

# 資源循環社会を担う下水道技術

平成 27 年 3 月

大 迫 健 一

著者 大迫 健一

著者略歴

日本下水道事業団東京支社長  
東京都下水道局施設管理部長、建設部長  
千葉工業大学建築都市環境学科教授  
東京都下水道サービス株式会社参与  
月島機械株式会社 技術顧問



改訂履歴

12. October. 2011	第一版
01. March. 2013	第二版
01. September. 2013	第三版
01. March. 2014	第四版
01. September. 2014	第五版
01. March. 2015	第六版

# 目 次

1. 生命の誕生と水 (1)
2. 地球における水の大循環 (2)
3. 文明の進展と人口増加 (2)
4. 衛生工学の発達 (3)
5. 水資源の循環および環境保全のための高度処理 (9)
6. 有機物と無機物資源の循環の為の下水汚泥処理 (10)
7. 資源循環利用に向けた下水道技術 (12)

## 参考資料－1) 下水道施設の設計と施工

- 参考－1) 計画下水量の算定 (14)
- 参考－2) ストークスの法則と重力沈澱池の設計 (17)
- 参考－3) 土の強度と土圧の大きさ (18)
- 参考－4) セメントコンクリートの材料特性と強度 (28)
- 参考－5) 均等な流れと損失水頭 (31)
- 参考－6) 標準活性汚泥法の設計(晴天時日最大汚水量10万m<sup>3</sup>として) (32)
- 参考－7) 基礎工法 (32)
- 参考－8) 施設構造および耐震設計の考え方 (36)
- 参考－9) 山留め堀削工法と地盤改良および地下水の排水工法 (43)
- 参考－10) 下水道施設の施工法 (47)

## 参考資料－2) 最近知り得た情報

- 細胞膜(51)
- 再生可能エネルギー(51)
- 水と溶存物質の分離(51)
- 発泡材の製造(プラスチック、金属、セラミック、ガラス、セメント、アルミナ)(51)
- 宇宙の中の地球(52)
- 繊維強化プラスチックの活用による省エネルギー(52)
- 3D技術の応用(53)
- 分散型エネルギーと直流発送配電システム(54)
- 選択肢としての発送配電分離(54)
- 原子核エネルギーの発電利用(55)
- 電磁波の可能性(56)
- 音波の可能性(56)

天然ガスについて(57)

太陽光エネルギーの活用 ―太陽光発電と人工光合成―(58)

触媒の効用(59)

核融合とミュオン触媒(60)

光触媒酸化チタンの親水性と疎水性の性状変化(61)

レアアースの活躍と副産物放射性トリウム原子力エネルギー利用(61)

ユビキタス通信技術を活用したオリンピック開催時のおもてなし(62)

鉄の素材価値を引き出す(62)

溶射皮膜による耐摩耗性能、耐腐食性能の向上(65)

電池(66)

## 1. 生命の誕生と水

水は生命の源と言われる。惑星である地球は約46億年まえに恒星の太陽の超新星爆発により誕生した。アインシュタインによると原子は核融合や核分裂によりその構成を変え質量の変化はエネルギーとなる。灼熱の原始地球のマグマは摂氏6000度にもなり大気は温室効果ガスである二酸化炭素や水蒸気で覆われていた。このマグマには1%弱の水が含まれていたであろう事は落ちてきた隕石の成分分析からも推定できる。この二酸化炭素は高温のマグマに溶け大気の温室効果を下げ、マグマに含まれている水分はやがて灼熱の海を形成する。海水に溶ける二酸化炭素はカルシウムと結合し石灰岩として沈積し大気温度を更に緩和する。また海水の一部は蒸発し上空で冷やされて高温の雨を降らせる。厳しい地球環境は次第に緩和され生命誕生の機会を準備した。

約38億年まえには地球に生命が誕生した痕跡をオーストラリアのビルバラの化石に確認できる。有機物の合成にはC H O Nなどの元素が必要であるが水素は軽く圏外に飛散して確保しにくいので最初は硫化水素に求めた。高温噴出孔などの硫化水素を太陽エネルギーで分解して水素を利用する嫌気性菌の誕生である。この嫌気性菌が繁栄するにつれ水素が不足してきたので水に期待したがその水素結合は強力であった。やがて太陽光の短波長を利用しクロロフィルで水を分解してできる水素と大気中の二酸化炭素を利用して有機物を合成し併せてATPと酸素を発生させる光合成細菌が生まれた。この子孫がシアノバクテリアである。約27億年前頃に大量発生した光合成細菌は地球大気の酸素濃度を高めて次第に好氣的環境に変えていった。この環境に最も適合したのは酸素呼吸し有機物を分解してエネルギーを得る好気性細菌である。好気性細菌は呼吸により38ATPのエネルギーを得るが嫌気性菌は2ATPである。やがて嫌気性菌は暗く深い場所に追いやられていった。

初期の細菌は遺伝子DNAを細胞膜で包み核をもたない原核細菌であり真正細菌と古細菌に分けられる。やがて原核細菌は核を持つ真核細菌へ進化していく過程で、真正細菌のうち光合成機能を葉緑体として、あるいは細胞呼吸とATP形成機能をミトコンドリアとして核内に取り込み共生した。この真核細菌のうちセルロースやリグニンの細胞壁を備え核内に葉緑体と好気性のミトコンドリアを取り込む細菌は植物の祖先に、細胞壁を持たず核内に好気性菌などをミトコンドリアとして共生した真核細菌は動物の祖先となる。ダーウインの「種の起源」によると環境の変遷に最も適応する生命体が寄生や共生など駆使し機能を獲得しながら進化していく。

水は強力な水素結合を持ち約4オングストロームの大きさを持つ分子である。水は固体、液体、気体の3態様を示し融解熱は80cal/gで潜熱は539cal/gと大きい。水は気温の急激な高低変化を融解熱と潜熱を利用して緩和する。比熱が大きいので熱を気流や海流の移動にのせて地球の隅々まで運ぶ。また物質を溶解し運搬し反応の場を提供する。摂氏4度

水の密度は最も大きいので固体の水は水に浮き、冷えた密度の高い水は大気の酸素を溶解したまま深層に沈む。これが湖の躍層を形成するが四季の気温の変化は水温と密度の変動を誘発し湖水の表層と深層の大循環の原動力となる。次第に深層には有機物などが沈殿し溶存酸素は消費しつくされ太陽光も届かないので嫌気性分解が進行するがその分解栄養物は細菌のエネルギー源となる。

また水は強力な水素結合による粘性が大きい。これが水の表面張力や毛管現象に関わり土壌や植物の先端まで水に溶かした栄養素を運搬する機能を与える。細胞質や血液の大部分は水で構成されているので、これら水の特徴を生かして生命を維持している。

人類は500～700万年前にアフリカ大陸に出現したと想定される遺跡が発掘されているが、やがてユーラシア大陸へ移動していく。

## 2. 地球における水の大循環

太陽光の地球への影響は大気圏の浮遊物質や地表面で吸収反射され平衡を保っている。近年オゾン層の破壊と温室効果ガスの増加が国際的な地球環境変動要因として議論されている。オゾン層は太陽光の紫外線を吸収しその人類などへの障害を軽減していると言われている。フロンなど特定合成化学物質の使用によりオゾンが分解し紫外線の吸収機能の低下を懸念するものである。一方温室効果ガスについては人口の増加と経済産業の発達に伴い資源エネルギーの消費が増大し二酸化炭素などの大気への放出が地球気象に影響するまでに増えていると言うものである。水蒸気も温室効果ガスであるが水は地球大気を大循環している。太陽エネルギーを受けて地球上の水は潜熱を吸収して蒸発し純水となる。地球大気は宇宙から見ると約摂氏-18度であるので大気圏の上層で凝結し雲や水滴は雨として降る。この働きにより大気中の水蒸気は約10日に1回入れ替わる。その地球全体の降雨は平均すると年間約1000mmに相当する。

自然の純水製造機能であるこの蒸発も降雨により大気や山地の物質を溶かし込みながら森林に浸透し地下水となり、やがて湧水や溪流を育み表流水や伏流水として流れ下る。この水の大循環によりミネラルを含んだおいしい飲用水が得られ併せて位置のエネルギーも確保できる。二酸化炭素や水蒸気などの温室効果により大気圏の平均気温は摂氏15度に緩和され生命の維持に貢献している。

## 3. 文明の進展と人口増加

アフリカに生まれた人類の祖先は約10万年前にはユーラシア大陸やアメリカ大陸を移動している。森に育まれて狩猟生活が中心であったので食糧の制約は人口の増加を抑制した。約1万年前には農耕革命があり食糧を獲得し易くなり人口の増加の契機となった。このころの世界人口は200～500万人といわれている。農業による余剰生産は富と権力の集中を生んだものの森林資源や農産物生産量に支配され人口の増加は緩やかであった。共同社会の権力者は集落を形成し道路や湧水を引く水道のほか生活排水や雨水排水施設な

ど社会基盤の原型を設けるようになった。モヘンジョダロ遺跡やバビロンの遺跡のほかローマの水道橋や下水道など良く知られている。

コロンブスのアメリカ大陸発見や江戸幕府初期にあたる1600年ごろの世界人口は約5億人であり産業革命に入る1830年ごろは約10億人となった。ところがイギリスに始まった産業革命は多くの地下資源を消費し工場を中心に生産効率をあげ都市に人口と産業基盤を集約した。急激な労働者の都市集住に対して住宅や近代水道を整え、加えて生活排水や雨水排水などの近代下水道を整備して都市環境の維持に努めた。また産業の生産性の向上により物質文明は開花し食糧や生活物資を得やすくなるほか医療や生活環境の充実により世界人口は大幅に増え21世紀初めには64億人を超えた。さらに開発途上国の経済発展と出生率の高さから国際連合の中位推計では2050年の世界人口は94億人になると予測している。地球環境容量に見合う人口負荷や経済産業活動負荷であれば生活環境を維持保全できるものの現状の人類の繁栄はその限界を超えつつある。

#### 4. 衛生工学の発達

人は生きていくのに1日2～3Lの水を摂取する必要がある。産業活動が都市に集中し多くの労働者が住むようになると水道の需要が高まる。湧水や地下水のほか河川水を原水として浄化し供給するが、やがて使用済み排水を集めて処理し公共用水域にもどす下水道に繋がる。太陽光による水の蒸発で得た純水は利水の障害物はないが山間地を経て原水として取水するまでに無機、有機物質やミネラルなど物質を溶解しているので利水目的の水質に合う様に浄化する。水に含まれている物質を除去する為の適用技術は粒子の大きさやその物性により変わる。

まず物質の大きさを球形で代表させその直径で表し一般的な除去技術を対応させる。

表一水溶性物質の大きさと重力沈殿除去技術の適用性

直 径	粒子の名称	代表的な成分	除去技術	補助技術
2mm (ミリメートル $10^{-3}\text{m}$ )	礫	礫 岩	重力沈殿良好	自然沈殿
	砂	砂 砂質土		
76 $\mu\text{m}$	シルト	シルト 粘性土	重力沈殿不良	
5 $\mu\text{m}$ (1 $\mu\text{m}$ ) (マイクロメートル $10^{-6}\text{m}$ )	粘土 (懸濁性物質)	粘土 粘性土 原生動物	重力沈殿不可 凝集沈殿可能	凝集操作
	コロイド (溶解性物質)	粘土 細菌 病原菌 臭気成分 色素成分 ウイルス フミン酸		
1 $\text{\AA}$ (オングストローム $10^{-10}\text{m}$ )		農薬 微量有機物 硝酸 亜硝酸 フルボ酸 金属塩類 水(4 $\text{\AA}$ )	凝集沈殿不可	

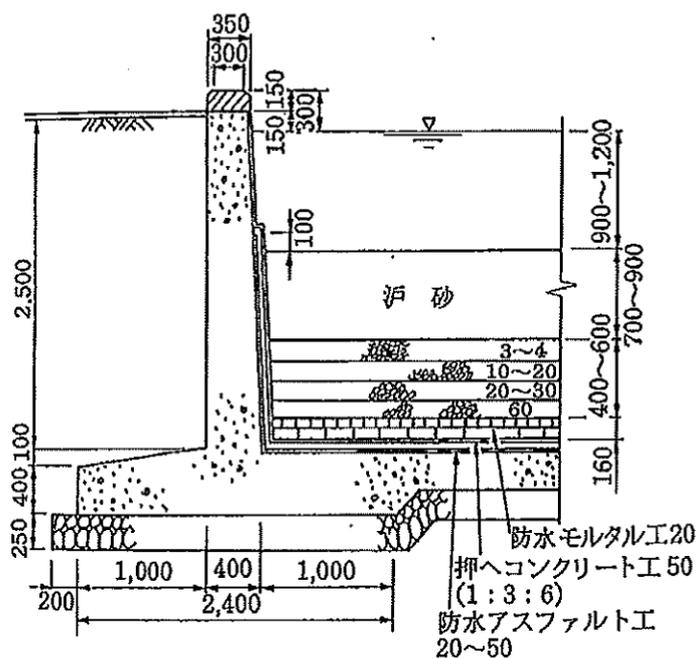
自然界の汚濁物質除去技術の基本は地球の重力を利用する沈殿技術である。この重力沈殿で利水目的の水質、水量を確保できれば非常に経済的となる。これを簡易浄水処理と言う。粒径が小さくまた重力沈殿に要する時間がかかり過ぎる主としてコロイド成分の除去には粒径を大きくする凝集技術を採用する。一般にコロイド粒子は負の電荷を持ち互いに反発してブラウン運動をしており重力沈殿は難しい。ストークスの法則（参考—2）によると沈降速度は粒径の2乗に比例するのでより短い時間で目的を達成するには粒径を大きくする凝集が重要である。この凝集操作には一般に生物凝集と物理化学凝集がある。生物凝集は好気性細菌や嫌気性細菌による有機物の酸化、分解作用と生物凝集および架橋機能を活用する。上水道で良く利用する緩速砂ろ過法は比較的良好な原水に対して採用され、おいしい飲用水を提供する。その浄化工程は河川表流水では、

原水取水堰—導水渠—着水井—沈砂池—揚水ポンプ—最初沈殿池—緩速砂ろ過池  
—消毒槽—配水池—送水管—配水池—配水管—給水管—給水栓

となる。

沈殿池は重力により砂質無機分を除去するもので、その水面積は除去対象粒子の沈降速度（水面積負荷  $m/d$ ）で処理水量（ $m^3/d$ ）を割って求める。（参考—2）

緩速砂ろ過池はろ過速度 3 ~ 5 ( $m/d$ ) で 60 ~ 90 cm のろ床（40 ~ 60 cm の砂利層の上に敷き込む）を通過させ、ろ床の上部表面に厚さ 5 mm 程度の生物膜（シュムッツデッケ）を増殖させ生物による酸化、分解および凝集させる。1 ~ 2 か月ごとにろ床の損失水頭が大きくなると運転を停止し生物膜を 10 ~ 15 mm 程度掻き取る。ろ床が 60 cm を下回らない様に砂を補充し、ろ過機能の回復を図る。掻き取った生物膜は水洗浄し、ろ過砂は再使用する。緩速ろ過池の水面積は



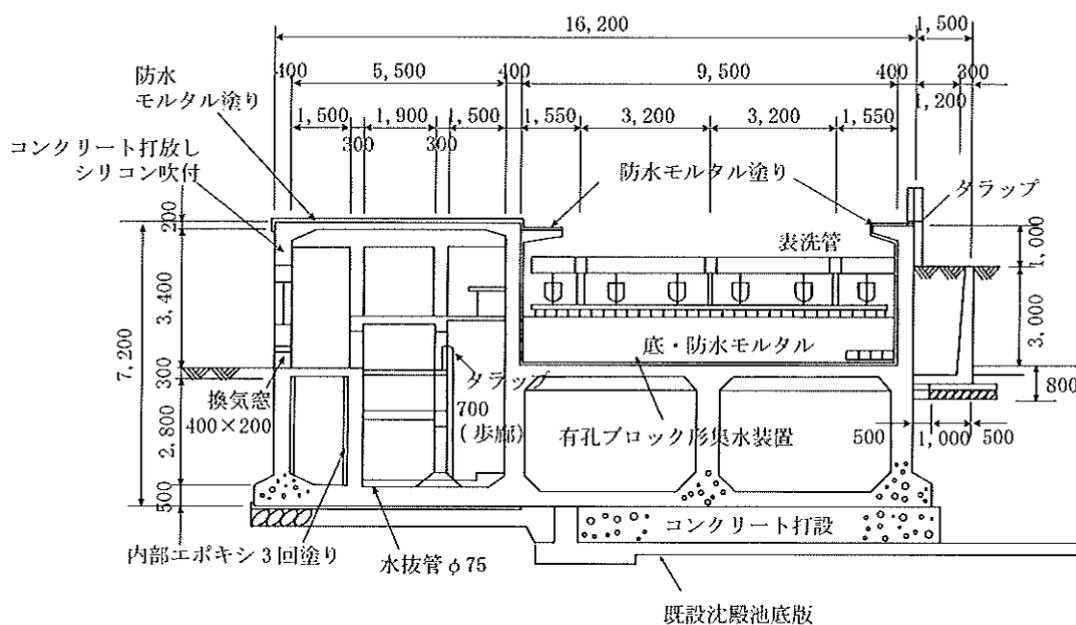
緩速ろ過池の参考図

処理水量（ $m^3/d$ ）をろ過速度（ $m/d$ ）で割って求める。またろ過砂の有効径  $D_{10}$  は 0.3 ~ 0.45 mm で均等係数  $U=D_{60}/D_{10}$  は 2.0 以下とする。（参考—3）

そもそもこの緩速ろ過法は 1892 年エルベ川より飲料水を取水し無処理で給水していたドイツのハンブルグ市ではコレラが流行したのに対し、対岸のアルトナ市は緩速ろ過して給水していたので被害が少なくその効果が認められた。1820 年にはイギリスのチェ

ルシー浄水場で本格的に導入されコンチネンタルフィルターと呼ばれている。生物膜の微生物は水中の溶存酸素を利用して酸化分解するのでその水への溶存限界10 mg/lに制約され原水は清浄である必要がある。このコンチネンタルフィルターを19世紀末アメリカ東部に導入したが原水の濁度や色度が高く閉塞を防ぐため生物膜の掻き取りが頻繁となるのでこれを克服する為に物理化学凝集による急速砂ろ過法の開発に繋がった。

急速砂ろ過法はアメリカンフィルターと呼ばれ重力沈殿処理水に硫酸バンドやPAC（ポリ塩化アルミニウム）など凝集剤を加え混合、急速攪拌しろ過速度120～150 m/d



急速ろ過池の参考図

で固液分離する。ろ過池の損失水頭や浄水濁度を指標にして表面洗浄並びに逆流洗浄を行う過機能を回復する。この逆洗の一般的な手順は、1) 水流ジェットによる表面洗浄を2分程度、2) 次に砂層の膨張率が120～130%になるように60～100 cm/min程度の上昇水流を加えながら2～3分表面洗浄を行い、3) 次に上昇流のみで数分洗浄する。ヨーロッパでは表面洗浄の代わりに逆流洗浄の前半は空気をろ床の底部から吹き込んで砂層を攪乱し、次に逆流洗浄を加える方法であり多層ろ過に有効と言われている。ろ過層は2～50 mmの礫層20～50 cmのうえに有効径0.45～0.70 mmで均等係数1.7以下の砂を60 cm程度敷き込む。ろ過池の砂層の間隙は100 μm程度あるのに対して凝集フロックは10 μm以下であり凝集しつつ沈殿除去されると解釈している。急速濾過池の必要水面積は処理水量をろ過速度で除して決めるのは緩速ろ過池と同様である。河川表流水を原水とする場合の急速ろ過法による浄水工程は一般に次の通りである。

原水取水堰—導水渠—着水井—沈砂池—揚水ポンプ—最初沈殿池—薬品混和池—急速攪拌池—急速ろ過池—消毒槽—浄水池—送水管—配水池—配水管—給水管—給水栓

一般にコロイド性汚濁物質は負に帯電しており互いの反発力は大きく遊離しているので凝集操作は負イオンを弱酸性においてアルミニウムや鉄などの金属陽イオンで中和し、併

せて中性付近で金属水酸化物による架橋作用により凝集効果を高める。最適な凝集ろ過条件を定める為に濁度を指標として凝集剤注入量と操作水素イオン濃度を変化させるジャーテストを実施する。

下水道による一般的な処理工程は、

流入下水—沈砂池—揚水ポンプ—最初沈澱池—反応槽—最終沈殿池—消毒槽—放流渠である。

反応槽において生物凝集を活用しており大規模処理場では標準活性汚泥法を採用しているが小規模ではオキシデーショondiッチ法や回分式活性汚泥法のほか接触酸化法や回転円板法などを用いている。標準活性汚泥法やオキシデーショondiッチ法のほか回分式活性汚泥法は水中に浮遊する微生物を利用しているが接触酸化法と回転円板法は固着性の微生物を活用する。現在の標準活性汚泥法の反応槽で活用している一般的な微生物は次の4種類である。

表一微生物の種類

種類	備考
好気性細菌	炭素を主体とした有機物を分解してエネルギーを得る他栄養型の好気性細菌
硝化細菌	有機物を分解してできるアンモニアを亜硝酸に酸化するニトロソモナス、更に硝酸に酸化するニトロバクターは自栄養型の好気性硝化細菌
脱窒素細菌	溶存酸素のない無酸素状態では硝酸や亜硝酸に含まれる結合酸素を利用する他栄養型で窒素ガスとして大気に放出する通性嫌気性細菌
燐固定細菌	溶存酸素も結合酸素もない嫌気状態で菌体内の燐酸を放出する一方下水の有機物を取り込み、続く好気状態ではその有機物をエネルギー源として分解しながら放出した以上の燐酸を固定する他栄養型の嫌気性細菌

また、反応槽の容量計算に用いる代表的な水質項目の内容は次のとおりである。

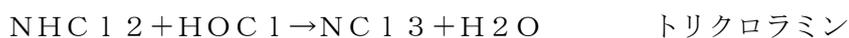
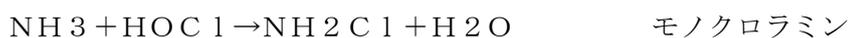
水質項目	内容
BOD	生物化学的酸素要求量 (biochemical oxygen demand) は有機物量の指標であり、下水の有機物が微生物分解するのに消費する酸素量で示す。水温は摂氏 20 度で 5 日間に消費した酸素重量で BOD <sub>5</sub> mg/l として示す。
SS	浮遊物質 (suspended solid) 46 μm のメンブレンフィルターでろ過して残留した固形物を 110 度で乾燥した懸濁物重量で mg/l として示す。
MLSS	反応槽の浮遊物質 (SS) で微生物量を代表し mg/l で示す。
DO	溶存酸素 (dissolved oxygen) は水中の溶存酸素濃度で mg/l として示す。
COD	化学的酸素要求量 (chemical oxygen demand) は有機物の指標であり、下水の有機物が酸化分解するのに消費する化学薬品の酸素量で mg/l として示す。過マンガン酸カリウム法と重クロム酸カリウム法があり後者が酸化力

水質項目	内 容
	は大きい。
大腸菌群	摂氏 36 度 24 時間の間で寒天培地にコロニーを形成するグラム陰性桿菌で細菌の指標であり CFU (colony forming unit) として示す。
固形分	下水汚泥に含まれる固形物重量で有機分と無機分に分かれる。摂氏 110 度で下水汚泥の水分を蒸発させ残さの重量の汚泥重量に対する%
有機分	固形分のうちマッフル炉 600 度でガス化する重量%で示し炭素化合物のうち二酸化炭素及び炭酸と炭酸塩を除いた物質
無機分	固形分のうち有機分を除いた物質の重量%
含水率	下水汚泥のうち残さ固形分を除いた水分重量%

