多摩川における礫の円磨度について

中山正民*

1. 緒言 河川に堆積する砂礫は、河水の破壊作用によつて生じ、それが種々の運搬過程を経て現在の場所に堆積しているものである。従つてその形態、円磨度等は破壊されて礫となつてから現在の堆積地点に至る迄の、或る歴史、環境等を暗示しているものである。そこでこの礫の形態や円磨度を数量的に表わし、河川の勾配、流量、距離等との関係を明らかにすれば、砂礫の運搬状態を知ることが出来、更に磨滅の程度等を推測することになる。また更に礫層の礫の円磨度より、堆積当時の河川の状態を知る一方便になるかも知れない。筆者は今挙げたような目的で、この研究を行つた。礫の円磨度を実際の河川、海浜等で調査したものは数多くある⁽¹⁾。しかしこれらの研究は、大きさ、形態等礫の他の諸性質を調査した時一緒に測つたものが多く、礫経も限られており、分布の理由等については、深く掘り下げられていない。従つてこのような研究から、運搬状態を知るとは困難である。筆者はかくの如き意味において、研究河川を多摩川にとり、調査範囲を拡大し、種々の大きさにわたつて測定を行い、また種々な環境との関係について考察を行つた。

本研究を行うに当つて、石川教授からはいろいろ御懇篤なる御指導を賜り、実際の調査には延江正昭、関谷雅臣両君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する次第である。なお本研究費は文部省科学研究費によるものである。

2. 円磨度の表現方法及び測定個數に関する実験 円磨度の表現方法に関しては幾多の研究が発表されている⁽²⁾。これらのうち現在最もよく使用されている方法は、H. Wadell⁽³⁾の方法である。この方法は角ごとの曲率半径 ri 、礫の最大内接円の半径 R 、角の数 N を測定して求めるもので、これによれば

$$p = \frac{\sum \left(\frac{ri}{R} \right)^2}{N} = \frac{\sum ri^2}{NR}$$

で表わされる。従つて円礫は 1.0 に近くなり、角礫は 0.0 に近くなる。この方法は礫の投影図さえできれば、以後の操作は比較的簡単であるが、細長い礫は一般に数値が大きくなり、また円磨度が 1.0~0.0 という簡便に

* 東京教育大学理学部地理学教室

あるため、細かい差が明瞭に出ない欠点をもつ。筆者はアメリカで測定したデータとの比較、及び測定方法の簡易なることより、この方法をとつた。円磨度を求める場合には、礫の3方向の投影図をつくり、その各々を測定して平均し、それを1つの礫の値とすれば最も理想的である。しかし実際には此様な方法は中々大変であるので、最大面の投影のみで済ませた。

実際に礫の投影を行う場合には次の如き方法をとつた。即ち現地で適当な数の礫を最大面を向けて並べ、それを写真撮影する。筆者は「コニカ」にアタッチメントをつけて撮影を行つたが、満足すべき結果が得られた。この原画を引伸機にかけて、礫の直径4~6cm位に引伸し、これを測定した。

円磨度を測定するに必要な礫の個数については研究されたものはない。今迄になされた論文を見ると100~200個とか、50個とか記述してあるに過ぎない。しかし精密な測定を進める場合には、一応きちんとした個数と、それに対する信頼限界を決めて置く必要がある。測定に用いた礫は、多摩川の青梅で採集した径32~16mmのGraywackeの礫である。青梅は多摩川の上流と下流との境にあたり、その河床は上流から運搬されて可成り円くなつた礫や、附近の谷壁から混入した角礫などから成立つてゐる。従つてここで礫の円磨度の測定個数をきめておけば、より簡単な上流部や下流部ではこれより少ない個数でよいわけである。これら採集した礫を写真に撮り、円磨度を求めた。この円磨度を50個、100個、150個、200個、250個、300個と集計して、その平均値、標準偏差、95%の信頼限界等を表にしたものが、第1表である。

第1表 円磨度の平均値、標準偏差

Number of gravels 礫の個数	Average roundness 平均値	Standard deviation 標準偏差	Confidence interval (a=0.05)95% の信頼限界
50	0.542	0.147	± 0.042
100	0.531	0.140	± 0.028
150	0.553	0.141	± 0.022
200	0.538	0.140	± 0.020
250	0.536	0.144	± 0.018
300	0.533	0.120	± 0.014

