

貯水池の環境

安 芸 周 一

1. まえがき

ダム・貯水池の価値、効用についてほんの一昔前まで何んの疑念もいだかれていなかった。渓谷にそそり立つ巨大なダム、満々と水を湛える貯水池は近代土木技術の象徴の一つとして高い社会的評価を受けてきた。厳しい自然条件を克服しながら技術の粋をつくして築造されるダム・貯水池はそれにかかわる土木技術者にとって大きな誇りであり、社会の福祉に貢献するという大きな喜びの対象であった。この誇り高いダム・貯水池が種々の環境問題から地元住民、自然保護論者の反対にあい、ダム公害、ダム災害という言葉まで生まれ、昔日の面目を失いかけている。ダムは人間の創ったもっとも有用な構造物の一つであるが、同時に自然および社会環境に及ぼす影響がもっとも大きいものの一つでもある。ダム・貯水池はその開発の目的を十分に果しながらも、周辺の環境に様々な影響を与えてきた。その顕著なものが貯水池の水質変化であり、堆砂、ダム下流の河床低下などの地形的変化、また河川の生態の変化であろう。

確かに従来のダム・貯水池が環境問題に十分な配慮を払って築造されてきたか否かには疑問がある。山間の僻地に小規模なダム・貯水池が立地し、その影響が周辺環境に吸収されて目立たなかったうちは問題にされなかったが、ダムの大規模化とこれと同時に進行した流域の社会開発の相乗作用として、ダムが有害視されるような環境問題が顕在化してきたのである。

しかし、いぜんとしてダム・貯水池は国民生活の向上に必要であり、その築造を続けなければならない。このため周辺環境と調和したダム・貯水池の開発方策の確立がますます重要になってきている。

ダム・貯水池の築造は他の大規模開発事業とともに環境アセスメントの主要な対象になっている。環境アセスメント法は未だ制定の運びになっていないが、ダムの事業主体では近年真剣に環境影響の事前予測と評価にとりくんでおり、環境影響調査書の作成および公開が行なわれている。

しかしながら、環境影響の予測と評価は社会、経済学から工学、物理、化学、生物、生態学の広範な学問分野にわたるものであり、かつ現状の科学技術の水準では定量的な予測、評価が可能なものは極く限られた事象にすぎない。現象の環境影響予測評価は個々の事象についても、また全体のシステムとしても決して十分なものとは言えず、予測、評価には明らかに限界がある。しかし、限界があるとはいえ、事前の慎重な調査と可能な限りの影響予測と対策は環境保全上有用なことは間違いない。これによって建設後生ずるかも知れない予測しえなかった事象への対応も効果的に行なわれよう。この意味で現状の科学技術の水準からすれば、環境保全対策がある程度後追的になるのはやむをえない。今後の環境科学の進展に期待するところである。

実際問題として、ダム・貯水池の築造は河川の社会、自然環境への大きなインパクトであり、本来が河川の流況変化を目的とする以上、周辺環境に対して変化をもたらさないということはありません。

ダム建設以前の河川の自然の均衡は確かに魅力的な望ましい環境であろう。しかし、自然の制御と資源の開発が国民の福祉の増進に必要なものであるならば、そのために変化する新しい環境を人間にとって望ましい環境に改善し、新しい均衡を形成するよう努力すべきである。

さらに、ダム・貯水池の環境問題は工業団地や火力、原子力発電所のそれとは別な特徴を有している。ダム・貯水池はそれ自体として環境に影響を及ぼすと同時に流域から種々の影響を受け、そのうちの幾つかを更に増幅させて下流へ伝達するという宿命を持っている。ダム・貯水池の環境保全は流

域全体として広範囲に総合的に考慮しなければならないのである。

2. 貯水池の環境影響要因と要素

2.1 国際大ダム会議の要因、要素マトリックス

環境に影響を及ぼす開発行為の個々の成分を要因、影響を受ける個々の成分を要素と呼ぶ。要因、要素は開発行為と環境の諸条件から選定され、要因、要素の関係を、一次、二次、三次影響と波及効果を考慮して詳細に検討し、環境影響評価項目が特定される。

諸外国および我国の多くの機関でダムの環境アセスメント手法の開発が進められている。要因、要素のとり上げ方、評価項目の特定と重要度の判定はそれぞれ国情に応じて異なるが、ここでは一例として国際大ダム会議（ICOLD）の作成したマトリックスを図－1に示す。

マトリックスの行には影響要素が示されており、次の6項目に大別されている。

1. 社会、経済へのインパクト（E 100）
2. 地球物理学的インパクト（E 200）
3. 水へのインパクト（E 300）
4. 気候へのインパクト（E 400）
5. 陸生、水生植物へのインパクト（E 500）
6. 陸生、水生動物へのインパクト（E 600）