反応槽の大きさは微生物反応時間（流入水の滞留時間で概ね 6～8 時間）で決まるが詳細の計算を例示する。（参考—6）

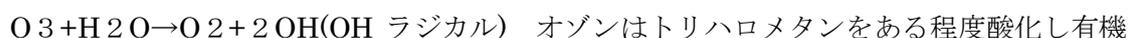
消毒は病原菌の活性をなくすことを目標としている。一般に塩素やオゾンのほか紫外線などが用いられる。日本の水道法では給水栓の蛇口で 0.1 mg/l 以上の残留塩素の保持を義務付けているのでオゾンや紫外線による消毒においても最後に少量の塩素の注入が必要である。塩素は安価でしかも注入操作が容易であり消毒効果が高い。

また塩素は強い酸化剤であるので鉄やマンガンのほかアンモニアなど還元性物質を酸化し塩素要求量として確認できる。塩素は水に溶解すると  $\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl} + \text{HOCl}$  となり PH により  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HOCl}$ ,  $\text{OCl}^-$  とその構成が変化する。また塩素は水中の無機性、有機性の窒素化合物と結合してクロラミンを生成し塩素要求量と呼ばれている。



消毒効果は  $\text{HOCl} > \text{OCl}^- > \text{NHC}_1_2 > \text{NH}_2\text{Cl}$  (=有機性塩素) の順に大きい。この様にアンモニアを含む水に塩素を加えていくと順次結合塩素を形成し結果として  $2\text{NH}_3 + 3\text{Cl}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{HCl}$  となり窒素を水中から除去できる。これをアンモニアストリッピング法（不連続点塩素注入法）と言いアンモニア濃度の約 10 倍の塩素を消費した後遊離塩素が確認できる。従って塩素による消毒の前に塩素要求量を削減しておくことが発がん性物質と言われるトリハロメタンなどの生成量を少なくできる。廃塩素は水酸化ナトリウムで中和する。塩素接触槽は少なくとも 15 分以上の処理時間を確保する容量とする。

オゾン ( $\text{O}_3$  分子量 48) は常温では不安定なガスで沸点は  $-112$  度、融点は  $-251$  度で水には酸素の約 10 倍溶解する。オゾンの酸化力は消毒薬品の中では最も強力であり次のようにヒドロシキラジカルに分解する。



物や難生物分解性有機物も酸化分解する。特に PH が 8 以上になると OH ラジカルの反応性は高く過酸化水素や紫外線にも触発され促進酸化法と呼ばれている。炭酸塩や重炭酸塩は反応阻害因子でありオゾンとの接触可能時間を長くする為に用いる。

オゾンは一般に純酸素あるいは乾燥空気にエネルギーを与えて発生させる。オゾン処理システムは原料ガス供給ユニット、電力供給ユニット、オゾン発生器、オゾン接触槽、廃オゾン処理装置から構成される。放電下では窒素と水から腐食性の硝酸が合成され水分はまたオゾンを分解させるので原料ガスとしては乾燥空気をを用いる。オゾン発生器は一对の電極間にガラスあるいはセラミックのような誘電体を挟み電極間に原料ガスを流しながら 1 ~ 2 万ボルトの交流高電圧を加える。この方法で重量 1 % 以上のオゾン濃度を得られるが純酸素を原料とすれば 8 ~ 9 % の濃度にできる。高電圧のかわりに紫外線照射でもよいがオゾン濃度は 0.25 % となる。オゾンによる消毒には一定の CT 値 (オゾン濃度 × 接触時間) が必要であるが塩素の約 10 倍の消毒力があり接触時間 4 ~ 5 分で 0.4 ~ 0.6 mg/l を必要とする。空気中のオゾンの許容濃度は日本産業衛生協会によると 0.1 ppm を勧告している。これは 1 日 8 時間 40 時間程度の軽労働における細気管支や肺胞などへの深部刺激剤としての許容濃度である。残留オゾンが鰓呼吸の魚類に影響しないようオゾン濃度は 0.05 mg/l 以下とする。廃オゾンを処理するには 300 ~ 350 度で 3 秒間の熱分解や金属およびその酸化物の触媒による分解のほか活性炭吸着および薬品洗浄がある。

紫外線は波長 200 ~ 380 nm の電磁波で可視光線より短く X 線より長い。太陽光のうち 10 ~ 200 nm は酸素や窒素に、200 ~ 300 nm はオゾン層に吸収され地表には 300 ~ 380 nm の紫外線が到達している。紫外線ランプは電極の構造から分類すると熱陰極型、冷陰極型、スリムライン型があり、水銀の封入圧では低圧、高圧、超高圧に分類される。日本では熱陰極型低圧ランプが多く蛍光灯と同じ原理である。すなわち電極間に存在する水銀蒸気のなかを電気エネルギーが電子として流れ水銀原子を励起して 85 % の効率で波長 253.7 nm の紫外線を放射する。紫外線ランプは発生した紫外線を透過する石英ガラスまたは紫外線透過ガラスで出来ているのに対し蛍光灯はガラス管の内面が蛍光体で塗装してある。石英ガラスは二酸化ケイ素を軟化点の 1650 度で熔融し冷却した物である。これに酸化ナトリウムや酸化カルシウムを加えて 400 ~ 500 度に軟化点を下げ加工し易くした普通ガラスから紫外線を吸収する不純物である酸化第二鉄を除いたのが特殊ガラスである。紫外線は空気や魚など食品の消毒のほか皮膚病の治療に使用され公共用水域への影響を少なくするために排水処理で利用されている。紫外線の消毒は小規模でも適用できウイルスや細菌には有効であるがジアルジアランブリアには効果が少ない。

微生物による有機物の酸化、分解にも反応時間の制約の基では限界があり山や森で自浄作用を受けた湧水や下水道の処理水にも難生物分解性有機物のフミン酸やフルボ酸が残存することがある。これに塩素を加えるとクロロホルムを主成分とする発がん性のトリハロメタンが生成されることが 1972 年にロッテルダム水道のルーク博士が見い出してから注目されている。従って消毒に必要な塩素注入量は目的を達成する範囲で極力少ないこと

が望ましいので塩素要求量を最小限にするよう浄水や原水の水質を監視する。

## 5. 水資源の循環および環境保全のための高度処理

より安全でおいしい水を給水するには水道の原水をできるだけ清浄にしておくことが重要となる。国際河川であるライン河の下流では表流水の原水水質成分のうち約2/3は難生物分解性有機物であるので取水した原水を1週間単位で貯水して置き、その間に実施する原水水質分析結果により次の浄水工程に導水するか安全を期して再度伏流水として利水するよう砂層に注入する。望ましくない原水を排除した後の浄水操作は緩速砂ろ過及び急速砂ろ過のほか更にオゾンや活生炭など高度浄水処理をほどこして給水している。オゾンは強力な酸化剤であり1 mg/l程度の処理で臭気成分や発色団を酸化し難生物分解性有機物も分解する。オゾンの酸化ではアルデヒドやオキシダントなどが副生することがある。このような副次的影響を少なくする為に日本では活生炭吸着の併用を推奨している。活生炭には粉末と粒状がある。粉末活生炭は粒径が数十～百 μmで吸着速度は速いが使い切りであるので不経済となる。粒状活生炭は粒径0.5～1.0 mmで2～4 mの固定床か1.5～2 mの流動床を通過させて処理し吸着能力が低下したら熱で再生する。この再生工程では3～5%の再生重量ロスを見込む。吸着能力が低下した活生炭を間欠的に流動している吸着層の下部より引き出し連続的に再生して吸着層の上部に戻す方式もある。褐色のフミン酸は μmオーダーの大きさであり薬品凝集沈殿で除去可能であるが金色のフルボ酸は nm オーダーで小さく活生炭吸着で取り除く。セシウムなど放射性物質の除去にも粉末活生炭は有効である。

下水の高度処理の目的は高級処理以上の BOD および SS のほかリンや窒素の処理水質を得ることにある。これにより公共用水域の環境基準を達成し併せて処理水の循環利用の可能性を広げる。一般に標準活性汚泥法などの高級処理水は良好な状態でも BOD 10 mg/l弱であり3～5 mg/lの利水を目指すには更に砂ろ過など高度処理が必要となる。また磷や窒素の多く含まれる水域では藻類による光合成が盛んとなり有機物生産による富栄養化現象が懸念される。これを抑制していくには下水処理水の磷および窒素の除去が必要となる。磷の除去には薬品凝集沈殿法と生物化学的処理法がある。凝集沈殿法は反応槽の端部に硫酸バンドや PAC など凝集剤を加え沈殿除去する。生物による処理は磷固定細菌が嫌気槽で放出する以上のリン酸を続く好気槽で微生物細胞内に取り込む特性を利用している。窒素の生物処理法は好気槽において有機物の酸化分解に伴うアンモニアを亜硝酸や硝酸に硝化し無酸素槽で脱窒素細菌により窒素ガスとして大気に戻す。従って生物による下水高度処理法の反応槽の配置は嫌気槽—無酸素槽—好気槽となる。嫌気槽には最初沈殿池処理水と磷を固定している微生物種汚泥として最終沈殿池の返送汚泥を送り無酸素槽には嫌気槽流出水と硝化の十分進んだ好気槽の循環水を返水する。磷は好気槽における磷固定細菌による過剰摂取により、また窒素は無酸素槽において脱窒素細菌によるガス化で除去する。

今後、水処理は農薬など微量有機物による汚濁のほか環境ホルモンが問題として提起さ

れており、ウイルスのほかクリプトスポリジウムやジアルジアなど病原性細菌による汚染のほか重金属の流入にも対処していく必要がある。近年の膜処理技術の急速な進展はこれらの需要に応じて開発され可能性は広がっている。

## 6. 有機物と無機物資源の循環の為の下水汚泥処理

下水の処理は固液分離である。できるだけ清浄な処理水を得て固形分は汚泥として分離する。この固形分は有機分を約80%含み残りは無機分である。有機物は炭素化合物のうち炭酸ガスや炭酸、炭酸塩を除いた物質であり肥料や燃料としての価値がある。無機物は固形物のうち有機物を除いたもので建設材料となる。

原汚泥は99%以上の水分を含み最初沈殿池汚泥と最終沈殿池汚泥に分ける。最初沈殿池汚泥は無機分が多く重力沈殿で濃縮可能であるが最終沈殿池汚泥は微生物など有機分が多く返送汚泥として反応槽に堆積する以外は余剰汚泥として処理される。

重力濃縮槽は固形物負荷 $60\sim 90\text{ kg}\cdot\text{ds}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ で設計され水深4m程度の円形槽が一般的である。固形分の滞留時間は平均12時間ほどである。汚水と雨水を同じ管で運ぶ合流式が採用され食生活が洋風化されていない頃の下水汚泥は無機分が多く重力濃縮が可能であったが有機分が多く成るにつれて余剰汚泥は機械濃縮を採用している。機械濃縮には浮上濃縮と遠心濃縮がある。浮上濃縮は加圧浮上法と常圧浮上法がある。加圧浮上法は原汚泥に微細な加圧気泡を付着させ、見かけの比重を下げ浮上濃縮したフロスを掻き取った後脱気する。原汚泥全量に気泡を付着させる全量加圧法が部分加圧法より採用事例が多い。常圧浮上法は気泡助剤を水に溶かし気泡を発生させ原汚泥に高分子凝集剤を用いて付着させ浮上分離したフロスを掻き取った後脱気する。遠心濃縮法は2000Gの遠心力で濃縮するが構造は遠心脱水機に類似している。一般に遠心濃縮では高分子凝集剤は用いないが固形分に対して0.02%程度加える時もある。

下水汚泥の脱水については天日乾燥され肥料として活用された頃もあったが臭気など環境に配慮したり、20世紀初めにアンモニアの合成による化学肥料の導入により衰退した。機械脱水機には凝集剤として無機系と有機高分子系がある。初期は石灰や塩化第二鉄など無機系の凝集剤に対応して真空濾過脱水機やベルトフィルター脱水機、フィルタープレス脱水機が使用されたが固形分に対してたとえば重量で石灰40%、塩化第二鉄8%ほど加えるので脱水汚泥量が多く成り後続の処理工程を考慮すると必ずしも有利でなくなった。有機系の高分子凝集剤の発達とそれに適したベルトプレス脱水機や遠心脱水機、スクリュウプレス脱水機が開発され採用されてきた。ベルトプレス脱水機は固形分に対して数%の高分子凝集剤を加え重力プレス一圧搾脱水を経てスクレパーで掻きとり脱水汚泥含水率が76%にもなる。遠心脱水機は外側のボウルは2500Gで回転し内側のスクリュウは差速を保持し回転する。スクリュウプレス脱水機はその性能は向上し有機系無機系の凝集剤を併せて活用する場合がある。

下水汚泥の固形分の循環利用を考える時その無機分は建設資材として有機分は肥料ある

いは燃料として活用できる。焼却炉は無機系脱水汚泥にたいして多段炉やストーカ炉が採用されたが高分子系脱水汚泥では流動焼却炉が一般化している。

硅砂を流動材として摂氏800～900度で焼却するが温室効果ガスである二酸化炭素や一酸化二窒素の発生を抑制する為に焼却温度を850度以上で十分酸化燃焼するよう空気の投入点を増やすなど工夫している。また流動材の硅砂を高速で一部循環させ燃焼効率を高める循環流動炉も増加している。脱水汚泥の焼却により有機分は酸化され無機材料となる。フライアッシュと類似の成分と性状を示し煉瓦や透水性ブロックのほかアスファルトフィラーの代替にもなる。脱水汚泥の有機分は肥料や燃料として無機分は粘土シルトの材料とするセメント原料として循環利用されている。

脱水汚泥の有機分を肥料として活用する為に空気を吹き込みながら60～80度に昇温できるコンポスト法は好気性酸化による汚泥安定化で病原菌も死滅する。

また脱水汚泥の有機分を燃料として利用するのに嫌気性消化法によるメタンガス化がある。摂氏150～180度の高温で消化したりメタン醗酵菌の固定化担体を活用する提案もある。そのほか下水汚泥の炭化やガス化も選択肢である。炭化には200～500度の低温炭化法と500～600度の高温炭化法がある。いずれも酸素不足のなかで下水汚泥の有機分の一部を燃焼させ蒸し焼きの状態に炭化するのと同様である。低温炭化の方が炭化物の保持エネルギーは高いが臭気は多く残る。ガス化は石炭より都市ガスを得る時の技術を活用するもので水蒸気改質法や部分酸化法その他吸熱反応の水蒸気改質法と発熱反応の部分酸化法をエネルギーバランスさせたオートサーマル法がある。下水汚泥のガス化はその成分の多様性から部分酸化法を活用するが脱水汚泥を乾燥し800～900度で部分燃焼させ水素や一酸化炭素を得る。一酸化炭素は水蒸気を加えて水生ガスシフト反応により水素エネルギーとして回収する技術に繋がる。また下水汚泥の炭化やガス化は温室効果ガスの発生抑制に一層貢献し、併せてカーボンニュートラルなバイオエネルギーとして発電に利用できるのでRPS対応の手段として評価できる。

熔融炉は摂氏1200～1500度で下水汚泥の固形分を熔融して焼却灰より更に1/3程度に減量し熔融スラグとして安定化する。溶流点は原料が熔融し流れ出す温度であるが材料の塩基度= $\text{CaO/SiO}_2$ に影響される。無機系脱水汚泥の塩基度は1に近く高分子系脱水汚泥は0.1～0.2である。溶流点を1200度にするのが補助燃料を削減できるので高分子系脱水汚泥では石灰等を加え塩基度を上げ粘性を下げる。熔融スラグは冷却の仕方によって製品の性状が変わる。急に水冷すると細かいガラス質となり強度は弱い。空気中でゆっくり冷やすと形状はやや大きくなり強度も増す。摂氏900度程度で養生して序冷したり1000度～1050度に再加熱すると硬度の高い石材となる。熔融炉には脱水汚泥を直接熱風乾燥炉で含水率10～15%に乾燥した汚泥を原料とする方法と焼却灰より製造するものがある。いずれにしても排熱の回収や排ガスの処理法は焼却炉に準じて実施する。熔融温度は高いので重金属は安定化し溶出することはなくなる他ダイオキシン類も分解処理される。熔融炉にはコークスベッド熔融炉や旋回熔融炉のほか表面熔融炉がある。

## 7. 資源循環利用に向けた下水道技術

人工膜は細胞膜の特質の一部を備えており従来の水処理の主流である凝集と沈殿分離に変えて篩分けによる固液分離を特徴とする。従って浄水水質の品質や衛生性はより高度に保障され塩素による消毒の困難なクリプトスピリジウムの除去などにも対応できる。濁質汚染物質の粒径とその除去に対応できる膜の種類を示す。

粒径の大きさ	対象物質	対応可能な膜の名称
$\mu\text{m}$ (マイクロメートル $10^{-6}\text{m}$ )	粘土 細菌 病原菌 クリプトスピリジウム ジアルジア 臭気物質 色素物質 フミン酸 ウイルス	MF膜 (micro filter)  UF膜 (ultra filter)
nm(ナノメートル $10^{-9}\text{m}$ )	農薬 微量有機物 重金族 フルボ酸 硝酸 亜硝酸 水 (4 Å) 海水の淡水化	NANO膜 (nano filter) RO膜 (reverse osmosis)
Å (オングストローム $10^{-10}\text{m}$ )		

膜の活用にはその除去対象物質などによるファウリングを防ぐ工夫が必要である。細胞膜は分裂増殖の速い細菌およびその速度が比較的緩やかな高等生物にも備わっており、膜リン脂質二重層と言われ膜の外側はまわりの水環境（細胞質は海水の組成に類似）にあわせて親水性のリン化合物であり、膜の中央部は脂肪酸で疎水性であり細胞を外部環境より守っている。細胞膜は物質を移送するが脂質の疎水部は通しにくい。細胞膜の輸送法には3つの方法があり親水性の小さい分子を濃度勾配などで移動させる受動拡散と、無機イオンや有機分子などを単一輸送体の膜たんぱく質を介して移送するほか、ATP依存性ポンプなどによって濃度勾配に逆らい運び上げる能動輸送がある。また殺菌免疫作用や止血凝結作用のほか互いに情報を交換し自己認識する役割もある。この多才な細胞膜に比べるとまだ人工膜の機能は制限されてはいるものの急速に発達し、しかも経済的となりその浄水水質はあらゆる用途に対応できるようになってきた。細胞膜に倣って人工膜の性能を更に高めることは再生水の活用を促進していく原動力となりうる。

また下水の焼却灰には重量で約15%ほどの磷が含まれているのでこれを温度50～70度の可性ソーダで溶出し消石灰で磷酸カルシウムとして回収し資源化する。磷の少なくなった焼却灰はコンクリートの硬化に対する支障がなくなり、粘土シルトなど細骨材とし

て活用しコンクリート管材に利用できる。

## 参考資料—1)下水道施設の設計と施工

### 参考—1)計画下水量の算定

下水は汚水と雨水により構成される。汚水と雨水を分けて集水するのが分流式であり同一の管渠で対応するのが合流式である。汚水量は年間のうち1日最大の上水道給水量を基本にして1日最大汚水量を推定する。この汚水量は集水区域の人口と水道の使用量により決まるが日本の総人口は減少傾向にありまた節水型社会に移行しているので現状を十分把握して計画規模を定める事が重要である。一方高層建築が多い人口集中地区などは土地利用との整合を図る。汚水管は一日最大汚水量を約1.5倍した時間最大汚水量を流す能力を持たせる。

揚水施設であるポンプ場も管渠と同じ時間最大汚水量に対応するが下水処理場は計画一日最大汚水量にたいして高級処理できる能力で設計するのが一般的である。

$$\text{分流式汚水管の流下能力(m}^3\text{/秒)} = \text{流集人口} \times (\text{計画時間最大汚水量} + \text{地下水量})$$

(m<sup>3</sup>/人・秒)

$$\text{地下水量} = \text{実測結果あるいは汚水量の約} 20\% \text{程度}$$

$$\text{高級処理下水処理場の処理能力} = \text{計画一日最大汚水量}$$

洪水は河川や下水道で対応するが一級河川など大河川は計画対象生起確率降雨を1/1000~1/2000としており100年以上の実積降雨記録は十分ではないので既往最大流出量や流出波形に対して対象河川の計画高水位を定め河川改修計画を立案している。

規模の小さい二級河川や下水道(流域面積2km<sup>2</sup>以下)は計画対象生起確率降雨が1/3~1/10であるので明治以降の実積降雨記録に基づく合理式などで雨水流出量を推定できる。近年計画確率降雨を上回る降雨強度や総降雨量が局地的に頻発し浸水被害が発生している。当然この超過洪水の原因を詳細に調査して対策を立案して実施すべきであるが、多額の投資額と具体化への期間が必要である。雨水の浸透貯留対策を更にすすめ日常の散策地や水辺など土地利用や街づくりの工夫で浸水被害を軽減し併せて避難や自助努力などのソフト対策の推進も重要となる。

下水道の雨水流出量の推定には実験式と合理式がある。

$$\text{実験式は } Q = \frac{1}{360} \cdot C \cdot R \cdot A \cdot \sqrt{\frac{S}{A}}$$

ここに、

$Q$  : 最大計画雨水流出量 (m<sup>3</sup>/s)

$C$  : 流出係数

$R$  : 降雨強度 (mm/hr)

$A$  : 排水面積 (ha)

- $S$  : 地表平均勾配 (%)  
 $n$  : 定数 (4 または 6)

合理式は  $Q = \frac{1}{360} \cdot C \cdot I \cdot A$

ここに、

$I$  : 降雨強度公式 I (mm/hr) は、

タルボット型  $I = \frac{a}{t+b}$

シャーマン型  $I = \frac{a}{t^n}$

久野、石黒型  $I = \frac{a}{\sqrt{t \pm b}}$

クリーブランド型  $I = \frac{a}{t^n + b}$

の提案式がある。

ここに、

$t$  : 降雨継続時間 (min)

$a, b, n$  : 定数

最大流出量は、降雨継続時間  $t$  (分) = 流入時間 + 流下時間 = 流達時間 として管渠の懸案地点へ最も遠い流達時間と等しい降雨継続時間  $t$  に対応する降雨強度  $I$  で定まる。

工種別基礎流出係数の標準値

工 種	流出係数	工 種	流出係数
水 面	1.0	勾配の急な山地	0.40~0.60
屋 根	0.85~0.95	勾配の緩い山地	0.20~0.40
道 路	0.80~0.90	芝樹木の多い公園	0.05~0.25
その他不透面	0.75~0.85	間 地	0.10~0.30

流入時間の標準値 (平均 7 分)

人口密度が大きい地区 (5 分)、人口密度が小さい地区 (10 分) として定めるがカーベイの公式による流入時間の推定もできる。

$$t_1 = \left( \frac{2}{3} \times 3.28 \times \frac{L \cdot n}{\sqrt{S}} \right)^{0.467}$$

ここに、

$t_1$  : 流入時間 (分)

$L$  : 斜面距離 (m)

- $S$  : 斜面勾配  
 3.28 : フィートをメートルに換算  
 $n$  : 粗度係数に類似の遅滞係数

表一粗度係数に類似の遅滞係数

地覆状態	$n$
不浸透面	0.02
良く締まった裸地（滑らか）	0.10
裸地（普通の粗さ）	0.20
粗草地又は普通の草地	0.40
森林地（落葉樹林）	0.60
森林地（深い落葉樹等堆積地、針葉樹林）	0.80
密草地	0.80

流下時間

$$t_2 = \frac{L}{\alpha \cdot V}$$

ここに、

- $t_2$  : 流下時間（分）  
 $L$  : 管渠の延長（m）  
 $V$  : マニングによる平均流速（m/s）  
 $\alpha$  : 洪水の移動速度の補正係数