この表より
平均値や標準偏差は、50個、100個、150個、200個、250個、300個と殆んど変化がみられない。しかし信頼限界を考えると、

50個では±0.04となり、大体0.1位の範囲は誤差と考えられるから、円磨度の変化を知る場合には不適當である。従つて誤差を±0.02とすれば、

それに対応する最も個数の少ない数は150個である。即ち多摩川においては、150個位の礫を測定すれば ± 0.02 位の信頼限界が得られることが分つた。

3. 測定方法及び測定地域概観 多摩川において測定を行つた地域は、

Fig 1. Observation Stations

氷川の上流約2kmの小留浦から、二子玉川に至る約60kmの地域である。この60kmの範囲に、第1図に示す如く、約5kmの間隔で12箇所を設けた。各測点

では主流路に沿つて、その地点附近で礫の大きさの最も代表的地域を選び、篩を使用して64~32mm, 32~16mm, 16~8mmの各階級に分けた。この篩分を行つた礫の中から graywacke 150個内外をより分け、この種の礫のみについて測定を行つた。測定に graywacke を使用した理由は、緻密で堅く、花崗岩等の深成岩のように16mm前後で各鉱物粒に分解することもなく⁽⁴⁾、勾配、流量、距離等の関係を考察するに最も都合よいと考えたからである。その上多摩川河床に存在する礫は、上下流を通じて70%位はこの礫であるので、必要個数を容易に集めることができる。このように選んだ礫のうち、64~32mm, 32~16mm, 16~8mmの3階級は現地では撮影したが、残りの8~4mmは研究室に持帰つて、極近接撮影を行つた。調査地域のうち、小留浦から青梅までは、秩父系及び中生代鳥の巣統の砂岩、頁岩、石灰岩等の分布する地域で、川はここを峡谷をなして流れる⁽⁵⁾。従つてこの地域の砂岩層のところでは、運搬礫以外に、両岸から多数の砂岩屑の混入が見られる。青梅より下流拝島附近迄は、川は武蔵野台地と加佐、草花両丘陵との間を流れる。この区間は河幅も相当に広いから、両岸の段丘から礫が混入しても、影響は少ない。また拝島附近では秋川が、日野附近では浅川が合流する。両河川とも上流に砂岩層の分布する地域があり、合流点附近でも多量の graywacke の礫がみられる。しかし合流点よりかなり離れた日野及び中河原では、その後の混同によつて影響は少ないと考

えられる。

4. 円磨度と運搬距離との関係 運搬距離と各階級別の円磨度との関係を図示すれば第2図の如くなる。全般的に小留浦から青梅までの円磨度は、必ずしも運搬距離の函

数となつておらず、32~16mmの円三郎、16~8mmの白丸の如く、上流の測点より却つて円磨度が小さいものがある。前述の如く、この区間では、多摩川は秩父系及び中生代鳥の巣統の地層を切つて流れる。従つて両岸から測定に使用したと同種の graywacke の角礫が多量に混入することが考えられる。上流地域で円磨度が急激に変化するの、このような角礫が上流から運搬されてきた礫に混合するためと思われる。ま

た粒径によつて円磨度の急変する地点が異なっているのは、岩石の joint の発達状態が地域によつて異なり、その大小によつて割れ方に変化を生ずる結果であろう。なお円三郎、二俣尾の8~4mmの値が、下流の諸地点よりも大きいことについては、今回の調査では明かにすることはできなかった。これについては今後の研究で明かにしたい。

青梅から下流では前述の如く、段丘礫や秋川、浅川等の支流の礫の流入による影響は少ないと考えられるから、礫が磨滅しながら堆積していつた過程と見做すことができる。此様に考えると、64~32mm、32~16mmの礫は日野と中河原の間で、16~8mmは矢野口と稻田多摩川で、8~4mmの礫は稻田多摩川と二子玉川で円磨度が急激に増加することがわかる。

従来の研究によれば、円磨度は最初は急激に増加するが、ある値まで達すると、その後は殆んど変化しないといわれている。(6) また Sarmiento(7)

Fig 2. Change of roundness with distance from Kotozura

の実験でも、円磨度の増加は最初の2~3kmで、それ以上は円磨度は殆んど増加しない。しかし多磨川の中流以下では、礫の円磨度は漸増的傾向を示さず、ところどころで急激に増加している。この場合、円磨度の急変点は、粒径の大なるものほど上流で、小なるもの程下流になつている。

