

社会環境工学研究連絡委員会
地盤環境工学専門委員会報告

地盤環境工学の展開と連携に向けて

平成 17 年 6 月 23 日

日本学術会議
社会環境工学研究連絡委員会
地盤環境工学専門委員会

この報告は、第19期日本学術会議社会環境工学研究連絡委員会地盤環境工学専門委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

委員会等構成委員リスト

第19期社会環境工学研究連絡委員会 地盤環境工学専門委員会

委員長 日下部 治（東京工業大学大学院理工学研究科教授）

幹事 東畑 郁生（東京大学大学院工学系研究科教授）

風間 基樹（東北大学大学院工学研究科教授）

委員 落合 英俊（九州大学大学院工学研究院教授）

加倉井正昭（竹中工務店技術研究所副所長）

木村 孟（第5部会員，大学評価・学位授与機構長）

田村 武（京都大学大学院工学研究科教授）

三木 博史（独立行政法人土木研究所技術推進本部長）

宮崎 毅（東京大学大学院農学生命科学研究科教授）

オブザーバー協力

寺師 昌明（日建設計中瀬土質研究所所長）

会議開催記録

第19期社会環境工学研究連絡委員会 地盤環境工学専門委員会

第1回委員会：平成15年12月3日

第2回委員会：平成16年2月27日

第3回委員会：平成16年7月23日

第4回委員会：平成16年10月21日

第5回委員会：平成16年12月9日

第6回委員会：平成17年2月4日

第7回委員会：平成17年3月30日

第8回委員会：平成17年4月28日

要 旨

1 報告の名称

「地盤環境工学の展開と連携に向けて」

2 報告の内容

(1) 作成の背景

日本学術会議は、平成14年9月に21世紀における科学的学問展開の方向性を示した中間報告書「日本の計画 (Japan Perspective)」を提案した。この報告書では、20世紀における科学技術の発展と科学者の責任を述べ、研究者は自らの研究成果が人類社会に与える影響をこれまで以上に慎重に考慮し、研究活動を行う責任を持たなければならないことを述べている。また、21世紀に直面する人類の問題群を述べ、既存の価値観を見直す必要性が強調されている。第19期地盤環境工学専門委員会では、この「日本の計画」の視点に立って、地盤環境工学が21世紀において主体的に貢献しうる学問領域の展開の方向性と課題解決に必要な他分野との連携を議論した。

(2) 現状及び問題点

第17期の地盤環境工学専門委員会は、新たな工学領域として環境の構成要素としての「地盤」の重要性を認識した上で、これに関わる学問領域として「地盤環境工学」の創設を提言した。従来の力学を基盤とした地盤工学に、土壌科学、微生物学、化学、化学工学、生態環境工学、毒物学、等を援用統合するとともに、社会科学、人文科学とも広く連携することを提言した。その一方、第18期における現状認識調査では、我が国における地盤環境工学の研究、教育、社会的認知は、いずれも欧米に比較して遅れていると意識されていることが明らかとされた。第18期では、人材育成の観点から改善策を議論し、高等教育機関における新人教育に加えて、社会人の継続教育による人材の再教育、あるいは人材の流動化の方策等が提言された。

21世紀初頭の現在、循環型社会の構築、安心・安全で快適な社会の構築、社会資本ストックのアセットマネジメントなどが求められている社会情勢の中で、「地盤」に関わる環境問題、すなわち廃棄物処理・防災・土壌汚染・地下水汚染などの諸問題は社会問題として顕在化し、その対策の成否は人類の将来展望を左右する問題となっている。これらは、大きくは「日本の計画」で指摘されている人類的課題としての「行き詰まり問題」の一側面と捉えることができる。地盤環境工学は、地球規模の地盤環境の保全と継続的な利用を目指し、必要な新しい社会技術を開発することに貢献することが期待されている。そのためには、地盤環境工学は他分野とこれまで以上に連携を強化することが必要である。

(3) 提言の内容

社会問題として顕在化している「地盤」に関わる環境問題を解決するため、地盤環境工学の展開の方向性として、①社会技術重視の展開、②環境重視の展開、の二つを提示し、それぞれの方向性に対して地盤環境工学が具体的に貢献しうる課題を抽出するとともに、その展開のシナリオを示し、それらの課題を解決するために必要となる具体的な他分野との連携内容を示している。そして、工学分野に加えて人文・社会科学分野、環境科学分野、情報科学分野など、多くの専門分野を連携・融合した総合科学技術としての「環境社会技術」の学問領域の展開を進め、地盤と生物(地盤生物学)・地盤と農作物(地盤生物生産学)・地盤と化学物質(地盤化学)の相互作用に関わる研究と学問分野の創成を生物・農物・農業・化学分野と連携して推進すべきことを提言している。最後に、次世代廃棄物処分を担う地盤環境工学の展開を述べ、都市再生のための空間資源として廃棄物埋立処分場を生活・産業空間として、積極的に有効利用するための実証的技術開発、及び社会に認知されるための社会学的方法論の構築、ビジネスとして成立するための財政的検討など、多様な分野との協力・連携を推進すべきであることを強調している。以上の論点から7項目の提言を行っている。

目 次

はじめに	1
第1章 地盤環境工学専門委員会の第18期までの活動の総括	2
1.1 環境の構成要素としての地盤の重要性	2
1.2 地盤環境工学に関わる委員会活動	2
1.3 地盤環境工学の定義, 役割と社会的位置づけ	3
1.4 地盤に関わる学協会の活動	5
第2章 地盤環境工学の社会技術重視の展開	8
2.1 社会技術重視の展開に関わる課題とその必要性	8
2.1.1 循環型社会の構築に貢献する課題	8
2.1.2 安心・安全な社会の構築に貢献する課題	9
2.1.3 社会資本ストックの資産保全(アセットマネジメント)に貢献する課題	13
2.2 社会技術重視の展開に関わる課題の将来展望	14
2.2.1 人文・社会科学分野との連携による展開	14
2.2.2 環境科学分野との連携による展開	15
2.2.3 情報科学分野との連携による展開	16
第3章 地盤環境工学の環境重視の展開	17
3.1 環境重視の展開に関わる課題とその必要性	17
3.1.1 地球環境問題としての問題群に貢献する課題	17
3.1.2 地盤汚染とその修復に関する問題群に貢献する課題	19
3.1.3 環境に影響を及ぼす物質循環に関する問題群に貢献する課題	21
3.1.4 生物・生態系に関わる問題群に貢献する課題	21
3.2 環境重視の展開に関わる課題の将来展望	22
3.2.1 農業あるいは生物分野との連携による展開	22
3.2.2 化学分野との連携による展開	23
第4章 次世代廃棄物処分を担う地盤環境工学の展開	26
4.1 人類的課題の歴史的背景	26
4.2 リサイクルの限界と廃棄物処分	27
4.3 一般廃棄物の処分技術の向上に対する地盤環境工学の課題	28
4.4 地盤環境工学の展望—都市再生問題を例にして—	29
4.4.1 都市再生の本質的な要件	29
4.4.2 経済的な視点を備えた都市再生—イギリスの事例—	30
4.4.3 大都市の再生へ向けて地盤環境工学からの提案	30
4.4.4 他分野との連携について	32
第5章 提言のまとめ	34

はじめに

「日本学術会議の在り方について」(平成15年2月26日総合科学技術会議意見具申)にもとづいて、日本学術会議法の一部を改正する法律が平成16年4月14日に公布され、平成17年10月1日から施行されることになり、日本学術会議は新体制へ移行中である。その中で第19期社会環境工学研究連絡委員会地盤環境工学専門委員会は、地盤環境工学の将来の方向性と課題について議論をしてきた。その際、平成14年9月日本学術会議日本の計画委員会による報告書「日本の計画」に示された問題意識を軸として議論し、地盤環境工学が主体的に貢献しうる課題を抽出し、関連諸分野との適切な連携を得ることによって、どのような展開が期待されるかの発展シナリオを描くことに努めた。

地盤環境工学の展開には大きく二つの方向性が考えられる。一つは、地盤環境問題の社会科学的側面との連携を目指した方向であり、地盤環境工学の社会技術重視の展開と呼ぶ。他の一つは、地盤環境諸事象の自然科学的・技術的側面の更なる解明と発展を目指した方向であり、地盤環境工学の環境重視の展開と呼ぶことにする。本報告書は、以下の5章構成となっている。

第1章では、第16期から第18期までの地盤環境工学委員会の活動を総括し、本専門委員会が何を目指し、どのような役割を果たしたのか、国際的視点から関連学会とどのように連携をしてきたのかを記述している。その中で「地盤環境工学」を再定義し、理学及び工学における地盤環境工学の科学的位置づけと社会的役割の重要性を確認して、環境、防災、廃棄物処理などの社会問題が顕在化する中で、環境の構成要素としての「地盤」に関わる問題に取り組むためには、日本学術会議の研究連絡委員会・専門委員会との密接な連携の下で、地盤工学会を中心とした国際的・学際的な活動が今後一層重要になることを指摘している。

構成員が科学的・学問的根拠に基づき安全と感じられる社会秩序の状態を「安心な社会」と捉える時、第2章は地盤に関わる環境問題に対して社会技術を駆使して安心な社会を構築する課題を抽出し、発展シナリオを描いている。第3章では、地盤に係わる環境諸問題に対して科学的現象の更なる解明と工学的技術開発によって実証的に安全向上を目指す環境重視の諸問題を抽出し、その発展シナリオを描いている。

第4章では、地盤環境工学が取り組むべき人類的課題として廃棄物埋立処分場問題を取りあげ、都市再生を例にして地盤環境工学の役割を示している。そこでは、廃棄物埋め立て処分場を負の遺産として捉えるのではなく、都市再生のための空間資源として廃棄物埋め立て処分場を生活・産業空間として積極的に有効利用するとの視点にたった議論を組み立て、多様な分野との協力・連携を推進することを強調している。

第5章は、以上の議論を集約し7項目の提案として取りまとめている。

平成17年 月 地盤環境工学専門委員会 委員長 日下部 治

第1章 地盤環境工学専門委員会の第18期までの活動の総括

1.1 環境の構成要素としての地盤の重要性

環境の劣化、防災、廃棄物処理などの社会問題が顕在化する中で、環境の構成要素としての「地盤」の重要性が強く認識されるようになってきた。

地盤は、本来、多面的な機能とそれに基づく様々な役割を有しており、次世代に引き継がねばならない人類の貴重な財産である。しかし、近年の人間活動は、経済性と効率を至上とした開発の歴史の中で地盤が持つ多面的な機能と役割に十分な注意を払わずに、主に生活・社会・産業基盤施設を整備する場として利用してきたために、地盤環境の悪化が顕在化しつつある。次世代以降の持続的開発の可能性を損なわないようにするためには、環境と調和した地盤の利活用を図ることが不可欠である。そのためには、地盤に関わる環境の現状を正しく評価し、環境変化のメカニズムを理解し、将来の変化を予測して適切な対応を図る学術・技術が求められ、地盤を多様な視点から総合的に理解する学問の体系化が必要である。

1.2 地盤環境工学に関わる委員会活動

日本学術会議では、バブル社会が崩壊し、新たな世紀の到来を前にした歴史的転換期の第16期において、第13～15期に活動した「土質基礎工学研究連絡委員会」を改組し、「地盤環境工学研究連絡委員会」として新たに発足させた。また、第17期からは、第5部研究連絡委員会の見直しに伴い、社会環境工学研究連絡委員会の中の「地盤環境工学専門委員会」として活動を継続してきた。各期の活動を総括することは、将来の地盤環境工学の展開を考える上で必須であり、各期の報告書から要約して時系列で示すと下記のとおりである。

