高校化学 L01 第 65 講 イオン結晶・共有結合の結晶・分子結晶

この講でできるようになること

- イオン結晶・共有結合の結晶・分子結晶について、構成粒子と粒子間の結び付きの違いを説明できる。
- 結晶の構造から、融点・硬さ・電気伝導性などの一般的な傾向を判断できる。
- イオン結晶の固体・融液・水溶液の電気伝導性を、イオンが移動できるかどうかから説明できる。
- ダイヤモンドと黒鉛の構造の違いから、硬さや電気伝導性の違いを説明できる。
- 分子結晶について、分子内の共有結合と分子間の相互作用を区別して物性を説明できる。

結晶の性質は「何が、何によって集まっているか」で考える

見た目の違いから、内部の構造へ

塩化ナトリウム、石英、ヨウ素はいずれも結晶をつくる物質である。しかし、結晶を構成する粒子と、それらを結び付ける力は同じではない。



図 1　結晶試料のイメージ（左：塩化ナトリウム、中央：石英、右：ヨウ素）

ここでは試料名が分かっているものとして内部構造を考える。写真の外観だけから硬さや電気伝導性を決めるのではない。

結晶の物性を考えるときの出発点は、次の二つである。

1. **結晶を構成している粒子は何か。**
2. **その粒子どうしを何が結び付けているか。**

この二つが分かれば、粒子を動かしたり、互いの位置を変えたりするのにどの程度のエネルギーが必要かを考えられる。その結果として、融点・硬さ・電気伝導性などの違いを説明できる。

©ミライコーチング

三つの結晶型

結晶型	主な構成粒子	結晶を保つ主な結び付き	代表例
イオン結晶	陽イオン・陰イオン	正負の電荷間の静電引力	NaCl
共有結合の結晶	原子	連続した共有結合	ダイヤモンド、SiO_2
分子結晶	独立した分子	分子間力	I_2、CO_2、H_2O

この表は構造を分類するための基本である。物性については例外があるため、「結晶型だけであらゆる物質の性質が絶対に決まる」と考えてはならない。

イオン結晶

陽イオンと陰イオンが規則正しく並ぶ

イオン結晶では、陽イオンと陰イオンが静電引力によって結び付き、規則正しく配列している。
塩化ナトリウムの結晶は、独立した「NaCl 分子」が多数集まったものではない。多数のNa^+とCl^-が結晶全体にわたって配列した構造であり、NaCl という式はその個数比が 1 : 1 であることを表す。
正負のイオン間には強い静電引力が働くため、イオン結晶は**一般に融点が高く、硬い**。一方、力を加えたときの配列の変化が、もろさにつながる。

硬いのに、なぜ割れやすいのか

イオンが正負交互に並んでいる状態では、近くの異符号のイオンどうしが引き合っている。
ところが、外力によって結晶の一部の層がずれると、境界付近で同符号のイオンが向き合う配置が生じることがある。同符号のイオンどうしには反発力が働くため、結晶はその境界から割れやすくなる。
したがって、**硬いことと、衝撃を受けても割れにくいことは同じではない**。

電気を通すには、電荷を運ぶ粒子が動ける必要がある

イオン結晶には電荷をもつイオンが存在する。しかし、電荷をもつ粒子が存在するだけでは電流は流れない。
固体のイオン結晶では、各イオンは結晶格子の位置付近に束縛されており、結晶中を長距離移動できない。このため通常、固体のイオン結晶は電気を通さない。
一方、融解すると規則的な格子が崩れ、イオンが移動できるようになるため、融液は電気を通す。
また、水に溶けるイオン結晶では、水溶液中のイオンが移動できるため電気を通す。
ただし、**すべてのイオン結晶が水によく溶けるわけではない**。水溶液の電気伝導性を考える場合は、その物質が実際に水に溶け、可動イオンを生じているという条件を確認する必要がある。

高温での融解について

イオン結晶の融液は電気を通すが、イオン結晶には高温でなければ融解しないものが多い。家庭で加熱して融解を確かめる実験は行わず、学校などの適切な設備での観察や資料を用いて理解する。

