

濁度の流出・分散と河川の特性について Yield and Dispersion of Turbidity in Some Rivers

京都大学工学部 正員 綾 史 郎
京都大学工学部 正員 岩 佐 義 朗

1. はじめに

降水の河道への流出に伴ない、多くの水質物質も、河道へ流出し、河道流下により海へ注ぎ、河川・海域の環境保全上、問題となることも多い。このような一般の水質物質の降水に伴なう河道での流出、流下過程は、多くの場合、一次元解析法により得られる水理学的なモデルを用いて解析されることが多く、筆者らも、いくつかの河川における洪水と、それに伴なう濁度の河道における流出過程の解析を行ってきた^{1), 2)}

一次元解析法にもとづく水理モデルを用いて、一般の水質物質の河道内での流下過程を解析する際に重要となるのは、系への外部からの入力としての、流入流量、流入水質の正確な把握、ならびに、基礎方程式に含まれるパラメータ（移流分散係数、反応定数、沈降速度等）の適切な選定である。筆者らは、このような見地より、既に、移流分散係数の推定法や、筆者らの扱うことの多かった水質指標としての濁度について、河道への流出流量と流出濁度との関係等³⁾について研究してきた。

各種水質物質の斜面流出、流下過程については、近年極めて盛んに研究が行なわれており、濁度物質の生産、流出過程についても精力的に研究が進められている。濁度に関しては、その定義そのものが、あいまいであり、測定する河川・水系により、濁質成分も異なっており、また、測定法により、測定値そのものも異なることがあり、いたずらな総合化は、避けるべきであるが、河川・水系により、どのように濁度流出の特性が異なっているかを知ること重要であろう。本研究では、このような見地より、新宮川水系旭川、那賀川水系本川、および支川坂州木頭川において、多年にわたって行なわれてきた濁度観測の成果を整理し、各河川における濁度の河道への流出特性を明らかにするとともに、それら各河川における結果を比較検討した。

2. 濁度の河道への流出特性

前述したように、河道における水質物質の流下過程については、流入流量、流入水質の濃度の把握が極めて重要である。各種水質量の流出過程については、降雨量、流出流量との関係として、近年多くの研究がなされてきており^{4), 5)} 本研究で対象とするような濁度についても、村本ら⁶⁾の研究を始めとして、近年江頭ら⁷⁾により、降雨の流出過程と、濁度物質の生産、流出過程とを連立させた数理モデルにより解析しようとする研究が進められてきた。一方、従来から経験的に知られてきた流出濁度と流量のベキ乗則についても、宮永ら⁸⁾により、改良が加えられている。

以下においては、後者の立場にたち、新宮川水系支川旭川、那賀川水系本川、および支川坂州木頭川における濁度流出の観測結果を整理し、流出流量と流出濁度の関係、履歴特性、降雨量との関係、流出負荷量と流量の関係等について検討を加えるとともに、これら3河川におけるそれらの特性について比較することとする。

2.1 新宮川水系旭川における観測結果とその整理

新宮川水系の支川旭川は、流域面積 51.9 km^2 程度の小河川であるが、その中流部（流域面積 29.8 km^2 ）において、1978年より、濁度の1時間毎の自動観測が行なわれている。本研究では、1978年7月より、1980年10月までにおける降雨に伴なって高濁度の流出が観測された18降雨（後述する分離法に従えば20件）の濁度流出を対象として、主として、流量と濁度の履歴特性について検討を行なった。なお、流量は、水位～時間曲線より流量観測によって得られた水位～流量曲線を用いて求められている。降雨流出、濁度流出の特性が、Table. 1にまとめられている。

