

氏 名 山 本 麻 希

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第524号

学位授与の日付 平成13年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 極域科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 カワウの循環機能調節における自律神経系の

役割に関する研究

論 文 審 査 委 員	主 査 教授	福地 光男
	教授	神田 啓史
	教授	内藤 靖彦
	助教授	吉岡 基 (三重大学)
	助教授	桑原 正貴 (東京大学)

カワウ (*Phalacrocorax carbo*) は保温性の低い羽毛を有するにもかかわらず、極域から熱帯域まで広く分布している。このように幅広い温度域で生息可能なカワウの体温調節は興味深い。また、カワウは水と空気という物理的性質の異なる媒体中で行動することができるが、飛翔、潜水行動に伴って心拍数を著しく変化させなければならない。そのためには特殊な循環調節機構を有していると考えられる。循環機能や体温調節は自律神経活動によって制御されていることから、カワウの自律神経活動は比較生理学的な観点からとても興味深い対象である。本研究は、これまで哺乳類で確立されてきた心拍間隔変動の周波数解析を用いた自律神経機能評価法を応用し、カワウの循環機能の調節に自律神経系が果たす役割を明らかにすることを目的とした。

これまで無拘束の海鳥の心電波形を計測することは、筋電位のノイズの混入、動物による電極の剥奪などから非常に困難とされてきた。そこで、まず無拘束のカワウで簡便に心電波形を計測する方法を確立した。ゲル状円盤形の板電極を胸骨の中央上部と中央下部の皮膚に生体接着剤で固定し、電位ノイズが少ない心電波形データを小型心電波形記録計 (ECG ロガー) に記録することができた。カワウの心電波形を用いて心拍変動の周波数解析を行った結果、0.02 - 0.07 Hz の低周波領域 (LF) と 0.07 Hz 以上の高周波領域 (HF) に 2 つの周波数のピークがあるパワースペクトル図が得られた。哺乳類では HF の面積を副交感神経活動の定量的指標として、また、LF と HF の面積比を交感神経活動の相対的なバランスの指標とする手法が確立されている。しかし、このような自律神経活動を推定する手法は未だ鳥類に応用されていない。そこで、LF、HF が交感・副交感神経活動を反映して表れたものかを検証するため、交感・副交感神経遮断薬を投与する前後の LF、HF の変化を調べた。交感神経の遮断薬としてプロプラノロール、副交感神経の遮断薬としてアトロピンを翼下静脈より投与し、投与前と投与後の心電波形を連続的に計測した。その結果、副交感神経を遮断した際は LF、HF が共に減少し、交感神経を遮断した際は LF だけが減少したことから、LF は両自律神経活動を反映し、HF は副交感神経活動だけを反映していることが確認された。以上のことから、カワウでも哺乳類と同様に心拍変動から自律神経活動を推定する手法が確立された。また、副交感神経の遮断は交感神経の遮断より心拍変動に与える影響が大きく、両方の神経を遮断して得られる固有心拍数は安静時心拍数より高かった。これらのことからカワウは安静時には副交感神経活動を優位に働かせることで、固有心拍数より心拍数を低く保っていることが明らかになった。

続いて、カワウの自律神経系による循環機能調節機構を明らかにするため、(1)異なる環境温度条件においた際と(2)人為的ストレスを与えた際の自律神経活動と循環機能の変化について調べた。

日本に分布するカワウが 1 年間に経験する環境温度として、5、15、25、35°C の 4 つを代表的な実験温度に設定した。心電波形の計測と同時に、体温調節に関わる熱産生の指標である酸

素消費速度および放熱の指標となる熱コンダクタンスを計測した。その結果、低温では、HF、LF/HF 比が共に低い値を示したことから、交感・副交感神経活動はともに低く、熱産生が高く、放熱効果が低かった。一方、高温では HF、LF/HF 比が共に高い値を示したことから、交感・副交感神経活動はともに高く、熱産生が低く、放熱効果が高かった。このように異なる環境温度下においてカワウは自律神経活動を同時に増減させることで熱産生と放熱を調節し、体温を一定に保っていることが明らかとなった。カワウは副交感神経活動の影響が交感神経活動の影響より大きいため、主に副交感神経活動の増減によって異なる環境温度に対し体温調節を行っていることが示唆された。

