

## 泡の二次元「結晶」模型 主としてその工學的價值についての予報

Two-dimentional model of a crystal structure.  
Preliminary report on the values from the point of view  
of engineering.

鹽田 信雄 (Nobuo SHIOTA)  
小野崎 長英 (Chōei ONOZAKI)

**Abstract:**—Bragg and Nye have reported on the remarkable resemblance between the crystal structure of a metal and the bubble rafts assembling to the hundreds of thousands of bubbles, such as grain boundaries, slip and recrystallization etc. It may be expected that this model has an important problem from the point of view of engineering, and so we will report some preliminary experimental results by using the same method.

The results obtained are summarized as follows ;

1. When the diameter of bubble is small, the velocity of recrystallization becomes to remarkable.
2. Owing to the strains due to "foreign" atoms, the breaking of a crystal structure rises from its point.
3. The slip lines are stopped at the places in which the grain boundaries or the impurity atoms are exist.

### I 序 言

1947年に英国の Bragg 卿及び Nye<sup>(1)</sup>, それに引続いて行はれた数種の論文は表面張力の作用下に数十万個と云ふ均一な石鹼球の集団が金属の種々の性質(例へば結晶粒界, 再結晶, 塑性変形の問題等)に極めて類似する点の多いことを指摘してゐる。斯くの如く個々の泡を金属の各原子に対応せしめて所謂, 金属の二次元(或ひは三次元)「結晶」模型を提出したことは, 直接我々に原子そのものを単位として結晶構造を見る手段を与へた点に於て正に劃期的な仕事であると云つてもよいであらう。上述の実験で泡の間の理論的な強さが金属原子間のポテンシャル, エネルギーに極めて類似してゐることは注目される所であるが, 泡自身が有効質量を持たないこと, 従つて変形に与かる転位が運動エネルギーを保有してゐないこと, 即ち一般の金属にあつては転位のエネルギー消滅が恐らく弾性波

の放射にあると考へられるのに反してこの場合には粘性的な仕方による以外にはない事實は力学的な模型としてはその有効性を疑はれる所以であるけれども, 工学的には幾多の暗示とひいては適応性を有するものと想はれるので此処にその一端を記述して今後何等かの参考に供し得れば幸甚と考へる次第である。

尙, 泡の大小と金属の異同に関する理論的考察等に関しては上述の論文に詳述されてゐるから, それ等について記述することは省略した。

## II 実験のあらまし

### a) 液の製法;

使用する溶液の必要條件は泡の發生を容易にすると共にその寿命の長いものが望ましいその為の使用液として乳化剤として使用されてゐるトリエタノールアミン ( $(\text{CH}_2\text{OH}\cdot\text{CH}_2)_3\text{N}$  の 10% 溶液 73c.c とオレイン酸 [ $\text{CH}_2(\text{CH}_2)_7\text{CH}\cdot\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ .] 15c.c に蒸溜水 50c.c を加へた兩液を温湯中で良く震盪させて混合し, それにグリセリン 111c.c の割合で追加したものであり, 泡の寿命は 2~30 分程度迄には充分到達することが出来る。

### b) 実験装置;

其の一, 直径 1mm 前後の泡を發生せしめる為のピペットの先端は可成り慎重な製作を必要とし略々  $50\mu$  ( $\frac{5}{100}$  mm) 程度, 薄肉の口径が理想的である。勿論噴出する空気圧に依つても泡の大小は左右される。Fig. 1 は実験装置の本体部分を図示せるものである溶液皿の底面は黑色ワニス<sup>\*</sup>を塗布して焼付けたものであり泡の写真撮影の場合, そのコントラストを良好ならしめる様にしてある。ピペットの先端は液面より 5mm 以下一定となし圧力は 80~150 cm 水銀柱程度の一定に保持する。ピペット先端の口径が大きくて 3mm.  $\phi$  以上の泡が出来るとその形状は次第に六角形に変形し, 而も泡の寿命は短くなる。尙所期の目的に合致せぬ泡が生じた時には小さい焰で之を除去することが出来る。

