

熱帯地域の河川ケニア・アチ川の流出解析

Runoff Analysis for Tropical River Basin Athi, Kenya

小葉竹重機* Maurice O. Nyadawa**

By Shigeki KOBATAKE and Maurice O. Nyadawa

Athi basin is one of the five basins which form the drainage pattern of Kenya and occupies about 70,000 km² (12% of Kenya's land area). Athi river drains approximately 65% of the basin's area with the remaining area drained by smaller independent streams. The study area lies approximately between latitudes 0° 50'S and 4° 30'S. Like most parts of Kenya, greater part of Athi basin experiences two rainfall regimes also referred to as bimodal rainfall regime, March to May (long rains), October to December (short rains). The coastal strip adjoining Indian Ocean has one long rainy season from April to July with maximum in May.

This paper describes water balance of this area and runoff model of upper Athi basin.

Keywords : Tropical river, Water balance, Runoff simulation model

1. まえがき

我国では、赤道直下に位置するケニアの河川については、まだまだ知られていない。ケニアは北緯4°から南緯4°の間に位置する正に赤道直下の国であるが、気象学あるいは水文学的に見ればかなり異なった地域から構成される、決して様な国土ではない。大きくは5つの地域に分けられ、それぞれ正式名称として流域1、とか流域5とか呼ばれる。図-1はその流域区分を示した図である。流域1はその南西部にナイル川源流となるビクトリア湖の一部をもつ、通称lake basinと呼ばれる流域である。湖面の標高は約1,100mで、流域の標高は1,100~2,000mが大部分を占める。年平均気温は24℃程度で年間を通して大きな変化はなく、月平均の最低と最高はそれぞれ17℃、30℃前後である。年平均降水量は高度とともに変化し、低地で500~1,000mm、高地では1,500~2,000mmである。他の流域と異なり顕著な雨期・乾期をもたないが、ピークは3月~5月にある。ピークの時期を除けば全体の水文環境は日本と似ていると想像される。流域2はいわゆるRift Valleyで、北のTurkana湖周辺は低地で年間降水量250mm以下の乾燥地帯である。南は標高3,000mの山もある山岳地帯で、年間降水量は500~1,500mmである。年平均気温は北の低地で28℃程度、南の山岳地域で20℃前後である。流域3は今回報告するAthi(アチ)川流域で、水文特性は別途説明する。流域4はTana川流域で、ケニアで最も水量の豊富な河川で、ケニアの電力のほとんど全てがこの流域における水力発

* 正会員 工博 群馬大学助教授 工学部建設工学科

(〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

** 学生員 群馬大学大学院博士後期課程 (同上)

電によってまかなわれている。上流にケニアの最高峰ケニア山(5,199m)を擁し、この地域で年間降水量1,500mm以上、高度が高いところでは2,000mmを越える。一方、海岸地帯は1,000～1,500mmであるが、上流と海岸の中間の流域では年降水量250mm～500mmの半乾燥地帯が広がっている。流域5は低地の乾燥地帯で、年降水量は250mm以下である。年平均気温は28℃程度である。

以上はケニアの大きな流域区分とその簡単な水文特性を示したものであるが、以下では流域3のAthi川流域を対象として、流域の水収支と流出モデルについて検討した結果について述べる。

2. 流域3 (Athi川流域) の水文特性

図-2は流域3だけを取り出したもので、大略の河川網と、本研究で使用する降雨量、水位の観測所位置を示している。図からも分かるように、流域3はその65%がAthi本川であり、残りは海に直接流出する小河川群から成っている。本川上流は標高1,000～2,000mの高原ないしは山地から成り、ケニアの首都ナイロビはこの上流域内の標高1,616mに位置する。図-1 ケニアの流域区分図
下流はインド洋に注ぎ、本川河口から南に約120kmにはケニア最大の港モンバサがある。このようにAthi川は赤道直下にありながら、海岸地帯の標高の低い地域から、内陸の標高の高い地域まで変化に富んでいるために、降雨の特性も地域によって大きく異なる。

