

## Salt 論文の解説付きサマリー

### How Does Wind Turbine Noise Affect People?

By Alec N. Salt and Jeffery T. Lichtenhan

著者らはワシントン大学医学部耳鼻咽喉科の医学者

<http://waubrafoundation.org.au/wp-content/uploads/2014/04/Salt-Lichtenhan-How-Does-Wind-Turbine-Noise-Affect-People.pdf>

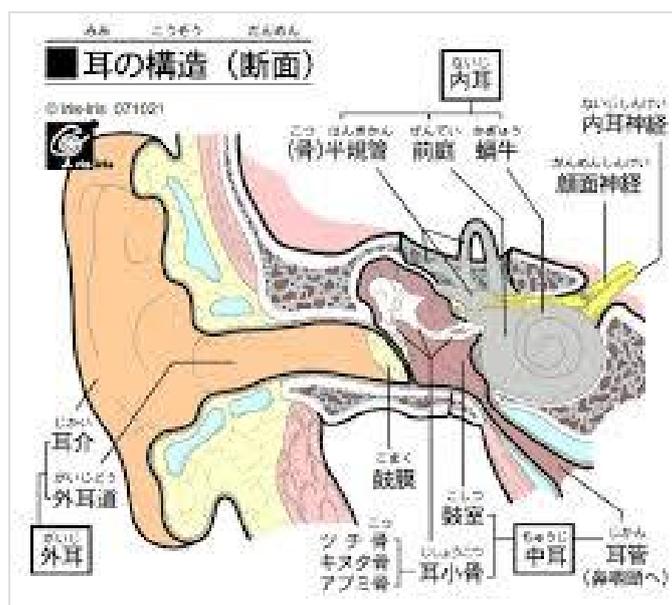
表題：風力タービンノイズはどのように人に影響するのか？

風力からの超低周波音や低周波音は、聴こえなくても、  
近傍の住民に苦痛を与える可能性がある。

#### はじめに

“今日の音響学” *Acoustics Today* の最近号で、風力タービンからの超低周波音が近くに住む人々に影響するかどうかの議論があった (Leventhall 2013, Schomer 2013, Timmerman2013)。筆者らはここに、影響があり得るメカニズムを提起したい。

訳註：非専門家の理解を助けるために（訳者も非専門家であるが）、随時訳註を入れるとともに説明図も挿入する。下図に耳の構造と各部の名称を示す。まず「外耳」「中耳」「内耳」を区別する。以後の議論の大半は内耳（半規管と蝸牛の間が前庭）に関連し、ときに中耳に及ぶ。「内耳」では「前庭」と「蝸牛」がよく登場する。前庭、蝸牛はリンパ液で満たされている。



説明図1 外耳（耳介、外耳道）、鼓膜、中耳（耳小骨；つち、きぬた、あぶみ）、内耳（半規管、前庭、蝸牛）。鼓膜の振動は耳小骨を介して内耳に伝わる。前庭、内耳はリンパ液で満たされ、蝸牛の有毛細胞が振動を電気信号に変換する。電気信号は内耳神経を経て脳に伝えられる。右下への耳管は喉につながる。

*Acoustics Today* の議論の要点は、風力産業側が、1. 測定される超低周波音レベルは人の聴覚閾値以下で、A特性（人の聴覚に合わせた特性）では十分測定できないぐらい弱いから問題ないとしていること、2. 医師たち（たとえば Steven D. Rauch ハーバード大学医学部）が他の原因では説明できない症状が患者に起こっているのに、風力タービン症候群（Pierpont 2009）の可能性を認めようとしないこと、3. 風力発電で普通に出ている音レベルに基づく風力タービンと住居間の離間距離を不必要と主張していることなどである。

一方、風力タービンノイズの影響が苦痛で、家に住むことに耐えられないと訴える多くの人々がいる。そのうち一部の人たちは、自己負担で、あるいは風力業者から買いあげられてすでに移転している。残る人たちは、不満を抱きつつ住み続けており、症状を和らげるため医者にかかっている。また、同一家族でありながら、平気な人もいる。次に、われわれのもとに数週間前に飛び込んできたEメールにより、ヨーロッパの1婦人が受けた苦痛の経験を紹介する。

“タービンが動き出してすぐに私はめまいのような症状が続くのを経験しました。いろいろな点で、私がいま経験しているのは、一緒に起こるむかつきもひどいので、これまでに感じたことのある‘めまい’よりもひどいです。私には、タービンが出す脈打ち、ハミング（ぶんぶんいう）、ノイズが私に聴こえる主な音で、それが私に影響しているらしいのです。

主任研究員（彼女の家に音響測定に来た人）は、測定をやりながら、タービンが出している低周波のハム（ぶんぶん）はわかると言っていました（彼自身が風力発電のそばに住んでいて、家の中でハミングノイズのレベルを測定したことがあるといいます）。そして、私にそのノイズを気にしないように助言し、私の経験している症状は全部精神的なものだと言いました。“

