

全層なだれにいたるグライドの加速のモデル

納口恭明*・山田 穰*・五十嵐高志*

国立防災科学技術センター雪害実験研究所

A Model of Snow Glide Acceleration to Full Depth Avalanche Release

By

Yasuaki Nohguchi

Yutaka Yamada and Takashi Ikarashi

*Institute of Snow and Ice Studies, National Research Center for Disaster Prevention,
Nagaoka, Niigata-ken, 940*

Abstract

Snow glide is not always in equilibrium. Acceleration of snow glide before a full depth avalanche release is a typical example of nonequilibrium snow glide in nature. In this paper, the fundamental model is proposed to describe acceleration of snow glide before a full depth avalanche release and compared with the observations. As a result, it is found that the acceleration of snow glide can be represented by the proposed simple model. Moreover, the unknown parameters of the model are determined to discuss the effect of vegetation.

1. はじめに

「グライド現象の数値モデル」(納口, 1983)において非定常な現象を含めた斜面積雪のグライドの挙動を表現するための一般的なモデルを提案し, 簡単な数例について定性的な考察をした。このモデルではグライド速度そのものよりもむしろその変化の過程の理解に中心がある。すなわち, 非平衡な状態を一般的な状態とし, 定常的なグライドが実現するのは平衡状態が安定な場合として表現される。また全層なだれの発生にいたる過渡的な現象の発生

* 第1研究室

は平衡状態の不安定化あるいは消失として表現される。したがって定常的なグライドも全層なだれにいたる過渡的な現象も同時に議論できる。

全層なだれにいたるグライドの加速現象は非平衡な現象の典型的なものである。このような過渡現象は駆動力や気象条件などのような外的な効果が原因となって生じたとしても、その変化の過程自身はむしろ積雪の底面における地面との接触状況のような内的なものの連続的变化としてとらえるべきである。

本論文では、グライドの非平衡な現象の典型として、全層なだれや斜面積雪の小破壊にいたるようなグライドの加速現象の実際の観測例にこのモデルを適用し、定性的かつ定量的な対応を試みる。

2. グライドの加速のモデルの一般的表現

前報で提案したグライドの数理モデルの一般的な表現はつぎのとおりである。

$$f = R(A, v) \quad (1)$$

$$\frac{dA}{dt} = -p(A, v) + q(A, v) \quad (2)$$

f は駆動力、 R は底面の抵抗力、 v はグライド速度、 A は底面での接触を担う内的な変数で真の接触面積を想定している。(1)式は力のつり合いを表わす。(2)式は A の変化をその減少 p と増加 q (p, q ともに正)の収支として表わしたものである。

このモデルの特徴は、現象を記述する変数としてグライド速度 v のほかに底面における接触を量的に表現する内的な変数 A を導入し、力のつり合いと底面におけるすべりの過程を表現したことにある。 A の導入により、グライド現象に時間に依存した表現を与えると同時に、底面におけるすべりの過程に物理的な意味を与えることができる。

このモデルにおけるすべりの物理的な機構の表現は、 $R \cdot p \cdot q$ を A と v の関数として設定することであり、 $R \cdot p \cdot q$ の適当な選択は、結果としてグライドの挙動に質的な差を生み出すことになる。これはちょうど、斜面の植生や積雪の状態の差のため、あるいは注日する現象の時間スケールのちがいのためにグライドの挙動にちがいが生ずることに対応している。

このモデルを、とくに全層なだれの発生にいたる加速現象だけを記述するように変えよう。底面でのすべりにともなって、それまで接触していた部分の減少 p が新たな接触の形成による増加 q と等しいとき、底面における接触の状態は定常を保ち、したがってグライドも定常となる。これに対し、全層なだれにいたるグライドの加速の過程は A の減少 p に A の増加 q

が追いつかない状態ということが出来る。とくに全層なだれにいたる直前では \dot{p} は q よりも十分に大きく、 q は無視できるものとする。したがってこのときのグライドのモデルの一般的な表現はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= -p(A, v) \\ f &= R(A, v) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3. モデルの具体的な表現とグライドの挙動の定性