Table. 1 濁度流出の特性（新宮川水系支川旭川）

番号	Run No.	(1) 総降雨量 mm	(2) 先行雨量 mm	(3) 先行雨量 (日数)	(4) 先行雨量 (日数)	(5) Q_i	(6) C_i	(7) Q_p	(8) C_p	(9) Q_e	(10) C_e	(11) $T_{QP} \geq T_{CP}$	(12) 流量 ピーク数	(13) 履歴特性	(14) 年 月
(1)	2	99	(6)	28	(4)	3.00	1	17.4	17	9.26	1	<	2	A	1978, 7
(2)	3	92	(2)	0	(0)	1.64	1	13.2	2			>	2	B	, 7
(3)	4	56	(6)	8	(4)	2.09	1	25.9	11	8.69	1	=	1	A	, 8
(4)	5	81	(4)	0	(0)	1.96	1	35.7	6	7.56	1	=	1	A	, 8
(5)	6	37	(1)	0	(0)	1.10	1	42.0	19	9.74	2	=	1	A	, 8
(6)	7	53	(2)	8	(1)	2.26	1	17.7	12	5.28	1	=	1	A	1979, 1
(7)	8	77	(1)	0	(0)	2.00	1	30.3	26	6.09	1	=	1	A	, 3
(8)	9	82	(2)	12	(1)	1.48	1	53.6	32	9.39	2	=	1	A	, 3
(9)	10-1	248	(4)	1	(1)	0.46	1	37.4	18	3.52	1	=	1	B	, 4
(10)	10-2					2.76	2	26.6	30	4.35	2	=	2	A	, 5
(11)	11-1	164	(8)	54	(3)	1.72	1	34.8	9		2	=	3	B	, 6
(12)	11-2	201	(7)	73	(6)	4.19	2	12.4	3			=	1	B	, 6
(13)	12	188	(3)	1	(1)	1.76	1	47.7	24	8.80	2	=	3	A	, 6
(14)	13					1.14	1	18.7	4	8.33	2	=	1	A	, 9
(15)	15	116	(6)	37	(2)	7.10	2	31.0	11	8.59	2	=	1	A	, 9
(16)	16	119	(5)	2	(1)	17.00	4	98.0	25	5.06	1	=	1	A	, 9
(17)	17	110	(5)	0	(0)	2.40	1	90.0	59		1	=	1	B	, 10
(18)	18	71	(3)	7	(2)	4.70	1	307.0	38	2.60	2	=	2	C	, 10
(19)	19	341	(7)	34	(3)	4.90	1	80.2	120	11.80	3	=	1	C	1980, 4
(20)	20	69	(2)	0	(1)	0.80	1	97.0	66	*	*	=	1	B	, 5
								65.0	67	*	*	>	1	B	, 5
								64.8	35	*	*	<	1	B	, 6
								128.0	60	10.0	1	=	1	A	, 8
								131.0	33	*	*	=	3		, 9
								193.0	54	*	*	<	1	A	, 9
								68.0	40	*	*	<	1	A	, 10

 $Q_i, Q_p, Q_e: m^3/sec$ $T_{QP}: \text{ピーク流量}$ $Q_e: \text{終了流量}$ $Q_i: \text{たちあがり流量}$

Note:

* データ欠損

 $T_{CP}: \text{ピーク濁度}$ $C_e: \text{終了濁度}$ $C_i: \text{たちあがり濁度}$

Note:

a. 濁度流出の開始流量と終了流量

流量～時間曲線、濁度～時間曲線、および時間雨量の分布の1例(Run 12)をFig. 1に示す。この図からも明らかなように、濁度流出の開始時刻は、ほぼ降雨の河道系への流出時刻と一致し、流量～時間曲線のたちあがり時刻と、濁度～時間曲線のたちあがり時刻は、ほぼ一致している。一方、濁度流出の終了時刻については、あまり明確とは言えず、3～2 ppm程度の低濁度の流出が何時間か続いた後、もとの1 ppm程度の値にもどるのが一般的傾向である。したがって、濁度流出の終了時刻、およびその時の流量をこのようなハイドログラフから確定するのは、困難である。流出解析において、直接流出(表面流出と早い中間流出)と地下水流出を分離する際によく用いられる方法である片対数紙上に、流量と時間の関係をプロットし、流量と時間の関係をみたものが、Fig. 2である。Fig. 2中の“1→2”等の符号は、その時点以降、2 ppmの濁度が続いていることを示しているが、流量ハイドログラフの勾配が変化している時刻と濁度値が一定の値をとり続け始める時刻とは、よく対応している。濁度成分の生産が主として裸地における降雨に伴う表面流出に伴うものと考え、このような直接流出の終了時刻を、濁度流出の終了時刻と考えることができ、この時の流量を濁度流出終了流量として、Table. 1第9欄にのせている。このように定められた濁度流出の開始流量と終了流量は、両時点における濁度値が、ほぼ等しいにもかかわらず、Table. 1第5欄と第9欄に示されるように、開始流量が、終了流量に比較して、極めて小さいのが特徴である。