彼女が風力タービンから離れたらどう感じるか質問したところ、答えはこうだった：

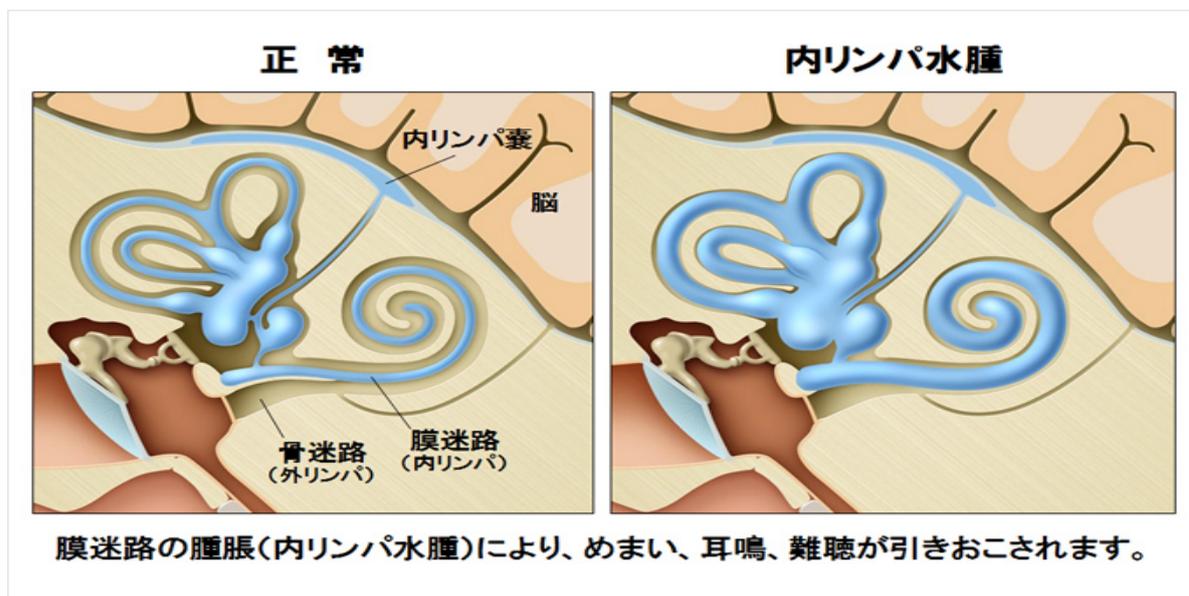
“8月の終わりごろ、2週間のバケーションをとってこの地を離れましたが、その間、私はとても元気でした。”

この書き物で検討したいことは、人々が風力タービンノイズのせいだという症状を耳の生理学で理解できるかどうかを調べることである。議論が特定の企業の利害や、法的な安定に影響するとき、企業関係者の研究目的に疑問が投げかけられるのは当然である。責任、損害賠償、多額の金銭が研究結果にかかっているからである。発がん性のダイオキシンで汚染された地下水が化学工場の責任か、タバコ産業が肺がん発生に責任があるか、ナショナル・フットボーリーグNFLのアスリートは脳に障害を受ける疑いがあるか？これらの問

題について、現状維持しようとする誰かが真実を明らかにすることは難しい。企業に利害関係のない人によって十分な科学的証拠が集められた時、この課題は初めて正解に到達できるのだから。

### 著者らが風力タービンによる超低周波音に関わるようになったきっかけ

どうしてわれわれが、聴こえない超低周波音が風力タービン・トラブルの原因だと考えるようになったのか、またどうしてわれわれがこの議論に巻き込まれるようになったのか？著者らは基礎および応用科学者の小グループで、耳が正常な時、また病気のとときどのように働くのかという基礎的な問題を明らかにしようとしてきた。そして研究のパラダイム（規範）を発展させるため、“低周波バイアス法” low-frequency biasing という古典的な技術を用いてきた。この方法は、聴覚範囲内のテスト音に対する聴覚応答を測定する際、テスト音と同時に低周波音（たとえば  $4 \cdot 8 \sim 50\text{Hz}$ ）を加えて内耳の感覚器官を変位させる（片寄せる）ためである。バイアス音により感覚器官が変位すると、聴覚応答の一部は飽和状態になるので、この方法を使って感覚器官が対称的に振動しているか、それとも液体の擾乱（外来音）によって聴覚器官が片側に変位させられているかがわかる（バイアス音については Ftg.2 参照）。



説明図 2 内リンパ水腫。右図では内耳が全体に腫脹している。

人のメニエール病で発見された“内リンパ水腫” endolymphatic hydrops では、内リンパ液を含むスペースの内リンパ腫脹によって感覚器官を移動させることがある。われわれの動物実験では、当初は  $20 \sim 50\text{Hz}$  のバイアス音を使っていたが、耳が  $1\text{Hz}$  までの低周波音に応答することがわかったので (Salt and DeMott, 1999)、われわれの装置で可能な最低周波数  $4.8\text{Hz}$  を使い始めた。これは超低周波音の周波数である。何百回もの実験にわたり、

4.8Hz、80~90 d B S P L（いいかえれば-13~-3 d B A；訳註：便利な換算表は持たないが、平坦特性で80~90 d Bの4.8Hzの音は、A特性では $80-13=67\sim 87$  d B、あるいは $80-3=77\sim 87$  d Bという意味だろう。ただし2番目の換算ではA特性値がほとんど下がっていない理由は不明）のバイアス音をを加えて多くのバイアス効果を調べた。その結果、内リンパ水腫により蝸牛頂（蝸牛殻の先端 cochlear apex）の液体スペースが部分的に閉塞されるとき、耳は超低周波音であるバイアス音に約20 d B感度が高くなることがわかった。

