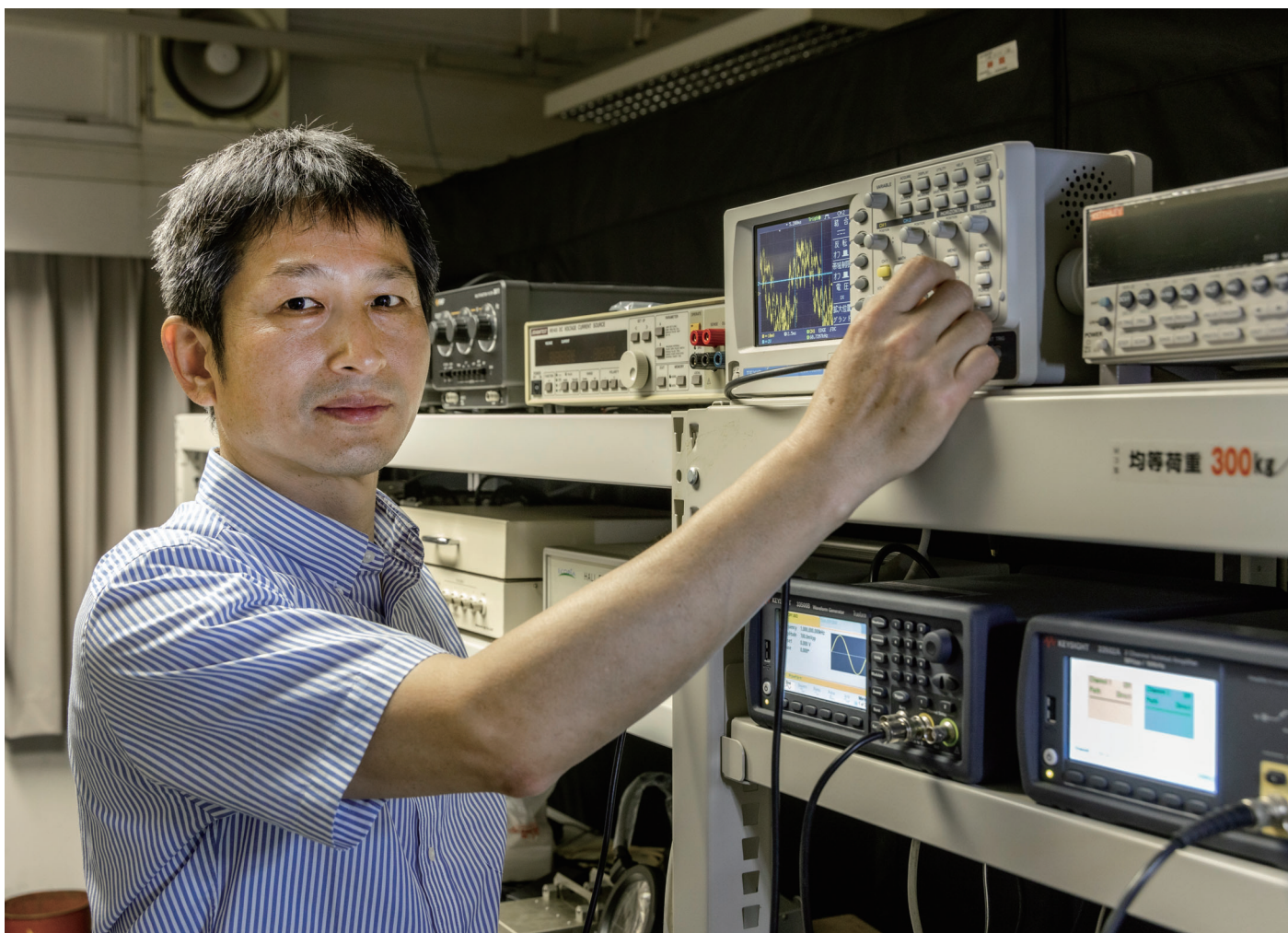


研究最前線

ナノ構造の物性の研究 • Research on physical properties of nanostructures



ナノテクノロジーは、ナノメートルで表されるサイズの物質を扱う技術だ。1ナノは1メートルの10億分の1。直径1メートルの球を地球の大きさまで拡大したとき、1ナノメートルの物体はようやくワイシャツのボタンの大きさになるほど小さな世界だ。不思議なことに、物質をナノサイズに小さくすると、発光などの従来にはない性質が現れるという。この謎の解明、そして応用に挑むのが、システム理工学部の稲田貢教授だ。

Nanotechnology is a technology that handles substances in sizes expressed in nanometers. One nanometer is one billionth of one meter. It is a scale so small that, if a sphere with a diameter of one meter was expanded to the size of the earth, an object with a diameter of one nanometer would be the size of a button on a dress shirt. Surprisingly, properties such as luminescence that a substance does not conventionally exhibit start appearing when a substance is reduced to a nanosize. Professor Mitsuru Inada at the Faculty of Engineering Science is taking on the challenge of elucidating and applying this mystery.