礫の円磨度を増加させる因子は、運搬距離の増加以外に、勾配の減小による摩擦力の増加、流量の変化、摩擦物質としての砂礫の組成の変化などが考えられる。大塚弥之助、谷津栄寿⁽⁸⁾、及び筆者⁽⁹⁾の研究によると、多磨川の日野附近から二子玉川附近までは、砂礫の組成及び礫径は非常に僅かながら漸減しており、急変する場所はない。また流量も浅川の合流による増加が考えられるが、中河原と日野の間の64~32mm, 32~16mmの説明はできても、下流の地点における16~8mm, 8~4mmの円磨度の増加を説明することはできない。これらの点より考えて勾配の減小による摩擦力の増加を考えるのが、最もよいように思う。今仮りにある階級の礫全体が転動によつて動くとする、勾配の変化する地点から下流では、粒径の大なるものは、転動形態をとることができず、滑動形態をとるようになるであろう。この運搬形態の変化によつて、礫の摩擦は急激に増加すると考えられる。此の如き場合には、礫の円磨度の変化は、まず上流で粒径の大きなものが変化し、下流に行くに従つて粒径の小なるものに及ぶことになる。

第2表 各測点における勾配
Gradient at each observation station

Observation Station 測点	Gradient 勾配
Kotozura	6.3×10^{-3}
Shiromaru	8.7×10^{-3}
Tanzaburō	7.7×10^{-3}
Futamatao	7.1×10^{-3}
Ōme	4.8×10^{-3}
Fussa	4.6×10^{-3}
Haijima	5.3×10^{-3}
Hino	4.0×10^{-3}
Nakagawara	3.4×10^{-3}
Yanokuchi	3.3×10^{-3}
Inada Tamagawa	2.1×10^{-3}
Futako Tamagawa	1.7×10^{-3}

5万分の1, 2万5千分の1の地形図をもとにして、測定地域の全縦断面図を書き、これをもとにして、測点より上流3~4kmの勾配を求めると第2表のごとくなる。第2表より二俣尾、青梅間、日野、中河原間、矢野口、稻田多磨川間は勾配の変遷点であることがわかる。従つて円磨度の急増地点と河川の勾配の変遷点とはほぼ一致している。ただこの場合、勾配の急減する二俣尾、青梅間で礫の円磨度の増加が64~32mm以外はあらわれていない。これは測定を行つた礫の粒径が64~4mmという範囲であるので、青梅より上

流でも下流でも殆んど同じ状態で運搬される結果、勾配の減少によつても円磨度は急増しないものと思われる。従つて此の如き勾配の変化による円磨度の急増は、64mm 以上の礫においてあらわれるのであらう。また勾配の減少の僅かな稲子多摩川、二子玉川間で8~4mmの円磨度が急増する。二子玉川附近の河況を見ると、二子橋附近を境として上流と下流とでは全く異なっている。上流側は河原が広く、礫の堆積も多いのに対し、下流側は河巾が狭く、礫の堆積も少ない。大塚弥之助、谷津栄寿⁽¹⁰⁾の研究によつても、大体この附近を境として礫が急変している。以上のことにより、上流より運搬されてきた砂礫は二子玉川附近で堆積する結果、粒径の小さな礫もより大きな河床の抵抗を受け、磨滅が増大するものと考えられる。

5. 礫の粒径と円磨度との関係 1地点の礫の粒径と円磨度との間には密接な関係があり、一般に粒径の大なるもの程、円磨度は大になると云われている⁽¹¹⁾。今各測点で半対数グラフに、粒径を対数にとつて円磨度との

Fig. 3 Pelation between average roundness (ordinate) and grain size (abscissa)

