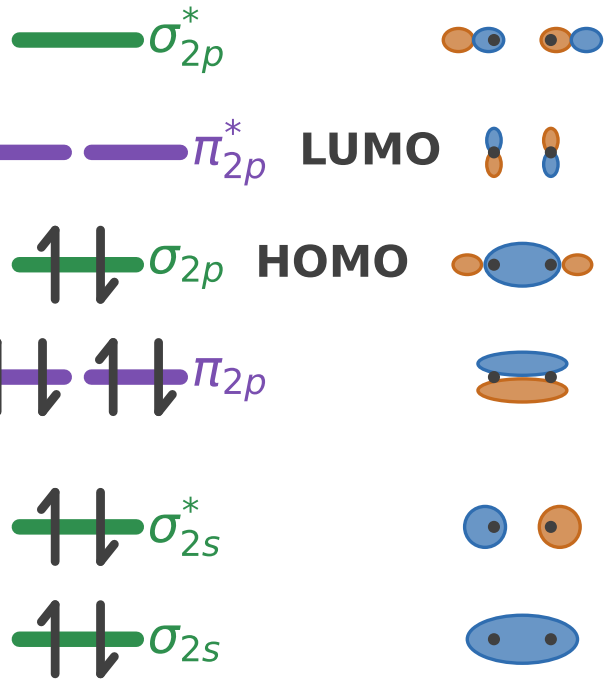
二原子分子の MO(2)：分子振動と異核二原子

量子化学1 第 9 回 ｜ 教科書 第 2 章（§2.3〜2.4）・第 7 章（§7.2）

赤外吸収の位置は、なぜ結合ごとに決まっているのか

前回の復習

N_2（価電子 10 個）

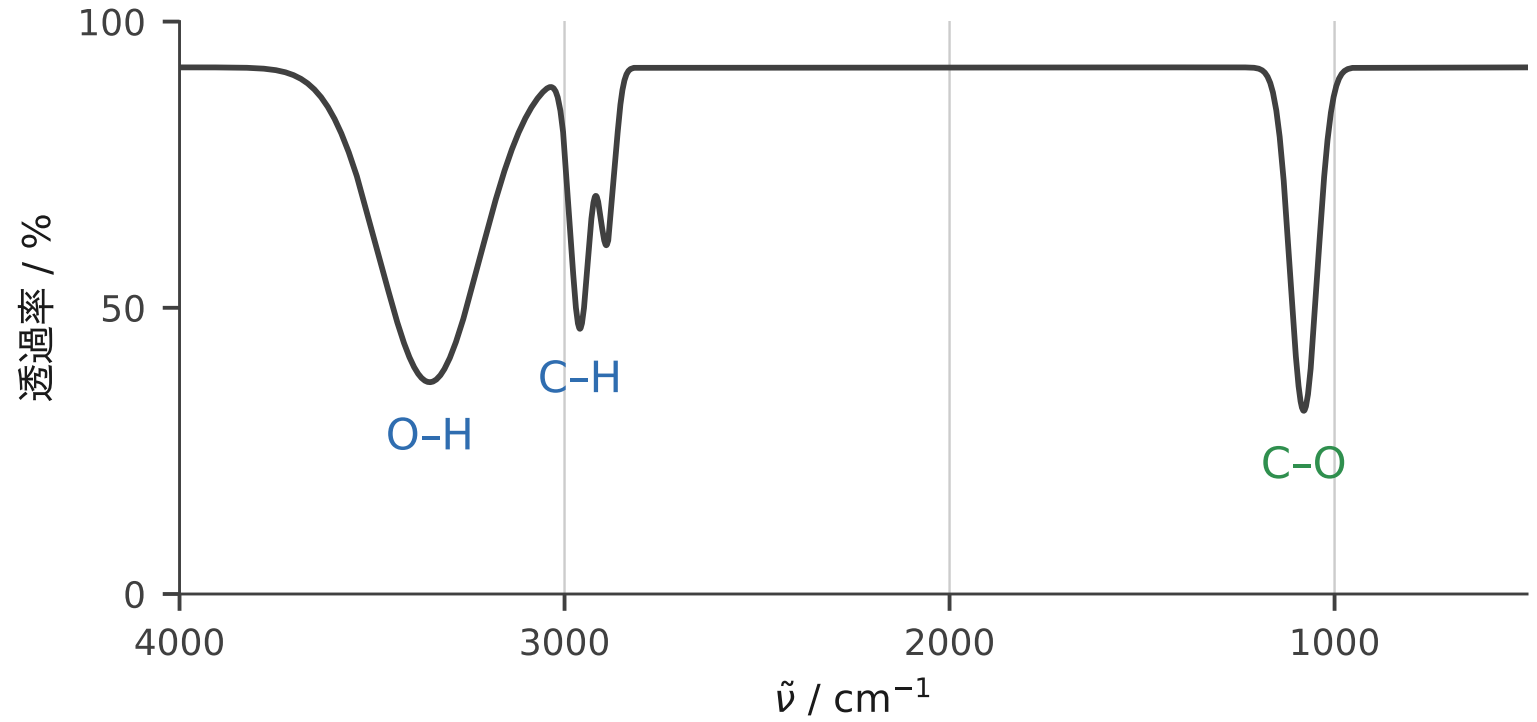


右：軌道の形（概念図。青＝正、橙＝負）

1　前回の謎：窒素は三重結合。$\mathrm{N_2}$ の結合次数 3 は、どの軌道の電子を数えて出しましたか

2　予想：核のあいだに結合の電子が多い結合ほど、結合の谷は狭い（硬い）でしょうか、広い（やわらかい）でしょうか

謎 1　赤外吸収の位置は、なぜ結合ごとに決まっているのか



赤外スペクトル（模式図）。横軸は**波数**（左ほど振動数が高い）。くぼみの位置で結合が分かる

O–H や C–H が高波数に出るのは、なぜか

今日の流れ

教科書 §2.3〜2.4、§7.2

全体像	① 解ける模型		② 軌道近似	③ 変分法 ＋ LCAO：分子					④ ヒュッケル法			
1 ✓ 全体像	2 ✓ 箱	3 ✓ 原子軌道	4 ✓ 多電子	5 ✓ 結合・LCAO	6 ✓ 変分原理	7 ✓ 中間	8 ✓ 等核	9 振動・異核	10 混成・π	11 π 準位	12 π 結合	13 期末
			復習の手引き					▲ 今日	復習の手引き			

