

情報通信審議会 情報通信技術分科会 電波利用環境委員会
電波防護指針の在り方に関する検討作業班（第14回）

- 1 日時：令和5年5月15日(月)15:00～17:30
- 2 場所：Web会議開催
- 3 出席者：
 - (1) 構成員（敬称略）
平田 晃正（主任）、牛山 明（主任代理）、寺尾 安生、柿沼 由佳、日景 隆、
上村 佳嗣、小島 正美、増田 宏、小寺 紗千子、松本 明子、佐々木 謙
介、宮越 順二、多氣 昌生（オブザーバ）（以上13名）
 - (2) 事務局（総務省総合通信基盤局電波部電波環境課）
内藤 新一（電波環境課長）、島田 淳一（電波利用環境専門官）、藤原 史隆（課長
補佐）
- 4 議事
 - (1) 眼球に関する研究動向について
 - (2) 基礎指針4(b)について
 - (3) 吸収電力密度の平均化面積について
 - (4) 電波ばく露によるストレス応答マーカーの変動について

【平田主任】 皆様、こんにちは。名古屋工業大学の平田でございます。

定刻になりましたので、第14回電波防護指針の在り方に関する検討作業班を開催いたします。構成員の皆様方におかれましては、御多用の中お集まりいただきまして、誠にありがとうございます。

まずは、事務局から諸連絡をお願いいたします。

【藤原課長補佐】 総務省電波環境課の藤原でございます。

本日も、ウェブ会議により開催しております。御発言を希望される際は、挙手かチャットでお知らせください。主任に順次指名いただきます。ほかの方が発言されていなければ、指名を待たずに発言いただいても結構です。また、御発言の際はカメラをオンにしていだけますと幸いです。モバイル回線の御利用など、回線速度が不安定な場合は音声のみで

も結構でございます。

本日の作業班は公開としておりまして、傍聴の方がいらっしゃいます。

続きまして、本日の作業班の出欠ですが、全構成員に御出席いただいております。

最後に、メールにてお送りしました本日の配付資料について、確認させていただきます。

まず、発表資料として、資料14-1から14-4までございます。それから、一部の構成員の肩書きが変更されましたので、参考資料14-1をお配りしております。不足がございましたら、チャット機能等で至急御連絡をお願いいたします。

事務局からの連絡事項は以上でございます。平田主任、どうぞよろしくをお願いいたします。

【平田主任】 藤原補佐、どうもありがとうございます。

それでは、議事に入らせていただきたいと思います。

本日の検討テーマでございますが、4つございます。前半の2つにつきましては、眼球に関する検討を行うものでございます。最初に、金沢医科大学の小島先生から、電波ばく露による眼障害の閾値に関する研究について御紹介いただきます。それを受けまして、私、平田から、我が国の電波防護指針の基礎指針における眼球に対する考え方を中心に、ICNIRPやIEEEの国際ガイドラインなど国際動向についても紹介いたします。

後半の2つでございますが、いずれも前回会合に続いた検討テーマとなります。1つ目は、名古屋工業大学の小寺先生の吸収電力密度に関する御発表を掘り下げる形で、北海道大学の日景先生より、平均化面積の考え方について詳しく御紹介いただきます。2つ目は、久留米大学の増田先生の皮膚ばく露における吸収電力密度と温度上昇の関係などの御研究の発表を受けまして、佐賀大学の松本先生から、ストレス応答マーカーに着眼にした研究について御紹介いただきます。

まず、議事（1）眼球に関する研究動向については、小島先生から御発表をお願いいたします。こちらの御研究については、御存じの先生方もいらっしゃるかと思いますが、総務省からの受託研究などで実施されたものでございまして、また、ICNIRPの改定ガイドラインの附属書などでも引用されたものでございます。

小島先生、お願いいたします。

【小島構成員】 よろしくをお願いいたします。では、進めさせていただきます。

最初に、背景から御説明させていただきたいと思います。スライドに示したのは、私ども金沢医科大学でミリ波の研究を実施する前に、論文等で報告があったものを示して

おります。

御覧のように、3つの論文があるのですけれども、大きな違いは、使っているアンテナです。こちらはホーンアンテナで、これは非常に特殊な使い方で、家兎の眼球にかぶせるような使い方をされています。Kuesらの1999年は、円形ホーンアンテナとしか書いていませんので、詳細は分かりません。Chalfinらは、切り離し導波管を使用しているということで、三者三様のアンテナを使っています。それから、実験動物が家兎とかサルとか、種類が異なりますので、これらのデータを直接比較することができないということでした。

それから、眼障害の指標に関しまして、これは1976年のRosenthalのデータですけれども、角膜の上皮障害、実質障害、角膜混濁というように3つの症状に分かれております。それらのスケールがさらに分かれているみたいですが、その論文で基準に記載がないということで、例えば、この微かなもや、かすみがどの程度かということが分からないわけです。

それで、私どものデータを追加して見てみました。これは蛍光染色のもので、こちらが蛍光染色(-)、こちらが蛍光染色(+))ということで、この場合、上皮障害があると判定いたします。

それから、微かなもや、こちらは正常ですけれども、こちらが若干濁りがあるかなという、この程度のもを言っているのかなと想像していますが、詳細は分かりません。

角膜混濁に関して、これがかなり強い混濁ですけれども、これぐらいになると2点となるようでございます。

こちらはChalfin、2002年の論文から引用させていただきました。このように、グレード0と、それから、障害ありで4段階に分かれております。全て細隙灯顕微鏡下で判定と書かれていますが、こちらはその写真の提示がないということです。

それで、上皮蛍光染色、これに関しては、先ほどお見せしたもので、それほど大きな違いはないと思いますが、一番難しいのは、上皮浮腫ということであります。

こちらは通常の細隙灯顕微鏡に搭載されている40倍の倍率で角膜を見たところです。これは私どものデータですけれども、こちらが正常像で、こちらがばく露眼です。そうしますと、この正常像の角膜の厚み、角膜厚と申しますけれども、これが1.5倍ぐらいに腫れています。これは角膜浮腫で、細隙灯顕微鏡で十分判定できると思います。こちらの上皮浮腫というのは、上皮細胞に浮腫があるかどうかなのですが、この上皮細胞を400倍

に拡大すると、こんなふうに見えます。この細胞にばく露しますと、1個の細胞がこのように腫れてまいります。400倍ぐらいにすると浮腫が分かるのですけれども、通常の40倍でこの浮腫が本当に分かるかという、ちょっと疑問でございます。

こういうものを踏まえて、私どもの眼障害を判定する方法や、ばく露の条件を決めてまいりました。ここに示します例は、75GHz、250mW/cm²、6分ばく露のデータでございます。

眼瞼の保持をせずにはばく露いたしますと、家兎は目に違和感を感じますので、忌避反応でまぶたを閉じることによって、眼瞼に障害が得られます。その結果、目を閉じてしまいますので、眼球には障害が起らないということでございます。

そこで、眼球の障害の程度を知りたいということで、私どもの方法は、ここに示しましたように、テープで眼瞼の動きを抑制しまして実験をしております。データを発表しますと、この眼瞼を抑制するのはどうかという御質問をいただきますが、家兎の瞬目のデータを調べてみますと、6.3秒に1回から20分に1回というデータがございます。私どもの検討では、40分間全くまばたきしないことがありましたし、例えば、近くに人の気配があると、ウサギは警戒して全くまばたきをしないというデータも認められました。そこで、6分程度の瞬目の抑制に関しては、特に問題がないと考えています。

もちろん、左眼、こちらは非ばく露対象眼ですけれども、こちらの障害も確認しております。まばたきを抑制することによって、こちらに障害が出るというような例はございませんので、この方法でも特に問題はないと考えております。

繰り返しになりますけれども、まばたきを抑制しない実験ですと、皮膚に障害が得られますので、このときのものは全て皮膚に帰属するのではないかとその当時考えておりましたが、眼瞼に高強度ばく露いたしますと、このようにやけどが生じるのですけれども、眼瞼の下の眼球自身にも、このように障害が出てまいります。ここにも浮腫が出てまいります。そのため、皮膚と眼球は部位によって若干異なる可能性があるかと、現時点では考えております。

こちら、眼障害の判定方法として、フルオレセインですけれども、先ほどもちょっと御紹介しましたけれども、フルオレセインを点眼して観察すると、Rosenthalは論文に、2%フルオレセイン1滴を点眼して、余剰の蛍光を生理食塩液で洗浄していると書かれています。Chalfinに関しては、この記載はありません。

私どもはこの方法を少し改良いたしまして、励起光の青色をカットする励起光カットフ

イルタを入れますと、このように蛍光の色、グリーンだけがディテクトできるようになります。蛍光染色の濃度が強いので、0.05%のフルオレセインに濃度を下げております。このフルオレセインを25 μ l、マイクロピペットで正確に点眼しております。その後、余剰の蛍光を洗浄するという方法です。

そうしますと、これ、全て同じ写真ですけれども、私どものような方法を使用いたしますと、ここの電波ばく露によって生じた角膜の上皮障害が明確に描写できるのではないかと考えております。

それから、先ほどもちょっと触れましたけれども、細隙灯顕微鏡で、この淡い角膜の混濁というものも判別困難だということで、前眼部のOCTで角膜の断面を撮影しまして、画像解析を用いてこの角膜の厚みを測定する方法を取っております。

こちらが同じく75GHz、150mW/cm²、6分ばく露による眼障害の推移を表しております。実際には、角膜の厚みは、このように3点測定いたします。これがばく露前、10分後、1日後、2日後、3日後となります。

角膜上皮障害に関しましては、ばく露10分後から障害を示唆する蛍光染色陽性所見が出て、2日目まで見られます。ピークはばく露1日後でして、これより2日後になりますとこの面積が小さくなることから考えますと、角膜上皮の再生による治癒が進んでいるのではないかと考えております。

このような方法をいろいろプロットして統計的に解析をしていきます。こちらが40GHz、75GHz、95GHzのデータでございます。これにプロビット解析をいたしまして、出てきたデータがこちらになります。縦軸に入射電力密度、横軸が周波数でございます。データとしては、40GHz、75GHz、95GHzということです。

このDD50というのは、実験に使用しました家兎の50%に障害が出る確率で、これが閾値になります。そのほか、90%の動物が障害を示すところ、それから、10%が表すところについてデータを出しております。

ここまでの、2018年に開催されましたこの会で発表したデータです。ここからが新しいデータですけれども、私どもが検索した限り、ミリ波ばく露による眼障害を検討した実験はあまり見当たりませんでしたので、私どもが総務省からの受託研究で実施させていただいたデータを御紹介させていただきます。

最初に、162GHzの実験でございます。

これは眼障害の判定時期をお示ししておりますが、162GHz、480mW/cm²、

6分ばく露の所見です。

従来の方法ですと、ばく露10分後とばく露1日後、この両方を判定していました。こちらの例ですと、ばく露10分後、この両方で比較いたしますと、1018番と1019番ですと、1019番のほうは角膜上皮障害が陽性、こちらは陰性ですので、この1019番のほうは眼障害は強いと判定できるかと思えます。

これをばく露1日後で比較しますと、角膜の混濁の程度というのはほぼ同じ。それから、蛍光の染色面積というのは、こちらが若干多いですけれども、それほど差はない。一番大きく違うのは角膜の浮腫です。真ん中のところが0.65mm、こちらが0.48mmということで、どちらの障害が強いかというと、こちらの1018番が強いかと思われます。

