HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Goto (1997) の粘性計算法の再評価
Author(s)	後藤, 章夫
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 72, 159-175
Issue Date	2009-03-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.72.159
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/38151
Type	departmental bulletin paper
File Information	11_Goto.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan.
No.72, March 2009, pp.159-175

Goto（1997）の粘性計算法の再評価

後藤　章夫
東北大学東北アジア研究センター
(2009 年 1 月 8 日受理)

Re-examination of viscosity evaluation model by Goto (1997)

Akio Goto
Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University
(Received January 8, 2009)

Viscosity evaluation model by Goto (1997) has been re-examined using 608 viscosity data for 37 samples from literature. The model gives viscosity (η) of multicomponent silicate melts using Williams − Landel − Ferry (WLF) equation:

$$\log\eta = \log\eta_{Tg} + \frac{A(T-T_g)}{B+T-T_g}$$

η_{Tg} : viscosity at glass transition temperature; A, B : adjustable constants;
T : temperature; T_g : glass transition temperature

Although used samples were only seven to formulate compositional dependency/independency of four parameters in WLF equation, by measuring viscosity and glass transition temperature, this model has successfully evaluated the viscosity from literature in wide range of temperature and chemical composition. Compared to other well-accepted viscosity model published in 2003, the accuracy of Goto model is almost equal overall, or seems to be higher in that it does not evaluate extremely different viscosity from the empirically determined value. This universality may be due to the application of compositional parameter from classical viscosity model that gives satisfactory evaluations for magmatic silicate melts in wide range of chemical composition at high temperature, and theoretical base of WLF equation.

Ⅰ．はじめに

マグマの粘性係数は，温度や化学組成により 10 桁以上変化する．密度や比熱といったほかの物性値がせいぜい数倍程度しか変化しない（Murase and McBirney, 1973）のに比べてその変化が極めて大きいこと，またマグマの上昇，気泡の生成や成長といった，噴火に至る物質移動過程に直接関わることから，粘性係数は噴火の様式をもっとも大きく支配する要素の一つと考えられている．このため，マグマの粘性係数を温度や化学組成から求めるモデルが，半世紀近くも前からいくつも提案されている（Murase, 1962; Bottinga and Weill, 1972; Shaw, 1972 など）．このうちもっとも広く，かつ現在でもしばしば用いられる Shaw（1972）のモデルは，粘性係数の対数は絶対温度 T の逆数に対して直線的に変化し（Arrhenius の関係），その直線はある定点を通り，勾配が化学組成で決まることを仮定して，次の式で粘性係数 η（Pa s）を求められるとしている．

$$\ln\eta = S\left(\frac{10^4}{T} - 1.50\right) - 8.70 \tag{1}$$

勾配 S の組成依存性は，Bottinga and Weill（1972）のモデルから見積もられる二成分系珪酸塩メルトの Arrhenius 勾配を平均化することで求められ，次式に Table 1 を適用することで与えられる．

$$S = \sum \frac{X_i}{1 - X_{SiO_2}} (s_i^{\circ} X_{SiO_2}) \tag{2}$$

X_i：成分 i のモル分率；X_{SiO_2}：二酸化珪素のモル分率

Bottinga and Weill（1972）のモデルが粘性係数実測値から各成分の粘性への寄与を求めた実験式であることから，Shaw（1972）のモデルもまた実験式である．このモデルはリキダス以上の高温では良い計算値を与えるものの，過冷却状態の低温域では値を低く見積もり，その差は温度の低下とともに大きくなる．これはマグマの粘性係数に Arrhenius の関係が成立せず，温度低下とともにその勾配が増大する（Neuville et al., 1993; Richet, 1984; Taniguchi and Murase, 1987; Bottinga et al., 1995 など）ためで，この傾向は二酸化珪素量の減少とともに強くなる．Bottinga and Weill（1972）や Shaw（1972）のモデルが考案された当時は広い温度範囲での粘性測定データが乏しく，高温の測定データだけから Arrhenius の関係を仮定したためにこのような結果となった．

これに対して Richet（1984）は，構造緩和過程に対する配位エントロピー理論（Adam and Gibbs, 1965）に基づく式を提案した．この理論によると，Arrhenius の関係からのずれは配位エントロピーの温度変化によって生じ，熱力学的なデータのある鉱物組成の珪酸塩メルトを用いて，こ

Table 1. Extrapolated Arrhenius slope of binary silicate systems at X_{SiO2}=1[1]

Mineral oxide-silica pairs	Slope intercept s_i°
H_2O−	2.0
K_2O−, Na_2O−, Li_2O−	2.8
MgO−, FeO−	3.4
CaO−, TiO_2−	4.5
"AlO_2"−	6.7

[1] Original data are from Shaw (1972).

のモデルが粘性係数の温度依存性をうまく表現できることが示された．しかしこの検証において，式に含まれる二つの定数は実測値に対するフィッティングで求められ，さらに配位エントロピーを化学組成から求めることができないため，現状ではこのモデルでマグマの粘性係数を求めることはできない．

Taniguchi（1995）は Williams et al.（1955）が提唱した，構造緩和時間に対する Williams－Landel－Ferry（WLF）式

$$\log\eta = \log\eta_{Tg} + \frac{A(T-T_g)}{B+T-T_g} \tag{3}$$

T_g：ガラス転移温度，η_{Tg}：ガラス転移温度での粘性係数，A，B：定数

を透輝石－灰長石系メルトに適用し，A と $T_g/(T_g-B)$ が組成に依存しないことを示した上で，もし T_g と η_{Tg} が得られれば，WLF 式を粘性係数計算に使えると主張した．WLF 式は元来経験式だが，のちに理論的な裏付けが Adam and Gibbs（1965）によって与えられている．

Goto（1997）は玄武岩質安山岩から流紋岩に渡る 5 種類の火山岩でガラス転移温度と $10^1 \sim 10^{14}$ Pa s の範囲で粘性係数を測定し，η_{Tg} と A が組成にほとんど依存しないことを示し，さらに B と T_g の組成依存性を定式化した．これらを用いて，文献に粘性係数測定値がある 5 種類の火山岩（Murase and McBirney, 1973; Taniguchi, 1993; Neuville et al., 1993）に対して化学組成から粘性係数を計算したところ，計算値と測定値は広い温度範囲に渡って良い一致を示した．その後さらに玄武岩と流紋岩を 1 種類ずつ実測し，B と T_g の組成依存式を改良したものの，モデル構築に使われた試料の少なさと，比較できる文献データの不足からその有用性確認が不十分で，国際会議の proceedings にある Goto et al.（1997）と，溶岩流シミュレーションの Hidaka et al.（2005）に改良前のモデルが掲載されている以外，これまで学術雑誌への公表はなかった．

近年，広い温度及び化学組成に渡る粘性係数の測定結果が多数報告され，Goto（1997）のモデルを再評価するに十分なデータが利用可能となった．またこれら文献データを基にして，粘性係数推定モデルが次々と提案されている（Giordano and Dingwell, 2003a; Hui and Zhang, 2007; Giordano et al., 2008 など）．本稿では Goto（1997）のモデルで粘性係数を計算し，それを文献データ及び Giordano and Dingwell（2003a）のモデルによる計算結果と比較することで，Goto（1997）のモデルの有効性を検証する．なお，モデル計算の比較対象として Giordano and Dingwell（2003a）を選んだのは，これが Goto（1997）のモデル同様，水の効果を考慮していないことによる．

II．モ デ ル

（3）式を粘性計数計算に利用するために，Goto（1997） は粘性係数測定と，示差熱分析（DTA）によるガラス転移温度測定を行い，T_g と η_{Tg} を求めた．それらの値を入れた上で，粘性係数を（3）式でフィッティングし，各試料に対する A と B を求めた．測定した粘性係数とそ

