

1988年リオ・デ・ジャネイロ州における集中豪雨災害

今 本 博 健

1. はじめに

1988年の1月末から2月末にかけてブラジルの各地で断続的な集中豪雨があり、とくにリオ・デ・ジャネイロ市とその近郊のペトロポリス市などで洪水氾濫や斜面崩壊・土石流が発生し、死者281人、負傷者734人、家を失った者18,000人以上という大災害となった。

リオ・デ・ジャネイロ市は、Fig. 1 に示すように、ブラジルの南部に位置し、1960年にブラジリアに遷都されるまでの200年近くにわたり首都として栄え、現在でも、サンパウロと並んでブラジルの政治・経済・文化の中心的役割を果たしている。リオ市はまた世界的に有名なカーニバルやコパカバーナ海岸など観光都市としての性格も強い。

リオ・デ・ジャネイロ市周辺の地形は、Fig. 2 および Photo 1 あるいは Photo 2 にみられるように、ガナバーラ湾北西部のバイシャ・ダ・フルミネンセとよばれる流送土砂で形成された低地を除けば比較的急峻な地形をしており、海岸まで山が迫っているところも多い。

リオ・デ・ジャネイロ市の北方には、ペトロポリスやテレゾポリスなど、リオ・デ・ジャネイロ市にあって住んでいたポルトガル王室貴族の避暑地として開けた高原都市が散在している。

今回の集中豪雨では、主としてバイシャ・ダ・フルミネンセ低地を流れるイグアス川・サラブイ川・メリチ川・エステラ川やリオ・デ・ジャネイロ市内を流れるマラカナン川の洪水氾濫と、ペトロポリス市の山地部やリオ・デ・ジャネイロ市の丘陵部での斜面崩壊や土石流という土砂崩壊によって多数の死傷者をもたらされた。低地部や急傾斜地部という危険地に多くの人々が居住するリオ・デ・ジャネイロ市周辺の状況は我

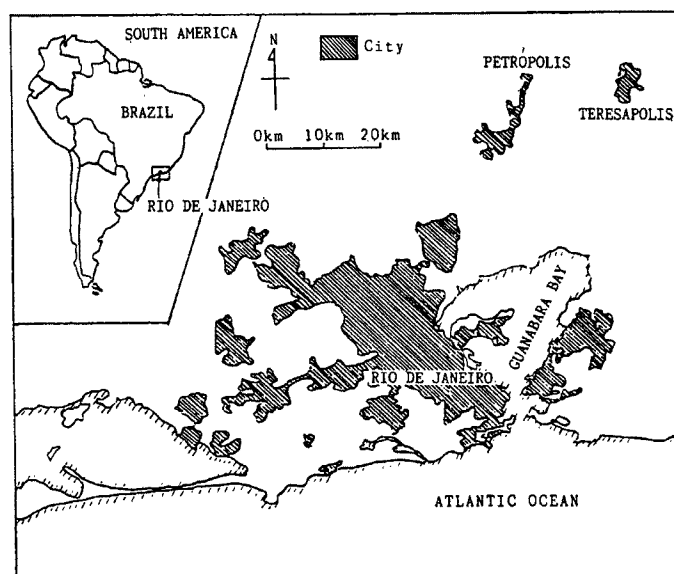


Fig. 1 Locations of Rio de Janeiro and Petropolis.

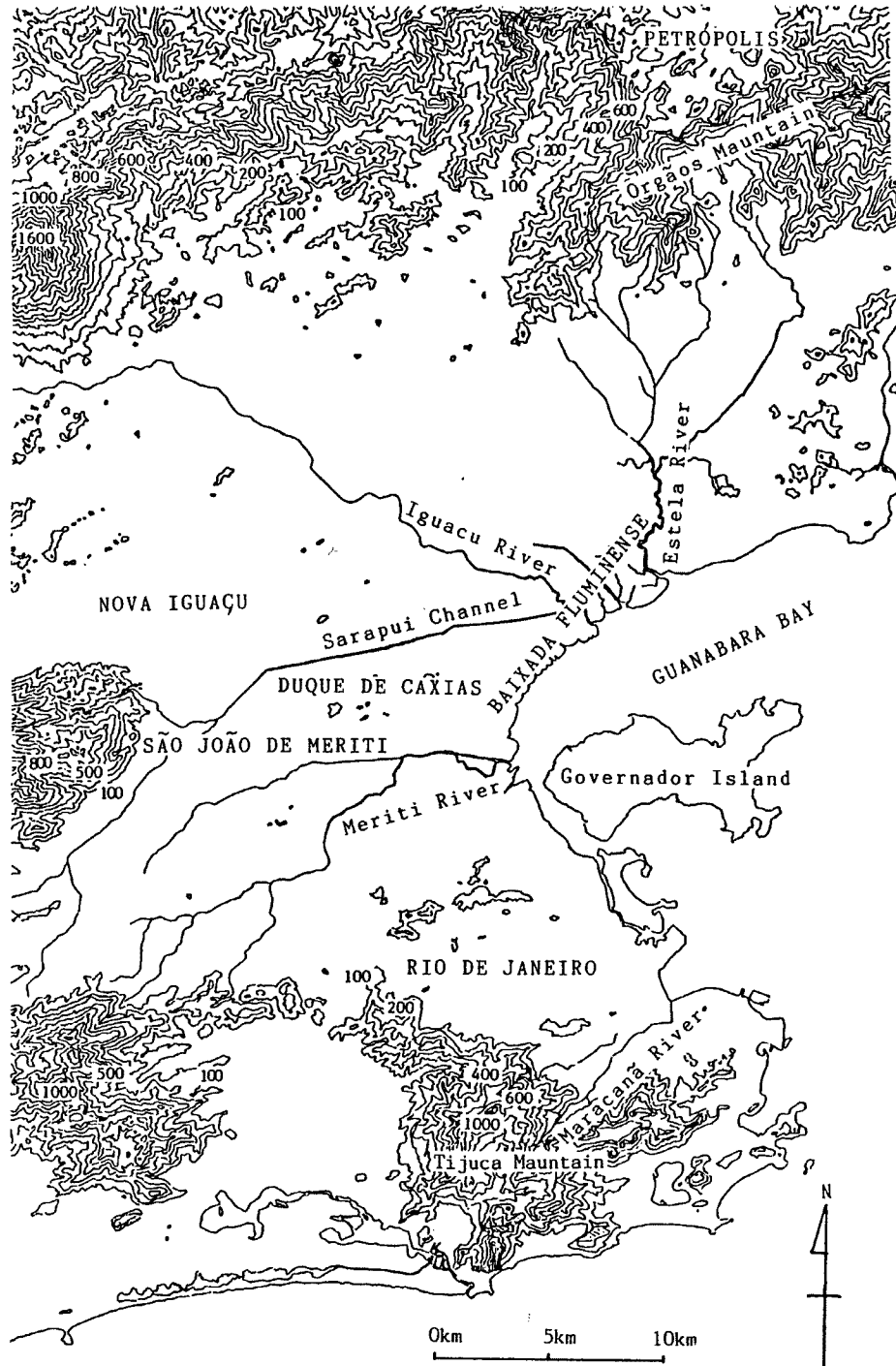


Fig. 2 Topography around Rio Janeiro and Petropolis.

国でも至るところに見られ、今回のリオ・デ・ジャネイロ市とその近郊での災害特性を明らかにするとともにその原因について検討しておくことは、我国の洪水・土砂災害対策を立てるうえでの重要な基礎資料となると考えられる。

このため、文部省重点領域「自然災害」総合研究班（研究代表者；芦田和男京大教授）でもこの水害につ



Photo 1 Flat plane of Baixada Fluminense (fluvial low land).

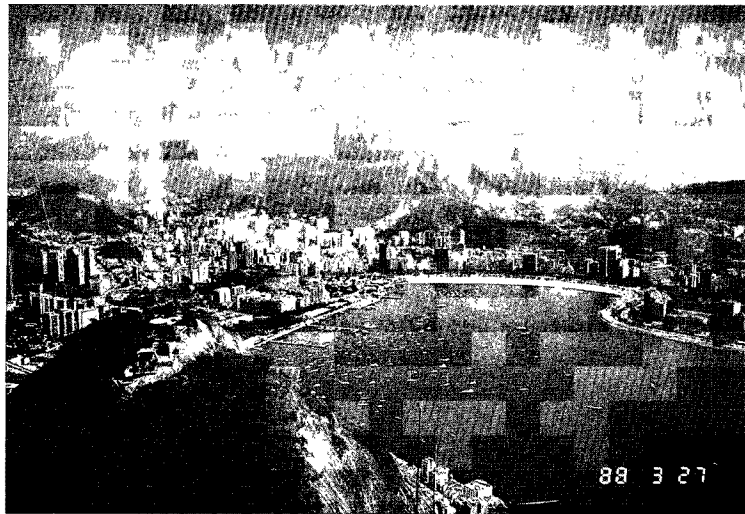


Photo 2 Central part of Rio de Janeiro with a distant view of Tijuca Mountains.

いての学術的な調査を行うことになり、特定研究(1)により3名の調査団を現地に派遣することが決定された。**Table 1** に調査団の構成と各分担者の研究課題を示す。

本調査団は1988年3月18日に日本を出発し、日本国在リオ・デ・ジャネイロ総領事館のほか、リオ・デ・ジャネイロ州環境局、同河川・湖沼部 (SERLA)、ブラジル地理統計研究所 (IBGE)、リオ・デ・ジャネイロ州消防局、サン・パウロ市内の3邦字新聞社などの協力のもとに、水害現地調査ならびに資料収集を行い、同年3月29日に帰国した。本報告はこれらの調査結果の概要を示したものであって、その大部分は研究報告として既に発表されている¹⁾⁻³⁾。

2. 降雨特性

豪雨災害の調査では、降雨量や河川の水位・流量などが重要な基礎資料となるが、本災害の場合、いずれの河川においても水位・流量の観測は全くなされておらず、また一部の観測地点を除いて降雨資料は日単位

Table 1. Members of research group.

Name	Affiliation	Research
Mr. Hirotake IMAMOTO (Leader)	Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University	• runoff analysis • rufugee
Mr. Toshie NISHIZAWA	Professor, Institute of Geoscience, The University of Tsukuba	• meteorological research
Mr. Koichi SUZUKI	Professor, Department of Civil Engineering, Ehime University	• slope failure, debris flow

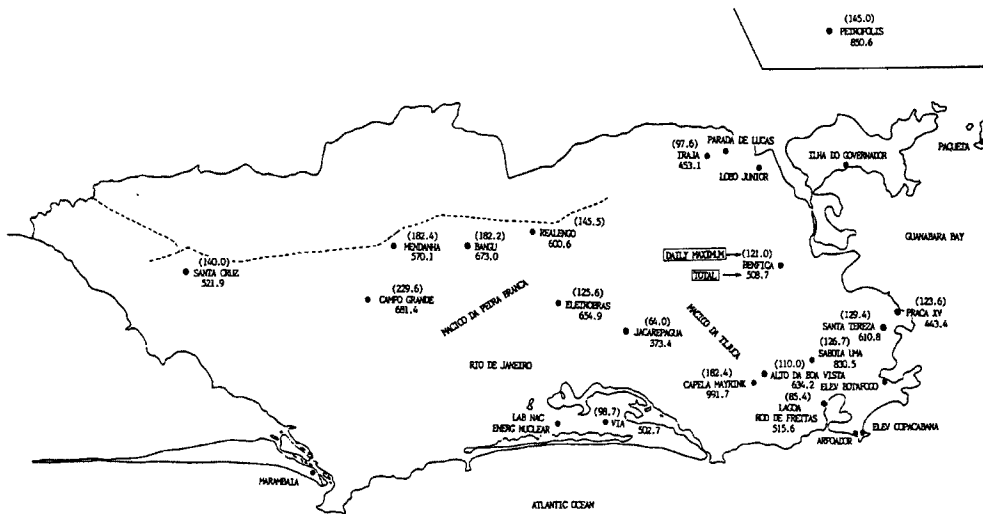


Fig. 3 Locations of pluviometer and total rainfall depth and the maximum daily rainfall depth.