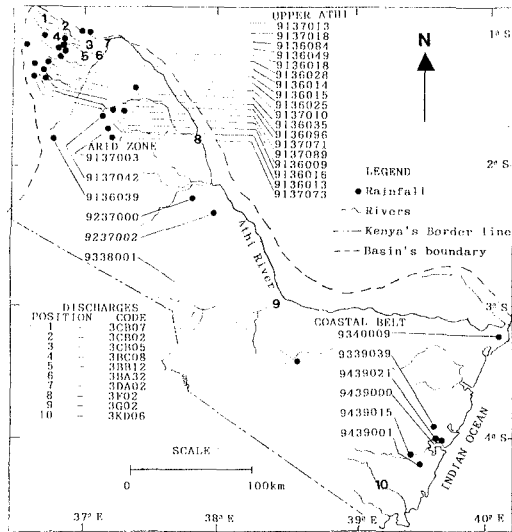
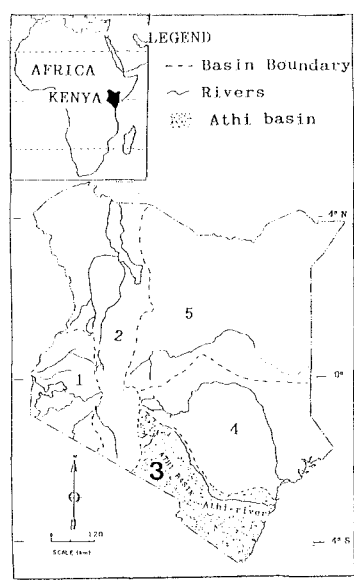


図-2 流域3の概要と観測点位置図

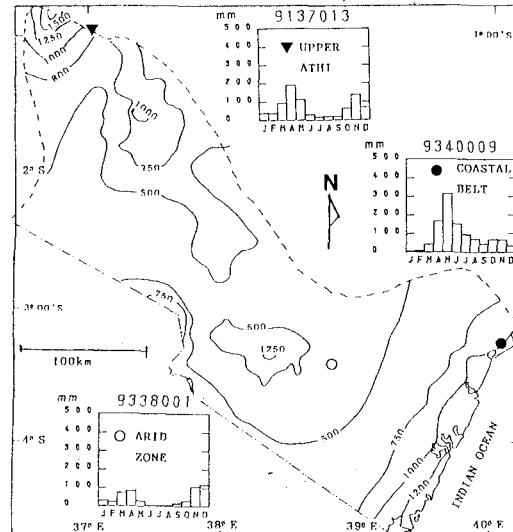


図-3 降水量分布図と代表的月雨量図

図-3は流域3の年降水量分布を示したもので大きくは3つの地域に分けられる。上流域の高原・山地流域、海岸線に沿うベルト状の地域、この両地域間の半乾燥地域である。図中には各地域の代表的な月降水量の分布を示している。上流域と中間の半乾燥地域では3月～5月と、10月～12月の2回の雨期があり、海岸地域では4月～7月にかけての1回の雨期であることがわかる。各地域内の雨量観測点の年降水量のレンジと変動係数を示したものが表-1である。中間の半乾燥地域でのレンジは505～644mmとなっているが実際にはこれより少ない地域がある。図-3において半乾燥地域の中

表-1 3地域の年平均降水量

地域	年降水量 (mm)	変動係数
上流域	725-1507	0.21-0.36
半乾燥地域	505-644	0.38-0.41
海岸地域	813-1122	0.26-0.35

央付近に1,000mmを越える地域があるが、これは標高が高い地域である。また、半乾燥地域の南東部の国境線が折れ曲がっている地域も降水量が多いが、これはキリマンジェロのすそ野にあたる地域である。

年平均気温はナイロビで18.8℃、前記の半乾燥地域の中で降水量の多い地域の町ボイ（Voi、標高557mm）で25.1℃、海岸のモンバサで26.5℃である。いずれも最高は3月か4月、最低は7月か8月で、最高・最低差は3～5℃程度であり、年変化は小さい。

