

水域アセスメントのための雨水幹線流出負荷の考察

関西大学工学部土木工学教室 和田 安彦
○ 関西大学工学部土木工学教室 吉本 幸宏

1. 緒言

公共用水域の水質管理は、わが国の水資源や水環境を守る上で特に重要視され、閉鎖性水域を含む水質管理には、総量規制の実施とともに、従来以上のきめの細かさが要求される。さらに、環境基準の達成において、クリティカルな論議がより多くなってくる。

下水道は水域への直接流入負荷を減少させる負荷カットの主たる施設であるが、都市活動や都市交通の活発化によって都市域に多くの負荷が堆積し、分流式雨水幹線にもこれらの負荷が流入し、雨天時には、公共用水域に多くの負荷が流出している。負荷減少のためには、これらの負荷を定量し、水域アセスメントのために負荷の総合的な検討を行うことは、今後特に重要となる。当論文は、雨水幹線流出負荷の状況や特性、流出物の構成等について調査解析を行い、定量したもので、分流式雨水幹線の水質管理、計画、設計の上で十分考慮すべきものである。

2. 分流式雨水管流出負荷の定量

分流式雨水幹線流出特性を水質、流出負荷量についてまとめる。

(1) 雨水幹線流出水質

中村ら²⁾によるある排水区(D排水区; 一部住居地域を含んでいるが、大半は繁華街)の分流式雨水管の平均水質(表-1)をみると、SSが436 ppmと高く、BOD 78.3 ppmで溶解性のものは12 ppmとなり、浮遊性物質の多いことを示している。有機性のSS(137 ppm)より無機性のSSの高いことを表している。栄養塩であるケルダール窒素(10.6 ppm)も必ずしも低くはない。

図-1は土木研究所³⁾によるA市A排水区における各降雨時の雨水管流出水質の範囲と平均を、雨水流出のある対象時間内について求めたものである。主な特徴をまとめると次のようになる。

1) どの水質項目も降雨流出量が小さいところでの流出水の平均水質濃度は高く、降雨流出量が大きくなるに従って濃度は低下する。

2) 水質には外乱が存在するが、降雨流出量が5mm~10mmまでの水質濃度は比較的高く、それ以降、急激に低くなる。

3) 降雨流出量が20~30mmになると、平均濃度はBOD 20 ppm以下、COD 15 ppm以下、SS 80 ppm以下となる。

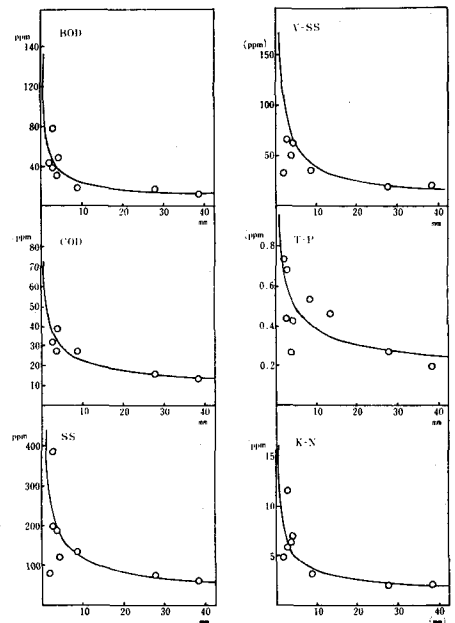
4) 降雨流出量と雨水管流出水質の回帰式は表-2のようになり、べきの絶対値の大きい水質項目にはV-SSがあり、べきの絶対値の小さいものにはBOD、T-Pがある。

表-2は、図-1の状態を降雨流出量 x (mm)と流出水質 y

表-1 分流式雨水流出水の平均水質

水質項目	(D排水区)	
	平均	範囲
BOD ₅	78.3	9.5 ~ 980.0
溶解性	12.0	2.7 ~ 70.0
SS	436	13.4 ~ 2,561.0
VSS	137	1.0 ~ 1,360.0
T-N*	10.6	1.4 ~ 71.0
T-P	0.69	0.32 ~ 2.96

* ケルダール窒素



(注) 縦軸: 水質。
横軸: 降雨流出量。

図-1 分流式雨水管の降雨流出量と水質

表-2 降雨流出量と流出水質回帰式 (A市A排水区)

