

〔論 説〕

ヒト半球睡眠の実験的検討

関 口 雄 祐

1. はじめに

動物の行動の中で最も機能的に卓越しているのが睡眠であると Lima (2005) は述べている。睡眠以外のすべての生命活動が、消耗する行動であるのに対して、睡眠は唯一、回復を目的とする行動であるからだ (Lima 2005)。しかし、その回復のための睡眠に関連する一連のプロセスは、覚醒中の行動をもリスクにさらす。睡眠中はもちろんのこと、眠気の出現・居眠り・覚醒直後は、いずれも認知・認識能力が低下し、ヒヤリとしようがハットしようが、ヒューマンエラー (誤判断・誤操作) の生起確率が高まる (Sekiguchi et al. 2007 ほか)。

徹夜明けや寝不足の蓄積が、注意力低下・記憶力低下・単純ミス増加など学習効率や作業効率を悪化させる要因であることは、経験的に理解できるものだが、その程度は明らかではなかった。Dongen (2003) は、2週間の減眠生活と3日間の断眠生活の間、認知 (覚醒度、注意力、計算力など) テストを行い、一日あたり4時間、6時間の減眠生活では、それぞれ6日間、10日間の連続で徹夜と同等まで認知能力が低下することを示した。認知能力の消耗と回復とのバランスが、消耗に大きく傾き“累積赤字 (cumulative deficit)”により睡眠負債 (sleep debt) が生じると説明している (Dongen 2003)。

このような睡眠負債が、肉体的精神的に過剰な負荷として累積し続けることで、命にかかわる種々の疾患を引き起こすことが明らかになっている (原田 2012 など)。肉体的にはまず、血管系に過緊張が持続することで負荷がかかり、高血圧、心疾患、脳梗塞、糖尿病の要因となる。同様に神経細胞に対しても緊張状態の継続が負荷となり正常機能の維持が困難となる結果、うつ病、痴ほう症などの遠因ともなる。さらに悪性腫瘍 (がん) の増悪にも睡眠負債が関わるとされる。このように、睡眠負債が質的に体に悪影響を与えることは理解が広まっているが、量的な理解、たとえば、どの程度の睡眠負債が、どの程度の糖尿病にどれだけのリスクで関わっているのか、詳細な因果関係は未だ明らかになっていない。内山 (2012) の試算よれば、不良な睡眠が引き起こす経済損失は年間 3.5 兆円と見積もられている。社会経済的な損失とともに、個人レベル・家族レベルで QOL が低下することも、隠れた大きな損失と言える。

睡眠負債が二つの大きな社会的損失と負担に影響を及ぼす。ひとつは、各種疾患が発症していない段階で生じる、作業効率低下や事故率上昇などの生産性の損失である。ふたつには、発症後の医療費・介護費の増加の負担である。本稿では、前段の「生産性の損失」に着目し、その回避の方法を探る。とくに急激かつ突発的な眠気による事故等を防ぐ手段について検討を加えていく。

一日の中でも、覚醒時間が長くなるほど、認知能力の低下は進んでいく。比較のために、

長時間覚醒と飲酒を比較した研究がある (Dawson 1997)。血中アルコール濃度 0.05% (呼気中アルコール濃度が 0.25mg/L に相当；酒気帯び運転の基準は同 0.15mg/L) は、統計的に自動車運転時の事故率が非飲酒時の 2 倍になる値である。この状態と 17 時間の連続覚醒の状態では、作業効率が同等との結果が出ている。Dawson (1997) の実験では、朝 8 時に起床し、17 時間後は夜中の 1 時、多くの人にありえる状況である。日常的な連続覚醒の状態ですえも、酒気帯び状態よりもはるかに認知能力が低下してしまう。

さまざまな疾患の要因となる睡眠負債の解消が中長期的には必要とされるが、長時間覚醒による突発的な居眠りによる事故が甚大な被害を生じた例も多くある。スペースシャトル・チャレンジャー号の爆発事故 (1986 年)、タンカー座礁によるアラスカ沖での原油流出事件 (1989 年)、山陽新幹線及び名鉄における運転操作ミスによる事故 (2003 年)、関越道での高速バス防護壁衝突 (2012 年) など、眠ってはいけない状況で眠ってしまう、すなわち眠気の高まりがクリティカルポイントを超えて居眠りしてしまうことが、多くの悲惨な結果を導いてきた。本稿では、「生産性の損失」に焦点をあてるが、特に居眠りの生起を減らす、つまり眠気の高まりがクリティカルポイントを超えさせないための手段として US (Unihemispheric Sleep；半球睡眠) 法を提案し、その検証を行う。

2. 方法

2.1. US 法提案の背景

感覚器の中で嗅覚に対する依存性が高い哺乳類の中で、視覚が発達しているヒトにおいては、視覚入力が脳機能 (神経活動) に大きく影響する。通常覚醒時、ヒトの脳波は 13Hz 以上の β 波優位であるが、目を閉じるだけでより周波数の低い (より休息的な；大脳の同期性が高い状態) 8~13Hz の α 波優位に顕著に変化する。視覚入力を遮断することにより、神経活動が減少し、脳の覚醒レベルも低下すると言える。覚醒レベルの低下は、脳神経活動の同期性の高まりを表し、脳波は高振幅性となることから、相対的に脳機能の回復 (睡眠) 効果が生じると仮定した。つまり、通常、覚醒している時は、疲労の蓄積が進むが、視覚の制限により覚醒を維持しつつ疲労の回復を見込めると仮定する。

