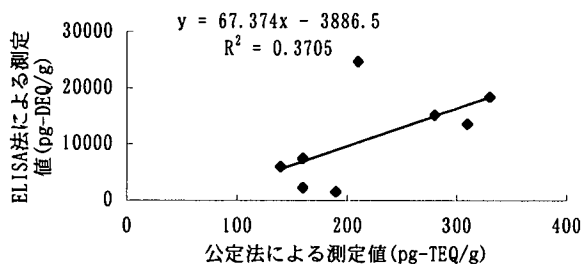


図-10 公定法のTEQとELISA_{ECO}法でのDEQとの比較

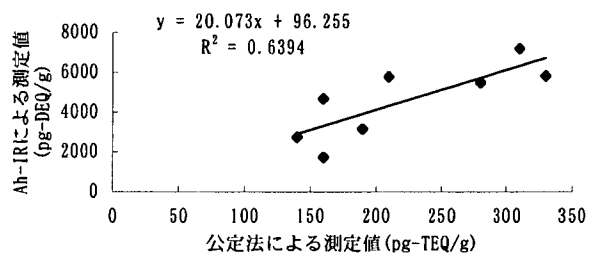


図-11 公定法のTEQとAh-IR法でのDEQとの比較

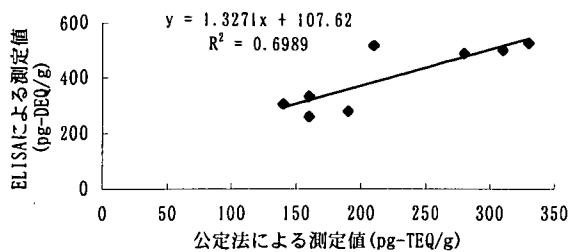


図-12 公定法のTEQとELISA_{DT2}法でのDEQとの比較

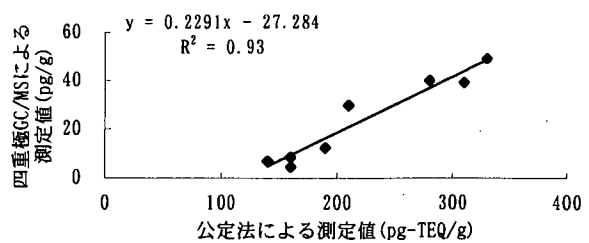


図-13 公定法のTEQと四重極GC/MS法による2,3,7,8-TCDD測定値の比較

ELISA_{ECO}、Ah-IR、ELISA_{DT2}については、試料数が少ないものの図-3、図-4、図-5に示した異なる河川・地点での底質を用いた結果と比べると相関が良くなっている。

四重極 GC/MS による方法では 2,3,7,8-TCDD を含め 17 異性体について相関を評価した。その結果を表-5 に示した。total TEQ に占める割合が高い異性体が比較的高い相関を示す傾向が見られる。このことは、四重極 GC/MS による方法を用いる場合は、total TEQ に占める割合が高い異性体を選択することが望ましいことを示唆している。

表-5 公定法のTEQ(x)と四重極GC/MSによる各異性体の測定値(y)の関係

異性体	回帰式	R ²	異性体	回帰式	R ²
2,3,7,8-TCDD	y=0.2291x-27.284	0.930	2,3,4,7,8-PCDF	y=0.0881x+10.177	0.413
1,2,3,7,8-PCDD	y=0.0645x-1.1043	0.710	1,2,3,4,7,8-HCDF	y=0.0722x-5.2844	0.760
1,2,3,4,7,8-HCDD	y=-0.0058x+2.9531	0.076	1,2,3,6,7,8-HCDF	y=0.2285x-17.936	0.687
1,2,3,6,7,8-HCDD	y=0.0061x-0.0502	0.306	1,2,3,7,8,9-HCDF	y=0.0049x+0.115	0.058
1,2,3,7,8,9-HCDD	y=0.0042x-0.0505	0.370	2,3,4,6,7,8-HCDF	y=0.1185x-8.653	0.629
1,2,3,4,6,7,8-HCDD	y=1.8514x-115.02	0.585	1,2,3,4,6,7,8-HCDF	y=1.1174x+3.0191	0.324
OCDD	y=7.1842x-358.09	0.523	1,2,3,4,7,8,9-HCDF	y=0.2637x-8.8752	0.327
2,3,7,8-TCDF	y=0.0433x+10.772	0.076	OCDF	y=2.3639x-232.69	0.345
1,2,3,7,8-PCDF	y=0.0886x+7.4737	0.505			

3. 4 ダイオキシン類簡易分析技術の適用性の評価方法

簡易分析技術は、ダイオキシン類による汚染が確認された場合その汚染範囲を迅速により安価に測定する手段として期待されている。前述の「同一試料を用いたダイオキシン類簡易測定技術の比較検討」で用いた底質 8 試料は、異性体構成が類似のものであり汚染範囲の確認調査の模擬試料として使用することができる。と判断しこの試料を用い簡易測定技術の現場への適用を試みた。

汚染範囲の推定に当たっては、汚染地域をメッシュに切って多くの試料の測定を行い、その結果から同等濃度のコンターラインを引く。この場合、いくつかの試料については公定法と簡易法で測定を行い、両者の関係から公定法の値を推定する方法をとる。公定法と簡易法の関係を求めるにはより多くの試料について測定することが望ましいが、時間と費用がかかることから実際には少ない限られた試料数で求めることになる。

実際の調査では数多くの試料が対象となるが、ここでは、仮定の検討として先の 8 試料を汚染地域の全試料と仮定した。このなかからどれ位の試料数を選んで相関を求めるかが問題となる。

- ① 先ず、8 試料から 3 試料を選び公定法と簡易法の関係を求め、この関係式から全 8 試料の値 (TEQ) を推定した。8 試料から 3 試料を選び出す場合、その組み合わせは 56 通りとなるが全ての組み合わせについて計算を行った。
- ② 次に、8 試料から 4 試料を選ぶ場合の 70 通り、5 試料を選ぶ場合の 56 通り、6 試料を選ぶ場合の 28 通り、7 試料を選ぶ場合の 8 通り、8 試料全てを選ぶ場合について計算した。

具体的には、ELISA_{ECO}、Ah-IR、ELISA_{DT2} と四重極 GC/MS の 2,3,7,8-TCDD について推定値を計算し、公定法実測値と簡易法推定値との乖離 (絶対値) を求めた。この乖離の全ての値から、その最小値、平均値、最大値をまとめて表-6 に示すとともに表中の平均値の値を図-14 に示した。当然のことながら試料数が多くなるに従い、公定法と簡易法推定値の乖離が小さくなる傾向が見られる。8 試料の公定法による実測濃度は、140~330pg-TEQ/g (平均値: 220pg-TEQ/g) である。公定法と簡易法の関係を 3 試料で求めたケースでは、公定法との乖離の絶対値の平均は、49~237pg-TEQ/g であった。しかしながら、公定法との乖離の絶対値の最大は、670~19000 pg-TEQ/g であり公定法の値と大きく異なることがあった。公定法と簡易法の関係を求める試料数が増えると乖離の絶対値は小さくなり、実際にはあり得ないと思われるが、全 8 試料で求めたケ

表-6 公定法と簡易法の関係式から推定した値と公定法実測値との乖離の絶対値 (pg-TEQ/g)

回帰式を求めたサンプル数	ELISA _{ECO}			Ah-IR		
	公定法との乖離			公定法との乖離		
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
3	0	91	670	0	223	19518
4	0	87	797	0	60	630
5	1	76	576	0	51	312
6	0	67	262	0	48	147
7	0	61	235	3	46	96
8	0	57	214	14	46	72
回帰式を求めたサンプル数	ELISA _{DT2}			四重極GC/MS(2,3,7,8-TCDD)		
	公定法との乖離			公定法との乖離		
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
3	0	237	11681	0	49	3299
4	0	156	17429	0	20	171
5	0	37	163	0	17	57
6	0	34	120	0	16	48
7	2	33	112	0	16	43
8	9	33	101	2	16	38

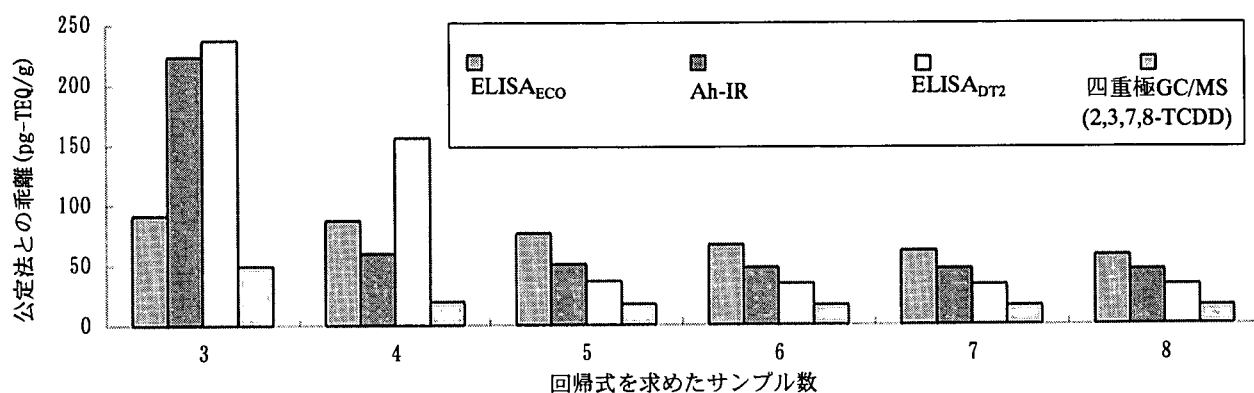


図-14 回帰式を用いた推定値と公定法実測値との乖離の絶対値の平均 (pg-TEQ/g)

ースで見ると、公定法との乖離の絶対値の平均は、16~57pg-TEQ/g、最大でも 38~214pg-TEQ/g の乖離に収まった。

また、公定法との乖離を平均値で評価すると 3 試料の関係式から推定したケースでは、四重極 GC/MS (2,3,7,8-TCDD)、ELISA_{ECO}、Ah-IR、ELISA_{DT2} の順に乖離が小さいが、4 試料の関係式から推定したケースでは、四重極 GC/MS (2,3,7,8-TCDD)、Ah-IR、ELISA_{ECO}、ELISA_{DT2} の順に、5 試料以上関係式から推定したケースでは、四重極 GC/MS (2,3,7,8-TCDD)、ELISA_{DT2}、Ah-IR、ELISA_{ECO} の順であった。5 試料以上の関係式から推定したケースでは、前述の図-10、11、12、13 に示す全 8 試料の相関係数の順 (四重極 GC/MS (2,3,7,8-TCDD)、ELISA_{DT2}、Ah-IR、ELISA_{ECO}) と同じであったが、4 試料、3 試料と試料数が少ない場合は異なった順番となっている。

以上のことから、実際の現場に簡易分析技術を適用する場合においては、単に公定法との相関関係から選定するのではなく、このようないくつかの限られた試料での関係式から推定した値と公定法との乖離について事前に評価しておくことが望ましい。実際の調査においては数十、或いはそれ以上の試料について測定することになると考えられるが、これらのケースについても検討し公定法と簡易法の関係式を求める上において適切な試料数を見極めておく必要がある。

3. 5 精度管理手法の検討

ダイオキシン類の測定分析に関しては『測定値の信頼性確保』のために、公定法（JIS K 0312）では種々の品質管理項目が定められている。品質管理項目のデータは測定分析機関に記録として保管され、依頼業務の場合、その一部は測定値と共に依頼元へ報告される。しかしながら、ダイオキシン類の測定分析結果の妥当性を、品質管理項目をも含めて確認するためには極めて高い専門知識が必要である。これまで専門家が行ってきたダイオキシン類測定データの精査作業の一部をパターン化、システム化することで、報告された測定値が公定法で定められた品質管理規格を満足する状態で得られたものであるかを確認するソフトウェアを作成した。本システムでの判定項目の1例を表-7に示す。本ソフトウェアの使用方法は、ソフトウェアを測定分析機関等の依頼先へ配布し、測定分析機関は測定分析終了後、数値等をソフトウェアに入力する。本ソフトウェアでは入力されたデータの内容に矛盾や規格逸脱があれば指摘し、また公定法で定められた規格を満足する状態でなければ出力（印刷等）が不可能とすることで判定が分かりやすい。依頼元は本ソフトウェアの出力結果の提出を要求することにより、定められた品質管理規格を満足しているダイオキシン類測定分析値を得ることが可能となる。本ソフトウェアは、土木研究所ホームページ等で公開し広く活用できるようにする予定である。

表-7 精度管理のための判定項目と判定基準（例）

判定項目			判定基準
クリーンアップ スパイク	PCDD, PCDF		各塩素数ごとに2, 3, 7, 8-位塩素置換体 1 種類を添加しているか
	Co-PCB	ノオクト体	全種類を添加しているか
		モノオクト体、ジオオクト体	各塩素化合物ごとに 1 種類ずつ添加しているか
分解能			10, 000以上であるか
サンプリング周期			1 秒以下であるか
測定質量数			正しい質量数で測定が行われているか
			試料、内標準物質各塩化物ごとに 2 つ以上の質量数とロックマス用 選択イオンの質量数を測定しているか
クリーンアップスパイクの回収率			50－120％の範囲にあるか
サンプリングスパイクの回収率			70－130％の範囲にあるか
塩素同位体比			±15％（検出下限の 3 倍以下の場合は±25％）の範囲にあるか
検量線作成時のRRFからの変動範囲			±20％の範囲にあるか

4. まとめ

本研究では、ELISA等による簡易分析法と精度管理手法について以下の結果を得た。

- 1) 共同研究を実施しているELISA_{Eco}、Ah-IR、ELISA_{DT2}の異性体ごとの検出と検出下限の特徴を整理し、実試料に適用した場合の結果と比較した。この結果、全国河川底質の実測DEQはTEQより、ELISA_{Eco}とAh-IRは常に過大、ELISA_{DT2}は過大あるいは過小となった。理論換算DEQと実測DEQの比較からは、TEFを持たない物質との交差反応の可能性が示唆され、精製法の検討が重要と分かった。
- 2) 同じ乾燥、抽出、精製の前処理を行った試料を用い、ELISA_{Eco}、Ah-IR、ELISA_{DT2}と四重極GC/MSによる簡易検出手法について比較検討した。試料数が少ないながらも比較的良好な相関性が認められた。
- 3) 簡易分析技術の現場への適用に当たっては、単に公定法との相関関係から選定するのではなく、いくつかの限られた試料での関係式から推定した値と公定法との乖離を求める等の評価方法も重要であることが分かった。
- 4) 測定値の信頼性確保のため専門家が行っていた測定データの精査作業の一部をパターン化、システム化し、報告された測定値が公定法で定められた品質管理規格を満足する状態で得られたものであるかを確認するソフトウェアを作成した。
- 5) 今後、より多くの試料を基に検討を進めるとともに、ダイオキシン類の対策がとられる現場での検討を行う必要がある。

5. 参考文献

- 1) 小森行也、八十島誠、田中宏明、南山瑞彦、鈴木穰、伊藤弘之「河川底質のダイオキシン類対策に必要な簡易測定技術」、環境システム計測制御学会誌、Vol. 7, No. 2, pp. 255-258、2002.9
- 2) 永柳、4重極 GC/MS によるダイオキシン類の簡易測定技術、資源環境対策、Vol. 37, pp. 921-925 (2001)
- 3) 上東浩、ダイオキシン類測定分析の迅速化・簡易化、資源環境対策、Vo. 37, pp. 942-947 (2001)
- 4) 大川真、GC/MS/MS によるダイオキシン類の簡易分析、資源環境対策、Vo. 37, pp. 932-935 (2001)
- 5) 中村朋之 他、大容量注入装置を用いたイオントラップ型 GC/MS/MS によるダイオキシン類分析法の検討、第9回環境化学討論会、pp. 248-249 (2000)
- 6) 坂田一登 他、高速溶媒抽出法と免疫測定法を組み合わせた迅速ダイオキシン分析技術、資源環境対策、Vol. 37, pp. 87-91 (2001)
- 7) 小林康男 他、Ah イムノアッセイによる環境サンプルのダイオキシン類測定の実例、造水技術、Vol. 27, pp. 3-8 (2002)
- 8) 橋場常雄、リポータージーンアッセイ法によるダイオキシン類の分析について、造水技術、Vol. 27, pp. 14-19 (2002)
- 9) 村田弘司、ジーン・バイオアッセイによるダイオキシン類の測定、資源環境対策、Vol. 37, pp. 970-974 (2001)
- 10) 加藤みか、ダイオキシン類の測定を正確かつ大幅に効率化できる方法、第2回効率的な環境管理のための最新の簡易測定技術、エコケミストリー研究会(2002)

水域におけるダイオキシン類汚染対策技術

水循環研究グループ 河川生態チーム 主任研究員 天野 邦彦

1. はじめに

平成 11 年 7 月にダイオキシン類対策特別措置法が制定され、平成 12 年 1 月に施行された。これに基づき、水質、水底の底質についてダイオキシン類に係わる環境基準値がそれぞれ 1pg-TEQ/L 及び 150pg-TEQ/g と定められるとともに、環境基準が達成されていない水域にあっては、可及的速やかに達成されるように努めることとなっている。

一級河川においては、河川や湖沼の水質及び底質のダイオキシン類による汚染状況を把握するため、定期的な常時監視が行われており、環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合は、速やかに対策を講じることができる体制となっている。

本稿は、河川・湖沼における底質の常時監視等により環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合に、汚染された底質の除去や封じ込め等の対策を講じることにより、ダイオキシン類の人への曝露量を低減し、人の健康を保護することを目的とするダイオキシン類汚染底質対策について概説するものである。

2. 河川・湖沼底質のダイオキシン類汚染実態

河川・湖沼底質のダイオキシン類調査については、環境庁が平成 10 年度に「ダイオキシン類全国緊急一斉調査」を実施して以来、環境省及び国土交通省河川局等が中心となって常時監視が行われてきた。平成 13 年度の調査結果によると表-1 のとおりであり、河川局が全国の 1 級水系の直轄管理区間の 237 地点について、都道府県や政令指定都市がそれら区間を除く全国の河川、湖沼の 1532 地点について調査を行っている。調査にあたっては、「ダイオキシン類に係わる底質調査測定マニュアル（環境庁水質保全局）」に基づき、水底表層の底質を採取している。

調査地点全体の平均値は 8.0pg-TEQ/g であるが、12 地点で環境基準値を超え、和歌山県山田川で最大の 690pg-TEQ/g に達した。また 1 級水系直轄管理区間においては、平均値が 3.1pg-TEQ/g で環境基準値を越える地点は発見されず、その他の河川・湖沼に比べダイオキシン類濃度は低かったが、綾瀬川においては河床面から深さ 53～63cm の地点で約 330pg-TEQ/g のダイオキシン類汚染が発見されており、この地点の上流に位置する古綾瀬川（150pg-TEQ//g）から流入してきたものと考えられる。

表-1 平成 13 年度全国調査結果（河川・湖沼）

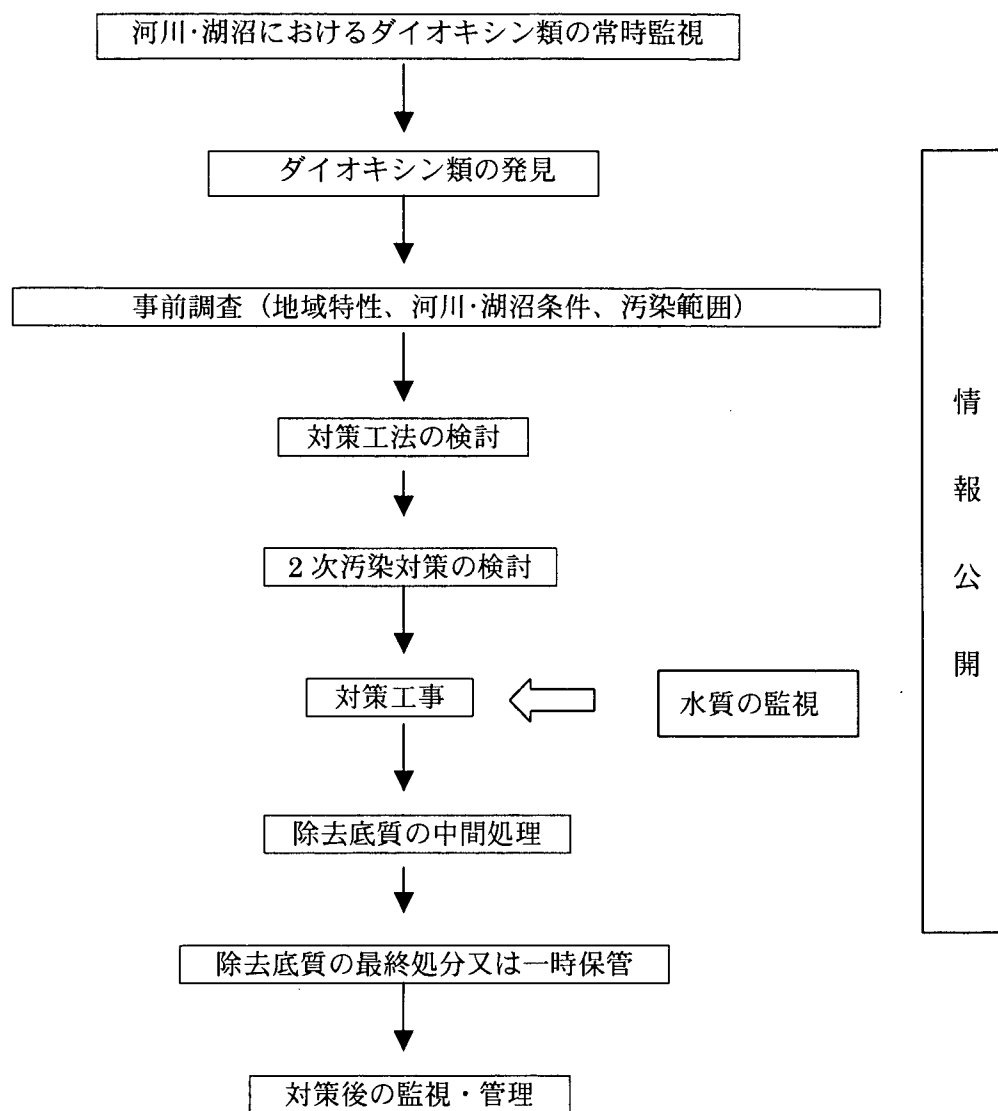
調査地点数	平均値 (pg-TEQ/g)	最大値 (pg-TEQ/g)	環境基準値 超過地点数
1769	8.0	690	12
237(上記のうち直轄管理区間)	3.1	63	0

3. 河川・湖沼におけるダイオキシン類汚染底質対策

3. 1 対策の流れ

河川・湖沼において、環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合は、以下の手順

で対策を講じるものとする。対策は、対策範囲や対策工法を検討するための事前調査から対策工事後における対策効果の継続的な監視までの一連の工程よりなる（図－１参照）。また、一連の工程の中では、対策の段階に応じて、適宜調査結果や対策計画等について適切な情報公開をしていくことが必要である。



図－１ ダイオキシン類対策の流れ

3. 2 事前調査

河川・湖沼において、環境基準値を超えるダイオキシン類汚染底質が発見された場合は、その対策を講じる範囲や対策方法等について検討するため、①汚染源の調査（地域特性）、②河川・湖沼条件調査及び③ダイオキシン類による汚染範囲調査を行うものとする。

①汚染源の調査

汚染水域上流の河川・水路における既存のダイオキシン類測定結果、排水系統、流域の土地利用、工場・廃棄物処理場の立地条件、排水水質等を調査し、ダイオキシン類の排出源及び排出状況等を把握することにより、汚染分布の推定や対策方法の検討材料とする。

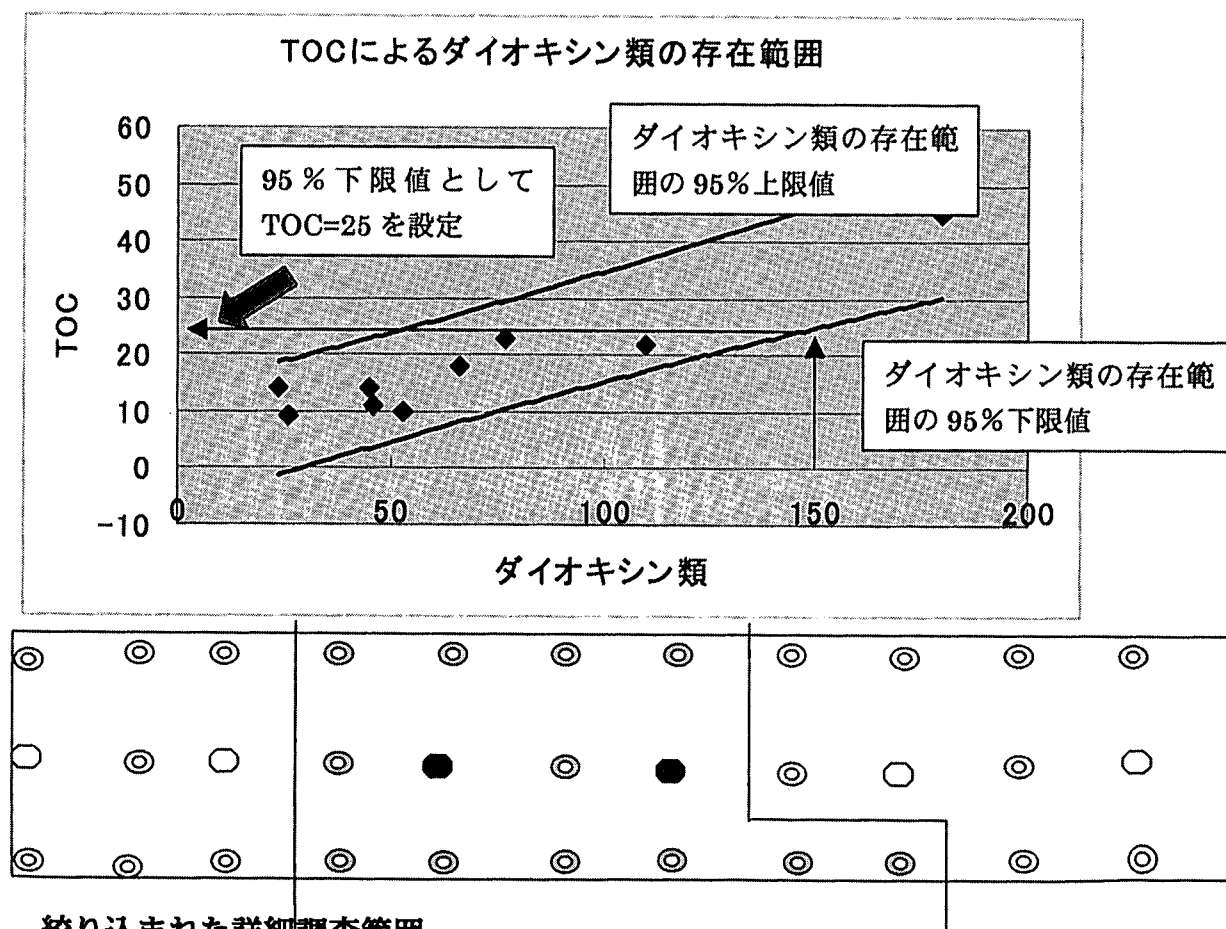
②河川・湖沼条件調査

当該河川・湖沼における地形、流況、取水、漁場・漁法、舟運、河川改修や橋梁等の計画等を調査し、対策方法の検討材料とする。

③ダイオキシン類による汚染範囲調査

当該水域におけるダイオキシン類濃度ほか底質の性状を把握し、対策が必要な範囲を決定したり、対策方法を検討するための資料とする。なお、汚染範囲調査は、ダイオキシン類の比較的広域の分布傾向を把握し詳細調査を実施すべき範囲を絞り込むための概略調査と、汚染対策を実施すべき範囲を確定するための詳細調査の２段階で行うものとし、概略調査においては期間の短縮や効率化のため簡易分析法や代替指標による推定方法については、当該水域における精度を確認した上で積極的に使用するものとする。

概略調査結果を基にした詳細調査範囲の絞り込みには、ダイオキシンに比べて分析が簡易な有機物指標の分布に基づいて行うことが有効な場合がある。現地河川において測定された底質ダイオキシン類濃度と強熱減量や TOC との相関関係を見ると、ダイオキシン類濃度と有機物指標の間に相関関係が認められ、相関係数が極めて高いケースが見られる。強熱減量や TOC はダイオキシン類濃度との間には特に物性上の関係は無く、またダイオキシン類はかなり局所的に分布していると見られるが、全体的な分布傾向としては、ダイオキシン類の付着基盤や沈降・堆積状況を指標するものとして、ダイオキシン類濃度を指標するものと考えられる。

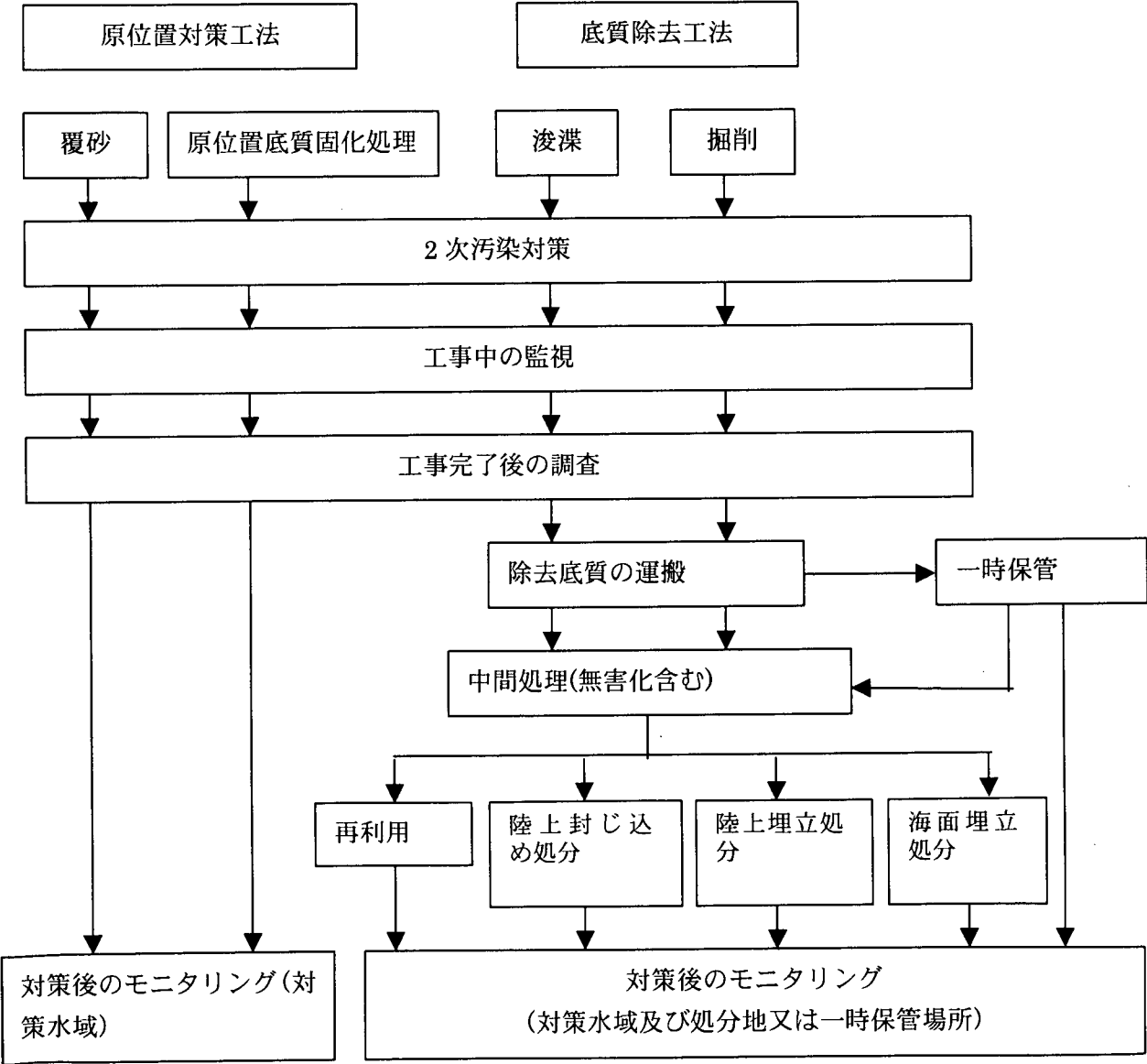


図一 2 代替指標を用いた汚染範囲の絞り込みの例

ある川の調査結果を用いて、TOC とダイオキシン類の相関関係と、これにより環境基準値を超えて汚染された底質に対する TOC の目安値の設定方法を図－2 に示す。底質ダイオキシン類と TOC の相関関係を踏まえた上で 95% の安全率で底質環境基準に相当するダイオキシン類が存在する TOC の下限値を求めたものである。環境基準値を越える底質ダイオキシン類の 95% 以上は TOC>25 の範囲に存在する。

3. 3 対策工法の検討

対策工法としては、水底にダイオキシン類を残したままで汚染底質を砂等で覆ったり、セメント等で固化することにより、ダイオキシン類が水に溶出したり、巻き上がったりを抑制する原位置対策工法や、汚染底質を河川・湖沼の水底から取り除き、水との接触を遮断する底質除去工法がある。汚染底質を除去した場合は、その除去底質を無害化して再利用したり、そのまま埋立処分等にする必要がある。原位置対策及び底質除去に係わる一連の工事を図－3 に示す。



