

ステップエアレーションタンク

—横浜市の設計例—

佐藤 昌之*

1. 緒言

ステップエアレーション法(Step Aeration Process)は1939年にニューヨークのTallmans Island処理場でGouldにより紹介されたものであるが、1957年、1958年とわが国において岐阜市、東京都により実験され、良好な結果が得られた¹⁾。われわれはこの方法を採用して実際にステップエアレーションタンクの設計を行なうに際し、従来用いられてきた返送汚泥量、エアレーション時間、送気量などの経験的基準で設計することは本法の理論的背景から考えて不満足なもので、横浜市におけるバイオソープション法の経験から、これとの関連を利用して合理的設計を試みた。

以下にステップエアレーション法の概要を説明し、タンク設計の基本的要素について述べ、横浜市の設計例を示すことにする。

2. ステップエアレーション法

この方法はエアレーションタンクの入口において返送汚泥を全量加え、流入する生下水量を適当に分割して流路の途中から添加するもので、これによりタンク内の汚泥量を十分に保って同一負荷量に対しタンクの容量を縮減することができると同時に、最終沈殿池に流入する固形物量を多くしないように考慮された方法である。これを具体的に説明しよう。

いま従来の活性汚泥法のエアレーションタンクにおいて

流入下水の浮游物濃度を 150 mg/l
 混合液浮游物濃度を 2000 mg/l
 返送汚泥の返送比を 25%

とすれば、汚泥日令を3.5日に保つにはエアレーション時間は

$$\frac{24 \times 3.5 \times 150}{1.25 \times 2000} = 5.0 \text{ (時間)}$$

となり、この時返送汚泥濃度は

$$\frac{(1+0.25) \times 2000 - 150}{0.25} = 9400 \text{ (mg/l)}$$

(後述(1)'式参照)

となる。もしタンク容量を1/2にして汚泥日令を3.5日に保つにはエアレーション時間が1/2となるので平均混合液濃度を2倍の4000 mg/lとしなければならない。この場合、返送汚泥濃度9400 mg/lを不変とすれば返送比は

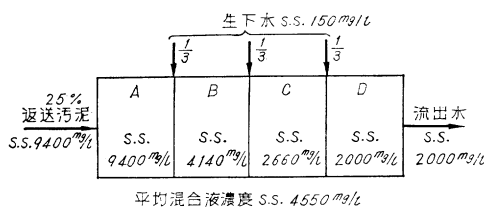
$$r = \frac{C_A - C_P}{C_R - C_A} = \frac{4000 - 150}{9400 - 4000} = 0.71$$

(後述(1)式参照)

すなわち71%にしなければならない。これは返送汚泥ポンプの容量から一般に不経済である。しかしステップエアレーションタンクにおいてはこの際次のように下水を分割流入させることによって返送汚泥濃度、汚泥日令を変えずにタンク容量を1/2にすることができる。

いまタンクを等容量A,B,C,Dの4流路にわけると図-1のようになる。

図-1



ここで各流路の混合液濃度を C_A, C_B, C_C, C_D とし、流路の平均混合液濃度を C_M とすれば

$$C_A = 9400 \text{ (mg/l)}$$

$$C_B = \frac{9400 \times \frac{1}{4} + 150 \times \frac{1}{3}}{\frac{1}{4} + \frac{1}{3}} = 4140 \text{ (mg/l)}$$

$$C_C = \frac{9400 \times \frac{1}{4} + 150 \times \frac{2}{3}}{\frac{1}{4} + \frac{2}{3}} = 2660 \text{ (mg/l)}$$

$$C_D = \frac{9400 \times \frac{1}{4} + 150 \times 1}{\frac{1}{4} + 1} = 2000 \text{ (mg/l)}$$

$$C_M = \frac{1}{4}(C_A + C_B + C_C + C_D) = 4550 \text{ (mg/l)}$$

したがって汚泥日令は

* 正員 横浜市土木局下水道部中部下水処理場長

$$\frac{4550 \times 1.25}{150} \times \frac{5.0}{2} \times \frac{1}{24} = 4.0 \text{ (日)}$$