「信号待ちでは、乗客に見つからないように片目だけつぶって休んだ。片目だけでもつぶってれば、ちょっとは違う (2013 年 6 月 28 日 朝日新聞生活面)」長距離バス運転手の過重労働による事故が続く、勤務実態についてバス運転手をインタビューした記事中のコメントがある。これを受けて、筆者が長距離運転者などを対象にインタビューすると、「片目で休む」に対してへ賛同意見が複数あった。

さらに、導入の予備実験として、片目に眼帯を装着し夜間覚醒を維持させる実験を数名に対して行った (関口ら 未発表)。その結果、深夜よりも明け方に問題誤答率が低下 (対照群とした通常の状態では、深夜より明け方に誤答率上昇) した被験者が数名確認できた。このことから、片目への視覚入力を制限することで、睡眠 (回復) の効果が得られる可能性が示された。

神経細胞を直接実験操作することで、確実な半球睡眠状態を設定することが理想的ではあるが、応用の実現性は乏しい。US 法により、視覚入力を制限することにより疑似的な半球睡眠状態を生起させることで、軽度の半球睡眠状態を生起できると考えた。

2.2. 半球睡眠について

半球睡眠とは、鳥類や鯨類で知られている睡眠の様式で、左右の大脳半球の一方が交互に睡眠状態に陥る状態をいう。睡眠状態では、記録される脳波が4~8Hzのシータ波や4Hz以下のデルタ波（徐波）が優位となる。半球睡眠では、「大脳半球が交互に」睡眠状態となる。右脳・左脳と言われるように、大脳は、中心部の大きな裂け目である大脳縦裂を境に、左右のふたつに分けられる。それぞれを右半球・左半球と言い、両者は脳梁という組織で繋がれている。半球睡眠を行うイルカの脳波計測を行うと、右半球で睡眠状態（徐波）が、左半球で覚醒状態（速波）の記録が数分間続いた後、1分足らずの間に、左右の状態が交代し左半球が睡眠、右半球が覚醒となる「半球睡眠」が記録される。その際、睡眠中の半球と対側の目は閉じており、覚醒している半球と対側の目は開いている。半球睡眠中は、大脳機能の半分が覚醒しているため、外敵に対する警戒を緩めることなく眠る（回復する）ことができる、群れからはぐれることなく泳ぎ続けることができるとされている（関口 2019 ほか）。

本稿では、ヒトにおいても、疑似的半球睡眠で部分的に生じる回復機能が、全体的な疲労を遅延あるいは減少させる（半球睡眠効果）と考えて、後述するような複数の状況を想定した対象に複数の実験方法を組みあわせることにより、日中・就床前の眠気の減少、長時間覚醒後の認知機能低下の抑制をベンチマークとして客観的な評価を試みた。

先述した、居眠りを直接の原因とする事故では、クリティカルポイントを超えて居眠りしたその瞬間、脳全体の認知機能が著しく低下してしまっている。その状況が生じることを防ぐことができれば、突発的な事故を減少させることが可能となる。そこで、半球睡眠を応用することによって、クリティカルポイントを超えさせない、つまり認知機能の低下を妨げることが可能になると仮定し、US法の検証実験を進めた。

2.3. US法の手順；疑似的半球睡眠様状態を仮定

両目に眼帯やアイマスクを装着し視覚系の情報入力を閉ざすことで、脳波の変化が生じる（覚醒時のベータ波優位から、アルファ波優位に変化）ことは古くから知られてきた。しかし、睡眠脳波とされる4~8Hzのシータ波や4Hz以下のデルタ波と周波数帯域が異なること、睡眠時には目を閉じる蓋然性の高さなどから、視覚入力と睡眠脳波との関係は詳しく調べられていない。ただし、視覚を閉ざすことが眠りを惹起することは、生理的な解釈として妥当であろう。同様に、覚醒状態を維持するには、閉眼よりも開眼状態が必要だとすることも一般的に理解が得られよう。この考え方をもとに、本研究では、一方の眼からの視覚信号は覚醒を維持させ、もう一方の視覚信号は、眼帯を装着することで遮蔽することにより、実験的に脳内に半球睡眠状態を作り出す試みを行う。

2.4. 疲労回復の検証

実験内容について、口頭および書面（資料1（53ページ））を用いて説明し、承諾した被験者に対して、4週間の記録を依頼した。なお、被験者は自筆により承諾書を記入している。

① US法について

US法適用時、被験者は、右目・左目にそれぞれ約1時間眼帯をつけて生活し、一日あ

たり合計約2時間、視覚入力を制限して過ごす。眼帯装着時間は、電車に乗っている登下校のあいだとした。そのため、被験者は、通学のための電車利用が1時間以上の者を対象として選出した。また、安全のため、眼帯装着は乗車中に限るように説明・指導した。

