

地形・地質の痕跡に基づく谷底侵食低地形成過程の考察及び極値流量とその発生年代の推定

A consideration on the process of erosional valley-floor formation and estimation of the extreme river discharge and the date on geomorphological and geological traces.

涌井 正樹¹・福岡 捷二²
Masaki WAKUI, Shoji FUKUOKA,

¹正会員 工修 株式会社キタック (〒950-0965 新潟県新潟市中央区新光町10番地2)

²フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

We attempt to estimate the maximum flood discharge (extreme discharge) that have occurred within the recent epoch (that is, within approximately the last 10,000 years) based on geomorphological and geological traces of rivers that flow through erosional valley-floor.

We focused on terraced landforms formed through the action of rivers flowing along erosional valley-floor and assumed the terraces along the valley floor to be erosion traces formed during a flooding event.

In this paper, we used radioactive carbon dating to date the sediment of flood deposits on the terrace surface, and estimate the extreme river discharge and the process of erosional valley-floor formation. In addition, we verified the validity for discharge per unit drainage of extreme discharge in contradistinction to Creager curve.

Key Words : extreme discharge, erosional valley-floor, Creager curve, radioactive carbon dating, the process of erosional valley-floor formation

1. 序論

平成27年8月に社会資本整備審議会より「水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し減災に取り組む社会へ～答申」¹⁾が公表され、地球温暖化により激化する水災害に対処するため、社会全体が想定最大外力に対しても施策を総動員して減災対策に取り組むことなどが示された。

現在、この想定最大外力の設定は、平成27年7月に公表された「浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法」により行われている。それは、過去100年程度の降雨量観測データに基づき、欧米の計画規模も参考にして、年超過確率1/1,000の降雨量から想定し得る最大規模の洪水流量を設定するものである。

本研究は、想定し得る最大規模の洪水流量を現在よりも平均気温が2℃程度高い時期（約6,000年前の縄文海進）を含む現世（完新世）における既往最大洪水流量（極値流量と称する）から推定するものである。

前報^{2),3)}では栃木県の余笹川において、下流の谷底侵

食低地では、高位、中位、低位の段丘面、旧河道地形を確認し、上流の谷底堆積低地では複数の洪水氾濫堆積物で構成されていることが分かった。それら地形・地質の特徴に河道形成無次元流量と無次元河幅に関する福岡の式⁴⁾や堆積物の無次元限界掃流力の関係を適用し、極値流量を得ている。

本報では、各段丘面や旧河道箇所、代表的な氾濫堆積物を対象に堆積物の年代測定を行い、堆積物の層序を地質学的、河川工学的解釈を加えながら考察し、過去の大規模洪水の発生年代を推定し、旧河道や段丘の形成年代を基に谷底侵食低地の形成過程を考察する。また、極値流量を全国の比流量包絡曲線と対比する。

