539.374 : 539.389

応力状態と塑性変形の形*

中西不二夫**, 佐藤和郎***

Strain Ratio Relationship in Plastic Deformation

by Fujio NAKANISHI and Yasuo SATO

In plastic deformation, it is generally assumed that the shear strains γ_1 , γ_2 and γ_3 are proportional to the shearing stresses τ_1 , τ_2 and τ_3 . But the experiments by Lode and also the experiments by Taylor and Quinney show that this assumption is not correct. The way of deformation such as shown by experiments, however, is not yet accounted for.

A new theory on plasticity has been advanced by the authors, and it was already explained that, not only the relation between plastic stresses under various states of stress, but also the forms of hysteresis curves, anisotropy due to plastic deformation, and the relation between the yielding of mild steel and the deformation beyond that could be well accounted for by this theory.

As for the strain ratio relationship this theory also conforms very closely with the experiments.

1. 緒 言

金属材料がある応力状態の下で塑性変形を起すとき、どういう形の変形が起るかということは、塑性の基本的な問題であるにかかわらず、まだよくわかっていない。引張応力、圧縮応力を受けたときの形はわかっている。また、一つのせん断応力だけを受けたときの形もわかっている。しかし、その中間の応力状態のときのひずみの起り方がわかっていないのである。

実際の変形の起り方がわからないまま、これまで一般には、金属材料を粘性体と同様に考えている。

いま、

x, y, z : 主応力の方向

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 主応力

τ_1, τ_2, τ_3 : 主せん断応力

$\tau_1 = (\sigma_y - \sigma_z)/2, \tau_2 = (\sigma_z - \sigma_x)/2,$

$\tau_3 = (\sigma_x - \sigma_y)/2.$

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: 主ひずみ

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: せん断ひずみ

$\gamma_1 = \epsilon_y - \epsilon_z, \gamma_2 = \epsilon_z - \epsilon_x, \gamma_3 = \epsilon_x - \epsilon_y.$

この場合、粘性流体と同様に考えれば変形の起り方は次のようになる。

$$\gamma_1/\tau_1 = \gamma_2/\tau_2 = \gamma_3/\tau_3 \dots\dots\dots (1)$$

いま、 z 軸を引張りの方向に採れば、Lode の表示法による応力状態を示す μ および ひずみの形を示す ν は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{2\sigma_y - \sigma_z - \sigma_x}{\sigma_z - \sigma_x} = \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2} \\ \nu &= \frac{2\epsilon_y - \epsilon_z - \epsilon_x}{\epsilon_z - \epsilon_x} = \frac{\gamma_1 - \gamma_3}{\gamma_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

z 方向に伸び、 x 方向に縮むような純粋せん断では $\mu=0, \nu=0$ であり、 z 方向の引張りでは $\mu=-1, \nu=-1$ である。この中間は (1) の関係が成立するとすれば

$$\nu = \mu \dots\dots\dots (1)'$$

であって、第 3 図のように μ を横軸に、 ν を縦軸に採って図に描けば、引張りの点と純粋せん断の点を結んだ直線になるはずである。

ところが ν と μ の関係については、既に古く、W. Lode の実験⁽¹⁾があり、また G. I. Taylor and H. Quinney の実験⁽²⁾もあり、実験の点は $\nu=\mu$ の直線からはめいりょうにはずれている。

著者は前に塑性の 3 方向せん断理論というのを提唱しておいた⁽³⁾。塑性引張応力と塑性純粋せん断応力との関係⁽³⁾、中間主応力の影響⁽⁴⁾、前歴のある材料に同種または別種の応力を加えたときに塑性的になりはじめる点⁽⁴⁾などについて、実験結果とよく一致する。

塑性ひずみの起り方が、 $\nu=\mu$ の関係に合わないこと、そして実際にはどのように起るかということも、

* 昭和 35 年 4 月 1 日 第 37 期通常総会講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和 34 年 11 月 26 日。

** 名誉員、正員、航空技術研究所 (三鷹市新川 700)。

*** 正員、航空技術研究所。

著者の理論で説明できるのではないかと思う。この論文では、このことを述べてみたい。

2. 実験

われわれのところでも実験を行なってみた。前にあげたように、すでに実験はあるのであるが、いずれも途中まで他の荷重をかけてから、次にある荷重をかけるというやり方のものである。われわれのところでも実験を行なったのは、初めからある荷重をかけてみたかったからである。なお、Taylor-Quinneyのは、せん断はねじりによる単純せん断である。単純せん断でも同様であると思うが、純粋せん断のほうが著者の理論と比較するのに都合がいいので、純粋せん断になるような実験を行なってみた。