②記録項目

主観的眠気については、スタンフォード眠気尺度(7段階)に従い、起床直後・午前11時・午後3時・就床前に判断した。また、スマートフォンのアプリを使用して、注意力と作業効率(単純計算)を計測した。上記項目について、資料2(54ページ)を使用して1日分の記録を被験者がまとめていった。

注意力については、iPhone用アプリ「漢字間違い探し(General5製)」を使用した。制限時間(30秒)内に画面の中から別の漢字ひとつを見つける作業を行い、その連続正答数を記録した(正答しないと次の問題に進めない)。

作業効率については、iPhone用アプリ「計算力トレーニング-小学生からできる計算脳トレ(Masaki Kanno製)」を使用した。制限時間(30秒)内に、四則演算の問題を回答する作業を行い、その正答数を記録した(誤答しても次の問題に進む)。

③スケジュール

第1週は、通常的生活(自由な就床、起床時間)で過ごすこととし記録内容について記録用紙記録するトレーニング期間とし、US法は適用しない。第2週は、通常的生活で過ごすこととし、US法を適用した。第3週は、減眠生活(平均的な就床時間から就床時刻を1時間遅らせる)とし、US法を適用した。第4週は、減眠生活とし、US法は適用しない(一部の被験者は、第3週と第4週を同じ内容で過ごした)。

第1週と第2週の比較で、通常生活におけるUS法の効果を、第3週と第4週の比較で、減眠生活、すなわち寝不足状態におけるUS法の効果を明らかにすることができる。

④分析

各週の実験環境への馴化期間を週末の2日間と考えて、各実験週の第3日~第7日の5日間の記録について分析を行った。なお、検定処理について、特段の記載のない項目については、対応のある2群間のt検定を行い、両側、危険率5%で有意差判定とした。また、各個人の眠気および作業課題の改善・悪化の評価は、基準となる“眼帯をしない”生活週と±10%以上変化した場合とした(±10%以内については「大差なし」と評価)。

2.5. 研究倫理

本研究の遂行にあたっては、ヘルシンキ宣言を遵守し、被験者には口頭および書面を用いて、実験に関しての説明を行い、書面による承諾をうけた。また、無理な覚醒維持を行わないように伝え、日常的に感じるよりも相当程度強い眠気を生じた場合、および体調に異変を感じた場合には直ちに実験を中止することも申し伝えた。

基本的人権の尊重と個人情報保護の観点から個人情報保護法などの関連法令を遵守し、千葉商科大学にて定められている、千葉商科大学研究倫理委員会の審査を経るとともに、個人情報保護及び個人情報の適正な取り扱いに関する学内規程(学校法人千葉学園個人情報保護規程)に基づき、個人情報の保護に努めた。

3. 結果

3.1. 通常生活における US 法の検証

対照実験データの適切性・欠落などを精査し、15名の記録が分析に耐えうると判断した。分析にあたっては、それぞれの実験週（連続した7日間）の後半5日間の平均値を代表値とした。

3.2. 通常生活における US 法の検証

通常生活の第1週と、一日約2時間眼帯をつけて過ごした第2週について、被験者15名を1群とした検定処理を行ったところ、主観的な眠気については、いずれの時間においても有意差は無かった（11h, $p=0.38$; 15h, $p=0.55$; 就床前, $p=0.65$ ）。また、認知作業課題については、注意力は有意差が無く（ $p=0.39$ ）、作業効率は有意差が生じた（ $p=0.004$ ）。ただし、作業効率は、解散問題を課題としたため、学習効果の影響が高いと考え、この有意差がUS法による回復効果であるとは判断しなかった。

以上から、被験者全体の傾向として、US法の効果は検出できなかった。

次に、被験者別に、眠気（11時、15時、就床前）について分析すると、改善（3つの時間帯において、「悪化」なし）6名、悪化（「改善」なし）4名、大きな変化なし（「改善」「悪化」ともなし）5名であった。それぞれの実験期間2週間の平均睡眠時間は改善グループが7時間19分、悪化グループが5時間52分、変化なしグループが6時間22分であった。

以上から、日常的に睡眠時間が短い場合には、US法の効果は無く、むしろ主観的な眠気を増幅させてしまった可能性も考えられる。いっぽう、日常的に睡眠時間が比較的長い場合には、US法の効果がある可能性が示唆される。しかし、いずれにおいても、通常生活時に十分な睡眠があるのか、慢性的な睡眠負債の状態なのかが不明なため、精度の低い解釈に留まる。

3.3. 減眠生活における US 法の検証

前節の分析結果からは、US法の明確な効果は得ることができなかったが、検証の精度を高めるための課題も見えた。ひとつは、通常生活における睡眠の状態（十分なか不十分なか）の不統一性である。各被験者が通常生活で睡眠が足りているのか不足しているのかが不明であった。もうひとつには、認知作業課題における学習効果である。

そこで、前段の解消のために被験者全体を軽い睡眠不足にさせるために、実験第3週、第4週は通常生活よりも就床時間を1時間程度遅らせる減眠生活を指示した（ $N=8$ ）。そのうえで、実験第3週にUS法を適用した。すなわち、実験第3週と第4週の比較により、寝不足状態におけるUS法の効果を検証することが可能となる。また、基準週を後半に置くことで、学習効果が少ない状態でUS法の効果を検証することが可能となる。