れに対する（3）式での回帰曲線を Fig. 1 に，また用いた試料の化学組成と，これらの手順で得られた T_g，η_{Tg}，A，B を Table 2 に示す．Fig. 1 から（3）式が粘性計数の温度依存性をうまく表現できることが，また Table 2 から η_{Tg} と A が組成によらずほぼ一定と見なせることがわかる．一方 T_g と B は，組成が玄武岩質から流紋岩質へと変化するに従い滑らかに変化する様子が見て取れる．この組成変化は，同じ温度で比べた場合の粘性係数増大に対応するので，T_g と B の変化を組成の関数として適切に表現できれば，化学組成から粘性係数を計算できると考えられる．この関係付けに，Goto（1997）は（2）式を用い，フィッティングにより T_g と B を S の二次式として与えた．S を用いたのは，Shaw（1972）のモデルは低温での精度は低いものの，高温では実測値をよく再現できることから，化学組成の粘性係数に対する情報を十分に含んでいると考えられたためである．

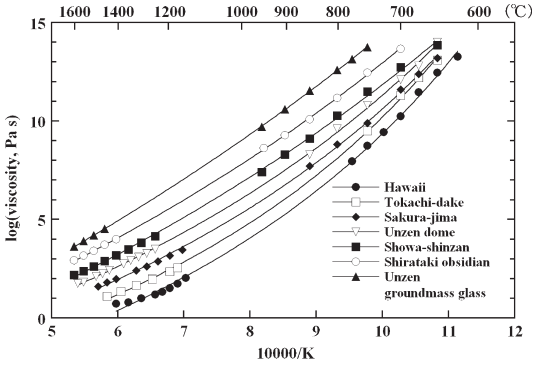

Fig. 1. Inversed absolute temperature − logarithmic viscosity relationship, together with lines fitted by WLF equation (eq. (3)), of magmatic silicate melts used for Goto model construction (Table 2).

なお，Goto（1997）は Fig. 1 と Table 2 の試料のうち，Hawaii と Shirataki を除く 5 試料

Table 2. Chemical compositions (wt.%) of the magmatic silicate melts used for the revision of WLF equation after the viscosity measurements[1], and their obtained parameters for eq. (3).

	Hawaii	Tokachi-dake	Sakura-jima	Unzen dome	Showa-shinzan	Shirataki obsidian[2]	Unzen groundmass glass[2]
SiO_2	50.79	53.78	61.05	65.28	70.13	76.39	79.65
TiO_2	2.39	1.07	0.82	0.65	0.43	0.04	0.40
Al_2O_3	12.11	17.74	16.50	15.93	14.98	11.81	10.86
Fe_2O_3	12.47	9.71	7.39	4.78	4.26	1.07	1.51
MnO	0.17	0.18	0.14	0.10	0.16	0.05	0.07
MgO	8.73	4.50	2.71	2.40	0.89	0.45	0.30
CaO	10.88	9.05	6.36	4.86	3.70	2.80	0.80
Na_2O	2.05	2.73	3.42	3.66	4.56	2.98	2.43
K_2O	0.42	1.25	1.61	2.33	0.91	4.41	3.99
T_g (K)	921	930	934	947	969	1004	1067
log (η_{Tg}, Pa s)	12.41	12.93	12.89	12.91	12.69	12.85	12.71
A	18.43	17.94	17.55	17.73	18.14	17.50	18.02
B (K)	397	389	444	521	640	658	790
S	2.238	2.615	3.053	3.308	3.646	4.023	4.272

[1] Obtained by XRF analysis. Normalized to 100 wt.%, total irons as Fe_2O_3 and volatile free bases.
[2] Synthetic samples made from reagent grade chemicals.

について測定及びフィッティングを行い，$A = 17.5$，$\log\eta_{Tg} = 13.0$，$B = 64S^2-202S+446$，$T_g = 57S^2-306S+1341$ を得たが，のちにこの 2 試料が加えられ，最終的に次の関係が得られている．

$$A = 17.9 \tag{4-1}$$

$$B = 26S^2+42S+114 \tag{4-2}$$

$$T_g = 48S^2-251S+1248 \tag{4-3}$$

$$\log\eta_{Tg} = 12.8 \tag{4-4}$$

以下ではこれらを用いて計算を行い，それを Goto モデルと呼ぶことにする．比較に用いる 37 文献試料の化学組成と，608 の粘性係数測定値をそれぞれ Table 3 と Table 4 に示す．試料はほとんどの火山岩種を網羅し（Fig. 2），一部は鉄やアルカリ土類金属を含まない合成試料である．

比較対象とする Giordano and Dingwell（2003a）のモデルは，温度と粘性係数を関係づける式として

$$\log\eta = c_1+\frac{c_2 c_3}{c_3+SM} \tag{5}$$

を導き，Table 3 および 4 のデータのうち HPG8 から NIQ までを用いて，c_1，c_2，c_3 の温度依存性を次式のように与えている．

$$c_1 = \frac{-17.80106+0.01808103T(℃)}{1-2.2869\times10^{-3}T(℃)} \tag{6-1}$$

$$c_2 = \frac{1}{0.02532+2.5124exp(-6.3679\times10^{-3}T(℃))+40.4562\times10^{-6}T(℃)} \tag{6-2}$$

$$c_3 = \frac{1-1.6569\times10^{-3}T(℃)}{0.017954-63.90597\times10^{-6}T(℃)} \tag{6-3}$$

化学組成は（5）式の SM で反映され，SM は $Na_2O+K_2O+CaO+MgO+MnO+FeO_{tot}/2$（mol%）で与えられる．以後，このモデルを G&D モデルと呼ぶ．

III．結　　果

計算値と文献値の比較を，Goto および G&D モデルのそれぞれについて，Fig. 3 に示す．両モデルとも，10^5Pa s 以下の低粘性では実測値をよく再現できている一方で，高粘性側は一致の程度がやや悪い．特に，測定値：計算値＝1：1 のラインに対して，斜行しながら大きく外れるデータの列がいくつか目を引く．これは特定の試料で計算値と測定値が系統的にずれていることを意味する．Fig. 3a でずれが特に目立つのは NIQ で，これは NIQ の SiO_2 量が 43wt%ほどと Goto モデルの構築で使われた試料よりかなり低い上に，CaO 量が約 26wt%と異常に高く，モデルの適用限界を超えていたためと考えられる．

二つのモデルの精度を比較するために，(計算値)－(測定値）の頻度分布を，G&D モデルの構築に使われていたデータを Fig. 4 に，使われていないデータを Fig. 5 に，それぞれ低粘性側と高粘性側に分けて，その標準偏差とともに示す．G&D モデルは Fig. 4 のデータを再現する

Table 3. Chemical compositions of literature samples used for G&D model construction (HPG8 - NIQ) and model examination (all samples), and derivative parameter S by eq. (2)

