

朝永振一郎記念

第18回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ0618

応募部門 : 中学生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : ひずむと熱が発生する?～イオの火山の不思議 part3～

学校名 : 静岡県 国立静岡大学教育学部附属浜松中学校 トップガン

学年 : 1年生

代表者名 : 柴田 千歳 (静岡大学教育学部附属浜松中学校)

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

ひずむと熱が発生する？
～イオの火山の不思議 part3～

静岡大学教育学部附属浜松中学校

7年2組17番 柴田 千歳

1. きっかけ・目的

私は宇宙が好きだ。以前「宇宙人が存在する可能性のある太陽系内の惑星・衛星」について調べた際、木星の衛星のイオという星がその候補に上がった。イオでは火山活動が活発なので、生物をつくる材料となるアミノ酸などが作られている可能性がある。火山活動が活発な理由は、イオの地殻が金属鉄できていて、木星の引力の変化によって、その部分にひずみが繰り返し起こり、火山のマグマとなる熱が発生しているからだ。⁽¹⁾⁽²⁾ 私はそれを知って「金属がひずむと熱が発生する」ということに興味を持ち、研究を続けてきた。2021年度は、金属を曲げ伸ばしすると本当に熱が発生するということが分かった。また、ステンレス鋼(SUS304)の太さ 2.0mm の針金で、最大 89.1°C温度が上昇した。2022年度は、装置を工夫して、もっと太くてかたい針金を曲げ伸ばしできるようになった。その結果、ステンレス鋼(SUS304)の太さ 2.6mm の針金で最大 134.4°C温度が上昇した。また、針金をひずませている部分で、金属に強いに力を加えると硬くなるという現象である「加工硬化」が起こり、針金が折れていることが分かった。しかし、曲げ伸ばしをするときの角度がそろわないなどの課題があった。今年度は、昨年度の反省を生かし、装置をさらに工夫した。そして、もっと高い温度を出すためには、折れるまでの時間が長い金属を選ぶ必要があると考えたので、どのような金属が折れにくいのかなど、金属の性質について詳しく調べることにした。

2. 原理・方法

金属を曲げ伸ばしするとひずんだ部分に熱が発生する。金属を繰り返し折り曲げてひずみを生かせ、金属の材料の違いによる発熱(温度の上がり方)や折れるまでの時間の違いを熱電対温度計を用いて測定する。

3. 予想

1. 折れるまでの時間が長い金属の方が温度上昇は大きくなる。

【折れるまでの時間が長い順】1位：SUS430 2位：SUS304 わからない：SUS304L

2. 加工硬化が起こりやすい(n値が高い)素材ほど早く折れる。

【n値が高い順】1位：SUS304 2位：SUS430 わからない：SUS304L

今回、SUS304Lのn値が分からなかったが、SUS304とほぼ変わらないと考えられる。

表1 ステンレスの物性⁽³⁾⁽⁴⁾

	SUS304	SUS304L	SUS430
n値	0.5	0.5	0.23
引張強さ(N/mm ²)	520	480	440
硬さ(HB)	<187	<187	<201
伸び(%)	40	40	20

n値：加工硬化の起こりやすさ。(n値が高いほど加工硬化が起こりやすい。)

引張強さ：その金属が耐えられる引張の限度。

硬さ(HB)：ブリネル硬さ。

伸び：標点間のひずみの平均値。

4. 準備

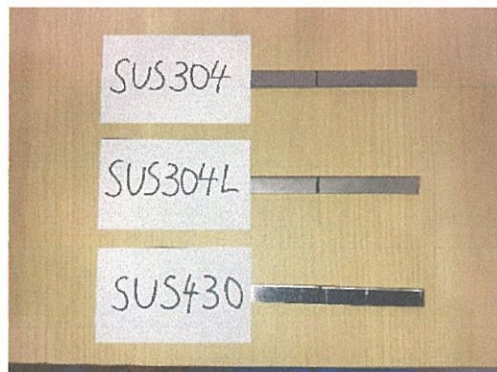
- 温度計(熱電対とデータロガー) ●メトロノーム ●万力 ●バイスプライヤー
- バルカーシールテープ ●ハサミ ●ノギス ●名前ペン ●ゴム手袋
- アルミニウムの板(厚さ 1.0mm：金属材固定用)
- 金折(35mm×90mm×40mm：曲げ伸ばしの角度をそろえる用)
- 金属材…板(縦：100mm 横：10mm 厚さ：2mm) ・SUS304 ・SUS304L ・SUS430