1. **謎 1** 赤外吸収の位置は、なぜ結合ごとに決まっているのか

   → 演習 A：C=O の吸収から、結合の電子を読む

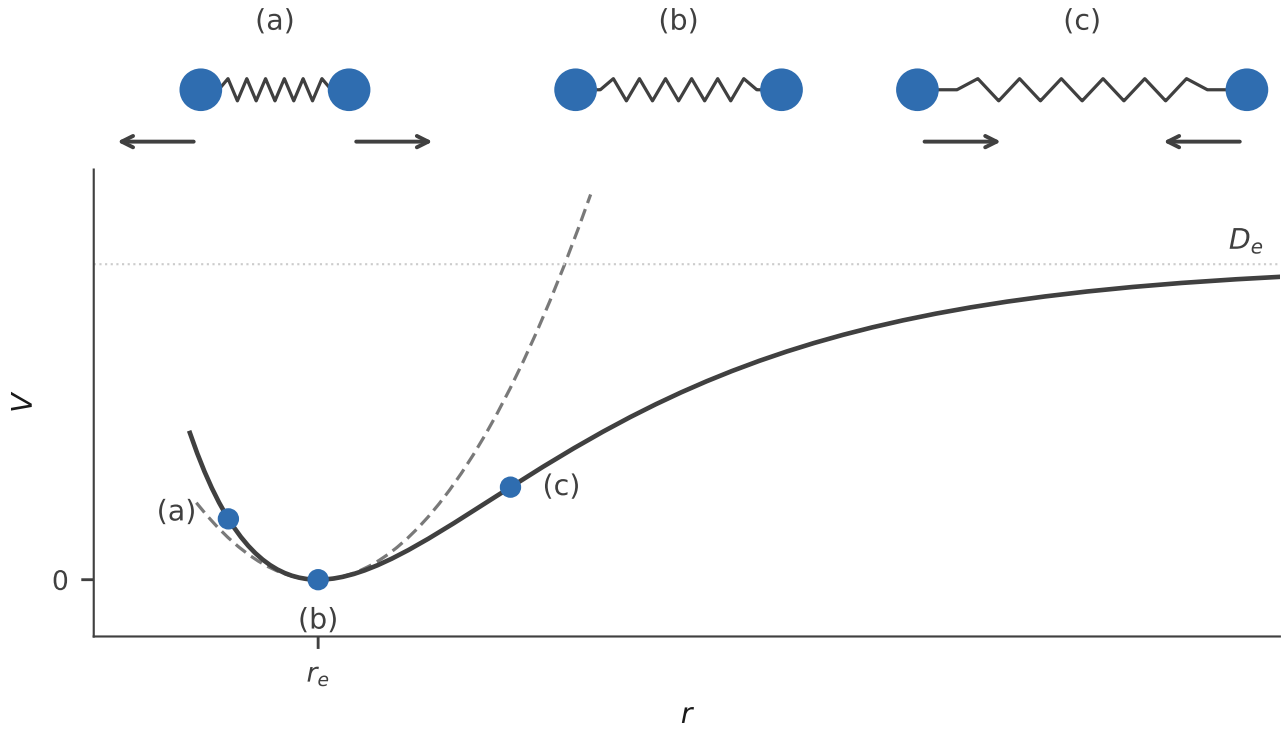
2. **謎 2** F は H より「電子を引きつける」とは、どういうことか

3. 準位が近いほど、よく混ざって強く押し合う

   → 演習 B：異核二原子の結合の電子は、どちらにいるか

谷の中で、原子はどう動くのか

教科書 §2.3

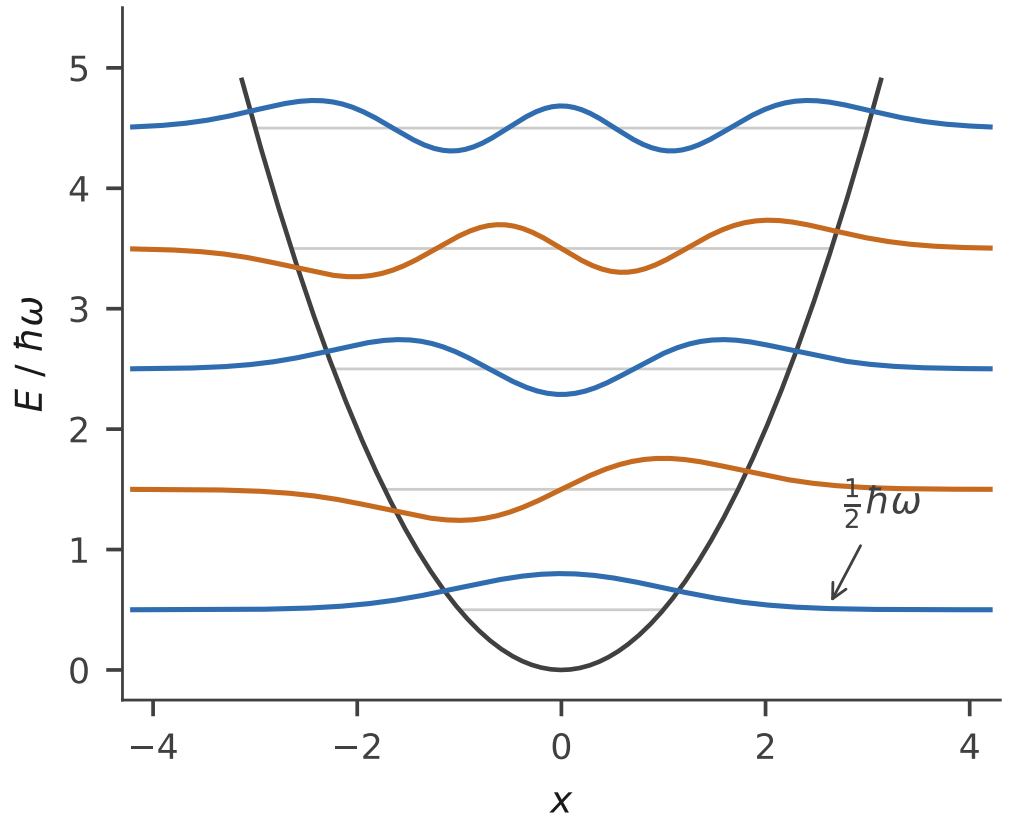


玉とばねの分子（上）と、結合の谷（下）

- 原子（核）は**谷**に閉じ込められ、谷底 r_e のまわりを行き来する
- 谷底の近くは**放物線**（破線）、つまり**ばね**

調和振動子：放物線の谷の準位は、どう並ぶのか

教科書 §2.3



放物線の上に等間隔に並ぶ準位と ψ_v（箱は n^2 で上ほど間隔が広がる）。青は偶関数、橙は奇関数

$$V = \tfrac{1}{2}kx^2, \qquad \omega = \sqrt{k/m}$$

k ばね定数　ω 角振動数

$$E_v = \hbar\omega\left(v + \tfrac{1}{2}\right), \quad v = 0, 1, 2, \ldots$$

v 振動の量子数

間隔はどれも $\hbar\omega$。$v = 0$ でも $\frac{1}{2}\hbar\omega$ 残る（**零点エネルギー**）

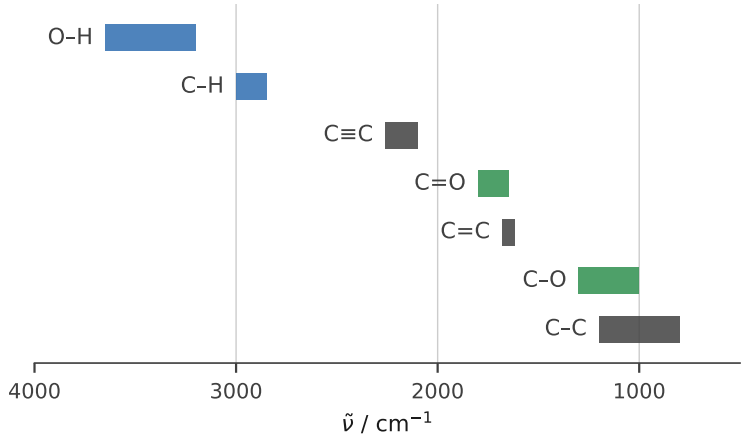
謎 1 の答え 結合の硬さと原子の質量

教科書 §2.4

謎 1：赤外吸収の位置は、なぜ結合ごとに決まっているのか

$$\omega = \sqrt{k/\mu}, \qquad \mu = m_A m_B/(m_A + m_B)$$

k 結合の硬さ　μ 換算質量



青：H を含む結合　灰：C–C・C=C・C≡C　緑：C と O

- 等間隔 → 吸収は 1 か所（**赤外線**）
- **軽い原子**（H）→ μ が小さく高波数。**硬い結合** → 高波数

読み方 ①　高い波数 → 硬い結合か、軽い H（硬い ＝ 結合の電子が多い）

例題：同位体に置き換えると、振動数は何倍か

問題　C–H の H を D に置き換えると、伸縮振動の振動数は何倍になるかを求めてください（結合の硬さ k は同じ。質量は C = 12、H = 1、D = 2 の比で使う）

① 換算質量　積 ÷ 和：$\mu = m_A m_B / (m_A + m_B)$

C–H $12/13 = 0.92$、C–D $24/14 = 1.71$

② 振動数の比　$\omega_{\mathrm{D}} / \omega_{\mathrm{H}} = \sqrt{k/\mu_{\mathrm{D}}} \,/\, \sqrt{k/\mu_{\mathrm{H}}}$

