

展示飼育下のケープペンギンにおける趾瘤症発症と 血漿中ビタミンA, ビタミンE, 亜鉛濃度の関連

明石 富美子¹⁾, 織田 悠詩¹⁾, 小島 早紀子¹⁾, 吉澤 聡吾¹⁾,
清水 いと世²⁾, 友永 省三²⁾, 舟場 正幸²⁾, 松井 徹^{2)†}

(¹⁾京都水族館*, ²⁾京都大学農学研究科応用生物科学専攻**)

The relationship between the incidence of bumble foot and plasma vitamin A, vitamin E and zinc concentrations in captured African penguins (*Spheniscus demersus*)

Fumiko AKASHI¹⁾, Yushi ODA¹⁾, Sakiko KOJIMA¹⁾, Sougo YOSHIKAWA¹⁾, Itoyo SHIMIZU²⁾, Shozo TOMONAGA²⁾,
Masayuki FUNABA²⁾ and Tohru MATSUI²⁾

¹⁾Kyoto Aquarium

²⁾Division of Applied Biosciences, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Summary

Bumble foot, an inflammatory pododermatitis, is frequently developed in rearing and exhibiting penguins. Inflammatory dermatitis due to hyperkeratosis is induced by deficiency and excess of vitamin A, and there have been some reports indicating the improvement of inflammatory pododermatitis by supplementation with vitamin E and/or zinc in other bird species. For clarifying the relationship between the incidences of bumble foot and vitamin A, vitamin E or zinc nutrition in African penguins (*Spheniscus demersus*), we investigated dietary and plasma vitamin A, vitamin E and zinc concentrations in penguins with and without bumble foot. The diet contained 27-fold more vitamin A than its estimated requirement (ER). Dietary vitamin E concentration was less than ER in almost all of penguins. Dietary zinc concentration was close to and satisfied ER. Plasma retinol and zinc concentrations were lower in the penguins with bumble foot than in the healthy penguins. On the other hand, the incidence of bumble foot did not affect plasma concentrations of retinyl ester and α -tocopherol.

Because of high vitamin A concentration in diet, the low plasma retinol concentration is not owing to vitamin A deficiency in the penguins with bumble foot and is assumed to result from the suppressed production of retinol binding protein 4 by inflammatory response. Plasma α -tocopherol concentration was not lower than its reported levels, suggesting that dietary vitamin E satisfied its requirement. The incidence of bumble foot may be related to the shortage of zinc. Further experiment is necessary for clarifying the effect of zinc supplementation on the prevention and improvement of bumble foot in penguins

展示飼育下のペンギンでは、腫瘍化足底炎である趾瘤症の発症が問題となっている。趾瘤症の予防を期待して、多くの動物園や水族館では様々なビタミン剤の補給を行っているが、その効果に関しては明瞭になっていない。

鳥類ではビタミンA欠乏・過剰により皮膚の過角化症が生じ、その結果として生じる上皮の損傷により、感染症に罹りやすくなることが知られている¹⁾。化膿性皮膚炎である蜂巣炎は傷からの細菌感染により生じるが、プロイラーではビタミンEと亜鉛補給により発症率が低下する

とされている²⁾。また、七面鳥において亜鉛補給による趾瘤症の軽減化が報告されている³⁾。飼育下のフラミンゴでも趾瘤症が多発しているが、Wyssら⁴⁾は、趾瘤症が多発するフラミンゴ群では血漿中亜鉛濃度が低いが、亜鉛濃度が高い個体でも趾瘤症が生じることもあるので、低い血漿中亜鉛濃度は趾瘤症の直接的な原因ではないが、その発症を促進すると示唆している。

本試験では、ペンギンにおける趾瘤症発症とビタミンA, ビタミンEまたは亜鉛栄養の関連を明らかにするため、

*所在地：京都市下京区観音寺町35-1 (〒600-8835)