実験に用いた材料は黄銅で、その成分は Cu 59.59%, Zn 38.26%, Pb 1.29%, Sn 0.47%, Fe 0.29% である。試験片は外径 18 mm, 内径 16 mm の円筒で、実験は、 μ の値が一定で変形していくように引張りと内圧とを種々の割合でかけたものである。

いま、材料中の微小部分を考えて、円筒の軸に平行に z 軸、半径方向に x 軸、円周方向に y 軸を採ることとする。実験で測定したのは、荷重による円筒の伸びひずみ ϵ_z と外径のひずみ ϵ_t であって、第1図が実験結果である。

第1図の実験結果をみるに、 ϵ_z に比べて ϵ_t の初期ひずみが大きいことから考えて、この実験に用いた材料は等方性ではないようである。前に塑性引張りと塑性純粋せん断の応力の関係を調べるための実験⁽³⁾⁽⁵⁾を行なったことがあるが、このときには種々の材料の棒

第1図 薄肉円筒に引張りと内圧を加えたときの軸方向の伸びひずみ ϵ_z と外径の伸びひずみ ϵ_t

材について検討し、ようやく等方性と認められる一本の棒材を見出し、それについて実験を行なった。その後、等方性の材料がなかなか得られないでいる。ここで用いたのも、前の等方性であった材料と成分は同じものなのであるが、これは等方性であるとは認められない。

そこで、 $\mu = -1$ すなわち引張りの実験結果について、次のような計算を行なってみた。

1. 弾性ひずみは、塑性ひずみにくらべてわずかであるが、これをさし引いて、軸方向の塑性伸びひずみ ϵ_z^p と外径の塑性伸びひずみ ϵ_t^p との関係を求める。
2. 外径のひずみ ϵ_t^p は、円周方向のひずみ ϵ_y^p と円筒の厚さの方向のひずみ ϵ_x^p との影響を受けているので、 ϵ_y^p を求めるために、まず内径のひずみを計算する。すなわち、塑性変形は容積一定で行なわれるものとして、内径のひずみを計算する。
3. 内径のひずみと外径のひずみの平均を採る。薄肉円筒であるから、この平均が ϵ_y^p であると考えていい。

このようにして求めた ϵ_z^p と ϵ_y^p とを対数ひずみの形にして図に描くと第2図のようになる。もし材料の初期状態が等方性であるならば、曲線は2の傾きをもった直線になるはずである。図にみるように、初めのうちは傾きが2になっていないが、これは材料が等方性でなかったことを示すものである。ところが、軸方向の伸びひずみが5%から上のところを見ると、傾き2の直線の上に非常によく乗っている。このことは、

第2図 円筒の引張りによる軸方向の塑性伸びひずみ ϵ_z^p と円周方向の塑性伸びひずみ ϵ_y^p との関係

この材料は、初めは等方性でなくても、しばらく塑性変形を続けているうちに等方性になってくるということである。等方性になるというのは、あるいは誤解をまねくかもしれない。正しくいえば、この材料は、しばらく塑性変形を続けると、後は、第2図のP点で示される寸法の等方性の試験片があったものとして、それに引張りを加えたときと同じ変形をするようになるということである。P点の代りに、第2図のすでに直線的になってからの点Qを元として、ここからのひずみを測っても同じであって、こうすれば初めに等方性であった材料について試験するのと同じ結果になると思う。

そこで、他の実験結果についても、引張りのときと同様に、1, 2, 3の計算を行ない、軸方向の伸びひずみが6%の点を元にして、そこから上の部分について、 ν の値を計算してみた。第3図の実験の点は、このようにして求めた ν の点である。この実験結果は、実験のやり方は違うが、Lodeの実験結果とも、Taylor-Quinneyの実験結果ともよく合っている。