2. 前報までの結論

本研究に関する前報^{2),3)}までの結論は次の通りである。

- (a) 1998年に観測史上最大の降雨により大規模な被害をもたらした一級河川那珂川水系余笹川の谷底侵食低地において、古い地図や空中写真を活用しながら、

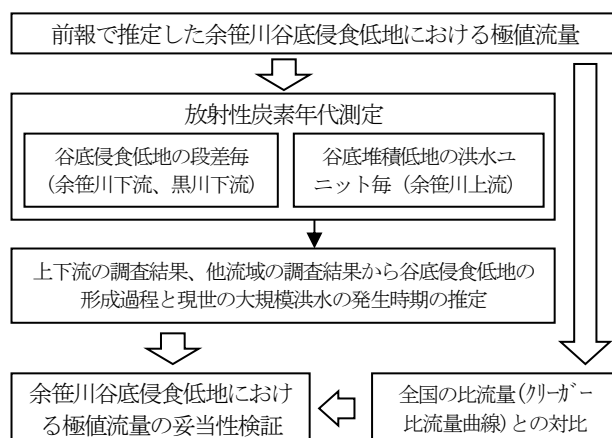


図-1 本業務の検討の流れ

微地形調査や検土杖による地質調査など簡易な道具で現地を詳細に調査することにより、河川地形の成り立ちや極値流量を知ることの可能性を示した。

- (b) 海水準変動や地殻変動の影響が少ない谷底侵食低地に形成されている横断方向の段差は、上段と下段で土質が不連続な場合、過去の大規模洪水の侵食作用により形成された段差であることを示した。
- (c) 大規模洪水時に流路湾曲部をショートカットする流れとなる箇所では、福岡の式⁴⁾の河幅を侵食幅として無次元化することにより、無次元流量との関係を福岡の式で説明できることを示した。
- (d) 高位の段差の河幅（侵食幅）を無次元化した無次元河幅から福岡の式を用いて極値流量を推定した。その結果、余笹川下流域（C.A=127km²）の極値流量は、平成10年洪水ピーク流量 $Q_0=1,740\text{m}^3/\text{s}$ の2～2.2倍の $Q=3,600\sim 3,900\text{m}^3/\text{s}$ （比流量換算値で $q=26\sim 31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）であると推察した。
- (e) この値は、余笹川中流域の堆積卓越区間における氾濫堆積物の堆積環境から推定した過去の洪水規模の推定値（比流量で $q=28\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）、及び余笹川に隣接する黒川の谷底侵食低地における極値流量の推定値（比流量で $q=22\sim 29\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ）との比較において、確からしい値であると判断した。

3. 本報の検討内容及び検討手順

前報で極値流量を推定した谷底低地において、主要な堆積物を対象に放射性炭素年代測定法で堆積時期を調べ、谷底侵食低地の形成過程と極値流量の発生時期を推定する。また、余笹川の極値流量の比流量をクリーガー比流量曲線と対比する。これらより、余笹川谷底侵食低地における極値流量の妥当性を改めて検証した（図-1参照）。

(1) 放射性炭素年代測定方法と測定箇所の選定

a) 放射性炭素年代測定の測定方法

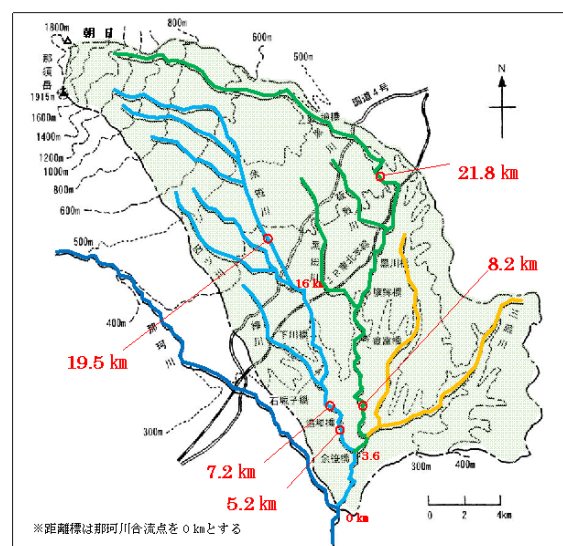


図-2 C14法を実施した箇所

表-1 C14法の調査地点及び目的

河川名・測点	地形種	目的
余笹川 5.2k	谷底侵食低地	段差ごとの堆積年代
余笹川 7.2k	谷底侵食低地	段差ごとの堆積年代
余笹川 19.5k	谷底堆積低地	洪水氾濫堆積物の堆積年代
黒川 8.2k	谷底侵食低地	高位面の谷底堆積物の年代
黒川 21.8k	谷底侵食低地	高位面の谷底堆積物の年代