項 目	回 帰 式	相関係数
B O D	$Y = 72.2341X^{-0.2789}$	0.869
C O D	$Y = 50.4222X^{-0.3449}$	0.927
S S	$Y = 376.4850X^{-0.495}$	0.890
V - SS	$Y = 162.9528X^{-0.6127}$	0.862
T - N	$Y = 0.8377X^{-0.9310}$	0.855
K - N	$Y = 10.4558X^{-0.4540}$	0.850

Y: ppm X: mm

表-3 降雨時雨水幹線流出水質、負荷量

項 目	水 質 (ppm, %)		負 荷 量 (g/s)	
	範 囲	平 均	範 囲	平 均
pH	7.0~7.1	7.0		
BOD	7.8~82.5	35.0	0.76~18.23	6.92
COD	12.0~55.3	27.0	0.87~12.22	5.29
SS	25.5~172	60.5	1.79~38.01	11.71
Cl ⁻	36.0~101	64.1	5.30~18.61	10.83
NH ₄ -N	1.4~4.4	2.72	0.14~1.10	0.51
PO ₄ -P	0.02~0.2	0.09	0.001~0.04	0.014
全蒸発残留物	229~451	347.0	22.37~110.94	61.86
上の熱灼減量	28~192 (%)	132.0	5.88~48.19	23.66
流 量	0.067~0.251 (m ³ /s)	0.178		

(ppm)について回帰式で表したものである。雨天時水質はばらつきの存在するものであるが、比較的良好な関数関係を示している。

表-3は筆者ら⁴⁾による神戸市椿鼻雨水幹線の雨天時水質を表したものである。その主な特徴をあげると次のようになる(図-2)。

- 1) pHは7.0~7.1にあり、ほとんど変化はない。
- 2) BODは平均34.98 ppm(7.8~82.5 ppm)にあるが、流量ピーク時にピークが表れ、流量が減少すると10ppm前後となる。
- 3) CODは平均27.0 ppm(12.0~55.3 ppm)で、BODと類似した挙動を示しているが、ピーク値はBODより小さく、流量が減少するとBODより高くなる傾向にある。
- 4) SSは平均60.5 ppm(25.5~172 ppm)で、流量が大きくなると値は大きくなる。
- 5) NH₄-Nは平均2.72 ppm(1.4~4.4 ppm)で、流量ピーク時の濃度は大きい、濃度変化の幅はSS、BOD、CODほど大きくはない。
- 6) PO₄-Pは平均0.09 ppm(0.02~0.2 ppm)で、流量ピークと水質ピークの対応は良いが、流量が減少すると濃度は急激に減少する。
- 7) Cl⁻は平均64.1 ppm(36.0~101 ppm)で、かなり高く、海水等の影響がみられるが、流量が増大するに従って濃度は減少し、流量が減少すると濃度が上がるなど、流量による希釈作用が大きい。
- 8) 全蒸発残留物(平均347 ppm, 229~451 ppm)等はCl⁻の影響を強く受け、ほとんどCl⁻と同じ挙動を示し、流量が減少するほど濃度は高くなり、降雨流出量による希釈作用を表している。

