

諏訪湖底質中の重金属, 有機炭素, 硫黄, リン等 14 元素の地球化学的研究

寺島 滋* 井内美郎** 中尾征三** 米谷 宏***

TERASHIMA, S., INOUCHI, Y., NAKAO, S. and YONETANI, H. (1990) Geochemistry of fourteen elements in bottom sediments from Lake Suwa, Central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 41(4), p. 147-172.

Abstract: Iron, manganese, copper, lead, zinc, cobalt, nickel, chromium, vanadium, beryllium, lithium, sulfur, organic carbon and phosphorous were analyzed by atomic absorption spectrometry, infrared absorption spectrometry (S and org. C) or spectrophotometry (P) for 241 bottom surface sediments collected from Lake Suwa, one of the hypereutrophic fresh water lakes in Japan.

As for the horizontal distribution of heavy metals, iron, manganese, copper, lead, zinc, cobalt and vanadium were concentrated at several points which are located in the shore side of the lake. These data suggest that the heavy metals are accumulated more actively in the near shore area than the central area. Sulfur, organic carbon and phosphorous were not concentrated in the near shore area.

The elements, such as copper, lead, zinc, nickel, chromium, organic carbon and phosphorous were concentrated clearly in the upper layer of the lake sediments, while iron, manganese, cobalt, vanadium, beryllium, lithium and sulfur behaved in different manner. It is considered that the high content of the former seven elements in the upper layer sediments may be caused mainly by the recent environmental pollution.

In the processes of fixation and diffusion of heavy metals in the oxidized or reduced sediment layer, it may play the important role that the deposition and dissolution of the oxides and/or hydroxides for iron and manganese, and those of sulfides for copper, lead and zinc. The effect of migration of heavy metals on forming the vertical distribution during diagenesis is evaluated to be small in the Lake Suwa bottom sediments.

Average background values of the fourteen elements were calculated from the unpolluted sediment samples, and the data are compared with those of the lake sediments of other regions. Although contents of most elements in the Lake Suwa sediments are more or less similar to those of other lakes, vanadium is significantly abundant in the Lake Suwa sediments. It is considered that background values of elements in lake sediments have been controlled by the geological characteristics of catchment area as well as the dimension of the lake and catchment area, sedimentation rate and lake water environments.

1. はじめに

河川水等を通して湖内に流入した各種元素がどのような挙動を示すかを研究することは, 単に湖沼汚染の問題ばかりでなく, 岩石や鉱物の風化に伴う元素の移動, 堆積過程や堆積後の続成作用に伴う変化を解明するうえで極めて重要な課題である。地質調査所では, これまでに霞ヶ浦や琵琶湖, 野尻湖等を中心に底質の堆積機構や各種元素の地球化学的挙動に関する諸研究を実施しており(例えば井内ほか, 1983, 1984, 1985, 1986, 1989; 寺島

ほか, 1986, 1989; TERASHIMA *et al.*, 1983), 平成2年度からは新しいプロジェクトとして国立機関公害防止特別研究「湖沼汚染底質の浄化手法に関する研究」が開始されることになっている。

諏訪湖は長野県のほぼ中央部にあり, 古くは山紫水明の湖とされていた。その後, 周辺の諏訪市, 下諏訪町, 岡谷市等から流入する都市下水や工場排水, し尿処理水等の増加によって著しく汚染され, 一時は日本で最も汚染された湖とされたこともあった。しかし, 最近では下水道の整備や汚染底質の浚渫等によって水質・底質の汚染状況は改善されつつあると言われている(沖野, 1984)。

* 地殻化学部 ** 海洋地質部 *** 元地殻化学部

第1表 諏訪湖の概要(沖野, 1984による)

Table 1 Some informations on Lake Suwa.

(a) 諏訪湖

成因: 断層湖

湖沼型: 調和型, 富栄養湖

位置: 東経 136 度 05 分, 北緯 36 度 03 分, 標高 759 m

湖盆形態: 湖面積 $1.33 \times 10^7 \text{ m}^2$

湖岸線 $1.59 \times 10^4 \text{ m}$

肢節量 1.3

最大水深 6.8 m, 平均水深 4.7 m

貯水量 $6.5 \times 10^7 \text{ m}^3$

湖水の滞留時間 38.8 日 (年平均)

(b) 集水域

面積: $52.8 \times 10^7 \text{ m}^2$

標高: 759-2,899 m

土地利用の内容: 耕地 18% (水田: 61%, 畑: 39%)

森林 58%

湿原, 草地 12%

その他 12%

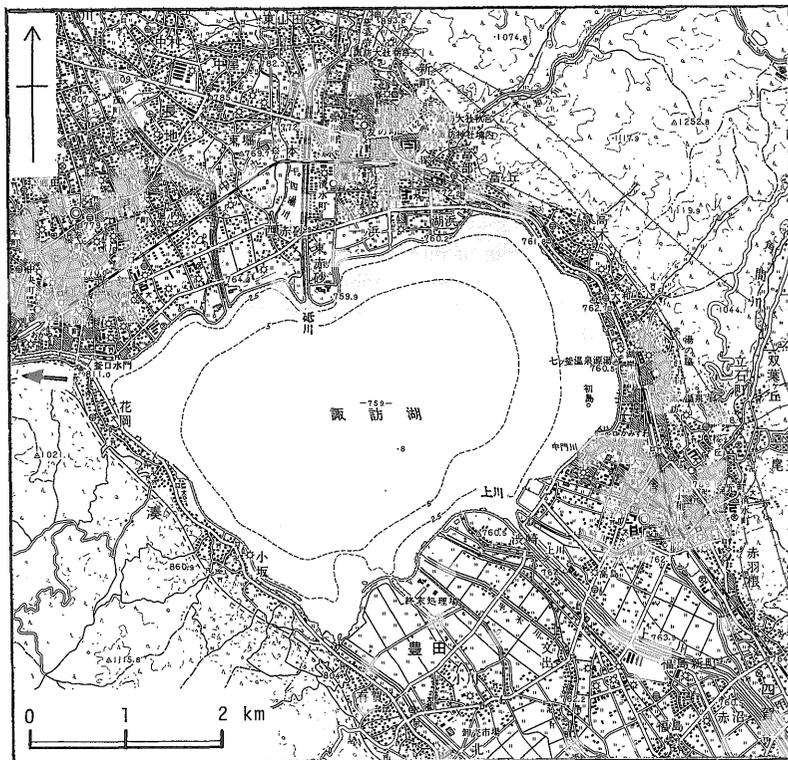
降水量: $730 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{y}^{-1}$, 流出率 77%

本研究は, 地質調査所における新プロジェクトの予察的な研究目的もあって, 諏訪湖の全域から採取した柱状又は表層試料中の重金属や有機炭素, 硫黄, りん等 14 元素を分析し, 現時点における諏訪湖の底質状況の全容を把握し, 浄化手法の設定における基礎的データを取得すると共に, 各元素の水平・鉛直分布の特徴や続成作用に伴う移動, 自然バックグラウンド値の評価等について検討した結果をとりまとめたものである。

本研究を行うに当り, 試料採取は主として安間 恵海洋調査部長をはじめとする川崎地質株式会社の方々に実施していただいた。厚く御礼申し上げる。

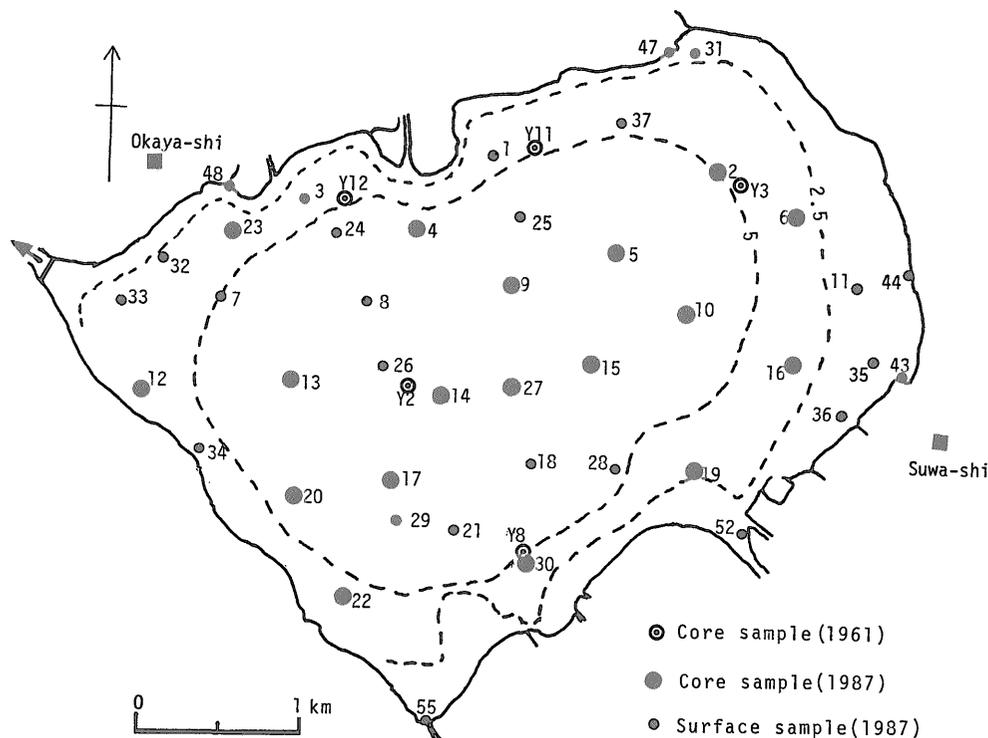
2. 諏訪湖の概要

諏訪湖は, 長野県下の断層盆地内に形成された富栄養型の淡水湖である(第1表)。湖面積については, 1957-1967年の理科年表では 14.5 km^2 とされていたが, 近年湖岸部の人為的な埋立て等がすすみ, 沖野(1984)によれば 13.3 km^2 に減少している。また, 平均水深は 4.7 m , 最大水深は 6.8 m とされているが, 1969年以降湖



第1図 諏訪湖周辺の概要(国土地理院発行1/50,000地形図に加筆)

Fig.1 Index map of Lake Suwa, Nagano-Ken, Japan.



第 2 図 諏訪湖堆積物試料の採取位置
Fig. 2 Sampling stations of bottom sediments in Lake Suwa.

岸部を中心に浚渫が行われており、正確な湖盆図の作成は行われていないとのことである (沖野, 1984)。

諏訪湖には、大小合せて 26 の河川が流入しておりその全集水域は 528 km² に達する。最大河川は南部から流入する上川である (第 1 図) が、その後背地には八ヶ岳、蓼科山、霧ヶ峰等を形成する第四紀の火山岩類とこれらに関係する岩屑や火山灰層が広く分布する。湖の北部から流入する砥川の水源に近い和田峠周辺および北東部の茅野市付近には新第三紀の石英閃緑岩-花崗岩類が、中央構造線に沿っては堆積岩類や変成岩類も分布する。湖水は、湖の北西部にある釜口水門から天竜川となって流出している。

3. 試料と分析方法

3.1 試料

柱状試料は、井内ほか (1987) により新しく開発された人力押し込み式の簡易軽量採泥器 (コア長 1 m, 内径 60 mm) を使用し、1987 年 12 月 1-4 日に湖内の全域 37 地点 (第 2 図) から長さ 40-90 cm の柱状試料を採取した。またこれとは別に湖岸部の 6 地点から表層堆積物

(0-5 cm) を採取した。

柱状試料は分割した後に風乾し、湖岸部の底質については混入している砂粒子等を除くため 80 メッシュのふるいを通させた後風乾し、いずれもめのう粉砕機で 150 メッシュ以下に粉砕して分析試料とした。

なお、人為的影響等を評価する目的で米谷 (1967) によって 1961 年に採取された 5 本の柱状試料についても分析したが、これら試料の採取位置も第 2 図に示した。

3.2 分析方法

鉄、マンガン、銅、鉛、亜鉛、コバルト、ニッケル、クロム、バナジウム、ベリリウム、リチウム: 試料 0.5 g を白金ざらに取り、過塩素酸 4 ml、硝酸 5 ml、ふっ化水素酸 8 ml を加え、加熱分解した後蒸発乾固した。塩酸 (1+1) 2.5 ml と水約 5 ml を加え、加温溶解した後メスフラスコ (25 ml) に移し入れ、水で定容とし、バナジウムとベリリウムは亜酸化窒素-アセチレンフレーム、その他の元素は空気-アセチレンフレームを用いる原子吸光法で測定した。この際鉛、亜鉛、コバルト、ニッケルの定量ではバックグラウンド吸収の補正を実施した。

りん: 上記試料溶液の一部 (2-5 ml) を正しくメスフ

第2表 1987年に採取した堆積物の分析結果

Table 2 Analytical results for the sediments collected in 1987.