図－3 ダイオキシン類汚染底質対策工事の流れ

3. 3. 1 原位置対策工法

原位置対策工法は、汚染底質の移動を伴わない、汚染底質の処分が不要であること等から、工費は比較的安価である。その一方で、水底にダイオキシン類が残るため、異常気象等に伴い対策工が破損等した場合にダイオキシン類が水中に拡散するリスクを内在する、河川環境の根本的な改善とならない、対策の結果として水深が減少するため舟運等の水域利用や治水対策との整合性が問題になる場合がある、ダイオキシン類の流入が続いている場合は持続的な対策とならない、といった短所を有しており、また当該汚染水域が周辺地下水の供給源となっており、かつ周辺地下水のダイオキシン類濃度が水質環境基準値（ $1\text{pg}\cdot\text{TEQ/L}$ ）を越えている場合は、原則適用できない。

対策効果の持続性が課題となるため、継続的なモニタリングが必要であり、将来的な費用を含めた総費用としては、必ずしも安価にならないことに十分留意する必要がある。

（1）覆砂

覆砂工法は、汚染底質を砂で被覆し、汚染底質と水との接触を低減するとともに、汚染底質への流体力の作用を阻止することにより、ダイオキシン類の巻上や溶出を抑制するとともに、生物によるダイオキシン類の摂取を低減するものである。覆砂工の検討では、①流れや波浪、水底地形等に対する覆砂工の安定性、②ダイオキシン類の溶出抑制効果、③水生生物と汚染底質の隔離、④施工精度やめり込み厚、⑤水域利用や治水計画等との整合性項目について検討し、覆砂材料及び覆砂厚を決定する必要がある。

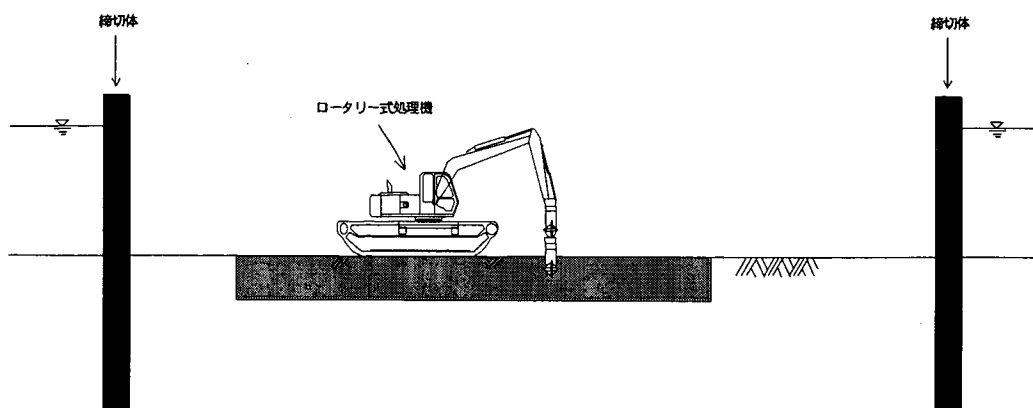
覆砂工によるダイオキシン類の溶出抑制効果については、有機物等の溶出抑制効果に関する調査結果とダイオキシン類の大部分が有機物等に付着した形で移動することから類推すると、一般に覆砂材料の粒径が小さく、覆砂厚が大きいほどダイオキシン類の溶出抑制効果は高く、30cm 以上の覆砂厚があれば一定の効果を確保できると考えられる。

（2）原位置底質固化処理

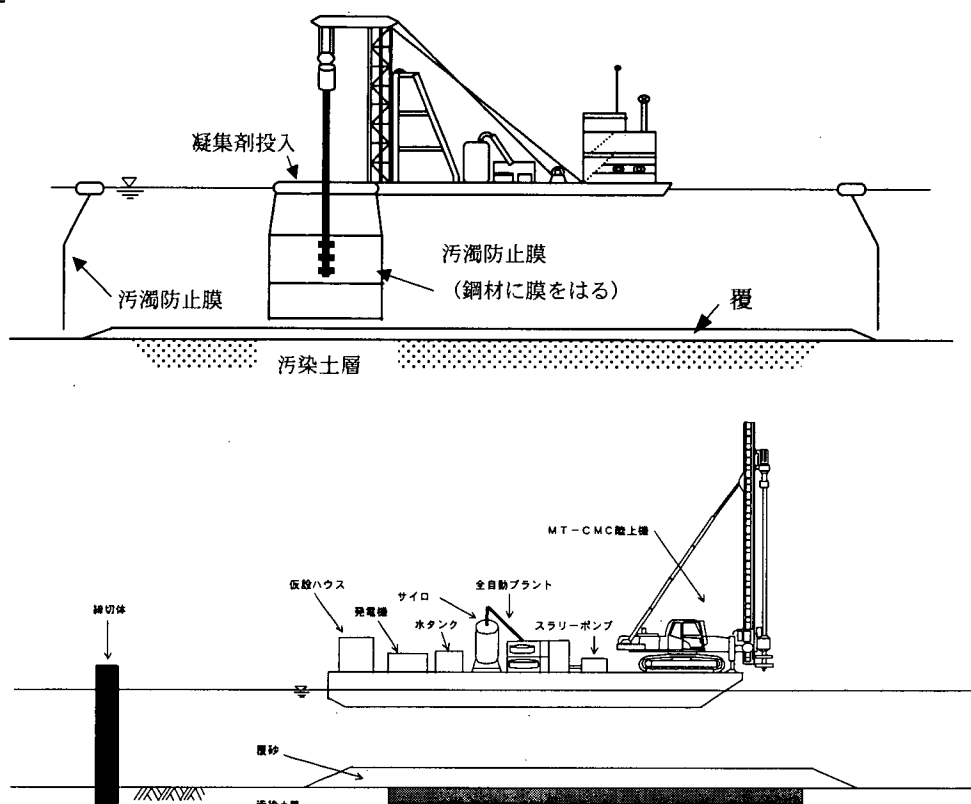
原位置底質固化処理工法は、汚染底質をセメント等で固化、結合させ、底質間隙への水の侵入や汚染底質の拡散を防ぐことにより、ダイオキシン類の水への巻上や溶出、生物による摂取を抑制するものである。固化材は水硬セメントを基本とし、所要の強度、溶出低減効果を確保するため必要な量を、汚染底質層に添加する。強度の目安としては一軸圧縮強度で 196kN/m^2 （ 2.0kgf/cm^2 ）程度を確保することが目安となり、ダイオキシン類の溶出抑制効果については、固化された汚染底質に対して浸透・分配試験（環境庁告示 13 号）を行い、溶出量が $1\text{pg}\cdot\text{TEQ/L}$ 以下であることを確認する必要がある。環境省が河床と海底の $1000\text{pg}\cdot\text{TEQ/g}$ 近いダイオキシン類汚染底質を用いて行った実験では、セメント添加量が 100kg/m^3 以上あれば、固化底質が破壊・粉砕され、粒子が水中に巻き上がった状態でも、水への移行量は環境基準値の $1\text{pg}\cdot\text{TEQ/L}$ より十分小さいことが確認されている。

固化工法を大きく分類すると、比較的浅い土層（深度 3m 程度まで）を固化する表層混合処理工法と、比較的深い土層まで固化処理が可能な深層混合処理工法に分類されるが、締切・排水後陸上施工する場合は表層混合処理工法が、水上施工の場合は深層混合処理工法がより高い適用性を有すると考えられる。図—4 に原位置底質固化処理工法のイメージを示す。

ドライ施工



ウェット施工



図－４ 原位置底質固化処理工法のイメージ

3. 3. 2 底質除去工法

底質除去工法では、水底のダイオキシン類を除去するため、水や魚介類を介した人への曝露経路については、ほぼ完全な遮断が可能であるとともに、河川・湖沼環境の根本的な回復が望めるため、基本的に本工法を適用することが望ましい。しかし、周辺構造物に影響が生じたり、底質の処分に高額のコストを要する場合がある。底質の処分方法には、陸上埋立処分、海面埋立処分、陸上封じ込め処分、無害化処理した上での再利用等があり、除去底質の汚染レベルに応じて、適切な方法や処分施設の構造を選ぶ必要がある。一般に、ダイオキシン類濃度が高いほど、処分費用が高額になるとともに、処分地周辺住民の理解を得るのが困難となる。

(1) 浚渫

浚渫は浚渫船による水上施工により、汚染底質を除去するものであり、汚染底質の巻き上げ、拡散による2次汚染を防止するため、施工に伴う濁りの発生の少ない方式や、比較的表層に集中していると考えられる高濃度のダイオキシン類を高い含泥率で除去できる高濃度薄層浚渫船、ポンプ式汚泥浚渫船（カッターレスポンプ浚渫船）、密閉式グラブ浚渫船の適用性が高いと考えられる。また、必要に応じて汚濁防止工の設置等について検討する必要がある。

(2) 掘削

掘削は水域を遮水矢板等で締め切り、締切内を排水することにより、気中施工として底質を除去するものである。水域が広く、水深が大きい場合には、締切や排水が大規模になるため工費が増大するが、簡易な陸上機械での施工が可能となり、気中施工となるため確実な施工管理が可能となる。また、排水後の水底が軟弱で陸上施工機械の乗り入れが困難な場合は、仮設栈橋や土質改良等により、足場を確保する必要がある。

3. 4 2次汚染防止対策

ダイオキシン類汚染底質の対策工事においては、少なからず汚染底質を攪乱・巻き上げるため、これに伴うダイオキシン類の水中への拡散に十分注意するとともに、水質環境基準を超える2次汚染が予想される場合は、利水や漁業等に影響を及ぼさないよう対策を講じる必要がある。2次汚染対策の検討は、「底質の処理・処分等に関する指針」に準じ、図-5の手順で行うものとする。

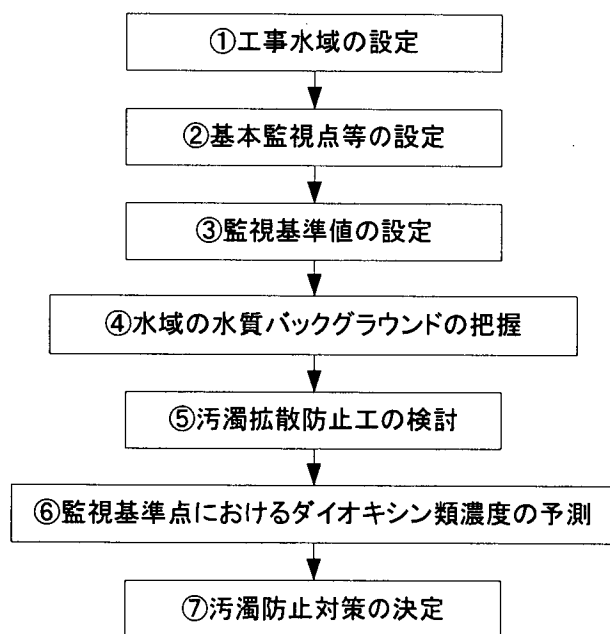


図-5 2次汚染対策検討の流れ

(1) 工事水域、基本監視点等及び監視基準値の設定

2次汚染対策の基本条件となる工事水域、基本監視点及び基本監視点における水質を予察するための補助監視点を設定する（図-6参照）。取水地点や漁場等に工事の影響が及ばないように工事水域を設定するとともに、水質への影響が最も大きいと考えられる工事水域境界上に2地点以上の基本監視点を、また基本監視点における水質を予察できる位置に補助監視点を設定する。また、水質のバックグ

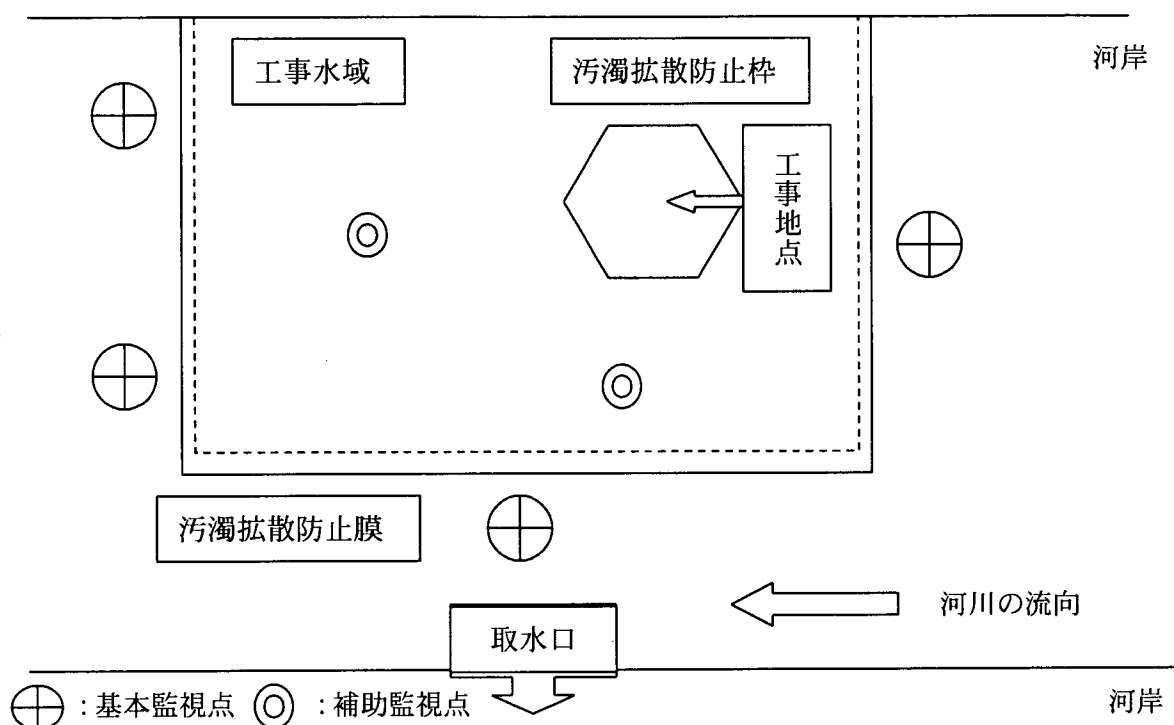
ランド値や環境基準を踏まえた上で、現況の水質を悪化させない範囲で、基本監視地点の水質監視基準値を設定する。

(2) 汚濁拡散防止対策の検討

汚濁防止柵や汚濁防止膜の適用性や、これらの組み合わせ使用等について検討する。

(3) 工事に伴うダイオキシン類拡散予測と汚濁拡散防止対策の決定

汚濁拡散防止工の使用案ごとに、工事中の基本監視点におけるダイオキシン類濃度を予測し、その結果を基に汚濁拡散防止対策を決定する。ダイオキシン類の濃度予測については、あらかじめ工事に伴う SS の拡散予測計算を行い、この結果と別途求めた SS とダイオキシン類濃度の関係からダイオキシン類濃度を予測することができる。



図一6 工事水域、監視地点の配置例

3. 5 工事中的水質監視

工事中的水質監視は、「底質の処理・処分等に関する指針」に従い行うものとし、基本監視点や補助監視点におけるダイオキシン類の監視には、ダイオキシン類と SS や濁度の関係を把握した上で、SS や濁度を代替指標として行う。なお、工事中的水質監視の結果が監視基準に適合しない場合は、以下の通り、工事を中断する等の所要の措置を講じるものとする。

- ①水質ダイオキシン類について、基本監視点における水質調査結果が監視基準に適合しない場合又はその恐れがある場合は、直ちに工事を中断し、その原因を究明した上、必要な措置をとる。
- ②生活環境項目について、基本監視点における水質調査結果が、監視基準に適合しない場合、補助監視点の水質調査結果が監視基準に適合しない場合又は工事地点周辺の水質に異常が認められた場合は、監視を強化し、その原因を究明するとともに、必要に応じて工事速度を減ずるか又は工事を中断するなど、早急に環境基準が達成されるよう所要の措置を講ずる。

3. 6 除去底質の中間処理工法

中間処理工法は除去底質のワーカビリティの向上、減容化、不溶化、無害化等を目的として行うものであり、脱水、固化、分級、無害化等の処理及びこれらの処理に伴い生じた余水の処理からなる（ダイオキシン類の水質排出基準値は $10\text{pg}\cdot\text{TEQ/l}$ ）。

（1）脱水

脱水処理は運搬や処分等における底質のワーカビリティの向上、汚染水の浸出防止、減量化等を目的として行われるものである。工法としては、標準型フィルタープレス、高圧薄層型フィルタープレス、高圧型フィルタープレスは作業中の密閉度が高く、遠隔操作も可能であるため、ダイオキシン類汚染底質の処理には適用性が高いと考えられる。

（2）固化処理

固化処理は除去底質の拡散や浸出水の発生を防止することを目的として行われる。工法としては、管中固化工法、仮置場混合方式、プラント混合方式があり、除去底質の含水比や処理量に応じて適切な工法を選定する必要がある。

（3）分級

分級は、除去底質について、ダイオキシン類がより付着していると考えられる細粒成分と比較的清浄と考えられる粗粒成分やゴミ等を選別することにより、汚染濃度や粒径別の処理を可能とし、処理効率全体を向上させるものである。

（4）無害化処理

ダイオキシン類の無害化技術については、これまでに①熔融固化法、②アルカリ触媒化学分解法等の技術が開発されており、熔融固化法については、和歌山県においてダイオキシン類汚染土の無害化処理を安全に施工した実績を残している。

しかし、現状においては、いずれの技術も単位処理量当たりの費用が高額で、大量の汚染底質の発生が想定される河川・湖沼のダイオキシン類対策への適用は容易でないため、極めてダイオキシン類濃度の高い比較的少量の汚染底質に対して重点的に適用するか、より安価な技術が開発されるまで、安全な場所に一時保管することが考えられる。

（5）余水処理

ダイオキシン類の水質排出基準値は $10\text{pg}\cdot\text{TEQ/l}$ であり、中間処理場や埋立処分地等からの排水がこれを越える場合は、周辺公共用水域を汚染しないよう適切な処理を実施する必要がある。余水の処理方式は、余水中の不純物質の濃度、粒子の大きさ及び溶存物質等に応じて適切なものを適用する。

3. 7 除去底質の処分

除去底質もしくは無害化処理等された底質の処分に当たっては、処分時点のダイオキシン類濃度に応じて適切な処分方法を選定するものとする。ダイオキシン類濃度に応じた適用可能な処分方法は、以下の通りである。

① $1000\text{pg}\cdot\text{TEQ/g}$ 以下

底質のダイオキシン類濃度が $1000\text{pg}\cdot\text{TEQ/g}$ 以下の場合は、陸上で再利用することができる。除去底質については、汚染土の監視、拡散防止のため、公共用地で使用することを原則とする。再利用にあたっては、環境基準を超える浸出水の発生を防止するとともに、汚染土には覆土や植樹、シート掛け等を行い、風による拡散を防止する他、ダイオキシン類濃度が $150\text{pg}\cdot\text{TEQ/g}$ を超える場合は、降雨等により水域へ流出することを防止するための対策を講じる必要がある。また、ダイオキシン類の

拡散を防止し、管理を徹底するため、再利用は原則官地に限り、運搬等を行わないものとする

②1000pg-TEQ/g～3000pg-TEQ/g

底質のダイオキシン類濃度が 1000pg-TEQ/g 超の場合は、土壤の環境基準を超えており、再利用することはできない。このため、陸上埋立処分、海面埋立処分、陸上封じ込め処分とするか、もしくは無害化処理を前提とした一時保管を行うものとする。

③3000pg-TEQ/g～

底質のダイオキシン類濃度が 3000pg-TEQ/g 超の場合は無害化を原則とするが、大量の底質に適用可能な無害化技術が未確立であることから、当面無害化処理を前提とした一時保管でもよいものとする。なお、一時保管の形態は、陸上埋め立て処分、もしくは陸上封じ込め処分とする。

3. 8 対策後の監視・管理

工事完了後の調査により工事の成果が確認され、対策が終了した後においても、対策効果の持続、対策工の安定性、新たなダイオキシン類の流入等について引き続き調査を実施するものとし、対策工の破損や所要の対策効果が持続されていないことが確認された場合は、必要に応じて補修等の適切な対策を講じるものとする。

3. 9 情報公開

ダイオキシン類の詳細調査や対策に当たっては、調査及び対策の実施者が、関係地方公共団体及び地元関係者に対して当該事業に関する情報を保管・提供することが重要である。

4. おわりに

本稿では、河川・湖沼における底質のダイオキシン類汚染実態の把握及び、ダイオキシン類汚染底質対策に関する検討を行った。ダイオキシン類対策の観点から、既存の汚泥対策技術の適用性を検討し、ダイオキシン類汚染底質に関する一連の工程、技術事項及び留意事項等を整理し、対策マニュアルを作成した。この成果の内容は、現在作成中の河川局のダイオキシン類対策マニュアルにも反映されている。

【参考文献】

- 1) 環境省：「ダイオキシン類による大気汚染、水質汚濁（水底の底質汚染を含む。）及び土壌汚染に係わる環境基準について（平成14年環境省告示第46号）」、2002年
- 2) 環境省環境管理局水環境部：「ダイオキシン類対策特別措置法に基づく底質環境基準の試行について」、2002年
- 3) 環境省環境管理局水環境部：「底質の処理・処分等に関する指針」、2002年
- 4) 環境庁水質保全局水質管理課：「ダイオキシン類に係わる底質調査マニュアル」、2000年
- 5) 千山善幸：「沿岸の環境圏,第5章底質改良技術第1節覆砂の設計」、1989年
- 6) 運輸省第三港湾建設局編：「広島湾（呉湾）底質浄化調査報告書」、1987年
- 7) 国土交通省港湾局：「港湾における底質ダイオキシン類対策技術指針」（平成15年2月、国土交通省港湾局）、2003年
- 8) 運輸省港湾局：「特定水底土砂及び海洋汚染防止法施工令第5条第2項第2号に掲げる水底土砂等の固形化に関する基準（運輸省告示第419号）」、1977年
- 9) セメント協会：「セメント系固化材による地盤改良マニュアル」（社）、技法堂出版社、1994年

土壌中のダイオキシン類の簡易分析手法の開発

材料地盤研究グループ上席研究員（新材料） 明嵐 政司

はじめに

ダイオキシン類は、その発がん性など毒性とともに環境ホルモン活性も報告されている。さらに燃焼に伴って生成する非意図的生成物質であることから、環境中への汚染の制御が困難な微量有害化学物質である。ダイオキシン類の汚染実態調査及び汚染除去対策を実施するうえでダイオキシン類の測定を精度良く、迅速に行うことが重要である。

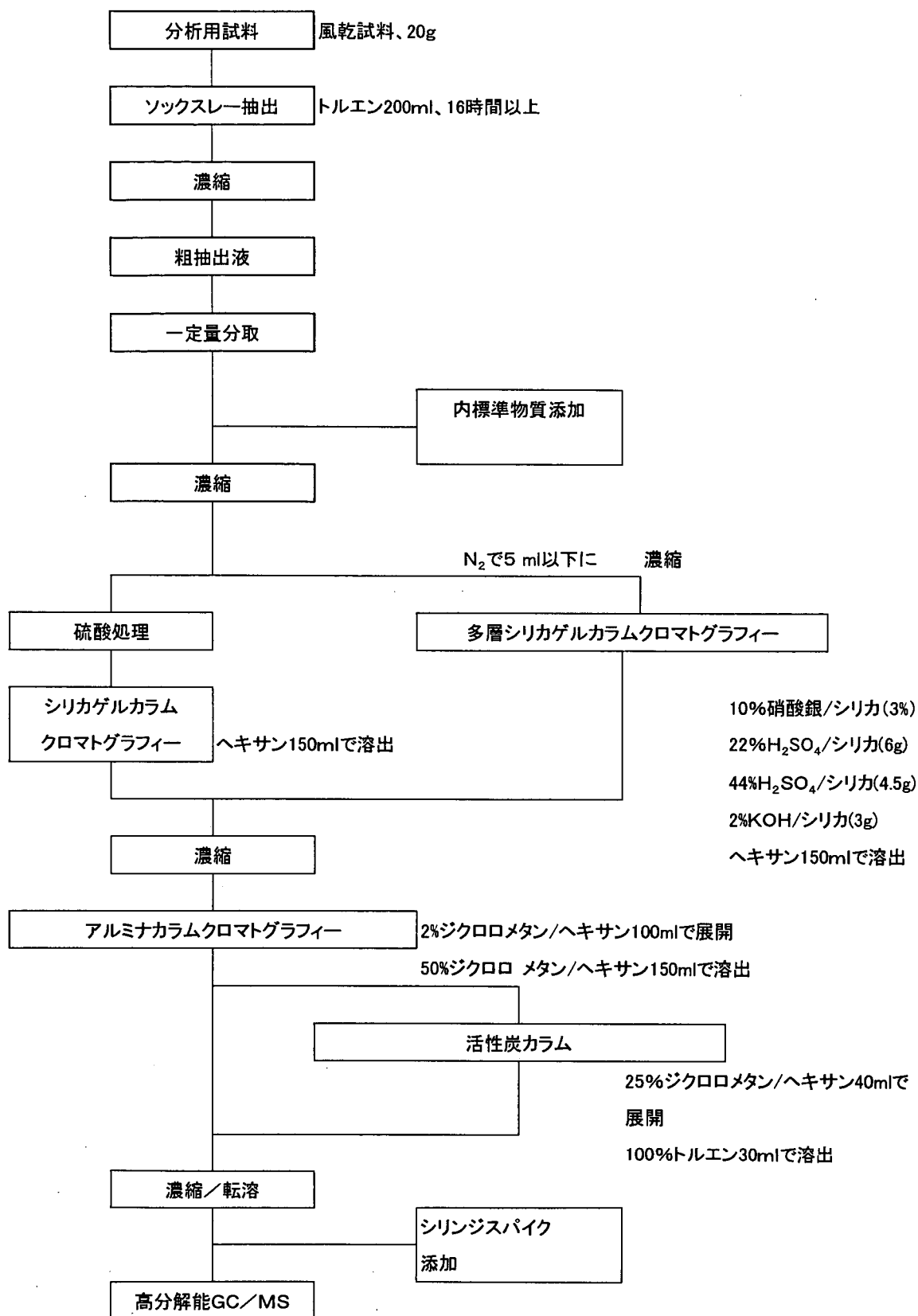
特に我が国では、欧米各国と比較して廃棄物の処理方法として焼却処理の比率が高いことにより生成するダイオキシン類の量が多いこと、さらに、かつて主に水田で大量に使用された農薬（PCP, CNP）中に不純物として存在したダイオキシン類が環境中に残存することからダイオキシン類に対する調査、汚染除去対策が急がれている。このような経緯からダイオキシン類対策特別措置法が平成 11 年 7 月 16 日に公布、平成 12 年 1 月 15 日に施行され、ダイオキシン類汚染に対して適切な対応を取ることが必要となった。なお、ダイオキシン類特別措置法以前には、ダイオキシン類にはコプラナーPCB を含めていなかったが、この法律制定後はコプラナーPCB（WH098 による TEF のあるもの）を含めてダイオキシン類ということになった。土壌中のダイオキシン類の測定方法は、「ダイオキシン類に係る土壌調査測定マニュアル（平成 12 年 1 月 環境庁水質保全局土壌農薬課）」¹⁾ に従って測定することが定められている。以後、この測定方法を「公定法」と記述する。また、土壌についてのダイオキシン類の環境基準は環境省告示第 46 号（平成 14 年 7 月 22 日）により、 $1,000\text{pg}\cdot\text{TEQ}/\text{g}$ 以下と定められている。この告示では、「土壌にあっては、環境基準が達成されている場合であって、土壌中のダイオキシン類の量が $250\text{pg}\cdot\text{TEQ}/\text{g}$ 以上の場合は、必要な調査を実施することとする。」とされている。環境庁が平成 10 年度に実施した全国調査（発生源周辺、大都市、中小都市、バックグラウンド等）の土壌を対象に、夏期 1 回調査（ $n=286$ ）のダイオキシン類の濃度測定結果の範囲は $0.0015\sim 61\text{pg}\cdot\text{TEQ}/\text{g}$ であり、環境基準を越える地点は見られなかった。しかし環境省が平成 14 年 12 月 6 日に発表した「平成 13 年度ダイオキシン類に係る環境調査結果について」によると土壌調査の対象である 3,735 地点のうち、1 地点（0.03%）のみ環境基準を超過した値が見られた。なお、この調査における濃度範囲は $0\sim 4,600\text{pg}\cdot\text{TEQ}/\text{g}$ であった。したがって、実際に土壌試料分析で遭遇する検体中のダイオキシン類濃度は、環境基準値（ $1000\text{pg}\cdot\text{TEQ}/\text{g}$ ）をはるかに下回る試料が多いと思われる。

ただし、工場跡地等 PCB 汚染が局所的に見られる地点や発生源（廃棄物焼却施設等）の影響を受ける土壌、産業廃棄物が投棄された土壌などもあるので、事業実施前にダイオキシン類による土壌汚染調査が必要な場合がある。

1. 公定法の簡易化の検討

1. 1 公定法の問題点

高分解能 GC/MS を使用する公定法は、①分析に高価で特殊な機器が必要である。②前処理（抽出・精製）及び高分解能 GC/MS での測定が煩雑で結果を得るまで時間がかかる（約 30～50 日）。③分析技術者の教育・訓練が必要である。④分析コストが高い（約 10～20 万円/検体）。等の問題点²⁾ が指摘されている。そのため、公定法の問題点について、低コスト化あるいは迅速化を目的とした簡易な前処理（抽出、精製）法や簡易測定法が検討・提案²⁾ されている。公定法のフローを図-1 に示す。



図－1 公定法による土壌試料の分析フロー

1. 2 土壌におけるダイオキシン簡易測定法の意義とその要件

簡易測定法には、①公定法と良好な相関がある。②測定費用が低減する。③測定時間が短縮される。④熟練技術者でなくても測定可能である。⑤現場で分析できる。⑥既存の機器、設備が活用できる。などの条件が求められる。簡易測定法の活用法としては、モニタリング、スクリーニング法としての利用、予備的な試験としての利用及び除染対策効果の迅速な判断への適用が考えられる。

1. 3 公定法の簡易化

公定法の迅速化、低コスト化に対する対応策としては、前処理（主に抽出工程）を簡略化し測定を公定法で行う簡易化がある。たとえば、ソックスレー抽出法を PFE 抽出法（Pressurized Fluid Extraction）に換え、精製工程を一部省略することなどが検討されている。また、測定方法を簡便な方法に置き換える簡易化も検討されている。本研究では、抽出の簡易化、精製の簡便化、測定の簡易化を組み合わせ、土壌中のダイオキシン類の分析方法の迅速化、低コスト化を目的として検討を行った。

環境基準値及び詳細調査を要求される値を考慮し、土壌中のダイオキシンの調査および汚染が発見された場合の浄化の基準として、250pg-TEQ/g を評価できる簡易測定法の検討を目標とする。

1. 4 前処理法の簡易化

1. 4. 1 抽出方法

土壌におけるダイオキシン類の簡易測定については、標準物質の取り扱いの点と抽出、精製工程の機器、操作の煩雑さから、現状では現場での適用は困難であるが、将来的には、抽出、精製工程を簡易化して現場での適用を検討する必要がある。また、測定法のみを簡易化しても、分析時間の短縮化、コストの削減化の要求を満たすには、不十分であり、抽出、精製、測定の各ステップにおける簡易化が必要である。この場合、測定法の簡易化という目的に沿った抽出・精製方法の検討が必要であり、妨害物質の影響の少ない測定法であれば、精製方法を省略し、迅速化、コスト節減を期待できる。

公定法による抽出方法は、図-1 に示すようにソックスレー抽出法（16 時間以上）であり、ダイオキシン類の抽出における簡易化、迅速化の方法としては、超音波抽出法、超臨界液体抽出法、マイクロ波による抽出法、高速溶媒抽出法（PFE 法）、加熱流下抽出法等が報告⁵⁾ されている。特に高速溶媒抽出法については、多環芳香族炭化水素（PAHs）を含む難揮発性物質、有機リン系殺虫剤、有機塩素系殺虫剤、塩素系除草剤、PCBs について、米国の環境保護庁（EPA）の定める土壌からの抽出法 METHOD 3445 として承認されている。今回の検討では、飛灰、土壌等で簡易抽出法として、PFE 法を中心に検討を行った。ソックスレー抽出法と PFE 法の抽出条件を表-1 に示す。

表-1 ソックスレー抽出法 PFE の抽出条件の例

抽出方法		PFE-1	PFE-2	ソックスレー
条件	溶媒	アセトン	トルエン	トルエン
	温度℃	150℃	150℃	
	圧力 psi (気圧)	2000 (140)	2000 (140)	
	サイクル (static~purge 回数)	3 回	3 回	
	加圧・加熱時間	10 分	10 分	(16 時間以上)

1. 4. 2 精製方法の検討

公定法による精製方法は、図－1に示すように、硫酸処理とシリカゲルカラムクロマトグラフィ処理の組み合わせか、その2段階を単一の多層シリカゲルカラムクロマトグラフィで行う方法があり、その後、アルミナカラム処理、活性炭カラム処理の工程がある。硫酸処理により主に妨害となる有機物質の分解後、水酸化カリウムで中和及び硝酸銀でイオン分を除去している。