そのため、ミリ波ばく露による眼障害の判定というのは、障害をしっかりと判定するほうがよいと思われるので、ばく露1日後に決定いたしました。

それから、周波数により眼障害のピークが若干異なるのではないかということが分かりました。

こちらが162GHz、6分ばく露による眼障害の閾値を示したものであります。全てデータはばく露1日後です。一番強いばく露が600mW/cm²、一番低いのが60mW/cm²でございます。

モデルとしましたのは、ちょうどこの部分です。10羽の家兎を使って実験しておりますが、480mW/cm²では、全て障害が出ております。これを徐々に下げていって、120mW/cm²まで下げますと、6羽の家兎で実験をしておりますが、全く障害が出ないと。障害が出たり出なかったりするところで閾値があるだろうということで、この障害に関しましては、240～360mW/cm²の間、この間に閾値が存在するのではないかと推定しております。

次に、60GHzの実験でございます。

こちらが60GHz、400mW/cm²、これがモデルですけれども、これの眼障害の推移です。これは先ほどお示しました162GHz、480mW/cm²の推移でございます。上皮障害の症状が現れるときは、ばく露10分後からばく露2日後でございます。60GHzですと、ばく露1日後に初めて眼障害が生まれて、2日後、3日後にも微かに障害が出たということで、基本的には同じような障害の推移を示しますが、上皮の治癒とかが若干異なると考えられます。

こちらが閾値に関するデータで、先ほどと同じ、こちらが600mW/cm²で、こちら

が100mW/c㎡であります。モデルが13羽の動物を使って、ほぼ全例に障害が出たということです。これを徐々に下げていくと、障害が出たり出なかったりするということ、こちらも200～300mW/c㎡あたりのところに閾値が存在すると推定いたしました。

こちらが、昨年度実施した28GHzの実験でございます。

これが28GHzの眼障害の推移、こちらが、今お話ししました60GHzの推移でございます。

28GHzの特徴は、この角膜の上皮障害が、60GHzでは3日後まで見られますが、28GHzでは、ばく露1日後以外は見られないということでもあります。

それと、もう一つ違いは、60GHzですと、ばく露4日後ぐらいになりますと、この浮腫が随分改善されますが、28GHzでは、4日経ってもまだかなりの浮腫が残っていることでございます。それで、28GHzは、今まで実施しました40～162GHzの眼障害の推移と比較しまして、角膜上皮障害の治癒は、ほかのものよりも早いですけれども、混濁の治癒速度は遅いということが分かりました。

これが眼障害の閾値でございます。400mW/c㎡、これがモデルでありまして、300mW/c㎡以下では全く障害が出ないということでもあります。それで、閾値は、この350～380mW/c㎡の間にあるのではないかと考えております。

今まで実施しました40～162GHzと、この28GHzを比較しますと、眼障害の出現の有無が非常に鋭敏であると考えられます。

こちらが各周波数と閾値を示したものであります。こちらが縦軸に入射電力密度、横軸に周波数でございます。これが28GHz、40GHz、60GHz、75GHz、95GHz、それから、162GHzということです。黒い実線が、50%に障害が現れるものがございます。

全体を見比べますと、75GHz付近、ちょうどこの付近で眼障害の閾値は極小値になると考えられます。この95GHzの間ぐらいにあるかもしれません。28GHzは閾値が最も高いことが分かりました。それから、100GHz超では閾値が若干上がってくるという傾向が見られました。

次に、電波ばく露による眼障害発生と室温、相対湿度との関連についてでございます。

こちらは電波ばく露による眼組織内温度と温度・湿度の関係でございます。これは家兎の角膜の模式図で、ここに直径0.5mmの蛍光式のファイバー温度計を侵入いたします。

こちら、水晶体にも侵入する。それから、もう1つ、眼球の温度との対照といたしまして、背部の皮膚、これは皮内に設置していますけれども、こういったものを手術的に侵入して測定しております。

これはプローブを設置するところですが、標準的な実験室環境の24℃、50%で設置しております。その家兎を45℃、湿度20%の環境に移しますと、皮膚の温度は、このように環境を移動させた後から徐々に温度が上昇してまいります。一方、眼球の、例えば、角膜の中はブルーで、水晶体の温度はこの緑ですが、最初大体4～5分程度は、このように温度が上昇しますが、それ以降は温度を一定に保とうとするような状況が見られました。ここでばく露を実施して、ばく露終了ということになります。

これを、室温45℃は一緒ですが、湿度80%に変化いたしますと、皮膚の温度は、先ほどと同じように、徐々に上昇します。それに対して、眼球の温度、20%のときは、皮膚の温度と相違が見られましたが、湿度80%にすると、眼球の温度も皮膚の温度と変わりが無いということが分かりました。

まとめますと、室温上昇は眼球とか皮膚組織温度を上昇させることが分かりました。高湿度は眼球の温度を上昇させるということが分かりました。そこから、眼球は他の器官とは性質が異なる可能性が高いということが分かりました。

こちらは、電波ばく露による眼内の熱輸送と周波数の関係を見たものでございます。

こちら、40GHz、75GHz、95GHzというデータでございます。こちらに、感温液晶カプセルと申しまして、温度によって色調が変化する細かいパーティクルを眼の中に手術的に注入して、ばく露をして温度変化を見ていくものであります。ざっくりとしたものですが、この赤い部分は温度が低くて、青色、寒色系のものは温度が高いとお考えください。

そうしますと、40GHz、75GHzは、ばく露3秒後には、このように色調変化が見られます。95GHzは少し遅れて、10秒後に角膜の直下に色調変化が見られます。60秒後ですと、45GHzは、ほぼ全体に色調変化が見られますが、95GHzでは、眼球の半分程度に色調変化が見られるということです。

この40GHz、75GHz、95GHzに比較して、28GHzを比較してみますと、このデータです。3秒、10秒、60秒ですが、先ほど40GHz、75GHzではばく露開始3秒、95GHzでは10秒で見られたのですが、28GHzでは10秒後でも全く色調変化が見られません。ただ、60秒後には眼球全体に色調変化が見

られたということです。色調変化が見られたのは、ばく露開始30秒後で、その後は一気に色が変わっていくということが見られました。

これが環境を変えるとどうなるかですけれども、こちらが45℃、20%の環境です。基本的にはそれほど大きな差はないんですけれども、着色に見られる時間が、標準環境では30秒かかっていましたが、これが若干早くなるということが見られました。

それから、これを80%にすると、さらにこの色調変化が見られるのが、ばく露が5秒と非常に早くなったこと。それから、もう1つ、温度や湿度を変えますと、今までほかの周波数では真ん中からしか色調変化が起きませんでした。28GHzは、このように角膜の下部の方向からも色調変化が見られるということで、60GHzと40GHz、75GHz、95GHz、162GHzの熱輸送形態には大差がないということが分かりました。

それから、28GHzばく露による発熱量は、他の周波数よりも低いのは確かですけれども、眼部に広範囲にばく露されるために、熱輸送形態がほかのミリ波とは若干異なるということが分かりました。

これは共同研究をしている都立大のデータをお借りしてまいりました。これは28GHzと60GHzのSARを計算してもらったものですが、この侵入深度というのは、先ほどこちらの感温液晶カプセルで見られたデータとうまく一致いたしました。

次に、眼部の周辺皮膚とその他の皮膚の比較でございます。

こちらは電波ばく露による眼部、眼瞼皮膚及び体部皮膚の表面温度を比較したものでございます。黒いカラムが皮膚のデータです。このグレーのカラムが角膜表面の温度でございます。こちらが28GHz、こちらが60GHzであります。これが入射電力密度でございます。

どの条件を比べてみても、皮膚の温度は常に眼球の温度よりも高いということが分かりました。

さらに、電波ばく露による眼部、眼瞼皮膚及び体部皮膚の障害を比較いたします。

まず、眼障害の閾値から見てみますと、28GHzでは350～380mW/cm²に對しまして、60GHzでは200～300mW/cm²のところに関値があるということです。皮膚は、28GHzが200～300mW/cm²、60GHzが100～200mW/cm²の間に閾値があるということで、角膜より皮膚のほうが障害閾値が低いということが分かりました。

それから、皮膚の障害に関してですが、上の段が28GHz、下が60GHzです。400mW/cm²をばく露したところです。眼瞼皮膚を比較いたしますと、28GHzに対して、60GHzは、こういう壊死を起こしている部分が見られますので、60GHzのほうが障害が強いです。一方、眼球上を比較しますと、角膜の混濁も、60GHzよりも28GHzのほうが強いですし、角膜上皮の障害の面積も、28GHzのほうが強いということで、反対の結果が得られたということでございます。

以上をまとめますと、ミリ波帯（28～162GHz）の眼部ばく露実験の眼障害実験結果及び眼が鋭敏な忌避反応を持つということから、現行の電波防護指針は安全側にあると考えております。

今後の課題としましては、6～18GHzのシミュレーションによるデータの補完というのが必要になってくるのではないかと考えております。

また、ヒトの瞬目速度といいますと、0.1～0.3秒ということですので、この0.1～0.3秒内に眼の中にばく露される波高値の高いパルス実験が今後必要ではないかと考えております。

以上です。ありがとうございました。

【平田主任】 小島先生、長年にわたり蓄積いただきました知見からの御説明、大変勉強になりました。どうもありがとうございます。

それでは、ただいまの御説明に対しまして、構成員の先生方から御質問などありましたら、御発言のほうをお願いいたします。

日景先生、お願いいたします。

【日景構成員】 日景です。今回お示しいただいた資料に記載の各周波数帯でのばく露量の評価方法につきまして御教示いただきたいです。実験的な、いわゆる測定されたものでしょうか、それとも、数値シミュレーション的なもので得られた値に基づいて書かれているということでしょうか。教えていただければと思います。

【小島構成員】 実際にその入射電力密度を用いて動物にばく露した結果を出しております。シミュレーションではありません。

【日景構成員】 ありがとうございます。入射電力密度の測定方法についてはいかがでしょうか。

【小島構成員】 これは都立大との共同の研究ですので、ばく露管理は全て都立大学に実施していますが、パワーメーターで測定して、任意の入射電力密度をばく露しております。

す。

【日景構成員】 分かりました。ありがとうございました。

【小島構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 ほか、構成員の皆様方から、いかがでしょうか。

まずは、久留米大学の増田先生、お願いできますでしょうか。

【増田構成員】 久留米大学の増田です。小島先生、どうも、大変示唆に富んだデータを御紹介いただきまして、ありがとうございました。

2つ私のほうから質問させていただければと思います。21ページですね。高温の部屋で行われた実験で、皮膚の温度は高温にさらされて上昇した一方で、角膜の温度が上昇していないというのが、非常に反対のイメージがあります。角膜のほうは血流がないのに温度が上がらないというのは、これは涙とかが関係しているのかというのが、まず1つ目の質問になります。

【小島構成員】 ここはまだ推測の域を出ないのですがけれども、以前から眼球の温度というのが、体の深部温度から2℃ぐらい低いという報告がございます。これは角膜上の涙液を蒸散させることによって、眼球表面の温度を下げているということが推察されております。そこで、湿度が低い20%の眼球では、その機構が働いているのではないかと考えております。今のでお答えになっていますでしょうか。

