活火山地域の河川の開発・保全

—東部ジャワ、カリブランタス流域を例として—

春 山 成 子* 大 矢 雅 彦** 水 原 嘉 男***

Geographical Study of Development and Conservation of the Kali Brantas Basin, East Java

Shigeko HARUYAMA*, Masahiko OYA** and Yoshio MIZUHARA***

Abstract

We have conducted our research on the influence of the eruption of the Kelud Volcano on the Kali Brantas, conservation of the river basin, mitigation of the resulting volcanic and flooding hazards, and development process of the basin.

For this purposes, we have made geomorphic land classification maps in the Kali Brantas Basin, utilizing the aerial photographs (scale is around 1/40,000) and LANDSAT Images which were taken in 1972.

The Kali Brantas is located in the eastern part of Java, *i.e.* easternmost part of the Himalaya-Alps Orogenic Zone. The Kali Brantas originates in Mt. Arjuno and round the foot of the Butac and Kelud Volcanos which are active volcanos, and then pours into the Madura Strait.

The southern part of the Kelud Volcano consists of the following geomorphic elements: piedmont gentle slope of the volcano, a slightly hilly area on the gently sloping terrace, valley floor plain, marsh, abandoned river course, steep slope, *etc.*

The Kali Brantas plain consists of the following geomorphic elements: natural levees, back-swamps, a delta, lagoon, sand-spits, *etc.* Natural levees are developed well around the city of Kediri and the river bed is higher than that of the adjacent plain.

The Kelud Volcano has erupted approximately once every 15 years. We have a record of its eruption since 1,000 years A. D. The eruption in 1919 was especially severe, and about $3,800 \times 10^4 \text{m}^3$ of "Lahar" flowed down to have killed 5,100 persons. Due to the eruption in the year 1586, about 10,000 persons were killed.

In order to mitigate the damage by "Lahar" a tunnel for decreasing water in the crater was constructed during the Dutch Colonial period. This drainage tunnel reduced the volume of the water from $4,000 \times 10^4 \text{m}^3$ to $2,000 \times 10^4 \text{m}^3$ in 1966. After the construction of the tunnel,

* 早稲田大学理工学研究所

** 早稲田大学教育学部

*** 日本工営

* Science and Engineering Laboratory, Waseda University

** Department of Geography, Faculty of Education, Waseda University

*** Nippon Koei Co. Ltd.

the lahar damages decreased. However, aggradation as a result of this eruption reduced the depth of the crater about 50 m to destroy the tunnel. Then the tunnel was repaired again.

After 1970, the lowering of the river bed has occurred partly because of the construction of dams, particularly the construction of “Sabo” dam for “Lahar” and partly because of the volcanic eruption. Although the lowering of the river bed decreased the possibility of the flooding, it becomes difficult to take the water for irrigation.

In February 1990, the Kelud Volcano erupted again. And a lot of volcanic ash was deposited on the southern slopes of the volcano. The tunnel disappeared again. So we must look again for the tunnel. Directly after the eruption, torrential rainfall occurred at the upper reaches of the Brantas River. The erosion in the upper reaches was remarkable and a lot of sand and gravel flowed down to the middle reaches and several reservoirs were buried immediately.

In conclusion, we would like to indicate that it is very important to predict the geomorphological changes of the river basin in the case of making development plain of the river basin.

I. 研究の視点

近年、各地で河川流域の開発が急速に展開しており、それに的確に対応するため、流域の環境変化の予測が必要とされている。しかし、人間の社会生活の変化とともに引き起こされた河川流域の自然環境変貌の実態を明らかにし、河川流域の環境の将来的な変化の予測に役立つような研究例はまだ少ない。また、台風、集中豪雨、地震、火山活動などの自然災害に対して防災施設の建設だけでなく non-structural な災害対策が望まれるようになってきている。このためには、河川地形を勘案し、開発によって変貌する自然環境との協調を意図した流域開発計画が必要と考えられる。開発計画が自然環境との調和のなかで検討されることで、地域の自然特性、景観も保全される。この報告では、自然環境重視の立場から流域開発計画を考えるための重要な資料を提供するため、東南アジア地域の一つの熱帯河川を例に、流域の特性、開発の過程、災害の様相、それらの変貌の実態を明らかにする。

II. 研究方法

ジャワ島東部、カリブランタス流域での研究を進めるにあたって、まず、1972年撮影の4、5、

7バンドの合成を行なった縮尺25万分の1の ER-TS 画像（写真1）と、1988年撮影、縮尺10万分の1の MOS-1 画像を入手し、画像判読からこの流域の地形分類図を作成した。ブランタス工事事務所の好意により縮尺5万分の1の空中写真を判読できたので、カリブランタス本流中流部のクデリ付近、モジョケルト付近、クルド火山南側の支流、レクソ川流域については空中写真判読を併用した。衛星画像、空中写真判読後に現地調査を行ない、地形分類図を作成するとともに、カリブランタス流域の地形特性を検討した。

次に、カリブランタス流域の開発の経過、大規模な河川工事の開始する1970年代のカリブランタス流域の平野地形の最近20年間の変化を比較した。これらをもとに、河川開発当初の流域の地形と、その20年間の変化とを明確にし、今後のカリブランタス流域の農業地域の開発、自然災害防止、都市開発について河川流域管理を重視する河川地理学の立場で論じたい。