実験結果に対して、被験者8名を1群とした検定処理を行ったところ、主観的な眠気については、いずれの時間においても有意差は無かった（11h, $p=0.12$; 15h, $p=0.97$; 就床前, $p=0.18$ ）。また、認知作業課題については、注意力（ $p=0.53$ ）、作業効率（ $p=0.07$ ）とも有意差は無かった。

以上から、被験者全体としては、US法の効果を有意なものとして検出できなかったも

の、就床前の眠気において、より値が低下し強い改善傾向が見られた（通常生活時の基準週平均 4.45 が US 法適用時 4.39；減眠生活時の基準週平均 4.91 が、US 法適用時 4.35）。また、学習効果を減じた場合においても、作業効率については US 法により値が上昇し改善傾向が見られた（基準週平均 14.9 が、US 法適用時 16.2）。

いっぽう、被験者別に、眠気（11時、15時、就床前）について分析すると、11時における眠気が US 法により改善（眠気の減少）が見られた被験者は 1 名であったのに対して、15時は 3 名、就床前には 5 名において改善が見られた。この結果から、寝不足状態における US 法の影響は、夜遅く、つまり覚醒時間が長くなるほど効果が高まる可能性が示唆される。長時間勤務や長時間運転など長い作業時間が求められる環境条件で、疲労回復の効果が認められるのは、応用を考えた場合に有効である。

また、第 4 週の「眼帯をしない」生活週を基準とし、 $\pm 10\%$ 以上変化した場合をそれぞれ改善・悪化として（ $\pm 10\%$ については「大差なし」と評価）。認知作業課題について、被験者別に改善・悪化の評価を行うと。改善（3つの時間帯において、「悪化」なし）5 名、悪化（「改善」なし）0 名、大きな変化（「悪化」も「改善」もなし）なし 3 名であった。

被験者 8 名の平均睡眠時間は、通常生活の第 1 週が 6 時間 18 分、第 2 週が 6 時間 3 分、減眠生活の第 3 週が 5 時間 38 分、第 4 週が 5 時間 56 分であった。実験設定として指示した 1 時間の減眠には至っていないものの、基準となる第 1 週と第 4 週で一日平均約 20 分の減眠となっている。1 週間当たりでは、2~3 時間の減眠となり、軽い睡眠不足を生じていると判断できる。また、基準週に比べて、US 法適用週で平均睡眠時間が短くなっていることから、通常の睡眠の効果が US 法の効果を減殺している可能性も排除できる。

以上から、US 法の効果について、有意な結果は示されなかったものの、被験者別の結果からみられるように、睡眠時間は少ないにもかかわらず、US 法適用週に「悪化」した例が無かった点には注目したい。すなわち、寝不足状態における US 法は、認知能力においてマイナス方向の影響を与えることは少なく、個人差が大きいながらプラス方向の影響を持ちうることを示唆される。

3.4. 各被験者の定性分析

各被験者についての定性的分析結果を以下に示す。

被験者 A：US 法の適用に対して、強いポジティブな結果を示した。視覚入力を制限することにより、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した（対照実験のそれぞれ 67%、58%）。また制限状態で減眠（対照実験より睡眠時間が平均 55 分減少）すると、起床時の眠気が 140% に増大し、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した（対照実験のそれぞれ 83%、67%）。ただし、視覚制限のみに比べると、視覚制限+減眠のほうが眠気は高まっている。これらのことから、約 2 時間の入力制限による「回復」効果は、55 分の睡眠時間減少を補うには不十分である可能性が考えられる。いっぽうで、視覚制限+減眠において、就床前の注意力・作業効率は上昇（119%、145%）していることから、実験環境が夜間のパフォーマンス低下抑制に影響する可能性がある。

被験者 B：ポジティブな結果を示した。視覚制限状態で減眠（対照実験より睡眠時間が

平均 40 分減少) すると、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した (対照実験のそれぞれ 69%, 93%) が、起床時の眠気および就床前の諸要素に大きな影響はなかった。

被験者 C：ポジティブな結果を示した。視覚入力を制限することにより、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した (対照実験のそれぞれ 79%, 59%)。また制限状態で減眠 (対照実験より睡眠時間が平均 72 分減少) すると、起床時の眠気が 114% に増大し、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した (対照実験のそれぞれ 95%, 86%)。ただし、被験者 A と同様で、入力制限のみに比べると、視覚制限 + 減眠のほうが眠気は高まっている。これらのことから、約 2 時間の入力制限による「回復」効果は、72 分の睡眠時間減少を補うには不十分である可能性が考えられる。いっぽうで、視覚制限 + 減眠において、就床前の注意力・作業効率は上昇 (121%, 115%) していることから、実験環境が夜間のパフォーマンス低下抑制にポジティブな影響を及ぼしている可能性がある。

被験者 D：強いポジティブな結果を示した。視覚入力を制限することにより、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した (対照実験のそれぞれ 90%, 71%)。視覚制限状態で減眠 (対照実験より睡眠時間が平均 36 分減少) すると、起床時の眠気が減少 (73%) し、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した (対照実験のそれぞれ 70%, 57%)。被験者 A、被験者 C と異なり、視覚制限のみに比べると、視覚制限 + 減眠のほうで眠気が減少しており、約 2 時間の入力制限による「回復」効果は、36 分の睡眠時間減少を補うに十分であった可能性が考えられる。いっぽうで、視覚制限 + 減眠において、就床前の注意力は減少 (94%)、作業効率は上昇 (114%) していることから、実験環境が夜間のパフォーマンス低下抑制にポジティブな影響を及ぼしている可能性がある。

