

資 料

539.32 : 552.1

温度と相関関係のある岩石の弾性係数の研究*

M. P. Volarovich, A. S. Gurvich

小 西 善 治 訳

岩石試料に及ぼす高温、高压の同時的作用の実験は、地殻内の条件を模して行われているので、地震理論の発展と関連して興味ある。しかしこの種研究はきわめて困難である。高温、高压下における岩石の剪断係数に関する Birch, Bancroft の研究、超音波パルス方式によつて行われた試料、岩石の弾性波速度に及ぼす高温、高压の影響に関する Gross の研究は有名である。ある種の研究は、室温下の圧力と岩石の弾性係数との相関関係を追跡し、ある種のもの、大気圧下の高温度影響を研究している。

この種研究は周知のように少ない。とくに高温、高压下における試料岩石の振盪の減衰効果に関する研究はきわめて少ない。もちろんこの問題は地震探査にとつて重要である。したがつて岩石の弾性係数に及ぼす高温の影響と熱の吸収性質との研究は興味がある。

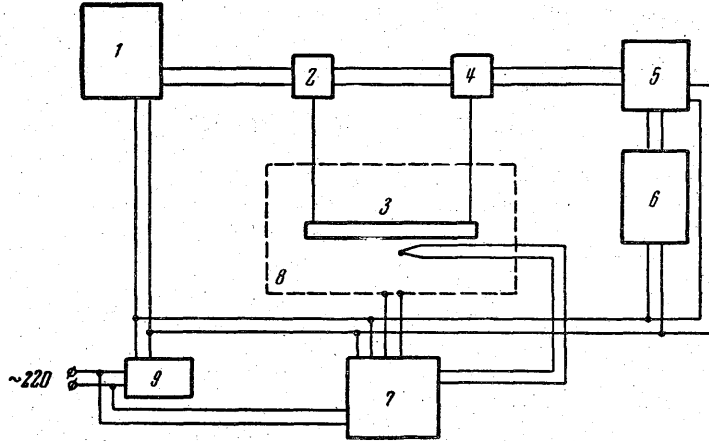
上述の目的で試料棒の変形振動の共振周波数測定を基にして、ヤング率を決定する音響法 (acoustic method) を選んだ。この動力学的方法は、精度が高いので、高温領域における研究に適する。A. S. Gurvich は 1,000° までの温度の下でほうろう質製品および他の窯業製品の弾性係数と減衰曲線との研究にこの方法を使用した。現在音響方法は、とくに高温下の金属の弾性性質の研究に広く使用されている。ヤング率および剪断係数の動力学的研究方法の変形したものが 2, 3 知られている。Crendall と Ging とは、高温下で耐火材料の弾性係数の測定にこの動的方法を使用している。しかしこれらの方法は、多くの場合室温と標準圧下の岩石の研究に利用されている。凝固時における岩石熔融液の転位係数を決定する特殊な方法は Volarovich が研究した。

研究装置と方法

岩石実験には第 1 図に示されてある Gurvich の装置を使用した。まず縦断面 $11 \times 0.8 \times 0.7$ cm (あるいはそれに近い大きさ) の棒につくられた岩石試料の末端はループ状の細いニクロム線の pickup 中にはめこむ。次にこの試料は、分解できる電気炉—これには熱制御装置が取り付けられてある—中に水平に置かれる。たゞしこの場合、電気炉はあらかじめ加熱しておく。pickup は試料棒の支えになるとともに、試料と振動励起装置とを結びつける役割を果す。特殊実験によると、試料の目方 8~10 g で温度 1,000° の下で信頼度の高い最良 pickup 材料は、直径 0.03 mm のニクロム線であつて、それより目方の重いものでは 2 重に合わせたものを使用した。以下に述べる実験は、温度を step-like にあげて行われた。この場合試料は共振周波数が一定値になるのに必要なある時間の間、一定の温度のもとにおかれた。

振動励起装置は普通の動力学的振動を電気力学的振動に変換する変換装置に役立った。受容装置としては、電磁式音受振装置の作動に成功した。この装置には Needle の代りに軽いアルミナ製の hook を挿入した。この hook に pickup の loop をはめ込んだ。励起装置と受振装置とは電気炉外に取り付けられた。2 つのこの種電気力学的変換装置は、特殊の遮蔽装置 (このなかには水が循環するようになってい) り) によつて炉の温度輻射を防止した。

* Волярович, М. П. & А. С. Гурвич: Исследование динамического модуля упругости горных пород в зависимости от температуры, Известия академии наук СССР, Серия геофизическая, No. 4, 1957

