

粉体の物理学

素 木 洋 一*

1. 粉体の定義

ここで粉体を液体と固体との中間の性質をもった一つの物質系と定義する。すなわち粉体は静止の状態においては固体と類似の性質を有し、流動状態では液体と類似の性質を示すものである。静止状態ではある大きさまでの荷重を支えることが可能であり、さらに大きな荷重が与えられれば細化現象がおこる。流動状態の下では、粉体は浮力をもつ。この性質があるためにフルイによる分級が可能になる。また細管から流出させたときには脈理に似た現象を示す。

このような現象を示すためには粉体を形成する粒子群はある大きさ（バク然とした用語であるが）をもつ。しかも一般にわれわれが概念的に粉体といっているばあいは比較的小さな粒子から成る、ある分布をもった系をさしている。一個の粒子の大きさは、小さい方の限界は原子の構成部分まで考えられ、大きい方の限界は規定できないが1000 μ くらいまでを限界とみている。

従ってこの範囲にわたる粒子群は、粒子が微細になれば表面の状態が著しく変わってくるし、形態上の要素とからみ合って粒子群が形成する組織は想像以上の性質の変化を示すものである。

粒子についての概念

一般に使用されている粒子という用語は、極めてバク然としたものであることは他の学術用語と同じである。一例を、与えられた土壌試料に例をとってみよう。試料はおそらく大部分が比較的大きな凝集体から成立っているであろう。これらの凝集体は、ある意味では粒子であり、土壌のいろいろな性質はそれらの大きさに左右される。いわゆる有機土壌形成体といわれているものの効力は、殆んどがこれらの凝集体を安定させる能力に支配される。すなわち凝集体は多くの「粒」から成立っている「粒子」である。土壌を構成する粒子の最小の大きさは常識的にいわれている極限の大きさではない。

結晶学的にみれば、土壌粒子は1個の結晶または結晶の破砕物である。あるいは岩石の破砕物とみてよい。

一般に、無機物質を対象として粉体の物理性を論ずるばあいに、普通に用いられている用語を次のように定義する。

(a) 粒子 (particle) 天然あるいは合成鉱物の1個の任意の破片をいう。この大きさは一般に1 μ ~1000 μ からの間にある。これが団粒の基礎単位となる。

(b) 団粒または顆粒 (granule) 2個以上の粒子からなる多孔性集合体で、粒子は種々の粘結剤あるいは力で結合されている。団粒の大きさはそれを用いる状態によっていろいろ変わってくる。

(c) 粉体 (powder) 粒子と団粒との混合物をいうが、主として団粒から成る系をいう。

いま、1個の団粒内に含まれる種々の直径の粒子数を算出してみると表-1のようになる。

表-1 種々の直径の団粒に含まれる粒子数の計算値

団粒の大きさ (mesh)	団粒の直径 (η)	団粒の容積 (η^3)	仮定した粒子直径 (η)		1個の団粒に含まれる粒子数	
			最高	最低	最高	最低
20	860	333,000,000	10	524	636,000	445,000
			50	65,400	5,090	3,560
			100	524,000	636	445
60	240	7,240,000	10	524	138,000	9,670
			50	65,400	111	78
			100	524,000	14	10
100	150	1,770,000	10	524	3,370	2,360
			50	65,400	27	19

(d) 真の密度 (true density) 固体鉱物片の単位容積当りの重量 (g/cm^3)。

(e) 見掛団粒密度 (apparent granule density) 単位嵩容積当りの重量 (g/cm^3)。かさ容積というものは団粒と内部空隙を含んだ容積である。

(f) 内部空隙 (internal void) 個々の団粒の中に入っている気孔の空隙。

(g) 外部空隙 (external void) 個々の団粒間の気孔の体積あるいは空隙。

(h) 粉体かさ密度 (powder bulk density) 団粒の一定容積の重量、すなわち固体、内部空隙、および外部空隙を含んだ単位容積当りの重量 (g/cm^3)

* 東京工業大学工学部無機材料工学科

2. 充てん密度

真の粉体密度は気孔率がゼロに達したときに得られるが、この状態にすることは粒子が不規則な形状である以上は不可能である。粉体の真密度のときには粉体かさ密度は団粒密度に等しいときである。個々の団粒が静止した空気中でかろうじて接触したときに実際上は値の小さい方の極限にくる。この状態は不安定なもので、再現性を与える実験を行なうことは困難である。何となればごくわずかな不調和がおこっても、ある数の団粒はさらに緻密に詰まりうる間ゲキに入りこんでしまうからである。従って実験室におけるかさ密度の測定結果はある範囲のばらつきをもつ。