III カリブランタス流域の地域概要

カリブランタスの河川延長距離は320km、流域面積は2,000km² である。この川はアルジュノ（Ardjuno）山塊に水源をもち、上流地域では南流してマラン（Malang）高原に谷を刻んでいる。

写真 1 EARTS, 衛星写真からみたカリブランタス (1972年撮影)
Photo 1 The Brantas River Basin in the ERTS (1972) Image

マランの南側には、完新世に活動したスメル (Semeru) 火山, ブタック (Butak) 火山, クルド (Kelud) 火山が分布しており, これら火山山麓には段丘が形成されている。河川流域の南側はインド洋に並行して石灰岩の丘陵地帯が東西方向にのび, カリブランタスはこの石灰岩丘陵の北側を西流している。ツルガグン (Tulungagung) でカリブランタス本流は中部ジャワとの境界となるリマン (Liman), ウイリス (Wilis) 火山東麓を北流する。

クデリ王朝の宮城史蹟を残すクデリ (Kediri) から13世紀に成立し, 東部ジャワに隆盛を誇ったモジョパイト王朝期の集落のあるモジョケルト (Mojokerto) までは, 蛇行する旧河道がウィダス (Widas) 川にむかって注ぎこみ, 現在とは異なる河道痕跡を見せている。モジョケルトより下流側では, ジャワ島の中央部に位置するボゴール (Bogor) からケンデン (Kenden) を結ぶ地塁地域, すなわち, 第三紀層からなる丘陵にさえぎられるために, この地点で東に流下方向を変える。

モジョケルトの東方に位置するレンコン (Lengkong) ダムから下流ではカリスラバヤ (Surabaya), カリポロン (Porong) の2河川に分流してマドラ (Madura) 海峡に注ぐ (図1, 2)。

上流地域の火山山麓には放射状の水系 (図3) が発達し, 乾期には流水のない涸れ谷となる河川もある。主要支流はレステ (Leste) 川, グロオ (Ngrow) 川, コント (Konto) 川, ウィダス川であり, 各々の流域面積は625km², 1,600km², 687km², 1,538km² である。支流河川の勾配は大きく, レステ川合流点までが5/1,000, グロオ川の合流地点までのカリブランタス本流は2/1,000-1/1,000, グロオ川からレンコンダムまでの本流の河川勾配は0.6/1,000, ポロンの狭窄部を抜けて, デルタ地帯では0.52/1,000となる。

カリブランタス流域の現在の人口は, 1,200万である。流域の63%が農業地域であり, 水田面積3,450km², 畑地面積3,600km², 果樹園・コーヒー園などが460km² となっている。水田は主に沖積平野に開発されたが, 火山山麓の湧水地帯に棚田

図 1 ジャワ島の起伏図
 B : バンドン, J : ジョクジャカルタ, S : サマラン, K : クデリ, M : マラン
 Fig. 1 Relief map of Java
 B : Bandung, J : Jogjakarta, S : Semarang, K : Kediri, M : Malang

図 2 カリブラントスの流域概念図
 Fig. 2 General map of the Brantas River

図3 カリブラントスの水系図

S: シドアルジョ, SU: スラバヤ, MO: モジョケルト, KS: クルトソノ, KE: クデリ, L: リマン火山, W: ウイリス火山, T: ツルガグン, BL: ブリタール, k: クルド火山, B: バタック火山, KA: カウイ火山, M: マラン, A: アルジュノ火山, AN: アンジャスマロ火山

Fig. 3 River system map of the Brantas River

S: Sidoarjo, SU: Surabaya, MO: Mojokerto, KS: Kertosono, KE: Kediri, L: Liman Volcano, W: Wilis Volcano, T: Tulungagung, BL: Blitar, K: Kelud Volcano, B: Butak Volcano, Ka: Kawi Volcano, M: Malang, A: Arjono, AN: Anjasmoro

もつくられ、水田の44%に灌漑施設があり、灌漑用水の2/3はカリブラントス本流に依存している。野菜、果樹を中心とした畑作地域および、コーヒー、紅茶などのプランテーションは火山山麓から中腹に立地し、標高400m以上は森林地域である。畑地開発は20世紀に急激に進み、若い火山地域では耕地造成後土壌侵食が進んでいる。

カリブラントス流域の水田開発は古く、12世紀のモジョパイト時代にはカリブラントス本流および支流から灌漑用水路をひき、地下水を利用した灌漑農業が行なわれていた。モジョケルト南部のトゥルーランには、13世紀に建設された農業水利

構造物が残されている。

IV. カリブラントスの気候

カリブラントス流域は南緯7度から8.5度、東経111.5度から113度に位置しており、熱帯サバナ気候下にある。流域の平均気温は、低地に位置するスラバヤで27°C、標高400mの高原に位置するマランでは23.7°Cであり、高原地域、火山地域を除き一年中高温である。気温の年較差はスラバヤ、マランともに2°Cと小さい。

カリブラントス流域の年間平均降水量は約2,000mmで、その80%までが11月から翌年の5

図 4 カリブランタス流域の降水量分布図

S: スラバヤ, MO: モジョケルト, Ke: クルトソノ, K: クデリ, T: ツルガゲン,
B: ブリタル, M: マラン

Fig. 4 Distribution map of precipitation in the Brantas River

S: Surabaya, MO: Mojokerto, Ke: Kertosono, K: Kediri, T: Tulungagung,
B: Blitar, M: Malang