©ミライコーチング

共有結合の結晶

独立した分子ではなく、原子の結合が連続する

共有結合の結晶では、多数の原子が共有結合によって連続的につながっている。独立した小さな分子が集まった構造ではない。
代表例はダイヤモンドと二酸化ケイ素SiO_2である。
ダイヤモンドでは、それぞれの炭素原子が周囲の 4 個の炭素原子と結び付き、三次元的な構造をつくる。結晶の広い範囲にわたって強い共有結合が続いているため、一般に非常に硬く、高温まで構造が保たれやすい。
SiO_2も、SiO_2という独立した分子が多数並んだ結晶ではない。Si 原子と O 原子が共有結合によって連続した構造をつくる。石英はその代表例である。
このような三次元構造を、単純な炭素原子だけの格子と同じものとして扱ってはならない。

共有結合の結晶の一般的な性質

共有結合の結晶では、結晶を変形させたり構造を大きく崩したりするために、強い共有結合に関わる変化が必要となる。このため、一般的には次の傾向を示す。

- 融点が高いものが多い。
- 非常に硬いものが多い。
- 電気を通しにくいものが多い。

ただし、これらは一般的な傾向であり、重要な例外として黒鉛がある。また、炭素は常圧で単純に「融点で固体から液体になる」と扱えない場合があるため、ダイヤモンドや黒鉛について単純な融点の大小だけで構造を説明しない。

黒鉛は重要な例外

同じ炭素でも、つながり方が違う

黒鉛も炭素原子からなる物質であるが、ダイヤモンドとは構造が異なる。
黒鉛では、各炭素原子が同じ層内の 3 個の炭素原子と強く共有結合し、六角形が連なった網目状の層をつくる。一方、層と層の間の相互作用は層内の共有結合より弱いため、層どうしがずれやすい。
このため、黒鉛はダイヤモンドより軟らかく、層がはがれたり滑ったりしやすい。
さらに黒鉛では、層内を移動できる電子が存在するため、層に沿った方向には電気を通す。この電気伝導性は方向によって異なり得るので、「黒鉛はすべての方向に同じように電気を通す」と考えてはならない。
黒鉛全体の結合が弱いのではない。**層内には強い共有結合があり、層間の相互作用がそれより弱い**という区別が重要である。

分子結晶

独立した分子が集まった結晶

分子結晶では、独立した分子が分子間力によって集まり、規則正しく配列している。
代表例として、ヨウ素I_2、ドライアイスCO_2、氷H_2Oなどがある。
ここで、**分子内の結合と分子間の結び付きを分けて考える**ことが重要である。たとえばI_2分子の内部では 2 個の I 原子が共有結合している。一方、I_2分子どうしを結晶としてまとめているのは主に分子間力である。
分子結晶を融解させるとき、主に変化するのは分子どうしのまとまりである。普通は分子内の共有結合まで切断して、分子をばらばらの原子にするわけではない。

©ミライコーチング

分子結晶の物性

分子間力は、共有結合の結晶を広くつなぐ共有結合や、イオン結晶を保つ静電引力に比べて弱い場合が多い。このため分子結晶は、一般に次の傾向を示す。

- 融点が比較的低い。
- 軟らかいものが多い。
- 電気を通しにくいものが多い。

ただし、分子間力の強さは分子によって異なる。氷ではH_2O分子間に水素結合が働くため、単純にすべての分子結晶を同じ強さとして扱うことはできない。

また、ドライアイスCO_2は常圧では液体を経ずに昇華する。したがって、分子結晶について「必ず低い温度で融解する」と一律に表現するのは適切ではない。

さらに、「分子結晶をつくる物質なら、その水溶液も必ず電気を通さない」とは限らない。水に溶けた後にイオンを生じるかどうかは、結晶状態とは別に判断する必要がある。

構造と物性の一般的な対応

結晶型	構成粒子	主な結び付き	融点・構造の崩れにくさ	硬さ	固体の電気伝導性
イオン結晶	陽イオン・陰イオン	静電引力	一般に高い	一般に硬いがもろい	通常は通さない
共有結合の結晶	原子	連続した共有結合	一般に高い	非常に硬いものが多い	一般に通しにくい
分子結晶	分子	分子間力	一般に低い	軟らかいものが多い	一般に通しにくい

この表は**一般的な傾向**を比較したものである。黒鉛、氷、常圧でのCO_2や炭素の状態変化など、構造や条件による例外がある。

例題

例題 1

イオン結晶について、次の問いに答えよ。

1. 正負のイオンが交互に並ぶイオン結晶に外力を加えると、ある面を境に配列がずれて結晶が割れることがある。この理由を、ずれた後のイオンの位置関係に注目して説明せよ。
2. あるイオン結晶は、固体では電気を通さないが、融液では電気を通した。この違いを、イオンの移動に注目して説明せよ。

解答・解説

1.