石英や長石などの硬い粒子では、一定容積のシリンダーの中に一定重量の粉末を入れて一定の重さのプランジャーを一定回数落してそのときの充てん物の容積を測定すればかさ密度が求められるが、団粒のばあいにはこわれやすいのでこの方法でかさ密度を求めることはできない。従って団粒のばあいには、いわゆる型充てん法または振動充てん法で求めなければならない。

外部間ゲキの生成されるひん度と大ききとは団粒自体の密度には無関係で、団粒の形態と大ききの分布とに関係する。

外部空隙容積は団粒の大ききがそろってゐるときに最も大きい。しかし粒子径の因子である内部空隙の生成されるひん度と粒子の平均真密度とは団粒の見掛け密度を決定する。

真密度、内部空隙、外部空隙および充てん分布の4項目が一般的にみて粉体のかさ密度を決定するものである。もし団粒密度が規定されれば、粉体のかさ密度は充てんの効果のみによって変化する。かさ密度をさらに著しく増加させるには内部気孔率を減少させなければならない。

粉体の加圧性状

一定の容量に粉体を入れ加圧したばあい、粉体のかさ密度および団粒密度がどのような影響を与えるだろうか。かさ密度の異なる2種類の粉体を用い、型充てん高さを1.83cmに規定し、型の面積を6.45cm²とし、

加圧体の密度すなわち加圧密度を2.32h/cm³と規定すると次のような実験結果が得られる。

	粉 体	
	I	II
粗 かさ 密度 (g/cm ³)	0.933	0.753
重 量 (g)	11.0	8.9
加 圧 体 の 高 さ (cm)	0.736	0.594
加 圧 体 の 容 積 (cm ³)	4.75	3.83
加 圧 密 度 2.32g/cm ³ を 得 る に 必 要 な 成 形 圧 (kg/mm ²)	14.06	17.57
圧 縮 比 (充 て ん 体 の 容 積 / 加 圧 体 の 容 積)	2.49	3.08

粉体Iは粉体IIに比較して、与えられた重量では容積が小さく、型充てんが浅くてよいことになる。すなわち加圧密度を同一にするには高かさ密度の粉体は低かさ密度の粉体よりも圧縮比は小さくてよい。この密度の差異が団粒密度の差、あるいは充てん効果によるがどうかということとは重要ではない。

粉体かさ密度は目的とする加圧密度を得るために必要な圧力に影響する。図-1から理解できるように、高かさ密度粉体では低かさ密度粉体よりも団粒のかたさ(粘着性)に関係なく圧力は少なくてすむ。かさ密度が大きいうことは団粒の硬さとは必ずしも同意義であるとは限らない。反対に実際上はかさ密度がどんな値の所でも硬い団粒と軟らかい団粒とは用いる減摩剤と結合剤の種類および量に支配される。この一例を図-2に示す。

型に入れて成形するばあいには粉体ならびに粉体に含まれている液体の量が型壁面に対する摩擦抵抗に変化をきたし、そのために成形体の密度が変ってくる。典型的な一例を図-3に示す。