つぎに年最大日降水量の統計解析の結果をまとめたものが表-2¹⁾である。これは図-1に示す黒丸の雨量観測点（上流域18箇所、半乾燥地域6箇所、海岸地域6箇所であるが、流域3内の雨量観測点総数は110地点である）の観測値に極値分布（GEV）をあてはめ、これから確率年5、10、15、20年の値を求めて変動係数とともに示したものである。この表から興味ある事実が読み取れる。すなわち、上流域と半乾燥地域は、年降水量では大きな差があるにもかかわらず、極値では全く差がないという事実である。これは通常の降雨は、太陽が南北回帰線の間を移動するにつれて同じように移動する低気圧帯と地形によってもたらされるのに対して、極値の原因となる降雨は地形の影響をあまり受けない、もう少しスケールの大きい現象であることを想像させる。また、海岸地域は上流域と比較して年降水量はほぼ同じであるのに対して、極値は20～30mm大きく、インド洋からの水蒸気の補給が容易であることによるものと考えられる。以上で流域3の降雨特性と流域特性のまとめを終わり、次章以下では水収支とそれに基づく流出モデルについて述べる。

表-2 確率年最大日雨量の比較

地域	確 率 年			
	5	10	15	20
上流域 (18地点)	89mm 0.07	103mm 0.06	107mm 0.07	117mm 0.07
半乾燥地域 (6地点)	83mm 0.17	99mm 0.18	106mm 0.17	115mm 0.18
海岸地域 (6地点)	108mm 0.10	127mm 0.09	138mm 0.10	149mm 0.13

下段は変動係数

3. 流域3の水収支の特性

表-3は図-1に示した10地点の流量観測点（流域3内の流量観測点は全部で24地点ある）における水収支計算の結果を示したものである。観測点のコード名は流域3をさらにサブ流域によって分割したものに割り当てられたもので、流域3を表す最初の数字3の次に現れる英文字のうち、A～Eは上流域、F～Gは中流域（半乾燥地域）、H、L、M、Kは半乾燥地域を上流にもつ海岸地域、J、Nはキリマンジェロのすそ野地域である。水収支計算において流域平均降雨量は図-3の等雨量線図を参照しながら全雨量観測点から計算した重み付き平均で、サブ流域内の雨量観測点の単純平均ではない。なお、3DA02と3F02は流域面積が大きくかつ流域内の正確な降雨分布が推定困難であるために流域平均雨量を計算していない。流出量は流量観測点での年流出高の平均である。最後の欄の雨量と流出高の差は、通常は蒸発散量と考えられる量である。半乾燥地帯を除けば年間約700～800mmの蒸発散量となり、首肯できる値である。また、半乾燥地帯の3G02観測点での年降水量463mmに対する年蒸発散量438mmも首肯できる値である。半乾燥地帯にある本川の観測点3F02では年流出高が96mmと小さいが、これは河道流下中での水面からの蒸発散と河床を通しての浸出によるものであろう。

表-3 流量観測点における水収支

流域	標識名	流域面積 (km ²)	年降水量 (mm)	年流出高 (mm)	年損失 (mm)
1	3CB07	29	1360	640	720
2	3CB02	65.1	1380	941	439
3	3CB05	312	1163	453	710
4	3BC08	280	1311	464	847
5	3BB12	237	1216	292	924
6	3BA32	1942	1003	234	769
7	3DA02	5724	—	125	—
8	3F02	10131.6	—	96	—
9	3G02	7252	463	25	438
10	3KD06	91	1122	293	829

次に降雨に対する流出の応答を見てみる。ここでは資料数の豊富な上流域を対象に考察を行うこととする。図-4(A), (B), (C), (D)はそれぞれ3CB02, 3CB07, 3CB05, 3BB12 流量観測点における平均月降雨量と平均月流出高を示したものである。²⁾ 図中、白丸が流出高、黒丸が雨量である。いずれの地点においても4月に雨量

次ページ

のピークがあるのに対して、流出高のピークは5月に現れており、乾期に続く4月では地中への浸透が卓越し流出高が小さく、流域が湿潤となる5月になって降雨量にはほぼ匹敵する流出高となることが分かる。ただし、(D)図の3BB12観測点においては5月の流出高も降雨量よりかなり少なく、表-3にも見られるように年間を通じて大きな損失量となっている。この原因は取水等の影響が考えられる。しかし、いずれにしても降雨量と流出高のピークがずれるのは明かである。