被験者 E：ネガティブな結果を示した。視覚入力を制限することにより、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに上昇した (対照実験のそれぞれ 138%, 175%)。また、起床時の眠気は減少 (86%)、就床時の眠気はやや増加 (104%) した。

被験者 F：ネガティブな結果を示した。視覚入力を制限することにより、日中の眠気午前 11 時には増加 (対照実験の 160%) し、午後 3 時には減少した (対照実験の 56%)。また、起床時の眠気は減少 (88%)、就床時の眠気はやや増加 (107%) した。

被験者 G：視覚入力を制限することにより、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時がともに減少した (対照実験のそれぞれ 93%, 88%)。制限状態で減眠 (対照実験より睡眠時間が平均 97 分減少) すると、起床時の眠気が増加 (147%) し、日中の眠気午前 11 時、午後 3 時はともに減少した (対照実験のそれぞれ 93%, 82%)。いっぽうで、視覚制限 + 減眠において、就床前の注意力は減少 (89%)、作業効率は上昇 (121%) している。

以上から、個人差があるものの、視覚入力を制限する US 法の適用により、覚醒を維持しつつ、疲労蓄積の「回復」もしくは疲労蓄積の「遅延」が、有効に機能する可能性が示唆された。

4. 考察

4.1. US法の効果

減眠生活中のUS法の適用結果から、被験者全体における回復の効果は有意に示されていない。いっぽうで、第一に、減眠生活中のUS法の適用結果から、認知作業課題についての個別の分析をすると「悪化」が8名中0名であること、第二に、通常生活中のUS法の適用結果から、眠気の生起および認知作業課題について個別の分析をするとポジティブ（回復効果が見られる）な結果が7名中4名であることから、US法の回復効果には個人的特性が大きく影響することが示唆される。逆説的に考えると、各個人に適した、半球睡眠状態を設定する（カスタムメイドUS法）ことで、眠気のクリティカルポイントを生じさせない、あるいは覚醒しながら回復することが可能になるのではないだろうか。今回の実験で、ポジティブ効果が見られた被験者4名については、US法がうまく“合致”したと考えられる。

半球睡眠をする鳥類や鯨類では、視交叉（視神経が対側の脳に投射される）が完全交叉（100%）となっている。一方、ヒトの場合、交叉している視神経は55%であることが知られている（加我 2009ほか）。つまり、右（左）側の視覚を閉ざすことが、大脳の左（右）半球全体への視覚入力への完全な制限となるわけではない。しかし、一側の視覚入力を閉ざすことで、左右それぞれの大脳半球への視覚入力は、通常の55%と45%となる。これにより、左右の大脳半球への入力情報量の比が20%以上の差を持つ。情報量の差（刺激の強さ）は、神経活動量に直結することから、少なくとも相対的な覚醒状態の差が生じていると考えてよいだろう。

近年、ヒトの睡眠の半球性について、新しい知見の報告が増えている。Tamaki (2016)は「初夜効果」を報告している。新奇環境で睡眠する場合には、右半球では通常睡眠である徐波が優位に表れるが、左半球は浅い睡眠状態の脳波が優位に表れるというものだ。さらに、同様の新奇環境において音刺激を左右の耳それぞれに加えた場合には、左半球が素早く反応した。これらから、左半球が「目覚めやすい」状態にある、つまり睡眠状態が左右の大脳半球で異なることが示されている。

さらに、20人の被験者から脳の90の部位のMRIデータを分析して、脳がインコヒーレント（覚醒）状態から同期（睡眠）状態にどのように移行するのかを示した報告（Ramlow 2019）では、各半球の結合（半球内結合）は、2つの半球間の結合（半球間結合）よりも強いことが示された。これは、脳活動が脳の全体的に均一なものではないこと、左右の半球間よりも同側半球内で神経活動の同期性が高いことをしめす。さらにRamlow (2019)は、神経どうしの結合強度をモデル化すると、半球間の結合強度を下げることで、半球睡眠状態が生じることも示している。

以上から長時間覚醒時や単純作業時など眠気を生じやすい環境においては、US法を改善し効果を高めることに加え、脳の非同期性を応用した作業環境などを構築することでクリティカルポイントを迎えることの無い労働環境につなげられるのではないだろうか。

4.2. 睡眠時の脳の非同期性

半球睡眠のみならず、局所睡眠（ローカルスリープ）や覚醒中の微小睡眠（マイクロス

リープ)など、脳の状態は、睡眠中も覚醒中も均一ではないことが明らかになってきている (Vyazovskiy 2011)。ヒトにおいても、特定環境での睡眠中には、大脳半球の片側が「意識レベルの高い」状態にあること (Tamaki 2016) が明らかになり、神経系のモデル化により半球睡眠の可能性が示唆 (Ramlow 2019) されるようになったこと、さらには、脳の構造や視交叉の交叉性が左右同等でないことなどを考えあわせると、睡眠が脳全体で均質であるとか、左右で同期すること自体が、先入観に囚われた“大前提”だったのかもしれない。