マトリックスの列には開発行為、すなわち影響要因が示されており、次の5項目に大別されている。

A	X	SOCIAL AND ECONOMIC IMPACT										GEOLOGICAL IMPACT										IMPACT ON WATER										CLIMATE										IMPACT ON TERRESTRIAL FLORA AND AQUATIC FLORA										IMPACT ON TERRESTRIAL FAUNA AND AQUATIC FAUNA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		E 101	E 102	E 103	E 104	E 105	E 106	E 107	E 108	E 109	E 110	E 201	E 202	E 203	E 204	E 205	E 206	E 207	E 208	E 209	E 210	E 211	E 212	E 213	E 301	E 302	E 303	E 304	E 305	E 306	E 307	E 308	E 309	E 310	E 311	E 312	E 313	E 314	E 315	E 316	E 317	E 318	E 319	E 320	E 321	E 322	E 323	E 324	E 325	E 326	E 327	E 328	E 329	E 330	E 331	E 332	E 333	E 334	E 335	E 336	E 337	E 338	E 339	E 340	E 341	E 342	E 343	E 344	E 345	E 346	E 347	E 348	E 349	E 350	E 351	E 352	E 353	E 354	E 355	E 356	E 357	E 358	E 359	E 360	E 361	E 362	E 363	E 364	E 365	E 366	E 367	E 368	E 369	E 370	E 371	E 372	E 373	E 374	E 375	E 376	E 377	E 378	E 379	E 380	E 381	E 382	E 383	E 384	E 385	E 386	E 387	E 388	E 389	E 390	E 391	E 392	E 393	E 394	E 395	E 396	E 397	E 398	E 399	E 400	E 401	E 402	E 403	E 404	E 405	E 406	E 407	E 408	E 409	E 410	E 411	E 412	E 413	E 414	E 415	E 416	E 417	E 418	E 419	E 420	E 421	E 422	E 423	E 424	E 425	E 426	E 427	E 428	E 429	E 430	E 431	E 432	E 433	E 434	E 435	E 436	E 437	E 438	E 439	E 440	E 441	E 442	E 443	E 444	E 445	E 446	E 447	E 448	E 449	E 450	E 451	E 452	E 453	E 454	E 455	E 456	E 457	E 458	E 459	E 460	E 461	E 462	E 463	E 464	E 465	E 466	E 467	E 468	E 469	E 470	E 471	E 472	E 473	E 474	E 475	E 476	E 477	E 478	E 479	E 480	E 481	E 482	E 483	E 484	E 485	E 486	E 487	E 488	E 489	E 490	E 491	E 492	E 493	E 494	E 495	E 496	E 497	E 498	E 499	E 500	E 501	E 502	E 503	E 504	E 505	E 506	E 507	E 508	E 509	E 510	E 511	E 512	E 513	E 514	E 515	E 516	E 517	E 518	E 519	E 520	E 521	E 522	E 523	E 524	E 525	E 526	E 527	E 528	E 529	E 530	E 531	E 532	E 533	E 534	E 535	E 536	E 537	E 538	E 539	E 540	E 541	E 542	E 543	E 544	E 545	E 546	E 547	E 548	E 549	E 550	E 551	E 552	E 553	E 554	E 555	E 556	E 557	E 558	E 559	E 560	E 561	E 562	E 563	E 564	E 565	E 566	E 567	E 568	E 569	E 570	E 571	E 572	E 573	E 574	E 575	E 576	E 577	E 578	E 579	E 580	E 581	E 582	E 583	E 584	E 585	E 586	E 587	E 588	E 589	E 590	E 591	E 592	E 593	E 594	E 595	E 596	E 597	E 598	E 599	E 600	E 601	E 602	E 603	E 604	E 605	E 606	E 607	E 608	E 609	E 610	E 611	E 612	E 613	E 614	E 615	E 616	E 617	E 618	E 619	E 620	E 621	E 622	E 623	E 624	E 625	E 626	E 627	E 628	E 629	E 630	E 631	E 632	E 633	E 634	E 635	E 636	E 637	E 638	E 639	E 640	E 641	E 642	E 643	E 644	E 645	E 646	E 647	E 648	E 649	E 650	E 651	E 652	E 653	E 654	E 655	E 656	E 657	E 658	E 659	E 660	E 661	E 662	E 663	E 664	E 665	E 666	E 667	E 668	E 669	E 670	E 671	E 672	E 673	E 674	E 675	E 676	E 677	E 678	E 679	E 680	E 681	E 682	E 683	E 684	E 685	E 686	E 687	E 688	E 689	E 690	E 691	E 692	E 693	E 694	E 695	E 696	E 697	E 698	E 699	E 700	E 701	E 702	E 703	E 704	E 705	E 706	E 707	E 708	E 709	E 710	E 711	E 712	E 713	E 714	E 715	E 716	E 717	E 718	E 719	E 720	E 721	E 722	E 723	E 724	E 725	E 726	E 727	E 728	E 729	E 730	E 731	E 732	E 733	E 734	E 735	E 736	E 737	E 738	E 739	E 740	E 741	E 742	E 743	E 744	E 745	E 746	E 747	E 748	E 749	E 750	E 751	E 752	E 753	E 754	E 755	E 756	E 757	E 758	E 759	E 760	E 761	E 762	E 763	E 764	E 765	E 766	E 767	E 768	E 769	E 770	E 771	E 772	E 773	E 774	E 775	E 776	E 777	E 778	E 779	E 780	E 781	E 782	E 783	E 784	E 785	E 786	E 787	E 788	E 789	E 790	E 791	E 792	E 793	E 794	E 795	E 796	E 797	E 798	E 799	E 800	E 801	E 802	E 803	E 804	E 805	E 806	E 807	E 808	E 809	E 810	E 811	E 812	E 813	E 814	E 815	E 816	E 817	E 818	E 819	E 820	E 821	E 822	E 823	E 824	E 825	E 826	E 827	E 828	E 829	E 830	E 831	E 832	E 833	E 834	E 835	E 836	E 837	E 838	E 839	E 840	E 841	E 842	E 843	E 844	E 845	E 846	E 847	E 848	E 849	E 850	E 851	E 852	E 853	E 854	E 855	E 856	E 857	E 858	E 859	E 860	E 861	E 862	E 863	E 864	E 865	E 866	E 867	E 868	E 869	E 870	E 871	E 872	E 873	E 874	E 875	E 876	E 877	E 878	E 879	E 880	E 881	E 882	E 883	E 884	E 885	E 886	E 887	E 888	E 889	E 890	E 891	E 892	E 893	E 894	E 895	E 896	E 897	E 898	E 899	E 900	E 901	E 902	E 903	E 904	E 905	E 906	E 907	E 908	E 909	E 910	E 911	E 912	E 913	E 914	E 915	E 916	E 917	E 918	E 919	E 920	E 921	E 922	E 923	E 924	E 925	E 926	E 927	E 928	E 929	E 930	E 931	E 932	E 933	E 934	E 935	E 936	E 937	E 938	E 939	E 940	E 941	E 942	E 943	E 944	E 945	E 946	E 947	E 948	E 949	E 950	E 951	E 952	E 953	E 954	E 955	E 956	E 957	E 958	E 959	E 960	E 961	E 962	E 963	E 964	E 965	E 966	E 967	E 968	E 969	E 970	E 971	E 972	E 973	E 974	E 975	E 976	E 977	E 978	E 979	E 980	E 981	E 982	E 983	E 984	E 985	E 986	E 987	E 988	E 989	E 990	E 991	E 992	E 993	E 994	E 995	E 996	E 997	E 998	E 999	E 1000																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION										ENVIRONMENTAL AND COMMERCIALIZATION									

図－1 国際大ダム会議・ダム環境影響要因要素マトリックス

1. 貯水池建設の目的 (A 100)
2. 行為および構造物の存在 (A 200)
3. 影響を受ける場所 (A 300)
4. 対策行為 (A 400)
5. 法および管理行為 (A 500)

このマトリックスは我国でダム・貯水池の環境アセスメントを行なう上で考慮すべき要因、要素をほとんど網羅していると言える。マトリックスの構成は先づA 100, A 200によりE 100 よりE 600 の環境要素が受ける影響を抽出し、次にA 300 でその影響の生ずる場所を特定し、続いてA 400 の対策行為によって、対策の効果を評価するようになっており、行列の2次元の座標によって要因の1次、2次影響などの波及効果から対策の効果まで総合的に検討できる仕組みになっている。

国際大ダム会議は現在このマトリックスを加盟国国内委員会に送付し、各国での現実のダム・貯水池についての検討を依頼し、本年秋の総会までに集約する計画である。国際大ダム会議の指示による検討方法は個々のインパクトを次ぎの記号で評価するものである。

評価の記号

+・有益

-・有害

×・影響は考えられるが、特別な研究を行なわねば害益の評価困難

重要性 1・小

2・中

3・大

可能性 c・確実

p・あり得る

i・ほとんどあり得ない

n・不明

期 間 T・1時的

P・永続的

発生時期 I・直ちに

M・ある時間経過した後

L・長時間経過した後

影響予知 Y・予知されていた

N・予知されていない

例えば、ある開発行為がある環境要素に対して有害、重要な影響を確実に永続的に直ちに生ずるものと予測され、それが事前に予知されていたとするとマトリックスの交点に「-3 cPIY」と記入するわけである。

以上のように、このマトリックスは環境影響の定性的な評価にすぎないが、全世界的な集約によって世界各国に共通な問題意識あるいは国情に応じた考え方の相異などが明らかにされることが期待され、極めて興味深いものがある。

2.2 ダム・貯水池の主要な環境問題

ダム・貯水池の築造は周辺環境に様々な影響を及ぼすが我国の河川の自然環境に限ればその主要なものは河川水の質と量へのインパクト、河川の生態へのインパクトに集約されよう。

ダムは川を遮断し、停滞水域を形成する。この昇温期には熱されにくく、降温期には冷めにくい巨

大な水塊は地点の水文、気象条件との関連のもとに特有の水温構造を持つようになり、同時に下流河川の水温性状を変化させる。貯水池の水温構造は密度構造として池内の流れに密度流現象を誘起して流動部分、停滞部分を生じ、特有の水域環境を形成して行く。この結果、流入水の水質によっては深刻な水質変化を招くことがある。洪水時に流入する濁水は池内に滞留し、長期にわたり下流に放流される結果、濁水長期化現象を生ずる。流域の人間活動が盛んで流入水の栄養レベルが高い場合には停滞水域で活発な生物活動が生じ、時には淡水赤潮の発生も見られ、その経年的な蓄積として富栄養化現象が進んで行く。