ところで、ここで対象としている流域はいずれも流域面積は数百km²以下であり、いわゆる雨水の伝播時間はそれほど大きくはない。土壌水分の消長によって現れる降雨と流量のピークの時差が、あたかも流域面積が大きく伝播時間によって現れる時差のように見えることから、「水文学的に大きい流域」と呼べそうである。以下では、こうした時差を説明する流出モデルについて述べる。

4. 雨期・乾期のある流域の流出モデル

図-5は採用したタンクモデルの構造を示したものである。3段直列で、右側のものには3段目のタンクにも浸透孔を設け漏水を表現している。パラメータの値を一括して流域別に示したものが表-4である。これらのタンクモデルの特徴は1段目と2段目の浸透孔がタンク底部よりも上に上がっていることである。この構造によって、降雨と流出の時差を発生させることができる。物理的には、土壌に取り込まれて下方には動かない（ただし、蒸発散はする）水分量を表す。その値は表-4のL11、L21に見るように合計で20mm程度であるが、これで時差が説明できるようになる。

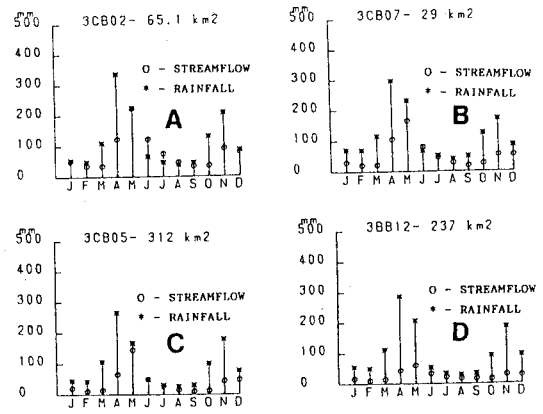


図-4 上流域4地点での月雨量と月流出高

表-4 流域別タンクモデル定数表

Basin	ET/Eo Ratio	Parameters
3CB07 and 3CB05	(0.8) (0.7)	L11=10, L12=60, L21=10, L22=40 L31=0, L32=100 R11=.005, R12=.02, R21=.005 R22=.01, R31=.001, R32=.001 F1=.015, F2=.01
3CB02	(0.5)	L11=10, L12=60, L21=10, L22=40 L31=0, L32=100 R11=.005, R12=.03, R21=.002 R22=.01, R31=.001, R32=.002 F1=.03, F2=.01
3BB12	(0.8)	L11=10, L12=140, L21=10, L22=120 L31=0, L32=100 R11=.005, R12=.02, R21=.004, R22=.004, R31=.0005, R32=.001 F1=.1, F2=.05, F3=.004

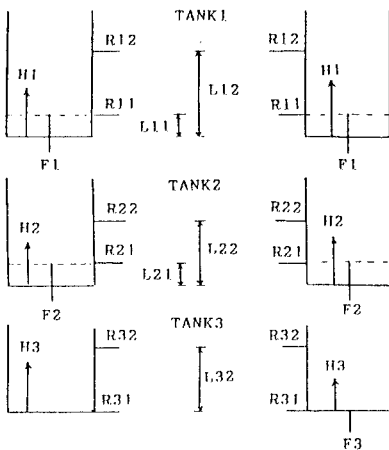


図-5 タンクモデルの構造

また、長期の流出解析では蒸発散をどのように見積もるのが重要となるが、ここではナイロビ近郊での蒸発皿による蒸発量をE0とし、これに一定の比を乗じて流域からの蒸発散量ETとした。蒸発皿観測値は表-5に、その比ET/E0の値は表-4中に示している。また、この蒸発散量ETの各タンクからの差引方であるが、1段目のタンクの水位がL12よりも高いときにはETそのものを、水位がL12よりも低いときには、0.5*ETを

下限値として水位に比例させた。2 段目のタンクも同様に扱い、上限値は $0.5 \times ET$ 、下限値は $0.25 \times ET$ とした。3 段目のタンクからは $0.25 \times ET$ の一定値をそれに見合う水分量があれば差し引くこととした。もちろん、順位としては1 段目、2 段目、3 段目の順序で生起する。