月の南西モンスーンによってもたらされる。スラバヤでは乾期の4月から10月の降水量は100mmをわり、8、9月は月平均5mmと少ない。火山山麓、高原地域では一年中降雨はあるが、スラバヤ同様、8、9月の降水量は少ない。流域での年降水量分布は、最下流地域のスラバヤで1,285mm、マランでは2,023mm、クルド火山の南側斜面は2,700mm-4,000mmと、流域の南側で多い。スメル火山山麓のダムピ(Dampit)は1920年に24時間最大降水量405mmを記録した。これに対して火山地帯の北側の降水量は少ない(図4)。なお、上流地域のマランは平均湿度が82%、蒸発量は年平均695mm(1928-1947年)、カリブランタス流域の年間総流量はおよそ130億 m^3 /1年と算

定されている(日本工営, 1960)。

V. カリブランタス流域の地形の特色

カリブランタス流域の地形は火山、石灰岩台地、第三紀層の丘陵、台地、沖積平野に区分できるが、人間活動と大きな関わりのある地形として、火山と火山を取り巻く山麓の扇状地、これを刻む谷および平野について、自然災害と関係づけながら説明する(図5、6)。

1) 火山とこれを取り巻く地形

カリブランタス上流地域の火山には、現在活動を継続しているものと更新世に活動したが侵食期に入っているものがある。最上流部のアルジュノ(3,339m)、アンジャスモロ(2,282m)、カウィ

図 5 ブランタス流域地形分類図

1. 丘陵, 2. 火山地域, 3. 火山山麓緩斜面, 4. 河岸段丘, 5. 谷底平野, 6. 自然堤防, 7. 後背湿地, 8. 沼沢地, 9. デルタ, 10. ラグーン, 11. 海底デルタ, 12. 旧河道

S: スラバヤ, M: モジョケルト, K: ケルトソノ, Ke: クデリ, B: ブリタール, Ku: クルド火山, Kw: カワイ火山, An: アンジャスマロ火山, A: アルジュノ火山, B: プロモ火山, SM: スメル火山

Fig. 5 Geomorphological land classification map of the Brantas River

1. hill, 2. volcano, 3. piedimont gentle slope of volcano, 4. terrace, 5. valley plain, 6. natural levee, 7. back swamp, 8. swampy area, 9. delta, 10. lagoon, 11. sub-marine delta, 12. abandoned river course

S: Surabaya, M: Mojokerto, K: Kertosono, Ke: Kediri, B: Blitar, Ku: Kelud Volcano, Kw: Kawi Volcano, An: Anjosmoro Volcano, A: Arjuno Volcano, B: Bromo Volcano, SM: Sumeru Volcano

(2,651m) などの火山はすでに開析が進み、北側斜面では崩壊が進んで、崩壊土砂は山麓に扇型に堆積している。

活火山であるクルド火山（写真2）の急斜面は、火口湖の湖水を混じえて流下したラハールで構成

され、不安定な斜面を形成している。スメル火山も19世紀の活動は激しく、1830年からほぼ毎年噴火し、溶岩流を流下させた。これらの火山斜面に刻まれた谷は流出する溶岩流、ラハールで埋積されている。過去のクルド火山の噴火では火山山体

図 6 ブランタス川の河川縦断図

Fig. 6 Longitudinal profile of the Brantas River

写真 2 クルド火山 (1989年) の全景

Photo 2 Kelud Volcano before the Eruption, 1989

が崩壊し、火山中央のカルデラ湖の湖水が火山噴出物とともに西側および南側斜面を流下して、泥流災害を発生させた。古文書などに従って990年前以降のクルド火山の活動史をおってみると、噴火の間隔は不規則であるが、19世紀の中ごろでは3年から13年の短い間隔で活動している(表1)。

2) ラハールと火山山麓の段丘地形

火山山麓は山麓緩斜面、斜面上の微高地、緩斜面を削剝して形成された段丘、浅い谷底平野に分けられる。火山山麓の地形について、レクソ川流域の地形分類図を用いて説明する。

レクソ川はクルド火山南東部に放射状に谷地形

を形成している。この谷は標高700mより上流では北西方向、700mより下流では北東方向に流れを転じて、カリブラントス本流に合流する。ウリンギでのレクソ川の谷幅は400mであり、段丘面が3面認められる。山麓緩斜面を侵食して形成された谷は火山噴出物によって充填され、下刻に転じ、再度火山噴出物によって充填された後に下刻された(図8)。この段丘面のうち最低位段丘は1990年2月のクルド火山の噴火後の洪水に冠水し、新たに土砂が堆積した。谷底平野には旧河道が検出でき、狭い谷底平野のなかでも河道変遷が行なわれている。谷は湧水地点に谷頭をもち、灌漑用水をもつ棚田の水田農業地域として開けている(図7, 8)。

3) 平野の地形

インド洋岸に平行する石灰岩台地は熱帯カルスト景観を呈し、孔隙の多い石灰岩なので地下水系は発達しているが、台地表面の表流水は少なく、20年前までは不毛の地であった。

