

テーマ3 電磁界関係

テラヘルツ波と 非周期的結晶としてのウィルス との相互作用について

加藤和明¹⁾ 鈴木壯兵衛²⁾

洗練課題研究所¹⁾ そうべえ国際特許事務所²⁾

目次

第1章 西澤潤一先生のご紹介 (担当 加藤和明)

- § 1.1 一口で紹介すると
- § 1.2 評伝 (多数あり) の一例
- § 1.3 職歴
- § 1.4 栄典・顕彰及び受賞歴等
- § 1.5 西澤潤一先生による主要特許
- § 1.6 著者の好みで選んだ発見・発明
- § 1.7 西澤潤一先生による独創の秘訣
- § 1.8 記憶に残る語録
- § 1.9 エピソードなど
- § 1.10 科学技術の発展と危険への対応
- § 1.11 学恩

第2章 テラヘルツ技術の紹介 (担当 鈴木壯兵衛)

- § 2.1 テラヘルツ波発生装置の開発の経緯
 - (2.1.1) 電磁波の暗黒地帯としてのテラヘルツ領域
 - (2.1.2) フォノンとして量子力学的記述がされる格子振動
 - (2.1.3) 受賞できたはずの3つのノーベル賞とラマンレーザの研究
 - (2.1.4) 1979年に実現した半導体ラマンレーザ
- § 2.2 微生物・ウイルスを電磁波で撃退する特許の紹介
 - (2.2.1) 量子生物学に向けられたテラヘルツ技術の方向
 - (2.2.2) 生物体は非周期性結晶
 - (2.2.3) 高周波の電磁波照射では、電磁波の浸透の深さが課題
 - (2.2.4) 癌の診断への西澤特許の適用
 - (2.2.5) 西澤特許の請求項7はゲノム編集への応用を規定している
 - (2.2.6) テラヘルツ波の光源は何でも構わない
- § 2.3 テラヘルツ分光によるウイルスの検出と、ウイルスの振動の量子力学的検討
 - (2.3.1) テラヘルツ分光によるウイルスの検出
 - (2.3.2) 新型コロナウイルスはどのようにしてACE2受容体を識別して結合するのか
 - (2.3.3) 嗅覚機構における振動説と形状説
- § 2.4 終わりに

第1章 西澤潤一先生のご紹介

§ 1.1 一口で紹介すると

- 西澤潤一: 1926/09/12(仙台) – 2018/10/21 (仙台)
- 20 万人に1人以下の偉人: 同年日本人2.5M
- “Mr. 半導体”: 半導体研究の草分けであり
pinダイオードや半導体レーザー、静電誘導トランジスタなど開発
- “Mr. 光通信”: 3要素(発光/伝送/受信)開発
- 偉大な教師: 高名な弟子を多数輩出
 - 枡岡富士雄(フラッシュメモリ)
 - 小柳光正(3次元IC), 等

§ 1.2 評伝(多数あり)の一例

津田健二(国際技術ジャーナリスト)

<https://news.yahoo.co.jp/byline/tsudakenji/20181028-00102181/>

§ 1.3 職歴

1953年4月 東北大学電気通信研究所助手
1954年5月 東北大学電気通信研究所助教授
1962年12月 東北大学電気通信研究所教授
1968年5月 財団法人半導体研究振興会半導体研究所所長
1983年4月 東北大学電気通信研究所長(1986年3月まで)
1989年4月 再び、東北大学電気通信研究所所長(1990年3月まで)
1990年4月 東北大学名誉教授
11月 東北大学総長(大谷茂盛総長の在職死去に伴い就任)
1998年4月 岩手県立大学学長
2004年4月 財団法人半導体研究振興会半導体研究所名誉所長
2005年4月 首都大学東京学長
8月 岩手県立大学名誉学長
2009年6月 首都大学東京名誉学長
8月 学校法人上智学院顧問 上智大学特任教授

§ 1.4 栄典・顕彰及び受賞歴等 (多数あるので一部を紹介)

1975年：紫綬褒章「完全結晶と静電誘導トランジスタ」
1983年：文化功労者(半導体工学)
日本人として初のIEEE ジャック・A・モートン賞受賞
「SIT(静電誘導トランジスタ)の開発と光通信の基本3要素」
1989年：文化勲章(電子工学)
1989年：IOCG(国際結晶成長機構)第1回ローデイス賞
1990年：宮城県名誉県民
1999年：日本人として初のIEEEエジソンメダル(永久メダル)を受け取る
2002年：名が冠された8番目の永久メダルNishizawa MedalをIEEEに創設し、エジソンらと同格に並ぶ
2002年：勲一等瑞宝章

§ 1.5 西澤潤一先生による主要特許

特許の取得数は外国特許を含めて約1240件（特許収入はすべて財団法人半導体研究振興会の半導体研究所の研究員・事務員の給与を含む運営費に充当すべく無償供与された）

pinダイオード及びpnipトランジスタ：渡邊寧先生と連名

LED：交通信号（青も赤崎・中村より早い）

静電誘導トランジスター集積回路(1984)

高性能（耐高電圧）サイリスタ：新幹線建設に貢献

完全結晶成長法（化合物半導体及びSi）：

学生時代 Hybrid Junction を考えたので特別の思いが在る
テラヘルツ波による癌診断・がん治療の提案(2000)

§ 1.6 著者の好みで選んだ発見・発明

半導体から絶縁体へのホットエレクトロン注入理論(1950)

pinダイオードの開発(1950)

イオン注入法の開発(1950)

静電誘導型トランジスタの開発(1950)

pnipトランジスタ(1950)

電子なだれ電流増幅トランジスタ開発(1951)

半導体中のなだれ現象の発見(1952)

アバランシェフォトダイオードの開発(1952)

pinフォトダイオード(1953)

pnipドリフトトランジスタ(1954)

～～～

静電誘導トランジスター集積回路(1984)

両面ゲート静電誘導サイリスタ

化合物半導体完全結晶成長法

テラヘルツ波による癌診断、がん治療の提案(2000年)

§ 1.7 西澤潤一先生による独創の秘訣

- ① 気力
- ② 体力
- ③ 知力
- ④ 独創力
- ⑤ 集中力
- ⑥ 決断力
- ⑦ 指導力
- ⑧ 夢・ロマン・理想・志

§ 1.8 記憶に残る語録

- (a) この國(の民)は、資源を輸入し科学技術で味付けし、その付加価値で生かして貰うしかない(1957頃:表現の文責は在著者)
- (b) (原子力産業会議の会長を務めた身だが)“原子力”には反対したい・・国境を越えて直流送電で道は開ける(西澤発明のサイリスタを使うと可能になる)
- (c) 半導体素子の開発を支えるのは材料の開発

§ 1.9 エピソードなど

- (a) 子供のとき $1 + 1 = 2$ を納得するのに苦労したと言われたのを覚えている。自分は $(-1) \times (-1) = +1$ を理解するのに8年掛かったが、上には上があるものだと感心した
- (b) 1990年にどこかで「半導体産業は主導国家が日本から韓国に移り、中国を経てベトナムへと移行する」と発言したらしく、2018年にそれを伝えた朝鮮日報は「一種予言のような言葉」と書いていた
- (c) 竹子夫人は早川種三の次女。種三の母方従妹の子に盛田昭夫。はとこに、作曲家・編曲家・シンセサイザー奏者の富田勲がいる。
- (d) 長女のお名前を“恵子”とされたが、半導体の主流がGeからSiに変わりつつあったのに因み“珪子”にしようと思ったが(使用制限があつて)叶わなかったとお聞きした。高橋恵子さんの夫君は外交官(元チェコ大使)
- (e) 父(西澤恭助:化学工学)は元東北大学工学部長、弟(西澤泰二:金属工学)は東北大学名誉教授

§ 1.10 科学技術の発展と危険への対応

- 放射線防護研究会(SS研)100回記念に寄せて -

西澤 潤一

平成15年(2003年)06月21日

(a) 科学・技術の進展には危険の科学技術の発展と危険への対応

付随が不可避である→発展の結果を享受する者は貢献者の犠牲を忘れてはならない

--Curie夫人の放射線症

--浮田幸吉(岡山の表具師):有翼飛行で墜落死(リリエントールに先立つこと約30年)

(b) 科学・技術に関わる者は、自身や仲間の危険回避・軽減に努めなければならない

--彦坂忠義(辻本先生の恩師:加藤注)は独自に原子炉の仕組みを案出していたが、
日本でそれをつくったとして“旨く”安全管理ができただろうか？

--日本で最初に始めることには“知恵”を働かせて積極的に危険を回避するのでなければ
世界から賞賛される国にはなれない

(c) 放射線は科学・技術の発展や成果の享受に不可欠であり、放射線防護に係る科学・技術も重要である

§ 1.11 学恩

- 先生は、学会などで“最たる不肖の弟子”を自認する著者に対して「先生」呼ばわりされ戴くご本に「学恩」の添え書きをされるので、なんという先生だろうと困惑したが以来自分もそれに倣っている
- 偉大な人物にお仕えするのは、公私を問わずシンドイものであるが、周りからは“鍛えられ多くを学んだであろう”と推測されることも多い。これだけでも大変な“学恩”である

第2章 テラヘルツ技術の紹介

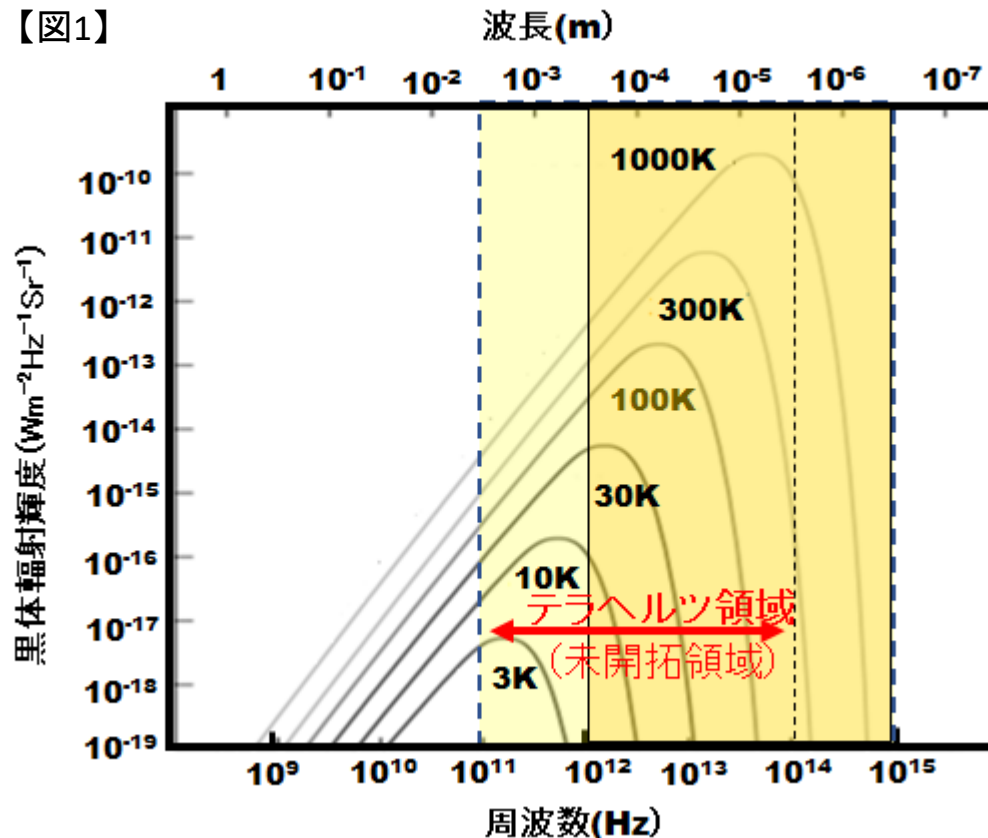
§ 2.1 テラヘルツ波発生装置の開発の経緯

(2.1.1) 電磁波の暗黒地帯としてのテラヘルツ領域

テラヘルツとは 10^{12} Hzを意味し、電磁波の波長で0.3mmである。本来は1THz～1000THz(=1PHz)までをテラヘルツ帯と呼ぶべきであるが、未開拓領域であった意味からは0.1THz～100THzの帯域がテラヘルツ帯と呼ばれている(明確な定義はないようである。)。実用上は0.1THz～30THz程度の領域がテラヘルツ帯と呼ばれていることが多い。

「周波数は財産なり」と言われたのは逓信院総裁を務められた松前重義先生(元東海大学長)であるが、テラヘルツ帯の増幅発振素子の開発は最も遅れ、テラヘルツ帯は「電磁波の暗黒地帯」と呼ばれていた。その一つの理由は、この領域は量子論と古典論の境界に位置するからであろう。テラヘルツ帯で動作する素子の開発の遅れた他の理由の一つは、図1に示すように黒体輻射による熱線の支配する遠赤外線領域であり、背景の遠赤外線から分離して信号として用いるためには低温に冷却する等の工夫が必要になってくるからである。図1から地球の地表温度を300Kとすると、波長約 $10\mu\text{m}$ (=30THz)にピークを有するエネルギーを地球が放射していることになる。

【図1】



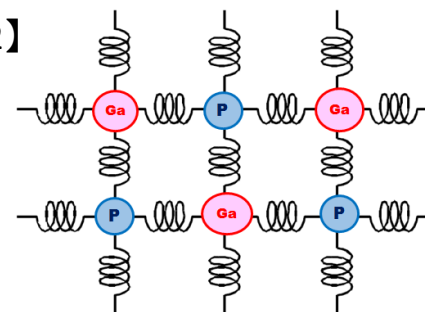
地球上の生物は、図1に示すようなスペクトルの黒体輻射の背景下で生きてきた。このため、テラヘルツ波は、大量に被爆しない限り、基本的には人体に安全な電磁波の性質を有していることが分かる。又、ボルツマン定数 k_B から決まる室温($=300\text{K}$)の熱エネルギー $k_B T$ は 26meV となり、これは波長約 $47.6\mu\text{m}$ ($=\text{約}6.3\text{THz}$)に相当する。 6THz 近辺の信号を、室温で熱振動している機器で処理するのは熱雑音対策から極めて難しい技術となる。このことは室温($=300\text{K}$)の付近で生きている生物は 6THz 近辺の熱エネルギーを有しているとも言える。

(2.1.2)フォノンとして量子力学的記述がされる格子振動

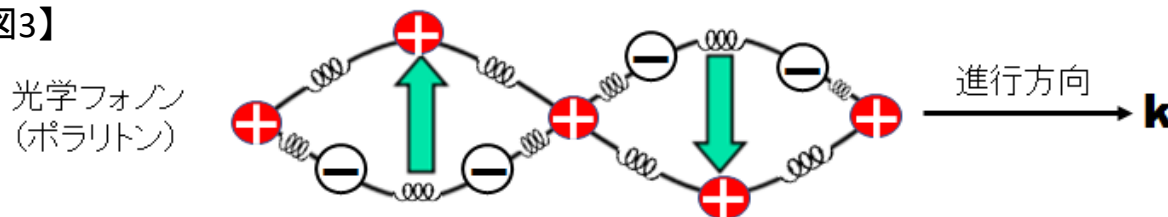
本来結晶構造は3次元構造であるが、化合物半導体の結晶格子の構造を燐化ガリウム(GaP) を例に古典論的に2次元モデルで記述すると図2のようになる。図2の模式的表示のバネは、ハイトラー・ロンドン理論を基礎とした共有結合に置き換えるべきであり、量子力学的な構造体を示すモデル図としては正しくないかも知れない。

即ち、図2に模式的に示した結晶格子の振動は、音波などの弾性波が伝搬する連続的な媒質中の場であると考えられる場の量子論によれば、結晶中における格子振動は「準粒子」として取り扱われ、「フォノン（音子又は音響量子）」と呼ばれる。即ち電子などの物質粒子の波動性を考えた「第一量子化」に対し、波動性を持つ電磁場を量子化する「第二量子化」が、「場の量子化」である。場の量子化により格子振動がフォノンという準粒子として扱われる。フォノンは、以下の図3に示す光学フォノンと図4に示す音響フォノンの2つに大別できるが、共に粒子性と波動性を有する。光学フォノンによる光散乱が「ラマン散乱」と呼ばれ、音響フォノンによる光散乱が「ブリルアン散乱」と呼ばれる。

【図2】



【図3】



フォノンとは振動そのものを量子化したものであり、質量を持たないが運動量を持っており、ラマン散乱やブリルアン散乱では、エネルギーと運動量が保存される。

光学フォノンは図3に示すように、隣のフォノンと逆の位相となる方向に振動するモードの量子である。図3で赤色のプラスは正イオン、白色のマイナスは負イオンを示す。図3に示す振動モードの光学フォノンは双極子モーメントの変化を伴い、光との相互作用によって直接励起されるため、光学的に活性である。フォノンの波数ベクトル $\mathbf{k}$ が光の波数と同程度に小さい領域において、緑色の矢印で示した光学フォノンの分極と光がエネルギーを交換しながら物質中を伝播する物理的量子状態と、その現象は「ポラリトン（フォノン－ポラリトン）」と呼ばれる。ポラリトンは部分的に物質（分極）であり、部分的に光（電磁波）である。特定の時間及び空間でどちらの状態にあるという解釈ではなく、その混合状態がポラリトンとして取り扱われる。

【図4】

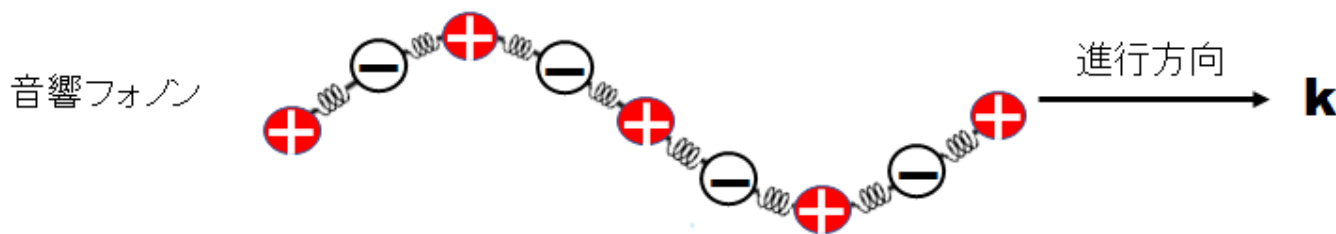


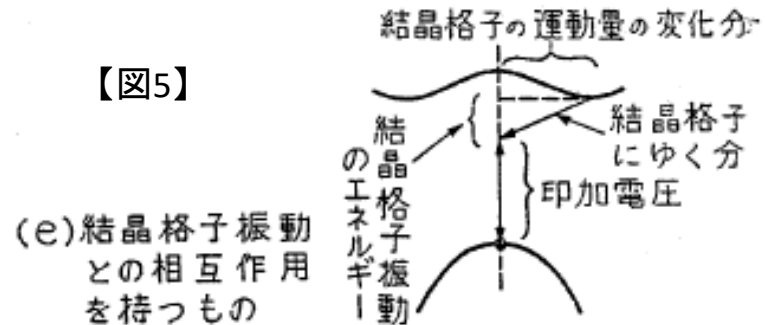
図4に示すように、音響フォノンは、隣のフォノンと同じ位相となる方向に振動する。光学フォノンとは異なり、音響フォノン自身は分極を伴わないため、基本的に光に対してポラリトンのような物理的量子状態や現象を構成しない。