【増田構成員】 ありがとうございます。非常に興味深いなど。

もう1つ、よろしいですか。同じスライドですけれども、高温多湿にした場合と、高温多湿でない場合で、同じばく露量での眼球の障害度は、最終的には異なったのでしょうか。

【小島構成員】 高温高湿度のほう障害は強く出ます。これは温度測定でも、温度が高くなっていることは確認しております。

【増田構成員】 ありがとうございます。ということは、温度によってその障害が強くなったと考えていいということですね。

【小島構成員】 おっしゃるとおりです。

【増田構成員】 ありがとうございます。

【小島構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 どうもありがとうございます。

ほか、御質問などいかがでしょうか。

それでは、上村構成員からお願いできますでしょうか。

【上村構成員】 実験は大変御苦労されたと思います。

19枚目のスライドで、40GHzだけすごくばらつきが大きくて目立ちますが、28GHzが非常にきれいな絵だというか、ばらつきの少ないデータになっています。この差は何でしょうか。

【小島構成員】 一番考えられるのは、40GHzというのが、一番最初にミリ波で実施させていただいた周波数です。それで、スキルの的にも、周波数を変えるごとに経験が蓄積されていきますので、判定の仕方が鋭敏になっている可能性が高いということが1つ。

もう1つは、40GHzは、いろんな実験をするのが主目的でしたので、現時点では、我が国の電波防護指針に合わせて6分間ばく露だけですけれども、この当時、40GHzをやったときは、30分ばく露とか、いろんなデータを取ったことによって、データの数は集まっています。その実験の期間がちょっとばらついているので、そういうこともデータのばらつきの原因の1つでないかというふうには考えております。

【上村構成員】 では、もしもう1回40GHzでやれば、かなりきれいなデータが得られそうなんです。

【小島構成員】 個人的には、もう少しきれいなデータが出ると思っています。

【上村構成員】 分かりました。どうもありがとうございます。

【小島構成員】 ありがとうございます。

【多氣オブザーバー】 すみません。今のに、私からコメントさせていただいてよろしいでしょうか。

うろ覚えで申し訳ないのですが、確か周波数が高くなってくると、対流が顕著になる。28GHzぐらいは、全体がわっと温まってしまう。40GHz、ちょっとその中間ぐらいのところ、非常に房水の対流が不安定な感じになっていたような記憶がありますが、そういうことはありませんでしたでしょうか。

【小島構成員】 対流自体は、このスライド（22ページ）でお示しましたように、それほど大きな差はありません。ただ、40GHzも28GHzも、要するに、周波数の関係で、それほど絞れませんので、そういう意味では、対流がほかのものよりも曖昧になる傾向はあると思いますけれども、それほど、それが影響しているということではない気はいたします。

【多氣オブザーバー】 分かりました。

ついでに、せっかくこのスライドが出ているので、教えていただきたいのですが、こ

の写真で重力の方向は、下ではないですよ。

【小島構成員】 重力は下です。

【多氣オブザーバー】 真下ですか。要するに、ウサギの目は、こういうふうに垂直に立っているんですか。

【小島構成員】 はい。基本的には、こういう状態です。

【多氣オブザーバー】 そうですか。そんなに上を向いていないのですね。

【小島構成員】 上は向いていないです。

【多氣オブザーバー】 分かりました。では、下が重力だという理解で大丈夫ですね。ありがとうございます。

どうも割り込みまして申し訳ございません。

【小島構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 それでは、牛山先生からお願いできますでしょうか。

【牛山主任代理】 国立保健医療科学院の牛山です。

私から2点質問があります。上皮障害の治癒まで数日かかっていますが、その間、ウサギの見え方はどのようになっていると想像できるのか、それに対しての痛みとかはどのように御理解しているかについて質問させていただきます。

【小島構成員】 上皮障害がある場合、例えば、この162GHz、480mW/cm²を例に取りますと、ここ、角膜表面が凸凹になっています。上皮があることによって、角膜表面がスムーズの場合は、うまく焦点を結ぶことができますが、上皮障害があると、この凹凸によって、恐らく乱視の状態になり、焦点がうまく結ばれていないと考えられると思います。

【牛山主任代理】 あと、痛みとかは、ウサギは感じるのでしょうか。

【小島構成員】 失礼しました。痛みは、補足のスライド(30ページ)で書いたかと思うのですが、これ、角膜の模式図でございます。この黄色のところは神経ですけれども、この角膜の表層に5層から6層の上皮細胞があります。これの表面から1層2層辺りに、もう神経があります。角膜上皮が1~2枚剥がれると、もうそれはすごい痛みで、例えば、角膜の上皮障害で夜中に救急車で運ばれてくるような患者さんもおられますので、強い痛みであることは間違いありません。

【牛山主任代理】 ありがとうございます。

2点目の質問ですが、スライドの12番で、一番左側に角膜表面温度が書かれています。

ほかの28GHzのスライドだと ΔT で表示されていますが、こちらのスライドでは実測値ということで間違いないでしょうか。

【小島構成員】 そのとおりです。統一性がなくて申し訳ないですけど、論文からそのまま持ってきましたので。申し訳ありません。

【牛山主任代理】 承知しました。ありがとうございました。

私からは以上です。

【小島構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 ありがとうございました。

ほか、いかがでしょうか。

NICTの佐々木構成員の手が挙がっていますでしょうか。

【佐々木構成員】 すみません。NICTの佐々木です。

小島先生、貴重な御発表ありがとうございました。

1点確認になります。一番最初の日景先生の御質問とも関連するんですけども、今回御検討されている、ばく露を規定するに当たっての入射電力密度のばく露量というのは、空間平均値か何かを取られているという理解でよろしかったでしょうか。

【小島構成員】 大体2kg前後のウサギを使っておりまして、この有色のウサギの角膜の直径の平均が大体13mmですので、この13mmで平均化してばく露量を出しております。

【佐々木構成員】 直径13mmということは、大体平均面積で言うと、 1 cm^2 より大きいぐらいですかね。

【小島構成員】 そうですね。

【佐々木構成員】 分かりました。

私の質問は、その確認の点でございました。ありがとうございました。

【小島構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 ほか、御質問、コメントなどいかがでしょうか。

多氣先生からございますでしょうか。

【多氣オブザーバー】 やはり、答申等にしたときには、一般の方々にも理解できるようにしていただきたいという気持ちがあるので、この $200\text{ mW}/\text{cm}^2$ がかなり熱いぐらいの強さだということが、何らかの形で分かるような書き方というのはできないのかなと思って見ていました。

例えば、 $200\text{ mW}/\text{cm}^2$ ということは、 $2\text{ kW}/\text{m}^2$ ですよね。ですから、 500 W が 25 cm 四方のところに集中しているような感じで、ストーブの前に立っているぐらいの電力ががーっと来ているので、明らかにぱっと熱いぐらいのレベルなんじゃないかなと思います。そんなイメージぐらいにすると障害が起こるといふ、そういう理解でよろしいでしょうか。

【小島構成員】 実際、自分の手のひらに、いろんな周波数でばく露してみますと、おっしゃるように、周波数が高いところのほうが鋭い痛みに近い感覚ではありますが、御指摘のように、まさしく熱いぐらいのばく露量であることは間違いございません。

【多氣オブザーバー】 ついでに聞きたいのは、そのぐらいだと障害はあるけれど、それより弱いレベルでは障害は今までの御経験の中では見られないという理解でよろしいですか。

【小島構成員】 私が知る限り、 $100\text{ mW}/\text{cm}^2$ 以下で障害が出たということはございません。

【多氣オブザーバー】 ありがとうございます。

【平田主任】 ありがとうございます。

ほかのガイドラインとかとの相違につきましては、次の私の発表で総括させていただきます。書きぶりなども含めて、改めて御相談させていただければなどは考えております。

小島先生の、特に今回得られた実験の解釈、そしてその知見といったものに対して、ほか、御質問などございますでしょうか。

それでは、小寺先生、お願いできますでしょうか。

【小寺構成員】 名古屋工業大学の小寺でございます。

私からは短い質問で、大変恐縮ですけれども、25ページのところで、眼球の閾値と皮膚の閾値を比較されていたかと思うのですが。

【小島構成員】 はい。

【小寺構成員】 ありがとうございます。こちら、大変貴重なデータとなると思いますが、1点質問です。皮膚の閾値ですけれども、御発表の中で、背部のところと眼瞼皮膚をまとめて御発表されていたかと思うのですが、背部の皮膚と眼瞼の皮膚は、およそ閾値は一緒になると考えてもよろしいのでしょうか。

【小島構成員】 後でお話ししますが、厳密なことを言うと、ちょっと違うのですけれども、温度に関しては、眼瞼皮膚も背中の背部皮膚も全く変わらないので、こちらのほうで

はまとめさせていただいております。

ただ、皮膚自体の病理標本を比較いたしますと、やはり眼瞼皮膚のほうが障害が出やすいことは、データとしては得られております。ただ、私自身が病理学者ではありませんので、炎症の程度とか、そういうマーカーで見るとそうじゃないかなということですよ。

それから、実際に病理医の方に外注して見ていただいておりますが、その方からは、若干そういう傾向はあるけれども、それほどでもないというコメントもいただいております。

今のでお答えになっておりますでしょうか。

【小寺構成員】 大変参考になりました。ありがとうございました。

【小島構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 ありがとうございます。

ほか、いかがでしょうか。

それでは、御質問は以上でよろしいでしょうか。

それでは、小島先生、どうもありがとうございました。

【小島構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 それでは、続きまして、議事（2）基礎指針4（b）についてということで、私、平田から発表させていただきます。

それでは、次のスライドをお願いいたします。

基礎指針4（b）ということで、振り返らせていただきたいのですが、電波防護指針をお持ちの方は御覧いただきたいところではございますが、3GHz以上の周波数においては、眼への入射電力密度（6分間平均）となりますが、10mW/cm²以下とすることが基礎指針に記載されております。

その根拠といたしましては、ウサギの角膜上皮に対する一過性の障害が、35GHz及び107GHzの周波数で10～50mW/cm²程度の照射で生じ、100mW/cm²程度を超えると一過性ではない影響の可能性も考えられるということで、先ほど小島先生からも御紹介いただいた幾つかの論文、そのバックグラウンドの1つでございますが、Rosenthalらのグループによる報告が引用されているところでございます。

そして、我が国と同様に、眼球に対する基礎指針に準ずるものとして記載があったのが、Health CanadaのSafety Code 6と呼ばれているものです。こちらはもう現在は使われてはおりませんが、1999年の記述がどうなっているかを確認させていただきます。その規則の必須条件ではありませんが、可能であれば眼球に対するSARが0.4W/kgを超

えないようにすることという記述がございました。

このようなことから、電波防護指針が策定された時期、そして、2000年代前半までは、かなり眼球に対する影響というのが注目をされていた。そして、そのHealth Canadaも、近年、こちらの記述が除外されているということになっております。

続いてのスライドをお願いいたします。

ICNIRPガイドラインにおける制限値設定についてということで、ICNIRPの国際ガイドラインについて振り返らせていただきますが、1998年に策定されたものですが、2.45GHzではございますが、家兎への眼球への局所ばく露に関する記述がございました。これはワシントン大学のグループが実施された実験に基づくもので、SARといいますが、ポイントのSARに対する温度上昇と白内障等に関する記述がございました。

そして、2020年に改定されたICNIRPガイドラインにおきましては、附録において論文を引用するにとどまっております。その附録といいますのは、次のスライドで紹介いたしますが、先ほど御紹介いただきました小島先生方の論文ということになります。

一方、本文において、眼球に対するばく露についての記載というのは明示されなくなっております。

一方で、タイプ1組織、タイプ2組織などと区分が変わりまして、それを一括する形で、眼の角膜・前房・虹彩という形で、「タイプ1」組織ということで引用されております。

6GHzから300GHzの範囲における最大温度上昇につきましては、ワーストケースを考える場合には、表面付近に現れ、このタイプ1組織は、温度上昇を健康への悪影響の運用上の閾値（5℃以下）を下回るように制限するばく露は、また、タイプ2組織の温度上昇をも健康への影響の運用上の閾値を下回るように制限している。さらに、低減係数の2を除することによって、2.5℃以内の温度上昇には抑えるという形になります。