検土杖で調査した表層1～2mの深さにある堆積土砂の堆積年代を把握するために、検土杖で採取した試料を用いて放射性炭素年代測定（C14法）を行うこととした。

C14法は、加速器で炭素14を直接数える加速器質量分析（AMS）法を採用し、¹⁴C-AMS専用装置（NEC社製）を使用し、¹⁴Cの計数、¹³C濃度（¹³C/¹²C）、¹⁴C濃度（¹⁴C/¹²C）の測定を行った。測定では、米国国立標準局（NIST）から提供されたシュウ酸（HOx II）を標準試料とした。この標準試料とバックグラウンド試料の測定も同時に実施した。

b) 放射性炭素年代測定の測定箇所の選定

前報で極値流量を推定した断面において、主要な地層の試料を採取し、年代測定を行い、堆積物の層序を地質学的、河川工学的解釈を加えながら考察し、谷底低地の形成過程を明らかにする。試料の採取箇所は、図-2、表-1に示す箇所である。

年代測定を実施した箇所は、特徴的な断面として余笹川の5.2km、7.2km、19.5km地点とした。5.2kmと7.2km地点は侵食卓越区間、19.5kmは堆積卓越区間である。黒川は高位段丘面の谷底堆積物の年代把握を目的として8.2k、21.8kで実施した。調査箇所の断面図を図-3～7に示す。

侵食卓越区間では、高さの異なる段丘面で検土杖を実施し、貫入不能となる砂礫盤の直上の土砂（試料）を採取した。一方、堆積の卓越する区間では、上方へ行くに従い粗粒から細粒に変化する洪水氾濫堆積物の洪水ユニットの中で最大規模の洪水と推定された⑤ユニットとその上部の④ユニットから土砂（試料）を採取した（図-5参照）。採取した土砂は水洗いと篩分けし、その中から有機物を抽出したのち炭素年代測定を実施した。

余笹川 5. 2k : 1998年(平成10)洪水の側方侵食幅大
 ➤ 地質が不連続な段差: 上下段で堆積年代異なる
 ➤ 堆積物年代: 高位段差5,500年前, 低位段差600年前、旧河道内3,200年前

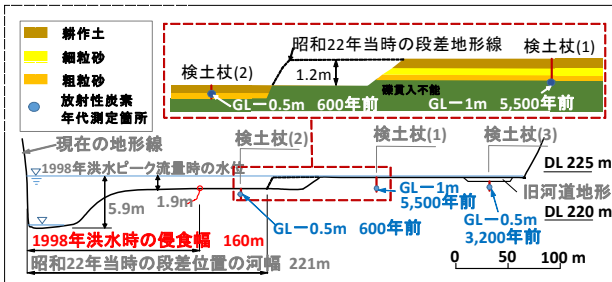


図-3 余笹川5. 2kの地質横断面図及びC14法調査結果

余笹川 7. 2k : 1段目段差は連続、2段目段差は不連続
 ➤ 高位の段差上面にのみローム層確認
 ➤ 中位の段差の堆積物年代: 3,200年前

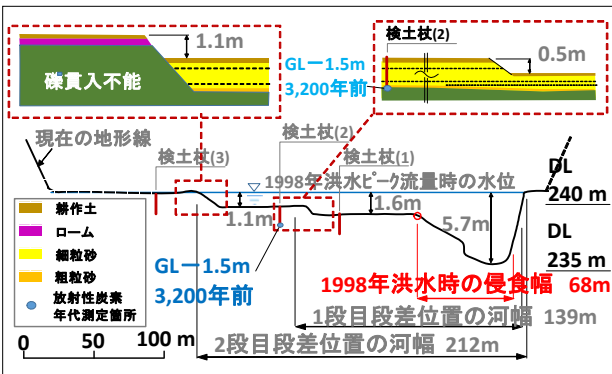


図-4 余笹川7. 2kの地質横断面図及びC14法調査結果

余笹川 19. 5k : 洪水氾濫堆積物から過去5つの洪水を確認
 ➤ 最も深部の最大規模の洪水氾濫堆積物 ⑤の堆積年代 3,400~3,800年前
 ➤ その上位の洪水氾濫堆積物 ④の堆積年代 670年前

