

酪農における光環境制御の効果とそのメカニズム

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
畜産研究部門 畜産環境研究領域 飼育環境ユニット
上級研究員 粕谷悦子

2019.1.31 酪総研シンポジウム in 札幌

1. 畜産と光環境

家畜の生産性や体調に影響をおよぼす環境要因

- ・ 温度
- ・ 湿度
- ・ 光
- ・ 音
- ・ 畜舎の面積
- ・ 畜舎の床材質 など

畜産では、生産性だけでなく家畜福祉の観点からも、動物におよぼす負の影響をできるだけ減らし正の影響をできるだけ増やす必要がある

本日の内容

1. 畜産と光環境
2. 光の動物(哺乳類)に対する作用
3. 光によるメラトニン分泌の制御
4. 泌乳の日長応答
5. 光の波長と非視覚的作用
6. 乳牛飼育における光線管理の必要性

照明管理と植物

植物の生育に最適な光の波長や日長の解明

大手家電メーカーによる工場内での野菜生産

照明管理と養鶏

ニワトリの産卵に最適な光の波長や日長の解明

ウィンドウレス鶏舎飼育での活用

The screenshot shows a Canon website page with the following content:

- キヤノンサイエンスラボ・キヤノン** (Canon Science Lab / Canon)
- 「光」は、作物の生育に最も重要な要素の一つです。最適な光の波長や日長を制御することで、作物の生育を促進し、収穫量を向上させることができます。
- 「光」は、動物の行動や生理にも大きな影響を与えます。最適な光環境を提供することで、動物の健康を維持し、生産性を向上させることができます。
- キヤノンは、最新のLED照明技術を活用し、工場内での野菜生産や、養鶏場での照明管理を実現しています。



知は光の下で育つ動物を飼育し、その結果、肉質や卵の品質が向上し、生産性を向上させます。また、動物をより健康的に育てることで、動物の健康を維持し、生産性を向上させます。また、動物をより健康的に育てることで、動物の健康を維持し、生産性を向上させます。

動物の健康を維持し、生産性を向上させるためには、最適な光環境を提供することが重要です。キヤノンは、最新のLED照明技術を活用し、工場内での野菜生産や、養鶏場での照明管理を実現しています。

2. 光（可視光）の動物に対する作用

- ・ 生体への入力経路はほ乳類では網膜のみ（鳥類は脳深部に直接入力あり）
- ・ 網膜からの出力は2系統

(1) 視覚性経路

- ・ 色, 形, 明るさからのイメージ形成
- ・ 網膜(視神経) → (外側膝状体) → 後頭葉視覚野
- ・ 環境や対象を知覚・認知することで情動・行動・生理反応に影響
(光刺激自体ではなく形成されたイメージによる影響)

(2) 非視覚性経路

- ・ 意識に上らない視覚情報
- ・ 網膜(視神経) → 視蓋前域 → 動眼神経：瞳孔の対光反射
→ 視床下部視交叉上核(SCN)：概日リズムの光同調

☞ 各種神経障害で異常が

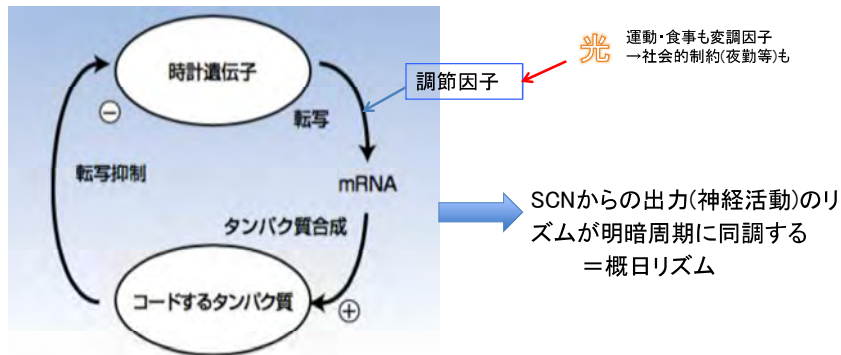
<生物時計>

「時計遺伝子の発現」と「その遺伝子がコードするタンパク質による発現抑制」のネガティブフィードバックループ；約24時間で1周する。

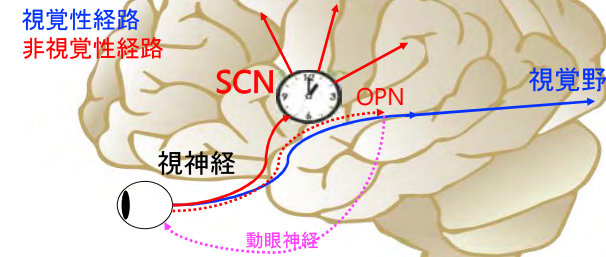
<光同調>

光刺激により時計遺伝子の発現調節因子の活性が変化し、生物時計の周期が延長または短縮する現象。

☞ ヒトは平均24h10m



SCN: 視交叉上核 suprachiasmatic nucleus
OPN: 視蓋前域オリブ核 olivary pretectal nucleus



SCN = "時計遺伝子"を持つ"時計細胞"が局在する部位
= "生物時計"のマスタークロック
("生物時計"は全身の細胞に存在するがSCNが最高位中枢)