精製方法の簡易化法としては、精製工程の一部を省略した簡便化が検討されている。

1. 5 簡易測定法

ダイオキシン類の簡易測定法を対象媒体を土壤に限定せずに、機器分析法と生物の特性を利用した方法の2大別して整理すると、図－2のようになる。なお、測定対象とする物質に着目すると、①TEQと相関の高いダイオキシン類の異性体（指標異性体）を測定する方法、②ダイオキシン類の前駆物質を測定する方法、③ダイオキシン類の毒性発現機構を利用する方法に区分される。

1. 5. 1 機器分析法

(1) ダイオキシン類を測定する方法

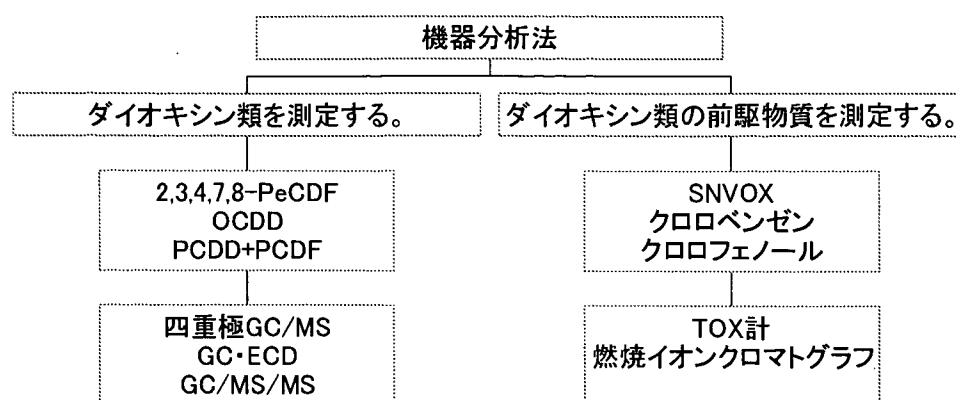
公定法で測定したダイオキシン類のTEQ値と相関の高い異性体（同族体）を測定し、TEQを推定する方法である。この場合の測定対象異性体（指標異性体）は、含有量の高いOCDDや、PCDDとPCDFの総量と、公定法のTEQと相関の高い異性体である2,3,4,7,8-PeCDFの測定を行う。OCDDについては、本検討結果や廃棄物研究財団の報告⁵⁾があり、TEQとある程度の相関が得られている。ただし、ダイオキシン類の異性体組成比が発生源ごとに異なることから、焼却物由来、農薬由来、PCB由来等で、指標異性体からTEQを推定するときの換算係数が異なり、土壤では農薬由来のダイオキシン類の影響を受ける土壤と焼却由来のダイオキシン類の影響を受ける土壤との差異が生じることが問題である⁵⁾。

2,3,4,7,8-PeCDFを測定対象とすることについては、四重極GC/MSでの感度の点から注入量を多くする必要がある⁸⁾。なお、柴山らの報告⁴⁾によると土壤では、2,3,4,7,8-PeCDFと公定法法のTEQ値との相関係数(R)は、0.974と良好であるが、農薬、PCBなど様々な要因の影響を強く受けると推定される試料があることから、TEQの推定は、2,3,4,7,8-PeCDF濃度のみから行う場合、その他の異性体も測定し、農薬、PCBの影響の有無を判断することを提案している。

(2) ダイオキシン類の前駆物質を測定する方法

難揮発性有機塩素化合物(NVOX)は、TOX計で測定可能であり、かつ、精製工程を経ない試料で測定可能という特色がある。TOX計での測定時にあらかじめ、試料を加熱し、低沸点の有機塩素化合物を除き、ダイオキシン類など難揮発性有機塩素化合物(NVOX)のみを検出する。この方法は、排ガスや土壤中のダイオキシン類と相関がある⁵⁾。なお、燃焼イオンクロマトグラフ法によりNVOXを測定する方法は、臭素系のNVOXを塩素系のNVOXと分離して測定できるため、今後、注目されるであろう臭素系ダイオキシン類の簡易測定法としての用途も期待できる。

ダイオキシン類が焼却炉で生成するとき、より低分子の有機塩素化合物であるダイオキシン類の前駆物質といわれているクロロベンゼン類、クロロフェノール類の濃度とダイオキシン類濃度との間に相関が見られる⁵⁾。これら、クロロベンゼン類、クロロフェノール類はダイオキシン類と比較して高濃度であるために、GC/FID*で測定可能である。また、燃焼状態をリアルタイムでモニタリングして前駆物質を測定する装置も開発されている。これらのクロロフェノール類、クロロベンゼン類等を測定する方法については、焼却施設の発生源でのモニタリングのみに適用可能であり、環境試料中のダイオキシン類の測定には用いられない。



図－2 ダイオキシン類簡易測定法（機器分析法）

1. 5. 2 生物の特性を利用した測定方法

（1）イムノアッセイ法の原理と環境分野での適用状況

生物の特性を利用したダイオキシン類の測定方法を図－3に示す。イムノアッセイ法とは、生物が自己（self）と自己以外（not self）を認識する免疫機能を利用した分析法である。脊椎動物は、自己以外（not self）の物質（抗原という）が体内に侵入すると、その抗原を特異的に認識するタンパク質（抗体という）を産生する。抗体と抗原との結合（抗原-抗体反応という）は、極めて特異性が高く、この特異性を分析方法に利用した分析法をイムノアッセイ法という。

抗原と抗体との反応を、ラジオアイソトープを標識して検出するラジオイムノアッセイ法、酵素を標識して検出するエンザイムイムノアッセイ法などの測定法が開発され、臨床検査分野および農薬測定などで汎用されている。環境分野では、測定対象物質の濃度が極めて低いこと、妨害物質の存在などの要因があり、上記分野ほどイムノアッセイ法は普及していなかったが、近年、ダイオキシン類、環境ホルモンなどを対象としたキットが開発され市販されるようになった。なお、米国では、EPAの公定法（METHOD 4000）の土壤汚染のスクリーニング法として、イムノアッセイ法が採用されている。また、我が国では、環境ホルモンの17β-エストラジオールの測定法として、酵素免疫法が、「平成10年度外因性内分泌攪乱化学物質暫定マニュアル（環境庁）」で採用されている。

①ダイオキシン類に対する特異的抗体を用いたイムノアッセイ法

公定法によるダイオキシン類の測定法は、ダイオキシン類の異性体（コプラナーPCBを含む）を個別に測定し、得られたそれぞれの濃度に異性体ごとに異なる毒性等価係数（TEF）を乗じ、さらにその合計値（毒性等量：TEQ）を最終的な測定結果としている。法令等によるダイオキシン類の規制、基準値が毒性等量によるためである。

イムノアッセイ法の場合、ダイオキシン類の中で特定の異性体に対する抗体を使用して、その測定結果と公定法から得られる毒性等量との相関から毒性等量を換算することができる。

抗原-抗体反応の検出法としては、酵素を標識して吸光光度法で測定するキットや、妨害物質の影響を軽減するため、希土類元素の1種であるユウロピウムで標識して蛍光光度法（時間分解蛍光光度法）で測定するキットが開発されている。

②ダイオキシン類の毒性を検出するイムノアッセイ法

ダイオキシン類を認識する抗体による抗原-抗体反応を利用する方法とは別に、ダイオキシン類が生物に対する毒性を発現する場合、細胞の Ah-レセプターに結合する。そこで Ah-レセプターに結合する性質を持つ物質をイムノアッセイ法で検出する原理に基づくキットが開発されている。なお、ダイオキシン類の毒性発現には比較的低用量における Ah-レセプターを経由する生物活性と、高用量*における Ah-レセプターを経由しない生物活性があるといわれている。

原理的に Ah-レセプターにはダイオキシン、PCB のほかに多環芳香族炭化水素 (PAHs) も結合するので、実際の測定では、この測定系における検体中のダイオキシン類以外の物質で Ah-レセプターに反応する物質は、精製工程で除き測定している。一定組成の試料ではダイオキシン類の TEQ と Ah-レセプターに結合する物質の量とは極めて高い相関が得られる。そこで Ah-レセプターに結合する物質量を測定することでダイオキシン類の TEQ を求めることができる。

なお、ダイオキシン類以外の Ah-レセプターに結合する物質を機器分析法では、総合的に把握することが困難であるが、Ah-レセプター結合物質を検出する方法では未知物質を含め、総合的な毒性物質の評価測定や、多数の類似化学物質の総合的な毒性の評価に有効であると考えられる。一例として、塩素系ダイオキシン類以外の臭素系ダイオキシン類も検出可能である。

このように、イムノアッセイ法は、公定法を補完する環境分野における簡易法として、測定時間の短縮、分析コスト削減などの点において、有用であると考えられる。

(2) バイオアッセイ法の原理と環境分野での適用状況

バイオアッセイとは、生物個体、微生物、培養細胞など、生物を用いて、化学物質の濃度や物理的刺激に対する生物の反応を指標として、物質濃度等を測定する方法である。環境分野ではミジンコを用いた毒性試験やサルモネラ菌を用いた変異原性試験などがある。バイオアッセイの特徴として、機器分析法が、個別の測定対象物質を精密に測定できるのに対し、バイオアッセイは、総合的な効果（相乗効果や相加効果を含む）や、未知物質の測定も可能である。

ダイオキシン類のバイオアッセイ法としては、ヒトやラットの肝臓由来の遺伝子組換え細胞を用いて、ダイオキシン類が細胞に作用するときに結合する Ah-レセプターに結合する物質を検出する方法が実用化されている。

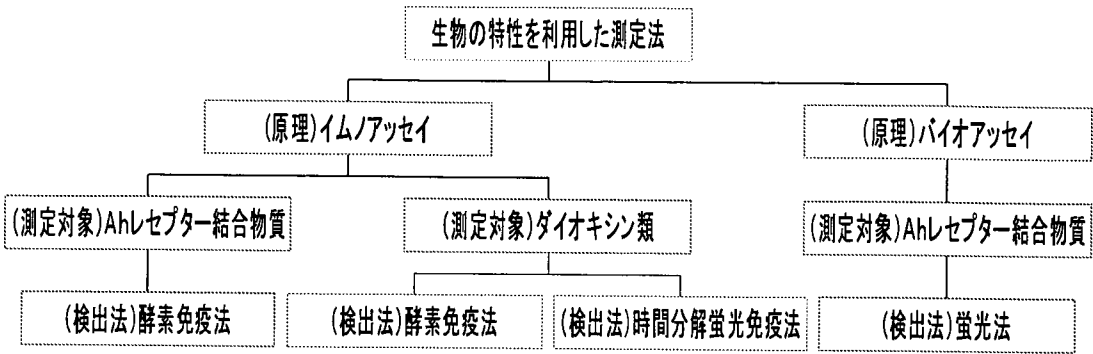
ダイオキシン類測定のバイオアッセイ法は、Ah-レセプターに結合する物質が存在すると、酵素が誘導されるように遺伝子を組換えた細胞を用いた方法が開発されている。

ダイオキシン類及び多環芳香族炭化水素 (PAH) などの平面構造をもつ化合物は、細胞膜を通過した後、Ah-レセプターと結合し、その後、構造変化し細胞内の核に移行し、さらに Arnt 蛋白*と結合し、DNA 上にある CYP1A1 と呼ばれる特定の塩基配列に結合して酵素 (チトクローム P450) を作る P450mRNA を誘導する。バイオアッセイ法の 1 種である P450HRGS 法に用いる細胞は、ヒト肝細胞から遺伝子組換え操作によって作られた特殊な細胞で、上記の P450mRNA が誘導される際にルシフェラーゼ mRNA も作るように設計されている。mRNA からチトクローム P450 とルシフェラーゼが作られるが、このルシフェラーゼにルシフェリンを加えることにより、ホタルの発光原理と同様な発光現象が起きる。この発光量をルミノメーターで測定することにより、ダイオキシン類様の化学物質の当量を測定する方法である。

酵素が誘導される時間が、ダイオキシン類と多環芳香族炭化水素で異なることを利用して、ダイオキシン類の TEQ を求めることができる。したがって、Ah-レセプターに結合して生物毒性を発現する物質の測定およびダイオキシン類の TEQ を求めることができる。

なお、バイオアッセイ法は、実験室で細胞を継代維持することが必要であるため、手間と時間がかかるが、レセプターと結合した後のステップである酵素（サイトクロム P450CYP1）の誘導を、培養細胞で検出するため、測定対象物質が Ah-レセプターに結合する段階だけでなく、その後の情報伝達までのステップに至るまでを検出できる利点を有する。

バイオアッセイ法は、①細胞の培養、維持が必要であることからクリーンルームが必要であり、簡易測定法とはいえない。②無菌操作が必須であり一般的な測定方法ではない。このため、バイオアッセイ法を検討対象から除外した。



図－3 ダイオキシン類簡易測定法（生物の特性を利用した法）

1. 5. 3 簡易測定法の測定必要時間とコスト比較一覧表

簡易測定法としてとりあげる TOX 計による NVOX 法、四重極 GC/MS 法、イムノアッセイ法の測定に必要な時間、コストの相互比較を表－2 に示す。簡易測定法の測定に係る時間は、かなり短縮されているが、実際は試料の風乾に要する時間、標準物質による検量線作成の時間、データの整理、報告に要する時間等が必要であり、丸2日間程度は最低必要である。なお、コストについては、検体数の多少にもよるが、概ね、公定法の 1/2～1/5 程度である。

表－2 簡易測定法の測定必要時間とコストの公定法との比較

	公定法高分解能 GC/MS 法	T O X 計 による NVOX 法	四重極 GC/MS 法	イムノアッセイ法
必要時間	30～40 日	前処理 5 時間	前処理 5 時間	前処理 5 時間
		測定 1 時間	測定 1 時間	測定 5 時間
コスト（万円）/検体	10～20	3～5	3～5	2～5
備考	通常の必要時間であり、最短では 14 日間である。	1 試料の測定時間で標準物質測定等の時間は除く。	1 試料の測定時間で標準物質測定等の時間は除く。	キットにより測定時間は 2 時間～1 日程度と幅がある。

2. 抽出・精製法の検討

2. 1 簡易抽出・精製法と簡易測定法の組み合わせによる迅速測定法の検討

簡易抽出、簡易精製法により調製した試料を用いて簡易測定を行い、公定法による測定結果と比較して解析、評価を行った。

簡易抽出法としては、数多く報告されているPFE抽出法を用い、精製法としては、3層シリカゲルカラムクロマトグラフィ（3層シリカゲルと表記）、多層シリカゲルカラムクロマトグラフィ（多層シリカゲルと表記）及び、それぞれを通過させた試料を活性炭カラム処理の有無の計4種類の試料について、簡易測定法用の試料として測定し、公定法との結果を比較した。

2. 2 PFE抽出法によるダイオキシン類の測定結果と公定法の抽出法との比較

公定法によるソックスレー抽出試料とPFE法による抽出試料の測定結果を図-4に示す。

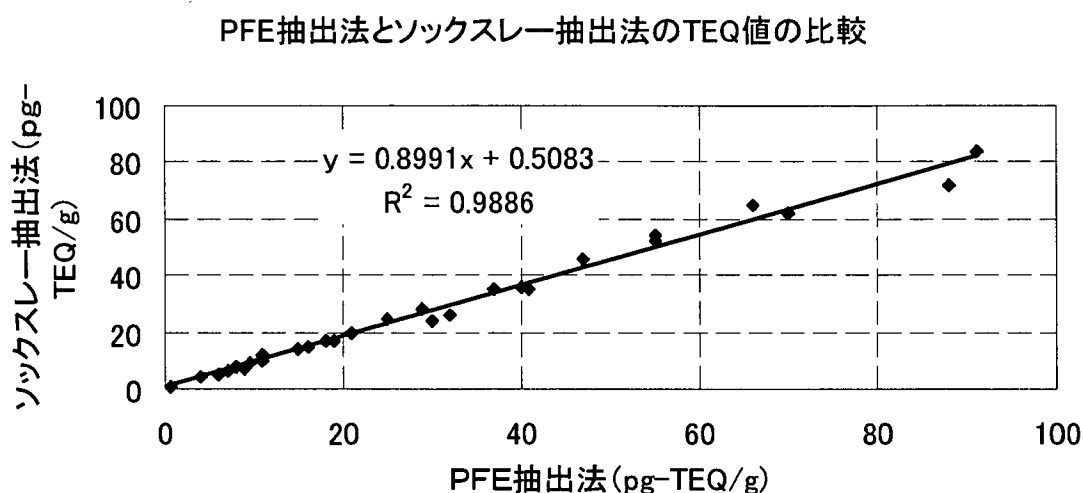


図-4 PFE抽出法及びソックスレー抽出法によるダイオキシン類TEQの相関

土壌をPFE抽出法で抽出して測定した結果、公定法のソックスレー抽出法と同等以上の抽出結果が得られた。ダイオキシン類による汚染の有無を判断するのに安全側の誤差であるのでスクリーニング法として適用することができると考えられる。

2. 3 土壌の簡易法検討の前処理法と測定法の選定

前処理方法（抽出法、精製法）として、下記の表に示す抽出法及び精製法による試料をそれぞれの簡易測定法用試料として供した。

迅速前処理法として、公定法であるソックスレー抽出法に代わる迅速法として、良好な結果が得られているPFE法を検討対象とした。

公定法の分析では、抽出・濃縮方法としては、土壌を風乾した後、ソックスレー抽出装置を用いた抽出方法（トルエンによる溶媒抽出を16時間以上）が定められている。公定法では、トルエン抽出液は、次の工程に進めるために濃縮し、多層シリカゲルクロマトグラフィまたは硫酸処理とシリカゲルカラムクロマトグラフィにより精製する。

さらに、高分解能GC/MSの試料とする場合は、アルミナカラムを通過後、必要に応じて活性炭カラム処理を行い最終試料とする。

2. 3. 1 精製法の検討、評価

抽出、濃縮操作の結果得られた粗抽出試料の精製工程は、公定法では複数の処理方法（硫酸処理、シリカゲル処理、活性炭処理、アルミナカラム処理）が例示されている。簡易測定法では、精製工程の一部または全部を省略して測定用の試料として用いることで迅速化、簡易化を図った。精製法の簡易化を表－3に示す。

表－3 精製法の簡易化

公定法	迅速法
硫酸 多層シリカゲルカラム、活性炭カラム、アルミナカラム処理	① 3層シリカゲルカラム処理のみ
	② 多層シリカゲルカラム処理のみ
	③ 3層シリカゲルカラム処理 ＋活性炭カラム処理
	④ 多層シリカゲルカラム処理 ＋活性炭カラム処理

2. 3. 2 測定方法の簡易化法

測定方法の簡易化については、機器分析法と生物の特性を利用した方法に区分し、さらに測定対象物質による簡易測定法の分類を行ったが、それらの簡易測定法のうち、比較的分析機関で汎用されている機器を用いて測定可能なもの。また、特許等の関連から特定の機関以外での測定ができないものを除外し、表－4に示す4種類の簡易測定法を検討対象とした。

表－4 測定方法の簡易化

公定法	迅速法
高分解能GC・MSによる測定	① TOX計による全NVOX測定
	② 四重極MSによる2,3,4,7,8-PeCDF測定
	③ 四重極MSによるOCDDの測定
	④ イムノアッセイ法：Ahレセプターに結合する物質を検出するイムノアッセイ法

2. 3. 3 簡易測定法の評価用の土壌試料の選定と調製

簡易測定法を検討、評価する場合は、簡易法自体の測定法としての分析化学上の評価及び迅速性や経済性の評価のほかに公定法との良好な相関が必須である。本検討では高濃度の実試料のほかに、土壌のダイオキシン類の由来の多くが焼却物由来であることから、濃度既知の飛灰を土壌に混和した試料を用いて濃度を調整した土壌を作成して検討用に供した。試料の由来等を表－5に示す。

表－5 供試した土壌

由来	調製の有無
焼却炉周辺の土壌 関東地方	無処理
工場跡地土壌 四国地方	無処理
畑地（有機質を多く含む土壌） 関東地方	飛灰を添加して調整

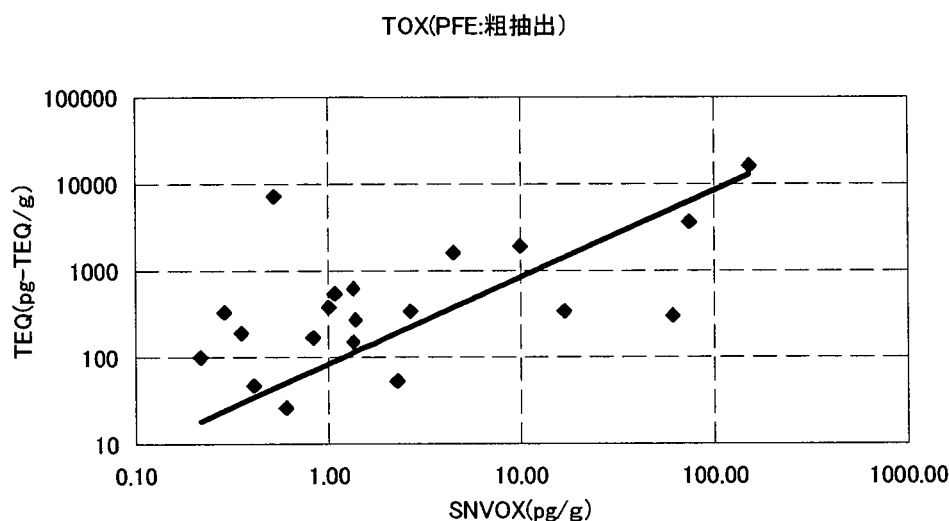
3. 試料測定法の簡易化法の検討結果

3. 1 TOX計法

簡易的な測定方法の検討として、土壤試料の有機溶媒抽出後に濃縮しただけの粗抽出液で、TOX計によるNVOXの測定結果及び同一試料の公定法による結果を表－6に、NVOXのTOX計による測定結果とTEQ値との相関を図－5に示す。

表－6 TOX計によるNVOXの測定の結果 (R^2)

	抽出法	粗抽出	多層 +活性炭	3層 +活性炭	多層のみ	3層のみ
相関係数	PFE法	0.6510	0.5417	—	0.7286	0.7045



図－5 NVOX の TOX 計による結果と TEQ 値との相関

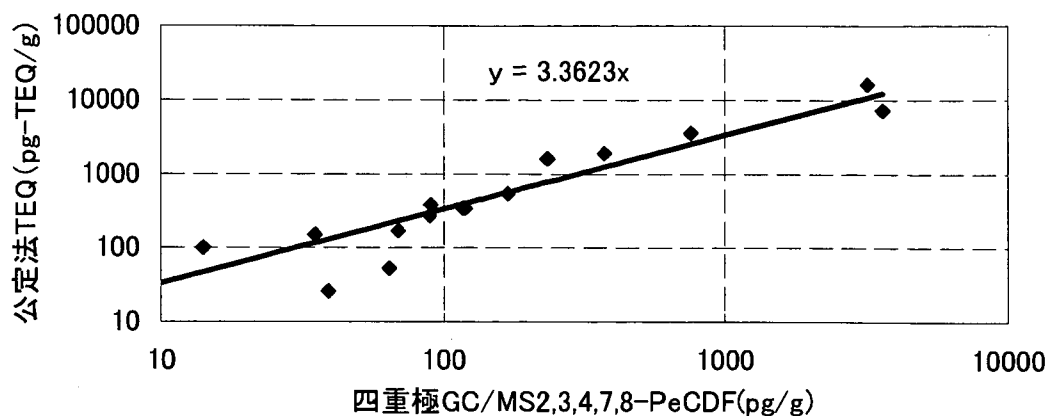
3. 2 四重極 GC/MS 法

四重極GC/MSによる2, 3, 4, 7, 8-PeCDF及びOCDDの測定による簡易法の結果を表－7と図－6、7に示す。PFE法による前処理で公定法による高分解能GC/MSとの良好な相関が得られた。なお、活性炭処理による公定法との相関の向上が3層シリカゲルカラムでは見られたが、多層シリカゲルカラムでは見られなかった。OCDDの測定では、3層シリカゲルカラムのほうが多層カラムより公定法との相関は良い傾向が見られた。2, 3, 4, 7, 8-PeCDFの測定では、多層シリカゲルカラム処理の後に活性炭処理を行った試料と比較して多層シリカゲルカラムのみの精製が良い相関を示した。

表－7 四重極GC/MSによる2, 3, 4, 7, 8-PeCDF及びOCDDの測定の結果 (R^2)

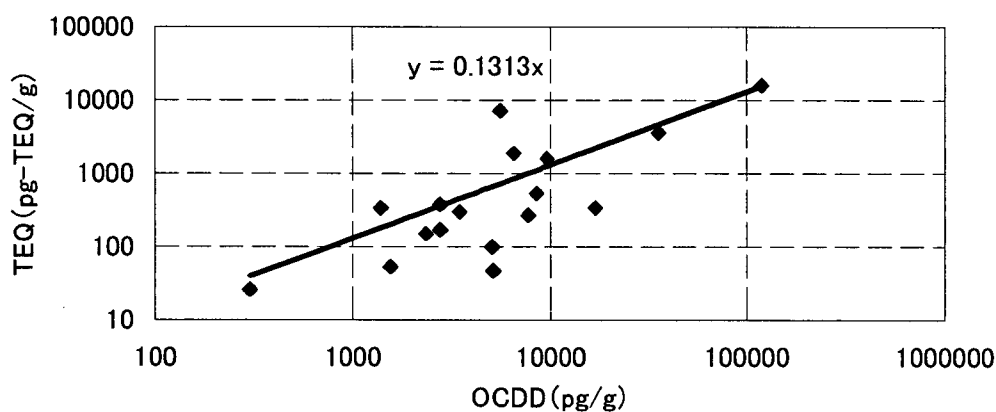
	抽出法	粗抽出	多層 +活性炭	3層 +活性炭	多層のみ	3層のみ
四重極 GC/MS による 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF	PFE 法	—	0.6017	0.8164	0.8540	0.7980
四重極 GC/MS による OCDD	PFE 法	—	0.3515	0.8306	0.4727	0.8147

四重極GC/MSによる2,3,4,7,8-PeCDFとTEQとの相関
(PFE抽出:3層シリカカラム)



図－6 四重極GC/MSによる2, 3, 4, 7, 8-PeCDFの測定

四重極GC/MS OCDDと公定法TEQ値との相関
(PFE抽出:3層シリカカラム)



図－7 四重極 GC/MS による OCDD の測定値

3. 3 イムノアッセイ法 (ダイオキシンレセプターに結合する物質を測定する方法) による結果

PFE抽出の後、多層カラム+活性炭処理、多層カラムのみ、3層カラムのみの3種類の精製を行い、3種類の試料の測定結果を表－8と図－8に示す。

表－8 イムノアッセイの相関係数 (R^2) の値

	抽出法	粗抽出	多層 +活性炭	3層 +活性炭	多層のみ	3層のみ
イムノアッセイ	PFE法	—	0.9107	—	0.8514	0.7311

いずれの簡易測定法の前処理操作として $R^2=0.7$ 以上の相関が見られ、より精製の進んでいるとみられる3層のみ、多層のみ、多層+活性炭の順に公定法との相関が高くなる傾向がみられた。

イムノアッセイ法(PFE抽出:多層シリカ)

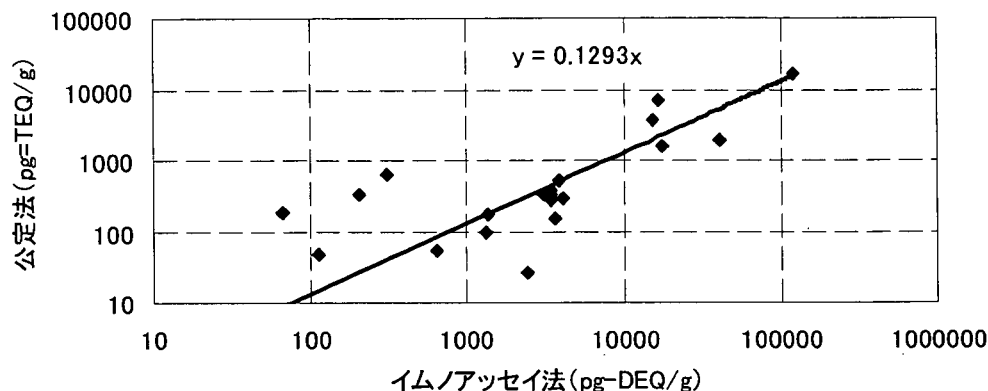


図-8 イムノアッセイ法によるDEQと公定法TEQとの相関

PFE抽出後、3層シリカゲルカラム処理を行った試料のイムノアッセイの測定結果 (pg-DEQ/g) と公定法によるTEQ (pg-TEQ/g) の相関式は、図-8のとおりで、DEQ (注: DXN equivalency Quantity) とTEQは、 $TEQ = DEQ \times 0.1293$ である。今回使用したイムノアッセイ法 (Ah-イムノアッセイ) による土壌試料におけるDEQとTEQの関係は、 $TEQ = DEQ \times 0.087$ とに報告³⁾されている。両者を比較すると、ほぼDEQの1/10がTEQに相当し、既報告と同様の結果であった。

3. 4 イムノアッセイ法の評価

イムノアッセイ法の機器分析法と、比較して大きな特徴は、多数検体を処理する場合に効率化が図れることである。一例をあげると、高分解能GC/MSの1台での実質的な年間処理試料数は、1,000~1,200検体程度である。また、4重極GC/MSの場合は、40分/検体、TOX計によるNVOX測定では、30分/検体である。一方、イムノアッセイの場合、測定だけに限定すれば1検体の分析時間は、5~6時間必要であるが、この試料数が100検体になっても、1人の実験者で6~7時間程度の時間があれば対応可能であるところに利点がある。換言すれば、検量線に要する試薬調製等の関係から、イムノアッセイの場合、検体数が少ない場合は、時間、費用ともに有用性が低いが、10検体程度であれば機器分析法と必要時間数では同等となり、10数検体を越える場合は一般にイムノアッセイ法の方が有利である。なお、Ah-イムノアッセイについては、その測定原理から塩素化ダイオキシン類の検出に限らず、臭素系ダイオキシン類の検出も可能であるので、そのような広義の毒性検出法としての用途も期待できる。

4. 簡易法測定結果から公定法 TEQ 値の推定法

4. 1 四重極 GC/MS の測定結果から TEQ 値を推定する手法

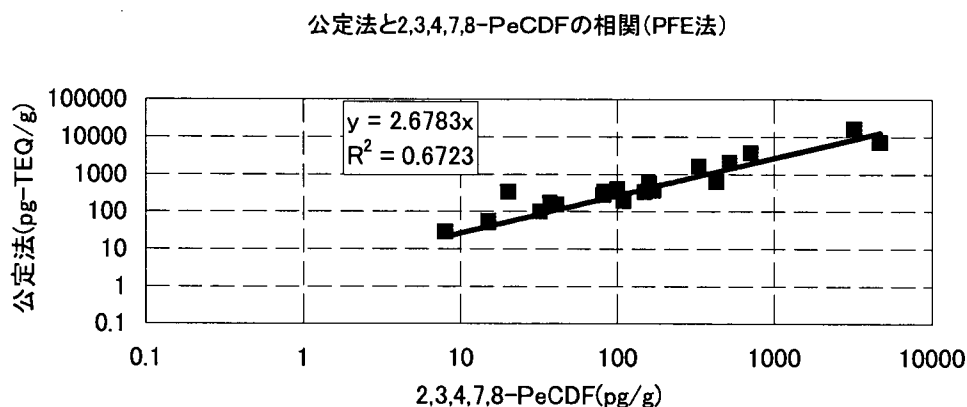
四重極 GC/MS による測定結果と公定法の TEQ との相関については、多くの報告が既になされている⁵⁾。土壌については、四重極 GC/MS を用いて得られた OCDD の値と公定法の TEQ との相関を求め、X (OCDD 値) と Y (TEQ 値) の間で、相関係数 ($R=0.79$, $n=25$) で、 $y=0.0034x+0.5753$ と報告⁵⁾している。なお、この報告での四重極 GC/MS の抽出、精製法は、公定法と同様のソックスレー抽出、硫酸処理、

シリカゲルカラム処理、アルミナカラム処理を行ったもので、高分解能 GC/MS 及び四重極 GC/MS でも同一の抽出、精製を行っている。

今回の検討では、四重極 GC/MS を使用した測定結果で、測定対象物質としては、OCDD よりも 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF のほうが、公定法の TEQ を推定するためには、適していると判断された。

2, 3, 4, 7, 8-PeCDF の値と TEQ との関係は、各環境媒体における相関（相関係数と相関式）を柴山らが報告⁴⁾ している。その報告を要約すると、土壌において、 $n=191$ の結果から、算出式として 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF の濃度 (pg/g) $\times 2.02$ が TEQ (pg-TEQ/g) であり、その相関係数 (R) は、0.97 とかなり高い。しかし、土壌中のダイオキシン類は、主に農薬及び燃焼由来であるといわれているが、特異的に農薬の影響を強く受けているものや、希に PCBs に汚染された土壌が存在するため、上述の算出式が、適用できない場合が存在すると判断している。そのための、対案として、農薬 (PCP 及び CNP) 由来と PCBs 由来のダイオキシン類の影響を判断するために、2, 3, 4, 7, 8-PeCDF 以外に、1, 2, 3, 7, 8-PeCDD、1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-HpCDD、3, 3', 4, 4', 5-PeCB (#126) の 3 異性体について測定し、①CNP、CNP+PCP、②PCP、③PCBs 由来のダイオキシン類である可能性を判別式から判断し、その判断基準に合致した場合は、毒性のあるすべての異性体を測定するほうが安全であるとしている。