Sample No.	Station No.	Location (cm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)	P (%)
1	1	0-1	5.24	1430	145	54	366	21	78	142	130	1.3	40	4.57	0.27	0.43
2	(3.3 m)*	2-5	4.82	830	161	58	381	20	80	161	149	1.2	39	4.08	0.32	0.38
3	2	0-1	5.02	900	198	71	463	20	119	320	147	1.4	50	4.77	0.38	0.24
4	(4.65 m)*	1-2	5.18	1350	174	49	381	20	91	184	161	1.1	51	5.16	0.29	0.27
5		2-5	5.44	1190	159	55	363	22	106	173	142	1.4	51	4.98	0.27	0.26
6		5-10	4.76	730	202	70	460	19	119	306	145	1.3	50	4.89	0.41	0.22
7		10-15	5.07	840	180	67	468	21	123	370	151	1.1	49	4.48	0.51	0.21
8		15-20	5.19	1010	118	48	263	21	58	192	155	1.1	50	3.99	0.51	0.20
9		20-25	5.80	1480	83	44	228	21	53	83	152	1.3	55	3.93	0.32	0.20
10		30-35	6.30	1550	66	30	131	22	57	70	161	1.3	56	3.01	0.29	0.18
11		40-45	6.00	1270	65	24	115	22	59	68	165	1.4	63	2.99	0.44	0.16
12		50-55	5.67	1230	63	21	105	22	62	72	164	1.4	66	3.11	0.29	0.15
13		60-65	5.20	1070	64	19	106	19	57	70	164	1.4	64	3.40	0.33	0.15
14		70-75	4.95	1000	59	21	109	20	52	62	160	1.4	80	3.46	0.26	0.15
15	3	0-1	5.20	1210	100	47	260	20	80	105	121	1.3	39	3.47	0.17	0.18
16	(3.55 m)*	2-5	5.00	960	96	50	229	24	77	98	136	1.3	37	3.29	0.22	0.15
17	4	0-1	4.84	720	57	19	122	21	40	41	142	1.2	30	3.11	0.35	0.12
18	(4.45 m)*	2-5	4.74	720	50	18	109	20	31	35	137	1.1	21	2.88	0.36	0.11
19		5-10	4.70	740	52	19	111	20	31	30	138	1.3	20	2.38	0.24	0.12
20		10-15	4.49	720	79	25	181	19	40	50	130	1.3	27	3.58	0.47	0.41
21		20-25	4.52	650	102	34	232	19	59	104	132	1.2	28	3.19	0.55	0.33
22		35-41	4.94	780	72	29	157	19	46	114	139	1.2	24	2.66	0.40	0.14
23	5	0-1	4.72	750	163	60	400	18	110	306	140	1.2	39	4.41	0.49	0.26
24	(5.75 m)*	1-2	5.19	1160	122	36	248	20	85	142	150	1.2	41	4.85	0.36	0.28
25		2-5	5.20	860	111	36	229	20	96	130	151	1.3	41	4.61	0.31	0.25
26		5-10	4.84	670	121	37	250	21	99	154	155	1.2	40	4.32	0.36	0.24
27		10-15	4.71	740	165	55	377	19	97	210	140	1.1	43	4.70	0.45	0.33
28		15-20	4.50	750	204	62	476	20	102	296	149	1.1	42	4.56	0.43	0.35
29		20-25	4.70	740	124	43	282	19	77	291	144	1.0	36	3.84	0.57	0.20
30		30-35	4.55	1130	79	31	177	19	40	72	146	1.2	37	4.35	0.30	0.19
31		40-45	5.22	1430	69	31	166	19	52	61	141	1.2	44	3.55	0.25	0.19
32		50-55	6.14	1450	66	29	112	21	57	74	162	1.3	47	2.56	0.26	0.17
33		60-65	5.90	1280	65	22	114	20	52	72	166	1.3	57	2.80	0.29	0.16
34		70-75	5.76	2060	56	21	100	21	59	77	160	1.4	60	n. d.	n. d.	0.16
35	6	0-1	5.50	1300	150	45	370	24	105	150	142	1.3	54	4.70	0.29	0.22
36	(2.6 m)*	2-5	5.89	1730	151	45	376	23	105	149	135	1.4	55	4.80	0.27	0.23
37		5-10	5.18	1010	170	56	470	23	123	184	160	1.2	60	4.80	0.38	0.21
38		10-15	5.20	1030	176	61	488	24	125	270	169	1.3	57	4.58	0.53	0.21
39		15-20	5.28	1210	128	49	320	23	57	142	168	1.3	56	4.46	0.43	0.21
40		20-25	5.41	1270	92	45	252	23	51	72	168	1.2	62	4.39	0.32	0.19
41		30-35	5.71	1160	68	23	110	23	52	55	168	1.3	59	3.35	0.39	0.16
42		40-45	5.49	1170	62	22	107	22	48	50	166	1.3	58	3.73	0.44	0.17
43		50-55	5.72	1080	62	15	92	22	60	67	172	1.3	67	3.87	0.28	0.17
44		60-67	5.42	1010	63	14	93	21	65	68	170	1.3	69	3.83	0.23	0.17
45	7	0-1	5.39	1730	140	56	346	21	120	215	135	1.2	48	4.40	0.21	0.39
46	(4.45 m)*	2-5	5.48	1340	137	60	324	22	124	205	138	1.5	42	4.43	0.28	0.39
47	8	0-1	4.63	1130	146	49	348	19	97	218	138	1.2	43	4.56	0.38	0.33
48	(5.75 m)*	2-5	5.11	1040	121	45	258	20	92	146	145	1.4	47	4.21	0.27	0.31
49	9	0-1	4.60	770	137	43	312	20	93	162	152	1.2	44	4.49	0.37	0.30
50	(6.1 m)*	1-2	4.68	1000	138	35	291	21	81	153	151	1.1	40	4.71	0.34	0.30
51		2-5	4.90	1030	112	32	230	20	94	123	159	1.2	53	4.69	0.30	0.27

諏訪湖底質中 14 元素の地球化学的研究 (寺島 ほか)

第 2 表 つづき
Table 2 continued

Sample No.	Station No.	Location (cm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)	P (%)
52		5-10	4.62	770	111	32	231	20	94	138	160	1.2	41	4.34	0.32	0.26
53		10-15	4.24	750	170	52	411	19	93	215	152	1.1	49	4.58	0.42	0.35
54		15-20	3.85	610	198	61	470	18	97	338	152	1.1	37	4.37	0.56	0.24
55		20-25	4.35	770	119	39	270	19	75	272	165	1.1	35	3.75	0.62	0.19
56		30-35	4.34	960	68	16	108	19	31	50	179	0.9	30	4.44	0.40	0.19
57		40-45	4.65	1220	63	28	147	18	46	51	155	1.0	44	3.36	0.28	0.17
58		50-55	5.06	1350	62	27	111	19	53	57	170	1.1	47	2.61	0.27	0.15
59		60-65	5.15	1180	60	19	90	20	64	64	189	1.2	49	2.20	0.34	0.15
60	10	0-1	5.17	1150	106	28	208	19	97	114	158	1.1	44	4.58	0.24	0.25
61	(5.55 m)*	2-5	4.95	900	103	35	193	24	101	121	165	1.3	40	4.35	0.28	0.23
62		5-10	4.86	750	106	32	193	27	107	145	172	1.2	40	4.12	0.31	0.22
63		10-15	4.47	720	142	44	317	22	88	165	161	1.2	46	4.60	0.45	0.31
64		20-25	4.40	700	182	73	452	20	110	330	163	1.0	45	4.26	0.51	0.24
65		30-35	4.63	930	70	10	107	22	31	68	204	1.0	28	3.60	0.44	0.18
66		40-45	5.23	1300	79	36	180	20	45	76	170	1.2	54	3.82	0.26	0.20
67		50-55	5.50	1430	70	30	148	23	43	76	171	1.1	54	3.05	0.26	0.18
68		55-61	5.81	1350	72	24	110	22	52	84	182	1.2	55	2.42	0.28	0.17
69	11	0-1	5.13	1220	129	35	305	22	90	90	144	1.3	65	4.67	0.29	0.20
70	(2.35 m)*	2-5	5.31	1300	126	36	285	22	88	94	143	1.4	59	4.79	0.32	0.21
71	12	0-1	5.13	1750	147	59	370	22	108	278	153	1.2	58	4.74	0.28	0.29
72	(3.2 m)*	2-5	5.05	1280	138	56	340	20	98	231	153	1.2	49	4.43	0.24	0.26
73		5-10	4.78	850	156	63	382	21	105	281	151	1.1	50	4.62	0.30	0.28
74		10-15	4.24	770	177	78	466	21	131	465	160	1.1	47	4.32	0.48	0.18
75		20-25	5.15	1350	91	52	238	20	65	192	162	1.3	51	3.33	0.36	0.17
76		30-35	5.88	1910	62	40	160	23	58	69	167	1.4	53	2.69	0.27	0.17
77		40-45	5.68	1450	62	23	108	21	66	64	188	1.4	65	2.53	0.44	0.14
78		50-55	4.91	1260	60	17	106	20	56	58	176	1.3	82	2.68	0.26	0.14
79		60-65	4.70	1160	55	19	107	19	50	53	172	1.2	75	2.97	0.36	0.14
80		70-75	4.62	1130	51	15	108	18	46	49	171	1.2	75	n. d.	n. d.	0.13
81		75-80	4.85	1030	61	14	119	19	34	55	169	1.2	69	2.96	0.34	0.13
82	13	0-1	5.00	1380	148	53	331	18	96	201	145	1.1	43	4.72	0.32	0.36
83	(5.35 m)*	2-5	4.85	950	136	48	298	19	93	168	150	1.0	43	4.39	0.30	0.35
84		5-10	4.30	750	158	56	362	18	103	220	150	1.0	44	4.40	0.36	0.26
85		10-15	4.29	690	190	73	464	16	115	436	157	1.1	40	4.07	0.57	0.21
86		15-20	4.20	810	160	47	375	18	76	268	141	1.1	39	3.34	0.53	0.33
87		20-25	4.90	1200	85	43	197	18	55	129	158	1.0	45	3.32	0.34	0.19
88		30-35	5.03	1460	63	35	148	18	46	63	157	1.3	45	2.75	0.19	0.16
89		40-45	5.88	1780	64	30	116	19	62	83	172	1.3	47	2.29	0.21	0.16
90		50-55	6.24	1820	62	27	110	22	62	80	188	1.4	67	2.22	0.32	0.16
91		65-70	5.60	1470	62	23	108	23	64	82	180	1.4	67	2.52	0.25	0.16
92	14	0-1	5.09	1110	123	58	265	19	89	136	152	1.2	42	4.70	0.35	0.33
93	(6.25 m)*	2-5	5.10	980	123	42	264	19	95	140	157	1.3	57	4.31	0.33	0.30
94		5-10	4.83	820	148	51	349	20	96	189	150	1.1	42	4.35	0.45	0.30
95		10-15	4.28	700	175	64	441	19	108	342	145	1.0	48	4.08	0.51	0.25
96		15-20	5.72	1170	103	43	260	22	72	214	167	1.2	46	3.68	0.51	0.18
97		20-25	4.71	930	65	20	98	18	36	61	188	1.1	26	4.19	0.43	0.19
98		30-35	4.90	1190	64	34	146	18	47	64	151	1.2	42	3.16	0.21	0.17
99		40-45	4.74	1200	61	23	111	17	38	49	149	1.3	39	3.59	0.23	0.16
100		50-55	5.61	1340	65	28	110	22	60	81	170	1.4	45	2.33	0.23	0.15
101		65-69	6.19	1790	61	24	96	19	61	79	180	1.4	49	2.25	0.26	0.14
102	15	0-1	5.21	1000	81	26	152	22	78	112	186	1.3	32	3.82	0.25	0.19

地質調査所月報(第41巻第4号)

第2表 つづき
Table 2 continued

Sample No.	Station No.	Location (cm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org.C (%)	S (%)	P (%)
103	(5.6 m)*	2-5	5.40	990	89	28	176	22	88	110	191	1.3	38	3.82	0.23	0.20
104		5-10	5.18	830	74	25	150	23	79	103	188	1.3	41	3.18	0.21	0.16
105		10-15	5.30	830	84	22	135	22	89	121	191	1.2	29	3.95	0.26	0.17
106		20-25	5.06	770	88	27	181	18	62	155	188	1.3	32	3.36	0.44	0.18
107		30-35	5.00	790	63	17	100	19	43	72	193	1.1	22	3.34	0.36	0.15
108		40-45	5.01	1240	55	14	94	17	30	40	195	1.1	21	3.38	0.31	0.15
109		55-61	5.32	1310	67	35	142	19	52	62	155	1.3	45	3.22	0.24	0.17
110	16	0-1	5.90	1150	120	37	333	23	86	100	159	1.3	53	4.96	0.33	0.18
111	(2.5 m)*	2-5	5.78	910	103	39	285	26	71	86	172	1.3	55	3.86	0.65	0.17
112		5-10	5.27	770	72	27	131	22	54	66	180	1.4	51	3.35	0.86	0.16
113		10-15	5.25	780	68	23	110	20	54	65	181	1.4	48	3.40	0.53	0.15
114		20-25	4.66	700	64	20	146	22	48	66	182	1.2	50	3.88	0.32	0.15
115		30-35	4.64	680	63	19	110	21	52	69	181	1.5	53	4.19	0.30	0.16
116		40-45	4.58	690	62	16	105	21	55	70	184	1.7	53	4.15	0.27	0.16
117		50-55	4.61	750	62	15	102	20	55	78	180	1.5	56	4.09	0.24	0.15
118		60-65	4.62	720	63	23	145	22	60	80	188	1.5	60	4.10	0.27	0.16
119		70-77	4.69	1180	61	16	119	22	53	66	182	1.4	67	4.19	0.29	0.16
120	17	0-1	4.98	950	130	42	313	23	89	167	161	1.3	40	4.57	0.33	0.32
121	(6.15 m)*	2-5	4.96	940	131	41	303	19	89	155	160	1.4	41	4.46	0.31	0.32
122		5-10	4.88	1040	127	42	305	19	89	156	160	1.4	41	4.57	0.38	0.35
123		10-15	4.56	700	137	45	358	18	90	180	152	1.4	40	4.39	0.48	0.32
124		20-25	4.58	850	90	41	223	19	55	159	163	1.4	46	3.54	0.42	0.21
125		30-35	4.80	1190	62	30	150	18	43	57	160	1.3	44	2.83	0.22	0.15
126		40-45	5.51	1360	64	26	111	22	60	80	182	1.4	55	2.04	0.26	0.16
127		50-55	5.67	1480	63	22	120	22	58	68	190	1.6	58	2.40	0.27	0.16
128		60-65	5.10	1210	63	19	108	22	58	70	184	1.6	63	2.68	0.29	0.16
129		70-75	4.88	1060	59	19	110	22	51	61	178	1.5	69	2.77	0.61	0.15
130		80-85	4.60	1010	54	16	110	19	50	54	169	1.0	67	2.90	0.32	0.14
131	18	0-1	4.71	1130	106	38	239	20	76	110	144	1.1	40	5.17	0.31	0.31
132	(6.35 m)*	2-5	4.73	840	108	36	226	20	82	139	177	1.4	48	4.26	0.26	0.25
133	19	0-1	5.08	780	76	20	177	19	50	63	188	1.2	30	4.06	0.24	0.17
134	(2.0 m)*	2-5	4.90	760	57	13	125	20	44	57	192	1.2	22	3.52	0.29	0.13
135		5-10	5.08	900	69	20	152	24	52	63	198	1.5	31	3.23	0.20	0.14
136		10-15	5.00	940	81	20	172	23	61	81	190	1.4	30	3.93	0.19	0.16
137		20-25	5.19	940	70	20	154	24	72	99	197	1.3	27	3.38	0.19	0.15
138		35-41	4.87	950	65	14	120	24	52	80	202	1.3	21	4.11	0.27	0.13
139	20	0-1	5.47	1760	110	41	290	23	85	146	143	1.3	45	4.57	0.26	0.33
140	(5.15 m)*	2-5	5.21	1100	110	42	278	24	86	152	160	1.3	47	3.82	0.25	0.25
141		5-10	5.13	980	113	43	301	24	95	200	162	1.3	45	3.64	0.31	0.21
142		10-15	5.39	1500	112	42	289	23	81	165	146	1.1	44	4.44	0.31	0.30
143		20-25	5.37	1030	112	44	298	20	85	184	161	1.3	48	3.61	0.31	0.23
144		30-35	6.09	1590	63	25	122	22	62	68	187	1.7	62	2.46	0.46	0.16
145		40-45	5.62	1360	63	25	99	21	69	74	186	1.5	67	2.65	0.54	0.15
146		50-55	5.37	1250	62	24	104	20	58	69	179	1.4	73	2.80	0.44	0.15
147		60-65	5.40	1230	60	23	106	20	53	67	187	1.5	75	2.94	0.58	0.15
148		75-80	5.29	1240	54	20	105	19	42	56	173	1.4	68	3.09	0.45	0.14
149	21	0-1	5.50	1620	110	37	223	18	81	128	144	1.1	40	5.25	0.39	0.38
150	(6.4 m)*	2-5	5.10	1220	110	37	230	23	89	136	156	1.4	42	4.49	0.36	0.33
151	22	0-1	6.15	2100	106	41	230	19	87	138	158	1.2	48	4.24	0.22	0.30
152	(4.15 m)*	2-5	5.96	1300	108	44	248	21	87	152	161	1.2	50	3.85	0.23	0.24
153		5-10	5.80	1010	118	50	280	22	94	197	163	1.2	59	3.84	0.28	0.20