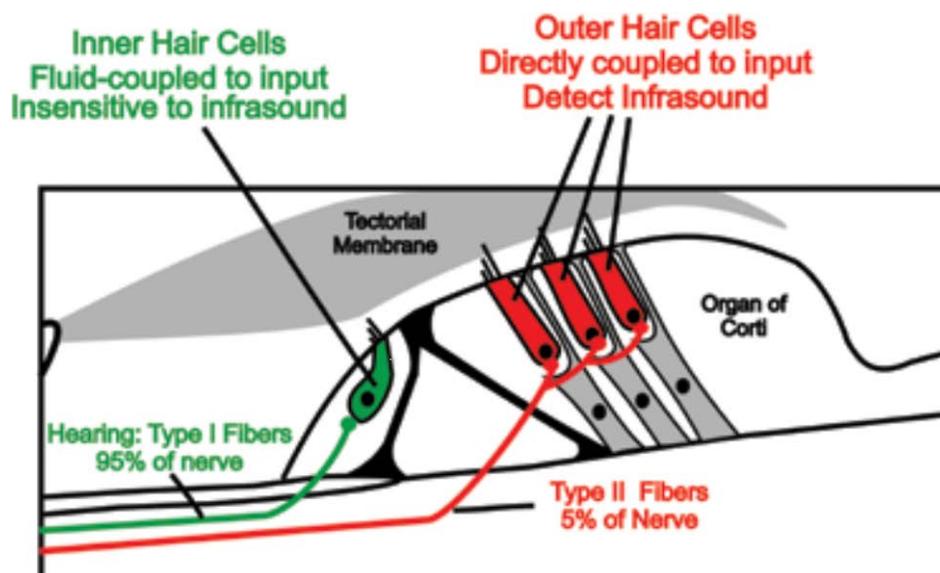
2009年の終わりごろ、第1の著者 Salt はメニエール病を患っている婦人の報告を受けた。彼女の症状が一第一に目まいと吐き気で一風力タービンの近くに行くととても悪化するというものだった。動物実験の経験から、この婦人は低周波音にひどく敏感になっているらしいとわかった。そして風力タービンノイズについての文献を調べて、次に述べるような2つの驚くべき特徴があることを知ったのである：

1. 超低周波音が人に生理的影響を起こすには、聴こえることが唯一の道であるという間違っただけの仮定にもとづき、風力タービンノイズの測定はほとんどA特性で行われていたことである。重みづけをしていないいくつかの測定や、発表されているA特性のスペクトルから、聴覚特性であるA特性の重みを取り除いて再計算してみると、低周波数域のエネルギーは明らかにもっと高く、超低周波域が最大エネルギーになる。客観的な全周波数測定をしてみると、風力タービンは、耳をいろいろなやり方で刺激する可能性のあるレベルの超低周波音を発生していることがわかった。このような状況下で、タービンノイズをA特性で測るのは大きな誤りに導くやり方である。
2. 風力業者による文献やウェブサイトには、風力タービンによる超低周波音は何も問題はないのだという強いメッセージが含まれていることが多い。この見解は多分に Laventhall (2006;2007)の論文に基づくのだろう。そこでは、風力タービンノイズは、木の葉のざわめきや川の流れ、空調のある事務室や冷蔵庫の音を隣室で聴いているのと似たようなものとされている。もし風力タービンノイズが本当にそれらの音と似たようなものだったら、苦情は起こらなかっただろう。だが、風力タービンノイズは、タービンから出る超低周波成分をA特性で測って無視した時に初めて、それらの音と似たようなものになるのである。他の目的のための（爆発、彗星、火山活動、大気活動その他）超低周波音や低周波の震動を測定する観測所は、遠方の風力発電所から出る低周波音や、それと地盤振動とのカップリングが彼らの計測に影響することをよく知っている。英連邦防衛省は、風力発電所を Eskdalemuir 地震計アレイ（訳註：東西冷戦時代にソ連の地下核実験探知のため、西側諸国により世界中に設置された世界標準地震計網の1観測所）から50 km以内に設けることに反対している。防衛省がこの地域に冷蔵庫を設置することに反対したという話は聞いたことがない。それは風力タービンから出る音と冷蔵庫から出る音が全く違うからである。

だから、風力発電ノイズ測定の大多数が、低周波部分を除いた測定だったというのは驚くべきことだった。もし耳が低周波音や超低周波音に反応するということを知っていたら、それらを優しい音源の音と比べるのは間違いで、A特性の測定は科学的に大きな欠陥があることがわかるだろう。

### 超低周波音に対する耳の反応

実験によって、蝸牛が超低周波音に反応してしっかりした電氣的応答を行うことがわかった (Salt and DeMott, 1999; Salt and Lichtenhan 2013)。この発見は当初、聴覚はそのような低周波音を感じないという常識と折り合うものではなかった。しかし、蝸牛には 2 つの型の違う感覚細胞があり、それらは非常に違う機械的特性を持つという、いまでは古典的な耳の生理学研究によってよく説明できることがわかった (Cheatham and Dallos 2001)。



**Fig.1** 内耳の感覚器官。内有毛細胞 ICH（入力と液体結合で、低周波音に無感）、外有毛細胞OCH（入力と直接結合で超低周波音も感知する。神経 Nerve。蓋膜 tectorial membrane

内耳の聴覚部分、蝸牛には、2 つの型の感覚細胞がある。内有毛細胞 inner hair cells(IHC ; 図 1 に緑で示す) は聴こえを伝達するタイプ I の求心性の神経線維により刺激される。IHC の不動毛 stereocilia はリンパ液内に自由に浮かんでいて、上部のゼラチン質の蝸牛蓋膜 tectorial membrane (図に灰色で示す) に接触していない。それらは液体の動きにつれて膜の下側のスペース中で動くことができる。それらへの入力は、液体により感覚器官の振動と結合されているので“速度感度”である。運動速度は、音が低周波になにつれて低下するので、液体結合インプットは、非常に低周波の音に対し IHC を無感にする (訳註：振動数  $f$  の振動変位を  $D$ ，振動速度を  $V$  とすると、 $V = 2\pi f D$  だから  $V$  は  $f$  とともに小