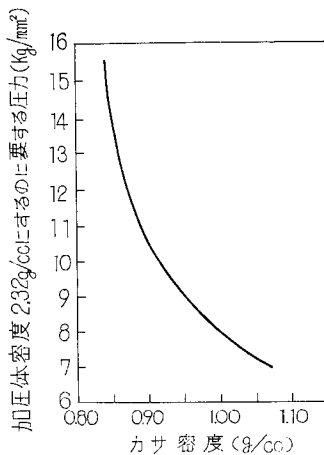


図-1 粉体かさ密度と圧力との関係

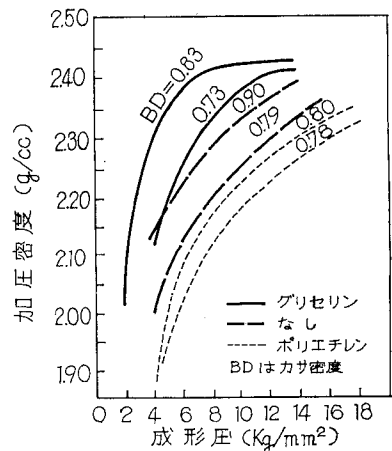
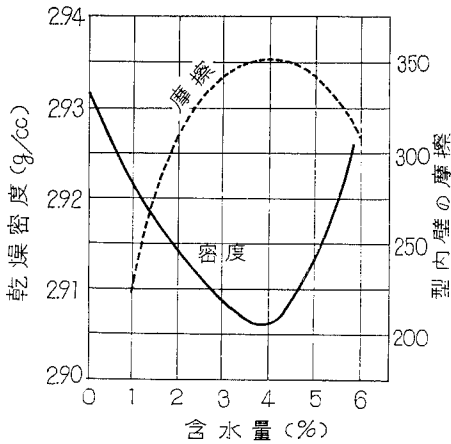


図-2 成形圧におよぼす減摩剤の効果



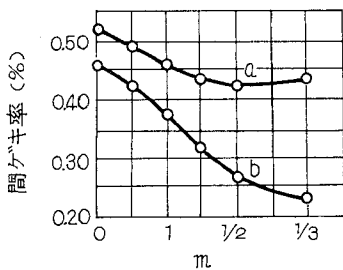
図一三 加圧密度と型内壁の摩擦におよぼす含水量の影響

最密充てんを得るための粒度分布

種々の大きさの粒子を組合せると、粒径のえらびかたに関係なく最密充てんをとる粒度組成というもの存在する。古く Fuller ら¹⁾ はコンクリートの最密充てんが得られる粒度分布を研究し、図一四に示す結果を報告している。その後 Andreasen²⁾ は、ある粒子径 x 以下の含有量 P をとし、 D を存在する最大粒子径とし

$$P = \left(\frac{x}{D}\right)^m$$

で示される曲線の m が 0.5 と 0.33 の間にあるばあいに加圧によって最大密度が得られることを明らかにした。このばあいはまた粗粒子あるいは微粒子の分離をおこすこともない。上記の m の値が 0.5~0.33 の間ということは、たとえば試料の最大粒子径が 10 μ であったとすると、その 1/10~1/15 の大きさの粒子すなわち 1~0.7 μ 以下の粒子が約 30~50% あればよいことになる。 m の値

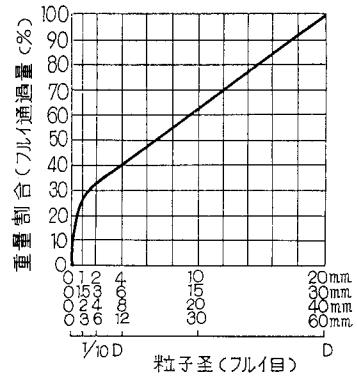


図一四 m 値の異なる珪砂による間ゲキ率の変化
a: 容器に落した場合
b: 振動を与えて詰めた場合

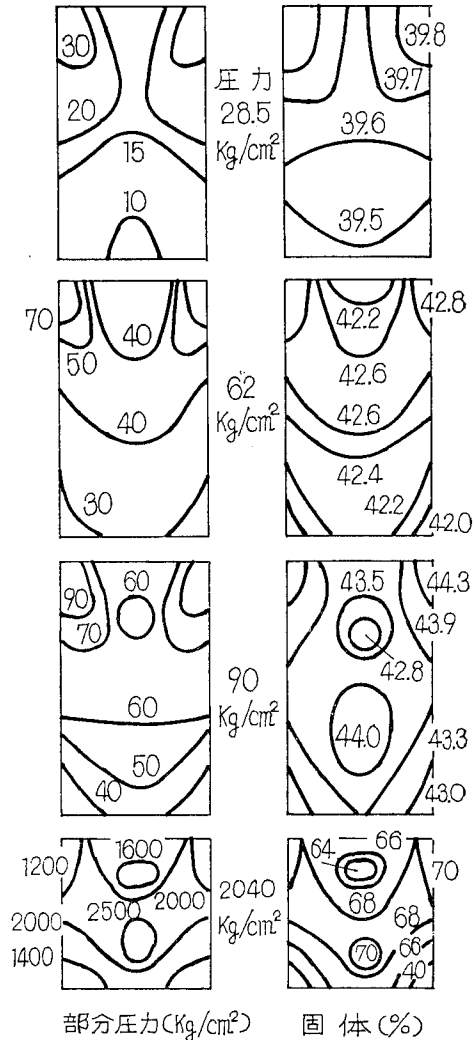
の異なる珪砂を用いて実験してみると図一五に示す結果が得られ、Andreasen の式の有用性が実証される。