諏訪湖底質中 14 元素の地球化学的研究 (寺島 ほか)

第 2 表 つづき

Table 2 continued

Sample No.	Station No.	Location (cm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)	P (%)
154		10-15	5.81	1190	97	43	224	19	77	159	161	1.4	52	3.35	0.41	0.17
155		20-25	5.88	1510	61	23	104	22	58	73	172	1.5	75	2.54	0.24	0.16
156		30-35	5.62	1160	60	24	110	22	51	70	187	1.3	87	2.78	0.37	0.14
157		40-45	5.20	1150	55	19	108	21	44	59	185	1.2	72	3.06	0.30	0.14
158		55-58	5.36	1110	53	18	112	19	41	58	194	1.2	76	2.69	0.29	0.15
159	23	0-1	5.19	990	150	66	366	22	111	188	151	1.2	41	3.99	0.33	0.23
160	(3.45 m)*	2-5	5.30	1120	144	62	329	22	114	145	136	1.2	41	4.03	0.24	0.27
161		5-10	5.22	820	145	65	330	21	120	162	144	1.2	42	3.92	0.36	0.21
162		10-15	5.02	740	173	79	448	23	118	260	151	1.4	43	3.87	0.47	0.17
163		20-25	5.45	910	142	82	345	23	80	388	153	1.2	42	3.24	0.42	0.15
164		30-35	5.68	1220	66	44	174	23	65	95	153	1.3	43	2.37	0.24	0.12
165		40-45	6.06	1230	60	44	137	27	83	124	162	1.2	43	1.67	0.24	0.10
166		55-62	5.83	1660	67	54	140	28	95	128	161	1.6	46	1.57	0.08	0.11
167	24	0-1	4.70	690	145	56	350	20	94	185	144	1.1	41	4.01	0.52	0.23
168	(4.95 m)*	2-5	5.26	1130	120	45	253	23	94	115	156	1.3	45	4.18	0.25	0.30
169	25	0-1	5.67	1980	124	45	271	20	90	132	145	1.1	43	4.86	0.25	0.34
170	(5.25 m)*	2-5	5.26	1320	128	42	253	20	94	126	156	1.3	41	4.70	0.27	0.33
171	26	0-1	5.38	1110	124	47	276	19	90	207	156	1.1	40	4.42	0.51	0.28
172	(6.20 m)*	2-5	5.01	930	132	47	282	22	93	163	158	1.4	40	4.11	0.31	0.32
173	27	0-1	5.35	1100	116	39	246	20	86	143	157	1.2	42	4.56	0.30	0.29
174	(6.65 m)*	1-2	4.83	890	122	40	278	20	85	165	153	1.2	42	4.54	0.35	0.28
175		2-5	4.58	750	151	52	347	20	93	210	159	1.4	40	4.42	0.41	0.29
176		5-10	4.39	710	156	50	346	18	84	208	160	1.2	41	4.32	0.46	0.31
177		10-15	5.36	1210	68	30	120	20	55	91	177	1.2	46	2.64	0.28	0.17
178		20-25	5.13	1070	66	15	89	20	50	88	194	1.3	44	2.44	0.28	0.17
179		30-35	4.98	1220	64	11	86	20	29	53	212	1.3	36	3.48	0.46	0.18
180		40-45	5.62	1260	66	17	116	21	51	79	200	1.4	63	2.44	0.23	0.17
181		50-53	5.60	1290	60	16	96	20	50	80	184	1.3	61	2.76	0.40	0.15
182	28	0-1	5.60	1810	133	51	310	19	89	205	152	1.2	46	4.81	0.28	0.27
183	(4.6 m)*	2-5	5.36	1050	100	29	176	21	82	101	170	1.4	40	4.46	0.25	0.25
184	29	0-1	5.92	1980	114	45	257	19	86	147	150	1.2	44	4.95	0.30	0.36
185	(6.0 m)*	2-5	5.15	1180	121	44	273	21	91	168	163	1.4	45	4.24	0.29	0.32
186	30	0-1	6.06	2130	123	48	285	18	93	169	149	1.2	47	4.67	0.24	0.32
187	(4.5 m)*	2-5	5.71	1280	125	48	293	18	95	182	151	1.4	48	4.47	0.23	0.27
188		5-10	5.04	800	154	59	387	18	110	240	153	1.2	48	4.78	0.48	0.20
189		10-15	5.00	850	155	64	413	19	115	356	164	1.2	43	4.32	0.55	0.18
190		15-20	4.78	890	119	45	268	20	68	308	155	1.3	39	3.47	0.47	0.19
191		20-25	7.62	1490	54	29	172	26	50	78	192	1.3	50	2.00	0.42	0.13
192		30-35	5.98	1110	43	15	142	25	49	73	203	1.3	49	2.21	0.44	0.12
193		40-45	4.50	890	43	10	160	24	43	67	213	1.4	39	4.69	0.39	0.17
194		50-55	5.16	990	43	13	131	24	54	98	242	1.2	30	2.34	0.30	0.13
195		60-65	4.96	870	46	10	130	23	46	75	227	1.2	32	3.38	0.30	0.15
196		70-77	5.18	870	50	13	131	22	52	77	224	1.2	37	4.16	0.34	0.16
197	31	0-1	5.44	1400	126	41	279	20	67	79	155	1.2	46	4.23	0.24	0.20
198	(2.25 m)*	2-5	5.16	870	124	42	266	21	65	77	166	1.1	43	3.83	0.27	0.15
199	32	0-1	5.25	1080	119	64	411	23	72	184	142	1.3	40	3.44	0.20	0.19
200	(2.4 m)*	2-5	5.22	1140	118	66	414	22	69	182	138	1.3	49	3.62	0.22	0.18
201	33	0-1	6.60	1730	135	62	455	24	101	273	142	1.2	50	4.02	0.28	0.21
202	(2.6 m)*	2-5	6.27	1070	138	69	486	24	108	298	155	1.4	58	3.77	0.39	0.17
203	34	0-1	5.30	2100	128	50	310	19	87	205	150	1.0	43	4.77	0.25	0.31
204	(4.4 m)*	2-5	5.15	1190	128	50	310	19	92	204	152	1.2	43	4.53	0.28	0.27

地質調査所月報(第41巻 第4号)

第2表 つづき
Table 2 continued

Sample No.	Station No.	Location (cm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)	P (%)
205	35	0-1	5.22	900	155	47	361	23	76	85	153	1.2	50	5.01	0.35	0.23
206	(2.1 m)*	2-5	5.00	770	156	46	357	22	76	85	152	1.3	49	4.65	0.32	0.21
207	36	0-1	5.13	880	139	44	350	23	57	55	156	1.2	48	4.30	0.33	0.19
208	(1.95 m)*	2-5	5.25	760	150	47	359	24	60	64	170	1.3	47	4.12	0.36	0.19
209	37	0-1	5.53	2380	141	49	312	20	91	144	144	1.2	47	5.18	0.26	0.34
210	(4.25 m)*	2-5	5.01	1080	98	31	196	20	82	96	173	1.2	44	4.52	0.23	0.24
211	43	0-5	5.00	1050	181	58	461	25	68	71	146	1.5	50	n.d.	n.d.	0.23
212	44	0-5	5.12	1090	145	53	392	29	81	75	144	1.5	53	n.d.	n.d.	0.23
213	47	0-5	5.46	840	105	65	197	24	33	57	158	1.6	40	n.d.	n.d.	0.17
214	48	0-5	5.56	970	118	44	323	22	57	140	160	0.9	23	n.d.	n.d.	0.18
215	52	0-5	6.92	1360	61	19	166	30	48	90	271	1.2	22	n.d.	n.d.	0.12
216	55	0-5	4.38	750	80	60	380	17	25	40	110	1.4	33	n.d.	n.d.	0.20

* Water depth. n.d. : Not determined.

第3表 1961年に採取した堆積物の分析結果

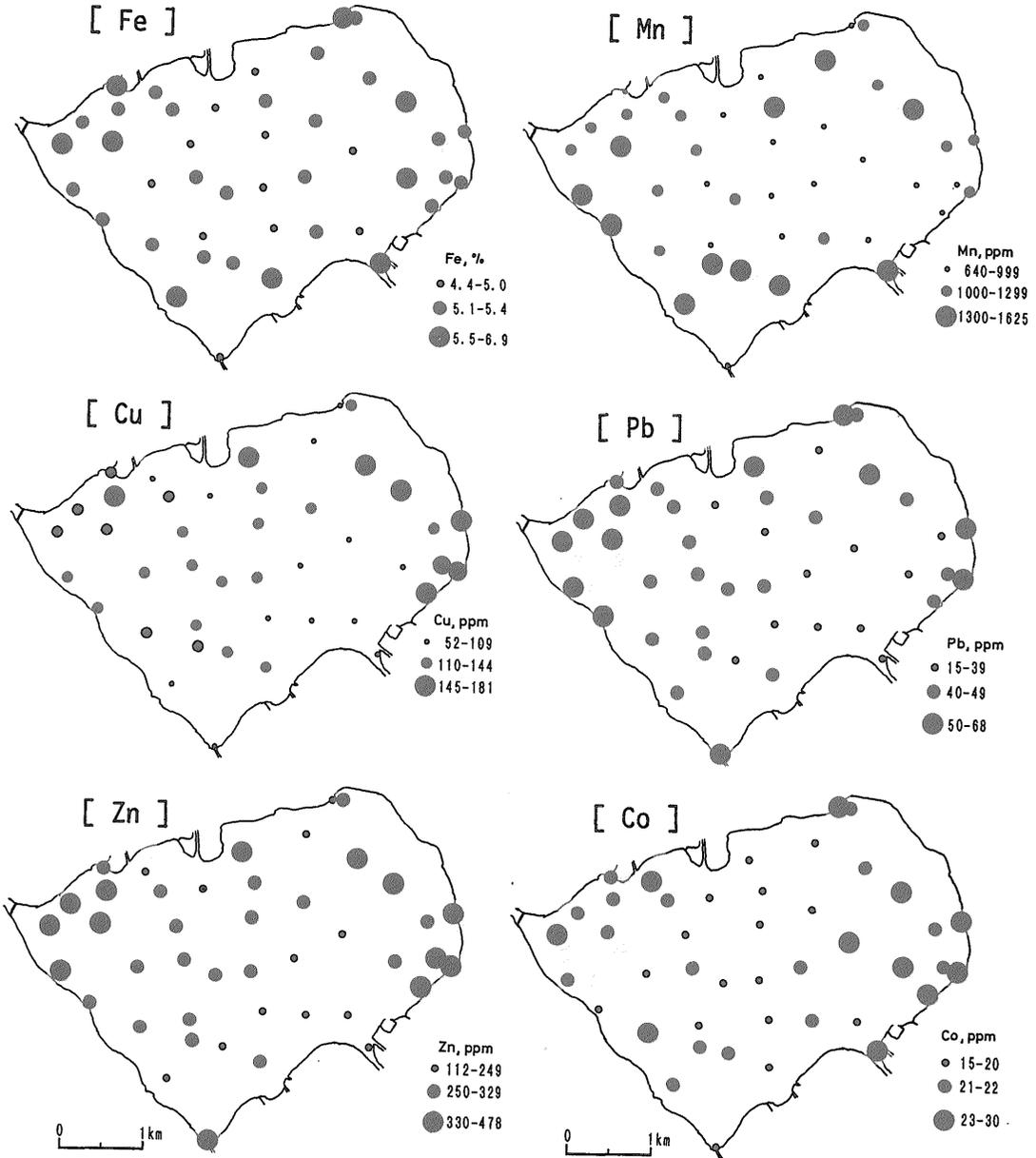
Table 3 Analytical results for the sediments collected in 1961.

Sample No.	Station No.	Location (cm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)
217	Y 2	0-15	4.81	1150	65	27	108	17	29	50	174	1.3	28	4.17	0.35
218		15-30	5.08	1350	64	33	141	16	40	55	158	1.4	43	3.25	0.22
219		30-45	5.56	1350	63	32	116	19	47	62	158	1.4	45	2.56	0.23
220		45-60	5.76	1610	63	27	110	18	47	61	174	1.4	55	2.52	0.22
221		60-75	4.48	1120	54	19	100	16	39	53	153	1.2	65	2.88	0.30
222		80-101	4.92	1220	60	24	102	16	45	58	162	1.2	67	2.77	0.29
223	Y 3	0-15	5.60	3110	102	44	212	21	41	82	156	1.2	52	3.94	0.23
224		15-30	6.06	1450	69	27	120	20	45	61	165	1.4	60	3.24	0.32
225		30-60	4.98	1080	84	24	109	20	54	60	168	1.8	69	3.20	0.31
226		60-80	4.86	1040	57	23	117	20	41	51	156	1.8	75	3.80	0.34
227	Y 8	0-13	5.60	1320	73	40	175	22	78	140	193	1.3	43	n.d.	n.d.
228		13-25	5.63	1250	70	44	148	25	80	98	168	1.8	41	4.01	0.29
229		25-40	6.41	1200	47	18	134	26	50	77	181	1.3	54	n.d.	n.d.
230		45-60	4.08	840	47	7	116	21	44	68	230	1.2	39	n.d.	n.d.
231		60-72	3.83	780	46	12	126	21	42	57	194	1.5	33	4.72	0.65
232	Y 11	0-20	6.03	710	92	68	226	18	35	98	158	1.2	30	n.d.	n.d.
233		25-35	5.00	680	53	25	101	19	23	31	137	1.6	24	1.52	0.53
234		35-50	5.60	790	57	20	85	17	47	79	178	1.3	32	n.d.	n.d.
235		50-65	5.39	950	54	15	76	14	29	43	184	1.2	29	n.d.	n.d.
236		65-80	5.22	810	54	14	77	14	30	42	185	1.2	31	n.d.	n.d.
237		80-92	5.02	740	51	23	78	17	22	28	174	1.5	31	1.58	0.26
238	Y 12	0-20	5.31	980	49	38	130	22	51	68	159	1.2	47	n.d.	n.d.
239		20-35	5.62	960	47	26	128	20	43	62	160	1.2	49	1.41	0.16
240		35-50	4.80	810	50	19	116	20	36	58	158	1.2	46	n.d.	n.d.
241		50-65	4.92	770	40	10	117	21	28	46	177	1.2	45	1.93	0.25

n.d. : Not determined.