の雨量しか入手できなかった。

Fig. 3 は、本調査団が入手した雨量資料の観測地点の位置を示したものであって、各観測地点における2月の総降雨量と日最大降雨量も併示されている。また、Fig. 4 は各観測地点における日降雨量の経時変化を示したものであって、リオ・デ・ジャネイロ市周辺では、2月1日から2月22日まで断続的に日雨量100 mm あるいはそれ以上の豪雨があったことがわかる。

Fig. 4 に示されるように、とくにリオ・デ・ジャネイロ市のサボイア・リマ(14)では2月中に3回の連日豪雨があり、19日～22日の4日間の降水量は432 mm に上がっている。このためリオ・デ・ジャネイロ市内の災害の多くはこの4日間に集中している。また、山岳地帯のペトロポリス(20)では1月28日と1月31日から2月3日にかけてかなりの降雨があったが、さらに2日おいた2月6日には1日だけで145 mm という集中豪雨に襲われ、先行降雨で緩んだ地盤は耐えきれず崩壊し、多くの死傷者を生むことになった。なお、カペラ・メイリンク(12)では2月2日から2月22日までの約20日間で991.7 mm もの降雨があり、カンポ・グランデ(4)では2月3日に229.6 mm の日雨量を記録している。ちなみに、この地方の年間降雨量は1,500 mm 程度であり、今回の豪雨がこの地方としては記録的なものであったことがわかる。

Table 2 はリオ州環境局の河川・湖沼部による4日雨量の確率年の推算結果を示したものであって、サボイア・リマの432.0 mm とカペラ・メイリンクの449.4 mm の確率は約50年とかなり大きいものの、他の

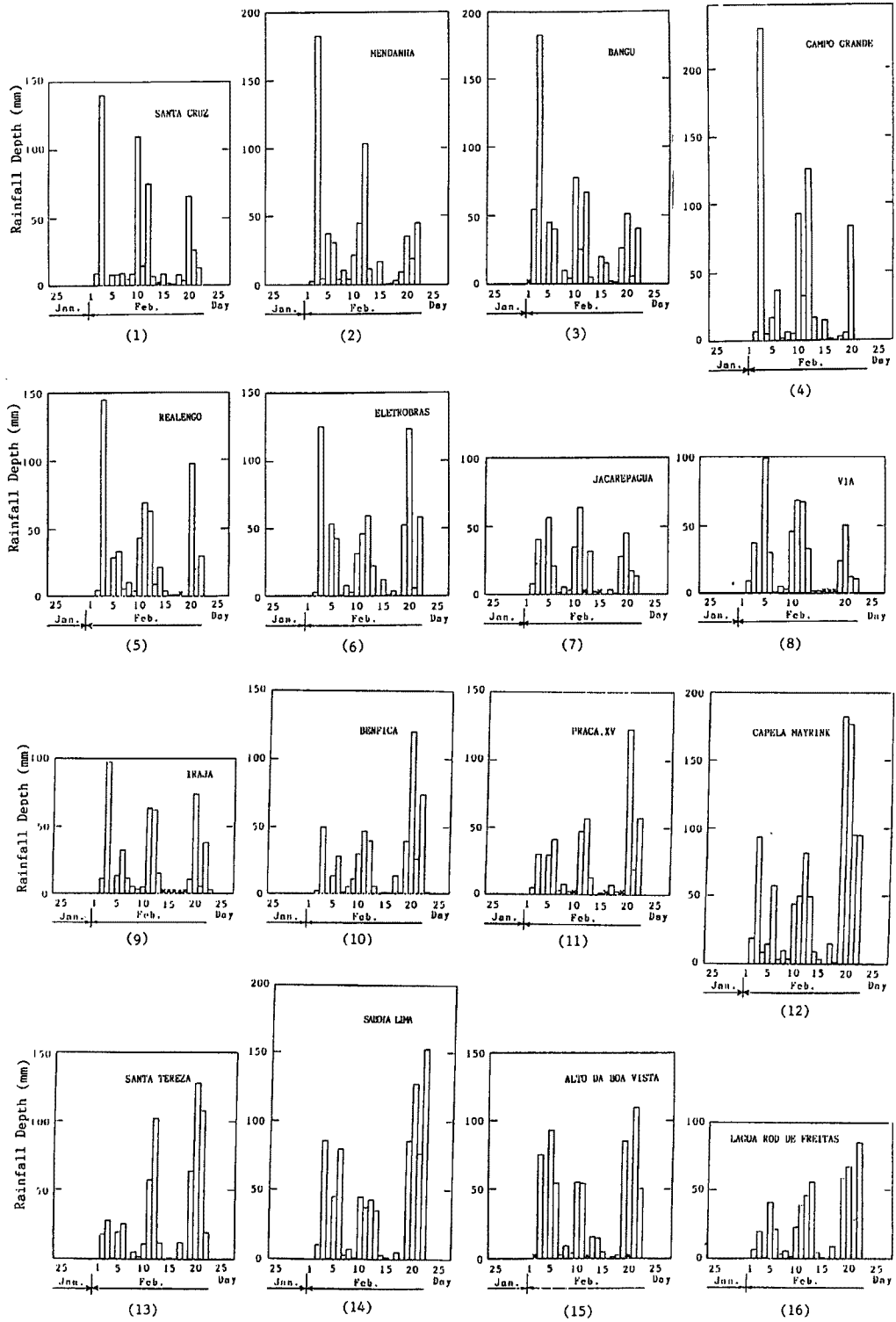


Fig. 4(a) Daily rainfall depth at each station.

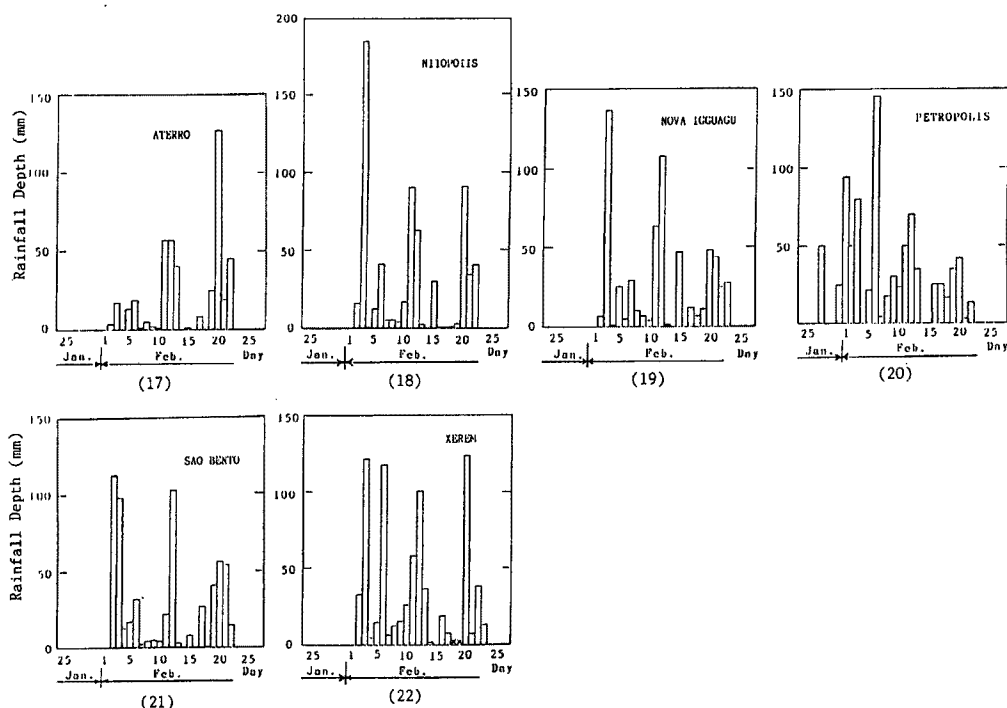


Fig. 4(b) Daily rainfall depth at each station.

Table 2. Total rainfall depth and its return period of 4 days from February 18 to 21, 1988 (SERLA)¹⁾.

Station	Total rainfall depth of 4 days from 18 to 21 (mm)	Approximate return period (years)
Realengo	149.4	5
Lagoa	239.8	9
Saboia Lima	432.0	50
Eletrobrás	240.1	10
Via 11	98.2	1
Capela Mayrink	449.4	50
Benfica	260.6	12
Santa Tereza	321.8	22

観測地点での確率年は、サンタ・テレーザの22年を除くと、全般的にそれほど大きいものではない。日雨量の確率年についても、サボイア・リマでの152 mmですら3年であり、他の観測地点ではいずれも1年から2年に過ぎず、日雨量もそれほど大きいものではなかった¹⁾。

以上より明らかなように、今回の豪雨は、我が国での集中豪雨のごく短時間に集中したものではなく、数日間にわたって断続的に強雨が続いたものであることがわかる。

3. 水害の概況および社会的素因

3.1 災害の概況

1月末から始まったリオ・デ・ジャネイロ州一帯での断続的な集中豪雨は、2月3日から10日にかけてペ

Table 3. Passage of the disasters and countermeasures of heavy rainfall in February 1988.

Date	Passage of the disasters (and countermeasures)
February 3 (Wed.)	<p>*It rained heavily everywhere in Rio de Janeiro.</p> <p>*It rained heavily in Nova Iguacu, João de Meriti and Duque de Caxias in Baixada Fuluminense and 8 persons died. (Oliveira, mayor of Duque de Caxias, announced officially "The official disaster ordinance" for the severe damage of the city.)</p> <p>*Three persons of one family including a baby died by the collapse of a jerry-built house in Teresopolis 95 km apart from Rio de Janeiro.</p> <p>*Many houses were inundated by a large flooding in Angra dos Reis 154 km apart from Rio de Janeiro. (About 6,000 persons took shelter in public buildings such as schools and police offices.)</p>
6 (Sat.)	<p>*Flooding and slope failures occurred in many places of Petrópolis and at least 71 persons died. The Quitanguinha river in the city was flooded and the city was isolated. (Paulo Lates, mayor of Petrópolis, declared "the state of disaster" and tried to do his best for sufferers' rescue and appropriated CZ\$ 1.4 billion in the budget of the city for restoration.)</p> <p>*Many cities such as Nova Iguacu, São João do Meriti suffered severe damage as well. (All the mayors of those cities asked for the help in emergency such as clothes, medical goods and food.)</p>
8 (Mon.)	<p>*Rainfall in Caxias city and adjacent cities in Baixada Fluminense did not stop, and 7 persons were drowned. (Several thousands of sufferers were taking shelter in the public facilities of the cities, churches, schools and stadiums. The number of sufferers was supposed to be increasing still more.)</p>
9 (Tue.)	<p>*It rained heavily in Petrópolis again.</p>
10 (Wed.)	<p>*The Maracanã river in Rio de Janeiro was flooded and 8,500 persons in the low-lying sections of the city became homeless. (Paulo Ratex, mayor of Petrópolis, announced that removal of 5,000 houses in mountain areas was under consideration, because they were exposed to the danger of collapse by the next heavy rain.)</p> <p>*The Gupiaçu river in Caxoeira do Macaco near Rio de Janeiro was also flooded.</p> <p>*Even the Paraíba river in Volta Redonda of highlands became dangerous with the increase of water level 2.5 m higher than usual level.</p>
11 (Thu.)	<p>(Federal Government of Brazil and the State of Rio de Janeiro asked each nation for help.)</p> <p>(Japanese Government decided to send medical goods equivalent to 36.6 million yen, and decided tentatively to offer the relief money of US\$ 150,000.)</p>
18 (Thu.)	<p>*The Acre river in Rio Branco, capital of Acre direct control section of Federal Government, was flooded. All the areas along the river and 25 percent of the city were submerged. The number of sufferers was 11,600 and agricultural damage amounted to CZ\$ 5 billion.</p> <p>(Volunteer groups of about 5,000 persons worked for the rescue of isolated families and for the accommodation of sufferers in primary schools and churches etc.)</p> <p>(Minister of Domestic Affairs admitted CZ\$ 20 million for the help of sufferers.)</p> <p>*The Acre river, a branch of the Jurua river, was flooded.</p> <p>*Patients of malaria, the inflammation of the liver and chicken pox came out and the number of undernourished children was increasing.</p> <p>(Wholesale price of soy bean increased by 9.3 percent, potato by 10 percent and coffee by 17.6 percent due to the recent continuous rainfall.)</p>
19 (Fri.)	<p>*Heavy rain continued for 5 hours in Rio de Janeiro. Slope failures of large scale occurred everywhere and more than 300 persons were supposed to have died. Severe flooding on record in the low-lying sections of the city made the traffic useless.</p> <p>*Three barracks collapsed in the afternoon and 13 persons died or were missing in Rio Comprido, north of Rio de Janeiro.</p> <p>*Santa Jenoveva hospital in Santa Tereza hill was crashed by large rocks of 500 tons which fell down and about 40 persons died.</p> <p>(continue)</p>