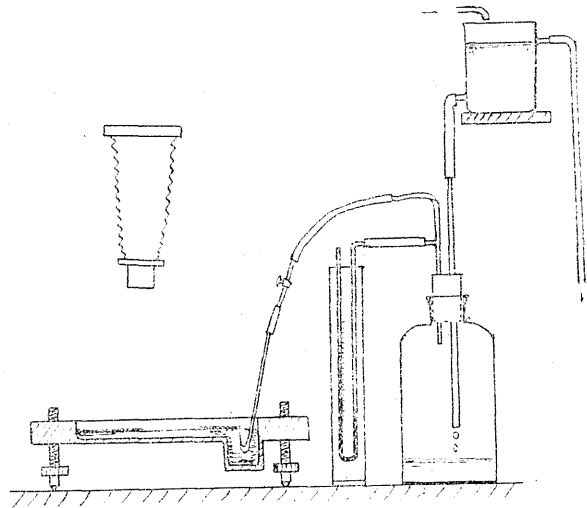


Fig. 1. Schematic diagram of our apparatus for producing rafts of bubbles.

其の二, 泡の結晶模型に加工変形を与える場合には Fig. 2 (a) 又は (b) の如き装置を使用した。Fig. 2 (a) は溶液中に線の太さの極めて小さい (0.09mm), 且つそのピツ

\* 日立工場, BAD ワニス。日月紋次博士の厚意による。

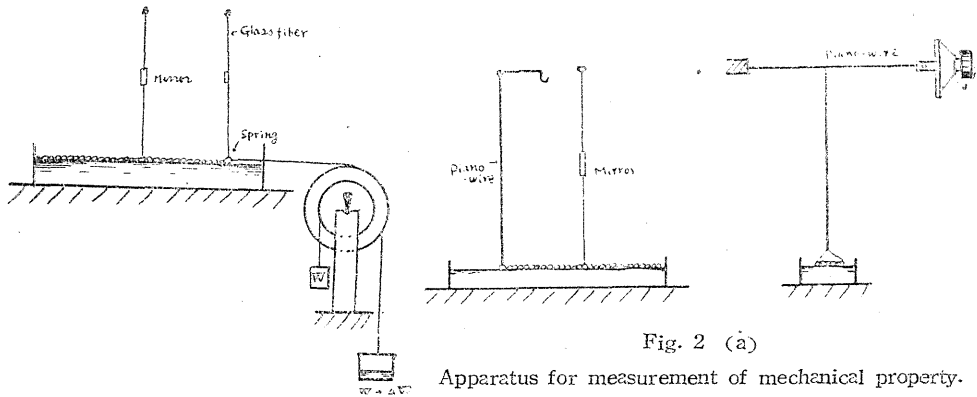


Fig. 2 (b)

Fig. 2 (a)  
Apparatus for measurement of mechanical property.

チが泡自体の径に殆ど等しい燐青銅のスプリングを「結晶」の両側に浸漬してある。一方のスプリングはマイクロメータ、スクリュで移動出来て、他方は2個の細い硝子ファイバーで支持されてゐる。その時の加工による歪は硝子ファイバー上の鏡をランプ、スケールに依つて読取ることによって測定出来る。勿論スプリングの強さは泡との接触部近傍を擾乱する程には強くないが、泡の弾性限以上の強さは有してゐる。ピアノ線の歪力対歪曲線を予め求めて置けば、その時の荷重は直ちに判定出来る。Fig. 2 (b) は試料が伸張変形を与へられる場合に於ける他の一例である。即ち互に逆方向に回転する共軸な2個のプーリーに同一の荷重(数g程度)を附加して両端のナイフ、エツヂに於ける変位を零に保つておく。ビュレットより水滴を滴下して荷重を附加し、その時の変位をランプ、スケールで読取る。

其の三、異常温度に於ける結晶模型の挙動、例へば再結晶、高温加工或ひは熔融状態の研究等を検討する場合に一般の金属結晶では原子の熱振動を高める結果を意味してゐるが泡の模型では丁度その直径前後の波長の振動を外部から与へることによつて近似的にその目的を達成することが出来る。即ち直径1.5mm.  $\phi$  の泡の「結晶」では溶液中の音波の伝播速度は略々  $15 \times 10^4$  cm/sec. であるから、その時の周波数を  $f$  で表せば次式の如くなる。