生態の面から見れば、ダム の 築造によって河川は遮断され、貯水池、下流、上流とそれぞれ独立した生息環境が生ずる。貯水池は新たに形成される停滞水域として自然河川の時代とは全く異なる環境であり、水温、水質、流動形態に応じた新しい生物相が造られていく。下流は貯水池による河川の水の質と量の両面の影響を受ける。量的な面では貯水池本来の目的である流量の平均化によって流況は安定化する。一方、質的な面では水温変化、濁度の上昇、富栄養化による有機物の増量などが生ずる。この質的、量的な変化によって下流河川の生態には変化が生じて行く。上流は比較的影響は少ないが溯河性の魚類の溯上が阻害される。一方、貯水池を産卵場とする新しい魚類の増殖が見られるなど同様に生態の変化が生じて行く。

現在、ダム・貯水池の環境問題として地域住民から共通して提起されている課題は水質汚濁とその景観、リクリエーション、利水および漁業への影響である。このため、貯水池の水質保全や周辺環境への影響低減のために様々な努力がなされている。

これらの努力はもちろん必要である。しかし、ダム・貯水池の築造は自然環境に対する大きなインパクトであるため影響低減、自然保護という消極的な姿勢だけでは問題の解決は期待できない。

ダムはそれ自体として景観上の価値を有している。さらにダムによって造られる水域、水ぎわはリクリエーション、生産の両面において本質的に人間にとって好ましい環境である。ダム・貯水池の築造はその機能的価値に加えて、自然河川を多様な水域に改変し、これを人間に提供するという高い価値を有していることを認識しなければならない。この価値を本当に発揮させるために新しい水域を人間にとって好ましい環境に創造していく積極的な姿勢が重要である。

これは決して容易なことではない。特に水質汚濁の観点からはダム側の対策だけでは不十分であり、流域からの汚濁物質流入防止のための流域管理を併せた総合的な対策が必要である。山地の保全、流域住民の協力による生活、産業排水の規制および水質保全上の貯水池運用操作の総合的対策によって貯水池による水質変化を最小限に押さえることができよう。

このように管理された水域は景観、リクリエーションの上でも快適であろうし、生産の場としても望ましい環境が期待されよう。上流河川については適切な流域管理によって清流が維持されよう。貯水池を産卵場とする新しい魚類の増殖もあろうし、ダムによって阻止された溯河性魚類の人工放流によって一層望ましい自然河川環境が保たれよう。下流河川は水量、水質ともにある程度避け難い影響を受ける。しかし、それが最小限に押さえられた環境変化であれば、それに適合し、かつ人間にとっても望ましい新しい生態の形成が可能であろう。

河川、貯水池を含めたこのような総合的な流域管理は流域における多様な人間活動を考えると容易ならざる事業である。しかし、高度成長とともに急速に顕在化してきた河川、貯水池の環境問題に対処し、さらに環境と調和した河川開発を続けるためには避けては通れない道ではないかと考えられる。

以下次章において貯水池環境問題の基本的課題である水質現象について解説する。

いて水温、濃度の収支を逐次計算し、貯水池内の水温、濃度分布および流出水の水温、濃度を算定する。現在のところ、水質の物理的変化のみが扱われており、化学的、生物学的変化の考慮は今後の課題とされている。

解析モデルはコントロール・ヴォリュームのとり方によって図-2に示すように1次元モデルと2次元モデルに別けられる。1次元モデルは貯水池水質を水平方向に平均化し、鉛直方向の変化のみを考えるものであり、2次元モデルは貯水池水質の河道方向および鉛直方向の変化を考慮するものである。また、両モデルとも貯水池の幅方向には平均化して考える。

この二つのモデルはそれぞれ適用性に得失がある。先づ計算時間の上で大まかに言って、2次元モデルは河道方向の分割数だけ1次元モデルより倍加され、1次元モデルの方がはるかに簡便である。河川水温の年間変化は漸变的であり、貯水池内でも水平方向の一様性は一般に保たれる。濁度などの濃度に関しても、一回の洪水で池水の大半が入れ換え、その後の流出、沈降、清水の流入による希釈などで清澄化して行く過程では、ほぼ水平方向に一樣とみなして良い場合が多い。この様な場合には1次元モデルによって貯水池水の水温、濃度の変化を良く表現することができる。

一方、小規模の洪水で濁水塊が貯水池内を伝播して行くような場合の解析には2次元モデルが有用である。

両モデルとも、大気、水面間の熱収支、流入、流出水による熱、濃度の移流、拡散を熱保存方程式、濃度保存方程式、池水の流動の式、連続式を用いて数値解析するものであり、実際の計算方法として二、三の方法が提案されているが、ここでは電力中央研究所が開発してきた手法について概要を説明する。

(1) 1次元モデルによる予測解析手法⁽⁵⁾

1次元モデルにおいて図-2〔A〕に示すように貯水池を厚さ Δy の水平層に分割し、それぞれの層について熱および濃度収支を計算する。標高 y の位置の水平層の平面積を A_y とすると、これを貯水池長 L_y を用いて平均幅 B_y 、長さ L_y の長方形、 $A_y = L_y \times B_y$ に置きかえる。すなわち、貯水池を各標高の平均幅を有する長方形の水平層の積重ねで示す。

大気圏からの熱の供給は日射 ϕ_0 および大気輻射 ϕ_a である。一方、大気圏への熱の流出は逆輻射 ϕ_r 、蒸発 ϕ_e 、熱伝達 ϕ_c である。このうち、短波放射 ϕ_0 は貯水池の比較的深部に到達するが、他の熱交換は表層付近のみで行なわれる。その他、地熱、地下水などによる熱収支が考えられるが、その貯水池水温に対する影響は一般に微弱とされている。

流入水は流量 Q_i 、水温 T_i 、濃度 C_i であるが、流入部で表層水を混合、連行し、 Q_i' 、 T_i' 、 C_i' となって貯水池内に流入する。 T_i は一般に表面水温より低いから、混合後の流れは密度流として貯水池底に沿って流入し、自身と等密度の層に達した後、水平方向に流入する。流入水の鉛直方向の流入厚さは貯水池鉛直方向密度分布によって規制され、くさび状に流入する流れの流速分布はガウス分布で近似され、かつ貯水池幅の方向には一樣とする。

流出水は越流型洪水吐、表層取水口などからの流出に相当する Q_{01} 、放流管、中層取水口などからの流出に相当する Q_{02} である。 Q_{01} 、 Q_{02} による貯水池内の鉛直方向の流動層厚は同じく密度分布により規制され、また流速分布はガウス分布で近似され、かつ貯水池幅方向には一樣とする。流出水温、濃度、 T_{01} 、 T_{02} 、 C_{01} 、 C_{02} はそれぞれ貯水池内の水温、濃度分布と流出による流れの流速分布の関係によって定まる。

一方、貯水池内には流入、流出による流れによって鉛直方向の移流流速が生ずる。移流流速は貯水池の各標高につき連続の条件から定められる。また、貯水池内の密度分布が冷却その他によって鉛直方向に不安定になると対流による流れが生ずる。さらに貯水池内には分子拡散、渦動拡散が存在する。

また、懸濁粒子は個有の沈降速度で沈降する。

以上のような外圏との熱・濃度収支、貯水池内の流動によって貯水池には特有の水温、濃度分布が形成されるのであるが、現象を規定する熱保存、濃度保存方程式および連続式は鉛直一次元の仮定にもとづき標高 y の水平層に関し、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_y}{\partial t} = & \frac{(\alpha + D)}{A_y} \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial T_y}{\partial y} \right) \\ & - \frac{1}{\rho c A_y} \frac{\partial}{\partial y} (A_y \phi_y) - \frac{1}{A_y} \frac{\partial}{\partial y} (v_y A_y T_y) \\ & + \frac{1}{A_y} (u_{iy} B_y T'_i - u_{oy} B_y T_y) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_y}{\partial t} = & \frac{(\alpha + D)}{A_y} \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial C_y}{\partial y} \right) \\ & - \frac{1}{A_y} \frac{\partial}{\partial y} (v_y A_y C_y) \\ & + \frac{1}{A_y} (u_{iy} B_y C'_i - u_{oy} B_y C_y) \\ & + \frac{1}{A_y} \frac{\partial}{\partial y} (w_o A_y C_y) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial Q_{oy}}{\partial y} = q_{iy} - q_{oy} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 T_y ：標高 y の水温

