

古墳に関する工学的視点からの考察（風雨侵食について）*

A Study on the Ancient Tomb from the Engineering Viewpoint
(The Erosion caused by the Wind and the Rain)

木村真也**, 田中邦熙***

By Shinya KIMURA, Kunihiro TANAKA

要旨：古墳とは3～7世紀に築かれた「古代の墓」であり、土木技術の原点が数多く認められる。本研究はこれらに関して工学的視点から検討を加えるものであり、本報告では風雨による侵食について取りまとめた。

古墳は土を高く盛って築かれたが、千数百年を経ていることを考えたとき、この間の風雨侵食により特にその高さが大きく変化したと考えられる。このことは現存する古墳の後円部等の直径 D と高さ H との関係を整理した結果、 $H(m) \approx 0.13D + 1.0 \pm 4.0(m)$ と表わされるように、同じ D でも H は $\pm 4.0m$ の大きなバラツキがあることから明らかである。一方この風雨侵食量を推定するために行った風雨侵食実験結果から、盛土斜面から流出する土砂量を求め、この結果を整理して、古代の古墳高さを推定する手法を提案した。この手法は全国各地で数多く行なわれている古墳の修復復元に当り、その高さ等を設定するときなどの参考とされることが期待される。

1. まえがき

現存する古墳の高さは平面的に同程度の規模のものであっても平均値 $\pm 4.0m$ 程度の大きなバラツキがある。この原因は古墳は土を高く盛った盛土であり、築造から千数百年経ていることを考えたとき、この間の風雨などの侵食により著しく変化したと考えられることも一因であろう。

本報告では古墳の高さに関して、次の2項目に関する検討を行った結果をとりまとめた。

① 既存データを用いて、特に古墳が群在する千葉・茨木・埼玉・群馬、岐阜、奈良・大阪、岡山・香川、福岡・宮崎の11府県ごとに古墳の後円部等の直径 $D(m)$ と高さ $H(m)$ との関係を整理図示し、地域性や分布、バラツキ状態に関し、どのような傾向があるか検討した結果を考察とりまとめた。

② 幅 $0.83m$ 、長さ $1.78m$ 、深さ $0.30m$ の木製土槽を作成し、その中に今回は細砂と粗砂の2種類の土砂を締固め程度（湿潤密度 γ_t ）を2通りに変化させて締固め、土槽勾配および風速又は降雨強度を変化させて、侵食（流出）土砂量等を測定した。この侵食実験結果を考察して、Ellison の、雨滴による土粒子の地盤からの剥離量推定式に用いられている補正係数 K に土砂の

種類や斜面勾配による影響を加味する修正補正係数を用いることにより、侵食土砂量を推定する手法を提案した。

2. 古墳の形状寸法に関する過去の研究

古墳の形状寸法などに関し、上田は前方後円墳のような複雑な形態を有する古墳は、その墳形の特徴を示す計測点が数多く存在するので、築造企画の変異を研究することが可能であるとして、先駆的な業績を上げてきた。すなわち後円部直径を整数6としたとき、古墳各部の長さも整数値をとることを見出し、主軸上における後円部直径と後方部の後部長および前部長の三連比により古墳の形式分類を行った。¹⁾ そして古代オリエントに由来する60進法あるいは12進法による影響を想定し、後円部の直径を6単位とする設計が行われた可能性があると延べている。²⁾ そしてこのような方法論に基づいた研究成果を文献3)にとりまとめている。これらは小沢による研究成果として文献4)～5)などにも発表された。一方沼沢はこの考え方を円墳にも適用して、「円墳に用いられている築造企画は前方後円墳の後円部の築造企画を抜き出して踏襲したものであり、また基本単位は墳丘直径の $1/24$ の長さである」との結論に達したとしている。^{6), 7)} ただし沼沢も述べているように、「地域によりこの築造企画の浸透度は異なっていた」のは、これらの企画に適合しない古墳も数多く存在することからも当然のことと考えられる。

*keyword：古墳の修復復元、風侵食、雨侵食

**学生会員 木更津工業高等専門学校 専攻科生

***正会員 博（工学）

木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 教授

(〒292-0041 木更津市清見台東 2-11-1)

また古墳時代に使用されていたと考えられている長さの単位には、尋・漢尺・晋尺・高麗尺・唐尺などがあり、同じ尺でも23～36cmの差がある⁸⁾とされているので、これらの使われた時代や地域を正しく特定して研究していく必要もあろう。

以上のように古墳の形状寸法に関しては、主として現存古墳の平面的な形状寸法を測定検討し、古代にあればの規模と均整のとれた美しい古墳が築造されたという事実が「古墳の築造企画（設計規準）が存在したのであることを示す」ことを実証しようとする研究方向のよう考えられる。しかし工学的視点から定量的に検討した研究成果は皆無と言える。

本研究は古墳の企画性を否定しようというものではない。このような研究を行うには、風雨侵食による古墳の変形などに関して工学的視点からの定量的データに基づく検討結果も加味していけば、より合理的な研究成果が得られるであろうことを期待してとりまとめたものである。古墳には築造企画の他に盛土施工法、石室築造法など工学的視点から検討すべき事項は数多くあるが、本報告では風雨侵食による古墳高さの変化に関する検討を行った結果にしばって報告する。

3. 文献調査による古墳寸法データに基づく解析

(1) 今回用いた資料

古墳の形状寸法に関する信頼できる定量データを明示した調査報告書などは非常に少ない。今回は「前方後円墳研究会」が全国の古墳発掘調査報告書などを整理集大成した下記資料を用いて解析を加えた。

「前方後円墳集大成」 編集 近藤義郎 山川出版社				
東北・関東編	1994.1	古墳データ数	約 3,500	
中部 編	1992.2	"	約 1,100	
近畿 編	1992.12	"	約 1,700	
中国・四国編	1991.2	"	約 1,300	
九州 編	1992.2	"	約 900	

(2) 解析データ

上述資料に示されたデータは発掘調査のグレードや古墳の重要性などにより、データの種類とその信頼性にかなり大きなバラツキが認められる。しかし改めて現地調査を行なうことも事実上不可能であるので、今回は上述資料に示された、前方後円墳の後円部直径Dとその高さHとを抽出して解析を行なった。なおデータ中には円墳の直径と高さおよび方墳の辺長と高さのデータも含む。

(3) データ整理結果

古墳は北海道と沖縄を除く日本全国に点在するが、今回は特に群在する千葉・茨木・埼玉・群馬、岐阜、奈良・大阪、岡山・香川、福岡・宮崎の11府県ごとに、DとHとの関係に注目して整理した結果を図-1(1)～(11)に示す。