配列がずれると、境界付近で同符号のイオンどうしが向き合う配置が生じ、同符号間の反発力によって結晶が割れやすくなる。

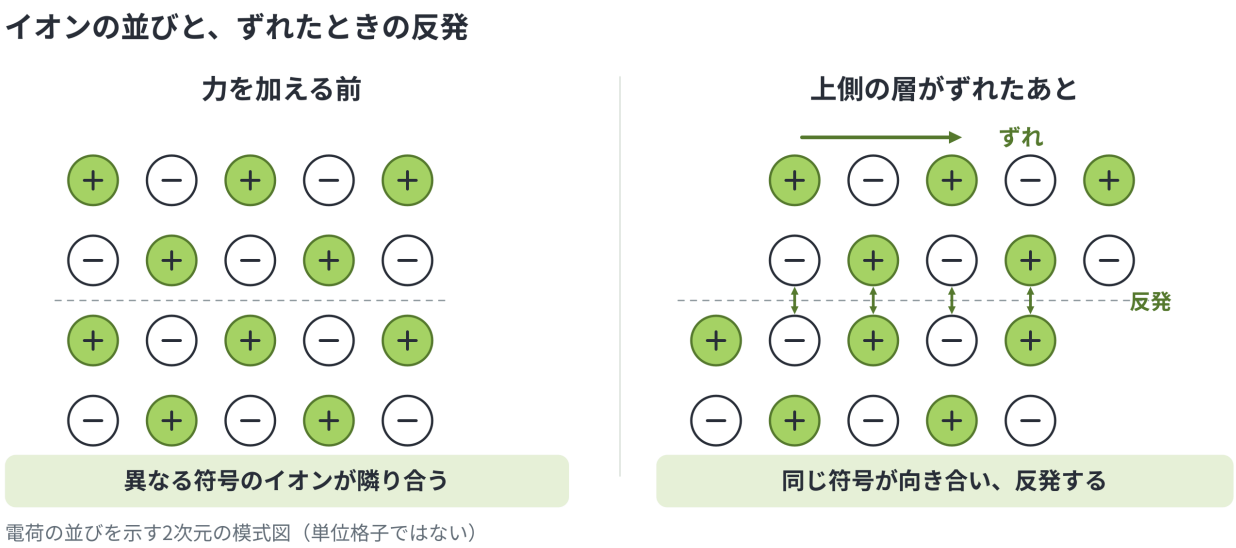


図 2　イオンの配列がずれると、境界で同符号のイオンが向き合う。

ずれる前には、境界をはさんでも主に異符号のイオンが隣り合い、互いに引き合っている。上側の配列が一粒子分ずれると同符号のイオンが向き合う部分が生じるため、強い反発によってその面に沿って割れやすくなる。これが、イオン結晶が一般に硬い一方でもろい理由である。

2.

固体ではイオンが格子位置付近に束縛され、結晶中を長距離移動できないため、電荷を運べない。一方、融液では格子が崩れてイオンが移動できるため、電荷を運び電気を通す。

重要なのは「イオンがあるか」だけでなく、**そのイオンが移動できるか**である。

例題 2

図 X と図 Y は、原子のつながり方が異なる二つの固体の構造を模式的に示したものである。
X では、原子間の強い結合が三次元に連続している。Y では、2 個の原子からなる独立した分子の内部には強い結合があるが、分子間にはそれより弱い相互作用が働いている。
図中の実線は強い結合、点線は弱い相互作用を表す。X の端の二重斜線は、結合が図の外へ続くことを表す。