b. 流量と濁度の履歴特性

一般に、濁度と流量の関係は $C = \alpha Q^n$ といったべき乗の関係で表現されることが多いが、必ずしもこういった一般的な関係であらわされないこともよく知られた事実である。すなわち、各種水質濃度と流量の関係で言えば、両対数紙上で、縦軸に濃度を、横軸に流量をとるとき、これらの関係は、時計まわりのループを描くことが多いことが従来より指摘されている。濁度と流量の関係の場合、江頭らによれば、“8の字”型の曲線を描くことが、また、村本らのwash loadの解析例では、逆に、反時計まわりのループを描くことが、指摘されている。

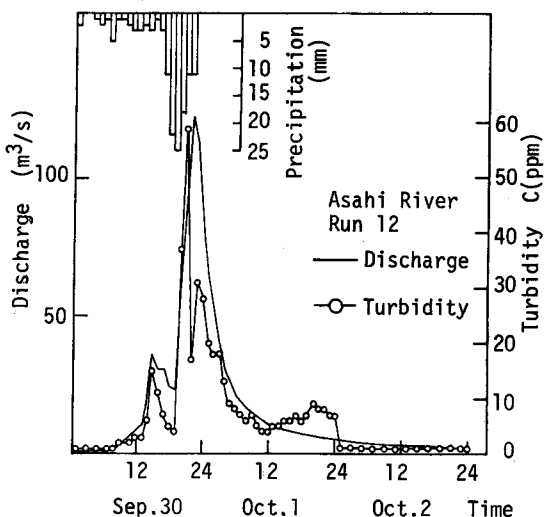


Fig. 1 流量、濁度、降雨量 (Run 12)

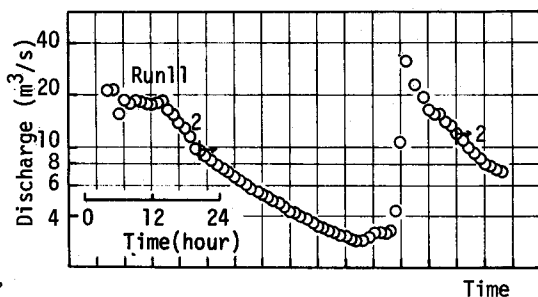
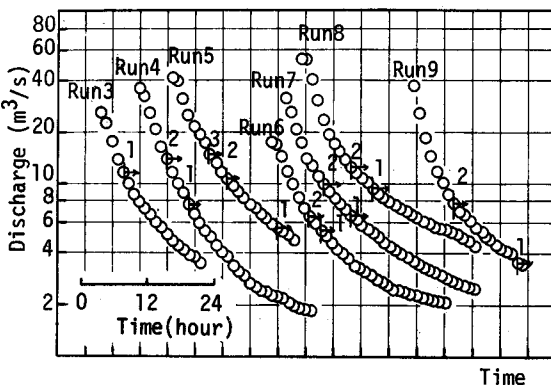


