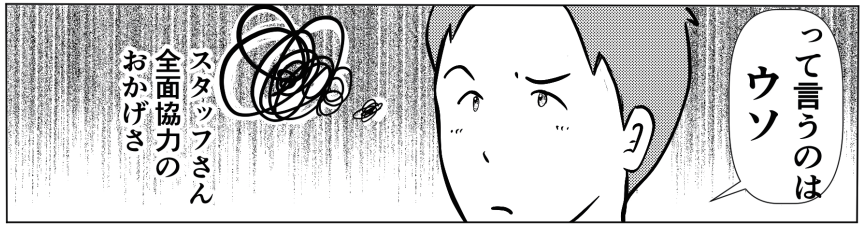
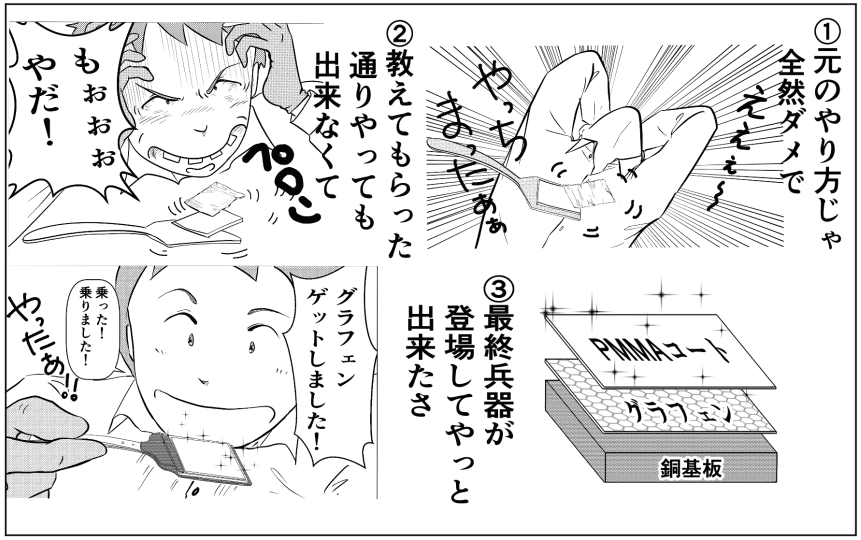
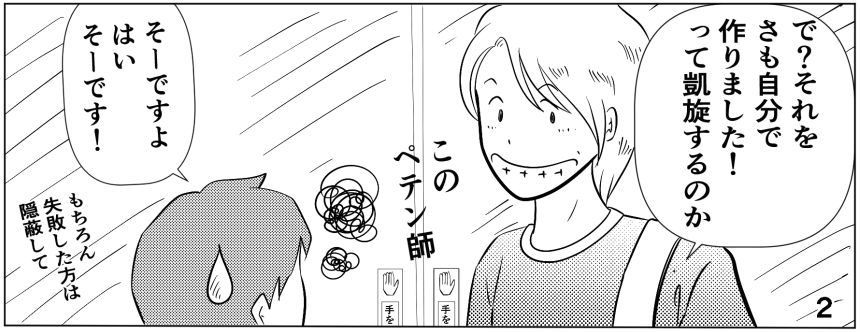
第4話　2.5次元インターカレーション







令和3(2021)年度学術変革領域研究(A)
2.5D Materials
2.5次元物質科学：
社会変革に向けた物質科学のパラダイムシフト
NEWS LETTER

2.5次元研究室へようこそ

© もんでんひでこ



前回までのあらすじ

最先端科学のゼミにどうにか入ろうと、他大学にまで出向いてCVD法で大面積グラフェン作製を試みる新4年生太田浩二。

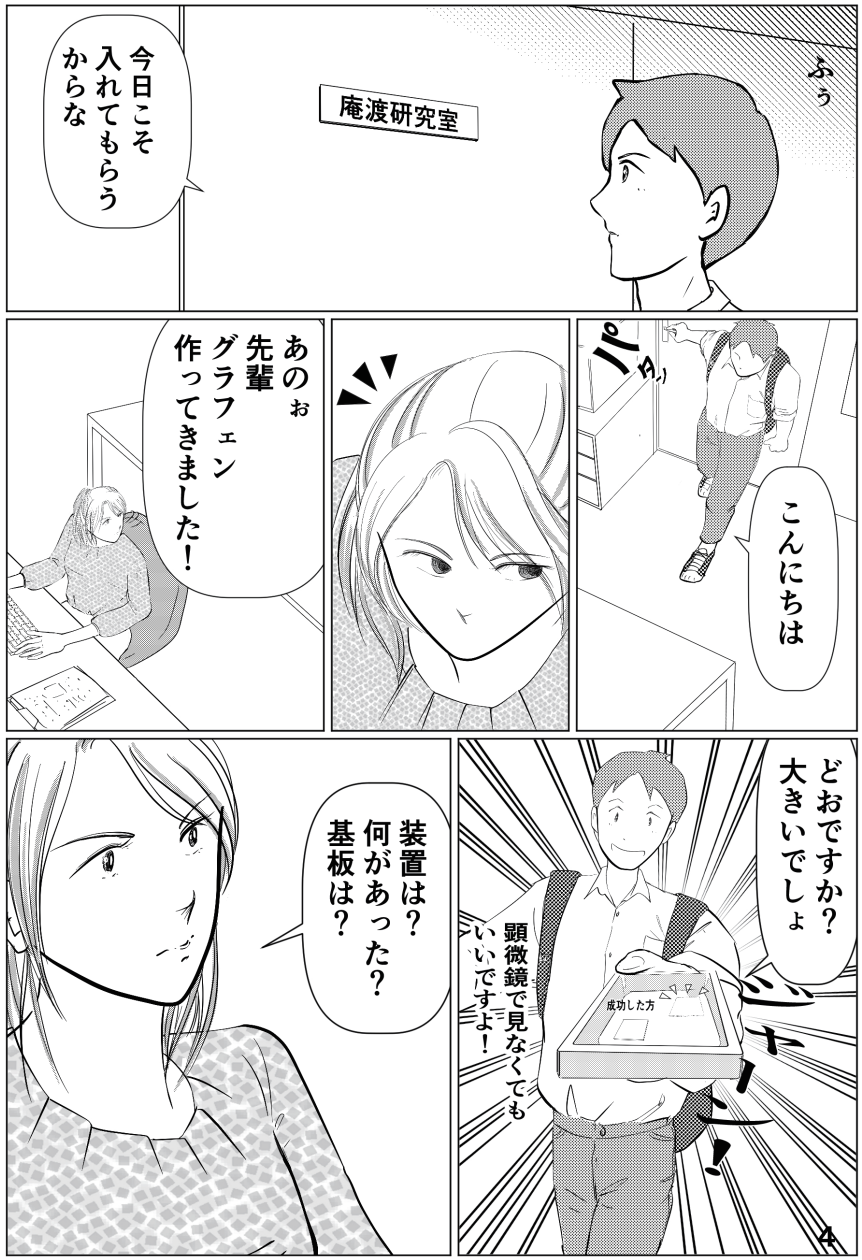
やっと出来たグラフェンの検査方法を教えてもらったり、それを応用して社会課題解決に向けて研究するドクターに会えて大満足だったのに、なぜか次なる指令が降ってきて戸惑う太田君。次の研究テーマは？？