分流式雨水幹線からの流出水質は、都市の活動状況、排水状況等を反映し、各都市域や排水区によって変化し、種々の調査資料の集積のもとに都市特性の解析も重要である。

(2) 流出負荷の特徴

図-3は、中村によるD排水区に分流式雨水管の流出ハイドログラフとポリユートグラフを表したものである。SSの流出は特に大

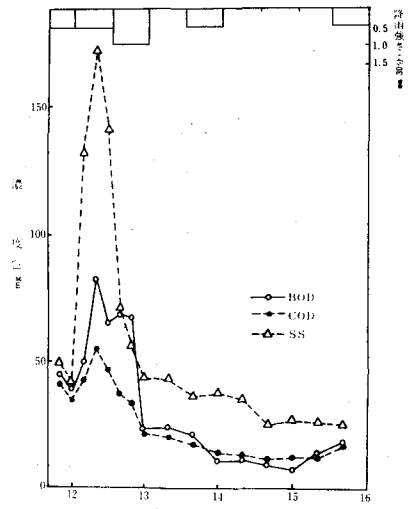


図-2 降雨時雨水幹線流出水質

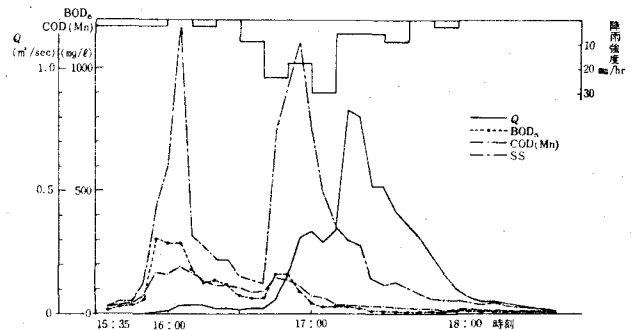


図-3 雨天時分流式雨水流出水の1例 (D排水区)

きく、初期流出の大きいことを表している。

棒鼻雨水幹線での流出負荷の主な特徴をあげると（図-4）次のようになる。

1) 降雨が小さく流量も小さいが、BOD、COD、SSの流出負荷量の挙動は、水質の挙動と類似している。いずれも、ファーストフラッシュでピーク負荷が流出したあと、急激に流出負荷量は小さくなる。

2) $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の流出負荷もBOD、COD、SSと類似し、ファーストフラッシュ後、急激に流出負荷量は小さくなる。

3) Cl^- はファーストフラッシュでピーク流出負荷は大きい、その後変動はあるものの、ほぼ一定しており、海水中の塩素イオンの影響を受けている。

4) 全蒸発残留物もファーストフラッシュ後、減少するものの、BOD、COD、SSほどの急激な減少はみられない。

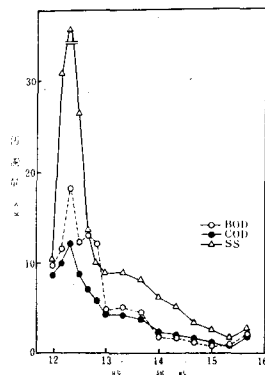


図-4 降雨時雨水幹線流出負荷量

3. 分流式雨水管単位流出負荷

(1) 算定法

分流式雨水管流出負荷量そのものを定量しても、雨水幹線流出負荷は都市の密度や排水区の広さ等によって異なるため、一般化しては検討しえない。単位面積流出負荷量について比較すると、その特徴や一般的な流出負荷の定量が容易となる。しかし、このような考え方によって定量されたものはまだ少ない。

降雨時流出負荷量 L_R は、排水面積 S や降雨量 R 、雨水流出率 C によって変化する。

単位面積単位降雨流出の流出負荷量 l_u は、

$$l_u = \int l_R \cdot dt / S \cdot C \cdot \int r_e \cdot dt \quad (1)$$

で求められる。ここで、 l_R ：単位時間降雨時流出負荷量、 r_e ：単位時間降雨量

(2) 単位流出負荷量

筆者らによる棒鼻雨水幹線での晴天時の日流出負荷量と降雨時に新たに流出した負荷量を、単位面積当たりについてみると表-4のようになる。晴天時流出負荷は、BOD 0.744 kg/ha、COD 0.592 kg/ha、SS 1.307 kg/haにあり、降雨時の単位流出量の含有負荷はBOD 0.324 kg/ha·mm、COD 0.258 kg/ha·mm、SS 0.569 kg/ha·mmである。これを他の雨水幹線と比較してみると表-5のようになる。

神戸市間踏切（4回調査の平均）や、F市（2回調査）のそれとBODはほぼよく似ており、CODもよく似ている。SSが他の雨水管と比較して流出負荷量が小さいが、オーダーは一致している。

以上のことから、ここで得られた降雨時の分流式雨水管からの流出負荷は、他都市の排水区の値に近いものと考えられ、地域性はあるものの一つの代表値であると判断しうる。

ここに求めた値を用いることにより、都市の状況を判断し、対象面積の広さ、流出降雨量を設定すると、平均的な分流式雨水管からの流出負荷量をマクロに算定しうる。

表-4 単位面積、単位降雨流出の流出負荷量

項目	晴 天 時 (kg/ha・日)	降雨時(新たに流出した負荷) (kg/ha・mm)
BOD	0.744	0.324
COD	0.592	0.258
SS	1.307	0.569
Cl^-	1.450	0.631
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.0600	0.0262
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.0017	0.00078