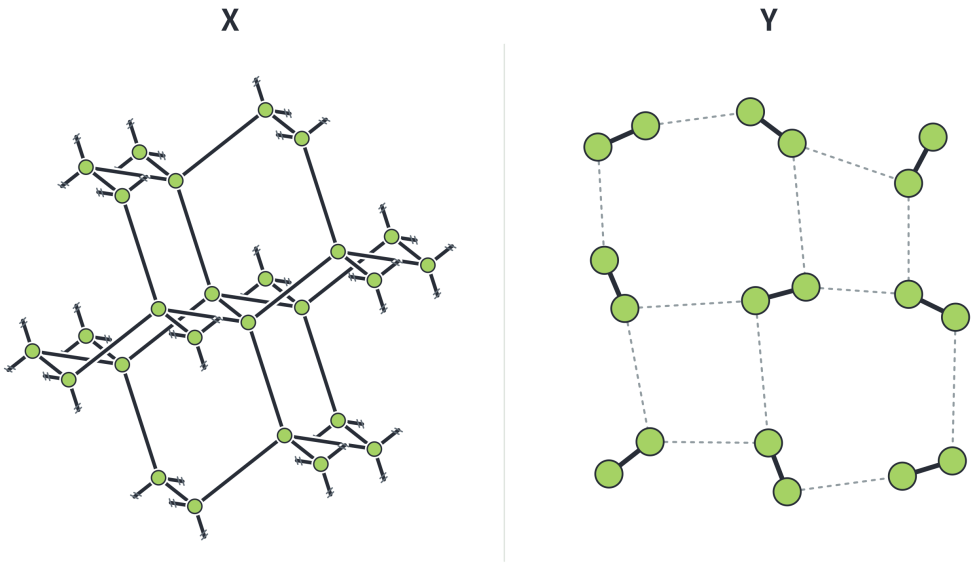


図 3　原子のつながり方が異なる構造 X と Y の模式図。

1. X と Y を、それぞれ「共有結合の結晶」「分子結晶」のどちらに分類できるか答えよ。
2. X と Y を比べたとき、一般に Y のほうが構造を崩して融解させやすいと考えられる理由を説明せよ。また、Y が融解するとき、分子内の強い結合は通常どうなるか答えよ。

解答・解説

1.
X は共有結合の結晶、Y は分子結晶である。
X では原子どうしの強い結合が三次元に連続しており、独立した小分子に分かれていない。これが共有結合の結晶の特徴である。一方、Y では独立した二原子分子が存在し、その分子どうしが分子間力によって集められているため、Y は分子結晶である。

2.
一般に Y のほうが構造を崩して融解させやすい。Y を結晶としてまとめているのは分子間の比較的弱い相互作用であり、融解では主にこの分子間のまとまりが崩れるからである。これに対して X では、強い結合が原子から原子へ三次元に連続しているため、構造を大きく崩すには強い結合に関わる変化が必要となる。
Y が融解するとき、分子内の強い結合は通常は保たれる。したがって、二原子分子がばらばらの原子になるのではなく、独立した分子としてのまとまりを保ったまま、分子どうしの位置関係が変化する。

©ミライコーチング

例題 3

ダイヤモンドと黒鉛はいずれも炭素原子からなる。ダイヤモンドでは各炭素原子が周囲の 4 個の炭素原子と結び付き、三次元的な構造をつくる。一方、黒鉛では各炭素原子が同じ層内の 3 個の炭素原子と結び付き、六角網目状の層をつくる。

1. 黒鉛がダイヤモンドより軟らかく、層がずれやすい理由を説明せよ。
2. 黒鉛が電気を通す理由を説明せよ。

解答・解説

1.

黒鉛では、同じ層内の炭素原子どうしは強い共有結合で結び付いているが、層と層の間の相互作用は層内の共有結合より弱い。このため、力を加えると層どうしがずれやすく、ダイヤモンドより軟らかい。