	(continued)
20 (Sat.)	<p>*Slop failures took place burying 14 persons alive also in Formiga hill of Tijuca Mountains.</p> <p>*The rain continued and a three store building collapsed with instantaneous death of 10 persons. Damage was supposed to be increasing still more. (220 persons died and about 10,000 persons were rescued and accommodated in schools and churches etc. until February 20.)</p> <p>*Whole the city of Rio de Janeiro was flooded and almost all the traffic on the ground stopped. (Fire-fighting teams cooperated with policemen worked for the rescue of sufferers and exhumation of dead bodies with general mobilization.)</p> <p>*Leptospirose, a contagious disease, outbroke and 6 persons already died of the disease. (142 patients of Leptospirose were being given medical treatments in hospitals.)</p>
21 (Sun.)	<p>*Heavy rain attacked again the State of Rio de Janeiro where heavy rainfall had continued intermittently from the end of last week. 238 persons died, 700 were injured and 10,000 to 20,000 persons became homeless so far. (TV asked the people for the help and offer of food, medical goods and clothes etc. It also warned that row water from water service should not be taken for the fear of contagious diseases.) (Firemen were very active for the rescue of sufferers everywhere.)</p>
27 (Sat.)	<p>*Severe floodings occurred in Manaus, capital of the State of Amazonas. (More than 300 families took shelter.)</p>
May 1 (Tue.)	<p>*Heavy rainfall caused floodings everywhere in Rio de Janeiro and traffics stopped. (About 4,000 persons took shelter in schools and churches etc.)</p>

トロポリス市やバイシャ・ダ・フルミネンセ地域などに大きな被害をもたらした。リオ・デ・ジャネイロ市も2月18日から21日にかけて集中豪雨に見舞われ、洪水氾濫や土砂崩壊により多数の犠牲者を出した。

水害の発生状況の概要をブラジル国内で発行されている邦字新聞3紙(サンパウロ新聞、パウリスタ新聞、日伯毎日新聞)の記事に基づいてまとめると **Table 3** のようになる。

Table 3 にみられるように、2月6日のベトロポリス市ならびに2月19日のリオ・デ・ジャネイロ市では主として斜面崩壊あるいは土石流といった土砂災害によって多数の死者がもたらされ、バイシャ・ダ・フルミネンセ低地やリオ・デ・ジャネイロ市内のマラカナン川流域では大小の河川の洪水氾濫によって多くの住宅が奪われている。

リオ・デ・ジャネイロ市内では2月に入ってからしばしば断続的な大雨に見舞われ、その度に市内の各地で浸水騒ぎを起こしていたが、**Fig. 4** に示されたように、2月18日から21日までの連日にわたって、この地域としては異常な時間雨量 50 mm クラスの集中豪雨があり、市内の中心部を流れるマラカナン川が氾濫し、バンデイレ広場付近一帯が 1.5 m も浸水するとともに、サンタ・テレーザやチジュッカなどの各地で土砂が崩壊し、死者86名、家を失った者1万名以上という被害が発生した。またベトロポリス市では1月31日から断続的な集中豪雨があり、2月6日までの雨量は 412 mm (20年確率雨量に相当) に達し、とくに6日の日雨量は 145 mm (10年確率雨量に相当) であった¹⁾。このため、市内を流れるキタンジニア川が氾濫するとともに各地の斜面が“まるで砂糖を溶かすように”崩壊した。

Table 4 は、2月2日から29日の約1ヶ月間における、リオ・デ・ジャネイロ州の各市ごとの死者・負傷者および家を失った者の人数を示したものである²⁾。死者・負傷者は、ベトロポリス市およびリオ・デ・ジャネイロ市における斜面崩壊によるものが殆どで、家を失った者は上記の斜面崩壊によるもののほか、リオ・デ・ジャネイロ市のマラカナン川周辺およびノバ・ノグアス市やドゥーケ・デ・カシアス市などバイシャ・ダ・フルミネンセ低地における河川の氾濫によるものがかなりの部分を占めている。

Table 4. Human damage at each city.

City	dead	injured	homeless
Duque de Caxias	3	4	702
Tersópolis	8	28	763
Nova Iguaçu	6	92	849
São João de Meriti	—	—	332
Rio de Janeiro	86	81	10,824
Nilópolis	—	—	43
Petrópolis	170	601	3,128
Cachoeira de Macacu	—	—	460
Angra dos Reis	—	—	30
Barra do Piari	1	4	765
Niteroi	2	—	19
São Gonçalo	4	14	128
Campos	—	—	106
Volta Redona	1	—	—
Total	281	734	18,149

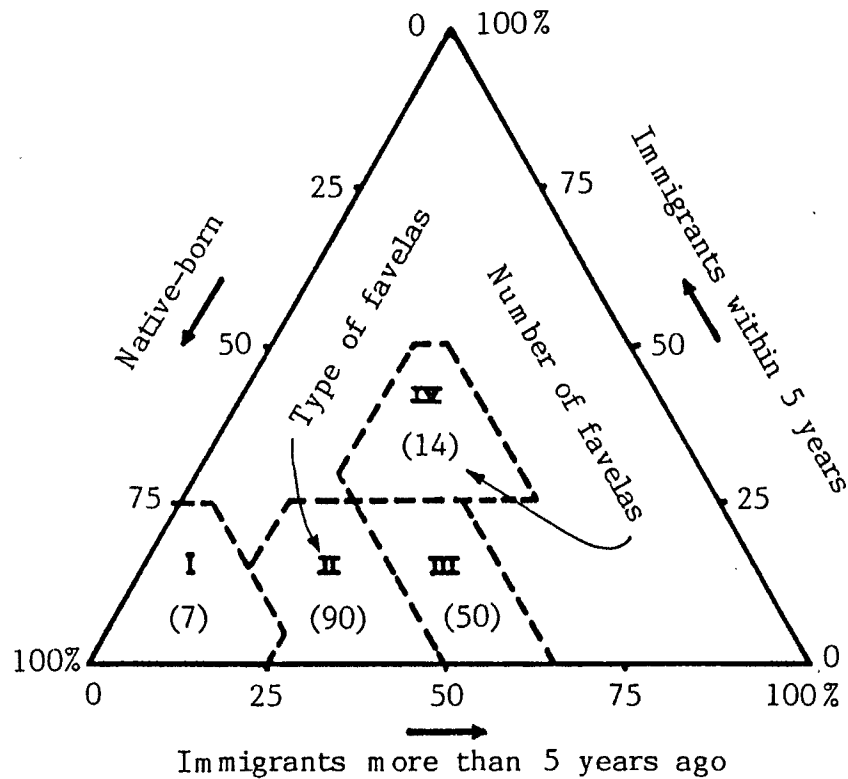


Fig. 5 Types and number of "favelas".

3.2 水害の社会的要因

1988年2月にリオ・デ・ジャネイロ州で発生した集中豪雨による災害の特徴として次の3点が挙げられる。すなわち、

- 1) 雨量はそれほどでないものの、強雨が連日のように続いたこと、
- 2) 急傾斜地などに多数の家屋が無秩序に建てられていたこと、
- 3) 低平地における洪水対策が遅れていたこと、

である。1)の降雨特性については既に2章において検討したため、ここでは2)および3)について簡単に述べる。

近年、ブラジル各地の農村住民が貧困を逃れてリオ・デ・ジャネイロなどの大都会に多数集まるようになり、市内や周辺部に無秩序に不良住宅を建て、数百から数千戸のスラム集落を形成するようになってきている。これらの集落はポルトガル語で「ファベイラ(Favela)」と呼ばれるが、いずれも急斜面や川沿いなどのきわめて環境の悪いところに位置している。ファベイラには、形成過程、構成人種、地理的条件などから各種のものがあるが、その数はますます増えつつあり、ブラジル国の大きな社会問題となっている。

Bezerra and Cruz の調査³⁾によると、リオ・デ・ジャネイロ市には1970年時すでに161ものファベイラが

Table 5. Population and number of favelas in Rio de Janeiro (1970).

Administrative regions	Population			Number of favelas				
	Total A	Favelas B	rate (%) 100 (B/A)	Total	I	Type II	III	IV
Portuaria	51,052	17,625	34.52	6	—	4	2	—
Cetro	59,457	—	—	—	—	—	—	—
Rio Comprido	96,751	22,532	23.28	5	—	5	—	—
Botafogo	256,250	10,885	4.25	10	2	4	1	3
Copacabana	239,256	15,585	6.51	7	—	6	1	—
Lagoa	175,586	36,537	20.81	10	1	5	3	1
Sôa Cristvao	90,473	33,994	37.57	6	—	4	2	—
Tijuca	192,094	36,066	18.78	5	1	4	—	—
Vila Isabel	157,980	14,011	8.87	2	—	2	—	—
Ramos	234,605	94,181	40.14	18	—	7	8	3
Penha	286,892	60,619	21.13	16	—	8	7	1
Meier	364,796	75,449	20.68	10	—	3	6	1
Engenho Novo	195,619	27,300	13.96	10	1	8	1	—
Iraja	240,443	21,530	8.96	8	2	4	2	—
Madureira	267,321	20,544	7.69	16	—	11	3	2
Jacarepagua	241,017	4,526	1.88	5	—	2	2	1
Bangu	372,433	27,463	7.37	7	—	4	3	—
Campo Grande	230,324	3,209	1.39	1	—	—	1	—
Santa Cruz	92,927	1,781	1.92	1	—	1	—	—
Governador (Ilha)	105,651	20,032	18.96	7	—	3	3	1
Paqueta (Ilha)	3,250	—	—	—	—	—	—	—
Anchieta	233,037	29,841	12.81	6	—	1	4	1
Santa Teresa	64,684	11,264	17.41	5	—	4	1	—
Total	4,251,918	584,983	13.76	161	7	90	50	14

存在していたという。これらのファベイラを居住年数から分類すると Fig. 5 に示す 4 種となる。このうちタイプⅡが最も多く、その数は90に達している。なお、このタイプのファベイラは、総居住人口の50～75%がそこで生まれ、移住後5年以上が25～50%を占め、5年以下が0～25%となっている。

Table 5 は1970年のリオ・デ・ジャネイロ市におけるファベイラの人口および集落数を示したものであって、総人口4,251,918人の13.76%に相当する584,983人がファベイラに住んでいたことがわかる。ファベイラの多くは、Photo 3 に示すように、住宅地として不向きな急斜面にあり、水害に対して非常に危険な条件下にある。さらにファベイラの住民は燃料用として周辺の樹木を伐採することが多いため、斜面崩壊の危険性はさらに増大している。

ベトロポリスは、山間地のリゾート地区として開発されたため、もともと住宅建設に適した平坦地が非常に少なく、このため低所得者の小家屋ばかりでなく高所得者の大住宅も、多くは急斜面の危険な場所に建設されていた。さらに、ベトロポリス市の人口は近年の織物などの地場産業の発展に伴って増加しており、現在は1980年の241,884人を大幅に上回っていると考えられる。これがまた危険地内の住宅数を増加させるこ



Photo 3 One of favelas in the suburbs of Rio de Janeiro.