関係をみると第3図のごとくなる。青梅より上流の測点では、円磨度は小さく且つ粒径と円磨度との関係は不規則である。特に円三郎、二俣尾では粒径の大なるもの程、円磨度は小となつており、一般に云われているものとは逆の関係がみられる。このように粒径と円磨度との関係が、不規則であつたり、逆であつたりするのは、各測点で卓越する角礫が岩石の joint の発達状態によつて、粒径が異なるためであらう。青梅より下流では、従来報告されている如く、粒径の小なるもの程、円磨度が小となる傾向がある。青梅、福生、拝島、日野では $64\sim 32\text{mm}$ 、 $32\sim 16\text{mm}$ 、 $16\sim 8\text{mm}$ の3階級の円磨度は殆んど同じ値を示すが、 $8\sim 4\text{mm}$ 円磨度は非常に値が低くなつている。また中河原、矢野口では $64\sim 32\text{mm}$ 、 $32\sim 16\text{mm}$ の円磨度は殆んど同じ位であり、 $16\sim 8\text{mm}$ は上の2階級よりやや低く、 $8\sim 4\text{mm}$ の円磨度は急激に低下している。稲田多摩川では $64\sim 32\text{mm}$ 、 $32\sim 16\text{mm}$ 、 $16\sim 8\text{mm}$ の3階級は殆んど同じであるが $8\sim 4\text{mm}$ の値は急減している。測定地点の最下流の二子玉子川では $8\sim 4\text{mm}$ の値が増加し、それ以上の階級の円磨度との差をちぎめている。このように粒径と円磨度とが正比例的でなく、ある粒径で急変しているのは、いかなる理由によるのであろうか。

Sarmiento⁽¹²⁾によれば $128\sim 16\text{mm}$ の角礫を、 $128\sim 64$ 、 $64\sim 32$ 、 $32\sim 16\text{mm}$ の3階級に分け、それぞれについて円磨度の変化をみた実験では、最初の $2\sim 3\text{km}$ では粒径と円磨度とは、あまり明確な関係がないが、それ以上運搬された場合は、直線的に粒径が小なるもの程、円磨度は小となり、途中の急減はみられない。また同じ階級の礫を細かく階級区分せず、円磨度の変化を調べた実験では、大礫と小礫との円磨度の差異は、殆んどみられない。従つてこの2種類の実験から、各測点で粒径が異なつても円磨度が殆んど同じ場合には、上流からその測点まで同時に運搬されたことを示し、またある粒径のみ円磨度が異なる場合は、その粒径が他の粒径とは別の方法で運搬されたといえる。以上のことより、青梅より稲田多摩川までの地点で $8\sim 4\text{mm}$ の礫の円磨度が急減することは、この区間で、他の $64\sim 8\text{mm}$ の礫とは全然異なつた方法で運搬されたものと考えられる。

或る断面を流下する粒子が、その大きさによつて運動の形態が異なることについては、古くから水理学で云われているのである。特に Gilbert は砂礫の大きさによつて、Sliding, Rolling, Saltation, Suspension の4つの運搬型があることを述べた⁽¹³⁾。この中 Saltation と Suspension との境界については、野満隆治、山下幸三郎⁽¹⁴⁾が砂の円磨度が急変する部分より、 $0.3\sim 0.15\text{mm}$ または $0.15\sim 0.05\text{mm}$ 附近としている。しかし、その他の境界がどの辺にあるかは、未だ明かでない。延江正昭⁽¹⁵⁾は理論的に勾配

が0、運搬物体を球とした場合、Saltation と rolling の境界を約2mmと
している。また実際の河川の中流以下では勾配は0に近いとしても、礫は
球でないから、摩擦は大となり、この値は2~4mm程度大となると云つて
いる。以上のことから青梅より稲田多摩川に至る各測点の8~4mmの円
磨度の減少は、より以上の階級が rolling または sliding で運搬されるに
対し、この階級あたりで saltation になることを示すものと考えられる。

6. 結論 以上を要約すると次の如くである。

(1) 円磨度、扁平度などを測定する場合の礫の個数は、非常に多くの階
級にわたっている場所で、150個位で相当な信頼限界が得られる。従つて
目測で階級がととのつていると思われる場所では、これ以下で充分間に合
う。

(2) 礫の円磨度は必ずしも距離の函数とはなっていない。上流地域で、
谷壁からの角礫が上流からの運搬礫と混合する場合は、円磨度が急激に変
化する。この場合粒径によって急変する場所が異なるのは、joint によつ
て岩石の割れ方が変化するためである。

(3) 礫供給地域より下流でも、円磨度は殆んど変化を示さないのではな
く、途中で急激に増加する。この変化する場所は粒径の大きなもの程上流
にあらわれ、小さくなるにつれて下流に移動する。これは勾配の変化によ
る摩擦力の増加によるものと思われる。

(4) 粒径と円磨度との関係は、何処でも $y = mx^n$ (y は円磨度, x は粒
径, n は係数, m は常数) では表わされない。上流の岩石混入地域では、粒
径と円磨度との関係はばらついたり、上記の関係式と全く逆の関係があら
われる。また青梅より稲田多摩川に至る各測点では、8~4mmの円磨度が
急に減少する。これは Saltation と rolling または sliding との境界を示す
ものであろう。