5. 実験

5-1. 実験方法

1) 10cm に切りそろえられた板に、万力で挟む中心の 5cm のところに印をつける。

写真1

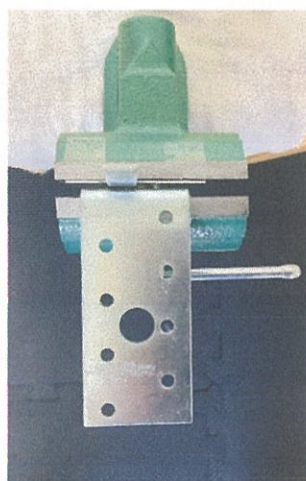


2) 万力とアルミニウムの 1.0mm の板と金折で板の 5 cm 部分を挟む。

写真2 横から見た様子



写真3 上から見た様子



3) 万力が一番近い部分にバルカーシールテープでセンサーを貼る。

写真4



4) 貼ったセンサーに近いところにバイスプライヤーをつける。

写真5



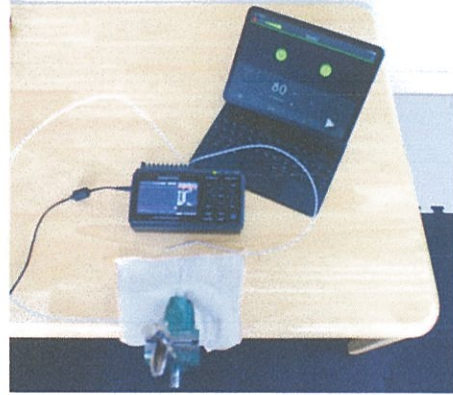
5) 室温を測るためにもう一つのセンサーを机に取り付ける。

写真6



6) 温度計のスタートスイッチを押し、測定を開始してから5秒待つ。

写真7



7) 板が折れるまで、材料の曲げ伸ばしを続ける。(1分間に90回のペース)

写真8 伸ばしている様子

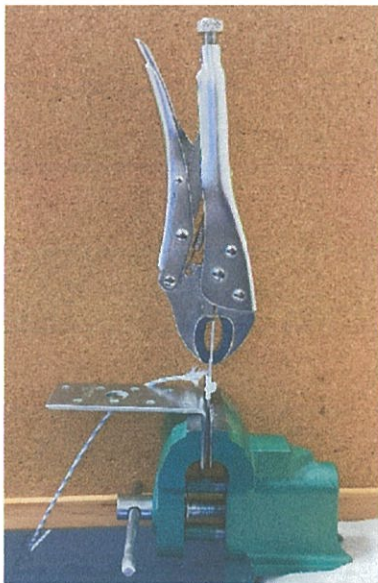
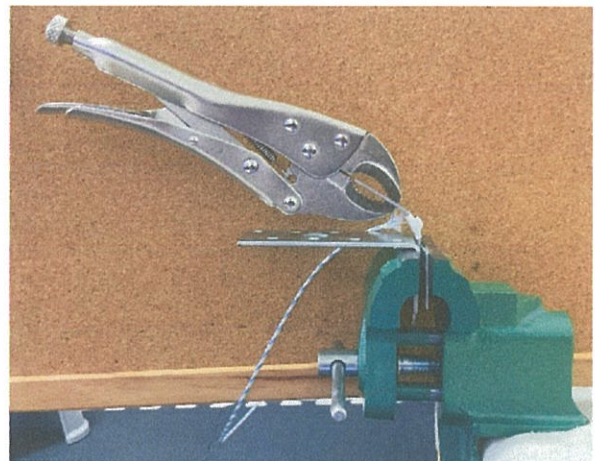


写真9 曲げている様子



(1)～(7)の手順を材質を変えて行い、1つの材質に対して3つずつデータ(合計9データ)をとった。全ての測定で、新しい板を使用した。

5-2. 昨年度までの実験方法からの改良点

- ・ 前は針金で実験を行ったが、針金だと加工硬化の起こりやすさの違うステンレスを集めることが困難だったため、板を用いて実験を行った。
- ・ 前は曲げ伸ばしをする角度がバラバラになってしまったので、金折を万力に挟み、バイスプライヤーがそこにあたるまで曲げるようにした(写真10参照)。矢印の角度は約 50° になった。