第16期地盤環境工学研究連絡委員会では、第16期活動の背景にある基本認識、「歴史的転換期における新たな展望の探求」を重視し、「自然観の転換」と「方法論の転換」が提言された。自然観の転換においては、土構造物や地盤を単なる力学材料、つまり人間が力学的にコントロールできる「仮想の土構造物や地盤」としてのみ見るのではなく、人間が社会を通じて、その自然メカニズムに即して共生すべき「生きた土構造物や地盤」として見る、ことへの転換の必要性が示された。すなわち、「力学的自然観から生命論的自然観への転換」の提言である。また、方法論の転換においては、地盤力学に加えて、地質学、地形学、環境地盤学、環境倫理学、生態学等を地盤工学の基礎理論として位置づけ、「自然科学的方法主体から人文・社会科学方法の導入」、すなわち「自然科学的方法万能主義から総合科学的方法への転換」が提言された。

第 17 期地盤環境工学専門委員会では、第 17 期活動の基本的方向、「多数の領域を要する学術全体を俯瞰的に見る視点の重視」の立場から、新たな工学領域として“地盤環境工学”の創設を提言した。従来の力学を基盤とした地盤工学に、土壌科学、微生物学、化学、化学工学、生態環境工学、毒物学、等を援用・統合するとともに、社会科学、人文科学とも広く連携するものである。すなわち、地盤環境工学は従来の土木、建築、農業工学、資源工学といった工学体系の基礎学問であるとともに、防災・減災や環境といった全ての人間活動を横断する視点を持つものである。社会科学や人文科学との連携が必要となるのは、防災や環境問題への取組が国や自治体の政策、法規制と不可分であり、かつ、社会を構成する個人や組織のもつ多様な価値観や倫理観に支配される部分が多いからである。

第 18 期地盤環境工学専門委員会では、広範多岐にわたる“地盤環境工学”の中で、特に環境という視点に焦点を当て、個別の課題に先駆的な取り組みを展開している学識経験者を招いて意見を聴くとともに、社会全般の現状認識をアンケート形式によって明らかにした。そして、これらを踏まえて環境という切り口を重視した時の“地盤環境工学”を担う次世代の人材を創出するために高等教育機関、国立研究機関や企業はどの様に取り組むべきかについて検討を加えた。

1.3 地盤環境工学の定義、役割と社会的位置づけ

環境と地盤の関わり

第 17 期では、地盤環境工学 (Geotechnical and Geoenvironmental Engineering) が対象とする「地盤」の機能と役割を環境と地盤の関わりの視点から次のように捉えた。

地盤の表層部に存在する土は、大気・水・多様な生物と連携し、きわめて多面的な機能をもって、自然環境そして生活環境に重要な役割を果たしている。すなわち、土は保水機能・通気機能・浄化機能・養分の貯蔵調節機能などの多様な機能を持ち、またそれらを総合化したものとして優れた緩衝能力を有しており、本来、環境の変化によく順応していく力を備えている。このため、土は植物の生育環境を与え、植物と土との共生関係が地上のすべての生物生存の基盤をなすとともに生物循環の場を提供し、かつそれが食糧生産の場としての安定に寄与している。生態系から与えられるこれらの恵みは、多数の生物が介在した水や栄養分の循環、分解、及びその分解物を貯留あるいは再循環する能力によっている。地球規模の生物循環、物質循環を考えると、地盤はその重要な環境要素であり、物質循環のかなめとも言える大きな役割を果たしている。土の演ずる役割は、地球的規模の循環機能にとどまらない。土の持つ浄化機能と貯蔵機能に期待して、人間の生活、生産活動の結果生じる廃棄物を受入れる場として利用され、局所的な環境汚染に対しても大きな関わりを持っている。土中に投棄された産業・生活廃棄物は、微生物による分解、複雑な酸化・還元反応などいわば生

化学的処理を経たのち、土中水の移動などを通じて土中に拡散し、地下水を含めた周囲の環境に影響を及ぼし、工場跡地や廃棄物埋立て地周辺の地盤及び地下水の汚染として顕在化している。

地盤環境工学の定義と役割

生物の生存場としての地圏・水圏・気圏と生物は、土をかなめとした物質循環によって互いに強く結びついている。したがって、環境問題を考える時に「地盤に関わる問題」という形で切り離して考えることは本来不可能であり、地盤の多面的な役割を考慮すると、広範囲で多様な問題を対象とする学問体系の構築が必要である。工学領域としての地盤環境工学は、「地盤工学の伝統的な役割に加えて、地盤工学技術を快適な環境の創生と保生・再生のための学術・技術と位置づけ、環境の保全・修復・改善のために役立てるべく、その領域を更に拡大した工学」として位置づけられる。すなわち、地盤環境工学が検討の対象とする領域は、従来の土質・基礎工学あるいは地盤工学を内包し、これに関連する環境科学、防災科学などとの学際的な広範な領域を対象とするものであり、環境（工学）と地盤（工学）を結ぶ学問領域である。地盤に関わる技術者が単に生活・社会基盤の整備のためのプロジェクトの達成に役立つ工学に基礎をおいて活動するだけでなく、人類の生活環境及び地球環境を念頭に、常に環境の創生・保生・再生の観点を重視しつつ、多様な環境に関わる学問を援用・統合して、地盤の有する特性を駆使しながら環境への様々なインパクトを最小限にするための予測並びに問題を解決し、新たな環境を創造するための工学と位置づけられる。同時に地盤環境工学は、社会科学、人文科学とも広く連携するものでなければならない。

人材育成の必要性

環境という視点を重視した時に、地盤環境工学が先取的に取り組むべき課題として、汚染地盤、廃棄物・核廃棄物の貯蔵及び処分、酸性雨・酸性土壌、砂漠化、海面上昇、環境影響物質、生物・生態系、等といった新しい分野を例示できる。第18期では、これらの問題にビジネスとして取り組んでいる企業、高等教育機関、国立研究機関等を対象にしてアンケート調査を実施した。その結果、例示した環境分野に限ると、地盤環境工学に関する我が国の教育、研究、社会的認知は、いずれも欧米に比べて遅れていると意識されていることが明らかとなった。それにもかかわらず、大学においてこの分野での海外研究機関との交流は進んでいなく、国内における学外との交流も多くないことも判明した。また、地盤の環境問題の実務に取り組む多くの企業において、この問題に関わる技術者は土木工学系が主体で、農業土木系や環境工学系（衛生工学等）がこれに次いでいるが、学際的な地盤環境の問題に取り組むために企業が求めている人材と、既存の学問体系で育成されてきた人材にはミスマッチがあることも明らかとなった。これらの結果から、第18期で提言されたように産・官・学の共同のもと

で、地盤環境工学に関わる人材育成のシステムを構築することが急務である。

1.4 地盤に関わる学協会の活動

活動の特徴：学際性と国際性

「地盤」に関わる国内学協会の中で最大規模の組織は、(社)地盤工学会（Japanese Geotechnical Society。以下、JGS と言う。）である。JGS は設立の経緯から、他の多くの学協会と比べ次の二点で異なる。第一点は、この学会の対象とする科学技術の領域が、そもそも学際的なことである。すなわち、多くの学協会が従来の大学の学部・学科と同様な伝統的な専門領域別に組み立てられているのに対して、地盤工学会はその発足時から、工学分野の土木、建築、資源、農学分野の農業土木、砂防、理学分野の地質等の複数領域を横断して、産官学の研究者・技術者を結集した学会として発足していることである。これは、対象とする「地盤」が多様な機能を持ち、様々な領域で活用されてきた当然の帰結である。第二点は、この学会が国際地盤工学会（International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering。以下、ISSMGE と言う。）の日本における National Committee として結成され、発足時から本質的に国際的な存在として、情報の交換、学術技術の発展への貢献を積み重ねてきたことである。JGS が発行している論文集 ”Soils and Foundations” は、国際的な主要ジャーナルとして広く認知されており、掲載論文のほぼ半数が外国からの論文である。したがって、「地盤」に関わる学際的、国際的活動は、JGS 及び ISSMGE の活動によって、その多くをカバーしていると言ってよい。

環境を意識した地盤工学の誕生

ISSMGE は、4年に1度国際会議を開催している。この国際会議で Plenary Session あるいは Discussion Session として取り上げられるテーマが、地盤工学の対象領域の変化を映す鏡となっている。JGS と ISSMGE の活動領域は、本来、学際的・国際的であるが、1970年代の半ばまでは、土木・建築・農業・資源を対象とした社会資本整備を経済的・効率的に進めるために地盤の力学的挙動を解明することに、その活動の主力が向けられていた。

この流れに変化が見え、地盤工学分野が「環境」を大きく意識するようになったのは、JGS がホストした 1977 年 ISSMGE 東京会議で、1936 年第一回国際会議以来、初めて地盤環境に関わる Specialty Session が設けられた。「環境」に対して、地盤工学はどのような役割を果たしうるかという観点でのセッションであるが、この時点では地盤に関わる環境の範囲も明確ではなく、廃棄物、土壤汚染、地下水など、様々な問題が提起されている。しかし、討議の中で、環境問題は地盤工学のみでは対処することができず、理学・工学を横断する学際的な取り組みが必要であること、更には、理工

学だけではなく、法規制や倫理と言った人文・社会科学的取組も重要であることが既に認識されている。

これを受けた 1981 年の Stockholm 会議では、「地盤と環境の関わり」が Plenary Session の一つとして取り上げられ、「Environmental Geotechnics」と題する基調講演が行われた。この基調講演は、地盤工学（当時は、土質基礎工学と呼ばれていた。）が、社会資本整備の対象となる狭い領域の中での合理性を追求することに留まってきたことを反省し、Environmental Geotechnics は、人間の様々な活動が Project Site よりも更に広範な領域に対して、どのようなインパクトを与えるかを予測し、対処するために地盤工学を活用するというスタンス（責任並びに倫理）であることを指摘している。

東京会議、Stockholm 会議以後、4年に一度の国際会議では、会議の主要テーマの一つとして「環境」を意識したセッションが必ず設けられるようになっている。また、ISSMGE は約 30 の国際技術委員会を組織して主要な課題への国際的な情報交換を図っているが、その一つとして ISSMGE TC-5 Environmental Geotechnics があり、JGS はこの委員会の主要メンバー国として、指導的役割を果たしている。さらに、ISSMGE は、地盤工学を網羅する国際会議とは別に、環境に特化した「環境地盤工学国際会議」の第一回会議を 1994 年、カナダで開催した。JGS は第二回会議をホストし、1996 年大阪で開催した。この環境地盤工学国際会議は、その後も継続し、4年毎に世界各地で開催されている。

関連学協会との連携

JGS は、ISSMGE の有力な member society として、国際的な場で地盤と環境の接点へ大きく貢献してきた。同時に、国内的には地盤に関連する様々な領域の研究者・技術者を結集する学会として、地盤環境問題に取り組んでいる。このような時代背景の中で、日本学術会議において、第 16 期から地盤環境工学研究連絡委員会が発足し、活動してきたことは、社会の要請や国際的な潮流と整合したものである。地盤環境工学専門委員会のこれまでの活動は、JGS、ISSMGE の活動と密接に関わっており、また、委員会提言は、地盤工学会の機関紙や研究発表会等を通して、多分野の「地盤」に関わる研究者・技術者にも広く伝えられてきた。環境、防災、廃棄物処理などの社会問題が顕在化する中で、環境の構成要素としての「地盤」に関わる問題に取り組むためには、日本学術会議の研究連絡委員会・専門委員会との密接な連携の下で、地盤工学会を中心とした国際的・学際的な活動が今後一層重要になる。

参考文献

- 1) 日本学術会議，第 16 期地盤環境工学研究連絡委員会報告「地盤環境工学の現状と将来」，1997.3.31.