西澤先生は1963年の「電子科学」誌4月号において「化合物分子の固有振動によるチェレンコフ輻射」がテラヘルツ帯の発振素子になりうることを予言された¹⁾。同じ1963年の9月にはエセックス大学のR. ラウドン (Loudon) が一軸性結晶(光学的異方性物質)による誘導ラマン効果の可能性を指摘する論文を発表している²⁾。

但し、1971年の画像技術で西澤先生は「チェレンコフ発振」は、ラマン散乱やブリルアン散乱の一つであるということができよう、と記載されている³⁾ので、「電子科学」誌4月号で指摘された「チェレンコフ輻射」は、ラマン散乱やブリルアン散乱を含む意味でのご指摘と考えられる。

なお、媒質中では媒質中の光速度より大きな速度を電子（ホットエレクトロン）が持つことができるので、ホットエレクトロンが媒質中で光速度より大きな速度をもつと、チェレンコフ輻射（光の衝撃波）による電磁波が放射される。2016年にMITのI. カミナー（Kaminer）らがグラフェン内部でホットエレクトロンによるチェレンコフ輻射が可能であることを発表している⁴⁾。

音響フォノンも光学フォノンも電子励起などを介して光と間接的に相互作用する。西澤先生は1965年の「電子技術」誌において、図5に示したような、トンネル効果によるフォノンの励起にも言及されている⁵⁾。更に1967年には、西澤先生はGaAsガンダイオードによりフォノン（超音波）を励起して石英棒の中を伝搬させる実験に成功されている⁶⁾。



半導体等の固体中の格子振動（フォノン）によるラマン散乱において、量子論的な意味で関与する粒子は、光子（光子）、電子（正孔を含む）とフォノンである。このため全系のハミルトニアン H は、光-電子相互作用 H_{eR}^* 、電子-格子振動相互作用 H_{eL}^* 及び格子振動-光相互作用 H_{RL}^* と、相互作用のない場合のハミルトニアン H_0 を用いて、

$$H = H_0 + H_{eR}^* + H_{eL}^* + H_{RL}^* \quad \dots\dots (1)$$

と表現できる。式（1）の右辺第1項に示す相互作用のない場合のハミルトニアン H_0 は、独立な電子系のハミルトニアン H_e^* 、独立な光子系のハミルトニアン H_R^* 、独立な格子振動系のハミルト

ニアン H_L^* を用いて、

$$H_0^* = H_e^* + H_R^* + H_L^* \quad \dots\dots (2)$$

と表現できる。式 (1) において、光と格子振動の周波数が大きく異なる場合には、光—格子振動相互作用 H_{RL}^* の寄与は他の相互作用を示すハミルトニアン H_{eR}^* , H_{eL}^* に比較して非常に小さい。したがって、光と格子振動の周波数が大きく異なる場合には、

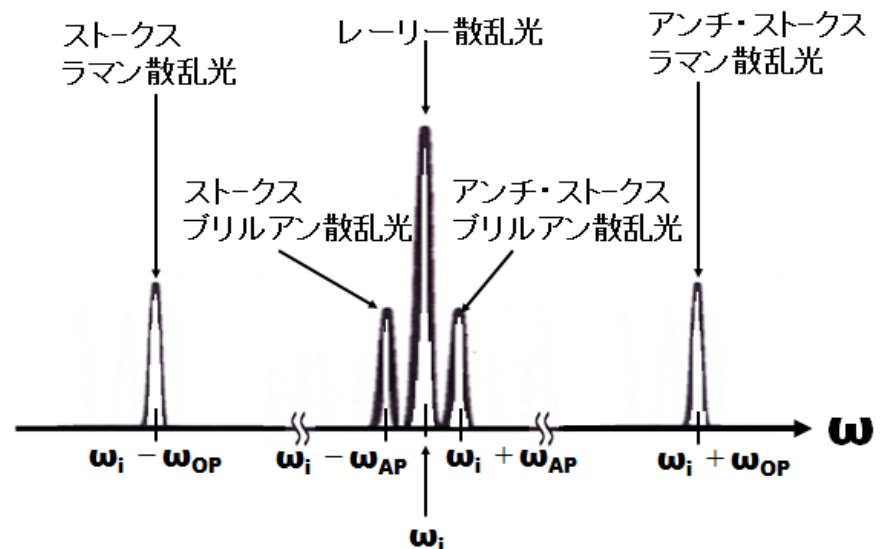
$$H' = H_{eR}^* + H_{eL}^* \quad \dots\dots (3)$$

として、相互作用ハミルトニアン H' を考慮すればよい。このことは光と格子振動の周波数が大きく異なる領域においては、格子振動（フォノン）による光散乱は、光が格子振動と直接相互作用することによって起こるのではなく、電子を介して光が変調を受けることによることを意味している。すなわち固体中の格子振動が電子状態を変調し、電子状態の変調が固体に入射した光を散乱すると考えることができる。

周波数 ω_i の入射光が固体の周波数 ω_{OP} の光学フォノン(OP)に由来してエネルギーを変化させた場合、入射光より散乱光の方のエネルギーが小さくなるように $(\omega_i - \omega_{OP})$ 周波数シフトした場合をストークスラマン散乱と呼び、入射光より散乱光の方のエネルギーが大きく $(\omega_i + \omega_{OP})$ になった場合をアンチ・ストークスラマン散乱と呼ぶ。

同様に周波数 ω_i の入射光が固体の周波数 ω_{AP} の音響フォノン(AP)に由来してエネルギー

【図6】

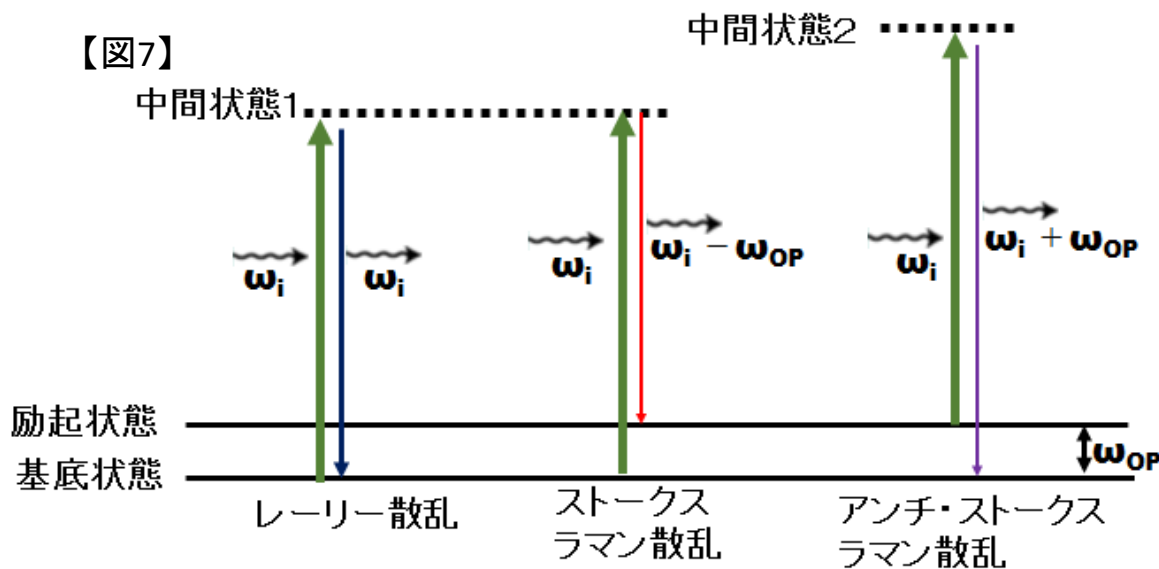


ギを変化させた場合、入射光より散乱光の方のエネルギーが小さく ($\omega_i - \omega_{AP}$) なるように周波数のシフトが生じた場合はストークスブリルアン散乱と呼ばれ、入射光より散乱光の方のエネルギーが大きく ($\omega_i + \omega_{AP}$) になった場合がアンチ・ストークスブリルアン散乱と呼ばれる。図6から分かるようにブリルアン散乱の方が周波数シフトが小さいのでテラヘルツ帯よりも低い周波数帯の発振素子に利用可能である。なお、入射光と散乱光のエネルギーが等しい場合はレーリー散乱と呼ばれる。

図6に示した周波数スペクトルは、図7に示すような中間状態を経由して2個の光子が振動準位を遷移する状態として量子論的な記述をすることができる。図7において、基底状態から励起状態への遷移がストークス散乱光、励起状態から基底状態への遷移がアンチ・ストークス散乱光となる。

ラマン散乱には自発ラマン散乱と誘導ラマン散乱が

ある。「自発ラマン散乱」は、ランダムな時間間隔で、入射された多数の光子のうちの一つが物質によって散乱される。「誘導ラマン散乱」では、いくつかのストークス散乱光が既に自発ラマン散乱により生成されている場合、光学的な共振器構造を設ける等により、意図的にストークス散乱光をシグナル光として元々の入射光（ポンプ光）と同時に入射させる構造を設ければ生じる。誘導ラマン散乱の場合、ラマン散乱の散乱断面積は総計で自発的ラマン散乱のものよりも飛躍的に増加する。ポンプ光がより高速に新たなストークス散乱光に変換され、より多くのストークス散乱光



が存在することになり誘導放出が実現する。ポンプ光の存在によりストークス光が「増幅」される誘導放出現象が発生しラマンレーザとなる。

(2.1.3)受賞できたはずの3つのノーベル賞とラマンレーザの研究

さて、第1章で西澤先生の業績紹介をしたが、1964年、2009年及び2014年の3つのノーベル物理学賞は、西澤先生に与えられるはずであったと第2章の著者である鈴木は考えている。表1に示すように、1964年のノーベル物理学賞受賞者のC. H. タウンズ(Townes)らの特許出願より先の1957年に西澤先生は量子論的な準位間の遷移は半導体のpn接合で可能であると着想し、半導体レーザの特許を出願した。この特許出願は、1960年に特公昭35-13787号として公告され、特許第273217号として登録されている。後に西澤先生の半導体レーザの特許出願がタウンズらより先にされたことが知られると、欧米で大騒ぎになり、1967年の米国エレクトロニクス誌12月号は西澤先生の顔写真をその表紙に採用し、顔写真の上の欄に「オプトエレクトロニクスのパイオニア」と記載して大々的に紹介したのである⁷⁾。しかし、本当は「量子エレクトロニクスのパイオニア」と紹介すべきであったであろう。

実は、表1から分かるように研究ノートが存在による特許訴訟によって、米国ではG. グールド(Gould)が「真のレーザの発明者」とされ、ノーベル賞を受賞したタウンズは除外されている。しかし、西澤先生の特許第273217号の出願日は1957年4月であるので、G. グールドが研究ノートに着想を記載した1957年11月よりも早い。よって、西澤先生は「半導体レーザの発明者」というよりも、より包括的な「レーザの発明者」と呼ばれるべき量子電子工学の開祖のひとりなのである。しかしながら、特許第273217号の特許出願後、当時の半導体研究所所長喜安善一先生が西澤先生を引き連れ電電公社通研に赴き、西澤先生が半導体レーザの話をして、研究費を要請したが断られたという残念な背景がある。西澤先生が訪問したとき、電電公社通研の中で、格別強い反対をしなかったのが水島宜彦氏である。水島氏は、1962年にGE社のR. N. ホール(Hall)が半導体レーザの発振に成功したとの発表⁸⁾があった後、西澤先生に丁重な詫びの手紙を送っている。そして、更に、水島氏は1972年には「半導体ラマン効果による長波長レーザの研究」の委託研究費を西澤先生に供出している。この委託研究費を基礎に学位論文のテーマを西澤先生から頂いたのが著者(鈴木)である⁹⁾。R. N. ホールに先を超された西澤先生は、それならばと、量子論の適用を更に低周波側に拡張して、テラヘルツ帯、遠赤外領域のレーザの実現に向かったのである。

表1 量子力学の発展とラマンレーザ開発の経緯

1877年	I.E.ボルツマン(Boltzmann)が離散的エネルギー準位を示唆
1900年	M.K.E.L.プランク(Plank)の量子仮説の提案
1905年	A.アインシュタイン(Einstein)が光電効果を光量子仮説で説明
1916年	A.アインシュタインが誘導放出の予言をする
1923年	L-V.P.R.ド・ブロイ(de Broglie)がド・ブロイ波の提唱
1926年	E.R.J.A.シュレーディンガー(Schrodinger)が波動力学(波動方程式)の提唱
1927年	W.H.ハイトラー(Heitler)とF.W.ロンドン(London)による原子価結合理論の提唱
1929年	L.C.ポーリング(Pauling)が、共有結合は量子力学的共鳴に基づくと提唱
1951年	C.H. タウンズ(Townes)がアンモニアからマイクロ波が発振できることを着想(未発表)し、研究を開始
1952年6月	J.ウェーバー(Weber)がアンモニアからマイクロ波が発振できることをIREで発表
1953年9月	ノイマン(von Neumann)が半導体pn接合で光の増幅は可能だが、荷電キャリアの吸収で実現できないだろうと、J.バーディーン(Bardeen)らに語る(学会発表せず)
1954年	C.H. タウンズがアンモニアからマイクロ波(24GHz)が発振できることを確認しメーザー(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)と名付ける
1957年4月	渡辺・西澤が半導体レーザの特許出願(特許第273217号)
1957年11月	G.グールド(Gould)が光誘導放出装置を考案し、この光をLASER(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)と名づけ、その着想の記録を残す。
1958年	C.H. タウンズがルビーメーザーの発振に成功
1958年7月	A.L.シャウロウ(Schalow)と C.H. タウンズのレーザの特許出願(USP2.929,922)
1959年4月	G.グールドによるレーザの特許出願(USP4,704,583)
1960年6月	T.H.メイメン(Maiman)が、ルビーレーザのパルス発振に成功
1961年	N.G.バゾフ(Basov)が半導体レーザの論文発表 ¹³⁾
1963年4月	西澤が半導体中の格子振動を用いたテラヘルツ波の発生を提案 ¹⁾
1963年9月	R.ラウドン(Loudon)が一軸性結晶による誘導ラマン散乱の理論的な可能性を指摘 ²⁾
1964年	C.H. タウンズ,N.G.バゾフ,A.M.プロホルフ(Prokhorov)が、ノーベル物理学賞 受賞
1967年4月	西澤が、ガンダイオードで超音波励起に成功 ⁶⁾
1967年12月	米国エレクトロニクス誌が西澤潤一の顔写真を表紙に使い「オプトエレクトロニクスのパイオニア」と紹介 ⁷⁾
1977年	西澤が、6方晶系CdS結晶中の35GHz超音波と光のコヒーレントな相互作用を観測 ⁹⁾
1979年	西澤が、閃亜鉛鉱型結晶のGaPを用いたラマンレーザを実現(特許第1511554号)

2009年のノーベル物理学賞受賞者のC. K. カオ (Kao) 博士は西澤先生の方が先に光ファイバを提案したことを認めていた。カオ博士はなぜ日本人は、あなたを「光通信の元祖」と呼ばないか、と西澤先生に直接質問したという。現在光ファイバによる誘導ラマン効果やラマン増幅が利用されているが、光ファイバの誘導ラマン効果や誘導ブリルアン効果は、西澤先生が昭和39年に出願した特許（特公昭46-29291号公報）に記載の屈折率分布型収束性ファイバ⁴¹⁾の構造が好適である。

更に、2014年のノーベル物理学賞受賞者である赤崎先生らの窒化ガリウム (GaN) の青色発光ダイオード (LED) は1985年に実現されたものであるが、その2年前の1983年に、西澤先生はセレン化亜鉛 (ZnSe) の p-n 接合による青色 LED を実現していたのである¹⁰⁾。2014年のノーベル物理学賞は青色 LEDの実現により、赤、緑、青の3原色のLEDのラインナップが揃ったということが理由と思われるが、青色 LEDの前に西澤先生は世界最高輝度の赤色LEDと緑色LEDもすべて実現していたのである¹¹⁾。従来窒素を添加しないと燐化ガリウム (GaP) 結晶から緑色の発光が得られなかった。西澤先生が発明された「蒸気圧制御温度差液相成長法」という手法で、GaとPの比率（化学量論的組成）が正確に1：1となる完全性が高いGaP結晶が実現したことにより、西澤先生は窒素を添加しないGaP結晶によって効率良く緑色LEDを発光させたのである¹²⁾。そして、半導体ラマンレーザは、この世界最高輝度のLED開発の基幹技術として培われた完全性の高いGaP結晶を成長する技術（完全結晶成長技術）が背景に存在したのである。

(2.1.4) 1979年に実現した半導体ラマンレーザ

著者（鈴木）の研究は35GHzという半導体としては従来知られている周波数よりも1桁高い周波数の超音波（音響フォノン）を励起してブリルアン散乱を確認したものであるが、光学的な共振器を用いていないため、誘導ブリルアン散乱には至っていない。その後、著者はテラヘルツ帯で動作するトランジスタの研究に移ったので、誘導ブリルアン散乱の研究は中断した。著者のブリルアン散乱の研究から分かったことは硫化カドミウム (CdS) 中の結晶欠陥が超音波を減衰させるので、フォノンの励起には完全性の高い半導体結晶が必要であるということである。