(3)式によって全層なだれにいたる加速現象を表現するための一般的なモデルを与えた。つぎに R と p の関数形を与えてモデルをより具体的に表わそう。

いま試験的に R と p をつぎのように与えてみよう。

$$R(A, v) = \epsilon_0 A + \epsilon_1 v A \quad (4)$$

$$p(A, v) = a A v \quad (5)$$

ϵ_0 , ϵ_1 , a はそれぞれ現象論的な定数であり、のちに実際のグライドとの対応により決定される未知パラメータとする。(4)式の抵抗力の表現は、まず第1に R が A の増加関数となっていること、すなわち接触面積に比例して抵抗力が増加することを表わしている。また第2として(4)式の右辺第1項の速度 v を含まない項は、剪断破壊的な抵抗を表わし、第2項の速度 v に比例する項は粘性的な抵抗を表わすことを意図している。一方(5)式では、 A の減少 p が A それ自身とグライド速度 v とに比例するものとした。(3), (4), (5)式をまとめておく。

$$f = \epsilon_0 A + \epsilon_1 A v \quad (6)$$

$$\frac{dA}{dt} = -a A v \quad (7)$$

A を導入することにより非平衡状態のグライドの物理的な過程を表わせるようになったが、表面上、現われてくるのはグライド速度 v である。このモデルにおけるグライド速度 v の挙動は、(6)・(7)式の A を消去し、 v だけの式を導びくことによって得られる。このとき

$$\frac{dv}{dt} = a \frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} \left(1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} v\right) v \quad (8)$$

となる。図1に(8)式から求めた加速の過程を表わすグライド速度と時間の関係をつぎのように無次元化して示す。

$$v^* = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} v \quad (9)$$

$$t^* = a \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} t \quad (10)$$

(8)式は、グライドの加速度 dv/dt がグライド速度 v の関数として表わされたものと考えることができる。これは、(3)式にもとづくグライド現象の数理表現からの自然の帰結として導かれたものである。(8)式から、グライドの加速度はグライド速度の増加関数であり、速度が小さいときは速度に比例する項が卓越するが、速度が大きくなる全層なだれ発生の前では

$$\frac{dv}{dt} \simeq a v^2 \quad (v^* \gg 1) \quad (11)$$

のように速度の2乗に比例する項で表わされる。

このときの A の変化は v を消去した A だけの式

$$\frac{dA}{dt} = a \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} \left(A - \frac{f}{\varepsilon_0} \right) \quad \left(A < \frac{f}{\varepsilon_0} \right) \quad (12)$$

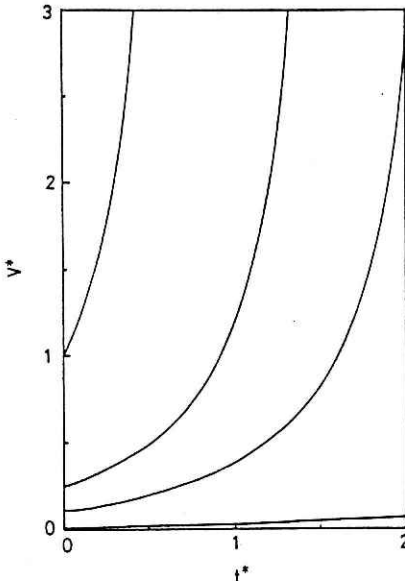


図1 グライド速度の時間変化.
Fig. 1 Glide velocity vs. time.

から求められる。(12)式と(8)式はつぎの関係

$$v = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} \frac{f/\varepsilon_0 - A}{A} \quad (13)$$

により相互に変換できる。Aがゼロのときvは無限大となる。これは静的な意味において速度が無限に大きくなるという意味でなだれの発生点である。

加速状態にあるグライド速度が $v = v_0$ のとき、その後なだれが発生するまでの時間 t_c は(12)式あるいは(8)式から求めることができ、 v_0 の関数としてつぎのように表わされる。

$$t_c = \frac{\varepsilon_1}{a \varepsilon_0} \log \frac{\varepsilon_0 / \varepsilon_1 + v_0}{v_0} \quad (14)$$

(14)式は t_c の逆数と v_0 との関係にするとつぎのような簡単な近似式で表わすことができる。

$$t_c^{-1} \simeq a \left(v_0 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} \right) \quad (15)$$