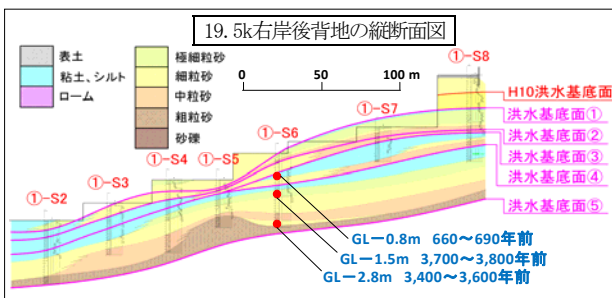


図-5 余笹川19. 5kの地質縦断面図及びC14法調査結果

(2) 全国の比流量との対比

黒川合流点より上流の余笹川の流域面積は、 $A=127\text{km}^2$ 程度と河川としては小規模である。比較的小流域面積の比流量図には、ダムの計画に用いる比流量包絡線がある。比流量包絡線は流域面積が変数となっており、それ以外の多くの影響要素（気象、水文、地形、地質、地被など）をすべて含んだ係数 C がパラメータとなっている。

黒川 8. 2k : 1998年(平成10)洪水の側方侵食幅大
 ➤ 現在の流路から最も離れた位置の谷底堆積物の年代 6,000年前

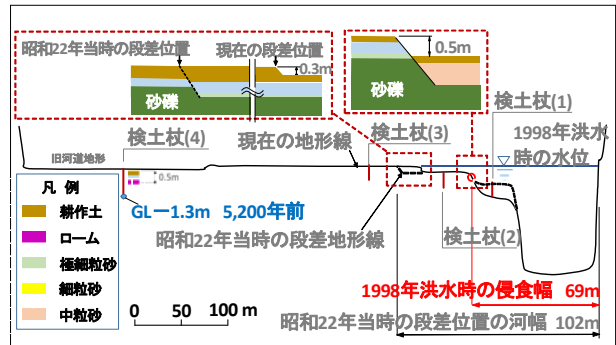


図-6 黒川8. 2kの地質横断面図及びC14法調査結果

黒川 21. 8k :
 ➤ 現在の流路から最も離れた位置の谷底堆積物の年代 5,500年前

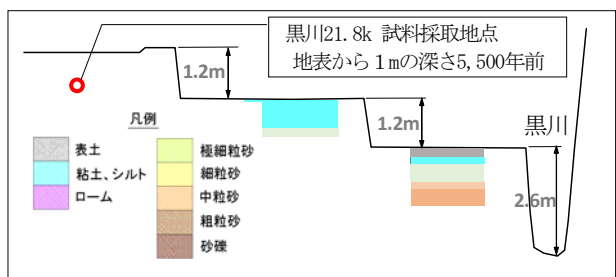


図-7 黒川21. 8kの地質横断面図及びC14法調査結果

諸外国の資料では、同一の気候区または地方区に対して地勢と気象状態は大きく変動するものではなく、比流量図は流域面積を変数としてかなりまとまった群となることが認められている。これらの包絡線は経験的に地域最大規模として取り扱うことの有効性が知られている。

本報で用いる比流量包絡線は、1977年に河川管理施設等構造令及び同令施行規則の運用で、建設省局長通達の地域別比流量図として示されたクリーガー（Creager）比流量曲線とする。前報において算出された極値流量の比流量をこのクリーガー比流量曲線にプロットし、全国の比流量と対比する。

4. 調査結果

(1) C14法の測定結果

図-2、表-1の調査箇所におけるC14法の測定結果を表-2、図-3~7に示す。

表-2の着色は、余笹川の上流と下流、余笹川と黒川の異なる場所において、同一時期の堆積物と判断された箇所を同一色で表したものである。ここで、余笹川19.5kの地表から1.5mと2.8mの2試料は採取深度1.5mほどで年

表-2 余笹川および黒川の年代測定の結果一覧

河川名、測点	試料採取地点	堆積年代
余笹川 5.2k	高位段丘の地表から1m	5,500～5,600年前
余笹川 5.2k	低位段丘の地表から0.5m	560～670年前
余笹川 5.2k	旧河道内の地表から0.5m	3,200～3,300年前
余笹川 7.2k	中位段丘の地表から1.5m	3,100～3,200年前
余笹川 19.5k	地表から0.8mの洪水④	660～690年前
余笹川 19.5k	地表から1.5mの洪水⑤	3,700～3,800年前
余笹川 19.5k	地表から2.8mの洪水⑤	3,400～3,600年前
黒川 8.2k	高位段丘の地表から1.3m	5,900～6,100年前
黒川 21.8k	高位段丘の地表から1.0m	5,500～5,600年前