既に図3で光学フォノンを図4で音響フォノンを説明したが、図8(a)に示すように光学フォノンには縦モードのLOフォノンと横モードのTOフォノンがある。同様に、図8(b)に示すように音響フォノンには縦モードのLAフォノンと横モードのTAフォノンがある。GaPのラマンレーザでは図8(a)に示したLOフォノンとTOフォノンが用いられる。

1963年のR. ラウドンの論文では、ニオブ酸リチウム

(LiNbO_3) などの光学的異方性物質では、ポラリトンモードによる誘導ラマン散乱が可能

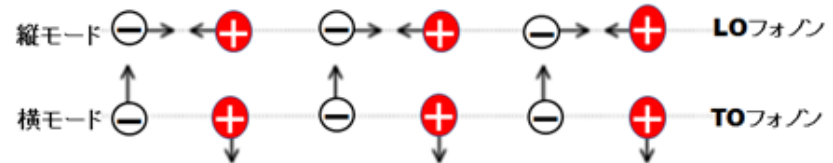
であるが、結晶の対称性からGaPのような光学的な等方性を有する結晶では、TOフォノンによる前方散乱は不可能であるとされていた²⁾。しかし、ベル研究所のC. H. ヘンリー(Henry)らがGaP結晶中のTOフォノンによる前方散乱を1965年に確認していた¹⁴⁾。但し、この1965年の報告で C. H. ヘンリーらはGaP結晶中のポラリトンモードによる誘導ラマン散乱には成功していなかった。

これに対し、当時大学院の学生であった著者の研究を直接指導していた須藤教授が、完全性の高いGaP結晶に着目し、誘導ラマン散乱の研究を進め、1979年にラマンレーザが実現した。須藤教授は著者のブリルアン散乱の実験装置の横にラマン散乱の実験装置を立ち上げて、著者と並行して研究していたのである。ここに緑色LEDで培われた西澤先生のGaPの完全結晶技術が役に立ったのである。

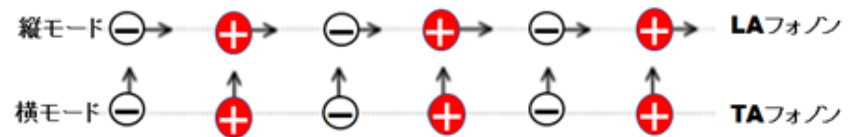
既に図7に示したように、周波数 ω_i の光を入射し、ストークスラマン散乱光 $\omega_s = \omega_i - \omega_{\text{OP}}$ が放出され、ポラリトン ω_{OP} が励起される。したがって前方散乱でストークスラマン散乱光 ω_s を発振させることができれば、ポラリトンモードの振動 ω_{OP} が励振されテラヘルツ光を取り出せる。

【図8】

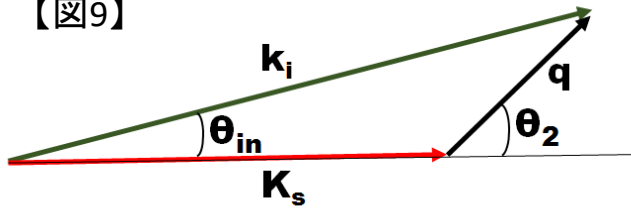
(a) ラマン散乱



(b) ブリルアン散乱



【図9】



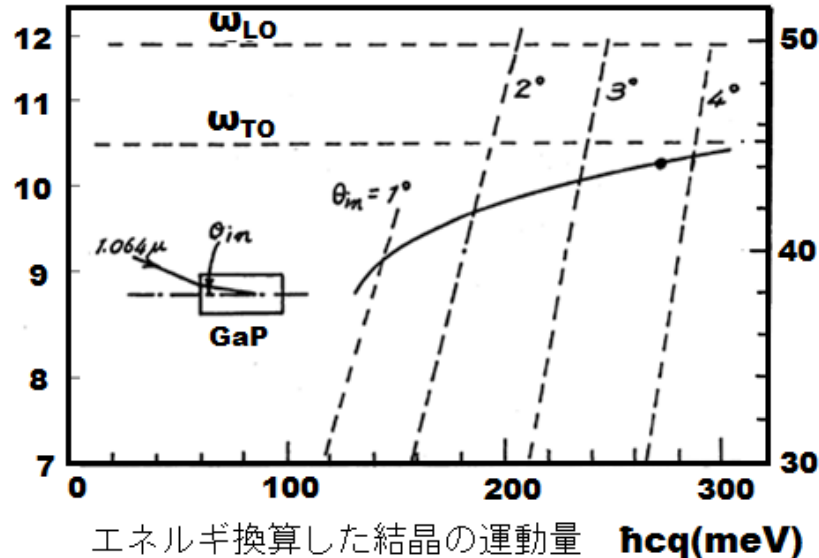
しかし、そのためには、入射光（ポンプ光） ω_i の波数ベクトル k_i 、ストークスラマン散乱光 ω_{sp} の波数ベクトル k_s 、ポラリトン ω_{op} の波数ベクトル q が、図9のように三角形を構成して位相整合条件を満足する必要がある。

図7に示したストークスラマン散乱のエネルギー保存則及び図9に示した運動量保存則から、C. H. ヘンリーらは、既に図10に実線で示したようなポラリトンの分散曲線が導き出していた¹⁴⁾。図10は、学会発表に先立ち西澤先生が1979年に出願した特許1511554号の第2図に記載された図面の座標軸を著者が書き変えたものである。T. E. スチーブンス（Stevens）は、TOフォノンのフォノンポラリトンの分散曲線が大きく曲がると、ポンプ光の背後にチェレンコフ輻射的にコヒーレントフォノンポラリトンが発生すると述べている¹⁵⁾。図10に示すように曲がる分散曲線で、西澤先生が1963年に電子科学で指摘したチェレンコフ輻射的なラマン散乱が実現できたのである¹⁶⁾。

図10の破線は相互作用により結合していない段階のフォノンと光子の分散を示すが、結晶の運動量が大きくなると実線で示したポラリトンの分散曲線は、TOフォノンの分散曲線に漸近することが分かる。図10の右上がりの破線はTOフォノンと結合していない状態における入射角 $\theta_{in}=1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ の入射光のそれぞれの分散を示す。入射角 θ_{in} は、入射光と共振器の軸が結晶内でなす角度になる。

【図10】

チェレンコフ輻射周波数 (THz)



ポラリトンのエネルギー $\hbar\omega$ (meV)

図10はGaPの場合について示したものであり、図10中のパラメータとして示した入射角 θ_{in} の破線と実線で示した分散曲線の交点で、図9に示す位相整合が成り立つ。一般的には、ラウドンの指摘するようにGaPのような光学的等方性結晶では適当な位相整合角が存在しないことになる。しかし、入射光（ポンプ光）の波数ベクトル k_i は入射光の周波数 ω_i における屈折率 n_i から

$$k_i = n_i \omega_i / c \quad \dots\dots (4)$$

の関係から求まる。また、ストークスラマン散乱光の波数ベクトル k_s はストークスラマン散乱光の周波数 ω_s における屈折率 n_s から

$$k_s = n_s \omega_s / c \quad \dots\dots (5)$$

の関係から求まるので、入射光のエネルギー ω_i がGaPの禁制帯幅よりも小さく近赤外から可視領域にあるときは、GaPの屈折率逆分散効果により、誘導ラマン散乱に必要な適当な位相整合角が存在することを須藤教授が実験的に見だし、光学的等方性結晶における位相整合に成功した。図9に示す位相整合条件は入射光のエネルギー ω_i の値によって異なるのである。図10の分散曲線からわかるように、前方散乱ではT0フォノンの周波数 ω_{T0} より長波長側でかつ周波数が ω_{T0} に近いテラヘルツ光が得られる。L0フォノンとは横波である電磁波とは結合しないので、図10に示すようにL0フォノンの分散は平坦である。ラマンレーザに用いるGaP結晶を直方体に切り出した構造において、入射光が入射する端面の法線方向に定義される結晶軸方向が〈100〉に近いときはL0フォノンモードが励起される。GaPの端面の法線方向に定義される結晶軸方向が〈110〉方向に近いときは、前方散乱によりポラリトンモード及び後方散乱によるT0フォノンモードが発振する。L0フォノンモードの誘導ラマン効果の発振の閾値はT0フォノンに比して1桁近く低い。

§ 2.2 微生物・ウイルスを電磁波で撃退する特許の紹介

(2.2.1) 量子生物学に向けられたテラヘルツ技術の方向

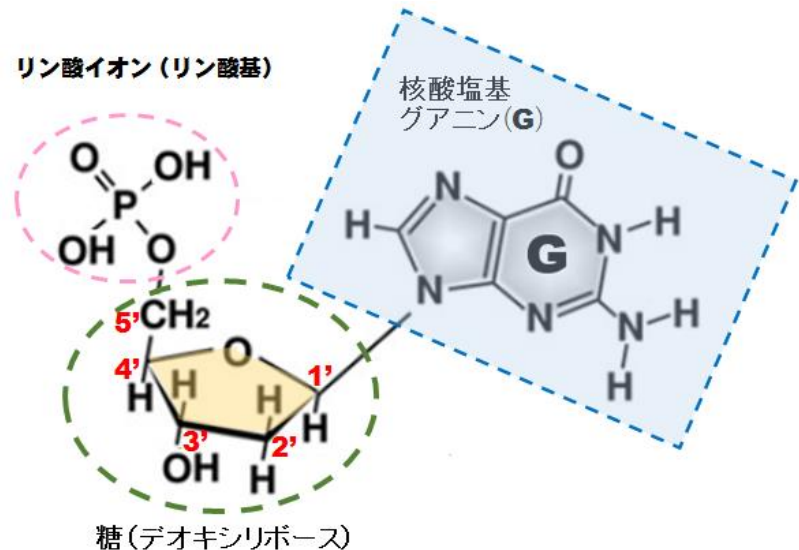
既に紹介した1963年の「電子科学」誌にはテラヘルツ帯の発振素子になりうる候補を示す表が図1として第2頁の下段に記載されている。この「電子科学」誌に西澤先生が掲載された図1の左下の端には「タンパク質核酸の溶液」と記載されている¹⁾。

周知のようにデオキシリボ核酸（DNA）は「ヌクレオチド」と呼ばれる構成単位が連なっていてできている。ヌクレオチドは、リン酸基及び糖（デオキシリボース）という2種類の分子と、アデニン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C)の4種の塩基分子のいずれか一つからできている。

図11はグアニン(G)に糖（デオキシリボース）が接続され「ヌクレオシド」が構成され、この、ヌクレオシドの糖（五炭糖）にリン酸基が接続されてヌクレオチドが形成された状態を例示している。図11の塩基には示していないが塩基中に含まれる元素にも番号が割り当てられているので、塩基側の番号と区別するために五炭糖の5つの炭素

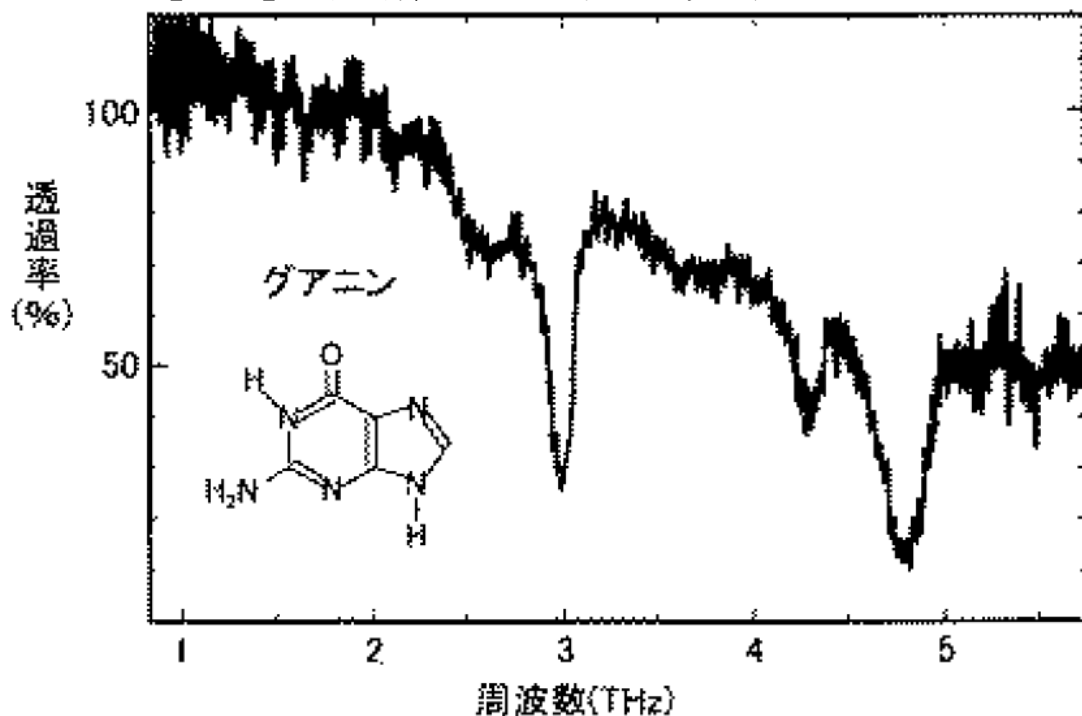
には赤字で示したように、それぞれ『^{1'}』が付けられている。核酸中のリン酸基は負電荷のため酸性となり、生理的pHでは陰イオンとなる。アデニン(A)、チミン(T)、シトシン(C)も同様の構造である。又、もう一種類の核酸であるRNA（リボ核酸）の五炭糖は、2番目の炭素(2')にヒドロキシ基(-OH)を持つリボースであり、塩基分子もチミン(T)の代わりにウラシル(U)を含んでいる。

【図11】 グアニンからなるヌクレオチド



西澤先生が2004年5月に出願した特許第4272111号（以下において「西澤特許111号」と略記する。）の図1及び図2には、西澤先生が測定したアデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、ウラシル(U)、チミン(T)の振動特性が開示されている。

【図12】（特許第4272111号から引用）



【表2】

塩基	吸収ピーク(THz)
アデニン(A)	1.7
	2.1
	3
	4.2
グアニン(G)	2.6
	3
	4.3
	4.8
シトシン(C)	5.5
	1.6
	2.9
	3.4
チミン(T)	4.3
	5.3
	2.3
	3
ウラシル(U)	3.33
	3.8

本稿の図12にはその一例として西澤特許111号の図1（b）に示されたグアニン(G)の吸収スペクトルを示す。図12からグアニン(G)単体としては、2.6THz、3.0THz、4.3THz、4.8THz、5.5THz

に吸収ピークを持つことが分かる。図12に示した吸収ピークは、グアニン(G)単体が示す固有の振動数と言える。西澤特許111号の図1及び図2には、他の塩基の単体としての吸収スペクトルが同様に、それぞれ示されている。即ち表4に示したように、アデニン(A)は1.7THz、2.1THz、3.0THz、4.2THz付近に吸収ピークを持つ。又、シトシン(C)は1.6THz、2.9THz、3.4THz、4.3THz、5.3THz付近に吸収ピークを持つ。更にチミン(T)は2.3THz、3.0THz付近に、ウラシル(U)は3.33THz、3.8THz付近にそれぞれ吸収ピークを持つ。これらのグアニン(G)等のヌクレオチドを構成する塩基は、単体では室温において固体である。西澤特許111号の図1及び図2に示されたアデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、ウラシル(U)、チミン(T)の吸収スペクトルの測定は市販で入手した固体粉末結晶をポリエチレン粉末に混ぜて透過法で測定したものである³⁹⁾。

(2.2.2)生物体は非周期性結晶

量子生物学の端緒の一つとなったのは、1944年に原著が出版されたE. シュレーディンガー(Schrödinger)の名著『生命とは何か(What is life?)』であると思われるが、シュレーディンガーは『生命とは何か』の中で生物体は「非周期性結晶」とであると述べている¹⁸⁾。なお、ウィルスは通常無生物として扱われることが多いが、本稿では生物として扱う(生物の定義は後述する。)。さて、西澤特許111号は2009年に請求項の数は8で登録され、独立請求項として装置に関する請求項1と方法に関する請求項7を有している。対応する外国特許として米国特許第7912553号が2011年に登録されている。西澤特許111号の請求項1の内容は以下の通りである。

【請求項1】

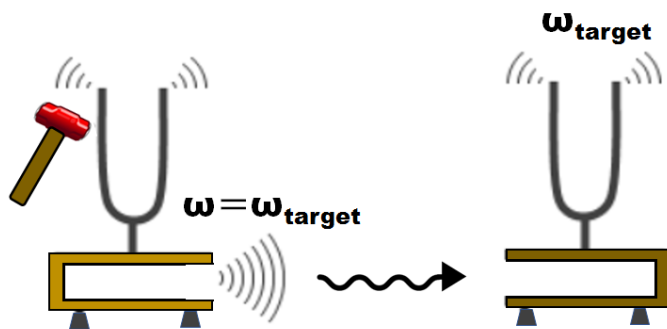
0.01THz～200THzの範囲において、生物学的な標的分子の固有振動数に等しい周波数の電磁波を照射し、前記標的分子を活性化、変態若しくは破壊する電磁波照射手段と、
前記電磁波照射手段に、前記周波数の電磁波を供給する電磁波発生手段と、
前記標的分子を透過した前記電磁波、若しくは前記標的分子から反射した前記電磁波を測定して、前記電磁波の照射による前記標的分子の変化状態を検出する操作結果測定手段
とを備えることを特徴とする標的分子操作装置。

【図13】



なぜ電子レンジでお湯を沸かせることができるかというと、標的分子である水 (H_2O) の分子が 2.45GHz という固有振動数 ω_{target} をもっているからである。この水分子の固有振動数 ω_{target} に共振（共鳴）するように、同じ振動数（周波数） $\omega = \omega_{\text{target}}$ の電磁波を、マグネトロンという電磁波照射手段で水分子に照射すると、水分子の振動が高い運動エネルギーのレベルまで励起されて、加熱されるからである。西澤特許111号では電子レンジより更に高い $0.01 \text{ THz} (= 10 \text{ GHz}) \sim 200 \text{ THz}$ の電磁波を、微生物やウイルス等の生物学的な標的分子に用いる。