管渠の断面の算定に用いる平均流速公式は、以下のいずれかを用いる。

マニングの式

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m/s})$$

ここに、

$n$  : 粗度係数（樹脂：0.010，鉄筋コンクリート：0.013）

$R$  : 径深

$$R = \frac{\text{水断面}}{\text{潤辺}}$$

$I$  : 動水勾配

$$I = \frac{\text{損失水頭}}{\text{流下距離}}$$

クッターの式

$$V = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{I}\right) \cdot \frac{n}{\sqrt{R}}} \cdot \sqrt{R \cdot I}$$

ヘーゼン・ウィリアムズの式

$$V = 0.84935 \cdot C \cdot R^{0.63} \cdot I^{0.54}$$

ここに、

$C$  : 流速係数

管内面の粗度、屈曲、分岐の数で異なるが、これらの屈曲損失を含み 110 を標準とする。なお、直線部のみ（屈曲損失等を別途計算する。）の場合は 130 を標準とする。

計画発生汚泥量(固形分 t / 日) = 計画一日最大汚水量 (m<sup>3</sup>/日) × 計画流入 S S 濃度 (mg/l) × 10<sup>-8</sup> × 水処理施設での総合 S S 除去率 (%) × 除去 S S 当たりの汚泥発生率 (一般的な発生汚泥の含水率は 99% 強である。)

## 参考—2) ストークスの法則と重力沈殿池の設計

水中での単粒子の沈降を球体として直径を  $D$ 、その沈降速度を  $V$ 、粒子の密度を  $\gamma_s$ 、水の密度を  $\gamma_w$ 、抵抗係数を  $C_d$  とすると粒子球体の等速沈降は次式の  $\frac{dV_s}{dt} = 0$  で平衡となる。

$$\frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \gamma_s \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot (\gamma_s - \gamma_w) - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot C_d \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$V_s^2 = \frac{1}{C_d} \cdot D \cdot g \cdot \frac{4}{3} \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \text{ となりこれが等速沈降速度である。}$$

ストークスの法則では  $C_d = \frac{24}{Re}$  であり  $Re = \frac{V_s \cdot D}{\nu}$  より  $C_d = \frac{24 \cdot \nu}{V_s \cdot D}$  となる。

従って  $V_s = \frac{D^2}{18} \cdot \frac{g \cdot (\gamma_s - \gamma_w)}{\nu}$  である。ここに、 $\nu$  は動粘性係数とする。

すなはち 76  $\mu$  m 以上の粒子は重力沈殿の対象であり沈降速度は粒径の 2 乗に比例する。

重力沈殿では、水面積負荷 (overflow rate) = 水量 / 水面積 = 除去対象粒子の沈降速度が設計指標となる。重力沈殿池の幅  $B$ 、長さ  $L$ 、深さ  $H$ 、とし除去対象粒子の沈降速度を  $V_s$ 、沈殿池の水平流速を  $V$ 、流量  $Q$ 、沈殿時間を  $T$ 、沈殿池水面積  $A = B \cdot L$  とすると

$$T = \frac{L}{V} = \frac{H}{V_s} \text{ また } V = \frac{Q}{B \cdot H} \text{ であるので } V_s = \frac{H \cdot V}{L} = \frac{Q}{B \cdot L} = \frac{Q}{A}$$

水面積負荷は沈殿池水面積への水量負荷であり除去対象粒子の沈降速度を示す。

### 参考—3)土の強度と土圧の大きさ

土は土粒子及び水と空隙で構成される。土粒子は地殻の岩盤が水流や温度変化のほか地震などにより風化され多様な粒径と成分より成り立つ。従って土の粒度や成分はその地層の永い間の履歴の集積である。このため地形図や地盤図は懸案の場所の概略の地質情報を得るのに非常に有効である。土の粒度分布を知るには篩分け試験とその分析結果に基づく粒度加積曲線が良く用いられる。標準の篩目である80, 40, 20, 10, 5, 2.5, 1.2, 0.6, 0.3, 0.15 mm の10の篩で試験する。各篩を通る重量を全重量で割り百分率とし篩目幅を横軸に累加百分率を縦軸に図示する。試料の累加重量10%を通過する粒径を有効径 D10 とし均等係数を $U=D60/D10$  と定義する。有効径はその試料を代表して大きい影響を与える粒径を示し均等係数は試料のばらつきの程度を示す。また粗粒率はそれぞれの篩を通らない全部の量の全試料に対する重量百分率の和を100で割ったもので同じ採取場所であれば骨材粒度の変化が判る。細骨材では2.3～3.1が望ましい。粗骨材の最大寸法は重量で90%以上が通る篩のうちの最少寸法である。土は粒径で次の様に分類している。

土の分類

粒径		
2mm以上	礫	地盤やコンクリートの主要材料でその強度を支配する。
76μm以上	砂	礫の間隙を埋め骨格を形成し強度に貢献する。
5μm以上	シルト	細粒であり電荷や構造を持ち強度は弱い。
5μm以下	粘土	極細粒であり電荷や分子構造の特性が支配する。

砂質土は礫や砂が多く粘性土はシルトや粘土が主体の土である。一般に砂質土は粒子同士の噛み合う骨格構造に支配され摩擦角が重要であるが粘性土は電荷による引力や粒子の粘着力が卓越してくる。岩盤や砂礫地盤は支持地盤として良好であるがシルトや粘土の様な粘性土は間隙水の移動に伴う変形や沈下を防ぐ為に山留め支保工や地盤改良に配慮する。また均等な砂質地盤で地下水位が高い場合は地震力などにより間隙水圧が上昇し地盤の全応力を超えると砂は流動化する。この液状化現象を防止することも管渠など下水道構造物の設計には重要となる。

地盤は土粒子 ( $s$ ) と水 ( $w$ ) と空気 ( $a$ ) により構成される。 $V$  = 総体積、 $W$  = 総重量、 $v = w + a$  とすると次の様に定義される。

$$\text{水の単位体積重量} = \gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 1 \text{ (gf/cm}^3\text{)}$$

$$\text{土粒子の単位体積重量} = \gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \text{ (gf/cm}^3\text{)}$$

$$\text{土粒子の比重} = G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = W_s \cdot V_s \cdot \gamma_w$$

$$\text{土の単位体積重量} = \gamma = \frac{W}{V} \quad (\text{gf/cm}^3)$$

$$\text{土の乾燥単位体積重量} = \gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (\text{gf/cm}^3)$$

$$\text{間隙比} = e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\text{間隙率} = n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{含水比} = w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{飽和度} = S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{空気含有率} = A_v = \frac{V_a}{V_v} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{空気間隙率} = V_a = \frac{V_a}{V} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{相対密度} = D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

## 地盤調査の概要

### 原位置試験

#### 弾性波探査

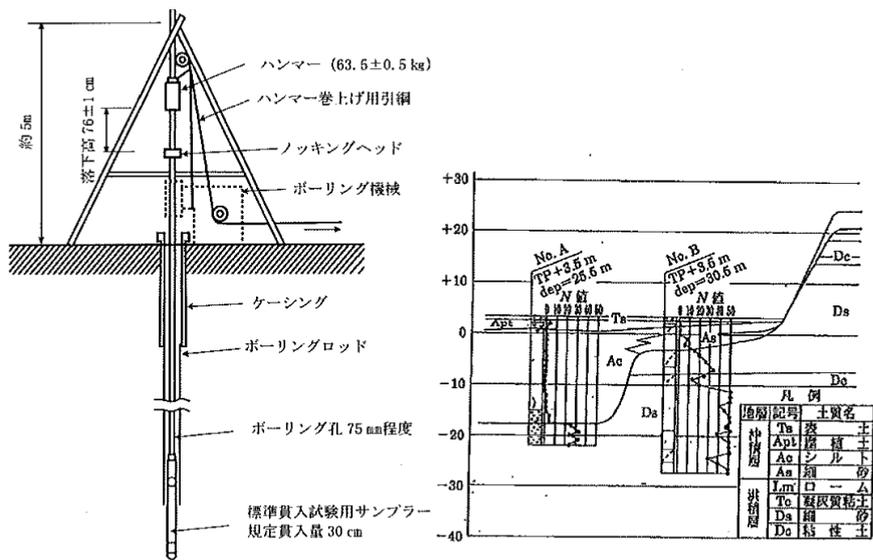
地中に伝播する弾性波（地震波）速度は硬質で緻密な地盤ほど早いので地層構成が判る。一般に p 波を用い深層は反射法を、浅層は屈折法を採用する。経験的に弾性波速度よりリッパビリテーターを推定する時もある。

#### 電気探査

地中に電極を設置し地盤の比抵抗を測定する場合が多く地下水の状態を推定する。

#### 標準貫入試験

ボーリングロッドの先端にレイモンドサンプラーやデニソンサンプラーを取り付け 63.5 kg のハンマーを 76 cm 落下させて先端地盤のサンプラーを 30 cm 貫入するに必要な打撃回数で示し N 値とする。地盤の概略の強度や構成の判定に有効である。

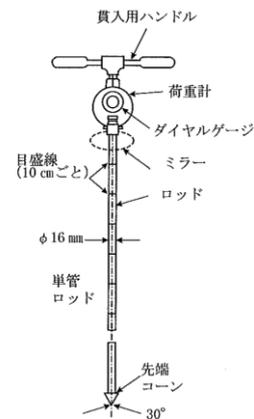


標準貫入試験 (サウンディング)

N 値の利用 (地層断面図の作成例)

ポータブルコーン貫入試験

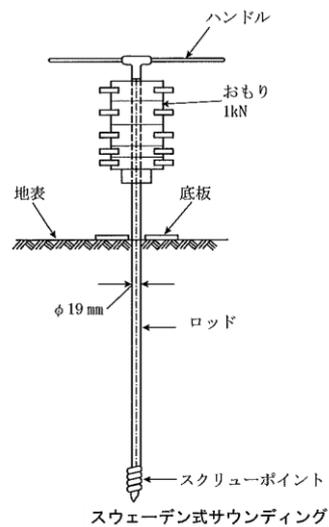
ロッド先端に先端角度 30 度で断面積 6.45 cm<sup>2</sup> のコーンを装着したハンドルの付いた貫入棒を毎秒 1 cm の速度で貫入させ単位面積当たりの貫入抵抗値からコーン指数を求める。施工機械のトラフィカビリティーの判定に用いる。



ポータブルコーン貫入試験 (サウンディング)

スウェーデン式サウンディング

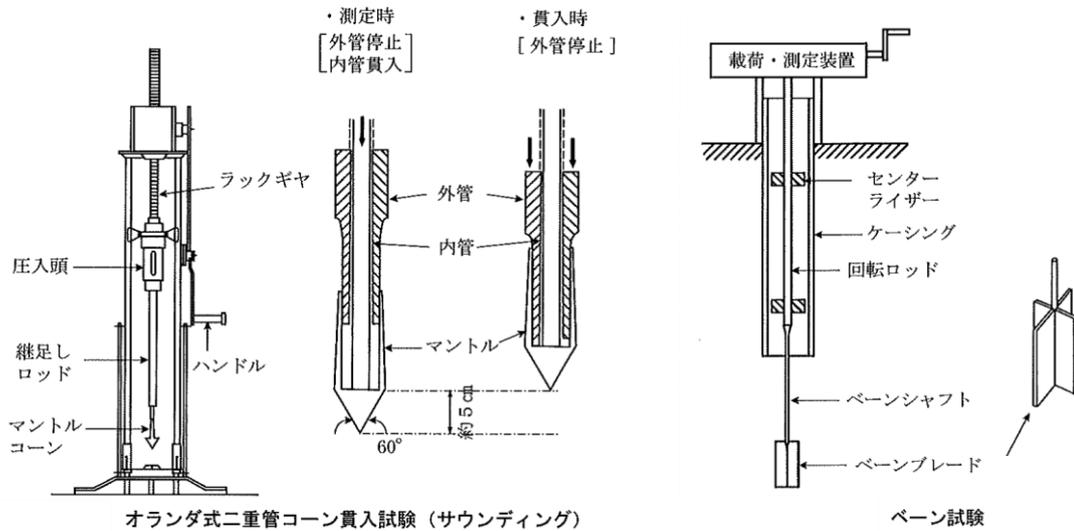
荷重による貫入と回転貫入を併用したものでロッドの先端にスクリュウポイントを取り付け静荷重として 50 N ~ 1 kN を順次かけ荷重と貫入量を測定する。1 kN かけても貫入しなくなったらロッドを回転させ 2.5 cm 貫入させるに必要な半回転数を求めこの半回転数と貫入量の関係から静的貫入抵抗を定め土の硬さや構成を推定する。



スウェーデン式サウンディング

オランダ式二重管コーン貫入試験

周面摩擦を取り除くために二重管としたロッドに先端角 60 度、断面積 10 cm<sup>2</sup> のマントルコーンを取り付け静荷重によりマントルコーンを 5 cm 貫入させるのに必要な圧入力を計りコーン貫入抵抗を求める。土の硬さや構成の目安となる。

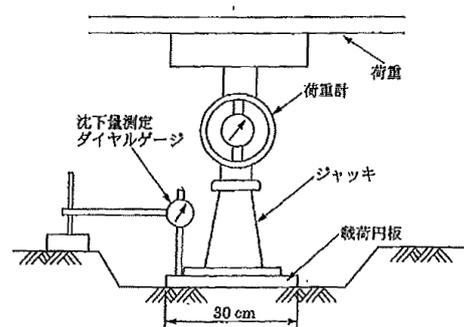


### ベーン試験

十字型のベーンをロッドの先端に取り付け地盤に押し込みロッドを回転させてベーンが地盤をせん断する時のロッドのトルクから土の粘着力を求める。軟弱地盤の判定や斜面の安定計算に用いる。

### 平板载荷試験

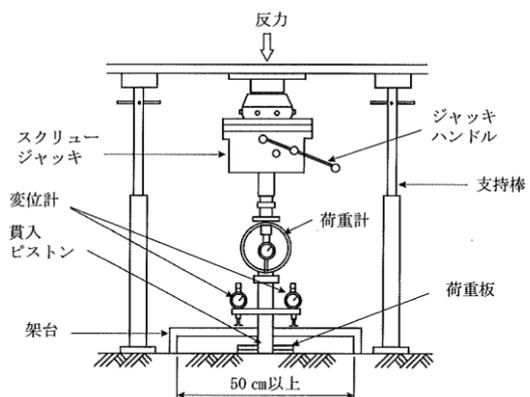
地表面におかれた直径30 cmの鋼製円盤に段階的に荷重を加えていき各荷重に対する沈下量を測定して地盤反力係数(支持力係数または支持力値、K値)を求める。路床、路盤の地盤係数や盛土の締め固めの管理に用いる。



平板载荷試験

### 現場CBR試験

直径5 cmのピストンリングを所定の深さに貫入させる時の荷重強さを測定し、その貫入量における標準荷重強さ(代表的なクラッシュラン砕石を使って供試体を作成して貫入試験を繰り返し、その平均値を100%とする)と比較して相対的な強さを求める。モールド内に試料を入れてピストンリングを貫入する室内CBR試験は舗装の材料選定や舗装設計の設計CBRや修正CBRに用いる。現場で直接地盤中に貫入する現場C



現場CBR試験

B R 試験は盛土の締め固めの管理などに使用される。

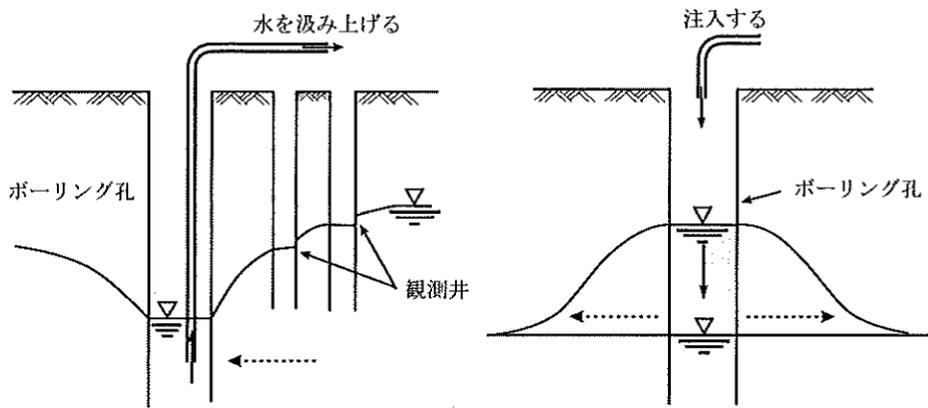
### 現場透水試験

井戸から水をくみ上げて周辺の地下水の変動を観測する揚水試験

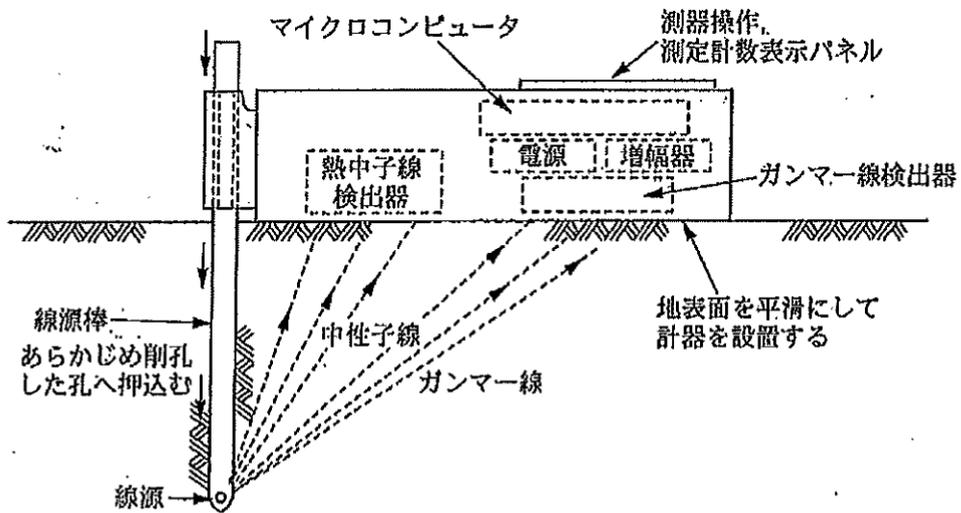
井戸に一定水圧の水を注入して流入量を測定する注入試験

井戸の水位を低下させてその回復を観測する回復試験

広範囲の平均の透水性を測定する信頼性の高い試験で排水や地下水位低下の設計に用いる。



現場透水試験



R1 計器

### 土質試験

含水比試験

土の含水比 = 土中水の質量 / 土の 110 度の乾燥質量

## 密度試験

土の密度=個体単位質量/単位体積

## 締め固め試験

土の含水比を変化させて一定の方法で突き固めた時の乾燥密度と含水比を締め固め曲線として図示し、最大乾燥密度に対応する最適含水比を締め固めの施工管理基準とする。

## せん断試験

直接せん断試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験があり土の内部摩擦角や粘着力を求め斜面の安定や支持力のほか土圧などの計算に用いる。

## 直接せん断試験

土の供試体のある決まった面でせん断しその面のせん断応力とせん断強さを求め基礎や斜面の安定計算に用いる。

## 一軸圧縮試験

粘性土を円筒形に成型し供試体の上下一軸方向に圧縮力を作用させせん断強さを求める。

粘着力  $C = \frac{q_u}{2}$  (一軸圧縮強さ) となる。

## 三軸圧縮試験

同じ状態の供試体を3個作りそれぞれ異なる三軸方向の水圧の基で上下に圧縮してせん断破壊したピストン荷重を測定する。地盤の安定や構造の判定に用いる。

## 圧密試験

粘性土の載荷重による継続的な圧密沈下特性を測定するもので沈下量と沈下時間の関係が重要である。

## 液性限界試験

$LL$  (liquid limit) =  $W_l$

金属製のくぼんだ皿に  $420 \mu m$  篩を通過した土を適当に加水して練平にして溝をきる。クランクを回して皿を  $1 cm$  の高さから落下させることを繰り返し  $25$  回の落下回数で溝の両側の土が長さ  $1.5 cm$  にわたって合流した時の含水比を液性限界とする。

## 塑性限界試験

PL (plastic limit) = W<sub>p</sub>

土を手とガラス板の間で転がし、細く伸ばそうとした時大きさが約 3 mm の紐状になし得ない時の含水比を言う。

アッターベルグ塑性指数 PI (plastic index) = W<sub>l</sub> - W<sub>p</sub> と定義した。

土量の変化率

L = ほぐした土量 (m<sup>3</sup>) / 地山の土量 (m<sup>3</sup>)                      1.20~1.30

C = 締め固め土量 (m<sup>3</sup>) / 地山の土量 (m<sup>3</sup>)                      0.85~0.95

圧密沈下量の推定

間隙比  $e = \frac{V_v}{V_s}$  が  $e' = \frac{V_v'}{V_s}$  に小さくなると深さ  $H$  は  $H'$  に縮小する。

$$\text{沈下量 } h = H - H' = H - \frac{H \cdot (1+e')}{1+e} = \frac{H \cdot (e-e')}{1+e}$$

圧縮係数  $C_c = \frac{e-e'}{\log p - \log p'}$  とすると

$$\text{沈下量 } h = \frac{H}{1+e} \cdot C_c \cdot \log\left(\frac{p'}{p}\right) \text{ となる。}$$

## 土圧の算定

ランキン・レザール土圧

クーロンは土の破壊は内部摩擦角  $\phi$ 、粘着力  $c$ 、鉛直応力  $\sigma = \gamma \cdot h$  とすると、せん断力  $\tau$  は  $\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$  に等しくなるときに起こるとした。これをクーロンの破壊基準という。

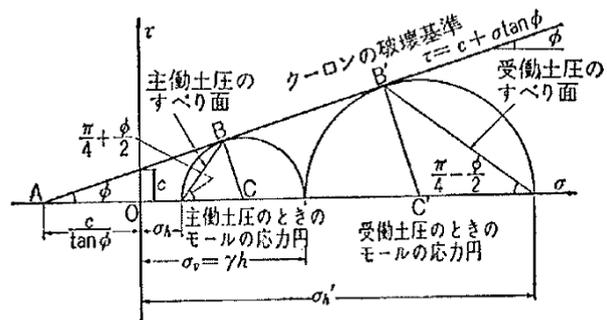
鉛直土圧  $\sigma_v$ 、水平土圧  $\sigma_h$  とし水平に対し  $\alpha$  の角度をもつ任意の斜面に垂直な応力を  $\sigma_\alpha$ 、並行な応力を  $\tau_\alpha$  とすると

$$\frac{\sigma_\alpha \times 1}{\cos \alpha} = \sigma_v \cdot \cos \alpha \times 1 + \sigma_h \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha$$

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= \sigma_v \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_h \cdot \sin^2 \alpha \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_v + \sigma_h) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_v - \sigma_h) \cdot \cos^2 \alpha \end{aligned}$$

また

$$\frac{\tau_\alpha \times 1}{\cos \alpha} = \sigma_v \cdot \sin \alpha \times 1 - \sigma_h \cdot \cos \alpha \cdot \tan \alpha$$



モールの応力円とクーロンの破壊基準

$$\begin{aligned}\tau_\alpha &= \sigma_v \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha - \sigma_h \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma_v - \sigma_h) \cdot \sin^2 \alpha\end{aligned}$$

これは  $\left\{ \frac{1}{2} \cdot (\sigma_v + \sigma_h), 0 \right\}$  を中心として

$\frac{1}{2} \cdot (\sigma_v - \sigma_h)$  を半径とする円で示されモールの応力円という。このモールの応力円とクーロンの破壊基準を図示する。