(1954年7月16日受理)

参 考 文 献

1. Pettijohn, F. J. (1949) ; Sedimentary Rocks.
2. Krumbein, W. C. and Pettijohn, F. J. (1938) ; Manual of Sedimentary Petrography. Caillifux. A (1952) ; Marphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie, Geol. Rund. Bd. 40, S. 11—19.
3. Wadell, H. (1935) ; Volume, shape and roundness of quartz particles, Jour. Geol. vol. 43, pp. 250—280.
4. 谷津榮寿, 中山正民, 井口正男, 高野繁 (1952) : 渡良瀬川の運搬物質について 地理学評論 第25巻 182—192 頁.
5. 藤本治義 (1953) ; 日本地質誌 関東地方.
6. Krumbein, W. C. (1940) ; Flood gravels of San Gabriel Canyon, California, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 51, pp. 639

—676. 7. Pettijohn, F. J. (1949); *ibid* 1. 8. 大塚弥之助, 谷津榮寿 (1949); 多摩川の堆積物に関する研究 地質学雑誌 第54巻 41—43頁. 9. 中山正民 (1952); 河川礫の大きさの分布に関する研究 地理学評論 第25巻 401—403頁. 10. 大塚弥之助, 谷津榮寿 (1949); *ibid* (7). 11. Pettijohn, F. J. (1949); *ibid* 1. 12. Pettijohn, F. J. (1949); *ibid* 1. 13. 富田芳郎 (1933); 水蝕作用に於ける砂礫について 大塚地理学論文集 (1) 175—193頁. 14. 野満隆治, 山下幸三郎 (1947); 砂粒角稜度表現法並びに河砂の粒径と角稜度との関係 地球物理 第8巻 73—87頁. 15. 延江正昭 (1953); 河の合流について 東京教育大学卒業論文未発表.

ROUNDNESS OF PEBBLES OF THE TAMA RIVER, KANTO DISTRICT.

Masami NAKAYAMA*

There have been made public many papers on the roundness of gravel, but no work has so far been done on various sizes of gravels over a long distance in field. However, in order to make clear the relations between roundness and transportation agency it is necessary to investigate these factors. The purpose of this paper is to clarify the change in roundness of various sizes of pebbles over a distance and the relations between roundness and size in particular stations.

The investigation was made in the river-bed of the Tama River extending over about 60km. from Hikawa to Futako-Tamagawa and 12 sampling stations were selected there. The method of measuring is as follows: First samples are divided into four classes, those of 64~, 32~, 16~, and 8~mm. in diameter respectively, and next, about 150 graywacke pebbles of each class were photographed and then the roundness was measured by the method developed by Wadell. The results are as follow:

(1) The number of pebbles necessary for measuring mean roundness was determined in the following way. At Ōme, where the frequency of roundness seems to be most complex, the relations among number and mean roundness and confidence interval were elucidated (Tab. 1). The table shows that the smallest number with small confidence interval is approximately 150.

(2) The roundness of pebbles is not always the function of transported distance as shown in fig. 2. Where the detritus from valley walls are mixed with transported gravels in the upper reaches, the roundness decreases abruptly. The location where the roundness suddenly decreases is different according to pebble size. For the size of detrital materials differs according to the density of crack or joint spacing which differs as the outcropping locality differs.

* Tokyo Kōyiku University.

(3) In the lower reaches there are locations where the roundness of pebbles increases abruptly. The location where the roundness increases abruptly lies in comparatively upper stream in case of larger pebbles and in comparatively lower reaches in case of smaller pebbles. It is probable that larger pebbles change first the mode of their downward shifting by decrease of the gradient of river course and friction acts on them earlier than it does on smaller pebbles.

(4) The relation between size and roundness is not always expressed as $y=mx^n$, where y is roundness, x is size, n is a coefficient, and m is a constant as shown in fig. 3. In the upper reaches where the detritus from the valley walls are mixed with river gravels, no relation like this can be found or the converse relation is observed. At each sampling station in the river-bed from Ōme to Futako-Tamagawa, roundness of pebbles of 8~4mm. in size is remarkably lower than that of larger pebbles. This fact suggests that pebbles of a size of 8~4mm. are transported by saltation, while the larger pebbles by rolling or sliding in the reaches above-mentioned.