粉体を加圧するばあいに、表面に与えられた力の分布状態は液体と異なり極

めて複雑な状態を示すものである。たとえば D. Train³⁾ が $MgCO_3$ で行なった研究では図一六のようになる。すなわち圧力分布と密度分布とは関係がないという重要な結論を提出している。



図一五 Fuller 曲線



図一六 $MgCO_3$ 粉体の圧縮体内の圧力(左)と密度(右)分布

液体のばあいにはパスカルの原理が応用できるわけであるが、粉体の中に液体がどの程度入ってくれば圧力の分布あるいは密度の分布が比較的均一になるかということは現在の所解明されていない。しかし粉体が液体と類似の性質を示すことを利用して振動を与えながらつきかためる方法は実際に古くから用いられている。このばあいは粉体中の粗い粒子が浮力を持ち、表面に浮上ってくる（すなわち分離をおこす）ことがあるのでAndreasenの分布を考えておかなければならない。

型内で加圧するばあい、粉体内部の圧力分布を考慮せず底面に伝達される割合だけを見ると、内壁との摩擦の他に粉体の安息角が問題になることが明かににされている⁴⁾。すなわち、いま P_2 と P_1 をそれぞれ加圧面における圧力と底面に伝達された圧力とし、粉体が自然堆積するときの安息角の $1/2$ を α 、粉体の型内壁との摩擦係数を μ とすると

$$\frac{P_2}{P_1} = e^{-\frac{4H}{D} \cdot \mu \cdot \tan \alpha}$$

で示される。このことは加圧力の減少は粒子相互の摩擦や変形には関係せず、主として粉体と型内壁との摩擦抵抗にもとづくことになる。

また、粉体を一定断面積の円筒型に入れて圧縮すると、圧力 P と圧縮体の最後の高さ h_∞ との間には実験的に次の関係があることがわかる。

$$\log P = -l \frac{h}{h_\infty} + C$$

ここに h は型に入れたときの粉体の高さ、 C は実験当初の条件や圧力などによってきまる定数で、 l は粉体の圧縮について重要な量で変形係数と呼ぶことのできる値である。

3. 成形体内の粒子の配向性

扁平、あるいは板状の粒子は圧縮すると配向性を示すものである。この現象は圧縮体の物理的性質に方向性を与える。

一例として粘土を試料とし、水を加えて可塑性状態にし、型に圧力を加えて押し込んで成形体をつくり、乾燥途上における収縮率をとると図-7に示すような結果が得られる。

さらに、乾燥試料を水に浸し、膨潤の状態を追跡すると図-8のようになり、成形方向による膨潤の状態が大きく変化することが理解できる。

このような現象は粒子と水との間に形成される水膜と、水膜と自由水との状態に左右される。水膜の厚さ、

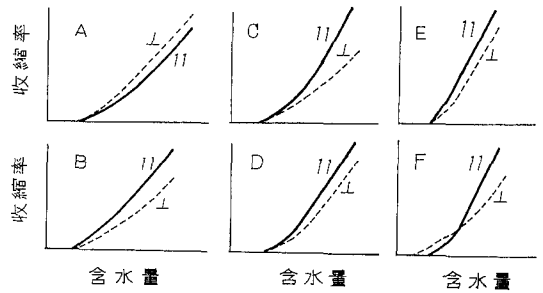


図-7 線上の乾燥収縮の方向性

- A: 朝鮮カオリン (ハロイサイトを主成分とする)
- B: 香港カオリン (//)
- C: 原蛙目粘土 (カオリサイトを主成分とする)
- D: 土岐口蛙目粘土 (//)
- E: 大畑木節粘土 (//)
- F: 赤津木節粘土 (//)
- //: 成形方向に平行 (//)
- ⊥: 成形方向に直角 (//)