すなわち、汚泥日令は約4.0日で適当な範囲にあり、返送汚泥の返送比を変えずに、十分処理することができる。しかも流出水のSS濃度を同じに保つことができる。

3. タンク設計の基本的要素

ステップエアレーションタンクを設計するに当たり、次の各基本的要素を検討し、定める必要がある。

(1) 汚泥日令および BOD kg/SS 100 kg/日

エアレーションタンク内で良好な活性汚泥が下水と混和されると、汚染質の大部分が汚泥によって吸着され、ついで適当な酸素供給の下で急速に増殖した好気性生物により生物酸化が行なわれる。この吸着と酸化の両作用間には適当な均衡が保たれねばならず、もし酸化作用が吸着作用より遅れると汚泥の沈降性が失われ、いわゆる膨化(Bulking)が起こる。一方もし吸着作用が酸化作用より遅れると汚泥の大部分が自己酸化(Wet Combustion)により破壊され、フロックは非常に小さく緻密なものとなって硝化度は高いが清澄な処理水とならない。これは一般に解離(Disintegration)と呼ばれる。上述の吸着、酸化の両作用間における均衡をはかるため、管理作業の指針としてGouldにより汚泥日令(Sludge Age)が、HaseltineによりBOD kg/SS 100 kg/日(BOD Loading)が提案された²⁾。

汚泥日令は次式で表わされる。

$$\text{汚泥日令} = \frac{\text{タンク混合液の SS 濃度 (mg/l)}}{\text{タンク流入下水の SS 濃度 (mg/l)}} \times \frac{\text{タンク容量 (m}^3\text{)}}{\text{タンク流入下水量 (m}^3\text{/日)}}$$

これは下水中の有機物が活性汚泥フロックに吸着され、活性汚泥とともにくり返し返送されながら長時間エアレーションを受ける実質の時間ということができ、タンク内混合液中の浮遊物が単に流入下水から除去された浮遊物の累積であるとするもので、最終沈殿池にいちじるしい汚泥の蓄積がないと仮定している。

BOD kg/SS 100 kg/日 はタンク内混合液中の浮遊物量 100 kg 当り 1日に負荷する BOD 量 kg を表わす。これはタンク内混合液中の浮遊物量が吸着と酸化にあずかる活性汚泥微生物量を代表すると考え、下水中の BOD に関係する有機物を微生物の栄養源と考えて、負荷 BOD とタンク内 SS の比つまり有機栄養物と微生物量の比を汚泥の吸着、酸化作用の均衡に関する示標としたものである。

ステップエアレーションタンクではわが国での実験によっても従来の活性汚泥法と同様に汚泥日令を 3~5 日程度とすればよく、BOD kg/SS 100 kg/日 を大体 25

~40 とすればよい。汚泥日令はタンク内混合液中の浮遊物量が単に流入下水から除去された浮遊物量の累積であるとする、つまり流入下水中の浮遊物が同量の活性汚泥になるという仮定がふくまれるが、溶解性有機物を多量にふくむ下水に対して活性汚泥生物はこれをも栄養源として増殖し、活性汚泥を生成すると考えられるから若干不適当な点がある。したがって BOD kg/SS 100 kg/日 を用いる方がより合理的であろう。ここでもしある処理場において流入下水の BOD と SS の比率が一定の場合には汚泥日令と BOD kg/SS 100 kg/日 の間に次の関係が成立するから、この比率にあまり変動のない下水を処理する時は汚泥日令をより短時間に得られる処理調整の示標とすることができる。

$$\text{汚泥日令(日)} = \frac{\text{下水中の BOD 濃度}}{\text{下水中の SS 濃度}} \times \frac{100}{\text{BOD kg/SS 100 kg/日}}$$

(2) SVI または SDI

活性汚泥の沈殿特性を示すものとして汚泥容量示標(SVI)および汚泥容度示標(SDI)がある。SVI はモールマン示標(Mohlman Index)ともいい、エアレーションタンク混合液 1 l の浮遊物 1 gr が 30 分沈殿後に占める汚泥容量 ml 数を表わし、

$$\text{SVI} = \frac{\text{エアレーションタンク混合液 1 l の 30 分沈殿後の汚泥容量 ml}}{\text{エアレーションタンク混合液 1 l 中の浮遊物量 gr}}$$

で示される。SDI は Donaldson 示標 (Donaldson Index) ともいい、エアレーションタンク混合液 1 l の 30 分沈殿後の沈殿汚泥 100 ml 中の浮遊物量 gr 数を表わし、

$$\text{SDI} = \frac{\text{エアレーションタンク混合液 1 l の浮遊物量 gr} \times 100}{\text{エアレーションタンク混合液 1 l の 30 分沈殿後の汚泥容量 ml}}$$