■ ナノ構造にすると、光物性、電気伝導特性、磁性に変化

— 専門分野を教えてください。

物の性質を調べる物性物理学です。特に、ナノ構造の物性を研究しています。物質には、光物性、電気伝導特性、磁性の3つの大きな性質がありますが、ナノレベルの小さな世界では、私たちが目で見ている大きさの物質とは全く違う性質が出てきます。なぜ違う性質が現れるのか理由を調べた上で、センサーなどの開発に応用する研究を続けています。

— ナノ構造になると、どんな性質が現れるのでしょうか。

まず、光物性ですが、一番大きな変化は光らない物質が光るようになることです。例えば、半導体として有名なシリコン(ケイ素)はナノ粒子(原子数1000個程度)にすると発光します。また通常は光を反射してピカピカしている金属の金も、原子数10個程度のナノ粒子にすると、金そのものが光るようになります。

電気伝導特性も変化します。有名なオームの法則は、電圧をかけるとそれに比例して電流が流れることを示していますが、ナノ構造になると成り立たなくなります。比例ではなく、階段状になるからです。

磁性も、磁石でなかったものが磁石になる現象が見られます。

— なぜナノ構造にすると、物質の性質が変わるのですか。

一番の理由は、物質の中にある電子の状態が変わるためです。

■ Changes in optical properties, electrical conduction properties, and magnetic properties appear when a substance is made into a nanostructure

— What is your specialty?

My specialty is condensed matter physics, which investigate the properties of substances. In particular, I study the physical properties of nanostructures. There are three major properties in substances, which are optical properties, electrical conduction properties, and magnetic properties. However, properties that are completely different from those of the substances that we see with our eyes start to appear when we look at them on the nanoscale. I continue to research how to apply these in the development of sensors and so on, having investigated why these different properties appear.

— What properties appear when a substance is made into a nanostructure?

First, the greatest change we see in optical properties is that substances that do not emit light begin to glow. For example, silicon, which is a well-known semiconductor, emits light when it is made into nanoparticles (approx. 1000 atoms). And gold, a metal that shines by reflecting light, begins to glow when made into a nanoparticle comprised of approximately tens of atoms.

The electrical conduction properties also change. While the famous Ohm's law indicates that a current flows in proportion to the voltage when a voltage is applied, it no longer holds when the substance is reduced to a nanostructure. It is no longer proportional but rather starts changing in steps.

There is also a phenomenon seen in magnetic properties, where a substance that was not magnetic becomes magnetic.

物質をナノサイズにすると発光するのはなぜか

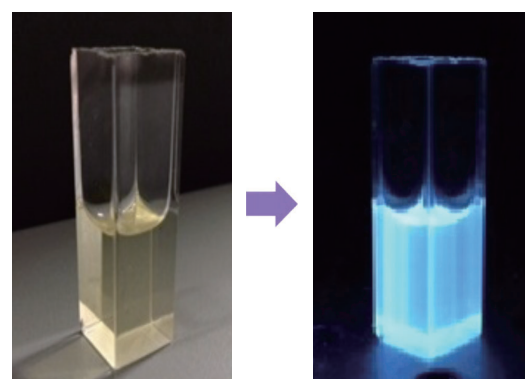
原子数個~1000個の世界の解明と応用

Why do substances have a luminescence when they are nanosized?

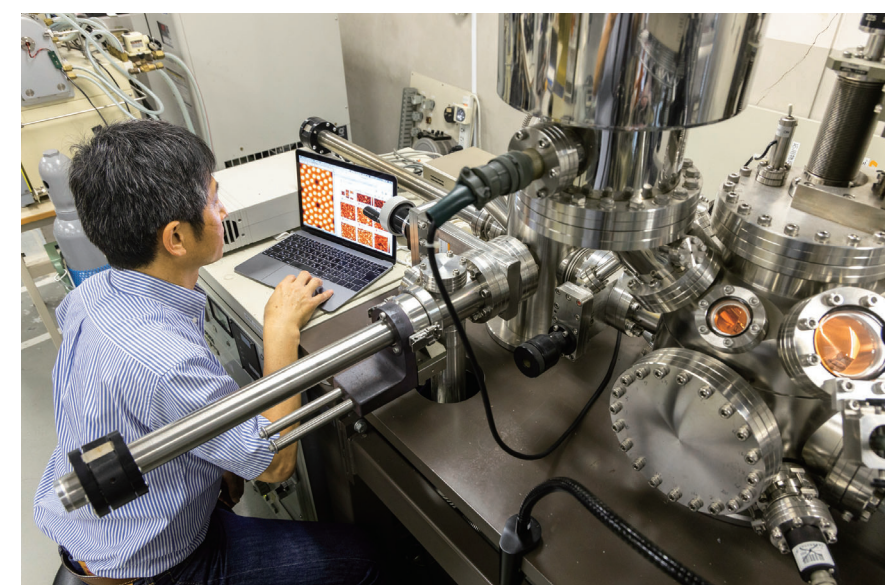
Elucidation and application of the scale of several to one thousand atoms