**所在地：京都市左京区北白川追分町 (〒606-8502)

†連絡先 (corresponding author), E-mail: matsui@kais.kyoto-u.ac.jp

飼料中ならびに正常群と趾瘤症群のペンギンにおける血漿中ビタミン A, ビタミン E, 亜鉛濃度を測定した。

実験方法

供試動物, 飼料, サンプル採取

本試験は, 日本動物園水族館協会ガイドラインを遵守し行われた。京都水族館で展示飼育されているケープペンギン (*African penguin*) 種 (*Spheniscus demersus*) の正常な成鳥 16 羽 (雄 8 羽, 雌 8 羽) と趾瘤症の成鳥 14 羽 (雄 8 羽, 雌 6 羽) を供試した。正常群の雄と雌の年齢は, 5.4 ± 3.8 歳 (以下, 平均 \pm 標準偏差) と 6.2 ± 3.8 歳であった。また趾瘤症群の雄と雌の年齢は, 4.7 ± 2.6 歳と 4.9 ± 2.5 歳であった。これらには, 慣行的に 1 日あたり 282 ± 58 g のアジをほぼ 3 等分し, 10:00, 13:00, 16:00 に給与されていた。なお, 正常群の雄, 趾瘤症群の雄, 正常群の雌, 趾瘤症群の雌の飼料摂取量は, それぞれ 287 ± 65 g, 286 ± 44 g, 295 ± 63 g, 251 ± 64 g であり, 各区間で差は認められなかった。また, 10:00 の飼料給与の際には, 1 錠の展示鳥類用ビタミン剤 (Mazuri Vita-Zu Small Bird Tablet # 5M25, Land O'Lakes, Minnesota: ビタミン A, 835 IU/錠; ビタミン E, 25 IU/錠) が与えられていた。したがって, 1 日あたりのビタミン A ならびにビタミン E の摂取量/飼料乾物摂取量 (飼料中ビタミン含量) は, アジの摂取が多い個体では少なくなるが, 亜鉛の飼料中含量は, 総ての個体で差はなかった。また, 摂取されたビタミン A ならびにビタミン E のそれぞれ $11 \pm 3\%$, $88 \pm 2\%$ がビタミン剤から供給されていた。

これらペンギンから朝の飼料給与前に血液を採取し, ヘパリン血漿とした。給与飼料であるアジならびに血漿は分析まで -20°C で凍結保存した。

分析

アジ中水分含量は, 愛玩動物用飼料等の検査法のケイソウ土添加フィルム法により求めた⁵⁾。アジ中ビタミン A およびビタミン E 濃度は, ファルコライフサイエンス社 (京都) に分析を委託し, 五訂日本食品標準成分表分析マニュアル⁶⁾ に準じて, ケン化処理後に HPLC を用いてレチノールおよび α -トコフェロールとして測定した。飼料中亜鉛濃度は, 硝酸と過塩素酸による湿式灰化の後に, 原子吸光分析器 (AA-6600F, 島津製作所, 京都) を用いて測定した。

血漿中レチノール濃度, 血漿中レチニルエステル濃度ならびに血漿中 α -トコフェロール濃度は, ヘキサン抽出の後に ODS カラム (UG120, 4.6 mm \times 150 mm, 粒子径 5 μm , 資生堂, 東京) ならびに分光検出器 (SPD-10A, 島津製作所) を装着した HPLC (LC-10AD, 島津製作所) により, 大森と武藤の方法⁷⁾ を用い分析した。溶離液としては, メタノール: エタノール (V/V 90/10) を用い, 流速は 1 ml/min とした。レチノールとレチニルエステルは 325 nm で, α -トコフェロールは 292 nm で測定した。この方法では, パルミチン酸ならびにオレイン酸のレチニルエステルの分離ができなかったため, Wilson らの報告⁸⁾ にしたがってレチニルエステル濃度をレチニルパルミテート相当濃度として示した。なお, 極少量のレチニルステアレートが検出される場合もあったが, 定量できなかった。血漿中亜鉛濃度は, 飼料中亜鉛と同じ方法で分析した。血漿中アルブミン濃度は, 臨床化学分析装置 (ドライケム 4000V, 富士フィルム, 東京) を用い測定した。

統計処理

データは平均値と標準偏差で示した。飼料中亜鉛含量以外のデータは, 性の効果, 趾瘤症発症の効果とこれらの交

Table 1 Dietary vitamin A, vitamin E and zinc contents in penguins with bumble foot^{a, b)}

		Vitamin A IU/kg dry matter	Vitamin E IU/kg dry matter	Zinc mg/kg dry matter
Healthy	Male	96,110 \pm 3,590 (93,560 – 104,470)	303 \pm 85 (242 – 502)	57.6
	Female	95,520 \pm 2,060 (92,130 – 98,460)	289 \pm 49 (208 – 359)	57.6
Bumble foot	Male	95,650 \pm 1,510 (93,560 – 97,230)	292 \pm 36 (242 – 330)	57.6
	Female	97,720 \pm 4,110 (94,460 – 105,460)	341 \pm 98 (264 – 526)	57.6
Estimated requirement ^{c)}		3,500	400	50.0
ANOVA (P=)				
Sex		0.592	0.592	–
Bumble foot		0.483	0.483	–

^{a)} Means \pm SD with ranges in parenthesis

^{b)} Dietary vitamin content was calculated as total amount of dietary and supplemental vitamin divided by dry weight in diet.