【図14】



微生物やウイルスは固有の細胞構造や分子構造を有し、それ故その固有の細胞構造や分子構造に依拠した固有振動数 ω_{target} の振動数を持っているはずである。図14に示すように同じ固有振動数 ω_{target} を持つ共鳴箱付き音叉を2つ用意して、左側の音叉を鳴らせば、右側の音叉も鳴り始める。叩かれた左側の音叉が下の共鳴箱を揺らし、音波が空気を伝わって右側の音叉の共鳴箱を揺らし、共鳴箱の上にある右側の音叉を鳴らす。両方の音叉の固有振動数が違う場合は共鳴は起こらない。

西澤特許111号によれば、標的分子の固有振動数 ω_{target} の電磁波を完全結晶の格子振動（フォノン）から発生させ、この固有振動数 ω_{target} の電磁波を図13及び図14に示すように、標的分子に照

射して、人体の他の細胞に影響を与えないで、標的分子で構成された微生物やウイルスを選択的に撃退することができる。

Covid-19は7番目のコロナウィルスのようにであるが、更に新たなコロナウィルスが発見されたら、先ずそのコロナウィルスの固有振動数 ω_{target} をワイドバンドな分光器で調べ、調べられた固有振動数 ω_{target} の電磁波を新たなコロナウィルスに照射すればよい。西澤特許111号の発明によれば、1年以上かけて新たな治療薬やワクチンを開発する前に、そのコロナウィルスに固有振動数 ω_{target} を測定すればよいので、直ちに新たなコロナウィルスを撃退することができる。

§ 2.1で説明した式 (1) と同様に、西澤特許111号の標的分子で構成される生物系の全系のハミルトニアン H^{bio} は、電磁波-電子相互作用 $H^{\text{bio}}_{\text{eR}}$ 、電子-格子振動相互作用 $H^{\text{bio}}_{\text{eL}}$ 及び格子振動-電磁波相互作用 $H^{\text{bio}}_{\text{RL}}$ と、相互作用のない場合のハミルトニアン H^{bio}_0 を用いて、

$$H^{\text{bio}} = H^{\text{bio}}_0 + H^{\text{bio}}_{\text{eR}} + H^{\text{bio}}_{\text{eL}} + H^{\text{bio}}_{\text{RL}} \quad \text{..... (6)}$$

と表現できる。式 (6) では、シュレーディンガーの非周期性結晶によって生物系が格子を構成していると考えている。式 (6) の右辺第1項に示す相互作用のない場合の生物系のハミルトニアン H^{bio}_0 は、独立な電子系のハミルトニアン $H^{\text{bio}}_{\text{e}}$ 、独立な電磁波系のハミルトニアン $H^{\text{bio}}_{\text{R}}$ 、独立な非周期性結晶の格子振動系のハミルトニアン $H^{\text{bio}}_{\text{L}}$ を用いて、

$$H^{\text{bio}}_0 = H^{\text{bio}}_{\text{e}} + H^{\text{bio}}_{\text{R}} + H^{\text{bio}}_{\text{L}} \quad \text{..... (7)}$$

と表現できる。§ 2.1の式 (1) の説明では、光と半導体の格子振動の周波数が大きく異なる場合には、光-格子振動相互作用 $H^{\text{bio}}_{\text{RL}}$ の寄与は他の相互作用を示すハミルトニアン $H^{\text{bio}}_{\text{eR}}$ 、 $H^{\text{bio}}_{\text{eL}}$ に比較して非常に小さいとした。しかし、請求項1に記載の発明では、標的分子の固有振動数 ω_{target} の電磁波を照射しているので、式 (6) における格子振動-電磁波相互作用 $H^{\text{bio}}_{\text{RL}}$ の寄与は、他の相互作

用を示すハミルトニアン $H_{\text{er}}^{\text{bio}}$, $H_{\text{el}}^{\text{bio}}$ に比較して非常に小さいという近似はできない。なお、1941年にA. セント＝ジェルジ (Szent-Gyorgyi) がタンパク質に半導体のようなエネルギーバンド構造が存在する可能性を指摘しており¹⁹⁾、更に1961年にJ. ラディック (Ladik) らがDNAのエネルギーバンド構造の可能性を指摘している²⁰⁾。生物系に半導体のような電子構造があるのであれば、生物系の格子振動（フォノン）と電磁波の直接的な相互作用の他に、電子を介して電磁波が変調を受けることや、生物系の非周期的な構造の格子振動が電子状態を変調し、電子状態の変調が生物系の格子構造に入射した電磁波と相互作用することも考える必要があるだろう。

最近波長222nmの紫外線がSARS-CoV-2の殺菌に有効であるとの論文が出ているが²¹⁾、この場合は電子系の励起が主になるであろうから、電磁波-電子相互作用のハミルトニアン $H_{\text{er}}^{\text{bio}}$ の寄与が大きいであろう。

【図15】（米国特許第7912553号から引用）

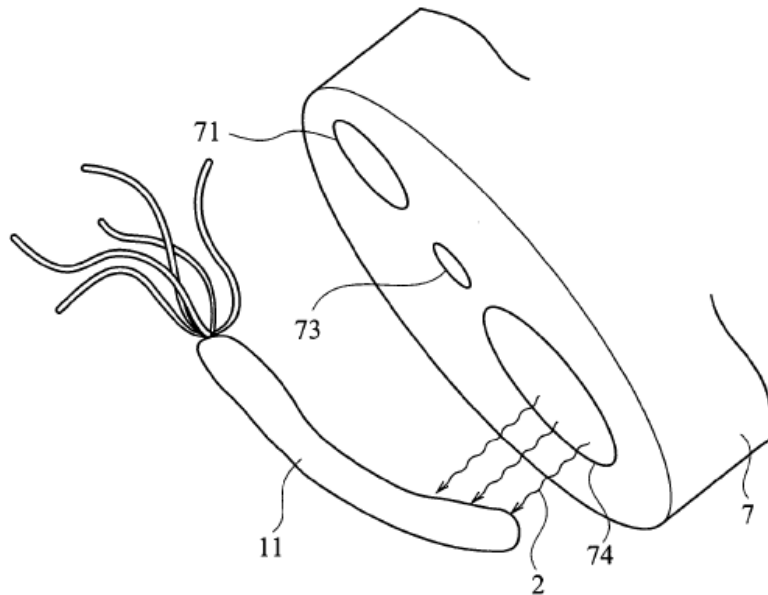
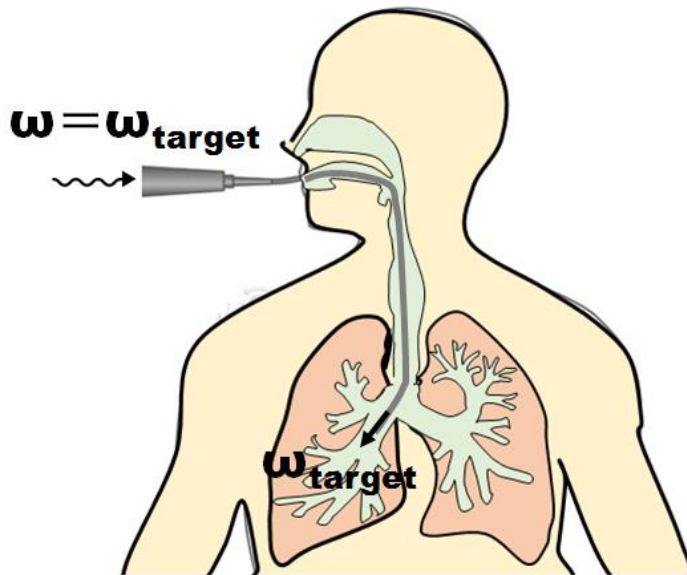


図15は、米国特許第7912553号に記載された発明の実施形態を説明する図で、患者の胃の中にピロリ菌11が存在した状態を仮定している。患者の胃の中に内視鏡7を挿入し、内視鏡7の内部を貫通する導波路の先端74から電磁波2を、ピロリ菌11に照射している。胃の中に存在する標的分子に対し、その固有振動数 ω_{target} の電磁波2を照射して、標的分子で構成されたピロリ菌11が焼き殺されるという模式図である。図15では、内視鏡7の先端にピロリ菌11を観察するCCDカメラ71と、ピロリ菌11の温度を測定する温度測定端子が露出している場合の構造例を示している。

図15では、胃の中のピロリ菌11に対して内視鏡7を介してピロリ菌11の固有振動数 ω_{target} の電磁波2を照射する例を示したが、Covid-19ウイルスの場合は、図16に示すように気管支内視鏡を介してCovid-19ウイルスの固有振動数 ω_{target} の電磁波を、肺の内部や気管支に照射すればよい。ただし、現在のところ図16に示すようなウイルス患者への適用例はない。図15でのピロリ菌の場合と異なり、ウイルスは光学顕微鏡では観測できないので、ウイルスに感染した組織の細胞変性効果等による表面状態や電磁波に対する反射率の差異を利用して、ウイルスに感染した組織を検知し、感染した組織に対して電磁波を照射することになろう。仮に「めくら撃ち」の場合であっても、ウイルスの存在又はウイルスの感染による反射率の変化があれば、高周波の伝送経路の伝送インピーダンスが変化するので、間接的にウイルスの生死を判定できる。

【図16】 気管支内視鏡を介してコロナウイルスを撃退する例



例えば、4端子網を測定するネットワークアナライザを用いて固有振動数 ω_{target} の電磁波の伝送経路のSパラメータを測定すれば、反射波の変化を知ることができるので、Covid-19ウイルスが存在するか否か、或いはCovid-19ウイルスが撃退されたか否かの判断ができる。

しかし、(9)式を用いて後述するように、光導波路にはカットオフ波長があるので、低周波側では気管支内視鏡の外径が太くなることに留意が必要である。又、電磁波の浸透の深さ δ は、高周波になればなるほど浅くなる問題にも留意が必要である。

更に、図16のように、気管支内視

鏡を用いた場合であっても、細胞の深い位置にいるウイルスや気管支内視鏡が届かない末端の位置にいるウイルスには効果が期待できない。

(2.2.3) 高周波の電磁波照射では、電磁波の浸透の深さが課題

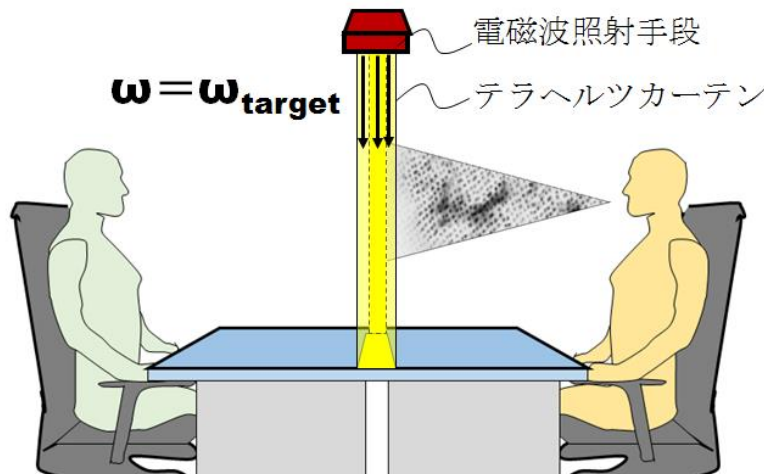
周知のように電磁波の浸透の深さ δ は、組織の導電率 σ 、透磁率 μ を用いて、

$$\delta = (2 / \omega \mu \sigma)^{1/2} \quad \dots \dots (8)$$

という式が近似的に用いられる。生体は水の誘電率と同程度であり、生体を構成する分子のほとんどが非磁性体と考えられるので、 $\mu \approx 1$ [H/m] 程度と推察できる。(8)式からと、3THzの電磁波を生体に照射した場合は $\delta = 70 \mu\text{m}$ 程度、周波数1.2THzの電磁波を照射した場合は、 $\delta = 115 \mu\text{m}$ 程度となるので、生体の内部に浸透させて治療目的に使用するためには大出力のテラヘルツ光源が必要になってくる。

なお、水のテラヘルツ帯における吸収特性は一定ではなく、例えば2.45THz～2.6THzの帯域は比較的透過率が高い。西澤先生は、このような水の吸収スペクトルの窓を活用する技術が、生体にテラヘルツ波を照射する場合に重要になることも弟子達に指導されていた⁴²⁾。

【図17】 感染予防にテラヘルツ波を用いる例 I



電磁波の浸透の深さ δ の問題が軽減されるのは、感染予防の殺菌装置にテラヘルツ波を用いる場合であろう。図17のテーブルの中央の黄色の部分、テラヘルツ波で構成された目に見えない電磁波のバリア（テラヘルツカーテン）の模式的な表示である。

より確実に感染予防をするためには図17に例示した構成において、更に机の中央にアクリル板等の透明板を配置しその両面にテラヘルツカーテンが形成されるように、透明板の上方からテラヘルツ波を照射すればよい。中央に透明板を配置することにより透明板の

の前面にウィルスやウィルスを含む飛沫、エアロゾルが滞留する。このため、テラヘルツ波のウィルスへの照射時間を実効的に長くでき、ウィルスの殺菌効果をより高めることができる。

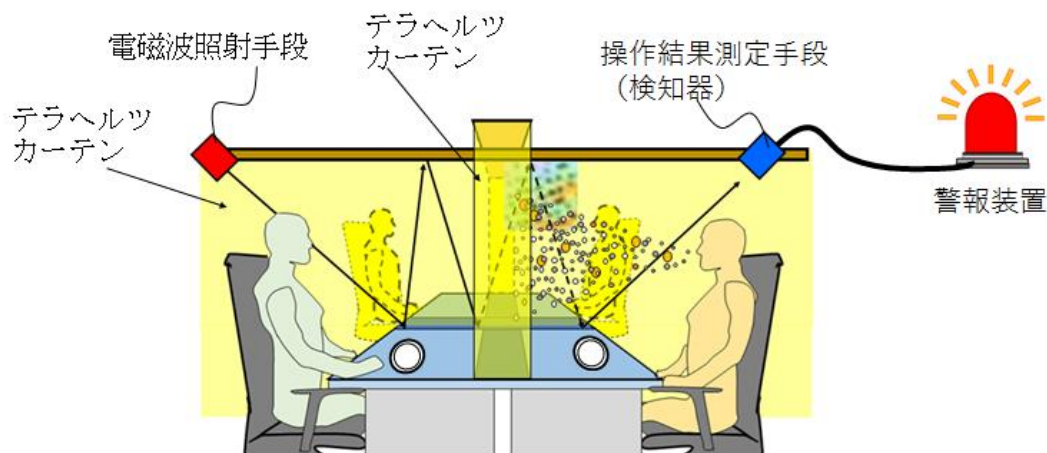
図1に示したようにテラヘルツ波は地球の黒体輻射のスペクトルの帯域に位置するので、原則として人体に安全な電磁波である。このテラヘルツ波を照射する電磁波照射手段は天井に設けてもよい。例えば、飲食店、接待を伴う夜の店、休憩室、集会室、喫煙室、更衣室等の人間が多数集まる恐れのある部屋の天井に電磁波照射手段を設け、天井からテラヘルツ波を室内に照射して、透明で通行等の障害にならないテラヘルツカーテンを形成しておけば感染予防になる。

図18は4人がけテーブルの中央に、黄色で示した十字のテラヘルツカーテンが形成される例を示す図である。手前の2名の中央に黄色のテラヘルツカーテンがあるが、手前の2名の奥に黄色のテラヘルツカーテンで仕切られて2名が座っている。即ち、4人が透明なテラヘルツカーテンで区切られて、感染症学的に4つの孤立空間が構成されている。テラヘルツ波の電磁波は指向性が高い。このため、有効なテラヘルツカーテンを形成するためには図18に示すように、テラヘルツカーテン形成予定のテーブル上の中央十字の箇所と、対応する天井の十字の箇所にそれぞれに、マイクロミラーアレイ等の反射器を設置して、テラヘルツ波を多重反射させればよい。図18で矢印で示したテラヘルツ波の経路は、見やすいように簡略化した模式図である。実際には、更に緻密に多重反射させることにより

線状のテラヘルツ波の経路を、擬似的なテラヘルツ波の面や擬似的なテラヘルツ波の直方体にすることができる。

図17に示した構成においても、同様である。図17の机の中央に黄色の帯状に示した部分と、対応する上方の赤色で示した電磁波照射手段のそれぞれに、マイクロミラーアレイ等を設置して、テラヘルツ波を多重反射させればよい。

【図18】 感染予防にテラヘルツ波を用いる例Ⅱ

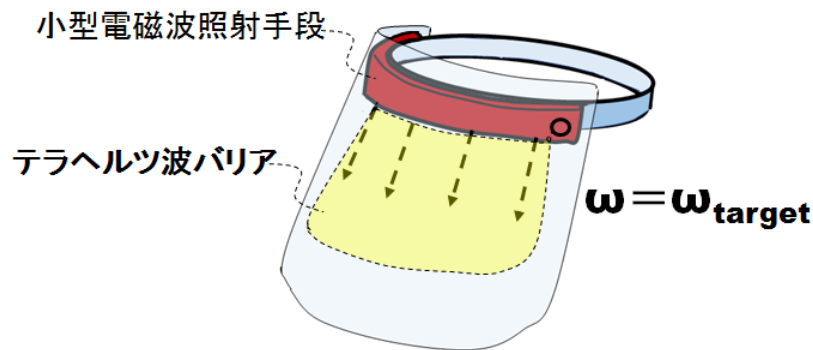


更に図18に示したように、多重反射した一筆書きの経路の最終目的地に操作結果測定手段（検知器）を設けておけば、ウィルスの検知ができる。この場合、検知器の出力を警報装置に接続してもよい。

図18に示した多重反射させて擬似的なテラヘルツ波の面や擬似的なテラヘルツ波の直方体にする技術は、空気清浄機や空調機の内部に組み込んでもよい。特に寒冷地の冬期の換気が困難な場合は、テラヘルツ波による殺菌機能を備えた空気清浄機や空調機が感染予防に有効になる。

又、図18に示した構成の延長として、例えば照明器具にテラヘルツ波照射手段を構成してもよい。LED電球の次世代版として、テラヘルツ波照射手段を備えた感染予防の機能付き照明器具を室内の各天井に備えることが、ウイズコロナの時代の新しい生活様式になるう。