Wt%	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	alkali[1]	S	reference
HPG8	78.68	0.00	12.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.60	4.20	0.00	8.81	4.25	[1]
Td_ph	60.68	0.56	18.88	0.00	3.32	0.20	0.36	0.67	9.80	5.47	0.06	15.26	3.06	[2]
W_ph	58.82	0.79	19.42	0.00	0.00	0.00	1.87	2.35	9.31	7.44	0.00	16.75	2.94	[3]
W_T	64.44	0.50	16.71	0.00	0.00	0.00	2.92	5.36	6.70	3.37	0.00	10.07	3.20	[3]
Ves_W	53.18	0.60	19.71	0.00	4.75	0.14	1.76	6.73	4.63	7.86	0.66	12.49	2.70	[4]
Ves_G	52.75	0.60	19.70	0.00	4.68	0.12	1.76	6.70	4.74	8.23	0.73	12.96	2.43	[4]
AMS_B1	61.16	0.39	18.35	0.00	3.49	0.14	0.74	2.97	4.57	8.03	0.16	12.60	3.17	[4]
AMS_D1	60.74	0.39	18.24	0.00	3.87	0.11	0.89	2.95	4.11	8.48	0.21	12.59	3.15	[4]
MNV	64.57	0.31	17.28	0.00	2.93	0.13	0.24	1.84	5.73	6.89	0.05	12.63	3.35	[5]
ATN	60.68	0.47	18.82	0.00	3.66	0.17	0.66	2.85	3.95	8.59	0.15	12.54	3.17	[6]
PVC	65.27	0.46	17.30	0.00	2.60	0.14	0.33	0.85	6.46	6.50	0.09	12.95	3.38	[6]
UNZ	66.58	0.36	15.36	0.00	4.12	0.10	2.23	5.05	3.87	2.18	0.14	6.05	3.35	[6]
N_An	61.72	0.85	17.45	0.00	5.44	0.00	3.38	5.88	3.88	1.40	0.00	5.29	3.07	[7]
Ves_Gt	49.71	0.84	16.57	0.00	7.27	0.13	5.15	10.31	2.73	6.57	0.73	9.29	2.35	[6]
Ves_Wt	51.95	0.68	18.87	0.00	6.19	0.13	2.54	7.41	3.81	8.02	0.41	11.82	2.58	[6]
W_Tph	50.17	2.33	13.92	0.00	0.00	0.00	8.72	14.88	6.99	2.99	0.00	9.97	2.20	[8]
ETN	48.39	1.66	16.75	0.00	10.42	0.21	5.32	10.77	3.86	2.00	0.61	5.86	2.26	[9]
EIF	41.22	2.74	12.12	0.00	10.13	0.00	11.26	15.69	2.76	3.05	1.02	5.81	1.76	[6]
NIQ	43.35	2.95	10.13	0.00	0.00	0.00	9.12	25.94	7.55	0.96	0.00	8.51	1.82	[8]

Table 3. (continued)

Wt%	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	alkali[1]	S	reference
IGC	61.29	0.27	19.39	0.00	3.40	0.18	0.28	2.13	5.33	6.38	0.06	11.70	3.27	[5]
OAB	46.53	2.62	17.55	2.89	6.84	0.15	9.16	8.84	3.59	1.84	0.00	5.43	2.10	[10], [11]
CRB	51.48	1.73	14.70	4.96	9.21	0.22	4.75	8.96	3.21	0.78	0.00	3.99	2.38	[10], [11]
MHA	60.98	0.92	17.53	3.46	2.68	0.10	3.36	5.55	4.24	1.17	0.00	5.41	3.03	[10], [11]
rhyolite	78.36	0.07	12.12	0.00	0.77	0.00	0.05	0.52	4.03	4.08	0.00	8.11	4.20	[7]
St Helens	63.59	0.63	17.68	5.02	0.00	0.09	1.71	5.22	4.72	1.21	0.12	5.93	3.28	[12]
HPG8An10	73.97	0.00	15.68	0.00	0.00	0.00	0.00	2.11	4.42	3.82	0.00	8.24	4.06	[13]
HPG8An20	71.14	0.00	17.21	0.00	0.00	0.00	0.00	3.98	4.18	3.48	0.00	7.66	3.91	[13]
HPG8An50	63.81	0.00	23.03	0.00	0.00	0.00	0.00	8.67	2.59	1.89	0.00	4.49	3.59	[13]
HPG8An75	56.31	0.00	27.25	0.00	0.00	0.00	0.00	13.33	1.60	1.50	0.00	3.11	3.14	[13]
MST	60.56	0.58	18.24	0.00	6.36	0.19	2.57	7.08	3.56	0.85	0.00	4.41	3.05	[14]
STB	50.60	1.01	17.44	0.00	8.62	0.23	5.91	11.22	2.71	2.27	0.00	4.98	2.37	[14]
Fra	56.00	0.73	18.58	0.00	7.39	0.16	2.42	5.82	4.28	4.63	0.00	8.90	2.78	[14]
CI_OF	68.93	0.23	12.60	0.00	3.18	0.14	1.24	3.44	4.02	6.19	0.03	10.21	3.41	[14]
SLP	45.97	2.28	12.58	0.00	11.35	0.25	11.47	11.50	2.66	1.07	0.86	3.74	1.95	[14]
MRP	53.39	0.82	18.90	0.00	9.01	0.19	3.41	9.21	3.44	1.64	0.00	5.08	2.61	[14]
MDV	79.86	0.20	9.99	0.00	1.90	0.03	1.65	2.43	0.49	3.44	0.00	3.93	4.18	[14]
UNZ_andesite	56.75	1.01	17.44	0.00	8.17	0.13	4.31	7.39	3.24	1.56	0.00	4.80	2.74	[15]

[1] Na_2O+K_2O

reference
[1] Dingwell et al. (1996); [2] Giordano et al. (2000); [3] Whittington et al. (2001); [4] Romano et al. (2003); [5] Giordano et al. (2004); [6] Giordano and Dingwell (2003a); [7] Neuville et al. (1993); [8] Whittington et al. (2000); [9] Giordano and Dingwell (2003b); [10] Murase and McBirney (1973); [11] Taniguchi (1993); [12] Alibidirov et al. (1997); [13] Dingwell et al. (2000); [14] Giordano et al. (2006); [15] Liebske et al. (2003)

Table 4. Viscosity data (η in Pa s)

Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η
HPG8	881.7	11.02	W_ph	761.7	8.97	Ves_G	689.0	11.05
HPG8	905.0	10.63	W_ph	773.3	8.66	Ves_G	707.3	10.66
HPG8	925.7	10.28	W_ph	1344.3	2.86	Ves_G	726.7	10.20
HPG8	938.8	10.16	W_ph	1396.3	2.57	Ves_G	756.4	9.78
HPG8	1180.0	6.79	W_ph	1448.8	2.33	Ves_G	771.2	9.58
HPG8	1396.8	4.90	W_ph	1492.9	2.12	Ves_G	805.1	8.81
HPG8	1446.0	4.53	W_ph	1542.4	1.92	Ves_G	1052.5	4.75
HPG8	1495.2	4.15	W_T	678.0	12.70	Ves_G	1101.7	4.29
HPG8	1544.4	3.81	W_T	700.2	11.96	Ves_G	1151.0	3.87
HPG8	1593.6	3.58	W_T	708.7	11.67	Ves_G	1200.2	3.48
HPG8	1642.8	3.24	W_T	721.0	11.23	Ves_G	1249.4	3.15
Td_ph	614.7	11.63	W_T	725.3	11.14	Ves_G	1298.6	2.83
Td_ph	650.8	10.85	W_T	726.1	11.09	Ves_G	1347.8	2.54
Td_ph	672.7	10.32	W_T	741.5	10.59	Ves_G	1397.1	2.28
Td_ph	691.6	10.00	W_T	763.0	10.04	AMS_B1	693.9	11.18
Td_ph	737.3	8.99	W_T	771.9	9.82	AMS_B1	732.5	10.39
Td_ph	1101.7	4.65	W_T	784.1	9.53	AMS_B1	768.3	9.41
Td_ph	1126.4	4.46	W_T	792.7	9.34	AMS_B1	784.8	9.06
Td_ph	1151.0	4.27	W_T	809.5	8.99	AMS_B1	1151.0	4.80
Td_ph	1175.6	4.07	W_T	818.9	8.81	AMS_B1	1200.2	4.39
Td_ph	1200.2	3.91	W_T	830.0	8.58	AMS_B1	1249.4	4.02
Td_ph	1224.8	3.74	W_T	840.6	8.37	AMS_B1	1298.6	3.67
Td_ph	1249.4	3.57	W_T	1258.6	3.41	AMS_B1	1347.8	3.35
Td_ph	1274.0	3.42	W_T	1304.9	3.12	AMS_B1	1397.1	3.06
Td_ph	1298.6	3.26	W_T	1355.4	2.83	AMS_B1	1446.3	2.79
Td_ph	1323.2	3.11	W_T	1404.7	2.56	AMS_D1	683.6	11.29
Td_ph	1347.8	2.97	W_T	1452.7	2.32	AMS_D1	700.1	10.75
Td_ph	1372.5	2.83	W_T	1503.4	2.09	AMS_D1	711.9	10.56
Td_ph	1421.7	2.57	W_T	1554.6	1.86	AMS_D1	736.4	9.77
Td_ph	1446.3	2.44	W_T	1606.5	1.64	AMS_D1	765.2	9.32
Td_ph	1470.9	2.32	W_T	1655.6	1.46	AMS_D1	814.0	8.45
Td_ph	1495.5	2.20	Ves_W	689.2	10.68	AMS_D1	1151.0	4.73
W_ph	616.1	13.12	Ves_W	708.5	10.26	AMS_D1	1200.2	4.33
W_ph	625.1	12.71	Ves_W	723.0	9.97	AMS_D1	1249.4	3.96
W_ph	637.9	12.25	Ves_W	752.3	9.44	AMS_D1	1298.6	3.62
W_ph	646.9	11.96	Ves_W	755.1	9.01	AMS_D1	1347.8	3.30
W_ph	659.1	11.55	Ves_W	770.0	8.98	AMS_D1	1397.1	3.01
W_ph	668.4	11.29	Ves_W	1052.5	4.77	AMS_D1	1446.3	2.74
W_ph	679.2	10.94	Ves_W	1101.7	4.22	AMS_D1	1495.5	2.49
W_ph	689.4	10.67	Ves_W	1151.0	3.72	MNV	685.5	11.08
W_ph	700.2	10.39	Ves_W	1200.2	3.29	MNV	706.1	10.71
W_ph	716.9	9.97	Ves_W	1249.4	2.91	MNV	743.8	10.03
W_ph	732.0	9.62	Ves_W	1298.6	2.56	MNV	769.3	9.56
W_ph	742.1	9.38	Ves_W	1347.8	2.25	MNV	816.8	8.76
W_ph	753.7	9.15	Ves_W	1397.1	1.96	MNV	1175.6	4.55

Table 4. (continued)

Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η
MNV	1200.2	4.36	PVC	1372.5	3.36	VES_Gt	707.5	10.55
MNV	1224.8	4.17	PVC	1397.1	3.20	VES_Gt	720.2	10.17
MNV	1249.4	3.97	PVC	1421.7	3.05	VES_Gt	729.2	9.78
MNV	1274.0	3.82	PVC	1446.3	2.91	VES_Gt	744.8	9.51
MNV	1298.6	3.65	PVC	1470.9	2.76	VES_Gt	756.3	9.13
MNV	1323.2	3.49	PVC	1495.5	2.63	VES_Gt	767.0	8.79
MNV	1347.8	3.33	PVC	1520.1	2.50	VES_Gt	1347.8	1.36
MNV	1372.5	3.18	PVC	1544.7	2.37	VES_Gt	1372.5	1.24
MNV	1397.1	3.03	PVC	1569.3	2.25	VES_Gt	1397.1	1.12
MNV	1421.7	2.89	PVC	1593.9	2.14	VES_Gt	1421.7	1.01
MNV	1446.3	2.75	UNZ	761.0	10.50	VES_Gt	1446.3	0.90
MNV	1470.9	2.62	UNZ	784.7	9.85	VES_Gt	1470.9	0.81
MNV	1495.5	2.50	UNZ	801.0	9.28	VES_Gt	1495.5	0.71
ATN	761.4	10.30	UNZ	818.0	8.91	VES_Gt	1520.1	0.62
ATN	774.5	10.11	UNZ	1101.7	4.66	VES_Gt	1544.7	0.53
ATN	794.3	9.73	UNZ	1126.4	4.44	VES_Wt	705.0	10.66
ATN	810.6	9.55	UNZ	1151.0	4.21	VES_Wt	724.4	10.15
ATN	830.9	9.11	UNZ	1175.6	4.00	VES_Wt	743.3	9.75
ATN	1151.0	4.60	UNZ	1200.2	3.80	VES_Wt	1347.8	1.88
ATN	1175.6	4.40	UNZ	1224.8	3.61	VES_Wt	1372.5	1.75
ATN	1200.2	4.20	UNZ	1249.4	3.43	VES_Wt	1397.1	1.63
ATN	1224.8	4.02	UNZ	1274.0	3.25	VES_Wt	1421.7	1.50
ATN	1249.4	3.83	UNZ	1298.6	3.08	VES_Wt	1446.3	1.38
ATN	1274.0	3.66	UNZ	1323.2	2.92	VES_Wt	1470.9	1.28
ATN	1298.6	3.48	UNZ	1347.8	2.76	VES_Wt	1495.5	1.17
ATN	1323.2	3.32	UNZ	1372.5	2.62	VES_Wt	1520.1	1.07
ATN	1347.8	3.16	UNZ	1397.1	2.48	VES_Wt	1544.7	0.97
ATN	1421.7	2.72	UNZ	1421.7	2.34	W_Tph	644.9	12.85
ATN	1446.2	2.58	UNZ	1446.3	2.21	W_Tph	657.6	12.05
ATN	1470.9	2.45	UNZ	1470.9	2.09	W_Tph	661.0	11.86
PVC	722.9	10.77	N_an	666.2	12.66	W_Tph	673.3	11.32
PVC	737.2	10.53	N_an	677.5	12.30	W_Tph	683.6	10.75
PVC	738.6	10.41	N_an	688.6	11.85	W_Tph	687.5	10.61
PVC	743.1	10.49	N_an	698.7	11.64	W_Tph	694.2	10.38
PVC	749.7	10.19	N_an	708.0	11.33	W_Tph	698.1	10.21
PVC	760.6	9.95	N_an	719.1	10.83	W_Tph	703.2	9.93
PVC	781.8	9.63	N_an	738.7	10.25	W_Tph	710.0	9.71
PVC	806.6	9.11	N_an	752.4	9.90	W_Tph	713.6	9.57
PVC	1200.2	4.59	N_an	763.7	9.67	W_Tph	719.0	9.30
PVC	1224.8	4.40	N_an	1396.8	2.19	W_Tph	724.1	9.18
PVC	1249.4	4.21	N_an	1445.9	1.97	W_Tph	735.0	8.73
PVC	1274.0	4.00	N_an	1494.9	1.74	W_Tph	1140.8	1.96
PVC	1298.6	3.85	N_an	1544.9	1.52	W_Tph	1190.4	1.65
PVC	1323.2	3.68	N_an	1593.9	1.33	W_Tph	1224.4	1.45
PVC	1347.8	3.52	VES_Gt	696.8	10.98	W_Tph	1240.1	1.38

Table 4. (continued)

Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η
W_Tph	1291.9	1.13	IGC	803.0	10.44	CRB	1398.0	0.83
W_Tph	1341.3	0.91	IGC	836.0	9.84	CRB	1445.0	0.62
W_Tph	1393.1	0.70	IGC	861.0	9.32	MHA	675.0	12.40
W_Tph	1445.5	0.50	IGC	1176.0	4.54	MHA	700.0	11.60
ETN	711.9	10.82	IGC	1200.0	4.34	MHA	725.0	10.90
ETN	715.9	10.70	IGC	1225.0	4.14	MHA	750.0	10.30
ETN	731.6	10.23	IGC	1249.0	3.94	MHA	775.0	9.80
ETN	1397.1	0.72	IGC	1274.0	3.76	MHA	800.0	9.30
ETN	1421.7	0.62	IGC	1299.0	3.58	MHA	825.0	8.60
ETN	1446.3	0.52	IGC	1323.0	3.40	MHA	1115.0	4.00
ETN	1470.9	0.43	IGC	1348.0	3.24	MHA	1165.0	3.56
ETN	1495.5	0.34	IGC	1373.0	3.08	MHA	1215.0	3.14
ETN	1520.1	0.26	IGC	1397.0	2.92	MHA	1260.0	2.77
ETN	1544.7	0.18	IGC	1422.0	2.77	MHA	1310.0	2.50
EIF	691.9	10.77	IGC	1446.0	2.63	MHA	1357.0	2.25
EIF	702.0	10.26	IGC	1471.0	2.49	MHA	1405.0	2.04
EIF	709.6	9.81	IGC	1496.0	2.37	MHA	1410.0	1.98
EIF	710.0	10.05	OAB	650.0	13.40	MHA	1455.0	1.70
EIF	1347.8	0.16	OAB	675.0	12.60	rhyolite	647.0	15.08
EIF	1372.5	0.07	OAB	700.0	11.70	rhyolite	715.0	13.77
EIF	1397.1	−0.02	OAB	725.0	10.80	rhyolite	790.0	12.49
EIF	1421.7	−0.09	OAB	750.0	9.90	rhyolite	795.0	12.26
EIF	1446.2	−0.16	OAB	775.0	8.90	rhyolite	818.0	11.87
EIF	1470.9	−0.22	OAB	800.0	8.50	rhyolite	821.0	11.51
NIQ	613.4	13.70	OAB	1150.0	2.00	rhyolite	855.0	11.02
NIQ	619.2	13.40	OAB	1200.0	1.53	rhyolite	856.0	11.02
NIQ	626.1	12.99	OAB	1250.0	1.24	rhyolite	858.0	10.92
NIQ	639.0	12.22	OAB	1300.0	0.90	rhyolite	862.0	10.87
NIQ	640.5	12.16	OAB	1350.0	0.69	rhyolite	863.0	10.90
NIQ	645.6	11.83	OAB	1400.0	0.51	rhyolite	865.0	10.84
NIQ	651.1	11.56	OAB	1450.0	0.28	rhyolite	884.0	10.62
NIQ	656.1	11.26	OAB	1500.0	0.02	rhyolite	913.0	10.07
NIQ	661.0	11.04	CRB	650.0	12.90	rhyolite	946.0	9.55
NIQ	667.8	10.75	CRB	675.0	11.70	rhyolite	948.0	9.57
NIQ	671.6	10.51	CRB	700.0	11.40	rhyolite	980.0	9.19
NIQ	679.7	10.17	CRB	725.0	10.60	rhyolite	1397.0	4.79
NIQ	685.1	9.93	CRB	750.0	10.20	rhyolite	1446.0	4.41
NIQ	686.4	9.88	CRB	775.0	9.20	rhyolite	1495.0	4.09
NIQ	693.3	9.57	CRB	800.0	8.70	rhyolite	1544.0	3.81
NIQ	698.9	9.35	CRB	1128.0	2.28	rhyolite	1594.0	3.50
NIQ	704.3	9.16	CRB	1195.0	1.94	rhyolite	1643.0	3.22
NIQ	709.8	8.94	CRB	1240.0	1.65	St Helens	735.9	10.60
NIQ	719.6	8.66	CRB	1295.0	1.38	St Helens	750.3	10.25
NIQ	1300.0	0.41	CRB	1370.0	1.03	St Helens	764.5	10.00
IGC	783.0	10.83	CRB	1385.0	0.90	St Helens	783.9	9.53

Table 4. (continued)

Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η
St Helens	802.7	9.25	HPG8An75	1299.0	2.99	STB	1520.1	0.45
St Helens	1298.0	3.22	HPG8An75	1349.0	2.61	STB	1544.7	0.37
St Helens	1347.0	2.91	HPG8An75	1399.0	2.27	STB	1569.3	0.28
St Helens	1397.0	2.61	HPG8An75	1449.0	1.89	STB	1593.9	0.21
St Helens	1446.0	2.35	HPG8An75	1499.0	1.61	Fra	711.9	10.98
St Helens	1495.0	2.11	HPG8An75	1549.0	1.35	Fra	713.7	10.99
St Helens	1544.0	1.87	HPG8An75	1599.0	1.11	Fra	734.0	10.65
St Helens	1594.0	1.66	MST	688.7	11.60	Fra	741.4	10.55
HPG8An10	876.9	10.51	MST	739.6	10.18	Fra	749.1	10.52
HPG8An10	892.6	10.25	MST	753.4	9.74	Fra	753.3	10.45
HPG8An10	927.4	9.75	MST	1200.2	3.25	Fra	765.7	10.05
HPG8An10	1449.0	4.13	MST	1224.8	3.06	Fra	771.3	10.11
HPG8An10	1499.0	3.81	MST	1249.4	2.90	Fra	1151.0	3.35
HPG8An10	1549.0	3.50	MST	1274.0	2.73	Fra	1175.6	3.16
HPG8An10	1599.0	3.24	MST	1298.6	2.58	Fra	1200.2	2.99
HPG8An10	1649.0	2.97	MST	1323.2	2.43	Fra	1224.8	2.83
HPG8An20	871.1	10.50	MST	1347.8	2.29	Fra	1249.4	2.67
HPG8An20	893.2	10.03	MST	1372.5	2.15	Fra	1274.0	2.52
HPG8An20	933.7	9.25	MST	1397.1	2.01	Fra	1298.6	2.38
HPG8An20	1349.0	4.40	MST	1421.7	1.89	Fra	1323.2	2.24
HPG8An20	1399.0	4.04	MST	1446.3	1.76	Fra	1347.8	2.10
HPG8An20	1449.0	3.71	MST	1470.9	1.65	Fra	1372.5	1.97
HPG8An20	1499.0	3.40	MST	1495.5	1.53	Fra	1397.1	1.85
HPG8An20	1549.0	3.12	MST	1520.1	1.43	Fra	1421.7	1.72
HPG8An20	1599.0	2.85	MST	1544.7	1.32	Fra	1470.9	1.50
HPG8An20	1649.0	2.60	MST	1569.3	1.21	Fra	1495.5	1.40
HPG8An50	852.9	10.60	MST	1593.9	1.11	Fra	1520.1	1.29
HPG8An50	894.2	9.52	MST	1618.6	1.04	Fra	1544.7	1.19
HPG8An50	916.0	9.10	STB	697.9	10.51	Fra	1569.3	1.08
HPG8An50	928.3	8.70	STB	729.5	9.35	Fra	1593.9	1.02
HPG8An50	1199.0	4.49	STB	1151.0	2.39	CI_OF	780.3	10.35
HPG8An50	1249.0	4.02	STB	1175.6	2.21	CI_OF	797.2	10.08
HPG8An50	1299.0	3.59	STB	1200.2	2.02	CI_OF	822.8	9.56
HPG8An50	1349.0	3.22	STB	1224.8	1.86	CI_OF	836.3	9.31
HPG8An50	1399.0	2.88	STB	1249.4	1.70	CI_OF	856.3	9.00
HPG8An50	1449.0	2.56	STB	1274.0	1.56	CI_OF	1249.4	4.13
HPG8An50	1499.0	2.27	STB	1298.6	1.42	CI_OF	1274.0	3.94
HPG8An50	1549.0	2.01	STB	1323.2	1.29	CI_OF	1298.6	3.76
HPG8An75	872.5	10.22	STB	1347.8	1.16	CI_OF	1323.2	3.59
HPG8An75	910.7	9.12	STB	1372.5	1.06	CI_OF	1347.8	3.42
HPG8An75	928.2	8.69	STB	1397.1	0.95	CI_OF	1372.5	3.25
HPG8An75	931.8	8.60	STB	1421.7	0.84	CI_OF	1397.1	3.10
HPG8An75	1149.0	4.46	STB	1446.3	0.74	CI_OF	1421.7	2.94
HPG8An75	1199.0	3.90	STB	1470.9	0.64	CI_OF	1446.3	2.80
HPG8An75	1249.0	3.40	STB	1495.5	0.54	CI_OF	1470.9	2.66