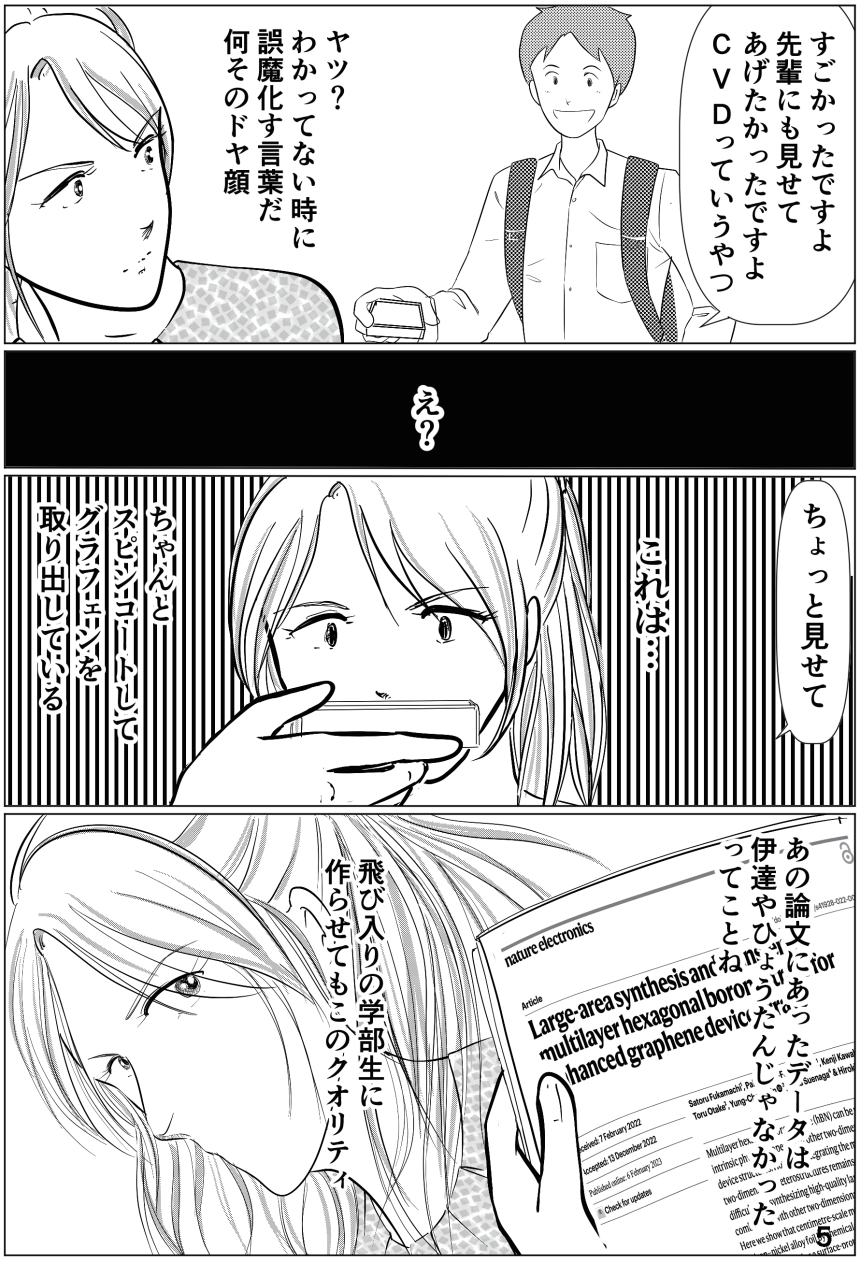


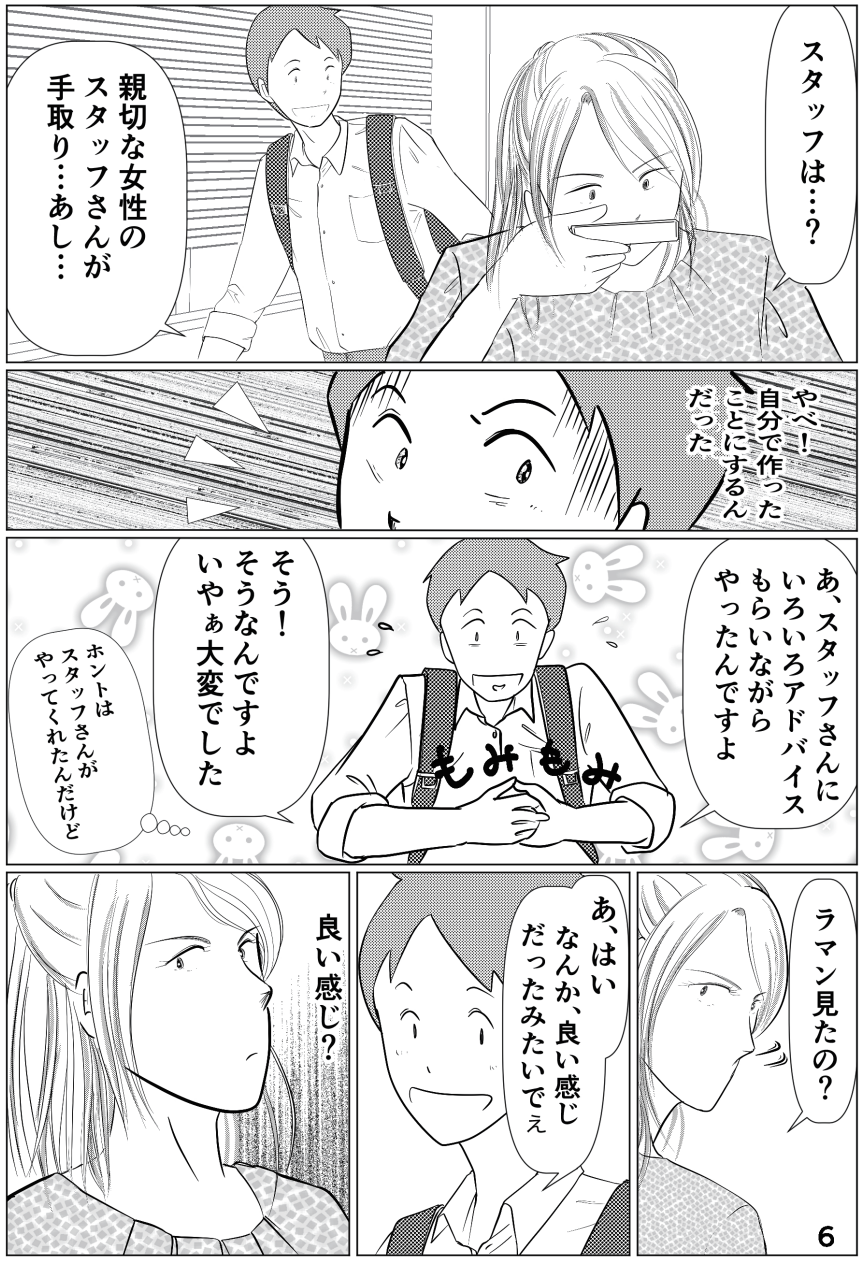


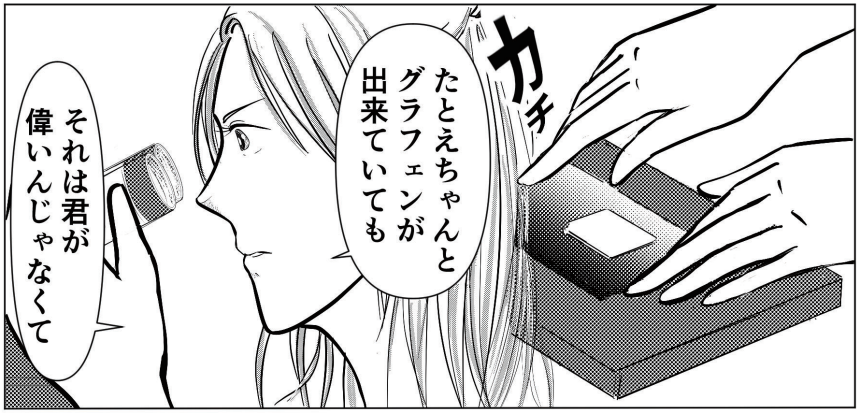



細工は流流
仕上げは…
なんだっけ？
ま、いっか
ザシザシ
きっとさ
俺が頑張ってるって
筑紫先生が庵渡先生に
メールしてくれたんだ
それは
どうだか
けど
あの先生は
どうなんだ？
だろ？
俺の頑張りが
伝わったんだよ
どうやって？
ただ不思議なことが
おこったんだ
今度は飯山大学に
行って来いって
春日大の先生のとこに
庵渡先生から
メールが来たって
へぇ
すごいじゃん
もうゼミ残留
確定じゃん
庵渡
email
春日大
筑紫
今度は飯山大へ
3


ふぅ
庵渡研究室
今日こそ
入れてもらう
からな
パタン
こんにちは
あのぉ
先輩
グラフェン
作ってきました！
どおですか？
大きいでしょ
顕微鏡で見なくても
いいですよ！
成功した方
装置は？
何があった？
基板は？
4


すごかったですよ
先輩にも見せて
あげたかったですよ
ＣＶＤっていうやつ
ヤツ？
わかってない時に
誤魔化す言葉だ
何そのドヤ顔
え？
ちょっと見せて
これは…
ちゃんと
スピンコートして
グラフェンを
取り出している
飛び入りの学部生に
作らせてもこのクオリティ
あの論文にあったデータは
伊達やひょうたんじゃなかった
ってことね
nature electronics
Article
Large-area synthesis and
multilayer hexagonal boror
hanced graphene device
5