図-1より以下のようなことが読み取れる。

① 古墳直径Dは奈良・大阪・岡山を除いてほぼ100m

以下であり、巨大古墳はこの3府県に集中している。

② HとDとの相関関係は図-1(1)～(11)を概観して、ほぼ次(1)式で示される。

$$H(m)=(0.10\sim 0.14)D+(0.8\sim 1.4) \quad (1)$$

③ (1)式による同一Dに対するHのバラツキはほぼ±4.0mとかなり大きい。

④ Hと最近の年間降水量との関係は、(1)式におけるDの係数と年間降水量とを検討しても、降水量が多い地方ほど係数が小さい即ちHが低いという傾向は明瞭でない。Hが低くなる原因は年間降水量の他にその地方の土質種類なども考えられるので、現存古墳高さと降雨侵食量とを直接結びつけることには無理がある。

4. 風雨侵食実験

(1) 実験土槽と土砂貯め

図-2, 3 参照

内法：幅0.83m、長さ1.76m、深さ0.30m

材料：木製 底面に水抜き孔あり

傾斜：土槽は図-2のように一辺をチェーンブロックにより釣り上げることににより、任意の勾配に固定できる。

防護：アングルをフレームとして組み立てて(3.60m×1.80m×1.80m)、スプリンクラーを固定したり、青シートで覆うのに用いた。

(2) 実験方法

A. 風侵食実験

a. 土砂・木更津高専敷地内より採取した

成田砂 細砂

・木更津高専近傍宅地造成工事現場より採取した 成田砂 粗砂

(土質試験結果は表-1中に示した)

b. 締固め 土槽内に上記土砂を厚さ10cm程度に投入し、人間が均一に10回又は30回ずつ踏み固め、この作業を3層繰り返して3層仕上げとした。出来上り厚は24cm程度であり、最後に上面を平坦に定規で均した。