で表わされる。したがって SVI と SDI とは次の関係にある。

$$\text{SDI} = \frac{100}{\text{SVI}}$$

従来の活性汚泥法と同様に一般に平均の SVI が 100 くらいの方が最も良好であるが、平均の SVI が 100 くらいの場合であっても 1 日を通じてはかなりの変動があり、60~250 である。これは 1 日を通じて負荷 BOD がいちじるしく変化したり、雨天時におけるシルトなどの非反応物質の流入によるためと考えられ、その変動を抑えることは不可能である。設計に際して SVI をもし平均値で採ると、SVI がそれより増大した場合、最終沈殿池における汚泥の過剰蓄積を避けるため返送汚泥濃度を低下させねばならず、したがって最大の平均混合液濃度を得る下水の分割流入方式によってさえ汚泥日令が低

下するので限界値以下では処理効率が悪くなる。ゆえに SVI が 100 をかなり越える場合にも満足に処理できるように設計しなければならない。一般に SVI=250 を想定して設計すれば適当と思われる。

(3) 返送汚泥濃度

活性汚泥法による処理場の実際の操作では、返送汚泥濃度が SDI を越えないようにしなければならない (Bloodgood's rule)。返送汚泥濃度が SDI を越える時—例えば SDI=0.5 のとき返送汚泥濃度 5000 mg/l を越える時—には最終沈殿池において汚泥フロックが破壊されるほど過剰に汚泥を蓄積し、滞留して活性汚泥の性状が悪化する。この操作指針について Bloodgood は $\frac{\text{返送汚泥濃度}(\%)}{\text{SDI}(\%)}$ = 1.1 (Kraus 係数) までよいとされており、Kraus は SDI>1.0 の場合にはこの係数を 1.2 にすることができるとしている。一般に SVI を前述 (2) のように想定し、返送汚泥濃度を SDI (固形物重量 % を示す値, 100/SVI) の 1.1 倍に等しいものとして設計すればタンク容量決定には安全である。

(4) 返送汚泥量

ステップ エアレーション タンクにおける流入固形物量と流出固形物量の平衡関係から次式が成り立つ。

$$C_P Q + C_R r Q = C_A (1+r) Q$$

ここに

Q: 流入下水量

C_A: 最終沈殿池に流入する混合液浮游物濃度

C_P: タンクに流入する下水の浮游物濃度

C_R: 返送汚泥の浮游物濃度

r: 返送比

上式より

$$r = \frac{C_A - C_P}{C_R - C_A} \dots \dots \dots (1)$$

$$C_R = \frac{(1+r)C_A - C_P}{r} \dots \dots \dots (1)'$$

ステップ エアレーション タンクでは最終沈殿池に流入する混合液浮游物濃度は従来の活性汚泥法におけるほぼ同様に 1500~2000 mg/l に保たれるので、返送汚泥濃度がふつう 8000~10000 mg/l の場合、返送汚泥量は流入下水量の 20~30% を標準とすればよいことが (1) 式からわかる。

ここで返送汚泥量は最終沈殿池に流入するエアレーションタンク混合液の沈殿容量と重要な関係にあり、最終沈殿池における沈殿汚泥の過剰蓄積を防ぐためそれらの間に均衡を保つ必要があることに注意しなければならない。このことから次式が成り立つ。

エアレーションタンク混合液の沈殿容量 (%)

$$= \frac{\text{返送汚泥量}}{\text{流入下水量} + \text{返送汚泥量}} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

この沈殿容量は 30 分沈殿試験で示される値を許容され

る最大値とすれば安全である。もし 30 分沈殿容量をこの値以上にすると最終沈殿池になお汚泥が残留蓄積して活性汚泥の性状を悪化する危険がある。一般にこれを 20% 以下に抑える方がよい。返送汚泥量は許容される最大 30 分沈殿容量 % を定めることにより (2) 式から求めるとよい。