- 2) 日本学術会議, 第 17 期社会環境工学研究連絡委員会・地盤環境工学専門委員会報告「21 世紀における地盤環境工学－新たな **discipline** の創造に向けて－」, 2000.4.24.
- 3) 日本学術会議, 第 18 期社会環境工学研究連絡委員会・地盤環境工学専門委員会報告「地盤環境工学の新たな展開－次世代を担う人材育成に向けて－」, 2003.4.22.
- 4) JGS (地盤工学会) : <http://www.jiban.or.jp/>
- 5) ISSMGE: <http://www.issmge.org/home/>

第2章 地盤環境工学の社会技術重視の展開

地盤環境工学の展開には大きく二つの方向性が考えられる。一つは、環境保全の社会的側面を重視した展開であり、本報告では社会技術重視の展開と呼ぶ。他の一つは、環境問題の諸事象の環境科学的側面を重視した展開であり、環境重視の展開と呼ぶことにする。

地盤環境工学の社会技術重視の展開では、1) 広域的なリサイクル拠点としての廃棄物海面埋め立処分場の建設・管理・跡地利用技術、汚染土壌の低コスト封じ込め技術、各種産業廃棄物再生材の地盤材料としての利用技術などによる「循環型社会」の構築への貢献、2) 大規模災害を想定した総合的な防災戦略の構築や、地下水・土壌汚染などの地盤環境保全技術の高度化などによる「安心・安全で快適な社会」の構築への貢献、及び3) 地盤に関係する社会資本としてのトンネル、橋梁基礎、地下構造物、歴史的遺産などの長寿命化に関わる診断・補修・更新技術による「資産保全」(アセットマネジメント)への貢献を取り上げる。

これらの技術の展開においては、1) 情報の蓄積と公表による地域住民の問題意識の向上やコンセンサスの形成、2) 政策や意志決定の支援と法制度の整備、3) 情報の伝達・提供システムの整備、4) 土地利用の工夫や都市計画への反映など、社会制度の整備にまで踏み込んだ対策の検討が不可欠である。このため、ハード技術からソフト対応まで包含した幅広い視点からの学術研究が必須であり、地盤工学分野に加えて人文・社会科学分野、環境科学分野、情報科学分野など、多くの専門分野の連携・融合による総合科学技術としての「環境社会技術」なる学問領域の展開を進める必要があることを述べる。

2.1 社会技術重視の展開に関わる課題とその必要性

地盤環境に関わる問題群は、人間社会と密接に関わる社会問題である場合がほとんどであるため、それに関わる技術は社会技術的な側面を強く持っている。ここでは、社会技術重視の展開の視点から、具体的課題テーマとその必要性を概観する。

2.1.1 循環型社会の構築に貢献する課題

近年、我が国では、平成12年6月に公布された「循環型社会形成推進基本法」をはじめとして、「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」(建設リサイクル法)、「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」(グリーン購入法)、「資源の有効な利用の促進に関する法律」(資源有効利用促進法)など、持続的な発展を指向する循環型社会の法的基盤が整いつつある。

「地盤」は、建設工事等によって自ら排出する建設副産物(建設発生土と建設汚泥)

や汚染土壌の量が圧倒的に多いばかりでなく、廃棄物埋立処分場での受入れや汚染土壌の原位置封じ込め、あるいは各種産業廃棄物再生材の地盤材料としての利用などによる廃棄物の受入れ容量が大きいこともあって、循環型社会の形成において極めて大きい位置付けを占めている。

これまでの建設リサイクル推進の取組の結果、2000年度における建設廃棄物全体としての再資源化率は85%と向上してきているが、アスファルト・コンクリート塊及びコンクリート塊の再資源化率が95%を超える一方で、建設発生木材、建設汚泥、建設混合廃棄物、建設発生土のリサイクルは未だに低迷している。建設副産物のリサイクル技術は、基本的なものは概ね確立しているが、建設発生木材のリサイクル技術や汚染土壌対策技術などはまだ発展途上である。また、一般廃棄物焼却灰、下水汚泥、石炭灰、廃ガラス、古紙、廃木材、廃タイヤ、廃プラスチック等の産業廃棄物についても、従来の各産業内での処理・処分やリサイクルに限界が生じてきており、容量の大きな地盤材料としての展開に期待が寄せられている。これらの産業廃棄物の再生材の地盤材料としての利用技術については、一部すでに実用化しているものもあるが、多くのものはまだ利用方法と試験評価方法の両面からの研究が必要である。

このような背景から、地盤環境工学が循環型社会の形成に果たす役割には極めて大きいものがあり、社会システムの全体系からみて最適な、産業間循環を基本としたリサイクルシステムの構築への貢献が期待されている。具体的には、次のような貢献や技術開発が求められている。

- ① 世界最高水準にある地盤改良技術のリサイクルへの応用
- ② 産業廃棄物（一般廃棄物焼却灰、下水汚泥、石炭灰、ガラス、古紙、木材、廃タイヤ、プラスチック等）の再生資材の地盤材料としての評価・利用技術
- ③ 汚染土壌の低コスト調査・封じ込め技術
- ④ 管理型廃棄物海面処分場の建設・管理技術
- ⑤ 間伐材の地盤工学への利用技術
- ⑥ 広域的なりサイクル拠点とトラック輸送と鉄道や船舶による輸送の適切な組み合わせやIT等を活用した静脈物流ネットワークシステムの整備
- ⑦ IT等を活用した廃棄物等の収集・運搬・再生・処分などの効率的な管理技術などである。

2.1.2 安心・安全な社会の構築に貢献する課題

(1) 地盤防災への貢献

災害には、大別して「気象災害」（豪雨災害、豪雪災害、強風災害、洪水氾濫災害、高潮・高波災害、土砂災害、気候変動災害）と「地変災害」（地震災害、地震時地盤災害、津波災害、火山災害）があるが、地盤環境工学が主な対象とするのは、豪雨災害、洪水氾濫災害、土砂災害、地震災害、地震時地盤災害、火山災害である。

我が国は脆弱な地質・地盤構造をもつ災害列島であり、これまで毎年のように災害を経験しながら営々と防災対策を積み上げてきた。そして、その過程で、地盤防災に関わる個別の要素技術の進歩や経験工学としてのノウハウの蓄積が着実に図られてきている。しかし、その一方で、首都圏直下型地震や巨大火山噴火あるいは大規模洪水など、過去の経験を超える大規模災害を想定した防災戦略の構築が社会的に強く要請されるようになってきている。このため、今後、リスクマネジメントの導入と適切な防災システムの構築、ハザードマップの高度化、各種先端技術の災害軽減への積極的利活用、災害情報の高度化など、地盤防災技術のより一層の高度化を継続して推進していくことが必要である。地盤環境工学に期待される具体的な貢献や技術開発には、以下のようなものがある。

- ① 防災対策の戦略の構築（リスクマネジメントの導入と適切な防災システムの構築）
 - ・ GIS等を活用した斜面・地盤等のリスクマネジメントシステムの開発
（対策の優先順位，投資効果，整備水準の評価に活用）
 - ・ 安全な土地利用への誘導手法の開発
 - ・ 土砂災害に対する事前通行規制・警戒避難システム等の高度化
 - ・ 復旧・復興過程の最適化技術の提案
- ② ハザードマップ（災害発生危険度予測地図）の高度化
 - ・ 各種災害に関する空間情報データベースの作成
 - ・ 防災GIS構築のための共通フォーマットの整備と基盤・応用ソフトウェアの開発
 - ・ 各種土砂災害，地震災害の危険度評価技術の高度化
 - ・ 堤防弱点箇所抽出のための調査技術の高度化
 - ・ ミクロスケールでの被害想定手法の開発
 - ・ リアルタイム型のハザードマップ作成手法の開発
 - ・ ストックデータの情報提供システムの整備
- ③ 地震による地盤・構造物連成系の破壊過程解明と耐震性評価・補強技術の高度化
 - ・ 耐震設計・耐震点検技術の高度化と開発途上国等におけるローカル材料，ローカル工法を活用した耐震技術の開発
 - ・ 地震時被害抑止技術の高度化
- ④ 先端技術の災害軽減への積極的利活用
 - ・ 被害想定や災害対応シミュレーション技術の高度化
 - ・ 災害時支援ロボット等の実用化
 - ・ 先端技術の防災分野への円滑な導入と応用プロセスの研究
- ⑤ 災害情報の高度化
 - ・ 人工衛星，航空機，気象レーダ，地域気象観測システム等を利用した気象の短時間予測システム
 - ・ 斜面崩壊・土石流の発生検知機器の開発・高度化

- ・ 堤防モニタリングシステムの高度化
- ・ 地震時の地盤の震動特性の調査・観測技術の高度化
- ・ 火山災害現象の早期検知技術の開発
- ・ 探査衛星等による地盤変状の監視技術の開発
- ・ 土地利用状況のモニタリングシステムの開発
- ・ 同報無線，テレビ，携帯電話等の多様な手段によるリアルタイム防災情報伝達システムの整備

(2) 地盤環境保全への貢献

地盤環境保全の対象として特に重要なのは、地下水の保全と土壌汚染対策である。
 ー地下水の環境影響評価・保全技術ー

1996年の環境影響評価法の全面的施行により、法の対象となる環境要素として、地下水が明記された。また、各地方自治体の条例に基づく地下水の環境影響評価や自主的な環境影響評価も数多く実施されるようになってきている。さらに、2000年に制定された「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」においても、地下水を含めた環境の保全に特に配慮しなければならないとされており、大深度地下の使用の許可にあたっては、事業計画が「大深度地下の公共的使用における環境の保全に係る指針」(2004年：国土交通省都市・地域整備局大都市圏整備課大深度地下利用企画室)に適合することを要件としている。当指針では、環境の保全のための措置の対象として、地下水の水位・水圧低下、水質及び地下水の流動阻害を取り上げている。施設の設置により地下水の流動が阻害される場合は、事業区域及びその周辺において地下水位・水圧の変化が生じ、井戸の取水障害や湧水の枯渇、地盤沈下、他の地下施設への漏水等が発生する可能性があるため、環境の保全のための措置が必要になる。このように、最近では事業の種別や大小にかかわらず、何らかの形で工事による地下水への影響を評価することが求められるようになってきており、地下水のための環境影響評価が、地域住民との合意形成を図り、円滑に事業を進めるうえでの重要な要素となっている。

そして、地盤環境工学には、地下水問題の発生メカニズムの解明、影響評価の方法、調査、数値解析、地下水保全工法の設計・施工、モニタリング・メンテナンスなどの技術の高度化が期待されている。これらの技術は、基本的な体系や要素技術はすでにある程度構築されているが、地下水問題では、流域全体や地下水の長期的な変動傾向を大局的・総合的に観る視点と、局所的な地形・地質構造や地下水脈あるいは対策の効果等を微視的に観る視点の両方が不可欠で、実際問題への適用を蓄積しながら、調査・予測精度の向上や対策技術の高度化を図っていく必要がある。

また、地下水問題でもっとも注意すべきは法律上の問題点である。地下水保全の実効を挙げるためには、法規制を念頭においた人文・社会学分野との連携が不可欠であり、必要に応じて具体的な法体系の整備を講じていく必要がある。

ー土壌汚染対策技術ー

平成 15 年から施行された土壤汚染対策法により、土壤汚染又は地下水汚染が判明しているか、土壤汚染が存在する蓋然性の高い土地であり、かつ、人への暴露の可能性がある場合には土壤汚染対策法による調査並びに汚染の除去等の措置が命じられることになった。

また、土壤汚染対策法の対象とならない場合でも、土地の資産価値の保全の観点から自主対策を実施するケースや、建設工事で汚染地盤に遭遇して対応に迫られるケースが増えてきており、土壤汚染対策が求められる場面が今後急増する傾向にある。

その一方で、土壤環境基準の制定や土壤汚染対策法の施行からまだ日も浅く、土壤汚染対策技術はまだまだ発展途上にある。今後この分野で取り組むべき主な課題を列挙すると以下のとおりである。

① リスク評価技術の高度化

調査命令や措置命令を発令する際の鍵となるのは、人への暴露の可能性の評価、すなわちリスク評価であり、調査・解析・評価技術の信頼性やそれに基づく高度な技術的判断が極めて重要である。このリスク評価を適切に行うには、有害物質の地盤中での吸着・移流・分散挙動に関する知識、将来予測のための解析技術、モニタリングによる予測の検証とフィードバックをはじめ、実際の現場経験に裏打ちされた総合的な技術力が求められ、今後更に土壤汚染のリスク評価技術の高度化と信頼性の向上を図っていく必要がある。

