

富岩運河等におけるダイオキシン類堆積年代測定結果について

1-1 底質堆積年代測定調査の概要

富岩運河等の底質堆積年代測定を実施し、堆積年代別のダイオキシン類を分析することにより、富岩運河等におけるダイオキシン類汚染の発生時期について考察を行った。

1-2 調査フロー

本調査における調査フローは、図 1 のとおりである。

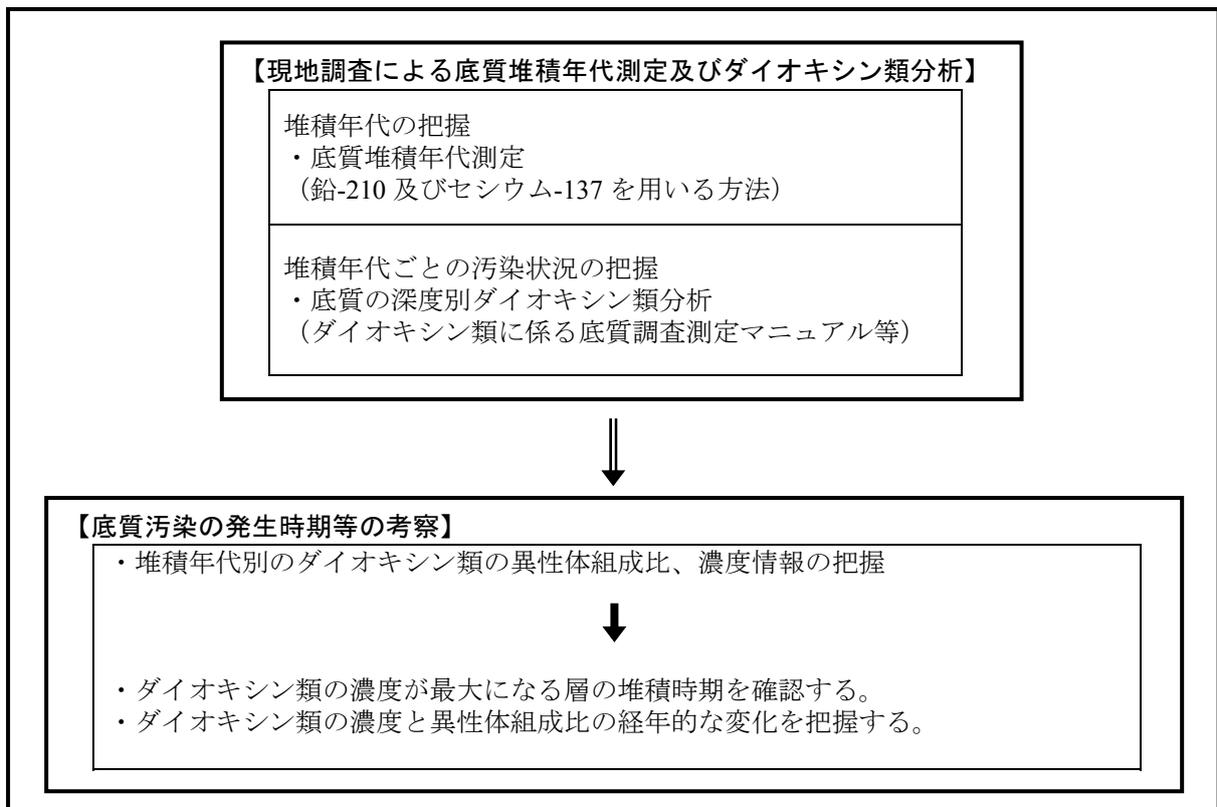


図 1 調査フロー

1-3 堆積年代測定の概要

1-3-1 鉛-210 を用いた堆積年代測定について

鉛-210 の堆積イメージを図 2 に示す。鉛-210 は、地殻に存在するラジウム-226 が壊変して発生するラドンガスから常に生まれ続けている。

鉛-210 は、微小粒子の形で風に乗って空気中を循環しているが、その一部は塵や降水に取り込まれ、水中に移動するとともに、懸濁粒子に付着して沈降し、毎年ほぼ一定量が底泥に移行する。

そして、

① 底泥に取り込まれた後は、大気からの新たな鉛-210 の供給がないこと

② 鉛-210 は放射壊変により一定の速さ（半減期 22.2 年）で減少すること

から、底泥に含まれている鉛-210 の濃度を調べることで、その層がいつ頃堆積したものかを把握することができる。

なお、堆積深度が深くなるにつれ鉛-210 は少なくなるため、鉛-210 を用いた年代測定が可能な期間は、およそ 100 年前までである。

また、調査地点の環境の変化に伴い、堆積速度等に大きな変化があった場合や堆積物が大きく攪乱されている場合には、堆積年代を当てはめることができない。

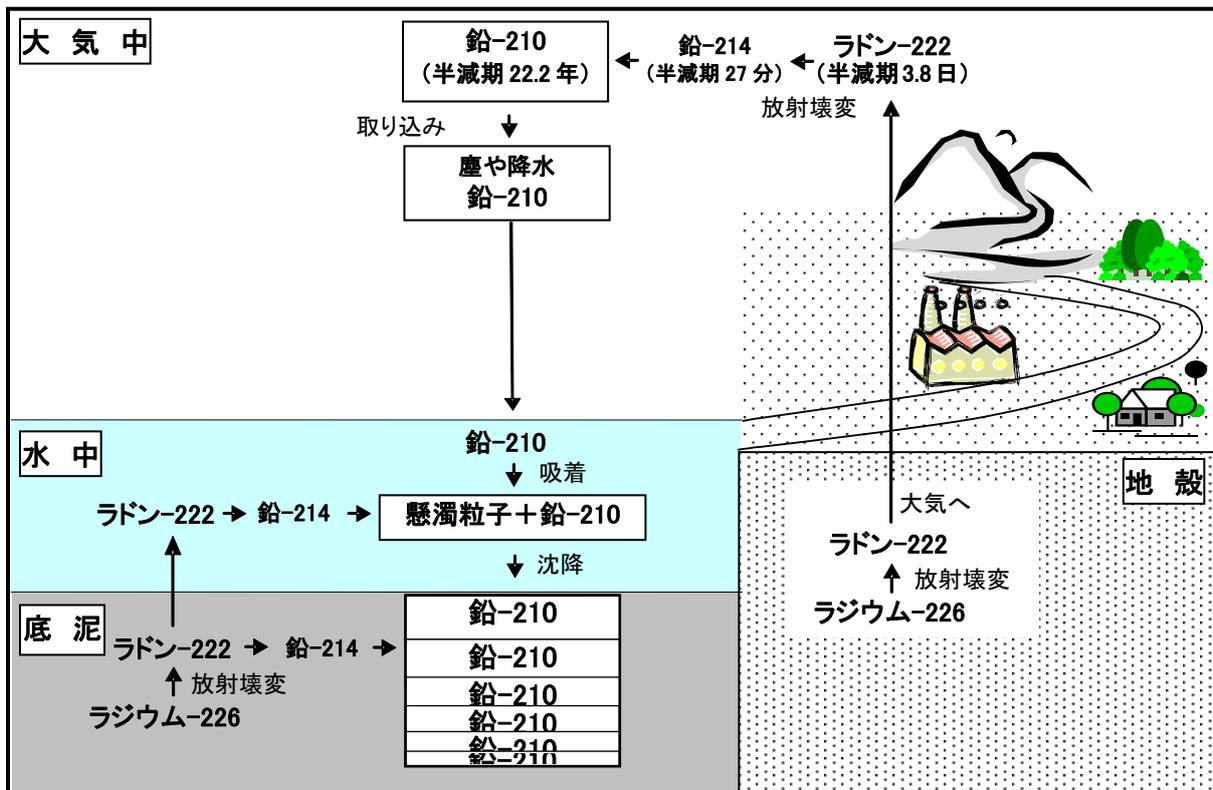


図 2 鉛-210 の堆積イメージ

1-3-2 セシウム-137 を用いた堆積年代の検証について

セシウム-137 の堆積状況を図 3 に示す。セシウム-137 は、大気圏原水爆実験により地球上に放出された放射性物質である。1954 年のビキニ環礁の水爆実験に始まり、1963 年の米英ソ 3 国の部分的核実験禁止条約成立まで大気圏内の実験が行われていたため、1950 年代後半から 1960 年代前半にかけて大量の放射性物質が地表に降下してきたと言われており、特に 1963 年には東京で最大のピークが観測されている。

また、近年では 1986 年にチェルノブイリ原子力発電所の事故により放出されたことも知られている。

このため、 γ 線測定装置を用いて各層のセシウム-137 を測定することにより、セシウム-137 の検出され始めた 1950 年代前半や、最大のピークが得られる 1963 年、さらにチェルノブイリ原子力発電所の事故が起きた 1986 年の推定が可能である。また、その結果を鉛-210 による堆積年代測定結果と一致するか検証することにより、より精度の高い年代測定を行うことができる。

