自然環境の変化と土砂収支

総括執筆者（座長）
足立昭平
正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

話題提供者
細井正延
正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部土木工学科

河村三郎
正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

担当：中部支部・水理委員会・海岸工学委員会

はじめに

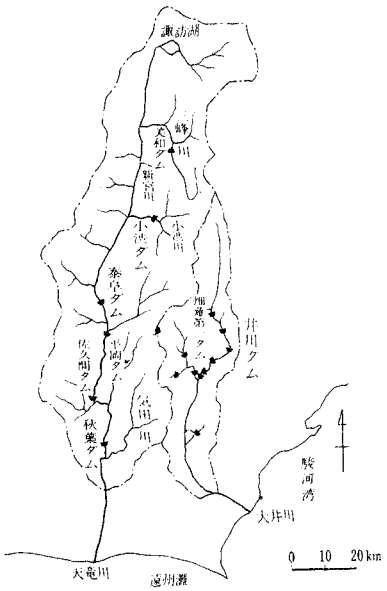
自然環境の変化といえば，非常に幅の広い課題になるが，ここでは自然環境の基本的要素の一つである水循環に伴う地形変化を課題とする．一般にこの種の地形変化は緩やかに進行し，急には目立たないものであるが，その影響は年月の経過とともに徐々に累積し，なんらかの外力をきっかけとして急激な災害現象となって顕在化するものである．特に現代の河川・海岸においては，自然力だけでなく，人間の開発力が加わってその進行が加速され，地形変化に起因する災害の潜在的危険性が増大してきている．このような環境の基本的条件の変化に対処するために，河川・海岸の土砂収支ならびにその不均衡の結果として生ずる地形変化に関する調査・研究が急がれねばならない．

本討論会は，わが国の代表的山岳地帯を擁し，ダム堆砂，河床変動，海岸浸食など水循環に伴う地形変化の規模が大きい中部地方における事例として，大井川および天竜川に関する土砂収支について，それぞれ名古屋工業大学・細井正延教授および岐阜大学・河村三郎助教授から話題を提供していただき，この種の調査・研究における問題点を検討し，今後の調査・研究の発展に役立てようとするものである．以下に提供された話題の概要を紹介し，今後の課題としてあげられたいくつかの問題点に関する意見を要約して本討論会の報告とする．

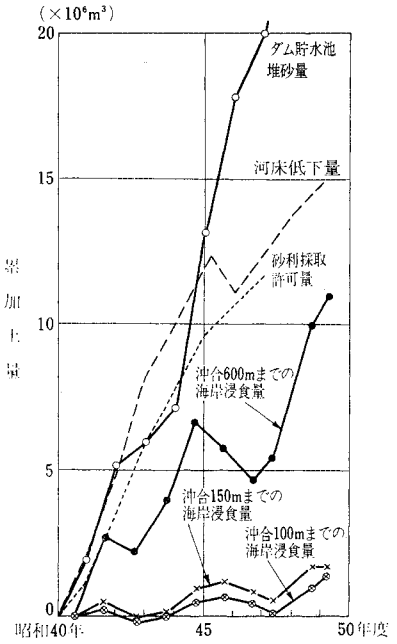
話題 1．大井川河口周辺の海岸浸食とその原因について（細井正延）

大井川は，図—1 の流域図に示されるように，天竜川と隣り合って，南日本アルプスに発し，駿河湾に注ぐ東海の代表的河川の一つであり，本川延長は約 180 km，流域面積は約 1 280 km² である．大井川河口周辺の海岸浸食は，昭和 30 年代後半から目立ち始め，現在の浸食規模の大きさは全国でも有数のものになってきている．そしてその原因は，大井川上流に建設されたダム群による河道流砂の阻止，河道の砂利採取による海への土砂供給量の減少および大井川港の建設による沿岸漂砂の阻止にあるといわれている．

河口を中央に延長約 18 km の SW-NE 方向に伸びる海岸線については，建設省中部地方建設局において昭和 38 年以降海岸調査が実施されており，沖合約 600 m（水深にして約 10 m）までの深浅測量図，表層底質の粒度調査資料，河口沖合の波浪観測資料などが得られている．それらの調査資料によれば，この範囲の沿岸地形は比較的に単調であって，海底勾配約 1/50 で沿岸砂州