三角形 ( $\triangle ABC$ ) において

$$\left\{ \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} + \frac{c}{\tan \phi} \right\} \cdot \sin \phi = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}$$

よって

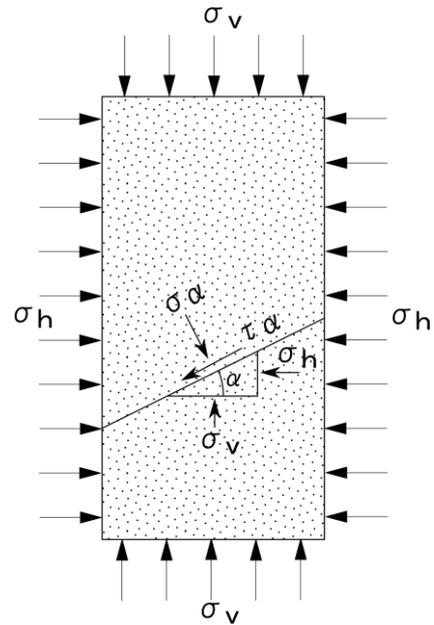
$$\sigma_h = \sigma_v \cdot \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$$

$K_a$  (主動土圧係数)

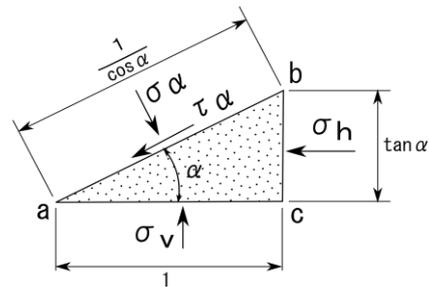
$$\begin{aligned}K_a &= \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\sigma_h}{\gamma \cdot h} \\ &= \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) - \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot h} \cdot \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)\end{aligned}$$

$K_p$  (受動土圧係数)

$$K_p = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) + \frac{2 \cdot c}{\gamma \cdot h} \cdot \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$



(a)微小な円柱状の土に作用する応力

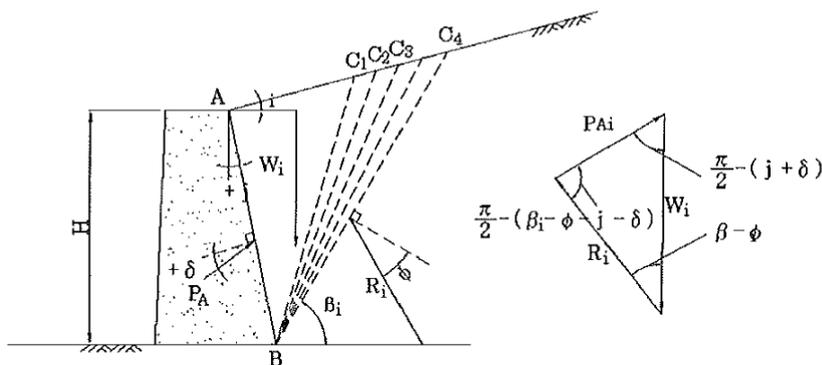


(b)微小部分の内部の応力

地盤内部の応力

クーロン土圧

クーロンの土圧は図の三角形で



クーロンの主動土圧

$$\frac{P_{ai}}{\sin(\beta_i - \phi)} = \frac{W_i}{\sin\left\{\frac{\pi}{2} - (\beta - \phi - j - \delta)\right\}}$$

$$P_{ai} = \sin(\beta_i - \phi) \cdot \frac{W_i}{\sin\left\{\frac{\pi}{2} - (\beta - \phi - j - \delta)\right\}}$$

$\beta_i$  を変化させて  $\frac{dP_{ai}}{d\beta_i} = 0$  として最大の主動土圧  $P_{ai}$  を求める。

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a$$

$K_p$  の受動土圧係数は主動土圧係数  $K_a$  と同様の手法で推定できる。

### テルツアギの緩み土圧

土被り  $H$  のうち  $dh$ 、堀削幅  $B$  のつりあいは鉛直荷重  $\sigma_v$ 、水平荷重  $\sigma_h$  とし  $K$  を水平荷重と垂直荷重の比とすると  $\sigma_h = K \cdot \sigma_v$  また粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  とすると

$$\text{せん断力 } \tau = c + \sigma_h \cdot \tan \phi = c + K \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi$$

$$\gamma \cdot B \cdot dh + B \cdot \sigma_v = B \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + 2 \cdot (c + K \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi) \cdot dh$$

$$B \cdot d\sigma_v = \gamma \cdot B \cdot dh - 2 \cdot c \cdot dh - 2 \cdot K \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi \cdot dh$$

$$\frac{d\sigma_v}{dh} + \frac{2 \cdot K}{B} \cdot \tan \phi \cdot \sigma_v = \gamma - \frac{2 \cdot c}{B}$$

この微分方程式の一般解は

$$\sigma_v = C \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B}\right)$$

$C = A(h)$  とし代入して定数変化法により

$$\sigma_v = A(h) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B}\right) \text{ これを微分して}$$

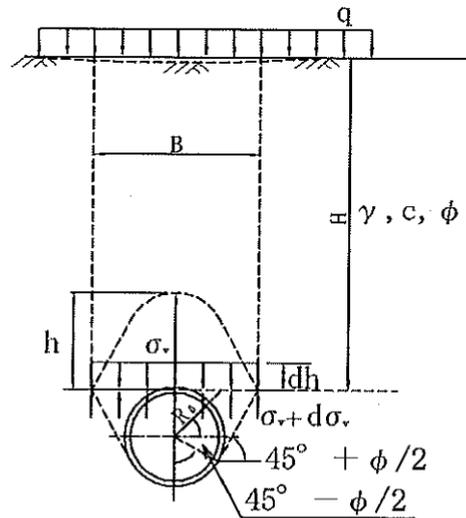
$$\frac{d\sigma_v}{dh} = A'(h) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B}\right) = \gamma - \frac{2 \cdot c}{B}$$

整理すると

$$A'(h) = \left(\gamma - \frac{2 \cdot c}{B}\right) \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B}\right)$$

を解けば

$$\begin{aligned} A(h) &= \int \left(\gamma - \frac{2 \cdot c}{B}\right) \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B}\right) \\ &= \left(\gamma - \frac{2 \cdot c}{B}\right) \cdot \frac{B}{2 \cdot K \cdot \tan \phi} \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B}\right) + C' \end{aligned}$$



テルツアギの均一地盤における緩み土圧

$$\sigma_v = \left( \gamma - \frac{2 \cdot c}{B} \right) \cdot \frac{B}{2 \cdot K \cdot \tan \phi} + C' \cdot \exp\left( -\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B} \right)$$

境界条件  $h=0$  で  $\sigma_v = q$  とすると

$$C' = q - \left( \gamma - \frac{2 \cdot c}{B} \right) \cdot \frac{B}{2 \cdot K \cdot \tan \phi}$$

$$\sigma_v = \left( \gamma - \frac{2 \cdot c}{B} \right) \cdot \frac{B}{2 \cdot K \cdot \tan \phi} + \left\{ q - \left( \gamma - \frac{2 \cdot c}{B} \right) \cdot \frac{B}{2 \cdot K \cdot \tan \phi} \cdot \exp\left( -\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B} \right) \right\} = \gamma \cdot h$$

で  $h$  は緩み高さで  $q$  は上載荷重である。土被りが 1 D (D は管径) 以下は直土圧とするのが一般である。

マーストンの式

埋設管の鉛直土圧は管の剛性や埋め戻し土の沈下により変化する。ここで堀削幅  $B$ 、土被り  $h$  の中で  $dh$  部分のつりあいは

$$\gamma \cdot B \cdot dh + B \cdot \sigma_v = B \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + 2 \cdot \tau \cdot dh$$

ここで  $\sigma_v$  は鉛直土圧、 $\sigma_h$  は水平土圧、 $K$  は横方向土圧係数とすると

$$\text{せん断抵抗は } \tau = \sigma_h \cdot \tan \phi = K \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi$$

$$B \cdot d\sigma_v + 2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot \sigma_v \cdot dh = B \cdot \gamma \cdot dh$$

これはテルツアギの緩み土圧で  $q=0, c=0$  としたものである。

$$\sigma_v = \frac{\gamma \cdot B}{2 \cdot K \cdot \tan \phi} \cdot \left\{ 1 - \exp\left( -\frac{2 \cdot K \cdot \tan \phi \cdot h}{B} \right) \right\}$$

$h$  が  $B$  の 10 倍を超えると一定値に近づく。

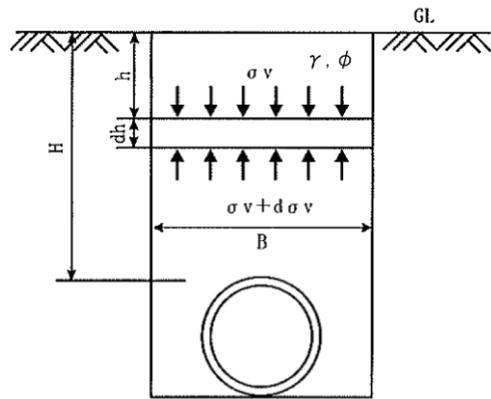
ヤンセンの式

この式はテルツアギの緩み土圧の算定式で  $q=0$  としたものである。堀削溝に埋め戻しを行った場合、溝内における管頂より上部の土柱の全重量から溝壁と埋め戻し土の摩擦力 ( $K \cdot \gamma \cdot h \cdot \mu \cdot dh$ ) と粘着力 ( $c \cdot dh$ ) を差し引いた重量が堀削幅  $B$  に等分布すると考える。

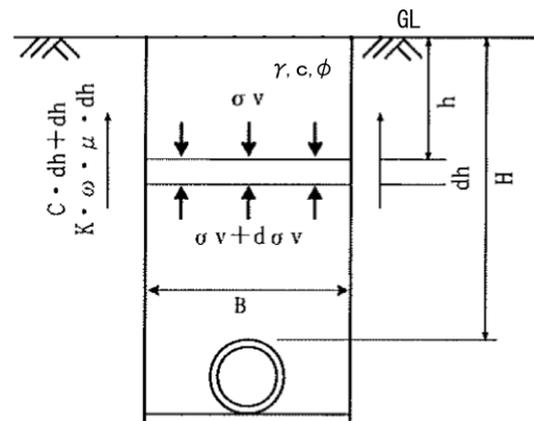
$$B \cdot \sigma_v + B \cdot \gamma \cdot dh = B \cdot (\sigma_v + d\sigma_v) + 2 \cdot (c + K \cdot \gamma \cdot h \cdot \mu) \cdot dh$$

ここで、 $\sigma_v = \gamma \cdot h$  であるから

$$B \cdot d\sigma_v + 2 \cdot K \cdot \mu \cdot \sigma_v \cdot dh = (B \cdot \gamma - 2 \cdot c) \cdot dh$$



マーストン式の考え方



ヤンセン式の考え方

$$\sigma_v = \frac{\gamma \cdot B - 2 \cdot c}{2 \cdot K \cdot \mu} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot K \cdot \mu \cdot h}{B}\right) \right\}$$

$$\text{主動土圧係数 } K = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$$\text{摩擦係数 } \mu = \tan \phi$$

ヤンセンの式は入念な突き固め施工を期待している。

#### 参考—4)セメントコンクリートの材料特性と強度

コンクリートは粗骨材や細骨材とセメントやアスファルトのほか合成樹脂などの結合材を混合し硬化させた構造物材料である。セメントはCaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（下水脱水汚泥の成分は類似）、などを一般に多段サスペンションプレヒーターを用いて摂氏800度で混合乾燥しロータリーキルンを用いて摂氏1400～1500度で焼成したクリンカーに3%の石膏を加え微粉碎し製造する。セメントの特性は次の4成分の構成割合により変化する。即ち

ケイ酸三石灰                    3CaO · SiO<sub>2</sub> (C3S)

ケイ酸二石灰                    2CaO · SiO<sub>2</sub> (C2S)

アルミン酸三石灰                3CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C3A)

鉄アルミン酸四石灰            4CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C4AF)

石膏 (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O) はC3Aの水和反応を抑制する。C3Sはセメントの早期強度に関わり普通ポルトランドセメントの主要成分である。C3Aは早期強度を高める時に使用する。早期強度を高めるに従い発熱量は大きくなり硬化に伴う収縮量も大きくなる。

C2Sはコンクリートの長期強度に関わる。また粉末度はセメント1gの全粒子の表面積の和をcm<sup>2</sup>で表わすもので(概念として)コンクリートの早期強度や発熱量に影響する。セメントの風化はCaO + CO<sub>2</sub> → Ca(OH)<sub>2</sub>, 更にCa(OH)<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> → CaCO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O, となり強熱減量が増し強度は弱くなる。

セメントのアルカリ量はR<sub>2</sub>O (%) = Na<sub>2</sub>O (%) + 0.658K<sub>2</sub>O (%) としJSR 5210ではR<sub>2</sub>Oを0.6%以下の低アルカリ型ポルトランドセメントを規定している。アルカリ骨材反応を抑制する。

#### 高炉セメント

高炉セメントはポルトランドセメントクリンカーと水砕スラグに少量の石膏を加え混合粉碎する方式とクリンカーと水砕スラグを分けて粉碎する分離粉碎方式がある。水砕スラグは高炉で銑鉄を作る時にできる熔融状態のスラグを冷水ジェットで急冷したもので、この粉末はそのままでは水硬性を示さないが水酸化カルシウムやアルカリ塩類などの刺激剤

があると水硬性を発現する。この性質を潜在水硬性という。高炉セメントは早期の発熱を抑制し長期強度は増加するのでマッシュなコンクリートに適しアルカリ骨材反応の抑制に有利である。水砕スラグはガラス化の程度を示す塩基度 =  $(CaO + MgO + Al_2O_3) / SiO_2$  が高い方が望ましい。一般には1.4程度である。

高炉スラグの化学成分の例 (%) (下水汚泥の熔融水砕スラグは類似品)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	塩基度
31~35	12~16	40~44	4~8	0.5~1.0	1.80~1.95

### フライアッシュセメント

それ自体は水硬性はない微粉末状のシリカ質混和材をポラズンという。ポラズン反応とはポルトランドセメントの水和の際に生じる  $Ca(OH)_2$  と水の存在する時に不溶性のカルシウムシリケート化合物を生成し硬化する。フライアッシュセメントはポルトランドセメントクリンカーにフライアッシュを混合し少量の石膏を加えて微粉碎したものである。フライアッシュセメントは早期強度は小さいが長期強度は大きく水密性や化学抵抗が大きい。

フライアッシュの化学成分の例 (%) (下水汚泥の焼却灰は類似品)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	強熱減量	可溶成分		比重
							SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
59.7	25.8	5.8	3.3	1.1	0.05	0.9	31.5	13.0	2.17

アルミナセメントはポーキサイトと石灰石を混合粉碎し焼成後、微粉碎したもので材齢1日でも  $400 \text{ kg/cm}^2$  を超える圧縮強度が得られる。

### 骨材

粗骨材 5 mm の篩に重量で85%以上留まる骨材

細骨材 5 mm の篩を重量で85%以上通過し10 mm の篩は全部通過する骨材

吸水率 = 吸水量 / 絶対乾燥状態重量

表面水率 = 表面水量 / 表面乾燥飽水状態

絶対乾燥状態	空气中乾燥状態	表面乾燥飽水状態	湿潤状態
気乾含水量	有効吸水量	表面水量	
	吸水量		

### 配合設計

示方配合 示方書または責任技術者により指示される配合で骨材は表面乾燥飽水状態であり粗骨材は5mm篩に留まり、細骨材は5mmの篩を通過するものです。

現場配合 示方配合に対し現場の表面水量や有効吸水量のほか粗骨材および細骨材の現状で補正する。

試験により  $C/W \sim \sigma_{28}$  を図示し、現場コンクリートのばらつきを示す変動係数から割増しし、その値に対して図上で  $C/W$  を定め逆数を水セメント比とする。実績資料から単位水量を定め水セメント比より単位セメント量を決定する。

コンクリートの強度、耐久性の向上に良いフレッシュコンクリートは運搬、打ち込み、締め固め、仕上げなどの作業がし易く材料の分離の少ないものである。この性質をワーカビリティと言い一般にスランプ試験を指標としている。スランプ試験は上部直径 10 cm、下部直径 20 cm、高さ 30 cm の円錐状のスランプコーンにコンクリートを充填し、これを引き上げてコンクリート頂部が下がる高さをスランプ値とする。8 cm 程度が普通でポンプ車打設では 15 ~ 18 cm もある。コンクリートの設計基準強度に基づき示方配合により水セメント比  $W/C$  が定まると単位水量を小さくするのが経済的なコンクリートとなる。微細気泡はワーカビリティを改善するので AE 剤を加えたり混和剤である減水剤を用いて単位水量を削減する。

日平均気温が摂氏 4 度以下は寒中コンクリートとして留意する。コンクリートは 0 ~ 2 度で凍結し水和反応は停止するので強度は増加しない。打ち込みコンクリートの温度は摂氏 5 ~ 20 度の範囲とする。また日平均気温が摂氏 25 度以上は暑中コンクリートとして留意する。打ち込みコンクリートの温度は 30 度以下とする。湿潤な養生に配慮し風の影響を防ぎ乾燥収縮を少なくする。

アルカリ骨材反応はセメントのアルカリ (Na, K) と骨材の構成物質が長期に亘って化学反応しコンクリートに有害な膨張を生む。アルカリと反応する骨材構成物質によりアルカリシリカ反応、アルカリケイ酸反応、アルカリ炭酸塩反応があるがアルカリシリカ反応の事例が多い。これは一般にシリカ鉱物(クリストパライト、トリジマイト、微小石英、結晶格子に歪を有する石英、オパールなど)と火山ガラスが関与する。

コンクリートの炭酸化(中性化)はセメントの水和生成物である  $Ca(OH)_2$  や  $C-S-H$  が空気中の  $CO_2$  と反応し  $CaCO_3$  などに変わりアルカリ性が低下する。これにより鉄筋表面に形成されていた不動態皮膜が破壊され腐食され易くなる。

硫黄は人体には不可欠な成分でアミノ酸や蛋白質に含まれており生命誕生の初期には有機物合成の為に水素を高温噴出孔の硫化水素に求めたと言われている。排水中の有機物は分解し硫酸イオンを生じる。硫酸還元細菌はこの硫酸イオンを硫化水素に還元する。酸素と水の存在する条件で硫黄酸化細菌は硫化水素を酸化して硫酸を生成する。この硫酸はコンクリートの水酸化カルシウムなどと反応し硫酸カルシウムとなり体積は膨張し劣化を進める。硫黄酸化細菌の活性をニッケルとタンゲステンで抑制するのがビツクリートでありゼオライトの格子に銅と銀を担持し硫黄酸化細菌の増殖を抑えるのがゼオマイテーターである。このほか樹脂による塗布や塩化ビニール製品など耐蝕性材料で被覆する方法もある。

レジンコンクリートは細骨材に対し重量で 12% のフライアッシュをワーカビリティ改善に利用し 11% 程度の不飽和ポリエステル樹脂を結合剤とし少量の硬化促進剤を加え製造する。圧縮強度が高く耐薬品性に優れた材料であるがセメント製品より高い。

ハイガードパイプはヒューム管の内面を目荒らししガラス繊維強化樹脂を遠心力で巻き立てた製品で強度や耐薬品性は高いが割り高である。

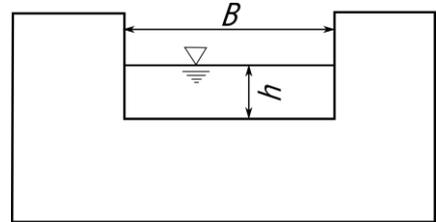
参考—5)均等な流れと損失水頭

エネルギー (E) の保存則は運動E + 圧力E + 位置E =  $\frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{P}{\gamma \cdot g} + Z = \text{一定}$ でこれをベルヌーイの定理という。オリフィスは流量を計り均等に分配する時に利用する。

トリチェリーの定理は  $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$  で流量  $Q = C \cdot A \cdot V$  でAは断面積、Cはベナコントラクターを含む流量係数で実験で定める。開水路の流れは一般に常流—遷移流—射流がある。

フルード数  $F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} = \frac{\text{流速}}{\text{表面波速}} = 1$  を限界流と言いその時

のVを限界流速、hを限界水深という。Fが1より小さい時常流、大きい時射流で下流水深が高くなると跳水が起こる。流量を計測したり均等に流す時四角堰や三角堰などを採用するが堰を越流する時は限界流となる。四角堰の限界



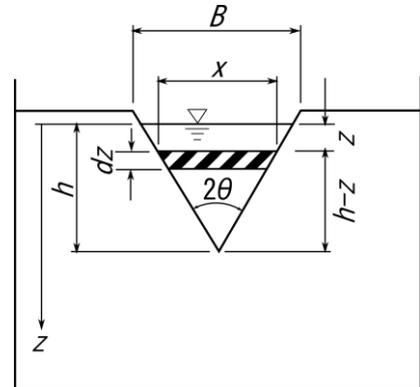
四角堰

流速  $V = \sqrt{g \cdot h}$  でhは限界水深である。幅B、流量Qとし

$$Q = \int (B \cdot \sqrt{g \cdot h}) dh = \frac{2}{3} \cdot B \cdot \sqrt{g} \cdot h^{3/2}$$

三角堰は  $dA = \frac{B}{h} \cdot (h - z) \cdot dz$ 、越流幅B、越流水深h、zは水面からの水深

$$\begin{aligned} Q &= \int \left( \frac{B}{h} \cdot (h - z) \cdot \sqrt{g \cdot z} \right) dz \\ &= \frac{B}{h} \cdot \sqrt{g} \cdot \left( \frac{2h}{3} \cdot h^{3/2} - \frac{2}{5} \cdot h^{5/2} \right) \\ &= \frac{4}{15} \cdot B \cdot \sqrt{g} \cdot h^{3/2} \end{aligned}$$



三角堰

となる。

沈殿池の流れを層流にするには流入部に整流壁を設け流出部には越流計算に基づき三角堰を設置し流れを整え活性汚泥の浮上流出を防止する。

参考—6) 標準活性汚泥法の設計(晴天時日最大汚水量10万 m<sup>3</sup>として)

$$\text{時間最大汚水量} = 10\text{万} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \cdot \frac{1.5}{24 \times 60 \times 60} = 1.736 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{汚水沈砂池の水面積} &= \frac{150000 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{(\text{水面積負荷}) 1800 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)} = 83.4 \left(\text{m}^2\right) \\ &= \text{幅 } 2.0\text{m} \times \text{長さ } 21.0\text{m} \times 2 \text{池とする。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ポンプ口径 } D &= \frac{\sqrt{2} \cdot Q \cdot \pi}{(\text{流速}) V} = \frac{\sqrt{2} \times 1.736 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \times 3.14}{3 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} \\ &= 0.68\text{m} \quad (700 \text{mm} \times 2 \text{台とする。}) \end{aligned}$$