^{c)} Penguins: Nutrition and Dietary Husbandry⁹⁾

相互作用からなる二元配置分散分析を用いて統計検定を行った。総てのデータにおいて交互作用は有意ではなかったため、続いて、性の効果と趾瘤症発症の効果からなる二元配置分散分析を用いて統計検定を行った。また、全個体のデータを用い、血漿中レチノール濃度と血漿中レチニルエステル濃度、血漿中レチノール濃度と血漿中 α -トコフェロール濃度、血漿中レチニルエステル濃度と血漿中 α -トコフェロール濃度、血漿中アルブミン濃度と血漿中亜鉛濃度の相関分析を行った。統計処理には、SAS (version 9.1, SAS Institute, Cary, North Carolina) の GLM procedure と CORR procedure を用いた。

結 果

ビタミン A およびビタミン E の飼料中含量には、性ならびに趾瘤症の影響は認められなかった (Table 1)。ペンギンは魚食性鳥類であるが、その栄養素要求量はほとんど報告がなく、ニワトリならびに肉食性であるネコの栄養素要求量、野生のペンギンにおける栄養素摂取量から推定栄養素要求量が求められている⁹⁾。本試験で用いた飼料におけるこれらビタミンと亜鉛の含量を推定要求量と比較した。供試した全個体における飼料中ビタミン A 含量は、 $96,148 \pm 2,878$ IU/kg 乾物であり、推定要求量の 27 倍であった。供試した全個体の飼料中ビタミン E 含量は、 304 ± 69 IU/kg 乾物であり、推定要求量を上回っていた個体は、正常な雄と趾瘤症の雌 1 羽ずつだった。また、半数以上の個体では推定要求量の 75% を下回っていた。ただし、ペンギンの主な飼料源である魚は不飽和脂肪酸を多く含み、保存中のこれらの過酸化によるビタミン E の損失を考慮し、ビタミン E の推定要求量は高めに設定されている⁹⁾。飼料中亜鉛含量は 57 mg/kg 乾物であり、わずかではあるが推定要求量を上回っていた。

血漿中レチノール濃度には性による影響は認められなかった (Table 2)。しかし、趾瘤症の影響は有意であった。雌雄のデータをまとめると、趾瘤症群の血漿中レチノール

濃度は 128.9 ± 29.8 μ g/dl であり、正常群の血漿中レチノール濃度 149.5 ± 26.4 μ g/dl と比べ低かった。ペンギンにおける血漿中レチノール濃度は報告により大きく異なっているが (Table 3)、本試験における趾瘤症群を含めたペンギンの血漿中レチノール濃度は、多くの報告^{10,13-15)} と比べると同程度または高かった。

血漿中にレチニルエステルは存在していたが、その濃度に性や趾瘤症の影響は認められなかった (Table 2)。全個体をまとめた血漿中レチニルエステル濃度は、 8.02 ± 2.76 μ g/dl であり、血漿中レチノール濃度よりも著しく低かった。このように、血漿中レチノール濃度と比べ著しく低いレチニルエステル濃度が、飼育下ならびに野生のフンボルトペンギン^{12,14)} でも報告されている (Table 3)。

血漿中 α -トコフェロール濃度には、性ならびに趾瘤症の影響は認められず (Table 2)、全個体をまとめた濃度は $3,753 \pm 991$ μ g/dl であった。また、血漿中 α -トコフェロール濃度は、推定要求量を大きく上回るビタミン E 含量の飼料を給与されていた同種のペンギンにおける報告と差がなく¹⁰⁾、他のペンギンにおける多くの報告^{12-14,16)} と比べると同程度または高かった (Table 3)。

血漿中亜鉛濃度には性の影響は認められなかったが、趾瘤症の影響が認められ (Table 2)、雌雄をまとめると、正常群では 2.78 ± 0.42 mg/l、趾瘤症群では 2.25 ± 0.63 mg/l と趾瘤症群で低かった。ペンギンの血漿中亜鉛濃度に関してはほとんど報告がないが、野生のイワトビペンギン (Rockhopper penguin) の血漿中亜鉛濃度は 2.80 ± 0.46 mg/l であり¹⁷⁾、本試験における正常群の血漿中亜鉛濃度と差はなかった。血漿中アルブミン濃度には、性および趾瘤症の影響は認められなかった (Table 2)。

また、年齢と血漿中レチノール濃度、血漿中レチニルエステル濃度、血漿中 α -トコフェロール濃度、亜鉛濃度に関連は認められなかった (データは示さなかった)。

血漿中レチノール濃度とレチニルエステル濃度、血漿中レチノール濃度と α -トコフェロール濃度、血漿中アルブミン濃度と亜鉛濃度に相関関係は認められなかった

Table 2 Plasma concentrations of retinol, retinyl ester, α -tocopherol, zinc and albumin in penguins with bumble foot^{a)}

		Retinol μ g/dl	Retinyl ester μ g/dl	α -Tocopherol μ g/dl	Zinc mg/l	Albumin g/dl
Healthy	Male	164.6 ± 22.1 (141.0–211.7)	6.73 ± 2.65 (2.64–10.30)	$3,317 \pm 915$ (2,088–4,860)	2.60 ± 0.42 (2.08–3.38)	1.5 ± 0.1 (1.4–1.6)
	Female	134.3 ± 22.1 (101.6–154.9)	8.98 ± 2.54 (5.84–12.10)	$3,755 \pm 944$ (2,726–5,555)	2.96 ± 0.63 (2.21–4.02)	1.6 ± 0.3 (1.3–2.2)
Bumble foot	Male	132.7 ± 32.5 (83.9–149.3)	8.76 ± 2.65 (3.59–13.06)	$4,336 \pm 930$ (2,202–4,865)	2.23 ± 0.65 (1.71–3.57)	1.6 ± 0.2 (1.4–1.7)
	Female	123.9 ± 27.7 (93.0–192.9)	7.50 ± 3.19 (3.12–11.46)	$3,552 \pm 1084$ (3,259–5,940)	2.28 ± 0.65 (1.70–3.28)	1.6 ± 0.1 (1.4–1.8)
ANOVA (P=)						
Sex		0.062	0.566	0.667	0.245	0.686
Bumble foot		0.032	0.697	0.224	0.025	0.817