② 対策技術の低コスト化

土壤汚染対策法の汚染の除去等の措置の実施に関する技術的基準で原則として推奨しているのは、指定区域内において土壤汚染のリスクを低減又は管理する措置である。この結果、浄化や掘削除去して廃棄物処理法に規定する最終処分場への搬入などの高コストのため往々にして実現が困難であった従来の恒久対策に替わるリスク管理型の対策が示されたことで、対策技術の実現可能性はかなり高まったと評価できる。しかし、膨大なサイトのリスクを確実に低減するためには、土壤汚染対策技術の低コスト化を実現することが不可欠である。このため、リスク評価技術を駆使することによって、要対策区域を絞り込み、現場の諸条件に応じて対策工法のスリム化を図ること、あるいは生物や植物による浄化（バイオレメディエーションあるいはファイトレメディエーション）などの長期的な対策や、固化・不溶化処理の一層の適用拡大などを今後確立していく必要がある。

③ 汚染土壌混じり土砂や自然由来の重金属に起因する汚染の取扱い

土壤汚染対策法の指定区域以外の土地から搬出される土壌や操業中の工場等からの搬出土砂を含む一般の土砂に汚染土壌が混じっている場合は、土壤汚染対策法の対象にも、廃棄物処理法の対象（廃棄物）にもならない。また、自然的原因により有害物質が含まれる土壌についても、土壤汚染対策法の対象とならない。これらにおいては、1) 汚染源を動かして拡散させないこと、2) 建設工事でやむを得ず土砂が発生する

場合は、現場内で封じ込めて利用できないか工夫すること、3) 環境省告示において定める搬出土砂の取扱いによること、が原則であるが、今後は、4) 環境リスクを生じない搬出先での利用方法を工夫することが重要である。

④ 環境リスクを生じない汚染土壌の利用方法の提案

最近では、他産業からの廃棄物の再生資材（リサイクル材）を建設分野で積極的に利用していこうという方向にある。実際に、鉄鋼スラグなどは既に有用物として社会的に認知されているし、石炭灰なども微量有害物質の溶出を抑えた有用物としての利用が進みつつある。同様の観点から、今後、汚染土壌や汚染土壌混じり土砂についても、循環型社会への貢献と過剰な社会的コストの無駄を省くという両面から、環境リスクを生じない利用方法を工夫していく必要がある。

2.1.3 社会資本ストックの資産保全（アセットマネジメント）に貢献する課題

地盤環境工学に関連する社会資本ストック（構造物）には、トンネル、基礎構造物、地下埋設物、河川堤防、盛土・切土法面、アンカー、空洞（坑道跡等）、歴史的遺産などがある。これらの社会資本ストックは、戦後急速に整備が進められ既に膨大な量に達しており、最近のいくつかの事故例にもみられるように、適切な補修が行われなければ長年月の間に劣化が進行し、社会的に重大な影響を及ぼすと同時に、構造物そのものとしての機能を損ない、貴重な社会資本ストックの損失をまねきかねない状況にある。このため、これらの構造物の維持管理・更新（メンテナンス・リニューアル）の技術は、社会政策上、極めて大きな位置付けにある。

したがって、劣化の進行を未然に防止するための適切な補修システムや、構造的健全度に影響を及ぼすような劣化が生じた構造物に対するリニューアル技術の高度化が重要である。また、既に健全度診断や補修・補強のための要素技術は各種提案され、各種構造物ごとに点検や種々の劣化調査が行われているが、それらの調査結果に基づく定量的な健全度診断技術の確立が不可欠である。さらに、診断・補修・更新の個々の要素技術を総合的に組み合わせてライフサイクルコストを下げする方法論（メンテナンスの計画論・ストックマネジメント）を考えていく必要があり、次のような戦略的な技術体系の構築が求められている。

- ① 構造物に求められる健全度の基本的考え方（要求性能）を明確にし、その要求水準に応じたメンテナンスの基本方針を確立する。
- ② 劣化の実態と劣化機構をふまえた構造物別点検・調査・モニタリング手法を確立し、健全度診断技術の高度化を図る。
- ③ 劣化状態に応じた補修・リニューアル技術を提案し、これまで以上に構造物の延命化のための補修に適切な費用をかけ、将来の更新費用の負担を軽減する。
- ④ データベースを整備し、対策優先度の決定や補修・対策コストの将来予測が行えるマネジメントシステムにより、実行可能なメンテナンス計画を策定する。

- ⑤ 劣化しにくい長寿命の構造物や、劣化しやすい部位を容易に交換可能な構造物の設計法を提案する。

2.2 社会技術重視の展開に関わる課題の将来展望

以上のように、地盤環境工学には、広域的なりサイクル拠点としての廃棄物海面埋立処分場の建設・管理・跡地利用技術、汚染土壌の低コスト封じ込め技術、各種産業廃棄物再生材の地盤材料としての利用技術などによる「循環型社会の構築への貢献」が期待されている。また、大規模地震や巨大火山噴火あるいは超過洪水などの大規模災害を想定した総合的な防災戦略の構築と地盤防災技術の高度化や、地下水や土壌汚染などに関する地盤環境保全技術の高度化を通じた「安心・安全な社会の構築への貢献」が求められている。さらに、地盤に関連する構造物の資産保全（アセットマネジメント）に関する診断・補修・更新技術の体系化への期待も大きい。

そして、これらの社会技術の展開には、ハード技術からソフト対応まで包含した幅広いニーズ対応が求められるため、人文・社会科学分野、環境科学分野、情報科学分野など、「多くの専門分野の連携・融合による総合科学技術としての推進」が不可欠である。そこで、以下には、考えられる他分野との連携による発展のシナリオを示す。なお、現代の科学技術は専門領域が専門化したことの弊害が徐々に現れてきており、学問分野間の融合や社会技術を実践する行政等との連携が進んでいない印象がある。社会技術を重視する立場からは、従来から学際的分野として位置付けられている地盤環境工学の研究者においても、より一層全体を見渡して問題解決を図る能力が期待されている。

2.2.1 人文・社会科学分野との連携による展開

廃棄物処理やリサイクル、総合防災、地下水の保全や土壌汚染対策など社会問題は、理工系の科学技術のみでは解決できない側面を持っており、関係する法体系や行政システム、地域住民との合意のもとで政策が実行されることによって、初めて実効ある成果が期待される。したがって、地盤環境工学は、人文・社会科学分野と連携・協力することによって、工学を基盤とした最適な社会システムを提案していく道が開かれよう。

防災の分野では、

- ① 高度に利便性が発達した社会は、災害時の脆弱性を増大させていること
- ② 災害時要援護者となる高齢者が増えていること
- ③ 地域コミュニティの崩壊は地域防災力の減少をもたらしていること

などの社会構造の変化が指摘されている。地盤環境工学が人文・社会科学分野と適切に連携していくことによって、1) ハザードマップや災害データ等の蓄積・公表に

よる地域住民の危機意識の向上， 2) 災害時要援護者を考慮した地域コミュニティ単位の実践的な防災訓練の実施， 3) 分かりやすくきめ細かな防災情報の伝達・提供システムの整備， 4) 地域防災体制の強化と適切な避難場所の確保， 5) 想定を超える外力に対して壊滅的被害を避ける構造や土地利用の工夫の推進など， 社会制度の整備にまで踏み込んだ対策の検討が進展するであろうし， また学問的にも幅広い分野間の連携・融合による総合科学技術として展開が期待され， 我が国の先進的な防災研究をより一層国際展開させ， 自然災害（地震， 火山噴火， 豪雨等）によって失われている人命の大半がアジア地域で生じていることへ多大な貢献も期待される。

地盤防災のように， 経験に基づく工学的判断が強く求められ， しかも， 防災の対象が国土をすべてカバーすると言ってもよいほど広い分野では， 防災の現場において的確な技術的判断を下せる専門技術者の数が圧倒的に不足している現在， 人文・社会科学との連携と融合教育によって， 高度な社会的判断力をもつ防災分野の専門技術者群が育成されるであろう。

以上， 地盤環境工学は， 廃棄物処理やリサイクル， 総合防災， 地下水の保全や土壌汚染対策など社会問題を解決するため， 人文・社会科学分野と連携・協力することで， 工学を基盤とした最適な社会システムを提案していくと同時に， その政策を実現する法体系や行政システムを担う関係部局とも密接に連携し， 幅広い分野間の連携・融合による総合科学技術としての展開を図っていくことが可能となろう。さらに， 一層の国際展開を図るとともに， 幅広い視野と素養のある専門技術者を育成するための人文・社会科学との融合教育を推進していくことが期待される。

2.2.2 環境科学分野との連携による展開

環境要素としての「地盤」を理解し， 社会技術として貢献するためには， いわゆる環境科学分野との連携が是非とも必要になる。特に， 次世代を担う地盤環境工学の高度専門家には， 生物学や化学の素養が必須であり， 地盤工学に関する技術基盤を持つ技術者が求められている。このような人材育成を推進するための方策に関しては， 第18期の専門委員会で提言されている。環境科学分野と特に連携の必要な社会技術的課題としては， 下記のものあげられる。

- ① 汚染地盤・地下水汚染に関わる課題：汚染地盤・地下水の調査， リスク評価， 修復技術など
- ② 廃棄物処分場に関する課題：汚染源の隔離技術， 処分場跡地の利用技術など
- ③ 核廃棄物貯蔵・処分に係わる課題
- ④ 砂漠化防止に関わる課題

このように， 環境要素としての「地盤」に関わる主要な社会技術的課題の多くも， 環境科学分野と不可分の関係にあり， 地盤環境工学と生物学や化学あるいは農学や森林学との連携・融合がより一層強く求められている。この議論はさらに3章で展開す

る。

2.2.3 情報科学分野との連携による展開

地盤防災や地盤環境保全の問題に限らず、社会資本の維持管理・更新（メンテナンス・リニューアル）の分野でも、高度に発達した情報技術を有効に活用する必要がある。

特に、情報技術との融合・連携に関しては、

- ① ユビキタス技術の地盤環境工学への応用
- ② 防災情報システムの高度化
- ③ IT情報化施工技術の新たな展開

などが期待される。

このため、地盤防災や地盤環境保全あるいは社会資本ストックの資産保全に関わる専門技術者は、日進月歩する情報科学との連携を積極的に図りながら、自らも基本的な素養としての情報技術の高度化を図っていくという展開が不可欠である。

参考文献

- 1) 総合科学技術会議環境担当議員・内閣府政策統括官（科学技術政策担当）共編：ゴミゼロ社会への挑戦—環境の世紀の知と技術 2004—，日経B P社，平成16年9月30日。
- 2) 文部科学省，科学技術・学術審議会，研究計画・評価分科会：防災に関する研究開発の推進方策について，平成15年3月。
- 3) 環境地盤調査解説執筆委員会：地盤調査の方法と解説 第12編 地盤環境調査，（社）地盤工学会，pp.735-845，平成16年6月。
- 4) 内閣府防災情報のページ：<http://www.bousai.go.jp/>
- 5) 中央防災会議のページ：<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/index.html>

第3章 地盤環境工学の環境重視の展開

第1章で総括したように、第17期報告「21世紀における地盤環境工学—新たなdisciplineの創造に向けて—」では、地盤環境工学を必要とする社会的背景と、この学が担うべき問題群を詳細に分析し、“地盤環境工学”の創設とその体系化について提案を行った。続く第18期報告「地盤環境工学の新たな展開—一次世代を担う人材育成に向けて—」では、地盤環境工学に対する社会的認知度を、大学、民間、国研、それぞれへのアンケート調査に基づいて分析し、環境重視の展開に向けた人材育成の方向を提言した。以上2つの報告は、地盤環境工学の創設と発展のための重要な指針となっているが、その議論の連続性を保つために一部を重複させているので、これらをここで再整理するとともに、環境重視の展開に関わる地盤環境工学が担うべき具体的課題を抽出し、地盤環境工学の将来の方向性として環境重視の展開を選択したときどのような発展シナリオが描けるかを述べる。