さくなる)。もう 1 つの感覚細胞は外有毛細胞 (OHC ; 図 1 に赤で示す) で、タイプ II の求心性神経細胞により刺激されるが、タイプ I ほどよくわかってはいないけれども、基本的には意識的な聴こえは伝達しないらしい。IHC とは対照的に、OHC の不動毛は蝸牛蓋膜に挿しこまれている。この直接の機械的結合のため、それらは“変位感度“になっており、低周波音や超低周波音によく応答することになる。われわれがかつて記録したり、研究したりしてきた耳の電気応答は感度のよい OHC からのものだった。この理解から、非常に低い音や超低周波音は、可聴閾値よりもずっと低レベルでも容易に蝸牛を刺激すると結論できる。風力タービンからの低周波音や超低周波音は、したがって、可聴閾値よりもずっと低いレベルでも耳を刺激することができるのである。

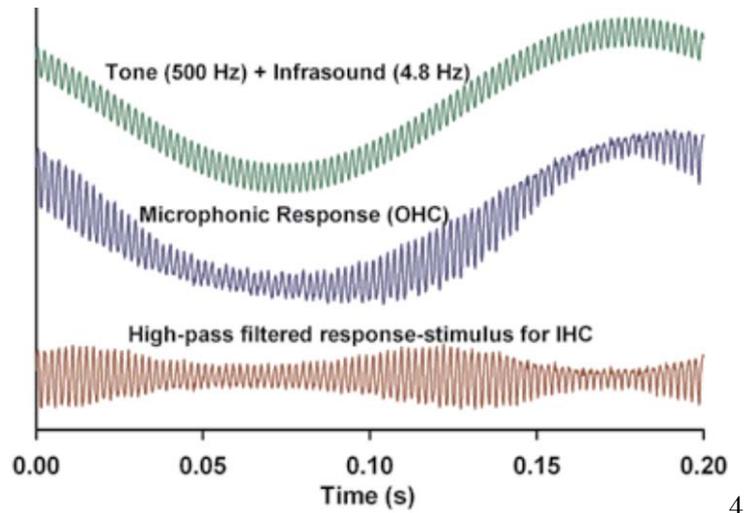
非常に大事な疑問は、風力タービンの超低周波音の刺激は耳を通じてだけなのか、それとも人や動物にそれ以外の影響も与えるのではないかという問題である。現在のところ、風力業界や彼らの音響専門の助言者は、長期の低周波音や超低周波音の刺激に問題はないというスタンスである。この立場は、長期にわたる低レベルの超低周波音刺激が人や動物に影響しないという研究成果に基づくものではない。そういう研究はこれまで行われたことがないからである。彼らの狭い見方は、生体システムの複雑微妙さを全く理解していないことを示しており、ほぼ確実に誤りであろう。以下に考察するように、長期にわたる超低周波音の蝸牛への刺激が人に影響し得るいろいろな生理的メカニズムが考えられる。

風力タービンノイズの生理学的影響に関する一つの重要な様相は、その暴露時間が極度に長いことで、1日に24時間どころか、風の条件によっては数日あるいはもっと長く継続することである。これは8時間暴露と、それに続く長い静穏時間が想定されるような(すなわち1日に16時間+全週末の静穏)多くの工業ノイズとは違っている。数時間にわたる高い超低周波音への暴露の研究は多くあるが、長期間にわたる超低周波音への暴露の系統的研究はこれまで全くない。風力タービンノイズの発する低周波音による蝸牛刺激度について見積もることは、これまでほとんどA特性の測定データしかないので非常に難しい。A特性の測定レベルが低かったからといって、蝸牛への刺激が無視できるとは仮定できないからである。例えば、5Hzによる蝸牛応答は-30 dBAで引き起こされるので、約20 dBAの刺激は飽和応答を起こすのに十分である(生体変換器が限界まで駆動されていることを示す。**訳註**：-30 dBですでに応答があるなら、20 dBはその50 dB上=300倍であるから、感覚器官は飽和状態になるという意味と解される)(Salt and Lichtenhan, 2012; Salt et al. 2013)。125Hzローパス・フィルターを通したちょうど45 dBAのノイズは、同じ低周波成分を持つバンド幅の広い90 dBAのノイズよりも大きい応答を起こすこともわかった(**訳註**：同程度の強さの低周波音でも広帯域の音よりも、単独周波数の低周波音の方が大きい影響を及ぼす意味と思われる。Salt and Lichtenhan 2012)。耳の低周波数域は、風力タービンノイズの長期間暴露により、中くらい～強い刺激を受けると結論できる。

次に、刺激が影響を与えると思われるいくつかのメカニズムを考えよう。

### 1. 振幅変調：可聴音の低周波バイアス

超低周波音による内耳の「生物学的機械 - 電気変換器の振幅変調」は、ある条件で風力タービン直下の音響レベルメーターで測定される「可聴音の振幅変調」とは全く違う。それは低周波バイアスの考えで説明できる。低周波バイアス法では、低周波音とより高周波の可聴音とが同時に対象に加えられる。



**Fig.2** 上：可聴音 500Hz に超低周波音 4.8Hz を重ねて作られる振幅変調された波形。中：OHCから生じる蝸牛マイクロフォンの出力は低周波と高周波の双方を含む。下：IHCは高周波しか検出できないが、低周波音の刺激により振幅変調が2度起きている。