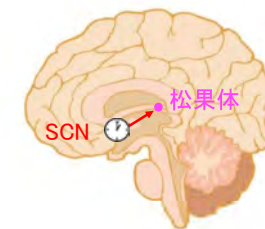
SCNからの神経シグナルの出力先

- ① 脳幹網様体 → 大脳皮質 : 覚醒水準
- ② 外側野・腹内側核 : 摂食行動
- ③ 室傍核 → 自律神経 → 末梢臓器/器官 : 体温, 血圧, 心拍, 内分泌等

それぞれの概日リズムが光同調する

↑
家畜の生産性(特に乳生産)に関わるものとして重要なものが

- ③のうちの松果体への投射 = メラトニン分泌の光同調



松果体においてトリプトファンを基質として合成されるホルモン

3. 光によるメラトニン分泌の制御

3-1 メラトニンの生理作用

- ① 体温降下, 心拍減少・血圧降下
- ② 生物時計のフィードバック制御
- ③ 抗酸化作用
- ④ 他のホルモン分泌を制御

ex. 甲状腺ホルモン刺激ホルモン
ex. プロラクチン, 成長ホルモン

→睡眠誘導

←酸化ストレス軽減

←繁殖行動

←泌乳, 増体

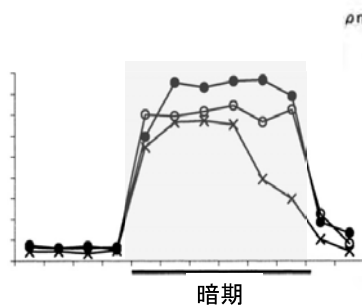
乳生産

繁殖成績 (受胎率等)

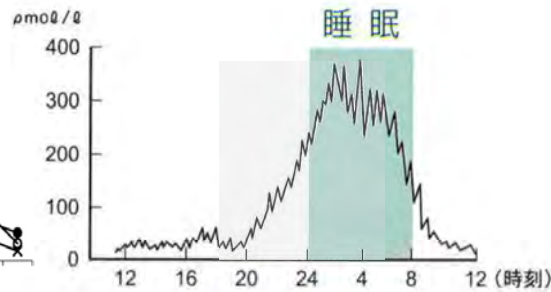
3-3 メラトニンの分泌パターン

・基本的なパターンは「昼(明期)は低く, 夜(暗期)は高い」

ex. 人工照明下のブタ



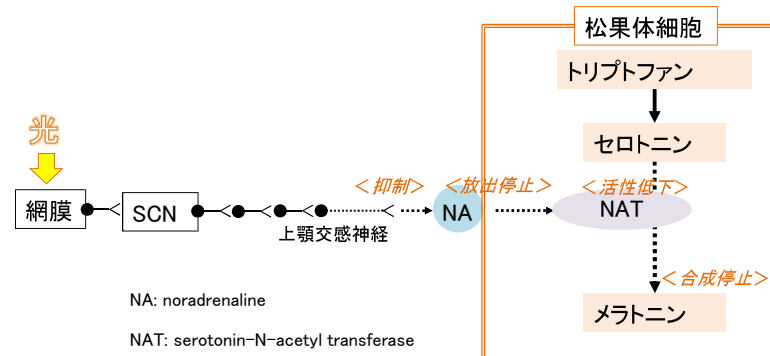
ex. 通常生活のヒト



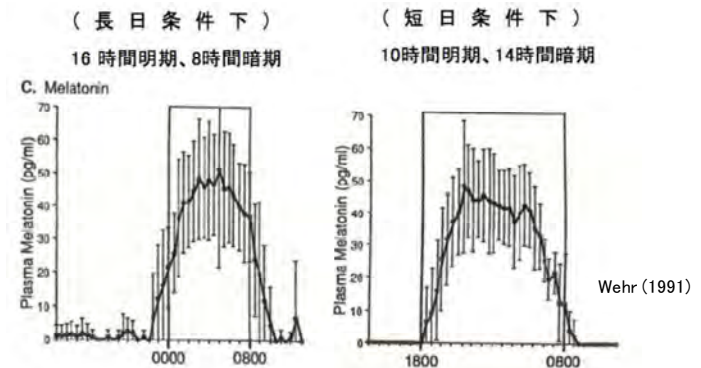
↑環境の明暗と睡眠(=主観的暗期)

3-2 メラトニン合成・分泌の制御機構

- ・暗期にはメラトニン合成の律速酵素(NAT)の活性が高く, 合成されたメラトニンは速やかに分泌される
- ・光刺激はSCNを介して交感神経終末からのノルアドレナリン放出を抑制し, それによってNAT活性が低下してメラトニン合成が止まる



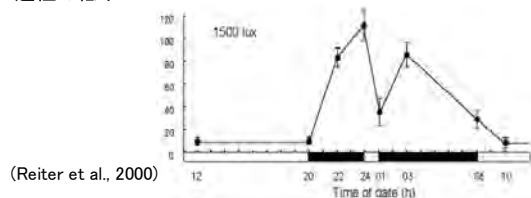
- ・基本的なパターンは「昼(明期)は低く, 夜(暗期)は高い」
- ・その結果, 血中濃度が高値となる時間は「昼(明期)が長いと短く, 夜(暗期)が長いと長い」; 1日当たりの分泌量は「昼(明期)が長いと少なく, 夜(暗期)が長いと多い」



