

有機フッ素化学序説

小林, 宏
九州大学機能物質科学研究所

<https://doi.org/10.15017/6665>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 9 (1), pp.1-6, 1995-11-15. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン :
権利関係 :



名誉教授 小林 宏博士

略 歴

昭和6年12月	大阪府に生まれる
昭和25年3月	福岡県立修猷館高等学校卒業
昭和32年3月	九州大学工学部応用化学科卒業
昭和34年3月	九州大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程修了
昭和37年3月	同上 博士課程 単位修得の上、退学
昭和37年4月	九州大学講師（工学部）
昭和39年1月	工学博士（九州大学） 学位論文題名「松材精油成分のジテルペン、ツンベルゲンの構造 に関する研究」
昭和40年8月	九州大学助教授（工学部）
昭和50年11月	九州大学教授（生産科学研究所）
昭和51年1月	九州大学大学院指導教官（工学研究科）
昭和54年4月	九州大学大学院指導教官（総合理工学研究科）
昭和62年5月	九州大学教授（機能物質科学研究所）
平成2年4月	九州大学中央分析センター長
平成3年4月	九州大学評議員
平成5年4月	九州大学機能物質科学研究所長 九州大学評議員併任
平成7年3月	九州大学を停年により退官
平成7年5月	九州大学名誉教授

小林宏先生ご退官記念号発刊の言葉

九州大学機能物質科学研究所長

持 田 勲

小林宏先生は平成7年3月31日をもってご退官されました。

小林宏先生は、昭和32年3月に九州大学工学部応用化学科をご卒業後、引き続いて進学された同大学院応用化学専攻博士課程を37年3月に修了されました。同年4月九州大学工学部講師に就任され、40年8月工学部助教授にご昇任の後、昭和50年11月に九州大学生産科学研究所教授に就任されました。昭和62年5月には生産科学研究所の改組により機能物質科学研究所教授に配置換となりました。爾来ご退官まで33年の長きにわたり九州大学において、有機フッ素化合物の化学に関して基礎から応用までの広い分野にわたる研究において優れた業績を残されました。特に、非配位性の有機アニオン種で耐酸化性と高脂溶性を有する含フッ素ホウ素アート錯体の合成とこれらを用いた応用化学に関する研究は顕著であり、中でも現在「TFPB (小林試薬)」として工業化されている含フッ素テトラフェニルホウ酸イオンとその金属塩は、優れた工業有機触媒として、これまでに、相間移動触媒、イオン選択電極イオン交換体、リチウム電池電解質、リチウムイオン触媒、光メモリー媒体、オレフィン重合触媒等として、広範な分野において活用されています。また TFPB を用いたアニオン型相間移動触媒反応の開発は他に類を見ない実用的な反応系であり、この研究分野の開拓的業績として高く評価されています。このように先生のお仕事は有機フッ素化合物の新しい利用の化学において先導的役割を果たしてきました。

先生はフッ素化学の分野における国際的な学会活動についても積極的に参画され、フッ素化学懇談会世話人や数々の国際フッ素化学会議の組織委員長等、ご関係学協会の要職を努められ、この専門分野の学術振興に大いに尽くされました。

先生は、また平成3年4月から平成5年3月まで九州大学評議員を、さらに平成5年4月から平成7年3月までは機能物質科学研究所長および九州大学評議員を努められ、変革の火中に大学運営の中核にあってご苦勞されると共に21世紀に向けた機能物質科学研究所の新しい発展のために多大の貢献をなされました。

本研究所では先生が残された大きな業績とご貢献に敬意と感謝の念を表して、ここに記念号を発刊することができましたことは後進一同の大きなよろこびであります。

有機フッ素化学序説

小 林 宏

Basic Knowledges on Organofluorine Compounds

Hiroshi KOBAYASHI

はじめに

多数個のフッ素置換基を有する有機化合物は対応する炭素骨格を有する通常の炭化水素型化合物とは著しく異なる性質を示す。このことは液体材料のガス溶解性や固体材料の超潤滑性、薄膜の気体選択透過性などの物理的性質を始めとして、フッ素置換色素類の耐光褪色性、ペルフルオロ高分子材料の耐熱性や耐薬品性、イオン交換樹脂官能基の超強酸性、フッ素置換による農・医薬の薬理活性の修飾など、色々な形の機能として既に明らかにされている。