検討結果を図-9に示す。回帰式の傾きは、2.68 と柴山らの報告⁴⁾ の 2.02 と比較すると若干、大きく、また、相関係数 (R) も 0.82 とやや低かったが、全体としてみると、ほぼ報告と同様の傾向を示し再現性が確認されたと判断できた。この理由としては、柴山らの解析は、公定法の TEQ の値と、公定法による個別の異性体の濃度との相関であり、本検討では、PFE 抽出による試料を公定法による精製を行って、公定法による測定で TEQ を求めた値と、その 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF の濃度との相関であることによる違いに起因する可能性が考えられる。



4. 2 イムノアッセイ法の測定値から TEQ を推定する手法

TEQ を確率的にスクリーニングする際、重要なパラメータは偽陰性度（間違っ、陰性と判断する確率）である。現在、この値が決められていないが、「ダイオキシン類の簡易測定法測定のための生化学的測定法等の適用に関する手引き」³⁾（平成 15 年 6 月廃棄物研究財団）では、環境サンプルにおいて Ah-イムノアッセイで約 2.5%（偽陰性度と偽陽性度を合わせて約 5%）を提案している。この手法に関して、具体的なスクリーニング法のやり方を概説する。

土壌での Ah-イムノアッセイの実データを元に作成した公定法値推定のための検量線を図-10 に示

す。95%の確率を考えるため、データ数は一定数以上が必要である。回帰直線の上下にプロットの95%が含まれるような上限直線と下限直線を設定する。ただし、データの中は判断したい基準値、たとえば1000pg-TEQ/gの前後の10倍程度を含ませるようにし、必要以上に広範囲を取る必要はない。

これによるとAh-イムノアッセイで分析した土壌試料の結果が3,000 pg-DEQ/gであれば、公定法値は95%の確率で150~1,000pg-TEQ/gの範囲に入っている値となり、Ah-イムノアッセイ値が20,000pg-DEQ/gであれば、公定法値は95%の確率で1,000~6,600pg-TEQ/gの範囲に入っている値であることを示している。

つまり、Ah-イムノアッセイ値が3,000 pg-DEQ/g以下であれば、95%の確率でその試料の公定法値が1,000pg-TEQ/gの基準値以下になり、20,000 pg-DEQ/g以上であれば、95%の確率でその試料の公定法値が1,000pg-TEQ/gの基準値以上になることを示している。また、その間は公定法値が1,000pg-TEQ/gの基準値以下か以上かどちらとも言えない疑汚染の状態である。疑汚染については公定法で確認測定すればよい。このスクリーニング方法で、たとえば、土壌の汚染状況を、詳細かつ迅速に把握することができることになる。

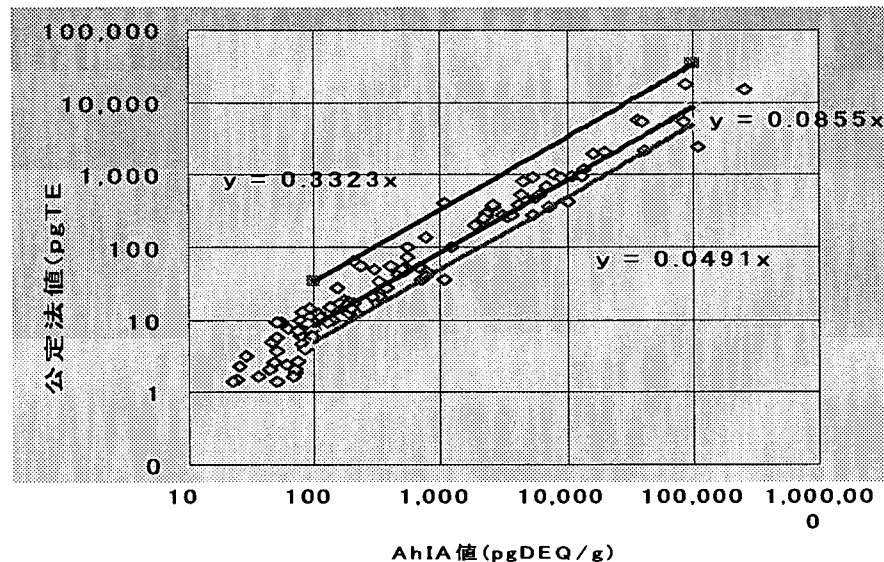


図-10 土壌の公定法値推定のための例³⁾

5. 土壌の汚染の判定

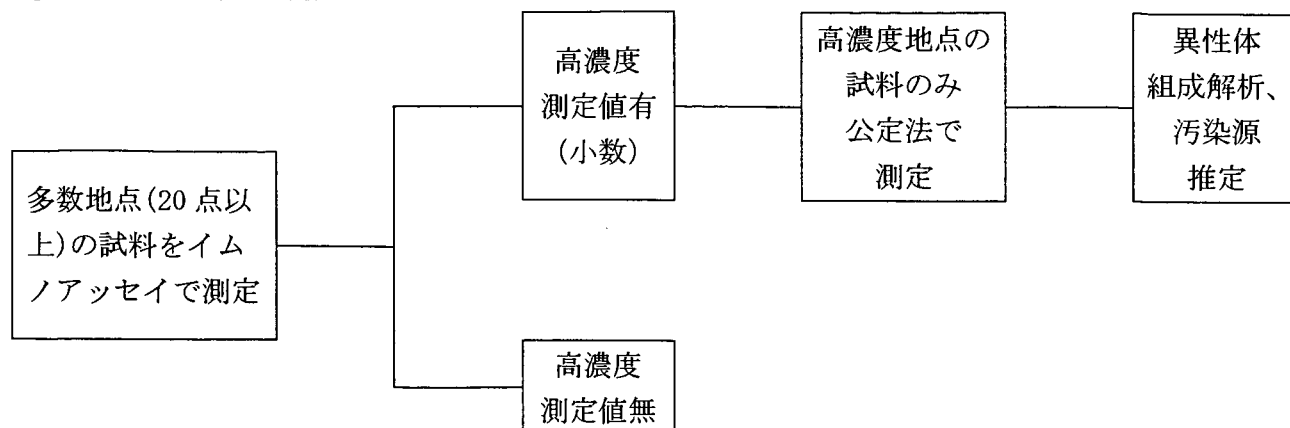
5. 1 簡易測定法の選定と公定法の適用

実際のダイオキシン汚染土壌を対象とした簡易測定法を適用に当たっては、以下のような状況が想定される。

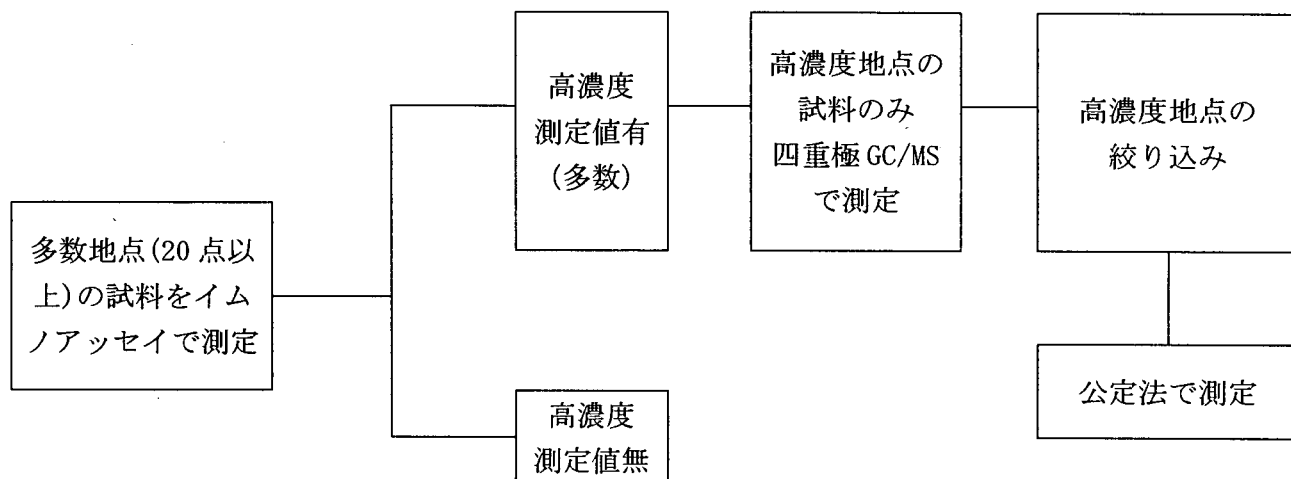
ダイオキシン汚染調査を行う土壌での公定法による測定結果がなく発生源が不明の場合、広範囲の地点の汚染の有無を第一段階で簡易測定法を使用して判断し、次の段階で公定法を実施して、異性体組成を把握するとともに、法令に基づいたTEQ値を求めるものである。

1. 汚染の由来が不明な場合（公定法の測定結果・解析結果がない場合）

①イムノアッセイ法→公定法



②イムノアッセイ法→四重極GC/MS→公定法



5. 2 環境基準との比較

土壤についてのダイオキシン類の環境基準は環境省告示第 46 号（平成 14 年 7 月 22 日）により、1,000pg-TEQ/g 以下と定められている。この告示では、「土壤にあっては、環境基準が達成されている場合であって、土壤中のダイオキシン類の量が 250pg-TEQ/g 以上の場合は、必要な調査を実施することとする。」とされている。

5. 3 ダイオキシン類汚染土壤汚染範囲の特定

「ダイオキシン類に係る土壤調査測定マニュアル（平成 12 年 1 月 環境庁水質保全局土壤農薬課）には、環境基準を超過した調査地点があった場合に、汚染範囲を確定するための平面範囲と深度範囲の確定法、及び対策効果の確認方法が記載されている。

なお、土壤の汚染範囲の確定のときは、その線引きにあたっては、両側の土壤のダイオキシン類の測定は公定法により測定する。

まとめ

これらの検討結果に基づいて、試料の数や判定までの時間などの現場条件により適切な測定方法を

選定して、土壤のダイオキシン類による汚染の有無と対策の必要性を迅速に判定するための「土壤中のダイオキシン類の簡易分析マニュアル（案）」を作成した。マニュアル（案）の目次構成を以下に示す。

土壤中のダイオキシン類の簡易分析マニュアル（案）目次

- | | |
|----------------|------------------------------------|
| 1. 総則 | 3. 前処理（抽出・精製） |
| 1. 1 適用範囲 | 3. 1 抽出方法 |
| 1. 2 用語の定義 | 3. 2 精製方法 |
| 1. 3 精度管理 | 4. 測定方法 |
| 1. 4 安全管理 | 4. 1 測定方法の選定 |
| 1. 5 試薬及び器具 | 4. 2 TOX計によるNVOXの測定 |
| 2. 試料採取 | 4. 3 四重極GC/MSによる2,3,4,7,8-PeCDFの測定 |
| 2. 1 事前調査 | 4. 4 イム/Aッセイ法によるAh-レセプター結合物質の測定 |
| 2. 2 試料採取位置の選定 | 5. 測定結果の整理・解析 |
| 2. 3 試料採取 | 5. 1 TEQの推定 |
| | 5. 2 判定 |

【参考文献】

- 1) ダイオキシン類に係る土壤調査測定マニュアル；環境庁水質保全局土壤農薬課、平成12年1月
- 2) 資源環境対策；㈱環境コミュニケーションズ、2001年7月号
- 3) ダイオキシン類の簡易測定のための生化学的測定法等の適用に関する手引き；財団法人 廃棄物研究財団、成15年6月
- 4) 柴山基ら：指標異性体を用いたダイオキシン類の迅速測定法 環境化学 vol13、No. 1, pp17-29、2003
- 5) 有害性廃棄物の分析手法の総合化・簡素化に関する研究；平成11年度報告書（総合報告書）財団法人 廃棄物研究財団、平成12年3月
- 6) 鈴木則之ら：高速溶媒抽出-GC/MSを用いた土壤環境中のダイオキシン類の分析と調査；第8回環境化学討論会講演要旨集、日本環境化学会、平成11年
- 7) 黒澤茂ら：水晶振動子を用いたダイオキシン濃度の簡易測定法；資源環境対策 No. 5、50-55、2003
- 8) 内山和子：神奈川県における新スクリーニング法を導入した河川のダイオキシン類調；No. 6、61-67、2002
- 9) 日浦盛夫ら：ダイオキシン類の簡易迅速抽出法の検討-4；第12回環境化学討論会講演要旨、2003
- 10) 平成14年度 廃棄物処理当科学研究報告書（平成14年度）総合研究報告書（平成12年度～14年度）、廃棄物に係るダイオキシン類等の分析方法の体系化に関する研究、平成15年3月 財団法人 廃棄物研究財団

陸域におけるダイオキシン類の汚染対策手法の開発

材料地盤研究グループ（土質） 上席研究員 小橋 秀俊

1. はじめに

陸域で公共工事を進める際に、処分場跡地や不法投棄地であることを知る機会がないまま用地を取得し、ダイオキシン類が検出されたため、掘削工事が進められなくなるといった事態が頻発している。その結果、予定の位置に工作物が建設できない、あるいは、設計変更のきかない箇所では、膨大な掘削汚染土等の対応に苦慮するなどの問題に直面している。ダイオキシン類汚染土等の処理をめぐっては、用地外に搬出できる特別管理型処分場等の確保が年々難しくなっている。また、環境省等で浄化処理技術の公募実証試験などが実施されているものの、短期に処理できる分量は限られており、大部分は浄化処理を前提とした用地内での待機か、周辺への汚染拡大防止措置に依らざるを得ない現状にある。

土木研究所ではこのような状況を踏まえ、陸域で考えられるダイオキシン類汚染の対策手法を紹介するとともに、汚染拡大防止対策を担保する技術的根拠を得るため、ダイオキシン類の土壤中の挙動について、基礎的な検証実験を行った。

2. 陸域で考えられるダイオキシン類の汚染対策手法

ダイオキシン類汚染土壌の対策技術としては、主に「浄化処理」、「掘削搬出処分」、「汚染拡大防止措置」が存在する。また、ダイオキシン類は主としてシルト以下の粒径が小さい土粒子に比較的多く含有される傾向があるため（表－1 参照）、汚染土壌の分級などを行い、対策が必要な土壌の量を低減させることは有効である。以下に各対策技術について簡単に述べる。

表－1 粒度毎のダイオキシン類含有量 (pg-TEQ/g)

	原土		礫	砂	シルト 1	シルト 2	粘土
			75 -2 mm	2 -0.075 mm	0.075 -0.0409 mm	0.0409 -0.005 mm	0.005 mm 以下
PCDDs	16,000	12,000	140	4,000	6,900	20,000	34,000
PCDFs	61,000	50,000	420	16,000	23,000	81,000	150,000
Co-PCBs	3,200	910	17	420	550	1,100	1,600
Total	80,000	63,000	580	20,000	30,000	100,000	190,000
	平均 71,500						

①浄化処理

土壌に含まれるダイオキシン類を分解し、無害化する方法である。具体的な浄化処理技術としては、溶解固化法、熱脱着分離法など熱を加えて分解する「熱分解方法」やアルカリ触媒化学分解法、脱ハロゲン化法のように化学的に分解する「化学分解方法」、研究段階ではあるが「微生物分解方法」などが存在する。現場での適用性、処理能力やコストなどに未だ検討課題が残されている。

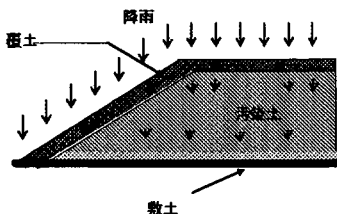
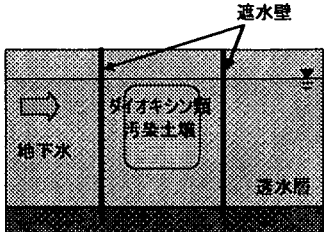
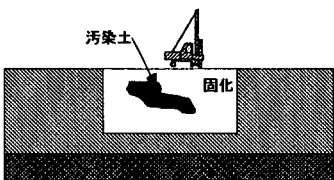
②掘削搬出処分

ダイオキシン類に汚染された土壌を掘削搬出し、現場外の最終処分場などにおいて適切に処分する方法である。搬出先としては、最終処分場(遮断型、管理型)などが考えられるが、廃棄物や油の混入などをめぐり、受け入れ先の処分場や自治体との協議が必要となる場合がある。また、冒頭にも述べたとおり近年、処分場の確保が難しくなってきている。

③汚染拡大防止措置

現場内で土や遮水壁、固化材などを用いて周辺環境とダイオキシン類に汚染された土壌とを分離し、ダイオキシン類の移動・拡散を防止する方法である。大量の土壌等に対して実現性のあるコストで、比較的短期間に処理できる方法と考えられる。具体的には表－2に示すとおり、覆土・敷土工法、遮水壁工法、固化工法など挙げられるが、周辺環境への影響を監視および管理するための、モニタリングとの併用が必要となる。

表—2 汚染拡大防止措置の概要

工法	概要
■覆土・敷土工法 	遮水性の高い覆土・敷土材料により土壤に含まれるダイオキシン類の外部への移動・拡散を防止する工法である。 覆土は、汚染土壤の大気中への飛散を防止すると共に、高濃度汚染土壤の場合は雨水の浸透を減少させることを目的として設置する。一方、敷土はそのフィルター効果により、土粒子に付着したダイオキシン類の外部への流出を防止する。
■遮水壁工法 	遮水性能が高い壁構造又は壁と底盤からなる構造でダイオキシン類により汚染された土壤を封じ込め、汚染経路の遮断および地下水流の制御によりダイオキシン類の外部への移動・拡散を防止する工法である。
■固化工法 	固化工法は、セメント系材料を用いて土壤を固化処理することによって、周辺環境へのダイオキシン類の移動・拡散を防止する工法である。 セメント系材料の水和反応により土壤の物理特性が改善され、高い強度発現性(ダイオキシン類の付着した土粒子の移動を防止)と遮水性(内部からの水の移動を抑制するとともに降雨などによる外部からの水の浸入を防止)を発揮する。

3. 汚染拡大防止措置の技術的根拠に関する検討

3. 1 概要

覆土・敷土工法、遮水壁工法、固化工法などの汚染拡大防止措置を、ダイオキシン類に汚染された土壤への適用性に関する検討を行うため、ダイオキシン類の土壤中の挙動に関する基礎実験を行った。これらの汚染拡大防止措置は、土中でダイオキシン類の移動が抑制できることが前提となるため、汚染土壤から浸透水へ移行する状況、浸透水中に含まれたものの周辺地盤での挙動について検討を行った。

既往の研究として、Freeman¹⁾、²⁾らによる、降灰に起因したダイオキシン類は土壤の表層(0~5cm)に大部分が滞留し、降雨等によって12年間で鉛直方向へ10cm程度の拡散したとの観測例などがあり、ダイオキシン類は一般的には土壤中において動きにくい物質との知見はある。しかし、非懸濁態ダイオキシン類(実質的に水に溶解していると考えられるダイオキシン類)の拡散特性、土粒子に吸着したダイオキシン類の移動・拡散特性などを、存在形態別に検証した事例はみられない。ここでは、実際の汚染サイトから採取したダイオキシン類汚染土壤を用いて、土壤中での存在形態(懸濁態か非懸濁態か)、土壤中にあるダイオキシン類の浸透水への移行状況、汚染浸透水に移行し含まれるダイオキシン類が周辺地盤でどの程度移動が抑制されるかの検証実験を行った。ダイオキシン類の測定は、旧環境庁が定めたいわゆる公定法を用いた。

3. 2 汚染土壤中におけるダイオキシン類の存在状態の検証

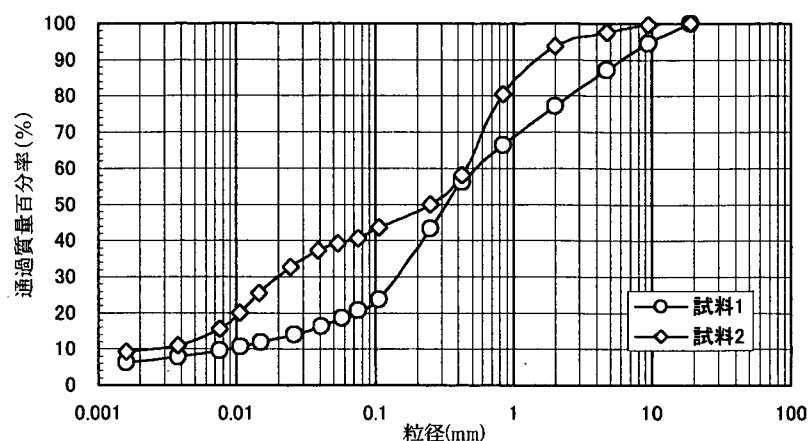
3. 2. 1 目的および方法

本実験は、現地で採取した二種類のダイオキシン類汚染土壤(試料1:清掃工場に起因、試料2:農薬工場に起因で、19mmメッシュのふるいで礫やごみなどを取り除いたもの)を対象に、懸濁態ダイオキシン類(SS、コロイドを含む土粒子(以下、土粒子という)に吸着されているダイオキシン類)とそれ

以外の非懸濁態ダイオキシン類を定量的に測定し、土中での存在形態を検証した。各試料の土質試験結果を表－3、粒度分布を図－1に示す。

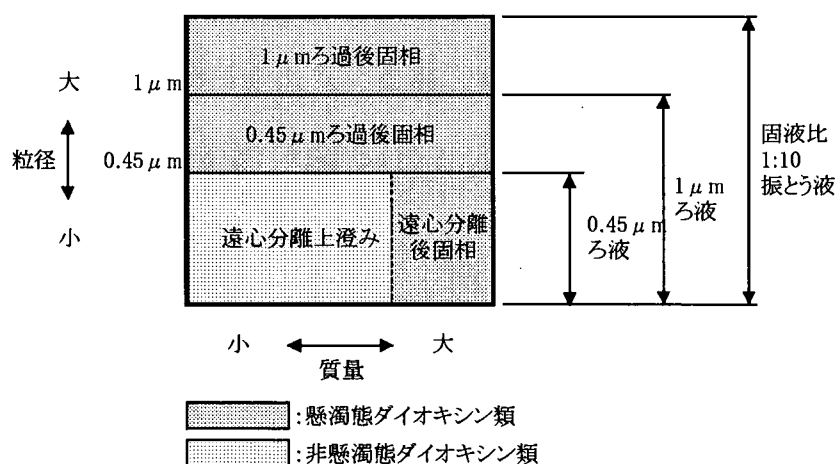
表－3 土質試験結果

	土の密度	含水比 (%)	液性限界 (%)	強熱減量 (%)	ダイオキシン類 含有量(pg-TEQ/g)
試料1	2.665	66.3	51.7	6.63	63,000
試料2	2.596	27.05	48.9	6.62	790



図－1 粒径加積曲線

各試料について以下の操作を行い、ダイオキシン類を懸濁態と非懸濁態に分類した（図－2 参照）。なお、この操作は汚染土壌から重金属などの溶出を調査する環境庁告示第 46 号に示される条件とほぼ同じである。



図－2 懸濁態と非懸濁態ダイオキシン類の分類

- ① 試料に対して、2mm のふるいを用いて粉砕を行った後、固液比 1:10 にて6時間振とうを行う。
振とう液は pH、濁度、SS の測定を行う。（振とう液）
- ② 振とう液を 1μm-GFP（グラスファイバーフィルターペーパー）により固液分離し、ろ過した液相に対して pH、濁度、SS、ダイオキシン類濃度測定を行う。（1μm ろ液）
- ③ 1μm ろ液を 0.45μm-MF（メンブランフィルター）により固液分離し、ろ過した液相に対して pH、濁度、SS、ダイオキシン類濃度測定を行う。（0.45μm ろ液）
- ④ 0.45μm ろ液を遠心分離（毎分 3,000 回転、20 分）により固液分離し、上澄み液に対して pH、

濁度、SS、ダイオキシン類濃度測定を行う。(遠心分離液)

3. 2. 2 結果

実験結果を図-3、表-4、5に示す。本実験において最後に得られた遠視分離液を非懸濁態のダイオキシン類と仮定すると、その非懸濁態ダイオキシン類は土壤に含まれるすべてのダイオキシン類の0.0007%(7.0×10^{-6})程度であった。

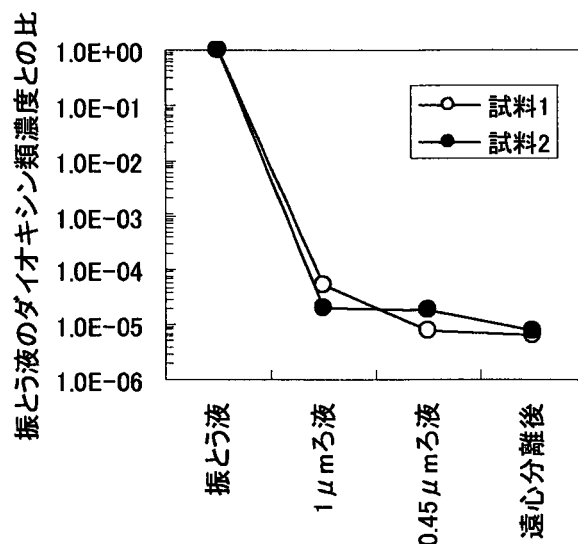


図-3 液相中ダイオキシン類濃度の変化

表-5 実験結果 (試料1: 63,000pg-TEQ/g)

	ダイオキシン類濃度 pg-TEQ/l	pH	濁度 (度)	SS (mg/l)	振とう液の ダイオキシン類 濃度との比
振とう液	6.1×10^5 *	7.28	12,200	93,000	1
1μm通過液	320	7.12	2.03	7.5	5.3×10^{-5}
0.45μm通過液	47	7.45	0.86	7.5	7.4×10^{-6}
遠心上澄液	39	7.38	0.51	-	6.4×10^{-6}

*ダイオキシン類含有量、土粒子の密度、固液比より計算

表-6 実験結果 (試料2: 790pg-TEQ/g)

	ダイオキシン類濃度 pg-TEQ/l	pH	濁度 (度)	SS (mg/l)	振とう液の ダイオキシン類 濃度との比
振とう液	76,000 *	3.30	15,600	90,500	1
1μm通過液	1.5	3.41	0.63	1.3	2.0×10^{-5}
0.45μm通過液	1.4	3.37	0.00	測定不能	1.8×10^{-5}
遠心上澄液	0.57	3.37	0.00	-	7.5×10^{-6}

*ダイオキシン類含有量、土粒子の密度、固液比より計算

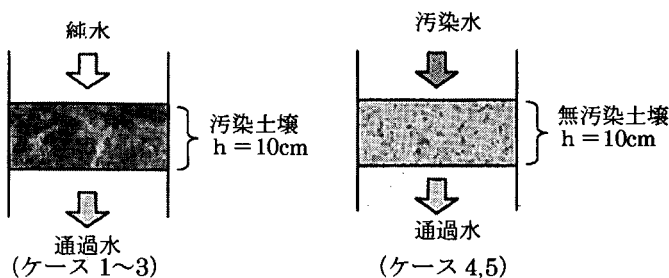
この結果は、ダイオキシン類のオクタノール/水分配係数(K_{ow})が大きく³⁾、水に溶解しにくく土粒子に吸着しやすいことを裏付けている。ただし、文献値³⁾から計算で求めたダイオキシン類の水への溶解度($1.0 \times 10^{-6} \sim 10^{-12}$ 程度)と比較すると、非懸濁態ダイオキシン類の割合はそれよりやや大きいものとなっている。これは0.45μm未満かつ比重1以下の微粒子に吸着したダイオキシン類が、溶液濃度として計上された影響と考えられる。したがって、ダイオキシン類に汚染された土壤に起因するダイオキシン類の挙動に関しては、事実上、土粒子吸着の懸濁態ダイオキシン類を考慮しておけばよいと考えられる。

3. 3 ダイオキシン類の移動特性に関する実験

3. 3. 1 目的および方法

本実験では汚染土壌（汚染源）の通水へのダイオキシン類の移行状況（ケース 1～3）、通水に移行したダイオキシン類の周辺土壌による類移動抑制効果（ケース 4,5）について検証するため、カラム実験を行った。

実験に用いた汚染土壌は、表—4に示す試料 1（ケース 1）および試料 2（ケース 3）である。ケース 2 には、試料 1 と砂質土を 1:9 の割合で混合し、ダイオキシン類含有量を 10 分の 1 程度とした調整試料を用いた。またケース 4,5 の周辺土壌を模した無汚染土壌には、透水性が高く土粒子の移動抑制効果が低いと考えられる砂質土と透水性が低く土粒子の移動抑制効果が高いと考えられる火山灰質粘性土の二種類を用いた。実験ケースを表—7に、実験概要を図—4に示す。



図—4 実験概要

表—7 実験ケース

ケース	通水試料		充填試料	
	種 類	濃 度 (pg-TEQ/L)	種 類	含有量 (pg-TEQ/g)
1	純水	—	試料 1	61,000*
2	純水	—	調整試料 (試料 1+砂質土)	5,300
3	純水	—	試料 2	790
4	汚染水	1,100	無汚染土壌 (砂質土)	—
5	汚染水	136	無汚染土壌 (火山灰質粘性土)	—
	うち非懸濁態	0.15		

*試料 1 を再分析した結果

実験は以下の手順で行った。

- ① 透水係数が $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 程度となるように、ダイオキシン類汚染土壌もしくは無汚染土壌をガラス製カラムに充填し、通水カラム(直径 10cm、面積 78.5cm^2 、高さ 10cm)を作製する。
- ② ケース 1～3 については純水、ケース 4, 5 ではダイオキシン類を含む汚染水を用いて下方より飽和状態にした後、通水速度は 1ml/min ($\approx 7.6 \text{mm/h} \approx 20 \text{L/2 週}$)程度で上方から下方へと通水を行う。
- ③ 所定の通水量毎に通過水のダイオキシン類の定量分析を公定法に基づき行う。
- ④ 火山灰質粘性土を充填したケース 5 では、非懸濁態ダイオキシン類の挙動を把握するため、カラム通水前の汚染水と通過水のダイオキシン類濃度の測定とともに、それぞれの通過水に遠心分離(毎分 3,000 回転、20 分)を行った後、 $0.45 \mu \text{m-MF}$ を通過させた検体についても分析を行う。

3. 3. 2 結果

実験結果を表—10に示す。また、ケース1～3については充填した土の乾燥質量を1kg(充填密度 約1.3g/cm³)と仮定したときの充填試料の全ダイオキシン類量から、また、ケース4,5については汚染水のダイオキシン類濃度と総通水量から求めた全ダイオキシン類量から、カラムを通過したダイオキシン類量の全ダイオキシン類量に対する割合を求めた。

表—10 実験結果

ケース	分析結果(pg-TEQ/l)				カラム通過水中のダイオキシン類量 /ダイオキシン類全量(%)
	0 ～2L	2 ～20L	20 ～40L	40 ～60L	
1		150	45	21	7.1×10^{-3}
2	220	32	50	43	5.4×10^{-2}
3	12	0.26	—	—	3.6×10^{-3}
4	通過水	420	360	300	33
5	通過水 (うち非懸濁態)	0.0099 (0.0088)	0.0056 (0.0020)	1.6 (0.011)	0.40 (4.8)

ケース1～3の結果から汚染土壌から移動・拡散したダイオキシン類の割合は、60L 通水時で全体の0.01%以内であった。また、ケース1,3と比較してケース2の割合が1桁程度大きなものとなっている理由として、混合した砂質土の間隙から、ダイオキシン類を含む土粒子(浸透水中に移行した土粒子)が漏出しやすい環境になったためと考えられる。

ケース4,5については、無汚染土壌の存在により、ダイオキシン類の移動・拡散を60L 通水時に1～33%程度にまで低減することが確認された。さらにケース5においてはカラムを通過する非懸濁態ダイオキシン類の割合が、懸濁態の10倍以上高いことが確認された。しかし、全体のダイオキシン類の通過量に対する割合は1%程度であり、ダイオキシン類の移動・拡散は懸濁態の寄与が大きいと考えられる。また、ケース4ではケース5の100倍程度通過量が増加しているが、これは透水性の高い砂質土の間隙から、ダイオキシン類を含む土粒子(浸透水に移行したもの)が漏出しやすい環境になったためと考えられる。

以上の結果から、汚染土壌から浸透水に移行するダイオキシン類、浸透水に含まれて移動・拡散し周辺土壌で移動が抑制されるダイオキシン類ともに、土粒子に吸着した懸濁態が主であることが確認された。本実験条件の60Lの通水は、我が国の平均年間降雨量の約4.5年分(7,643mm)に相当するが、そのような厳しい条件下においても、通水中に移行し外部に漏出する量は汚染土壌全体の0.01%程度であった。また、周辺土壌へ移動・拡散したダイオキシン類は厚さ10cmの周辺土壌により67～99%程度、移動・拡散が抑制されることが確認された。ダイオキシン類の移動量については、地盤の透水性の影響が大きいことも確認できた。