(5) 所要空気量

従来送気量は流入下水量に対して 3~7 倍の割合を標準とすればよいとされている。活性汚泥法において供給する空気は混合液の攪拌と生物酸化に必要とする酸素の供給を行なうもので、これによって酸素要求量の減少をはかるのがおもな目的であるから、下水に対するよりもむしろ BOD 除去量に対して送気量を関係づける方が合理的である。空気消費量はタンク内の吸着、酸化両作用の平衡に関係あり、BOD kg/SS 100 kg/日 が 35~50 なら比較的一定で、25 以下なら自己酸化、硝化により急激に増大することが知られている。したがって (1) に示したように BOD kg/SS 100 kg/日 を 25~40 の範囲にとれば所要空気量は大体一定と考えられ、BOD 除去量 1 kg 当り 35~60 m³ とされる³⁾。この際ステップ エアレーション タンクではその容量が従来の活性汚泥法の約 1/2 になるからタンクの単位容量当り所要空気量は約 2 倍となり、これに応ずるエアレーション設備が必要になる。

4. 下水の分割流入方式

従来の活性汚泥法ではある返送汚泥濃度に対してタンク内混合液濃度はタンク流出部まで変わらないが、ステップ エアレーション タンクでは流入下水を分割して前部に大きい割合で添加した場合、タンク内平均混合液濃度が低くなり、後部に大きい割合で添加した場合、タンク内平均混合液濃度が高くなる。このように下水の分割流入方式を変えることにより平均混合液濃度を加減して SVI の変動または過負荷に対し一定の BOD kg/SS 100 kg/日 または汚泥日令を保つことができる。この分割流入方式の選択は $\frac{\text{タンク内平均混合液 SS 濃度}}{\text{タンク流出水 SS 濃度}} = \alpha$ を示標としてタンクを等容量 A, B, C, D の 4 流路に分ったものとすれば、 $\alpha=1.55$ 以下なら A 流路に下水の全量を、 $\alpha \approx 2.0$ になると B, C 流路または B, C, D 流路に分割流入させるよう提案されている³⁾。

ステップ エアレーション タンクの容量決定に際してはこれら分割流入方式のうちタンク内平均混合液濃度を最大となるよう後部に最も大きい割合で添加した場合を考慮することが経済的である。その場合 D 流路に流入下水を 100% 添加することはちょうど汚泥エアレーションタンクと混合液エアレーションタンクに分離したバイオンソープション法 (または Contact Stabilization

Process) に相当する。この処理法は吸着と酸化の作用を分離したタンクで行なわせるもので、完全な吸着には 20~40 分を要するといわれるが、実際の混合液エアレーションタンクでは短絡を考慮して少なくとも 60~90 分与える方が望ましい。したがって A,B,C 流路が汚泥エアレーションタンクに相当し、D 流路が混合液エアレーションタンクに相当することからこの吸着作用の時間を考慮して一般に C 流路に 100% 流入させる方式で設計するのがよいと考える。

5. タンクの設計

前述のような設計の根本的要素を定めてからそれらを組み合わせてタンクの設計を行なうが、横浜市のステップエアレーションタンクを例として次にその方法を示す。

(1) タンクの容量決定

a) 処理量 タンクの形式は散気管による旋回流式ステップエアレーションタンクとし、等容量 4 流路に分割するものとする。流入下水量は 72 400 m³/日 (晴天時 1 日平均計画下水量)。

最初沈殿池において生下水全 SS 300 mg/l のうち沈殿性 SS 200 mg/l についてその 60% が除去されるものとし、生下水 BOD (溶解性物質をふくむ) 200 mg/l のうち 30% が除去されるものとして

タンク流入水の水質

$$\begin{aligned} \text{SS} &= 300 - 200 \times 0.6 = 180 (\text{mg/l}) \\ \text{BOD} &= 200 \times (1 - 0.3) = 140 (\text{mg/l}) \end{aligned}$$

b) 設計基準

- ① BOD kg/SS 100 kg/日 = 40 とする。
- ② SVI = 250 を考慮する。
- ③ SVI = 250 のとき、返送汚泥濃度 100/250 (%) × 1.1 = 4 400 (mg/l) とする。
- ④ 返送汚泥量 最大 30 分沈殿容量 20% として (2) 式により返送比 25% とする。
- ⑤ 下水分割流入方式 等容量 A, B, C, D の 4 流路として C 流路に 100% 添加する方式とする。