写真10



5-3. 昨年度までの研究方法との比較

<p>2021年度</p> <p>8cmの棒状の金属を約90°に1分間に120回のペースで、1分間曲げ伸ばしを行った。手とペンチを用いた。アルミニウム・銅・鉄・ステンレス(SUS304)のそれぞれ太さ(0.9mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.6mm)で、3回ずつデータを取った。</p>	<p>写真11</p>
<p>2022年度</p> <p>8cmの棒状の金属を約90°に1分間に80回のペースで、針金が折れるまで曲げ伸ばしを行った。万力とバイスプライヤーを用いた。アルミニウムの板(1.0mm)を一緒に挟み、万力と針金がずれてしまうのを防いだ。アルミニウム・銅・鉄・ステンレス(SUS304)のそれぞれ太さ(1.5mm, 2.0mm, 2.6mm, 3.0mm)で、5回ずつデータを取った。</p>	<p>写真12</p>
<p>2023年度</p> <p>10cmの板状の金属を約50°に1分間に90回のペースで、板が折れるまで曲げ伸ばしを行った。万力とバイスプライヤーを用いた。片側に金折をつけ、一定の角度で曲げ伸ばしを行えるようにした。板厚2.0mmの3種類ステンレスで、3回ずつデータを取った。</p>	<p>写真13</p>

6. 結果

以下の結果の上昇温度とは、データ中の最高温度と室温との差である。

6-1. SUS304 の測定結果

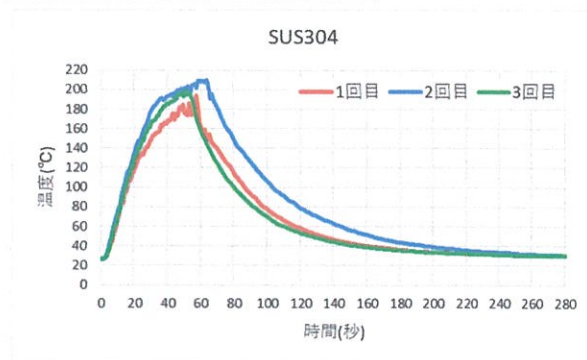
表2 実験結果 (SUS304)

SUS304	1回目	2回目	3回目	平均
最高温度 (°C)	193.6	209.4	198.8	200.6
上昇温度 (°C)	166.7	183.1	172.1	174.0

表3 板が折れるまでの時間 (SUS304)

SUS304	1回目	2回目	3回目	平均
折れるまでの時間 (秒)	63.0	65.0	57.0	61.7

図1 温度の変化 (SUS304)



6-2. SUS304L の測定結果

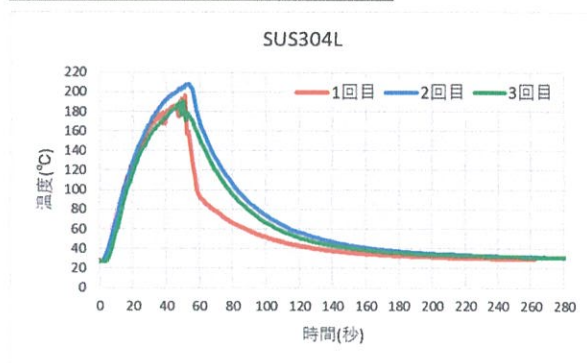
表4 実験結果 (SUS304L)

SUS304L	1回目	2回目	3回目	平均
最高温度 (°C)	196.0	208.4	190.9	198.4
上昇温度 (°C)	168.3	181.5	163.5	171.1

表5 板が折れるまでの時間 (SUS304L)

SUS304L	1回目	2回目	3回目	平均
折れるまでの時間 (秒)	54.0	58.0	54.0	55.3

図2 温度の変化 (SUS304L)