Table 4. (continued)

Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η	Name	T(℃)	log η
CI_OF	1495.5	2.52	MRP	722.9	10.50	MDV	882.3	10.11
CI_OF	1520.1	2.39	MRP	1126.4	3.22	MDV	919.6	9.43
CI_OF	1544.7	2.26	MRP	1151.0	3.01	MDV	954.7	8.92
CI_OF	1569.3	2.14	MRP	1175.6	2.81	MDV	1372.5	4.53
CI_OF	1593.9	2.02	MRP	1200.2	2.62	MDV	1397.1	4.36
SLP	688.3	10.53	MRP	1224.8	2.44	MDV	1421.7	4.18
SLP	696.6	10.08	MRP	1249.4	2.28	MDV	1446.3	4.01
SLP	719.3	9.42	MRP	1274.0	2.12	MDV	1470.9	3.84
SLP	730.1	9.01	MRP	1298.6	1.97	MDV	1495.5	3.69
SLP	1249.4	0.81	MRP	1323.2	1.82	MDV	1520.1	3.53
SLP	1274.0	0.68	MRP	1347.8	1.68	MDV	1544.7	3.38
SLP	1298.6	0.56	MRP	1372.5	1.56	MDV	1569.3	3.24
SLP	1323.2	0.45	MRP	1397.1	1.43	MDV	1593.9	3.10
SLP	1347.8	0.34	MRP	1421.7	1.31	MDV	1618.6	2.96
SLP	1372.5	0.24	MRP	1446.3	1.20	MDV	1643.2	2.83
SLP	1397.1	0.15	MRP	1470.9	1.09	UNZ_andesite	745.0	11.31
SLP	1421.7	0.05	MRP	1495.5	0.99	UNZ_andesite	755.0	10.91
SLP	1446.3	−0.03	MRP	1520.1	0.89	UNZ_andesite	765.0	10.55
SLP	1470.9	−0.12	MRP	1544.7	0.80	UNZ_andesite	775.0	10.32
SLP	1495.5	−0.19	MRP	1569.3	0.70	UNZ_andesite	805.0	9.49
SLP	1520.1	−0.24	MRP	1593.9	0.61	UNZ_andesite	816.0	9.03
SLP	1544.7	−0.31	MDV	817.8	11.20	UNZ_andesite	825.0	9.02
MRP	716.0	10.60	MDV	864.7	10.45			

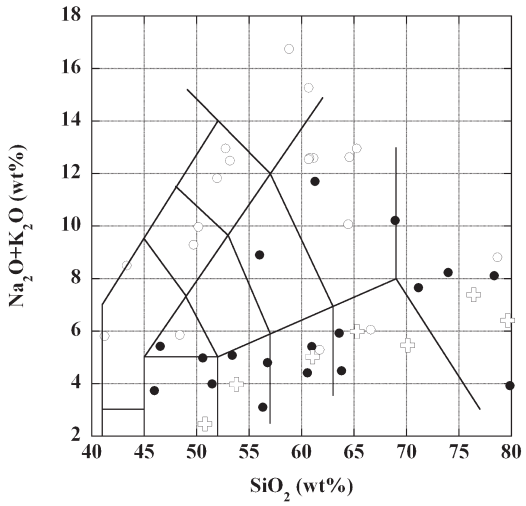

Fig. 2. Total alkalis versus SiO_2 diagram of the samples used in the present study. Open circles: samples from literature used either for viscosity comparison and G&W model construction; closed circles: samples from literature used for viscosity comparison but NOT for G&W model construction; crosses: samples used for Goto model construction (Table 2).

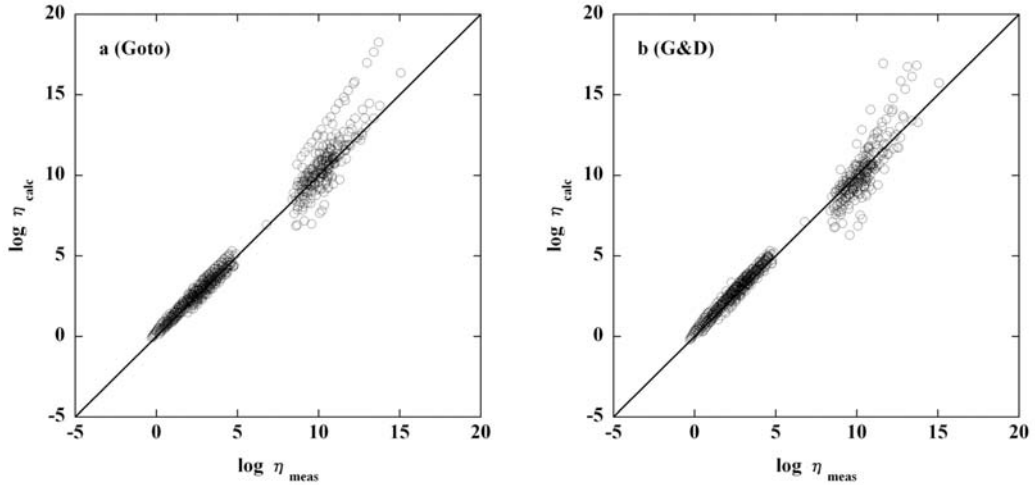

Fig. 3. Comparisons of experimental viscosity form literatures (log η meas) with calculated ones (log η calc) by Goto model (a) and G&D model (b).