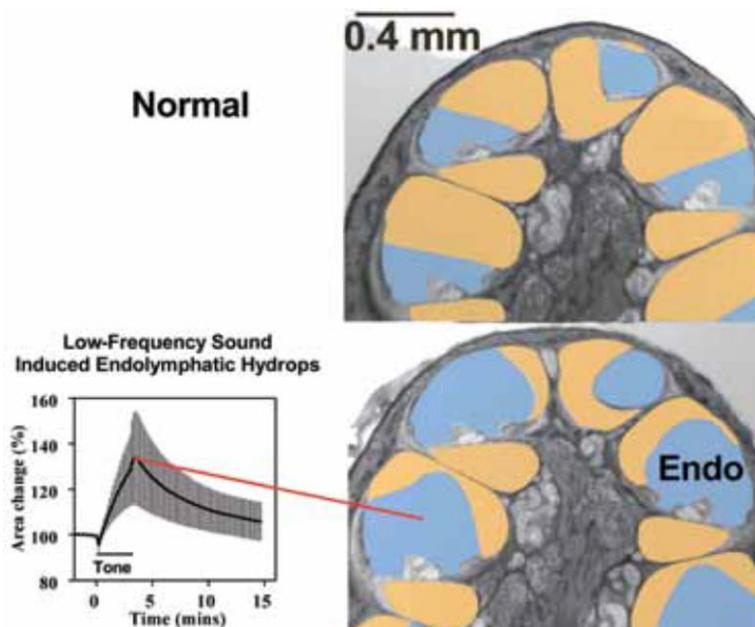
**訳註：**振幅変調とは「搬送周波数の振動（図中のぎざぎざ）の振幅を上げ下げすること」。たとえば AM=amplitude modulation 放送は、局ごとに決まっている数百Hz程度の搬送周波数の振幅を、送りたい音声波形で振幅変調して放送しており、聴者は受信機で搬送周波数をフィルターで消して音声を聴く方式である。

外有毛細胞OHCは、低 - 、高 - 周波数成分の両者に応答し、高周波成分を機械 - 電気変換器を飽和させるか、あるいは高周波の機械的増幅度を周期的に変化させることによって、高周波成分を変調する。内有毛細胞IHCは低周波成分に感度がないので、OHC応答のハイパス・フィルター表示のようになる (Fig.2 下段の聴こえる試験音の振幅変調バージョン)。聴こえは、聴力神経の求心的刺激により約 90~95%を受け取る IHCを通して伝達され (Fig.1)、被験者は振幅 (ラウドネス) の変動する高周波試験音を聴く。低レベルの音により蝸牛に引き起こされる応答へのバイアス効果は、低周波バイアス音によりOHCの蝸牛増幅器の増幅度が変わることで説明される (Lichtenhan 2012)。この研究で、耳の頂点部が低周波バイアスに最も感度が高いこともわかった。このような研究は、風力タービン

近くの住人がとても迷惑だという音の振幅変調が、A特性のレベルメーターの測定では簡単には説明できないことを示している。それどころか、低周波音や超低周波音のレベルが、感知される現象（迷惑）に寄与していると考えられるべきである。主観的には、振幅変調された音、および低周波バイアスされた音は、発生メカニズムは全く違うのに、知覚される変動は同じである。この問題について、両タイプの振幅変調音の総和的效果が変調の知覚に寄与するのであろう。したがって音響学者は、風力タービンの近くに住む人と動物により知覚される変調の度合いが音響レベルメーターにより検出される度合いを超えていないか注意する必要がある。

## 2. 低周波音により引き起こされる内リンパ水腫

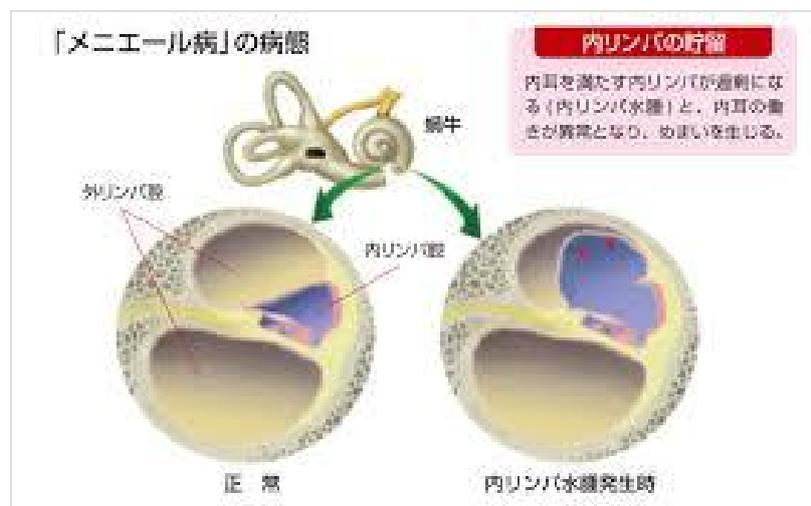
前述のように、内リンパ水腫はもっとも内部の、内耳の膜に囲まれた液体室の腫れである。中位からやや強いレベルの低周波音を1.5～3分加えると、水腫が出来（Fig.3）、耳鳴り（耳がリンリン鳴る）、聴力の変化が引き起こされることがあり、内リンパ水腫を起こす生理学的に証明できる音響放射である（Salt,2004; Drexel et al. 2013）。



**Fig.3** 動物を低周波音に短時間暴露したときの内リンパ水腫（Salt, 2004）。人の耳鳴りと音響放射による内リンパ水腫が対応している（Drexel et al, 2013）。解剖図は正常な蝸牛（上）と水腫の腫れた蝸牛（下）。下図では、内リンパスペース（青）が水腫性蝸牛により拡大している（この場合の水腫は外科的に起こされたもの）。

大音響による聴力ロスと違って、内リンパ水腫の症状は永久的ではなく、水腫の度合いにより治癒したり、変動したりする。環境が静寂に戻るか（Fig.3 の挿入図のように）、ある