$$f = \frac{15 \times 10^5}{1.5} = 10^6 \approx 1 \text{ M.C.}$$

故に波高は大凡2~3mm. 程度迄で1 M.C. 前後の超音波を發振せしめればよい。再結晶又は高温加工の問題では熔融状態に対応する振動振幅以下の音波を与へることが必要である。此の場合、容器の形状とか振動を与へる条件を変へて振動波形が定常波形として局部的に「異常温度」になることは避けなければならない。即ち容器の底部から斜めに超音波を与へるとかの方法で各「原子」が独立にその振動条件(振動振幅等)を満足する様に考へることが必要である。Fig. 3 は水晶發振器による發振回路の一例を示す。「結晶」が主とし如き方振動振幅の変化に従つて熔融状態に至る温度を定量的に見出す為には次の法によれば良い。即ち Fig. 2 (a) 又は (b) の装置を併用して弾性限界を僅か超えた点に迄荷重を加へて次第に振幅を高めてゆくと、伸びはそれに伴つて増加してゆくが(高温)、急激に降伏する振動振幅で結晶は融解点に達したものと見做すことが出来る。要するに無

附加の状態にあつても此の程度の振動振巾以上では熔融状態にあるものと考へても差支へない。

(勿論圧力対温度關係の補正が必要である)

### III 実験結果とその考察

#### a). 1. 主として再結晶に關聯した実験

Photo. 1 (a) 及び (b) は泡の直径 1.5mm $\phi$  の多「結晶」試料に就ての再結晶(硝子の熊手又は適當な方法で「熱的振動」を与へた)状態を表す。10min. の經過後には可成り結晶の成長が認められるが格子欠陥(Shrinking and Bursting)を増加し之は泡の径が大となるにつれて甚しく、その測定を困難にする。焦点を泡の帽子(Cap)

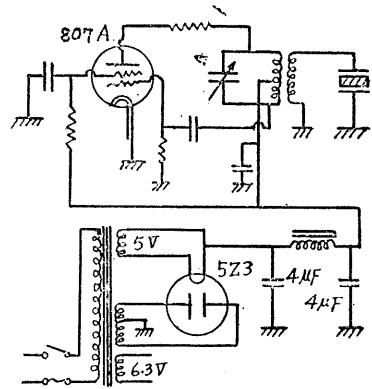


Fig. 3. Schematic diagram of supersonic oscillating circuit.

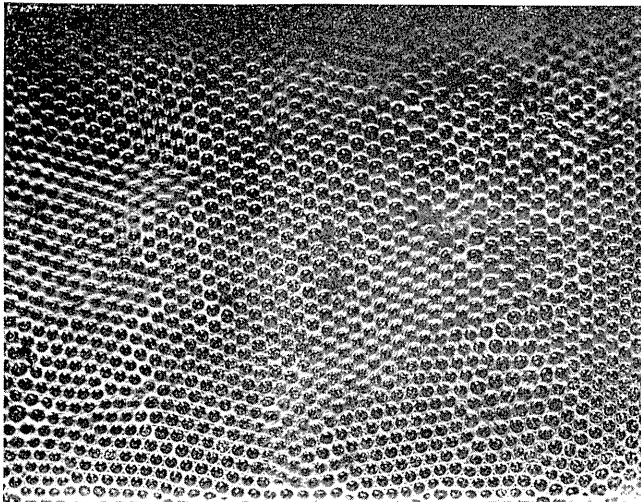
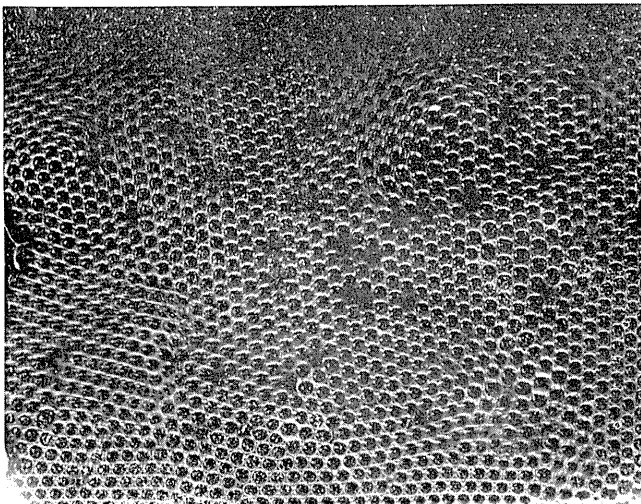


Photo. 1. (a)  
Recrystallization after 4 min.