図をみればわかるように、実験結果は $\nu=\mu$ の関係から明らかにはずれているが、著者の塑性理論から、このはずれることが説明できるように思う。

3. 塑性理論

いま、 S_1, S_2, S_3 は第4図に示すようなせん断応力であるとし、I, II, IIIはせん断の方向で、 γ_1, γ_2 ,

第3図 μ と ν の関係

第4図 せん断応力 S_1, S_2, S_3

γ_3 のせん断ひずみの方向をI, II, IIIの方向と呼ぶことにする。

著者の塑性理論⁽³⁾は、

(i) I, II, IIIの3方向のせん断を別々に考える。

別々に考えるということは、せん断ひずみの増加に対する抵抗も、それぞれの方向に独立に R_1, R_2, R_3 であると考えることである。いま、材料中の微小球体を探って、その変形を考えるとして、純粋せん断の場合には、その変形は第5図のようになる。従来の考え方のように、 τ_2 でIIの方向にすべって、この変形が生ずるものと考えれば、このとき抵抗 R_2 はもちろん直接にきいてくるが、I, IIIの方向にもひずみが生じているので、 R_1, R_3 もきくことになる。エネルギーのほうから考えても、 R_1, R_3 のIIの方向への成分から考えても、すべっている間は次のようになっているはずである。

$$\tau_2 = \frac{1}{2} R_1 + R_2 + \frac{1}{2} R_3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

R_1, R_2, R_3 はそれぞれの方向のせん断ひずみ増加に対する抵抗であって、せん断応力に対応するものであるが、上記の関係にもみられるように、直接に τ_1, τ_2, τ_3 に対応するものではない。それぞれの方向に独立に考えるということは、第4図に示したせん断応力 S_1, S_2, S_3 に対応するということである。 τ と S の関係は

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= S_1 - \frac{1}{2} S_2 - \frac{1}{2} S_3, \\ \tau_2 &= -\frac{1}{2} S_1 + S_2 - \frac{1}{2} S_3, \\ \tau_3 &= -\frac{1}{2} S_1 - \frac{1}{2} S_2 + S_3 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

第5図の各方向のひずみの正負を考えて、(3)式と(4)式とを比べてみれば、 R と S とが対応していることがよくわかると思う。

(ii) 単調にせん断ひずみが増して、主応力の方向と主ひずみの方向とが一致している場合には、 R_1, R_2, R_3 の大きさは等しい。すなわち、

$$R_1 = R_2 = R_3 = R \quad \dots\dots\dots (5)$$

第5図 純粋せん断

第6図 引張変形

(iii) それぞれの方向について, ひずみの方向が逆転した場合には, 弾性的に変形する応力の範囲は R である。

荷重を下すとき, または再荷重の場合などに起るように, ひずみの変化の方向が逆転すれば, その逆転した変化は弾性的である。その弾性的変化がどこまで続き, どこからまた塑性的になるかが決まるのは, τ によってではなく, S によってである。それぞれの方向について, その方向の S の変化量が R に達するまでは弾性的であり, そこからさきには塑性的になる。

以上 (i), (ii), (iii) に述べたのが著者の塑性理論である。3 方向を別々に考えるのが特徴であって, それぞれの方向については, せん断応力理論である。ただし, そのせん断応力というのは, τ ではなく, S である。

4. 応力状態とひずみの起り方

4.1 純粋せん断 上記の塑性理論を, $\mu=0$ の純粋せん断に適用してみよう。材料の中に微小球体を考えれば, この場合の変形は第5図のようになる。すなわち, 球体の一部 ABC は変形して $A'BC'$ となり, II の方向は正の変形, I, III の方向は負の変形になっているので, 応力状態は次のようになっているはずである。

$$S_1 = -R, \quad S_2 = R, \quad S_3 = -R \dots \dots \dots (6)$$

τ で表わせば

$$\tau_1 = -R, \quad \tau_2 = 2R, \quad \tau_3 = -R \dots \dots \dots (6)'$$

応力状態は一般に σ または τ で表わされているので, (4) 式に (6) 式を入れて (6)' 式をだしてみたのであるが, 塑性流動の応力状態を直接的に表わしているのは (6) 式である。

(6) 式の応力状態のもとで, どういう変形を起すと考えたらいいであろうか。それぞれの方向のせん断抵抗は等しく, そこに働くせん断応力の大きさも当然等しい。こういう状態のもとでは, それぞれの方向のせん断, あるいはそれぞれの方向のすべりと呼んでもい