^{a)} Means \pm SD with ranges in parenthesis

Table 3 Summary for the reported concentrations of plasma vitamin A and vitamin E in penguins

Species	n	Plasma			Diet		Condition	Reference
		Retinol μg/dl	Retinyl ester μg/dl	α-Tocopherol μg/dl	Vitamin A IU/kg DM	Vitamin E IU/kg DM		
African penguin	15-16	85.7 ± 39.9	ND ^{a)}	3,710 ± 1230	70,175 ^{b)}	2,838 ^{b)}	Captured	Gulland <i>et al.</i> ¹⁰⁾
Humboldt penguins	39	190 ± 8	11.0 ± 0.4	2640 ± 940	59,800	58.6	Captured	Crissey <i>et al.</i> ¹²⁾
Humboldt penguins	19	120 ± 9	3 ± 12	3910 ± 372	13,500	40.5	Captured	Crissey <i>et al.</i> ¹²⁾
Ggentoo penguin	5	58 - 109	ND	3080 - 5070	ND	ND	Captured	Monroe ¹³⁾
Rockhopper penguin	10	63 - 114	ND	2230 - 4080	ND	ND	Captured	Monroe ¹³⁾
Humboldt penguin ^{c)}	30	117 ± 8	7.4 ± 0.7	1887 ± 99	ND	ND	Free-living	Wallace <i>et al.</i> ¹⁴⁾
Rockhopper penguin ^{d)}	12	138 ± 27	ND	ND	ND	ND	Free-living	Ghebremeskel <i>et al.</i> ¹⁵⁾
Magellanic penguin ^{d)}	4	67.7 ± 9.7	ND	ND	ND	ND	Free-living	Ghebremeskel <i>et al.</i> ¹⁵⁾
Ggentoo penguin ^{c)}	6	67.9 ± 8.7	ND	ND	ND	ND	Free-living	Ghebremeskel <i>et al.</i> ¹⁵⁾
Macaroni penguin ^{e)}	8	160 ± 30	ND	3260 ± 540	ND	ND	Free-living	Ghebremeskel <i>et al.</i> ¹⁶⁾

Means ± SD or ranges

a) data not available

b) Dietary vitamin concentrations were calculated from vitamin intake and dry matter intake of which was calculated from standard moisture concentration of fish (sprat)¹¹⁾

c) Pre-breeding male

d) Non-molting adult

e) Pre-moult male

(Fig. 1)。一方、血漿中レチニルエステル濃度とα-トコフェロール濃度には有意な正の相関関係が認められた。

考 察

本試験における飼料中ビタミン A 含量は、推定要求量⁹⁾の 27 倍であった。また、このビタミン A 含量は他のペンギンにおける報告よりも著しく多かった^{10, 12)}。ペンギンにおけるビタミン A の最大耐用量は明らかになっていないが、本試験における飼料中ビタミン A 含量は、産卵鶏における許容上限量を上回っており、ネコにおける許容上限量を下回っていた¹⁸⁾。肉食性であるネコはビタミン A 過剰に対し高い耐性を有しているが、魚食性であるペンギンにおいても、野生下で摂取している小魚に含まれるビタミン A 含量は著しく高い場合があり、ビタミン A 過剰に対する耐性は高いことが示唆されている¹²⁾。

多くの哺乳動物と同様に、鳥類も肝臓でビタミン A を貯蔵しており、肝臓からの輸送時には、レチノールはレチノール結合タンパク質 4 (RBP4) との複合体として肝臓から放出され、血液中でトランスサイレチンと結合し肝臓外組織に運搬されるため、血漿中の主なビタミン A の形態はレチノールである¹⁹⁾。ネコでは、レチノールは 30% が RBP4・トランスサイレチンとの複合体として、また 70% が超低密度リポタンパク質に取り込まれたレチニルエステルとして肝臓から血液中を肝臓外組織に運搬される²⁰⁾。したがって、ネコでは血漿中レチニルエステル濃度は恒常的に高い。本試験では、趾瘤症発症に係わらず、血漿中でレチニルエステルは認められたが、血漿中レチノール濃度よりも著しく低かった。これは、飼育下ならびに野生のファンボルトペンギン (Humboldt penguin) における報告^{12, 14)}と一致していた。したがって、ペンギンでは、他

