

Gaussian講習会 2025

日時 2025年2月20日(木) 10:00～18:00

会場 横浜市立大学 金沢八景キャンパス 情報実習室A

主催 量子物理化学研究室

監修 立川 仁典 (教授)

講師 大野 周平 (D2), 高桑 美央 (D1), 藤原 昂 (M1), 他

補佐 中薗 拓斗 (B4), 高嶋 賢志 (B4), 木内 悠翔 (B4), 馬場 悠翔 (B4)

はじめに

アンチパターン集, 目標, 教科書の紹介, 原子単位について

こんな計算はダメだ

- そもそもインプットの構造や手法が間違っている
- アウトプットファイルの読む場所を間違えている（特に自動化する場合は注意）
- 構造最適化していない（IR, NMR, UV-vis, 反応熱などいずれの計算でも必須）
- データベース等の構造をそのまま利用している（基底関数や手法が異なれば最適化し直すべき）
- 対照実験になっていない（基底関数, 手法, 分子構造などを2つ以上変えて比較している）
- 他の手法や基底関数で計算していない（ある手法や基底関数でしか再現性が無い計算）
- 構造最適化の後に虚振動が出ていない（PESの極小点）か確認していない（振動解析もするべき）
- トリプレットの方が安定なのにシングレットで計算している（特に酸素など）
- 発光の計算なのに基底状態で最適化している（発光の場合は励起状態で最適化しなければいけない）
- etc.

→ 気を付けるべき点を網羅して解説する

目標

- 卒業研究に向けてGaussian16およびGaussView6を使いこなせるようになること.
- インプットファイルを読んで何の計算をしているのかわかるようになること.
- ザボゼミ（電子状態理論）の内容の理解を深めること.
- より発展的な計算手法の利点・欠点を理解し, 使い方を学ぶこと
- 最終課題に向けて一通りの計算をこなせるようになること

おことわり

- Gaussian16の全ての機能をカバーするものではない. GaussView6はあくまで補助.
- 理論は概要だけ説明し, 詳細は文献に譲る. ここでは入力と出力に基づいて手法の理解を深める.

理論に関しては下記文献を参照.

A. Szabo, N. S. Ostlund 著 『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』(東京大学出版会, 1987)

独学で使う場合はあまりお勧めしないが, Hartree-Fock法について実装レベルで詳しく解説されている.
弊研究室では全員必修. この講習会では, この教科書で学んだことを実際に計算して理解を深める.

A. Szabo, N. S. Ostlund 著 『新しい量子化学電子構造の理論入門 下』(東京大学出版会, 1988)

相関法に関して解説されている. ゼミでは網羅していないため, この講習会で補完する.

D. A. McQuarrie, J. D. Simon著 『マッカーリ・サイモン物理化学 上 分子論的アプローチ』(東京化学同人, 1999)

Gaussian94の具体的なインプットファイルも含めた解説がある. 分子分光やNMRにも解説がある.

常田 貴夫 『密度汎関数法の基礎』(講談社サイエンティフィク, 2012)

DFTについて参考にした. 研究でDFTを使う場合は一度は読んだ方がよい.

原田義也 『量子化学 下巻』(裳華房, 2007)

経験的・半経験的分子軌道法から相関法, DFTまで解説がある. 化学反応について参考にした.

ソフトウェアや具体的な計算に関しては下記文献を参照.

大野周平 著『計算科学のためのWindowsセットアップ』(2022)

Visual Studio Code, Gaussian16, Gauss View 6, GAMESS, SMASH等のソフトウェアや各種コンパイラのインストール手順を丁寧に解説している. コロナ禍, 後輩の環境構築を直接指導できない中で執筆したもの. 無料で読める.

平尾公彦・監修, 武次徹也・編著『新版 すぐできる 量子化学計算 ビギナーズマニュアル』(2015)

Gaussianの使い方などを丁寧に解説した初心者向けの入門書. 分子モデリングソフトが紹介されている.

J. B. Foresman, A.E. Frisch 著『電子構造論による化学の探究』(2017)

Gaussianの公式マニュアル的な位置づけ. 各研究室で1冊購入してもらうとよい. (第三版が最新)

Gaussian 16 Documentation

Gaussian社の公式ドキュメント. 慣れてきたらこれが一番参考になる.

Gaussian日本語マニュアル

上記の和訳に相当する. 情報量は英語のドキュメントよりやや少ないが, 日本語のため初心者にはおすすめ.

原子単位系を用いる。例えば、水素原子の基底状態のエネルギーは $-0.5 E_h$ であり、「マイナスれいてんごハートリー」と読む。

なお E_h ではなく E_h である。LaTeX では `E_\mathrm{h}` と書く。同様に m_e ではなく m_e である。

数学の定数は π や i のようにローマン体で書く。しかし、 m_e や e などの物理定数はイタリックで書くルールが国際純正応用化学連合 (IUPAC) の勧告である[1]。なお、上にも書いたが m_e の m はイタリックだが e はローマン体である。

記号	読み方	他の単位との関係[2]
m_e	電子質量	$1 m_e = 9.109\,383\,7015(28) \times 10^{-31} \text{ kg}$
e	イー	$1 e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} C$ 定義値のため誤差無し
\hbar	エイチバー	$1.054\,571\,817\dots \times 10^{-34} \text{ J s}$ 定義値を円周率で割るため誤差無しだが桁数が無限大
a_0	ボーア	$1 a_0 = 5.291\,772\,109\,03(80) \times 10^{-11} \text{ m}$ $= 0.05291\,772\,109\,03(80) \text{ nm}$ $= 0.5291\,772\,109\,03(80) \text{ \AA}$
E_h	ハートリー	$1 E_h = 4.359\,744\,722\,2071(85) \times 10^{-18} \text{ J}$ $= 27.211\,386\,245\,988(53) \text{ eV}$

これらの値は“2018年CODATA推奨値”を引用したものである。
Gaussian16の内部で使用されている定数[3]とは異なるため注意。

[1] J. G. Frey, H. L. Strauss 著, (社)日本化学会監修, (独)産業技術総合研究所計量標準総合センター訳『物理化学で用いられる量・単位・記号第3版』(講談社, 2009) p.8

[2] E. Tiesinga, P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, “CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2018”, *Rev. Mod. Phys.*, **93**, 025010 (2021)

[3] Gaussian16で用いられている定数: <https://www.hpc.co.jp/chem/software/gaussian/help/keywords/constants/>

IUPACのGreen Bookを読んだことのあるだろうか？もしないなら、あなたは原子単位の正しい扱いをほぼ確実に理解していないだろう。とはいっても、2022年頃に[Wikipedia](#)にも書いておいたから、このような煽り文句は使えなくなってしまった。Green Bookでは右のような間違いが指摘されている。

原子単位の扱いに関する間違いとは別に、方程式を無次元化した際に $r_e^* = r_e/a_0 = 2.1$ の*を省略して r_e^* と r_e に同じ記号を使うこと（記号の乱用）も混乱の原因である。

3.9.2 和訳版p.117より

「原子単位では e , m_e , \hbar , E_h , a_0 などの定数はすべて 1 である」という表現がよく使われるが、これはまちがった表現である。正しくは「原子単位では電気素量は $1 e$, 電子質量は $1 m_e$, …… である」と表現しなければならない。

…中略…

多くの研究者は原子単位を使う場合に、上の表にある単位記号を使わないで、単に“a.u.”あるいは“au”と書く。しかし、この習慣はやめるべきである。なぜならば、これはあらゆる SI 単位を“SI”，あらゆる CGS 単位を“CGS”と書くようなものだからである。

《例》水素分子の結合距離 r_e と解離エネルギー D_e は、
 $r_e = 2.1 a_0$ および $D_e = 0.16 E_h$ と書くべきであって、
 $r_e = 2.1 \text{ a.u.}$ および $D_e = 0.16 \text{ a.u.}$ と書いてはならない。

基本操作

実際に計算を行いながら理論の理解を深めていくため、まずはGaussian16とGaussView6の最低限度の使い方を身に付けよう！

まず右図を参考に拡張子を表示しよう。
Gaussian16で扱うファイルは主に4種類。

gjfファイル

`sample.gjf`といった名前のファイル。拡張子には`.com`や`.inp`が使われることもある。手法や基底関数、分子構造などを記入したファイル。

logファイル

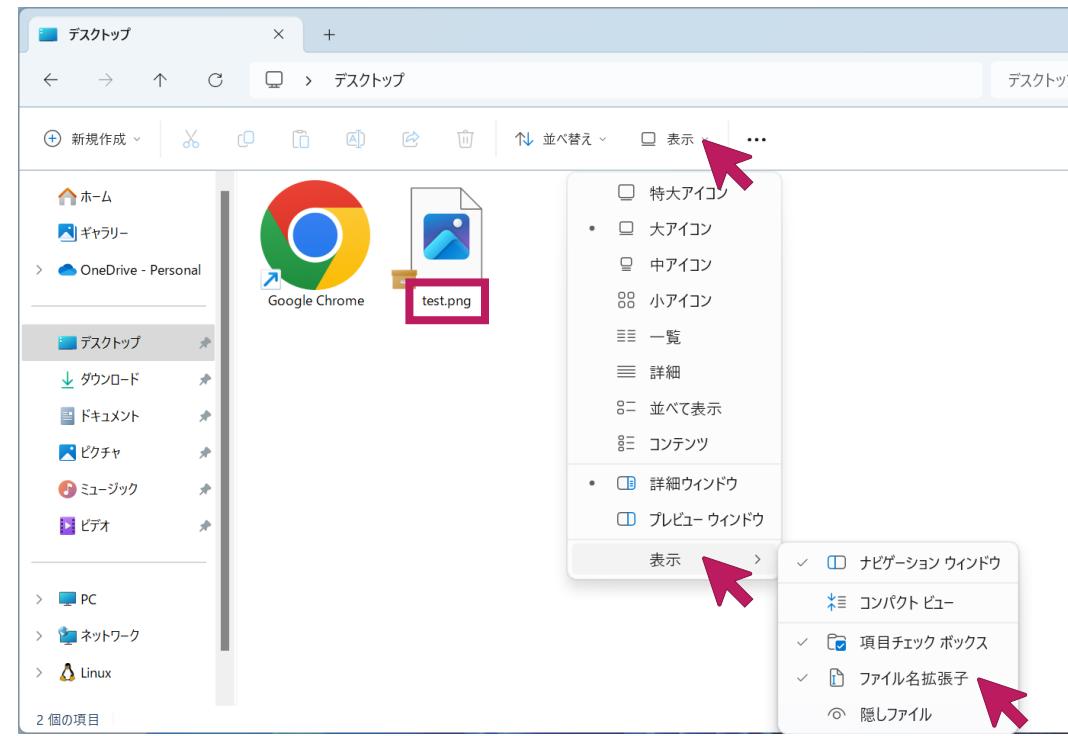
計算結果。`.out`が使われることもある。エネルギーや分子構造などの情報を持っている。

chkファイル

計算結果。軌道を可視化する場合などに必要。例えばスペコン等で計算した`.chk`ファイルはWindowsやMac等で開けない。

fchkファイル

Windows等で開けるように`.chk`ファイルを変換したもの。詳しくは"formchk"で検索。



インプットファイルの書き方

入力

```
%chk=H2.chk
%mem=4GB
%nprocshared=4
# HF/STO-3G Units=AU
```

H2

```
0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.4
```

意味

チェックポイントファイル名. 可視化の時などに必要. 省略可
使用するメモリの容量. 省略可

並列数. 省略可

手法/基底関数 キーワード=(オプション1,オプション2)

空行

タイトルセクション (何を書いても良い. 説明など)

空行

電荷 n重項

元素記号 x座標 y座標 z座標 (標準では Å 単位)

元素記号 x座標 y座標 z座標 (標準では Å 単位)

最後の3行は空行

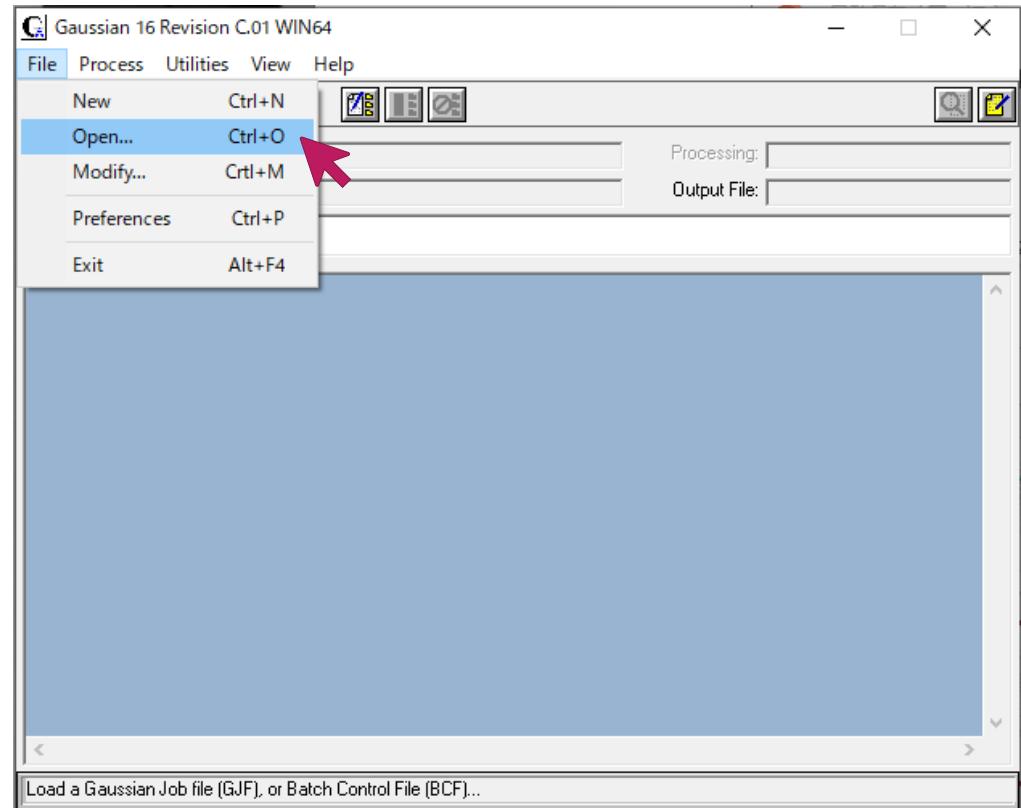
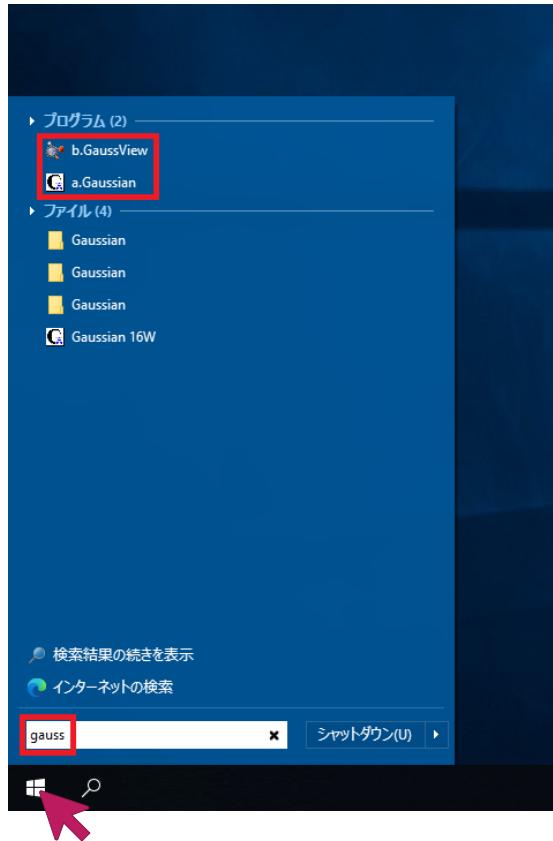
最後の3行は空行

最後の3行は空行

手法・基底関数・ジョブタイプの一覧はホームページ（Gaussian日本語マニュアル）を参照

Gaussian16の起動方法

16



1. 入力ファイルを作成する.
できれば[Visual Studio Code](#)
[のインストール・使用](#)を推奨.

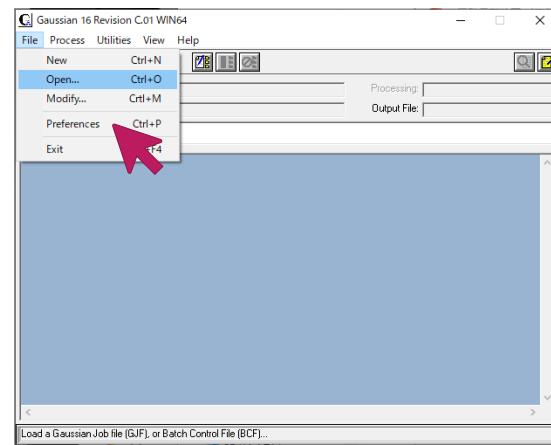
examples/3.2/R=1.40.gjf

```
# HF/STO-3G units=au

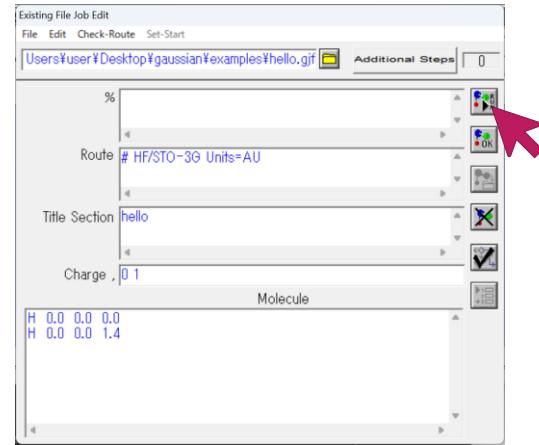
minimal basis

0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.40
```

2. Gaussianを起動する.
3. File > Openをクリック.
4. 入力ファイルを選択.
→ 新しいウィンドウが開く.



5. 特に変更が無ければそのまま右上の[RUN]をクリック.
6. 出力ファイルの保存先を聞かれるので、デスクトップ等を選択して[OK]をクリック.



結果の読み方 (1/2)

```
Normal termination of Gaussian 16 at Sun Feb 26 15:38:17 2023.
```

```
Job cpu time:      0 days 0 hours 0 minutes 2.0 seconds.  
Elapsed time:      0 days 0 hours 0 minutes 0.6 seconds.
```

```
Unable to Open any file for archive entry.  
1|1|UNPC-SURFACE|LAPTOP4|SP|RHF|STO-3G|H2|USER|26-Feb-2023|0||# HF/STO-  
3G Units=AU||hello||0,1|H,0,0.,0.,0.|H,0,0.,0.,0.7408480953||Version=E  
M64W-G16RevC.01|State=1-SGG|HF=-1.1167143|RMSD=0.000e+000|Dipole=0.,0.,0.,0.|  
,0.|Quadrupole=-0.1043149,-0.1043149,0.2086297,0.,0.,0.|
```

```
Cite this work as:  
Gaussian 16, Revision C.01,
```

```
# HF/STO-3G Units=AU
```

Input orientation:					
Center Number	Atomic Number	Atomic Type	Coordinates (Angstroms)		
			X	Y	Z
1	1	0	0.000000	0.000000	0.000000
2	1	0	0.000000	0.000000	0.740848

最終行. 正常終了している.

CPU時間 = CPUの数に依存
経過時間 = 実際にかかった時間

結果まとめ

バージョン情報・引用方法

指定した手法など

入力が正しく反映されているか確認しよう. ボーア a_0 からオングローム \AA に変換されている.

結果の読み方 (2/2)

19

エネルギーは手法によって読むべきところが異なる。
構造最適化の場合は複数あるので最後のものを読む。

```
SCF Done:  E(RHF) =  -1.11671432518    A.U. after    1 cycles
            NFOck=  1  Conv=0.00D+00          -V/T=  1.9298
```

$E_{\text{tot}} = -1.11671432518 E_{\text{h}}$
平衡構造かつ厳密解なら $-V/T = 2$

```
*****
```

Population analysis using the SCF Density.

電子密度解析

```
*****
```

Mulliken charges:

	1
1	H 0.00000
2	H 0.00000

Sum of Mulliken charges = 0.00000

Mullikenの密度解析は標準で出力。

Dipole moment (field-independent basis, Debye):

X=	0.0000	Y=	0.0000	Z=
0.0000	Tot=	0.0000		

Quadrupole moment (field-independent basis, Debye-Ang):

XX=	-1.8477	YY=	-1.8477	ZZ=
-1.4267				
XY=	0.0000	XZ=	0.0000	YZ=
0.0000				

双極子や四極子モーメントも標準。

エネルギーの意味

HF/STO-3Gによる水素分子H₂のエネルギー

$$E_{\text{tot}}(\text{H}_2) = -1.116\ 714\ 325\ 18\ E_{\text{h}}$$

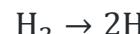
という値から何を感じ取れるだろうか？

水素原子Hの電子エネルギーは厳密解では

$$E_{\text{elec}}(\text{H}) = -0.5\ E_{\text{h}}$$

という値を取ることを量子力学の講義で習う。

つまりH₂が壊れて、2つのHにバラバラになったとき



でのエネルギーは水素原子2個分であるから、

$$2 \times E_{\text{elec}}(\text{H}) = -1.0\ E_{\text{h}}$$

という値となる。H₂は2Hよりも安定であろうから、-1.0より低い値は妥当であると考えられるのである。

ただし、注意点が2つある。

まず、同じ基底関数での値を比較すべきである。

$E_{\text{elec}}(\text{H}) = -0.5\ E_{\text{h}}$ という値は厳密解であって、実際にHF/STO-3Gで計算した値は $E_{\text{elec}} = -0.466\ 581\ 850\ E_{\text{h}}$ である。つまり、-1.0より低くなくても-0.93...以下なら結合している可能性がある。いずれにせよ、エネルギーに関しては複数の計算結果の「差」をもって議論することになるから、基底関数や手法は揃える必要がある。

次に、全エネルギー E_{tot} の意味に注意せよ。後に説明するが、ハミルトニアンの5種類の項、電子の運動、核の運動、電子間反発、核間反発、核-電子間引力のうち、核の運動を無視して全エネルギー E_{tot} を定義することがある。正確には、核の運動を考慮しなければ結合するか否かを判断することはできない。

演習：インプットファイルの書き換え

examples/3.2/R=1.40.gjf

```
# HF/STO-3G units=au
          原子単位で指定
minimal basis

0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.40
          ここを書き換える
```

メモ帳やエディタ等でCtrl + Fで検索機能を起動し, “SCF Done”を検索する. またはPowerShell上で下記のコマンドでも検索できる.

```
grep "SCF Done" *.out
```

HF/STO-3GによるH₂の一点計算：エネルギー $E_{\text{HF}}/E_{\text{h}}$

核間距離 R/a_0	ザボ 表3.2 [1]	Gaussian16
1.32	-1.117 31	-1.117 308 000 91
1.34	-1.117 50	-1.117 495 784 02
1.36	-1.117 45	-1.117 449 932 04
1.38	-1.117 19	-1.117 184 921 88
1.40	-1.116 72	-1.116 714 325 18

通常は Å で核の座標を指定するが, 教科書との比較のため a_0 を使用した. これをグラフにすればポテンシャルエネルギー曲線 (PEC) が描ける. 通常は Opt や Freq を指定して, エネルギーが低くなる点を自動的に探す. その場合は `# HF/STO-3G Opt Freq` のように指定する. 上の表から, 最小になる点は $R = 1.34 a_0$ 付近であろうと予想される.

examples/hello/opt.gjf

```
# HF/STO-3G opt
          書き換えた
Opt example

0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 0.7
          近い値ならOK
          さっきとは違い
          Åで指定した
```

構造最適化では構造を変えながらエネルギーが低くなる点を探索しているため, “SCF Done”がアウトプット中に複数ある. 収束判定が全てYESであることを確認する.

“SCF Done”で検索 → 何度も計算してPECの極値点を探索している.

```
SCF Done: E(RHF) = -1.11671432518    A.U. after    1 cycles
SCF Done: E(RHF) = -1.11740644480    A.U. after    1 cycles
SCF Done: E(RHF) = -1.11750588510    A.U. after    1 cycles
SCF Done: E(RHF) = -1.11750588510    A.U. after    1 cycles
```

“Converged?”で検索 → 4つ全てYESなら収束している.

Item	Value	Threshold	Converged?
Maximum Force	0.000008	0.000450	YES
RMS Force	0.000008	0.000300	YES
Maximum Displacement	0.000007	0.001800	YES
RMS Displacement	0.000010	0.001200	YES

“Optimized Parameters”で検索 → $0.7122 \text{ \AA} = 1.346 a_0$ に収束.

! Name	Definition	Value	Derivative Info.
! R1	R(1,2)	0.7122	-DE/DX = 0.0

examples/hello/freq.gjf

HF/STO-3G opt freq

書き換えた

Opt+Freq example

0 1

H 0.0 0.0 0.0

H 0.0 0.0 0.7

近い値ならOK
さっさとは違い
Åで指定した

FreqはOptの後に行うべき計算なのでOptと併せて指定する。まずは先ほどと同様にOpt計算が収束しているか確認する。IRスペクトルやエンタルピー, Gibbsエネルギーなどが計算できる。

“NImag”で検索 → 0なら虚振動が出ていないので平衡構造に収束。

|NImag=0| |0.00000624,0.,0.00000624,0.,0.,0.57290747,0.00000624,0.,0.,...