3.1 環境重視の展開に関わる課題とその必要性

本節では地球環境問題としての問題群、地盤汚染とその修復に関する問題群、環境に影響を及ぼす物質循環に関する問題群及び生物・生態系に関わる問題群に貢献する課題の4つの問題群について研究の必要性を述べつつ具体的課題を挙げる。

3.1.1 地球環境問題としての問題群に貢献する課題

地球環境問題群は、温暖化問題、砂漠化問題、水資源不足問題、人口爆発問題、食料不足問題、エネルギー問題など多岐にわたっている。これらの問題群に、地盤環境工学はこれまでどれだけ応えてきたか、また今後応えうるか、という視点で課題を挙げ若干の展望を試みる。

地球温暖化問題と海面上昇に関する課題について、第18期報告書のアンケートでは日本の研究が欧米に比べて遅れているとの結果が示されたが、その背景として、地球温暖化に伴う寒冷地における凍土融解を誘因とする地盤沈下、斜面崩壊、土石流の現象は、我が国においては局所的に留まっていることも一要因となっている。しかし、スマトラ沖地震による津波被害を例に挙げるまでもなく、海洋に囲まれて海岸線が長大である我が国地形の特殊性から見て、海面上昇に伴う海岸保全・低地保全などの課題の重要性は高い。河川管理やダム建設の結果としての土砂輸送量の減少と海岸線の後退問題も類似現象として地盤環境工学が担う環境問題として重視すべき課題である。地球温暖化問題は一方で食料不足問題と関連しており、地球の温暖化が進めば、耕作の北限が広がるかもしれないとの指摘もある。その意味で、地球温暖化問題は砂漠化問題、水資源不足問題、人口爆発問題、食料不足問題とも関わる問題として捉えるべ

きである。

地盤環境工学の貢献が期待される問題の一つとして、地球の砂漠化防止の課題があるが、半乾燥地の砂漠化防止に関する課題テーマについては、現在まで地盤環境工学領域としての直接的経験の蓄積は乏しい。それは、この種の地球環境問題が放牧や耕作、それに関わる河川水や地下水の過剰利用といった農業分野からの問題提起は多いものの、生活レベルや生産レベルに反映される工学的技術課題が設定しにくいことが、その原因となっていると考えられる。砂漠化などで縮小する耕地面積を補って新たな耕地を開拓することを目指して、乾燥地帯の緑化や効率的な灌漑技術の開発への努力が積み重ねられている。この分野にも地下水資源の探索や水の運搬施設の建設を通じて地盤環境工学の貢献する余地があると言え、他分野との協働が必要である。また、地下ダムの建設・管理技術の応用や蒸発損失の少ない導水技術の開発に加えて、我が国が誇る世界最先端の多様な地盤改良技術を砂漠化防止のために応用する地盤環境工学的課題は潜在的に多い。

水資源不足問題は、フィルダム建設や地下水挙動解析を基幹専門分野に含む地盤環境工学がより積極的に解決に当るべき問題である。河川水、湖沼水、地下水の各水資源をバランスよく、かつ持続的に利用するために、地盤環境工学はグローバルな水資源問題にも関与を強め、また地域的な水資源問題においても貢献度を増す必要がある。米国中西部オガララ帯水層の枯渇問題は、地盤環境工学的に十分予測し警告しうる現象であった。砂漠化防止と食料問題と関連して、新たな水資源の開発と余剰水の乾燥地帯への移転は、効果が期待できよう。ただし、これにはアラル海の縮小や黄河断流という前例もあり、環境への影響の正確な予測作業が重要である。このような広域・局所的水資源問題に対して地盤環境工学はよりいっそうの貢献が求められる。

人口と食料に関する諸問題では、いままで農業土木学分野の貢献度が際だっており、従来当該問題群に対して地盤環境工学が積極的に関与する場が限定されていたが、環境重視の地盤環境工学を展開するためには、農業分野、生物生産分野との連携は不可避である。これは生物・生態系に関わる問題群に貢献する課題に含まれる。

エネルギー問題も深刻である。我が国の電力エネルギーは火力と原子力に大きく依存しているが、火力は石油資源の先行き不安と二酸化炭素の排出という大気環境問題があり、そこに原子力発電の存在理由が見いだされる。原子力発電の問題点は、使用済み核燃料の最終処分であり地盤環境工学との強い接点がある。この最終処分は自国内で完了しなければならないことが国際的な取り決めであり、かつ放射能の半減期を考えると、未来十万年にわたる安全性を、後世に負担をかけること無く、確保しなければならない。現在想定されている処分方法は、地中への埋設である。この処分方法を巡り、使用済み燃料を直接地中処分する選択肢と、再処理して再利用する選択肢がある。我が国では後者を選択したが、同一の燃料がリサイクルを通じて無限に使用を繰り返せるわけではなく、いずれは、再処理再利用を繰り返した末の最後には処分しなけ

ればならないのであって、地中処分技術の確立は重要課題である。

代替エネルギーに関しては、原子力に加え、深海底に埋蔵されている高圧下でシャーベット状になったメタンハイドレートの採掘と利用、という構想がある。我が国の四国沖の深海底に、天然ガスの現在の輸入量にして100年以上分もの量が埋蔵されている。この資源を商業ベースで採掘できれば、我が国のエネルギー安全保障上、きわめて有益である。深海底の地質的調査の一環として、メタンハイドレートはすでに採取されているが、商業的に安定して大量採掘する技術は未だ存在しない。仮にメタンハイドレートが暴噴して大量に気化すれば、地球の温暖化に及ぼす影響は測り知れない。世界各地の海底で、大陸斜面などに、更新世以前のもものと推定される巨大斜面崩壊の痕跡が発見されている。一説によれば、氷河時代の海水面の低かった時代に、現在より低い海水圧の下で不安定状態にあったメタンハイドレートが爆発的に気化・暴噴し、斜面を崩壊させたものと、考えられている。また、採掘技術そのものに加えて、これを支援する施設を海底地盤上にどのように設置するのか、海底斜面崩壊と乱泥流の危険の評価と対策など、地質学・地盤環境工学との関係の必要な課題が多く存在する。

3.1.2 地盤汚染とその修復に関する問題群に貢献する課題

本問題群には、土壤汚染、地下水汚染、都市廃棄物、核廃棄物などによる環境汚染が該当する。第18期アンケートによると、この問題群に対する科学技術的貢献は民間先導であり、大学での研究が立ち遅れていることが示された。すなわち、汚染地盤に関する技術開発を行っている大学は67回答中11件(16%)であったのに対し、民間は74回答中24件(32%)と2倍の比率にのぼる。民間での地盤汚染とその修復技術の必要性に対する問題意識に、大学の基礎研究が追いついていない現状が浮き彫りにされている。このことは、研究だけでなく教育にも反映することは明らかであり、結果的に地盤汚染関係の人材育成が遅れることにもつながりかねない。この問題群に対する課題を増強する必要性がある。

地盤工学会は、学会誌「土と基礎」の小特集号「地盤・地下水汚染と対策」(Vol. 47, No. 10, 1999)、「土壤汚染とその対策—メカニズム解明から最新技術開発まで—」(Vol. 52, No. 10, 2004)において、地下水汚染・土壤汚染に関するモニタリング手法、対策技術と最先端研究の端緒を紹介し、当該分野の技術情報の普及につとめているが、社会的要請に応える成熟した実用的技術が確立しているとは言い難いのが現状認識である。

しかし、一方で近年地盤汚染を研究対象としている学術領域は広く、多くの知識・データが蓄積されつつあるが、それら領域間の連携不足により、関連する学問的・技術的専門知識が有機的に集約され体系化するに至っていないことも十分認識されるべきである。例えば、化学分析に優れた土壤化学分野では、土壤や河川、湖沼などに分布する汚染物質の濃度に関する知識の集積は大きいですが、地盤中の汚染物質の移動・輸

送問題についてはやや専門外とする傾向が強く、むしろ力学モデルの構築と数値解析手法に強い地盤工学分野での汚染物質の移動・輸送問題の研究の進展が著しい。しかし、両分野の連携は未成熟である。地下水学分野では、地下水の水質汚染について早くから社会的警告を発し、その貢献度は高く評価されるが、研究対象を地下水問題に限定しているため、土壌汚染や大気汚染などとの環境関連現象を含めた研究展開が十分ではなく、土壌物理学会や農業土木学会も農薬、家畜起源の汚染等独自に地盤汚染問題を取り上げているが、研究対象が限定的であり他分野との連携は弱い。

このような関連領域間の連携の欠如は、国際的レベルで更に顕著である。アメリカ地球物理連合（American Geophysical Union, AGU）は、毎年一万人を超える大規模な国際会議を主催し、その中で多様な地盤汚染問題が議論されているが、我が国における工学領域の環境関連分野での AGU 活動の認知度は極めて低い。2004 年 12 月にサンフランシスコで開催された AGU 年次大会の Hydrology セッションでは、地下水の砒素汚染問題に関する発表が数十件以上報告されている。地盤汚染とその修復に関する問題群における集積された知識の多さが有機的に体系付けされていない現状は、国内外の連携強化の必要性を認識させる。なお、AGU 年次大会の研究発表には斜面崩壊と土石流及び雪崩現象の計測とモデル化、海岸地形保全問題、など地盤環境工学が担うべき地球環境問題としての問題群も数多く含まれていることにも注目しておくべきである。

以上のように、地盤に関わる地球規模の環境問題、地盤汚染とその修復問題などは、国際的に多様な学問分野での研究が進展しているが、分野間相互の情報流通が成熟しておらず、知識の体系化が進んでいない。この広範囲な学問領域に関する知識の集積と発展に寄与する国際ネットワーク化と知識集約プログラムを積極的に提起すべきである。

核燃料廃棄物の地中処分は、地盤汚染を未然に防ぐという意味で、地盤汚染とその修復に関する問題群に含められる。地中処分技術では、核物質のガラス固化体及びステンレススチール製のオーバーパックという漏洩防止技術に加え、ベントナイト埋め戻しと岩盤を併せた多重の地質バリアーを利用することが、計画されている。地盤環境工学の立場からは、放射能の半減期から定まる超長期を対象にして、ベントナイトの飽和度増加と膨潤、変形を予測することが重要であり、オーバーパックの腐食から発生する水素や放射性物質の崩壊熱がベントナイトのバリアー性能に及ぼす影響の予測、核種のベントナイト中の移動と吸着の予測法などは、他分野との共同研究が必要な課題である。また、周辺岩盤のバリアー性能の評価においては、地質学や岩盤工学との共同作業が重要である。研究の現況では岩盤における物質移動という工学的側面に重点が置かれているが、ナチュラルアナログと呼ばれる自然界の天然原子炉の跡の調査によれば、放射性物質は一箇所に留まっていたとされており、吸着という化学のメカニズムにも目を配るべきである。

3.1.3 環境に影響を及ぼす物質循環に関する問題群に貢献する課題

環境に影響を及ぼす物質循環に関する問題群に関連して第 17 期報告 7～8 ページに以下の記述がある。「地球規模の生物循環，物質循環を考えると、地盤はその重要な環境要素であり、物質循環の要とも言える大きな役割を果たしている。(中略) これまで地盤工学分野で蓄積されてきた地盤内の流体・熱移動や地盤の安定性に関する調査・解析技術に加えて、多種多様な汚染物質の地盤中での挙動や生物・化学的变化などに対応し、地盤環境の保全という消極的効果に止まらず、地盤環境を改善し、新たな地盤環境の創造につなげるために、従来の地盤工学の枠組みを越えた新しい技術が要求される。」

すなわち、従来地盤工学が蓄積してきた地盤内の流体・熱移動，地盤の安定性，といった研究視点を，地球環境に影響する物質循環に関する問題群，すなわち，多種多様な汚染物質移動とそれらの生物・化学的变化の視点を付加すべきことを主張している。この第 17 期の認識を再確認しつつ，地盤環境工学の環境重視の展開に関わる具体的課題として，物質循環に関わる問題群は中核的問題として位置づけられるべきである。