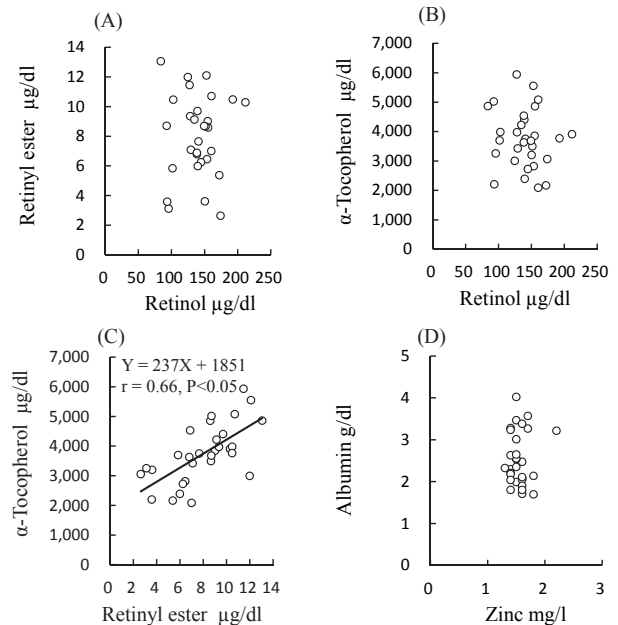


Fig. 1 The relationship between plasma concentrations of retinol and retinyl ester (A), retinol and α-tocopherol (B), retinyl ester and α-tocopherol (C), and zinc and albumin (D) in penguins

の多くの動物同様にネコとは異なり、肝臓から輸送されるビタミン A の主な形態はレチノールであることが確認された。

吸収されたレチノールは小腸細胞内でレチニルエステルとなり、カイロミクロンに取り込まれてリンパ管、次いで血管を介して肝臓へ運搬される。そのため、ビタミン A 摂取後一時的に血漿中レチニルエステル濃度が上昇する⁸⁾。また、ラットおよびヒトにおいて、ビタミン A 過剰摂取は、血漿中レチニルエステル濃度を上昇させることも知られている^{21, 22)}。本試験では、アジとともにビタミン剤を給与前に採血を行った。一方、本試験と同じ飼料を摂取した

ケープペンギンでは、食前および食後6時間にわたり血漿中レチニルエステル濃度の大きな変化は認められなかった(未発表)。ラットおよびヒトでは、ビタミンA過剰摂取により血漿中レチニルエステル濃度が上昇しても、血漿中レチノール濃度は変化しない^{21, 22)}。本試験では、血漿中レチノール濃度と血漿中レチニルエステル濃度の間に関連は認められなかった。しかし、Crisseyら¹²⁾は、ビタミンA摂取量が多いフンボルトペンギンでは血漿中レチニルエステル濃度とともに血漿中レチノール濃度が高まることを報告している。本試験の正常群ならびに趾瘤症群における血漿中レチノール濃度は、ビタミンA含量が本試験より低い推定要求量を大きく上回る飼料を給与されていた同種のペンギンよりも高かった¹⁰⁾。また、フンボルトペンギンにおける典型的な血漿中レチノール濃度は、68から130 $\mu\text{g}/\text{dl}$ であることが示唆されているが²³⁾、本試験における正常群ならびに趾瘤症群において、この範囲を下回る個体はなく、正常群では80%の個体が、趾瘤症群では50%がこの範囲を上回っていた。したがって、ペンギンにおいてビタミンA過剰が血漿中レチノール濃度に及ぼす影響を検討する必要がある。Wallaceら²³⁾は、高水準のビタミンAを摂取したペンギンでは血漿中レチノール濃度と血漿中レチニルエステル濃度が上昇することから、血漿中レチノール濃度が200 $\mu\text{g}/\text{dl}$ を上回り、かつ血漿中レチニルエステル濃度が10 $\mu\text{g}/\text{dl}$ を上回る場合は潜在的なビタミンA過剰とすることを提唱している。本試験では、正常群個体の1羽では血漿中レチニルエステル濃度が10 $\mu\text{g}/\text{dl}$ を上回るとともに、血漿中レチノール濃度が200 $\mu\text{g}/\text{dl}$ を上回っていた。したがって、Wallaceら²³⁾の基準からは、本試験のペンギン群にはビタミンA過剰のリスクがあると推察される。

正常群と比べ趾瘤症群の血漿中レチノール濃度は低かった。血漿中レチノール濃度は、ビタミンA欠乏またはRBP4合成低下により減少する²⁴⁻²⁶⁾。本試験では、ビタミンA摂取量は推定要求量⁹⁾を大きく上回っており、趾瘤症群の血漿中レチノール濃度でも他のペンギンにおける報告^{10, 13-15)}と比べると低くなかった。趾瘤症による血漿中レチノール濃度の低下はビタミンA不足に起因しておらず、ビタミンA不足が趾瘤症の発症や回復に影響を及ぼしていないことが示唆された。タンパク質摂取不足は、RBP4の合成抑制を介して血漿中レチノール濃度を減少させることが知られているが²⁴⁾、本試験では、正常群と趾瘤症群の飼料摂取量および血漿中アルブミン濃度には差はなかった。趾瘤症群における血漿中レチノール濃度の低値は、栄養不良に起因するとは考えられない。一方、炎症性疾患はRBP4合成抑制を介して血漿中レチノール濃度を低下させる^{25, 26)}。また、亜鉛不足もRBP4合成抑制を介して血漿中レチノール濃度を低下させる²⁴⁾。後述するように、趾瘤症群では亜鉛が不足している可能性もある。したがって、趾瘤症による炎症反応または趾瘤症群における亜鉛不足がRBP4合成を抑制し、その結果、血漿中レチノール濃