● システム理工学部 稲田 貢 教授

● Faculty of Engineering Science — Professor Mitsuru Inada

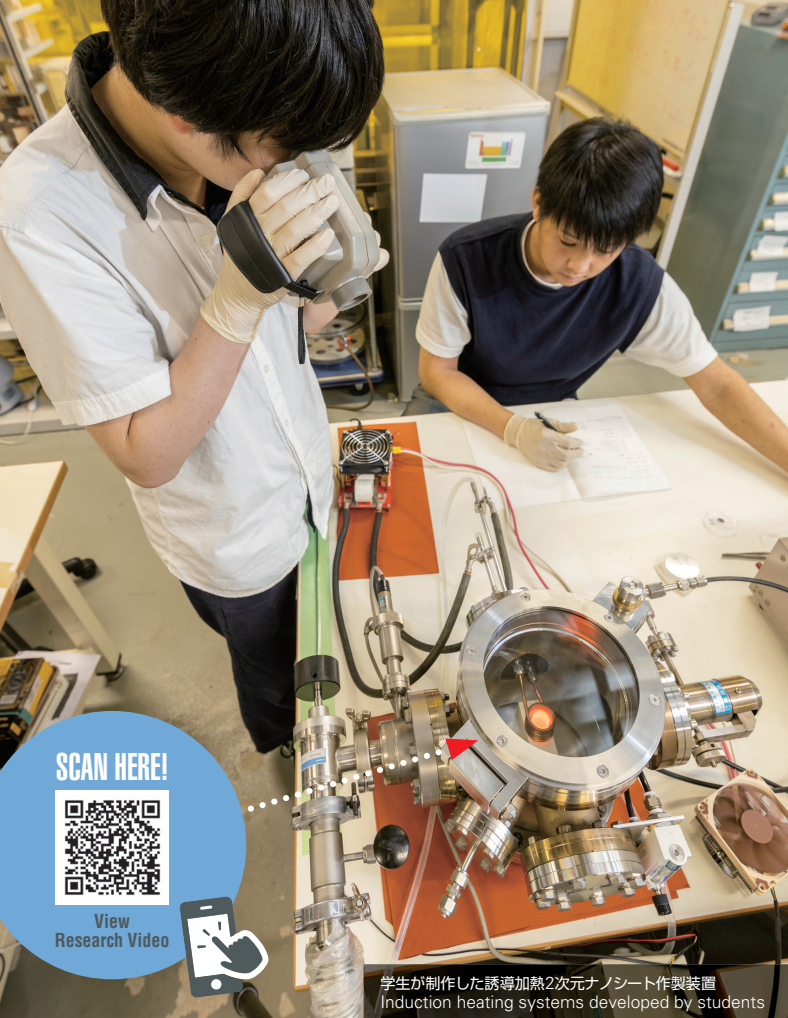


▲発光や触媒作用など応用上有用な性質を持つ金ナノクラスター。左は通常時、右は発光時
Photoluminescence from colloidal Au nanoclusters. Left: under room light (not emitted). Right: under UV irradiation (emitted).



◀物質表面のさまざまな性質を原子スケールで観察できる走査型プローブ顕微鏡
SPM that provides various information of a sample with the atomic scale resolution





SCAN HERE!