一般環境では、このさらに5分の1ですから、0.5℃ということになります。

先ほど小島先生のスライドで、温度上昇を閾値として示していただいたものがございますが、その閾値よりはかなり下回る値となっております。

続いてのスライドをお願いいたします。

こちらはもう既に御説明いただいたものですが、電磁界情報センターさんから和訳いただいておりますICNIRPの附属書Bの和訳部分から示させていただきますが、該当部分はこちらになっております。後半部分になりますが、「例えば」というところから始まっておりまして、Kojimaら、2018年の論文が引用されておりまして、また、まばたきに

関しましても、先ほど小島先生から詳細に御説明いただきましたとおりで、ウサギとヒトの相違をどうするかという議論は、ICNIRPでも、小島先生方の資料を基に、メインコミッションで議論させていただいて、こちらに記述させていただいたという経緯です。

さて、先ほど非常に精緻な実験結果について御報告いただいたわけですが、ばく露時にそれをどう解釈するか、現実のばく露の安全性を担保するためにはとなりますと、電波防護指針となってまいります。その解釈について、これから議論をさせていただきたいと思います。

続きましてのスライドをお願いいたします。

まず、角膜表面における温度についてでございますが、ばく露時に瞬目の抑制をしない条件では、眼部の障害の閾値は皮膚障害の閾値に帰属するということが、あくまでも瞬目が無い場合という形でお出しいただきました。

そして、眼球、先ほど1.3cmとおっしゃられたのかもしれませんが、おおよそ1cmの眼球のみに入射する場合、ビームなどに限定されることになっていくと。こちらについては、御承知いただきたいと思います。

そして、ばく露なしのときに、家兎の角膜表面温度ということになりますが、環境が通常環境でございますと、32.5℃程度であるということは、小島先生のデータを改めてお尋ねいたしまして、抽出した値になっております。ただし、これはあくまでも個体、環境によるということなので、大ざっぱな値であるとお考えください。

そして、障害の閾値は、100～300mW/cm²ということになりまして、これ、どれぐらいの大きさなのかと言いますと、60GHzの例でございますと、2.5℃温度上昇に相当する入射電力密度というのは、50mW/cm²。ICNIRPにおける入射電力密度の参考レベル(1cm²)に直しますと、5.3mW/cm²ということ、2.5℃に比べましてもかなり小さく、さらに、ICNIRPの入射電力密度の参考レベル、私たちが一般環境で浴びるといえるものは、かなり小さい値になっております。これが大体温度上昇が0.5℃未満という形になってまいります。

次のスライドをお願いいたします。

それを国際ガイドラインとの比較、そして、補助指針も併せて示させていただいております。100GHz辺りの上の方に、先ほど小島先生から御報告いただいた値を示すという形にさせていただいております。

先ほどと桁が1つずれているように思われるかもしれませんが、こちら、国際ガイドラ

インが W/m^2 ということもありまして、その桁を国際ガイドラインの合わせさせていただいております。

そして、我が国のいわゆる補助指針、今議論をさせていただいている部分ですが、 $100W/m^2$ の青い線が、 $3GHz$ 以上でずっと $300GHz$ までありますが、そちらに相当いたします。

小島先生から導出いただいた値というのは、それよりも1桁程度高い値となっています。

管理指針の補助指針、空間最大値で $10cm$ 以上離れた空間に適用ということになっております。

ICNIRPの参考レベルは、あくまでもlocal exposureという定義になっておりまして、IEEEは、unrestricted areaという表現、いろいろ変わっております。ただ、 $30GHz$ 以上のところで黒い点線を書かせていただいておりますが、この辺りの補助指針は御覧のような値となっています。

それで、皆様方、値を国際ガイドラインと比べて御理解いただける資料にはなかったのではないかと考えております。

それでは、続きましてのスライドをお願いいたします。

こちらは、国際ガイドラインがどのようになっているのかということで整理させていただきます。こちら、吸収電力密度で見ますと、基本的には、一応周波数に依存しませんので、比較が容易になりますので、こちらで比較させていただくこと、御了承ください。

ICNIRPの1998年のみは、入射電力密度のものも混在しております。そのため、少々過渡期でございまして、分かりにくくなっている部分がございます。

さて、一番上の線にあるのが、 $300GHz$ 以上で、レーザーガイドラインでございまして、直径が $11mm$ のレーザー光につきましてのガイドラインがありまして、98年のものでは、入射電力密度が一致するような形となっております。

それが、現在、この5倍の、これがどーんと下がりがまして、今、赤い線で書かせていただいておりますところまで、ICNIRPのほう制限を厳しくしている形になっております。

この経緯でございまして、これは前回の改定するときにもお話をさせていただきました。ICNIRPやIEEEの規格が、 $6GHz$ 未満から $300GHz$ まで一貫した温度上昇で制限する、これは安全側に考えて、今まで $6GHz$ 以下ではその熱影響が支配的であるという名目で、そちらを外挿した場合の温度上昇ということになっておりまして、その場

合の設定値がこの赤い線となりますので、レーザーガイドラインに比べて5倍ないしは、それよりも安全側になっているということを御理解いただければと思っております。

そして、通常光に関しましては、光のガイドラインの E_{IR} と、直径が7mmになっておりますが、それを横に延ばしたような形で 4 cm^2 のものがずっととなっておりますので、一般環境ではほぼ担保されている形となっております。

そのため、光領域に比べますと、現在の電波防護指針、国際ガイドラインというのは、安全側の設定になっているということをまずは御説明をさせていただきます。

それでは、続きましてのスライドをお願いいたします。

こちらまでの内容をまとめさせていただきますが、ICNIRPガイドライン及びIEEE国際規格におきまして、眼球への記述は限定的となりました。これはICNIRPガイドライン本文からは記載がかなり限定的となっております。

そして、皮膚と角膜の閾値を同じ扱いとし、ICNIRP98と比べて、低い入射電力密度を設定し、 1 cm^2 の場合には5倍厳しくなっているということになります。

光放射ガイドラインに比べて、電波防護ガイドラインのほうは安全側に設定されている点については、説明をさせていただきました。

Health Canada Safety Codeにおいても、眼球に関する記述は、数年前となりますが、削除されております。

そして、電波防護指針における補助指針4(b)は、眼球を対象としているため、改定された国際規格と同等、あるいは、より安全側にあるということを御紹介させていただきました。

まずは、いろいろなデータを1つの表に直させていただき、国際ガイドラインの歴史的な経緯について御説明をさせていただきました。

それでは、ただいま私の説明、そして、小島先生の結果等々も併せまして、構成員の方から御質問、御意見等ございましたら、よろしくをお願いいたします。

それでは、増田構成員、よろしくをお願いいたします。

【増田構成員】 御説明ありがとうございます。久留米大学の増田です。

今の御説明と、それから、小島先生の御発表とも少し関連するのではないかとということで、ちょっとお尋ねしたいのがあります。今の平田先生の御発表ですと、眼球と皮膚とをほぼ同じ閾値ということで考えていきましょうという方針をお話しされましたけれども、小島先生のデータですと、眼球と皮膚とでは、その温度上昇に差がすごくあったというこ

とでした。この点について、今後どのようにお考えになるのか。先ほどの小島先生の御発表は温度の差だけでしたけど、皮膚に対する影響と眼球に対する影響、例えば、同じばく露量で同じような結果が出たのかどうか、その辺りも含めて教えていただければと思います。よろしくお願いします。

【平田主任】 国際ガイドラインの議論に携わらせていただきました立場から申し上げますと、皮膚と眼球の取扱いは、画一的に取り扱ってはいますが、眼球などの閾値も含めた上で、より安全側な値としております。

附属書の部分でも小島先生の論文を引用させていただいておりますが、そういった部分も踏まえた上での温度上昇等も勘案の上に、より安全側にして、さらに安全係数を掛けております。

したがって、同じような扱いにするだけでございまして、実際には、眼球の閾値については、大変注目させていただいていたのが実際のところではないかと考えております。

そして、御質問いただきました実験データの解釈につきましては、やはり実施された小島先生のほうからコメントいただくほうがよろしいかと思いますが、小島先生、いかがでしょうか。

【小島構成員】 金沢医大、小島でございます。

眼球の皮膚、眼瞼ですけれども、それとか、通常背部の皮膚、若干皮膚としては異なりますので、実際のところ、少し眼瞼の皮膚のほうが障害が出やすいというのは事実であります。同じばく露量をばく露しても、背部皮膚よりも眼球のほうが浮腫が多いという経験はしております。

これは血管の数、それから、ウサギ自体は汗腺がほとんどないことも関係します。ヒトの場合、それが必ずしも当てはまるかどうかちょっと分かりませんので、今のウサギの話だというふうに御理解いただけると幸いです。

以上です。

【平田主任】 ありがとうございます。

増田先生、回答になっておりますでしょうか。

【増田構成員】 久留米大の増田です。

ありがとうございます。今のでクリアに解釈ができますので、ありがとうございます。

【平田主任】 それでは、寺尾先生、手を挙げられていますでしょうか。

【寺尾構成員】 ありがとうございます。

今、電磁波の影響について、ガイドライン、電波防護のことで、安全側に寄っているということでお話しただいて、非常に御説明はクリアだったのですけれども。

生体への影響といいますと、やっぱり表面の組織が一番ばく露量が当然多くなるということ、皮膚とか角膜、今の小島先生の非常に広範なお話もありましたが、そういった組織を調べるというのは非常にいいと思うんですが、その一方で、やっぱり筋肉とか、そういった組織への影響も、この指針では考慮に入れているという考えでよろしいのでしょうか。そうすると、もう少し深部に伝達しうるようなタイプの電磁界の影響を考慮することは、今後考えていく必要があるのでしょうか。ちょっと曖昧な質問で申し訳ありません。

【平田主任】 御質問いただきましてありがとうございます。

この辺りは、先ほど小島先生が、6 GHzから18 GHzなどの電波も、計算などによって外挿、あるいは、解釈していく必要があるのではないかとおっしゃられた点と通ずるところがあるかと思うのですが、工学系でそのような実験に携わっております日景先生、ただいまのようなコメント、いかがでしょうか。

寺尾先生から、例えば、皮膚だけになっているのかということと、筋肉まで届くような周波数帯などは検討の余地があるのかどうかというコメントをいただいております。確かに、筋肉質である方を考えると、例えば、6 GHzであれば筋肉まで到達するのかなと思ったりはするのですが、先生は実験にも携わられていらっしゃるかと思うのですが、実際のところ、皮膚が支配的になっている、あるいは、筋肉が支配的になるような周波数帯があるかどうかなど、コメントいただけないかと思ったのですが、いかがでしょうか。

【日景構成員】

ミリ波帯の周波数帯ですと、ミリ以下の侵入深さになりますので、皮膚での吸収が支配的で、その奥にある、筋肉などでの吸収は考慮しなくてもよいと思いますが、6 GHz以下の場合、皮膚や筋肉でそれぞれの組成の違いに基づいた吸収があることを考慮した検討が必要と考えています。

【平田主任】 ありがとうございます。

6 GHz以下になりますと、SARについては、深部としましては、平均組織として約2.2 cmまで考慮しております。筋肉の温度上昇まで含んだ上での指標となっておりますので、今回の議論の対象外ではございますが、十分電波防護指針で防護できるのではないかと考えております。