“Harmonic frequencies”で検索 → 振動数やIR強度が確認できる。

```

Frequencies -- 5481.1154
Red. masses -- 1.0078
Frc consts -- 17.8391
IR Inten -- 0.0000
Raman Activ -- 20.6323

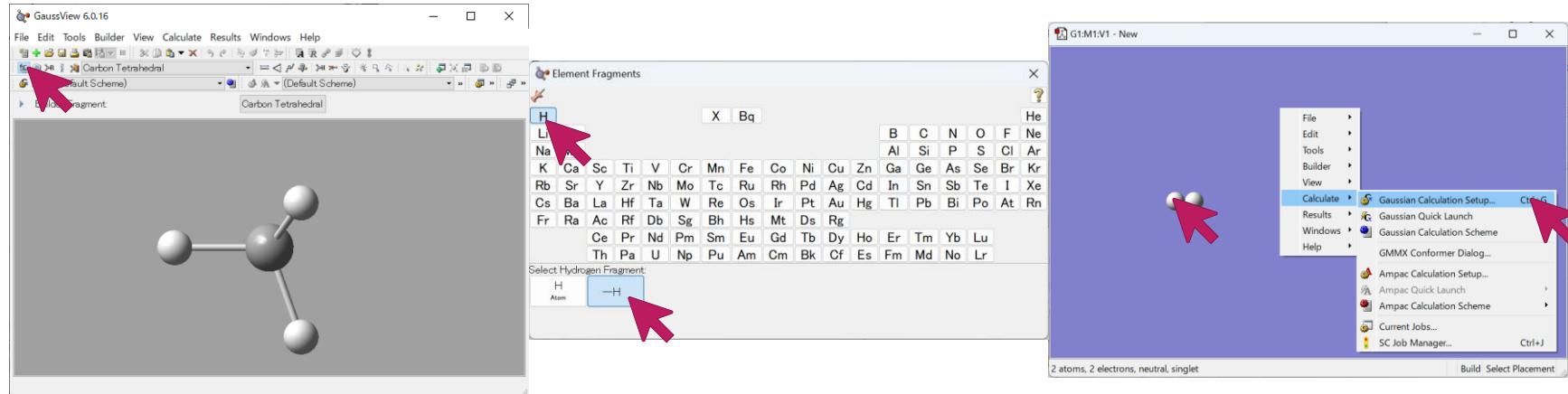
```

“Thermochemistry”で検索 → エンタルピーなどの計算に使える。

Zero-point correction=	0.012487
(Hartree/Particle)	
Thermal correction to Energy=	0.014847
Thermal correction to Enthalpy=	0.015792
Thermal correction to Gibbs Free Energy=	0.001079
Sum of electronic and zero-point Energies=	-1.105019
Sum of electronic and thermal Energies=	-1.102659
Sum of electronic and thermal Enthalpies=	-1.101714
Sum of electronic and thermal Free Energies=	-1.116427

GaussView6の使い方

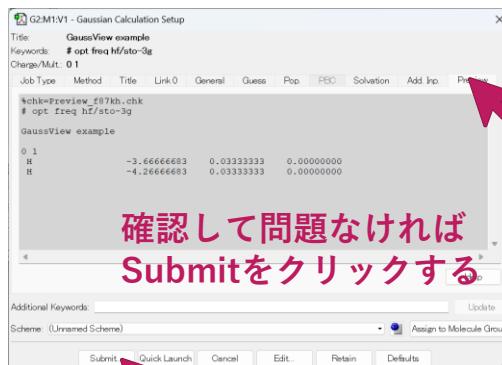
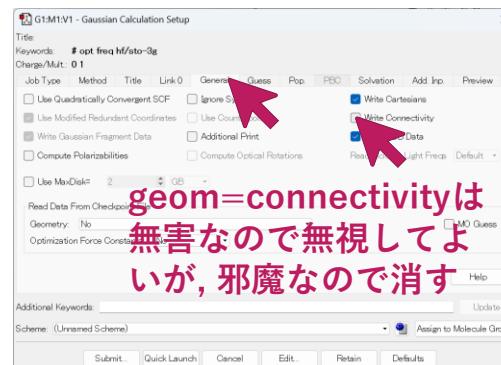
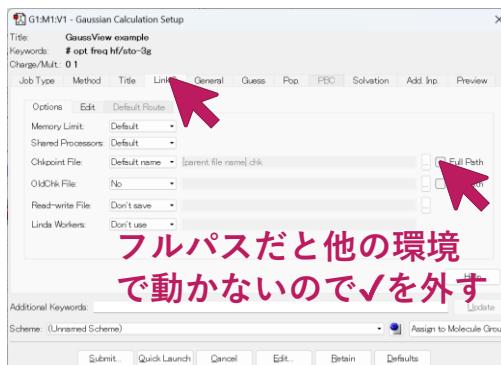
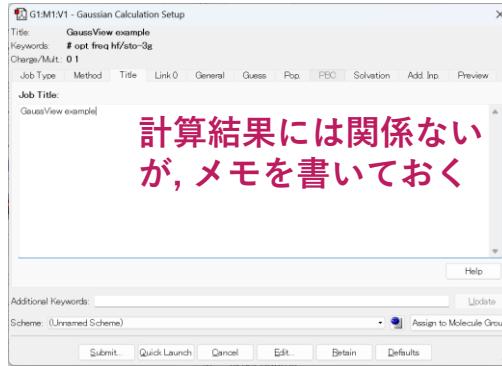
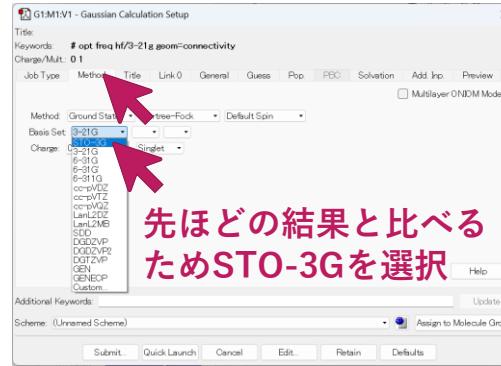
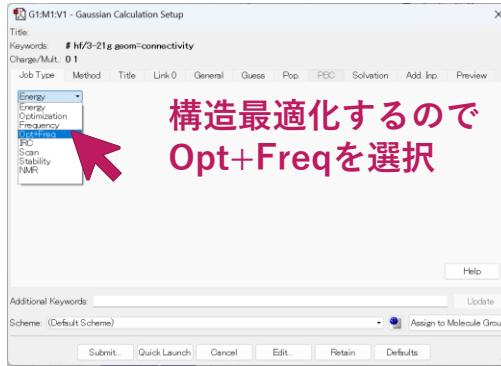
24



最初にメタンCH₄が表示されているが、この画面は絵の具を出すパレットのようなものである。実際に絵を描くキャンバスは紫色の画面であり、ここに計算対象の分子を作っていく。まずは水素分子H₂を置いてみよう！右クリック > Calculate > Gaussian Calculation Setup から計算をセットアップしていく。

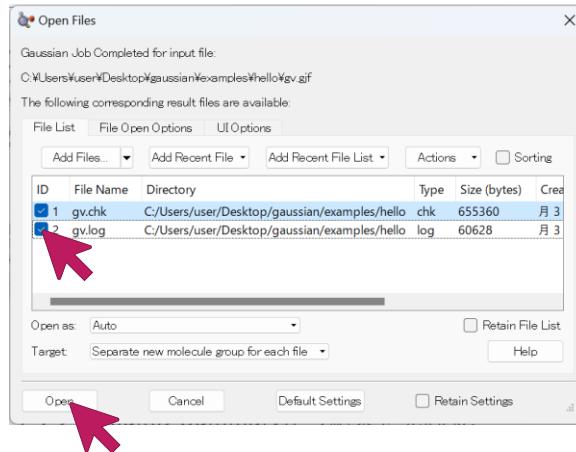
https://www.comp.tmu.ac.jp/minoria/3nen_jikken/how_to_use_gaussian_gaussview.pdf
核間距離は右クリック>Builder>Modify Bondをクリックして2つのHをダブルクリックすれば調整できる。
H₂の場合は初期構造に依存しないが、多原子分子の場合は直線型や平面型などよりも少し曲げておくとよい。

計算のセットアップ

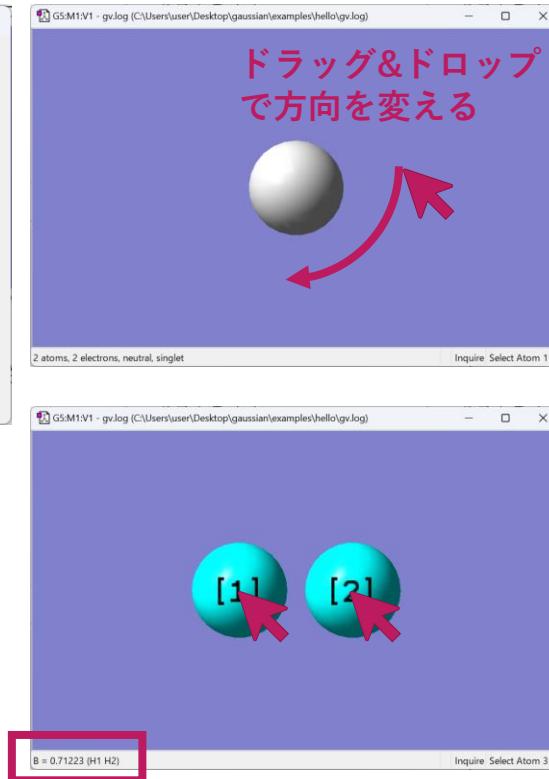


結果の見方

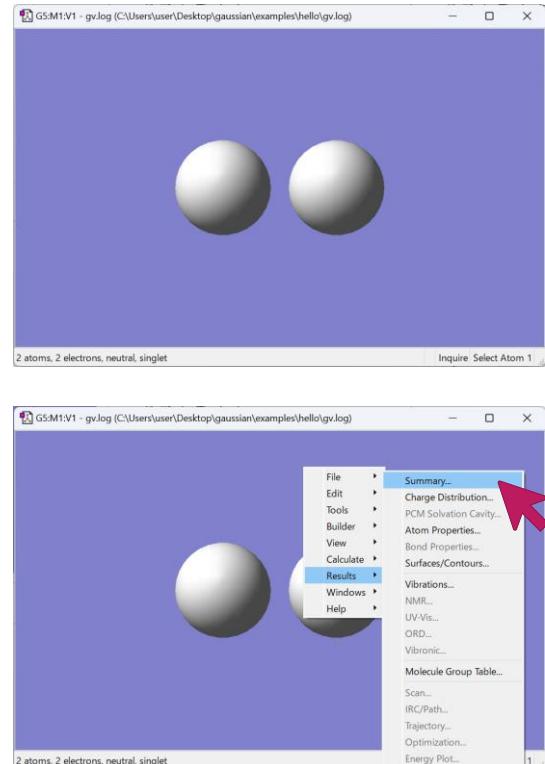
26



計算が終わるとlogファイルとchkファイルを選ぶ画面が表示されるので両方チェックを付けて読み込む。まずlogファイルの方を開く。



原子を選択すれば距離がわかる



右クリックから詳細を確認する

chkファイルでは軌道のデータが含まれているため軌道を可視化できるが、熱力学量や構造最適化の収束判定などが含まれていないので、まずlogファイルを確認する。

確認すべきところ

27

Title Card Required	
C:\Users\user\Desktop\gaussian\example\	
File Type	.log
Calculation Type	FREQ
Calculation Method	RHF
Basis Set	STO-3G
Charge	0
Spin	Singlet
Solvation	None
E(RHF)	-1.117506 Hartree
RMS Gradient Norm 0.000000 Hartree/Bohr	
Imaginary Freq	0
Dipole Moment	0.000000 Debye
Polarizability (α)	0.962333 a.u.
Point Group	D ⁺ H
Job cpu time:	0 days 0 hours 0 minute...

虚振動が出ていないか確認

Imaginary Freq	0
Temperature	298.150 Kelvin
Pressure	1.00000 atm
Frequencies scaled by	1.0000
Electronic Energy (EE)	-1.117506 Hartree
Zero-point Energy Correction	0.012487 Hartree
Thermal Correction to Energy	0.014848 Hartree
Thermal Correction to Enthalpy	0.015792 Hartree
Thermal Correction to Free Energy	0.001079 Hartree
EE + Zero-point Energy	-1.105019 Hartree
EE + Thermal Energy Correction	-1.102658 Hartree
EE + Thermal Enthalpy Correction	-1.101714 Hartree
EE + Thermal Free Energy Correction	-1.116427 Hartree
E (Thermal)	9.317 kcal/mol
Heat Capacity (C _v)	4.968 cal/mol- K
Entropy (S)	30.965 cal/mol- K

色々な熱力学量が得られる*

Step number	1
Maximum force	0.000000 Converged
RMS force	0.000000 Converged
Maximum displacement	0.000000 Converged
RMS displacement	0.000000 Converged
Predicted energy change	-3.53e-14 Hartree

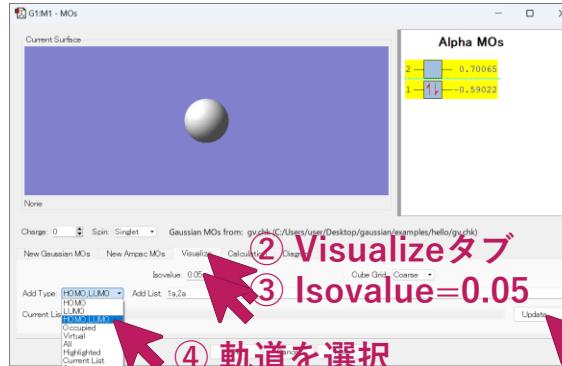
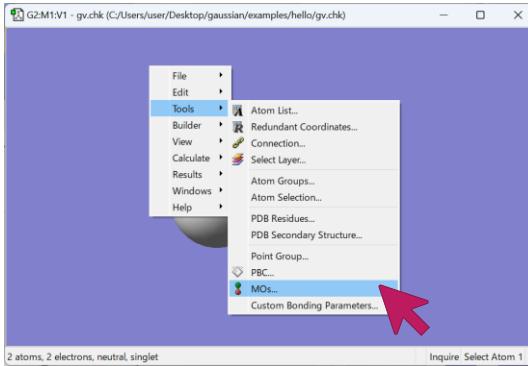
収束判定を満たしたか確認*

* 右クリック > Results > Summary に Thermo や Opt のタブが表示されない場合、chk ファイルではなく log ファイルか out ファイルを開いていることを確認しよう。

軌道の可視化

28

① Chkファイルを開く



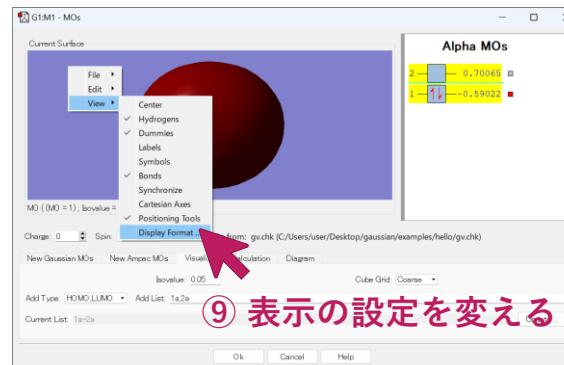
② Visualizeタブ

③ Isovalue=0.05

④ 軌道を選択

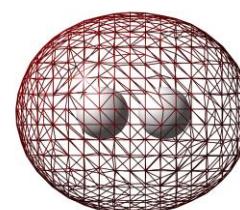
⑤ Updateをクリック

⑥ Positioning Toolsを起動



⑨ 表示の設定を変える

⑩ File> Save Image File
から背景色を変更し,
PNGで保存する。



⑦ 向きを調整する

⑧ 閉じる

演習：結合次数

29

examples/bond内のファイルを用いて計算を実行し,
 $C_2H_6 \cdot C_2H_4 \cdot C_2H_2$ の炭素間距離と分子軌道を比較せ
よ. 結合次数の伝統的な定義は次式で与えられる[1].

$$\text{結合次数} = \frac{N_B - N_{AB}}{2}$$

ただし, N_B は結合性軌道に入った電子の数, N_{AB} は反
結合性軌道に入った電子の数である.

chkファイルをGaussViewで開き, 右クリック
>Tools>MOs>Gaussian Mos form>Add Type:
Occupied>Updateで占有軌道をまとめて描写できる.

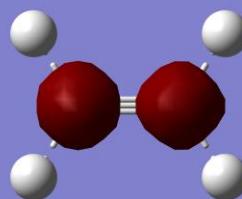
正確な数え方ではないが, ここではC-C間の中央に
逆位相の節があるものを反結合性軌道, そうでない
ものを結合性軌道と数えてよい. また, サンプルの
ファイルの計算レベルはHF/6-311++G(d,p)である.

炭素間距離	計算値* / Å	実験値[2] / Å
C_2H_6	1.5407	1.5360
C_2H_4	計算してみよう	1.3390
C_2H_2	1.1834	1.2026

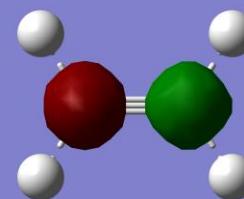
	N_B	N_{AB}	結合次数
C_2H_6	10	8	1
C_2H_4	10	計算してみよう	2
C_2H_2	10	4	3

C₂H₄の例

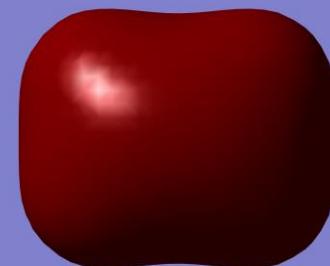
結合性



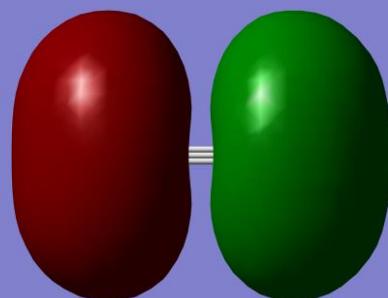
反結合性



結合性



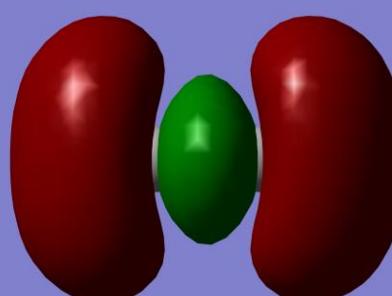
反結合性



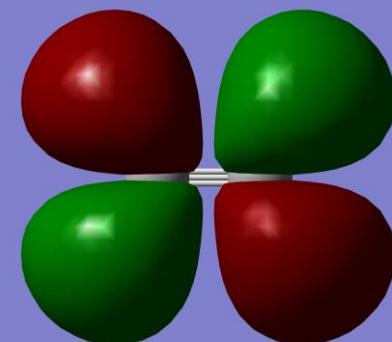
結合性



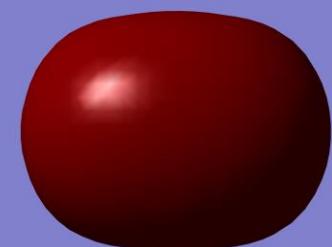
結合性



反結合性



結合性

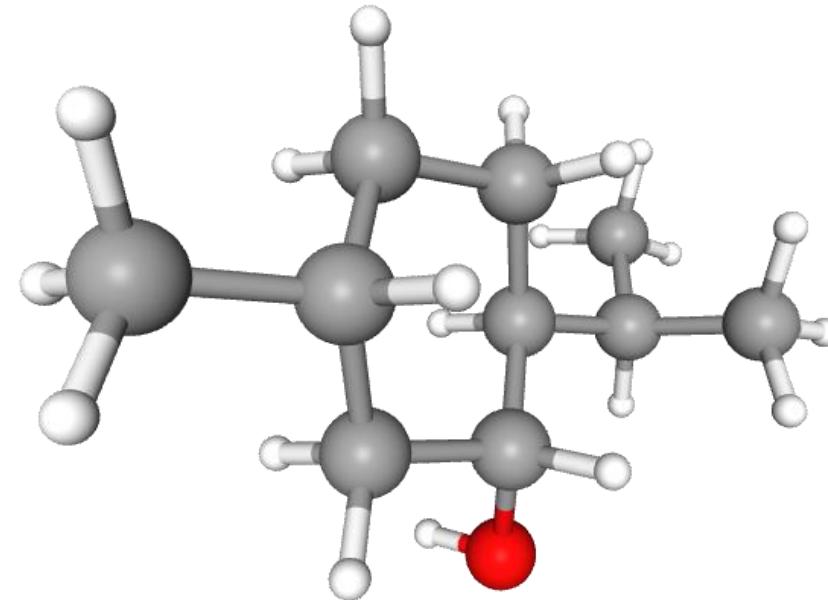
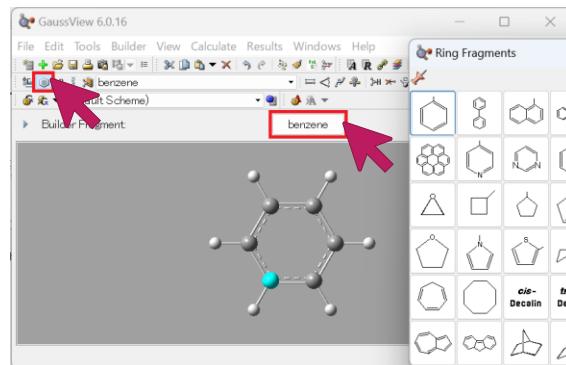


$$\text{結合次数} = \frac{10 - 6}{2} = 2$$

演習：分子モデリング

DL-メントールを作りPM6で
Opt+Freqを計算しなさい。

- ドラッグで角度を変える
- Ctrl + ドラッグで拡大
- Shift + ドラッグで平行移動



結果 (1/2)

32

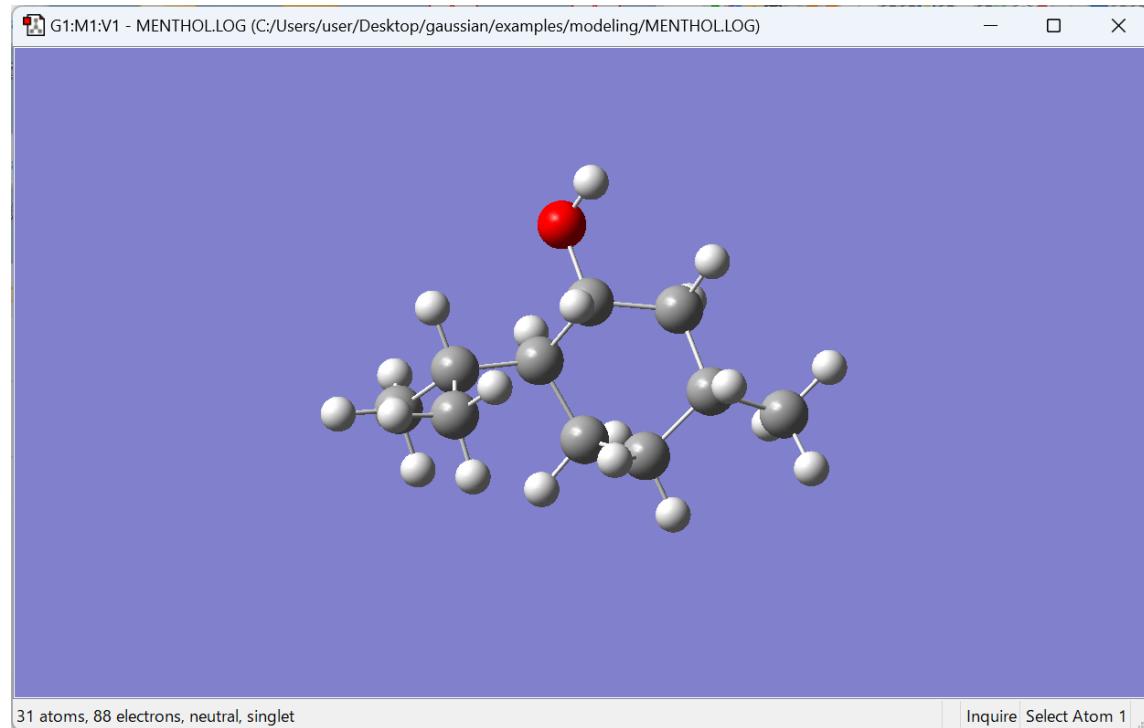
収束判定も確認せよ

G1:M1:V1 - Gaussian Calculation Summary

Overview Thermo Opt

Title Card Required		
C:/Users/user/Desktop/gaussian/examples/...		
File Type	.log	
Calculation Type	FREQ	
Calculation Method	RPM6	
Basis Set	ZDO	
Charge	0	
Spin	Singlet	
Solvation	None	
E(RPM6)	-0.142194	Hartree
RMS Gradient Norm	0.000014	Hartree/Bohr
Imaginary Freq	0	
Dipole Moment	1.910057	Debye
Polarizability (α)	70.032667	a.u.
Point Group	C1	
Job cpu time:	0 days 0 hours 0 minute...	

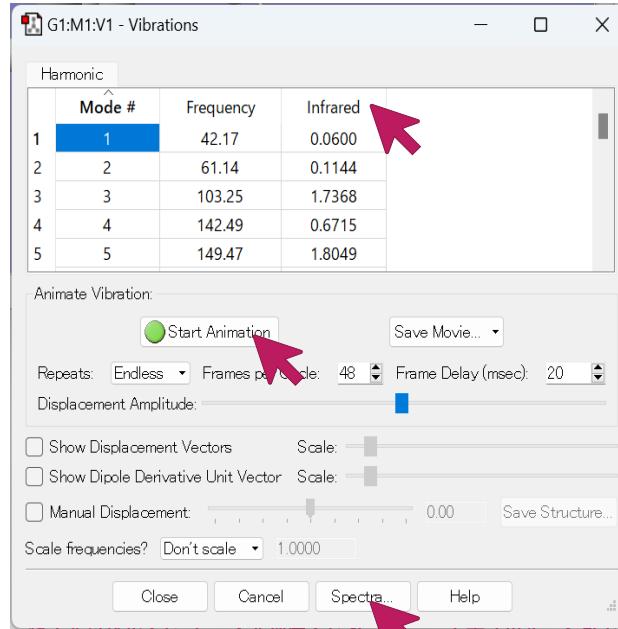
Ok File Help



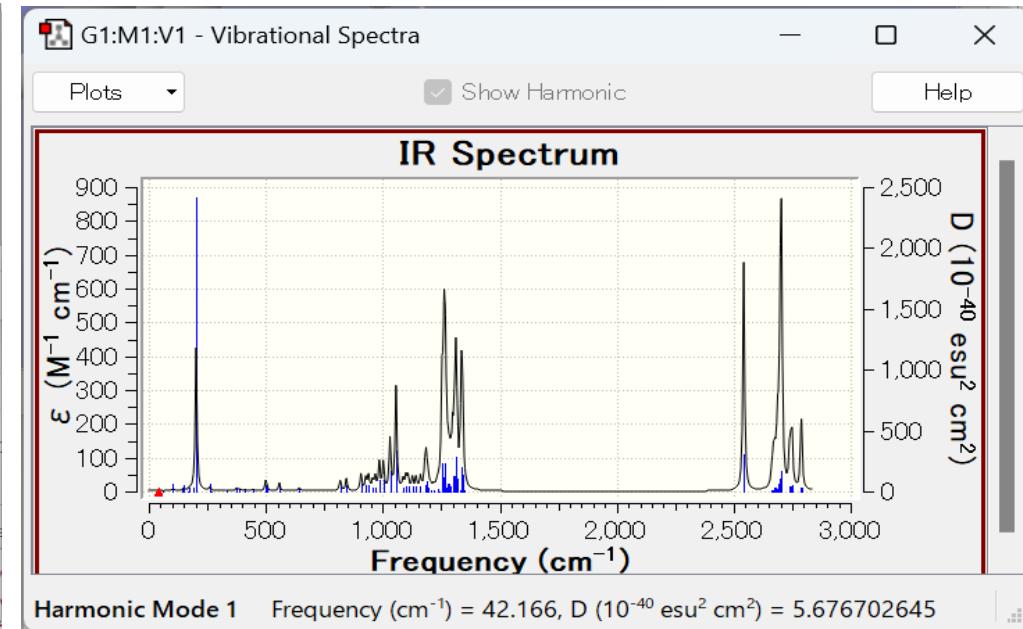
虚振動が出ていない
極小点には到達した

結果 (2/2)

33



振動数や振動子強度でソートできる。
●Start Animationをクリックすると振動の様子を可視化でき、ピークを帰属できる。



スペクトルをクリックしてピークを選択しよう。右クリック>Propertiesから軸の向きや色合いなどの設定を変えることもできる。数値データとして書き出すこともできる。実験値と比較してみよう。

基底関数データベース

- [Basis Set Exchange](#)

計算値・実験値データベース

- [PubChem](#) - 各種情報
- [The PubChemQC Project](#) - 最適化構造
- [Computational Chemistry Comparison and Benchmark DataBase](#) - 各種物性, 計算値&実験値
- [Benchmark Energy & Geometry Database](#) - エネルギー&構造
- [OQMD](#) - DFTによるエネルギー&構造
- [Chem Tube 3D](#) - 遷移構造
- [CHESHIRE](#) - NMRスペクトル
- [COD](#) - 結晶構造データベース

演習：PubChem

35

The image shows two screenshots of the PubChem website. The left screenshot shows the search results for 'menthol' on the homepage. The search bar contains 'menthol' and the results table includes 'MENTHOL' and 'Menthol'. A green arrow points to the search bar, and a red box highlights the search term 'menthol'. The right screenshot shows the detailed page for 'Menthol | C10H20O - PubChem'. It displays the 3D conformer of menthol and a download dialog box. The download dialog box has four buttons: 'SDF' (highlighted with a red box), 'Save' (highlighted with a green box), 'JSON', 'XML', and 'ASNT'. The right sidebar contains a table of contents with 14 sections, and the URL is https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/rest/pug/compound/CID/1254/record/SDF/record_type=3d&response_type=save&response_basename=Conformer3D_CID_1254.