生産科学研究所から機能物質科学研究所に在任した20年間、機能性有機分子の開発にフッ素官能基の特性を活用することとその本質の解明によって新しい機能性の展開を図ることを目標において研究部門あるいは研究分野の課題研究を進めてきたが、炭化水素を中心とする有機化学の本流から見ると多フッ化有機化合物の化学は風変わりを超えてむしろ常軌を逸した支流の観を呈していたことを案じる。

周期律表の上で水素と対立的な位置を占めるフッ素の特性が化学の世界に知られたのは1886年のMoissan [1] のフッ素発見に始まるが、その後、大きな展開の兆しとなった幾つかの画期的な発見がなされながらも体系的な研究の成果はその特異な機能性の故に軍事機密の扉の中に閉ざされて第2次世界大戦の終了まで化学の分野に開示されることは稀であった。私の限られた経験に照らしても、1960年代の初めに Sievers

らによる含フッ素アセチルアセトン金属錯塩のガスクロマトグラフ分離の論文 [2] に驚嘆し、追跡実験を試みた時、フッ素の化学に関する体系的記述の検索は特に日本において入手可能な一次、二次文献を通じて極めて困難であった。戦後に民生用に公開されたフッ素化学の応用技術の急速な拡張とともに、当時寡聞にして知られなかった Simons らの成書 [3] も含めて国内外で多数の様々な二次文献が上梓され、それらはさらに新たな一次情報の発信を促進したが、フッ素の特性の活用は依然と限定的な段階に留まっているように見受けられる。

九州大学における研究活動の区切りに際して、有機フッ素化合物に魅惑される切っ掛けとなったフッ素置換基の挙動についてまとめて来たことをご覧頂いて、有機フッ素化学に長年執着した所以をご賢察願うものである。また新たにフッ素の特性の活用を志向される開拓的試行の門口の敷居を低くすることに役立てば望外の収穫である。

フッ素の基本的性質

フッ素置換によって発現する特異な物性あるいは反応性は、元素としてのフッ素に固有の基本的性質に起因する。表1にフッ素の特性を他のハロゲン族元素及び水素のそれらと比較して示す。有機フッ素化合物やその集合系の物性あるいは反応性に見られる特異性は、分子中に組み込まれた置換基としての個々のフッ素の基本的性質から誘導される効果の分子軌道論的総和と理解される。ここでは総和として把握するよりは定性

受理日 1995年8月9日

表1 ハロゲン族元素及び水素の基本的性質^{a)}

	F	Cl	Br	I	H
原子価殻の電子配置	2s ² 2p ⁵	3s ² 3p ⁵	4s ² 4p ⁵	4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	1s ¹
電気陰性度 ^{b)}	3.98	3.16	2.96	2.66	2.20
イオン化ポテンシャル(eV)	17.422	12.966	11.814	10.451	13.598
電子親和力(eV)	3.399	3.617	3.365	3.059	0.750
電極電位 ^{c)} (V)	2.87	1.3595	1.065	0.5355	0
原子分極率	0.38	2.28	3.34	5.11	0.42
結合モーメント ^{d)} (D)	1.39	1.47	1.42	1.25	0.4
C-X 結合エネルギー ^{e)} (kcal/mole)	116	78.2	68	51	98.3
X-X 結合エネルギー(kcal/mole)	37.0	57.3	45.45	35.60	103.24
C-X 共有結合距離 ^{f)} (Å)	1.35	1.77	1.94	2.14	1.09
ファンデルワールス半径 ^{g)} (Å)	~ 1.55	~ 1.80	~ 1.95	~ 2.05	~ 1.35
共有結合原子価	1	1, 3, 5	1, 3, 5	1, 3, 5, 7	1
安定なイオン形	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	I ⁻	H ⁺