いは低周波音環境から脱出すれば、水腫や水腫による症状は解決する。これは前に紹介した婦人の記述と合っている。水腫は、膜で限られた内リンパスペースの機械的な腫れだから、一番膨れる領域（蝸牛頂 cochlear apex および前庭囊 vestibular sacculus として知られる）にまず影響する。小囊に問題のある患者に特徴的な経験はめまい感で、それにふらふら感、吐き気が伴う。上に述べたように、内リンパ水腫を起こした耳は、蝸牛孔 helicotrema が部分的に塞がれるので、超低周波音に 20 dB 以上敏感になる。Salt et al. は、耳を低周波音に敏感にする水腫に注意を払うべきだとした。これまでの研究で、水腫を生じる低周波音の継続暴露時間は非常に短かった（1～2分）。これは一部、長時間の暴露実験をして、長期に続く恐れのある結果を避けたいという道義的気配りのためだった（Drexel et al. 2013）。中レベルの低周波音への長時間暴露による内リンパ水腫も長期に続く可能性が考えられる。



説明図 3 内リンパ水腫。蝸牛内の内リンパ腔が腫脹している。

### 3. 求心性神経路による外有毛細胞の興奮

求心性神経線維の約 5～10%（蝸牛から脳に信号を送る—Fig.1 のタイプ II の繊維）は OHC に神経伝達する。これらの線維は通常の音響範囲ではよく反応せず、連続的な聴きには組み込まれないと考えられている。繊維が興奮すると、聴覚の充満や耳鳴りのような感じの他の知覚が生じる。さらに、超低周波音が OHC の求心的繊維を興奮させるのが理想的な刺激であることは、実験室的条件下 *in vitro* のニューロンの記録でわかったことである（Weisz et al. 2012; Lichtenhan and Salt, 2013）。OHC 求心路の刺激が、超低周波音で実際に試されたことはまだないが、鳥類の類似の繊維が超低周波音に極めて敏感であることはわかっている（Shermuly and Klinke, 1990）。蝸牛神経核の OHC 求心性刺激細胞は、選択的聴きと警戒の機能を持っているので、風力タービンの近くの住人が訴える睡眠障害を説明しているのかもしれない（Nissenbaum et al., 2012）。OHC 求心路が低周波ノイズ

の影響に組み込まれる可能性は、タイプⅡの神経支配が、超低周波音で最も刺激される蝸牛の低周波領域中で最大であることにも合っている (Liberman et al., 1990; Salt et al. 2009)。

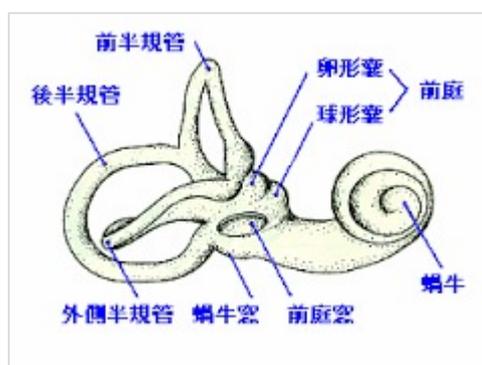
#### 4. ノイズによる聴力低下の増悪

何年か前、超低周波音が騒音傷害を防ぐ手段にならないかという仮説で実験が行われたことがある (Harding et al., 2007)。低周波バイアスにより、感覚器官の機械 - 電気変換器チャンネルが周期的に閉じられれば (前述のバイアス研究で示した電気応答を低下させて)、その結果、有毛細胞傷害の原因になる刺激への暴露時間を減らせるのではないかと考えたのである。実験の結果、まったく逆のことが真であるとわかった。超低周波音と大きい騒音とに同時に暴露すると、超低周波音なしで騒音に暴露するときよりも、損傷が増悪することがわかったからである。われわれの解釈は、低周波音は有毛細胞 (の機能) が失われる場所で液体の混合が起こり (内リンパと外リンパの)、損傷をより大きくするからである。考え得る可能性は、風力タービンによる超低周波音への長時間暴露は難聴を悪化させ、ノイズが原因の聴覚ロスに導きかねない。この型の聴覚ロスは、年数をかけてゆっくり進行するので、超低周波音への暴露の影響に潜伏期間があって、症状が明らかになるまで何年もかかるだろう。

#### 5. 前庭感覚器官の超低周波刺激

この雑誌の最近号で Dr. Leventhall と Schomer の間で交わされた、低周波音や超低周波音による前庭受容器の直接的刺激に関する議論はここで触れておく価値があろう。Dr. Leventhall は、耳の感度は骨伝導による機械的低周波刺激によるとする Todd の研究を引用して、Dr. Schomer や Dr. Pierpont が風力タービンによる超低周波音が前庭受容器を刺激し得るといっているのは間違いだと主張した。だが Leventhall は音響的に伝えられる超低周波音に対する前庭応答の研究については何も語らず、前庭応答の研究がないことにも触れなかった。ということは、彼の強い否定にもかかわらず、耳の前庭受容器が超低周波音には反応しないことを研究では証明できなかったのである。球形囊、卵形囊 saccular and utricular (説明図 4 参照) の可聴音に対する応答について、多くの研究が発表されている。そのような計測は、VEMP (前庭刺激を通じての筋原性ポテンシャル vestibular-evoked myogenic potentials) を通じての球形囊、卵形囊の療法上の試験の基礎である。これらの研究のあるものによると、音響刺激に対する感度は、周波数が下がると最初は低下する。ところが実験室の研究で、前庭有毛細胞は超低周波数 (~1 - 10 Hz) で最高の感度になるのである。したがって、音響刺激に対する感度は、刺激周波数が超低周波域まで低下すると増大するのである。直接の前庭刺激の研究が行われるまで、球形囊その他の前庭受容器が刺激に反応しないかどうかはまだよくわからないということである。