以上で回答になっておりますでしょうか。

【寺尾構成員】 ありがとうございます。今の御説明、非常に納得できました。

その一方で、超音波に関しては、やっぱり音波の帯域によって深部に到達しにくいというのもあるわけですけど、ちょっとビーム状にしたりすると、割と深部に到達しようというような場合もあると聞いています。そういったことはあんまりここでは考慮する必要はないという理解でよろしいでしょうか。

【平田主任】 寺尾先生、どうも御質問ありがとうございます。

そちらに関しましては、平田から確認をさせていただきたいのですが、その超音波というものは、医療機器での超音波による診断などのデバイスを想定されていますでしょうか。

【寺尾構成員】 そうです。エコー検査と言われる超音波、深部まで見ることもできるわけですけども、これを少しビーム状に収束させると、割と深部に結構強い強度で入れることもできるということで、それも臨床的に熱凝固といった形で応用されています。超音波と電磁波というのはかなり違うものかもしれませんが、そういった考えから深部に到達してしまう場合がある可能性、ちょっと特殊な場合ですけども、そういうのがないかどうかという辺りです。

【平田主任】 ありがとうございます。

そちらの診断装置に関しましては、まず電波防護指針のカバーするところではないということが1点ございます。

そして、電波でも、同様に深部のほうに集中させることはできなくはないのですが、それほど奥まで、電波では到達はしません。これはやはり途中で減衰があることにもよるのでございます。

そして、あくまでも、そういったデバイスは、体内に向けてかなり強度、皮膚表面温度もかなり上がるために、例えば、超音波装置ですと、クリームを塗ったりとか、いろいろな作業があると思います。特殊なケースで、医療目的ということで、そちらのメリットがある場合には御利用いただければとは思いますが、今回の電波防護指針の範疇ではないとの理解でございまして、それは超音波においても、自由空間中を伝搬する超音波と、医療目的の超音波の利用というのは、規則が別となっております。

以上でございます。

【寺尾構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 ほか、いかがでしょうか。

小島先生から手が挙がっていますでしょうか。

【小島構成員】 平田先生、分かりやすい御説明ありがとうございました。

スライド3をもう一度見せていただけますでしょうか。

ここで、聞き逃したのかもしれませんが、この論文で測定されている温度というのは、もし御存じでしたら、どのようなもので測定されているかというのを教えていただけますでしょうか。

【平田主任】 こちらはガイラのグループの論文だったと思うのですが、1998年のガイドラインの記載でございまして、先生方もよく御存じの2.45GHzの実験でございます。それがICNIRPのガイドラインでは、眼球の記述がありましたと。一方、2020年から、その辺りの記述もなくなっているということを客観的に御説明した次第でございます。

【小島構成員】 ありがとうございます。

ちょっと私の記憶違いかもしれませんが、ガイラが使っているのは、ガラスチューブを入れて、そこに……。

【平田主任】 そうですね。サーモプローブか何かを入れて。

【小島構成員】 あのサーモプローブ自体が電波を吸収するという事は考えられないのでしょうか。

【平田主任】 当時のものが多分残っていないと思うので、分からないのですが、ガラス自体はそれほど吸収性の高いものではないという認識は持っております。

【小島構成員】 測定のプロブ自体が、ひょっとしたら吸収しているのではないかなということ。

【平田主任】 どのような手続かは分かりませんが、そういったことがゼロではないとか、可能性としては考えられるかもしれませんが。はっきり私も立ち会っておりませんので。

【小島構成員】 分かりました。御教示ありがとうございました。

【平田主任】 ほかの先生方、いかがでしょうか。

NICTの佐々木構成員、お願いできますでしょうか。

【佐々木構成員】 すみません。NICTの佐々木です。

小島先生の25枚目のスライド、先ほどから議論に上がってございます皮膚と眼の閾値の違いですけれども。右側のスライドに記載されてございます、角膜より皮膚のほうが障害閾値が低いという部分の障害閾値です。こちらは入射電力密度のばく露の閾値というこ

とですので、御質問としてお伺いしたいのは、角膜と皮膚で、温度上昇、あるいは、温度でもいいのですけれども、熱を指標とした閾値というのがあれば、御教授いただきたい。御知見があれば御教授いただけますでしょうか。

【小島構成員】 すみません。角膜は大体42～3℃ぐらいで障害が出ると思っておりますが、皮膚で何℃というのも、ほぼほぼ、しっかり測ったわけではないのですけれども、同じような温度で障害が出たと記憶しております。

【佐々木構成員】 ありがとうございます。

もちろん、その温度で当てる時間とかも重要なパラメータだと思うので、一概には言えないと思うのですけれども。仮に障害が発生する温度が一致するという前提ですけれども、こちらのスライドの左側の図で、28GHzと60GHzで、同じ電波を当てたときに、温度上昇が皮膚と眼で変わるということは、私の記憶の中では、基本的にはレンズアンテナのようなもので、ビーム状の電波を局所的に当てるような装置が使われていたと記憶しておりますが、これは皮膚と角膜とで同じという理解でよろしかったですか。

【小島構成員】 はい。全く同じ装置を使用しております。

【佐々木構成員】 そうですか。ある程度仮定は入ると思うのですけれども、基本的には、平らなような皮膚と、ちょっと曲面を持った眼とでは、入射電力密度が一緒でも、体の中に入っていくと、今まさに議論になっている吸収電力密度といった量は恐らく変わることが理由になって、同じ電波量のときに温度上昇の差が出る。

その結果、これは温度上昇の閾値なんかも関連するので一概には言えませんが、右側の閾値の結果が逆転するというのは、はっきりと明言は難しいですが、皮膚と眼球の閾値が同じような前提、ちょっと大ざっぱな前提を入れますと、割と素直な結果、矛盾のない結果なのかなと思いましたので、一応お伝えさせていただきます。

ありがとうございました。

【小島構成員】 佐々木構成員、ありがとうございました。

今おっしゃられたことと全く同じことは、グループ内のディスカッション等によく出てまいります。御指摘のように、角膜は曲率になっていますので、ちょこっとずれると、全然影響が出ないこともございます。今おっしゃられたとおりではないかなとグループ内では想像しておりますけれども、その確証が得られるようなデータはないところです。

【佐々木構成員】 そうですね。

【小島構成員】 そういう状況です。ありがとうございました。

【佐々木構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 よろしいでしょうか。ほか、ございませんでしょうか。

それでは、小島先生の御発表と私の発表の国際ガイドライン等々との比較を踏まえた上で、皆様に御意見をいただきたい部分がございます。

この2点の発表から、現在、これまでは大変な役割をしてきておりました基礎指針4(b)でございますが、電波防護指針の入射電力密度に関する指針値が低下してきており、国際ガイドラインなどを見ますと、これらが事実上、補助指針がほぼ置き換わったというふうにも解釈できます。

その意味で、眼への入射電力密度のみを規定する基礎指針は、これを削除しても、特に安全性を損なうということはないように思うのですが、いかがでしょうか。

多氣先生、お願いいたします。

【多氣オブザーバー】 基礎指針の4(b)というのがありまして、それはかなり高い周波数の、むしろRosenthalの話が背景にあったとは思いますが、ただ、電波防護指針のときに非常に議論になったのは、カナダの 0.4 W/k g というものが新たに問題になっていたため、それについての議論が随分ありました。

その背後にあったのが、ヘンリー・キューズという人が、サルに電波を当てたときに、 2.45 GHz だったのですけれども、そのときに角膜内皮の障害が起こるという閾値が、 20 mW/cm^2 とか、パルスの場合だと 10 mW/cm^2 といった数値があったということが背後にありました。

これに関して、今日もおいでになっている上村先生が追試をされて、そのようなものは見られなかったということでしたので、そのときに一番気にしていた現象については、我が国の中で確認をした上で、問題が見つからなかったということが1つあります。そして、カナダのほうも、同じく 0.4 W/k g というものを前は入れていたけれど、これを削除しているということがあるので、少なくとも4(b)のときに問題になっていた現象の1つについては、クリアされていると考えてもいいのではないかなと私は思っています。上村先生にもコメントいただければと思うのですが、いかがでしょうか。

【上村構成員】 上村です。多氣先生、当時のことをかなり覚えておられるので感心していたのですけれども。

眼というのは、やっぱり一般的に一番弱いところだと思われていたので、それで、あつたほうがいいのではないかという気はしたのですが、最近のように吸収電力密度で置き換

えてもいいのではないかということであれば、統一してもいいかなとは思っています。安全性に関して、特に温度上昇ですね。

ただ、先ほど言ったように、曲率の問題で、眼独特に吸収の度合いが、平面と比べて曲率があるものに対しては、多少強くなるとか、そういうのであれば、何らかの低減率をつけてもいいのかなとは思っています。

以上です。

【平田主任】 ありがとうございます。

上村先生への御返答となりますが、その低減率というのが非常に不明瞭ではございます。6 GHz 以上に関しましては、ICNIRP等々では、吸収電力密度という規定になっておりまして、そして、安全側を見越した上での制限値となっておりますので、私としては、さらなる低減率というのは不要だと考えておりますが、いかがでしょうか。

【上村構成員】 全体的に十分な低減率があれば大丈夫だと思いますが、先ほど言ったように、単なる普通のほかの皮膚と眼のところとでは少し違うという現象があったというのをどのぐらい加味するかというだけの話なので、全体的な低減率が十分であれば問題ないと思います。

【平田主任】 御確認いただきましてありがとうございます。

先ほどの小島先生の論文も加味した上で、皮膚・眼球まとめてとはなりますが、その閾値の中でも低い値を用いまして、ICNIRPでもその閾値というのを定めていることは御説明したとおりです。

そして、吸収電力密度に関しましても、計算で安全側になるようなものを調べてまいりました。このときにはシステムティックなレビューを行いまして、一番悪い状況を考えていらっしゃるのが、実はNICTの佐々木構成員らが出されたモンテカルロの計算実験などもございます。こういったものを加味して導出した値で、曲面についての検討も国際的にも行われているところでございます。

そういった意味で、しっかりとした検討で、低減率ももうこれ以上必要がないと考えております。考慮していないものがあれば、当然考慮すべきかと思いますが、温度上昇に関しては、低減率が考慮されていないということは多分ないと考えておりますし、上村先生が御指摘の部分につきましては、基本的には考慮されている部分かと思っております。

以上でございます。

ここでは、特に眼球の補助指針に対する基礎指針4 (b) についてということになりま

すが、ほか、いかがでしょうか。

よろしいでしょうか。会合も短い時間でございますので、最後、もし時間がありまして、そのときにお気づきの点がございましたら、改めて御指摘いただければと思います。

それでは、次の議題の前に、1点だけ御紹介をさせていただきます。皆さんの御意見をいただいたところでございますが、生体電磁環境に関する検討会の委員で、眼科医でもいらっしゃいます、金沢医科大学の佐々木先生にも御意見を伺っております。

主なポイントとしては、国際基準と整合させるということで、安全性が損なわれるようなデータではないということをお話しいただいております。また、先ほどから上村先生からも御指摘いただいているところではございますが、眼球の重要性が損なわれたわけではないといえますか、もちろん、一番低い閾値が眼球であるということで、眼球を無視していいというわけではないということをおっしゃられていました。それは、完全に私としても同意するところでございます。

ICNIRPの議論の一端をちょっと御紹介させていただきますと、RFガイドラインが2020年に発行されましたが、それに関するデータギャップドキュメント、今後の研究課題というものを議論しております。