【図19】 感染予防にテラヘルツ波を用いる例Ⅲ



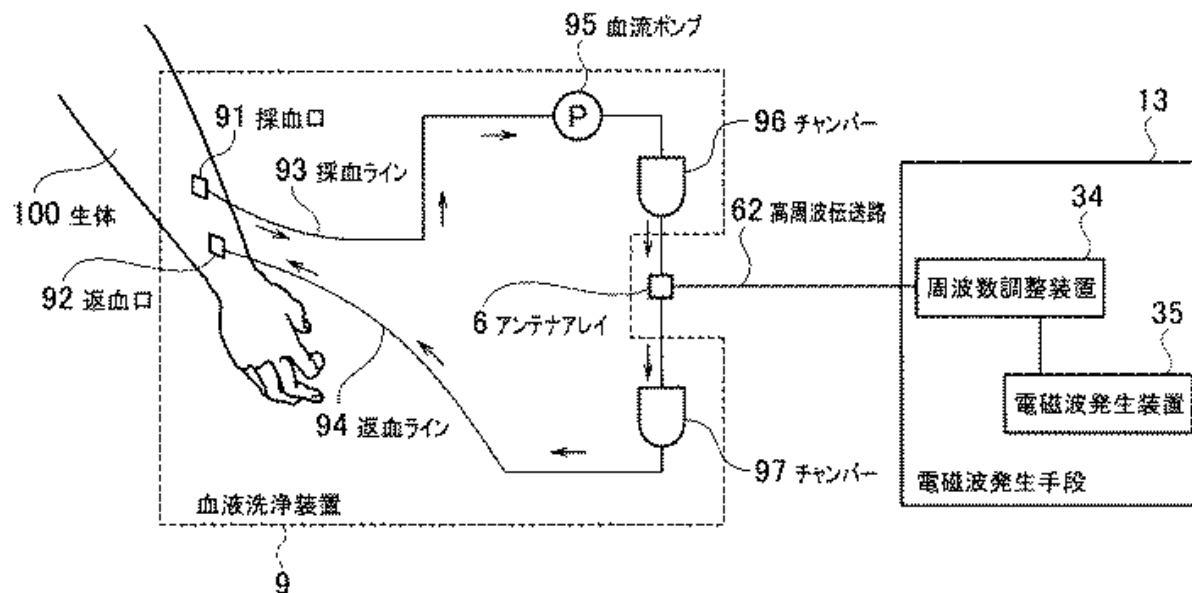
感染予防の他の例として、図19に示したように、フェイスシールドの内側に小型電磁波照射手段を設けて、フェイスシールドの内側に黄色で模式的に示したような、透明なテラヘルツ波バリアを形成するようにしてもよい。この場合もフェイスシールドの下端と上端の間に多重反射の機構を設けることが好ましい。

残念ながら、現在のテラヘルツ光源の小型化は図19の構造に実装できるまで進展していない。しかし、GaPラマンレーザは、既に半導体レーザを励起源に使えるレベルまできているので、光ICとして集積化する小型化への技術が進めば、図19の構造も可能と考える。

又、タブレット端末程度にまで小型軽量化が進んだ段階において、鞆等に入れて携帯した光源部から光導波路を介してフェイスシールドの内側にテラヘルツ波を導入する構造も可能である。

Covid-19ウイルスが血管を攻撃して血栓を作り、この血栓が心臓や肺の血管に詰まり重症化や様々な症状の原因になる場合もあるようである。血液にウィルスが入り込んでしまった場合は、例えば、図20に示すような生体の血液を採血する採血ライン93及び血液を生体に返血する返血ライン94を有する血液洗浄装置9において、採血ライン93に電磁波を照射するように囲むアンテナアレイ6の構造を電磁波の浸透の深さ δ を考慮した設計にすればよい。つまり、電磁波発生手段13から電磁波をアンテナアレイ6に供給して目標とする**ウイルスのみを選択的に攻撃したい場合は**、アンテナアレイ6が囲むチューブの外径を、電磁波の血液中の浸透深さ δ の2倍以下に設定すればよい。3THzではチューブの外径は $140\mu\text{m}$ 以下が好ましいことになる。

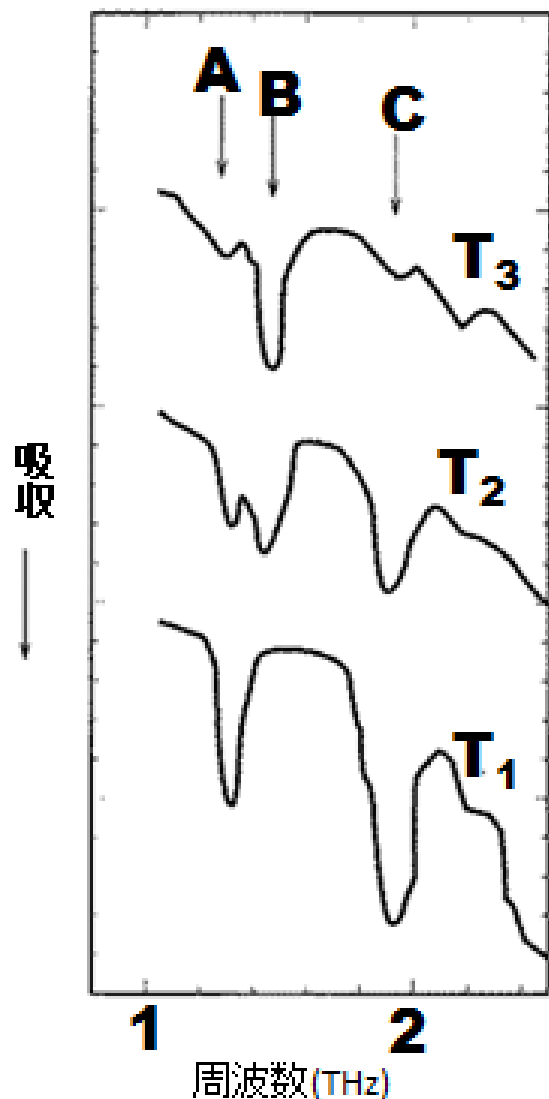
【図20】（特許第4272111号から引用）



所望の量の血液の流量を流すためには外径 2δ 以下のチューブを複数本束にした構造で、それぞれのチューブに電磁波照射部6から電磁波が照射するようにしてもよい。或いは、内径が 2δ 程度の孔が多数開いたハニカム構造のチューブにして、それぞれの孔の内壁にパッチアンテナを設けて、標的とするウイルスのみを選択的に攻撃し、撃退するようにしても良い。

(2.2.4) 癌の診断への西澤特許111号の適用

【図21】（特許第4272111号から引用）



西澤特許111号の明細書の段落【0046】の欄には、図21のT₃、T₂、T₁に示すように癌の進行状態の異なる細胞の吸収スペクトルを予め測定しておき、この予め測定した癌と同種の癌に対して、予め測定したデータを用いて癌の進行の診断をする例が開示されている。

図21は、西澤特許111号に記載された胃癌の癌細胞が癌の進行に伴う吸収ピークの変化を示すが、胃癌の癌細胞は、室温で1.37THzに吸収ピークAを生ずる還元グルコースを多量に含む。これに対し正常組織の細胞は室温で1.5THzにピークBを生ずる通常のグルコースを多く含む。図21に示すように、癌の進行とともに吸収ピークAの強度がT₃→T₂→T₁へと順次増大し、吸収ピークBが順次減少する。西澤特許111号の操作結果測定手段の出力と、予め記憶装置に格納されているデータと比較することにより、癌の進行の程度を知ることができ、人間ドック等の検診にも適用できる。

正常組織の細胞の吸収特性と癌細胞の吸収特性が異なることを利用すれば癌細胞の像の撮像が可能となる。本発明の操作結果測定手段を複数個用意して、マトリクス状に配列してイメージセンサを構成してもよいが、操作結果測定手段を光軸に対して固定して、細胞の位置を光軸に対して相対的に掃引するようにしても撮像は可能である。

【図22】癌細胞のテラヘルツ像²²⁾

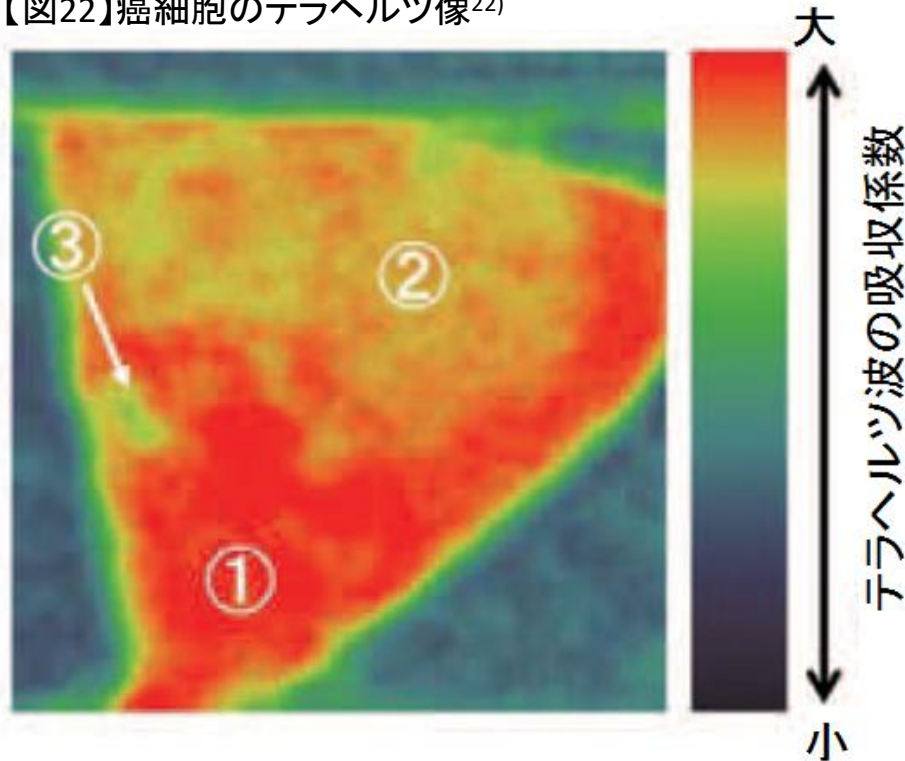


図22は、転移性肝臓癌によって一部が損傷を受けた生体細胞の組織病理学的なテラヘルツ像である²²⁾。図22に示すテラヘルツ像は、テラヘルツ波の光軸の位置に対して測定試料となる細胞の空間的な位置を掃引して撮像している。図22で赤色が強い領域①が3.7THzのテラヘルツ波の吸収が大きな領域を示し、このテラヘルツ像では正常組織の細胞であることを意味する。右側の縦バーに示すように、緑色が濃くなると、テラヘルツ波の透過率が大きくなることを示し、外周に位置する一番濃い緑色の領域はテラヘルツ波の透過率が最も大きな領域で、生体細胞が存在しないことを意味する。図22の黄色～オレンジの領域②が、正常組織の細胞よりも3.7THzのテラヘルツ波の吸収が少なくなった領域を意味し、転移性肝臓癌で損傷を受けている生体細胞の像に対応する。図22の黄緑色の領域③は肝臓中の血管を示す。

西澤特許111号の明細書の段落【0046】の欄には、血管新生因子である上皮成長因子受容体(EGFR)を抑制する薬剤ゲフィチニブの投与の際に、EGFRの固有振動数と等しい周波数の電磁波を照射する例が記載されている。EGFRの活性を阻害、若しくはEGFRを変態させながら、ゲフィチニブを投与することにより、副作用を抑制しつつ、より効果的な治療が可能になる。西澤特許111号に記載された、標的とする細胞のみを他の正常細胞より高温状態若しくは活性状態に局所的に励起する手法は、ゲフィチニブの薬効のみに限らず、Covid-19ウイルスに感染した細胞の治療の際にも適用できる。即ち、重症患者等の治療に際し、感染した細胞のみに薬効があるようにすれば、

副作用を抑制しながら、Covid-19ウィルスによる感染の治療ができるので、治療薬の薬効を高めることができる。

(2.2.5) 西澤特許の請求項7はゲノム編集への応用を規定している

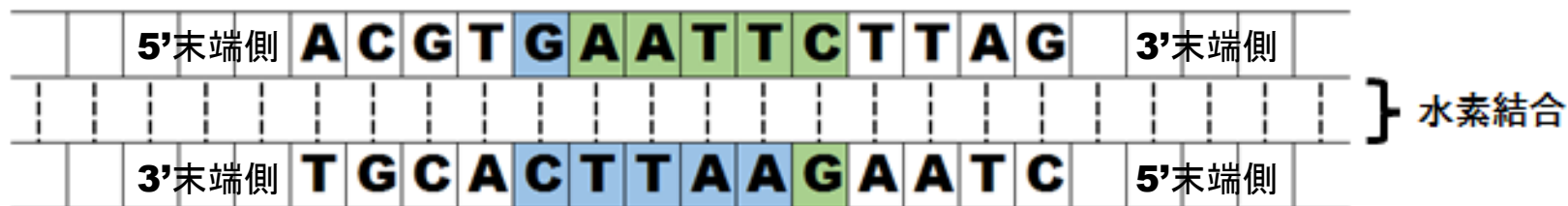
2020年のノーベル化学賞は、カリフォルニア大のJ. A. ダウドナ(Doudna)教授らが2012年に発明した、CRISPR/Cas9による原核生物のゲノム編集の技術に与えられた（米国特許第10266850他、日本国特許第6343605号、特許第6692856号）。しかし、既に2004年に出願していた西澤特許111号の請求項7にはゲノム編集の内容を含む記載がある。即ち西澤特許111号の請求項7は以下のよう、DNAの塩基配列を変更する標的分子操作方法を規定している。

【請求項7】

DNAを、所望の切断箇所で切断する段階と、
前記切断箇所の端部に存在する端部コドン若しくは該端部コドンを構成する端部塩基分子の固有振動数に等しい周波数の電磁波を照射し、前記端部コドン若しくは前記端部塩基分子を選択的に活性化し、前記切断箇所に他のコドンを接続する段階
とを含み、前記DNAの塩基配列を変更することを特徴とする標的分子操作方法。

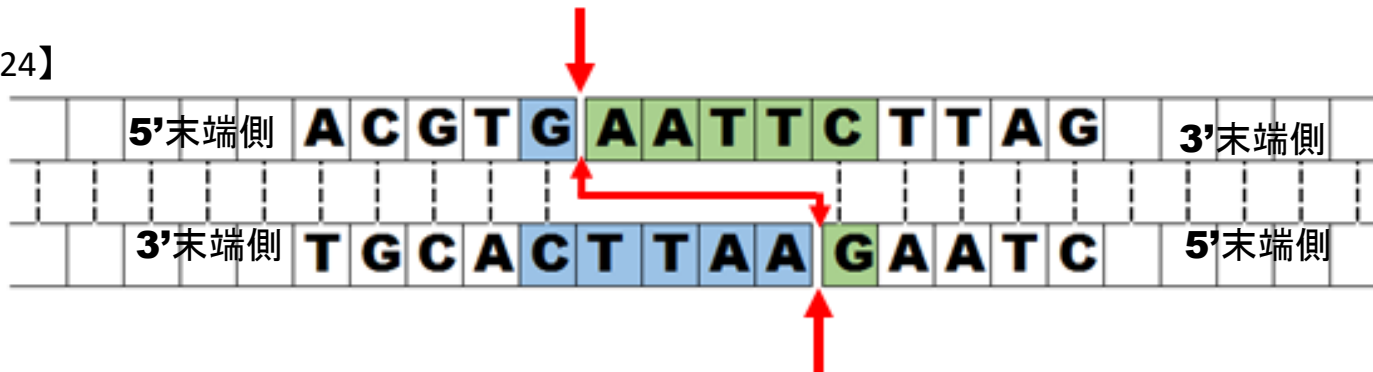
E. シャルガフ (Chargaff) が1948～1951年頃発見したように、アデニン(A)とチミン(T)の数は常に等しく、グアニン(G)とシトシン(C)の数は常に等しい²³⁾。即ち、図23の2重螺旋のモデル図に示すように、アデニン(A)とチミン(T)は互いに水素結合し、グアニン(G)とシトシン(C)は互いに量子力学的な水素結合をしている。

【図23】



西澤特許111号の明細書の段落【0093】の欄には、例えば、EcoRIという制限酵素は図23に示すような5'－GAATTC－3'という塩基配列を認識し、図24に示すように、始めのグアニン(G)とアデニン(A)との間に切れ目を入れるという、従来の制限酵素を用いる場合の例を説明をしている。『5'』、『3'』は、図11に赤字で示した糖（デオキシリボース）の炭素の位置で、DNA配列の末端の位置を示している。後述する図25の左上に糖の5'末端が示されている。

【図24】

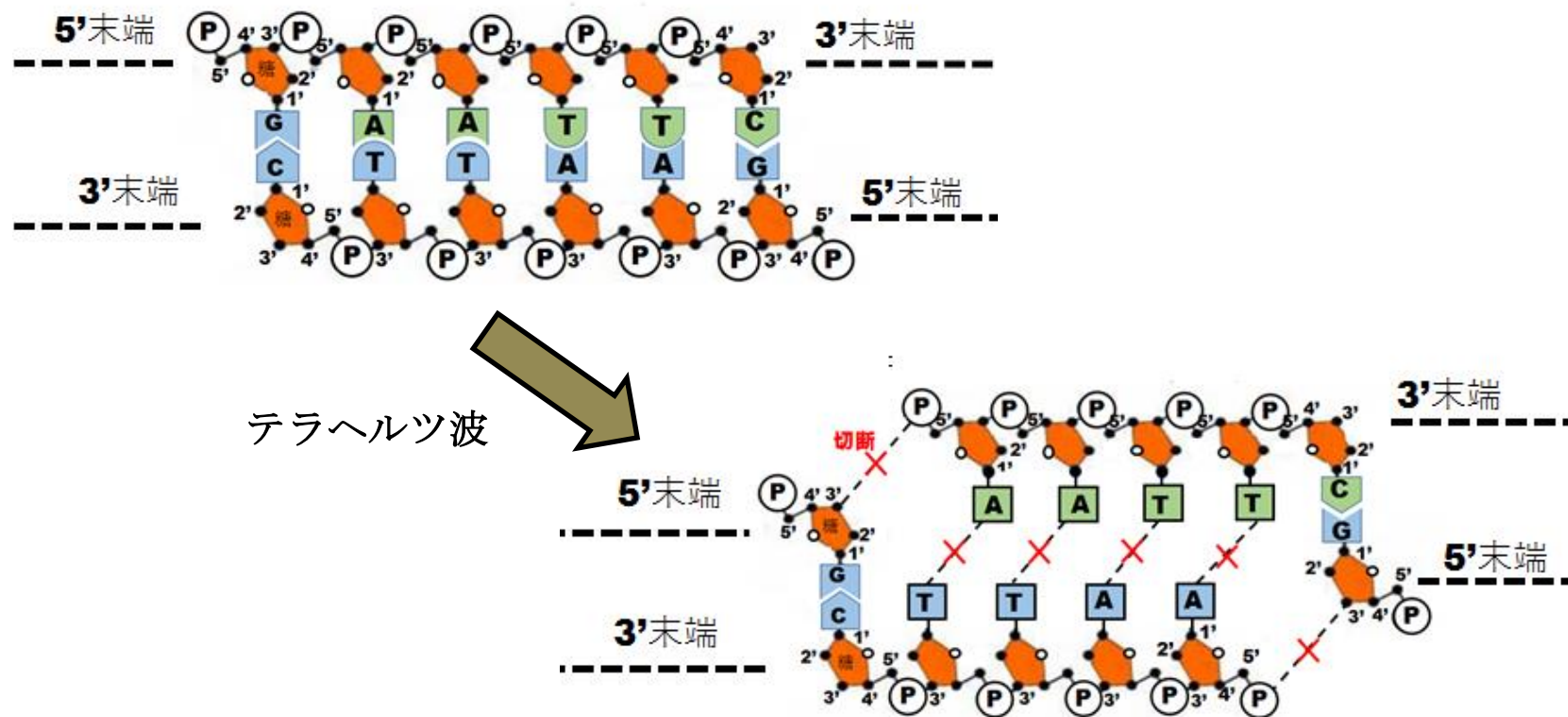


2020年のノーベル化学賞の対象となった発明は、EcoRIのような自然界の制限酵素ではなく、CRISPR/Cas9という第3世代の人工制限酵素を用いて効率的に原核生物のゲノム編集をするという技術である。