Photo 4 The Iguacu river in Baixada Fluminense.

とつながり、今回の災害を甚大化したものと考えられる。

次に、バイシャ・ダ・フルミネンセ低地の洪水対策について見てみよう。

バイシャ・ダ・フルミネンセ低地は、Photo 4 に示されるように、イグアス川・サラプイ川・メリチ川・エステラ川などの流送土砂で形成された沖積平野であり、洪水氾濫に対して危険な地域として、河道の改修や治水ダムの建設など種々の洪水対策が検討されてきていた。しかしながら、近年、リオ・デ・ジャネイロ市のベッドタウンとしての宅地化が進み、河口付近を除くと両岸近くまで住宅が密集するようになったのに加えて、リオ・デ・ジャネイロ市内の急傾斜地でみたと同様に、河道内の高水敷にまでファベイラが形成されており、拡幅のみにより通水能力を確保することは実際上きわめて困難である。このような状況は我が国でもしばしばあり、河道改修やダム建設のほか流出量を制御するといった総合的な治水対策が必要である。

Fig. 6 はリオ・デ・ジャネイロ州の SERLA が計画しているメリチ川改修とサラプイ運河開削を中心と

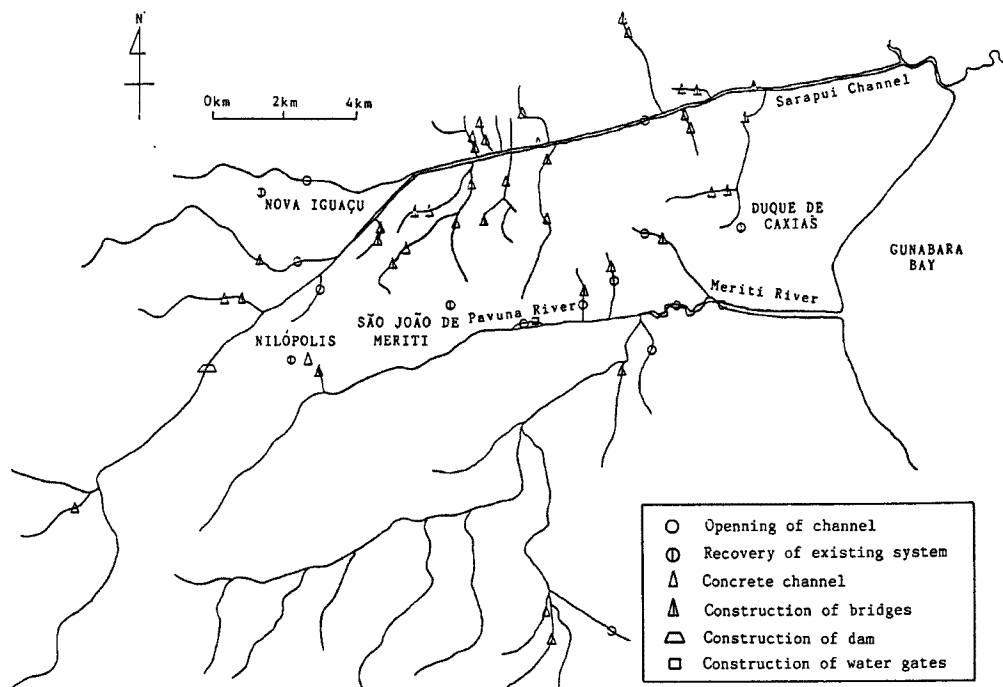


Fig. 6 Flood control projects of Baixada Fluminense (SERLA).

した洪水制御計画を示したものである。この計画では、運河の開削、現施設およびコンクリート水路の復旧、橋梁・ダム・水門の建設などが含まれている。バイシャ・ダ・フルミネンセ低地や、リオ・デ・ジャネイロ市内のマラカナン川周辺の水害を防ぐには総合的な治水対策が不可欠であり、早急な実施が望まれる。

4. 土砂災害の特性

4.1 斜面崩壊および土石流

今回の水害ではベトロボリス市およびリオ・デ・ジャネイロ市周辺の山地部で多くの斜面崩壊や土石流が発生したが、両地域における主な土砂崩壊箇所を示すと Fig. 7 および Fig. 8 のようになり、ベトロボリス市では31箇所、リオ市および周辺では50箇所以上で大規模な崩壊が生じたことがわかる。

Photo 5 は、上空から見たベトロボリス市郊外の写真であるが、斜面上に建てられた多数の住家が斜面崩壊により破壊されていることがわかる。崩壊の規模は、高さが数 10 m 程度のもものが多く、それほど大きく

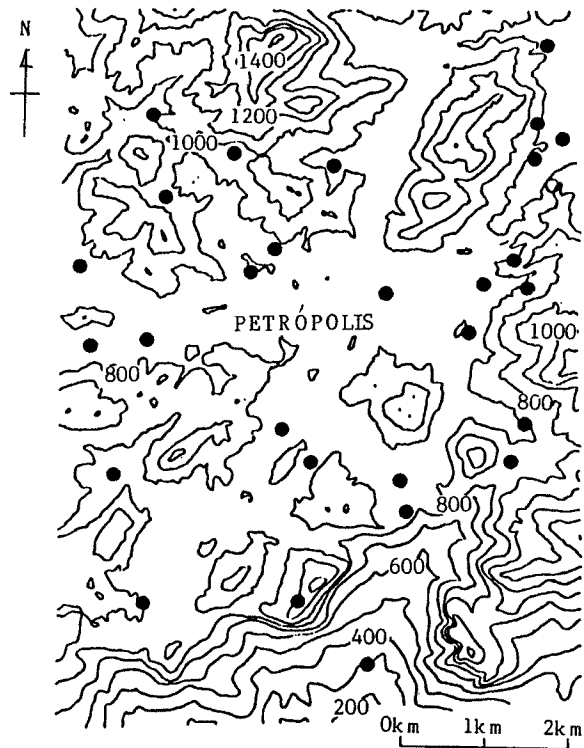


Fig. 7 Locations of slope failures in Petrópolis.

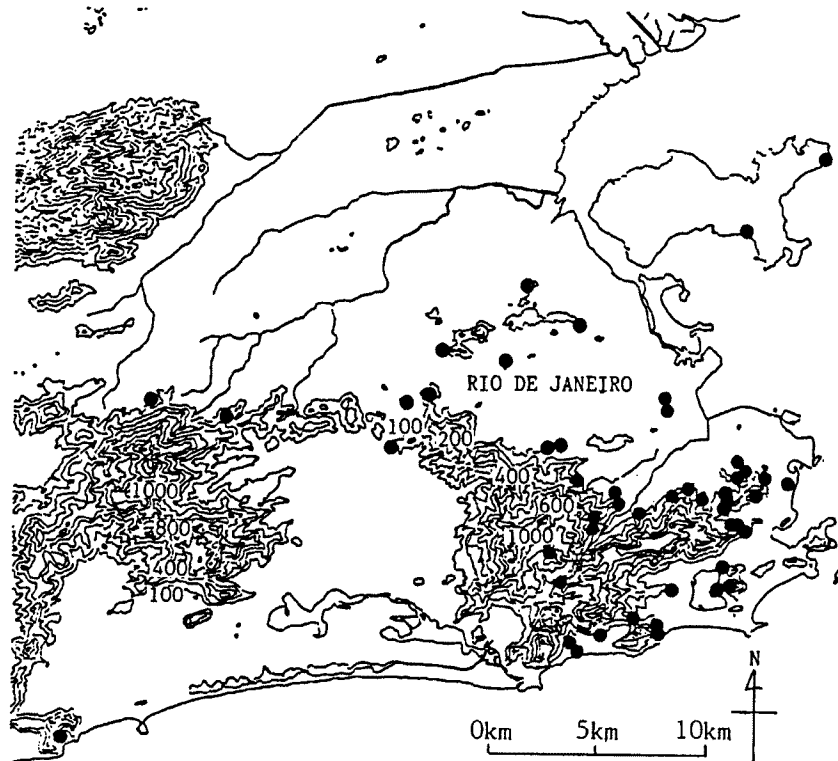


Fig. 8 Locations of slope failures in the suburbs of Rio de Janeiro.



Photo 5 Overview of suburbs of Petropolis.

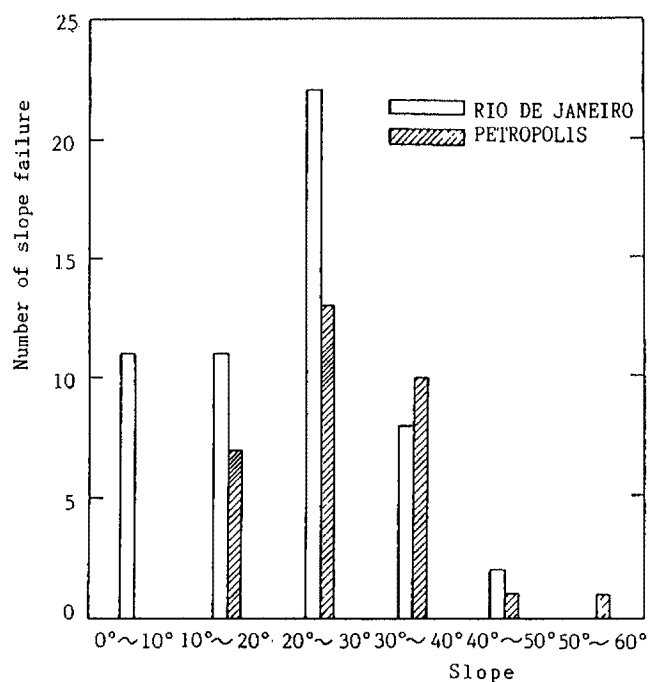


Fig. 9 Numbers of slope failures of every 10 degrees of land slope.

はない。

Fig. 9 は、このような斜面崩壊の発生と斜面勾配の関係を示したものである。斜面勾配を1/25,000地図の等高線から推定したため、あまり精度は高くないが、斜面崩壊の発生は斜面勾配が20°~30°の場合が最も多くなっている。なお、リオ・デ・ジャネイロ市では0~20°の緩斜面でもかなりの崩壊が発生しているのに対し、ペトロポリス市では30°以上の急斜面の崩壊も多いことがわかる。

また土石流については、数百メートルの距離を直径数メートルという巨石が流れた痕跡が認められた。土石流を目撃した住民の一人は「雨が強く降っていたが溪流には水がなかった。突然立木が立ったまま攻め寄



Photo 6(a) Slope failure near the top of a hill in Petropolis.



Photo 6(b) Steep slope failure near the central part of Petropolis.