6-3. SUS430 の測定結果

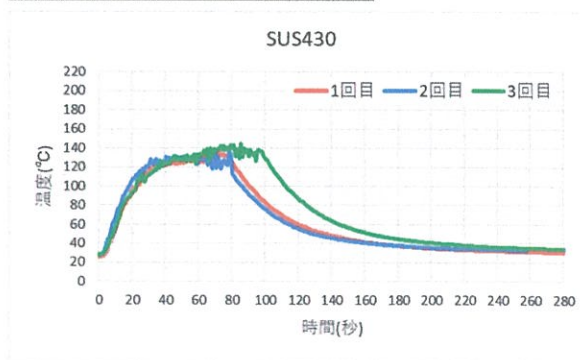
表6 実験結果 (SUS430)

SUS430	1回目	2回目	3回目	平均
最高温度 (°C)	135.7	138.4	144.9	139.7
上昇温度 (°C)	109.5	111.0	116.9	112.5

表7 板が折れるまでの時間 (SUS430)

SUS430	1回目	2回目	3回目	平均
折れるまでの時間 (秒)	91.0	83.0	99.0	91.0

図3 温度の変化 (SUS430)



6-4. まとめ

- ・温度上昇が大きくなった順に並べると下記のような結果となった。(図4参照)

SUS304 > SUS304L > SUS430

1番温度上昇が大きくなった SUS304 の温度上昇は、平均 174°C になった。

- ・板が折れるまでの時間が長かった順に並べると下記のような結果となった。(図5参照)

SUS430 > SUS304 > SUS304L

図4 上昇温度 (各材質の平均)

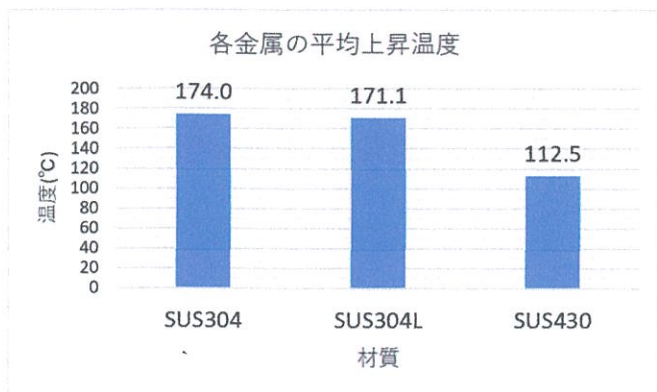
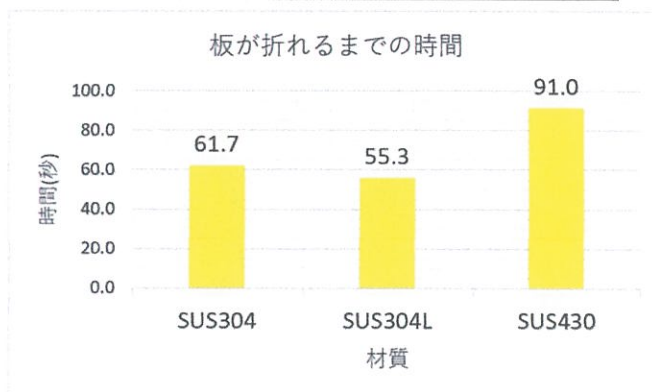
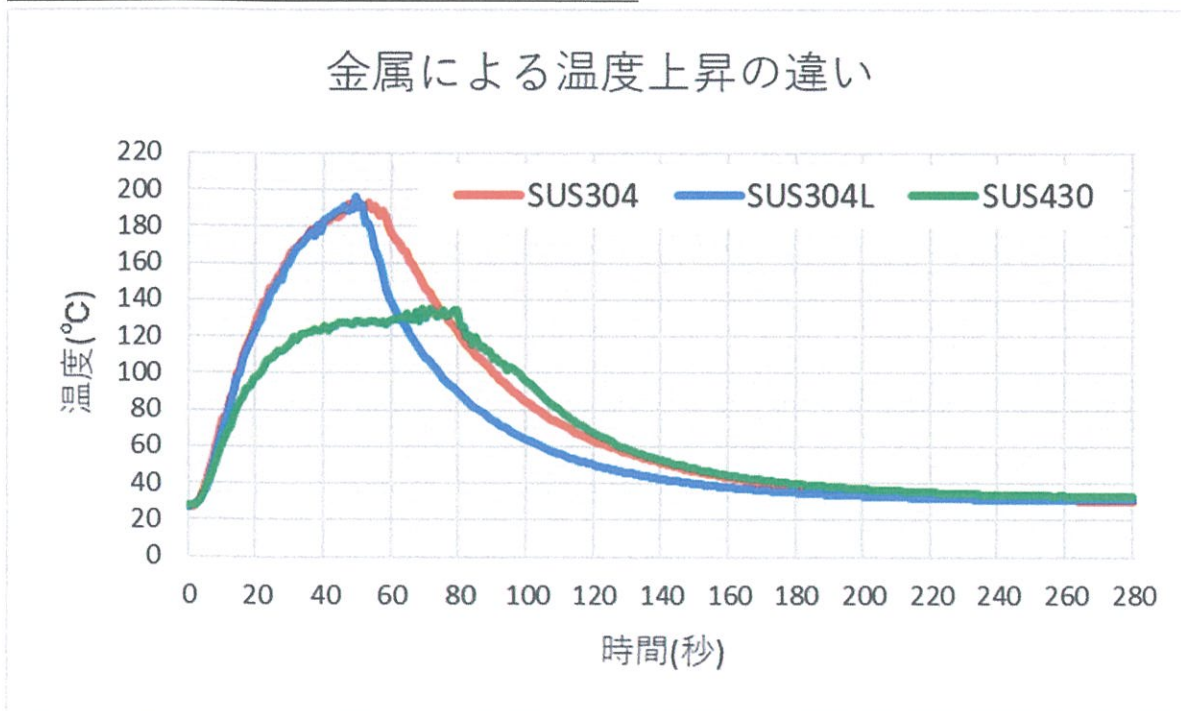