k は消え、上下が入れ替わる：$\sqrt{\mu_{\mathrm{H}}/\mu_{\mathrm{D}}}$

$\sqrt{0.92/1.71} \approx 0.73$（約 $1/\sqrt{2}$ 倍）

③ 確かめ　波数も 0.73 倍：C–H 約 $2900〜3000$

→ 約 $2100〜2200\ \mathrm{cm}^{-1}$（実測と一致）

答え　約 0.73 倍

- 使い道：吸収がどの結合のものか迷ったら、同位体に置き換えて吸収が動くかを見る

演習 A：C=O の吸収から、結合の電子を読む

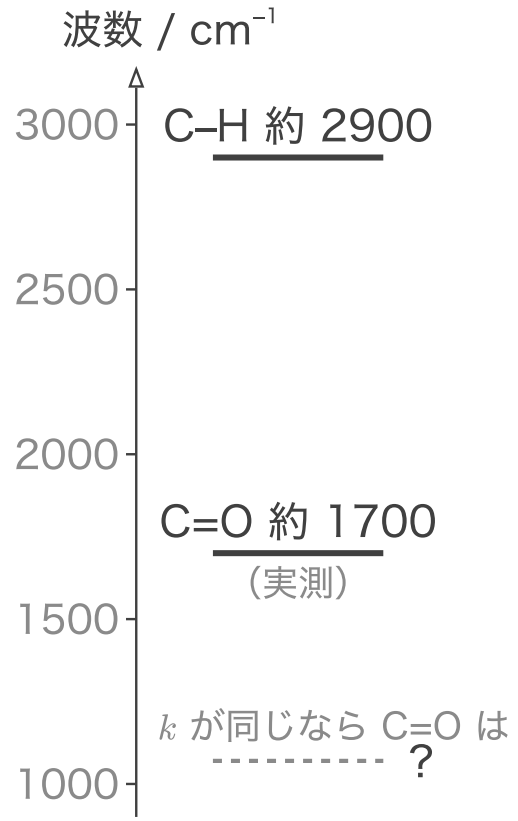
目安 5 分

C=O の伸縮振動（約 1700 cm^{-1}）を読みます。質量は C = 12、O = 16、H = 1

問 1 ^{12}C=O の換算質量 μ を求めてください。硬さ k が同じなら、C–H（$\mu = 0.92$）の波数は C=O の何倍ですか

問 2 実際は C–H 約 2900、C=O 約 1700 cm^{-1} で 1.7 倍だけです。k は何倍ですか。谷が狭いのはどちらですか 。そのわけを、核のあいだの結合の電子（第 8 回）で一言