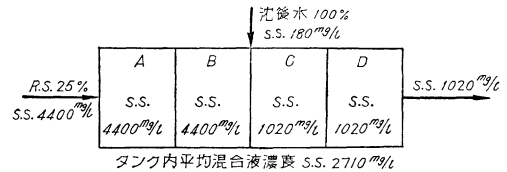
(SVI = 250 の時)

c) タンク内平均混合液濃度 A, B, C, D の各流路の SS 濃度を C_A, C_B, C_C, C_D とし、平均混合液 SS₂ 濃度を C_M とすれば、

$$\begin{aligned} C_A &= 4\,400 \text{ (mg/l)} \\ C_B &= 4\,400 \text{ (mg/l)} \\ C_C &= \frac{4\,400 \times 0.25 + 180 \times 1.0}{1.25} = 1\,020 \text{ (mg/l)} \\ C_D &= 1\,020 \text{ (mg/l)} \end{aligned}$$

$$\therefore C_M = \frac{1}{4} (C_A + C_B + C_C + C_D) = 2\,710 \text{ (mg/l)}$$

図-2



d) 1 日の負荷 BOD

$$72\,400 \times \frac{140}{1\,000\,000} \times 1\,000 = 10\,140 \text{ (kg/日)}$$

e) タンク所要容量 BOD kg/SS 100 kg/日 = 40 よりタンク内所要 SS 量は

$$\frac{10\,140}{40} \times 100 = 25\,350 \text{ (kg)}$$

したがってタンクの所要容量は

$$\frac{25\,350}{2\,710} \times 1\,000 = 9\,350 \text{ (m}^3\text{)}$$

f) タンクの寸法, 数 1 所を長 20.0 m × 巾 6.5 m × 深 5.0 m × 4 流路 とすれば 4 所まで

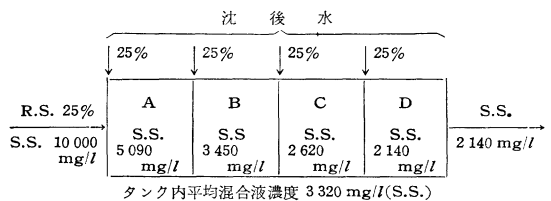
$$20.0 \times 6.5 \times 5.0 \times 4 \times 4 = 10\,400 \text{ (m}^3\text{)} > 9\,350 \text{ (m}^3\text{)}$$

となり、エアレーション時間 3.5 時間に相当する。

(2) 標準の場合における下水の分割流入方式

タンク流出水の SVI = 100, 返送汚泥濃度 SS = 10 000 mg/l の場合には次のように沈後水を 4 等分して添加する。

図-3



(C_A, C_B, C_C, C_D, C_M の計算は省略する)

ここに

$$\begin{aligned} \text{BOD kg/SS 100 kg/日} &= \frac{10\,140 \times 1\,000 \times 100}{3\,320} \\ &\times 10\,400 \approx 30 \end{aligned}$$

(汚泥日令 3.8 日)

(3) 送気量, タンクの構造

所要空気量を BOD 除去量 1 kg 当り 50 m³ とすれば、エアレーションタンク以降の BOD 除去量は

$$72\,400 \times \frac{140 - 20}{1\,000\,000} \times 1\,000 = 8\,690 \text{ (kg/日)}$$

所要空気量 : 50 × 8 690 = 434 500 (m³/日) = 300 (m³/分)

すなわち、流入下水量 1 m³ に対し送気量 6 m³ の割合となる。タンクは 4 カ所にステップゲートを設けるとともに、下水の分割流入口には阻流板を設置した。散気装置はサラン巻多孔管 660 本を用いて、1 所当り 16 基の可動接合部を有する吊下管に取り付け、底版上 60

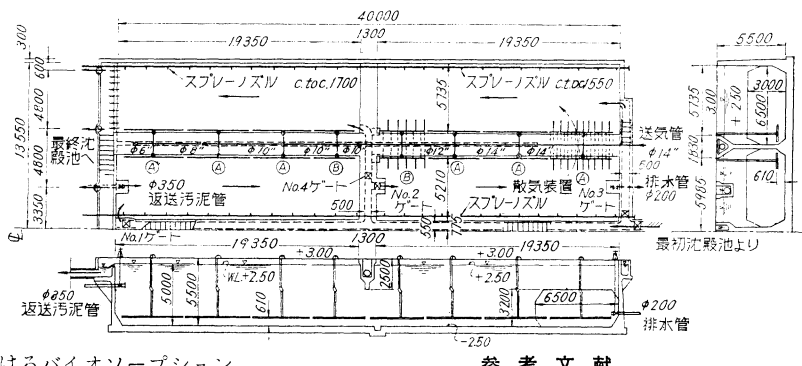
cmの位置に水平に設置した。なお消泡装置として散気装置の反対側に処理水によるスプレーノズルを取りつけ、流路延長1m当り毎分3.5l、水圧約1kg/cm²で散水する(図-4)。