4. 汚染拡大防止措置の適用性

以上を総括すると、土壌の透水性の影響を受けるが、土壌中のダイオキシン類の99.999%以上は懸濁態として土粒子とともに移動すること、周辺土壌へ移動・拡散したダイオキシン類は厚さ10cmの周辺土壌により67～99%程度汚染の拡大が抑制されることが確認された。これにより、降雨等による地中浸透水によるダイオキシン類の移動性は、非常に低いことが実証され、表—2に述べた汚染拡大防止措置に対する、ダイオキシン類汚染土壌対策としての、基礎的な裏付けが得られた。

ただし、礫質土や砂質土のように透水性の高い地盤の場合は、土粒子の移動に伴うダイオキシン類の移動・拡散の可能性がある。また、粘性土のように透水性の低い地盤においても地盤の不均一性などが懸念される場合には、モニタリング等による安全性の監視が必要と考えられる。

なお、有機溶剤や界面活性剤などがキャリアーとなってダイオキシン類の移動性が高くなるという報告⁴⁾があり、それらの物質がダイオキシン類と共存している場合には、汚染拡大防止措置の適用について留意が必要である。

5. おわりに

土木研究所では、上記の研究成果をもとに今年度中に「建設現場で遭遇するダイオキシン類汚染対策マニュアル（素案）」をとりまとめ、土木研究所資料として発刊する予定である。土木研究所資料の発刊後も、実際の現場への適用を図りながら、内容の完成度を高めていく予定である。建設用地でダイオキシン類汚染問題に直面した際には、是非、土木研究所土質チームにご一報くださるようお願いしたい。

また、高含水比のダイオキシン類汚染底質・土壌を袋詰脱水処理工法（写真-1）の適用により、脱水・減量化を図るとともに、ダイオキシン類を封じ込めることを目的として、「袋詰脱水処理工法による高含水比ダイオキシン類汚染底質・土壌封じ込めマニュアル（案）」（土木研究所資料第 3902 号）を、平成 15 年 7 月に発刊した。興味がある方は、ぜひ一読されたい。

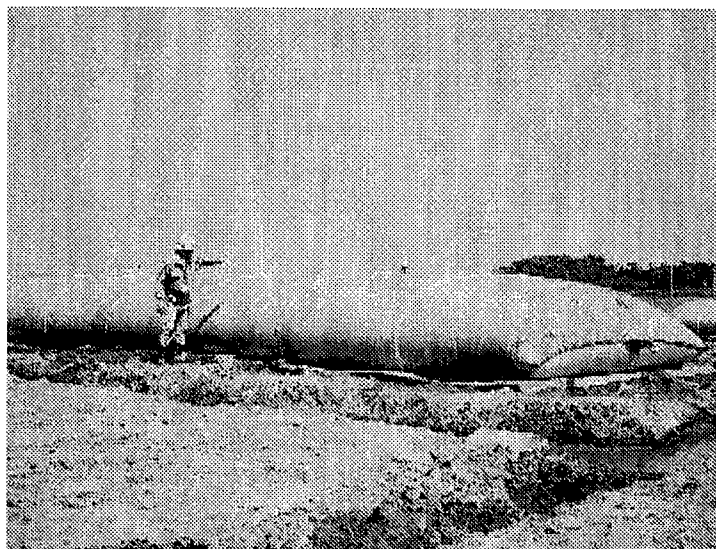


写真-1 袋詰脱水処理工法

参考文献

- 1) Freeman R A, Schroy J M : "Modeling the Transport of 2, 3, 7, 8-TCDD and other Low Volatility Chemicals in Soils". Environ Prog, Vol.5, No.1, pp.28-33. 1986
- 2) Freeman R A, Schroy J M: Comparison of the Rate of TCDD Transport at Times Beach and at Eglin AFB. Chemosphere Chem Biol Toxicol Relat Environ Probl, Vol.18, No.1/6, pp.1305-1312, 1989
- 3) 森田:「ダイオキシンの化学と環境動態」、農林水産技術研究ジャーナル、Vol.23、No.4、pp.35-39、2000
- 4) 例えば Kapila.S et al "Field and Laboratory Studies on the Movement and Fate of Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin in Soil", Chemosphere, Vol.18, No.1-6, pp.1297-1304, 1989

ダイオキシン類に関する発表論文

- 1) 森、三木、小橋:「袋詰脱水処理工法を用いた汚染土壌封じ込めに関する実験」第 7 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.173-174, 2000.12
- 2) 森、三木、恒岡、小橋:「袋詰脱水処理工法による汚染土壌封じ込めの適用性に関する一考察」土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, III-B32, 2001.10
- 3) 森、恒岡、三木:「袋詰脱水処理工法による汚染底質封じ込め」土木技術資料, pp.50-55, 2002.5
- 4) H.MORI, H.MIKI, N.TSUNEOKA and H.KOHASHI: "The use of geo-tube method to retard the migration of contaminants in dredged soil", Seventh International Conference of Geosynthetics, 2002.9
- 5) H.MORI, H.MIKI and N.TSUNEOKA: "The Geo-Tube Method for Dioxins Contaminated Soil", the special edition of Geotextiles and Geomembranes
- 6) 森、三木、恒岡、柴田:「ジオテキスタイル製袋を用いた汚染底質の封じ込め実験」第 38 回地盤工学研

究発表会講演概要集，投稿中

- 7) 柴田、森、恒岡：「ダイオキシン類の土壤中の移動特性に関する実験」第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.412-415，2003.6
- 8) 松下、桑原、渡辺、森川、森、恒岡：「カートリッジ式膜モジュールによるダイオキシン類汚染土壌からの排水処理」第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.412-415，2003.6
- 9) 恒岡、森、中島、小山、山本、中村：「フタロシアニン系吸着材によるダイオキシン類含有水の処理」第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，pp.412-415，2003.6
- 10) 森、小橋、柴田：「袋詰脱水処理工法によるダイオキシン類汚染底質の封じ込め」月刊土木技術、投稿中
- 11) 森、小橋、柴田：「建設現場で遭遇するダイオキシン類汚染対策マニュアル（素案） —汚染拡大防止措置について—」月刊土木技術、投稿中

[一般講演]

豊かで多様な生態環境を創り出すための都市の河川と下水道の課題

水循環研究グループ（水質） 宮島 潔

目 次

1. はじめに	91
2. 下水処理水と水生生物の関係調査	91
2-1. 調査対象	92
2-2. 下水処理水放流後の河川における現地調査の結果	93
3. 出現する生物相と影響因子の検討	97
3-1. 栄養塩類濃度	97
3-2. 消毒方法	98
3-3. 水温	101
3-4. 分子アンモニア	103
3-5. 物理条件	103
4. 生態系にやさしい下水道の促進に向けた手引き書（案）の概要	105
4-1. 生態系にやさしい下水道の内容	105
4-2. 整備の手順	106
5. おわりに	107
参考文献	108

豊かで多様な生態環境を創り出すための都市の河川と下水道の課題

水循環研究グループ(水質) 宮島 潔

1. はじめに

近年、下水道の普及が進むに従い、放流先の水域に占める下水処理量の割合が増加してきている。また、都市河川等の維持流量の確保や快適な水辺空間の創出等の要請に応えるために、下水処理水を積極的に利用するなど、水環境における下水道の占める役割が大きくなりつつある。下水道はこれまで、公共用水域の水質保全に積極的に取り組んできた。その結果、河川などのBODは大幅に改善したが、同時に河川に占める下水放流量が増大し、河川の水質と流量が下水処理水に大きく左右されるようになった。このことにより、下水処理水が生態系に与えている影響は大きくなっていると考えられる。

下水道政策研究委員会は、平成14年5月、「中長期的視点に置ける下水道整備・管理のあり方について」の報告を発表した。報告では、下水道施策としての重点事項を8つ掲げ、そのひとつに都市の水・緑環境整備をあげている。今後の下水道事業には、高度処理や生態系に配慮した放流方法など、生態系を保全する機能が求められている。健全な水循環、良好な水環境の創造といった新たな役割を下水道が果たすためには、生態系の理解、生態系にやさしい下水道技術の開発、開発した技術を導入した施設の整備、および適切な維持管理が必要である。

しかし、下水道では、計画、維持管理のいずれにおいても、下水処理水の放流先水域にどのような生物が生息し、下水道の整備とともに生態系がどのように変化してきたのか、これまでほとんど調査することはなかった。そのため、土木研究所では、平成8年度から生態系の保全・生息空間の創造を目的とした総合プロジェクトを立ち上げ、また生態系保全に関心を持つ地方公共団体や下水道新技術推進機構とともに、下水処理場放流先の都市河川でどのような生物が生息しているのか共同調査を行ってきた。

生態系との共生を図る下水道については、全体像が必ずしも明確になっているわけではなく、技術的にも解決すべき事柄が数多く残されている。土木研究所は、関係機関と連携しながら、これまでの調査をふまえ、生態系への配慮を行う際の基本的考え方や、既に先進的な取り組みが行われた事例を「生態系にやさしい下水道を目指して」として報告書にまとめることに携わった。また、土木研究所等の成果をもとに下水道整備の手順を整理し、昨年8月には、国土交通省が「生態系にやさしい下水道の促進に向けた手引書(案)」を発刊した。本稿では、生態系にやさしい下水道を進めるにあたって、どのような課題があるのかを下水処理水の水質の視点から整理した。

2. 下水処理水と水生生物の関係調査

水を基軸とした生態系や自然の循環システムを健全に保ち、人と自然、都市と自然との共生をはかっていくためには、下水処理水が放流先水域の水環境、特に生態系に与える影響をより多角的に評価し、悪影響を与えないように、かつ水環境を改善するようにしていく必要がある。水生生態系の保全のためには、生息空間(ハビタット)構造、流況、生物相互作用、食物(エネルギー)源、そして水質が大きな役割を果たしていると考えられる。図-1に示すように、水生生物相への影響因子は多く、複雑に影響し合っている。ここでは、影響因子として化学的条件に注目し、下水処理水放流先河川に

おける水質と生物との関係について、財団法人下水道新技術推進機構、地方公共団体や河川生態学術研究会での大学等の研究者との共同調査による成果をもとに報告する。

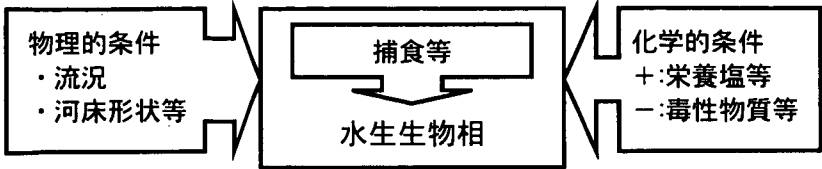


図-1 水生生物相への主な影響因子

2-1. 調査対象

調査対象の概要を表-1に示す。対象とする下水処理水放流先河川については、処理水の流量比率が高い都市河川、処理水を利用した親水や修景のためのせせらぎ水路を選んだ。下水処理の方式では、一般的な有機物の処理を目的とした標準活性汚泥法だけでなく、窒素、リンの除去も目的とする硝化内生脱窒法、嫌気好気活性汚泥法を用いている処理場も対象に含めた。消毒方式は、塩素によるものほか、オゾンや紫外線を用いている処理場を含めた。

表-1 調査対象処理場及び水域の概要

処理場名	調査水域	調査期間	処理方式	調査区間へ供給する処理水の消毒方式	調査時の処理水平均水質(mg/L)			処理水量比(%)
					T-N	T-P	DO	
A処理場	せせらぎ水路	H8～H10	標準活性汚泥法 +急速ろ過	塩素	10.4	0.2	7.6	100
B処理場	河川	H12～H13	標準活性汚泥法	塩素	15.8	0.5	6.5	70
C処理場	河川	H8～H10	嫌気好気活性汚泥法	塩素	10.8	0.8	7.9	80
D処理場	せせらぎ水路	H8～H9	硝化内生脱窒法 +PAC注入 +急速ろ過	オゾン	6.2	0.3	7.6	100
E処理場	せせらぎ水路	H9～H10	標準活性汚泥法 +急速ろ過	オゾン	15.6	1.9	12.7	100
F処理場	河川	H12～H13	標準活性汚泥法	塩素	11.4	1.5	6.9	70
G処理場	河川	H13	嫌気好気活性汚泥法 +急速ろ過	オゾン	-	0.7	7.9	70
H処理場	せせらぎ水路	H12～H13	凝集剤添加 標準活性汚泥法 +急速ろ過	なし	6.7	0.3	8.2	100
	冷却池 植生浄化池			紫外線				
I処理場	安定池	H9～H11	硝化内生脱窒法 +急速ろ過	紫外線	10.7	0.7	8.8	100
	河川		+磯間接触酸化	塩素				70 90
J処理場	ビオトープ	H12	標準活性汚泥法	塩素	9.1	0.6	1.3	100
K処理場	河川	H13	標準活性汚泥法	塩素	11.1	0.7	7.6	40

2-2. 下水処理水放流後の河川における現地調査の結果

(1) 現地調査で出現した生物種

調査対象における処理水放流先水域の結果について、全体的な傾向をまとめると次のような特徴があることがわかった。まず、処理水が河川と混合される場合、付着藻類としては緑藻類の占める割合が増加する傾向がある、ということがあげられる。図-2のように、多くの場合、放流口および合流後においては、合流前と比べて緑藻類の占める割合が高くなっていた。しかし、G処理場のように合流前と合流後のどちらも珪藻類がほとんどを占め、合流後においても緑藻類の占有率増加がみられない場合もあった。

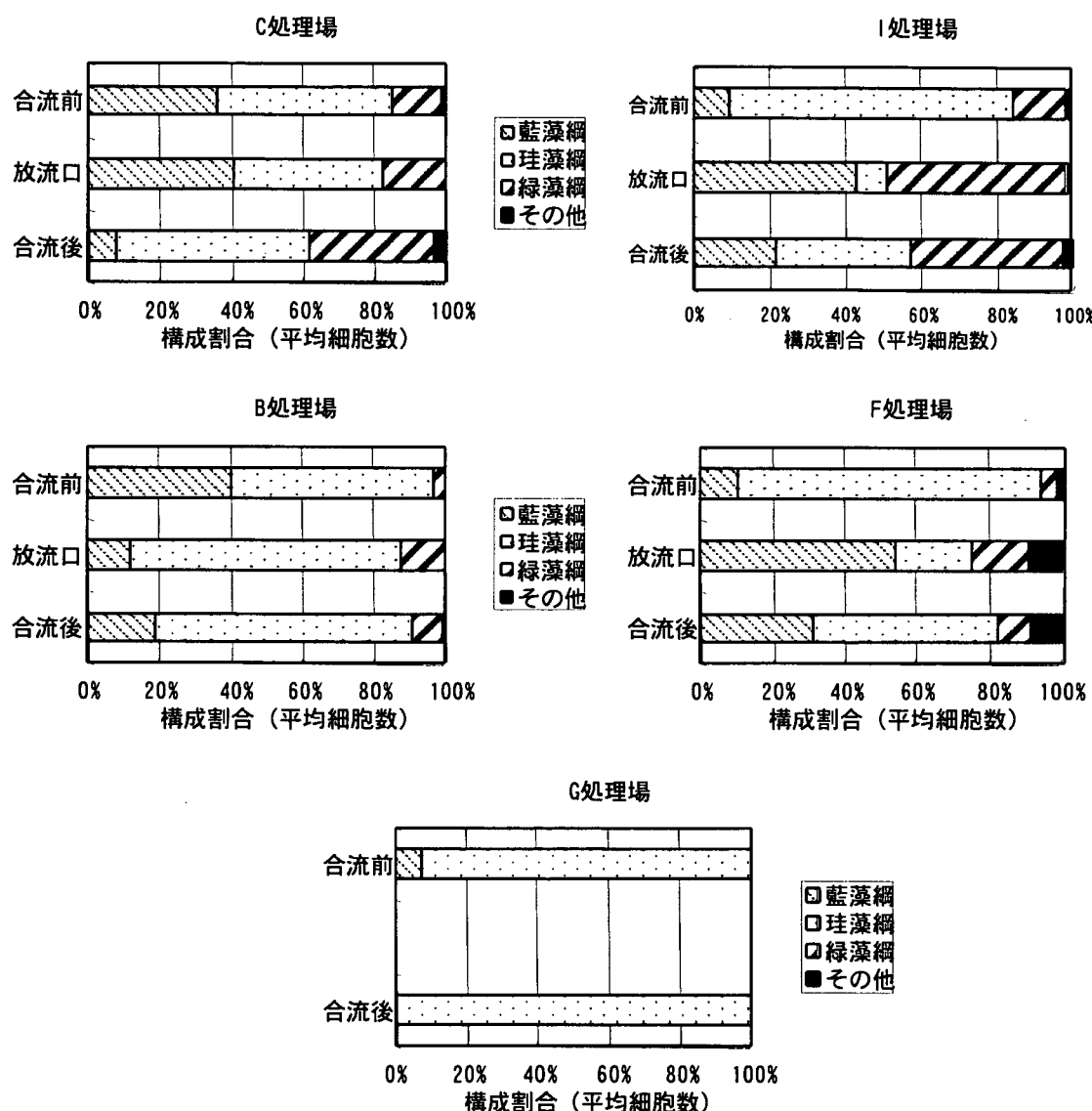


図-2 処理水の流入による付着藻類構成種の変化

また、表-2に示すように、処理水の水域であっても、現地で出現が確認できた付着藻類は合計279種、底生動物は合計190種に達し、処理水がほとんどの河川でも多数の種類が生息できる可能性がある。これら出現した生物種は、処理水が多くを占める河川においても、水質条件や構造等の環境条件が適切に選択されれば生息が可能であり、多様な棲み場を形成する能力を持つと期待できる。

今回調査した河川のなかには、図-3に示すように上流側で汚濁が比較的進んでいるため、処理水合流後に水質が改善された例もあり、生物にとって処理水放流がマイナス面だけでなく、プラスに働く場合のあることが確認できた。

表-2 処理水のための水域に出現した種

付着藻類	藍藻類	珪藻類	緑藻類	その他	合計
	32	192	46	9	279
底生動物	節足動物	環形動物	軟体動物	扁形動物	合計
	146	23	18	3	190

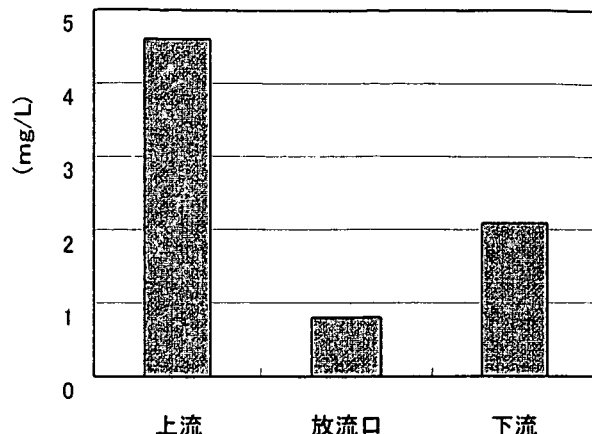


図-3 I 処理場放流前後の BOD (H9~10 調査時平均)

(2) 河川に処理水を放流する場合の合流前後の変化

下水処理水が河川に放流される場合、水質あるいは流量の変化により生物相が変わることが考えられる。下水処理水が放流された前後の河川の水質変化や生物相について調査した例を示す。

K 処理場の上流は、当該処理場の処理区域になっており、下水道整備が進んでいる。そのため、放流先の水域は、都市排水がほとんど流入することのない清澄な河川である。処理水合流前の上流 (St.1)、処理場から処理水が流れ出る樋門、合流後 100m 下流 (St.2)、合流後 200m 下流、及び 1400m 下流 (St.3) について、水温、電気伝導度、BOD、栄養塩類等を測定した。その結果、下水処理水は、図-4のように合流後すぐに混合されるわけではなく、ある程度流下した後に均一な水質になることがわかった。均一になるまでの距離は、冬場の方が長くなる傾向があり、混合されにくい要因として、河川水との水温差が冬場に大きくなることが影響していると考えられた。

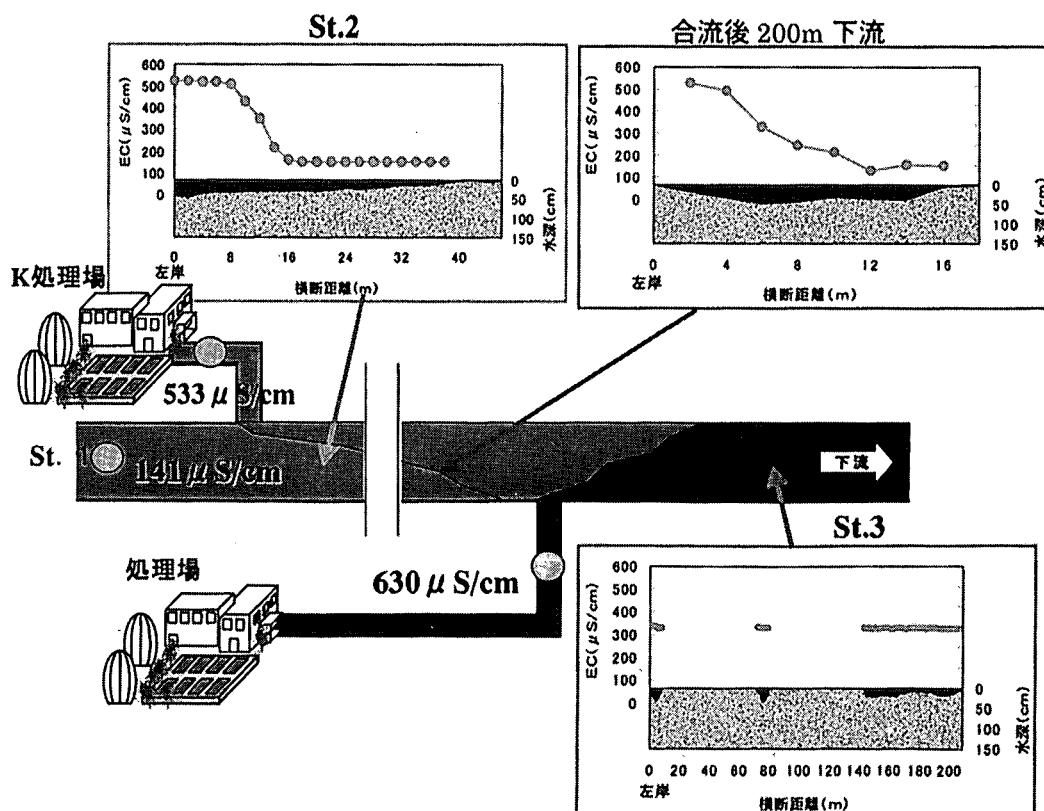


図-4 下水処理水放流先河川における電気伝導度分布の一例 (H13.12.20)

St.2 では、右岸から左岸への横断方向に水質濃度の変化が顕著であり、BOD、窒素、りんについても電気伝導度と同様に濃度の変化がみられた。K処理場の上流部の水質は、水道原水レベルであるため、下水処理水合流前後で水質変化が大きいと考え、下水処理水放流前後の St.1、St.3 を比較するとともに、St.2 における横断方向を比較するために、底生動物の調査を実施した。

底生動物は、St.1 では瀬の任意の5地点で採取し、St.2 及び St.3 については、横断方向に5～7地点を選んで採取した。採取した底生動物は、乾燥重量、構成比及び多様性指数によって評価した。多様性指数は生物種の多様性を評価する指数である。出現数が同じ場合、各出現種の個体数が均等なほど値が大きくなり、多様性が高くなることを示す。逆に、特定の出現種のみが卓越した場合は、多様性指数は小さくなる。多様性指数は、以下の式で求められる。

$$\text{多様性指数 (Shannon 指数)} H = - \sum P_i \log_2 P_i$$

(P_i : i 番目の種類の個体数が総個体数に占める割合)

底生動物の生物量（乾燥重量）は、図-5に示すように、St.2 では下水処理水の影響がみられる左岸に向かって、横断方向に生物量が減少する傾向があり、下水処理水の影響が大きい地点で多様性指数が小さくなる傾向が確認された。種の構成については、St.1 で見られたカゲロウ目が、St.2 では下水処理水の影響を受けている地点でほとんど見られなくなっていた。最下流の St.3 ではミミズ目の出現量が多く見られ、ミミズ目の出現量によって乾燥重量や多様性指数が大きく変動した。

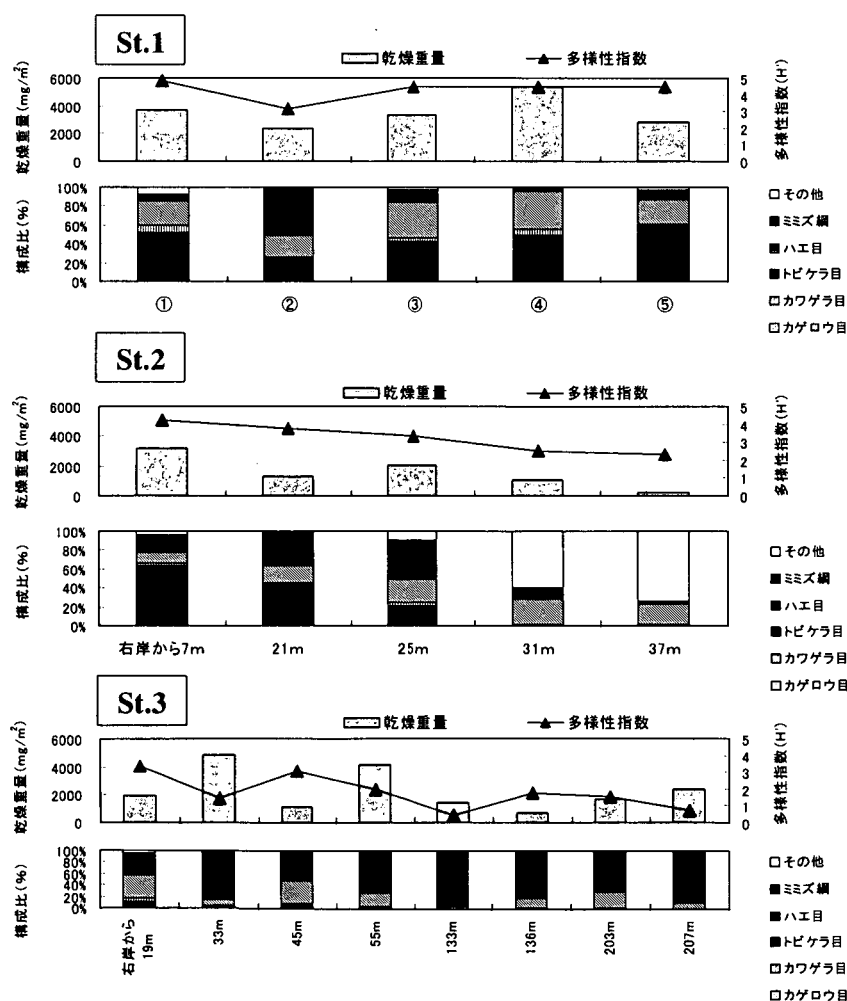


図-5 各調査地点における底生動物の乾燥重量、多様性指数、構成比(H13.12.20)

St.1 と St.3 を比較すると、下水処理水合流前後の底生動物の種構成比や多様性指数は、明らかに差がみられ、下水処理水の合流は底生動物に影響していると考えられた。また、St.2 の横断方向の生物の変化は、水質の違いによる影響ではないかと考えた。ただし、河川への処理水合流前後の変化は、放流先河川および処理水の水質、水量等に大きく影響を受けるので、調査対象河川のすべてで一定の傾向を示すことはなかった。

(3) 放流後の流下過程による変化

放流後の流下過程による変化をみるため、河川との合流による影響がない処理水 100%のせせらぎ水路に放流するA、D、Eの3処理場を選んで調査した。付着藻類、底生動物を採集して、多様性指数による評価、優占種や種構成の変化を把握するための汚濁指数による評価を実施した。

汚濁指数は、指標生物の出現頻度を考慮した評価方法で、有機汚濁の異なる水域にはそれぞれ特徴的な生物種が出現するという指標生物の出現をベースに算出される。得られた値が小さいほど、水質階級は清浄であると区分される。汚濁指数は、次の式で求められる。

$$\text{汚濁指数 } S = \sum (s \times h) / \sum h$$

(h : i 番目の種類の個体数が総個体数に占める割合

s : サプロビ階級 (水質汚濁階級)

汚濁指数 (S)

1.0~1.5=汚濁は非常に少ない (貧腐水性)

1.6~2.5=汚濁は中くらい (β 中腐水性)

2.6~3.5=汚濁は強い (α 中腐水性)

3.6~4.0=汚濁は非常に強い (強腐水性)

これらの各指数を用いて求めた、せせらぎ水路における付着藻類、底生動物の流下過程における変化を図-6に示した。

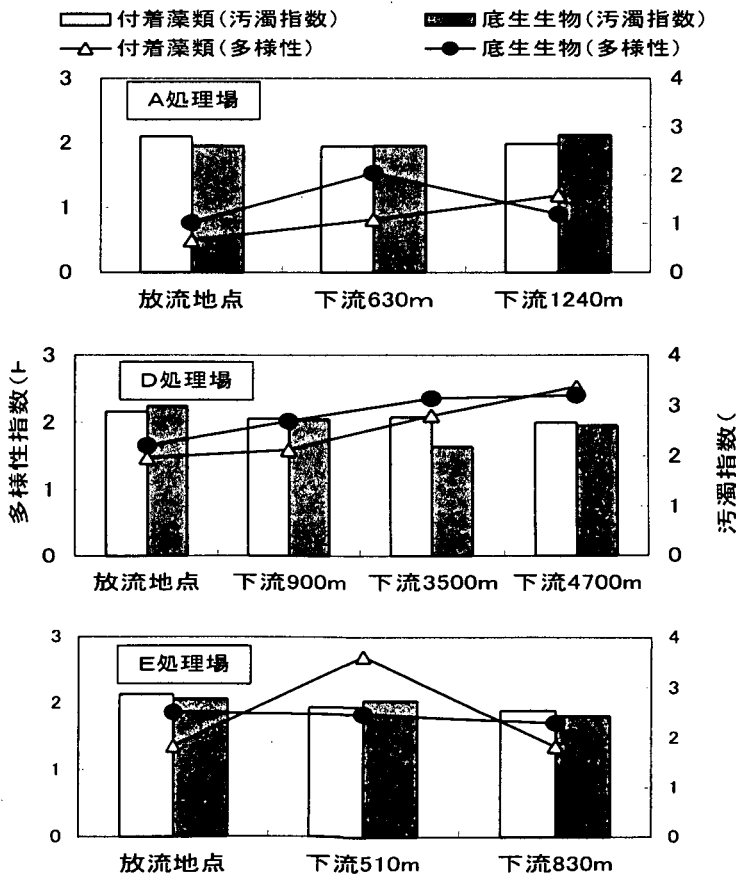


図-6 せせらぎ水路における多様性指数、汚濁指数の変化

多様性指数は、A処理場のせせらぎ水路の付着藻類、D処理場のせせらぎ水路の付着藻類および底生動物に関しては、流下過程に伴い増加傾向にあった。これらの水路における多様性の増加の要因として、流下距離による水質変化が考えられるが、水質の大きな変化は確認できなかった。ただし、A処理場については、残留塩素濃度が流下過程に伴い減少していたことから、残留塩素による生物群集への影響が考えられた。A処理場のせせらぎ水路における付着藻類の優占種は、塩素消毒を行っている下水処理場の放流水路等で良く見られる *Chlorolobion* (クロロピオン) 属であり、流下に伴い本種の出現量は減少傾向を示した。このような変化からA処理場では、付着藻類への影響因子として残留塩素の影響が大きいことが考えられた。一方で、E処理場のように多様性指数についても変化が見られないケースも確認された。

3. 出現する生物相と影響因子の検討

下水処理水の水質は、処理水放流先河川の横断方向でみられたように、出現する生物に反映されると推測できる。処理水質と生物との関係が得られれば、処理施設の変更等に活用できる可能性がある。同様に、放流先の物理条件と生物との関係が得られれば、せせらぎやビオトープの整備、処理水の放流方法の改善に役立つ可能性がある。下水処理水の水質は、栄養塩類濃度が河川水に比べて高く、消毒されていて、水温の季節変化が少ないなどの特徴を持っている。そこで、これらの特徴に注目して、調査結果を整理した。また、物理条件の河床材料、水深・流速についての検討も併せて行った。

3-1 栄養塩類濃度

一級河川における平成7～9年の総窒素濃度平均は、1.0mg/L、総りんが 0.115mg/L (河川環境管理財団,2002) と報告されている。下水処理水は、河川の栄養塩類濃度に比べて窒素、りんともに1桁大きく、中央値でT-N 13mg/L、T-P 1.13mg/L (藤井,2003) と報告されている。そこで、栄養塩濃度の違いによって生育する付着藻類量の増減について調べた。ここでは、処理水100%のせせらぎ水路で、かつオゾン消毒を行っているD及びE処理場の2つの放流先河川を選んだ。

処理水の窒素、りんの濃度と付着藻類クロロフィルaとの関係を図-7に示す。栄養塩濃度と付着藻類クロロフィルa量とは、明確な相関がなかった。また、図には示していないが、付着藻類種類数、付着藻類総細胞数との明確な相関もみられなかった。栄養塩濃度と付着藻類クロロフィルa量との関係を示したEPAの資料 (USEPA,2000) では、低濃度の領域では栄養塩濃度が高くなると付着藻類クロロフィルa量の増加がみられるが、高濃度になると濃度が高くなっても付着藻類クロロフィルa量の増加は必ずしも大きくないことから、今回調査した処理水の濃度レベルでは、濃度が変動しても付着藻類クロロフィルa量に変化を及ぼさない範囲であると推定した。したがって、栄養塩類だけのコントロールにより、せせらぎ水路での藻類の存在量を制御するためには、栄養塩濃度を大きく低下させる必要があり、下水処理の高度化が一層必要になる。このため、底生動物や魚類等による捕食圧の利用あるいは周辺の緑地環境の改良による日照のコントロールなど異なる抑制方法にも注目する必要がある。