そのときにやはり足りなかった部分として、眼球の温度上昇の部分に関しては、動物実験による測定、そして、計算による内挿といえますか、外挿といえますか、その分析というのはやはり必要ではないかという意見を、ICNIRPの日本人以外のメンバーからもやはりいただいております。本日御紹介いただきました小島先生方のグループの研究というのは、非常に重要な役割を果たしてきたと、そして、今後も期待されているということだけは補足させていただきたいと思っております。

それでは、続きましての議事に移らせていただきたいと思います。

議事(3)でございますが、吸収電力密度の平均化面積についてでございます。こちらは、北海道大学の日景先生、そして、共同で、名古屋工業大学の小寺先生からの発表となります。

それでは、日景先生、よろしく申し上げます。

【日景構成員】 北海道大学の日景です。

前回、第13回作業班にて、小寺構成員から御紹介されて検討が決まりました吸収電力密度につきまして、今回補足的に平均化面積の内容を紹介させていただきたいと思っております。よろしく願いいたします。

それでは、次のスライドをお願いいたします。

はじめに、平均化面積の全体概要をここで紹介いたします。前回の資料にございました表を右側に再掲しております。ICNIRPガイドライン及びIEEEの規格における吸収電力密度ですが、こちらの表に示されるとおり、基本制限ということで、6GHzから300GHzまで、 $20\text{W}/\text{m}^2$ の値が基準値として示されており、その評価を行う際の平均化面積が 4cm^2 と規定されております。また、周波数帯が30GHzから上において、平均化面積を 1cm^2 とした $40\text{W}/\text{m}^2$ という値が追加的に設定されております。これらの平均化面積につきまして紹介いたします。

6GHz以下の周波数帯における局所ばく露の評価指標ではSARが用いられておりますが、10g平均の空間最大値が用いられています。一方、入射電力密度と吸収電力密度は、SARと違いまして、面的に平均を取った値を用いることとなります。すなわち、面積平均の空間最大値が用いられることが、SARとの違いとなります。

入射電力密度の面積平均最大値とは、電波が人体に入射する面を定義いたしまして、その定めた面積にわたって平均化した電力密度ということになってございます。後ほど示しますが、照射された電波の電力密度が空間的に一定の場合、いずれの面積で平均化しましても平均値は変わらないですが、局所に分布するようばく露を評価の対象とするわけですので、その切り取り方、いわゆる評価する面積の設定によって値が変わります。そのため、平均化するための面積が重要になってきます。

その平均化に用いる面積ですが、ICNIRPガイドライン、あるいは、IEEE基準でも、科学的知見に基づき、30GHz以下であれば 4cm^2 、それ以上の周波数帯で、より狭いスポット的なばく露が想定される場合には平均化面積を 1cm^2 とした評価が追加的に設定されておりその場合の許容値は2倍に設定されております。

次のスライドをお願いいたします。

こちらは、ICNIRPガイドラインとIEEE基準における記載を掲示しています。表の上がICNIRPのガイドラインになっています。下がIEEE基準になっています。

紫色の四角で囲んでいる表中の値、こちらが吸収電力密度におけるガイドラインの値を示しております。一般環境と管理環境で、それぞれ一般環境が $20\text{W}/\text{m}^2$ 、管理環境が $100\text{W}/\text{m}^2$ になっていることが分かります。表下のNote欄に以下の記載がございます。吸収電力密度に関する記載で、ICNIRPガイドラインでは、 4cm^2 の平均化面積を使うということ、また、30GHz以上で、狭領域いわゆる狭いスポットに対す

るばく露が考えられる場合には、 1 cm^2 の平均化面積を適用した上で評価すること。さらに、その場合の許容する値は 4 cm^2 の平均化面積の場合の倍の値とするということが書かれています。

その下のIEEE基準でも、同様のことが記載されておりまして、いずれもICNIRPガイドライン、IEEE基準、同じ取り扱い基準になっているということが分かります。

次のスライドをお願いいたします。

こちらが吸収電力密度の定義で、前回作業班の資料13-4から再掲させていただいているものです。右側のイラストに、局所のSARと入射電力密度、そして、吸収電力密度の概念図が書かれています。Aと書かれているのが面積を表しておりまして、Vで書かれているものが、体積を表しています。左からばく露される電波が書かれており、入射電力密度というのは、ばく露対象がないときの、その空間における電力密度になります。一方、吸収電力密度は、実際に生体に吸収される電力の面積平均ということになります。基本的には、入射電力密度に反射係数を掛け、生体に吸収される正味の電力密度の面積平均ということになります。

この図に示されるように、生体表面で吸収される電力の分布が、均一ではなく、局所的に強弱が生じる場合、こういった領域を対象として平均値を評価するかで値が変わってきます。

次のスライドをお願いいたします。

平均化面積の基本的な考え方と評価をまとめて示しています。基本的には、吸収電力密度と入射電力密度に関して、平均化面積の考え方というのは同じになりますので、左に示した図面は、本作業班第9回の入射電力密度の際に用いられた資料を再掲しています。

左上の図に示しておりますのが、一辺が 10 cm 、 2 cm 、あるいは、 1 cm の領域における 10 GHz と 30 GHz の電力密度分布を示しております。同じ面積における分布でも、周波数が 10 GHz の場合と 30 GHz の場合で異なることが分かると思います。同じ一辺 2 cm の面積で領域を切り出しその面積平均値を評価した場合でも、 10 GHz の場合と 30 GHz の場合で吸収電力の平均値が変わってくる事が分かると思います。

文献1に挙げた論文で検討されたものですが、Hashimotoらは、4素子からなるダイポールアンテナを用い、人体の頭部を模擬した多層直方体モデル近傍にダイポールアンテナを設置した場合の入射電力密度および皮膚温度上昇の関係を調査しました。その結果が、左下に書かれているグラフです。

(a)、(b)、(c)、(d) とございまして、(a) が、平均化面積を 1 c m^2 、(b) 4 c m^2 、(c) が 9 c m^2 、(d) が 20 c m^2 で平均化した入射電力密度と、それら入射電力密度に基づいて計算した温度上昇の関係が示されています。

これら結果より、周波数が高い領域において、平均化面積が 9 c m^2 あるいは 20 c m^2 の場合では特性が大きくばらついていることが分かります。すなわち、入射電力密度と温度上昇の相関性が悪くなることが分かります。

一方、平均化面積を 1 c m^2 とした (a)、あるいは、 4 c m^2 とした (b) のグラフですと、周波数帯によらず、おおよそ一定の特性になっており、温度上昇との相関性が高いことが分かると思います。

また、Foster らも、2次元皮膚単層モデルを用いまして、理論的な解析から平均化の面積を 1 c m^2 から 4 c m^2 の範囲にした場合に、入射電力密度と皮膚の温度上昇というのは良い相関が得られるという結果を出しました。

最大温度上昇とよく相関する 4 c m^2 の平均化面積というのが、これらによって提案されたということです。ただし、 30 GHz 以上で、非常に狭い領域のビームを考慮し 1 c m^2 の平均化面積に対する指標が追加で設定されたということがございます。

次の資料をお願いいたします。

先ほど示しましたのは入射電力密度の特性でしたが、ここでは吸収電力密度を評価した例を示しております。示しておりますのは、IEEE の ICES の TC 95、第6小委員会で行われました、吸収電力密度を複数の研究機関で条件をそろえ比較計算した Intercomparison Study の結果です。

評価内容は、形状を単純化した人体モデルの近傍にダイポールアンテナ、あるいは、ダイポールアレーアンテナを配置し吸収電力密度を計算したものです。

11 の機関で得た値をそれぞれプロットしているのが、左下のグラフになります。複数の研究機関で行われた結果が、おおよそ一致した値が得られるということが分かります。

各グラフは、左から 10 GHz 、 30 GHz 、 90 GHz の特性を、上の段は平均化面積が 1 c m^2 、下の段は平均化面積を 4 c m^2 として評価した結果です。

ダイポールアンテナを対象としたばく露シナリオにおいて、11 の研究機関でおおよそ一致した結果が得られていること。さらに、ダイポールアレーアンテナを対象としたばく露シナリオでも、それぞれの 10 GHz 、 30 GHz 、 90 GHz において、11 機関の相対標準偏差が 42.55% 、 29.55% 、 16.7% でおおよそ一致した結果が得られ

た結果になります。

これら特性において、上の段が 1 c m^2 の平均化面積、下の段が 4 c m^2 の平均化面積で求められたものですが、 1 c m^2 当たりの平均化を用いた上の段の値が、いずれも大きな値になっていることが分かります。吸収電力密度分布が狭い領域に集中しているような場合、 1 c m^2 の面積で平均化することで細かい領域での評価が可能となり、大きな平均化面積を用いた場合と値の違いが生じることが分かります。

次のスライドをお願いいたします。

平均化面積と吸収電力密度の関係です。Fosterらの理論的な検討、名工大のFunahashiらの3次元人体モデルに基づいた数値計算による検討を示しています。

Fosterらは平均化面積を小さくした場合に温度上昇との相関が変わるということ、局在化したばく露に対して温度上昇は平均化面積の平方根で小さくなるということを示した結果となっています。Funahashiらは、下に示したような実際的なモデルを使って検討を行っています。人体の頭部モデルの側頭部に、ダイポールアンテナか、あるいは、実機モデルに近いパッチアンテナを放射源として、それぞれ周波数を変えて吸収電力密度と温度上昇の関係を評価したものです。

図5は、吸収電力密度と温度上昇の関係についてダイポールアレイアンテナとパッチアンテナで比較したものです。平均化面積 1 c m^2 と 4 c m^2 の特性を比較した結果、平均化面積 4 c m^2 の特性において、 1 c m^2 の平均化面積では生じない吸収電力密度と温度上昇の相関の乖離が場合によって生じるということが分かります。このように、 1 c m^2 の平均化面積を用いなければいけない場合があることが分かります。

また、図8は各周波数において、吸収電力密度の基準を満足する場合の許容放射電力を評価したグラフです。平均化面積を 4 c m^2 とし上限値を 20 W/m^2 とした場合、さらに、平均化面積を 1 c m^2 とし上限値を 40 W/m^2 とした場合で、おおよそ同じ許容入射電力となっていることが分かります。平均化面積 1 c m^2 の許容値が平均化面積 4 c m^2 の2倍とする根拠と考えられるものです。

次のスライドをお願いいたします。

結びになります。電力吸収が表層組織に集中する6GHz超の周波数領域では、吸収電力密度が最大温度上昇と相関がよいことは、前回作業班資料で小寺構成員から御紹介されたとおりです。

30GHz以上の周波数帯での非常に狭いビームばく露に関する制限、これについては、

平均化面積が 1 cm^2 の場合で補完されるのであれば、 300 GHz までの周波数帯において、 4 cm^2 の平均化面積は妥当であろうということになっています。

また、この平均化面積 1 cm^2 といいますのは、先ほどの平田主任からの御紹介にありましたとおり、光のガイドラインの平均化面積とも連続するもので、連続性が確保されることとなります。

以上になります。

【平田主任】 それでは、日景先生、どうもありがとうございました。

それでは、ただいまの御説明に対しまして、構成員の方から御質問などがございましたら、御発言をお願いいたします。

佐々木先生、お願いいたします。

【佐々木構成員】 日景先生、NICTの佐々木です。大変丁寧な御説明ありがとうございました。

確認になるのですけれども、今回 1 cm^2 と 4 cm^2 の話でまとめていただきましたが、御説明にあったように、やはり 30 GHz 超の周波数につきましては、両方満足しなければいけないという理解でよろしかったでしょうか。