図5 板が折れるまでの時間 (各材質の平均)



- ・SUS430 では折れるまでの時間が長かったが、温度が上昇し続けず、停滞した。(図6参照)
このことから、板が折れるまでの時間と温度上昇の大きさは関係ないといえる。(予想1は間違っていた)
- ・SUS304 や SUS304L は n 値が低い SUS430 よりも早く折れた。
このことから、加工硬化が起りやすい(n 値が高い)素材ほど、板が折れるまでの時間が短いといえる。(予想2はあっていた)

図6 金属ごとの温度上昇の違い (3回の平均)



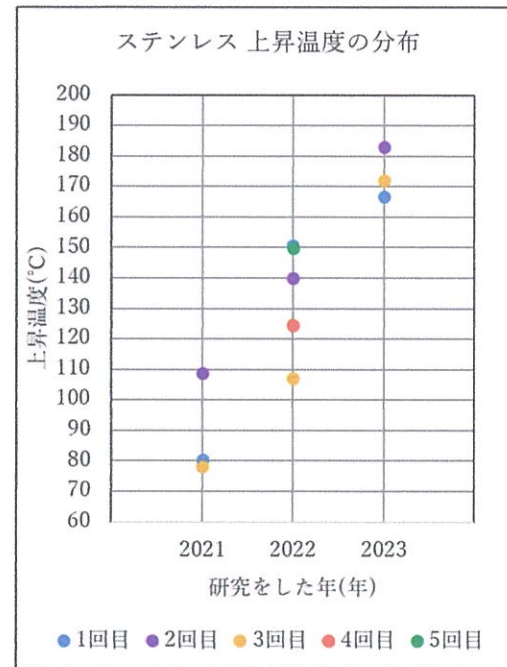
6-5. 昨年度までの結果との比較

- ・昨年度針金を曲げ伸ばしした際よりも温度上昇が大きかった。(表 8 参照)
- ・昨年度に比べてデータのばらつきが小さかった。(図 7 参照)

表 8 各年の平均上昇温度 (SUS304)

	太さ(mm)	平均上昇温度(°C)
2021年度	2.0	89.1
2022年度	2.6	134.4
2023年度	2.0	174.0

図 7 各年の上昇温度の分布



7. 考察

今年度は昨年度までよりも温度上昇が大きくなり、データのばらつきも小さかった。針金の場合は曲げ伸ばしをしている際にねじれができ、力を加えるところが時々少し変わってしまっていたが、板の場合はねじれができづらく、1か所に力を集めやすくなったからだと考えた。また、データのばらつきが小さくなったのも同様の理由で、どの場合も同じように1か所に力を集めることができるようになったからだと考えられる。そして曲げる角度をきれいにそろえたことも要因だと思う。