前スクリーン 50mm、後スクリーン 25 mm、沈砂揚砂機 2機とする。

$$\begin{aligned} \text{最初沈殿池} &= \frac{100000 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{(\text{水面積負荷}) 50 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)} = 2000 \left(\text{m}^2\right) \\ &= \text{幅 } 5\text{m} \times \text{長さ } 40\text{m} \times \text{深さ } 3\text{m} \times 5 \text{池} \times 2 \text{系列とする。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{反応槽} &= \frac{100000 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{(\text{反応時間}) \frac{16 \text{ (hr)}}{24 \text{ (hr)}}} = 66667 \left(\text{m}^3\right) \\ &= \text{幅 } 5\text{m} \times \text{長さ } 267\text{m} \times \text{深さ } 5\text{m} \times 5 \text{池} \times 2 \text{系列とする。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{最終沈殿池} &= \frac{100000 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{(\text{水面積負荷}) 30 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)} = 3334 \left(\text{m}^2\right) \\ &= \text{幅 } 5\text{m} \times \text{長さ } 70\text{m} \times \text{深さ } 3\text{m} \times 5 \text{池} \times 2 \text{系列とする。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{塩素混和池} &= \frac{1.736 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{60 \times (\text{混和時間}) 15 \text{ (min)}} = 1563 \left(\text{m}^3\right) \\ &= \text{幅 } 2.1\text{m} \times \text{長さ } 25\text{m} \times \text{深さ } 3\text{m} \times 5 \text{回路} \times 2 \text{系列とする。} \end{aligned}$$

反応槽は高度処理の嫌気槽—無酸素槽—好気槽として配列を考える。

参考—7) 基礎工法

基礎は直接基礎と杭基礎に分類できる。杭基礎は支持杭と摩擦杭に分けられる。

直接基礎は設計荷重に対して地盤の支持力が十分である場合、砂や割栗石で均して直接支持地盤に荷重をかけるので経済的である。

支持杭は設計荷重に対して地盤沈下を許容値以内とし、摩擦杭は等しい沈下を許容する。また杭は施工法により既成杭と場所打ち杭に分ける。既成杭には、以下のものがある。

- 木杭      古くから 6 m 程度の松杭は世界で使用され水中にあると腐食し難い。
- R C 杭    鉄筋コンクリート (reinforced concrete pile) の工場製品で木杭に代わる。
- P C 杭    R C 杭のプレストレス杭 (prestressed concrete pile) で地震時の水平耐力が

大きい。

- H杭 H鋼を杭材に用いたもので山留め仮設材や覆工にも採用される。
- 鋼管杭 鋼管を杭材にしたもので水平耐力も大きく施工性や信頼性は高い。
- 合成杭 鋼管の内面にコンクリートなどを遠心力で巻き立てた杭で水平耐力や剛性も高い。

既成杭はもんけんやデーゼルハンマーで打設するのが経済的で信頼性も高いが現場周辺への騒音及び振動などの被害が懸念される。近年の都市土木や建築の施工環境では防音カバーの使用や中掘工法など工夫されている。その場合アースオーガーやウオータージェットを併用して中掘した後最終打ち止めか先端をセメントモルタルで根固めする工法が用いられる。バイブロハンマーは一般に山留め用の鋼矢板やH鋼の打ち込み引き抜きに用いられる。

既成杭の施工における騒音振動対策のほか現場で大口径の杭を構築する為に場所打ち杭が開発されてきた。場所打ち杭には、以下のものがある。

#### リバーサーキュレーション杭

ドイツのザルツギッター社が開発した工法で地上部にスタンドパイプを建て込み内水位を2 m程度高くし坑内を回転ビットで掘削する。掘削土砂は坑内に保持している泥水とともにサクシオンポンプで揚砂し地上にある泥水処理設備で土砂と泥水を分離し泥水は坑内に戻す。所定の深さまで掘削したら坑内底部のスライムを処理し杭の鉄筋カゴを建て込み水中コンクリートを打設する。スライム処理で杭の品質が影響されるが大口径で大深度の実績がある。

#### オールケーシング杭

フランスのベノト社が開発した工法でビットの付いたケーシングを揺動回転させて掘削山留めする。土砂はグラブバケットで揚砂し鉄筋カゴを建て込みコンクリートを打設する。坑壁の崩壊は少ないが細砂では砂締めによりケーシングが抜けにくい事がある。また先端のビットに高強度材料を用いて礫や岩盤の掘削も可能である。

#### アースドリル工法

アメリカのカウエルド社が開発した工法で地表部に6 mほどのケーシングを建てビットの付いた掘削機で掘削し揚砂する。下部の坑壁防護は泥水で対応しながら鉄筋カゴを建て込み水中コンクリートを打設する。坑壁の崩壊や底部スライム処理には留意する必要がある。

#### 深礎工法

日本で発達した工法で円形または小判型の波形鋼板山留め材のなかを人力や小型機械で掘削しながら山留めを下し内部に鉄筋コンクリートなど構造物を構築する。傾斜した施工面や作業高さには制約のある現場では有利となる。

#### ケーソン工法

ケーソン工法は底面掘削の後、順次鉄筋コンクリート製構造物を作りその自重で

沈下させ躯体を構築する。堀削を大気圧の状態で行うオープンケーソンと土圧水圧に見合う圧搾空気を加えた状態で行うニューマチックケーソン工法がある。より安定した姿勢で早く沈設する為にアンカーの引張反力を利用する場合もある。近年圧気作業をロボット化し長時間の高気圧条件下での作業の制約を克服して経済性や工期短縮に繋げている。

## 鉛直支持力の推定

道路橋示方書の式

$$R_a = \frac{\gamma}{n} \cdot (R_u - W_s) + W_s - W$$

ここに、

$R_a$  : 杭頭における杭の軸方向許容押し込支持力 {KN (tf)}

$n$  : 安全率で支持杭 (常時 3、地震時 2)、摩擦杭 (常時 4、地震時 3)

$R_u$  : 地盤から決まる杭の極限支持力 {KN (tf)}

$W_s$  : 杭で置き換えられる部分の土の有効重量 {KN (tf)}

$W$  : 杭及び杭の内部の土砂の有効重量 {KN (tf)}

$\gamma$  : 極限支持力推定法の相違による安全率の補正係数(推定式 1.0、載荷試験 1.2)

$$R_u = q_d \cdot A + U \cdot \sum (L_i \cdot F_i)$$

ここに、

$q_d$  : 杭先端で支持する単位面積当たりの極限支持力 {KN/m<sup>2</sup> (tf/m<sup>2</sup>)}

$q_d$  の推定は、 $N_{ave} = \frac{N_1 + N_2}{2}$ , ( $N < 40$ ) を図より読み取る。

$N_1$  : 杭先端N値、 $N_2$  : 杭先端から上方 4D の範囲の平均N値

$A$  : 杭先端面積 (m<sup>2</sup>)

$U$  : 杭の周張 (m)

$L_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

$F_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 {KN/m<sup>2</sup> (tf/m<sup>2</sup>)}

テルツアギーの式

$$Q_a = \frac{1}{F_s} \cdot (q_d \cdot A_p + U \cdot D_f \cdot f_s)$$

ここに、

$Q_a$  : 杭の許容支持力 {KN (tf)}

$F_s$  : 安全率

$q_d$  : 杭先端の極限支持力度 {KN/m<sup>2</sup> (tf/m<sup>2</sup>)}

円形断面  $q_d = 1.3 \cdot C \cdot N_c + 0.6 \cdot r \cdot \gamma_1 \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$

正方形断面  $q_d = 1.3 \cdot C \cdot N_c + 0.4 \cdot b \cdot \gamma_1 \cdot N_\gamma + \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$

$N_c, N_\gamma, N_q$  は支持力係数で図より読み取る。

$\gamma_1$  : 杭先端地盤の土の単位体積重量 {KN/m<sup>2</sup> (tf/m<sup>2</sup>)}

- $\gamma_2$  : 杭の根入れ部分の土の単位体積重量 {KN/m<sup>2</sup> (tf/m<sup>2</sup>)}  
 $r$  : 円形杭の断面半径 (m)  
 $b$  : 杭の幅 (m)  
 $A_p$  : 杭先端面積 (m<sup>2</sup>)  
 $U$  : 杭の周長 (m)  
 $D_f$  : 杭の根入れ長さ (m)  
 $f_s$  : 杭の周面摩擦力 {KN/m<sup>2</sup> (tf/m<sup>2</sup>)}

マイヤーホッフの式

$$Q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left( 40 \cdot N \cdot A_p + \frac{1}{5} \cdot N_{sa} \cdot A_s + \frac{1}{2} \cdot N_{ca} \cdot A_c \right)$$

ここに、

- $N$  : 杭先端地盤のN値  
 $N_{sa}$  : 杭の根入れ部分の砂層の平均N値  
 $N_{ca}$  : 杭の根入れ部分の粘土層の平均N値  
 $A_p$  : 杭の先端面積 (m<sup>2</sup>)  
 $A_s$  : 中間砂層中の杭の表面積 (m<sup>2</sup>)  
 $A_c$  : 中間粘土層の杭の表面積 (m<sup>2</sup>)

N値の補正

ロッドの長さによるN値の補正

$$N = N' \left( 1 - \frac{1}{200} \cdot X \right), \quad N = \text{補正後のN値、} N' = \text{実測N値、} X = \text{ロッドの長さ (m)}$$

土質による補正 (極細砂またはシルト質砂では透水性が低くN値は過大)

$$N = 15 + \frac{N' - 15}{2} \quad (N > 15)$$

杭先端地盤のN値の補正

$$N_{ave} = \frac{N_1 + N_2}{2}$$

ここに、

- $N_{ave}$  : 杭先端地盤の設計N値  
 $N_1$  : 杭先端地盤の測定N値、ただし下方に向かって深さと伴にN値が減少する時杭の幅の2倍の範囲の平均N値  
 $N_2$  : 杭先端より上方へ杭幅の3.75倍の範囲の平均N値

場所打ち杭の $q_d$ の推定

地盤種別	先端極限支持力度
砂礫層砂層 (N > 30)	3000 KN/m <sup>2</sup> (300tf/m <sup>2</sup> )
良質な砂礫 (N > 50)	5000 KN/m <sup>2</sup> (500 tf/m <sup>2</sup> )
硬質粘性土層	3qu (一軸圧縮強度)

中掘り杭工法の極限支持力度

先端処理工法	杭先端の極限支持力度 $q_d$		
最終打撃方式	打ち込み杭に倣う。		
セメントミルク根固め (噴出攪拌方式)	150N (KN/m <sup>2</sup> )	( $\leq 7500$ KN /m <sup>2</sup> )	砂層
	15N (tf/m <sup>2</sup> )	( $\leq 750$ tf/m <sup>2</sup> )	
コンクリート打設方式	200N (KN/m <sup>2</sup> )	( $\leq 10000$ KN /m <sup>2</sup> )	砂礫
	20N (tf/m <sup>2</sup> )	( $\leq 1000$ tf/m <sup>2</sup> )	
コンクリート打設方式	場所打ち杭に倣う		

プレボーリング工法による杭先端極限支持力度

地盤種類	杭先端極限支持力度(KN/m <sup>2</sup> )
砂層	150N ( $\leq 7500$ )
砂礫層	200N ( $\leq 10000$ )

最大周面摩擦力度 (KN/m<sup>2</sup>)

施 工 法	地 盤 の 種 類	
	砂 質 土	粘 性 土
打ち込み杭工法	2N ( $\leq 100$ )	Cまたは10N ( $\leq 150$ )
場所打ち杭工法	5N ( $\leq 200$ )	Cまたは10N ( $\leq 150$ )
中掘り杭工法	2N ( $\leq 100$ )	0.8Cまたは8N ( $\leq 100$ )
プレボーリング工法	5N ( $\leq 150$ )	Cまたは10N ( $\leq 100$ )
鋼管ソイルセメント杭工法	10N ( $\leq 150$ )	Cまたは10N ( $\leq 200$ )

参考—8)施設構造および耐震設計の考え方

下水道構造物は地上1階スラブ上面以深は土木構造物として、それ以上は建築構造物とする複合構造物と定めており構造計算は一体として応力計算する。構造物は常時と地震時の双方に安全で耐力があり、また経済的である様に設計する。土木では大きく管渠と水処理施設などに分かれる。

管渠施設

鉄筋コンクリート管の鉛直土圧はマーストンの式を、塩化ビニール管については直土圧を用い水平土圧＝横方向土圧係数×鉛直土圧とする。管渠の耐震設計は線状の構造物であり相対的に巨大な周辺地盤の挙動に大きく影響される共同溝に類似することから共同溝設計指針に倣う。

地盤種別による固有周期

表層地盤の固有周期は地盤の特性値  $T_g(s)$  による。

$$T_g = 4 \cdot \sum \frac{H_i}{V_{si}} (s)$$

ここに、

$H_i$  :  $i$  番目の地盤の厚さ (m)

$V_{si}$  :  $i$  番目のせん断弾性波速度 (m/s)

粘性土  $V_{si} = 100 \cdot N_i^{1/3}$  ( $1 \leq N_i \leq 25$ )

砂質土  $V_{si} = 80 \cdot N_i^{1/3}$  ( $1 \leq N_i \leq 50$ )

これは表層地盤の各層の地震波伝播時間の総和が固有周期の  $1/4$  に相当すると仮定する。  
表層地盤の固有周期  $T_s = 1.25 \cdot T_g$  ( $T_g$  を  $1/0.8$  (補正係数) で補正する。)

共同溝設計指針 (応答変位法による)

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot H}\right)$$

ここに、

$U_h(z)$  : 地表面から深さ  $z$  (m) の水平変位振幅 (m)

$H$  : 地表面から耐震基盤面までの厚さ (m)

$S_v$  : 設計応答速度スペクトル (m/s)

$T_s$  : 表層地盤の様な固有周期 (s)  $= 1.25 \cdot T_g$

この  $U_h(z)$  は単一な表層地盤の一質点系のばねマスモデルにおける地表面最大変位量を  $\frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_s$  とし、基盤面で零とする地盤変位分布  $\cos\left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot H}\right)$  (変位分布を示す振動モード関数で基盤面零で地表面最大とする  $1/4$  波長の余弦波分布) の積である。

地表面最大変位量  $U_h(0)$  は、

$$U_h(0) = \beta \left( \text{一次の刺激係数で} \frac{4}{\pi} \right) \cdot S_d(T_s, h)$$

{固有周期  $T_s$ , 減衰定数  $h$  での変位応答スペクトル (m)}

$$S_d(T_s, h) = \frac{T_s}{2\pi} \cdot S_v(T_s, h)$$

{ $T_s$ ,  $h$  での速度応答スペクトル (m/s)} とすると

$$U_h(0) (\text{地表面最大変位量}) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{T_s}{2\pi} \cdot S_v(T_s, h) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v(T_s, h) \cdot T_s$$

と表せる。

地表面から深さ  $z$  (m) の垂直変位振幅 (m) は、

$$U_v(z) = \frac{1}{2} \cdot U_h(z)$$

管の拔出し量の算定は、

$$\text{波動の式 } W = U_h(z) \cdot \left\{ \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot \left(t - \frac{X}{V_s}\right) \right\}$$

波長  $L$  は  $L = T_s \cdot V_s$  となり

管軸  $x$  と波動の進行方向  $X$  の入射角を  $\phi$  とすると  $X = x \cdot \cos \phi$ 、 $W_s = W \cdot \sin \phi$

$$x \text{ 方向変位成分 } W_s = -U_h(z) \cdot \sin \phi \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot \left(t - \frac{x \cdot \cos \phi}{V_s}\right)$$

$$x \text{ 方向地盤の歪 } \varepsilon = \frac{dW_s}{dx} = U_h(z) \cdot \frac{\pi}{L} \cdot \sin(2 \cdot \phi) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot \left(t - \frac{x \cdot \cos \phi}{V_s}\right) \quad \text{となるので}$$

地盤の歪最大値は  $\phi = 45^\circ$  に近い時  $\varepsilon = \frac{\pi \cdot U_h(z)}{L}$  となり

抜け出し量は、 $\delta = \varepsilon \cdot p$  ( $p$  : 管有効長) となる。

屈曲角の算定は、

管軸  $x$  と地震波動  $X$  の入射角が零に近い時最大となる。

$$\text{波動曲率 } \frac{1}{R} = \frac{d^2W}{dx^2} = \left(\frac{2\pi}{T \cdot V_s}\right)^2 \cdot U_h(z) \cdot \left(\sin\left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot \left(t - \frac{x \cdot \cos \phi}{V_s}\right)\right) \text{ となるので}$$

$$\left(\frac{1}{R}\right)_{\max} = \left(\frac{2\pi}{T \cdot V_s}\right)^2 \cdot U_h(z) \text{ であり、また管の有効長を } p \text{ とし}$$

$$R = \frac{p}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{p}{\theta} \quad (\theta \text{ が極小さいときの近似})$$

$$\text{屈曲角は、} \theta = \left(\frac{2\pi}{T \cdot V_s}\right)^2 \cdot U_h(z) \cdot p \text{ となる。}$$

レベル 1 (供用期間に数回発生する地震に対しすべての管渠において設計流下能力を維持)

共同溝設計指針による地震荷重をかけ許容応力度法または使用限界状態設計法の照査

レベル 2 (兵庫県南部地震級に対し重要な管渠で下水流下機能を維持)

兵庫県南部地震による表層地盤の固有周期に対する応答速度スペクトルと永久歪を用いて終局限界状態設計法による照査

## 土木施設

土木学会の材料強度および荷重の特性 (レベル 1、レベル 2)、鉛直土圧については直土圧またはランキン・レザール・カクーロン土圧を採用する。水平土圧は管渠と同様である。

レベル 1 は、標準設計水平震度 = 0.2 (一般構造)、0.3 (特殊構造) とし地域別、地盤別、重要度別補正係数をかけ許容応力度法 (震度法) で照査

レベル 2 は兵庫県南部地震による一般構造物地上部設計水平震度 0.8 (一種地盤)

0.6 (二種、三種)

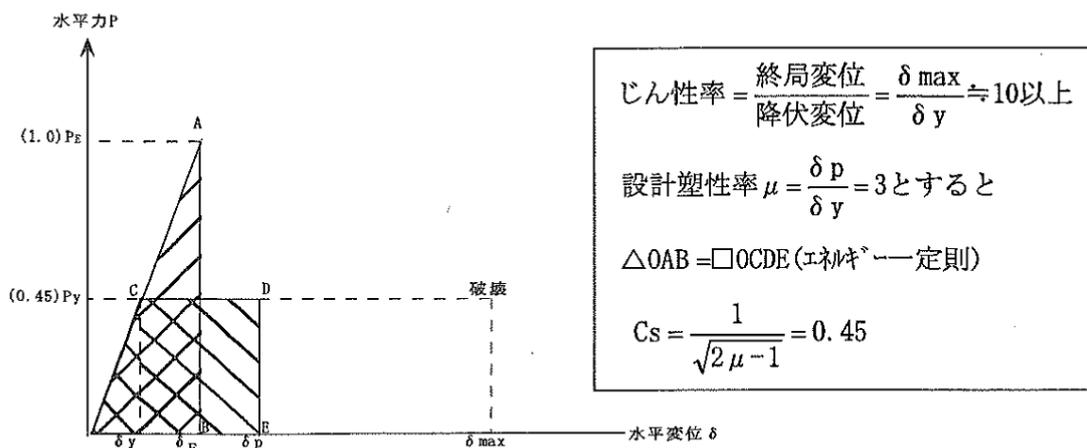
特殊構造物地上部設計水平震度 1.2 (一種地盤)

0.9 (二種、三種)

地下部設計水平震度 = 地上部設計水平震度  $\times (1 - 0.0015z)$  で 0.5 以上とする。

$z$  = 地表面からの深さ (m)

設計等価水平震度で静的設計により地震力を算定する。これは固有周期の小さい下水道土木施設を動的設計で確認した結果である。靱性を考慮する場合、弾塑性の終局限界状態設計法で照査する。しかしながら機能上重要な構造部は弾性降伏応力内で照査すると共に水密性などひび割れ歪の制限にも配慮する。



構造物特性係数のイメージ

エネルギー一定の法則では標準設計震度の弾性降伏歪による仕事量と塑性歪までの変位で消費する仕事量を等しくする水平地震力の低減値を等価設計水平震度とする。即ち、構造物の標準設計震度に構造特性係数 ( $C_s$ ) をかけ等価設計水平震度とする。

許容設計塑性率  $\mu = \frac{\text{設計塑性終局歪}}{\text{弾性降伏歪}} = 3$ とすると  $C_s = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} = 0.45$  となる。

許容設計塑性率  $\mu$  を 1 に近づけると塑性部は少なく弾性領域の設計となる。限界状態設計法と許容応力度設計法の本質的な相違はない。限界状態設計法の部分安全係数法は安全を確保する係数を変更し易くする特徴を持つ。

限界状態設計法の一般式は、

$$\frac{C_s \cdot \sum \gamma_a \cdot S \cdot \gamma_f \cdot F_k}{\frac{1}{\gamma_b} \cdot R \cdot \left( \frac{f_k}{\gamma_m} \right)} < 1$$

ここに、

$F_k$  = 荷重の特性値,  $S$  = 荷重効果 (断面力),  $f_k$  = 設計材料強度,  $R$  = 抵抗値 (断面力),  $C_s$  = 構造係数 (=  $\gamma_i$ ),  $\gamma_a$  = 構造解析係数,  $\gamma_f$  = 荷重係数,  $\gamma_b$  = 部材係数,  $\gamma_m$  = 材料係数

である。

地震時動水圧 = ウェスターガードの式

## 建築施設

建築基準法による耐震設計法は建物の高さ60m以上は動的設計し許容応力度法で断面算定する。60m以下の一次設計は弾性範囲で許容応力度法で確認する。60m以下の二次設計についてはルート1の20m以下、ルート2の31m以下、ルート3の60m以下に分けて計算する。許容応力度法で断面算定し一定の壁や柱の量を確保する。そして層間変形角Rを1/200以下（著しい損傷の生じる恐れのない場合は1/120）、また各階の保有水平耐力を確認する。

設計用地震荷重は1981年の建築基準法による新耐震設計法を適用した建築物の兵庫県南部地震における被害状況から変更していない。新耐震設計法は震度法に変えて地盤種別の固有周期により層せん断力係数を用い、より靱性を考慮した保有水平耐力を計算する。各層の地震力＝その層より上部の（固定荷重＋積載荷重）×層せん断力係数

地上の層せん断力係数は

$$C_i = Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot C_0 \cdot S_i$$

ここに、

- Z : 地震地域係数で東京は1.0（建設省告示第1793号第一）
- R<sub>i</sub> : 振動特性係数（建設省告示第1793号第二）
- A<sub>i</sub> : 地震層せん断力係数の分布係数（建設省告示第1793号第三）
- S<sub>i</sub> : 重要度別補正係数（一次設計のみ適用し1.1、ただし簡易な施設は1.0）
- C<sub>0</sub> : 標準層せん断力係数 一次設計用（許容応力度法）C<sub>0</sub>は0.2以上  
二次設計用（保有水平耐力法）C<sub>0</sub>は1.0以上

地下部の地震力＝当該部の（固定荷重＋積載荷重）×水平震度K

$$\text{水平震度 } K = 0.1 \cdot \left(1 - \frac{H}{40}\right) \cdot Z \cdot S_i$$

ここに、

- H : 建築構造物の各部分の地表面からの深さ（20m以上は20mとする）
- Z : 地震地域係数で東京は1.0

一般に動的設計を適用するが実績を踏まえて固有周期が小さく高さの条件を満足すれば静的設計を採用できる。二次設計の層せん断力係数は塑性歪を考慮した構造特性係数と重心と剛心の偏心率を示す形状係数を掛けて保有水平耐力を算定する。断面算定は許容応力度法による。

## 地震動

地震によって引き起こされる波動（地震波）の伝播により地表や地中に発生した振動

### レベル1地震動

施設の供用期間内に1～2度発生する確率を有する地震動をいう。

## レベル2 地震動

陸地近傍に発生する大規模なプレート境界地震や直下型地震による地震動の様に施設の供用期間内に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震をいう。