c. 送風 図-2に示すように土槽は水平に設置したまま、強力送風機2台を風軸方向が土砂面に対して20°となるように固定して、風速を順次、弱→中→強の3ステップでそれぞれ30分間ずつ送風した。今回の風速は最強条件でも9.8m/secであった。

d. 防護 実験装置全体は上述フレームに青シートを張りつけて、自然風の影響を除去した。

e. 測定

・風速：土砂面にハンディ風速計を静置して計測。

・表面土砂侵食量：図-4に示したように、10cmメッシュで水糸を張り、交点からの鉛直距離をスケールアップした。

測定回数 初回+送風強度3ステップごと

=計4回

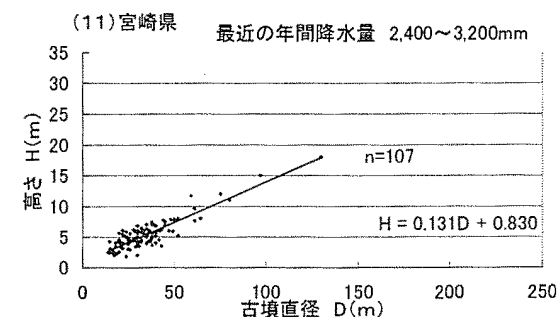
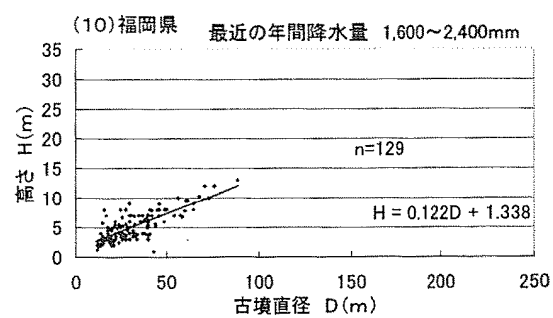
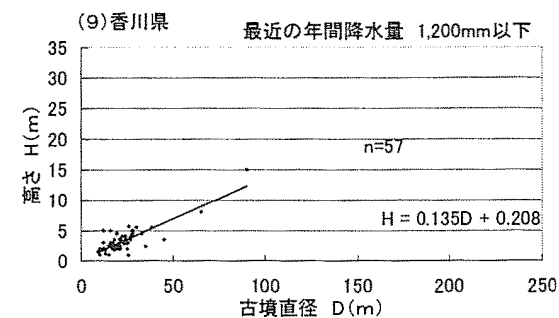
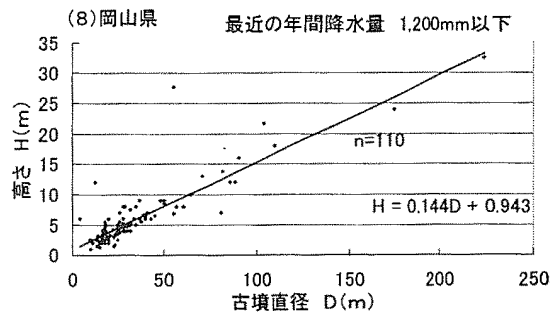
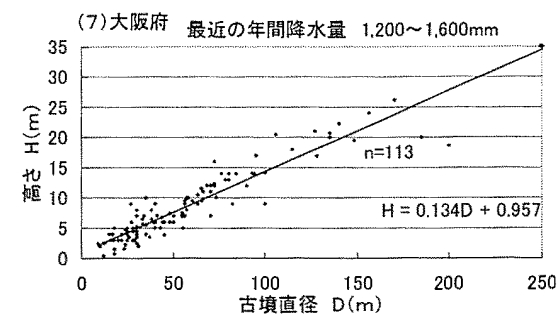
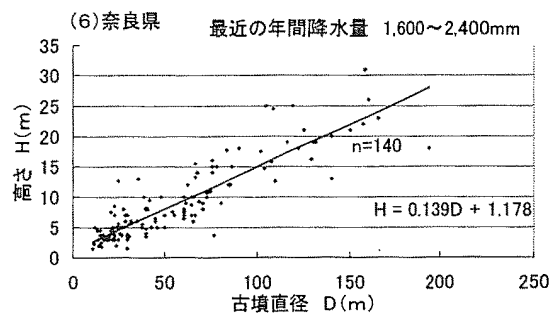
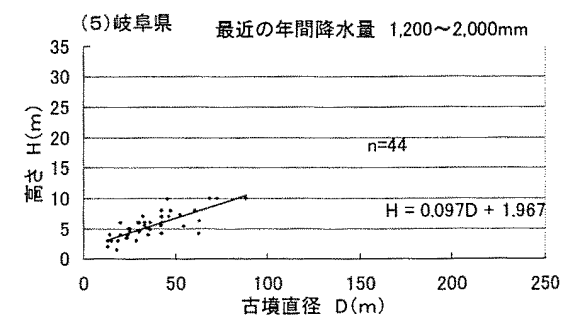
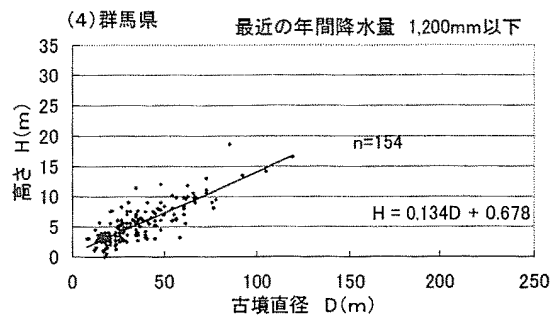
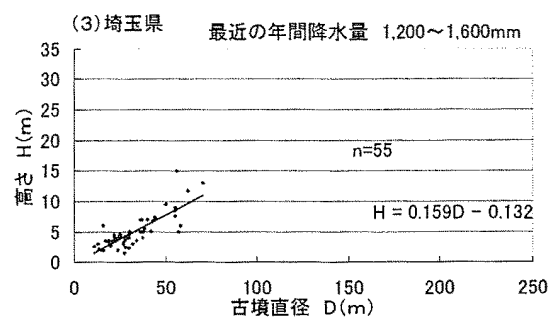
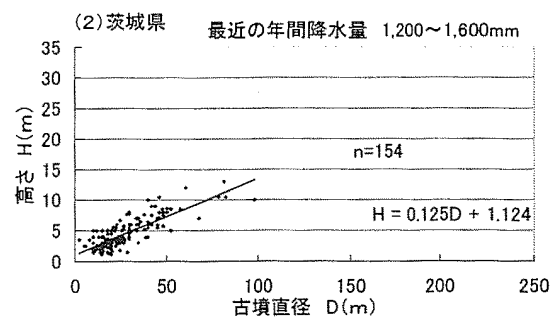
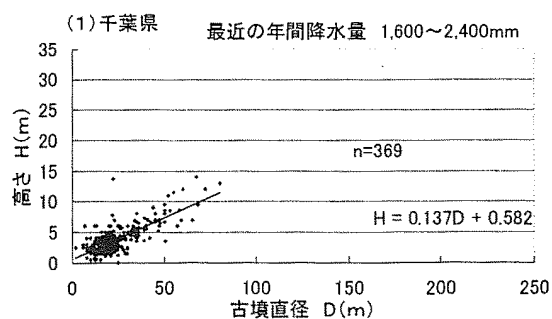
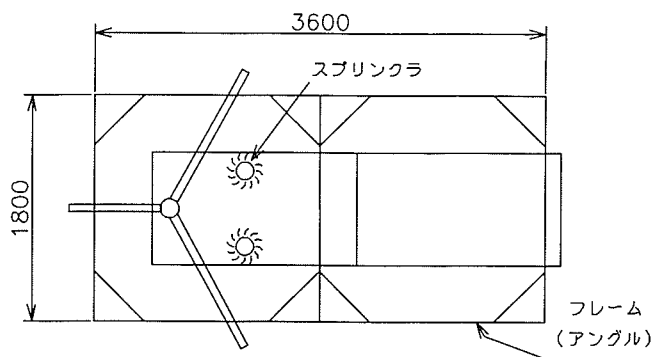
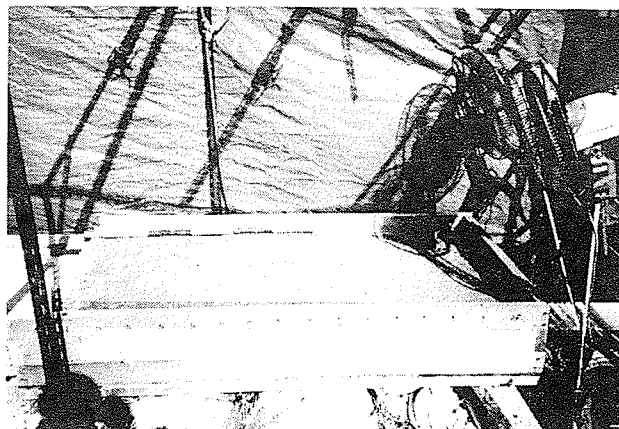