6. 結 語

横浜市のステップエアレーションタンクは Haseltine らの理論をもとにして横浜市におけるバイオソープション法の実験を参考に合理的設計を試みた点の一つの特徴であり、ほかに散気装置、消泡装置などの新しい試みがあるが、今後いくらかでも他都市の参考にできれば幸いである。

なお、本文は横浜市土木局下水部 宮腰繁樹君の協力に負うところ多大であることを付記する。

図-4 ステップ エアレーション タンク (横浜市)



参 考 文 献

- 1) 日本水道協会：新しい下水処理方法調査専門委員会総合報告書(昭和36年3月)
- 2) Haseltine, T.R. : "A Rational Approach to the Design of Activated Sludge Plants", Water and Sewage Works, Nov. 1955
- 3) Torpey, W.N. and Chasick, A.H. : "Principles of Activated Sludge Operation", Sewage and Industrial Wastes, Nov. 1955 (1962.9.10・受付)

豆 知 識

日本の建設業の国際的地位

近年、日本の建設業は目ざましい飛躍をとげている。ここでその国際的な比重を調べてみることは、大変興味深い問題であると思われる。

1961年度大手5社受注高(各社公式発表)

	(100万円)	(1000\$)	
1. 鹿島建設	113 500	315 278	(36・6・1~37・5・31)
2. 清水建設	110 400	306 667	(36・4・1~37・3・31)
3. 大林組	100 700	279 722	(" ")
4. 大成建設	94 700	263 056	(" ")
5. 竹中工務店	93 500	259 722	(36・1・1~36・12・31)

1961年度米国業者ベスト5(共同受注、海外受注、子会社受注をふくむ) ENR誌発表

		国内受注	
1. Morrison-Knudsen	394 798(1 000\$)	144 765(1 000\$)	
2. C.J. Langenfelder	382 128 "	28 165 "	
3. Bechtel Corporation	323 175 "	306 155 "	
4. Brown & Root	254 540 "	44 301 "	
5. Kaiser Engineers	195 529 "	77 477 "	

国内受注高だけに限ると

1. Bechtel Corporation	306 155(1 000\$)
2. Peter Kiewit Sons'	178 769 "
3. Fluor Corporation	173 870 "
4. George A. Fuller	157 038 "
5. United Engineers & Constructors	150 750 "

上表のとおり、米国建設業者の総受注高のランキングにも、日本の大手5社は4位~8位を占め、国内受注高においては、Bechtel Corp.の3位を除いて、1~6位

を占有することになる。世界で抜群の国力を誇る米国と比較して、かくも圧倒的な地位を占めていることは、日本の建設業大手5社が単なる建設ブーム以上の実力を保有していることを示しているといえよう。

しかし年間90億円(25 000 000\$)以上の受注高を持つ業者が米国では、毎年65~70社あるのに比して、日本では最近の急増した数字でも、その4分1ぐらいである。建設市場の包蔵量ではやはり米国におよぶべくもない。

次に日本とともに驚異的な経済発展をとげている西ドイツの建設業者を見てみよう。

1960年度西独建設業者ベスト5(建設調査会調査)

	('60)	('59)
1. Phillip Holzmann	97 750 (1 000\$)	88 750 (1 000\$)
2. Hoch-Tief	89 500 "	72 750 "
3. Beton & Monierbau	59 250 "	49 750 "
4. Grünzweig & Hartmann	46 000 "	37 550 "
5. Grün & Bilfinger	—	—

(ただし1マルク=1/4ドル=25セント=90円)

ヨーロッパ大陸で最大の繁栄を続ける西ドイツとの比較においても、1年間のずれはあるが、日本の大手5社は約3倍の実績を残している。そして何よりも注目される事実は米国の建設業者が2年前('59)の実績より、横ばいあるいは減退している傾向にあるのにくらべ、日本の上位業者は2年前の実績より、2倍以上の伸びを示していることである。このように日本の建設業者は世界に互して躍進している。【鹿島建設KK 生田・記】