SDFファイルをGaussViewで開いて同じ計算を行い、自分で作った構造とエネルギーを比べてみよう！

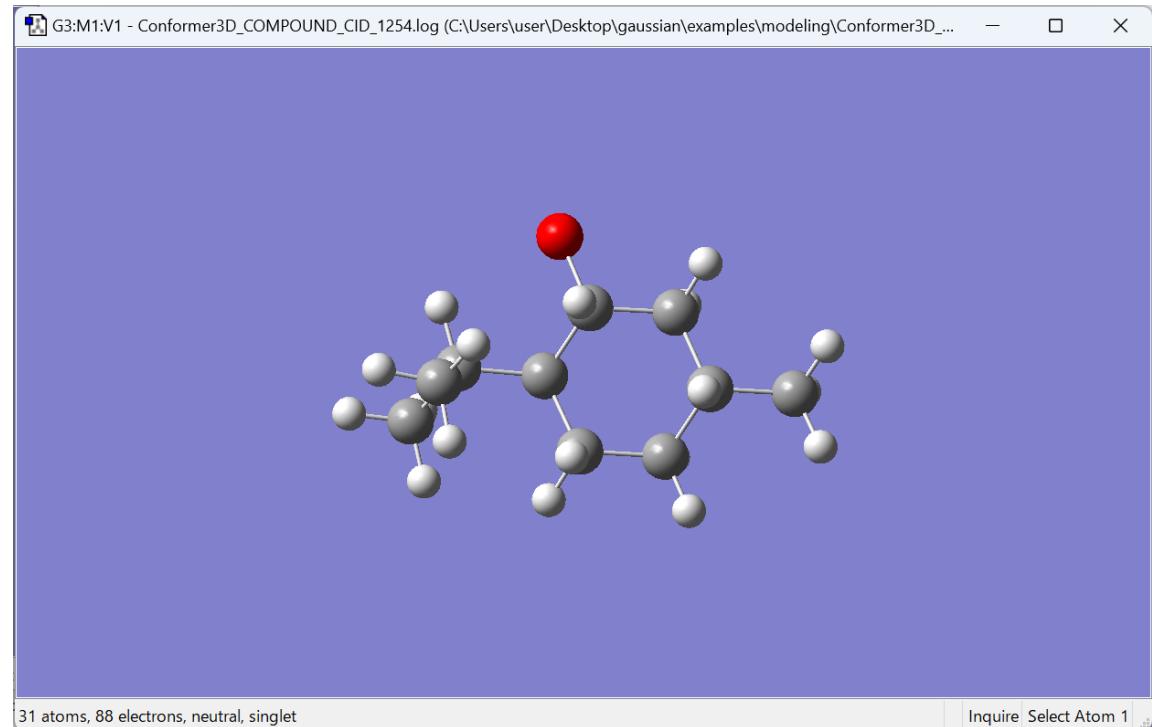
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1254>

G3:M1:V1 - Gaussian Calculation Summary

Overview Thermo Opt

1254	
C:\Users\user\Desktop\gaussian\examples\Conformer3D\CID_1254.log	
File Type	.log
Calculation Type	FREQ
Calculation Method	RPM6
Basis Set	ZDO
Charge	0
Spin	Singlet
Solvation	None
E(RPM6)	-0.150799 Hartree
RMS Gradient Norm	0.000009 Hartree/Bohr
Imaginary Freq	0
Dipole Moment	2.175647 Debye
Polarizability (α)	70.691333 a.u.
Point Group	C1
Job cpu time:	0 days 0 hours 0 minute...

Ok File Help

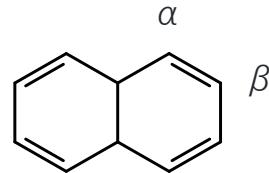


より安定な極小点に到達

演習：フロンティア軌道理論

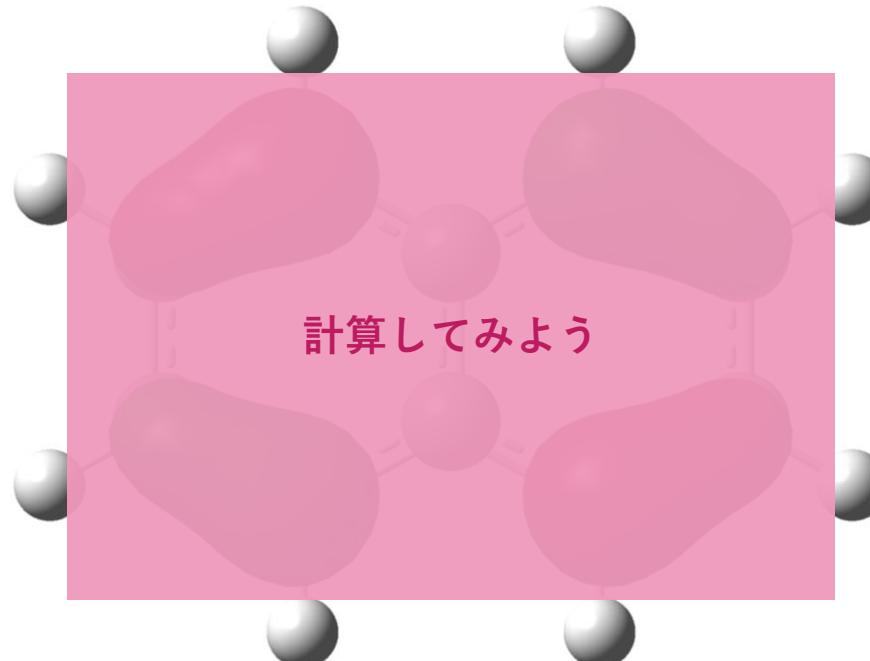
37

ナフタレン $C_{10}H_8$ の HOMO を可視化し, α 位と β 位の値を比較せよ.



$|Isovalue|$ は $MO=0.05$ とせよ.

ナフタレンの求電子置換反応では β 位よりも α 位の方が反応性が高い. 福井謙一博士はこれをフロンティア軌道 (HOMO と LUMO) の密度から説明した. これらの功績で1958年にノーベル化学賞を受賞している. 詳細は下記文献に譲る.



examples/frontier/naphthalene.gif を参照.

稻垣 都士, 池田 博隆, 化学と教育, 67, 28 (2019) https://doi.org/10.20665/kakyoshi.67.1_28

The Nobel Prize in Chemistry 1981, Kenichi Fukui Nobel Lecture <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1981/fukui/lecture/>

Hartree-Fock法

HF法の入力を一言で言えばハミルトニアンと基底関数であり, 近似的なエネルギーと固有関数を出力する. このハミルトニアンを決めるために核の座標と電荷 (原子番号) が必要なのである.

HF法に限らず、電子状態理論における分子の全ハミルトニアン(2.2)は共通であり

- ・ 質点、点電荷とみなされた核、電子のクーロン相互作用のみを考える（質点*、クーロン相互作用）
- ・ 非相対論的な運動エネルギーを扱う（非相対論**）

というモデルの下で定式化される。

$$\hat{H} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^N \sum_{A=1}^M \frac{Z_A}{r_{iA}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{1}{r_{ij}} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{2M_A} \nabla_A^2 + \sum_{A=1}^M \sum_{B>A}^M \frac{Z_A Z_B}{R_{AB}}$$

電子の運動
電子-核間引力
電子間反発
核の運動
核間反発

演習：水素原子、水素分子イオン、ヘリウム原子、水素分子の全ハミルトニアンを書き下しなさい。

上記に加え、次の近似によって電子のみを考えていく。

- ・ 電子と核の運動を分け、電子の運動のみを考える（Born-Oppenheimer近似）

* 「量子力学では電子は雲のように分布している」と言われるが、これは電子が大きくなっているという意味ではなく、質点・点電荷である電子の存在する位置がただ1点には決まらず、その位置を決める波動関数（および確率密度関数として解釈されるその絶対値の2乗）が空間的な広がりを持っているという意味である。

** 相対論的な運動エネルギー $\sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4} = mc^2 + \frac{\mathbf{p}^2}{2m} - \frac{\mathbf{p}^4}{8m^3 c^2} + \dots$ のうち、我々は \mathbf{p}^2 の項のみを扱っている。相対論補正として摂動的に \mathbf{p}^4 の項を取り入れることがある。

A. ザボ、N.S. オストランド著、大野公男、阪井健男、望月祐志訳。『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』、東京大学出版会、1987. p.43 (2.2)

電子と核を分離して扱う

(2.1)

$$\hat{H}\Phi = E\Phi \quad \leftarrow \text{本来の方程式}$$

(2.11)

$$\hat{H}_{\text{elec}}\Phi_{\text{elec}} = E_{\text{elec}}\Phi_{\text{elec}} \quad \leftarrow \text{HF, DFT等で解く}$$

(2.16)

$$\hat{H}_{\text{nucl}}\Phi_{\text{nucl}} = E\Phi_{\text{nucl}} \quad \leftarrow \text{freq, VSCF等で解く}$$

(2.10) 分子の全ハミルトニアン

$$\hat{H} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^N \sum_{A=1}^M \frac{Z_A}{r_{iA}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{1}{r_{ij}} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{2M_A} \nabla_A^2 + \sum_{A=1}^M \sum_{B>A}^M \frac{Z_A Z_B}{R_{AB}}$$

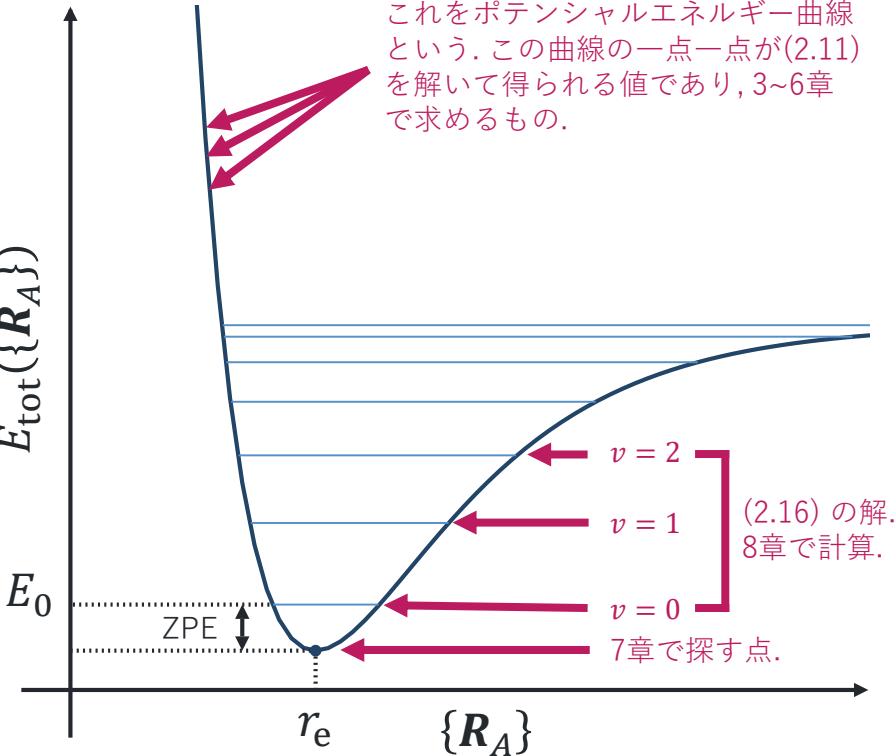
(2.10) 電子ハミルトニアン

$$\hat{H}_{\text{elec}} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \nabla_i^2 - \sum_{i=1}^N \sum_{A=1}^M \frac{Z_A}{r_{iA}} + \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{1}{r_{ij}} \quad \text{(2.11)を解いて } E_{\text{elec}}(\{\mathbf{R}_A\}) \text{ を得る}$$

(2.15) 核ハミルトニアン

$$\hat{H}_{\text{nuc}} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{2M_A} \nabla_A^2 + \sum_{A=1}^M \sum_{B>A}^M \frac{Z_A Z_B}{R_{AB}} + E_{\text{elec}}(\{\mathbf{R}_A\})$$

$$=: E_{\text{tot}}(\{\mathbf{R}_A\})$$



HF法では、さらに次の近似*を用いる。

- Pauliの排他原理を満足する試行波動関数としてSlater行列式(2.37)を用いる (Hartree-Fock近似)

$$\Psi(x_1, x_2, \dots, x_N) = (N!)^{-1/2} \begin{vmatrix} \chi_i(x_1) & \chi_j(x_1) & \cdots & \chi_k(x_1) \\ \chi_i(x_2) & \chi_j(x_2) & \cdots & \chi_k(x_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi_i(x_N) & \chi_j(x_N) & \cdots & \chi_k(x_N) \end{vmatrix}$$

そして分子軌道の空間部分 $\psi_j(\mathbf{r})$ は基底関数 $\phi_\mu(\mathbf{r})$ の線形結合で作られる:

$$\chi_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} \psi_j(\mathbf{r})\alpha(\omega) \\ \psi_j(\mathbf{r})\beta(\omega), \end{cases} \quad \psi_i = \sum_{\mu=1}^K C_{\mu i} \phi_\mu$$

この展開係数 $C_{\mu i}$ を決める方法 (付録を参照) は既にあるので、ユーザーとしてはどのような基底関数 $\phi_\mu(\mathbf{r})$ を使えば良いかを知りたい。基底関数を増やすほどに正確さは増すだろうが、計算コストも増える。何を基準に基底関数を選ぶべきか？ そもそも、どのような基底関数があるのか？

基底関数を変えて計算してみよう.

STO-3Gを書き換えればよい.

入力ファイルの例

```
# HF/STO-3G Units=AU

H2

0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.4
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
```

なぜ同じ値なのか
考えてみよう！

基底関数の数を
比べてみよう！



	HF/	E(RHF)
STO-3G		-1.116 714 325
3-21G		-1.122 933 366
4-31G		-1.126 742 701
6-31G		-1.126 742 701
6-31G(d)		-1.126 742 701
6-311G		-1.127 977 947
6-31G(d,p)		-1.131 284 347
6-31G(3df,3pd)		-1.132 144 451
6-311G(3df,3pd)		-1.133 036 542
HF極限		-1.133 629 573

基底関数を変えて計算してみよう.

cc-pVDZを書き換えればよい.

入力ファイルの例

```
# HF/cc-pVDZ Units=AU

H2

0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.4
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
```

Pople系と基底関数の数や指数を比べてみよう！

6-31G(d,p) →

6-311G(3df,3pd) →

2つ選んで計算してみよう

HF/	E(RHF)
cc-pVDZ	-1.128 709 449
cc-pVTZ	-1.132 960 525
cc-pVQZ	-1.133 459 034
cc-pV5Z	-1.133 608 187
cc-pV6Z	-1.133 625 506
aug-cc-pVDZ	-1.128 787 753
aug-cc-pVTZ	-1.133 026 847
aug-cc-pVQZ	-1.133 473 021
aug-cc-pV5Z	-1.133 610 655
aug-cc-pV6Z	-1.133 626 526
HF極限	-1.133 629 573

いろいろな基底関数

基底関数	特徴	同じ										同じ	
		H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Ar	Kr
STO-3G	最小基底系. 練習用. 3つの原始Gauss基底関数を短縮した1つの短縮Gauss基底を用いる.	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	9	18
3-21G	スプリットバレンス基底系. 内殻軌道に3個, 原子価軌道の内側に2個と外側に1個の原始Gauss基底.	2	2	9	9	9	9	9	9	9	9	13	23
4-31G	スプリットバレンス基底系. 内殻軌道に4個, 原子価軌道の内側に3個と外側に1個の原始Gauss基底.	2	2	9	9	9	9	9	9	9	9	-	-
6-31G	スプリットバレンス基底系. 内殻軌道に6個, 原子価軌道の内側に3個と外側に1個の原始Gauss基底.	2	2	9	9	9	9	9	9	9	9	13	24
6-31G(d)	6-31GをベースとしてLi以降に分極関数 (p型やd型などの関数) を足したもの. よく使われる.	2	2	15	15	15	15	15	15	15	15	19	30
6-31G(d,p)	HとHeにもp型の分極関数を足したもの. 水素が重要なとき使う. Hでは2s1pなので $2 \times 1 + 1 \times 3 = 5$.	5	5	15	15	15	15	15	15	15	15	19	30
6-31G(3df,3pd)	6-31G(d,p)をベースとしてLi以降にはd型を増やし, f型も足す. HとHeにもp型を増やしてd型も足す.	17	17	34	34	34	34	34	34	34	34	38	49
6-31+G	6-31GをベースにLi以降に分散関数 (括がった関数) を足す. アニオンや励起状態, 分子間力で重要.	2	2	13	13	13	13	13	13	13	13	17	28
6-31+G(d)	6-31GをベースにLi以降に分極関数と分散関数を両方足したもの.	2	2	19	19	19	19	19	19	19	19	23	34
6-31+G(d,p)	6-31+G(d)をベースにHとHeにもp型の分極関数を足したもの.	5	5	19	19	19	19	19	19	19	19	23	34
6-31+G(3df,3pd)	6-31+G(d,p)をベースにLi以降にはd型を増やし, f型も足す. HとHeにもp型を増やしてd型も足す.	17	17	38	38	38	38	38	38	38	38	42	53
6-31++G	6-31GをベースにLi以降だけでなくHとHeにも分散関数を足したもの.	3	3	13	13	13	13	13	13	13	13	17	28
6-31++G(d)	Li以降で6-31++Gに分散関数を足したもの.	3	3	19	19	19	19	19	19	19	19	23	34
6-31++G(d,p)	6-31++G(d)をベースにHとHeにもp型の分極関数を足したもの.	6	6	19	19	19	19	19	19	19	19	23	34
6-31++G(3df,3pd)	6-31++G(d,p)をベースにLi以降にはd型を増やし, f型も足す. HとHeにもp型を増やしてd型も足す.	18	18	38	38	38	38	38	38	38	38	42	53
6-311G	スプリットバレンストリブルゼータ基底系. 原子価軌道に3個の短縮Gauss基底を用いたもの.	3	3	13	13	13	13	13	13	13	13	21	39
6-311G(d)	Li以降で6-311Gに分散関数を足したもの.	3	3	18	18	18	18	18	18	18	18	26	44
6-311G(d,p)	以下略	6	6	18	18	18	18	18	18	18	18	26	44
6-311G(3df,3pd)		17	17	35	35	35	35	35	35	35	35	43	61
6-311+G		3	3	17	17	17	17	17	17	17	17	25	43
6-311+G(d)		3	3	22	22	22	22	22	22	22	22	30	48
6-311+G(d,p)		6	6	22	22	22	22	22	22	22	22	30	48
6-311+G(3df,3pd)		17	17	39	39	39	39	39	39	39	39	47	65
6-311++G		4	4	17	17	17	17	17	17	17	17	25	43
6-311++G(d)		4	4	22	22	22	22	22	22	22	22	30	48
6-311++G(d,p)		7	7	22	22	22	22	22	22	22	22	30	48
6-311++G(3df,3pd)	GaussView6のGUIで指定可能なPople系の基底関数だと最大のもの.	18	18	39	39	39	39	39	39	39	39	47	65
cc-pVDZ	Correlation-Consistent系. pは分極, Vは原子価軌道を意味するダブルゼータ基底.	5	5	14	14	14	14	14	14	14	14	18	27
cc-pVTZ	上記のトリプルゼータ版. D→T→Q→…と完全基底系(CBS)に収束するよう設計されている.	14	14	30	30	30	30	30	30	30	30	34	43
cc-pVQZ		30	30	55	55	55	55	55	55	55	55	59	68
cc-pV5Z		55	55	91	91	91	91	91	91	91	91	95	104
aug-cc-pVDZ	cc-pVDZに分散関数を加えたもの.	9	9	23	23	23	23	23	23	23	23	27	36
aug-cc-pVTZ		23	23	46	46	46	46	46	46	46	46	50	59
aug-cc-pVQZ	GaussView6のGUIで指定可能なDanning系の基底関数だと最大のもの.	46	46	80	80	80	80	80	80	80	80	84	93
aug-cc-pV5Z		80	80	127	127	127	127	127	127	127	127	131	140

解説は[英語版](#)または[日本語版](#)の公式HPまたは石田先生による講義資料などを参照されたい. 右の数字はアウトプット内のNBasisを抜き出して表にしたもの.

基底関数の内訳や軌道指数は
GFPprintキーワードで出力できる。

例えばHの4-31Gでは、内殻という概念は存在しないので「4」は使われない。原子価軌道では「3」はs型の原始ガウス基底を3つ用いて1つの短縮ガウス基底を作り、残りの「1」は原始ガウス基底をそのまま用いている。合計すると2sであり、NBasis=2である。また、Hの6-31G(d,p)では「6」と「d」は使われない。先ほどの「31」に「p」が加わった2s1pである。p型関数はx,y,z方向に対して計3つ使われる所以、Nbasis= 2 + 1 × 3 = 5。

d型の場合はデカルト基底関数のxx,xy,xz,yy,yz,zz計6個が使われる場合と純粹基底関数の5個の場合があるため注意。
<https://gaussian.com/basissets/>

基底関数	H	He	Li	Ne	Ar	Kr
STO-3G	1s	1s	1s1sp1p	1s1sp1p	1s2sp2p	1s3sp3p1d
3-21G	2s	2s	1s2sp2p	1s2sp2p	1s3sp3p	1s4sp4p1d
4-31G	2s	2s	1s2sp2p	1s2sp2p	-	-
6-31G	2s	2s	1s2sp2p	1s2sp2p	1s3sp3p	6s4p1d
6-31G(d)	2s	2s	1s2sp2p1d	1s2sp2p1d	1s3sp3p1d	6s4p2d
6-31G(d,p)	2s1p	2s1p	1s2sp2p1d	1s2sp2p1d	1s3sp3p1d	6s4p2d
6-31G(3df,3pd)	2s3p1d	2s3p1d	1s2sp2p3d1f	1s2sp2p3d1f	1s3sp3p3d1f	6s4p4d1f
6-31+G	2s	2s	1s3sp3p	1s3sp3p	1s4sp4p	6s1sp5p1d
6-31+G(d)	2s	2s	1s3sp3p1d	1s3sp3p1d	1s4sp4p1d	6s1sp5p2d
6-31+G(d,p)	2s1p	2s1p	1s3sp3p1d	1s3sp3p1d	1s4sp4p1d	6s1sp5p2d
6-31+G(3df,3pd)	2s3p1d	2s3p1d	1s3sp3p3d1f	1s3sp3p3d1f	1s4sp4p3d1f	6s1sp5p4d1f
6-31++G	3s	3s	1s3sp3p	1s3sp3p	1s4sp4p	6s1sp5p1d
6-31++G(d)	3s	3s	1s3sp3p1d	1s3sp3p1d	1s4sp4p1d	6s1sp5p2d
6-31++G(d,p)	3s1p	3s1p	1s3sp3p1d	1s3sp3p1d	1s4sp4p1d	6s1sp5p2d
6-31++G(3df,3pd)	3s3p1d	3s3p1d	1s3sp3p3d1f	1s3sp3p3d1f	1s4sp4p3d1f	6s1sp5p4d1f
6-311G	3s	3s	1s3sp3p	1s3sp3p	6s5p	8s7p2d
6-311G(d)	3s	3s	1s3sp3p1d	1s3sp3p1d	6s5p1d	8s7p3d
6-311G(d,p)	3s1p	3s1p	1s3sp3p1d	1s3sp3p1d	6s5p1d	8s7p3d
6-311G(3df,3pd)	3s3p1d	3s3p1d	1s3sp3p3d1f	1s3sp3p3d1f	6s5p3d1f	8s7p5d1f
6-311+G	3s	3s	1s4sp4p	1s4sp4p	6s1sp6p	8s1sp8p2d
6-311+G(d)	3s	3s	1s4sp4p1d	1s4sp4p1d	6s1sp6p1d	8s1sp8p3d
6-311+G(d,p)	3s1p	3s1p	1s4sp4p1d	1s4sp4p1d	6s1sp6p1d	8s1sp8p3d
6-311+G(3df,3pd)	3s3p1d	3s3p1d	1s4sp4p3d1f	1s4sp4p3d1f	6s1sp6p3d1f	8s1sp8p5d1f
6-311++G	4s	4s	1s4sp4p	1s4sp4p	6s1sp6p	8s1sp8p2d
6-311++G(d)	4s	4s	1s4sp4p1d	1s4sp4p1d	6s1sp6p1d	8s1sp8p3d
6-311++G(d,p)	4s1p	4s1p	1s4sp4p1d	1s4sp4p1d	6s1sp6p1d	8s1sp8p3d
6-311++G(3df,3pd)	4s3p1d	4s3p1d	1s4sp4p3d1f	1s4sp4p3d1f	6s1sp6p3d1f	8s1sp8p5d1f
cc-pVDZ	2s1p	2s1p	3s2p1d	3s2p1d	4s3p1d	5s4p2d
cc-pVTZ	3s2p1d	3s2p1d	4s3p2d1f	4s3p2d1f	5s4p2d1f	6s5p3d1f
cc-pVQZ	4s3p2d1f	4s3p2d1f	5s4p3d2f1g	5s4p3d2f1g	6s5p3d2f1g	7s6p4d2f1g
cc-pV5Z	5s4p3d2f1g	5s4p3d2f1g	6s5p4d3f2g1h	6s5p4d3f2g1h	7s6p4d3f2g1h	8s7p5d3f2g1h
aug-cc-pVDZ	3s2p	3s2p	4s3p2d	4s3p2d	5s4p2d	6s5p3d
aug-cc-pVTZ	4s3p2d	4s3p2d	5s4p3d2f	5s4p3d2f	6s5p3d2f	7s6p4d2f
aug-cc-pVQZ	5s4p3d2f	5s4p3d2f	6s5p4d3f2g	6s5p4d3f2g	7s6p4d3f2g	8s7p5d3f2g
aug-cc-pV5Z	6s5p4d3f2g	6s5p4d3f2g	7s6p5d4f3g2h	7s6p5d4f3g2h	8s7p5d4f3g2h	9s8p6d4f3g2h

Hartree-Fock極限

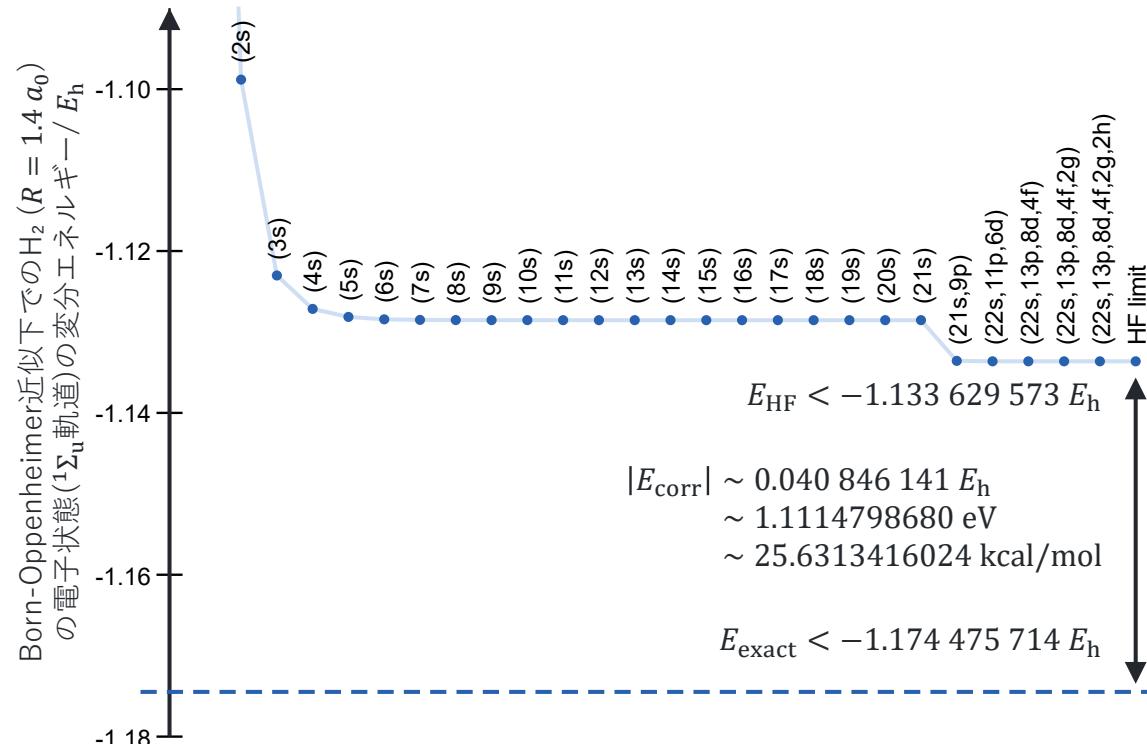
多電子系に対してHartree-Fock法を用いるとき、どんなに基底関数を増やしてもエネルギーが厳密解まで下がらないことが知られている。

この下限をHartree-Fock極限という。

相關エネルギー

Hartree-Fock極限のエネルギー E_{HF} と厳密解のエネルギー E_{exact} の差を相關エネルギー(correlation energy)といい、 E_{corr} で表す。

$$E_{corr} = E_{exact} - E_{HF}$$



1 Attila Szabo, Neil S. Ostlund, Modern Quantum Chemistry: Introduction to Advanced Electronic Structure Theory (McGraw-Hill, 1989)

2 HF極限への収束の様子 : Jensen, F. (1999). *The Journal of chemical physics*, **110**(14), 6601-6605. <https://doi.org/10.1063/1.478567>

3 E_{HF} の上限 : Sundholm, D. (1988). *Chemical physics letters*, **149**(3), 251-256. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(88\)85022-X](https://doi.org/10.1016/0009-2614(88)85022-X)

4 E_{exact} の上限 : Kurokawa, Y., Nakashima, H., & Nakatsuji, H. (2005). *Physical Review A*, **72**(6), 062502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.062502>

5 $1 E_h = 27.21138\ \text{eV} = 627.5095\ \text{kcal/mol}$: IUPAC GreenBook 3rd edition (2007) <https://doi.org/10.1039/9781847557889>

HFで基底関数をリッチにしても
厳密解には収束しない。

入力ファイルの例

```
# CISD/STO-3G Units=AU
H2
0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.4
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
grep "E(Corr)" *.out
```

	HF	CID	CISD
STO-3G	−1.116 714 325	−1.137 275 945	−1.137 275 945
4-31G	−1.126 742 701	−1.151 609 960	−1.151 679 083
6-31G	−1.126 742 701	−1.151 609 960	−1.151 679 083
6-31G(d)	−1.126 742 701	−1.151 609 960	−1.151 679 083
6-31G(d,p)	−1.131 284 347	−1.164 951 649	−1.165 153 434
6-31++G(d,p)	−1.131 358 751	−1.165 081 615	−1.165 280 378
6-311++G(d,p)	−1.132 486 303	−1.168 199 185	−1.168 371 523
6-311++G(3df,2pd)	−1.132 995 537	−1.172 212 927	−1.172 346 814
aug-cc-pVDZ	−1.128 787 753	−1.164 499 846	−1.164 607 792
aug-cc-pVTZ	−1.133 026 847	−1.172 509 120	−1.172 632 582
aug-cc-pVQZ	−1.133 473 021	−1.173 736 761	−1.173 866 594
aug-cc-pV5Z	−1.133 610 655	−1.174 118 836	−1.174 251 842
aug-cc-pV6Z	−1.133 626 526	−1.174 225 530	−1.174 359 685
HF極限	−1.133 629 573	最良変分	−1.174 475 714

計算詳細 : H₂, 核間距離 $R = 1.4a_0$, Gaussian 16, Revision C.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, et al., Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2019.