3.1.4 生物・生態系に関わる問題群に貢献する課題

生物・生態系の保全について，これまでは人類の利便性や安全性が優先され，これに資するものとしての価値を与えられてきたが，今日では，生物の多様性そのものに大きな価値を認める傾向が世界的に広まっている。すなわち，生物の多様性は，自然界の必然であると同時に，人類の持続性を維持する上でも必要不可欠な要因であり，これを積極的に保全する必要がある，国際的にも国内的にも認知されている。

地盤環境工学は，本来広範かつ学際的である地盤工学を，特に環境との接点で注目した場合の切り口であることから，生物の多様性を保全するような地盤工学的問題群を設定する必要がある。土壌は生物多様性を担保する生物資源の宝庫である。地盤工学会誌「土と基礎」誌上で生物・生態系のテーマが論じられることは極めて少ないが，たとえばカナダでは，自然林を横断する高速道路上に，野生動物用の大規模な陸橋が架けられ，その陸橋上の自然環境を人工的に造成するなどの努力が見られる。この分野の課題を積極的に提起すべきである。

地盤と生物生産との関わりは，地球環境問題群で述べた食料不足問題と強く関連しており，同時に人口爆発，砂漠化や土壌流失による耕地の減少とも関連している。リビアやサウジアラビア，北アメリカやオーストラリアのように化石地下水を汲み上げて灌漑に使い続けている地域では，地下水中の微量塩類が耕土中に次第に集積し，これが土を汚染して耕作を困難としつつある。食糧問題の解決として，20世紀の中盤に品種改良や化学肥料の使用と灌漑技術の改善が行われ，これは緑の革命と呼ばれるほどの大きな成果を挙げた。しかし，これは土壌の劣化や塩類集積，砂漠拡大などの

壁に遭遇しており、今後は大きな食糧増産は期待しにくいとの指摘もある。

3.2 環境重視の展開に関わる課題の将来展望

環境重視の展開を選択したときどのような発展シナリオが描けるか、新たな学問領域の形成への可能性を持つ方向として、「農業あるいは生物分野との連携による展開」及び「化学分野との連携による展開」について将来展望を示し、その帰結として地球規模の地盤環境問題への展開を次に述べる。

3.2.1 農業あるいは生物分野との連携による展開

農業及び生物分野の中では、土壌科学分野が積極的に連携活動を展開している。地盤環境工学は、この種の動向にも注意を向け、必要かつ可能な連携を積極的に行うことによっても発展のシナリオが描けると考えられる。

平成 16 年 11 月 27 日、「土壌資源の秘めたる可能性と未来－土壌科学からのアプローチ」と称するシンポジウムが開催された。主催は、日本学術会議土壌・肥料・植物栄養学研究連絡委員会であり、共催は、(社)日本土壌肥料学会、日本ペドロジー学会、日本土壌微生物学会、日本土壌動物学会、農業土木学会、土壌物理学学会、後援は、(独)農業技術研究機構、(独)農業環境技術研究所、(財)日本土壌協会、全国農業共同組合連合会である。そのプログラムの中の演題の中からキーワードをあげると、国際土壌科学連合 (IUSS)・ペドロジー研究・先端的土壌化学とフィールド研究・土壌物理学・物質循環・土壌微生物群集と生態系機能陸上生態系の機能と土壌動物の多様性・持続的農業生産を支える地域資源循環・土壌生態系からの温室効果ガス放出、などであった。

この中で、土壌物理学は地盤環境工学との関連性が高い。その内容を簡略に述べれば、

- ① 最近 20 年間に、人間の行為によって地球全体で約 20 億 ha の土壌が劣化したこと (国連環境計画 (UNEP) 代表 ISRIC の調査報告)
- ② 土壌劣化の内容は、土壌侵食 (風食や水食)、土壌の酸性化、土壌の塩類化、土壌汚染、土壌からの溶脱や有機物損失、土壌圧縮、土壌の目詰まり、などであること
- ③ 日本の土壌劣化は報告されていないが、農地では「土壌が硬くなった」「土が悪くなった」「表土が薄くなっている」「排水不良圃場が出てきた」などという“現場の声”があり、日本の土壌劣化の危険も増大していること
- ④ トリクロロエチレン、六価クロム、重金属、有機塩素化合物、PCB、ヒ素など、社会問題化した土壌汚染が進行していること
- ⑤ SSSAJ (Soil Science Society of America Journal), JEQ (Journal of Environmental Quality), VZJ (Vadose Zone Journal) などの雑誌における最近 7 年間の土壌物理部門論文数

は、土壌物理一般 144 件、測定法 137 件、土壌構造 100 件、流れ (Flow) 44 件、透水係数 42 件、物質循環 (Fate) 21 件、熱関連 10 件、力学的挙動 9 件等となっており、期待される物質循環に関わる研究実績は萌芽的と言わざるを得ないこと

⑥ 土壌物理学において物質循環の研究があまり進展していない理由は、物質の化学変化をモデルに組み込むことの困難性、物質の吸着・離脱過程をモデルに組み込むことの困難性、移流・分散現象の測定や解析の困難性、植物が関与する移動現象の実験手法、解析手法の未確立、微生物が関与する移動現象の実験手法、解析手法の未確立、土壌ガス移動の基礎研究の遅れ、などが考えられること

⑦ このような現状を打開する方法として、土壌物理学から他分野への“越境”，他分野から土壌物理学への“越境”が有効であることなどが述べられた。

地盤環境工学が環境重視の展開を行い、これに関わる具体的課題の将来展望を掲げるためには、上述したような、農学分野の土壌科学関連諸科学との連携も視野に入れ、地盤工学が蓄積した独自の手法や技術を、他分野にも積極的に提供し、共通の課題を開拓することも重要である。将来的に地盤と生物の関係（地盤生物学）や地盤と農業の関係（地盤生物生産学）を取り扱う学問分野が創生され体系化されることにより、課題解決の道筋をつけることが期待される。

3.2.2 化学分野との連携による展開

地盤工学では主に「土の力学」を取り扱う上で必要とされてきた土の物理的性質および力学的性質の解明に必要とされる地盤の問題が研究対象となってきた。これに加えて、近年では地盤環境に関する研究成果が地盤工学研究発表会、地盤環境工学シンポジウムなどで発表され、地盤の化学的性質の重要性が増してきている。特に、汚染地盤修復・廃棄物処分場・環境影響物質循環・核廃棄物に関する技術開発が進められ、将来的にビジネスとしてその市場性が大きくなると考えられている。化学分野との連携が必要とされる由縁である。化学分野と連携して解決すべき問題には、次のようなものがある。

汚染地盤や廃棄物地盤の安全性評価への展開—土の化学的性質の評価—

汚染された地盤や有害物質を含む可能性のある廃棄物地盤の安全性を評価するためには、土と化学物質の化学的性質を質的・量的に評価する必要がある。従来から、土の化学的基本性質に関して、地盤工学会では、

- ① 土粒子に関する鉱物的取り扱い
- ② 土に含まれる鉱物由来の土粒子以外の物質、例えば有機物などの化学的特性
- ③ 間隙流体の化学的特性
- ④ 土粒子と間隙流体との物理化学的相互作用、特に粘土—水系の相互作用

- ⑤ 土中構造物への土の化学的性質の影響
- ⑥ 地盤改良効果への土の化学的性質の影響
 - などが重要とされ、研究されてきた。これらに加えて、
- ⑦ 土中の陽イオンや陰イオン含有量，特に陽イオン交換容量
- ⑧ 土中の微量成分としての重金属含有量，溶出量
- ⑨ 土中の有機物質の同定，特に有機塩素系物質や油脂類，炭化水素物などの含有量
- ⑩ 地盤汚染調査におけるサンプルの採取方法とその取り扱い方法

などの研究が必要である。地盤工学会は、これら土の化学的性質の把握に対する化学試験法の検討を、化学分野の専門家との連携の中で、平成17年度から始めようとしているところである。対象とする化学物質が非常に多いことから、土と化学物質の相互作用に関わる研究は、従来の「土壌化学」を「地盤化学」・「地盤物理化学」とも言うべき大きな学問分野体系へ発展させる可能性がある。

地球規模の地盤環境問題への展開

土の化学的性質や他の化学物質との物理化学的作用を実験室レベルでとらえる基礎研究に加えて、地球規模の地盤環境を実際のフィールドでとらえ、予測することが必要である。すなわち、個々の地盤中の物質移動に関する実験室レベルでの理解に加えて、広域での地盤環境のモニタリングとその評価が不可欠となる。具体的には、

- ① 酸性雨に対する地盤の反応を評価し、予測する技術
- ② グローバルな気候変動に対する地盤の反応を評価し、予測する技術
- ③ 地盤環境の変化が水圏や気圏に及ぼす影響を評価し、予測する技術
- ④ 地盤環境の変化が生物圏に及ぼす影響を評価し、予測する技術

などが求められるであろう。これらの研究においては、これまでの地盤の力学的知見と化学分野の連携によって、問題解決の糸口が見つけられる可能性がある。地盤の化学的性質のモニタリングは、地球環境変化の優れた指標となる可能性もある。これらの技術開発の困難性は、現象に関与する要素が多岐に渡るだけでなく、地盤環境自身が地域的に多様であることにあるが、若い研究者を魅了する学問分野になることが期待される。

このように、従来の力学をベースにした地盤工学の学問領域に加えて、地盤の化学的性質を深く理解することは、既存の学問の深化と新しい学問領域の創生に寄与すると考えられる。例えば、土の力学的性質である地盤の透水係数は、間隙流体の性質や流体と土粒子の化学反応、温度、土中の生物反応によって変化するであろう。しかし、この点に関して、ほとんど知見がないのが現状である。また、不飽和地盤中の物質移動もしかりであり、間隙空気－土粒子－水連成系の問題となる。これも研究は端緒についたばかりである。近い将来、土の化学的性質の理解が進み、地盤環境問題の抱える学問的課題が具体的に理解され、新たな学問領域の枠組みの骨格が出来上がること

が期待される。

参考文献

- 1) 日本学術会議，第 17 期社会環境工学研究連絡委員会・地盤環境工学専門委員会報告「21 世紀における地盤環境工学－新たな discipline の創造に向けて－」，2000.4.24.
- 2) 日本学術会議，第 18 期社会環境工学研究連絡委員会・地盤環境工学専門委員会報告「地盤環境工学の新たな展開－次世代を担う人材育成に向けて－」，2003.4.22.
- 3) レスター・ブラウン，プラン B－エコ・エコノミーをめざして，ワールドウォッチジャパン，2003.12.10.
- 4) フード・セキュリティー－誰が世界を養うのか－，ワールドウォッチジャパン，2005.4.11
- 5) 日本学術会議公開シンポジウム「土壌資源の秘めたる可能性と未来－土壌科学からのアプローチ」，2004.11.27.
- 6) 小特集「地盤・地下水汚染と対策」，土と基礎， Vol.47, No.10, 1999.
- 7) 小特集「土壌汚染とその対策」，土と基礎， Vol.52, No.10, 2004.