この石灰岩台地とカリブラントスには含まれるツルガゲン地域も20年前(写真3)までは沼沢地であったが、1970年代の排水事業によって水田になった(写真4)。これより下流は東西両岸とも火山山麓には含まれる幅の狭い沖積平野である。クデリからモジョケルトまでは自然堤防がよく発達している。1970年までのカリブラントス中下流(写真5, 6)は天井川であり、河床は平野面の地盤高より1ないし2m高いため、河川背後では外水、内水氾濫で長期にわたる洪水被害が発生していた。

中流のクデリ付近では、クルド火山の活動がカリブラントス本流の河道変遷に影響を与えたようであり、火山活動の休止期、火山噴出物の休止期には山麓の扇状地では侵食が進んだ。クデリ付近の平野地形(図5)は、クデリ王朝、モジョパイット王朝を通して、大きな変化を示したようである。カリブラントス本流は自然堤防および旧河道の追跡から、西側、ワルジャエン付近に南北方向の河道変遷の跡が検出される。明瞭な旧河道はモジョパイット王朝時代のカリブラントス本流でウィダス川に注いでいたものと思われる。この旧河道に沿

表 1 クルド火山の活動とブランタス川の変化
Table 1 Eruption of Mt. Kelud and changing of the Kali Brantas

	東部ジャワ史	火 山 活 動	ブランタス整備	ブランタス 川
100万年 B.P.	前期旧石器 (モジョケルト)	ウイリス噴火		
10万年 B.P.	中期旧石器	ウイリス噴火		
	後期旧石器	アンジャスマロ噴火 ブランタスデルタの Djomban 層を褶曲させる		
1 万年 B.P.	ウイリス噴火			
	シャイレンドラ王国 マタラム国		787年ハリジン川に水流 施設 921年トローランに水利 施設	
1,000年 B.P.	クデリ王国	クルド噴火 (1000年A.D. 1万人死亡)	926-947年クデリ東方の バレ、コント川で水利工 事、デルタ開発 1037年ブランタス川工 事：堤防、ムリリブ川シ ョートカット、トルーラ ンに水利施設	ブランタス本流はクデリ からはほぼ北へ流れる 山麓湧水を利用した水田 の開発
	シンゴサリ王国 マジャパヒト王国	クルド噴火 (1311, 1334, 1376, 1385, 1394, 1411, 1451, 1461, 1481年)	1350年ハリジン川に灌漑 施設再建	
500年 B.P.				
300年 B.P.	オランダ領東インド	クルド噴火 (1752, 1771 年)		
200年 B.P.		クルド噴火 (1811, 1826, 1848, 1851, 1864年)、ス メル火山は 19-20 世紀に 毎年噴火	1847年オランダのブラン タス工事 1853年オランダのブラン タス治水工事 1857年ポロン川にレンコ ンダム建設、灌漑計画	ラハール災害 ブランタス河床上昇、中 下流の洪水
100年 B.P.		クルド噴火 (1901) クルド噴火 (1919; cwv =38×10 ⁶ m ³ , l=323×10 ⁶ m ³ , DL: 37.5km, p: 5110, DAL: 135ha) クルド噴火(1951; cwv= 1.8×10 ⁶ m ³ , l=200×10 ⁶ m ³ , DL: 6.5km, DAL: 70ha) クルド噴火(1966; cwv= 20.5×10 ⁶ m ³ , l=90×10 ⁶ m ³ , DL: 31km, DAL: 11.5ha, p: 286)	1928年クルド火山火口湖 の水抜きトンネル建設 1961年ブランタス治水計 画(噴出物コントロール、 湖水水抜、築堤、放水路、 ダム) 1964年カランカテスダム 1970年スロレジョダム 1972年ラホールダム、ウ リングダム、ツルガゲン トンネル、1973年レンコ ンダム、1981年ロドヨー ダム、1983年スングルー ダム、植林が進む ブランタス治水計画の見 直し	1929年ブランタス本流は 現河道をとる ブランタス河床上昇、中 下流の水害多発、土砂災 害 (中流地域で水田化が進 御、山麓部で畑化が進む)
現在		クルド噴火 (1990)		ブランタス河床低下 (最 大-2m)

cwv=火口湖の水量, l=ラハールの量, DL: ラハールの流出距離, DAL: 耕地被害面積, p: 被災者数

図 7 カリレクソ流域地形分類図

a: 火山山麓緩斜面, b: 火山山麓緩斜面上の微高地, c: 谷底平野, d: 湿地, e: 段丘, f: 旧河道, g: 現河道, h: 急斜面
A-B は図 8 に示す断面の位置。

Fig. 7 Geomorphological land classification map of the Lekso River Basin, Valley of the southern Part of Mt. Kelud

a: piedmont gentle slope of volcano, b: slightly hilly area on piedmont gentle slope of volcano, c: valley plain, d: swampy area, e: terrace, f: abandoned river course, g: present river course, h: steep slope

図 8 カリレクソの地形断面図

1. ラハール, 2. 軽石, 3. 砂層, 4. シルト層
Fig. 8 Longitudinal section of the Lekso River Basin
1. lahar, 2. pumice, 3. sand layer, 4. silt layer

う大規模な自然堤防には火山噴出物径を含み, 1 cm 程度の小礫, 砂, シルトが堆積している。

また, クデリの北側50km のカリブランタスの旧河道では, 地下水が湧きだしているところがある。近辺の井戸の水位も高く, 原地表面より80-100cm で容易に水を汲み上げることができる。聞き取り調査から, 1800年代の河道と推定できる(現地の50歳前後の人の祖父の時代には水が流れており, 旧ブランタス川と伝承している)。1800年代はクルド火山の噴火活動が激しかった時代であり, 噴火, 火山噴出物の流出, 洪水などの複合作用によって河道変遷が行なわれた可能性が高い。