HF極限 : Sundholm, D. (1988). *Chemical physics letters*, **149**(3), 251-256. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(88\)85022-X](https://doi.org/10.1016/0009-2614(88)85022-X)

最良変分 : Kurokawa, Y., Nakashima, H., & Nakatsuji, H. (2005). *Physical Review A*, **72**(6), 062502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.062502>

相関法

Szaboの下巻の4章(CI)のp.305-310では「系の正確な非相対論的エネルギー(ε_0)と基底関数系が完全系の場合のHartree-Fock エネルギー(E_0)の差」として相関エネルギー E_{corr} を定義している。これへの理解を深めるため, Hartree-Fock法以外の手法を使ってみよう。

配置間相互作用法 (CI)

$$\Phi_{\text{CI}} = \Phi_{\text{HF}} + \sum_a^{\text{occ}} \sum_r^{\text{vir}} C_a^r \Phi_a^r + \sum_{a>b} \sum_{r>s}^{\text{occ}} C_{ab}^{rs} \Phi_{ab}^{rs} + \dots$$

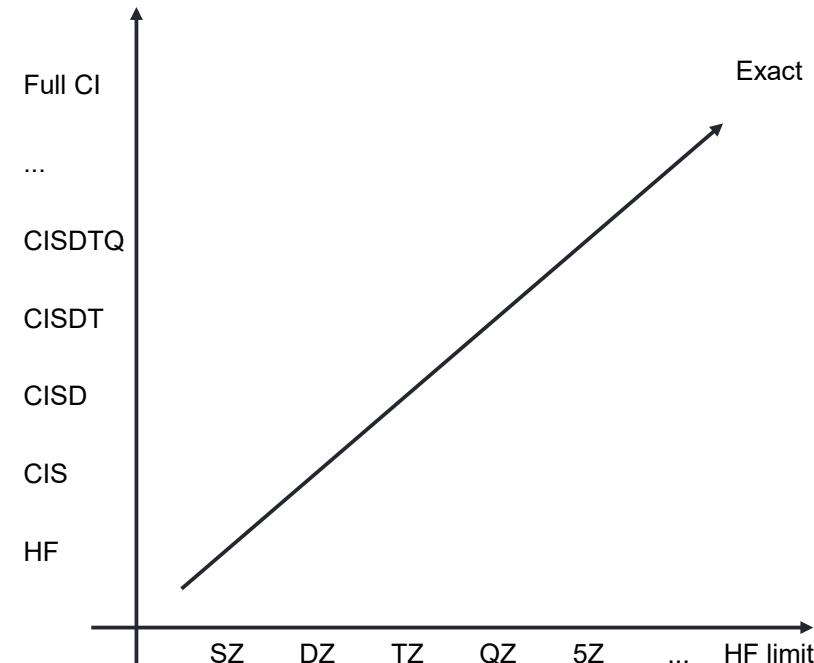
Hartree-Fock法が1つのSlater行列式を試行波動関数とするのに対して, CI法では複数のSlater行列式の線形結合を取る. CIの試行関数は初項にHFの試行関数(基底配置)を含むので, 基底関数が同じならばCI法の方が低いエネルギーを与える.

Full CI

考えうる全ての配置を含むCI

CISD

一電子励起配置(S)と二電子励起配置(D)を含むCI



この図を数値的に理解しよう！

水素原子HにおけるHF極限・電子相関

水素原子ではHFとCIに差は無い。
相関エネルギーは0である。

入力ファイルの例

```
# CISD/aug-cc-pVTZ
```

```
H
```

```
0 2
```

```
H 0.0 0.0 0.0
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
grep "E(Corr)" *.out
```

	HF	CI	CISD
STO-3G	-0.466 581 850	-0.466 581 850	-0.466 581 850
4-31G	-0.498 232 909	-0.498 232 909	-0.498 232 909
6-31G	-0.498 232 909	-0.498 232 909	-0.498 232 909
6-31G(d)	-0.498 232 909	-0.498 232 909	-0.498 232 909
6-31G(d,p)	-0.498 232 909	-0.498 232 909	-0.498 232 909
6-31++G(d,p)	-0.498 801 102	-0.498 801 102	-0.498 801 102
6-311++G(d,p)	-0.499 817 916	-0.499 817 916	-0.499 817 916
6-311++G(3df,2pd)	-0.499 817 916	-0.499 817 916	-0.499 817 916
aug-cc-pVDZ	-0.499 334 315	-0.499 334 315	-0.499 334 315
aug-cc-pVTZ	-0.499 821 176	-0.499 821 176	-0.499 821 176
aug-cc-pVQZ	-0.499 948 321	-0.499 948 321	-0.499 948 321
aug-cc-pV5Z	-0.499 994 785	-0.499 994 785	-0.499 994 785
aug-cc-pV6Z	-0.499 999 276	-0.499 999 276	-0.499 999 276
厳密解	-0.500 000 000		

水素原子ではHFとCIに差は無い。
相関エネルギーは0である。

入力ファイルの例

```
# CISD/aug-cc-pVTZ Units=AU
H2+
1 2
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 2.0
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
grep "E(Corr)" *.out
```

	HF	CI(D)	CISD
STO-3G	-0.582 695 369	-0.582 695 369	-0.582 695 369
4-31G	-0.584 036 393	-0.584 036 393	-0.584 036 393
6-31G	-0.584 036 393	-0.584 036 393	-0.584 036 393
6-31G(d)	-0.584 036 393	-0.584 036 393	-0.584 036 393
6-31G(d,p)	-0.594 355 331	-0.594 355 331	-0.594 355 331
6-31++G(d,p)	-0.595 375 641	-0.595 375 641	-0.595 375 641
6-311++G(d,p)	-0.601 166 144	-0.601 166 144	-0.601 166 144
6-311++G(3df,2pd)	-0.602 256 704	-0.602 256 704	-0.602 256 704
aug-cc-pVDZ	-0.601 247 738	-0.601 247 738	-0.601 247 738
aug-cc-pVTZ	-0.602 301 708	-0.602 301 708	-0.602 301 708
aug-cc-pVQZ	-0.602 535 332	-0.602 535 332	-0.602 535 332
aug-cc-pV5Z	-0.602 622 271	-0.602 622 271	-0.602 622 271
aug-cc-pV6Z	-0.602 632 509	-0.602 632 509	-0.602 632 509
厳密解	-0.602 634 619		

計算詳細 : H2+, 核間距離 $R = 2.0a_0$, Gaussian 16, Revision C.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, et al., Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2019.

厳密解 : Scott, T. C., Aubert-Frécon, M., & Grotendorst, J. (2006). Chemical physics, 324(2-3), 323-338. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2005.10.031>

水素分子H₂におけるHF極限・電子相関

54

CIのアウトプット内にHFのエネルギーも書いてあるため注意せよ。

H₂は二電子系であるため、
相関エネルギーは0ではない。

入力ファイルの例

```
# CISD/aug-cc-pVTZ Units=AU
H2
0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.4
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
grep "E(Corr)" *.out
```

	HF	CID	CISD
STO-3G	-1.116 714 325	-1.137 275 945	計算してみよう
4-31G	-1.126 742 701	-1.151 609 960	-1.151 679 083
6-31G	-1.126 742 701	-1.151 609 960	-1.151 679 083
6-31G(d)	-1.126 742 701	-1.151 609 960	-1.151 679 083
6-31G(d,p)	-1.131 284 347	-1.164 951 649	-1.165 153 434
6-31++G(d,p)	-1.131 358 751	-1.165 081 615	-1.165 280 378
6-311++G(d,p)	-1.132 486 303	-1.168 199 185	-1.168 371 523
6-311++G(3df,2pd)	-1.132 995 537	-1.172 212 927	-1.172 346 814
aug-cc-pVDZ	-1.128 787 753	-1.164 499 846	-1.164 607 792
aug-cc-pVTZ	-1.133 026 847	-1.172 509 120	-1.172 632 582
aug-cc-pVQZ	-1.133 473 021	-1.173 736 761	-1.173 866 594
aug-cc-pV5Z	-1.133 610 055	いくつか選んで計算してみよう	1.174 251 842
aug-cc-pV6Z	-1.133 626 526	-1.174 225 530	-1.174 359 685
HF極限	-1.133 629 573	最良変分	-1.174 475 714

計算詳細 : H₂, 核間距離 $R = 1.4a_0$, Gaussian 16, Revision C.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, et al., Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2019.

HF極限 : Sundholm, D. (1988). Chemical physics letters, 149(3), 251-256. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(88\)85022-X](https://doi.org/10.1016/0009-2614(88)85022-X)

最良変分 : Kurokawa, Y., Nakashima, H., & Nakatsuji, H. (2005). Physical Review A, 72(6), 062502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.062502>

窒素分子N₂におけるHF極限・電子相関

55

CIのアウトプット内にHFのエネルギーも書いてあるため注意せよ。

N₂はH₂よりも電子数が多いため
相関エネルギーが大きくなる。

入力ファイルの例

```
# CISD/aug-cc-pVTZ Units=AU
N2
0 1
N 0.0 0.0 0.0
N 0.0 0.0 2.068
```

結果の検索コマンド

```
grep "SCF Done" *.out
grep "E(Corr)" *.out
```

	HF	CID	CISD
STO-3G	-107.494 925 3	-107.638 214 6	-107.638 429 0
4-31G	-108.753 910 2	-108.962 929 5	-108.965 379 0
6-31G	-108.867 914 9	-109.075 243 5	-109.077 570 8
6-31G(d)	-108.943 064 5	-109.230 885 1	-109.233 604 6
6-31G(d,p)	-108.943 064 5	-109.230 885 1	-109.233 604 6
6-31++G(d,p)	-108.946 126 2	-109.236 182 2	-109.239 033 7
6-311++G(d,p)	-108.972 191 1	-109.273 801 7	計算してみよう
6-311++G(3df,2pd)	-108.982 309 3	-109.325 328 3	-109.328 551 1
aug-cc-pVDZ	-108.961 045 0	-109.254 997 7	-109.257 564 8
aug-cc-pVTZ	-108.985 317 3	-109.332 034 2	計算してみよう
aug-cc-pVQZ	-108.992 205 1	-109.356 204 0	-109.359 373 2
aug-cc-pV5Z	-108.993 607 9	-109.363 691 9	-109.366 881 4
aug-cc-pV6Z	-108.993 786 6	-109.366 300 5	-109.369 495 1
HF極限	-108.993 825 7	最良変分	-109.542 7

計算詳細 : N₂, 核間距離 $R = 2.068a_0$, Gaussian 16, Revision C.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, et al., Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2019.

HF極限 : 小林正人(2019), Hartree-Fock(-Roothaan)法のエッセンス, フロンティア, <http://hdl.handle.net/2115/74383>

最良変分 : L. Bytautas and K. Ruedenberg, J. Chem. Phys., 122, 154110 (2005) <https://doi.org/10.1063/1.1869493>

相関エネルギーは重要か？

いずれにせよ相関エネルギーは小さな値に思われるが、単位をeVやkcal/molに直せばかなり大きな値であることはよく指摘される。電子数が多いほど、全エネルギーに占める相関エネルギーの割合は下がる傾向にあるので重要性も下がっていきそうに思われる。だが、結合エネルギーに占める割合はむしろ増加するため、電子相関を考慮しないと結合を弱く見積もる。HF法は定量的だけでなく、定性的にも完全に間違った結果を与える例がいくつか知られている。

単位は E_h	H	H_2	$H_2 - 2H$
$E_{HF\, limit}$	- 0.500 000 000	- 1.133 629 573	- 0.133 629 573
E_{exact}	- 0.500 000 000	- 1.174 475 714	- 0.174 475 714
E_{corr}	0.000 000 000	- 0.040 846 141	- 0.040 846 141
E_{corr}/E_{exact}	0%	3.5%	23.4%

単位は E_h	N	N_2	$N_2 - 2N$
$E_{HF\, limit}$	- 54.400 94	- 108.993 83	- 0.191 95
E_{exact}	- 54.531 24	- 109.425 13	- 0.362 65
E_{corr}	- 0.130 3	- 0.431 3	- 0.170 7
E_{corr}/E_{exact}	0.2%	0.4%	47.1%

H_2 と N_2 のいずれも電子相関を考慮しないと結合を弱く見積もってしまう。

上記はいずれも「傾向がある」という話であって、いかなる状況においても絶対的に正しい主張ではない。

D. Sundholm Chem. Phys. Lett., 149(3), 251 (1988); [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(88\)85022-X](https://doi.org/10.1016/0009-2614(88)85022-X)

Y. Kurokawa, H. Nakashima, H. Nakatsuji, Phys. Rev. A, 72(6), 062502 (2005); <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.72.062502>

L. Bytautas and K. Ruedenberg, J. Chem. Phys., 122, 154110 (2005); <https://doi.org/10.1063/1.1869493> Table IX, CBS-1B

Full CI法

非常に正確だがコストが高い。

打ち切られたCI法

HFよりも正確だが、大きさについての無矛盾性を満足しない。

MP法

大きさについての無矛盾性があるが、変分原理を満足しない。

CC法

変分原理を満足しないが、CI法のように正確であり、大きさについての無矛盾性もある。

→ 一長一短があるので、いろいろな手法を試そう！

	コスト	CI法	MP法	CC法
Full CI法	M^5	CIS	MP2	
打ち切られたCI法	M^6	CISD	MP3	CCSD
MP法	M^7		MP4	CCSD(T)
CC法	M^8	CISDT	MP5	CCSDT
	M^9		MP6	
→ 一長一短があるので、いろいろな手法を試そう！	M^{10}	CISDTQ	MP7	CCSDTQ
	$M^!$	Full CI		

CCSD(T)はゴールドスタンダードと呼ばれている

いろいろな手法を使ってみよう

58

CI法以外の相関法についても
基底関数を変えて計算してみよう. HF→CID→CISD
HF/STO-3Gを書き換えればよい. は単調に下がる

入力の例

```
# HF/STO-3G Units=AU
```

H2

0 1

H 0.0 0.0 0.0

H 0.0 0.0 1.4

CIより下がること
が知られている

HFに大きな問題が
ないときは問題ない

変分原理に従わない

手法	/STO-3G	/6-31G(d,p)
HF	-1.116 714 325	-1.131 284 347
	-1.137 275 945	-1.164 951 649
	-1.137 275 945	-1.165 153 434
CID	-1.137 275 949	-1.164 951 650
	計算してみよう	
	収束しない	-1.165 153 435
CISD	-1.137 275 949	-1.164 951 650
	計算してみよう	
	計算してみよう	
CCSD	-1.137 275 949	-1.164 951 650
	計算してみよう	
	計算してみよう	
MP2	-1.129 872 195	-1.157 626 137
	-1.137 275 949	-1.164 951 650
	計算してみよう	
MP3	-1.136 433 949	-1.164 561 454
	計算してみよう	
	計算してみよう	
MP4	-1.136 433 949	-1.164 561 454
	計算してみよう	
	計算してみよう	
B3LYP	-1.165 153 434	-1.178 536 777
	計算してみよう	
	計算してみよう	
HF極限	-1.165 153 434	-1.133 629 573
最良変分	-1.174 475 714	-1.174 475 714

基底関数 : <https://gaussian.com/basissets>

計算詳細 : H₂, 核間距離 $R = 1.4a_0$, Gaussian 16, Revision C.01, M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel, et al., Gaussian, Inc., Wallingford CT, 2019.

HF極限 : Sundholm, D. (1988). *Chemical physics letters*, **149**(3), 251-256. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(88\)85022-X](https://doi.org/10.1016/0009-2614(88)85022-X)

構造最適化

Gaussian16では簡単にポテンシャルエネルギー曲面の極小値を求めることができる. このような, 全エネルギーを最も低くするような原子核の位置(分子構造)を求めることを, 構造最適化という.

ポテンシャルエネルギー曲線と構造最適化

(2.1)	$\hat{H}\Phi = E\Phi$ ← 本来の解きたい方程式
(2.11)	$\hat{H}_{\text{elec}}\Phi_{\text{elec}} = E_{\text{elec}}\Phi_{\text{elec}}$
(2.16)	$\hat{H}_{\text{nucl}}\Phi_{\text{nucl}} = E\Phi_{\text{nucl}}$
(2.15)	$\hat{H}_{\text{nuc}} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{2M_A} \nabla_A^2 + E_{\text{tot}}(\{R_A\})$

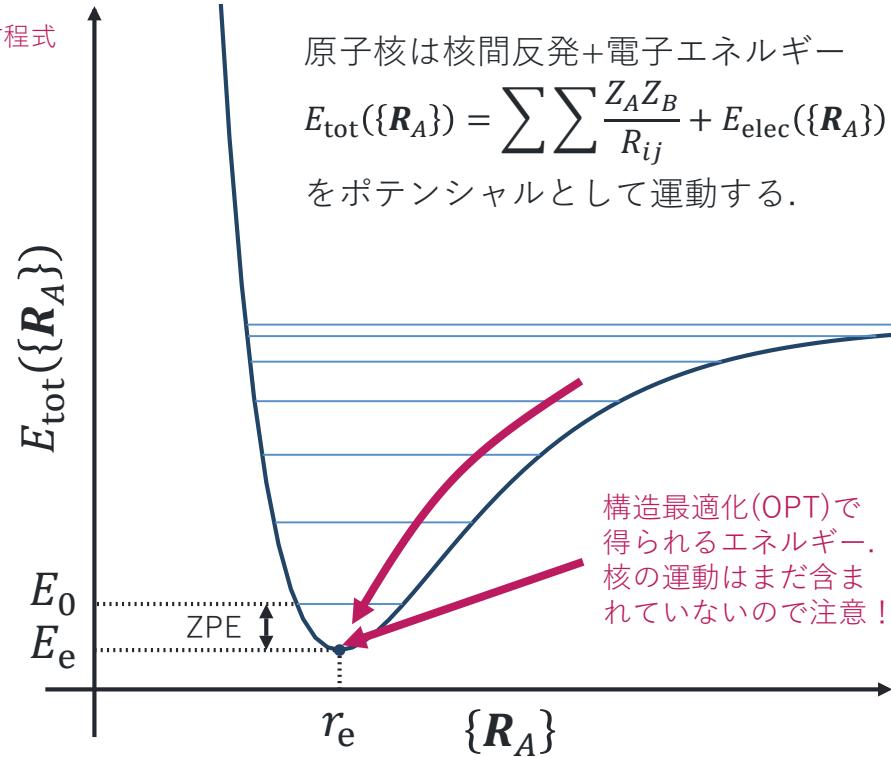
電子ハミルトニアン \hat{H}_{elec} は核の運動項を含まないため (2.11) を解いただけでは核の運動は考慮されていない。しかし、PEC や PES の極小点 = 平衡構造から様々な有益な情報を得ることができる。NMR スペクトルも平衡構造において計算される。

PEC: potential energy curve

原子核は核間反発 + 電子エネルギー

$$E_{\text{tot}}(\{R_A\}) = \sum \sum \frac{Z_A Z_B}{R_{ij}} + E_{\text{elec}}(\{R_A\})$$

をポテンシャルとして運動する。

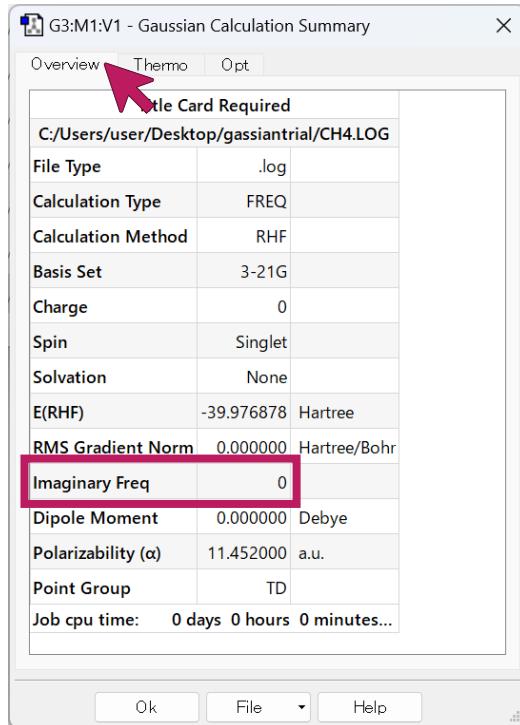


GaussView6での構造最適化 (1/2)

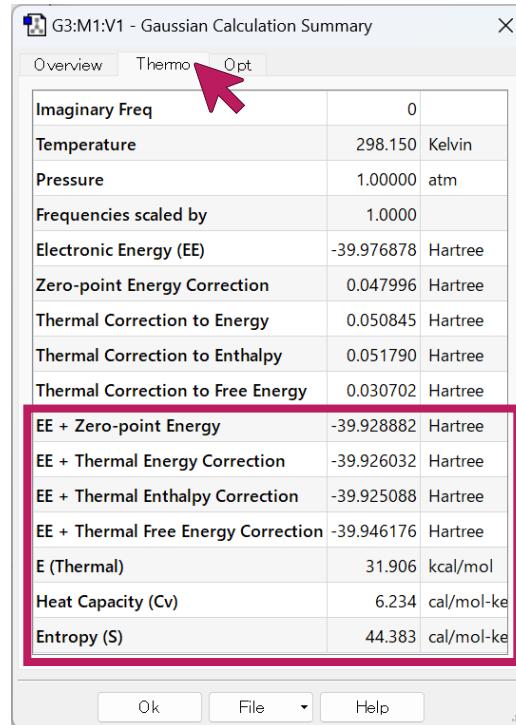
The screenshot shows the GaussView6 interface. On the left, the main window displays a 3D molecular model of a molecule with 5 atoms, 10 electrons, and a neutral singlet state. The menu bar is visible, and the 'Calculate' menu is open, with 'Gaussian Calculation Setup...' highlighted. A red arrow points to this option. On the right, the 'G1:M1:V1 - Gaussian Calculation Setup' dialog is open. The 'Job Type' dropdown is set to 'Opt+Freq'. The 'Keywords' field contains the command: '# opt freq hf/3-21g geom=connectivity'. The 'Charge/Mult' field is set to '0 2'. The 'Opt+Freq' tab is selected in the dialog. A red arrow points to the 'Opt+Freq' tab. A pink annotation in the center-right of the dialog reads: '虚振動が出ていないか確認するために freq も一緒に指定するとよい' (To check if virtual vibrations are present, specify freq along with other keywords). At the bottom of the dialog, a pink annotation reads: 'これまでと同じように手法や基底関数を指定し、計算を流す' (Specify the method and basis set as you did before, and run the calculation).

これまでと同じように手法や
基底関数を指定し、計算を流す。

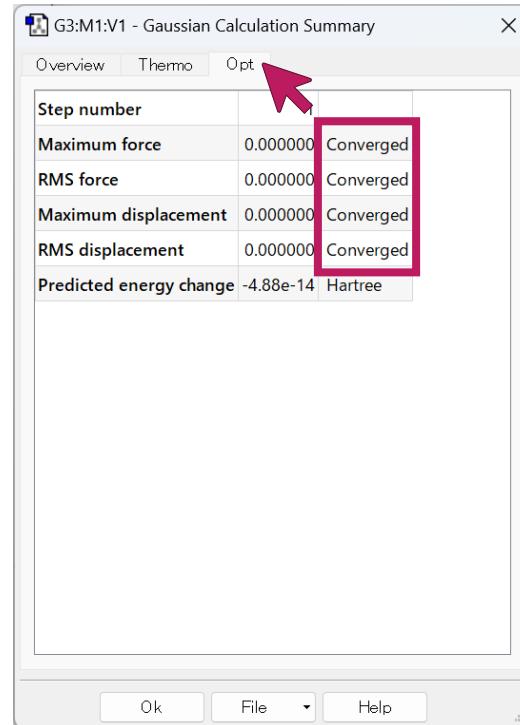
GaussView6での構造最適化 (2/2)



虚振動が出ていないか確認



色々な熱力学量が得られる*



収束判定を満たしたか確認*

H₂のエネルギー

70

入力 通常はoptと同時に
freqも指定するとよい

```
# HF/STO-3G OPT
```

H2

0 1

H 0.0 0.0 0.0

H 0.0 0.0 0.7

結果

```
grep "SCF Done" *.out
```

SCF Doneがアウトプット中にいくつも存在するので最後のものを確認すること. 手法や基底関数によって核間距離の結果は異なる.

HF法によるH₂のOPT計算: エネルギー $E_{\text{tot}}/E_{\text{h}}$

基底関数	ザボ 表3.11 [1]	HF/
STO-3G	-1.117	-1.117 505 885 16
4-31G	-1.127	-1.126 827 811 03
6-31G	-	計算してみよう
6-31G(d)	-	-1.126 827 811 03
6-31G(d,p)	-1.131	-1.131 333 563 82
HF極限	-1.134	-

入力 通常はoptと同時に
freqも指定するとよい

```
# HF/STO-3G OPT
```

H2

0 1

H 0.0 0.0 0.0

H 0.0 0.0 0.7

結果

```
grep “! R1” *.out
```

! Optimized Parameters !
!(Angstroms and Degrees) !

HF法によるH₂のOPT計算：平衡結合長 R_{eq} /Å

基底関数	ザボ 表3.18 [1]	HF/
STO-3G	0.7123	0.7122
4-31G	0.7303	0.7301
6-31G	-	計算してみよう
6-31G(d)	-	0.7301
6-31G(d,p)	0.7329	0.7328
正確な平衡結合長*	0.7414	-

アウトプットファイル中の“Optimized Parameters”という表を探そう. 基底関数に依存して平衡結合長が変化しているはずである.

$1 a_0 = 0.529177210903 \text{ \AA}$ で換算. Gaussian内部の換算に使われている値はCODATA推奨値とは異なるので <https://gaussian.com/constants/> を参照せよ.

[1] A. ザボ, N.S. オストランド著, 大野公男, 阪井健男, 望月祐志訳. 『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』, 東京大学出版会, 1987. p.224 表3.18

* ザボ表3.18には実験値と書いてあるが, あくまでも精密な計算の結果である. 期待値を取るともう少し大きくなる.