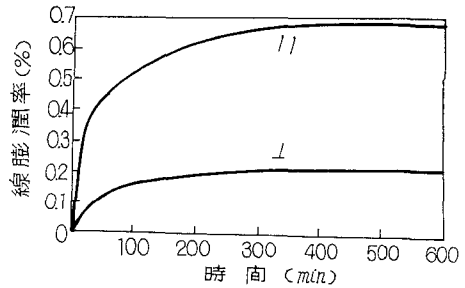


図-8 カオリナイトの膨潤の方向性

およびその摩擦係数と表面張力は粒子に吸着されているイオンの種類に影響される。カオリンをイオン置換し単イオンカオリンをつくると、練土として押し出し、乾燥して収縮率を測定すると表-2のようになる。

表-2 イオン飽和カオリンの押し出し成形による性質の変化

試料	乾燥収縮率(%)		単位容積中に含まれるカリオンの容積 (%)	乾燥上げ強度 (kg/cm)
	長さ	直径		
Na-カリオン	4.4	10.2	61.4	44.2
K-カリオン	5.8	7.6	57.8	22.4
Mg-カリオン	6.2	6.2	58.3	16.4
Ca-カリオン	6.2	6.2	58.8	18.8

このばあい単位容積中に含まれるカオリンの容積が1価カチオンと2価カチオンで異なってくるのは水膜の厚さの差が大きな影響を与えるからである。水膜が厚いばあいには摩擦抵抗が小さく、従ってわずかな外力で沁りを生じ最密充てんに着くからである。この結果として乾燥強度は大きくなる。

4. 堆積局内の水の通過

いま球状の粒子がランダムに並んで、深さ L 、面積の A のベッドをつくっており、それに粘度 η の液体を圧力差 P で流したときの容積流出割合を dQ/dT とすると、ベッドの透水率 K は次のように定義される。

$$K = \frac{\eta \frac{dQ}{dT} L}{AP} \dots\dots\dots(1)$$

また、ベッドを形成している粒子の比表面を Sp とすると Carman の実験から

$$Sp^2 = \frac{gE^3}{5K(1-E)^2} \dots\dots\dots(2)$$

- Sp粒子の単位容積の表面積 (cm²/cm³)
- g重力の加速度 (980cm/sec²)
- Eベッドの気孔率
- K透水率

(1) と (2) とから K を消去すると

$$\frac{gE^3}{5Sp^2(1-E)^2} = \frac{\eta \frac{dQ}{dT} L}{AP} \dots\dots\dots(3)$$

粉体が水中で沈降していくときには泥シヨウのきわめてうすい層がつみ重なって層ができてゆき、圧力差は泥シヨウから余分の水を既に形成された層を通して押し出すと考えてよい。

ベッドの容積 V は粒子の容積 $V(1-E)$ と液体の容積 VE との和になる。粒子 $V(1-E)$ を含む泥シヨウの容積を X とすると、形成された容積 V のベッドを流れる液体の容積は $(X-V)$ となる。このようにベッドを流れる液体の容積 dQ に対して $VdQ/(X-V)$ のベッドが形成されていく。

この増加によって生ずるベッドの厚さの増加を dL とすると

$$\frac{VdQ}{X-V} = AdL \dots\dots\dots(4)$$

または $y=X/V$ とすると上式は

$$dQ = AdL(y-1) \dots\dots\dots(5)$$

y = 粒子 $(1-E)$ の容積を含む泥シヨウの容積

(3) 式を dQ で置換えると

$$LdL = \frac{P_g E^3}{5Sp^2 \eta (y-1)(1-E)^2} dT \dots\dots(6)$$

時間 0 におけるベッドの厚さが無限に小さいと考えると(すなわち最初の水の流出に対する抵抗を無視すると)上式を積分して T 時間後のベッドの厚さ L を求めることができる。

すなわち

$$\frac{L^2}{T} = \frac{2P_g E^3}{5Sp^2 \eta (y-1)(1-E)^2} \dots\dots\dots(7)$$

この式はすなわち泥シヨウ中の粒子が圧力を受けて層を形成していくときに、 η が一定のときには時間の成層の厚さの 2 乗とは直線になることを示している。この式は実験によって容易に確認することができる。