表-5 単位面積、単位降雨流出含有負荷量

項目	棒 鼻(神戸市)	間踏切(神戸市)	F 市(分流式)
BOD	0.324	0.230	0.220
COD	0.258	0.340	0.199
SS	0.569	1.190	3.630
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.0262	—	—
T-N	—	—	0.0379
$\text{PO}_4\text{-P}$	0.00078	—	—
T-P	—	—	0.00584
Cl^-	0.631	—	—
溶 COD	—	—	0.0571

4. 分流式、合流式雨水流出負荷の比較

分流式雨水管の流出負荷を総合的に検討するため、分流式、合流式雨水流出負荷の比較を行い、分流式雨水管の流出負荷の減少化のための方策について、比較論的立場から考察する。

(1) 合流式下水道

合流式下水道からの越流負荷のもとになる堆積負荷は、建設省土木研究所⁵⁾によると(図-5)、対象域542haでBODでみると、路面、間地、屋根からの負荷は0.75t、雨水マスには0.77t、下水管きよには2~3tとなっている。これらの負荷のうち、管きよ系に堆積している負荷は全体の56~66%を占めており、合流式下水道は管きよ内に多くの負荷を内蔵している。家庭下水からの負荷は8.0t/日で、マクロには発生負荷の9.4%程度が公共用水域への流出対象となる。

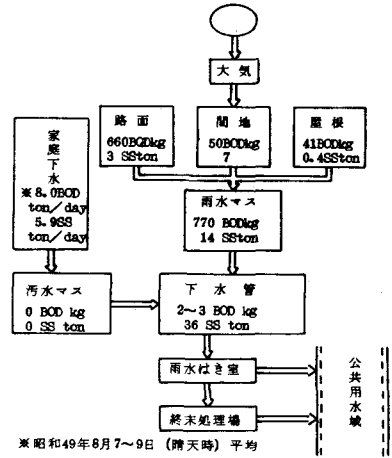


図-5 雨水の流下機構(合流式下水道)からみた負荷堆積量
(東京都谷端川流域A=5.42km²)

下水道システム全体から公共用水域へ放流される負荷量(図-6)は、雨天時(38日9時間)には雨水吐から134t/年、一次処理から44t/年、二次処理からは67t/年で、晴天時(326日15時間)の処理放流負荷632t/年とから、雨天時流出負荷量は年間発生負荷4,847t/年のうち877t/年となる。

総発生負荷の18.1%が公共用水域に流出し、合流式下水道の総合除去率は81.9%といえる。このうち雨天時流出によるものは5.1%で、これらの対策を行うと総合除去率は87.0%となる。筆者らの調査研究⁷⁾を行っているA都市排水区(154ha)におけるこれらの特徴をみると次のようになる(図-7)。

各都市や地域における降雨量の差も流出負荷量に影響する。雨天時には、雨水吐や一次処理施設からの流出負荷のウエイトが高くなるが、年平均でみると総合除去率は81%にある。地域によって、雨水吐、一次処理放流負荷に変化がある。

アメリカ合衆国全土の処理場から公共用水域へ放流される負荷量⁶⁾は、BOD 270万t/年で、合流式下水道から越流する負荷は80万t/年である。この量は処理放流負荷の29.6%にあたり、わが国の例ではその割合(245/632)38.7%でその比率は米国より大きい。

以上のことから、下水処理場の発生負荷の軽減率はかなり大きく、公共用水域負荷からみると、処理場の除去は非常に大きい。

(2) 分流式下水道

分流式下水道雨水管きよから流出する負荷量も大きく、神戸市の例でみると、BOD流出水質は50ppm程度にある。この負荷量を合流式と比較してみよう。

神戸市の分流式下水道の雨水幹線から流出している負荷量⁷⁾は、300ha(60,000人)として年間BOD 135t/年

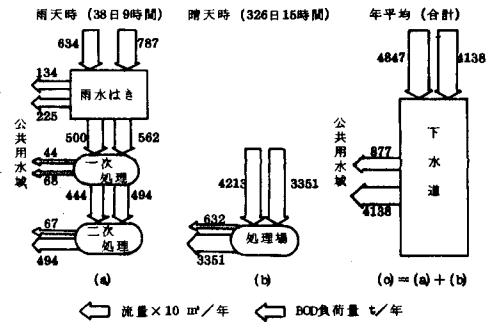


図-6 谷端川流域の排水システムの現況
(1962~1971年の平均)