予想 1 に対する答え：板が折れるまでの時間と温度上昇の大きさは関係なかった。

これまでは、板が折れさえしなければどの金属も永遠に温度は上がり続けると思っていた。しかしそうではなく、温度は上がり続けているのに同じだけ放熱してしまっているのではないかと、また、その金属にとっての最大上昇温度があるのではないかと考えた。

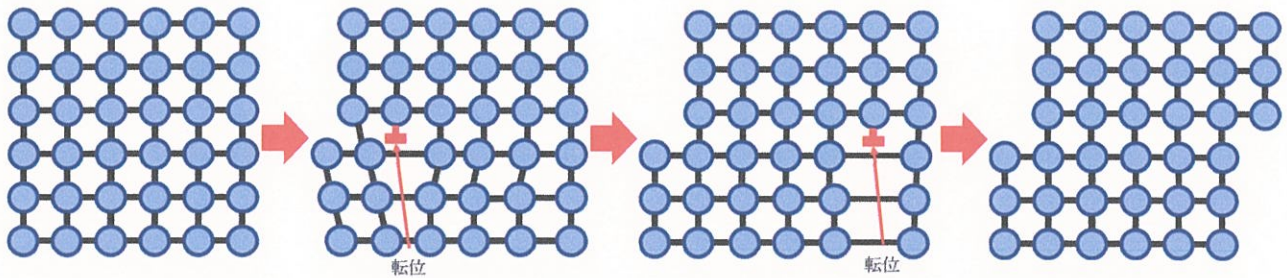
予想 2 に対する答え：加工硬化が起りやすい(n 値が高い)素材の方が、板が折れるまでの時間が短かった。

昨年度までは、ひずませると熱が発生するのは、中に原子がたくさん入っていて、金属が変形することで原子同士がこすれ合い、摩擦によって熱が発生しているからだと考えていた。また、金属を曲げ伸ばしすると折れるのは、曲げ伸ばしをしている部分で加工硬化という現象が起こっていて、そこにしわがよって行って硬くなり、硬くなった状態で曲げ伸ばしを続けたから折れたという認識だった。今回はさらに深くその原理を調べた。⁽⁵⁾

曲がる：今回行ったのは塑性変形で、力を加えるのを止めても元の形には戻らない変形のこと。
 塑性変形は、隣り合う原子同士をつないでいたばねが切れて、別の原子との結合になって始まる。その時に起こるのはすべり変形というもので、トランプの束をずらすようなイメージである。変形後の金属表面には段差が確認される。しかし、トランプのように一斉に起こるのではなく、1原子列ずつ絨毯のしわを順次送って位置をずらすようにしてずれていく。(図8参照)

図8 変形の仕方のイメージ

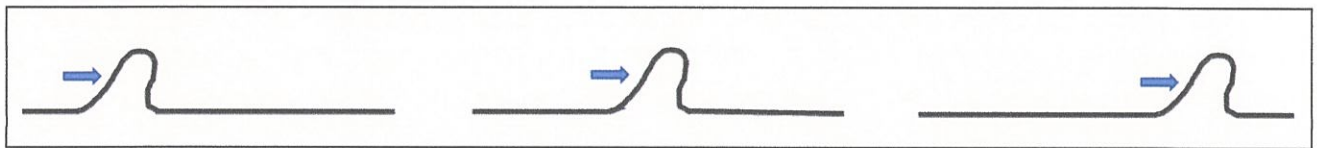
全体：すべり面 青い丸：原子 黒い棒：原子をつなぐばね 赤印：転位



すべり系：すべり面やすべり方向を総合した、転位が動きやすい面と方向のこと

転位：原子の線状欠陥のこと。絨毯の位置を変えるときに送るシワと同じようなもので、転位が抜けた後は原子の段差ができて形状が変わる。(図9参照)