Fig. 2 流量、濁度の低減特性

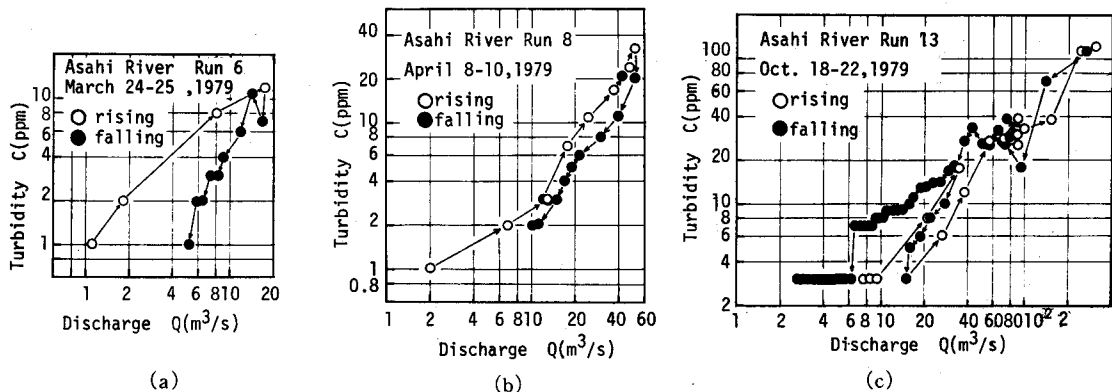


Fig. 3 流量と濁度の関係

本観測においてみられた代表的な関係を Fig. 3 (a), (b), (c) に示すが、a) 時計まわりのループを描くもの—A型、b) 流量の上昇期も下降期もほぼ同一の曲線にのるとみなされるもの—B型、c) 反時計まわりのループを描くもの—C型の3種が混在していることが示される。最大流量の生起時刻と、最大濃度の生起時刻が必ずしも一致しないため、“8の字”型を描く場合もあるが、上記の3種に大別して示すと Table. 1 の第13欄のようであり、A型のものが多い。

降雨規模とこのような履歴特性の関係を検討すると、総降雨量が100 mm以下の単一のピークを持つ小出水の場合、A型、B型となることが多い。すなわち、a. の項で述べたように、少ない流量でたちあがり、上昇期には、下降期に比較して、小流量で高濁度を有するが、ピーク終了後には、すみやかに低下してしまう。一方、降雨量が100 mm以上の場合には、流出は2つ以上のピークを持つことが多く履歴も複雑であり、B型、C型のものが増える。Fig. 4 に示した2例では、一度A型の履歴を示して低下した後、流量の増加とともに、第2回目のピークを迎えた後、B型の履歴を示して低減している。これは、a. で述べたように、濁度物質の生産の場が、表面流出の生起場とほぼ同一の場である裸地であることを考慮すると、先行降雨量や、先行晴天日数などにより、裸地の土湿等の条件が異なり、このような初期条件の影響により、履歴特性が変化するためと考えられる。実際、Run 12~Run 16 の例では、降雨毎に曲線は異なるが、流量が大きいときは、上昇期も下降期も同一の曲線にのるとみなすことができる部分もある。

以上のように、同じ流域でも、降雨、初期条件により、異なった履歴特性をとることがわかるが、平均的な挙動をみるために、両対数紙上で、縦軸に負荷量の型でCQを、横軸に流量Qをとって、観測されたすべての点をプロットしたものが、Fig. 5 である。各出水毎の変動の方が大きく、履歴特性の相違は、

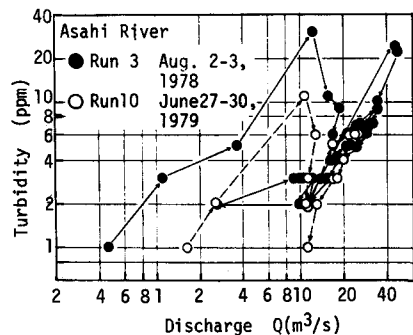


Fig. 4 流量と濁度の関係

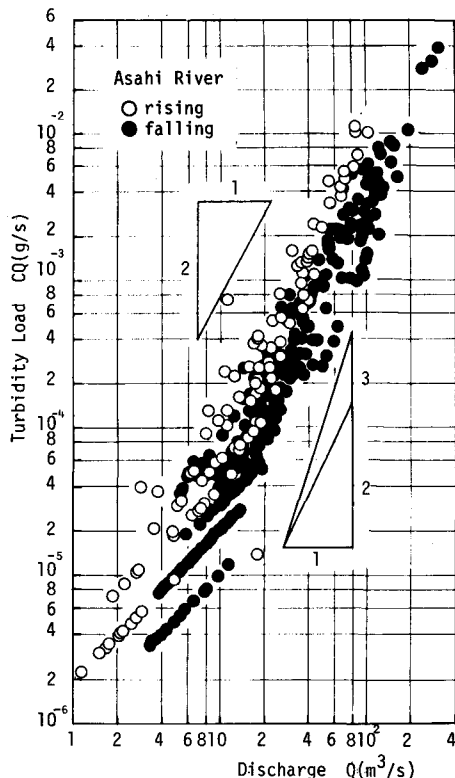


Fig. 5 濁度の負荷量と流量の関係

明らかではないが、平均的にみたときのベキ乗則の適用を試みると上昇期の傾きが、ほぼ2であるのに対して、下降期のそれは、やや大きい値となるようである。

2.2 那賀川水系における濁度観測結果とその整理

那賀川水系の上流域 (Fig. 6) の本川沿い、白久地点 (流域面積 178.0 km^2) 付近においては、1974 年より、また支川坂州木頭川広野 (流域面積 150.5 km^2) 付近においては、1976 年より 10 日に一度程度の定時観測を中心とした濁度の観測が行なわれている。同流域は、1975、1976 年に、台風性の降雨により、大規模な崩壊がおり、小出水にもかかわらず、高濁度の河道への流出が続いた。筆者らは、既に、この流域における濁度流出の経年変化について一部発表しているが、その後、新しく得られたデータを加えて、その濁度流出の特性について整理した。なお、濁度は、積分球式濁度計により測定され、流量は、小見野々、長安口両貯水池への流入流量と、放流流量より、流域面積比で換算して求められている。