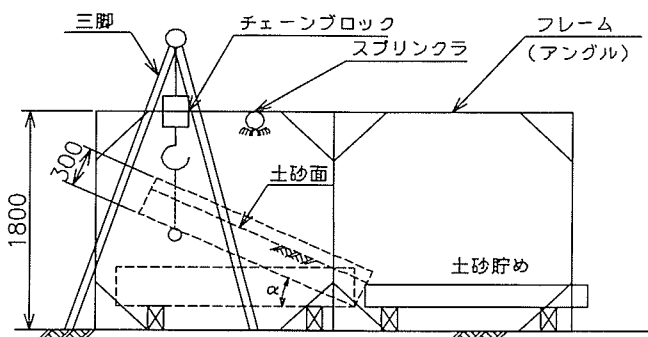
図-1 古墳群在府県ごとの古墳直径 D と高さ H との関係図



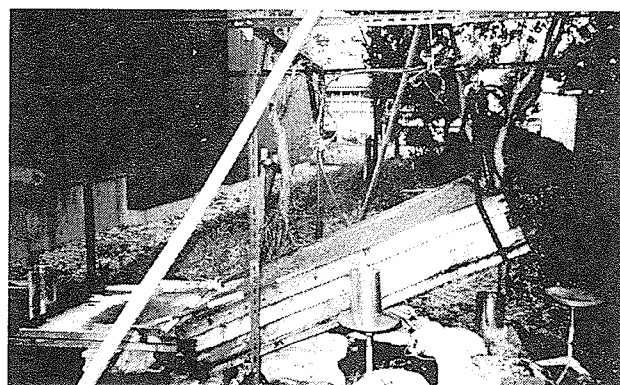
図－２ 侵食実験土槽概念図（作成：田中）



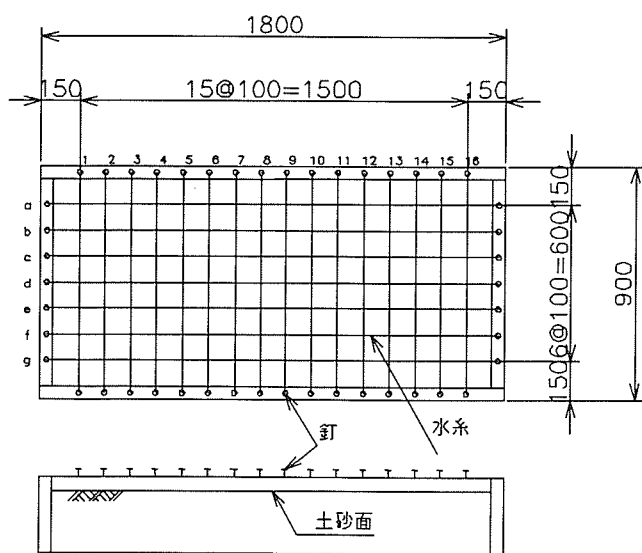
写真－１ 風侵食実験実施状況（撮影：田中、2001.11.7）



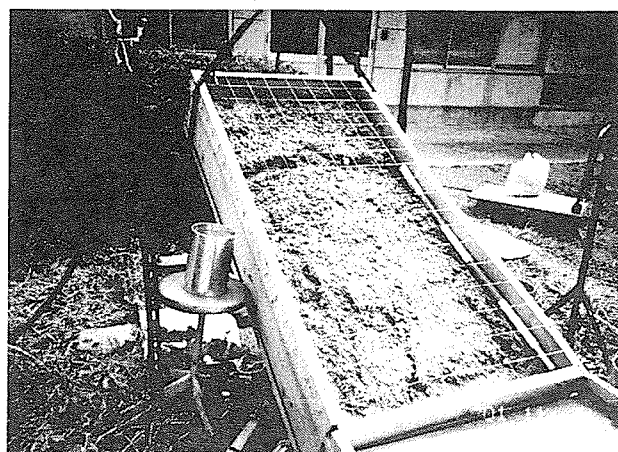
図－３ 雨侵食実験概念図（作成：田中）



写真－２ 雨侵食実験実施状況（撮影：田中、2001.10.27）



図－４ 土砂面侵食測定点（作成：田中）



写真－３ 雨侵食状況例（撮影：田中、2001.11.7）

- ・飛砂量：図－２に示したように土砂上面と同一高さに設置した土砂貯め板上に堆積した土砂を送風強度ステップごとに３回に分けて集めて、炉乾燥後乾土重量を求めた。

f. 実験回数

土砂２種類×締固め２種類＝４回

風侵食実験実施状況を写真－１に示す。

表-1 雨浸食実験結果一覧表

(作成：田中)

土質条件	計画降雨強度 P_p (mm/hr)			40			80			120		
	実測降雨強度 P_a (mm/hr)			42~49			86~95			132~147		
	雨滴径 D (mm)			1~2			2~3			3~4		
	雨滴速度 V (m/sec)			1.0~2.0			1.5~2.5			2.0~3.0		
	流出土砂			乾土重量 W_s (kgf /1.46m ² /hr)	乾土重量 累計 W_t (kgf /1.46m ² /hr)	単位面積 当り乾土重量 W_{su} (kgf /m ² /hr)	乾土重量 W_s (kgf /1.46m ² /hr)	乾土重量 累計 W_t (kgf /1.46m ² /hr)	単位面積 当り乾土重量 W_{su} (kgf /m ² /hr)	乾土重量 W_s (kgf /1.46m ² /hr)	乾土重量 累計 W_t (kgf /1.46m ² /hr)	単位面積 当り乾土重量 W_{su} (kgf /m ² /hr)
	転圧回数 N	湿潤密度 γ_t (gf/cm ³)	土槽傾斜角 θ °									
粗砂 レキ混り砂質細粒土 含水比 $W_n=15.2\%$ 均等係数 U_c $=D_{60}/D_{10}$ $=0.42/0.13=3.2$ コーン支持力 q_c $=0.3\sim0.5$ (kgf/cm ²)	10	1.85	15	30.2	30.2	20.7	5.3	35.5	24.3	11.5	47.0	32.2
			25	44.2	44.2	30.3	12.4	56.6	38.8	29.5	86.1	59.0
			35	80.6	80.6	55.2	23.9	104.5	71.6	37.4	141.9	97.2
	30	1.95	15	18.3	18.3	12.5	6.2	24.5	16.8	4.4	28.9	19.8
			25	32.3	32.3	22.1	4.6	36.9	25.3	4.9	41.8	28.6
			35	52.9	52.9	36.2	10.6	63.5	43.5	18.4	81.9	56.1
細砂 砂質細粒土 含水比 $W_n=19.5\%$ 均等係数 U_c $=D_{60}/D_{10}$ $=0.33/0.065=5.1$ コーン支持力 q_c $=3.0\sim4.0$ (kgf/cm ²)	10	1.95	15	7.2	7.2	4.9	0.2	7.4	5.1	4.3	11.7	8.0
			25	9.9	9.9	6.8	0.9	10.8	7.4	5.7	16.5	11.3
			35	12.0	12.0	8.2	1.1	13.1	9.0	7.5	20.6	14.1
	30	2.00	15	1.2	1.2	0.8	0.8	2.0	1.4	0.5	2.5	1.7
			25	3.2	3.2	2.2	0.0	3.2	2.2	1.5	4.7	3.2
			35	3.7	3.7	2.5	0.7	4.4	3.0	2.6	7.0	4.8

B. 雨浸食実験

- 土砂 風浸食実験と同じ
- 締固め 風浸食実験と同じ
- 試料の飽和と土槽傾斜 土槽を水平に置いた状態で、土砂表面に水面が現われるまで静かに注水しつづけ、30分経過後に図-3に示すように土槽をチェーンブロックで釣り上げて所定の勾配に固定した後に雨浸食実験に供した。
- 雨浸食実験条件
降雨：スプリンクラー 2ヶ（水道より給水）
降雨強度（計画）：40、80、120（mm/hr）
3ステップ（水道バルブ調整）
降雨時間：各ステップ1.0時間
土槽勾配：15°、25°、35° 3段階
- 測定
・降雨強度 土槽周辺4ヶ所に静置した雨水枴（φ

20cm、h=20cm、円筒ブリキ製容器）に溜った水の深さをスケールアップし、その平均値を用いた。

- ・土砂面侵食状況 風浸食実験の土砂面侵食量測定と同様、図-4に示したように10cmメッシュで張った水系の交点からの鉛直距離をスケールアップした。

測定回数 初回+降雨強度3ステップごと

＝計4回

- ・流出土砂量 風浸食実験の飛砂量測定法と同様、図-3に示すように傾斜した土槽の土砂最下面と同一高さに水平に設置した土砂溜め板上に堆積した土砂を降雨強度ステップごとに3回に分けて集めて、炉乾燥後乾土重量を求めた。

f. 実験回数

土砂2種類×締固め2種類×土槽勾配3種類

= 1 2 回（内 4 回は風侵食実験後の土砂上面を均して使用）

雨侵食実験実施状況を写真－2、土槽土砂面の雨侵食状況例を写真－3に示す。

(3) 実験結果

A. 風侵食実験結果

今回の実験条件では飛砂量はいずれの条件でも数 g 以下と非常に少なく、測定結果を整理図化できるデータは得られなかった。

B. 雨侵食実験結果

実験条件ごとの流出土砂乾土重量を中心に測定結果をとりまとめて、表－1に示す。

なお、今回用いた土砂の土質試験結果は表－1中に示したとおり、粗砂は三角座標分類ではレキ混り砂質細粒土で、自然含水比 $W_n=15.2\%$ 、均等係数 $U_c=D_{60}/D_{10}=0.42\text{mm}/0.13\text{mm}=3.2$ 、細砂は砂質細粒土で、 $W_n=19.5\%$ 、 $U_c=0.33/0.065=5.1$ であった。