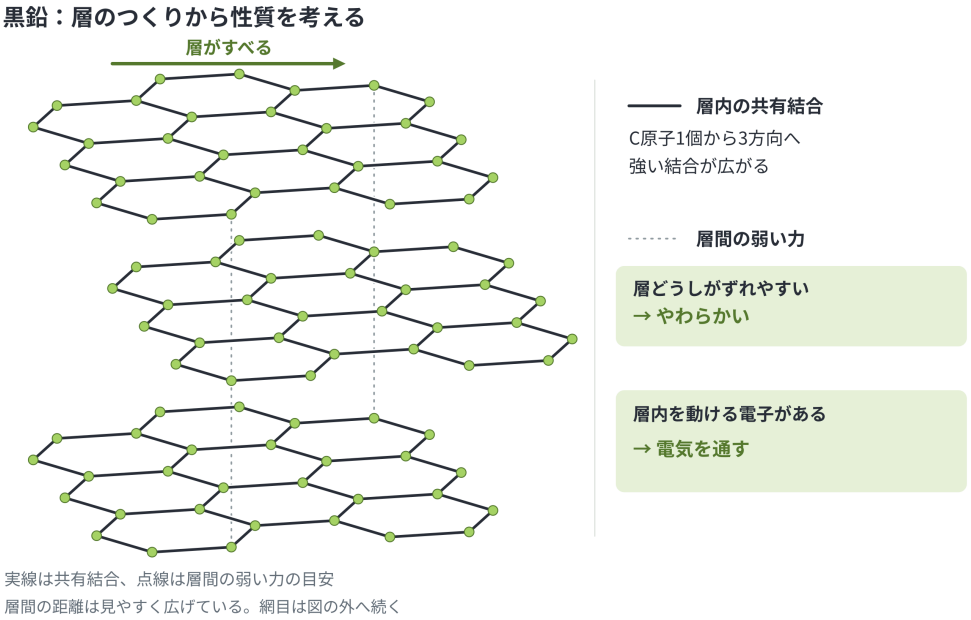


図 4　黒鉛の層内の結合と層間の弱い相互作用。

黒鉛について「共有結合が弱いから軟らかい」と説明するのは不正確である。層内には強い共有結合が連続しており、**層間の相互作用が層内の結合より弱い**ことが、層のずれやすさにつながる。

2.

黒鉛では、層内を移動できる電子が存在するため電気を通す。共有結合の結晶は一般に電気を通しにくいが、黒鉛は重要な例外である。

黒鉛の電気伝導性には方向による違いがあり、すべての方向に同じように電気を通すわけではない。構造と物性を結び付けるときは、「共有結合の結晶だから必ず電気を通さない」と機械的に判断せず、実際の電子の状態や構造を確認する必要がある。

©ミライコーチング

演習問題

演習 1

次の物質 A、B について、結晶中の構成粒子に注目して答えよ。
- 物質 A では、陽イオンと陰イオンが規則正しく配列している。
- 物質 B では、独立した分子が規則正しく配列している。

1. A、B をそれぞれイオン結晶・共有結合の結晶・分子結晶のいずれかに分類せよ。
2. A と B について、結晶を保つ主な結び付きをそれぞれ答えよ。

演習 2

あるイオン結晶 P について調べたところ、次の性質が分かった。P は水に溶けるものとする。
- 固体 P は電気をほとんど通さない。
- P の融液は電気を通す。
- P の水溶液は電気を通す。

1. 固体 P と P の融液で電気伝導性が異なる理由を、イオンの移動に注目して説明せよ。
2. P の水溶液が電気を通す理由を説明せよ。また、この結果だけから「すべてのイオン結晶が水によく溶け、電気を通す水溶液をつくる」と一般化できない理由も答えよ。

演習 3

物質 Q は、2 個の原子が強い共有結合で結び付いた独立分子からなる結晶である。結晶中では、その分子どうしが分子間力によって集まっている。

1. Q を融解させるとき、主に変化するのは「分子内の共有結合」と「分子間の結び付き」のどちらか答え、その理由を説明せよ。
2. 分子結晶が一般に共有結合の結晶より低い温度で構造を崩しやすい理由を、結晶を保つ結び付きの違いから説明せよ。

演習 4

物質 R では、多数の原子が強い共有結合によって三次元に連続している。物質 R は非常に硬く、高温まで結晶構造が保たれやすい。

1. R はどの結晶型に分類されるか答え、構成粒子と結合の特徴を説明せよ。
2. R が非常に硬く、高温まで構造が保たれやすい理由を説明せよ。

演習 5

ダイヤモンドと黒鉛について答えよ。

1. 黒鉛がダイヤモンドより軟らかい理由を、黒鉛の層内と層間の結び付きの違いから説明せよ。
2.「共有結合の結晶は電気を通しにくいので、黒鉛も電気を通さない」という判断が誤りである理由を説明せよ。

©ミライコーチング

演習 6

未知の固体 S は、独立した小分子やイオンを構成単位とせず、多数の原子が強い結合によって結晶全体へ連続している。また、S は非常に硬く、固体では電気をほとんど通さないことが分かった。

1. 与えられた情報から最も考えやすい結晶型を答え、「構成粒子・結び付き→物性」の順に根拠を説明せよ。

演習問題の解答・解説

解答 1

1.

A はイオン結晶、B は分子結晶である。
A では陽イオンと陰イオンが結晶の構成粒子となっているため、イオン結晶と判断できる。B では独立した分子が構成粒子となっているため、分子結晶である。

2.