第4章 次世代廃棄物処分を担う地盤環境工学の展開

第2章では、社会技術重視の視点から、「環境社会技術」領域創成の必要性、第3章では、環境重視の視点から関連学問領域との連携による「地盤生物学」、「地盤生物生産学」、「地盤化学」、「地盤物理化学」等の学問領域の創成の必要性を述べた。当然ながら現在直面する環境諸問題の解決には社会技術重視と環境重視の両方の展開が必須である。最終の第4章では、都市再生の視点から地盤環境工学が主体的に貢献すべき廃棄物処分に問題を絞って、地盤環境工学の展開を展望する。

4.1 人類的課題の歴史的背景

人間史において人類の活動による地球環境の改変は、狩猟時代からさまざま経験されてきたが、それらは人類や地球の存亡に関わる程の規模ではなく、自然環境の自律的な循環作用で吸収可能なものであった。しかし、21世紀では人類の生存と地球の環境保全とが最重要テーマとして展開して行くであろうことは、広く認識されている。そしてこのテーマは、多くの分野の英知を総合してこそ実現の可能性が見えてくるものである。

地球環境への本質的脅威は、近代科学技術の発達と産業革命の帰結にその素因を求めることができる。20世紀の中盤までは、近代科学と産業は人類に幸福をもたらす善である、と信じられていたが、局所的で過度の快適性・利便性の追求は、その程度、規模において地球環境が吸収し得る許容限界を突破し、人類の生存すら危ぶまれる事態に至った。現代の人類が直面している根元的問題には、地球の環境問題の他にも第三世界の貧困と南北隔差の問題、テロリズムに発展している宗教対立の問題がある。21世紀になっても「南」における貧困と混迷が続き、現代の人口爆発とその統御の困難に至っている。ここで、20世紀の負の遺産とも呼べる人類が抱える問題を列挙してみる。

- ・ 気圏・水圏・地圏の汚染とその拡大,
- ・ 文明廃棄物の氾濫,
- ・ 人口の爆発と資源の濫費,
- ・ エネルギー, 鉱物, 水資源の枯渇,
- ・ 食糧供給拡大の限界,
- ・ 南北隔差と, 南世界における発展への希求,
- ・ 国際社会の不安定とテロリズム

20世紀の人類, 特にいわゆる先進国の国民は, 産業革命以後のヨーロッパ式文明の果実を享受して来た。そのことが開発途上国の国民の間で強い羨望を招き, 「環境よりも経済発展」という主張から, 資源の大量消費の原因となっている。したがって, 後

世の人類から「楽しむだけ楽しんで責任を垂れ流した 20 世紀」と非難されぬよう、問題解決の道筋をつけておかねばならない。そしてこの仕事は先に述べたように、特定のグループの努力で達成できるものではなく、様々な分野の叡智の結集が必要なのである。後世の人類に困窮と耐乏を残すのではなく、20 世紀の人類が概ねそうであったように、改善への希望を残したいものである。

4.2 リサイクルの限界と廃棄物処分

「日本の計画」には、資源の循環ということの重要性が謳われている。同じ物質を繰り返し使用すること（リサイクル）によって限られた資源の濫費を防ぎ、その欠乏を回避しよう、というものである。リサイクルという言葉の響きの良さもあって、これを廃棄物の氾濫と資源の保全のための切り札視している人々も多い。しかし、2 章でも論じたようにそれを実行に移すのはそれほど単純ではない。第一に、廃棄物を再度資源化するためには、雑多な物質の混在する廃棄物を純度の高い材料に戻さなくてはならない。これは資源工学の分野で選鉱と呼ばれている工程である。往年のガラス瓶や古新聞回収では、「選鉱」作業が家庭で容易に行うことができ、それゆえに資源の循環が実行可能であった。しかしそれでも、緑色の瓶を透明瓶に戻すことは現実的な費用では実行できない、と言われているし、古新聞から高級アート紙は再生できない。まして、金属やプラスチックの混在する電器製品を選鉱して 100%リサイクルすることは、余程の費用を消費者が負担せぬ限り実現できないだろう。すると、廃棄物の発生は減りこそすれ、消滅はしない。リサイクルの限界である。したがって、人類は未来永劫、廃棄物の処分場を探し続けなければならないであろう。江戸時代であれば、廃棄物のほとんどが土に返り得るか、もしくは肥やしとなって自前の田畑に還元することができた。しかし当時の大都市において既に塵芥の 100%リサイクルは実現せず、江戸湾の埋め立てに廻されていた。まして、現代の大都市の生活から発生する一般廃棄物は、たとえ一部をコンポスト肥料化できても、我が国の大都市の場合、それを受け入れる農業が近傍には足らないのである。さらには、人体に有害な物質を含む恐れのある産業廃棄物や医療廃棄物は、到底循環しうるものではない。発生し続ける廃棄物を処分するためには、廃棄物を地盤に変えてしまうことが伝統的な手法であり、安全かつ後世の人類に負担をかけない処分技術の確立にあたっては、地盤環境工学を中心に各分野の共同作業が望まれる。

現代の廃棄物処分場では、発生する汚水が周辺の地下環境を汚染せぬよう、最新の注意が求められている。そのためには透水性の低い粘土層上に廃棄物や処分する他、配水管で汚水を集め、人工的にベントナイト粘土やシートを敷き込んで漏洩を防いでいる。これらの漏洩防止バリアーの信頼性向上や、万一漏洩が発生した時の対処技術などに、今後とも地盤環境工学上の技術開発の課題がある。

4.3 一般廃棄物の処分技術の向上に対する地盤環境工学の課題

ここで言う一般廃棄物とは、例えば、家庭から排出される残飯その他のゴミや、それと同等な事業者起源の廃棄物を指している。いわゆる産業廃棄物のように、人体の健康に影響することが心配される廃棄物は、本節では触れない。まず、世界4地域の一般廃棄物処分の現状を眺めてみる。

イランのテヘランでは、市内から搬入された生ゴミをそのまま砂漠地帯に投棄している。汚水の漏出が起きているが、特に対策はとられていない。イランの家庭から出る生ゴミには果物の分量が多く、含まれる水分の為に焼却は非効率になってしまうようである。他方、農業人口が多いため、併設されているコンポスト肥料工場は、補助金の支援つきながらも運営が軌道に乗っている。

フィリピンの田舎では、廃棄物の取り扱いが無秩序である。ただし、私的な廃品収集業者が存在し、ゴミの山から紙や金属など換金できる資源を持ち去っており、ある意味のリサイクル体制が存在する。しかし、残余の有機質ゴミは、家畜がこれを食べる以外、処理されていない。多くの場合、ゴミは山野に山積みされ、限度を越えたゴミの山に大量の雨水が浸透するなどすると、安定を失った廃棄物斜面は崩壊し、周辺住民が生き埋めとなって犠牲者が出ている。このような災害は、近年ではフィリピンのマニラ郊外のパヤタスやインドネシアのバンドンの事例があり、開発途上国の都市問題の一つとして、顕在化しつつある。

米国のデラウェア州ウィルミントンの処分場では、従来コンポスト工場を併設して廃棄物の減容積と肥料化が行われていた。しかし、周辺住民から不安が寄せられ、これに同調した政治家の動きによって、工場は閉鎖された。廃棄物処分の分野では科学的な議論が通用しにくいことの一例である。現在は生ゴミの直接投棄が行われており、有機質の嫌気性分解によってメタンガスが発生する。メタンガスの持つ地球温室効果は二酸化炭素の20倍以上大きいため、メタンガスを燃やして二酸化炭素に変えてから排出している。ロサンゼルスでは、処分場を域内に立地できなくなったため、新しい試みがはじまっている。これは石油採掘のために水を地層へ圧入する技術を応用したもので、廃棄物に圧力をかけて地層中の深所へ押し込もうとしている。深所における地下水の移動速度から考えて、汚水が表層地盤を汚染する危険はごく小さい、とされているが、我が国の世論には受入れ難い技術とも思われる。

ドイツでは、廃棄物処分技術の先進国を自認しており、その技術の在り方には独特のものがある。大都市では生ゴミの焼却が盛んに行われていることは、我が国の状況と同様である。一方、特に中小都市においては、生ゴミは微生物による分解にゆだね、体積を減少させてから処分場（ランドフィル）に投棄されている。3週間の室内発酵の後、野外で数ヶ月処理を続け、十分減容した後、ランドフィルに処分するのである。また、ドイツ式の廃棄物処分体制の特徴は、リサイクルの重視にある。物質循環と再

利用に余分のコストがかかることは前述したが、それを国民が負担する、ということである。この流れに沿ってドイツでは現存のランドフィルの三分の一を近年中に閉鎖し、残りも 20 年後に閉鎖する、という驚異的な予定を実行に移している。ランドフィルが無くなれば廃棄物は全量リサイクルに廻さねばならないが、そのようなことが果たして可能なかどうか、社会制度からコスト負担、不法投棄の防止までを含めて、多方面の協力が必要である。

ドイツの現状の特徴として、1960 から 70 年代頃までの処分場の跡地を、他目的に利用する試みが進んでいることがある。ケルンの近郊のレーバークーゼン(Leverkusen)には、化学工場の「産業廃棄物」を処分した跡地があり、ここで 2005 年に庭園や花壇の見本市が開かれる。同じくケルンの北郊のノイス (Neuss) には、一般廃棄物のランドフィルの上に、室内人工スキー場の大構造物が建設され、営業している。また、ハンブルグでは、一般廃棄物処分場跡地を宅地に転換して分譲を図った例がある。これは、技術的には安全と考えられ、万一の場合にも責任をとる体制が作られていたものの、一般市民の不安はぬぐえず、分譲は不成功であった。新技術の社会的な認知がかならずしも容易でないことを示す例である。

我が国では、一般廃棄物は発生する自治体の中で処分する原則がある。自治体とは市町村のこともあれば、その広域連合体のこともある。いずれにせよ、市街地化や宅地化の進んだ自治体では、処分場の立地選定は多くの困難がある。我が国の廃棄物処分体制においては、景気不景気の影響以外に投棄量の大幅な減少は期待しにくく、また、廃棄物発生量の多い人口集中地域ほど処分場の適地が少ないという皮肉な問題がある。また、処分場を迷惑施設として設置に反対する近隣住民の意思も、無視しえない要素である。とすれば、限られた処分場にできるだけ多くの廃棄物を詰め込むことが、重要であろう。

以上、都市の一般廃棄物処分に関わる問題を、地盤環境工学的側面を中心に述べてきた。そして将来に向けて我が国における地盤環境工学の課題をまとめると、周辺地下水環境の保全、迷惑施設という低い地位からの脱却、処分場の容量増大すなわち延命の技術、ということになるろう。

4.4 地盤環境工学の展望—都市再生問題を例にして—

本節では、地盤環境工学が具体的に果たしうる役割について、都市再生を例にして論じる。なお、議論でおおよそ 30 年後の社会を想定している。

4.4.1 都市再生の本質的な要件

都市と農漁村との違いは、人口集中の度合いにある。時代によって差異はあるものの、都市は少なくとも万単位、現代なら 10 万から 100 万単位の人口が集中して住むと

ころである。集中して住んでいけば、自ら農地を耕して食糧を十分に生産する空間的な余地は無い。すると、これだけの人口が「食べる」ためには、食糧や住居を入手／維持できるだけの収入の途がなければならない。都市には多くの種類がある。人類の歴史を通じて、政治都市、宗教都市、軍事都市、交易都市など、その在り方は様々であったが、いずれもお金の流れがあり、それによって住民が生活を維持できることが共通項であった。その事情は現在も変わっておらず、都市再生、あるいは更に進んで大都市の国際競争力再生を目指すなら、都市を維持するに足る金銭収入をもたらす展望が不可欠である。

4.4.2 経済的な視点を備えた都市再生－イギリスの事例－

イギリスは戦後福祉国家への途を歩んだが、その政策が結果として経済活力を喪失させることになった。特に産業革命の中心であったイングランド中部の都市圏においては、人口流出に伴い都心が荒廃した。高い失業率と低所得、劣悪な住宅環境、高い犯罪発生率による治安への不安など、大都市に深刻な問題が広がった。これらの問題に対応するため、1969年に地方自治体補助金法が成立し、それに基づく補助金制度であるアーバン事業が設立された。その内容は、住宅環境の改善、新たな学校の建設、交通網整備などであったが、都心荒廃の問題の解決には至らなかったのである。特に、経済活力を高めるという視点が欠けていたため、根本的に問題解決をすることができなかった。1977年の政府報告書は、都市衰退の最も深刻な問題は経済の衰退であり、社会福祉やハード系中心の政策だけでは問題が解決できないこと、より包括的な施策を実施しなければならないとともに都市再生には長い期間を要することを指摘した。1979年のサッチャー政権成立後、アーバン事業は継続されたものの内容は見直され、規制緩和によって経済の活性化が推進された。地域再生事業に対して民間の参入を促進するとともに、Value for Moneyへの関心を高めることを目指し、この政策が90年代になって成果を生みはじめた。