いと思うが, それを ds_1, ds_2, ds_3 とすれば, これらの大きさは等しいと考えるのが当然であろう。

すなわち,

$$ds_1 = -ds, \quad ds_2 = ds, \quad ds_3 = -ds \dots \dots \dots (7)$$

こういうすべりを起した結果が, 第5図に示すような変形になることは明らかである。

4.2 引張り 引張りによる変形は, 第6図のようであって, このときの応力状態は⁽³⁾,

$$S_1 = -R, \quad S_2 = R, \quad S_3 = \pm \frac{1}{2} R \dots \dots \dots (8)$$

$$\tau_1 = -\frac{7}{4} R, \quad \tau_2 = \frac{7}{4} R, \quad \tau_3 = \pm \frac{1}{2} R \dots \dots \dots (8)'$$

引張りは, I, II の方向には細かく交互にすべっているものと考えられるが, I の方向にすべるときは III は正の変形, II の方向にすべるときは III は負の変形になる。すなわち, III の方向では正負の変形を繰返しているのであって, (iii) に述べたように弾性範囲は R であり, 正負の方向に交互に同量の変形を繰返すとすれば, III の方向の応力状態は (8) 式のようにならない。+ $R/2$ が I の方向のすべりに対応するもの, - $R/2$ が II に対応するものである。ある1点についてみれば交互にすべっており, ある瞬間についてみれば, I の方向にすべっている部分もあり, II の方向にすべっている部分もあって, III の方向は巨視的には応力は0であるが, $\pm R/2$ の内部応力が存在することになる。

ひずみについても同様であって, III の方向には正の方向にすべっている部分もあり, 負の方向にすべっている部分もあって, 巨視的にみれば III の方向のせん断ひずみは0になる。すなわち, 測定に出てくる量としては

$$ds_1 = -ds, \quad ds_2 = ds, \quad ds_3 = 0 \dots \dots \dots (9)$$

4.3 中間の応力状態 塑性応力状態を図で表わしてみる。第7図(e)は(6)式の純粋せん断を表わしたものであり, 同図(a)は(8)式の引張りの状態を表わしたものである。この二つを比較してみると, I, II の方向については同じであり, 違っているのは III の方向だけである。したがって, 中間の状態では, III の方向の状態が引張りから純粋せん断へ順次変っていくはずであって, 弾性範囲が R であることを考えれば, 中間の状態は第7図(b), (c), (d)のようになっているに相違ない⁽⁴⁾。

第7図の(a)から(c)までは, $\pm R/2$ の弾性範囲がそのまま移動している状態であって, その応力状態は次のように表わせる。

(a): 引張り, (e): 純粋せん断

第7図 応力状態の図式表示

$$S_1 = -R, \quad S_2 = R, \quad S_3 = -\alpha R \pm \frac{1}{2}R \dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= -\frac{7}{4}R + \frac{1}{2}\alpha R, & \tau_2 &= \frac{7}{4}R + \frac{1}{2}\alpha R, \\ \tau_3 &= -\alpha R \pm \frac{1}{2}R \end{aligned} \right\} \dots (10)'$$

ただし, $0 < \alpha < 1/2$.

(10) 式に示す応力状態のもとでは, III の方向には $-\alpha R + R/2$ で正の方向にすべっている部分もあり, $-\alpha R - R/2$ で負の方向にすべっている部分もあって, 巨視的にみれば次のようになるであろう.

$$ds_1 = -ds, \quad ds_2 = ds, \quad ds_3 = -\alpha ds \dots (11)$$

s と γ の関係は

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= s_1 - \frac{1}{2}s_2 - \frac{1}{2}s_3, & \gamma_2 &= -\frac{1}{2}s_1 + s_2 - \frac{1}{2}s_3, \\ \gamma_3 &= -\frac{1}{2}s_1 - \frac{1}{2}s_2 + s_3 \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

(11), (12), (2) 式から ν を求めれば

$$\nu = -\frac{3(1-\alpha)}{3+\alpha} \dots (13)$$

(10)' 式の τ_3 の $\pm R/2$ というのは塑性変形のために生ずる内部応力であって, 外力による応力としてはこれは別に考えなければならぬ. これを除いて考えれば, μ の値は

$$\mu = -\frac{7-6\alpha}{7+2\alpha} \dots (14)$$

ν と μ の関係は

$$\nu = \frac{3+27\mu}{25+\mu} \dots (15)$$

ただし, $-1 < \mu < -1/2$.