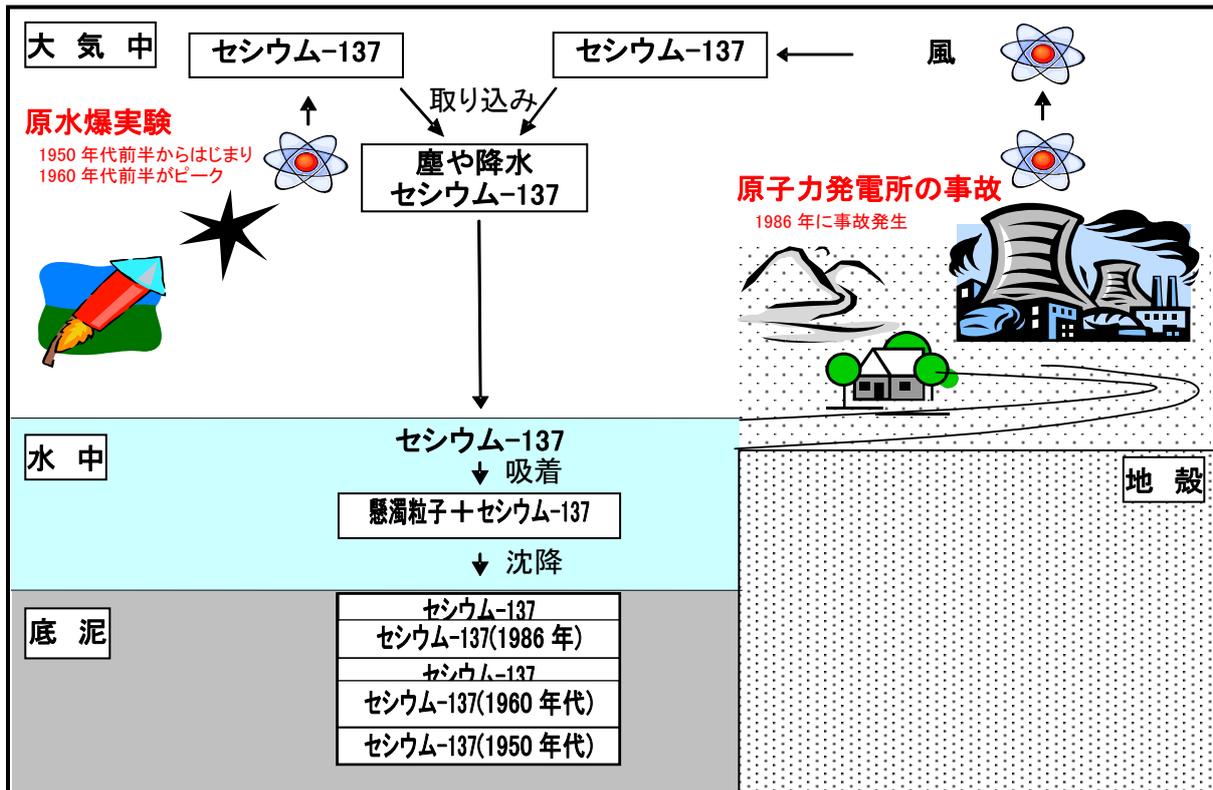


図 3 セシウム-137 の堆積イメージ

1-4 試料の採取

1-4-1 試料採取地点

本調査における試料採取地点については、運河の利用開始（昭和 9 年）以降の底質の堆積状況を把握するため、近年に浚渫が行われている区間を避け、

- ・ 富岩運河の未浚渫区間（萩浦小橋～運河口）
- ・ 住友運河

のそれぞれから柱状堆積物試料を採取することとした。

堆積年代測定を行う前提として、堆積粒子の底泥表面への堆積速度が一定で、かつ堆積後再移動しないことが挙げられる。

詳細な試料採取地点の選定にあたっては、浚渫等による底質の攪乱が少ない試料を採取するため、次の選定方針に従って実施することとした。

- ・ 在来層から均一な泥質（シルト分）として底質が堆積しており、在来層と堆積層の境界が明確である地点
- ・ 底質表層から在来層までの層厚が比較的小さく、出水等による土砂流入の影響が比較的小さいと考えられる地点
- ・ 底質中のダイオキシン類濃度が底質環境基準値よりも高い地点

上記に基づき選定した試料採取地点を表 1 及び図 4 に示す。

表 1 試料採取地点

調査地点名	緯度	経度	備考
富岩運河	36°44.809'	137°13.327'	萩浦小橋から下流へ 103m、右岸から 10m 付近
住友運河	36°44.339'	137°13.917'	県道 177 号橋より上流へ 211m、右岸から 20m 付近

※実際には、富岩運河及び住友運河のそれぞれ 2 地点から試料を採取し、攪乱等の影響が少ない方を選択した。

1-4-2 試料採取日

本調査における試料の採取は、平成 19 年 9 月 7 日に行った。

1-4-3 試料採取方法

本調査における試料の採取方法は図 5 のとおりで、スクーバ式潜水士によりアクリルコアサンプラー（ポリカーバネート製パイプ）を用いて、運河底面～運河底面下 1m 程度までの底泥を採取した。

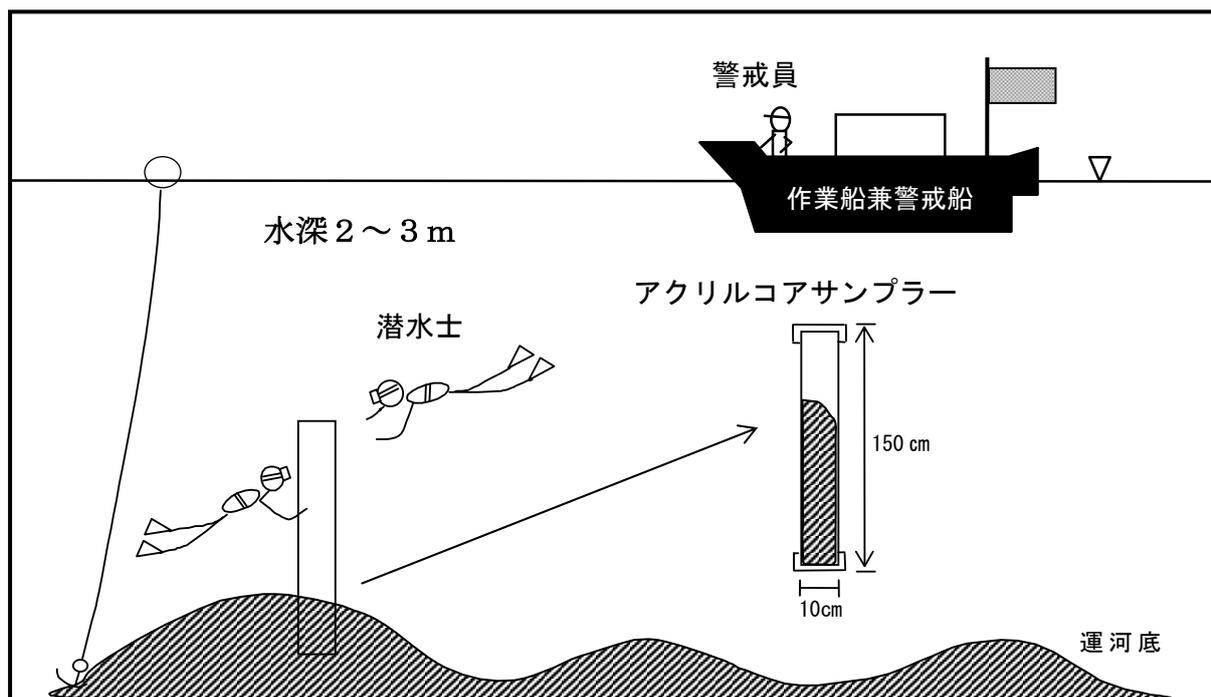


図 5 試料の採取方法

1-4-4 採取試料の状況

採取試料の状況等は表 2 のとおりである。富岩運河の調査地点では、底質表面にゴカイ多数、カニが確認された。また、住友運河の調査地点では底質表面に植物片が確認された。

表 2 採取試料の状況等

項目 \ 地点	富岩運河	住友運河
採取日時	平成 19 年 9 月 7 日 11:40～12:05	平成 19 年 9 月 7 日 10:05～10:25
採取位置 北緯	36°44.809'	36°44.339'
東経	137°13.327'	137°13.917'
水深	2.05m	2.25m
確認された混入物等	表面にゴカイ多数、カニ	表面に植物片

1-5 分析項目

本調査における分析項目は、表 3 のとおりである。

1-5-1 底質堆積年代の測定

富岩運河等の底質の堆積年代及び堆積速度を特定するため、試料を 2cm ごとに層別し、そのうち 40 層程度について含水率、強熱減量及び密度の測定を行うとともに、20 層程度について鉛-210 及びセシウム-137 の分析を行った。

(1) 鉛-210 を用いた年代測定の求め方

- ① 層切りした試料をシャーレに移し、乾燥させ、すりつぶした後、 γ 線測定器を用いて鉛-210 (46.50keV) と鉛-214¹ (351.99keV) の測定を行った。
- ② 各層の鉛-210 から鉛-214 を差し引き、新生堆積物と共に沈降した過剰鉛-210 (鉛-210ex²) を求めた。
- ③ 片対数紙上に積算重量深度³に対し鉛-210exをプロットし、この直線の傾きより 平均重量堆積速度⁴を求めた。この平均重量堆積速度から平均堆積速度⁵及び堆積年数⁶を求めた。