(b)  
After 10min.  
Diameter 1.5mm.

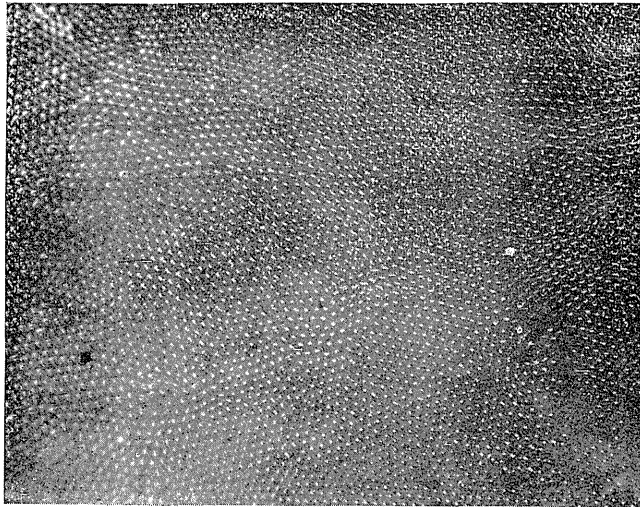
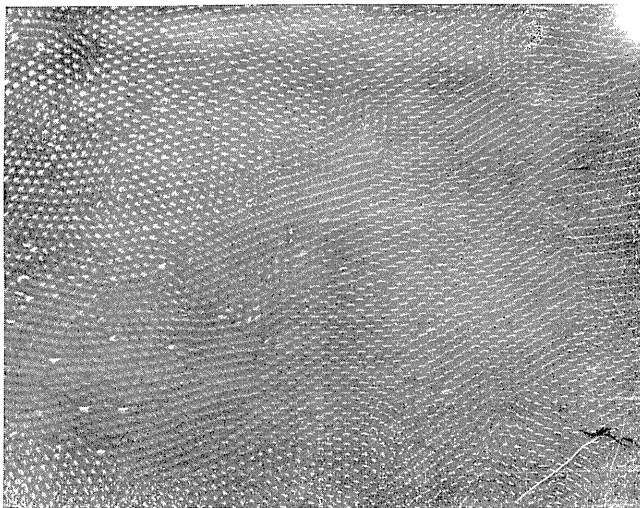


Photo. 2. (a)



(b)

Observation upon the caps of the bubble rafts.  
After 2min.

After 4min.

Diameter. 1.2mm.

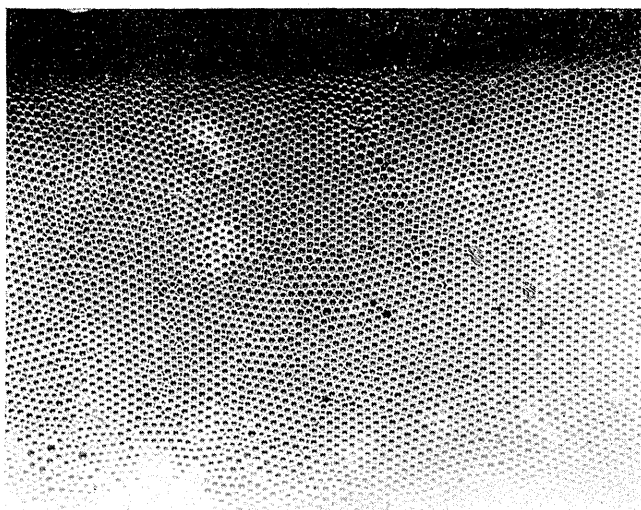
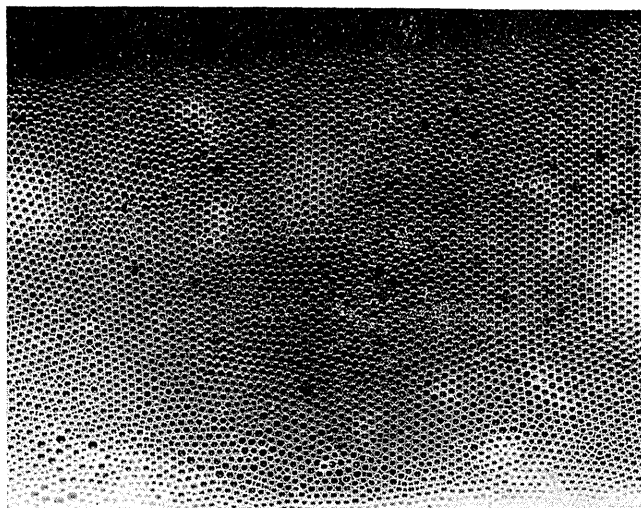
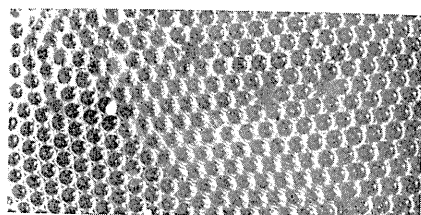