【日景構成員】 基本的にはそうです。追加的に設定されている平均化面積 1 cm^2 当たりのガイドラインですので、基本的には、両方満足しなければいけないという理解です。

【佐々木構成員】 そういった御説明をいただいたのが、Foster先生のところですよね。分かりました。ありがとうございます。そこを確認させていただきたかったわけでございます。

【日景構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 ほか、いかがでしょうか。

それでは、多氣先生、お願いいたします。

【多氣オブザーバー】 すみません。ほかから質問がなかったので、ちょっとつなぎのように質問させてください。

ちょっと細かい話になってしまうのですけれども、3ページだったか、ICNIRPとIEEEの定義が書いてあります。IEEEのほうは式で書いてくれていないのですが、これはどのような式で書くのかなというのが1つの質問です。もう1つの質問ですが、この定義に従うと、次のページの図にあるような直方体みたいな領域だったら、今のでいいのですけれども、7ページにヒトの頭で書いてありました。そうすると、DESというべ

クトルがあっち向いたりこっち向いたりするわけで、曲面の面積もどのように 4 cm^2 とか 1 cm^2 とか決めたのかなという、細かいことが気になってしまいますが、その辺りについて、御説明いただけないでしょうか。

【日景構成員】 ありがとうございます。

まず I E E E 基準のほうは、先生御存じのとおり、文章で書かれています。この次のスライドの記載、こちらがまさに I E E E のほうで書かれているものなので、こちらから数式化しなければいけないというところがあるということです。

それから、先生御存じのとおり、曲面は、非常に取扱いが難しいです。まだ計算手法でやっているときでも、どういった面を垂直面として取っていくのか、法線方向として取るのかですとか、あるいは、どういった形で最大値を指していくのかですとか、そういったところはまだ検討中の部分があると思います。

ここの部分は補足していただければと思うのですけれども、佐々木構成員、お願いします。

【佐々木構成員】 すみません。N I C T の佐々木です。多氣先生、非常に鋭い御指摘ありがとうございます。

まず定義ですけれども、日景先生が御説明いただいたとおりではございますが、私も、文章だけで I C N I R P の式と一緒になのかというのは、やはり疑問に思うところはございます。これはオフィシャルではございませんが、名前の Epithelial Power Density と Absorbed Power Density の違いはありますけれども、両者の定義は一致だという御説明を、I E E E / I C E S T C 9 5 の委員長から伺ってございます。

2 点目、曲面の話は、やはり日景先生おっしゃるように、難しいところでございます。こちらはプロダクトスタンダードのほうで現在議論されている部分もございますので、そちらの進展を踏まえて、本作業班で議論すべきかどうかというのは、平田主任の考えもあるかと思えます。基本的には、S A R のときも立方体の話もあったと思えますけれども、曲面に対して立方体をどう取るか、そこはプロダクトスタンダードの部分なので、どう担保するために定義するのかというのがポイントになるかと思ってございます。

すみません。明確なお答えにはなっていないかと思えますが、こういった御回答でよろしいでしょうか。

【多氣オブザーバー】 ありがとうございます。難しいということがよく分かりました。

【佐々木構成員】 すみません。ありがとうございます。

【日景構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 平田から少し補足させていただきますと、基本的にはやはりプロダクトスタンダードのほうで議論するというのは、これまでも実施されてきたことでございます。ICNIRPのほうでも、2020年版ですと、SARが立方体と書かれていますが、それをどう処理するかというところまでは記載されておりません。そういった意味では、歴史的に考えて、それがすごく変わっていることかということ、そういうわけでもございません。

曲面については、実は検討はされています。それをスタンダードとしてどうするかというと、プロダクトスタンダードのほうで考えることだとは思いますが、そのばらつきというのは、少なくとも2割未満程度の値が出ておりました、文献を紹介させていただくことは可能ですし、実際、そういったことがIEEE/ICESの委員会のワーキンググループでも比較計算などがなされているのが状況でございます。

以上です。

【多氣オブザーバー】 ありがとうございます。

平田先生、とても丁寧にやられていることは承知しておりますので、十分納得いたしました。ありがとうございました。

【平田主任】 ほか、いかがでしょうか。よろしいでしょうか。

それでは、日景先生、どうもありがとうございました。

【日景構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 それでは、続きましては、議事（4）電波ばく露によるストレス応答マーカーの変動についてでございますが、こちらは佐賀大学の松本先生から御報告いただきます。よろしく願いいたします。

【松本構成員】 よろしく願いいたします。佐賀大学の松本です。

私からは、電波ばく露によるストレス応答マーカーの変動について御報告させていただきます。令和元年から4年にかけて行った研究の一部でございます、私自身は公衆衛生学が専門であります。御報告させていただきます。

次、お願いいたします。

タイトルの「ストレス応答」ですけれども、これは生命を保つのに必須のシステムでありまして、例えば、怖いことがあったときに、心臓がバクバクして緊張状態を保って、いつでも逃げられるようにしないとイケないし、エネルギーがすぐ使えないとイケませんの

で、そういう体の変化が必要になるわけです。あるいは、暑い日が急に来了。そうしたら、夏に向けて体を変えていかんといかんということです。こういう変化を促す変化の結果をストレス応答と呼んでいます。次のページをお願いいたします。

これが一番よく知られているストレス応答の経路になりますけれども、ストレッサーを脳が関知したときに、最初に動くのが自律神経系と。交感神経系のノルアドレナリン、あるいは、アドレナリン、脳の神経伝達物質、ホルモンでもありますけれども、これが分泌されて、例えば、アドレナリンは心臓をバクバクするというのはよく知られていると思います。そして、少し遅れて副腎皮質から糖質コルチコイド、ラットではコルチコステロンになりますけれども、これが分泌されて血糖値を上げてくれるといったような働きがあります。こういう状態では体の中に酸化ストレスがたくさん生じますけれども、これがシグナルとなって体の変化が起こってくるという仕組みがございます。

次、お願いします。

このストレッサーが、いいものなのか、悪いものなのかということをお話ししないといけないのかなということで作ったスライドなのですけれども、大体的場合は、好ましいストレッサー、不可欠なストレッサーだと思うのですが、こういうような運動とか、温浴とか、生活の張りみみたいなところのストレス、こういうものが私たちの体を、先ほどの役者、糖質コルチコイドとか、アドレナリンとかを介して、私たちの体を健康に保ってくれる。

一方で、これの度が過ぎますと体を壊すということですが、ストレス応答のシステムが壊れてしまって、例えば、糖質コルチコイドが出ないといけないうちに出ないといったようなことが起こると、それによって病気になっていくということが知られています。

次、お願いいたします。

先ほど出てきたこれらのマーカー、うちで測るのを得意としておりまして、測ったのですけれども、このマーカーを測定する目的は大体2つあります。1つが、ストレッサーを身体がどういうふうに感知しているのかを「見える化」するという。2つ目は、負荷試験を例えばやってみて、ストレスにちゃんと応答するのかなと、病気のインディケータを得るみたいなところでやる。本研究は1つ目が目的でございます。

次、お願いします。

本研究の目的は、5Gシステムで用いられる準ミリ波には、熱的影響は、先ほどから示されているとおりに確実にあるので、ストレッサーであることは確かなのだけれども、そ

れだけでいいのか、ストレス応答のパターンを見てみたい、熱的影響でこれらが説明できるのか、暑熱環境の重なりが影響するのかどうか、深部体温1℃上昇ガイドラインと関連するのか見たいというところが目的で行ったところでございます。

次、お願いします。

ばく露実験ですけれども、表1を御覧いただきますと、通常のお部屋と暑熱のお部屋でやった、高温多湿のお部屋でやったということがお示ししていますけれども、全身平均SARでいくと、0W/kg、3.7W/kg、7.2W/kgの3条件をやっています。暑熱のお部屋の場合には、3.7W/kgですごく体温が上がってしまいますので、2条件です。

ラットをアクリルホルダーの中に入れて、しっかりミリ波を当てていきます。28GHzで40分、ばく露して、そして、検体を採取して、検体の採取は、ばく露よりも前の日、それから、直前、直後、数時間後、後日なのですけれども、尿のほうはちょっと取るのが難しく、欠損値が多く出ました。

次、お願いします。

得られたデータを、繰り返し測定を考慮した混合モデルで検証してまいりました。

ちょっと飛ばします。次、お願いします。

結果、まず体温ですけれども、サーモグラフィーで見ますと、0W/kgのところはほとんど変わっていませんけれども、7.2W/kgでは明らかに赤くなっています。

それで、下に終了時の体温をプロットしています。左から直腸温、皮膚の表面、尾の表面とあるのですけれども、直腸温度だけ御紹介させていただきます。

横軸がSARで、0W/kg、3.7W/kg、7.2W/kgと、右側は、赤いプロットが暑熱です。青いシェードをつけたところが正常体温域になっていまして、0W/kgではここに収まっているのですけれども、そのほかは終了時体温が非常に上がってしまっています。

次、お願いします。

これがメインの結果の1つですけれども、尿中のノルアドレナリン値の生データをプロットしています。左の4つのカラム、1個のカラムが1つの条件を表していきまして、0W/kg、その次が0W/kgの暑熱のお部屋でやった群、3.7W/kg、3.7W/kg暑熱ですね。左の4つは、ラットに対しましてアクリルホルダーへの馴化処置を前もって行ったので、右側の3つと別々にプロットしています。縦軸がノルアドレナリン、横軸が

時系列になっております。S t a r tと書いてあるところがばく露のスタート、E n dがばく露後です。

何も当てていないのに、拘束ストレスだと思うのですが、0 W / k gのところ、一番左のカラムを見ていただきますと、ぐーんと上がっています。これが、その次、右のカラムを見ていただきますと、暑熱のお部屋でやると、この上がりが抑制されています。ミリ波を当てた3.7 W / k g、そのお隣を見ていただきますと、0 W / k gと比べまして、ほんのちょっと抑制されていて、そのお隣、3.7 W / k gのh e a tのところを見ていただきますと、うんと抑制されています。というわけで、統計学的に有意なミリ波の影響があって、暑熱の影響があったということです。

赤丸で囲ったところだけちょっと抜き出して、右の下にプロットしています。ドーズレスポンスが見やすいようにと思ひましてプロットしたもので、横軸がS A Rになっています。黒丸が通常のお部屋のものですけれども、きれいにドーズレスポンスが見えています。赤の丸は暑熱のお部屋でやったものですけれども、こちらのほうがカーブが急ですけれども、一応統計学的に有意な交互作用がなかったので、結論としては、ミリ波と暑熱、これが加算的にこの拘束ストレスに対する応答を減弱していた、弱めていたと考えています。

次、お願いします。

次は血清コルチコステロンですけれども、こちらも先ほどと同じように、S t a r tからE n dにかけてぐーんと、0 W / k gのところでも上がっていますが、これは暑熱でもミリ波でもあまりはっきりした影響が見えないんですけれども、今度、先ほどと違ひまして、D a y 1とD a y 3のプロットが増えております。血清はこの辺を採ったということで。D a y 1でnが3、D a y 3でnが3で、ちょっとnが少なくて、パワーが少ないのですが、後日に拘束ストレスらしきピークがあって、大体これのピークがミリ波を当てたラットで強まっていたということでございまして、こちらも後日値だけ抜き出して、プロットを右下にしておりますけれども、こういったような結果になっております。