1-5-2 底質の深度別ダイオキシン類分析

ダイオキシン類は、堆積年代測定の結果を踏まえ、1 地点あたり表層付近及び最下層を含む 7 層について分析した。

表 3 本調査における分析項目

分析項目	数量等	備考
1) 底質堆積年代測定 底質の含水率、強熱減量及び密度	2 地点×40 層	試料を 2cm 毎に層別し、そのうち 40 層程度について分析した。
底質中の鉛-210 及びセシウム-137	2 地点×20 層	上記のうち、20 層程度について分析した。
2) ダイオキシン類 底質中のダイオキシン類	2 地点×7 層	1) の結果を踏まえ、表層付近及び最下層を含む 7 層について分析した。

¹ 鉛-210 は鉛-214 の放射壊変で生まれる娘核種のため、鉛-214 はラドン-222 の時に大気中に放出されなかった鉛-210 (バックグラウンド値) と同じ値を示す (図 2 参照)。

² 各層の鉛-210 濃度には、大気中で鉛-210 となり堆積物と一緒に降り積もったものと、底質や水中のラジウム-226 から生成してくる鉛-210 (バックグラウンド値) とが含まれていることから、各層の鉛-210 濃度からバックグラウンド値を差し引き、鉛-210ex を求めた。

各層の鉛-210 = (底質や水中のラジウム-226 から生成してくる鉛-210) + 鉛-210ex

鉛-210ex = 各層の鉛-210 濃度 - 鉛-214 (底質や水中のラジウム-226 から生成してくる鉛-210)

³ 1cm² 当たりの堆積粒子の積算重量。

積算重量深度: W [g/cm²] = (100 - 間隙率) / 100 × 泥の密度 × 深さ [cm]

⁴ 平均重量堆積速度: ω [g/cm²/年] は、積算重量深度に対し鉛-210ex を片対数紙上にプロットし、得られたグラフの直線の式を下の式に代入する事により求める事ができる。

直線の式が $Y = Ae^{ax}$ の場合 [Y: 鉛-210ex, A: 切片, a: 傾き]

$A_{ex}(W) = A_{ex}(0)\exp(-\lambda W/\omega)$ 壊変定数: $\lambda = 0.693/22.2$

$A_{ex}(W) = Y$ [Y: 鉛-210ex]

$A_{ex}(0) = A$ [A: 切片]

$-\lambda/\omega = -a$ [a: 傾き] $\omega = \lambda/a$

よって、平均重量堆積速度: $\omega = (0.693/22.2) / \text{傾き}$

⁵ 平均堆積速度 (cm/年) = $\omega / ((100 - \text{間隙率}) / 100 \times \text{堆積粒子の密度})$

⁶ 堆積年数 (年) = 積算重量深度 (g/cm²) / ω

1-6 調査結果

1-6-1 堆積年代測定結果

(1) 含水率及び強熱減量の分析結果

富岩運河及び住友運河における試料の層別の含水率及び強熱減量の分析結果は、それぞれ表 4 及び図 6 並びに表 5 及び図 7 のとおりである。

表 4 含水率及び強熱減量の分析結果（富岩運河）

深さ (cm)	含水率 (%)	強熱減量 (%)	深さ (cm)	含水率 (%)	強熱減量 (%)
0～2	71.6	17.6	50～52	60.5	12.6
2～4	52.4	11.9	52～54	62.5	12.2
4～6	47.9	9.0	54～56	63.8	11.3
6～8	49.7	9.4	56～58	62.5	10.3
8～10	49.3	9.0	58～60	62.5	11.4
10～12	50.1	8.9	60～62	60.4	11.5
12～14	49.6	9.1	62～64	58.8	11.1
14～16	49.5	9.2	64～66	55.7	12.0
16～18	49.2	9.1	66～68	52.3	10.6
18～20	50.3	9.0	68～70	45.5	9.1
20～22	50.8	9.2	70～72	46.5	8.5
22～24	52.0	9.4	72～74	43.1	7.4
24～26	53.2	10.1	74～76	46.3	8.3
26～28	53.8	9.1	76～78	50.7	9.3
28～30	54.0	9.1	78～80	43.3	8.4
30～32	53.5	9.4	80～82	47.7	8.2
32～34	56.7	10.6	82～84	44.7	8.1
34～36	57.9	10.6	84～86	42.8	8.2
36～38	58.3	10.7	86～88	42.0	8.2
38～40	60.0	11.3			
40～42	58.5	11.2			
42～44	57.6	11.8			
44～46	58.2	12.9			
46～48	59.1	12.6			
48～50	59.3	12.5			

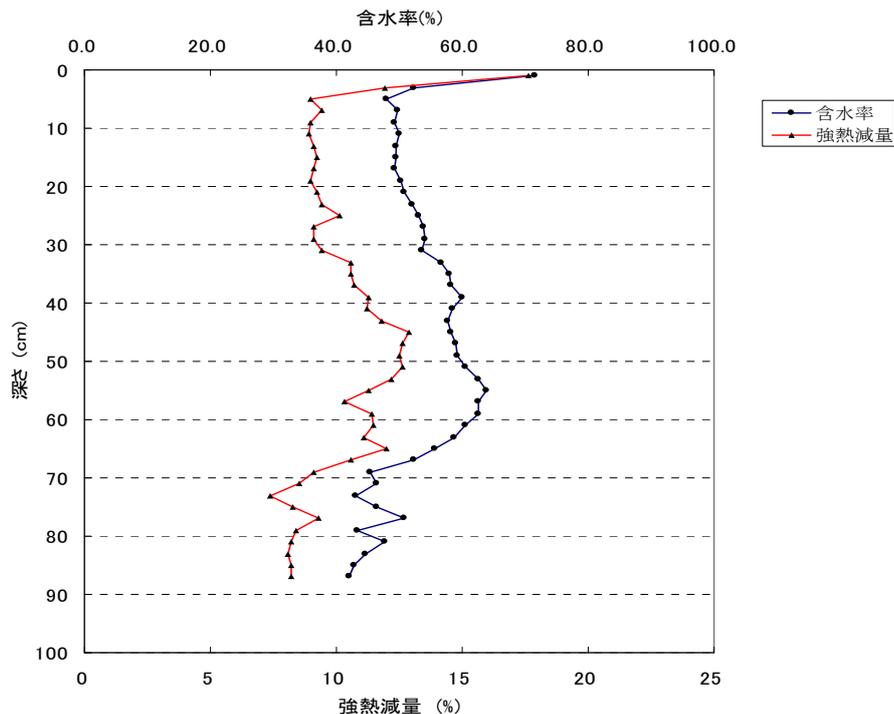


図 6 含水率及び強熱減量の分析結果（富岩運河）

表 5 含水率及び強熱減量の分析結果（住友運河）

深さ (cm)	含水率 (%)	強熱減量 (%)	深さ (cm)	含水率 (%)	強熱減量 (%)
0～2	81.9	15.6	50～52	62.0	9.0
2～4	77.3	14.7	52～54	59.2	8.3
4～6	74.8	14.0	54～56	62.8	9.3
6～8	73.8	15.3	56～58	67.6	10.2
8～10	73.4	13.3	58～60	57.1	7.1
10～12	74.0	14.1	60～62	45.3	5.3
12～14	74.4	13.5	62～64	38.7	3.8
14～16	74.7	12.5	64～66	39.3	3.8
16～18	72.3	10.8	66～68	47.7	5.0
18～20	74.2	11.7	68～70	52.9	6.5
20～22	74.6	12.6	70～72	52.5	6.6
22～24	73.1	11.0	72～74	51.5	6.2
24～26	73.0	11.4	74～76	45.2	4.7
26～28	73.3	11.0	76～78	48.1	5.4
28～30	72.8	11.1	78～80	47.6	5.1
30～32	72.1	10.2	80～82	45.7	4.7
32～34	72.5	10.1	82～84	45.3	5.0
34～36	72.9	10.6	84～86	40.7	4.5
36～38	70.6	9.9			
38～40	69.0	11.1			
40～42	65.8	11.0			
42～44	65.0	10.6			
44～46	49.4	7.3			
46～48	54.8	8.9			
48～50	60.2	9.5			