## 地震力

地震動により構造物に作用する荷重（慣性力、土圧、動水圧の総称）をいう。

## 震度法

地震力を静的な荷重に置き換えて構造物の計算を行う耐震計算法をいう。

## 応答変位法

地中に埋設される管路や管廊などの施設を対象とし地震時の挙動が周辺地盤の運動に支配されるものとして地盤の相対変位から応力等を算定する計算法をいう。

## 許容応力度法

応力度計算の仮定に従って部材の応力度を計算しその応力度が鉄筋及びコンクリートの許容応力度以下であることを検証し部材の安全を確かめる方法をいう。

## 限界状態設計法

終局、使用、疲労の各限界状態を定義し荷重及び耐力の評価に基いて限界状態に達していないことを確率統計的に設定する設計法をいう。

## 終局限界状態

構造物または部材が破壊したり転倒、座屈、大変形等を起こし安定や機能を失う状態をいう。

## 使用限界状態

外力によって構造物や部材が過度のひび割れ、変位、変形、振動等を起こし設計に基づく所定の機能や耐久性を損なうなど正常な使用が不可能となる状態をいう。

## 動的解析

地震時における構造物の挙動を動力的に解析する計算法をいう。

## 設計水平震度

構造物の耐震設計計算に用いる水平方向の荷重を求める為の係数を言い重力加速度との比をいう。

## 地震応答スペクトル

特定の地震入力に対して任意の固有周期及び減衰定数をもつ1自由度振動系の最大応答値として定義されるもので一般に減衰定数を一定にして周期に対して最大応答値を示すものをいう。

## 速度応答スペクトル

地震応答スペクトルのうち速度を応答値としたもの

## 地震時の慣性力

物体の重量と設計水平震度の積で与えられる力をいう。

#### 耐震設計上の地盤種別

地震時における地盤の振動特性に応じて工学的に分類する地盤の種別をいう。

#### 耐震設計上の地盤面

耐震設計において地表面（基準面）と仮定する地盤面をいう。

#### 基盤面

耐震設計時に設定する基盤層であって表層地盤に比べて相対的に堅固な地盤が下方に続くときその地盤の上面をいう。

#### 液状化

地震動による間隙水圧の急激な上昇により水で飽和した砂質土層などがせん断強度（有効応力）を失い土の構造が破壊する現象をいう。

#### 液状化に伴う側方流動

液状化に伴い護岸等の近傍において地盤が側方へ大きく変形あるいは移動する現象をいう。

#### 地盤の永久歪

地震によって地盤に発生し残留した静的な歪をいい引っぱり歪と圧縮歪がある。

#### 重要な幹線等の施設

ポンプ所や処理場及びそれに直結する幹線管渠や避難所に繋がる管路などをいう。

#### その他の管路

重要な管路等以外の管路をいう。

#### 設計流下能力

設計流量計算書に記載された当該管路の流下能力をいう。

#### 流下機能の確保

地震によって本管部のクラックや沈下等の被害が生じ設計流下能力の確保が困難となるが補修や敷設替え等の対策を講じるまでの間は管路として下水を上流から下流へ流せる状態をいう。

#### 一次設計

建物の耐用年中に数回は遭遇する可能性の高い中規模の地震動に対応する耐震設計

#### 二次設計

建物の耐用年中に遭遇するかもしれない大規模の地震動に対応する耐震設計

#### 有限要素法

有限要素法は対象構造を有限個の要素に仮想的に分割して応力解析する。構造物に対し座標を基に形状入力しジオメトリーと言われる構造モデルを想定する。構造は要素の集合であり、一般に線—梁状、面—板状、体状が利用されている。このモデル要素を適切にイメージし課題の解析目的に適うよう要素分割し節点で結合する。板要素は正方形が、体要素は6面体が解析精度は良いと言われている。

構造モデルの捉えかたや要素分割の細かさなどノウハウがあり高い精度を期待する所は重みを付けて分割（メッシュ）数を増やす。特殊な機能を持つ要素としてばね要素、すきま要素、質量要素、剛体要素があり他に節点自由度もある。この節点自由度には並進自由度と回転自由度があり x 軸 y 軸 z 軸に関し  $2 \times 3 = 6$  通りの拘束で条件指定できる。荷重は分布荷重と集中荷重をプリプロセサーを用いて等価節点荷重として節点に分配し集中荷重とする。分割数は 10 の倍数を目安とし目的に合わせて解析精度と解析時間を考慮して定め必要があれば共通する節点はマージ処理し統一する。要素内の変位分布には一次線形分布と二次放物線分布がある。これらの設定条件や材料データを基に構造モデルを確定しソルバーを使いシミュレーション解析しポストプロセサーで結果を見易くコンター図やグラフィックスとして表示する。そして解析結果を過去の事例や現場の実測値を参考に検証し必要ならば材料データや要素分割のほか拘束や荷重など境界条件を調整し解析精度を高める。応力解析の要素分割は固有振動解析や熱伝導解析に比べ密となる場合が多い。

管渠の耐震設計における応答変位法は対象の表層地盤を単一の梁要素で一様なせん断弾性波速度と固有周期の材料特性として換算し基盤層を境界（変位零）とする一質点バネモデルに設計応答速度スペクトルを適用した時の地表面最大変位量を計算し更に深さ方向には余弦分布で変位量を推定する。

## 参考—9) 山留め堀削工法と地盤改良および地下水の排水工法

### 山留め工法

#### 木矢板工法

木製の山留め材で古くから浅い堀削に用いられる。止水性はない。

#### 軽量鋼矢板工法

浅い山留めに利用し止水性はある。

#### 親杭横矢板工法

親杭にH鋼を利用し2本のH鋼の間に横方向矢板を差し込むもので止水性はない。バイブロハンマーでH鋼の打設、引き抜きを行う場合が多い。

#### 鋼矢板工法

鋼矢板を使用する一般的な山留めでバイブロハンマー打設や油圧圧入で施工する。圧入には反力が必要であり、3枚程度の鋼矢板を先行打設し利用する場合がある。

#### 鋼管矢板工法

剛性の大きい鋼管に溶接継ぎ手などを細工した山留めであり大規模で深い堀削

に使用され止水性もある。施工環境が許せば打撃工法もあるがバイブロハンマーか油圧圧入が一般的である。

#### 柱列杭工法

多連オーガー堀削しH鋼を建て込みコンクリートを打設する。現場打ちであるので施工精度にもよるが一般に止水性はある。

#### 地中連続壁工法

ガイドウォールの中に泥水を張りグラブバケットやBWのほかエレクトロミルなどの回転堀削機で堀削し土砂はサクショポンプで泥水と共に揚砂する。地上の泥水処理設備で土砂と泥水を分離し泥水は坑内に戻す。床付けのスライムを処理し鉄筋カゴを建て込み水中コンクリートを打設する。剛性の大きい深い山留めを構築できる。止水性があり最近継ぎ手構造を一体化しせん断力やモーメントを受ける本体利用の工夫もある。

### 堀削工法

#### オープンカット工法

法きりオープンカット工法は比較的浅い堀削に適し経済的であるが広い工事面積を必要とする。

#### 切梁 腹起こし工法

鋼矢板やコンクリート壁などの山留めにH鋼材などで切り梁と腹起こしを設けて堀削する一般的な工法である。

#### アンカー工法

山留め材と腹起こし材にかかる土水圧をアンカーの張力で受ける工法で山留め内の作業空間は大きくとれるがアンカー打設の用地が必要となる。工事終了時にアンカーを撤去するか存置するかあらかじめ設計しておく。

#### 控え杭工法

アンカー工法と類似しているが控え杭で反力を受ける。

#### アイランド工法

比較的広いが軟弱な工事用地のなかで浅い堀削を行うとき中央部を先行して堀削後、躯体構築してその躯体に切り梁反力を取りながら外周部の堀削躯体構築をおこなう。工期は長くなりかねないが安全に施工できる。

#### トレンチカット工法

切り梁腹起こし工法で外周部の一部躯体を先行構築し次にその本体構造物を山留めにして中央部を堀削構築する。工期は長くなるが安全性は増す。

#### ケーソン工法

底面を堀削しながら躯体自重で沈設する工法でオープンケーソンとニューマチックケーソン工法がある。最近圧気環境での作業にロボットを活用して労務環境

の改善と工期短縮および経済性を追求している。

#### 山留め根入れ長の算定

山留めの設計は堀削深さ10m程度以下で良く用いられてきた慣用法と近年大規模大深度施工に伴う土圧や水圧の計測及びコンピューターを活用した数値解析に基づき変位量も加味した設計施工が一般化している。情報化施工による安全で経済的な仮設への取り組みである。慣用法は山留め材の根入れ長の算定と断面の算定が主要事項である。

水圧は地下水位により設定する。止水性のある山留め材には考慮するがない場合は見込まない。堀削側の床付けより深い根入れ部分の受動土圧はその合力の重心を仮想支点として全ての合力を作用させる。最下段あるいはその一段上の切り梁位置以下の根入れ部分の主動土圧と水圧によるモーメントと受動土圧の合力モーメントが平衡する根入れ深さの大きい方を1.2倍し根入れ長とする。

#### 山留めの断面算定

断面算定に用いる土圧は実測から土木学会や建築学会が土質ごとの慣用土圧を定めている。水圧は地下水位による。最下段切り梁位置と仮想支点間の単純梁として主動土圧(+), 受動土圧(-)、水圧(+)を懸け正の荷重だけで部材の断面を算定する。水圧を加味するか否かは山留め材の止水性による。

### 地盤改良工法

#### 載荷重工法

将来建設する構造物と同等の荷重を懸けあらかじめ圧密沈下をおこした後荷重を除去して構造物を作るものでプレロード工法とも言う。サーチャージ工法は将来の構造物の荷重以上を載荷する。

#### バーチカルドレーン工法

圧密に要する時間は排水距離の二乗に比例するので軟弱地盤の中に人工的に排水路を設けて圧密時間を短縮する工法をバーチカルドレーン工法という。排水路の材料によりサンドドレーン工法とペーパードレーン工法がある。サンドドレーン工法は透水性の良い砂杭を鉛直に造成し排水と地盤の強化を図る。ペーパードレーン工法は厚紙のカードボードを排水路として打設するもので経済的で管理し易い。

#### サンドコンパクションパイル工法（締め固め砂杭工法）

軟弱地盤中に振動あるいは衝撃により砂杭を打ち込み砂の締め固め圧入効果と間隙比を下げ密度を増すことによるせん断強度を増加させ粘性土との複合地盤を形成する。地震時の液状化防止対策や盛土の円弧すべり防止のほかサンドドレーンとして排水路にもなる。鋭敏比の高い粘性土では振動で地盤強度を乱すことも

あるので留意する。

#### バイブロフローテーション工法（振動締め固め工法）

棒状の振動機をゆるい砂地盤のなかで振動させながら水締めし生じた空隙に砂利などを充填し改良する。地震時の液状化対策となる。

#### ロッドコンパクション工法（振動締め固め工法）

クローラークレーンに吊り下げたロッドをバイブロハンマーで地中に貫入させハンマーの振動をロッドを介して地盤を締め固め空隙には砂利や砂を充填する。

#### 重錘落下締め固め工法

クローラークレーンに吊り下げた重錘を落下させ締め固めるもので改良可能深さは10～15mである。

#### 単管ロッド注入工法

セメントモルタルなど懸濁性の薬液を単管で注入するもので強度もあり簡便かつ経済的である。LW工法などが含まれる。

#### 二重管瞬結緩結工法

二重の注入管を用いて、先ず瞬結のセメントモルタルなど瞬結懸濁型で間隙を楔状に充填改良し、次に改良された内側を緩結の水ガラスなど溶液型で浸透注入して改良する。マンシエットチューブやパッカー工法の導入に伴い工夫されてきた。

#### 石灰パイル工法（固結工法）

石灰石（ $\text{CaCO}_3$ ）を摂氏1000度で焼成した生石灰（ $\text{CaO}$ ）を軟弱地盤に杭状に打設する。生石灰自重の32%に相当する地下水（ $\text{H}_2\text{O}$ ）を吸収すると消石灰（ $\text{Ca(OH)}_2$ ）として体積が2倍に膨張し固結するので改良効果がある。発熱するので火傷や防塵など取扱に留意する。

#### 深層混合処理工法

石灰やセメントなど土質改良安定材を粉体あるいはスラリーとして軟弱地盤の土と深層の原位置で強制攪拌混合して2m前後の円柱状の改良体を形成し複合地盤として評価する。ウォータージェットに圧縮空気を併用して地盤を切削しセメントモルタルと混合攪拌する工法のほか、切削した土砂をエアリフトで排土してセメントモルタルと置換する工法もある。改良体の強度や平面配置は改良効果に繋がるので配合試験により定める。

#### 凍結工法

凍結管を通して間隙水を凍結させ強度増加と不透水性を期待する。凍上沈下に留意する。

凍結にはブライン方式と低温液化ガス方式がある。

ブライン方式は不凍液として $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{MgCl}_2$ を用い凍結ユニット（圧縮機、凝縮機、冷凍機）を通してブライン循環ポンプで地中の凍結管に送り込み凍

土を形成する。150 m<sup>3</sup>以上の土量で1か月以上のとき有利となる。地下水流速が2 m/sを上回ると凍土の造成は困難となる。

低温液化ガス方式は沸点-196度の液体窒素をタンクローリー車で搬入しコールドエバポレーターという貯槽を介して地中の凍結管に送り液体窒素の蒸発潜熱と気化による600倍に体積変化した窒素ガスの感熱で凍土を形成する。凍結速度は早く簡便であり騒音振動が少ない。地下水の流速は10 m/d以下であれば可能である。酸欠に配慮する。

## 地下水の排水工法

堀削底盤の地下水圧による崩壊には、以下の種類がある。

- |       |   |
|-------|---|
| ボーリング | 砂質土で地下水位が高い時、堀削側床付け以深の土の重量を山留め外側の水圧が勝り押し上げる現象で山留めの崩壊に繋がり易い。 |
| パイピング | 砂質土で杭打ちやボーリング跡などの水みちを通して山留め外側の水が回り込む現象で堀削に障害となる。            |
| ヒービング | 粘性土で山留め外側から内側へ円弧すべりが堀削側床付けに影響する現象で山留めが変形してくる。               |
| 盤ぶくれ  | 粘性土で山留め内側の被圧水圧で堀削底盤が盛り上がり噴出する現象                             |

## 釜場排水工法

比較的規模の小さい地下水の処理で土工において相対的に低い所に釜場を設け水中ポンプなどで排水する。

## ウエルポイント工法

地下水を下げたい区域の周りにウエルポイントと呼ばれるライザーパイプ付きの揚水施設をウォータージェット等で建て込み真空ポンプで揚水し地下水位の低下を計る。配管などの損失を見込むと約6 m程度が有効揚程である。更に必要な時は多段にウエルポイントを設置する場合もある。

## ディープウエル工法

6インチ程度の揚水管を建て込み水中ポンプを多段に繋いで排水する。揚水量が多くまた深くなる場合が多いので周辺の井戸涸れや地下水位の低下および地盤の沈下にも配慮して採用する必要がある。

## 参考—10)下水道施設の施工法

### 管渠の施工

#### 開削工法

地上より法を切ったり山留めをし堀削床付けして鉄筋コンクリート管や塩化ビ

ニール管などの工場製品を敷設する。安全の為に堀削深1.5 m以上は山留めを使用することが労働安全衛生法に規定されている。大型のボックスカルバートなど現場打ちコンクリートの矩形渠を構築する場合もある。

#### 推進工法

発進立坑から到達立坑に向けて工場製品である推進管を元押しジャッキで押し込み推進管の先端を堀削し排土する。堀削方法には人力、機械掘り、密閉型機械掘りがあり、最近では密閉型機械掘りの泥水式や土圧式が主流である。泥水式推進工法は切羽の土水圧に対してカッターチャンバー内の泥水圧でバランスさせカッタービットで堀削した土砂はポンプ圧送し地上の泥水処理設備で土砂と泥水に分離し泥水は切羽に戻す。大きな礫は破碎し圧送の障害とならない様にする。土圧式は切羽の土水圧に対してベントナイトなど泥蔣材を加え堀削土とあわせ泥土圧でバランスさせスクリュウコンベアーの回転数を調整し排土する。坑外へはトロッコやポンプで搬送する。大中口径推進は仕上がり内径800 mm～3000 mmで人が管内で作業できるが小口径推進は100～700 mmで遠隔自動制御が原則である。推進管には鉄筋コンクリート管や鋼管など管周囲の土水圧とジャッキの推進力を併せて受ける高耐荷力管とジャッキ推進力はスクリュウロードなどで対応し管周囲の土水圧のみを受けもつ塩化ビニール管など低耐荷力管がある。従来推進工法は施工延長100 m以下の直線施工が一般的であったが最近1000 mにも及ぶ長距離で途中に曲線を含む推進が施工されている。たとえば先端カッターフェイスの外側に25 mm程度の余掘りを認め泥水滑材注入点と注入量を工夫する泥濃式推進工法は中折れ推進機の改良と短管ないしは継ぎ手構造など推進管材の開発と相俟って長距離曲線施工を提案している。

また密閉型推進機のローラービットで礫や岩盤を圧砕できるので鉄筋コンクリート管や陶管などを破断除去する改築推進工法に発展しているが取り付け管の入れ替えに苦勞している。従来道路法などの制約により3000 mm以上は工場より現地に運搬できなかったが2分割して工場製作し現地で組み立て5000 mm未満について可能としている。

#### シールド工法

シールド工法はフランス人ブルネルがイギリスのテムズ川の横断道路を施工する時に船食い虫が木材に穴を開けて粘液で固めながら進む挙動にヒントを得て1825年に開発したとある。日本における本工法の適用は1910年に日本国有鉄道の東北本線の折渡トンネルと第二次大戦中1942年の関門海峡トンネルである。都市内では名古屋市地下鉄の覚王山トンネルが最初で東京においてはオリンピック前に飛鳥山付近の下水道幹線で採用された。このときは開放型の刃口シールドであったがその後泥水式、土圧式、2連、3連、球体シールドなどの特殊シールドに進化してきている。

シールド工法はシールドと呼ばれる鋼殻のフード部にカッターフェイスがありガーダー部は推進の為にシールドジャッキを装備する主要構造体で、続くテール部はセグメント組立用のエレクターで構成される。このテールの内周部であるシールドのスキンプレートには1段から3段のテールブラシが付いておりカッターフェイスや約50～60mmのテールボイドからの土水圧がテールクリアランスを通して侵入しないようにグリースを注入する。セグメントはトンネルの本体構造となるがA、B、Kタイプがあり1リングを底部よりAで組上げ上部両側にBを、最後にKを頂部に収める。このセグメントジョイントは千鳥に配置するのが構造上も安定する。セグメント幅は1～2mであるが大きい方がリングジョイントは少なくなるので日進量は増し継ぎ手の漏水など弱点は少なくなる。テール部でエレクターを用いてセグメントリングを組立て、それに反力を取りシールドジャッキで推進しテールボイドには同時注入で裏込めする。セグメントの注入孔より即時注入として裏込めする時もある。セグメントには鉄筋コンクリート製と鋼製および鋳鉄製がある。一般に経済性より3000mm以下は鋼製でそれ以上は鉄筋コンクリート製である。小口径ではコンクリートの型枠が高価になるほか曲線部のテーパセグメントや施工段階で他の管渠の取り付け加工があるとき鋼製は有利である。特殊な応力のかかる構造部材は鋳鉄製となる場合がある。掘削方法は全面開放型、部分開放型、密閉型がある。当初全面開放型は人力掘削であったがブレイカーやバックホウの他アーム掘削機を利用し更に回転掘削機を用いた。沖積地盤では部分開放型のブラインドシールド工法が採用されている。密閉型シールド工法のうち泥水式は切羽の土水圧に対してカッターチャンバーの泥水圧で対応し掘削土は泥水と混合してポンプで流体輸送した後、地上の泥水処理設備で土砂を回収する。土圧式は掘削土砂をカッターチャンバー内に取り込みその泥土圧で切羽の土水圧とバランスする様にスクリーコンベアーの回転数で排土量を制御する。セグメントによる一次覆工は構造体として設計するので土圧、水圧、載荷重など設定し構造決定する。セグメントの慣用計算法ではリング全体の曲げ剛性を有効率で低減しセグメントにかかる曲げモーメントは割増率で大きく負担させ、セグメント継ぎ手部の負担は割増率で低減する。二次覆工は約30cmの無筋コンクリートが一般である。シールドの発進や到達部は地盤を改良しておく必要があり薬液注入工法のほか深層攪拌混合工法や凍結工法など採用する。

#### 沈埋工法

沈埋工法は海底や河底に道路や共同溝などを施工する時に採用され日本では1935年安治川トンネルで施工された。ドライドック方式は沈埋函をあらかじめドックで構築のあと海水などの浮力で浮かせ現地に曳航して沈設する。鋼殻方式は造船所などで型枠となる鋼殻函体を作り現地に曳航してコンクリートを打設し沈設する。沈設する水底部は溝状に掘削し碎石を敷きならし函体を沈設した後上

部は1 m程度覆土する。沈埋函は水中構造物が多いので外周を鋼板で覆い水密性を高め、曳航し易い様に浮力より自重を1 %程度軽く設計し構造体を水面より約10 cmほど浮かせる。継ぎ手はゴムガスケットを用いる水圧接合方式が一般化している。

#### 山岳隧道工法

山岳トンネルは古くから隧道や井戸カナートなどの構築に用いられ鉱山の採掘にも利用されてきた。人力で掘り木製支保工で山留めし粘土や石、日干し煉瓦などで壁面の崩壊を抑えた。やがて工具を使い1866年にノーベルによるダイナマイトの発明により発破工法が導入され山留めも鋼製支保工に変わった。鉄道や道路など大断面を施工するには地層の変化や破砕帯のほか被圧地下水などへ対応する必要がありNATM工法による山留めのほか有効な加背割など堀削工法が発達した。堀削工法は全断面工法、(多段、ロング、ショート、ミニ、補助) ベンチカット工法、中壁分割工法、(側壁,底設,頂設,中央、TBM) 導坑先進工法などがあり堀削断面の形状や地盤条件により選定する。近年は密閉型回転堀削機であるTBM (tunnel boring machine) 工法を用いセグメントで本体構築しジャッキ推進反力をグリッパーで地山に受けたりあるいは後方セグメントにとる施工事例もある。薬液注入工法や深層攪拌混合工法のほかパイプルーフ工法など補助工法を採用し地下水対策など工夫して全断面施工も増加している。

#### NATM工法

NATM (new Austrian tunneling method) 工法はロックボルトと吹き付けコンクリートを用いて山岳隧道の山留めをする。これは地山の弱点を吹き付けコンクリートで補いロックボルトで一体化して地山の崩壊を抑える。発破工法やTBM工法などの堀削と併用する山留めである。近年山岳トンネルのNATM 工法を都市土木で採用したりシールド工法を道路や鉄道の山岳トンネルに利用する事例もある。

#### 土木建築構造体の施工法

##### 順巻き工法

基礎—山留め—堀削—床付け—本体構築の順に施工する。

##### 逆巻き工法

基礎—山留め—上部堀削および本体構築を行い、本体を山留めの支保に利用しながら順次床付けまで堀削本体構築する。本体基礎に支持させながら地上および地下を同時施工し工期短縮する。

##### プレハブ工法

本体を工場製作し搬入の後現地で組み立て構築する。工場製品であり品質が安定する。

## 参考資料－２）最近知り得た情報

### 細胞膜

水処理に利用する膜と細胞膜は現状では相違がある。篩い分けなど物理的に固液分離する水処理膜に対し、細胞膜は親水性と疎水性の２分子膜でつくるベクシルで構成され細胞内の化学反応環境を保持する。細胞内外の物質移動は二分子膜の本体や周囲で自由に運動するタンパク質や金属イオンの他電荷の移動による。物質を選択的に透過するタンパク質の機能を温度や酸アルカリ性のほか光や電圧などで制御する。また情報や味覚等の感覚情報を伝達するのはカリウム、ナトリウム、カルシウムなどの金属イオンが関わる電子の伝搬のようである。これら詳細の科学情報が明らかになるにつれ人工細胞膜の構造機能も高度化するであろう。