ように（6）式が求められており，これを精度良く計算できるのは当然であるが，独立に求められた Goto モデルでも，標準偏差がわずかに大きいものの，G&D モデルとほぼ遜色なく測定値を再現できていることがわかる．Goto モデルとの一致が悪い NIQ と，G&D モデルとの一致が悪い Td_ph を双方の低温データから除いた場合は，むしろ Goto モデルのほうが良い一致を示す．

G&D モデルに使われなかった試料（Fig. 5）については，二つのモデルともに，むしろ使われた場合（Fig. 4）より良い計算値が得られた．Fig. 2 を見ると G&D モデルに使われた試料はアルカリ金属に富んだものが多く，そのような試料に対しては計算精度がやや劣るようだ．Fig. 5 により，G&D モデルも任意の火山岩に対して十分適用可能であることが確認されたが，標準偏差を比べると，低温では G&D モデルに使われた Fig. 4 の場合と比べて二つのモデルの差が縮まり，さらに高温では Goto モデルのほうがわずかながら小さい．G&D モデルがこの組成域の試料をあまり含んでいないのに対し，Goto モデルに使われた試料は Fig. 5 のと同じ組成域に含まれるのが一因だろう．

Goto モデルは構築に用いられた試料の少なさがひとつの問題だったが，わずか 7 試料の測定から求められたパラメータで，Fig. 4 のデータを含め，広い温度・組成域で G&D モデルに遜色なく粘性係数を求められると確認されたのは注目に値する．これは Shaw（1972）の S（(2) 式）が粘性に対する化学組成の寄与を適切に表現していることと，(3) 式が理論的裏付けをもつことに起因すると考えられ，Goto モデルが多くの火山岩に対して普遍的に適用できることを支持する．これに対して G&D モデルは，標準偏差ではあまり差がないものの，Goto モデルより（計算値）－（測定値）の頻度分布の幅が大きい，すなわち測定値と極端に異なる値を算出する場合があることがわかる（Fig. 4c，Fig. 5c, d）．Goto モデルとは逆に，(5) 式が理論的背景をもたず，単に与えられたデータセットを再現できるように（6）式が決定されていることも考

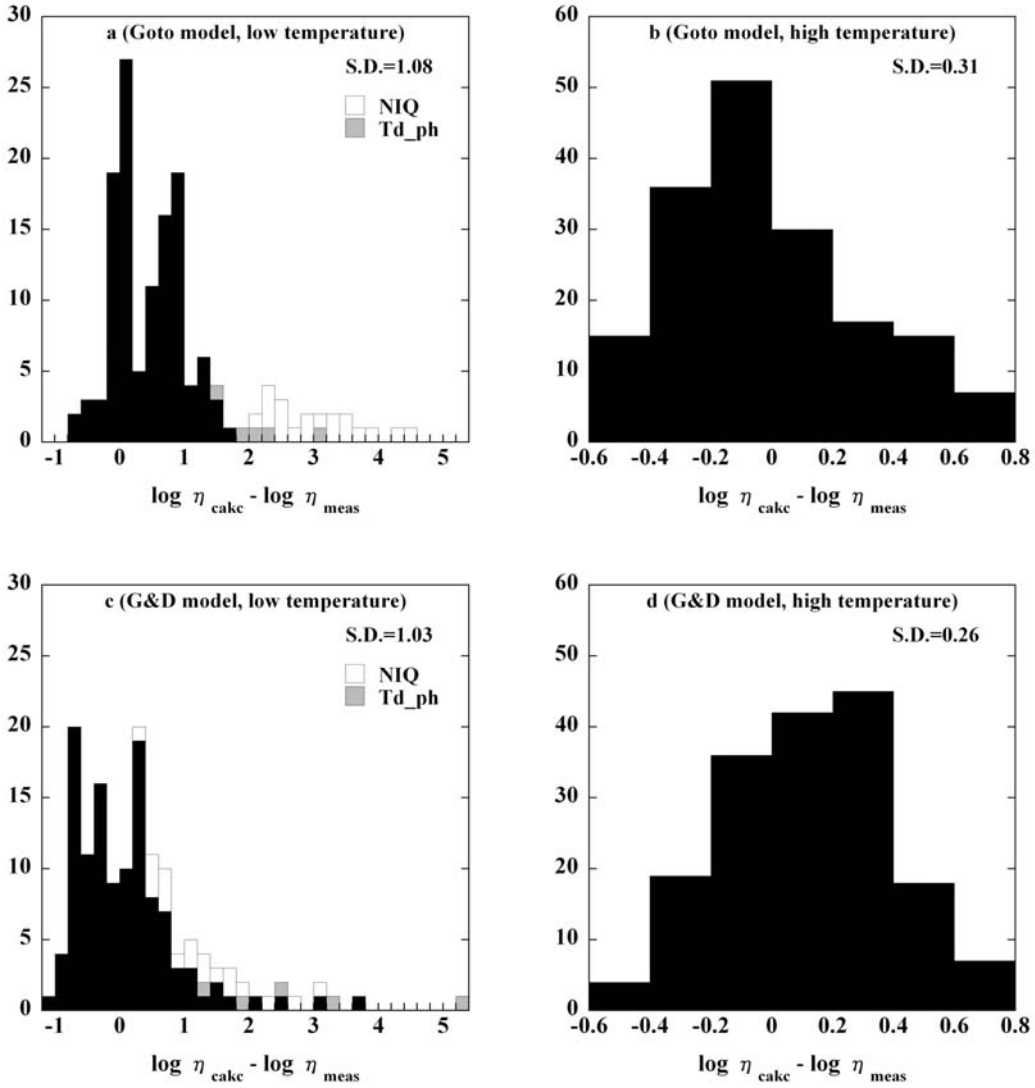

Fig. 4. Deviation histograms of logarithmic calculated viscosity (log η calc) from logarithmic measured viscosity (log η meas), together with standard deviations, for the samples from literature used for G&D model construction. a: Goto model, low temperature; b: Goto model, high temperature; c: G&D model, low temperature; d: G&D model, high temperature. In a and c, NIQ and Td_ph, those viscosity are not evaluated successfully by Goto model and G&D model, respectively, are shown using different symbols.