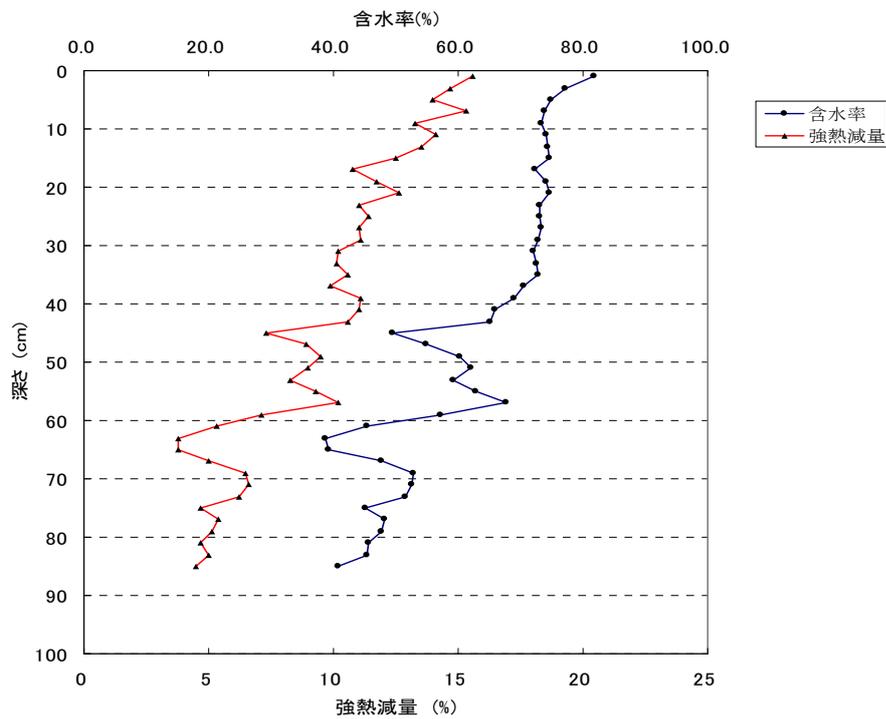


図 7 含水率及び強熱減量の分析結果（住友運河）

(2) 富岩運河における堆積年代測定結果

1) 鉛-210 を用いた堆積年代測定結果（富岩運河）

γ線測定器を用いて分析した鉛-210 と鉛-214 の結果は、表 6 のとおりである。

堆積物は、次々と堆積する堆積物の重さのため、堆積物中の間隙水が絞り出されて圧縮され、同じ厚みでも含まれる粒子の量が異なることから、まず、測定した含水率と密度から、深さを一定面積当たりの乾燥重量（積算重量深度： g/cm^2 ）として示すことにより、圧密による補正を行った。

なお、図 8 のとおり、66cm 以深の堆積物は、含水率に揺らぎが見られることや、これまでの堆積物と異なった泥質であるため、堆積過程が異なっていると考えられる。

次に、表 6 で得られた鉛-210ex の結果と積算重量深度との関係を図 9 に示し、このグラフから求められる鉛-210ex（66cm 以深の鉛-210ex は除外）の指数近似式の傾きから平均重量堆積速度（ $\text{g}/\text{cm}^2/\text{年}$ ）を求めた。

その結果、平均重量堆積速度は、 $0.826\text{g}/\text{cm}^2/\text{年}$ であった。更にこの平均重量堆積速度で積算重量深度を割ることにより、各層の堆積年代を求めた。その結果は表 7 のとおりである。

また、得られた平均重量堆積速度を用いて表層の平均堆積速度を求めたところ、0-2cm 層の環境条件においては、 $2.42\text{cm}/\text{年}$ （参考値）であった。

表 6 鉛-210 と鉛-214 の分析結果（富岩運河）

測定層 [cm]	深さ [cm]	含水率 [%]	泥の密度 [g/cm^3]	間隙率 [%]	積算重量深度 (g/cm^2)	鉛-210 [Bq/g]	鉛-214 [Bq/g]	鉛-210ex [Bq/g]
0-2	1	71.6	2.450	86.1	0.34	1.41 ± 0.040	0.052 ± 0.005	1.36 ± 0.040
2-4	3	52.4	2.427	72.8	1.34	0.98 ± 0.032	0.093 ± 0.005	0.89 ± 0.032
4-6	5	47.9	2.512	69.8	2.76	1.24 ± 0.034	0.097 ± 0.005	1.14 ± 0.034
6-8	7	49.7	2.417	70.5	4.24	0.82 ± 0.031	0.098 ± 0.005	0.72 ± 0.032
8-10	9	49.3	2.408	70.1	5.67	0.80 ± 0.032	0.095 ± 0.005	0.71 ± 0.033
10-12	11	50.1	2.427	70.9	7.10	-	-	-
12-14	13	49.6	2.400	70.3	8.52	-	-	-
14-16	15	49.5	2.486	70.9	9.95	0.86 ± 0.035	0.116 ± 0.006	0.74 ± 0.035
16-18	17	49.2	2.431	70.2	11.40	-	-	-
18-20	19	50.3	2.421	71.0	12.83	0.68 ± 0.033	0.113 ± 0.006	0.56 ± 0.033
20-22	21	50.8	2.428	71.5	14.22	-	-	-
22-24	23	52.0	2.407	72.3	15.58	-	-	-
24-26	25	53.2	2.396	73.1	16.89	0.80 ± 0.037	0.089 ± 0.006	0.71 ± 0.038
26-28	27	53.8	2.431	73.9	18.17	-	-	-
28-30	29	54.0	2.467	74.3	19.44	0.50 ± 0.028	0.081 ± 0.005	0.41 ± 0.028
30-32	31	53.5	2.491	74.1	20.72	-	-	-
32-34	33	56.7	2.369	75.6	21.94	-	-	-
34-36	35	57.9	2.418	76.9	23.07	0.63 ± 0.034	0.099 ± 0.006	0.53 ± 0.035
36-38	37	58.3	2.411	77.1	24.19	-	-	-
38-40	39	60.0	2.403	78.3	25.26	0.70 ± 0.033	0.074 ± 0.006	0.62 ± 0.034
40-42	41	58.5	2.386	77.1	26.33	-	-	-
42-44	43	57.6	2.359	76.2	27.44	-	-	-
44-46	45	58.2	2.348	76.6	28.55	0.61 ± 0.035	0.094 ± 0.006	0.52 ± 0.036
46-48	47	59.1	2.350	77.3	29.63	-	-	-
48-50	49	59.3	2.355	77.4	30.70	0.51 ± 0.030	0.089 ± 0.006	0.42 ± 0.031
50-52	51	60.5	2.372	78.4	31.74	-	-	-
52-54	53	62.5	2.360	79.7	32.73	-	-	-
54-56	55	63.8	2.384	80.8	33.67	0.40 ± 0.030	0.084 ± 0.006	0.31 ± 0.030
56-58	57	62.5	2.458	80.4	34.61	0.39 ± 0.029	0.070 ± 0.006	0.32 ± 0.030
58-60	59	62.5	2.410	80.1	35.57	0.37 ± 0.029	0.064 ± 0.006	0.31 ± 0.030
60-62	61	60.4	2.377	78.4	36.57	0.43 ± 0.003	0.086 ± 0.006	0.34 ± 0.007
62-64	63	58.8	2.407	77.5	37.62	0.42 ± 0.003	0.084 ± 0.006	0.34 ± 0.007
64-66	65	55.7	2.422	75.3	38.76	0.36 ± 0.003	0.074 ± 0.006	0.28 ± 0.007
66-68	67	52.3	2.420	72.6	40.02	-	-	-
68-70	69	45.5	2.452	67.2	41.49	0.18 ± 0.023	0.074 ± 0.005	0.11 ± 0.023
70-72	71	46.5	2.402	67.6	43.07	-	-	-
72-74	73	43.1	2.501	65.5	44.72	-	-	-
74-76	75	46.3	2.524	68.5	46.37	0.13 ± 0.021	0.068 ± 0.005	0.06 ± 0.021
76-78	77	50.7	2.485	71.9	47.87	-	-	-
78-80	79	43.3	2.502	65.6	49.43	0.13 ± 0.019	0.074 ± 0.005	0.05 ± 0.019
80-82	81	47.7	2.492	69.4	51.05	-	-	-
82-84	83	44.7	2.505	66.9	52.64	-	-	-
84-86	85	42.8	2.502	65.2	54.34	0.14 ± 0.025	0.087 ± 0.005	0.05 ± 0.026
86-88	87	42.0	2.495	64.4	56.10	-	-	-

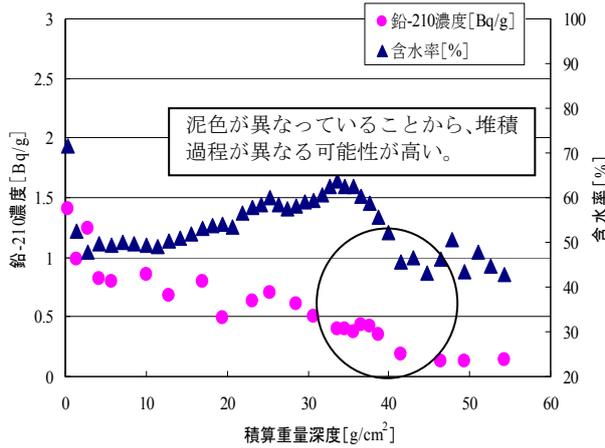


図 8 積算重量深度に対する含水率と鉛-210 の結果 (富岩運河)

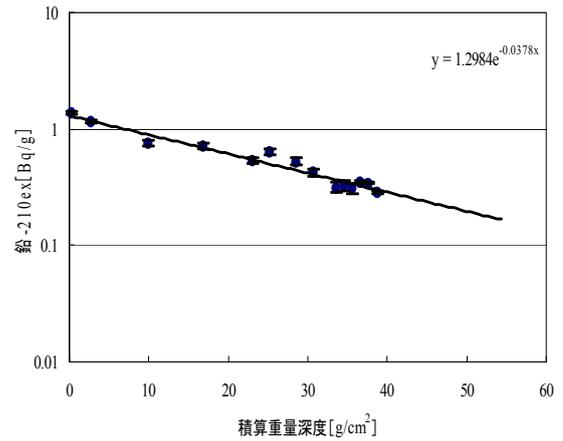


図 9 積算重量深度と鉛-210ex との関係 (富岩運河)