### 再生可能エネルギー

植物の炭水化物の多くは糖に加水分解されエタノールなどに発酵生成し利用されてきた。しかしさとうきびのバカスや稲わらなどの膨大なセルロースやヘミセルロースは糖に加水分解されにくいので燃料や飼肥料のほかは活用されてこなかった。発酵効率を高めた遺伝子組換え細菌を活用するエタノール生成に取り組んでいるが現状の発電投資効果は太陽光発電のほうが高く糖の分解やエタノール発酵は低いようである。従って合成材料としてのエタノールにも注目する必要がある。

### 水と溶存物質の分離

一般に溶存物質には親水性と疎水性がある。また界面活性剤の膜には一分子膜と二分子膜などがある。生物膜は親水基を外側に配置する二分子膜のミセルやベクシルと考えて良い。活性汚泥の有機質は微生物群が多く無機質は土砂などが主体であると思われる。下水汚泥の濃縮及び脱水は水と溶存物質の分離工程であるので汚泥の処理は親水性物質と疎水性物質の分離工程と言い換えても良い。分離すべき固形分は疎水性を示す物が多いので水分と区分し易くするには界面活性剤を加え疎水性物質相互作用によりミセルやベクシルに取り囲むか疎水性の微細気泡に付着させる方法があると思われる。また界面活性剤を加えると気液界面において疎水基を気体側に揃えるので水分子の表面張力を水素結合分子間力の約半分には削減し摩擦抵抗が少なくなる。併せて発泡にも役立つので超音波振動子による分離促進も考えられる。濃縮や脱水工程で使用している凝集剤は下水汚泥の調質や気泡への付着などに役立つ事は変わらない。

発泡材の製造（プラスチック、金属、セラミック、ガラス、セメント、アルミナ）

人工膜の製造に発泡技術の均一な発泡が役立つ可能性がある。

発泡には窒素ガスや炭酸ガスを化学分解により生成する化学法と揮発などによる物理法がある。発泡材料は気泡が単体で含まれる場合と連結体の形で含まれるものがある。その製造した材料の特徴は軽量で柔軟性があり断熱性や阻水性あるいはフィルター性などがある。プラスチックにナノセラミックを混合し強度を高めたりケイ素や鉄、アルミニウムの酸化物を含むフライアッシュ（下水汚泥流動焼却灰も類似品）の発泡材も研究されている。

## 宇宙の中の地球

宇宙は水素ガスやヘリウムなどの塵で覆われた未だ未解明の物性構造である。地球より大気圏を通して光による観測技術やあらゆる物性科学の知識の制約のなかで現在は150億年の過去まで辿れる。150億光年の光源を観測し記録することが宇宙科学の推進力である。X線や紫外線のほか赤外線による観測技術は宇宙考察の内容を深め、人工衛星や新材料を駆使した大型望遠鏡による観測手法は更に可能性を広げる。現時点の宇宙観では恒星太陽は約46億年前に超新星爆発を契機として銀河系のなかに惑星地球と伴に生まれた。銀河系には1000億個の太陽と同じような星がありその1割は太陽のような惑星を伴う恒星でマントルでは核融合し多様な元素を合成しながらエネルギーも出している。惑星地球は外部にエネルギーを放出しないが恒星太陽との距離や質量大きさに恵まれ化学反応を繰り返しながら生命を育てている。銀河系の恒星のなかには太陽のほかにも地球のような惑星を持っている可能性もあるようだ。太陽ほどの質量を持つ恒星の寿命は約100億年と考えられ、ハッブルによると膨張しつつありこのまま膨張を続けるのか途中で収縮にはいるか未だ未解明のようである。しかし最終の超新星爆発で元のガス状にもどり物質循環すると考えられている。宇宙は回転運動しているので重力と遠心力の釣り合いから、光などにより認識されている星の物質量は全体の約1割で、残りはダークマターといわれ未だ探求の途上にある。

## 繊維強化プラスチックの活用による省エネルギー

プラスチックは1870年にビリヤードの玉である象牙の代替材料開発懸賞競技で栄冠を勝ち取ったアメリカ人ジョン・ウエズリー、ハイアットに始まる。これは硝化綿に樟脳を加えて加熱成形しセルロイドとして発表され、1889年にはイーストマン、コダックが映画のフィルムに用いた。一方1909年にはアメリカ人化学者ベークランドがフェノール樹脂をベークライトとして市販した。数年後にはベークランドの親友であった高峰譲吉博士が国産化し第二次大戦前の日本の生産量は世界有数となっていた。現在プラスチックは多様な製品が開発されその用途の拡大には目覚ましいものがある。

プラスチックは加熱成形加工した製品を廃棄処分する時の再加熱への挙動で大きく熱可塑性と熱硬化性に分かれる。熱可塑性プラスチックは主に直鎖状の重合体で加熱すると塑性を示し冷却すると固まり製品となる。使用したのち製品に再び熱を加えることによるリサイクルは比較的容易である。呼称として頭部にポリを付ける例が多い。熱硬化性プラスチックは加温や加圧により主鎖や側鎖が重合架橋し立体的な構造を形成するので硬さや強度のほか耐熱など性能が向上する場合が多い。一方臨界状態にしてリサイクルする研究はあるが一搬にマテリアルリサイクルは困難である。語尾に樹脂とつけて呼ばれている例が多い。

また種類の異なるプラスチックを混合反応させ新しい特性を生み出すアロイやそれぞれの特性を生かしながら目標とする構造材を組み合わせるコンポジットがある。ノーベル賞を授与された白川英樹博士は絶縁性の高いポリアセチレンに臭素やヨウ素をドーピングして導電性のプラスチックとする技術を見いだした。たとえばアロイの一例であるがプラスチックにガラス繊維や炭素繊維を加えると材料の強度が高くなる。このガラス繊維強化プラスチック（GFRP）や炭素繊維強化プラスチック（CFRP）はアルミニウム合金より2割程度軽く宇宙航空機に用いられているが、アロイやコンポジット技術を更に追究し、その性能及び成形性や経済性を高め自動車など主要材料としての活用を目指す取り組みがある。また、ウラン濃縮において遠心分離機に炭素繊維プラスチックを用いる研究がある。この開発されつつある経済的で性能の高い材料を下水道でも導入できれば軽く省エネルギーでしかも腐食にも強い装置が構築できる。ここでは下水道施設部材個々の形状及び構造その要求性能に対する新規供給材料の成形性や性能確保能力とそのコストとのトータルバランスが重要となる。この取り組みには適用材料並びに設計対象の構造や機能に関わる専門知識が不可欠である。

従来の主要材料である鋼材は純鉄への炭素添加量とそれらの熱処理方法により多様な性能を提供してきている。また他の金属（クロム、ニッケル、亜鉛、マンガン、チタン、バナジウム、モリブデン、タングステン、マグネシウムのほかセラミックなど）との合金はその特性を更に伸ばしてきている。いまプラスチックが注目されているのは鉄における合金と同様にアロイやコンポジットでその性能を発展させ、しかも軽量であるための省エネルギー性と耐食性にある。

### 3D技術の応用

アナログでメガネなどを使用して3次元立体の地形図を俯瞰した経験がある。最近のデジタル技術の進歩により実在する対象をレーザーや超音波でスキャンし3Dのデータとして取得したうえ3Dプリンターで投影描写しながら更に樹脂などを使用して造形する精度の高い技術がある。これにコンピューターエイデッドデザイン（CAD）技術を組み合わせると現況をふまえた設計や創作を精緻にシ

ミュレーションできる。また近年の3Dでの正確な視認技術はロボット技術と組み合わせると閉鎖空間での遠隔制御操作のほか福祉医療にも活用できる。

#### 分散型エネルギーと直流送配電システム

太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーは直流が多く、発電する場所や時間帯は偏りがある。この地域及び時間に制約のある再生可能エネルギーの有効活用を図り社会全体の省エネルギーや経済性を追求するスマートコミュニティーを実現するには直流送配電による相互補完が望ましい。直流であれば東西日本の周波数の違いも利用する時に機器の周波数に合わせて交流変換すれば良い。そもそも電気技術の黎明期には直流を主張するエジソンと交流を主張するニコラ・テスラおよびジョージ・ウエスチングハウスの争いがあったがナイアガラ瀑布発電所に交流が採用され今日に至っている。しかしながら再生可能エネルギー導入による直流発電の増加傾向を踏まえ広域の電力負荷需給の平準化を目指すスマートグリッドの育成には送配電損失の少ない超電導直流高圧送配電や超電導電力貯蔵装置（SMES）技術が有望であり、その研究が進められている。分散型エネルギーの活用に適した送配電システムの構築が必要となっている。

#### 選択肢としての送配電分離

戦後の電力供給は電気事業法に基き東京、関西、東北、北海道、中部、北陸、中国、四国、九州、沖縄の10電力会社が地域を分けて送配電を一貫して提供する体制である。これにより10社は総括原価方式に基く電気料金を経済産業省の認可を得ながら互いに良質な電力を経済性などサービス水準を競うことになった。初期はその競争性は発揮され機能していたが国策として原子力発電が導入されるとその技術は日本では未だ開発途上であり最初の福島第一原子力発電所はアメリカのジェネラルエレクトリック社からターンキー方式で導入した。放射性廃棄物の処理処分は国を中心に10電力会社が協力して使用済み核燃料再処理工場を青森県六ヶ所村に建設しプルトニウムとウランをMOX燃料として取り出し福井県敦賀に高速増殖炉もんじゅを設けて電気エネルギーを連続的に生産する計画であったが、国産の技術を中心とする高速増殖炉もんじゅは冷却材のナトリウム漏れがあり、大半の技術をフランスから導入する一方高レベル廃棄物溶融ガラス固化設備はジュール熱で廃液を溶融する国産技術としたものの白金属が不溶解残さとしてノズルに詰まり再処理工場も休止している。原子力発電所は現在全国で54基に及び供給総電力の約3割を占め重要な電源となっているが原子核エネルギーの国内活用はウラン濃縮から放射性廃棄物の再処理活用および最終処分のほか、現時点でも90トンにもなる生成したプルトニウムに関わる核拡散防止の国家保証などがあり10電力会社がそれぞれ独自性を発揮することは困難となっている。

2011年3月11日東日本大震災が発生しその後の津波被害も併せて福島第一原子力発電所は放射性燃料棒の炉心溶融など過酷な事故を起こし広域の放射能汚染と住民の長期にわたる避難を余儀なくしている。地震及び津波の災害復興は急がれているが産業民生の基幹である電力を将来に向けて経済的で安定して確保して行くか課題である。エネルギー資源に乏しく自然災害の多い日本で合理的に電力需要を満たして行くには如何なる選択が最適か真剣に検討されている。日本のエネルギー政策を検討するにあたって英国のサッチャー政権以来、欧米で試行されている電力自由化も重要な選択肢のひとつである。発電、配電、給電を分離自由化し競争を導入しながら分離した送電部門を公共の目的で公平に活用できる基盤として育成し規制する方向である。その際電気卸売市場の整備や電気料金設定の公共的な監視方法のほか最も重要な電気の需要供給の均衡を図り電圧や周波数の変動を抑制し、またピーク需要の平準化を指向するとともに個々の需要者に対する供給者責任を担保する制度設計などが検討課題である。電圧および周波数の変動の少ない良質な電力を安価に必要とする需要者に安定して供給する公共システムを構築していくものである。

#### 原子核エネルギーの発電利用

原子核エネルギーの軍事平和利用は1938年ドイツのオットー・ハーンとフリッ・シュトラスマンによるウラン核分裂の発見から始まった。まず軍事利用の研究が各国で実施されたがアメリカのマンハッタン計画は英、仏、カナダの科学者の協力を得て成功し1945年8月の広島、長崎の原爆投下となった。

日本も陸軍の二号研究や海軍のF研究などがあり理化学研究所に2台、京都帝大に1台、大阪帝大に1台、サイクロトロンがあったが戦後GHQの判断により破壊された。1949年にソ連、1952年に英国の核実験があり冷戦は深刻になる一方1953年にアイゼンハワー米大統領の“平和利用の為の原子力”の演説があった。これを契機に日本でも原子核エネルギーの発電利用が検討され1954年4月には原子核エネルギー利用に関わる国家予算が計上された。日本は戦後経済復興と高度成長を目指しエネルギーの自立を高めるため科学技術庁原子力委員会を中心に原子力発電事業の育成を国策とした。ウラン濃縮、原子炉、使用済み核燃料の再処理、ウランとプルトニウムのMOX燃料、高速増殖炉、バックグラウンド核廃棄物最終処分など原子核エネルギーの再処理サイクルを展望しながらその基本技術を獲得するため学官民の原子力開発利用体制を整備していった。基礎技術開発は科学技術庁が担当し経済産業省と10電力会社は具体的な発電事業など実施運営に集中する二元的な推進体制を形成した。初期に英国のコールダーホール型の実験炉を茨城県東海村に設けたがアメリカのジェネラルエレクトリック社GEは沸騰水型軽水炉BWRを濃縮ウランも併せて提供する条件のもとにタ

ーンキー方式で売り込み始めた。同様にアメリカのウエスチングハウス社WHは加圧水型軽水炉PWRで追随した。東芝と日立はGEと三菱重工はWHと技術提携し順次国産化比率を高めつつ全国にBWRとPWRを導入していった。第一次及び第二次オイルショック以後は経済産業省資源エネルギー調査会の意向を受けて天然ガスや石炭と共に原子力は石油の代替一次エネルギーとして大きく成長した。次第に原子力発電所他の立地には地域住民や漁業関係者の反対が激しくなるので1974年には電源3法{発電用施設周辺地域整備法、電源開発促進税法、電源開発促進対策特別会計法}を制定し発電施設建設促進のための交付金、補助金、委託金を支出した。しかし核エネルギー導入で当初目指した使用済み核燃料の再処理と高速増殖炉など核燃料サイクルの基礎技術の獲得は非常に困難であり夢の技術と謳われたプルトニウムとウランをMOX燃料とする高速増殖炉及び軽水炉にMOX燃料を利用するプルサーマル発電も含め重大な岐路に差し掛かっている。しかし核エネルギー利用技術の研究開発推進のなかでその先端的な科学技術に学官産で協力して取り組むことは国内の総合科学技術力を高めていく動機付けと成りうる。例えば核廃棄物再生処理法開発関連においてウラン遠心濃縮法の回転ドラムに炭素繊維強化プラスチックを自動車関連に先行して導入している。

#### 電磁波の可能性

光は電磁波である。電波も光速で伝搬するが拡散するので広範囲で利用できる。レーザー光は位相と波長が同一の人工的に生み出された特殊な光である。レーザーは波長により短いものからγ線、x線、紫外線、可視光線、赤外線、ミリ波などそれぞれ特徴があり、たとえば紫外線より短い波長は半導体製造に、可視光線は光通信に、赤外線は手術や加工に利用されている。レーザー光は指向性、干渉性、エネルギー密度が高く、その特性を活用する研究がある。また波長が短いほどエネルギーの密度は高く位相や波長が同一であるので集束させやすい。0.1～10ナノメートルの波長を使うx線レーザーの発生には原子核に一番近い軌道を回る電子を励起するので大きいエネルギーが必要であり、またx線レーザーの増幅に利用する鏡など研究しているが実用化すればその効用は期待できる。レーザービームを活用して重水素と三重水素を閉じこめヘリウムとして核融合させエネルギーを得る研究もある。さらに人工衛星に設置した太陽光発電の電力をマイクロ波レーザーで送電する実験もあるが、まだ伝送力は小さく電離層やオゾン層への影響が懸念されている。

#### 音波の可能性

音波は電磁波と同じく波動であるが真空でも伝搬する電磁波と違って、媒質の中でしか伝わらず気体では波速340m/s、液体では1440m/s、個体で

例えば鉄は5180 m/sである。電磁波は進行方向に対して垂直な波動であるが音波は進行方向と同じ向きの正弦波である。一般に振動数により20 kヘルツ以上を超音波、20 kヘルツより20ヘルツを可聴周波、20ヘルツ以下は低周波と呼ぶ。振動数の大きい音波は指向性が強く振幅の大きい音波は遠くまで届く。振動数と振幅は大きいほどそれぞれの二乗に比例かつ相乗してエネルギーの高い音波となる。ランジェバン型振動子は2個の金属物体間に圧電素子を挟んだ超音波振動子でその振動エネルギーは超音波洗浄器や加工機に使われ、更にコーンやホーンで振動振幅を拡大して高エネルギーによる研磨、切断、溶接にも利用されている。

地球環境には生物や鉱物の発する人が認識出来ない広範な音波が行き交っておりコウモリやイルカの超音波などその高い機能はよく知られている。またアコースティックエミッションはいろいろの物体が壊れる直前に出す特殊な超音波エネルギーの事でこれを検知して保全対策に役立てる。超音波はよく反射するのでその反射波の性状や発信から受信までの所要時間などを使って魚群探知器やソナーなど距離や厚みの測定ができるほか、エコーなど状態変化の医療診断に活用される。超音波振動は加速度エネルギーが大きく、また気泡などのキャビテーション効果と併せて洗浄剥離作用がある。

#### 天然ガスについて

地球に生命が誕生する約27億年前には高温高压条件で無機物から有機物につながるアンモニア化合物が合成された。地球の生命活動の履歴を反映する植物及び動物の化石燃料は産業革命以来まず石炭を利用し石油の後、温室効果ガス発生の少ない天然ガスに比重が移りつつある。それは炭素より水素の単位重量当たりの熱量が高く硫黄化合物など不純物が少ない特徴があり将来の水素エネルギー社会を想定させる。これら化石エネルギーの大量活用順位は採取および運搬の適用技術と経済性による様である。すでに有用に活用している石炭、石油、天然ガスなど従来型エネルギーの確認埋蔵量に対しまだあまり利用されていない非従来型天然ガスエネルギーも全世界で従来型に匹敵する程の埋蔵量を確認しているようである。これら非従来型天然ガスには水溶性ガス、石炭層中に吸着されているコールベッドメタン、硬い緻密な岩石に含まれるタイトガス、根源岩の頁岩に含まれるシェールガス、燃える氷と言われるメタンハイドレートなどがある。日本にも水溶性ガスはヨードを含むメタンガスを千葉県で産出しており南海トラフなどにはメタンハイドレートの埋蔵を確認している。特に最近アメリカで活発なシェールガスの採掘は2000メートル級の縦孔に継いで横孔を3000メートルほど掘り超高压水で頁岩を破碎し経済的にメタンガスを集めるもので従来型採掘技術を応用発展させシェールガス革命とも呼ばれている。液化天然ガスLNGは運

搬の便を目的として $-162$ 度C・で液化し $600$ 分の $1$ の体積にしたもので、この液化に全コストの $4$ 割、LNGタンカー運搬に $3$ 割、ガスに戻すのに $1.5$ 割の費用を要する。したがってパイプラインなどを使った近い場所で消費する方が有利である。またLPGは石油から得たプロパンやブタンを冷却液化したものでメタンを主体とする天然ガスより熱量が高く個別分散利用や非常用携帯に便利である。このほか天然ガスの液化方法として水と混合し $-20$ 度C・で天然ガスハイドレートNGHにして運搬したりガスツリーキッドGTL技術では水素と一酸化炭素の混合ガスを経てメタノールやジメチルエーテルにするほか石油科学系製品への合成も試みられている。

#### 太陽光エネルギーの活用 ー太陽光発電と人工光合成ー

地球に年間照射する太陽光エネルギーは人類の年間全消費エネルギーの一万余とも言われる。また植物や藻類の水や炭酸ガスを利用した光合成による年間有機物固定量は人類の年間全必要エネルギーの $10$ 倍あるともいう。この太陽光エネルギーを活用して人為的に電気エネルギーを取り出すのが太陽光発電であり、水と大気中の炭酸ガスを固定して有機物を人為的に作るのが人工光合成である。自然界の光合成においては太陽光エネルギーでクロロフィルの電子を放出させNADPHに活性酸素を保持し、次に水の分解により酸素、水素イオンと電子を発生させその電子で空いているクロロフィルの空孔を埋める。さらに励起した電子を集めてNADPHやATPに蓄積したエネルギーを利用して炭酸ガスや水素イオンを有機物に合成している。まず太陽光エネルギーで伝導電子を励起させるのは太陽光発電及び人工光合成も同様である。更に励起された電子を価電子帯から半導体PN接合を含む禁制帯を通り伝導帯へ伝えて直流電流とするのが太陽光発電であり、高エネルギー電子を集めて蓄えたエネルギーを使って水と炭酸ガスを原料にギ酸やメタノールを合成するのが人工光合成である。しかし自然の光合成に倣った人工光合成は達成されておらず触媒による化学反応を使って燃料を合成している。太陽光は波長の長い方から赤外線、可視光線、紫外線などに分類されるが、光合成で触媒として利用する金属錯体や半導体などの挙動特性に影響され光波エネルギーの吸収範囲及び化学反応速度に違いがある。

ちなみに太陽光発電のシリコンN型半導体は価電子が通常のシリコンより一つ多い燐などの原子を導入して伝導電子の多く存在する状態にあり、一方P型半導体は価電子が一つ少ないホウ素などを導入し正孔を増やす。PN接合により電子と正孔が再結合する接合部は空乏層と言い内部電界を形成する。半導体材料の特性で定まるバンドギャップは禁制帯のエネルギー幅を意味しており太陽光エネルギーの特定光波長を吸収して光起電力効果により半導体から伝導電子を放出させ更に励起しこのバンドギャップを乗り越えて価電子帯から伝導帯に持ち上げられ外

部回路を経てP型半導体に戻り正孔を埋める。単結晶シリコンは現在最も多く用いられている高品質材料であり、その光エネルギー変換効率は高く25%である。多結晶シリコンは粒界など不完全な部分を含むので変換効率はやや落ちるが製造コストは安価である。更に原料シリコンを節約する薄膜アモルファスシリコンを単結晶シリコンと積層するヘテロ接合H i Tは200度以下の低温で製造でき表裏両面を用いて発電可能である。そのほかC i G S、C d T e、色素増感、有機薄膜、量子ドット太陽光発電など薄く軽量でしかも印刷技術を用いる大量生産低コスト化の研究が盛んである。多接合太陽光発電はバンドギャップの異なる半導体及び異なる波長を吸収する発電材料を複数重ねる構造をしており60%を超える高い変換効率を目指している。

また人工光合成に於いては太陽光エネルギーで水から電子を分離し励起する化学反応を促進する為に窒化ガリウムG a N半導体を触媒電極とし、その分離し励起した電子を移送し集め易くする為にA lで挟みA l G a Nとして利用する。集めた高電子エネルギーで炭酸ガスや水素イオンをインジウム系の触媒を使って還元しギ酸やメタノールなどの有機物を合成する。酸素を分離する電極にはT i O<sub>2</sub>を用いている。この化学反応操作で自然の光合成に匹敵する0.2%の変換効率を達成し温室効果ガスである炭酸ガスを有用な燃料として固定する。変換効率の良い人工光合成技術を育成するには太陽光のエネルギー密度は低いので太陽光を集める技術と集めた太陽光のあらゆる波長を有効に吸収し獲得した高電子エネルギーで燃料など有機物の合成に関わる革新的な触媒の開発が重要である。