せてきた。何トンもの石が土砂や砂と一緒にどっと流れてきた」と語っている。

Photo 6 および **Photo 7** は、それぞれペトロポリス市における斜面崩壊および土石流による被害状況の一例を示したものである。**Photo 7** の現場では **Fig. 10** に示すように、大石、土砂および流木がきれいに分離して堆積していた。

また、**Photo 8** はリオ・デ・ジャネイロ市山中のサンタ・テレザの土石流による被害の状況を示したものであって、左手前の老人病院の病棟が土石流に押潰され、ここだけで40名の死者が発生した。

4.2 リオ・デ・ジャネイロ州の地質特性

リオ・デ・ジャネイロ州の表層地質分布を **Fig. 11** に示す。リオ・デ・ジャネイロの地質はポルトガル語で Podzolic と呼ばれる粘土と砂から成る赤黄色の土である。ペトロポリスは、やはり粘土と砂を成分とする赤黄色の Latossole あるいは Cabissolo alico で覆われている。これらの土が水分を含んだ場合、粘着性



Photo 7 Mark of the biggest debris flow in Petropolis.

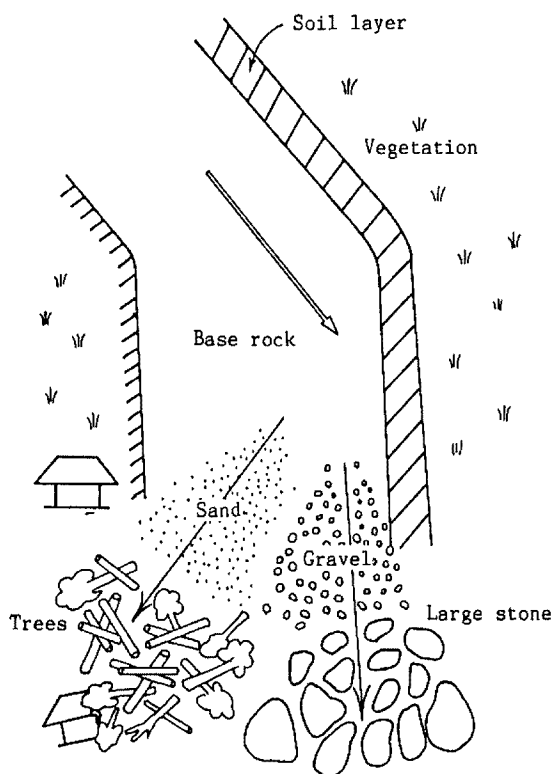


Fig. 10 Schematic figure of sediment segregation.

を示すが、非常に変形しやすく、乾燥状態では強風により空中に舞上げられる。また、植生の無い場合には非常に浸食されやすくなる。したがって、これらの土質を有する急斜面は集中豪雨による多量の浸透水により簡単に崩壊する。

リオ・デ・ジャネイロ州一帯の地質は、Fig. 12に模式的に示されるように、表土・風化岩および基岩という構造が基本となっている⁴⁾。表土は暗赤色あるいは黄赤色の砂混り粘土からなっているが、その厚さは崩壊地や土石流の現場のみから判断すると場所によって異なるがせいぜい数メートルと推定される。また、土石流後の基岩盤の露出状態から表土と基岩との境界の風化岩層厚も表土厚と同程度と推定される。Fig. 12には斜面が崩壊して行く過程も模式的に示されているが、斜面において水の集中によって小川が生じ表土が小川によって削られた後の低い部分に次々に斜面が崩壊している。土石流は斜面崩壊後、小川に堆積した表土中の礫や風化岩が一時に流れ出たものであると考えられる。

山腹では道路の切土部や宅地が引き金となったと考えられる崩壊箇所が多数みられたが、基本的には、市周辺部の急傾斜面は不安定となっており、住宅地には適していないといえる。また、山間谷部では、大規模な土石流が数箇所発生しており、地形から見て今後もこのような土石流が降雨条件によっては容易に発生すると思われる。

ペトロポリス市では約20年前にも大きな土砂災害があったが、この時に崩壊した場所は、急傾斜であるにもかかわらず、今回の災害では崩壊していないところが多く、斜面崩壊は過去の履歴が大いに関係することを示している。ただし、今回の災害で大丈夫だったから安全であるとは言えないことに留意する必要がある



Photo 8 Debris flow with many large rocks of 500 tons in total attacked Santa Jenoveva hospital and 40 persons died.

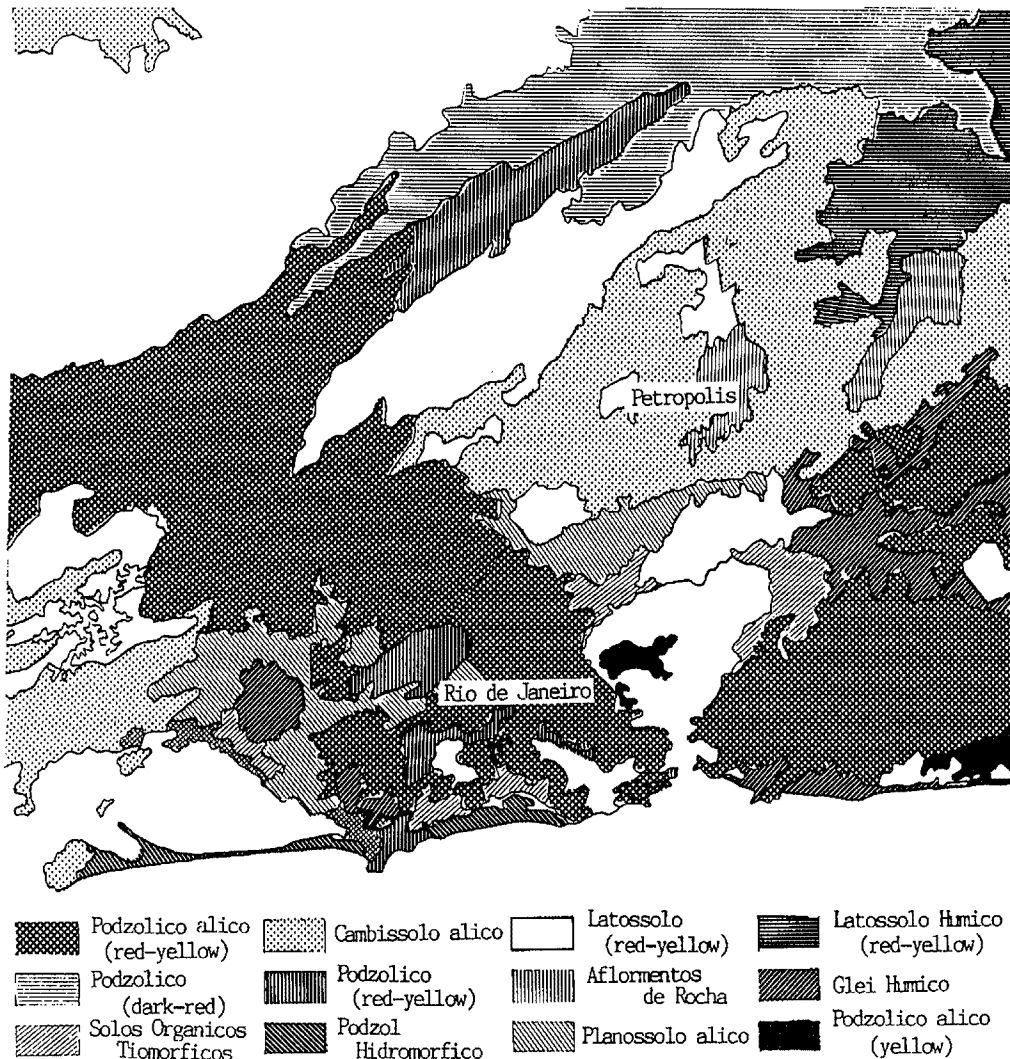


Fig. 11 Geology of ground surface in the State of Rio de Janeiro.

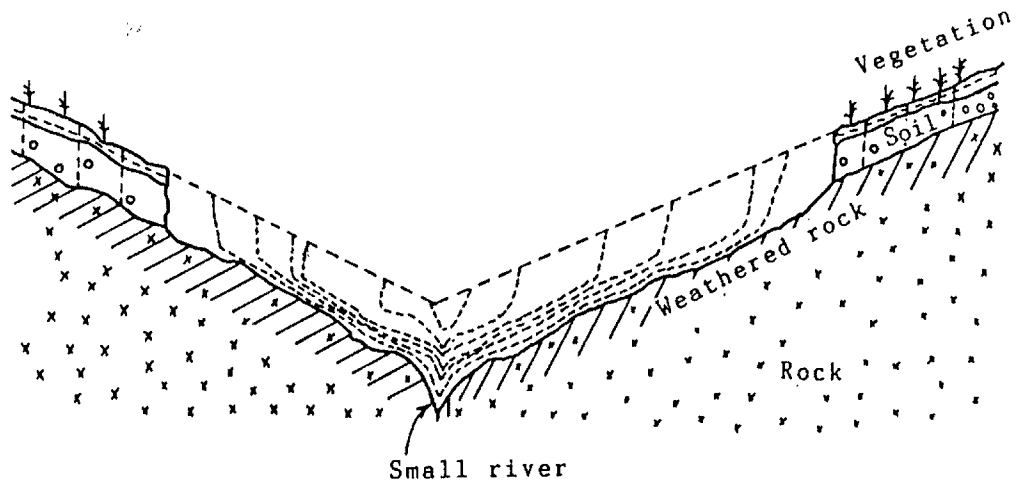


Fig. 12 Schematic figure of erosion and failure process of slope.

る。

5. 洪水災害の特性

5.1 リオ・デ・ジャネイロ州の洪水災害

Fig. 2 に示すように、サン・ジョアン・デ・メリチ川とサラプイ川に囲まれた沖積化平地を中心とするバイシャ・ダ・フルミネセ地域はリオ・デ・ジャネイロ市の北方に位置し、ノバ・イグアス、サン・ジョアン・デ・メリチ、ドゥーケ・デ・カシアスといった各市がリオ・デ・ジャネイロ市のベッドタウンとして急激に都市化してきた。Photo 9 にみられるように、低平地部分の河並には小規模ながら連続堤防が建設されており、内水災害が頻発するようになった。このため、リオ・デ・ジャネイロ州政府によって、Fig. 13 に示すようなダムを設置、堤内地排水路の改良など抜本的な河川改修計画が検討されてきたが、現在のところまだ実現されるに至っていない。今回の断続的な集中豪雨でも、この地域の各所で内水氾濫が発生し、河道内に建てられた数多くのバラック住宅が流失するという被害を被った。また、住宅地の浸水が長期にわ



Photo 9 Houses along a river without banks in Baixada Fluminense.