人為的ストレスとして、カワウのそばにヒトが立つという処置とカワウをヒトが保定するという処置を設定した。実験は1時間の間隔をおいて10分間ずつ、カワウに各々の人為的ストレスを与えた。その結果、人為的ストレスを与えると HF が急激に減少し LF/HF 比が増加したことから、副交感神経活動が減少し交感神経活動が相対的に増加していることがわかった。これら二つの神経活動の変化は相乗的に働くため、人為的ストレスを与えると大きく心拍数が上昇した。

カワウは、安静時には副交感神経活動が優位に働いていた。環境温度の変化に対しては、主に副交感神経活動の増減によって体温調節を行っていた。ストレスを与えられると副交感神経活動を下げ、交感神経活動を上げることによって、急激に心拍数を上昇させた。一般に心拍数と代謝速度には正の相関関係があることから、このように安静時から心拍数を大きく上昇させる能力は、代謝速度の高い上昇をもたらすと予想される。安静時からの高い代謝速度の上昇によって、カワウは羽ばたき飛翔や潜水後の代謝上昇などのエネルギーコストが高い運動を行うことができると考えられた。このようにカワウの副交感神経活動優位な循環機能調節機構は、広い分布域の獲得や飛翔、潜水行動への適応に役立っていると考えられた。

海鳥類は、空中や水中を自由に行動できる数少ない動物群である。中でもウ類は比較的大型の体サイズであり、潜水能力に優れた飛翔性鳥類である。本論文はウ類の飛翔、潜水行動に伴う循環機能調節に着目し、心拍間隔変動の周波数解析法を用いて自律神経系機能を明らかにすることを目的にしている。

論文はウ類の中でカワウを研究対象とし、始めにマイクロデータロガーを利用して非拘束状態のカワウの心電波形を安定して計測する方法を開発することから始めている。従来の非拘束状態の鳥類の心電計測は外科的手術により電極を体内に埋め込む方法をとって来たが、現場における種々の制限から、また術後の回復などのケアを必要とすることから、さらに鳥類にとっても負担となることから、非侵襲的で簡便な方法の開発が求められていた。この課題解決のため、論文では対象種の筋肉と運動の関係を解剖学的に検証し、筋電ノイズの除去を効果的に図れる電極装着部位の詳細な検討を行った。また、電極の形状についても板電極を中心に詳細に検証し、動物の動きによる筋電ノイズの軽減をはかった。その結果、運動中のカワウから QS 波を顕著に検出できた。更に小型化した動物装着型のデータロガーを用い、安定した心電波形を収録することに成功した。

次いで、心電計測ロガーから得られた安静時の心電波形データを用いて心拍変動の周波数解析を行った結果、0.02-0.07Hz の低周波数領域 (LF) と 0.07Hz 以上の高周波領域 (HF) の 2 つの周波数成分があることを明らかにした。従来、哺乳類では LF と HF には血液と呼吸の変動に一致した周波数成分が存在することが知られているが、カワウについても同様に HF 成分は副交感神経活動の定量的指標として、LF と HF の面積比は自律神経活動のバランスを示す指標として利用できること、その結果自律神経機能の評価に使用できることを示した。

論文は次に自律神経の薬物遮断実験により、自律神経機能の検証実験を行なった。プロプラノロールを交感神経遮断に、アトロピンを副交感神経遮断に用いた。副交感神経遮断時に LF / HF 比が高く、交感神経遮断時に HF の上昇が確認されたことから、心拍変動解析法がカワウの自律神経系活動の良い指標となることが確認できた。

論文はさらに温度ストレス、人的かく乱による人為ストレスが自律神経系機能におよぼす影響について実験的検証を行った。カワウは温度変化に対して副交感神経活動の増減によって心拍数、酸素消費速度、放熱効果を調節しているとして。また、人為的ストレスに対して交感神経系活動の増加と副交感神経系活動の低下が起こり相補的に心拍上昇を急激に起こすとしている。これらから本法が鳥類の自律神経系機能の解析方法として広く応用可能であることを示した。カワウは安静時に副交感神経系活動が優位で、心拍数も低く保たれているのは相対的に大きな心臓を有していることによっているとし、一方運動時には副交感神経系活動を下げ、交感神経系活動を上げることで急激に心拍数を上昇させることがで

きるとしている。この安静時から運動時への急速な心拍数の増大能力は高い代謝能力をもたらし、高いコストの羽ばたき飛翔を可能にしているとしている。同時に潜水後の酸素負債からの回復に貢献すると結論している。

以上の研究は、従来困難であったストレスの評価を簡便に行う方法の開発に貢献した点において、また、自律神経系機能の解析方法の有効性を示した点で学位に相当する論文として審査委員会は評価した。