Photo. 3 (a)  
Immediately after stirring.



(b)  
Recrystallization after 2min. Diameter. 1mm.



← Photo 4.  
Grain boundary migration.

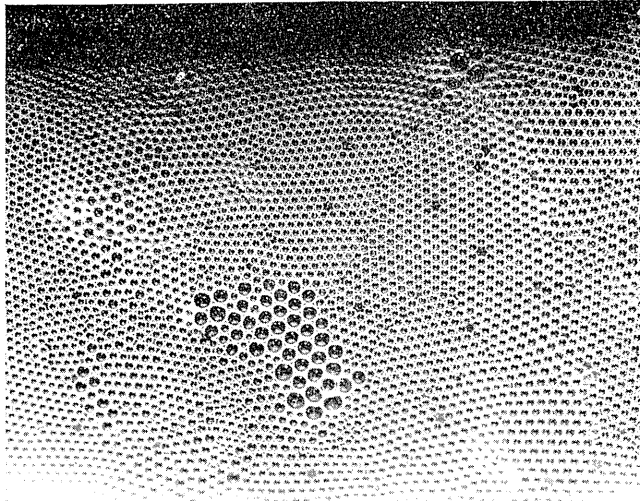
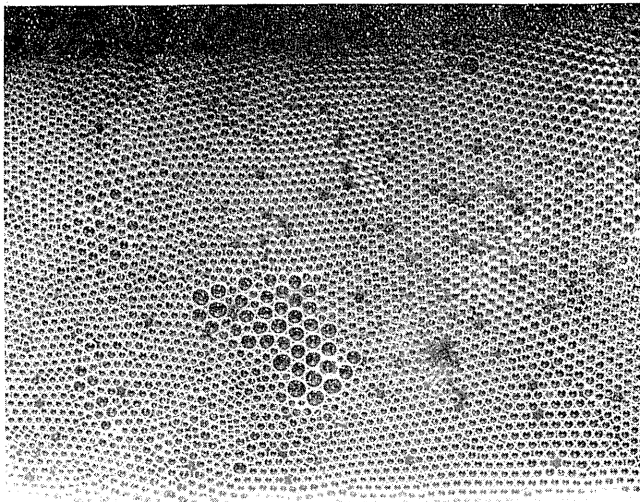


Photo. 5 (a)



(b)

Relation between the strains due to 'foreign' atoms and recrystallization.

After 2min.

After 7min.

Diameter, 1.2mm.

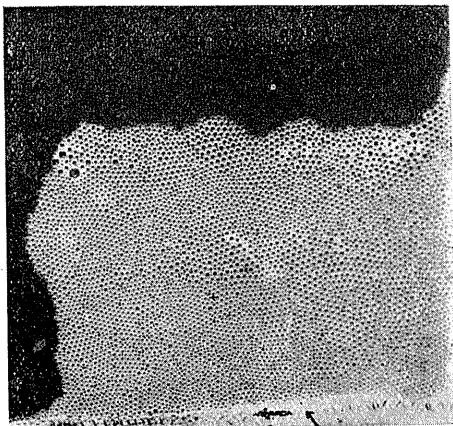
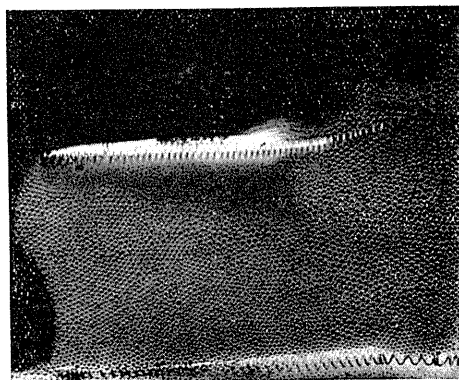


Photo. 6 (a)  
After 4min. Diameter. 0.8mm.