H₂の平衡結合長（電子相関を取り込んだ場合）

72

H₂のOPT計算：平衡結合長 R_{eq} /Å

	HF/	B3LYP/	CCSD/
STO-3G	0.7122	0.7284	-
4-31G	0.7300	0.7428	0.7462
6-31G	0.7300	0.7428	0.7462
6-31G(d)	0.7300	0.7428	0.7462
6-31G(d,p)	0.7326	0.7428	0.7385
正確な平衡結合長[1]	0.7414	0.7414	0.7414
期待値[2]	0.7666	0.7666	0.7666

仮に正確な計算を行ったとしても
平衡結合長は期待値よりも小さい

全て $a_0 = 0.529177210903$ Åで換算

[1] W. Kolos and L. Wolniewicz, *J. Chem. Phys.* **41**, 3663 (1964); <https://doi.org/10.1063/1.1725796>

[2] D. B. Kinghorn, L. Adamowicz, *J. Chem. Phys.* **113**, 4203 (2000); <https://doi.org/10.1063/1.1288376>

演習：二原子分子

74

等核二原子分子N₂および異核二原子分子COの平衡結合長をCCSDレベルで計算しなさい。

examples/opt/N2/CCSD/aug-cc-pVTZ.gjf

```
# CCSD/aug-cc-pVTZ opt
```

N2

```
0 1
N  0.0  0.0  0.0
N  0.0  0.0  2.068
```

CCSDによるN₂およびCOのOPT計算：平衡結合長 R_{eq} /Å

基底関数	N ₂	CO
STO-3G	1.1891	1.1822
4-31G	1.1227	1.1594
6-31G	1.128	計算してみよう 1.1634
6-31G(d)	1.1135	1.1421
6-31G(d,p)	1.1135	1.1421
HF極限	1.0652	1.1012
実験値*	1.0975	1.1282

¹ $a_0 = 0.529177210903$ Åで換算

* ザボには実験値と言いながら精密な計算値が載っていることがあるため注意されたい。

examples/opt/H2O/HF

```
# HF/STO-3G OPT
H2O
 0 1
 0 0.0 0.0 0.0
H 0.0 1.4 1.4
H 0.0 1.4 -1.4
```

結果の検索コマンド

```
grep “! R1” *.out
```

H₂とは異なり, H₂Oでは4-31Gと6-31Gの結果が異なる. これはOでは4と6の差が顕れるためである.

HFによるH₂OのOPT計算: 平衡結合長 R_{eq} /Å

基底関数	ザボ 表3.20 [1]	HF/
STO-3G	0.9901	0.9894
3-21G	-	0.9667
4-31G	0.9509	0.9505
6-31G	-	0.9497
6-31G(d)	0.9478	0.9473
6-31G(d,p)	0.9430	0.9431
HF極限	0.9398	-
実験値*	0.9573	-

計算してみよう

examples/opt/H₂O/HF

```
# HF/STO-3G OPT
H2O
 0 1
 0 0.0 0.0 0.0
H 0.0 1.4 1.4
H 0.0 1.4 -1.4
```

結果の検索コマンド

```
grep “! A1” *.out
```

H₂Oの結合角の説明にはd型関数
が重要であることが知られている。

HFによるH₂OのOPT計算：平衡結合角[°]

手法/基底関数	ザボ 表3.21 [1]	HF/
STO-3G	100.0	100.0283
3-21G	-	107.6801
4-31G	111.2	111.2241
6-31G	-	111.5355 計算してみよう
6-31G(d)	105.5	105.4992
6-31G(d,p)	106.0	105.9669
HF極限	106.1	106.1
実験値*	104.5	104.5

10電子系の結合長 (CH_4 , NH_3)

77

もちろんエネルギーは基底関数を増やすほど単調に下がっていくが、結合長は単調に正確な値に近づくわけではない。

CH_4 の平衡結合長 R_{eq} / Å

基底関数	ザボ 表3.20 [1]	HF/	B3LYP/	CCSD/
STO-3G	1.0832	1.0830	1.0968	1.1079
4-31G	1.0811	1.0811	1.0917	1.0978
6-31G(d)	1.0838	1.0837	1.0935	1.0943
6-31G(d,p)	1.0838	1.0835	1.0920	1.0881
near-HF極限	1.0838	1.0838	-	-
実験値*	1.0848	1.0848	1.0848	1.0848

NH_3 の平衡結合長 R_{eq} / Å

基底関数	ザボ 表3.20 [1]	HF/	B3LYP/	CCSD/
STO-3G	1.0330	1.0324	1.0624	1.0700
4-31G	0.9911	0.9912	1.0057	1.0133
6-31G(d)	1.0038	1.0026	1.0194	1.0200
6-31G(d,p)	1.0038	1.0007	1.0180	1.0140
near-HF極限	1.0001	1.0001	-	-
実験値*	1.0118	1.0118	1.0118	1.0118

$1 \alpha_0 = 0.529177210903 \text{ Å}$ で換算

A. ザボ, N.S. オストランド著, 大野公男, 阪井健男, 望月祐志訳. 『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』, 東京大学出版会, 1987. p.225 表3.20

* ザボには実験値と言いかながら精密な計算値が載っていることがあるため注意されたい。

10電子系の結合長 (H₂O, FH)

これらの結果だけから考えれば、実験値よりX-H結合長を過小評価していた原因は電子相関の欠如であると推測される。

H₂Oの平衡結合長 R_{eq} / Å

基底関数	ザボ 表3.20 [1]	HF/	B3LYP/	CCSD/
STO-3G	0.9901	0.9893	1.0272	1.0283
4-31G	0.9509	0.9505	0.9769	0.9765
6-31G(d)	0.9478	0.9474	0.9686	0.9696
6-31G(d,p)	0.9430	0.9432	0.9652	0.9608
near-HF極限	0.9398	0.9398	-	-
実験値*	0.9573	0.9573	0.9573	0.9573

FHの平衡結合長 R_{eq} / Å

基底関数	ザボ 表3.20 [1]	HF/	B3LYP/	CCSD/
STO-3G	0.9562	0.9555	0.9953	0.9945
4-31G	0.9218	0.9222	0.9507	0.9487
6-31G(d)	0.9112	0.9110	0.9338	0.9343
6-31G(d,p)	0.9012	0.9005	0.9254	0.9204
near-HF極限	0.8975	0.8975	-	-
実験値*	0.9171	0.9171	0.9171	0.9171

1 $a_0 = 0.529177210903$ Åで換算

A. ザボ, N.S. オストランド著, 大野公男, 阪井健男, 望月祐志訳. 『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』, 東京大学出版会, 1987. p.225 表3.20

* ザボには実験値と言ひながら精密な計算値が載っていることがあるため注意されたい。

NMRの計算例 C₂H₄

79

入力 : examples/NMR/C2H4.gjf

```
%Chk=C2H4.chk
#p PBE1PBE/aug-cc-pVTZ opt freq

C2H4 OPT

0 1
C1
C2 C1 1.35
H1 C1 1.1 C2 120.0
H2 C1 1.1 C2 120.0 H1 180.0
H3 C2 1.1 C1 120.0 H1 0.0
H4 C2 1.1 C1 120.0 H1 180.0

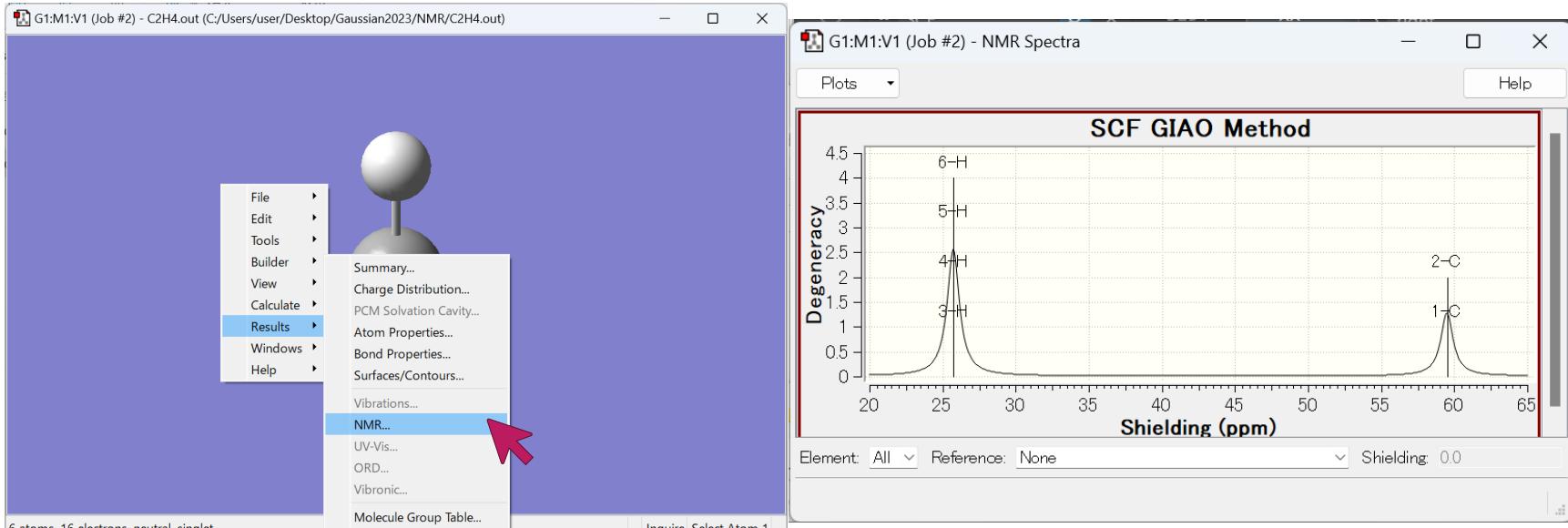
--Link1--
%Chk=C2H4.chk
#p PBE1PBE/ChkBasis NMR Geom=Check Guess=Read

C2H4 NMR Link1とGeom=Checkを使うと最適化した構造を利用して連続した計算ができる
0 1
```

出力

```
SCF GIAO Magnetic shielding tensor (ppm):
  1  C  Isotropic =  59.5023  Anisotropy = 171.6996
    XX= 173.9687  YX= 0.0000  ZX= 0.0000
    XY= 0.0000  YY= -63.9858  ZY= 0.0000
    XZ= 0.0000  YZ= 0.0000  ZZ= 68.5240
Eigenvalues: -63.9858  68.5240  173.9687
  2  C  Isotropic =  59.5023  Anisotropy = 171.6996
    XX= 173.9687  YX= 0.0000  ZX= 0.0000
    XY= 0.0000  YY= -63.9858  ZY= 0.0000
    XZ= 0.0000  YZ= 0.0000  ZZ= 68.5240
Eigenvalues: -63.9858  68.5240  173.9687
  3  H  Isotropic =  25.7325  Anisotropy = 4.4835
    XX= 25.7313  YX= 0.0000  ZX= 0.0000
    XY= 0.0000  YY= 22.7452  ZY= -1.1093
    XZ= 0.0000  YZ= 1.2160  ZZ= 28.7210
Eigenvalues: 22.7447  25.7313  28.7215
  4  H  Isotropic =  25.7325  Anisotropy = 4.4835
    XX= 25.7313  YX= 0.0000  ZX= 0.0000
    XY= 0.0000  YY= 22.7452  ZY= 1.1093
    XZ= 0.0000  YZ= -1.2160  ZZ= 28.7210
```

...



.outファイルをGaussViewにドロップして読み込む。

右クリック > Results > NMR でスペクトルを表示。

.outファイルの等方核磁気遮蔽定数 (Isotopic) が図として表示されている。化学シフトは同じ計算レベルでTMS = Si(CH₃)₄を計算して差を取る必要がある。

$\text{TMS} = \text{Si}(\text{CH}_3)_4$ の等方遮蔽定数を PBE1PBE1/aug-cc-pVTZ で計算しなさい (時間がかかるので実習内では不可, 右上表を用いよ). 差を取ることにより, C_2H_4 の化学シフトを計算しなさい.

等方核磁気遮蔽定数

	H	C
TMS	31.5	189.7
C_2H_4	25.7	59.5

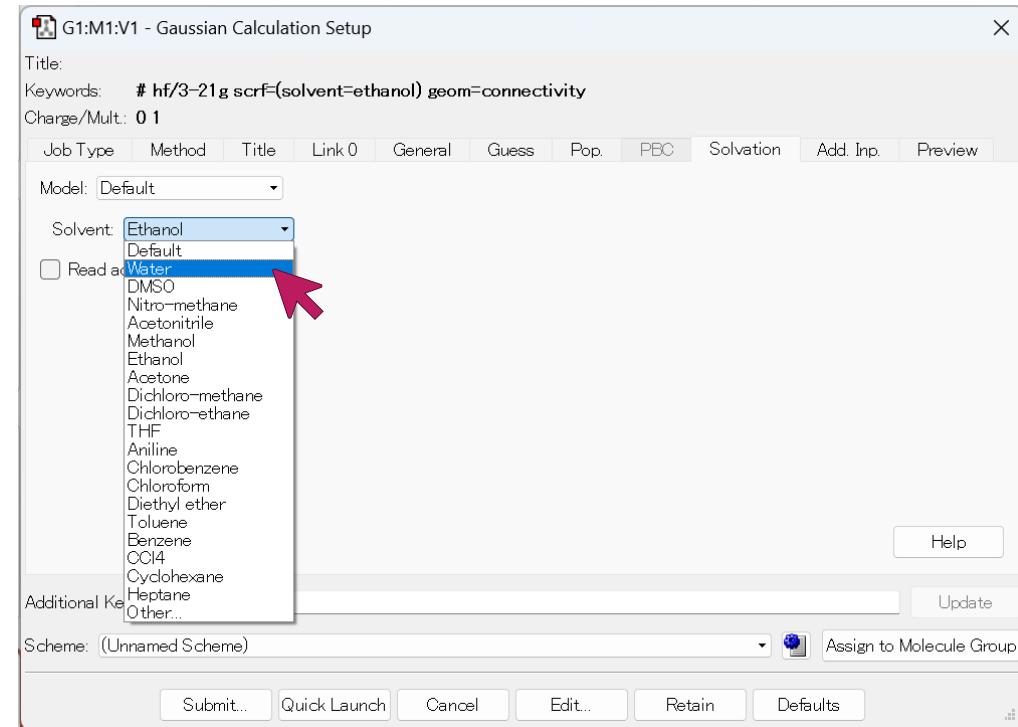
化学シフト

	H	C
計算	5.8	計算してみよう 130.2
実験	5.25	123.2

溶媒分子を溶質分子に一つずつ配位させていく方法も考えられるが、計算コストがかかりすぎる。インプットファイルに
`SCRF=(Solvent=Water)`

のように追記することで簡易的に溶媒効果を取り込んだ計算が可能である。インプットファイル内に書き込むか、右図のようにGaussView上で溶液を指定する。

これを用いて最適化を行うと、構造が変化する。構造が変化するということは、NMRスペクトルやIRスペクトル、UV-visスペクトルにも変化が生じる。



任意の分子について、気相中と溶液中でそれぞれ最適化し、構造を比較しなさい。構造が異なることを確かめよ。例えば



のような溶媒効果の有無によってアンモニアの形がどのように変化するか計算してみよう。

標準Gibbsエネルギー ΔG° は負の値を取るとされている[1]。

正しく再現できているだろうか？
gas.gjfとwater.gjfを比較しよう。

examples/solvent/water.gjf

```
# B3LYP/6-31G(d,p) opt freq SCRF=(Solvent=Water)

NH3(aq)

0 1
N
H 1 B1
H 1 B1 2 A1
H 1 B1 3 A1 2 D1 0

B1    1.0
A1    109.47120255
D1   -120.0
```

gas.out	1.018
! R1 R(1,2)	
! A1 A(2,1,3)	105.7446
計算してみよう	
water.out	1.0191
! R1 R(1,2)	
! A1 A(2,1,3)	104.7781

次のように並進ベクトルをTVで指定することで周期境界条件の計算が可能である。構造最適化を行い、グラフェンの格子定数を決定し、実験値と比較せよ。

なお、汎関数と基底関数の改善については、講習会の時間内に終了しない恐れがあるため、各自の宿題とする。

ポリエチレン（1次元）やダイヤモンド（3次元）などの周期系を各自で構造最適化せよ。[AFLOW](#)や[COD](#)などの結晶構造データベースを活用せよ。

examples/PBC/graphene.gjf

```
%chk=graphene.chk
# SVWN/STO-3G opt

graphene from "Examples" of https://gaussian.com/pbc/

0 1
C           0.000000   0.000000   0.000000
C           0.000000   1.429118   0.000000
TV          2.475315   0.000000   0.000000
TV          -1.219952  2.133447   0.000000
```

振動解析

電子状態ハミルトニアンは核の運動を含まないため, 同様に全エネルギー E_{tot} も核の運動の寄与を含ない. 正確に各種の物理量を見積もるために零点振動エネルギー (ZPE) をはじめとする核の量子効果を考慮しなければならない. 振動解析によってIRスペクトルが計算できる.

零点振動エネルギー (ZPE)

(2.1)

$$\hat{H}\Phi = E\Phi \quad \leftarrow \text{本来の解きたい方程式}$$

(2.11)

$$\hat{H}_{\text{elec}}\Phi_{\text{elec}} = E_{\text{elec}}\Phi_{\text{elec}}$$

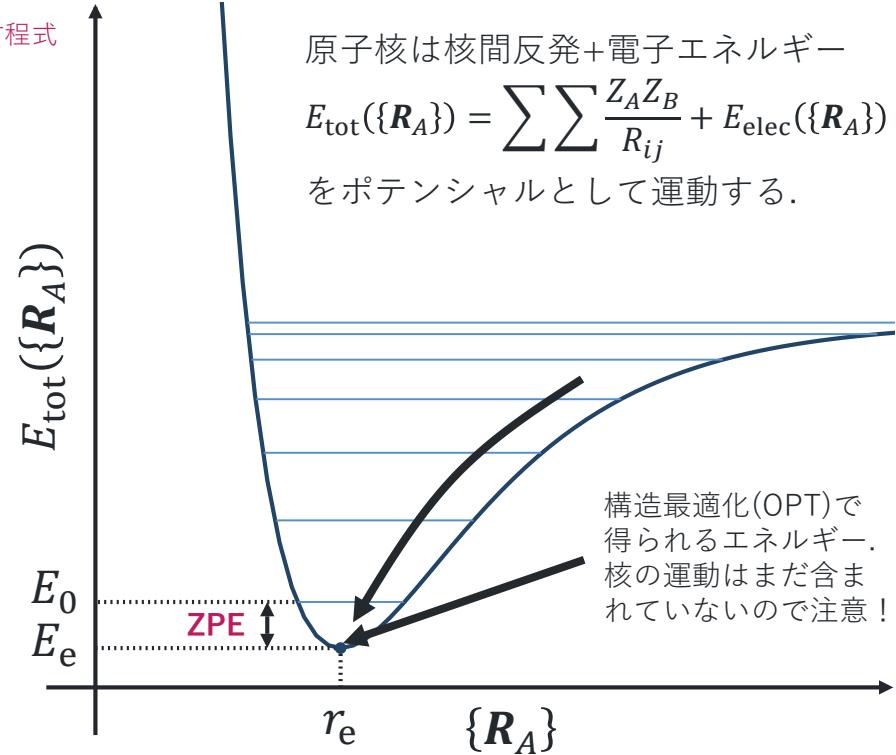
(2.16)

$$\hat{H}_{\text{nucl}}\Phi_{\text{nucl}} = E\Phi_{\text{nucl}}$$

(2.15)

$$\hat{H}_{\text{nuc}} = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{2M_A} \nabla_A^2 + E_{\text{tot}}(\{R_A\})$$

式(2.1)の全エネルギー E をBorn-Oppenheimer近似のもとで求めたのが式(2.16)の E で, これは電子, 振動, 回転, および, 並進の各エネルギーを含む[1]. 分子振動を考慮することで, より正確に反応熱を見積もることができ, BO近似でも同位体効果を扱える.



ゼロ点振動エネルギー(ZPE)を求めるとき、まずは調和振動子に近似することが多い。2原子分子では、平衡点近傍の三点を用いてPECを

$$V(r) = -\frac{1}{2}k(r - r_e)^2 + E_e$$

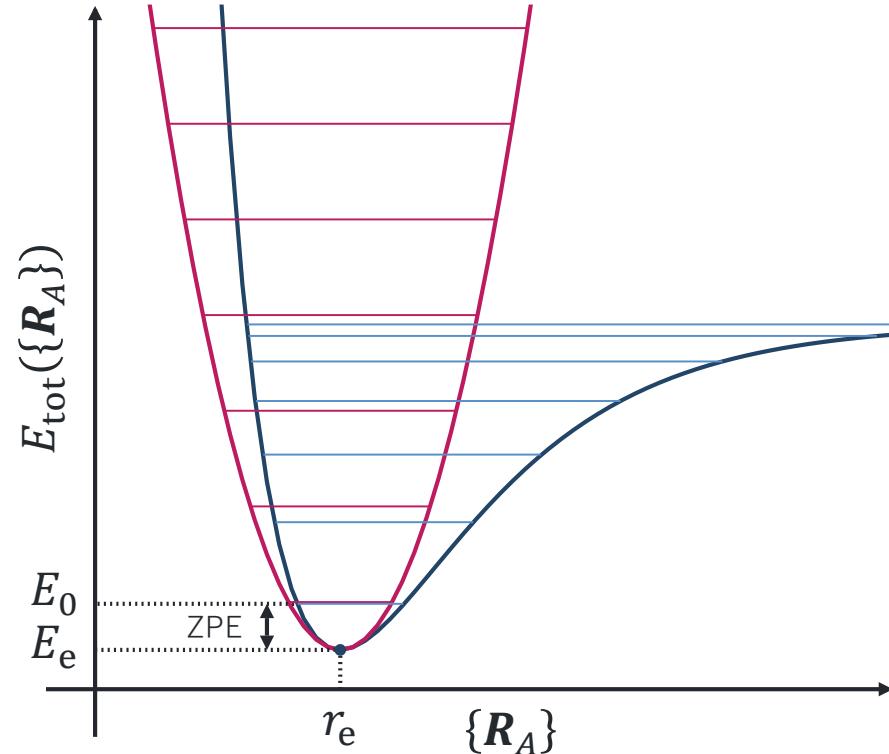
に近似する。このバネ定数 k と換算質量 μ から

$$\omega = \sqrt{k/\mu}$$

として

$$\text{ZPE} \approx \frac{1}{2}\hbar\omega.$$

ただし、Gaussianの k, μ は計算方法が独特なので、計算は自分で行わずにソフトに任せること！



入力

```
# UHF/6-31G(d,p) Units=AU opt freq
```

H2

0 1

H 0.0 0.0 0.0

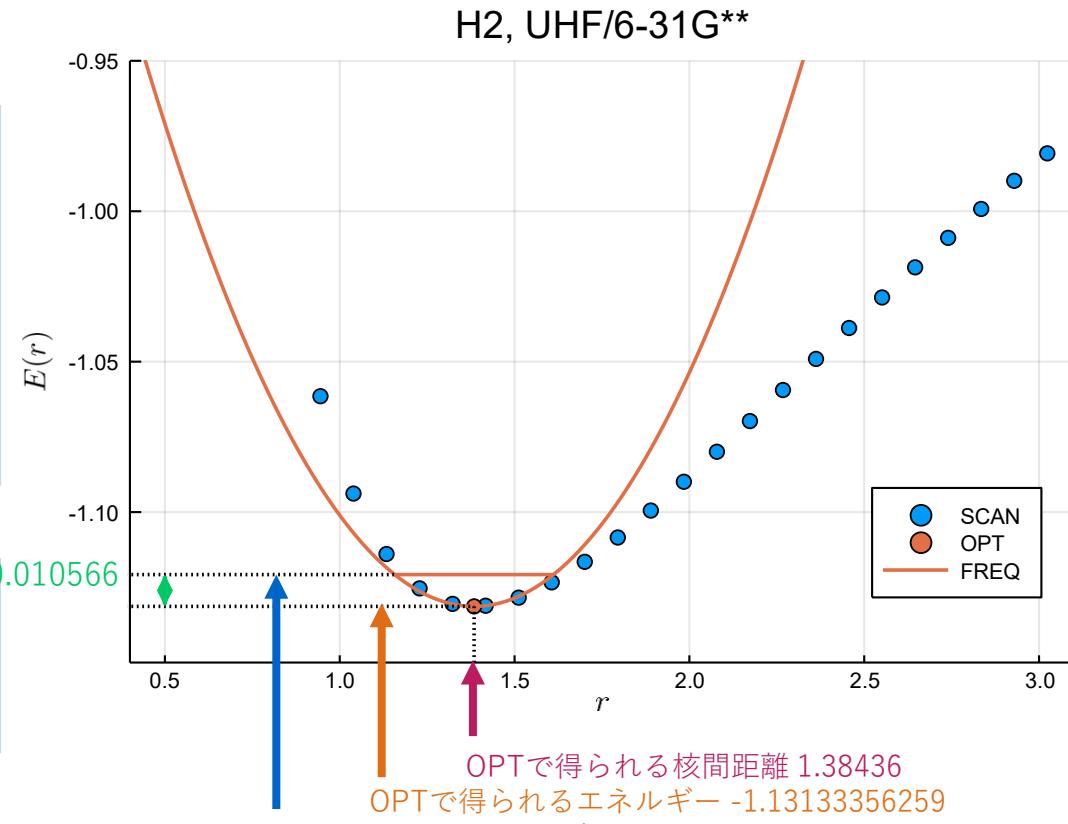
H 0.0 0.0 1.4

結果

次の内容で検索してみよう

- New X, R1, Optimized Parameters など
- E(UHF), |HF など
- Zero-point correction
- Sum of electronic and zero-point Energies

ZPE=0.010566



$$k = 12.7722 \text{ mDyne/A} \div 15.569141 (E_h/a_0^2) / (\text{mDyne/A}) \div 2$$

換算係数 : <http://stemwomen.org/teach/QM/qm54.pdf>

バネ定数・換算質量の計算法 : <https://gaussian.com/wp-content/uploads/dl/vib.pdf>

零点振動（核の運動）の寄与を考慮するとエネルギーは上昇する

examples/freq/H2+/HF/*.gjf

```
# HF/STO-3G Opt Freq
H2+
1 2
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 1.0
```

結果の検索コマンド

```
"E(UHF)"
"and zero-point Energies="
```

HF/基底関数	$\mathcal{E}_{\text{tot}}/E_{\text{h}} \times 10^4$	$\mathcal{E}_{\text{tot}} + \text{ZPE}/E_{\text{h}} \times 10^4$
STO-3G	- 0.582 696 648	- 0.576 444
4-31G	- 0.584 082 314	- 0.579 185
6-31G	- 0.584 082 314	- 0.579 185
6-31G(d)	- 0.584 082 314	- 0.579 185
6-31G(d,p)	- 0.594 498 834	- 0.588 984
6-31++G(d,p)	- 0.595 511 190	- 0.589 972
6-311++G(d,p)	- 0.601 180 382	- 0.595 701
6-311++G(3df,2pd)	- 0.602 252 596 953	計算してみよう
Exact [1,2]	- 0.602 634 619	- 0.597 897

※ 平衡結合長がそれぞれ異なるため注意。

※ 零点振動エネルギーは採用される核の質量によって異なるので注意。また、調和振動子近似やBorn-Oppenheimer近似の有無も異なるため、文献はあくまで目安。

[1] T. C. Scott, M. Aubert-Frécon, J. Grotendorst, *Chemical physics* **324**, 323 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2005.10.031>[2] Y. Hijikata, H. Nakashima, H. Nakatsuji, *Journal of Chemical Physics* **130**, 024102 (2009) <https://doi.org/10.1063/1.3048986>