図—1 大井川および天竜川流域図



図—2 大井川における地形変化累加土量

は見られない．また表層底質材料は，水深約 2 m までの浅い区域では 7～70 mm の砂利，それよりも深い区域では 0.2～1 mm の砂になっている．汀線沿いの砂粒平均径の分布を見ると，河口左岸（北）海岸線約 6.5 km から，河口右岸（南）海岸線約 4.6 km の区間はほぼ一様であって，平均粒径約 20 mm であり，その区間から北側の汀線では 1～3 mm，南側の汀線では 0.25～0.5 mm と急激に小さくなっている．また波浪については，最大頻度波向 SE であり，有義波高の非超過確率 50% の波高約 50 cm で波高が比較的小さいが，台風時にはかなり大きな風波やうねりの来襲がある．

毎年の海底深浅測量図から，汀線後退が顕著である河口左岸（北）6 km から同右岸（南）8.8 km までの区間を取り上げ，沖合 600 m までの範囲について，昭和 40 年 8 月の海底地形を基準として求めた海岸浸食土量を図示すれば，**図—2** の●印のようである．昭和 41～42 年および昭和 44～46 年に一時的な堆積期間も認められるが，この図は，現在もなおかなりの速さで浸食が進行していることを示している．浸食の原因に河川から海へ流送される土砂量の減少があげられているわけであるが，河川から流送される土砂のうち，砂と砂利の海岸浸食に対する寄与率を推定するために，海底底質の粒度がほぼ水深 2 m の位置を境として急変し，浅い所は砂利であることに着目し，汀線から沖合 100 m までの範囲についての浸食量が砂利に関する浸食量であるとみなせば，それは **図—2** の⊗印のようになる．また，砂と砂利の境界が必ずしも明確でないことを考慮して，汀線から沖合 150 m までの範囲を砂利と見なすことにしても，その浸食量は **図—2** の×印の程度であり，砂利に関する浸食量は比較的に少なく，この海岸範囲における浸食の大部分は，細粒砂の収支不均衡によるものと考えることができる．

つぎに，海岸浸食の原因といわれているダムによる貯水池堆砂量と河道の砂利採取量の状況を見よう．大井川流域には，大小 11 個のダムが建設されているが，貯水容量の大きいものは，井川ダム（昭和 32 年竣工，貯水容量 1.5×10^8 m³）および畑薙第一ダム（昭和 38 年竣工，貯水容量 1.7×10^8 m³）であり，それらの昭和 47 年の貯水池堆砂率はそれぞれ 18% および 15% であるが，現在のところ，全流域のダム貯水池堆砂量の大部分がこれら二つのダム貯水池で堆砂している．**図—2** の○印が昭和 40 年以降のダム貯水池の累加堆砂量を示し，最近 10 年間の年平均堆砂量は約 2.5×10^6 m³ である．また，河道の砂利採取は，昭和 48 年以後全面的に禁止されているが，昭和 40～47 年の採取許可量の累加量は **図—2** の点線のようであり，その間の年平均量は約 1.4×10^6 m³ である．

これらのダム貯水池堆砂量および河道砂利採取量と海岸浸食量との土砂収支を考えるには，さらに，河口に至るまでの河床変動量を考慮しなければならない．河口－0.4～24.4 km の河道区間は，最近 9 年間にほぼ一様に約 1 m の河床低下を生じており，昭和 40 年河床高を基準として，この区間の河床低下量を求めると，**図—2** の破線のようであり，年平均低下量は 1.75×10^6 m³ である．この河床低下量は，ほぼ砂利採取量と対応してお

り，砂利採取が河床低下の直接的原因になっていると考えることができる．また，この河道区間は単に量的な河床低下だけでなく，河床材料の粒度にも変化が現われており，細粒砂が減少して，いわゆる armouring 現象を生じている．こうした底質の粗粒化は浮遊流砂の減少につながるものと考えられ，河道から海へ供給される細粒土砂量が，著しく減少してきているといってよいであろう．