表 7 鉛-210 を用いた年代測定の結果 (富岩運河)

測定層 [cm]	深さ [cm]	積算重量深度 [g/cm ²]	堆積年数 [年]	西暦 [年]
0-2	1	0.34	0.4	2007
2-4	3	1.34	1.6	2005
4-6	5	2.76	3.3	2004
6-8	7	4.24	5.1	2002
8-10	9	5.67	6.9	2000
10-12	11	7.10	8.6	1998
12-14	13	8.52	10.3	1997
14-16	15	9.95	12.1	1995
16-18	17	11.40	13.8	1993
18-20	19	12.83	15.5	1991
20-22	21	14.22	17.2	1990
22-24	23	15.58	18.9	1988
24-26	25	16.89	20.5	1987
26-28	27	18.17	22.0	1985
28-30	29	19.44	23.5	1983
30-32	31	20.72	25.1	1982
32-34	33	21.94	26.6	1980
34-36	35	23.07	27.9	1979
36-38	37	24.19	29.3	1978
38-40	39	25.26	30.6	1976
40-42	41	26.33	31.9	1975
42-44	43	27.44	33.2	1974
44-46	45	28.55	34.6	1972
46-48	47	29.63	35.9	1971
48-50	49	30.70	37.2	1970
50-52	51	31.74	38.4	1969
52-54	53	32.73	39.6	1967
54-56	55	33.67	40.8	1966
56-58	57	34.61	41.9	1965
58-60	59	35.57	43.1	1964
60-62	61	36.57	44.3	1963
62-64	63	37.62	45.6	1961
64-66	65	38.76	46.9	1960
66-68	67	40.02	48.5	1959
68-70	69	41.49	50.2	1957
70-72	71	43.07	52.2	1955
72-74	73	44.72	54.1	1953
74-76	75	46.37	56.2	1951
76-78	77	47.87	58.0	1949
78-80	79	49.43	59.9	1947
80-82	81	51.05	61.8	1945
82-84	83	52.64	63.7	1943
84-86	85	54.34	65.8	1941

※ 66cm 以深は、堆積過程が異なると考えられるため参考値

2) セシウム-137 を用いた堆積年代測定結果（富岩運河）

γ線測定器を用いて測定した結果は表 8 及び図 10 のとおりである。セシウム-137 の結果を見ると、表層から下層に行くに従い高い値を示すようになり、60-62cm 層に最大のピークが得られた。その後、急激に減少するが、最下層においても 10 Bq/kg 程度検出された。

今回の結果を見ると『セシウム-137 が検出され始めた層が判定できないこと』と『表層と最大のピーク層との間に顕著なピークが得られていないこと』から、セシウム-137 の検出され始めた“1950 年代前半の特定”とチェルノブイリ原子力発電所の事故が起きた“1986 年”の推定は困難であったが、60-62cm 層の最大のピークは顕著であることから、この層を東京で最大のピークが観測された 1963 年と推定し、平均重量堆積速度を求めた。

その結果、平均重量堆積速度は、 $0.831\text{g}/\text{cm}^2/\text{年}$ であった。更にこの平均重量堆積速度で各層の積算重量深度を割ることにより、各層の堆積年代を求めた。

また、得られた平均重量堆積速度を用いて表層の平均堆積速度を求めたところ、0-2cm 層の環境条件においては、 $2.43\text{cm}/\text{年}$ であった。

ここで得られたセシウム-137 を用いた年代測定の結果と鉛-210 を用いた年代測定の結果は表 9 のとおりである。

その結果を見ると鉛-210 を用いた方法とセシウム-137 を用いた方法とは、ほぼ同じ堆積年代を示した。

このことから、鉛-210 を用いた年代測定結果は妥当なものであると考えられる。

表 8 セシウム-137 の結果（富岩運河）

測定層 [cm]	深さ [cm]	セシウム-137 [Bq/kg]
0-2	1	21.5 ± 2.21
2-4	3	15.8 ± 2.00
4-6	5	18.3 ± 2.17
6-8	7	26.8 ± 2.28
8-10	9	27.3 ± 2.28
10-12	11	-
12-14	13	-
14-16	15	29.0 ± 2.41
16-18	17	-
18-20	19	27.4 ± 2.58
20-22	21	-
22-24	23	-
24-26	25	41.1 ± 2.99
26-28	27	-
28-30	29	32.1 ± 2.61
30-32	31	-
32-34	33	-
34-36	35	44.4 ± 3.15
36-38	37	-
38-40	39	43.2 ± 3.18
40-42	41	-
42-44	43	-
44-46	45	57.6 ± 3.55
46-48	47	-
48-50	49	62.7 ± 3.61
50-52	51	-
52-54	53	-
54-56	55	71.7 ± 3.93
56-58	57	79.9 ± 3.87
58-60	59	84.9 ± 4.26
60-62	61	87.7 ± 4.15
62-64	63	72.4 ± 4.26
64-66	65	65.6 ± 3.72
66-68	67	-
68-70	69	20.7 ± 2.27
70-72	71	-
72-74	73	-
74-76	75	23.2 ± 1.68
76-78	77	-
78-80	79	32.7 ± 1.44
80-82	81	-
82-84	83	-
84-86	85	11.5 ± 1.78
86-88	87	-

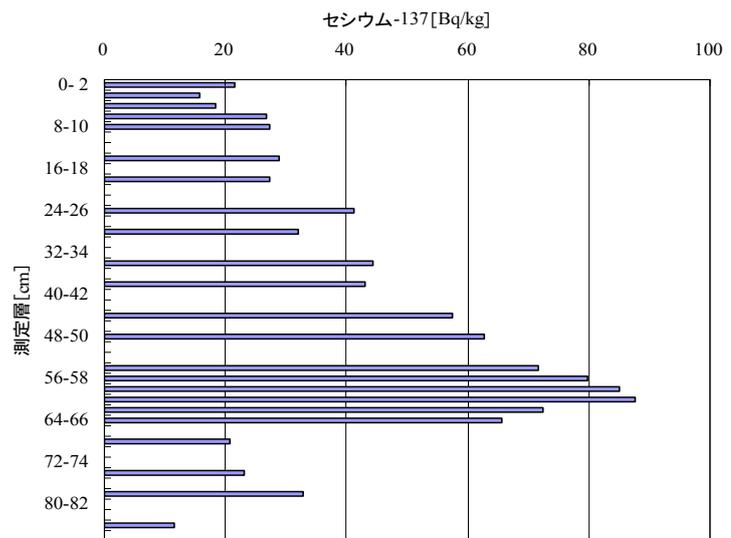


図 10 セシウム-137 の結果（富岩運河）

表 9 鉛-210 を用いた年代測定とセシウム-137 を用いた年代測定の結果（富岩運河）

測定層 [cm]	深さ [cm]	積算重量深度 [g/cm ²]	鉛-210 を用いた方法		セシウム-137 を用いた方法	
			堆積年数 [年]	西暦 [年]	堆積年数 [年]	西暦 [年]
0-2	1	0.34	0.4	2007	0.4	2007
2-4	3	1.34	1.6	2005	1.6	2005
4-6	5	2.76	3.3	2004	3.3	2004
6-8	7	4.24	5.1	2002	5.1	2002
8-10	9	5.67	6.9	2000	6.8	2000
10-12	11	7.10	8.6	1998	8.5	1998
12-14	13	8.52	10.3	1997	10.2	1997
14-16	15	9.95	12.1	1995	12.0	1995
16-18	17	11.40	13.8	1993	13.7	1993
18-20	19	12.83	15.5	1991	15.4	1992
20-22	21	14.22	17.2	1990	17.1	1990
22-24	23	15.58	18.9	1988	18.8	1988
24-26	25	16.89	20.5	1987	20.3	1987
26-28	27	18.17	22.0	1985	21.9	1985
28-30	29	19.44	23.5	1983	23.4	1984
30-32	31	20.72	25.1	1982	24.9	1982
32-34	33	21.94	26.6	1980	26.4	1981
34-36	35	23.07	27.9	1979	27.8	1979
36-38	37	24.19	29.3	1978	29.1	1978
38-40	39	25.26	30.6	1976	30.4	1977
40-42	41	26.33	31.9	1975	31.7	1975
42-44	43	27.44	33.2	1974	33.0	1974
44-46	45	28.55	34.6	1972	34.4	1973
46-48	47	29.63	35.9	1971	35.7	1971
48-50	49	30.70	37.2	1970	36.9	1970
50-52	51	31.74	38.4	1969	38.2	1969
52-54	53	32.73	39.6	1967	39.4	1968
54-56	55	33.67	40.8	1966	40.5	1966
56-58	57	34.61	41.9	1965	41.6	1965
58-60	59	35.57	43.1	1964	42.8	1964
60-62	61	36.57	44.3	1963	44.0	1963
62-64	63	37.62	45.6	1961	—	—
64-66	65	38.76	46.9	1960	—	—
66-68	67	40.02	48.5	1959	—	—
68-70	69	41.49	50.2	1957	—	—
70-72	71	43.07	52.2	1955	—	—
72-74	73	44.72	54.1	1953	—	—
74-76	75	46.37	56.2	1951	—	—
76-78	77	47.87	58.0	1949	—	—
78-80	79	49.43	59.9	1947	—	—
80-82	81	51.05	61.8	1945	—	—
82-84	83	52.64	63.7	1943	—	—
84-86	85	54.34	65.8	1941	—	—
平均重量堆積速度 [g/cm ² /年]			0.826		0.831	
平均堆積速度 (0-2cm 層の環境条件) [cm/年]			2.42		2.43	