また締固め回数 $N=10$ 回時の粗砂の湿潤密度 $\gamma_t=1.85(\text{gf}/\text{cm}^3)$ 、コーン支持力 $q_c=0.3\sim0.5(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 、細砂の $\gamma_t=1.95(\text{gf}/\text{cm}^3)$ 、 $q_c=3.0\sim4.0(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 程度であった。

粗砂と細砂の大きな違いは、細粒分含有量の差による粘着力であり、前者は完全な砂で雨滴により容易に侵食されるが、後者は粘着力を有しているために侵食され難い土質として選定したものである。

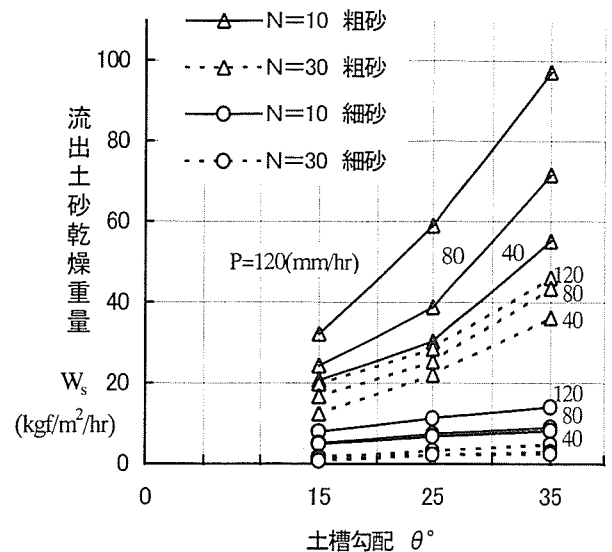
表－1に示した結果を図示すると図－5、6のようになる。これから次のようなことが読み取れる。

- ① 流出土砂乾燥重量 W_s は土槽勾配 θ および降雨強度 P の増加とともに増加するが、細砂ではその増加量は小さいのに対し、粗砂では大きく、 θ の増大とともに急激に指数関数的に増大する。
- ② 土槽勾配 $\theta=15^\circ$ を基準にしたときの 25° 、 35° 時における W_s の増加量、または降雨強度 $P=40(\text{mm}/\text{hr})$ を基準にしたときの 80 、 $120(\text{mm}/\text{hr})$ 時における W_s の増加量は、 15° あるいは $40(\text{mm}/\text{hr})$ 時ですでに土砂面からクイックサンド状にかなりの土砂が流出していて、それ以上の勾配や降雨強度時には流出土砂量が少なくなっていたと観察された。従って現実には実験データよりさらに多量の流出量があったのではと考えられる。即ちグラフの増加勾配はさらに急激であろうと判断された。

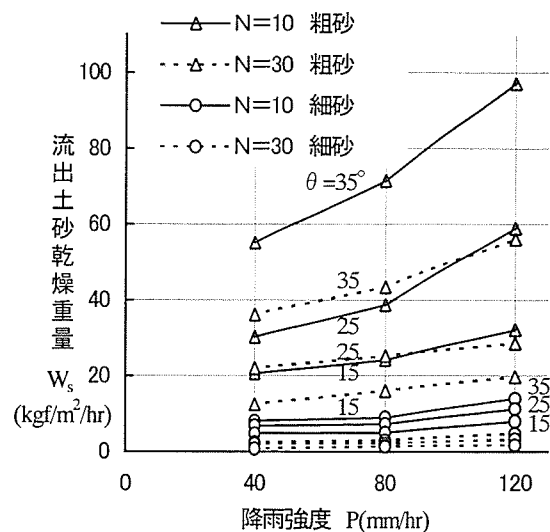
5. 考察

(1) 風侵食

風により地表の土砂が吹き飛ばされるには、地表が草木などの植生に被われておらずかつ、乾燥して粒子が分離独立状態になっていることが必要である。そして粒子の大きさや密度によって動き方が異なる。図－7は地表の土砂がどの位の風で動き始めるかを示したもので、直径 1mm の砂は風の摩擦速度（≒地上 1.0m での風速の $1/25$ ）が $45\text{cm}/\text{s}$ （風速約 $11.0\text{m}/\text{s}$ ）、直径 0.1mm の砂は $15\text{cm}/\text{s}$ （風速約 $9.0\text{m}/\text{s}$ ）で動き始めるこ



図－5 土槽勾配と流出土砂量との関係図（作成：田中）



図－6 降雨強度と流出土砂量との関係（作成：田中）

と、さらに細粒のシルトや粘土では砂よりもかえって動き難くなることを示している。またその動き方も、大きな砂粒や細砂は地上移行または転動（地表を転がる）し、風圧がさらに大きくなると跳躍する一方、 0.1mm より小さい細粒土では一度空中に飛び上がると浮遊し、砂ぼこり、黄砂などの状態となる。図－7は砂が最も動かされ易く、風の障害物の風下側に吹き寄せられ易いことを示している。⁹⁾

今回の実験結果は4.(3)で示したとおり、飛砂量は数 g 程度と非常に少なかった。粒径的には表－1に示したように粗砂・細砂ともに風により動き易い土砂に属すると考えられ、転動は認められたものの、土槽外まで移動するものは少なく飛砂量はわずかであった。この原因は今回の実験では最大風速が $9.6\text{m}/\text{sec}$ しか発生できなかったことも一因と考えられる。

従って現実の古墳では、今回の実験規模では確認できなかったが、長年月間にはかなりの土砂が風食され

たであろうとことを否定してしまうことはできないと考えられる。

(2) 雨侵食

地表侵食の過程は一般的に、雨滴による土粒子の地盤からの剥離と薄層流による土砂の剥離および輸送（層状一様侵食や流水によるリル・ガリのような雨裂状侵食を含む）とからなり、侵食土量の80%が前者、10～20%が後者である。また侵食に関与する降雨は、単なる積算量よりも、限界強度より強い雨の量と雨滴の衝撃力が支配的である¹⁰⁾。

土砂の剥離量に関し、Ellison は実験データから次(2)式を得た。¹⁰⁾

$$E = K \cdot \nu^{4.33} \cdot D^{1.07} \cdot P^{0.65} \quad (2)$$

ここに E: 30 分間の雨滴による飛散土量(g)、K: 土により定まる定数(補正係数)、 ν : 雨滴の落下速度(ft/sec)、D: 雨滴の直径(mm)、P: 限界降雨強度(in/hr)

(2)式を図示すると図-8 になる。E は ν に対して指数関数的に大きく増大すること、そして E は D や P に対しても比例的に増大するが、D や P は ν に比べてその影響度合は小さく、 ν が支配的であることが分る。