ラスコ (50 ml) に分取し, 水で全体を約 25 ml にした後, モリブデン酸アンモニウム-硫酸溶液 (20 g の $(\text{NH}_4)_2\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ を 5M の硫酸に溶かして 1 l とする) 5

ml と硫酸ヒドラジン溶液 (0.75 g の $(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ を水に溶かして 500 ml とする) 2 ml を加えた後水で標線まで希釈する. 沸とう水浴中で 20-30 分間加温して発色



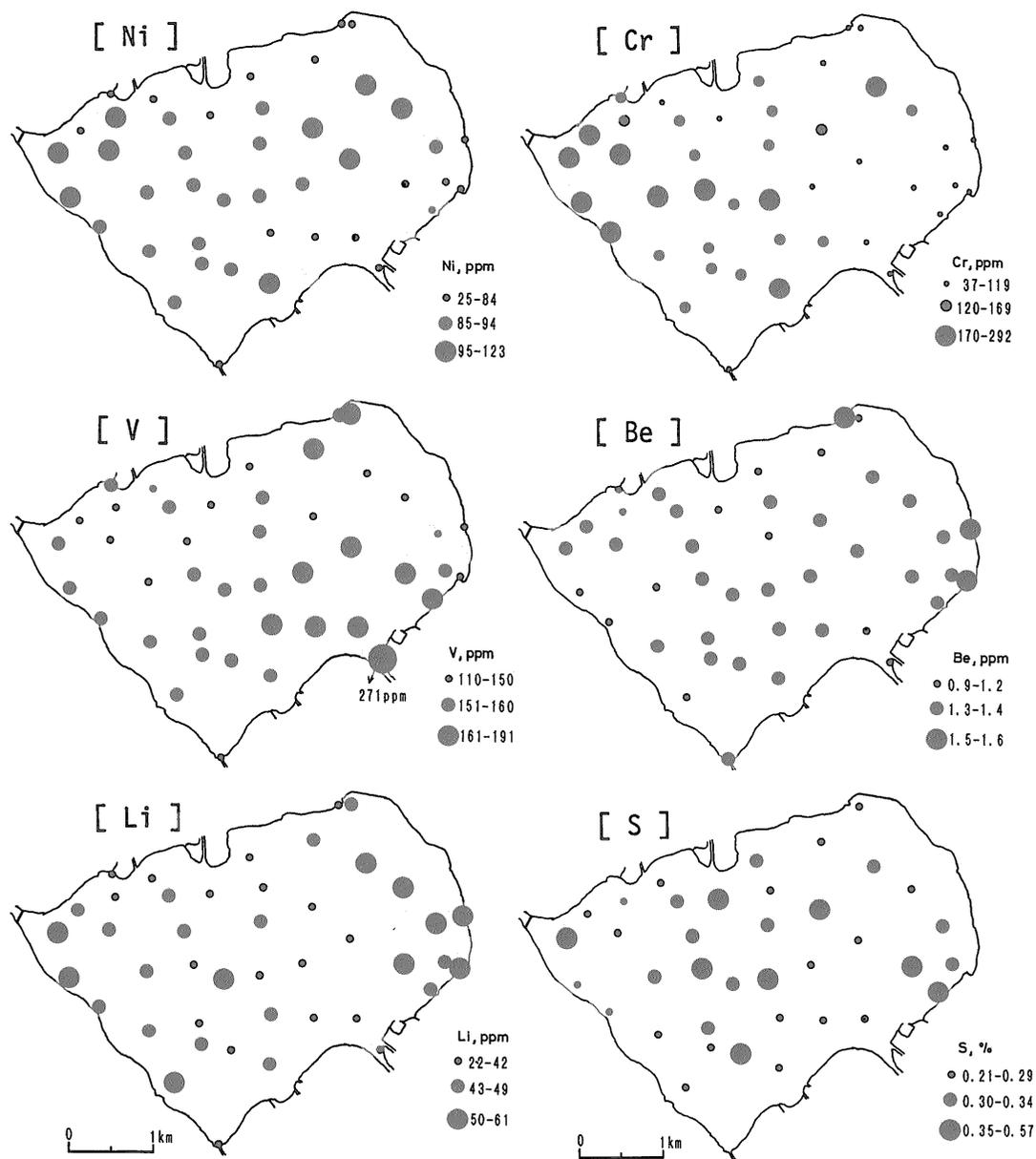
第3図 諏訪湖底層堆積物中の鉄, マンガン, 銅, 鉛, 亜鉛, コバルトの水平方向の含有量変化
 Fig. 3 Horizontal variation of iron, manganese, copper, lead, zinc and cobalt contents in the Lake Suwa surface (0-5 cm) sediments.

させた後水冷し, 再び標線まで水を加えて混合し, 830 nm における吸光度を測定してりん含有量を求める。

有機炭素および全硫黄: TERASHIMA *et al.* (1983) と同様に燃焼-赤外吸収法で定量した。

4. 結果と考察

採取した表層試料と柱状試料を深度別に分割したのから合わせて 216 試料を選定し, 鉄, マンガン, 銅, 鉛, 亜鉛, コバルト, ニッケル, クロム, バナジウム, ベリ



第4図 諏訪湖底表層堆積物中のニッケル、クロム、バナジウム、ベリリウム、リチウム、硫黄の水平方向の含有量変化

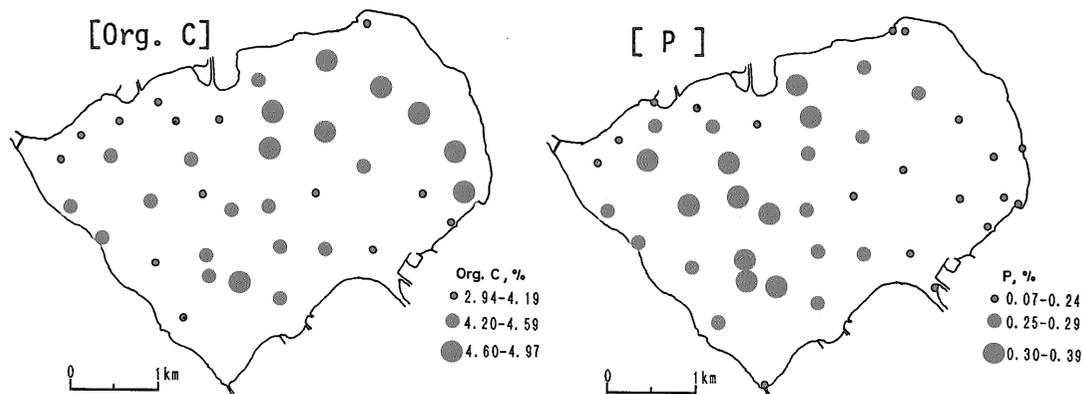
Fig. 4 Horizontal variation of nickel, chromium, vanadium, beryllium, lithium and sulfur contents in the Lake Suwa surface (0-5 cm) sediments.

リウム、リチウム、有機炭素、全硫黄、りんを定量した結果を第2表に、1961年に採取した試料から得られた25試料について各元素を分析した結果を第3表に示した。

4.1 水平分布の特徴

湖底底質中の各元素について、湖底水平方向の濃度分

布を解明することは各元素の供給源や湖沼内での挙動および堆積粒子の移動過程を研究する上で重要である。ここでは第1表の結果から、各採泥点(以下 St-No. で表示する)における表層部 0-5 cm の堆積物中各元素の濃度分布図を作製した結果(第3-5図)をもとに考察をす



第 5 図 諏訪湖底表層堆積物中の有機炭素およびリンの水平方向の含有量変化

Fig. 5 Horizontal variation of organic carbon and phosphorous contents in the Lake Suwa surface (0-5 cm) sediments.

すめる。

4.1.1 鉄, マンガン

鉄, マンガンはいずれも湖心部よりも湖岸部で高濃度を示す傾向がある(第 3 図)。これは河川等から供給されたこれら元素が湖岸部で沈降しやすいためと思われる。底質中のマンガンは、堆積層が還元状態になると間隙水中に溶出し、さらに上方へ拡散して湖水中に入り、湖水中の酸素によって酸化されて再び沈殿する(川嶋ほか, 1978; 中島, 1982; TAKAMASTU *et al.*, 1985)。この溶出と沈殿を繰り返すことによって最大水深が 30 m を越え、しかもすりばち状の湖底面を有する琵琶湖や野尻湖では最大水深付近の底質でマンガン濃度が最も高くなる(立川, 1979; 井内ほか, 1986; 寺島ほか, 1989)。しかしながら、諏訪湖と同程度の水深で、しかも扁平状の湖底地形を有する宍道湖では湖心部でのマンガンの高濃度は認められていない(横田ほか, 1988)。このことは、諏訪湖や宍道湖のように浅い湖では湖水中へのマンガンの溶出と湖水中での移動が起こりにくいことを示すと思われる。鉄はマンガンに比べると堆積層からの溶出は少ないようであり、野尻湖では最大水深付近でわずかに高濃度を示す(寺島ほか, 1989)が、琵琶湖ではそのような傾向は認められない(井内ほか, 1986)。

4.1.2 銅, 鉛, 亜鉛

銅, 鉛, 亜鉛についても高濃度域は湖岸付近に分布する傾向がある。しかし、最大流入河川である上川の河口付近の数地点、北部から流入する砥川の河口に近い 1 地点では低濃度である(第 3 図)。

琵琶湖や霞ヶ浦における銅, 鉛, 亜鉛の水平分布に関しては、これら元素の供給源に近いと考えられる湖岸部

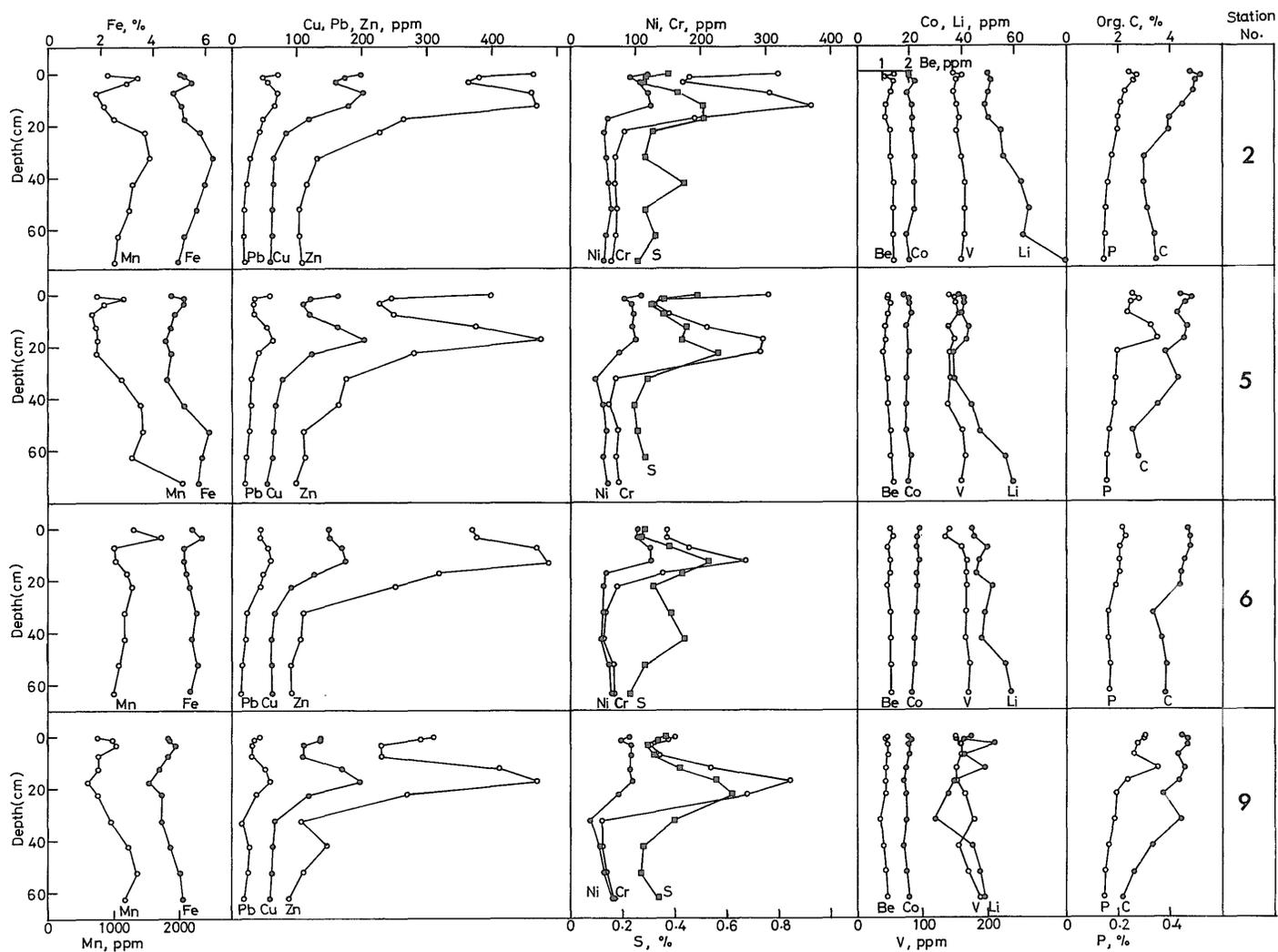
の底質で高濃度が得られている(井内ほか, 1984, 1986)。銅, 鉛, 亜鉛もこれらが水和酸化物として存在する場合はマンガンの同様に還元状態の底質ではその一部が間隙水中に溶出すると考えられる(寺島ほか, 1989)。しかし、銅, 鉛, 亜鉛については琵琶湖, 野尻湖のいずれにおいても湖心部付近で高濃度を示さないことから、間隙水から湖水への拡散は無視できる程度に小さいと思われる。鉛は、琵琶湖, 野尻湖のいずれでも湖岸からやや離れた水域に高濃度地点がある(井内ほか, 1986; 寺島ほか, 1989)。