表-5 蒸発皿による月平均蒸発量 (単位はmm)

1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
150	161	180	133	114	95	85	105	139	163	127	132

計算結果を示したものが図-6(A), (B), (C), (D) であり、記号は図-4と同一である。ここで、(D) の3BB12は表-4にも示すように、3 段目のタンクの下部にも浸透孔を設けている。示している計算結果はデータの存在期間中 (長いもので1956~1988年、短いもので1964~1990年) を通して行った計算結果のうち、降雨量の多かった年と少なかった年が続けて起こった1968年~1969年の場合を示したものである。図中で変化の激しいのが実測値で、計算値は緩やかに変化している。

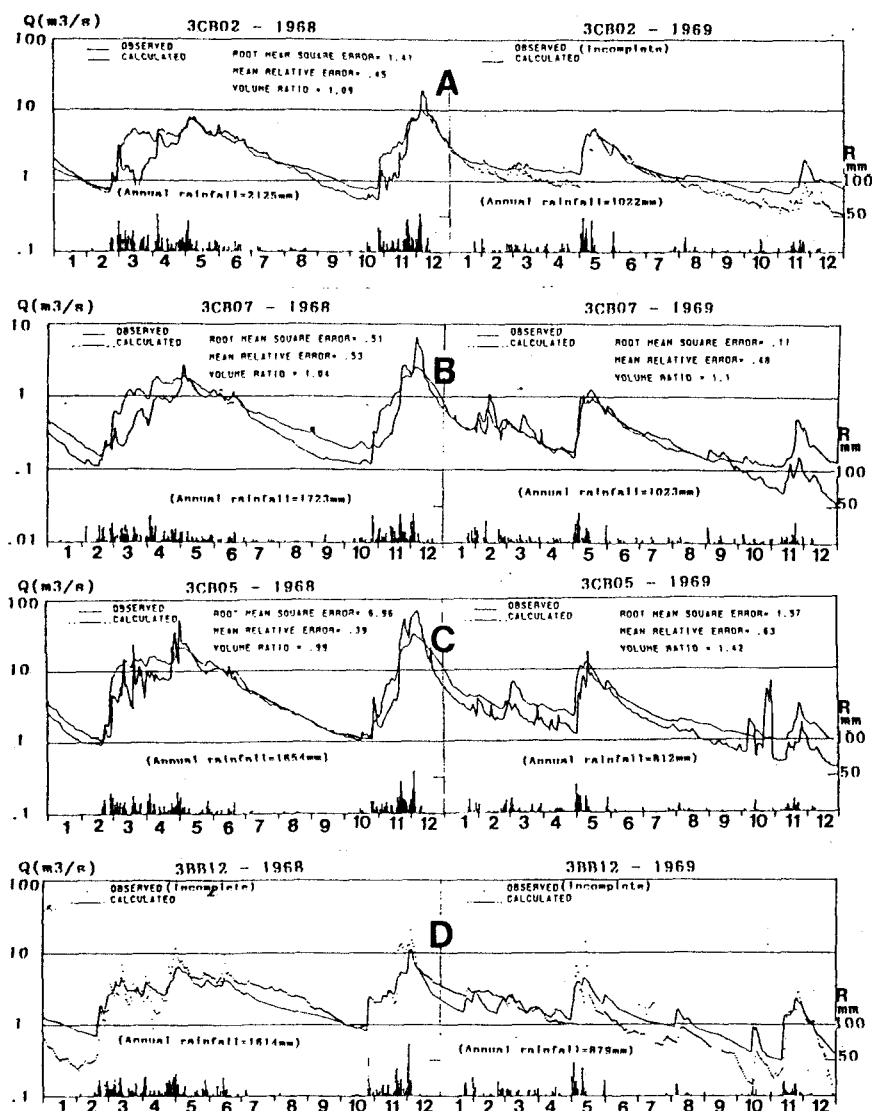


図-6 実測流量と計算流量の比較 (豊水年と渇水年の連続2年の比較)