つまり; 日長(日出~日没の長さ or 24h明暗周期での明期の長さ)はメラトニン分泌量と逆相関

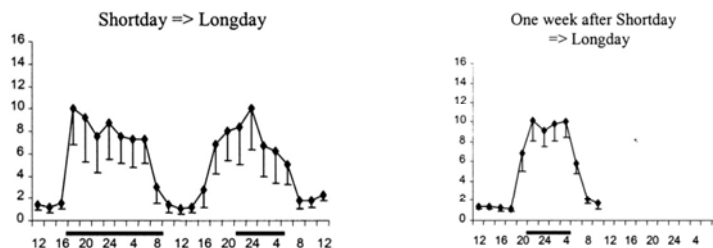
・明暗周期の変化の影響は持続時間やタイミングにより異なる

ex. 暗期中の短時間光照射では一過性の低下



(Reiter et al., 2000)

ex. 明暗周期の急変では即応できずに数日間元のパターンを維持する→”時差ボケ”の一因



短日(8h明16h暗)から長日(16h明8h暗)に変更直後および1週間後のブタ血漿中メラトニン濃度 (Tast et al., 2001)

2. 光の動物に対する作用

・視交叉上核(SCN)の生物時計を介して様々な生理反応の概日リズムを明暗周期に同調させる (その一つがメラトニン分泌)

3. 光によるメラトニン分泌の制御

・松果体でのメラトニン合成は、SCNの生物時計を通じて暗期には促進性の刺激を受け、明期にはこの刺激が止まる

・その結果、メラトニンは明暗周期に同調した分泌リズムを示す;つまり、暗期には分泌が多く明期には少ない

・従って、明期(日長)が長いと血中メラトニン濃度が高い時間は短く、1日の分泌量は減少する

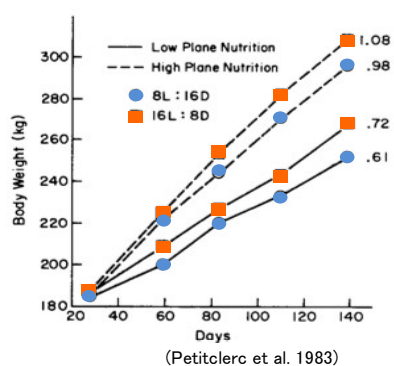
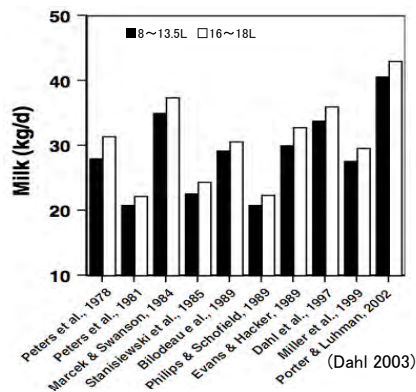
4. 泌乳の日長応答

4-1 明期延長による乳量増加(長日効果)とそのメカニズム

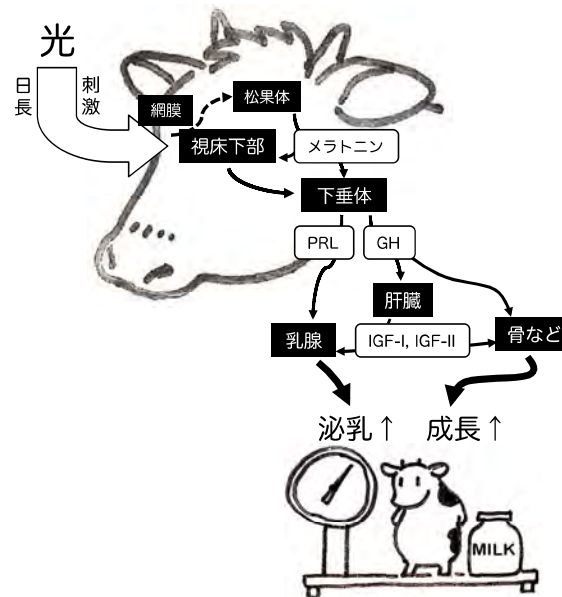
(1)長日効果

・明期8~13.5h vs. 16~18hの比較

→16~18hで乳量1~2kg/day増加(育成牛で増体亢進, 初発情日短縮)



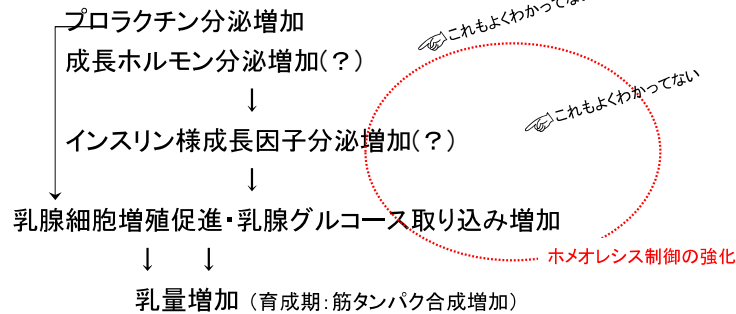
光と内分泌系-GHとPRL-



(2)長日効果のメカニズム

- ・メラトニン分泌時間の短縮

(血中濃度が高い時間の長さ and/or 1日当たり分泌量の減少)



- ・採食量の増加? 日長との因果関係不明;変化なしという報告も多い

乳量増加の<原因>ではなく<結果>の可能性も

ただし明期が長いほど乳量が増える;というわけではない

乳量は 明期8h < 16h = 20h > 24h

→採食量の限界?