a) J. E. ヒューイ著, 小玉 剛二, 中沢 浩 訳, “無機化学,” 東京化学同人(1984)所載のデータによる。

b) Pauling の熱化学的方法による値

c) 半電池反応; $X_2 + 2e^- \rightarrow 2X^-$ における電極電位

d) C-X 結合の結合モーメント

e) C-X 結合の解離エネルギー, C-C 結合エネルギー; 82.6kcal/mole

f) C-C 共有結合距離; 1.54 Å

g) ± 0.1 Å の中央値

的ながら個々の要因の効果について分析的に考察する方法を選び, 序説とした。

1) 電子求引性: フッ素原子のイオン化エネルギーは総ての元素の中で最大であり, 7 個の L 殻電子が原子核に強く束縛されていることを示している。原子分極率は水素のそれよりも小さく, 外殻電子は外部電場により分極を受けることの少ない固い殻を形成している。一方, 電子親和力は塩素よりも僅かに小さいが, 酸素の値 (1.461 eV) と比較するとフッ素の酸化力の大きいことが理解できる。電子親和力におけるフッ素と塩素の逆転はフッ素の原子価軌道である L 殻に 1 個の余分の電子が加わることの静電的反発が塩素の原子価軌道 M 殻の場合に比べて大きいことに起因すると考察され, フッ素分子の特異的に小さい解離エネルギーが同じ不安定要因により説明されている。一般にフッ素の関与する化学結合の解離エネルギーは他のハロゲン族のそれらよりも遙かに大きい, 原子価軌道の大きさのパラメーターである結合半径と結合解離エネルギーとの関係から外挿すると上述の不安定要因の大きさはフッ素 1 個当たり 27kcal/mol であると推定されている [4]。

フッ素置換基の効果として最も特徴的に現れるのは電子求引効果であり, フッ素置換基の電気陰性度はハ

ロゲン族の中では最大を示す。 α 位炭素からの電子求引効果, すなわち, 炭素-フッ素結合の分極は大きな永久電気双極子を形成している。電子求引効果はまたプロトン性官能基の酸性の増大や官能基ヘテロ原子の塩基性の低下に端的に現れる。置換基の電子的効果を定量的に示す様々な経験的置換基パラメータが定義されているが, 一例を表 2 に示す。フッ素及びペルフルオロ炭素置換基の置換基パラメータは, フッ素及びトリフルオロメトキシル基の σ_R^0 を除いて, それぞれ水素及び対応する炭化水素型置換基よりも常に正に大きな値を示し, それらの強い電子求引効果を指示している。

2) 化学的安定性および脱離基能: 炭素-フッ素結合の解離には 116kcal/mol のエネルギーを要し, 炭素-水素結合 (98.3kcal/mol) や炭素-炭素結合 (82.6 kcal/mol) の場合に比較して安定であり, ラジカル的な結合開裂は起こり難い。また, 多くの分子軌道計算に示されるように, フッ素置換基の強い電子求引効果によってイプソ位炭素上の電子密度は大きく低下して求電子試剤に対しては不活性になるが, 逆に求核試剤に対しては不飽和結合や芳香環上のフッ素置換基は置換反応活性になり, 炭素アニオン中間体や Meisenheimer 中間体を經由してフッ化物イオンの形で脱離

表2 芳香族置換基の極性効果 (σ_I) 共鳴効果パラメーター (σ_R^0) の比較^{a)}

炭化水素型 置換基	電子的パラメーター		ハロゲン及び 含フッ素置換基	電子的パラメーター	
	σ_I	σ_R^0		σ_I	σ_R^0
H	0.00	0.00	F	0.50	-0.31
			Cl	0.46	-0.18
			Br	0.44	-0.16
			I	0.39	-0.12
CH ₃	-0.05	-0.13	CF ₃	0.42	0.08
CH ₂ CH ₃	-0.03	-0.14	CF ₂ CF ₃	0.41	0.11
CH(CH ₃) ₂			CF(CF ₃) ₂	0.48	0.04
C(CH ₃) ₃	-0.07	-0.17	C(CF ₃) ₃	0.55	0.00
C ₆ H ₅	0.10	-0.10	C ₆ F ₅	0.25	0.02
OCH ₃	0.27	-0.42	OCF ₃	0.55	-0.18
N(CH ₃) ₂	0.10	-0.54	N(CF ₃) ₂	0.49	0.01
SCH ₃	0.13	-0.16	SCF ₃	0.42	0.06
COCH ₃	0.20	0.16	COCF ₃	0.47	0.33
SO ₂ CH ₃	0.60	0.12	SO ₂ CF ₃	0.76	0.31
NO ₂	0.65	0.15			
CN	0.56	0.08			

a) C. Hansch, A. Leo, S. H. Unger, K. H. Kim, D. Nikaitani, E. J. Lien, J. Med. Chem., **16** (1973), 1207; C. Hansch, S. D. Rockwell, P. Y. C. Jow, A. Leo, E. E. Steller, *ibid*, **20** (1977), 304.