度が低下したことが推察された。

ビタミンA過剰によりビタミンEの吸収が抑制され²⁷⁾、血漿中 α -トコフェロール濃度が低下する²⁸⁾。Crisseyら¹²⁾は、高水準のビタミンAを含む飼料を給与されたフンボルトペンギンでは、推定要求量⁹⁾を上回るが比較的低水準のビタミンAを含む飼料を給与された場合と比べ、飼料中ビタミンE含量に大きな差がないにもかかわらず血漿中 α -トコフェロール濃度が低かったと報告している。本試験で用いた飼料中のビタミンA含量はCrisseyら¹²⁾が用いた高ビタミンA飼料よりも高かった。また、本試験で用いた飼料中のビタミンE含量は多くの個体で推定要求量⁹⁾を下回っていたが、Crisseyら¹²⁾が用いた飼料中ビタミンE含量より著しく多かった。本試験における血漿中 α -トコフェロール濃度は、他のペンギンにおける報告^{12-14, 16)}と比べると同程度または高く、ビタミンE含量が本試験より著しく高い飼料を給与されていた同種のペンギンと同程度であった¹⁰⁾。また、フンボルトペンギンにおける典型的な血漿中 α -トコフェロール濃度は、1500から2500 $\mu\text{g}/\text{dl}$ であることが示唆されているが²³⁾、本試験ではこの範囲を下回る個体はなく、87%の個体がこの範囲を上回っていた。さらに、血漿中 α -トコフェロール濃度は、レチノール濃度との相関が認められず、レチニルエステル濃度とは、逆に正の相関関係があった。Crisseyら¹²⁾が用いていた著しくビタミンE含量が低い飼料を給与されたペンギンでは、高水準のビタミンA摂取によりビタミンE不足になる可能性はあるが、本試験で供試したペンギンでは趾瘤症群を含め、飼料中ビタミンA含量は高いが、ビタミンEは不足していなかったことが示唆され、ビタミンEの栄養状態が趾瘤症の発症や回復に影響を及ぼしているとは考えられなかった。血漿中 α -トコフェロール濃度とレチニルエステル濃度との間に正の相関が認められた原因は明らかではないが、 α -トコフェロールは超低密度リポタンパク質に組み込まれて肝臓から血液を介して肝臓外組織に運搬される²⁹⁾。また、血漿中レチニルエステルも超低密度リポタンパク質に組み込まれた形態で存在している³⁰⁾。したがって、ペンギンの血漿中超低密度リポタンパク質濃度が血漿中 α -トコフェロール濃度とともにレチニルエステル濃度に影響している可能性がある。飼料中亜鉛含量はわずかではあるが推定要求量⁹⁾を上回っていた。本試験における正常群の血漿中亜鉛濃度は、野生のイワトビペンギンにおける亜鉛濃度¹⁷⁾と差はなかった。しかし、趾瘤症群の血漿中亜鉛濃度はこれらと比べると低かった。飼育下のフラミンゴでも、趾瘤症が多発する群では血漿中亜鉛濃度が低いことが報告されている⁴⁾。乾癬、静脈性潰瘍脚症候群など皮膚疾患の患者では、血漿中亜鉛濃度が低いとされている^{31, 32)}。また、炎症性リウマチ疾患患者では、血漿中亜鉛濃度は低下するが単球の亜鉛濃度は上昇することから、炎症によって亜鉛の体内分布が変化することが示唆されており、亜鉛補給により単球の亜鉛濃度は変化しないが、血漿中亜鉛濃度は回復すること

が示されている³³⁾。一方、全身性炎症反応症候群患者では、血漿中亜鉛濃度が低値となるが、アルブミン濃度も低く、血漿中亜鉛濃度とアルブミン濃度に正の相関関係があることが示されており、血漿中では亜鉛の70%がアルブミンと結合していることから、炎症反応症候群患者では亜鉛栄養状態とは関係なく血漿中アルブミン濃度低下に伴い亜鉛濃度も低下することが示唆されている³⁴⁾。しかし、本試験では、正常群と趾瘤症群の間に血漿中アルブミン濃度の差はなく、血漿中亜鉛濃度とアルブミン濃度にも相関は認められなかった。一方、プロイラーでは化膿性皮膚炎である蜂巣炎の発症がビタミンEと亜鉛補給により抑制できること²⁾、七面鳥に対する亜鉛補給が趾瘤症の発症を抑制することが報告されている³⁾。また、炎症性瘡瘍患者に対する亜鉛補給が、炎症を軽減させることも報告されている³⁵⁾。本試験では、正常群ならびに趾瘤症群における飼料中亜鉛含量は等しく、推定要求量程度⁹⁾であるにも係わらず、趾瘤症群において血漿中亜鉛濃度が低かった。したがって、亜鉛の利用能の低いペンギンでは亜鉛が不足し、その結果として趾瘤症が発生した可能性、趾瘤症により亜鉛要求量が高まるため亜鉛が不足し、趾瘤症からの回復が遅延した可能性、趾瘤症による血漿中亜鉛濃度の低下は亜鉛不足と関係がない可能性がある。