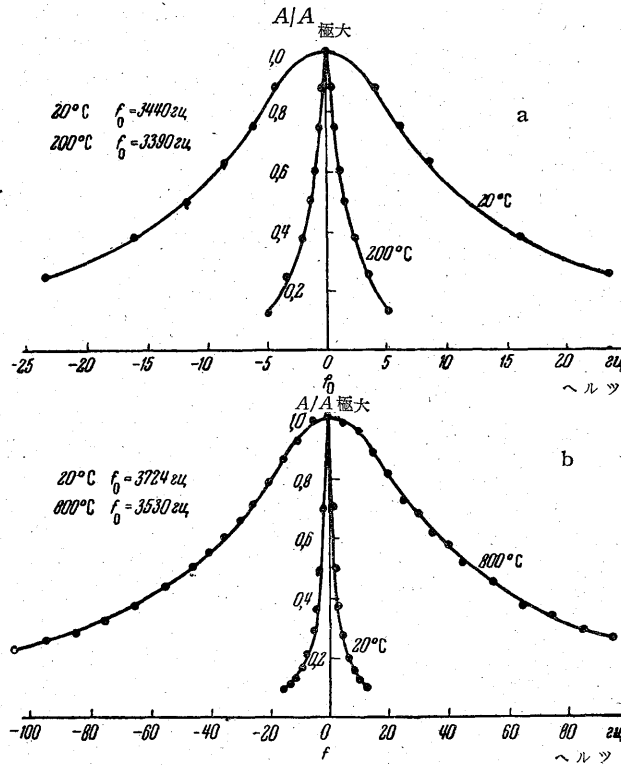


第1図 弾性係数測定用装置のブロック模式

1. 音波発生装置 2. 変換, 励起装置 3. 試料 4. 受振装置 5. 増幅装置
6. 陽極オシログラフ 7. 制御装置 8. 炉 9. 応力安定装置

振動源としては、3g—2A型音響発振器が用いられ、振動数を変えて、試料の共振曲線を決定した。受振装置は増幅装置に接続されたが、indicatorとしては陽極オシログラフが利用された。音響発振器—印荷励起装置—から発する（剪断応力によって生じる）音響の振動周波数が岩石資料棒に生じた変形振動の共振周波数と一致する場合にはオシログラフに遮蔽現象が起るので信号装置の振幅が著しく大きくなった。

第2図には種々の温度下で砂岩 (No. 144) ならびに玄武岩玻璃で求められた共振曲線例が示



第2図 種々の温度下における試料の変形振動の共振曲線

a—砂岩 b—玄武岩の溶融玻璃

第1表 種々の温度下におけるγ岩石試料のヤング率の平行測定成績

温 度 (°C)	輝緑岩 No.3 Onezhskii		玄武岩 No.4 Kutaisskii		玄武岩No.21 Berestovet- skii		花 崗 岩 No. 104 Garmskii (中部アジア)		白雲石No. 26 Gazganskii	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	20	10.4	10.4	6.42	7.30	7.08	7.13	6.32	6.44	7.08
100	10.2	10.3	6.41	7.23	6.97	7.03	6.01	—	5.64	5.50
200	8.95	8.90	6.34	7.03	6.68	6.72	4.36	4.35	4.02	3.88
300	7.76	7.82	6.19	6.80	6.39	6.47	3.32	3.27	3.10	2.88
400	6.15	6.20	5.64	6.26	5.59	5.65	2.40	2.42	2.70	2.66
500	4.83	4.81	5.23	5.76	5.18	5.28	1.70	1.82	2.52	2.50
600	3.31	3.26	5.04	5.51	4.99	5.07	0.76	0.82	2.49	2.45
700	—	—	5.07	5.43	4.96	5.10	0.66	—	2.23	2.25
800	—	—	5.15	5.60	5.10	5.20	0.60	—	1.45	—
900	—	—	5.34	—	5.31	5.37	—	—	0.43	—
1000	—	—	—	—	5.45	5.60	—	—	—	—