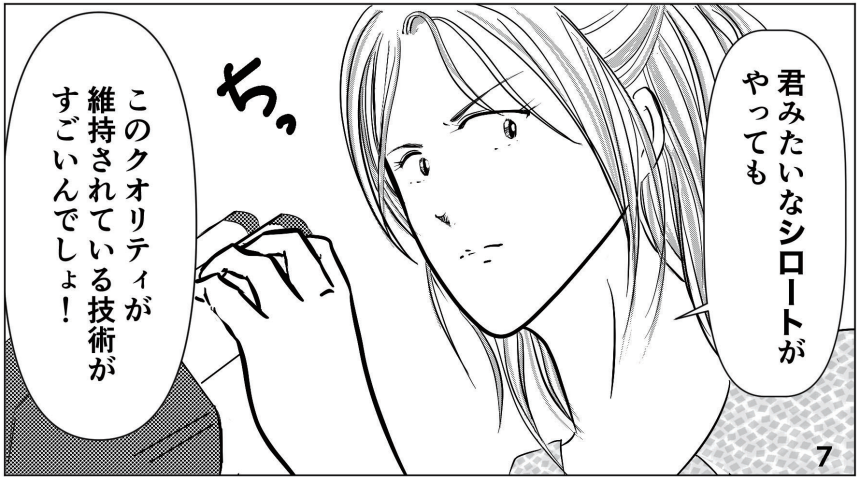

スタッフは…？
親切な女性の
スタッフさんが
手取り…あし…
やべ！
自分で作った
ことにするん
だった
あ、スタッフさんに
いろいろアドバイス
もらいながら
やったんですよ
もみもみ
そう！
そうなんですよ
いやぁ大変でした
ホントは
スタッフさんが
やってくれたんだけど
ラマン見たの？
あ、はい
なんか、良い感じ
だったみたいでぇ
良い感じ？
6