モジョケルトより下流側のデルタでは平野表面の水路網は放射状であり, 洪水時には表流水は扇状地に似たような挙動を示す。河川に沿って低い自然堤防, 後背湿地も形成されているが, 海峡に面して南側からのびる砂州に閉塞されるラグーンがある。本流の平野には明瞭な扇状地は形成されていない。

デルタ地域には沿岸砂州が現在の海岸線にほぼ平行して残存している。最奥のものは現海岸線より20km 西側, 地盤高4m に位置している。これらの微高地は河川とは直交しており, 微高地上には線状に集落が立地する。20世紀には, ポロン川, スラバヤ川では農地開発, 河川の開削事業, 築堤が進められ, 現在の河川はほぼ直線状に流下している。また, 用排水路整備で本流流量は低減したが, 直線河道となったため豪雨時の河川の流速は早まり, 河岸侵食が発生している。平野では, 従

写真 3 ツルガゲン (1972年) の湿地
Photo 3 Swampy area at Tulungagung, 1972

写真 4 ツルガゲン (1989年) の水田
Photo 4 Paddy fields at Tulungagung, 1989

来, 自然堤防, 砂州地域などの微高地に集落が立地し, デルタは水田, 養殖池であったが, 土地利用効率のよい畑作地への転換なども行なわれ, 土地造成は進みつつある。

VI. クルド火山の活動と地域の保全対策

第四紀に活動を継続したクルド火山の噴火は, カリブランタス流域の地形形成に大きな役割を果たしてきた (図9)。20世紀におけるクルド火山の噴火は, ラハール流出を伴ったために, 土地に産業基盤を置く農業には大きな被害を与えた。東部ジャワは古くからの重要な農業地域であり, 火山山麓地域はプランテーションにすぐれた立地条件をもつために, オランダ領インドネシア時代では農地維持のため, 火山災害を僅少にとどめる工夫がなされた。

Proyek Penanggulangan Akibat Bencana

写真 5 カリブランタス中流地域, クデリ付近 (1972年)
Photo 5 Middle reaches of the Brantas River, Kediri, 1972

写真 6 カリブランタス中流地域, クデリ付近 (1989年)
Photo 6 Middle reaches of the Brantas River, Kediri, 1989

Alam Gunung Kelud (1989) はクルド火山の噴火活動を次のように示した。1919年のラハールはクデリ, プリタール方面に流出し, 特にプリタールに流れるバタック川流域でのラハールの流出距離は長く, かつ流出量も大きかった。この時のラハールの流出距離は37.5km, 流出面積は135km², 平均時速は25km/h と推定されている。1919年噴火では, 一次ラハール流出で5,110人の人命を失った。これを機に火口湖の水を抜く排水トンネルが計画され, 1923年に排水トンネルが建設された。火口湖の水量は1919年の噴火後の $38 \times 10^6 \text{m}^3$ が, 1951年の活動時では $1.8 \times 10^6 \text{m}^3$ に減少した。このため1951年の火山噴火時のラハールの流出量は

図 9 1919, 1951, 1966年のクルド火山噴火とラハールの流出分布
 1. 1951年の噴火による崩壊地域, 2. 1966年の噴火による崩壊地域,
 3. 1919年のラハール流出地域, 4. 1966年の一次ラハール流出地域,
 5. 1966年の二次ラハール流出地域

Fig. 9 Outflow of Lahar distribution map in 1919, 1951 and 1966 eruption of Mt. Kelud

1. the summit of Mt. Kelud collapsed by eruption, 1951, 2. the summit of Mt. Kelud collapsed by eruption, 1966, 3. lahar in 1919 eruption, 4. primary lahar in 1966 eruption, 5. second lahar in 1966 eruption

$200 \times 10^6 \text{ m}^3$ にとどまり、ラハールの流出距離は6.5kmと短い流送距離に終わった。この時の噴火で排水トンネルが崩壊したが、湖水量を減少させるために従来より位置を下げて再建された。

1966年の爆発時ではカルデラ湖の水量は $20.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ に押さえられ、この時の一次ラハールの流出量は $90 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、流送距離は31km、平均時速22km/hであった。一次ラハールはブリタル、クデリの農地に流れこんだ。二次ラハールはクルド火山の山地斜面に放射状に流れるコント、グロウ、バタック、プテイ、レクソ川などの支谷に流れこみ、谷を埋積した。

1966年のクルド火山噴火による被害は死者 212

人、怪我人74人、行方不明者89人であった。噴火でカルデラ湖底が約50m上昇し、排水トンネルが破損したので、再建の必要性が生じた。このような火山活動で生産された火山噴出物に加えて、カリブランタスの上流域では熱帯多雨気候下で風化の進んだ斜面の土壌が雨期の豪雨で削剥され、河川へ土砂が供給される。細粒土砂は、下流域の沖積平野の発達に大きな影響を及ぼしてきた。

紀元後1000年から1990年2月の噴火までに、主要なクルド火山噴火は表1に示した24回である。死者1万人をだした1586年の噴火以降では、1966年までに平均して29年間隔で活動したが、19世紀以降、噴火活動は間隔を短くしてきた。火山噴出