→プロラクチン産生細胞の過負荷による合成能低下?

→メラトニン分泌の概日リズムのフリーラン(=16L8D)?

明期を8hから24hまで漸増させた時の子牛血中プロラクチン濃度変化 → (Leining et al. 1979)

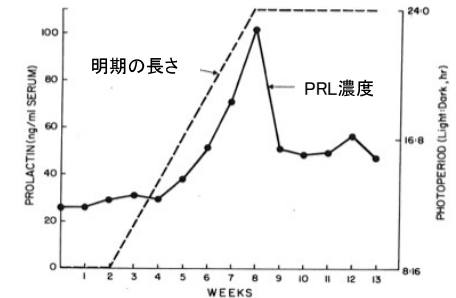


FIG. 1. PRL in serum from prepubertal bulls during daily light exposure which was increased from 8 to 24 h (four bulls per observation). Overall pooled SE was 11 ng/ml.

4-2 乾乳期の明期短縮による乳量増加(短日効果)とそのメカニズム

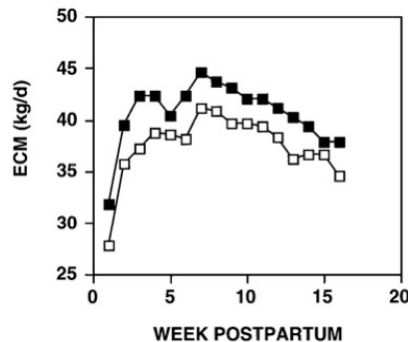
(1)乾乳期の短日効果

- ・乾乳期(分娩前約2か月)の日長が16h vs. 8h

→次乳期の泌乳前期乳量が8hで約3kg/d増

→分娩前1か月間の末梢血リンパ球増殖能が8hで高い

(乳房炎に感染しやすい分娩前2週間のリスク軽減)



※ECM=エネルギー補正乳量; 飼料の利用効率を比較する際に用いられる。乳脂肪と乳タンパク質の濃度を加味した"エネルギー量"としての乳生産量。

Miller et al. 2000

(2)短日効果のメカニズム

- ・暗期延長=メラトニン分泌時間の延長(分泌量の増加)

↓

プロラクチン分泌減少

↓

(乳腺)プロラクチン受容体増加

→泌乳開始後のプロラクチン感受性が上昇し乳量増

(リンパ球)プロラクチン受容体増加

→抗原刺激に対するリンパ球増殖能亢進

(分娩前30日~分娩後数日目まで持続)

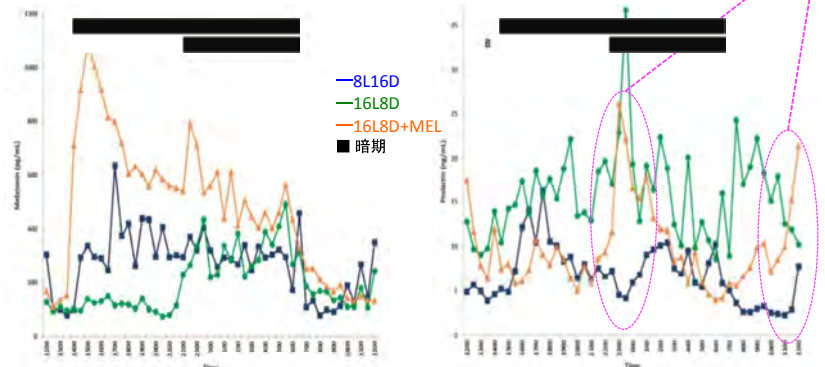
- ・分娩後の採食量増加(?)

←日長が短いこととの直接の因果関係は不明

分娩前後は乳房炎感染リスクが高い

Q:「泌乳の日長応答＝メラトニン量による泌乳調節」？

- ・乾乳期の明期が 8h vs. 16h vs. 16h+メラトニン経口投与
 - 乳量にメラトニン投与の効果なし(8h > 16h = 16h+メラトニン)
 - ←メラトニン投与だけではプロラクチンを低濃度に維持できなかった
 - ←メラトニン以外を経由する光の作用(ex.TSH, 自律神経)が必要？



血中メラトニン濃度(24h)

血中プロラクチン濃度(24h)

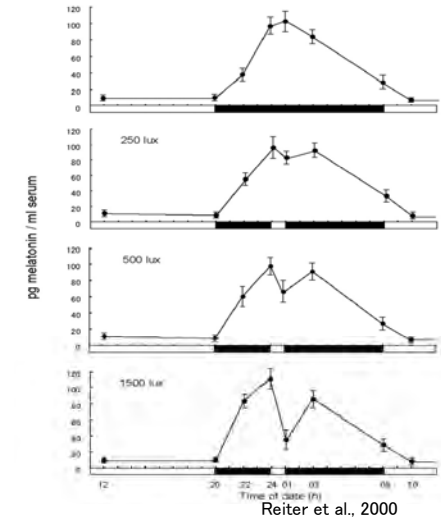
(Lacasse et al., 2014)