View Research Video

学生が制作した誘導加熱2次元ナノシート作製装置
Induction heating systems developed by students

発光は電子がエネルギーの高い状態から低い状態に移動する際にそのエネルギー差を光として放出する現象です。電気伝導は電子の移動、磁性も電子の運動がその起源です。このように物質の主役は電子なのですが、物質のサイズを小さくしていくと、自由に動いていた電子が自由に動けなくなってしまいます。これが電子の状態の変化です。我々が電子だとすると、グラウンドを自由に走り回っているときと、ロッカーの中に閉じ込められたときで気持ちが変わるようなイメージです。

もう一つの理由は、ナノサイズになると物質の表面の性質が現れるためです。物質の内部では、原子が周期的に規則正しく並んだり、原子が電子を共有して結合したりしてネットワークを組んでいます。一番外側の表面の原子はつながる相手がいません。そのため、無理やり他の原子や空気中の水分や酸素と結合します。このため表面の性質は、内部と全く異なります。

物質のサイズが大きいと、表面に位置する原子の割合は全体に比べて非常に小さいため、特殊な性質は消されています。物質をどんどん小さくすると、表面の割合が大きくなり、表面の性質が現れてくるのです。

このようにナノ構造の物質はサイズと表面に敏感です。表面に何かをくっつけると性質が変わるので無数のバリエーションが存在します。ナノ構造が示す性質の起源が解明できれば、好みの性質を持つ物質をデザインできる可能性があります。これが、ナノ構造の物理を研究する楽しみの一つです。

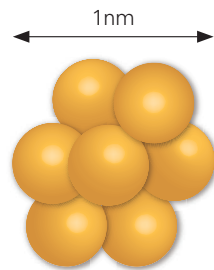
■金のナノクラスターを利用した糖尿病判定センサー

— 稲田教授の研究室で行われている研究をお聞かせください。
金のナノ粒子の発光はサイズに敏感です。サイズが大きくなると急激に発光しなくなります。この研究成果を応用して、糖尿病を判定できるバイオセンサーを開発しました。金のナノ粒子をたんぱく質で覆い、発光する性質を持たせておきます。試験管内で

■研究最前線

疑似血液と混ぜ、液中に糖が含まれていると反応が起きてたんぱく質がはがれ、ナノ粒子がくっついて光らなくなる仕組みです。血糖値が高いと、ナノ粒子が減って光が弱くなります。

また金のナノ粒子の磁性についても研究しています。金は磁性を持ちませんが、ナノ粒子にすると粒子そのものが一つの磁石になります。この特性はハイパーサーミア(温熱療法)と呼ばれるがん治療に応用できる可能性があります。がん細胞に結合するたんぱく質で修飾した金のナノ粒子を体内に入れて、交流の磁場を当てます。すると、金のナノ粒子は磁性を持つため熱を帯び、熱に弱いがん細胞を局所的に攻撃してくれます。金のナノ粒子は、さまざまな種類のたんぱく質で修飾できるというメリットがあります。



▲金属ナノクラスター
metal nanocluster

■蓄電への応用

— 医療分野への応用を紹介していただきましたが、他の分野はいかがですか。

現在は蓄電分野にも力を入れています。太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーによる発電が進められていますが、それらを有効に活用するためには蓄電技術の研究開発が必要です。今後主役になる電気自動車は、バッテリーが重い、充電に時間がかかるという問題を抱えています。解決策の一つとして、蓄電に適したナノ構造を研究しています。

今、研究しているのは、遷移金属と炭素、あるいは遷移金属とチッ素との組み合わせで作るナノシートです。遷移金属にはたくさんの種類があり、未知の組み合わせが数多くできます。ナノシートは表面積が大きく、表面にイオンや電子がくっつけば容量の大きな蓄電池として機能させられます。リチウムイオン電池のように化学反応を起こさなくてもいいので、あっという間に充電することが可能です。太陽電池の研究も続けていますが、研究者としては蓄電池の可能性に魅力を感じています。

■電子の不思議さに魅了されて

— 研究のどのようなところに面白さを感じていますか。

研究者を志すようになったのは、電子の不思議さに魅了されたためです。電子は、物質の性質を決めるものすごく大きなファクターであり、粒子の性質と波の性質という矛盾した2つの性質を兼ね備えています。電子は観測すると粒子、観測しないと波のように振る舞います。この不思議な現象を半導体ナノ構造で観察できると知り研究に没頭するようになりました。電子は不思議です。生まれ変わったら電子になりたいです。

— 今後の抱負をお聞かせください。

研究者として、大学で研究できる残り時間を考えると、取り組める大きなテーマは1つか2つです。これまでは基礎研究にこだわってききましたが、これからは応用を視野に入れた研究にも取り組みたいと思っています。

— Why do the properties of a substance change when it is made into a nanostructure?

The primary reason is that the electronic state in the substance change. Luminescence is a phenomenon in which the energy difference is emitted as light when the electrons move from a state that is high in energy to a state that is low in energy. The origin for electrical conduction is the migration of electrons, and the origin for magnetism is the motion of electrons. As described above, electrons play the main role in generating the physical properties. However, the electrons, which had moved freely, start losing the freedom to move as the size of the substance is reduced. This is the change in the electronic states. If we are the electrons, it is similar to how our mind changes when we are locked inside a locker after running freely on a field.