図9 転位(絨毯のしわ)の動きのイメージ



加工硬化：金属が変形していくうちに、たくさんのすべり系が活動して転位どうしが絡み合い、硬くなっていく現象。

引張強さ：その金属が耐えられる引張の限度。それを過ぎるまでの伸びは一様伸び、それを過ぎてからの伸びは局部伸びと呼ばれる。

ステンレスのような多結晶金属の変形では、動きやすいすべり系の転位から順に動いていき、様々な理由でその転位が動けなくなると、次の転位が動き始める。このようにして様々な種類のすべり系が活動し、全体の変形が起こる。

以上が調べたことである。それを踏まえてさらに深く結果を考察してみた。

金属の曲げ伸ばしをしていると温度が上がるのは、原子をつないでいるばねのようなものがちぎれたり別の部分と結合したりするときに発熱しているからだと考えた。原子の結びつきが変わるときに発熱するという現象があるのではないかと考えた。

金属を曲げ伸ばしすると折れる理由について、2つの説を考えた。

1つ目は、引張強さの限界が来たから。引張強さの限界とは、周りで加工硬化が起こりきり、もう周りの方は動けなくなって、真ん中に大きなくびれを作るしかない状態になったということだと解釈した。しかしこれは、そのあとの局部伸びを考慮するとそうとも言い切れない。また、今回の結果からすると、引張強さはあまり関係していなさそうだった。

2つ目は、去年の考えと同じように、加工硬化が起こって金属が硬くなり、その硬くなった状態で曲げ伸ばしを続けたからだと考えた。

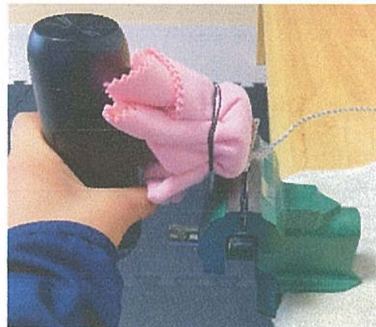
8. 今後の方針

- ・もっと高い温度を出すための工夫を行う。特に、熱の散逸を防ぐ。例えば、固定している金属の板を熱伝導率が低いものにする、断熱材を探す、真空状態を作るなどする。
- ・熱の散逸時間を短くするために、もっと早く曲げ伸ばしを行う、曲げ伸ばしの角度を大きくするなどの工夫も行う。
- ・どのような条件であればイオの火山の温度(2027°C)を作り出せるか計算で求める。
そのために、木星の引力によるひずみの大きさ、金属の地殻の直系、どのような金属がどのような割合で混ざっているのか、などをまず調べる。
- ・今回の実験で、イオの地殻の金属鉄もいつか加工硬化しきり、ひずまなくなるのでは？と疑問に思ったので、調べる。
- ・今回は塑性変形で実験を行ったが、次は弾性変形でも実験を行う。
試しに筋膜リリースを行う、振動を与えることができる器具(写真14参照)を用いて実験を行ってみた。写真15のように10分間振動を針金に伝え続け、温度上昇があるかどうか調べた。

写真14



写真15



その結果、最初 26.4°Cだったのが 30.3°Cになった。弾性変形でも温度上昇がある事が分かったので、手を放して測定を行える・長時間当て続けられる・一定の場所に当て続けられる・放熱をしにくいなどの条件がそろった装置を作り、来年度は研究を進めたい。

9. 感想

今回の実験では、角度をそろえてデータのばらつきを減らすことができて良かった。また、2021年度は89.1°C、2022年度は134.4°Cだった上昇温度を上回り、174.0°Cとなったのが嬉しかった。これからももっと高い温度を出したいので、そのためにはどのような金属が最適なのか調べていきたい。また、金属の物性について調べていく中で、新しい疑問やほかに知りたいことが増えたので、これからも金属について調べていき、色々なことを理解したい。

参考文献

- 1) 宮本英昭・橘省吾・平田成・杉田精司 「惑星地質学」
東京大学出版会 2008年1月23日, p199
- 2) 坂井宏先 「ポプラディア大図鑑 WONDA 宇宙」株式会社ポプラ社 2013年11月, p132
- 3) ステンレス協会 「ステンレス鋼データブック」日刊工業新聞社 2000年2月29日,
p122,126,501-表 1.9
- 4) 日本金属学会編 「金属データブック改訂4版」丸善 2004年, p144-145, 376
- 5) 徳田昌則 「構造、状態、磁性、資源からわかる金属の化学」
株式会社ナツメ社 2012年1月8日, p56-P63