次に第7図の (c) から (e) の間は,

$$S_1 = -R, \quad S_2 = R, \quad S_3 = -\alpha R \pm (1-\alpha)R \dots (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= -2R + \alpha R, & \tau_2 &= 2R, \\ \tau_3 &= -\alpha R \pm (1-\alpha)R \end{aligned} \right\} \dots (16)'$$

ただし, $1/2 < \alpha < 1$.

巨視的にみれば, (11) 式と同様に

$$ds_1 = -ds, \quad ds_2 = ds, \quad ds_3 = -\alpha ds \dots (11)'$$

したがって, ν の値も (13) 式と同様に

$$\nu = -\frac{3(1-\alpha)}{3+\alpha} \dots (13)'$$

μ の値は, (16)' 式の τ_3 の $\pm(1-\alpha)R$ を前同様に除いて考えて,

$$\mu = -(1-\alpha) \dots (17)$$

ν と μ の関係は

$$\nu = \frac{3\mu}{4+\mu} \dots (18)$$

ただし, $-1/2 < \mu < 0$.

(15) 式および (18) 式の ν と μ の関係を図示すれば, 第3図のようになる. 図にみるように, 理論と実験とはよく合っている.

5. 結 言

塑性変形の起り方については, 一般に $\nu = \mu$ であると考えられているが, 実際はそうでないことが前からわかっていた. しかし, どうして実験のようになるかということは, 説明がつかなかったのである. 著者の塑性理論では, その説明がつくし, 理論と実験とはよく一致する.

著者の理論は, 純粋せん断以外は, (10), (16) 式に示されるように, 内部応力が存在しているのが特徴である. もし, 内部応力を保ち得ないような材料があれば, これはこの理論の適用範囲外である. あるいは, 常温では保ち得ても, 高温では保ち得ないという場合の高温状態についても同様である. こういう場合には, ds_i が S_i に比例すると考えても, 結果は $d\gamma_i$ が τ_i に比例すると考えるのと同じことになる.

Taylor-Quinney の実験の中に, 赤熱状態のガラスの実験結果があり, $\nu = \mu$ の線に乗っているが, これは当然のことである. また, 鉛およびカドミウムについての実験の点があり, これらは $\nu = \mu$ の直線に近いところにあるが, これらは, 常温においてもクリープする材料であって, 内部応力を十分保つことができないためであると思われる. アルミニウム, 銅, 軟鋼などについての実験結果は, 著者の理論とよく合っている.

終りに, 実験およびその整理を手伝ってくれた永井文雄君に厚く謝意を表す.

文 献

- (1) W. Lode, *Mitt. u. Forschungsarb.*, 303 (1928); A. Nadai, *Theory of Flow and Fracture of Solids* (1950), McGraw Hill.
- (2) G.I. Taylor & H. Quinney, *Proc. Roy. Soc. London, Sec. A*, 230 (1931).
- (3) 中西, 佐藤, 機械学会論文集, 24, 147 (昭 33-11), 791.
- (4) 中西, 佐藤, 機械学会論文集, 25, 155 (昭 34-7), 587, 596.
- (5) 佐藤, 機械学会論文集, 24, 143 (昭 33-7), 472.

討

〔質問〕 (1) 実際に作用している応力は
 $\sigma_x' = -S_2 + S_3$, $\sigma_y' = -S_3 + S_1$, $\sigma_z' = -S_1 + S_2$,
 したがって I, II, III の面の実際のせん断応力は

$$\tau_1 = \frac{\sigma_y' - \sigma_z'}{2} = S_1 - \frac{1}{2} S_2 - \frac{1}{2} S_3, \dots\dots$$

であるにもかかわらず, すべりを起すせん断応力は実際に作用している応力の一部分 (たとえば I の面では $\sigma_y' = -S_3 + S_1$, $\sigma_z' = -S_1 + S_2$ の中の S_1 だけ) から生ずるものと考えている点が不合理のように思われる。

(2) 塑性変形ではひずみ増分が降伏曲面に垂直であるという原則 (最大塑性仕事の原理) を認めると, 前論文の降伏曲面が多角形であるという結果と, この論文の μ - ν 関係とが互に矛盾するが, この点はどうか考えられるか。 (吉村慶丸)