A では、陽イオンと陰イオンの間に働く静電引力が結晶を保つ主な結び付きである。B では、独立した分子間に働く分子間力が結晶を保つ主な結び付きである。
結晶を分類するときは、物質名だけを暗記するのではなく、**何が構成粒子で、それらが何によって結び付いているか**を順に確認するとよい。

解答 2

1.

固体 P では、陽イオンと陰イオンが結晶格子の位置付近に束縛されており、電荷をもつイオンが結晶中を長距離移動できない。そのため、通常は電気を通さない。
一方、P を融解すると規則的な格子が崩れ、陽イオンと陰イオンが移動できるようになる。可動イオンが電荷を運ぶため、融液は電気を通す。

2.

P は水に溶けるという条件が与えられており、水溶液中では陽イオンと陰イオンが移動できる。この可動イオンが電荷を運ぶため、P の水溶液は電気を通す。
ただし、すべてのイオン結晶が水に十分溶けるわけではない。したがって、イオン結晶であることだけから、その物質の水溶液が必ず得られて電気を通すと一般化することはできない。水溶液について判断するときは、**水に溶けて可動イオンが存在するか**を確認する必要がある。

解答 3

1.

主に変化するのは分子間の結び付きである。
Q では、独立した分子の内部を強い共有結合が保っており、分子どうしは分子間力によって集まっている。融解では主に分子間のまとまりが崩れ、分子が互いに位置を変えられるようになる。通常、分子内の共有結合を切って分子を原子に分解する変化ではない。

2.

分子結晶では、結晶全体をまとめるのは分子間力である。一方、共有結合の結晶では、強い共有結合が多数の原子の間で連続している。
分子間力は、このような連続した共有結合より弱い場合が多いため、一般に分子結晶のほうが比較的低い温度で結晶構造を崩しやすい。
ただし、これは一般的な傾向である。分子間力の強さは物質によって異なり、氷のように水素結合が重要な分子結晶もあるため、すべての物質について絶対的な融点の順序を示す規則ではない。

解答 4

1.

R は共有結合の結晶である。
R では独立した小分子が構成単位となっているのではなく、多数の原子が強い共有結合によって三次元に連続している。この構造が共有結合の結晶の特徴である。
ダイヤモンドや石英が代表例である。石英を構成するSiO_2についても、SiO_2という独立した 1 個の分子が多数集まっているという意味ではなく、Si 原子と O 原子が連続的につながった構造をもつ。

2.

R では強い共有結合が結晶の広い範囲にわたって連続しているため、原子の位置を大きく変えて構造を崩すことが難しい。このため、非常に硬く、高温まで構造が保たれやすいと考えられる。
「原子そのものが硬いから」ではなく、**原子間の強い結合が結晶全体へ連続していること**が物性の理由である。

解答 5

1.

黒鉛では、各炭素原子が同じ層内の 3 個の炭素原子と強い共有結合で結び付き、六角網目状の層をつくっている。一方、層と層の間の相互作用は層内の共有結合より弱い。
そのため、力を加えると強い層内の結合を切らなくても層どうしがずれることができ、黒鉛はダイヤモンドより軟らかい。
したがって、「黒鉛では炭素原子どうしの共有結合が全体的に弱い」と説明するのは誤りである。

2.

黒鉛には層内を移動できる電子が存在し、その電子が電荷を運ぶことができる。このため、黒鉛は共有結合を主体とする構造をもちながら電気を通す。
共有結合の結晶が一般に電気を通しにくいという性質は、すべての物質に例外なく適用できる絶対的な規則ではない。黒鉛はその重要な例外である。また、黒鉛の電気伝導性には方向による違いがあるため、全方向に同じように電気を通すと考えるのも適切ではない。

解答 6

1.

最も考えやすいのは共有結合の結晶である。
まず構成粒子と結び付きを見ると、S は独立した小分子やイオンの集合ではなく、多数の原子が強い結合によって結晶全体へ連続している。この特徴は共有結合の結晶に対応する。
次に物性を考える。強い結合が結晶全体に連続しているため、原子の位置を大きく変えて構造を崩すには大きなエネルギーを必要とし、非常に硬いという性質と整合する。また、共有結合の結晶には固体で電気を通しにくいものが多く、S の電気伝導性とも整合する。
したがって、与えられた情報からは共有結合の結晶と判断するのが最も適切である。ただし、電気を通しにくいという性質だけで分類したのではなく、**原子が強い結合で連続しているという構造を中心に判断する**ことが重要である。