実測値と計算値を比較すれば両者はほぼ一致していることが分かる。表-3に示した水収支と計算による水

収支を比較したものが表-6である。前述のように(D) 図の3BB12 流域には、3 段目のタンクに漏水孔をつけたが、これが実測の損失924 mmと計算蒸発散量587mm の差である。なお、計算では漏水としているが、図-6 (D) の実測流量低減部の様子から見て、実質は取水であると想像される。

表-6 水収支比較表

標識名	実測損失	計算蒸発散
3CB02	439 mm	523 mm
3CB07	720 mm	804 mm
3CB05	710 mm	694 mm
3BB12	924 mm	587 mm

5. あとがき

以上、我国では比較的まだ情報の少ないケニアの赤道直下の河川の資料を用いて流出解析を試みた。得られた結果を要約すると以下のようである。

1) Athi流域は大きくは3つの異なる降雨特性の流域に分割でき、それぞれ年平均降水量は異なる。しかし、年平均量では2倍以上異なる上流域と中間の半乾燥地域でも、確率年最大日雨量は同じ値となる。これは通常の降雨と極値をもたらすような降雨とは原因となる気象スケールが異なることを意味していると考えられる。

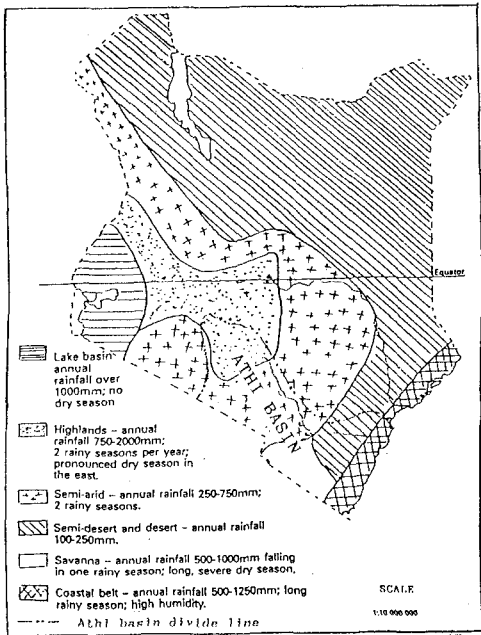
2) 上流域においては月雨量のピークは4月にあるが、流出高のピークは遅れて5月に現れる。これは乾期と雨期を通じての土壌水分の消長によるものである。これはタンクモデルの浸透孔を底部より上に上げることシミュレートすることができる。

なお、参考のためにケニア全域の大まかな気候区分と、Athi流域の地質分布を示しておく。最後に貴重な資料を提供して頂いた、水資源局、気象局の関係者に深甚なる謝意を表する。

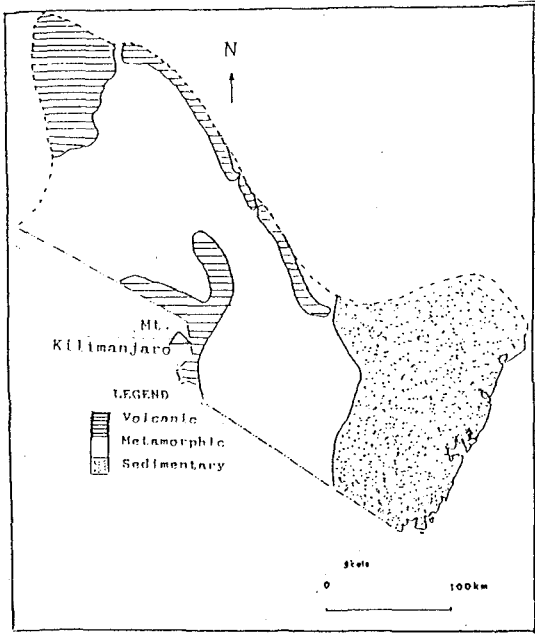
参考文献

1) M.O. Nyadawa, S. Kobatake and K. Ezaki : Generalized characteristics of intense rainfall and peak discharge in Athi basin, Kenya, Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, Vol.8, No. 1, 1995 (in printing)

2) M.O. Nyadawa, S. Kobatake and K. Ezaki : Simulation of daily streamflows for hydrologically large catchments in Drainage area 3, Kenya, Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, Vol. 8, No. 1, 1995 (in printing)



ケニア気候区分図



流域3 地質図