4.1.3 コバルト, ニッケル, クロム, パナジウム

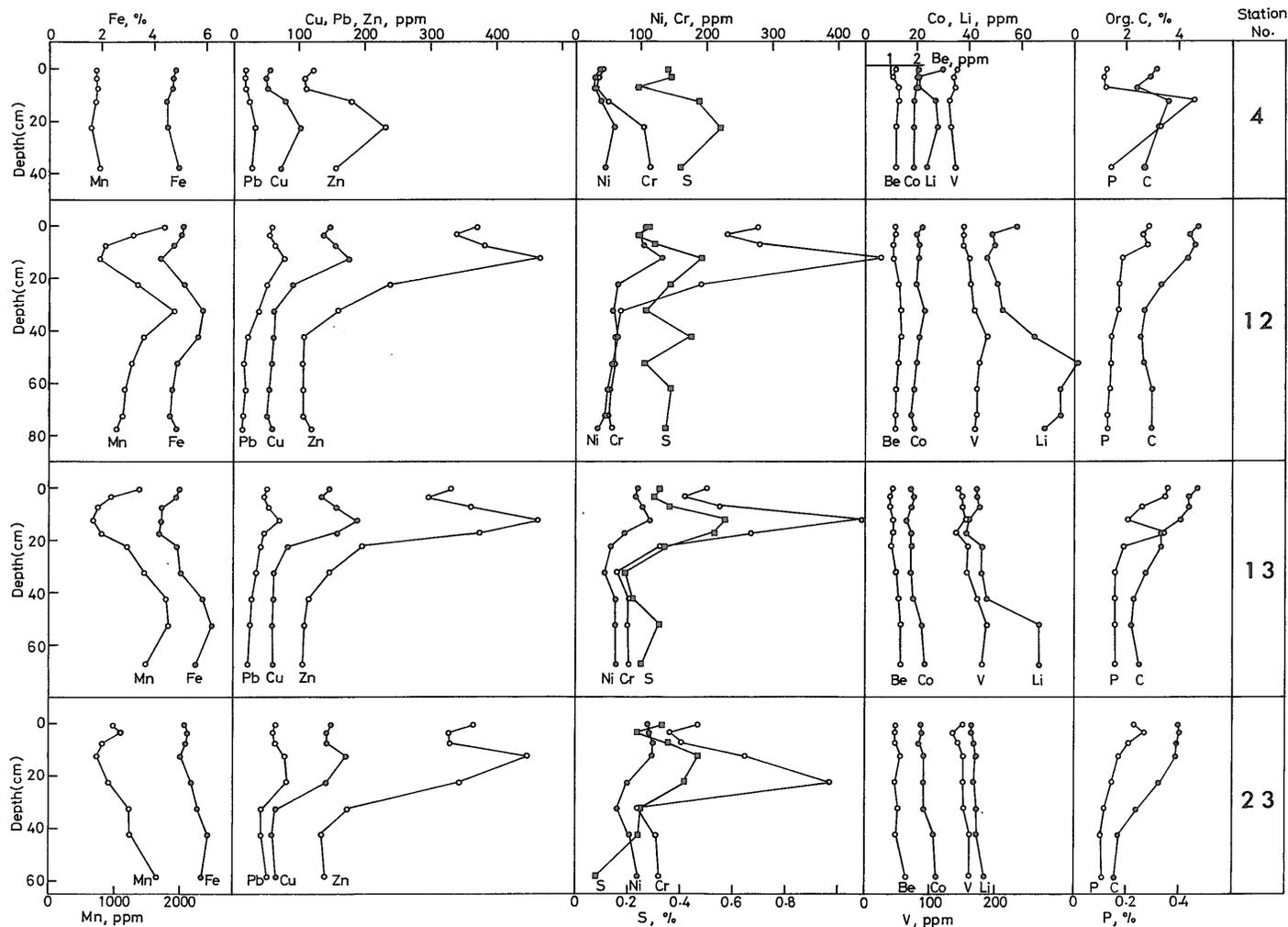
コバルトは、供給源に近いと考えられる湖岸部で高濃度を示す(第 3 図)が、この傾向は他の湖沼でも同様である。ニッケル, クロムは、必ずしも湖岸部で高濃度を示しておらず(第 4 図)、湖内における挙動が鉄, コバルト等とは若干異なることを暗示している。パナジウムは、上川の河口で最高濃度 271 ppm が得られ、しかもその付近の数地点で比較的高濃度が得られた(第 4 図)。このことは上川から供給される堆積物、すなわち八ヶ岳をはじめとする第四紀の火山岩類がパナジウムに富むことを示すと思われる。

4.1.4 ベリリウム, リチウム

前記の各種重金属のうち鉛以外は珪長質岩よりも苦鉄質岩により多く含有される。それに対してベリリウムおよびリチウムは珪長質岩で多い特徴がある。諏訪湖底質中のベリリウム含有量は 0.9-1.6 ppm で変化が小さく水平分布では湖の東側でやや高い(第 4 図)。リチウムに関しては、湖の東側と西側に高濃度域があり、ベリリウムの分布とは必ずしも一致していない。

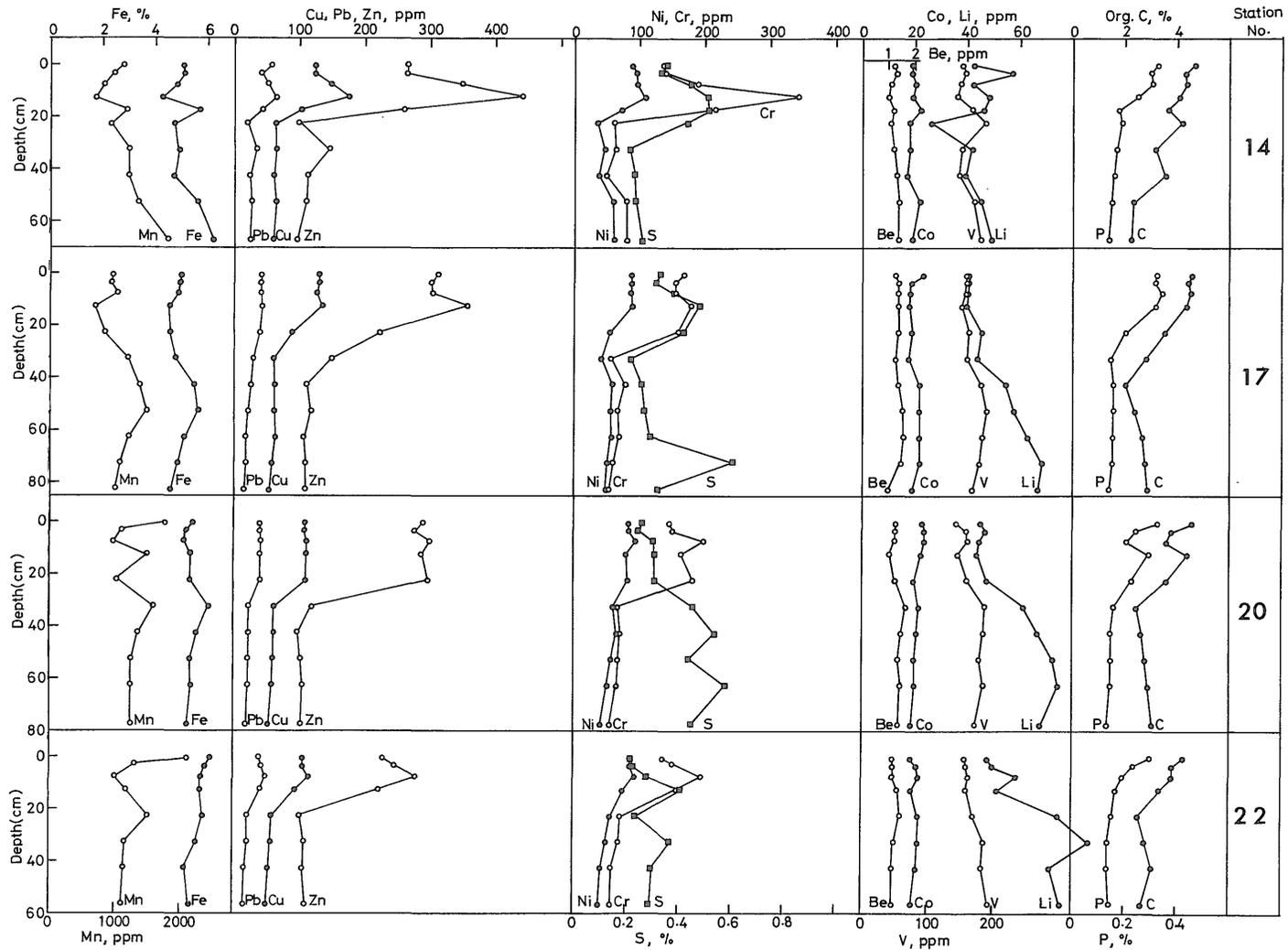


第6図 諏訪湖底北東域の柱状試料中14元素の鉛直変化
 Fig. 6 Vertical variation of fourteen elements in the core samples of the northeastern part of Lake Suwa.

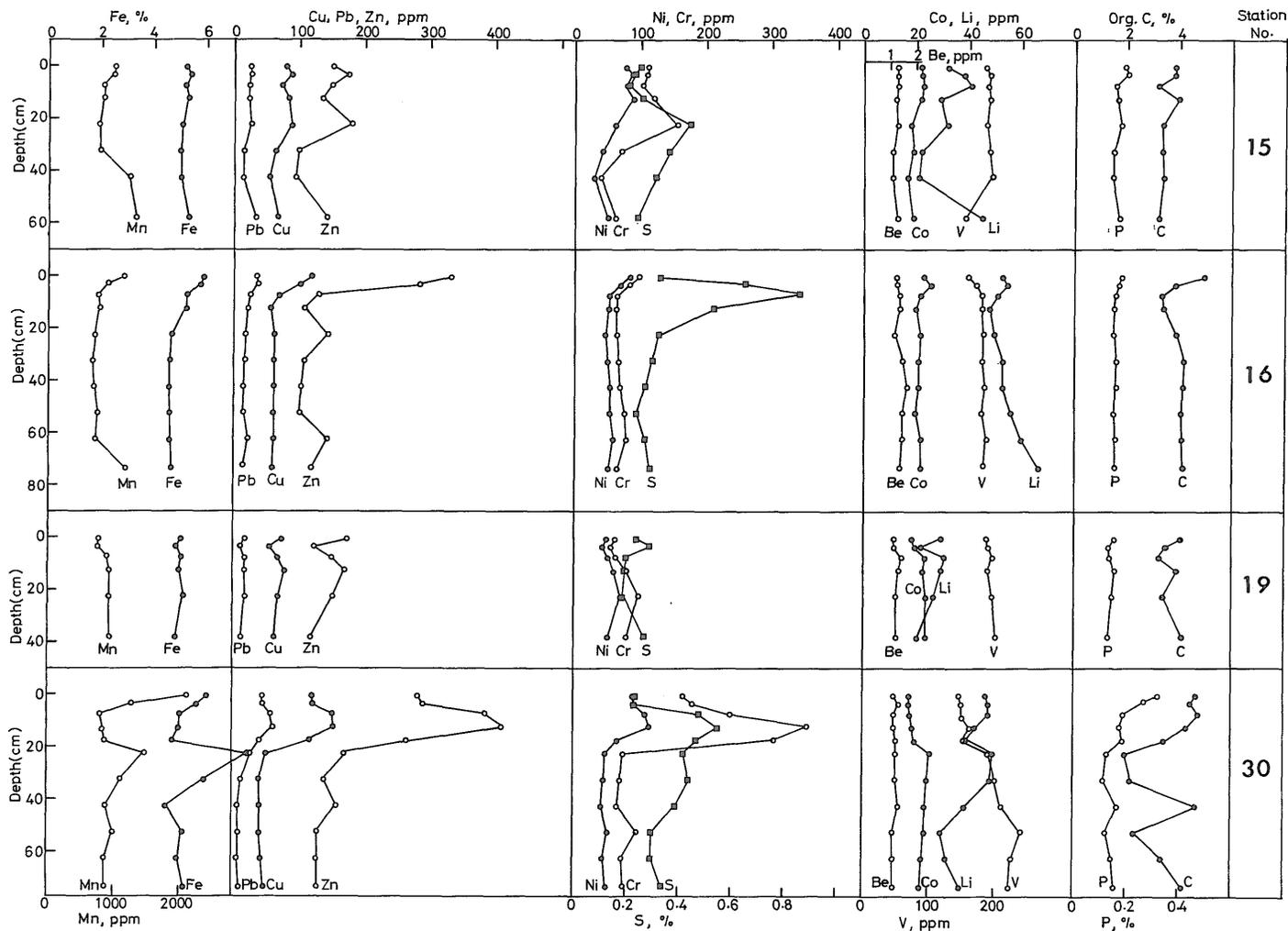


第7図 諏訪湖底北西域の柱状試料中14元素の鉛直変化

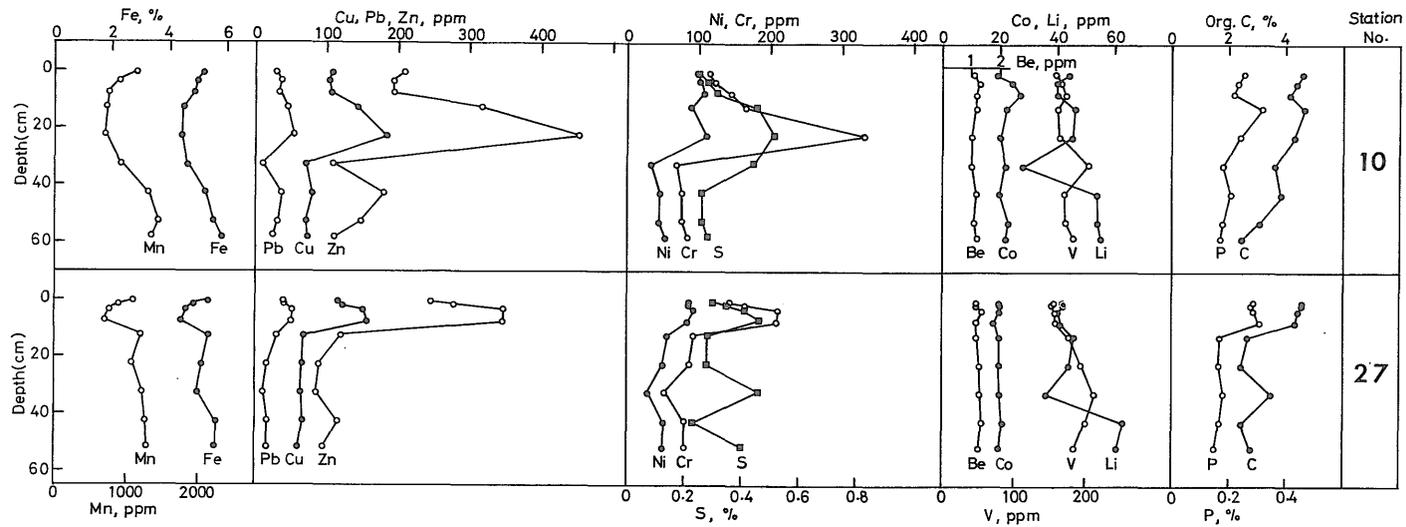
Fig. 7 Vertical variation of fourteen elements in the core samples of the northwestern part of Lake Suwa.