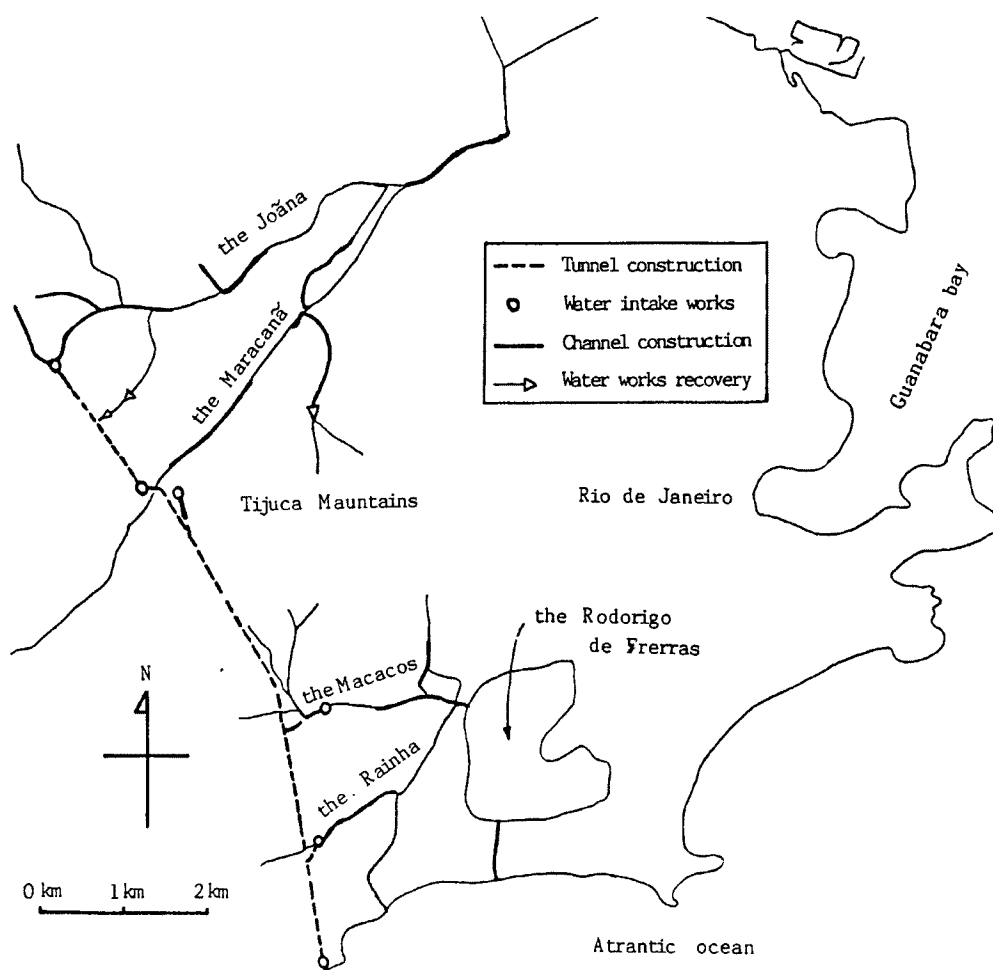


Fig. 13 Flood control project of rivers in Rio de Janeiro by SERLA.

たつたため、伝染病レプトスピローゼが発生し、10名近くが死亡するとともに、多くの住民を恐怖におののかせた。このバイシャ・ダ・フルミネンセ地域は、現在検討されている洪水対策の計画が実施されない限り、わずかな降雨でも内水災害は今後とも生じると考えられる。財政のおよび、技術的検討が、現在の計画について早急に加えられなければならないと考える。

5.2 マラカナン流域の洪水災害

リオ・デ・ジャネイロ市内では多くの中小河川が至るところで氾濫したが、その中でも Fig. 2 に示されているリオ・デ・ジャネイロ市の下町を流れるマラカナン川の氾濫は最大のものであった。

Fig. 14 は、マラカナン川流域のサボイア・リマ観測所 (Fig. 3 参照) での雨量自記記録紙より調査団が読取った時間雨量を示したものであって、最大日雨量は 131.0 mm (2月21日)、最大時間雨量は 57.0 mm (2月18日19~20時) となっている。Photo 10 は、マラカナン川での側岸浸食状況を示したものであって、河道内に建てられた違法建築のバラックが洪水によりひとたまりもなく流された。

マラカナン川の流域はジョアンナ川流域と接しており、Fig. 15 に示すように、上流部は急な山地で、下流部は比較的緩やかな平地となっている。上・下流部の諸元を Table 6 に示す。マラカナン川とジョアンナ川との合流点付近にあるバンデイラ広場付近での河道は、幅が 5~6 m 程度、深さが 2 m 程度と小さく、

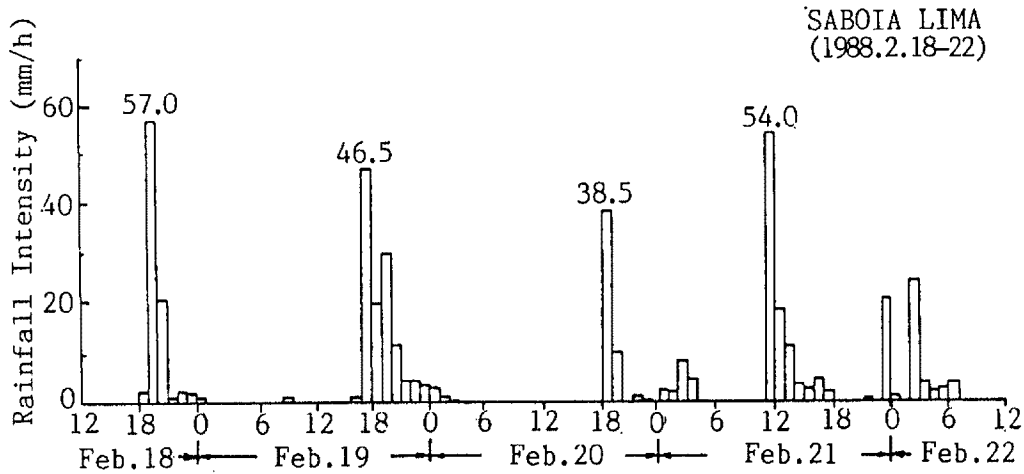


Fig. 14 Hourly rainfall depths at Saboia Lima from February 18 to 22.



Photo 10 Barracks in a water way in the upstream region of the Maracana.

今回の洪水ではたちまち氾濫し、ここでの浸水深は1.5 mにも及んでいる。

洪水時の河川流量は全く観測されていなかったので、Fig. 15の地形図およびFig. 14の雨量を用いて、今回の洪水ピーク流量を合理式によって推定した。すなわち、まず最初に河道を標高50 m以上の上流部と50 m以下の下流部にわけ、それぞれでの洪水到達時間を計算すると、上・下流部とも約2時間という結果が得られた。Fig. 14に示されたように、今回の豪雨の最大2時間雨量は78 mmであるから、合理式に用いる雨量強度として39 mm/hrを採用した。つぎに流出係数であるが、これについても不明のため、我国における流出係数を参考にして0.7という値を用いることにした。以上の前提条件のもとで洪水流量を計算すると、ジョアンナ川では $103 \text{ m}^3/\text{s}$ 、マラカナン川では $93 \text{ m}^3/\text{s}$ という結果が得られた。

また、両河川の合流する直前の河床勾配を $1/150$ 、川幅を5 m、マンニングの粗度係数を0.03とし、等流状態を仮定して水深を計算すると、マラカナン川では約4.8 m、ジョアンナ川では約5.3 mとなる。現在の川の深さは約2 mであるので、河積が全く不足しており、洪水が氾濫したのも当然であったといえる。

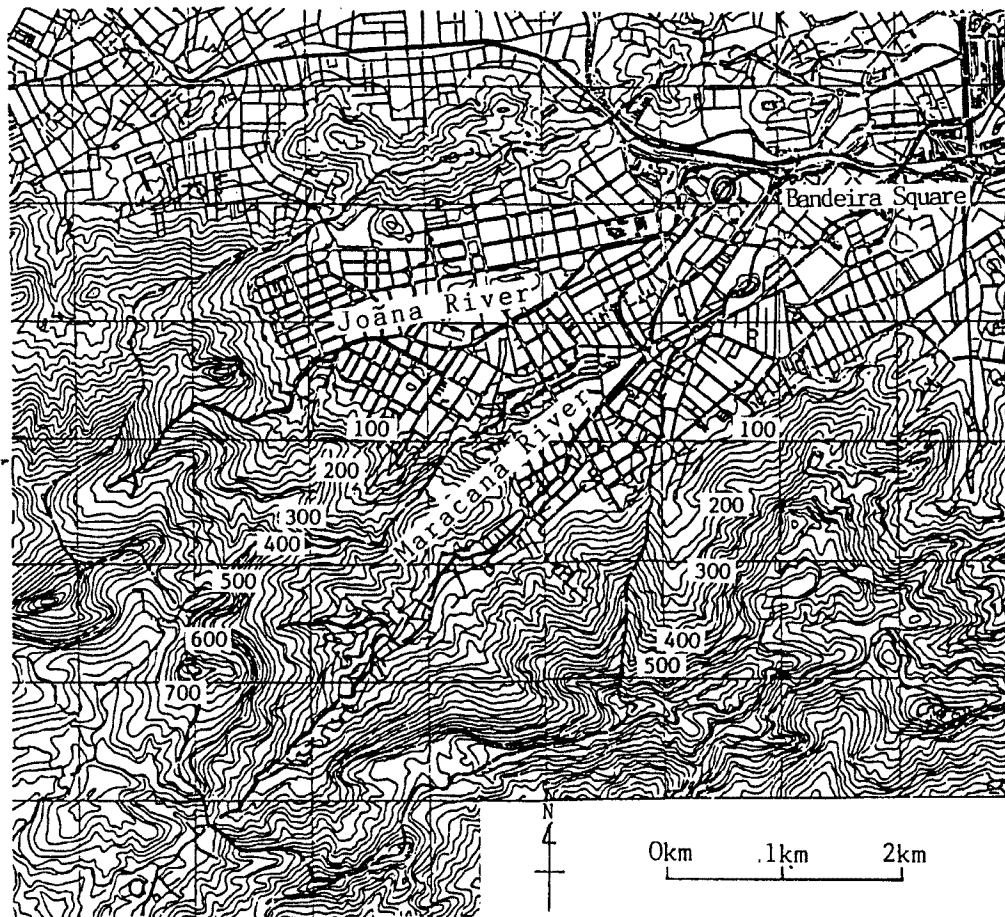


Fig. 15 Topography of the Maracana river and the Joana river basins.

Table 6. Topography of the Maracana river and the Joana river basins.

River	Basin area (km ²)	Length (km)	Bed slope	
			upstream	downstream
Maracanã	12.52	9.6	EL. 355m 1/10 50m 3.0km	1/150 5m 6.6km
Joãna	13.94	9.9	EL. 550m 1/5 50m 2.4km	1/150 5m 6.7km

5.3 マラカナン川流域の流出解析

治水計画の立案に際しては、ピーク流量と同様に洪水波形を計算する必要がある。今回の洪水では、長年マラカナン川における流量観測が行われていないこともあって、洪水波形についても全く不明である。した

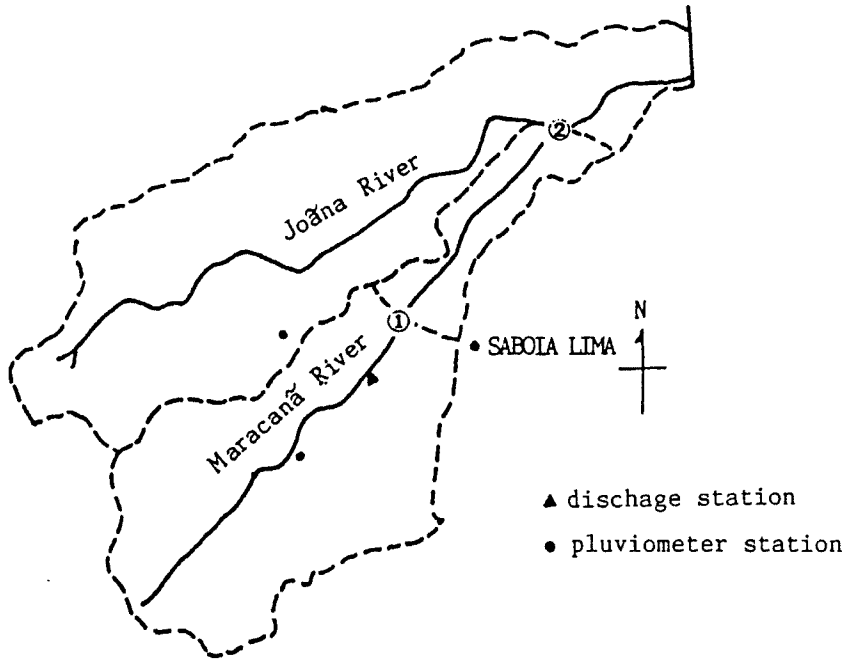


Fig. 16 Stations of pluviometer and discharge observation in the river basin of the Maracana.