使う読み方　① 高い波数 → 硬い結合か、軽い H



演習 A の答え（1）

問 1　^{12}C=O の μ と、k が同じときの波数の比

① 求めるもの　C=O の μ と、波数の比（C–H ÷ C=O）

② 使う式　μ ＝ 積 ÷ 和、$\omega \propto 1/\sqrt{\mu}$（$k$ が同じ）

③ 見当　μ は 12 より小さく、0.92 より大きい

④ 代入

$$\mu = (12 \times 16)/(12 + 16)$$

$$= 192/28 \approx 6.86$$

$$\text{比 } \sqrt{6.86/0.92} \approx 2.7$$

答え　$\mu \approx 6.86$。**C–H は C=O の約 2.7 倍**

⑤ 意味　質量だけなら C–H が 2.7 倍高いはず。実際との差は、谷の硬さ（問 2）

演習 A の答え（2）

問 2　k は何倍か、谷が狭いのはどちらか

① 求めるもの　硬さの比 $k_{\mathrm{CO}}/k_{\mathrm{CH}}$

② 使う式　$k = \mu\omega^2$（$\omega = \sqrt{k/\mu}$ を 2 乗）

③ 見当　k が同じなら 2.7 倍のはずが、1.7 倍

→ C=O のほうが硬い

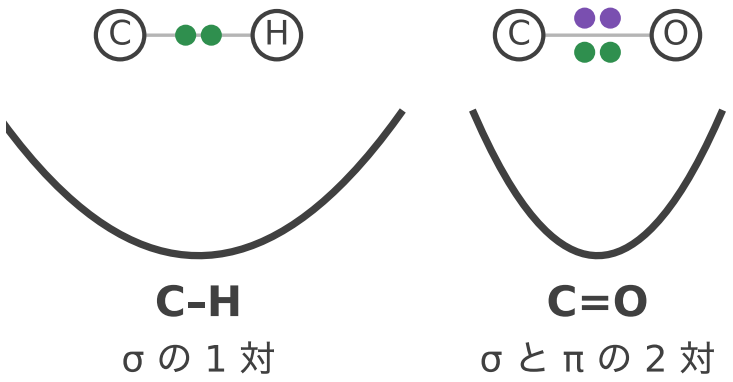
④ 代入

$$(6.86/0.92) \times (1700/2900)^2$$

$$\approx 7.46 \times 0.344 \approx 2.6$$

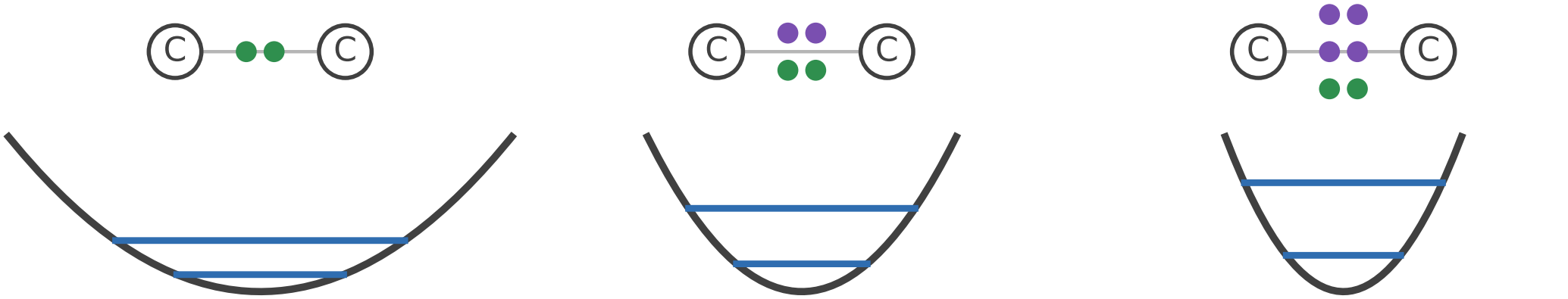
答え　C=O が約 2.6 倍硬い（谷が狭い）

⑤ 意味　C=O は核のあいだに σ と π の 2 対 → 谷が狭い（C–H は σ の 1 対）



読み解き：谷の硬さは、結合の電子が決める

教科書 §2.4



C–C　約 1000 cm⁻¹　σ²（電子 2 個）

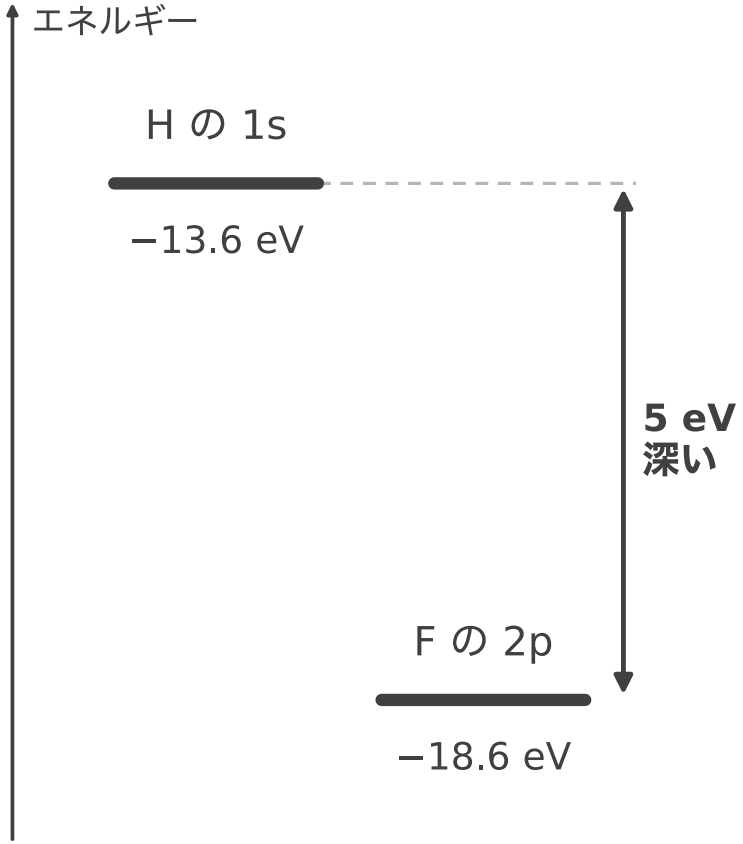
C=C　約 1620 cm⁻¹　σ²π²（4 個）

C≡C　約 2120 cm⁻¹　σ²π⁴（6 個）

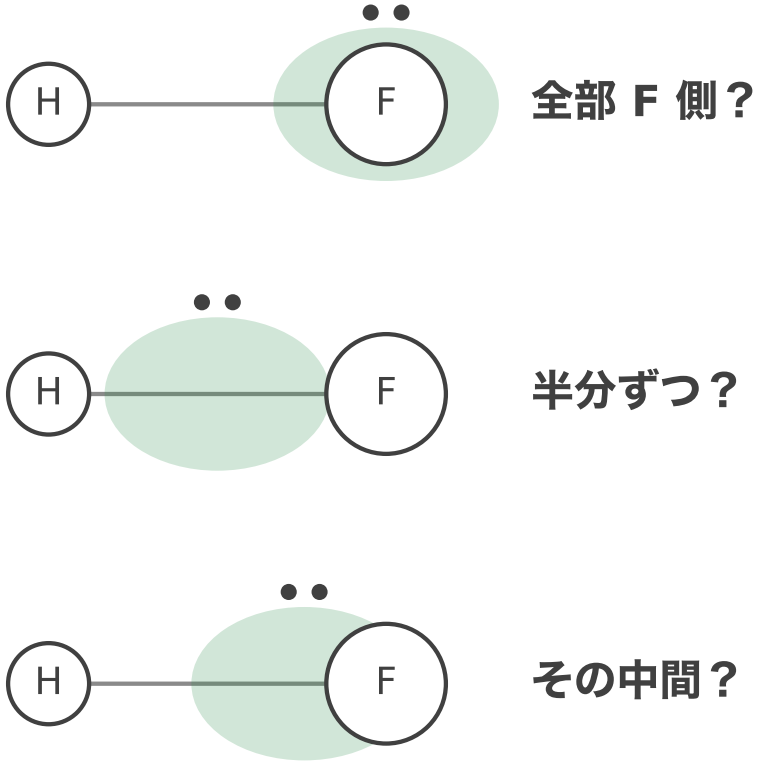
3 つとも質量は同じ（$\mu = 6$）。緑は σ、紫は π の電子。青は振動の準位（間隔 $\hbar\omega$）

読み方 ① を電子で　核のあいだの電子が多いほど、谷が狭い（硬い）→ 高い波数

謎 2　F は H より「電子を引きつける」とは、どういうことか



結合の電子 2 個（緑の雲）は、どこに？



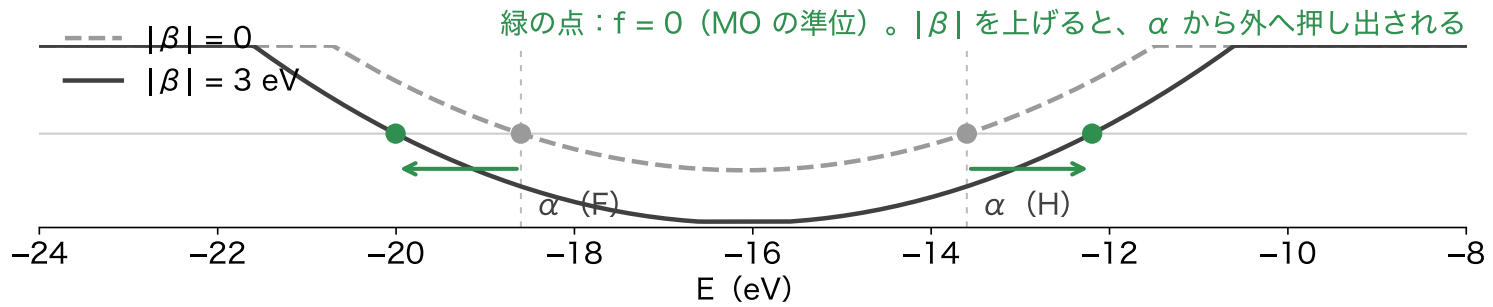
F の 2p は H の 1s より 5 eV 深い。HF の結合の電子は、どこまで F に寄るのか

原子が違うと、MO のエネルギーはどう変わるか

教科書 §7.2

$$\begin{vmatrix} \alpha_{\mathrm{A}} - E & \beta \\ \beta & \alpha_{\mathrm{B}} - E \end{vmatrix} = (\alpha_{\mathrm{A}} - E)(\alpha_{\mathrm{B}} - E) - \beta^2 = 0 \qquad (S = 0)$$

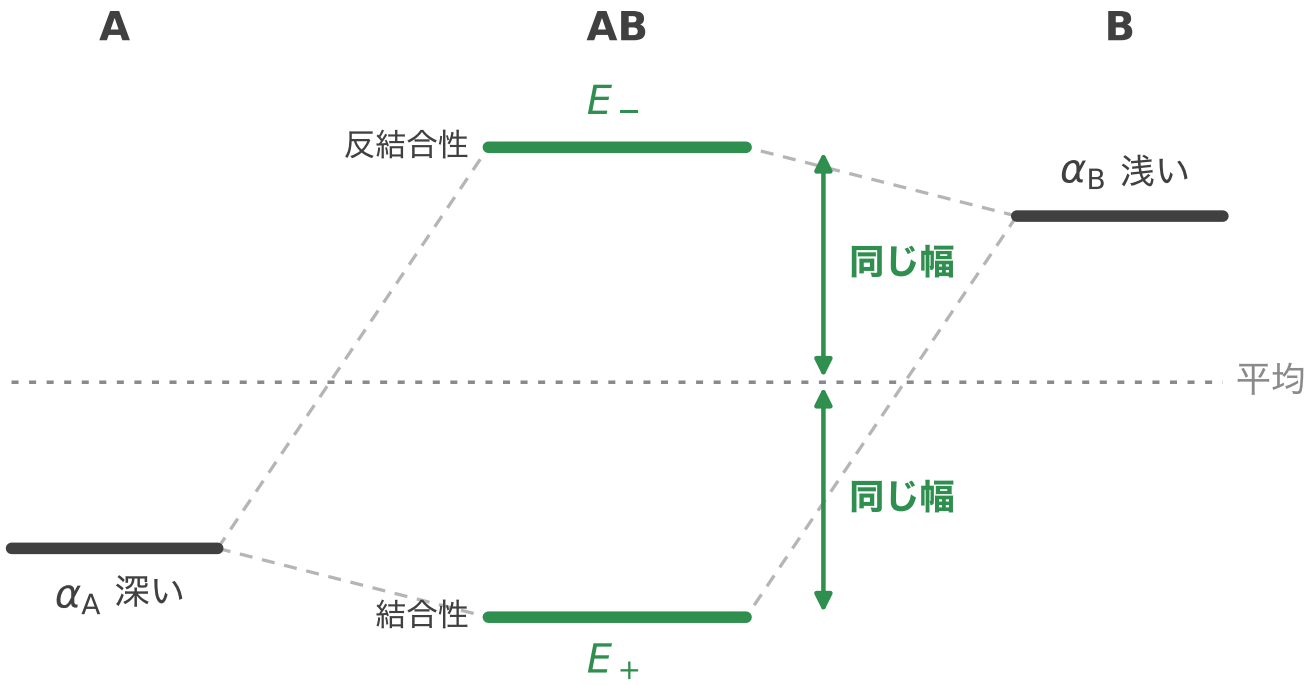
α_{A}・α_{B} 原子 A・B の上の電子のエネルギー（$-\alpha$ がイオン化エネルギーの目安。A が深いほう）　β 共鳴積分



電気陰性度の大きい原子ほど α **が深い**。違うのは対角項だけ

$E_{\pm}$：二つの準位は、平均の上下に同じ幅だけ割れる

教科書 §7.2



$$E_{\pm} = \frac{\alpha_{\mathrm{A}} + \alpha_{\mathrm{B}}}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\mathrm{A}} - \alpha_{\mathrm{B}}}{2}\right)^2 + \beta^2}$$

E_+ 低いほう（結合性）。根号を**引く**側

発展 6：E± を、解の公式で導く →

例題：異核二原子の $E_{\pm}$ を求める

問題　$\alpha_{\mathrm{A}} = -15\ \mathrm{eV}$、$\alpha_{\mathrm{B}} = -11\ \mathrm{eV}$、$\beta = -2\ \mathrm{eV}$、$S = 0$ の異核二原子で、E_+ と E_- を求めてください（教科書の例題）

① 平均　$(\alpha_{\mathrm{A}} + \alpha_{\mathrm{B}})/2$ に数を入れる

$$(-15 - 11)/2 = -13\ \mathrm{eV}$$

② 半差　$(\alpha_{\mathrm{A}} - \alpha_{\mathrm{B}})/2 = (-15 + 11)/2 = -2\ \mathrm{eV}$（差 –4 ではなく半差）