表3 置換基の立体パラメーター (Taft's E_s^{a)}, Charton's ν ^{b)}, Meyer's V^{a c)} の比較

炭化水素型 置換基	立体置換基パラメーター			ハロゲン及び 含フッ素置換基	立体置換基パラメーター		
	-E _s	$\nu/\text{\AA}$	V ^a ×10 ²		-E _s	$\nu/\text{\AA}$	V ^a ×10 ²
H	0.00	0.00	0.00	F	0.46	0.27	1.22
				Cl	0.97	0.55	2.54
				Br	1.16	0.65	3.29
				I	1.40	0.78	4.04
CH ₃	1.24	0.52	2.84	CH ₂ F	1.48	0.62	3.09
				CHF ₂	1.91	0.68	
				CF ₃	2.40	0.97	3.54
CH ₂ CH ₃	1.31	0.56	4.31				
CH(CH ₃) ₂	1.71	0.76	5.74				
cyclo-C ₆ H ₁₁	2.03	0.87	6.25				
C(CH ₃) ₃	2.78	1.24	7.16				

a) E_s; R. Gallo, Prog. Phys. Org. Chem., Vol. 14 (1983), 115; S. H. Unger, C. Hansch, Prog. Phys. Org. Chem., Vol. 12 (1976), 91.

b) ν ; M. Charton, J. Am. Chem. Soc., **97** (1975), 1552; J. Org. Chem., **41** (1976), 2217

c) V^a; A. Y. Meyer, J. Chem. Soc. Perkin 2, **1986**, 1567.

表4-1 ペルフルオロ炭素化合物の20°Cにおける表面張力 (dyne cm⁻¹), 対応する炭化水素化合物のと比較

化合物	ペルフルオロ型	炭化水素型
ペンタン	9.87	16.05
ヘキサン	11.92	18.40
ヘプタン	12.69	21.90
オクタン	13.7 ^{a)}	23.33
ベンゼン	22.6	28.90
ブチルテトラヒドロフラン	15.1 ^{a)}	—
トリブチルアミン	16.1 ^{a)}	24.81

a) 25°Cにおける値

表4-2 固体の臨界表面張力, σ^0 , と表面の化学構造

表面物質	表面の化学構造	σ^0 /dyne cm ⁻¹
ペルフルオロラウリン酸 (単分子膜)	CF ₃ , 最密充填型	5.6
ペルフルオロ酪酸 (単分子膜)	CF ₃ , 最密充填型	9.2
ペルフルオロケロセン (液体)	CF ₂ 及び若干の CF ₃	17.0
テフロン (固体)	CF ₂	18.2
オクタデシルアミン (単分子膜)	CH ₃	22
ポリエチレン (固体)	CH ₂	31
ナフタレン (固体)	芳香環の辺	25
安息香酸 (単分子膜)	芳香環の辺及び面	35
ポリスチレン (固体)	CH ₂ 及び若干の芳香環	32.8~43.8

する。共役位置に強い電子求引基がある場合には更に反応活性である。この反応様式は Wheland 中間体からのプロトン脱離を経由して進行する通常の芳香核求電子置換反応と電荷符号の正負を逆にした関係にあり、電子的性質において水素と対照的なフッ素の表徴的挙動の一つである。

芳香環求核的の反応条件下における脱離基能の序列の一例として F > NO₂ > OTs > SPh > Cl, Br, I > N₃ > NR₃⁺ > OR, OAr, SR, SOR, SO₂R, > NH₂ が知られているが [5], フッ素は求核攻撃に対して最も抵抗力の低い部類に属し, 脱離し易いことを示している。

3) 立体効果: 共有結合しているフッ素は原子価1で, 炭素との共有結合距離1.35 Å と van der Waals 半径約1.55 Å は, 原子価1の元素の中では水素のそれらに最も近い。フッ素は炭化水素骨格上の水素を任意の数だけ置換できる唯一の置換基であり, 特に van der Waals 半径が水素のそれの僅かに1.2倍であることは水素擬位の立体効果を分子設計に利用できることを期待させるが, 反応速度に対する立体効果や分子力学計算から求められた含フッ素置換基の立体置換基パラ