註) I と II 2 試料の平行実験

第2表 種々の温度下での石英と砂岩との縦波の速度 v, 減衰曲線 1/q, ヤング率 E

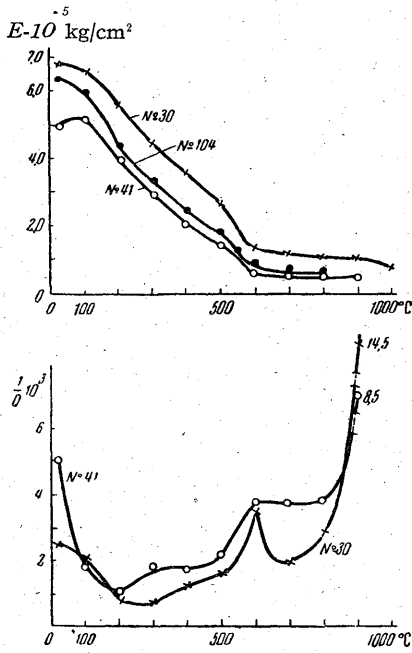
温 度 (°C)	石 英 No. 22*				砂 岩 No. 107		
	E · 10 ⁻⁵	(kg/cm ²)	1/q · 10 ³	v · 10 ⁻³ (m/sec)	E · 10 ⁻⁵ (kg/cm ²)	1q · 10 ³	v · 10 ⁻³ (m/sec)
20	7.91	7.97	2.9	5.75	6.45	6.1	5.45
100	7.78	7.81	2.0	5.71	6.26	2.5	5.06
200	7.66	7.74	1.4	5.65	5.98	1.8	4.95
300	7.17	7.28	1.0	5.49	5.67	1.8	4.83
400	6.16	6.27	1.7	5.08	5.09	1.7	4.57
500	5.05	5.10	1.8	4.60	4.59	2.0	4.35
550	4.25	4.38	3.5	4.22	3.88	5.1	3.98
575	3.29	3.23	7.8	3.72	3.26	7.2	3.66
600	4.30	4.34	3.5	4.24	3.69	2.8	3.90
625	4.53	—	2.3	4.36	—	—	—
650	4.60	4.62	2.0	4.39	3.98	4.3	4.05
700	4.68	4.74	1.5	4.43	4.08	4.8	4.10
800	4.80	4.81	1.3	4.49	4.20	4.3	4.15
900	4.95	—	1.7	4.55	4.55	5.8	4.33
1000	5.62	—	4.0	4.86	4.76	12.5	4.81

* 2 試料の平行実験

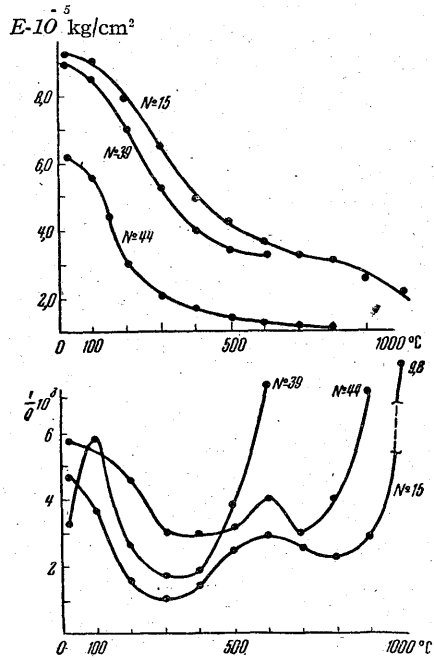
されてある。高温度下では、音響の吸収に関連して、共振曲線は著しく緩やかになっている。
共振装置のスケルで読み取られた共振周波数には、剪断応力と回転慣性との補正を行った。
共振周波数の補正值 f_1 は次式によつて決定された。

$$f_1 = f_0 \left(1 + \alpha \frac{h^2}{l^2} \right)$$

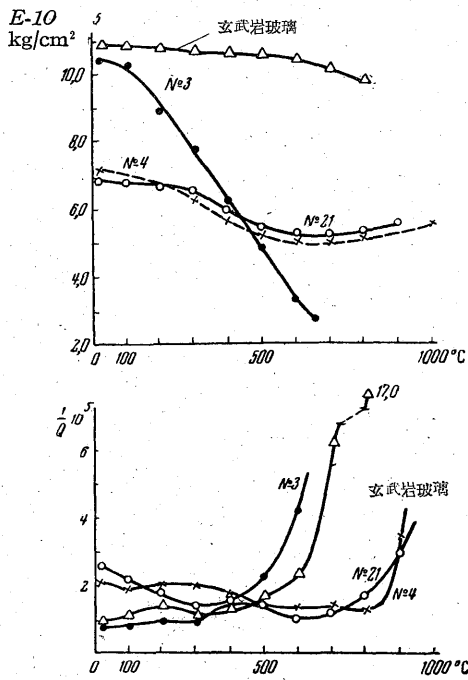
h は振動面における試料棒の厚さ、 l は試料棒の長さ、 α 値は素材のポアソン係数 μ によつて異なる。 $\mu=0, \alpha=8.3$; $\mu=0.2, \alpha=9.6$; $\mu=0.33, \alpha=10.4$ 、本研究の岩石の μ 値は決定されなかつた。文献データによると信頼度の高い近似値として 0.2をとることができる(ポアソン係数は温度によつて僅かに異なる)。