4. 実測例との対応と未知パラメータの決定

(6)・(7)式で与えた定性モデルを、全層なだれにいたるグライドの加速の実測例と対応させ、式の中の未知パラメータを決定しよう。

雪害実験研究所では全層なだれ発生予知システムの開発を目的として、1982年から新潟県守門村細野の自然斜面上に歯車式グライドメーターを数台設置しており、一冬期にわたるグライド量の連続測定をおこなっている。この自然斜面上には約2m前後の低木が密生しており、堆雪にともなってこれらの低木が倒伏した上を積雪はすべっている。また斜面勾配は40～45°であり斜面の長さは数10mである。この斜面上の雪は、ほとんど毎年、ひと冬のうちに1回は全層なだれとなってすべり落ちる。なお、その観察方法・結果などについては別報で詳述される予定である。

いまここで用いる例は図1のような単純な加速曲線からなる部分のみに限る。このようなグライドの加速は、1983年2月18日・2月20日・3月25日に得られている。今後これらをS-1・S-2・S-3と呼ぶことにする。S-1とS-2は隣り合った斜面でほぼ同時期に発生したものであり、S-3は周囲の雪がほとんどなだれ落ちて最後に残されていた積雪がなだれ落ちたものである。

またこれらとは別に、新潟県十日町市にある農林水産省林業試験所十日町試験地において

ソリ式グライドメーターによって測定されている実験用の人工斜面上のグライド測定の記録のなかの一例も用いる。これは1982年1月23日前後のもので、積雪の小破壊となったものである。今後これをT-1と呼ぶ。この斜面の表面は短く草が刈られた状態であり、斜面勾配は 40° である。

モデルの定量化をする前に、(6)・(7)式のモデルが実測結果の定性を説明しうるかどうかを確かめておかなければならない。もし、モデルと実測との間に定性的な対応がつかなければ、(4)式・(5)式による底面のすべりの物理的な機構の表現が不適切であるとして変更しなければならない。

図2と図3はそれぞれS-1とS-3におけるグライドの加速度と速度の関係を対数目盛りで示している。図の中の直線は勾配が1と勾配が2のものである。(8)式からわかるように、モデルでは加速度は速度の増加につれてその1乗から2乗の間で関係している。したがってこの定性に関してはモデルと実測例との間に矛盾はない。

図4と図5はグライド速度 v_0 となだれの発生までの時間 t_c の逆数 t_c^{-1} の関係を示している。モデルでは t_c^{-1} と v_0 は(15)式からわかるように正の切片をもつ直線で近似される。したがってこの性質に関してもモデルと実測例との間に対応がつかうことがわかる。

以上から、これらの実測例は(6)・(7)式のモデルによって十分に表現しうるものと考えられる。そこでモデルと実測との対応によってモデルに含まれる未知パラメータを決定しよう。測定されたものがグライド量に関する情報だけであるため、(8)式から、決定できるパラメータは a と ϵ_1/ϵ_0 のふたつである。また、(8)式あるいは(14)式が駆動力 f を陽に含んでいないために、定量化の際に駆動力 f を与える必要がない。

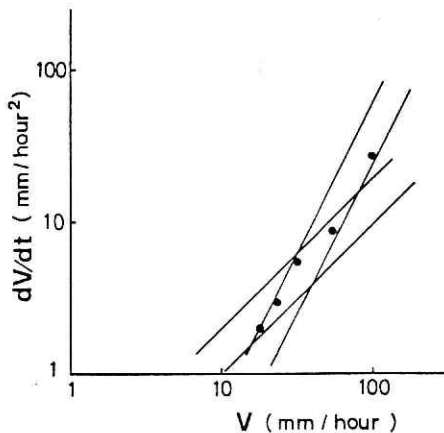


図2 S-1におけるグライドの速度と加速度の関係。

Fig. 2 Glide velocity vs. acceleration (S-1).