表-3 余笹川流域の極値流量の推定結果および比流量

		位置	流域面積 (km ²)	平成10年 洪水ピーク 流量Q ₀ (m ³ /s)	極値流量 Q (m ³ /s)	Q/Q ₀	極値流量 の比流量 (m ³ /s/km ²)
余笹川	谷底侵食低地	5.2k	127	1,740	3,900	2.2	31
		8.2k	127	1,740	3,600	2.0	28
	谷底堆積低地	19.5k	38	400	1,080	2.7	28
黒川	谷底侵食低地	7.2k	98	810	2,800	3.5	29
		8.2k	98	810	2,200	2.7	22
		16.5k	91	750	2,300	3.1	25

代に違いを生じた。これは、試料を検土杖で採取したため、異なる年代の有機物が混入する可能性を完全には排除できなかったためと考えられる。今回の調査方法では、この程度の年代は誤差の範囲と判断することとした。

(2) クリーガー比流量曲線との対比

前報の極値流量（比流量）推定結果を表-3に示し、その値をクリーガー比流量曲線にプロットした結果を図-8に示す。

4. 考察

(1) 余笹川における谷底低地形成過程と洪水発生年代

a) 余笹川5.2km地点

当該地点は、余笹川の侵食卓越区間であり、谷底低地には上下流方向へ連続する高さ約1.2mの明瞭な段差が形成され、2段の平坦な段丘面が形成されている。また、高位の段丘面には幅20m程度の僅かに窪んだ地形があり、旧河道であると判断される。そして、これら3つの地形を形成した地質の年代は、図-3、表-2に示すような値が得られた。

地質学的解釈と放射性炭素年代測定結果より、以下のような地形の成り立ちを考察できる。

- 1) 高位の段丘面(余笹川の谷底低地)が形成されたのは5,500～5,600年前である。ただし、この年代の河道がどの位置にあったかは不明である。
- 2) 旧河道位置に最後に土砂が堆積したのは3,200～3,300年前である。この年代に大規模洪水があり、

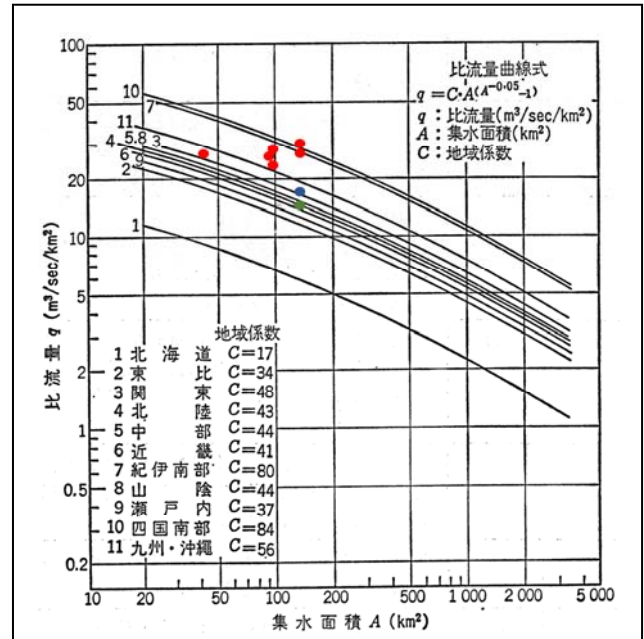


図-8 地域別比流量図（クリーガー曲線）

赤丸：本研究で求めた極値流量の比流量

青丸：関東の比流量曲線での当該地点（余笹川下流）の比流量

緑丸：1998年洪水ピーク流量の比流量

旧河道位置まで氾濫土砂が到達した可能性がある。

- 3) 低位の段丘面において560～670年前の堆積物が確認された。低位段丘は現在の余笹川に向かって段差が形成されていることから、この時代、河道は現在の位置に固定されていたと考えられる。