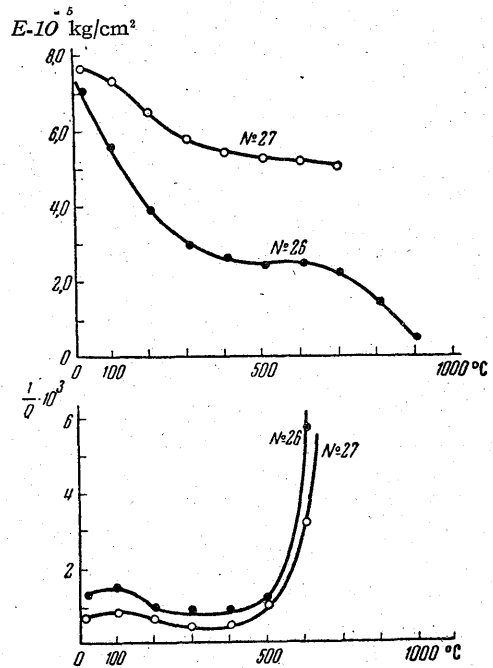
第3図 Garmsh 産中粒花崗岩 No. 104, Yaltsenskii 花崗岩 No. 30, 花崗岩 No. 41 の(振動)減衰および動的ヤング弾性率と温度との相関関係を示す



第5図 閃綠岩 No. 39, 斑隲岩 No. 15, 曹灰長石 No. 44 の振動の減衰およびヤング弾性率と温度との相関関係を示す



第4図 Onezhskii 輝綠岩 No. 3, Kuttaiskii 玄武岩 No. 4, Berestovetskii 玄武岩 No. 21, Kuttaiskii 玄武岩から溶融された玻璃の振動の減衰およびヤング弾性率と温度との相関関係を示す



第6図 Gazganskii 白雲石 No. 26, Garuzinskii 石灰岩 No. 27 の振動減衰およびヤング弾性率と温度との相関関係を示す

ポアソン係数値の不決定性は、測定結果に著しい誤差を招かない。これは次の事実をみれば明らかである。上述寸法の試料測定を行う場合には廻転の慣性効果の補正值はポアソン係数が 0.2 から 0.3 に増加しても 0.1 以下の変動にとどまるからである。室温下での上述寸法の岩石試料の共振周波数は、3,000 ~ 4,000 (ヘルツ) 範囲であつた。ヤング率の計算は次式によつた。

$$E = \frac{48}{\pi^2 \beta^4} \frac{l^2 f^2 \gamma}{h^2}$$

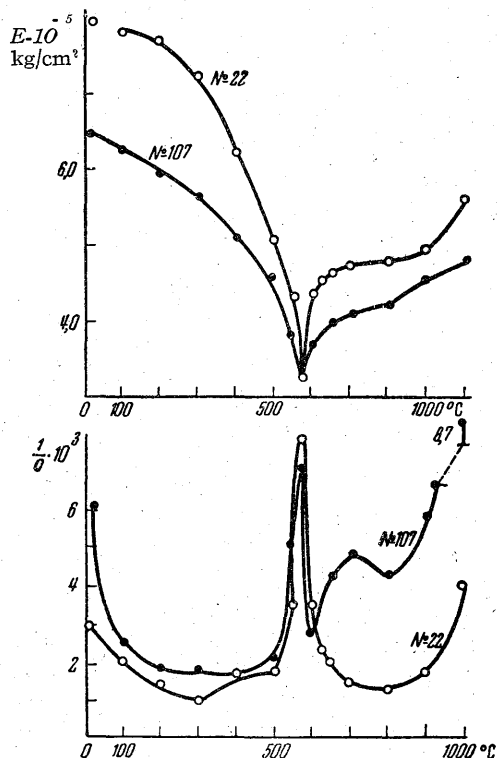
γ は素材の容量、 β は振動型で決められる係数、自由端をもつ試料の曲げ振動の主音では $\beta = 1.5056$ である。他の記号は 1 式と同じである。高温下でのヤング率の決定精度は 2 ~ 3 % である。