C_y ：標高 y の濃度

u_{iy} ：標高 y の流入水の水平方向流速

u_{oy} ：標高 y の流出水の水平方向流速

v_y ：標高 y の鉛直方向流速

w_o ：懸濁粒子の沈降速度

T'_i ：標高 y の流入水温

C'_i ：標高 y の流入水濃度

A_y ：標高 y の貯水池平面積

B_y ：標高 y の貯水池平均幅

ϕ_y ：標高 y に達する輻射熱

α ：分子拡散係数

D ：渦動拡散係数

ρ ：水の密度

c ：水の比熱

t ：時 間

Q_{oy} ：標高 y の鉛直方向の流量

q_{iy} ：標高 y の水平方向の流入量

q_{oy} ：標高 y の水平方向流出量

(1)式の左辺は水温の時間的变化，右辺第1項は鉛直拡散項，第2項は輻射熱項，第3項は鉛直移流項，第4項は水平移流項である。

(2)式の左辺は濃度の時間的变化，右辺第1項は鉛直拡散項，第2項は鉛直移流項，第3項は水平移流項，第4項は沈降項である。

また，(3)式は連続式である。

(1)，(2)，(3)式によって支配される貯水池内の水温，濃度は，これ等を差分式に置きかえた数値計算により解かれる。

(1)，(2)，(3)式には貯水池水の運動方程式が含まれていない。このため，池水の流動を計算するために流入，流出端に流速分布を与え，これを境界条件として連続式を用いて計算する。

流出による流れは池内の鉛直方向密度分布によって，その流動範囲が制約され，流出口の標高によって表層流，中間流および底層流を形成する。流出水の流速分布および流動層厚は次式で与えられる。

$$u_{oy} = u_{o\max} e^{-\frac{(y-y_{out})^2}{2\sigma_o^2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta_o = G^{-1/3} \left(-\frac{Q_o}{\theta \sqrt{g \epsilon_o}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_o = \delta_o / 3.93 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\epsilon_o = \frac{\rho_o - \rho_y}{\rho_o y} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに $u_{o\max}$: $y = y_{out}$ の流速

y_{out} : 流出口中心線の標高

σ_o : 流速分布の標準偏差

δ_o : 流出層の鉛直方向厚さ

G : 日野・大西⁽⁶⁾の無次元数， G の値は白砂の実験⁽⁷⁾により次のように与えられている。

表層，底層流出 $G = 0.324$

中層流出 $G = 0.134$

Q_o : 流出流量

θ : 流出口開口角 (ラジアン)，鉛直，平板なダム上流面に開口する場合は $\theta = \pi$

g : 重力加速度

ϵ_o : 密度勾配

ρ_o : 流出点の密度

ρ_y : 流出点より鉛直方向に y はなれた点の密度

流入水の貯水池流入部における表層水との混合およびその後の密度流としての貯水池深部への流入過程については未知の問題が多いが，当面次のように考える。

流入水は表層水を連行係数 r で連行する。すなわち

$$Q'_i = (1 + r) Q_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T'_i = \frac{T_i + r T_m}{1 + r} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$C'_i = \frac{C_i + r C_m}{1 + r} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに， r : 連行係数 (0.5 ~ 1.0)

Q_i : 流入流量 (′ は連行後の値)

T_i : 流入水温 (′ は連行後の値)

C_i : 流入濃度 (′ は連行後の値)

T_m : 表層付近で連行される水の平均水温

C_m : 表層付近で連行される水の平均濃度

連行は表層から深さ d_m の範囲で行なわれるものとするが、 d_m は流入河川の水深程度とする。

混合後の流れは密度流として貯水池底に沿って流下し、等密度の標高に達して水平方向に層状に流入する。流入層厚および流速分布は主として現地観測の結果から次のように示される。

$$u_{iy} = u_{i\max} e^{-\frac{(y-y_{in})^2}{2\sigma_i^2}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$d = \sqrt{\frac{Q'_i}{B_{yn} F_i \sqrt{g\epsilon_i}}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_i = \frac{d}{3.93} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\epsilon_i = \frac{\rho_{in} - \rho_s}{\rho_{in} (y_s - y_{in})} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $u_{i\max}$: 標高 y_{in} の流入流速

y_{in} : 流入水中心線の標高

d : 流入層の鉛直方向厚さ

F_i : 内部フルード数、流入水は $F_i = 0.25$ となるように形で流入することが観測されている。

B_{yn} : 標高 y_{in} の貯水池幅

σ_i : 流速分布の標準偏差

ϵ_i : 密度勾配

ρ_{in} : 流入水および標高 y_{in} の貯水池水の密度

ρ_s : 表層水の密度

y_s : 水面の標高

この他、大気との熱収支として日射による輻射熱、有効逆輻射、蒸発、伝導による熱損失を考慮するが計算の詳細については参考文献⁽⁸⁾を参照されたい。

(2) 2次元モデルによる予測解析手法

貯水池内での水温、水質の水平方向の一様性の仮定が成立しない場合、例えば小規模洪水時の濁水塊の貯水池内の伝播を解析するためには流れ方向の変化も考慮できる2次元モデルが必要である。

2次元モデルにおいては、図-2〔B〕に示すように貯水池を厚さ dy の N 個の水平層および区間距離 dx の M 個の区間に分割し、分割された各要素 (m, n) に関し、熱、濃度の収支計算を行なう。貯水池の形状は各水平層について現実の貯水池の水平面積を等しく、各区間の幅 B_n^m を現実の形状を簡略化して定める。このようなモデルに関し、各要素毎に数値解析を行うわけであるが、熱、濃度の両者について同時に解析をすすめることは膨大な計算量になる。ここでは、計算の簡略化をはかるために前述の1次元モデルを基礎とし、濃度に関してのみ2次元的に計算する簡便な2次元モデル⁽⁹⁾を紹介する。

貯水池の水温はほとんどの場合、水平方向に一樣と考えて良い。したがって、水温については水平方向の変化を考慮してもあまり意味はない。そこで、先づ前述の1次元モデルによって熱収支のみを計算し、貯水池の鉛直方向の水温分布を定める。つづいて、この密度構造を2次元モデルに与え、流入、流出端の流速分布 u_n^b を一次元モデルと同様に(4)~(10)式で計算する。貯水池内の流れは、流入、流出端の流速分布を境界条件として、連続の条件より次のように計算する。

$$v_{n,n+1} = \frac{v_{n-1,n} \sum \bar{B}_{n-1,n}^m dx + A_n^b u_n^b}{\sum \bar{B}_{n,n+1}^m dx} \dots \dots \dots (15)$$

$$u_n^{m, m+1} = \frac{\bar{B}_n^{m-1, m}}{\bar{B}_n^{m, m+1}} u_n^{m-1, m} + \frac{\bar{B}_{n-1, n}^m}{\bar{B}_n^{m, m+1}} \frac{dx}{dy} u_{n-1, n} - \frac{\bar{B}_{n, n+1}^m}{\bar{B}_n^{m, m+1}} \frac{dx}{dy} v_{n, n+1} \dots \quad (16)$$

ここに、 v ：鉛直流速（添字については図-2参照）

 u : 水平流速 ()

B : 要素の幅 (")