以上から，河口周辺の広範囲にわたる海岸浸食は，ダム貯水池の堆砂による下流への流送土砂量の減少，特に armouring による河床底質の粗粒化が海へ流送される細粒土砂量の減少を招いたことに大きな原因があるということができる．なお，図—2 では，昭和 41～42 年および 44～46 年に海底の上昇，また 45～46 年に河床の上昇を示しているが，昭和 41 年と 44 年は他の年に比べて河道の流送土砂量が非常に多く，昭和 44～46 年は海の波が小さかったためと考えられる．このように，河川流況と海岸波浪の変動によって，短期的には河床や海底高の上昇・低下が繰り返されるが，大井川の場合，今後もダム貯水池堆砂の影響が河床低下や海岸浸食の進行となって現われるものと考えられる．そして，それらの量的な関係を詰めるために，河道流送土砂量の算定精度を高めること，海岸浸食土量の砂と砂利との構成比，さらに沖合 600 m の外側における海底地形変動の把握が必要である．

話題 2. 天竜川における土砂収支（河村三郎）

天竜川は，諏訪湖から伊那谷を縦走して南下し，途中峻嶮な山岳地を縫って海岸平野に入り，遠州灘に注ぐ東海の代表的な河川で，本川延長約 216 km，流域面積約 5 049 km² である．図—1 に示すように，その上流流域は東西の山脈から支川が羽状に流入し，西側支川は流路延長が短く急流をなし，東側支川は本川と平行して南北に走る中央構造線に沿って屈曲している．地質的にも西側山脈（中央アルプス）と東側山脈（南アルプス）とは相違し，西は花崗岩または火成岩系であるのに対して，東は古生層からなるしゅう曲山脈であるが，いずれも風化侵食が著しく，土砂生産量も大きい．

建設省中部地方建設局による天竜川水系土砂動態調査（1973）から，昭和 36 年 6 月豪雨の際の山地流域における土砂収支を示すと，表—1 のようであり，この調査によれば，崩壊全土量の約 20% が崩壊地に残留し，河道へは約 80% が供給され，また，崩壊全土量に対する河道堆積率は約 36% である．

山地流域における土砂生産は，一般には山腹崩壊だけではなく，河岸浸食も考慮に入れねばならないが，昭和 36 年 6 月豪雨によるようなきわめて大規模な山腹崩壊の場合，その崩壊土量がある程度の年月にわたって流出するわけであるから，表—1 は厳密な山地流域の土砂収支量ではないけれども，ここ 10 年余の上流域土砂収支の目安になるものといってよいであろう．

表—1　天竜川山地流域の土砂収支（昭和 36 年 6 月豪雨）

流域区分＼土砂収支	流域面積 (km^2)	崩壊全土量 ($\times 10^3 m^3$)	残土量 ($\times 10^3 m^3$)	河道堆積量 ($\times 10^3 m^3$)	残土率 (%)	河道堆積率 (%)	河道への供給率 (%)
三峰川	311.1	18 517	3 483	6 144	18.8	33.2	81.2
小渋川	295.0	37 365	8 921	14 112	23.9	37.8	76.1
新宮川	58.0	5 135	826	2 312	16.1	45.0	83.9
その他小支川	155.1	5 986	1 092	1 607	18.2	27.6	81.8
合計・平均	819.2	67 003	14 322	24 175	19.2	35.9	80.8

さて，天竜川の場合，山地流域からの流出土砂は，海岸平野部へ出るまでに，途中のダム群によって阻止される．天竜川における主要なダムは図—1 に示されるようであり，それらのダム貯水池の年平均堆砂量は，昭和 28～37 年の 10 年間では 861 万 m^3/年，また，昭和 34～43 年の 10 年間では 610 万 m^3/年と記録されている．したがって，これらのダム群の下流には，上流流域からの流出土砂はほとんど及んでいないものと推定される．事実，河口から 25 km 区間の海岸平野の河道では河床低下が顕著に現われており，河床低下量は土量にして年平均 178 万 m^3/年になっている．ただし，大井川と同様に，ここでも大量の砂利採取が行われており，昭和 29～48 年の砂利採取許可量は 1 895 万 m^3 にのぼり，昭和 34～46 年の年平均許可量は 127 万 m^3 と報告されている（なお，昭和 48 年以降は年間約 75 万 m^3 の程度に抑制されている）．したがって，ダム貯水池の堆砂がもたらしたと推定される河床低下は，実際の消失土量の約 26% ということにはなるが，さらに，河口部河道の流砂輸送能力を試算して，この河道へ上流から供給される土量を推察すると以下のようである．

流砂量の試算方法にもなお多くの問題を含んではいるが，一応の試算値は，掃流砂量 3 万 m^3/年，浮遊流砂量 60 万 m^3/年，計 63 万 m^3/年となった．これからこの河道区間の土砂収支は