b) 余笹川7.2km地点

当該地点は、余笹川の侵食卓越区間であり、谷底低地には上下流方向へ連続する高さ約1.1mと高さ0.5mの明瞭な段差が2段形成され、3段の平坦な段丘面が形成されている。これらの地形を形成した地質の年代は、図-4、表-2に示すような値が得られている（低位の段丘面には採取できる土砂が少なく、年代測定は実施していない）。

地質学的解釈と放射性炭素年代測定結果より、以下のような地形の成り立ちを考察できる。

- 1) 中位の段丘面(余笹川の谷底低地)が大きく侵食されたのは3,100～3,200年前である。中位段丘は現在の余笹川に向かって段差が形成されていることから、この時代、河道は現在の位置に固定されていたと考えられる。
- 2) 低位の段丘面は、河道が現在の位置に固定されてからのものであるが、最後に大きく侵食された年代については不明である（堆積物がないため）。

c) 余笹川19.5km地点

当該地点は、余笹川の堆積卓越区間であり、後背地には過去の氾濫堆積物が厚く堆積している。そして、この氾濫堆積物は上方細粒化を示す5つのユニットに区分することができることから、過去に5回の大規模洪水が発生した証拠と判断される。これらユニットを形成した地

質の年代は、図-5、表-2に示すような値が得られている（層厚が薄いもしくは、粒度が粗い土砂の年代測定は実施していない）。

地質学的解釈と放射性炭素年代測定結果より、以下のような地形の成り立ちを考察できる。

- 1) 当該地で最も層厚が厚く、粗粒な土砂を堆積した洪水⑤の年代は3,400～3,600年前もしくは、3,700～3,800年前である。
- 2) 洪水④の年代は、660～690年前である。
- 3) 洪水①～③の年代は、層厚が薄く、かつ細粒分が少ないため、年代は不明である。

(2) 余笹川、黒川の谷底低地形成過程の考察

余笹川の5.2km地点における高位の段丘面、黒川の8.2km地点及び21.8km地点における高位段丘面から得られた5,500～6,100年前という年代は、余笹川及び黒川の谷底低地から得られた14C法の年代の中で最も古い年代を示す。これらはすべて侵食の卓越する区間で得られたものであり、谷底平野の原型はこの時代に形成されたものと考えられる。那須岳の山麓を流域とする2つの河川において、谷底平野の形成が5,500～6,100年前というほぼ同じ年代まで遡れるという事実は、河川の形成史にとって非常に興味深い事実である。

余笹川の5.2km地点における旧河道から得られた3,200～3,300年前という年代は、大規模な洪水により旧河道位置（僅かな凹地）まで氾濫土砂が到達し堆積した時期を示していると考えられる。この土砂は耕作土の下0.3～0.6mで採取したものであり、3,200～3,300年前以降、旧河道位置まで氾濫土砂は到達していないことになる。一方、余笹川の7.2km地点における中位の段丘面からは、3,100～3,200年前という値が得られており、大規模な洪水により中位の段丘面を形成するような侵食が起きた時期を示していると考えられる。5.2km地点における旧河道位置に土砂が堆積した年代（3,200～3,300年前）と、7.2km地点における侵食が起きた年代（3,100～3,200年前）は、ほぼ同年代であり、3,100～3,300年前頃に大規模な洪水があった可能性が考えられる。

余笹川の19.5km地点では、当該洪水の氾濫堆積物の年代が直接得られている。確認された堆積物の中で最も規模が大きいと推定される洪水⑤が発生した年代（堆積した年代）は3,400～3,800年前であり、5.2km地点の旧河道内に堆積した年代（3,200～3,300年前）、7.2km地点における中位の段丘面が形成された年代（3,100～3,300年前）とほぼ同年代であり、3,300～3,400年前頃に極値流量を示す大規模な洪水があった可能性が考えられる。