(b)  
A crystal structure after Compression.



← After extension.

Photo. 7. →  
Breaking of a crystal structure.





に合せるか又は斜方から撮影するとこの状況が良く観察出来る。即ち Photo. 2 (a) 及び (b) は 1.2mm- $\phi$  の泡に就ての 2min 及び 4min 後の状態を示してゐる。Photo. 3 (a) 及び (b) は 1mm- $\phi$  の泡について再結晶直後及び 2min 後の状態を示す。泡の径が小となるに従つて内部歪も増加する結果、その再結晶速度は増大し而も再結晶直後では微細な多結晶状態を呈してゐることが認められる。Photo. 4 は結晶粒界移動の一例で撮影時間 (20sec.) 中に粒界近傍の原子が変位し、而も粒界近傍に格子の欠陥箇所が集中してゐることを示してゐる。

## 2. 不純物原子が介入した場合

一般に原子半径の異なる不純物原子が結晶中に存在する場合には局部的な内部歪を発生することが知られてゐるが、その状況を示したものが Photo. 5 (a) 及び (b) である。(a) は 2min. 後の状態でその近傍を除いては明瞭に結晶粒界が認められるに拘らず不純物原子の集団近傍では不規則的な配列で尚内部歪の除去されてゐないことを示してゐる。7min. の経過後には、最早局部的な内部歪の存在は殆ど認められず而も結晶成長と共にその粒界が一見して規則的な欠陥格子の配列によつて構成される部分の多いことが認められる。今迄の写真に於ても粒界に不純物原子の析出し易い事実等から結晶粒界が可成り歪を保持してゐることが知られるけれども一面では転位列による下組部織の形成に際して転位中心が此の格子欠陥に対応してゐるものとも考へられる<sup>(4)</sup>。

### b) 加工過程に於ける実験例

Photo. 6 (a) は 0.8mm- $\phi$  (大きさの相異なる部分も可成ある) の泡の 4min. 後に於ける状態で矢印内では結晶粒界が明瞭に認められる。此の場合、スプリングのピッチは差当り泡の径に等しくなく従つてその近傍は局部的な擾乱を免れ難い。Photo. 6 (b) 及び (c) は夫々圧縮又は引張変形を与へた場合の組織を示してゐる。何れも亡り線の発生が認められ而も上りは結晶粒界又は不純物原子の存在する箇所<sup>(4)</sup>に於て停止し、方向を変へて発生してゐる。即ち結晶粒界或ひは不純物原子が「結晶」の変形抵抗を左右する主因子であることが考へられる。尚不純物原子又は結晶の不規則的配列によつて形成される表面層 (Beilby layer) が機械的、化学的又は物理的現象に如何なる役割を為すものであるかも知ることが出来るであらう。Photo. 7 は不純物原子の介入による結晶の破断状況を表してゐる。内部歪の集中する異種原子の介入近傍から破断が進行してゆくことが示される。

## IV 総括

以上、工学的価値についての予報として可成り定性的な実験を提示するに止つたが、超音波を併用した実験、例へば熔融状態から結晶核の形成機構、高温加工又はその再結晶、異種「金属」の介入による熔融温度の低下に関する問題等、羅列したのみでも枚挙に遑がない。映写用設備によつて\* 連続した変化現象と併せて考察を加へてゆき度い。

(昭和27年3月15日受付)

\* 日立製作所技術課大瀧電造氏の厚意による。

参 考 文 献

- (1) Sir. L. Bragg & J. F. Nye : Proc. Roy. Soc. A 180 (1947) 474
- (2) Sir. L. Bragg & W.M. Lomer: ibd. A 196 (1949)  
W. M. Lomer : ibd. A 196 (1949)  
J. Dyson : ibd. A 199 (1949)
- (3) M. Born : J. Chem. Phys. 7 (1939) 591
- (4) H. Iwamura & N. Shiota : J. Phys. Soc. Japan. 6 (1951) 227 etc.