a. 本川における流量と濁度の関係

前述したようなことにより、本流域では、濁度流出に経年変化がみられること、高濁度の河道への流出が続いていたことが特色である。Fig. 7 には、1974 年から 1977 年における 9 月を中心とした主要な出水における流量と濁度の関係 (いずれも流量下降期におけるもの)、ならびに、1978 年から 1981 年にかけての平常時における定時観測における流量と濁度の関係がプロットされている。まず、流量と濁度の関係の経年変化をみると、1974 年から、1977 年までの観測値より、点群が、1974 年から 1976 年までは左方に移動し、1977 年には、また右方へ移動していることがわかる。1977 年以降、大規模な濁度流出の観測結果がないので、その後の状況は明確ではないが、1978 年から、1981 年における定時観測の値は、1975 年、および 1977 年の洪水時の点群より外挿される曲線の間にはいっており、ほぼ安定した状態にあることと思われる。

つぎにベキ乗則の検討を行なってみると、その勾配は、途中で変化している。すなわち、 $50 \sim 100 \text{ ppm}$ 以上の場合、係数は年によって異なるものの、その指数はほぼ 1 とすることができるのに対し、 50 ppm 以下の低濁度の場合、2 程度の比較的大きい値となる。

b. 坂州木頭川における流量と濁度の関係

1979 年および 1980 年における 9 月、10 月の洪水において、流量下降時に観測された流量と濁度の関係を両対数紙上にプロットしたものが Fig. 8 である。ベキ乗則の検討を行なうと、那賀川本川同様、勾配は二つにわかれており、 $50 \sim 100 \text{ ppm}$ 以上で、指数は $1 \sim 1/2$ 程度の値であるのに対し、 $50 \sim 100 \text{ ppm}$ 以下の場合、指数は 2 程度の値となる。な

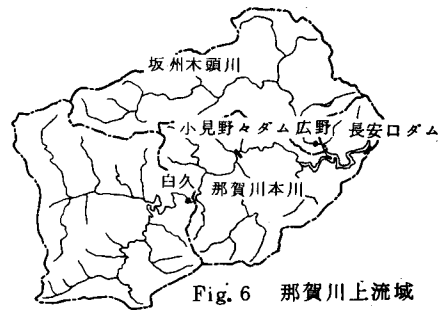


Fig. 6 那賀川上流域

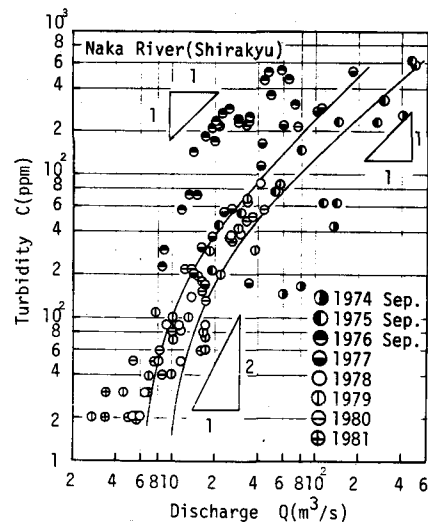


Fig. 7 濁度と流量の関係 (那賀川本川)

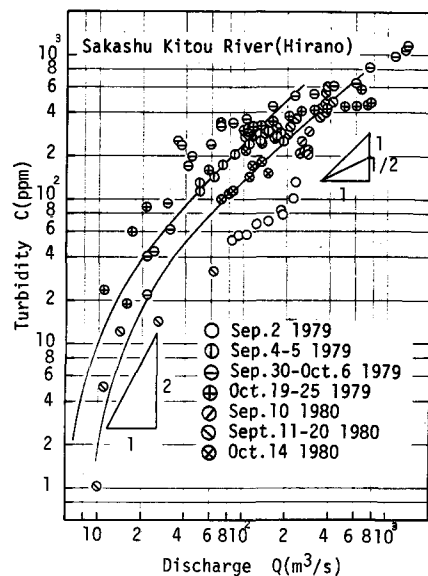


Fig. 8 濁度と流量の関係 (坂州木頭川)