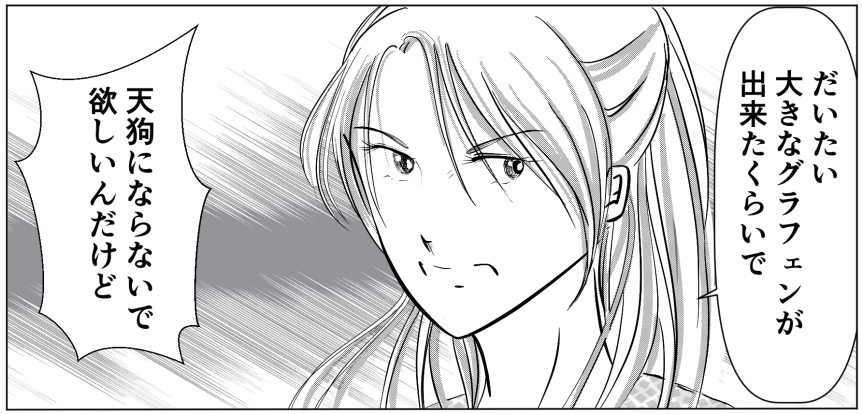


こ…これは

確かに見てみないとわからないこともあるかもしれない

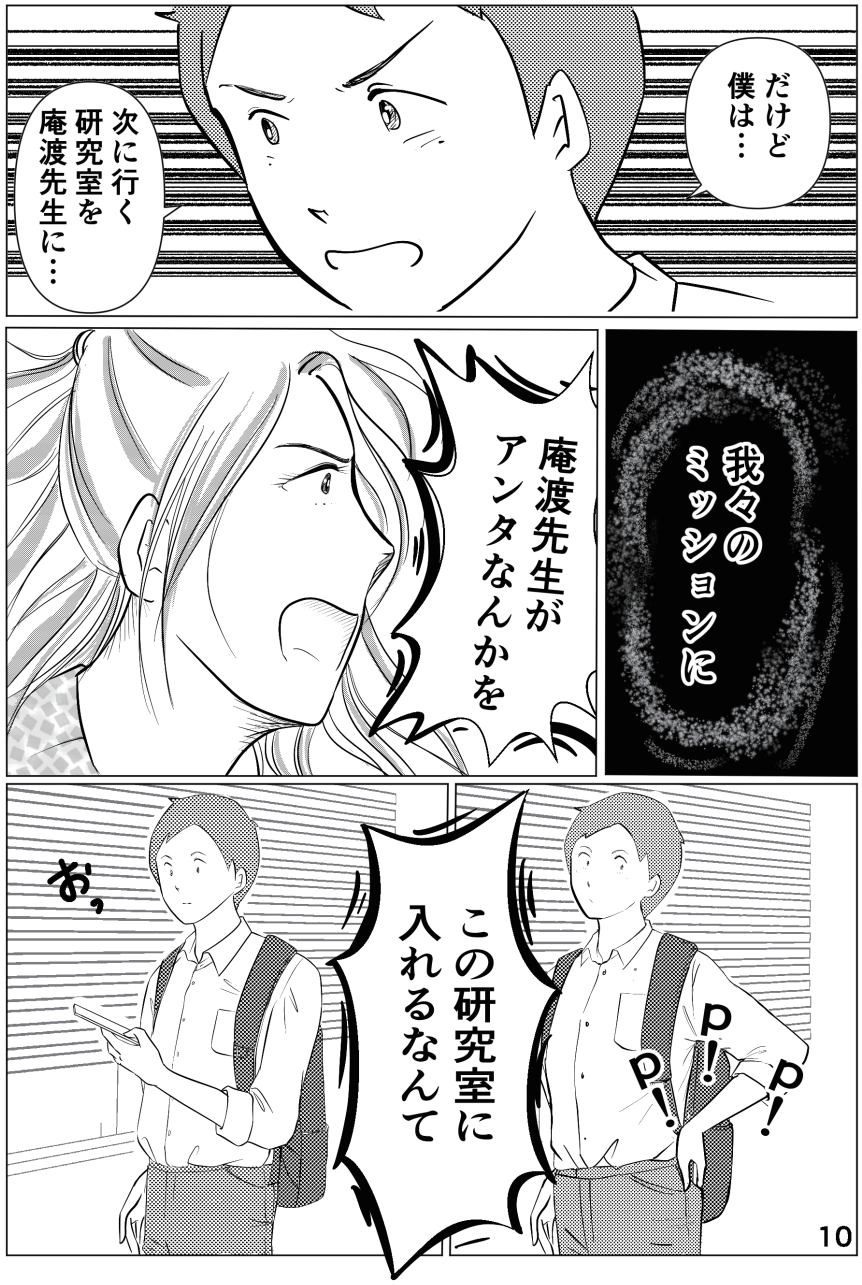
第3話参照、まっさらなグラフェン



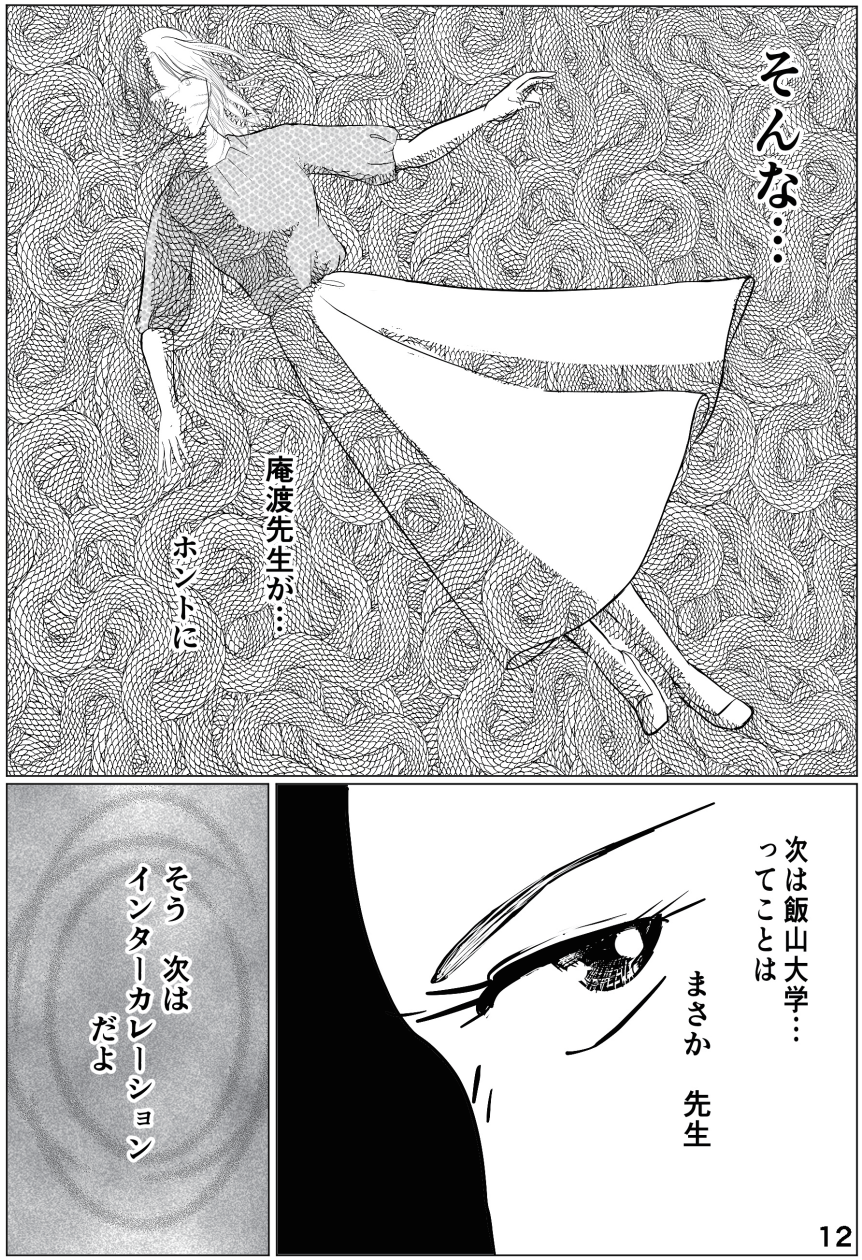




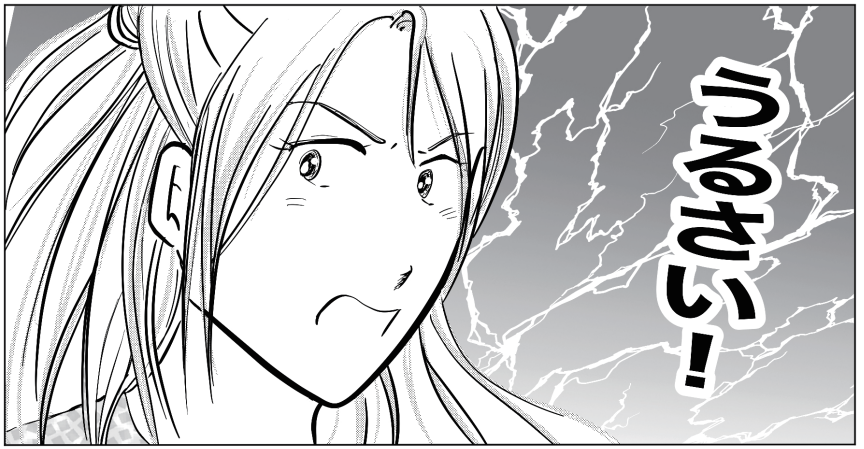

みんな必死で研究してるの
将来が約束されてるわけでもないのに
携帯も持たずに砂漠を彷徨う辛さがあんたにわかるの??
乃木は携帯持ってるけど
それをちょっとCVDが出来たくらいで
どーせ手取り足取りスタッフさんに教えてもらってやっと出来たんでしょ
およ…
とにかくうちの研究室にはいらない

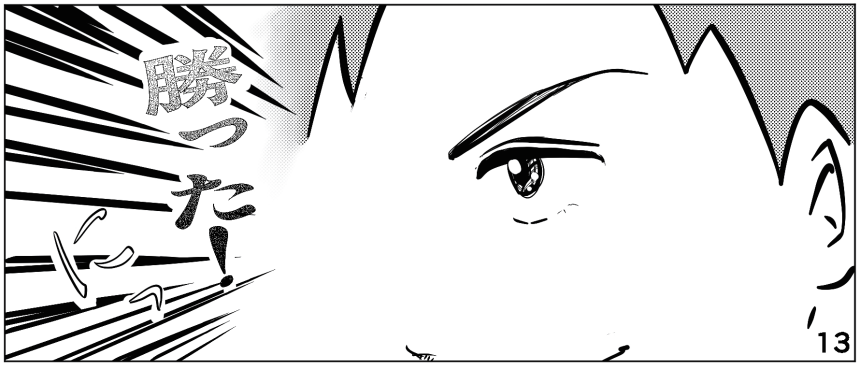

だけど僕は…
次に行く研究室を庵渡先生に…
我々のミッションに
庵渡先生がアンタなんかを
お。
この研究室に入れるなんて
P!
P!
P!

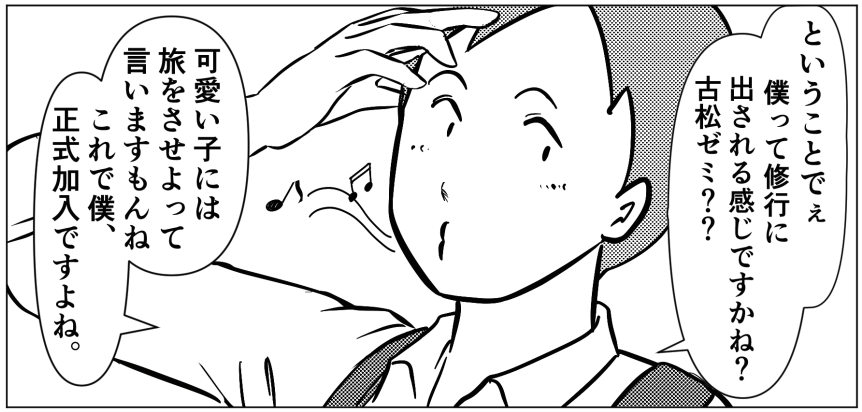

協力してもらうことにしよう
ありえない！
に？
ど？
太田くん
庵渡先生からのメールを転送します。
春日大学　筑紫
筑紫先生
そちらにお邪魔している太田君ですが
この後、飯山大学の古松先生のところへ
行くようにお伝え下さい。
お手数ですが、よろしくお願いします。
庵渡
ゾゾゾ
11

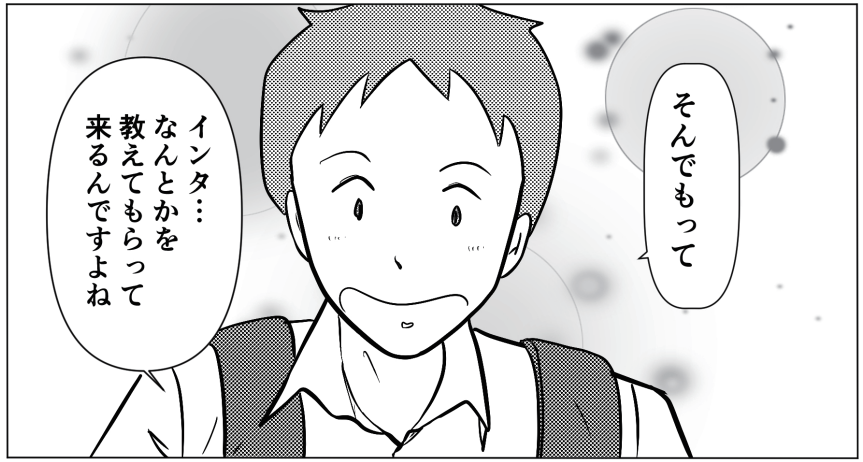

そんな…
庵渡先生が…
ホントに
次は飯山大学…
ってことは
まさか　先生
12
そう　次は
インターカレーション
だよ

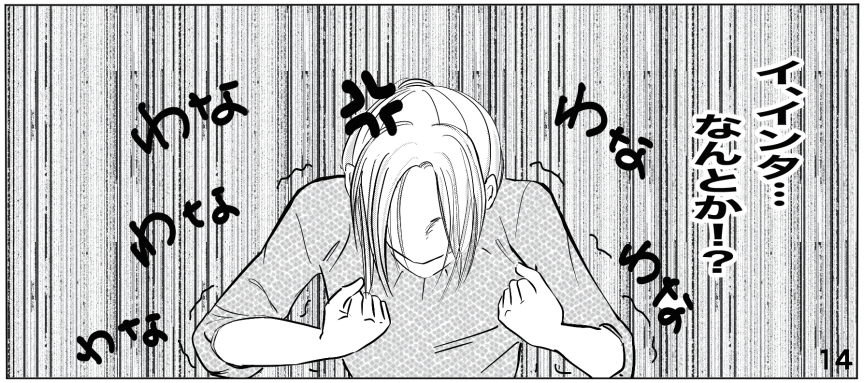

ほら
ほら
「たく…


うるさい!


勝った!