第8図 諏訪湖底南西域の柱状試料中14元素の鉛直変化
 Fig. 9 Vertical variation of fourteen elements in the core samples of the southwestern part of Lake Suwa.

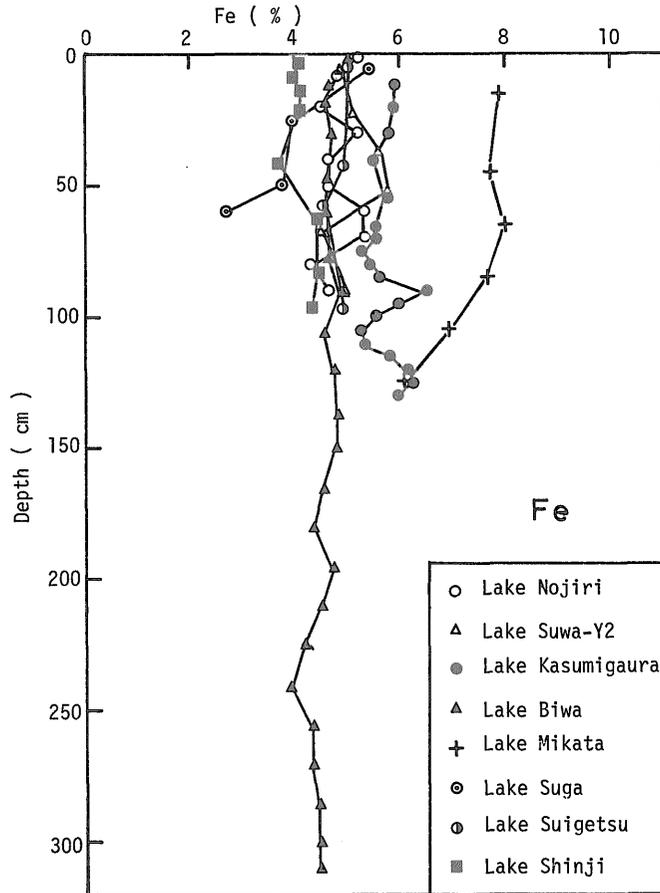


第9図 諏訪湖底南東域の柱状試料中 14 元素の鉛直変化
 Fig. 9 Vertical variation of fourteen elements in the core samples of the southeastern part of Lake Suwa.



第 10 図 諏訪湖底中央域の柱状試料中 14 元素の鉛直変化

Fig. 10 Vertical variation of fourteen elements in the core samples of the central part of Lake Suwa.



第 11 図 湖沼底質柱状試料に見られる鉄の鉛直変化
 Fig.11 Vertical variation of iron contents in the core samples collected from eight Japanese lakes.

琵琶湖では、集水域に珪長質岩が広く分布する河川の河口域でベリリウムが高濃度を示し、そこから離れるに従って濃度を減ずるが、リチウムについては明瞭な濃度変化はみられない (井内ほか, 1986)。

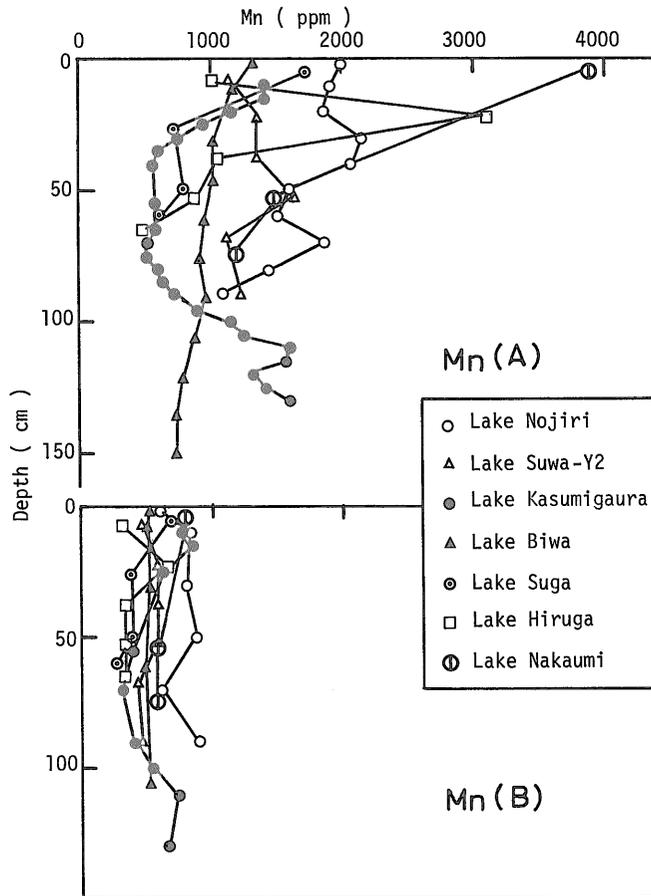
4.1.5 硫黄, 有機炭素, りん

硫黄は、全体として湖岸部よりも湖心部で高濃度を示す (第 4 図) が、湖岸付近にも高濃度地点があり濃度分布が複雑である。硫黄は主として硫酸イオンとして河川等から供給され、還元状態の環境下で微生物の作用によって硫化水素イオンとなり、これが重金属類と反応して硫化物となり、底質中に蓄積されると一般に考えられている。従って湖底堆積物中の硫黄の濃度分布にばらつきがあるということは、湖内における酸化-還元状態が必ずしも一様でないことを示すと思われる。

有機炭素は、湖の北東部に 4.6% 以上の高濃度域が分

布しており、鉛や亜鉛の濃度が高い岡谷市付近の水域では低濃度である (第 5 図)。他の湖沼における有機炭素は、琵琶湖では供給源に近いと思われる湖岸部で高い (井内ほか, 1986) が、霞ヶ浦や宍道湖では逆に湖心部に高濃度域がある (井内ほか, 1989; 横田ほか; 1988)。有機炭素に関しては、供給源の他に湖内における生物生産、移動、分解等が底質中の濃度分布を支配していると考えられる。

りんは、全体として湖の東部で低く、西部で高い傾向がある (第 5 図)。りんもマンガンと同様に還元状態の底質では溶出することが知られており、諏訪湖の嫌気的条件下におけるりんの溶出速度は 6.3-36.5 mgP/m²/日 (17-22°C) と見積られている (福原ほか, 1981)。諏訪湖と同様に浅くかつ富栄養化した霞ヶ浦では流入河川の河口域でりん濃度が高く、湖心部に向かって低濃度となる



第12図 湖沼底質柱状試料に見られるマンガンの鉛直変化
 (A)：全マンガン，(B)：希塩酸処理で非溶出のマンガン
 Fig. 12 Vertical variation of manganese contents in the core samples collected from seven Japanese lakes. (A) : Total manganese, (B) : Undissolved manganese by the diluted hydrochloric acid.

(細見・須藤, 1981)。しかし、諏訪湖の上川河口域はりんについては低濃度域である。

4.2 鉛直分布の特徴

湖内を北東部、北西部、南西部、南東部の4つに分け、それぞれの水域から代表的な4本の柱状試料を選び、各元素を分析した結果(第2表)をもとに鉛直方向の濃度分布を求め、第6-9図に示した。なお、湖心付近の柱状試料(St-15)におけるいくつかの元素の鉛直分布が他と異なったので、湖心部付近で採取した他の柱状試料(St-10, 27)についても分析し、結果を第10図に示した。

4.2.1 鉄, マンガン

全柱状試料についての鉛直分布を概観すると、全体として大きな上下変化はないが、いくつかの異なる分布パ

ターンが認められ、湖底における堆積と続成過程が必ずしも一様でないことを暗示している(第6-10図)。しかしながら、同一柱状試料における鉄とマンガンの鉛直分布は、1-2の例外を除いて極めて良好な一致を示しており、この両元素の湖内における挙動には大きな差のないことがうかがわれる。

他湖沼における鉄、マンガンの鉛直分布の一例として、筆者らの未公表資料の一部を第11, 12図に示した。第11図からわかるように、鉄に関しては多くの湖沼において顕著な上下変化を示さない。これは鉄が堆積物の主成分元素であるため近年の人為的影響を受けにくいこと、およびマンガンに比べると化学的に不活性で続成作用に伴う移動が少ないことによると考えられる。これに対して、

マンガンは表層で高濃度を示す特徴がある (第 12 図)。マンガンの存在形態を推定するため、試料を希塩酸 (0.5M) で処理し、溶出するマンガン (主として水和酸化物として沈降・濃集したもの) を除去した試料中のマンガンを定量した。その結果、希塩酸に溶出しにくい主としてけい酸塩鉱物に含有されると考えられるマンガンの濃度は低く、しかも鉛直変化は小さいことがわかった (第 12 図)。このことは、マンガン濃度の鉛直変化は主として水和酸化物としての蓄積量の相違に起因することを意味している。

マンガンの鉛直分布に関して、もう一つの特徴は富栄養化した多くの湖沼では表層直下で低濃度を示す場合の多いことである。第 6-10 図でも見られるように、いくつかの例外を除いて表層下 5-10 cm の層準に極小値がある。この傾向は手賀沼等でも認められ、還元状態の堆積層でマンガンの溶出が起きているためと考えられている (小林・楠田, 1984)。

4.2.2 銅, 鉛, 亜鉛

諏訪湖における銅, 鉛, 亜鉛の鉛直分布の特徴は、最下層から表層に向かって濃度が増加し、最高濃度を示す層準の上部では濃度を減じることである。また、銅, 鉛, 亜鉛と鉄, マンガンの鉛直分布を比較すると、大多数の試料において逆相関の分布を示している。すなわち銅, 鉛, 亜鉛が最高値を示す層準では鉄, マンガン濃度が最低となる場合が多く、St-2, 5, 9 等においては表層直下の小さな増減傾向も逆になっている (第 6 図)。このことは、諏訪湖では同じ重金属であっても鉄, マンガンの濃集機構と銅, 鉛, 亜鉛のそれが必ずしも同一とはかぎらないことを示唆していると思われる。

他湖沼における銅, 鉛, 亜鉛の鉛直分布においても下層から表層に向かって濃度が増加するケースが多いが、同じ湖沼でも試料の採取地点によって異なり、また鉄, マンガンとの逆相関の傾向は手賀沼のいくつかの柱状試料でも認められている (小林・楠田, 1984)。

4.3.2 ニッケル, クロム, 硫黄

ニッケルとクロムの鉛直分布は全体として銅, 鉛, 亜鉛のそれと一致している (第 6-10 図)。硫黄についても多くの試料では銅, 鉛, 亜鉛と一致するが、いくつかの例外がある。St-16 (第 9 図) では、重金属類の鉛直分布が他と異なって最表層部で高濃度を示すが、硫黄は表層下 5-10 cm の層準が最も高く、表層に向かって濃度を減じている。また、St-20 (第 8 図) では表層部よりも下層部の濃度が高い。

他湖沼の堆積物におけるニッケル, クロムの鉛直分布には明らかな上下変化は認められていない。いくつかの

湖沼および海域の柱状試料における硫黄の鉛直分布はすでに報告した (TERASHIMA *et al.*, 1983)。堆積環境が淡水から汽水に変化すると著しい増加がみられるが、堆積環境の変化や人為的影響のない場合の上下変化は小さい。

4.2.4 コバルト, バナジウム, ベリリウム, リチウム
コバルト, バナジウム, ベリリウムは、本研究で分析した元素のうちでは鉛直変化が最も小さいグループに属する (第 6-10 図)。これは、これら元素が人為的影響や続成作用の影響を受けにくいことによると思われる。リチウムは、他の元素とちがって下層から表層に向かって濃度を減ずる場合が多い。しかし、St-9, 14, 15 等では中間層で低濃度を示している。

他の湖沼においてもコバルト, バナジウム, ベリリウムの鉛直変化は小さい。リチウムについては、硫黄と同様に堆積環境の変化の影響を受けるが、全体としては上下変化の小さい分布を示す。

4.2.5 有機炭素, りん

有機炭素とりんは、ほとんどの柱状試料において下層から表層に向かって濃度が増加している (第 6-10 図)。例外として St-4 では中間部に高濃度を示す層準があり、St-19 では明らかな上下変化がない。St-4 は、北部から流入する砥川の河口に近く、St-19 は上川の河口付近にあるため、他の柱状試料とは堆積条件が若干異なることが考えられる。

4.3 浚渫の影響

諏訪湖の浄化対策の一環として 1969 年以降汚染底質の浚渫が行われるようになった。これまでの浚渫の規模について詳細なデータは入手できなかったが、沖野 (1984) によれば浚渫によって湖全体の水深を 2.5 m 以上とし、水生植物の生育を抑制して湖内における有機物の二次汚染を防止することが目標の一つであり、浚渫の対象となる水域は湖岸部を中心に湖面積の約 23% に達するという。一方、最近の井内ほかの未公表音波探査資料によれば、水深 4-6 m の St-17, 20, 21, 22, 29 付近においても浚渫が行われた可能性がある。

もし浚渫によって汚染底質が効果的に除去されれば、人為的に供給された元素の濃度は浚渫前の底質よりも低下しているはずである。そこで小林ほか (1971, 1975) が 1968-1969 年に諏訪湖の湖心部、岡谷市に近い湖の西方域および諏訪市に近い東方水域で採取した表層堆積物中の銅, 鉛, 亜鉛含有量と本研究結果のそれを比較することにし、第 4 表を作成した。試料数が少なく、また採取位置も完全に一致するとは言えないため厳密な議論はできないが、1968-1969 年に採取した試料と 1987 年のそ

第4表 表層堆積物中の銅, 鉛, 亜鉛の含有量に対する浚渫の影響

Table 4 Effect of dredging for the contents of copper, lead and zinc in some surface sediments.

Sampling location	Sampling period	Dredging	Number of sample	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Central area	1961	No dredging	1	65	27	108
do.	1969*	do.	1	99	27	200
do.	1987	do.	4	119±23	40±10	254±63
Western area	1969*	Before dredging	4	136±56	113±90	278±87
do.	1987	After dredging	2	128±13	67±1	446±46
Eastern area	1969*	Before dredging	5	886±1203	92±80	512±415
do.	1987	After dredging	4	148±31	47±8	368±68

* Data taken from KOBAYASHI *et al.* (1971).