4-3 泌乳の日長応答における光の強さ(照度)の影響

- ・メラトニン抑制効果には照度依存性がある
- ・抑制効果の下限
 - ヒト: 100~150 lx程度
 - ウシ: 50 lxでも明らかな抑制

牛舎照明で

- 短日効果を期待するなら ≤ 10lx
- 長日効果を期待するなら ≥ 300lx



Reiter et al., 2000



inpress社HP
パナソニック調光・調色型
ライトのレビュー
ライト直下2mの照度

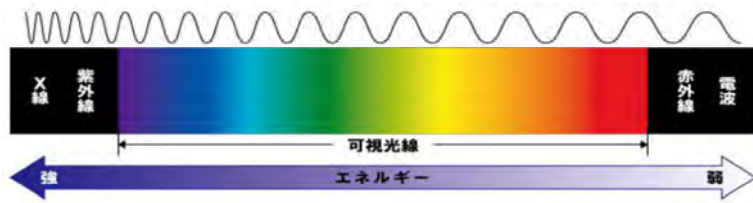
4. 泌乳の日長応答

- ・メラトニンの分泌増加(時間 and/or 量)は、泌乳促進作用を持つホルモン(プロラクチンおよび成長ホルモン)の分泌を抑制する
- ・そのため、泌乳期に日長が長くなると、メラトニン分泌の減少(と採食量の増加?)により乳量は増加する
- ・ただし、乾乳期の日長は短い方が泌乳開始後の乳量は多くなる この効果は、乾乳期のプロラクチン分泌低下によるプロラクチン受容体のアップレギュレーションが一因と考えられている

5. 光の波長と非視覚的作用

・波長の違い＝透過性・エネルギーの違い

→組織・細胞レベルで影響に違いがある可能性



・鳥類(光が直接脳深部に達する)での報告

青色光:アンドロゲン分泌増加→成長促進

緑色光:骨格筋衛星細胞の増殖促進→成長促進

赤色光:産卵のピーク期間延長?

→メカニズム解明・効果の検証はまだ不十分

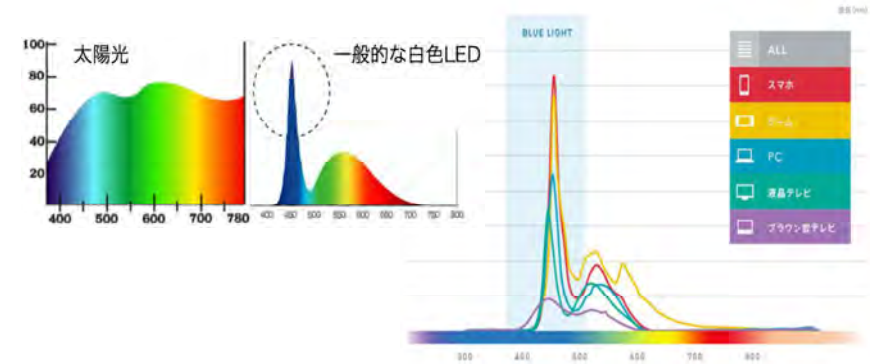
・哺乳類では非視覚的作用について”青色光”に特徴あり

5-1 ブルーライト(380~500nm)の特徴

・LEDの普及により健康への影響という面からが問題視されるように

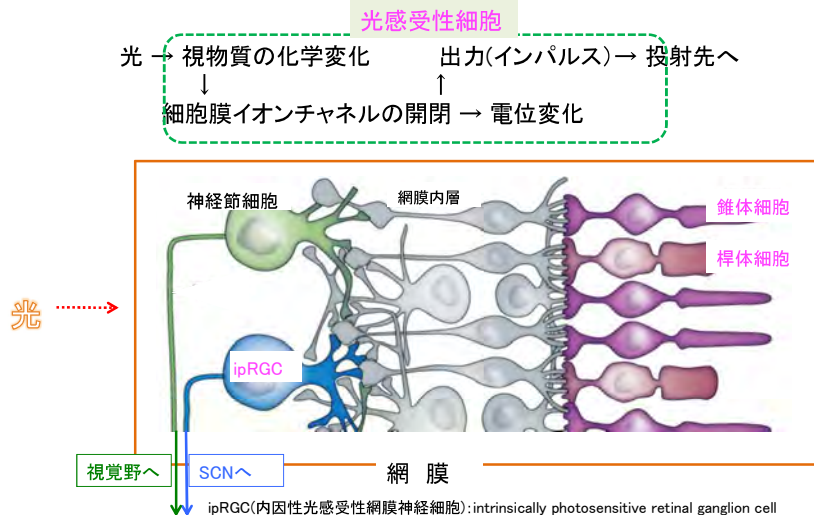
①網膜への物理的ダメージ ←紫外線に近い高エネルギー電磁波

②睡眠覚醒リズムの変調 ←長波長光とは異なる受容システム



(1) 可視光の基本的受容システムとブルーライトの特殊性

可視光の神経興奮変換経路



光感受性細胞の種類と機能

| 光感受性細胞 | 視物質 | | 投射先 | 機能 | |
|------------------------|--------------|----------------|-------|--------|--------|
| | 名称 | 最大吸収波長(※2) | | 暗所視 | 明所視色覚 |
| 桿体細胞 | ロドプシン | 498nm | 外側膝上体 | | |
| 錐体細胞 | S型 | 420nm | | | |
| | M型(※1) L型 | 534nm 564nm | | | |
| 内因性光感受性網膜神経節細胞 (ipRGC) | メラノプシン | 480nm | SCN | 生物時計同調 | 非視覚的作用 |
| | | | OPN | 瞳孔対光反射 | |