演習：H₂Oの基準振動モード

90

examples/freq/H2O/HF/*.gjf

```
# HF/STO-3G Opt Freq
```

H2O

0	1		
O	0.0	0.0	0.0
H	0.0	1.4	1.4
H	0.0	1.4	-1.4

結果の検索コマンド

```
grep "Frequencies --" *.out
```

HF/基底関数	対称伸縮 ν_1 / cm ⁻¹	変角 ν_2 / cm ⁻¹	逆対称伸縮 ν_3 / cm ⁻¹
STO-3G	4139.9927	2170.0296	4391.0714
4-31G	3957.6912	1743.0575	4109.3746
6-31G	3988.0041	1737.2447	4144.8467
6-31G(d)	4070.4414	1826.5634	4188.6820
6-31G(d,p)	4147.4374	1769.6745	4229.8006
6-31++G(d,p)	4147.4589	1728.3493	4269.7235
6-311++G(d,p)	4142.9240	1726.1178	4244.9423
6-311++G(3df,2pd)	4149.4832	計算してみよう	4249.1918
実験値 [1]	3657	1595	3756

[1] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Mask=800#ESpecA>

実験値と合わない理由としては、調和振動子近似と電子相関の有無が大きな理由として挙げられる。原子核の質量の違いやBorn-Oppenheimer近似の有無は今回は無視してよい。

演習：IRスペクトル

91

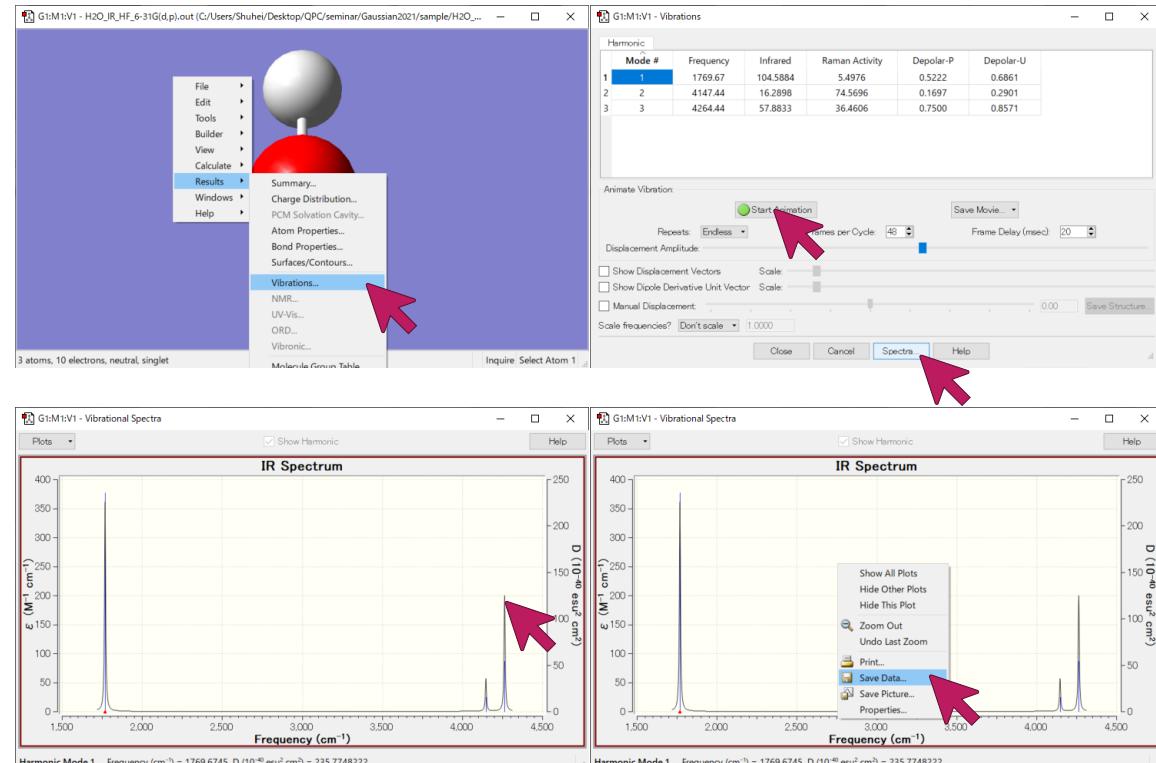
水分子の3つの振動モードをアニメーションで表示し、IRスペクトルの3つのピークを帰属しなさい。

examples/freq/H2O/HF/6-31G(d,p).gjf

```
# HF/6-31G(d,p) Opt Freq
```

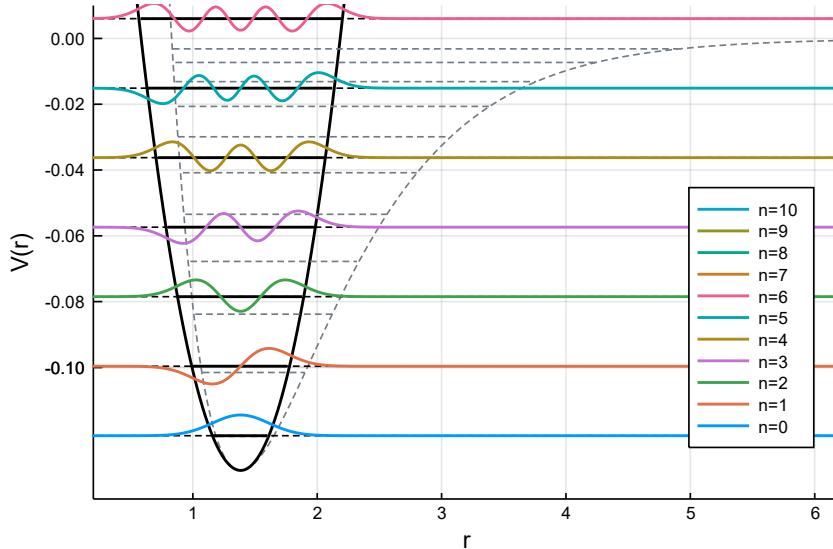
H2O

```
0 1
0 0.0 0.0 0.0
H 0.0 1.4 1.4
H 0.0 1.4 -1.4
```



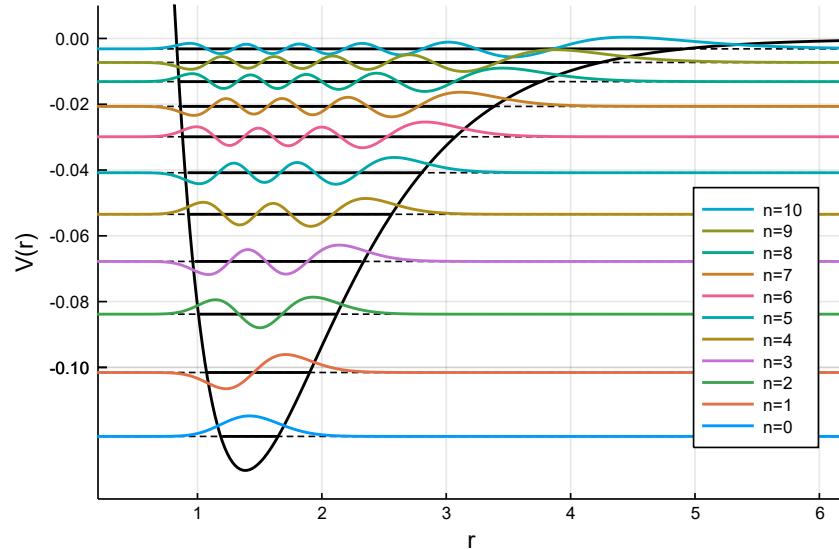
ピークをクリックすると上記のアニメーションが変化する

右クリック > Save Data からプロット用のデータを保存できる



調和振動

- エネルギー準位は等間隔
 - 平衡結合長を中心として対称
- 振動数を過大評価（波長を過小評価）する傾向



非調和振動（モースポテンシャル）

- エネルギー準位の間隔は徐々に狭くなる
 - 励起状態では長距離側にシフト
- 調和振動子では消えていた倍音が顕れる

H_2O の伸縮振動の計算値は実験と500 cm^{-1} 近いズレが生じている。電子相関の欠如によるものか、あるいは調和近似によるものか確かめなさい。基底関数は6-311G++(3df,2pd)で十分と考えてよい。手法はHFとB3LYPを比較せよ。非調和効果の計算には`Freq=Anharmonic`のオプションを用いる。

手法	対称伸縮 v_1 / cm^{-1}	変角 v_2 / cm^{-1}	逆対称伸縮 v_3 / cm^{-1}
HF + 調和	4147	1747	4246
HF + 非調和	3980	1690	4067
B3LYP + 調和	3827	計算してみよう	3928
B3LYP + 非調和	3648	1571	3736
実験値[1]	3657	1595	3756

→ 電子相計算してみよう両方が重要

examples/anharmonic/B3LYP.gjf

```
# B3LYP/6-311++G(3df,2pd) opt freq=anharmonic

H2O

0 1
0
H 1 B1
H 1 B1 2 A1

B1 0.96
A1 109.50
```

examples/anharmonic/HF.gjf

Mode(n)	Status	E(harm)	E(anharm)
1(1)	active	4147.374	3980.346
2(1)	active	1747.815	1690.074
3(1)	active	4246.556	4067.312

計算してみよう

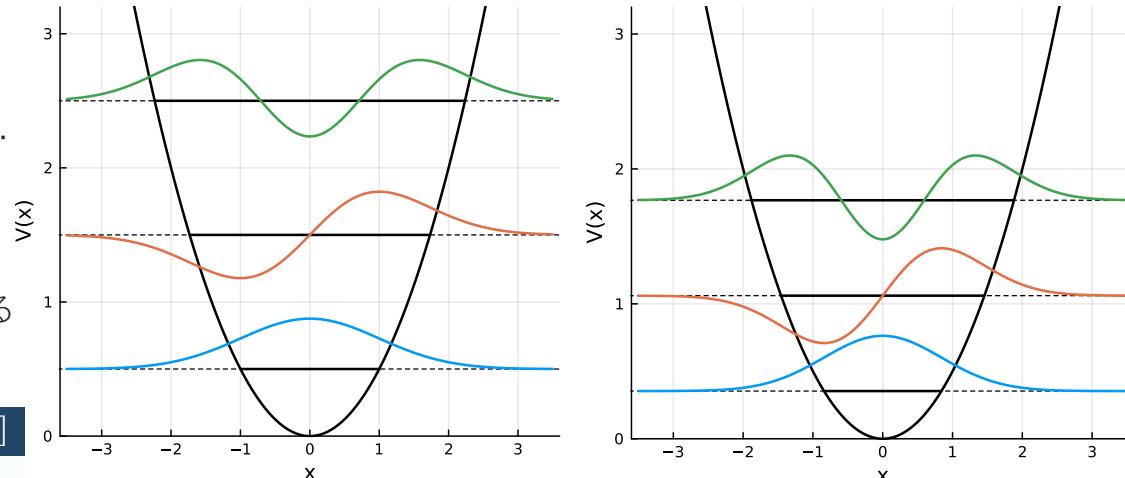
examples/anharmonic/B3LYP.gjf

Mode(n)	Status	E(harm)	E(anharm)
1(1)	active	3827.493	3648.222
2(1)	active	1627.212	1571.530
3(1)	active	3927.696	3756.236

物質中の原子をその同位体に置換することによって、その物質の性質が変化することを同位体効果という。核が重くなると、

- 全エネルギーは下がる
 - 振動数は小さく(波長は長く)なる
- 傾向がある。具体例：

	v	$E_{v=0}/E_h$ [1]	cm^{-1} [2,3]
H_2^+	0	-0.597 139 1	
	1	-0.587 155 7	2191.2
	2	-0.577 751 9	2064
HD^+	0	-0.597 898 0	
	1	-0.589 181 8	1913.01
	2	-0.580 903 7	1816.7



仮にばね定数(ポテンシャル)が同じだとしても、換算質量が大きくなることでエネルギーが下がる。

$$k = 1, \quad \mu = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1}} = \frac{1}{2}$$

$$k = 1, \quad \mu = \frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}} = 1$$

[1] Y. Hijikata, H. Nakashima, H. Nakatsujii, *J. Chem. Phys.* **130**, 024102 (2009); <https://doi.org/10.1063/1.3048986>

[2] A. Ishikawa, H. Nakashima, H. Nakatsujii, *Chim. Phys.*, **401**, 62. (2012); <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2011.09.013>, * HT^+ のみ実験値ではなく理論値

[3] K.P. Huber, G. Herzberg, *Molecular Spectra Molecular Structure IV. Constants of Diatomic Molecules*, Van Nostrand, Reinhold, New York, (1979)

Born-Oppenheimer近似による電子状態計算では原子核の運動が考慮されていないため、同位体に置換しても電子状態、すなわちPESは完全に同じである。同じPES上ではあるが、Freq計算では原子核の質量も考慮されるため、同位体効果の計算が可能である。 H_2O および D_2O の振動数を比較せよ。

	B3LYP/ 6-311++G(3df,2pd)	対称伸縮 ν_1 / cm^{-1}	変角 ν_2 / cm^{-1}	逆対称伸縮 ν_3 / cm^{-1}
H_2O 調和		3827	1627	3928
H_2O 非調和		3648	1571	3736
実験値[1]		3657	1595	3756
D_2O 調和		2759	1191	2879
D_2O 非調和		2666	1162	2775
実験値[2]		2671	1178	2788

計算してみよう

examples/isotope/D20.gjf

```
# B3LYP/6-311++G(3df,2pd) opt freq=anharmonic
D20
0 1
O(Iso=16)
H(Iso=2) 1 B1
H(Iso=2) 1 B1 2 A1
B1 0.96
A1 109.50
```

examples/isotope/H20.out:

Mode(n)	Status	E(harm)	E(anharm)
1(1)	active	3827.493	3648.222
2(1)	active	1627.212	1571.530
3(1)	active	3927.696	3736.236

examples/isotope/D20.out:

Mode(n)	Status	E(harm)	E(anharm)
1(1)	active	2759.214	2556.256
2(1)	active	1191.130	1161.570
3(1)	active	2878.634	2774.884

[1] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Mask=800#Electronic-Spec>

[2] <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7789200&Mask=800#Electronic-Spec>

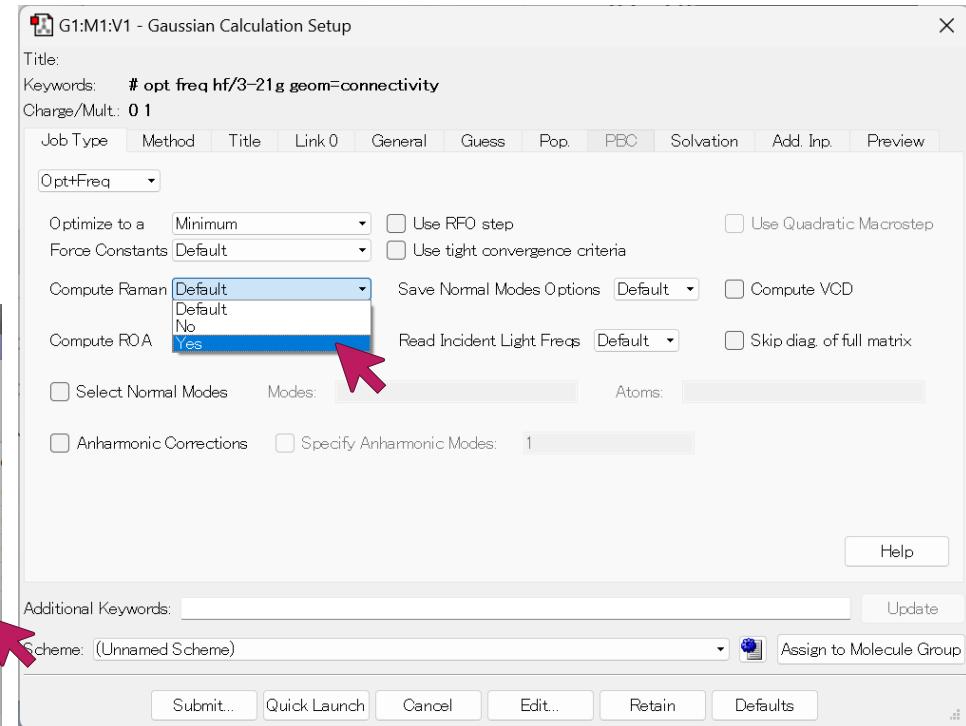
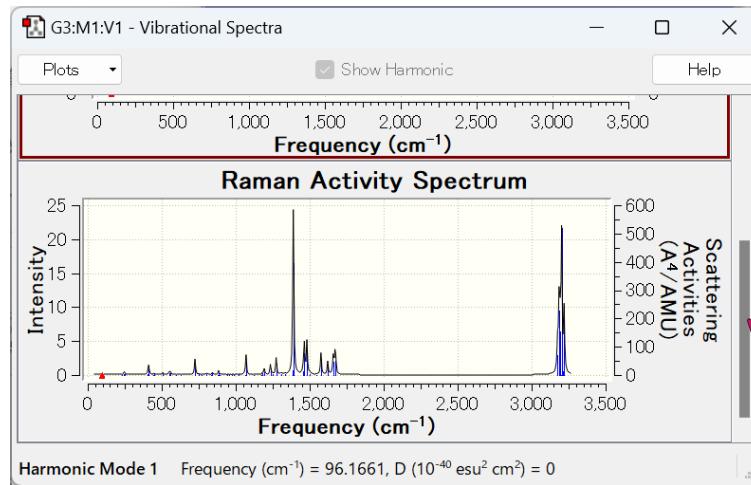
通常、水素は1つの陽子と電子だけからできた安定同位体 ^1H のことを指すが、我々の体内や海水中には一定の割合で同位体である重水素 ^2H が含まれている。

ここでは ^1H をH, ^2H をDと表す。IUPAC RedBook, Nomenclature of Inorganic Chemistry IUPAC RECOMMENDATIONS 2005, RSC Publishing (2005), IR-3.3.2

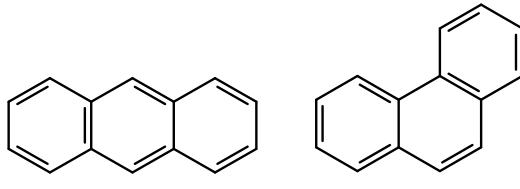
ラマンスペクトル

96

ラマンスペクトルを計算するにはIRスペクトルの計算における`Freq`を`Freq=Raman`に置き換えればよい。GaussView6では右図のよう指定する。結果は下図のようにIRスペクトルの下に表示されているのでスクロールする。



任意の分子の構造異性体のエネルギー, IRスペクトル, ラマンスペクトルを比較せよ. 例:

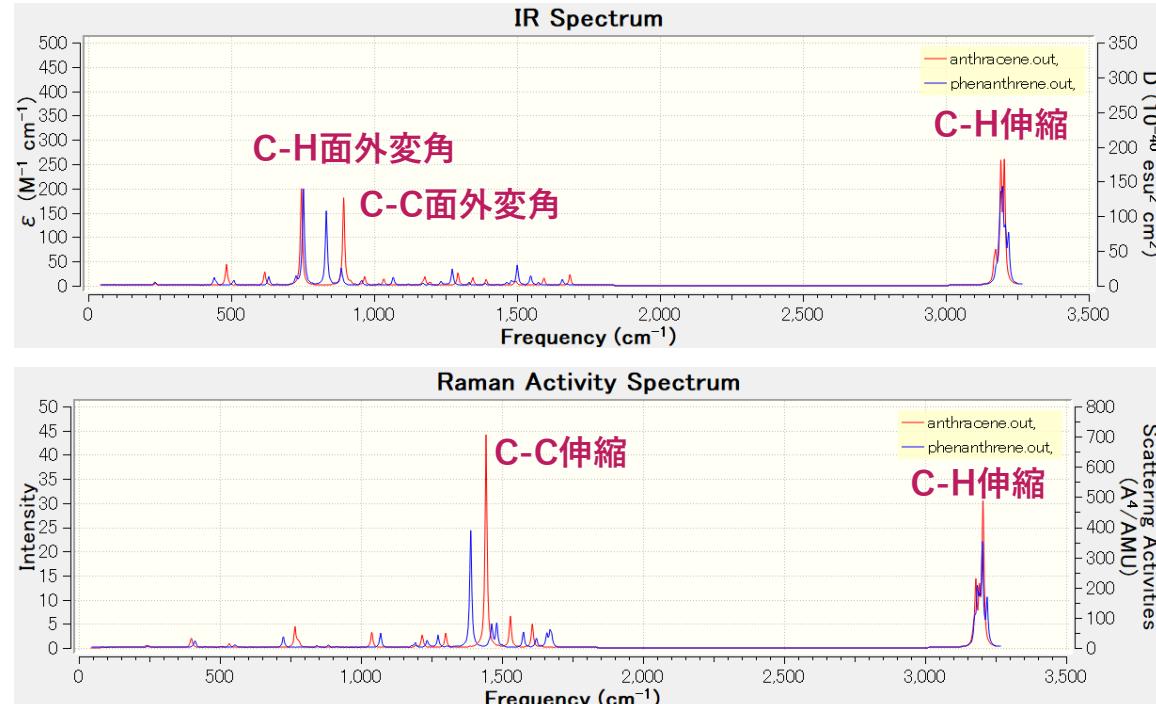


Anthracene

Phenanthrene

$-539.546261 > -539.554442$

上記はB3LYP/6-31G(d,p)で最適化したエネルギーE(RB3LYP)である. 構造異性体のエネルギー差が mE_h スケールであることや, C-C 伸縮がラマン活性だが赤外活性ではないことなどが確認できる.



化学反応

水素の燃焼を題材として反応エンタルピーの計算方法を解説する。窒素の水素化を題材として零点振動エネルギーの重要性に関連した教科書の問題を検証する。

Opt+Freq計算の結果として得られるいくつかのエネルギー：

- **Electronic Energy (EE)**

HF法などで求めたPECの極小値. 核の運動は一切含まれないので, 原子の質量数(同位体)や温度, 圧力には一切依存しない.

- **EE + Zero-point Energy**

EEに零点振動エネルギーを加えたもの. 0Kでの全エネルギー. 各原子の質量数(同位体)には依存するが, 温度や圧力には依存しない.

- **EE + Thermal Energy Correction**

EE+ZPEに加えて, 並進運動 $E_t = \frac{3}{2}RT$ や振動・回転などが含まれる. 零点振動も含まれる. 各原子の質量数(同位体)と温度に依存するが, 圧力には依存しない.

- **EE + Thermal Enthalpy Correction**

上記 + $k_B T$. 零点振動も含まれる. 各原子の質量数(同位体)と温度に依存するが, 圧力には依存しない. エンタルピーの計算にはこの値を使う.

- **EE + Thermal Free Energy Correction**

上記 - $S_{\text{tot}}T$. Gibbsの自由エネルギー. この中では唯一, 圧力にも依存する.

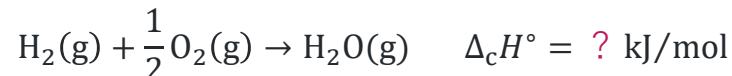
G1:M2:V1 - Gaussian Calculation Summary

Overview Thermo Opt

Imaginary Freq	0	
Temperature	298.150	Kelvin
Pressure	1.00000	atm
Frequencies scaled by	1.0000	
Electronic Energy (EE)	-76.059156	Hartree
Zero-point Energy Correction	0.023113	Hartree
Thermal Correction to Energy	0.025947	Hartree
Thermal Correction to Enthalpy	0.026891	Hartree
Thermal Correction to Free Energy	0.005541	Hartree
EE + Zero-point Energy	-76.036043	Hartree
EE + Thermal Energy Correction	-76.033209	Hartree
EE + Thermal Enthalpy Correction	-76.032265	Hartree
EE + Thermal Free Energy Correction	-76.053615	Hartree
E (Thermal)	16.282	kcal/mol
Heat Capacity (Cv)	5.992	cal/mol-ke
Entropy (S)	44.935	cal/mol-ke

Ok File Help

水素の燃焼における標準反応エンタルピーを計算しよう. $H_2O(l)$ ではなく $H_2O(g)$ の場合なので注意.



結果中にある“Sum of electronic and thermal Enthalpies= -1.118739”などの記述を探そう.

手法/基底関数	H_2	O_2 (三重項) $\div 2$	H_2O	$\Delta_c H^\circ / [\text{kJ/mol}]$
HF/aug-cc-pVTZ	- 1.119 309	- 74.837 350	- 76.034 448	- 204.234 991
CCSD/aug-cc-pVTZ	- 1.166 658	- 75.188 801	- 76.441 170	- 225.035 512
B3LYP/aug-cc-pVTZ	- 1.159 307	- 75.057 476	- 76.308 302	- 240.284 414
G3	- 1.164 078	- 75.122 453	- 76.378 265	- 240.847 584
実験値				- 241.83

インプットファイルのサンプルは examples/enthalpy 内を参照. $1E_h = 4.359\ 744\ 722\ 2071 \times 10^{-18} \text{ J}$: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?hrij> および $N_A = 6.022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?na> より結果に $((4.3597447222071*10^{(-18-3)})*(6.02214076*10^{23}))$ をかけて換算. 平尾公彦・監修, 武次徹也・編著『新版 すぐできる 量子化学計算 ビギナーズマニュアル』(2015) p.85 C5に各種の熱力学量の見積もりに関する解説がある. 実験値は [こちらのサイト](#)の引用元 D. M. Himmelblau, *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 4th Ed., Prentice-Hall, New Jersey (1982) の10.4にある

2008年の試算では人類の約50%が
Haber-Bosch法で合成された窒素
肥料由来の食料で賄われている。

上巻p.214の問題3.32について、
Gaussian16を用いて検証せよ。
具体的にはHF法を用いて次のエ
ネルギー差を計算せよ。



発熱的であることはどの基底関数
でも変わらない。ただし、どちらも
零点振動を考慮しないと実験値と
合わない。前者では+95%。

単位はkcal/mol	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$		$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	
	ΔE_{EE}	$\Delta E_{\text{EE+ZPE}}$	ΔE_{EE}	$\Delta E_{\text{EE+ZPE}}$
HF/STO-3G	-36.186 953	-13.143 186	-72.036 629	-49.851 235
HF/4-31G	-49.372 820	-27.535 743	-72.517 218	-51.635 245
HF/6-31G	-51.803 498	-29.849 371	-74.176 635	-53.172 643
HF/6-31G(d)	-27.785 960	-5.211 466	-54.943 495	-33.951 400
HF/6-31G(d,p)	-33.345 231	-10.965 101	-58.635 770	-37.693 867
HF/6-311++G(d,p)	-36.331 650	-14.096 373	-59.012 613	-38.285 608
実験値		-18.604 000		-45.894 000

計算してみよう

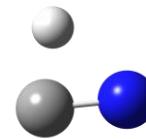
ΔH ではなく $\Delta E_{\text{EE+ZPE}}$ なので注意。零点振動エネルギーを含むが、並進や回転、 $k_B T$ は含まない。OKを意味する。圧力にも依存しない。

A.ザボ, N.S.オストランド著, 大野公男, 阪井健男, 望月祐志訳. 『新しい量子化学電子構造の理論入門上』, 東京大学出版会, 1987. p.214 問題3.32

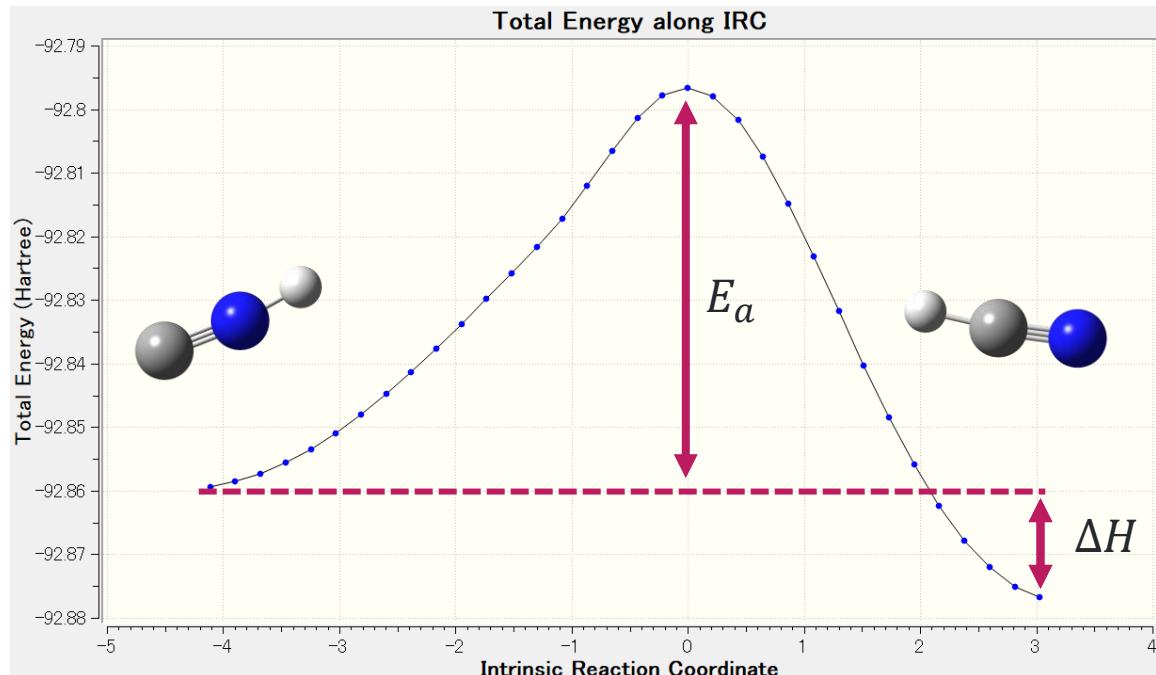
計算のインプットはexamples/3.32/内を参照せよ。なおエネルギーの値は表3.11～表3.13とややズれているため注意。スクリプトまたはインプットに問題がある可能性がある。試算については J. Erisman, M. Sutton, J. Galloway, et al. *Nature Geosci* 1, 636 (2008). <https://doi.org/10.1038/ngeo325> のFigure 1を参照せよ。

遷移状態

反応経路において重要な概念である遷移状態の理解とその探索, IRC計算について解説する. HCNおよびHNCの水素移動反応, NH₃のWalden反転, S_N2反応 ($\text{ClCH}_3 + \text{Br}^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{CH}_3\text{Br}$) という3つの例を用いてIRC計算を試してみよう.