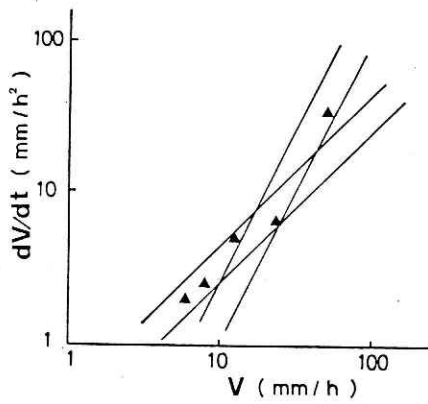


図3 S-3におけるグライドの速度と加速度の関係。

Fig. 3 Glide velocity vs. acceleration (S-3).

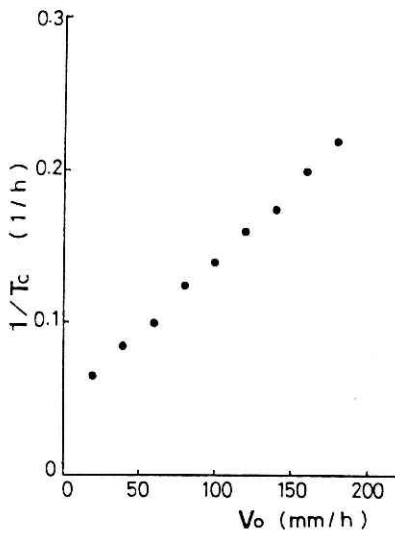


図4 S-1におけるグライドの速度となだれ発生までの時間の関係。

Fig. 4 Glide velocity vs. time to avalanche (S-1).

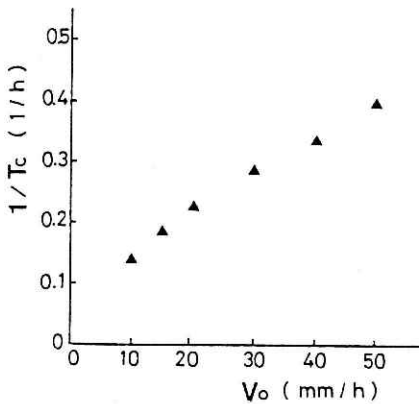


図5 S-3におけるグライドの速度となだれ発生までの時間の関係。

Fig. 5 Glide velocity vs. time to avalanche (S-3).

図6は、S-1とS-3を(14)式との対応によって求めた a と ϵ_1/ϵ_0 とから無次元化してプロットしたものである。図中の曲線は(14)式を無次元化した

$$t_c^* = \log \frac{1 + v_0^*}{v_0^*} \quad (16)$$

である。また図7は、S-2とT-1を(8)式との対応によって求めたパラメータを用いて無次元化してプロットしたものである。図中の曲線は(8)式を無次元化した

$$\frac{dv^*}{dt^*} = v^*(1 + v^*) \quad (17)$$

である。なお図7には(14)式で求めたパラメータによって無次元化したS-1とS-2も、同様に(8)式にもあうことを示すために記入している。

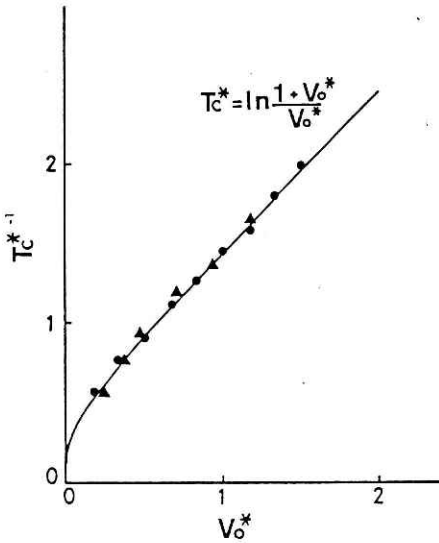


図6 なだれ発生時間のモデルとの対応 (●: S-1, ▲: S-3).

Fig. 6 Comparison between the observation and model on time to avalanche (●: S-1, ▲: S-3).