次、お願いいたします。

次、お願いします。

次、酸化ストレスですけれども、こちらははっきりとした関連が見られませんでした。

次、お願いします。

先ほどのストレス応答マーカー、動いていた。体温との関連を見てみたのですが、それぞれに体温指標と関連が強くて、やはり熱的影響なのかなというところでもございました。

コルチコステロンだけ、ちょっと角度を変えた図を作成しております、御紹介させていただいております。こちらにも直腸と皮膚と尾の表面温度、3つカラムを作っておりますけれども、一番右の直腸だけ御紹介させていただきます。横軸が、先ほどと違いまして、ばく露条件関係なしに見ていただきたいです。直腸、ばく露実験の前後で変化量を取りまして、 ΔT が小さい順に並べました。それを4群に4等分しています。クォータイルの1からクォータイルの4に並べたということです。

クォータイル3と4、赤いシェードをつけたところは、直腸の変化が 1°C を超えるラットたちです。ここ、クォータイル1、2は、コルチコステロンの値は変わっていませんが、ここで上がってきています。やっぱり直腸温度の変化が 1°C を超えるというのは、体にとって負担が大きい、ストレスラーとして大きいということが、このコルチコステロンから示唆されました。

次、お願いいたします。

考察ですけれども、「拘束ストレスに対するストレス応答」に対して、ミリ波、あるいは、暑熱の影響が見られました。

このばく露量をコントロールするために拘束したわけなので、ミリ波単独の影響は検証できなかったということになります。

体温との関連からは、やはりストレスラーとしては、この熱なのかなということでした。

暑熱環境の実験から、深部体温の 1°C 上昇が早くなるということが明らかに示されていますので、環境の重要性が示されました。

そして、ガイドラインの深部体温 1°C 上昇に対応する電波ばく露レベル、30分間平均で $4\text{W}/\text{kg}$ というところが、 28GHz においても妥当であることが裏づけられたと考えております。

以上です。ありがとうございました。

【平田主任】 松本先生、どうもありがとうございました。

それでは、ただいまの御発表に対しまして、御質問などございますでしょうか。

日景先生、お願いいたします。

【日景構成員】 松本先生、御教授ありがとうございました。

2つございます。この評価をした際、大体何匹ぐらいのラットを使った評価結果なのかという点と、それから、このストレスの評価法が実際にヒトには適用できるのかどうかと

いう点、この2点で教えていただきたいのですけれども。

【松本構成員】 ありがとうございます。

1点目のnは、8が目標だったかと思いますが、そのぐらいです。Day 1、Day 3はnが3ずつしかありません。

そして、ヒトへの拡大という点に関しましては、やはり熱に対して恒常性の保ち方という面では、かなり違うと思っています。まず毛が生えていませんし、汗腺がヒトの場合にはあちこちにある、全然違うシステムになっているので、なかなかヒトへの外挿には制限があるのかなと考えております。

【日景構成員】 ありがとうございます。

あと、この評価する試薬なり何なりをヒトに対応させることはできるものですか。

【松本構成員】 これはできます。

【日景構成員】 できるのですね。

【松本構成員】 コルチコステロンに関しましては、ヒトでは代わりにコルチゾールを測るようにしております、うちで開発した方法がございますので、評価しております。今、進めているところです。

【日景構成員】 ありがとうございます。

【平田主任】 それでは、寺尾先生、お願いできますでしょうか。

【寺尾構成員】 大変興味深い発表、ありがとうございました。

深部体温が1℃上がったということで、すごいなと思ったのですけれども。ヒトで深部体温1℃上がるというのは、やっぱり風邪をひいて上がるとか、ある程度、相当強い反応みたいに思うのですが、ラットの場合はどうなのでしょう。そのぐらいは何らかの操作で上がるということは割とあることでしょうか。

【松本構成員】 ありがとうございます。

私がラットは素人なものですから、増田先生、何かコメントございますでしょうか。

【増田構成員】 久留米大学の増田です。御質問ありがとうございます。

ラットでも、さすがにこういった環境に直接ばく露されることはまずないということで、あと、たとえばく露されても、体温調節の機能が働いて、37℃に保つように、特に尻尾等を使って保つようにしているという形です。

以上です。

【寺尾構成員】 ありがとうございます。

あと、もう1点だけ、すみません。今見せていただいたところで、深部体温も上がったし、コルチコステロンも上昇したということで、その起こっている現象というのは、視床下部で起こっているという考えでよろしいのでしょうか。その場合、交感神経系も、最初に図を示していただきましたけれど、交感神経も刺激されて、カテコールアミン系も上がるというような反応が見られるというような理解でよろしいのでしょうか。

【松本構成員】 ありがとうございます。

基本的にはそういうストレス応答が出てくるはずのところ、結局、体温の調整のために、カテコールアミンのノルアドレナリンもアドレナリンも上がっているのですけれども、このノルアドレナリンが体温調節にもどうも関わっているようです。これはノルアドレナリンの上がり、熱いお部屋とか、ミリ波が当たった場合に邪魔になるようで、これが抑制されていたと、そういうような知見になっております。

だから、どのようなことに結びつくのかというのは、解釈が難しいのですけれども、こういうような形になっております。

【寺尾構成員】 ありがとうございました。

【平田主任】 ほか、いかがでございましょうか。

それでは、小島先生、お願いできますでしょうか。

【小島構成員】 金沢医大の小島でございます。

ちょっと教えていただきたいのですが、2点ほどございます。

1点目は、アクリル製の保定器に入れられるときに、麻酔の有無を教えていただきたいのが1点目です。

【松本構成員】 一時的にイソフルランで軽く麻酔していると思います。増田先生、違っていたら御発言いただきたいですけど。

【増田構成員】 久留米大学の増田です。

そのとおりです。一時的に麻酔をかけて、その後、麻酔が覚めてから実験を行うという形を取っております。

【小島構成員】 分かりました。

2点目は、ちょっと技術的な話です。温度の測定方法で、確か御発表中に、サーモグラフィで測っていらっしゃるというお話でしたけれども、深部体温は直腸か何かの温度を測られているのでしょうか。

【松本構成員】 増田先生、お願いできますでしょうか。

【増田構成員】 同じく、御質問ありがとうございます。

サーモグラフィーと、それから、ファイバー温度計と両方使いまして測っております。先生のおっしゃるとおり、直腸温はファイバー温度計のほうで測っております。

【小島構成員】 分かりました。ありがとうございました。

【牛山主任代理】 牛山ですけど、よろしいですか。

【平田主任】 牛山先生、お願いいたします。

【牛山主任代理】 すみません。発表ありがとうございました。

簡単な質問で恐縮ですけれども、直腸温が上がることについては、28GHzの性質を考えると、やはり熱、血流に乗って運ばれて直腸温が上がったという理解でいいのかというのが1つ。

あと、もう1つは、事前馴化の指標については、何をもちいて事前馴化が完了したと考えるのかが2つ目の質問です。お願いします。

【松本構成員】 ありがとうございます。

こちら増田先生からお答えいただいたほうがいいのかと思います。

【増田構成員】 久留米大学の増田です。御質問ありがとうございます。

まず1点目の熱の体温上昇に関しては、今、牛山先生がおっしゃったとおりで、まず背中中の皮膚が加温されて、それが血流に乗って体温に反映していると考えております。その証拠として、実は、このとき、ちょっとデータにも出ていましたが、尻尾の温度も上昇していきまして、これは完全に血流の影響ということで、全身的に血流の循環が高まっていると考えております。

それから、もう1つの馴化の話ですけれども、これはラットに聞いてみないと分からないところがあって、難しいです。1つの基準としては、アクリルホルダーに入れたときの暴れ具合というのをまず見ております。

それで、正直なところ、本当は馴化をしたら、ここに今示されているノルアドレナリンが上昇しないという仮説を立てていたのですが、馴化をしてもノルアドレナリンが上がるということも分かりましたので、逆に言えば、このデータが、この電磁界とは関係ない部分では役に立つというふうになっております。

以上です。

【牛山主任代理】 ありがとうございました。

あと、すみません。もう1点、40分というばく露時間というのは、どうして40分を

選択されたのかというのを教えてください。

【増田構成員】 40分というのは、まさに全身平均SARの時間が30分ということで、その30分を目指してデータを取っていましたが、ちょっと後半の温度上昇が変わるのではないかとということで、プラス10分加えて、それで、どの辺りで体温が安定するかというのを見たかったので、40分ということでさせていただきました。

【牛山主任代理】 ありがとうございます。

【平田主任】 ほか、よろしいでしょうか。

多氣先生、お願いできますでしょうか。

【多氣オブザーバー】 すみません。私も質問させてください。

まず初めに確認ですけれども、ホルダーの中に入れたときに、フレッシュエアは供給しているのでしょうか。これは増田先生ですね。

【増田構成員】 ありがとうございます。

フレッシュエアを供給しております。

【多氣オブザーバー】 分かりました。

総務省で発がん性の試験を何度も何度も実施していますが、今までのものを見ていますと、イニシエーションプロモーションの発がん性試験だったのですけれども、どれも一番発がんが多いのが0W/kgで拘束しているものです。電波が当たっていると、ほぼ同じか、ちょっと少ない、かなり少なかつたりもするということが今までの経験なので、やっぱりストレスの話とばく露の話をこうやって実験していただいたのはとても興味深いなと思って聞かせていただきました。とても興味深かったです。ありがとうございます。

以上です。

【平田主任】 ほか、いかがでしょうか。よろしいでしょうか。

それでは、松本先生、どうもありがとうございました。

【松本構成員】 どうもありがとうございました。

【平田主任】 それでは、本日の議事が全て終了ということで、その他事項に移らせていただきたいと思います。

今回、構成員の皆様方に、当初予定をしておりました項目については、一度ざっと御紹介させていただいたつもりでございますが、全体を通して御発言などの希望がございましたら、よろしくお願いたします。

よろしいでしょうか。

それでは、私から御提案という形になります。かなりの部分がもう御紹介できたかと思っております、これまでの議論を少し整理させていただく時間を手短かに頂戴できたらと思っております。

これまで吸収電力密度の導入、そして、その平均化面積につきましては、本日も御紹介いただきました。入射電力密度につきましても議論をさせていただき、ただ、入射電力密度につきましては、ほかの周波数等々も勘案いたしますと、まだ完全に国際基準と整合が取れていない部分もあるという課題があるということも御紹介をさせていただきました。

そして、本日でございますが、基礎指針については、4（b）については、国際動向を鑑みますと、眼球のみをフォーカスした形ではなくて、指針値を適切な値に設定することによって、十分安全性を担保できるのではないかといった議論がなされてまいりました。

ここままで認識が違う意見があるということがございましたら、まず御発言いただきたいのですが、いかがでしょうか。よろしいでしょうか。

それでは、こちらの状況を考えまして、論点の整理のほうを準備させていただきたいと思っております。これまでの御発表いただきました構成員の皆様、そして、関連の構成員の皆様からインプットをいただきながら整理をしていきたいと思っておりますので、引き続きよろしくお願いたします。

また、非常に多岐にわたる議論をこの作業班では行わせていただいておりますので、もしお気づきの点、見落としの点がございましたら、事務局、あるいは私に直接でもよいので、御連絡いただければと思っております。よろしいでしょうか。

それでは、最後に、閉会に当たって事務局から連絡事項をお願いいたします。

【藤原課長補佐】 電波環境課の藤原でございます。

先ほど平田主任から御発言いただきましたとおり、論点整理を行う方向で、事務局としても進めていきたいと思っております。

次回の作業班の開催日時につきましては、改めてメールで御案内させていただきたいと思っております。

本日は誠にありがとうございました。

【平田主任】 それでは、これにて第14回電波防護指針の在り方に関する検討作業班を終了いたします。本日は、長い間お疲れさまでした。ありがとうございました。

以上