メーターは, 表3に示すように, van der Waals 半径から推定される空間的拡がり大きく超える立体効果を示唆している。

4) 表面活性能, 揮発性, ガス溶解性: 共有結合しているフッ素の最外殻に位置する3組の2p非共有電子対は, 原子核の正電荷によって強く束縛され, 分極能に乏しいので誘起双極子相互作用に基づく分子間引力への寄与は小さい。炭化水素系化合物の骨格炭素上の水素の全部あるいは大多数をフッ素置換した場合に現れる分子間相互作用の低下は, 表4に示すような凝縮相の表面張力の低下や揮発性の増大に現れる。ペルフルオロ炭素化合物の沸点や融点は, 炭素数の等しい炭化水素化合物のそれらに比べて, 分子量の増大にも拘わらず大差がない [6]。分子間相互作用の小さいことは凝縮相においても凝集による安定化効果が元々小さいことを意味し, 分子間相互作用の小さいガス分子と混合しても自由エネルギー変化は小さい。従って溶液相に対するガス相の分配係数が大きくなり, 表5の事例に示されるようにガス溶解性は炭化水素系溶媒の場合よりも高い。

表5 ガス溶解性の比較
25°C, 1気圧下における溶液中のガス分子のモル分率, $\chi \times 10^4$

溶媒	ガスの種類					
	He	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	CH ₄
ペルフルオロヘプタン	8.862	14.13	38.80	55.08	208.2	82.56
ヘプタン	2.498	6.859	13.54	21.66	120.2	34.53
ペルフルオロメチルシクロヘキサン	7.498		32.66	45.8		
メチルシクロヘキサン	1.625		9.46	18.7		
ペルフルオロベンゼン	2.137		17.95	24.18	220	38.42
ベンゼン	0.771	2.580	4.461	8.165	97.30	20.77
ペルフルオロ(トリブチルアミン)	11.67		34.90	52.01	199.0	68.8
四塩化炭素		3.349	6.480	12.01	105.3	28.70
水	0.069	0.069	0.12	0.23	6.0	0.24

表6 置換基, X, の疎水性パラメーター (Hansch π -定数^{a)}) の比較
 $\pi_X = \log(P_{RX}) - \log(P_{RH}) / \text{オクタノール-水}$

炭化水素型 置換基	Hansch π -定数		ハロゲン及び 含フッ素置換基	Hansch π -定数	
	芳香族	脂肪族		芳香族	脂肪族
H	0.00	0.00	F	0.14	-0.17
			Cl	0.17	0.39
			Br	0.86	0.60
			I	1.12	1.00
CH ₃	0.56	0.50	CF ₃	0.88	1.02
CH ₂		0.5	CF ₂	0.6 ~ 0.9	
OCH ₃	-0.02	-0.47	OCF ₃	1.04	
SCH ₃	0.61	0.45	SCF ₃	1.44	
			SF ₅	1.23	
NO ₂	-0.28	-0.85			
CN	-0.57	-0.84			

a) C. Hansch, A. Leo, S. H. Unger, K. H. Kim, D. Nikaitani, E. J. Lien, J. Med. Chem., **16** (1973), 1207; C. Hansch, S. D. Rockwell, P. Y. C. Jow, A. Leo, E. E. Steller, *ibid*, **20** (1977), 304.

5) 疎水性, 脂溶性, 相分離性: 同様の発現機構から多数個のフッ素で置換されている有機化合物は極性相互作用が小さく, 特に水のような水素結合力の大きい極性溶媒からは排除されて, 相対的に極性の小さい有機溶媒相に分配される疎水性を示す。同様の機構により極性有機溶媒相を組み合わせた場合にも相分離し易い。含フッ素置換基の疎水性パラメーターを表6に示すが, 脂肪族フッ素置換基の場合を例外として, いずれも正に大きな値を有し, フッ素修飾された溶質が二相分配において相対的に極性の低い有機溶媒相に片寄って分配されることを示しているが, 特に代表的な