また、洪水④の年代が660～690年前というのは、5.2km地点の低位段丘が形成された年代（560～670年前）とほぼ同年代であり、660～670年前頃に大規模な洪水があったと考えられる。

以上を整理すると、余笹川及び黒川の形成過程は以下

の通りとなる。

①5,500～6,100年前

余笹川及び黒川の谷底低地で遡ることのできる最古の年代。谷底低地の原型が形成された時代と考えられる。谷底平野の高位段丘の形成された年代であり、洪水に関する間接的証拠ではない。

②3,300～3,400年前

余笹川の侵食卓越区間では中位段丘を形成し、堆積卓越区間では極めて多量の氾濫堆積物を堆積させた洪水が発生した時代。侵食地形、堆積した土砂から推定して、5,500～6,100から現在までの間で最も規模の大きい洪水（極値流量）が発生した時代と考えられる。

③660～670年前

余笹川の侵食卓越区間で低位段丘を形成し、堆積卓越区間では比較的多量の氾濫堆積物を堆積させた時代。侵食地形、堆積した土砂から推定して、余笹川において②の洪水の次に規模の大きな洪水が発生した時代と考えられる。

図-9は、これらの形成過程を模式図として表したものである。今回確認できた余笹川の谷底侵食低地における最古の堆積物の年代である5,500～6,100年前から現在に至るまでの谷底侵食低地の段差地形と堆積層序の形成過程を表している。

(2) 余笹川における洪水発生年代の考察

図-8より、余笹川の推定極値流量の比流量は、紀伊南部、四国南部の曲線付近にプロットされた。栃木県は関東地域に区分されることから、地域別比流量では $17\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 程度となり、推定極値流量はその約1.6倍に相当することとなる。

余笹川の推定極値流量の比流量 $q \approx 28\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ の値は、クリーガー比流量曲線における南西日本の比流量に相当し、現世における過去の気候変動を踏まえると我が国で起こり得た洪水規模であると判断した。また、今後の地球温暖化に伴う気候変動を踏まえると同規模の事象は起こり得ると判断した。

5. 結論

前報において谷底侵食低地を流れる余笹川の地形・地質の痕跡から現世（完新世）における既往最大洪水流量（極値流量）を推定した。その発生時期をC14法で測定した結果、及び極値流量をクリーガー比流量曲線で対比した結果より以下の結論が得られた。

- 1) 余笹川及び黒川の谷底低地の原型が形成されたのは今から5,500～6,100年前であると考えられる。
- 2) 余笹川下流域で推定した極値流量は1998年（平成10）洪水ピーク流量の2～2.2倍であり、比流量で $q=26\sim31\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ である。その発生時期は、侵食卓