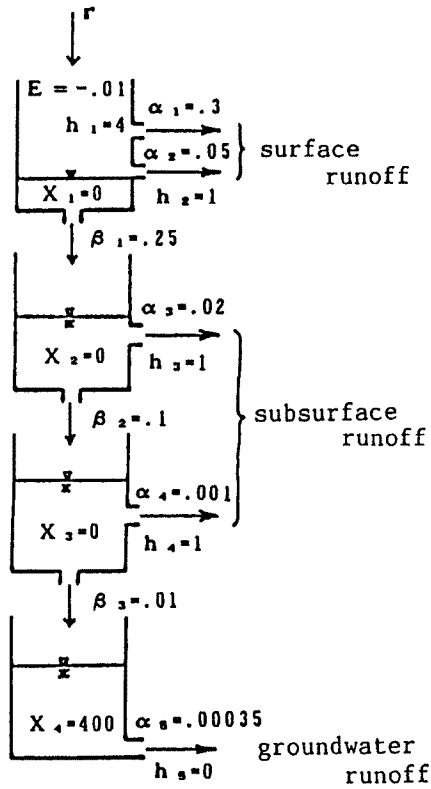


Fig. 17 Tank model with four tanks.

がって、ここでは1969年に SERLA によって実施された観測資料に基づき、タンクモデル法によって洪水波形の推定を行なった。

SERLA では、1969年2月～3月の2か月間にわたり、Fig. 16 に示した地点①(リブレイロ・フランシスコ・アルベス)における河川流量ならびに流域内の2点における時間雨量を観測している。いま、Fig. 17 に示した4層のタンクモデルを用いて、雨量から河川流量を推定し、実測値と比較すると Fig. 18 のようになる。Fig. 18 に見られるように、推定値は実測値と必ずしもよく一致していないが、全体的な特性は再現されていると言える。

次に、本モデルを用いて1988年2月18日～22日の4日間の地点①における流量変化を計算したところ、最大流量は $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、流出率は0.23という結果となったが、これらの値はいずれも既述の合理式によるものと比較するとかなり小さい。このような差異は、1969年の降雨の最大時間雨量が 20 mm/hr と小さかったのに対し、1988年の豪雨は 50 mm/hr を上回っており、モデルの適用範囲を超えたためと考えられる。

このため、流出流量と降雨強度とは1次的な関係にあると仮定し、計算された洪水流量に対する流出率が

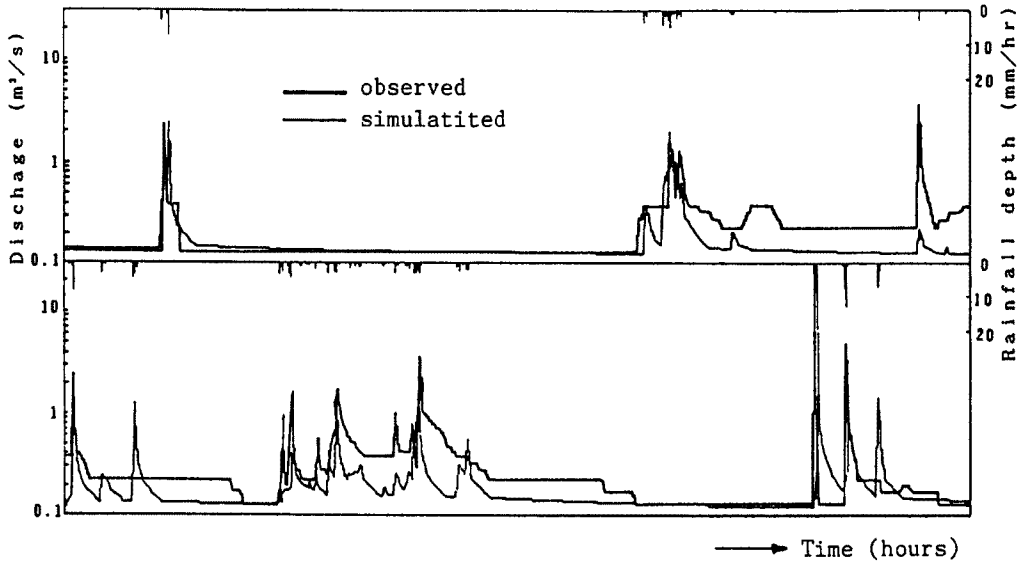


Fig. 18 Observed and calculated discharges by the tank model for February and March 1969.

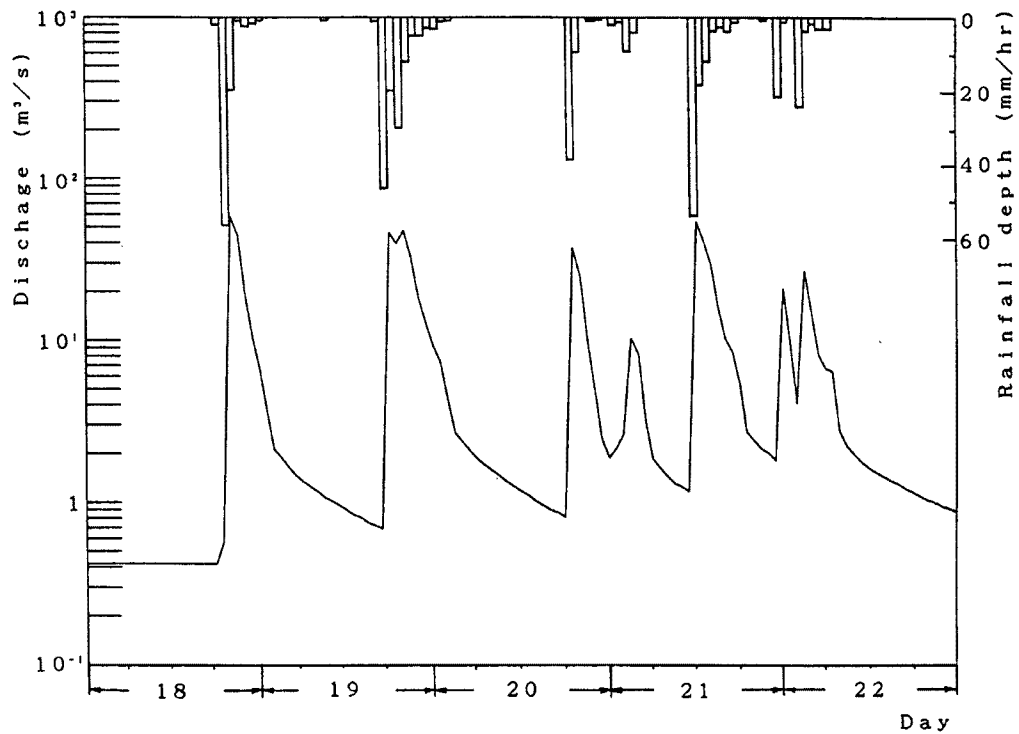


Fig. 19 Discharge variation with time estimated by the established tank model for the rainfall from 18 to 22 February 1988.

0.7となるような補正を行なうと、Fig. 19 に示す結果が得られる。なお、0.7という流出率の値は合理式を用いてピーク流量を推定する際に設定したものである。

Fig. 16 の地点①より下流については、流域における有効降雨による流出過程を、山腹斜面の表面流出と河道での流下という、二つのものより構成されるとする等価粗度法を用いて計算することができる。

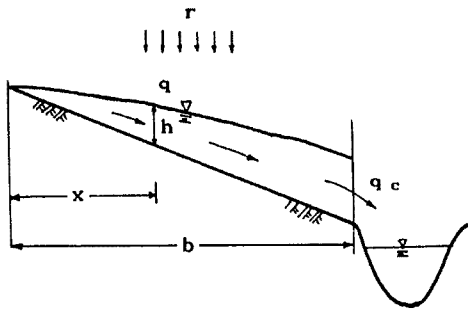


Fig. 20 Notations of slope flow.

すなわち, Fig. 20 に示した記号を用いると, モデルの基礎式は次のように表される。

$$\text{運動方程式: } h = Kq^p \quad (5.1)$$

$$\text{連続式: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad (5.2)$$

ここに, t は時間, x は斜面に沿って測った距離, h は水深, q は単位幅流量である。 r_e は斜面流に対しては有効雨量, 河道の流量に対しては流下方向単位の横流入量である。また, K および p は平均流速公式より求められるものであって, これを Manning 流速公式によって近似されたとすると,

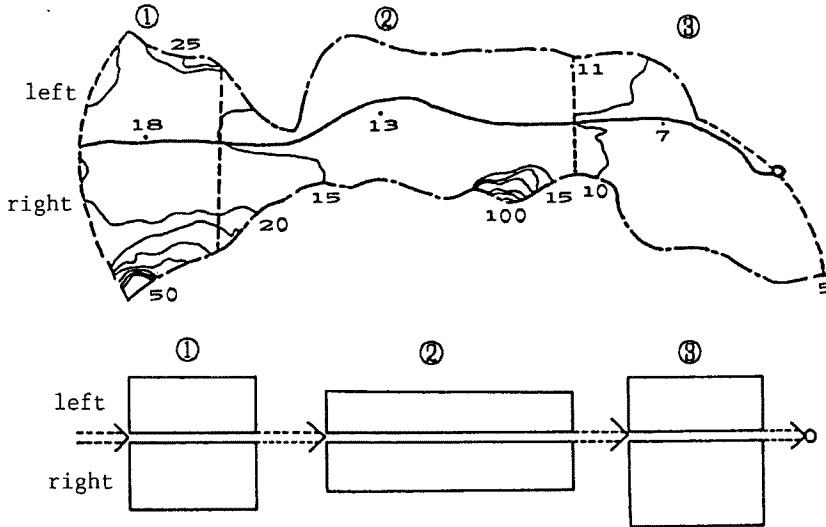


Fig. 21 Divided three areas of downstream river basin of the Maracana for the equivalent catchment model.