図 11 河川への土砂流入量の変遷

EK : クルド火山の噴火, EA : アグン火山の噴火 (バリ島),
 Pk : Pakel-Jonbiru, KB : Kaulon-Pakel, KJ : Kaulon-Jaban
 Fig. 11 Alternation of debris supply to the main river course
 of the Brantas from 1951 to 1980
 EK : eruption of Kelud Volcano, EA : eruption of Agung
 Volcano (Bali)

y の土砂が流入し、ウリンギダムより下流のカリブランタス本流で河床は上昇した。カウロン (Kaulon) 地点では、噴火後の1952年10月に約 2 m 河床が上昇している。

噴火後は河川へ多量に土砂が流入し、クルド火山に水源をもつ支流、本流では天井川化が顕著になり、雨期の氾濫の危険度が増した。1951年以降もほぼ毎年のように外水氾濫が発生している。1961年1月出水では、ポハデイ (Pohgadjih) でのピーク流量は1,920m³/s に達した。1978年ごろまで、このような外水氾濫の発生しやすい状況であった。

1966年噴火は農地被害、人命損失の被害も大きく、これ以降、流域開発、保全のなかで火山砂防工事が重要課題となった。二次ラハールの流出したバタック川、プティ川、コント川などの主要支川には、ラハール沈砂地、砂防ダムが建設された。洪水防御、農業用灌漑用水確保、電源開発、上水等の利用目的のために、カランカテスダム (現スタミダム)、ウリンギダム、ロードヨーダム、スロレジョダム、ツルガゲン排水トンネルの建設が並行して進められた。ここでは、上流のカランカテ

スダムで330m³/s の洪水流量をカットして、中流クデリでのピーク流量を320m³/s 少なくすることが計画された。水利構造物の建設が進むにつれて、上流地域からの流出土砂はダム、沈砂地などへ堆積をはじめることになった。

ラハール流出地域からカリブランタス本流への流入土砂量は、1951年噴火では総量192×10⁶m³のうち、噴火後5年間に16%の30.8×10⁶m³、10年間で13%の24.9×10⁶m³であり、1966年噴火では総量90×10⁶m³のうち、噴火後5年間で23%の20.8×10⁶m³が二次ラハールとして河道に流出した。このように、河川開発の進展で、火山噴出物、山地斜面の削剝による生産土砂がカリブランタスへ運搬される量は、徐々に減少しはじめた。カリブランタスの上流地域のダムの土砂の堆積量を、カランカテスダムを例にとって調査したところ、次のような結果を得た。カランカテスダムの集水面積は2,050km²であり、1977年から1980年までの年堆砂は1,600×10³m³、1981年から1983年までは1,426×10³m³と計測された。1977年以降1983年までのカランカテスダムでの年平均堆砂量は0.77mm/y/km²と推定される (日本工営, 1989)。

図 12 カリブランタスの河床変動図

K : Kaulon, G : Glondong, R : Rejotongan, P : Pare, J : Jeli, Ke : Kediri, M : Mrican, Mn : Minggirao, Pa : Papar, Pu : Purwoasri, Ks : Kertosono, B : Bunder, Po : Ploso, T : Tapen, Kb : Kasamben, Ga : Gempolkerep, Te : Terusan, N : Ngrame, Pr : Porong

Fig. 12 The river bed movement of the Kali Brantas

なお、堆砂量は1980年にウリンギダムで $3 \times 10^6 \text{m}^3$ 、プティ、スメット、レクソダムで $4.21 \times 10^6 \text{m}^3$ 、バダクダムで $7.01 \times 10^6 \text{m}^3$ 、ヌゴボダムで $2.07 \times 10^6 \text{m}^3$ 、コントダムで $1.27 \times 10^6 \text{m}^3$ であった (図 11, 12)。

以上をまとめると、カリブランタス流域の上流地域の水利構造物に堆砂が進み、中下流地域への土砂供給が止まり、上昇した河床は安定から低下へと変化した。1980年代には河床洗掘が始まり、アンジャスマロ火山山麓の下流の河床部分では基

盤が露出するまでに河床低下が進んだ。中流のクデリ付近の河床変動 (写真 5, 6) を1951年以降みてみると、噴火後の5年間で60cmの上昇、次の4年間で30cmの低下、1959年以降1974年頃までは上昇傾向を示している。1975年に急激に下降したが、その後6年は安定したものの、1982年から低下に転じた。

河床低下、洗掘の進行で、建設骨材としての河床砂採取を1985年には禁止した。しかし、砂は高値で取り引きされるために採取禁止は定着せず、現在なお河床砂採取は続いている。河床低下で灌漑用水路、取水堰は使用不能になり、河川堤防や橋脚などの基礎が掘削される被害も出始めている。ブランタス下流地域では、灌漑用水用の取水堰が河川水位より上部にとり残されたために自然流下できず、ポンプ揚水での灌漑用水路への導水も検討されている。

また、ブランタス最下流のデルタ地域では、オランダ統治時代に建設されたレンコンダムほかのバラージュの修復、新設、用水路建設が重なり、上流地域からの生産土砂、河川水の供給がコントロールされるようになったため、本流流量は減少した。漂砂による河口閉塞が始まり、カリブランタスの自然景観は大きく変化しはじめた。