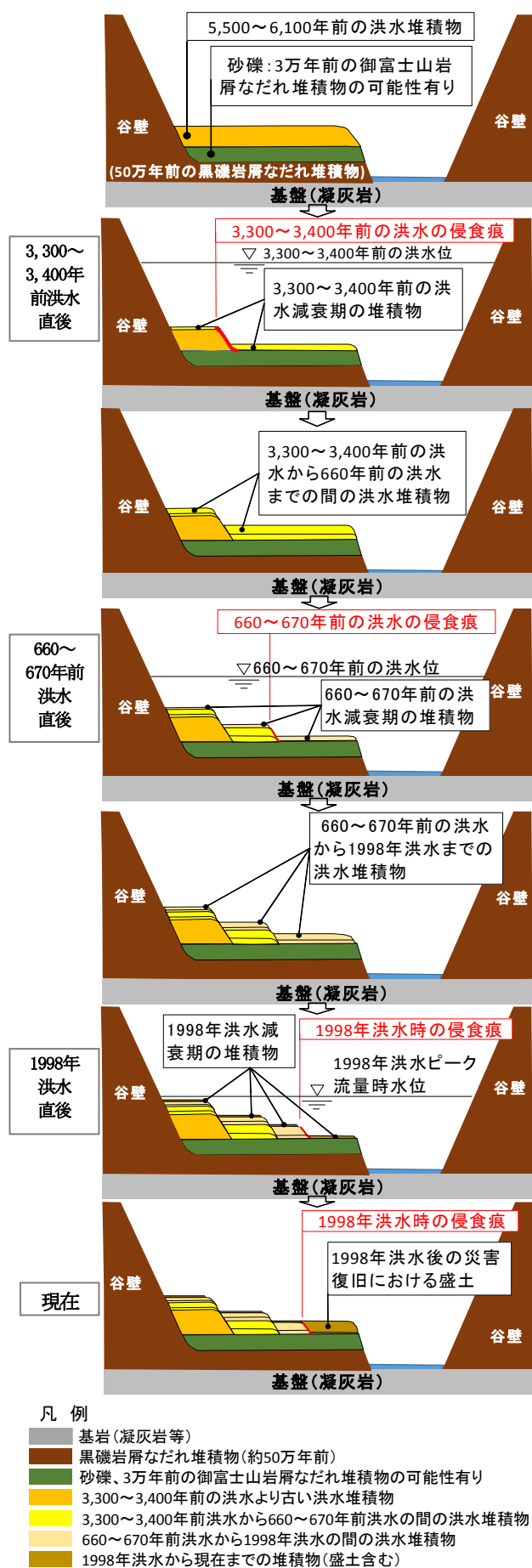


図-9 余笹川谷底侵食低地形成過程模式図

越区間における段丘形成年代、及び堆積卓越区間における氾濫堆積物の堆積年代をC14法より測定した結果より、3,300～3,400年前頃と推定された。

- また、今から660～670年前には、侵食地形、堆積した土砂から推定して、余笹川で極値流量に次ぐ比較的規模の大きい洪水が発生した時代と考えられる。
- 本研究で推定した極値流量は、縄文海進以降に発生したものであり、現在よりも気温が2℃程度高かった時期に発生した可能性がある。一方、今世紀の終わりには地球温暖化の影響で平均気温が現在よりも2℃程度上昇することも予測されている⁵⁾。余笹川の極値流量の比流量 $q \approx 28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ の値は、クリーガー比流量曲線との対比より、我が国の南西日本の比流量に相当する値であり、我が国で起こり得た洪水規模であること、また今後の地球温暖化に伴う気候変動を踏まえると起こり得る事象であると判断した。

6. おわりに

昨年8月に岩手県に上陸した「平成28年台風第10号」では、岩泉町の小本川において谷底低地に立地していた高齢者グループホームの入所者が氾濫流により亡くなる痛ましい災害が発生した。谷底低地は谷底幅いっぱいに流れる大規模洪水が発生した場合、洪水からの避難が困難な地形条件であり、早めの避難が必要となる。その上でも、本研究のように谷底部の地形・地質状況から過去の大規模洪水の規模(極値流量)を把握しておくことは減災・防災対策を考える上で特に重要となる。

今後は、谷底平野の地形・地質状況を詳細に調査することによる極値流量推定の試みを他の河川でも行い、その手法を汎用性のある確かなものとしていきたい。

参考文献

- 社会資本整備審議会: 水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～答申, 2015.
- 涌井正樹, 福岡捷二, 佐藤豊, 江川千洋, 味方圭哉: 河川が形成した谷底低地の微地形とその河川地形学的意味に関する考察, 河川技術シンポジウム, 第21巻, pp.437-442, 2015.
- 涌井正樹, 福岡捷二, 佐藤豊, 江川千洋, 味方圭哉: 谷底平野の地形・地質の痕跡に基づく極値流量の推定, 河川技術シンポジウム, 第22巻, pp.25-30, 2016.
- 福岡捷二: 治水と環境の調和した治水適応策としての河幅、断面形の検討方法, 河川技術シンポジウム, 第16巻, pp.5-10, 2010.
- 気候変動に関する政府間パネル: IPCC第5次評価報告書, 2014

(2017. 4. 3受付)