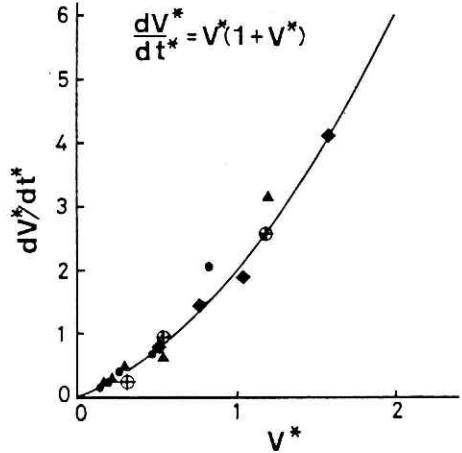


図7 速度-加速度関係のモデルとの対応 (◆: S-2, ⊕: T-1, ●: S-1, ▲: S-3).

Fig. 7 Comparison between the observation and model on the relation of velocity to acceleration (◆: S-2, ⊕: T-1, ●: S-1, ▲: S-3).

こうして得られたパラメータの値をまとめて表1に記す。

表1 モデルのパラメータの値.

Table 1 Parameters of model.

	時	植 生	a (mm^{-1})	$\varepsilon_1 / \varepsilon_0$ (hour/mm)
S-1	1983年2月18日	低木自然斜面	0.00092	0.0083
S-2	1983年2月20日	〃	0.0022	0.034
S-3	1983年3月25日	〃	0.0056	0.023
T-1	1982年1月23日	草刈実験斜面	0.0033	0.21

5. 考 察

(1)・(2)式あるいは(3)式で代表されるこのモデルの考え方の基本は、物理的な機構を表現しうる構造をしているということである。それは、実測との対応によって定量化されたパラメータの値が単なる実験式上の値にとどまらず、なんらかの物理的な意味をもつということである。

ここで得られたパラメータの値から、それぞれの加速現象におけるすべりの特性を比較しよう。とくに、低木斜面と草刈り斜面とで植生の差がパラメータの値のちがいとなってどのように現われたかを検討しよう。

物理的なイメージをよりわかりやすくするために、表1におけるふたつのパラメータ a と $\varepsilon_1 / \varepsilon_0$ を、この加速現象を代表する速度 V 、時間 T 、長さ $L = V \times T$ に変換する。(9)・(10)式から代表速度・代表時間・代表長さをつぎのように与える。

$$V = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} \quad (18)$$

$$T = \frac{\varepsilon_1}{a \varepsilon_0} \quad (19)$$

$$L = V \times T = \frac{1}{a} \quad (20)$$

(4)式では底面抵抗力を剪断破壊的な項 $\varepsilon_0 A$ と粘性抵抗的な項 $\varepsilon_1 v A$ からなるものとして設定した。したがって(18)式からわかるように代表速度 V が大きいほど底面抵抗力にしめる粘性的な抵抗の効果が大きいことを示している。また(5)式の設定からわかるように a は移動にともなう接触面積の減少のしやすさの程度を表わす。したがって a の逆数である代表長さ L が小さくなればなるほど、わずかの移動量でなだれが発生することを表わす。

一方、代表時間 T はグライド速度が代表速度 V の程度であるときのなだれ発生までの時間の目安を与える。表 2 にこれらの値をまとめて示す。

表 2 現象の代表時間、代表速度、代表長さ。

Table 2 Characteristics time T , velocity V and length L .

	代表時間 T (hour)	代表速度 V (mm/hour)	代表長さ L (cm)
S-1	9.1	120	110
S-2	16	29	46
S-3	4.2	43	18
T-1	64	4.8	31

低木斜面での現象 (S-1, S-2, S-3) と草刈り斜面での現象 (T-1) のちがいの第 1 は、代表速度 V が草刈り斜面の方が低木斜面よりも約 10 分の 1 程度小さいことである。これは前述したとおり、草刈り斜面の方が低木斜面よりも底面抵抗にしめる粘性的な抵抗の効果が小さいことを意味する。それが何によるものであるかの考察は、積雪底面と斜面とのすべりの直接観察を待たねばならない。

また、代表時間 T は草刈り斜面では 64 時間と低木斜面よりも数倍から十数倍大きく、なだれが発生するまでに長い加速の時間を要することがわかる。代表長さ L に関しては、代表速度と代表時間の特徴が相殺された形となって、とくに植生の差によるちがいは見られず、いずれも数 10 cm のオーダーである。すなわちいずれも 1 m 程度の移動によって底面での束縛から解放されたことになる。