＜上流からの供給土砂＞＝＜河口から海への流送土砂：63 万 m^3/年＞＋＜砂利採取量：128 万 m^3/年＞－＜河床低下量：178 万 m^3/年＞＝13 万 m^3/年

ということになる．この土砂量については，ダム群の最下流ダムである秋葉ダムのさらに下流で合流する気田川からの流砂を含むものと考えねばならない．気田川における推算生産土砂量は，名大・西畑教授によれば約 24 万 m^3/年であり，その河道への供給率を表—1 を参考にして 80% と見れば，気田川からの供給土砂量は 19 万 m^3/年となり，これだけでも上記の数値を上回ってしま

う．この数値上の矛盾は，土砂収支各項の推定値の不明確さにもよるものと考えられるが，ともあれ，この結果は，河床変動に寄与するような粒径範囲の流砂について本川上流域からの供給が断たれており，ダム群による貯水池堆砂が下流部の河床低下に影響を及ぼしていることを示している．

つぎに，河口周辺の海岸地形の変化を見ると，測量範囲が海岸線延長で 8.8 km とやや狭いきらいはあるが，その海岸浸食土量の概算値は表—2 のようである．年平均約 11 万 m^3/年という浸食土量は，ダム貯水池堆砂量 610 万 m^3/年に対して 1 桁以上小さい量であり，大井川の場合の海岸浸食土量が 100 万 m^3/年であることと比較しても浸食規模は小さい．表—3 は，海岸地形の変化を汀線の変化で見たものであるが，最近の汀線後退量は減少してきているようにも見ることができ，天竜川の場合には，河口周辺の海岸地形変化は比較的に少ないといえよう．

一般に，河川流域の土砂収支を考察するうえに，ダム地点は一つの支配断面として重要であるが，ダム貯水池の堆砂土量と下流の河床低下および海岸浸食との関連を考える際には，砂粒の粒度に注意を配る必要があろう．天竜川では大井川の場合と異なり，海岸底質の粒度が小さく，平均径 0.5～0.75 mm で 5 mm 以上の粒径の砂利は見あたらない．また，河道の河床材料も大井川のそれよりは細かく，河口で 16 mm，河口から 25 km 上流で 27 mm 程度の粒径である．しかし，海岸底質の 0.3 mm とか 0.5 mm といった細粒砂は，河道部では wash load の類に属し，それらは河床変動にはほとんど関与しないものと考えられる．また，ダムによる流砂の貯留もそのような細粒砂に対しては，影響が薄いと考えられる．おそらく，こうした点が天竜川河口周辺の海岸地形の変化が，比較的に緩やかであることの理由と推察される．

表—2　河口部の浸食・堆積土量の変化
（測定期間：1962 年～1973 年）

測定区域	海岸線延長	変動量（＋：堆積，－：浸食）	
	(km)	(m^3/年/km)	(m^3/年)
河口東部	4.8	$+1.85\times10^4$	$+8.88\times10^4$
河口西部	4.0	-3.6×10^4	-14.4×10^4
河口部全域	8.8	-1.3×10^4	-11.4×10^4

表—3　天竜川河口付近の汀線変化

測定区域	汀線変化量（＋：汀線前進，－：汀線後退）			
	測定期間	変化量	測定期間	変化量
河口東部	1961～1966	+11.6 m/年	1966～1973	−0.17 m/年
河口西部	1961～1969	−15.8 m/年	1966～1973	+ 2.1 m/年

研究の問題点と今後の課題

流域を接する東海の代表的河川，大井川および天竜川において，いずれも河床低下，海岸浸食の地形変化がダム貯水池の堆砂，河道の砂利採取に結びつけられ，しかもそれらの様相にそれぞれの特徴のあることが紹介されたが，同様の問題は全国各地に起こっている．実際に，わが国の国土の 2/3 を占める山地流域の 1/2 がダム流域であり，また，急増する骨材需要をもっぱら河道の砂利採取に依存してきたことから，この種の地形変化は全国的な問題として重大である．文部省科学研究費・自然災害特別研究の石原藤次郎京大名誉教授を研究代表者とする昭和 47～49 年の計画研究「土砂の流送・運搬に伴う自然環境変化に関する研究」は，この問題を全国的視野から取り上げたものであり，本討論会でもその研究分担者の中から代表的に河川，海岸に関する土砂収支および山地の土砂生産について研究上の問題点ならびに今後の課題に対する意見を述べていただき，討論会を結んだ．以下にそれらを要約しよう．