※ 66cm 以深は、堆積過程が異なると考えられるため参考値

(3) 住友運河における堆積年代測定結果

1) 鉛-210 を用いた堆積年代測定結果（住友運河）

γ線測定器を用いて分析した鉛-210 と鉛-214 の結果は表 10 のとおりである。

なお、図 10 のとおり、40cm 以深の堆積物は、含水率に揺らぎが見られることや、これまでの堆積物と異なった泥色であるため、堆積過程が異なっていると考えられる。

次に表 10 で得られた鉛-210ex の結果と積算重量深度との関係を図 11 に示し、このグラフから求められる鉛-210ex (40cm 以深の鉛-210ex は除外) の指数近似式の傾きから平均重量堆積速度 (g/cm²/年) を求めた。

その結果、平均重量堆積速度は、0.238g/cm²/年であった。更にこの平均重量堆積速度で積算重量深度を割ることにより、各層の堆積年代を求めた。その結果は表 11 のとおりである。

また、得られた平均重量堆積速度を用いて表層の平均堆積速度を求めたところ、0-2cm 層の環境条件においては、1.18cm/年 (参考値) であった。

表 10 鉛-210 と鉛-214 の分析結果 (住友運河)

測定層 [cm]	深さ [cm]	含水率 [%]	泥の密度 [g/cm ³]	間隙率 [%]	積算重量深度 [g/cm ²]	鉛-210 [Bq/g]	鉛-214 [Bq/g]	鉛-210ex [Bq/g]
0-2	1	81.9	2.427	91.7	0.20	2.06 ± 0.054	0.033 ± 0.006	2.03 ± 0.054
2-4	3	77.3	2.422	89.2	0.67	-	-	-
4-6	5	74.8	2.384	87.6	1.22	0.96 ± 0.021	0.014 ± 0.002	0.95 ± 0.021
6-8	7	73.8	2.402	87.1	1.83	-	-	-
8-10	9	73.4	2.347	86.6	2.45	2.99 ± 0.062	0.051 ± 0.005	2.94 ± 0.063
10-12	11	74.0	2.361	87.0	3.07	-	-	-
12-14	13	74.4	2.369	87.3	3.68	-	-	-
14-16	15	74.7	2.372	87.5	4.27	2.21 ± 0.058	0.044 ± 0.005	2.17 ± 0.059
16-18	17	72.3	2.415	86.3	4.90	-	-	-
18-20	19	74.2	2.408	87.4	5.54	1.54 ± 0.044	0.046 ± 0.005	1.49 ± 0.044
20-22	21	74.6	2.414	87.6	6.14	-	-	-
22-24	23	73.1	2.371	86.6	6.76	-	-	-
24-26	25	73.0	2.414	86.7	7.39	1.56 ± 0.047	0.033 ± 0.005	1.53 ± 0.047
26-28	27	73.3	2.396	86.8	8.03	-	-	-
28-30	29	72.8	2.419	86.6	8.67	1.18 ± 0.042	0.052 ± 0.006	1.13 ± 0.042
30-32	31	72.1	2.428	86.3	9.33	-	-	-
32-34	33	72.5	2.413	86.4	9.99	1.23 ± 0.045	0.054 ± 0.006	1.17 ± 0.046
34-36	35	72.9	2.405	86.6	10.64	1.22 ± 0.043	0.042 ± 0.006	1.18 ± 0.044
36-38	37	70.6	2.402	85.2	11.32	0.96 ± 0.039	0.062 ± 0.006	0.90 ± 0.040
38-40	39	69.0	2.429	84.4	12.05	0.65 ± 0.034	0.056 ± 0.006	0.60 ± 0.035
40-42	41	65.8	2.416	82.3	12.86	-	-	-
42-44	43	65.0	2.409	81.7	13.73	-	-	-
44-46	45	49.4	2.586	71.6	14.90	0.30 ± 0.023	0.092 ± 0.005	0.21 ± 0.024
46-48	47	54.8	2.448	74.8	16.25	-	-	-
48-50	49	60.2	2.424	78.6	17.39	0.29 ± 0.029	0.147 ± 0.007	0.14 ± 0.030
50-52	51	62.0	2.453	80.0	18.40	-	-	-
52-54	53	59.2	2.445	78.0	19.42	-	-	-
54-56	55	62.8	2.448	80.5	20.44	0.10 ± 0.021	0.070 ± 0.005	0.03 ± 0.022
56-58	57	67.6	2.370	83.2	21.31	-	-	-
58-60	59	57.1	2.468	76.7	22.29	0.14 ± 0.020	0.088 ± 0.005	0.05 ± 0.021
60-62	61	45.3	2.538	67.8	23.68	-	-	-
62-64	63	38.7	2.565	61.8	25.48	-	-	-
64-66	65	39.3	2.559	62.4	27.42	0.10 ± 0.017	0.090 ± 0.005	0.01 ± 0.018
66-68	67	47.7	2.525	69.7	29.15	-	-	-
68-70	69	52.9	2.542	74.1	30.57	0.09 ± 0.020	0.109 ± 0.005	-0.02 ± 0.021
70-72	71	52.5	2.526	73.6	31.90	-	-	-
72-74	73	51.5	2.534	72.9	33.25	-	-	-
74-76	75	45.2	2.585	68.1	34.77	0.11 ± 0.020	0.119 ± 0.006	-0.01 ± 0.021
76-78	77	48.1	2.584	70.5	36.35	-	-	-
78-80	79	47.6	2.547	69.8	37.88	0.14 ± 0.020	0.111 ± 0.005	0.03 ± 0.020
80-82	81	45.7	2.569	68.4	39.46	0.16 ± 0.021	0.123 ± 0.006	0.04 ± 0.022
82-84	83	45.3	2.546	67.8	41.09	0.16 ± 0.021	0.124 ± 0.006	0.04 ± 0.022
84-86	85	40.7	2.540	63.5	42.84	-	-	-

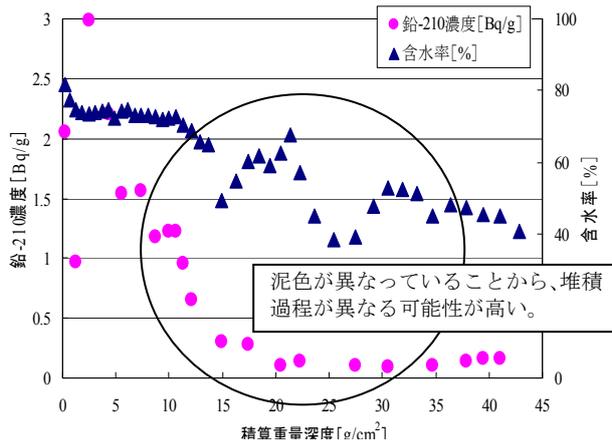


図 10 積算重量深度に対する含水率と鉛-210の結果（住友運河）

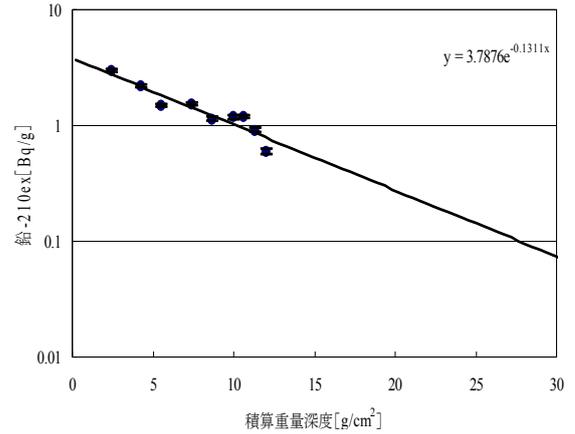


図 11 積算重量深度と鉛-210ex との関係（住友運河）

表 11 鉛-210 を用いた年代測定の結果（住友運河）

測定層 [cm]	深さ [cm]	積算重量深度 [g/cm ²]	堆積年数 [年]	西暦 [年]
0-2	1	0.20	0.9	2006
2-4	3	0.67	2.8	2004
4-6	5	1.22	5.1	2002
6-8	7	1.83	7.7	1999
8-10	9	2.45	10.3	1997
10-12	11	3.07	12.9	1994
12-14	13	3.68	15.4	1992
14-16	15	4.27	18.0	1989
16-18	17	4.90	20.6	1986
18-20	19	5.54	23.3	1984
20-22	21	6.14	25.8	1981
22-24	23	6.76	28.4	1979
24-26	25	7.39	31.1	1976
26-28	27	8.03	33.7	1973
28-30	29	8.67	36.4	1971
30-32	31	9.33	39.2	1968
32-34	33	9.99	42.0	1965
34-36	35	10.64	44.7	1962
36-38	37	11.32	47.5	1959
38-40	39	12.05	50.6	1956
40-42	41	12.86	54.0	1953
42-44	43	13.73	57.6	1949
44-46	45	14.90	62.6	1944
46-48	47	16.25	68.2	1939
48-50	49	17.39	73.0	1934
50-52	51	18.40	77.3	1930
52-54	53	19.42	81.6	1925
54-56	55	20.44	85.8	1921
56-58	57	21.31	89.5	1917
58-60	59	22.29	93.6	1913
60-62	61	23.68	99.5	1908
62-64	63	25.48	107.0	1900
64-66	65	27.42	-	-
66-68	67	29.15	-	-
68-70	69	30.57	-	-
70-72	71	31.90	-	-
72-74	73	33.25	-	-
74-76	75	34.77	-	-
76-78	77	36.35	-	-
78-80	79	37.88	-	-
80-82	81	39.46	-	-
82-84	83	41.09	-	-
84-86	85	42.84	-	-