本試験の結果から、飼料中ビタミンA含量は著しく高く、正常群と比べると趾瘤症群の血漿中レチノール濃度はわずかに低かったが、他のペンギンにおける報告と比べると趾瘤症群でも血漿中レチノール濃度は低くなかったので、ビタミンA不足ではないと推察された。飼料中ビタミンE含量は推定要求量を下回っていたが、他の報告と比べ趾瘤症群でも血漿中 α -トコフェロール濃度は低くないことから、飼料中のビタミンEは不足していないと考えられた。一方、趾瘤症群では正常群よりも血漿中亜鉛濃度が低く、他のペンギンにおける報告と比べても血漿中亜鉛濃度が低いことから、亜鉛不足が趾瘤症と関連がある可能性がある。今後、亜鉛補給が趾瘤症の予防や治療に及ぼす影響を検討する必要がある。

本試験の一部は、京都大学野生動物研究センターからの資金援助によって行われた。

参考文献

- 1) Harrison GJ, McDonald D (2006) Nutritional considerations: section II nutritional disorders. in *Clinical Avian Medicine*. Spix Publishing, Palm Beach: pp. 108-140.
- 2) Downs KM, Hess JB, Macklin KS, Norton RA (2000) Dietary zinc complexes and vitamin E for reducing cellulitis incidence in broilers. *J Appl Poul Res* 9: 319-323.
- 3) Youssef IMI, Beineke A, Rohn K, Kamphues J (2012)

Influences of increased levels of biotin, zinc or mannanoligosaccharides in the diet on foot pad dermatitis in growing turkeys housed on dry and wet litter. *J Anim Physiol Anim Nutr* 96: 747-761.

- 4) Wyss F, Wolf P, Wenker C, Hoby S, Schumacher V, Béchet A, Robert N, Liesegang A (2014) Comparison of plasma vitamin A and E, copper and zinc levels in free-ranging and captive greater flamingos (*Phoenicopterus roseus*) and their relation to pododermatitis. *J Anim Physiol Anim Nutr* 98: 1102-1109.
- 5) 独立行政法人農林水産消費安全技術センター、愛玩動物用飼料等の検査法, <http://www.famic.go.jp/ffis/pet/sub4.html> (2016年3月2日閲覧)
- 6) 文部科学省科学技術・学術審議会源調査分科会食品成分部会編 (1997) I 脂溶性ビタミン. in 五訂日本食品標準成分表分析マニュアル, 文部科学省科学技術・学術審議会源調査分科会食品成分部会編, 国立印刷局, 東京: pp. 54-99.
- 7) 大森正英, 武藤泰敏 (1989) ビタミンA. in ビタミンハンドブック3, ビタミン分析法 (ビタミン学会編) 科学同人, 京都: pp. 1-13.
- 8) Wilson DE, Chan I-F, Ball M (1983) Plasma lipoprotein retinoids after vitamin A feeding in normal man: Minimal appearance of retinyl esters among low density lipoproteins. *Metabolism* 32: 514-517.
- 9) Crissey S, Slifka K, McGill P (2001, 2002) Penguins: Nutrition and Dietary Husbandry. in *Nutrition Advisory Group Handbook Factsheet 012*. <http://nagonline.net/836/penguins-nutrition-dietary-husbandry/> (2016年3月2日閲覧)
- 10) Gulland FM, Ghebremeskel K, Williams G, Olney PJ (1988) Plasma vitamins A and E, total lipid and cholesterol concentrations in captive jackass penguins (*Spheniscus demersus*) *Vet Rec* 123: 666-667.
- 11) National Food Institute, Technical University of Denmark (2009) *Danish Food Composition Databank—ed. 7.01*. (2016年3月2日閲覧)
- 12) Crissey SD, McGill P, Simeone AM (1998) Influence of dietary vitamins A and E on serum α - and γ -tocopherols, retinol, retinyl palmitate and carotenoid concentrations in Humboldt penguins (*Spheniscus humboldti*) *Comp Biochem Physiol Part A* 121: 333-339.
- 13) Monroe A (1993) Annual variations in plasma retinol and alpha-tocopherol levels in gentoo and rockhopper penguins. *Zoo Biol* 12: 453-458.
- 14) Wallace RS, Teare JA, Diebold E, Michaels M, Willis MJ (1996) Plasma tocopherol, retinol, and carotenoid concentrations in free-ranging Humboldt penguins (*Spheniscus humboldti*) in Chile. *Zoo Biol* 15: 127-134.