Another reason is that properties of the substance surface appear when the substance is nanosized. While a network is formed inside a substance with atoms aligned in a regular manner and bound to one another by sharing electrons, the atoms on the outermost surface do not have others with which to connect. Therefore, they binds forcibly to other atoms such as moisture and oxygen in the air. The properties of the surface are therefore completely different from those of the inside.

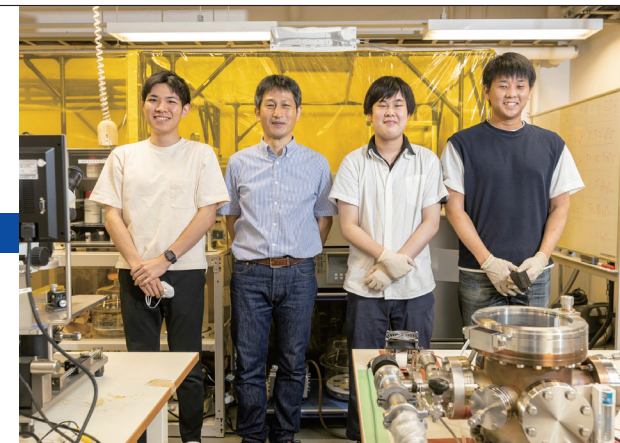
Since the ratio of atoms located on the surface is extremely small compared to the overall substance when the size of the substance is large, their unique properties disappear. When the size of the substance is reduced further and further, the ratio of the surface increases and the properties of the surface start appearing.

Therefore, the properties of a nanostructure are sensitive to the size and surface. There are infinite variations, because the properties change when something is attached to the surface. If the origin of the properties indicated by a nanostructure can be elucidated, we may be able to design substances with the desired properties. This is one of the attractions of studying the physics of nanostructures.

■Diabetes judgment sensor using gold nanoclusters

— Please tell us about the research being conducted at your laboratory, Professor Inada.

The luminescence of gold nanoparticles is sensitive to the size. When the size increases, it rapidly loses the luminescence. We de-



▲研究室のメンバーたちと / Photo with Lab members

veloped a biosensor capable of determining diabetes by applying this result of our study. Gold nanoparticles are covered with protein and given the property to glow. The gold nanoparticles undergo a reaction if sugar is contained when it is mixed with pseudo blood in a test tube, which causes the protein to peel off and the nanoparticles to bind to one another and stop glowing. A high blood glucose level reduces nanoparticles and weakens the luminescence.

We are also studying the magnetism of gold nanoparticles. Although gold does not have magnetic properties, the particle itself becomes a magnet when made into a nanoparticle. This property may be applicable in a cancer treatment called hyperthermia. We inject gold nanoparticles that are modified with proteins which bind to cancer cells into the body and apply an alternating current magnetic field. The gold nanoparticles, which have magnetic properties, are then thermally charged and locally attack the cancer cells that are sensitive to heat. Gold nanoparticles have the advantage of being modified with various different types of proteins.

■Application in electricity storage

— You have introduced applications in the medical field, but what about other fields?

We are also currently focusing on the field of electricity storage. Research and development of storage technology is necessary in order to effectively utilize the power generated using renewable energy that is being promoted, such as solar power and wind power. Electric vehicles will play a leading role in the future but face problems such as heavy batteries and long charging times. We are studying nanostructures that are suitable for electricity storage in order to develop solutions.

Right now, we are studying nanosheets made of a combination of a transition metal and carbon or a transition metal and nitrogen. There are many different types of transition metals and many yet unknown combinations. The nanosheets have a large surface area and can be made to function as a storage battery with a large capacity if ions and electrons can attach to the surface. Since these nanosheets do not have to undergo reactions like lithium ion batteries, they can be charged instantly. As we continue to also study solar cells, as a researcher I am drawn to the potential of storage batteries.

■Fascination with the mystery of electrons

— What aspects of research do you find interesting?

I became a researcher because I was fascinated by the mystery of electrons. Electrons are very large factors that determine the properties of a substance, and they combine two conflicting properties of being particles and waves. There is what is called the measurement problem. The electrons behave like a particle when it is measured and a wave when it is not measured. I immersed myself in research after learning that I could experiment with this using semiconductor nanostructures. Because of this, I would like to be an electron when I am reborn.

— What are your future aspirations?

As a researcher, considering the remaining time available for research at universities, I can only work on one or two major topics. Up until now, I have focused on basic research. Going forward, I would also like to conduct research with a view to its applications.