フッ素化炭素置換基であるCF₃やOCF₃は1個加わる毎に分配係数が1桁増大する脂溶化効果を有しており, 特筆に値する。また, 求電子効果においてCF₃よりも優れているNO₂, CNがいずれも大きな親水性を示していることは相補的特徴として注目に値する。

6) 低屈折率: 分極率の小さいことは, 電磁波との相互作用においても現れる。ペルフルオロ炭素化合物の屈折率は, 表7の比較に示されるように, 対応す炭化水素同族体に比べて10%ほど小さく, 紫外透明性と共に低屈折率を利用する光学材料の構成要素として類例の少ない特性を有している。

表7 ペルフルオロ炭素化合物の20°Cにおける屈折率 (589 nm).^{a)} 対応する炭化水素化合物のと比較

化合物	ペルフルオロ型	炭化水素型
ペンタン	1.2383	1.3575
ヘキサン	1.2509	1.3749
ヘプタン	1.2602	1.3876
ベンゼン	1.3781	1.5011
トルエン	1.3680	1.4969
トリブチルアミン	1.2906 ^{b)}	1.4176
ブチルテトラヒドロフラン	1.2772 ^{b)}	

a) Ref. 6

b) 25°Cにおける値

7) フッ素核種の特性：専ら核外電子の構造に起因する物性・反応性とは直接には関係しないが、フッ素修飾に付随してフッ素核種の特性から誘導される大きな特徴がある。質量数19のフッ素安定核種は天然存在比100%である。したがってペルフルオロケロセン (PFK) は質量分析法において質量標準物質として有用である。また、¹⁹F核は核スピン1/2を有し、核磁気共鳴信号の応答感度は¹H核よりも約17%低い、¹H核と同様に存在比に比例したシグナル強度を示す。有機フッ素化合物は天然物として知られているモノフルオロ酢酸を除いてすべてが人工物であり、天然物による妨害がないのでフッ素核種の磁氣的性質を利用する¹⁹F-NMRは目的物フッ素に選択的な検出法として極めて有力な分光分析手段であるばかりでは無く、¹⁹F化学シフトは結合するリガンドの構造によって大きく変化し、CFCl₃基準でF₂O₂の-865ppmからFClの448ppmの範囲、また炭素に結合したフッ素に限ってもCF₃CSFの-121ppmからFCH₃の272ppmまでの広い範囲にわたって広がっている、化学シフトは化学構造の変化を敏感に検知することが可能であり、フッ素置換基を廻る微細な化学構造の差異を知る有力な指標となり得る。

フッ素及び含フッ素置換基の特性は、勿論、単独に利用される場合も少なくないが、複数の特性を組み合わせる機能物質の分子設計や利用技術の構成に組み込み、機能の高性能化や新規複合機能の誘導を図るのが理の当然である。フッ素修飾によって高次機能の誘導に成功した私共の若干の事例は折りに触れて総説の形で本誌にも呈示し、諸賢のご批判を仰いで来た。一方、得られたフッ素修飾体の特性とフッ素置換基の効果と

の因果関係の解明は必ずしも成功している場合ばかりではない。フッ素置換基の特性の発現機構の解明ついて経験的知見の蓄積と分子軌道法的研究の進展が望まれる所以である。

参考文献

1. Moissan のフッ素の発見の経緯は、国分信英，“フッ素の化学”，裳華房，東京（1987）に詳しく述べられている。
2. a) R. E. Sievers, R. W. Moshier, M. I. Morris, *Inorg. Chem.*, **1** (1962), 966 ; b) R. W. Moshier, R. E. Sievers, “Gas Chromatography of Metal Chelates,” Pergamon Press, London, (1965).
3. J. H. Simons, Ed., “Fluorine Chemistry”, Academic Press, New York, Vol. 1 (1950) ~ Vol. 5 (1965).
4. P. Politzer, *J. Am. Chem. Soc.*, **91** (1969), 6235.
5. J. March, “Advanced Organic Chemistry,” 4th Ed., Wiley-Interscience, New York (1992), p. 652.
6. a) T. J. Brice, Ref. 3, Vol. 1, Chapt. 13, (1950) ; b) T. M. Reed, III, Ref. 3, Vol. 5, Chapt. 2, (1964).
7. 掲げた物性値は、引用文献の記載がない場合には汎用の便覧類から引用したものであり、比較の議論には十分な精度を有している。