上に述べたように、低周波音で誘発された内リンパ水腫は、音響入力によって球形囊刺激の量を増大させ得る。水腫は始めはおとなしい球形囊膜を膨らませ、ときどき球形囊があぶみ骨基盤 *stapes footplate* に直接に接触するまでになる。これはメニエール病の今では廃止された療法“*tack*”の基礎になったもので、大きくなった球形囊に孔をあけるため、あぶみ骨基盤に小さい補てつ *prosthesis* (訳註：リングのようなもの) を埋め込む方法である (Schuknecht et al., 1970)。球形囊が大きくなると、振動が内リンパに作用し、外リンパには作用しないので、受容器の音響刺激の効率がより良くなる可能性がある。ある患者グループで、前庭システムが低周波音や超低周波音刺激に異常に敏感な場合がある。たとえば、上半規管裂隙 *superior canal dehiscence* 症候群の患者は音響刺激により目まいが起こることがわかっている。前庭器官が普通の人よりも低周波音に敏感な裂隙が軽度の、あるいは不完全な患者もいる。



説明図 4 球形囊、卵形囊

## 6. 超低周波音に対して可能性のある保護療法

よく行われる療法が、超低周波音に対する感度の軽減に使えるかもしれない。中耳換気チューブ *Tympanostomy tube* というのは、鼓膜を小さく切開してゴムの管“*grommet*”を挿入する方法である。これは小児の中耳炎によく用いられ、メニエール病の患者の治療にも使われて効果があつた。中耳換気チューブの挿入は簡単な治療法である。中耳換気チューブは、会話の周波数の音を聴くのにほとんど影響しないが、外耳道と中耳の間の圧力を平衡させることにより、低周波音の感度を画期的に低下させる (Voss et al., 2001)。内耳に到達する超低周波音レベルを 40 d B 以上も低下させることが (訳註：これはいわば鼓膜にローパス・フィルターを設置することに当たる。高周波は減衰しないので聴こえには影響しないが、メニエール病で問題の中耳の圧力を下げる効果がある)。中耳換気チューブは永久埋め込みではなく、何ヶ月かで自然に排除されるか、または医師の手で抜き取ることが出来る。これまで、風力タービンの近くに住む人の症状が中耳換気チューブで軽減できるかどうか試した例はない。患者の予後からいえば、そこから転居するか、医療処置によって、めまいや吐き気、睡眠障害を治療することが望ましい。この治療法の結果は、よいに

せよ、悪いにせよ、風力タービンノイズの議論に大きな科学的影響を与えるだろう。

### 結論と関心事項

超低周波音や低周波音が耳に影響して、風力タービンの近くに住む人々の一部が訴えているような症状を起こす可能性があることを縷々述べてきた。もし、早晚、タービン近くの住民の症状に生理学的に根拠があることが証明されたら、風力産業の音響学者たちが長年にわたり、“聴こえない音があなたに影響するはずがない”と保証したり、症状は心因性だとか、ノセボ効果（副作用があると信じ込む事により、副作用が強く現れること）だとか言ったりしてきたのは大きな不正義である。現在の非常に噛み合わない議論がなされている状況は、長期間にわたる超低周波音刺激の影響について理解が非常に原始的なレベルに留まっていたからである。耳の生理学の確立した原理と、非常に低い周波数に耳がどのように応答するかに基づけば、この問題はこれまで行われてきたよりも、もっとまじめに取り組まれるべき根拠は十分にある。注意深く、かつ客観的な研究を通してのみ解決できる重要な科学的課題はたくさんある。実験室における超低周波音発生は技術的に難しいけれども、人に対して制御された条件下で実験できる装置を設計中の研究グループが既にいくつかある。

関心ある問題の一つは、一部の音響学者や、音響学者らの学会の果たしてきた役割である。音響学者の第一義的役割は、ノイズ暴露のネガティブな影響から社会を保護し、奉仕することのはずである。風力タービンノイズの場合、多くの音響学者はこの役割を果たさなかった。何年にもわたり、彼らは、いまでは誤りとわかったマントラ **mantra**（真言；サンスクリットで文字、言葉の意）の陰に隠れていた。マントラはいろいろな形で繰り返し表明されてきた；“聴こえないものは影響しない”；“ある音があなたに聴こえなかったら他の方法では知覚できないのだから、それはあなたに影響しない”；“風力タービンから出る超低周波音のレベルは聴覚閾値以下だから影響はない”；“この型のタービンから出る超低周波音は無視できる”；“最新設計の風力タービンからは大した低周波音は出ないと断定できる”などの言葉のことである。これらの発言はすべて、低周波音に感度のない IHC 応答から得られる聴こえ方が、低周波音が身体に影響する唯一のメカニズムであると仮定している。この仮定が誤りであることをわれわれは知っており、この誤りの根源は耳の生理学の詳しい知識が欠如であることを非難する。

もう一つの関心事は、医療に関連して、風力タービンノイズの測定法を改善すべきことである。A特性の使用は、感覚のない IHC を介しての聴こえに基づいており、ノイズにより生じる内耳の刺激を全く表していない。科学的には、A特性による音響測定は、耳の多くの諸要素が聴こえ以上の感度を示しているのだから受け入れられない。風力業界も同じ水準に立つべきである。一部の報告に含まれている、全スペクトルモニタリングが基本で