お、観測例は、7例であるが、1977年9月2日におけるものを除くと、点群の収束は良好である。

2.3 3河川における流量と濁度の関係の検討

水質指標としての濁度は、前述したように、その定義自体もあいまいで、安易な比較はさけねばならないが、本研究でとりあげたような濁質生産の主たる場が、ガリ、崩壊地等の裸地であることを考えると、流量と濁度の関係は、流域の特性をあらわしているものと考えられる。

このような流域の特性を示す試みとして、流域面積の大きさの影響を除くために、単位面積当りの濁度負荷量 CQ/A と、比流量 Q/A の関係を、上述の3河川についてプロットすると Fig. 9 のようである。那賀川水系における2観測点におけるものが、ほぼ同一の曲線にのるとみられるのに対し、新宮川水系旭川におけるものが異なっているのが明らかである。

濁質生産に最も関係する指標の一つとして考えられる崩壊地の面積率についてまとめたものが Table. 2 である。この表から明らかなように、那賀川本川と支川坂州木頭川とでは、崩壊地の面積率がほぼ等しいのに対して、一方、新宮川水系旭川は、崩壊地面積率も小さいものとなっている。

3. おわりに

本文は、水質（濁度）の河道内での流下過程を解析する際の入力としての、流入流量ならびに濁度を対象として、流量と濁度の関係を中心として、河川の流域特性との関係をみようとして行なったものであるが、充分な解析も行なえないままに、観測事例の紹介といった形になり、検討不足の点も多い。今後より詳細な、また、より多くの河川における資料を収集し、検討を加えていきたい。

最後に、貴重な資料を提供して頂いた各位に深く謝意を表しますとともに、データの整理に御手伝い頂いた京都大学工学部河川工学研究室の諸氏に感謝致します。

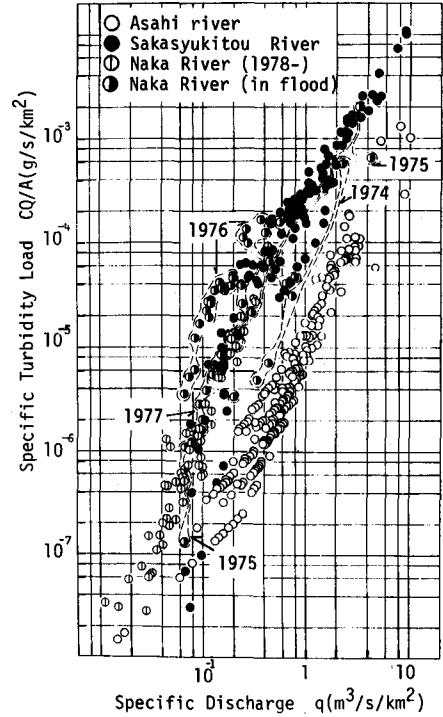


Fig. 9 比負荷量と比流量の関係

Table. 2 崩壊地面積率

	崩壊地面積率 (%)	
新宮川水系旭川	0.107	
那賀川本川	0.429	0.871
坂州木頭川	0.313	0.880
	-1976	1976-

参考文献

1) 綾, 岩佐, 松尾; 第22回水理講演会論文集, 1978, pp. 131~138.
2) 綾, 岩佐, 今西; 第25回水理講演会論文集, 1981, pp. 417~422.
3) 岩佐, 綾, 松尾; 第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1979, pp. 203~204.
4) 海老瀬, 村岡, 大坪; 第25回水理講演会論文集, 1981, pp. 473~479.
5) 浅野, 馬場, 伊藤, 綿貫; 第24回水理講演会論文集, 1980, pp. 173~178.
6) 村本, 道上, 下島; 第18回水理講演会論文集, 1974, pp. 91~96.
7) 江頭, 芦田, 金屋敷; 第25回水理講演会論文集, 1981, pp. 481~487.
8) 宮永, 安芸, 秋元, 斉藤; 第23回水理講演会論文集, 1979, pp. 107~112.