③ 根号　$\sqrt{(-2)^2 + (-2)^2}$。半差も β も 2 乗する

$$= \sqrt{8} \approx 2.83\ \mathrm{eV}$$

④ $E_{\pm}$　平均 $\mp$ 根号。E_+ は平均から引く

$$E_+ = -13 - 2.83、\quad E_- = -13 + 2.83$$

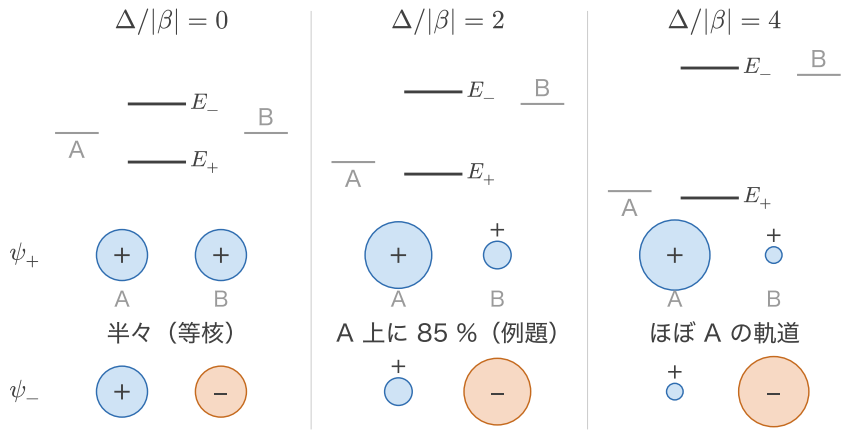
⑤ 確かめ　E_+ は深い α_{A} より下、E_- は浅い α_{B} より上

答え　$E_+ = -15.83\ \mathrm{eV}$、$E_- = -10.17\ \mathrm{eV}$

結合性軌道は、どちらの原子へ偏るか

一次式 $(\alpha_{\mathrm{A}} - E)c_{\mathrm{A}} + \beta c_{\mathrm{B}} = 0$ を $c_{\mathrm{B}}/c_{\mathrm{A}}$ について解く

$$\frac{c_{\mathrm{B}}}{c_{\mathrm{A}}} = \frac{E - \alpha_{\mathrm{A}}}{\beta}$$



中：結合性 ψ_+、下：反結合性 ψ_-（大きさが係数、色と ＋・− が符号）

読み方 ②　α の深い原子へ、結合の電子が寄る（反結合性は浅い側）

例題：係数の偏りを求める

問題　前の例題の続き（$\alpha_{\mathrm{A}} = -15$、$\alpha_{\mathrm{B}} = -11$、$\beta = -2\ \mathrm{eV}$、$E_{+} = -15.83\ \mathrm{eV}$）。結合性軌道で電子が A 上にいる割合 c_{A}^2 を求めてください

① 比　$c_{\mathrm{B}}/c_{\mathrm{A}} = (E_{+} - \alpha_{\mathrm{A}})/\beta$ に代入

引くのは c_{A} の対角項 α_{A}（α_{B} でない）

$$\frac{c_{\mathrm{B}}}{c_{\mathrm{A}}} = \frac{-15.83 + 15}{-2} \approx 0.41$$

② 規格化　第 6 回の式で $S = 0$：$c_{\mathrm{A}}^2 + c_{\mathrm{B}}^2 = 1$

$c_{\mathrm{B}} = 0.41\, c_{\mathrm{A}}$ を入れる：$c_{\mathrm{A}}^2 + 0.41^2 c_{\mathrm{A}}^2 = 1$

くくる：$c_{\mathrm{A}}^2 (1 + 0.41^2) = 1$

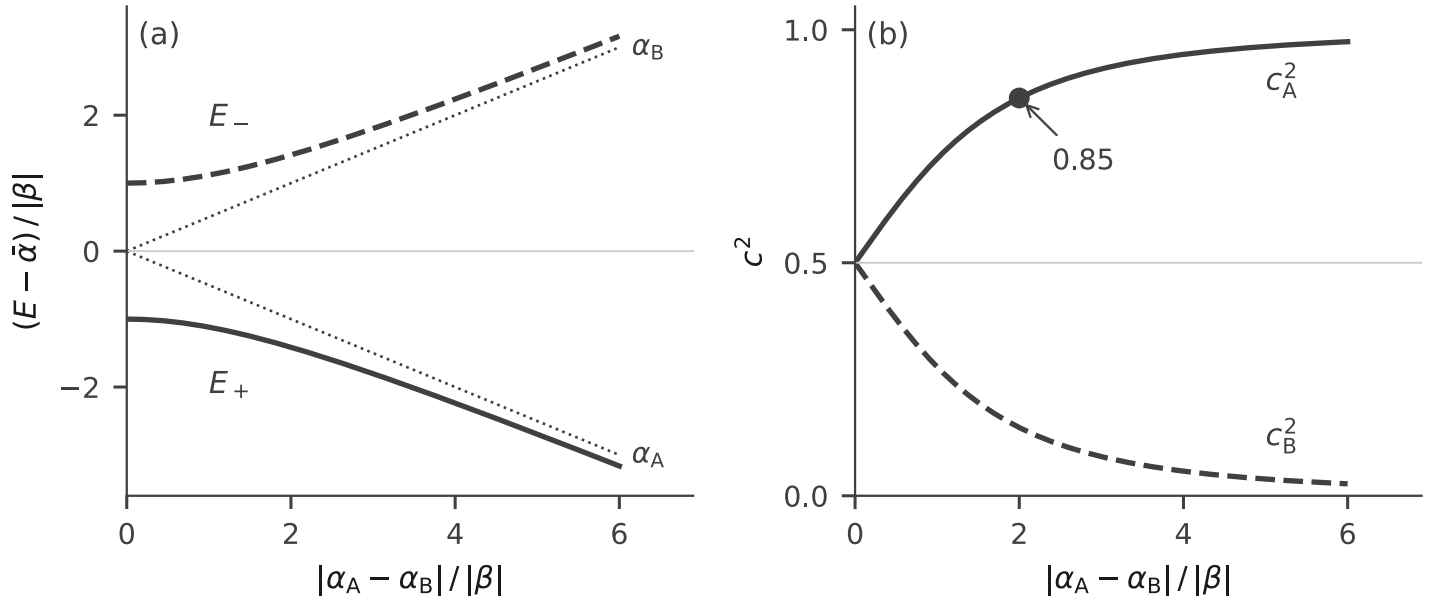
$c_{\mathrm{A}}^2 = 1/(1 + 0.414^2) \approx 0.85$

③ 割合　$c_{\mathrm{A}}^2 : c_{\mathrm{B}}^2 \approx 85 : 15 \rightarrow \mathrm{A}^{\delta-}\!-\!\mathrm{B}^{\delta+}$

答え　$c_{\mathrm{A}}^2 \approx 0.85$（**電子の約 85 % が A 側**）

偏りの大きさは、何で決まるのか

謎 2　F は H より「電子を引きつける」とは、どういうことか　に戻る



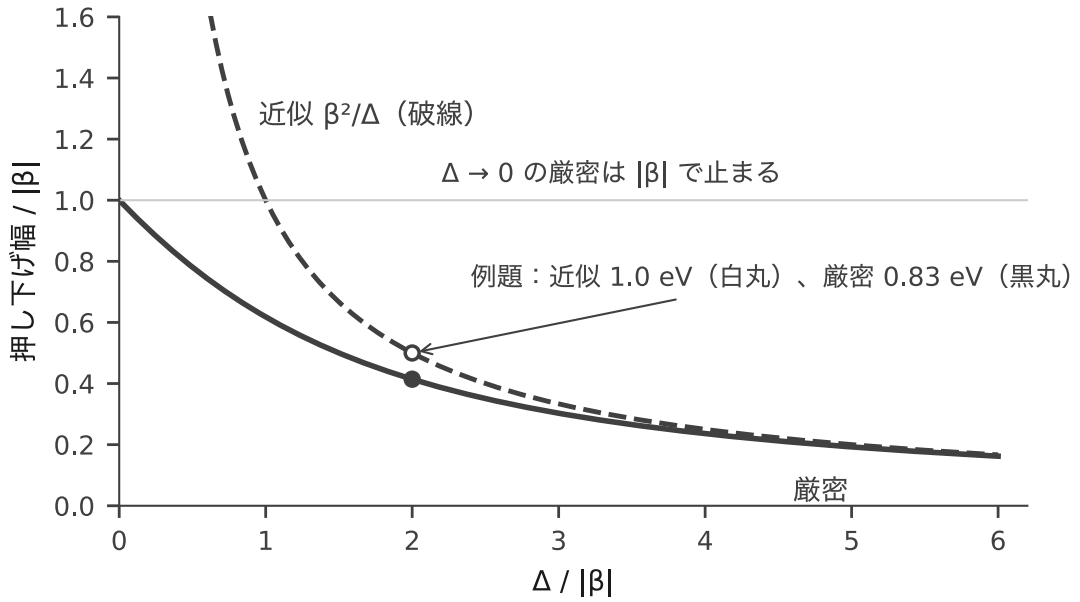
横軸は $|\alpha_A - \alpha_B|/|\beta|$。(a) $E_\pm$（$\bar{\alpha}$ は二つの α の平均）、(b) 結合性軌道の c_A^2 と c_B^2。丸は例題（85 %）