※40cm以深は、堆積過程が異なると考えられるため参考値

2) セシウム-137 を用いた堆積年代測定結果（住友運河）

γ線測定器を用いて測定したセシウム-137の結果は表12及び図12のとおりで、34-36cm層に最大のピークが得られ、それ以深では急激に減少するが、最下層においても10 Bq/kg程度検出された。

富岩運河と同様に『検出され始めた層が判定できないこと』や『表層と最大のピーク層との間に顕著なピークが得られていないこと』から、セシウム-137の検出され始めた1950年代前半の特定とチェルノブイリ原子力発電所の事故が起きた1986年の推定は困難であった。しかし、34-36cm層の最大のピークは顕著であることから、この層を東京で最大のピークが観測された1963年と推定し、平均重量堆積速度を求めたところ、0.242g/cm²/年であった。更にこの平均重量堆積速度で各層の積算重量深度を割ることにより、各層の堆積年代を求めた。

また、得られた平均重量堆積速度を用いて表層の平均堆積速度を求めたところ、0-2cm層の環境条件においては、1.19cm/年であった。

ここで得られたセシウム-137を用いた年代測定の結果と鉛-210を用いた年代測定の結果は表13のとおりで、鉛-210を用いた方法とセシウム-137を用いた方法とは、ほぼ同じ堆積年代を示したことから、鉛-210を用いた年代測定結果は妥当なものであると考えられる。

表12 セシウム-137の結果（住友運河）

測定層 [cm]	深さ [cm]	セシウム-137 [Bq/kg]
0-2	1	12.1 ± 2.32
2-4	3	-
4-6	5	6.6 ± 0.95
6-8	7	-
8-10	9	19.6 ± 2.47
10-12	11	-
12-14	13	-
14-16	15	24.8 ± 2.49
16-18	17	-
18-20	19	22.9 ± 2.43
20-22	21	-
22-24	23	-
24-26	25	23.7 ± 2.88
26-28	27	-
28-30	29	23.6 ± 2.79
30-32	31	-
32-34	33	37.7 ± 3.40
34-36	35	52.9 ± 3.67
36-38	37	27.4 ± 2.96
38-40	39	32.8 ± 2.95
40-42	41	-
42-44	43	-
44-46	45	17.5 ± 2.02
46-48	47	-
48-50	49	24.8 ± 2.75
50-52	51	-
52-54	53	-
54-56	55	13.8 ± 2.02
56-58	57	-
58-60	59	11.0 ± 1.80
60-62	61	-
62-64	63	-
64-66	65	8.8 ± 1.61
66-68	67	-
68-70	69	13.0 ± 1.90
70-72	71	-
72-74	73	-
74-76	75	14.8 ± 1.94
76-78	77	-
78-80	79	9.9 ± 1.60
80-82	81	11.5 ± 1.87
82-84	83	12.4 ± 1.78
84-86	85	-

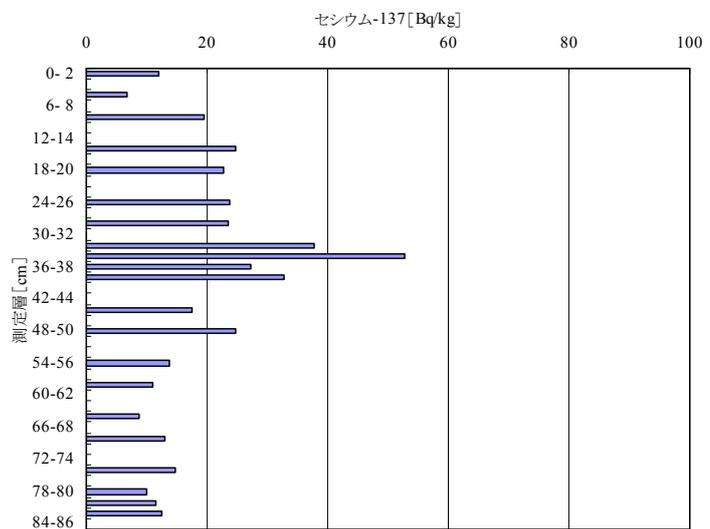


図12 セシウム-137の結果（住友運河）

表 13 鉛-210 を用いた年代測定とセシウム-137 を用いた年代測定の結果（住友運河）

測定層 [cm]	深さ [cm]	積算重量深度 [g/cm ²]	鉛-210 を用いた方法		セシウム-137 を用いた方法	
			堆積年数 [年]	西暦 [年]	堆積年数 [年]	西暦 [年]
0-2	1	0.20	0.9	2006	0.8	2006
2-4	3	0.67	2.8	2004	2.8	2004
4-6	5	1.22	5.1	2002	5.1	2002
6-8	7	1.83	7.7	1999	7.6	1999
8-10	9	2.45	10.3	1997	10.1	1997
10-12	11	3.07	12.9	1994	12.7	1994
12-14	13	3.68	15.4	1992	15.2	1992
14-16	15	4.27	18.0	1989	17.7	1989
16-18	17	4.90	20.6	1986	20.3	1987
18-20	19	5.54	23.3	1984	22.9	1984
20-22	21	6.14	25.8	1981	25.4	1982
22-24	23	6.76	28.4	1979	27.9	1979
24-26	25	7.39	31.1	1976	30.6	1976
26-28	27	8.03	33.7	1973	33.2	1974
28-30	29	8.67	36.4	1971	35.9	1971
30-32	31	9.33	39.2	1968	38.6	1968
32-34	33	9.99	42.0	1965	41.3	1966
34-36	35	10.64	44.7	1962	44.0	1963
36-38	37	11.32	47.5	1959	—	—
38-40	39	12.05	50.6	1956	—	—
40-42	41	12.86	54.0	1953	—	—
42-44	43	13.73	57.6	1949	—	—
44-46	45	14.90	62.6	1944	—	—
46-48	47	16.25	68.2	1939	—	—
48-50	49	17.39	73.0	1934	—	—
50-52	51	18.40	77.3	1930	—	—
52-54	53	19.42	81.6	1925	—	—
54-56	55	20.44	85.8	1921	—	—
56-58	57	21.31	89.5	1917	—	—
58-60	59	22.29	93.6	1913	—	—
60-62	61	23.68	99.5	1908	—	—
62-64	63	25.48	107.0	1900	—	—
64-66	65	27.42	—	—	—	—
66-68	67	29.15	—	—	—	—
68-70	69	30.57	—	—	—	—
70-72	71	31.90	—	—	—	—
72-74	73	33.25	—	—	—	—
74-76	75	34.77	—	—	—	—
76-78	77	36.35	—	—	—	—
78-80	79	37.88	—	—	—	—
80-82	81	39.46	—	—	—	—
82-84	83	41.09	—	—	—	—
84-86	85	42.84	—	—	—	—
平均重量堆積速度 [g/cm ² /年]			0.238		0.242	
平均堆積速度 (0-2cm 層の環境条件) [cm/年]			1.18		1.19	

※40cm 以深は、堆積過程が異なると考えられるため参考値

1-6-2 ダイオキシン類分析結果

(1) ダイオキシン類濃度

1) 富岩運河

富岩運河における底質の層別のダイオキシン類濃度は、表 15 のとおりである。

2000 年代は 800pg-TEQ/g であったが、1960 年代が 4,900pg-TEQ/g で最も高く、次いで 1970 年代が 4,100pg-TEQ/g であった。

また、1950 年代以前は 180～200pg-TEQ/g であり、1960 年代以降の層と比較すると非常に低い濃度であった。

表 15 底質の層別のダイオキシン類濃度（富岩運河）

分析層	測定層 [cm]	堆積年代測定結果	ダイオキシン類濃度 [pg-TEQ/g]
第 1 層	0-2	2000 年代	800
第 2 層	16-18	1990 年代	1,300
第 3 層	28-30	1980 年代	1,600
第 4 層	44-46	1970 年代	4,100
第 5 層	60-62	1960 年代	4,900
第 6 層	72-74	(1950 年代)	180
第 7 層	84-86	(1940 年代)	200