(2)式には斜面勾配 θ (≡ 雨滴衝突角度) や土の締固め度合の影響は含まれていないので、今回の実験結果と単純には比較できないが、表-1 に示した実測値を、 θ が大きいときは飛散土量≒流出土量と想定すると、両者の関係は次のようになる。なお降雨実験における雨滴の ν 、D は雨侵食実験をビデオ撮影した映像から推定した。

表-1、図5、6より $P_p=120(\text{mm/hr})$ 、 $\theta=35^\circ$ のときの実測降雨強度 $P_a=132\sim 147(\text{mm/hr})$ 、 $D=3\sim 4(\text{mm})$ 、 $\nu=2.0\sim 3.0(\text{m/sec})$ で、粗砂の場合 $W_s \approx 60\sim 100(\text{kgf/m}^2/\text{hr})$ である。この条件での(2)式による飛散土量 E は $K=0.1$ と仮定すると、図-8より $50(\text{kgf/30分})=100(\text{kgf/hr})$ となり、両者はほぼ合致する。

従って、雨侵食量は、(2)式による図-8を基本にして、図-4～5を参考に、土砂の種類・締固め条件・斜面傾斜角等による修正を K に加えれば精度よく推定できると考えられる。

次に水滴により土砂面がかく乱されない表面水の限界水深に関して、岩垣・土屋は(3)式を示した。¹⁰⁾

$$h_{cd}=275D^{1/2} \cdot d^{-1/8} \cdot \nu^{-3/4} \quad (3)$$

ここに h_{cd} : 限界水深(cm)、D: 水滴の直径(cm)、d: 砂の粒径(cm)、 ν : 水滴の落下速度(cm/sec)

(3)式を図示すると図-9 が得られ、 h_{cd} は D が大きいほど、d が小さいほど、 ν が小さいほど大きくなることが分る。ここで、図示した h_{cd} の最小値は $D=0.05\text{cm}$ 、 $d=0.2\text{cm}$ 、 $\nu=300(\text{cm/sec})$ としても、1.0cm 以上となり、このことは土砂面に表面水が水深 1.0cm 以上溜っていなければ、土砂面がかく乱されることを示している。換言すれば、濠雨時で斜面傾斜角がゆるい場合でも表面水水深は平均的に 1.0cm 以下となっている場合が多

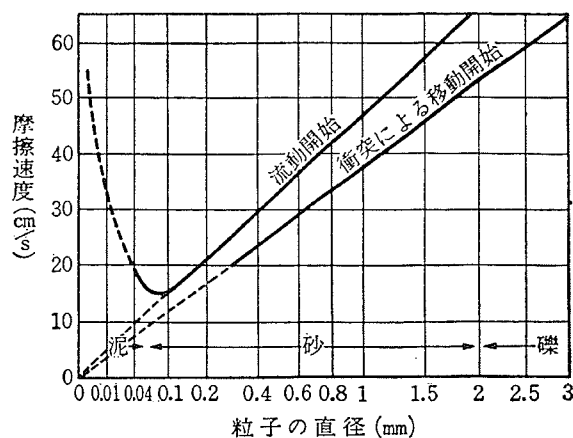


図-7 風による地表の粒子の動き始める風速
(原図:『飛砂と砂丘の理論』p.100, 1963) ⁹⁾

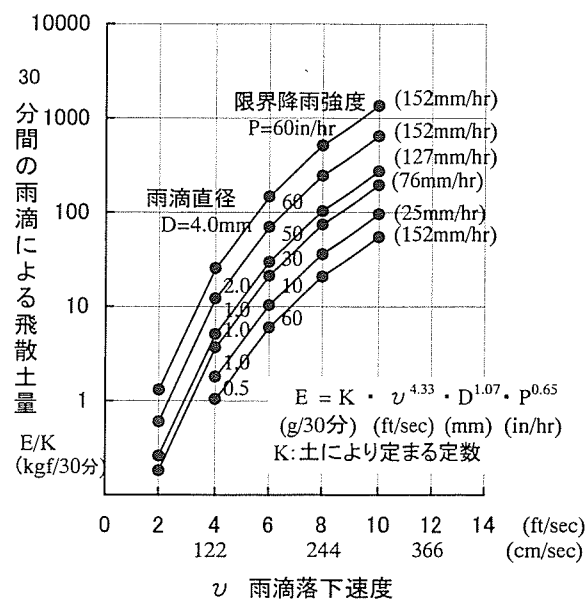


図-8 雨滴による飛散土量推定図(Ellison)(作成:田中)

いと考えられるので、土砂の種類・締固め条件により大きく差があるであろうが、土砂面は雨滴により容易にかく乱されることを示している。

今回の実験結果を示した図-5、6より粗砂の流出土砂量 W_s は、細砂のほぼ 10 倍である。一方図-9 は d が小さいほど h_{cd} が大きくなり、細砂の方が地表面がかく乱され易いことを示しているので、実験結果と逆のことを言っている。しかし実験時の表面水水深はほとんど 1.0mm 以下と観察されていたので、粗細砂とも雨滴衝撃を直接受ける状態であり、細粒土の場合粘着力 c が雨滴による侵食に対して大きな抵抗力を示した結果であろうと考えられる。

ここで図-9 に示す h_{cd} を越える降雨が限界降雨強度と考えられるが、土砂の耐水食強度は粘着力 c が大きく影響するので、この c の効果を検討することも必要と考えられる。

次に一様流れによる土砂の侵食量に関して考察する。上述のとおり一様流れによる土砂侵食は、土砂の剥離および輸送からなるが、両者合わせても、雨滴による剥離が80%程度であるのに対して10~20%である。

一様流れによる土砂剥離量に関して、岩垣・土屋は(4)式を示している。¹⁰⁾

$$\frac{q_{TD}}{U \cdot d_{50}} = 0.023 \left[\frac{U_*^2}{\{(\sigma/\rho) - 1\} g d_{50}} \right]^8 \quad (4)$$

ここに q_{TD} : 単位幅当り土砂の剥離量(cm^2/sec)、
 U : 流水の摩擦速度、等流の場合 $U_*^2 = g h I$ 、
 d_{50} : 土砂の中央粒径(cm)、 $\sigma/\rho (=G_s)$: 土砂の比重、
 g : 重力加速度(cm/sec^2)。実験条件：斜面長 3.5m、
 斜面勾配 $I=0.062 \sim 0.322$ 、単位幅流量 $4.4 \sim 16.2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 。

(4)式を図示すると図-10 が得られ、 q_{TD} は d_{50} が少し変化しただけで大きく変化し、 d_{50} が小さいほど指数関数的に増大することが分る。他の要因の I は急なほど、 h は高いほど、 G_s は小さいほど q_{TD} は大きくなるが d_{50} ほど影響力は大きくない。