読み方 ③　準位が近い → よく混ざり、押し合う（電子は半々に広がる）

準位が離れているほど、強く反発するのか

$$E_+ \approx \alpha_{\mathrm{A}} - \beta^2/\Delta, \qquad E_- \approx \alpha_{\mathrm{B}} + \beta^2/\Delta$$

Δ 準位差 $|\alpha_{\mathrm{A}} - \alpha_{\mathrm{B}}|$（Δ が $|\beta|$ の 3 倍以上で使える）



二準位の反発：準位差 Δ が**小さい**ほど、$|\beta|$ が**大きい**ほど強く押し離される

発展 1：近似 β^2/Δ は、どこまで使えるか →

発展 2：準位差が大きいと、結合は弱くなるのか →

演習 B：異核二原子の結合の電子は、どちらにいるか

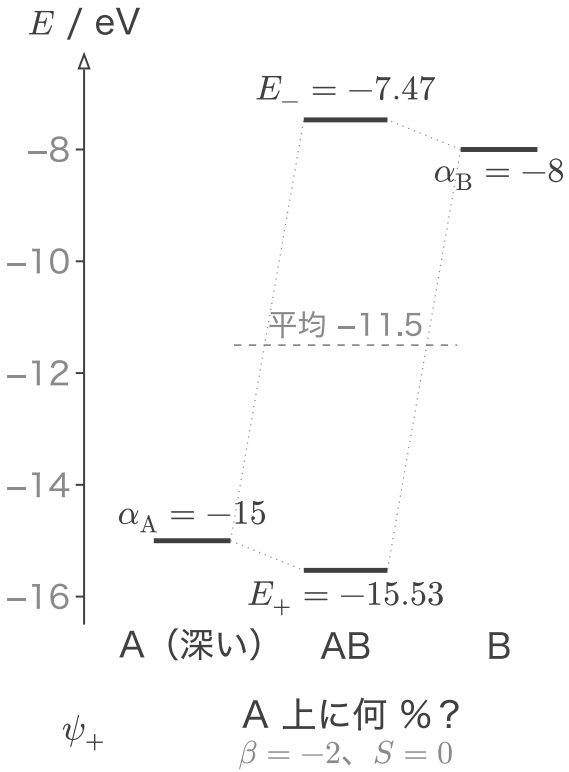
目安 5 分

異核二原子 AB で $\alpha_{\mathrm{A}} = -15\ \mathrm{eV}$、$\alpha_{\mathrm{B}} = -8\ \mathrm{eV}$、$\beta = -2\ \mathrm{eV}$、$S = 0$。準位は $E_+ = -15.53\ \mathrm{eV}$、$E_- = -7.47\ \mathrm{eV}$ です

問 1 結合性軌道で、電子が A 上にいる割合 c_{A}^2 を求めてください。計算の前に、例題（準位差 4 eV で 85 %）より A へ偏るか偏らないかを予想し、理由を一言

問 2 **謎 2** に答えてください：HF の結合の電子は、F 側に全部寄るか、半分ずつか、その中間か 。F の 2p が H の 1s より 5 eV 深いことと、1 の答えを使って