従来、睡眠は、覚醒時に身体機能や認知能力を十分に発揮するための「回復」を目的に理解されてきた。仕事をするには眠らないとパフォーマンスが落ちる、しかし眠っていると仕事は進まない。このジレンマが、睡眠負債をためこむ要因のひとつであろう。ここで、半球睡眠を常に一定の覚醒機能を維持できる特殊な覚醒状態と捉えたと、睡眠負債返済にも光が差す。機能を維持しながら、回復 (そしてメンテナンス) が可能となれば理想だ。

近年は、情報処理技術の発達により、自動車の衝突防止システムなど、さまざまなリスク回避が可能になりつつある。しかし、センシング技術と AI 処理はリスクの抽出目的で、最終的判断はヒトが担当する仕組みは、今後も当分残存するであろう。このような状況では、認識能力の低下した眠気出現状態、あるいは覚醒直後において、判断ミス (誤操作) が重大な事故等につながる可能性は否定できない。

睡眠負債による経済損失が 3.5 兆円とも言われる (内山 2012) が、その対策は「眠って返済」するか「損失抑制」のいずれかである。前者は日本人のライフスタイルを変え睡眠時間を十分確保する必要がある、後者は覚醒時間を保ちつつ眠気を生じさせない方法が求められる。本稿で示した、US 法により後者の成功が期待できる。通常生活時の US 法適用結果から、半数程度に対して効果を期待できた。残りの半数には、視覚入力を制限する時間帯や継続時間などを個別化したカスタムメイド US 法で効果が得られるのではないだろうか。

今後の詳細な研究が必要ではあるが、US 法により眠気が減少していく過程で、おそらく睡眠負債も減っていく。それに伴い、個人レベルでは QOL の維持改善、社会的には医療費介護費の抑制へとつなげていくことも、視野に入れることが期待できる。

4.3. 覚醒しながら眠る “ながら眠り”

睡眠と活動は、しばしば対極におかれる。動物の活動周期を表す場合も、さまざまな行動を含めた活動時間と、睡眠を含めた休息時間に二分される。それでも、睡眠が脳の活動状態のひとつであるとする理解が進んできた。睡眠は、単に脳活動の低下を表しているわけではなく、脳が脳をコントロールしつつ、メンテナンスとリニューアルがおこなわれているかなり積極的な活動であることが明らかになりつつある。

本稿で検証してきた US 法は、一部ではあるが覚醒中に脳の一部が睡眠し回復を生じさせる、「ながら眠り」と考えられる。「ながら眠り」は、半球睡眠以外の方法もあり、動物には広くみられる。イルカや渡り鳥は、泳ぎながら (飛びながら) 同時に眠る半球睡眠をおこなう、ウシの仲間、食べながら反芻しながら眠るウトウト睡眠がある。また、ヒトが眠気を我慢していると生じてくる数秒程度のマイクロスリープ (微小睡眠) も眠りと他の活動を両立するための手段であるし、赤ちゃんが眠りながらお乳を吸うのもウトウト睡

眠に近い状態だろう。電車の中で、ほぼほぼ眠りながらそれでもスマホの操作をしているサラリーマンもたくさん見かける。睡眠は、意外と両立できる。

近年、研究が進んだ鳥類の「飛びながら眠り」は、興味深い。グンカンドリのある種類は1か月以上全く着陸（着水）することなく飛び続けることから、半球睡眠で「飛びながら眠り」をしていると考えられてきた。脳波計の小型化により、オオグンカンドリの脳波を数週間にわたって計測可能となった。Rattenborg (2016) によれば、ときに10日を超えて飛行し続けたオオグンカンドリの睡眠のうち、約3割が左右の大脳半球が同期する通常の眠りであった（陸上では約5割が通常の眠り）。

飛行中のオオグンカンドリの例からは、覚醒中の行動のように見えても、「ながら眠り」の状態であること、しかも、半球睡眠ばかりか通常睡眠さえも生じていることがわかる。

ヒトの場合、起きているのかと思うと、目を開けたまま眠っている例がある。このような特性を持つヒトは、半球睡眠や局所睡眠などの「ながら眠り」に長けているのかもしれない。ただし、視覚入力を無視して眠りを生じることができるので、US法の適用はむしろ難しくなるかもしれない。

5. おわりに；睡眠の理解の拡大

睡眠機能としての半球睡眠を、覚醒機能として捉えなおすことで、睡眠負債への対処に応用したのがUS法である。従来、一定の覚醒レベルを常に保つ“機能”として、半球睡眠は説明されてきた。半球睡眠は、鳥類（Rattenborg 2001 など）、鯨類（Lyamin 2004 など）、鰭脚類（Lyamin 2012 など）で報告されている。半球睡眠では、大脳半球の一侧（右半球）が覚醒状態、もう一侧（左半球）は睡眠状態となる。一定時間後には、その覚醒・睡眠の状態が切り替わる大脳の状態であり、脳波計により明確に記録される。半球睡眠の目的としては、周囲の警戒、行動の継続（鳥類では飛び続ける、海獣類では泳ぎ続ける）、群れの保持（海獣が眠ったまま海流に流されるのを防ぐ）、体温保持（水中は熱を奪われる）などが挙げられるが、半球睡眠動物のいずれも複数の目的、必要性をもって半球睡眠を行っていると考えられる。