いま図-10 を用いて、 $d_{50}=1 \sim 2 \text{ mm}$ に対し q_{TD} を求め、土砂剥離量を推定すると次のようになる。

$$q_{TD} = 0.023 \times (10^{10} \sim 10^{15}) \times 10^{-4} \times 1/350 \\ = 6.57 \times (10 \sim 10^6) (\text{cm}^2/\text{sec}/\text{m}^2)$$

$d_{50}=1.5 \text{ mm}$ 、乾燥密度 $\gamma_d=1.6 (\text{gf}/\text{cm}^3)$ とすると、流出土砂量は

$$W_s = 6.57 \times (10 \sim 10^6) \times 0.15 \times 1.6 \times 60 \times 60 \times 10^{-3} \\ = 5.68 \times (10 \sim 10^6) (\text{kgf}/\text{m}^2/\text{hr}) \quad (5)$$

すなわち W_s は d_{50} 、 I などにより 10^5 もの差も生じることを示していて、 d_{50} が小さいほど、 I が大きいほど W_s は増大することが分る。ただし一様流れによる土砂侵食量は、雨滴による剥離が $100 (\text{kgf}/\text{m}^2/\text{hr})$ 程度で、その10~20%であるから、(5)式において $(10 \sim 10^6)$ は現実的には生じないと判断しないと、今回の実験結果とも合致しない。

(3) 古代の古墳高さの推定

3. 4. で示したように現存古墳の高さは古墳築造時から大きく変化していることは間違いない。しかしそれを推定しようとしても多くの不明な点が存在し、現時点で多くの仮定を用いて変化量の推定法を提案することは早計すぎるであろう。しかしあえて以下に示すような手法を提案することにより、古墳研究に関する問題点を広く認識していただき、討議いただくことにより、少しでも古墳研究に科学的手法が導入されていくことを期待している。

4. 5. で示した実験・考察結果を次のように整理して、この条件のもとに古代の古墳高さを推定する手法を示す。

- ① 古墳の風侵食量はかなり小さいので無視する。
- ② 古墳の雨侵食量は地表侵食の80%を占める、雨滴による土粒子の地盤からの剥離量を推定する Ellison 式を基本に、今回の実験結果から得られた知見により、

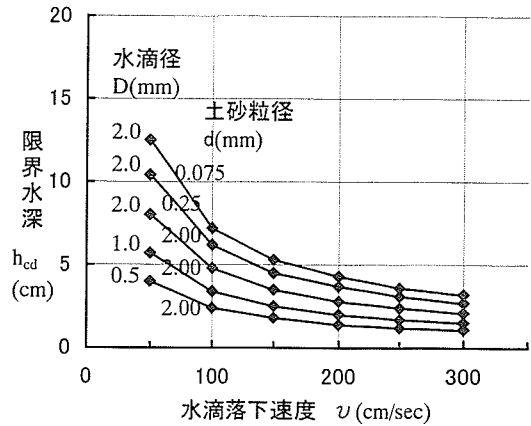


図-9 水滴落下速度と限界水深との関係図

(作成:田中)

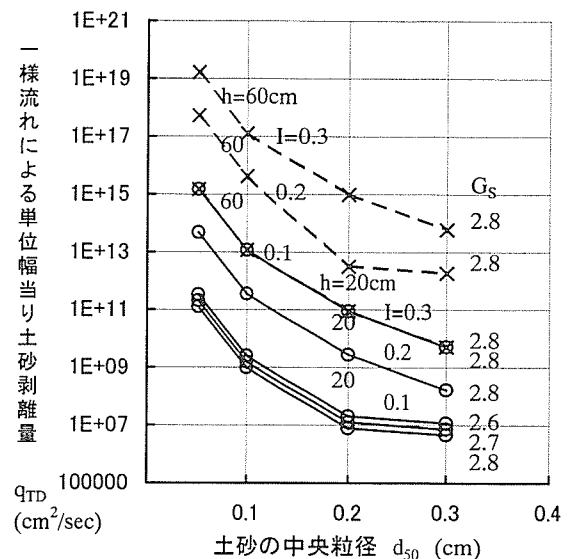


図-10 土砂剥離量と中央粒径との関係図 (作成:田中)

土砂の種類(粒度分布・粘着力)、締固め度、斜面勾配等による修正を加味することにより、より精度の高い推定が可能と思われる。薄層一様流れによる土砂侵食は10~20%と言われており、今回は以下に示す Ellison 修正補正法による土砂剥離量に含まれると考えて無視する。

ここで Ellison 式による飛散土量 $E (\text{kgf}/30 \text{ 分})$ を求めるときに補正係数 K は実験結果などに基いた次(6)式のような仮定式を用いて修正することにより求められると想定する。

$$K = k_c \cdot k_\theta \cdot k_p \quad (6)$$

k_c : 土砂の種類(粒度)と粘着力 c とから定まる修正係数で図-11(1)に示すように表示される。(土砂の締固め度は雨滴による耐剥離性に関し、粘着力 c で代替される。)

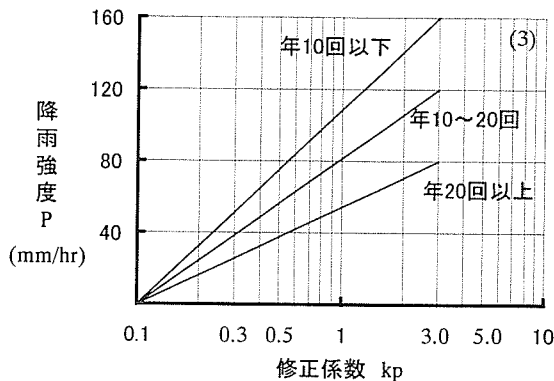
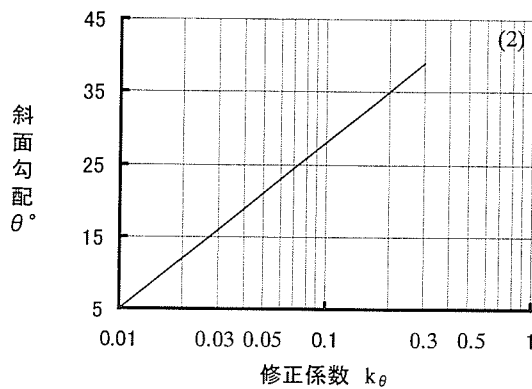
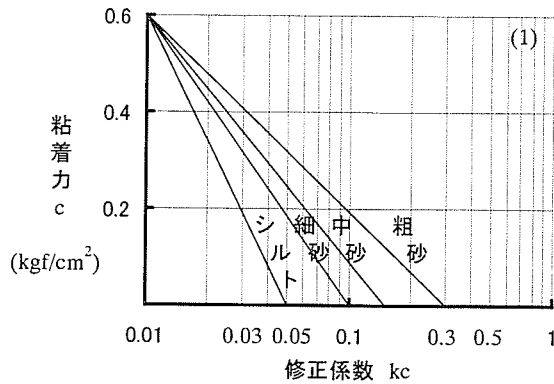