西澤特許111号の請求項7に記載の発明によれば、テラヘルツ波を用いて端部コドン若しくはこの端部コドンを構成する端部塩基分子を選択的に活性化し、従来のように制限酵素を用いな

いで切断できる。既に説明したとおり、DNAを構成するヌクレオチドは、リン酸の分子、デオキシリボースの分子と、アデニン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C)のいずれかの塩基分子から構成されているので、図23は図25の左側上段の図のように模式的に表現できる。図11と対比すると○の中にPと示した分子がリン酸基で、橙色の5角形が糖（デオキシリボース）の分子を示している。

【図25】

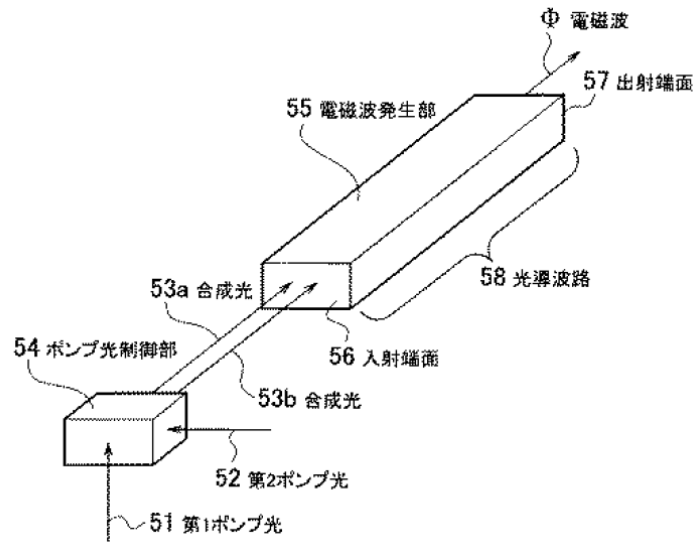


似たようなDNA配列との読み取り誤差をさけるためには、DNA配列の振動スペクトルを調べて、振動スペクトルが有する複数の吸収スペクトルにあわせた複数のテラヘルツ波を照射する必要がある。

(2.2.6) テラヘルツ波の光源は何でも構わない

既に紹介した1963年の『電子科学』誌の中で、「あちこちにお願いしたが……研究を開始することができなかった。1959年に訪米したとき、この論文を討論した2,3人の人びとが半導体論文発表者となっている……。」と記載され¹⁾、西澤先生が半導体レーザの実現に関し先鞭をつけられなかったご無念の気持ちが伝わって来る。しかし、既に述べたとおり西澤先生は「半導体レーザの発明者」と呼ぶべきではなく、より包括的かつ一般的な「レーザ」の発明者である。

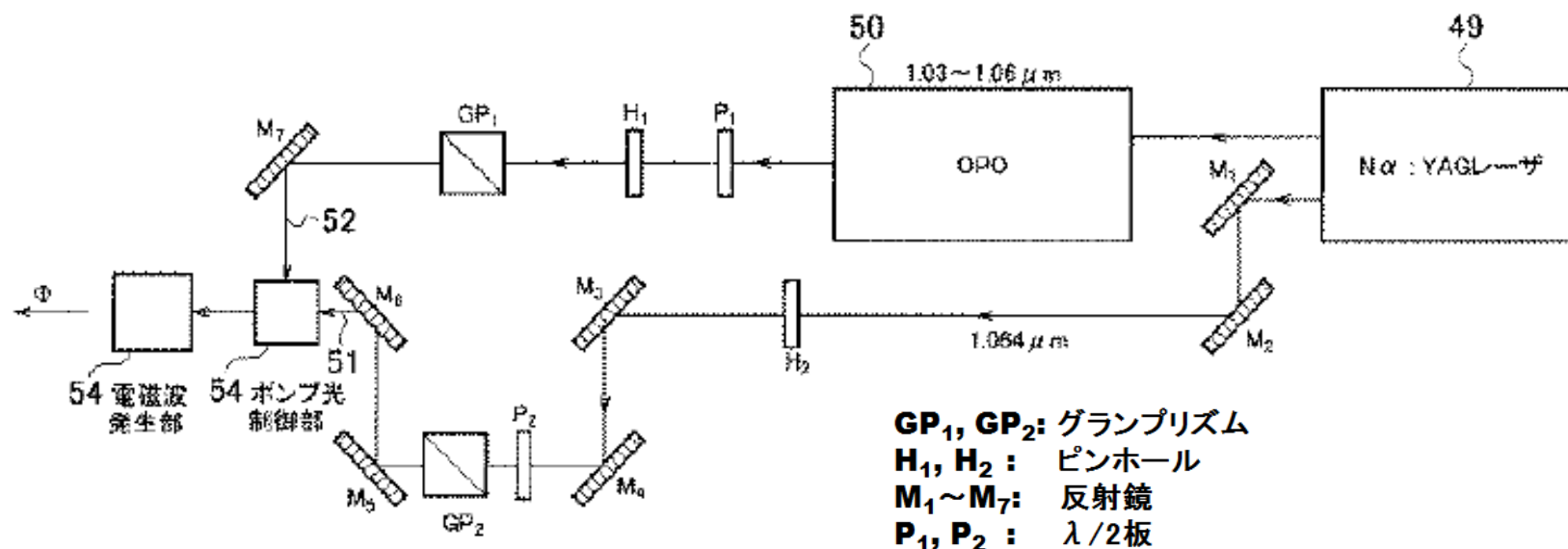
【図26】（特許第4272111号から引用）



ガスレーザ、或いはYAGレーザ等の固体レーザは高出力が可能であり、この高出力レーザの発明がその後の非線形光学を用いた種々のテラヘルツ光源の励起源になっていることは感慨深いものである。西澤特許111号の明細書の段落【0045】の欄には、「電磁波発生装置」としては、マグネトロン、進行波管、クライストロン、カルシノトロン等の電子管、H₂Oレーザ、C₂Oレーザ、HCNレーザ、DCNレーザ等の気体レーザ等のミリ波帯から遠赤外領域における各種の電磁波発生装置でも良い。更に、電子管、気体レーザ等に比べて、小型、軽量、低電圧、低消費電力等の点で優れた機能を有するテラヘルツ帯の固体発振素子も使用可能であると記載されている。

しかし、請求項1に規定する電磁波照射手段は広帯域で周波数可変であることが望まれる。このため、例えば図26に示すような電磁波発生部55において第1周波数の第1ポンプ光51と第2周波数の第2ポンプ光52との差の周波数の電磁波Φを発生する構成において、ポンプ光制御部54の角度を変えることにより、第1ポンプ光51と第2ポンプ光52の入射ベクトルの方向を変え、電磁波発生部55の出射端面57から出射する電磁波Φの周波数を可変にしてもよい。

【図27】 (特許第4272111号から引用)

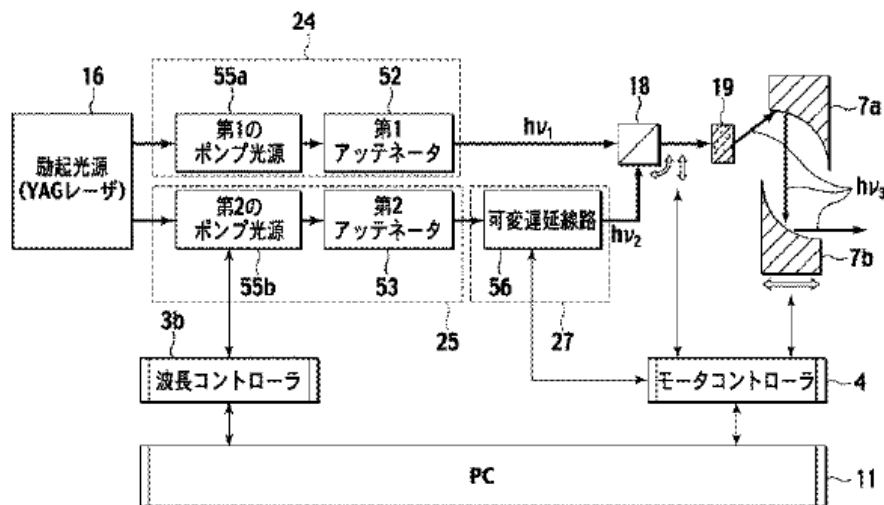


更に広い帯域で周波数可変にするためには図27に示すような、光パラメトリック発信器 (OP0) 50を用いて、差周波数発生に用いる第2ポンプ光52の周波数をより広帯域で可変とすればよい。即ち、第2ポンプ光52の周波数をより広帯域で可変にし、この広帯域可変の第2ポンプ光52を、図26に示したポンプ光制御部54を介して電磁波発生部55に入射させて、第1周波数と第2周波数の差周波数の電磁波 Φ を発生させればよい。

図27に示した光パラメトリック発信器 (OP0) 50としては、種々のパラメトリックレーザが使用可能である。例えば半導体GaP結晶のパラメトリック効果により0.2THzから7THzに至るテラヘルツ周波数領域において任意の周波数の単一可変周波数テラヘルツ波を発生させることができる。一方誘電体LiNbO₃のパラメトリック効果を利用した場合は、0.5THzから3THzの範囲内の周波数領域において単一可変周波数テラヘルツ波を発生することができる。光パラメトリック発信器 (OP0) 50の代わりに、半導体や誘電体を利用したラマンレーザを用いても、同様に、テラヘルツ帯の可変周波数電磁波を発生させることができる^{24, 25)}。

なお、西澤先生の別の特許発明となるが、特許第4749156号に記載された差周波発生方式の周波数可変テラヘルツ光源の技術を基礎として、帯域0.3THz～45THz等で可変の数種の仕様の信号源やテラヘルツ分光器が、既に製品化されている。特許第4749156号に記載された電磁波発生装置

【図28】 (特許第4749156号から引用)



は、図28に示すように、第1のポンプ光 $h\nu_1$ を出射する第1のポンプ光出射部24と、第1のポンプ光 $h\nu_1$ とは異なる波長の第2のポンプ光 $h\nu_2$ を、波長可変で出射する第2のポンプ光出射部25を有している。更に、第1のポンプ光 $h\nu_1$ と第2のポンプ光 $h\nu_2$ との差周波数の電磁波 $h\nu_3$ を生成する非線形光学結晶19を備えている。第1のポンプ光 $h\nu_1$ と第2のポンプ光 $h\nu_2$ との外部交叉角度 $\theta_{i_{next}}$ を調整し、第1のポンプ光及び第2のポンプ光を非線形光学結晶19に入射させるために、光学系18が用意されている。

そして、第2のポンプ光 $h\nu_2$ の周波数と外部交叉角度 $\theta_{i_{next}}$ を連動して変えることにより、非線形光学結晶19から可変波長のテラヘルツ電磁波 $h\nu_3$ を発生させる。更に、図28に示すように、第2のポンプ光出射部25と光学系18との間に、タイミング制御機構(手段)27を挿入している。タイミング制御機構(手段)27は、ポンプ光(第1のポンプ光) $h\nu_1$ のパルス及び信号光(第2のポンプ光) $h\nu_2$ のパルスの非線形光学結晶19に到達するタイミングを制御する機能を有する。第1のポンプ光出射部24及び第2のポンプ光出射部25の第1及び第2のポンプ光源として、例えば、1.15～1.35 μm の範囲で波長可変なCr添加フォルスステライトレーザ55a及びCr添加フォルスステライトレーザ55bを採用することができる。特注仕様となると思われるが、現在の技術レベルは0.2THz～100THzの範囲の可変周波数光源が、製品として市場に提供できる状況にあると思われる。

§ 2.3 テラヘルツ分光によるウィルスの検出と、ウィルスの振動の量子力学的検討

(2.3.1)テラヘルツ分光によるウィルスの検出

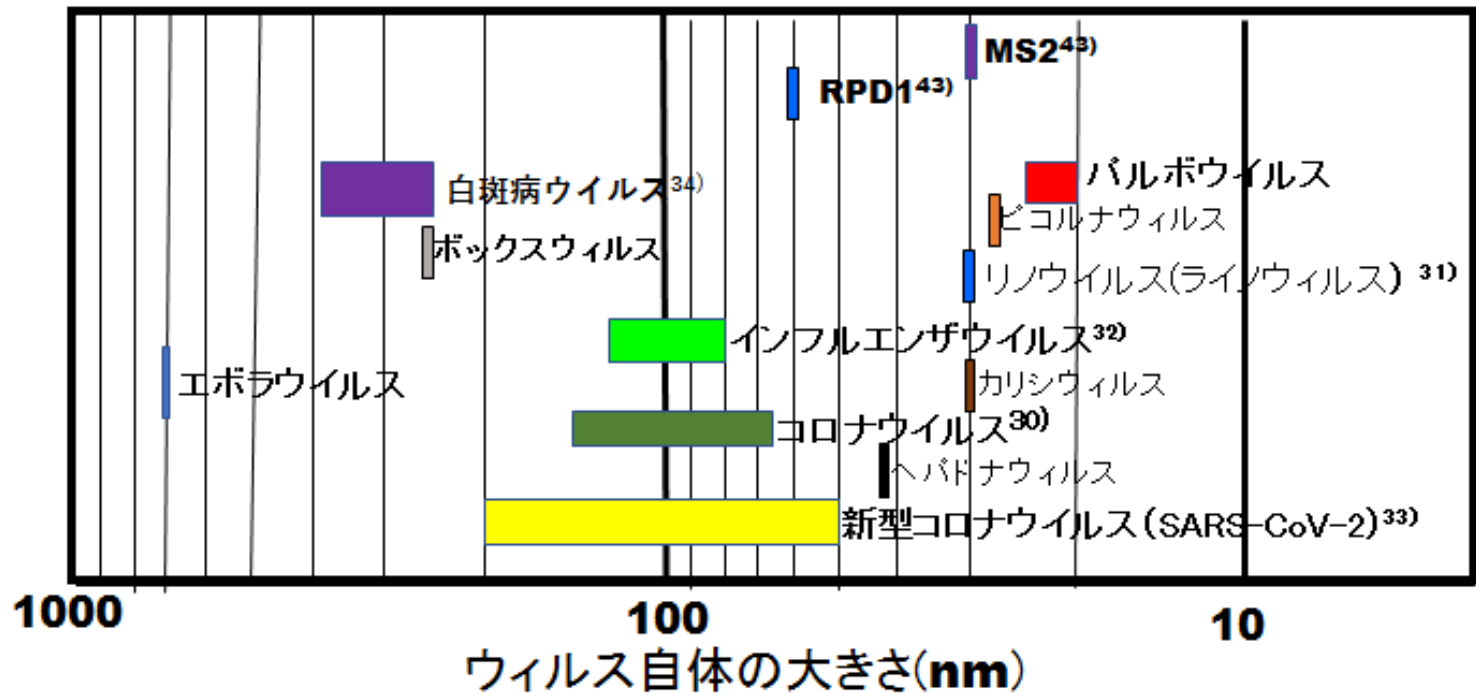
ギガヘルツ帯等のマイクロ波の伝送路の一つに金属製の管である導波管がある。導波管には、マイクロ波の波長に依存した遮断周波数というものがあり、導波管の寸法で決まる遮断周波数より大きな波長を有する電磁波は、その寸法の導波管の内部を伝搬できない。同様に光ファイバにも、あるモードの光が光ファイバを伝送していけるか遮断されるかの境界となる波長がカットオフ波長と呼ばれる。ステップインデックス型シングルモード光ファイバの場合、コア半径を a 、コアの屈折率を n_{core} 、コアを覆うクラッド層の屈折率を n_{clad} とすると、カットオフ波長 λ_{ct} は

$$\lambda_{\text{ct}} = \frac{2\pi a \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}}{2.405} \quad \text{.....(9)}$$

で与えられる。シングルモード光ファイバでは、伝送波長がカットオフ波長 λ_{ct} より短くなると基本モードに加え高次モードも伝送できるようになる。一方、伝送波長がカットオフ波長 λ_{ct} より長くなると光が伝送できない。

さて、第2章の冒頭で説明した図1に示すように、1THzの電磁波の波長は、 $0.3\text{mm} = 300\mu\text{m}$ である。一方、図29に示した例では、左側に示したエボラウィルスのサイズが最大であり、 $700\text{nm} = 0.7\mu\text{m}$ である。図29から多くのウィルスのサイズはテラヘルツ帯の電磁波の波長よりも2～3桁小さいことが分かる。導波管や光ファイバの場合と同様に、ウィルスの寸法で決まるカットオフ波長より遙かに大きな波長の電磁波が、ウィルスに照射されることになる。古典論で考えるとエバネッセント波のような形式で、減衰しながら電磁波がウィルスの中に入っていくことになる。