〔回答〕 (1) 変形の形のことを考えないで, すべることだけを考えるときには, もちろん τ ですべると考えてさしつかえない。また, σ で伸びると考えても, S で変形すると考えてもかまわない。

しかし, われわれの理論では3方向に分けて, それぞれの方向の抵抗を R_1, R_2, R_3 と考えている。そして, 平衡状態では S_1 と R_1 が平衡を保ち, 同様に S_2 と R_2 , S_3 と R_3 が平衡を保っている。平衡が破れればすべりが起り, 平衡状態に達するまですべりが続くと考えている。そうすると, すべりの量は S と R の関係で決まることになり, われわれの理論では本文に書いたように考えるのが当然だと思う。そして, そう考えると実験ともよく合う。

別の言い方をすれば, 実験の結果は第3図のように

論

なるが, こうなるためには, どういうすべり方をしているのであるか。 τ に比例してすべるとしたのでは実験に合わない。本文に書いたように考えると, 実験ともよく合う。そうすると, 実際にも, このようにすべっているのではないだろうか, ということである。

(2) 降伏曲面として, Mises-Hencky のものを採ったときに, $\nu = \mu$ の場合が塑性仕事最大であり, ひずみ増分が降伏曲面に垂直になるのだと思うが, このとき内部応力のことももちろん考えていない。

本文の終りのほうに書いておいたように, 内部応力がなければ $\nu = \mu$ であるが, われわれの理論は内部応力のあることが特徴であって, R という弾性範囲があれば, 塑性変形にもなって内部応力が生じ, そのために $\nu \neq \mu$ となり, また降伏曲面が多角形になるのである。しかも, それらの関係は外力による応力の形で表わされている。I の方向にすべるときと, II の方向にすべるときとでは, III の方向の抵抗が違いう意味で τ_1, τ_2 には内部応力が含まれている。しかし, τ_3 の内部応力は, 外力による応力としては当然除いてある。このような形で表わしてあるので, 内部応力を考えないときに, ひずみ増分が曲面に垂直になるからといって, そのまま, この場合にも垂直でなければならないと考える必要はないと思う。

なお, われわれの考え方では, 除荷または再負荷のときに弾性範囲があれば, 塑性流動の際には内部応力が生じ, $\nu \neq \mu$ になるのであって, 弾性範囲があるということと, $\nu = \mu$ とは両立しないことになる。

やがてくる太陽エネルギーの商業化時代

太陽エネルギーは無限であって, 数世紀の間人類はこの利用に注目してきた。現在アメリカでは, 人工衛星パドル・ホイールを月の軌道にのせようと計画して, 絶えず努力を続けている。200 000 mile 以上地球から離れた太陽エネルギーを産業上に応用することは不可能のように見えたが, 今日では, 太陽熱の研究はしろろとの研究から脱して, 産業上に活用することに向けられている。その例をあげれば次のとおりである。

(1) 1954 年ベル・テレホン実験室で通信工業にシリコン太陽電池を開発した。(2) ロケット推進に太陽エネルギーを利用することも調査中で, ウェスチングハウス社実験室, RCA 実験室 (ノースロップ航空機会社), トムプソン・ラモなどで実験されつつある。(3) 太陽利用の電気写真, 太陽時計, 補聴器, 映写機などにも利用されている。(4) 核爆発を可能にする 5000°F の温度の太陽炉も研究中で, この太陽炉

は, アルミナジルコニア, ソリアおよび純金属の生産にも利用され, パリではすでに 1000 kW のものが1日 2 400 kg のシリコニア生産に使用される予定になっている。(5) アメリカでは暖房用に太陽熱利用が要望され, 1年中, 大部分のビルディングが太陽熱を利用できるようにするための実験が行なわれた。目下熱の能率的な貯蔵法について研究中である。これによって, 冬期の燃料節約ともなろう。(6) 海水から鉱物質を除去して, 飲料用, かんがい用, 工業用に適する水をうるため, 太陽エネルギーを利用することも実験中である。

しかし, 以上いずれも, また開拓の段階にあるが, 一度問題が解決すれば, 世界中を風びすることとなる。〔Management Rev., 4, 7 (1960), 61〕

(日本科学技術情報センター提供)