図-11 飛散土槽 E の補正係数 K を求める図表
($k = k_c \cdot k_\theta \cdot k_p$) (作成：田中)

図-11(1)は、雨滴による侵食土砂量は土砂面における粘着力 c が大きいほど指数関数的に減少する、土質種類別には粗砂→中砂→細砂→シルト順に侵食され易い (k_c が大きいほど侵食量は大きい) と想定して設定した。

k_θ ：斜面勾配から定まる修正係数で、図-11(2)に示すように表示される。

図-11(2)は侵食土砂量は斜面勾配が急なほど指数関数的に増大する (k_θ が大きいほど侵食量は大きい) と想定して設定した。

k_p ：限界降雨強度の年間頻度から定まる修正係数で図-11(3)に示すように表示される。

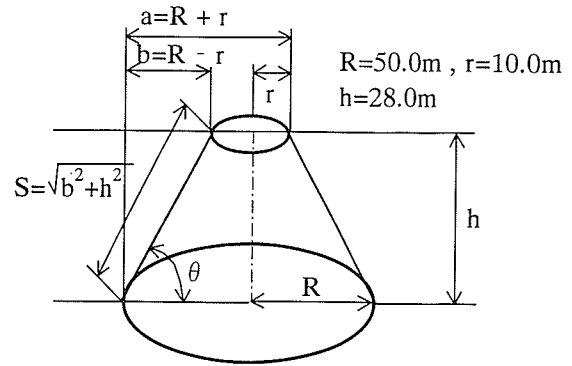


図-12 古墳モデル形状寸法 (作成：田中)

図-11(3)は侵食土砂量は降雨強度が大きいほど指数関数的に増大する (k_p が大きいほど侵食量は大きい)、年間頻度が高いほど侵食土砂量は増大すると想定して設定した。

図-11(1)～(3)はそれぞれの要因の E の補正係数 K に対する定性的傾向を実験結果などを考慮に入れて図化したもので、現時点ではデータも少なく定式化するに至っていないが、上述の手法に従って事例検討してみると以下ようになる。

図-12 において古墳底面直径 100.0m、頂面直径 20.0m、高さ $h=28.0$ m とすると

$$\text{全体積 } V = \frac{\pi \cdot h}{3} (R^2 + Rr + r^2) = 90,897 \text{ m}^3$$

$$\text{全表面積 (斜面部) } M = \pi \cdot b \cdot \sqrt{b^2 + h^2} = 6,136 \text{ m}^2$$

$$\tan \theta = 28.0/40.0 = 0.700 \quad \theta = 35.0^\circ$$

この古墳が限界降雨量 120mm/hr が年 10 回以下の地域において、粗砂で $c=0.1(\text{kgf/cm}^2)$ の盛土であったとすると、図-11(1)～(3)より

$$k_c=0.18, k_\theta=0.20, k_p=1.3$$

$$\text{一方図-8より、} P=127(\text{mm/hr}), D=2.0\text{mm}, v=244(\text{cm/sec}) \text{ とすると } E/K \approx 200(\text{kgf/30分})/\text{m}^2$$

$$\text{従って流出土砂重量 } E = 200 \times 2 \times 0.18 \times 0.20 \times 1.3 = 18.7(\text{kgf/hr/m}^2)$$

上示古墳に当てはめると、流出土砂総量は

$$18.7(\text{kgf/hr/m}^2) \times 10 \text{ 回} \times 6,136 \text{ m}^2 = 1,147(\text{tonf/年})$$

$$\text{単位体積重量 } \gamma = 1.8(\text{tf/m}^3) \text{ とすると、} 637(\text{m}^3/\text{年})$$

この値は古墳体積 90,897 m^3 に対して毎年 637 m^3 ずつ減少することを示していて、高さに換算すると平均的に 637 $\text{m}^3/6,136 \text{ m}^2 = 0.1\text{m}$ となる。現実には草木が生えたり、勾配が緩くなっていけば流出土砂量も減じていくなどのことも考えれば、上述推算結果はさらに小さくなると考えられる。しかし逆に言えば、古墳からの土砂流出は上述のようにかなりの量に達するので、高さも大きく減少することも確かである。

6. あとがき

本論文において、古墳からの降雨による侵食土砂量を推定する手法を示した。

本手法は Ellison の雨滴による土砂飛散量算定式における補正係数 K に、今回行った雨侵食実験から得られた K に影響する要因、土砂粘着力に関する係数 k_c 、斜面勾配に関する係数 k_θ 、降雨強度、瀬度に関する係数 k_p の 3 者を相乗した修正補正係数を用いるものである。

実用的には仮定、想定、未知の事項が多くて、計算結果も大幅に異なる結果となるので、問題が多いが、今後の研究に対する検討項目等がかなり明らかになったと思われる。今後は未解決な項目を一つずつ解決していきたいと考えている。

なお、古墳には本研究で報告した築造企画に関する問題点以外にも、盛土施工法、石室築造法など工学的視点から検討すべき事項は種々あるが、文化財を考える上からも、考古学的研究の立場からも、我々理系の研究者が貢献すべき分野は広い。¹¹⁾ 今後とも多面的に協力していきたいと考えている。

最後に本研究に当り、木更津高専卒研 5 名の協力をいただいた。謝意を示します。

なお、本研究は公益信託大成建設自然歴史環境基金の助成金を受けて実施致しました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 上田宏範：前方後円墳における築造企画の展開、近畿古文化論、吉川弘文館、1963
- 2) 上田宏範：『前方後円墳』、学生社、1969
- 3) 上田宏範：前方後円墳の築造企画と型式学的研究、考古学ジャーナル、No.150、1978
- 4) 小沢一雅：前方後円墳の築造企画、考古学ジャーナル、No.276、1987
- 5) 小沢一雅：『前方後円墳の数理』、雄山閣出版、1988
- 6) 沼沢豊：円墳築造の企画性、研究連絡誌、No.56号、(財)千葉県文化財センター、2000.3
- 7) 沼沢豊：円墳の規模と序列、研究連絡誌、No.59号、(財)千葉県文化財センター、2000.10
- 8) 大田区立郷土博物館編集：『大田区 古墳ガイドブック』、大田区土木部公園課、2000.2
- 9) R.A.バクノルド著、金沢肇訳：『飛砂と砂丘の理論』創造社、pp.100、1963
- 10) 土木学会編：『水理公式集—昭和46年改訂版』pp.132、1981
- 11) 田中邦熙：古墳（関東地方）に関する工学的視点からの考察、土木史研究No21、pp.295～304、土木学会、2001.6