- 15) Ghebremeskel K, Williams G, Keymer IF, Horsley DT (1989) Liver and plasma retinol (vitamin A) in wild, and liver retinol in captive penguins (Spheniscidae). *J Zool, Lond* 219: 245-250.
- 16) Ghebremeskel K, Williams TD, Williams G, Gardner DA, Crawvord MA (1991) Plasma metabolites in macaroni penguins (*EUDYPTES CHRYSOLOPHUS*) arriving on land for breeding and moulting. *Comp Biochem Physiol* 99A: 245-250.
- 17) Karesh WB, Uhart MM, Frere E, Gandini P, Braselton WE, Puche H, Cook RA (1999) Health evaluation of free-ranging rockhopper penguins (*EUDYPTES CHRYSOCOMES*) in Argentina. *J Zoo Wildl Med* 30: 25-31.
- 18) National Research Council, Subcommittee on Vitamin Tolerance (1987) in *Vitamin Tolerance of Animals*. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- 19) Abe T, Muto Y, Hosoya N (1975) Vitamin A transport in chicken plasma: isolation and characterization of retinol-binding protein (RBP), prealbumin (PA), and RBP-PA complex. *J Lipid Res* 16: 200-210.
- 20) Raila J, Mathews U, Schweigert FJ (2001) Plasma transport and tissue distribution of β -carotene, vitamin A and retinol-binding protein in domestic cats. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 130: 849-856.
- 21) Mallia AK, Smith JE, Goodman DW (1975) Metabolism of retinol-binding protein and vitamin A during hypervitaminosis A in the rat. *J Lipid Res* 16: 180-188.
- 22) Krasinski SD, Russell RM, Otradovec CL, Sadowski JA, Hartz SC, Jacob RA, McGandy RB (1989) Relationship of vitamin A and vitamin E intake to fasting plasma retinol, retinol-binding protein, retinyl esters, carotene, α -tocopherol, and cholesterol among elderly people and young adults: increased plasma retinyl esters among vitamin A-supplement users. *Am J Clin Nutr* 49: 112-120.
- 23) Wallace RS, Crissey S, Willis M, McGill P (1992) The effect of dietary vitamin A (retinol) and vitamin E (α -tocopherol) on serum status of Humboldt penguins. *Spheniscus Penguin Newsletter* 114-20.
- 24) Glover J (1983) Factors affecting vitamin A transport in animals and man. *Proc Nutr Soc* 42: 19-30.
- 25) Rosales FJ, Ritter SJ, Zolfaghari R, Smith JE, Ross AC. (1996) Effects of acute inflammation on plasma retinol, retinol binding protein, and its mRNA in the liver and kidneys of vitamin A-sufficient rats. *J Lipid Res* 37: 962-971.
- 26) Stephensen CB, Gildengorin G (2000) Serum retinol, the acute phase response, and the apparent misclassification of vitamin A status in the third National Health and Nutrition Examination Survey. *Am J Clin Nutr* 72: 1170-1178.
- 27) Combs GF, Jr (1976) Differential effects of high dietary levels of vitamin A on the vitamin E-selenium nutrition of young and adult chickens. *J Nutr* 106: 967-975.
- 28) Blakely SR, Grundel E, Jenkins MY, Mitchell GV (1990) Alterations in β -carotene and vitamin E status in rats fed β -carotene and excess vitamin A. *Nutr Res* 10: 1035-1044.
- 29) Cohn W, Loechleiter F, Weber F (1988) α -Tocopherol is secreted from rat liver in very low density lipoproteins. *J Lipid Res* 29: 1359-1366.
- 30) Schindler R, Klopp A (1986) Transport of esterified retinol in fasting human blood. *Int J Vitam Nutr Res* 56: 21-27.
- 31) Greaves M, Boyde TR (1967) Plasma-zinc concentrations in patients with psoriasis, other dermatoses, and venous leg ulceration. *Lancet* 2: 1019-1020.
- 32) McMillan EM, Rowe D (1983) Plasma zinc in psoriasis: relation to surface area involvement. *Br J Dermatol* 108: 301-305.
- 33) Peretz A, Nève J, Jeghers O, Pelen F (1993) Zinc distribution in blood components, inflammatory status, and clinical indexes of disease activity during zinc supplementation in inflammatory rheumatic diseases. *Am J Clin Nutr* 57: 690-694.
- 34) Ghashut RA, McMillan DC, Kinsella J, Vasilaki AT, Talwar D, Duncan A (2016) The effect of the systemic inflammatory response on plasma zinc and selenium adjusted for albumin. *Clin Nutr* 35: 381-387.
- 35) Dreno B, Amblard P, Agache P, Sirot S, Litoux P (1989) Low doses of zinc gluconate for inflammatory acne. *Acta Derm Venereol* 69: 541-543.