使う読み方　② 深い原子へ寄る　③ 近いとよく混ざる



演習 B の答え（1）

問 1　結合性軌道の c_{A}^2（例題の 85 % より偏るか）

① 求めるもの　結合性軌道の c_{A}^2

② 使う式　$c_{\mathrm{B}}/c_{\mathrm{A}} = (E_+ - \alpha_{\mathrm{A}})/\beta$

規格化 $c_{\mathrm{A}}^2 + c_{\mathrm{B}}^2 = 1$

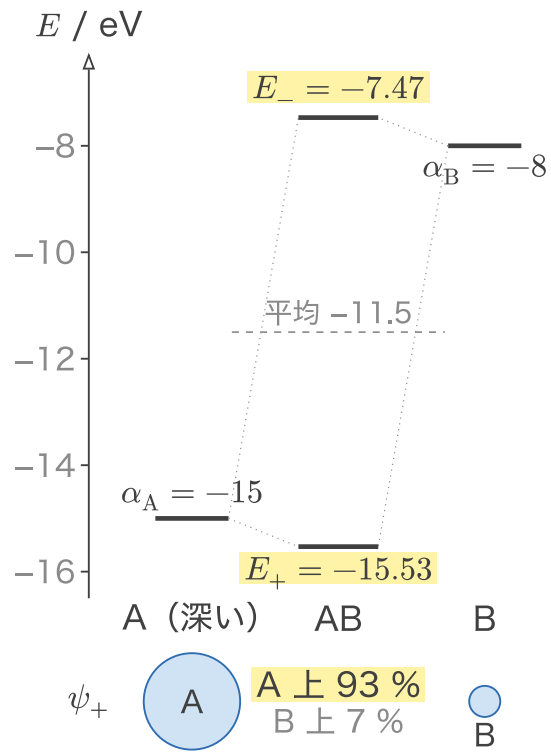
③ 見当　準位差 7 eV（例題 4 eV）→ もっと偏る

④ 代入　比 $(-15.53 + 15)/(-2) \approx 0.27$

$c_{\mathrm{A}}^2 = 1/(1 + 0.27^2) \approx 0.93$

答え　$c_{\mathrm{A}}^2 \approx 0.93$（約 9 割が A 側。85 % より偏る）

⑤ 意味　約 9 割が A のそば → $\mathrm{A}^{\delta-}\!-\!\mathrm{B}^{\delta+}$ が強い



要点：準位が近いほど強く混ざって反発し、離れるほど偏ってイオン結合に近づく

謎 2 の答え　結合性軌道は F 側へ寄るが、全部ではない

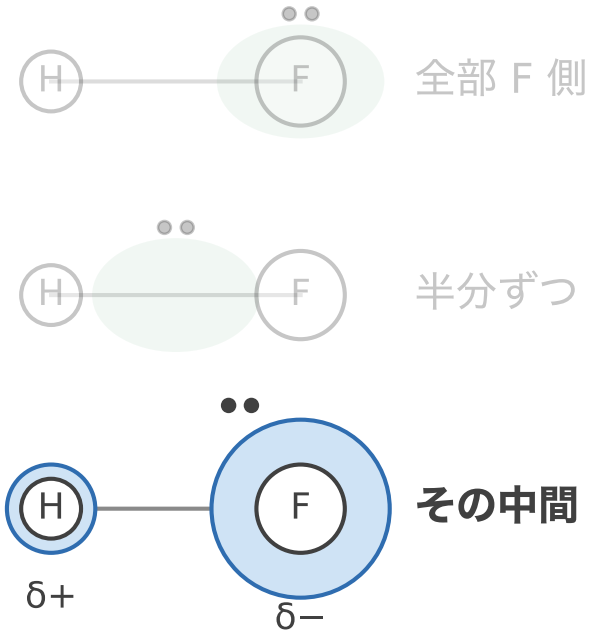
謎 2：F は H より「電子を引きつける」とは、どういうことか

演習 B 問 2　HF の結合の電子は、F 側に全部寄るか、半分ずつか、その中間か

考え方　F の $2p$ は H の $1s$ より 5 eV 深い → F 側の係数が大きい。問 1（準位差 7 eV）でも 93 %、全部にはならない

答え　その中間（極性のある共有結合）

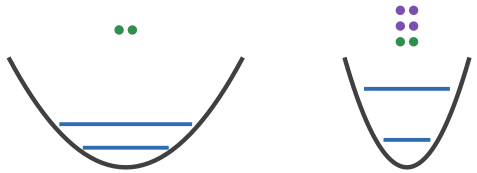
- HF の部分電荷は実測で ± 0.41 ほど（半々なら 0、全部なら 1）



発展 3：HF の電子は、どの軌道にどう入るか →
発展 4：HF の極性を、数で確かめる →
発展 5：CO は、なぜ炭素の側で金属につくのか →

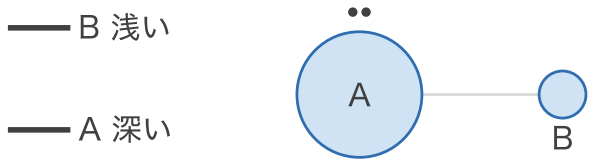
思い出す：今日の読み方 3 つ

読み方 ①



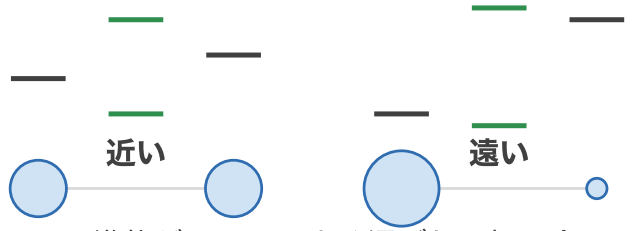
高い波数 → ＿＿ 結合か、＿＿ H

読み方 ②



α の ＿＿ 原子へ、結合の電子が寄る

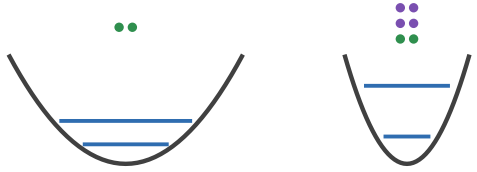
読み方 ③



準位が ＿＿ → よく混ざり、押し合う

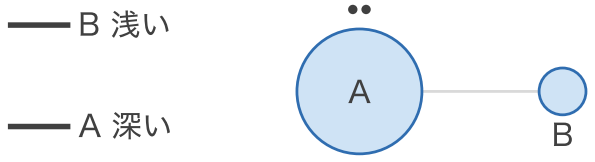
絵を手がかりに、空欄に入る言葉を何も見ずにノートに書く（1 分）

読み方 ①



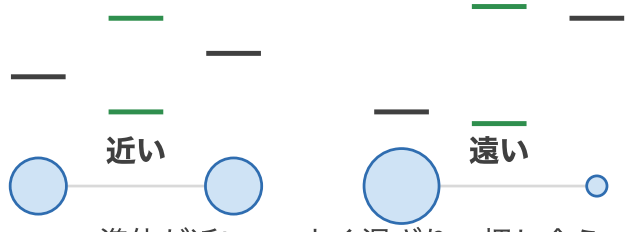
高い波数 → 硬い結合か、軽い H

読み方 ②



α の深い原子へ、結合の電子が寄る

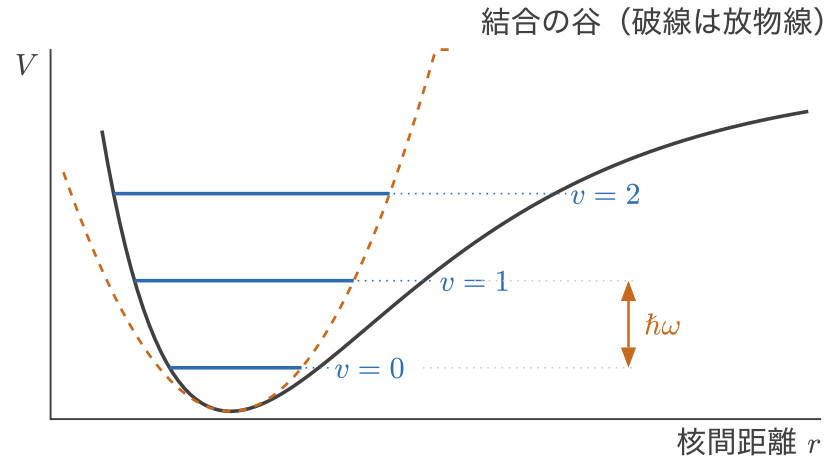
読み方 ③



準位が近い → よく混ざり、押し合う

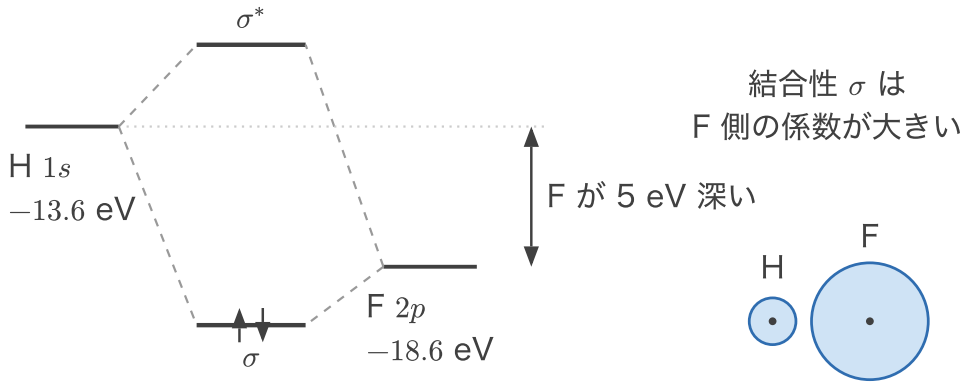
まとめ：謎 1・謎 2 への答え

謎 1　赤外吸収の位置は、なぜ結合ごとに決まっているのか



結合の硬さ k と質量 μ：$\omega = \sqrt{k/\mu}$

謎 2　F は H より「電子を引きつける」とは、どういうことか



結合の電子が、深い F 側へ寄る（全部ではない）

結合の電子の量と偏りが、振動と極性を決める

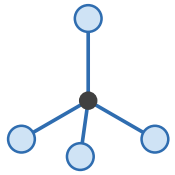
今日の復習

教科書 §2.3〜2.4、§7.2

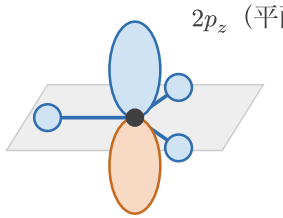
どこで	すること
動く図（振動）	C–C → C=C → C≡C と C–H を押して、吸収の動きを読み方 ① で言う
動く図（偏り）	Δ と $\lvert\beta\rvert$ を動かし、ローブの偏りと割れ幅を読み方 ② ③ で言う
§2.3	基底状態を釣鐘型と置いて代入し、$\frac{1}{2}\hbar\omega$ を導く計算
§2.4	CO の伸縮振動の波数の計算
§7.2	二準位の反発の近似の導出（付録 A.1・A.3）と、近似が使える目安の表
発展の箱	§2.3 なぜ放物線の谷では等間隔になるのか（広がる箱で見積もる）・実在の結合はモース型（高い準位ほど間隔が詰まる）、§7.2 HF と CO の MO ダイアグラム（HF の非結合軌道、CO の HOMO と金属への配位）・準位差が大きいと結合は弱くなるのか。試験の範囲外

次回予告：第 10 回 混成軌道とヒュッケル法(1)

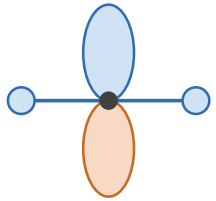
教科書 §7.3、§8.1



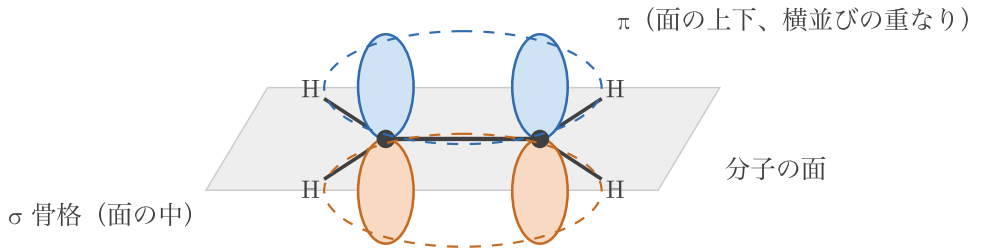
sp^3：正四面体 109.5°



sp^2：平面 120° ＋ p_z 1 本



sp：直線 180° ＋ p 2 本



エチレン：sp^2 の σ 骨格が原子をつなぎ、面に垂直な $2p_z$ が π 結合をつくる

次回の謎

メタンは、なぜ正四面体なのか

- 今日まで原子と原子のあいだで使ってきた「軌道を足し合わせる」を、一つの原子の中で使う

今日の復習 演習 A・B・小テスト第 9 回　**次回の予習** メタン・エチレンの構造式・教科書 §7.3、§8.1

発展：時間があれば・自習用

授業では扱わないことがある枚。試験の範囲外

1. 近似 β^2/Δ は、どこまで使えるか
2. 準位差が大きいと、結合は弱くなるのか
3. HF の電子は、どの軌道にどう入るか
4. HF の極性を、数で確かめる
5. CO は、なぜ炭素の側で金属につくのか
6. $E_{\pm}$ を、解の公式で導く