※1: 霊長類以外の大部分の哺乳類には存在しない

※2: 光感受性細胞の最大感度を示す波長(ヒト)

つまり;メラトニン分泌の光同調などの非視覚的作用は

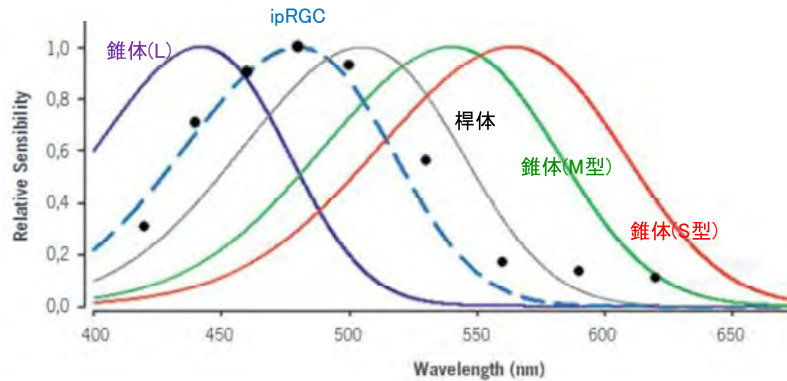
① 主にipRGCからのシグナルによるもの

② 青色波長域の光が強い

各視細胞の相対感度曲線に各波長光のメラトニン分泌抑制率(●)を重ねると;

→ ipRGCの感度曲線に近似

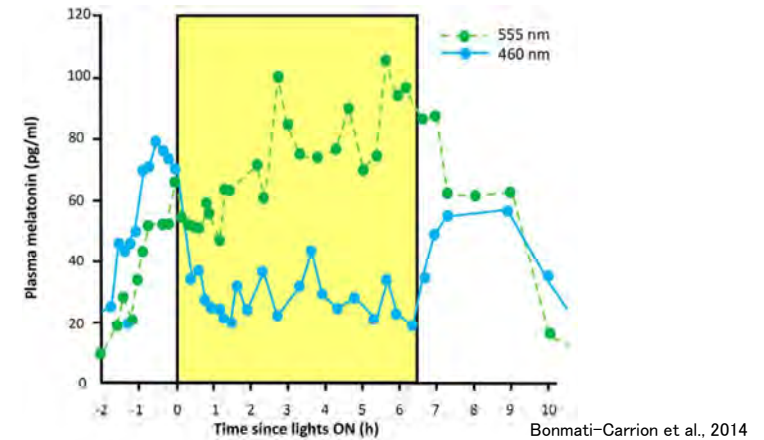
→ ipRGCからの出力がメラトニン抑制作用の主体



(2) ブルーライトのメラトニン分泌抑制効果

550nm = ヒトの比視感度最大波長

460nm = ipRGCの分光感度極大(近傍)



Bonmati-Carrion et al., 2014

5-2 ブルーライトの作用はウシでも同じ?

ipRGCの関与する作用特性(Brainard, 2005)

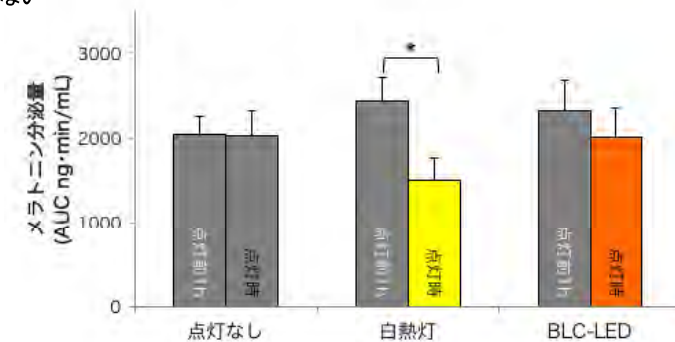
| 生理的応答対象 | ピーク波長(nm) | 動物種 |
|-----------|---------------|--------|
| メラトニン抑制 | 495-505 | ハムスター |
| | 464, 484, 492 | ヒト |
| 瞳孔対光反射 | 498 | マウス |
| | 482, 483 | ヒト, サル |
| ipRGC細胞電極 | 483 | ラット |
| | 482 | サル |

各作用のピーク波長は齧歯類と霊長類で大差ない

→おそらく他の哺乳類(ウシ含む)も同様

【育成牛での暗期点灯実験(500 lx)】

- ・照明としては比較的ブルーライトが少ない白熱灯でも暗期の点灯でメラトニン分泌抑制は起きる
- ・ブルーライトカットLED(550nm以下の波長はほぼゼロ)では抑制が認められない



「牛舎照明で短日効果を期待するには10 lx以下」(3-3-3)