れを比較すると、浚渫が行われていない湖心部では1987年の試料が高濃度を示す。しかし浚渫が行われたと考えられる湖岸部では、1987年採取の試料で低濃度を示す場合が多く、この点では浚渫の効果があらわれていると解釈できる。一方、1987年採取の湖心部と湖岸部試料について銅、鉛、亜鉛含有量を比較するといずれも湖岸部で高濃度を示しており、これは浚渫を行ってもまだ人為的影響がすべて除去されていないことを示すと思われる。

浚渫等による底質攪乱が各種元素の鉛直分布にどのような影響を与えるかを検討することにした。4.2で述べたように、各元素の鉛直分布パターンにはある程度の類似性があり、もし浚渫の影響を受ければその鉛直分布にみだれが生ずると思われる。まず鉛直方向の濃度変化が大きい銅と亜鉛に注目すると、ほとんどの試料において表層から5-20cmの下層に最高濃度を示す層があるが、St-15, 17, 19, 20, 22では表層付近での濃度変化が小さい特徴があり、またSt-16では最表層部が高濃度となっている(第8-9図)。クロムに関しては、最高濃度を示す層の濃度は300ppmを越える場合が多い。しかし、St-4, 15, 16, 17, 19, 20, 22では200ppm以下である(第7-9図)。このうちSt-4については他元素の鉛直分布から考えて、河口に近い水域であるため他よりも堆積速度が速いことによる例外と判断される。

上記の銅、鉛、クロムの鉛直分布の検討から本研究で分析した柱状試料のうちで浚渫等の人為的影響を受けている可能性があるのは、St-15, 16, 17, 19, 20, 22の6点ということになる。このうちSt-17, 20, 22は音波探査データからも予想されたものであり、St-16, 19は採泥地点の水深が2.5m以下でしかも諏訪市に近い水域であるため、実際に浚渫された可能性が高い。St-15については、何らかの人為的影響を受けていると考えられるが、浚渫については不明である。

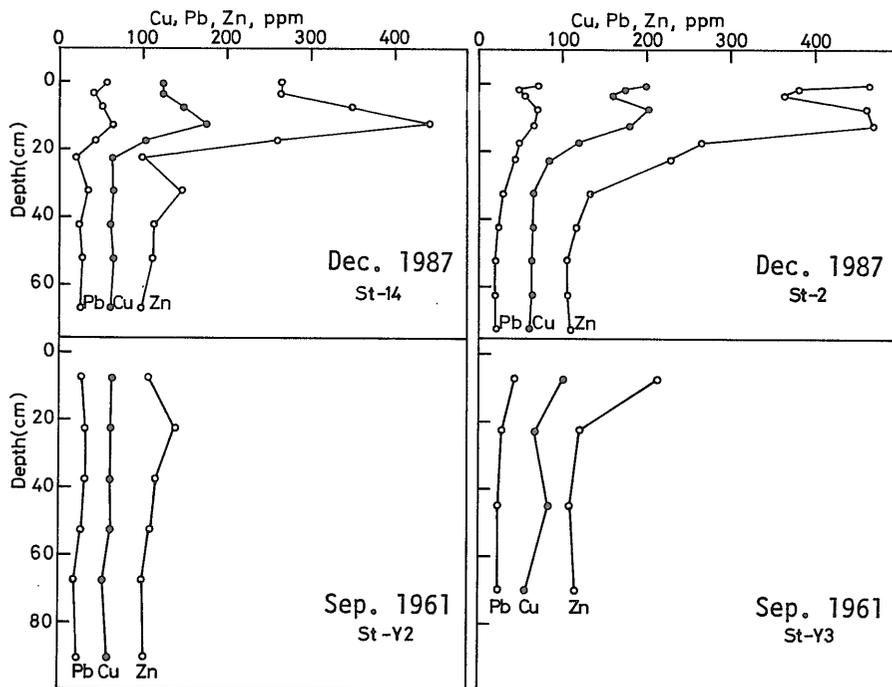
4.4 人為的影響の長期的変化

人為的影響の長期的変化を検討する場合、堆積層の形成年代がわかれば好都合であるが、今回採取した試料の年代測定は行われていない。そこで、1961年に採取した柱状試料のデータとの比較を行うことにした。第13図は、湖心付近から採取したSt-14とSt-Y2および湖の東側のさほど離れていない場所で得られたSt-2とSt-Y3について銅、鉛、亜鉛の鉛直分布を比較して示したものである。この図からわかるように、1961年に湖心付近で採取したSt-Y2では表層部での高濃度は認められない。しかし、湖の東側のSt-Y3では表層部での濃度増加がはじまっている。1961年に採取した他の柱状試料(St-Y8, Y11, Y12)においてもいくつかの重金属等が表層で高濃度を示す傾向があり(第3表)、このことは、湖心部を除いて1961年以前から人為的影響を受けてきたことを示すと思われる。

諏訪湖の湖心付近の堆積速度として、鉛-210を用いる方法では3.9mm/年(MEGUMI, 1978)、セシウム-137では15mm/年(NISHIMURA, 1978)という若干異なる値が報告されている。本研究結果において、湖心部付近で銅や亜鉛の濃度増加がはじまった年代を1960年と仮定すると、St-9では12.0mm/年、St-14では8.3mm/年という値が得られる。他湖沼における年間堆積速度に関しては、琵琶湖0.6mm(井内ほか, 1987)、霞ヶ浦0.4-1.1mm(平均1.5mm, 井内ほか, 1983)、浜名湖1.6-4.8mm(池谷ほか, 1987)、水月湖1.1mm(MATSUYAMA, 1974)、野尻湖0.2mm(塚田, 1967)という報告があり、諏訪湖は他の湖沼に比べて堆積速度が速いようである。

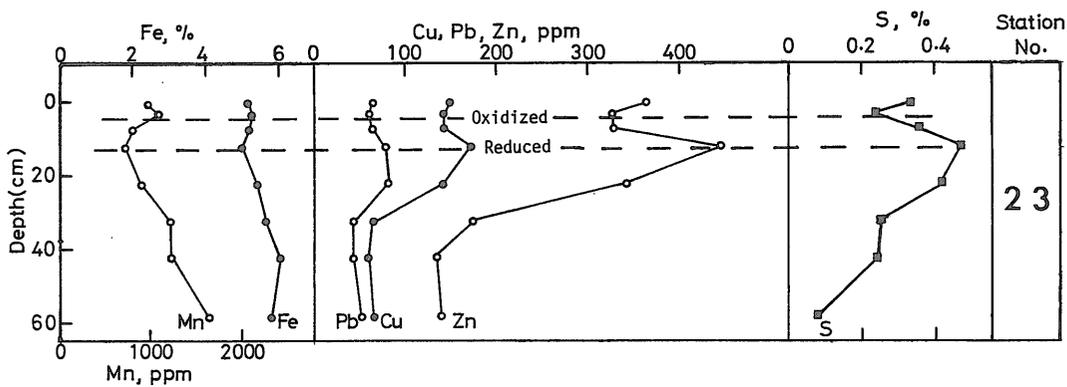
4.5 続成作用に伴う移動と濃集

4.4の検討により、堆積物表層における重金属等の高濃度は主として人為的影響によって供給されたと判断される。それでは、供給された重金属等がすべて機械的に底質中に固定されるかという点については疑問が残る。



第 13 図 ほぼ同一地点で 1961 年と 1987 年に採取した柱状試料中銅, 鉛, 亜鉛含有量の鉛直変化の比較

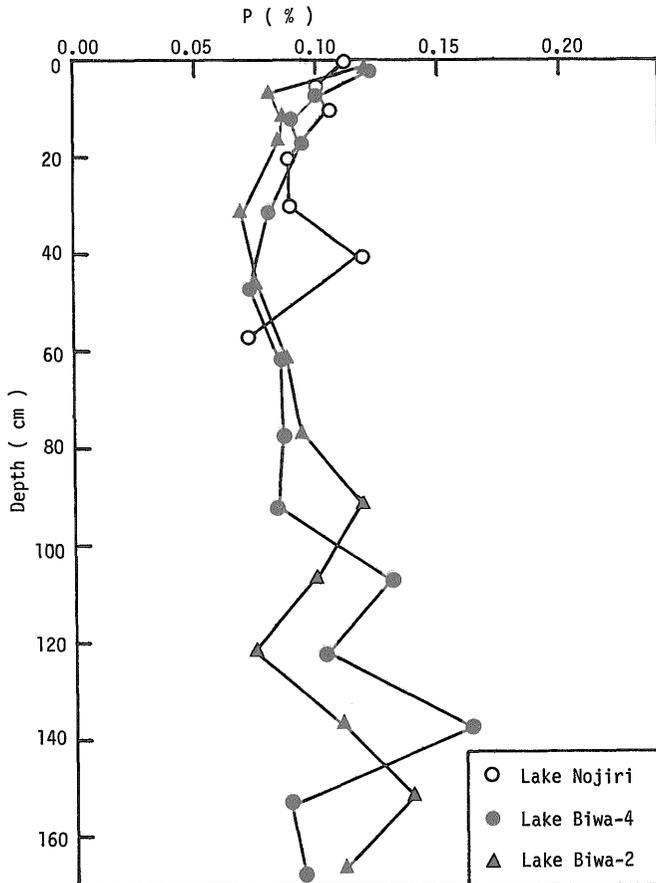
Fig. 13 Comparison of vertical variation of copper, lead and zinc contents in the core samples collected from nearly the same position in the different period of 1961 and 1987.



[Oxidized condition] $Mn(II), Fe(II) \rightarrow Mn(IV), Fe(III) \downarrow$; Sulfide(CuS etc.) \rightarrow Sulfate($CuSO_4$ etc.) \uparrow
 [Reduced condition] $Mn(IV), Fe(III) \rightarrow Mn(II), Fe(II) \uparrow$; $Pb(II), Cu(II), Zn(II) \rightarrow PbS, CuS, ZnS \downarrow$

第 14 図 諏訪湖における底質中の重金属の溶解と固定概念図

Fig. 14 Dissolution and fixation of five heavy metals in the Lake Suwa sediment layer.



第15図 野尻湖, 琵琶湖柱状試料に見られるリンの鉛直変化
 Fig. 15 Vertical variation of phosphorous contents in the core samples of Lake Nojiri and Lake Biwa.

それは、浚渫等の影響が考えられない柱状試料中各元素の鉛直分布パターンにも若干の差が認められるからである。例えば St-2, 5, 6, 9 (第6図) における銅, 亜鉛, クロムの鉛直分布を見ると, St-6 では表層直下の低濃度はみられないが, 他の試料では認められる。この鉛直分布がすべて人為的なものであるとすれば, St-6 では重金属の供給量が最大となった後に減少し, 最近では一定状態を保っていることになる。しかし他の3試料では一定状態の時期を過ぎ再び増加がはじまっており, St-2 では最高濃度に近くなっている。このような説明困難な鉛直分布パターンは, 他の多くの試料においても観察される(第6-10図)。

湖沼堆積物中の重金属等が続成作用に伴って移動, 濃集することはすでに4.1で述べた。琵琶湖や野尻湖における鉄, マンガン, 銅, 鉛, 亜鉛等の場合は水和酸化物の生成が主要原因と考えられた(中島, 1982; 寺島ほか,

1989)。諏訪湖では, 水和酸化物と共に, 硫化物の生成と溶解が重要と思われる。その理由は, 1) 柱状試料中の各元素の鉛直分布において, 鉄, マンガンの増減パターンと, 銅, 鉛, 亜鉛のそれが多くの場合逆相関の傾向を示すこと, 2) 硫黄の鉛直分布は, 鉄, マンガンとは逆の場合が多く, 銅, 鉛, 亜鉛と一致すること, 3) 堆積層が酸化状態の場合, 水和酸化物は安定であるが, 硫化物は酸化されて硫酸塩となり溶解しやすくなること等である。これをわかりやすくするため, St-23 を例として第14図を作成した。鉄, マンガンの鉛直分布から見て表層直下に酸化層があり, それより10cm程度下層が還元層と思われる。還元層では, 鉄, マンガンの水和酸化物が溶出するため低濃度となる。これに対して銅, 鉛, 亜鉛等は主として硫化物として固定されることにより還元層では安定で高濃度を示すが, 酸化層ではその一部が酸化されて硫酸塩となり溶出することが考えられる。この

第 5 表 上層 (0-40 cm) および下層 (40 cm 以深) 堆積物中 14 元素の平均値, 最小値, 最大値

Table 5 Average, minimum and maximum contents of fourteen elements for upper and lower layer sediments.

		Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)	P (%)
Upper (0-40 cm) n=163	Avg.(A)	5.14	1074	116	43	273	21	80	154	159	1.2	44	4.05	0.35	0.23
	Min.	3.85	610	43	10	86	16	25	30	110	0.9	20	2.00	0.17	0.11
	Max.(B)	7.62	2380	204	82	488	30	131	456	271	1.7	87	5.25	0.86	0.46
Lower (>40 cm) n=53	Avg.(C)	5.31	1240	61	22	116	21	54	70	178	1.2	58	3.01	0.31	0.15
	Min.	4.50	690	43	10	90	17	30	40	141	1.0	21	1.57	0.08	0.10
	Max.	6.24	2060	79	54	180	28	95	128	242	1.7	82	4.69	0.61	0.20
Concentration ratio	(A)/(C)	0.97	0.87	1.90	1.95	2.35	1.00	1.48	2.20	0.89	1.00	0.76	1.35	1.13	1.53
	(B)/(C)	1.44	1.92	3.34	3.73	4.21	1.43	2.43	6.64	1.52	1.42	1.50	1.74	2.77	3.07

問題についてさらに詳細な議論を進めるためには、堆積物中の重金属等の形態別分析を行うことや、湖底堆積物表層における酸化-還元電位の測定等が必要である。

有機炭素は、人為的影響の考えられない柱状試料でも表層に比べて下層で低濃度を示すのが一般的で、続成作用に伴って分解すると考えられている (TERASHIMA *et al.*, 1983). 4. 1. 5 で述べたように、りんは還元状態の底質から溶出して表層に濃集する傾向があり、さらに人為的影響が加わることで諏訪湖ではほとんどの試料で最表層部で高濃度を示す (第 6-10 図). そして琵琶湖や野尻湖においても表層 0-30 cm の分布では、最表層部で最高濃度となっている (第 15 図). しかし、30 cm よりも下層を含めると最表層部よりも高濃度を示す層準があり、続成作用や人為的影響以外の要因、例えば気候変化による湖内動植物現存量の増減に伴うりん供給量のちがいを考慮する必要があることを示している。

4.6 バックグラウンド値

湖沼堆積物中各元素の自然バックグラウンド値を明らかにすることは、地球化学や地質学における基礎的資料として重要であり、また近年における人為的影響を正しく評価するうえでも必要なデータと思われる。すでに述べたように、諏訪湖の表層堆積物で高濃度を示す重金属等の大部分は人為的影響によって供給されたと考えられる。しかし、第 6-10 図に示した各元素の鉛直分布によれば、表層下 40 cm 以深ではほとんどの試料中の各元素の鉛直分布がほぼ一様で人為的影響は無視できる程度であると判断される。そこで、本研究では表層下 40 cm 以深の試料について得られた値の平均値をバックグラウンド値として用いることにし、第 2 表の試料を表層 (0-40 cm) と下層 (40 cm 以深) に分け、それぞれについて各元素の平均値、最小値、最大値を求め、第 5 表に示した。表層試料における銅、鉛、亜鉛の最大値は、バックグラウンド値の 3.3-4.2 倍であり、クロムのそれは 6.6 倍に

達している。一方、表層試料の平均値とバックグラウンド値を比較すると、人為的影響の考えられる銅、鉛、亜鉛、ニッケル、クロム、有機炭素、硫黄、りんはいずれも表層試料で高い値を示すが、鉄、コバルト、ベリリウムについてはほとんど差がなく、マンガン、バナジウム、リチウムについてはバックグラウンド値の方がやや高い傾向がある。

諏訪湖底質中の各元素のバックグラウンド値がどのような特徴を有するかを明らかにするため、筆者らの未公表データを中心とした他の湖沼堆積物 (淡水湖沼としては野尻湖、霞ヶ浦、琵琶湖、三方湖、汽水湖沼として管湖、水月湖、久々子湖、日向湖、宍道湖、中海) のバックグラウンド値および TUREKIAN and WEDEPOHL (1961) の世界の頁岩の平均値、MASON (1958) の地殻存在量との比較を行った (第 6 表)。この表からわかるように、諏訪湖底質中の各元素のうち苦鉄質岩に多く含有される傾向のある鉄、マンガン、銅、亜鉛、コバルト、ニッケル、クロム、バナジウムはいずれも日本の湖沼堆積物の平均値よりもやや高い傾向がある。これは、2 で述べたように、流入する河川の集水域に苦鉄質火山岩が広く分布することによって考えられる。中でもバナジウムは他の湖沼や世界の頁岩の平均値、地殻存在量のいずれよりも高い特徴を有している。

有機炭素および硫黄含有量と堆積環境の関係についてはすでに報告した (TERASHIMA *et al.*, 1983)。その結果によれば、有機炭素の含有量は宍道湖の 1.02% から管湖の 5.21% まで大きく変化するが、淡水湖と汽水湖によるちがいは明瞭ではない。一方、硫黄は淡水湖よりも汽水湖で明らかに高く、堆積環境の指示元素として用いられている。諏訪湖底質中の有機炭素は 3.01% で湖沼としては中間的であり、硫黄含有量の 0.31% は淡水湖としては高い方である (第 6 表)。

野尻湖は、長野県の北部にある中栄養型の淡水湖であ

第6表 日本の湖沼堆積物中14元素のバックグラウンド値
Table 6 Background values of fourteen elements in Japanese lake sediments.

	(n)	Fe (%)	Mn (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cr (ppm)	V (ppm)	Be (ppm)	Li (ppm)	Org. C (%)	S (%)	P (%)
Fresh-water lake															
Lake Suwa	(53)	5.31	1240	61	22	116	21	54	70	178	1.2	58	3.01	0.31	0.15
Lake Nojiri	(10)	4.51	1504	17	9	56	11	15	16	104	0.9	15	4.48	0.21	0.08
Lake Kasumigaura	(41)	5.46	1150	42	16	86	12	23	40	121	1.4	59	3.22	n.d.	n.d.
Lake Biwa	(39)	4.56	891	43	29	115	21	44	83	108	2.5	55	1.12	0.05	0.09
Lake Mitaka	(6)	7.34	1153	53	23	142	29	51	81	154	3.6	65	3.87	0.20	n.d.
Brackish-water lake															
Lake Suga	(4)	3.24	683	45	14	91	15	26	51	97	1.7	39	5.21	0.87	n.d.
Lake Suigetsu	(3)	4.77	1887	60	22	99	18	30	57	113	1.6	37	4.21	1.32	n.d.
Lake Kugushi	(6)	3.67	683	22	28	96	10	17	40	70	2.9	88	3.87	2.16	n.d.
Lake Hiruga	(5)	4.85	1084	74	22	106	21	28	59	130	1.2	45	3.64	2.21	n.d.
Lake Shinji	(8)	4.10	794	23	26	94	13	16	41	97	2.2	54	1.02	0.55	n.d.
Lake Nakaumi	(5)	3.38	1714	28	25	79	12	13	32	69	2.4	83	1.42	1.13	n.d.
All the samples	(180)	4.97	1123	46	22	103	17	37	59	130	1.8	56	n.g.	n.g.	n.g.
World shales (A)		4.72	850	45	20	95	19	68	90	130	3	66	n.g.	0.24	0.07
The earth crust (B)		5	1000	45	15	65	23	80	200	110	2	30	n.g.	0.05	0.118

Number of samples in parentheses. Data of organic carbon and sulfur taken from TERASHIMA *et al.* (1983), and others from unpublished. (A) : TUREKIAN and WEDEPOHL (1961). (B) : MASON (1958). n.d. : Not determined. n.g. : Not given.

り、湖の周辺には諏訪湖と同様に苦鉄質火山岩類が分布している。しかし野尻湖底質中の銅、鉛、亜鉛、コバルト、ニッケル、クロム、リチウム等の含有量は諏訪湖のそれに比べて1/2かそれ以下で明らかに低い(第6表)。この原因としては、野尻湖の集水域が湖面積の2倍以下と小さいために集水域からの元素供給量が少ないことが考えられるが、これについては今後の検討が必要である。

5. ま と め

諏訪湖の全域48地点から採取した柱状および表層試料中の鉄、マンガン、銅、鉛、亜鉛、コバルト、ニッケル、クロム、バナジウム、ベリリウム、リチウム、有機炭素、硫黄、りん、の14元素を分析し、水平・鉛直分布の特徴、人為的影響、続成作用の影響、バックグラウンド値等について検討し、以下の結果を得た。

(1) 各元素の湖底水平方向の濃度分布に関しては、鉄、マンガン、銅、鉛、亜鉛、コバルト、バナジウムは湖心部に比べて湖岸部の底質で高濃度を示す傾向があり、これら元素は供給源に近い水域で沈降しやすいと考えられた。これに対して有機炭素、硫黄、りんは必ずしも湖岸部で高濃度を示さず、湖内における挙動が重金属とは異なることが予想された。

(2) 柱状試料中の各元素の鉛直分布については、全体として銅、鉛、亜鉛、ニッケル、クロム、有機炭素、り

んは下層よりも表層で高濃度を示す傾向があった。この原因として、一部元素では続成作用に伴う表層への移動、濃集による部分もあると思われるが、全体としてこの影響は小さく、大部分は近年における人為的影響による供給量の増大に起因すると判断された。

(3) 湖岸付近の底質中の重金属濃度は、汚染底質の浚渫によってある程度は低下したと考えられた。しかし、現時点においても多くの重金属類が浚渫の実施されていない湖心部よりも湖岸部で高濃度であり、一度の浚渫で人為的な影響をすべて除去することはむずかしいことを示している。

(4) 採取年月の異なる柱状試料の分析結果から、諏訪湖底質中の銅、鉛、亜鉛、クロム、ニッケル等の濃度増加がはじまったのは湖心部では1960年頃であり、湖岸部ではそれ以前という結果を得た。

(5) 諏訪湖底質における重金属類の続成作用に伴う挙動については、鉄、マンガンは主として水和酸化物、銅、鉛、亜鉛等では硫化物の生成と溶解が重要であると考えられた。

(6) 諏訪湖底質中各元素の自然バックグラウンド値と他湖沼のそれを比較した。その結果、バナジウム含有量は他のいずれよりも高かったが、その他の元素では中間的な値を示すものが多かった。湖沼底質における各元素のバックグラウンド値は、集水域の広さや地質的条件、

堆積時の水質環境の影響等により変化すると考えられた。

文 献

福原晴夫・田中哲治郎・中島光敏(1981) 底泥からの栄養塩の溶出II. 諏訪湖集水域生態系研究報告, vol. 7, p. 1-20.

細見正明・須藤隆一(1981) 底泥中のリンの分布特性とその季節変化—高浜入を中心として—, 国立公害研究所報告, vol. 22, p. 45-54.

池谷仙之・和田秀樹・大森真秀(1987) 浜名湖のボーリング柱状試料について. 静岡大学地球科学研究報告, vol. 13, p. 67-111.

井内美郎・斎藤文紀・横田節哉(1983) 霞ヶ浦湖底泥の堆積速度—火山灰層を用いた堆積速度算定法—, 地質雑, vol. 89, p. 125-128.

—————・横田節哉・小野寺公兒・大嶋和雄・村上文敏・木下泰正・斎藤文紀・青木市太郎・斎藤英二(1984) 湖沼堆積物の調査技術に関する研究. 環境庁環境保全研究成果集, p. 60-1~60-26.

—————・—————・斎藤文紀・村上文敏・中尾征二・竹内三郎・吉川秀樹・寺島 滋・寺島美南子(1985) 湖沼汚染底質の堆積機構解明に関する研究. 環境庁環境保全研究成果集, p. 74-1~74-20.

—————・中尾征三・横田節哉・村上文敏・斎藤文紀・寺島 滋・寺島美南子・竹内三郎・吉川秀樹・志岐常正・太井子宏和・徳岡隆夫・公文富士夫(1986) 湖沼汚染底質の堆積機構解明に関する研究. 環境庁環境保全研究成果集, p. 64-1~64-14.

—————・—————・—————・斎藤文紀・村上文敏・寺島 滋・寺島美南子・竹内三郎・吉川秀樹・志岐常正・太井子宏和・徳岡隆夫・公文富士夫・中野聡志・遠藤修一・前田広人・熊谷道夫・近藤洋一(1987) 湖沼汚染底質の堆積機構解明に関する研究. 環境庁環境保全研究成果集, p. 64-1~64-19.

—————(1988) 琵琶湖の堆積モデル. 碎屑性堆積物の研究, no. 5, p. 49-72.

—————・中尾征三・横田節哉・斎藤文紀・村上文敏・宮田雄一郎・寺島 滋・寺島美南子・竹内三郎・吉川秀樹・安田 聡・斎藤英二・渡辺和明・宮崎純一・星加 章・志岐常正・

徳岡隆夫・公文富士夫・中野聡志・遠藤修一・武蔵野実・吉川周作・久富邦彦・前田広人・近藤洋一(1989) 湖沼汚染底質の堆積機構解明に関する研究. 環境庁環境保全研究成果集, p. 47-1~47-30.

川嶋宗継・中川利宏・中嶋美栄子・塩田 晃・谷口孝敏・板坂 修・高松武次郎・松下録治・小山睦夫・堀 太郎(1978) 琵琶湖堆積物における種々の元素の鉛直分布と化学的性質—特に, マンガン, リン, ヒ素の分布について—, 滋賀大紀要, 自然, vol. 28, p. 13-29.

小林節子・楠田 隆(1984) 手賀沼の底質—汚染泥の堆積と性状. 千葉県水質保全研究所資料, no. 39, 49 p.

小林 純・森井ふじ・村本茂樹・中島 進(1971) 諏訪湖の重金属汚染について. 用水と廃水, vol. 13, p. 809-814.

—————・—————・—————・—————・寺岡久之・堀江正治(1975) 琵琶湖湖底堆積物中のヒ素, カドミウム, 鉛, 亜鉛, 銅, マンガン含有量について. 日本陸水学会誌, vol. 36, p. 6-15.

MASON, B.(1958) Principles of geochemistry. John Wiley and Sons, Inc., New York, 310 p.

MATSUYAMA, M.(1974) Vertical distributions of some chemical substance in surface sediments of a meromictic Lake Suigetsu. *Jour. Ocean. Soc. Japan*, vol. 30, p. 209-215.

MEGUMI, K.(1978) A problem in ^{210}Pb geochronologies of sediments. *Nature*, vol. 274, p. 885-887.

中島 進(1982) 琵琶湖柱状堆積物中の重金属元素(マンガン, 鉄, ヒ素, カドミウム, 鉛, 銅, 亜鉛, コバルト, ニッケル)の形態分別. 日本陸水学会誌, vol. 43, p. 67-80.

NISHIMURA, M.(1987) Geochemical characteristics of the high reduction zone of stenols in Suwa sediments and the environmental factors controlling the conversion of stenols into stanols. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 42, p. 349-357.

沖野外輝夫(1984) 諏訪湖—湖の回復と下水道. 門

- 司正三・高井康雄編, 陸水と人間活動, 東京大学出版会, 東京, p.103-166.
- TAKAMATSU, T., KAWASHIMA, M., MATSUSHITA, R. and KOYAMA, M.(1985) General distribution profiles of thirty-six elements in sediments and manganese concretions of Lake Biwa. *Jap. Jour. Limnol.*, vol. 46, p. 115-127.
- 立川正久(1979) 琵琶湖底泥中の重金属類について. 関西自然保護機構会報, no. 3, p. 1-26.
- TERASHIMA, S., YONETANI, H., MATSUMOTO, E. and INOCHI, Y.(1983) Sulfur and carbon contents in recent sediments and their relation to sedimentary environments. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 34, p. 361-382.
- 寺島 滋・井内美郎・米谷 宏・中尾征三・三田直樹(1986) 表層堆積物中のスズ存在量と堆積環境. 地調月報, vol. 37, p. 117-137.
- ・—————・中尾征三・米谷 宏(1989) 野尻湖底表層堆積物におけるマンガン, 銅, 鉛, 亜鉛の挙動. 地調月報, vol. 40, p. 113-125.
- 塚田松雄(1967) 野尻湖における化石枝角類と生態的秩序. 第四紀研究, vol. 6, p. 101-110.
- TUREKIAN, K. K. and WEDEPOHL, K. H.(1961) Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 72, p. 175-192.
- 横田節哉・井内美郎・徳岡隆夫(1988) 宍道湖底質表層部の重金属分布. 島根大学地質学研究報告, vol. 7, p. 33-37.
- 米谷 宏(1967) 湖水および底質中のガス成分. 地調月報, vol. 18, p. 731-757.
- (受付: 1989年12月6日; 受理 1990年1月12日)