研究岩石には、2 つの異なる試料ごとに平行実験を行つた。第 1, 2 表には No. 3 輝緑岩, No. 4 および 21 玄武岩, No. 104 花崗岩, No. 26 大理石, No. 22 石英のそれぞれの実験結果が示されてある。表からみられるように、No. 4 の玄武岩を除けば、平行実験結果はきわめてよく一致している。同一岩石の 2 つの異なる試料のヤング率値の差は 5 % を超えない。

第 3 ~ 6 図にはヤング率 E と温度によつて異なる $(1/q)$ 振動減衰曲線に比例する値が示されてある。この図表から次の現象が認められる。玄武岩を除く他の岩石類では、弾性率は温度の上昇に伴つて規則的に減少する。この場合花崗岩 (第 3 図) には弾性率の減少が 600° まで著しく現われるが (約 $\frac{1}{6}$)、さらに 900° までほとんど一定の値を示す。温度の上昇を伴うヤング弾性率の著しい減少は、輝緑岩・斑礫岩・閃緑岩および曹灰長石でも起きる。玄武岩に関しては、温度の上昇に伴う弾性率の低下は大きくなく (20%) 600° に達すると若干上昇する傾向を示す。堆積岩・石灰岩および白雲石では 20° から 400° までの温度変化で弾性率の著しい低下が表われる。さらに加熱すると、この種岩石の弾性率は、岩石の分解が認められる温度までほとんど一定の値を保つ。

粗粒岩石 (花崗岩・曹灰長石) では、初期には減衰はきわめて大きく、次で 300° までは温度の上昇によつて低下するが、さらにこの温度を超えると相当高温でも著しく上昇し始める。細粒岩石、例えば玄武岩・輝緑岩および堆積岩では $t = 20^\circ$ の場合の減衰値は比較的大きくない。ある温度範囲では、その値の変化は小さいが、さらに高温になると減衰値は花崗岩の場合のように著しく増大してくる。

玄武岩を熔融してつくられた玻璃 No. 4 (しばしば晶状を示す) ではヤング率は原玄武岩の 1.5 倍になる。 800° まで加熱すると、ヤング率は、僅か 10% の低下を示す。減衰率は初期にはほとんど一定であるが 600° から始まつて著しく大きくなる。特異な挙動は、



第 7 図 石英 No. 22 試料と砂岩 No. 107 との動的ヤング率および減衰率 $1/q$ との温度的相関関係を示す

晶質石英からなる岩石中で認められる (第7, 8図参照)。

この図からみられるように, 砂岩および珪岩中では, ヤング率は 500° まで最初緩やかに低下し, 次で著しく低下を示し, $t = 575^\circ$ で最低値に達する。この温度を超すと, ヤング率はふたたび上昇を始める。したがってこの現象と対応して 575° では極大減衰率が表われる。この種岩石のこのような挙動は $t = 575^\circ$ で起こる石英の同質異像の転移で説明できる。石英は, 文献から知られているように, この温度でヤング率の極小値を示す。

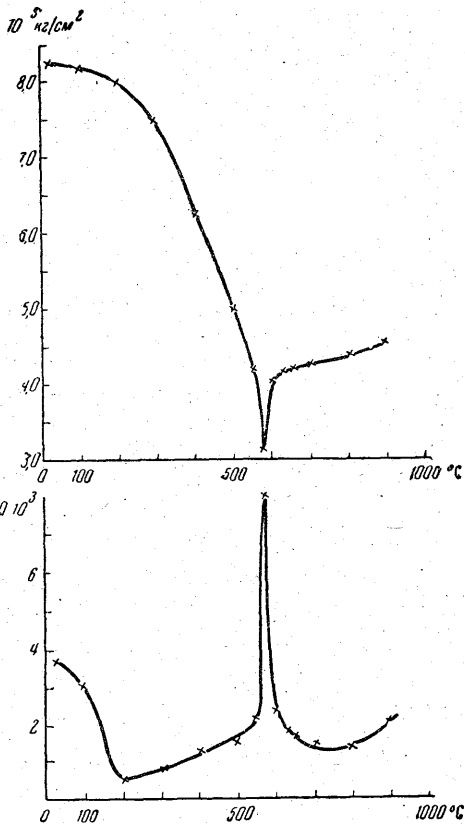
求められた以上のデータを基にして, 与えられた岩石の縦波 (弾性) の伝達速度を周知の次式を利用し計算することは興味がある。