いま、多孔体がら成る、たとえば土壌などの吸引力を計算で求めようと試みるならば、(7) 式を変形した次式を用いればよい。

$$P = \frac{L^2}{T} \cdot \frac{5Sp^2 \eta (y-1)(1-E)^2}{2gE^3}$$

もちろんこのばあいには次の仮定をおくことが必要である。

- (a) 沈殿層が厚くなっても気孔率は変化しない
- (b) 粒子が水を吸着しても気孔率は変らない
- (c) イオン置換による透水率の変化を無視する

5. むすび

粉体に関する成書⁵⁾⁶⁾も出版されているが、この小文ではこれらに殆んど盛られていない事項のうち、筆者の研究過程で疑問を生じた種々の問題のごく一部を説明した。なお引用した筆者の実験結果は殆んどが未発表であり、詳しい説明がなければ理解しにくい点もあるが了承して頂きたい。

参考文献

- 1) W. B. Fuller and S. E. Thompson: Proc. Amer. Soc. Civil Engr., 33, 222 (1907)
- 2) A. H. M. Audreassen: Kolloid-Z., 50, 217 (1930)
- 3) D. Train: J. Pharm., London, 8, 745 (1956)
- 4) C. Ballhausen: Archiv Eisenhiitt., 22, 185 (1951)
- 5) 粉体: 丸善, 昭37
- 6) 粉体工学ハンドブック: 朝倉, 昭40

会 務 報 告

(昭和42年 4月1日～10月31日)

(1) 幹事会

42年 5月22日(月) 東大農学部

〔出席〕 国分, 岩田, 増島, 竹中, 土井, 中野, 多田

1. 会誌16号の編集進捗状況 2. 春季他学会での会誌の販売ならびに会員獲得状況 3. 17号の編集内容について 4. シンポジウムについて 5. 評議員会開催について 6. 新規加入の促進について 7. 規約改正について

(2) 在京評議員会

42年 6月12日(月) 東大農学部

〔出席〕 山崎, 美蘭, 山中, 田原, 吉良各評議員
(役員側) 八幡, 国分, 竹中, 中野, 増島, 土井, 岩田

1. 会務執行状況 2. 会則の一部改正について 3. 第9回シンポジウム開催について 4. 会誌の内容について

(3) 幹事会

42年 7月3日(月), 東大農学部

〔出席〕 八幡, 国分, 竹中, 中野, 岩田, 増島, 福桜, 土井

1. シンポジウムのプログラムについて 2. 会誌第17号の編集進捗状況について

(4) 幹事会

42年 9月19日(火) 東大農学部

〔出席〕 八幡, 国分, 竹中, 中野, 岩田, 増島, 福桜

1. シンポジウムの準備について 2. 会誌第17号の内容決定

昭和41年度 会計報告
(41年4月1日～42年3月31日)

1. 収入の部

費 目	金 額	備 考
(1) 繰 越 金	236,094	
(2) 会 費	281,260	
(3) 賛 助 会 費	65,000	
(4) 出 版 物 売 上	41,300	バックナンバー売上とシンポジウム要旨の売上
(5) 会 誌 広 告	110,000	
(6) 雑 収 入	39,151	展示料, 預金利子, 郵送料
(7) 合 計	772,805	

2. 支出の部

費 目	金 額	備 考
(1) 通 信 費	39,372	切手等連絡用郵送費, 会誌郵送費, 会誌発送アルバイト費, ポスター郵送費
(2) 会 誌 製 作 費	366,200	会誌印刷製本費, 編集会費, 編集アルバイト費
(3) 謝 金	7,000	
(4) 文 具 費	10,620	
(5) 交 通 費	5,910	
(6) 会議費並びに討論会費	95,080	会 議 費 25,750 討 論 会 費 69,330
(7) 雑 費	700	
(8) 次 年 度 繰 越 金	247,923	
(9) 合 計	772,805	

編 集 後 記

涼しい秋風と共に17号をお送りします。

従来はシンポジウム開催後の会誌はもちろん開催前の会誌もシンポジウムのテーマを中心に編集されてきたのですが、本号ではそれにとらわれずに編集してみました。そのかわり、シンポジウムの報告者の方々をわずら

わして、要旨を掲載させていただきました。

新しい編集方針の確立まではよかったですのですが、幹事の不手際や投稿をお願いした方が急に病気になられたりして論文を三つしか掲載出来ず最低の頁数という有難くない記録を作ってしまった。しかし、それぞれの論文はいずれも特色ある力作なので私達は喜びを新たにしみめています。

(編集幹事 増島, 土井, 多田, 福桜, 岩田)