ということでぇ
僕って修行に
出される感じですかね?
古松ゼミ??
可愛い子には
旅をさせよって
言いますもんね
これで僕、
正式加入ですよね。


そんでもって
インタ…
なんとかを
教えてもらって
来るんですよね


インインタ…
なんとか!?
わな
わな
わな
わな
わな

インターカレーション！

あのねぇ
インターカレーション
ってのはねぇ

おょ…

はいはい
なんすか？

もみ
もみ

15

化学反応で
黒鉛などの
層状物質の間に
物質を挟むこと

黒鉛

そうすることで
熱、電気、光などの性質が
どう変化するかを
研究する

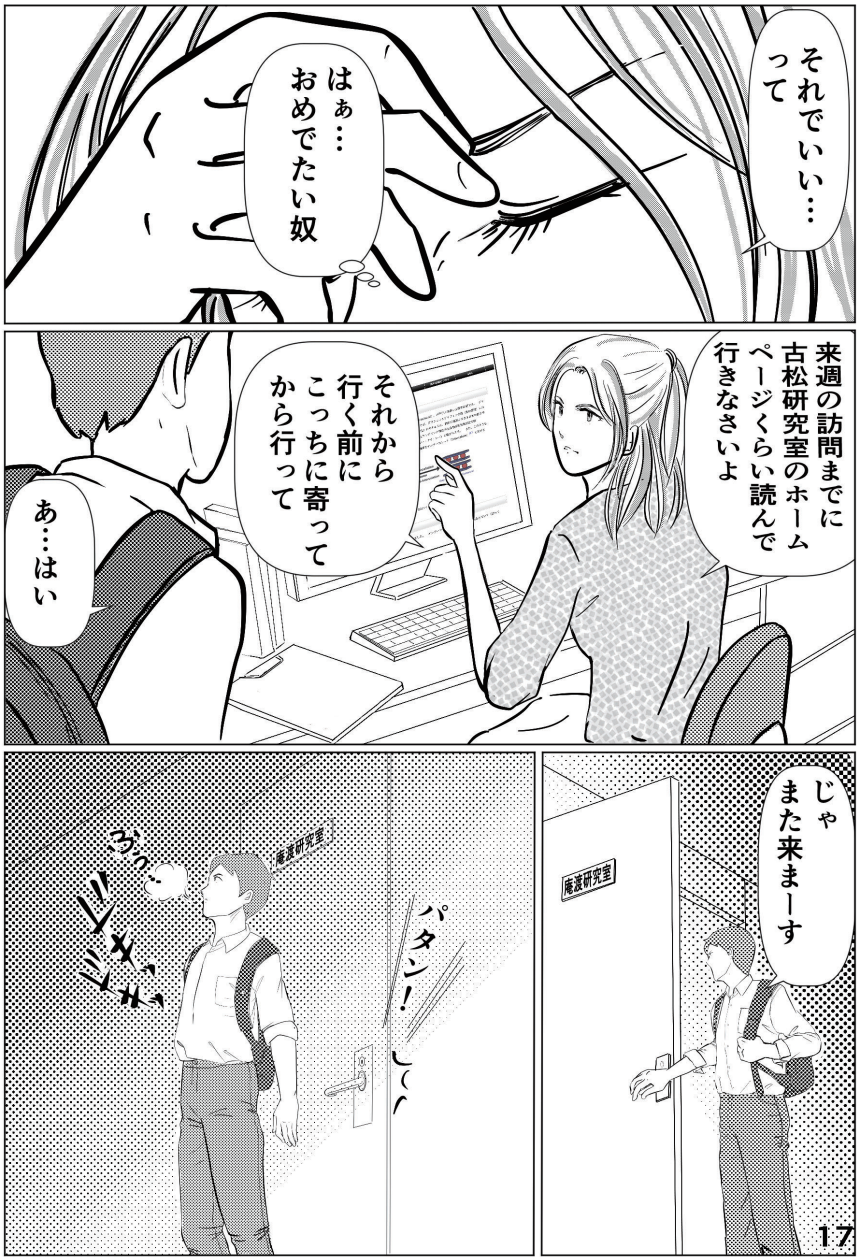
特に古松研究室では
黒鉛やグラフェンに
銅やモリブデン塩化物
アルカリ金属などを使って
インターカレーションしている

インターカレーションを
どう実験してるのか
ちゃんと
学んで報告するように！

それで
良いんですか？

あ、
はい!!

16


じゃ
また来まーす
庵波研究室
17
パタン！
ごっ
ごめんください
庵波研究室
来週の訪問までに
古松研究室のホーム
ページくらい読んで
行きなさいよ
それから
行く前に
こっちに寄って
から行って
あ…はい
それでいい…
って
はぁ…
おめでたい奴


夢が叶うぞおおお
よっしゃー
あへっ…
いやーん
いやーん
18
インターカレーションねぇ
グラフェンの中になんか挟む
…って
俺や身を持って
知ってんだぞ※
あんなに
ペラペラシートなのに
ホントにそんなこと
出来んのか？
※第3話参照のこと