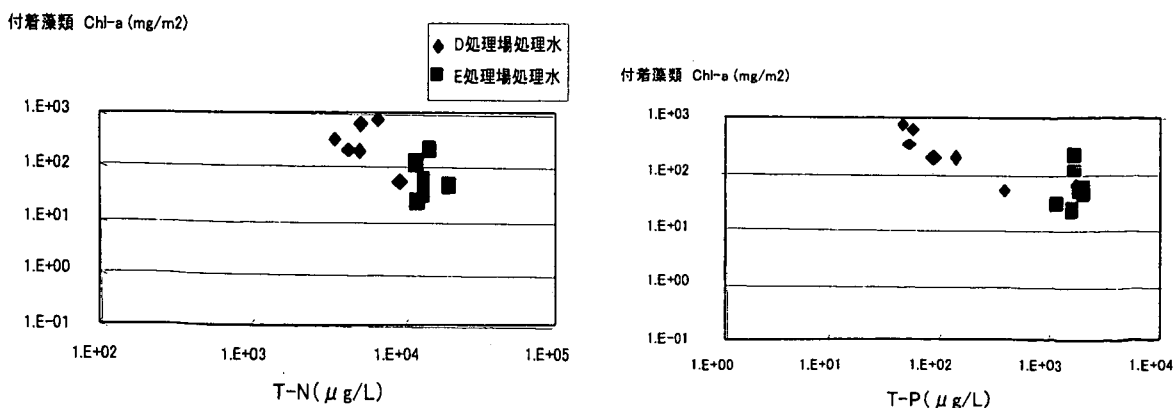
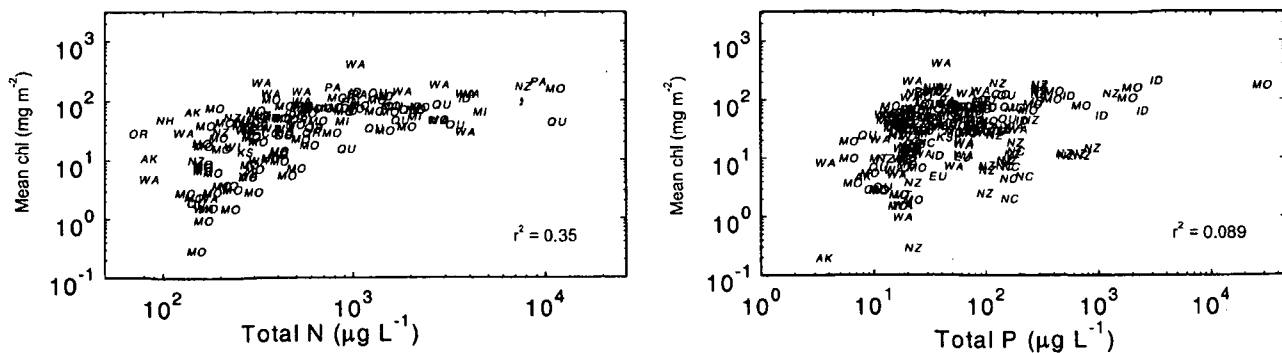


図-7 窒素、りんの濃度と付着藻類クロロフィルa量との関係



AK-Alaska, ID-Idaho, MI-Michigan, MO-Montana, NH-NewHampshire, NC-NorthCarolina, OR-Oregon, PA-Pennsylvania, WA-Washinton, QU-Quebec, EU-Europe, NZ-NewZealand

図－8 窒素、リンの濃度と付着藻類クロロフィルa量との関係 (USEPA, Nutrient Criteria,2000)

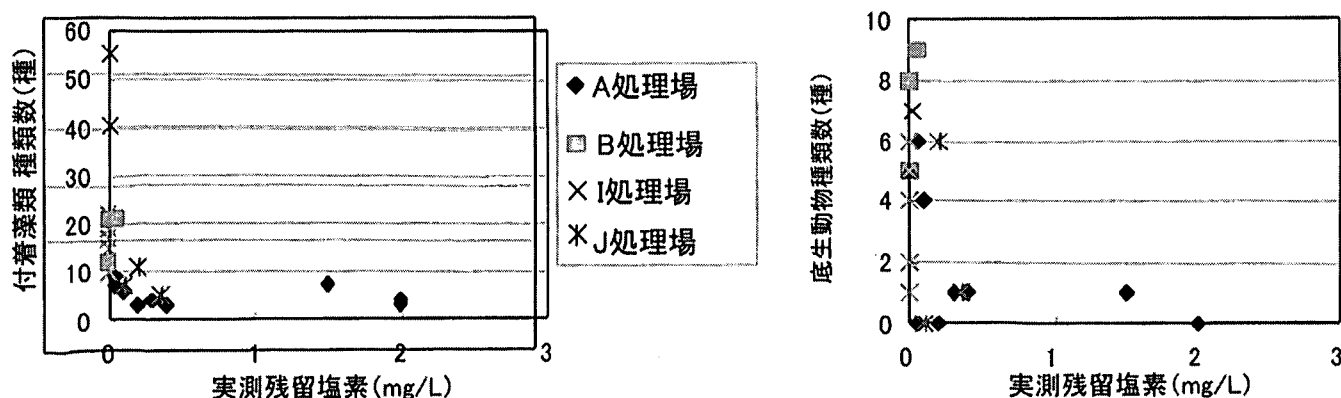
3-2. 消毒方法

消毒処理は、下水処理水の衛生学的安全性を保つために行われるが、塩素消毒では残留塩素が生物に影響を及ぼすことが知られている。そのため、塩素の注入率と出現種数を検討した後、消毒方法の違いによる生物群集の変化を調べた。

(1) 塩素注入率と出現種数

塩素の濃度と生物の出現状況には、どのような関係があるのかということを検討するため、A、B、IおよびJ処理場における調査時の残留塩素濃度と出現種類数の関係を調べた。図－9に示すように、残留塩素濃度が高いと、出現種数が小さくなる傾向がみられた。しかし、残留塩素が検出されない場合が多く、残留塩素濃度と出現種数に定量的な関係を見いだすことはできなかった。そこで、処理場の塩素注入率のデータを用いて、再度検討を行った。ここでは、調査前2ヶ月間の平均塩素注入率を塩素注入率とし、出現種類数との関係を求めた。

図－10に示すように、処理場ごとに注入率の範囲に差があるものの、全体として右下がりの傾向を示した。塩素注入率が、1.0～1.5mg/Lを超えると、付着藻類、底生動物ともに目立って影響が大きくなり、出現種数が少なくなることがわかった。



図－9 処理放流先河川水中の残留塩素実測値と付着藻類、底生動物の出現種数との関係

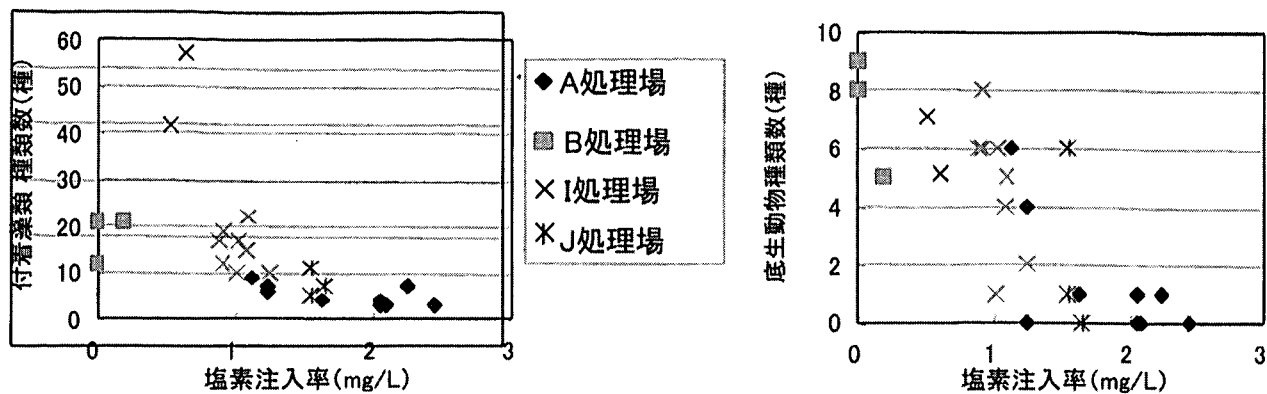


図-10 処理場での塩素注入率と付着藻類、底生動物の出現種数との関係

(2) 塩素消毒とオゾン消毒

同じ標準活性汚泥法で処理した後に急速ろ過を行っていて、消毒方法が異なるAおよびEの2処理場を比較した。いずれの処理場もせせらぎへ放流しており、比較的類似した河床条件になっているため、塩素消毒を行っているA処理場のせせらぎ2地点 (St.1: 処理水流出口、St.2: 620m下流) とオゾン消毒を行っているE処理場放流先1地点について底生動物を比較した。

底生動物の出現個体数は、図-11に示すように、塩素消毒で処理されているA処理場において差がみられ、下流に位置するSt.2が、処理水流出口のSt.1よりも大きくなった。その原因のひとつとして、図-12に示した残留塩素濃度の差が考えられた。また、オゾン消毒のSt.3は、出現個体数についてはSt.2よりも小さかったが、種類数は、3地点で最も大きかった。多様性指数についても、出現種類数と同様の傾向がみられた。汚濁指数は、多様性指数のように明確な傾向を示すことはなかったものの、オ

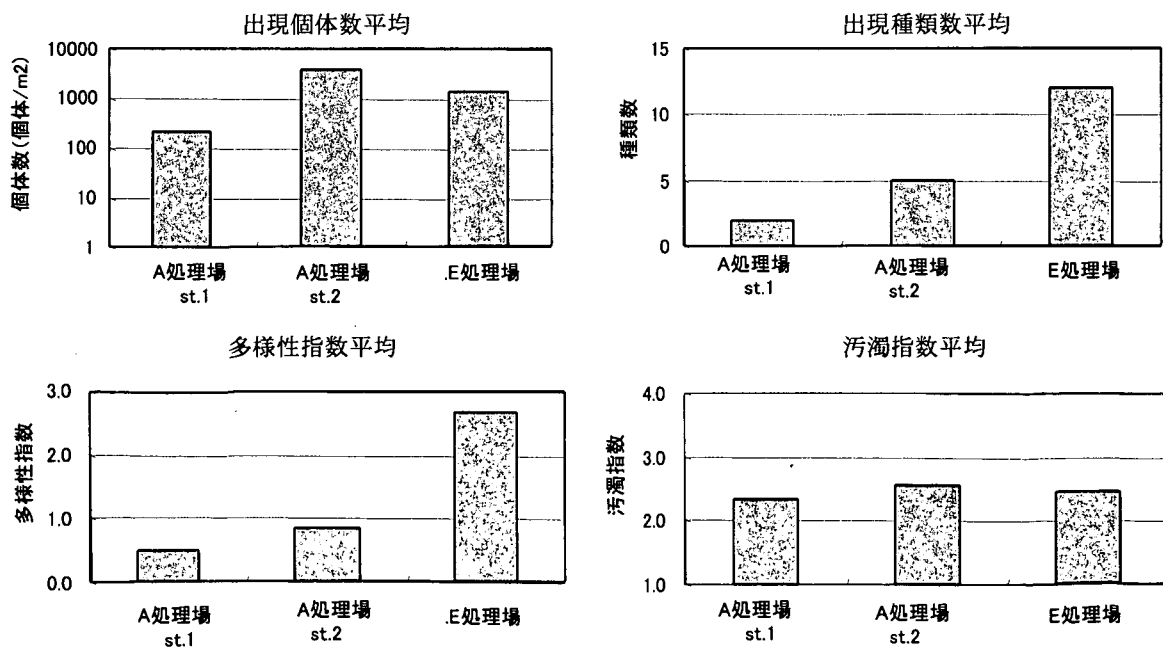


図-11 処理水放流先河川における底生動物の出現状況

ゾン消毒は、塩素消毒に比べて相対的に多くの種が生息することが可能になると推測された。また、残留塩素濃度により出現する数及び種が少なくなることが示唆された。

次に、消毒方法を、塩素からオゾンに変更した後のD処理場における底生動物の調査結果を示す。消毒方法を変更後の底生動物出現個体数の経月変化を図-13に示した。1月の調査結果はオゾン消毒に切り換えて1週間後の調査であるため、塩素消毒の影響を反映した底生動物群集であると考えた。調査開始時にはピロウドイシビル(*Erpobdella testacea*)を優占種とした僅か4種のみの種構成であったが、時間の経過に伴い、ピロウドイシビルの出現量は減少し、サホコカゲロウ(*Baetis sahoensis*)やコガタシマトビケラ(*Cheumatopsyche brevilineata*)などの、河川でもよく見られる種の出現が確認された。またオゾン消毒に変更した後の多様性指数は0.14から1.7となり、塩素消毒からオゾン消毒に変更したことにより、底生動物群集の多様性が高まっていることが確認された。

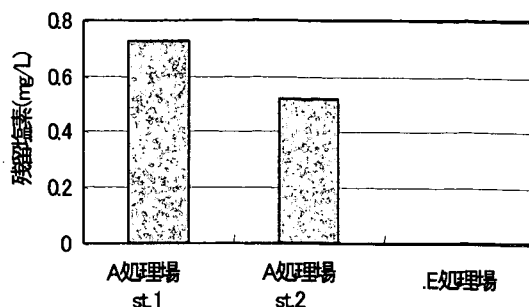


図-12 A、E処理場放流先河川での残留塩素濃度

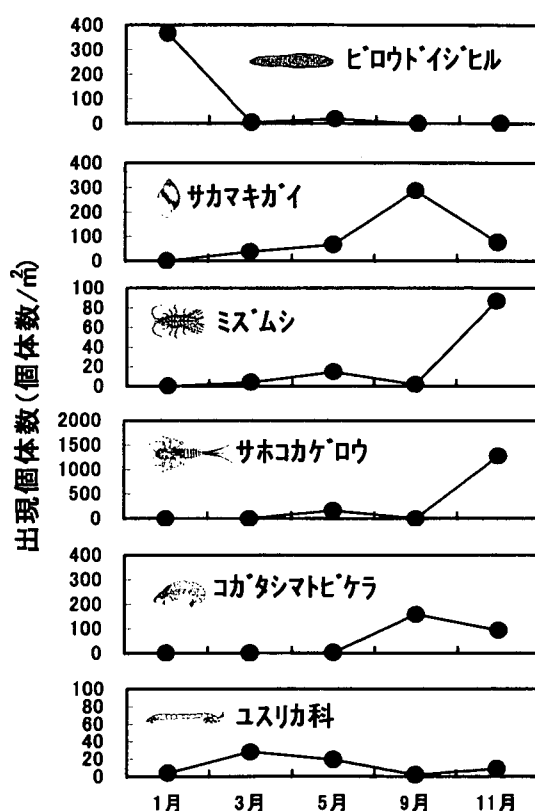


図-13 オゾン処理変更後の底生動物の変化

(3) 塩素消毒と紫外線消毒

C処理場においては安定池の流入部に紫外線消毒装置が設置されている。一方、河川への放流水には塩素消毒が行われている。安定池入口と放流口では流速や河床形態などの物理的条件が大きく異なるため、消毒方式だけの違いを反映しているとは言い難いが、それぞれの水域における多様性指数や汚濁指数は、消毒方式の違いを含んでいると考え、両者を比較した。

付着藻類については、表-3に示すように、安定池と放流口との間で差がみられ、放流口（塩素消毒）と比べて安定池（紫外線消毒）による水域の方が多様性が高く、かつ汚濁指数が小さく清浄と評価され

た。一方、底生動物については汚濁指数からみると、どちらの水域も α 中腐水性と計算され目立った違いはみられなかったが、多様性指数からみると安定池における多様性指数が放流口における計算値を上回っており、塩素消毒と比較して紫外線消毒の方が高い多様性を示す傾向がみられた。消毒方法を比較した結果、オゾン処理、紫外線処理のいずれも塩素処理に比べて生物の多様性のためには有利になると考えられた。また、塩素の場合、注入率の的確な制御が重要であると思われた。

表－3 付着藻類と底生動物の多様性指数と汚濁指数

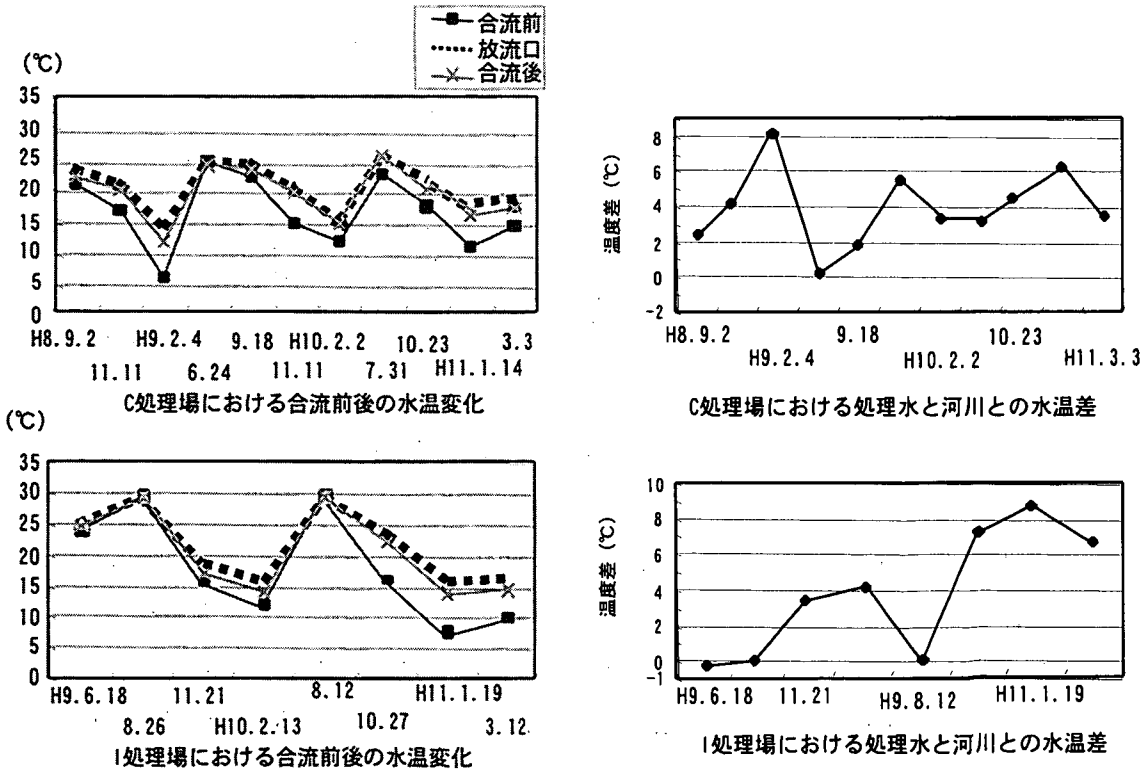
	安定池 (紫外線消毒)	放流口 (塩素消毒)
多様性指数 (付着藻類)	2.5	1.6
多様性指数 (底生動物)	1.8	1.3
汚濁指数 (付着藻類)	2.5	3.5
汚濁指数 (底生動物)	3.2	2.8

3－3 水温

通常、下水処理水は冬でも比較的温かく、水温の変動が小さいことが知られている。そこで、河川水と処理水とでどの程度差があるのかを比較した後、生物の出現個体数と水温変動との関係を調べた。

(1) 河川水と処理水の温度差

C、Iの各処理場において、合流前の河川水、処理水、合流直後の混合水の水温変化を調べた結果を一例として示す。図－14のとおり、河川水の水温が高くなる夏場には処理水と河川水との水温差がほ

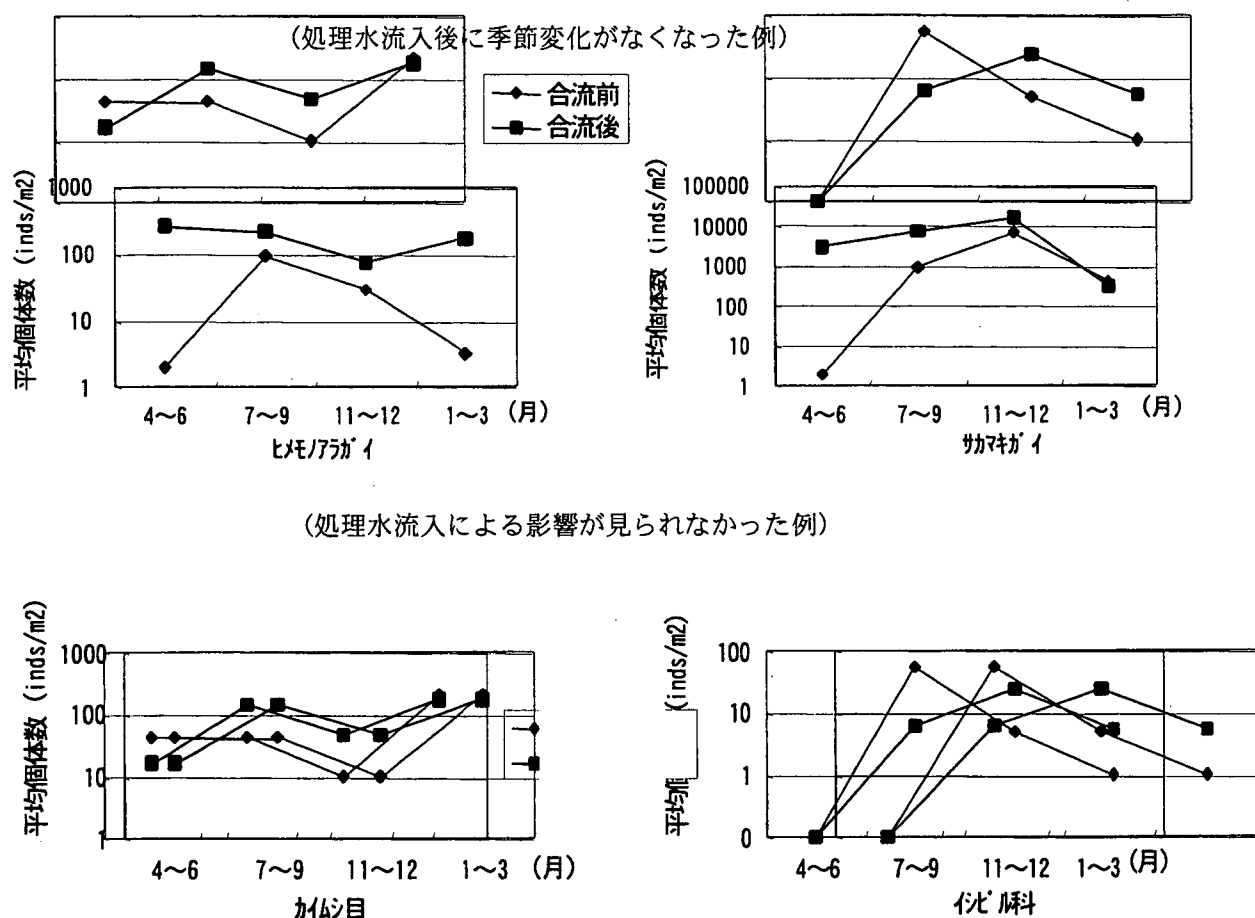


図－14 処理水合流前後の水温、および河川水と処理水との水温差

ば0になるが、河川水の水温が低くなる冬場には5～10℃ほど処理水の方が高くなるため、処理水の放流により特に冬場の水温の低下が抑えられることがわかった。

(2) 出現種の比較

処理水が放流される水域で処理水の合流前、合流後それぞれの地点における出現個体数を、生物種ごとの季節変化について整理した。その結果、処理水流入後に出現個体数に季節変化がなくなる生物と差のない生物とに分類された。それぞれの場合の例を図一15に示す。



図一15 処理水流入前後それぞれの地点における底生動物の季節変化

次に、処理水流入前の地点では夏と冬で大きく変化しているが、処理水流入後は季節変化が小さくなっている種を河川ごとに抽出した。その結果、処理水の流入によって季節変化を失った生物種は、表一4に示すように、本来、夏に多くなる種類、冬に多くなる種類のいずれの場合もみられた。

水温差による影響を緩和するためには、処理水をいったん安定化池などに通水した後放流する、放流先を複数に分散させる対策等が考えられる。

表-4 処理水の流入によって季節変化がみられなくなった種

処理場	処理水流入前の水域では夏に多く、冬に少ないが 処理水流入後の水域では季節変化が無くなった種	処理水流入前の水域では夏に少なく冬に多いが 処理水流入後の水域では季節変化が無くなった種
C	—	ヒメノアラガイ (<i>Bakerlymnaea viridis</i>) サカマキガイ (<i>Physa acuta</i>)
I	<i>Chlorobion</i> (cf. <i>braunii</i>) <i>Ulothrix</i> sp.	エリュスリカ亜科 (<i>Orthocladinae</i>)
B	<i>Oscillatoria</i> sp. <i>Eunotia lunaris</i> <i>Frustulia vulgaris</i> <i>Navicula minima</i> <i>Navicula mutica</i> <i>Navicula subminuscula</i> <i>Nitzschia amphibia</i> <i>Pinnularia braunii</i> <i>Cloniophora plumosa</i>	イトミズ科 (<i>Tubifex</i> sp.) ホソバマダラカゲロウ (<i>Ephemerella denticula</i>) ユスリカ亜科 (<i>Polypedilum</i> sp.) ユスリカ科 (<i>Chironomidae</i>)
F	<i>Navicula symmetrica</i> <i>Navicula ventralis</i> <i>Navicula viridula</i> v. <i>rostellata</i> <i>Schroederia</i> sp.	サカマキガイ (<i>Physa acuta</i>) ツリミズ科 (<i>Lumbricidae</i>)
G	<i>Melosira varians</i> <i>Navicula minima</i> <i>Nitzschia amphibia</i> <i>Nitzschia hantzschiana</i>	サホコカゲロウ (<i>Baetis sahoensis</i>) ヒメビケラ科 (<i>Hydroptilidae</i>)
	付着藻類	底生動物
		付着藻類
		底生動物

3-4 分子アンモニア

下水処理水に含まれる代表的な毒性物質として、重金属、分子アンモニア、亜硝酸等が挙げられるが、このうち分子アンモニアは生物への毒性が高いことが知られている。そこで、分子アンモニアと底生動物の出現状況について整理した。分子アンモニア濃度は、アンモニウム態窒素濃度とpH、水温から計算によって求めた。

図-16に示すように、分子アンモニアが検出されている地点で見られる生物は、イトミミズやユスリカを中心とした強腐水性の種であった。河川における主要な構成生物であるカゲロウやトビケラは、分子アンモニアの濃度が上昇するにつれ、出現しなくなった。処理水中の分子アンモニアを低下させる対策としては、下水処理工程でアンモニアが残らないように硝化をすすめること、放流先河川での光合成によるpHの上昇の抑制等が考えられる。

3-5 物理条件

底生動物は、その生息空間が礫と礫の隙間や泥の中など、限られた条件の空間を必要としている。また、餌となるプランクトンやデトリタスの供給のために流れが

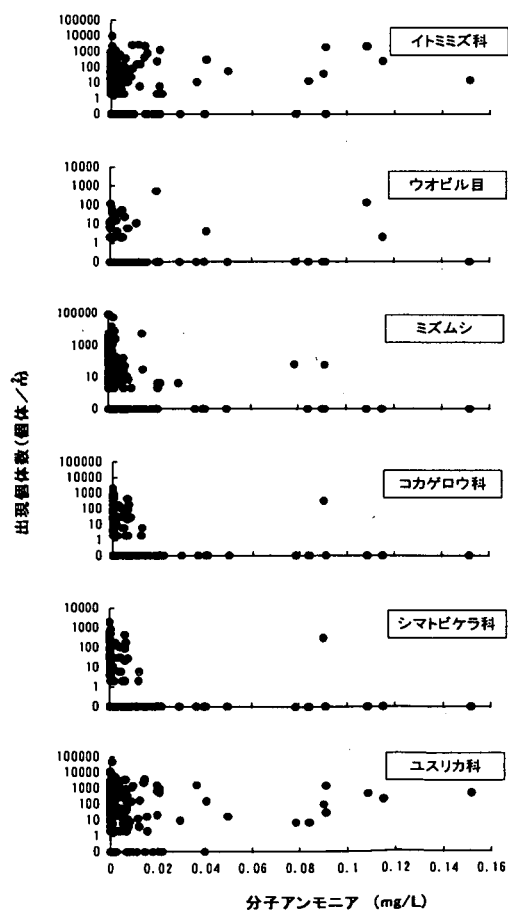


図-16 分子アンモニア濃度と底生動物の関係

必要な場合もあるなど、物理的な条件と生息条件との関わりが深い。そこで、下水処理水を主に受ける都市河川での影響因子として、物理条件の水深・流速および河床材料を取り上げ、若干の検討を行った。

(1) 水深、流速

底生動物の出現が、流速および水深とどのような関係があるのかを、特定の生物種に注目して検討した。清冽な水域に棲む種としてシマトビケラ科を、幅広い水質条件下で生息する種としてミズムシ科を選び、流速、水深の範囲ごとの出現頻度を比較した。出現頻度は、それぞれの地点でシマトビケラまたはミズムシが出現した回数をのべ調査地点数で除して算出した。

図-12に示すように、シマトビケラ科については、出現頻度が大きくなる水深の範囲は明確ではないが、流速は0.6m/s以下に生息に適する領域があると推測された。ミズムシ科については、流速との関係はみられなかったが、水深30～50cmに生息に適した範囲があると推測された。

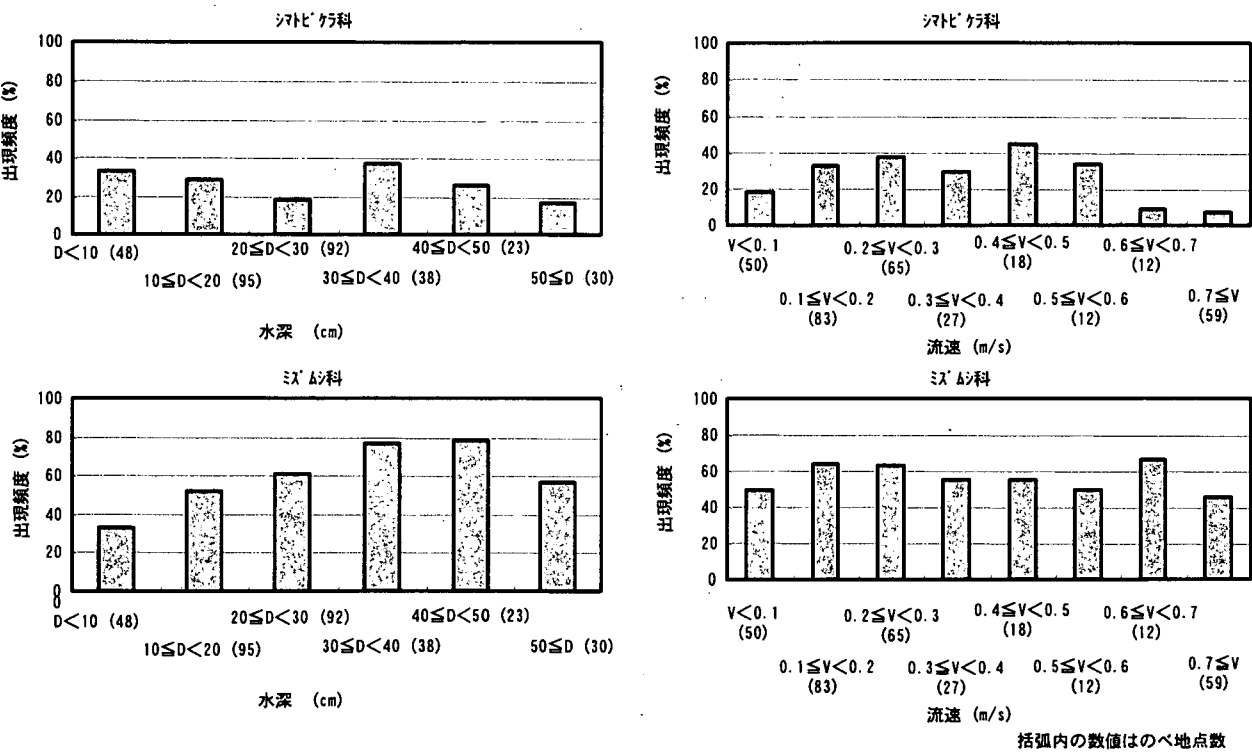


図-17 水理条件と底生動物出現の関係

(2) 河床材料

河床材料を実験的に複数設定してE処理場で調査した結果を示す。処理場放流先のせせらぎ水路において、4種の河床材料で構成する区画を設置し、それぞれの区画で底生動物及び付着藻類についての分析を行った。

実験に用いた素材は、せせらぎ等を設置する際に用いる材料を想定して「レンガ」「大礫（径10～15cm）」「小礫（径2～5cm）」「川砂」の4種を設定した。設置はプラスチック製の網籠（実効面積30×30cm²）に材