VII. 1990年2月のクルド火山の爆発とその周辺地域への影響

1) クルド火山の活動の予知と噴火

1990年2月10日、クルド火山は24年ぶりに噴火活動をした。この火山については、すでに1989年12月からインドネシア鉱山エネルギー省が地震、地盤変位にあわせ、火口湖の水温観測などにより噴火を予測していた。

1989年12月から徐々にクルド火山のカルデラ湖の湖水温が上昇したので、火山噴火が考えられた。カルデラ湖の 38°C の湖水温度は1990年1月22日まで継続し、同年1月26日に一旦 36°C に下降、この後に急激に 40°C に上昇した。この湖水温度の上昇に並行して、1990年2月9日に持続性のある地震が発生、2月10日午前10時に噴火口の轟きを伴う地震、午前11時41分に第1回目の噴火、午

図 13 1990年2月のクルド火山噴火による火山灰分布図

Fig. 13 Distribution map of volcanic ash fall in the Mt. Kelud, 1990 Feb.

後1時15分にクルド火山の火口10km 圏内の第一危険区域内で火山性の小石（軽石）が降った。午後1時20分には、径5cm 程度の小石（軽石）が火山砂と火山灰を伴って降下した。1時間後、午後2時30分には溶岩が Puncu 区の Mangli 川に流出し、午後2時40分に、この溶岩流は速度100km/時 で Plosoklaten, Serinjing 川へ流出し始めた。午後3時には溶岩流出は終了した。

同日午後9時30分、クルド火山の南西火山山麓末端部のクデリ、ブリタル、ツルガゲンで降灰が続いた。この火山灰は東からの風にのり、中部ジャワのジョクジャカルタでも降灰した。噴火後14時間経過した2月11日の未明、0時15分には火山灰の量は次第に減少していった。この1990年2月のクルド火山噴火での降灰量は $1.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ と推定される（図13）。

2) クルド火山の爆発が周辺に与えた影響

火山性地震、激しい爆発に始まり、クルド火山の西側、南側には半径40km 以上にわたって火山灰が降った。噴火後7時間で、火山灰はクルド火山火口から10km 圏で層厚30cm、20km 圏で層厚15cm、40km 圏で層厚5cm と見積もられる。ク

写真 7 火山灰に埋まる水田（1990年9月）
Photo 7 Paddy fields buried under volcanic ash, 1990, 9

写真 8 バタック川とラハール（1990年9月）
Photo 8 The Batak River and Lahar, 1990, 9

デリでは粒径5mm の火山礫を含む火山噴出物が堆積し、その重みで家屋は倒壊した。クルド火山火口から半径1-2km の地域では、森林、農地、集落が焼失した。Puncu 地区の Mangli 川では溶岩が流出し、この時の時速はおおよそ100 km/h とされる（写真7、8）。

1990年9月15日現在もまだ、噴火による樹木の焼失が認められたが、ネム類などの深根性の樹木はすでに生命を取り戻していた。1990年のクルド火山噴火は火山灰の噴出に特色があり、ラハールは流出しなかった。

火山噴火の予知は1989年の12月ごろからなされていたために、噴火後大きな混乱はなかった。また、無線の交信による噴火の状態の伝達、および避難指示がだされ、住民の避難行動は村ごとに速

やかに進んだ。このために、死者17人、重傷64人と人的被害は最低限度に食い止められ、倒壊家屋も136軒と軽微であった。

ジャワの活火山地域では、火山噴火の予警報として次のような慣習がある。警報用の警戒音を各村落に流す時、1つ叩くと人命が奪われるような災害発生、2つ叩くと火山噴出物が流下してくる、3つ叩くと火事になる、4つ叩くと洪水になる、5つ叩くと火山の噴火の恐れがある、6つ叩くと災害は終了したことを示す。このような、村落単位の災害予警報で住民のすみやかな避難行動を促した。

今回の噴火で火山災害による被害が大きかったのは、ブリタルである。学校・役所などの公共施設、倉庫・モスク・市場・コーヒー工場などで落盤・崩壊が発生した。噴火による災害対策本部はクデリに置かれ、災害救援センターを中心に災害救援活動は進み、比較的スムーズに災害復旧、処理がなされた。噴火後に農業地域では、水田・畑地域に積もった火山灰の除去が農民の手により行なわれた。

クルド火山の過去の噴火で大きな農地災害をだしたのは、一次ラハール流出、ついで二次ラハールであった。1990年噴火後も、雨期以降に二次ラハールの発生が予測される。また、今後1-2年後に水害を伴うラハール被害が出る可能性は大きい。

すでに、クルド火山の南側・西側にかけての降灰、1990年3月の豪雨により、ウリンギダムを含む多くの砂防ダムが満砂状態になっており、今後の土砂流出は主要な河川流域で予想される。

VIII. 今後の開発とその問題点

東部ジャワでは、ブンガワンソロ、カリブラントス流域に、旧石器時代の遺蹟が多く分布している。カリブラントス流域では、下流地域の標高30mのジェチス地点でのホモ・モジョケルティスの人骨が発見されたのをはじめとして、新石器文化時代では上流地域のマラン河谷を中心にして、海拔高度400-500mのマラン高原で陸稲栽培を行なった農耕遺蹟、ついで青銅器時代にもマラン高