訪問日当日

おはようございまぁす

先輩これから行きますけどなんか用事ですか？

パタン

なんでもない…ちゃんと予習したの？

うーん、まあなんとなく

ったく…　ついておいき

じゃぁ

ぶへん

行ってきまーす

ぴとっ

もぞもぞ

飯山大学

こんにちは

初めまして庵渡先生の学生さんが来てくれるなんて光栄

今日よろしくお願いしますインターカレーションってなんか不思議っていうか

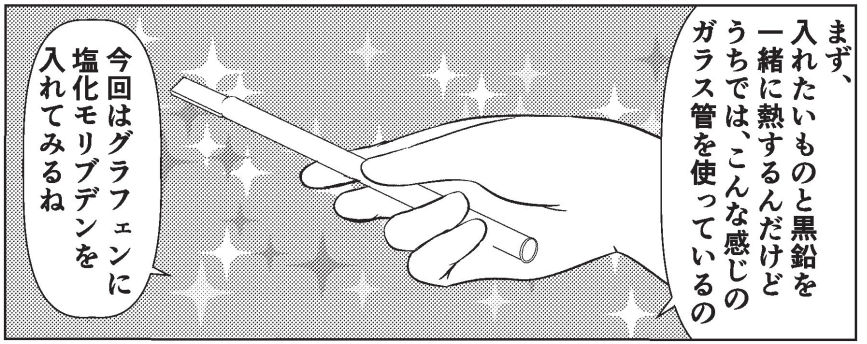
入れたい分子がうまいこと入っていくのが驚きで…

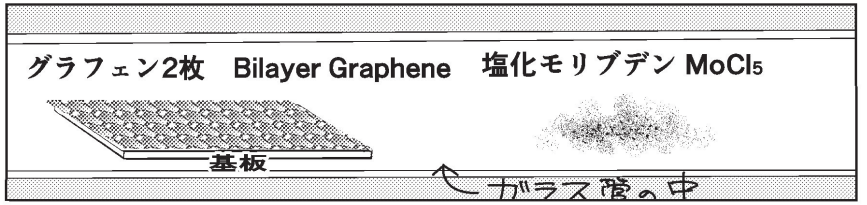
そうなのよスルスルって入っていく感じなの

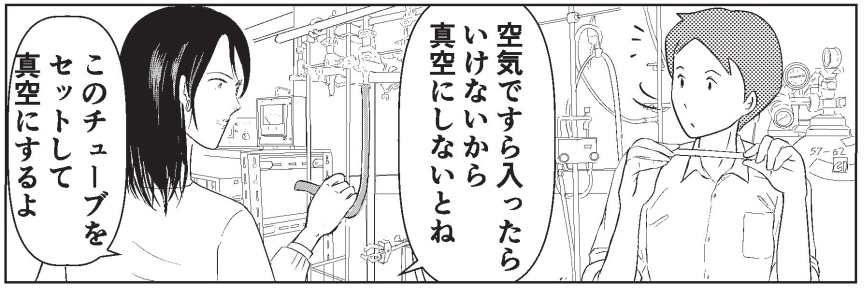
あ、荷物そこへ置いてね

あ、はい

百聞は一見に如かず早速、インターカレーションの実験やってみようか

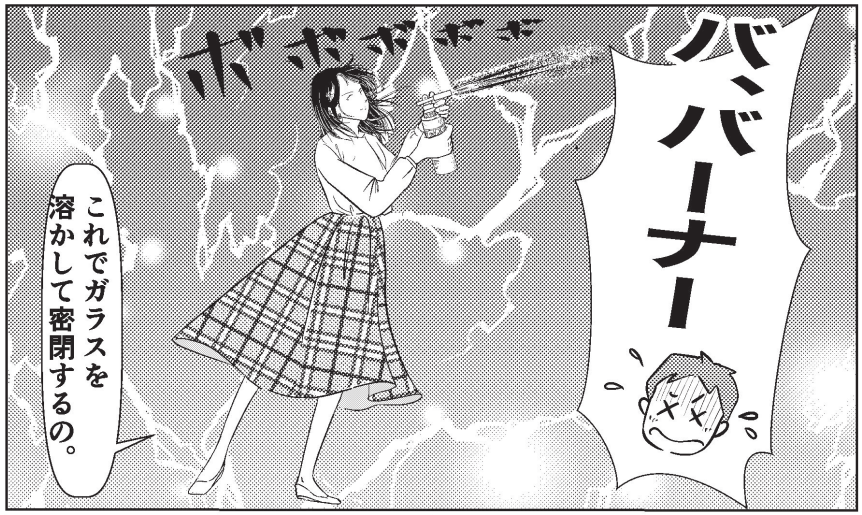

まず、
入れたいものと黒鉛を
一緒に熱するんだけど
うちでは、こんな感じの
ガラス管を使っているの
今回はグラフェンに
塩化モリブデンを
入れてみるね

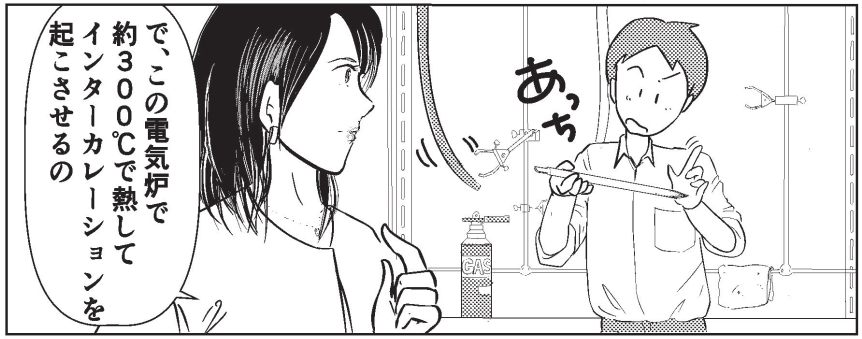

グラフェン2枚　Bilayer Graphene　塩化モリブデン $MoCl_5$
基板
ガラス管の中

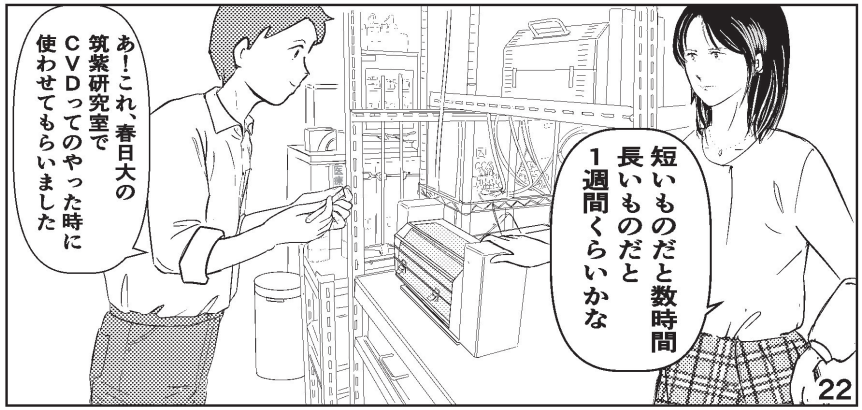

空気ですら入ったら
いけないから
真空にしないとね
このチューブを
セットして
真空にするよ


そう、そこで、これ


え？真空にしても
このチューブを外したら
また空気が入りますよよね
ぐいっ


バ、バーナー
これでガラスを
溶かして密閉するの。


あっち
で、この電気炉で
約３００℃で熱して
インターカレーションを
起こさせるの


短いものだと数時間
長いものだと
１週間くらいかな
あ！これ、春日大の
筑紫研究室で
ＣＶＤってのやった時に
使わせてもらいました

さて
そろそろいいかな

あれ？
なんも
変わって
ないような

ホントに
入ってんのかな？

インターカレーションが
成功すると
色が変わることも
あるんだけどね

わ…
わからん…

グラフェンでは
色の変化は
わからないんだな

※ちなみに
グラフェンは透明です

だからこそ
何が起こったか
ラマンで
見ないとね

でもこのままじゃ
円筒形のガラスが
邪魔だから

こっちの平たい方に
作ったものを
移動させるの

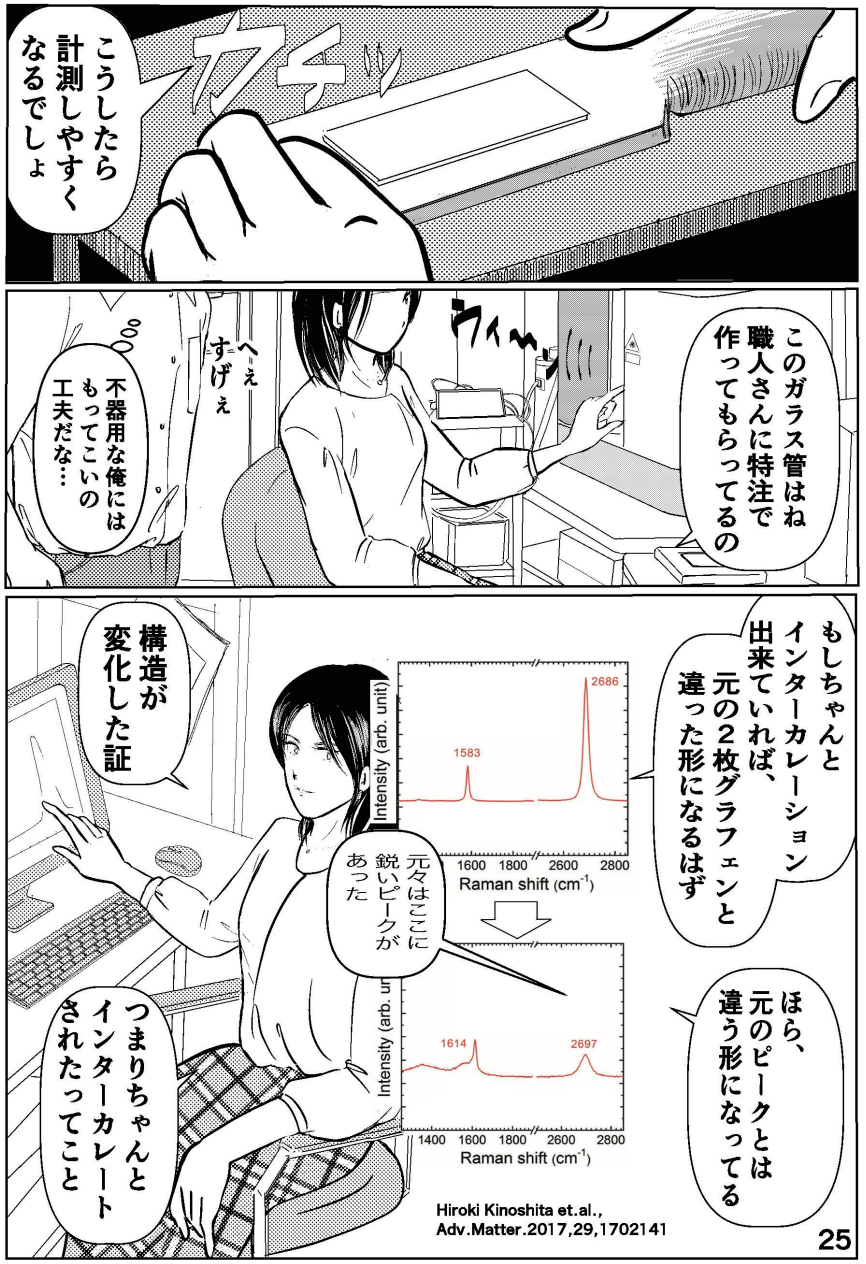
こうすると…