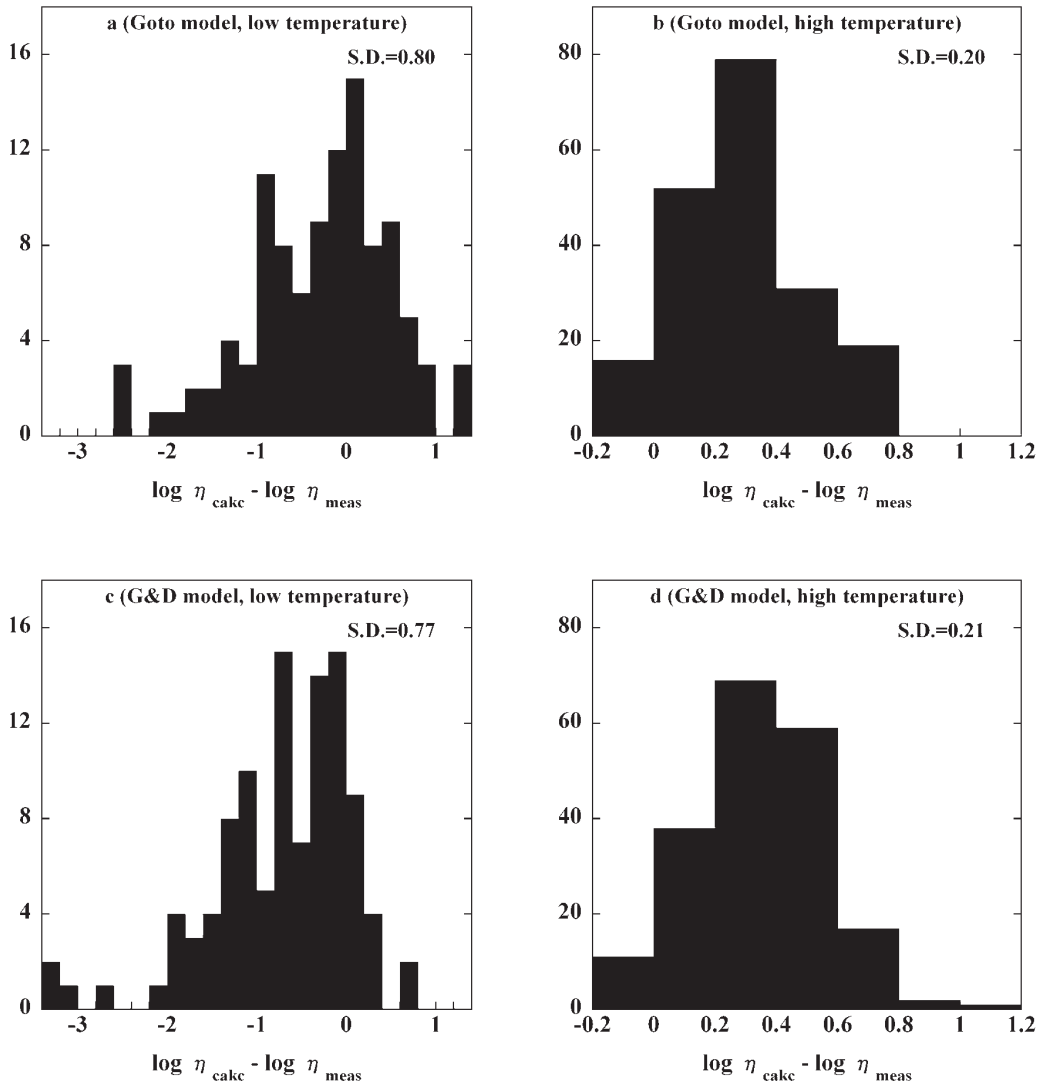

Fig. 5. Deviation histograms of logarithmic calculated viscosity (log η calc) from logarithmic measured viscosity (log η meas), together with standard deviations, for the samples from literature NOT used for G&D model construction. a: Goto model, low temperature; b: Goto model, high temperature; c: G&D model, low temperature; d: G&D model, high temperature.

えると，G&D モデルの汎用性が保証されるとは必ずしも言えないだろう．

IV. ま と め

37 試料，608 測定値の文献データに対して Goto モデルで粘性係数を計算したところ，G&D モデルに遜色ない結果が得られた．Goto モデルがわずか 7 試料のガラス転移温度及び粘性係数測定値をもとに構築されたにも関わらず，不特定な火山岩に対して良好な計算値を与えたことは，Shaw（1972）のパラメータ S の採用が妥当であったことと，基礎式である WLF 式が理論的裏付けをもっていることが背景にあると考えられ，このモデルの汎用性が支持される．

謝辞　本論は，著者の博士後期課程での研究の一部がもととなっている．ご指導下さった西田泰典名誉教授，前田亟博士，大島弘光准教授に感謝いたします．

文　　献

Adam, G. and J. H. Gibbs, 1965. On the temperature dependence of cooperative relaxation properties in glass forming liquids, *J. Chem. Phys.*, **43**, 139-146.

Alibidirov, N., D.B. Dingwell, R.J. Stevenson, K.U. Hess, S.L. Webb and J. Zinke, 1997. Physical properties of the 1980 Mount St. Helens cryptodome magma, *Bull. Volcanol.*, **59**, 103-111.

Bottinga, Y. and D. F. Weill, 1972. The viscosity of magmatic silicate liquids : a model for calculation, *Amer. Jour. Sci.*, **272**, 438-475.

Bottinga, Y., P. Richet and A. Sipp, 1995. Viscosity regimes of homogeneous silicate melts, *Amer. Mineral.*, **80**, 305-318.

Dingwell, D. B., C. Romano and K. U. Hess, 1996. The effect of water on the viscosity of a haplogranitic melt under P-T-X-conditions relevant to silicic volcanism, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **124**, 19-28.

Dingwell, D.B., K.U. Hess and C. Romano, 2000. Viscosities of granitic (sensu lato): Influence of the anorthite component, *Amer. Mineral.*, **85**, 1342-1348.

Giordano, D. and D.B. Dingwell, 2003a. Non-Arrhenian multicomponent melt viscosity: A model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **208**, 337-349.

Giordano, D. and D.B. Dingwell, 2003b. Viscosity of hydrous Etna basalt: implications for Plinian-style basaltic eruptions, *Bull. Volcanol.*, **65**, 8-14.

Giordano, D., D. B. Dingwell and C. Romano, 2000. Viscosity of a Teide phonolite in the welding interval, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **103**, 239-245.

Giordano, D., C. Romano P. Papale and D.B. Dingwell, 2004. The viscosity of trachytes, and comparison with basalts, phonolites, and rhyolites, *Chem. Geol.*, **213**, 49-61.

Giordano, D., A. Mangicapra M. Potuzak J.K. Russell, C. Romano, D.B. Dingwell and A. DiMuro, 2006. An expanded non-Arrhenian model for silicate melt viscosity: A treatment for metaluminous, peraluminous and peralkaline melts, *Chem. Geol.*, **229**, 42-56.

Giordano, D., J. K. Russell and D.B. Dingwell, 2008. Viscosity of magmatic liquids: A model, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **271**, 123-134.

Goto, A., 1997. An experimental study on the viscosity of some silicate melts, *Doctoral Thesis, Graduate School of Science, Hokkaido University*, 56pp.

Goto A., I. Maeda Y. Nishida and H. Oshima, 1997. Viscosity－Equation for magmatic silicate melts over a wide temperature range, In *Proceedings Unzen Intern; Workshop: Decade Vulcano and Scientific Drilling*, pp.100-105. Shimabara, Japan.

Hidaka, M., A. Goto, S. Umino and E. Fujita, 2005. VTFS project: Development of the lava flow simulation code LavaSIM with a model for three-dimensional convection, spreading, and solidification, *Geochem. Geophys. Geosys.*, **6**, Q07008, DOI 10.1029/2004GC000869.

Hui, H. and Y. Zhang, 2007. Toward a general viscosity equation for natural anhydrous and hydrous silicate melts, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **71**, 403-416.

Liebske, C., H. Behrens, F. Holtz and R.A. Lange, 2003. The influence of pressure and composition on the viscosity of andesitic melts, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 473-485.

Murase, T. 1962. Viscosity and related properties of volcanic rocks at 800 to 1400 ℃, *Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **6**, 487-584.

Murase, T. and A. R. McBirney, 1973. Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **84**, 3563-3592.

Neuville, D. R., P. Courtial, D. B. Dingwell and P. Richet, 1993. Thermodynamic and rheological properties of rhyolite and andesite melts, *Contrib. Mineral. Petrol.*, **113**, 572-581.

Richet, P., 1984. Viscosity and configurational entropy theory of silicate melts, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 471-483.

Romano, C., D. Giordano, P. Papale, V. Mincione and D.B. Dingwell, 2003. The dry and hydrous viscosities of alkaline melts from Vesuvius and Phlegrean Fields, *Chem. Geol.*, **202**, 23-38.

Shaw, H. R., 1972. Viscosities of magmatic silicate liquids : an empirical method of prediction, *Amer. Jour. Sci.*, **272**, 870-893.

Taniguchi, H., 1993. On the volume dependence of viscosity of some magmatic silicate melts, *Min. Petrol.*, **49**, 13-25.

Taniguchi, H., 1995. Universal viscosity-equation for silicate melts over wide temperature and pressure ranges, *Volcanol. Geotherm. Res.*, **66**, 1-8.

Taniguchi, H. and T. Murase, 1987. Some physical properties and melt structure in the system diopside-anorthite, *Volcanol. Geotherm. Res.*, **34**, 51-64.

Whittington, A., P. Richet and F. Holtz, 2000. Water and the viscosity of depolymerized aluminosilicate melts, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **64**, 3725-3736.

Whittington, A., P. Richet, Y. Linard and F. Holtz, 2001. The viscosity of hydrous phonolites and trachytes, *Chem. Geol.*, **174**, 209-223.

Williams, M. L., R. F. Landel and J. D. Ferry, 1955. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids, *Amer. Chem. Soc.*, **77**, 3701-3707.