 A^b : 流入, 流出端における n 層の断面積

$$\bar{B}_{n,n+1}^m = (B_{n,n+1}^{m-1,m} + B_{n,n+1}^{m,m+1}) / 2$$

$$\bar{B}_n^{m,m+1} = (B_{n-1,n}^{m,m+1} + B_{n,n+1}^{m,m+1}) / 2$$

つぎに、流入端の濃度分布 C_0 を与え、濃度の時間変化を次式によって計算する。

$$\begin{aligned}
C_{nm}^{t+\Delta t} = & C_{nm}^t + (C_{nx}^t \bar{B}_{n,m+1}^{m,m+1} u_{n,m+1}^m - C_{nx}^t \bar{B}_{n,m}^{m-1,m} u_{n,m}^{m-1,m}) \frac{\Delta t}{\bar{B}_{nm}} \frac{dx}{\Delta x} \\
& + (C_{ym}^t \bar{B}_{n-1,n}^{m,m} v_{n-1,n} - C_{ym}^t \bar{B}_{n,n+1}^{m,m} u_{n,n+1}) \times \frac{\Delta t}{\bar{B}_{nm}} \frac{dy}{\Delta y} \\
& + (C_{n+1,m}^t \bar{B}_{n,n+1}^{m,m} - C_{nm}^t \bar{B}_{n-1,n}^{m,m}) \times \frac{w_0 \Delta t}{\bar{B}_{nm}} \frac{dx}{\Delta x} \\
& + C_{nm}^t (\bar{B}_{n-1,n}^{m,m} - \bar{B}_{n,n+1}^{m,m}) \frac{w_0 \Delta t}{\bar{B}_{nm}} \frac{dy}{\Delta y} \\
& + (\alpha + D) \left\{ (C_{n+1,m}^t - C_{nm}^t) \bar{B}_{n-1,n}^{m,m} - (C_{nm}^t - C_{n-1,m}^t) \bar{B}_{n,n+1}^{m,m} \right\} \frac{\Delta t}{\bar{B}_{nm}} \frac{dy}{\Delta y} \quad (17)
\end{aligned}$$

$$\text{с.с.с.}, \quad \bar{B}_{n,m} = (B_{n-1,n}^{m-1,m} + B_{n-1,n}^{m,m+1} + B_{n+1,n}^{m-1,m} + B_{n+1,n}^{m,m+1}) / 4$$

C の添字: (x, x', y, y') : 濃度の輸送速度が正の時 $(m+1, m, n-1, n)$, 負の時 $(m, m-1, n, n+1)$

 w_0 : 懸濁粒子の沈降速度 α : 分子拡散係数

D : 渦動拡散係数

(7)式の右辺第2項は水平移流，第3項は鉛直移流，第4項は沈降，第5項は沈積，第6項は拡散による濃度変化を表わす。

3.3 水質現象の予測解析に必要な資料

(1) 水温・濁度の予測資料

前節に述べた予測解析手法によって水温、濁度の予測を行なうに当り必要な資料は次のとおりである。

(i) 水文資料 (1) 貯水池流入量

(口) 流入水温

(ハ) 流入水濁度

(二) 懸濁物質の粒度分布, 密度

貯水池流入量は常時においては日平均値，洪水時には洪水波形にしたがって与える。流入水

温は常時においては日平均値を用いるが、定時観測の資料を用いる場合には、河川水温は日間で2～3℃変化することから、定時観測値と日平均値の関係を把握しておく必要がある。また、洪水時の河川水温は常時より一般に低下する傾向にあるので、その特性を良く調べておく必要がある。河川水の流量と濁度の関係および懸濁物質の性状は極めて複雑であり、その的確な把握は難しい。一般に濁度Cは流量Qと関係づけられ、次式で表現されることが多い。

$$C = aQ^b \quad \dots\dots\dots (18)$$

しかし、同一河川においても洪水条件によって係数a、指数bの値は大幅に変化することが観測されている。濁度はいわゆるWash Loadであり、元来水理量との関係づけは困難である。洪水観測を繰返し、対象河川の対象地点における平均的なa、bを求めなければならない。参考までに従来の観測例を図-3に示す。濁度と同時に懸濁物質の粒度構成、物質の性状も重要な要素である。粒度分布も濁度と同様に洪水条件によって変化するし、また洪水期間中でも変化する。これも濁度と同じく、洪水観測を繰返し、平均的性状を把握しなければならない。懸濁物質は一般に無機の粘土鉱物と考えて良いが、その組成、密度について調査しておく必要がある。

- (ii) 気象資料
 - (イ) 気温
 - (ロ) 湿度
 - (ハ) 風速
 - (ニ) 雲量
 - (ホ) 日射量

気象資料は日平均値を用いる。新設ダムの事前調査として気象観測を行う場合には計画貯水池の水面標高付近で行うのが望ましい。また、ダム地点に気象資料が不備な場合には気象条件の類似した最寄りの測候所、気象台の資料を高度補正などして用いることもできる。

- (iii) 貯水池運用操作
 - (イ) 常時の運用方法
 - (ロ) 洪水時の運用方法

常時の運用方法において、日間に放流量の変動がある場合、例えばピーク発電、揚水発電を実施する場合には日間の放流方式を定め、これを予測解析に織りこむ。洪水時には水位の予備低下、サーチャージ、洪水放流管や堤頂洪水吐の使用など、あらかじめ計画されている貯水池運用操作方を予測解析に織りこむ。

(2) 富栄養化の予測資料

貯水池の富栄養化の過程を解析的に予測する試み⁽¹⁰⁾もなされているが、生物活動に原因する複雑な現象の機構解明はなお将来の課題であろう。富栄養化の予測資料としては河川水の栄養塩類（リン、窒素など）、COD、BOD、TOCなどの濃度が考えられている。これらの水質汚染物質の排出源は生

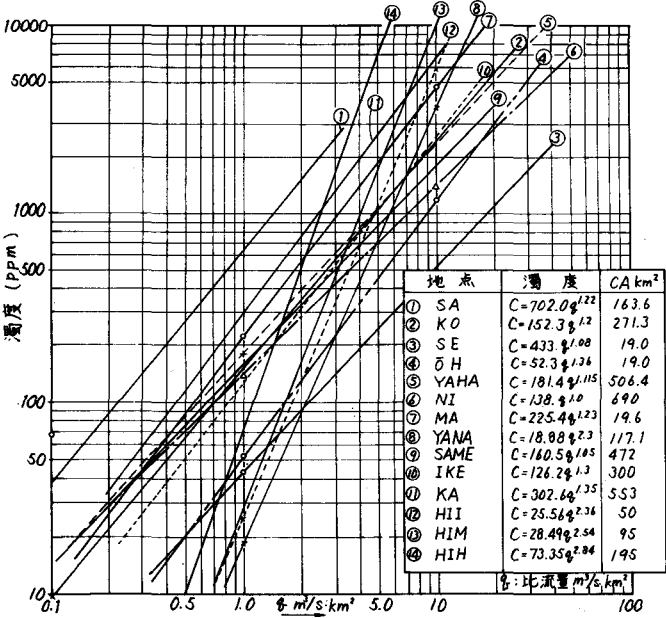


図-3 濁度と比流量の関係

活排水、産業排水をはじめ農林畜産業から自然の山地に及ぶ多様なもので、しかも生活形態の変化、多施肥農業の傾向、畜産の振興、し尿処理方式の変化などによって排出量は増大する傾向にある。

この多様な排出源からの排出形態も様々で、生活排水、産業排水のように、日間ないしは週間の変動が主で、季節的な変動の少ないものから農業排水のように季節的なもの、また流域に廃棄物などとして蓄積された栄養塩が降雨により洗い流されるものなどがあり、河川の定点での月1,2回の定期観測ではその実態の把握は難しい。