半球睡眠は、短時間単位では、脳の一部が覚醒、一部が睡眠状態となるものの、24時間単位では、脳全体が交互に一定時間の必要な睡眠をとっていることになる。見方を変えれば、24時間単位では、脳全体としては眠ることなく一定の機能を維持しつづけていると捉えることができる。この、部分は休み（睡眠）つつ、全体では機能が維持されるスキームは、交代制フル稼働の工場にも例えることができる。それぞれの工具は休みを取りながら、工場機能は休まず機能し続ける。

US法は、半球睡眠の理論を拡張し、脳が処理する情報量を制限することで、脳内に半球睡眠状態を作り出すこととした。具体的には、一方の眼からの視覚入力は断ち、もう一方の視覚入力は維持することで、視覚野を中心とした脳内の情報処理量に、左右の偏りを生じさせる。ヒトの視神経は、半交叉のため、片側の視覚を閉ざしても、左右どちらの大脳半球の視覚野にも投射されるが、交叉の割合が等分ではないため、左右の偏りはヒトにおいても生じる。

前述した「ながら眠り」には、局所睡眠や特殊な通常睡眠も含まれるが、コントロール

できる可能性が最も高い「ながら眠り」は半球睡眠であろう。1日に二回各1時間ほど眼帯ですごす簡便なUS法で、半数程度の被験者に眠気の減少や、長時間覚醒後の認知作業課題のパフォーマンス向上が見られたことは、よりの確な疑似半球睡眠方法を探ることで、より効果的な「ながら眠り」の可能性がみえる。疲れをいやすお風呂に例えてみよう、好みの湯加減・入浴方法が個々人で異なるのと同じように、その人にとって適した“US法”があるはずだ。

謝辞

本稿は、千葉商科大学平成30年度学術研究助成金および、科学研究費補助金(15K12708)を受けて行った研究成果の一部である。

〔引用文献〕

- ・ Dawson, D. & Reid, K. 1997. Fatigue, alcohol and performance impairment. *Nature*, 388, 235.
- ・ 原田大輔, 大淵敬太, 伊藤洋. 2012. 不眠の心身機能・身体機能に及ぼす影響; *不眠の科学*, 井上雄一, 岡島義(編)朝倉書店, 52-61.
- ・ 加我君孝, 竹腰英樹, 小村豊. 2009. 2つの耳(両耳聴)と2つの目(立体視)と頭部の運動. *医療*, 63(9), 545-557.
- ・ Lima, SL. 2005. Sleeping under the risk of predation. *Animal Behaviour*, 70(4), 723-736.
- ・ Lyamin OI, Mukhametov LM, Siegel JM. 2004. Relationship between sleep and eye state in Cetaceans and Pinnipeds. *Archives Italiennes de Biologie*, 142(4): 557-568.
- ・ Lyamin OI, Kosenko PO, Vyssotski AL, Lapierre JL, Siegel JM, Mukhametov LM. 2012. Study of sleep in a walrus. *Doklady Biological Sciences: Proceedings of the Academy of Sciences of the Ussr*, Biological Sciences Sections, 444: 188-191.
- ・ Masako Tamaki, Ji Won Bang, Takeo Watanabe, and Yuka Sasaki. 2016. Night watch in one brain hemisphere during sleep associated with the first-night effect in humans. *Current Biology*. 26(9): 1190-1194.
- ・ Ramlow, Lukas; Sawicki, Jakub; Zakharova, Anna; Hlinka, Jaroslav; Claussen, Jens Christian; Schöll, Eckehard. 2019. Partial synchronization in empirical brain networks as a model for unihemispheric sleep. *epl (Europhysics Letters)* 126, 50007; doi: 10.1209/0295-5075/126/50007
- ・ Rattenborg NC, Amlaner CJ, Lima SL. 2001. Unilateral eye closure and interhemispheric EEG asymmetry during sleep in the pigeon (*Columba livia*). *Behavior and Evolution*. 58(6): 323-32.
- ・ Rattenborg NC, Voirin B, Cruz SM, et al. 2016. Evidence that birds sleep in mid-flight. *Nature Communications*. 7: 12468.
- ・ 内山真. 2012. 睡眠障害の社会生活に及ぼす影響と経済損失(特集 睡眠障害と精神衛生,

- 付随する社会問題). *日本精神科病院協会雑誌*. 31(11), 1163-1169.
- Vladyslav V. Vyazovskiy, Umberto Olcese, Erin C. Hanlon, Yuval Nir, Chiara Cirelli, and Giulio Tononi. 2011. Local sleep in awake rats. *Nature*. 472(7344): 443-447.
 - Van Dongen HP, Maislin G, Mullington JM, Dinges DF. 2003. The cumulative cost of additional wakefulness: dose-response effects on neurobehavioral functions and sleep physiology from chronic sleep restriction and total sleep deprivation. *Sleep*. 15; 26(2): 117-26.
 - 関口雄祐, 井上聡, 荒井一利. 2019. イルカの睡眠, *Clinical Neuroscience (月刊 臨床神経科学)*, 37(7), 774-777.
 - Yuske Sekiguchi, Naoya Suzuki, Satoshi Horihata, Yoshifumi Yasuda. 2007. Prototype System for Intelligent Human Sensing: Using Two Blink Parameters Derived from EOG to Detect the Drowsiness, *Proceeding of The 5th Symposium on Intelligent Human Sensing (IHSS2007)*. 27-30.