Table 7. Dimensions and values of K and p of each divided region.

block number	slope						river			
	side	area (km ²)	length (m)	slope	K	p	length (m)	slope	K	p
1	left	0.26	380	0.013	0.40	0.60	680	0.007	1.43	0.63
	right	0.38	560	0.057	0.26	0.60				
2	left	0.43	250	0.008	0.47	0.60	1690	0.003	1.43	0.63
	right	0.55	330	0.015	0.39	0.60				
3	left	0.17	160	0.019	0.36	0.60	1040	0.004	1.43	0.63
	right	0.54	520	0.006	0.51	0.60				

$$K=(n/\sqrt{I})^p, p=3/5 \tag{5.3}$$

となる。ここに、 I は勾配、 n は斜面の粗度係数である。

(5.1) 式と (5.2) 式は特性曲線法を用いて解くことができる。

計算を行なうに当たって、上流端 (①地点) からの流入流量はタンクモデルを用いて計算した Fig. 19 の結果を与え、流域は Fig. 21 に示すように3分割した。各分割流域の諸元及び定数 K と p を Table 7 に示す。なお、 n は0.04とした。各分割流域の下流端における流量変化の計算結果を Fig. 22(a), (b), (c)にそれぞれ示す。降雨の変化に対する応答は早く1時間以内となっている。③ブロックの下流端 (バンデイレ・スクエア) における最大流出流量は $68 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、合理式を用いて計算された値に比して小さいものとなっている。ここに示した解析結果は、流量観測記録の不足のために正確さを欠いているが、このような手法は流量観測記録が無い場合の流出流量概算には有効なものと考えられる。

6. 災害時の避難・救助

今回の水害では、多くの住民が学校や教会に避難して共同生活をしている (Photo 11)。これらの人々の大半は家を失ったため避難したのもであって、行政側の避難命令によって事前に避難行動をしたものは殆どなかったといわれる。これは警戒・避難システムがこの国ではいまだ十分確立されていないためでもあるが、危険状態になっても避難しないのは、その地を離れると住む場所がなくなるという貧しい人の不安があることも影響している。

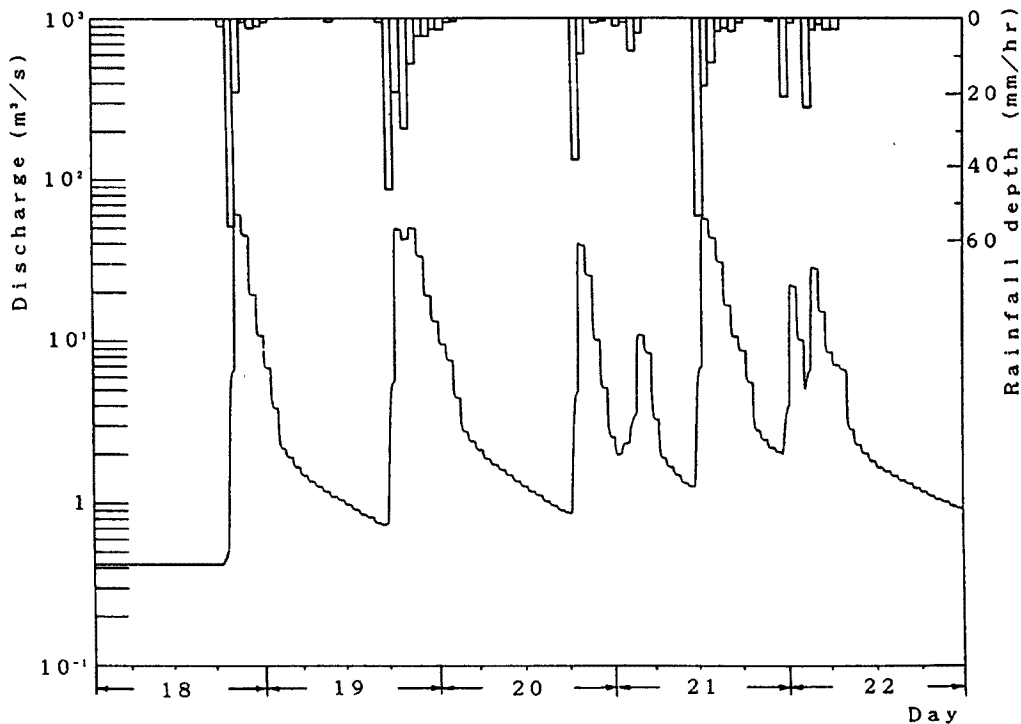


Fig. 22(a) Estimated discharge variation with time at the end of block 1.

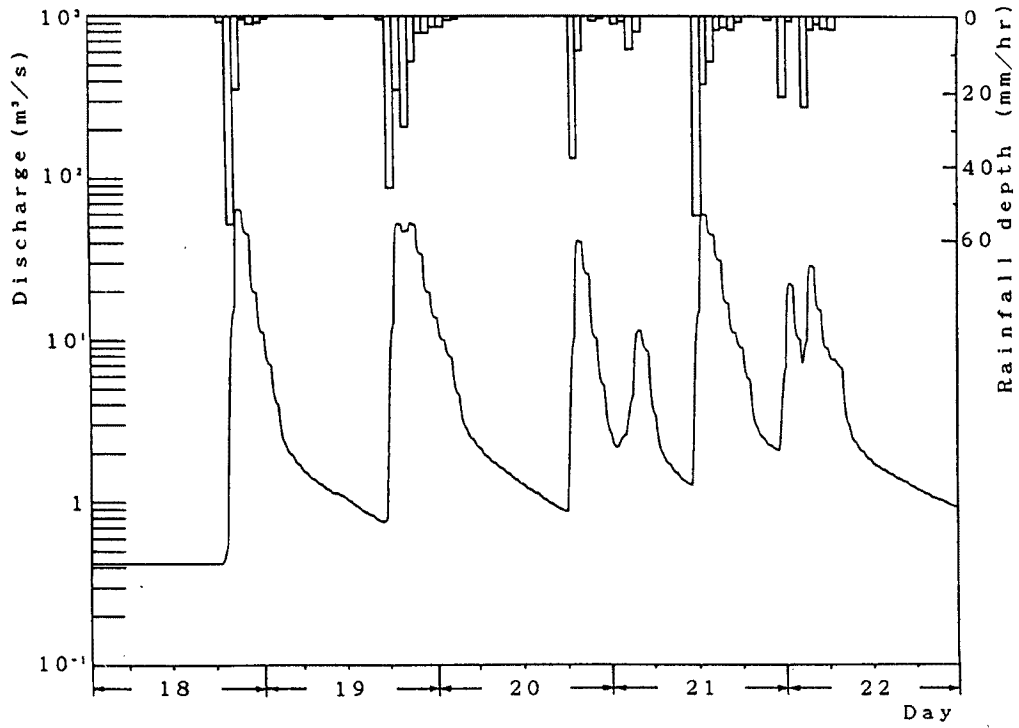


Fig. 22(b) Estimated discharge variation with time at the end of block 2.

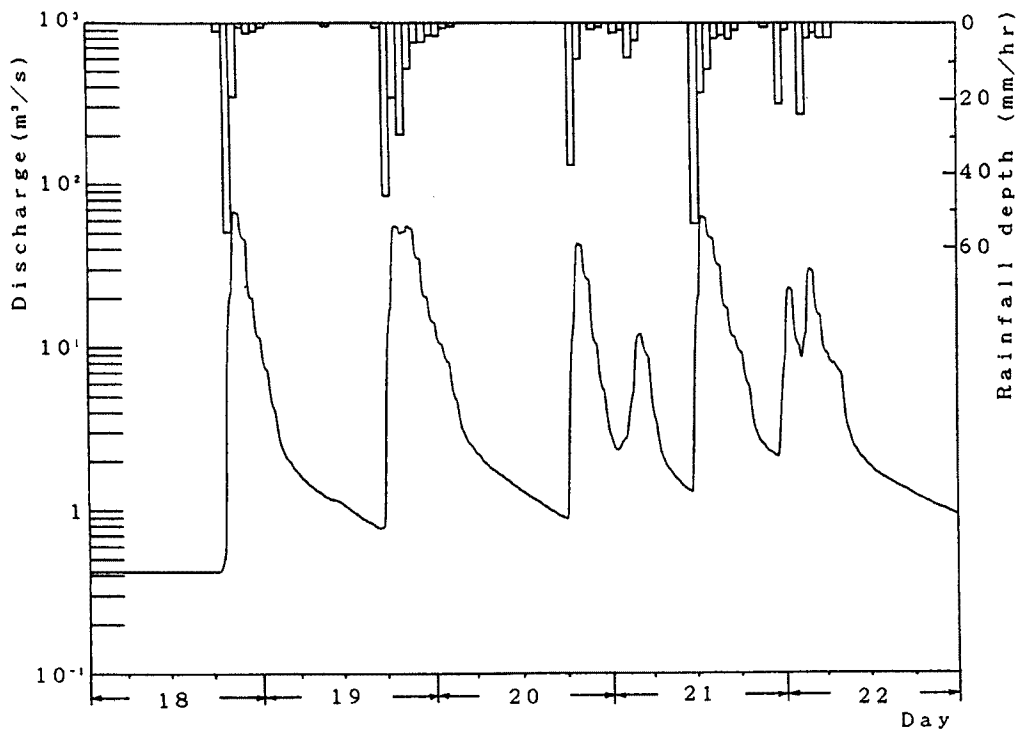


Fig. 22(c) Estimated discharge variation with time at the end of block 3.



Photo 11 Sufferers in a school in Petropolis.



Photo 12 Materials gathered in Maracana football stadium for the help of sufferers²⁾.

水害発生後の消防を中心とする行政側の対応は素早く、住民側もボランティアとして救助・救援活動の積極的な参加をしている。また、外国からの救助・救援活動も盛んに行われている。Photo 12 は20万人収容できる世界最大のマラカナンサッカー場に溢れる救助物資の様子を示している²⁾。

7. おわりに

今回のリオ・デ・ジャネイロ周辺での水害は、異常な集中豪雨というよりも比較的強い雨が長期に断続的に降ったことによって、今のままでは人が住むに適していない急傾斜地や沖積低地で生じたものである。リオ・デ・ジャネイロ市の市街を取り巻く急傾斜地に住まざるを得ない貧しい人々やペトロポリスのように山岳都市周辺の急傾斜地の住宅の必要性、あるいはリオ・デ・ジャネイロ市を支える人々の河川の氾濫源であるバイシャ・ダ・フルミネンセ低地への居住が今回の災害の人的被害を大きくしている。低地の洪水災害に対しては、地質のもろさや土地の傾斜を考えると工学的な対策は立てにくく抜本的にはファベラの住民の

安全な場所への移住という社会的対策が必要と考えるが、当面の課題として、危険な溪谷での砂防ダムの建設や環境局で計画中の山地での森林化を進めるとともに、水害時の警報非難システムを確立するとともに住民の防災避難に関する意識の向上が望まれる。

参 考 文 献

- 1) Secretari de Estado Meio Ambiente, Superintendencia Estadual de Rios e Lagos.: Avaliacao de 1988, nos Municipios de Rio de Janeiro e Petropolis, 1988.
- 2) Secretari de Estado da Defesa Civil do Rio de Janeiro: Atuacao da Secretaria da Estado de Defesa Civil e do Corpo de Bombeiros nos Eventos Calamitosos de Fevereiro de 1988, 1988.
- 3) Bezerra, V. M. d' A. C. and Cruz, J. M.: Imigracao e favelas O caso do Rio de Janeiro em 1970, Revista Brasileira de Geografia, Instituto Brasileiro Geografia, 2, 1982, pp. 357-367.
- 4) Domingues, A. J. P., Lima, G. R. Alonso, M. T. A. and de Bulhoes, M. G.: Os movimentos coletivos do solo e aspectos da flora, Revista Brasileira de Geografia, Instituto Brasileiro Geografia, 3, 1971, pp. 3-51.

FLOOD DISASTER CAUSED BY THE 1988 HEAVY RAINFALL IN THE STATE OF RIO DE JANEIRO

By *Hirotake* IMAMOTO

Synopsis

The disaster in the State of Rio de Janeiro was caused by not so concentrated but intermittent continuous heavy rainfall for a long time. Many people died and injured mainly in Petropolis and Rio de Janeiro by slope failures and debris flow. Many people are living in steep slopes around Petropolis and Rio de Janeiro and some low lands in Baixada Fluminense which are not suitable for house construction. This increased the damage of the disaster extensively.

Flood control projects are proposed by the State against floodings in Baixada Fluminense and in the city of Rio de Janeiro. This kind of projects should be carried out as soon as possible. And effective countermeasures such as afforestation and sabo dam construction against steep slope failures and debris flows should be taken and the warning and sheltering system are desired to be established as well as the improvement of consciousness about disaster prevention and refuge as a tentative measure. But social policy that the fundamentally needed because engineering countermeasures are difficult to be made due to weakness of the soil and steepness of the slopes.