料を均一に敷き詰め、それを籠全体が水に浸かり、素材の上を水が流れるように河床に置いた。なお、砂については籠から流出しないよう麻製の土のう袋を内側に敷いた。また、籠は1つの素材につき2個設置し、1つを付着藻類用、もう一つを底生動物用とした。この実験用河床材を設置し、73日経過後に回収して、試料採取、分析を行った。個体数、出現種数及び多様性指数と汚濁指数について計算した結果を図18に示す。

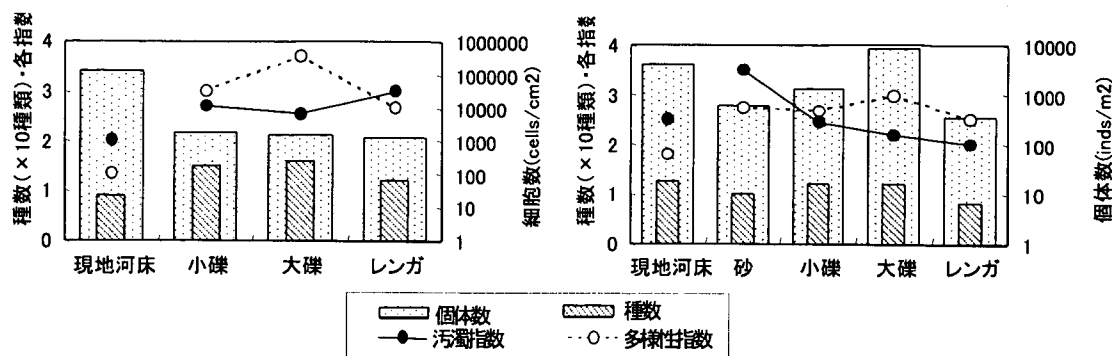


図18 河床材料の違いと付着藻類、底生動物

付着藻類については、砂では出現種数および総細胞数が観察されなかったが、その他の材料については、種類数と多様性指数は、大礫>小礫>レンガの順であった。底生動物については、個体数、種類数および多様性指数ともに大礫が最も高く、次いで小礫が高く、レンガが最も低い値を示した。

4. 生態系にやさしい下水道の促進に向けた手引き書（案）の概要

共同調査等によって得られた下水道と生態系の関係についての成果から、栄養塩類、消毒、水温、アンモニアなどの水質条件や水深・流速、河床材料などの物理条件を改善することが、多様な生物の生息にとって有効な対策になりうると考えられる。このような調査結果等を活用して、生態系にやさしい下水道に取り組むための手順をわかりやすく示す、ということを目的として、学識経験者や行政関係者で構成された生態系にやさしい下水道促進検討委員会により『生態系にやさしい下水道の促進に向けた手引き書（案）』がとりまとめられ、国土交通省下水道部から出版されている。

水環境改善施策に例示されたうちのいくつかは、前項の調査結果と対応している。ここでは、特に生態系にやさしい下水道の内容、整備の手順を説明する。

4-1. 生態系にやさしい下水道の内容

生態系にやさしい下水道とは、地域における生態系の健全性を維持・回復し、自然と人間との豊かなふれあい、共生を確保するため、棲み場の保全や創出、環境学習の拠点づくりとして活用できる下水道である、と定義している。

① 良好な棲み場保全のための“水循環・水環境”を形成する下水道

下水道による放流先の水質改善や流況改善、雨水浸透などが、健全な水循環の形成に向けた下水道の役割としてあげられる。

② 棲み場創出のための“空間”を形成する下水道

生物の棲み場の形成やネットワーク化に向けて、下水道施設空間の利用が有効である。なお、“空間”を形成する下水道の場合、周辺の水辺や緑地などとの連絡や位置関係を考慮すると共に、水量・水質のみならず、河床や護岸構造、植栽なども考慮する。

③ 環境学習の拠点となる下水道

環境学習の拠点として住民の関心を高め、地域に根ざした生態系保全の取組を行うことが必要である。そのため、計画の策定段階から地域住民との連携や調整を行うと共に、整備後の維持管理、さらにはモニタリングなどにおいても積極的に情報交換し、協調を図ることが重要である。

4-2. 整備の手順

下水道の整備にあたっては、図-19のフロー図に示すとおり住民や研究者等の協働を図りながら、①現況特性の把握、②生態系にやさしい下水道の目標設定、③生態系にやさしい下水道の整備計画の策定、④維持管理、⑤事後評価、の手順に沿って進めることとしている。

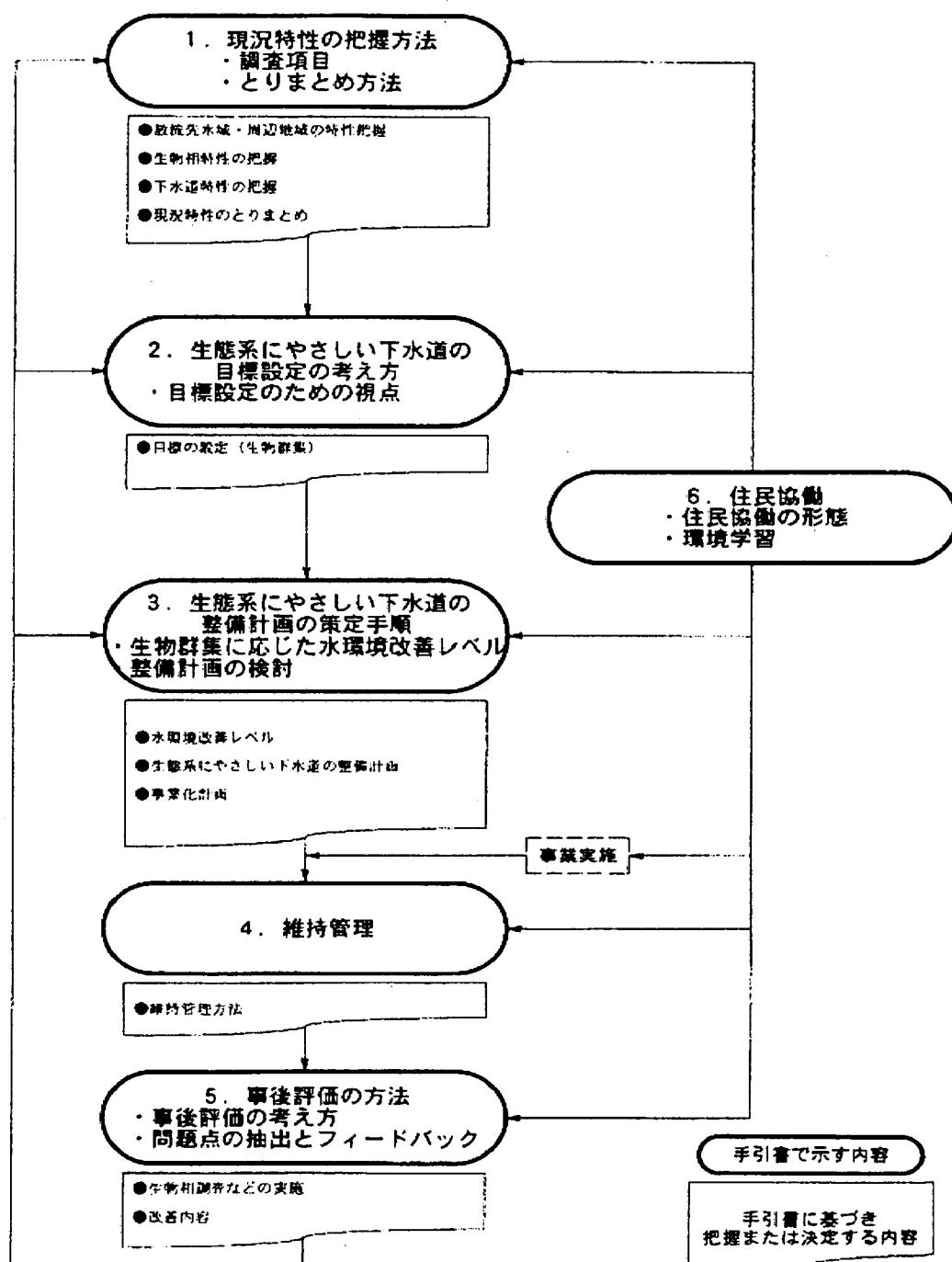


図-19 生態系にやさしい下水道の整備手法の検討手順

① 現況特性の把握

下水道や生態系の現況特性を把握し、生態系にやさしい下水道の目標設定のための基礎情報を得る。放流先水域の特性として、流況、水質、河道特性（河床状況、護岸形態、河道形態）底質について把握する。また、周辺地域の特性として、土地利用（流域面積、土地利用用途別面積など）、社会特性（人口密度など）、地形、植生について把握する。生物相については、放流先水域調査と同じ地点で、付着藻類、底生動物、浮遊生物、魚類、水生植物などを把握する。

また、下水処理場の特性として、処理場の施設諸元、流況、水質などを把握する。

② 生態系にやさしい下水道の目標設定

生態系にやさしい下水道の目標として、保全・創出の対象となる“生物群集”を設定する。

③ 生態系にやさしい下水道の整備計画の策定

目標の生物群集に応じた水環境改善レベルを水質、流況、空間の面から、既往知見に基づき整理する。次に、水環境改善レベルを達成するための施設整備計画を検討する。整備計画は、水質対策（処理水質の改善、処理水質の安定化、処理水の消毒方法の改善）、流況対策（処理水流況への影響緩和、河川・水路の正常流量の確保）、棲み場となる空間の整備に分類して、下水道及び関係部局と協調・連携しながら進めていくことが必要である。下水道が主体となる水環境改善施策を表―5に示す。

表―5 下水道が主体となる水環境改善施策

分 類		主な整備方法
水質対策	処理水質の改善	高度処理、生物膜浄化
	処理水質の安定化	安定池、植生池
	消毒方法の改善	塩素消毒（残留濃度レベルを意識した注入量の制御、安定池などによる脱塩素）、オゾン消毒、紫外線消毒
流況対策	処理水放流による放流先流況への影響緩和	放流先の変更、分散放流、流量の平準化
	河川・水路の維持流量の確保	処理水の導水（水源が枯渇している河川・水路）、雨水の浸透貯留
空間の整備		池（雨水調整池や安定化池などによる止水域の創出）、小川・せせらぎ水路（流水域の創出）、緑化

④ 維持管理

建設が完了し、供用開始された施設の機能を十分発揮させるためには、適切な維持管理が必要である。特に、生態系にやさしい下水道では、住民協働をもとに行うことが望ましいと考えられるため、住民の積極的な参加が得られる維持管理方法を検討する必要がある。

⑤ 事後評価

下水道と生態系の関係についての知見は少ないため、データ蓄積と分析、評価によって、下水道整備へのフィードバックが必要である。具体的には、生物群集、水環境改善レベル、及び下水道特性について整備後の事後調査を実施した後、調査結果に基づき問題点を抽出し、必要に応じて、今後の調査、計画、整備、維持管理面において改善を図っていく。

5. おわりに

本稿では、土木研究所が関わった共同調査、及び検討委員会での成果である『生態系にやさしい下

水道の促進に向けた手引書（案）』の概要を報告した。調査の成果は表－５に示す施策の検討のために有効に使われている。しかし、これまでの現地調査の結果だけから、処理水の水質と生物との関係すべてを明らかにすることは難しいと思われる。今後は、さらなる現地調査の実施や施策の実施による変化の把握を続けることに加え、実験水路による調査や室内実験などもあわせて実施していく必要があると考えられる。

なお、生態系を考慮して整備した実施例に関しては手引書（案）に事例リストが掲載されているが、この他、生態系との共生をはかる下水道のあり方検討委員会編『生態系にやさしい下水をめざして』に写真などの視覚的にわかりやすい事例が紹介されているので、参考にさせていただきたい。

本稿の作成にあたり、土木研究所が河川生態学術研究会 多摩大橋地区において行った調査結果および生態系との共生をはかる下水道のあり方検討会で実施している調査結果を使用した。財団法人下水道新技術推進機構、関係自治体とともに、土木研究所が中心に実施している調査にあたって、協力いただいた関係者の方、および水循環研究グループ水質チームの研究員の方に感謝いたします。

参考文献

- 藤井滋，生活系汚濁源からの負荷と対策、流域マネジメント，技報堂出版，2003
- 河川環境管理財団，栄養塩類濃度が河川水質環境に及ぼす影響に関する研究，2002
- 宮本宣博、玉本博之、田中宏明，下水処理水が水生生物に与える影響の評価，土木技術資料，Vol. 44, No. 7, 64-69, 平成 14 年 7 月
- 笹尾圭哉子、田中宏明、白崎亮、玉本博之，下水処理水が放流先の生物相に与える影響，下水道協会誌，vol. 40, No. 483, 平成 15 年 1 月
- 笹尾圭哉子、白崎亮、田中宏明、玉本博之，下水処理水放流先河川水域に形成される生物相に関する調査研究，第 40 回下水道研究発表会講演集，487-499, 平成 15 年 6 月
- 生態系との共生をはかる下水道のあり方検討会，生態系にやさしい下水道をめざして，技報堂出版，平成 13 年 3 月
- 生態系にやさしい下水道促進検討委員会，生態系にやさしい下水道の促進に向けた手引き書（案），国土交通省都市・地方整備局下水道部 財団法人下水道新技術推進機構，平成 14 年 9 月
- 田中宏明、南山端彦、松原正明、原田新，河川水質と水生生物相との関係把握，土木研究所資料第 3528 号 平成 8 年度下水道関係調査研究年次報告書集，315-322, 平成 9 年 10 月
- 田中宏明、南山端彦、松原正明、原田新，河川水質と水生生物相との関係把握，土木研究所資料第 3606 号 平成 9 年度下水道関係調査研究年次報告書集，277-282, 平成 10 年 10 月
- 田中宏明、高橋明宏、東谷忠、矢古宇靖子，河川水質と水生生物相との関係の把握，土木研究所資料第 3661 号 平成 10 年度下水道関係調査研究年次報告書集，295-300, 平成 11 年 8 月
- 田中宏明、高橋明宏、東谷忠、矢古宇靖子，河川水質と水生生物相との関係の把握，土木研究所資料第 3755 号 平成 11 年度下水道関係調査研究年次報告書集，315-322, 平成 12 年 10 月
- 田中宏明、高橋明宏、東谷忠、矢古宇靖子、斉藤正義，水生生物からみた河川水質の評価に関する調査，国総研資料第 10 号 平成 12 年度下水道関係調査研究年次報告書集，291-292, 平成 13 年 11 月
- 田中宏明、玉本博之、宮本宣博，水生生態系からみた河川水質の評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第 64 号 平成 13 年度下水道関係調査研究年次報告書集，299-300, 平成 14 年 12 月
- 植松龍二、笹尾圭哉子，下水処理水放流先河川水域に形成される生物相に関する調査研究，第 39 回下水道研究発表会講演集，407-409, 平成 14 年 6 月
- USEPA, Nutrient Criteria, 2000

[一般講演]

火山噴火時の対応とその後の土砂災害防止手法

土砂管理研究グループ長 西本晴男

目 次

1. はじめに	109
2. 平成 12 年（2000 年）有珠山噴火時における土砂災害への対応	109
2.1 有珠山土砂災害専門家チームの活動	109
2.2 有珠山土砂災害対策における課題	111
3. 火山噴火時の土砂災害防止に関する手引きについて	111
3.1 噴火に起因した土砂災害防止のための初動対応について（案）	111
3.2 現場技術者のための火山に起因した土砂災害防止手引き（案）：仮称	112
4. 三宅島で実施している現地観測について	115
4.1 三宅島 2000 年噴火とその後の土砂流出状況の概要	115
4.2 現地観測・調査の概要	117
4.3 観測・調査結果	118
4.4 三宅島における調査・観測の今後の展望	121
5. おわりに	122
謝 辞	122
参考文献	122

火山噴火時の対応とその後の土砂災害防止手法

土砂管理研究グループ長 西本 晴男

1. はじめに

我が国は世界でも有数の火山国であり、近年も有珠山(77,00)、三宅島(82,00)、伊豆大島(86)、雲仙岳(91)といった噴火により広域的な土砂災害を被っている。

火山災害による人的被害を軽減するためには、噴火時の初期対応とその後の土砂災害対策を迅速・的確に行う必要がある。そこで、近年、特に 2000 年の有珠山噴火時の対応実態を踏まえ、火山災害時の情報収集・整理手法のあり方について検討を行った。その結果は、主に現場責任者（直轄事務所長、都道府県砂防主管課長等）の初動対応のあり方を示した「噴火に起因した土砂災害防止のための初動対応について（案）」（以下、初動対応手引きと称す）としてとりまとめた。また、実際に土砂災害防止を担当する現場技術者向けに、これまで実施されてきた災害対応の詳細を記し、対策の参照とするため「現場技術者のための火山に起因した土砂災害防止の手引き（案）」（以下、噴火対応手引きと称す）を取りまとめた。今回は、有珠山噴火災害の対応の課題を踏まえて、防災担当機関は噴火時にどのような対応を行うべきかを整理し、前述した手引き案の紹介を行う。また、噴火後に頻発する火山泥流による災害防止を目的として、2000 年三宅島噴火災害後の土石流・泥流発生状況の変化等、土砂管理研究グループが実施している現地観測による解析の中間報告を行う。

2. 平成 12 年（2000 年）有珠山噴火時における土砂災害への対応

2. 1 有珠山土砂災害専門家チームの活動

北海道南西部の内浦湾北側、伊達市、虻田町、壮瞥町にまたがる著名な活火山である有珠山は、2000 年 3 月 27 日より火山性地震が頻発し、その後 3 月 31 日 13 時過ぎ、西山山麓で、23 年振りに噴火が発生した。この火山活動により、伊達市、虻田町、壮瞥町においては、3 月 28 日から自主避難が始まり、3 月 29 日 11 時 10 分には気象庁より緊急火山情報が出された。同日には、「有珠山現地連絡調整会議」が設置され、その後 31 日の噴火を受けて、政府内に「平成 12 年有珠山噴火非常災害対策本部」が、現地には「政府有珠山噴火非常災害現地対策本部」が設置された。

その後、4 月 2 日には、火山泥流、土石流の監視体制を強化し、発生の危険性の変化、対策に必要な基礎調査及び関係各所への情報提供を目的として、建設省（当時）、北海道開発庁（当時）、北海道との連携により、土砂災害防止に関する専門家からなる「有珠山土砂災害専門家チーム」（以下、専門家チームと略す）が結成され、即日、現地へ派遣された。

専門家チームは、4 月 3 日から、ヘリコプターからの目視による火山灰の堆積状況と泥流流出状況や、今後の泥流発生の可能性等について調査を実施し、翌日にはチーム・レポートをまとめ、現地非常災害対策本部へ資料提供を行った。以後、火山周辺の土砂生産域の変化状況、土砂移動現象の実態、砂防施設の機能と効果予測、住宅等の被害範囲・程度、避難場所の危険度調査等、土砂災害に関する様々な調査・検討を実施し、平成 12 年 10 月 27 日までに合計 170 のレポートの公表を行ってきた。公表に関しては、非常災害対策本部への資料提供や記者会見の他、北海道広報誌への要約掲載、北海道開発局ホームページへの掲載等により、情報の周知に努めた。

また、噴火活動に伴う立入り制限区域内における泥流発生危険度調査や、大規模な地殻変動に伴う

泥流発生時の危険範囲の把握に、GPS 搭載自律型無人ヘリコプター（写真-1、2）や、航空機によるレーザー測量の活用（図-1）を図るなど、最新鋭の調査技術を活用し、噴火中の火山における土砂災害防止に関する新たな調査手法への道を開いた。



写真-1 無人ヘリコプター

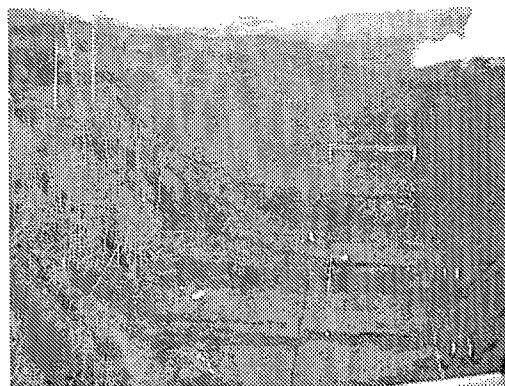
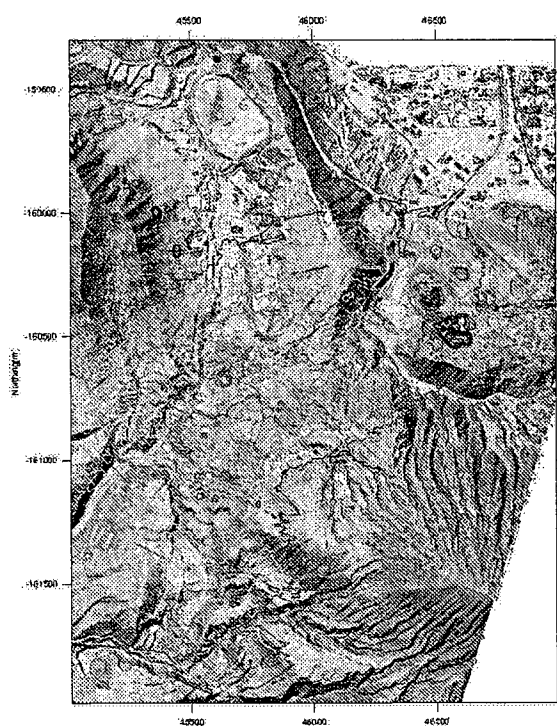
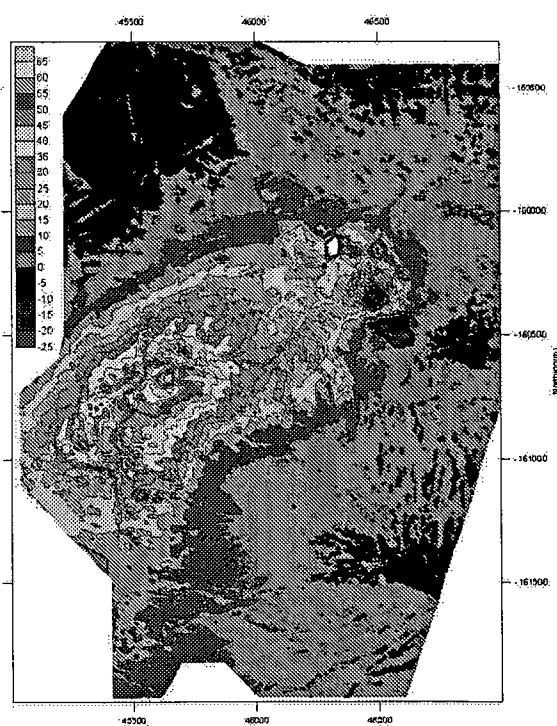


写真-2 無人ヘリコプターから撮影した火口近傍の状況



変化図(1)



変化図(2)

図-1 航空レーザー測量結果

2. 2 有珠山土砂災害対策における課題

以上のように、2000 年有珠山噴火時における土砂災害防止は、専門家チームが主体となり、調査、対応の検討、関係機関への助言といった対策が行われてきたが、いくつかの課題も指摘された。そこで、今後の対策に反映させるため、当時の専門家チームの担当者にヒアリングを実施し、課題の整理を行った。以下に主な課題を挙げる。

- ① 初動体制の立ち上げを如何に迅速にできるかに全てがかかっている。
- ② 初動期には、必要な図面や参考資料も無い状態（所管出張所が立ち入り制限区域となり、資料が持ち出せなかったため）であり、迅速な対応に支障を来した。対策の基本となる重要な図面や資料は、関係機関内で共有すべき。
- ③ 緊急時の初動対応で何をやるか、やらなければならないか不明確な場合は、現場で混乱することが予想される。初動対応事項の手引きの必要性を感じた。
- ④ 溪流周辺の他官庁所管の施設（溪流をまたぐ橋梁諸元、構造、道路幅員等）諸元を把握しておけば、泥流等の土砂移動現象の流動深等、規模の推測に役立つ。
- ⑤ 現地と東京で緊迫感に温度差を生じさせないため、情報の共有化が必要である。
- ⑥ 災害情報を一人に集中させると、その担当者が不在の場合には対応が取れず、初動対応に支障を来す。そのため、情報は必ず担当者全員で共有することが重要である。初動対応時には特に情報の共有化が必要である。

以上のように、初動対応の重要性や情報の収集・伝達・共有化の重要性を指摘する声が多い結果となった。このような実際の災害時の対応に対する課題を踏まえ、特に初動対応の重要性が認識されたことから、初動対応時の対策を明文化する必要を実感し、3. 以下で紹介する各種手引きの作成に至った。

3. 火山噴火時の土砂災害防止に関する手引きについて

土砂管理研究グループでは、以上のような有珠山噴火時の対応の課題を整理し、噴火時に現地対応責任者や現場技術者の対応事項をとりまとめた初動対応手引きを作成（公表は国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター）した。また、噴火活動中に現場担当者が行う対策事項や対策技術の内容を網羅した噴火対応手引きを現在作成中であり、近々の公表を予定している。これらの内容を以下に紹介する。

3. 1 噴火に起因した土砂災害防止のための初動対応について（案）¹⁾

本手引きは、2000 年有珠山噴火時における課題を踏まえて、火山噴火の予兆が現れたときに、直轄事務所や都道府県砂防主管課において、対策の意志決定を行う現場責任者（所長・課長級）が、土砂災害防止のため緊急に対応すべき初動対応事項と、初動対応を円滑かつ効果的に行うため、静穏期に備えるべき内容を整理したものである。

特徴としては、非常時でも容易に活用できるように、6 ページとコンパクトにし、対応事項をチェックリスト的に箇条書きにしている。しかし、内容については、有珠山噴火時の災害対応の教訓を踏まえ、広範囲に及び必要な項目をまとめている。

構成については、1. 火山噴火の予兆が現れた時点で最初に行うべき初動対応、2. 情報収集・提

供に関連する初動対応、3. 緊急調査・対策に関連する初動対応、4. 静穏期に備えるべき対応、という構成になっている（図・2）。また、初動対応は、気象庁より臨時火山情報が発表された時点进行想定している。

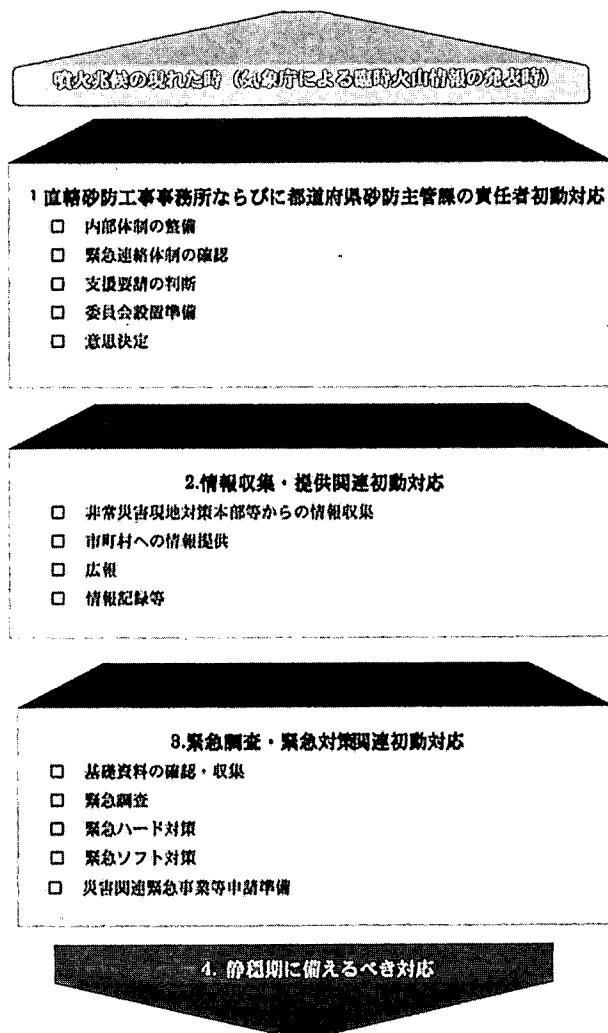
初動対応手引きは、国土技術政策総合研究所のホームページの技術情報（<http://www.nilim.go.jp/>）に掲載されているため、いつでも、誰でも参照が可能である。災害対策の成否を左右する初動対応を的確に行えるよう、各現場における災害対策計画や地域防災計画と合わせて、災害対策に必要な参考資料として活用されることを期待している。

3. 2 現場技術者のための火山に起因した土砂災害防止手引き（案）；仮称²⁾

本手引きは、直轄事務所や都道府県砂防主管課の現場技術者を対象として、火山噴火に起因する土砂災害防止・軽減を図るため、対策検討時の詳細な参考資料となることを目指している。本手引きの作成に当たっては、2000 年有珠山噴火時、1998 年岩手火山、1991 年雲仙普賢岳における現地での担当者からのヒアリング結果を参考としたほか、災害対策時の調査報告書や最新の火山噴火時の対応技術等を盛り込み、対策技術については、具体的な説明を心がけ実践的な内容となるよう考慮している。以下に、ヒアリング結果から得られた主な課題を記す。

- ① 噴火当初は具体的な緊急対策実施へのプロセス等が体系づけられていなかった。また、現状把握で精一杯だった。
- ② 有珠山や雲仙普賢岳のように、噴火が始まってからは既存砂防堰堤等の除石や、直接影響が及んでいない流域の対策が精一杯であり、現象が発生した流域の新たな施設設置等の対策は、立ち入り規制等が行われるため実施が困難である。
- ③ 噴火予兆が始まってから瞬時に噴火する事例や、予兆が長引く場合もあるが、予兆が現れた期間に、いかに具体的な緊急対策を実施するかが、その後の被害軽減の成否を担っている。
- ④ 噴火前の施設整備については、地元住民の合意形成が得られない可能性がある。

以上のヒアリング結果からも分かるように、実際の災害対応の教訓を踏まえた噴火時に実施すべき具体的な対策を体系づける資料が必要であったことが、本手引き作成の背景となっている。また、噴



図・2 初動対応手引き案の構成

火予兆が現れた段階での緊急対策の重要であることが分かる。そのため、静穏期には、緊急対策の実施内容、緊急除石が可能なストックヤードや資材搬路の確保、対策に必要な用地の砂防指定地化や用地買収等、初動対応が迅速に行えるような体制の整備が必要と考えられる。また、静穏期に整備する施設整備としては、最初から圧迫感のある大規模な構造物を設置するよりは、緊急時には機能の追加や施設規模の拡大・増強等、基本施設の一部を緊急対策として柔軟に実施できる基本構造とすることも有効と考えられる。また、短期間に材料の手配と施工が可能な新工法の開発も今後、検討されるべきであろう。

以上のようなヒアリング結果等を踏まえて、本手引き案の内容については、次のような方向性で作成するように考慮し、その構成を図-3に示す。

- ① 静穏期、予兆期、活動期、沈静期という火山活動の状況（フェーズ）に応じて、それぞれに、現場担当者の心構えと実施すべき対策を記述する。特に、ヒアリング結果にあるように、初動体制が重要であるため、初動体制を効果的に実施するための対策手段、それに備えて平常時に実施すべき調査等を整理する。また、実際の噴火では当初想定していないような現象が発生することもあると考えられるため、土石流、火山泥流、溶岩流、火砕流等の現象毎にも対策技術等を記述する。
- ② これまで緊急施工で実施されてきたハード対策の種類、無人化施工の内容、監視技術の内容、危険範囲を推測するシミュレーション手法及びパラメータの設定手法等、対策に必要な技術等を網羅し、それらの技術について、内容、活用方法、適用限界等について具体的に記述することとする。