ガスコンロではメタンやプロパンなどの可燃ガスを燃やしている。これらの可燃ガスは空气中に存在するだけでは発火しない。圧電素子を叩いて高電圧を発生させ、ガスの近くで放電することで着火させる。ライターの着火でカチカチ音がするのも同じ理屈である。このように、化学反応はエネルギーが低い方に自動的に進むわけではなく、ポテンシャルの障壁を超えるようなエネルギーが必要となる。これを活性化工エネルギー E_a という。



活性化工エネルギーを計算するために遷移状態を求める必要がある。

演習：遷移状態の探索

104

遷移状態の探索では、まず虚振動1の点に収束させるとよい。例えば $\text{HCN} \rightleftharpoons \text{HNC}$ の遷移状態を探すときは $\angle \text{HCN} = 90^\circ$ に固定して最適化すれば反応経路に入ることができる。さらに `Opt=(TS)` を用いて遷移状態を見つけることができる。



`examples/IRC/isomerization.gjf`

```
%chk=isomerization.chk
# HF/6-31G(d,p) opt=Z-matrix freq

HCN optimization in 90-degree

0 1
H
C 1 B1
N 2 B2 1 A1

B1 1.0
B2 1.0

A1 90.0

--Link1--
%chk=isomerization.chk
# HF/ChkBasis Geom=Check Guess=Read opt=(CalcAll,TS) freq

TS

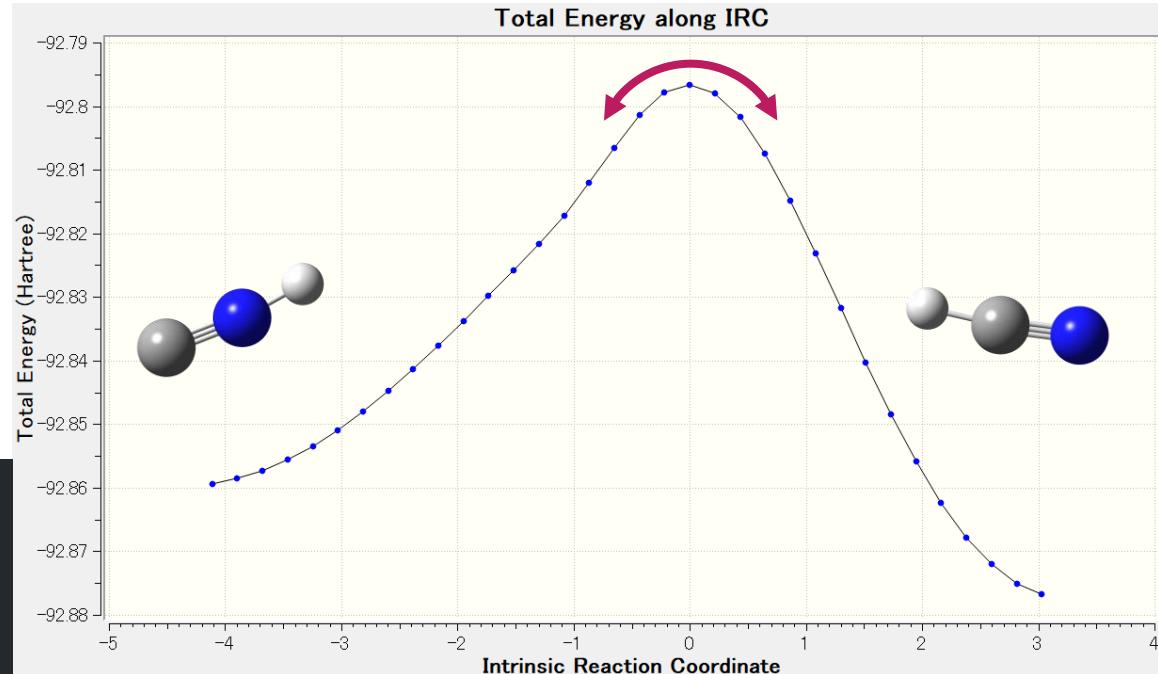
0 1
```

ひとたび遷移状態が得られれば、それを出発点としてIRC計算を行うことができる。先ほどの遷移状態を出発点としてIRC計算を行い、右図を描写しよう。TSに構造最適化した結果のchkファイルを読み込んでIRC計算を行えばよい。

examples/IRC/isomerization.gjfの3つ目のジョブを参照せよ：

```
--Link1--
%chk=isomerization.chk
# HF/ChkBasis Geom=Check Guess=Read
IRC=(CalcAll,maxpoints=60,StepSize=20)

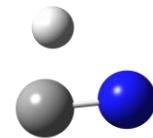
IRC
0 1
```



遷移状態を出発点として反応経路を調べることができる。

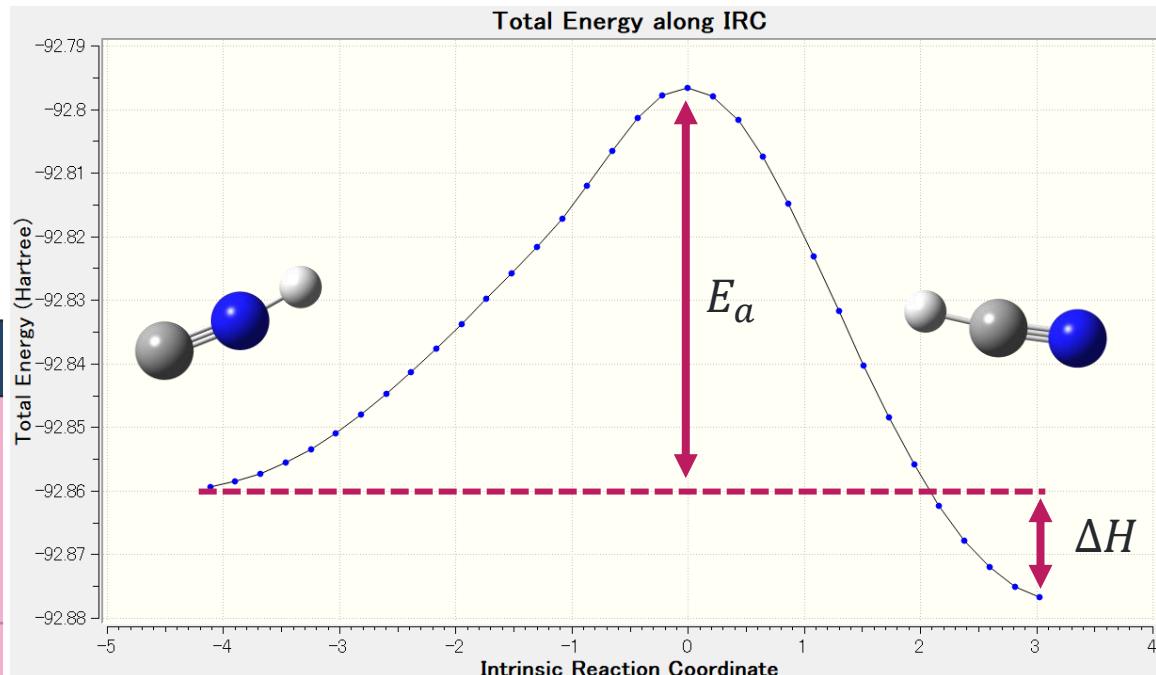
演習：異性化反応

106



さて, IRC計算によって遷移状態から2つの構造が見つかった. これら HCNとHNC, そして遷移状態での Opt + Freq計算から $\text{HCN} \rightarrow \text{HNC}$ の標準生成エンタルピー ΔH° と 活性化エネルギー E_a を算出せよ.

	EE + T. Ent. C. / E_h
HNC	-92.838 913
TS	-92.781 160
HCN	計算してみよう
E_a	0.057 753
ΔH°	-0.016 920



IRC計算は正確な平衡構造（直線型）には到達しないので, それぞれ最適化している.

平尾公彦・監修, 武次徹也・編著『新版 すぐできる量子化学計算 ビギナーズマニュアル』(2015) p.104 C10に $\text{HCO}^+ \rightarrow \text{COH}^+$ の例がある.

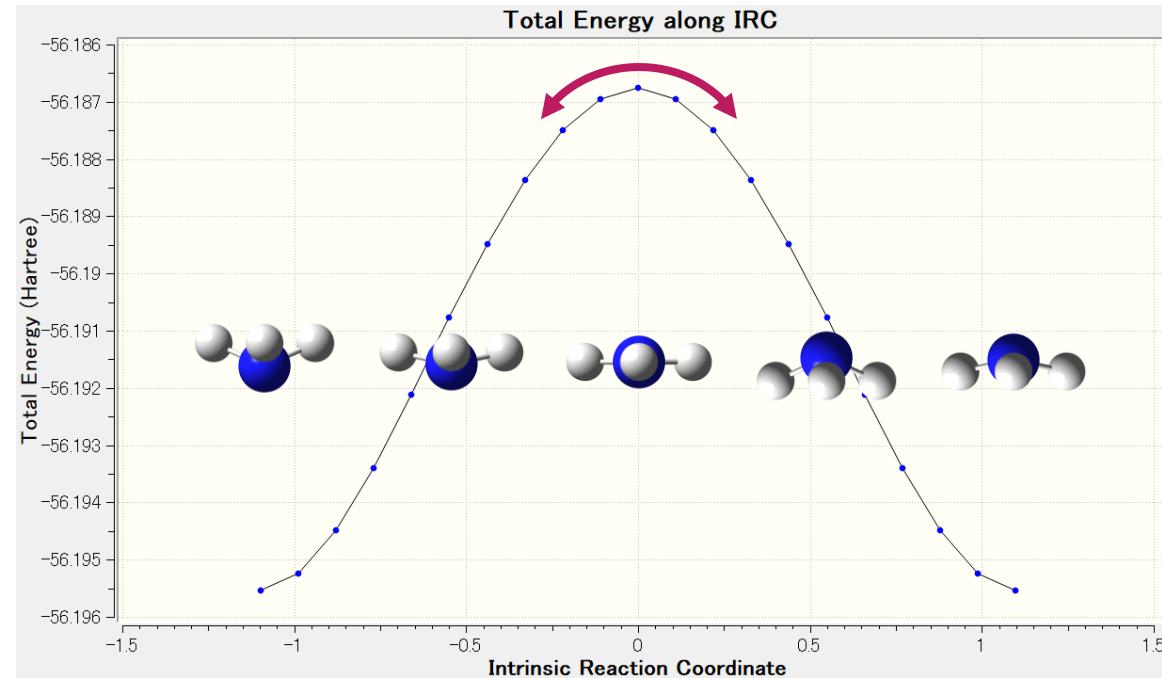
D. Talbi, Y. Ellinger, Chemical Physics Letters 263, 385 (1996) [https://doi.org/10.1016/s0009-2614\(96\)01253-5](https://doi.org/10.1016/s0009-2614(96)01253-5) も併せて参考されたい.

演習：Walden反転

107

NH_3 のWalden反転を例にIRC計算を練習しよう。 NH_3 は平面構造が遷移状態であることが知られているので、平面に固定して最適化すれば反応経路に入ることができ、それを元にして遷移状態を用意することができる。

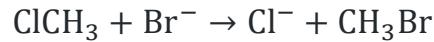
examples/IRC/Walden.gjfの計算を実行せよ。結果の右クリック > Results > IRC/Path から、反応経路を表示することができる。また、右クリック > File > Save Movie > Save Movie Frame Files から全ての構造を画像で保存できる。



演習：S_N2反応

108

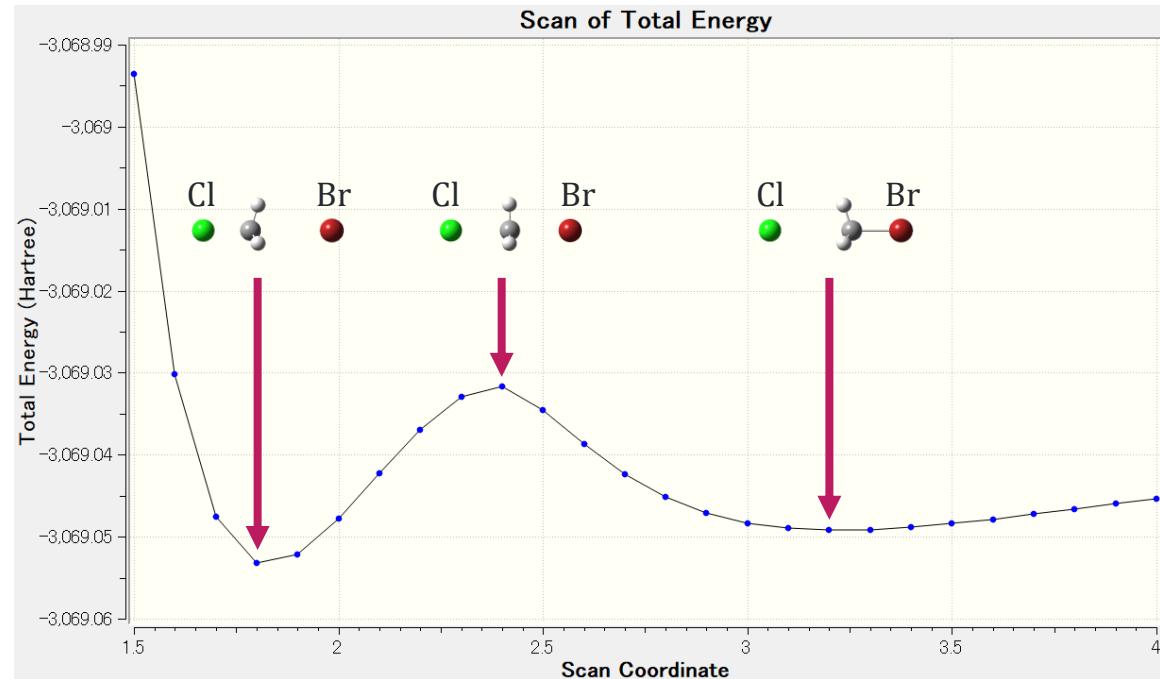
次のS_N2反応※



のTSを見つけなさい. 右図はIRC計算ではなくCl - C間距離を横軸の値にそれぞれ固定し, 最適化を行ったものであるため注意せよ.

(examples/IRC/SN2.gjfの一つ目のジョブ)

GaussView6ではSilicon Trigonal Bipyramidalを利用すれば初期構造を作ることができる. Cl-C-Brを直線上におき, CH₃を平面上に制限して最適化すれば遷移構造を見つける. Opt=Z-matrixでCl-C長とC-Br長以外を制限すればよい.



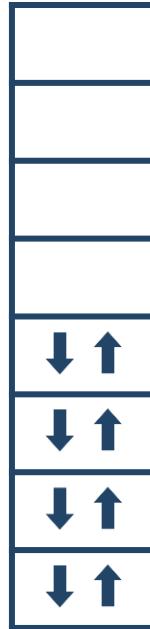
※ 化学式の順番等は右図に併せているためおかしな表記になっている. ただし, 電荷密度解析によればClの電荷は-1だがBrはほぼ中性である.
<http://pc-chem-basics.blog.jp/archives/1479575.html> に $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{F}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{Br} + \text{Cl}^-$ の例がある
https://www2.itc.nagoya-u.ac.jp/pub/pdf/pdf/vol06_02/190_207kouza.pdf に $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{F}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{F} + \text{Cl}^-$ の例がある
<https://katakago.sakura.ne.jp/cc/wm/mop09a/sn2.pdf> に $\text{CH}_3\text{NH}_3 + \text{Br}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{Br} + \text{NH}_3^-$ の例がある

電子励起

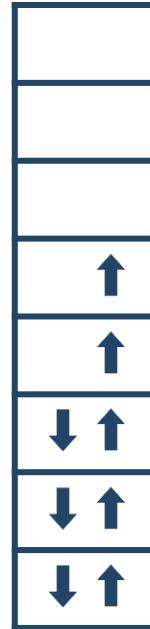
まず酸素を題材としたシングレット状態とトリプレット状態の計算について解説する. 次に水素原子および炎色反応を題材として原子の可視紫外分光スペクトルの計算方法を解説する. 最後に分子のスペクトルの計算方法を解説する.

一重項と三重項

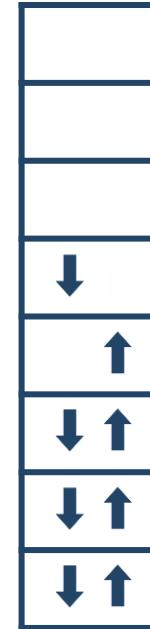
110



シングレット状態



トリプレット状態



シングレット励起状態



トリプレット励起状態

→ 通常はシングレットの方が安定だが、シングレットとトリプレットどちらが基底状態かは系による。

※ 画像はイメージです。C原子やO原子、O₂分子ではトリプレットの方が安定である。

演習：酸素

111

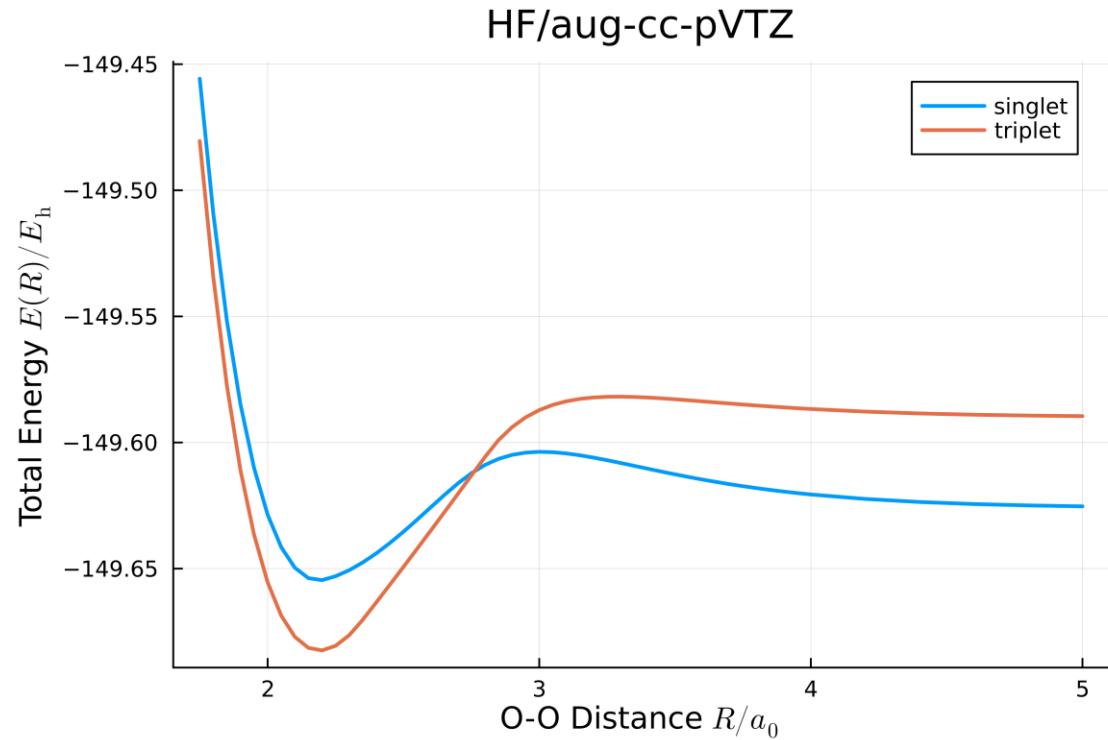
酸素分子 O_2 では平衡構造において、一重項よりも三重項の方が低いエネルギーをもつ。HF法で一重項と三重項それぞれのエネルギーを比較せよ。CCSD法でもこのエネルギーの大小関係は同じか？

[examples/multiplicity/triplet.gjf](#)

```
# HF/aug-cc-pVTZ opt

O2 triplet

0  3
0  0.0  0.0  0.0
0  0.0  0.0  2.2
```



計算手法

- ZINDO 半経験的分子軌道法による励起状態計算.
- CIS CISの基底状態はHFと変わらない* が, 励起状態が計算できる.
- TDDFT TD B3LYP/6-31G(d)のように使う. TDの後には空白が必要. TDは後に書いてもよい.
- CASSCF 精密な計算だが, 使用方法が少し難しい.

計算方法

- 吸収波長 基底状態で構造最適化 → 基底状態と励起状態のエネルギー差を計算
- 蛍光波長 励起状態で構造最適化 → 基底状態と励起状態のエネルギー差を計算

分子の場合は構造最適化を行ってからでなければならない（Franck-Condonの原理で検索せよ）が, 原子の場合は構造最適化が必要ないため, まずは原子で練習していくことが教育的であると思われる.

* Brillouinの定理として知られている. 下記の文献を参照せよ.

A. ザボ, N.S. オストランド著, 大野公男, 阪井健男, 望月祐志訳, 『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』(東京大学出版会, 1987) p.140 3.3.2
志賀 基之, 電子状態理論の初步V, アンサンブル 15, 116 (2013) <https://doi.org/10.11436/mssj.15.116>

CIS法では励起状態を計算することができる。右表は水素原子の例である CIS/6-311++G で計算した波長は 119.57 nm であり Lyman α 線の波長 121.56 nm を再現している。なお、水素原子では++を加えないと励起状態のエネルギーが全く記述できない。

examples/Lyman/CIS/6-311++G.gjf

```
# CIS/6-311++G

Lyman series

0 2
H 0.0 0.0 0.0
```

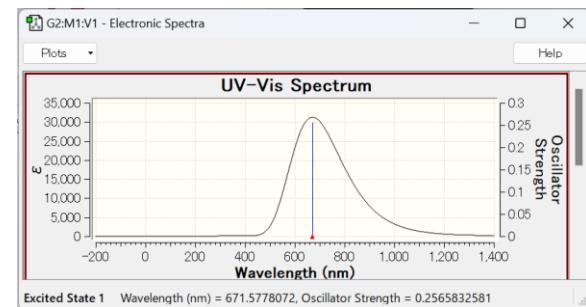
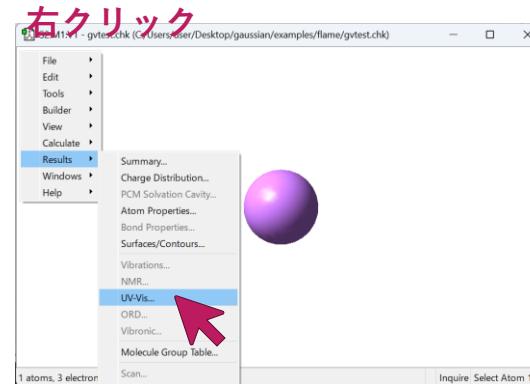
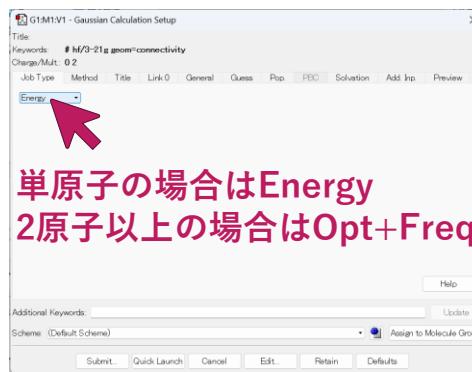
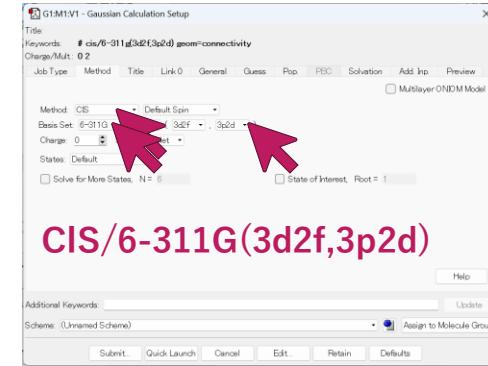
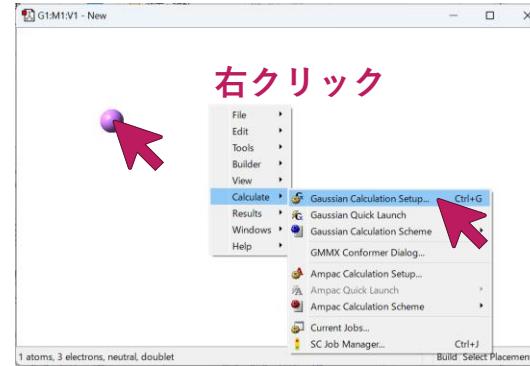
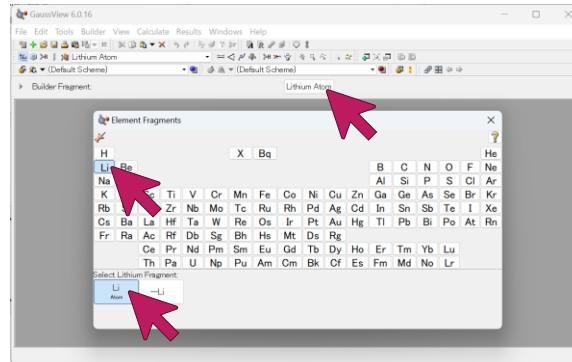
$E(H)/E_h$	HF	CIS
3-21G	-0.496 198 636	0.586 483 103
4-31G	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-31G	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-31G(d)	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-31G(d,p)	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-31+G	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-31+G(d)	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-31+G(d,p)	-0.498 232 909	0.460 934 644
6-311G	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311G(d)	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311G(d,p)	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311G(3d2f,3p2d)	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311+G	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311+G(d)	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311+G(d,p)	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-311+G(3d2f,3p2d)	-0.499 809 815	0.025 905 566
6-31++G	-0.498 801 102	-0.116 403 310
6-31++G(d)	-0.498 801 102	-0.116 403 310
6-31++G(d,p)	-0.498 801 102	-0.116 403 310
6-311++G	-0.499 817 916	-0.118 768 036
6-311++G(d)	-0.499 817 916	-0.118 768 036
6-311++G(d,p)	-0.499 817 916	-0.118 768 036
6-311++G(3d2f,3p2d)	-0.499 817 916	-0.118 768 036
Exact	-0.500 000 000	-0.125 000 000

解析解は下記パッケージを参照。

<https://ohno.github.io/Antique.jl/stable/HydrogenAtom/>

演習：UV-Visスペクトル

Liを計算してみよう



実験値は670.8nm[1]

CIS/6-311G(3d2f,3p2d)でリチウムの吸収・蛍光波長が計算できた. これを参考に他の金属も計算せよ. ただし, 基底関数にはSDDを用い, TD-DFT法の結果および実験値と比較せよ. 単位はnmとする.