ある。

近年中に、人に対する超低周波音の長時間暴露の影響がよくわかるような実験が行われるだろうから、音響学者や風力発電業者のパートナーである専門家の役割がもう一度評価できるだろう。現在の証拠に基づいても、超低周波音による刺激を耳だけに限定し、身体に他の影響はないという現在の賭けは危ない。考え得るすべてのメカニズムを列挙すると：低周波による振幅変調、低周波による内リンパ体積変化、超低周波音によるタイプⅡの神経刺激、ノイズによる傷害の超低周波音による増悪と前庭器官の超低周波音刺激、これらすべてが無意義であるという賭けだからである。これら全部が無意義だとは思われないから、将来、議論に影響する新発見があるだろうと予想する。

耳の生理学の知識に基づいてわれわれは、“問題があることを認め、その解決のために研究する”という Nancy Timmerman の識見に賛成する。

#### 著者の紹介

**Alec N. Salt** ワシントン大学耳鼻咽喉学区教授。長期にわたり米音響学会、耳鼻咽喉学研究協会、米耳科学会の長期にわたる会員。研究分野は、前庭生理学の広い分野にわたるが、とくに内耳液体、内耳への薬物伝達、耳への低周波音の影響などに重点をおく。

**Jeffery T. Lichtenhan** ワシントン大学セントルイス校、耳鼻咽喉科助教授。ハーバード大学医学部、耳生理学でポストク終了。研究分野は、低周波音の聴こえメカニズム、聴覚刺激システム。目標は、聴覚神経による難聴の鑑別診断法の改良である。

#### 文献

Cheatham, M.A., Dallos, P. (2001). “Inner hair cell response patterns: implications for low-frequency hearing,” *Journal of the Acoustical Society of America*. 110, 2034-2044.

Drexler, M., Überfuhr, M., Weddell, T.D., Lukashkin, A.N., Wiegand, L., Krause, E., Gürkov, R. (2013). “Multiple Indices of the ‘Bounce’ Phenomenon Obtained from the Same Human Ears,” *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*. (e-pub, before print copy) 10.1007/s10162-013-0424-x

Harding, G.W., Bohne, B.A., Lee S.C., Salt A.N. (2007). “Effect of infrasound on cochlear damage from exposure to a

- 4 kHz octave band of noise," *Hearing Research*. 225:128-138.
- Leventhall, G. (2006). "Infrasound From Wind Turbines – Fact, Fiction Or Deception," *Canadian Acoustics* 34:29-36.
- Leventhall, G. (2007). "What is infrasound?," *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 93: 130–137.
- Leventhall, G. (2013). "Concerns About Infrasound from Wind Turbines," *Acoustics Today* 9:3: 30-38.
- Lieberman, M.C., Dodds, L.W., Pierce, S. (1990). "Afferent and efferent innervation of the cat cochlea: quantitative analysis with light and electron microscopy," *Journal of Comparative Neurology* 301:443-460.
- Lichtenhan, J.T. (2012). "Effects of low-frequency biasing on otoacoustic and neural measures suggest that stimulus-frequency otoacoustic emissions originate near the peak region of the traveling wave," *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*. 13:17-28.
- Lichtenhan, J.T., Salt, A.N. (2013). "Amplitude modulation of audible sounds by non-audible sounds: Understanding the effects of wind turbine noise." Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 19: *Journal of the Acoustical Society of America*. 133(5), 3419.
- Nissenbaum M.A., Aramini J.J., Hanning C.D. (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise Health*. Sep-Oct;14(60):237-43.
- Pierpont, N. (2009). "Wind Turbine Syndrome." K-Selected Books.
- Salt, A.N., DeMott, J.E. (1999). "Longitudinal endolymph movements and endocochlear potential changes induced by stimulation at infrasonic frequencies," *Journal of the Acoustical Society of America*. 106, 847-856.
- Salt, A.N. (2004). "Acute endolymphatic hydrops generated by exposure of the ear to nontraumatic low frequency tone," *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*. 5, 203-214
- Salt, A.N., Brown, D.J., Hartsock, J.J., Plontke, S.K. (2009). "Displacements of the organ of Corti by gel injections into

- the cochlear apex," *Hearing Research* 250:63-75.
- Salt, A.N., Lichtenhan, J.T. (2102). "Perception-based protection from low-frequency sounds may not be enough," Proceedings of the InterNoise Symposium , New York.
- Salt, A.N., Lichtenhan, J.T., Gill, R.M., Hartsock, J.J. (2013). "Large endolymphatic potentials from low-frequency and infrasonic tones in the guinea pig," *Journal of the Acoustical Society of America* 133 :1561-1571.
- Schermuly, L, Klinke, R. (1990). "Origin of infrasound sensitive neurones in the papilla basilaris of the pigeon: an HRP study," *Hearing Research* 48, 69-77.
- Schomer, P. (2013). "Comments On Recently Published Article, "Concerns About Infrasound From Wind Turbines," *Acoustics Today* 9:4: 7-9
- Schuknecht, H.F. (1977). "Pathology of Ménière's disease as it relates to the sac and tack procedures," *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*. 86:677-82.
- Timmerman, N.S. (2013). "Wind Turbine Noise," *Acoustics Today*, 9:3:22-29
- Voss, S.E., Rosowski, J.J., Merchant, S.N., Peake, W.T.. (2001). "Middle-ear function with tympanic-membrane perforations. I. Measurements and mechanisms," *Journal of the Acoustical Society of America* 110:1432-1444.
- Weisz, C.J., Lehar, M., Hiel, H., Glowatzki, E., Fuchs, P.A. (2012). "Synaptic Transfer from Outer Hair Cells to Type II Afferent Fibers in the Rat Cochlea," *Journal of Neuroscience*. 32:9528-9536.