## 触媒の効用

触媒は化学反応速度を促進する物質で金属、金属化合物、半導体等のほか生体の酵素（RNA、タンパク質）も含まれ、その物質自体は反応の過程で一時的に変化しても最終的には外見上変わらない性状性能を示す。一般に生化学反応はエネルギーの低い状態へと進む。化学反応が次のエネルギーの低い安定状態を獲得するには高い活性化エネルギーを示す遷移状態を乗り越えなければならない。触媒はこの峠となる越えるべき活性化エネルギーを低くするなど克服し易くし目的の反応を促進する。その為に反応物質を触媒粒子の表面に吸着する。この吸着にはファンデルワールスの分子間力である弱い物理吸着と強い化学吸着がある。触媒の化学吸着は反応物質の化学結合より強い場合があり分子は原子などに分解して解離吸着を起こし結果として遷移状態の活性化エネルギー自体を低下させる。またこの解離吸着は主に触媒の粒子表面で起こるので反応物質に関わる分解原子などは触媒表面近傍に凝集密着し反応し易くなり高温高圧力や太陽光などのエネルギー刺激を活用し低くなった活性化エネルギーを乗り越えて安定した化合物を形成する。個々の触媒作用は特定の生化学反応への強い選択性を有するので新規

の触媒開発に向けて精力的な研究が進められている。

触媒の効用についての事例を見ると農産物の収穫向上に貢献した1913年のアンモニア合成法がある。これは主触媒である鉄の吸着表面積を大きく保持する酸化アルミニウムと鉄への電子供与を容易にする酸化カリウムを助触媒とする二重促進鉄触媒法である。また鉄触媒に於ける高温高压条件を避けてルテニウムを主触媒とするアンモニア合成法もある。アセトアルデヒドは硫酸水銀を触媒としてアセチレンと水から合成されるがメチル水銀を排出するので問題となった。水銀を用いないワッカー法は塩化パラジウムと塩化銅を触媒としエチレンに空気あるいは酸素を吹き込んで反応させるものである。

今後環境に配慮した資源循環型社会を形成してゆく上で触媒の役割は大きい。資源循環サイクルの中で下水の水処理や汚泥処理の位置付けを評価しながら触媒反応を導入をしていく。下水の処理は物理生化学反応であるので如何なる経過を経て貴重な資源あるいはエネルギーとして分解合成するか、資源循環サイクルのなかで個々の反応における触媒の選択が重要となる。たとえば接触分解触媒で有機物を水や炭酸ガスのほか窒素酸化物にしたり、接触改質触媒でアルコール燃料など目的の有価物を合成する。自動車排ガスの窒素酸化物を酸素の過不足のない状態で窒素ガスとして除去するロジウム、白金、パラジウムを主剤とした三元触媒のほか光半導体の二酸化チタン触媒（微粉末の吸引は発がん性の懸念あり）による窒素の硝化促進は380nm以下の紫外線に限定されるが参考となる。さらに変換効率を高める為に可視光線を含むエネルギーを吸収する窒素ドープ酸化チタン触媒や $\text{InVO}_4$ も研究されている。色素増感太陽電池では可視光や赤外光のエネルギーを（無機、有機）色素で吸収しチタニアの発電変換効率を10%オーダーに高めようとしている。またナノ粒子は比表面積が増大するので静電気力や付着力が増し触媒作用も強化される場合がある。ナノ粒子を担持する担体の材質やその特異な製造法及び粒子の収め方などナノテクノロジーへの期待は大きい。

## 核融合とミューオン触媒

核融合でエネルギーを取り出す発想は1950年代はじめソ連のAサハロフ、Iタムに始まる。原子核や電子の集合をプラズマと言うが現在の核融合では水素、重水素、三重水素{トリチウム}を一般的なプラズマ燃料としている。

まずソ連で研究が始まり国際熱核融合実験炉ITER{イーター、日、米、EU、ロシア}にも採用されているのが磁場型のトカマク型核融合である。トカマク装置では中心にドーナツ状の真空容器があり、このドーナツを型どる円環をソレノイドコイルで巻いて電流を流しドーナツ面に沿うトロイダル磁場を形成し真空容器内のプラズマの陽陰イオンを誘引する。このプラズマの陽陰電子の流れによりト

ロイダル磁場に垂直にポロイダル磁場が形成される。これら磁場の合成力は螺旋状の磁力線となりプラズマは激しい運動にも拘わらず外部に漏れずに閉じ込められる。このプラズマに電流を流すとジュール熱で一次加熱され更に高速の中性粒子ビームや高周波などで二次加熱される。そして主に重水素と三重水素の核融合が起こりヘリウム原子核のアルファ粒子と中性子を生成し高いエネルギーを得る。

慣性型のレーザー核融合では重水素と三重水素を固体とし周りを気体で満たした球状燃料ペレットを作る。これに強いレーザー光を当てると急激な表面部の加熱とプラズマの膨張により爆縮を起こし一億度、一億気圧にもなる。爆縮にはペレットの高い球対称性が要求されており課題の一つとなっている。

一般的な高温高压の核融合反応でなく低温の核融合にミュオン触媒を利用する研究がある。ミュオンは電子の207倍の重量を持ちしかも大きさは207分の一で正負の電荷を示す不安定な素子である。人工的にミュオンを作るには非常に高いエネルギーを持った陽子や重イオン（ヘリウムより重い原子核）をベリリウムや銅等の金属に照射する。この時に $\pi$ 中間子（パイオン）と呼ばれる正負の電荷を持つ素粒子ができるが真空の中では0.0026マイクロ秒の寿命しかなくミュオンに変わる。このミュオンの寿命も短く約2.2マイクロ秒経つと正負の電子となる。

ミュオン触媒核融合は重水素あるいは三重水素の周りを回る電子を負ミュオンに置き換えてクーロン障壁を小さくし分子内の核間距離を電子の207分の一程度まで縮めることにより低温で核融合を可能にしようとするものである。

#### 光触媒酸化チタンの親水性と疎水性の性状変化

光触媒酸化チタンは紫外線の照射によりオゾンや過酸化水素にも勝る酸化作用を示し脱臭や脱色、NO<sub>x</sub>など空気の浄化や殺菌消毒効果がある。自然光の他ブラックライトや蛍光灯などの紫外線エネルギーを受けても親水性を示しフロントガラスや反射鏡の曇りを解消する。また光のない所に置いたり超音波洗浄あるいは油性に曝すと疎水性が強化される。この特性を生かして水分と油脂分を分離し易くする。たとえばメタルスクリーンをまずシリカ膜で被覆し金属の酸化腐食を防護したうえで酸化チタン膜を貼り付け疎水性の有機質汚泥から水分を除くのに役立つのではないと思われる。

またメタルスクリーンによる汚泥固形分と水分の分離性を向上させるのに親水性あるいは濡水性が有用であると判ればそのコーティング材を塗布することも有効かもしれない。

#### レアアースの活躍と副産物放射性トリウムの原子力エネルギー利用

ハイテクノロジー産業におけるレアアースの効用は大きい。自動車排ガス処理

の三元触媒や石油精製触媒のほかSm磁石、Nd磁石などの磁気特性や光学特性など活用されている。レアアース鉱石は広く世界に分布しているが精製したレアメタルの価格優位な中国が97%とほぼ供給を独占している。この精製の過程で鉱石に含まれる10%程度の副産物（放射性トリウム）を用いた溶融塩炉による発電ができないか研究されている。またトリウム溶融塩炉は核反応の暴走を抑え易く軽水炉で生成したプルトニウムや超ウランの削減及び核反応廃棄物の半減期の短縮に役立つとの意見もある。

トリウム溶融塩炉は1954年米国オークリッジ国立研究所で初めての実験炉を建設し運転した。その後実験研究は継続されたが1976年に中止された。すなわち東西冷戦のなかでウランを用いる軽水炉と生成されたプルトニウムを利用する増殖炉が核政策上優先したのである。しかしながらトリウム溶融塩炉は2002年に第4世代原子炉の6候補の一つとして選ばれMITなどでも材料の劣化や生成核物質など個別要素研究が進められている。中国においてもレアアース副産物の活用としてトリウム溶融塩炉が研究されている。冷戦の終局を迎え軽水炉よりプルトニウムは千分の一、超ウランは25分の一を生成するトリウム溶融塩炉の長所に注目しつつある。

#### ユビキタス通信技術を活用したオリンピック開催時のおもてなし

特定情報とアンテナを組み込んだICタグや映像などの無線センサーとリード装置やライト装置をネットワークしオリンピックにお迎えした観光客に必要なサービス情報を取り扱い易いリード装置を通して提供する。サーバーでは顧客の話す言葉や趣味など属性情報を頼りにデータマイニング技術を利用しながら検索し解りやすい表現言語でリコメンデーションを容易に受信出来る様にする。観光客にとり必要且つ十分な情報を街中どこでも手軽に得られる様にソフト・ハードシステムを準備したい。

#### 鉄の素材価値を引き出す

宇宙はビッグバンにより137億年前に誕生したと読んだ。そして陽子、中性子、電子など微粒子が飛び交い水素やヘリウム元素の核融合による高温環境は次第に安定した鉄元素の構成を高くしていく。続く超新星爆発によるビッグバンでニッケルからウランに至る元素も生成され46億年まえに地球が誕生する。地球の元素構成の34.6%は鉄である。海水に溶出した鉄は27億年前に発生したシアノバクテリアによる光合成で酸素が生成したので酸化鉄として沈殿し現在の鉄鉱石の起源となる。この大量の鉄鉱石の酸化鉄から鉄を生産する為に製鉄所の高炉でコークスを用いて還元し銑鉄を得る。銑鉄には4%程度の炭素を始め窒素やイオウ、燐のほか微量金属が含まれており、まず転炉の一次精錬で主に炭素を、

次に二次精錬で他の微量物質の含有量を調整する。精錬した鉄鋼を素材にして加熱温度や加熱冷却速度などのほかクロム、マンガン、モリブデン、燐、チタンなどを添加し強度や靱性のほか耐食性など材料特性を造り込む。

鉄は切断や溶接など加工し易い材料であるが反面、錆て元の酸化鉄に戻り劣化し易い。ここに材料特性を担保しつつ切断溶接技術と酸化防止技術の研鑽が重要課題となる。

まず高炉は鉄鉱石に含まれる酸素を効率よく還元する装置で日本には30基更に世界では800基あるといわれる。炉内圧は従来1～2気圧であったが現在は4～5気圧である。この高温高压の排気ガスでタービンを回す炉頂圧発電（TRT）が一搬化している。

つぎの製鋼法の主流は転炉である。炭素分が2%以上が铸铁で2%以下は鋼と言われる。日本古来のたたらは木炭還元した鋼の組織を緻密にし不純物を除く為にたたく鍛冶を行う。転炉法による製鋼は溶銑中の燐や硫黄（脱硫剤—酸化カルシウム）、珪素を除く溶銑予備処理のあと鉄スクラップを加えさらに炭酸カルシウムを主成分とするスラグを投入する。これに平方センチメートル当たり約10kgの圧力で酸素を吹き付けると銑鉄中の炭素、燐、マンガンなどと酸化反応し炭素は除かれ残りの酸化物は軽いスラグとなる。この一次精錬のあと更に真空の容器に溶鋼を吸い上げ、あるいはアルゴンガスなど不活性ガスを吹き込んで還元させ炭素、酸素、窒素、水素など不要な成分をガスとして抜く真空脱ガス法は二次精錬に良く使われる方法である。

転炉において純酸素は上部より吹き込み攪拌は底部よりアルゴンや窒素を吹く上底吹き転炉が主流となっており底吹き羽口の耐火物の保護にはプロパンガスやメタンガスなどの熱分解時の吸熱、冷却効果を期待して二重管ノズルの外管に流し内管は純酸素を通す。

連続铸造は溶鋼を最上部の鑄型に注ぎ側面が凝固し始めた原料を鑄型の底から引き出す段取りであるが溶鋼中の介在物を浮かせて取り除き強度、加工性、耐疲労性を向上させる。

熱間圧延は250mm厚のスラブをロール上で押し延ばし最小1.2mmまで薄くする。冷間圧延は常温で1mm未満の薄い飲料缶材料などにする。この工程では板幅方向板厚差（クラウン）を小さくするよう開発した四重圧延機や六重圧延機の活躍がある。この六重圧延機とクラウン形状計算モデルの導入により多様な製品需要に対してスケジュールフリー圧延が実現できるようになった。

鉄は加熱し酸素と反応させ、より熔融温度の低い酸化鉄にする事で溶断可能であるが他の金属の酸化物は逆に熔融温度が高くなる。溶断出来るので鉄は溶接も可能である。圧接は母材と母材を十分に加熱してから圧縮力を加える方法であり、ろう接のような溶加材（はんだ）は使用しない。アーク溶接は導体同士を近づけ

電圧をかけると電子と陽子に電離したプラズマができアーク内は1万度にもなる。高温のアーク内では溶加材は溶滴として一部母材も溶かし熔融溶接するが溶接部の酸化による脆化を防ぐ為にアルゴンや炭酸ガスでシールドするのがガスシールドアーク溶接である。被覆アーク溶接は溶接棒を被覆したフラックス粉体の燃焼ガスでシールドする。サブマージアーク溶接はスラグでアークを覆い空気を遮断する。電気抵抗スポット溶接は重ねた2枚の鋼板の上下から銅電極で押さえて通電し抵抗発熱で熔融接合する。押さえ電極が回転円盤であればシーム溶接であり鋼板を押しつぶすほどの加圧力となればマッシュシーム溶接となる。溶接は原子同士の結合であるので衝撃が瞬時に伝わり脆性破壊に繋がりにくい。これを防ぐには金属材料の衝撃試験で確認するシャビー値を規格内に収める必要がある。鋼板の両面溶接を片面のみから大入熱溶接で行うにはチタンを添加しTiNを鋼材に析出分散させ熱影響部での結晶成長を止め脆化を抑制した入熱溶接用鋼が役立っている。しかし溶接熱影響線直近では窒化チタンは溶解し機能しなくなるのでチタン酸化物(TiO<sub>2</sub>)を加えると核となり微細な結晶が成長し靱性も増し電気も通し易くアーク溶接に有利である。レーザー溶接はアーク溶接より高温で熱源集中度が高い為高速溶接ができるが金属プラズマによる気孔が溶接欠陥となることがある。そこでアーク溶接とレーザー溶接の利点を生かすハイブリッド溶接も検討されている。

鉄には結晶格子の一部に転位と言われる変形し易い部分がありここに炭素や窒素など集中して硬くなる。これに注目して転位に多量の炭素や窒素を導入したりより重い珪素やマンガンに入れ替えると鋼を強化することになる。また不安定であるが伸びの良いオーステナイトと安定した硬いマルテンサイトを共存させて力を加えると変形しながら硬く強くなる加工有起変態の性能をもつTRIP鋼は加熱冷却による組織制御で作られる。

鋼材は酸化して錆びるので鉄よりイオン化傾向の大きい犠牲防食型皮膜の亜鉛を表面に塗布する。どぶ漬け亜鉛メッキ法は鋼材表面にフラックス(塩)を塗った後熔融亜鉛に浸漬し硬さ厚さなど材質は温度や窒素ガス吹き量で制御する。これを連続して塗布するのに高温加熱して水素で鋼材表面を還元処理した後亜鉛メッキする連続式熔融亜鉛メッキ法(GI)が発明され腐食環境の厳しい所で使用している。電気メッキ法はメッキ金属イオンを含む水溶液をくぐる鋼板の両側に陽極を置いてメッキ金属を鋼板の表面に陰極として付着させる方法で容器など薄いメッキに適している。近年、亜鉛メッキのプレス成形性や溶接性を高める為に亜鉛メッキ鋼板を加熱し亜鉛メッキに鉄をしみ込ませる合金化処理亜鉛メッキ鋼板(GA)が主流となっている。また合金化亜鉛メッキ鋼板の表面にマンガンと燐の酸化被膜アモルファス、7nmをコーティングすることによりメッキ表面の摩擦抵抗を小さくしプレス成形脱型作業を容易にするL処理(潤滑皮膜付きメッキ)

を推進している。

#### 溶射皮膜による耐摩耗性能、耐腐食性能の向上

溶射は1910年スイスのショー博士によって発見され、日本には1922年江澤謙二郎が導入し美術工芸に利用した。

溶射にはガス式溶射と電気式溶射がありガス式は純酸素と可燃性ガスを混合燃焼し、このフレイムを用いて溶射材料を溶かす。純酸素は空気を零下190度以下で液化した後液体窒素と液体酸素の沸点が-196度と-183度と異なるので分離して利用する。一般に可燃性ガスはアセチレンガスかプロパンガスなどを使用している。ガス式溶射はフレイム溶射と爆発溶射がありフレイム溶射には溶線式、溶棒式、粉末式がある。溶線式は金属のワイヤを用いたり、チューブ状の金属線やプラスチックコードの中に硬くてもろいセラミックのほか金属とセラミックの混合物であるサーメットを詰めたコアードワイヤがある。このワイヤを適切な速度で送り込みガスフレイムで熔融した後、圧縮空気で溶滴を加速搬送し目標の素材に溶射皮膜を形成する。この層状皮膜は溶射粒子が均一ではなく、また多孔質であり酸化物を含んでいる。溶棒式は硬く太くするとワイヤのように曲げることができない酸化アルミニウム、酸化ジルコニウム、酸化クロム、セラミックなどを棒状にした溶射材料を用いる。粉末式は溶射材料を粉末とするものである。高速フレイム溶射は可燃性ガスをプロピレンあるいは水素とし燃焼室を加圧して粉末材料を溶かした溶滴を高速で素材に衝突させ緻密で気孔の少ない溶射皮膜を形成する。電気式溶射はアーク溶射とプラズマ溶射がある。アーク溶射は溶射材料である2本の電導性金属ワイヤの電極間にアークを発生させ、その熱でワイヤの端部を熔融し圧縮空気で加速して素材表面に皮膜を形成する。フレイム溶射の温度が約3300度であるのに対しアーク溶射は約6000度にもなるので素材への密着性に優れる。アーク溶射は電流値の制御により皮膜表面の粗さなどコントロールし易くフレイム溶射と共に現場作業に適した設備構成としている。

気体は高温になると原子は電子と正イオンに分離しプラズマを形成する。一般に正（銅）負（タンゲステン）の電極間に点弧するアーク放電を用いた高速、高温のプラズマジェットを熱源とするプラズマ溶射がある。プラズマの放電作動ガスはアルゴン、アルゴンと窒素、アルゴンと水素が用いられる。この作動混合ガスの原子量の差異によりプラズマの特性は変わるが10000度を超える高温で粉末材料を熔融する。

大気中でプラズマ溶射すると溶射皮膜には酸化物ができ易い。これを防ぐ為に減圧溶射及び雰囲気溶射が利用される。減圧溶射は不活性ガスの減圧雰囲気のなかで溶射皮膜を形成するもので酸化物がなく緻密で素材との密着性も良い。この

手法はアーク溶射でも同様に活用できる。

防食を期待する溶射では亜鉛、アルミニウム、および亜鉛アルミニウム合金の溶射皮膜を形成するとこれ自体が耐食性があるほか鉄に対して電気化学的犠牲防食効果もある。自溶合金はニッケル、ニッケルクロム、コバルトの合金にホウ素、ケイ素を添加した合金である。これを溶射した多孔質皮膜をアセチレンや水素のトーチあるいは炉中で1050～1080度で再熔融すると溶射皮膜中の金属酸化物はほうけい酸ガラスとして熔融浮上し無気孔で耐摩耗性の高い皮膜を作る。

皮膜を形成するには一搬に前処理、溶射処理、後処理が行われる。前処理の目的は溶射する素材の表面を清浄にすることと粗い表面を造ることにある。表面を清浄にするには溶剤洗浄、アルカリ洗浄、エマルジョン洗浄及び電界洗浄がある。溶剤には引火の危険が少ないトリクレン等を使用し鉱油などの付着物を取り除く。アルカリ洗浄は苛性ソーダや炭酸ソーダなどに界面活性剤を加えて鉱油グリースやワックスなどを除去した後軟水で十分に洗浄する。

脱スケールには酸洗いなど化学的方法もあるがブラスト法による機械的方法が一般的である。スケールが厚い時は素材とスケールとの熱膨張差を利用するフレームクリーニングで大部を取り除いた後細粒のグリッド研磨材でブラストする。ブラスト法には素材表面の粗さを整え素材と溶射皮膜の密着性を良くする事も含まれている。素材表面粗さを評価するには凹凸の高さ深さを示すアンカーボタンと単位長さ当たりの山の数を示すプロフィールを測定し指標とする。

素材表面が清浄でしかも適切な粗さを準備できた後はこの活性化されている素材表面を素早く出来れば4時間以内に溶射処理し皮膜への酸化物などによる障害を防ぐ。

溶射の後処理は溶射皮膜が多孔質であり且つ皮膜表面は複雑な粗さを持ち活性化しているので封孔処理材を塗布し浸透アンカーさせ溶射粒子と素材の密着性を良くする。さらに熱処理を加えると無孔質で素材と冶金的結合を高めた皮膜とする事が出来る。

複合溶射皮膜は二種以上の溶射材料を単体ごとあるいは混合して成層積層しそれぞれの溶射皮膜の特性を活用する。硬質な耐摩耗性のタングステンと結合力を強化するコバルトの複合皮膜であるタングステンカーバイトコバルトの他クロムカーバイトニッケルクロムなどはその例である。また結合力の強いニッケルやコバルトのアンダーコートに耐摩耗性のセラミックやサーメットのトップコートを積層皮膜する組み合わせもある。

## 電 池

電池には化学エネルギーを直流の電気エネルギーに変える化学電池と物理エネ

ルギーを変換する物理電池がある。物理電池は太陽電池や熱電池がある。化学電池には原材料より化学反応で起電した電気エネルギーを使いきる一次電池と電池の放電充電を繰り返し化学エネルギーから電気エネルギーを取り出す二次電池がある。化学エネルギーの原材料を本体内部に取り込んでいるのが化学電池であるのに対して燃料電池は原料の水素やメタノールのほか天然ガスなど化学物質を電池の外部から供給し電気エネルギーを取り出し併せて熱エネルギーも利用するものでエネルギー利用効率が高まる。石油や石炭のほか天然ガスなどの火力発電、原子力発電、再生可能エネルギー発電などの特性を踏まえた電力供給体制のベストミックスを策定する時、電池の効用は大きい。すなわち電気エネルギー需要の負荷変動や瞬時停電対応のほかスマートグリッドなど効率的で経済的なエネルギー供給体制の構築に欠かせないものとなりつつある。

電池は負極（アノード）の活性物質から電子と陽イオンを放出する酸化反応とその陽イオンが電解質および正負極間のセパレーターを通過し正極（カソード）において外部回路を流れてきた電子を受け取る還元反応とで構成される。一次電池の主要なものにはマンガン電池、アルカリマンガン電池、ニッケル系電池などがあり二次電池には鉛蓄電池、リチウムイオン電池、ニッケルカドミウム電池、ニッケル水素電池のほか、大容量のナトリウム硫黄電池やレドックス・フロー電池などがある。

リチウムイオン電池は負極にリチウムを吸蔵する炭素を用い有機溶剤やポリマーを電解質とし正極をコバルト酸リチウムとするエネルギー密度の高い製品として開発されてきた。更に運用時の安全性と蓄電性能の増強を展望してリチウム硫黄電池やリチウム空気電池の研究を進める他リチウムより正電荷の高いマグネシウムやカルシウム、アルミニウムの活用も検討されている。また充電時の電圧レベルの制御が厳しいコバルト酸リチウムより電圧やエネルギー密度は低いが資源的な制約が少なく酸素との結合力が強いので熱暴走などに対し安全な磷酸鉄リチウムを正極に使うリチウムイオン電池の導入も期待されている。一方炭素を負極に用いる場合と比較し珪素は約10倍の大きい容量を持つ反面リチウムイオンの充放電により膨張し劣化するので原材料をナノサイズにして利用するとその欠点は緩和したとの報告もある。