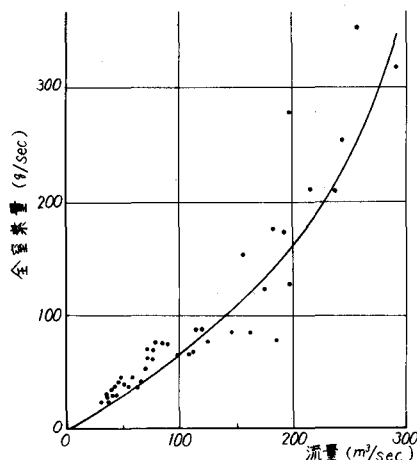


図-4 H川における流量と全窒素量の関係

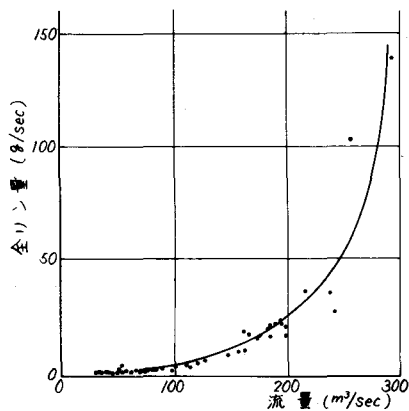


図-5 H川における流量と全リン量の関係の一例

現在、富栄養化の予測は主として栄養塩濃度を用いて行なわれている。栄養塩濃度の把握は濁度の把握よりも難しいが、現状では濁度と同様に河川流量と何んらかの関連づけを行ない、負荷量を予測せざるを得ない。このためには、月1,2回の定期観測に加えて、低水量時の連続観測および洪水時観測が必要である。低水量時の連続観測は生活、産業排水など排出量が自然現象に影響されない排出源の日間ないしは週間の変化を求めるもので、休日をはさむ3日以上連続観測が望ましい。

洪水時には多量の栄養塩類の流出があることが幾つかの実測例で確かめられている。例として、全窒素、全リンと洪水流量の関係を図-4, 5に示す。濁度と同様に栄養塩濃度も流量と明らかな相関があることが解る。しかし、この相関関係も洪水条件によってさまざまと考えられるので洪水観測の積み重ねによって平均的な性状を把握するよう努めねばならない。

3.4 水質現象の予測解析例

(1) 水温・濁度の予測

(i) 1次元モデルによる解析例

1次元モデルによる水温予測が良好な結果を与えることは良く知られている。

一方、濁度に関しては資料の不十分な点もあって、解析例のうち適合性の良いものもあれば悪いものもある。この原因はモデルの適合性とともな濁度および懸濁物質の性状が十分把握されていない点に主としてあるものと考えられる。適合性の良い結果としてO貯水池の例を図-6, 7に示す。これはO貯水池に既往最大規模の洪水が生じ、池水が全面的に濁水化した後の濁度の変化を解析したものであり、1次元モデルの適用性が高いケースである。図-6は洪水後の池内の水温、濁度分布であり、水温成層の再形成、池水の清澄化の過程が良く表現されている。図-7は放流水の水温、濁度の観測値と計算値の比較であるが、両者の適合性は良い。

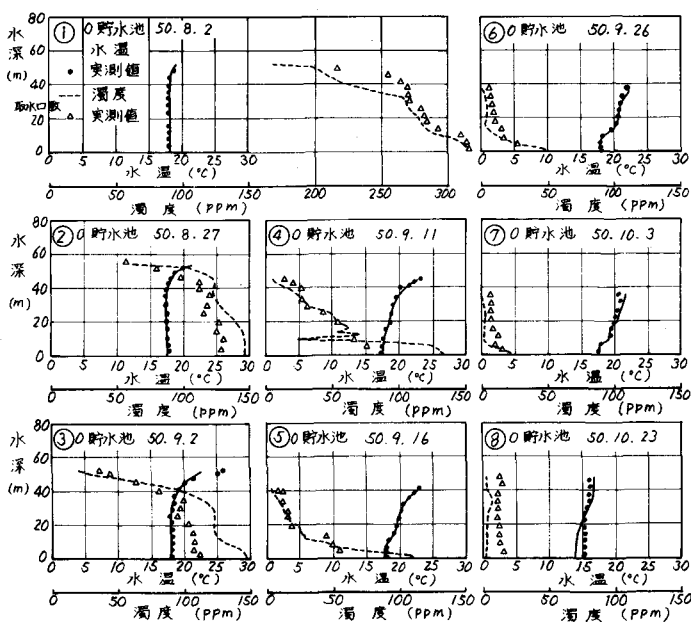


図-6 O貯水池洪水後の水温、濁度の鉛直分布の経時変化、計算値と実測値の比較

(ii) 2次元モデルによる解析例

H貯水池において、出水時に詳細な水質観測を行ない、出水時に流入した濁水の貯水池内での挙動を2次元モデルにより解析した例を図-8, 9, 10に示す。図-8は出水時の流量、濁度および懸濁物質の50%粒径の1時間毎の変化を示すもので、濁度は流量と極めて良い相関を有するが、その粒度構成には時々刻々の変化のあることが解る。図-9は濁水塊が取水口に到達し、排出されている時期の池内の濁度、水温分布の計算値と観測値である。H貯水池には濁水軽減対策として選択取水設備が設けられている。この出水時には洪水後約10日間中層取水を続け、その後表層取水に切替えている。図-9には濁水塊が2次躍層上を流下し、取水口に達する過程が良く示されている。

図-10は放流水の濁度の計算値と実測値の比較である。図-10から流入した濁水が約5日後に取水口に達することが解るが、2次元モデルによる計算はこれを良く表現している。取水口を表層に切替えた後に放流水濁度は急減し、選択取水の有効性を示している。また、中層、表層取水のそれぞれの時期において濁度の計算値と観測値は良い一致を示している。図には同条件の出水を1次元モデルで計算した結果を併記したが、当然のことながら1次元モデルでは貯水池内の濁水塊の伝播は表現できない。なお、以上の解析例を示した貯水池の諸特性は表-1のようである。

(iii) 解析モデルの適応性

貯水池の水温、濁度は予測に必要な資料が整備されていれば実用上十分な精度で予測できると言える。ここに示した予測手法においても2次元モデルは1次元モデルの2倍以上の計算時間を要し、1次元モデルでも十分有用な場合があるので、その適応性を考慮して手法を選定する必要がある。