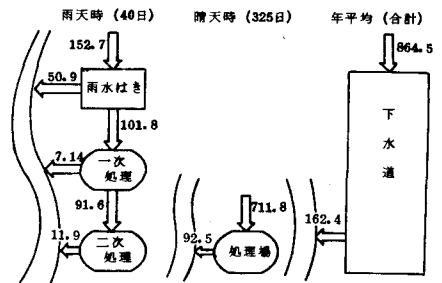


図-7 A都市排水区の排出負荷量(BOD t/年)

で、処理水の放流負荷(98.6 t/年)の約1.37倍で、下水道から公共用水域に放流する負荷の約60%を占め、今や処理放流負荷より大きくなっている。処理場で全力を尽して放流負荷の軽減を行っている意味が、雨水幹線負荷とバランスしなくなる。

神戸市ですべて合流式にした場合を想定した試算例をみると、現状の合流式システムでは年間放流負荷は分流式の場合より約13%増えるが、希釈放流(138.6 t/年)、沈殿放流(23.6 t/年)が全体の62%を占めることから、希釈放流を軽減することによって総放流負荷を減することができる。以上のことから次の点が指摘しうる。

1) 神戸市型の都市では、分流式雨水幹線の流出負荷は、合流式とした場合の希釈放流負荷に等しくなり、越流負荷を制御することができれば、合流式下水道は公共用水域への放流負荷をかなり軽減しうる。

2) 二次処理による放流負荷は、分流式と合流式は比較的類似している。

(3) 分流化と合流式対策の評価

合流式の場合と分流式の場合の総放流負荷量は、都市の雨水排水水質によって異なるが、両者がほぼ等しくなる都市もあり、どの方式によるのが各都市にとって放流負荷量が少なくなるのかを検討することが重要である。ここでは分流化した場合と雨天時の合流式越流対策を行った場合の総負荷量について検討する。

分流式下水道と合流式対策のある下水道のどちらが公共用水域にトータルとしての総流出負荷量が大きいのかは、下水道排除方式を決める上で重要な課題である。基本的には、都市域からの汚濁流出をとこまで下水道が対象とするかによって異なる。

表-6 合・分流式放流負荷量の比較 (t/年)

年 度		4 8				4 9				5 0				5 1				5 2			
項 目		B O D		S S		B O D		S S		B O D		S S		B O D		S S		B O D		S S	
雨 水	滞 水 池	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流	合 流	分 流
q	0	180.6	89.85	168.6	251.79	226.3	124.35	358.7	376.58	331.4	132.35	376.9	377.61	227.2	121.13	123.3	342.49	130.6	80.98	108.8	227.24
	5,000m ³ (2.5mm)	150.9		142.3		195.6		307.8		281.1		320.1		192.8		109.2		105.7		90.0	
	20,000m ³ (10mm)	104.7		101.4		139.3		214.3		195.8		224.0		137.0		86.4		72.9		65.1	
	5,000	148.2		139.6		191.2		300.9		277.6		316.1		189.2		106.7		104.1		88.4	
1.5q	20,000	109.7		105.5		144.1		222.8		205.4		234.6		141.5		87.2		79.1		69.5	
	5,000	145.5		137.0		168.4		294.9		275.3		313.4		186.9		104.9		103.7		87.8	
2.0q	20,000	115.0		110.0		131.3		233.4		214.5		244.9		147.4		88.8		85.0		73.7	
	5,000	143.2		134.6		182.7		287.9		269.4		306.6		181.0		101.2		103.7		87.5	
3q	20,000	126.4		119.7		158.9		248.5		230.2		262.4		159.6		92.5		92.1		78.7	