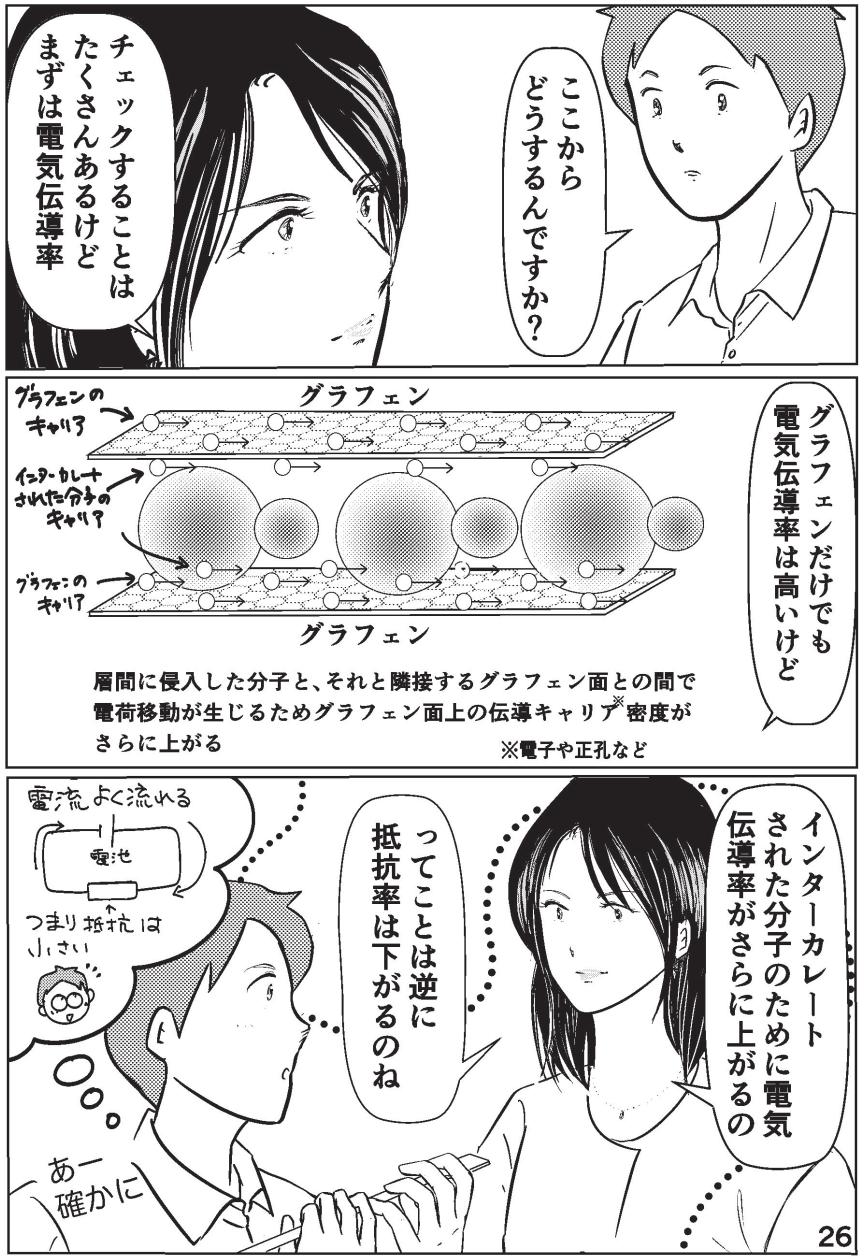
くいっ

※ちなみに
グラフェンは透明です

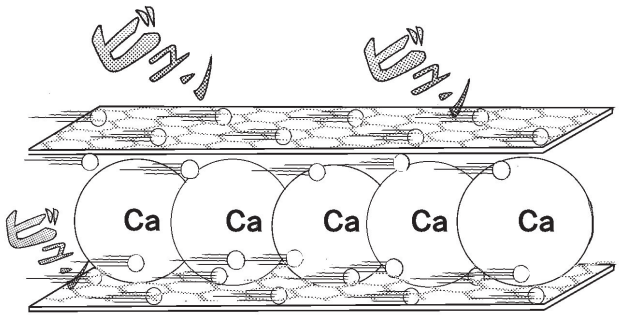
あ！
滑り込んだ！

おおお


カチッ
こうしたら計測しやすくなるでしょ
このガラス管はね職人さんに特注で作ってもらってるの
ウィーン
へぇ
すげぇ
不器用な俺にはもってこいの工夫だな…
もしちゃんとインターカレーション出来ていれば、元の2枚グラフェンと違った形になるはず
構造が変化した証
Intensity (arb. unit)
2686
1583
1600 1800 2600 2800
Raman shift (cm-1)
元々はここに鋭いピークがあった
Intensity (arb. un
1614
2697
1400 1600 1800 2600 2800
Raman shift (cm-1)
ほら、元のピークとは違う形になってる
つまりちゃんとインターカレートされたってこと
Hiroki Kinoshita et.al.,
Adv.Matter.2017,29,1702141
25

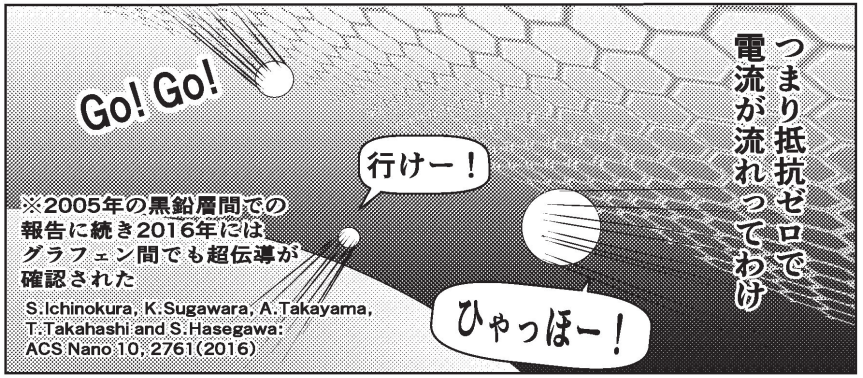

ここからどうするんですか?
チェックすることはたくさんあるけどまずは電気伝導率
グラフェンだけでも電気伝導率は高いけど
グラフェン
グラフェンのキャリア
インターカレートされた分子のキャリア
グラフェンのキャリア
グラフェン
層間に侵入した分子と、それと隣接するグラフェン面との間で電荷移動が生じるためグラフェン面上の伝導キャリア※密度がさらに上がる
※電子や正孔など
インターカレートされた分子のために電気伝導率がさらに上がるの
ってことは逆に抵抗率は下がるのね
電流よく流れる
電池
つまり抵抗は小さい
あー確かに
26

しかも
挟むものがカルシウムだと
電気伝導率が上がるなんて
もんじゃなくて
超伝導を示すっていう
報告があったの※



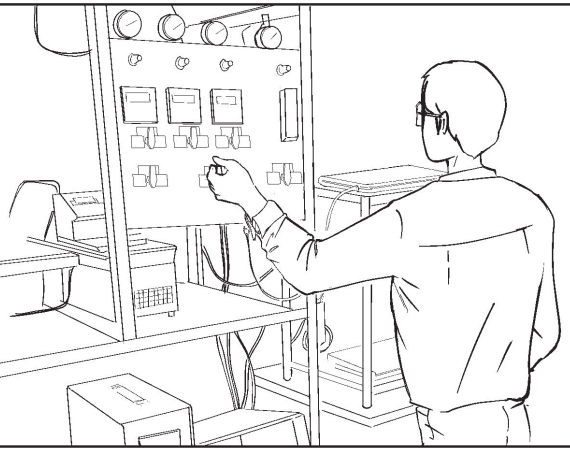
※イ、イメージです(汗)

つまり抵抗ゼロで
電流が流れってわけ



もっと高い温度で
超伝導を起こさないか
他にすごい性質はないか

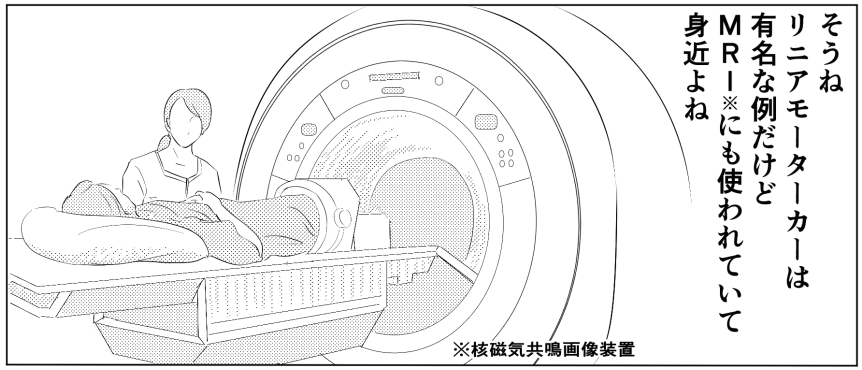
インターカレーションに
大きな注目が集まったの



超伝導自体
夢のありそうな
感じですけど
実際には
何に使うんですか？



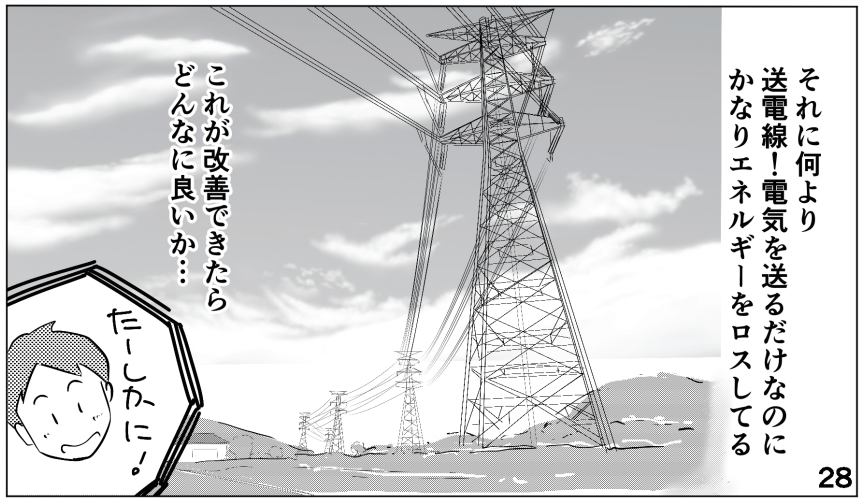
そうね
リニアモーターカーは
有名な例だけど
MRI※にも使われていて
身近よね