水平方向の一様性の仮定が成立する水温および大洪水後の濁水の清澄化過程の予測には1次元モデル

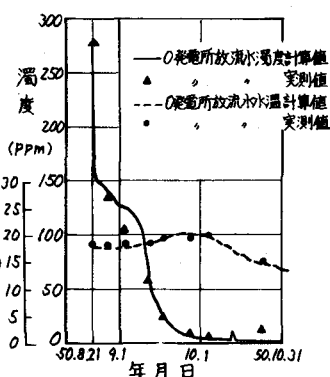


図-7 O貯水池放水口水温、濁度変化

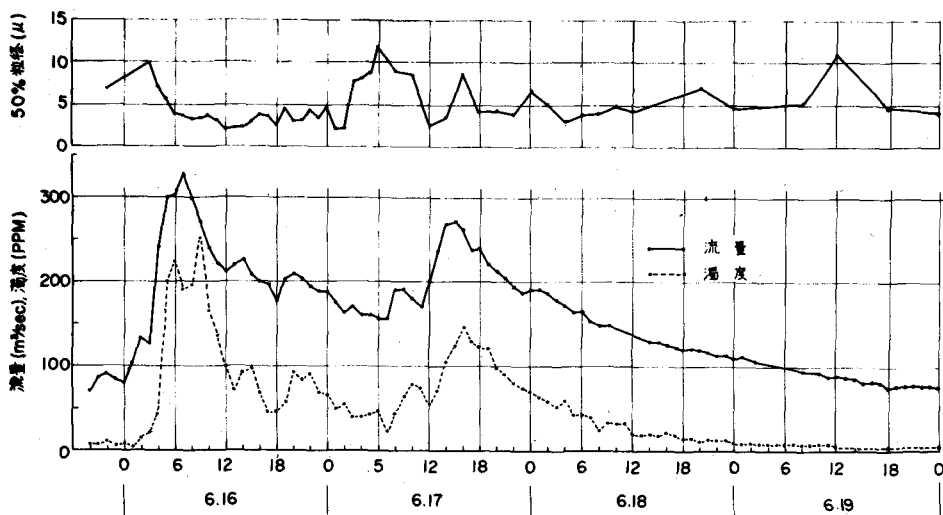


図-8 洪水時の流量、濁度、懸濁物質の粒径（H川における観測例）

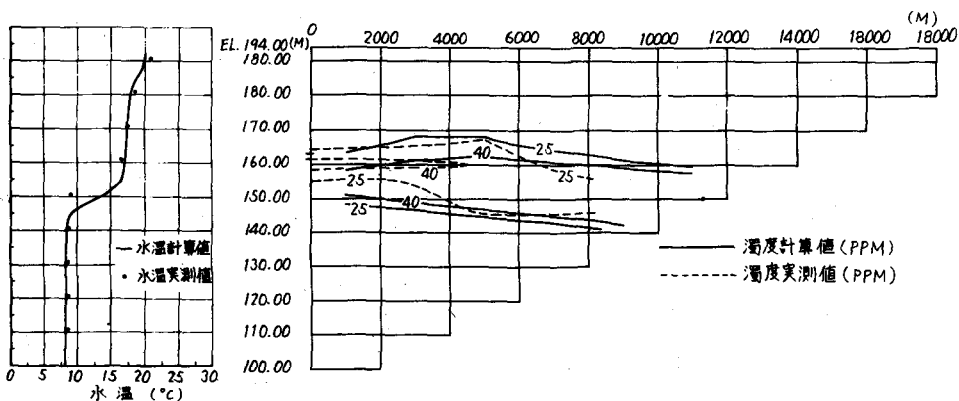


図-9 貯水池内水温、濁度の計算値と実測値の比較（昭和52年6月23日）

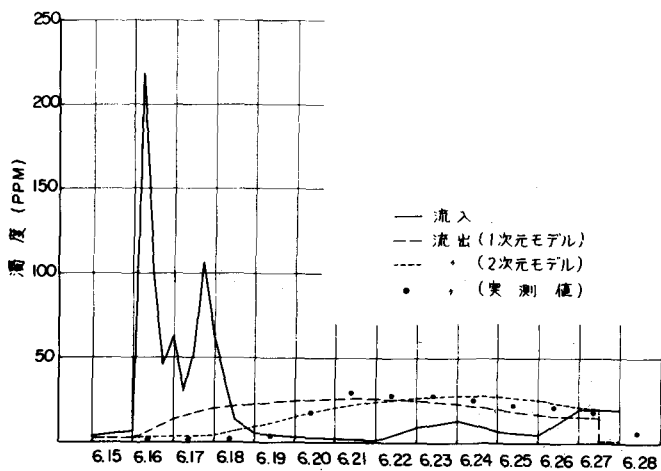


図-10 流出水濁度の計算値と実測値の比較（Hダムにおける観測例）

ルが十分有効である。一方、時間的变化が比較的に急な現象で水平方向の一様性を仮定し難いような場合、例えば小規模洪水時の濁水塊の伝播や大規模洪水時の洪水期間中の貯水池内の濁水挙動の予測には2次元モデルが有効である。両者の適応性および計算時間などを考慮すると、年間を通して水温、濁度の予測を行う場合には原則として1次元モデルにより、洪水時など短期間に2次元モデルを併用するのが有効と考えられる。

(2) 富栄養化の予測

(i) 富栄養化の判断基準

湖沼の栄養レベルは一般に貧栄養、中栄養、富栄養に分類される。坂本は栄養レベルを湖沼水の全窒素(T-N)、全リン(T-P)の濃度で分類し、表-2⁽¹¹⁾を与えている。また、Vollenweiderは湖沼への全リンの負荷量から富栄養化の危険性の有無を判断する図-11⁽¹²⁾を与えている。図-11はリンを

表-1 解析例貯水池の諸元

貯水池名	H	O
種類	発電専用	発電専用
ダム高(m)	130	74
総貯水容量($\times 10^6 \text{ m}^3$)	258	20
有効容量($\times 10^6 \text{ m}^3$)	156	12
湛水面積(km^2)	6.86	0.85
貯水池長(km)	22	7
流域面積(km^2)	415	190
年総流入量/総貯水量	4.1	13.2
最大使用水量(m^3/sec)	137	14
取水口位置	表層, 中層	中層

表-2 湖沼栄養度の分類

栄養状態	全窒素(mg/ℓ)	全リン(mg/ℓ)
貧栄養	0.02~0.2	0.002~0.02
中栄養	0.1~0.7	0.01~0.03
富栄養	0.5~1.3	0.01~0.09

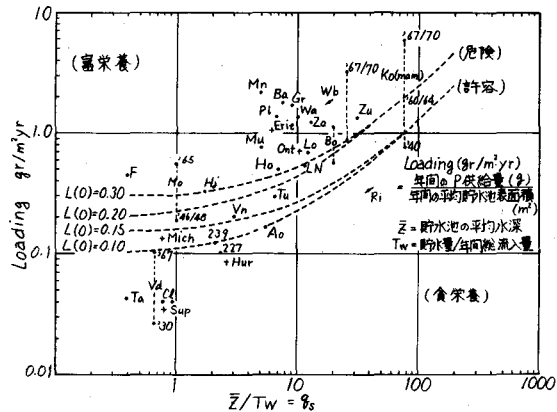


図-11 リン負荷と平均水深/深留時間の相関図 (Vollenweider 1973)

富栄養化の主要因として扱ったもので、縦軸は湖の単位面積当りの全リンの年間負荷量($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)、横軸は湖の平均水深 $\bar{Z}$ (m)と湖水の滞留期間 T_w (年)の比をとっている。図から解るように、同じ負荷量に対して、湖の水深が浅いほど、また滞留期間が長いほど富栄養化の危険が大きい。

しかし、これらの陸水学的な自然湖沼の栄養レベルの分類は必ずしも水質上の障害と関係づけられているわけではない。坂本の基準によると我国の既設主要貯水池のうちで貧栄養のレベルにあるのは稀れであり、大半が中ないし富栄養レベルに属している。そして、その中で富栄養化による水質障害を起している事例はそれ程多くはない。狭小な国土で大規模な生産活動を行っている我国では水域のある程度の栄養レベルの上昇は覚悟しなければなるまい。問題はそれを水質障害の生ずるレベル以下に押さえることである。人工の貯水池は自然湖沼とは異った流動形態、栄養塩類の蓄積機構を有し、かつ水質障害という観点からすれば独自の判断基準が必要である。現状では既設貯水池の水質現象の実態調査からある類型化を行って判断基準を作成することが適切と考えられ、これからの研究課題である。

(ii) 貯水池への栄養塩蓄積過程の試算

洪水時に大量の栄養塩類が流域から排出されることが観測されている。図-4, 5に示したH川は

その1例であるが、これらの全窒素、全リンが貯水池に流入した後の挙動を解析した例を示す。全窒素、全リンを溶解性、非溶解性に分けて分析したところ、いずれも非溶解性成分は濁度と良い相関が得られた。そこで、窒素、リンともに非溶解性分は懸濁物質と同じ挙動を示し、溶解性成分は水と同じ挙動をするものとして、その貯水池内での挙動を2次元モデルにより解析した。貯水池内には生物活動などに原因する窒素、リン収支の生物化学的変化が存在するが、その評価は難しいし、また短期間の現象であるためこれは無視した。