※第 6 層及び第 7 層については、上層と比較して急激な含水率及び鉛-210 濃度の変化がみられたことから、1960 年代以降の堆積過程と異なる可能性があるため、1960 年代以降の堆積年代測定結果から算出した堆積速度を当てはめて堆積年代を算出した。そのため、年代測定結果の妥当性に注意が必要であり、ここでは、堆積年代を参考値として（ ）内に示した。

2) 住友運河

住友運河における底質の層別のダイオキシン類濃度は、表 16 のとおりである。

2000 年代は 150pg-TEQ/g であったが、1970 年代が 930pg-TEQ/g で最も高く、次いで 1960 年代が 390 pg-TEQ/g であった。

また、1950 年代以前は 1.5～140pg-TEQ/g であった。

表 16 底質の層別のダイオキシン類濃度（住友運河）

分析層	測定層 [cm]	堆積年代測定結果	ダイオキシン類濃度 [pg-TEQ/g]
第 1 層	0-2	2000 年代	150
第 2 層	10-12	1990 年代	290
第 3 層	18-20	1980 年代	430
第 4 層	26-28	1970 年代	930
第 5 層	34-36	1960 年代	390
第 6 層	40-42	(1950 年代)	140
第 7 層	82-84	(-)	1.5

※第 6 層については、上層と比較して急激な含水率及び鉛-210 濃度の変化がみられたことから、1960 年代以降の堆積過程と異なる可能性があるため、1960 年代以降の分析結果から算出した堆積速度を当てはめて堆積年代を算出した。そのため、年代測定結果の妥当性に注意が必要であり、ここでは、堆積年代を参考値として（ ）内に示した。また、第 7 層について、1960 年代以降の堆積速度を当てはめると、堆積年代が 1900 年以前となり住友運河の開削（昭和 15 年）以前となるため、ここでは数値を示さなかった。

(2) ダイオキシン類の異性体組成比

1) 富岩運河

富岩運河における底質のダイオキシン類の異性体組成別濃度（TEQ 値）は表 17 のとおりで、すべての層において概ね同じパターンの異性体組成比であった。

主要な異性体は 1,2,3,7,8-PeCDD、1,2,3,6,7,8-HxCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、1,2,3,4,7,8-HxCDF、1,2,3,4,6,7,8-HpCDF で、特に 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 及び 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF が大きな割合を占めていた。

また、どの層においてもコプラナーPCB（#77～#189）の占める割合は低くなっていた。

2) 住友運河

住友運河における底質のダイオキシン類の異性体組成別濃度（TEQ 値）は表 18 のとおりで、第 5 層を除いた各層においては概ね同じパターンの異性体組成比であった。

主要な異性体は 1,2,3,6,7,8-HxCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、2,3,4,7,8-PeCDF、1,2,3,4,7,8-HxCDF 及び 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF で、特に 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD 及び 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF が大きな割合を占めており、この傾向は富岩運河と同様であった。

住友運河の第 5 層については他の調査層と異なる異性体組成を示しており、1,2,3,7,8-PeCDD、1,2,3,4,6,7,8-HpCDD、2,3,4,7,8-PeCDF 及び 1,2,3,4,6,7,8-HpCDF の割合が高くなっていた。

また、第 1 層～第 3 層、第 5 層～第 6 層についてはコプラナーPCB（#126）も確認された。

表 17 ダイオキシン類の異性体組成別濃度 (富岩運河)

分析層	測定層/ 堆積年代	濃度 [pg-TEQ/g]	異性体組成別濃度 [pg-TEQ/g]
第1層	0-2cm 2000年代	800	
第2層	16-18cm 1990年代	1,300	
第3層	28-30cm 1980年代	1,600	
第4層	44-46cm 1970年代	4,100	
第5層	60-62cm 1960年代	4,900	
第6層	72-74cm (1950年代)	180	
第7層	84-86cm (1940年代)	200	

表 18 ダイオキシン類の異性体組成別濃度（住友運河）

分析層	測定層/ 堆積年代	濃度 [pg-TEQ/g]	異性体組成別濃度 [pg-TEQ/g]
第1層	0-2cm 2000年代	150	
第2層	10-12cm 1990年代	290	
第3層	18-20cm 1980年代	430	
第4層	26-28cm 1970年代	930	
第5層	34-36cm 1960年代	390	
第6層	40-42cm (1950年代)	140	
第7層	82-84cm (-)	1.5	

1-7 底質汚染の発生時期等の考察

1-7-1 富岩運河

富岩運河における底質中のダイオキシン類堆積状況の推移は、図 13 のとおりである。1950 年代以前は 180~200pg-TEQ/g と低いが、1960 年代から 1970 年代にかけて急激に増加し、その後は緩やかに減少している。

このことから、富岩運河においては、1950 年代以前にはダイオキシン類による汚染はほとんどなかったが、1960 年代から 1970 年代にかけて、発生源は不明であるが、高濃度のダイオキシン類が何らかの経路により流入したものと考えられる。

現在においても、1960~1970 年代と比較して低濃度ではあるが、底質表層は環境基準を超過している。

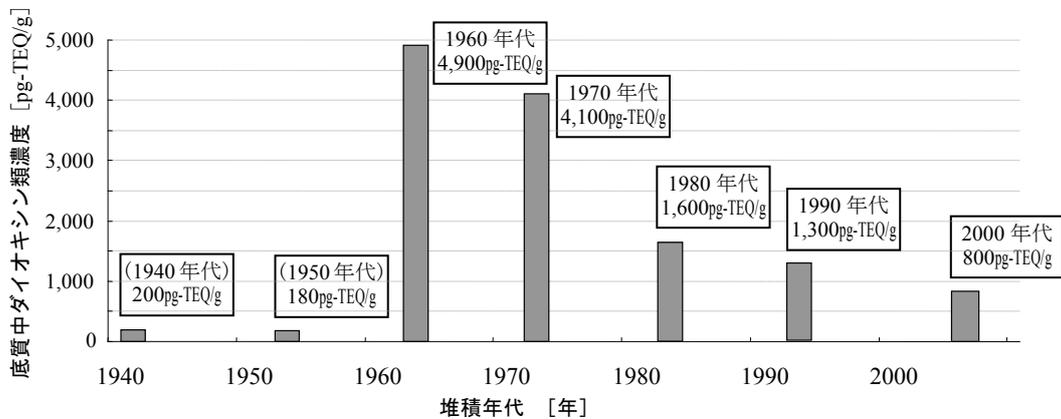


図 13 ダイオキシン類の堆積状況の推移（富岩運河）

1-7-2 住友運河

住友運河における底質中のダイオキシン類堆積状況の推移は、図 14 のとおりである。1950 年以前は 1.5~140pg-TEQ/g と低いが、1960 年代から増加し始め、1970 年代でピークとなり、その後は緩やかに減少し、現在では 150pg-TEQ/g となっている。

このことから、住友運河においても富岩運河と同様に、1950 年代以前は汚染がほとんどなかったが、1960 年代から 1970 年代にかけてダイオキシン類が流入し始めたものと考えられる。

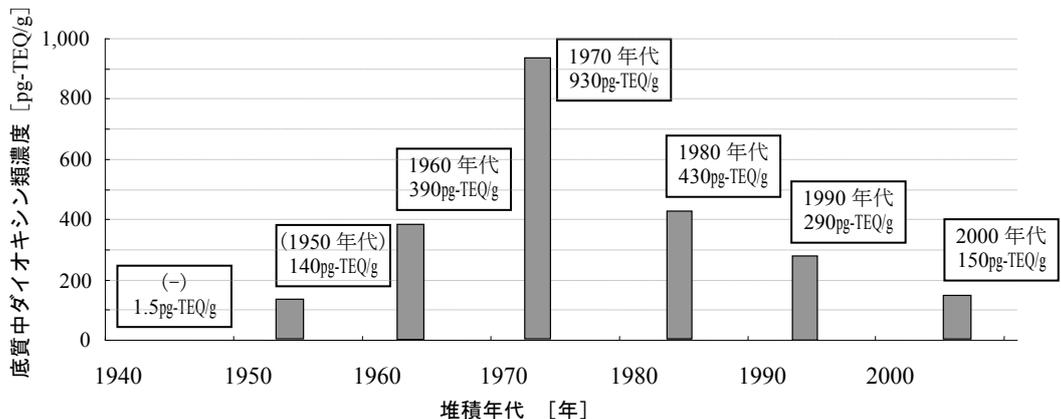


図 14 ダイオキシン類の堆積状況の推移（住友運河）

1-8 まとめ

底質堆積年代測定により、以下の事項が明らかとなった。

- ①. 富岩運河（未浚渫区間）及び住友運河における堆積年代の測定結果は概ね良好であった。
- ②. 富岩運河等におけるダイオキシン類の流入は 1960 年代から増加し、その後は緩やかに減少する傾向であった。
- ③. このことから、富岩運河等におけるダイオキシン類汚染は、1960 年代から 1970 年代にかけて高濃度のダイオキシン類が何らかの経路により流入したことによると考えられた。