※核磁気共鳴画像装置

それに何より
送電線！電気を送るだけなのに
かなりエネルギーをロスしてる

これが改善できたら
どんなに良いか…



そうなると
がぜん心配になるのが
耐久性なんですけど

そうね

インターカレーションって
大気には弱いのよね
モノによっては
すぐに燃えちゃう

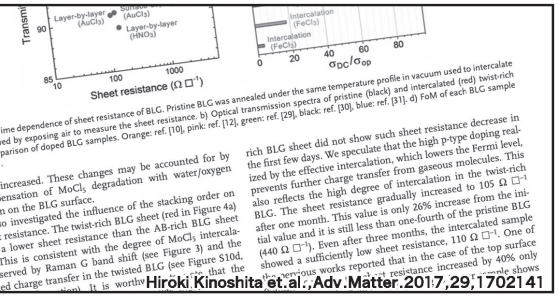


Figure 4. a) Time dependence of sheet resistance of BLG. Pristine BLG was annealed under the same temperature profile in vacuum used to intercalate $MoCl_5$, followed by exposing air to measure the sheet resistance. b) Optical transmission spectra of pristine (black) and intercalated (red) twist-rich BLG. c) Comparison of doped BLG samples. Orange: ref. [10], pink: ref. [12], green: ref. [29], black: ref. [30], blue: ref. [31]. d) FoM of each BLG sample shown in (c).

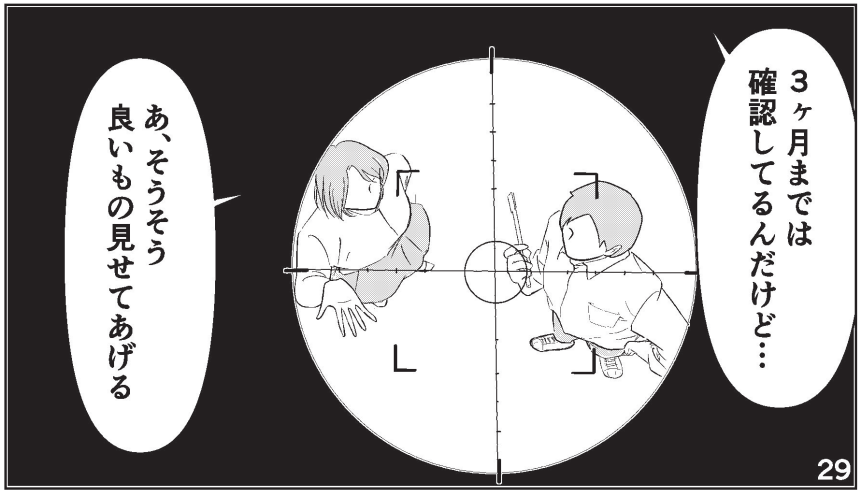
gradually increased. These changes may be accounted for by the compensation of $MoCl_5$ degradation with water/oxygen adsorption on the BLG surface.

We also investigated the influence of the stacking order on the sheet resistance. The twist-rich BLG sheet (red in Figure 4a) showed a lower sheet resistance than the AB-rich BLG sheet (pink). This is consistent with the degree of $MoCl_5$ intercalation observed by Raman G band shift (see Figure 3) and the enhanced charge transfer in the twisted BLG (see Figure S10d, [illegible] that the [illegible]). It is worthy

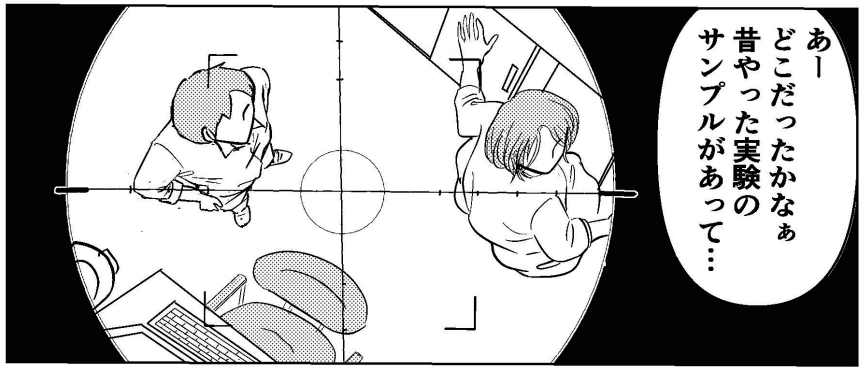
rich BLG sheet did not show such sheet resistance decrease in the first few days. We speculate that the high p-type doping realized by the effective intercalation, which lowers the Fermi level, prevents further charge transfer from gaseous molecules. This also reflects the high degree of intercalation in the twist-rich BLG. The sheet resistance gradually increased to 105 Ω □⁻¹ after one month. This value is only 26% increase from the initial value and it is still less than one-fourth of the pristine BLG (440 Ω □⁻¹). Even after three months, the intercalated sample showed a sufficiently low sheet resistance, 110 Ω □⁻¹. One of previous works reported that in the case of the top surface [illegible] resistance increased by 40% only [illegible] shows

Hiroki Kinoshita et.al., Adv.Matter.2017,29,1702141

今日やった
塩化モリブデンを
グラフェンに
インターカレート
した実験では

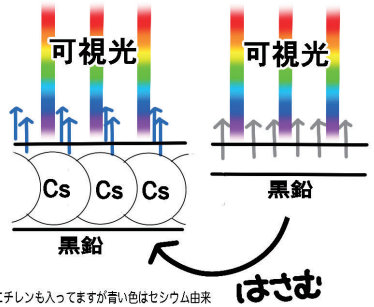


29



実はね
色は物質の構造を
反映しているのね

インターカレーション
すると色が変わる
ことがよくあるのよ



10年前に黒鉛に
セシウムをはさんだのね
その時の青い色が今も
変わっていないの

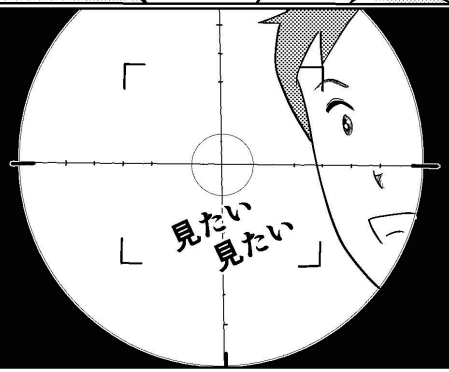
実はエチレンも入ってますが青い色はセシウム由来



10年もの
インターカレーション？

黒鉛層間化合物は
大気下では不安定なはず

つまり10年は
性質が変わってないと



30

俺ならすぐ捨てちゃう

捨てるぅ？これだからシロートは…

違う違う！これも実験のうちよ大気安定性の検証

あーあったあった

大気安定性？

安定性が増す組み合わせを調べていたのか

インターカレーションは空気にさらされるとすぐに電気伝導率が下がっちゃうけど…

これ見つけた時は嬉しかったなぁ

これなら実用化出来そうですよね

先生は10年もののインターカレーションを持っていたりもうこの研究長いんですか？

そうなの物持ちもいいけど身持ちもいいのよね

浮気しないって感じかな

大学院の頃からずっとインターカレーション一筋

ん？どっかで聞いたぞその言葉※

※第3話参照のこと

もうやめようかなって思うこともあったけど

その度に面白い発見がされて私も実験してみようって思うのよね

うぬ！これイケるかも!!

どお？
グラフェンに
ひとひねり加える
実験面白くない？

今、たくさんの人が
この2次元物質を
研究してるの
重ねたり挟んだり
ずらしたり

人呼んで
2・5次元物質
ってところかな

2・5次元物質！？

あははは。
に、2・5次元…

漫画の
読み過ぎだな俺

それにね　今
インターカレーション
させた化合物の
色変化を図鑑みたいに
まとめた論文を
考えてるの

私たちが見ている
カラフルな世界は
結晶構造を反映して
いることをわかって
もらえたら良いなって



へぇ〜
俺も見てみたい

ぶーん

はい

庵渡先生に
よろしくね

ゴゴゴゴゴ

それにしても
2.5次元物質
ってウケる

Mission
complete

インターカレーション
って面白いなぁ
あんなペラペラシートを
加工できるんだもんなぁ

第4話監修
A02班 松本里香教授（東京工芸大学）
詳しくは　https://25d-materials.jp



©もんでんひでこ
門田美子　神奈川工科大学 講師(物理)
領域広報担当　サイエンスコミュニケーター