初期条件として貯水池内の窒素、リン濃度分布を観測値にもとづいて与え、窒素、リンの蓄積、排出の過程を計算した結果を図-12に示す。6月15日の洪水流入以来、6月27日に取水口を中層から表層に切替える間に貯水池内には窒素12t、リン4.3tの蓄積があるという結果になっている。このことから、洪水時に流入する栄養塩類は貯水池富栄養化現象の主要な要因であることが類推される。

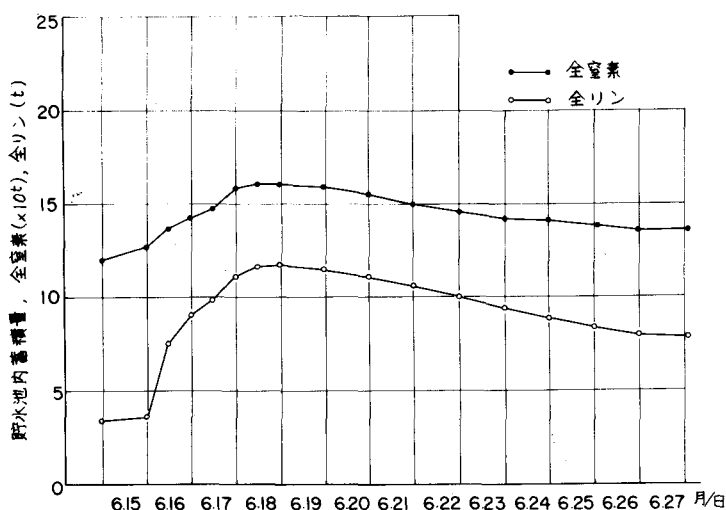


図-12 出水前後における貯水池内全窒素、全リンの蓄積量

3.5 水質保全対策

(1) 水温変化の対策

貯水池の水質変化現象として水温のみを考慮すれば良い場合には対策は比較的容易である。解析事例に示したように貯水池内および放流水の水温は高い精度で予測することができ、かつ下流域の水温要求に対しては選択取水設備によって十分対応することができる。下流域の水温要求が灌漑期のみの場合には表層取水設備だけで対応でき、ほぼ流入水温に近い温度の水を放流できる。

しかし、水温のみが問題になる事例はむしろ稀れであり、他の水質現象とともに考えねばならないことが多い。

(2) 濁水長期化の対策

濁水長期化現象は貯水池規模、洪水規模、洪水発生時期および貯水池運用操作によって様々な形態をとる。したがって、対策も多様化するし、対応しきれない現象もある。水温変化は純粋に貯留による水質変化であるが、濁水や富栄養化はその原因が貯水池自体のみでなく、上流域に人為的に作られる場合が多い。濁水長期化の対策として第一に流域の適切な管理がなされなければならない。しかし、いかに流域管理が実施されても日本の河川で洪水時に濁らないことは有り得ないし、また洪水時の水を貯留することがダムの主な目的であるとすれば濁水の貯留は避けられず、貯水池としてもできるだけの対策を講ずる必要に迫られている。既に選択取水が一つの手段として提案され、二、三の

現実の地点に設置され、効果も確認されている。⁽¹³⁾しかし、その効用にも限度があり、選択取水によってすべてに対応できるわけではない。

洪水放流設備と選択取水設備の組合せによって、できるだけ早期に濁水を排出し、清水の温存をはかる。放流操作による濁水長期化の軽減対策は数値解析により効果の評価ができるが、大まかな目安として効果の期待できるのは洪水の総流入量が貯水池総容量以下の規模の洪水である。

(3) 富栄養化の対策

貯水池の富栄養化防止対策として、貯水池側でとるべき対策と流域からの汚染物質の流入規制がある。貯水池側でとるべき対策としては例えば前節で示したように貯水池の運用操作によって栄養塩をできるだけ排出し、蓄積の防止をはかったり、貯水池深部に酸素を供給し、酸欠状態による湖底堆積栄養塩の溶出を防ぐなどが考えられるが、水温、濁水対策との競合もあり、その効果はあまり期待できない。一方、富栄養化現象の原因物質の流域からの排出は濁水現象とは異なり、主として人為的な原因によるものであり、山地からの排出でも伐採、植林、施肥などが主因と考えられている。したがって、排出の人為的な制御も濁水に較べては容易であり、流域の適切な管理が重要である。

ただ、富栄養化現象自体の理解が未だ十分でなく、どのような栄養レベルを目標に貯水池の水質保全を行うべきかも明らかにされていない。著者の私見では植物性プランクトンの異常増殖、いわゆる淡水赤潮の発生防止が一つの規準になるものと考えられる。淡水赤潮の発生環境は栄養塩濃度が基盤になることは当然であるが、なお、その他の微量成分、水温、池水の流動の影響など未解明の事項が多い。今後の研究によって、淡水赤潮の発生環境を明らかにし、栄養塩をはじめとする原因物質の負荷量を許容範囲以下に押さえるための流域管理および貯水池運用操作方法の確立が望まれる。

5. 結 語

繰返し述べたように、ダム・貯水池の築造は河川の自然環境への大きなインパクトであり、様々の避け難い影響を及ぼす。この新らしく創られる水域環境を人間にとって好ましいか、また少なくとも支障のない状態に保たなければならない。ダム、貯水池の環境問題の基本は水質であろう。水質さえ適切に保全されれば、これに応じた好ましい生態が維持されよう。このためには技術の面だけでなく、行政面からの制度的対応が必要である。貯水池による水質変化は直接的には長期貯留に原因するが、流域での人間活動がこれに拍車をかけているのも事実である。特に濁水、富栄養化現象に関しては流域管理の重要性が指摘されている。森林の適正な管理、産業、生活廃棄物の規制、人間や家畜排泄物の資源化など既にこの分野の改善の動きが見られている。水域環境を保全しつつ貯水池の築造を行うことが治水、利水を含めての社会的要請であるならば行政、貯水池所有者、流域住民の協力による国家的規模での流域管理の推進が今後益々重要性を増すものと考えられる。

参 考 文 献

- (1) 安芸周一・「貯水池濁水現象」土木学会水理委員会，水工学シリーズ75-A-1，1975. 8
- (2) 足立昭平・「貯水池汚濁現象」土木学会，水工学シリーズ77-A-5，1977. 7
- (3) 第21回水理講演会論文集，土木学会，1977. 2，第32回土木学会年講概要集Ⅱ，1977. 10 など
- (4) Huber et al・Temperature Prediction in Stratified Reservoirs, Jour. of ASCE, Vol. 98, Hy 4, April 1972
- (5) 安芸・白砂「貯水池流動形態のシミュレーション解析」，発電水力，No. 134，1975. 1
- (6) 日野・大西「密度成層流に及ぼすPoint Sink の高さの効果」，土木学会論文報告集，第163号，44. 3

- (7) 白砂・安芸「貯水池の濁水現象と水理学的軽減対策」, 発電水力, No.126, 1973. 9
- (8) 前出の(5)
- (9) 宮永・白砂「貯水池内の濁度の2次元解析」, 土木学会第32回年講概要集Ⅱ-175, 1977. 10
- (10) 合田・海老瀬・「ダム貯水池の富栄養化とシミュレーション」, 土木学会論文報告集, No.263, 1977. 7
- (11) 坂本・「Primary production of phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth」 Arch. Hydrobiol., 62, 1-28, 1966
- (12) Vollenweider, R. A., 「Input-Output Models-With special reference to the phosphorus loading concept in limnology」 Zielsetungen des Gewässerschutzes, 37-1, 1975
- (13) 内田・「揚水発電所選択取水設備の計画と設計」, 大ダム, No.71, 1975. 3, 前出の(5), (7)など