	CIS/SDD	TD B3YLP/SDD	TD APFD/SDD	TD HSEH1PBE/SDD	実験値
Li	676.51	623.68	627.3	624.60	610.3667, 670.7926
Na	622.24	548.19	584.68	583.12	588.9950
K	866.70	713.14	777.89	767.14	404.414, 766.48991
Rb	897.38	731.4 計算してみよう	802.01	777.06	780.027
Cu	379.70	1008.49	797.86	779.21	780.7659
Ca	393.19	554.99	544.19	543.43	558.8757
Sr	435.47	502.12	512.57	512.13	460.733

分子の吸収波長

HF法で構造最適化し、その構造においてCIS法の計算すれば、吸光波長を予測できる。右図はH₂の例である。

examples/UV-vis/abs.gif

```
%chk=abs.chk
# HF/aug-cc-pVTZ opt

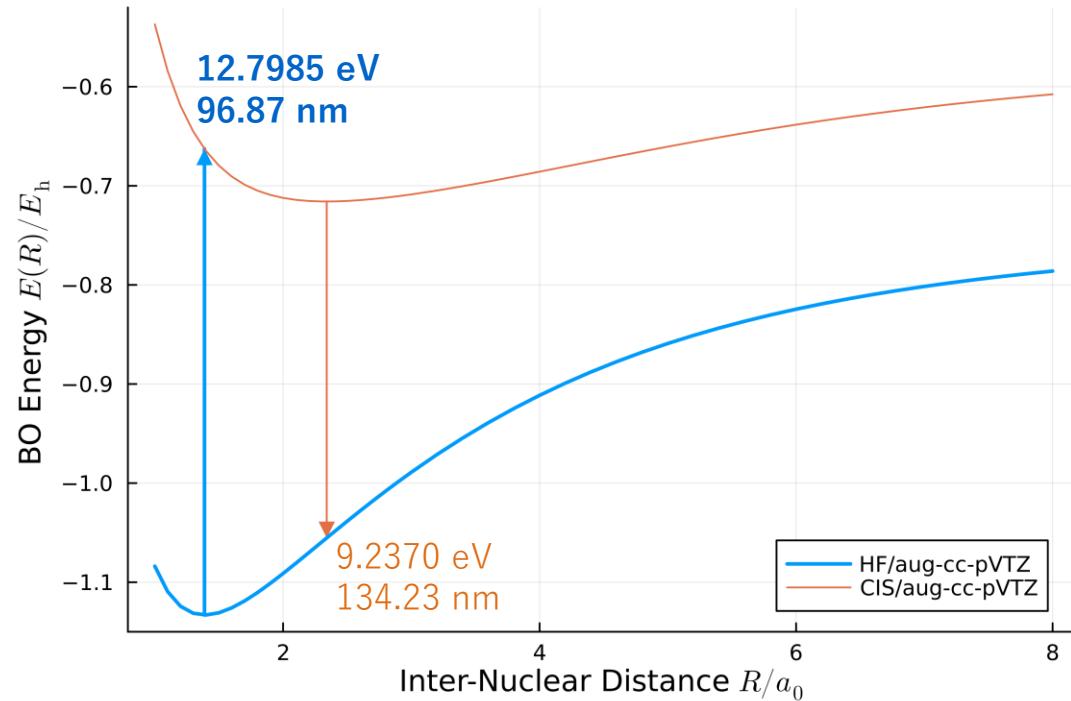
opt

0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 2.0

--Link1--
%Chk=abs.chk
# CIS/ChkBasis Geom=Check Guess=Read

absorption

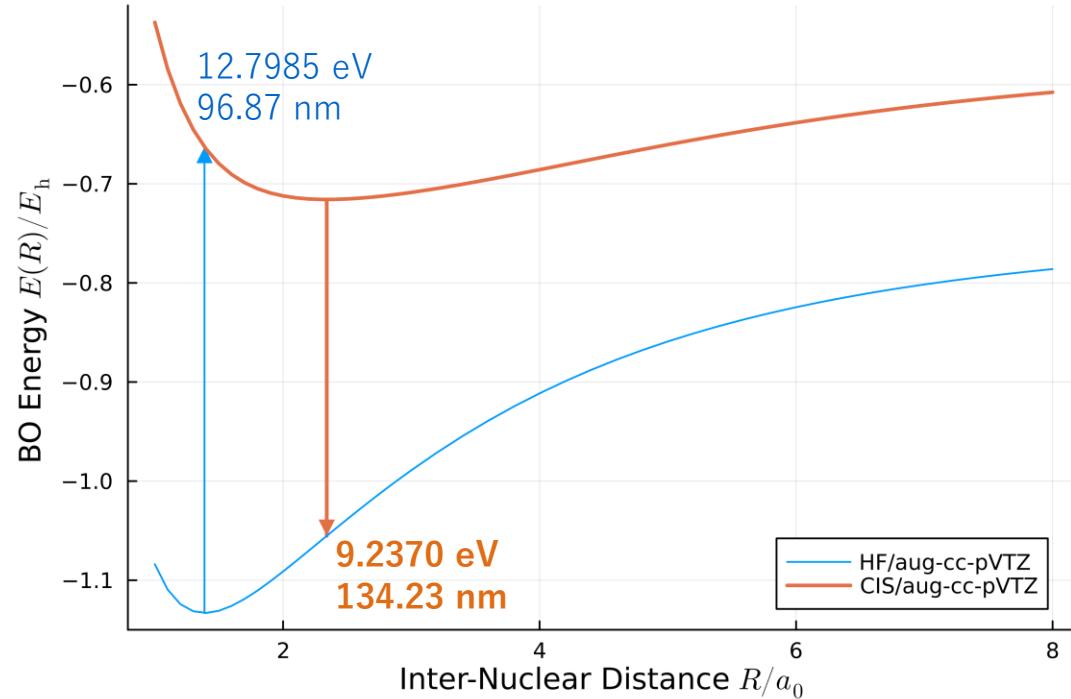
0 1
```



CIS法で構造最適化すれば、そのまま蛍光波長を予測できる。右図はH₂の例である。実験値は 133.57 nm であるから、かなり近い値が得られているようである。

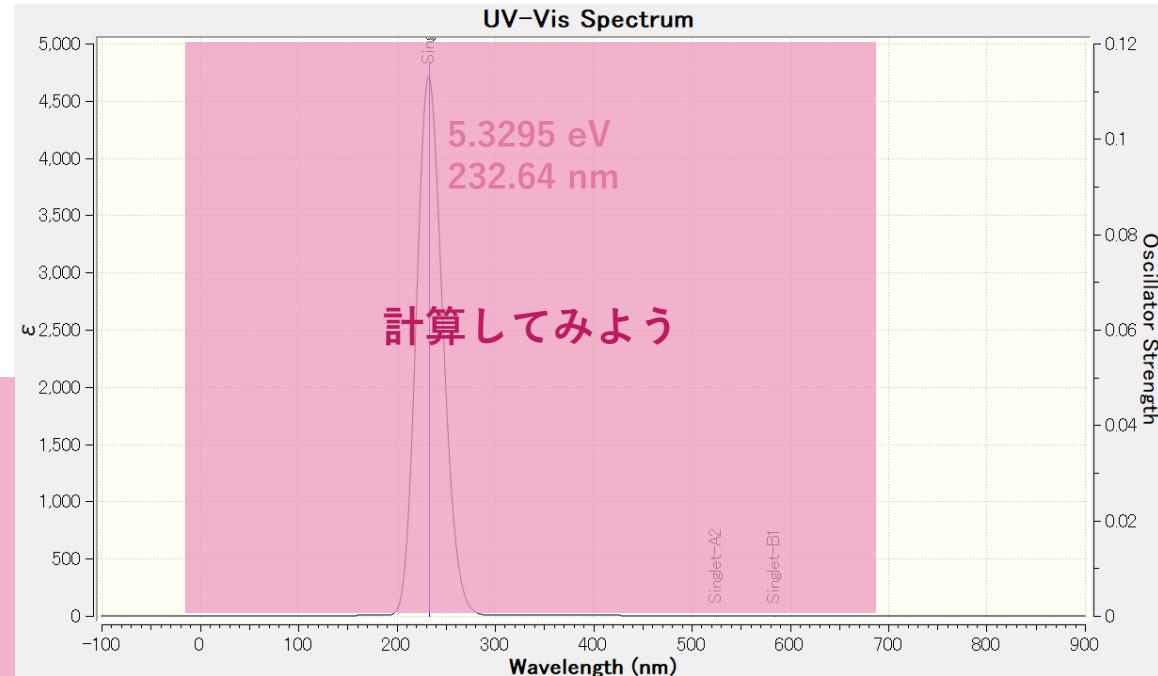
examples/UV-vis/emi.gjf

```
# CIS/aug-cc-pVTZ opt
opt + emission
0 1
H 0.0 0.0 0.0
H 0.0 0.0 2.0
```



オゾン O_3 は太陽からの有害な紫外線を吸収し、地上の生態系を保護しているとされる[1]。その吸収波長は200~300nm付近である[2]。この波長をB3LYP/aug-cc-pVTZおよびTD B3LYP/aug-cc-pVTZを用いて検証せよ。

examples/UV-vis/O3/B3LYP.gifの結果



文献のスペクトルよりも吸収波長がやや短いが、概ね一致している。
B3LYP以外の汎関数 (CAM-B3LYP, wB97XD, APFD) でも計算せよ。

[1] <https://www.data.jma.go.jp/env/ozonehp/3-10ozone.html>
1980年代にはウィーン条約やモントリオール議定書によりオゾン層に向けたの保護の国際的な枠組みが整備された他、国内でもオゾン層保護法やフロン排出抑制法が施行されている。詳細は経済産業省のホームページ (https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/ozone/index.html) を参照されたい。

[2] https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/attach/1333534.htm

基底状態も励起状態も計算でき、同じ軌道の数を使えばCI法よりも正確。

手法/基底関数	基底状態 E_h	手法/基底関数	第一励起 E_h
HF/6-31G(d,p)	-1.131 284 347	CIS/6-31G(d,p)	-0.576 396 215
CASSCF(2,2)/6-31G(d,p)	-1.149 536 252	CASSCF(2,2,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.605 862 850
CASSCF(2,3)/6-31G(d,p)	-1.156 823 423	CASSCF(2,3,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.605 862 850
CASSCF(2,4)/6-31G(d,p)	-1.157 238 374	CASSCF(2,4,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.608 983 212
CASSCF(2,5)/6-31G(d,p)	-1.160 601 679	CASSCF(2,5,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.608 983 212
CASSCF(2,6)/6-31G(d,p)	-1.163 907 750	CASSCF(2,6,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.608 983 212
CASSCF(2,7)/6-31G(d,p)	-1.164 380 644	CASSCF(2,7,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.608 983 214
CASSCF(2,8)/6-31G(d,p)	-1.164 737 326	CASSCF(2,8,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.610 921 593
CASSCF(2,9)/6-31G(d,p)	-1.165 090 846	CASSCF(2,9,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.612 826 564
CISD/6-31G(d,p)	-1.165 153 434	-	-
CASSCF(2,10)/6-31G(d,p)	-1.165 153 436	CASSCF(2,10,NRoot=2)/6-31G(d,p)	-0.613 194 241

水素分子H₂において核間距離を $1.4 a_0$ に固定して計算を行った。CASSCFでは励起状態も計算できる。examples/CASSCF内のファイルを参照せよ。

おわりに

最後に各自の演習を取ります. 演習にあたって, いくつかの注意点を述べます. 気軽に質問してください.

- 99割はスペルミス
- 基底関数や手法の名前が間違っている
- 全角の空白が入っている
- 半角の空白が足りない
- ファイルやフォルダの名前に日本語や全角文字（ θ や α など）が入っている
- インプットの下3行は空行を入れないといけない
- 分子が直線や平面の構造だと最適化がうまくいかない場合がある
- 原子の座標が重なっている, 近すぎる（1ボーアより近いとエラーが出る）
- 距離の単位はデフォルトではオングストーム. Units=AUを指定するとボーアが使える.
- IRCでは遷移状態が出発点になっていないといけない
- 遷移状態を計算するときは GV のForce ConstantをCalculate at all Points にすること

- 自前の基底関数系 (GEN)
- DFTにおける分散力以外の補正
- Gibbs自由エネルギーに関する演習課題
- その他の熱力学量
- 擬ポテンシャル
- 分子力学法
- 半経験的分子軌道法
- ONIOM
- 触媒反応 (触媒分子の有無による反応障壁の変化など)
- 金属表面での反応
- ...

課題

- 計算対象の分子を決めなさい. 複数の分子の計算結果を比較してもよい. 卒業研究に関連する分子や興味のある分子など, 好きな分子を選んでよいが, 計算コストを抑えるために簡略化した分子を選ぶとよい.
- 構造最適化計算および振動解析を行い, 虚振動が出ていないか（極小点であるか）確認すること.
- 複数の手法, 3種類以上の基底関数を用いて計算し, 基底関数依存性を評価せよ.
- 反応エンタルピー, 分子構造, 紫外可視吸収・蛍光・IR・NMR・ESR等のスペクトルや波長に関する先行研究（実験 or 計算）を1つ以上見つけ, その物理量をGaussianを用いて計算し, 比較せよ.
- 先行研究ある計算をベースとして, 先行研究が無い計算も行うとなお良い.
- 先輩や教員に相談しながら進めるとなお良い.
- その分子を選んだ理由, 実際に計算してみた感想なども簡単に述べてください.

発表

- 各自, スライド数枚で発表してもらいます.
- 昨年の『発表資料作成方法』を参考に資料を作成してください.
- テーマを確定する必要はありませんが, 少し計算を流してから帰ってください.

付録：SCFの手続き

ザボ・オストランド『新しい量子化学電子構造の理論入門 上』の付録Bに掲載されたプログラムを読み,
実際に動かしてみよう. 繰り返しのたびに行列要素やエネルギーが変化する様子を観察できる.

手順1~4

入力および初期化. 分子積分を用意する手順2に系の特徴が全て含まれる.

手順5~11

SCFの順7~9が, 式(3.159)の一般化固有値問題を解く手続き. 分子によらず共通.

手順12

結果の解析. 式(3.184)などからエネルギー等を計算する.

$$E_0 = \frac{1}{2} \sum_{\mu, \nu} P_{\mu \nu} (H_{\mu \nu}^{\text{core}} + F_{\mu \nu})$$

1	入力 $\{R_A\}, \{Z_A\}, N, \{\phi_\mu\}$	7	式(3.177) 正準直交化 $F' = X^\dagger F X$
2	分子積分の計算 $S, H_{\mu \nu}^{\text{core}}, (\mu \nu \lambda \sigma)$	8	標準固有値問題 式(3.178) を解く $F' \mapsto C', \epsilon$ $F' C' = C' \epsilon$
3	式(3.167) 正準直交化の準備 $X = U S^{-1/2}$	9	式(3.174) $C = X C'$
4	密度行列 P の初期値を設定 $P = \begin{pmatrix} 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots \end{pmatrix}$	10	式(3.145) $P_{\mu \nu} = 2 \sum_a^{N/2} C_{\mu a} C_{\nu a}^*$
5	式(3.154)の G を計算する $G_{\mu \nu} = \sum_{\lambda, \sigma} P_{\lambda \sigma} \left[(\mu \nu \sigma \lambda) - \frac{1}{2} (\mu \lambda \sigma \nu) \right]$	11	収束判定, ダメなら(5)に戻る
6	式(3.154)から F を計算する $F = H^{\text{core}} + G$	12	出力 $G, F, C, P \mapsto E_0, \text{etc.}$

付録Bのプログラム

130

上巻の付録Bのプログラムは

[Quantum Chemistry Program Exchange](#)

で配布されている。

underlying theory, please read the book... I think that
the readers that do not want to type in the program

File List for szabo Directory

- [szabo.f](#) [18kB] : Program contained in the book

Instructions

1. install gfortran (or another fortran77 compiler)

をダウンロードしよう。

```
C*****
C
C MINIMAL BASIS STO-3G CALCULATION ON HEH+
C
C THIS IS A LITTLE DUMMY MAIN PROGRAM WHICH CALLS HFCALC
C
C APPENDIX B: TWO-ELECTRON SELF-CONSISTENT-FIELD PROGRAM
C OF MODERN QUANTUM CHEMISTRY by
C Attila Szabo and Neil S. Ostlund
C Ed. 2nd (1989) Dover Publications INC.
C
C Labourly Typed by Michael Zitolo (Feb., 2005)
C Edited and Compiled by Michael Zitolo and Xihua Chen
C
C Cleaned up and debugged again by Andrew Long (2012)
C and Daniele (kalium) Dondi (2013)
C*****
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
IOP=2
N=3
R=1.4632D0
ZETA1=2.0925D0
ZETA2=1.24D0
ZA=2.0D0
ZB=1.0D0
CALL HFCALC(IOP,N,R,ZETA1,ZETA2,ZA,ZB)
END
```

Q. 付録Aの式(A.9)の積分の名前は？

→ 重なり積分

Q. 式(A.9)はプログラムの何行目か？

→ 231行目

Q. その関数の引数と式(A.9)の記号の対応表を完成させなさい。

→	プログラム	式(A.9)
	A	α
	B	β
	RAB2	$ \mathbf{R}_A - \mathbf{R}_B ^2$

```

C*****
FUNCTION S(A,B,RAB2)
C
C CALCULATES OVERLAPS FOR UN-NORMALIZED PRIMITIVES
C
C*****
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DATA PI/3.1415926535898D0/
S=(PI/(A+B))**1.5D0*DEXP(-A*B*RAB2/(A+B))
RETURN
END

```

$$(A|B) = \left[\frac{\pi}{\alpha + \beta} \right]^{3/2} \exp \left[-\frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta} |\mathbf{R}_A - \mathbf{R}_B|^2 \right]$$

1. gfortranをインストールする
2. コンパイルして実行

Windowsの場合

```
gfortran szabo.f -o szabo.exe
szabo.exe > szabo.out
type szabo.out
```



Linux環境の場合

```
gfortran szabo.f -o szabo
./szabo > szabo.out
cat szabo.out
```

STO-3G FOR ATOMIC NUMBERS 2.00 AND 1.00				
R	ZETA1	ZETA2	S12	T11
1.463200	2.092500	1.240000	0.450770	2.164313
T12	T22	V11A	V12A	V22A
0.167013	0.760033	-4.139827	-1.102912	-1.265246
V11B	V12B	V22B	V1111	V2111
-0.677230	-0.411305	-1.226615	1.307152	0.437279
V2121	V2211	V2221	V2222	
0.177267	0.605703	0.311795	0.774608	
THE S ARRAY				
		1		2
1		0.1000000000D+01	0.4507704116D+00	
2		0.4507704116D+00	0.1000000000D+01	

計算の最初に用意される分子積分は手計算によって得られた式をプログラムに書き起こしたものである。

Q. STO-3G基底での重なり積分 S_{12} を計算しなさい。

式(B.4), (A.9)およびZETA1, ZETA2を用いよ。

Q. 重なり行列 S から行列 X を求めなさい。

Q. 二電子積分(11|11)を計算しなさい。

STO-3G FOR ATOMIC NUMBERS 2.00 AND 1.00				
R	ZETA1	ZETA2	S12	T11
1.463200	2.092500	1.240000	0.450770	2.164313
T12	T22	V11A	V12A	V22A
0.167013	0.760033	-4.139827	-1.102912	-1.265246
V11B	V12B	V22B	V1111	V2111
-0.677230	-0.411305	-1.226615	1.307152	0.437279
V2121	V2211	V2221	V2222	
0.177267	0.605703	0.311795	0.774608	

THE S ARRAY		
1	1.0000000000D+01	0.4507704116D+00
2	0.4507704116D+00	0.1000000000D+01
THE X ARRAY		
1	0.5870642812D+00	0.9541310722D+00
2	0.5870642812D+00	-0.9541310722D+00
THE H ARRAY		
1	-0.2652744703D+01	-0.1347205024D+01
2	-0.1347205024D+01	-0.1731828436D+01
(1 1 1 1)	1.307152	
(1 1 1 2)	0.437279	
(1 1 2 1)	0.437279	
(1 1 2 2)	0.605703	
(1 2 1 1)	0.437279	
(1 2 1 2)	0.177267	
(1 2 2 1)	0.177267	
(1 2 2 2)	0.311795	
(2 1 1 1)	0.437279	
(2 1 1 2)	0.177267	
(2 1 2 1)	0.177267	
(2 1 2 2)	0.311795	
(2 2 1 1)	0.605703	
(2 2 1 2)	0.311795	
(2 2 2 1)	0.311795	
(2 2 2 2)	0.774608	

※ ZETA1とZETA2の使い方はp.266に簡単に書いてあるのみである。詳しい使い方はプログラムを参照せよ。

Q. 最初に表れる行列Gの要素が0である理由を答えよ.

Q. SCFの1周目と6周目において手続き5を検算せよ.

$$G_{\mu\nu} = \sum_{\lambda, \sigma} P_{\lambda\sigma} \left[(\mu\nu|\sigma\lambda) - \frac{1}{2} (\mu\lambda|\sigma\nu) \right]$$

```
...
THE P      ARRAY
           1           2
 1      0.1286163006D+01  0.5401631334D+00
 2      0.5401631334D+00  0.2268578784D+00

START OF ITERATION NUMBER =  6

THE G      ARRAY
           1           2
 1      0.1194108547D+01  0.2966131916D+00
 2      0.2966131916D+00  0.9213190058D+00
...
```

```
...
( 1 1 1 1 )  1.307152
( 1 1 1 2 )  0.437279
( 1 1 2 1 )  0.437279
( 1 1 2 2 )  0.605703
( 1 2 1 1 )  0.437279
( 1 2 1 2 )  0.177267
( 1 2 2 1 )  0.177267
( 1 2 2 2 )  0.311795
( 2 1 1 1 )  0.437279
( 2 1 1 2 )  0.177267
( 2 1 2 1 )  0.177267
( 2 1 2 2 )  0.311795
( 2 2 1 1 )  0.605703
( 2 2 1 2 )  0.311795
( 2 2 2 1 )  0.311795
( 2 2 2 2 )  0.774608

...
THE P      ARRAY
           1           2
 1      0.0000000000D+00  0.0000000000D+00
 2      0.0000000000D+00  0.0000000000D+00

START OF ITERATION NUMBER =  1

THE G      ARRAY
           1           2
 1      0.0000000000D+00  0.0000000000D+00
 2      0.0000000000D+00  0.0000000000D+00
...
```

手続き6~10

135

Q. SCFの手続き6~10を検算しなさい。

手順8の検算には [Wolfram Alpha](#) などを用いよ。

6	式(3.154)	$F = H^{\text{core}} + G$
7	式(3.177)	$F' = X^{\dagger} F X$
8	式(3.178)	$F' C' = C' \epsilon$
9	式(3.174)	$C = X C'$
10	式(3.145)	$P_{\mu\nu} = 2 \sum_a^{N/2} C_{\mu a} C_{\nu a}^*$

THE S	ARRAY
1	1 0.1000000000D+01
2	2 0.4507704116D+00
THE X	ARRAY
1	1 0.5870642812D+00
2	2 0.5870642812D+00
THE H	ARRAY
1	1 -0.2652744703D+01
2	2 -0.1347205024D+01

START OF ITERATION NUMBER = 6
THE G ARRAY
1 2 1 0.1194108547D+01 0.2966131916D+00 2 0.2966131916D+00 0.9213190058D+00
THE F ARRAY
1 2 1 -0.1458636156D+01 -0.1050591833D+01 2 -0.1050591833D+01 -0.8105094301D+00
THE F' ARRAY
1 2 1 -0.1506209810D+01 -0.3630392881D+00 2 -0.3630392881D+00 -0.1529068392D+00
THE C' ARRAY
1 2 1 0.9698409800D+00 0.2437385353D+00 2 0.2437385353D+00 -0.9698409800D+00
THE E ARRAY
1 2 1 -0.1597448132D+01 0.0000000000D+00 2 0.0000000000D+00 -0.6166851652D-01
THE C ARRAY
1 2 1 0.8019175078D+00 0.3368004878D+00 2 0.3368004878D+00 -0.7822652261D+00 0.1068445602D+01
THE P ARRAY
1 2 1 0.1286143379D+01 0.5401724156D+00 2 0.5401724156D+00 0.2268691372D+00
DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.000013
CALCULATION CONVERGED
ELECTRONIC ENERGY = -0.422752913203D+01
TOTAL ENERGY = -0.286066199152D+01

収束判定の閾値は357行目の $\text{CRIT} = 10^{-4}$ で指定している。

Q. DELTA が初めて 10^{-4} より小さくなるのは何周目か？

→ 6周目

Q. $\text{CRIT} = 10^{-2}$ に設定したとき、何周目で終了するか？

→ 4周目

THE S ARRAY

1	0.1000000000D+01	0.4507704116D+00
2	0.4507704116D+00	0.1000000000D+01

THE X ARRAY

1	0.5870642812D+00	0.9541310722D+00
2	0.5870642812D+00	-0.9541310722D+00

THE H ARRAY

1	-0.2652744703D+01	-0.1347205024D+01
2	-0.1347205024D+01	-0.1731828436D+01

START OF ITERATION NUMBER = 1
 ELECTRONIC ENERGY = 0.000000000000D+00
 DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.882867

START OF ITERATION NUMBER = 2
 ELECTRONIC ENERGY = -0.414186268681D+01
 DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.279176

START OF ITERATION NUMBER = 3
 ELECTRONIC ENERGY = -0.422649172562D+01
 DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.029662

START OF ITERATION NUMBER = 4
 ELECTRONIC ENERGY = -0.422752275334D+01
 DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.002318

START OF ITERATION NUMBER = 5
 ELECTRONIC ENERGY = -0.422752909612D+01
 DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.000174

START OF ITERATION NUMBER = 6
 ELECTRONIC ENERGY = -0.422752913203D+01
 DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.000013

CALCULATION CONVERGED
 ELECTRONIC ENERGY = -0.422752913203D+01
 TOTAL ENERGY = -0.286066199152D+01

Q. 式(3.184)に従って、電子エネルギーを検算せよ

$$E_0 = \frac{1}{2} \sum_{\mu, \nu} P_{\mu\nu} (H_{\mu\nu}^{\text{core}} + F_{\mu\nu})$$

Q. 全エネルギーと電子エネルギーの差

$$-2.8606E_h - (-4.2275E_h) = +1.3669E_h \text{ は何か？}$$

$$\rightarrow \text{核間反発} = +2/1.4632 = +1.3669$$

THE S ARRAY

	1	2
1	0.1000000000D+01	0.4507704116D+00
2	0.4507704116D+00	0.1000000000D+01

THE X ARRAY

	1	2
1	0.5870642812D+00	0.9541310722D+00
2	0.5870642812D+00	-0.9541310722D+00

THE H ARRAY

	1	2
1	-0.2652744703D+01	-0.1347205024D+01
2	-0.1347205024D+01	-0.1731828436D+01

START OF ITERATION NUMBER = 6

THE G ARRAY

	1	2
1	0.1194108547D+01	0.2966131916D+00
2	0.2966131916D+00	0.9213190058D+00

THE F ARRAY

	1	2
1	-0.1458636156D+01	-0.1050591833D+01
2	-0.1050591833D+01	-0.8105094301D+00

THE F' ARRAY

	1	2
1	-0.1506209810D+01	-0.3630392881D+00
2	-0.3630392881D+00	-0.1529068392D+00

THE C' ARRAY

	1	2
1	0.9698409800D+00	0.2437385353D+00
2	0.2437385353D+00	-0.9698409800D+00

THE E ARRAY

	1	2
1	-0.1597448132D+01	0.0000000000D+00
2	0.0000000000D+00	-0.6166851652D-01

THE C ARRAY

	1	2
1	0.8019175078D+00	-0.7822652261D+00
2	0.3368004878D+00	0.1068445602D+01

THE P ARRAY

	1	2
1	0.1286143379D+01	0.5401724156D+00
2	0.5401724156D+00	0.2268691372D+00

DELTA(CONVERGENCE OF DENSITY MATRIX) = 0.000013

CALCULATION CONVERGED

ELECTRONIC ENERGY = -0.422752913203D+01

TOTAL ENERGY = -0.286066199152D+01