【図29】



一方、光学の分野では、レイリー (Rayleigh) の分解能が知られている。即ち、2つの点光源の分解能 δ は、光の波長を λ 、対物レンズの開口数を NA 、物体と対物レンズの間の媒質の屈折率を n 、物体から対物レンズに入射する光線の光軸に対する最大角度を θ とすると、

$$\delta = \frac{0.61\lambda}{NA} = \frac{0.61\lambda}{n \sin \theta} \quad \dots\dots(10)$$

で与えられる。(10)式とほぼ同様な式で、アッベ (Abbe) の分解能も知られている。

導波管や光ファイバのカットオフ波長の例で示したとおり、1THzの電磁波の波長が $0.3\text{mm}=300\mu\text{m}$ を考慮すると、(10)式で示されるレイリーの分解能やアッペの分解能に対し、図29に示すウィルスのサイズは遙かに小さい。電磁波の分解能以下のサイズのウィルスに電磁波を照射して、はたしてウィルスは検出することが可能であろうか。

粒子サイズが電磁波の分解能以下のサイズになって来たときに、粒子としてのウィルスと電磁波との相互作用はどのように考えたらよいのであろうか。電磁波の波長より2～3桁小さい粒子と電磁波との相互作用は、古典論でイメージしにくくなり、ウィルスの波動性を考慮した量子論における相互作用を考える必要が生じる。

良く知られているように、半導体粒子の直径を電子のド・ブロイ波長（数nm～20 nm）程度まで小さした量子ドットにおいては、電子が量子ドットの領域に閉じこめられるため、電子の状態密度は離散化され「量子サイズ効果」が発生する。ド・ブロイの関係式は、電子の運動量 p 、プランク定数 h 、電子のド・ブロイ波長 λ_{DB} を用いて、

$$p = \frac{h}{\lambda_{\text{DB}}} \quad \text{.....(11)}$$

と表せられる。 K_B をボルツマン定数とし、質量 m の電子の運動エネルギーが温度 T の電子の熱エネルギーと等しいとすると、

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{3}{2} k_B T \quad \text{.....(12)}$$

となる。したがって、(11)式から、電子のド・ブロイ波長 λ_{DB} は、

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{\sqrt{3mk_B T}} \quad \text{.....(13)}$$

と表せる。砒化ガリウム（GaAs）の有効質量0.067を用いて、半導体完全結晶中の電子の質量を $m = 0.067m_0 = 0.036 \times 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ とすると、 $T=300\text{K}$ のときの半導体完全結晶中の電子のド・ブロイ波長 λ_{DB} は、

$$\lambda_{DB} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{3 \times 0.067 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}} = 24.1 \text{ nm} \quad \text{.....(14)}$$

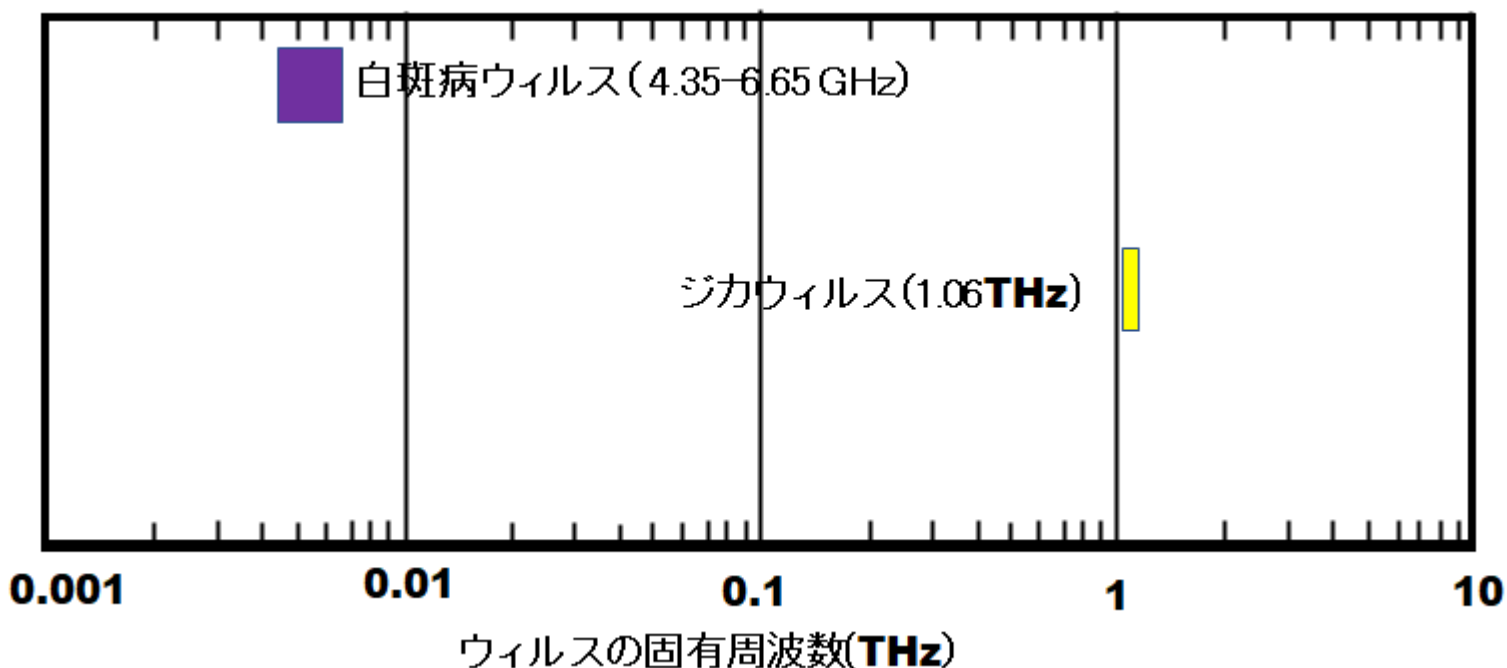
となる。半導体粒子がド・ブロイ波長程度になった量子ドットにおいては、電子や正孔（ホール）等のキャリアの運動の自由度が極端に制限されてキャリアの運動エネルギーは増加する。このため、粒子径が小さくなるにつれて、半導体のバンドギャップエネルギーが、バルクの半導体のバンドギャップエネルギーより増加する。既に述べたとおり、A.セント＝ジェルジによればタンパク質も半導体と同様なエネルギーバンド構造が存在すると予想されるので¹⁹⁾、ウィルスも量子ドットと同様な振る舞いをする事が予想される。

2003年にはウィーン大学のL. ハッカーミュラー（Hackermüller）博士らの研究チームは、生体に含まれるテトラフェニルポルフィリン（tetraphenylporphyrin）分子の波動性を測定している⁴⁴⁾。そして、2019年になり、ウィーン大学のA. シャエギ（Shayeghi）博士らの研究チームは、15個のアミノ酸で構成される天然抗生物質であるグラミシジン分子の量子干渉を実証した⁴⁵⁾。ウィルスの波動性が測定されても不思議ではないであろう。

残念ながら西澤先生の研究グループからはウィルスの検出に関する研究の成果は出ていない。バイオハザードの問題から研究者が安易に測定できない環境にある。

2020年5月にイスラエルのネゲヴ・ベン＝グリオン (Ben-Gurion) 大学の G. サルシ (Sarusi) 教授のグループがテラヘルツ分光を用いて20秒で Covid-19ウィルス (SARS-CoV-2) を検出する技術に成功したとの報告があるが²⁶⁾、論文レベルの発表がないので、詳細は不明である。テラヘルツ波でのイメージングができているようなので、何らかのCovid-19ウィルスの吸収ピークがテラヘルツ帯にあると判断できる。

【図30】



現在論文レベルで確認できているのは、図30に示すようにジカウイルスの1.06THz²⁸⁾、白斑病ウイルスの4.35-6.65GHz²⁹⁾ という固有周波数である。白斑病ウイルスの固有周波数はテラヘルツ帯の下のギガヘルツ帯に位置する。

表3には、2019年の国際ウイルス分類委員会（ICTV）発表の168科、103亜科の内の代表的な一部のウイルスを紹介している。

【表3】 ウィルスの分類

2019年のICTV発表の168科、103亜科の内の代表的な一部を紹介

DNA ウイルス	1本鎖	エンベロープなし	直鎖	パルポウイルス科	バクテリオファージ φX174
			環状	ミクロウイルス科	
	2本鎖	エンベロープなし	直鎖	アデノウイルス科	バクテリオファージ PRD1
			直鎖	テクティウイルス科	
			環状	パピローマウイルス科	
		エンベロープあり	直鎖	ヘルペスウイルス科	天然痘 白斑病 B型肝炎
			直鎖	ポックスウイルス科	
			環状	ニマウイルス科	
RNA ウイルス	1本鎖 (一鎖) 遺伝子が3'→ 5'方向に読み 取られる	エンベロープあり	直鎖	ラブドウイルス科	狂犬病 インフルエンザ エボラ
			7or8本の直鎖	オルソミクソウイルス科	
			直鎖	フィロウイルス科	
			直鎖	パラミクソウイルス科	
	1本鎖 (+鎖) 遺伝子が5'→ 3'方向に読み 取られる	エンベロープあり	2本の直鎖	アレナウイルス科	ジカ/デング/日本脳炎 SARS/MARS
			直鎖	フラビウイルス科	
			直鎖	コロナウイルス科	
			直鎖	トガウイルス科	
		エンベロープなし	2分子の直鎖	レトロウイルス科	ノロ リノ(ライノ)/ポリオ バクテリオファージMS2
			直鎖	カリシウイルス科	
			直鎖	ピコルナウイルス科	
	2本鎖	エンベロープなし	直鎖	レビウイルス科	
			10~12本の直鎖	レオウイルス科	

表3に示すように、図30に示したジカウィルスはフラビウィルス科に属し、コロナウィルスと同様にエンベロープのある1本鎖でプラス鎖のRNAウィルスである。「プラス鎖のウィルス」とは、メッセンジャーRNA(mRNA)と同様に遺伝子が5'末端側から3'末端側の方向に読み取られる塩基配列を有するウィルスである。プラス鎖のウィルスは宿主細胞のタンパク質合成機能を利用してウィルスタンパク質を合成する。これに対しマイナス鎖のウィルスは、mRNAと相補的な塩基配列で遺伝子が3'末端側から5'末端側の方向に読み取られる。マイナス鎖のウィルスは、先ずウィルスが持ち込んだ合成酵素でmRNAを合成した後、宿主細胞のタンパク質合成機能を利用してウィルスタンパク質を合成する。

白斑病ウィルスは、表3に示すようにエンベロープのある2本鎖のニマウィルス科に属する。白斑病ウィルスは、図29に示すように直径70-159nm長さ240-380nm程度の比較的大きなサイズのウィルスであるので³⁴⁾、マクロな振動周波数は図30に示すような低周波の領域となりテラヘルツ帯からずれてきていると思われる。

粒子サイズが電磁波の波長より短い領域になってくると、「天然の物質を超える機能を示す物質」のような意味で「メタマテリアル」という用語が用いられている。「メタ」とはギリシャ後の「超越した」「超える」「上位の」「より高い」という様な意味から来ているようである。このメタマテリアルの測定では、半導体の微細加工技術によって、電磁波の波長より小さな分割リング型共振器のパターンが用いられる。そして、Covid-19ウィルス(SARS-CoV-2)のスパイクタンパクについては、分割リング型共振器によって表面プラズモンを励起して0.4THz付近に共鳴周波数が得られている²⁷⁾。同様にメタマテリアルの分割リング型共振器を用いた測定で、バクテリオファージMS2の1.26THz⁴³⁾、バクテリオファージPRDの1.26THz⁴³⁾の共鳴周波数が得られている。これらの共鳴周波数は分割リング型共振器の寸法により決まる電気回路的な共振周波数であって、ウィルス分子に固有の振動数に直接関係するものではない。上述のサルシ教授のCovid-19ウィルスのテラヘルツ帯における検出報告も、メタマテリアルの技術を用いているようである。

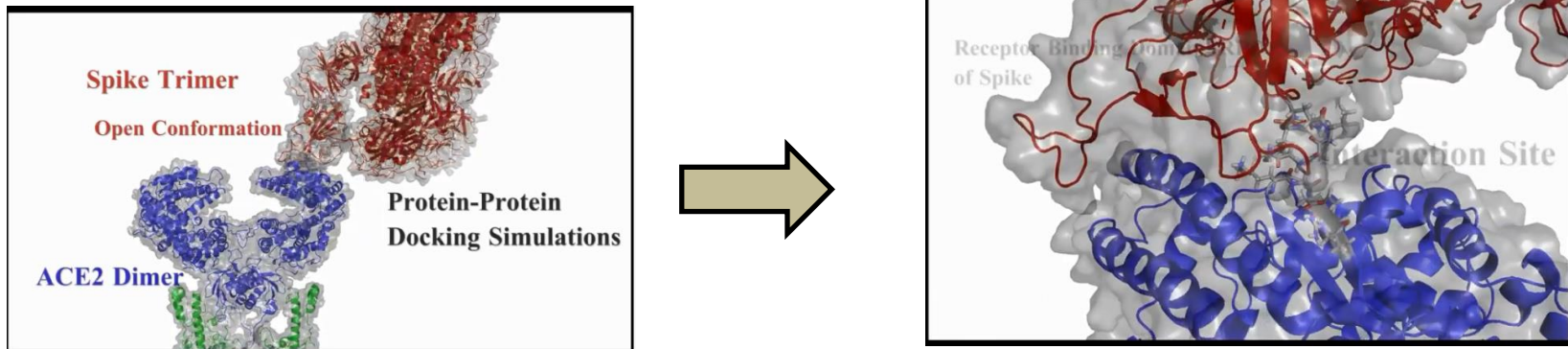
メタマテリアルの測定で採用されたバクテリオファージは細菌(バクテリア)に感染するウィルスで、ギリシャ語で「バクテリアを食べるもの」という意味である。表3に示すように、バクテリオファージMS2は正20面体の一本鎖のプラス鎖のRNAウィルスでエンベロープがない。バクテリオファージMS2はレビウィルス科に属する。バクテリオファージMS2は大腸菌に感染するウィルスで

あるが、MS2ゲノムは3569塩基のRNAからなり、最も小さいゲノムのひとつとされる。30nmの寸法であってもメタマテリアルの測定手法を用いると検出できる。バクテリオファージ PRDは60nmの寸法で、表3に示すようにテクティウィルス科に属し、エンベロープのない2本鎖のDNAウイルスであるが、メタマテリアルにおける電気回路的な共振周波数の測定により、テラヘルツ帯で検出されている。

(2.3.2) 新型コロナウイルスはどのようにしてACE2受容体を識別して結合するのか

分子機能研究所は、以下の図31に示すような新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）のスパイクグリコプロテインとhuman ACE2のタンパク-タンパクのドッキングシミュレーションの動画をYouTubeで公開している³⁵⁾。実際には更に、ウイルス表面のヘマグルチニンタンパク質（HE）と宿主細胞のN-アセチルノイラミン酸との相互認識のプロセスと結合もあるようである。

【図31】



スパイクグリコプロテインとACE2のドッキングの多くの説明はスパイクグリコプロテインとACE2受容体の形状が一致する、或いはスパイクグリコプロテインとACE2受容体の間の「親和力」が高いからドッキングできると、現象論的な説明がなされているが、著者（鈴木）には親和力の正体として機能している認識力や結合に関与する力は何かが理解できない。

ウィルスにもACE2受容体にも対象物を検出する眼がない。(10)式で示したようなレイリーの分解能やアッペの分解能を考慮すると、ドッキングに際し、一体どのようなセンサで対象物を特定しているのでしょうか。光学センサ等の識別手段のないウィルスやACE2受容体が、いかにしてドッキング対象の構造を互いに認識して、正しいドッキング対象であると判断するのであるのでしょうか。

【図32】



QRコードを発明したデンソーの原昌宏氏は、QRコードを構成している2次元図形の方角、大きさの光学的な認識技術に1年以上苦労したという（特許第2938338号他）。まして、3次元の形状の認識は至難の技である。図32は幼児用の嵌め込みおもちゃであるが、2歳になりたてぐらいの幼児は形状認識が苦手で、円柱状の形状しか嵌め込み用に開孔された穴に入れることができない。

著者の偏見に過ぎないが、スパイクグリコプロテインとACE2の間の「親和力」とは量子力学的なエネルギーの共鳴、即ち量子力学的な波動（＝周波数）の一致により、互いがドッキング対象を識別しているのではないか、という仮説を考えている。即ちウィルスはテラヘルツイメージングをしているのではないかというのが著者の仮説である。

(2.3.3) 嗅覚機構における振動説と形状説

通信分野で最も遅れたのがテラヘルツ帯であるが、人間の視覚・聴覚・嗅覚のうち最も遅れた学問領域は嗅覚である。表4には、2004年にR. アクセル (Axel) らの嗅覚受容体および嗅覚系組織の発見という学術的功績に対してノーベル生理学・医学賞が授与されたことを示している。しかし、未だ人間の嗅覚機構が分子の形状を認識しているのか、振動を認識しているのかの争いには決着がついていないようである。

1966年にR. W. モンクリーフ (Moncrieff) がニオイの質は分子の構造ではなく、その外形によって決定される³⁶⁾と主張して以来、形状説が主流となった背景があり、1995年にL. トゥリン (Turin) が振動説の論文をネイチャー誌に投稿したが、掲載拒否されている。L. トゥリンによれば、人間の嗅覚受容体はテラヘルツ帯の

振動を分析しているという。2004年に現大阪産業大学の高根慎也教授らが、振動説を支持する論文³⁷⁾を出して以来、現在は振動説が少し優勢を盛り返しているようである。前述したウィルスとACE2受容体の関係と同様に、人間の嗅覚受容体が形状を認識するのは無理であろう。そもそも嗅覚機構における形状説は、免疫機構における抗原・抗体反応が分子の形状を探って判別しているという説のアナロジーがその根源のようである。著者の偏見は、抗原・抗体反応も、テラヘルツ帯における量子力学的振動を基礎としているであって、形状は関係ないという解釈である。

留意すべきは、ACE2受容体は嗅覚受容体の近くにあるということである。Covid-19ウィルスの陽性者に嗅覚異常が見られるという症例からは、ACE2受容体も嗅覚受容体も似たような振動を検知する機構を持つという仮説を立てたとしても、荒唐無稽なものではないであろう。結局、人間は視覚・聴覚・嗅覚のすべてを波動 (= 振動数) で観測していると考えの方が自然であろう。