(2020.1.20 受稿, 2020.2.27 受理)

覚醒度調査の手順説明

- ・ 調査を開始したら、4週間続けてください
- ・ 「朝の作業」の記録は、その時に行ってください
- ・ 他の項目は、随時記録してください
(最低限、寝る前の作業時に当日分の記録を行う)

眼帯や減眠が原因で、気分が悪いなどの場合は、直ちに調査を中止し、関口へ連絡ください。

***** @cuc.ac.jp

-*-****

記録するタイミング

- ・ 起床時
- ・ 電車内で眼帯をつけて 登校/下校 (第1週, 第4週は不要)
- ・ 午前11時, 午後3時
- ・ そのほか随時, “あれば”
- ・ 就床前

記入項目

- ・ 眠気の程度; 下記の眠気尺度 (1~7) から選択
- ・ 行動内容; 「授業」「歩行」「電車 (立位)」など, 簡単に記載
- ・ 「漢字»; “漢字間違い探し”通常モード (30秒モード) でプレイ
- ・ 「計算»; “計算力トレーニング”を制限時間30秒 (デフォルト設定)
トレーニング → 時間制限モード → すべて → ふつう
- ・ ココロロ; “ココロロ”で「キモチをはかる」を選択し計測。
→ 右側 (濃茶色) のストレス度を記載。

謝金振込口座のコピー
または、写真で送信

途中面談日

____月____日

眼帯のスケジュール

第1週; 通常生活

第2週; 通学時, 眼帯を交互に装着し, それ以外は通常生活

(例: 登校時に右目に眼帯, 下校時に左目に眼帯)

第3週; 通学時, 眼帯を交互に装着し, 減眠生活

(減眠 = 通常より1時間程度, 就床時間を遅らせる)

第4週; 減眠生活

眠気尺度

1. やる気があり、活発で、頭がさえていて、眠くない感じ
2. 最高とはいえないまでも、頭の働きが活発、集中してられる
3. くつろいで起きている、しかしどちらかというと少し頭がぼんやりし反応が悪い
4. すこしぼんやりしていて、何かしたいと思わない
5. ぼんやりしている、集中してられない、起きているのが困難
6. 眠いので横になりたい、ぼおっとしている
7. まどろんでいる、起きてられない、すぐにねむってしまいそうだ

眠気調査

_____月 _____日

朝 の 作 業	起床時刻	_____時 _____分	眠気の種類 _____
	前夜の入眠時刻	_____時 _____分	
	夢	記憶にない, ぼんやり< . . . 1 . . . 2 . . . 3 . . . 4 . . . 5 . . . > はっきり	
	眠りの充実感	悪 < . . . 1 . . . 2 . . . 3 . . . 4 . . . 5 . . . > 良	
	目覚めの爽快感	悪 < . . . 1 . . . 2 . . . 3 . . . 4 . . . 5 . . . > 良	

右 の眼帯時間 _____時 _____分 ~ _____時 _____分

この間の 眠気の種類 _____ 行動内容 _____

左 の眼帯時間 _____時 _____分 ~ _____時 _____分

この間の 眠気の種類 _____ 行動内容 _____

午前11時 ごろの 眠気の種類 _____ 行動内容 _____

午後3時 ごろの 眠気の種類 _____ 行動内容 _____

(あ れ ば)	強い眠気を感じた時間帯	_____時 _____分	ごろ
		_____時 _____分	ごろ
	ウトウトしてしまった時間帯	_____時 _____分	ごろ
		_____時 _____分	ごろ
	眠ってしまった時間帯	_____時 _____分	ごろ
	_____時 _____分	ごろ	

寝 る 前 の 作 業	漢字 _____ 問	計算 _____ 問
	ココロ口 _____ %	眠気の種類 _____
	就床時刻	_____時 _____分

〔抄 録〕

居眠りによる社会的損失は大きい。とくに、疲労蓄積により生じる急激かつ突発的な眠気による事故は、ときに大惨事につながってきた。このような居眠りの回避や眠気生起の遅延は、社会的にも意義あるものである。

視覚入力と脳の活動には、密接な関係があり、視覚入力の制限は、脳波の同期化（脳の活動レベルの低下）に直結する。半球睡眠動物は、片側の脳半球が眠っている間、片側の目は閉じて視覚入力を遮断している。この関係性から、片側の視覚入力を制限することで、ヒトにおいても眠気の生起を減少できると仮定した。本稿では、眼帯を用いて片側の視覚を制限する US 法を提案し、その効果検証を試みた。

その結果、①ポジティブな一部の効果（被験者の一部には効果が確認できた）があり、②ネガティブな効果はなかった（睡眠時間を減らした際に、眠気等が悪化した被験者はいなかった）。このことから、各個人に適した視覚制限方法を作成していくことで、より効果の高い居眠りの回避・減少へとつなげていける可能性が示唆された。