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

こゝでは金岩石のポアソン係数は, すでに述べたように, 温度と無関係に 0.2にとる。この式から算出された種々の温度下の縦波の速度は第3表に示されてある。

石英および砂岩の対応速度値は第2表に示してある。加熱による岩石密度の変化は大きくないから, この場合における弾性波の速度変化はヤング率の変化で決められる。室温下での縦波の速度値は文献で知られている速度に近い値が求められた。

高温下での加熱後には大多数の岩石には, 見掛上, 多数の微割れ目の出現と関連して, 強さ (脆弱性) が著しく低下するのが認められることを指摘しておこう。高温, 高圧下, すなわち地球内部に存在する状態を模した条件のもとで岩石の弾性率を研究するのはきわめて興味がある。



第8図 No. 144 砂岩の動的ヤング率と減衰率との温度的相関関係を示す

結 論

1) ヤング率を研究するために, 測定棒の振り振動の共鳴方法を使用した。この場合岩石を削つて縦断面 $11 \times 0.8 \times 0.7 \text{ cm}$ の測定棒を作り, ニクロム線の hanger で電気炉中に装入れた。炉温は $1,000^\circ$ まであげた。

2) 振動励起装置を電気動力学的変形に使用し, 受振装置として電磁式 sound pickup を用いた。振動源—音響発生装置—の周波数を変えて, 試料の共鳴周波数を決定した。求められた共鳴曲線から, 岩石のヤング率ならびに減衰状態 (機械的ロス) を計算した。

3) 岩石試料の研究によれば花崗岩・玄武岩・輝緑岩・石灰岩・大理石のヤング率は, 温度の上昇によつて遞減する。この場合花崗岩のヤング率は, 温度 600° までは $1/10$ 減少してさらに 900° ではほとんど一定となる。玄武岩では, 温度上昇によるヤング率の低下度は低い。高温領域では, 岩石の減衰度が著しく現われる。玄武岩から作られた玻璃 (部分的には晶質)

第3表 種々の温度下で岩石中を伝達する縦波の速度

温 度 (°C)	v · 10 ⁻³ m/sec										
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
輝緑岩 Onezhskii No. 3	6.16	6.13	5.72	5.34	4.75	4.20	3.50	—	—	—	—
玄武岩 Berestovetskii No. 21	5.19	5.17	5.06	4.95	4.64	4.45	4.37	4.36	4.41	4.51	4.57
玄武岩 Kutaiskii No. 4	5.18	5.16	5.10	5.03	4.82	4.64	4.54	4.53	4.58	4.65	—
玄武岩玻璃 No. 4	6.27	6.24	6.21	6.18	6.16	6.15	6.11	6.03	5.94	—	—
斑 礫 岩 No. 15	5.94	5.88	5.52	4.98	4.45	4.03	3.72	3.52	3.43	3.11	2.86
閃 綠 岩 No. 39	5.89	5.73	5.20	4.54	3.90	3.64	3.56	—	—	—	—
曹灰長石 No. 44	5.32	5.09	4.50	3.74	3.13	2.83	2.62	2.47	2.32	2.27	—
中粒花崗岩 Garmskii No. 104	5.13	5.00	4.25	3.72	3.15	2.67	1.77	1.66	1.58	—	—
花 崗 岩 No. 41	4.54	4.67	4.08	3.48	2.95	2.43	1.63	1.50	1.45	1.38	—
花 崗 岩 Yaitsenskii No. 30	5.28	5.25	4.82	4.30	3.81	3.27	2.28	2.18	2.13	2.06	1.80
大 理 石 Gazganskii No. 26	5.35	4.78	4.04	3.53	3.30	3.20	3.17	3.00	2.41	1.31	—
石 灰 岩 Garuzinskii No. 27	5.61	5.50	5.14	4.88	4.73	4.68	4.66	4.57	—	—	—

では、ヤング率は原玄武岩よりも若干大きい。この種玻璃を 800° まで加熱した場合でも、ヤング率の減少率はきわめて低く10%程度である。

4) 砂岩および珪岩のヤング率は 500° まで緩やかに低下し、次で急に低下度が大きくなり $t = 575^\circ$ で極小値を表わす。さらにヤング率はふたたび上昇する。この現象は $t = 575^\circ$ では石英の同質異像的転移が生じると対応している。

5) 岩石のヤング率で求められたデータを基にしてポアソン係数が温度によつて比較的左右されない点を考慮に入れると、温度 1,000° までの岩石中を走行する縦波の速度を算出することができる。