【表4】

ノーベル生理学・医学賞	
聴覚	1961 G. ベーケーシ (Békésy) 内耳蝸牛における刺激の物理的機構の発見
視覚	1967 R. グラニト (Granit), H.K. ハートライン (Hartline), G. ワルド (Wald)、視覚の化学的、生理学的基礎過程に関する発見
抗体	1987 利根川進 抗体の多様性に関する遺伝的原理の発見
嗅覚	2004 R. アクセル (Axel), L.B. バック (Buck) 嗅覚受容体および嗅覚系組織の発見

既に述べたようにタンパク質は半導体である。L. トゥリンは1991年にタンパク質を用いた半導体装置の特許を出願している（米国特許第5258627号）。図29のウィルスのサイズを見ると、ウィルスの少なく共一部は半導体の量子ドットと同様に量子論で取り扱えるように思われる。しかし、ウィルスの非周期的結晶を非周期的な場の量子論で取り扱うのであれば、完全結晶におけるフォノンと同様に、ウィルスの波動を取り扱うことも可能になるであろう。

1970年にウプサラ大学のP-O. ローディン（Löwdin）らが国際量子生物学会(International Society of Quantum Biology: ISQB)を発足させているが、未だ未解決の問題が多い。例えば図23～図25に示したようなアデニン(A)とチミン(T)との水素結合やグアニン(G)とシトシン(C)との水素結合も、独立した水素分子の水素結合とは異なるので、どのような方法で結合しているのか解明するのは困難になっている。W. ハイトラー（Heitler）は「数学は自然科学ではない」という³⁸⁾。そして、水素分子のような単純構造以外は量子論的に分子構造を数学で記述するのは無理であると言っている。しかしながら、ウィルスの分子構造が半導体と同様なフォノンの性質を持ち、ウィルスが単なる粒子ではなく、テラヘルツ帯の振動をしている準波動として量子論で取り扱うべきであり、それには現在の数学ではない他の手法による理解や解析等が必要であろう。

1927年に提唱されたボルン-オッペンハイマー（Born-Oppenheimer）近似により分子の電子波動関数と分子の振動・回転の波動関数を分離して求めることが可能になった。非周期性結晶である生物の分子の振動・回転等の挙動を解析するのは極めて困難であるため、現在の量子生物学は電子の運動から論じることが主となっている。

しかし、式（6）で説明したように、生物系の全系のハミルトニアン $H_{\text{bio}}^{\text{total}}$ は、電磁波-電子相互作用 $H_{\text{eR}}^{\text{bio}}$ 、電子-格子振動相互作用 $H_{\text{eL}}^{\text{bio}}$ 及び格子振動-電磁波相互作用 $H_{\text{RL}}^{\text{bio}}$ のすべてを考慮すべきである。特に、格子振動-電磁波相互作用 $H_{\text{RL}}^{\text{bio}}$ を考慮し、非周期性結晶の波動としての性質や非周期性結晶の固有の振動数を顧みると、生物系の不思議な挙動も見えてくるであろう。例えば、タンパク質である酵素が、なぜ図23～図25に示したようなDNAの配列を認識できるかという疑問も、酵素やDNAの配列が有している波動という性質や固有の振動数を考慮しないと説明が難しいであろうと考える。

なお、(2.2.2)において、「ウイルスは本稿では生物として扱う」と述べたのは、ウイルスにも量子生物学を適用したいためである。実際のところ、2003年に直径約 $0.75\mu\text{m}$ のミミウイルスのような自己複製にかかわる遺伝子を有する「生物のようなウイルス」が発見されたことや⁴⁶⁾、2006年にカルソネラ・ルディアイと呼ばれるキジラミの細胞の中に共生する「ウイルスのような生物」が発見され⁴⁷⁾、生物と無生物の境界が非常に曖昧になっている。図29では省略しているが、2013年に長径約 $1\mu\text{m}$ のパンドラウイルス⁴⁸⁾、2014年に長径約 $1.5\mu\text{m}$ のピソウイルス等の巨大ウイルスも見つかっている⁴⁹⁾。

即ち、従来の生物の定義では以下のような特徴を骨子として、生物が定義されていた：

1. 細胞で構成されている
2. 自らエネルギー代謝をして利用している
3. 遺伝因子を持ち自己複製する
4. 刺激に対し反応し、体内環境を一定に保とうとする

しかし、本稿では、以下のような特徴で「生物」を仮定義し、ウイルスを生物であるとして説明するものである：

1. 核酸で構成されている
2. 自ら、若しくは宿主の細胞に入り込んでエネルギー代謝し利用する
3. 遺伝因子を持ち、自ら若しくは宿主の遺伝子进行操作して自己複製する
4. 外部環境を検知し、体内環境の維持を図る、又は宿主の細胞を認識して結合する

この仮定義の4番目の「外部環境を検知」の項目では、振動数の共鳴という量子論的な手法が使われているのではないか、というのが著者の仮説である。

なぜ植物が緑色かというと、植物の細胞が波長665nmの赤色光を吸収する葉緑素をもっているからで、日光の赤色光が吸収されると、赤色光の補色で緑色に見えるのである⁵⁰⁾。図5に示した半導体完全結晶の場合と同様に、赤色光の吸収によって得られた電子の運動エネルギーが非周期的結晶を構成している植物の分子に与えられる。葉緑素が波長665nmの赤色光を吸収すると分子の運動が励起され、プラストキノン分子が還元される。プラストキノン分子の酸化がATPを合成し、植物の細胞のエネルギー源になる。このように日光のエネルギーを獲得するために多くの植物は緑色である。

このことは、植物においては、波長665nmの光が持つ振動数と葉緑素の固有振動数を共鳴させていることになる。この共鳴の結果、電子の運動だけではなく、電子と原子核で構成された植物の細胞内の分子構造（＝非周期的結晶）の運動にも影響が与えられるということである。葉緑素の例から分かるように、ウィルスを含む生物は、よりシンプルな原理に依拠してエネルギー代謝や外部環境の検知をしているはずで、生物の行動や機能を考えるとき、西澤特許111号が示す振動数の共鳴という考え方が重要になると考える（図14の音叉の例参照。）。

§ 2.4 終わりに

1981年に開始された新技術開発事業団（現JST）の創造科学推進事業（ERATO）では、西澤先生を総括責任者とする西澤完全結晶プロジェクトが、ERATOの第1期のプロジェクトとして採択された。その当時、最も新技術開発事業団に特許収入を還元していたのは西澤先生であった。この西澤完全結晶プロジェクトの終了報告会において、著者が5年間のプロジェクト期間で開発された分子層単位で半導体装置を製造できる技術によってテラヘルツ帯のトランジスタ（理想型静電誘導トランジスタ）が設計できる旨の発表をしたとき、西澤先生から「お前のは古典論の設計だ。テラヘルツ帯のトランジスタは量子論で設計しなくてはならない」と、大変なお叱りを受けた。

半導体レーザーの特許（特許第273217号）の共同発明者である渡辺寧先生は、日本人として最初のノーベル物理学賞推薦委員に任命されている（ノーベル賞委員会からの委嘱状には1931年の委嘱との記載があるが、推薦委員の任命は本来は秘密事項である⁵¹⁾）。渡辺先生は、量子論に非常に熱心であられた。物理学会で『前期量子論は正しく出発したか』と題して15分間の予定の講演を、3時間にわたって渡辺先生が熱弁を振るわれたという逸話がある（一般に1926年にシュレーディンガーの波動方程式が提案されるまでが「前期量子論」の時代とされている。）。「渡辺先生は量子論に夢中で自分の実験を見ていただけない」と、学生時代の西澤先生は、ぼやいておられる。

著者が思うには、渡辺研究室は、単なる電気工学を超えた量子論の研究室であった。この渡辺研究室の系譜が西澤先生に受け継がれ、「場の量子論」を含め、西澤先生の頭の中には物質の量子論的な世界がかなり見えておられたはずである。よって、西澤先生は常に半導体デバイスの量子論的設計を考えておられていたのではないかと推測する。しかしながら、西澤先生が1963年の『電子科学』で提案された「量子論の適用範囲を低周波側まで拡張する」研究は、未だ一部しか実現されていない。

なぜなら、西澤先生は直流で音波を励起して信号源とするような量子論の適用も考えておられたからである（特許第844479号）。ラマンレーザーの動作を実験的に確認したのは須藤教授である。大学院時代の著者の指導にあたり、西澤先生が「直流励起ラマンレーザー」の構想を当時助教授であった須藤教授にしたとき、須藤教授が「そんな馬鹿な」と失言し、西澤先生が激怒

された事件がある。大学院生の著者が西澤先生からいただいたブリルアン散乱の研究テーマは、この直流で音波を励起する研究の流れにあるが、未だに実現していない。

1920年代以降になるとアインシュタインもシュレーディンガーも現在の量子論の主流となっている正統派的解釈（コペンハーゲン的解釈）から少し距離を置いたようである。メタマテリアルの出現により新たな量子論の拡張も必要かもしれない。哲学的に非常に難しい主題を有する量子論を西澤先生は工学的に活用され、この成果を医学生理学的にも適用できることを見事に示された。

西澤先生は米国では「テラヘルツ将軍」とよばれている⁴⁰⁾。今回紹介した特許発明の技術は、完全結晶の結晶格子が構成するフォノンによるテラヘルツ波等の電磁波を、ウィルスの非周期的結晶の持つ固有の振動数に共振（共鳴）させるように照射するという、量子論の世界における量子論に依拠した技術である。

2018年1月に、「先生は、未だ少なく共、『テラヘルツ技術』、『SIサイリスタ』、及び『完全結晶成長技術』という3つのテーマでノーベル賞受賞の可能性があります。120歳まで頑張ってください」と申し上げたが、そのときは西澤先生は非常に元気であられた。その日から約9箇月後の突然の旅立ちであった。

西澤先生は完全結晶成長技術を基軸に、量子論を含む大きな哲学の中での独創研究を、見事にされたと著者は考えている。

謝辞

ウィルスに関する情報に関しご指導賜った弘前大学大学院医学研究科 感染生体防御学講座の中根明夫特任教授、同浅野クリスナ教授にお礼申し上げます。

第2章の文 献

- 1) 西澤潤一著、『半導体レーザの生い立ちと特質』、電子科学、第14巻、第4号、pp17-20、(1963)
- 2) R Loudon, "Theory of Stimulated Raman Scattering from Lattice Vibrations", Proc. Phys. Soc., Vol. 82, No. 3, pp.393-400 (1963)
- 3) 西澤潤一著、『オプトエレクトロニクス(IV-b)』、画像技術vol.2, No.8, pp.13-27 (1971)
- 4) I. Kaminer et al., "Efficient plasmonic emission by the quantum Čerenkov effect from hot carriers in graphene", Nature Communications, Vol.7,ncomms11880, pp.1-9 (2016)
- 5) 西澤潤一著、『エサキダイオードと長波長レーザ』、電子技術、第7巻、第3号、pp102-106、(1965)
- 6) K. Okamoto, H. Ishikawa and J. Nishizawa, Tohoku Univ. RIEC Tech. Rep. TR-22, pp.1-8 (1967)
- 7) この号の表紙での顔写真の紹介の他に、以下の西澤先生の投稿も記載されている：J. Nishizawa, "Optoelectronics goes digital", Electronics. pp.117-122 (1967)
- 8) R. N. Hall et al., "Coherent light emission from GaAs junctions", Phys. Rev. Lett., Vol.9, No.1, pp.366-368 (1962)
- 9) S. Suzuki, J. Nishizawa and K. Suto, "The Coherent Interaction of Externally Generated 35-GHz Sound with the Light in CdS", Appl. Phys. Lett., Vol. 30, No. 7, (1977)
- 10) J. Nishizawa et al., "Blue Light Emission from ZnSe p-n junctions", J. Appl. Phys., Vol.57, No.6,pp.2210-2216 (1985)
- 11) J. Nishizawa et al., "Recent Advances in Visible LEDs", IEEE Int. Electron Devices Meeting, pp311-314,Dec., (1983)
- 12) J. Nishizawa et al., "Bright Pure Green Emission from N-free GaP LEDs", 11th Conf. on Solid State Devices; Jpn., J. Appl. Phys., Vol. 19, Suppl. 19-1, pp.3-11 (1980)
- 13) N. G. Basov et al., Advan, Quant. Elec., pp.496 (1961)
- 14) C. H. Henry et al., "Raman Scattering by Polaritons", Phys. Rev. Letters, vol.15, No. 25, pp.964-966 (1965)

- 15) T. E. Stevens, et al, "Cherenkov Radiation at Speeds Below the Light Threshold: Phonon-Assisted Phase Matching", Science vol 291. pp.627-630 (2001)
- 16) J. Nishizawa et al., "Semiconductor Raman Brillouin Laser", J, Appl. Phys.,vol.51, no.5, p.2429-2431 (1980)
- 17) J. Nishizawa et al., "Semiconductor Raman and Brillouin Lasers for Far Infrared Generation", Proc. 1981 IEEE int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Dec.7-12 (1981)
- 18) シュレーディンガー著、岡小天他訳、『生命とは何か』、岩波書店、pp.15,119-120 (2008)
- 19) A. Szent-Gyorgyi, "Toward a New Biochemistry?", Sciednce,vol.93, no.2426,pp.609-611 (1941)
- 20) T, A, Hoffmann et al, "A Possible Correlation between the Effects of Some Carcinogenic Agents and the Electronic Structure of DNA", Cancer Res., vol.21, pp474-484 (1961)
- 21) H. Kitagawa et al., "Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination", American Journal of Infection Control, September 04, 2020, online (DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.08.022>)
- Log in
- 22) Y. Miura et al., "Terahertz-Wave Spectroscopy for Precise Histopathological Imaging of Tumor and Non-tumor Lesions in Paraffin Sections", Tohoku J. Exp. Med., vol.223, pp.291-296 (2011)
- 23) E. Chargaff et al., "The composition of the desoxypentose nucleic acids of thymus and spleen. J. Biol. Chem. 177, 405– 416 (1949)
- 24) T. Tanabe et al., "Tunable terahertz wave generation in the 3- to 7-THz region from GaP", Appl. Phys. Lett. Vol.83, no.2, pp.237-239 (2003)
- 25) K. Kawase et al., "Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO3 with monolithic grating coupler", Appl. Phys. Lett. Vol.68, no.18, pp.2483-2485 (1996)
- 26) 例えばhttps://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-05/aabu-ome052220.php等参照
- 27) A. Ahmadvand et al., "Femtomolar-level detection of SARS-CoV-2 spike proteins using toroidal plasmonic metasensors", arXiv:2006.08536

- 28) S. Dolai, "Terahertz Detection of Zika Viruses", Preprints 2020, 2020020232 (doi: 10.20944/preprints202002.0232.v1)
- 29) C-Ksun et al., "Structure Resonance Energy Transfer from EM wave to Rod-like Virus", Proceedings of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), paper F2B.5, Copenhagen, Denmark, Sept. 2016
- 30) Na Zhu et al, "A Novel Coronavirus from Patients with Pneumonia in China, 2019", N. Eng. J. Medicine, 382;8, pp,727-733 (2020)
- 31) Bella J et al.: Review: Rhinoviruses and their ICAM receptors. Journal of Structural Biology, 128: pp.69–74. (1999)
- 32) Noda T: Native morphology of influenza virions. Frontiers in Microbiology, 3: p.269. (2012)
- 33) Chen N et al.: Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. Lancet, 395: pp.507-513. (2020)
- 34) ICTV report, Nimaviridae
- 35) <https://www.youtube.com/watch?v=V8m4HX5eY0k&feature=youtu.be>
- 36) R. W. Moncrieff, "Odour Preferences", Leonard Hill, (1966)
- 37) S. Takane et al., "A structure–odour relationship study using EVA descriptors and hierarchical clustering". Org. Biomol. Chem. 2 (22), pp.3250–3255 (2004)
- 38) W.ハイトラー著、岡小天他訳、『科学と人間』、みすず書房、p75 (1965)
- 39) J. Nishizawa et al., "THz transmittance measurements of nucleobases and related molecules in the 0.4- to 5.8-THz region using a GaP THz wave generator", Optics Communications, vol.246, pp.229-239 (2005)
- 40) P. H. Siegel, "Terahertz Pioneer: Jun-ichi Nishizawa 'THz Shogun'", IEEE Trans. Terahertz Science and Technology, vol. 5, no,2, ppp.162-169 (2015)
- 41) S. Kawakami et al., "Propagation Loss in a Distributed Beam Waveguide", Proc. Of the IEEE, vol.53, no.12, pp.2148-2149 (1965)

- 42) J. Nishizawa et al., “High-resolution GAP Terahertz Spectrometer and Its Application to Detect Defects in Gamma-irradiated Glucose Crystal”, Int. J. Infrared Milli Wave, vol. 29, issue 3, pp291-297 (2008)
- 43) S. J. Park et al., “sensing viruses using terahertz nano-gap matamaterials,”Biomed. Opt. Expres., vol.8, no.8, pp.3551-3558 (2017)
- 44) L. Hackermüller et al., “Wave Nature of Biomolecules and Fluorofullerenes”, Phys. Rev. Lett. Vol. 91, Iss.9, 090408
- 45) A. Shayeghi et al., "Matter-wave interference of a native polypeptide", Nature Communications 11, Article number: 1447 (2020)
- 46) La Scola B. et al., "A giant virus in amoebae“, Science vol.299, pp.2033 (2003)
- 47) Nakabachi et al., “The 160-Kilobase Genome of the Bacterial Endosymbiont Carsonella”, science vol.314, pp.267 (2006)
- 48) N. Philippe et al., “Pandoraviruses: Amoeba Viruses with Genomes Up to 2.5 Mb Reaching That of Parasitic Eukaryotes”, Science vol. 341 (6143), pp. 281–286 (2013)
- 49) E. Yong ed., “Giant virus resurrected from 30,000-year-old ice : Nature News & Comment”, Nature, (2014), doi:10.1038/nature.2014.14801.
- 50) E. I. Rabinowitch et al., "The Role of Chlorophyll in Photosynthesis“, Scientific American, vol. 213 (1), pp.74–83 (1965)
- 51) 渡辺寧先生追悼録刊行会発行、『学尊先覚―渡辺寧先生追悼録』、オーム社、pp.6