→正確には「ブルーライトを含む場合は10 lx以下」

5. 光の波長と非視覚作用 まとめ

- ・メラトニン分泌はSCNの生物時計を通じて暗期には促進性の刺激を受け、明期には止まる(3-2)
- ・網膜から光刺激をSCNに伝達しているのは(主に) ipRGCである
- ・ipRGCの視物質メラノプシンは青～青緑(450～500nm)の光に対する感受性が特に高い
- ・そのため、青色光は長波長光(黄～赤色光)と比較してメラトニン分泌抑制効果が強い

6. 乳牛飼育における”光線管理”の必要性

(これまで)

- ・暑熱対応(換気・通風)→高天井/開放式;冬期日長時間>9h/d
→長日効果より電気代が…

(最近)

- ・強制換気(トンネル換気、プッシュプル方式)導入で天井低/開口部
- ・LED普及により照明コスト低下
→導入事例増加傾向

(今後の問題)

- ・乾乳期はどうする？



LED照明と長日条件照明の導入事例(北海道)

↓
秋口からの乳量低下をLED投光器による補完照明で抑える

↓
LEDによる省エネルギー効果&生産性向上



藤本牧場は、日没が早まる秋以降の乳量減を光周期コントロールによって改善した。少ない費用で手間もかからず、満足のゆく結果が得られている。

乳牛の生理に影響を与える日長

藤本清之さん(44)は2013年10月からつなぎ牛舎の飼槽上部にLED投光器を設置して日長制御に取り組んでいる。きっかけは所属するサツラク農産・畜産アドバイザーの鎌川博基さん(51)と同経済部営農支援対策課の松崎龍(りょう)さん(38)からの提案。「藤本牧場は秋から冬にかけて、乳量の落ち込みが大きい。明るさと乳量の間は知られているところだが、藤本牧場の場合も日照時間の減少が強く影響しているので

牛舎は32頭収容の対称式で、南北に出入り口、東西の側面に窓がある。

LED投光器設置前の照明は中央通路に蛍光灯(40W)5本、飼槽側は両方にそれぞれ蛍光灯(20W)2本。窓は大きく日中の日差しはよく入るが、照明は少なく日没後は暗い牛舎だった。

餌はトウモロコシサイレージ、牧草ラップサイレージ、ビートパルプ、メイズフレーク、大豆粕、配合飼料(TDN75・CP18)の給与量は3.0~9.0kg/日・頭で、取り組み前後でメニューの変更はない。取り組み前の12年11月、前月検定時



左からサツラク農産の鎌川博基さん、藤本清之さん、サツラク農産の松崎龍さん。

つながっている可能性がある」と話す。

飼槽上部にLED投光器を10台

データを確認し「日長の制御によって秋

Home » LED Applications Products » LED lighting increases milk production at Michigan dairy

LED lighting increases milk production at Michigan dairy

Published on: January 20, 2015

By Maury Wright

Editor in Chief, LEDs Magazine and Illumination in Focus

Michigan State University documents how long-day lighting in a dairy with closely-controlled intensity from LED sources boosted milk production by 8%.



Michigan State University has announced the results of a long-day lighting (LDL) research project at Wing Acres Dairy in Barry County, MI. Researchers from the school's Biosystems and Agricultural Engineering Department worked with the Michigan Milk Producers Association (MMPA) to study the implications of LED-based LDL on milk production, and the study indicates an 8% increase over the course of a year.



LEDによる長日条件が乳量に及ぼす影響

—ミシガン州立大学とミシガン牛乳生産者協会による試験

↓
8%の乳量増加

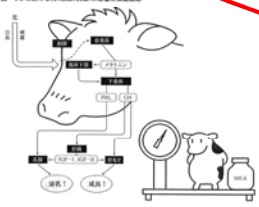
↓
LEDによる省エネルギー効果&生産性向上

光が泌乳・成長に及ぼす影響とメカニズム

二つのホルモンが生産性に強く作用する

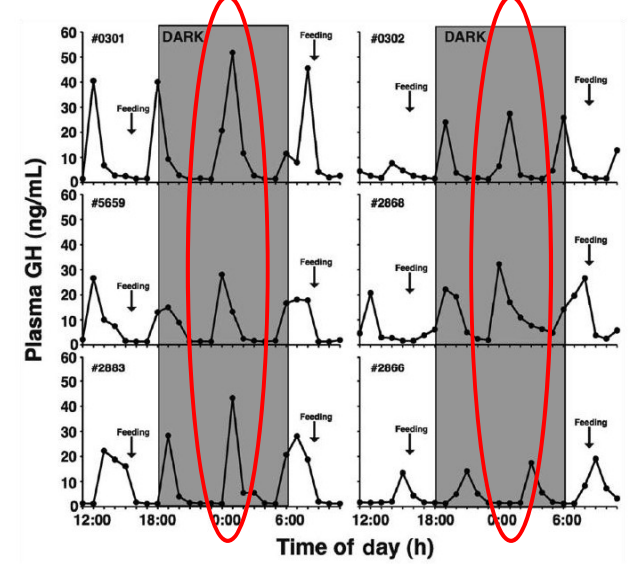
LED照明と長日条件照明の導入事例(北海道)
 ↓
 秋口からの乳量低下をLED投光器による補完照明で抑える
 ↓
 LEDによる省エネルギー効果&生産性向上
 ↓
 LEDによる長日条件が乳量に及ぼす影響(アメリカミシガン州における実証試験)
 ↓
 8%の乳量増加
 ↓
 LEDによる省エネルギー効果&生産性向上