都市再生への具体的な方策は、全世界で一定ではない。地域の特性を生かして臨機応変たるべきである。しかし、都市の本質が人口集住である以上、それを維持するための経済力を重視したイギリスの例は、重視して参考にすべきである。このことを踏まえて、次節で具体的な議論を展開する

4.4.3 大都市の再生へ向けて地盤環境工学からの提案

－都市一般廃棄物地盤を空間資源へ循環再利用する可能性－

限られた平野で稠密な人口が集住する我が国の大都市の弱点は、新たな成長を遂げる為の空間・土地資源の不足である。都市周辺にグリーンベルトが確保されておらず、都心は既に飽和している。鉄道の貨物施設跡地などを新たな街区として開発することは実行されているが、大都市の国際競争力を高めるほどのパワー集積は、限られた面

積では生まれにくい。そこで着目するのが、大都市に隣接して存在している都市一般廃棄物の埋め立て人工島、正しくは海面処分場跡地である。跡地とは廃棄物の処分が終了したことを意味し、現在は処分進行中であっても近い将来には必ず処分が終了し、広大な空き地となる。このような海面処分場跡地の長所は以下のとおりである。

- ・ 既に存在していて土地は公有であり、利用に当たって買収の必要がない。
- ・ 国際空港や国際貿易港に隣接して、交通の要地を占めている（ものがある）。
- ・ 周辺に百万人から一千万人規模の人口と産業の集積がある。
- ・ 周辺からの交通路も整備が進んでいる（ものがある）。
- ・ 環境汚染への関心の高まりから、廃棄物に起因する汚染防止のため、処分場を囲む護岸や浸出水の浄化には、既に多額の公費を費やして万全が期されている。

これらの利点に対して、処分場跡地の人工島を都市施設として発展させる上での問題点は、次のとおりである。

- ・ 地盤として安定しておらず、地盤沈下やメタンガス発生の問題がある。
- ・ 廃棄物地盤から発生、漏出する物質が、環境に悪影響を及ぼす懸念がある。

往年の生ゴミの直接投棄は、昆虫の発生や汚水とメタンガスの大量発生など問題が多く、近年は焼却処分に置き換わっている。特に、高温焼却は有害なダイオキシンを分解する力もあり、有益である。東京湾の焼却灰と不燃ゴミの処分場で経年観測された大気中のダイオキシン濃度は、基準値以下であり、都心の水準と大差が無いことがわかっている。このように、安全上の問題が認められないことと市民教育上の重要性が合わさって、東京港の埋立地の廃棄物処分場は、一般市民から小学生の社会科見学まで、広く市民に公開されている。また、廃棄物処分場で通年勤務している人々は、当然のことながら健康診断を受けており、通常の市街地で生活している人々と比べても、特に健康上の問題は見出されていない。なお、その環境条件が長期的に維持できることを多角的に検討し、更なる環境改善を可能とするような研究が必要である。

一般に、廃棄物層は軟弱で、建物その他の施設を支える材料強度に乏しい、と誤解されている。しかし、実際に実験してみると、廃棄物層は重力に抗して自らを支える十分な「せん断強度」が備わっている。問題は、外力が作用した場合の変形と地盤沈下である。この問題に対しても、プレローディングと呼ばれる地盤の改良技術（地表面にあらかじめ過大な重量を載荷し、十分な地盤沈下を起こさせてから荷重を除去し、実用に供する技術）が有効であることが、実験室のレベルでは判明している。また、地震国の日本では、廃棄物地盤の地震時挙動についても検討する必要があるが、廃棄物層は地震に際して振動しにくい地盤であることも、模型の振動実験を通じて分かっている。このような特性は、廃棄物に含まれる繊維質成分が大きな役割を果たしている。今後の課題としては、実験で得られたこれらの知見を実際の廃棄物地盤で検証すること、さまざまな廃棄物の混在する処分場地盤の変形を正しく予測できる技術を開発すること、そのために廃棄物地盤の挙動を現地観測して物性の空間分布を逆推定す

る技術を確立すること，そして環境面からの安全性を多角的に確認し，これを市民に理解してもらう社会的な技術の開発が想定される。

4.4.4 他分野との連携について

廃棄物地盤が人体の健康に影響がないと言われていることはすでに述べたが，一般国民の感覚では，廃棄物処分場跡地の利用には心理的抵抗感がある。特に，不特定多数が長期在留する状況に備え，詳細な調査を実施すべきである。また，処分場から周辺へ漏出する物質の可能性とその影響は，これからの大きな課題となることが予想されるので，他分野との研究連携が是非とも必要である。

処分場地盤からのメタンガスの発生には，正負の両面がある。メタンガスは，有機物の嫌気性分解を通じて発生するので，その発生量は生ゴミ廃棄地盤においてはなほだしい。しかし，不燃性ゴミの地盤であっても，プラスチック容器に付着した食料品などの有機物が無いわけではなく，実際かなりの量のメタンガスが大気中に放散され，地球の温暖化にもつながっている。このガスを単に放散せずに発電施設に導入して資源化している例も珍しくない。また，福岡方式と呼ばれる空気導入という技術も実用化が進むとともに，化学的な研究も進んでおり，地盤中に酸素に富む好気性環境を形成することにより，有機物の分解を速め，かつ発生ガスを二酸化炭素に転換することが目指されているなど，新しい研究開発を通して地盤環境工学が大きな貢献をすることが期待される。

地盤沈下の起こる状況では，建築基礎構造にも配慮が必要である。ごく軽量の鉄骨構造で三階建て程度の建物であれば，廃棄物地盤の持つ材料強度によってこれを支えることは十分可能である。このとき，超高層ビルの建設を通じて蓄積された技術が利用できる。また，地盤と建物がともに同量沈下することは，建物の使用性に何ら影響しない。問題となるのは，建物の地盤中へのめり込みと傾斜（不等沈下）である。これを防ぐには，プレローディング地盤改良技術に加えて，硬質な地層まで到達する杭基礎で建物を支えることが，最も確実である。廃棄物地盤でも過去にはそのような事例が数多く施工されたが，現在は環境保全に対する考え方が厳しく，埋め立て処分場の廃棄物層の下には汚染水の漏洩を防ぐ役割を果たしている海底粘土層があり，これを杭が貫いて硬質地層へ達することは，外界への汚水漏洩を招くことになるとして，実現に困難が多い。このため，新しい杭基礎工法の開発が必要になる。具体的には，廃棄物地盤のように「構造物を支える能力は十分あるが沈下めり込みが問題である」軟弱地盤に対して開発されてきたパイルドラフト基礎及び，一部の埋め立て地で実用化されているジャッキアップによる沈下補正技術が有効と考える。これらの技術の導入に当たっては，現場毎に異なる地盤沈下性状の調査と予測技術の確立が重要であり，先述のプレローディング地盤改良の実施に当たって地盤の沈下を計測し，そのデータを利用して廃棄物地盤の物性を推定する逆解析の技術開発が，期待される。そして，

これらの技術開発の信頼性を社会に向かって示し、信頼を勝ち得るための方法論が、社会学の分野との協力によって、確立されなければならない。さらに、現下の財政事情を考慮するならば、国際的な資本導入をも見据えて、廃棄物処分人工島の有効利用を民間ビジネスとして実施する可能性も、財政的に検討することが重要である。

地盤工学と地盤環境工学の将来展望の一例として、廃棄物の処分によって生み出された埋め立て地盤を、20世紀の負の遺産から転換し、都市再生のための空間資源として再利用する技術を説明した。その実現に向けては、地盤工学の分野で従来確立されてきた技術シーズが重要な役割を果たすことは言うまでもない。しかし、それだけではまったく不十分であり、地盤沈下の害を受けにくい建築技術の確立、有機廃棄物の変質を促進させるための化学／生物学の応用、廃棄物処分場跡地に長期滞在するときの人体の健康の徹底的な検討、社会に認知されるための社会学的方法論、ビジネスとして成立するための財政的検討など、多様な分野との協力・連携がきわめて重要である。

第5章 提言のまとめ

21世紀初頭の現在、環境の構成要素としての「地盤」の重要性が強く認識されるようになってきた。地盤は、本来、多面的な機能とそれに基づく様々な役割を有しており、次世代に引き継がねばならない人類の貴重な財産である。環境、防災、廃棄物処理などの社会問題が顕在化する中で、環境の構成要素としての「地盤」に関わる問題に取り組むためには、日本学術会議の研究連絡委員会・専門委員会との密接な連携の下で、地盤工学会を中心とした国際的・学際的な活動が今後一層重要になる。

本報告では、社会問題として顕在化した「地盤」に関わる環境問題を解決するため、地盤環境工学の展開の方向性として、①社会技術重視の展開、②環境重視の展開、の二つを提示し、それぞれの方向性に対して、地盤環境工学が具体的に貢献しうる課題を抽出するとともに、その展開のシナリオを示した。また、これらの課題を解決するために必要となる具体的な他分野との連携内容を提言した。最後に、都市再生を例にして地盤環境工学の役割を明示的に示した。以上の論点から、以下の7項目の提言を行う。

- 1) 「循環型社会」や「安心・安全で快適な社会」の構築を目指す社会技術重視の展開では、ハード技術からソフト対応まで包含した幅広い視点からの学術研究が必須である。そのためには、基盤となる工学分野に加えて人文・社会科学分野、環境科学分野、情報科学分野など、多くの専門分野を連携・融合した総合科学技術としての「環境社会技術」というべき学問領域の展開を進める必要がある。
- 2) 循環型社会の構築のため、広域的なリサイクル拠点としての廃棄物海面埋め立処分場の建設・管理・跡地利用技術、汚染土壌の低コスト封じ込め技術、各種産業廃棄物再生材の地盤材料としての利用技術など、「地盤」の受け入れ容量の大きさの特徴を生かす技術開発に取り組むべきである。
- 3) 安心・安全で快適な社会の構築のため、大規模災害を想定した「総合的な防災戦略の構築」、及び地下水の環境影響評価・保全技術、土壌汚染のリスク評価・低コスト対策技術などの「地盤環境保全技術の高度化」の2課題を重点的に推進すべきである。
- 4) 地盤に関係する社会資本として、歴史的遺産から生活・社会・産業基盤施設として現在使用している道路、トンネル、建築物・橋梁・港湾施設等の基礎、河川堤防、地下構造物、廃棄物処分場などがあり、これら社会資本の長寿命化に関わる診断・補修・更新技術は環境保全上重要な技術課題と再認識される必要がある。
- 5) 環境重視の展開として、地盤に係わる地球規模の行き詰まり問題としての環境問題に積極的に取り組む必要がある。そのため、地盤と生物（地盤生物学）・地盤と農作物（地盤生物生産学）・地盤と化学物質（地盤化学）の相互作用に関する研究と学問分野の創成を生物・農業・化学分野と連携して推進すべきである。

- 6) 地盤に関わる地球規模の問題, 地盤汚染とその修復問題などは, 国際的に多様な学問分野での研究が進展しているが, 分野間相互の情報流通が成熟しておらず, 知識の体系化が進んでいない。この広範囲な学問領域に関する知識の集積と発展に寄与する国際ネットワーク化と知識集約プログラムを積極的に提起すべきである。
- 7) 都市再生のための空間資源として廃棄物埋立処分場を生活・産業空間として, 積極的に有効利用するための実証的技術開発, 及び社会に認知されるための社会学的方法論の構築, ビジネスとして成立するための財政的検討など, 多様な分野との協力・連携を推進すべきである。

このような地盤環境工学の社会技術・環境重視の展開が, 他分野との連携によって地球規模の地盤環境の保全とその有効利用に寄与することが期待される。