以上のような方針で、取りまとめた各フェーズにおける対応策の項目を図-4に示す。

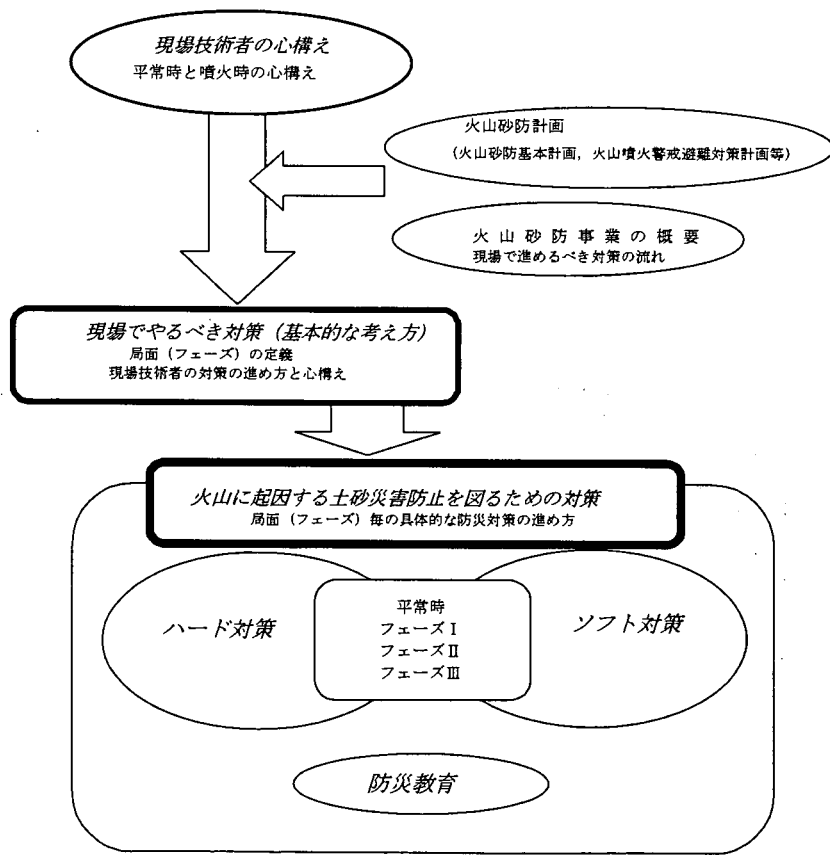


図-3 現場対応手引き案の構成

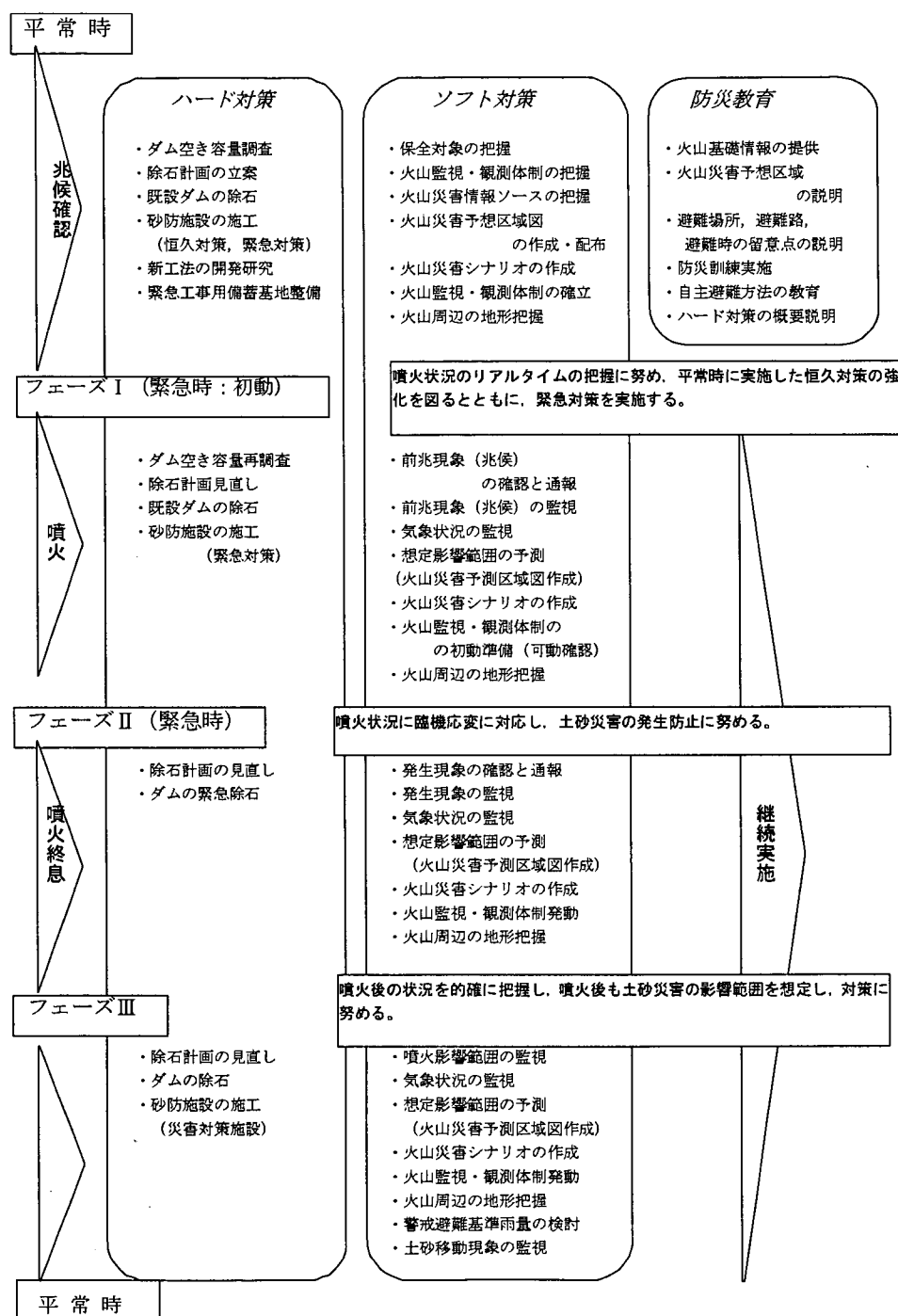


図-4 各フェーズでの対応策

4. 三宅島で実施している現地観測について

噴火災害は噴火活動の終了と同時に終わるわけではない。前章では、2000年3月の有珠山噴火災害へのリアルタイムの初期対応についてその実態を紹介し、そこから得られた知見や教訓をもとに取りまとめた「火山に起因した土砂災害防止手引き（案）」の内容について報告した。本章では、噴火活動が終了した後も引き続き警戒を要する降雨に伴う火山泥流による災害の防止を目的とした取り組みについて報告する。

降雨に伴う火山泥流（以下、単に泥流と呼ぶ）は、火山噴火を誘因とするが、降雨に起因する現象であることから、災害防止のための対策立案には通常の土石流危険渓流に対する考え方が準用される。すなわち、ハード対策を行うためには「土石流対策指針（案）」を適用し、ソフト対策を行うためには「土砂災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針（案）」等を適用する。しかし、火山噴火の影響を受けた渓流では、流域の特性がこれらの指針が想定する通常の土石流危険渓流とは大きく異なっているため、指針の適用にあたってはその特性を十分に考慮することが重要である。しかし、いかにして火山噴火の影響を考慮するかは大きな技術的課題として残っており、未だに完全に解決されてはいない。

土砂管理研究グループ火山・土石流チームでは、火山噴火が流域に及した影響を評価し、その結果得られた流域特性の変化を泥流の発生規模や発生危険雨量の推定に役立てる手法の開発を行っている。同チームでは、火山噴火が流域特性に及ぼす影響を実証的に明らかにするために、2000年に噴火した三宅島において現地観測および調査を実施中である。以下では、この現地観測および調査の結果、これまでに得られた知見について中間的に報告する。

4. 1 三宅島 2000 年噴火とその後の土砂流出状況の概要

4. 1. 1 三宅島 2000 年噴火の概要

三宅島雄山は、伊豆諸島の三宅島にある富士火山帯に属する活火山であり、側火口を数多く有する成層火山の形状を呈している。近年は、1940年、1962年、1983年と、ほぼ20年おきに噴火を繰り返してきた。今回の噴火活動は、最後の噴火から17年が経過した2000年6月26日に始まった。

2000年の噴火活動は、6月26日の海底噴火によって始まり、7月8日には山頂噴火が起こった。東京大学地震研究所がとりまとめたところによると、この噴火から同年8月末までの間、火山灰噴出を伴う主要な噴火は表-1に示すとおり7回発生し、火山灰の噴出を伴う一連の噴火によって三宅島島内に堆積した火山灰の総量は、3,300万トンであった³⁾。

その後、顕著な火山灰の噴出を伴う噴火は起きていないが、火口からは大量のSO₂を含む火山ガスが放出され続けており、全島避難した住民の帰島を現在も阻んでいる。そのほか、2000年噴火の特徴として、山頂部のカルデラが急速に拡大していったことが挙げられる。長谷川ほか(2001)によれば、7月8日以降8月2日までの間に急速に成長し、2000年9月末の時点で、最大直径1640m、最大陥没深550m、陥没量6億m³の規模に成長した⁴⁾。

一連の火山噴火による全島の火山灰堆積厚分布が大学合同観測班地質グループ・地質調査所によって調査

表-1 2000年三宅島噴火における主要な噴火イベントにおける噴出量³⁾

Date of eruption	Amount of ash deposit in Miyakejima (ton)
2000/7/8	990,000
2000/7/14-15	11,000,000
2000/8/10	1,500,000
2000/8/13	310,000
2000/8/14	18,000
2000/8/18	15,000,000
2000/8/29	5,300,000

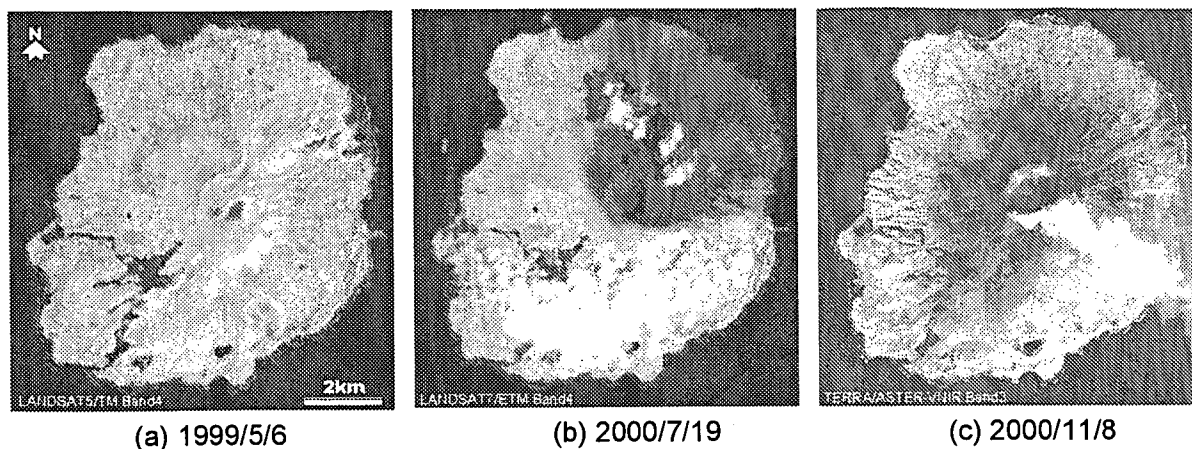


図-5 三宅島の衛星画像，(a)噴火前，(b)噴火開始 11 日後，(c)主要な一連の噴火後

されている。2000 年 7 月～9 月の噴火前、噴火中、そして、主たる噴火活動の終了後の衛星画像を図-5 に示す。この画像は、植生の活性度をよく表すと考えられている近赤外バンドデータの画像である。暗いほど近赤外線の反射率が低いことを意味している。したがって、火山灰が堆積した範囲は、この図では暗い範囲として見えることになる。衛星画像によると、7 月の噴火によって、当初、島の北東部を中心に火山灰が堆積していたが、それ以降の噴火によって火山灰堆積域が島内全域に拡大したことがわかる。

4. 1. 2 その後の土砂流出状況の概要

2000 年 7 月 26 日に降った、総雨量 48mm，最大時間雨量 26mm(雨量観測点：三宅村役場，7/26 6:00～14:00)の雨によって、それ以前の噴火ですでに火山灰が堆積していた雄山の北東および東斜面を流域にもつ溪流で、顕著に土砂が流出した。流出した土砂の多くは海に流失していたため、その流出量は不明である。その後、引き続き 8 月 18 日と 29 日に雄山の噴火があり、三宅島の全方位の斜面に火

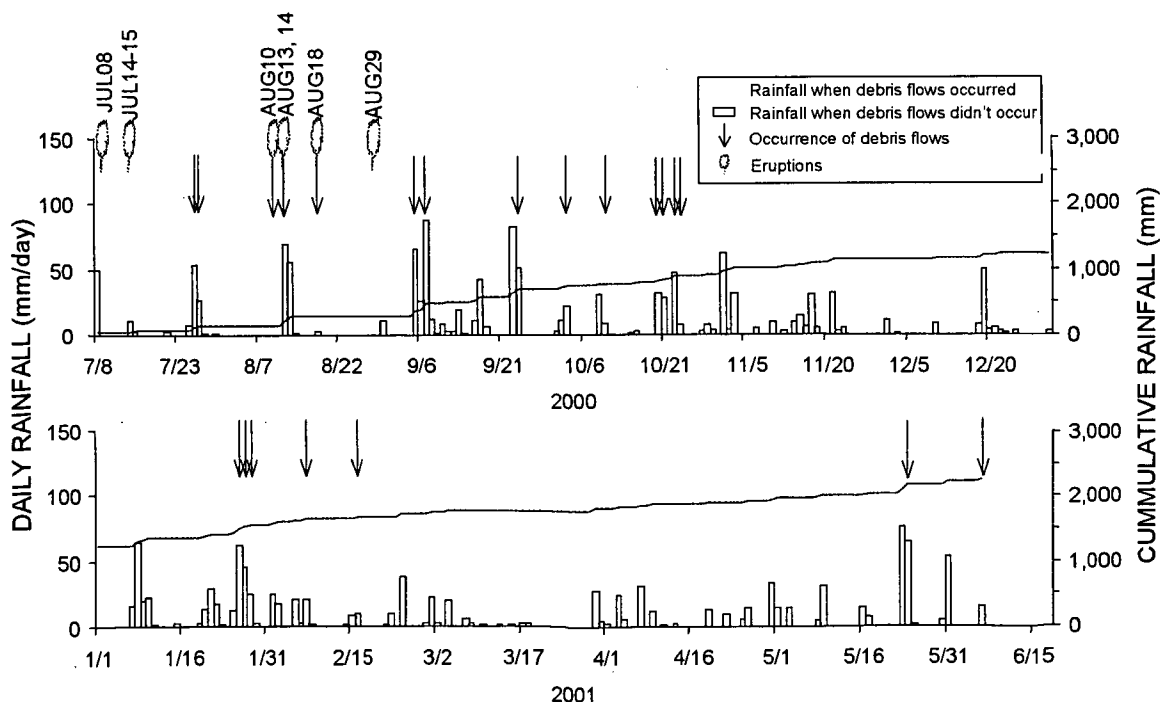


図-6 三宅島における降雨量と泥流発生状況の推移(噴火後～2001 年 6 月)

ほどではない溪流（立根沢）の中流部と溪流出口に、泥流観測カメラを設置し（図-8）、2002年5月から降雨時の流出状況の観測を開始した。観測カメラはカメラ本体・コントロールユニット・ソーラーパネル・バッテリーで構成されており、指定した時間ごとに自動的にビデオテープが終了するまで撮影を繰り返す仕組みに

なっている。観測カメラはほぼ1ヶ月毎に動作点検・撮影日時設定確認を行い、そのたびにビデオテープを回収・交換した。照明施設は設置されていないため、夜間の流出は記録できない。

流出が撮影された場合、その水位から通水断面積・流速を求め、これらを乗じて流量を算出した。通水断面積は、あらかじめ流下断面を測量し、水位と通水断面積の関係を求め

ておいた。流速は、マニング式により計算した。マニングの粗度係数は、実際の流出を現地で観測し、流速・水深を測定して逆算して求めておいた。

土砂流出については、現地で流出に遭遇したときの観測データ、撮影されたビデオテープの映像、土砂流出の顕著な立根沢については渓床の定点写真撮影を行い、その変動の概要を解析した。

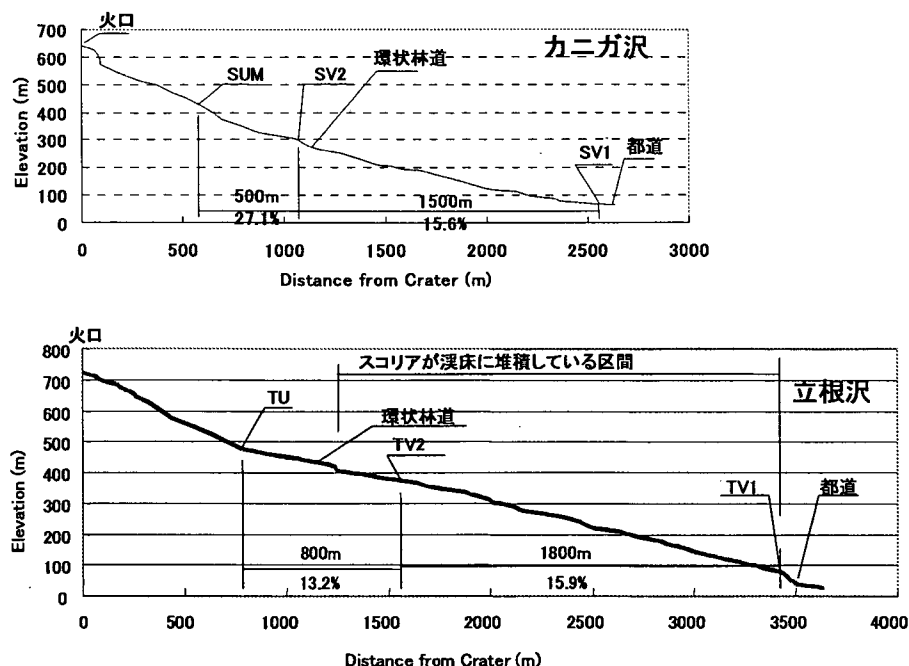


図-8 カニガ沢と立根沢の主流路の縦断図

4. 3 観測・調査結果

4. 3. 1 火山灰堆積斜面からの降雨流出

計測機器のトラブルや、大量の土砂流出のため、欠測となることがしばしばあった。図-9に、観測の結果得られた各観測斜面におけるハイエート・ハイドログラフの一例を示す。TLを除くどの斜面においても、流出は降雨に即応して発生し、降雨終了とともに速やかに終了していることが分かる。このような応答の速い流出は地表流による流出と考えられる。また、前述の通り本研究の観測斜面は、透水性の悪い細粒火山灰によって表面が覆われている。最上層に難透水性土層が堆積している場合には、側方浸透・復帰流による飽和地表流が発生していることは考え難く、火山灰堆積物の浸透能を超過した雨水（浸透余剰水）が地表面を流下する Horton 地表流が発生しているものと考えられる。

2002年9月7日、27日、30日の降雨流出事例における各観測斜面における流出率を求め、表-4に示した。流出率は、総流出高を一連の降雨（無降雨時間6時間で区切られた降雨）による総雨量で除すことによって求めた。6箇所の観測斜面で得られた観測結果によると、流出率が高いグループと低いグループの大きく二つのグループに分けられることが分かった。すなわち、SU、SUM、SLM、TUの4斜面ではほぼ37%～80%という高い流出率を示している。一方、SLでは、3～5%と際立って少なく、TLで

は流出率はゼロである。

全ての観測斜面は、厚い薄いの違いはあったが、火山灰で全面が覆われていた。しかし、図-9 等に示すように、降雨流出には大きな違いが生じた。降雨流出は、SU, SUM, SLM, TU で多く、SL では少なく、そして TL では全く観測されなかった。火山灰堆積厚という点で整理すると、15cm 以上の堆積厚を有する斜面では流出が多いが、それ以下の斜面では流出が少ないということが出来る(図-10)。火山灰堆積厚と降雨流出の因果関係については現時点では不明であるが、火山灰が厚く堆積している斜面ほど、植生被害の程度が大きい(表-3 参照)ことから、植生の被害状況の違いが流出

表-4 観測斜面における流出率

Name of Slope	Date	Total Rainfall (mm)	Total Runoff (mm)	Runoff Ratio
SU	2002/9/7	39.7	20.0	50%
	2002/9/27	103.9	56.1	54%
	2002/9/30	203.3	77.3	38%
SUM	2002/9/7	37.9	30.1	80%
	2002/9/27	-	-	-
	2002/9/30	-	-	-
SLM	2002/9/7	34.4	15.0	44%
	2002/9/27	80.3	44.1	55%
	2002/9/30	203.2	78.4	39%
SL	2002/9/7	29.3	0.8	3%
	2002/9/27	86.8	4.0	5%
	2002/9/30	166.6	6.6	4%
TU	2002/9/7	21.0	11.0	52%
	2002/9/27	90.9	35.7	39%
	2002/9/30	122.1	45.5	37%
TL	2002/9/7	24.8	0	0%
	2002/9/27	83.8	0	0%
	2002/9/30	115.1	0	0%

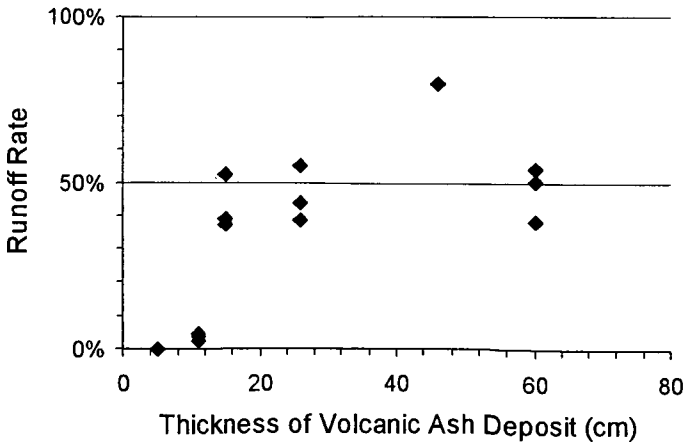


図-10 火山灰堆積厚による流出率の違い

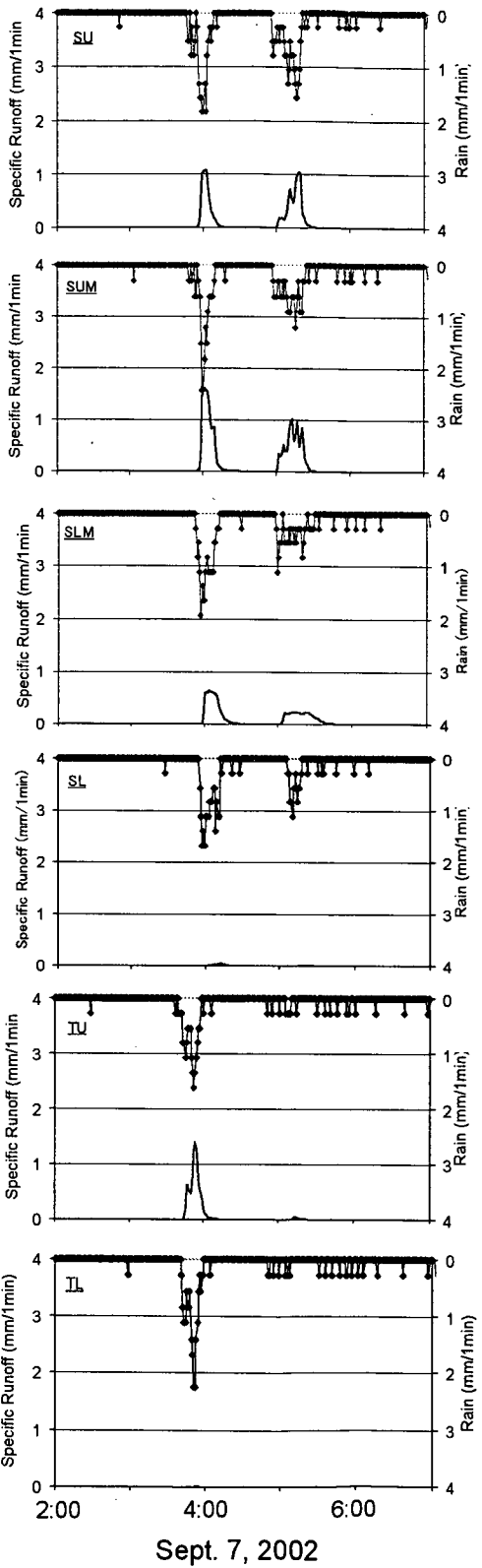


図-9 各観測斜面におけるハイト・ハイドログラフの一例 (2002 年 9 月 7 日)

の差となって現れている可能性もある。この点については、今後の重要な研究課題としたい。

4. 3. 2 ガリーにおける水と土砂の流出特性

(1) 降雨流出特性

火山ガス・酸性雨による影響のためか機材の不調が多く、また特に中流部のカメラにおいては、霧の発生がしばしば撮影されたビデオテープの解析を困難にした。今年度取得できたデータを分析し、流域内の降雨観測点での降雨強度のピークと、ビデオテープから判読された流出のピークの遅れ時間を調べた。その結果を図-11 に示す。図

-11 では、カニガ沢、立根沢の最上流端からビデオ観測点までの直線距離を横軸としている。この図によると、カニガ沢では、沢出口でも、流出ピークの降雨ピークからの遅れ時間は、概ね1時間以内であることが分かる。

一方、立根沢では、上流側の観測点での遅れ時間は、カニガ沢とほぼ同等である。これは、両流域の上流域斜面(SU, TU)における降雨流出観測結果(図-9 参照)が、ほぼ同様な傾向を示していることから妥当な結果であるといえる。一方、下流端での遅れ時間が、上流端からの距離を考慮しても特別に長い。

以上、カニガ沢では速やかに下流端まで流出し、立根沢では、中流部まではカニガ沢と同様な流出傾向を示すものの、下流端では、大きくことなっていることがわかった。この違いの原因は、両溪流の中流域から河口までの溪床の状態が大きくことなっていることにあるものと考えられる。すなわち、写真-3 に示すように、カニガ沢では、上流部から下流端まで、ほぼ連続的に溪床に溶岩が露出し、水が速やかに流下し易い状態にあるといえる。一方、立根沢の中流部から河口にかけての区間の溪床には、後述するが、大量のスコリアが堆積している(写真-4 参照)。このスコリア層を通過するのに、時間を要しているものと考えられるが、あくまで仮説に過ぎない。今後の重要な検証課題である。

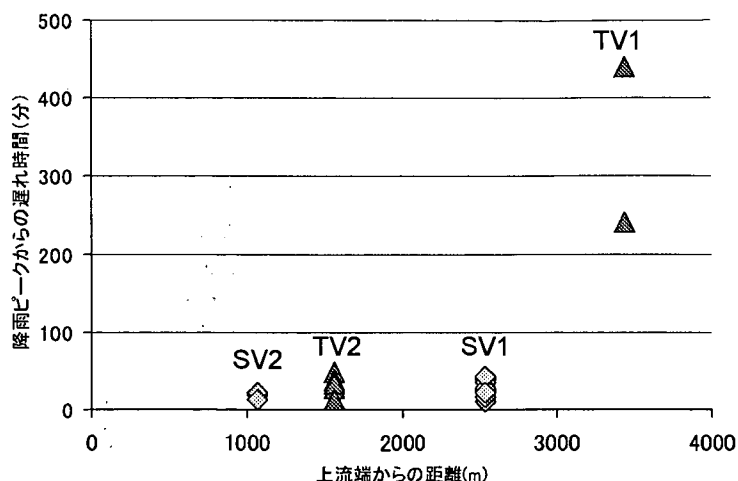


図-11 カニガ沢、立根沢における流出ピークの遅れ時間

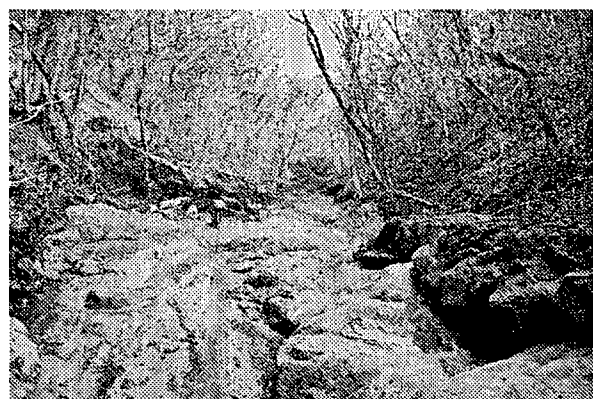


写真-3 カニガ沢の溪床に露出した溶岩

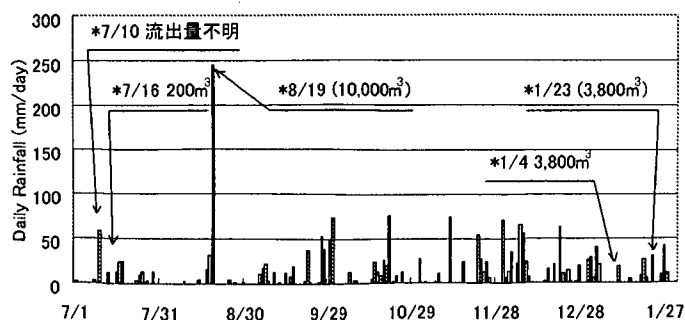


図-12 日雨量とスコリア流出
(2002年7月～2003年1月)

(2) 土砂流出特性

現地で流出を目撃し、泥流観測カメラで流出状況を観察した限りでは、観測期間中のカニガ沢の流出にはほとんど土砂が含まれていなかったように見えた。2002年3月以降の主な出水後に現地踏査を行った際にも、顕著な土砂流出の痕跡は一度も確認されなかった。

一方、立根沢では、降雨後スコリアが渓流出口の砂防ダム工事現場に徐々に流出し工事の障害とな

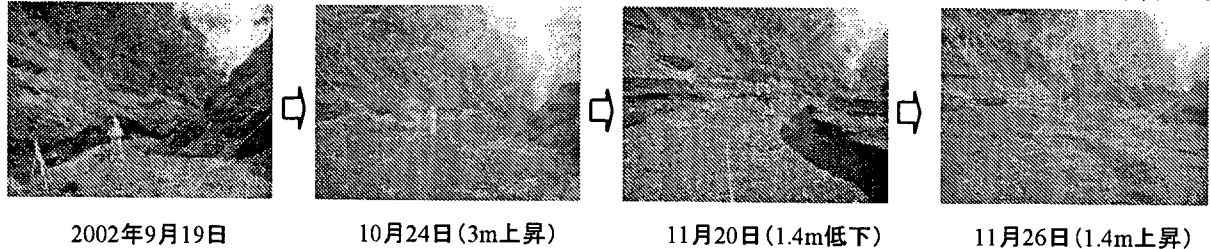


写真-4 立根沢出口から上流 300m 地点での溪床変動状況（上流から下流に向かって撮影）

っている。以下、立根沢におけるスコリア流出についてこれまでの調査結果を示す。

2002年7月1日から2003年1月31日までの日雨量(TU)と立根沢出口の砂防堰堤工事現場に流出したスコリア量の関係を、図-12に示した。この7ヶ月間に立根沢出口にスコリアが流出したのは5回である。図中には流出発生日と流出量を示した。図中()内の数字は、工事従事者の証言に基づく推定流出量である。

日雨量と流出量の間には正の相関が見られるようだが、流出の発生した雨量より大きな日雨量が記録されたにも拘わらず、流出が発生しなかった事例も多い。

7ヶ月の観測期間中、渓流出口における流出は5回であったが、流出がなかった期間においても流域内での土砂移動は顕著であった。写真-4は出口から300m上流地点で、上流から下流に向かって2002年9月19日、10月24日、11月20日、11月26日に撮影したものである。9月19日から10月24日の間に溪床は約3m上昇、11月20日に1.4m低下、26日には1.4m上昇し、この期間の雨量はそれぞれ445mm、149mm、121mmであった。期間中、出口でスコリアの流出は認められなかったが、立根沢では降雨の度にこのような河床変動が繰り返されている。また、新規の溪岸侵食の進行、崩壊の発生もあり、新たなスコリアがさらに溪床に供給されている。

2002年の観測期間中に、現場でスコリアの流動状況を肉眼で観察する機会があった。その観察結果によると、スコリア先頭部が20m下流へ移動するのに30分を要した。表流水の流れに伴い、堆積と侵食を繰り返しながらではあるが、その平均移動速度は約1cm/sと計算できる。移動区間の溪床勾配(スコリア流出後)は 10° であった。一般的に知られている土石流の流下速度⁵⁾と比較し非常に遅く、またその流出形態は異なっていた。

4. 4 三宅島における調査・観測の今後の展望

これまでの観測の結果、2000年に噴火した三宅島において、火山灰堆積厚による斜面からの降雨流出の違い等、火山噴火後の泥流対策を立案する際に考慮すべき重要な特性がいくつか明らかになりつつある。しかし、依然として大量の火山ガスが放出されている等、現地観測条件が厳しいため、平成14年度はデータの欠測が多く、必要なデータが断片的にしか得られなかった。平成15年度も引き続き三宅島において現地観測を継続し、火山噴火が流域特性に及ぼす影響を実証的に明らかにしてゆきたい。

5. おわりに

以上、これまで発生した火山噴火の教訓を踏まえた対策の方向性を示し、それらを明文化した手引きの内容の紹介、火山噴火に起因する土砂災害を防止するため三宅島で当グループが実施している観測・調査などの取り組みを紹介した。今後も火山噴火時の対応について、火山泥流や土石流といった土砂移動現象の解明のみではなく、現場が実施する具体的な災害対策のあり方についても、検討を行い、火山災害対策の高度化に努めていきたいと考えている。その一環として、本日紹介した手引きについても、災害対応訓練等で参考にして頂き、その内容についてご意見を頂けると幸いである。現場のみなさんの声を反映させ、さらに精度の高いものとしていきたい。

謝辞

三宅島における現地観測および調査を行うにあたり、東京都三宅支庁には、資料を提供していただくとともに、現地観測を行う上で諸々の便宜を提供いただいた。また、三宅村には、現地観測用地を貸与していただいた。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター：「噴火に起因した土砂災害防止のための初動対応について（案）」、2001.9
- 2) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ：「現場技術者のための火山に起因した土砂災害防止手引き（案）」、印刷中
- 3) 東京大学地震研究所：2000年の主要な噴火の噴出量，第90回火山噴火予知連絡会資料，資料番号30、2001.10
- 4) 長谷川裕之，村上亮，政春尋志，松尾馨，小荒井衛：三宅島山頂の陥没地形の計測，国土地理院時報、No.95、pp.121-128、2001
- 5) 池谷浩：土石流の分類，土木技術資料、Vol.20、No.3、pp.150-155、1978