北陸地方で見られる比較的大きな全層なだれは低木の斜面で発生することがかなり多い。そこで、ここで得られた数値を使って、低木斜面上での全層なだれ発生のだいたいの目安を与えておくのは重要である。ここで詳細な数値をあげる必要はない。むしろ一般的な意味でオーダーだけを示す。このため (15) 式をさらに簡単にしてつぎのようにする。

$$t_c \sim \frac{1}{a v_0} \quad (21)$$

a は大きいほどなだれは発生しやすいから、いわゆる安全率を見込んで $a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ とする。こうすると、速度が低木斜面の代表速度のオーダーのとき、すなわち $v_0 = 1 \text{ cm/hour}$ のとき t_c は 10 時間となる。一般に全層なだれの空間スケールは 100 m 程度である。したがって 10 時間もあれば十分避難することができるので、 1 cm/hour を「注意すべき速

度」と呼ぶことにする。加速状態のグライド速度を $1\text{ cm}/\text{min}$ とすると t_c は10分間となる。この場合、一刻も早く危険斜面から避難しなければならないという意味で「危険な速度」と呼ぶことにする。ちなみに普通、安定な状態でグライドが生じている場合のグライド速度のオーダーは $1\text{ cm}/\text{day}$ (de Quervain, 1965) なので、ひとつの試みとして、これらを合わせて表3のようにまとめた。

表3 低木斜面におけるグライド速度と安全度。

Table 3 Glide velocity and safety standards against avalanche on a slope of low tree.

グライド速度	なだれ発生時間	安全度
$1\text{ cm}/\text{min}$	10 分 間	危 険
$1\text{ cm}/\text{hour}$	10 時 間	注 意
$1\text{ cm}/\text{day}$	—	安 全

6. おわりに

一般のグライド現象の数値モデルの特別な場合として、全層なだれ、あるいは斜面積雪の小破壊にいたるようなグライドの加速現象のモデルを与え実測との定性的な比較ならびにモデルに含まれる未知パラメータの定量化をおこなった。このモデルは、底面でのすべりの機構がわかっている場合にグライド速度の変化を記述するのに使えるのと同時に、底面でのすべりの機構がわかっていない場合に、実測されたグライド速度の変化からその物理過程を推測するのに使える。

底面での物理過程を表わすより具体的モデルとして、底面抵抗力 R と A の減少速度 \dot{p} をそれぞれ (4) 式・(5) 式のように与えたもので実測例との定性的な対応が得られた。同時にその対応によって R と \dot{p} に含まれる未知パラメータ a と $\varepsilon_1/\varepsilon_0$ が決定できた。

一般に、グライドが加速状態になったときのなだれの発生を予測する目的のためには、(6)・(7) 式にまでさかのぼる必要はなく、ただ単に (8) 式のような加速度と速度の関係式を実験的に与えてやればよい。ここで用いたモデルはむしろその背後にある物理的な過程を表現あるいは推測するためのより根本的なものと考えべきである。すなわち加速度と速度の関係式によってグライドの加速現象が記述できることの根拠を与えるモデルであるといえる。

本論文では、全層なだれの発生予知に関しては表3に示したような低木斜面における一般

的なことを述べたにすぎない。特定斜面の時々刻々変化するグライド速度の情報からなだれの発生を予測することに関しては別報で述べる予定である。

なお本論文をまとめるにあたり、農林水産省林業試験所十日町試験地の渡辺成雄氏・大関義男氏にはグライドの資料を使用させて頂いた。記して感謝の意を表す。また雪害実験研究所内の研究発表会で多くの意見を頂いた所内の諸兄、ならびに本論文の校閲をして頂いた国立防災科学技術センター新庄支所の佐藤篤司氏に感謝する。

本研究は科学技術振興調整費によった。

参 考 文 献

- 1) De Quervain, M. R. (1965): Problems of avalanche research. International Symposium on Scientific Aspect of Snow and Ice Avalanches, 5-10 April, 1965, Davos, Switzerland, 15-22.
- 2) 納口恭明 (1983): グライド現象の数理モデル. 国立防災科学技術センター研究報告, 第30号, 189 - 206.

(1986年6月5日 原稿受理)