発展 近似 β^2/Δ は、どこまで使えるか

教科書 §7.2・付録 A.3

$\Delta/\lvert\beta\rvert$	1	2	3	5	10
厳密（$\lvert\beta\rvert$ を 1）	0.62	0.41	0.30	0.19	0.099
近似 β^2/Δ	1.00	0.50	0.33	0.20	0.100
近似のずれ	+62 %	+21 %	+10 %	+4 %	+1 %

- 近似の出どころ：$\sqrt{(\Delta/2)^2+\beta^2}=\dfrac{\Delta}{2}\sqrt{1+\varepsilon}\approx\dfrac{\Delta}{2}\left(1+\dfrac{\varepsilon}{2}\right)$、$\varepsilon=(2\beta/\Delta)^2$
- Δ が $\lvert\beta\rvert$ の 3 倍以上なら、ずれは 1 割ほど以内。近いと大きすぎる
- 量子化学 2 の反応（フロンティア軌道）と置換基でも、同じ式を同じ条件で使う

← 本編 p.20 に戻る

発展 準位差が大きいと、結合は弱くなるのか

教科書 §7.2

- 深い準位 α_{A} から測った下がり β^2/Δ は、Δ が大きいほど**小さい**（混ざりにくい）
- 分裂の幅 $E_- - E_+ = 2\sqrt{(\Delta/2)^2+\beta^2}$ は、Δ とともに**広がる**
- 電子どうしの反発を入れない見積もりで、電子 2 個を中性の原子（A に 1 個、B に 1 個）から数えると、下がりは $(\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}}) - 2E_+ = 2\sqrt{(\Delta/2)^2+\beta^2}$ で、Δ とともに大きい（電子が深い A へ移るぶんが加わる）

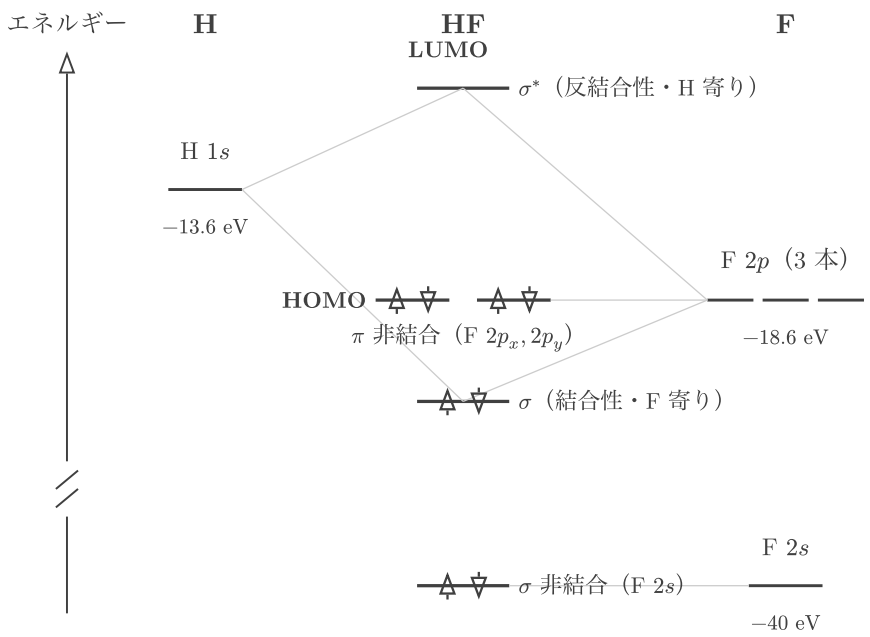
結合	H–H	F–F	H–F
結合を切るエネルギー	4.5 eV	1.6 eV	5.9 eV

- 「混ざりにくい」と「結合が弱い」は別の話。電気陰性度の差のある結合は、むしろ強い

← 本編 p.20 に戻る

発展 HF の電子は、どの軌道にどう入るか

教科書 §7.2 の発展



H $1s$ と F $2p_z$ が σ・σ^* をつくる

- F 2s（−40 eV）は H 1s と 26 eV も離れ、ほとんど混ざらない（β^2/Δ が小さい）
- F $2p_x$、$2p_y$ は軸に垂直で、H $1s$ との重なりが 0 → **非結合**（二重縮重）
- 価電子 8 個：σ に 2、F $2s$ に 2、非結合 $2p$ に 4 → 非共有電子対 3 組（H–F の F の 3 組）
- HOMO は F の非結合 $2p$。LUMO は H 寄りの σ^* → 塩基の電子がここへ入ると H–F が切れ、HF は H^+ を渡す（酸）

← 本編 p.23 に戻る

発展 HF の極性を、数で確かめる

教科書 §7.2

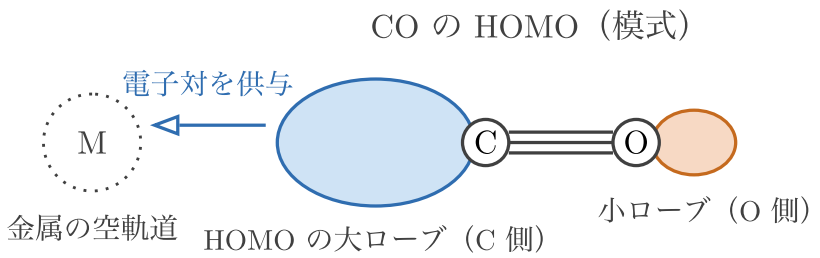
	値
実測の双極子モーメント	1.82 D
結合長	0.917 Å
電子 1 個がまるごと F へ移ったら（$e \times 0.917\ \text{Å}$）	4.40 D

- 比 $1.82/4.40 \approx 0.41 \rightarrow \mathrm{H}^{+0.41}\mathrm{_F}^{-0.41}$ ほど
- 全部（イオン結合、1）でも、半分ずつ（等核、0）でもない：謎 2 の答え「その中間」を数で見る
- $1\ \mathrm{D} = 3.34 \times 10^{-30}\ \mathrm{C\,m}$

← 本編 p.23 に戻る

発展 CO は、なぜ炭素の側で金属につくのか

教科書 §7.2 の発展



- 結合性の σ は、電気陰性度の大きい O の側へ偏る（今日の結論どおり）
- HOMO はその上の σ 型の軌道で、浅い C の側に大きく張り出す（反結合性が浅い側へ偏るのと同じ理屈）
- この C 側のローブが、金属の空の軌道へ電子対を渡す → M–C≡O（金属カルボニル）
- 双極子も予想と逆：0.11 D と小さく、C の側が負

← 本編 p.23 に戻る

発展 $E_{\pm}$ を、解の公式で導く

教科書 §7.2

① 展開　$E^2-(\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}})E+(\alpha_{\mathrm{A}}\alpha_{\mathrm{B}}-\beta^2)=0$（$a=1$、$b=-(\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}})$、$c=\alpha_{\mathrm{A}}\alpha_{\mathrm{B}}-\beta^2$）

② 解の公式　$$E=\frac{-b\mp\sqrt{b^2-4ac}}{2a}=\frac{(\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}})\mp\sqrt{(\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}})^2-4\alpha_{\mathrm{A}}\alpha_{\mathrm{B}}+4\beta^2}}{2}$$

③ 根号の中　$(\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}})^2-4\alpha_{\mathrm{A}}\alpha_{\mathrm{B}}=(\alpha_{\mathrm{A}}-\alpha_{\mathrm{B}})^2$（$(p+q)^2-4pq=(p-q)^2$）→ 中は $(\alpha_{\mathrm{A}}-\alpha_{\mathrm{B}})^2+4\beta^2$

④ 2 で割る　前の項は平均 $\frac{\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}}}{2}$。根号は $\frac{1}{2}\sqrt{X}=\sqrt{X/4}$ なので

$$E_{\pm}=\frac{\alpha_{\mathrm{A}}+\alpha_{\mathrm{B}}}{2}\mp\sqrt{\left(\frac{\alpha_{\mathrm{A}}-\alpha_{\mathrm{B}}}{2}\right)^2+\beta^2}$$

- 等核（$\alpha_{\mathrm{A}}=\alpha_{\mathrm{B}}=\alpha$）：$E_{\pm}=\alpha\mp\sqrt{\beta^2}=\alpha\mp|\beta|$。$\beta<0$ で $|\beta|=-\beta$ → $E_{\pm}=\alpha\pm\beta$（第 6 回で $S=0$ と置いたもの）

← 本編 p.15 に戻る