原で古代文化が栄えた。10-14世紀はシンゴサリ王国、モジョパイト王国など、ヒンドゥー系の王国の中心となり、多くの文化が開花した（有吉・クロム、1985）。カリブラントス流域の文化の断絶には、火山活動・噴火・火山灰の降下・ラハール流出等の自然災害の影響も考えられよう。

活火山を上流地域にもつ熱帯多雨地帯のカリブラントスは、土砂供給が大きく、従来は土砂の下流側への運搬・洪水氾濫で、河道周辺に自然堤防・デルタを前進させる河川であった。しかし、災害軽減のための火山地域での砂防工事・河床上昇・水害防備に対して、築堤・多目的ダム建設、等の河川工事は人工河川にカリブラントスを変貌させた。このような工事の進展は河床低下などの、新たな環境問題を発生させた。

今回の噴火でも、モジョパイト王国史蹟のチャンデイ・プナタランが火山灰に埋もれた。活火山をもつ河川流域は、火山活動そのものの影響にあわせ、土砂流出・外水氾濫などの災害克服は大きな問題である。このようなダイナミックな動きを示す河川流域の開発には、河川、流域地形の変化を正確に予測して、開発による自然環境の変化を見積もる必要があろう。

カリブラントス流域の河川開発過程をまとめると次のようになる。

(1) ブラントス川流域の開発は8世紀に遡る。初期の開発は、河川の氾濫に対して居住地域の安全度を高めるために河川の一部に堤防を建設し、灌漑用水路を溪流からひくものであった。オランダ統治時代、18世紀末期頃から、河川流域・火山地域に自然災害対策のための構造物の建設が進められた。その初期には、農業地域への配水を目的として、河川のショートカット、築堤などで河川水を効率よく灌漑用水路へ流す計画の中に、治水を含めていた。

(2) 20世紀後半から大規模な河川改修工事が始まった。ブラントス流域では洪水被害の大きかったクデリを中心とする中流地域の築堤・堤防強化・河床上昇を食い止めるための浚渫・上流地域の砂防ダム建設・洪水流量調整用のダム建設、および、中流部の洪水流量調整のためのツルガグンの

排水トンネル建設が続き、河川構造物の建設を中心として洪水防御計画がたてられた。

1970年代までは河川水が本流河道に集中し、特に中流の自然堤防地帯より下流での河床上昇が続いたが、1970年代後半に入ると上流ダム群での堆砂、ブランタス川の流水のインド洋への排出、灌漑用水路への流量配分がなされ、河道に供給される土砂、流量ともに減少した。1980年代後半には中下流で河床低下がおきた。

今世紀の後半における河川開発は、これまでの開発のなかではもっとも大きく自然環境を変貌させるものであった。ツルガグンの排水トンネルの建設以降、ブリタールより上流のブランタス川の流水、土砂はインド洋側へ流出し、クデリより下流では自然堤防の形成は止まった。最近10年間、デルタの前進も認められない。デルタ地域では河床の洗掘、河岸侵食が認められる地点もあり、堆積地形が侵食地形に転じている。

洪水軽減化の目的は達成したが、それが引き起こした地形変化により従来自然取水可能であった灌漑用水の取水が困難になり、河川構造物の基礎が洗掘され始めた。これからは、計画初期にも河川流域の全体的な地形動向を正確に予測して河川計画を立案するために、河川工学のなかへ地形学の知見が生かされる必要がある。

そこで、地形分類図から河川流域の地形分布、従来の地形変化を知り、このうえで超過洪水時の水害状況の予測、ラハールの流出を想定していくことが必要である。また、土砂流出については、ダムあるいは砂防ダムで完全に貯留させるだけでなく、地形維持のために一部を流送させることも

必要であろう。地形の維持はこれを取り巻く環境保全につながる。従来、上流でのダム建設、堤防強化が重要な洪水調整方法であった。これらにより、下流平野では外水氾濫頻度は減少したが、内水氾濫、排水困難などの問題が発生しており、一時的な洪水調整施設を下流部の後背湿地を利用して建設することなども検討すべき課題となろう。

謝 辞

1972年、1989年、1990年の3回にわたり、日本工営のカリブランタスプロジェクトの方々にお世話になりました。また、1990年の調査においては、ブランタスプロジェクトの貴重な空中写真を使用させていただくのに便宜をはかっていただきました。ここに記して感謝の意を表したいと思います。

文 献

- 有吉・N. J. クロム (1985) : インドネシア古代史. 天理南方文化研究会監修, 道友社, 711 p.
国際協力事業団 (1983) : インドネシア共和国の建設事情. 323p.
Ministry of Public Works, Directorate General of Water Resources Development (1980) : *Irrigation history in Indonesia*. JICA, 247p.
Nippon Koei (1960) : *Preliminary report on the Kali Brantas overall project*, Nippon Koei. 33p.
日本工営 (1989) : ブランタス川中流地域のフィージビリティスタディー. 日本工営, 364p.
Proyek Penanggulangan Akibat Bencana Alam Gunung Kelud (1989) : *Kegiatan Gunung Kelud dan pekerjaan Penanggulangannya*. Direktorat Jenderal Pengairan Dep., 22p.
Van Bemmelen, R. W. (1949) : *The Geology of Indonesia. Vol. IA*. Government Printing Office, The Hague, 188-608.
(1991年10月31日受付, 1992年2月10日受理)