本誌2014年11月号の産乳フォーラムで、日照時間によって乳量が増えることを示した論文が紹介された。日照時間によって乳量が増えることは、乳牛の生産性に大きく影響する。日照時間によって乳量が増えることは、乳牛の生産性に大きく影響する。日照時間によって乳量が増えることは、乳牛の生産性に大きく影響する。



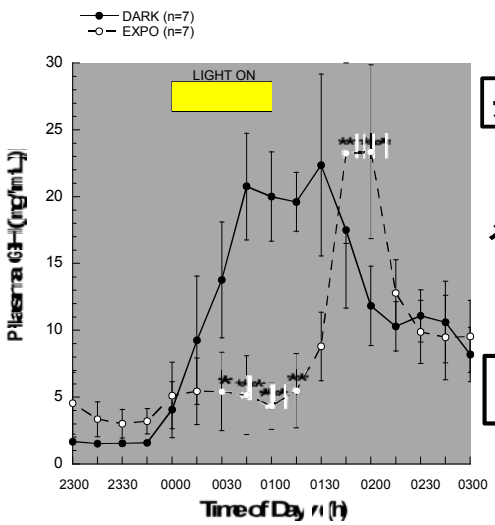
プロラクチン (PRL)
成長ホルモン (GH)

ウシのGH分泌リズム

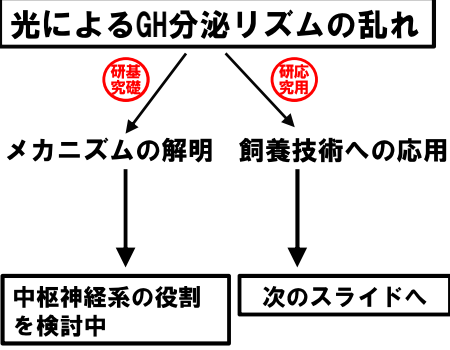


▲ウシのGH分泌リズム (Kasuya et al. 2012)

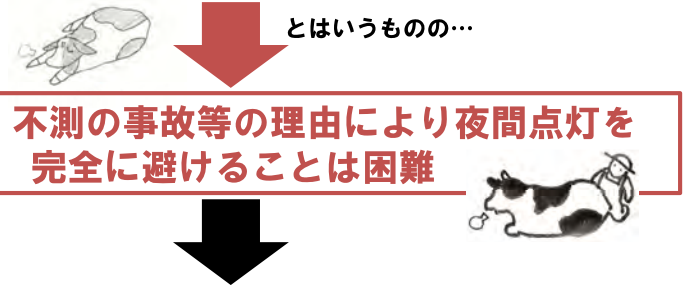
夜間光曝露によるGH分泌抑制



▲深夜の大きなGHピークは照明の点灯により抑制される
 Kasuya et al. (2008) Journal of Animal Science



成長ホルモンの分泌リズムや睡眠を妨げないためには
 (=成長の妨害をしないためには)
 夜間の不定点灯は行わない方が望ましい



ウシの生理状態を変化させない照明手法の開発

- ・照明の種類を検討
- ・波長の検討
- ・体にわるいと言われる青色光の影響の検討

ブルーライト95%減らすLED 昭和電工が開発

2013/11/21 11:46 | 日本経済新聞 電子版

小 中 大 保存 印刷 リプリント 共有

昭和電工はパソコンやスマートフォン（スマホ）の画面などから出る青色の光「ブルーライト」を、従来品より95%減らせる発光ダイオード（LED）チップを開発した。ブルーライトは目の疲れや睡眠障害を引き起こす可能性が指摘されており、専用の遮断メガネが人気を集めている。昭和電工は新型LEDチップを2014年にも製品化し、液晶ディスプレイやLED照明向けの需要を開拓する。

LED照明や液晶ディスプレイは主に青色LEDを光源に使っている。青色LEDから出るブルーライトは目を乾きやすくしたり、眠りにくくしたりする要因になる恐れがあるとされる。

昭和電工は赤紫、黄、青緑の3色のLEDチップを組み合わせ、青色LEDの光源とほぼ同じ光を再現した。従来の赤紫色LEDは照明などの光源にできるほどの明るさがなかったが、独自技術で輝度を高めた。

青色LEDを使わないため、ブルーライトを95%以上減らせる。チップ価格は青色LEDの2～3倍と高いものの、照明や液晶ディスプレイなどの製品価格自体は2～3割高にとどまる見通しという。

昭和電工はLEDチップを生産しているが、青色は手掛けておらず、新型LEDチップを代替品として需要を掘り起こす。秩父事業所（埼玉県秩父市）の既存設備を使い生産する予定。液晶ディスプレイのほか、オフィスや学習機の照明などでの用途を見込む。世界の青色LEDチップの生産量は月間約100億個とされる。昭和電工は置き換えの潜在需要が、このうち5%前後であると予測している。

畜産への応用 → ウシ内分泌リズムや行動に及ぼす影響を検討