河川土砂収支の問題点（京大・芦田和男）：地形変化の実態を把握することが研究の出発点になるが，その出発点で測量精度の信頼性が問題であった．土砂収支の算定は測量精度に左右されるわけであり，地形変動に対する精度の高い，そして定期的な継続調査がいかに必要であるかを痛感させられた．また，土砂収支に基づく地形変動の予測に関しては，確率的に生ずる山地崩壊現象に始まり，ダム貯水池，河道等による平均化過程を経る土砂流出に対する一貫した力学的モデルの模索，とくに大井川，天竜川の事例でも指摘された粒径別の土砂収支を追究するための学問的基礎づけが今後の重要な課題といえよう．

海岸土砂収支の問題点（阪大・椹木 亨）：海岸は閉じられた場でないという点が，海岸土砂収支の一番の問題であった．河川から海岸へ供給される土砂量と海岸地形の消失土量との対応関係は，対象地域によってかなりの相違がある．例えば，鳥取県弓ケ浜の場合，鳥取大・野田教授らの研究では，海岸浸食量が河川流出土砂量の 10 倍にも達し，一方，新潟海岸の場合，東大・堀川教授らの研究では両者は同程度の量になっている．大井川・天竜川の例では，海岸の沿岸方向の範囲が問題にされているが，さらに沖合方向の範囲を問題にする必要があるように思われる．さきにも指摘されたように，測量の精度も問題にしなければならないが，東播海岸の実測では沖合 800 m でも海底地形にかなりの変動があり海岸土砂収支算定の場の選定が非常に難しい問題である．さらに

また海岸地形の変動は，短期的にはたえず浸食・堆積が繰り返されるものであるが，長期的に見ると，たとえ汀線の後退があっても，海底地形土量には変化がない場合も少なくはなく，海岸が土砂消失の場であるという考え方は，必ずしもあたっていない．一般に，土砂収支は空間的スケールと時間的スケールの設定を基本的条件とするが，海岸土砂収支の考察では，特にこれらのスケールの選定が重要である．

山地土砂生産量の問題点（名大・西畑勇夫）：山地における土砂生産の様相はさまざまであるが，山腹崩壊ということになると大部分のものが雨に伴って発生する．天竜川上流域における昭和 36 年6月豪雨を中心にして，山腹崩壊土量に関する調査資料を整理した結果によれば，崩壊量は地質と雨量に密接に関連しており，この点に注目した崩壊土量の推算法を統計的に導いてみた．この推算法は一つの参考値を与えるものであるが，山地の土砂生産量の見通しを考えるには，さらに山腹崩壊機構における雨の役割を解析的に考察する方法を考えねばならない．山腹の崩壊は通常ある程度風化が進行したところに大雨が加わって発生し，一時に大量の土砂が流出するわけであるが，崩壊地の残土量も少なくはなく，その後の中小洪水で流出する土砂量もまた大きい．したがって，山地流域の土砂生産は，第一次の崩壊と第二次の崩壊とに区分し，それぞれによる流出土砂量を分けて考えるのが良策と思われる．

今後の課題（京大・石原藤次郎）：文部省科学研究費で，昭和 47～49 年の3年間に行った研究では，全国的に見て山地流域でどの程度の土砂が生産・流出されているか，またその変化に伴って河床変動および海岸地形の変動はどのような大勢にあるか，といった実態調査を行い，ダム堆砂や砂利採取などのそれらに及ぼす影響が著しいことを明らかにした．しかし，土砂収支に基づく山地流域の変化，河道の変動および海岸地形の変動の予測については，基本的な考え方，またある種の力学モデルについて考察したというところであり，山地から海岸に至るまでの土砂流出過程の力学機構の究明，さらにそれに基づく予測法の具体化という面では，ようやく問題の緒口にとりかかったという段階であり，今後の研究にまつところが大きい．

なお，自然環境の変化を，ここでは地形的な問題に限定しているけれども，土砂収支の変化によって生物がどのように変化し，それによって，われわれの生活，社会条件がどう展開するかというところまで，深く追究していかねばならない．この課題に多くの若い研究者が関心を寄せ，その解明に取り組まれることを期待している．