一次処理 30% 二次処理水 BOD15ppm、SS18ppm

今、ある排水区域を設定し、合流式下水道からの越流負荷を雨水滞水池等を設けて負荷軽減を行った場合と、分流式下水道の場合について、年間総放流負荷量について検討したものが表-6である。排水区は大阪府寝屋川北部広域下水道A排水区(142ha)で、雨量諸元および晴天時水質等はこの排水区のものを用いている。排水区の諸元を合・分流式とも同一とし、雨水(管)水質はBOD 50 ppm, SS 200 ppmとした。

雨水遮集容量を変えて、滞水池の容量も変えた場合の年間総放流負荷量がどのようになるかを表している。51年の結果をみると、次のような特徴がみられる。

1) SSでは、合流式で滞水池を設けた場合には、分流式(342.5 t/年)の場合より大幅に公共用水域への放流負荷が減少(86.4 t/年)し、分流式の場合の放流負荷量の1/4になる場合もみられる。

2) BODでは、合流式で滞水池を設けた場合の総放流負荷と合流式からの総放流負荷はほぼ類似している。

3) SSは、合流式より分流式の方が現状においても総流出負荷量は多い。これは、分流式はすべての雨水が

未処理で放流されるが、合流式では越流負荷以外は一次処理されていることになっている。降雨の頻度、大きさ等による影響もある。

今後、都市活動や人間活動の増大によって、雨水(管)水質がどの程度になってゆくのか(BOD 50ppmでとどまるのかどうか)によってどちらの方式がより良いのかが決定される。雨天時に分流式汚水に雨水の流入が増大すると、両者の関係は変化する。

(4) 分流式下水道への選定へのアセスメント

分流式下水道は、合流式下水道雨天時放流負荷軽減対策として用いられているが、都市の実情によって必ずしも分流式下水道の放流負荷が小さいというのではない。都市の実情によって総負荷量は変化するため、分流式下水道を採用するにしても、上にあげた検討は是非必要である。そうでなければ、総量規制の実施とともに、放流負荷量へのクリティカルな論議の多い現状においては、下水道の放流水が公共用水域の水質基準をクリアできない事態も生じてくる。

(5) 分流式雨水管流出負荷軽減策

分流式雨水管からの流出負荷を軽減する方策には、まず雨水管の水質を低下させることである。そのために行う事項は次のものがある。

- 1) 大気降水物の清掃管理
- 2) 路面清掃
- 3) 土木建設材(土砂、砂利)輸送の適正化と貨物車の載荷量の適性化
- 4) クロスコネクション(汚水等)の検討
- 5) 不法投棄のパトロール
- 6) 建設工事現場のクローズドシステム化(排水)
- 7) 雨水マス等の堆積汚濁物の清掃管理
- 8) 浄化槽排水の規制強化と適正管理

これらの事項の一つ一つの対策を行い、少しでも流出負荷を軽減させるとともに、各都市に合致した排除方式を水域アセスメントの立場から検討することが重要である。

5. 結 言

公共用水域の水質アセスメントのために、排出源となる雨水幹線流出負荷の定量と考察を行い、その流出負荷特性について考察した。雨水管から流出する負荷を算定するための方法と、その原単位に当たるものを求め、それらの考察を行って、水質アセスメントに最も重要となる下水道排出負荷を排除方式の面から検討した。合流式でも雨天時越流対策を行ったものは、分流式より総排出負荷量の小さくなることも多く、各都市において、水域のアセスメントの立場からもう一度、排除システムからの流出負荷を再検討してみることの重要性を示唆した。

参 考 文 献

- 1) 和田安彦・田内和三：非点源負荷の定量と水域環境への影響度の評価，第16回衛生工学討論会論文集，1980年1月
- 2) 中村栄一：雨天時問題の現状と対策，月刊下水道，Vol. 2, No. 10, 1979年9月
- 3) 建設省土木研究所：分流式下水道からの雨水流出水に関するデータベース，土木研究所資料，1980年1月
- 4) 和田安彦：非点源負荷における分流式雨水管の流出負荷の考察，No. 138, 139, 1981年4月，6月，水利科学
- 5) 雨天時における合流式及び分流式下水道の改善に関する調査，日本下水道協会，昭和54年3月
- 6) Michael D. Giggey et al: National Needs for Combined Sewer Overflow Control, Journal EE2, April, 1978, ASCE
- 7) 藤原英也：分流式と合流式，月刊下水道，Vol. 2, No. 10, 1979年9月